

# 海峽兩岸 2019 水利科技交流研討會

23<sup>rd</sup>



## — 論文集 —

Kinmen



## 目錄

### 議題 A 水資源管理與越域供水

金門自大陸引水工程之設計與施工介紹 .....	A-1
應用 AHP 探討使用者採用目前國內防救災 APP 考量因素 .....	A-2
大面積旱作物灌溉水源量之評估與規劃 .....	A-3
豎井消能工三維數值模擬分析 .....	A-4
金門地區水資源管理-以金門海水淡化廠為例 .....	A-5
農業灌溉之水資源管理與技術策略研究 .....	A-6
數理規劃與水庫水資源系統 .....	A-7
大甲溪與大安溪水源運用與水力發電效能增進策略 .....	A-8
應用集水區耦合模式於臺中地區地表地下水資源評估與研究 .....	A-9
輿情探勘結合雨量分析於淹水預報最佳化之研究 .....	A-10
曾文南化聯通管豎井消能工水工模型試驗 .....	A-11
台灣水資源交易機制與環境用水標的設置之效率分析——實驗經濟分析方法之應用 .....	A-12
台中海線地區地下水資源量化 .....	A-13
水力發電蘊藏量分析整合資訊平台建置以秀姑巒溪流域為例 .....	A-14
應用光纖光柵與水力掃描於污染場址之三維水文地質參數場推估 .....	A-15
使用人工智慧技術進行即時水位預報之研究-以桃園大圳為例 .....	A-16
水文氣候資料之流形學習分析 .....	A-17
水資源管理與供水以本會金門地區農業灌溉水源規劃建置計畫為例 .....	A-18
結合關聯結構與卜松過程之乾旱分析架構 .....	A-19
Power Output Efficiency in Large Wind Farms with Different Streamwise Turbine Spacing .....	A-20
建立水資源-能源-糧食(WEF Nexus)鏈結可轉移評估框架之初步研究 .....	A-21
Conjunctive Use Planning and Management of Surface Water and Groundwater in Southern California .....	A-22
以資料分析方法探討濁水溪地下水含水層補注量 .....	A-23
基于水权转让需求情境下的察尔森水库调度研究 .....	A-24
水資源高效利用實踐與可持續利用對策—以鄂爾多斯杭錦旗為例 .....	A-29
广平县地下水超采综合治理分析 .....	A-36
新疆水资源禀赋、开发利用现状及其长期战略对策 .....	A-43
合理农业水价形成机制构建研究 .....	A-50
基于水资源配置的水库群生态调度研究 .....	A-55
金沙江~三峡梯级水库调度管理与实践 .....	A-62

淮河流域用水總量控制指標分解細化探討 .....	A-68
基於“三條紅線”的淮河流域取水許可控制指標計算 .....	A-73
2018年江西省大氣降水離子特征分析 .....	A-79
關於新時代加強農村供水安全工作的思考以陝西省彬州市為例 .....	A-87
淡水河河口與近海水舌擴散之模式診斷與探討 .....	A-92
大安溪、大甲溪及濁水溪水系之水資源風險管理計畫 .....	A-101
都市開發中所保留之自然河道其地下水出滲 .....	A-112
金門農地土壤特性及入滲補注能力之調查與空間分析 .....	A-120
未來水井管理策略方向思考 .....	A-129
以空載掃描儀影像推估灌溉需水量之研究 .....	A-136

## 議題 B 水利防災與海綿城市

基於水文學大數據分析的山洪災害氣象風險預警平台探討 .....	B-1
區域淹水預報系統開發與測試 .....	B-2
淹水潛勢圖製作模式精進與應用 .....	B-3
逕流分擔出流管制政策推動及技術研發 .....	B-4
網格式淹水損失推估系統開發與應用摘要 .....	B-5
都會區供水系統地震衝擊案例分析 .....	B-6
JW 生態工法打造防洪、永續水資源新模式--以全球第一座無排水溝校園的黎明 中學為例 .....	B-7
莫拉克颱風在臺灣阿里山地區之強降雨過程模擬檢討 .....	B-8
利用民俗植物進行植生復育之種間適性比較--以五峰鄉和平部落為例 .....	B-9
強降雨天氣系統診斷與防災預警策略探討 .....	B-10
氣候變遷下跨河橋梁多重災害之可靠度分析 .....	B-11
Analysis of Hydroclimatic Factors Associated with Occurrences of Afternoon Thunderstorms in Taipei .....	B-12
台灣區域排水水環境水域生態評估 .....	B-13
區域性海岸土砂管理推動探討 .....	B-14
拱型固床工之三維流場研究 .....	B-15
利用人工智慧與系集預報雨量建立淡水河流域災害預警系統 .....	B-16
Evaluating Relief Wells along Inner Harbor Navigation Canal, New Orleans, Louisiana .....	B-17
都市低衝擊開發的最佳化研究 .....	B-18
海口市城區非點源污染特征與模擬研究 .....	B-19
基於機器學習短歷時暴雨時空分布規律研究 .....	B-27
城市高水高排洪澇綜合防治措施的应用條件及適用性研究 .....	B-35
基於完整二維淺水方程組的流域地表徑流數值模擬 .....	B-43

多云光学卫星数据洪涝淹没范围快速提取模型研究 .....	B-50
台风暴雨洪涝灾害全链路遥感动态监测与快速评估 .....	B-58
基于 SLIC 的 Sentinel1ASAR 图像水体信息提取 .....	B-65
面向海绵城市建设的城市下垫面变化对地表径流影响的实验研究 .....	B-71
浅议海河流域洪水风险管理 .....	B-79
东北三省农业旱灾风险评估研究 .....	B-83
沈丘沙河大桥工程对河道行洪影响研究 .....	B-91
小浪底水库运用对山东黄河减灾影响分析 .....	B-97
不同倒悬角琴键堰模型泄流特性数值模拟研究 .....	B-102
夯实水泥土桩处理湿陷性黄土的工程应用 .....	B-111
邁向海綿城市—推動總合治水策略之都市防洪成效 .....	B-127
不同地籍逕流減量效益 .....	B-137
路面淹水感測器空間配置方案之分析 .....	B-141
農田水利於災害前中後之災防應變作為 .....	B-146

### 議題 C 水環境與水生態

海底管道流致振动计算分析 .....	C-1
低衝擊開發設施於臺北市降雨型態下之設置效益探討 .....	C-2
應用二維真實孔隙微模型進行孔隙介質中多相流殘餘量之研究 .....	C-3
氣候變遷對水稻種植期距與灌溉用水量影響之研究 .....	C-4
利用深度學習追蹤魚群活動行為之研究 .....	C-5
曝氣增氧設備之葉扇形式對水中溶氧分佈及流場 .....	C-6
都市快速淹水模擬應用與即時模擬 .....	C-7
都會區快速淹水模擬模式與下水道模式結合與應用 .....	C-8
都會區快速淹水模式之水理演算改進：納入具空間變異的曼寧糙度值 .....	C-9
堵塞因子對都會區淹水之影響 .....	C-10
水庫泥砂來源的判釋與因應 .....	C-11
沼液產製腐植酸應用於種植與養殖環境之改善 .....	C-12
高低地分線治理概念應用於嘉義縣排水系統成效探討 .....	C-13
亞熱帶森林的地表阻抗及蒸發散 .....	C-14
改良生物滯留池填料對暴雨逕流中營養鹽去除績效評估 .....	C-15
建筑屋面雨水有压回补地下水理念及潜力评估 .....	C-16
海口大同沟的水动力水质数值模拟 .....	C-18
滇池流域水环境承载力与水资源可持续利用研究 .....	C-25
城市河流水生态与水环境治理探讨 .....	C-33
福建省鱼道研究新进展 .....	C-39

人为干预强烈河段穿江地铁极限冲刷深度研究 .....	C-47
基于人工神经网络的丹江口水库氨氮遥感反演方法研究 .....	C-54
南四湖健康评估及问题探讨 .....	C-61
淮河流域某市水污染总量控制及水生态修复 .....	C-69
智慧化水井實務系統管理 .....	C-76

## 議題 D 水利資訊、政策與教育

應用衛星影像建立植生判釋模式-以臺北市為例 .....	D-1
公私協力推動機制研究—以區域排水參與式調查為例 .....	D-2
蒙地卡羅模擬機器學習法在疏濬工程專案預測之應用 .....	D-3
無人機對農漁業之實務應用案例 .....	D-4
臺灣地下水水井與水權管理現況與願景-以彰化、雲林地區為例 .....	D-5
解析文獻資料擷取水利深化知識之探討-以 1963 年葛樂禮颱風侵襲石門水庫為例 .....	D-6
臺灣西部平原旱田之水理特性觀測與模式參數探討 .....	D-7
日本時期臺灣的水利糾紛案例研析 .....	D-8
以多屬性決策分析方法訂定提昇企業志工投入公共防洪警報系統之策略 .....	D-9
智慧水管理—精進田間灌溉管理 .....	D-10
智慧水務城市供水管網及時監控系統 .....	D-11
中華水文化背景下長江委精神的形成、實踐及思考 .....	D-12
近现代水利发生、发展及分期 .....	D-17
都江堰灌溉工程遗产及其可持续发展经验分析 .....	D-23
鄂爾多斯市黃河南岸灌區農業水價改革實例分析 .....	D-30
莆田水文化遗产的时空分布特征研究 .....	D-37
征地统一年产值标准和区片综合地价综述 .....	D-42
珠江水量调度立法必要性分析 .....	D-49
中國傳統灌溉工程特征及遺產保護策略 .....	D-54
我国水生态文明实践与思考 .....	D-63
黄河基层信息化项目实施与展望 .....	D-67
供给侧结构性改革视角下河湖管护动力机制发展分析 .....	D-73
道路限高设备智能管理系统研发与应用 .....	D-79
沁河口监控布设与坝岸监测系统应用 .....	D-85
山區聚落災害孤島即時示警系統之建置 .....	D-89
圖籍資料管理數位化與雲端應用研究 .....	D-97
智慧化疏濬工程管理之研究 .....	D-102
屏東縣政府推動地下水管制區合法畜牧產業納管水井輔導合法計畫論文 .....	D-107

三維實境模型輔助河川區域劃設研究 .....	D-110
國民政府遷台前的水利法子法 .....	D-117

### 青年優秀論文競賽

南方灌区现代化建设新思考 .....	E-1
水文和一维水动力耦合计算的城市雨洪粗模初步研究—以深圳河流域为例 .....	E-6
基于可恢复性和可持续性的海绵城市指标评价体系的构建 .....	E-12
旋流竖井有压泄洪洞的集排气措施研究 .....	E-20
基于改进预泄能力约束法的水库汛限水位分期动态控制域确定及应用 .....	E-26
地面地下聯合營運最佳規劃模式研究 .....	E-34
整合智能監管與雲端技術進行灌溉圳路系統管理 .....	E-40
融合人工智慧與數值模式於水庫泥砂濃度 .....	E-50
地下水補注敏感區之補充調查成果：以臺中盆地為例 .....	E-57

## 議題 A.水資源管理與越域供水

## 金門自大陸引水工程之設計與施工介紹

林建清<sup>1</sup> 徐勝勇<sup>2</sup>

### 摘要

為解決金門地區用水成長及原水水質不佳等供水問題，兩岸水利有關主管部門及執行單位決定大陸引水計畫採用「晉江供水方案」，輸水管道由龍湖水庫至晉江入海，埋管穿越海域至金門的田埔水庫，設計流量為 34,000CMD。基本設計考量包括設計參數、管徑及壓力、管厚、液化潛能分析、預挖管溝之影響、管線穩定分析、管線保護、管線維修清淤等。海底管線設計基準，考量全線埋設於海床下，依挪威船塢協會 DNV 就海底管線系統規範建議之臨時狀態下風、浪、流等條件，採用 1 年、10 年重現期進行載重組合，進行管線穩定之分析，以設計配重塊及混凝土席塊保護。對於管材之選擇，以鋼管(SP)、聚乙烯鋼塑複合管(SPE)及高密度聚乙烯管(HDPE)進行耐蝕性、可靠性、施工工期、耐震能力…等因子之比較而擇定以 HDPE 管為本工程海管使用之管材。管徑及壁厚受水理分析結果控制，水理分析時考量穩態水理分析、暫態水錘分析，管線水頭損失採用 Darcy-Weisbach 公式，另考慮制水閘特性曲線、水錘造成之壓力，設計外徑 800mm，SDR≤13.6 之 HDPE 管。本工程為統包工程，自 2016 年發包後即進行細部設計及施工，因單元長度海管之接合係於鋪管船上進行熔接，故以加強之錨泊系統提高接管時之穩定性，且於海上風浪達 6 級或浪高達 1.5 公尺即須停止熔接，船上並設密閉熔接室，以避免海上風、雨、霧對熔接品質之影響。由於管線曲率半徑有 60D 之限制，施工中遇阻礙需改變路線時亦以此標準微調；管線埋置後以混凝土席塊保護，為使席塊鋪設於海管上方容許範圍內，席塊鋪設緊接於管線鋪設船後施工。對於晉江端海管登陸之施工，則於施作海上圍堰後破堤，以混凝土管保護 HDPE 管自堤下通過後復原海堤。為保護海管避免航行船隻傷害，海管上方設置浮燈標，晉江側之浮燈標依大陸方規定，須由廈門航港處設計施工。海陸管工程完工後，進行整體測試，由大陸龍湖泵站供水至金門田埔水庫，以測試輸水能力及各項儀器設備，完成本工程。

**關鍵字：**晉江供水方案、田埔水庫、高密度聚乙烯管(HDPE)

<sup>1</sup> 中興工程顧問股份有限公司水利部工程師

<sup>2</sup> 中興工程顧問股份有限公司水利部協理



# 應用 AHP 探討使用者採用目前國內防救災 APP 考量因素

陳郁甯<sup>1</sup>

## 摘要

極端氣候頻繁，全球陸續傳出災情，每年國家等級災難發生次數持續增加，近20年來全球因天然災害死亡人數更超過150萬人，平均一年損失6599億美元。據世界銀行統計，台灣約有百分之九十的人口居住在二種以上天然災害可能衝擊地區，百分之七十三的人口居住在三種以上天然災害可能衝擊地區，高居世界第一。在《2015-2025城市風險指標》報告中，台北更被評為全球未來十年內最脆弱城市，未來10年內因事故和天然災害導致的經濟損失規模預估為1812億美元。

隨著智慧城市蓬勃發展、人口快速老化，智慧手機在生活中不可或缺，智慧防災更成為災害管理重要趨勢。各國積極開發與防救災相關之應用程式(APP)，台灣也陸續開發了各行政區的防救災APP來提供即時資訊，能夠在發生天然災害時提供即時警報，提醒民眾危險時能盡快疏散，有效降低災害損失，這顯示防災不再只是改善硬體設施，而是能透過軟體虛實整合，並可潛在培養民眾的防災素養，讓防災、救災能更精確、有效率，因此培養國民防災素養及建設即時避難路線資訊誓不可擋。

現代天然災害多為複合型，台灣又處天然災害高風險區，雖防救災APP不斷推陳出新，但民眾使用上卻不普及，防救災APP多以政府、廠商角度去探討，少有從使用者角度去探討。因此本研究透過相關文獻及調查彙整，選擇合適評估構面與要素，並應用層級分析法，分析使用者在採用使用防救災APP所考量的關鍵因素為何，最後歸納研究結果與建議，期盼能提供廠商及使用者作為未來開發或推廣的參考依據。

**關鍵字：**國內防救災APP、智慧城市、智慧防災、多準則決策方法、層級分析法

<sup>1</sup> 國立臺灣師範大學工教所碩士生

## 大面積旱作物灌溉水源量之評估與規劃

姜世偉<sup>1</sup>、蔡正輝<sup>2</sup>

### 摘要

本文針對位於臺東縣鹿野鄉約 235 公頃之農田進行灌溉水源量之評估，首先經由現地水源調查瞭解農場內灌溉水源來源有雨水、井水、地表水等 3 類，為能滿足作物穩定之灌溉水源需求，初步建議以每日最大取水量分別為 5,029 m<sup>3</sup> 與 3,283 m<sup>3</sup> 之 2 口地下水井為基礎，並建議設置平均水深約 2.5 公尺之調蓄水池，並在適當高程處開挖截水溝以及輸水渠道，採用重力方式引入調蓄水池做為補充水源。另一方面，為評估種植作物(鳳梨釋迦)之灌溉用水量，本文蒐集臺東地區月平均氣象資料，包括溫度、日照、濕度、風速與風向及年降雨量情形，並配合 CROPWAT 作物需水量模式進行計算(作物係數 0.55 與 0.95)，另外，訪調臺東地區農民以及諮詢臺東區農業改良場，獲得作物平均日灌溉用水量分別約為 1.15mm~2.39mm、1.29mm~3.81mm、1.43mm~2.86mm。建議各旬別作物用水量以 CROPWAT 模式計算(作物 0.95)之結果為基礎，再以最小日灌溉用水量 1.43mm 完成概估各旬別所需之用水量，最後綜整各旬可供水量以及灌溉用水量，進行整體灌溉用水量評估。初步結果顯示在最大所需灌溉用水量條件下(3 月下旬)，若單以井水水源供灌並配合管路灌溉系統，可滿足作物所需水量。而在豐水期的夏季(7 月至 10 月中旬)，若能配合調蓄水池有效利用降雨量，則可進一步降低灌溉營運成本。

**關鍵字：**農業水資源、灌溉水源、CROPWAT、管路灌溉

<sup>1</sup> 財團法人農業工程研究中心副研究員兼副組長

<sup>2</sup> 財團法人農業工程研究中心技師

## 豎井消能工三維數值模擬分析

李明龍<sup>1</sup>、連和政<sup>2</sup>

### 摘要

曾文水庫下游增設管路改善供水設施，規劃新增聯通管路，從曾文水庫電廠壓力鋼管取水，重力輸水至淨水場調節池及既有的聯通管，輸水流量約 10 萬到 80 萬 CMD 之間，然而在低輸水量情況下，聯通管的上游需消耗 86 公尺的水頭能量，為避免下游管內流速過快產生穴蝕，造成聯通管破壞，設計採用美國愛荷華水利學院開發的豎井消能工取代傳統閘室設計進行消能，其豎井可藉由調整池至公路的高度差 60 公尺作為消能媒介，底部輸水管的壓力變化反應於豎井的水位高低，因此操作時只需確保進出調整池的流量平衡，維持調整池水為即可。為了瞭解豎井內的消能過程及消能效果，本研究透過三維數值模擬分析豎井內的流場分佈、能量水頭及壓力變化，以分析豎井形式及消能情形，並與水工模型實驗進行比對驗證，確保模擬準確性。

**關鍵字：**流場分析、能量水頭、豎井消能工

<sup>1</sup> 財團法人國家實驗研究院國家高速網路與計算中心 副研究員

<sup>2</sup> 財團法人國家實驗研究院國家高速網路與計算中心 研究員

## 金門地區水資源管理-以金門海水淡化廠為例

蔡誌崇<sup>1</sup>、董士龍<sup>2</sup>

### 摘要

金門地區年降雨量少，豐枯懸殊，年蒸發量高於年降雨量，湖庫水質優養化致水質欠佳，長期受缺水所苦。因金門地區觀光人數與居外人口回流致用水需求增加之因素，故為解決金門缺水狀況及減少地下水抽取，已於 107 年 8 月 27 日完成「大金門海水淡化廠功能改善暨擴建工程」，使其供水量由 2,000CMD 增加至 4,000CMD，以供金門地區用水之需求。本工程範圍包含既有 2,000CMD 海水淡化廠功能改善及擴建 2,000CMD 機組二部分，進行既有流程之前處理功能提升，與修正 RO 逆滲透設計，以有效提昇既有海水淡化廠之功能。

本海淡廠採先進之生產流程，前處理系統以砂濾及袋濾並配合 UF 系統替代原規劃之混凝、沉澱及中間過濾器，可減少藥劑添加及污泥產量，簡單成本低的前處理系統，讓前處理過程控制在生物性的和諧自淨狀態。又前處理池之滷水，除做為砂濾的反洗水外，更將高壓滷水做為能源回收使用，以減少過濾水之使用及能源之消耗。另海淡廠使用之能源回收器，以壓力轉換之方式，構造簡單但結實，能源回收率達 98% 以上。其脈衝式之作動方式，也有防止濾膜生物阻塞之功能，此不加藥除垢的海水淡化操作模式，更是海淡廠之最佳特色。所有動力設備均採用變頻式供電以調整產水量，使得操作變得更有彈性，整場產水單位能耗極低，單位產水耗電約在 3.5kwh/m<sup>3</sup> 以下。

自大陸引水後，在中央單位的全力支持下，海淡廠處理技術採先進做法，符合節能減碳設計，增設前處理單元，大幅降低 RO（逆滲透）設備的維護成本，並提供符合直接生飲的水質，讓金門不只依賴大陸引水，確保金門自主水源之穩定，提高用水質量，對金門未來發展影響至大，並向水資源多元化目標更邁進一步。

**關鍵字：**海水淡化、能源回收器、節能減碳

<sup>1</sup> 經濟部水利署中區水資源局正工程司

<sup>2</sup> 經濟部水利署中區水資源局課長

## 農業灌溉之水資源管理與技術策略研究

楊昇學<sup>1</sup>、徐元棟<sup>2</sup>、陳美嫦<sup>3</sup>、褚淑慧<sup>4</sup>、楊涵媛<sup>5</sup>、李明龍<sup>6</sup>、葉克家<sup>7</sup>

### 摘要

農業灌溉所面臨之水環境狀況有諸多挑戰，加上氣候變遷下，區域降雨時空特性與以往水情資訊有明顯之差異，尤其在春冬交季之豐枯水情時間有明顯變化，枯水期有增長之趨勢。此外，用水需求也因應經濟持續發展及都市化程度持續增加，農業用水之管理需更為精進與水資源有效利用，此成為灌溉用水管理工作上需要調整之議題。本研究面臨問題包含：水資源豐枯、民生、社經用水標的調整、水庫蓄水、水資源管理者傳統經驗與農民用用水習性等重大課題，將農業灌溉用水管理工作日漸困難且複雜之問題上，導入水資源管理系統與方法、配合實際狀況所需，規劃未來一至三旬水資源調配之資訊與即時水情（平時灌溉、夜間與防汛期）操作，提升灌溉用水使用效率。研究區域以臺灣新竹農田水利會竹東圳灌區為例，建立研究區域之水文、水理與閘門操作模型，將農田灌溉之遠端閘門控制之資通訊(ICT)、即時監測物聯網(IoT)與雲端資料庫技術等方法，結合灌溉與可操作之導水設施，配合智慧管理方法，用以輔助灌溉用水決策，有效提升配水效能，並滿足灌溉用水需求，降低農業及社會發展所面臨之缺水風險。

**關鍵字：**農業灌溉、遠端閘門控制之資通訊、監測物聯網(IoT)

- <sup>1</sup> 交通大學防災與水環境研究中心副研究員
- <sup>2</sup> 臺灣新竹農田水利會會長
- <sup>3</sup> 臺灣新竹農田水利會組長
- <sup>4</sup> 臺灣新竹農田水利會股長
- <sup>5</sup> 臺灣新竹農田水利會助理管理師
- <sup>6</sup> 臺灣國家高速網路與計算中心副研究員
- <sup>7</sup> 交通大學土木工程學系教授

## 數理規劃與水庫水資源系統

朱健行<sup>1</sup>

### 摘要

運用基準線係水庫蓄水營運過程中，判別水量之豐枯，並規定不同情況下水量使用方式，期使水資源最佳利用。良好之運用基準線能使供水量最大，節水量、溢洪量最少。

本研究以建立數理規劃模式自來水配水模式，其要點為數理規劃模式:考慮不同目標函數，建立線性規劃與動態規劃模式，期使水庫運用基準線合乎目標所需:自來水配水模式::考慮有效雨量、蒸發散量、滲漏量、輸水損失，以推求配水合理運用。

水庫建設所費不貲，如何使其發揮建設之目的，福利民生，為水資源經濟利用之努力方向。水庫建設時即釐定運用基準線營運規則，期使管理最佳化。近年來水庫營運；由於觀測設備進步，數值水文學發展，資料處理系統廣泛運用，系統分析最佳運用；將助益水庫運用效率之提高；基於(水資源節省即是開發，水資源經濟利用即是節省)之觀念，有效及充分利用水庫，為當今開源政策之一。

本研究在探討數理模式中最佳模擬模式及最佳模式釐定水庫運用基準線之方法。模擬模式可藉計算機程式迅速求得，惜使系統無法於模擬過程中，此為其缺點。本文探討最佳模式中動態規劃與線性規劃建立水庫運用線之可行性及優良特性。

動態規劃應用於水庫營運管理，為當今世界先進國家研究水庫管理之目標，因其針對各水庫系統特性，制定遞歸函數，依循最適化原則，求取系統最佳效益。由於目標函數制定，因此各以經濟因素收集成本作為決定放水策略。未來新興水庫規劃，以自來水、公共給水、工業給水為主之水庫或串聯水庫亦可採用動態規劃求得最佳效益。

**關鍵:**數理規劃、線性規劃、動態規劃、水庫運用基準線、水庫管理、水庫特性簡介

<sup>1</sup> 臺北自來水事業處退休工程師

## 大甲溪與大安溪水源運用與水力發電效能增進策略

吳嘉文<sup>1</sup>、周乃昉<sup>2</sup>、李皓志<sup>3</sup>、陳弘叄<sup>4</sup>、陳贊文<sup>5</sup>

### 摘要

台灣電力公司於大甲溪上建有七座水力電廠及機組，其中五座電廠設有蓄水壩，除最上游的德基水庫外，依序為青山壩、谷關壩、天輪壩與馬鞍壩。惟大甲溪亦為供應台中地區家用及公共給水的主要水源，最下游控制點石岡壩之操作主要為攔蓄大甲溪上游電廠發電尾水及河道兩側未控制側流量，為大甲溪水源運用之樞紐，故前述諸水庫之發電運轉亦需配合下游樞紐石岡壩之水資源調度。依近年德基水庫運用之水位過程可知為確保穩定供水，即使德基水庫水位於運用規線以上時亦常配合下游水資源運用，儘量避免為發電而超量放水，卻使得水庫常處於高水位，以致洪水期間需開啟排洪隧道或溢洪道洩洪，另一方面洩洪水量也錯失發電機會，迫切需要謀求可同時增進發電與供水兩標的效能之措施。

本研究探討大甲溪與大安溪流域系統之水資源，尋求可達成促進發電(能源)、穩定供水(水量)與維持農業(糧食)等多贏之行動措施，第一步驟聚焦於提升系統之供水與發電成效，藉模擬測試獲得一組新運用規線，依此組規線運用之供水能力與平均年總發電量均高於現況規線之運用成效。此組規線建議在每年3-6月份期間無需維持高水位，因此時的高水位徒增後續豐水期之溢流機會，而7月底需提升水位至標高1393公尺，8月底再提升水位至標高1400公尺，至9月底即需提升水位至接近滿水位，以確保隔年枯水期之穩定供水。

**關鍵字：**區域水資源調度、水力發電、公共給水、運用規線、模擬

<sup>1</sup> 成功大學水利及海洋工程學系博士後研究員兼任助理教授

<sup>2</sup> 成功大學水利及海洋工程學系教授

<sup>3</sup> 成功大學水利及海洋工程學系博士後研究員

<sup>4</sup> 台灣水利署中區水資源局局長

<sup>5</sup> 台灣水利署中區水資源局石岡壩管理中心主任

# 應用集水區耦合模式於臺中地區地表地下水資源評估 與研究

陳柏穎<sup>1</sup>、石棟鑫<sup>2</sup>、廖苑雅<sup>3</sup>、陳政欣<sup>4</sup>

## 摘要

臺灣本島年降雨量豐沛，但降雨多數集中於 5、6 月的梅雨季節及 7 至 10 月的颱風季節，在地形與時空分配不均的情形下，造成豐枯差異甚大，加上近年來經濟發展快速，使得用水需求大幅增加，以致臺灣的水資源面臨著供應不足的問題。而在開發新水源不易的情形下，則須針對現有水資源進行探討，本研究計畫以臺中地區為研究主題，區域內具有大安溪、大甲溪、烏溪等三條河川與其支流，在目前水資源短缺的情形下，以地表地下水資源進行聯合運用，來供應大臺中地區的水資源需求。

在本研究中，以臨近臺中盆地的海線地區為主要研究目標，針對臺中海線地區地表地下水資源進行探討，由於該區地下水資源不多，而臨近的臺中盆地區域地質構造推估其地下水資源豐沛，運用完整的整合性地表地下水模式，探討臺中海線地區地表水與地下水交換的情形。本研究將建置臺中海線地區的一二三維水文地質模型，並以 WASH123D 模式耦合一維河川、二維漫地流，以及三維地下水數值模型進行聯合模擬，呈現整體水循環之特性。本研究將對臺中海線地區較具規模的水文事件進行模擬驗證，後進行長期事件模擬，評估河川水位變化、與漫地流淹水情形，以及地表地下水交換趨勢，並於長期趨勢分析中探討地表地下水變化之影響。

根據研究成果顯示，WASH123D 進行聯合模擬之結果良好，河道模擬水位整體誤差小於 1 公尺，且對於短期強降雨事件、極端事件之模擬結果也大致相符，其河川水位變動趨勢、地表漫地流淹水情形都能準確掌握，可應用於此地區進行聯合模擬，透過聯合模擬以釐清本研究地區之地表地下水互動機制與關連性，並且透過綜合評估其地表地下水資源變動情形，可以做為後續水資源管理與調配的策略參考。

**關鍵字：**地表地下水整合模擬、WASH123D、臺中海線地區、地下水資源

<sup>1</sup> 國立中興大學土木工程系 碩士生

<sup>2</sup> 國立中興大學土木工程系 副教授

<sup>3</sup> 國立中興大學土木工程系 助理

<sup>4</sup> 國立中興大學土木工程系 助理



## 輿情探勘結合雨量分析於淹水預報最佳化之研究

謝宜穎<sup>1</sup>、廖品豪<sup>2</sup>、石棟鑫<sup>3</sup>

### 摘要

隨著資訊傳播速度的提升，以及社群媒體日益普及，網路社群的溝通模式已成為人們主要的溝通方式之一。在災害發生前後常有大量的輿情聲量在社群上傳遞，如颱風侵襲時，根據不同關鍵字篩選出的輿情聲量，分別占總聲量之比例顯示出民眾關注程度，且人們在網路上發表關於颱風關鍵字之文章數量會明顯增加，因此，本研究整合關聯關鍵字篩選之輿情資訊、區域內雨量資料及淹水事件，再使用TensorFlow資料庫建置一個機器學習系統，訓練模式做進一步的推估，以達到預防災害與加速救災之目的。

本研究以彰化縣作為研究區域，藉由蒐集在發布颱風警報期間，中央氣象局、國家災害防救中心等單位之定量降雨系集雨量預報，所提供之未來三天臺灣降雨時間與空間分布，並透過災害社群網路情資綜整平台之分散式網路爬蟲技術，將鎖定「豪雨」、「淹水」等關聯關鍵字篩選之輿情資訊進行彙整，以每一小時為單位，經過時間序列化分析，可以顯示出輿情聲量峰值與雨量峰值之發生時間具有高度相關性，將有助於判別災害發生時間及嚴重程度，再把以上兩種資訊結合消防單位紀錄之災情通報，淹水災害發生的時間與地點，能得知當災害發生時，三者間具有關聯性，因此對於颱風侵襲時，若使用適當的輿情關鍵字於網路進行輿情探勘，有助於推估淹水發生的時間與地區，在災情出現前後，輿情聲量的相對極大值做為預警民眾災害危險之參考。結合定量降雨系集雨量預報、輿情聲量及淹水事件，使用TensorFlow機器學習系統之CNN架構進行訓練，將可利用過去12小時特定關鍵字之網路輿情波動狀況及雨量，推估未來72小時內可能發生淹水的時間與地區，進行機率式預警。

**關鍵字：**輿情探勘、機器學習、淹水

<sup>1</sup> 國立中興大學土木工程系 碩士生

<sup>2</sup> 國立中興大學土木工程系 碩士生

<sup>3</sup> 國立中興大學土木工程系 副教授

## 曾文南化聯通管豎井消能工水工模型試驗

粟群超<sup>1</sup>、陳春宏<sup>2</sup>

### 摘要

為強化臺灣南部地區調配支援能力及穩定供水，並考量未來氣候變遷導致旱澇加劇下彈性調度能力、既有管路路線現況、影響供水之緊急事件等因素，南區水資源局規劃透過曾文南化聯通管，使曾文水庫及南化水庫能彼此支援調度，以提升南部地區供水穩定。曾文南化聯通管將自曾文水庫電廠壓力鋼管取水，輸水至臺南南化區北寮銜接既有南化高屏聯通管，總長度約 25 公里，最大輸水能力為 80 萬 CMD。為解決連通管兩端水頭高差過大之問題，在曾文水庫木瓜園臺地設計一豎井消能工進行消能，豎井之垂直高度約 60 公尺、內部直徑 7.6 公尺，豎井內部由上而下採用一系列跌水板，水流經跌水板以階梯方式交替往下跌水進行消能；為比較消能板之消能效果，並進行無消能板之豎井試驗，以直接投潭方式消能，作為對照組進行比較，試驗結果顯示具有消能板之豎井其氣泡及水位震盪明顯減少，可見此豎井消能工之效果。

**關鍵字：**聯通管、豎井消能工、跌水

<sup>1</sup>經濟部水利署水利規劃試驗所工程員、臺灣大學土木工程學系博士生

<sup>2</sup>經濟部水利署水利規劃試驗所所長

# 台灣水資源交易機制與環境用水標的設置之效率分析 ——實驗經濟分析方法之應用

林冠妤<sup>1</sup>、闕雅文<sup>2\*</sup>

## 摘要

台灣降水季節集中於夏季，冬季降水量低，又因島形狹長、河川多為荒溪型河川，使水資源儲存更加不易；另一方面，依據水利法規定，台灣的用水標的僅有公共用水、農業用水、工業用水、水利用水與發電用水，並未設置環境用水標的。在氣候變遷旱澇頻繁之下，如何將水資源在得兼顧各級產業與生態環境之下公平與有效率配置水資源是一個重要議題。他山之石可以攻錯，乾燥的澳洲於2004年6月澳洲政府議會(the Council of Australian Governments)開展一項水資源保護創始計畫，以改革澳洲的水資源管理。其主要改革包括：確定分配水資源予環境和公眾用水，得以符合其需求，且和分配給其他使用者使用的水資源一樣，具備一定程度的保障。並藉由有效利用水資源、鼓勵水資源的再利用和尋求水資源、水資源的處理、儲存和排放的創新活動，來確保可以供應都市地區安全、安心的水資源。其後澳洲在保障環境水權下加速水資源市場化的腳步，於1994年執行水市場機制，一方面兼顧環境用水、一方面提高水資源的使用效率。聯合國政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2008年提出水市場開發是提高水資源使用效率之希望(Bates, et al., 2008)。美國科羅拉多河流域的加州亦於1991年為成立乾旱水銀行(Drought Water Bank, DWB )以解決乾旱問題(闕雅文, 2005; Möller-Gulland & Donoso, 2016; Macaulay, 2009)。然而台灣水利法並無規範水資源交易管理機制，亦無環境用水標的之設置。實驗室的研究結果可以作為經濟理論在實地實驗前的嚴謹研究方式(Smith, 1976)；本研究依據實驗經濟方法，探究設置環境用水標的及台灣水資源交易機制，對水資源分配效益之影響，以為台灣水資源管理制度變革之參考，期望能提升水資源之公平分配與利用效率。

**關鍵字：**環境用水(Environmental water)、水市場(Water Market)、經濟實驗(Experimental economics)

<sup>1</sup> 國立清華大學環境與文化資源學系碩士班學生

<sup>2</sup> 國立清華大學環境與文化資源學系教授 yawen.chueh@gapp.nthu.edu.tw

## 台中海線地區地下水資源量化

劉宏仁<sup>1</sup>、徐年盛<sup>2</sup>

### 摘要

台中主要地下水系統包含山線地區的台中盆地與海線地區的清水平原，其中台中盆地由礫石層所構成，為一優良含水層，清水平原則局部有礫石層分布，蓄水量較少，但由於都市不斷發展，產業進駐，也面臨開發壓力。本研究建立清水平原地下水區的概念模型，可分為三個含水層及兩個阻水層，並以地下水監測井網之水位紀錄配合現地試驗之水力參數，以地下水蓄水量歷線法計算得到清水平原年抽水量量約 0.5 億噸、年補注量約 0.5 億噸，整體地下水資源大致維持抽補平衡。

**關鍵字：**台中海線地區、清水平原、地下水、蓄水量歷線法

<sup>1</sup> 臺灣大學水工試驗所助理研究員，[HarrylittlePrince@gmail.com](mailto:HarrylittlePrince@gmail.com)，02-33662636

<sup>2</sup> 臺灣大學土木工程學系兼任教授

## 水力發電蘊藏量分析整合資訊平台建置

### - 以秀姑巒溪流域為例

李光敦<sup>1</sup>、洪夢秋<sup>2</sup>、黃雅琪<sup>2</sup>、陳煥元<sup>3</sup>、廖聿勳<sup>3</sup>、  
張膺燦<sup>4</sup>、吳建成<sup>5</sup>、莊漢鑫<sup>5</sup>

#### 摘要

本研究整合流域地形分析、水文學，以及水力學理論，應用開放原始碼地理資訊系統，建置水力發電蘊藏量分析整合資訊平台。研究中以秀姑巒溪流域為研究範圍，透過水文紀錄與自動化分析模組之連結，使用者即可以滑鼠點選流域範圍內河川網路上任一位置點，進行集水區之雨量分析、流量分析、水庫壩址可能最大洪水分析、崩塌地分析、水力發電蘊藏量分析、流量-水位率定曲線、流量-含砂量率定曲線推求等各項水文與水理分析工作，相關計算成果可與空間資料進行整合分析，直接於地圖上展示各類訊息，而各項計算模組均提供友善的 GIS 空間操作介面，可降低傳統水文水理分析的繁瑣程序。本研究以秀姑巒溪流域為研究範圍，透過早期電源開發規劃報告以確認本系統平台分析的正確性。本計畫所建置的資訊系統平台可提供省時且精確的方式，以進行水力發電蘊藏量開發規劃，以及後續維護管理營運。

**關鍵字：**水力發電蘊藏量分析、地理資訊系統、流量分析、地文特性分析

<sup>1</sup>國立臺灣海洋大學地理資訊系統研究中心主任 (Email: ktleee@ntou.edu.tw)

<sup>2</sup>國立臺灣海洋大學地理資訊系統研究中心專案經理

<sup>3</sup>國立臺灣海洋大學地理資訊系統研究中心專案研究員

<sup>4</sup>臺灣電力股份有限公司電源開發處水文組組長

<sup>5</sup>臺灣電力股份有限公司電源開發處水文組組員

## 應用光纖光柵與水力掃描於污染場址之三維水文地質 參數場推估

蔡瑞彬<sup>1</sup>、張良正<sup>2</sup>、何彥德<sup>3</sup>、王子賓<sup>4</sup>

### 摘要

污染場址實有必要建立更為精確的場址性流場，以掌握污染團可能的現況流布，並預測污染團未來的可能發展，以提供預警監測管理或建議；同時，精確的流場能協助規劃更有效益的整治系統，並更能掌握灌注後的整治藥劑分布情形。傳統場址性流場推估上多假設現場之水文地質場呈均質(homogenous)分佈，因此僅能推估大致上的主流場，但局部流場易受地質異質性、異向性或水文地質邊界等影響，使得預測污染團的分佈往往與現場分佈有相當大的落差。為了對水文地質變化或分布有較為精確的掌握，傳統作法可能需大量調查資料（如多深度微水試驗、大量地質鑽探資料或其他調查方法），然而有污染之虞的場址有時不適合執行抽水試驗，因為可能造成污染團重新分布或擴大(即二次污染)。因此建立新的方法來描述水文地質的細部變化或分布將能有效地幫助掌握精確的流場。因此，本研究之主要目的為透過污染場址注藥時期量測多井多深度的水位與溫度進行研究場址之三維水文地質參數場推估，以建立精準的流場，協助預測預測污染團未來可能的發展，以提供預警監測管理或建議、協助規劃更有效益的整治系統，以及掌握灌注後的整治藥劑分布情形。因為環保署監測井大都為全開篩之觀測井，本研究研發以光纖光柵觀測系統觀測注藥期間在多井多深度之水溫與水壓變化，將量測之水位以水力掃描技術推估三維水力參數場，再以此參數場進行注藥後之藥劑流場模擬，最後在與注藥期間量測之跨孔井下地電阻比對，研究結果顯示，本研究推估之藥劑流場與電阻觀測結果一致，說明本研究研發之技術應用於污染整治之可行性。

<sup>1</sup> 國立成功大學地球科學系

<sup>2</sup> 國立交通大學土木工程系

<sup>3</sup> 奇博科技股份有限公司

<sup>4</sup> 健行科技大學空間資訊與防災研究中心

# 使用人工智慧技術進行即時水位預報之研究-以 桃園大圳為例

張明瑞<sup>1,\*</sup>、陳建國<sup>2</sup>、廖皓宇<sup>3</sup>、賴進松<sup>4</sup>、張向寬<sup>5</sup>、程于芬<sup>6</sup>

## 摘要

近年因隨著氣候變遷影響，其極端降雨的現象明顯增加，且農業水資源使用常需要即時因應配置，因此有效分配調整貯水池蓄水能力更顯為重要。為達成水資源永續利用以及促進桃園水利會轄內貯水池效益，更有效調配管理水資源，提供農作時期可供水量使用，維持農耕正常運作，因此本研究擬在桃園大圳 10 支線與 12 支線建構幹線水位預測模型，預測即時水位，建立水情預測與輔助決策管理系統。使用物聯網資通訊技術收集水位資料後，傳送至水資源物聯網後，根據收集的即時水位資料，使用 Microsoft Azure Machine Learning 的運算資源建構類神經網路幹線水位預測模型，其預測模型可提供未來 1 至 3 小時即時水位預報，根據水位預報資訊，輔助調控水資源管理，以利進行貯水池調配策略，有效分配農業水資源使用。

**關鍵字：**桃園大圳、水資源管理、類神經網路、Microsoft Azure Machine Learning

<sup>1</sup> 國立臺灣大學氣候變遷與永續發展研究中心博後研究員

<sup>2</sup> 桃園農田水利會資訊室主任

<sup>3</sup> 國立臺灣大學氣候變遷與永續發展研究中心專任研究助理

<sup>4</sup> 國立臺灣大學水工試驗所研究員

<sup>5</sup> 國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心助理研究員

<sup>6</sup> 國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心專任研究助理

\*通訊作者：10617 臺北市大安區羅斯福路四段 1 號，TEL：(02)33662618，Email：f99521311@gmail.com

## 水文氣候資料之流形學習分析

胡明哲<sup>1</sup>、余化龍<sup>2</sup>、溫在弘<sup>3</sup>

### 摘要

本研究擬建立一個新穎的水文型態分析方法，以流形演算的概念，應用於水文氣候型態分析。其中流形演算取代傳統直線的歐氏距離計算，並以群論分析資料的對稱與轉置操作，並且提供多維資料降維可視化展現，本研究的流形演算並與建構在歐氏空間中常見的時空資料分析方法（最近距離法、克利金法等）比較，以確定方法的適用性。

本研究方法建立後，不僅可以用水文分析上，也可以應用在其他資料分析、機器學習領域，例如工程、環境、生態、運輸、經濟等領域，在學術上或是各領域的決策分析支援上，都能夠有相當的貢獻。

**關鍵字：**流形演算、資料降維、水文氣候資料

<sup>1</sup> 台大生工系副教授

<sup>2</sup> 台大生工系教授

<sup>3</sup> 台大地理系教授



## 水資源管理與供水:以本會金門地區農業灌溉水源規劃 建置計畫為例

古季平<sup>1</sup>

### 摘要

金門地區天然水源匱乏，降雨量少且分布極度不均，又因地理環境特殊，具戰地背景情況下，仍留存為數不少之戰備用水，導致農業用水十分有限。因此，如何藉由各種方法，包含建造水工構造物、水源再生、提升灌溉效率並成立管理組織，強化水資源利用，使當地農民用水充裕，為本計畫之主要目標。本計畫架構大致可分為三期，包含工程結構方法-整治農塘、生態工法-改善既有已喪失功能之淨水池，以及設置末端灌溉系統等三階段計畫。此外，並成立當地管理委員會，多管齊下以達水資源之極大化利用。至截稿為止，本計畫已執行至第二期尾段，大幅提升農塘蓄水量、改善上游水源品質及周遭生態環境，具立竿見影之效，符合預期。本計畫後續將著重於第三期管路配置、委員會成立運作及管理維護事項，期望維護既有功能，朝永續經營之方向運作。

**關鍵字：**蓄水農塘、生態工法、灌溉系統

<sup>1</sup> 台北市瑠公農田水利會工程員

## 結合關聯結構與卜松過程之乾旱分析架構

巫佩諭<sup>1</sup>、游景雲<sup>1</sup>

### 摘要

乾旱是一種經常性與反覆出現的氣候現象。由於近年來氣候變遷與全球對於水資源需求的增加，我們經歷了更嚴重的乾旱。為了評估乾旱趨勢的影響，本研究旨在提出一個完善的分析架構，利於流量乾旱分析並模擬未來情境的乾旱特徵。基於本研究提出的關聯結構(Copulas)與卜松過程(Poisson process)之乾旱模型架構。首先，分析歷史水庫入流數據，估算最佳乾旱事件之參數，並定義乾旱事件。接著從乾旱事件中萃取三個乾旱特徵，分別為乾旱持續時間，乾旱缺水量以及乾旱發生時間。此三個乾旱特徵具有一定相關性，故本研究使用三維高斯關聯結構，建構隨機模型來模擬乾旱事件之發生，此外，為了更恰當地模擬乾旱事件，本研究進一步採用改良之卜松過程來描述兩乾旱事件間之時間隔年份，此做法能有效地降低合成乾旱事件時的困難度。至此，上述分析過程與模擬結果皆是基於定常性假設，而為進一步考慮氣候變化的影響並分析乾旱特徵的趨勢，本研究於最後提出一個非定常性乾旱分析架構，能繁衍可信之未來乾旱事件。這項研究的結果可以應用在施政方針的參考、提供未來的乾旱政策或乾旱調節模式的檢驗，並在後續中、長期有更好的規劃。

<sup>1</sup>臺灣大學土木工程學系

# Power Output Efficiency in Large Wind Farms with Different Streamwise Turbine Spacing

Yu-Ting Wu<sup>1</sup>、Chang-Yu Lin<sup>2</sup>、Yu-Hsiang Tsao<sup>3</sup>

## 摘要

A large-eddy simulation model and actuator-disk model are used to predict the turbine power production of the large wind farm and to study the impact of increasing streamwise turbine spacing on the entire turbine power performance of the wind farm. In this study, thirty wind farm cases are considered and consist of 120 wind turbines which are arranged into 30 turbine rows along the streamwise direction with different turbine configurations (i.e., aligned, laterally-staggered, and vertically-staggered), increasing streamwise turbine spacing (i.e., 7d, 9d, 12d, 15d, and 18d), and incoming turbulence intensity level (i.e., ABL11 and ABL07), as shown in Figure 1. Figure 2 shows the turbine power production has a significant improvement by increasing the streamwise turbine spacing. With increasing the streamwise turbine spacing from 7d to 18d, it enhances the total average of turbine power production about 13%~21%, especially for wind farm cases with aligned turbine configuration. Moreover, the total average of turbine power production reaches over 80% at LS-18d wind farm case under ABL11 flow condition. However, even though the increasing streamwise turbine spacing can enhance the power performance effectively, the power density decreased. The effective analysis shows the larger streamwise turbine spacing leads to a lower effective roughness and friction velocity. The wind farm cases with aligned turbine configuration reach to stable and close to the three models more quickly than vertically-staggered and laterally-staggered turbine configurations.

**關鍵字** : *Large Eddy Simulation, Streamwise Turbine Spacing, Power Output.*

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Engineering Science, National Cheng Kung University, Tainan

<sup>2</sup> Ph. D. student, Department of Engineering Science, National Cheng Kung University, Tainan

<sup>3</sup> Master student, Department of Engineering Science, National Cheng Kung University, Tainan

## 建立水資源-能源-糧食(WEF Nexus)鏈結 可轉移評估框架之初步研究

蘇淑慧<sup>1</sup>、范致豪<sup>2</sup>

### 摘要

隨著全球經濟與工業的發展，都市化與人口增長已成為世界之趨勢，人口數的激增勢必連帶影響人類對於水資源、糧食、能源的迫切需求，因此，如何在有限的水資源、糧食、能源與經濟之間達成平衡並維持永續生活，成為目前人類最需解決的課題。為了能提供政府機關決策者於制定國家未來發展政策時有更全面的量化參考數據，若能由過去之歷史數據建立一相關模式則會有利於擬定國家未來政策。本研究考量水資源、糧食、能源三者間可能的影響變因以及人口數、經濟成長等因子，並以統計及迴歸分析之方式找出三者之間的鏈結。相關數據蒐集以政府相關單位提供之統計數據為基準，蒐集國家包含臺灣、日本及美國，並使用正規化(Normalization)之方法進行數據標準化處理，以消除各國家間統計單位不同所致之誤差；在本研究中亦建立一永續指標以檢驗整體環境是否朝永續性之方向發展，以督促政策制定時可確保資源之有效利用，進而減少資源濫用。本研究以永續的水資源(SW)、永續的糧食(SF)及永續的能源(SE)作為依變項，並列舉出可能影響該三大類別之變因及人口數與國內生產總值(GDP)作為自變項，其中 SW、SF、SE 也分別做為其他兩依變項之自變項。研究結果顯示，以此迴歸方式所建立之模式可套用於所蒐集三個國家之歷史數據，並可由現有水、糧食、能源相關數據推估未來相關趨勢，以提供政府決策者制定未來發展之量化參考依據。

**關鍵字：**能源、水資源、糧食、鏈結、永續指標

<sup>1</sup> 國立臺灣大學 生物環境系統工程學系，研究助理

<sup>2</sup> 國立臺灣大學 生物環境系統工程學系，教授兼系主任

## **Conjunctive Use Planning and Management of Surface Water and Groundwater in Southern California, USA**

William W-G. Yeh, PhD, NAE

Department of Civil and Environmental Engineering  
University of California, Los Angeles, California, 90095, USA

### **Abstract**

Southern California is one of the major metropolitan centers of the United States of America, with more than 19 million people. The population and economy were founded upon extensive development of both local groundwater resources and supplemental imported surface water supplies. Over the years, several groundwater basins in Southern California have experienced over-pumping of groundwater. This has caused the decline of the water table, land subsidence, seawater intrusion, and other negative environmental impacts. To recover the water table and prevent seawater intrusion, surplus surface water and reclaimed waste water are being used to recharge the groundwater basin by means of spreading grounds and injection wells. This paper discusses the sources of water supply to Southern California, the seawater barrier projects, and an integrated approach to water resources planning and management for the future.

## 以資料分析方法探討濁水溪地下水含水層補注量

曾華廷<sup>1</sup>、余化龍<sup>1</sup>

### 摘要

因臺灣本身河川、地質以及降雨特性，水工建築物通常壽命很短，如目前臺灣內水庫平均淤積量已超過 30%，雖政府每年都有進行水庫清淤的工作，但清淤速度遠不其淤積，再加上極端氣候的影響，未來水資源問題將日益嚴峻。欲因應未來可能發生的水資源問題，開發地下水資源是選擇之一，但若妥善使用地下水資源，就需掌握區域內之補注量。過去對於地下水補注量的推估大多使用數值模型如 MODFLOW 等，但運用數值模型需花費大量時間學習其使用方法與操作流程，對研究區域也要有一定程度的了解，才能輸入適當的參數，還需將輸入的資料整理成模式可接受的型式，模式才可正常運作，整體建模過程費時費力，且耗費較大量運算資源。本研究目的即在於，發展一套以地下水位資料為基礎，不須輸入複雜的參數，較為簡易的補注量推估流程。

本研究在推估過程中，只需運用水位資料、雨量資料以及一些地文資料如研究區之面積、孔隙率和 CN 值，並參考水文地質架構與土地利用進行補注區的判釋，使用的水位與雨量資料皆為 2004-2010 年之小時資料。以濁水溪沖積扇為例，為找出補注區的位置與補注趨勢，先以經驗正交函數分析水位資料，萃取解釋變異量較大的空間趨勢以及時間趨勢，配合水文地質架構與周圍雨量測站，找出補注區。結果顯示該地補注區位於名竹盆地與濁水溪沖積扇扇頂，由於兩者為上下游關係，再對於兩地進行地下水位與雨量關聯性分析結果的基礎下，建立一簡易水筒模式，以水平衡方程式描述兩者地下水互動的關係，最後以普通最小平方法求解方程式中各項參數，進一步推估濁水溪沖積扇的補注量。

結果顯示濁水溪沖積扇扇頂平均年直接補注量為 7,880 萬噸，從名竹盆地側向流入濁水溪沖積扇的入流量平均一年為 1 億 310 萬噸，總補注量平均一年則為 1 億 8,190 萬噸。

**關鍵字：**補注量推估、簡易水筒模式、經驗正交函數

<sup>1</sup> 國立臺灣大學生物環境系統工程學系

# 基於水權轉讓需求情境下的察爾森水庫調度研究

韓俊山<sup>1</sup>、梁團豪

## 摘要

洮兒河幹流是松遼流域省（自治區）間用水矛盾最為突出的地區，察爾森水庫作為洮兒河流域唯一一座大型控制性工程，是一座以防洪、灌溉為主，結合發電、養魚等綜合利用的大型水利樞紐。2014 年以後，察爾森水庫興利調度邊界條件發生了較大變化，進行了水權轉讓，供水行業和供水量均發生了較大變化。因此，統籌協調生活、生態、工業、灌溉和發電等多個興利目標，研究制定更加科學合理且實用性較強的察爾森水庫動態調度方案，是水庫水權轉讓後且供水任務發生變化情況下，水庫調度運行必須要解決的問題。

建立水庫動態調度模型，以水庫 1956 年~2017 年實際入庫水量作為模型輸入，同時，生活工業需水量、生態需水量、興安盟灌溉需水量、白城市灌溉需水量、電站參數、水庫特徵參數等主要參數也作為模型輸入，採用長系列法以旬為單位進行水庫徑流調節計算。採用有加大供水區和無加大供水區兩個方案進行對比分析。

通過方案對比，考慮到察爾森水庫的任務是以防洪、灌溉為主，兼顧發電，因此水庫興利調度仍應以保障工農業供水為主，在發電量差別不大的情況下，應最大程度的滿足水庫的工農業供水需求。因此，本次察爾森水庫近期興利調度的優選方案為無加大供水區方案。

本次方案能夠較好的綜合協調好防洪、灌溉、供水、發電、生態和養魚等任務及各部門的關係，在發揮水庫綜合效益的同時，將大力促進洮兒河流域的水資源合理開發、高效利用、綜合治理、優化配置和科學管理。

**關鍵字：察爾森水庫、水權轉讓、興利調度**

## 壹、研究背景

洮兒河幹流是松遼流域省（自治區）間用水矛盾最為突出的地區，察爾森水庫作為洮兒河流域唯一一座大型控制性工程，是一座以防洪、灌溉為主，結合發電、養魚等綜合利用的大型水利樞紐，如何科學的進行水庫的興利調度，關係到下游城市、農村供水安全能否得到保障，對流域水資源宏觀調控和可持續利用起著至關重要的作用。

2014 年以後，察爾森水庫興利調度邊界條件發生了較大變化。首先，察爾森水庫原供水任務沒有生態任務，察爾森水庫除險加固時，明確了水庫的最小生態放流任務。其次，根據

內蒙古自治區水利廳批復的《察爾森水庫下游灌區水權轉讓可行性研究報告》（內水資〔2017〕21 號）和松遼委新發發的察爾森水庫取水許可（證書編號 201500053911），察爾森水庫下游興安盟將部分灌溉供水份額轉讓給興安盟生活和工業，取水用途變更為農業灌溉、水力發電、城鎮生活、工業及生態用水，較原取水許可增加了城鎮生活、工業及生態用水。

因此，如何統籌協調生活、生態、工業、灌溉和發電等多個興利目標，研究制定更加科學合理且實用性較強的察爾森水庫動態調度方案，是水庫水權轉讓後且供水任務發生變化情況下，水庫調度運行必須要解決的問題。

<sup>1</sup> 作者簡介：韓俊山，男，水利部松遼水利委員會，教授級高級工程師，主要從事水利規劃、水資源管理工作。

通訊作者：梁團豪，男，水利部松遼水利委員會，高級工程師，主要從事水利規劃、水資源管理工作。E-mail: [346783772@qq.com](mailto:346783772@qq.com)。

## 貳、模型的建立

### 一、水庫興利調度約束條件

#### (一) 供水約束條件

1. 水庫興利調度需嚴格執行 1991 年形成的《察爾森水庫下游灌區規劃設計工作第二次協調會議紀要》(松遼 [91] 水政字第 3 號) 分水協議。

2. 察爾森水庫農業用水水權轉讓為工業用水的最大份額為 7200 m<sup>3</sup>，由於興安盟農業用水水權轉讓造成白城市回歸水的減少，將從興安盟分水份額中扣除，以水庫直供的方式供給白城。

3. 如果內蒙古自治區不進行水權轉換，或者水權轉換沒有達到最大量(生活工業用水之和 7200 萬 m<sup>3</sup>)，剩餘的農業用水的水權仍歸內蒙古自治區所有，仍可用於農業灌溉。

4. 生活和工業供水保證率為 95%(月)，生態供水保證率為 90%(月)，農業灌溉供水保證率為 75%(年)。

#### (二) 水庫庫容及棄水約束條件

$$V_s \leq V_i \leq V_z$$

式中， $V_z$  表示水庫正常蓄水位或汛限水位對應的庫容， $V_s$  表示水庫死庫容， $V_i$  表示水庫第  $i$  時段庫容。水庫水位超過正常蓄水位(汛期為汛限水位)時開始棄水。

#### (三) 流量、出力和水頭約束條件

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}; N_{\min} \leq N_i \leq N_{\max}; H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max}$$

式中， $Q_{\min}$  和  $Q_{\max}$  分別表示水電站最小、最大下泄流量； $N_{\min}$  和  $N_{\max}$  分別表示水電站最小、最大發電出力； $H_{\min}$  和  $H_{\max}$  分別表示水電站最小、最大發電水頭。

#### 2.2 計算方法

建立水庫動態調度模型，以水庫 1956 年~2017 年實際入庫水量作為模型輸入，同時，生活工業需水量、生態需水量、興安盟灌溉需水量、白城市灌溉需水量、電站參數、水庫特徵參數等主要參數也作為模型輸入，採用長系列法以旬為單位進行水庫徑流調節計算。

水庫徑流調節計算的水量平衡計算公式為：

$$V_{i+1} = V_i + W_{\text{入}} - W_{\text{城鎮}} - \max(W_{\text{農}}, W_{\text{生}}, W_{\text{電}}) - W_{\text{損}} - W_{\text{棄}}$$

$$\text{電}) - W_{\text{損}} - W_{\text{棄}}$$

式中： $V_i$  和  $V_{i+1}$  分別為水庫第  $i$  時段初和時段末的庫容； $W_{\text{入}}$  為第  $i$  時段水庫來水量； $W_{\text{城鎮}}$  為第  $i$  時段城鎮生活工業供水量； $W_{\text{農}}$  為第  $i$  時段農業灌溉供水量； $W_{\text{生}}$  為第  $i$  時段河道內生態用水量； $W_{\text{電}}$  為第  $i$  時段水庫發電用水量； $W_{\text{損}}$  為第  $i$  時段水庫蒸發、滲漏等損失水量之和； $W_{\text{棄}}$ ——第  $i$  時段水庫棄水量。

## 參、興利調度方案制定

### 一、調度圖的編制

初步擬定興利調度圖分為灌溉期(4 月 21 日~9 月 10 日)和非灌溉期(9 月 11 日~翌年 4 月 20 日)，以旬為計算時段。興利調度圖編制過程中，首先保證生態放流、工業生活供水和灌溉用水，用生態和灌溉水進行發電。此次察爾森水庫興利調度圖編制根據建立的計算模型，採用有加大供水區和無加大供水區兩個方案進行對比分析。

#### (一) 無加大供水區方案

無加大供水區方案即調度目標是以供水為主的方案，水庫不設加大供水區，工農業供水保證率最高、供水量最大的角度，選擇最優調度線，制定察爾森水庫近期興利調度圖。

灌溉期初步擬定 4 條調度線，分別為上調度線(水庫允許最高蓄水位)、農業降低供水線、工業降低供水線和起調線(死水位)；由水庫調度線劃分為保證供水區、農業降低供水區和工業降低供水區三個供水區域。非灌溉期初步擬定 3 條調度線，分別為上調度線、降低供水線和起調線，劃分為保證供水區和降低供水區。

採用長系列法以旬為單位繪製水庫調度圖，將長系列調節計算成果中灌溉設計保證率以內的年份的各時段水位，點繪在同一圖上，取其下包線為農業降低供水線的初始調度線；將長系列調節計算成果中工業生活設計保證率以內的年份的各時段水位，點繪在同一圖上，取其下包線為工業降低供水線的初始調度線。在各初始調度線的基礎上，進行長系列調節計算，通過電腦模型不斷調整優化調度線。調度圖詳見圖 1。

#### (二) 有加大供水區方案



有加大供水區方案，即在滿足工業生活 95%保證率、農業 75%的基礎上，當水庫水位較高、水量多餘時，加大放流以減少棄水增加發電量。

灌溉期初步擬定 5 條調度線，分別為上調度線（水庫允許最高蓄水位）、保證供水線、農業降低供水線、工業降低供水線和起調線（死水位）。由水庫調度線劃分為加大供水區、保證供水區、農業降低供水區和工業降低供水區四個供水區域。非灌溉期初步擬定 4 條調度線，分別為上調度線、保證供水線、降低供水線和起調線，劃分為加大供水區、保證供水區和降低供水區。調度圖詳見圖 2。

## 二、調度方案比選

從有加大供水區和無加大供水區兩個方案 1950 年~1987 年的長系列調算結果來看，兩個方案生活工業、生態供水量和供水保證率相差不大。

無加大供水區方案的優點是供水保證率高、供水量大，尤其以農業最為明顯，農業供水保證率達 87.2%，較有加大供水區方案的 76.9%增加十個百分點；多年平均供水總量為 40317 萬  $m^3$ ，較有加大供水區方案有較大幅度提高；另外，生活工業和生態的供水保證率較有加大供水區方案也有一定幅度的提高。方案的缺點是沒有將水庫發電效益做為水庫調度的目標，但由於水庫多年平均水位較有加大供水區方案要高，因此多年平均發電量（2998 萬  $kW\cdot h$ ）較有加大供水區僅減少 145 萬  $kW\cdot h$ ，減少幅度不大。而有加大供水區的方案的優點是最大程度的考慮了發電效益，減少了水庫棄水量，但工農業供水量和供水保證率均較無加大供水區方案有大幅度減少。

考慮到察爾森水庫的的任務是以防洪、灌溉為主，兼顧發電，因此水庫興利調度仍應以保障工農業供水為主，在發電量差別不大的情況下，應最大程度的滿足水庫的工農業供水需求。因此，本次察爾森水庫近期興利調度的優選方案為無加大供水區方案。

該方案能夠較好的綜合協調好防洪、灌溉、供水、發電、生態和養魚等任務及各部門的關係，在發揮水庫綜合效益的同時，將大力促進洮兒河流域的水資源合理開發、高效利用、綜

合治理、優化配置和科學管理。  
方案比較詳見表 1。

第二十三屆兩岸水利科技交流研討會

表 1 兩種方案 1950 年~1987 年計算成果對比表

項目		單位	指標		
			有加大出力區方案	無加大出力區方案	
農業	農業需水量	興安盟	萬 m <sup>3</sup>	18150	18150
		白城市	萬 m <sup>3</sup>	16457	16457
		農業總需水量	萬 m <sup>3</sup>	34607	34607
	農業供水量 (多年平均)	興安盟	萬 m <sup>3</sup>	16770	17412
		白城市	萬 m <sup>3</sup>	15206	15788
		農業總供水量	萬 m <sup>3</sup>	31976	33199
	農業供水量 (75%)	興安盟	萬 m <sup>3</sup>	18150	18150
		白城市	萬 m <sup>3</sup>	16457	16457
		農業總供水量	萬 m <sup>3</sup>	34607	34607
	農業供水保證率(年)		%	76.9	87.2
生活、工業	生活、工業需水量		萬 m <sup>3</sup>	7200	7200
	生活、工業供水量(多年平均)		萬 m <sup>3</sup>	7113	7118
	生活、工業供水保證率(月)		%	95.4	96.1
生態	生態保證率(月)		%	99.6	99.6
	多年平均生態下泄量		萬 m <sup>3</sup>	11354	11349
多年平均下泄量		萬 m <sup>3</sup>	58082	57685	
多年平均年棄水量		萬 m <sup>3</sup>	8530	11956	
多年平均年發電量		萬 kW·h	3143	2998	
水庫總經濟效益		萬元	5943	5924	
水庫發生棄水年份數		年	7	13	

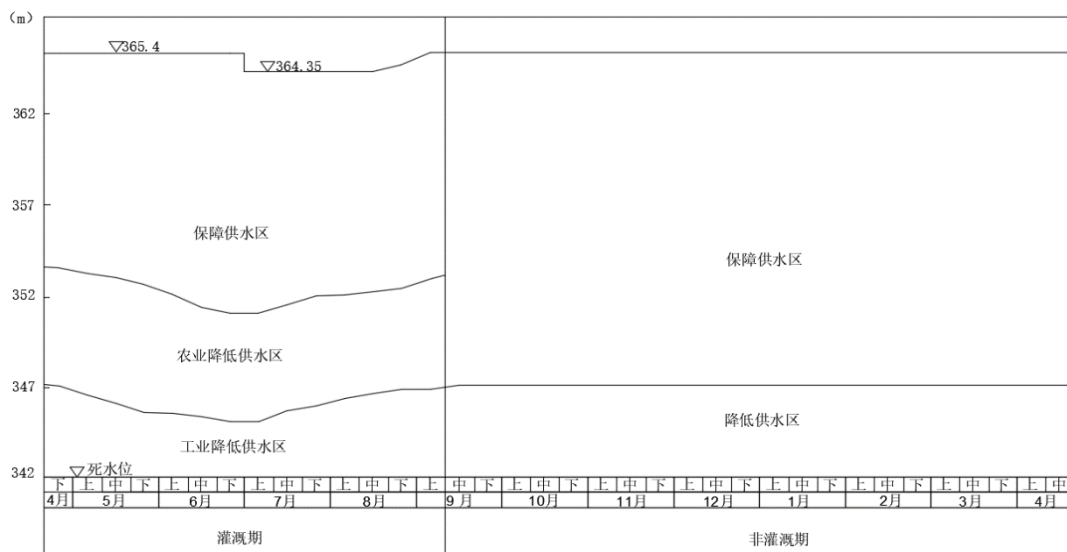


圖 1 無加大供水區方案水庫近期興利調度圖

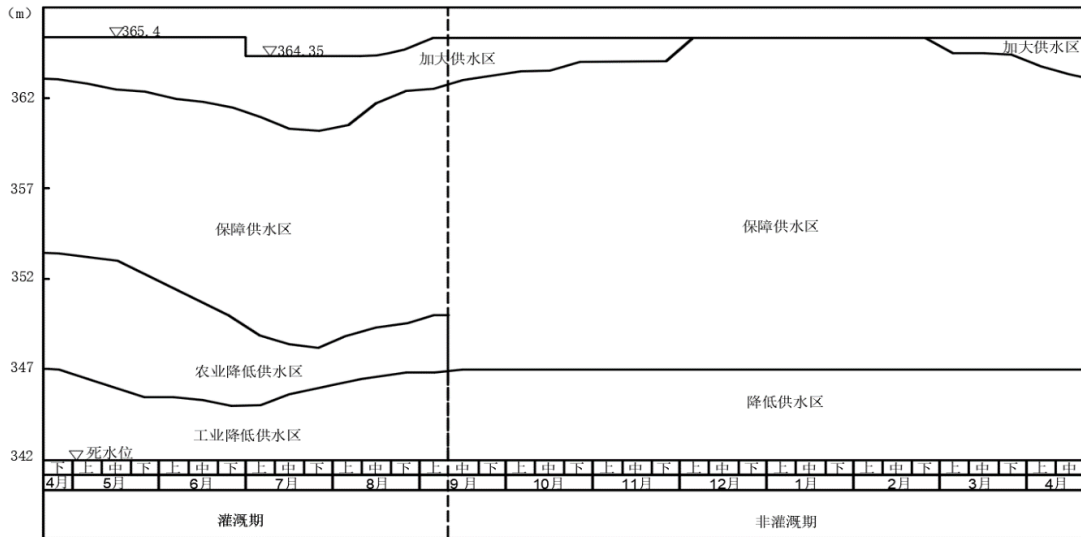


圖 2 有加大供水區方案水庫近期興利調度圖

## 肆、興利調度方案的應用

### 一、調度方案的適用條件

察爾森水庫興利調度圖的水準年為 2020 年，反映察爾森水庫近期的運行狀況，察爾森水庫興利調度圖適用以下條件：

- (1) 水庫任務沒有改變；
- (2) 電站機組參數不變；
- (3) 電站在興安盟電網的運行方式沒有變化；
- (4) 下游灌區灌溉面積及用水量較《察爾森水庫取水許可變更評估報告書》中的灌溉面積和用水量沒有發生較大改變。
- (5) 內蒙古自治區工業生活用水量之和不大於 7200 萬  $m^3$ 。

### 二、應用時需注意的問題

(1) 當水庫調度任務、運行條件、調度方式、工程安全狀況發生重大變化時，應及時修正該調度圖。

(2) 如遇特殊水情或其他重大水事件(如下游向海濕地等補水、重大水污染事件及其他應急調水情況等)，察爾森水庫管理局應向松遼委提出申請，及時調整調度計畫。

(3) 根據以往水庫調度經驗，每年的 4 月中下旬和 4 月上旬，水庫下泄水量中的一部分用於填補河道和地下水位的虧空，下游灌溉用水容易受到影響，因此在水庫年度調度中應考

慮 4、5 月份的輸水損失問題。

## 參考文獻

1. 張利升、張睿等(2016),「丹江口水利樞紐多目標興利調度決策模型」,人民長江,第 47 卷,第 22 期,第 105-109 頁。
2. 孔維哲(2018),「基於長序列調節的大伙房水庫興利優化調度研究」,東北水利水電,2018 (03),第 24-26 頁。
3. 任政(2017),「基於多目標動態規劃演算法的水庫興利優化調度模型及應用」,水電能源科學,第 35 卷,第 4 期,第 69-71 頁。

## 水資源高效利用實踐與可持續利用對策—以鄂爾多斯 杭錦旗為例

佟長福<sup>1</sup>、李和平<sup>1</sup>、劉海全<sup>2</sup>、苗平<sup>3</sup>、樊文彪<sup>2</sup>、冷豔傑<sup>4</sup>、蘇志雄<sup>5</sup>

### 摘要

水資源是基礎性的自然資源、戰略性的經濟資源和生態環境的控制因素。杭錦旗在水資源合理開發、高效利用、有效保護和綜合管理等方面進行了大量實踐探索，確立可持續發展的治水新思路：著力推進牧區高效節水、黃灌區水權轉換和農業水價實施；開展工業節水、城鎮生活用水、生態環境治理和農村牧區人畜飲水安全保障等實踐工作；加強非常規水利用工程建設；構建水權交易市場體系。針對水資源開發利用中存在的問題，科學制定水資源高效利用戰略：實施最嚴格的水資源管理制度，加強水資源與生態環境保護，強化水資源的科技支撐等，實現水資源高效利用支撐經濟社會的可持續發展。

**關鍵字：**水資源、高效利用、實踐、可持續利用、對策

1 水利部 牧區水利科學研究所 教授級高級工程師

1 水利部 牧區水利科學研究所 副所長 教授級高級工程師

2 杭錦旗水利局 局長 工程師

2 杭錦旗水利局 總工 工程師

3 鄂爾多斯市水利局 科長 高級工程師

4 北京中水科工程總公司 高級工程師

5 烏審旗水利局 工程師

## 壹、引言

水資源是基礎性的自然資源、戰略性的經濟資源和生態環境的控制因素。水是生命之源，也是人類及自然界賴以生存的最重要物質之一，它已經成為一個國家綜合國力的有機組成部分。水資源合理開發、高效利用和有效保護是解決水資源短缺問題、保障經濟社會可持續發展、實現全面建設小康社會戰略目標的重要措施，促進人與自然和諧發展的必然要求。

杭錦旗位於內蒙古自治區鄂爾多斯市西北部，地跨鄂爾多斯高原與河套平原，地理座標為東經  $106^{\circ}55' \sim 109^{\circ}16'$ ，北緯  $39^{\circ}22' \sim 40^{\circ}52'$ ，總面積  $18830.62\text{km}^2$ 。屬於中溫帶半乾旱高原大陸性氣候，多年平均降水量為  $245\text{mm}$ ，氣溫  $6.8^{\circ}\text{C}$ ，蒸發量為  $2720\text{mm}$ ，風速  $3.0\text{m/s}$ ，日照時數  $3193\text{h}$ ，無霜期  $155\text{d}$ 。多年平均地表水資源可利用量為  $0.16\text{億}\text{m}^3$ ；淺層地下水資源量為  $3.87\text{億}\text{m}^3/\text{a}$ （礦化度  $\leq 2\text{g/L}$  地下水資源量為  $3.55\text{億}\text{m}^3/\text{a}$ ；礦化度  $>2\text{g/L}$  地下水資源量為  $0.32\text{億}\text{m}^3/\text{a}$ ），礦化度  $\leq 2\text{g/L}$  地下水資源可開採量為  $2.87\text{億}\text{m}^3/\text{a}$ 。根據內蒙古自治區水利廳核定，杭錦旗黃河供水量指標為  $4.10\text{億}\text{m}^3/\text{a}$ 。黃灌區一、二期水權轉讓指標  $1.74\text{億}\text{m}^3/\text{a}$ ，轉讓後剩餘農業灌溉的黃河水指標  $2.36\text{億}\text{m}^3/\text{a}$ 。

2017年，全旗地區生產總值  $94.80\text{億元}$ ，其中：第一產業  $19.85\text{億元}$ ；第二產業  $36.48\text{億元}$ ；第三產業  $38.47\text{億元}$ 。農作物總播面積  $8.06 \times 10^4\text{hm}^2$ ，牲畜頭數  $145.62\text{萬頭}$ （只）；規模以上工業企業  $25$  家，主要有石油、天然氣開採業、化學原料和化學製品等；戶籍人口  $14.41\text{萬人}$ ，其中：城鎮人口  $2.78\text{萬人}$ ，農村人口  $11.64\text{萬人}$ ；建成生態自然恢復區  $7500\text{km}^2$ ，禁牧面積達到  $5.30 \times 10^5\text{hm}^2$ ，休牧面積達到  $8.58 \times 10^5\text{hm}^2$ 。沙漠綜合治理  $2.00 \times 10^5\text{hm}^2$ ，造林  $1.37 \times 10^5\text{hm}^2$ ，森林覆蓋率和植被覆蓋度分別提高到  $14.4\%$  和  $75\%$ 。農牧業是用水大戶，用水量為  $2.78\text{億}\text{m}^3$ ，其中：黃灌區灌溉用水  $1.96\text{億}\text{m}^3$ ；其它用水量  $0.82\text{億}\text{m}^3$ 。

黃河自西向東流經杭錦旗  $242\text{km}$ ，庫布其沙漠橫互東西，將全旗自然劃分為北部沿河區和南部梁外區。梁外區以草原和天然林保護區為主，草原遼闊，草質優良，並盛產多種野生綠色食品，是自治區重要的草原生態畜牧業基地；沿河區屬於黃河沖積平原，水源充沛，土壤肥沃，是內蒙古自治區高效農牧業基地。隨著杭錦旗國民經濟和社會事業的快速發展，工業化和城鎮化進程加快，對水資源的需求越來越大，對水資源合理開發利用及水資源保護等提出了更高的要求。通過系統調研分析，以系統性、綜合性和前瞻性為視角，分別從水資源的開發、保護、管理和應用等環節切入，以管

理體制、科技創新和理念轉變等效能支撐，研究水資源高效利用的戰略，提出實現水資源可持續發展的對策，使有限的水資源實現可持續發展的要求，促進社會經濟的健康和諧發展。

2017年，全旗總用水量  $2.96\text{億}\text{m}^3$ ，農田灌溉水利用係數  $0.50$ ，萬元工業增加值用水量  $14.7\text{m}^3$ ，監測水功能區達成率  $100\%$ 。鄂爾多斯市人民政府辦公廳關於下達 2017 年度水資源管理工作任務：2017 年全旗總用水量為  $3.17\text{億}\text{m}^3$ ，農田灌溉水利用係數為  $0.50$ ，萬元工業增加值用水量為  $\leq 15\text{m}^3$ ，監測水功能區達成率為  $100\%$ 。2017 年，水資源利用均符合三條紅線控制指標要求。

《鄂爾多斯市人民政府關於下達最嚴格水資源管理制度控制目標任務的通知》（鄂府發[2014]36 號）三條紅線控制指標中用水總量控制指標：2020 年全旗用水總量控制在  $3.18\text{億}\text{m}^3$ ，2030 年全旗用水總量控制在  $3.57\text{億}\text{m}^3$ ；檔僅對全旗的用水總量指標提出要求，未對用水效率和監測水功能區達成率下達控制指標，目前三條紅線指標還沒有細化到每個行業。到 2020 年僅有  $0.22\text{億}\text{m}^3$  的用水增長空間，2030 年僅有  $0.61\text{億}\text{m}^3$  的用水增長空間，未來用水形勢嚴峻，水資源供需矛盾日益突出，因此按照三條紅線控制指標、地區經濟社會可持續發展和保護生態建設的目標和要求，在水資源合理開發、高效利用、有效保護和綜合管理等方面進行了大量實踐探索，確立可持續發展的治水新思路，開展了一系列治水實踐並取得顯著成效。

### 一、現代農牧業迅速發展

（一）梁外牧區水利建設。梁外牧區主要分為東南部乾旱硬梁區和中西部牧區，地表水資源缺乏。80 年代以前，只有簡單的筒井供人畜飲水外，其它水利工程一無所有，完全屬於靠天吃飯。1998 年開始，創造性的在乾旱硬梁區提出集人畜飲水、開發水澆地和發展節水灌溉為一體的“三位一體”工程模式，在牧區提出了“五個一”工程模式（即每戶牧民打 1 眼機電井，建 1 座  $15\text{m}^3$  的水塔，建 1 座  $80\text{m}^2$  的舍飼暖棚，建 1 處  $30\text{--}50\text{m}^3$  的青貯窖，發展 1 處  $2.67\text{hm}^2$  的經濟園）。2006 年，共計實施“三位一體”工程  $56$  處，“五個一”工程  $1100$  餘戶，效益十分顯著，不僅推動了禁牧和休牧政策的貫徹落實，使草原生態得以修復，恢復草原面積達到  $1.33 \times 10^5\text{hm}^2$ ，而且解決了牧區人畜飲水困難和農牧民經濟收入不穩定的問題。

2006 年開始，將牧區水利的重點放在了承包草牧場  $200\text{hm}^2$ 、水澆地  $6.67\text{hm}^2$ 、牲畜飼養規模  $300$  只以上的牧戶中，進行試點推廣。2010 年，以戶為單元安裝噴灌  $572$  台，發展節水灌溉面積  $0.84 \times 10^4\text{hm}^2$ 。2011 年開始，爭

取實施了自治區“四個千萬畝”節水改造項目、牧區節水示範項目、牧區水利重點縣專案和節水增效項目，以及配套滴灌水肥一體化技術。截止 2017 年，全旗實施牧區節水灌溉面積  $1.31 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，牧區耕地在  $4 \text{hm}^2$  以上牧戶節水配套率達到 92% 以上，其中：管灌面積  $0.07 \times 10^4 \text{hm}^2$ ；噴灌面積  $0.18 \times 10^4 \text{hm}^2$ ；滴灌面積  $1.06 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。

(二) 黃河南岸灌區水權轉換工程。黃河南岸灌區位於杭錦旗北部黃河沖積平原區，南靠鄂爾多斯臺地，北鄰黃河，屬東西狹長的帶狀平原。按照灌溉形式自西向東依次劃分為揚水、自流和井揚結合 3 大類型灌區，灌區總灌溉面積  $3.75 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，是自治區主要商品糧基地之一，也是鄂爾多斯地區最大的引黃自流灌區。灌區主要以自流灌溉為主，由南岸總幹渠從三盛公樞紐引水灌溉，全長 242km，控制灌溉面積  $2.73 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。

按照水利部的治水新思路，在全國率先提出了水權轉換，即“企業投資節水，農業轉換水權”。通過水權轉換節水改造，科學合理配置黃河水資源，既可節約農業灌溉成本，又可有效滿足新建工業項目用水要求，從而達到農業和工業發展雙贏目標。實施一、二期水權轉換工程累計完成投資 11.67 億元，完成節水灌溉面積  $2.94 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，襯砌各級管道 252.23km。其中：畦田改造  $1.70 \times 10^4 \text{hm}^2$ ；滴灌工程  $0.73 \times 10^4 \text{hm}^2$ ；噴灌工程  $0.41 \times 10^4 \text{hm}^2$ ；改造井渠結合灌區  $0.10 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。

通過水權轉換，建設現代農牧業基地，投資規模大、速度快、效益高，這在全市農業開發史上是一個奇跡，水權轉換取得的效益可概括為：一加強、二提高、三降低、四滿意。

1. 加強：通過水權轉換節水改造工程的實施，大大加強了項目區的基礎設施建設，實施節水改造的地區，渠系整齊有序，渠、田、林、路四配套，面貌煥然一新，為建立現代化農業園區奠定了基礎。

2. 提高：節水改造工程實施後，水資源服務於經濟社會的能力和灌區管理服務水準都有了大幅度提高。未實施前，水利僅僅服務於農業，水的效益偏低；實施後，不僅服務農業的能力沒有降低，而且拓展到工業乃至整個國民經濟。通過與之配套的灌區管理體制改革，實行“服務到門，管理到門，計量到門”和“管理單位+用水者協會+農戶”的管理方式，杜絕了農村供水亂加價、亂攤派和亂收費

等不良現象的發生。

3. 降低：水資源損失率、水費、地下水位大幅度降低。節水改造工程實施前，管道水的損耗率在 68% 左右；改造後，僅以萬畝節水示範片為例，渠系水損耗率下降到 35% 左右。灌溉定額也由原來的  $16500 \text{m}^3/\text{hm}^2$  下降到  $7500 \text{m}^3/\text{hm}^2$ ，農民水費隨之減少，降低了農業生產成本。

4. 滿意：政府、農民、企業和社會滿意。水權轉換節水改造工程實現了水資源的優化配置，既為農牧民增收創造了條件，又為工業企業提供了可靠的水資源保障，強有力地推動了經濟社會全面進步。

水權轉換工程實施後，提高了水資源的利用效率和效益，拓寬了水利工程的融資管道，加快了土地流轉整合，提高了土地規模化和集約化水準，支持了現代農牧業的發展，同時推動了灌區管理體制的改革。

(三) 黃河南岸灌區農業水價改革。杭錦旗被列為全國首批 80 個農業水價綜合改革試點旗之一，依託農業水價綜合改革專案，推進灌區現代化管理。2014 年，在吉日嘎朗圖鎮乃瑪岱村選擇  $1587 \text{hm}^2$ ，總投資 0.14 億元，實施效果很好。2017 年，編制《杭錦旗 2017-2020 年農業水價綜合改革專案建設方案》，規劃  $2.67 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。2017 年實施  $5420 \text{hm}^2$ ，其中畦灌面積  $2607 \text{hm}^2$ ；滴灌  $2813 \text{hm}^2$ 。新建 6 個農民用協會，投資 0.16 億元。灌區農業水價改革共計實施面積  $7007 \text{hm}^2$ 。

項目實施主要是通過組建農民用者協會，從事小型農田水利建設，維護管理和農業灌溉服務；實行總量控制和定額管理；建立和完善協會規章制度和運行機制，讓協會真正成為工程管護、用水管理、水費計收、解決水事糾紛等工作的責任主體，實現農民用者自治；完善農業水價政策，建立節水獎勵制度。

截止目前，黃灌區  $3.05 \times 10^4 \text{hm}^2$  未實施農業水價改革，總體方案已經批復。2017 年已經實施完成，目前正在編制下一年度的實施方案，加快推進農業水價改革實施。

(四) 農牧業節水效果分析。通過牧區飼草料地高效節水技術，黃河南岸灌區水權轉換和農業水價改革工程建設，實施節水灌溉面積  $4.95 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，節水量為 2.19 億  $\text{m}^3$ ，其中：地下水 0.22 億  $\text{m}^3$ ；黃河水 1.97 億  $\text{m}^3$ 。增產效益 2.37 億元，詳見表 1。

表 1 杭錦旗農牧業節水效果

名稱	實施節水灌溉面積 (10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	節水量 (億 m <sup>3</sup> )	增產效益 (億元)
牧區飼草料地	1.31	0.22	0.69
黃河南岸灌區水權轉換	2.94	1.74	1.37
黃河南岸灌區農業水價改革	0.70	0.23	0.31
合計	4.95	2.19	2.37

## 二、工業節水實施

2017年，杭錦旗堅持“工業強旗”的戰略定位，推動工業產業集聚增效，進一步規範園區管理體制和工作機制，提升園區服務企業能力。工業主要分佈在錫尼鎮工業園區、巴拉貢鎮工業園區和獨貴塔拉鎮工業園區，獨貴塔拉工業園區被列入自治區“十三五”開發區發展規劃重點開發區，是自治區規劃建設的22個重點園區和產業集中區之一，也是自治區重點推進的“雙百億”工業園區。由於經濟低速發展，園區工業沒有全部運行，用水量僅為0.04億m<sup>3</sup>。

近幾年，工業也有了長足的發展，企業項目頻繁上馬，加大了工業對水資源的需求。目前，工業採取節水措施主要包括：建立健全用水管理體制，加強企業科學用水管理；加強冷卻用水的管理；改進傳統的生產工藝和節水方式，降低工藝取水量；加大污水回用；依靠技術進步，完善監控體系，形成合理工業用水價格機制。工業萬元增加值用水量11.4m<sup>3</sup>，處於國內先進水準。因此，工業節水指標處於較高的水準，節水潛力較小。

## 三、強力推進農村牧區人畜飲水安全保障

農村牧區人口分佈廣是我國的一個重要國情，人畜飲水安全是廣大農牧民最關心、最直接和最現實的問題，是農牧民生活狀況改善的重要標誌，也是可持續發展核心本質。杭錦旗地域面積大，水資源條件差異大，人畜飲水是全旗水利面臨的重大難題。1996年以前，全旗人畜飲水主要靠群眾自行修建的簡井和大口井等取水，飲水沒保障。1996年自治區人畜飲水“380”工程全面啟動實施，至2000年，“380”飲水工程取得了很大的成績，解決了3.90萬人，14.90萬頭只牲畜飲水問題。但是，梁外地區缺水、沿河地區氟砷超標仍是人畜飲水面臨的挑戰。本著先易後難和重點突破的原則，合理佈設工程，在人口集中的巴拉貢鎮和吉日嘎朗圖鎮成功的實施以集中供水為主的防氟改水工程，解決了1.15萬人飲水問題；在乾旱硬梁區推廣集人畜飲水、開發水澆地和節水灌溉為一體的“三位一體”工程，在牧區主要實施“五個一”模式工程，引導群眾大搞人畜飲水及水源工程建設，解決了0.86萬人，6.70萬頭只牲畜的飲水問題。

2000年開始，國家加大了人畜飲水及安全飲水工程建設力度，杭錦旗將安全飲水工程作為重點來抓。至2007年，新打機電井143眼，基本供水井23眼，大口井12眼，筒井86眼，旱井和水窖等112處，截伏流2處，塑管井6眼，水塔81座，水池3座，管道鋪設131km，架高壓線路18.20km，建成沿河地區集中供水工程3處，解決了7.40萬人，37.21萬頭只牲畜的飲水問題。其中自來水入戶2172戶，使1.08萬人用上了安全自來水。

隨著經濟社會的發展進步，在人畜飲水的理念上提出了從喝上“有水喝”到喝上“安全水”的轉變，2008-2017年，累計建成飲水安全工程112處，解決了農村牧區12.11萬人的飲水不安全問題，全旗農村牧區常駐人口飲水問題全部解決完成，農村牧區自來水普及率達到72%，居全市首位。

以前已解決人飲工程標準低、覆蓋率低、已到使用壽命等，又有2.50萬人重新飲水不安全，從2016年開始實施飲水安全鞏固提升工程，特別是針對沿河地區自來水水質部分指標仍存在超標問題，邀請清華大學水資源教授指導進行找水，經過3年努力，在位於庫布其沙漠腹地的鐵蓋廟一帶找到了符合人飲標準的水源，採取PPP模式進行建設，一次性投資1.20億元，徹底解決巴拉貢鎮、吉日嘎朗圖鎮和獨貴塔拉鎮的飲水安全問題，已經開始供水。

近年來，隨著杭錦旗人口的增長，政府對供水投入的加大，以及人民生活品質的改善與城鎮化率的提高，杭錦旗生活用水量不斷增加。2017年，生活用水量為0.03億m<sup>3</sup>，其中：城鎮用水量0.02億m<sup>3</sup>；農村牧區用水量0.01億m<sup>3</sup>。城鎮和農村人均生活用水定額分別為95L/人·d和62L/人·d，城鎮生活用水水準高於內蒙古自治區平均水準91L/人·d；但與全國水準221L/人·d相比，仍有較大的差距，有待提高生活用水品質。

## 四、生態環境治理

(一)庫布其沙漠生態治理。庫布其沙漠位於內蒙古鄂爾多斯高原北部的庫布其沙漠，總面積18600km<sup>2</sup>，是中國第七大沙漠，也是距離北京最近的沙漠。這裡曾是京津冀地區三大風沙源之一，也是一片飛鳥難越、寸草不生的死亡之地。杭錦旗水務和水土保持局在總結前人治沙經驗的基礎上，利用了全新的“引澆治

沙”理念，這是“庫布其精神”的成功體現。杭錦旗庫布其沙漠（巴彥溫都爾濕地）重點水生態綜合治理保障工程被納入《全國江河湖庫水系連通 2018 年度實施方案》，獲國家投資 1.20 億元，目前已經投資 0.60 億元，建成了首期 38.03km 分凌引水渠，生態圍堤 17.35km，黃河凌水順著引水渠流進了庫布其沙漠。3 年多來，累計引進黃河水 0.50 億  $m^3$ ，滋養出了野生蘆葦面積達到 4667  $hm^2$ ，吸引來了仙鶴、鴛鴦、天鵝等 20 餘種野生鳥類，形成濕地面積 36.0  $km^2$ ，周邊水草豐茂，流域內草場植被蓋度增加 30%。庫布其水生態治理區不僅使水資源得到科學高效利用，而且將庫布其沙漠打造成“沙水相連”自然景觀，打造出沙漠局部水生態景觀長廊，形成了獨有的沙漠湖泊和沙漠綠洲，進一步改善庫布其沙漠生態環境。黃河冰凌變害為利的同時，也讓生活在周邊的農牧民享受到了生態治理帶來的效益，為沙漠的生態治理探索了實踐經驗，提供了成功範例。同時，黃河凌水還能改善巴彥溫都爾濕地劣水、沙漠湖泊萎縮等問題，恢復沙漠湖泊，使得濕地和湖泊的水生態環境得到了很大緩解，為當地水生態環境建設及經濟發展提供保障。

（二）城鎮生態環境用水量。2017 年城鎮生態環境用水量（包括城鎮綠地用水和環境衛生用水）0.10 億  $m^3$ 。隨著城鎮面積的擴大，園林綠化和環境衛生用水將逐漸增加，加劇了水資源緊張的局面。因此，城鎮生態環境用水應當優先使用再生水和雨洪水，而且園林綠化應當選用與當地氣候條件相適應的耐旱型樹木、花草，推廣採用噴灌、微灌等節水灌溉方式，不得採用漫灌等高耗水灌溉方式。

## 五、加強非常規水利用工程建設

非常規水源是指地表水和地下水以外的其他水源，通常有再生水（即汙水處理回用的水）、海水（包括海水淡化和直接利用）、雨水、微咸水和礦井水等，這些水源的特點是經過處理後可以再利用的非飲用水。杭錦旗的非常規水源主要有再生水和礦井疏幹水，大力推進錫尼鎮汙水處理廠建設、新能源產業示範區汙水處理廠建設、獨貴塔拉汙水處理廠建設和塔然高勒煤礦疏幹水利用 4 個項目的非常規水利用工程建設，為生態和工業用水提供水源，提高非常規水資源利用率，對解決水資源短缺和水環境污染都具有重要的現實和長遠意義。同時，也是建設資源節約型、環境友好型社會和實現可持續發展的重要措施。

## 六、構建水權交易市場體系

水權交易是通過政府與市場兩手發力，促進水資源節約保護、優化配置的重要途徑。為應對和解決水資源供需矛盾，我國的水資源管理理念不斷創新，以往單一的行政化管理手段也逐漸發生改變。杭錦旗正在制定水權交易管

理辦，目前開展的水權交易主要是灌區與工業企業之間的交易，用水總量已接近用水總量控制指標，新增用水需求通過水權交易解決。正在開展灌溉用水戶水權確權，採取多種措施（包括非常規水源工程建設）培育水權交易（多種水源）賣方和交易水權範圍，鼓勵和引導農牧民調整種植結構的同時，積極推進高效節水專案，發展設施農業等，使現狀用水戶節餘水量轉換給需要用水的工業或農牧業。同時，建立健全交易機制和制度辦法，推動水權交易市場建設營造良好的氛圍<sup>[4]</sup>。

## 七、嚴格落實水資源管理制度

近年來，杭錦旗水資源管理逐漸轉變“政府主導”的傳統模式，依照創新、綠色、開放、共用和協調的理念，從水資源消耗量與消耗強度兩個方面進行雙向控制，嚴格對地下水資源開發量與開發水位進行約束，將水源涵養作為水資源管理的根本，逐步出臺了水資源交易管理辦法等一些相關政策規定，實行嚴格的水資源管理制度，切實落實三條紅線與思想制度。三條紅線是落實用水方式轉變，強化用水管理的約束機制，實現水資源節約與保護的產業結構、生產方式和空間格局，使水資源開發利用與當地經濟發展形勢相適應，從而提升水生態系統的整體承載能力<sup>[5]</sup>。

## 參、水資源開發利用面臨問題和保障需求分析

### 一、水資源利用效率不高

當前農業灌溉節水多以常規的管道節水為主，灌區資訊化、自動化管理水準較低，用水效率較低。高效節水面積不足、田間節水發展緩慢，農業節水管理工作薄弱，但是施肥、耕作、秸稈覆蓋、保水劑應用等農藝措施推廣應用力度不夠，未形成綜合節水模式。

### 二、用水結構不合理，水資源配置體系尚不完善

農牧業用水過多，結構不合理。2017 年農牧業用水量占總用水量的 94%，是杭錦旗的第一用水大戶，而農業增加值對 GDP 的貢獻率占比 21%；農業用水結構本身不合理，高附加值作物種植面積較少。農業用水量過大，影響了工業項目的發展用水。

地表水利用相對較多，地下水開採分佈不合理，非常規水源利用量偏少。在地表水供水中，對黃河取水依賴程度高，而一些支流調蓄工程能力不夠，不能充分發揮“以豐補枯”的作用，開發利用存在一定的難度。流域蓄水和引水等水資源配置骨幹工程建設滯後。水資源配置工程體系尚不完善，水資源配置能力不足，缺乏有效的水資源調度手段。



### 三、水生態環境狀況

杭錦旗水環境問題產生的因素包括自然和人為因素兩部分，其中人為因素占主要原因。水環境問題主要表現在以下幾個方面：地方病問題；苦咸水問題；部分地區長期超采地下水造成地下水位不斷下降；生態環境遭受破壞導致土地荒漠化；土壤鹽漬化和水土流失等。

### 四、保障需求分析

隨著人口數量增加，工業化、城鎮化進程持續推進，用水量在未來一段時間內仍持續增長。根據文獻《杭錦旗水資源可持續利用規劃》：2030年，杭錦旗人口總量將接近17.37萬人。灌溉面積達到 $6.12 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，其中：土渠灌溉面積為 $0.95 \times 10^4 \text{hm}^2$ ；襯砌渠灌面積為 $1.71 \times 10^4 \text{hm}^2$ ；管灌面積為 $0.61 \times 10^4 \text{hm}^2$ ；噴灌面積為 $0.70 \times 10^4 \text{hm}^2$ ；滴灌面積為 $2.15 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。國民生產總值達到387.03億元，其中：第一產業生產總值為50.31億元；第二產業生產總值為224.48億元；第三產業生產總值為112.24億元。在各行業採取高效節水措施的條件，需水總量將達到3.59億 $\text{m}^3$ ，其中：生活需水量為0.05億 $\text{m}^3$ ；第一產業需水量為2.46億 $\text{m}^3$ ；第二產業需水量為0.94億 $\text{m}^3$ ；第三產業需水量為0.01億 $\text{m}^3$ ；生態需水量為0.13億 $\text{m}^3$ 。

全旗需水量總量超過2030年杭錦旗三條紅線總量控制指標（3.57億 $\text{m}^3$ ）0.02億 $\text{m}^3$ ，水資源供需基本平衡。如不採取節水措施，按照目前用水水準發展，到2030年需水量將達到3.98億 $\text{m}^3$ ，超過三條紅線總量控制指標0.41億 $\text{m}^3$ ，水資源難以支撐經濟社會的發展。

按照建設節水型社會的要求，以水資源可持續利用為目標，充分考慮區域發展訴求、國家重大戰略對區域的發展要求，根據區域水資源時空分佈格局、水資源開發利用條件和工程佈局等眾多因素，結合節約用水並參考用水效率較高地區的用水水準，對杭錦旗內國民經濟各部門的需水量進行多種用水模式下的需水方案分析和優化，實現單位水量產出最大化，及水資源的可持續利用。

## 肆、水資源可持續利用對策

### 一、加快推進最嚴格的水資源管理制度建立

實行最嚴格的水資源管理制度是我國未來較長時期內的基礎性水資源公共政策，國家還將水資源管理嚴格定位於“加快經濟發展方式的戰略舉措”，充分發揮水資源管理紅線的倒逼機制，推進產業結構調整和區域經濟佈局優化，實現經濟社會發展與水資源和水環境承載能力相協調<sup>[7]</sup>。通過最嚴格水資源管理制度的實施，到2030年，杭錦旗用水總量力爭控制在3.57億 $\text{m}^3$ 以內，萬元國內生產總值和

萬元工業增加值用水量明顯降低，農田灌溉水有效利用係數提高到0.55以上，全國水功能區達成率爭取達到100%。

### 二、加強對水資源和生態環境的保護

水資源作為一項基礎性的自然資源，對經濟的可持續發展具有重要的影響。伴隨市場經濟的飛速發展以及城市化發展進程不斷加快，水資源得到最大限度應用，導致水資源的供給與需求矛盾擴大，需要加強對水資源的合理利用和有效保護，保護措施如下：

1. 以用水總量控制為核心，完善水資源配置工程體系，提高水資源配置能力，保障水生態系統的合理用水需求。

2. 以提高用水效率和效益為目標，加強農業、工業和城鎮服務業的節水工程建設，減少水資源開發利用和污水排放，減輕對水生態系統的影響。

3. 以水功能區管理為載體，加強污染源的治理。修建非常規水處理設施，提高非常規水處理能力，完善非常規水資源開發利用激勵機制；加強排污口的管理，控制排污口的數量；大力推動綠色農業和生態農業的發展；加強對水資源和生態環境的保護，不斷完善保護措施，從源頭上解決水資源的過度使用和污染。

4. 以實施河湖水系連通工程和調水補水工程等水利工程設施建設為手段，實現山水林田湖草水生態的空間均衡發展。

5. 以實現綠水青山就是金山銀山的理念為目標，開展水生態創新實踐——“引凌治沙”工程，讓水患變為了水利，讓沙地變成了濕地，把庫布其沙漠的北部邊緣建成一道綠色屏障。

6. 以落實法律法規和執法監督為保障，開展地下水資源管理和水資源保護等方面立法工作，規範水資源管理行為，強化監督管理。

7. 處理好政府主導和水權市場的關係問題。通過南岸灌區水權轉換和農業水價的改革的實施，灌區產生大量的退水，爭取灌區的退水量指標為黃河水用水指標，將其放置水權市場進行交易，提高水資源的利用效率。

### 三、夯實水資源安全保障科技支撐

水資源安全保障對科學技術提出了系統的要求，科技支撐方面需要解決的幾個關鍵技術問題，分述如下：

1. 針對全旗灌溉人工草地發展面臨的水-土-草-畜多要素動態平衡調控的問題，研究水-土-草-畜平衡調控閾值，提出4要素的適宜發展指標。

2. 梁外牧區。針對牧區地下水灌溉的特點和缺乏成套易操作、易推廣的技術成果，研究飼草料作物節水灌溉技術、與農藝和農機等配套技術，提出牧區提質增效節水灌溉技術集成模式，在井灌區進行推廣應用。

3. 黃河南岸灌區。(1) 針對南岸灌區水分運動特點，研究土壤水、地表水和下水系統的水迴圈過程，揭示灌區的排水過程；(2) 水權轉換主要實施灌區節水工程，灌區需要進一步細化水權，加強灌區資訊化建設，提高灌區資訊化、自動化管理水準；(3) 水權轉換工程中黃河水滴灌存在一些問題，研究滴灌工程對於生態環境的影響，以及黃河水滴灌的適應性；(4) 農民對於滴灌工程的運行管理還比較陌生，缺乏管理經驗，需要進一步研究黃河水滴灌的運行管理模式；(5) 建立農業水價的改革機制，健全水資源高效利用的管理機制。

4. 庫布其沙漠水生態治理。如何確定引黃水量，探索高效利用水資源的方法，改善巴彥溫都爾濕地劣水、沙漠湖泊萎縮等問題，恢復沙漠湖泊，為當地水生態環境建設及經濟發展提供保障。

5. 應用虛擬水理論研究杭錦旗水資源的投入與產出，為水權轉換奠定理論基礎。

### 參考文獻

1. 王曉娟、鄭國楠、陳金木 (2018), 「我國水權交易兩級市場的培育與構建」, 中國水利, 第 19 卷, 第 20-23 頁。
2. 孫金華、王思如、朱乾德 (2018), 「水問題及其治理模式的發展與啟示」, 水科學進展, 第 29 卷, 第 607-613 頁。
3. 石玉波、張彬 (2018), 「我國水權交易的探索與實踐」, 中國水利, 第 19 卷, 第 4-6 頁。
4. 鐘華平、吳永祥、李岱遠 (2017), 「水資源管理模式與管理對策探討」, 水利發展研究, 第 10 期, 第 3-8 頁。
5. 巴圖、毛廣元、郭志宏 (2016), 「杭錦旗水資源可持續利用規劃」, 第 108、167 頁。
6. 王浩、王建華 (2012), 「中國水資源與可持續發展」, 中國科學院院刊, 第 27 卷, 第 352-357 頁。
7. 萬育生、張國玉 (2012), 「加快非常規水源開發利用的思考」, 中國水利, 第 17 卷, 第 9-10 頁。
8. 丁文喜 (2011), 「中國水資源可持續發展的對策與建議」, 中國農學通報, 第 27 卷, 第 221-226 頁。

## 广平县地下水超采综合治理分析

许长青<sup>1</sup>、唐 蕴<sup>2</sup>、王建华<sup>3</sup>、邵薇薇<sup>4</sup>

### 摘要

河北省地下水超采综合治理项目已经实施 3 年，亟须对地下水压采效果进行评估。本文以河北省广平县为研究对象，收集评估区自然地理数据、社会经济发展状况数据、农业信息数据、水资源基础数据、长序列降水数据、地下水埋深数据、农业用电量数据以及其他相关基础数据，并开展相关抽水试验；利用有效降水与开采量曲线（P-W）计算出地下水的压采量，分析了 2014 年广平县在水利和农业 2 个方面压采目标的完成情况；同时对地下水超采综合治理工作做出客观评价，为以后开展类似地下水超采治理提供参考借鉴。

**关键字：**地下水超采、综合治理、压采、效果评估、有效降水、开采量、地下水位、河北广平

<sup>1</sup> 中国水利水电科学研究院+研究生

<sup>2</sup> 中国水利水电科学研究院+教授级高工

<sup>3</sup> 中国水利水电科学研究院+副院长/教授级高工

<sup>4</sup> 中国水利水电科学研究院+教授级高工

## 壹、前言

在过去的 50 年中，由于降雨在时间和空间上的分配不均匀性以及随着河水径流量的减少、水资源严重短缺的增加，北方地区在农业灌溉水资源和灌溉原理上应提出新的要求<sup>[1-2]</sup>。中国北方平原作为一个重要的农业灌溉地区，当前正面临严重的水资源短缺问题<sup>[3]</sup>。农业灌溉在很大程度上依赖于地下水。由于水资源供求关系的极度不平衡，使得地下水过度开采问题变得尤为突出。作为水循环中的一个重要组成部分，过度开采地下水不仅影响水循环，而且能够影响区域水文地质条件。一个地区的地下水开采量应该设置在合理范围内，需要一个限度指标，当开采量超过允许值时，就会导致一系列地质、环境、社会问题，包括含水层排水、地面沉降、喀斯特坍塌、水质恶化、海水入侵（沿海地区）等<sup>[4]</sup>。在河北省有超过 91% 的地区存在地下水过度开采的问题，在地下水超采严重的地区已经产生了含水层缺失、地下水降落漏斗、地面沉降等一系列水文地质灾害。胡志荣等<sup>[5]</sup>对比地下水开采量和可开采量来定量分析由于地下水过度开采引起的地面裂缝、地面沉降等环境问题。

党中央、国务院高度重视地下水保护工作，2011 年中央一号文件明确提出了到 2020 年地下水超采基本遏制的目标。财政部、水利部针对河北省地下水超采问题进行了专题调研，提出支持并先期推动河北省地下水超采治理工作。2014 年先期在河北省地下水超采最严重的黑龙港流域开展地下水超采综合治理试点。

河北省广平县地表水供水工程现有民有灌区和蓄水闸灌区，但由于近几年连续干旱，只有大量超采地下水才能维持国民经济的发展和人民群众生活的需要。近几年来，广平县深层淡水开采量已达到 2500 万  $m^3$  左右，且有逐年递增趋势，致使地下水位持续下降，并形成以广平镇和大马庄为中心的地下水降落漏斗。由于水位下降，使微咸水或咸水区的地下水向周边低水位区进行补给，致使淡水区水质变化，灌溉后造成耕地次生盐碱面积不断扩大；由于严重缺水，大量的工业废水和生活污水得不到有效稀释，水环境质量难以改善，沿渠两岸的地下水也受到了不同程度的污染。

2014 年河北省地下水过度开采综合治理措施已实施 1 年，对其治理效果的评价显得尤为重要。广平县作为地下水超采综合治理试点县之一，又是传统意义的农业大县，在农业节水方面大有潜力。地下水超采综合治理项目压采效果评估工作，即通过理论计算分析，对工程项目实施后压采地下水量和超采现状改善情

况做出评估，展示地下水超采治理效果。对破解水资源短缺难题，促进广平县农业可持续发展、促进农民增收、改善农民生活具有重要意义。同时对地下水超采综合治理工作做出客观评价，为以后开展类似地下水超采治理提供参考借鉴。

## 贰、研究区概况与数据来源

广平县地处黑龙港流域上游、河北省南部，隶属邯郸市，距邯郸市 50 km，位于东经  $114^{\circ}51' \sim 115^{\circ}10'$ 、北纬  $36^{\circ}23' \sim 36^{\circ}37'$  之间，东与馆陶、大名为邻，西与成安、肥乡交界，南与魏县接壤，北与曲周毗连，交通便利，总面积 320  $km^2$ ，耕地面积 2.36 万  $hm^2$ 。属山前冲积、沉积平原，位于古黄河、漳河冲积而成的扇形平原的中下部。地处暖温带半湿润大陆性季风气候区，四季分明，雨热同期。具有春旱秋涝的特点，气象灾害以旱灾为主。全县多年平均降水量为 514.3 mm，多年平均蒸发量为 1 038.6 mm，多年平均无霜期为 201.8 d。境内无天然河流，仅有历史上遗留的黄河、漳河故道自西南向东北、弯弯曲曲时断时续贯穿全县。按水系划分，全县均属黑龙港流域平原区。境内植被主要是人工种植的各类农作物、林木和野草。其中，农作物种植以小麦、玉米、薯类、豆类、棉花、油料为主，果树种植以苹果、梨树为主。地处黑龙港流域上游，属冲积洪积平原，境内广泛分布着埋深不等的古河道，在河床相和牛轭湖相及决口的大溜处形成了厚度不等、层次复杂的含水层，含水层以细砂为主，粉砂、粉细砂次之，局部有少量的中砂，富集着丰富的地下水。

广平县现辖 7 个乡镇 169 个行政村，总人口 28.91 万人，其中农业人口 20.89 万人，占人口总数的 72.26%，是一个典型的农业县。2014 年总用水量为 5892.2 万  $m^3$ ，其中地下水用水量为 5512.2 万  $m^3$ 。从供水水源看，地下水为主要供水水源，占供水总量的 93.6%。多年平均总补给量为 3384 万  $m^3$ ，多年平均浅层地下水可开采量为 2783 万  $m^3$ 。

广平县 2014 年度地下水超采综合治理有农业、水利两大类项目。农业项目包含调整农业种植结构、小麦保护性耕作节水项目、小麦-玉米水肥一体化技术、冬小麦春节水稳产配套技术 4 个农艺节水工程。水利项目包括①高效节水灌溉工程 1 项，位于东张孟乡，规模 493.3  $hm^2$ ；②地表水替代地下水工程 2 个灌区，民有三分干渠灌区和吴村支渠灌区，规模分别为 662.1、625.1  $hm^2$ 。农业项目包括①调整农业种植结构规模为 333.3  $hm^2$ ；②冬小麦春节水稳产配套技术，规模 2486.7  $hm^2$ ；③小麦保护性耕作节水项目，规模 453.3  $hm^2$ ；

④小麦-玉米水肥一体化技术,规模 200.0 hm<sup>2</sup>。评估区压采项目分布如图 1 所示。

该研究主要收集了评估区的自然地理数据、社会经济发展状况数据、农业信息数据、水资源基础数据、长序列的降水数据(图 2)、地下水埋深数据、农业用电量数据以及其他相关基础数据。其中社会经济发展状况数据来源于广平县国民经济和社会发展统计年鉴、农业种植结构数据来源于广平农牧局、2010—2014 年的水资源数据来源于广平县水利局、1956—2015 年的日降水量数据来自于河北省水利局。该研究还收集了 7 口测井的水位埋深数据,为 1998 年至 2013 年每年的 5 月和 9 月的水位数据。其中分别位于双庙乡北汶村西、广平镇单庄村南、韩村乡南韩村东、韩村乡江庄村西北、平固店乡西营村、南堡乡前大寨村南、双庙乡小马庄村北。

### 参、研究方法

农业地下水实际开采量为当年由于农业生产灌溉需求而实际发生的地下水开采量。对于广平县而言,当年农业地下水实际开采量与当年降水丰枯之间有关系密切。降水偏丰的年份,作物对降水的利用增多,需灌水量减少;反之,则由于对降水利用减少而导致需灌水量的增加。因此,地下水开采量的代表性,需要将降水丰枯的因素考虑在内。一个地区一定的作物结构和用水水平情况下的农业开采量,一般以平水年份下的地下水开采量来衡量,此时其代表性最强,与多年降水丰枯变化下的地下水开采量期望值接近。

广平县地下水压采综合治理在 2014 年才开始实施,考虑到治理前基准年(2013 年)和考核基准年(2015 年)的降水频率并不一致,2 个年份调查评价的地下水实际开采量,只能代表当年特定降水情况下的开采量。为合理评估地下水压采效果,需要将治理前基准年和考核基准年的实际地下水开采量都换算到平水年降水状况下再行比较才有意义。

#### 一、丰平枯代表年的选取

有效降水指自然降水中补充到植物根系分布层的部分。很多有关有效降水的研究主要针对其生态效应而言,而实际上有效降水的本质是首先降水进入土壤,其次通过土壤水分间接被植被利用或对其他生态环节产生影响。因此,从土壤水分变化的角度去研究有效降水能更好地理解这一概念。对土壤水分而言,最小有效降水量是指一次降水过程中能使土壤相对湿度稳定增加的最小降水量。关于最小有效降水的大小,一般认为 5 mm 以上的降水大都是有效降水,而在农业上将日降水量超过 10 mm 的降水称为有效降水。

对广平县 1956—2015 年地面降水量系列进行排频,并采用皮尔逊Ⅲ型曲线进行适配。利用配好的频率曲线查找参考降水频率分别为 25%、50%、75%时的降水量,记为 P<sub>25</sub>、P<sub>50</sub>、P<sub>75</sub>。经过计算,广平县多年平均降水量 475.17mm, P<sub>25</sub>=565.74 mm, P<sub>50</sub>=453.46 mm, P<sub>75</sub>=361.04 mm。根据广平县面均有效降水量对比选出 2004—2013 年近期 10 年的丰、平、枯代表年分别为 2008 年、2007 年和 2013 年。

#### 二、项目区 1 kW·h 电出水量的计算

考虑到项目区和非项目区 1 kW·h 电出水量的不同以及不同区域间各个井的出水量也有差别,应该在项目区多种不同节水措施的区域分别试验。广平县分别有水利措施和农业措施两大方面。区域内的种植结构主要是玉米和小麦的交替循环种植,灌溉农作物的方式主要为抽取地下水管灌和地表水灌溉。广平县在南阳堡镇、胜营镇、东张孟乡布设典型试验井 13 眼,其中南阳堡镇 6 眼、胜营镇 3 眼、东张孟乡 4 眼。项目区布设 9 眼,分别为井灌地下水高效利用区 2 眼,作物类型是小麦玉米、蔬菜;地表水置换地下水区 2 眼,作物类型小麦玉米;农艺春灌节水区 3 眼,小麦玉米水肥一体化区 2 眼。非项目区布设 4 眼,位于小麦玉米轮作区。

把流量计置于抽水管外侧,每 6 min 测 1 次,每口井测量 30 min,即每口井得到 5 组数据,并取其平均值作为求取 1 kW·h 电的值。在每次读取流量计读数的同时还要记录电表的读数,利用 5 组数据的平均值和电表读数求取 1 kW·h 电出水量。试验得到,单井每 1 kW·h 电开采量在 0.685~1.776 m<sup>3</sup>之间,平均 1.221m<sup>3</sup>。其中,春灌节水项目区典型区作物是小麦,1 kW·h 电出水量为 0.85 m<sup>3</sup>。水肥一体化项目区典型区作物是小麦玉米,1 kW·h 电出水量为 1.52 m<sup>3</sup>。井灌区高效利用项目区典型区作物是蔬菜,1 kW·h 电出水量为 1.74 m<sup>3</sup>。地表水置换项目区典型区作物是小麦玉米,1 kW·h 电出水量为 0.84 m<sup>3</sup>。在非项目区的 1 kW·h 电出水量为 1.16 m<sup>3</sup>。根据单井每 1 kW·h 电开采量、历史用电量数据及种植结构,可以推求典型区种植类型在丰平枯代表年的单位面积用水量。

#### 三、P-W 曲线

根据广平县 2013 年农业种植结构、丰平枯 3 个代表年、2 个考核年的地下水开采量以及相应的降水量,绘制农业开采量-降水量(P-W)之间的相关曲线,采用幂函数进行拟合(图 3),函数计算公式为:

$$y=19.527x^{-0.676} \quad (1)$$

式中, y 为开采量, x 为有效降水量。

$R^2=0.9768$ ，拟合效果较好。根据广平县有效降水排频结果，选择 2011 年和 2014 年为校核年，2011 年和 2014 年的有效降水量分别为 159.52、142.42mm，对应降水频率为  $P=36.07\%$ 、 $P=62.3\%$ 。2 种年份下各种种植作物的单位面积用水量及相应开采量，2006 年农业开采量为 7351 万  $m^3$ ，2011 年农业开采量为 8795 万  $m^3$ 。

#### 四、压采量的计算

考核基准年（2015 年）共有  $N$  个井灌区/井渠双灌区，每个灌区采用地下水灌溉的作物种植类型有  $S$  种，则考核基准年（2015 年）的地下水实际开采量为：

$$W_{2015}^{\text{实际}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^S (w_{i,j}^{2015} \cdot a_{i,j}^{2015}) \quad (2)$$

式中， $a_{i,j}^{2015}$  为考核基准年（2015 年）第  $i$  个灌区第  $j$  种作物种植类型的井灌面积（万  $hm^2$ ）； $w_{i,j}^{2015}$  为考核基准年（2015 年）第  $i$  个灌区第  $j$  种作物种植类型当年的单位面积开采量（ $m^3/hm^2$ ）。

根据治理前基准年（2013 年）平水状况下的地下水开量、考核年基准年（2015 年）地下水实际开采量、考核基准年（2015 年）降水量及 P-W 曲线进行确定。

比例换算基于以下公式：

$$\frac{W_{2015}^{\text{平}}}{W_{2015}^{\text{实际}}} = \frac{W_{2013}^{\text{平}}}{W_{2013}^{\text{PW}}} \quad (3)$$

式中， $W_{2015}^{\text{平}}$  为考核基准年（2015 年）平水状况下的地下水开采量（万  $m^3$ ）； $W_{2013}^{\text{PW}}$  为治理前基准年（2013 年）P-W 曲线上对应考核基准年（2015 年）降水量时的地下水开采量（万  $m^3$ ）。

可得考核基准年（2015 年）平水状况下的地下水开采量计算公式：

$$W_{2015}^{\text{平}} = W_{2013}^{\text{平}} \times \frac{W_{2015}^{\text{实际}}}{W_{2013}^{\text{PW}}} \quad (4)$$

考核基准年（2015 年）地下水压采量为治理前基准年（2013 年）平水状况下地下水开采量与考核基准年（2015 年）平水状况下地下水开采量之差，即：

$$W_{2015}^{\text{压采}} = W_{2013}^{\text{平}} - W_{2015}^{\text{平}} \quad (5)$$

式中，为  $W_{2015}^{\text{压采}}$  考核基准年（2015 年）地下水压采量（万  $m^3$ ）。

## 肆、结果与分析

### 一、基准年治理前后地下水开采量分析

根据 2015 年各种作物在项目区和非项目区种植面积及相应单位面积地下水开采量，计算得到评估区 2015 年种植结构下的地下水实际开采量为 8650 万  $m^3$ ，其中项目区农业地下水开采量 1759 万  $m^3$ 、非项目区开采 6891 万  $m^3$ （表 1）。

可以看出，2015 年地下水开采量井灌高效节水项目区为 137.53 万  $m^3$ 、地表水置换地下水项目区为 505.33 万  $m^3$ 、调整农业种植结构项目区为 72.83 万  $m^3$ 、保护性耕作节水项目区为 153.42 万  $m^3$ 、冬小麦春灌节水项目区为 827.42 万  $m^3$ 、小麦-玉米水肥一体化项目区为 55.85 万  $m^3$ 。

### 二、治理前后地下水压采量分析

广平县项目区治理基准年前即 2013 年平水状况下地下水开采量为 1917 万  $m^3$ ，考核基准年 2015 年平水状况下地下水开采量为 1411 万  $m^3$ ，项目区治理前后地下水压采量 505.39 万  $m^3$ 。

广平县考核基准年项目区总压采目标是 610.3 万  $m^3$ ，实际完成压采量 505.39 万  $m^3$ ，完成比例 83%。各分项治理措施地下水压采完成地下水压采完成情况：水利项目压采目标 281.8 万  $m^3$ ，实际压采量 204.18 万  $m^3$ ，完成比例 72%，其中井灌区高效节水项目完成较好，达到 95%；地表水置换地下水项目完成 65%。农业项目压采目标 328.5 万  $m^3$ ，实际压采量 301.21 万  $m^3$ ，完成比例 92%，其中调整农业种植结构措施完成比例 88%、保护性耕作节水完成比例 88%、冬小麦春灌节水措施完成比例 94%、小麦-玉米水肥一体化措施完成比例 95%（表 2）。

### 三、治理前后地下水埋深修复效果分析

#### （一）项目区地下水位变化分析

广平县有广平县城关、平固店、南盐池 3 眼地下水监测井，均在项目区外，平固店点邻近项目区。对比 3 眼监测井的 2013 年和 2015 年均埋深数据，埋深变幅分别是 -0.48、1.67、-2.34 m，广平县城关和南盐池监测井埋深变浅，平固店监测井埋深依然下降。说明超采治理工程实施后，项目区水位较非项目区有较明显回升态势（图 4）。逐月对比 2013 年和 2015 年各监测点地下水埋深变化，用 2015 年埋深值减去 2013 年埋深，正值表示水位下降，负值表示水位上升，统计上升和下降点，有 22 个水位上升数据，其余 38 个水位下降数据；对比各监测点可以看出，广平县城关、南盐池处每月同比水位上升明显。

## (二)全县地下水位变化分析

2006—2013 年广平县浅层水埋深年均增大 0.08 m/年, 2013—2014 年期间埋深增大 0.08m, 2014—2015 年埋深增大 0.49 m, 表明浅层地下水位呈持续下降趋势(图 5)。2006—2013 年深层水埋深年均增大 0.83m, 2013—2014 年期间埋深增大 2.25m, 2014—2015 年埋深减小 1.57 m。表明 2014 年之前深层地下水位呈持续下降状态, 2014 年之后水位呈上升趋势(图 6)。从全县层面来看, 浅层地下水位继续下降, 修复效果不佳。深层地下水位 2014 年以后呈回升态势, 具有一定修复效果, 这与实施的 2014 年地下水超采治理工程有直接关系。

## 伍、结论与讨论

此项研究旨在评估广平县地下水过度开采的综合治理效果, 确定出地下水压采量, 但此项研究仍有其缺点和不足。一是由于受时间和能力的限制, 不能对全区内的井进行抽水试验, 没有得到每一口井 1 kW·h 电出水量, 而是选取了部分典型井进行试验, 可能会忽略一些其他不一致的井的出水量。二是地下水过度开采的综合治理才实施 1 年, 地下水水位回升不明显, 尤其是非项目区的地下水, 还需要项目的持续进行, 才能得到理想的效果。三是研究受到季节条件的影响, 不同的季节可能会不同以及在试验时不能排除一些试验安排的不合理等因素。通过对广平县过度开采的综合治理, 得出以下结论:

(1) 2015 年地下水压采量为 505.40 万 m<sup>3</sup>, 水利项目压采量为 204.19 m<sup>3</sup>, 农业项目压采量为 301.21 m<sup>3</sup>。总体完成指标为 83%, 其中水利项目完成指标为 72%, 井灌高效节水为 95%, 地表水置换地下水为 65%; 农业项目完成指标为 92%, 调整农业种植结构、保护性耕作节水、冬小麦春灌节水、小麦-玉米水肥一体化完成指标分别为 88%、88%、94%、95%。

(2) 广平县地下水超采治理工程实施前后浅层地下水位继续下降、地下水修复效果不甚明显, 2015 年深层地下水位比 2014 年回升了 1.57 m, 回升幅度较大, 地下水超采治理工程

发挥了积极作用。对比 3 眼监测井的 2013 年和 2015 年均埋深数据, 埋深变幅分别是 -0.48、1.67、-2.34 m, 广平县城关和南盐池监测井埋深变浅, 平固店监测井埋深依然下降。说明超采治理工程实施后, 项目区水位较非项目区有较明显回升态势。

(3) 浅层地下水位没有回升具有多个方面的原因: ①第 1 年压采能力有限。现状地下水开采量 5190 万 m<sup>3</sup>, 2014 年压采量 505 万 m<sup>3</sup>, 仅为开采量的 10%。②2014 年和 2015 年的气象条件对地下水压采效果影响较大。广平县多年平均降水量为 475.17 mm, 2014 年降水量 440.75 mm, 比多年平均值减少 7.2%; 2015 年发生严重干旱, 降水量只有 295.31 mm, 比多年平均值减少 37.9%。由于区域性干旱影响, 引黄水量没有达到设计引水指标, 导致地表水替代工程没有完全发挥作用。③南水北调配套工程建设滞后也影响了全县地下水水位的恢复。广平县南水北调替代城市工业和生活的水量为 592 万 m<sup>3</sup>, 由于南水北调水源还没有使用, 因而只能继续超采地下水维持工业和生活用水。

## 参考文献

1. ZHANG Q, XU C Y, YANG T(2009). Variability of water resource in the yellow river basin of past 50 year, China[J]. Water Resources Management, No.6, pp.1157-1170.
2. ZHANG Q, SUN P, SINGH V, et al(2012). Spatial-temporal precipitation changes (1956-200) and their implications for agriculture in China[J]. Global & Planetary Change, No.1, pp.86-95.
3. XU R, ZHONG X L(2013). Improving water use efficiency of wheat crop varieties in the North China Plain: review and analysis[J]. Journal of Integrative Agriculture, vol.12, No.7, pp.1243-1250.
4. 单兰波, 汪家权(2013). 地下水超采评价研究的现状与发展[J]. 低碳世界, 第 20 期, 第 110-112 页。
5. 胡志荣, 曹万金, 任清潮, 等(1995). 地下水超采及其环境影响研究[J]. 水资源保护, 第 2 期, 第 37-41 页。

## 图与表

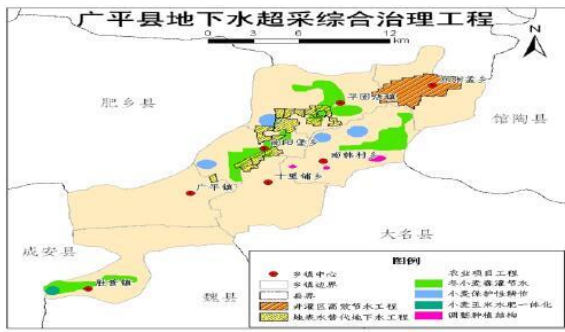


图1 评估区水利压采项目分布

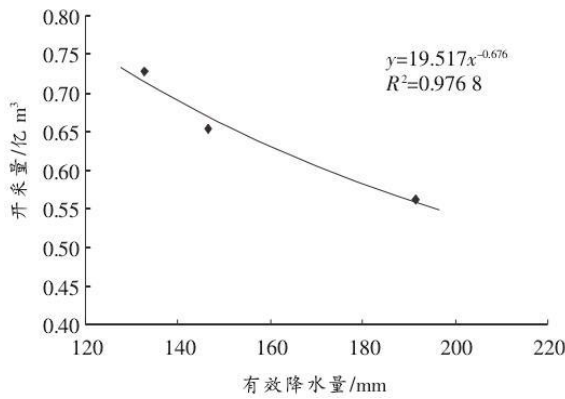


图2 1956-2015年广平县年降水量变化

图3 2013年评估区农业种植结构下P-W曲线

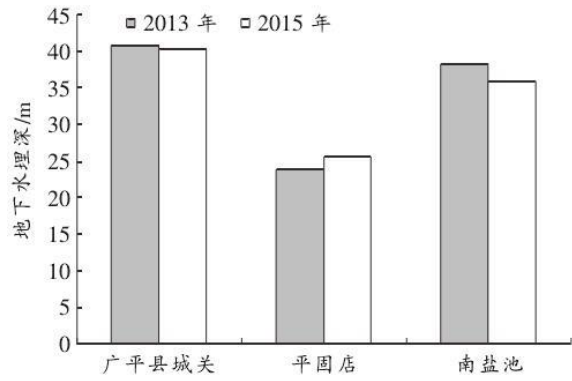
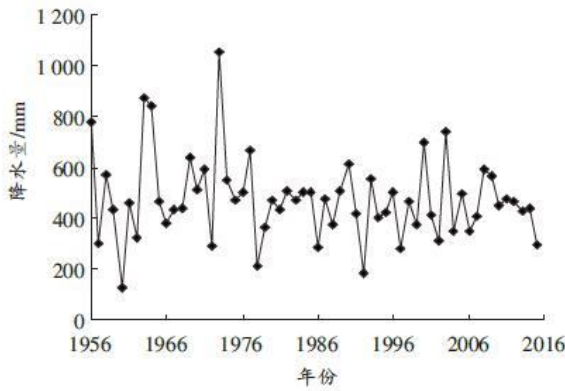


图4 2013年和2015年广平县各地下水

监测点埋深对比

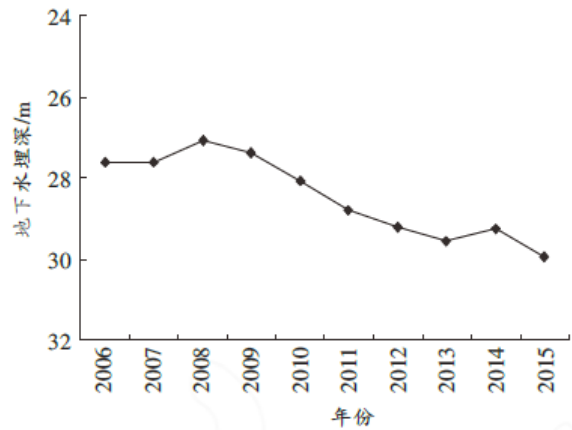


图5 2006-2015年广平县浅层地下水

埋深变化

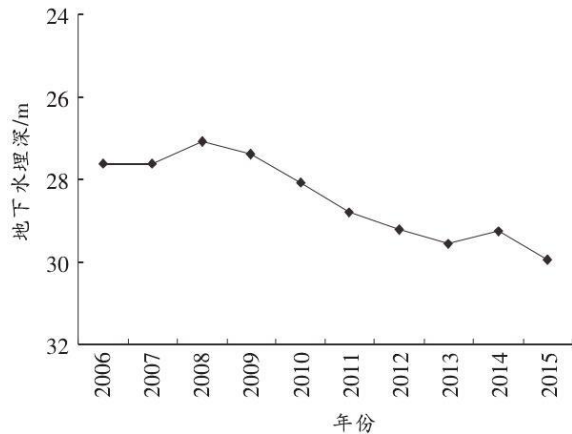


图6 2006-2015年广平县深层地下水

埋深变化



第二十三屆兩岸水利科技交流研討會

表 1 2015 年各項目區農業地下水實際開採量

項目區序號	實施項目	種植作物	種植面積 (畝)	畝均用水量 (m <sup>3</sup> /畝)	農業地下水開採量 (萬 m <sup>3</sup> )
1	井灌高效 節水	小麥	6700.00	134.97	90.43
		玉米	6700.00	50.26	33.67
		棉花	300.00	50.00	1.50
		蔬菜	400.00	298.27	11.93
2	地表水置 換地下水	小麥	19308.00	201.05	388.19
		玉米	19308.00	60.67	117.14
3	調整農業 種植結構	玉米、谷 子、油料等	5000.00	145.65	72.83
4	保護性耕 作節水	小麥	6800.00	169.80	115.46
		玉米	6800.00	55.82	37.96
5	冬小麥春 灌節水	小麥	37300.00	165.55	617.50
		玉米	37300.00	56.28	209.92
6	小麥玉米 水肥一體 化	小麥	3000.00	164.14	49.24
		玉米	3000.00	45.36	13.61
合計	—	—	151916.00	—	1759.39

表 2 考核基準年（2015 年）項目區農業地下水压採量完成情況統計

压采項目	實施項目	压采目標 (萬 m <sup>3</sup> )	農業地下水压採 量 (萬 m <sup>3</sup> )	完成比例 (%)
水利項目	井灌高效節水	69.80	66.00	95
	地表水置換地下水	212.0	138.18	65
水利項目小計		281.8	204.19	72
農業項目	調整農業種植結構	90.0	79.57	88
	保護性耕作節水	34.0	29.80	88
	冬小麥春灌節水	186.5	174.81	94
	小麥玉米水肥一體化	18.0	17.03	95
農業項目小計		328.5	301.21	92
合計		610.3	505.40	83

## 新疆水资源禀赋、开发利用现状及其长期战略对策

姜付仁<sup>1</sup>，克里木<sup>2</sup>

### 摘要

【目的】利用水利部水利水电规划设计总院《中国水资源及其开发利用调查评价》、邓铭江等《新疆水资源及其可持续利用》和新疆水资源公报 2012-2016 年等有关成果，分析新疆水资源禀赋及开发利用规律。【方法】按照水资源流域分区、行政地市分区分析各地水资源禀赋及其开发利用规律。【结果】新疆多年平均水资源总量为 832 亿 m<sup>3</sup> (1956-2000)。本世纪以来受降水偏丰影响，2001-2017 年间年均水资源量为 931.9 亿 m<sup>3</sup>，比多年平均多 99.1 亿 m<sup>3</sup>，年均偏多 12%。2012~2016 年间年均供水总量为 580.52 亿 m<sup>3</sup>，总体呈下降趋势，从 2012 年的 590.14 亿 m<sup>3</sup>，下降到 2016 年的 565.39 亿 m<sup>3</sup>。【结论】提出了坚持节水优先，持续推进节水型社会建设；坚持生态优先，加快推进西北地区生态文明工程建设等相关长期战略对策，供有关部门决策时参考。

**关键词：**新疆；水资源禀赋；开发利用；战略对策

1 作者简介：姜付仁（1969-），男，山东青岛人，教授级高工，主要从事水利水电发展战略与规划和防灾减灾研究。E-mail：[jiang@iwhr.com](mailto:jiang@iwhr.com)。中国水利水电科学研究院，北京，100038

2 新疆水利水电规划设计管理局，新疆乌鲁木齐，830000

新疆维吾尔自治区的战略地位极为特殊。新疆是新丝绸之路经济带核心区，是实施西部大开发的重点地区，是我国重要的能源基地和运输通道。新疆是我国西北地区的重要屏障，事关国家安全、祖国统一与民族团结，事关全国改革开放、经济发展和国际竞争大局。新疆有全国六分之一的国土，人类基本生活在位于盆地边缘和干旱河谷平原区的片片绿洲上。由于适宜人类生活居住的绿洲少，人口增长快，绿洲人口密度很大，生态环境非常脆弱，结构性缺水非常严重。在中央确立的西部大开发和生态文明发展的战略背景下，水资源已经成为制约新疆经济和社会发展的的重要因素，必须根据新疆的水资源禀赋、水资源开发利用现状，精确调控并形成合理的水资源配置格局，对支撑新疆未来经济社会跨越式发展，提升水资源对生态环境保护的保障能力，具有十分重要的意义。

### 壹、新疆水资源禀赋

根据水利部水利水电规划设计总院《中国水资源及其开发利用调查评价》和邓铭江等《新疆水资源及其可持续利用》等有关成果，新疆按水资源流域二级分区水资源禀赋见表1。从表1可以看出，新疆多年平均降水量为2544亿 $m^3$ ，占全国总降水量的4.11%；新疆多年降水深为154.8mm，仅为全国多年降水深的23.8%，不足全国平均值的四分之一，是我国多年平均降水深最少的省区。从分区降水总量看，塔里木河源流域

最多，为860.39亿 $m^3$ ，约占全疆的33.8%；天山北麓诸河次之，为402.03亿 $m^3$ ，约占全疆的15.8%；中亚西亚内陆河区再次之，为390.5亿 $m^3$ ，约占全疆的15.3%；以上三区合计1652.9亿 $m^3$ ，约占全疆的65%，是新疆水资源较为丰富的地区。从分区多年均降水深度看，中亚西亚内陆河区为最大，为502.2mm；阿尔泰山南麓诸河次之，为313.6mm；藏西诸河再次之，为310.2mm；塔里木盆地荒漠区为最小，仅为18.7mm；另外塔里木河干流和古尔班通古特荒漠区也不大，分别为41.3mm和62.1mm。

从表1还可以看出，新疆多年平均水资源总量为832亿 $m^3$ ，其中塔里木河源流域最多，为319.97亿 $m^3$ ，占全疆的38.46%；次之为中亚西亚内陆河区，为184.1亿 $m^3$ ，占全疆的22.13%；再次之为天山北麓诸河，为115.28亿 $m^3$ ，占13.86%；以上三区水资源量合计约占全疆水资源总量的四分之三。从水资源的深度看，中亚西亚内陆河区为最深，为236.8mm；次之为阿尔泰山南麓诸河，为129.8mm；再考虑该二区水资源总量为290.3亿 $m^3$ ，约占全疆的三分之一强，而面积约为15.95万 $km^2$ ，约占全疆面积的十分之一弱，因此该二区为新疆水资源较为丰富地区。两大荒漠区（塔里木盆地荒漠区和古尔班通古特荒漠区）面积合计为43万 $km^2$ ，约占全疆的四分之一，而水资源总量仅为0.141亿 $m^3$ ，因此这是新疆乃至我国最为干旱、最为缺水的地区。

表1 新疆维吾尔自治区水资源二级区水资源禀赋情况表（1956~2000）

序号	水资源二级分区	面积 /km <sup>2</sup>	多年均降水		多年均水资源		不同频率年水资源量/亿 m <sup>3</sup>			
			总量/亿 m <sup>3</sup>	深度/mm	总量/亿 m <sup>3</sup>	深度/mm	20%	50%	75%	95%
1	藏西诸河	4516	14.01	<b>310.2</b>	<b>4.467</b>	98.9	5.172	4.306	3.779	3.249
2	柴达木盆地西部	17365	21.31	<b>122.7</b>	<b>4.901</b>	28.2	5.097	4.901	4.754	4.509
3	吐哈盆地小河	133598	110.62	<b>82.8</b>	<b>25.066</b>	18.8	28.704	24.53	21.75	18.54
4	阿尔泰山南麓诸河	81792	256.5	<b>313.6</b>	<b>106.2</b>	129.8	125.3	104.5	89.6	71.0
5	中亚西亚内陆河区	77759	390.5	<b>502.2</b>	<b>184.1</b>	236.8	208.3	182.5	163.4	138.6
6	古尔班通古特荒漠区	85134	52.87	<b>62.1</b>	<b>0.087</b>	0.1	0.109	0.084	0.067	0.049
7	天山北麓诸河	148951	402.03	<b>269.9</b>	<b>115.28</b>	77.4	126.68	113.59	104.85	94.722
8	塔里木河源流域	429363	860.39	<b>200.4</b>	<b>319.97</b>	74.5	360.14	313.12	282.47	247.73
9	昆仑山北麓小河	196568	214.93	<b>109.3</b>	<b>48.92</b>	24.9	56.36	46.92	41.44	36.41
10	塔里木河干流	31606	13.05	<b>41.3</b>	<b>0.352</b>	1.1	0.454	0.308	0.238	0.191
11	塔里木盆地荒漠区	345028	64.69	<b>18.7</b>	<b>0.054</b>	0.015	0.079	0.044	0.028	0.015
12	羌塘高原内陆区	92049	138.2	<b>150.1</b>	<b>22.57</b>	24.5	24.38	22.35	20.99	19.41
合计		<b>1643729</b>	<b>2544</b>	<b>154.8</b>	<b>832.0</b>	<b>50.6</b>	<b>899.2</b>	<b>825.1</b>	<b>772.8</b>	<b>707.9</b>

资料来源：邓铭江等《新疆水资源及可持续利用》，2005年8月；水规总院《中国水资

源及其开发利用调查评价》，2014.10。

从新疆各市(地区、自治州)看(见表2)，2016年新疆人均水资源量为3613.8 m<sup>3</sup>，总体高于全国平均水平的2010 m<sup>3</sup>；但各市(地区、自治州)差异很大，如阿勒泰地区和克孜勒苏州人均较多，人均分别为15803.6 m<sup>3</sup>和10207.3 m<sup>3</sup>；人均超过5000 m<sup>3</sup>的还有巴音郭楞州、博

尔塔拉州、伊犁州(直属)和塔城地区，分别为8644.4、5827.1、5462.1和5516.8 m<sup>3</sup>；人均低于1000 m<sup>3</sup>的有乌鲁木齐、克拉玛依和石河子三市，分别为393.5、149和22.6 m<sup>3</sup>，该三市经济较为发达，但其发展受水资源的制约严重。

表2 新疆行政分区水资源总量表

行政区名称	计算面积 (km <sup>2</sup> )	年降水量(亿 m <sup>3</sup> )	年降水深 (mm)	地表水资源 (亿 m <sup>3</sup> )	地下水资源量 (亿 m <sup>3</sup> )	水资源总量(亿 m <sup>3</sup> )	人均水资源 量(m <sup>3</sup> )
乌鲁木齐市	15090	33.19	186.22	10.49	4.66	10.91	393.5
克拉玛依市	8396	7.2	85.76	0.0397	0.72	0.4537	149.0
吐鲁番市	66739	31.3	46.90	6.137	7.43	8.101	1280.4
哈密市	142756	86.8	60.80	10.33	8.40	12.51	2227.6
昌吉州	73831	131.1	184.48	30.55	20.68	34.47	2460.4
博尔塔拉州	25091	75.1	299.31	25.73	16.31	27.83	5827.1
巴音郭楞州	478995	452.2	94.41	104.75	61.81	109.3	8644.4
阿克苏地区	131076	180.5	137.71	67.36	79.7	74.4	2803.3
克孜勒苏州	70064	182.8	260.90	60.51	34.1	61.54	10207.3
喀什地区	111670	198.3	177.58	68.86	62.65	73.4	1572.9
和田地区	249335	320.1	128.38	89.99	43.27	94.27	3848.1
伊犁州(直属)	57507	310.0	539.06	159.3	86.40	162.4	5462.1
塔城地区	94546	253.9	268.55	52.23	33.94	56.1	5516.8
阿勒泰地区	118171	280.8	237.62	102.3	42.66	106.2	15803.6
石河子市	462	0.922	199.57	0.062	0.66	0.1294	22.6
<b>全 疆</b>	<b>1643729</b>	<b>2544</b>	<b>154.8</b>	<b>788.7</b>	<b>503.42</b>	<b>832</b>	<b>3613.8</b>

资料来源：邓铭江等《新疆水资源及可持续利用》，2005年8月；《新疆统计年鉴2017》，2017.10。

## 貳、2001年以来新疆水资源演变特征

根据全国水资源公报的资料分析(见表3)，新疆2001~2017年17年平均降水深比多年平均降水深偏多15.8%；这17年中只有2008、2009和2014年低于多年平均值，最大值为2016年，年降水深为229.6mm，比多年均降水量高74.8mm，为多年均的148.3%。总体而言，这17年新疆地区属于偏丰水年。

受2001年以来降水偏丰影响，新疆地

表水资源量总体偏多，年均偏多11.7%；地下水资源量也显著偏多，年均偏多12.3%(见表3)；因此水资源量也明显偏多，这17年年均水资源量为931.9亿m<sup>3</sup>，比多年平均多99.1亿m<sup>3</sup>，年均偏多12%。与降水量相类似，这17年水资源总量中只有2008、2009和2014年低于多年平均值，最大值为2010年，比多年均值高281.1亿m<sup>3</sup>，为多年平均值的134%。总体而言，这17年新疆地区属于偏丰水年，水资源较为丰富。

表 3 新疆 2001~2017 年水資源量演變情況

年份	全國		新疆					
	降水深/mm	降水量/億 m <sup>3</sup>	降水深/mm	降水量/億 m <sup>3</sup>	地表水資源量/億 m <sup>3</sup>	地下水資源量/億 m <sup>3</sup>	水資源量/億 m <sup>3</sup>	多年均水資源 倍數
<b>多年平均</b>	<b>649.8</b>	<b>60844</b>	<b>154.8</b>	<b>2544</b>	<b>789</b>	<b>503.24</b>	<b>832</b>	
2001	612.4	58122.21	160.9	2644.92	966.91	692.31	<b>1024.48</b>	1.23
2002	659.7	62610.29	216.9	3565.06	1005.56	724.86	<b>1068.2</b>	1.28
2003	638	60415.52	181.4	2981.76	863.24	604.25	<b>920.14</b>	1.11
2004	600.6	56876.43	166.4	2734.7	809.16	502.64	<b>855.39</b>	1.03
2005	644.3	61009.57	193.7	3184.68	910.65	562.57	<b>962.81</b>	1.16
2006	610.8	57839.6	170.3	2799.77	903.84	554.11	<b>953.1</b>	1.15
2007	610	57762.98	159.1	2615.35	816.6	514	<b>863.8</b>	1.04
2008	654.8	62000.3	146.9	2415.01	772.48	518.49	<b>815.62</b>	0.98
2009	591.1	55965.51	144.1	2368.96	713.66	470.47	<b>754.31</b>	0.91
2010	695.4	65849.6	226.9	3728.9	1051.2	624.3	<b>1113.1</b>	1.34
2011	582.3	55132.9	167.0	2745	841	540.2	<b>885.7</b>	1.06
2012	688	65150.1	182.7	2992.9	851.6	557	<b>900.6</b>	1.08
2013	661.9	62674.4	184.1	3040.7	905.6	560.2	<b>956</b>	1.15
2014	622.3	58924.7	145.6	2394	686.6	443.9	<b>726.9</b>	0.87
2015	660.8	62569.4	179.0	2942.1	880.1	544.9	<b>930.3</b>	1.12
2016	730	68672.3	229.6	3774.7	1039.3	610.4	<b>1093.4</b>	1.31
2017	664.8	62935.7	192.4	3162	969.5	587	<b>1018.6</b>	1.22
<b>2001-2017</b>	<b>642.78</b>	<b>60853.6</b>	<b>179.2</b>	<b>2946.5</b>	<b>881.6</b>	<b>565.4</b>	<b>931.9</b>	<b>1.12</b>
17 年是多年倍數	0.989	1.000	1.158	1.158	1.117	1.123	1.12	

資料來源：中國水資源公報 2000-2017。其中全國數據不含港澳台。

### 叁、新疆現狀供水量和用水分析

根據 2012~2016 年新疆水資源公報資料（見表 4），新疆近五年年均供水總量為 580.52 億 m<sup>3</sup>，總體呈下降趨勢，如 2012 年全疆供水總量為 590.14 億 m<sup>3</sup>，到 2016 年下降到 565.39 億 m<sup>3</sup>。從表 4 還可以看出，有喀

什、阿克蘇、昌吉等 7 個市（地區、自治州）近 5 年的供水總量超過了多年平均水資源量；最多的為喀什和阿克蘇地區，分別比多年均值多用 48.2 億和 38.7 億 m<sup>3</sup>；有伊犁州（直屬縣市）、阿勒泰、巴音郭楞、和田等 8 市（地區、自治州）供水總量尚低於多年平均水資源量。

第二十三屆兩岸水利科技交流研討會

表 4 2012~ 2016 年新疆分地区供水量情况表 单位：亿 m<sup>3</sup>

供水量	2012	2013	2014	2015	2016	5年平均	多年平均水资源量	差值
乌鲁木齐市	10.96	12.08	11.24	10.91	10.74	<b>11.186</b>	10.91	-0.28
克拉玛依市	5	5.52	6.41	6.06	5.37	<b>5.672</b>	0.4537	-5.22
吐鲁番市	14.11	14.25	13.23	13.47	13.22	<b>13.656</b>	8.101	-5.56
哈密市	12.05	12.06	11.48	10.74	10.83	<b>11.432</b>	12.51	1.08
昌吉州	43.18	43.58	47.92	45.03	44.56	<b>44.854</b>	34.47	-10.38
博尔塔拉州	15.46	15.36	16.44	16.07	15.92	<b>15.85</b>	27.83	11.98
巴音郭楞州	57.76	57.57	56.24	55.26	54.13	<b>56.192</b>	109.3	53.11
阿克苏州	118.75	118.88	111.67	107.63	108.48	<b>113.082</b>	74.4	-38.68
克孜勒苏州	11.34	11.37	12.81	12.24	11.34	<b>11.82</b>	61.54	49.72
喀什地区	129.02	125.05	116.78	118.96	117.99	<b>121.56</b>	73.4	-48.16
和田地区	47.57	46.47	45.62	46.3	46.55	<b>46.502</b>	94.27	47.77
伊利州(直属)	49.65	49.62	51.83	52.75	44.86	<b>49.742</b>	162.4	112.66
塔城地区	40.48	41.29	43.09	43.13	43.13	<b>42.224</b>	56.1	13.88
阿勒泰地区	30.92	31.23	33.34	32.79	32.78	<b>32.212</b>	106.2	73.99
石河子市	3.89	3.74	3.71	5.84	5.49	<b>4.534</b>	0.1294	-4.40
<b>全疆合计</b>	<b>590.14</b>	<b>588.07</b>	<b>581.81</b>	<b>577.18</b>	<b>565.39</b>	<b>580.52</b>	<b>832.01</b>	<b>251.50</b>

资料来源：新疆水资源公报 2012~2016。

鉴于近年来新疆降水较丰，从表 5 可以看出，只有喀什、阿克苏、昌吉、克拉玛依、吐鲁番等 6 个市（地区、自治州）近 5 年的供水量超过了近 5 年平均水资源量，其中阿克苏和喀什用水较多，分别比 5 年均值多用

58.52 亿 m<sup>3</sup> 和 29.83 亿 m<sup>3</sup>。2012-2016 年水资源量为 918.43 亿 m<sup>3</sup>，比多年均值的 832 亿 m<sup>3</sup> 高 86.42 亿 m<sup>3</sup>，说明近几年用水量较多主要得益于较多的降水量和较多的水资源量。

表 5 2012~ 2016 年新疆分地区水资源量和近 5 年平均供水量情况表 单位：亿 m<sup>3</sup>

水资源量	2012	2013	2014	2015	2016	近 5 年均水资源量	近 5 年均供水量	差值
乌鲁木齐市	10.35	10.68	9.009	13.32	14.99	<b>11.670</b>	<b>11.186</b>	0.484
克拉玛依市	0.4786	0.651	0.3596	0.6521	0.6794	<b>0.564</b>	<b>5.672</b>	-5.108
吐鲁番市	6.697	7.812	7.279	10.99	10.63	<b>8.682</b>	<b>13.656</b>	-4.974
哈密市	13.45	11.69	12.95	14.71	17.89	<b>14.138</b>	<b>11.432</b>	2.706
昌吉州	32.82	35.37	29.42	40.11	45.56	<b>36.656</b>	<b>44.854</b>	-8.198
博尔塔拉州	27.85	25.33	24.92	26.54	33.18	<b>27.564</b>	<b>15.85</b>	11.714
巴音郭楞州	141.1	126.6	109.4	140.1	157	<b>134.84</b>	<b>56.192</b>	78.648
阿克苏州	58.59	60.74	53.61	65.9	62.74	<b>60.316</b>	<b>113.082</b>	-52.766
克孜勒苏州	84.76	69.39	56.23	68.4	72.91	<b>70.338</b>	<b>11.82</b>	58.518
喀什地区	107.9	105.5	78.41	82.85	83.99	<b>91.73</b>	<b>121.56</b>	-29.83
和田地区	142.4	135.9	98.21	116.1	132.3	<b>124.982</b>	<b>46.502</b>	78.48
伊利州(直属)	145.3	146.4	107.2	160.4	228.3	<b>157.52</b>	<b>49.742</b>	107.78
塔城地区	48.36	55.85	49.35	64.52	80.84	<b>59.784</b>	<b>42.224</b>	17.56
阿勒泰地区	83.24	159.1	90.5	112.9	151.8	<b>119.508</b>	<b>32.212</b>	87.296
石河子市	0.1094	0.1392	0.1076	0.1514	0.196	<b>0.14072</b>	<b>4.534</b>	-4.393
<b>全疆合计</b>	<b>903.405</b>	<b>951.15</b>	<b>726.96</b>	<b>917.64</b>	<b>1093.01</b>	<b>918.43</b>	<b>580.52</b>	<b>337.91</b>

资料来源：新疆水资源公报 2012~2016。

根据2016年新疆水资源公报资料,2016年新疆总用水量为565.38亿 $m^3$ ,其中第一产业用水量为533.26亿 $m^3$ ,占总用水量的94.3%;第二产业用水量为12.67亿 $m^3$ ,占2.2%;第三产业用水量为2.2亿 $m^3$ ,占0.4%;居民生活用水量为10.75亿 $m^3$ ,占1.9%;生态环境用水量为6.49亿 $m^3$ ,占1.1%。可以看出,第一产业用水比重较大。分市(地区、自治州)看,喀什地区用水最多,高达117.99亿 $m^3$ ;次之为阿克苏州,为108.48亿 $m^3$ 。

## 肆、新疆未来长期战略对策

### 一、新疆水资源禀赋不足,长期以来一直属于缺水地区,未来缺水形势还将更严峻

新疆深居内陆,为典型的大陆型季风气候,干燥少雨,蒸发强烈,多风沙。该地区多年平均降水深为154.8mm,只有全国平均降水深649.8mm的23.8%,不足全国平均值的四分之一。新疆地广人稀,人类活动多集中于绿洲地区,形成经济社会发展和人口分布相对集中的态势,造成人均水资源量的地区分布极不平衡。新疆多年均水资源总量为832亿 $m^3$ ,人均水资源量为3613 $m^3$ ,但新疆西北部地表水资源量占93%,东南部仅占7%,水资源分布与经济发展布局极不匹配。总体而言,新疆水资源禀赋严重不足,缺水较为严重。

受水资源总量不足和分布不均影响,新疆水资源开发利用总体很高。新疆多年均可用水资源量只有832亿 $m^3$ 的情况下,近五年(丰水年)全疆年均用水总量为580.5亿 $m^3$ ;可见新疆大部地区水资源利用率均超过100%,如阿克苏、喀什、克拉玛依、吐鲁番、昌吉和石河子等市(地区、自治州)。2012~2016年新疆年均供水量为580.52亿 $m^3$ ,这种供水条件是在近五年处于丰水的条件下取得的,正所谓“人努力、天帮忙”,如近五年新疆年均水资源量比多年均多86.4亿 $m^3$ (近17年则年均偏多99.1亿 $m^3$ ),其用水较多主要得益于21世纪以来降水偏丰的较好天时条件。

正如中国气象局原局长秦大河2012年指出,受气候变化影响,虽然我国西北地区近年来降水有明显的增加趋势,新疆的南疆和北疆的南部降水量普遍增加,其实降水量增加值一般也只有数十mm,降水量的这种增加绝对不会改变我国新疆地区气候干旱

的基本状况,不过这已经对西北地区的环境和生态方面产生了一些有利的影响,如近年来即使新疆地区人类生产生活用水量持续增加的情况下,依然出现了内陆河尾间湖泊面积扩大、径流增加、植被改善等良好趋势。如果未来气候变化导致新疆降水量和水资源量再回到多年均值甚至低于多年均值的话,新疆的缺水形势将更加严重,因此这个问题需要高度重视。

### 二、新疆地区长期以来节水意识浓厚,但要正确平衡节水优先与生态优先的关系

鉴于新疆地区地处干旱半干旱地区,长期以来新疆人民节水意识浓厚,如历史上的新疆坎儿井就说明了这一点。新疆地区农田灌溉用水量持续稳步下降,节水灌溉率已达较高水平,其中新疆高效节水灌溉率已达40%以上。鉴于农业用水历来是新疆地区的用水大户,新疆地区农业用水比例更高,高达94%以上,因此现在节水优先的核心在于农业节水。习近平总书记在2014年的3·14讲话中指出,“治水要良治,良治的内涵之一就是善用系统思维统筹水的全过程治理,分清主次、因果关系,找出症结所在”。这就需要正确处理节水优先和生态优先的关系。新疆2016年用水总量565.38亿 $m^3$ ,全区总体水资源开发利用率为68%,远超国际公认的40%水资源开发利用警戒线和2020年新疆用水总量控制红线。另外习近平总书记在2014年12月9日指出,“农业发展不仅要杜绝生态环境欠新账,而且要逐步还旧账”,从这个意义上讲,不仅新疆地区未来的农业用水要逐步下降,而且农业节约出来的水不应用于工业和生活被完全消耗掉,而应部分或全部用于河流和湖泊生态环境的修复,从而扭转生态环境恶化的趋势,进而逐步改善并恢复原有的生态环境质量。实际上塔里木河等若干河流综合治理主要目的之一就是逐步改善并恢复原有的生态环境。21世纪以来的生态调度实践证明节水优先和生态优先是可以协调发展的。

### 三、始终坚持节水优先,持续推进节水型社会建设

新疆地区降水稀少,受水资源总量不足和地域分布影响,水资源禀赋严重不足,新疆地区用水长期处于较为紧张的状态。随着经济社会的快速发展,其社会经济用水大量挤占生态环境用水,造成若干河道断流、湖泊萎缩、生态环境恶化等不利后果。习近平

总书记提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时代治水思路，并指出当前的关键环节是节水，从观念、意识、措施等各方面都要把节水放在优先位置，水利部最新提出的“水利工程补短板、水利行业强监管”的水利发展改革总基调。为此必须全面推进以水资源管理体系、经济结构体系、工程技术体系、行为规范体系等“四大体系”为重点的节水型社会建设，使新疆地区的水资源利用效率和效益显著提高。在今后相当长的一段时间内，新疆地区应紧紧围绕丝绸之路经济带、能源基地等发展战略要求，以区域水资源承载力为控制，长期加强水资源节约集约利用，保障生态基本用水需求，促进资源环境逐步休养生息。在工业方面，严格控制高耗水行业发展，提高能源化工等重点行业用水效率准入门槛，新建项目或转移产能必须配套先进节水工艺和设备；在重点行业推广一水多用等节水技术改造，发展循环经济。在农业方面，根据水资源承载力合理确定水土开发和灌溉发展规模，限制和压缩高耗水作物种植面积，退耕还林还草；大力推进节水增效改造，加快渠道防渗改造，因地制宜发展管灌、滴灌、喷灌、微灌。在市场调节方面，注重使用价格手段，借鉴以色列等发达国家利用价格杠杆调整产业用水结构的成功经验，促进农业用水大户向高效产业用水转变。

#### 四、坚持生态优先，加快推进西北地区生态文明工程建设

习近平总书记的 3·14 讲话明确指出，“我国生态环境矛盾有一个历史积累过程，不是一天变坏的，但不能在我们手里变得越来越坏，共产党人应该有这样的胸怀和意志”。21 世纪以来，新疆陆续实施了塔里木河流域综合治理工程、河道整治工程、水源工程、高效节水工程、大中型水库工程，水生态文明建设取得了显著的成绩。1983 年起已干涸的台特马湖也于 2001 年 11 月再次进水，逐步扭转了新疆地区生态恶化的局面。另外新疆的生态环境质量也大幅改善，如新疆森林覆盖率已达为 4.24%。据自然资源部资料，1990~2000 年间天山中部南麓、新疆北部地区开始出现沙漠化逆转现象，2000~2010 年间新疆农林和农牧交错区荒漠和荒漠化土地大幅减少，都表明了新疆地区的生态环境明显改善，这些成功的生态文明建设实践也表明了我们有信心有决心有能力不让我们的生态环境变得越来越坏。

党的十九大已经确立了到 2035 年基本

实现社会主义现代化，和到 21 世纪中叶把我国建成富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国的战略规划。为此，今后新疆地区应努力退还长期以来生产用水所挤占的生态用水，大力实施湖泊湿地保护修复工程，全面恢复良好状态的河流湖泊湿地，从而把新疆地区建设成为和谐美丽的新边陲和丝绸之路。

#### 参考文献

- 1、中共中央文献研究室编，习近平关于生态文明建设论述摘编，北京：中央文献出版社，2017.10。
- 2、邓铭江、王世江、董新光、章曙明编著，新疆水资源及其利用，北京：中国水利水电出版社，2005.8。
- 3、水利部水利水电规划设计总院，中国水资源及其开发利用调查评价，北京：中国水利水电出版社，2014.10。
- 4、陈志恺主编，王浩、汪党献副主编，工程院重大咨询项目-西北地区水资源及其供需发展趋势分析，北京：科学出版社，2004.04。
- 5、水利部水资源司、中国水利水电科学研究院编，水资源公报技术资料 2012~2016。
- 6、水利部编，中国水利统计年鉴 2017，北京：中国水利水电出版社，2017.10。
- 7、新疆维吾尔自治区水利厅，新疆水资源利用及附件，1990。
- 8、新疆维吾尔自治区统计局，新疆统计年鉴 2017：汉英对照，北京：中国统计出版社，2017.8。
- 9、秦大河主编，中国气候与环境演变：2012，北京：气象出版社，2012.12。
- 10、邓铭江，破解内陆干旱区水资源紧缺问题的关键举措—新疆干旱区水问题发展趋势与调控策略，中国水利，2018.06，PP14-17。
- 11、水利部编，中国水资源公报 2000~2017，北京：中国水利水电出版社。



## 合理農業水價形成機制構建研究

姜文來<sup>1</sup>、羅其友<sup>2</sup>、馮欣<sup>3</sup>、劉洋<sup>4</sup>、栗欣如<sup>5</sup>

### 摘要

文章在系統梳理文獻的基礎上，結合農業水價綜合改革實地調研，綜合分析了農業水價形成機制存在問題，探尋解決途徑。文章提出了中國大陸農業水價形成機制合理性判別標準，指出了合理農業水價形成機制存在的問題，明確了改進的方向。研究結果表明：合理農業水價形成機制構建具有緊迫性和現實性，農業水價合理形成機制首要補償農業水價運行成本，回歸農業水價基本功能，建立農業水價綜合改革獎懲制度，同時開展農業水價合理分擔理論研究。

**關鍵字** 農業水價 機制 合理 水資源

1 中國農業科學院農業資源與農業區劃研究所 研究員

2 中國農業科學院農業資源與農業區劃研究所 研究員

3 中國農業科學院農業資源與農業區劃研究所 博士研究生

4 中國農業科學院農業資源與農業區劃研究所 副研究員

5 中國農業科學院農業資源與農業區劃研究所 博士研究生

## 壹、前言

農業水費是維持農田水利工程持續運行的重要財源。農業水費收取是否合理，在一定程度上取決於農業水價形成機制。長期以來，中國大陸農業水價形成機制不合理，雖然經歷了多次農業水價改革<sup>[1]</sup>，但農業水價合理形成機制尚未在中國大陸範圍內建立。從 2016 年開始，中國大陸又進行了新的一輪農業水價綜合改革，研究表明，農業水價效應和農業水價綜合改革績效不同程度地提升<sup>[2,3]</sup>，在試點地區基本構建了農業水價合理形成機制，但推行起來困難依然較大。值得注意的是，即便是在農業水價綜合改革試點地區基本建立了合理的水價形成機制，但機制形成過程中對農業水價合理分擔涉及較少<sup>[4]</sup>。根據《國務院辦公廳關於推進農業水價綜合改革的意見》(國辦發〔2016〕2 號)要求<sup>[5]</sup>，用 10 年左右時間，建立健全合理反映供水成本、有利於節水和農田水利體制機制創新、與投融資體制相適應的農業水價形成機制。要實現此目標，還得需要相當大的努力。開展合理農業水價形成機制構建研究十分必要。

## 貳、中國大陸農業水價形成機制

### 主要存在問題

“機制”一詞最早源于希臘文，原指機器的構造和工作原理。目前機制已經應用於各個領域，通常指各要素之間的結構關係和運行方式。水價形成機制就是影響水價的各要素之間的結構關係和運行方式。正確認識和理解合理的水價形成機制，對於水資源的可持續利用，建立水利工程良性運行機制，水環境的保護，促進社會經濟發展具有重要的意義。中國大陸農業水價形成機制尚不完善，存在的主要問題

包括如下。

#### 一、國家和地方認識存在偏差

從國家層面，完善農業水價形成機制已經成為共識，國家四部委全力推動，並且每年將農業水價綜合改革納入最嚴格的水資源管理考核體系進行考核，推動力很大，也很迫切。但從地方實踐上來看，北方相對積極，南方還有待於進一步提升認識，這與中國大陸南北方水資源豐富程度有關，南方相對水多，農業水價改革積極性由於受水資源供需矛盾不那麼尖銳內生動力不足，北方相對缺水，農業水價改革積極性較高，農業水價接近供水成本程度普遍高於南方。特別值得注意的是，個別地方取消農業水費的呼聲較高，不能不引起高度重視。

#### 二、農業水價成本補償構成存在疑義

農業水價成本由哪幾部分組成大家都相對清楚，但農業水價成本執行存在不小爭議，農業水價主管部門堅持補償成本是農業水價改革的核心原則，但自從 1985 年以來，中國大陸沒有一個省份達到完全成本，甚至也沒有一個灌區能做得好。部分人認為農業水價成本主要包括運行成本，至於折舊成本可暫時不包括在內，目前整體農業水價達到運行成本的省份也未見到，只是部分農業水價綜合改革試點區達到運行成本，極個別試點區達到完全成本，將其推到全省或者中國大陸還需要很大的努力。

#### 三、理論研究成果不能滿足實踐需求

《國務院辦公廳關於推進農業水價綜合改革的意見》提出了“建立政府和農民共同承擔農業水價成本制度，合理確定政府補貼標準和方式”，但是為什麼要由政府 and 農民共同負擔理論支撐不足，什麼政府補貼標準和方式是合理的，也缺乏評價標準，理論沒有弄清楚，實踐推動上顯得“底氣不足”，“摸著石頭過河”比較普遍。

#### 四、獎勵懲罰機制難以激發內動力

合理農業水價形成機制構建是一個複雜的系統工程，涉及到政府、農民、水利工程管理單位等多部門，特別是涉及到農民的切身利益，沒有強大的動力推動是難以推進的。目前農業水價合理形成機制缺乏獎勵和懲罰機制，對於推動比較好的，缺乏激勵，對於推動不好的，也沒有什麼懲罰機制，有“吃大鍋飯”之嫌，考核這把利劍還沒有充分發揮作用，導致農業水價形成機制過程中內生動力不足，只靠外力難以取得決定性勝利。

#### 參、農業水價形成機制合理性判別標準

什麼樣水價形成機制才算合理，主要取決於目標的設定，目標不同，水價形成機制合理判斷指標和標準不同。

根據《國務院辦公廳關於推進農業水價綜合改革的意見》（國辦發〔2016〕2號），完善農業水價形成機制主要包括：一是完善農業水價形成機制，合理核定供水成本、科學制定供水價格。二是建立政府和農民共同承擔農業水價成本制度，合理確定政府補貼標準和方式，對農業用水實行定額內用水優惠水價、超定額用水累進加價，促進節約用水。三是發揮農業合作組織的作用。農業水費收取要向農民公開，接受群眾監督。四是加快末級渠系節水改造和計量設施配套，提高農業灌溉用水利用係數，全面實現計量供水。前兩項是直接涉及到農業水價，其中第一項是涉及到供水成本與供水價格關係，能否達到供水成本是農業水價形成機制的重要指標，它是和供水價格密切地聯繫在一起的。第二項說明農業水價成本由誰來承擔問題，是由政府和農民共同承擔，值得注意的是，國家並沒有強調農業水價成本完全由農民自己承擔，而是要建立政府與農民共同承

擔的制度。後兩項與農業水價形成有間接的關係，水費監督機制讓農民知道誰交了多少錢，農民明明白白，末級渠系的配套和計量，可以節約用水，減少農民的水費支出，有完善的計量設施，農戶用多少水清清楚楚，便於按方收費。

從實踐調研層面上來看，中國大陸農業水價形成機制尚不合理，一些保障合理農業水價形成機制的法規尚不完善，與國家的要求還有一段距離。根據國家發展和改革委員會、水利部、國土資源部（現自然資源部）、農業部（現農業農村部）調查，截至2017年底，中國大陸共有15個省份研究制定了農業水價成本核定和價格管理辦法，612個試點縣（灌區）完成了農業供水成本監審工作。試點區平均農業水價比改革前每立方米提高了0.06元左右，多數試點區農業水價達到運行維護成本水準，部分地區達到全成本水準。如山東省試點區農業水價從每立方米0.34元提高到0.41元，總體達到運行維護成本水準；河南省試點區糧食作物、經濟作物平均水價分別為每立方米0.23元、0.77元，均較改革前提高40%以上，基本達到全成本水準；四川省綿陽市游仙區推行農業用水超定額累進加價制度，用水量超過定額10%以內的，每立方米加收0.02元，超定額10%以上的，每立方米加收0.04元。在水價調整過程中，各級地方政府堅持總體不增加農民負擔的原則，通過推進設施節水和管理節水、促進省工省時和增產增收、建立精準補貼和節水獎勵機制等方式，保障農民用水支出基本穩定。

如何判斷農業水價形成機制是否合理，目前還沒有大家公認的標準。筆者初步提出三個可以重點考慮的標準：一是農業水價是否超過農業用水戶承受能力，如果超過農業用水戶承受能力則是不合理的，當然農業用水戶不付水費也是不合理的；二是農業用水利益相關者是否合理分擔農業水價，農業用水具有多方面的

功能，如生態功能、維護國家糧食安全等公益性功能，其受益者應該分擔由此產生的費用，只由農業用水戶來分擔是不合理的；三是農田水利工程是否能健康運行，國家適當補貼和水費收入能否維護農田水利健康運行，如果農田水利工程由於缺乏經費不能健康運行，農業水價形成機制是不合理的。

從目前中國大陸農田水利工程完好率方面，中國大陸已建大型灌區骨幹建築物的完好率不足 40%，工程配套率不足 70%，老損率達 70% 以上，中國大陸 85% 的斗渠和 95% 的農渠為土渠，基本沒有襯砌，管道淤積嚴重，最終農業用水效率不高，農田水利難以健康發展，也直接威脅國家糧食安全。這與農業水價形成機制不合理有關，中國大陸農業水價僅占供水成本的 43% 左右，是導致農田水利工程設施老化失修重要原因，說明中國大陸農業水價形成機制整體上尚不合理。

## 肆、推進合理農業水價形成機制

### 構建建議

#### 一、進一步提高合理農業水價形成機制認識

雖然地方政府都成立了以地方主要領導為組長的農業水價綜合改革機構，但在認識層面還有待於進一步提升，提升合理農業水價形成機制認識，其並不是為了幾毛錢水費，而是著眼於農業用水效率的提升、農田水利健康的發展、國家糧食安全和國家水安全，要從政治、戰略高度認識這個問題。特別是對於水資源相對豐富的局部地區，更要摒棄農業水價可有可無的不正確觀念，將認識和中央迅速統一起來，努力推進農業水價改革，儘快建立合理的農業水價形成機制。

#### 二、補償農業水價運行成本作為首選

農業水價成本中，運行成本和折舊成本是重要組成部分，農業水價成本測算實踐表明，折舊成本占整個農業水價成本比例較大，有的達到 40% 以上，如果農業水價按照全成本計算，農業水價會更高，更難以達到預期目標，因此，從現實出發，首先努力滿足農業水價運行成本，讓農田水利工程先持續地運轉下去，折舊成本可以考慮由國家來承擔，待更新改造時一次性付出。

#### 三、開展農業水價分擔理論研究

建立政府和農戶農業水價成本共同承擔制度，需要清楚農業水價分擔理論是什麼（為什麼要分擔）、分擔的份額怎麼樣，如何評價農業水價分擔是否合理，目前，在農業水價綜合改革過程中，由於相關的理論研究極其薄弱，超出農民承受能力的水價都是由政府來承擔，缺乏理論依據，農業水價如何影響水利綠色發展機制不清【6】，無法支撐農業水價綜合改革實踐。

#### 四、建立農業水價改革懲罰制度

對於農業水價改革工作到位，效果好，因地制宜結合自己的實際情況創造性開展工作好的單位和個人，給予適當的獎勵，鼓勵其繼續前進，對於改革消極，沒有取得實質進展，採用應付做表面文章的單位或個人，給予批評教育，甚至開出“罰單”，督促其改進工作，向先進看齊。

#### 五、高度回歸農業水價基本功能

農業水價總體功能維護工程正常運行，補償成本、合理收益是最根本的原則，這是主流，農業水價改革要緊緊抓住這個“牛鼻子”來進行，不要將農業水價附加各種功能，即便附加了也做不到，只是理論上的附加，實際操作上難以實現，如通過農業水價調節農業用水供需矛盾，理論上沒有問題，但實際上難以做到，農業水價提高到一定程度，農民連灌溉都不灌

溉了，這樣的例子曾出現過，將農業水價作為農業節水的主要手段是不可行的，必須認識到這一點。

## 伍、結束語

建立合理的農業水價形成機制不僅僅有利於農業用水戶，有利於促進農業用水高效利用，更是利國利民的大事，可以說是功在當地，利在千秋。目前推進合理農業水價形成機制還面臨著不少困難，可謂“任務重、挑戰多、要求高”，特別是在可預見或者不可預見的困難面前實現這個目標可謂任重道遠，未來需要我們靠勤勞、智慧、奮鬥創造新的農業水價改革歷史，需要我們實幹、苦幹和巧幹才能將其變成現實。

## 参考文献

1. 馮欣、姜文來、劉洋（2019），「農業水價利益相關者定量排序研究」，中國農業資源與區劃，第3期，第173-180頁。
2. 伊熱鼓、姜文來（2017），「農業水價效應研究進展」，中國農業資源與區劃，第8期，第224-229頁。
3. 伊熱鼓、姜文來（2018），「農業水價綜合改革績效評估研究——以內蒙古杭錦旗為例」，中國農業資源與區劃，第7期，第153-158頁。
4. 姜文來、劉洋、伊熱鼓（2015），「農業水價合理分擔研究進展」，水利水電科技進展，第35卷，第5期，第191-195頁。
5. 「國務院辦公廳關於推進農業水價綜合改革的意見」，中國政府網，[http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-01/29/content\\_5037340.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-01/29/content_5037340.htm)。
6. 姜文來（2016），水利綠色發展。北京：中國水利水電出版社。

## 基於水資源配置的水庫群生態調度研究

劉宇棟<sup>1</sup>，高仕春<sup>1</sup>，張翔<sup>1</sup>，肖宜<sup>1</sup>

### 摘要

為解決複雜流域水資源配置和水庫群生態調度問題，以閘壩眾多的沙潁河流域為研究物件，以流域關鍵斷面的生態基流為基礎，建立以“保證河道生態用水，優先生活用水”為目標的水資源配置模型。以近年用戶的實際用水為基準年的需水水準，在豐、平、枯、特枯來水條件下，應用改進大規模線性規劃方法求解，得到水庫生態調度控制線和運行規則，以及地表水資源配置方案，並以枯水年 85% 來水條件進行驗證。結果表明，與原常規調度相比，水庫生態調度可充分利用可調水量的時空分佈以及水庫群的調控能力，更有效地提高沙潁河流域關鍵斷面生態用水的保證率。本研究為沙潁河流域水資源綜合管理提供了技術支撐和決策支援。

**關鍵字：**沙潁河流域、水庫群、生態調度、水資源配置

### 壹、引言

中國大部分流域水利工程密集，水資源開發利用程度高。由於對水生態環境保護的認識不足，使得大部分水利工程的運行調度規程中，沒有關於水環境保護的相關內容，長期運行的結果就是大部分地區天然基流缺乏，河湖水生態系統退化嚴重。因此改善河流水生態狀況，實現流域水量合理調度，是當前流域水資源管理關注的重點。

國內外對於水資源優化配置和水庫群生態調度開展了一系列研究，取得了豐富的成果。Salman 等<sup>[1]</sup>以尋求農業部門的最低成本為目標，通過建立線性規劃模型，分析了農業用水的季節配置對農業生產的影響。Babel 等<sup>[2]</sup>綜合考慮社會經濟，環境和技術等各個方面，以用水部門缺水量最小和淨經濟效益最大化為目標，建立了線性互動式綜合水量配置模型。郭文獻等<sup>[3]</sup>為三峽水庫引入了生態調度目標，為三峽工程後續制定合理的調度運用方案提供參考。廖四輝等<sup>[4]</sup>在淮河生態用水調度平臺的搭建過程中，建立了供用水單元的拓撲關係，通過設置河道生態斷面，綜合考慮社會經濟和生態用水，得到考慮生態用水的優化調度方案。郭旭寧等<sup>[5]</sup>將類比和優化方法結合，類比水庫調度規則，優化水庫供水方式，為水庫群聯合調度中複雜的多目標問題提供了一種解決方案。黃草等<sup>[6]</sup>通過設置目標權重，將包含發電、河道外供水和河道內生態用水等目標的多目標非線性優化問題線性化求解。黃志鴻等<sup>[7]</sup>提出一種利用分時段加權法處理水庫群多目標生態調度的方法。張連鵬等<sup>[8]</sup>針對水庫群中長期生態調度問題，採用自反覆運算和大系統協調的方法，建立了調度函數並通過合理性檢驗。

以上研究成果大多針對水庫群調度過程中的單一物件的研究，如解決生態流量過程、改善水庫群調度演算法、優化水資源配置結果等。相對而言，對於生態環境要求、水資源配置、與水庫群聯合調度的相互影響，以及如何實現各目標之間協同優化的研究較為缺乏，弱化了各個目標之間的有機聯繫。同時，大多數研究只提出某種對於水庫生態調度的優化方法，並未從優化結果中總結出可供實際調度參考的生態調度圖。

<sup>1</sup> 武漢大學水資源與水電工程國家重點實驗室 湖北 武漢 430072

中圖分類號：TV 697.11

文獻標識碼：A

基金專案：國家水體污染控制與治理科技重大專項（2017ZX07602-003）

作者簡介：劉宇棟（1995-），男，湖南省常德市人，碩士研究生。主要從事水資源規劃與管理方面研究。E-mail：[newline23@whu.edu.cn](mailto:newline23@whu.edu.cn) 手機：13006192750

沙潁河是淮河最大的支流，它是淮河流域歷史上航運和農業灌溉的重要水源，其水資源系統網路概化如圖 1。該流域由幹流和一條支流組成，幹流上建有 5 座有調節能力的水庫（包括白沙水庫、昭平臺水庫、白龜山水庫、孤石灘水庫、燕山水庫），由於昭平臺和白龜山是梯級水庫，供水物件均為平頂山市，因此將二者簡化為一個聯合水庫，其有效庫容為兩個水庫興利庫容的疊加。全流域用水劃分為 10 個區域，河流上有 8 個控制斷面（主要包括賈魯河中牟站、潁河黃橋站、北汝河大陳站、沙河幹流漯河站、沙潁河周口、沙潁河槐店站以及汾泉河沈丘站），每個斷面處均有河道內生態環境流量要求。

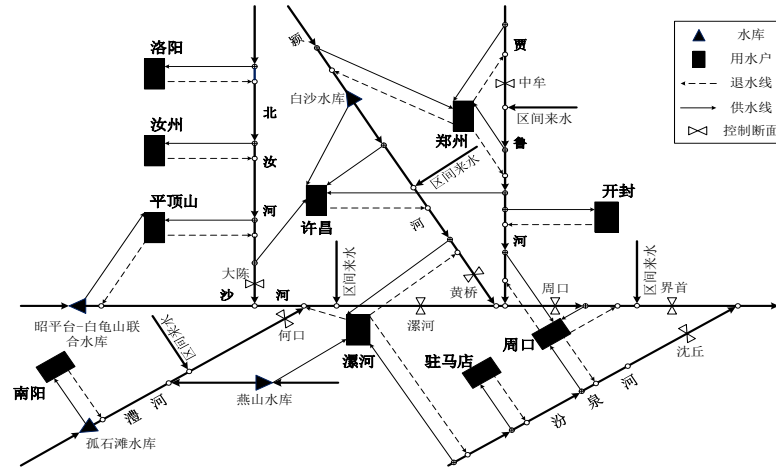


圖 1 沙潁河流域水資源系統網路圖

沙潁河全流域總面積約 40 萬平方公里，一直以來洪澇災害嚴重，經多年治理有所好轉，但近幾十年來，由於流域上游工農業發展迅速，使得沙潁河嚴重污染，成為淮河流域污染最嚴重的支流。為了減少水利工程對生態環境的不利影響，需要對水庫群進行有序的控制，在滿足生活用水的前提下，以水資源可持續性利用為底線，達到社會經濟生態環境綜合效益最大化。

## 貳、水資源優化系統模型

水庫群中長期生態調度模型需要解決河道內生態保護長期用水要求，其目標函數以綜合缺水損失最小來表達。為表達簡潔起見，設第  $t$  時段第  $i$  分區城鎮用戶的需水量為  $DI_{i,t}$ 、供水量為  $RI_{i,t}$ ，缺水水量的權重係數為  $\alpha_{i1}$ ；第  $t$  時段第  $i$  分區農業用戶的需水量為  $DA_{i,t}$ 、供水量為  $RA_{i,t}$ ，缺水水量的權重係數為  $\alpha_{i2}$ ；第  $t$  時段第  $i$  分區河道內生態需水量為  $DE_{i,t}$ 、用水量為  $RE_{i,t}$ ，缺水水量的權重係數為  $\alpha_{i3}$ 。運算式如下：

$$\min Z = \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T [\alpha_{i1} (DI_{i,t} - RI_{i,t}) + \alpha_{i2} (DA_{i,t} - RA_{i,t}) + \alpha_{i3} (DE_{i,t} - RE_{i,t})] \right\} \quad (1)$$

式中： $T$  為計算期，一般為季度或年； $M$  為分區數。

約束條件有：

(1) 水庫水量平衡約束

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + (I_{i,t} - R_{i,t} - SU_{i,t}) \Delta t \quad (2)$$

式中： $S_{i,t}$  為第  $i$  分區第  $t$  時段水庫初、末的蓄水狀態； $I_{i,t}$  為第  $i$  分區第  $t$  時段入庫流量； $R_{i,t}$  為第  $i$  分區第  $t$  時段從庫區的引水流量； $SU_{i,t}$  為第  $i$  分區第  $t$  時段水庫下泄流量； $\Delta t$  為計算時段，一般為月、旬。

(2) 水庫蓄水量約束

$$S_{\min,i,t} \leq S_{i,t} \leq S_{\max,i,t} \quad (3)$$

式中： $S_{\min,i,t}$  和  $S_{\max,i,t}$  為第  $i$  分區第  $t$  時段水庫允許的最小、最大的蓄水狀態。

(3) 泄流特性約束

$$0 \leq SU_{i,t} \leq f(Z_{i,t}) \quad (4)$$

式中： $Z_{i,t}$  為第  $i$  分區第  $t$  時段水庫水位； $f(Z_{i,t})$  為水庫泄流函數。

(4) 引水能力約束

$$0 \leq R_{i,t} = R_{Ei,t} + R_{Ai,t} \leq R_{max,i,t} \quad (5)$$

式中： $R_{max,i,t}$  為第  $i$  分區第  $t$  時段水庫引水能力。

(5) 匯流節點水量平衡方程

$$R_{Ei,t} = I_{i,t} + F_{i,t} - R_{i,t} \quad (6)$$

式中： $F_{i,t}$  為第  $i$  分區第  $t$  時段節點區間匯入流量； $R_{i,t}$  為第  $i$  分區第  $t$  時段節點取水流量。

(6) 水庫邊界條件

$$Z_{i,1} = Z_{i,T} = Z_0 \quad (7)$$

式中： $Z_{i,1}$  和  $Z_{i,T}$  為第  $i$  分區水庫時段初和時段末的庫水位； $Z_0$  為水庫的死水位。

從以上數學模型結構可以看出，它具有以下特點：一是運算式都是線性函數；二是部分約束方程在時段之間相互關聯；三是具有多階段梯階結構形式，各時段的約束條件和變數有十分類似的形式。採用改進的大規模線性規劃方法（PFI）求解。

### 參、水資源優化配置結果分析

#### 一、計算依據

2015 年 6 月至 2016 年 5 月水利調度年的天然來水接近平水年，由於水文資料有限，以該年的實測徑流資料為典型年，設置五種來水條件：10%、25%、50%、75%、90%。計算時段為月。假設在各種節水措施維持現有水準情況下，用水戶需水預測都是在 2017 年的實際用水基礎上進行。農業用水則是按照水資源公報提供的資料，以降雨頻率與農業用水量做頻率曲線進行預測，其它用水戶的需水量維持基準年的用水水準。水庫從庫空（死水位）起算。

遵循地表水資源取水量建議值約束，在保證河道生態用水的前提下，根據用水戶的重要程度，按照“生活、工業、其它、農業”四類用戶，從“非常重要、很重要、重要、一般”賦予權重。

將以上資料，代入模型進行優化計算，對其優化計算結果進行統計分析。

#### 二、配置結果分析

(1) 河道內生態水量保證率

表 1 不同來水頻率下各斷面河道內生態水量保證率情況

來水頻率	界首	周口	沈丘	漯河	大陳	黃橋	中牟	何口
10%	100%	100%	92%	100%	100%	100%	100%	100%
25%	100%	100%	92%	100%	100%	100%	100%	100%
50%	100%	100%	92%	100%	100%	100%	100%	100%
75%	100%	100%	83%	100%	100%	100%	100%	100%
90%	100%	100%	67%	100%	92%	100%	100%	100%

從表 1 可以看出，除汾泉河沈丘斷面和北汝河大陳斷面由於河道上沒有控制性工程，在枯水年有不同程度的生態缺水外，其它河道都滿足生態用水要求。

(2) 用水戶缺水

表 2 不同來水頻率下各城市缺水情況/（萬 m<sup>3</sup>）

行政區	鄭州	開封	許昌	洛陽	汝州	平頂山	南陽	漯河	駐馬店	周口	合計
10%	0	0	0	0	0	0	0	0	54	1234	1289
25%	0	0	0	0	0	0	0	0	151	3950	4101
50%	0	0	0	0	301	0	0	0	506	10459	11266
75%	191	243	6172	1317	1437	0	0	1593	670	19468	31091
90%	2503	1739	18404	2293	3395	7591	784	7676	1200	36781	82366
期望值	592	428	5067	714	1055	1708	176	1966	532	14681	26918

從表 2 可以看出，儘管優化配置是一個比較樂觀的配置結果，但還是需要通過引進外來水源才能解決流域供水緊張的局面。總缺水量期望值為 26918 萬 m<sup>3</sup>，總缺水率期望值為 8.46%。

為了更加直觀瞭解缺水情況，分析 50% 平水年的計算結果，統計實際供水情況，並與用水計畫進行比較，得到統計結果如圖 2 所示。



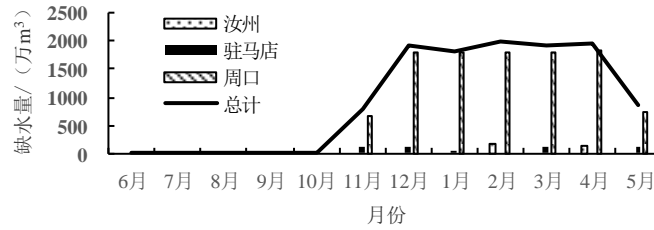


圖 2 缺水情況的時空分佈

從缺水的空間分佈來看，每個城市都存在不同程度的缺水。汝州和駐馬店由於取水河道天然流量小，且無控制工程調節，存在工程性缺水。而周口市農業用水比值大，而用水優先權最低，因此周口缺水量最大，占總缺水量的 93%，為自身計畫用水量的 27.4%。從缺水的時間分佈來看，11~5 月整個枯水期都有不同程度的缺水，其中，12~4 月份缺水最為嚴重，占總缺水量的 92%。

(3) 地表水資源配置

表 3 地表水資源配置期望值占常規建議值的比例

行政區	鄭州	開封	許昌	洛陽	汝州	平頂山	南陽	漯河	駐馬店	周口	總計
賈魯河	51%	65%	100%	0	0	0	0	0	0	100%	56%
潁河	12%	0	64%	0	0	0	0	95%	8%	72%	65%
北汝河	0	0	66%	58%	68%	81%	0	0	0	0	69%
沙河	0	0	0	0	0	48%	36%	84%	0	100%	58%
合計	42%	65%	66%	58%	68%	54%	36%	88%	8%	77%	62%

從表 3 可以看出，所有指標都在建議值以內，期望總取水量距離建議值尚有 38% 的餘地。從水源來講，賈魯河和沙河的剩餘可分配地表水量較大。從用戶來講，許昌在賈魯河的取水、周口在賈魯河和沙河的取水都已經達到建議值。但是考慮到周口依然存在大量缺水，因此可以適當調整用水戶在沙潁河各河道的取水比例。

肆、水庫生態調度方案擬定

一、水庫生態調度方案的生成

(1) 地表水資源配置方案

以上結果表明，存在缺水的另外一個主因是地表水資源配置方式的不合理，因此取基於系統優化情景下的用水戶地表水分配比例期望值作為生態調度的地表水分配比例，生成地表水資源配置方案，如表 4。

表 4 沙潁河流域地表水資源配置方案 / (%)

行政區	鄭州		許昌		平頂山		漯河		周口		開封	洛陽	汝州	南陽	駐馬店
	常規	優化	常規	優化	常規	優化	常規	優化	常規	優化					
賈魯河	78	100	3	10					2	23	100				
潁河	22	~	47	86			38	61	83	3	~				100
北汝河			50	4	17	40						100	100		
沙河					83	60	62	39	15	74		~	~	100	

從表 4 可以看出，基於系統优化的地表水資源配置方案比常規建議值更具合理性。以鄭州和周口為例。相對於賈魯河而言，潁河的天然流量相對較小，且下游有生態斷面約束，因此鄭州完全從賈魯河取水，周口從賈魯河的取水比例提高了 20%。周口在沙河的取水點位於最下游，該點彙集了賈魯河，北汝河，潁河等各支流，流量較大，因此周口在沙河下游的取水比例提高了 59%，相對而言大大減少了在潁河的取水量。

(2) 水庫生態調度方案

統計沙潁河流域上的四個大型水庫在不同來水條件以及地表水資源配置方案下，基於系統优化情景的蓄水量變化過程。現以白沙水庫為例，如圖 3 所示。

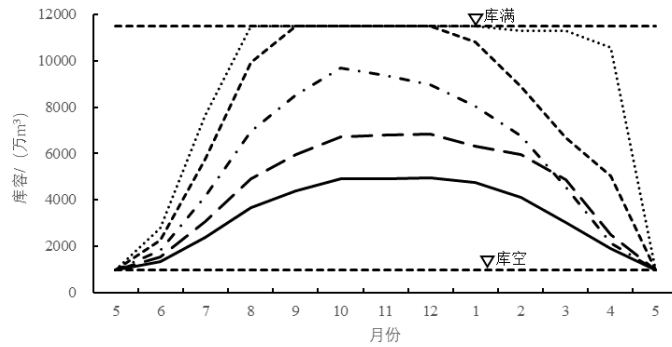


圖 3 白沙水庫生態調度圖

由於以上水庫運行過程考慮了河道生態用水要求，因此，可以以該過程線為基礎繪製水庫生態調度控制線，從而繪製各水庫的生態調度圖。其中 90% (實線) 為符合河道生態用水保證率要求的水庫生態調度基本控制線。

水庫按照生態調度圖進行生態調度。當水庫實際蓄水處於生態調度控制線以上時，為生態用水保證區，水庫應該滿足河道生態用水要求；當水庫實際蓄水處於生態調度控制線以下時，為降低生態用水區，水庫減少生態流量的下泄，此時河道生態用水不能滿足。

## 二、基於水資源配置的水庫生態調度方案的檢驗

由於水資源的有限性，水資源配置是一個多方參與的利益衝突問題。設置來水條件為 85%，結合用水預報和給定多目標權重情況下，進行水庫生態調度方案和常規調度方案的對比計算，對生態調度方案的效果進行檢驗。

### (1) 河道內生態保證率對比

將兩種調度方案對於河道內生態用水保證率的影響進行對比，如圖 5 所示。結果表明，各斷面的河道內生態用水保證率相對於常規調度方案可以得到顯著提高，各斷面河道內共增加生態水量 80294 萬 m<sup>3</sup>。

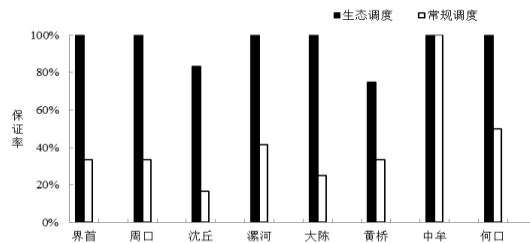


圖 5 生態調度和常規調度河道內生態水量保證率對比

### (2) 用水戶缺水情況對比

將兩種調度方案對於各使用者缺水情況的影響進行對比，如表 4 所示。

表 4 生態調度和常規調度各用水戶缺水情況對比 / (萬 m<sup>3</sup>)

缺水量	鄭州	開封	許昌	洛陽	汝州	平頂山	南陽	漯河	駐馬店	周口	總計
生態調度	2263	1764	20489	2246	3592	7056	233	6925	907	23827	69302
常規調度	1500	800	16283	1789	2645	3234	205	5995	1116	30512	64077

從表 4 可以看出，由於生態調度將河道內生態用水的優先順序設置為第一位，減少了用水戶的河道外可用水量，導致用水戶的總缺水量增加 5225 萬 m<sup>3</sup>，但是遠遠低於河道內增加的 80294 萬 m<sup>3</sup> 生態水量。

### (3) 水庫調蓄過程對比

將兩種調度方案對於水庫的調蓄過程的影響進行對比，以“昭平臺-白龜山”聯合水庫為例，如圖 6 所示。

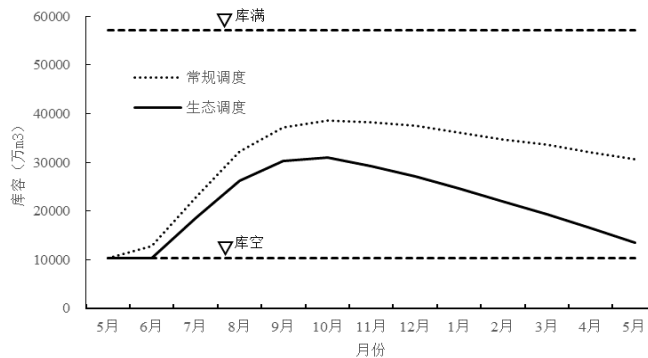


圖 6 生態調度和常規調度“昭平臺-白龜山”聯合水庫調蓄過程對比

從圖 6 中可以看出，“昭平臺-白龜山”聯合水庫群在調度期末多動用興利庫容 17235 萬  $m^3$ ，說明生態調度充分利用了水庫的興利庫容，較大幅度發揮了水庫的調蓄作用。

從過程上來看，在枯水期末，生態調度的庫水位基本上降到了死水位，然後，利用汛期，再將水位蓄上來。相應地，水庫在枯水期泄流（供水量）增加，在汛期泄流（供水量）會減少。這正好和缺水情況分析的時間段一致，有效地解決了供需矛盾。

## 伍、結論

(1) 水資源優化配置可以說是一個比較樂觀的配置結果，但沙潁河流域還是需要通過引進外來水源才能解決流域供水緊張的局面。外調水大約在 2.7 億立方米，調水時間應集中在枯水期。

(2) 在保證河道生態流量的條件下，一般年份，各城市都有不同程度的缺水。考慮來水的隨機因數，最終得到各城市地表水資源配置方案以及水庫生態調度方案。生態調度發揮了水庫的調蓄作用，能夠顯著提高沙潁河流域各斷面的生態流量保證率，不過同時會少量增加用水戶的總缺水量。

(3) 沙潁河水文資料不全，外調水源與用水區的水文頻率遭遇問題，將配置方案在水資源管理的具體工作中的應用問題，以及如何改進生態調度方案以減少缺水損失等問題待下一步進行深入研究。

## 參考文獻

- [1] Salman A Z, Al-Karablieh E K, Fisher F M. An inter-seasonal agricultural water allocation system (SAWAS) [J]. *Agricultural Systems*, 2001, 68(3):233-252.
- [2] Babel M S, Gupta A D, Nayak D K. A Model for Optimal Allocation of Water to Competing Demands [J]. *Water Resources Management*, 2005, 19(6):693-712.
- [3] 郭文獻, 夏自強, 王遠坤, 等. 三峽水庫生態調度目標研究[J]. *水科學進展*, 2009, 20(04): 554-559.
- [4] 廖四輝, 程緒水, 施勇, 等. 淮河生態用水多層次分析平臺與多目標優化調度模型研究[J]. *水力發電學報*, 2010, 29(04):14-19+27.
- [5] 郭旭甯, 胡鐵松, 黃兵, 等. 基於類比-優化模式的供水水庫群聯合調度規則研究[J]. *水利學報*, 2011, 42(06):705-712.
- [6] 黃草, 王忠靜, 李書飛, 等. 長江上游水庫群多目標優化調度模型及應用研究 I: 模型原理及求解[J]. *水利學報*, 2014, 45(09):1009-1018.
- [7] 黃志鴻, 董增川, 周濤, 等. 濁漳河流域水庫群多目標生態調度模型研究[J]. *水電能源科學*, 2019, 37(03):58-62.
- [8] 張連鵬, 鄧銘江, 黃強. 面向生態的額爾齊斯河水庫群中長期調度[J]. *水科學進展*, 2018, 29(03):365-373.

## **Research on Ecological Operation of Reservoir Group Based on Water Resources Allocation**

LIU Yu-dong, GAO Shi-chun, ZHANG Xiang, XIAO Yi

*(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China )*

**Abstract:** To solve the problem of water resources allocation in complex river basins and ecological operation of reservoirs, taking the Shaying River Basin(SRB) with numerous sluice gates and dams as an example, based on the ecological base flow of the key sections, a water allocation model with the objective of ‘Ensure instream ecological water demand and prioritize domestic water use’ was developed. The model took the actual water consumption of consumers in 2017 as the water demand level of the base year, optimized the allocation scheme of water resources in SRB by applying large-scale linear programming methods under the conditions of wet, normal, dry and extream dry years. The reservoir ecological operation control line, operation rules and the water resource allocation scheme were obtained after the statistical analysis of calculation results, verified with 85% water supply conditions in dry years. Comparing with the conventional operation results, the ecological operation can make full use of the spatial and temporal distribution of the adjustable water quantity and the operation capacity of floodgates and dams. It can also improve the guarantee rate of ecological water use in key sections of SRB. This study provides technical support and decision support for the comprehensive management of water resources in SRB.

**Key words:** Shaying river basin; reservoir group; ecological operation; water resources allocation.

## 金沙江～三峽梯級水庫調度管理與實踐

曹輝<sup>1</sup>、舒衛民<sup>2</sup>、吳碧瓊<sup>3</sup>

### 摘要

中國水資源分佈不均勻，年均降雨量從東南的 1600 mm 以上遞減到西北的不足 200 mm，且有 80% 以上的降雨集中在 6~9 月，造成洪澇乾旱災害頻繁。另外，全球變暖可能使中國年降水量及年徑流量向“南增北減”的更為不利的趨勢變化，水資源短缺、水資源利用效率低，經濟發展與生態環境矛盾突出已經成為當前中國水危機中最嚴重和最緊迫的問題。長江流域面積 180 萬 km<sup>2</sup>，約占我國國土面積約 1/5；流域多年平均入海水量 9190 億 m<sup>3</sup>，約占全國淡水資源的 2/5。水能資源理論蘊藏量 30.5 萬 MW、年電量 2.67 萬億 kW·h，約占全國的 2/5，總計通航里程約 7.1 萬 km，占全國內河通航里程的 56.0%。流域總人口約占全國的 1/3，地區生產總值占全國的 1/3；耕地面積占全國的 1/4，糧食總產量約占全國的 1/3，長江流域在中國政治、經濟、文化等方面具有重要戰略意義。三峽、溪洛渡、向家壩等巨型水庫，作為長江水資源的骨幹工程，自建成以來，通過搭建功能齊全的流域水雨情遙測系統，建立完備的氣象水文預報系統，開展基於大資料市場、氣象、水文集合智慧預測預報，研發流域梯級新一代智慧水調自動化系統和巨型機組電站群遠方“調控一體化”自動控制系統，利用科學、智慧化的科技手段，提升了水庫運行規律的掌控能力和多目標調度的協調能力，充分發揮了水庫的綜合效益，在長江流域防洪、發電、航運、枯期補水等方面發揮了巨大的作用，為流域水資源配置、水生態與水環境保護等起到重要支撐。

**關鍵字：**長江、三峽、水資源、調度

1 三峽集團梯調中心、高工

2 三峽集團梯調中心、工程師

3 三峽集團梯調中心、工程師

## 壹、前言

中國水資源可利用量 8140 億  $m^3$ ，僅占水資源總量的 29%，2005 年中國實際用水量已達 5632 億  $m^3$ ，為可利用水資源量的 69.2%，北方部分地區已達到 80%，接近警戒線；預計到 2030 年中國的生產總值將增長 10 倍，經濟、社會和生態需水量將增到 7000 億  $m^3$ ，水資源利用量達到警戒線。經濟社會發展與水資源、生態-環境保護的矛盾愈來愈尖銳，與水相關的生態~環境退化問題愈來愈嚴重。

長江流域是中國人口最密集區域之一，人口超 4 億，占中國人口近 1/3；耕地 2460 多萬公頃，占中國耕地總面積的 1/4；2016 年 GDP 總量達到 33.3 萬億元，超過到中國總量的 43%。2018 年以來，中國全力推進生態環境修復工作，長江由“治理開發利用”向“保護與管理”轉變。三峽、溪洛渡、向家壩等梯級水庫，擁有調節庫容 238.53 億  $m^3$ ，防洪庫容 277.03 億  $m^3$ ，承擔防洪、發電、航運等綜合利用任務，是開發利用長江水資源的骨幹工程，在防洪、發電、航運、枯期補水等方面發揮了巨大的綜合效益。因此，科學、高效的調度管理好水庫，優化配置水資源，不僅能保產生巨大的社會經濟效益，同時也是流域生態環境保護與修復非工程措施的一種重要手段和途徑，對支撐長江環境保護發和經濟發展有重要的現實意義。

## 貳、基本情況

### 一、流域概況

#### (一) 自然地理

長江是我國第一大河，幹流全長 6300 餘 km，是世界第三長河。流域面積 180 萬  $km^2$ ，占全國陸地總面積的 19%。橫跨東部、中部和西部三大經濟區，共計 19 個省、市、自治區。自西向東劃分為金沙江、岷沱江等 11 個流域二

級區。支流多，呈南北輻射狀（超 1000 平方公里 437 條）。長江流域呈多級階梯性地形。流經山地、高原、盆地、丘陵和平原等；自源頭至入海口，落差約 6600m。

#### (二) 氣候情況

長江流域大部分地方屬於亞熱帶季風氣候，在青藏高原的部分屬於高山高原氣候。亞熱帶季風氣候是冬夏季風交替控制形成的，夏季炎熱多雨、冬季寒冷少雨，雨熱同期。最冷月平均溫不低於  $0^{\circ}C$ ，最熱月平均溫高於  $22^{\circ}C$ ，年降水量在 800mm 以上。

#### (三) 徑流特性

長江流域有明顯汛期、非汛期之分，汛期與雨季時間相應。徑流年內分配規律與降雨相似，年內分配不均勻，主要集中在夏季。長江流域洪水發生時間和地區分佈與暴雨一致，一般年份各河洪水相互錯開，不致造成大的洪災，但如果氣象反常，幹支流洪水發生遭遇，可形成大洪水導致洪災。

## 二、梯級電站情況

三峽集團目前在長江幹、支流擁有三峽工程在內的 9 座巨型電站，分別為，長江幹流白鶴灘、烏東德、溪洛渡、向家壩、三峽、葛洲壩以及清江水布壩、隔河岩、高壩洲。流域水庫航道里程近 2000km，約為長江經濟帶規劃里程的 40%；三峽船閘、三峽升船機、向家壩升船機航道里程 1000 餘 km，約為長江經濟帶規劃通航里程的 25%；梯級水庫防洪庫容近 287 億  $m^3$  的，約為 2019 年長江上游總防洪庫容（396 億  $m^3$ ）的 73%；此外，三峽工程控制著長江中下游最險的荊江河段 95% 來水，三峽壩址年徑流（4510 億  $m^3$ ）約為整個長江流域年平均水資源（9616 億  $m^3$ ）的 47%，在長江防洪體系中的重要地位；向家壩、溪洛渡水庫同為川江咽喉，清江梯級電站均屬清江核心控制性工程；溪洛渡、向家壩水電站是金沙江“西電東送”骨幹電源點；三峽工程是我國西電東送和南北互供

的骨幹電源點，。梯級水庫情況見表 1。

## 參、水庫調度運行管理

### 一、技術能力

#### (一)資料接收能力

通過自建遙測站，報汛站、共用站接收近 1400 個水情測站資訊，覆蓋長江流域面積 58 萬 km<sup>2</sup>，實現了從長江頭到長江入海口主要控制站和控制水庫的資料收集，傳輸通道因地制宜，基本都有雙通道保障。

#### (二)氣象預報

針對水庫調度特殊需求，建立了一整套集成度高，涵蓋氣象觀測、資訊處理、預報分析、資訊服務等功能塊，包括了實況監測、氣象資訊綜合分析、強天氣短時臨近預報、壩區災害天氣預警、預報產品製作、流域氣候預測和預報產品評價檢驗 7 部分內容。

#### (三)水文預報

預報劃分為 203 個子分區，共用 102 套預報方案，有 33 個輸出節點，覆蓋長江上游絕大部分區域，對入庫流量有造成影響區域覆蓋 100%。其中，短期預報採用降雨徑流預報採用新安江三水源、TANK；河網洪水傳播採用馬斯京根河道匯流、MIKE 模型，中長期採用水文統計法、神經網路法、基於長期氣候預測的動力模式法等。預報結果可是現實誤差滾動計算和自動修正。最大洪峰預報精度 95%以上；24 小時預報基本維持在 98%左右；2~7 日平均預報精度整體維持在 90%左右；月滾動預報來水精度 90%；年來水預報精度平均在 83%左右。

#### (四)系統

研發了流域梯級新一代智慧水調自動化系統和巨型機組電站群遠方“調控一體化”自動控制系統，具備水雨情資料通信、處理及監視、資訊查詢與展示、值班管理等 40 餘項功能，對中國長江流域梯級電站 110 台水力發電機組及泄水閘等約 100 萬個資料點進行資料獲取、資

料處理、運行監視控制，通過資料視覺化、資料採擷、雲計算等手段實現梯級水庫的智慧調度和梯級電站、流域水庫的綜合資訊展示。

### 二、科學研究

聯合科研院所和高校開展了以三峽水庫為核心的優化調度研究，並與水庫調管理部門通過建立綜合溝通協調機制，將優化調度研究成果應用於調度實踐，逐步形成了“技術先行、溝通協調、運行實踐、總結完善”的研究模式。在大量研究工作的基礎上，實施了汛期水位浮動、中小洪水調度、汛末提前蓄水、泥沙減淤和生態調度等一系列優化調度措施，提升了三峽工程的防洪、發電、航運效益拓展了水資源利用、泥沙減淤和生態等效益。

### 三、制度體系

通過梳理流域梯級水庫聯合調度各個管理單元內部流程及外部相互關係，識別各個管理過程的過程輸入、過程輸出、管理活動、相關部門職責，確定相對應的管理制度與管理流程，制定梯級水庫聯合調度各項工作的職責許可權和管理要求，建立了以下評價體系：

水文預報及發電計畫評價體系：規定了氣象預報、水文預報、發電計畫準確性和時效性評價的各項考評指標、考評標準、考評頻次。

調度值班品質評價體系：規定日常業務、即時調度和應急管理三方面內容的評價指標、評價辦法、評價標準。

遙測系統運行評價體系：規定了遙測系統運行評價方法及評價標準。

### 四、組織管理

#### (一)預報方案統一製作

長江幅員遼闊，上游和中游在地貌、氣候以及徑流特性等方面存在較大差異，但為了全面掌握流域的水雨情特性，充分利用好水資源，通過對系統升級、預報會商等手段實現了流域氣象、水文預報方案的統一製作。

#### (二)流域梯級水庫統一聯合調度

從上游溪洛渡水庫和三峡水庫相距 770 公里，且各水庫調節性能和承擔的功能有所不同。為了提高流域水資源利用率，實現流域梯級水庫綜合效益最大化，就需要充分利用好流域降雨在時間和地區分佈上的差異，以及流域梯級水庫的調節性能，發揮梯級水庫削峰、錯峰的功能，從防洪、發電、蓄水、消落等方面開展流域梯級水庫統一聯合調度。

### （三）統一協調管理

建立了對外統一協調機制，成立了負責電站運行管理的機構和負責樞紐對外協調的機構，各司其職。一方面減輕了梯級水庫協調的難度和工作量；另一方面，將流域梯級水庫作為一個整體，有利於站在全域的角度出發協調各方面的訴求，充分發揮梯級水庫的綜合效益。

## 肆、水庫綜合調度與實踐

### 一、防洪調度

截至 2018 年底，三峡水庫歷年累計攔洪運用 48 次，總蓄洪量 1459 億  $m^3$ ，幹流堤防未發生一起重大險情，保證了中下游的社會穩定。其中，成功應對 2010、2012 年兩次洪峰超  $70000m^3/s$  的洪水過程，以及面對 2016、2017 年長江中下游區域性大洪水，有效控制下游沙市站水位未超過警戒水位、城陵磯站水位未超過保證水位，保證了長江中下游的防洪安全，減輕了下游幹支流地區的防洪壓力，降低了防汛成本。據中國工程院 2014 年關於三峡工程試驗性蓄水階段評估的估算，三峡工程多年平均年防洪效益為 88 億元，工程防洪減災效益顯著。三峡水庫運行以來攔洪情況見表 2。

### 二、發電調度

2003~2018 年 10 月，三峡電站（含電源電站）累計發電量 11787 億  $kW\cdot h$ 。其中，2018 年發電量達到了 1016 億  $kW\cdot h$ ，為電網的安全穩定運行發揮了重要作用，同時為節能減排作出了貢獻。據中國工程院 2014 年關於三峡工

程建設協力廠商獨立評估，按照碳排放交易價二氧化碳減排效益達 539 億元。

### 三、航運調度

三峡樞紐蓄水後庫區幹流航道等級由建庫前的 III 級航道提高為 I 級航道，重慶至宜昌航道維護水深由 2.9m 提高到 3.5~4.5m，庫區航道年通過能力由建庫前的 1000 萬噸提高到 5000 萬噸，實現了全年全線晝夜通航。同時，下游葛洲壩枯水期出庫最小通航流量由  $2700m^3/s$  提高到  $6000m^3/s$  以上，比天然情況下增加  $2500\sim 3000m^3/s$ ，枯水期航道維護水深達到了 3.5m，比蓄水前提高了 0.7m。與蓄水前相比，年均事故件數、死亡人數、沉船數和直接經濟損失與建庫前相比分別下降了 72%、81%、65%和 20%。近六年更是實現了零死亡、零沉船事故發生。

### 四、水資源調度

長江上游來水年內分配不均，6~10 月多年平均徑流量占全年的 70%以上，12 月~次年 4 月多年平均來水僅約  $4000\sim 6000m^3/s$ 。三峡水庫建成後，憑藉良好的“攔洪補枯”的季調節性能，有效利用洪水資源、增加枯水期長江中下游下泄流量，將枯水期 1~4 月份水庫最小下泄流量提高至  $6000m^3/s$ 。截至 2018 汛前，三峡水庫枯水期累計為下游補水 1950 天，補水總量 2172.13 億  $m^3$ ，滿足了下游航道暢通及沿江兩岸生產生活等用水需求。

### 五、生態調度

為促進四大家魚繁殖，2011 年以來，三峡水庫採取了持續加大下泄流量的調度方式，創造促進四大家魚繁殖的水力學條件。2011 年起，連續 8 年開展了 12 次生態調度試驗。監測情況表明，在水溫條件滿足四大家魚產卵的情況下，三峡水庫實施生態調度期間，宜都斷面均監測到四大家魚產卵現象。2011~2018 年生態調度期間宜都江段四大家魚繁殖總量為 31.8 億顆，沙市江段四大家魚繁殖總量為 9.3



億顆。

## 六、泥沙調度

根據三峽庫區泥沙特點，在水庫水位消落期間，通過選擇合適的入庫來水過程和時機，將變動回水區淤積的泥沙沖刷到常年回水區，避免局部河段泥沙淤積引起礙航問題。例如，三峽水庫庫尾重慶大渡口～涪陵段在減淤調度期間，2012 和 2013 年河床沖刷量分別達到、241.1 萬 m<sup>3</sup>、441.3 萬 m<sup>3</sup>。

汛期，當遇到較大的來水來沙過程時，通過適時增大下泄流量排出入庫泥沙。通過泥沙調度，三峽水庫汛期主要的洪水過程排出的泥沙，可占主汛期和全年出庫沙量的 50%~90%。

## 七、應急調度

1. 船舶疏散。2018 年汛期，來水偏豐，三峽出庫流量超 4000 立方米每秒，功率較小的貨船無法前行，大量積壓在兩壩間。三峽水庫開展 4 次疏散船舶調度，日間減少出庫流量至貨船可運行流量，共疏散船舶 838 艘。

2. “壓鹹潮”補水調度。2014 年 2 月，受同期降水偏少、長江中下游水位下降和潮汐活動等因素影響，上海長江口水源地遭遇歷史上持續時間最長的鹹潮入侵。應上海市政府要求，三峽水庫啟動了“壓鹹潮”補水調度，三峽平均入庫流量 5040 m<sup>3</sup>/s，平均出庫流量 7060 m<sup>3</sup>/s；向下游累計補水 17.3 億 m<sup>3</sup>，緩解了上海鹹潮入侵影響。

3. 海損應急救援。2015 年 6 月 1 日，“東方之星”號客輪航行至湖北省荊州市監利縣翻沉。為了給“東方之星”沉船事件救援創造有利條件，6 月 2 日三峽水庫出庫流量由 17200 立方米每秒逐步減至 7000 m<sup>3</sup>/s，下游水位最大降低 3.37m，為救援工作的順利開展創造了有利條件。

## 伍、展望

大型水庫是現代社會不可缺少的重要基礎

設施，水力發電和水資源調控是密不可分的整體，直接關係著水安全、糧食安全、國家安全，解決水資源短缺是建設生態文明的前提和保障。三峽、溪洛渡、向家壩水庫在防洪、發電、航運、水資源利用等方面為長江經濟帶的發展和長江大保護提供了基礎保障作用。未來隨著長江上游烏東德、白鶴灘等巨型電站相繼投產發電，以三峽水庫為核心水利工程將在流域防洪、發電、航運、水資源配置、水生生態與水環境保護等方面得到充分發揮和進一步拓展。

## 參考文獻

1. 陳敏(2017),「長江流域水庫群聯合調度管理及思考」, 中國防汛抗旱, 第 27 卷, 第 1 期, 第 40-44 頁。
2. 陳進(2018),「長江流域水資源調控與水庫群調度」, 水利學報, 第 49 卷, 第 1 期, 第 2-8 頁。
3. 薑加虎、黃群(1997),「三峽工程對其下游長江水位影響研究」, 水利學報, 第 27 卷, 第 8 期, 第 40-44 頁。
4. 伍勇、柳鑫(2017),「三峽工程蓄水後宜昌站水流特性變化及測驗措施」, 長江科學院院報, 第 5 期, 第 26-30 頁。
5. 唐金武、由星瑩、李義天(2014),「三峽水庫蓄水對長江中下游航道影響分析」, 水利發電學報, 第 33 卷, 第 1 期, 第 102-107 頁。
6. 許繼軍、李昊潔(2015),「長江上游大型水電站群聯合調度關鍵科技問題探討」, 中國三峽, 第 51-56 頁。
7. 夏軍(2011),「中國水資源管理與水系統科學發展的機遇與挑戰」, 瀋陽農業大學, 第 13 卷, 第 4 期, 第 394-398 頁。

表1 梯級電站基本情況

電站	防洪庫容 (億 m <sup>3</sup> )	總庫容 (億 m <sup>3</sup> )	裝機容量 (MW)
烏東德	24.4	74.08	10200
白鶴灘	75	206.27	16000
溪洛渡	46.5	129.1	12600
向家壩	9.03	51.63	6000
三峽	221.5	450.44	22500
葛洲壩	/	7.41	2715
合計	277.03	638.58	70015

表2 三峽水庫防洪調度統計表

年份	最大洪峰	最大削峰量
2004	60500	3700
2007	52500	5100
2009	55000	16300
2010	70000	30000
2011	46500	25500
2012	71200	28200
2013	49000	14000
2014	55000	22900
2015	39000	8000
2016	50000	19000
2017	38000	/
2018	60000	18000

## 淮河流域用水總量控制指標分解細化探討

洪 成<sup>1</sup>

### 摘要

在當前我國水資源形勢日趨嚴峻的形勢下，國家層面實施的最嚴格水資源管理制度對於保障經濟社會長期平穩較快發展具有重要意義。作為三條紅線考核目標之一的用水總量控制指標是最嚴格水資源管理制度的核心組成部分，將其分解細化對強化水資源管理抓手具有重要促進作用。本文介紹了淮河流域概況，擬定了流域用水總量控制指標分解細化的主要任務，分析了用水總量控制指標分解細化工作應注意的技術要點，對淮河流域用水總量控制指標進行了分解，對於實際從事用水總量控制指標分解細化工作的專業技術人員有一定的參考和指導作用。

**關鍵字：**淮河流域、用水總量控制指標、分解細化、技術要點

<sup>1</sup> 中水淮河規劃設計研究有限公司 安徽 合肥 230000

## 壹、研究背景

當前，我國水資源面臨的形勢十分嚴峻，為遏制水資源短缺、水污染嚴重、水生態環境惡化等日益突出的勢頭，促進經濟社會可的持續發展，根據國發〔2012〕3號檔要求，《國務院辦公廳關於印發實行最嚴格水資源管理制度考核辦法的通知》（國辦發〔2013〕2號）確定了全國及各省級行政區用水總量控制紅線指標，標誌著我國最嚴格水資源管理制度的核心組成部分用水總量控制指標的頂層設計已完成。

我國幅員遼闊，各省級行政區轄區面積一般也都較大，僅控制省級行政區用水總量，無法判斷省內不同地區用水總量是否超越應有指標，不利於最嚴格水資源管理制度由大到小、由小入微的全面貫徹實施。將省級行政區用水總量控制指標進一步分解細化至地市級、縣級行政區，將流域層面用水總量控指標分解細化至行業、水源，分解細化至流域內各省、河流水系內各省，並制定相應的考核辦法與獎懲機制，才能最大限度地發揮最嚴格水資源管理制度的重要作用，從而促進水資源可持續利用、經濟社會發展方式轉變，推動經濟社會發展與水資源水環境承載能力相協調，保障經濟社會長期平穩較快發展。

## 貳、淮河流域概況

淮河流域地處我國東部的南北氣候過渡地帶，介於長江和黃河之間，位於東經 $111^{\circ}55'$ ~ $121^{\circ}25'$ 、北緯 $30^{\circ}55'$ ~ $36^{\circ}36'$ ，西起桐柏山、伏牛山，東臨黃海，南以大別山、江淮丘陵、通揚運河及如泰運河南堤與長江流域分界，北以黃河南堤和沂蒙山與黃河流域、山東半島毗鄰，面積約27萬 $\text{km}^2$ ，跨湖北、河南、安徽、江蘇、山東五省40個地級市。

淮河流域總人口1.70億人，約占全國總人口的13%，流域平均人口密度為631人/ $\text{km}^2$ ，是全國平均人口密度的4.5倍。淮河流域在我國國民經濟中佔有十分重要的戰略地位，是重要的糧、棉、油主產區之一，糧食總產量約1億t；區內礦產資源豐富、

品種繁多，其中煤炭資源探明儲量為700億t、石油儲量近1億t、岩鹽儲量達2000億t以上；交通發達，通江達海，京滬、京九、京廣鐵路大動脈貫穿其中，全國內河高等級航道7條、區域性重要航道22條，內河航道通航里程達17118km。

淮河流域多年平均地表水資源量595億 $\text{m}^3$ ，折合年徑流深221mm。地表水資源量年內分配不均勻，年平均汛期6~9月徑流量約占年量的55%~85%，集中程度呈自南向北遞增趨勢。徑流的年際變化也較大，年徑流量最大為1160億 $\text{m}^3$ ，最小為161億 $\text{m}^3$ ，最大與最小年徑流量的比值一般為5~25倍，呈現南部小，北部大，平原大於山區的規律。地下水資源總量為流域內平原區地下水資源量與山丘區地下水資源量之和扣除重複計算量。淮河流域多年平均淺層地下水資源量（ $M \leq 2\text{g/L}$ ）為338.1億 $\text{m}^3$ ，其中，平原區多年平均年地下水資源量（ $M \leq 2\text{g/L}$ ）為257.4億 $\text{m}^3$ ，山丘區多年平均年地下水資源量（礦化度 $M \leq 2\text{g/L}$ ）為87.0億 $\text{m}^3$ 。淮河流域1956~2000年多年平均水資源總量794億 $\text{m}^3$ ，其中地表水資源量為595億 $\text{m}^3$ ，淺層地下水資源量扣除與地表水資源量的重複水量為205億 $\text{m}^3$ 。

## 參、分解細化工作的主要任務

國辦發〔2013〕2號文明確的全國及各省級行政區用水總量控制指標僅僅是一個全口徑的總量指標，這一總量之中各地市、縣各占多少，地表水、地下水等各水源各占多少，生活、工業、農業等各行業又占多少，作為最嚴格水資源管理制度的頂層設計中沒有明確、也不宜明確，這是由於全國層面與各級地方水行政管理部門、流域管理機構的管理事權不同所決定的。進一步分解細化用水總量控制指標，不僅是完善最更嚴格水資源管理體系的需要，更是強化水資源管理抓手的需要，是亟待開展的一項工作。

淮河流域層面的用水總量控制指標的分解細化任務主要包括縱橫兩個方面：縱向上一是將全國分配至流域層面的用水總量控制指標分解細化至流域內的省級行政區，二是在流域總量控制指標框架內確定主

要跨省河流的用水總量控制指標及其省際間的分配；橫向是確定各省級行政區分行業及分水源的分項指標。

## 肆、分解細化工作的技術要點分析

### 一、現狀資料的獲取及其可靠性分析

由於未來的不確定性，現狀已經發生的並有記載的有關資料是開展用水總量控制指標分解細化工作的重要參考。現狀資料品質的好壞，將直接影響分解細化成果的優劣，進而影響後期的有關技術及行政層面的協調。因此，對現狀資料的來源及其可靠性分析必須引起相關技術人員的重視。

一般來說，現狀資料的收集應從權威部門獲取為主，比如社會經濟發展指標宜從省級統計部門發佈的統計年鑒中獲取，供水、用水量資料應從流域管理機構或省級水行政主管部門編制的水資源公報中獲取，降雨量、蒸發量、徑流量等水文資料應從水文部門編制的水文年鑒中獲取等。

獲取現狀資料後，還應對其可靠性進行必要的分析。可靠性分析可主要從兩個方面展開：一是進行同一類資料進行不同年份之間的一致性分析，分析各年資料間的變化趨勢是否符合經驗規律，如有突變資料，應分析突變的合理性；二是將通過不同管道收集的同一類資料進行橫向對比，分析其中的差異，確定最終需要採用的資料。經濟指標的對比分析，應注意可比價格水準的換算。

### 二、地區差異分析

這裡的地區差異主要是指相鄰地區間的產業結構、用水水準差異等。地區差異是客觀存在的，也是影響用水總量控制指標分解細化成果協調的主要因素之一。也就是說地區差異問題若處理不好，可能會導致後期技術協調工作難度加大，嚴重的甚至會引發整個分解細化方案的推倒重來。

地區差異分析主要是分析由地區產業結構、用水習慣、用水效率導致的各地區主要用水戶用水定額之間的差異是否合理。用

水定額是反映現狀用水水準的重要指標，同時也是制定用水總量控制指標分解細化方案的重要基礎。為避免後期協調難度增加，在制定用水總量控制指標各行業分解細化方案時，一定要注意將相鄰區域的同行業用水定額控制在合理的差異範圍之內。

### 三、與上一級用水總量控制指標的銜接

對於流域管理機構而言，分解細化的流域套行政區用水總量控制指標之和應與流域層面用水總量控制指標一致，包括分行業及分水源的分解細化指標；分解細化的流域內河流套行政區用水總量控制指標應與相關省相應分區的用水總量控制指標相協調，同時，還要注意各河流用水總量控制指標之和與流域用水總量控制指標之間的大小關係，還要與其所在的水資源分區規劃可供水量進行對比分析。

### 四、與有關規劃成果的協調

2010年10月國務院國函[2010]118號批復的《全國水資源綜合規劃（2010-2030）》及其附件（各流域水資源綜合規劃報告）是制定全國及各流域用水總量控制指標的基礎。本次水資源綜合規劃，是以水資源三級區套地級行政區為基本單元進行需水量預測、供水量預測及水資源配置的，其成果包含行政分區及水資源分區可供水量。在開展用水總量控制指標分解細化工作時應以水資源綜合規劃相應區域成果為基礎，並相互協調。

近年來，隨著經濟社會的快速發展，農業用水占總用水量的比重呈下降趨勢，生活、工業及生態環境用水量占總用水量的比重呈上升勢頭，只是增速大小有差異，用水結構較2010年之前已發生較大變化。由於本次水資源綜合規劃是以2006年為基準年編制的，按照當時的發展情形預測的國民經濟各行業用水量與現狀相比，局部地區已出現不相適應的地方。因此，在進行用水總量控制指標分解細化，特別是進行分行業指標分解細化工作時應注意與相應區域各行業

總用水量的協調，分行業指標應考慮現狀變化情況後與分行業用水量成果相協調。

## 五、成果的合理性分析

成果的合理性分析宜從水資源開發利用程度、水資源開發利用水準、水量分配份額的匹配性、生態環境用水等方面著手開展。

水資源開發利用程度宜重點分析地表水開發利用率和地表水資源利用消耗率兩個指標，分別用分配水量與相應區域水資源量及分配水量對應的耗水量與相應區域水資源可利用量比值進行測算。同時，還應結合流域或區域的水資源開發利用目標分析相應區域的水資源開發利用程度的合理性。

水資源開發利用水準應以分配的水量為基礎，結合規劃水準年人口及 GDP 指標預測成果，測算人均用水量及單位 GDP 用水量指標，分析相應區域水資源開發利用水準。並結合水量分配有關各方在與水有關的指標方面的協調性與合理性分析，分析區域平衡性。

水量分配份額的匹配性主要是分析參與水量分配各方分配的水量比例是否合適。宜從現狀資料中選擇主要指標進行分析，主要通過測算參與各方現狀用水量、水資源量、人口、耕地面積、GDP 等指標占分配區域的比重，結合經濟社會發展趨勢等分析各方水量分配份額是否合理。

生態環境用水分析的目地是控制水資源開發利用程度，保障河湖生態健康。主要通過分配後的河流主要控制斷面下泄水量進行分析。

## 伍、淮河流域用水總量控制指標

### 分解

#### 一、分解方法

基於《淮河流域及山東半島水資源綜合規劃》，結合近幾年經濟發展對水資源需求及實際用水情況，對淮河流域用水總量控制指標進行細化分解。

##### (1) 2015 年用水總量控制指標分解

農業用水量（含林牧漁）：按照《淮河流域及山東半島水資源綜合規劃》，農業用水基本不增長，農業新增灌溉面積發展用水主要來源於灌區節水改造配套節約水量。2015 年農業用水量以 2001~2010 年近 3~10 年平均值為基礎，綜合分析近 10 年來灌溉條件、氣象因素變化情況後確定。

工業用水量（含建築業）：根據 2001~2010 年《淮河片水資源公報》資料分析，年增長率在 1.2%~2.5% 之間，本次 2015 年用水量在 2010 年基礎上按 2% 增長率考慮。

生活用水量（含城鎮、農村、牲畜）：根據 2001~2010 年《淮河片水資源公報》資料分析，年增長率在 3%~4% 之間，本次 2015 年用水量在 2010 年基礎上按 3.5% 增長率考慮。

河道外生態用水量：近年來城鎮生態用水增加迅速，考慮人民生活水準提高，生態用水由 2010 年 7.9 億  $m^3$  提高到 9.5 億  $m^3$ 。

##### (2) 2020 年和 2030 年用水總量控制指標分解

###### ① 總量控制指標

參照全國用水總量控制指標方案初步確定淮河流域各省用水總量控制指標，即 2020 年全國水資源綜合規劃總供用水量為 6779 億  $m^3$ ，用水總量控制指標為 6700 億  $m^3$ ，2030 年全國水資源綜合規劃總供用水量為 7113 億  $m^3$ ，用水總量控制指標為 7000 億  $m^3$ ，淮河流域 2020 年和 2030 年用水總量控制指標按全國的用水總量控制目標對淮河流域水資源綜合規劃指標進行同倍比打折處理。

經計算，淮河流域 2020 年用水總量控制指標為 700.8 億  $m^3$ ，2030 年用水總量控制指標為 742.0 億  $m^3$ 。

###### ② 各行業用水總量控制指標

農業用水量（含林牧漁）：按照《淮河流域及山東半島水資源綜合規劃》，農業需水量基本不增長，農業用水量總體保持穩中有升的趨勢。根據 2020 年和 2030 年流域各省有效灌溉面積發展情況，結合各省用水總量及其他行業用水變化情況，分析確定 2020 年和 2030 年淮河流域各省農業用水量指標。

工業用水量（含建築業）：在分析 2001~2010 年 10 年工業用水變化情況的基礎上，參考淮河流域水資源綜合規劃 2020 年和 2030 年工業用水增長率情況，確定本次 2020 年工業用水量在 2010 年用水量的基礎上按 2% 以內的年增長率控制，2030 年工業用水量在 2020 年用水量的基礎上按 1.5% 以內的年增長率控制。

生活用水量（含城鎮、農村、牲畜）：在分析 2001~2010 年 10 年生活用水變化情況的基礎上，參考淮河流域水資源綜合規劃 2020 年和 2030 年生活用水增長率情況，確定本次 2020 年生活用水量在 2010 年用水量的基礎上按 2.5% 以內的年增長率控制，2030 年生活用水量在 2020 年用水量的基礎上按 1% 的增長率控制。

河道外生態用水量：近年來城鎮生態用水增加迅速，考慮人民生活水準的提高，對規劃配置水量進行適當修正，2020 年生態用水量指標 13.6 億 m<sup>3</sup>，2030 年為 16.8 億 m<sup>3</sup>。

③各水源用水總量控制指標

地表水：以打折後的用水總量為控制，

考慮規劃工程的實施情況及實際用水變化情況，確定淮河流域各省地表水源用水控制指標。

地下水：在分析近 10 年地下水開發利用量的基礎上，結合淮河流域各省實際情況及流域有關地下水開發利用規劃，2020 年和 2030 年各省地下水用水總控制指標總體保持下降趨勢。

跨流域調水：跨流域調水量與水資源綜合規劃數基本一致。

其他水源：與水資源綜合規劃數基本一致。

二、分解成果

根據規劃 2020 年和 2030 年全國用水總量控制指標，按照淮河流域用水總量控制指標分解方法，確定淮河流域規劃 2015 年、2020 年和 2030 年用水總量控制指標分別為 665.0 億 m<sup>3</sup>、700.8 億 m<sup>3</sup> 和 742.0 億 m<sup>3</sup>。淮河流域規劃 2015 年、2020 年和 2030 年用水總量控制指標按行業和按水源分解成果詳見表 1、表 2。

表 1 淮河流域用水總量控制指標按行業分解 單位：億 m<sup>3</sup>

水準年	農業	工業	生活	生態	總用水
2015	439.0	110.6	104.3	9.1	663.0
2020	450.2	122.3	114.7	13.6	700.8
2030	459.3	141.7	124.2	16.8	742.0

表 2 淮河流域用水總量控制指標按水源分解 單位：億 m<sup>3</sup>

水準年	當地地表水	地下水	調入	其他水源	總供水
2015	372.7	158.4	119.5	12.4	663.0
2020	372.9	148.8	158.1	21.0	700.8
2030	379.4	146.9	188.8	27.0	742.0

陸、結語

用水總量控制指標是最嚴格水資源管理制度的核心組成部分，對其進行分解細化是完善水資源管理體系的需要，同時也是強化水資源管理抓手的需要。為合理控制區域水資源開發利用程度、促進產業結構優化調

整，本次研究從分行業及分水源兩個方面進行淮河流域用水總量控制指標的分解細化。為避免用水總量控制指標分解細化成果可能面臨的技術協調障礙，應在分解細化成果協調前，對成果進行必要的合理性分析，確保將成果的技術風險降到最低。

聯繫方式 通訊位址：安徽省合肥市濱湖新區雲谷路 2588 號，郵編：230000，聯繫電話：辦公室（0551）65707600。

## 基於“三條紅線”的淮河流域取水許可控制指標計算

洪 成<sup>1</sup>、席 翔<sup>2</sup>

### 摘要

“三條紅線”與取水許可管理制度都是國家層面關於水資源管理方面的重要制度，二者之間既有區別又有聯繫。本文分析了以“三條紅線”為核心的最嚴格水資源管理制度與取水許可管理制度的主要聯繫，根據“三條紅線”要求，結合淮河流域實際情況，對淮河流域取水許可控制指標進行了計算，本文對於水資源管理實踐工作具有一定的指導和借鑒作用。

**關鍵字：**淮河流域、“三條紅線”、取水許可、總量控制

1 中水淮河規劃設計研究有限公司，副處長，高級工程師

2 中水淮河規劃設計研究有限公司，助理工程師



## 壹、研究背景

水是生命之源、生產之要、生態之基。水資源是事關國計民生的基礎性自然資源和戰略性經濟資源，也是生態環境的控制性要素。近年來，隨著我國人口不斷增長、經濟規模不斷擴大、工業化和城市化進程加快，對資源環境的壓力加大，不合理的水資源利用方式普遍存在，用水浪費、水污染、水資源過度開發和水生態環境惡化、一些地區水資源短缺等問題十分突出，已成為經濟社會可持續發展的嚴峻挑戰。

## 貳、淮河流域概況

淮河流域地處我國東部的南北氣候過渡地帶，介於長江和黃河之間，位於東經 $111^{\circ}55'$ ~ $121^{\circ}25'$ 、北緯 $30^{\circ}55'$ ~ $36^{\circ}36'$ ，西起桐柏山、伏牛山，東臨黃海，南以大別山、江淮丘陵、通揚運河及如泰運河南堤與長江流域分界，北以黃河南堤和沂蒙山與黃河流域、山東半島毗鄰，面積約27萬 $\text{km}^2$ ，跨湖北、河南、安徽、江蘇、山東五省40個地級市。

淮河流域總人口1.70億人，約占全國總人口的13%，流域平均人口密度為631人/ $\text{km}^2$ ，是全國平均人口密度的4.5倍。淮河流域在我國國民經濟中佔有十分重要的戰略地位，是重要的糧、棉、油主產區之一，糧食總產量約1億t；區內礦產資源豐富、品種繁多，其中煤炭資源探明儲量為700億t、石油儲量近1億t、岩鹽儲量達2000億t以上；交通發達，通江達海，京滬、京九、京廣鐵路大動脈貫穿其中，全國內河高等級航道7條、區域性重要航道22條，內河航道通航里程達17118km。

淮河流域的氣候特點是四季分明。在氣候區劃中，以淮河和蘇北灌溉總渠為界，北部屬暖溫帶半濕潤區，南部屬亞熱帶濕潤區。影響本流域的天氣系統眾多，既有北方的西風槽和冷渦，又有熱帶的颱風和東風波，還有本地產生的江淮切變線和氣旋波，因此造成流域氣候多變，天氣變化劇烈。東亞季風是影響流域天氣的主要因素。

淮河流域多年平均地表水資源量595億 $\text{m}^3$ ，折合年徑流深221mm。地表水資源量年內

分配不均勻，年平均汛期6~9月徑流量約占年量的55%~85%，集中程度呈自南向北遞增趨勢。徑流的年際變化也較大，年徑流量最大為1160億 $\text{m}^3$ ，最小為161億 $\text{m}^3$ ，最大與最小年徑流量的比值一般為5~25倍，呈現南部小，北部大，平原大於山區的規律。

地下水資源總量為流域內平原區地下水資源量與山丘區地下水資源量之和扣除重複計算量。淮河流域多年平均淺層地下水資源量( $M \leq 2\text{g/L}$ )為338.1億 $\text{m}^3$ ，其中，平原區多年平均地下水資源量( $M \leq 2\text{g/L}$ )為257.4億 $\text{m}^3$ ，山丘區多年平均地下水資源量(礦化度 $M \leq 2\text{g/L}$ )為87.0億 $\text{m}^3$ 。

淮河流域1956~2000年多年平均水資源總量794億 $\text{m}^3$ ，其中地表水資源量為595億 $\text{m}^3$ ，淺層地下水資源量扣除與地表水資源量的重複水量為205億 $\text{m}^3$ 。

## 參、“三條紅線”與取水許可管理

### 制度的涵義及主要聯繫

#### 一、“三條紅線”制度

水是生命之源、生產之要、生態之基。水資源是事關國計民生的基礎性自然資源和戰略性經濟資源，也是生態環境的控制性要素。近年來，隨著我國人口不斷增長、經濟規模不斷擴大、工業化和城市化進程加快，對資源環境的壓力加大，不合理的水資源利用方式普遍存在，用水浪費、水污染、水資源過度開發和水生態環境惡化、一些地區水資源短缺等問題十分突出，已成為經濟社會可持續發展的嚴峻挑戰。

為應對新形勢下我國面臨的水資源短缺問題，2011年中央1號文件和中央水利工作會議明確要求實行最嚴格水資源管理制度，從制度上推動經濟社會發展與水資源水環境承載能力相適應。針對中央關於水資源管理的戰略決策，國務院發佈了《關於實行最嚴格水資源管理制度的意見》，對實行最嚴格水資源管理制度工作進行全面部署和具體安排。

最嚴格水資源管理制度的主要內容是確立“三條紅線”，實施“四項制度”，即建立水資源

開發利用紅線，建立用水效率控制紅線，建立水功能區限制納汙紅線；實施用水總量控制制度，用水效率控制制度，水功能區限制納汙制度，水資源管理責任和考核制度。最嚴格水資源管理制度不僅是緩解我國目前面臨的突出水資源問題的重要措施，而且是面向今後較長一個時期經濟社會發展任務和要求的的水資源管理方略。

## 二、取水許可管理制度

二十世紀八十年代末期《中華人民共和國水法》的頒佈實施，首次將取水許可制度提高到了國家層面，明確規定取水許可制度是國家管理水資源的基本制度之一。為緩解經濟社會發展快速發展帶來的水資源供需矛盾，我國一方面興建水利工程增加供給，另一方面嘗試運用取水許可和水資源政策杠桿，促進水資源的優化配置，提高用水效率，降低用水量。1993年，國務院頒佈了《取水許可制度實施辦法》，明確了取水許可制度的具體內容和申請程式。

2002年經修訂的《中華人民共和國水法》實施，重申了取水許可和水資源費政策的重要性，明確了水資源由水利部門統一管理，賦予了流域管理機構更多的行政權力。2006年，國務院令第460號發佈，《取水許可和水資源費徵收管理條例》頒佈實施，進一步推動了取水許可制度的實施。2008年水利部發佈了第34號令，《取水許可管理辦法》開始實施，從總體提出了不同水源地、不同取水工程的取水許可和水資源費徵收管理的原則、方法、程式和法律責任，對於完善取水許可制度、增強有關制度的可操作性、推進取水許可制度的全面實施具有重要意義。

## 三、二者的联系

“三條紅線”中的用水總量控制紅線、用水效率控制紅線與取水許可管理聯繫較為緊密。取水許可管理的是具體的用水戶，水行政主管部門根據區域水資源狀況、水資源開發利用程度、用水效率、行業發展等情況，審核用水戶取水申請，按規定核發取水許可證或駁回申請，是對水資源開發利用的事前控制。用水總量控制紅線、用水效率控制紅線是從宏觀上對

區域水資源開發利用進行控制，其源頭在於對取水許可申請的管理與控制，若取水許可管理這道關把不住，用水總量控制將無從談起，用水總量控制紅線必將突破。另外，“三條紅線”中的用水總量控制紅線、用水效率控制紅線與取水許可管理中的取水許可總量控制指標制訂的基礎都是水資源綜合規劃。

“三條紅線”是對區域取用水行為的事後考核與監督，其考核結果必將反作用于取水許可管理，指導或倒逼有關水行政主管部門嚴格按區域水資源開發利用總量控制指標執行取水許可管理制度。

## 肆、思路與方法

以《淮河流域及山東半島水資源綜合規劃》為依據，通過“三條紅線”的用水總量控制紅線和用水效率控制紅線進行控制，在現狀調查分析評價的基礎上，進行需水預測，需水預測採用的用水效率指標通過用水效率控制紅線進行控制；根據需水預測成果，進行供需分析，確定淮河流域2020年可供水量；依據《取水許可和水資源費徵收管理條例》規定和《水量分配暫行辦法》的有關技術要求，在可供水量中扣除不在取水許可管理範圍內的水量，確定淮河流域可取用水量，通過用水總量控制紅線進行控制；然後計算可取用水相應的耗損量，若可取用水耗損量小於流域的水資源可利用量，則以可取用水量為取水許可總量控制指標；若可取用水耗損量大於流域的水資源可利用量，說明取用水量過大，超過流域水資源承載能力，需要對可取用水量進行適度修正，然後再次計算用水耗損量，並與水資源可利用量進行比較，直到可取用水量對應的用水耗損量不大於水資源可利用量，在此基礎上制定取水許可控制指標。

淮河流域取水許可控制指標方案修編技術路線見圖1。

## 伍、淮河流域取水許可控制指標

### 計算

#### 一、需水預測

淮河流域需水預測採用的定額依據《淮河流域及山東半島水資源綜合規劃》，並通過用水效率控制紅線進行控制，分為生活需水、工業需水、農業需水、建築業和第三產業需水、河道外生態需水進行預測。經預測，規劃 2020 年淮河流域多年平均河道外需水量為 740.4 億 m<sup>3</sup>，淮河流域規劃 2020 年需水總量預測成果見表 1。

#### 二、可取用水量分析

根據淮河流域可取用水量計算的方法，通過用水總量控制紅線進行控制，經調算整理分析，規劃 2020 年淮河流域 75%、95% 及多年平均可取用水量分別為 721.9 億 m<sup>3</sup>、777.9 億 m<sup>3</sup> 和 700.8 億 m<sup>3</sup>。淮河流域規劃 2020 年不同保證率可取用水量成果詳見表 2。

#### 三、取水許可控制指標

在充分考慮淮河流域經濟社會的發展及其對水資源需求量的變化情況下，根據用水總量控制紅線和用水效率控制紅線控制下的需水量預測和可取用水量計算成果，考慮相應的耗損量和不在取水許可管理範圍內的水量，按照本次研究的思路與方法，計算得出淮河流域規劃 2020 年取水許可控制指標，見表 3。

### 陸、結語

以“三條紅線”為核心的最嚴格水資源管理制度，是在對過去水資源管理制度系統總結、深入思考和有效繼承的基礎上的重大制度改革；取水許可和水資源有償使用是我國水資源管理的重要法律制度，二者構成了我國當前的水資源管理制度體系。本文闡述了“三條紅線”與取水許可管理制度的主要聯繫，根據“三條紅線”要求，結合淮河流域實際情況，對淮河流域取水許可控制指標進行了計算，對於水資源管理實踐工作具有一定的指導和借鑒作用。

## 參考文獻

1. 儲德義(2012)，「紅線約束下的淮河流域水資源利用現狀與未來」，治淮，第 7 期，第 4-6 頁。
2. 儲德義(2012)，「基於最嚴格水資源管理制度下的淮河流域水資源管理」，治淮，第 9 期，第 4-6 頁。
3. 劉小勇(2012)，「三條紅線」與“四項制度」，環境保護與迴圈經濟，第 3 期，第 32 卷，第 8-9 頁。
4. 李薇等(2011)，「中國取水許可制度和 water 資源費政策分析」，水資源保護，第 4 期，第 27 卷，第 83-89 頁。
5. 水利部水利水電規劃設計總院(2010)，「全國水資源綜合規劃」。
6. 水利部水資源司(2006)，「建設專案水資源論證法規及有關文件彙編」。
7. 國務院令第 460 號(2006)，「取水許可和水資源費徵收管理條例」。

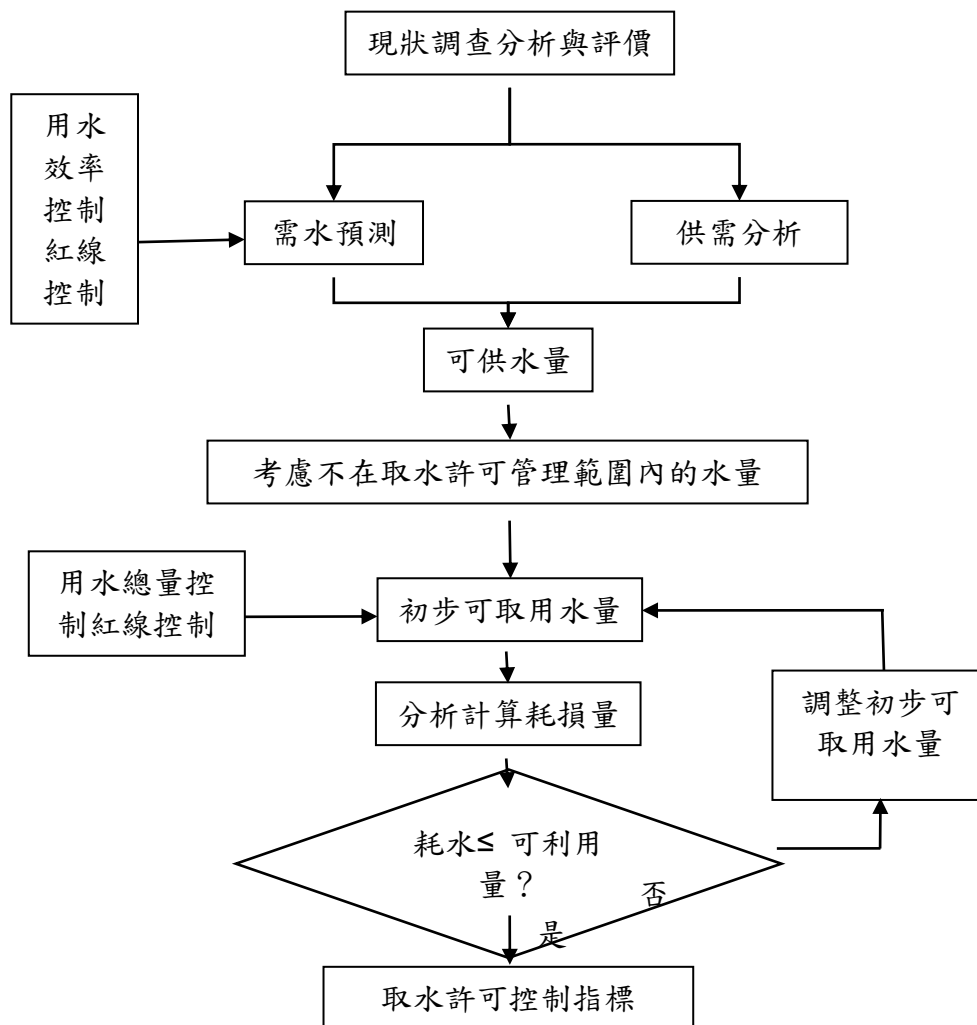


圖 1 淮河流域取水許可控制指標修編技術路線圖

表 1 淮河流域 2020 年河道外需水量預測成果 單位：億 m<sup>3</sup>

保證率	生活		生產		其它		合計
	城鎮	農村	工業	農業	建築業、三產	生態	
75%	51.8	33.8	124.7	524.1	25.4	13.6	773.4
95%	51.8	33.8	124.7	609.8	25.4	13.6	859.1
多年平均	51.8	33.8	124.7	491.1	25.4	13.6	740.4

表 2 淮河流域規劃 2020 年可取用水量計算成果 單位：億 m<sup>3</sup>

保證率	地表	淺層地下	跨流域	其它	合計
75%	359.6	161.3	174.2	26.8	721.9
95%	316.2	176.9	254.3	30.5	777.9
多年平均	373.0	148.8	158.2	20.9	700.8

表 3 淮河流域 2020 年取水許可控制指標 單位：億 m<sup>3</sup>

保證率	當地地表	淺層地下	跨流域調水	其他	合計
75%	359.6	161.3	174.2	26.8	721.9
95%	316.2	176.9	254.3	30.5	777.9
多年平均	373.0	148.8	158.2	20.9	700.8

## 2018年江西省大氣降水離子特徵分析

鄧燕青<sup>1</sup>、劉建新<sup>2</sup>、張迪<sup>3</sup>、王華<sup>4</sup>、袁偉皓<sup>5</sup>、劉志奇<sup>6</sup>

### 摘要

通過對2018年江西省11個設區市佈設109個大氣降水水質監測點開展監測，對大氣降水的電導率、pH值、氟化物、氯化物、亞硝酸鹽、硝酸鹽、硫酸鹽、銨鹽、鈉、鉀、鈣、鎂等12項檢測參數進行分析。得出主要結論如下：（1）全省全年監測pH範圍為4.3~9.0。出現偏酸性降雨的地區為贛州大部分地區，九江、景德鎮和萍鄉局部地區；出現偏鹼性降雨的地區為吉安、萍鄉、新餘、宜春大部分地區以及九江、贛州、撫州、景德鎮部分地區。（2）對全省降水離子濃度的分析表明，南昌、上饒和鷹潭地區 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 的比值大於3，屬於燃煤型或者硫酸型污染類型；九江、吉安、景德鎮、贛州、萍鄉、新餘和宜春 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 的比值範圍在0.5和3之間，屬於硫酸、硝酸的混合型污染類型；撫州 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 的比值小於0.5，屬於機動車型或硝酸型污染類型。（3）從降水離子濃度分析表明， $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 為降水中最主要的兩種水溶性陰離子， $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{K}^+$ 為降水中最主要的三種水溶性陽離子。（4）根據全省全年大氣降水測定均值和地表水水質進行比對分析，對地表水水質有一定影響的水溶性離子主要為 $\text{F}^-$ 和 $\text{NO}_3^-$ 。

**關鍵字：**江西省、大氣降水、水質監測、酸雨、離子成分

<sup>1</sup> 江西省水文局 水质处处长

<sup>2</sup> 江西省水文局 调查员

<sup>3</sup> 河海大学 硕士

<sup>4</sup> 河海大学 副教授

<sup>5</sup> 河海大学 硕士

<sup>6</sup> 河海大学 硕士

## 壹、監測背景

大氣降水是由海洋和陸地蒸發的水蒸氣凝結而成，它包括降雨、降雪等各種降水形式，是大氣污染物質進入地表水體的主要途徑。近年來，由於化石燃料的使用，嚴重污染了大氣環境，同時由於降雨過程的發生，使大氣污染物質隨雨水降落到地面，對河道水體造成污染。

江西省位於長江中下游交接處的南岸。全省有大小河流 2400 多條，總長約 18400 公里，全省多年平均水資源總量 1565 億立方米，全省雨水豐沛，水資源豐富多年平均降水量 1638 毫米，居全國第 4 位。通過對江西省大氣降水開展監測，瞭解沉降物的主要組成，某些污染組分的性質和含量。

## 貳、監測站點與採樣

監測點位的佈設與樣品採集遵循《大氣降水樣品的採集與保存》(GB13580.2-1992)中的相關規定，本文對江西省 11 個設區市佈設 109 個大氣降水水質監測點，選取 2018 年四個季度典型月份進行監測，監測點位分佈如圖 1。

## 參、監測專案與分析方法

### 一、檢測項目

大氣降水檢測參數包括：電導率、pH 值、氟化物、氯化物、亞硝酸鹽、硝酸鹽、硫酸鹽、銨鹽、鈉、鉀、鈣、鎂等 12 項。

### 二、檢測方法

大氣降水水質檢測參數與方法標準見下表。

分析項目	分析方法	方法來源
電導率	電極法	GB 13580.3-1992
pH 值	電極法	GB 13580.4-1992
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、F <sup>-</sup> 、Cl <sup>-</sup> 、 Na <sup>+</sup> 、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、K <sup>+</sup> 、 Ca <sup>2+</sup> 、Mg <sup>2+</sup>	離子色譜法	GB 13580.5-1992

### 三、評價內容

#### (一) 降水 pH 值

我國環境保護局根據大氣降水 pH 值制定了雨水酸性程度分級標準，如下表所示。

我國降水酸性程度的分級標準

pH 值	酸度分級
pH > 7.00	鹼性
5.6 < pH < 7.0	中性
4.5 < pH < 5.59	弱酸性
4.00 < pH < 4.49	較強酸性
pH < 4.00	強酸性

#### (二) 降水電導率

電導率是降水中所含離子綜合指標的反

映，它的大小從整體上體現了降水中離子總濃度的高低。

#### (三) 主要離子組分

對大氣降水中陰陽離子進行測試，分析陰、陽離子的濃度及百分比組成，判斷區域降水中主要的污染物質。

#### (四) 降水污染類型

用大氣降水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的比值可以判斷區域降水的污染類型，當 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的比值大於 3 時，通常認為該地區主要為燃煤型或者硫酸型污染；當 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的比值小於 0.5 時，則認為是機動車型或硝酸型污染；當 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的比值範圍在 0.5 和 3 之間時，則認為該地區的酸雨污染類型為硫酸、硝酸的混合型污染。

#### 3.3.5 對地表水水質的影響

為瞭解大氣降水對地表水水質的影響，可根據全年大氣降水測定資料均值與其在月份地表水資料均值進行比對分析。

## 四、檢測結果分析

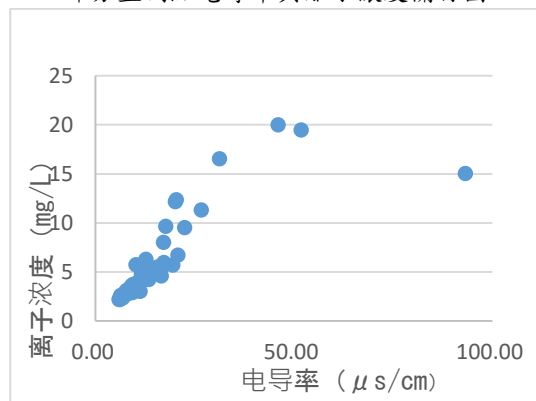
### 一、降水 pH 分析

江西省 11 市監測點降水統計 pH 範圍、極值與酸鹼度分析如表 1，得出 pH 分析成果如下：全省全年監測 pH 範圍為 4.3~9.0。(1) 贛州大部分地區，九江、景德鎮和萍鄉局部地區出現 pH < 5.6，即出現偏酸性降雨；(2) 吉安、萍鄉、新餘、宜春大部分地區以及九江、贛州、撫州、景德鎮部分地區出現 pH > 7.0，即出現偏鹼性降雨。酸雨分佈圖如圖 1。

### 二、降水電導率分析

選取部分監測點電導率與離子濃度資料，繪製關係圖如下，降水中溶解性的離子濃度基本上隨電導率的增大而增大。分析所有網站監測資料得出鷹潭市、宜春市電導率較低，監測點電導率範圍分別為 4.85~22.4 μs/cm 和 3~38 μs/cm，撫州市和九江市電導率分佈範圍最高，監測點電導率範圍分別為 96~241 μs/cm 和 11.7~135 μs/cm。

部分監測點電導率與離子濃度關係圖



### 三、主要離子組分分析

全省各地區大氣降水離子濃度及所占百分比如表 2 及圖 2-12 所示，分析資料所得結論如下：

- 1、南昌市各離子濃度從大到小的順序為： $\text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{F}^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{NO}_2^-$ 。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{NH}_4^+$ 為最主要的兩種水溶性陽離子，由圖可知它們分別占總離子的 44.2% 和 10.1%； $\text{Cl}^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 為最主要的兩種陰離子，由圖可知它們分別占總離子的 18.7% 和 15.4%。
- 2、上饒市各離子濃度從大到小的順序為： $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_2^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{F}^-$ 。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{NH}_4^+$ 為最主要的兩種水溶性陽離子，由圖可知它們分別占總離子的 22.6% 和 7.9%； $\text{Cl}^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 為最主要的兩種陰離子，由圖可知它們分別占總離子的 15.7% 和 32.9%。
- 3、鷹潭市各離子濃度從大到小的順序為： $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{NO}_2^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{F}^-$ 。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{NH}_4^+$ 為最主要的兩種水溶性陽離子，由圖可知它們分別占總離子的 17.8% 和 13.1%； $\text{Cl}^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 為最主要的兩種陰離子，由圖可知它們分別占總離子的 13.4% 和 32.0%。
- 4、九江市各離子濃度從大到小的順序為： $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{F}^- > \text{NO}_2^- > \text{K}^+$ 。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{NH}_4^+$ 為最主要的兩種水溶性陽離子，由圖可知它們分別占總離子的 28.7% 和 7.2%； $\text{NO}_3^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 為最主要的兩種陰離子，由圖可知它們分別占總離子的 17.4% 和 29.2%。
- 5、吉安市各離子濃度從大到小的順序為： $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{F}^- > \text{NO}_2^-$ 。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{NH}_4^+$ 為最主要的兩種水溶性陽離子，由圖可知它們分別占總離子的 47.6% 和 7.9%； $\text{NO}_3^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 為最主要的兩種陰離子，由圖可知它們分別占總離子的 10.2% 和 25.0%。
- 6、景德鎮市各離子濃度從大到小的順序為： $\text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{F}^- > \text{NO}_2^-$ 。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{NH}_4^+$ 為最主要的兩種水溶性陽離子，由圖可知它們分別占總離子的 14.0% 和 16.0%； $\text{NO}_3^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 為最主要的兩種陰離子，由圖可知它們分別占總離子的 15.0% 和 30.0%。
- 7、撫州市各離子濃度從大到小的順序為： $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{F}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_2^- > \text{K}^+$ 。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{NH}_4^+$ 為最主要的兩種水溶性陽離子，由圖可知它們分別占總離子的 10.6% 和 2.0%； $\text{NO}_3^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 為最主要的兩種陰離子，由圖可知它們分別占總離子的 53.7% 和 17.7%。
- 8、贛州市各離子濃度從大到小的順序為： $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{F}^- > \text{NO}_2^-$ 。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{NH}_4^+$ 為最主要的兩種水溶性陽離子，由圖可知它們分別占總離子的 14.0% 和 10.0%； $\text{NO}_3^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 為最主要的兩種陰離子，由

- 圖可知它們分別占總離子的 23.0% 和 38.0%。
- 9、萍鄉市各離子濃度從大到小的順序為： $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{F}^- > \text{NO}_2^-$ 。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{K}^+$ 為最主要的兩種水溶性陽離子，由圖可知它們分別占總離子的 37.5% 和 21.4%； $\text{NO}_3^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 為最主要的兩種陰離子，由圖可知它們分別占總離子的 10.1% 和 15.1%。
  - 10、新餘市各離子濃度從大到小的順序為： $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{NO}_2^- > \text{Mg}^{2+} > \text{F}^-$ 。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{K}^+$ 為最主要的兩種水溶性陽離子，由圖可知它們分別占總離子的 30.0% 和 23.3%； $\text{Cl}^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 為最主要的兩種陰離子，由圖可知它們分別占總離子的 12.0% 和 18.1%。
  - 11、宜春市各離子濃度從大到小的順序為： $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{NO}_2^- > \text{Mg}^{2+} > \text{F}^-$ 。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{K}^+$ 為最主要的兩種水溶性陽離子，由圖可知它們分別占總離子的 30.4% 和 19.2%； $\text{NO}_3^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 為最主要的兩種陰離子，由圖可知它們分別占總離子的 11.2% 和 19.8%。
- #### 四、降水對地表水水質的影響

根據全省全年大氣降水測定均值和地表水水質進行比，如表 3，分析得出對地表水水質有一定影響的水溶性離子主要為  $\text{F}^-$  和  $\text{NO}_3^-$ 。

### 五、結論建議

- 1、全省全年監測 pH 範圍為 4.3~9.0。出現偏酸性降雨的地區為贛州大部分地區，九江、景德鎮和萍鄉局部地區；出現偏鹼性降雨的地區為吉安、萍鄉、新餘、宜春大部分地區以及九江、贛州、撫州、景德鎮部分地區。
- 2、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 和  $\text{K}^+$ 為降水中最主要的三種水溶性陽離子。 $\text{NH}_4^+$ 主要來自農業生產、畜禽養殖、生物質燃燒等； $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{K}^+$ 主要是來自建築工程、街道揚塵和土壤灰塵。 $\text{NO}_3^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 主要來源於煤炭燃燒和汽車尾氣排放。
- 3、對全省降水離子濃度的分析表明，南昌、上饒和鷹潭地區  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 的比值大於 3，屬於燃煤型或者硫酸型污染類型；九江、吉安、景德鎮、贛州、萍鄉、新餘和宜春  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 的比值範圍在 0.5 和 3 之間，屬於硫酸、硝酸的混合型污染類型；撫州  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 的比值小於 0.5，屬於機動車型或硝酸型污染類型。
- 4、根據全省全年大氣降水測定均值和地表水水質進行比，如表 3，分析得出對地表水水質有一定影響的水溶性離子主要為  $\text{F}^-$  和  $\text{NO}_3^-$ 。

### 參考文獻

- 馮養雲 《山西省大氣降水水質評價》 環境監測管理與技術 2003-9-30

表 1 大氣降水 pH 分析



第二十三屆兩岸水利科技交流研討會

地區 pH	pH 值 範圍	pH 最大值		pH 最小值		酸度級別及對應地 區占比
		時間	地點	時間	地點	
南昌	6.3~7.0	8.29	崗前站	11.14	外洲站	中性降水地區 100%
上饒市	5.7~6.8	12.2	鐵路坪	3.19	廣豐水文站	中性降水地區 100%
				6.21	沙溪	
鷹潭市	5.8~6.6	12.2	余江	3.18	貴溪	中性降水地區 100%
九江市	5.2~7.8	5.13	都昌	5.23	星子	弱酸性占 9%、中性 占 68%、鹼性占 23%
吉安市	6.4~9.0	7.7	遂川水文 站、峽江水 文站	11.13	峽江	中性占 2%、鹼性占 98%
景德鎮市	4.7~7.2	7.6	虎山水文 站	7.1	渡峰坑	酸性占 16%、鹼性占 5%、中性占 79%
撫州市	5.9~7.1	10.22	牛田水文 站	6.6	廖家灣水文站	中性占 97%、鹼性占 3%
				6.19	琅琊站	
				6.20	南城水文站	
				11.21	婁家村水文站	
贛州市	4.3~7.5	12.7	勝前(二) 水文站	11.16	尋烏水背水文 站	酸性占 88%、鹼性占 3%、中性占 9%
萍鄉市	5.3~8.7	7.6、 7.12	蓮花站	7.12	湘東站	酸性占 7%、鹼性占 67%、中性占 26%
新餘市	6.3~7.6	6.21、 7.12	新餘站	8.25	神山村	中性占 17%、鹼性 83%
宜春市	6.3~7.7	8.16	上高水文 站	8.3	高安水文站	中性占 59%、鹼性占 41%

表2 主要離子組分分析

地區 占比 濃度	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	F <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
南昌	5.042	2.29	1.88	1.234	0.52	0.327	0.251	0.213	0.08	0.05
	42.4%	19.3%	15.8%	10.4%	4.4%	2.8%	2.1%	1.8%	0.7%	0.4%
上饒	1.296	0.902	1.885	0.455	0.056	0.241	0.224	0.115	0.314	0.240
	22.6%	15.7%	32.9%	7.9%	1.0%	4.2%	3.9%	2.0%	5.5%	4.2%
鷹潭市	0.896	0.765	1.611	0.408	0.054	0.368	0.162	0.105	0.381	0.234
	18.0%	15.4%	32.3%	8.2%	1.1%	7.4%	3.3%	2.1%	7.7%	4.7%
九江市	2.453	0.878	2.491	0.612	0.111	0.190	0.020	0.248	1.485	0.048
	28.7%	10.3%	29.2%	7.2%	1.3%	2.2%	0.2%	2.9%	17.4%	0.6%
吉安市	4.849	0.46	2.543	0.805	0.052	0.160	0.187	0.066	1.039	0.02
	47.6%	4.5%	25.0%	7.9%	0.5%	1.6%	1.8%	0.6%	10.2%	0.2%
景德鎮市	0.43	0.482	0.974	0.500	0.034	0.114	0.066	0.088	0.495	<0.04
	13.5%	15.1%	30.6%	15.7%	1.1%	3.6%	2.1%	2.8%	15.6%	0

撫州市	2.528	3.198	4.223	0.479	0.199	0.081	0.030	0.236	12.807	0.049
	10.6%	13.4%	17.7%	2.0%	0.8%	0.3%	0.1%	1.0%	53.7%	0.2%
贛州市	0.653	0.313	1.736	0.457	0.054	0.159	0.078	0.058	1.027	0.004
	14.4%	6.9%	38.2%	10.1%	1.2%	3.5%	1.7%	1.3%	22.6%	0.1%
萍鄉市	6.167	1.401	2.489	0.558	0.112	0.267	2.686	0.150	1.662	0.109
	39.5%	9.0%	16.0%	3.6%	0.7%	1.7%	17.2%	1.0%	10.7%	0.7%
新餘市	4.556	1.818	2.750	0.716	0.083	0.281	3.536	0.107	1.19	0.164
	30%	12.0%	18.1%	4.7%	0.5%	1.8%	23.3%	0.7%	7.8%	1.1%
宜春市	4.258	1.463	2.769	0.658	0.102	0.243	2.686	0.112	1.569	0.127
	30.4%	10.5%	19.8%	4.7%	0.7%	1.7%	19.2%	0.8%	11.2%	0.9%

表3 大氣降水與地表水相應污染物指標比對

地區	項目	pH	$\rho$ ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) /(mg.L <sup>-1</sup> )	$\rho$ ( $\text{F}^-$ ) /(mg.L <sup>-1</sup> )	$\rho$ ( $\text{Cl}^-$ ) /(mg.L <sup>-1</sup> )	$\rho$ ( $\text{NO}_3^-$ ) /(mg.L <sup>-1</sup> )
南昌	降水水質	6.2	1.88	0.52	2.29	0.08
	地表水質	7.2	8.786	0.205	6.77	2.649
	品質濃度比率 (%)	/	21.4	253.5	33.8	3.0
上饒市	降水水質	6.2	1.88	0.056	0.902	0.34
	地表水質	7.2	34.9	0.307	6.29	1.20
	品質濃度比率 (%)	/	5.39	18.24	14.34	28.33
鷹潭市	降水水質	6.2	1.61	0.05	0.76	0.38
	地表水質	7.1	20.1	0.43	7.86	1.25
	品質濃度比率 (%)	/	8.01	11.63	9.67	30.40
九江市	降水水質	6.7	2.491	0.111	0.878	1.485
	地表水質	7.6	24.28	0.217	13.49	5.35
	品質濃度比率 (%)	/	10.26	51.15	6.51	27.76
吉安市	降水水質	8.1	2.54	0.052	0.46	1.04
	地表水質	7.2	9.90	0.309	5.29	5.31
	品質濃度比率 (%)	/	25.7	16.8	8.70	19.6
景德鎮市	降水水質	6.2	0.97	0.03	0.48	0.50
	地表水質	7.6	37.89	0.21	4.47	0.69
	品質濃度比率 (%)	/	2.56	14.29	10.74	72.46
撫州市	降水水質	6.4	3.35	0.14	2.98	10.79
	地表水質	7.3	16.29	0.19	6.93	15.19
	品質濃度比率 (%)	/	20.6	73.7	43.0	71.0
贛州市	降水水質	5.8	1.74	0.054	0.313	1.03
	地表水質	7.4	7.92	0.358	7.96	3.76
	品質濃度比率 (%)	/	21.97	15.08	3.93	27.39

萍鄉市	降水水質	7.4	2.49	0.112	1.401	1.66
	地表水質	7.7	35.6	0.22	6.89	0.92
	品質濃度比率 (%)	/	7.0	50.9	20.3	180.4
新餘市	降水水質	7.2	2.75	0.083	1.818	1.19
	地表水質	7.6	27.9	0.36	11.95	1.18
	品質濃度比率 (%)	/	9.9	23.1	15.2	100.8
宜春市	降水水質	6.9	2.77	0.102	1.463	1.57
	地表水質	7.4	16.2	0.26	9.77	1.16
	品質濃度比率 (%)	/	17.1	39.2	15.0	135.3

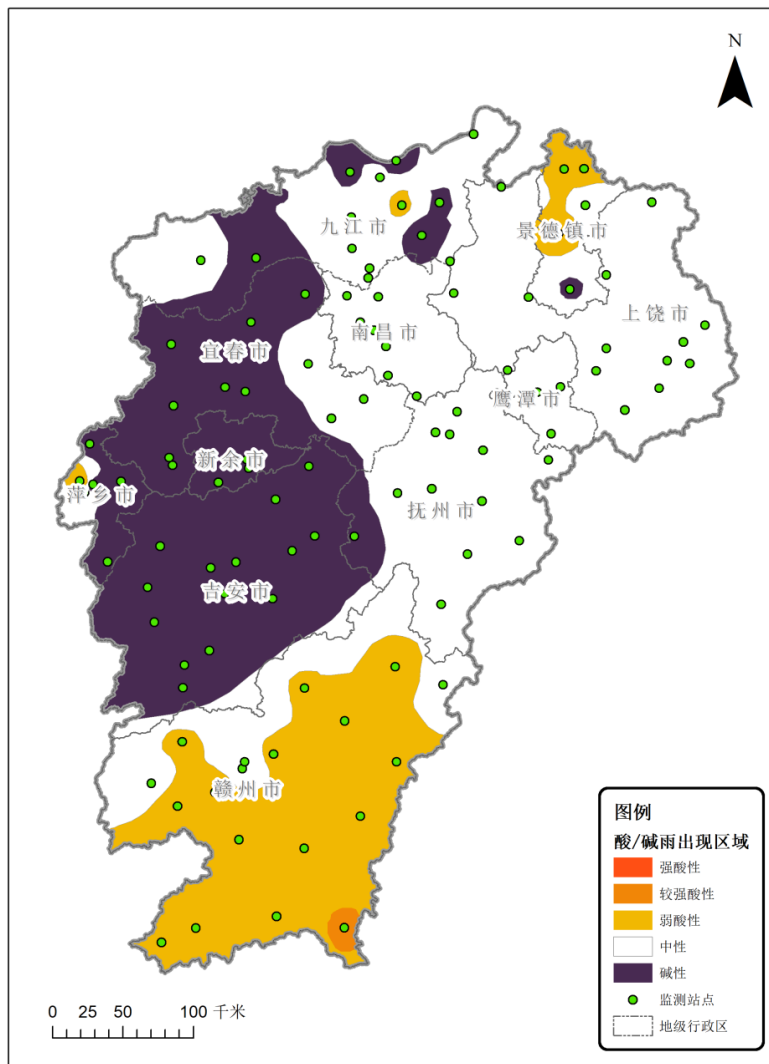


圖1 江西省酸雨分佈圖

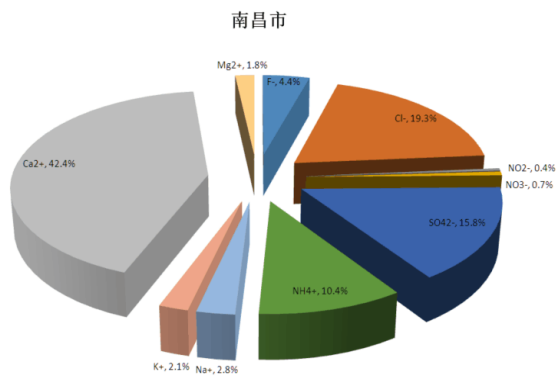


圖2 南昌市各離子濃度所占百分比

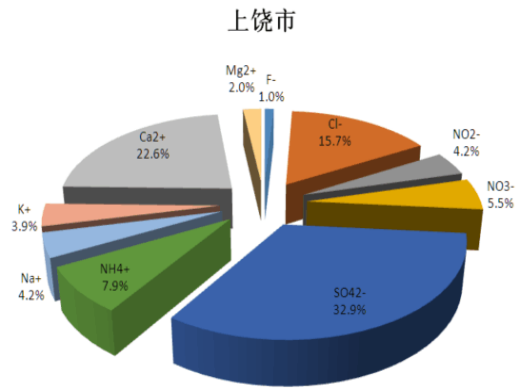


圖3 上饒市各離子濃度所占百分比

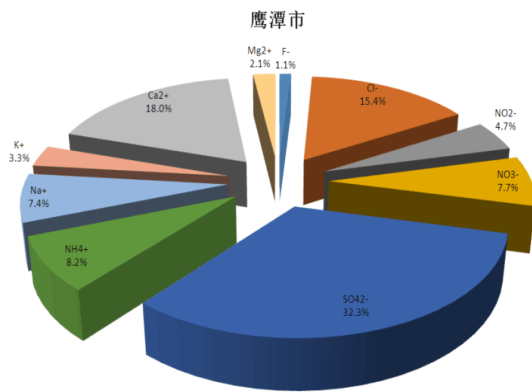


圖4 鷹潭市各離子濃度所占百分比

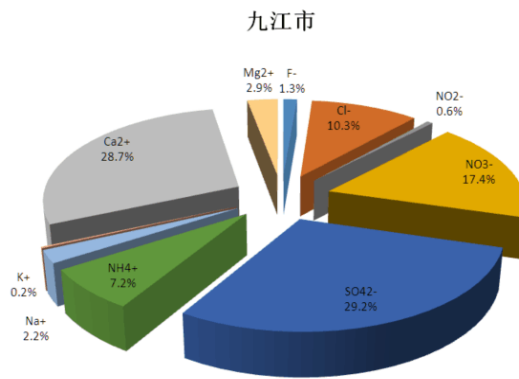


圖5 九江市各離子濃度所占百分比

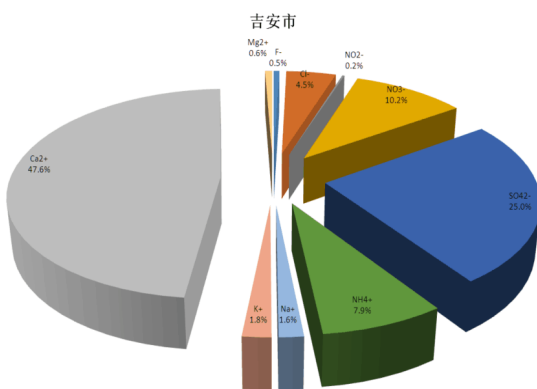


圖6 吉安市各離子濃度所占百分比

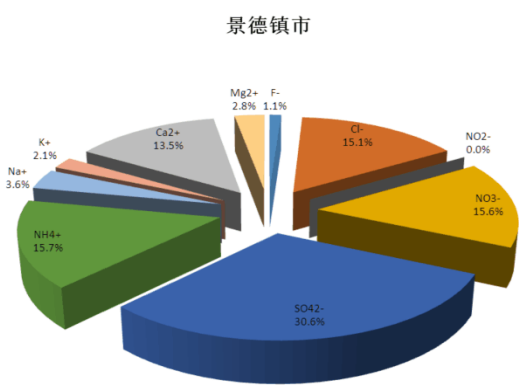


圖7 景德鎮市各離子濃度所占百分比

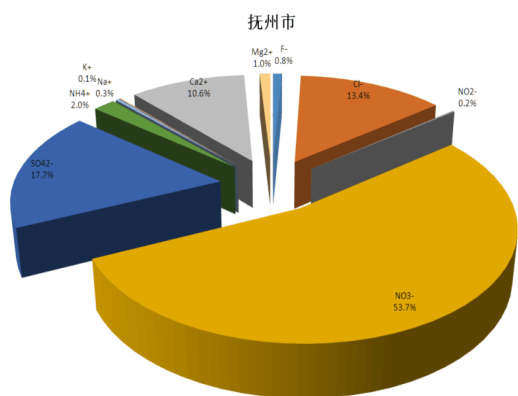


圖8 撫州市各離子濃度所占百分比

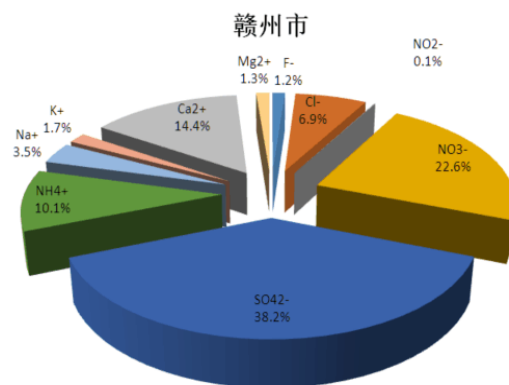


圖9 贛州市各離子濃度所占百分比

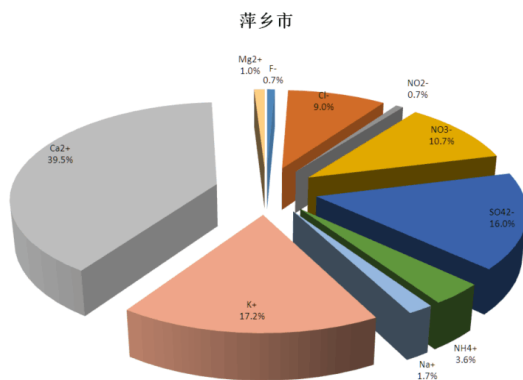


圖10 萍鄉市各離子濃度所占百分比

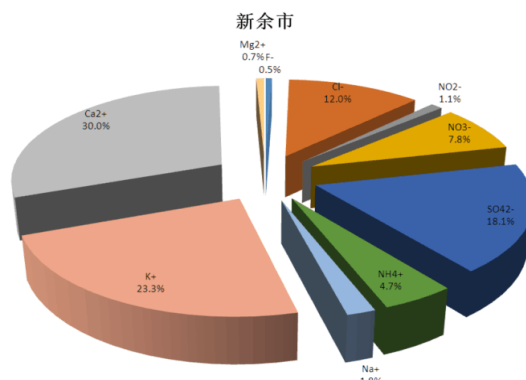


圖11 新餘市各離子濃度所占百分比

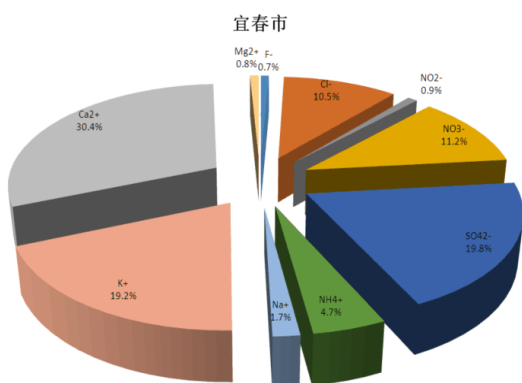


圖12 宜春市各離子濃度所占百分比

## 關於新時代加強農村供水安全工作的思考 ---以陝西省彬州市為例

張海濤<sup>1</sup>

### 摘要

農村供水安全是農村群眾最關心、最直接、最現實的利益問題。進入新時代後，隨著社會經濟發展，農村居民對於飲用水安全有了更高要求，但是農村供水與城市供水相比，仍存在供水規模偏小、供水保證率不高、淨水設施不齊備、管網漏損率較高、入戶率和水質合格率偏低、資訊化和專業管理水準較低等問題，農村居民日益增長的飲用水安全需要和城鄉供水發展不平衡不充分的矛盾越發凸顯。針對農村供水工程建設和運行維護難題，陝西省彬州市縣探索出了一條“嚴控品質，精心維護，統一管理，規範運營”的“農村供水城市化”新路子，使全市農村供水管理工作更加制度化、規範化和科學化，顯著提升了彬州市農村供水安全水準。在梳理總結彬州市“農村供水城市化”管理模式的成功經驗基礎上，本文從構建城鄉供水一體化格局，保障農村供水水質安全，提升農村供水專業化管理服務水準，提升資金保障水準，提高農村應急供水能力等方面提出了新時代加強農村供水安全工作的相關建議。

**關鍵字：**農村供水、安全、一體化、彬州市、思考

<sup>1</sup> 水利部 發展研究中心 高級工程師

## 壹、前言

農村供水安全是農村群眾最關心、最直接、最現實的利益問題。在新時代應進一步加強農村供水安全工作，逐步推進城鄉供水一體化，切實解決農村居民日益增長的飲用水安全需要和城鄉供水發展不平衡不充分的矛盾。彬州市位於西部缺水地區，其探索建立的“農村供水城市化”管理模式，有效解決了農村供水工程建設和運行維護難題，契合新時代農村供水發展思路，其成功經驗可在陝西省乃至全國複製和推廣。

## 貳、农村供水工程运行维护存在的主要问题

農村供水與城市供水相比，仍存在供水規模偏小、供水保證率不高、淨水設施不齊備、管網漏損率較高、入戶率和水質合格率偏低、資訊化和專業管理水準較低等問題。

### 一、部分供水工程建設標準偏低

農村供水工程規模小，點多、面廣、量大。截至 2015 年底，全國 100 萬處農村集中供水工程，90% 以上為小型單村供水工程，占供水人口 40% 以上<sup>[1]</sup>。其中部分農村供水工程設施和供水管網由於建設標準低，特別是 2004 年以前建設的 30 多萬處集中供水工程，取供水工程、淨水設施和管網老化嚴重，供水可靠性差，管網漏損率多在 20% 以上。<sup>[1]</sup>

### 二、供水水質存在安全隱患

農村有的供水工程缺乏必要的水處理設施設備，有的供水工程水處理工藝選擇不當，還有不少供水工程只能以高氟水、高砷水、高鐵錳水、苦咸水、甚至是污染水等作為供水水源，飲用水保證率和水質衛生指標合格率低，存在較嚴重的水質安全隱患。此外，部分村莊沒有排水設施和污水處理系統，生活廢污水隨意排

放，雨汙橫流，不僅地表水和淺層地下水水源受到了污染，深層地下水也面臨被污染的風險，水質存在安全隱患。<sup>[1]</sup>

### 三、農村供水管理服務水準不高

很多農村供水工程的運行維護只是聘請或指定臨時工，普遍年齡偏大，缺乏供水工程專業運營維護知識，難以實現定崗定編，較低的薪資水準又難以吸引年輕人和專業技術人員，致使農村供水管理和服務水準不高。

### 四、農村供水管理服務水準不高

部分農村水價形成機制不合理，執行水價低於運行成本且實收率低。部分農村供水抄表計費制度不完善，一些農村居民對水價政策不理解，不願交水費，供水抄表收費困難，加之缺乏維修養護基金，致使農村供水工程維護費用短缺，供水工程難以健康持續發揮效益，影響了農村飲水安全。

## 參、彬州市“农村供水城市化”管理模式

彬州市是陝西省咸陽市下轄的一個山區縣，地處渭北旱原西部溝壑區。彬州市結合農村供水管理工作實際，近年來逐步探索開創了一條“嚴控品質，精心維護，統一管理，規範運營”的“農村供水城市化”新路子，使全縣農村供水管理工作更加制度化、規範化和科學化，顯著提升了彬州市農村供水安全水準。

### 一、嚴控品質，確保供水工程建設達標

彬州市在建設農村供水工程時，主要採取三項措施確保供水工程建設達標：一是明確工程建設目標，提出工程品質要求，實行領導責任制和工程品質終身負責制。二是在招投標上，擇優選用資質合格、施工經驗豐富、信譽高的施工單位，層層把關，確保工程品質。三是對新建的農村供水工程，彬州市農村供水管理總站（以下簡稱“供水總站”）安排工程技

術人員駐守施工現場，進行技術指導和品質監督，確保品質達標。“十二五”期間，彬州市修建人飲工程 185 處，全部被上級水利工程質檢部門檢測評定為合格工程，其中 20% 的供水工程被評定為優良工程。

## 二、精心維護，確保供水工程良性運行

彬州市把做好農村供水設施日常維護作為確保農村供水安全的關鍵環節。一是定期檢查維護。彬州市明確要求各鎮供水管理站、水廠和基層水管員每月定期對轄區內的所有供水管網設備和構築物進行檢查，發現故障及時排除，同時在各村確定了義務報告員，做到供水設施小修不過時，大修不過夜，用戶維修隨叫隨到。

二是嚴肅追查問責。彬州市制定了農村供水設施維修管護相關規定和處罰措施，對供水管網設備破漏不及時維修，故障不及時排除的，按照不同情況，對當事水管員處以 10 元至 100 元不等的罰金，有效規範和促進了基層供水管理站、水廠及時做好日常供水管網和設備設施的維護管理工作。三是做好資金保障。彬州市制定了供水設施大修備用金制度，按照各基層供水管理站和水廠供水量，每立方米水提取 0.20 元的大修備用基金，統一存入供水總站專戶，專賬管理，專款專用。近年來，彬州市農村供水設備、設施完好率和安全供水率均保持在 95% 以上。

## 三、統一管理，提升供水管理能力

彬州市結合當地農村供用水實際情況，創新管理機制，強化統一管理。一是統一管理機構。1991 年 7 月，彬州市組建成立了全額事業編制的供水總站，隸屬彬州市水利局管理。同年，各鎮都組建成立了鎮供水管理站。2000 年，彬州市水利局將全縣 8 個鎮的供水管理站及 82 個水廠的人事、財務、運行管理納入供水總站統一管理，並為員工妥善辦理了養老統籌。二是統一管理辦法。彬州市於 2013 年制定了《彬

州市農村供水管理辦法》，明確規定了供水總站、鎮供水管理站和水廠的職責及任務。各鎮供水管理站依照《彬州市農村供水管理辦法》，結合各自經營管理實際，均制定了《鎮供水管理辦法》。三是統一聯網供水。“十二五”期間，彬州市打破原來一村一塔、村各自為用的供水格局，積極推進鎮域及跨鎮聯網供水，將統一調配水源、鎮域及跨鎮聯網供水納入供水工程規劃方案並付諸實施，有效提高了農村供水安全水準。四是統一核定水價。針對早期彬州市農村供水工程管網維修量大、供水成本高、鎮供水管理站和水廠虧損、各鎮供水價格不一等突出問題，彬州市經過充分論證，統一核定了全縣農村供水價格，有效扭轉了全縣農村供水價格不一、鎮供水管理站和水廠長期虧損的不利局面。

## 四、規範運營，提升供水服務水準

彬州市多措並舉，規範農村供水運營管理。一是建章立制。制定實施了農村供水“一檔兩賬三卡”和“四統一”管理制度，即制定使用者檔案、水廠台賬和用戶台賬，制定用戶交費卡、抄表人員通知卡和用戶明白卡，統一供水管理、供水價格、收費票據、收費時間，規範了基層供水管理站和水廠的供水運營管理，有效杜絕了“人情水”和“關係水”。二是聯網運營。彬州市在各鎮供水管理站設立了水費收費大廳，配備了電腦、印表機等辦公設施，與供水總站電腦聯網運行，使縣鎮兩級供水管理站實現了資訊網路化管理，水費收取實現了電腦製表打票。三是強化審計。彬州市嚴格農村供水財務收支審批，嚴格水費徵收，嚴格財務報表編制報送，做到賬務日清月結季公佈，賬款相符，賬物相符，票據合格，確保各項賬務真實、完整、可靠。按照“收支兩條線”管理辦法，嚴格財務內部審計，對違反財務管理和財經紀律的人和事，按照有關規定嚴肅處理。四是嚴格考核。每年初，彬州市水利局與



供水總站，供水總站與各鎮供水管理站，鎮供水管理站與水廠之間，逐級簽訂《目標責任書》或《供水合同書》，將全年供水任務和各項經濟指標分解落實到人，逐人逐月嚴格考核兌現獎懲。

#### 肆、对策建议

建議推廣彬州市“農村供水城市化”模式，進一步強化和完善農村供水工作，圍繞集中供水規模化、分散供水標準化、城鄉供水同質化、供水排水一體化和運行管理長效化進行農村供排水工程建設和管理，確保農村供水安全，為實現十九大提出的鄉村振興戰略，全面建設小康社會提供良好的飲用水安全保障。

##### 一、統籌規劃，構建城鄉供水一體化格局

農村供水要與城鎮化建設和新農村建設相協調，依據城鄉總體規劃，充分考慮當前供水需求和遠期集中供水發展趨勢，以城帶鄉，以鄉帶村，建立適宜的農村供水發展模式。做好農村供水工程統籌規劃和佈局，充分利用已有水源和城鄉供水設施，通過新改擴建水源和水廠、管網延伸及並網改造等工程建設，構建城鄉一體化、鎮村一體化的規模化供水格局。

##### 二、多措並舉，保障農村供水水質安全

通過採取各種有效措施，努力實現公共供水服務均等化，確保農民喝上與城市市民相同標準的飲用水。一是推進分類劃定水源保護區或保護範圍。對供水人口在一千人以上的集中式飲用水水源，科學編碼並劃定水源保護區；對供水人口小於 1000 人的飲用水水源劃定保護範圍。二是配備完善水處理和消毒設施。對於集中供水工程，配套完善水處理、消毒等設施，配備必要的水質檢測儀器；對不具備集中供水條件的分散供水農戶，根據水源水質配備小型淨化過濾消毒設施設備以及必要的家用淨水裝置。三是提升水質監測及檢測能力。強化

縣級水質檢測中心建設，“千噸萬人”以上集中供水廠建立水質化驗室，開展技術人員培訓，提升供水工程水質檢測設施裝備水準和檢測能力，對分散供水工程的水質監測實現全覆蓋。四是探索建立符合農村特點的供水排水一體化管理模式。借鑒城市供水排水一體化發展經驗，加快排水設施建設，探索建立農村供水排水一體化設施建設模式和運行管理模式。

##### 三、規範運營，提升農村供水專業化管理服務水準

建立符合新時代要求，符合農村供水工程特點，管理主體到位，責權利相統一的農村供水管理和運行機制，提升農村供水專業化服務水準。一是完善管理隊伍。針對農村供水工程基層管理人員老化、技術力量薄弱的現狀，積極探索實施“引得進、留得住、幹得好”的招人用人制度，吸引更多具有專業知識的年輕人進入農村供水一線開展供水服務工作。二是提高供水服務科技水準。推廣應用新材料、新工藝、新技術，探索開展自動化供水、自動化監測、自動化控制、自動化計量、遠端收費試點工作，提高農村供水服務的科技水準[2]。三是加強技術培訓。組織編制適用於不同類型農村供水工程的技術手冊，通過舉辦培訓班和電視媒體宣傳等多種方式，加強農村供水管理技術人員培訓和推行持證上崗。

##### 四、多元運作，提升資金保障水準

結合農村飲水工程建設、農村環境綜合整治、新農村建設等工作，多管道籌集農村供水工程建設維護資金。調整財政投入結構和投入方式，採取建立政府引導資金、政府投資的股權收益適度讓利、財政貼息、投資補助和安排前期經費等方式，充分發揮公共財政引導作用，鼓勵國內外企業、社會和民間資金投入農村供水工程，推動農村供水工程建設維護資金的社會化運作[2]。同時按照《農村飲水安全工程建設管理辦法》等規定，切實加強資金管理，落

實用電用地和稅收優惠等政策，推進農村供水機構、環境監測機構和維修養護基金建設，保障農村供水工程安全、穩定、長期發揮效益。

#### 五、未雨綢繆，提高農村應急供水能力

加強集中式供水工程的自動化監控能力建設，完善水質、水量、水壓等關鍵指標的線上監控和安全預警功能。以縣或鎮行政區域為基本單元，成立應急指揮機構，完善乾旱、水污染災害防範和應急供水預案，儲備應急供水物資與設備，配備搶修工具，依託農村供水專管機構、抗旱服務隊、規模化水廠的維修人員等組建專業隊伍，確保及時應對處置農村應急供水事故。

### 参考文献

- 1.楊繼富、李斌(2017),「我國農村供水發展現狀與發展思路探討」,中國水利,第7期,第23-25頁。
- 2.張明君、王玉太、趙玉慶,等(2006),「農村供水城市化 城鄉供水一體化」,中國水利,第1期,第50-52頁。
- 3.閔冠宇、徐佳(2013),「我國農村供水未來發展戰略初探」,中國農村水利水電,第4期,第1-4頁。
- 4.時元智、張學明、施海祥,等(2017),「雲南省農村供水管理模式分析」,中國農村水利水電,第5期,第211-214頁。
- 5.胡孟、鄔曉梅、李曉琴,等(2015),「我國農村供水特性與形勢辨析及應對措施建議」,中國水利,第11期,第3-5頁。

## 淡水河河口與近海水舌擴散之模式診斷與探討

柳鴻明<sup>1</sup>、柳文成<sup>2,3</sup>

### 摘要

河口是一個淡水與海水交互作用之區域，亦是聯繫河川與海洋之間的過度水域，河川中的污染物質會經由河口流入海洋，透過海洋的自淨能力將污染物質淨化，然而隨著人口密度與都市化程度上升，排入河川的民生廢水與工業廢水劇烈增加，必定會影響到河口附近的水生環境與生態。因此，若能瞭解河口與近海水體交換區域的水理變化情形，以及水體中物質的傳輸與分佈，對於未來在保護河口生態環境與管理將會有很大的幫助，其中水舌擴散是河口與近海區域最容易觀測到的現象。

淡水河是臺灣北部最重要的感潮河川，沿岸人口眾多且工商業發達，造成河川污染情形也最為嚴重。為瞭解淡水河河口與近海之水理情形、水中物質的污染傳輸與分佈，本研究首先蒐集淡水河與其近海之地形、流量、水位、流速與鹽分資料，以三維數值模式(SCHISM)建置淡水河河口與其近海之數值模型，SCHISM 模式係採用非結構性數值網格，可精確地模擬複雜之淡水河河岸與其近海海岸線。本研究使用 2017 年之實測水位、實測流速與實測鹽分資料，進行水理與鹽分傳輸模式的校驗證，結果顯示模式模擬結果與實測數據相當吻合，顯示 SCHISM 模式能正確模擬淡水河河口之水位、流速變化與鹽分分佈，再者應用驗證後之 SCHISM 模式於探討 2012 年蘇拉颱風事件之淡水流量對淡水河河口與近海水舌擴散之影響。

**關鍵字：**鹽分、水舌擴散、淡水河河口與近海、SCHISM

<sup>1</sup> 聯合大學土木與防災工程學系(所)研究助理

<sup>2</sup> 聯合大學土木與防災工程學系(所)特聘教授

<sup>3</sup> 聯合大學副校長暨研發長

## 壹、前言

### 一、研究動機與目的

河口是一個淡水與海水交互作用之區域，亦是聯繫河川與海洋之間的過度水域，河川中的污染物質會經由河口流入海洋，透過海洋的自淨能力將污染物質淨化，然而隨著人口密度與都市化程度上升，排入河川的民生廢水與工業廢水劇烈增加，必定會影響到河口附近的水生環境與生態。

淡水河是臺灣北部最重要的感潮河川，沿岸人口眾多且工商業發達，造成河川污染情形也最為嚴重。因此，瞭解淡水河河口與近海之水理情形、水中物質的污染傳輸與分佈，對於後續在改善與保護淡水河河口生態環境、河岸工程的設計規劃與水資源的管理將會有很大的幫助，其中水舌擴散是河口與近海區域最容易觀測到的現象，而本研究將以鹽分之水舌現象瞭解淡水河河口與近海之間的交互作用，以及探討 2012 年蘇拉颱風事件之淡水流量對淡水河河口與近海水舌擴散之影響。

### 二、文獻回顧

對於河口於近岸水舌擴散之相關研究方面，例如 Liu et al. (2008)使用三維數值模式 UnTRIM 模擬淡水河河口水理情形，並且探討風剪應力與流量大小對水舌現象影響。Kamidis et al. (2011)應用三維數值模式 ELCOM 模擬希臘 Nestos River 之水舌情形，結果顯示水舌擴散方向與擴散程度主要受風剪應力的控制，而淡水流量的大小則影響水舌往外海擴散之距離。Fissel et al. (2017)使用三維數值模式 Delft3D 進行加拿大納斯河河口之水理情形模擬，模擬結果顯示 Delft3D 模式可正確模擬納斯河河口複雜的水理情形，且能模擬出歷史懸浮泥沙水舌之分佈。Lee et al. (2017)採用 ROMS 模式探討颱風對於長江水舌擴散延伸之影響，接果顯示颱風引致強烈的垂直混合導致長江口水舌的鹽

分分布並延遲長江水舌擴散延伸約 20 天以上。Vallaes et al. (2018)使用三維數值模式 SLIM 3D 模擬位於北美太平洋西北地區之哥倫比亞河河口的水理情形，其模擬結果顯示 SLIM 3D 可正確模擬哥倫比亞河河口實際之水舌情形與鹽分入侵情形。Du and Park (2019)應用 SCHISM 模式模擬 2017 年颶風哈維對德克薩斯州加爾維斯頓灣之影響，探討於極端事件後水中鹽分之恢復情形與事件期間之水舌變化。

### 貳、研究區域概述與資料蒐集

本研究之研究區域為位於台灣北部的淡水河流域，淡水河流域發源於品田山及大霸尖山之北麓，而標高 3,529 m 的品田山，位於新竹縣及台中縣的交界，係台灣河川長度第三長之河川。淡水河流域共有三大支流，最南邊的為主流大漢溪，係淡水河第一大支流，中間的為支流新店溪，大漢溪與新店溪匯流於台北市的江子翠，北邊的為支流基隆河，於台北盆地內匯聚成一大河，稱之為淡水河，在關渡隘口向西北，經由淡水注入台灣海峽，如圖 1 所示。

本研究使用之地形資料分別為科技部海洋學門資料庫提供淡水河近海地形資料與經濟部水利署第十河川局提供之實測淡水河河道斷面資料；水位資料與流量資料是由經濟部水利署第十河川局所提供，做為數值模式輸入設定與輸出結果驗證之依據，水位資料分別為河口、台北橋、新海橋、中正橋與百齡橋；流量資料是蒐集在數值模式設定之上游邊界流量，分別為大漢溪的城林橋、新店溪的秀朗橋與基隆河的江北橋附近的流量測站資料。本研究鹽分資料則是 2017 年 6 月 24 日在淡水河流域中採取水樣並分析之實測鹽分數據，採樣水樣之位置分別為關渡橋、台北橋、新海橋、中正橋與百齡橋。

## 參、模式理論與建置

### 一、模式理論

本研究係使用 Zhang 等人所發展之三維數值模式 Semi-Implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model (SCHISM) (Zhang et al., 2016a; 2016b)，進行模擬淡水河河口與近海之水位、流速變化與鹽分分佈，而模式因使用非結構性網格離散模擬區域，故可精確地模擬複雜之淡水河河岸與其近海海岸地形，使得模擬區域與實際區域之間的誤差降到最小，控制方程式如下：

#### 1. 動量方程式：

$$\frac{D\bar{u}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) - g \nabla \eta + \bar{F}$$

$$\bar{F} = -f \bar{k} \times \bar{u} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \nabla \rho d\zeta - \frac{1}{\rho_0} \nabla p_A + \alpha g \nabla \psi + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{u}) \quad (1)$$

#### 2. 連續方程式：

$$\nabla \cdot \bar{u} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

將式(2)垂直積分液面到底部的深度可得自由液面方程式：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} \bar{u} dz = 0 \quad (3)$$

#### 3. 鹽分傳輸方程式：

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (4)$$

#### 4. 狀態方程式：

$$\rho = \rho_0(p, S) \quad (5)$$

### 二、模式建置

模擬區域係使用實測淡水河河道斷面資料與近海之地形資料為依據，應用 SMS (Surface Water Modeling System) 網格生成模組進行數值網格之建置，在水平方向將研究區域劃分成 7,948 個非結構性數值網格，如圖 2 所示。最後設定上游開放邊界流量與外海開放邊界潮位，即可進行 SCHISM 模式之模擬。本研究於 SCHISM 模式中，垂直方向設定為 Sigma 座標，將水體平均分為 10 層，模擬時距為 120 秒計算一次。

## 肆、模式驗證與應用

### 一、水位驗證

本研究於水位驗證部分，是以分潮的振幅與相位角方式進行驗證，數值模式的驗證時間為 2017 年 6 月 22 日至 2017 年 7 月 2 日之實測水位資料進行水位驗證，結果顯示振幅部分之平均絕對百分誤差為 7.1 % 至 51.7 %，均方根誤差為 0.022 m 至 0.082 m，Skill 指標為 0.986 至 0.999，評價均為 Excellent，相關係數為 0.998 至 1.000，圖 3 為各測站分潮之實測振幅與模擬振幅比較，圖中顯示數值模式能準確地模擬出淡水河水位均由 M<sub>2</sub> 分潮所主導之情形；相位角部分之平均絕對百分誤差為 4.8 % 至 23.8 %，均方根誤差為 6.1° 至 18.0°，Skill 指標為 0.974 至 0.999，評價均為 Excellent，相關係數為 0.969 至 0.999，圖 4 為各測站分潮之實測相位角與模擬相位角比較，圖中顯示各測站分潮實測相位角與模擬相位角尚稱吻合。

### 二、流速驗證

本研究於流速驗證部分，係使用 2017 年 6 月 24 日之實測流速進行驗證，其結果顯示平均絕對百分誤差為 -9.6 % 至 12.0 %，均方根誤差為 0.050 m/s 至 0.283 m/s，Skill 指標為 0.869 至 0.988，評價均為 Excellent，相關係數為 0.845 至 0.958，圖 5 為各測站實測流速與模擬流速之比較，圖中顯示實測流速與模擬流速尚稱吻合。

### 三、鹽分驗證

本研究於鹽分驗證部分，係使用 2017 年 6 月 24 日之實測鹽分進行驗證，其結果顯示平均絕對百分誤差為 2.1 % 至 114.8 %，均方根誤差為 0.002 ppt 至 5.528 ppt，Skill 指標為 0.333 至 0.970，評價為 Good 至 Excellent，相關係數為 0.779 至 0.964。圖 6 為各測站實測鹽分(平均值加減一個標準偏差)與模擬表底層鹽分之比較，圖中顯示實測鹽分與模擬鹽分之趨勢大致吻合。

#### 四、模式應用與討論

在經過模式驗證後，顯示 SCHISM 模式能正確模擬淡水河河口之水位、流速變化與鹽分分佈。本研究將驗證後之 SCHISM 模式應用於探討淡水河河口鹽分恢復時間與水舌擴散範圍受颱風事件淡水流量之影響。使用之颱風事件為 2012 年蘇拉颱風事件，其淡水流量峰值分別為大漢溪 1803.97 m<sup>3</sup>/s、新店溪 3249.65 m<sup>3</sup>/s 與基隆河 755.08 m<sup>3</sup>/s；常流量設定則分別固定為大漢溪 4.65 m<sup>3</sup>/s、新店溪 18.52 m<sup>3</sup>/s 與基隆河 2.12 m<sup>3</sup>/s。

圖 7 為有無蘇拉颱風事件在淡水河河口之模擬表層鹽分比較，圖中顯示淡水河河口鹽分濃度會隨著淡水流量的增大而減少，甚至接近 0 ppt，且經過比較後可得知淡水河河口之鹽分恢復時間約為 183 小時(7 天 15 小時)。Du and Park (2019)探討 Galveston 海灣於颱風作用下之平均鹽分恢復時間達 2 個月，相較於美國德州的 Galveston 海灣，台灣的淡水河口水舌擴散之恢復時間僅半個月相去甚多。

圖 8 為蘇拉颱風事件期間不同淡水流量下之模擬表層鹽分分佈圖，由圖中可得知當淡水流量變大時，淡水河河口之水舌擴散距離與範圍增加，且往外海擴散，而當淡水流量變小時，其水舌擴散距離與範圍均減少。此結果與 List et al. (2014), Hong et al. (2016), Lee et al. (2017), 及 Du and Park (2019)之模擬結果相似，淡水流量注入的多寡會嚴重影響到水舌擴散的距離與擴散區域的大小。

許多文獻指出 (Zheng et al., 2014, Androulidakis et al., 2015, Zhao et al. 2016, Gong et al., 2019)，風場亦會影響水舌擴散的上湧 (upwelling) 及下湧 (downwelling)。於未來的研究中將應用已發展的數值模式探討風場對於淡水河近海水舌擴散可能導致的上湧及下湧作用。

#### 伍、結論

本研究應用非結構網格之三維數值模式 SCHISM 建置淡水河河口與其近海之數值模型，進行模擬淡水河河口之水位、流速變化與鹽分分佈，可獲致以下幾點結論：

1. 本研究使用三維數值模式 SCHISM，模擬淡水河 2017 年 6 月 22 日至 2017 年 7 月 2 日之時序水位，並以分潮振幅與相位角方式進行驗證，分潮振幅部分之平均絕對百分誤差為 7.1 % 至 51.7 %，均方根誤差為 0.022 m 至 0.082 m，Skill 指標為 0.986 至 0.999，評價均為 Excellent，相關係數為 0.998 至 1.000；分潮相位角部分之平均絕對百分誤差為 4.8 % 至 23.8 %，均方根誤差為 6.1° 至 18.0°，Skill 指標為 0.974 至 0.999，評價均為 Excellent，相關係數為 0.969 至 0.999，顯示 SCHISM 模式能正確模擬淡水河河口之水位變化。
2. 模擬淡水河 2017 年 6 月 24 日之流速變化，平均絕對百分誤差為 -9.6 % 至 12.0 %，均方根誤差為 0.050 m/s 至 0.283 m/s，Skill 指標為 0.869 至 0.988，評價均為 Excellent，相關係數為 0.845 至 0.958，顯示 SCHISM 模式能正確模擬淡水河河口之流速變化。
3. 模擬淡水河 2017 年 6 月 24 日之鹽分變化，平均絕對百分誤差為 2.1 % 至 114.8 %，均方根誤差為 0.002 ppt 至 5.528 ppt，Skill 指標為 0.333 至 0.970，評價為 Good 至 Excellent，相關係數為 0.779 至 0.964，顯示 SCHISM 模式能正確模擬淡水河河口之鹽分變化。
4. 模式應用於受到颱風事件淡水流量之影響，初步瞭解淡水河河口之鹽分恢復時間，選定 2012 年蘇拉颱風事件進行模擬，模擬結果顯示淡水河河口在經歷蘇拉颱風後之鹽分恢復時間約為 183 小時(7 天 15 小時)。
5. 探討淡水河河口之水舌現象受到蘇拉颱風期間不同淡水流量的影響，可得知淡水流量變大時，淡水河河口之水舌擴散距離與範圍

會增加，且往外海去擴散；淡水流量變小時，其水舌擴散距離與範圍均會減少。

### 參考文獻

1. Androulidakis, Y. S., Kourafalou, V. H., Schiller, R. V. (2015), "Process studies on the evolution of the Mississippi River plume: Impact of topography, wind and discharge conditions", *Continental Shelf Research*, 107, 33-49.
2. Du, J., Park, K. (2019), "Estuarine salinity recovery from an extreme precipitation event: Hurricane Harvey in Galveston Bay", *Science of The Total Environment*, 670, 1049-1059.
3. Fissel, D. B., Lin, Y., Scoon, A., Lim, J., Brown, L., Clouston, R. (2017), "The variability of the sediment plume and ocean circulation features of the Nass River Estuary, British Columbia", *Satellite Oceanography and Meteorology*, 2, 2, 316.
4. Gong, W., Chen, L., Chen, Z., Zhang, H. (2019), "Plume-to-plume interaction in the Pear River Delta in winter", *Ocean and coastal Management*, 175, 110-126.
5. Hong, J. S., Moon, J. H., Lee, J. H., Pang, I. C. (2016), "Modeling the largest inflow of Changjiang freshwater into the Yellow Sea in 2012 with particle-tracking experiment", *Ocean Science Journal*, 51(4), 549-562.
6. Kamidis, N., Sylaios, G., Tsihrintzis, V. A. (2011), "Modeling the Nestos River plume dynamics using ELCOM", *Desalination and Water Treatment*, 33(1-3), 22-35.
7. Lee, J. H., Moon, I. J., Moon, J. H., Kim, S. H., Jeong, Y. Y., Koo, J. H. (2017), "Impact of typhoons on the Changjiang plume extension in the Yellow and East China Seas", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 4962-4973.
8. Liu, W. C., Chen, W. B., Cheng, R. T., Hsu, M. H. (2008), "Modelling the impact of wind stress and river discharge on Danshuei River plume", *Applied Mathematical Modelling*, 32(7), 1255-1280.
9. Liste, M., Grifoll, M., Monbaliu, J. (2014), "River plume dispersion in response to flash flood events. Application to the Catalan shelf", *Continental Shelf Research*, 87, 96-108.
10. Vallaeys, V., Kärnä, T., Delandmeter, P., Lambrechts, J., Baptista, A. M., Deleersnijder, E., Hanert, E. (2018), "Discontinuous Galerkin modeling of the Columbia River's coupled estuary-plume dynamics", *Ocean Modelling*, 124, 111-124.
11. Zhang, Y. L., Stanev, E. V., Grashorn, S. (2016a), "Unstructured-grid model for the North Sea and Baltic Sea: Validation against observations", *Ocean Modelling*, 97, 91-108.
12. Zhang, Y. L., Ye, F., Stanev, E. V., Grashorn, S. (2016b), "Seamless cross-scale modeling with SCHISM", *Ocean Modelling*, 102, 64-81.
13. Zhao, J., Gong, W., Shen, J. (2018), "The effect of wind on the dispersion of a tropical small river plume", *Frontiers of Earth Science*, 12(1), 170-190.
14. Zheng, S., Guan, W., Cai, S., Wei, Z., Huang, D. (2014), "A model study of the effects of river discharge and interannual variation of winds on the plume front in winter in Pear River Estuary", *Continental*

Shelf Research, 73, 31-40.

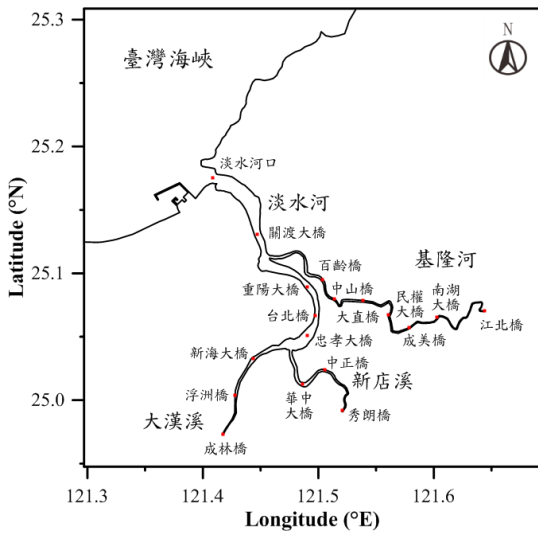


圖 1 淡水河流域圖

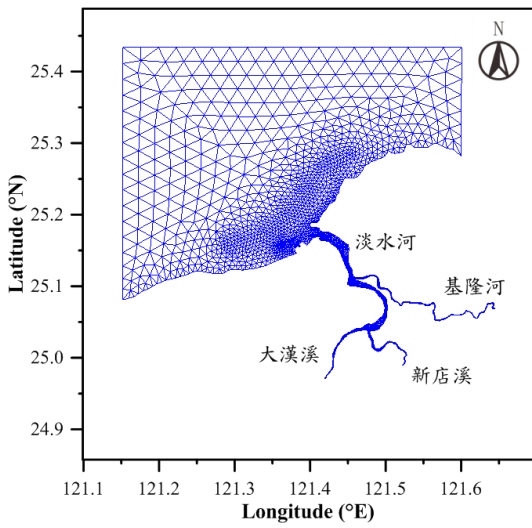


圖 2 淡水河流域網格圖

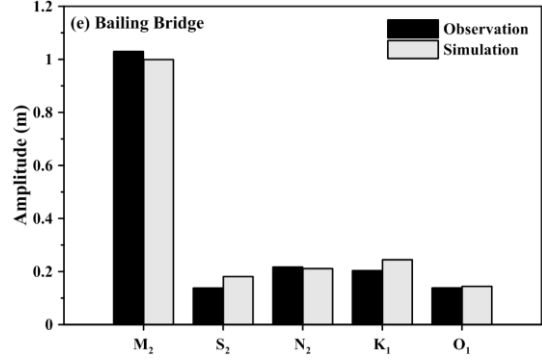
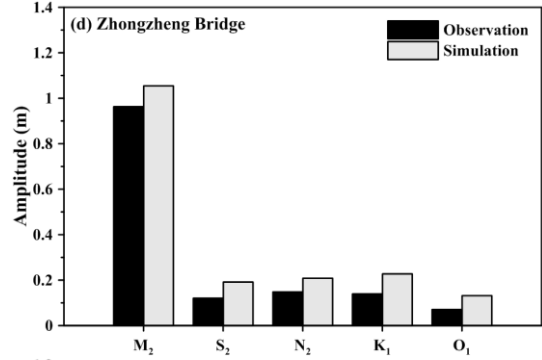
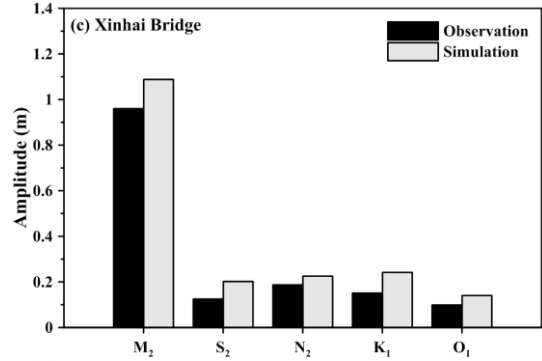
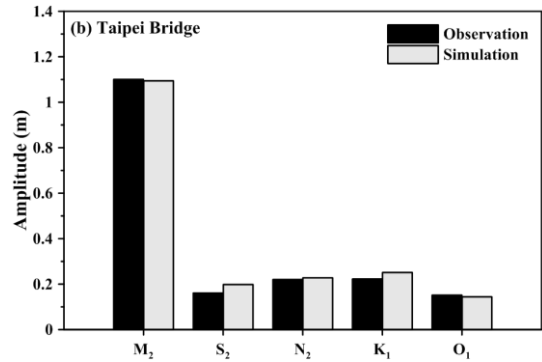
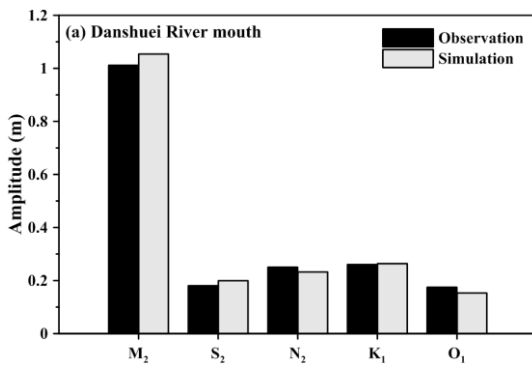


圖 3 各測站實測與模擬之振幅比較(a)河口(b)台北橋(c)新海橋(d)中正橋(e)百齡橋



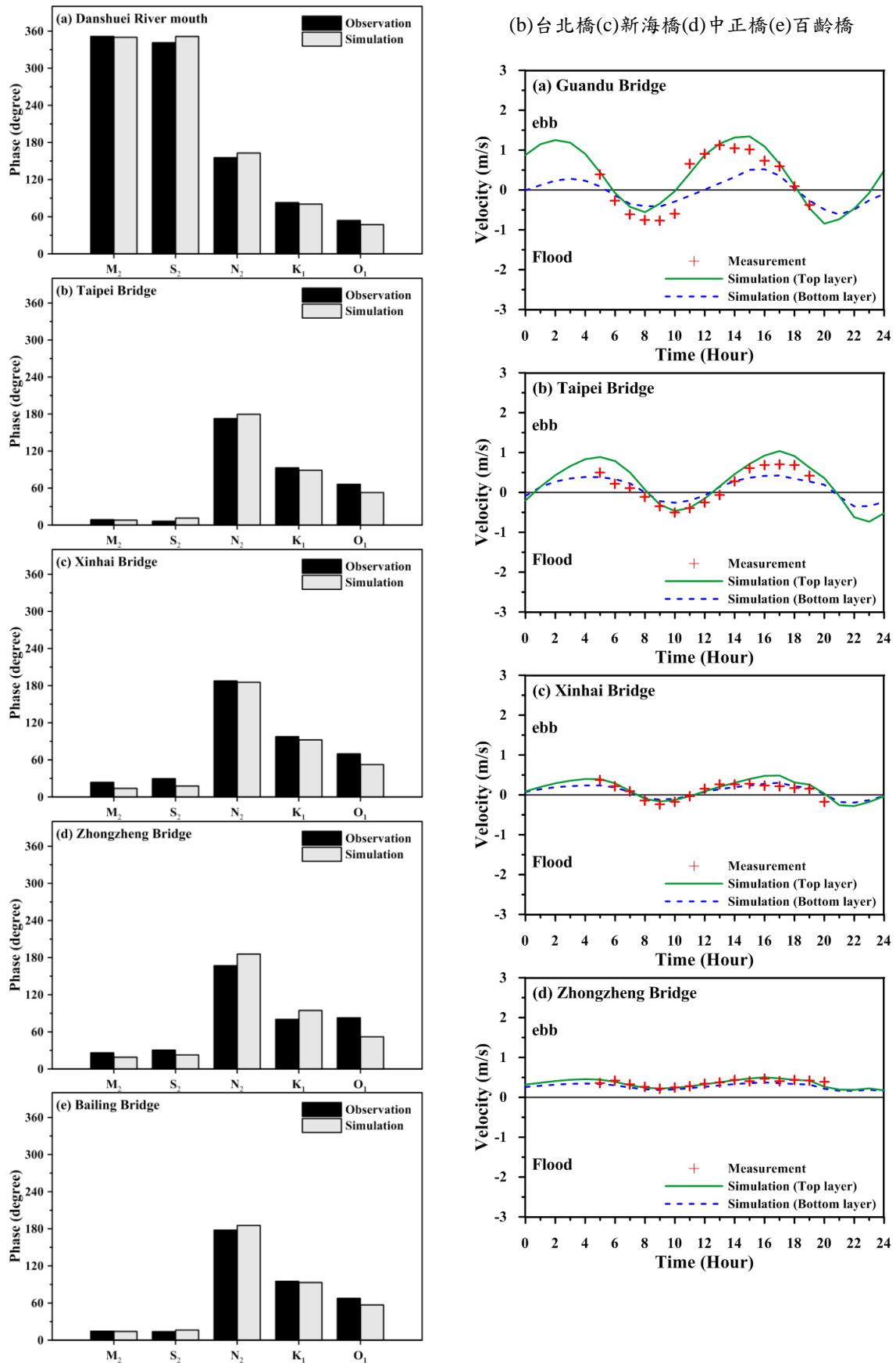


圖 4 各測站實測與模擬之相位角比較(a)河口

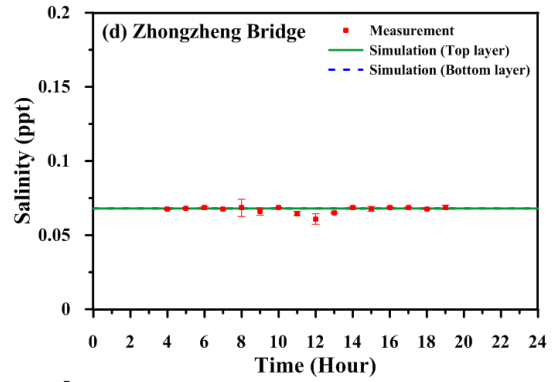
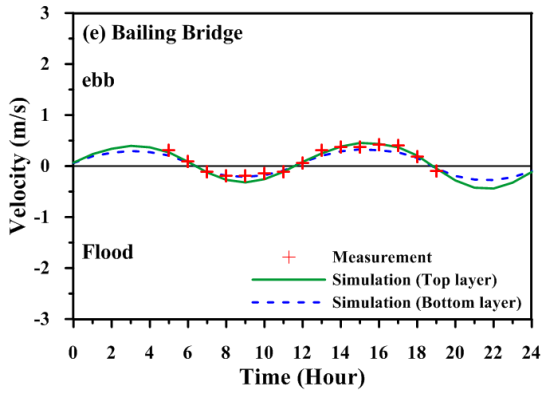


圖 5 各測站實測與模擬之流速比較(a)關渡橋 (b)台北橋(c)新海橋(d)中正橋(e)百齡橋

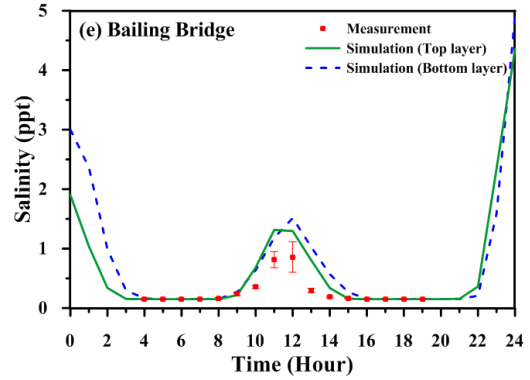
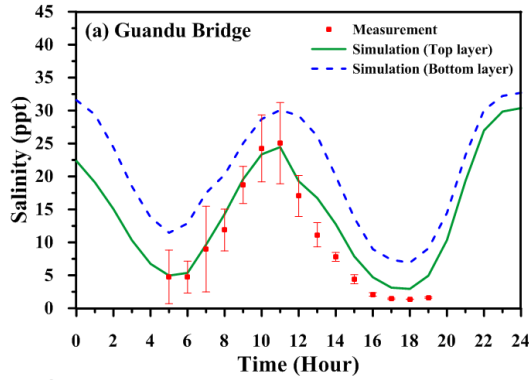


圖 6 各測站實測與模擬之鹽分比較(a)關渡橋 (b)台北橋(c)新海橋(d)中正橋(e)百齡橋

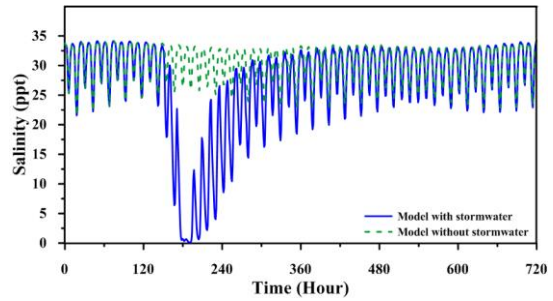
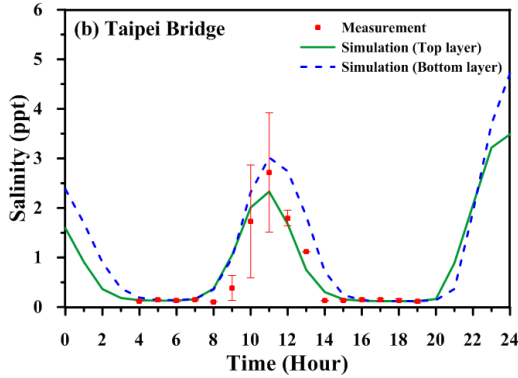
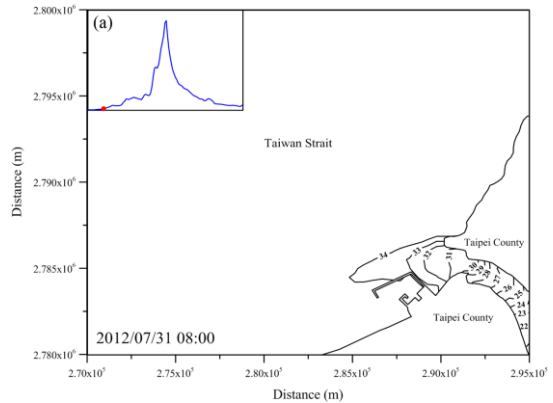
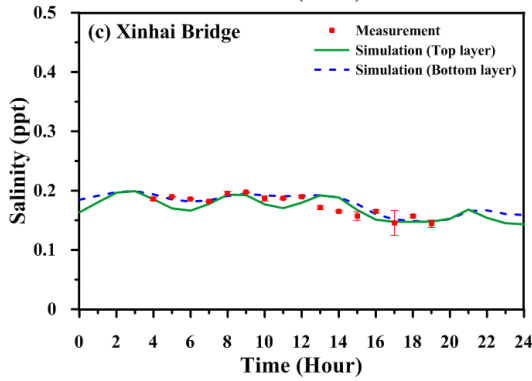


圖 7 有無蘇拉颱風事件模擬鹽分比較(表層)



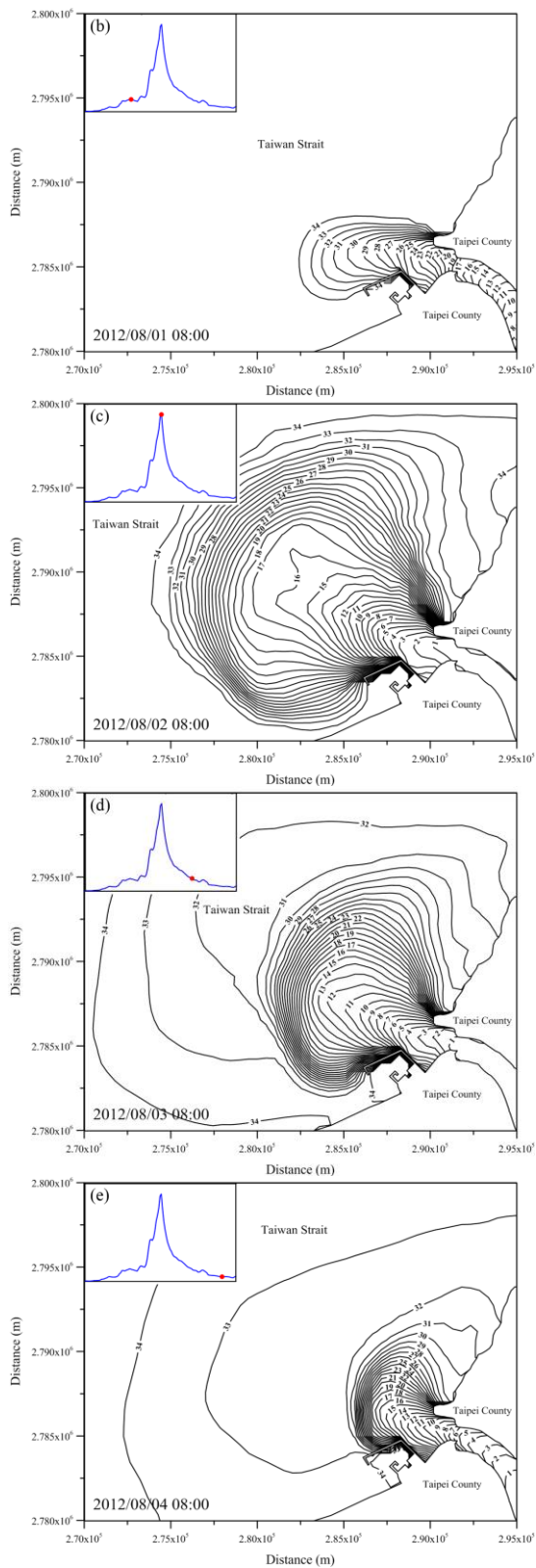


圖 8 2012 年蘇拉颱風事件之模擬鹽分分佈圖  
(表層)(a)07/31 08:00 (b)08/01 08:00 (c)08/02  
08:00 (d)08/03 08:00 (e)08/04 08:00

# 大安溪、大甲溪及濁水溪水系之水資源風險管理計畫

陳弘由<sup>1</sup>、林志堅<sup>2</sup>、董士龍<sup>3</sup>

## 摘要

氣候變遷增加極端事件發生頻率，旱、澇等自然災害頻傳，從臺灣乾旱次數統計資料可看出，近年來豐水期(5月~10月)的降雨量變多，枯水期(11~4月)的降雨量變少，豐水期與枯水期的降雨差距明顯拉大，增加了水資源運用管理的困難及影響供水系統穩定性之風險。故進一步分析氣候變遷對大安溪、大甲溪及濁水溪水系水資源供水系統的衝擊及重新擬定供需間調配的能力，掌握雨水、河川水、水庫水及地下水之間受到氣候變遷的影響，評估區域供水系統之風險，並藉過去既有區域供水潛能評估方案，尋求各項新增水資源方案的可能性與適用性。在評估風險係依據風險值 = 影響程度 × 發生機率進行計算，各項風險因子訂定發生機率進行量化，影響程度之計算參考自來水公司「乾旱時期停止及限制供水執行標準與措施作業要點」，當水源無法供應充足水量時，係採分階段限水方式因應，分別對應供水缺口小於 2~5%、5~10%、10%以上之水量，分析期程則配合行政院最新穩定產業供水策略內容，分為短期(至 2019 年底)、中長期(2020~2031 年)及因應氣候變遷(2032~2039 年)三個目標年。根據大安溪、大甲溪及濁水溪水系風險結果，研擬水資源有效運用策略及風險因應策略，掌握整體水資源系統之承載能力與風險，進而提升區域供水系統之穩定性，以做為未來大臺中及彰雲投地區推動水資源相關計畫之參考依據。

**關鍵字：**風險管理、水資源、大安溪、大甲溪、濁水溪

<sup>1</sup>經濟部水利署中區水資源局 局長

<sup>2</sup>經濟部水利署中區水資源局 副工程師

<sup>3</sup>經濟部水利署中區水資源局 正工程師兼課長

## 壹、前言

氣候變遷增加極端事件發生頻率，旱、澇等自然災害頻傳，從臺灣乾旱次數統計資料可看出，近年來豐水期(5月~10月)的降雨量變多，枯水期(11~4月)的降雨量變少，豐水期與枯水期的降雨差距明顯拉大，增加了水資源運用管理的困難及影響供水系統穩定性之風險。預估未來此「豐越豐、枯越枯」之降雨趨勢將更為明顯，且氣候變遷具有時間與空間的高度不確定性，是一持續累積的過程，故宜將氣候變遷影響及未來水文趨勢納入考量，以整合現有水資源利用、營運與風險管理，結合長期設定之調適策略，方可提供穩定水源，提高人民生活品質及創造優質之產業發展環境。

為分析氣候變遷對大安溪、大甲溪及濁水溪水系水資源供水系統的衝擊及重新擬定供需間調配的能力，建立水資源風險評估機制，將設施風險、系統風險及供水風險同時納入考量且進行風險管理，研擬氣候變遷下水資源有效運用及風險因應策略，以達掌握整體水資源系統之承載能力與風險，進而提升區域供水系統穩定性，做為未來大臺中及彰雲投地區推動水資源相關計畫之參考依據。

## 貳、水資源運用

### 一、大安溪

大安溪流域主要水資源設施為士林攔河堰與鯉魚潭水庫，鯉魚潭水庫位於支流景山溪，係一離槽水庫，主要目標供應苗栗縣及大臺中地區的公共給水、工業用水，同時具有觀光、灌溉、防洪、發電等四大功能。為補充本身水源之不足，於2002年起自大安溪士林攔河堰越域引水，以增加鯉魚潭水庫之蓄水量。大安溪鯉魚潭水庫現階段與大甲溪流域之石岡壩聯合運用，以穩定供應苗栗地區及大臺中地區之民生用水，供水架構如圖1所示。

### 二、大甲溪

大甲溪流域內主要之水源調節設施為德基水庫與石岡壩。德基水庫至石岡壩之間，台電公司設有一系列水力發電廠，因應其發電需求設有青山壩、谷關壩、天輪壩、馬鞍壩、馬鞍後池堰等調整池，其主要功用在於調整水量確保各電廠可穩定發電。石岡壩攔蓄大甲溪上游電廠發電尾水及馬鞍壩以下之未控制流量，亦屬大甲溪水源運用樞紐之一，為大臺中地區公共給水之主要來源。

目前由石岡壩取水工取水後，透過南幹渠抽取原水進行處理，每日約提供60~80萬立方公尺之水量送至豐原給水廠，該給水廠之設計淨水能力為每日100萬立方公尺，目前實際最大處理能力約85萬立方公尺。

### 三、濁水溪

濁水溪流域水源主要供應南投、彰化及雲林等地區，主要水源設施有集集攔河堰、霧社水庫、日月潭水庫以及桶頭攔河堰與湖山水庫，現階段水源調配以集集攔河堰為樞紐，統籌調配上游河川流量及臺電公司霧社及日月潭水庫發電系統放水量。另湖山水庫，已於2016年7月完工，將與集集攔河堰聯合運用，以供應雲林地區公共用水之需，供水架構如圖2所示。

## 參、歷史重大供水異常事件

透過統整研析過往曾經發生之重大供水異常事件，有助於進行各種致災風險因子的辨識，對過去未曾發生之風險因子可暫予排除(或給予相對極低發生機率)，而曾經發生災害事件之風險因子則應予納入評估考量。中部地區近20年水資源設施重大供水異常事件彙整如下。

### 一、921大地震

1999年9月21日凌晨中部地區發生規模7.3之強烈大地震，該次地震造成石岡壩受損嚴重，蓄水調節功能喪失，致使大臺中地區面臨

缺水困境。

要降低類似災害造成的缺水風險，除水利設施於規劃時(尤於水庫及攔河堰等重要設施)，應盡量避開可能之斷層帶，以減輕地震對水利設施的損害外，未來在面對氣候變遷的強降雨挑戰，宜加速強化維生供水系統之調度、相互支援、緊急備用等，如加速辦理跨區的聯合調度支援管線、地表地下水的備援機制建立、地區性水源之自有水源的開發等手段，以期遭遇緊急事變時，供水系統能正常運轉或損失影響降低。

## 二、鯉魚潭水庫擋水閘門脫落事件

2004年7月2日敏督利颱風為大安河流域帶來強烈降雨，鯉魚潭水庫為進行防洪運轉而開啟出水工擋水閘門，在7月5日17時發生閘門脫落，以致影響水庫供水功能，臺中地區長達1周採輪流供水因應。依據臺灣省水利技師公會鑑定結果，判斷係因出水工進行防洪運轉時，取水工箱涵流量大增，擋水閘門受到進水口高流速及大流量衝擊力，致使負載總和大於原始設計強度，是為脫落主因。

因各場颱風帶來之洪水可能與水庫相關供水設施之初始設計條件不同，亦有可能已超出原設計假設條件，因此在颱風期間設施損壞機率因而提高，尤其在各座閘門的操作過程更易有突發狀況產生。為降低各項構造物設施損壞所帶來之供水風險，除可參酌不同氣候變遷情境提升設施設計強度、設施本身提高維護操作頻率以外，可考量強化取水設施備援系統(如取水備援專管或渠道)。

## 三、鯉魚潭原水輸水幹管破管事件

2009年鯉魚潭水庫送往下游鯉魚潭淨水場之2,600 mm管徑原水輸水幹管破裂，造成苗52線與舊鐵路橋交會點附近路面一側長約15m，寬約5m，深約2m之坑洞，並造成水庫後池堰蓄水範圍邊坡混凝土面板錯動。

事件發生後，經濟部中區水資源局關閉水

庫送水之蝶閥，避免災情擴大，並開設應變小組，辦理特別檢查以評估相關設施安全狀況；啟動緊急供水備援，調配石岡壩滿載供應豐原淨水場，並與台水公司聯繫，以降低缺水影響。

## 四、集集攔河堰南岸渠道損毀事件

2012年6月份之610水災造成集集攔河堰南岸渠道破堤損毀，停止供水約2周。8月又因蘇拉颱風過境挾帶充沛雨量，造成濁水溪水底察堤防及集集共同引水南岸聯絡渠道破損約200m，停水25日，2次災害致使南岸渠道共受損450m。

由災害事件可知，因集集攔河堰南岸渠道係貼近濁水溪堤岸構築，當颱風期間河川堤防設施受損時將連帶造成取水構造物的毀損，因此未來在評估水資源設施損害風險時，宜同時考量水資源設施所在區位可能提升設施損壞之風險程度，而針對此等高設施損壞風險之區位宜先予規劃應變調度機制。

## 五、2013年上半年抗旱水源調度

因2013年上半年水情欠佳，中區水資源局於該年2月27日成立「中區水資源局旱災緊急應變小組」以為因應，並邀集相關單位研商相關因應措施。

鯉魚潭水庫公共用水供水量管控於60萬CMD以下，石岡壩供應豐原淨水場水量以80~85萬CMD管控；3月底大甲溪灌區以計畫用水量70%管控，4月開始減為60%供水；鯉魚潭水庫以3月下旬5.0cms、4月4.8cms方式供水大安溪下灌區；彰雲投農用水調配以集集攔河堰採總量27~30cms供水，各標的供水依「總量管制」原則調配因應辦理。

## 六、鯉魚潭原水管破管事件

2013年5月25日臺灣自來水公司鯉魚潭淨水場的2,600mm直徑原水管發生破裂意外，導致鯉魚潭給水廠全部停擺，嚴重影響臺中、彰化、苗栗約有36萬用戶無水可用。研判應為經常性大型砂石車行駛碾壓，復以中部地區大

兩後路基鬆軟，致使原水水管不堪重力擠壓而破裂。

由於自來水管線因多數埋設於既有道路底下，自來水管線在大型車輛經常行駛路段其相對破壞機率偏高，未來宜全面調查自來水管線與重型車輛行駛路段交叉比對，以掌握自來水管線高破管風險之區位。

#### 七、2014-2015 年事件

2013 年因豐水期雨量過少，9 月起水利署提前啟動抗旱部署，實施水庫總量出水管制、跨區調度及協調水利會加強灌溉管理，持續至同年 12 月乾旱情況並未好轉，爰分別於 2014 年 12 月 31 日及 2015 年 2 月 12 日正式公告明德水庫灌區、大安溪北岸灌區及中港溪灌區停灌，為首次大安溪流域停灌休耕。

後因乾旱缺水狀況持續惡化，自 2015 年 3 月 13 日開始針對苗栗地區大型用水戶減供水量 7.5%，4 月 1 日針對臺中地區大型用水戶減供水量 7.5%，後至 5 月 1 日則苗栗地區及臺中地區大型用水戶同步減供水量 10%。

歷經此次乾旱事件，因旱象程度延續時間長，且不降雨狀況亦較預期嚴重，造成過去未曾辦理停灌休耕的大安溪灌區亦須納入休耕行列，顯示近年在氣候變遷衝擊下，水文異常事件可能出現更極端變化，乾旱及洪水都可能更為加劇，因此在水資源調配管理部分，更應做好不同層面氣候變遷情境的調適準備。

#### 八、2016 年人為意外事件

2016 年 7 月 29 日自來水公司豐原給水廠取水渠道南幹渠傳出民眾掉落意外，為進行搜救行動，自來水公司關閉石岡壩南幹渠進水閘門，造成豐原給水廠暫時停止進水以致無法正常供水，致臺中市第一供水區減壓供水，第二供水區減壓供水，第三供水區大部分區域停水，小部分減壓供水。

此事件屬於臨時性人為意外事件，雖影響

範圍不小，但因影響時間短暫(4~8 小時)，就民生用水而言因多數建物已備有水塔因應，故對民生用水實質衝擊不大，對水資源調度管理而言或因應氣候變遷衝擊尚無調適準備需要。

### 肆、探討水資源風險評估與管理

#### 一、風險評估

風險管理包括風險評估(Risk Assessment)及風險控制(Risk Control)二部分，而其中風險評估又包含風險辨識(Risk Identification)、風險分析(Risk Analysis)及風險評價(Risk Evaluation)三個部分。

此外，應透過風險辨識、風險分析及風險評價之過程，綜合評估風險。並設計方法以辨識風險，訂定風險發生可能性及其影響之嚴重程度之評量指標以分析風險，依風險容忍度訂定風險標準與等級以評量風險，並持續執行風險評估及檢視組織風險圖像之變化。

風險評估之首要工作為風險辨識，識別出風險因子及失效模式後，接著進行風險分析，計算風險因子與失效模式發生可能性(機率)與後果，得到風險尺度(風險數值或關鍵性數)，最後根據設定之可接受風險標準進行風險評價，決定既有風險可以接受還是需要加以控制；如果風險不可接受則進入風險控制階段，根據風險因子及失效模式決定合適之風險控制措施，如藉由完善營運操作維護程序、強化監測系統、緊急應變計畫或其他如保險等風險控制策略來降低或轉移風險，使風險降低至可接受之程度。

最後，亦將藉由使用風險管理政策、風險管理目標、相關稽核與監控、矯正與預防措施及管理階層審查，以持續改善風險管理之績效，並且持續滾動式修正。

#### 二、風險辨識

風險辨識為風險評估之第一步驟，內容包含定義危害(Hazard)、判斷潛在失效模式

(Potential Failure Mode, PFM)與確認風險因子(Risk Factor)等三部分,其目的為根據過去工程案例累積之資料庫、事故紀錄和專家經驗,建立上述三者的因果關係。其中潛在失效模式之判斷最為關鍵,其判斷正確與否影響後續風險分析結果之可靠性。

與經濟部水利署召開多次會議,討論風險管理計畫應辨識之風險因子(如表 1)及盤點對象,分析期程則配合行政院最新穩定產業供水策略內容,分為短期(至 2019 年底)、中長期(2020~2031 年)及因應氣候變遷(2032~2039 年)三個目標年。

評估風險係依據風險值 = 影響程度 × 發生機率進行計算,各項風險因子之發生機率量化指標,如表 2,影響程度之計算參考自來水公司「乾旱時期停止及限制供水執行標準與措施作業要點」,當水源無法供應充足水量時,係採分階段限水方式因應,分別對應供水缺口小於 2~5%、5~10%、10%以上之水量,如表 3。

### 三、風險評估結果

#### (一)現況風險

##### 1、大安溪、大甲溪水系

B1 原水高濁度列為「高度風險」,應優先調適處置;其餘多在「中度風險」或是「低度風險」,可視情況選擇「維持」或「減輕」之調適作為。大安溪、大甲溪現況水資源風險分布情形,詳如圖 3 所示。

##### 2、濁水溪水系

根據風險分析結果,濁水溪並無「高度風險」之因子,多在「中度風險」以下,可視情況選擇「維持」或「減輕」之調適作為,濁水溪現況水資源風險分布,如圖 4 所示。

#### (二)風險因應策略及方法

從風險評估得知大安溪、大甲溪及濁水溪水系風險情形後,進一步透過工程面、非工程面手段,作為因應水資源設施、系統及供需風險之策略或解決方法,降低各因子之風險,各

類措施之控制手段詳如表 4。

在大安溪及大甲溪水系,主要工程手段為「大安大甲溪水源聯合運用輸水工程計畫」,此項工程完工後,透過水源聯合運用,每日增加臺中地區 25.5 萬噸水源供應能力及高濁度期間每日 80 萬噸備援水量,因此,對 A1、B1、B2、C1、C2 等因子有降低風險之功能。而濁水溪水系,可透過「濁水溪伏流水工程」、「集水區保育治理」等工程,增加濁水溪備援水量、降低水庫淤積等問題。

## 伍、殘餘風險

進一步探討各類風險因子之控制手段,若按期程執行與未執行下,其短期(至 2019 年底)、中長期(2020~2031 年)及因應氣候變遷下(2032~2039 年)之殘餘風險變化情形,故後續殘餘風險結果,分為無作為以及有作為情況進行說明。

### 一、短期風險成果

因相關計畫尚未完成,因此無作為以及有作為情況,殘餘風險結果與現況分析相同,大安溪、大甲溪短期水資源殘餘風險如圖 5 所示,濁水溪短期水資源殘餘風險如圖 6 所示。

### 二、中長期風險成果

#### (一)大安溪、大甲溪

在無作為情況下,C2 因子的發生機率及影響程度皆提高,使得在 2031 年殘餘風險更嚴重,另外 B2 因子之影響程度也提高。

有作為情況下,台水公司自來水漏水率預計降至 10%以下,因此 A3 因子將會降低。此外,「大安大甲溪水資源聯合輸水計畫」完工後,除了可作為高濁度時期及石岡壩供水設施之備援系統,亦可改善 B1、B2、C1、C2 等風險程度,因此中長期之殘餘風險如圖 7。

#### (二)濁水溪

在無作為情況下,濁水溪水系因 A1 因子年限增加,導致發生機率提高。



有作為情況下，台水公司自來水漏水率預計降至 10% 以下，故 A3 因子將會降低。此外，透過「濁水溪伏流水工程」，降低缺水風險及淨水用藥成本，其效益亦可作為備援供水，公共給水最大 3 萬 CMD，可解決 B2、C1、C2 等因子。中長期濁水溪水系殘餘風險如圖 8。

### 三、因應氣候變遷

#### (一) 大安溪、大甲溪

在無作為情況下，因 A1 因子年限增加，發生機率提高。

有作為情況下，透過農業節水、強化跨區調度、水庫防淤與更新改善、改善管線漏水、開發伏流水、海水淡化廠或再生水等各類手段，將可再繼續降低風險造成供水之影響。對於因應氣候變遷下，大安溪、大甲溪之殘餘風險如圖 9 所示。

#### (二) 濁水溪

在無作為情況下，因 A1 因子年限增加，發生機率提高。

有作為情況下，透過完成湖山水庫以及鳥嘴潭人工湖，將可取代原先使用之地下水，改為地面水(川流水、水庫水)供應，因此對於水資源的供需上，並非因應新水源的開發，而有增加可供水量，反倒是增加可供水量，取代原先超抽致地下水源，因此對於減緩地層下陷有十分的助益；另外有關於濁水溪之原水高濁度因其受限於集水區自然環境，基本上原水高濁度發生機率仍無法因為各項改善而降低，但是透過伏流水工程、林內淨水場初沉池改善等，都可將原水高濁度的影響有效降低。因應氣候變遷下，濁水溪殘餘風險如圖 10。

### 陸、建議

至中長期風險分析結果，大安溪、大甲溪若沒有相關工程作為，所面臨之高度風險為「B1

因子—原水高濁度」，此外「B2 因子—枯旱水源不足」及「C2—需求成長」之影響程度也上升，透過殘餘風險圖可知，若透過「大安大甲溪水源聯合運用輸水工程」計畫，高風險因子皆可降低至低風險區域，故建議大臺中地區可優先辦理「大安大甲溪水源聯合運用輸水工程」，透過此計畫的推動，不光是能增加區域供水量外，亦能作為高濁度時期的備援供水方案。另外需降低漏水率，並以 2031 年將漏水率降至 10% 以下為目標，特別是在用水成長較高的地區，集中資源加速辦理。

本風險管理計畫針對中部區域風險評估提出風險監督及管控檢討流程圖，每兩年滾動檢討各水系殘餘風險，並配合因應通報機制，更新風險評估成果，以利適時修正符合實際面臨情況。

### 參考文獻

1. 經濟部水利署中區水資源局 (2010)，「大安大甲溪水源聯合運用輸水工程可行性規劃-總報告」。
2. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2012)，「強化中部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」。
2. 經濟部水利署中區水資源局 (2015)，「大安大甲溪水源聯合運用輸水工程計畫—因應二階環評及穩定供水替代方案對策研擬」。
3. 經濟部水利署中區水資源局 (2015)，「大安大甲溪水源聯合運用輸水工程計畫—因應二階環評及穩定供水替代方案對策研擬」。
4. 行政院 (2015)，「前瞻基礎建設計畫—水環境建設」。
5. 經濟部水利署中區水資源局 (2017)，「大安大甲溪水源聯合運用輸水工程計畫替代方案可行性規劃」。

圖與表

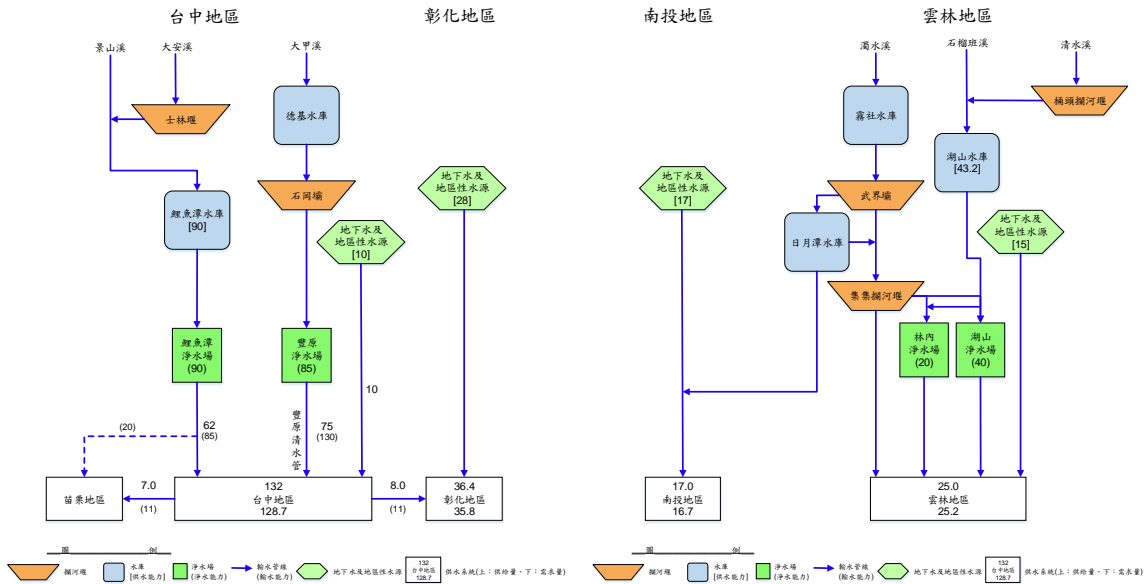


圖 1 大安溪與大甲溪自來水供水系統示意圖

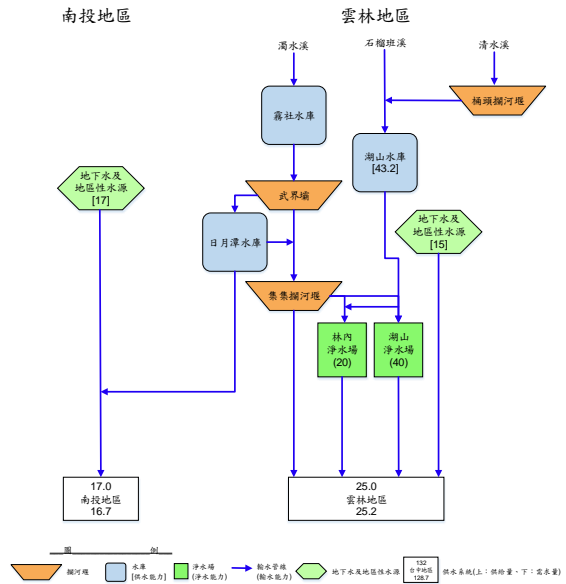


圖 2 濁水溪自來水供水系統示意圖

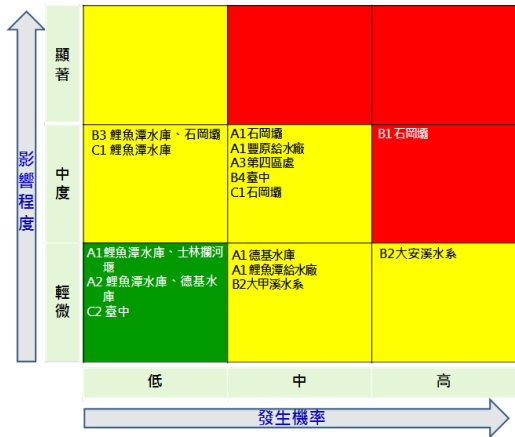


圖 3 大安溪、大甲溪現況水資源風險分布情形

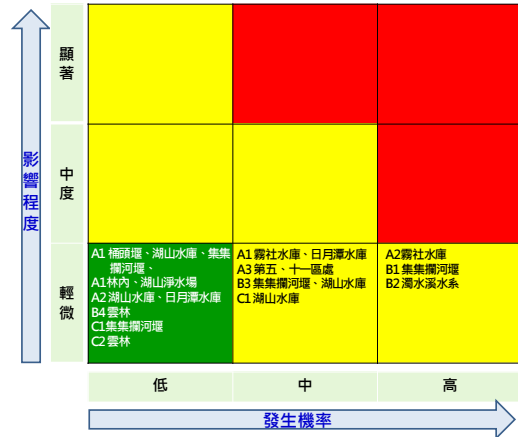


圖 4 濁水溪現況水資源風險分布情形

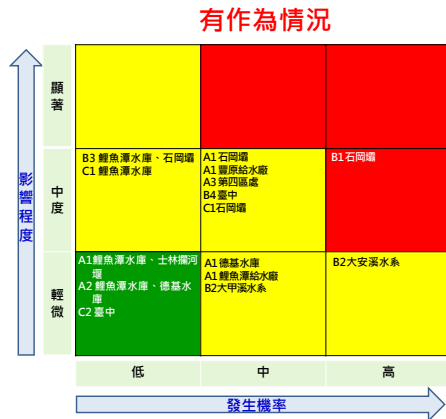
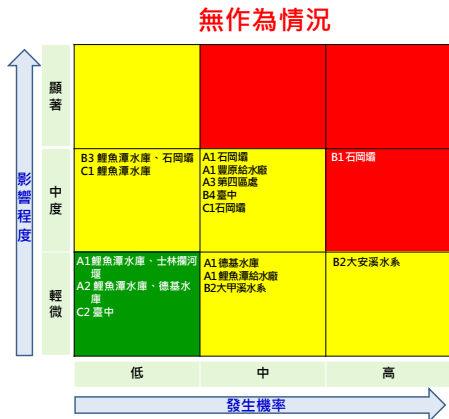


圖 5 大安溪、大甲溪短期水資源殘餘風險圖

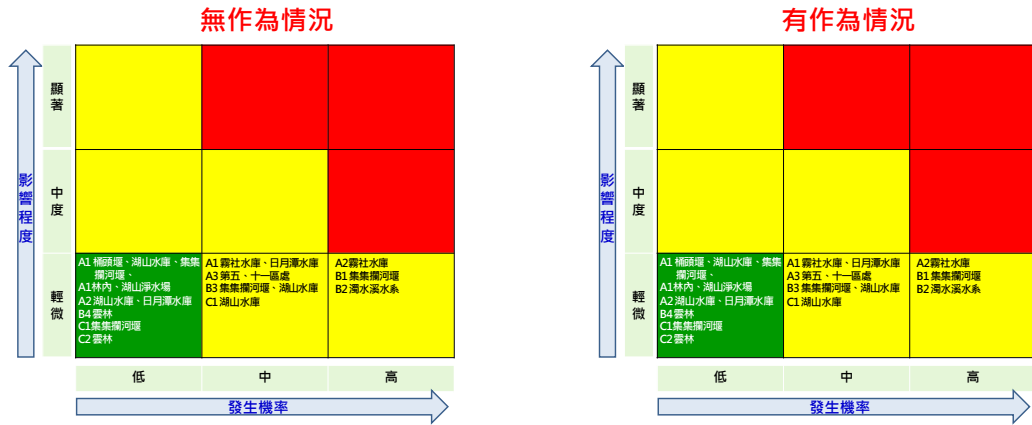


圖 6 濁水溪短期水資源殘餘風險圖

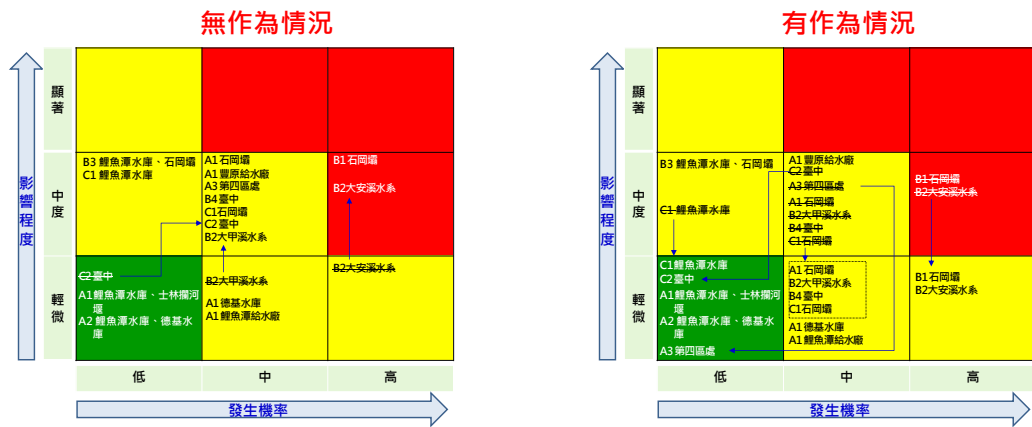


圖 7 大安溪、大甲溪中長期水資源殘餘風險圖

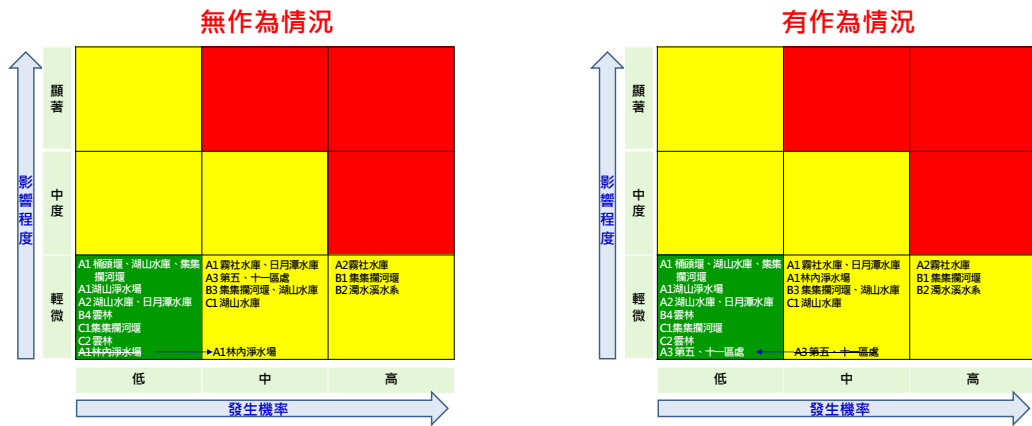


圖 8 濁水溪中長期水資源殘餘風險圖

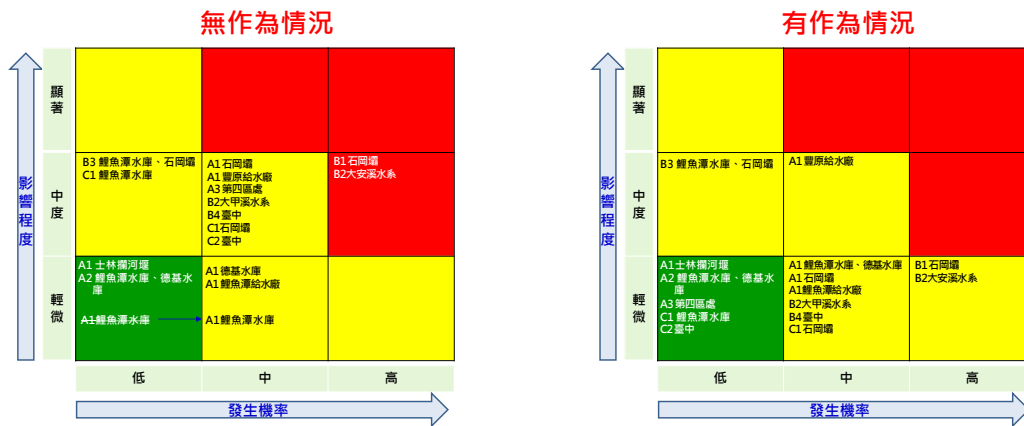


圖 9 大安溪、大甲溪因應氣候變遷水資源殘餘風險圖

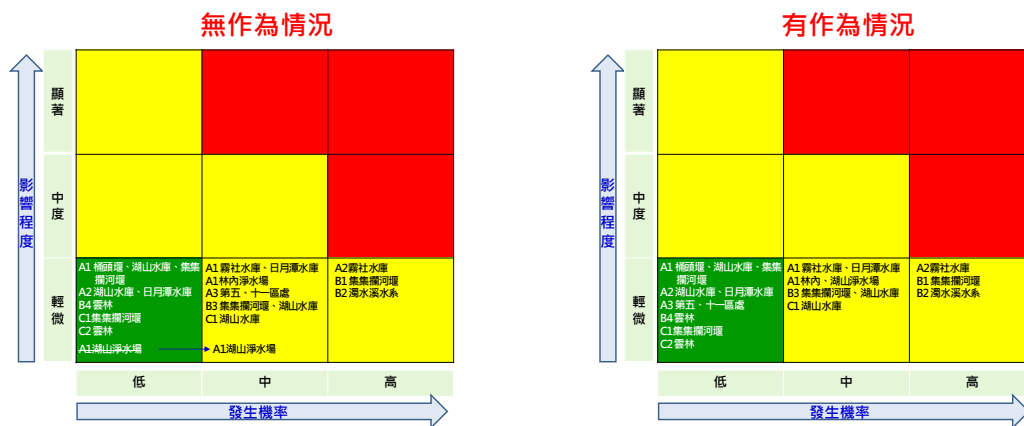


圖 10 濁水溪因應氣候變遷水資源殘餘風險圖

表 1 各類風險因子

風險構面	風險因子
設施風險	設施功能異常(A1)
	水庫淤積(A2)
	自來水管線漏水(A3)
系統風險	原水高濁度(B1)
	枯旱水源不足(B2)
	水質汙染(B3)
	其他-維護操作及突發事件(B4)
供需風險	氣候變遷下供給減少(C1)
	需求成長(C2)

表 2 各項風險因子內容及定義

因子 (分類編號)	評估指標	風險發生機率量化指標		
		低(1)	中(2)	高(3)
設施功能異常 (A1)	使用年份(A1)及 設施維護更新情形	水庫： A1 ≤ 40 年且 有定期維護 淨水場： A1 ≤ 20 年且 有定期維護	水庫： A1 > 40 年且 有定期維護 淨水場： A1 > 20 年且 有定期維護	無定期 維護
水庫淤積 (A2)	有效容量淤積率	A2a ≤ 20 且	A2a ≤ 20	40 ≥ A2a > 20 且 A2b > 1

因子 (分類編號)	評估指標	風險發生機率量化指標		
		低(1)	中(2)	高(3)
	(A2a,%)及近三年平均淤積年增率(A2b)	$A2b \leq 1$ 或 $A2a < 40$ 且 $A2b \leq 0$	且 $A2b > 1$ 或 $40 \geq A2a > 20$ 且 $0 < A2b \leq 1$	或 $A2a > 40$
自來水管線漏水(A3)	自來水管線漏水率(%)	$A3 \leq 10$	$10 < A3 \leq 20$	$A3 > 20$
原水高濁度(B1)	原水高濁度影響設施正常取水天數(天/年)	$B1 \leq 10$	$10 < B1 \leq 20$	$B1 > 20$
枯旱水源不足(B2)	年枯水期降雨量小於歷年枯水期平均值之年數/統計年數(%)	$B2 \leq 50$	$50 < B2 \leq 60$	$B2 > 60$
水質汙染(B3)	取水代表性測站水質監測符合標準(河川汙染指數)	$RPI < 2$	$2 \leq RPI < 6$	$RPI > 6$
其他-維護操作及突發事件(B4)	近10年因突發事件(含人為因素、地震、洪水等天然災害、停電等)造成影響供水之次數	$B4 \leq 2$	$2 < B4 \leq 5$	$B4 > 5$
氣候變遷下供給減少(C1)	氣候變遷情境下枯水期年平均流量小於歷年平均之年數/統計年數	$C1 \leq 50$	$50 < C1 \leq 60$	$C1 > 60$
需求成長(C2)	民生及工業用水之成長幅度大於計畫供水量比例(%)	$C2 \leq 5$	$5 < C2 \leq 10$	$C2 > 10$

表3 影響程度分級表

影響分級	影響程度	
顯著	需實施分區或定點供水，停水10萬戶且72小時以上	公共用水缺水率 $\geq 10\%$
中度	需實施減壓或減量供水，停水1萬戶且24小時以上	$5\% \leq$ 公共用水缺水率 $< 10\%$
輕微	達水情稍緊情況，停水未達1萬戶或24小時	公共用水缺水率 $< 5\%$

表4 各類因子之風險管理控制手段

因子 (分類編號)	控制手段	
	工程面	非工程面(管理面)
設施功能異常(A1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>水庫更新改善、提高供水備援及淨水場處理能力</li> <li>鯉魚潭給水廠第二原水管</li> <li>大安大甲溪水源聯合運用輸水工程計畫</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>定期辦理重要設施安全評估與檢查</li> </ul>
水庫淤積(A2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>持續進行水庫清淤浚漂，以強化蓄水建造物設施功能及維護營運正常</li> <li>水庫集水區保育治理工程</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>加強集水區巡查，減少濫墾濫伐</li> <li>加強水庫集水區保育宣導</li> <li>加強水庫集水區土地使用管理</li> <li>加強水庫入庫泥砂監測系統</li> </ul>
自來水管線漏水(A3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>持續改善自來水管網漏水率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>枯水期夜間實施常態減壓供水</li> <li>透過智慧水管理有效偵測漏水點位</li> </ul>

第二十三屆兩岸水利科技交流研討會

因子 (分類編號)	控制手段	
	工程面	非工程面(管理面)
原水高濁度(B1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 加強水庫集水區保育治理</li> <li>• 大安大甲溪水源聯合運用輸水工程計畫</li> <li>• 豐原給水廠新設初沉池工程(食水崙溪右岸)</li> <li>• 林內淨水場增設初沉池工程</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 臺中地區：鯉魚潭水庫增供水量、啟動食水崙溪備援系統，水量不足時增加八寶圳引水量</li> <li>• 雲林地區：湖山水庫增供水量及觸口寬口井抽取伏流水</li> </ul>
枯旱水源不足(B2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 大安大甲溪水源聯合運用輸水工程計畫</li> <li>• 臺中防災備源井、濁水溪伏流水工程天花湖水庫(原調配苗栗地區支應 6 萬 CMD，可回供臺中地區)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 大安大甲溪：枯水期以大甲溪水源為主，盡量將鯉魚潭水庫蓄滿，確保枯水期穩定供水</li> <li>• 濁水溪：枯水期以集集攔河堰供水為主，盡量將湖山水庫蓄滿，確保枯水期穩定供水</li> <li>• 透過「水源調配小組」調配各標的用水，促進水資源之有效運用</li> <li>• 水情預警機制建立及抗旱準備</li> <li>• 枯旱時期調度農業用水</li> </ul>
水質污染(B3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 集水區上游增設攔汙設施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 環保機關加強河川水質稽查管理</li> </ul>
其他(B4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 湖山水庫第二原水管工程</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 天然災害後主動巡查各設施</li> <li>• 推廣水資源智慧管理系統及節水技術</li> </ul>
氣候變遷下供給減少(C1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 鳥嘴潭人工湖</li> <li>• 大安大甲溪水源聯合運用輸水工程計畫</li> <li>• 持續改善自來水管網漏水率</li> <li>• 常態備援井及防災備援井</li> <li>• 灌溉圳路更新改善，減少圳路滲漏</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 成立「水源調配小組」調配各標的用水，促進水資源之有效運用</li> <li>• 做好水情預警機制建立及抗旱準備</li> <li>• 枯水期夜間常態減壓供水</li> <li>• 對地綠色環境給付計畫</li> <li>• 節約用水，農業加強灌溉管理</li> </ul>
需求成長(C2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 大安大甲溪水源聯合運用輸水工程計畫</li> <li>• 臺中盆地地下水與地面水聯合運用</li> <li>• 廢污水回收再生利用(福田、水湳)</li> <li>• 伏流水利用</li> <li>• 天花湖水庫(原調配苗栗地區 6 萬 CMD，可回供臺中地區)</li> <li>• 持續改善自來水管網漏水率</li> <li>• 鳥嘴潭人工湖</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 節約用水</li> <li>• 加強用水計畫書審查及查核機制</li> <li>• 提升工業用水回收率</li> </ul>

## 都市開發中所保留之自然河道其地下水出滲 之環境價值-以台中舊南屯溪為例

許少華<sup>1\*</sup>、林郁汶<sup>2</sup>、林美華<sup>3</sup>、陳姿諭<sup>4</sup>、陳品涵<sup>5</sup>

### 摘要

早期都市河川整治以截彎取直及渠底三面光混凝土化等工程手段為主。台中市第十三期都市重劃計畫中，原先預計將舊南屯溪填平開發，但因舊南屯溪為台中市區少數仍留存之天然河道，又因在開發中發現麻糍埔考古遺址，使舊南屯溪被列為台中市文化景觀保留對象。本研究探討舊南屯溪其水質條件可以維繫其區域生態豐富之水文要件。

由台中盆地地下水位分布之各觀測井水位資料所得知，台中盆地北側的大甲溪及東側的烏溪為主要補注源，地下水流往盆地中心地勢低處匯流。本研究區域位於烏日-霧峰連線一帶之地下水流區。因地下水出滲後補充地表水，其水量增加有稀釋河川污染濃度之功能，使得舊南屯溪下游水質較上游良好，故於舊南屯溪各區段及南屯溪排水，運用多功能水質檢測儀進行水質測試，以得知各河段水質優劣變化。本研究於舊南屯溪先以微型壓力計測得河床地表與地下水之水頭差，測得該區為地下水出滲區，並於該區進行滲流儀試驗，測得地下水出滲量，並利用 Dracy 公式求得河床水力傳導度 K 值，進一步瞭解此區域地下水出滲情況。

本研究利用地下水出滲量之量測結果，討論對水質之影響，而後進一步觀測陸域及水域生態，綜合描述地下水出滲補注自然河道對舊南屯溪及下游南屯溪排水之水質及生態效益，以此為例證實天然河道保留下來之重要性。所量測之數據，可作為未來都會空間可利用方式之重要參考依據。

**關鍵字：**舊南屯溪、滲流儀、微型壓力計、地下水出滲、水質。

<sup>1</sup>逢甲大學水利工程與資源保育學系 教授

\*通訊作者，E-mail: shhsu@fcu.edu.tw

<sup>2</sup>逢甲大學水利工程與資源保育學系 研究助理

<sup>3</sup>逢甲大學水利工程與資源保育學系 學生

<sup>4</sup>逢甲大學水利工程與資源保育學系 學生

<sup>5</sup>逢甲大學水利工程與資源保育學系 學生

## 壹、前言

早期都市重劃區河川整治的觀念僅依照排水功能的考量而以截彎取直為主，且認為混凝土構造物較為堅固，造成現今許多三面光的河道，使得地下水及地表水的交換功能受阻。然而天然河道可以提供地下水補給、水質稀釋、生態棲息地以及人類親水遊憩等功能。藉由瞭解舊南屯溪被保留的價值，以及使得對附近生態、水質環境都有所保護，進而提供政府作為未來都市規劃與開發之參考依據。

## 貳、文獻回顧

### 一、達西公式

達西定律是描述流體通過多孔隙介質的流動方程式，是由 Henri Darcy 在 1856 年所提出(詳 1 式)。水流經過多孔隙介質時，水的流速與兩端壓力梯度差成正比，且與通過多孔隙介質厚度成反比，測出流體在多孔隙介質的流速正比於兩端水力梯度差。達西定律也適用於描述水、空氣或油等流過多孔隙介質的特性。達西定律其中經飽和土壤流域與單位水距離水頭差之函數如下所示：

$$V = \frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

式中 V 為流速(m/s)。

Q 為流量(cms)。

A 為斷面積(m<sup>2</sup>)。

Δh 為水頭差(m)。

L 為多孔隙介質厚度(m)。

K 為土壤之水力傳導係數(m/s)。

### 二、都市開發重劃

本研究舊南屯溪之原始河道位於第八期及第十三期重劃區內，配合重劃區之規劃河道有所改變或保留。

台中市政府於 2007 年提出第十三期重劃區計畫書(如圖 1 所示)，重劃區範圍東至西川一

路，西至環中路，南至建國北路，北至文心南七路。於重劃區開發執行期間，遇有麻糍埔遺址、舊南屯溪文化景觀及番婆庄遺址(2013 年訂定)，因而進行計畫變更，保存文化資產及營造文化資產景觀環境，使本研究自然河段得以保存。

舊南屯溪範圍北自永順路靠文心南七路段，沿楓樂巷南抵永春東二路和環中路交叉處附近，為第 13 期重劃區範圍內尚存一小段天然河道，稱為「舊南屯溪」，河段全長約 940 公尺(如圖 2 所示)，即為本研究河段。

### 三、地下水位

本研究區域鄰近之地下水觀測井有南屯觀測站、烏日(1)觀測站、烏日(2)觀測站。本研究區域位於南屯及烏日觀測站之間，因此藉由水文年報之統計資料，了解本研究區域鄰近觀測站近 10 年的年平均地下水水位之關係(詳圖 3 所示)，來推測舊南屯溪周圍地下水水位之變化，作為地下水水位之參考依據。

## 參、現地實驗設置與方法

依照試驗流程進行微型壓力計，測得河水水頭高與地下水頭高，進而判定出滲或入滲。若為出滲則施作滲流儀試驗，入滲則重新選擇研究地點。於出滲區域進行滲流儀試驗，測得地下水出滲量，並探討地下水與水質、與生態之關係(如圖 4 所示)。

### 一、微型壓力計試驗

微型壓力計是測量地表水和地下水之總水頭差的儀器。用水頭差可了解該區域之床底為入滲或出滲。當地表水總水頭大於地下水總水頭，則為入滲，反之，地表水總水頭小於地下水總水頭，則為出滲。

操作微型壓力計實驗步驟：利用錘子敲打金屬棒使探頭能進入河床下 15 公分處，利用手動式泵將管內空氣排出並使管內水位提升至滿管後，洩壓至標尺讀數。觀察出地下水總水頭



和地表總水頭之水頭差並記錄之，並量測至少 10 筆之數據。

## 二、滲流儀試驗

試驗步驟：利用打環器將鐵環（直徑 56 公分）打入河床 15cm，包圍欲測量位置，並隔離外界水域，在儀器上開一排氣閥，利用集水袋收集出滲之水並率定。忽略水的可壓縮性，當鐵環內控制體積不改變，地下水出滲，控制體積內便會將原本存在的水推至袋中。

實驗過程中須將收集滲流水的集水袋完全浸入水中，降低大氣壓力給塑膠袋的影響。而打環進行時，若因河床底下的石頭而無法向下，則以盡量不擾動河床之方式，移除底下的石塊。

試驗儀器可量測出固定時間下收集河床面滲出之水量，其延時大約十分鐘至二十分鐘，因須地下水流出之速率，故藉由公式  $V=Q/A$ ，計算出鐵環單位面積後，即可算出滲流量之水流 Darcy 流速  $V$ 。式中  $Q$  為流量，即為集水袋中單位時間所蒐集之水量 ( $m^3/s$ )。  $A$  為面積，為鐵環內徑之面積 ( $m^2$ )

## 三、水質檢測

本實驗使用攜帶式多功能水質檢測儀器進行水質檢測，將儀器探頭放入各水樣體中輕輕攪動，待儀器上數值不再跳動時便可記錄其數據，再將探頭置入清水中清洗後擦乾放入下一水樣體中測定，當一項水質數據測定完後即可更換探頭進行下一個水質數據的測定。

本研究水質樣點選取，選定上、中、下游等 3 處做水質檢測，分別為河段上游、河段中游(實驗點)、河段下游(與南屯溪排水混合點)，藉由河段上游、河段中游(實驗點)樣點可了解舊南屯溪本身水體水質變化情形，河段下游(與南屯溪排水混合點)則可檢測舊南屯溪匯入南屯溪排水後水質之變化。而在本研究期間，為了更進一步了解主流水質變化情形，另增設兩處樣點河段下游(未與南屯溪排水混合點)和南

屯溪排水，可更完善檢測得知本研究支流舊南屯溪上、中、下游水質變化，亦可得知主流南屯溪排水受支流舊南屯溪匯入前後水質變化之情形，以下水質採樣點名稱由代號表示(如表 1 所示)。

## 肆、試驗結果與分析

本研究區域因上游及下游，地形、水理及安全考量因素，故選定舊南屯溪中游水深適中，水流平緩處，進行微型壓力計、滲流儀、水質試驗。並依據試驗紀錄的數據，分析地下水出入滲關係及水質與地下水。

### 一、微型壓力計實驗成果

利用微型壓力計，測量地表水與地下水之水頭差，以判斷此點為出滲或入滲，由表 2 所示，推測地下水頭差會隨時間不同有所變化，因前兩次試驗時間較為相近，但第三次試驗時間相隔較遠，使數據有所落差，但整體來說此區域屬於地下水湧出段。

### 二、滲流儀試驗及推算河床水力傳導度 $K$ 值

經過三次滲流儀試驗發現出滲量皆有變化。推測地下水流至河川的出滲量，因河床石塊密度不一及土壤空隙大小不同，導致每次試驗測得數據有所不同。

滲流儀實驗與水頭差量測所得到的數據，利用達西公式可以求得試驗之  $K$  值，經實驗數據推算之  $K$  值介於 1.02 至 5.638 (cm/hr)之間。

由表 3 看出，前兩次試驗水力傳導度  $K$  值為 1.02 及 1.306 (cm/hr)較相近。推測此研究區域土壤之水力傳導度較相似，但第三次試驗之水力傳導度  $K$  值卻與前兩次試驗差距甚大，但平均出滲量卻是一致的，推測為滲流儀打入深度未達指定標準(15 公分)，影響試驗所量測之數據，進而使水力傳導度  $K$  值產生誤差。

### 三、推估舊南屯溪地下水補注量

本研究因水流湍急及河床高低落差大，故

只選舊南屯溪中游處做滲流儀試驗，得出此地點地下水平均出滲量。並假設水面寬及水深等參數，經由計算求得全河段推測之地下水總補注量。

由的三次平均出滲量，再將其取平均值，取得實驗河段的總平均出滲量。河段全長為940m，而本研究假設半圓形渠道(如圖5所示)，水面寬為2.6m，水深1m，求得潤濕周界為3.14公尺，乘上總河段長940公尺，得出總河段地下水出滲總面積為2950m<sup>2</sup>。再將其值乘上地下水總平均出滲量，推估出此河段一小時地下水補注量為39.8m<sup>3</sup>/hr、一天地下水補注量為955m<sup>3</sup>/day、一年地下水補注量為348,575m<sup>3</sup>/year，推估地下水補注量占全流量的1.39%。

#### 四、水質檢測成果與分析

利用攜帶式多功能水質檢測儀器，檢測各河段的酸鹼值、導電度及溶氧量(由表4~表6所示)，可得知各河段的污染高低。

三次檢測的pH值為7.34~7.88，皆在中性範圍之內，屬正常水流pH值範圍；導電度為408~428( $\mu$ s/cm)，無超過灌溉用水水質標準(750 $\mu$ s/cm)，對於農業灌溉用水並無明顯影響；溶氧量在各河段檢測數值中，變化幅度差異較大，因此對溶氧量深入討論。

A點(實上)水質在三次量測中由中度污染轉變為輕度污染，推測因量測時間不同，有無污染源排放是使其水質改變的因素；B點(實驗)水質變化較小，多為輕度污染，推斷有地下水的補注稀釋上游排放之污染，水質較為穩定；C點(實下未匯)位於本研究河段最尾端，水質數據接近無污染，推測由河段上游所排放之污染流至此點時，已受稀釋作用影響，水質較乾淨、穩定；D點(實下匯入點)所量測之水質為輕度污染，在C點時水質近乎無污染，推測與南屯溪排水匯合，使得水質受影響進而轉變為輕度污染；E點(南屯溪排水)之水質為中度污染。

本研究河段從上游至下游(未匯)水質，由中度污染轉至近似無污染，推測本研究河段因地下水湧出達稀釋作用，使得河川水質變為良好，本研究進而量測南屯溪排水水質，得知其為中度污染，然而在與

舊南屯溪匯流後期水質轉為輕度污染，由此可看出舊南屯溪的匯流有助於南屯溪排水水質改善。

#### 五、地下水水質比較

鎮平國小地下水水質觀測站與舊南屯溪各區段水質檢測之比較(如圖6所示)，可看出導電度在地表逕流相對於地下水比較低，因雨水導電度較低會稀釋地表逕流中的導電度，而地下水因經過地下底質，底質礦物含較高的帶電離子。溶氧量在地表逕流相對於地下水比較高，因地表逕流易接觸空氣，所以氧氣較易溶於水中，又地下水接觸空氣較少，生活在底質下的生物進行呼吸作用或硝化作用時亦會消耗氧氣。pH值在地表逕流相對於地下水比較低，因地表逕流水中溶氧量比較高，多數生物生活在地表逕流較多，進行呼吸作用會較旺盛，水中二氧化碳濃度會增加。

因上述三種指標無法詳細表達出地下水水質優良之標準，故選用氮氮進一步描述地下水之水質，由圖7所示，鎮平國小地下水水質觀測站氮氮之數值，可看出本研究河段地下水氮氮數值皆在0.5mg/L以下(屬於未/稍受污染程度)，可證實地下水本身水質為無污染，以利于湧出地表時達水質稀釋作用。

#### 六、生物概況

本研究下游河段現場觀察到大量的白鷺鷥棲息，食物以各式魚蝦為主食，藉由食物鏈關係可推測本研究河段足以提供白鷺鷥食物來源。以現場觀察得知本研究河川中游(實驗點)具有不少魚類生存，進一步推測本研究全區河段有大量魚類生存，但是觀測到現場趨於單一物種魚類生存(包含吳郭魚及鯉魚)。河道內趨於

單一物種吳郭魚生存，由魚類指標來看，本研究河道為嚴重污染地區，然而水質檢測結果為輕度或無污染，推測雨水下水道管線混有第八期都市重劃區民生廢污水匯入此河段，使河川之水質短時間內呈現嚴重污染且混雜著些微惡臭狀態，造成其他魚類無法存活，且河川周圍散發著家庭污水及工業廢水的惡臭，而過一段時間之後因河川稀釋作用使水質恢復原來狀態。

綜合以上所述，本研究區域於污染未排放期間水質良好，提供白鷺鷥生存環境及植被茂盛、樹木成林，使生物得以生存棲息。

## 伍、結果與討論

本研究區域為第十三期重劃區內已保留之自然河道，先使用微型壓力計量測點位之水頭差，依其結果判斷地下水之出入滲，本研究實驗結果判定此河段地下水湧出段，再進行滲流儀試驗，測得出滲量介於 1.134cm/hr ~ 1.387cm/hr，因地下水位會有些微起伏，每日出滲量不為定值，但仍可看出本研究區域為地下水補注河段。

本研究區域內估計一天地下水補注量為 955m<sup>3</sup>/day，約佔河川總流量 1.39%，對於有河段水溫恆定、河川流量穩定及水質達到稀釋作用。

研究區域位於沖積層，所對應的土壤水力傳導度 K 值，介於 1.02~3.05(cm/hr)之間。本研究於舊南屯溪中游所求得水力傳導度 K 值，介於 1.02~1.306(cm/hr)之間，證實研究區域河床土壤組成多為砂土。

地下水出滲對於河川水質影響明顯，舊南屯溪整體水質應為無污染至輕度污染，惟因有污染源排入，導致污染物流至的河段水質較差，但經舊南屯溪地下水湧出達稀釋作用後，使水質有些微變好之趨勢，與南屯溪排水匯流後，凸顯出自然河道改善水質之功能，於都市

開發中有其保留之意義。

地下水湧出使水質改善，舊南屯溪生態原本屬於良好，然而污染源的排放使水域生態趨近單一物種，由魚類指標來看，本研究河道為嚴重污染地區，然而水質檢測結果為輕度或無污染，推測因有污染源流入河川，使河川之水質短時間內呈現嚴重污染狀態，造成其他魚類無法存活，而過一段時間之後因河川稀釋作用使水質恢復原來狀態，但整體來說，舊南屯溪下游因稀釋作用水質較為良好，使下游段陸域生物較為豐富。故未來應積極將污水來源加以管理或處理，避免直接排入河川造成生態衝擊。

本研究提供政府未來都市規劃與開發之參考依據，可建立麻糍埔遺址教育園區，結合歷史文物河道演變顯現出過去人民利用溪水生活的意義；可在河道兩岸設置生態環境教育園區結合景觀餐廳，保留原始自然生態環境及提供民眾一個休閒遊憩的空間，讓民眾瞭解此河段保留之可貴性。

建議未來可針對此河川進行更深入的污染源檢測，且因本研究試驗時間較短，建議可進行長期之研究試驗，已提供更完整之數據。進行滲流儀試驗探討 K 值時，建議可加做現場的粒徑分析試驗，使可探討的面向更為齊全。若未來學弟妹欲探討與本研究相似之，可以以這些方向作為延伸。

## 參考文獻

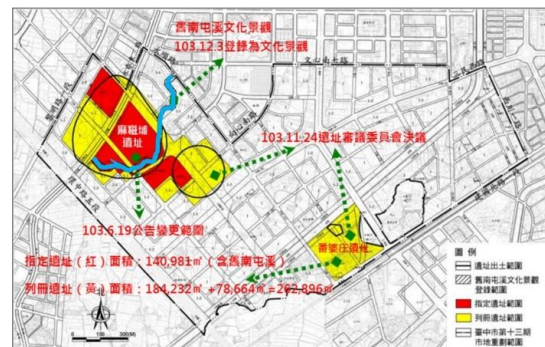
1. 經濟部水利署水文資料查詢網站  
<http://gweb.wra.gov.tw/wrhygis/>
2. 行政院環保署水質稀釋現地處理網站  
<https://goo.gl/1c831S>
3. 行政院環境保護署水體水質資料庫  
<http://alphapc.epa.gov.tw/cgi-bin>
4. 行政院環境保護署全國環境水質監測資訊網  
<https://goo.gl/RP0JM2>
5. 水汙染管理  
<https://goo.gl/jmWDPm>

6. Environment and Climate Change Canada  
https://goo.gl/P9IpI3
7. HACH 公司 HQD 系列 Portable Meters  
https://goo.gl/iu8VnK
8. 臺中市政府都市發展局(2015),「變更台中市都市計畫主要計畫(配合麻糍埔遺址及舊南屯溪文化景觀保存)」。
9. 臺中市政府地政局(1989),「臺中市第八期豐樂市地重劃計畫書」。
10. 臺中市政府地政局(2016),「臺中市第 13、14 期市地重劃及第 13 單元私辦重劃相關作業進度專案報告」。
11. 李光敦 (2002),「水文學」,五南出版社, P114-P124; P155-P158
12. 黃慶聲(2017),「南屯溪之歷史脈絡」,保存維護計畫工作坊。
13. 經濟部水利署(2014)。「地下水補注地質敏感區畫定計畫」。
14. 紀椹能(2011),「淺層地下水補注卵礫石型陡坡溪流之季節性估算-以筏子溪為例」,逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士班碩士學位論文。
15. 屈慧麗(2013),「麻糍埔的前世今生」,國立自然科學博物館館訊,第 317 期。
16. 許少華、劉建榮、賴慶昌、潘俊宏、洪碧芳(2015),「卵礫石河川稀釋能力分析研究-以台中市筏子溪為例」,台灣水利,第 63 卷。
17. 朱達仁、施君翰、汪淑惠、張睿昇(2006),「溪流環境評估常使用的量化生態指標簡介」,台灣林業,32(2),30-39。
18. 莊順興(2014),「水質指標說明與應用」,朝陽科技大學環境工程與管理系,水質指標與查證作業實務講習班。
19. 鄭柏璋、林興宏、伍紹陽(2017),「利用滲流儀於筏子溪測得河床之滲漏水力梯度之探討」,逢甲大學水利工程與資源保育學

系,大專生論文。

20. 陳柏穎、莊信宏、丘御辰(2017),「埔里盆地地下水出滲入滲量測與分析」,逢甲大學水利工程與資源保育學系,大專生論文。
21. Darcy, H. (1856). “Les fontaines publiques de la ville de Dijon.” Paris: Dalmont.
22. Martinez, Christopher J. (2013). “Mini-piezometers for Measuring Groundwater to Surface Water Exchange.”
23. Martinez, Christopher J. (2013). “Seepage Meters for Measuring Groundwater – Surface Water Exchange.”

## 圖與表



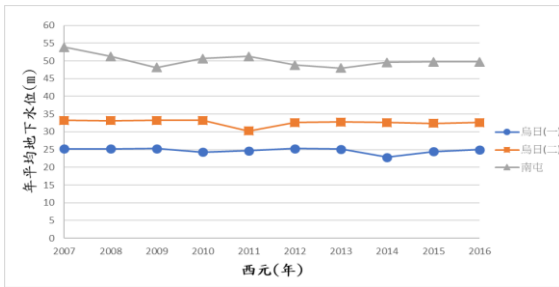
資料來源:臺中市政府地政局,2016

圖 1 台中市第十三期重劃區範圍保留之遺址



資料來源:臺中市政府都市發展局網站

圖 2 舊南屯溪文化景觀登錄範圍示意



資料來源:水文年報地下水水位經本研究統整

圖3 周圍地下水觀測站歷年資料統整圖表

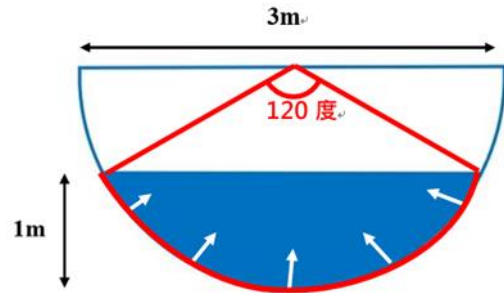


圖5 半圓形渠道示意圖

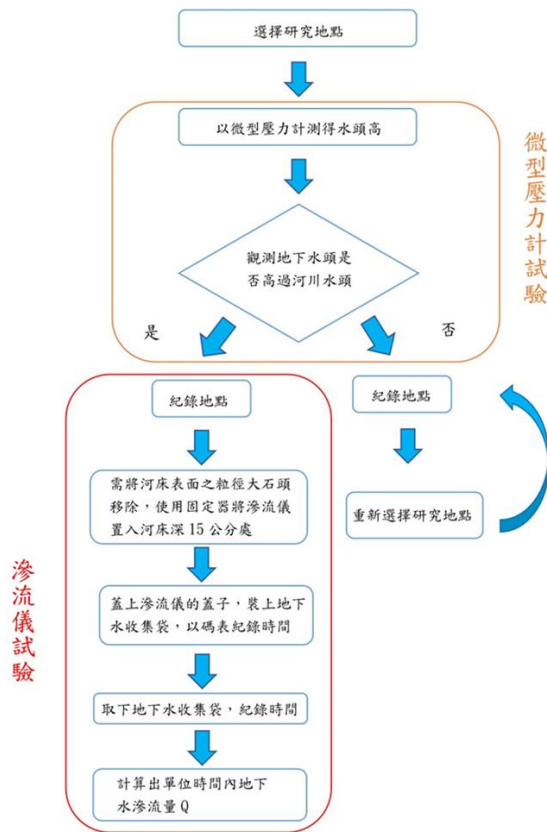


圖4 實驗流程圖

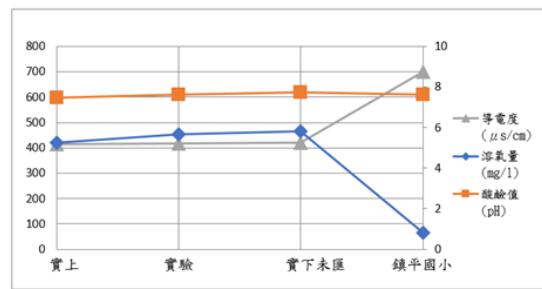


圖6 地表水與地下水水質之比較圖



資料來源: 行政院環境保護署全國環境水質監測資訊網

圖7 鎮平國小地下水水質(氨氮)

表 1 模擬值與觀測值誤差總表

編號	點位說明	簡稱
A	實驗河段上游(舊南屯溪)	實上
B	實驗河段中游(滲流儀實驗點位)	實驗
C	實驗河段下游 1 (未與南屯溪排水匯合點)	實下未匯
D	實驗河段下游 2 (與南屯溪排水匯合點)	實下匯入點
E	南屯溪排水 (與南屯溪排水匯合點上游)	南屯溪排水

表 2 微型壓力計試驗結果一覽表

次數	第一次試驗(cm)	第二次試驗(cm)	第三次試驗(cm)
1	-12.7	-18.1	-2.8
2	-9	-18.2	-4.2
3	-8.9	-11.9	-2.6
4	-10.8	-17.1	-4.2
5	-24.5	-8.9	-4.5
6	-19.4	-18.3	-2
7	-19.9	-21	-7.5
8	-21.7	-22.3	-2.4
9	-18.7	-21.7	-2
10	-21.2	-22.3	-4.7
平均值	-16.68 (出滲)	-17.98 (出滲)	-3.69 (出滲)

表 3 滲流儀量測之出滲計算結果

次數	平均出滲量 q(cm/hr)	平均水頭差 (cm)	水力梯度	水力傳導度 K 值 (cm/hr)
第一次試驗	1.134	-16.68	-1.112	1.020
第二次試驗	1.524	-17.50	-1.167	1.306
第三次試驗	1.387	-3.69	-0.246	5.638

表 4 酸鹼值(pH)結果

點位	A(實上)	B(實驗)	C(實下未匯)	D(實下匯入)	E(南屯溪排水)
第一次試驗	7.38	7.54	7.50	7.50	7.34
第二次試驗	7.49	7.45	7.89	7.55	7.34
第三次試驗	7.51	7.88	7.55	7.56	7.46

表 5 導電度結果

點位	A(實上)	B(實驗)	C(實下未匯)	D(實下匯入)	E(南屯溪排水)
第一次試驗	408	412	408	408	420
第二次試驗	416	419	427	416	420
第三次試驗	418	421	413	422	428

表 6 溶氧量結果

點位	A(實上)	B(實驗)	C(實下未匯)	D(實下匯入)	E(南屯溪排水)
第一次試驗	4.14	6.70	4.98	4.98	2.95
第二次試驗	5.12	4.94	6.60	4.61	2.95
第三次試驗	6.50	5.32	5.04	4.94	4.08

## 金門農地土壤特性及入滲補注能力之調查與空間分析

陳豐文<sup>1</sup>、譚允維<sup>2</sup>、張雅婷<sup>3</sup>、陳永欽<sup>4</sup>、鄭雅娟<sup>5</sup>

### 摘要

金門為一面積小之島嶼，受面積、地形及氣候的影響、水資源匱乏；水資源為影響產業發展及生活品質之關鍵因素之一，金門各項產業中以高粱生產為最具重要地方特色的產業之一，穩定供水為作物生產重要條件，水資源的調配不外乎供給與需求的最佳化平衡；因此本研究嘗試為達成本區域水資源供需調配的長遠目標，由農業作物生產耗水的觀點，初步藉由農地土壤質地性的調查、入滲能力的計算，輔以空間分析方法進行金門地區的農地土壤耗水暨補注特性之探討。

本研究之研究區域以大金門島嶼(包含金沙鎮、金城鎮、金湖鎮、金寧鄉)及小金門島嶼(烈嶼鄉)為範疇，於2018年進行土壤質地調查，土壤採集以等距劃分為原則，總計採集70處；土壤質地判別透過篩分析、比重計、比重等實驗，配合USDA之土壤質地三角圖(砂粒 Sand、粉粒 Silt、黏粒 Clay)含量進行土壤質地判別，分析成果顯示USDA規範的12類土壤，金門區僅包含2種土壤，砂土92.8%、壤質砂土7.2%；其中金城鎮及金寧鄉土壤均為砂土；小金門地區之壤質砂土比例則提高至33.3%。土壤入滲能力推估以臺灣大學農業工程學系(1970)的間接推估法為主，利用土壤質地與入滲量關係查表而得，進一步依各鄉鎮旱作面積權重計算金門地區整體平均土壤入滲率；成果顯示金城鎮及金寧鄉均為25.00 mm/day，金沙鎮、金湖鎮及烈嶼鄉分別為24.49 mm/day、24.39 mm/day、21.97 mm/day，金門地區整體為24.32mm/day。空間區域分析為後續水資源調度或供蓄水工程設施之參考資料之一，本研究以克利金方法進行空間資料內插並應用Arc GIS軟體繪製土壤質地及耗水之空間分布圖；藉以快速判斷土壤質地特性空間分布情形，結果顯示土壤黏粒以金門東北(金沙鎮)、金門西部的金城鎮以及烈嶼鄉北部比例較高，土壤粉粒以烈嶼鄉全區含量比例較高，金城鎮以及金東太武山地區次之；含砂量比例以金門西北方、金東地區含量較高。土壤耗水(入滲)能力顯示以金門西部之金城鎮及金寧鄉入滲能力較大，往東部金湖鎮(太武山地區)及金沙鎮區域則有下降之趨勢。

**關鍵字：**土壤質地、入滲能力、空間分析、農地耗水特性

<sup>1</sup> 財團法人農業工程研究中心 副研究員

<sup>2</sup> 財團法人農業工程研究中心 助理研究員

<sup>3</sup> 財團法人農業工程研究中心 副研究員

<sup>4</sup> 台北市瑠公農田水利會 管理組長

<sup>5</sup> 台北市瑠公農田水利會 管理員

## 壹、前言

依據 2016 年統計資料，全臺總農地面積約為 79 萬 4,002 公頃，其中農田水利會灌區面積為 36 萬 7,847 公頃(約 46.3%)；另依據農委會農糧署統計 2016 年農作物種植面積，收穫面積以 2016 年為例，扣除 8.64 % 的綠肥作物，稻米約為 34.49 %；果品約 23.13 %；蔬菜約 19.24 %；雜糧(飼料玉米、食用玉米、甘藷、落花生、高粱、紅豆、大豆、其他)約 9.63 %；特用作物(茶、菸草、胡麻、其他)僅 2.66 %；特用作物(甘蔗)僅 1.13 %；花卉為 1.81 %。不同作物有其適合的栽培期間及溫度分布限制、作物需水特性等；然而國內受限於氣候及地形的分布，不同區域的水資源蘊藏量條件不同，如能建立國內水量、氣候(溫度及濕度)、土壤質地(入滲量)、作物需水量之空間分布資料；將不同作物之需水特性及適合栽培期配合本研究建立之水文及氣候分布資料，分級篩選不同作物合適栽培區域；針對不同區域，以水源供應觀點，亦可優選排序建議合適栽培之作物，以達到配合水情及氣候條件下，不同區域適地適栽的目標。本年度以金門地區(包含小金門地區)旱作灌區為研究範圍，進行前述作物栽培及水源概況調查及合理用水量分析，從多面向觀點切入，如：降雨、用水時態、水資源分配、土壤質地、土壤需水量…等角度進行分析，盼能藉由今年度調查，於有限水源、土壤多重限制下，建立金門各地區適用作物類別及需水量建議，以供未來農業政策上之參考依據。

## 貳、材料與方法

### 一、研究區域概述

#### (一)氣象特性

金門東鄰臺灣海峽，西鄰中國廈門市，天氣易受海洋環境、東北季風影響，屬於亞熱帶海洋季風氣候，本研究以金門站(中央氣象局地

面氣象站，站號 467110)為例，近 10 年平均溫度為 21.1°C。金門地區由於地勢平坦、無高山形成遮蔽，易受到東北季風影響、且風力強勁，金門站測得近 10 年平均日均風風速約為 2.98 m/s，其中以 10 月風速較強，平均風速約 3.74 m/s。金門地區長年受強勁東北季風影響，故該地區蒸發散量也隨之影響，以金門站 A 型蒸發量統計結果為例，近 10 年來年平均蒸發量為 1,117.5 mm，其中以 7~10 月蒸發量較高(圖 1)。

#### (二)雨量分布

金門地區年平均降雨量約 1,049.4 mm，降雨多集中於 4~9 月，以金門站為例，近 10 年平均年降雨量為 1,054.5 mm，其中 4~9 月降雨量即達到 741.6 mm(約佔全年降雨量 70.3%)，降雨不均、乾濕季分明，分析其降雨型態可發現 4~6 月屬於梅雨季，而 7~9 月則多為颱風降雨，至於 10 月~1 月雖然受到強烈東北季風影響，然而金門地區地勢較低、無高山格檔，難以產生地形降雨，有關降雨時間分佈如圖 2。綜合前述金門年蒸發量資料(1,117.5 mm)，且降雨時間不均勻、缺乏山脈難以涵養水源，故水資源缺乏，使得農業用水分配、調度上更顯重要。

#### (三)水資源概況

金門地區用水型態主要為地表水源(湖庫水)及地下水。金門地區至 2017 年統計現有使用湖庫水共有 15 座(海淡廠目前擴建中)，共可分為金湖供水系統(太湖淨水場)、金沙供水系統(榮湖淨水場)及烈嶼供水系統(紅山淨水場)等三大供水系統，金門地區湖庫水設計總庫容約為 593.4 萬 m<sup>3</sup>，最大水庫為太湖水庫，設計總庫容約為 168.9 萬 m<sup>3</sup>；供水系統而言，最大供水系統為金湖供水系統，供水量約 6,500 CMD，其次為金沙供水系統(供水量約 2,000 CMD)，烈嶼供水系統則較少(供水量約 300 CMD)。金門地區湖庫相對位置如圖 3。

除地表水源外，地下水同為金門重要之用水來源，金門現有地下水井數量共計 25 口深



井，其中 16 口為觀測井(均位於金西地區)，安全出水量最大者為金寧鄉之寧山庫為 0.66 m<sup>3</sup>/min，有關各井口位置詳如圖 4 所示。

#### (四)農業栽培概況

依 2017 年農業統計年報，金門縣土地面積 15,166 ha，其中耕地面積 2,001 ha，農耕土地佔總面積 13%；其中 1,993 ha 為中短期耕作，長期耕作僅為 8 ha；由於氣候、雨量等因素，耕地類別均為旱田。2017 年金門縣農業產值約 5.68 億元，其中農產產值 2.05 億元(36.1%)、畜產產值 2.96 億元(52.1%)、漁產產值 0.67 億元(11.8%)。根據行政院農業委員會農糧署 2016 年數據顯示金門縣耕地面積逐年上升之趨勢，由 2007 年統計耕地面積 1,928.9 ha 上升至 2016 年的 2,500 ha。各鄉鎮耕地面積分別為：金城鎮 348.2 ha、金湖鎮 267.3 ha、金沙鎮 869.1 ha、金寧鄉 653.2 ha、烈嶼鄉 362.2 ha。金門由於受到農業人口老化、駐軍人口大量減少市場需求下滑等衝擊，導致農民耕作意願低落，影響金門本地農產品的生產，另氣候自然條件不佳、全年降雨量少等限制，因此作物栽培僅適於種植需水量較低作物為主，例如高粱、麥、花生、甘藷等旱作雜糧及少部分芋頭、蒜等蔬菜類，其中最大宗作物為高粱，2016 年統計其耕種面積為 1,969 ha，佔總耕種面積之 78.8%。

## 二、調查範圍及選點作業

土壤質地調查及其入滲分析均為本研究評量區域性農地耗水或補助地下水能力之重點項目，本文以金門地區(包含小金門)為調查範圍，考量土壤採樣及實驗之代表性，過去臺灣本島的農田水利會之灌溉計畫的土壤質地實驗單元均以 50 公頃(輪區)為實驗單元。由於金門地區無農田水利會之灌溉系統及組織劃分，因此無法以班或小組為實驗單元，本研究改採等距劃分採樣為原則，等距採取 1 處農地的土壤樣本為原則；本研究採用普查方式，總計土壤採樣數量為 70 處；圖 5 為本研究於金門地區土壤選

點採樣分布位置一覽。

## 三、土壤質地調查、實驗及分類方法

土壤分類包含 3 大步驟，分別為現地調查採樣、土壤顆粒實驗、分類判定等；資分述如下。

### (一)土壤調查採樣

土壤質地分類須完成外業採樣及內業實驗；外業調查作業包含輪區分佈圖資建立及具代表性農地選點作業；現場調查包含紀錄點位座標資訊、農作物類別、土地利用情形等；其中將 5 個行政區域分別以英文字母代替，分別為金沙鎮(A)、金城鎮(B)、金湖鎮(C)、金寧鄉(D)、烈嶼鄉(E)；並將各點位依序編號，土壤實地採樣深度為表土至深度 30 公分之混合土樣。

### (二)土壤實驗分析

土壤採集作業結束後，即將樣品送回實驗室進行風乾，參照洪如江(1995)進行土壤粒徑實驗(土壤分類實驗)，包含篩分析實驗、比重計實驗、比重實驗等，並依據上述實驗結果繪製土壤粒徑分佈曲線。

### (三)土壤質地分類方法

土壤質地是由三種粒子所組成，粒子分別為：砂粒(Sand)、粉粒(Silt)、黏粒(Clay)，這三種粒子，根據土壤所含之砂粒、粉粒及黏粒重量百分率，可作為土壤分類之依據。常見的分級標準為美國農業部(USDA)及日本澀谷博士土壤分類法等。目前常見之美國農業部(USDA)將粒子直徑(mm)區分為：砂粒 2~0.05、粉粒 0.05~0.002、黏粒<0.002，由粒徑大小之比例對照三角座標可得土壤分類，現行土壤分類主要訂有砂土、壤質砂土、砂質壤土、粉土、粉質壤土、壤土、砂質黏壤土、黏質壤土、粉質黏壤土、砂質黏土、粉質黏土及黏土等 12 種土壤質地如表 1，再使用美國農業部(USDA)之土壤質地三角圖(如圖 6)進行比對判別土壤質地。

經濟部水利署水權手冊之土壤分類採用日本-澀谷紀三郎博士之分類法計算入滲量，澀谷紀三郎為日治時代臺灣總督府中央研究所農業

部農藝化學科長，為臺灣早期土壤、土性調查之權威，其分類方式與目前日本工業規格 JIS(日本工業標準調查會)相同，將粒徑區分為：砂粒 5~0.05、粉粒 0.05~0.005、黏粒 <0.005，由粒徑大小之比例將土壤分為：砂質礫土、礫質砂土、砂土、壤質砂土、砂質壤土、壤土、埴質壤土、壤質埴土、埴土、中埴土及重埴土等 11 種壤質地。本研究土壤質地普查均採用美國農業部(USDA)三角分類座標法，此分類方法無法直接對應至經濟部水利署水權手冊中之土壤分類，故利用二種分類法之砂粒>0.05 共通關聯性，整理出可對應相同範圍之土壤分類如表 2。

#### 四、土壤理論入滲率推估

##### (一)單點理論入滲率推估方法

土壤入滲能力推估部分，影響田區入滲的主要因素為土壤別，本研究以灌區土壤質地屬性進行土壤入滲率之估算。臺灣省水利局設計規範以土壤黏土粒含量計算垂向入滲率，如(1)式，表 3 乃臺灣省水利局過去於臺灣各地之田間試驗結果；林俊男(1993)以統計迴歸方式推求土壤質地與  $I$  之關係式，如(2)式。本研究建議採用水利局公式(1)~(2)式作為灌區不同土壤入滲量推估之依據。

$$P=240/(S_c \times I) \quad (1)$$

$$I=0.932039+0.0362642S_c-0.000296759S_c^2 \quad (2)$$

式中： $P$  為入滲率(mm/day)； $S_c$  為土壤黏粒百分比(%)； $I$  為係數(依黏粒百分比大小)。

##### (二)區域性理論入滲率推估方法

本研究應用(1)式及(2)式進行農地之理論入滲率推估，主要以該土壤樣本之黏粒含量百分比間接推估理論入滲率。另外，為了進一步推估金門各鄉鎮區域整體平均之入滲率，本研究以(3)~(5)式推估之。

$$P_{AV,i}=(P_{N=1} \cdot K_{N=1})+(P_{N=2} \cdot K_{N=2})+(P_{N=m-1} \cdot K_{N=m-1})+\dots+(P_{N=m} \cdot K_{N=m}) \quad (3)$$

$$K_{N=1}=A_{N=1}/A_{T,i} \quad (4)$$

$$K_{N=1}=A_{N=1}/(A_{N=1}+\dots+A_{N=m-1}+A_{N=m}) \quad (5)$$

式中： $P_{AV,i}$  為第  $i$  鄉鎮的平均入滲率(mm/day)； $P_{N=1}$  為該鄉鎮第 1 場址入滲率， $N$  為場址序號(共  $m$  處)； $K_{N=1}$  為第 1 處場址的權重係數； $A_{N=1}$  為該場址的控制面積； $A_{T,i}$  為該鄉鎮總面積。

#### 五、空間資料內插分析方法

對於將點的資料進行內插分析，以獲得空間的資料有許多方法；本研究採用反距離權重法(IDW)，將土壤質地、入滲能力等單點參數，轉換為以空間方式展示，並進一步據以繪製空間分布圖資。反距離權重法是美國國家氣象局(U.S. National Weather Service)於 1972 年發展出的方法，主要依照平均權重的概念，利用未知測站的附近測站之水文量推估未知測站的水文量(Bedient *et al.*, 1992; Goovaerts, 2000)。反距離權重法之計算觀念源自於 1970 年提出之地理學第一定律(Tobler's first law)的觀念進行數據內插；依據未知點(目標點)和各個氣象站的距離關係給予權重，距離越近的權重越大，距離越遠的權重越小，權重乘以各個測站的水文或地文值，其總和即為未知點的估計量，其方程式表示如(6)~(7)式(Bedient *et al.*, 1992; Burrough *et al.*, 1998; Goovaerts, 2000; Li *et al.*, 2008)：

$$\hat{R}_p = \sum_{i=1}^N w_i R_i \quad (6)$$

$$w_i = \frac{d_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-\alpha}} \quad (7)$$

式中： $\hat{R}_p$  為未知點的估計入滲量(mm/day)、 $R_i$  為各測站的入滲量(mm/day)、 $N$  為土壤樣站的數量、 $w_i$  為各樣站所佔之權重。 $d_i$  為未知點和各樣站的距離(m)、 $\alpha$  為指數，一般設為 2 (Zhu *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2008)。

## 叁、結果與討論

### 一、土壤實驗及分類成果

本研究於 2018 年完成採集 70 組土壤樣本及篩分析、比重實驗及比重計分析等三項土壤實驗，經由前述實驗成果判析土壤砂粒、粉粒、黏粒之組成比例，並依美國農業部三角座標分類法分類土樣分析土壤質地，各土樣之粒子含量比例及其土壤分類分析成果如下：

土壤分類實驗主要以顆粒的篩分析及細顆粒的比重計實驗為主，其中篩分析的部分，土樣經搖篩實驗後將其#10、#20、#40、#60、#100、#140、#200 及最後篩出等 8 種土樣秤重記錄，再計算通過不同篩號之土樣其各篩號存留百分比、累積存留百分比及累積通過百分比；比重計實驗則進一步將通過#200 之土壤以史托克定率(Stoke's Law)的沉降方式進行實驗。

此外，比重實驗成果可作為比重計實驗計算所需之參數，本研究 70 個土樣之比重分布範圍為 2.4~2.7，球狀形土壤比重約在 2.66，片狀形土壤比重則約在 2.8~2.9。比重成果被應用於推估比重計實驗之 K 值，進而可推算土壤中砂粒、黏粒、粉粒之比例。本研究將每一處土壤之篩分析成果與比重計分析成果合併繪出該土樣之全顆粒分析曲線，範例如圖 7 所示。

本研究於金沙鎮調查 18 處農地土壤，經分析後，除 1 處砂粒比例較低(壤質砂土，LS)，其餘土壤砂粒含量比例皆超過 90%，屬於砂土(S)。金城鎮調查 11 處農地土壤，全區土壤均屬於砂土(S)。金湖鎮調查 15 處農地土壤，除 1 處為壤質砂土(LS)，其餘土壤砂粒含量比例皆超過 90%，屬於砂土(S)。金寧鄉調查 18 處農地土壤，全區均為砂土(S)。烈嶼鄉調查 9 處農地土壤，除 3 處為壤質砂土(LS)外，其餘 6 處樣本皆屬於砂土(S)。整體而言，大小金門農地土壤以砂土 92.8% 為主、其次為壤質砂土 7.2%；其中金城鎮及金寧鄉土壤均全數為砂土；

小金門地區(烈嶼鄉)之壤質砂土比例則提高至 33.3%。

### 二、土壤入滲能力評估結果

本研究利用土樣實地採樣及實驗分類調查成果，進一步推估大小金門各鄉鎮之土壤理論入滲率，理論入滲率推估成果包含兩種推估方法，其一為應用(1)~(2)式(以黏粒含量推估)；其二為應用表 3(以土壤類別進行查表方式)；由於本研究於金門地區的土壤類別實驗結果顯示土壤黏粒含量極低，因此以公式推估之入滲率適合用以繪製空間分布圖之用途(以凸顯各地區不同入滲能力之程度差異)；土壤入滲率則以查表成果為主，其結果分析如下。

金沙鎮之土壤理論入滲率推估成果顯示以土壤類別推估之平均區域性入滲率為 24.49 mm/day；以公式推估而言，土壤理論入滲率範圍為 56.09~412.10 (mm/day)。金城鎮之土壤理論入滲率推估成果，以土壤類別推估之平均區域性入滲率為 25.00 mm/day；以公式推估而言，土壤理論入滲率範圍為 60.64~3,490.50 (mm/day)。金湖鎮之土壤理論入滲率推估成果顯示以土壤類別推估之平均區域性入滲率為 24.39 mm/day；以公式推估而言，土壤理論入滲率範圍為 139.85~1,133.78 (mm/day)。金寧鄉以土壤類別推估之平均區域性入滲率為 25.00 mm/day；以公式推估而言，土壤理論入滲率範圍為 95.58~1,120.64 (mm/day)。烈嶼鄉之土壤理論入滲率，以土壤類別推估之平均區域性入滲率為 21.97 mm/day；以公式推估而言，土壤理論入滲率範圍為 82.20~1,322.68 (mm/day)。

本研究利用金門各鄉鎮之旱作栽培面積推估各鄉鎮所佔權重，分別為金沙鎮(0.3476)、金城鎮(0.1393)、金湖鎮(0.1069)、金寧鄉(0.2613)、烈嶼鄉(0.1449)，應用(3)~(5)式，並配合查表(表 3)方式推估金門地區整體之土壤理論入滲率為 24.32 mm/day。

### 三、土壤特性空間圖資建立及分析

本研究將大小金門 70 處土壤採樣點之土壤黏粒、粉粒、砂粒含量比例，以反距離權重法進行空間資料內插並應用 Arc GIS 軟體繪製空間分布圖，整體分析金門地區各土壤顆粒含量比例，黏粒以金東北(金沙鎮)、金西的金城鎮以及烈嶼鄉北部比例較高，粉粒以烈嶼鄉全區含量比例均較高，其次為金城鎮以及金東太武山地區；含砂量比例以金門西北方、金東地區含量較高，其空間分布結果如圖 8~圖 10 所示。

本研究利用土壤實驗成果進一步依據黏粒含量(公式計算)及依據土壤類別(查表)獲得不同土壤對應之土壤理論入滲值；其兩種不同方法獲得的土壤入滲率均以反距離權重法進行空間資料內插並繪製空間分布，如圖 11~圖 12 所示。其中圖 11 為採用土壤類別對應該土壤類別之入滲量推估而得，因多數點位之土壤類別一致，因此於入滲值相同的情形下，不易凸顯各區域細緻之差異；圖 12 為利用 70 處農地個別的黏土粒含量推估得入滲量進行空間內插推估，雖其入滲量數值偏高(不作為合理用水量之推估使用)，惟較圖 11 能反應出不同區位較細微之入滲能力差異；因此空間之差異特性以圖 12 探討其結果顯示以西部之金城鎮及金寧鄉入滲能力較大，往東部金湖鎮(太武山地區)及金沙鎮區域則有下降趨勢。

### 肆、結論與建議

1. 本研究以大小金門為研究區域，進行土壤質地調查，採等距劃分採樣為原則，進行 70 處農地土壤採樣，透過篩分析、比重計、比重等實驗，配合美國農業部(USDA)之土壤質地三角圖(砂粒 Sand、粉粒 Silt、黏粒 Clay)含量進行土壤質地判別，成果顯示 USDA 規範的 12 類土壤，金門僅包含 2 種土壤，依所佔比例分別為砂土 92.8%、壤質砂土 7.2%。
2. 金門地區土壤入滲能力推估，本研究依農地

土壤質地與入滲量關係推估理論入滲量，並進一步依各鄉鎮旱作面積權重計算金門地區整體平均入滲率；金沙鎮、金城鎮、金湖鎮、金寧鄉及烈嶼鄉之平均入滲率分別為 24.49 mm/day、25.00 mm/day、24.39 mm/day、25.00 mm/day、21.97 mm/day，金門地區整體為 24.32 mm/day。

3. 本研究利用反距離權重法(IDW)進行空間資料內插並繪製空間分布圖；藉以快速判斷土壤質地特性空間分布情形，結果顯示黏粒以金門東北(金沙鎮)、金門西部的金城鎮以及烈嶼鄉北部比例較高，粉粒部分烈嶼鄉全區含量比例均較高，其次為金城鎮以及金東太武山地區；含砂量比例以金門西北方、金東地區含量較高。土壤入滲能力顯示以西部之金城鎮及金寧鄉入滲能力較大，往東部金湖鎮(太武山地區)及金沙鎮區域則有下降趨勢。
4. 本研究對於農地土壤質地的入滲能力採用間接推估理論值，與實地入滲情形是否相似或有何種程度之差異性，建議可以現地進行單筒入滲佐證比對判斷。
5. 金門區域為缺水地區，農地灌溉實際所需水量為何，與採用灌溉設施及農民習慣有關，實際用水量部分可透過流量計等設施規劃觀測，以取得不同作物、灌溉設施下之實際用水量，可作為後續區域性水源系統規劃時之客觀參考數據。

### 參考文獻

1. Bedient, P. B., Huber, W. C. (1992), "Hydrology and floodplain analysis", 2nd ed., Addison-Wesley, Reading, MA.
2. Burrough, P. A., McDonnell R. A. (1998), "Principles of geographical information systems", Oxford.
3. Goovaerts, P. (2000), "Geostatistical approaches for incorporating elevation into the

- spatial interpolation of rainfall”, Journal of Hydrology 228: 113-129.
4. Li, J., Heap, A. D. (2008), “Spatial interpolation methods: A Review for environmental scientists”, Geoscience Australia, Record.
  5. Zhu, H. Y., Jia, S. F. (2004), “Uncertainty in the spatial interpolation of rainfall data”, Progress in Geography 23(2): 34-42.
  6. 洪如江 (1995), 「土壤力學實驗」, 科技圖書股份有限公司, 台北。
  7. 行政院農委會農糧署 (2016), 「105 年農業統計年報」
  8. 林俊男 (1993), 「地理資訊系統應用於乾旱早期安排停灌順序之研究」, 農委會研究報告。
  9. 經濟部水利署 (2009), 「地面水水權(臨時用水)登記申請手冊」。
  10. 臺灣大學農業工程學系 (1970), 「台灣之水稻灌溉」。



圖 3 金門地區湖庫相對位置

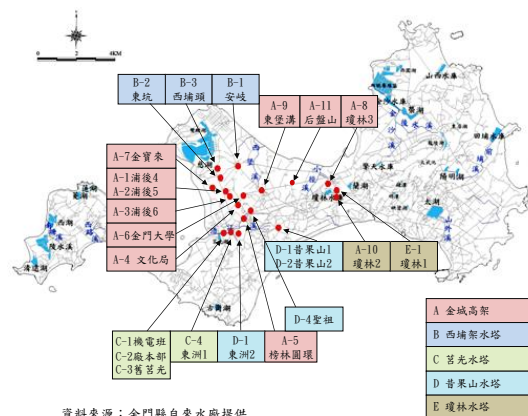


圖 4 金門地區地下井分布位置一覽

圖與表

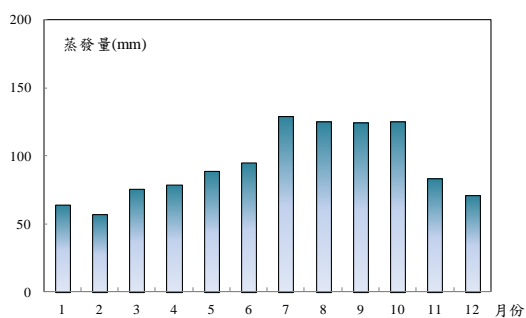


圖 1 金門平均蒸發量變化一覽

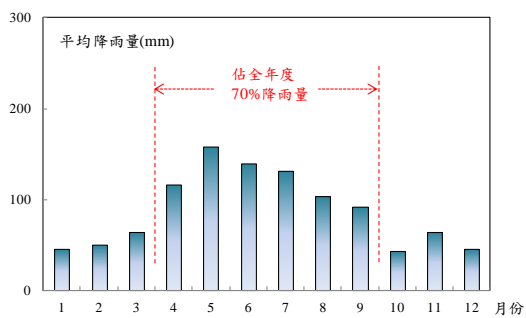


圖 2 金門平均雨量變化一覽

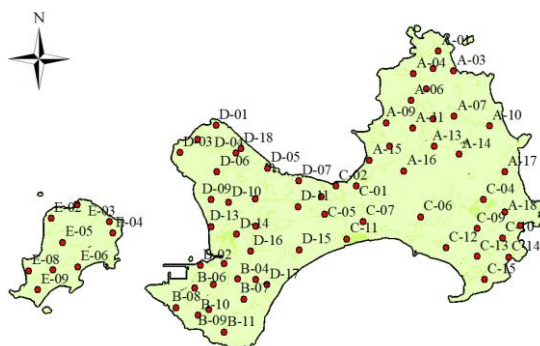


圖 5 土壤質地分類實驗樣本採樣分布一覽

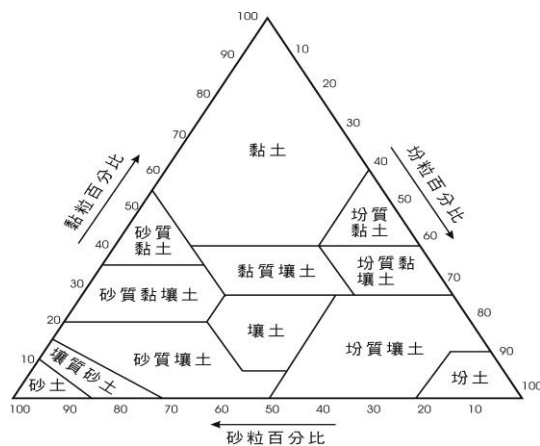


圖 6 美國農業部(USDA)土壤質地三角圖

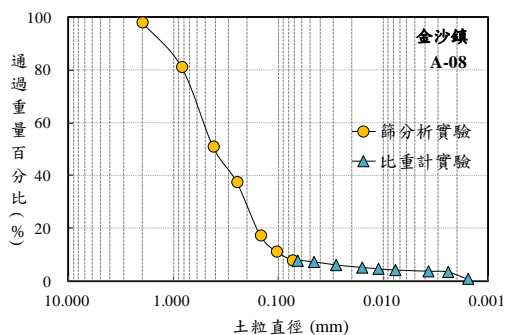


圖 7 土壤粒徑實驗通過百分比曲線圖

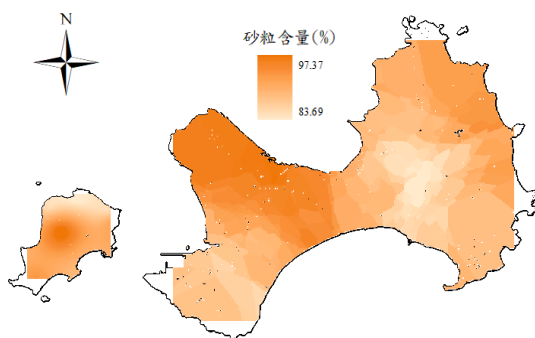


圖 10 土壤砂粒含量百分比空間分布

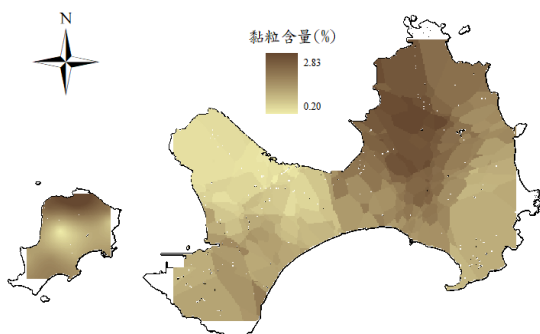


圖 8 土壤黏粒含量百分比空間分布

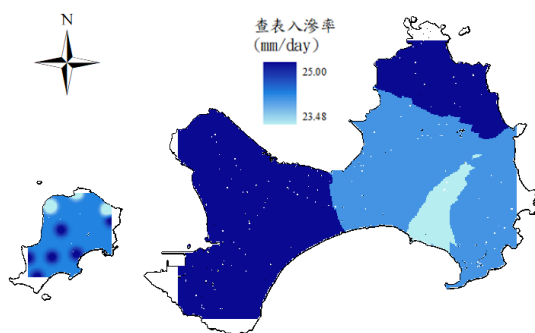


圖 11 土壤理論入滲量空間分布(依土壤類別)

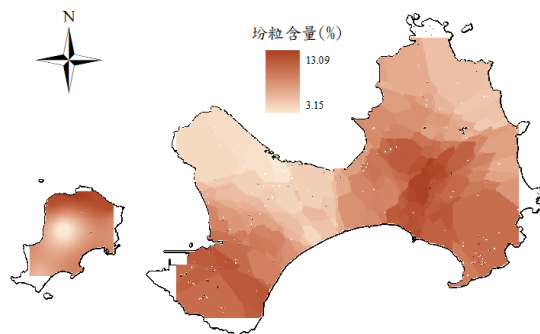


圖 9 土壤粉粒含量百分比空間分布

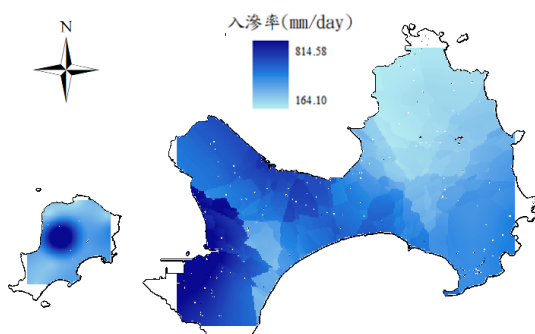


圖 12 土壤理論入滲量空間分布(依黏粒含量)

表 1 美國農業部(USDA)土壤分類一覽

序號	中文名稱	代號	英文全名	黏粒 %	粉粒 %	砂粒 %
1	砂土	S	Sand	0~10	0~15	85~100
2	壤質砂土	LS	Loam Sand	10~15	0~30	70~90
3	砂質壤土	SL	Sand Loam	0~20	0~50	43~85
4	粉土	Si	Silt	0~20	80~100	0~20
5	粉質壤土	SiL	Silty Loam	0~27	50~88	20~50
6	壤土	L	Loam	7~27	28~50	23~52
7	砂質黏壤土	SCL	Sandy Clay Loam	20~35	0~28	45~80
8	黏質壤土	CL	Clay Loam	20~45	15~53	27~40
9	粉質黏壤土	SiCL	Silty Clay Loam	27~40	40~73	0~20
10	砂質黏土	SC	Sand Clay	35~55	0~20	45~65
11	粉質黏土	SiC	Silty Clay	40~60	40~60	0~20
12	黏土	C	Clay	40~100	0~40	0~45

表 2 土壤分類法對照一覽

USDA 土壤分類法			澀谷博士土壤分類法		
土壤質地	砂粒(Sand) % 2~0.05 mm	<0.05mm% (100%-砂粒)	土壤分類	砂土(Sand) % 5~0.05mm	<0.05mm% (100%-砂粒)
砂土	85~100	0~15	砂質礫土	100~90	0~10
壤質砂土	70~90	10~30	礫質砂土	90~80	10~20
			砂土	80~70	20~30
砂質壤土	50~70	30~50	壤質砂土	70~60	30~40
壤土	25~20	50~75	砂質壤土	60~50	40~50
坩質壤土	0~50	50~100	壤土	50~40	50~60
砂質黏壤土	30~75	25~70	埴質壤土	40~35	60~65
砂質黏土	30~65	35~70	壤質埴土	35~30	65~70
黏質壤土	20~30	70~80	埴土	30~25	70~75
黏土	0~30	70~100	中埴土	25~20	75~80
坩質黏土	0~20	80~100	重埴土	<20	>80
坩質黏壤土	0~20	80~100			
坩土	0~20	80~100			

表 3 各種土壤別與入滲量之關係

土壤種類	黏土質含量 %	係數 (I)	入滲量 P(mm/day)	土壤種類	黏土質含量 %	係數 (I)	入滲量 (mm/day)
砂質礫土*	1.6	1.0	150.00	黏質壤土(CL)	21.9	1.6	6.85
礫質砂土*	5.0	1.1	43.70	壤質黏土(LC)*	27.0	1.7	5.24
砂土(S)	8.0	1.2	25.00	黏土(C)	33.0	1.8	4.04
壤質砂土(LS)	11.6	1.3	15.90	中黏土*	40.0	1.9	3.16
砂質壤土(SL)	14.9	1.4	11.50	重黏土(HC)*	49.0	2.0	2.45
壤土(L)	18.2	1.5	8.80				

註：\*為 USDA 土壤質地三角圖尚無定義此種土壤。

資料來源：臺灣大學農業工程學系，1970。

## 未來水井管理策略方向思考

林育如<sup>1</sup>、葛武松<sup>2</sup>、李友平<sup>3</sup>、吳益裕<sup>4</sup>、宋長虹<sup>5</sup>

### 摘要

臺灣現階段係藉由《水利法》及其施行細則，以及《地下水管制辦法》等相關法令之規定構築著地下水資源及水井管理之架構體系，盱衡水利法規管理架構，地下水資源及水井管理，係以公有財概念，以水權為運作核心，輔以量水設備(水表或獨立電表)之計量管理，配合地下水水位監測及地層下陷檢測與地下水水情燈號(綠燈、黃燈、橙燈與紅燈)分析操作，採以地下水管制區劃設公告方式進行管制區內水井管理，縮限水井抽水行為。然地下水採單井管理架構將不易達成區域性地下水水位管理目標(即易給難收，減抽管控不易)，能否採以區塊管理思維，改以區域產業管理為手段(諸如農業枯水期改以旱作為主，地下水管制區輔導產業節水管理或管制產業發展類別與型態，落實水資源為產業發展之制約條件非配合條件)，達成地下水管理目標，在未來水井管理機制建構上，有創新思維以尋求突破性管理作為。本論文係「以水井全面納管，減少違法水井，落實水權規定，健全水井管理為手段；初以單井管理為對象，進而以區域地下水水位管理為目標，長期則導入智慧管理架構，以抽水計量、水位監控及總量管制原則，重新釐定地下水資源角色，由消極管制抽水邁向積極動態水權管理，以永續利用保育地下水資源。」為願景目標，嘗試探討未來水井管理策略方向。

**關鍵字：**地下水、違法水井、水井管理

<sup>1</sup> 經濟部水利署水利行政組 副工程司

<sup>2</sup> 經濟部水利署水利行政組 科長

<sup>3</sup> 經濟部水利署第四河川局 局長

<sup>4</sup> 經濟部水利署水利行政組 組長

<sup>5</sup> 亞磊數研工程顧問有限公司 總經理



## 壹、前言

臺灣現階段係藉由《水利法》及其施行細則，以及《地下水管制辦法》等相關法令之規定構建著地下水資源及水井管理之架構體系，盱衡水利法規管理架構，地下水資源及水井管理，係以公有財概念，以水權為運作核心，輔以量水設備(水表或獨立電表)之計量管理，配合地下水水位監測及地層下陷檢測與地下水水情燈號(綠燈、黃燈、橙燈與紅燈)分析操作，採以地下水管制區劃設公告方式進行管制區內水井管理，縮限水井抽水行為。然此行政作為受限於民眾對於水權管理意涵之瞭解與長期累積之地下水為天然資源依附於其所有土地之私權觀念，違規使用狀況普遍；兼以計量設備安裝等客觀要件未臻成熟，且擅行取水裁罰多採被動管理方式，肇致水權管理架構推動趨於形式化。衡諸此情況，行政院 2011 年 8 月 16 日核定「雲彰地區地層下陷具體解決方案暨行動計畫」規劃健全水井管理策略項下先就雲林、彰化地區進行各標的水井清查，再予以分類、分級，再依環境敏感程度及替代水源取得條件，規劃管理、管制計畫，循序納管或處置，以期兼籌產業用水需求、民眾生計，並顧及地下水水資源保育條件，逐步降減地下水超量抽用對地層下陷之負面效應。

因地下水資源之取用係採單井抽水方式，其抽水量體未若水庫或傍河取水設施(如攔河堰)之地面水資源可採端源管理方式進行供需管控，亦即依湖庫或河川水文條件進行主動式之調配管理；換言之，地下水採單井管理架構將不易達成區域性地下水水位管理目標(即易給難收，減抽管控不易)，能否採以區塊管理思維，改以區域產業管理為手段(諸如農業枯水期改以旱作為主，地下水管制區輔導產業節水管理或管制產業發展類別與型態，落實水資源為產業方展之制約條件非配合條件)，達成地下水管理目標，在未來水井管理機制建構上，宜有創新思維以尋求突破性管理作為。

## 貳、水井管理面臨之問題

臺灣因降雨時空分布不均、河川坡陡流短流量變化大，湖庫蓄容有限兼以泥砂淤積嚴重，以及具較高之水資源污染潛勢等諸項因素，致在產業發展用水需求下，地下水抽用量占年均水資源利用總量之 33%。然因產業發展區位之配置與水資源調配管理之供應條件未相應配合下，肇致部分地區地下水超限使用，發生地層下陷問題，嚴重影響地下水涵養及國土保安。依據水利署歷年監測資料統計，全臺年下陷速率超逾 3 公分/年之顯著下陷面積已自 1990 年代初期之千餘平方公里逐年改善下降，唯其仍隨水文狀況呈起伏變化，至 2017 年全臺顯著下陷面積為 395 平方公里。衡諸地下水水資源耗用型態及民眾用水行為，歸納水井管理面臨之問題為：

1. 地下水價廉取水方便：中南部地面水源不足或沿海地區因地下水取用成本地廉、水溫穩定、水量固定且污染較少，爭相開鑿水井以應產業需要。
2. 民眾欠缺知法守法觀念與態度：水為天然資源，屬於國家所有，不因人民取得土地所有權而受影響，為水利法揭示之水資源管理原則，而民眾鑿井多未依法定程序申請水利建造物核准及申請水權。
3. 各標的用水型態難以改變：臺灣地區水稻種植分二期，一期水稻耕作期為枯水期，地下水補注少抽取多，惟其收益較二期稻作為高，輔導農民轉種旱作不易推動。
4. 未登記水權水井數量龐大難以掌握：至 2010 年全臺已調查區域未登記水井數已逾 30 萬口，且地下水使用無紀錄。封閉空間鑿設之水井(如工業或生活用水)因無法進入，除舉報外查獲率低，致往昔查獲之違法水井絕大多數位於開放空間，其中近 9 成為灌溉用水井。以彰化縣及雲林縣為例，因水井調查僅係就無建築物遮蔽之水井或井主願意配合調查者為之，故調查出水井數分別為 75,266 口及 107,689 口，較諸納管申報水井數，此調查水井數僅分別占納管申報數之 50.45%及 72.64%。
5. 地面水源不足，水井無法完全停用封填：公有及登記工業用水井，仍有用水需求；農業

用水井主要位於灌區，農民未能配合輪作制度，貿然封停水井，影響產業及生計；而非灌區之農田，因無地面水源挹注，更需鑿設水井供灌。

6. 水井管理法規未臻健全：以往囿於無明確法律授權致無法進入檢查及封閉既有存在之違法深層抽水井，管制困難，對整體地層下陷防治工作形成漏洞且有違公平正義原則。
7. 地下水可利用總量不確定：因地下水水位監測井有限，水文地質複雜，地下水模式推估可利用總量差異大，訂定區域地下水資源抽取總量管制目標，具高度挑戰性。

### 參、水井管理願景

有關水井管理初步研擬願景目標為：「以水井全面納管，減少違法水井，落實水權規定，健全水井管理為手段；初以單井管理為對象，進而以區域地下水水位管理為目標，長期則導入智慧管理架構，以抽水計量、水位監控及總量管制原則，重新釐定地下水資源角色，由消極管制抽水邁向積極動態水權管理，以永續利用保育地下水資源。」(請參見圖 1 所示)。水井管理之良窳攸關地下水資源環境發展，健全之水井管理將有助於地下水資源在總量管理目標下之有效運用，其主要管理架構概為：

- 水井納管輔導合法：落實水權規定，健全水井管理，掌握區域抽水量。
- 水位監控與警示：以嚴密之地下水水位觀測及警示機制，落實地下水管理，管控區域地下水抽用情形，避免發生超抽狀況、紓緩地層下陷。
- 地下水可用水量評估：評算區域地下水可用水量，供縣府核發水權量參考，落實「抽不超補」之總量管制，以保育地下水永續經營。
- 違法水井查處及廢棄水井封填：加強違法水井查處，建立政府施政公信力；積極封填廢棄

水井，減少地面污染物隨水流進入地下含水層或避免人為灌注污染物可能性。

- 資訊系統建置與管理：掌握實際水井空間分布配合計量設備安裝估算實際抽水量，以及研判核發水權量是否適宜。
- 地面地下水資源聯合調度：供地面地下水資源聯合調度基本參據，使水資源利用趨向最佳化。

### 肆、水井管理處置策略及措施

衡諸水井抽用地下水方式及其對環境負面影響之嚴重性，研訂水井管理策略為：(一)公告地下水管制區分區加強管理，(二)水井分類管理，(三)多元管道查核水井，(四)地下水鑿井業管理。水井管理處置策略架構請參見圖 2 所示，茲分述策略構想及相應措施臚列如后。

#### 一、公告地下水管制區分區加強管理

經濟部依據「水利法」第 47-1 條規定訂定「地下水管制辦法」，據以管理地下水管制地區內之鑿井引水行為。「地下水管制辦法」第 2 條規定：「地下水管制地區(以下簡稱管制區)由中央主管機關考量地層下陷程度、地下水水位變化、地質條件及其他相關因素，區分為第一級及第二級管制區劃定公告。前項管制區之劃定，中央主管機關得每五年或依實際狀況檢討變更之。」；為執行「地下水管制辦法」第 2 條規定經濟部特訂定「地下水管制區劃定作業規範」，參據地層下陷、地下水水位、地質、高程、潮汐、水質及地下水水情(區分為綠燈、黃燈、橙燈及紅燈等四類燈號)以評析劃定管制區。第二級地下水管制區內鑿井引水，須符合「地下水管制辦法」第 5 條之規定，而第一級管制區則須符合第 1、4、6 或 7 款為限。

#### 二、水井分類管理

分類管理原則為：

##### (一)大用水戶及深層水井優先處理

依據雲彰地區地層下陷分層監測資料，地層主要壓密區為位於深度逾 100 公尺，開篩位置位於受壓含水層之深井需優先管理。此外，大用水戶抽用地下水量較多，亦須優先管理。除自來水公司及農田水利會等公有水井為優先處

理對象外，符合此原則之工廠水井亦須納入。  
其處理原則如下：

1. 自來水公司及農田水利會等公有水井專案  
列管：自來水公司水井於地面水源供應後處  
置，水利會水井於建置埤塘、輔導轉作、圳  
路更新改善、提供替代水源等措施，足具減  
少地下水需求後再予處置。
2. 工廠內之水井加強查察：依據「水利法」第  
93-6 條強制檢查權之規定及「地下水管制區  
工廠內水井查察與處置作業原則」辦理。

### (二) 未登記既有水井專案輔導納管

主要以農業使用之未登記既有水井為對象專  
案輔導納管。

### (三) 新增違法水井即查即填、既有違法 水井分類處理

依據環境危害程度、水源條件及用水需求等分  
級分類排序處置。

## 三、多元管道查核水井

### (一) 既有合法水井加強管理，落實水權 管理規定

依據水利法第 33 條及第 39 條規定，加強辦理  
下列事項：

1. 依水權年限 3 至 5 年履勘查核：每筆水權其  
核准年限為 3 至 5 年，配合履勘及展限定期  
查核水井使用狀況，包括井體及量水設備與  
用水範圍等。倘其計量方式採獨立電表者，  
則主管機關在履勘或不定期檢查時，應辦理  
水電比量測檢定作業(至其人力與經費衡諸  
水井納管輔導合法之量體規模可採專案編  
列經費補助方式辦理)。
2. 不定期查核量水設備及用水情形：(1)以工  
廠及用水大戶與地層下陷地區優先辦理水  
權用水情形不定期檢查。(2)配合其他目的  
(水源保育、溫泉取用、環保、工廠管理、  
衛生、勞安)進行不定期檢查。
3. 用水紀錄書面填報及大用水戶線上填報：(1)  
依水利法第 39 條規定，水權展限時應提出  
核准用水期間，歷年逐月引用水量紀錄。(2)

推廣逐月線上填報用水紀錄：以工業用水及  
水力用水、其他地下水抽取量 0.1CMS 以上  
或繳交溫泉取用費、水源保育回饋費者為推  
廣對象。

4. 推動智慧地下水計量管理：依據水利法第  
39 條規定，水權人需裝置量水設備，依「雲  
彰地區納管水井輔導合法作業規範」規定灌  
溉用水井其量水設備除水量計外，亦可以獨  
立電表代之。為透過量化監控、遠距傳輸、  
智慧管理建構地下水物聯網，確實掌握地下  
水量，使地下水管理智慧、精確、明快與合  
理化，以工廠、水利會、自來水公司、用水  
大戶、深井為對象推動智慧地下水計量管理  
(包括智慧水表或電流啟閉紀錄器)。智慧地  
下水計量管理可進行下列分析，以利瞭解水  
資源使用情況，包括：(1)抽水資料大數據分  
析，(2)水權人井群抽水總量分析，(3)抽水與  
水位綜合分析，(4)專家決策管理模組，及(5)  
水資源綜合分析。

### (二) 多元管道查察違法水井，遏止違法 水井持續增加

1. 補助地方政府提高巡查人力，加強巡查作業：  
巡查重點區域以第一級地下水管制區及高  
鐵沿線為優先辦理區域。
2. 管制區提供檢舉獎金，鼓勵民眾檢舉：申報  
納管期限過後，若發現未申報納管之水井時，  
任何人均可向各縣市政府檢舉，地方政府將  
由專人前往現勘，若確認為違法水井時，將  
依現行法律處理。地下水管制區內經民眾檢  
舉經各縣市政府認定屬新增違法開鑿，發給  
檢舉人新臺幣 3 千元獎金。
3. 加強工廠水井查察，核對用水量及排放量，  
以水平衡關係查核是否使用地下水：水利法  
第 93-6 條賦與主管機關具有強制進入檢查  
權，主管機關基於健全工廠管理或維護公共  
利益之需要，得通知工廠申報或提供有關資  
料；必要時，並得派員進入工廠調查，工廠  
不得規避、妨礙或拒絕(工廠管理輔導法第

18 條)，經濟部水利署為強化地下水管制區地下水管理、防治地層下陷，規範直轄市及縣市政府水利單位辦理區內各工廠抽水井數量及其用水情形之查察及處置（依據「地下水管制區工廠內水井查察與處置作業原則」）。各縣市政府配合地層下陷防治執行方案辦理地下水管制區工廠內水井查察，透過用水與排放水資料分析，查察主要工廠。本項工作可配合各目的事業聯合稽查辦理。

4. 臺電公司查獲竊電案件通報：各縣市政府每月依臺電公司通報查獲漁塭竊電/違章用電資料中疑似有水井者優先赴現地查察，倘確實發現水井，即依法裁處，非疑似水井者則俟行有餘力時再前往查察。
5. 遙測衛星偵測變異點查核：內政部國土測繪中心自 2014 年度起辦理整合內政部營建署、行政院農業委員會水土保持局及經濟部水利署等機關衛星影像監測工作，以衛星遙測為偵測工具，配合地理資訊系統（GIS）技術，進行全國性土地利用變遷偵測作業，並將變異點資訊透過網路通報各相關單位，促其派員至現地查核及回報稽查結果，並追蹤後續處理情形，以確實掌握土地變化。透過衛星變異點判斷是否有新增違法水井。

#### 四、地下水鑿井業管理

##### （一）地下水鑿井業者之管理

依據水利法第 60 條、第 93-1 條、第 93-5 條及鑿井業管理規則第 4 條規定辦理。

1. 為管理地下水開發，地下水鑿井業應申請許可。地下水鑿井業之許可及其所屬技工之資格等，訂定地下水鑿井業管理規則管理之。
2. 地下水鑿井業營業許可之期限為 5 年，可申請展延。地下水鑿井業者應於取得籌設許

可辦妥商業登記後，加入鑿井工程工業同業公會。

3. 地下水鑿井業承辦未經申請核准興辦水利事業之鑿井工程，應廢止其許可。
4. 未申請設立許可從事地下水鑿井業者，處新臺幣 5 萬元以上 25 萬元以下之罰鍰。
5. 違反興辦水利事業情形者，得沒入使用之設施或機具，並得公告拍賣之。

##### （二）地下水鑿井技工之管理

依據水利法第 60-6 條及鑿井業管理規則第 6 條規定辦理。

1. 技工為經中央主管機關或委託其他機關（構）辦理考驗合格者。
2. 已受聘僱之技術員、技工每 5 年應受 6 小時之訓練或講習，並取得時數證明。
3. 地下水鑿井業技工，未依管理規則規定，經受警告處分 3 次以上者，應廢止其工作證，並於 1 年內不再重新發證。

#### 五、違法水井處置

##### （一）行取水裁罰

依水利法第 93 條規定，違反本法或主管機關依法所發有關水利管理命令，而擅行或妨礙取水、用水或排水者，處 4 千元以上 2 萬元以下罰鍰；因而損害他人權益者，處 3 年以下有期徒刑、拘役或科或併科 4 千元以上 2 萬元以下罰金。前項擅行或妨礙取水、用水或排水所使用之機件、工具，主管機關得先行扣留之。

##### （二）水井處置

違反水利法第 46 條、第 47 條、第 54-1 條、第 63-3 條、第 63-5 條、第 65 條、第 78 條、第 78-1 條、第 78-3 條規定者，依水利法第 93-4 條規定主管機關得限期令行為人回復原狀、拆除、清除或適當處分其設施或建造物；屆期不遵行者，得按日連續處新臺幣 1 萬元以上 5 萬元以下之罰鍰，違反第 46 條、第 47 條、第 54-1 條、第 63-3 條、第 63-5 條、第 65 條、第 78 條、第 78-1 條或有第 78-3 條情形者，依水利法第 93-5 條規定主管

機關得沒入行為人使用之設施或機具，並得公告拍賣之。

### 伍、結論

加強落實水井管理將可提高下列環境效益：

1. 切實掌握地下水資源使用量之時空分佈情況，奠立總量管理基礎，輔導民眾建立優化管理機制，落實地下水資源保育永續利用目標。
2. 推動建立地下水資源智慧管理架構，掌握水井抽用及地下水水位動態變化資訊，在總量管制目標下，提高與地面水聯合運用彈性與可靠度，優化區域供水系統穩定性。
3. 加強水井查處與封填廢棄水井，減少地面污染物進入地下含水層或避免人為灌注污染物可能性，保護地下水資源，降低污染風險，提升用水安全。
4. 配合產業政策調整輔導與國土規劃引導，加強地下水資源合理利用，推動節水產業發展(諸如降低一期稻作耕作面積，轉型旱作)減少地下水超抽，紓緩地層下陷。
5. 資訊系統建置輔以人工智慧(AI)決策資訊及計算管理設備研發，創造產業服務發展市場空間。

參考文獻

1. 經濟部水利署，「107 年度水井管理實務推動計畫」，2018 年 12 月。

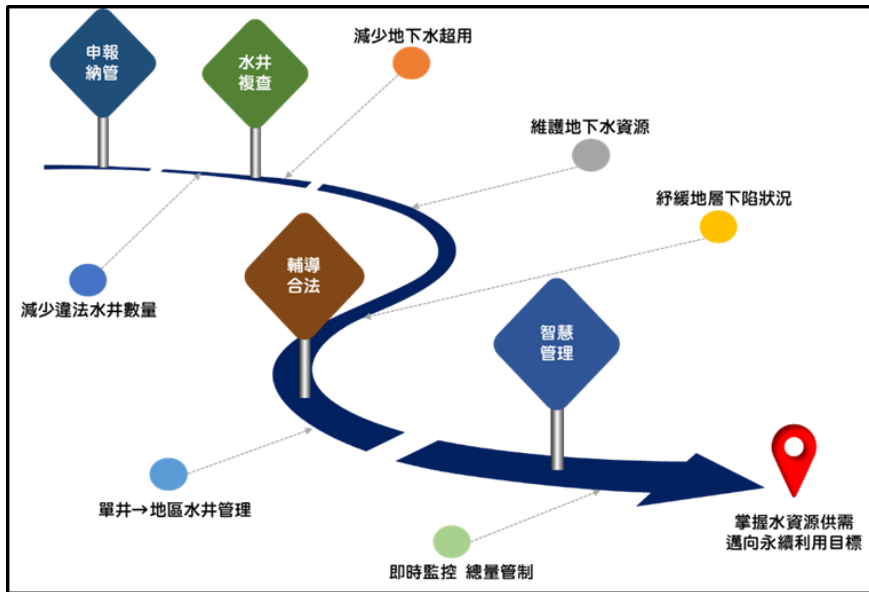


圖 1 水井管理之願景目標

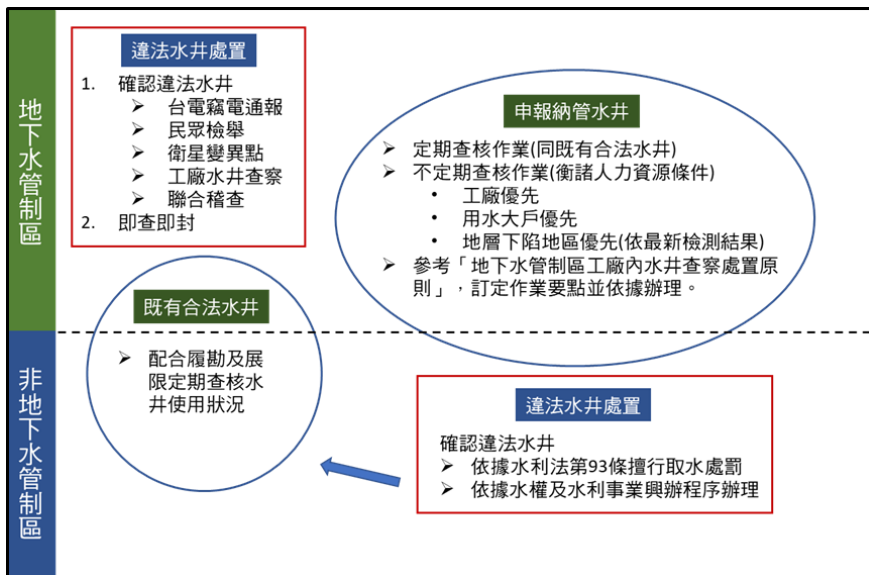


圖 2 水井管理處置策略架構

## 以空載掃描儀影像推估灌溉需水量之研究

陳莉<sup>1</sup>徐元棟<sup>2</sup>徐家盛<sup>3</sup>簡大為<sup>4\*</sup>

### 摘要

受全球氣候變遷影響，台灣地區降雨趨向於極端，日數減少惟強降雨頻率提高，在與都市相鄰的農地，需要更精準掌握作物類別與需水量，以平衡各標地用水。然而近都會區土地利用複雜，一塊田地上可能種植不同作物，耗水情形各有不同，需要精準的分辨種植作物及統計灌溉面積，方能精確掌握供應灌溉用水。

近年來，在農作判釋的影像分類方法從傳統像元式分類逐漸轉變成結合物件導向方式分類，相較於傳統以像元方式易有如斑點般的椒鹽效應，物件導向除了能減少椒鹽效應的問題，亦大幅度簡化所需的分析資料量。為求影像能有較佳之光譜辨識效果，大多利用色彩、紋理、形狀等影像資訊來描述影像內容，以強化影像辨識結果。本研究擬以數值航照影像 ADS40 為實驗材料，比較傳統監督式分類及影像物件化分類(Image Object Classification)模式進行影像資訊萃取及作物判釋。透過不同方法比較作物類別分類準確度，並利用此作物種植面積估算灌溉水量。

結果顯示監督式影像分類及影像物件式分類二種方法都能對農作物面積判釋達到水準以上的精確度，影像物件式分類方法精確度最高為 88.68%。研究區域以影像物件分類法推估作物日灌溉需水量為每日約 2,586 立方公尺。

**關鍵字：**物件式影像分類、空載數位掃描儀、灌溉需水量

---

<sup>1</sup> 中華大學土木工程學系 特聘教授

<sup>2</sup> 臺灣新竹農田水利會 會長

<sup>3</sup> 臺灣新竹農田水利會 工務組組長

<sup>4</sup> 臺灣新竹農田水利會 副工程師，通訊作者，E-mail: [davidgo@mail2000.com.tw](mailto:davidgo@mail2000.com.tw)

## 議題 B.水利防災與海綿城市



# 基于水文气象大数据分析的山洪灾害气象风险预警平台探讨

林炳章

## 摘要

山洪灾害由于其突发性特点、影响因数复杂,往往难于预测,准确预报更是不可能。立足预防、预警是唯一的选择。本文分析了山洪灾害的三大原因:强降雨、水土流失或下垫面过度硬化、行洪道上违规建设,指出必须在强降雨上做文章。本文认为研究山洪灾害防治非工程措施的关键在于研究强降雨的空间分布,建立“强降雨落区、降雨雨强、概率”三者之间的关系,这是理论基础。为此本文提出“山洪暴雨高风险区划”的概念,及其定义、分析计算方法、应用示范。接着,本文提出“三张图山洪预警系统”,即:静态的山洪暴雨高风险区划(科学底图)+动态的临界河漫滩径流值图(缺水图)+动态的临界卫星-雷达临界雨量值图(来水图),并且以此为范例,提出应用大数据分析和网络可视化山洪灾害预警作业平台的路线图。同时,本文指出应用大数据分析进行洪涝灾害预警研究的优点和存在的困难,及其发展前景。最后,本文以厦门市为实例,展示动态的“厦门市降雨频率图集数字化和暴雨高风险区划可视化平台”的两个突出的功能:1)该平台具备人机对话功能,能快速(1-2分钟)精准地计算出任何地点发生的大暴雨量级(重现期),并进一步展现历史上该量级暴雨在研究区的空间分布状况。现有老方法可能需要2-3天才能计算出结果,而且可靠性存疑。2)防汛期间,该平台能够动态展现(屏幕24小时滚动)实时暴雨灾害气象风险的空间分布状况(等级),为提升防洪级别和汛期防洪决策提供科学参考依据。

**关键词:** 山洪灾害、强降雨空间分布、暴雨高风险区、大数据分析、网络可视化

## 區域淹水預報系統開發與測試

鐘柏顯<sup>1</sup>、劉敏梧<sup>2</sup>

### 摘要

在颱風期間為讓防災單位及民眾提前準備減少洪災損失，本研究希望透過颱風豪雨之氣象預報資訊，經由淹水預報系統模擬未來可能淹水範圍。故以 FEWS-Taiwan 整合技術建立淹水預報系統，將氣象預報資料、淹水模式及展示介面整合於同一系統中。系統透過標準化程序運作，從介接氣象資料、啟動模式運算、整合運算結果、自動輸出簡報及展示，使系統於 1 小時內完成預報工作。

系統中使用之淹水模式為荷蘭 Deltares 發展之 SOBEK 模式，該模式可考慮降雨逕流、河川渠道、地表漫流及雨水下水道等不同流況。本研究以臺南市為研究區域，依據現地情形及相關地文資料建立一維及二維耦合模式，為使模式於預報系統中順利完成程序作業，本研究將臺南市 SOBEK 淹水模式分為 7 個區塊進行平行運算，待完成運算後將預報結果整合輸出至展示介面。為使預報資訊提供防救災人員參考，本研究亦開發展示介面及自動輸出簡報功能，使預報資訊提供決策者參考。

系統經數場颱風豪雨測試，預報結果與現場淹水通報比對後準確率最高可達約 60%。另外為驗證淹水預報正確性，本研究亦於臺南市 10 處地點實地裝設淹水感知器，並藉由即時回傳功能，可即時比較觀測資料歷程與淹水預報結果，研究結果顯示淹水預報結果與大部分淹水感知器觀測趨勢一致，也顯示建置之淹水模式可大致掌握現地淹水趨勢。除了有關預報準確率研究外，本研究亦於颱風豪雨期間測試系統運作穩定性，整體測試結果顯示，大部分颱風豪雨事件系統完成排程作業比率超過 95%，且相關運作錯誤均已排除，可使系統於颱風期間穩定產製預報資訊。

**關鍵詞：**FEWS-Taiwan，SOBEK 淹水模式，淹水預報系統

---

<sup>1</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所工程員

<sup>2</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所研究員兼課長

## 淹水潛勢圖製作模式精進與應用

李家彰<sup>1</sup>、陳春宏<sup>2</sup>

### 摘要

臺灣地區常受颱風、豪雨侵襲而造成淹水災害，致使人民生命及財產蒙受損失，為使各級政府對於此類災害預防及應變有所參考，因此自民國 88 年起至 90 年，行政院國家災害防救科技中心首次進行並完成全省 22 個縣市淹水潛勢圖分析與製作，供各級行政機關做為施政參考。近年來，由於圖資資訊化及淹水模擬分析程式快速演進，經濟部水利署於民國 96 年起進行全國淹水潛勢圖更新工作(第一次更新)。由於此次淹水潛勢圖製作所輸入之基本資料、模擬條件及演算模式不盡相同，無法整合及提高模擬之準確性，因此民國 103 年水利署依據目前淹水模擬技術，參酌國內外做法，並藉由專家座談會制訂「淹水潛勢圖製作手冊」，俾利往後製作淹水潛勢圖時，有遵循標準作業程序，產出穩定可靠及高品質之成果。並自民國 103~105 年執行全臺「淹水潛勢圖第二次更新」計畫，並已逐年完成全臺以 SOBEK 模式為基礎的區域淹水數值模型之建置。所建立之數值模型包含諸多地文及水文資料，其資料量相當龐大，但模型中仍然有些地區之模式設定並不能完全呈現現地之淹水特性。隨著模式計算功能進步與硬體效能提高，為強化模型功能、接近現地淹水特性及擴大加值應用，持續不斷進行模型設定精進與細緻化。本研究將以高雄市為範例，說明淹水潛勢圖之製作與更新，並進行模型精進與細緻化，最後利用精進完成之 SOBEK 模式進行雨量警戒值訂定之研究，可作為中央部會及所轄各級政府審視水災災害防救計畫之用。

**關鍵字：**淹水潛勢圖、淹水數值模型、模型設定精進與細緻化

---

<sup>1</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所副工程司

<sup>2</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所所長

## 逕流分擔出流管制政策推動及技術研發

王大業<sup>1</sup>、劉敏梧<sup>2</sup>、陳有志<sup>3</sup>

### 摘要

近年來由於全球氣候異常，極端降雨事件頻傳，以傳統築堤工程作為防洪手段已無法因應，又都市高度發展造成治水用地取得困難致水道拓寬不易、土地開發造成降雨入滲減少、逕流體積增加及洪峰流量增加之洪災現象更甚以往。有鑒於此，政府亟需推動逕流分擔與出流管制，期將降雨之逕流量，藉由水道及土地共同分擔，並要求辦理土地開發義務人依出流管制規劃書及計畫書承擔其開發而增加之逕流量，另輔以非工程避災措施，減輕淹水災害所帶來之損失。

政府為加速推動逕流分擔及出流管制政策，率先於 107 年中完成水利法修正新增「逕流分擔與出流管制」專章；並於 108 年初訂頒相關子法，作為後續逕流分擔及出流管制相關成果提送、審議、核定及公告等各項執执行程序之依據，並整合既有技術及經驗，研訂逕流分擔與出流管制相關技術手冊，以為後續實務操作之依循。

逕流分擔推動係由公務部門負責辦理，主要利用公共設施兼具滯洪功能，一方面不妨礙原本設施功能，一方面可於洪水期間發揮滯洪功用，讓土地共同分擔滯洪、蓄水責任。出流管制推動範疇為達一定規模以上之土地開發案，規範開發單位需提送出流管制計畫書，避免土地開發導致地表逕流量增加，保障整個地區性防洪安全。

爰此，本研究主要目的係藉由逕流分擔及出流管制政策推動及技術研發之成果說明，提供相關部門嶄新的治水視野及方向，未來政府部門對於洪災管理，需以跨域整合及流域土地共同承納洪水之新思維，來務實面對氣候變遷下極端氣候及複合型災害嚴峻挑戰。

**關鍵字：**氣候變遷、逕流分擔、出流管制、跨域整合

---

<sup>1</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所副工程司

<sup>2</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所研究員兼課長

<sup>3</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所副研究員

## 網格式淹水損失推估系統開發與應用

周志興<sup>1</sup>、劉敏梧<sup>2</sup>、謝建宏<sup>3</sup>

### 摘要

台灣因特殊的地理位置經常遭受颱風暴雨的侵襲而導致水災，淹水災害損失亦隨著社會經濟發展的密度增加而益形嚴重，淹水災害風險管理成為相當重要的工作，而淹水災害損害評估是淹水災害風險管理及相關決策之基礎。利用淹水災害損失曲線配合淹水深度資料推估淹水災害損失是目前國內外最常用的災損估算方法，但是淹水災害損失與建築式樣、用途與內容物等關係密切且具地域性，國外的淹水災害損失曲線並不一定適用國內。本所於民國 102~103 年完成桃園、宜蘭、台中與高雄地區四縣市之淹水損失問卷調查，並建立淹水損失模式。然而國內之淹水災害並非僅侷限於此四縣市，倘若就全省其他縣市逐一調查，勢必得花上大量之人力、物力與時間成本，故民國 104~105 年計畫主要應用四縣市調查結果，研討如何建置其餘縣市之住宅、工商業類別之淹水損失推估模式，以使整體之排水規劃更趨於完善。此外並收集彙整相關社經圖層，建構淹水災害損失評估模組，並完成淹水災害損失評估系統，以簡化災損人工估算之複雜程序，提升排水規劃於淹水災害損失估算之效率及便利性。

鑑於 105 年起建置淹水災害損失評估系統，並逐年發展各土地利用類型淹水損失推估模式。系統中依據不同土地利用類別其淹水損失特性之差異，將淹水損失推估模組分為住宅、工商、農業、畜牧業與公共設施五大類。其中住宅再細分為透天厝與集合住宅；工商業分為製造、服務、批發與零售業；農業則分為水稻、旱作、水果與魚塭等；畜牧業則分為豬、牛、其他畜類、雞、鴨與其他禽類。由於農作物損失之多寡與災害發生時段有關，本系統農業損失推估模式考量作物之生長期，以更準確的估算災害損失。以 107 年 0823 豪雨事件造成嘉義地區淹水災害為例，本系統所估算的淹水損失約為 3 億元，與行政院農業委員會所公告之 2 億 9,919 萬元(含農業與漁產)相近。

本系統不僅可以推估單一場次水文事件的淹水損失，對於工程規劃方案選定時，亦可透過本系統推估規劃案與現況案各重現期距之直接損失與間接損失值，並快速推得規劃案與現況案之年平均損失與直接損失減少效益，以作為工程規劃方案選定之參考。由於工程施作成本相較於規劃成本高，倘若能應用本概念於排水規劃方案選定之評估，將可在整體經費有限之下，更有效率的擇定規劃方案，以供未來辦理排水規劃及水利防災應用。

**關鍵字：**淹水災害損失調查、淹水損失分析、淹水深度損失曲線、淹水評估系統

<sup>1</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所正工程司

<sup>2</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所研究員兼課長

<sup>3</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所副工程司

## 都會區供水系統地震衝擊案例分析

許智豪<sup>1</sup>、鄧敏政<sup>2</sup>

### 摘要

由地震災害紀實顯示，中、大型地震後，屢屢造成震區範圍內的維生設施損壞，在2016年高雄美濃規模6.6地震、及2018年大阪規模6.1地震，皆造成都會區維生基礎設施衝擊，其中亦引起震後震區停水情況，此外，供水系統具關連性，設施失效將會導致其他系統停擺，若無法迅速恢復，不僅造成民生、工商業的供水中斷外，也可能引致二次災害(如工業火災、疫疾災害等)，使人民生命財產嚴重損失。台灣位處環太平洋地震帶上，地震發生頻繁，供水系統乃維繫大眾生活的基本設施，倘若都會區發生中、大型地震時，供水系統將面臨挑戰。本研究目的為考量地震災害特性，結合地震動影響，與關聯性觀點，並以示範區進行供水系統地震衝擊案例分析，初步評估對防救災重要設施運作之衝擊影響，結果可提供設施災害或資源調度之決策參考使用。

**關鍵字：**地震衝擊、供水系統、都會區。

---

<sup>1</sup> 國家災害防救科技中心 助理研究員

<sup>2</sup> 國家災害防救科技中心 助理研究員

## JW生態工法打造防洪、永續水資源新模式 -以全球第一座無排水溝校園的黎明中學為例

陳瑞文<sup>1</sup>、陳庭豪<sup>2</sup>、高征財<sup>3</sup>、羅家強<sup>4</sup>、涂正英<sup>5</sup>

### 摘要

台灣南部雨量集中分佈於5月至9月，造成夏秋季淹水/冬春季缺水的極端情形。由於經常性地發生缺水災情，因此十分仰賴地下水，超抽地下水造成地層下陷，使淹水情形更加嚴重，造成許多地區地下缺水、地上淹水的矛盾情形。JW生態工法可因應旱澇頻繁問題，其具有高承載(>510kgf/cm<sup>2</sup>)及高透水性(12500mm/hr)，將地面洪水快速倒入地下，是海綿城市的重要建設工法，並已有數百個實績證明。但過去由於JW生態工法實績施作面積較小，使得防洪具體效益較無法突顯。台南市黎明中學利用JW生態工法打造全球第一座無排水溝的「LM & JW生態綠學校」，在38000平米的校園中鋪設8000平米的JW鋪面，使得校園整體透水，可以將雨水完全回收，並且可進行再利用或補注地下水，並具有淨水、減少登革熱、降低熱島效應、捕碳等效益。2017海棠颱風為台南市帶來暴雨(24小時累計降雨量超過350毫米)，導致台南市256個地區發生洪災。而黎明中學校園得益於JW生態工法發揮防洪功能，沒有發生淹水。2018年8月，在24小時內超過600毫米的極端強降雨造成台灣南部嚴重洪澇災害，但地勢比外面馬路低50~70公分且位於易淹區的黎明中學並未見任何內澇現象。結果顯示黎明中學已藉由相互連結的JW鋪面形成一個巨大的吸水海綿，在上述極端強雨中黎明中學可吸水約22,800噸(38000m<sup>2</sup>\*0.6m=22,800m<sup>3</sup>)，推估每年收集近10萬噸(38000m<sup>2</sup>\*2.6m=98800m<sup>3</sup>)的水資源。上述實績證明JW生態工法可落實海綿城市，其利用道路、停車場、廣場等鋪面打造微型滯洪池、地下水庫，吸水防洪並轉為日益珍貴的水資源，是調適極端氣候解決方案的新思維。

**關鍵字：**JW生態工法、海綿城市、微型滯洪池、地下水補注

---

<sup>1</sup> 品岱股份有限公司董事長、JW生態工法發明人

<sup>2</sup> JW生態工法發明人

<sup>3</sup> 方濟會學校財團法人臺南市黎明高級中學董事長、神父

<sup>4</sup> 方濟會學校財團法人臺南市黎明高級中學校長

<sup>5</sup> 英氏國際空間設計有限公司建築師

## 莫拉克颱風在臺灣阿里山地區之強降雨過程模擬檢討

周乃昉<sup>1</sup>、鄭洧嘉<sup>2</sup>、吳嘉文<sup>3</sup>

### 摘要

颱風雨是台灣地區最極端的暴雨類別，通常帶來高強度的集中降雨，2009年8月莫拉克(Morakot)颱風侵襲台灣，期間給曾文水庫集水區帶來幾近可能最大降雨的雨量，雖然莫拉克颱風的強度只是中度，但中央氣象局在事件後指出期間發生西南氣流共伴效應以致造成長延時的強降雨。本研究應用颱風定量降雨模式法模擬莫拉克颱風在阿里山地區的降雨過程，特別針對模式計算無法近似模擬的高強度降雨情況檢討可能原因，以供未來應用該法模擬降雨量之調整參考。

本研究模擬颱風降雨量之原理為暴雨模式法，將颱風降雨分為環流雨及地形雨兩型。環流雨為颱風底層環流向中心輻合造成之降雨，地形雨則為颱風氣流上昇過程中造成的降雨。應用 Riehl (1954)提出的公式計算 1,000 mb – 900 mb 之間氣層的颱風環流雨，而地形雨則應用 Fulks (1935)探討絕熱氣團垂直向上運動並致水氣凝結降雨之機制，計算 850 mb – 550 mb 之間氣層的降雨量，上述公式經王時鼎等(1977)採用模擬台灣地區多個重要水庫集水區的最大可能颱風降雨量。

由於氣象資料不盡完整，本研究模擬莫拉克颱風在阿里山地區之降雨量，先利用颱風定量降雨模式試算並與實際降雨量比較，定性探討雨量計算誤差的可能原因，再將整場降雨過程分成 14 個時間階段，定量修正或測試影響颱風降雨量的主要因子，包括阿里山地區風速、河谷有效風向與風速、氣流坡度、西南氣流共伴效應等，以期定量降雨模式計算雨量接近觀測雨量，最後結論阿里山地區之所以發生高強度降雨的合理物理條件，特別是各階段內西南氣流增進之風速及 625 mb 代表性氣層的氣流坡度。

**關鍵字：**颱風定量降雨模式、地形雨、西南氣流共伴效應、推論風速、氣流坡度

---

<sup>1</sup> 成功大學水利及海洋工程學系教授

<sup>2</sup> 成功大學水利及海洋工程學系研究生

<sup>3</sup> 成功大學水利及海洋工程學系博士後研究員兼任助理教授



# 利用民俗植物進行植生復育之種間適性比較

## —以五峰鄉和平部落為例

陳湘媛<sup>1</sup> 賴楹仁<sup>2</sup>

Shiang-Yuarn Chen \* Ying-Ren Lai \*\*

### 摘要

新竹縣五峰鄉的和平部落是以泰雅族為主的原民聚落，擁有豐富的自然資源與泰雅文化特色。部落位於 400~1000 公尺中海拔地區，植被生態分布為亞熱帶闊葉林臨界與暖溫帶闊葉林間。隨著經濟開發與產業變遷，和平部落的文化、生態環境與產業皆受到嚴重衝擊，青壯人口的外流，則造成部落文化斷層。與台灣其他山地部落類似的產業型態，和平部落亦在中高海拔山坡地大量栽植高經濟果樹與蔬菜，且有持續向更高坡地墾殖的趨勢，原始林地逐年被高經濟果樹、蔬菜取代，其環境代價即為每年風災期間的土石流與道路崩塌，在五峰鄉和平部落，淺根的果樹與蔬菜已經對部落甚至周邊環境造成重大的威脅。有鑑於此，本研究以部落的民俗植物為對象，進行坡地植栽適性實驗，擬找出對坡地保護效益高並具經濟價值的物種，逐步展開山林復育工程。

民俗植物為部落日常食衣住行育樂所利用之植物，從其應用方式可深入的瞭解部落祖先的生存智慧、歷史背景、風俗民情與生活型態。本研究以訪談、觀察和實地調查蒐集部落對民俗植物利用的相關資訊，從中挑選出四種具經濟價值的植栽，作為首期實驗樣本，進行種間生長適性比較，包括光蠟樹、杜英、楓香與樟樹。本實驗從 2015 年 10 月開始，最近一次採集及量測為 2019 年 4 月，初植時每月測量植株生長狀況，包括成活率、株高、離地十公分直徑，並採集實驗場域之土壤進行粒徑分析、酸鹼檢測，以及蒐集實驗期間的氣候資料，以便比較不同植栽的生長狀況與對極端氣候之適應性。鑒於植栽在經過三年半生長後根系分佈很廣，無法完整取出，挖除植栽量測生物量與根系長度亦會影響坡面穩定性，因此最後的比較係以個別植株的株高、離地十公分直徑為主，輔以採集生長狀態最佳的植株固定範圍之根系，比較其主要、次要與鬚根之總長度、生物量，與初植時的量測資料做比較，據以指認競爭能力最佳的物種，作為日後進行生態復育、文化傳承、邊坡防災與經濟效益之植栽建議清單。

**關鍵詞：**原住民聚落、民族植物、環境復育、邊坡穩定、經濟效益

**Keyword:** *Aboriginal settlement, Ethnobotany, Environmental restoration, slope stability, Economic benefit.*

---

<sup>1</sup> 中華大學景觀建築學系專任副教授，新竹市五福路二段707號，03-5186676; e-mail: sharon@chu.edu.tw.

<sup>2</sup> 中華大學建築與都市計畫學系碩士生，新竹市五福路二段707號，03-5186676; e-mail: zas112596@gmail.com.

## 強降雨天氣系統診斷與防災預警策略探討

林得恩<sup>1</sup>、尹孝元<sup>2</sup>、柯凱元<sup>3</sup>

### 摘要

台灣有 1/4 的土地屬於山坡地，每逢颱風或暴雨等強降雨型態的天氣系統時，由於降雨現象相當顯著且劇烈，常易引發土石流或崩塌等坡地災情。根據過去氣候統計結果，台灣坡地災害平均每年有 20.8 次事件發生，肇生多集中於暖季時段，發生地域又以新北市、南投及嘉義居前 3 名；尤其是以山區累積的總降雨量最高。檢視 2012-2016 年，台灣重大土石災情事件發生，若以大氣環境條件的降雨特徵來看，扣除地震的案例，可以分為下雨時間不長，但下很多的雨（如：颱風及午後雷陣雨）、下雨時間很長，下了很久的雨（如：梅雨鋒面）以及上述兩種情境發生後的 3-5 天（如：颱風過後）為主。

面對強降雨的天氣系統發生頻率及強度愈來愈高的現況來看，善用觀測及預報工具與方法，進行滾動式修正，至為重要。從氣象雷達觀測資料來分析劇烈降雨的結構變化以及強降雨帶分布；由閃電落雷系統來釐清劇烈降雨系統發生與延續的時間、強度以及運動趨勢；氣象探空氣球觀測系統可以提供劇烈降雨的垂直大氣結構特徵；藉地面雨量站觀測結果掌握降雨的時空分布；由雷雨檢查表可以得知降雨雷暴的肇生可能；透過雷達回波反演地面估計降水，瞭解劇烈降水的影響範圍以及強度變化。綜合研判、診斷分析、事先預警及有效支援，俾利提昇坡地災害防救效能。

**關鍵詞：**坡地災害、氣象資料、防災預警

---

<sup>1</sup> 台灣大學大氣科學系 專案研究員

<sup>2</sup> 水土保持局防災應變中心 主任

<sup>3</sup> 台灣大學氣候天氣災害研究中心 副研究員

## 氣候變遷下跨河橋梁多重災害之可靠度分析

廖國偉<sup>1</sup>、洪瀾<sup>2</sup>

### 摘要

台灣處於颱風經常行經之路徑上，每年的六至九月，降雨量十分豐富，洪峰流量也很可觀。台灣特殊的地形造成河川坡降大，豐水期、枯水期之流量相差巨大，當大流量洪水發生時，造成河川的局部流速快、水流衝擊力大的特點。河川長期沖刷橋基，基礎在裸露後會嚴重破壞結構物的穩定，橋梁耐洪能力下降。且台灣近年來極端氣候事件發生的頻率與強度均呈上升趨勢，年雨量變化呈兩極分化，高的越高、低的越低，高低雨量的發生間距也越來越短，天氣極端化的趨勢明顯，應該考慮未來氣候與環境的變遷下可能出現的豪雨、洪水帶來的複合型災害衝擊對於現有水工構造物的影響。本研究探討平原地區之跨河橋梁受氣候變遷之影響，主要為橋梁行水區域之洪水沖刷災害，目前工程師常會參考水利署訂定之重要河川之計劃重現期洪峰流量及洪水位進行橋梁設計，但氣候變遷可能會帶來比目前設計值更大的洪峰流量、水位，橋墩的沖刷深度也會加深，現有橋梁的耐洪設計值能否在氣候變遷下是否仍適用？此外，台灣位於歐亞板塊和菲律賓海板塊的聚合交界地帶，板塊間的相互碰撞、擠壓使地殼運動頻繁，地震成為危害橋梁安全的另一個來源。故本研究以濁水溪流域下游段自強大橋為例，同時考慮氣候變遷影響下之洪峰流量帶來之沖刷，進行沖刷危害度分析，再配合結構非線性動力分析建立的易損性曲線，利用聯合機率的概念與易損性分析得到複合災害之破壞機率，做為未來設計之參考。

**關鍵字：**氣候變遷、多重災害、可靠度

---

<sup>1</sup> 國立台灣大學，生物環境系統工程學系，副教授

<sup>2</sup> 國立台灣大學，生物環境系統工程學系，研究生

# Analysis of Hydroclimatic Factors Associated with Occurrences of Afternoon Thunderstorms in Taipei-Keelung Metropolitan Area

Hong Daliang<sup>1</sup>、Christina W. Tsai<sup>2</sup>、Lee, Tim Hau<sup>3</sup>

## Abstract

With the compound effect of climate warming and urbanization, the microclimate of Taipei-Keelung metropolitan area might be altered. At the same time, the intensity and frequency of small-scale rainfall events are changed. Summer is the season with the most rainfall in the Taipei metropolitan area. Among others, afternoon thunderstorms are proven to make the most substantial contribution to precipitation in summer. It has been demonstrated that flooding events caused by frequent afternoon thunderstorms in recent years have resulted in significant socio-economic losses.

This study aims to identify the contributing factors and to elucidate their quantitative relationship with occurrences of afternoon thunderstorms.

Hydroclimatic data from the Central Weather Bureau station are used, in view of the Taipei basin afternoon thunderstorm events from May to September from Year 2000-2017. Several statistical methods are used to analyze hydroclimatic data recorded at different stations in Taipei. For wind analysis, the wind rose plot is used to identify the wind direction, wind frequency, wind intensity. The principal component analysis (PCA) is used to analyze the wind contributing factors and other meteorological factors. It is expected that the results of the principal component analysis can be used to illustrate the wind convective mechanism that results in the occurrences of afternoon thunderstorms. This study will examine the potential pre-condition of afternoon thunderstorm occurrences such as convection features of winds, temperature, humidity and etc.

**keyword** : *Afternoon Thunderstorm* , *wind analysis* , *rainfall* ,

---

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan Master student

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan Professor

<sup>3</sup> Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan Professor

## 台灣區域排水水環境水域生態評估

傅鈺閔<sup>1</sup>、黃宏斌<sup>2</sup>

### 摘要

台灣多數區域排水鄰近都會區或農漁村聚落，相較於其他水體，區域排水與民眾生活空間的距離較近，然亦因與人類活動空間重疊性高，人類與區排生態環境交互關係頻繁，區排的生態環境品質優劣對民眾生活影響格外明顯；且在國內外皆持續關注水環境的生態議題下，區域排水的合理使用與管理為未來區域排水管理的重要課題之一。區排在其水文、地文、生態及人文等層面，皆有其特殊性，故妥善的生態系統評估對於環境永續使用規劃具有十分重要的影響。

本研究參考生態系統報告書與策略如千禧年生態系統評估(MA,2005)、歐盟與德國所發表的生態系暨生物多樣性經濟倡議(TEEB,2010)及歐盟生態系統通用分類(CICES,2013)，考量對於區域排水使用的廣泛性、可行性、區域特性等，參考生態系統服務框架擬定區域排水之生態系統服務分類，結合願意支付法、替代工程法法等多種評價法，提出各項生態系服務的定量核算法則。

**關鍵字：**區域排水、水環境、生態系統評估

---

<sup>1</sup> 國立台灣大學生物環境系統工程學系-研究生

<sup>2</sup> 國立台灣大學生物環境系統工程學系-教授

## 區域性海岸土砂管理推動探討

陳文俊<sup>1</sup>、蕭雅云<sup>2</sup>

### 摘要

台灣海岸災害頻傳，其中又以海岸侵蝕問題最為嚴重，為有效解決海岸侵蝕問題，產官學界不斷研擬可行之海岸侵蝕防治對策。如由考慮安全、環境、生態、景觀、親水等觀點言，養灘工法是目前及未來可能採用之方法之一。但養灘常見問題即是砂源及成本問題，台灣河川於颱風季節常輸送大量土砂淤積於河道中，如何以低財政而有效率的應用這些寶貴的土砂資源來減緩海岸侵蝕、維持生態環境及促進地方發展將是未來海岸管理的一項重要課題。本文目的即是探討區域性海岸土砂管理(RCSM)於台灣推動之可行性、可能面臨問題與如何因應解決等，以供未來實質推動時之參考。本文主要綜合美國東西岸各州實施與制定區域性海岸土砂管理計畫之參考資料作為分析探討之依據，比如實施範圍提出、漂砂單元劃設、土砂來源分析、資金管理、配合法規、執行機構、監測計畫、檢核機制等。再參考日本、歐洲等國相關土砂管理概念與做法後，進行歸納檢討，並以台灣過去推動流域土砂管理模式之作法等，探討國外建立區域性海岸土砂管理制度之優點即面臨之問題等，再針對國內流域土砂、海岸環境、海象條件、現有資料、相關法規、土地利用等綜合評估台灣推動區域性海岸土砂管理計畫之可行性及推動上可能面臨之困難等，再從學理面、資料面、政策面、作業面及執行面等進行說明，以作為海岸管理法通過後，未來實施新思維海岸防護策略之參考。

**關鍵字：**海岸管理、海岸侵蝕、養灘、土砂管理、漂沙

---

<sup>1</sup> 嘉義大學土木與水資源工程學系副教授

<sup>2</sup> 嘉義大學土木與水資源工程學系碩士

## 拱型固床工之三維流場研究

侯宥任<sup>1</sup>、黃宏斌<sup>2</sup>

### 摘要

在水土保持工程應用上，拱型固床工為常見之水工結構物，透過拱型的特性能使河床穩固，並導正流心，維持河川基流量，營造出深潭、淺灘、急流與緩流等多樣性的流況，提供生態補償，但固床工附近流場是一紊亂三維流場，透過較詳細之三維流場數值模擬，能模擬流場特性並改善工程上可能之缺失。

本研究使用三維計算流體力學軟體 ANSYS-FLUENT 來模擬渠道內流經不同拱型固床工之流況，藉由軟體模擬流場特性，了解拱型固床工三維流場分布、流線、流速分布及受力情形並希望探討不同間距下流速之關係。ANSYS-FLUENT 數值模擬採用有限體積法(finite volume method)並結合多項流  $K-\epsilon$  紊流方程式處理三維之自由液面情形。

本研究之案例模型主要參考宜蘭市大溪溪以及水仙溪已構築之固床工，模式網格主要為四面體網格，總網格數約在 45 萬個左右，希望透過相關研究能使未來相關工程有一參考之方向。

**關鍵字：**拱型固床工、ANSYS-FLUENT、三維流場、自由液面

---

<sup>1</sup> 國立臺灣大學 生物環境系統工程學系 研究生

<sup>2</sup> 國立臺灣大學 生物環境系統工程學系 教授

# 利用人工智慧與系集預報雨量建立淡水河流域 災害預警系統

廖皓宇<sup>1,\*</sup>、賴進松<sup>2</sup>、張明瑞<sup>3</sup>、張向寬<sup>4</sup>、郭鴻基<sup>5</sup>、譚義績<sup>6</sup>

## 摘要

由於全球氣候變遷因素，臺灣遭受颱風或短延時暴雨比往來嚴重，如 2015 年蘇迪勒颱風造成臺灣文山區嚴重淹水，或如 2017 年 6 月 2 日短延時暴雨，造成大武崙地區淹水，僅在 1 小時內，其降雨量高達 108 mm，並造成 2.3 m 淹水深度，因此有效的淹水預警系統提供大眾疏散離措施，有其必要性。本研究嘗試透過人工智慧方法與系集預報雨量建構淡水河流域災害預警系統，其預警系統結合山區降雨逕流模式與一維河川水理模式，並以網路為基礎架構，建構前端展示與後端資料儲存等複雜系統架構，依照此系統架構下，透過一維水理模式輸出淡水河流域各 487 個斷面未來 48 小時水位結果，爾後嘗試使用人工智慧方式，如支援向量機輸出未來 3 小時水位預報，將此兩種結果於系統內展示，如有超出警戒水位線，預警系統將發出閃爍燈提示，除水位預報外，本系統介接水利局 CCTV 即時影像，展示現場各斷面水位現場狀況，可提供水位模擬結果相互對照，供給決策者參考依據。

**關鍵字：**淹水預警系統、洪水預報模式、人工智慧、網路平台

---

<sup>1</sup> 國立臺灣大學氣候變遷與永續發展研究中心專任研究助理

<sup>2</sup> 國立臺灣大學水工試驗所研究員

<sup>3</sup> 國立臺灣大學氣候變遷與永續發展研究中心博士後研究員

<sup>4</sup> 國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心助理研究員

<sup>5</sup> 國立臺灣大學氣候變遷與永續發展研究中心主任

<sup>6</sup> 國立臺灣大學名譽教授暨氣候天氣災害研究中心主任

\*通訊作者：10617 臺北市大安區羅斯福路四段 1 號，TEL：(02)33662618，Email：hyu14116@gmail.com



# Evaluating Relief Wells along Inner Harbor Navigation Canal, New Orleans, Louisiana

Frank T.-C. Tsai, Ph.D., P.E.<sup>1</sup>

## Abstract

The Inner Harbor Navigation Canal (IHNC) is a 9-km waterway in New Orleans, Louisiana. The canal connects the Mississippi River to Lake Pontchartrain and is confined by concrete flood walls to protect the vicinity of the canal. This study area focuses on the northern portion of the IHNC. The study aims to evaluate efficiency of 78 relief wells at the eastern levee and 108 relief wells at the western levee. The function of relief wells is to reduce pore water pressure underneath levees and reduce risk of sand boils during high canal water stage. Geotechnical borings and drillers' logs were collected from Louisiana Coastal Protection and Restoration Authority (CPRA) and Louisiana Department of Natural Resources (LDNR). Well logs were classified into sand, silt, clay, and organic facies. A stratigraphic model was constructed and showed that canal dredging exposes the beach sand aquifer at the canal bed. High pore water pressure can occur in the aquifer beneath levees during tropic storms and hurricanes. This study also developed a 3D seepage model using MODFLOW-USG. Relief wells were simulated by the combination of CLNs and drains. The seepage model was calibrated by observed groundwater levels at piezometers and capacity test data for each relief well. At the hurricane design scenario, the model showed that 47% of relief wells at the eastern levee has factor of safety (FS) <1.5 and 85% of relief wells at western levee has FS<1.5. This result suggests that the current relief wells are not sufficient to protect the IHNC levees.

---

<sup>1</sup> Chevron Professor of Engineering, Director of Louisiana Water Resources Research Institute, Louisiana State University, Department of Civil and Environmental Engineering

## 都市低衝擊開發的最佳化研究

何昊哲<sup>1</sup>、李鴻源<sup>1</sup>、張淵舜<sup>1</sup>、高振豪<sup>1</sup>

### 摘要

全球氣候變遷與過度都市化是現今社會發展所面臨的困境，人口成長導致用水量遽增加上嚴重都市化問題，使得水資源無法有效利用與妥善管理，對水環境產生巨大壓力。在過去，高效的雨洪管理應是解決問題的手段之一，但面對極端氣候，當前的防洪工程、水利設施與排水系統已不敷使用，因此雨水管理的觀念也漸有轉變，暴雨控制從傳統的導水與排水轉變為以源頭控制與入滲為主的低衝擊開發技術(LID)，其主要概念以分散式設施改善當前土地利用劃分不當之情況，透過增加集水區的入滲或蓄水空間，直接減少地表逕流。LID除暴雨控制的能力外，同時能延緩洪峰及增加集流時間並減少非點源污染，降低暴雨對水環境生態的影響，使開發地區的水文環境儘量回復至開發前之自然水文循環狀態。

除此之外，LID不但能提升都市韌性，同時更具有生態、社會和經濟的效益，如緩和都市熱島效應、節省能源、提供都市內動物棲地，並為人民創造出舒適的都市生活環境和空間。傳統雨洪管理的評估往往忽略水質處理與污染物傳輸，多著重於洪峰流量，但洪峰流量僅能代表空間中某個點的水文量，不足以表示暴雨期間的逕流過程。因此本研究的評估除考慮下游整體洪峰流量外，更同時將能代表污染物傳輸過程的污染物質質量初期沖刷排放比( $MEFF_{30}$ )與能表示逕流過程的水文滯留足跡(HFR)納入考量。

本研究以人口密度居台灣之冠的新北市中永和地區為例，主要使用美國環保署(US EPA)的暴雨逕流管理模型(SWMM)進行模擬。並依照該地區所劃分之土地利用，選擇適合的LID設施或是滯洪池進行配置，再以不同降雨強度與延時進行模擬。結果顯示在短延時2至10年重現期的降雨下，LID能發揮較佳之減洪效果，而在25年重現期以上的降雨則建議使用滯洪池因其調洪能力較高；水質處理方面則較為理想，不論重現期之高低LID皆能維持一定比例之減污效益。此外，因為此區域為老舊、高密度開發之行政區，故在其空間有限的情況下，建議使用雨水收集；而在成本有限的情況下，則建議使用綠屋頂，才能發揮最大效益。

在有限的預算下，須深入探討LID配置之區位順序與各元件所能發揮之效益。因此本研究使用多目標基因演算法(MOGA)中之非支配型排序基因演算法(NSGA-II)，得到最佳空間配置下的成本與洪峰、HFR和 $MEFF_{30}$ 的關係曲線，判斷當LID設置比例達中永和地區可設置LID之面積的80%時，即使再增加預算其減洪與減污之效果已無明顯增加。本研究建議若已削減洪峰流量為主要目標，則應將LID配置於該地區主要輸水路之中上游；若已削減HFR為目標則應配置於輸水路主幹道上游與支線處下游；若以水質為LID之目標，則應考量研究區域之土地利用與人口分布，本篇建議將LID配置於明渠輸水路交集處、輸水主幹中游或人口密度較高處。最後，本研究以蒙地卡羅試驗證明在高度開發且管線老舊又複雜的情形下，LID應配置於不透水率高的區域以增加滯洪減污的功效。

---

<sup>1</sup> 國立台灣大學土木工程學系

# 海口市城區非點源污染特徵與類比研究<sup>1</sup>

董延軍<sup>2</sup>，嚴萌<sup>2</sup>，李興拼<sup>2</sup>，周豐<sup>3</sup>，薑宇<sup>2</sup>

## 摘要

城市河流與湖泊很大程度上受城市非點源污染的影響，非點源污染問題是城市水環境綜合治理亟待解決的主要問題之一。為了降低城市水環境風險，實現水環境預警預測，有必要對城市非點源污染特徵進行類比分析研究。本次研究首先針對 2018 年 6 月 18 日的場次降雨進行氣象、水文、水質同步觀測分析，並進行模型參數率定；然後基於所構建的非點源模型類比了典型降雨過程下的污染物負荷量及負荷累計過程。結果表明，污染物排放量與降雨時間呈正相關，污染物濃度出現在降雨量最大時刻，在降雨初期 0~30min 內，污染物負荷累計量迅速增加。研究區域不同下墊面中，社區道路/社區在 3 類下墊面中 3 種污染物負荷貢獻量均最大，占整個區域污染量負荷的 98% 以上。

**關鍵字：**城市化；非點源污染；污染負荷類比；水環境預警

## 壹、引言

隨著我國城市化進程步伐的加快，人口密度增加，城市規模擴大，與之伴生的水環境問題也日益增加。城市的河流水體水質很大程度上受城市非點源污染的影響，特別是當排污口為代表的點源逐步得到控制後，非點源污染問題則成為城市水環境綜合治理亟待解決的主要問題之一<sup>[1~3]</sup>。城市非點源污染物主要來自降雨尤其是暴雨對城市地表的沖刷<sup>[4]</sup>，因此城市河流和湖泊中污染物主要來源於城市地表沉積物。城市地表沉積物包括城市垃圾、大氣沉降物和車輛排放物，其含量取決於城市河流的地貌、地形、植被覆蓋程度以及污染物的排放強度和分佈。這些污染物會加速城市河流和湖泊富營養化<sup>[5,6]</sup>，進而導致藻類大量生長繁殖，甚至形成水華。人們在控制藻類生長和水華形成的研究中，逐漸形成了一種共識，也就是水華抑制在於早期的預防，而非爆發後的應急與善後。因此有必要對城市非點源污染特徵進行類比分析研究，這是城市水環境預警預測的關鍵。通過對城市非點源污染負荷類比，分析城市污染負荷的特徵與規律，對水環境潛在風險提出預警預測措施，以便於採取合理的水力調度和管控措施降低非點源污染對城市河流和湖泊的水環境風險。

海南目前適逢海南自由貿易區和國際旅遊島建設期，正迎來重大發展機遇。海南自由貿易區建設要“打造一流營商環境”，對標國際先進水準，海南水環境治理需亟待改善和提高。本文以海口市龍華區大同溝水環境和水生態治理為大背景，研究城市非點源污染特徵分析與類比研究，為水環境治理提供技術支撐。

## 貳、研究區域概況與方法

### 一、區域概況

本次研究區域為海口市龍華區大同溝沿岸至東西湖匯流區域，北緯 20°01′50″~20°02′30″，東經 110°19′37″~110°20′51″。區域地處低緯度熱帶北緣，屬於熱帶季風氣候。這裡冬無嚴寒，夏無酷暑，四季常青，溫暖舒適，年平均降水量 2067 毫米，面積共達 4.23km<sup>2</sup>，具體位置見圖 1。

<sup>1</sup>：国家自然科学基金《基于极值统计理论的非一致性水文频率计算方法及应用研究》(51679252)

<sup>2</sup> 珠江水利委員會珠江水利科學研究院,廣州,510611

<sup>3</sup> 北京大學,北京,100871



圖 1 研究區域位置圖

## 二、區域概化

基於海口市排水規劃圖、水系圖以及對研究區域實地調查獲取的地形資料，本研究區域的整個匯水區域被劃分為 8 個匯水子流域，具體如下圖 2 所示。根據研究區域下墊面特點，各子匯水區內土地利用類型分為社區道路/社區、市政道理、綠地，對各匯水子流域分區不同下墊面類型進行統計，結果如表 1 所示。

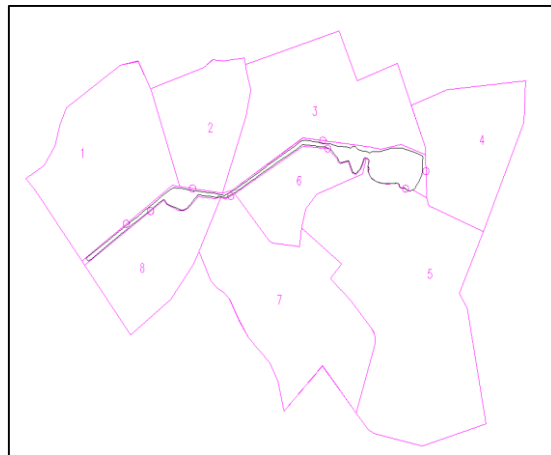


圖 2 匯水區概化圖

表 1 各分區不同下墊面類型 (單位: km<sup>2</sup>)

分區	面積	社區道路/社區	市政道路	綠地
1	0.591	0.569	0.010	0.013
2	0.324	0.281	0.009	0.033
3	0.566	0.536	0.026	0.004
4	0.410	0.395	0.011	0.004
5	1.101	0.673	0.055	0.373
6	0.210	0.202	0.009	0.000
7	0.685	0.629	0.038	0.017
8	0.323	0.272	0.009	0.043

### 三、採樣及方法

本次採樣點設置在第 5 個匯水子區，分別在社區道路/社區、市政道路、綠地區域設置 1 個採樣點，社區道路/社區採樣點佈設在社區低窪區，市政道路採樣點佈設在道路雨篋子口，綠地採樣點主要佈設在公園觀景草地區域。降雨強度和徑流量越大，初期間隔 3~5min，取樣 5~6 次後，逐步延長取樣時間，根據降雨歷時的長短調整取樣的次數及間隔時間，每隔 5~15min 採樣一次，一次降雨採樣不少於 8~10 次，本次觀測試驗共採集到 9 次有效降水。水質指標分析參照文獻 8 進行。

### 四、模型方法

#### (1) 地表產流過程

SCS 水文模型的降雨—徑流基本關係為：

$$\frac{F}{S} = \frac{R}{P - I_a} \quad (1)$$

式中：P 為降雨量；R 為直接徑流量(mm)； $I_a$  為初損值，主要是表層蓄水和截流等；F 後損值，是累積下滲量；S 為流域或城區當時的最大可能滯留量，即流域土壤的缺水量，它是後損的上限。

#### (2) 污染物累積、遷移與損失過程

污染物的累積量  $L_{ij}$  與降塵累積量  $L_{si}$  成正比，即

$$L_{ij} = f_{ij} \cdot L_{si} \quad (2)$$

式中： $L_{si}$ ，地表降塵的量， $\text{mg}/\text{m}^2$ ； $f_{ij}$ ，第  $i$  種地表特徵上的第  $j$  種污染物的比例係數，%； $L_{ij}$ ，第  $i$  種地表特徵上的第  $j$  種污染量， $\text{mg}/\text{m}^2$ ； $i$ ，第  $i$  種地表特徵。

污染物的沖刷以如下的指數沖刷方程給出：

$$\Delta L_{ij} = L_{ij} \cdot [1 - \exp(-k_i \cdot R)] \quad (3)$$

式中： $\Delta L_{ij}$ ，降雨時從第  $i$  種特徵的地表沖刷的第  $j$  種污染量， $\text{kg}/\text{km}^2$ ； $L_{ij}$ ，降雨時從第  $i$  種特徵的地表第  $j$  種污染量， $\text{kg}/\text{km}^2$ ； $k_i$ ，第  $i$  種特徵的地表沖刷係數， $\text{mm}^{-1}$ ； $R$ ，降雨量， $\text{mm}$ 。

流量與污染物確定後，則可以計算出單元匯水面積上的水文水質過程，即

$$C_j = \frac{\sum_i (\Delta L_{ij} \cdot A_i)}{Q \cdot \Delta t} \quad (4)$$

式中： $A_i$ ，為不同特徵地表面積， $\text{m}^2$ ； $\Delta L_{ij}$ ，同 (3) 式相同； $\Delta t$ ，時間間隔， $\text{s}$ ； $Q$ ，出流流量， $\text{m}^3/\text{s}$ 。

### 五、參數率定

本次主要對地表沖刷係數  $K_i$ 、污染物累積量  $L_{ij}$  進行率定，率定時間為 2018 年 6 月 18 日 16:10~6 月 18 日 17:40 的一場降雨(降雨過程見圖 3 所示)，以同步氣象、實驗觀測資料進行模型參數率定。

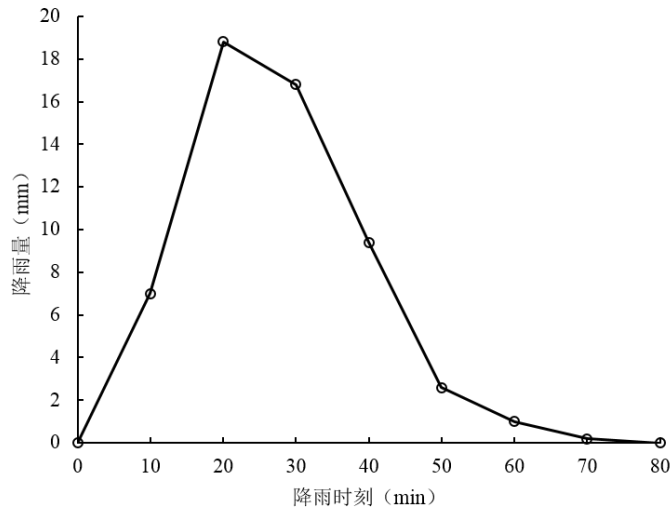


圖 3 2018 年 6 月 18 日降雨過程

(1) 地表沖刷係數  $K_i$

地表沖刷係數決定了地表累計污染物被降雨沖刷程度，地表污染物的沖刷受降雨強度、降雨持續時間、不同地類性質等多個方面影響，當降雨強度較大時，地表污染物隨雨水沖離地面。降雨結束後，在未被完全沖刷的地表剩餘污染物的基礎上，新的地面污染物隨城市垃圾、大氣沉降物和車輛排放物等重新富集。本係數採用對三類下墊面降雨徑流污染源監測資料進行率定，根據率定結果，各類下墊面沖刷係數取值為 0.4。

(2) 污染物累積量  $L_{ij}$

參考河海大學祈繼英計算蘇州城市非點源污染負荷的應用實例中蘇州下墊面污染物累計參數[]，結合本次監測結果，確定本模型中 3 類典型下墊面的 CODcr、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>4</sub>-N 的污染物累計量。通過模擬最終確定如下表。

表 2 蘇州各下墊面污染物累積模擬參數

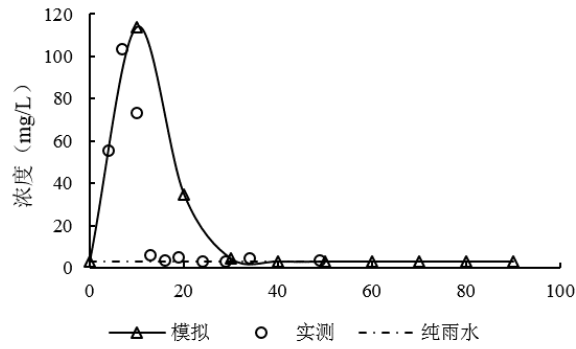
下墊面類型	項目	CODcr	TN
交通道路	$P_m$ (kg/ha)	170	6
	$K_s$ (d)	10	10
屋面	$P_m$	80	4
	$K_s$	10	10
綠地	$P_m$	40	10
	$K_s$	10	10

表 3 各下墊面地表污染物累積模擬參數

下墊面類型	CODcr(kg/km <sup>2</sup> )	BOD <sub>5</sub> (kg/km <sup>2</sup> )	NH <sub>4</sub> -N(kg/km <sup>2</sup> )
社區道路/社區	851.9	53.3	1.9
市政道路	244.1	11.7	0.08
綠地	16.7	0.4	0.2
屋面	79.7	3.1	0.1

確定以上參數後進行模擬，提取第 5 個匯水分區地表徑流模擬結果與監測結果對比如下，可以看到模型類比結果能夠較好的反應降雨形成徑流的污染物濃度過程，地表徑流中 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>4</sub>-N 的污染物濃度隨時間呈先增加後減小的趨勢。

COD<sub>Cr</sub>模擬



BOD<sub>5</sub>模擬

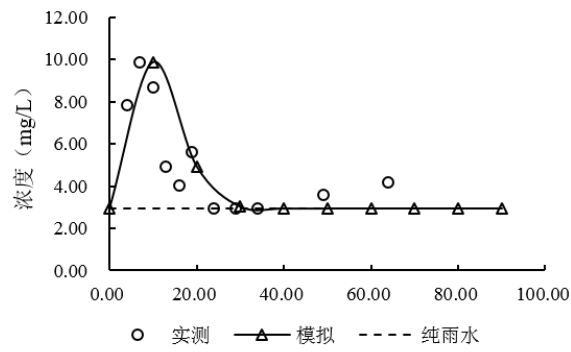


圖 4 第 5 分區 BOD<sub>5</sub> 的污染物濃度隨時間

圖 5 第 5 分區 COD<sub>Cr</sub> 的污染物濃度隨時間

NH<sub>4</sub>-N模擬

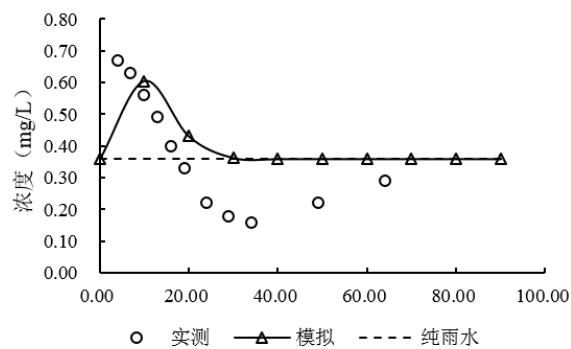


圖 6 第 5 分區 NH<sub>4</sub>-N 的污染物濃度隨時間

## 參、模擬結果分析

## 一、污染物負荷隨時間變化過程

研究區域產生的非點源污染物的平均品質濃度隨降雨時間的變化過程線如圖 7 所示。由圖 7 可知，3 種污染物質濃度隨降雨時間過程變化規律相同，均為先增加後減小至不變，其中 3 種污染物質濃度峰值均在降雨過程最大降雨時刻 10min，隨後減小至 40min 基本不變。整個區域 COD<sub>Cr</sub> 濃度峰值為 102.68mg/L，至 40min 後與雨水本底值相同為 2.92mg/L，BOD<sub>5</sub> 濃度峰值為 9.15mg/L，至 40min 後與雨水本底值相同為 2.94mg/L，NH<sub>4</sub>-N 濃度峰值為 0.58mg/L，至 40min 後與雨水本底值相同為 0.36mg/L。

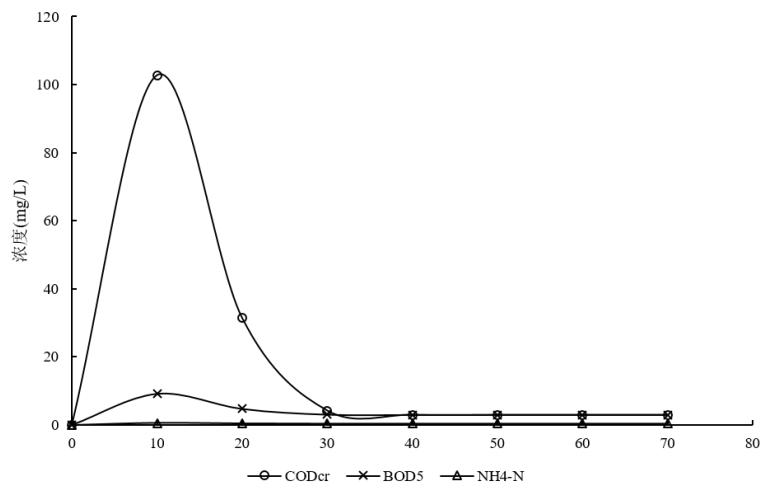


圖 7 研究區非點源污染濃度變化過程線

研究區域產生的非點源污染物的累計負荷量隨降雨時間的變化過程線如圖 8 所示。由圖 8 可知，3 種污染物累計負荷量隨降雨時間變化規律相同，均在 0~20min 迅速增加，隨後基本保持不變。整個區域 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>4</sub>-N 至降雨時刻末累計量分別為 5916.78t、1014.85t、96.05t。

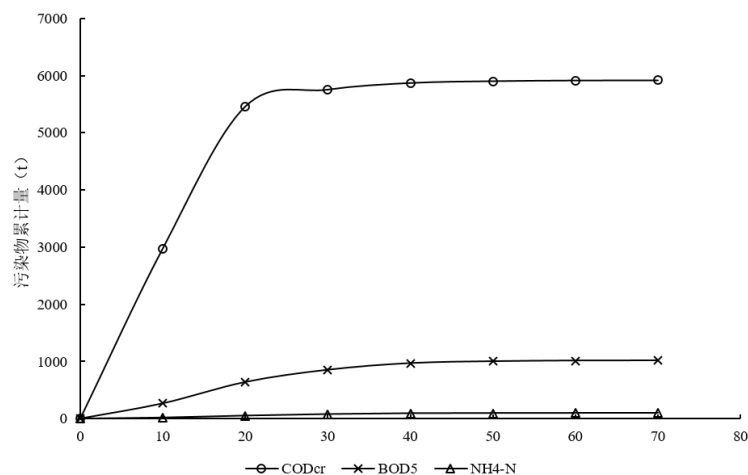


圖 8 研究區非點源污染物累積變化過程線

## 二、不同下墊面類型產汗量

對研究區域在本次典型降雨過程的不同下墊面類型污染物負荷量進行統計，結果見下表 4 所示。



運行模型後，統計資料得到研究區域內總的不同下墊面類型污染物總量，具體資料見下表 4：

表 4 研究區域不同下墊面類型產生的非點源污染負荷總量（單位：t）

面 污染類型	下 墊	社區道路/社區	市政道路	綠地
COD <sub>Cr</sub>		5822.72	78.33	15.63
BOD <sub>5</sub>		1003.49	10.34	1.03
NH <sub>4</sub> -N		94.50	0.19	1.36

由表 4 可知，研究區域社區道路/社區 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 及 NH<sub>4</sub>-N 貢獻占比最高，均達到 98% 以上，主要原因一是社區道路/社區在研究區域面積占比較大，達到 84% 以上，二是社區道路/社區人、車等的頻繁穿行，使大量的懸浮物等污染物產生，單位污染物累計量較其他兩個類型的較大。市政道路 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 及 NH<sub>4</sub>-N 貢獻占比分別為 1.32%、1.02%、0.19%，綠地 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 及 NH<sub>4</sub>-N 貢獻占比分別為 0.26%、0.10%、1.42%，以上兩類污染物貢獻占比少，主要原因是其面積在整個區域占比較小分別在 4%、11% 左右。同時可以看到，綠地類型面積約是市政道路的接近 3 倍，但其 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 的貢獻量分別僅為市政道路貢獻量的 20%、10%，主要原因一是綠地是按照透水下墊面來考慮；二是綠地對污染物的固定作用。綠化區的透水下墊面占多數，降雨形成的徑流下滲後產生徑流量小，對徑流形成起到延後作用，同時綠地植物也對徑流沖砂產生的污染物進行攔截。

#### 肆、結論

本研究以大同溝水環境水生態治理為切入點，針對海口市主城區不同下墊面特徵的地表徑流污染進行了模擬與分析。根據類比結果，海口市城區非點源污染特徵有以下基本結論：

a. 該研究以大同溝東西湖匯水區為研究物件，結合該區域降雨實測資料構建非點源污染負荷計算類比。類比資料可較好地與實測資料相吻合，表明本模型適於類比研究城市降雨徑流形成過程，為今後海口市城區非點源污染負荷類比方面提供說明。

b. 基於研究中所構建的非點源模型類比了典型降雨過程下的污染物負荷量及負荷累計過程，結果顯示，污染物排放量與降雨時間呈正相關，污染物濃度出現在降雨量最大時刻，在降雨初期 0~30min 內，污染物負荷累計量迅速增加。研究區域不同下墊面中，社區道路/社區在 3 類下墊面中 3 種污染物負荷貢獻量均最大，占整個區域污染量負荷的 98% 以上。

c. 該研究以非點源污染負荷模型為基礎，分析了海南典型城市河道匯水區域非點源污染負荷量及污染負荷過程變化，可為沿海城市化進程中對當地水體污染貢獻度的確定以及為其污染治理提供可靠的技術支援。

d. 隨著我國海綿城市推進，適當增加綠地等透水表面面積、綠色屋頂、植被淺溝、滲透路面單獨佈設和 L I D 措施可以減少地表徑流量和污染物入河量，是減少城市非點源污染的一個有效途徑。

e. 重視城市非點源防治工作，針對城市垃圾站、停車場和社區等重點污染源，採取多種措施。綜合防控，合理規劃，杜絕此類設施成為新的城市污染源。

#### 參考文獻

- [1] BREZONIK P L, STADELMANN T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. Water Research, 2002, 36 (7) :1743-1757.
- [2] 李家科, 楊靜媛, 李懷恩, 等. 基於 SWAT 模型的陝西澧河流域非點源污染模擬[J]. 水資源與水工程學報, 2012, 23(4):11-16.
- [3] 王曉燕、秦福來、歐洋、薛亦峰, 基於 SWAT 模型的流域非點源污染模擬[J], 農業環境科學學

報, 2008,27(3):1098-1105

- [4]城市非點源污染的主要來源及分類控制對策[J]. 郭青海,馬克明,楊柳. 環境科學. 2006(11)
- [5]高正, 黃介生, 曾文治, 等.基於 SWAT 模型的清江長陽段非點源污染及其控制方案研究[J].中國農村水利水電, 2016 (9) :174-177.
- [6]王宗明,張柏,宋開山,等.農業非點源污染國內外研究進展[J].農業資源與環境科學,2007,23(9):468-472.
- [7]王麗. 海安縣城區地表徑流污染負荷研究[D].揚州大學,2008.
- [8] 國家環境保護總局.水和廢水監測分析方法[M]. (第四版).北京:中國環境科學出版社, 2002.210-284.

### **The Impact of Non-point Pollution Load of Land-use Changes in Xinfengjiang River Basin**

Dong Yan-jun<sup>1</sup>, Yan Meng<sup>1</sup>, Li Xing-pin<sup>1</sup>, Zhou Feng<sup>2</sup>

( 1.Pearl river Hydraulic Research institute, Guangzhou,510611; 2.Peking University, Beijing, 100871)

#### **Abstract**

Rivers and lakes in Urban areas are largely affected by urban non-point source pollution. In order to reduce the risk of urban water environment and realize prediction of water environment, it is necessary to simulate and analyze the characteristics of urban non-point source pollution. In this study, firstly, meteorological, hydrological and water quality synchronous observation and analysis were carried out for the rainfall on June 18, 2018, and the model parameters were calibrated. Then, the pollutant load and cumulative load process under typical rainfall process were simulated based on the non-point source model. The results show that the pollutant discharge is positively correlated with the rainfall. The pollutant concentration occurs at the maximum rainfall time, and the cumulative load of pollutants increases rapidly within 0-30 minutes of the initial rainfall. Among the different underlying surfaces in the study area, the contribution of three pollutant loads of residential road/community parking in three types of underlying surfaces is the largest, accounting for more than 98% of the total regional pollution load.

**[Key words]**Urbanization; Non-point Source Pollution; Pollution Load Simulation; Water Environment prediction

# 基於機器學習短歷時暴雨時空分佈規律研究

劉媛媛<sup>1</sup>，劉洪偉<sup>2</sup>，霍風霖<sup>2</sup>，劉業森<sup>1</sup>

## 摘要

城市內澇風險的精細化管理和防洪排澇市政工程的科學設計，需要對當地降雨的時空分佈特徵有深入的瞭解。而傳統以單站雨型代表整個區域降雨特徵的分析方法，不能滿足這一要求。本文嘗試將機器演算法引入到暴雨時空分佈特徵研究中，以北京城區2004—2016年降雨資料為研究樣本，利用動態聚類演算法，提取北京城區短歷時暴雨的時空分佈的動態特徵。經分析，北京汛期的短歷時暴雨的時空分佈特徵，可以分為三種類型：(1) 降雨自西北部山區移動到城中心區，逐漸擴散到城區；(2) 降雨集中在城區西南部地區，逐漸向北部和城中心區擴散；(3) 降雨集中在城區中心區和東部地區，基本不發生移動。研究結果表明，基於機器學習演算法提取的暴雨的時空分佈特徵，與實際暴雨時空動態發展趨勢相符，並且有各自對應的降雨形成的不同物理機制，可為城區降雨設計、城市內澇風險管理等工作提供借鑒與參考。

**關鍵字:**機器學習、時空分佈、特徵提取、短時強降雨、北京

## 壹、研究背景

近年來，在我國由於暴雨引發的內澇已經成為影響城市生產生活運轉的重要問題<sup>[1]</sup>。尤其是隨著城市規模的快速擴大，人口和經濟活動變得越來越集中，內澇災害所造成的損失也被成倍放大，暴雨內澇對我國城市建設和運行的影響也越來越明顯<sup>[2]</sup>。據不完全統計，2010年1月—8月底，我國遭受洪澇災害的縣級以上城市已經超過了200座，其中大多數為暴雨內澇<sup>[3]</sup>。住建部2010年對32個省的351個城市的內澇情況的調研結果顯示，自2008年，62%的被調研城市都發生過不同程度的積水內澇<sup>[4]</sup>，“逢大雨必澇”已成為目前我國城市的通病。在極端天氣多發、“逢大雨必澇”的背景下，城市內澇風險管理工作的水準亟待進一步提高。

城市內澇的風險管理依賴於準確的降雨預報，當前降雨預報的主要工具是數值天氣預報模式，然而由於受整個學科水準的限制，要想在暴雨來臨前對城市雨量及其時空分佈進行精準預報十分困難，因此在實際工作中，降雨的數值預報可用性並不強。目前城市內澇的風險管理，更多的是依賴科學的市政工程措施和基於預案的應急管理手段。而科學的工程措施與管理手段，離不開對當地暴雨時空分佈特徵的深入瞭解，尤其是對降雨動態變化特徵的深入瞭解。掌握短歷時強降水時空分佈特徵和規律，在暴雨到來之前，根據歷史規律提前預估降雨的動態發展趨勢，即可根據歷史上已出現過的內澇災情預判不同地區的內澇風險，從而對內澇的風險管理具有重要意義。

城市內澇積水的具體情況與暴雨雨強和時空變化特徵有直接關係<sup>[5]</sup>，在匯流歷時內平均雨強

<sup>1</sup> 中國水利水電科學研究院，北京 100038

<sup>2</sup> 北京市水務局，北京 100038

基金項目：國家重點研究發展計劃項目（2016YFC0803109），國家重點研發計劃（2017YFC1502703）

作者簡介：劉媛媛（1978-），女，天津人，高級工程師，主要從事防洪減災相關研究。E-mail：[50237479@qq.com](mailto:50237479@qq.com)。

通訊作者：劉業森（1980-），男，山東人，高級工程師，主要從事空間信息技術及防災減災相關研究。E-mail：[liuys@iwhr.com](mailto:liuys@iwhr.com)。

相同的條件下，雨峰在中部或後部的雨型比均勻形雨型的洪峰大30%以上<sup>[6]</sup>。傳統的暴雨時空分佈研究，主要針對單站（代表站）的雨型開展。Pilgrim 和Cordery<sup>[7]</sup>提出的雨型與實際降雨過程較為相似，他們將雨峰時段放在出現可能性最大的位置上，雨峰時段在總雨量中的比例取各場降雨雨峰所占比例的平均值，再根據平均值由小到大的次序確定降雨強度從大到小的順序，最後計算各時段內各場次降雨量占總降雨量百分比的平均值，代入確定的順序中，由此得出雨型。Keifer 和 Chu<sup>[8]</sup>根據強度-歷時-頻率關係得到了一種不均勻的設計雨型——芝加哥雨型，該雨型中任何歷時內的雨量等於設計雨量。F.A. Huff<sup>[9]</sup>通過研究美國伊利諾斯州的暴雨，將整個降雨歷時平均分成4部分，依據降雨的峰值出現的4個時段位置，將降雨劃分為4種雨型。對每一類雨型，設計多種不同頻率的分配過程。

這些針對單站（代表站）的降雨雨型長期以來得到了廣泛的應用，但令人遺憾的是它們不能體現降雨過程在時間、空間上動態變化的綜合特徵。尤其大城市地區，熱力、動力環境均存在明顯的空間分異，傳統的單站（代表站）暴雨雨型就更不能滿足分析降雨時空分佈特徵的要求，很難對城市內澇積水風險的精細化管理形成有效支撐。

近十幾年來，人工智慧（Artificial Intelligence, AI）技術在電腦視覺、自然語言處理、機器翻譯、醫學成像、醫療資訊處理、機器人與控制生物資訊等領域已取得長足進展<sup>[10]</sup>，尤其在醫療診斷<sup>[11]</sup>、無人駕駛等方面，表現不俗，而在圖像識別、語音辨識等方面，AI更是超過人腦，識別的準確性更高。機器學習（Machine Learning, ML），是AI的核心組成部分，是實現人工智慧的主要途徑。機器學習的核心是讓電腦自動“學習”的各類演算法，可以說明電腦對大量樣本資料進行分析並獲得規律，然後利用規律對未知數據進行分類或預測。機器學習已在許多領域引發了歷史性的革命，氣象災害識別預測上也已得到了較好的應用<sup>[12]</sup>。同時，隨著降雨資料獲取和傳輸的發展，降雨資料更加豐富。基於大量降雨樣本資料，利用機器學習技術對降雨的時空分佈特徵進行提取，成為可能。

本文將機器學習引入到暴雨時空分佈研究中，提出了針對超大城市短歷時強降雨時空分佈模式研究方法。區別於傳統的針對單站降雨雨型分析的方法，本文以整個研究範圍內所有雨量站為研究物件，利用機器學習演算法，提取出研究區域短時強降雨時空動態分佈特徵，可為城市降雨方案設計、城市內澇風險分析等提供借鑒與參考。

## 貳、研究方法

### 一、方法流程

強降雨範圍、暴雨主要落區移動路徑、降雨量變化、最強時段出現時間等，都是暴雨的時空分佈特徵，瞭解這些特徵，對於有針對性地防範暴雨對城市的衝擊有重要意義。本文將這些降雨的時空特徵用高維陣列進行表達，利用機器學習演算法，提取短時強降雨的時空分佈特徵。主要步驟如下：

(1) 資料獲取和品質控制：對歷史短歷時強降雨資料進行品質控制，剔除不合理的資料。

(2) 降雨過程結構化：首先劃分降雨場次，將連續的降雨資料劃分為若干暴雨場次，並從中篩選出暴雨過程，作為研究樣本；其次從時間維度和空間維度構建陣列，將一場暴雨過程數位化。

(3) 聚類分析，特徵提取：利用機器學習演算法，對歷史降雨樣本集進行聚類分析和特徵提取。

### 二、降雨過程結構化

對各場次降雨，從時間維度和空間維度構建高維陣列。將一場降雨過程中每時段的降雨，用矩陣的方式描述。一場降雨有 $n$ 個時段，就有 $n$ 個矩陣。歷史暴雨樣本集中有 $N$ 場雨，那就有 $N$ 個這

樣的高維矩陣。該高維矩陣包含這次降雨過程的時間特徵和空間特徵。

基於該方法，建立降雨過程樣本集 $\Omega$ ，實現了多場次降雨的結構化描述，見式(1)、式(2)。

$$\Omega = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_N\} \quad (1)$$

$$Q_i = \begin{bmatrix} x_{1t1} & x_{2t1} & \dots & x_{st1} \\ x_{1t2} & x_{2t2} & \dots & x_{st2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{1tm} & x_{2tm} & \dots & x_{stm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\Omega$ 為歷史暴雨樣本集，包括 $N$ 個暴雨場次。其中， $Q_i$ 為第 $i$ 次降雨過程， $x_{stm}$ 為第 $s$ 個雨量站 $tm$ 時刻的降雨量， $s=1,2,3\dots S$ ， $tm=1,2,3\dots m$ ， $S$ 為雨量站個數， $m$ 為時段數。

2.3 動態聚類分析 本文所用的動態聚類演算法屬於人工智慧技術中常見的經典聚類演算法，是無監督的學習演算法。動態聚類分析<sup>[13]</sup>的基本思想是：通過反覆運算尋找 $r$ 個聚類的一種劃分方案，使得用這 $r$ 個聚類的均值來代表相應各類樣本時，所得的總體誤差最小。即，通過該演算法，將總體樣本集劃分為 $r$ 個子集，使得各子集內的樣本近似，而各子集之間的樣本不同。再提取各子集的均值，得到屬於該子集的降雨特徵。

分析時，先隨機選擇 $r$ 個樣本點，也就是 $r$ 個降雨過程作為 $r$ 個子集的初始聚類中心，計算所有樣本與這 $r$ 個初始聚類中心的距離，並把樣本劃分到與之距離最近的那個中心所在的子集中，使所有的樣本根據距離，自動聚集到各個子集中，從而得到初始分類類型數以及初始子集。計算各子集所有樣本的均值，得到新一代的聚類中心，再次計算所有樣本與新的聚類中心的距離，自動聚集，得到新的聚類中心，計算各子集所有樣本的均值……。不斷反覆運算，並比較第 $p$ 代和第 $p+1$ 代聚類中心，如果相差在範圍之內，則認為計算收斂，從而得到最終的子集及各子集的聚類中心。

該聚類方法收斂速度快，容易解釋，聚類效果較好，適用於高維資料。但是該方法的聚類結果受初始聚類中心的選擇的影響較大。因此本文在反覆運算收斂後，通過與實際雨量空間特徵不斷的比較分析，判斷子集數和初始子集中心是否合理，調整子集數以及子集的初始中心，……。以此反復進行聚類的反覆運算運算，直至確定合理的雨量空間分佈特徵類型數和聚類中心。計算步驟如下：

(1) 分析的樣本集為 $\Omega = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_N\}$ ， $M$ 為最大反覆運算次數， $r$ 為初始劃分的子集數， $C = \{C_1, C_2, \dots, C_r\}$ 為 $r$ 個子集。初始時 $C_j = \emptyset$ ， $j=1,2,\dots,r$

(2) 從 $\Omega$ 中隨機選取 $r$ 個樣本，作為初始 $r$ 個子集的各中心向量 $Z_j^0 = \{z_1, z_2, \dots, z_r\}$  ( $0$ 為反覆運算計算次數)

(3) 對於 $n=1,2,\dots,N$ ，計算樣本 $Q_i$  ( $Q_i \in \Omega$ ) 與每個聚類中心 $Z_j = \{z_1, z_2, \dots, z_r\}$ 的距離 $d_{ij} = \|Q_i - z_j\|_2^2$ ，如果 $d_{ij} = \min\{d_{ij}\}$   $i = 1,2,\dots,N$ ，則 $Q_i \in C_j$ 。更新 $C_j = C_j \cup Q_i$

(4) 對於 $j=1,2,\dots,r$ ，對 $C_j$ 中的所有樣本點，重新計算中心向量 $Z_j^1 = \frac{1}{C_j} \sum_{Q_i \in C_j} Q_i$

(5) 不斷重複反覆運算，如果 $Z_j^{p+1} \neq Z_j^p$ ， $j=1,2,\dots,r$ ，則回到(2)，重複反覆運算計算。如果 $Z_j^{p+1} = Z_j^p$ ， $j=1,2,\dots,r$ ，運算結束

(6) 輸出各子集 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_r\}$ 以及各子集的均值 $Z_j^{p+1} = \{z_1, z_2, \dots, z_r\}$ 。

## 參、計算實例分析

### 一、資料處理

北京作為超大規模城市，最近30年經歷了快速的城市化進程，同時內澇問題加劇。北京市主汛期（6—8月）降雨集中，汛期突發的強降雨基本占了全年降水量的大部分[14]。這種集中型的極端降雨，是北京嚴重城市內澇災害的主要誘因。尤其2011年“6.23”與2012年“7.21”特大暴雨，北京全市發生了嚴重的洪澇災害，並造成了重大人員傷亡和財產損失。2016年“7.20”暴雨，雖然降雨量與“7.21”暴雨相當，但歷時較長，雨強減半，危害較輕，可見雨型時空分佈有顯著影響。

本文選取北京市水文總站提供的2004—2016年北京城區14個氣象站（如圖1所示），夏季（6—8月）5min間隔降雨監測資料。在實際的監測降雨資料中，可能會受監測設備或者人為影響，出現非常不合理的資料，導致不能分析出合理的結果，或者根本不會出結果。因此在做分析之前，需要對實際的監測降雨資料進行品質控制，剔除不合理的資料。品質控制的標準如下：

（1）單站5min降雨量超過10mm，且孤立存在，該站前後時間都沒有降雨，則認為是不合理的記錄；

（2）某站5km×5km範圍內的雨量站監測資料為0，而該站5min降雨量超過10mm，則認為是不合理的記錄。

對於單站不合理的記錄，利用該站5km×5km範圍內雨量站差值結果，代替該站不合理的記錄。

將品質控制後的資料進行場次劃分，篩選出短歷時強降雨過程作為樣本。首先，根據北京城區降雨的特點，連續超過2小時5min降雨量小於0.1mm，則認為無有效降雨，按照這個規則劃分降雨場次。根據北京城區的暴雨藍色預警指標：1小時降雨量達30mm以上或6小時降雨量達50mm以上[15]，篩選出暴雨過程。按照上述標準和流程，在2004—2016年間，共篩選出強降雨過程89場，將場次降雨劃分為12個時段，構建高維陣列樣本庫。

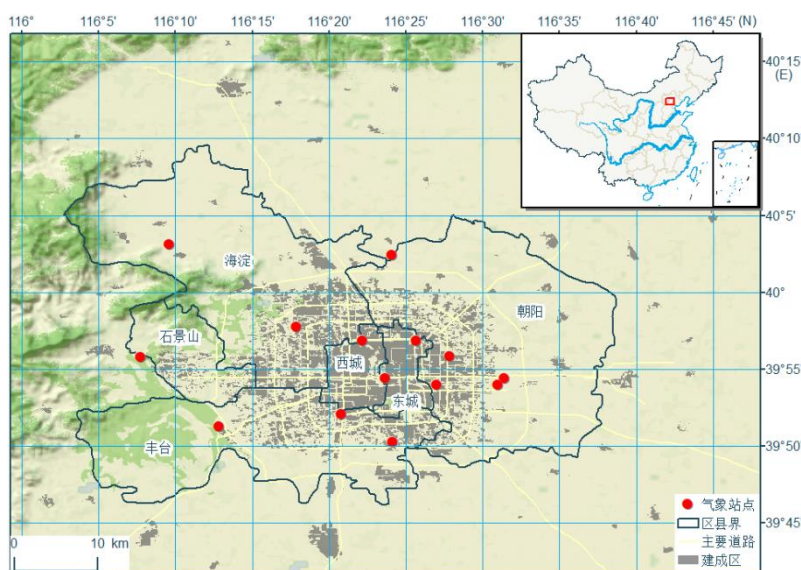


圖 1 氣象站分佈

## 二、結果分析

本文基於機器學習演算法，提取北京城區夏季短歷時強降雨的時空分佈特徵。經分析，北京夏季短歷時強降雨過程可分為三類：第一類，暴雨中心自西北山區向城中心區移動；第二類，暴雨中心自西南經城區，向東北方向移動；第三類，暴雨集中在城區，基本不發生移動。

這三類降雨模式的雨量格局及發展過程存在明顯差異，為了進行直觀對比，以各網站各時段的降雨量為權重，計算了這三類降雨各時段的雨量重心點，結果見圖2。圖2中，分別用不同顏色的正方形、圓形、三角形代表這三類降雨 $t_1 \sim t_{12}$ 時段的雨量重心點。從總體位置來看，這三類降

雨的重心點分別偏西北、西南、東南。從暴雨中心移動過程來看，第一類明顯由西北向城區移動，第二類主要自西南地區向北部和城中心區移動，第三類基本集中在城中心區。其中第一類的暴雨過程，暴雨中心移動的距離較長，而第三類的暴雨過程，降雨比較集中，暴雨中心基本不發生移動。

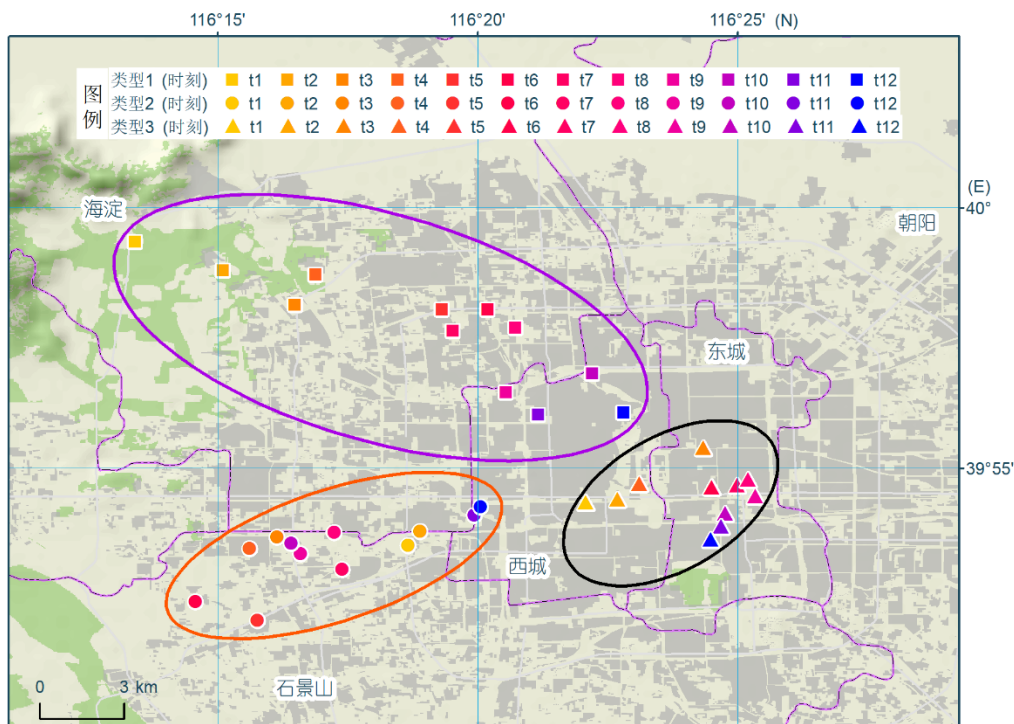


圖 2 不同類型降雨重心點時空變化對比

各類型降雨不同時刻的雨量分佈格局，見圖3—圖5。圖中色塊表示各時刻降雨空間分佈情況。

第一類降雨，如圖3所示。該類型降雨的時空分佈特徵為：降雨從西北部山區向城區中心區和城區東部擴散。降雨一開始都集中在西北部山區，城區其餘各站基本沒有降雨。而後降雨量逐漸分散，各站都有降雨發生，屬於該類型的暴雨占統計樣本數的31.8%。出現這類過程時，北京通常位於東移低渦前部的動力不穩地區，高空大尺度低渦自西北向東移動，當地層水汽條件配合時，即會自西北向東南出現強降水。2011年“6.23”大暴雨就屬於該類型，該場大暴雨自西北部山區逐漸向城中心區移動，西北部地區降雨量較大[16]，符合第一類降雨的時空分佈規律。

第二類降雨，如圖4所示。該類型降雨的時空分佈特徵為：主要降雨都集中在城區南部和西南部地區，逐漸向北部和城中心區擴散。屬於該類型降雨占樣本總數的13.7%，出現這種降雨時，北京通常處於槽前的西南暖濕氣流裡，或是位於偏南低空急流前部激發的強對流中，其本質是暖區強降水，因為濕度和對流不穩定條件好，降水強度大。

第三類降雨，如圖5所示。該類型降雨的時空分佈特徵為：主要降雨集中在城區中心區和東部、南部地區，基本不發生移動，降雨集中。該類型降雨占樣本總數的54.6%。為北京城區夏季主要降雨類型，基本發生在午後到傍晚。2004年“7.10”特大暴雨就是屬於該類型的典型暴雨過程。本次暴雨中心位於城區中部和西部。城區平均降雨量為81mm，而全市平均降雨量23mm。市級報汛站中最大點天安門站降雨量達到106mm[17]。屬於該類型的暴雨過程，主要是受城市“雨島效應”影響造成的，多為局地性降水。

綜上所述，北京城區汛期短時強降雨過程時空分佈特徵可以歸為三種類型，這三種類型的降雨時空分佈特徵與屬於該類的實際降雨過程基本符合，而且這三種類型降雨時空分佈特徵，均有相應物理機制的解釋。

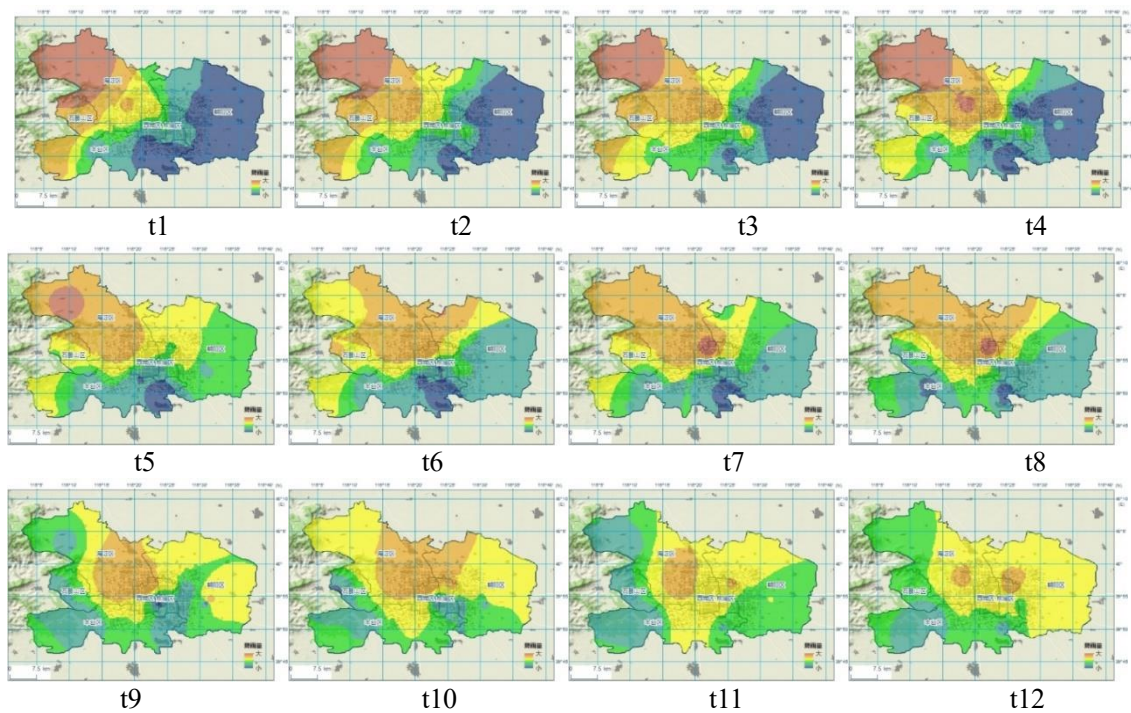


圖 3 第一類降雨時空分佈圖

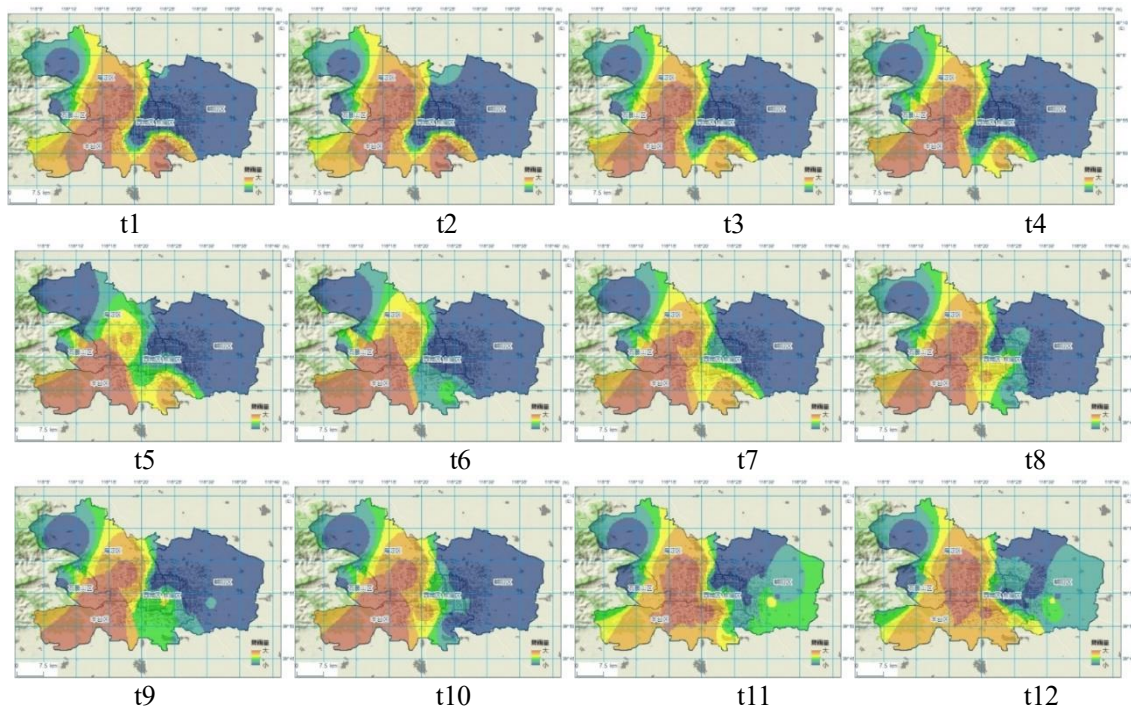


圖 4 第二類降雨時空分佈圖



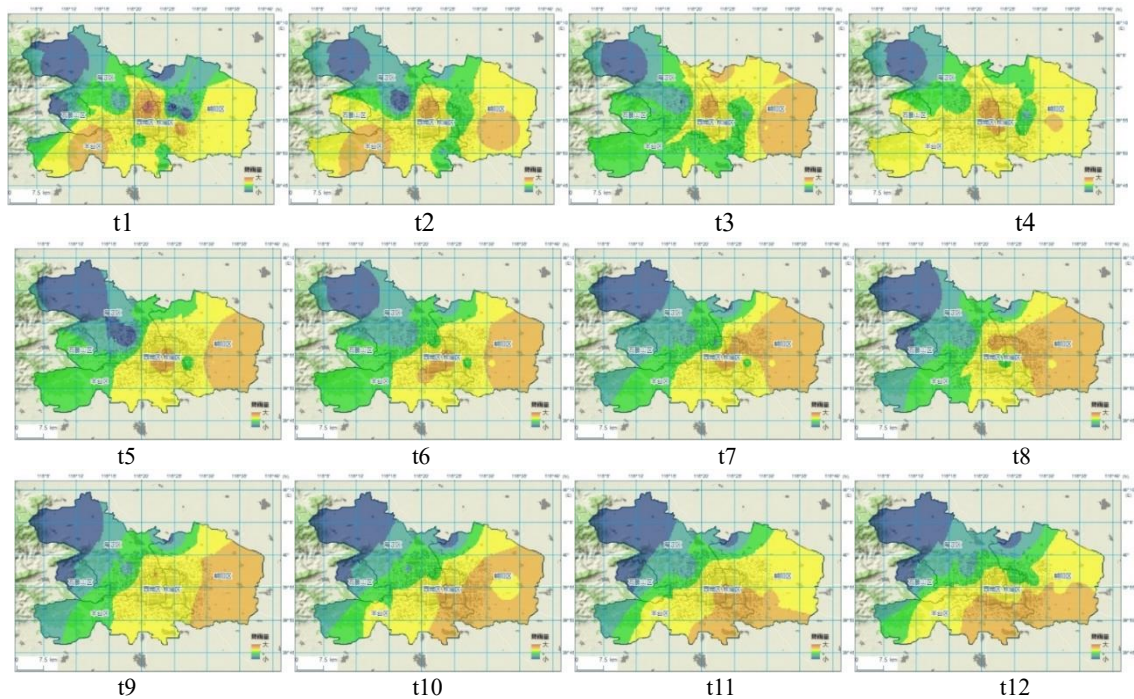


圖 5 第三類降雨時空分佈圖

#### 肆、結論與展望

深入瞭解城市暴雨動態變化的特徵規律，掌握短歷時強降水時空分佈特徵，是科學應對暴雨引發的積滯等次生災害的先決條件，而傳統的以點帶面的方法，不能很好的分析暴雨動態變化特徵，無法滿足提高城市內澇風險管控水準的需求。本文將機器學習演算法引入到降雨時空分佈特徵的研究中，實現了暴雨時空分佈的特徵提取，將北京城區的汛期的短時強降雨過程分為三種類型：

- (1) 降雨自西北部山區移動到城中心區，逐漸擴散到城區；
- (2) 降雨集中在城區西南部地區，逐漸向北部和城中心區擴散；
- (3) 降雨集中在城區中心區和東部地區，基本不發生移動。

經機器學習，提取出的各降雨模式的時空分佈規律，與屬於各模式的實際降雨過程基本相符，並且有各自對應的降雨形成的不同物理機制。

當然也應看到，本文僅以北京城區14個站，2004—2016年的降雨資料為分析樣本，提取的降雨時空分佈特徵可能具有一定的隨機性和不確定性，對於全北京市域的特點還未很好把握，有待進一步深入開展。未來可收集整理更大範圍、更長序列的降雨資料，進一步補充完善資料樣本，從更大範圍探討降雨過程的變化特徵，以得到更加全面完整的分析結果。

#### 參考文獻

- [1] 王浩, 梅超, 刘家宏. 海绵城市系统构建模式[J]. 水利学报, 2017, 48 (9):1099-1022.
- [2] 张炜, 李思敏, 时真男. 我国城市暴雨内涝的成因及其应对策略[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(5):180-184.
- [3] 程晓陶. 城市型水灾害及其综合治水方略[J]. 灾害学, 2010, 25(增刊):10-15.
- [4] Xia Jun, Shi Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (3) : 292-301.
- [5] Arezoo Rafieeiniasab , Amir Norouzi , etal. Toward high-resolution flash flood prediction in large urban areas – Analysis of sensitivity to spatiotemporal resolution of rainfall input and hydrologic modeling[J]. Journal of Hydrology 2015, 531 (2) : 370-388.

- [6] 吴彰春, 岑国平, 安智敏, 坡面汇流的试验研究[J]. 水利学报, 1995 第 7 期: 84-89.
- [7] David H. Pilgrim, Ian Cordery. Rainfall temporal patterns for design floods[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1975, 101(1) :81-95
- [8] Clint J. Keifer , Henry Hsien Chu . Synthetic Storm Pattern for Drainage Design[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1975, 101(10), 1371-1371
- [9] F. A. Huff. Time distribution of rainfall in heavy storms[J]. Water Resources Research, 1967, 3(4): 1007-1019
- [10] LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G. Deep Learning [J]. Nature , 2015 , 521 , 436-444.
- [11] 王威, 李郁, 张文娟, 等. 深度学习技术在疾病诊断中的应用[J]. 第二军医大学学报, 2018, 39(8): 852-858.
- [12] 张文海, 李磊. 人工智能在冰雹识别及临近预报中的初步应用[J]. 气象学报, DOI : 10.11676/qxxb2019.014
- [13] 杨明极, 马池, 王娅, 等. 一种改进的 K-means 聚类的 FCMM 算法[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(7), DOI : 10.3969/j.issn.1001-3695.2017.12.0851.
- [14] 刘照明, 胡非, 李磊, 等. 北京地区夏季城市气候趋势和环境效应的分析研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49 (3) : 689-697.
- [15] 北京市气象局, 北京市气象灾害预警信号与防御指南, 2016 年 3 月
- [16] 陈静, 刘琳. 2011 年汛期北京城市暴雨特征及其灾害成因初步分析[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(3):282-287
- [17] 化全利, 吴海山, 白国营. 2004 年 7 月 10 日北京城区暴雨分析及减灾措施[J]. 水文, 2005, 25 (3) : 63-64.

## An application of machine learning on examining spatial and temporal distribution of short duration rainstorm

Liu Yuanyuan<sup>1</sup> Liu Hongwei<sup>2</sup> Huo Fenglin<sup>2</sup> Liu Yesen<sup>1</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China. 2. Beijing Water Authority 100038, China)

**Abstract:** It is necessary and important to understand the spatial and temporal distribution characteristics of rainfall in order to improve management of urban waterlogging risk and scientific design of municipal works for flood control and drainage. However, it is hard to derive accurate prediction based on monitoring data of a single station or the average of multiple stations. Availing of machine learning algorithm, this paper contributes to investigating rainfall spatial and temporal distribution characteristics. Specifically, the technique of dynamic clustering algorithm examines the spatial and temporal distribution characteristics of rainfall in Beijing urban area during recent 10 years. The result shows that there are three types of rainstorms in Beijing urban area. Rainstorms of type 1 move from the northwest to the center of Beijing, then spreads to the eastern part of the urban area; rainstorms of type 2 occurs in the southwestern region of the urban area, and gradually northward, but there is no rainfall in the mountainous northwest; rainstorms of type 3 are concentrated in the central and eastern regions, and basically does not move. The results are consistent with the actual rainstorm process. It provides references for urban rainfall design and urban waterlogging risk management.

**Keywords:** machine learning; spatiotemporal patterns; feature selection; short duration rainstorm; Beijing

# 城市高水高排洪澇綜合防治措施的應用條件及適用性研究

劉偉<sup>1</sup>, 邱冰<sup>1</sup>, 劉洋<sup>1</sup>, 孫立飛<sup>1</sup>, 朱光華<sup>2</sup>, 陳敏<sup>2</sup>

## 摘要

大多城市採用疏挖河道方式治理城市內河，老城區由於河道兩岸建築密集，擴挖河道難度較大，為解決新老城區面臨的用地、拆遷與河道行洪之間的矛盾問題，研究高水高排洪澇綜合防治措施的應用條件及適用性具有實際的應用需求。通過研究工程案例，城市高水高排洪澇綜合防治措施的應用條件主要包括地形、水系、截流距離、降雨、經濟社會等5個方面，其中地形和截流點距離因素影響較大，可截流的山區匯流面積、幹流截流點河長與各河流截流點平均河長比值、降雨量、城市山區降雨與平原區降雨比值與適宜性正相關。採用高水高排洪澇綜合防治措施防洪排澇效果明顯，同時可兼具生態補水、景觀等綜合功能，在有一定比例山區面積、經常發生洪澇災害的老城區具有較好的適用性。文章總結提出高水高排措施適宜性評價公式，並對已實施和未實施高水高排措施的城市進行了適宜性評價。

**關鍵字：**高水高排；洪澇綜合防治；城市洪澇災害；防控體系；適用性；應用條件；生態補水

人類自古依水而居，我國城市大多鄰水而建，城市防洪排澇歷來是城市發展過程中需要優先解決的重要問題。隨著城市建設的發展，人民財富的積累，城市規模越來越大，發生洪澇災害可能帶來的損失越來越嚴重；全球氣候變化，極端天氣愈來愈頻繁，局地暴雨頻發，城市暴雨增多趨強；暴雨引起的洪澇災害愈來愈受到社會的關注。據相關統計，2008—2010年，全國有60%以上的城市發生過不同程度的洪澇，其中有近140個城市洪澇災害超過3次以上<sup>[1]</sup>，解決城市洪澇災害、提高城市水安全十分重要和迫切。

## 壹、研究背景

國際水文科學協會（IAHS）2013—2022十年科學計畫主題確定為變化環境下的水文科學研究，城市水文學及社會水文學為其中一個熱點，而“城市暴雨洪水”則為重要前沿科學問題【2-4】。受季風氣候影響，我國降水量分佈不均，從松遼流域的450-500mm到南部珠江流域的1470mm【5】，差異較大，局部城市區域暴雨洪水集中、洪澇災害嚴重，特別是海河流域、淮河流域，城市洪澇問題歷來非常突出。開展城市洪澇災害研究，對於保障國家水安全，支撐經濟社會可持續發展具有重要科學意義和實用價值。防洪排澇防治措施是城市洪澇綜合防控體系的重要一環，發揮著十分重要和直接的防洪治澇作用，城市防洪排澇措施包括水庫、堤防、海綿城市等低影響開發技術、高水高排洪澇綜合防治技術、深隧蓄排水技術等一系列技術措施，以上技術分別在不同特點的城市發揮不同的作用，不同的技術也具有不同的適用性和應用條件。其中，高水高排洪澇綜合防治技術對於解決部分城市的防洪排澇問題作用十分明顯，同時具有綜合的生態補水、景觀等作用，具有廣泛的應用範圍和適用性，本文結合城市洪澇災害綜合防控課題研究，對城市高水高排洪澇綜合防治技術進行詳細分析。

## 貳、國內典型工程

城市高水高排主要是採用隧洞、管道等工程型式，將山區產生的洪水，繞城或穿城排至城市下游承泄水體，減少進入城市的洪水，減輕防洪壓力；在工程通過的區域，可承接部分城市澇水，兼具治澇作用；也可通過工程進行生態補水，增強城市內河湖水動力條件，改善

---

中圖分類號：TV85；TV872 文獻標識碼：A

<sup>1</sup> 水利部水利水電規劃設計總院，北京 100120

<sup>2</sup> 福建省水利水電勘測設計研究院，福建 福州 350001

城市內河流水質，兼具生態環境功能。近年來，有些城市根據自身條件，實施了高水高排工程，防洪排澇效果十分明顯，大大減輕了城市洪澇災害，增強了河湖水動力條件，改善了河湖水質。下面以典型城市為例簡述其一般工程佈局。

一、基本情況

城市 A 城區三面環山、南臨外江，周圍山地陡峻、河流比降大，南部地勢平坦低窪，山洪水和澇水通過內河排泄江中。由於城區內河過水斷面偏小、排水不暢、調蓄容積不足，加之受下游洪潮水位頂托，城區內澇頻繁發生，同時，山洪進入城區帶來大量的泥沙和塊石，加劇城市內澇，平時河道水量不足，水動力條件差，老城區水體污染不易治理，水環境狀況惡劣。城市 A 地形見圖 1，低窪地分佈見圖 2，2005 年大雨洪澇淹沒範圍見圖 3。

城市 B 上游多山，坡度較大，每逢暴雨，河道狹窄處兩岸氾濫成災，低窪處積水成澇。年暴雨日數為 3~6 天，暴雨強度以降水量 50~100mm 居多，約占總暴雨次數的 80% 以上。2010 年 6 月 15 日洪水，市區連續普降大到暴雨，過程雨量最大值達 500mm，降雨造成經濟損失 1.885 億元。城區防洪能力已提高至 20 年一遇，但防山洪、治澇能力僅 2 年一遇。現狀河道沿線居民樓密集，若進行擴寬清淤，征遷難度極大，城區出口處滯洪區面積小，城區下游出口時受外江洪水頂托，加重城區內澇。城市 B 現狀澇片見圖 4。

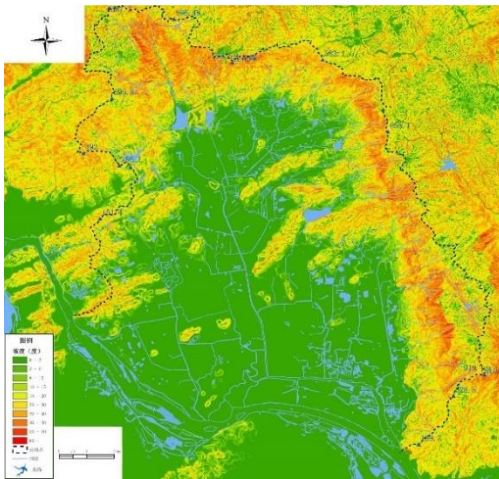


圖 1 城市 A 北部城區地形圖

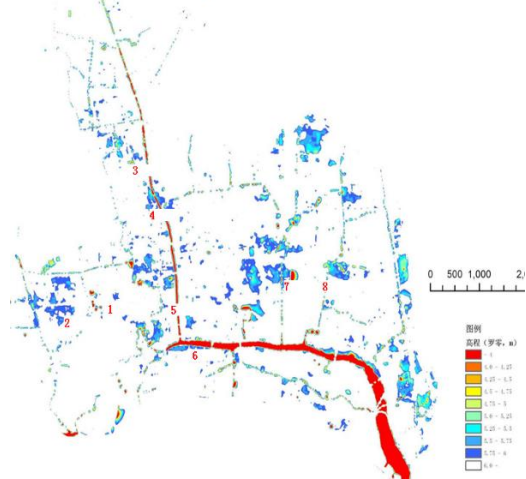


圖 2 城市 A 低窪地分佈圖

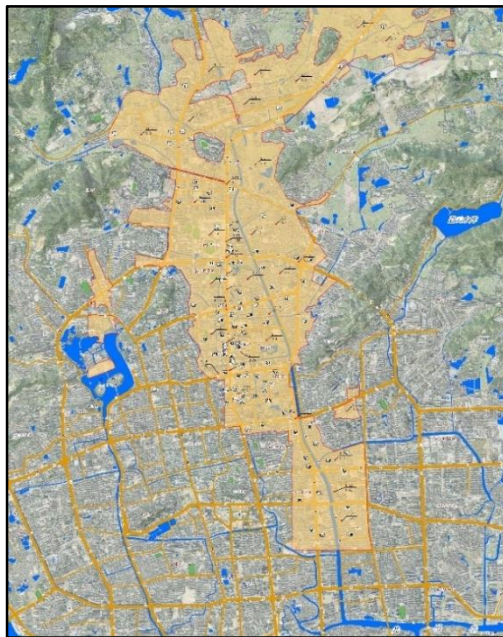


圖 3 城市 A 2005 年淹沒範圍圖

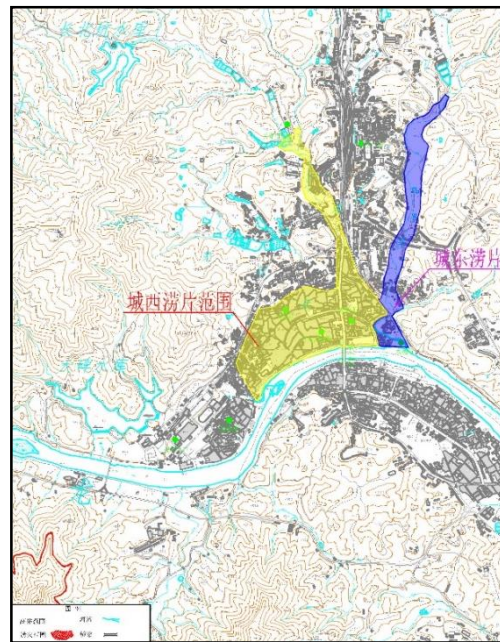


圖 4 城市 B 澇區範圍圖

## 二、工程佈局

在進行高水高排工程佈局時，需進行多方案比選，重點集中在傳統的治理城市內河增加河道下泄能力方案和採用高水高排引導洪水至城市外部方案的優劣性，一般來講，如果河道位於老城區，河道狹窄、兩岸房屋密佈，則傳統方案投資高、不易實施；相對的高水高排方案經濟技術性較好，易實施，投資少。

城市 A 根據流域自然條件和山洪防治目標擬定方案一城外排洪方案和方案二穿城排洪方案。方案一考慮北面的山洪不進入城區，設置全東線山洪隧洞直排外江和東、西線山洪隧洞直排外江兩個子方案。方案二考慮北面的山洪匯流後，通過修建新的排洪河道和拓寬兩條主河後直接排至外江。方案一推薦東、西線山洪隧洞直排外江方案。城外排洪可將山洪與生態補水相結合，排山洪主洞與生態補水主洞合二為一，投資最省，拆遷最小，征地拆遷費用最小；山洪直排外江不進城，減輕內河排洪壓力；城區內河僅需局部拓寬，為提高標準留有餘地；施工干擾小，社會影響小。但建設截洪樞紐會造成少量的植被損壞，需要定期清淤，山洪排泄調度存在一定風險。方案二可增加城區的水環境景觀效果，但挖河、擴河难度大，需搬遷城市人口較多，征地拆遷、施工干擾和社會影響大，工程運行方式單一，山洪與生態補水不能結合。經過技術經濟比較，推薦方案一城外排洪方案。

城市 B 根據城區現狀地形地貌條件，擬定兩個方案：方案一在內河出口處新增泵站抽排結合城區內河拓寬、改造等手段，同時在城西片區設置生態補水隧洞和滯洪湖（下湖）。方案二對城西、城東片區分別治理，城西片區設置控制閘和滯洪湖（下湖），通過高排隧洞將山洪排往外江，同時從外江抽水往城區補水；城東片區設置截洪壩和滯洪湖。方案一明渠部分拓寬河段沿線居民樓密集，拆遷改造費用高、征遷難度極大。方案二可以大幅度減少流往城區洪峰流量，現有河道無需整治，城西、城東片區可形成景觀湖，工程投資較少。因此推薦方案二即高水高排方案。

## 三、工程型式

高水高排採用的工程型式主要有隧洞、明渠、箱涵等，統計 20 多個項目，約 40%採用隧洞、50%採用明渠、10%採用箱涵作為排洪方式。選擇不同工程型式的主要影響因素為地形和城區建設情況，城區邊緣為平原區，若地形開闊便於佈置，多選擇明渠方式，需佔用較多土地；選擇隧洞則可佈置在山區，節省大量土地費用，但工程造價較高。城市 A 城區平坦，建築密佈，由於截洪流量達到 250m<sup>3</sup>/s，採用明渠則佔地面積巨大，因此採用隧洞型式；城市 B 與城市 A 類似採用隧洞型式，輔以滯洪湖等措施。

## 四、實施效果

### (一) 防洪治澇效果

城市 A 山洪防治及生態補水工程攔蓄山洪面積為 44.2km<sup>2</sup>，約占北部城區總面積的 27%，占 10m 以上山地面積的 56%【6】；實施後，主要河道河口 20 年一遇的洪峰流量由 433m<sup>3</sup>/s 減少為 331m<sup>3</sup>/s；降低水位 0.5~1.5m。山洪防治與內河整治共同實施後北部城區排澇標準達到 20 年一遇【6】。山洪防治工程實施後，主要河道 20 年一遇水麵線與綜合整治後的 5 年一遇水麵線接近，對提高下游防洪標準意義重大。高水高排實施後水麵線對比見圖 5，圖中綠色線條為高水高排實施後水麵線，圖中河道整治指高水高排配套的局部河段的少量河道整治，從圖中可見，高水高排效果十分明顯。

城市 B 北岸城區集水面積 28.7km<sup>2</sup>，城東片和城西片攔蓄洪水集水面積占城區的 70%。城東片與城西片高水高排聯合作用後，5 年一遇設計洪水位時，鐵路橋出口內澇最高洪水位由現狀的 161.35m 降低至 160.23m，基本達到 5 年一遇。10 年一遇設計洪水位時，鐵路橋出口內澇最高洪水位由現狀的 162.7m 降低至 161.21m，內澇水位降低 1.49m，淹沒範圍大大減少。20 年一遇設計洪水位時，鐵路橋出口內澇最高洪水位由現狀的 163.9m 降低至 162.1m，內澇水位降低 1.8m，淹沒範圍大大減少。城市 B 工程高水高排作用範圍見圖 6。

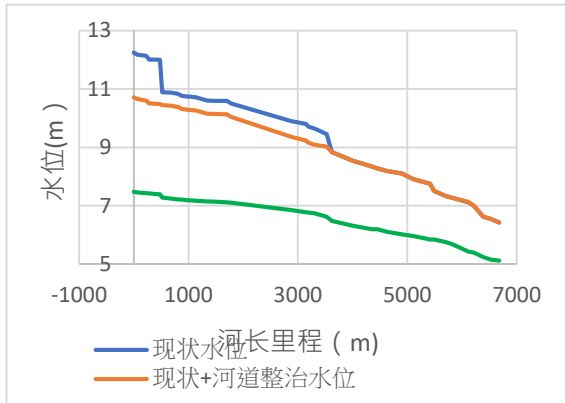


圖5 城市A主河道不同工況水麵線

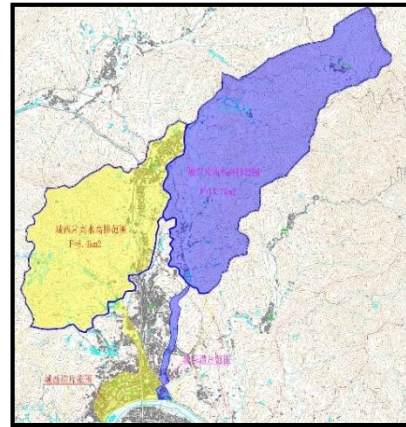


圖6 城市B高水高排作用範圍

### 2.4.2 改善水環境效果

根據城市A 現狀 51 個監測點監測資料，工程實施前氨氮平均超標 5.3 倍。經論證，城區內河補水流量為 47.5m<sup>3</sup>/s 基本合適，可滿足水環境功能要求。工程實施後，經一維河網水動力、水質模型計算，大多內河基本滿足水環境功能區劃水質目標要求。主河道氨氮濃度過程線見圖 7。經調查，城市B 在基準年份內河水質現狀很差，已超過V類水標準，急需通過生態補水改善內河水質。考慮到舊城區截污水平有限，推薦按截污率 70%計，生態補水量為 1.09 m<sup>3</sup>/s。實施補水後基本可滿足水功能區要求。

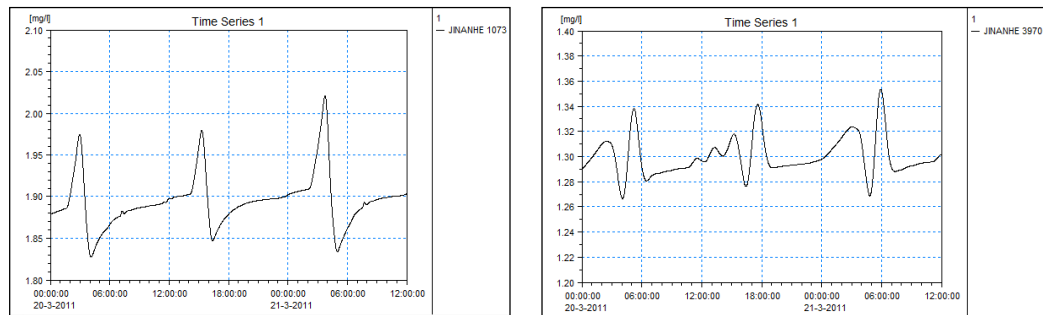


圖7 主河道截污率 80%下兩斷面氨氮濃度過程線

## 參、應用條件

對城市內部暴雨洪澇影響較大的因素有區域透水性、坡度和排水管道密度等【7】，對城區周邊區域洪澇影響較大的因素有地形、降水量、水系、城區建設情況等。高水高排措施大多佈置在主城區的周邊或邊緣地帶，主要與城市地形、水系、截流點與承泄水體的距離、氣象、經濟社會發展等因素有關，其中地形和截流點與承泄水體距離因素影響最大，同時高水高排具有先決條件，對於新城區，一般不推薦採用高水高排措施，宜採用原河道空間行洪，不應另開新河行洪；高水高排要具有較大的承泄水體，不具備承泄能力的水體，高水高排不易實施。

### 一、地形條件

高水高排措施主要應用於城市主體位於平原區，且多為受外洪或潮水位頂托，排水不暢，上游存在山丘或山區匯流面積的城市，城市的地形地貌是佈置高水高排工程要考慮的關鍵因素。採用高水高排主要目的是把山洪直接排至城外，地形條件是決定性因素，即城市部分位於平原區、部分位於山丘區，山丘區的面積越大，其必要性越強。根據 20 多個案例分析，山丘區或山區面積大於 20%才具有佈置高水高排工程的必要性，低於 20%則一般傾向採用傳統的河道治理模式。統計案例結論，高水高排工程的截流面積均大於 20%，平均為 50%，最高達到了 90%以上，高水高排對於解決山區洪水入城方面具有直接、明顯的效果。

城市的入城匯流面積中，山區面積越大，則高水高排措施的必要性越強，山區面積與高水高排措施的適用性是正相關關係，高水高排措施截流面積與城區總面積的比例以 50%為界，高於 50%則有較優的適用性，20%則為適宜與不適宜的分界線，低於 20%，則一般不適

宜做高水高排工程。

## 二、水系條件

高水高排措施的應用與水系條件密切相關，主要表現在其排出到外江外河的為山區河流，若不排出則該部分山洪則進入城市平原區域內部水系，高水高排截流的河流條數越多，則效果越明顯，經分析，扇形、梳形、平行水系效果最好，樹形、羽狀水系次之，水網區域則效果最差；同時，有外江或潮水位頂托的城市，高水高排措施效果更加明顯。

## 三、截流條件

高水高排措施佈局至關重要，若截流點距離最終匯入水體相對於原河長過長，則工程成本和難度增加較多，如果截流點距離最終匯入水體路徑短，則工程比較容易實施。截流點距離承泄水體的平均距離與幹流截流點以下河長的比值與適用性為負相關關係，截流點距離承泄水體的平均距離與幹流河長比值越小，則工程越容易實施，反之則增加工程難度。

## 四、降雨條件

由於地形、風向等條件，雲團多在山前形成落地降雨。對比城市平原區網站和山丘區網站降雨量資料分析，同一城市內，山區站年最大 1 小時降雨量均值为 43.9mm，年最大 6 小時降雨量均值为 80.8mm，年最大 24 小時降雨量均值为 126.5mm，平原區站年最大 1 小時降雨量均值为 40.2mm，年最大 6 小時降雨量均值为 72mm，年最大 24 小時降雨量均值为 111mm，山丘區網站較平原區網站大 10~14%。根據資料統計，2005 年 10 月 2 日 8:00~3 日 8:00 山區站的 24 小時最大雨量達 326.1mm，城區各雨量站均在 200~250mm，山區站比平原區站高 20% 以上。不論從長系列歷史資料統計還是從典型資料分析山洪防治區的降雨強度均大於平原區。南北方降雨量差別較大，時段暴雨值也差別較大，南方降雨量越大的地方，高水高排措施運用頻率越高，發揮的作用越大。

降雨條件方面，若山區降雨量較平原區越大，且越靠近南方，降雨量越大，則高水高排措施的必要性越強，山區降水量與平原區降水量的比值、年降雨量均與高水高排措施的適用性為正相關關係。

## 五、經濟社會條件

城市高水高排主要解決的是老城區的排水問題，老城區內部河道治理拆遷成本高，實施難度大，對於新城區則應以自然河流水系為基礎，留足行蓄洪空間，儘量以自然河道承泄上游山區洪水，同時保留足夠的水面水體，實現水城交融的綠色生態城市，一般不宜採用高水高排措施將水流引出城外。部分城市由於豐枯變化大，山區河道枯季乾涸，汛期則帶入大量泥沙進城，會給城市排水系統和景觀等帶來諸多影響，這些為城市的自然條件無法改變，則城市作為新城區也可考慮高水高排措施，同時可結合生態補水等功能，為城市景觀用水提供水源。因此，經濟社會條件方面，老城區更適宜實施高水高排措施，新城區實施高水高排措施的必要性則稍弱。

# 肆、適用性評價

## 一、評價方法

採用指數法評價高水高排措施的適用性，考慮城市地形、水系、截流點與承泄水體平均距離、氣象、經濟社會五類因素，分別以 D、S、L、Q、J 代表，權重係數分別取為  $i_d$ 、 $i_s$ 、 $i_l$ 、 $i_q$ 、 $i_j$ ，擬定適用性指數 I，公式如下：

$$I = i_d \times D + i_s \times S + i_l \times L + i_q \times Q + i_j \times J$$

D: 地形因素，高水高排截取流域面積/城市總面積/50%，截流面積應扣除防洪水庫可以控制的流域面積；

S: 水系因素，扇形、梳形、平行水系取 0.83，樹形、羽狀水系取 0.6，水網區域取 0.4，其他水系根據其形狀係數取 0.4~1.0，整體上，形狀係數越大，則該 S 取值越大，S 與形狀係數正相關；有外水頂托則 S 放大 1.2 倍。

L: 幹流截流點以下河長/各截流點距離承泄水體的平均距離，一般  $0.5 < L < 2$ ；

Q: 氣象因數，考慮城市內山區和平原區降雨量，以及城市所在區域降雨量不同，取  $(\text{城市山區降水量}/\text{平原區降水量} + \text{年降雨量}/650) / 2$ ；

J: 老城區取 1~0.5，老城區越擁擠、河道擴寬難度越大，則值越大；新城區取 0.5~0.1；若可結合為城區提供生態補水功能，則放大 1.5 倍，原則上新城市區不宜採用高水高排措施。

## 二、評價標準

根據邊界條件，計算高水高排適用性 I 的評價標準。地形因素，當高水高排面積低於 20% 時，即  $D=0.4$  時，則高水高排措施不太適宜；水系條件取平均偏不利的下限，即樹形、羽狀水系  $S=0.6$ ；截流條件，各截流點距離承泄水體的平均距離/幹流河長，中值為幹流截流點以下河長與各截流點與承泄水體的平均距離基本相當，不利的邊界可初擬為各截流點與承泄水體的平均距離為幹流河長的 80%，即  $L=0.8$ ；氣象因素，認為在城市區域的小範圍內，山區降水量與平原區降水量基本相同，年降雨量取全國平均值，計算  $Q=1$ ；高水高排在老城區更加適用，取老城區的下限，即  $J=0.5$ 。

考慮地形因素與截流條件影響最大，水系、降水量與老城區等其他因素相對較輕，初擬權重分別取為  $i_d=40\%$ 、 $i_s=10\%$ 、 $i_l=25\%$ 、 $i_q=10\%$ 、 $i_j=15\%$ ，經計算， $I=0.52$ 。因此取  $I=0.6$  為下邊界條件，當  $I<0.6$  時表示不適宜，當  $0.6\leq I<0.8$  時表示較適宜，當  $I\geq 0.8$  時表示特別適宜，I 可以超過 1。

## 伍、適用性分析案例

### 一、已實施城市的適用性分析

根據以上高水高排措施適用性評價公式，評價城市 A 和城市 B 的適用性指數。城市 A 和城市 B 高水高排截取流域面積比例分別為 27.3% 和 64.1%，則 D 分別取 54.6%、140%；水系分別為扇形水系和樹形水系，兩者均有外水頂托，則 S 分別取 1、0.72；城市 A 三面環山，幹流截流點以下河長與各截流點與承泄水體的平均距離的 2 倍，城市 B 則基本相當，則 L 分別為 2 和 1；兩城市城市山區降水量分別為城區的 1.2 倍、1.1 倍，則 Q 分別取 1.2、1.1；兩城市均為老城區，城市 A 十分擁擠，拆遷難度大，城市 B 相對較好，兩城市高水高排均設計具有補水功能，則 J 均分別取 1.5、1.2。根據以上參數，計算城市 AI 為 1.163，屬於特別適宜範圍；城市 BI 為 1.162，也屬於特別適宜範圍。經評價，兩城市均適宜採用高水高排措施進行城市洪澇災害治理。城市 A 和城市 B 目前均已經實施了高水高排工程，排洪治澇和生態補水效果十分明顯。

### 二、未實施城市的適用性分析及建議

深圳市全市面積 1991 平方公里，境內河流眾多、河道短小，流域面積大於 1km<sup>2</sup> 的河流共有 310 條。流域面積大於 100km<sup>2</sup> 的河流只有 5 條，即茅洲河、龍崗河、觀瀾河、深圳河、坪山河。通過對即茅洲河、觀瀾河、龍崗河、坪山河、深圳河的適宜性分析，指數分別為 0.63、0.61、0.63、1.09、0.66，具體成果見表 1，其中坪山河適宜性程度最高，比較適宜採用高水高排措施，減輕洪澇災害的影響，其餘河流指數介於適宜線附近，慎重進行高水高排措施。

表 1 深圳市 5 條河流高水高排措施評價指數表

流域	地形條件	水系條件	截流條件	降雨條件	經濟社會	指數值
茅洲河	0.50	0.50	0.50	1.86	0.45	0.63
觀瀾河	0.40	0.65	0.50	1.81	0.55	0.61
龍崗河	0.50	0.55	0.40	1.81	0.60	0.63
坪山河	1.20	0.80	1.00	1.81	0.65	1.09
深圳河	0.40	0.50	0.80	1.86	0.45	0.66

濟南市中心城區 1022 平方公里，南部為山丘區，北部為平原區，暴雨多，極易發生災害。山區面積除經上游南大沙河和北大沙河以及下游河道鑄江河匯入黃河外，其餘大多河道呈現南北向穿過市區匯入小清河東西穿城而過。小清河相當於城市的截洪溝，沿途截流了十多條小河流，保護了小清河與黃河之間的區域，也即濟南市已經實施了高水高排工程，但濟南市小清河過流能力有限，兩岸形成了密集的建築群，不宜擴挖。本次考慮在小清河上游新增高水高排措施評價高水高排措施的適宜性。濟南市可截流的流域匯流面積較大，流域形狀為梳狀，有利於截流，位於老城區，高水高排通道不易佈局，工程投資較大，但截流效果好，經計算，小清河流域指數為 0.87，具體成果見表 2，適宜採取高水高排措施，建議增加黃通道，在小清河上游與山區之間選擇合適的通道開挖新的截流溝，減少馬路行洪的頻率，減輕洪災害損失。



表 2 濟南市高水高排措施評價指數表

流域	地形條件	水系條件	截流條件	降雨條件	經濟社會	指數值
小清河	0.80	0.95	1.00	0.98	0.70	0.87

### 陸、結語

城市洪澇災害是世界性難題，城市洪澇綜合防控體系是系統、全面、全過程解決城市洪澇災害的綜合性方案，包含預防、準備、應對和災後恢復等階段的全過程工程和非工程措施體系，其中城市高水高排措施為工程措施中的重要一種，在特定城市解決洪澇災害效果十分明顯。本文統計 20 多個案例，提出了高水高排適宜性措施評價公式，採用該公式進行適用性評價，選擇合適的流域或區域採用高水高排措施，可解決防洪排澇問題，同時增強水體流動性，改善城市內河湖水質條件。經過已經開展過高水高排措施的城市驗證，該公式具有較好的適用性。通過對深圳、濟南等城市的流域進行評價，在採用建設水庫、加高堤防、疏浚河道、增設排水管道等傳統措施的基礎上【8】，研究提出可在深圳市的坪山河、濟南市的小清河與山區之前合適位置可新增高水高排措施，減輕洪澇災害，城市防洪規劃時可參考相關建議制定相應工程方案。

### 參考文獻

- [1]張建雲,王銀堂,賀瑞敏,等.中國城市洪澇問題及成因分析[J].水科學進展,2015,4:35-38.
- [2] MONTANARI A,YOUNG G,SAVENIJE H H G,et al. “Panta Rhei ( Everything flows) ” : change in hydrology and society: the IAHS Scientific Decade 2013-2022[J].Hydrological Sciences Journal,2013,58( 6) : 1256-1275.
- [3] SIVAPALAN M,SAVENIJE H H G,BLOSCHL G.Socio-hydrology: a new science of people and water[J].Hydrological Processes,2012,26: 1270-1276.
- [4]SIVAKUMAR B.Socio-hydrology: not a new science,but a recycled and re-worded hydrosociology[J]. Hydrological Processes,2012,26: 3788-3790.
- [5]劉偉,翟媛,楊麗英.七大流域水文特性分析[J]. 水文,2018,38(5):79-84.
- [6]林翠萍.高水高排對提高福州市江北城區排澇能力的效果分析[J].水利科技,2015,4:35-38.
- [7]江子皓,王慧亮,吳澤甯,胡潤停.城市暴雨洪澇敏感性因素資料倉庫構建與應用[J].人民黃河,2019,41(04):27-30.
- [8]孫曉英,王俊英,胡嘉,劉光東.完善北京市防洪排澇體系關鍵問題研究[J].人民黃河,2017,39(02):28-33.

基金專案：國家重點研發計畫，城市洪澇災害綜合防控(2017YFC1502705)

作者簡介：劉偉（1980—），男，漢，河南南陽人，高級工程師，碩士，研究方向為洪澇災害防治、水文、水資源規劃。

通信作者：邱冰（1983—），女，漢，山東高密人，高級工程師，博士，研究方向為洪澇災害防治、水文水資源規劃。

E-mail：qiubing@giwp.org.cn

劉偉聯繫電話：13911431980 地址：水利部水利水電規劃設計總院 北京市西城區六鋪炕北小街 2-1 號 100120

E-mail：liuwei@ giwp.org.cn

邱冰聯繫電話：15110065021 地址：水利部水利水電規劃設計總院 北京市西城區六鋪炕北小街 2-1 號 100120

E-mail：qiubing@giwp.org.cn

## **Study on Application Conditions and Applicability of High-water High-discharge of Comprehensive Prevention and Control Measures for Urban**

LIU Wei<sup>1</sup>, QIU Bing<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, SUN Lifei<sup>1</sup>, ZHU Guanghua<sup>2</sup>, CHEN Min<sup>2</sup>

(1. Institute of Water Resources & Hydropower Planning and Design of MWR, Beijing 100120 ;

2. Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower of Fujian Provincial)

**Abstract:** Most cities adopt dredging rivers to control urban inland rivers. Because of the dense buildings on both sides of the rivers, it is difficult to expand the rivers in the old urban areas. The comprehensive prevention and control measures of flood control with High-flood High-discharge measure have obvious effect. At the same time, they can also have comprehensive functions of ecological water supply and landscape. It has better applicability in old urban areas with a certain proportion of mountainous areas and frequent flood disasters. Through the case study, the application conditions of urban High-flood High-discharge measure mainly include topography, river system, interception distance, rainfall, economic and social aspects. Among them, topography and interception point distance have a greater impact. The interception area in mountain areas, the ratio of river length at the interception point of main stream to the average river length of each river, rainfall, rainfall ratio in urban mountainous area and plain area are positive correlated with suitability. This paper summarizes and puts forward the suitability evaluation formula of High-flood High-discharge measure, and evaluates the suitability of cities that have implemented and have not implemented High-water High-discharge measures.

**Key Words:** High-flood High-discharge measure; Comprehensive flood and waterlogging control; City flood and waterlogging disaster; Prevention and control system; Applicability; Application conditions; Ecological water;

## 基於完整二維淺水方程組的流域地表徑流數值模擬

張大偉

### 摘要

採用完整二維淺水方程組模擬地表徑流運動時會遇到幹濕處理的難題，為解決該問題，本文採用坡面流為均勻覆蓋流域地表的片狀薄層水流的概念開發完成了壹套新的基於Godunov格式的地表徑流二維水動力模型。模型中，採用三角形網格離散計算區域，修正的Roe格式計算介面通量，底坡項直接積分求解，對高度非線性的摩阻項進行半隱式處理。本模型的最大優勢是幹濕處理變得異常簡潔，單元水面和地形均無需任何特殊處理。通過四個經典算例驗證了該模型具有良好的精度和穩定性。最後將模型用於解家灣流域S曲線的計算和實測場次降雨徑流過程的模擬，所得計算結果合理、可靠，表明本文模型具備模擬真實流域地表徑流運動的能力，可為小流域匯流計算提供壹種新的解決方案。

**關鍵詞：**地表徑流、二維數值模擬、淺水方程、非結構網格、Godunov格式、真實流域

## 壹、研究背景

採用水動力學方法模擬地表徑流過程有諸多優點，如能夠更真實反應小流域地形、地貌的特點；能夠提供整個流域面上的風險點水力要素資訊；能夠適用於無水文資料的地區；具有更好的擴展性，方便與泥沙模型、水質模型耦合等。由於擴散波和運動波形式簡單，數值穩定性相對較好，因此在地表徑流模擬中得到較廣泛的應用<sup>[1-2]</sup>，但是對於複雜地形，特別是對於山洪這種洪水形態，採用簡化的運動波或擴散波方法會帶來較大的計算誤差<sup>[3-4]</sup>。近幾年，隨著電腦硬體技術和數值計算技術的快速發展，採用完整的二維淺水方程組對地表徑流過程進行模擬成為了可能<sup>[5-6]</sup>。完整的二維淺水方程組除能夠提供更準確的水力要素資訊外，還能夠類比局部複雜的水流現象，如滾波和水流流態過度現象等。

在淺水模擬領域應用較廣泛的以求解 Riemann 近似解為基礎的 Godunov 格式已發展的比較成熟，該格式既能模擬光滑解，又能自動適應複雜流態變化，因此在淺水模擬領域得到廣泛應用<sup>[7-8]</sup>。目前，在應用完整二維淺水方程組模擬地表徑流方面，該格式依然是主流數值格式<sup>[5-6]</sup>，但是，直接將已有的基於 Godunov 格式的淺水模型用來類比真實流域地表徑流過程時極有可能會出現不合理的計算結果<sup>[9-10]</sup>。採用完整二維淺水方程組對地表徑流過程進行模擬面對的主要難題是如何在複雜地形上（如坡度大、存在倒坡、地形起伏大）準確模擬水深相對較淺的（遠小於 mm 量級）薄層二維水流運動，這一問題與常規洪水（如河道洪水、潰堤洪水等）有明顯不同。當前的 Godunov 模型在地形概化時主要有斜底模型和平底模型之分，斜底模型的地形高程佈置在網格節點，平底模型的高程佈置在網格單元型心。常規二維洪水演進的幹濕變化過程如圖 1 所示，由圖可見，不論是平底模型還是斜底模型，在常規洪水類比中，幹濕變化一般位於洪水面邊緣的位置；但是在降雨徑流計算中，幹濕變化毫無規律，可能在任意時刻出現在任意網格單元上，再加上坡面徑流較淺，坡面離散後，按照現有的幹濕處理技術很容易出現水面到處間斷的假像，如圖 2 所示。所以，如果再直接採用常規洪水模擬時用到的幹濕處理技術，將很有可能不能正確反映真實的地表水流運動狀態。

綜上，將 Godunov 格式用於真實流域地表徑流模擬時遇到了新的技術問題，即坡面小水深條件下的幹濕處理難題。目前這一問題已成為該領域新的熱點和難點，很多學者提出了各自的處理方法，如 Yu & Duan (2017) 開發完成的 CHRE2D 模型，當水深小於 10<sup>-3</sup>m 時，採用擴散波計算單元流速<sup>[11]</sup>；Xia et al (2017) 提出了一種新的水面重建的方法來處理底坡源項<sup>[12]</sup>。已有的這些方法均取得了不錯的效果，但如何使幹濕處理更簡潔、模型精度更高依然有很大的研究空間。本文基於非結構網格的 Godunov 格式，開發完成了一套新的降雨徑流二維水動力模型，經過了多個經典算例的驗證，並用於謝家灣流域地表徑流過程的模擬中，取得了較好的效果。

## 貳、模型開發

### 一、控制方程

採用的完整守恆型二維淺水方程組如下式所示：

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

式中：

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, \mathbf{F} = E\bar{i} + G\bar{j}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \\ huv \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{gh^2}{2} \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} r \\ gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{bmatrix}$$

， $h$  為水深， $u, v$  分別為  $x, y$  方向的流速， $t$  為時間， $S_{ox} = -\partial Z_b / \partial x, S_{oy} = -\partial Z_b / \partial y$  分別  $x, y$  方向的坡度， $Z_b$  為地面高程， $g$  為重力加速度， $S_{fx} = n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} h^{-4/3}, S_{fy} = n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} h^{-4/3}$  分別為  $x, y$  方向的摩阻項，其中  $n$  為 Manning 糙率係數， $r$  為淨雨源項。

### 二、數值離散方法

在坡面流研究領域，作為一個可接受的概念，可以將坡面流設定成為均勻覆蓋流域地表的片狀薄層水流<sup>[13-14]</sup>，如圖 3 所示，本文模型開發就是基於這一概念進行的。也就是說採用三角形非結構網格對流域進行離散後，在每個三角形單元內的徑流量

是沿著地表坡度均勻分佈的，以此區別與常規洪水的不同。

整體的數值離散方法依然在有限體積法框架下進行，首先在三角形單元上對式(1)進行積分並進行 Green 變換後得到如下公式：

$$\frac{\Delta H_i}{\Delta t} A_i = -\int_{L_i} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dl + \int_{V_i} S dV \quad (2)$$

式中： $A_i$ 為第*i*個三角形計算單元的面積， $L_i$ 為第*i*個控制單元  $V$  的邊界， $\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}$ 為通過每條邊的法向數值通量。

在本模型中，高程點佈置在三角形網格節點，以  $x$  方向為例，對坡度直接積分如下式所示：

$$\int_{V_i} -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} dV = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} A_i \quad (3)$$

其中：

$$\frac{\partial Z_b}{\partial x} = \frac{(y_2 - y_0)(z_1 - z_0) - (y_1 - y_0)(z_2 - z_0)}{(y_2 - y_0)(x_1 - x_0) - (y_1 - y_0)(x_2 - x_0)} \quad (4)$$

式中： $x_0, x_1, x_2, y_0, y_1, y_2, z_0, z_1, z_2$  分別為三角形單元三個頂點的橫坐標值、縱坐標值和高程值，三個點以逆時針順序排列。

在介面通量計算方面，採用具有廣泛應用基礎的 Roe 格式進行求解。為了保持計算格式的和諧性，平衡底坡項直接離散帶來的數值誤差，需要在經典 Roe 格式的基礎上，加上一修正項<sup>[15]</sup>，通量計算如下式所示：

$$\mathbf{F} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{F}_{Roe} + \left(0, \frac{1}{24} g(\Delta h)^2 \cos\theta, \frac{1}{24} g(\Delta h)^2 \sin\theta\right)^T \quad (5)$$

式中： $\mathbf{F}_{Roe}$ 為經典 Roe 格式計算公式，詳細過程可參見文獻[16]。 $\Delta h$ 為單元邊兩端的水深差值， $\theta$ 為單元邊外法線方向與  $x$  軸正方向的夾角。

摩阻項具有高度的非線性性質，如果處理不當，很容易帶來數值不穩定的問題。為了適應降雨徑流這種小水深條件下摩阻項的計算，對摩阻項積分採用半隱式方法進行求解<sup>[17]</sup>，以  $x$  方向為例，對摩阻項的計算如下式所示：

$$\int_{V_i} gh(n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} h^{-4/3}) dV = (hu)^{t+1} g A_i (n^2 \sqrt{u^2 + v^2} h^{-4/3})^t \quad (6)$$

將公式(6)帶入公式(2)即可求得時段末的守恆變數 $(hu)^{t+1}$ 。

在幹濕處理方面，由於本模型採用了片狀薄層水流的建模概念，因此幹濕處理方法變得異常簡潔。

設定幹濕閾值  $H_{tol}$ ，當介面兩側均為幹單元時，不進行數值通量計算，其它情況下，正常進行通量計算，單元水面和地形均不需做任何特殊處理。在保持模型穩定的前提下， $H_{tol}$  閾值選取越小，理論上計算精度越高。在本文採用的算例中， $H_{tol}$  取值均為  $10^{-10}m$ ，可完全滿足降雨徑流條件下數值計算的精度需求。

## 參、模型驗證

### 一、一維坡面恒定雨強徑流算例

該降雨徑流實驗由 Morgali & Linsley (1965) 完成<sup>[18]</sup>，實驗區域是一塊長 21.945m (72ft) 的覆蓋草皮的坡面，坡度為 0.04。採用的恒定降雨強度為  $2.58233 \times 10^{-5}m/s$ ，坡面糙率係數  $n=0.5m^{-1/3}s$ ；降雨過程是一直持續的，計算時間取為 1200s，計算時間大於坡面的匯流時間，因此，出口徑流過程的末端是一恒定值。

採用 0.1m 的三角形網格來離散計算區域，採用本文研發模型對算例進行了模擬，計算的坡面末端徑流過程如圖 4 所示。總體上，模型計算數值解與運動波解析解和實驗觀測值吻合較好，在起始階段，計算值比實驗觀測值略大，分析原因可能是由於在實驗初始階段，降雨被帶有草皮的實驗坡面吸收、滯留造成的。

### 二、一維坡面非恒定雨強徑流算例

Govindaraju et al(1990)設計了該數值算例<sup>[19]</sup>，算例中，一維坡面長 21.945m (72ft)，在工況 1 中，謝才係數  $C=1.336m^{1/2}/s$ ，坡度為 0.001，在工況 2 中，謝才係數  $C=1.767m^{1/2}/s$ ，坡度為 0.04，兩種工況的降雨過程具體如表 1 所示。降雨過程在空間上分佈是均勻的，但是隨著時間變化。計算採用的網格尺寸為 0.1m，總模擬時長 80min。

模擬結果如圖 5 所示，由該圖可以看出，本模型計算結果與 Govindaraju et al(1990)提供的該算例的近似解析解吻合的非常好，說明模型對非恒定降雨過程的模擬是成功的。

## 肆、模型應用

### 一、流域概況

解家灣流域位於嘉陵江中下游，在四川省遂寧市安居鎮境內，緊鄰遂寧水土保持試驗站。該流域

面積 65827m<sup>2</sup>，流域平均坡度為 0.27，屬於典型的丘陵地貌。採用 1:1000 的高精度流域測繪資料開展研究工作。

為便於監測流域出口流量過程，在流域末端開挖了一條寬約 2m 的集水渠，水渠的末端連接集水池，集水池的出口為一三角堰，用來測流。

採用平均尺寸 2m 的三角形網格離散計算區域，為體現集水渠的效果，在流域末端位置進行了網格加密，該流域總共生成 51186 個三角形網格單元。由於該流域面積較小，地貌均質性較好，以耕地和荒坡為主，林草植被稀少，不失一般性考慮，計算區域內坡面糙率統一取為 0.05，溝道糙率取為 0.025。為檢驗該模型處理真實流域的能力，首先對該流域的 *S* 曲線進行分析，然後通過一場實測的降雨徑流過程對模型的精度進行驗證。

## 二、*S* 曲線求解

假定時段長為 10min，每個時段的淨雨為 10mm，淨雨持續不斷，則在流域出口形成的流量過程線即 *S* 曲線。由該圖可以看出，由於流域面積較小，匯流時間較短，所以 *S* 曲線在漲水階段的斜率較陡，*S* 曲線理論上的穩定值為 1.097m<sup>3</sup>/s，本模型計算的穩定數值解也為 1.097m<sup>3</sup>/s，說明該模型能夠處理真實地形，模型能夠保證嚴格的品質守恆特性。

圖 12 為 *S* 曲線達到穩定狀態時的水深分佈和局部流態圖。由圖 6 (a) 水深分佈圖可以看出，圖中白色區域為水深小於 1cm 的區域，流域坡面大部分地區的水深均小於 1cm，流域出口處的人工管道水深最大，最深處達到 1m 左右，除人工管道外，其餘天然溝道的水深相對較小，平均約 10cm 左右。圖 6 (b)、圖 6 (c) 給出了 A、B 兩處的局部流場分佈，A 處為溝道匯流處，流場變化平穩，兩條支流匯合後的最大流速約為 1.0m/s 左右，B 處為坡面水流進入人工渠的局部流場分佈圖，由該圖可以看出，由於管道邊坡陡峭，所以當水流由管道邊壁進入管道底部時流速較大，平均流速約為 1.3m/s 左右，水流一旦進入管道底部，由於管道水深較大，流速降低，平均流速約為 0.5m/s，計算結果與實際情況是吻合的。

## 三、實測降雨徑流過程模擬

採用該流域實測的一場降雨徑流過程來驗證模型的準確性。該場降雨徑流的模擬起始時間為 2010 年 8 月 21 日 11 點，結束時間為 2010 年 8 月 22 日

12 點。該流域屬於亞熱帶濕潤氣候區，採用在我國應用廣泛的新安江三水源模型進行淨雨過程的計算，採用的產流參數如表 2 所示。

將坡面淨雨過程作為輸入條件，採用本文研發的模型進行本場次降雨徑流過程的模擬，模擬結果如圖 7 所示。由該圖可以看出，計算徑流過程和實測的徑流過程吻合很好，Nash-Sutcliffe 係數為 0.95。前後兩個洪峰的計算值與實測值也比較接近，洪峰出現時間基本吻合。第一個洪峰實測值 35.81 l/s，計算值 32.30 l/s，相對誤差絕對值為 9.80%，第二個洪峰實測值 65.73 l/s，第二個洪峰計算值 61.20 l/s，相對誤差絕對值 6.89%。按照《水文情報預報規範》(GB/T 22482-2008) 的標準，該場洪水的計算精度達到了甲等。

通過以上分析，說明本文研發的二維地表徑流水動力模型能夠處理真實流域的複雜地形，具有較高的計算精度，模型研發是成功的。

## 伍、結論

本文採用 Godunov 格式對完整的二維淺水方程組進行非結構離散開發完成了一套新的地表徑流二維水動力模型。該模型具有如下特點：(1) 設定地表徑流為均勻覆蓋流域地表的片狀薄層水流，基於該概念完成的模型在幹濕處理方面異常簡潔，單元水面和地形不需任何特殊處理；(2) 採用三角形網格概化流域，地形高程存儲在網格節點，對底坡項直接積分求解，地形具有二階精度；(3) 摩阻項採用半隱的處理方法，幹濕閾值  $H_{tol}$  取為  $10^{-10}$ m 時，本文中用到的算例依然保持了很好的穩定性。

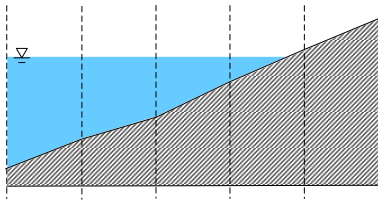
通過四個降雨徑流算例對本文模型進行了驗證，結果表明，本文的數值解與算例的解析解、實測值或已發表文獻結果吻合較好。最後將檢驗後的模型用於解家灣流域 *S* 曲線和場次降雨徑流過程的模擬中，結果表明，*S* 曲線穩定階段的數值解與理論解完全一致；場次洪水計算中，數值解與實測值符合的也很好，說明本文新研發的二維水動力模型應用是成功的。該模型能夠為小流域匯流計算提供一種新的途徑，可彌補現有水文方法的一些不足，在山洪災害防治項目和中小河流治理項目中具有廣闊的應用空間。

## 參考文獻

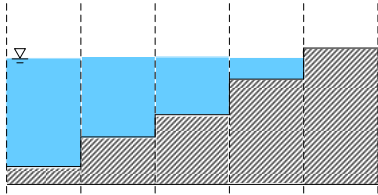
- [1] Panday S, Huyakorn P S. A fully coupled

- physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow [J]. *Advance in Water Resource*, 2004, 27(4):361-382.
- [ 2 ] Qu Y Z, Duffy C J. A semidiscrete finite volume formulation for multiprocess watershed simulation [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(8):1-18.
- [ 3 ] Costabile P, Costanzo C, Macchione F. Comparative analysis of overland flow models using finite volume schemes [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2012, 14(1):122-135.
- [ 4 ] 潘佳佳, 曹志先, 王協康, 曹叔尤. 暴雨山洪水動力學模型及其簡化模型的比較研究 [J]. *四川大學學報(工程科學版)*, 2012, 44(S1):77-82.
- [ 5 ] 王鑫, 曹志先, 談廣鳴. 暴雨山洪水動力學模型及初步應用 [J]. *武漢大學學報(工學版)*, 2009, 42(4):413-416.
- [ 6 ] Berardi L, Laucelli D, Simeone V, et al. Simulating floods in ephemeral streams in Southern Italy by full-2D hydraulic models [J]. *International Journal of River Basin Management*, 2013, 11(1):1-17.
- [ 7 ] 張大偉, 程曉陶, 黃金池. 複雜明渠水流運動的高適用性數學模型 [J]. *水利學報*, 2010, 41(4): 531-536.
- [ 8 ] Wang Y L, Liang Q H, Kesserwani G, et al. A 2D shallow flow model for practical dam-break simulations [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2011, 49(3):307-316.
- [ 9 ] Warnock A, Kim J, Ivanov V, et al. Self-Adaptive kinematic-dynamic model for overland flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 2014, 140(2):169-181.
- [ 10 ] Cea L, Blade E. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(7):5464-5486.
- [ 11 ] Yu C, Duan J. Simulation of surface runoff using hydrodynamic model [J]. *Journal of Hydrologic Engineering (ASCE)*, 2017, 22(6): 04017006.
- [ 12 ] Xia X L, Liang Q H, Ming X D, et al. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(5): 3730-3759.
- [ 13 ] Kim J, Warnock A, Ivanov V Y, et al. Coupled modeling of hydrologic and hydrodynamic processes including overland and channel flow [J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 37:104-126.
- [ 14 ] 劉青泉, 李家春, 陳力, 向華. 坡面流及土壤侵蝕動力學 (I) — 坡面流 [J]. *力學進展*, 2004, 34(3):360-372.
- [ 15 ] Bradford S F, Sanders B F. Finite-volume model for shallow water flooding of arbitrary topography [J]. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 2002, 128(3):289-298.
- [ 16 ] 張大偉. 基於Godunov格式的堤壩潰決水流數值模擬 [M]. 中國水利水電出版社, 2014.
- [ 17 ] 吳鋼鋒, 賀治, 國劉國華. 基於守恆穩定格式的二維坡面降雨動力波洪水模型 [J]. *浙江大學學報 (工學版)*, 2014, 48(3):514-520.
- [ 18 ] Morgali J R and Linsley R K. Computer analysis of overland flow [J]. *Journal of the Hydraulics Division (ASCE)*, 1965, 91(3):81-100.
- [ 19 ] Govindaraju R S, Kavvas M L and Jones S E. Approximate analytical solutions for overland flows [J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(12):2903-2912.

圖與表

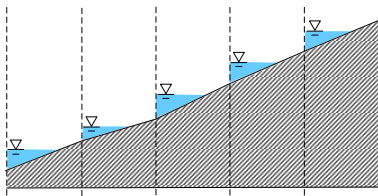


(a) 斜底模型

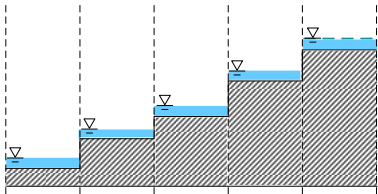


(b) 平底模型

圖 1 常規洪水的幹濕變化過程



(a) 斜底模型



(b) 平底模型

圖 2 降雨徑流的幹濕變化過程

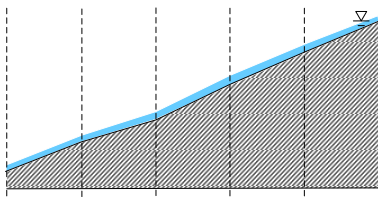


圖 3 坡面流流動示意圖

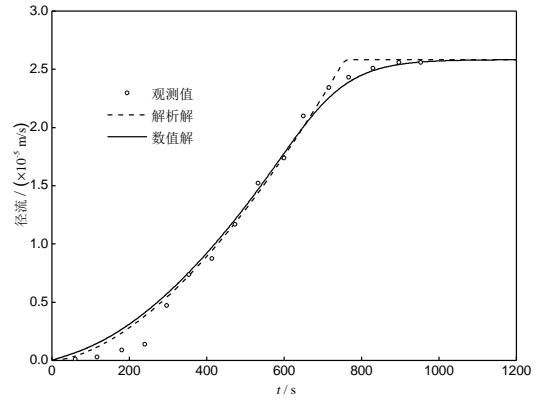
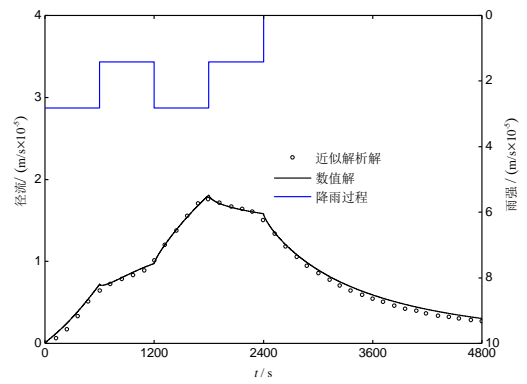
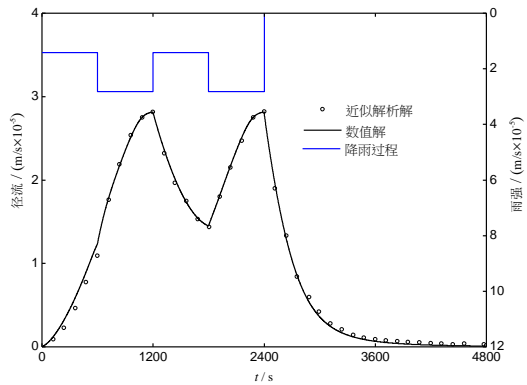


圖 4 恒定雨強算例計算結果



(a) 工况 1



(2) 工况 2

圖 5 非恒定降雨過程算例計算結果



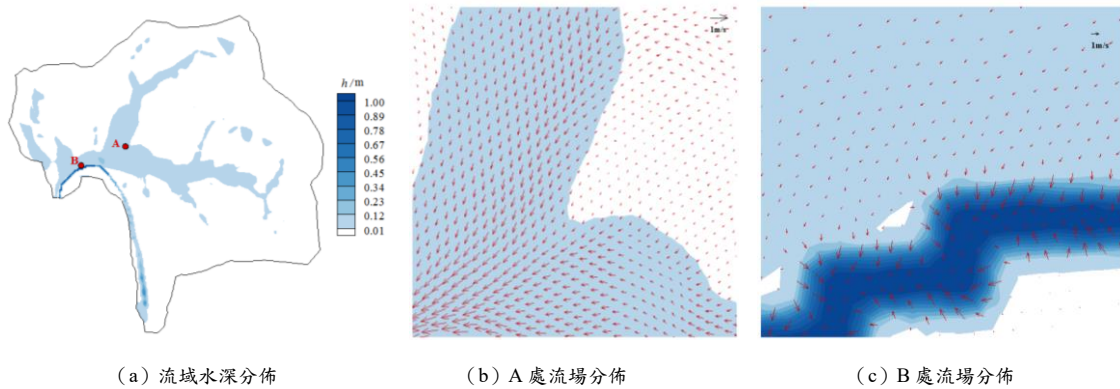


圖 6 S 曲線達到穩態時的流域水深分佈和局部流場分佈

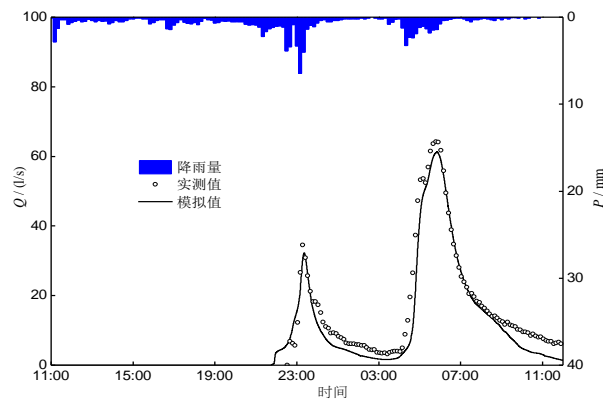


圖 7 解家灣徑流模擬值與實測值對比

表 1 降雨過程資料

時間 (min)	0-10	10-20	20-30	30-40	.....
工況 1 降雨 ( $10^{-5}m/s$ )	2.82222	1.41111	2.82222	1.41111	0
工況 2 降雨 ( $10^{-5}m/s$ )	1.41111	2.82222	1.4111	2.82222	0

表 2 新安江三水源模型產流參數表

參數	物理意義	參數值	參數	物理意義	參數值
$K_c$	蒸散發折算係數	0.90	$W_M$	張力水容量	80
$B$	張力水蓄水容量曲線指數	0.15	$I_M$	流域不透水率	0.0
$C$	深層蒸散發擴散係數	0.03	$E_x$	自由水蓄水容量曲線指數	1.5
$WU_M$	上層張力水容量	14	$S_M$	流域平均自由水蓄水容量	18
$WL_M$	下層張力水容量	15			

## 多云光学卫星数据洪涝淹没范围快速提取模型研究

李琳<sup>1</sup>、李小涛<sup>2</sup>、路京选<sup>3</sup>、曲伟<sup>4</sup>

### 摘要

洪涝灾害一直以来都是对人类生存及社会经济造成重要影响的一种灾害，灾害损失也随着全球变暖等因素而越来越大。因此利用遥感手段能够快速获取洪涝淹没范围，将会对防灾、救灾和减灾工作提供重要的技术支撑。光学卫星数据受云影响较大，如何去除云的影响快速获取洪涝淹没范围是高效利用光学卫星数据的重要内容。本文以国产高分1号卫星多光谱数据为例，研究了一种多云光学卫星数据洪涝淹没范围提取方法，既通过各类地物、云及云阴影光谱特征分析，提取云、云阴影区，建立云、云阴影区掩膜，最后采用植被指数法快速提取淹没范围，可实现多光谱数据洪涝淹没范围的快速自动提取，并以此方法对2018年8月“温比亚”台风造成的山东洪涝灾害进行了监测，取得满意效果。

**关键字：**遥感、洪涝灾害、剔除云、云阴影影响的淹没范围自动提取方法

---

国家重点研发计划资助项目（2017YFB0504100）

<sup>1</sup> 中国水利水电科学研究院 教授级高级工程师

<sup>2</sup> 中国水利水电科学研究院 教授级高级工程师

<sup>3</sup> 中国水利水电科学研究院 副主任 教授级高级工程师

<sup>4</sup> 中国水利水电科学研究院 教授级高级工程师

## 壹、引言

中国是一个自然灾害频繁的国家,灾害造成的损失十分巨大。据民政部国家减灾办发布的 2012 年全国自然灾害基本情况报告,全年各类自然灾害共造成 2.9 亿人次受灾,农作物受灾面积 2496.2 万公顷,包括绝收 182.6 万公顷,直接经济损失 4185.5 亿元。其中,水旱灾害在各类灾害中发生的频率最高,2012 年全国十大自然灾害事件中水旱灾害就有 8 件,占 80%,这还不包括由于地震、台风等灾害所造成的次生洪涝灾害。因此,及时、客观、准确掌握灾情发展的动态信息是做好防灾、救灾和减灾工作的重要前提。与常规信息获取手段相比,遥感具有监测范围大、监测周期短、获取资料及时、可全天候工作以及经济、客观等优点,而且不受地域、灾害和恶劣天气影响,可对任何危险地区以及全球任何地方进行持续动态监测。由于这些优点,遥感技术从一开始就被应用到水旱等主要涉水灾害的监测上,并在历次重大涉水灾害中都发挥了重要作用。从 98 长江大洪水到汶川与玉树地震监测,遥感发挥的作用越来越大,已经成为获取灾情第一手资料和掌握灾情动态发展信息所不可缺少的一种重要途径。

洪涝灾害发生时,及时获取淹没范围,对于了解灾情及组织安排救灾至关重要。洪涝灾害监测中,一般气象条件较差,采用多光谱卫星影像监测时影像或多或少存在云、云阴影的影响,直接采用植被指数提取淹没区始终存在提取结果误差较大的问题。本研究旨在通过剔除云、云阴影等因素的影响,建立一种基于高分 1 号多光谱影像的洪涝淹没范围快速提取模型。

## 贰、材料和方法

### 一、研究数据

本研究采用的遥感影像是高分 1 号 16m 分辨率多光谱影像。高分一号(简称 GF-1)为中国自主卫星,2013 年 12 月投入使用,卫星搭载了 2 台 2m 分辨率全色、2 台 8m 分辨率多光谱相机和 4 台 16m 分辨率多光谱相机。回归周期 41 天。其 16m 分辨率实现大于 800km 成像幅宽,广泛应用于大范围灾害监测等。高分一号卫星数据技术参数见表 1。

### 二、研究方法

首先,建立云及其他地物影像特征集(见表 2),采集云、云阴影及其他地物影像多个典型地物点,建立云、云阴影及其他地物光谱特征曲线,见图 3,其中 b1 为蓝波段, b2 为绿波段, b3 为红波段, b4 为近红波段。水体在 0.4-2.5 $\mu\text{m}$  电磁波范围内的吸收明显高于大多数其

它地物(反射在蓝绿光波段相对较强,其它波段都很弱),因而其反射率在整个波段都很低,在彩色遥感影像上表现为暗色调。在红外波段,水体吸收的能量高于可见光波段,即使水很浅,水体也几乎全部吸收了近红外及中红外波段内的全部入射能量,所以水体在近红外及中红外波段的反射能量很少,而植被、土壤在这两个波段内的吸收能量较小,且有较高的反射特性,这使得水体在这两个波段上与植被和土壤有明显的区别。反映在影像上,水体呈现出暗色调,而土壤植被则相对较亮。云的波谱特征可以看出,云在各波段都为高反射特征,可采用阈值法,选择适当阈值可将云去除。由于传感器入射角的存在,云会在地表投射阴影,这部分区域地物光谱值会受到影响。从阴影区影像地物光谱特征图 4 可以看出,云阴影区地物光谱值较正常区域各波段亮度值偏低,但各地物谱间关系未变。

从图 3 云的波谱特征可以看出,云在各波段都为高反射特征,即使在薄云时,其光谱反射率也较其他地物反射率高,根据这一特点,采用阈值法,选择适当阈值可将云去除。

从阴影区影像地物光谱特征图 4 可以看出,云阴影区地物光谱值较正常区域各波段亮度值偏低,但各地物谱间关系未变,因此可以通过调整阈值范围消除云阴影对地物分类的影响。

通过对各类地物、云及云阴影光谱特征分析,提取云、云阴影区,建立云、云阴影区掩膜,采用植被指数法快速提取淹没范围。这种去云去阴影影响的高分 1 号影像淹没范围快速提取算法见图 2。

## 参、研究结果

### 一、云提取

图 5 为去云影响后水体提取效果比较图,图 5a 为原始多光谱影像,图 5b 为以近红波段,采用单波段阈值法( $b_4 > 600$ )提取的云覆盖图,对比图 5a 可以看出,存在部分误判区域,这主要是由于近红波段为植被敏感波段,植被的亮度值较高,与部分薄云区域存在亮度值重叠情况,如提高亮度阈值,会出现部分云覆盖区无法提出,如降低亮度阈值,又存在部分植被覆盖区被错误分类为云,为消除这种单波段阈值提取的问题,采用多波段阈值法( $b_1 > 600$  and  $b_2 > 600$  and  $b_3 > 650$  and  $b_4 > 600$ ),即采用分析云在不同波段的亮度分布,给出云在不同波段阈值,综合考虑,提取云,图 5c 为采用多波段综合阈值法提取云的云覆盖图结果图,对比图 5a 可以看出云覆盖提取结果精度更高。

### 二、云阴影提取

图 6 为去云阴影影响后水体提取效果比较

图，图 6a 为原始多光谱影像，图 6b 为利用植被指数阈值取 0.469 时提取的水体范围，与图 6a 原始影像对比可以看出，正常植被覆盖区与水体很好的被区分，但云阴影覆盖的植被区由于阴影的影响被错分为水体，图 6c 为在将阈值调整为 0.3401 后的水体提取结果，可以看出云阴影区域被正确分类。

### 三、淹没范围（水体范围）提取

利用上述方法消除云及云影像的影响后，采用植被指数法提取淹没范围（水体范围）。根据上述研究结果，利用 python 开发了去除云、云阴影影响的水体提取算法程序，在所有输入数据准备完毕，该算法可在 1 分钟内完成 1 景高分 1 号影像水体提取，大大提高了水体提取效率与精度。

图 7 为采用植被指数阈值法（ $NDVI < 0.02$ ）直接提取水体结果，图中兰色、红色区为水体提取区，其中兰色为正确的水体区，红色为错。提区，可以看出误提率很高；图 8 为去除云区（ $b1 > 600$  and  $b2 > 600$  and  $b3 > 650$  and  $b4 > 600$ ）后利用植被指数阈值法（ $NDVI < 0.02$ ）水体提取结果，图中兰色、红色区为水体提取区，其中兰色为正确的水体区，红色为错提区，可以看出误提率大幅减少；图 9 为去除云、云阴影

（ $NDVI < 0.021$ ）后水体提取结果，图中兰色、红色区为水体提取区，其中兰色为正确的水体区，红色为错提区，可以看出误提率进一步减少；图 10 为消除云、云阴影及居民地影响（ $b4 > 400$ ）后水体提取结果，图中兰色区为水体提取区，可以看出水体提取结果具有较高精度。

### 肆、应用案例

2018 年 8 月，受台风“温比亚”影响，山东寿光多地连降暴雨，降雨量之大为历年罕见。受其影响，弥河流域上游冶源水库、淌水崖水库、黑虎山水库入库流量远超出库流量，

为确保水库安全，依据国家省市相关规定，8 月 19 日加大泄洪量向下游泄洪，到 8 月 21 日下午 18:15，三座水库才停止泄洪，期间寿光沿岸多个村庄遭遇河水倒灌，大量民居地、农田、大棚及养殖场等受淹，经济损失惨重。

收集了台风影响区灾害发生前的 2 景的高分 1 号数据（2018 年 6 月 5 日成像）及行政区划、土地利用等本底数据，利用 8 月 22 日灾害发生后 2 景高分 1 号卫星数据（图 16），采用上述多云光学卫星数据洪涝淹没范围提取方法，快速提取了淹没范围，对此次洪水灾情进行了遥感监测。

图 18 为洪涝影响区分布图，可以看出 8 月 22 日，三座水库虽已停止泄洪，但此时河道

依然满水运行，河道中耕地已被淹没，河道周边过水痕迹明显。经统计弥河沿岸受灾影响人口约 19870 人，受灾影响道路约 6.76km，受影响土地利用情况见表 3。

### 伍、结论与分析

本文以高分 1 号 16 米分辨率多光谱影像为例，分析了云及云阴影的波谱特征，建立了一种剔除非云、云影像影响的洪涝灾害淹没区自动提取方法。该方法在洪涝灾害监测应用中，取得满意效果，可应用于波段设置类似于高分 1 号的其他卫星数据。

### 参考文献

- 1 徐军, 李欣, 李建松. 基于案例推理的遥感影像水体信息提取方法[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2017, 42(3): 1078-1085.
- 2 薛丰昌, 黄敏敏, 唐步兴等. 三维 GIS 的城市暴雨积涝灾害模拟[J]. 测绘科学, 2017, 42(2): 53-58.
- 3 王嘉芄, 刘婷, 俞志强等. 基于 COSMO-SKYMED 和 SPOT-5 的城镇洪水淹没信息快速提取研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(3): 564-571.
- 4 张浩彬, 李俊生, 向南平等. 基于 MODIS 地表反射率数据的水体自动提取研究[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(6): 160-167.
- 5 Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R, et al. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140(1): 23-35.
- 6 赵阳, 程先富. 洪水灾害遥感监测研究综述[J]. 四川环境, 2012, 31(4): 106-109.
- 7 宋杨, 李长辉, 林鸿. 面向对象的 eCognition 遥感影像分类识别技术应用[J]. 地理空间信息, 2012, 10(2): 64-66.
- 8 毕海芸, 王思远, 曾江源等. 基于 TM 影像的几种常用水体提取方法的比较和分析[J]. 遥感信息, 2012, 27(5): 77-82.
- 9 刘健, 张哗萍, 等. 卫星遥感在灾害监测中的应用[J]. 卫星应用, 2010(6): 15-19.
- 10 万新宇, 王光谦. 近 60 a 中国典型洪水灾害与防洪减灾对策[J]. 人民黄河, 2011, 33(8): 1-4.
- 11 孙家柄. 遥感原理与应用[M]. 武汉大学出版社, 2009: 20-22.
- 12 王志辉, 易善桢. 不同指数模型法在水体遥感提取中的比较研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(4): 534-537.
- 13 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.

- 15 杨存建，魏一鸣. 基于星载雷达的洪水灾害淹没范围获取方法探讨[J]. 自然灾害学报，1998，7(3): 45-50.
- 16 Das S, Lee R.A Nontraditional Methodology for Flood Stage-Damage Calculation [J]. Water Resources Bulletin, 1988, (6), 132-167.

图与表

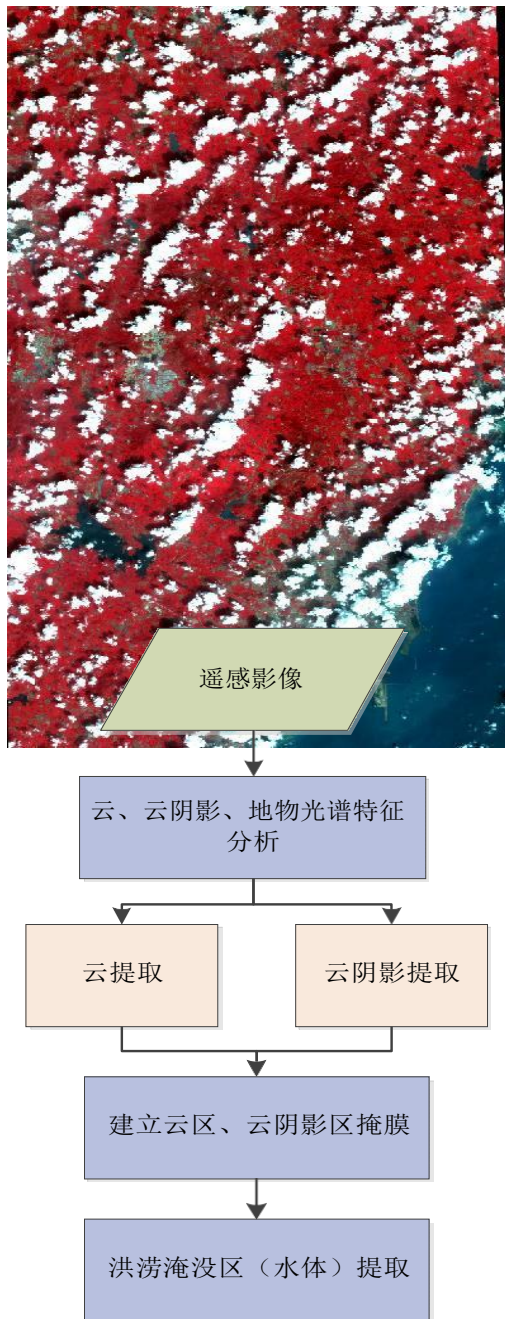


图 2 多云光学卫星数据洪涝淹没范围快速提取模型

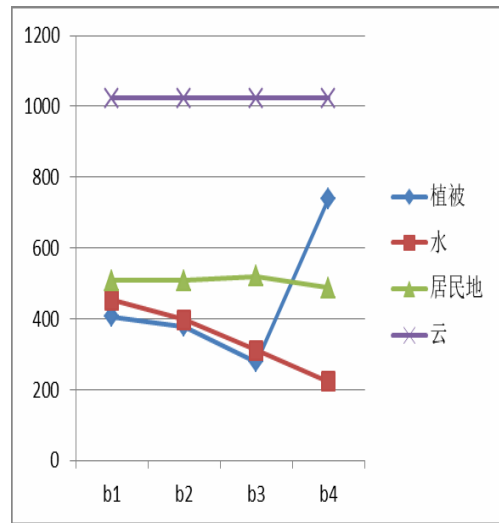


图 3 高分 1 号多光谱影像云及其他地物光谱特征

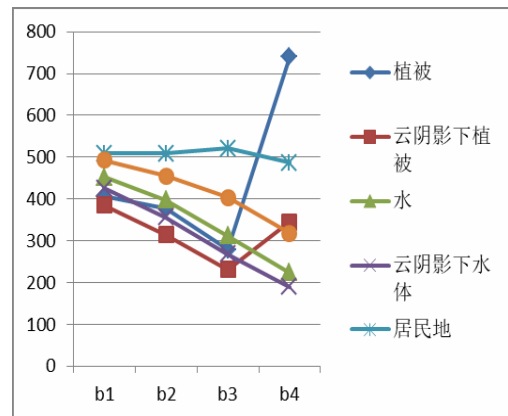


图 4 高分 1 号多光谱影像云阴影区地物光谱特征

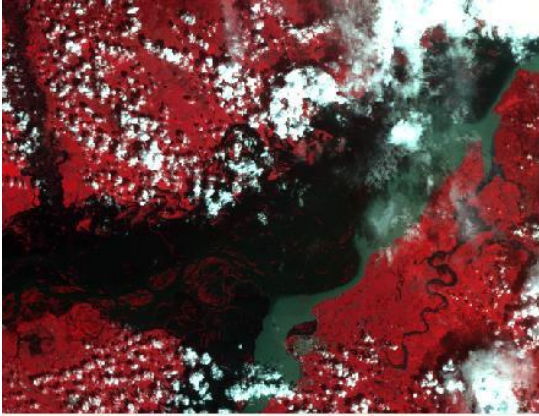


图 5a 原始多光谱影像

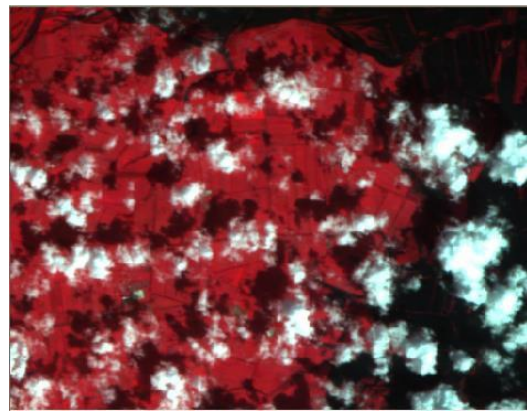


图 6a 原始多光谱影像

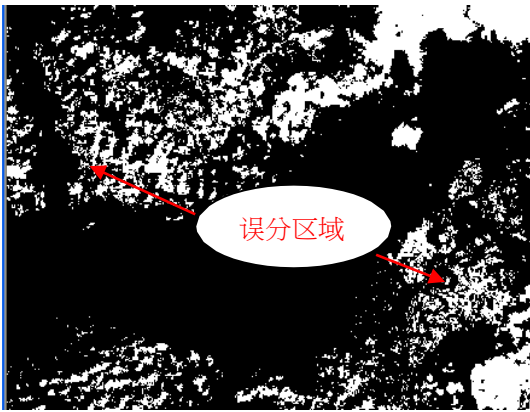


图 5b 单波段阈值提取云区 (白色区为云区)

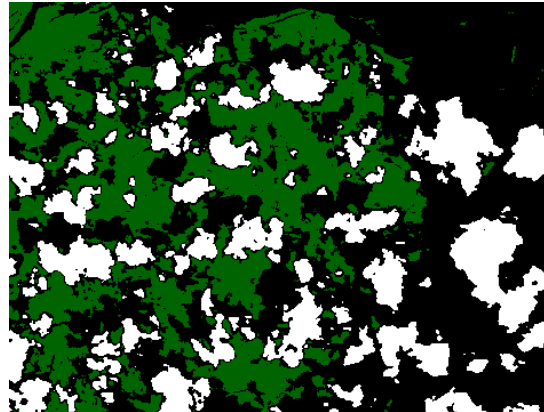


图 6b 阈值取 0.4692 (白色:云;黑色:水体;绿色:云水外其他地类)

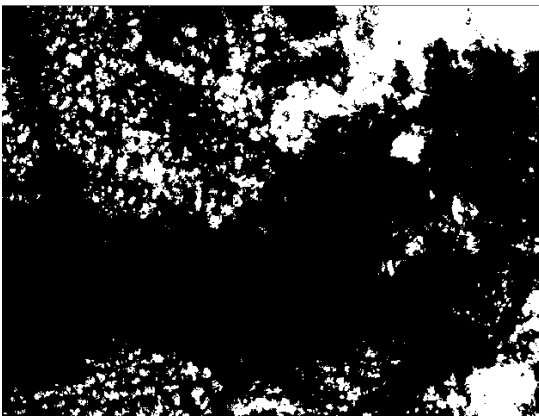


图 5c 多波段阈值云区提取结果 (白色区为云区)

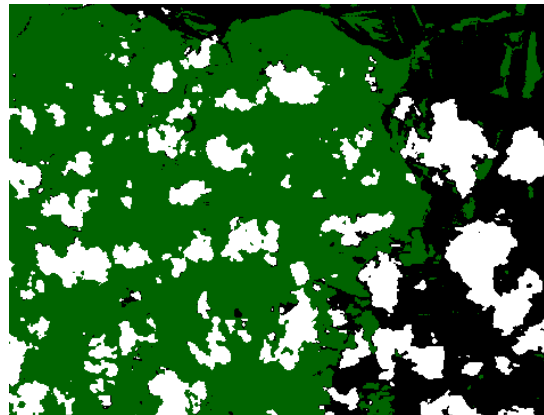


图 6c 阈值取 0.3401 (白色:云;黑色:水体;绿色:云水外其他地类)

图 5 去云影响后水体提取效果比较图

图 6 去云阴影影响后水体提取效果比较图

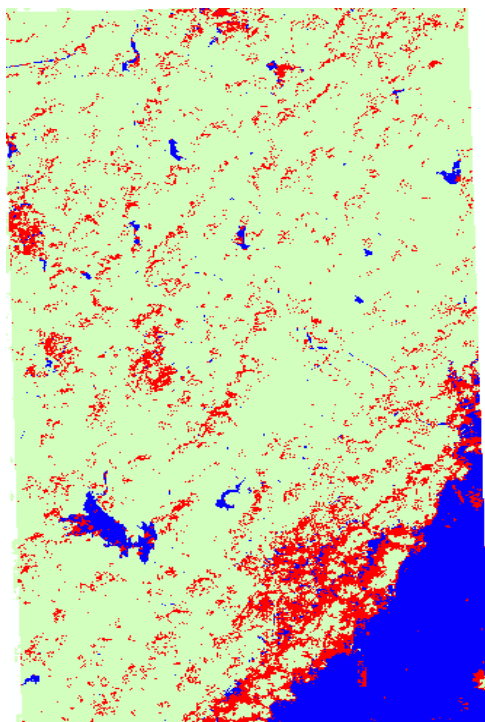


图7 植被指数阈值法直接提取结果（图中兰色为水体区，红色为错提区）

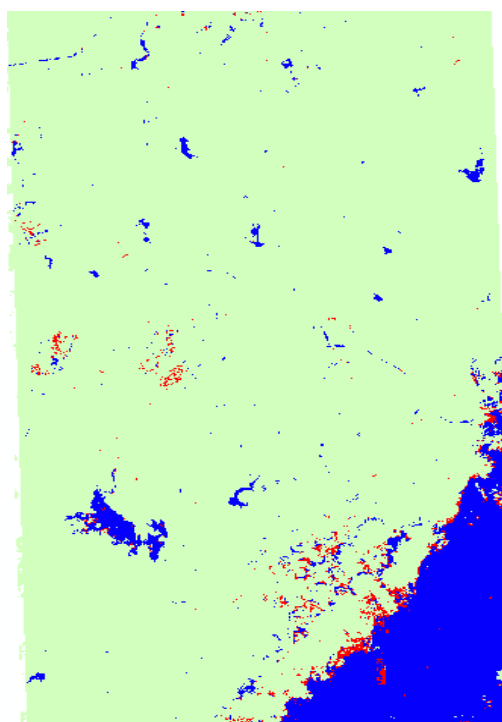


图9 去除云及云阴影影响提取结果（图中，兰色为水体区，红色为错提区）

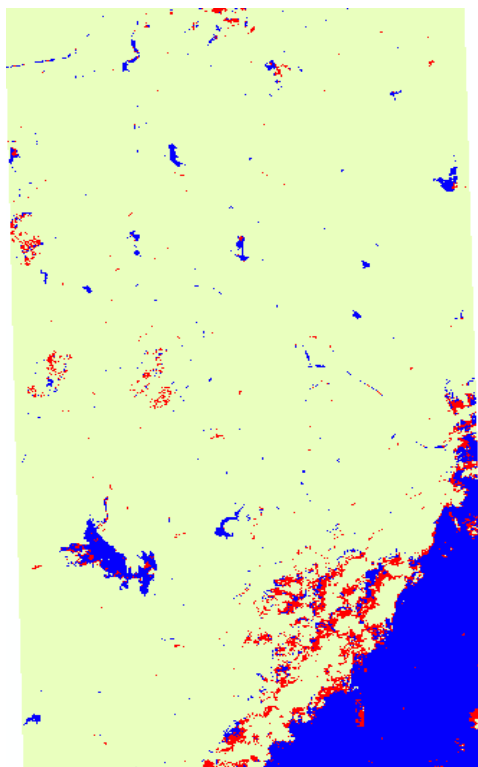


图8 水去除云影响水体提取结果（图中兰色为水体区，红色为错提区）

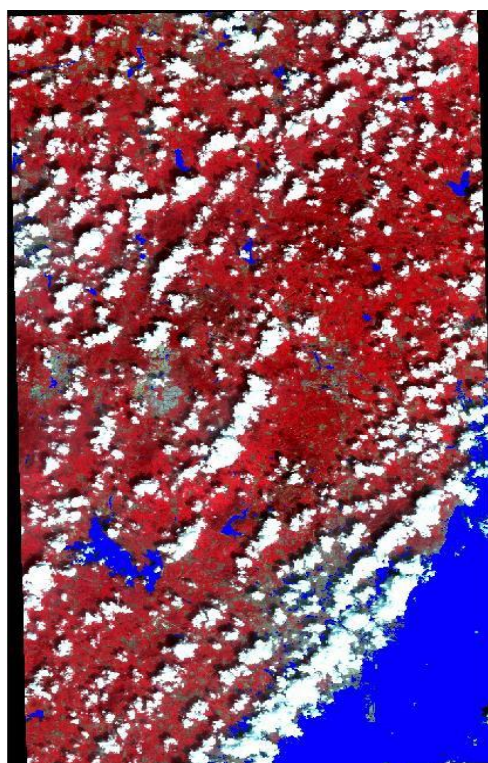


图10 去除云、云阴影及居民地影响水体提取结果（图中兰色为水体）



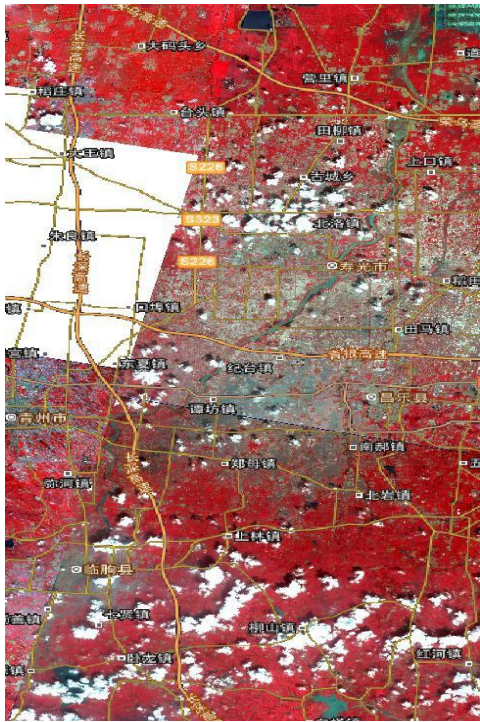


图 16 灾后遥感影像图

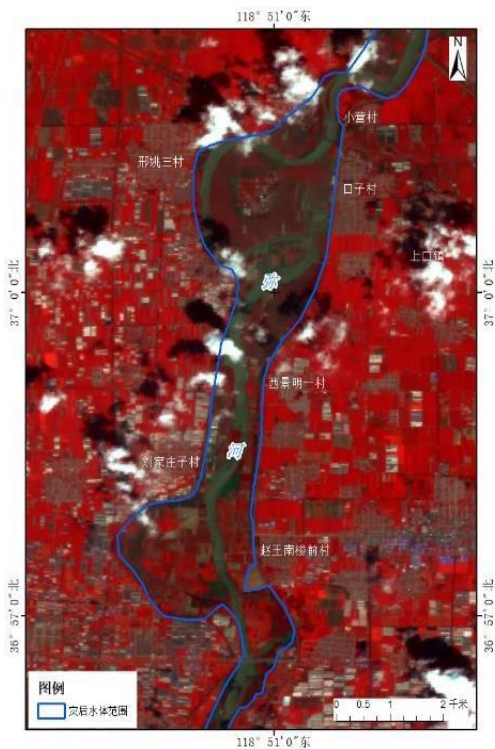


图 17 洪涝影响区图

表 1 高分一号卫星数据技术参数

平台	有效载荷	波段	光谱范围 ( $\mu\text{m}$ )	空间 分辨率(m)	幅宽 (km)	侧 摆能 力	重访时 间(天)
GF-1	全色相机	-	0.45~0.9	2	60	35	4
	多光谱相 机	1	0.45~ 0.52	8	60	35	4
		2	0.52~ 0.59				
		3	0.63~ 0.69				
		4	0.77~ 0.89				
宽视场相 机	1	0.45~ 0.52	16	800		4	

表 2 云及其他地物影像特征

地物类别	影像特征	地物类别	影像特征
云		水体	
薄云		植被	
居民地		云阴影	

表 3 淹没区土地利用分类统计表

土地利用类型	面积/km <sup>2</sup>
耕地	40.68
林地	0.01
草地	0.05
城市建设用地	1.05
裸土	0.01
总计	41.80

## 颱風-暴雨-洪澇災害全鏈路遙感動態監測與快速評估

李小濤<sup>1</sup>、路京選、李琳、曲偉、雷添傑、姬大彬、蔣衛國、范錦龍、

湛南渝、王曉雅

### 摘要

本文針對目前颱風-暴雨-洪澇鏈式災害監測中上下游存在的脫節問題，提出了一種颱風-暴雨-洪澇災害全鏈路遙感動態監測與快速評估的方法，並對颱風-暴雨-洪澇這一鏈式災害監測中從颱風路徑動態跟蹤、衛星降雨產品快速生產、暴雨風險性分析、遙感監測靶區早期預判、衛星產品快速獲取和洪澇災害遙感快速評估的整個技術環節做了系統闡述。同時以 2018 年登陸廣東的“艾雲尼”颱風監測為例對這一技術方法和流程進行了示範應用，取得了很好的效果。

**關鍵字：**颱風、洪澇、遙感、監測

### 壹、前言

水文氣象鏈式災害具有發生頻次高，災害強度大、災害鏈聯繫緊密的特點。在以往的氣象水文災害監測中，氣象和水文部門協同聯動監測較少，部門間災害資訊交流少，災害應急監測的效率和時效性都有待提高。基於遙感技術的洪澇災害監測在國內外已開展多年，但基本是基於一次降雨過程的災害監測，監測任務的開展也總是因為洪水發生時間地點的不確定性而常常處於被動應對狀況，缺乏必要的計劃性在連續性觀測和定量性災情資訊獲取方面存在明顯不足。因此，如何從颱風形成開始就啟動基於氣象衛星的動態監測，為基於多源遙感的地面洪澇災害監測目標區的預判爭取時間，從而實現颱風暴雨洪澇災害全鏈路的遙感動態監測是急需研究和解決的問題<sup>[1]</sup>。

### 貳、技術方法

要實現颱風-暴雨洪澇災害全鏈路遙感動態監測與快速評估，主要包括以下幾個部分的技術環節：颱風路徑動態跟蹤、高效衛星降雨產品快速生產、降雨風險性分析、遙感監測靶區確認和衛星產品定制、監測模型方法、監測評估。技術流程如圖 1 所示。

### 一、颱風路徑動態跟蹤

目前國內外熱帶氣旋預報機構有中央氣象臺、上海氣象局、日本氣象廳、美國關島、美國國家海洋和大氣局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)、美國國家環境衛星資料和資訊服務中心(National Environmental Satellite Data and Information Service, NESDIS)和美國熱帶氣旋中心(Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, CIMSS)，根據其定位、定強結果分析，各家機構的路徑監測結果較一致，白天的結果比夜間更可靠。中央氣象臺、上海氣象局、美國關島和美國 NOAA 區域中尺度氣象局(Regional and Mesoscale Meteorology Branch, RAMMB)四家機構的風速預報結果最接近。中央氣象臺的預報誤差最小，精度最高；其次是上海氣象局、美國關島和 RAMMB。因此，根據對我國颱風路徑和強度資訊的發佈管道及發佈規律的調研，基於網路爬蟲技術，使用 IDL 語言和 C#、C++，採用混合程式設計的方式，研發了一套可以近即時獲取颱風路徑強度資訊，包括颱風形成、移動、登陸、消亡的整個過程監測。利用自主研发的颱風路徑強度監測系統，可以即時掌握可能登陸並影響我國的颱風的位置和強度資訊，

<sup>1</sup> 中国水利水电科学研究院，教授级高工

特別是進入 48 小時警戒線的颱風，利用多源衛星資料可進一步跟蹤颱風的路徑，對於具有颱風眼的颱風，可以基於衛星資料確定此刻的颱風位置，並對颱風發佈的即時和預報的路徑進行檢驗。

## 二、氣象衛星降水產品的生產

隨著氣象衛星探測的時間解析度和空間解析度的不斷提高，衛星雲圖成為監測颱風的最主要手段。衛星資料產品是目前覆蓋範圍較廣的降雨資料產品，空間覆蓋均勻，但是其隨機誤差和由於觀測和降水之間關係的間接性質的影響使得降雨資料的準確性有待完善，且其空間解析度相對較低。在研究暴雨災害危險的過程精度更高的降雨資料對於危險性評估結果有著決定性的影響。融合多來源資料可以綜合考慮不同資料類型的優缺點，從而得到更加合適的降雨產品，可保證暴雨災害危險性評估資料來源的準確性。

GPM-IMERG (Near Real Time - NRT) 近即時降水融合資料是 NASA 在 TRMM-3B42 的基礎上發展的新一代多源降水融合產品。GPM-IMERG 降水融合產品融合了多顆微波，紅外衛星以及地面降水觀測資料。實現能全球南北緯 60° 的空間覆蓋，空間解析度 0.1°。葵花 8 號靜止氣象衛星是由日本氣象廳負責的新型氣象衛星，於 2014 年 10 月 7 日發射升空，2015 年 7 月份正式投入使用，可見光空間解析度為 1km，紅外波段空間分辨率為 2km。葵花 8 號靜止衛星可每隔 10 分鐘即時獲取觀測資料。GPM-IMERG NRT 6 小時後可生成全球降水融合資料，每半小時更新一次。通過編寫資料下載軟體，在網路通暢的情況下，目前可在 10 分鐘內分別下載葵花靜止衛星 (5km) 和 GPM-IMERG NRT 最新的觀測資料。

在即時獲取資料後，針對葵花 8 號高時空解析度靜止衛星資料，以時間上同步的 GPM-IMERG 降水融合資料為基礎，通過分析不同降雨條件下靜止衛星各個波段對雲頂亮溫的敏感性，利用概率密度匹配演算法構建靜止衛星資料降水識別和反演演算法，建立靜止衛星亮溫資料與 GPM-IMERG 降水融合資料匹配模型，生成 0.05°×0.05° 空間解析度，10 分鐘一次的靜

止衛星降水資料。基於 GPM-IMERG 和葵花 8 號靜止衛星熱紅外亮溫波段開發了極端降水事件的准即時遙感降水反演演算法。在所有輸入資料準備完畢，本反演演算法利用單核處理器可在 5-6 個小時內獲取全國範圍內的降水反演資料，針對局部區域內的極端降水事件，反演演算法可在 2-3 個小時內獲取降水反演資料。

## 三、暴雨風險性分析

降雨量、降雨強度及孕災環境的各種因數是暴雨洪澇災害危險性評估的重要指標。在暴雨危險性方面將綜合考慮融合多來源資料、極端降雨特徵研究及暴雨災害危險性評估的國內外研究現狀，在此基礎之上，通過融合多來源資料的降雨產品分析由於颱風導致的暴雨災害的危險性，進而為洪水災害評估與研究提供資料與主要受災地區。多時間尺度持續降雨過程的暴雨災害危險性評估體系構建的最終目的是評估暴雨災害的危險性。目前主要考慮事件總降雨量、最大小時降雨強度作為致災因數部分並結合土地利用資料、土壤分類資料、DEM 資料與河網分佈資料這些孕災環境因數，通過加權求和的方法計算暴雨災害危險性，其中各指標權重通過層次分析法計算得到。危險評估流程如圖 2 所示。

## 四、遙感監測靶區確認和衛星產品定

### 制

在暴雨危險性分析基礎上，結合地面水雨情資訊和即時洪水預報結果，結合暴雨危險區、水位超警情況及歷史災情情況可以概略確定監測區域，並將此作為遙感資料定制的範圍。同時，利用網頁、微博、微信等等多源網路資料，即時進行災情動態研判和監測區域的修正。在此基礎上，可以通過程式設計實現衛星產品的定制。

考慮到洪澇災害期間的天氣情況，洪澇災害的監測主要採用雷達資料。就目前來講，我國的高分三號衛星資料和歐洲的哨兵-1 資料是非常合適的選擇。哨兵-1 衛星是 C 波段合成孔徑雷達，可提供連續圖像(白天、夜晚和各種天氣) 全天時、全天候雷達成像任務。哨兵-1A 衛

星已於 2014 年 4 月 3 日發射，2016 年哨兵-1B 發射成功。“哨兵”-1 雷達成像衛星在洪水多發期可以探測到被淹沒的地區，這種能力在災害監測中是非常重要的，可以很準確地識別出洪水、陸地以及兩者之間的區域，並判斷未來的發展趨勢。“哨兵”資料採用“無歧視性訪問”原則，所有用戶均可免費獲取<sup>[2]</sup>。哨兵-1 兩顆衛星同時運行，重訪週期為 6 天，目前發佈的產品主要為 IW SLC——干涉寬幅模式 (TOPS Mode) 的斜距單視複數產品和 IW GRD——干涉寬幅模式 (TOPS Mode) 的地距多視產品，3-6 小時可以完成接收資料入庫，使用者即可下載。

由於 GF-3 還沒有實現免費獲取，研究主要開發了哨兵資料的即時下載和預處理程式，包括輻射校正，DB 轉換，正射校正，圖像濾波，波段計算等功能。

## 五、監測模型方法

雷達影像的水體提取，主要是基於微波範圍內水體較低的後向散射特性來進行識別，閾值法常常被用在雷達影像的水體提取上。對於哨兵 1 資料，圖像經過預處理後，一般要將非洪水淹沒區多餘圖像區域裁切，經過裁切後的圖像長條圖一般表現為明顯的雙峰特徵，適宜利用雙峰法和最大類間方差法來確定最優閾值<sup>[3]</sup>。該方法相對簡單，實現容易，且自動化水準水體識別的精度較高。

## 六、災情快速評估

通過洪澇災害遙感即時監測的水體與本底水體對比，可提取洪澇淹沒範圍。將淹沒範圍圖和土地利用資料、社會經濟資料等進行疊加分析，快速評估災情。

## 參、示範應用-以 2018 年第 4 號

### 熱帶風暴“艾雲尼”監測為例

#### 一、災情概況

颱風“艾雲尼”是 2018 年登陸廣東省的首個颱風，具有“登陸偏早、移動緩慢、三次登陸、生命史長、暴雨猛烈”的特點。雖然艾雲尼

在登陸我國時僅為颱風中比較低的熱帶風暴級別，最大風力 8 級，風力不大，但在登陸後，颱風艾雲尼在華南地區走向飄忽，且恰逢西南季風爆發，大量水汽從印度洋湧入我國南海，廣東境內連續三天出現大範圍暴雨，多地出現嚴重的淹沒和內澇。

#### 二、颱風監測

根據中央氣象臺預報結果，對“艾雲尼”活動路徑進行了跟蹤監測。2018 年 6 月 6 日 6 時 25 分，颱風艾雲尼在廣東湛江市徐聞縣新寮鎮沿海第 1 次登陸；6 日 14 時 50 分，颱風艾雲尼在海口市沿海第 2 次登陸；7 日 20 時 30 分前後，颱風艾雲尼在廣東陽江沿海第 3 次登陸；6 月 8 日 17 時，颱風艾雲尼減弱為熱帶低壓。颱風艾雲尼路徑監測如圖 3 所示。

#### 三、降雨產品快速生產

利用葵花衛星紅外亮溫資訊獲取了颱風艾雲尼活動期間每 10 分鐘一次的降水分佈圖，空間解析度為  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ ，並基於此資料獲取了日累積降水量，用於評估颱風艾雲尼登陸地區所造成的暴雨災害。同時基於 GPM-IMERG 降水融合資料生成了相同時間和區域的日累積降水量。圖 4 左側兩圖顯示了基於葵花 8 號衛星觀測資料的每天一次的日累積降水量，右側兩圖顯示同一時期基於 GPM-IMERG 的日累積降水量。對衛星觀測資料進行分析可知 6 月 5 日-10 日強降雨主要沿“陽江-江門-廣州-惠州-汕尾”一線的南側地區分佈 (圖 5)。

#### 三、降雨風險分析和監測範圍確認

基於衛星觀測降雨資料並結合廣東省土地利用資料、土壤分類資料、DEM 資料與河網分佈資料等，開展了颱風艾雲尼降雨過程的危險性評估 (如圖 6 所示)，可以看出，廣東南部沿海地區，包括陽江、江門、廣州、深圳等地區風險較高。同時地面水情監測顯示：廣東省漠陽江、羅定江、新興江等部分支流出現超警洪水，以肇慶新興江馬鞍水文站為例，6 月 8 日 9 時-9 日 22 時，該水文站超警戒水位運行，最高水位達 8.02 米，超警戒水位 1.52 米。將降雨風險評估圖與超警河流圖疊加分析，即可確定洪澇

災害遙感監測範圍。

#### 四、災情遙感監測

基於洪澇監測靶區範圍，通過歐空局網站獲取了6月11日5時21分哨兵1A雷達影像（空間解析度為20m），同時收集了颱風影響區2景2018年2月12日成像的LANDSAT8OLI資料及行政區劃、土地利用等本底數據。通過監測可以看到：監測範圍內河流水勢平穩，水庫運行正常，未發現災險情狀況；截止11日，颱風艾雲尼造成的內澇積水依然可見，監測範圍內內澇積水面積達6395KM<sup>2</sup>；在一些城市及周邊地段內澇嚴重，可以看到廣州白雲機場和深圳寶安機場依然被積水所包圍(如圖7，圖8所示)；廣東省北部的清遠市農田受浸，國道240飛來峽鎮部分路段道路依然積水。

#### 肆、結語

本研究在颱風降雨與暴雨洪水預報鏈路的銜接做了探討，通過研究實現了颱風的快速監

測，高時空解析度及高時效性降水融合資料產品生產和暴雨災害危險性評估，進而實現了“洪災監測靶區”的圈定和洪澇災害的監測評估。研究提出的技術方法初步實現了颱風暴雨洪澇災害全鏈路的遙感動態監測，突破了之前的災後遙感監測為災前監測，提高了洪澇災害遙感監測的時效性，促進了遙感技術在防汛業務應用水準的提升。

#### 參考文獻

1. 遙感技術在防汛抗旱減災中得到廣泛應用[J]，中國防汛抗旱，2018，28(10): 5-7。
2. 何國金，王桂周，龍騰飛等，對地觀測大資料開放共用：挑戰與思考，中國科學院院刊，2018，33(8)，783-790。
3. 李景剛，黃詩峰，李紀人等，ENVISAT衛星先進合成孔徑雷達資料水體提取研究——改進的最大類間方差閾值法，自然災害學報，2010，19(3)，139-145。

#### 圖與表

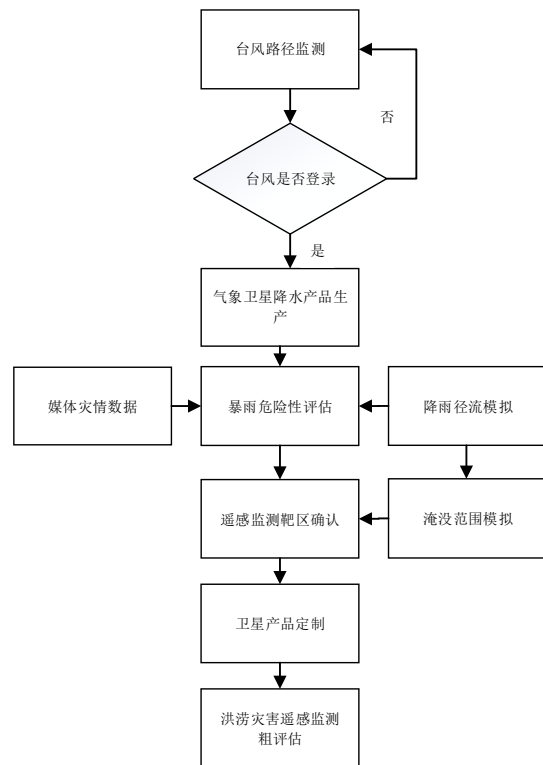


圖1 颱風-暴雨洪澇災害全鏈路遙感動態監測與快速評估技術流程圖

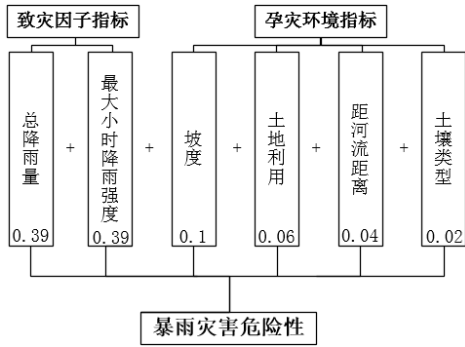


圖 2 暴雨災害危險評估流程圖

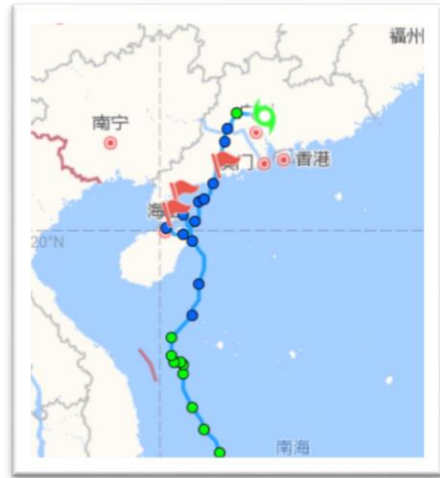


圖 3 艾雲尼路徑監測圖

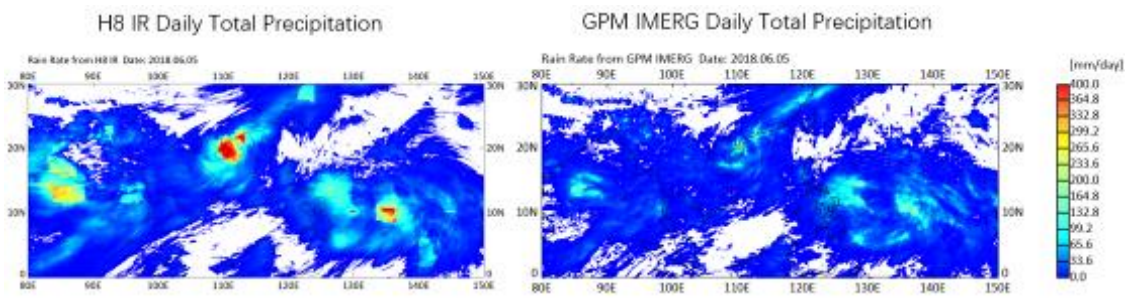


圖 4 颱風艾雲尼日累積降水量衛星觀測圖

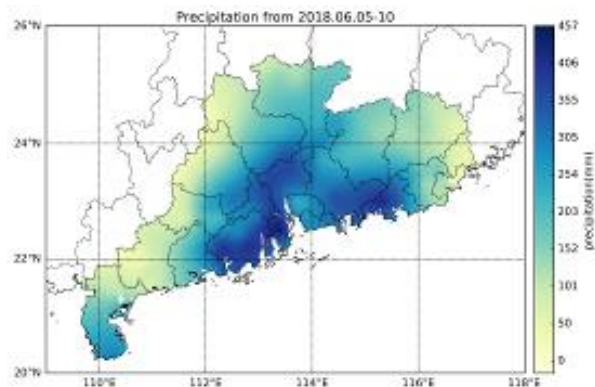
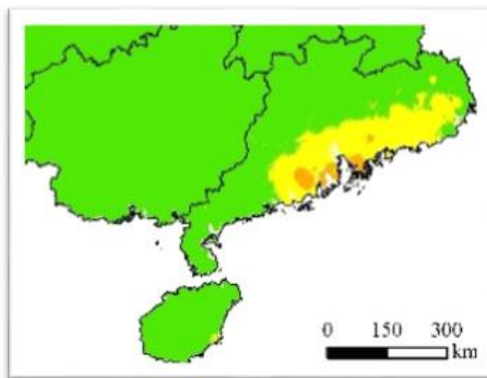


圖 5 颱風艾雲尼 2018 年 6 月 5 日-6 月 10 日降雨量分佈圖



■ 无危险区 ■ 低危险区 ■ 中危险区 ■ 高危险区 □ 省级行政区

圖 6 艾雲尼 6 月 5 日-6 月 10 日降雨風險評估圖

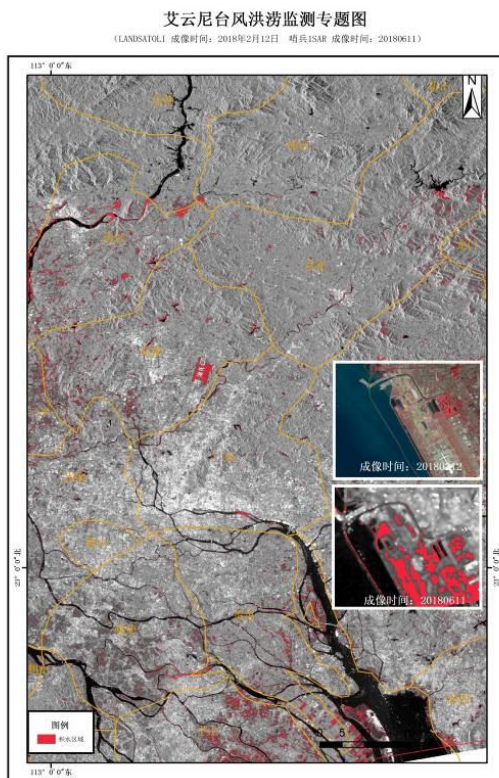


圖 7 深圳寶安機場及其周邊淹沒遙感監測專題圖

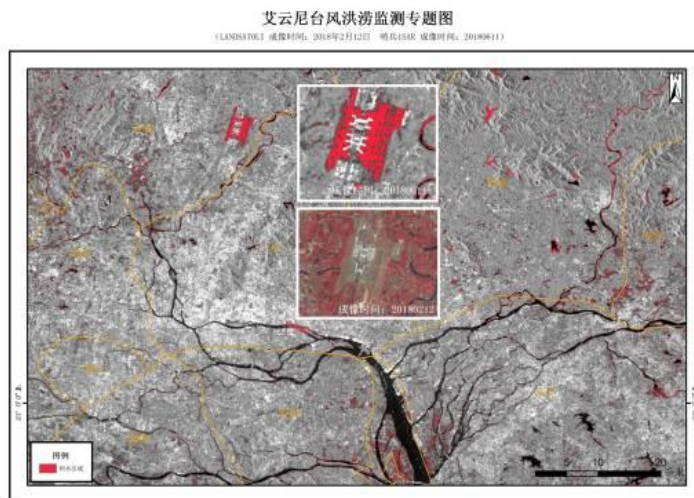


圖 8 廣州白雲機場及其周邊淹沒遙感監測專題圖

表 1 颱風艾雲尼遙感監測災情統計表

行政單元 名稱	花都	廣州	東莞	佛山	番禺	順德	江門	合計
積水面積 (km <sup>2</sup> )	1098.45	1145.21	2098.43	117.37	857.39	903.11	175.63	6395.60



# 基于 SLIC 的 Sentinel-1A SAR 图像水体信息提取

湛南渝、李小涛、路京选、许文波

## 摘要

水体信息提取是开展洪涝灾害遥感监测的重要组成部分, Otsu 阈值法是 SAR 图像水体信息提取的一种常用的方法, 但其存在阈值选取困难和提取精度不足的问题。针对此本文以 Sentinel-1A SAR 为数据源, 将简化的超像素分割算法 SLIC 和分层区域合并的方法引入到水体信息提取中。首先为了保留边缘细节和进行初始聚类, 先用简化的 SLIC 超像素分割算法对图像进行分割, 再将分割后图像根据相似度进行分层区域合并, 最后将处理后的图像二值化得到水体信息, 并与 Otsu 阈值法提取的水体信息进行对比分析, 实验结果显示本文的水体提取算法在精度和稳定性上都强于 Otsu 阈值法。同时以 2019 年 7 月份的株洲洪水监测为例对本文方法进行了应用, 取得了较好的效果。

**关键词:** SLIC、水体提取、分层区域合并、合成孔径雷达、Sentinel-1A

## 壹、引言

星载合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 因其具有全天时、全天候、大覆盖面积、高分辨率、成像不受云雾影像等特点, 被广泛应用在农业, 海洋, 灾害监测和军事领域上。

SAR 图像中的水体信息的提取是目标识别, 环境监控和洪水灾害监测领域中的重要内容。SAR 图像中的水体具有典型的特征, 表面因具有镜面反射特征而呈现为分布均匀的低强度区域; 由于 SAR 图像固有的斑点噪声及波浪、植被倒影等影响, 水域表面会出现一定程度的明暗变化; 尤其是在水陆结合部常表现为边缘的模糊性和不确定性。这些特征给水体的精确提取造成了较大的困难<sup>[1]</sup>。

目前常用于 SAR 图像水体提取的方法是基于阈值的分割方法<sup>[2]</sup>, 其中以 Otsu 阈值法<sup>[3-6]</sup>为代表, 该方法具有简单快速的优点, 但对于一副复杂的影像, 纯粹的单阈值法提取效果并不好, 所以如何自动确定合适的阈值一直是一个难题。活动轮廓法<sup>[7-8]</sup>是另外一种 SAR 图像水体信息的提取方法, 但计算复杂度高、适应性差, 对复杂图像的提取效果并不理想。

SLIC (Simple Linear Iterative Cluster)<sup>[9]</sup>算法是根据色彩和距离相似程度进行分割, 具有耗时短, 生成的超像素快大小均为、轮廓规则而被广泛应用在彩色图像、光学遥感图像分割

中。本文针对 Sentinel-1 SAR 图像的特征, 简化了 SLIC<sup>[10]</sup>从而应用于 SAR 图像分割, 并对分割的后超像素块进行分层区域合并, 从而提取出水体信息, 并与 Otsu 阈值法提取的水体进行对比分析。

## 贰、SAR 图像 SLIC 超像素分割

### 一、SLIC 超像素分割算法

SLIC 是由 Achanta 等提出的一种思想简单, 实现方便的超像素分割算法, 该算法根据颜色和距离特征对图像进行聚类。它首先将图像的颜色空间由 RGB 转为 LAB 空间, 将 LAB 色彩空间的三个分量和距离  $x, y$  组成 5 维特征向量, 然后使用 K-Means 按照一定的空间度量对图像进行聚类, 生成一个一个大小较为均匀的超像素, 该算法时间复杂度很低, 为  $O(N)$  ( $N$  为图像的像素个数)。

其算法步骤如下<sup>[11]</sup>:

1) 生成初始种子点: 假定图像的大小为  $M \times N$ , 超像素的个数为  $K$ , 取第  $K$  个网格中心点作为第  $K$  个种子点位置, 每个超像素的大小为  $M \times N / K$ , 邻近的两个种子点的距离为  $S = \sqrt{M \times N / K}$ 。

2) 调整种子点位置: 为了避免将初始种子点定位在物体边缘上, 并且减少初始种子点落在噪声上, 计算初始种子点  $n \times n$  邻域 (一般  $n = 3$ ) 的梯度值, 调正初始种子点的位置为其梯度最小值, 并为每一个初始种子点赋上不同

的标签。

3) 计算距离度量: 计算每个像素点 $p_i$  与距离其最近的种子点 $q_k$  的距离, 其由颜色距离和空间距离组成, 计算公式如下所示:

$$d_c = \sqrt{(l_k - l_i)^2 + (a_k - a_i)^2 + (b_k - b_i)^2} \quad (1)$$

$$d_s = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{m}{S}\right)^2 d_s^2} \quad (3)$$

其中 $d_c$  为在 LAB 颜色空间的欧式距离;  $d_s$  为在 x, y 空间上的欧式距离; D 为像素点与种子点的总距离, D 越小, 说明像素点与该种子点之间越相似; m 为紧凑度因子, 用来调整颜色信息和距离信息的相对重要程度, 对于 LAB 颜色空间来说, 一般 $m = [1,40]$ ; S 为种子点之间的距离。

4) 局部迭代聚类: 为了增加算法的运算效率, SLIC 在对每一个种子点聚类时, 将算法的计算范围限制在了 $2S \times 2S$ 的邻域范围内。在范围内计算所有种子点的距离, 如果该点的距离小于之前计算的距离, 则认为该点在这个超像素中, 并对该点的标签值和距离值重新赋值。重复迭代 1-4 步骤, 直到误差收敛到某一阈值或者最大的迭代次数, 停止计算。实验中发现, 在多数情况下, 10 次迭代对于绝大多数影像都能取得比较好的分割效果。

5) 连通性增强: 在通过 1-4 步骤后, 会出现多连通、超像素尺寸过小、单个超像素被切割成多个不连续超像素等情况。通过增强连通性来解决此问题。主要思路为: 新建一张标记表, 表内元素均为-1, 按照“Z”型走向将面积小于理想超像素一半大小的超像素重新分配给邻近的超像素, 同时分配相应的标签, 直到所有点遍历完成。

## 二、基于 SAR 的超像素分割算法

传统的 SLIC 的超像素的分割方法是基于彩色图像 RGB 来处理的, 虽然理论上可以把 RGB 三个波段都赋值为灰度信息, 由于进行了 RGB 颜色空间转 LAB 颜色空间, 显然这样做并不是很适用, 所以本文用灰度信息替代彩色信息的方法<sup>[12]</sup>。简化后的算式如下所示:

$$d_{gray} = \sqrt{(g_k - g_i)^2} \quad (4)$$

$$d_s = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} \quad (5)$$

$$D = \sqrt{d_{gray}^2 + \left(\frac{m}{S}\right)^2 d_s^2} \quad (6)$$

其中, 其中 $d_{gray}$  为在灰度颜色空间的欧式距离;  $d_s$  为在 x, y 空间上的欧式距离; D 为像素点与种子点的总距离。

## 三、区域合并

由于 SLIC 只是把相似的块进行了聚类, 并不能直接将图像进行二分化, 所以可以先根据一定合并规则逐步将相似度较高的块进行合并, 从而减少超像素的个数, 最终实现水体信息的提取。常采用的方法是层次区域合并 (Hierarchical Stepwise Region Merging, HSRM)<sup>[13]</sup>, 其基于区域邻接图 (Region Adjacency Graph, RAG) 来进行区域合并, 用相似度用来判断两个邻近区域是不是应该融合。区域就是初始分割后, 属于同一标记的像素集合。K 个区域的 RAG, 表示为 $G = (V, E)$ , 其中顶点集 $V = 1, 2, \dots, K$ , 对应的边集合 $E \subset V \times V$ 。每个顶点节点代表一个区域, 边表示和邻近区域相连, 边权重就是两个区域之间的相似度, 如图所示:

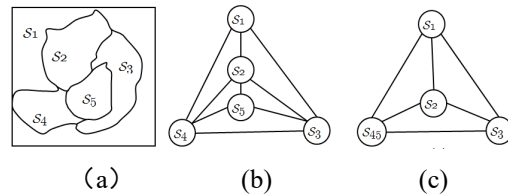


图 1 区域邻接图示意图

- (a) 区域邻接关系 (b) 初始区域邻接图  
(c) 合并 $S_4, S_5$  后的邻接图

相似度的计算公式如下所示:

$$C_{i,j} = \frac{N_i \times N_j}{N_i + N_j} (\mu_i - \mu_j)^2 \quad (7)$$

计算所有区域之间的相似度, 找到 RAG 的边集中最相似的边 ( $C_{ij}$  最小), 融合最相似边对应的两个区域的顶点, 得到 K-1 的 RAG, 更新顶点和边集合, 直到最小的相似度大于一个阈值, 停止合并。

## 叁、实验结果与分析

### 一、数据源与实验地点

Sentinel-1 号卫星欧空局发射的第一个哥白尼计划卫星星座, 其由两颗卫星 A、B 组合, 两个卫星的组合下, 可以达到 6 天对整个地球进行一次覆盖。其为 C 波段卫星, 有四种成像模式: 超精细模式 (Strip Map Mode, SM)、干涉宽幅模式 (Interferometric Wide Swath, IW)、

超宽幅模式(Extra-Wide Swath Mode, EW)、微波模式(Wave-Mode, Wave)。其中对地球陆地进行覆盖的主要为 IW 模式, SM 模式主要用于应急事件, EW 和 Wave 主要用于海洋监测。IW 模式的宽幅为 250km, 分辨率为 5x20m, 而且 Sentinel-1 号卫星数据完全免费, 从卫星拍摄到数据分发到数据库只要 3-6 小时左右, 对地观测能够穿透云雾, 不受天气影像, 非常适合运用于洪涝灾害遥感监测。

所以为了验证本文方法的有效性, 获取了 2018 年 7 月 29 日 Sentinel-1A GRDH 的 IW 的影像, 对湖南省湘江部分河道和其细小的支流进行水体信息提取。并用同一时间的光学影像 Landsat8 提取的水体作为真实水体进行精度评估。

## 二、超像素分割参数分析

在超像素分割算法中, 参数的设置对于超像分割的效果起着十分重要的作用。其中主要由两个参数决定: 超像素个数  $K$  和紧凑度因子 compactness。紧凑度因子主要用于调节距离信息和颜色信息的相对重要程度, 对于 0-255 的影像的 RGB 影像来说, 一般取值为 [1,40]。如下图所示, 固定超像素个数, 改变紧凑度因子, 当紧凑度取值太小时, 超像素分割就会失败; 当取值太大时, 就会丢掉颜色信息, 图像会被分割成均匀的方块。

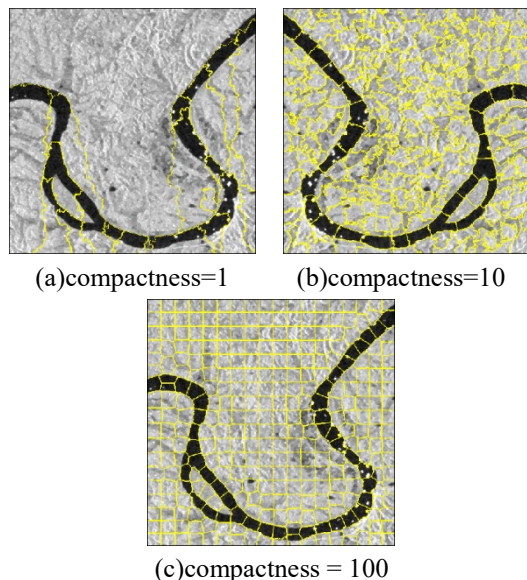


图 2 不同紧凑度因子对于超像素分割的影像

超像素个数对于不同宽幅, 不同的分辨率的影像, 不同的提取目标应有不同的值。根据超像素分割的理论来说, 超像素的个数可以根

据超像素的边长来决定, 所以可以根据最小识别单位的边长来确定超像素的个数。然后再通过分层区域合并过后, 进行二值化, 得到最终的水体提取结果。以下是不同边长  $N$  对应的水体信息提取结果:

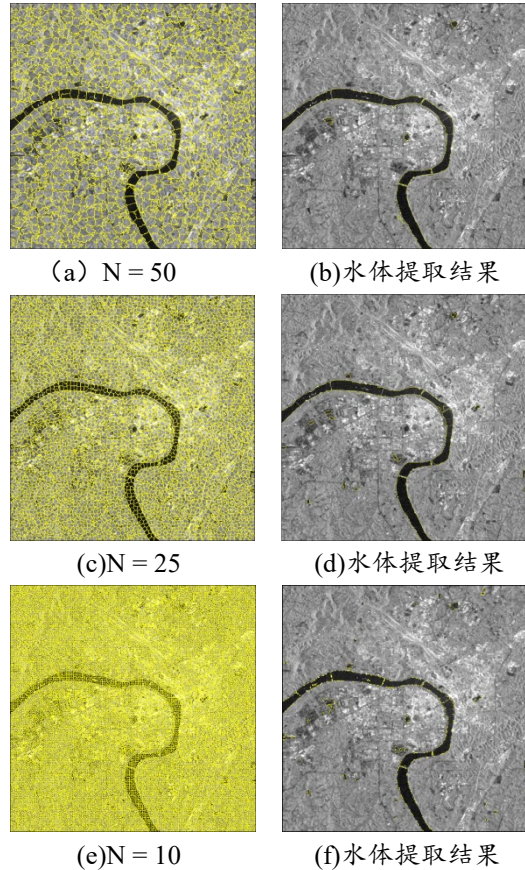


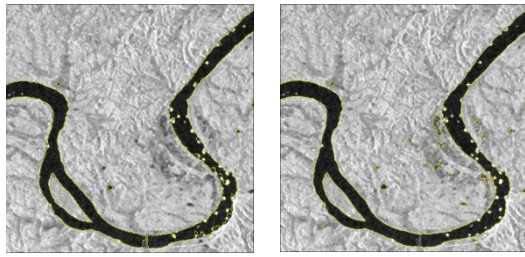
图 3 不同超像素数量提取结果

从上述结果可以看出, 分割出的水域面积主要取决于与目标分割对象的大小, 也就是超像素的数量。理论上能提出来的水域是大于超像素大小一半以上的水体, 因为小于这个面积的超像素块在增强联通性的时候被合并了。即当边长较大时, 可以提出大面积的大水体, 当边长较小时, 可以提出细小的水体和河流, 但会增加分割时间。

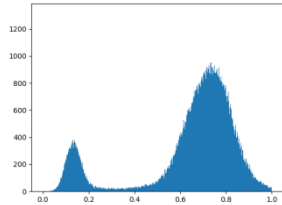
综上所述, 结合 sentinel-1 中的水体显示特征和效率的因素, 本文的参数设置为 compactness = 10, 超像素的边长  $N=25$ 。

## 参、与 Otsu 阈值法对比

为了验证本文方法的有效性, 与当前在 SAR 图像常用的水体提取算法 Otsu 阈值法提取效果进行对比分析。实验结果如下图所示:

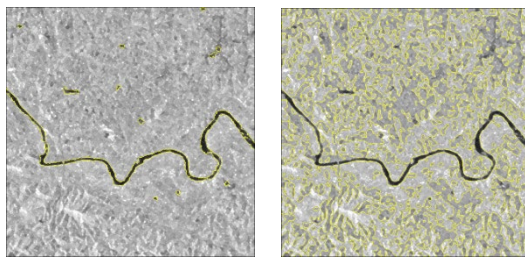


(a)本文方法 (b)Otsu 自适应阈值

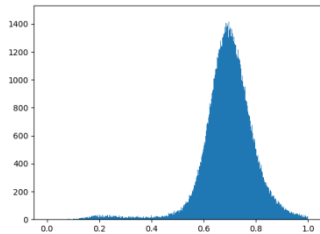


(c)图像直方图

图 4 有显著双峰特性的水体提取结果



(a)本文方法 (b)Otsu 自适应阈值



(c)图像直方图

图 5 无显著双峰特性的水体提取结果

由实验结果可知，当图像具有明显双峰特性时，两种方法的水体提取效果均不错，但当水体面积占总面积比例较少时，双峰特性不显著，Otsu 水体提取效果很差，而本文算法仍能提取出大部分水体。综上，本文方法在水体提取的稳定性上强于 Otsu 阈值法。

#### 四、本文方法与 Otsu 方法精度评估

将本文方法和 Otsu 阈值法提取的水体范围和同一时间 landsat8 的处理的确定的水体范围进行比较，采用查全率和查准率两种指标进行优劣性评价。查全率 R 和查准率 P 如下：

$$R = \frac{\text{提取的真正水体像素数目}}{\text{解译的水体像素数目}} \quad (8)$$

$$P = \frac{\text{提取的真正水体像素数目}}{\text{提取的像素数目}} \quad (9)$$

表 1 不同方法水体提取精度对比

方法	R/%	P/%
本文方法	0.93335	0.982296
Otsu	0.92784	0.956907

如表 1 中显示，在对于双峰特性明显的图像来说，两种方法都有较高的精度，本文算法在查全率和查准率上都高于 Otsu 算法，两种算法的查全率都相对不是很高，原因在于宽河道中的船被识别成了其他地物，导致水体面积相对减少了，也就形成了查全率相对不高。Otsu 的查准率相对较低，说明有较多的误提现象。

而且对于非双峰特性的图像来说，本文的方法仍然效果很好，但 Otsu 却基本不能识别水体，说明本文方法有很好的鲁棒性。

#### 肆、案例应用

水体提取的一个重要应用就在于洪水监测<sup>[14-15]</sup>，所以本文以 2019 年株州洪水监测作为应用，验证本文方法的有效性。受持续强降雨及上游来水影响，进入 7 月以来，湖南湘江干流中下游及部分支流全线超警，多次发生超警戒水位洪水，最大超警幅度 5.17 米，部分河段发生超保洪水。

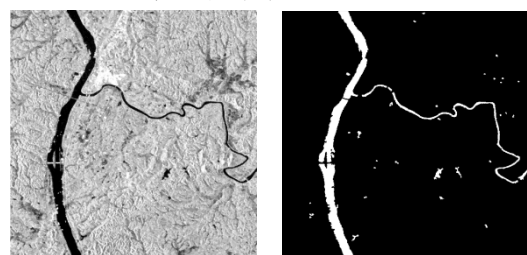
本文下载了欧空局的 Sentinel-1A 雷达影像，聚焦了其中受灾较为严重的湘江和渌水的交汇地段，对其进行动态监测。

Sentinel-1 的数据情况如下表所示：

表 2 监测数据情况

序号	产品类型	获取时间	极化方式	灾害情况
1	GRDH	2019-6-30	VH	灾前
2	GRDH	2019-7-12	VH	灾中
3	GRDH	2019-7-19	VH	灾后

监测结果如下图所示：



(a)灾前 (b)水体提取结果

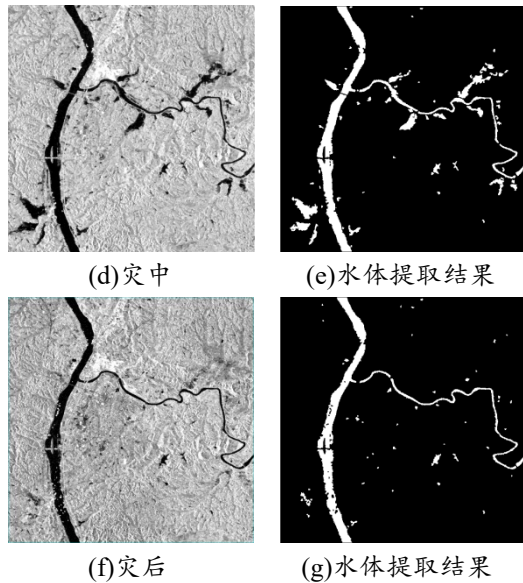


图 5 株洲洪水前后水体提取情况

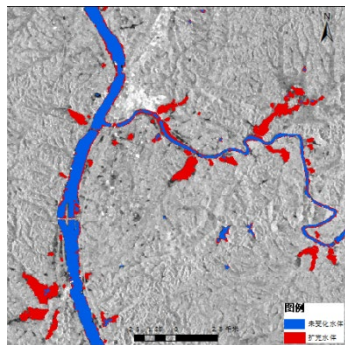


图 6 株洲灾前灾中对比图

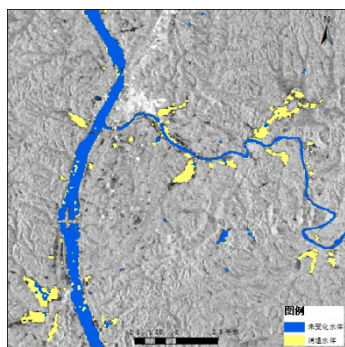


图 7 株洲灾中灾后对比图

从监测结果显示，7月12日监测区域内湘江和渌水沿岸受灾严重，监测范围内，淹没面积达到  $10.06 \text{ km}^2$ 。到7月19日时，沿岸洪水基本全部退去，河道恢复正常。

## 伍、结束语

本文基于欧空局发布的 Sentinel-1A SAR 数据，采用基于简化的超像素分割方法 SLIC

方法先对图像进行分割，再用分层区域合并准备对图像进行合并，最后进行二值化得到水体信息。并与 Otsu 阈值法水体信息提取进行了对比，实验结果显示，本文方法在查全率和查准率上都高于 Otsu 方法，能够较好的提取出水体信息。利用本文方法对 19 年 7 月份株洲洪水进行了案例应用，得到了较好的监测，验证了本文方法的适用性。

## 参考文献

1. 陈志国. 高分辨率 SAR 卫星影像洪水区域提取应用研究[D]. 武汉大学, 2017.
2. Santoro M, Wegmuller U. Multi-temporal Synthetic Aperture Radar Metrics Applied to Map Open Water Bodies[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(8):3225-3238.
3. 安成锦, 牛照东, 李志军, et al. 典型 Otsu 算法阈值比较及其 SAR 图像水域分割性能分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9).
4. 曾玲方, 李霖, 万丽华. 基于 Sentinel-1 卫星 SAR 数据的洪水淹没范围快速提取[J]. 地理信息世界, 2015, 22(5).
5. 孙亚勇, 黄诗峰, 李纪人, 等. Sentinel-1A SAR 数据在缅甸伊洛瓦底江下游区洪水监测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(2):282-288.
6. 范伟. 基于哨兵 1 号的洪水淹没面积监测[J]. 气象科技, 2018, 46(2):396-402.
7. Silveira M, Heleno S. Separation Between Water and Land in SAR Images Using Region-Based Level Sets[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(3):471-475.
8. 徐川, 华凤, 眭海刚, et al. 多尺度水平集 SAR 影像水体自动分割方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(1): 27-31. XU Chuan, HUA Feng, SUI Haigang, CHEN Guang. Automatic Water Segmentation Method in SAR Images Using Multi-scale Level Set. GEOMATICS AND INFORMATION SCIENCE OF WUHAN UNIVERS, 2014, 39(1):27-31.
9. Achanta R, Shaji A, Smith K, et al. SLIC

- Superpixels Compared to State-of-the-Art Superpixel Methods[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(11):2274-2282.
10. 龚林松, 李士进. 基于改进的 SLIC 和 OTSU 的遥感影像水体提取[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(01):151-155.
  11. 郭伟, 李红达, 邢宇哲. 基于 SLIC 的自适应多主体图像分割算法[J]. 计算机工程与科学, 2018, v.40; No.284(08):127-135.
  12. 朱鸣, 杨百龙, 何岷, et al. 基于改进 SLIC 算法的 SAR 图像海陆分割[J]. 电光与控制, 2019, 26(01):25-29+34.
  13. Haris K , Efstratiadis S N , Maglaveras N , et al. Hybrid image segmentation using watersheds and fast region merging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(12):1684-1699.
  14. 郭欣, 赵银娣. 基于 Sentinel-1A SAR 的湖南省宁乡市洪水监测[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4).
  15. 李小涛, 黄诗峰, 孙涛. 洪涝灾害遥感监测与评估系统的实现和应用[J]. 水电能源科学, 2012(5):115-118.

## 面向海綿城市建設的城市下墊面變化對地表徑流影響的實驗研究

王瑤<sup>1</sup>，張翔<sup>2</sup>，左豐華<sup>1</sup>

### 摘要

海綿城市是緩解城市化水文效應的有效措施，其核心在於通過改變下墊面條件來控制城市徑流，因此，厘清不同下墊面條件對城市徑流的影響尤為重要。基於小流域模擬降雨實驗，設置了兩種降雨強度、兩種初始土壤濕度條件，針對 14 種下墊面情景進行了 56 場降雨實驗，研究了不同下墊面類型及其面積變化對地表徑流的影響。下墊面類型考慮沙地、草地、不透水面三種，分別代表強滲透性路面、城市普通綠化用地、城市屋頂和道路等不透水面。得到主要結果如下：①降雨強度、流域不透水面的增加均能明顯增加地表徑流最大流量值，且在雨強較大時，不透水面積的變化對最大流量值的增益效果減小；②流域初始土壤濕度對最大流量值沒有影響，對產流初期流量過程有一定影響，表現為初始土壤濕度越大時，產流初期出口流量也越大，且對不透水面占比大於 30% 的情況，初始土壤濕度對地表流量過程無明顯影響。③相比不透水面，草地和沙地面積的變化對地表徑流的影響有限，普通綠地與高滲透性路面表現出相似的產匯流特性；④地表徑流係數與流域不透水面積比呈顯著的線性關係；⑤流域不透水面積、降雨強度、初始土壤濕度這三個數值的增加都會使地表徑流係數增大。且隨著其中某兩個數值的增加，地表徑流係數對另一個數值變化的敏感性減弱。綜合以上結果，結合我國海綿城市建設，本文認為，大面積減少城市不透水面積（如利用綠色屋頂、透水路面），尤其是對南方濕潤地區而言，是實現徑流控制的關鍵。

**關鍵字：**海綿城市；模擬降雨；下墊面變化；地表徑流

<sup>1</sup> 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室，硕士研究生

<sup>2</sup> 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室，教授

## 壹、前言

近年來，伴隨著我國城市化進程的快速發展，城市建成區面積持續擴張，這極大改變了城市下墊面條件和原有的水文迴圈過程，包括城市流域下滲、蒸發減少，城市徑流量增加，流量峰值增高，峰現時間提前<sup>[1-6]</sup>，導致城市內澇災害頻發。針對這些現象，我國在美國低影響開發（Low Impact Development, LID）的基礎上提出了海綿城市的理念。海綿城市旨在通過改變城市下墊面條件，使流域水迴圈過程盡可能地接近自然過程，從而達到控制徑流的目的。因此，厘清不同下墊面條件對城市產匯流過程的影響顯得至關重要。

目前，有關城市下墊面變化對地表徑流影響的研究多集中于單一或多個城市片區的降雨徑流關係分析<sup>[7-10]</sup>。相比之下，人工降雨徑流實驗中各種變數更易控制，量測精度高，有利於產匯流規律的分析<sup>[11]</sup>。現有實驗研究或是針對單一下墊面進行<sup>[12-16]</sup>，或是在微尺度上針對不同下墊面的分佈位置進行<sup>[11, 17, 18]</sup>，而缺少小流域尺度上綜合多種下墊面類型的實驗研究。

本文通過小流域模擬降雨實驗，研究了在小流域尺度上不同降雨強度和初始土壤濕度條件下，三種下墊面（草地、沙地、不透水面）及其面積變化對地表徑流的影響，以期為我國城市雨洪管理及海綿城市建設提供參考。

## 貳、模擬降雨實驗

### 一、實驗場概況

實驗場位於武漢大學灌溉排水與水環境綜合實驗場內，為一羽毛狀小流域（圖 1），匯水面積 144m<sup>2</sup>，長約 23m，寬 2~9m，平均坡度 3%。實驗場表層覆蓋厚約 5~10cm 的細砂，下層填充厚約 1m 的回填土。場地內鋪設有 8 條匯水管道，其中主渠 1 條，長 21m，支渠 7 條，長 1m~9m 不等。



圖 1 實驗場示意圖

在實驗場上方均勻分佈有 36 個懸掛式旋轉噴頭，並由自來水管道供水，供水水壓 0.4MPa，用於模擬自然降雨。在流域出口處設置有 1 個 30°角薄壁三角堰和 1 個投入式液位計，用於流域地表徑流的持續監測，監測頻率為每秒 1 次。三角堰出口處另設置 1 個儲水箱用於儲存地表出流，以便於計算地表產流量。

### 二、實驗方法

本實驗主要研究不同下墊面條件在不同降雨強度及初始土壤濕度條件下對地表徑流的影響。下墊面條件主要考慮三種不同的下墊面類型（沙地、草地、不透水面）及其面積占比。這三種下墊面類型分別代表了高滲透性路面、城市常見綠化用地以及城市屋頂和道路等不透水面。其中，不透水面和草地分別採用鋪設不透水薄膠墊（厚 1.5mm）和馬尼拉草皮（草根附帶厚約 1cm 的土層）的方式類比。對於不透水面的分佈位置，本實驗只考慮了不透水面未斷接的情況，即所有不透水面均直接與排水管道相連。

通過改變各下墊面類型的面積占比，共設置了 14 種下墊面情景，各情景下墊面組成及空間分佈如表 1、圖 2。

降雨情景共設置兩種（P1, P2），均為等雨強降雨，降雨強度分別為 0.09mm/min（即 5.4mm/h，對應 P1）和 0.15mm/min（即 9mm/h，對應 P2），每場降雨持續 30min。初始土壤濕度設置了較濕潤（M1）、濕潤（M2）兩種情況，通過控制流域乾燥時間實現。其中，較濕潤情景對應流域飽和後乾燥 22~24h，濕潤情景對應流域飽和狀態。在每次降雨實驗前，根據具體的下墊面情景，均勻選取 10~30 個測試點，利用可攜式土壤濕度計對這些測試點進行表層土壤濕度的檢測，檢測值以體積含水量表示。之後對檢



測值算術平均得到每場降雨實驗前的流域平均土壤濕度，作為初始土壤濕度。較濕潤、濕潤兩種情景對應的平均土壤濕度值分別為  $30.57 \pm 0.99\%$ 、 $37.82 \pm 0.77\%$ 。

表 1 下墊面情景下墊面組成表

下墊面 情景	不透水面積 比 (%)	草地面積 比 (%)	沙地面積 比 (%)
S0	0	0	100
S1	6.22	0	93.78
S2	9.78	0	90.22
S3	19.56	0	80.44
S4	29.33	0	70.67
S5	19.56	9.78	70.66
S6	29.33	9.78	60.89
S7	39.11	9.78	51.11
S8	29.33	19.56	51.11
S9	0	19.56	80.44
S10	57.29	0	42.71
S11	77.15	0	22.85
S12	19.56	38.4	42.04
S13	0	38.4	61.6

## 參、實驗結果與分析

### 一、地表流量過程線

為探討流域不透水面積變化對地表徑流的影響，選取了下墊面情景 S0, S2, S4, S10, S11 (不透水面積比分別為 0, 9.78%, 29.32%, 57.29%, 77.15%) 的地表流量過程線進行對比，各下墊面情景在兩種雨強、兩種初始土壤濕度條件下的地表徑流過程線如圖 3。

從圖中可以看出，小流域地表流量過程大致可以分為三個階段：部分匯流階段、全部匯流階段和退水階段。在部分匯流階段，流域產生的淨雨逐步匯流至流域出口，此時流域出口流量由 0 開始快速上升；當產流時間大於流域匯流時間時，即進入全部匯流階段，此時流量上升速

度變緩，且隨著降雨的持續進行，土壤濕度逐漸增加，土壤下滲速度逐漸接近最小下滲速度，出口流量也趨於穩定並達到最大流量值；在退水階段，產流隨著降雨的停止而停止，流域內剩餘淨雨繼續匯流至流域出口，出口流量逐漸下降至 0。

對比不同下墊面情景的地表流量過程線可以發現，隨著不透水面的逐漸增加，對應的最大流量值顯著增加，部分匯流階段流量上升的速度也越快。當雨強由 0.09mm/min 增加為 0.15mm/min 時，各下墊面情景的出口流量最大值和流量上升的速度均得到提升，這一影響與不透水面地增加相似。此外，在不同的降雨強度下，流域不透水面積的變化對地表流量過程的影響也有差異。在較大雨強下，不透水面的增加對最大流量值的增益效果較小。以情景 S0-M1 (即下墊面情景為 S0，初始土壤濕度條件為 M1，以此類推) 和 S11-M1 為例，在較小雨強下，S0 最大流量為 0.07/s，S11 最大流量為 0.18L/s，S11 相比 S0 出口最大流量增加了 157.14%；在較大雨強下，S0 最大流量為 0.16L/s，S11 最大流量為 0.32L/s，S11 相比 S0 出口最大流量增加了 100.00%。

初始土壤濕度對地表流量過程也有一定影響：初始土壤濕度較大時，各情景下全部匯流階段初期的流量值更大，部分匯流階段流量上升的速度也越快，但對最大流量值沒有影響。這是因為當初始土壤濕度較大時，土壤下滲速度較慢，相同時間內產生的淨雨也就越多，對應的流域出口流量越大。隨著降雨的持續進行，土壤含水率達到最大，下滲速度達到最小，此時出口流量只與降雨強度、流域面積、土壤最小下滲率有關，而與初始土壤濕度無關。此外還可以看出，隨著不透水面積的增加，沙地面積的減少，初始土壤濕度對地表流量過程的影響也變小。當不透水面占比達到 30% 時，初始土壤濕度對出口流量過程無明顯影響。

選取了下墊面情景 S0, S9, S13 做對比以探討草地面積變化對地表流量過程的影響。各下墊面情景在兩種雨強、兩種初始土壤濕度條件下的地表徑流過程線如圖 4。

可以看出，這三種下墊面的流量過程存在較小差異。這些差異主要出現在部分匯流階段及全部匯流階段初期，表現為草地面積越大的下墊面情景，其出口流量更大；而在較大雨強，初始土壤濕度較高的條件下，各情景之間無明顯差異。這可能是因為草地對水分的涵養作用，導致在經過相同的降雨——乾燥過程後，草地的初始土壤濕度高於沙地，從而出口流量過程在產流初期表現出一定的差異性，而隨著降雨的持續進行，初始土壤濕度對出口流量的影響逐漸減小至零，此時，三個下墊面情景的流量過程線基本重合。但總體而言，相比不透水面，沙地及綠地面積的變化對地表流量過程的影響較小。

## 二、地表徑流係數

計算了所有場次降雨實驗的地表徑流係數，選取不透水面為引數，繪製了兩種土壤濕度、兩種雨強條件下不透水面積比與地表徑流係數的關係圖（圖 5 (a)）。對於部分不透水面積一樣而草地、沙地面積不一樣的下墊面情景，對其徑流係數進行算術平均，得到該不透水面積比對應的平均地表徑流係數。從中可以看出，地表徑流係數與不透水面積比呈顯著的線性關係。對比不同雨強、土壤濕度條件下的擬合線可以發現，降雨強度和初始土壤濕度對地表徑流係數均有一定影響，且隨著雨強及初始土壤濕度的增加，擬合線斜率減小，即流域不透水面積的變化對徑流係數的影響減小。這表明雨強越大，初始土壤濕度越大時，地表徑流係數對不透水面積的變化越不敏感，而在雨強較小，初始土壤濕度較小的條件下，地表徑流係數對不透水面積的變化更為敏感。此外還可看出，隨著流域不透水面積和降雨強度的增加，地表徑流係數對初始土壤濕度的敏感性減弱；隨著不透水面積和初始土壤濕度的增加，地表徑流係數對降雨強度的敏感性也減弱。

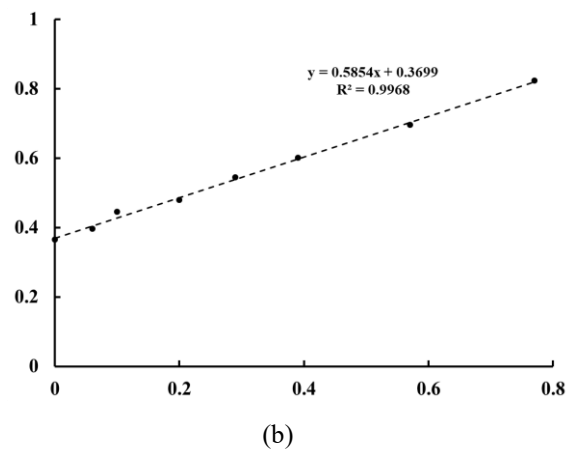
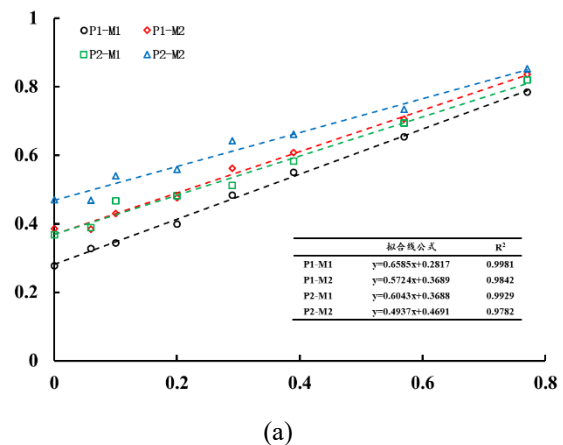


圖 5 不透水面積比——地表徑流係數關係圖  
（圖 a 中 P1、P2 分別代表較小、較大兩種降雨條件，M1，M2 分別代表較濕潤、濕潤兩種初始土壤濕度條件）

對圖 5 (a) 中同一下墊面情景、不同雨強及初始土壤濕度下的地表徑流係數算術平均得到本實驗條件下不透水面積比與平均地表徑流係數的關係圖（圖 5 (b)）。線性擬合公式如圖中所示，R<sup>2</sup> 達到 0.99。這個公式適用於雨強較小（5mm/h~9mm/h），流域初始土壤濕度較濕潤（表層平均體積含水量 30%~40%）的情況，可以為濕潤地區城市雨洪管理以及海綿城市規劃設計提供一定參考。

## 肆、結論與展望

本實驗通過改變降雨強度和初始土壤濕度，針對 14 種下墊面情景，共進行了 56 場降雨實驗，研究了不透水面及綠地面積變化對地表徑流過程的影響，定量分析了不透水面積比與地表徑流係數之間的關係，得到的主要結論如下：

(1) 小流域地表徑流過程大致可以分為部分匯流、全部匯流、退水三個階段。流域不透水面積和降雨強度的增加能顯著增加地表徑流過程的最大流量值，加快部分匯流階段流量上升速度。隨著雨強的增大，不透水面積變化對最大流量值的影響減小。

(2) 初始土壤濕度的增加能一定程度上增加產流初期出口流量，但對最大流量沒有影響，且隨著不透水面積的增加，初始土壤濕度對地表徑流的影響逐漸減少。當不透水面積比達到30%時，初始土壤濕度對地表徑流過程無明顯影響。

(3) 與不透水面相比，草地面積的變化對地表徑流過程的影響有限。此有限的影響主要體現在部分匯流階段和全部匯流階段初期。在這一時段內，草地面積較大的情景出口流量更大，這可能是因為植物對水分的涵養作用，導致在經過相同降雨——乾燥過程後，草皮土層含水量高於沙地。

(4) 流域不透水面積比與地表徑流係數之間呈顯著的線性關係。從不同降雨強度和不同初始土壤濕度條件下的線性關係線可以看出：不透水面積、降雨強度、初始土壤濕度的增加都會使地表徑流係數增加。且在這三個參數中，隨著某兩個參數值的增加，地表徑流係數對另一個參數的敏感性減弱。最後，得到了在較小雨強（5mm/h~9mm/h）、較高流域初始土壤濕度（表層平均體積含水量30%~40%）條件下的地表徑流係數與不透水面積比的平均關係： $y=0.5854x+0.3699$ 。

基於以上結論，結合我國海綿城市建設，本文認為，利用綠色屋頂、透水路面等海綿設施大面積減少城市不透水面是實現城市徑流控制得關鍵。尤其是對於我國南方濕潤地區，城市地表徑流對不透水面的減少更不敏感，這些措施顯得更為必要。

### 參考文獻

[1] Hsu M H, Chen S H, Chang T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system[J]. JOURNAL OF HYDROLOGY, 2000,234(1-2):21-37.

[2] BOOTH D B. URBANIZATION AND THE NATURAL DRAINAGE SYSTEM - IMPACTS, SOLUTIONS, AND PROGNOSIS[J]. NORTHWEST ENVIRONMENTAL JOURNAL, 1991,7(1):93-118.

[3] 萬榮榮, 楊桂山. 流域 LUCC 水文效應研究中的若干問題探討[J]. 地理科學進展, 2005(03):25-33.

[4] 史培軍, 袁藝, 陳晉. 深圳市土地利用變化對流域徑流的影響[J]. 生態學報, 2001(07):1041-1049.

[5] Rose S, Peters N E. Effects of urbanization on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach[J]. HYDROLOGICAL PROCESSES, 2001,15(8):1441-1457.

[6] 張建雲. 城市化與城市水文學面臨的問題[J]. 水利水運工程學報, 2012(01):1-4.

[7] Huang H, Cheng S, Wen J, et al. Effect of growing watershed imperviousness on hydrograph parameters and peak discharge[J]. HYDROLOGICAL PROCESSES, 2008,22(13):2075-2085.

[8] 程江, 楊凱, 劉蘭嵐, 等. 上海中心城區土地利用變化對區域降雨徑流的影響研究[J]. 自然資源學報, 2010,25(06):914-925.

[9] 岑國平, 沈晉, 范榮生, 等. 城市地面產流的試驗研究[J]. 水利學報, 1997(10):48-53.

[10] 徐振辭, 郭永辰. 城市不同下墊麵條件的降雨徑流模擬試驗研究[J]. 南水北調與水利科技, 2007(01):64-66.

[11] 申震洲, 劉普靈, 謝永生, 等. 不同下墊面徑流社區土壤水蝕特徵試驗研究[J]. 水土保持通報, 2006(03):6-9.

[12] 武晟, 汪志榮, 張建豐, 等. 不同下墊面徑流係數與雨強及歷時關係的實驗研究[J]. 中國農業大學學報, 2006(05):55-59.

[13] Ragab R, Bromley J, Rosier P, et al. Experimental study of water fluxes in a residential area: 1. Rainfall, roof runoff and evaporation: the effect of slope and aspect[J]. HYDROLOGICAL PROCESSES, 2003,17(12):2409-2422.

- [14] Ragab R, Rosier P, Dixon A, et al. Experimental study of water fluxes in a residential area: 2. Road infiltration, runoff and evaporation[J]. HYDROLOGICAL PROCESSES, 2003,17(12):2423-2437.
- [15] 劉慧娟, 衛偉, 王金滿, 等. 城市典型下墊面產流過程模擬實驗 [J]. 資源科學, 2015,37(11):2219-2227.
- [16] Pappas E A, Smith D R, Huang C, et al. Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation[J]. CATENA, 2008,72(1):146-152.

圖與表

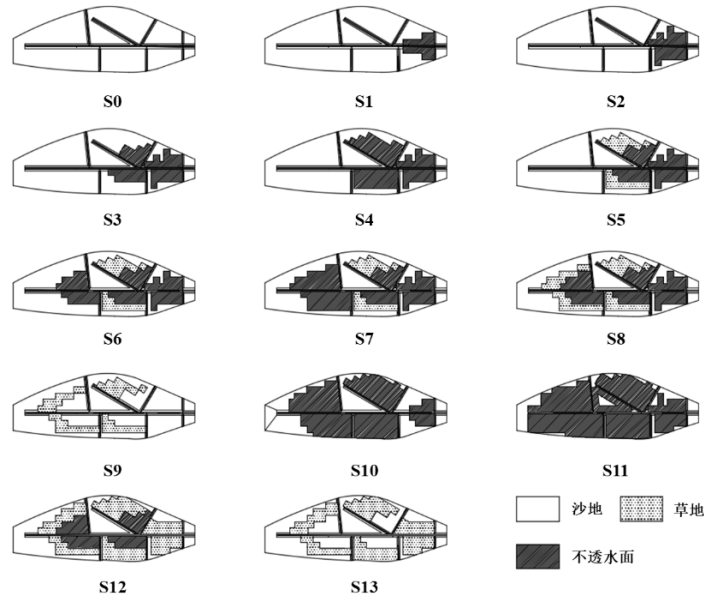


圖 2 下墊面情景示意圖

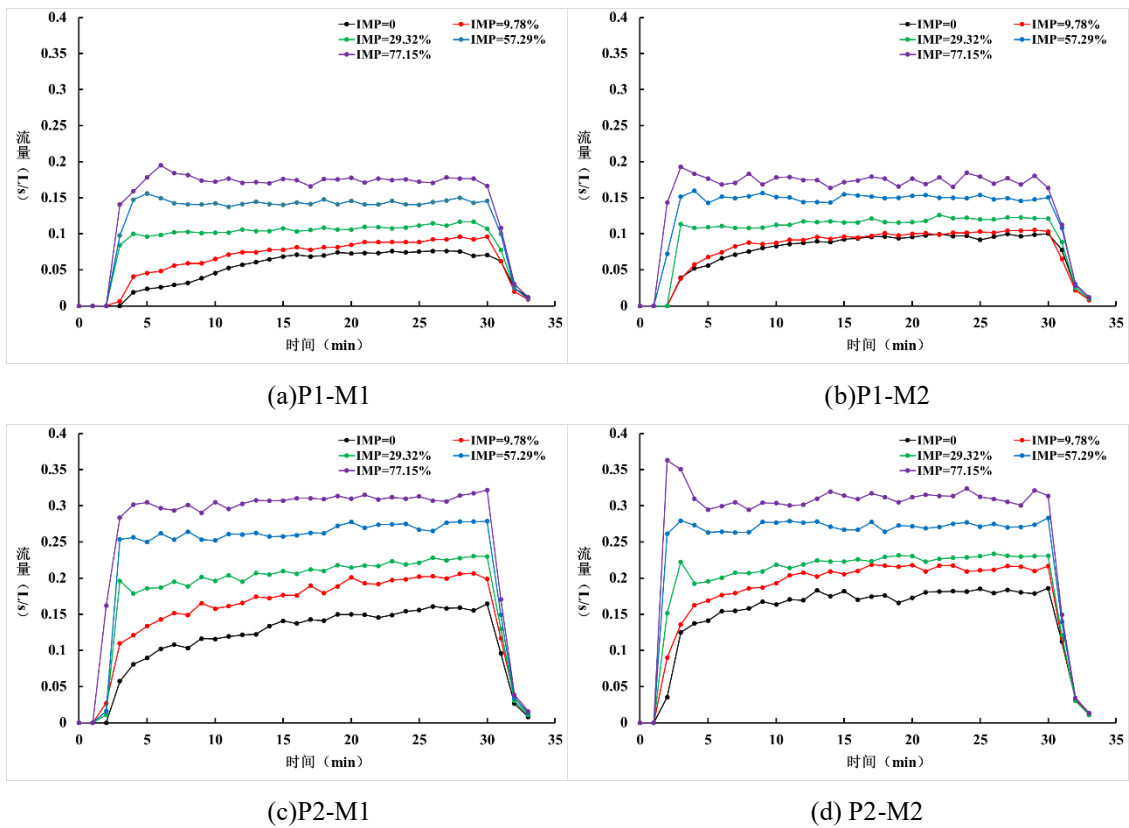


圖 3 情景 S0, S2, S4, S10, S11 地表流量過程線 (IMP 表示流域不透水面積比, P1-M1 表示降雨條件為雨強 P1=0.09mm/min, 初始土壤濕度條件為土壤濕度 M1=30.57%, 以此類推)

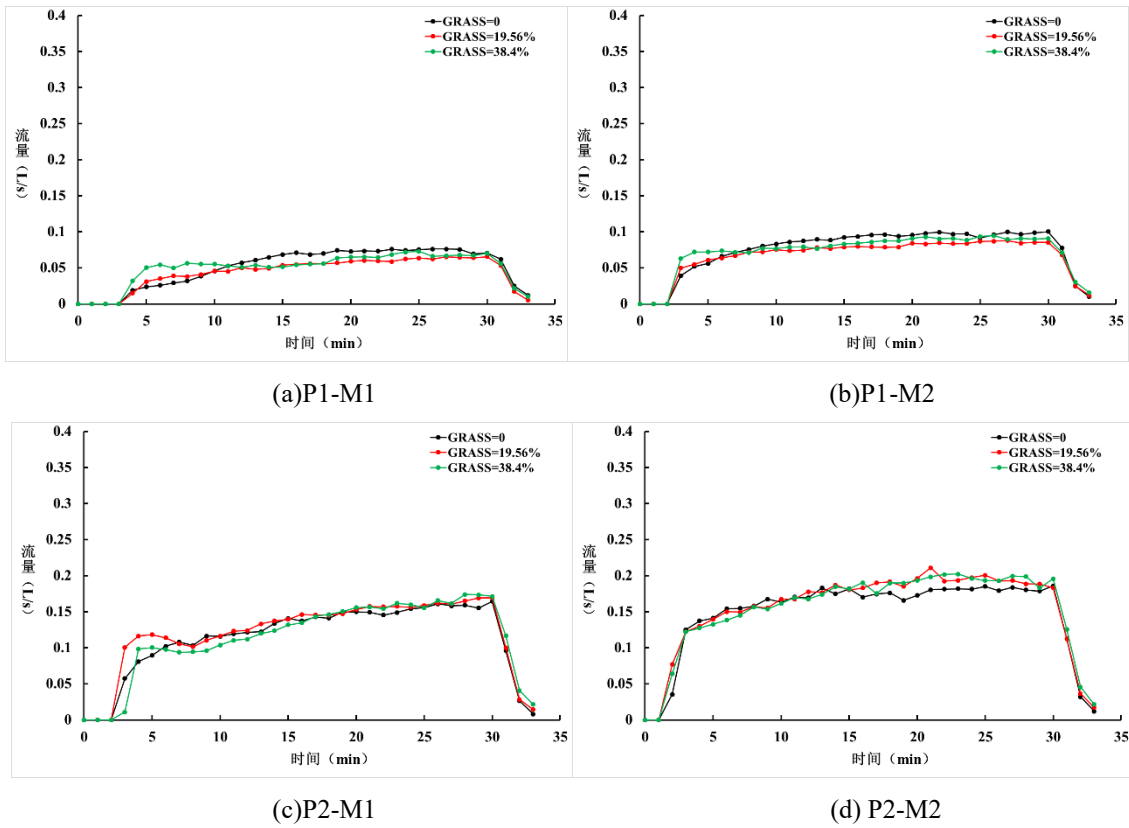


圖4 情景S0，S9，S13地表流量過程線（GRASS表示草地面積占比）

## 淺議海河流域洪水風險管理

翟學軍<sup>1</sup>、李琛亮<sup>2</sup>

### 摘要

海河流域地理位置重要，水文氣象情況複雜，歷史洪災頻發，做好洪水風險管理工作具有重要意義。通過近年來海河流域開展的洪水風險管理措施，在水庫、河道、蓄滯洪區、山洪、城市等洪水風險防範中起到了顯著作用。同時對今後流域洪水風險管理工作，在豐富風險分析手段，提升決策判別水準，提高管理處理能力等方面提出了建議。

**關鍵字：**海河流域、洪水、風險管理

---

<sup>1</sup> 水利部海河水利委員會 副主任 教授級高級工程師

<sup>2</sup> 水利部海河水利委員會 科長 高級工程師

## 壹、背景與意義

海河流域總面積 32.06 萬平方公里，占全國面積的 3.3%，總人口 1.54 億，占全國總人口的 11%，是我國政治文化中心和經濟發達地區。從歷史上看，海河流域是我國洪水的多發區，洪澇災害頻發的地區；從地位上看，海河流域政治、文化、經濟、社會等地位極其重要，

## 貳、海河流域基本情況

### 一、自然地理情況

海河流域地勢西北高、東南低，分為高原、山地和平原三種地貌類型。地形自西、北和西南向渤海傾斜，丘陵過渡區短，山區與平原區幾近相交。流域面積 32.06 萬平方公里，其中高原和山地面積 18.96 萬平方公里，占總面積的 59%；平原面積 13.1 萬平方公里，占總面積的 41%。海河流域包括海河、滌河和徒駭馬頰河三個水系，海河水系由漳衛河、子牙河、大清河、永定河、北三河等 5 條河流組成；滌河水系（包括冀東沿海諸河）位於流域的東北部；徒駭馬頰河水系位於流域的最南部，為單獨入海的平原排水河道。

### 二、流域降雨洪水特點

海河流域屬半濕潤、半乾旱大陸性季風氣候，降雨洪水具有顯著特點：一是降雨量年際變化大，豐水年可達 800 毫米以上，枯水年僅 270 毫米左右；二是年內分配極不均勻，80%左右的年降水量集中在 6~9 月份，且往往集中在幾次強降雨過程。三是點雨量大，據點雨量記錄統計，我國大陸 7 天最大降雨記錄發生在海河流域（1963 年 8 月，獐磨站 7 天降雨 2050 毫米）。四是洪水突發性強，山區與平原區幾近相交，丘陵過渡區短，暴雨洪水源短流急，突發性強。五是洪峰高、峰型陡、洪量集中，許多中小河流洪峰模數達到世界最大記錄，南泚河每平方公里洪峰流量達 12413 秒立米。

### 三、工程體系

海河流域防洪工程經過多年的建設，海河流域初步建成了由水庫、河道、堤防、水閘樞紐、蓄滯洪區組成的防洪工程體系，形成了各河系“分區防守、分流入海”的防洪格局。流域現有大、中、小型水庫 1854 座，總庫容 322.7 億立方米，控制流域山區面積的 87%，山區大型水庫 33 座，總庫容 271.4 億立方米；開挖、疏浚骨幹行洪河道 50 餘條，使海河水系設計入海能力達 24680 秒立米；現有堤防總長 9000 多公里，其中 I 級、II 級堤防約 3600 公里，相當於全國堤防總長度的十分之一；規劃保留蓄滯洪區 28 處，蓄滯洪總量 171 億立方米。

很多地區淹不得、淹不起；從工程體系上看，流域各河控制性工程多位於上游，部分河道標準偏低，防禦難度大。因此，結合海河流域的實際情況，對洪水風險進行充分研究，進而實施有效管理，提高抵禦洪澇災害的能力和韌性是十分必要和迫切的。

## 三、歷史洪水及災害情況

海河流域洪澇災害頻發，且流域內洪澇災害有連年發生的規律。從全流域看，在 537 年間發生連續大水年共 24 次，比較典型的洪水年如 1652、1653 和 1654 年連續 3 年大水，1822、1823 年連續兩年大水。1953~1964 年共 12 年間有 7 年發生大水，其中 1953、1954、1963、1964 年均發生連續性洪澇。例如：1939 年海河流域 7、8 月份降雨日數多達 30~40 天，其中出現若干次較大的暴雨，歷時長、次數多、範圍廣、強度大，部分河流出現了有記錄以來的最大洪水。1939 年海河流域還處於“天然狀態”，沒有任何大型水利工程可抵禦洪水侵襲，各河下游多處漫溢決口，潰不成河。據調查，下游主要河道決口 79 處，扒口分洪 7 處，受災地區涉及晉、冀、魯、豫 4 省及京、津兩市，受洪水影響，海河流域交通幾乎全都斷絕。1963 年 8 月上旬，受颱風等天氣過程影響，海河流域發生了罕見的特大暴雨，強度大、範圍廣、持續時間長，7 天累計降雨量大於 1000 毫米的籠罩面積達 15.3 萬平方千米，相應總降水量約 600 億立方米。“63·8”暴雨造成海河流域上游 40 多條支流相繼山洪暴發，南系漳衛、子牙、大清河同時發生大洪水。在本次洪水中，子牙河支流滄陽河為特大暴雨中心地區，5 座中型水庫漫頂潰壩，多座小型水庫被衝垮，多處蓄滯洪區連成一片，寬達 10 餘千米的洪流順滄陽河兩岸向東北奔流。

## 肆、海河流域洪水風險

海河流域自然稟賦差，洪水多發重發，發生洪水的風險大；同時，由於防洪工程具有一定的標準，因此工程安全與否也存在很大的風險。海河流域洪水風險存在著暴雨洪水觀測與預測、防洪標準與設計洪水、氾濫用水、氾濫洪水淹沒後果估計、氣候變化預測等諸多不確定性，其風險重點集中在水庫風險、河道風險、蓄滯洪區風險、山洪風險和城市防洪風險等方面。

### 一、水庫風險

水庫是洪水調控和水資源利用的重要工程設施，在地方經濟發展中發揮了重要作用，一旦發生重大險情，將對周邊和下游地區造成重大的災害風險。水庫風險主要包括調蓄能力下



降風險、調度決策風險、潰壩風險等方面。

## 二、河道風險

海河流域河網密佈，險工眾多，部分堤防未達標，存在較大的防洪隱患。河道風險包括行洪能力不足風險、決堤風險等方面。

## 三、蓄滯洪區風險

海河流域蓄滯洪區多，在防洪工程體系中發揮了重要的緩洪滯洪作用，隨著社會經濟發展，蓄滯洪區運用成本越來越大，啟用越來越難。蓄滯洪區風險主要包括啟用風險、人員轉移安置風險、工程退化風險等方面。

## 四、山洪風險

海河流域山區多，山洪災害突發性強，預測預報難度大，近年因山洪災害造成人員死亡的比重在海河流域因洪災死亡人數的八成以上。山洪風險主要包括預測預報風險、預警風險、人員轉移風險等方面。

## 五、城市防洪風險

海河流域特大型、大型城市多，人口密集，涉面廣，城市防洪壓力大。城市防洪風險主要包括社會管理風險、多部門聯動風險等方面。

## 伍、海河流域洪水風險管理手段

與傳統的洪水防禦或洪水控制相反，洪水風險管理是一個不斷嘗試利用有限資源，以獲得多重效益的過程。針對海河流域重點洪水風險，需從工程措施和非工程措施兩個方面進行風險管理。

對水庫風險進行科學管理，一是提高預測預報精度，堅持傳統和創新並舉，通過下墊面覆核、歷史洪水分析、建立適合海河流域的水文模型等方法，提高洪水預報精度和預見期；二是提高工程防禦能力，對大中小水庫定期安全鑒定、評價並對有問題的水庫安排除險加固，通過清淤等工程手段確保防洪庫容有效；三是提高調度決策水準，依靠調度系統等資訊化系統降低預報誤差風險，通過細化水庫調度規程、掌握下游河道行洪能力等手段，充分發揮水庫效益。

對河道風險進行科學管理，一是加強河道岸線管理，結合“河長制”“清四亂”等專項工作，消除侵佔河道的現象，清除阻水障礙使河道暢通，對未達到設計標準的堤防進行加固；二是加強巡堤查險力度，洪水未來時，排查堤防險工隱患，洪水到來時，增加巡堤查險人員，發現隱患和險情快速解決處置；三是強化抗洪搶險措施，通過每年編修應急搶險預案、組織抗洪搶險演練，保證一旦出險迅速應對，有效防止險情擴散；四是充分運用洪水風險圖成果，及時預判潰堤風險涉及的範圍和程度，為調度決策提供科學依據。

對蓄滯洪區風險進行科學管理，一是做好分洪決策分析，在摸清蓄滯洪區現狀條件的基礎上建立綜合分析模型，科學調度控制性工程；二是做好人員轉移避險，編制轉移避險預案，通過及時修訂預案、組織人員轉移演練，通暢應急轉移、避險的流程；三是修建避險設施，就近建設避險台、避險樓等設施，方便人員臨時避險；四是做好財產登記和運用補償，汛前組織蓄滯洪區全覆蓋的財產登記，一旦啟用後及時核查災情資料，為蓄滯洪區運用補償提供依據；五是推行洪水保險制度，將蓄滯洪區運用的財產損失通過保險途徑進行補償。

對山洪風險進行科學管理，一是完善調查評價成果，根據近年實測結果更新預警閾值，優化危險區群眾轉移路線；二是解決小流域產匯流問題，通過開發土壤質地類型資料集、開發數位高程模型網格，研發兩強影響匯流非線性特徵單位線方法，歸納下滲特徵參數取值範圍，分析臨界雨量，解決降雨產匯流問題；三是及時發佈預警資訊，以村為單位就地發佈預警，通過自動雨量站和水位站傳送監測資訊至省市平臺，運用即時資料規範化處理與空間歸一化分析方法，實現較大尺度山洪風險的精准識別。

對城市防洪風險進行科學管理，一是充分分析城市洪水的要素，全面考慮上游來水、暴雨積水和風暴潮等不同洪水遭遇組合，還要考慮城市防洪排澇體系及下墊面情況，系統分析洪水風險；二是建立多部門聯動體系，針對城市洪水涉及行業多的特點，以政府為主導會同水利、應急、電力、通訊、衛生、交通等部門根據預案聯合行動，協同作戰抗禦洪水；三是提高城市防洪工程標準，通過頂層規劃促進城市建設和防洪排澇建設協調發展，加快海綿城市建設，在內澇風險區進行多維度的建設和管控。

## 陸、海河流域洪水風險管理發展方向

進行洪水風險管理，最主要的驅動力是為可持續發展目標提供支援，充分考慮各種不確定性，使整體剩餘風險達到可接受水準。海河流域將結合自身特點，對洪水風險管理的風險分析、決策判別和管理處理三個階段，充分利用先進的技術手段，結合以往工作中的資料積累，促進洪水風險管理事業發展。

### 一、進一步豐富風險分析手段

在傳統方式的基礎上，充分採用衛星、無人機、視頻監控、雷達、大資料、物聯網、“互聯網+”等高新技術，準確全面的獲取風險源。同時，加強資料分類、資料採擷、資料分析等

技術，利用歷史洪水資料，對洪水風險的成因和特徵進行準確把握，找到發生條件、演化發展和時空分佈規律，實現智慧識別、快速感知、提前預警，對分析洪水風險提供有效的技術支撐。同時，強化重點部位和重點目標的主動感知，自動發佈汛情資訊，引導民眾主動避險，為防控決策爭取寶貴時間。

## 二、進一步提升決策判別水準

做好洪水風險智慧化決策系統建設的頂層設計，以問題為導向，全面梳理業務需求。制定智慧化決策系統應用的總體方案。加強人工智慧在洪水風險管理中的應用，風險識別或得到預警資訊後第一時間匹配方案預案，通過資訊化系統初步提出決策建議，供有關部門參考。提高業務人員素質，提升人機智能協同成果品質，確保判斷準確、理由充分、方案可行、效果顯著。針對海河流域自身特點，洪水風險智慧化決策系統可在已建資訊化系統的基礎上豐富內容和功能，並在重點區域先試先行。

## 三、進一步提高管理處理能力

在洪水風險識別、分析、預警和決策後，需要對風險進行應急處置。洪水調度決策後，智慧輔助工作人員調度防洪工程，並協調相關部門調配所需的物資、隊伍，優化生成處置方案，減少災害損失。同時，利用防汛抗旱和水旱災害防禦職能重新劃分的制度優勢，充分發揮各部門的專業特長，進一步理順“測防報”和“抗救援”的工作關係，做到有機銜接，提高風險處置能力。

## 柒、結語

海河流域自古以來是一個洪水頻發的區域，洪災損失之大、影響範圍之廣居自然災害前列。隨著經濟社會的發展，防洪安全保障需求也不斷提高。同時，海河流域的洪水風險管理工作還存在著管理粗放、體系尚未健全、先進技術運用不充分等問題。逐步增加人工智慧的參與程度，減少人為干預，最終實現風險管理從數位化到智慧化再到智慧化的飛躍。

## 參考文獻

1. 張志彤 (2019)，「實施洪水風險管理是防洪的關鍵」，中國防汛抗旱，第 29 卷，第 2 期，第 1-2 頁。
2. 陳敏 (2019)，「充長江流域控制性水庫聯合防洪調度實踐看洪水管理」，中國防汛抗旱，第 29 卷，第 2 期，第 3 頁。
3. 孫東亞 (2019)，「中國山洪災害預警體系建設」，中國防汛抗旱，第 29 卷，第 3 期，第

4-5 頁。

4. 王毅、劉洪偉、霍風霖 (2019)，「新形勢下北京市防汛抗旱及水旱災害防禦資訊化建設思考」，中國防汛抗旱，第 29 卷，第 3 期，第 5-8 頁。

## 東北三省農業旱災風險評估研究

楊曉靜<sup>1</sup>、徐宗學<sup>2</sup>、左德鵬<sup>3</sup>、蔡思揚<sup>4</sup>

### 摘要

氣候變化背景下，乾旱對農業生產造成的損失已不容忽視。明晰糧食主產區面臨的旱災風險特徵有利於保障我國糧食生產安全。已有研究中以多個省份為研究區針對多年份農業旱災風險的相關研究相對較少。東北三省是我國最重要的糧食主產區之一，明晰該地區的農業旱災特徵對農業生產具有十分重要的作用。本研究基於自然災害系統理論針對東北三省構建了農業旱災風險評估模型，並在縣市尺度對不同等級農業旱災風險進行了分區。研究中分別從省份尺度和縣市尺度對農業旱災危險性、暴露性、脆弱性、抗旱能力及農業旱災綜合風險進行評估。研究結果表明：省份尺度上，農業旱災綜合風險由高到低分別為：黑龍江省、吉林省與遼寧省。其中危險性年際間差異明顯，暴露性則相對穩定。2010-2015年間脆弱性呈增加趨勢，三省抗旱能力均隨年際變化而波動。空間範圍上，東三省農業旱災風險由南向北遞增。農業旱災綜合風險等級上，中級及其以上級別縣市占對應省份的比例由高到低分別為：黑龍江省（75.81%）、吉林省（41.30%）與遼寧省（0%）。值得注意的是，農業旱災綜合等級最高的地區主要集中在三江平原及松嫩平原區。

**關鍵字：**危險性；暴露性；脆弱性；抗旱能力；區劃

---

1 中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究中心，工程师

2 北京师范大学，教授

3 北京师范大学水科学研究院，副教授

4 北京师范大学水科学研究院，硕士研究生

## 壹、引言

近年來乾旱對農業生產的影響呈增加趨勢，全球約 7% 的大範圍產量損失源於乾旱<sup>[1]</sup>。乾旱對農業生產造成的影響已不容忽視，且大規模的農業旱災易引發區域饑荒問題，甚至造成社會動盪。因此，有效識別農業旱災高風險區，一方面有利於農業生產實踐，另一方面也有利於區域抗旱規劃及抗旱能力的提高。

從研究方法上，農業乾旱風險評價研究中所應用的評價模型主要可以分為：基於農業乾旱指標等級與作物產量數學關係構建的評價模型、災損資料為基礎的概率評價模型及基於自然災害風險理論構建的風險評價模型。儘管我國已有大量針對農業乾旱風險評估相關的研究，但是由於農業乾旱形成的複雜性及人類社會環境的動態多變性，導致地區之間農業乾旱風險在致災因數、孕災環境、承災體及抗旱能力等各方面差異顯著。且我國農業乾旱及農業旱災風險評估的研究多在單一省、市或典型流域尺度上開展<sup>[2-7]</sup>，以多個省份為研究區的農業旱災風險相關研究還相對較少<sup>[8-11]</sup>。其中基於自然災害風險理論的乾旱/旱災風險評價模型應用雖較為成熟，但大多研究僅針對研究區某一年份進行農業旱災風險評估。基於自然災害風險理論的農業旱災綜合風險評價在年際變化方面的研究則較少。此外，為提高農業旱災風險評估結果的可信度及其適用性，後續需要重點關注的問題主要包括：優先考慮研究區的經濟主體特徵；以研究區尺度為切入點，研究中需要兼顧區域主體功能與地區尺度特徵。

東北三省是我國最重要的糧食主產區之一，明晰該地區農業旱災風險特徵一方面有利於農業種植規劃，另一方面利於增進農業防旱抗旱規劃的有效性。因此，本文旨在基於東北三省為我國重要的糧食主產區且以雨養農業為主的特點，構建該區域農業旱災風險綜合評價

體系、探討其農業旱災風險年際變化特徵並明晰不同危險等級農業旱災的空間區劃。以期為該地區的農業生產實踐及防旱抗旱工作提供一定參考借鑒。

## 貳、資料與方法

### 一、研究區概況

東三省面積為 80.84×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>，地形以平原和山地為主。該區是我國重要的糧食主產區之一，地處北緯 38°43′~53°33′，東經 118°53′~135°05′之間(圖 1)。總體上屬於溫帶季風氣候，四季分明。多年平均降水量為 400~1000mm，年平均氣溫為-3~10℃。農作物以一年一熟為主，多年平均糧食種植面積占全國糧食種植面積 13.4%，糧食產量占全國糧食總產量比例為 12.8%。圖 1 糧食主產區是基於三省統計年鑒資料分析而得。

### 二、資料來源

本研究中的基礎資料主要包括：1961-2014 年東北三省 70 個氣象網站逐月降水、氣溫及 2011-2015 年黑龍江省、吉林省及遼寧省統計年鑒。年鑒中所用資料類型包括：農作物播種面積、糧食種植面積、糧食產量、農業總產值及農用機械總動力等。氣象資料來源於中國氣象資料網(<http://data.cma.gov.cn/>)。

### 三、研究方法

#### (一)指標選擇

旱災的形成過程較為複雜，基於自然災害理論評價體系及方法，較多學者認為農業旱災風險主要可以從致災因數危險性、承災體的暴露性、孕災環境的脆弱性及抗旱能力四個方面來進行研究<sup>[12-14]</sup>。旱災風險評估模型要素及相關指標如下：

#### (1)危險性

研究區涉及東北三省 148 個縣市，土壤含水量資料較難獲取，且農業乾旱指標值不確定性較難評估。故研究中選擇不同時間尺度(1

月、3月、6月、9月及12月)標準化降水指數(SPI)與標準化蒸散發指標(SPEI),分別從乾旱頻率、乾旱強度及指標不同乾旱等級對東北三省旱災事件的評估準確率進行分析,基於比較結果選取 SPEI 12 月尺度值作危險性指標。基於 Arcgis10.2 中反距離權重 (IDW) 將氣象網站對應 12 月尺度 SPEI 值插值為柵格資料,以縣市為邊界計算區域內所有柵格點的均值即為對應縣/市的 SPEI 值。

#### (2) 暴露性

暴露性表示在災害發生過程中可能受到旱災影響的範圍。糧食種植面積占對應行政區域總面積比例可反映暴露性。由於統計年鑒縣市範圍內三個省份間資料存在部分行政區域面積缺失的情況,綜合考慮區域特性及資料可利用性。研究中選取糧食種植面積與農作物播種面積的比值作為暴露性指標。

#### (3) 脆弱性

脆弱性用於體現農作物在乾旱條件下,農業種植環境緩衝並解除乾旱造成負面影響的能力。研究中常用灌溉旱地與耕地面積比例、灌溉水田與耕地面積比值、雨養農業與耕地面積比例、水資源開發利用程度、工程供水量、節水灌溉面積及有效灌溉面積等指標來反映脆弱性特徵。東三省縣市尺度上無法滿足上述典型脆弱性指標的資料需求,綜合研究區特點及資料可獲取性的條件下,選取單位面積糧食產量與單位面積農業產值作為脆弱性指標。利用層次分析法對上述指標權重進行計算。兩個指標在脆弱性表徵值計算時的權重值均為 0.5。

#### (4) 抗旱能力

抗旱能力表徵地區在乾旱發生前及乾旱致災過程中,該地區基於人為措施降低旱災造成損失的能力。綜合東三省縣市尺度 2011-2015 年統計年鑒資料連續性及可利用性等因素,本研究用單位播種面積農業機械總動力為表徵區域抗旱能力的指標。

#### (二) 指標歸一化

為能對比分析各指標計算結果,文中對危險性、暴露性、脆弱性及抗旱能力對應的指標均進行歸一化處理。在指標歸一化處理過程中需要區分指標為正向指標還是負向指標。正向指標值越大表徵旱災風險越高,而負向指標表徵的特點則與之相反。正向指標的歸一化計算方法如下:

$$y_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

公式中:  $x_i$  表示指標的數值,  $x_{\max}$  表示

指標最大值,  $x_{\min}$  表示指標最小值。

負向指標的計算公式如下:

$$y_i = (x_{\max} - x_i) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (2)$$

式中各變數含義同公式(1)。

對於旱災風險評估體系中的各要素,若反映各要素特徵的指標為多個,則該要素值為各指標值與對應權重乘積之和。

#### (三) 農業旱災風險評估模型

針對研究區構建的農業旱災風險評估體系如圖 2。所構建的農業旱災評估模型為:

$$R = \frac{H \times E \times V}{RE} \quad (3)$$

式中: R 表示農業旱災綜合指數; H 表示農業旱災危險性; E 表示農業旱災暴露性; V 表示農業旱災脆弱性; RE 表示抗旱能力。

#### (四) 農業旱災風險評估等級劃分

為明確東北三省農業旱災評估體系中各指標及綜合指標的等級特徵,對 2010-2014 年東北三省 148 個縣市的農業旱災風險、暴露性、脆弱性、抗旱能力及農業旱災綜合指標值分別進行正態分佈檢驗,檢驗結果表明資料中僅脆弱性對應的資料通過了正態分佈檢驗。為最大程度體現出空間上的區域差異性,以自然段點

法對評估體系中各指標 2010-2014 年的均值為標準進行分級，分級對應的標準見表 1。

## 參、結果与分析

### 一、時間演變特徵

基於圖 2 農業旱災風險評估體系，利用東三省 2011-2015 年統計年鑒對研究區縣市尺度上的農業旱災風險進行了評估。基於各縣市所屬省份平均值統計各省農業旱災風險評估體系中對應的指標值，結果詳見表 2。為直觀體現省份及各指標間的差異，分別計算各省份對應年份指標值在 5 年中所占百分比，如圖 3。

對比 2010-2014 年東三省危險性可得：三個省份不同年份間危險性差異明顯，其中黑龍江省 2010 年的農業旱災危險性最高，吉林省危險性最大的年份為 2011，遼寧省農業旱災危險性最大的年份為 2014 年。三省中農業旱災暴露性由高到低分別為：黑龍江省、吉林省與遼寧省。近 5 年東三省暴露性指標值反映出三省暴露性年際間波動範圍較小。相對其他農業旱災評價要素，暴露性對農業旱災的影響程度相對穩定。2010-2014 年間各省農業旱災脆弱性呈波動上升的趨勢，黑龍江省脆弱性最強的年份為 2014，其餘省份均為 2013 年。東三省糧食及農業產值的不斷增加是導致該地區農業旱災脆弱性整體上呈現增加趨勢的主要原因。對比三省對農業乾旱的抗旱能力結果發現，三省抗旱能力由高到低分別為：遼寧省、吉林省與黑龍江省。而基於東北三省農業旱災綜合指數多年平均值可看出三省農業旱災風險由高到低分為：黑龍江省、吉林省與遼寧省。

### 二、空間演變特徵

2011 年東三省整體農業旱災程度均較高，其中危險等級以較高和最高等級為主。2010 與 2012 年東北三省農業旱災危險性較高的區域主要集中在黑龍江省和吉林省。2013 年東三省整體農業旱災危險性較低，而 2014 年東三省農業

旱災危險程度較高的地區則主要集中在遼寧省及吉林南部與遼寧交界的地方。而 2014 年遼寧省發生了近 63 年最嚴重的乾旱，危險性空間分佈中也體現出遼寧省遭受農業旱災的風險較高。

暴露性可體現研究區糧食種植的重要性，2010-2014 年東北三省農業旱災暴露性年際間區域性差異較小，如圖 5。空間上呈現由南向北遞增的特徵，年際間吉林省和遼寧省農業旱災暴露性存在略微降低趨勢。暴露性等級特徵上，黑龍江省農業旱災暴露性遠高於其他兩個省份，該省暴露性中級及其以上縣市比例高達 91.94%，吉林省及遼寧省對應的比例分別為 71.74% 與 30.00%。從空間變異性上看，東北三省農業旱災暴露性的變異性存在由南向北減小的趨勢，而該特徵與暴露性等級空間分佈呈相反的變化趨勢。

東三省農業旱災脆弱性整體上存在由南向北減小的趨勢，如圖 6。此外，結合各年農業旱災脆弱性及多年平均空間分佈可明確得出：東三省農業旱災脆弱性最高的地區主要集中在三江平原及松嫩平原地區。從省份上看黑龍江省脆弱性較高的地區主要為以哈爾濱為中心的周邊地市，且哈爾濱市以南與吉林毗鄰的地區脆弱性最高。三省農業旱災脆弱性中級及其以上的等級縣市占各省縣市比例由高到低分別為：遼寧省（90.00%）、吉林省（73.91%）與黑龍江省（61.29%）。空間變異性上，農業旱災脆弱性均值與變異性空間分佈整體呈相反變化特徵，其中遼寧省西部地區及其東南部地區農業旱災脆弱性及其變異性等級均較高。

多年平均及逐年抗旱能力空間分佈均存在由南向北逐漸降低的趨勢，如圖 7。三個省份中抗旱能力由高到低分別為：遼寧省、吉林省與黑龍江省，對應的抗旱能力在中級及其以上的縣市比率分別為：80.00%、4.35% 與 0%。而遼寧省抗旱能力和空間變異性特徵均顯著高於

其他兩省，且遼寧省西北部地區鐵嶺市抗旱能力與空間變異性等級均最高。

為綜合體現東北三省農業早災綜合風險特徵，結合研究區特點構建了農業早災綜合評估模型，模型結果以農業早災綜合指數來反映。東北三省農業早災綜合指數年際間變化較大，但是結合逐年時空變化及多年平均農業早災綜合指數空間分佈特徵可發現：東三省農業早災綜合風險呈由南向北增加的趨勢。農業早災綜合風險等級上，中級及其以上級別縣市占對應省份的比例由高到低分別為：黑龍江省(75.81%)、吉林省(41.30%)與遼寧省(0%)。值得注意的是，多年平均農業綜合指標空間分佈圖(圖8)反映出東三省中農業綜合風險等級最高的地區主要集中在三江平原及松嫩平原地區。對比多年平均農業綜合指數空間分佈特徵發現：遼寧省遭受的農業早災等級與空間變異程度均最低。吉林省農業早災綜合風險變異性以中部的松原市與吉林市為中心離該中心越遠則變異性越大，且與綜合指數值變化特徵相反。黑龍江省農業早災綜合指數空間變異性及多年平均風險等級均較高。

## 肆、讨论

基於研究區特點構建省市尺度上的農業早災風險評估體系，方法上能夠豐富東北三省農業早災風險評估技術；在實用性方面，縣市尺度的農業早災風險評估能夠深化對農業早災風險的認知且對防旱抗旱規劃提供一定參考借鑒。省份尺度上，農業早災風險綜合評估結果表明三省的農業早災風險由高到低分別為：黑龍江省、吉林省及遼寧省。為進一步驗證早災綜合指數對早災的評估能力，將農業早災等級評估中常用的綜合減產成數評估結果與早災綜合指數進行對比。結果表明：兩種方法識別出的早災風險最低的年份均一致，且對農業早災風險等級結果較為相似；東北三省危險性與農

業早災風險均處中等水準，而暴露性與脆弱性的等級則相對較高。該結果與已有類似研究所獲結論較為相似<sup>[2-4]</sup>。

空間尺度上，危險性年際間空間變異性較大，其主要是受到降水與氣溫的共同作用。以典型乾旱年2014年為例，危險性空間分佈顯示遼寧省與吉林省大部分地區農業早災危險性均處於中級以上，其中遼寧省危險等級最高。暴露性與脆弱性均體現出東北三省農業以糧食種植為主，糧食主產區主要集中在松嫩平原與三江平原一帶，該區對應的農業早災暴露性與脆弱性等級均較高。為能保證糧食主產區糧食生產安全，後續防旱抗旱工作中需要關注的重點包括：(1)加強對農業種植區域氣象觀測與土壤墒情的監測與預報，進而提升對農業早災危險性的預估能力；(2)以《全國種植業結構調整規劃(2016-2020年)》為導向，強化對種植結構調整的重點區域作物特徵制定相應的防旱措施。研究結果表明三江平原與松嫩平原農業早災風險較高，而該區域在今後的種植要求為穩定水稻優勢產區的面積。為能有效提高防旱抗旱能力，該區域今後應重點強化灌溉配套設施建設並進一步推進節水改造；(3)強化區域間乾旱監測資料共用機制，以科學調度為前提，合理調配抗旱物質提前準備。

研究方法上，本文基於自然災害風險評估系統理論構建了針對東三省的農業早災評估體系。受年鑒資料類型、年限及省份間資料差異性所限，評估結果的代表性上存在一定欠缺。但是，本研究對跨省份的農業早災風險評估有利於從整體上明晰東北糧食主產區的農業早災特徵，對今後農業實踐及防旱抗旱工作具有一定參考借鑒價值。隨著今後統計年鑒的進一步規範化，農業早災風險評估體系的科學性及完整性有望進一步提升。研究內容上，有利於更為客觀地揭示研究區農業早災風險特徵本質。與此同時，後續研究中需要進一步關注的重點

是地區尺度與大區域尺度相結合的農業旱災風險評估的合理性研究。

## 伍、结论与展望

本研究基於東北三省區域特徵構建了農業旱災風險評估體系，分別對該區域農業旱災危險性、暴露性、脆弱性及抗旱能力的時空演變特徵進行研究。分析了該地區農業旱災綜合風險的時空演變特徵，並對不同農業旱災等級的縣市進行了區劃。主要結論如下：

(1)省份尺度上，危險性及脆弱性年際間變化幅度相對較小，而危險性與抗旱能力年際變化顯著。多年平均危險性與暴露性從高到低分別為：黑龍江省、吉林省及遼寧省，而脆弱性及抗旱能力由高到低為：遼寧省、吉林省及黑龍江省。

(2)空間尺度上，農業旱災危險等級呈由西向東增加的趨勢，松嫩平原地區危險性等級居中，但是該地區空間變異性較大，為保障農業生產的有序進行需要加強該地區農業乾旱監測。農業旱災暴露性由南向北遞增，而脆弱性與抗旱能力空間變化趨勢則與暴露性相反。農業旱災風險綜合評估結果表明東三省農業旱災風險由南向北遞增，且危險等級最高的地區主要集中在三江平原及松嫩平原地區。在今後研究中，需以東北三省種植結構調整規劃為基礎，不斷深入對農業旱災高風險區乾旱對不同糧食作物致災機理的研究。

## 参考文献

- [1]. Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N. Influence of Extreme Weather Disasters On Global Crop Production. *Nature*, 2016, 529(7584): 84.
- [2] 馮波，章光新，李峰平. 松花江流域季節性氣象乾旱特徵及風險區劃研究. *地理科學*, 2016, 36(3): 466-474.]
- [3] 左海陽. 東北地區農業旱災時空演變規律分析. *東北水利水電*, 2013(10): 43-45.
- [4] 單琨，劉布春，劉園，等. 基於自然災害系統理論的遼寧省玉米乾旱風險分析. *農業工程學報*. 2012, 28(8): 186-194.
- [5] 汪金英，尚傑. 基於資訊擴散理論的黑龍江省農業旱災風險分析. *生態經濟*, 2009(6): 129-131.
- [6] 別得進，朱秀芳，趙安周，等. 農業旱災脆弱性研究綜述. *北京師範大學學報(自然科學版)*，2015, 51(z1): 62-69.
- [7] Lei Y D, Zhang H L, Chen F, et al. How Rural Land Use Management Facilitates Drought Risk Adaptation in a Changing Climate - A Case Study in Arid Northern China. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 192-199.
- [8] 尹圓圓，王靜愛，黃曉雲，等. 全球尺度的旱災風險評價指標與模型研究進展. *乾旱區研究*, 2014, 31(4): 619-626.
- [9] 賈慧聰，王靜愛. 國內外不同尺度的旱災風險評價研究進展. *自然災害學報*, 2011, 20(2): 138-145.
- [10] Potopova V, Boroneant C, Boincean B, et al. Impact of agricultural drought on main crop yields in the Republic of Moldova. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(4): 2063-2082.
- [11] Dobrovolski S G. World Droughts and their Time Evolution: Agricultural, Meteorological, and Hydrological Aspects. *Water Resources*, 2015, 42(2): 147-158.
- [12] 屈豔萍，高輝，呂娟，等. 基於區域災害系統論的中國農業旱災風險評估. *水利學報*, 2015, 46(8): 908-917.
- [13] Carrao H, Naumann G, Barbosa P. Mapping Global Patterns of Drought Risk: An Empirical Framework Based On Sub-National Estimates of Hazard, Exposure and Vulnerability. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2016, 39: 108-124.
- [14] Blauhut V, Stahl K, Stagge J H, et al. Estimating Drought Risk Across Europe From



Reported Drought Impacts, Drought Indices, and Vulnerability Factors. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(7): 2779-2800.

图与表



圖 1 東北三省氣象站分佈圖

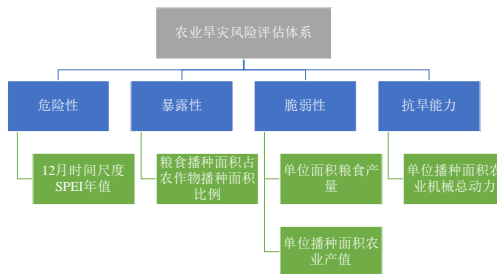


圖 2 農業旱災風險評估體系示意圖

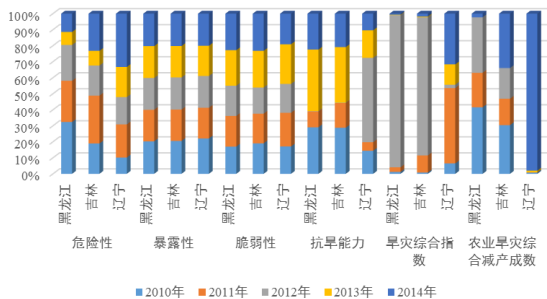


圖 3 東北三省農業旱災風險評估百分比堆積圖

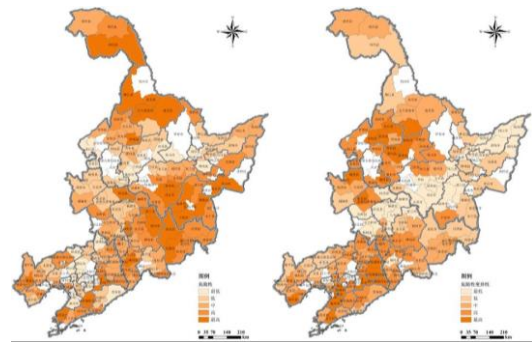


圖 4 東北三省 2010-2014 年農業旱災危險性均值及變異性空間分佈圖

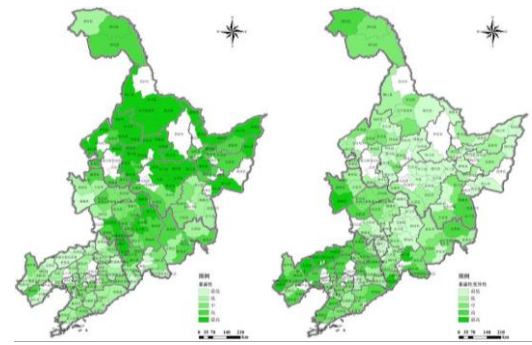


圖 5 東北三省 2010-2014 年農業旱災暴露性均值及變異性空間分佈圖

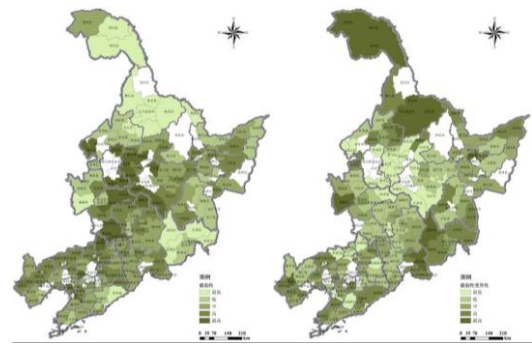


圖 6 東北三省 2010-2014 年農業旱災脆弱性均值及變異性空間分佈圖

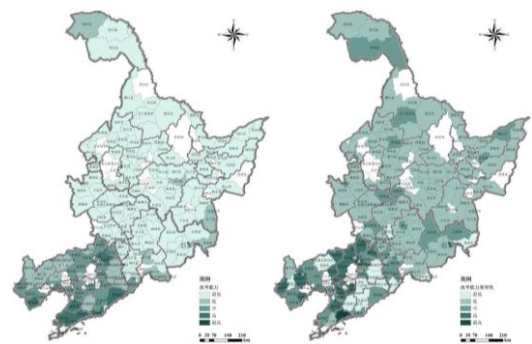


圖 7 東北三省 2010-2014 年農業旱災平均抗旱能力及變異性空間分佈圖

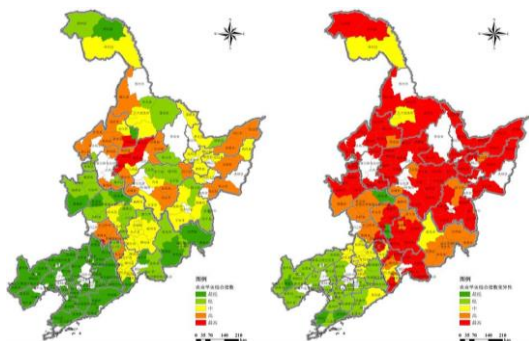


圖 8 東北三省 2010-2014 年平均農業旱災綜合風險及旱災變異性空間分佈圖

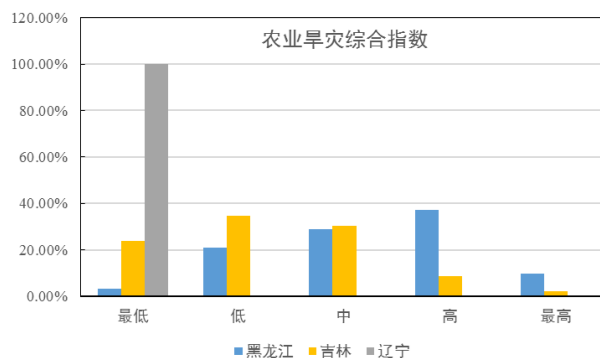


圖 9 各省份不同等級農業旱災的縣市百分率

表 1 2010-2014 年東北三省農業旱災風險評估分級標準

分級	最低	低	一般	較高	最高
危險性	0.03-0.39	0.40-0.43	0.44-0.46	0.47-0.52	0.53-0.74
暴露性	0.42-0.63	0.64-0.79	0.80-0.86	0.87-0.93	0.94-0.99
脆弱性	0.06-0.15	0.16-0.23	0.24-0.30	0.31-0.36	0.37-0.52
抗旱能力	0-0.2	0.03-0.05	0.06-0.08	0.09-0.13	0.14-0.40
旱災綜合指數	0.20-31.0	32.0-88.0	89.0-160.0	161.0-260.0	261.0-430.0

表 2 2010-2014 年東北三省省級尺度農業旱災風險評估結果

旱災評估指標	年份	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
危險性	黑龍江	0.76	0.60	0.52	0.19	0.27
	吉林	0.45	0.71	0.45	0.22	0.55
	遼寧	0.22	0.45	0.38	0.41	0.73
暴露性	黑龍江	0.94	0.92	0.92	0.93	0.94
	吉林	0.86	0.82	0.84	0.82	0.85
	遼寧	0.80	0.70	0.72	0.69	0.73
脆弱性	黑龍江	0.23	0.25	0.25	0.29	0.30
	吉林	0.27	0.26	0.23	0.33	0.33
	遼寧	0.26	0.32	0.27	0.37	0.29
抗旱能力	黑龍江	0.02	0.01	0.00	0.03	0.02
	吉林	0.03	0.02	0.00	0.04	0.02
	遼寧	0.06	0.02	0.22	0.07	0.04
旱災綜合指數	黑龍江	9.20	21.96	723.26	2.17	5.33
	吉林	3.52	46.15	372.99	1.78	8.15
	遼寧	1.08	7.83	0.35	2.11	5.28
農業旱災綜合減產成數	黑龍江	0.04	0.02	0.03	0.00	0.00
	吉林	0.04	0.02	0.02	0.00	0.04
	遼寧	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24

# 沈丘沙河大橋工程對河道行洪影響研究

徐雷諾<sup>1</sup>、吳廣昊<sup>2</sup>

## 摘要

利用二維水動力數值模型研究了沈丘沙河大橋工程建設對河道行洪的影響，得出了工程建設對河道水位、流速的影響。結果表明，工程建成後，以橋址處為界，上游水位壅高，下游水位下降，水位受橋墩阻水作用影響明顯，影響程度隨流量的增加而緩慢增大。流速變幅較大的區域主要集中在橋墩前沿，沿主流線方向的兩橋墩之間區域流速下降最為劇烈。工程建設對河道行洪的影響主要表現為阻水，對河勢穩定影響較小。研究成果對於衡量工程建設對河道行洪影響具有重要意義，同時亦可為工程建成後的運行管理提供依據。

**關鍵字：**防洪影響、數值模擬、水動力、橋墩壅水

## 壹、前言

橋樑工程建設會減少橋址處河道斷面的過水面積，改變河道流場條件，並引起局部水位壅高。國內外學者針對橋墩壅水問題已總結出大量經驗公式<sup>[1-2]</sup>，經驗公式法雖然方法簡便，但精度較低，主要用於對斷面平均壅水值進行估算，局限性較大。相對而言，數值模擬目前已發展到具有成熟的理論體系，得到越來越多的應用<sup>[3-6]</sup>。

本文擬採用數值模擬方法，針對沈丘沙河大橋工程這一工程案例開展橋墩壅水效應及對河道行洪影響方面的研究，成果可對分析評價工程建設對河道行洪影響及日後運行管理提供參考。

## 貳、模型建立

### 一、工程概況

沈丘沙河大橋為沈丘縣兆豐大道跨沙潁河大橋，位於沈丘槐店閘下游 1.3km 處，距下游新蔡河口 11.87km，是沈丘縣連接沙潁河南北的主要交通幹道。沈丘沙河大橋全長 645.08m，由北引橋、主橋、南引橋三部分組成，全橋共

分 5 聯，主橋寬 40m，引橋寬 35，橋面橫坡均為 1.5%，防洪標準為 100 年一遇。

### 二、控制方程

本文基於 Delft3D 軟體建立工程區域的二維水動力數值模型，控制方程為淺水方程。

連續性方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS \quad (1)$$

X 方向動量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = hf\bar{v} - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} \\ - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \quad (2) \end{aligned}$$

Y 方向動量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = hf\bar{u} - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} \\ - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \end{aligned}$$

1. 水利部淮河水利委員會；淮河水利委員會水文局（信息中心）工程師

2. 中水北方勘测設計研究有限公司 工程師

$$\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

$\bar{u}$  和  $\bar{v}$  的運算式如下：

$$h\bar{u} = \int_{-d}^n u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^n v dz \quad (4)$$

式中： $t$ ——時間； $d$ ——靜水深； $\eta$ ——水位； $h=\eta+d$ ——總水深； $u, v$ ——流速在  $x, y$  方向上的分量； $f$ ——科氏力係數； $\rho_0$ ——水密度； $p_a$ ——當地的大氣壓； $T$ ——水準粘滯應力項； $S$ ——源匯項； $\tau_{xx}, \tau_{yy}$ ——風摩擦應力分量； $\tau_{bx}, \tau_{by}$ ——河床摩擦應力分量；

有多種方法求解方程 (1) ~ (3) [7-8]，本文將一個時間步長分作兩個時間層，每一層上分別交替改變方向隱式求解控制方程。

### 三、網格劃分

為更好的貼合天然河道的不規則邊界，平面採用正交曲線網格[9]，如圖 1 所示，網格單元數為 414×54，共計 22356 個網格，結合計算區域的面積，本模型具有較高的計算精度。為保證計算精度，本次計算對橋墩採用了幹點處理，即將橋墩所在網格設置為不過水網格，來進行計算，橋墩區域的局部網格及幹點處理情況如圖 2 所示。

### 四、模型驗證

根據工程河段的地質資料可知河床的土質主要為粉質粘土，依據《水工手冊》糙率取值範圍，將河道的糙率設置為 0.0225，灘地的糙率設置為 0.0275。本次計算採用 20 年一遇洪水工況驗證，通過對比工程河段橋址處水位的模型計算值和設計值，來對模型的合理性進行驗證。

根據《沙潁河周口至省界航道升級改造工程沈丘樞紐工程規劃同意書論證報告》，沈丘沙河大橋橋址處河道在 20 年一遇洪水條件下的水位為 40.86m，與模型計算值的對比如下圖 3 所示。由圖可知，橋址處各測點處水位的計算值與設計值的最大誤差為 0.01m 左右，誤差率 0.024%，表明本模型基本合理，滿足本次計算的需求。

## 參、計算工況及結果分析

本文採用 20 年一遇洪水工況驗證，分別計算 50 年和 100 年一遇洪水工況下工程建成前後水動力場的變化情況，以研究分析工程建設對河道行洪的影響。20 年和 50 年一遇洪水工況對應的流量、水位根據《沙潁河周口至省界航道升級改造工程沈丘樞紐工程規劃同意書論證報告》中的成果取值，100 年一遇洪水流量採用交通高教《橋涵水力水文》[10]中的經驗公式法計算。

本文的計算工況如下表 1 所示。

### 一、水位影響分析

圖 4-圖 6 為 50 年和 100 年一遇洪水工況下工程建成前後的水位差分佈雲圖，本節所述的水位差（水位變化）定義為：水位差=工程建成後水位-工程建成前水位。由圖可知，工程建設對所在河道水位的影響表現為：以橋址處為界，橋址上游水位壅高，橋址所在斷面及其下游水位下降；受橋墩阻水作用影響，橋址上游一側橋墩前沿區域水位壅高最為明顯，兩種工況下的水位壅高極值均出現在該區域，最大水位壅高值分別達到 0.041m 和 0.047m；受橋墩所在斷面過水面積減小，流速增大影響，橋墩斷面所在區域水位下降最為明顯，沿水流流向兩橋墩之間區域的水位下降幅度最大；兩種工況下，最大水位降幅分別達到 0.021m 和 0.029m。

### 二、流場影響分析

圖 7、圖 8 分別為兩種洪水工況下，工程建設前後橋址處的流速分佈圖。由圖可知，橋墩處產生的水流擾動範圍較小，未對水流流態產生明顯影響。受橋墩阻水作用影響，流速變幅較大的區域主要集中在橋墩前沿，沿主流線方向的兩橋墩之間區域流速下降最為劇烈。

由計算結果（見表 2）可以發現，兩種洪水工況下，流速最大變幅分別為 1.29m/s 和 0.37m/s，受橋墩阻水作用影響明顯；百年一遇洪水工況下，流速最大變幅減小，主要

是受過水斷面擴大，流速減小影響。相較於最小流速，工程建設前後，橋址處最大流速的變化幅度相對較小，兩種洪水工況下，變幅均小於 0.1m/s，表明工程建設對河道行洪的主要影響表現為阻水，對河勢穩定影響較小。

### 肆、結論

本文採用二維數值模型研究了沈丘沙河大橋工程建設對河道行洪的影響，得出如下結論：

(1) 以橋址處為界，上游水位壅高，下游水位下降，橋墩前沿區域水位壅高最為明顯，最大值可達 0.41~0.47m；橋墩斷面所在區域水位下降最為明顯，最大降幅可達 0.021~0.028m，水位受橋墩阻水作用影響明顯，影響程度隨流量的增加而緩慢增大。

(2) 受橋墩阻水作用影響，流速變幅較大的區域主要集中在橋墩前沿，沿主流線方向的兩橋墩之間區域流速下降最為劇烈，最大變幅可達 0.37m/s~1.29m/s。工程建設對河道行洪的影響主要表現為阻水，對河勢穩定影響較小。

### 參考文獻

1. BRADLEY J N (1978), 「Hydraulics of bridge waterways」.

2. 陸浩、高冬光 (1991), 「橋樑水力學」。
3. HUNT J, BRUNNER G W, LAROCK B E (1999), 「Flow transitions in bridge backwater analysis」, Journal of Hydraulic Engineering, volume 125, phase 9, pages 981-983.
4. SECKIN G, AKOZ M S, COBANER M, et al (2009), 「Application of ANN techniques for estimating backwater through bridge constrictions in Mississippi River basin」, Advances in Engineering Software, volume 40, phase 10, pages 1039-1046.
5. 張細兵, 餘新明, 金現 (2003), 「橋渡壅水對河道水位流場影響二維數值模擬」, 人民長江, 第 34 卷, 第 4 期, 第 23-40 頁。
6. 王玲玲, 徐雷諾 (2018), 「周口港彎道碼頭工程水動力特性」, 河海大學學報(自然科學版), 第 46 卷, 第 2 期, 第 134-139 頁。
7. Ye Jian, (1998), 「McCorquodale J A. Simulation of curved open channel flows by 3D hydrodynamic model」, Journal of Hydraulic Engineering, volume 124, phase 7, pages 687-698.
8. 金忠青 (1989), 「N-S 方程的數值解和紊流模型」。
9. 汪德燿 (1989), 「計算水力學理論與應用」。
10. 人民交通出版社 (2009), 「橋涵水力水文」。

### 圖與表

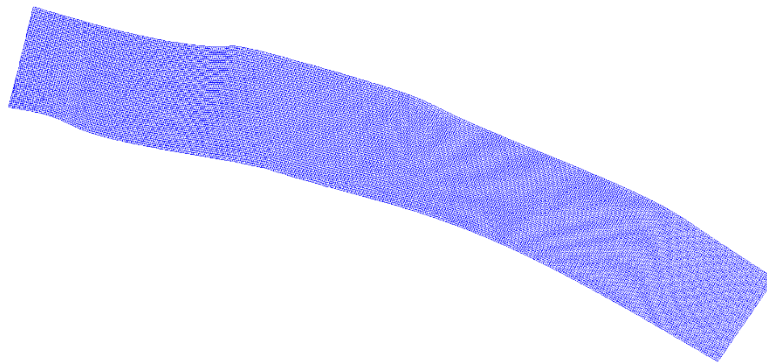


圖 1 工程河段網格分佈

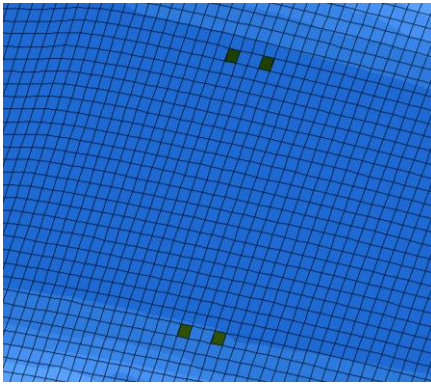


圖 2 橋墩位置網格及幹點處理

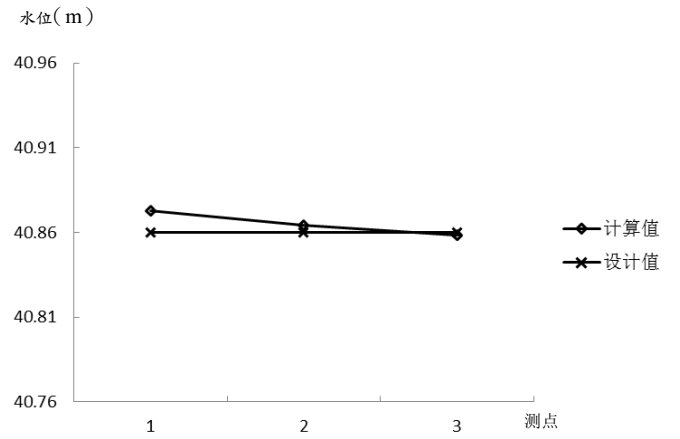
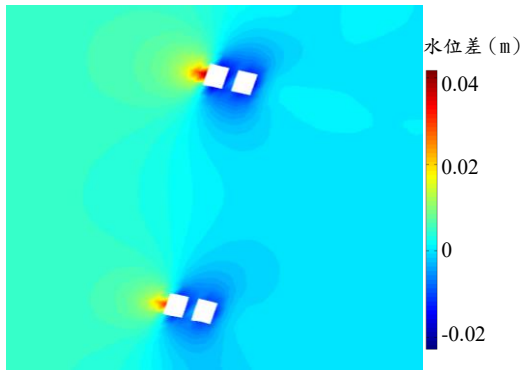
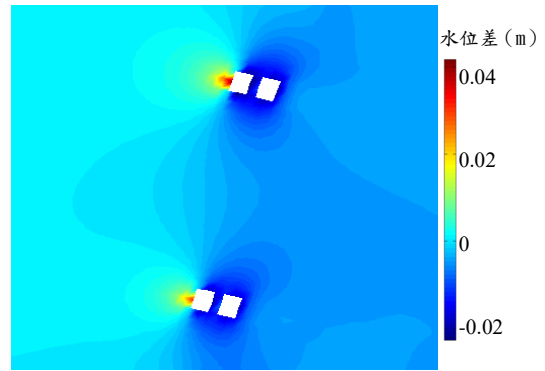


圖 3 20 年一遇洪水工況下橋址處水位分佈



50 年一遇洪水工況



100 年一遇洪水工況

圖 4 工程建成後橋址處水位差分佈

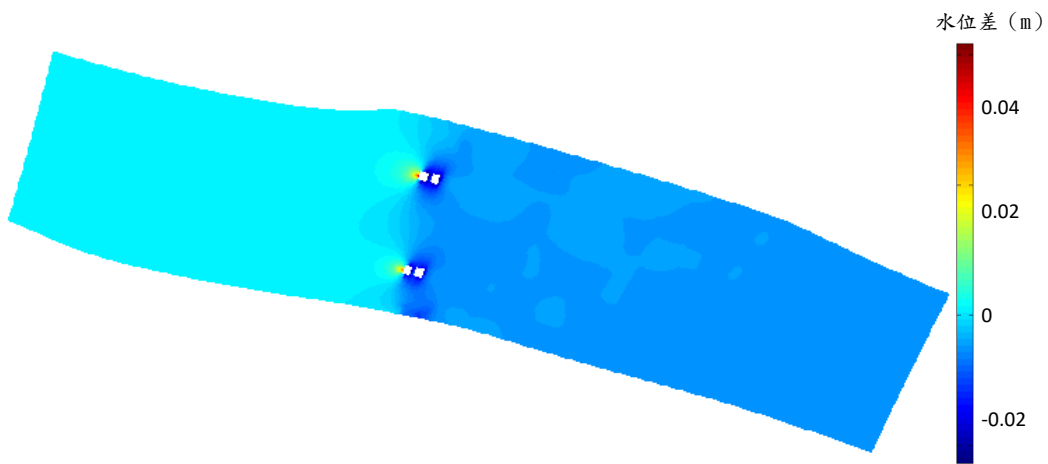


圖 5 50 年一遇洪水工況下工程建成前後工程河段水位差分佈

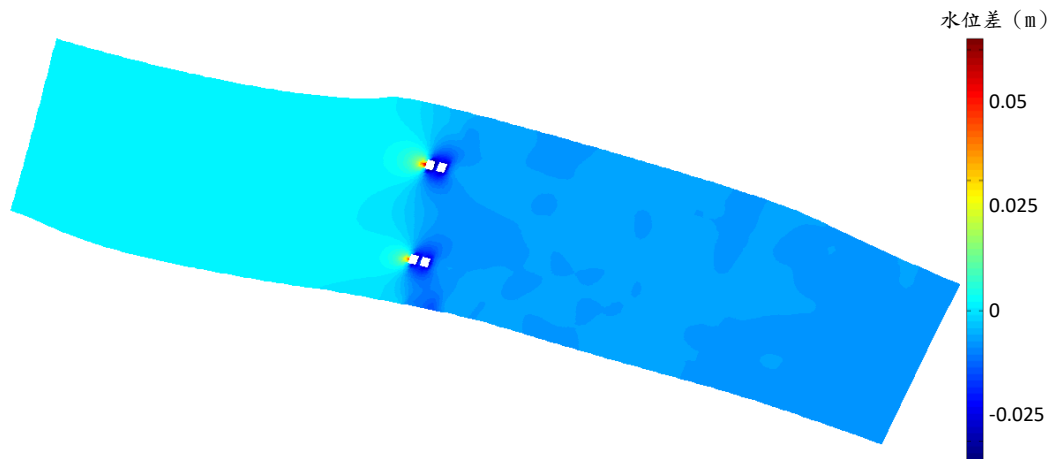
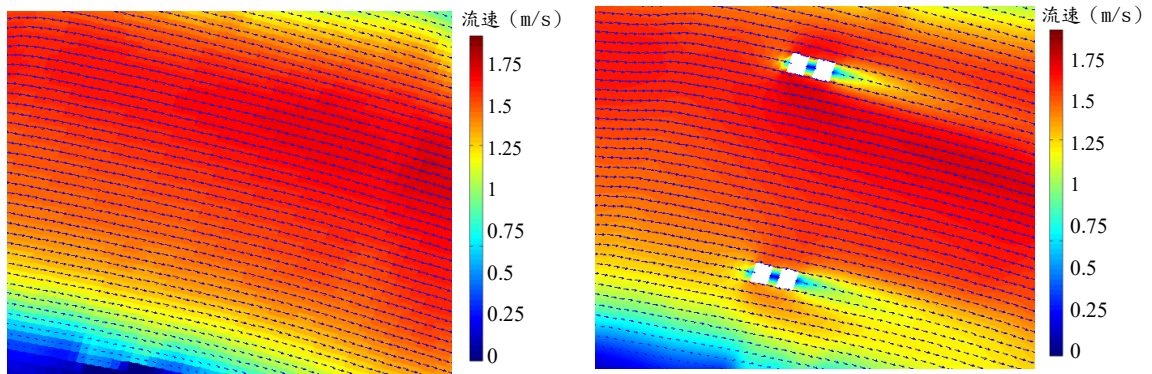


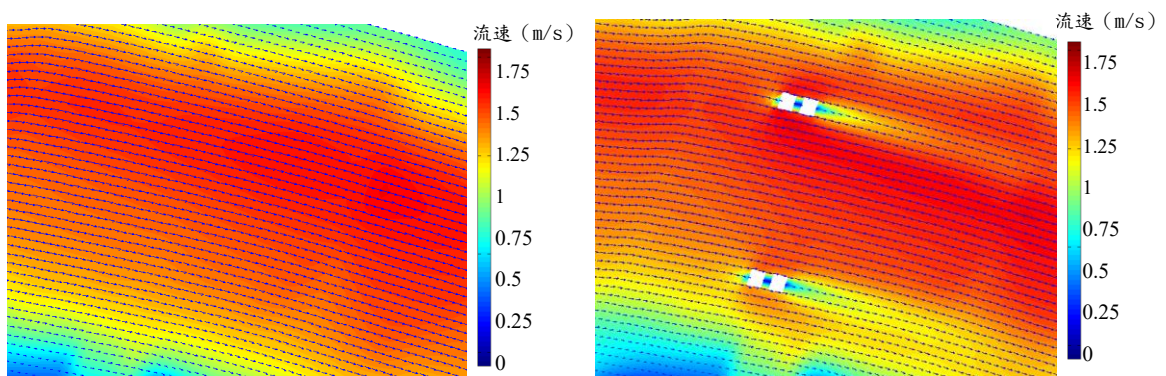
圖 6 100 年一遇洪水工況下工程建成前後工程河段水位差分佈



50 年一遇工程前

50 年一遇工程後

圖 7 50 年一遇洪水工況下工程建成前後橋址處流速分佈



100 年一遇工程前

100 年一遇工程後

圖 8 100 年一遇洪水工況下工程建成前後橋址處流速分佈

表 1 計算工況

工況	工況說明	上游邊界	下游邊界	備註
		流量 Q(m <sup>3</sup> /s)	水位 H (m)	
1	50 年一遇洪水	4150	41.98	工程建設前
2	50 年一遇洪水	4150	41.98	工程建設後
3	100 年一遇洪水	4780	42.94	工程建設前
4	100 年一遇洪水	4780	42.94	工程建設後

表 2 流場計算結果

序號	工況說明	平均流速 (m/s)	最大流速 (m/s)	最小流速 (m/s)
工況 1	工程建設前，50 年一遇洪水條件下，橋址處流場情況	1.72	1.85	1.48
工況 2	工程建設後，50 年一遇洪水條件下，橋址處流場情況	1.70	1.95	0.19
工況 3	工程建設前，100 年一遇洪水條件下，橋址處流場情況	1.62	2.06	0.56
工況 4	工程建設後，100 年一遇洪水條件下，橋址處流場情況	1.62	2.07	0.19



## 小浪底水庫運用對山東黃河減災影響分析

劉景國<sup>1</sup>

### 摘要

小浪底水庫於 1999 年建成運用以來，進行了 14 年汛前連續調水調沙，對下游河道防洪、防凌進行調度，黃河下游河道排能力得到顯著提高，河道得到了沖刷，在攔洪蓄洪及減災、防凌等方面取得了較大的效益。

**關鍵字：**黃河、小浪底水庫、山東河段<sup>2</sup>、減淤、防凌

---

<sup>1</sup> 黃河水利委員會山東黃河河務局 教授級高級工程師

## 壹、小浪底水庫簡介

小浪底水庫控制流域面積 69.4 萬 km<sup>2</sup>，占花園口以上流域面積的 95%，其任務是以防洪（包括防凌）、減淤為主，兼顧供水、灌溉、發電。小浪底水庫總庫容 126.5 億 m<sup>3</sup>，包括攔沙庫容 75.5 億 m<sup>3</sup>，防洪庫容 40.5 億 m<sup>3</sup>，調水調沙庫容 10.5 億 m<sup>3</sup>，可使黃河下游防洪標準由六十年一遇提高到千年一遇；採用蓄清排渾運作方式，利用攔沙庫容可使下游河床 20 年不淤積抬高。小浪底水庫 1999 年 10 月下閘蓄水，2000 年起投入防凌運用，2001 年起投入防洪調度運用，對下游河道防洪、防凌調度進行調節，在攔截泥沙與河道沖刷、攔洪蓄洪及減災、防凌等方面取得了較大的效益。

## 貳、小浪底水庫投入運用後山東

### 黃河沖淤情況

1999 年 10 月小浪底水庫下閘蓄水，1999 年 10 月—2007 年 10 月為攔沙運用初期，此後轉入攔沙後期運用。小浪底水庫自 1997 年 10 月大壩截流至 2019 年汛前已累計淤積泥沙 34.51 億 m<sup>3</sup>，占水庫設計攔沙庫容的 45.7%。2002 年—2015 年，小浪底水庫連續 14 年進行了調水調沙運用。2018 年根據來水情況，實施了汛期調水調沙。小浪底水庫下閘蓄水運用以來，黃河下游河道發生了持續沖刷。下游河道主槽過洪能力也得到一定恢復，目前我省各河段平灘流量為：高村以上 6000—7000m<sup>3</sup>/s 左右，高村—利津絕大部分河段在 4300m<sup>3</sup>/s 以上。最小平灘流量的位置下移到孫口上下的楊集-陶城鋪河段，最小值為 4300m<sup>3</sup>/s。

### 一、1999 年 10 月—2001 年 10 月沖淤情況

小浪底水庫運用第一年（1999 年 10 月—2000 年 10 月），高村—利津河段共淤積 0.177 億 m<sup>3</sup>，僅濼口—利津河段沖刷 54 萬 m<sup>3</sup>；運用第二年（2000 年 10 月—2001 年 10 月），高村—利津河段共淤積 0.090 億 m<sup>3</sup>，孫口—濼口河段受“01.8”汶河加水影響發生沖刷，沖刷量為

0.038 億 m<sup>3</sup>，其餘河段均表現為淤積，但高村—孫口河段淤積量明顯減小。

### 二、2001 年 10 月—2015 年 10 月沖淤情況

2002 年—2015 年，黃河下游河道發生了持續沖刷，過洪能力逐漸增大。下游主河槽最小平灘流量由 2002 年的 1800 m<sup>3</sup>/s 增大到 4200 m<sup>3</sup>/s，河道過洪能力得到很大提高。2001 年 10 月—2015 年 10 月，高村—利津河段共沖刷泥沙 5.862 億 m<sup>3</sup>，年均沖刷 0.419 億 m<sup>3</sup>。期間，2003 年沖刷量最大，主要是受“華西秋雨”影響，黃河下游出現了持續近 3 個月的 3000 m<sup>3</sup>/s 左右的洪水，河道沖刷劇烈。

### 三、2015 年 10 月—2018 年 10 月沖淤情況

2015 年 10 月—2018 年 10 月，高村—利津河段共沖刷泥沙 0.896 億 m<sup>3</sup>，其中 2018 年受黃河上中游來水影響，經小浪底水庫調控後進入下游，我省經歷了近 54 天的較大流量過程，河道沖刷較大。

### 四、3000m<sup>3</sup>/s 同流量水位的表現

2002 年—2015 年黃河調水調沙期間，我省河道全線（高村至利津）沖刷，主槽平均沖刷深度 1.5 米，濼口斷面最大為 2.11 米；3000 立方米每秒同流量水位主要站平均下降 1.93 米，蘇泗莊站下降最多為 2.76 米。

2015 年—2018 年，我省五個水文站 3000m<sup>3</sup>/s 同流量水位與 2015 年相比，高村至利津站均表現為下降。高村站下降最多為 0.97m，經初步分析，主要是 2018 年高村河段內吸泥船采沙建設灘區內房台造成主槽斷面增大。利津站下降最小為 0.03m。

從以上分析可以看出，1999 年 10 月—2018 年 10 月，黃河山東段經歷了淤積—沖刷的過程，除投入運用後的前兩個年度淤積外，其餘年份均為沖刷，最終表現為沖刷（參見圖一）。小浪底水庫運用以來，高村—利津河段主槽累

計沖刷 6.492 億  $m^3$ ，年均沖刷 0.342 億  $m^3$ 。從沖刷量的沿程分佈看，高村—孫口段沖刷量占山東河道總沖刷量的 44.6%，孫口—艾山段占 11.5%，艾山—濼口段占 18%，濼口—利津段占 25.9%，孫口—艾山段沖刷量最小。從沖淤時段來看，1999 年 10 月—2001 年 10 月表現為淤積，共淤積 0.2663 億  $m^3$ ；2001 年 10 月—2018 年 10 月表現為沖刷，共沖刷 6.758 億  $m^3$ ，在河道減淤方面發揮了較大作用。

## 參、小浪底水庫投入運用後攔洪

### 蓄洪及減災情況

1950 年—1999 年的 50 年間，發生最大流量超過 10000 $m^3/s$  的洪水，花園口站 6 次，其中 1958 年最大流量達 22300 $m^3/s$ ；我省高村站 5 次，其中 1958 年最大流量達 17900 $m^3/s$ 。發生最大流量超過 8000 $m^3/s$  的洪水(含 10000 $m^3/s$  以上)，花園口站 15 次，高村站 10 次。發生最大流量超過 4000 $m^3/s$  的洪水(含 6000 $m^3/s$  以上)，花園口站 46 次，高村站 39 次。

2000 年—2018 年的 19 年間，花園口站最大流量為 6680 $m^3/s$ (2010 年)，4000 $m^3/s$  以上洪水僅 8 次。高村站最大流量為 4700 $m^3/s$ (2010 年)，4000 $m^3/s$  以上洪水僅 5 次。主要是小浪底水庫投入運用後，聯合上中游水庫，多次對黃河洪水進行調控，攔洪蓄洪調洪，使下游河段在多次洪水中未超過河道安全過洪流量。

#### 一、2003 年洪水

2003 年自 8 月 25 日至 10 月 12 日，黃河流域受“華西秋雨”影響，黃河幹流及涇渭河、伊洛河、沁河、汶河、金堤河等支流相繼出現十餘次較大洪水。其中涇渭河出現 6 次洪水過程，咸陽站發生 1981 年以來最大洪水；三花間洛河上游出現有實測資料以來最大洪水。涇渭河、伊洛河大部分雨量、水文站的日降雨量、水位都創歷史記錄。由於來水量大，三門峽、小浪底、陸渾、故縣水庫長時間聯合調度運用，連續 6 次削減洪峰，大大減輕了下游防洪壓力，避免了大範圍漫灘，最大限度地降低了灘區人民群眾的損失，但洪水持續時間大大延長，我省持續時間 86 天。

據分析，如果沒有小浪底等水庫的防洪運用，8 月下旬至 10 月份將發生 5 次 5000-6000 $m^3/s$  的洪水，山東黃河灘區 50 萬人民群眾將面臨搬遷、受災，而且黃河下游部分堤防也將承受較大的洪水威脅。經調控後，使花園口站洪峰流量控制在 2780 $m^3/s$  以下，黃河下游未出現較大洪水，對 2003 年的洪水起到了很好的削峰和蓄洪作用，發揮了顯著防洪效益。

#### 二、2011 年洪水

2011 年黃河流域發生較大秋汛洪水，涇、渭、伊、洛、沁、汶河各支流相繼出現洪水，針對黃河中游幹支流出現了多場洪水過程，通過小浪底水庫攔洪錯峰，將花園口站流量由天然情況下的 7800 $m^3/s$  削減至 3120 $m^3/s$ ，減輕了下游防洪壓力。

#### 三、2018 年洪水

2018 年汛期，黃河流域暴雨過程頻繁，上游來水偏大，出現 3 次編號洪水，蘭托區間多條支流出現建站以來最大流量。黃河中游山陝區間、經渭河及黃河下游大汶河也發生洪水。黃河防總實施了上中游水庫聯合防洪和全河層面的水沙水沙聯合調控。小浪底水庫在洪水到來前，提前降低水位預泄排沙，騰庫迎洪，攔洪削峰錯峰，期間最大下泄流量為 3800 $m^3/s$ ，洪水過後保持低水位運行，盡可能多排沙多輸沙，並為應對大洪水預留更多防洪庫容。三門峽水庫起提前敞泄，海勃灣、萬家寨水庫根據水情變化，配合預泄調洪排沙，確保下游河道防洪安全，並接力補水，為小浪底異重流排沙提供動力，實現了水庫河道減淤。經上游水庫聯合調度攔洪蓄洪，使洪水在上游河段均未超過河道安全過洪流量。中游經小浪底、棲霞院水庫防洪運用，將潼關站流量 4620 $m^3/s$  消減為小浪底站最大流量 2800 $m^3/s$ ，下游花園口站流量基本控制在了 4000 $m^3/s$  左右，使得下游各站均為超過河道最小漫灘流量，確保了河道行洪安全和下游灘區安全。

#### 四、黃汶遭遇情況

大汶河是黃河下游最大的一條支流，迂回

向西于泰安東平縣馬口村注入東平湖滯洪區。東平湖東接大汶河下游、西連黃河，承擔著分滯黃河洪水和接納汶河全部來水的雙重任務，是確保濟南、津浦鐵路、勝利油田和沿黃兩岸人民生命財產安全的關鍵工程。

2004年汶河流域發生較大洪水，期間黃河流量在 $2000\text{m}^3/\text{s}$ 左右，為減少黃河洪水頂托影響，增大東平湖向黃河的洩洪流量，儘快降低老湖水位，黃河防總辦公室及時壓減了小浪底水庫的下泄流量，加快了湖水位元的回落速度，減輕了東平湖的防洪壓力。

2013年7月下旬，黃河上中游連續降雨，幹支流相繼出現洪水過程，我省黃河和東平湖同時發生較大洪水，出現了少有的黃河、汶河洪水相遇的不利形勢。灤口站洪峰流量 $4360$ 立方米每秒，為“96.8”洪水以來最大流量，利津站洪峰流量 $4390$ 立方米每秒，為1989年以來最大流量。東平湖老湖最高水位 $43.25$ 米，為2008年以來最高水位。為減少東平湖和我省黃河防洪壓力，在小浪底水庫超汛限水位的情況下，將水庫下泄流量從 $3600$ 立方米每秒壓減至 $2500$ 立方米每秒，既為東平湖洩洪創造了條件，又減輕了我省黃河河道的防洪壓力。由於汶河來水含沙量小，注入黃河後加大了黃河河道流量，對艾山以下河道沖刷起到一定作用。

另外，2002年—2015年連續實施了調水調沙，同時2004年、2005年、2007年、2010年—2013年小浪底水庫均對黃河洪水進行了調控。

從以上分析可以看出，小浪底水庫運用以來，發生大洪水的概率明顯減少了。運用以來的19年間，其中14年進行了調水調沙調度運用，10年對黃河洪水進行了調控，3次黃汶遭遇中小浪底發揮了調洪错峰作用，大大減輕了下游的防洪壓力，在防洪減災方面發揮了綜合

效益。

## 肆、小浪底水庫投入運用山東黃河防凌情況

每年冬春時節（當年12月至次年2月），黃河下游河道發生淌凌、結冰、封河及解凍開河等現象。有的年份封河或解凍開河時冰水下泄，冰塊堆積插塞，壅高水位，洪水陡漲偎堤，形成凌汛。由於水位猛漲，天寒地凍，風雪交加，堤防出險，防守搶護困難，汛情危急，人力難以抗拒，歷史上曾有“伏汛好搶，凌汛難防”、“凌汛決口，河官無罪”的說法。

自1855年—1938年的83年間，有24年凌汛決口，共決溢74處；1926—1937年間凌汛連年決口，為沿黃人民帶來深重災難。1950年—1999年的49個年度內，僅人民治黃初期的1951、1955年凌汛在利津王莊、五莊曾決口兩次，有7個年度未封凍，在封凍年度中封凍最上首達河南省鄭州市滎陽縣汜水河口，封凍長度最長 $703\text{km}$ （1968-1969年度）。分析原因主要是，1960年三門峽水庫建成運用，為黃河下游防凌河道流量調節創造了有利條件，大大減輕了下游凌情。

1999年小浪底水庫的運用對黃河下游防凌帶來了顯著影響，1999年—2018年的20個年度中，黃河下游有14個年度封凍，有6個年度未封凍，封凍最上界到達荷澤市東明縣王高寨控導，封凍長度最長 $330.6\text{km}$ （2002-2003年度），是1981年以來封河長度最長的年份，期間未發生決口災害。1999年小浪底水庫的運用對黃河下游防凌帶來了顯著影響，主要表現在以下兩個方面：一是可以對下游河道流量進行有效調節。封河期，控制較大流量下泄，形成較高的冰蓋；封河穩定期，控制河道流量小於

封河流量，並保持流量相對穩定；開河期，減少河道流量，促成河道“文開河”，即使局部形成冰塞，由於流量較小，也不至於造成大的危害。二是下泄水流水溫較高，水庫下游產冰、流凌、封河河段縮短。一般凌汛低溫情況下，小浪底水庫出庫水流水溫在 7~9℃，至孫口水文站附近水溫才降至 0℃，造成水庫下游較長河段接近無冰，縮短了黃河下游產冰、流凌、封河河段長度，且下游流凌冰塊尺寸變小、冰質變弱，有效減輕下游凌情。

### 伍、結語

- 1.小浪底水庫運用以來，黃河山東段經歷了先淤後沖的變化過程，黃河山東段河道過洪能力由 1800 m<sup>3</sup>/s 左右提高到 4300 m<sup>3</sup>/s 以上。
- 2.小浪底水庫運用以來，黃河下游發生大洪水的概率明顯減少，而且小浪底水庫充分發揮了調洪错峰作用，大大減輕了下游的防洪壓力，在防洪減災方面發揮了綜合效益。
- 3.小浪底水庫運用以來，對黃河下游防凌帶來了顯著影響，對下游河道流量進行有效調節，並保持河道流量相對穩定，減小了凌災的發生。同時下泄水流水溫較高，造成水庫下游較長河段接近無冰，縮短了黃河下游產冰、流凌、封河河段長度，有效減輕下游凌情。
- 4.小浪底水庫運用以來，可有效控制下游河道水量，基本解決下游防凌問題。但受小流量封河、跨流域調水和突發事件等因素影響，下游防凌仍面臨許多新的問題，需要採取多種措施，確保防凌安全。
- 5.小浪底水庫運用以來，可有效控制上大型洪水對下游河道的威脅，減輕了下游河道的防洪壓力。但小浪底水庫以下有 1.8 萬 km<sup>2</sup> 的無工程控制區，如果降水發生在這個區域，當花園口站發生超過 30 年一遇的洪水時，就可能運用東平湖分洪，我省陽谷縣陶城鋪以下的窄河段就可能達到或接近防洪標準，山東黃河防洪形勢依然嚴峻。

### 參考文獻

- 1.梁建鋒.李祚謨.張鵬.戴明謙. 2010, 「黃河山東段水沙特性及沖淤分析[J]」, 人民黃河, 第 32 卷, 第 6 期, 第 42-45 頁。

### 圖與表

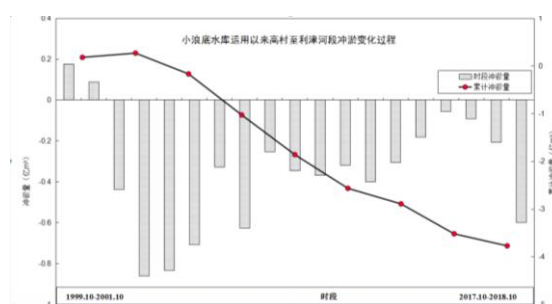


圖 1 小浪底水庫運用以來高村至利津河段沖淤變化情況

## 不同倒懸角琴鍵堰模型泄流特性數值類比研究

李珊珊<sup>1</sup>、李國棟<sup>2</sup>、薑鐸<sup>3</sup>、苗洲<sup>4</sup>

### 摘要

琴鍵堰是二十一世紀初發明的一種新型迷宮堰，通過上下游倒懸的設計使其相較于傳統迷宮堰其占地面積大大減小，從而拓寬了工程應用範圍，有效的解決了水庫泄流能力不足等問題。為了探討琴鍵堰重要體型參數之一——倒懸角，對其泄流能力的影響，本文採用數值模擬技術，建立了五種倒懸角度不同的琴鍵堰數學模型，進行了基於VOF自由面捕捉的全三維紊流數值模擬。結果表明：不同琴鍵堰模型的倒懸角度越大，其泄流能力越強，超泄比也越大；進一步分析各溢流前緣泄流能力發現，隨著堰上水頭的增加，各模型的側面溢流前緣的泄流量雖然也在增加，但其泄流效率卻是不斷減小的。

**關鍵字：**琴鍵堰、數值模擬、倒懸角、超泄比、泄流效率

---

基金项目：国家自然科学基金项目(51579206)；陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JM5201)；陕西省水利厅科技计划项目(2017slkj-17)

<sup>1</sup> 李珊珊，西安理工大学，西北旱区生态水利国家重点实验室，博士研究生

<sup>2</sup> 李国栋，西安理工大学，西北旱区生态水利国家重点实验室，教授，博士研究生导师，博士，E-mail: [gqli2008@xaut.edu.cn](mailto:gqli2008@xaut.edu.cn)

<sup>3</sup> 姜铎，西安理工大学，西北旱区生态水利国家重点实验室，硕士研究生

<sup>4</sup> 苗洲，陕西省水利电力勘测设计研究院

## 壹、前言

近年來，防洪安全成為當前社會各界所關注的一大焦點問題。我國許多在建或已建泄水建築物在運行過程中面臨著洩洪能力等不足的問題。洩洪設施的安全運行直接關係到整個國民安全與經濟利益，一旦失事後果將不堪設想。

迷宮堰通過堰軸線的鋸齒形曲折，使溢流前緣比直線堰增長了數倍，因此相對於寬頂堰、實用堰、駝峰堰等直線堰，其泄流能力也隨之增長了數倍。1984年郭子中<sup>[1]</sup>教授最早將迷宮堰引入國內，隨後張志軍，何建京等<sup>[2]</sup>對迷宮堰水力特性進行了較為系統的試驗研究，給出了流量係數關係曲線。此外其他學者也對迷宮堰進行了研究，取得了一系列成果<sup>[3-7]</sup>。但到目前為止，國內外在實際工程中對迷宮堰的使用並不廣泛，主要因為迷宮堰基礎較大，很難直接應用到大壩或者地形受限的溢洪道。然而琴鍵堰<sup>[8]</sup>作為一種新型的自由式迷宮堰，它利用向上游和下游倒懸的設計，不僅保留了較長的溢流前緣，同時大大減小了所需的基礎，完美的解決了這一重大問題。

2006年法國古勒爾大壩上<sup>[9]</sup>建成了世界上的首座琴鍵堰溢洪道(圖1)，此琴鍵堰的泄流能力是直線堰的4倍。Malarce<sup>[10]</sup>大壩的琴鍵堰是在傳統溢洪道上改造，使得洪水流量從 $4000\text{ m}^3/\text{s}$ 提高到了 $4600\text{ m}^3/\text{s}$ 。國內外相關研究表明，琴鍵堰在泄流方面擁有較大的優勢，其單寬流量的適應範圍可超過 $100\text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ <sup>[11]</sup>。Leite Ribeiro<sup>[12,13]</sup>，Kabiri-Samani A<sup>[14]</sup>提出了兩種描述琴鍵堰泄流能力的方法，而Machiels<sup>[15]</sup>提出了按入口、出口、側向三部分分別疊加計算泄流量的辦法。本文利用數值模擬技術，首先分析了不同倒懸角模型的琴鍵堰的總泄流能力隨其堰上水

頭的變化規律。其次，沿用Machiels的研究思路，進一步對各模型琴鍵堰入口，出口以及側面的溢流前緣泄流情況進行了深入的計算比較，探索琴鍵堰倒懸角影響其泄流能力的內在因素，為將來琴鍵堰的體型標準設計提供參考。

## 貳、琴鍵堰數值模型建立和網格

### 劃分

#### 一、琴鍵堰的模型尺寸

本文共設計了5種不同的琴鍵堰，其倒懸角度的正切值( $\tan S_i$ )分別為0.33、0.35、0.4、0.45和0.5，對應的上下游倒懸長度分別為0mm、30mm、60mm、90mm和120mm。其餘體型參數均相同，均為120mm的堰高 $P$ 、500mm的堰寬 $W$ 及兩進兩出的對稱宮室。進口寬度 $W_i$ 和出口寬度 $W_o$ 相等，忽略壁厚 $T_s$ ，進口倒懸角相等( $S_i = S_o$ )。具體參數見表1。

#### 二、計算網格劃分

為了更具體、準確的描述琴鍵堰過堰水流的有關水力特性，我們使用Gambit軟體對琴鍵堰進行建立模型以及網格劃分，用Fluent軟體對其進行三維數值模擬計算。為了在保證計算精度和品質的同時節省計算時間，對上游庫區段和下游河道段這種比較規則的區域採用六面體矩形網格，劃分網格時加入比例因數，使靠近琴鍵堰段水流流態比較複雜區域的網格密度大於上下游區域的網格密度。對於琴鍵堰堰體部分，採用楔形五面體來進行劃分，同時避免網格角度過小等。網格劃分如下圖2所示。

## 參、模型選擇及邊界條件設置

### 一、數學模型的選擇

為了得到較為準確的計算結果，需要結合實際的情況，選擇恰當的數學模型。通過計算分析比較，決定使用 standard k- $\epsilon$  湍流模型，結合 VOF 法捕捉自由水面，從而對琴鍵堰三維流場進行計算模擬。

### 二、邊界條件設置

上游庫區水流進口邊界採用壓力進口，給定自由液面高程，使進口邊界條件滿足靜水壓力分佈  $p = \gamma H$ 。而空氣進口則設置為壓力進口條件，大小為大氣壓強。出口邊界設置為壓力出口，且壓力為 0，也就是說下游河道出口設置為自由出流。邊壁設置為固定無滑移的實體牆，與實際實驗吻合。

## 肆、計算結果分析

### 一、不同倒懸角琴鍵堰泄流能力比較

經過數值模擬計算，得到不同倒懸角的琴鍵堰在不同堰上水頭時的泄流量，結果見圖 3，可以看出，隨著相對堰上水頭  $H/P$  的增大，五種不同倒懸角琴鍵堰的泄流量都隨之提高，在水頭較小即  $H/P < 0.2$  時，各個琴鍵堰泄流量基本接近，但隨著水頭的升高，各個泄流量的差距會越來越大。

圖 4 是五組不同倒懸角琴鍵堰的相對泄流量百分數與相對堰上水頭之間的關係，相對泄流量百分數的計算式為  $R = \frac{Q - Q_{0.33}}{Q_{0.33}} \times 100\%$ 。從

圖中可以看出，隨著堰上水頭的增加，曲線基本走向一致， $\tan S_i = 0.5$  的琴鍵堰與其他四種琴鍵堰相比，其 R 值最大，所以泄流量也是最多的，尤其當相對堰上水頭  $H/P = 0.68$  時， $\tan S_i = 0.5$  的琴鍵堰的泄流量要比  $\tan S_i = 0.33$  時多出近 25%。

在薄壁堰中，堰流公式為：

$$Q_s = C_s W \sqrt{2g} H^{1.5} \quad (1)$$

式中： $C_s$  是流量係數。對於標準的直線薄壁堰， $C_s$  可用 Rehbock 或巴贊公式計算，也近似等於恒定的常數，即  $C_s = 0.42$ 。下面將直線薄壁堰和琴鍵堰類比模型的泄流量繪在一起，見圖 5，可以明顯看出琴鍵堰的泄流量比薄壁堰一直都大很多，最開始時比較接近，但隨堰上水頭的增加，琴鍵堰泄流量與薄壁堰的泄流量之間的差距逐漸拉大。

瑞士 Leite Ribeiro 等人[12]提出琴鍵堰超泄比  $r$  的概念，來描述琴鍵堰的超泄能力，即用琴鍵堰泄流量除以相同堰上水頭下薄壁堰的泄流量。

$$r = \frac{Q_p}{Q_s} \quad (2)$$

式中： $Q_p$ 、 $Q_s$  分別表示為琴鍵堰和薄壁堰的泄流量。利用式 (1) 和式 (2) 繪製圖 6，從圖中可以看出，雖然隨著堰高的增加，琴鍵堰的泄流量增加的比同樣情況下薄壁堰增加量要多，可是泄流放大比卻是在減小，也就是說增長率相較於薄壁堰在減小，雖然有所減小，但是超泄比始終大於 1.5，理論上將無限接近於 1，而在低水頭下，琴鍵堰的超泄比幾乎就等於它們的溢流前緣長度比。此外還可以看出，隨著堰上水頭的增加，倒懸角度越大，超泄比也越大，在相對水頭  $H/P = 0.68$  時， $\tan S_i = 0.5$  琴鍵堰模型的泄流效率也是最大的，與直線堰相比，此時的泄流效率還能達到 2 倍之多，可見琴鍵堰在泄流方面的優勢是非常突出的。

### 二、琴鍵堰各部分溢流前緣的泄流能力分析

本文分析的主要思路是將琴鍵堰各部分溢流前緣分別進行研究，具體做法是：首先根據



水流下泄時所經過的琴鍵堰各不同溢流前沿的特點，將總的泄流量分成側面溢流前沿、進口溢流前沿和出口溢流前沿三個部分泄流量；即我們認為琴鍵堰的總泄流量為側面泄流量、進口泄流量以及出口泄流量之和。接著我們從計算模型中選出各個溢流前緣部分所包含的計算區域面，進一步對各區域面通過的流量進行面積積分，從而得到三個相應部分的泄流量。最後再依次計算側面單寬流量、進口宮室單寬流量、出口宮室單寬流量等。

圖 7 (a)、8 (a)，分別是工況  $\tan S_i=0.33$  與  $\tan S_i=0.5$  時各部分溢流前緣的泄流量曲線，可以看出三個溢流前緣的流量隨著堰上水頭的增加而不斷增加，不論是哪一種工況，側面溢流前緣的流量始終都是最大的，而且倒懸比較大的工況下泄流量也較大。圖 7 (b)、8 (b) 表明這兩種工況下，側面溢流前緣的泄流所占琴鍵堰總泄量百分比都是最大的，說明琴鍵堰較強的泄流能力主要體現在側面溢流前緣泄流能力的出眾，但隨著堰上水頭的增加，側面所占百分比在不斷的減小，說明隨著水頭的增加，對側面的泄流有抑制的作用。由圖 7 (c)、8 (c) 可知在低水頭時各溢流前緣上的單寬流量大致相當，此時泄流效率最高，而隨著水頭的增高，由於總體流量的增加，所以所有溢流前緣的單寬流量都在增加但是側面的單寬流量增加較為緩慢。從圖 7 (d)、8 (d) 中可以看出對於側面溢流前緣而言，隨著堰上水頭的逐漸增加，其泄流的效率在不斷減小，且減小的幅度比較大，而對於出口宮室的溢流前緣，隨著堰上水頭的逐漸增加，它的泄流效率沒有明顯的變化，對應的，進口宮室溢流前緣則隨著堰上水頭的增加泄流效率有點稍微的下降，不過總體上來說，其變化幅度也比較小。

圖 9 是五種不同倒懸角工況下，隨著堰上水頭的增加，琴鍵堰各部分溢流前緣的泄流量

占其總流量百分數。由圖 9 (a) 可以看出，五種不同倒懸比工況下琴鍵堰側面溢流前緣流量占總泄流量的百分數在隨著堰上水頭的增加而逐漸減小，具體來說， $\tan S_i=0.33$  的琴鍵堰體型側面溢流前緣泄流量所占總泄量百分數隨堰上水頭的增加而減少的最多， $\tan S_i=0.5$  的琴鍵堰體型在同樣情況下則減少的是最少的。由圖 9 (b) 可以看出，在五種工況隨著堰上水頭的增加，總體上來看，琴鍵堰進口宮室溢流前緣泄量占總泄流量的百分數均以相對平緩的趨勢逐漸增加，增加的幅度也都比較小，增加最多的是工況為  $\tan S_i=0.33$  的琴鍵堰體型，其增加的幅度也不超過 25%，其餘工況增幅基本在 15%—20% 左右。由圖 9 (c) 可知，出口宮室溢流前緣流量占琴鍵堰總泄流量的百分數隨著堰上水頭的不斷增加均在逐漸增加，但增加的幅度不是很明顯。具體看來，在堰上水頭較低的情況下，五種倒懸比工況下出口宮室溢流前緣流量占琴鍵堰總泄流量的百分數基本是一致的，均為 20% 左右，但是隨著堰上水頭達到中高水頭時，各工況增加的幅度差異則相對來說比較明顯，倒懸角正切值為 0.5 的體型工況所占的百分比最小，約為 25% 左右，而  $\tan S_i=0.33$  體型工況所占的百分比最大，約為 30% 左右。

圖 10 是五種不同倒懸角工況下琴鍵堰各部分溢流前緣泄流效率與堰上水頭之間的關係曲線圖。由圖 10 (a) 可以看出，在不同倒懸比工況下五種琴鍵堰體型的側面溢流前緣的泄流效率是當相對水頭不斷增加時均在逐漸的減小，引起這種現象的主要是由於在堰上水頭增加的情況下，造成了琴鍵堰的淹沒出流現象，從而抑制了側面溢流前緣的出流。但從整體上來看在  $\tan S_i=0.5$  的琴鍵堰體型的泄流效率還是要高於  $\tan S_i=0.33$  琴鍵堰體型的泄流效率，當相對水頭  $H/P=0.68$  時， $\tan S_i=0.5$  的琴鍵堰體型的泄流效率比  $\tan S_i=0.33$  的體型泄流效率高約 30%。由圖 10 (b) 可以看出，五種不同倒懸比

工況下琴鍵堰進口宮室溢流前緣的泄流效率隨著堰上水頭的增加的變化趨勢基本和 10(a) 相一致，也是隨著堰上水頭的增加，各工況下琴鍵堰泄流效率不斷的減小，但是依然有  $\tan S_i=0.5$  的琴鍵堰體型的進口溢流前緣的泄流效率要依然會比其他的體型大一些的趨勢。由圖 10(c) 可以看出，隨著堰上水頭的增加，琴鍵堰出口宮室溢流前緣泄流效率總體上是下降的，其下降的範圍為 0.8-1.3，且在堰上水頭變化的過程中，倒懸比  $\tan S_i=0.5$  的琴鍵堰體型出口溢流前緣的泄流效率較其他體型的泄流能力是最大的。

## 伍、結論

本文針對琴鍵堰的重要體型參數之一——倒懸角，建立了五種除倒懸角度不同外，其他參數均相同的琴鍵堰數學模型，試圖從倒懸角這一單一變數入手，研究其對琴鍵堰泄流能力的影響。主要研究了琴鍵堰泄流量與堰上水頭的關係、相較於薄壁堰的超泄能力以及各部分溢流前緣在五種不同倒懸角工況下的泄流量、泄流效率等隨著堰上水頭的增加各過流特性的變化差異。

結果表明，(1) 倒懸角度越大，其泄流能力越強，當相對堰上水頭  $H/P=0.68$  時， $\tan S_i=0.5$  的琴鍵堰要比  $\tan S_i=0.33$  時多出近 25% 的泄流量；(2) 倒懸角越大，超泄比越大，在相對水頭  $H/P=0.68$  時， $\tan S_i=0.5$  的琴鍵堰體型的泄流效率最高，此時的超泄比仍能達到 2 倍之多；(3) 通過對琴鍵堰側面，進口和出口溢流前緣流量的分析，發現隨著堰上水頭的升高，側面溢流前緣的泄流量雖然在增高，但其泄流效率是不斷減小的。總的來說，倒懸角度的增大在一定程度上能夠提高琴鍵堰的泄流能力，分析其主要原因是在同一堰上水頭下，隨著倒懸角度的增加，琴鍵堰進、出口溢流前緣的泄流量

變化相對較小，而側面溢流前緣的泄流量增加較多，這直接導致了琴鍵堰總泄流量的大量增加，但隨著堰上水頭繼續的增大，下游會逐漸形成淹沒出流，從而抑制側面溢流前緣的泄流能力，使得琴鍵堰的泄流效率開始下降慢慢下降。本文每個數學模型的上下游倒懸角相等，以後會進一步考慮不相等情形，以及進一步擴大研究倒懸角正切值的範圍。

## 參考文獻

1. 郭子中·「迷宮堰的水力特性及其設計」[J]·砌石壩技術.1984(3)·
2. 張志軍，何建京·「迷宮堰水力特性的試驗研究」[R]·中小型工程水力學討論集，1985·
3. 馬法三·「迷宮堰研究成果綜述」·河海科技進展[J].1994.(3)：31~33·
4. 王仕筠，林劍青·「迷宮堰的水力計算與應用」[J]長江科學院報，2000(3)：5—9·
5. 曾甄·「迷宮堰水力特性綜合研究及其應用」[D].河海大學碩士論文.2004:33-39.
6. 彭新民，崔廣濤，賈樹寶·「迷宮堰泄流能力及水力特性的實驗研究」[J].天津大學學報,2003(11).
7. 孫雪林·「迷宮堰水力特性的模型試驗研究」[D].瀋陽農業大學碩士論文.2007.
8. Lempérière, F., and Ouamane, A. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways[J]. Hydropower & Dams, 2003, 7 (5): 144-149.
9. Laugier, F. Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam[J]. Hydropower & Dams, 2007,14 (5): 94-101.
10. F.Laugier, J. Vermeulen, V. Lefebvre. Overview of Piano key Weirs experience developed at EDF during the past few year[C].Proceedings of

the second International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs 2013, Chatou Paris, France, 2013.12.

11. Laugier, F. Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam [J]. *Hydropower & Dams*, 2007, 24(5):93-101.
12. Leite Ribeiro M, Pfister M, Schleiss A J, et al. Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2012, 50(4): 400-408.
13. Leite Ribeiro, M. Bieri, J.L., Boillat, A. J. Schleiss, G. Singhal and N. Sharma. Discharge Capacity of Piano Key Weirs [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 2012.138(2):199-203.
14. Kabiri-Samani A. & Javaheri. Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key Weirs[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2012, 50(1):114-120.
15. Olivier Machiels, Michel Piroton,

Archambeau Pierre. Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs[J]. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 52, 2014 (3): 326-335

圖與表



圖 1 法國 Goulours 大壩上建成的琴鍵堰<sup>[9]</sup>

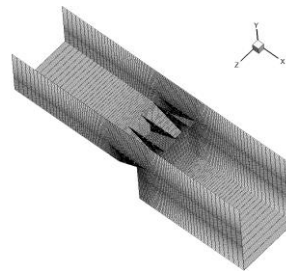


圖 2 琴鍵堰模型整體網

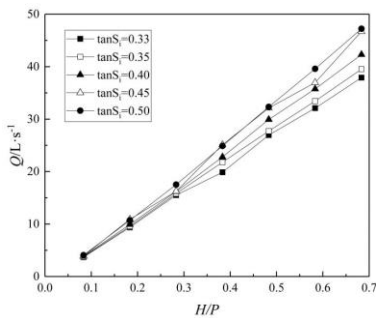


圖 3 五組不同倒懸角下琴鍵堰泄流量與堰上水頭關係

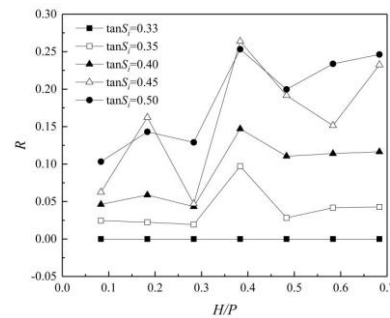


圖 4 五組不同堰高下琴鍵堰相對泄流量百分數與堰上水頭關係

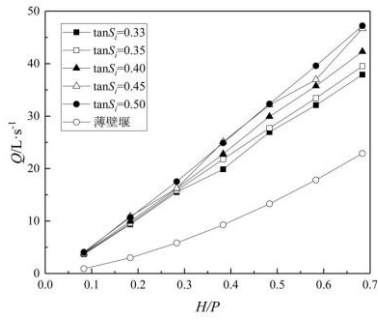


圖 5 不同倒懸角下琴鍵堰和薄壁堰泄流量與堰上水頭關係

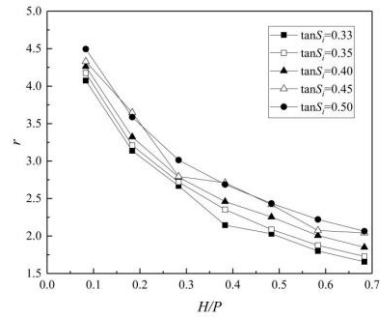


圖 6 五組不同倒懸角下琴鍵堰超泄比與堰上水頭關係

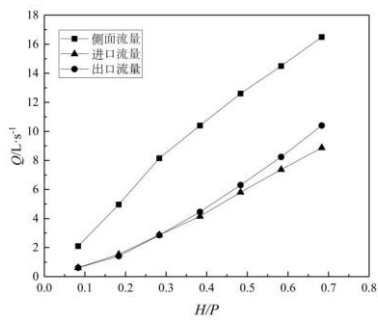


圖 7 (a) 各部分溢流前緣的泄流量曲線

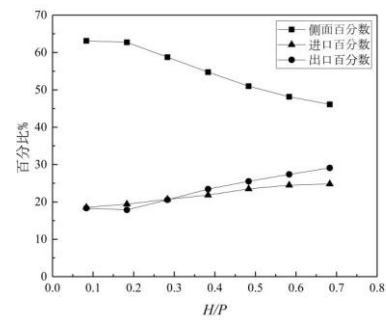


圖 7 (b) 各部分溢流前緣的泄流量所占百分比曲線

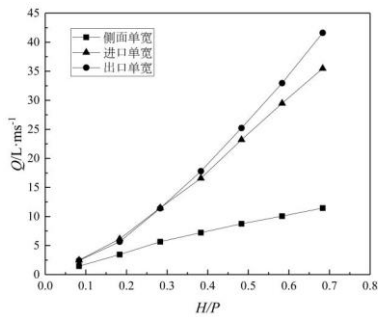


圖 7 (c) 各部分溢流前緣的單寬流量曲線

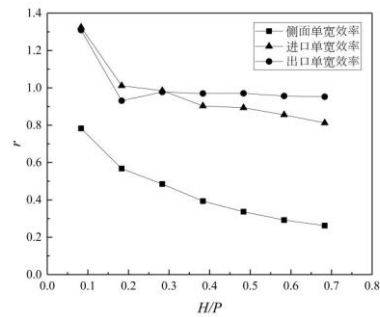


圖 7 (d) 各部分溢流前緣的泄流效率曲線

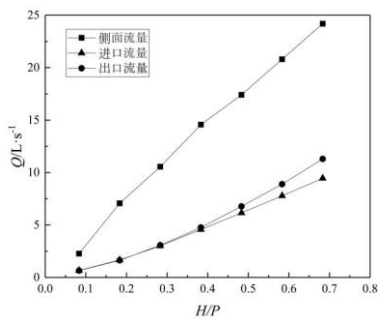


圖 8 (a) 各部分溢流前緣的泄流量曲線

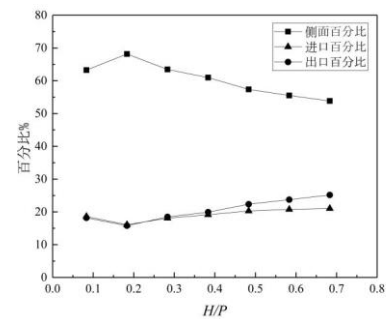


圖 8 (b) 各部分溢流前緣的泄流量所占百分比曲線

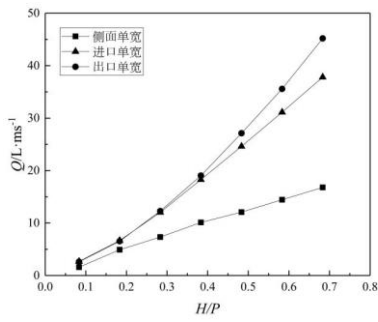


圖 8 (c) 各部分溢流前緣的單寬流量曲線

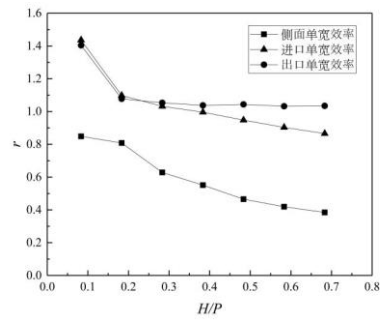


圖 8 (d) 各部分溢流前的緣泄流效率曲線

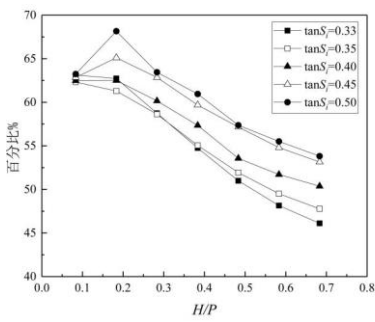


圖 9 (a) 側面溢流前緣泄流量所占百分數

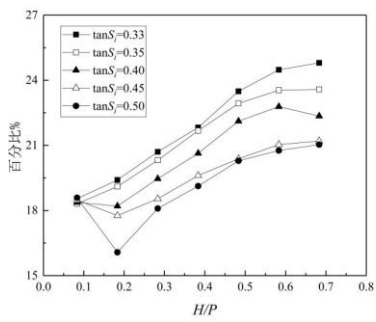


圖 9 (b) 進口宮室溢流前緣泄流量所占百分數

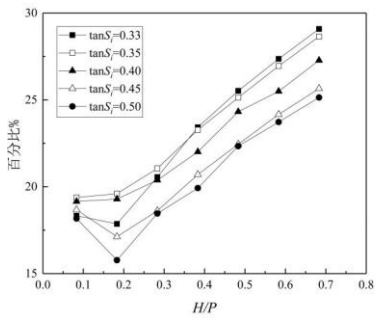


圖 9 (c) 出口宮室溢流前緣泄流量所占百分數

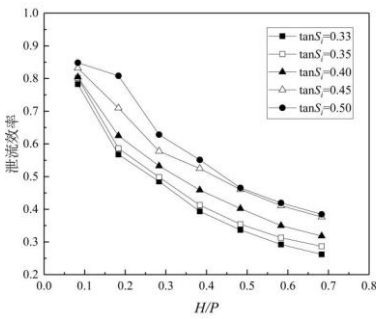


圖 10 (a) 側面溢流前緣泄流效率

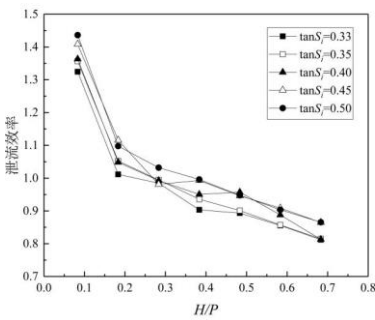


圖 10 (b) 進口宮室溢流前緣泄流效率

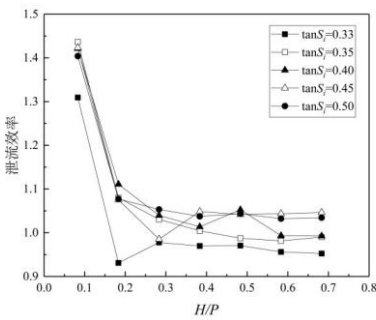


圖 10 (c) 出口宮室溢流前緣泄流效率

表 1 不同倒懸角琴鍵堰模型尺寸表 單位(mm)

計算工況	$P$	$W_o$	$W_i$	$\tan S_i$	$B_o$	$B_i$	$B$
1	120	125	125	0.33	0	0	360
2	120	125	125	0.35	30	30	360
3	120	125	125	0.4	60	60	360
4	120	125	125	0.45	90	90	360
5	120	125	125	0.5	120	120	360

## 夯實水泥土樁處理濕陷性黃土的工程應用

仇道健<sup>1</sup>、湯慧卿<sup>2</sup>、吳向東<sup>3</sup>、孫海建<sup>4</sup>

### 摘要

夯實水泥土樁是用人工或機械成孔選用相對單一的土質材料與水泥按一定配比在孔外充分拌和均勻製成水泥土分層向孔內回填並強力夯實製成均勻的水泥土樁與樁間土及與墊層一起形成複合地基的一種地基處理方法。該樁法適用於處理地下水位以上的粉土、素填土、雜填土、粘性土等地基，但應用於濕陷性黃土地基處理工程實例較少。目前濕陷性黃土地基處理多以換填、強夯、灰土擠密等方法進行處理。本文依託濕陷性黃土地區工程實踐介紹了夯實水泥土樁的設計、施工及檢測方案，對處理效果進行總結同時提出了改進方案。

**關鍵字：**夯實水泥土樁 複合地基 濕陷性黃土 原位檢測

---

<sup>1</sup> 黃河勘測規劃設計研究院有限公司+高級工程師、註冊土木工程師（岩土）

<sup>2</sup> 中國水北方勘測設計研究有限責任公司+高級工程師

<sup>3</sup> 黃河勘測規劃設計研究院有限公司+高級工程師

<sup>4</sup> 河南省電力勘測設計院+教授級高工程師、註冊土木工程師（岩土）

## 壹、夯實水泥土樁概述

夯實水泥土樁法是將水泥和土按設計的比例拌和均勻，在孔內夯實至設計要求的密實度而形成的加固體，並與樁間土組成複合地基的地基處理方法。樁、樁間土和褥墊層一起形成複合地基。夯實水泥土樁作為中等粘結強度樁，不僅適用於地下水位以上淤泥質土、素填土、粉土、粉質黏土等地基加固，對地下水位以下情況，在進行降水處理後，採取夯實水泥土樁進行地基加固，也是行之有效的一種方法。夯實水泥土樁通過兩方面作用使地基強度提高，一是成樁夯實過程中擠密樁間土，使樁周土強度有一定程度提高，二是水泥土本身夯實成樁，且水泥與土混合後可產生離子交換等一系列物理化學反應，使樁體本身有較高強度，具水硬性。處理後的複合地基強度和抗變形能力有明顯提高。

## 貳、夯實水泥土樁的技术特点

1、成孔機械簡便多樣。其成孔可採用人工成孔或機械成孔。機械成孔可採用螺旋鑽成孔、機械洛陽錐成孔、夯擴機或擠土機成孔。夯實機具有簡便、輕巧、靈活特點，且多採用人工夯錘、夾板式夯實機，吊錘式夯實機，採用機械進行夯實，施工品質便於控制，施工速度快。

2、成樁材料成本低。不使用鋼筋、碎石、砂等材料，其主要材料為土，輔助材料為水泥。可以採用成孔挖出的開挖料作為夯填料，水泥使用量為土的 $1/8-1/4$ ，故該項工藝成本低廉，且形成的中等粘結強度的剛性樁體，其單方成本為混凝土樁的 $1/5-1/2$ ，具有很高的性價比。

3、綠色環保、無污染。該項工藝避免了常規樁基礎施工的噪音，以及污染排放對環境的污染。施工中無噪音、無污染排放，施工完畢後不產生廢棄物和建築垃圾。

4、水泥土樁具有較好抗凍性，成樁後凍結對樁體不產生較大的強度降低。

5、適應性強，適用性廣。該項工藝可應用於多種鬆散、軟弱地基的工程處理，應用該技術對地基進行加固和改良，可大幅度提高地基承載力並且減少地基變形，被廣泛應用於工

業與民用建築、公路交通工程的地基處理。

6、品質容易控制。現場成孔成樁多採用機械操作，易於掌握和控制，此外，拌和料現場拌和，可按設計要求監理和監督。

7、承載力高、變形量小。經夯實樁處理的工程，承載力均有大幅度提高，一般可提高 $50\%-100\%$ ；變形量有明顯的減少，地基的不均勻沉降很小。

## 參、夯實水泥土樁的受力特性

夯實樁形成中等粘結強度樁，屬於半剛性樁複合地基。應設置褥墊層，通過褥墊層調整作用，保證複合地基中樁土共同承擔荷載。

夯實樁複合地基主要是通過樁體置換作用來提高地基承載力。當天然地基承載力小於 $60\text{kPa}$ 時，可考慮夯填施工對柱間土擠密作用。

### 1 夯實樁受力特點

夯實樁具有一定的強度，在垂直荷載作用下，樁身不會因側向約束不足發生膨脹破壞，樁頂荷載可以傳入較深的土層中，從而充分發揮樁側阻力作用。但由於樁身強度不大，樁身仍可發生較大的壓縮變形。

由於樁身的可壓縮性，樁的承載力發揮要經歷樁身逐段壓密，側阻力逐漸發揮，最後才是樁端承載力開始發揮的過程。

### 2 樁土應力比

隨著荷載的增加，樁土應力比增加，曲線呈上凸形，至樁身屈服破壞時，樁土應力比達到峰值，可以認為樁體達到極限荷載。在樁身屈服後，樁土應力比隨著荷載的增加而降低，並漸趨於較穩定的數值。說明在水泥土樁複合地基中，水泥土樁體的破壞將引起整個複合地基的破壞。

## 肆、工程应用实例

某建築物由2棟高層建築組成，均為地上23層，地下1層，高度80m。工程場地位於豫西丘陵邊緣的黃土原前沖積平原。

勘察結果表明工程場地為I級（輕微）非自重濕陷性黃土場地，濕陷深度10m，天然地基不能滿足建築物的要求，擬採用夯實水泥土樁進行複合地基處理。



## 一. 地基土構成與特徵

勘探深度範圍內揭露土層可分為 8 層，表層為素填土，②層為新近堆積黃土狀粉土 ( $Q_4^{2al+pl}$ )，③層為第四系全新統沖洪積 ( $Q_4^{1al+pl}$ ) 黃土狀粉質黏土，④~⑨層為第四系上更新統沖洪積 ( $Q_3^{al+pl}$ ) 黃土狀粉質黏土、粉土及碎石土。

①新近堆積 ( $Q_4^{2al+pl}$ )：淺黃、褐黃色。岩性為黃土狀粉土，局部夾粉砂或粉質黏土薄層。含零星磚瓦塊。孔隙發育，孔徑 0.5~1.0mm，蟲孔 2~3mm。搖振反應中等~迅速，幹強度、韌性均低。濕，稍密。中偏高—高壓縮性土。層厚 1.0~3.8m，層頂標高 148.54~151.58m，普遍分佈。

②黃土狀粉質黏土 ( $Q_4^{1al+pl}$ )：灰黃、灰褐色。偶見青灰色碎瓦塊。塊狀結構，易碎裂。孔隙較發育~發育。可塑為主。切面稍光滑，幹強度、韌性中等。中壓縮性土。層厚 2.0~2.3m，層頂標高 147.14~147.79m，普遍分佈。

③黃土狀粉質黏土 ( $Q_3^{al+pl}$ )：褐黃色。含零星鈣質結核，核徑一般 5~10mm。具裂隙，裂隙面見鐵錳質渲染。孔隙較發育。可塑。切面稍光滑，幹強度、韌性中等。中壓縮性土。層厚 1.6~2.3m，層頂標高 145.01~145.49m，普遍分佈。

④黃土狀粉質黏土 ( $Q_3^{al+pl}$ )：紅黃色。含零星鈣質結核，局部富集，核徑 30mm 左右。垂直、斜交裂隙發育，裂隙面見黑色錳質薄膜，塊狀結構。孔隙不甚發育。可~硬塑。切面稍光滑~光滑，幹強度、韌性中等。中偏低壓縮性土。層厚 1.6~2.2m，層頂標高 142.97~143.59m，普遍分佈。

⑤黃土狀粉質黏土 ( $Q_3^{al+pl}$ )：褐黃色。局部夾粉土薄層。含零星鈣質結核，核徑一般 20~40mm，層底含量較多。孔隙較發育。可塑為主。切面稍有光滑，幹強度、韌性中等。中偏低壓縮性土。層厚 0.5~5.2m，層頂標高 140.91~141.44m。普遍分佈。

⑥黃土狀粉質黏土 ( $Q_3^{al+pl}$ )：紅黃、黃褐色。局部夾粉土或粉砂薄層。含零星鈣質結核。孔隙較發育。可塑為主。切面稍有光滑，

幹強度、韌性中等。中偏低壓縮性土。層厚 3.2~4.3m，層頂標高 136.17~136.64m。普遍分佈。

⑦黃土狀粉土 ( $Q_3^{al+pl}$ )：褐黃色。局部夾薄層粉質黏土。含 5~20% 的礫卵石，局部較多，一般粒徑 10~40mm，大者 80mm 左右。孔隙較發育。濕~飽和，稍密。搖振反應迅速，幹強度、韌性均低。中偏高壓縮性土。層厚 1.6~4.2m，層頂標高 132.18~133.27m。局部分佈。

⑧卵(礫)石 ( $Q_3^{al+pl}$ )：褐黃色。岩性以石英砂岩、石英岩為主。亞圓形。微風化。一般粒徑 10~45mm，大者 80mm。卵(礫)石含量約 55~60%。級配一般，均勻性差，部分為圓礫或礫砂。個別孔段有漏水、漏漿現象。填隙物主要為粘性土，混少量砂。飽和，稍密~中密。低壓縮性土。層厚 0.6~1.7m，層頂標高 127.98~131.87m。普遍分佈。

⑧I 粉砂 ( $Q_3^{al+pl}$ )：褐黃、淺黃色。礦物成分以石英、長石為主，砂質不純，含 5~20% 砂結石塊或礫卵石。濕~飽和，中密。中偏低壓縮性土。層厚 0.7~1.7m，層頂標高 131.68~132.94m。

⑨卵石 ( $Q_3^{al+pl}$ )：灰黃色。岩性以石英砂岩、石英岩為主，次為火成岩類。亞圓形為主。微風化。一般粒徑 30~60mm，大者 100~120mm。卵石含量約 60~70%。級配一般，均勻性較差，局部為圓礫。個別孔段有漏水、漏漿現象。填隙物主要為砂，混少量粘性土。飽和，中密。低壓縮性土。該層普遍分佈，最大揭露厚度為 7.6m，該層頂面一般比較穩定，局部起伏較大，高程 126.88~130.74m，最大高差 3.86m。

各主要地層分佈情況見圖 1。

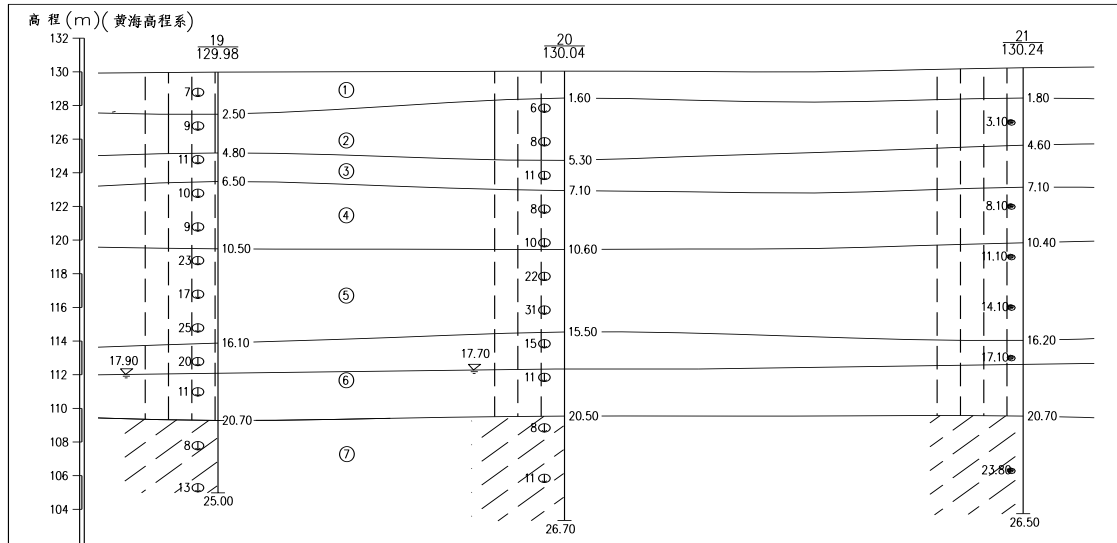


圖 1 工程地質剖面圖

各主要岩土地層物理性質及工程特性指標見表 1。

表 1 各主要岩土地層物理性質及工程特性指標表

地層編號及岩性	含水量 $\omega$ %	濕重 度 $\gamma$ $\text{kN/m}^3$	孔 隙 比 $e$	飽 和 度 $S_r$ %	塑 限 $\omega_p$ %	塑 性 指 數 $I_p$	液性 指 數 $I_L$	粘粒 含 量 $\rho_c$ %	壓縮 模 量 $E_{s1-2}$ MPa	標 貫 擊 數 N	雙橋靜探	
											錐尖 阻 力 $q_c$ MPa	側壁 阻 力 $f_s$ kPa
①新近堆積	13.8	17.2	0.802	50.7	19.4	10.1		18.7	10.0	7	2.8	60.5
②黃土狀粉質黏土	22.9	18.4	0.815	77.2	20.3	13.9	0.25		6.0	7	1.8	79.7
②黃土狀粉質黏土	18.4	18.0	0.779	63.9	19.0	12.0	-0.10		11.0	13	5.1	124.4
③黃土狀粉土	17.0	18.7	0.683	67.5	18.0	9.1		13.2	13.0	12	4.9	140
④黃土狀粉土	18.4	18.4	0.738	67.9	17.4	10.0		13.5	7.0	10	2.5	100.6
⑤黃土(粉土)	11.9	17.1	0.757	43.1	19.5	8.3		8.5	18.0	22	8.9	216.9
⑥黃土(粉土)	23.5	18.7	0.774	82.9	19.4	8.2		8.8	10.0	14	5.8	150.4
⑦粉土	25.8	19.9	0.698	97.7	18.3	8.5		11.4	10.0	12	2.6	106.4

## 二、地下水條件

地下水類型為潛水，水位埋深在 15.60 ~ 21.10m 之間，相應標高為 109.86 ~ 115.93m。

## 三. 地震動參數

工程場地 50 年超越概率 10% 危險水準的地面動峰值加速度為 0.10g，相應的地震基本烈度為 7 度。場地土類型為中硬場地土，建築場地類別為 II 類。

## 四. 黃土的濕陷性

(1) 濕陷程度：在 100kPa、200kPa 壓力下濕陷程度為輕微~中等；在 300kPa、400kPa、500kPa 壓力下濕陷程度為輕微~強烈；

(2) 計算自重濕陷量小於 70mm，場地為非自重濕陷性黃土地；

(3) 在平面上整個場地均有濕陷性土層分佈；在豎向上濕陷性土層的分佈不連續，濕陷性土層主要分佈在層④及以上，層⑤中零星分佈，濕陷土層最大深度在 200kPa、300kPa、

400kPa、500kPa 壓力等級下分別為 11.10m、11.10m、11.30m、11.60m；

(4)在各級壓力下計算總濕陷量均小於 300mm，場地濕陷等級為 I 級（輕微）；

(5)層①、層②濕陷起始壓力小於 100kPa，其餘各層濕陷起始壓力均大於 100kPa。

## 五. 原體試驗設計

地基處理的目的是消除黃土地基的濕陷性，提高地基承载力，提高地基剛度，減小地基變形量。

試驗按樁間距的不同分兩個方案，分別為樁間距 1.25m 方案（以下稱方案一）和樁間距 1.40m 方案（以下稱方案二），以是否完全消除濕陷作為方案最終取捨的首要條件。兩方案同時進行施工，然後進行濕陷性檢測，若方案二能完全消除濕陷，則優先採用方案二。

### 1 試驗位置

試驗位置佈置在兩棟高層中心位置，兩方案試驗區之間的淨間距大於 10m。

### 2 樁位佈置

方案一平面尺寸為 8.63m×5.91m，樁間距為 1.25m；

方案二平面尺寸為 9.60m×6.56m，樁間距為 1.40m。

兩方案均由 6 排共 33 根平面上呈正三角形佈置的夯實水泥土樁組成（見圖 2）。

### 3 樁徑和樁長

兩方案夯實水泥土樁直徑均為 500mm，有效樁長均為 10.00m（進入層⑤大於 1.0m），墊層厚度 300mm，樁頂設計標高為-4.40m，樁底標高為-14.40m。夯實水泥土樁樁頂夯填高度大於設計樁頂標高不小於 0.60m。

### 4 樁體強度及配合比

樁體混合料採用水泥和素土的拌和物。樁體混合料最優含水量、最大幹密度、水泥重量與素土幹重量的比例等根據水泥品種及素土性質通過試驗進行確定，其中水泥重量與素土幹重量的比例採用 1：5。

### 5 施工工藝

夯實水泥土樁採用衝擊成孔，不進行預鑽孔。填料前，孔底夯實；填料時，樁體混合料分層回填夯實，壓實係數不小於 0.97。

夯實水泥土樁施工完畢後，相鄰 3 根樁之間土的平均擠密係數不小於 0.93；最小擠密係數不小於 0.88。

## 六. 原體試驗施工

### 1 施工主要工藝流程

基坑開挖→樁機定位→成孔→填料→夯實→再填料→再夯實，最後填土封口壓實，一根樁即完成，如此往復施工，樁頂鋪設一層褥墊層，褥墊層材料為粗砂，褥墊層厚度 15cm。

### 2 主要控制指標

(1)成孔：採用柴油爆發錘錘擊成孔（錘重 3.2t），採用隔排跳打方式，成孔直徑 400mm。

(2)夯填：填料前，用卷揚吊錘夯實機（錘重 1t）以落距 7~8m 夯底 1 次，再用水泥土料分層夯填，落距 3.0m 左右，每層填料厚度約 700mm，每層夯實 8 錘填至基坑底面。

(3)混合料：水泥採用 P32.5 普通矽酸鹽水泥，土料採用原基坑開挖時層①粉土（去除 0.7m 厚耕植土），土料用碎土機粉碎，混合料幹重量比採用 1:5 拌合均勻，混合料的最優含水量 15.6%，最大幹密度 1.76g/cm<sup>3</sup>，混合料的含水量控制在最優含水量的±2%以內，現場的控制標準是“手握成團，落地開花”。

### 3 施工過程中存在的問題

施工過程中發現在基底下 1.5m（層②）及 6.7m（層④）左右部分孔有輕微縮徑現象，造成夯實機吊錘上下困難，最後採用直徑 400mm 洛陽鏟鑽頭對有縮徑現象的樁孔進行清孔，得以順利夯填。造成縮徑的原因是層②和層④局部含水量較大，土層較軟。

### 4 原體試驗檢測

#### ①檢測順序

施工前先進行勘測，以進一步確定地層分佈。夯實水泥土樁施工的同時進行樁身檢測（動力觸探試驗和鑽芯取土），樁體施工後進行樁間土擠密效果檢驗（探井、靜力觸探測試、標準貫入試驗、濕陷性檢測）。濕陷性檢測發現，兩方案地基的濕陷性均得以消除，則放棄對方案一的後續檢測，採用方案二。

然後對方案二施工浸水孔、浸水，樁施工完成 28 天后開始單樁、複合地基及樁間土靜載荷試驗（3 種靜載荷試驗面標高均為

127.40m，對應地層均為層②黃土狀粉質黏土)，最後部分開挖，檢測樁徑及成樁品質。

②檢測點的佈置、檢測工作量  
檢測點的佈置見圖 2。

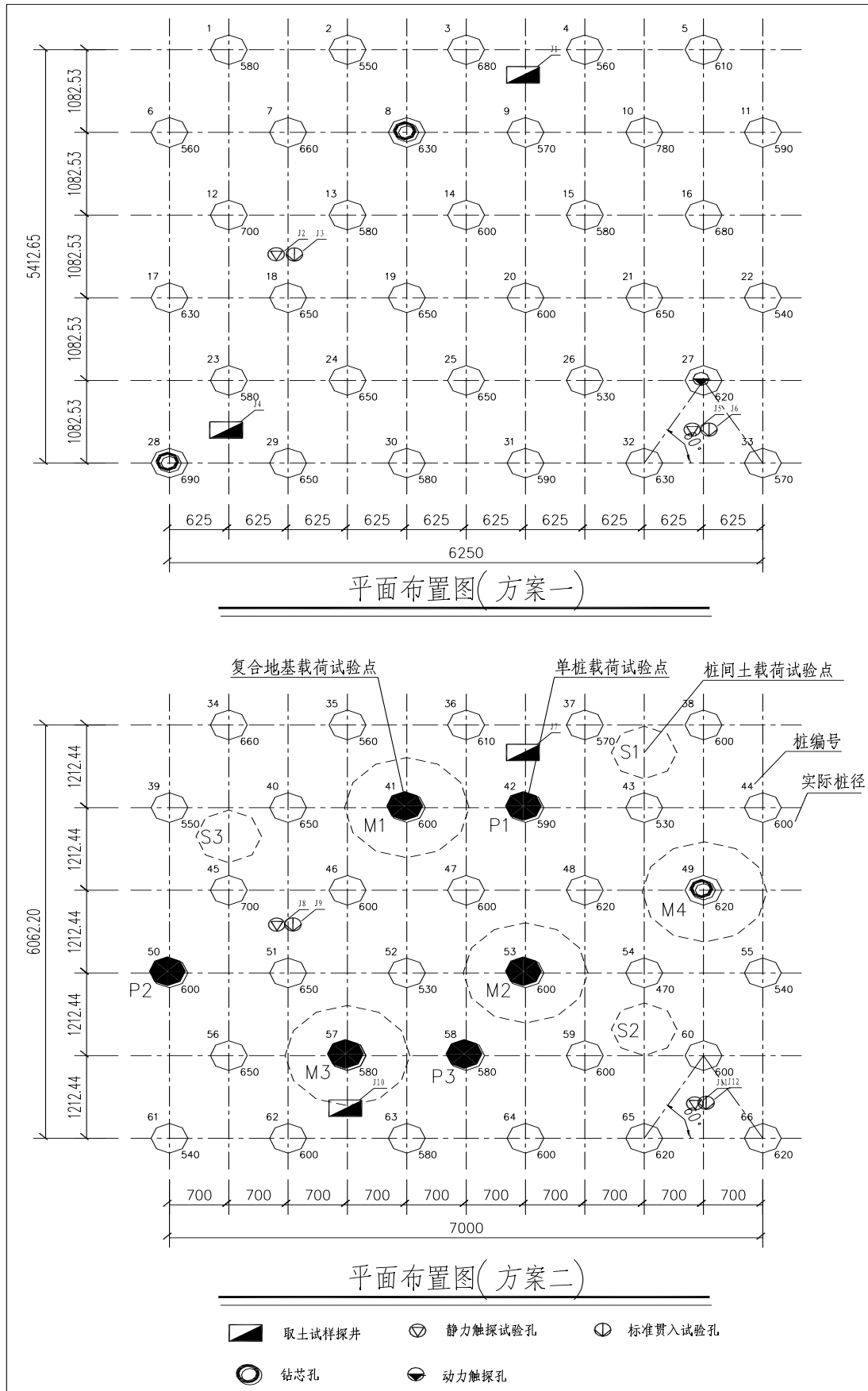


圖 2 原體試驗平面佈置圖 (圖中尺寸單位均為 mm)

具體工作量見表 2。

表 2 本次試驗檢測工作量一覽表

檢測位置	載荷試驗	鑽孔取芯	動力觸探	標準貫入	靜力觸探	探井
單 樁	3 組	3 孔	1 孔	/	/	/
複合地基	4 組	/	/	/	/	/
樁 間 土	3 組	/	/	4 孔	4 孔	4 孔

5 樁體檢測

(1) 樁徑

在載荷試驗前，將試驗平面人工清理到設計標高 127.40m。量測樁頭實際直徑結果見圖 13-2。經計算方案一和方案二樁頭平均直徑分別為 617.3mm 和 594.5mm。

檢測工作結束後，在方案二選擇 41、42 和 47 號三根樁進行開挖，深度 8.00m，每隔 1.00m 進行樁徑量測，其平均樁徑分別為 694mm、570mm 和 574mm，三根樁的平均樁徑為

614mm。

樁頭和抽檢的 3 根樁平均樁徑均超出設計樁徑 500mm 的最小要求，造成夯填量比 500mm 樁徑增大較多。

(2) 壓實係數

根據擊實試驗，在幹重量配合比為 1:5 時混合料最大幹密度  $\rho_{dmax}$  為 1.76g/cm<sup>3</sup>。在樁體施工完成後，抽取 8、28、49 號樁進行了鑽芯取樣，檢測試樣幹密度結果見表 3。

表 3 抽檢樁體幹密度表

8 號樁			28 號 樁			49 號樁		
深度 m	幹密度 g/cm <sup>3</sup>	壓實 係數	深度 m	幹密度 g/cm <sup>3</sup>	壓實 係數	深度 m	幹密度 g/cm <sup>3</sup>	壓實 係數
1.60	1.64	0.94	1.00	1.69	0.97	1.00	1.79	1.02
2.60	1.73	0.99	2.00	1.70	0.97	2.00	1.63	0.93
3.70	1.74	0.99	3.00	1.86	1.06	3.00	1.64	0.94
4.60	1.64	0.94	4.00	1.78	1.02	4.00	1.69	0.97
5.60	1.74	0.99	5.00	1.75	1.00	5.00	1.76	1.01
6.60	1.60	0.91	6.00	1.82	1.04	6.00	1.83	1.05
7.60	1.78	1.02	7.00	1.77	1.01	7.00	1.72	0.98
			8.00	1.75	1.00	8.00	1.61	0.92
			9.00	1.78	1.02	9.00	1.70	0.97
平均值	1.70	0.97	平均值	1.77	1.01	平均值	1.71	0.98

由上表可知各樁的平均壓實係數均大於或等於 0.97，但 8 號樁和 49 號樁均有 3 處壓實係數不滿足不小於 0.97 的設計要求。

(3) 輕型動力觸探成果

在 27 號樁成樁 10 分鐘後，進行了輕型動力觸探試驗。試驗持續進行 1.5h，僅進尺 0.70m，每 10cm 擊數分別為 130、126、158、123、140、214、381，說明樁體強度較高。

表 4 不同配比混合料試驗塊抗壓強度試驗成果表

混合料配合比	1:5	1:5.5	1:6	1:6.5	1:7
抗壓強度(MPa)	6.2	5.6	4.7	4.6	3.8

6 樁間土檢測

(4) 樁體試塊抗壓強度

為選擇合適的混合料配比，在試驗之前分別按水泥和土幹重量 1:5、1:5.5、1:6、1:6.5、1:7 的比例製作標準立方體試塊(每組三塊)。按規範要求在標準養護 28d 後，對製成的立方體試塊進行抗壓強度試驗。抗壓強度代表值按一組三塊試件強度的平均值確定。測試結果見表 4。

為直觀地反映地基處理前後地基土濕陷

性及工程特性的變化，在地基處理前和處理後的第 14 天，分別進行了探井取土和原位測試工作（標準貫入試驗、靜力觸探）。檢測點的佈置：處理前，在試驗區周圍；處理後，在三

樁之間，載荷試驗在地基處理 28 天后(浸水 10 天后)進行。

(1) 濕陷性檢測：地基處理前後濕陷性評價結果見表 5。

表 5 地基處理前後濕陷性評價結果比較表

方案	方案一				方案二			
	處理前			處理後	處理前			處理後
壓力等級	計算濕陷量 mm	濕陷性 評價	濕陷 最大深度 m	計算 濕陷量 mm	計算 濕陷量 mm	濕陷性 評價	濕陷 最大深度 m	計算 濕陷量 mm
200kPa	4.3	I 級	2.60	0	6.8	I 級	3.10	0
300kPa	32.0	I 級	4.60	0	39.6	I 級	4.10	0
400kPa	58.1	I 級	4.60	0	63.6	I 級	11.10	0
500kPa	43.9	I 級	10.60	0	44.1	I 級	11.10	0

注：計算條件為±0m 標高 131.80m，基礎埋深-4.40m。

由上表可以看出兩方案的濕陷性都完全消除。

地基處理前後各地層主要物理性質及工程特性指標統計結果見表 6。

(2) 主要物理性質及工程特性指標檢測

表 6 地基處理前後主要物理性質及工程特性指標比較表

層號	岩土類別	試驗分區	濕重 度 $\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	幹重 度 $\gamma_d$ kN/m <sup>3</sup>	孔隙比 e	壓縮模量 ES <sub>1-2</sub> MPa	三軸剪		標貫 擊數 N 擊	錐尖 阻力 q <sub>c</sub> Mpa	側壁 阻力 f <sub>s</sub> kPa
							凝聚 力 c <sub>u</sub> kPa	內摩 擦角 $\varphi_u$ °			
②	黃土狀 粉質黏 土	處理前	18.3	15.1	0.801	12.9	23	48.9	7.6	1.6	80.7
		方案一	18.9	13.9	0.845	15.3			7.0	1.8	104.0
		方案二	19.0	15.3	0.786	14.4	17	68.9	6.6	1.9	94.0
③	黃土狀 粉土	處理前	18.7	16.0	0.686	20.1	31	20.5	12.7	4.5	144.1
		方案一	20.1	16.9	0.587	20.7	26	54.5	15.3	6.7	341.1
		方案二	19.7	16.7	0.602	24.5	29	50.2	13.9	6.3	307.4
④	黃土狀 粉土	處理前	18.2	15.3	0.762	21.3	24	42.0	9.3	2.2	99.5
		方案一	19.5	16.3	0.658	17.5	21	72.8	11.2	4.2	289.9
		方案二	19.3	16.3	0.658	18.1	25	42.5	8.8	2.9	164.5
⑤	黃土狀 粉土	處理前	16.5	15.0	0.789	28.1	28	32.0	19.7	8.5	244.0
		方案一	18.4	16.2	0.661	20.6	31	30.4	32.7	13.4	513.4
		方案二	16.6	15.4	0.736	26.9	34	18.1	21.3	13.0	484.1

由上表可以看出，層②的壓縮模量、錐尖阻力和側壁阻力等工程特性指標均有所提高；但處理前後孔隙比等物理性指標變化不明顯。其餘各層處理前後各層物理性質和工程特性指標均有明顯改善，且方案一改善程度要高於方案二。

根據擊實試驗結果，試驗區基底土的最大幹密度  $\rho_{dmax}$  為 1.73g/cm<sup>3</sup>。方案一兩個檢測探井 1.00m 處土樣的幹密度分別為 1.53 g/cm<sup>3</sup> 和 1.40 g/cm<sup>3</sup>，擠密係數分別為 0.882 和 0.865；方案二兩個檢測探井 1.00m 處土樣的幹密度分別為 1.40g/cm<sup>3</sup> 和 1.42g/cm<sup>3</sup>，擠密係數分別為 0.865 和 0.876。由試驗結果可

(3) 樁間土的擠密係數

知，樁間土的擠密係數偏低，未能達到不小於 0.88 的要求。

(4) 樁間土浸水淺層平板載荷試驗

進行樁間土載荷試驗 3 組，遵循《建築地基礎設計規範》(GB50007)，以堆載方

式提供反力，採用沉降相對穩定法。壓板為圓形，面積 0.5m<sup>2</sup>。

荷載分級見表 7，試驗概況見表 8，試驗 p-s 曲線見圖 3，試驗成果見表 9。

表 7 樁間土荷載分級表 (單位：kPa)

分 級	1	2	3	4	...	13	14	15	16	17	18
S1	26	52	78	104		338	364	390	416	442	468
S2	34	66	100	134		434	468				
S3	34	66	100	134		434					

表 8 樁間土地基載荷試驗概況表

點 號 (#)	試驗歷時 (min)	最大載入量 (kPa)	最大沉降量 (mm)	終止載入條件
S1	3340	468	48.47	s/b>0.06
S2	2210	468	48.59	s/b>0.06
S3	1900	434	48.37	s/b>0.06

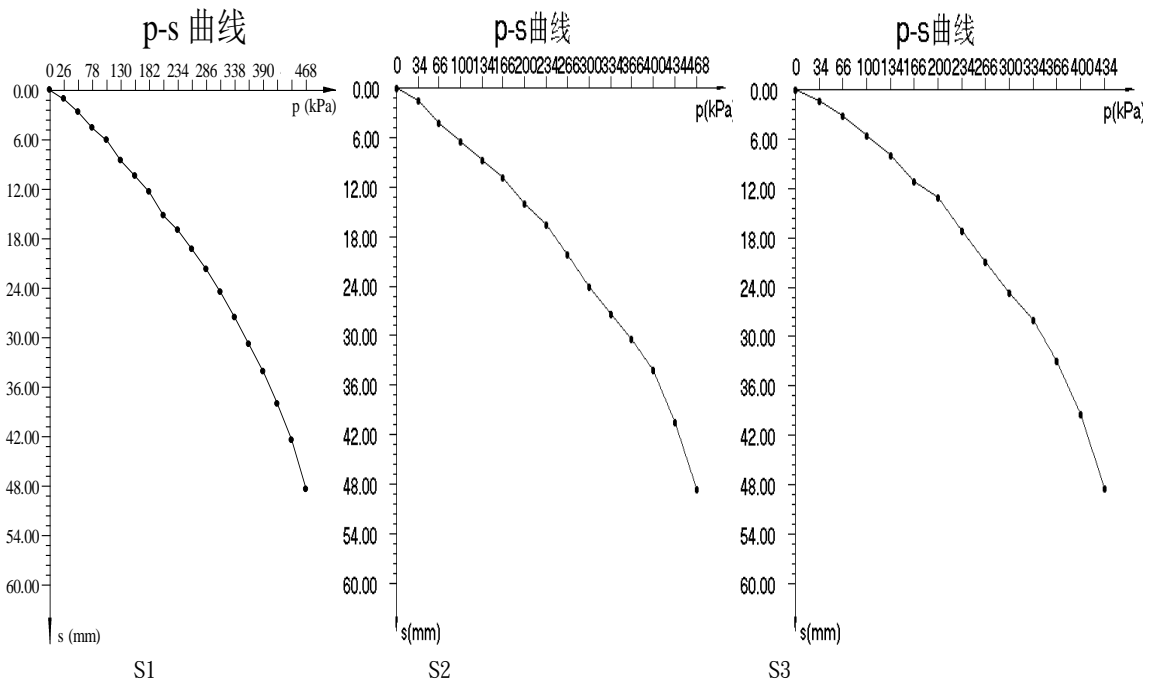


圖 3 p-s 曲線圖

表 9 樁間土靜載荷試驗成果表

點位 (#)	最大加荷量		累計沉降量 (mm)	承載力特徵值確定方法	承載力特徵值 (kPa)	樁間土承載力特 徵值 (kPa)
	(kN)	(kPa)				
S1	234	468	48.47	相對變形法, s/b=0.0125	150	152
S2	234	468	48.59	相對變形法, s/b=0.0125	154	
S3	217	434	48.37	相對變形法, s/b=0.0125	154	

7 浸水單樁豎向抗壓靜載荷試驗

選擇 42、50、58 (對應於實驗編號為 P1、P2 和 P3) 三根夯實水泥土樁進行了單樁豎向



第二十三屆兩岸水利科技交流研討會

抗壓靜載荷試驗。試驗遵循《建築基樁檢測技術規範》(JGJ106)，以堆載方式提供反力，採用慢速維持荷載法。壓板為圓形，直徑 600mm。荷載分級見表 10，試驗概況見表 11，試驗 Q-s 曲線見圖 4，試驗成果見表 12。

表 10 單樁豎向抗壓靜載荷試驗分級表 (單位: kN)

分級	1	2	3	4	5	...	9	10	11	12
P3	160	240	320	400	480	...	800			
P1	133	200	266	333	399	...	666			
P2	120	180	240	300	360	...	600	660	720	780

表 11 單樁豎向抗壓靜載荷試驗概況表

編號 (#)	試驗歷時 (min)	最大載入量 (kN)	樁頂最大沉降量 (mm)	樁頂殘餘沉降量 (mm)	終止載入條件
P3	1845	800	100.84	93.23	s>100mm
P1	1845	666	105.61	97.79	s>100mm
P2	2400	780	100.97	80.75	s>100mm

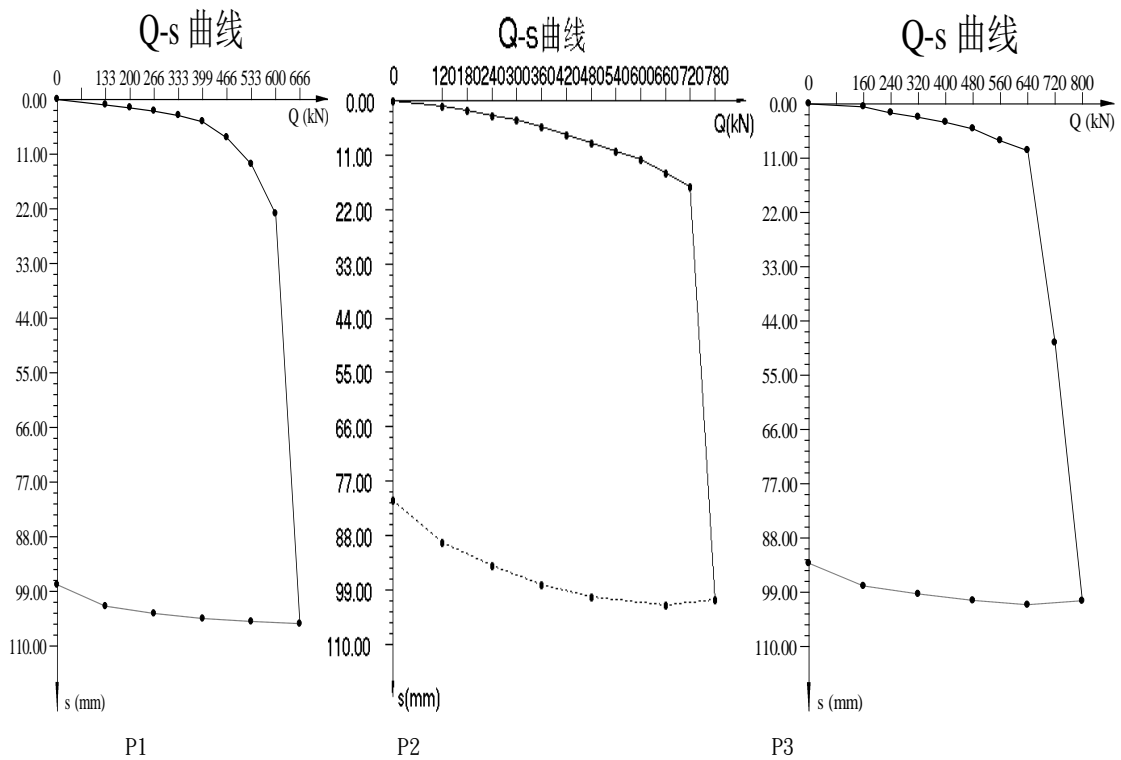


圖 4 Q-s 曲線圖

表 12 單樁豎向抗壓靜載荷試驗成果表

試驗樁號 (#)	極限承載力 (kN)	取值依據	極限承載力統計值 (kN)	承載力特徵值 (kN)	說明
P1	600	陡降型 Q-s 曲線	653	327	陡降型 Q-s 曲線取其發生明顯陡降的起始點對應的荷載值為極限承載力。
P2	720	陡降型 Q-s 曲線			
P3	640	陡降型 Q-s 曲線			

8 浸水單樁複合地基載荷試驗

選擇 41、49、53、57 (對應實驗編號分

別為 M1、M4、M2、M3) 四根夯實水泥土樁+樁間土進行單樁複合地基載荷試驗。試驗遵循《建築地基處理技術規範》(JGJ79), 以堆載方式提供反力, 採用沉降相對穩定法。壓板

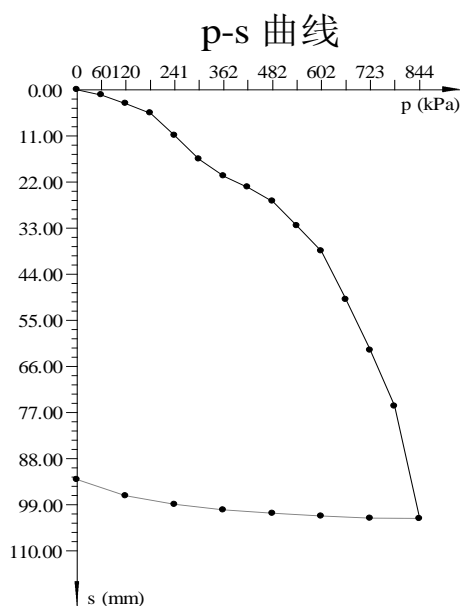
為圓形, 直徑 1.47m。荷載分級見表 13-13, 試驗概況見表 14, 試驗 p-s 曲線見圖 5, 試驗成果見表 15。

表 13 複合地基靜載荷試驗載入分級表 (單位: kPa)

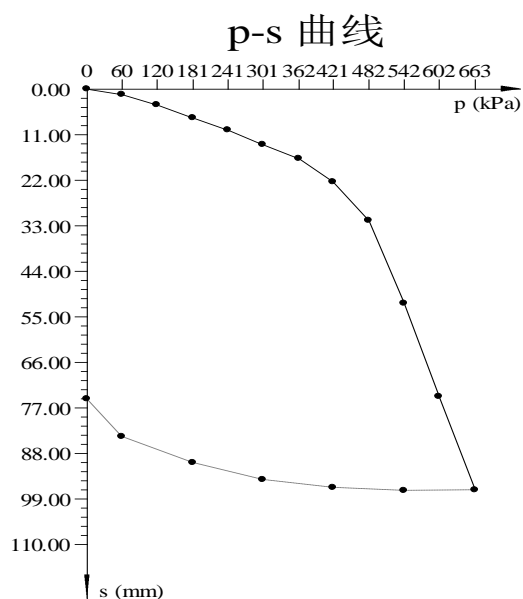
分級	1	2	3	4	...	11	12	13	14	15	16
M1	60	120	181	241	...	663	723	783	844		
M2	60	120	181	241	...	663					
M3	42	85	128	171	...	470	513	555	598	641	684
M4	60	120	181	241	...	663	723	784	844		

表 14 複合地基載荷試驗概況表

點號 (#)	試驗歷時 (min)	最大載入量 (kPa)	最大沉降量 (mm)	殘餘沉降量 (mm)	終止載入條件
M1	2550	844	102.43	93.06	s/b>0.06
M2	2490	663	96.91	74.93	s/b>0.06
M3	3210	684	102.18	87.58	s/b>0.06
M4	2730	844	104.57	86.34	s/b>0.06



M1



M2

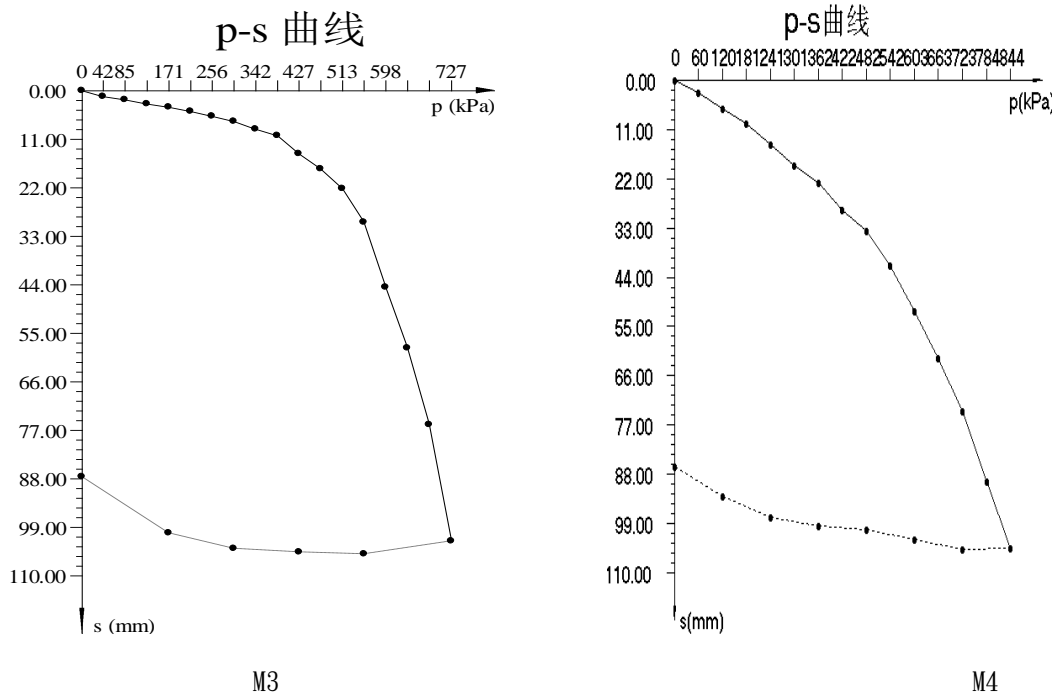


圖 5 p-s 曲線圖

表 15 複合地基承载力特征值判定表 (單位：kPa)

試驗點號	極限承载力		承载力特征值		單樁複合地基承载力值	複合地基承载力特征值
	相對變形法	極限荷載	相對變形法	比例界限		
M1	781		284		284	291
M2	602		329		301	
M3		555		385	277	
M4		727		301	301	

注：相對變形法確定極限承载力採用  $s/b=0.050$  所對應的壓力，確定承载力特征值採用  $s/b=0.010$  所對應的壓力。

8 工程應用效果

夯實水泥土樁複合地基應用於本建築地基處理中，目前工程已經運行未出現地基問題。

9 試驗成果分析

(1) 樁間土承载力折減係數的取值

《建築地基處理技術規範》(JGJ79)中提供的估算複合地基承载力的公式為：

$$f_{spk} = m \times R_a / A_p + \beta \times (1 - m) \times f_{sk} \quad (1)$$

式中：

$f_{spk}$ —複合地基承载力特征值，試驗結果為 291kPa；

$R_a$ —單樁豎向承载力特征值，試驗結果為 327kN；

$A_p$ —樁的截面積。試驗所用三根樁的直徑分別為 590mm、600mm、580mm，則截面積平均值為

$$0.2734 \text{ m}^2；$$

$m$ —樁土面積置換率，等邊三角形布樁，樁間距  $s$  為 1.40m，則  $m = d^2 / (1.05s)^2 = 0.169$ ；

$f_{sk}$ —處理後樁間土承载力特征值，試驗結果為 152kPa。

由公式可反算出樁間土承载力折減係數  $\beta$  為 0.70。

《建築地基處理技術規範》(JGJ79)中對於樁間土承载力折減係數  $\beta$  取值的規定是：宜按地區經驗取值，如無經驗時可取 0.90~1.00。本工程中的  $\beta$  值為 0.70，顯然超出了規範的經驗值範圍。該規範還規定  $f_{sk}$  為“處理後樁間土承载力特征值，可取天然地基承载力特征值”。我們把由勘測報告提供的天然地基承载力特征值  $f_{sk} = 110\text{kPa}$  代入公式 13-1 計算出的  $\beta$  為 0.97。由此可見，工程估

算複合地基承载力特徵值時處理後樁間土承载力特徵值可取天然地基承载力特徵值，而不能取處理後試驗所得樁間土承载力特徵值，也就是說規範推薦的樁間土承载力折減係數 $\beta$ 取值範圍不適合於本場地。

(2) 混合料配合比的選擇

根據《建築地基處理技術規範》(JGJ79)，樁體試塊抗壓強度平均值應滿足下式要求：

$$f_{cu} \geq 3R_a / A_p \quad (2)$$

根據試驗結果單樁承载力特徵值  $R_a$  為

327kN，樁截面積  $A_p$  為  $0.2734 \text{ m}^2$ ，代入式 13-2，計算得  $f_{cu} \geq 3588 \text{ kPa}$  (約 3.6MPa)。試驗中採用水泥和土的幹重量比為 1:5，其立方體抗壓強度值為 6.2MPa，遠大於 3.6MPa。因而工程中可適當降低水泥和土的幹重量比。由表 13-4 可知混合料水泥和土的幹重量比可選擇大於等於 1:7。

(3) 單樁承载力取值

根據土的物理參數，參照《建築樁基技術規範》(JGJ94) 相關表格，得出夯實水泥土樁所在各土層的樁基參數見表 16 所示。

表 16 樁基參數建議值表

層號	岩土類別	層厚 (m)	夯實水泥土樁	
			側阻力 特徵值	端阻力 特徵值
			(kPa)	(kPa)
②	黃土狀粉質黏土	2.3	30	
③	黃土狀粉土	1.7	31	
④	黃土狀粉土	4.0	22	
⑤	黃土狀粉土	2.0	30	500

規範所推薦估算單樁承载力特徵值的計算公式(規範中式 9.2.6)為：

$$R_a = u_p \sum q_{si} l_i + q_p A_p \quad (3)$$

式中：

$u_p$ ——樁身周長；

$q_{si}$ ——樁側第  $i$  層土的極限側阻力標準值；

$q_p$ ——極限端阻力標準值；

$l_i$ ——樁周第  $i$  層土的厚度；

$A_p$ ——樁端面積，為  $0.2734 \text{ m}^2$ 。

根據上式利用表 13-16 中的參數，可估算出單樁承载力特徵值為 718kN，而單樁載荷試驗所得的特徵值為 327，僅為估算值的 46%。

由單樁靜載荷試驗 Q-s 曲線可以看出，曲線的破壞形態均為“陡降型”，分析其原因是：樁長較長(10m)，複合地基的主要受力區為樁長加固深度範圍內，由於樁的存在使加固區的變形大大減少，樁端土受荷較小，最終的破壞是由於樁身強度的破壞而造成的沉降陡增，因而曲線表現為“陡降型”。規範中估算承载力的公式是適用於剛性樁的，而對於像夯實水泥土樁這類半剛性樁，樁端和樁側不

可能同時達到破壞，故式 3 不適用於樁身強度較低的樁。

(4) 樁身品質檢測方法

檢測樁身的壓實係數是樁身品質檢測的通用方法。《建築地基處理技術規範》(JGJ79) 規定：幹密度的檢測可在 24h 內採用取土樣測定或採用輕型動力觸探試驗  $N_{10}$  以判斷樁身品質與現場試驗確定的幹密度進行對比，以判別樁身品質。但該規範沒有寫明  $N_{10}$  的判別標準，其它規範也未涉及該問題。在《工程地質手冊》(第四版)中提出在成樁 1h 內進行檢測，採用錐角為  $50^\circ$  的錐頭進行輕型動力觸探試驗， $N_{10}$  的擊數不小於 25 擊的樁為合格樁。

本試驗中，在 27# 樁成樁 10 分鐘後，進行了輕型動力觸探試驗。試驗持續進行約 1.5 小時，僅進尺 0.70m，每 10cm 擊數分別為 130、126、158、123、140、214、381，遠遠大於《工程地質手冊》提供的判別標準。而鑽芯取樣幹密度的檢測結果卻顯示樁身品質不甚理想，說明  $N_{10}$  和幹密度檢測的結論不一致， $N_{10}$  受樁體夯實影響較大。

本試驗實踐表明，用輕型動力觸探的方法在成樁 1h 內不能完成對整根夯實水泥土樁的檢測，且其試驗資料均遠遠大於可供參考的

判別標準。因而  $N_{10}$  檢測夯實水泥土樁樁身品質的適用性和判斷標準值得商榷，可能是混合料配合比過大等因素造成，還有待進一步積累和總結工程經驗。

故工程中建議採用幹密度法進行樁身品質檢測，即現場取土樣測定幹密度與試驗確定的混合料的最大幹密度對比的檢測方法。

(5) 地基土變形模量

根據《岩土工程勘察規範》(GB50021)，淺層平板載荷試驗的變形模量按下式計算：

$$E_0 = I_0(1 - \mu^2) \frac{pd}{s} \quad (4)$$

式中  $I_0$ ——剛性承壓板形狀係數(圓型承壓板選 0.785)；

$E_0$ ——土的變形模量(MPa)；

$P$ ——P-s 曲線線性段壓力(kPa)；

$s$ ——與  $P$  對應的沉降(mm)；

$d$ ——承壓板直徑或邊長(m)；

$\mu$ ——土的泊松比(粉質黏土取 0.38)。

由上述公式計算的樁間土和複合地基的變形模量見表 17 和表 18 所示。

表 17 樁間土變形模量計算成果表

點位	P(kPa)	S(mm)	d(m)	$\mu$	$E_0$ (MPa)
S1	177	12.00	0.8	0.38	7.9
S2	179	12.00	0.8	0.38	8.0
S3	181	12.00	0.8	0.38	8.1

三個試驗點樁間土變形模量的平均值為 8.0MPa。

表 18 複合地基變形模量計算成果表

點位	P(kPa)	S(mm)	d(m)	$\mu$	$E_0$ (MPa)
M1	301	16.64	1.47	0.38	17.9
M2	301	13.42	1.47	0.38	22.1
M3	342	8.78	1.47	0.38	38.5
M4	241	14.28	1.47	0.38	16.7

M3 點所計算的複合地基變形模量的極差大於 30%，舍去。其餘三個試驗點複合地基變形模量的平均值為 18.9MPa，是樁間土變形模量的 2.36 倍。

由此可見地基處理提高了地基的剛度，將有效減小建築物的沉降量。作用。

(6) 地基土壓縮模量

《建築地基處理技術規範》(JGJ79)規定，夯實水泥土樁複合地基複合土層的壓縮模量等於該層天然地基壓縮模量的  $\zeta$  倍， $\zeta$  值由式

5 確定：

$$\zeta = f_{spk} / f_{ak} \quad (5)$$

式中  $f_{spk}$ ——複合地基承载力特徵值，試驗結果為 291kPa

$f_{ak}$ ——基礎底面下天然地基承载力特徵值(kPa)。

因此，天然土層壓縮模量的提高倍數  $\zeta$  值為 2.65。複合地基分層壓縮模量計算結果見表 19。

表 19 複合地基分層壓縮模量表

分層	層②	層③	層④	層⑤
複合 $E_{s1-2}$ (MPa)	15.9	37.0	18.5	47.6

複合地基的變形模量和壓縮模量分別是 18.9MPa 和 15.9MPa，這不符合由彈性理論中廣義虎克定律匯出的土的變形模量與壓縮模量之間的關係。其原因在於地基土不是理想彈性體，也不完全符合虎克定律。

## 伍、结论

一、原體試驗實踐證明，採用夯實水泥土樁對濕陷性黃土地基進行處理，可達到消除濕陷性，提高地基承載力，提高地基剛度的目的。

二、用《建築地基處理技術規範》(JGJ79) 式 9.2.5 估算本工程複合地基承載力特徵值時，處理後樁間土承載力特徵值應取天然地基承載力特徵值，而不宜取處理後試驗所得樁間土承載力特徵值。

三、用《建築地基處理技術規範》(JGJ79) 式 9.2.6 估算本工程夯實水泥土樁單樁承載力時與荷載試驗差距較大。

四、《工程地質手冊》提出的  $N_{10}$  檢測夯實水泥土樁樁身品質的適用性和判斷標準不適合於本工程，可能是混合料配合比過大等因素造成，有待進一步積累工程經驗。

五、依據規範，按試驗資料分別計算出來的地基土的變形模量和壓縮模量是不符合彈性理論中廣義虎克定律匯出的土的變形模量與壓縮模量之間的關係式的。

六、為保證地基處理效果，應在基礎埋置深度以上預留一定的土層，增加地基土的上覆壓力，從而增加夯擊時對地基土的限制。

## 邁向海綿城市—推動總合治水策略之都市防洪成效

陳志偉<sup>1</sup>、杜鐵生<sup>2</sup>、薛煌仕<sup>3</sup>、林君怡<sup>4</sup>

### 摘要

我國現行都市計畫區均以雨水下水道系統為都會排水主要設施，過往辦理都市地區雨水下水道系統規劃均循早期之「規劃原則」辦理，並依本部營建署頒布之「雨水下水道系統規劃原則檢討」為主要參考準則。然面對近年之都市快速發展及極端水文事件頻仍之影響，都市防洪工作已逐漸轉型為以國土規劃角度進行逕流分擔，如公部門採「滯洪」、「分洪」、「截流」等多元措施，以總合治水概念辦理雨水下水道之治理規劃及檢討，私部門以推動「入滲」、「滲透設施」、「貯留」等低衝擊開發設施為趨勢。其理念為廣泛利用都市地區各種可能之空間，設置分散式之貯留或入滲等各項具有暫時貯存雨水功能之設施，全面提升都市地區防洪效果，以成為海綿城市為目標。

內政部營建署為都市排水系統雨水下水道之中央主管機關，近年來積極推動都市總合治水，除修訂「雨水下水道系統規劃原則檢討」、「雨水下水道設計指南」等相關法規，研提「雨水調節池設計參考手冊」、「水環境低衝擊開發設施操作手冊」，由多元化治水措施進行雨水下水道設計與改善，全面提升全國各地區都市防洪保護標準。就工程面而言雨水貯留量較大者，可與雨水下水道系統密切結合，即為「雨水調節池」。雨水調節池主為貯留極端降雨所造成之過量逕流，分擔強降雨時排水設施之負荷，並於雨勢緩和後得適量將貯留水量排出，以有效降低短延時強降雨致災風險。惟都市地區因人口稠密，地價昂貴，用地徵收不易，如受限於缺少大面積土地，亦可透過廣布低衝擊開發設施，利用數量可觀的微型滯洪空間，有效發揮海綿城市成效。本文為本署落實「都市總合治水」策略之成果彙整，綜整營建署流域綜合治理計畫設置雨水調節池等重大建設、低衝擊開發示範計畫，經過短延時強降雨事件後，呈現都市治水之效益與正面影響，作為未來推動之經驗傳承。

**關鍵字：**海綿城市、總合治水、雨水下水道、雨水調節池、低衝擊開發

---

<sup>1</sup> 營建署下水道工程處處長

<sup>2</sup> 營建署下水道工程處課長

<sup>3</sup> 營建署下水道工程處工程司

<sup>4</sup> 巨廷工程顧問公司經理

## 壹、前言

民國 103 年 1 月 14 日立法院三讀通過「流域綜合治理特別條例」，編列 660 億特別預算，持續辦理水患治理計畫相關治理工程，另更以「滯洪」、「減洪」及「分洪」等方式未來辦理主軸計畫，並提出創新作為，包括以國土規劃角度推動逕流分擔及出流管制，加強非工程與水共存等治水新思維。其中雨水下水道系統經費編列 89.6 億元，由內政部營建署(以下簡稱營建署)執行，已進入第三期最後階段。

面對近年之都市快速發展及極端水文事件頻傳影響，欲全面提升設計標準實有相當難度，都市防洪工作備受挑戰，因此營建署在「流域綜合治理計畫」內，以全新思維導入「都市總合治水」、「低衝擊開發」及「海綿城市」等概念辦理雨水下水道之規劃及治理、都市土地低衝擊開發-海綿城市、都市排水資產管理及提升防洪效益等三項主要推行工作。

前述「都市總合治水」係整合雨水下水道、區域排水、都市計畫、建築工程等不同領域有關都市治水之面向，以整體都市計畫之思維擬定治水策略；「低衝擊開發」為以增加地面透水或貯水能力來控制降雨逕流之工程手法，多為小尺度分布式之在源處理，效益包括減洪、水質改善、環境綠化等；「海綿城市」係為增加都市之透水及保水能力，降低熱島效應，以工程手法，在不產生淹水災害之前提下，使雨水逕流於都市地區能夠入滲或暫時貯留，減輕下游排水系統負擔。

都市總合治水同時包含非工程手段，都市排水資產管理項目，係透過非工程措施手段，提升防洪效益。除辦理各縣市雨水下水道普查、健全基本資料庫，並透過抽水站健檢延壽計畫，提升抽水站效能，此外成立都市總合治水技術服務團，修訂相關法規，建置宣傳網站、辦理教育訓練、研討會、成果說明會，由上而

下推動宣導，建置雨水下水道「全台雨水下水道溢淹示警作業平台」提升防災預警資訊之精確度，以期達成並落實流域綜合治理計畫之目標。

## 貳、相關法規修訂

依據聯合國「跨政府間氣候變遷小組」(Intergovernmental Panel on Climate Change of the UN, IPCC)研究顯示，全球暖化使得大氣交流系統更強烈更集中，因此極端氣候事件強度變強、頻率變高，而且更難以預測發生地點，此現象可說明近年來全球各地面對降雨淹水災害規模有加劇的趨勢。我國雨水下水道自民國 68 年起，即開始逐年辦理各都市計畫區之「雨水下水道系統規劃」，許多地區的下水道設施年代久遠，且早期都市計畫區多以 1~5 年重現期降雨進行下水道設計，已無法負荷極端降雨的暴雨量，因此亟待治水方式之創新提升。

都市總合治水在國外已行之有年，並於近年來成為國際化治水策略之趨勢，因地制宜的治水方式蔚為先驅，然新思維的推動是否能落實執行，需視能否透過法規先行的方式，以妥善的法規制度作為各項方案發展、宣導貫徹之手段，以加速整體進程。內政部營建署為都市排水系統雨水下水道之中央主管機關，為推動我國都市地區之總合治水，近年來持續修訂相關法規，做為推動都市總合治水之基石。

營建署已於民國 103 年出版「水環境低衝擊開發設施操作手冊」，現階段持續將都市總合治水思維納入「雨水下水道系統規劃原則檢討」、「雨水下水道設計指南」之修訂作業中，同時新訂「雨水調節池設計參考手冊」，其理念除健全原有雨水下水道功能外，亦須廣泛利用都市地區各種可能之空間，設置分散式之貯留或入滲等各項具有滯洪功能之設施，利用土地規劃和工程設計的方法，來管理雨水逕流，打造透水保水的海綿城市。



## 參、雨水下水道系統提升改善

### 一、雨水下水道系統規劃建設沿革

早於民國 50、60 年代，政府有鑑於都會區及經濟之快速發展，亦造成都市之排水問題日趨嚴重，乃陸續著手辦理各都市計畫區之雨水下水道系統規劃，並逐年編列預算據以施設，歷經數十年建設迄今，亦已頗具規模。

歷年「雨水下水道系統規劃幹線建設實施率」詳圖 1，由於早期建設方興，實施率的提升迅速，91 年以前實施率平均每年提升 1.9%，隨著實施率升高，可供建設之土地多已完成建設工程，都市計畫區雨水下水道建設率提升趨近平緩，自 92 年後之實施率平均每年增加 1.1%。

截至民國 107 年底，雨水下水道建設之實施率則為 75.59%，其中以台北市實施率為 96.7% 最高，其次為澎湖縣 95.3%，第三為新北市 88.9%，而台灣省僅為 68.55%，仍有待加強建設。各縣市雨水下水道建設情形如圖 2。

### 二、雨水下水道系統建設

#### (一)雨水下水道檢討規劃

現行各都市計畫區之雨水下水道系統，原已依據人口密度與行政區分級擇定設計基準進行規劃，且對於已開發之區域，欲增加治水所需之排洪、保水或蓄水設施均較為困難。因此，重新進行檢討規劃最大課題即是如何維持現有雨水下水道功能之前提下，提升都市計畫區保護標準。營建署辦理之都市計畫區雨水下水道檢討規劃，均依據所在區位之降雨型態、現有雨水下水道系統設計基準及排洪能力、都市規模及開發密度、外水條件等，階段性訂定較高之設計準則，以因應極端氣候帶來之影響，因地制宜，採務實方式推動。

以流域綜合治理計畫為例，營建署總計辦理 49 件雨水下水道檢討規劃案，已完成審查定案之案件，其雨水下水道設計準則均較以往提

升，並優先以都市總合治水方式進行規劃檢討改善方案之擇定，俾供未來治理工程建設所需。

#### (二)雨水下水道系統治理工程

以流域綜合治理計畫為例，營建署總計辦理雨水下水道系統建設工程 234 件，其中包含 190 件雨水下水道工程，21 件抽水站新建及改善，2 件低衝擊開發示範工程，設置 12 件都市地區滯洪池(其中 3 件包含抽水站設施)，9 件屬於用地案件。

其中除傳統雨水下水道建設工程外，亦導入都市總合治水概念，透過增設都市地區滯洪空間、國土立體防災規劃及低衝擊開發建設等方式逐步推動治水工作，計畫核定辦理「辛亥路憲兵營區停車場滯洪池新建工程」及「文山運動中心北側用地滯洪池新建工程」、「新北市泰山區大窠坑溪舊河道滯洪池新建工程(含抽水站新建)」、「雲林縣虎尾鎮大成滯洪池」及「高雄市鼓山區臺泥廠區明渠及滯洪池工程」等共計 13 件工程，計畫全期預計可增加 25.4 萬噸滯洪量，相關工程於近期豪大雨時均發揮顯著成效，有效提昇都市防洪韌性及增加容洪量。

統計自 103 年流域綜合治理計畫開始至 107 年 12 月底，全國兩下水道實施率已由 68.54% 提升至 75.59%，雨水下水道建設長度亦由 4,651km 增加至 5,247km，都市雨水調節量更大幅成長約 30 萬立方公尺，成效不斐。

### 三、低衝擊開發

於流域綜合治理計畫中辦理「新北市中和區自強國中國小低衝擊開發(LID)示範工程」。新北市政府擇定自強國中與自強國小，辦理「新北市中和區國中、小低衝擊開發(LID)示範工程」，引入透水(海綿)城市概念，設置雨水貯集及滲透設施等低衝擊開發 (Low Impact Development, LID)設施，從源頭降低逕流量，提升防洪效能，降低排水系統負擔，透過各種設施達成計畫目標時雨量 80mm 時校園零出流量。

自強國小第一中庭設置深 50cm 生態池，既有不透水鋪面挖除回鋪草地，由雨水管蒐集之雨水排入生態池，池內種植水生植物以淨化水質，週邊以自然塊石及樹木造景，防止學童闖入，是校內水循環與生態教育的活教材。此外利用既有冬青樓地下結構體改建為地下貯水槽，水槽面積 400 平方米，高 1.8 米，儲水量 720 公噸，設置沉水馬達，連結雨水回收系統，另設置清潔孔以方便維護管理。

自強國中配合校園排水系統改善之規劃分析，利用透水管線建置重新鋪設校園鋪面，其中包含通學步道透水鋪面、停車場透水鋪面、校園中庭透水鋪面，利用排水管收集逕流，操場 PU 跑道則設置側溝收集。雨水回收利用系統工程，收集之雨水集中於貯水槽，並設置沉水泵，用於學校教室與辦公室兩棟樓之廁所沖廁用水。沖廁水之來源有二，包括貯水槽及自來水補充。透水鋪面施工方式詳見圖 3。

自強國中透水保水設施配置容量為 2,626 m<sup>3</sup>，自強國小為 1,933 m<sup>3</sup>。經分析可於極大豪雨條件下達成時雨量 80mm 零出流目標。

## 肆、非工程措施

### 一、都市計畫區雨水抽水站管理平台及延壽健檢計畫

有鑑於颱風造成之淹水災害日益嚴重，而都市高度發展，人口大量聚居使保全對象大增，所以防止地區淹水成為施政上首要達成之任務。然而雨水下水道工程建設有其侷限，且抽水站設備有其服務年限，應充分運用軟硬體之配合，建立營運維護資料平台(詳圖 4)，以提昇設備保養作業，並定期評估設備性能，達到機電設備預防性維修、延壽之目的，利用有限經費提高治水成效，有助於減災與救災。

截至 107 年度完成之健檢抽水站為新北市中原、中和、瓦礫、秀山、秀朗、新海、城中、禮門、五股、洲子洋抽水站；臺南市南興、興

隆寺抽水站及花蓮市國盛、明禮抽水站。

### 二、雨水下水道普查

因下水道管理人力不足、經費有限、及下水道建設年代久遠等問題，部分地方政府無法辦理雨水下水道全面管網調查，使中央無法掌握全國竣工資料庫。截至 103 年底時雨水下水道幹線已建設完成之長度為 4,722 公里，惟除少數直轄市外，地方雨水下水道系統數化之資料非常有限。因此，營建署著手辦理之全臺雨水下水道普查及資料庫建置，範圍包含新北市等 19 個直轄市及縣(市)政府，且因應極端氣候頻率增加，亦規劃於本普查案調查以都市計畫區為主之側溝、道路剖面等排水資料，將能更精確掌握全國防災救災訊息。為提升縣市普查資料庫建置之功效，委請顧問公司辦理輔導縣市政府補助申請、委外發包作業、審核、督導、成果查驗、資料檢核與整合、成本效益評估等工作，普查資訊最終統整於資料庫，以達成計畫目標(詳圖 5)。截至民國 107 年底止，18 個縣市皆已發包且進行中。普查案品質檢核情形：主要工作內容包含 1、檢討規劃案品質檢核情形；2、普查案品質檢核情形；3、現階段全臺雨水設施調查效益；4、普查成果展示雛型系統規劃情形。

### 三、成立都市總合治水技術服務團

「都市總合治水」係整合雨水下水道、區域排水、都市計畫、建築工程等不同領域有關都市治水之面向，以整體都市計畫之思維擬定治水策略。

為通盤考量全國雨水下水道系統建設，在營建署自有編制人力不足狀況下，於 104 年 7 月委託辦理「都市總合治水技術服務團」，協助推動雨水下水道系統建設及都市總合治水推動工作，另含雨水下水道規劃審查作業要點研擬、相關法規及管理維護手冊訂定、教育訓練、宣導網站設置(詳圖 6)及辦理國內外研討會召開等事宜，以期達成並落實流域綜合治理計畫

之目標。現階段已完成部分配套法規研擬，並於民國 107 年提出全國防洪保護標準提升指標，為未來雨水下水道建設提升及改善之新基準，亦為各縣市推動總合治水重要依據。

#### 四、辦理雨水下水道溢淹示警機制建置計畫

本計畫於 103 年度起，延續「易淹水地區水患治理計畫雨水下水道第三階段(100 至 102 年)委託專業服務案-雨水下水道淹水預警系統之可行性分析報告」，建立全臺都市計畫區新一代「都市溢淹示警系統」(詳圖 7)，該系統以全國雨水下水道規劃強度，連結中央氣象局之降水預報產品，建立短延時溢淹預警機制，提供全臺灣 322 個鄉鎮市區之都市淹水即時警戒資訊，以作為都市防災決策參考依據。

本計畫目前已完成短延時預警機制建立工作，可連結國家災害防救科技中心及氣象局之降雨預測資訊，並整合即時回傳水位計之臨界滿管監測資訊，以提供未來都市下水道溢淹資訊。此外，並應用新北市土城區所分析之瓶頸人孔迅洪指標值，建置該地區都市計畫區內人孔雨量警戒門檻值，藉以建立示範地區之雨水下水道溢淹示警系統。

營建署 107 年度計畫則以此都市溢淹示警系統架構，推展至全臺各都市計畫區，建置「全臺雨水下水道溢淹示警作業平台」，以都市計畫區之街廓路段為警戒發布單位，藉此詳細描述可能溢淹人孔位置，取代前期以鄉鎮市區為警戒發布單位，進而提升防災預警資訊空間精度。

### 伍、具體治理成效

#### 一、雨水下水道系統建設改善淹水

透過相關都市排水改善資源投入，已逐步獲其績效。諸如基隆市北寧路下水道排水改善工程完工後，海洋大學北寧路校區一帶於相同降雨強度下，已得到相當改善；另桃園市八德區高城社區雨水下水道幹線完工後，原逢雨必

淹之社區，最近幾次短延時強降雨已無災情；臺中市大里區中興路一帶雨水下水道工程完工後，原本時雨量超過 50mm 即有淹水情形，今年 6 月已順利通過時雨量超過 60mm 之檢驗。(詳圖 8)

#### 二、都市雨水調節池提升原有保護標準

都市雨水調節池(滯洪池)部分，已完成數十件都市滯洪工程，順利提升該區保護標準，舉例說明如下。

##### 1. 文山區辛亥路憲兵營區停車場滯洪池新建工程

台北市文山區興隆路排水興隆幹線箱涵排水容量不足，且局部地區地勢低窪，大雨必淹。滯洪池完工後，106 年 6 月 2 日豪雨時雨量達 90mm 以上(遠高於 78.8mm 之設計標準)，施工中滯洪池即開始蓄水(詳圖 9)，有效減輕下游興隆幹線排水負荷，且鄰近路段均無積水通報。現況文山區透過總合治水手段，已可提升該區都市防洪保護標準達 78.8mm/hr，與台北市保護標準相同。

##### 2. 新北市泰山區大窠坑溪舊河道滯洪池新建工程(含抽水站新建)

新北市泰山區大窠坑溪與中港大排，地勢低窪且為都市計畫區地表逕流匯流處，屬於易淹水地區。新北市泰山區大窠坑溪舊河道滯洪池新建工程(含抽水站新建)完工後，面對 106 年 6 月 2 日豪雨，新北市轄內多個行政區每小時尖峰雨量皆超過 100mm，另 6 小時累積降雨超過 400mm，已遠超大豪雨標準，本站啟用新建機組緊急配合需求進行實作運轉，並以臨時發電機啟動協助抽排水得宜，配合滯洪池蓄水，發揮功能且周邊未傳淹水災情。(詳圖 10)

##### 3. 高雄市台泥廠區明渠及滯洪池工程

愛河水系南鼓山一帶，以往常因柴山山區高流量逕流經明德路匯入鼓山三路雨水下水道，加上下游鼓山運河受愛河水位頂托影響，致使鼓山三路雨水下水道沿線低地湧水造成水

患。高雄市台泥廠區明渠及滯洪池工程完工後，106年7月30日海棠颱風未傳淹水災情，107年8月23日豪雨，高雄市區最大時雨量統計約88mm/hr~108mm/hr 遠超過市區雨水下水道系統設計標準，本滯洪池所在鼓山區無相關淹水災情回報。

綜整營建署補助高雄滯洪池工程共計6件，其中5件已完工，且於0823豪雨均發揮卓越滯洪成效，分析0823淹水通報災點與滯洪池位置關聯顯示施設滯洪池周邊之淹水通報極少，經高雄市政府統計當次降雨事件高雄市滯洪池滯洪總量為270萬立方公尺，總滯洪率達91.5%，其中屬營建署補助之都市雨水滯洪池計有寶業里、八卦里、十全、本安及柴山(原股山台泥)等5座，滯洪量占16.07萬立方公尺，詳表2，透過都市地區滯洪池施作，所在地周邊保護標準均較以往提升，淹水風險大幅降低，附近居民亦明顯感受到治水成效。

## 陸、持續推動總合治水建構海綿

### 城市之策略

#### 一、持續進行雨水下水道建設

依據雨水下水道重新檢討規劃，以較易淹水地區為優先對象，辦理雨水下水道系統建設，包含增加雨水下水道建設長度、抽水站數量及拓增雨水調節池容量。以提升實施率、增加保護面積、減少淹水範圍、增加抽水站數量、提高雨水調節池容量為目標持續推動之。

#### 二、落實雨水下水道系統維護管理

督導縣市政府落實轄區內雨水下水道清淤及抽水站維護管理工作，除利用抽水站營運維護資料平台及操作需求，篩選提報有維管需求抽水站，定期評估設備性能，提昇設備保養作業，並達到機電設備預防性維修、延壽之目的，利用有限經費提高治水成效，有助於減災與救災。

此外雨水下水道清淤檢查及抽水站操作管理人員教育訓練制度的落實，亦為後續成效影響因素，因此建置設施基本資料、訂定維護操作運轉規範、持續教育訓練等方面，皆應落實辦理，以確保設施防洪功能的發揮。

#### 三、廣設都市雨水調節池

經過持續性的治水工程，雨水調節池對於都市地區減洪成效不斐，規劃足夠之滯洪量體，可延緩都市地區短延時強降雨造成之洪峰時間與洪峰量，因此未來仍應評估土地分擔地表逕流之方式，針對都市地區公共設施用地進行盤點，提出適宜之雨水調節池規劃設計，以提升都市地區防洪保護標準。

#### 四、推廣低衝擊開發設施

應持續參酌各先進國家之調適策略與作法，推廣能導入具保水減洪、水質淨化、降低都市熱島效應、提升景觀美質之低衝擊開發設施，並將之列為氣候變遷下都市防洪之重要調適方案之一。

#### 五、持續辦理非工程措施

治辦辦理相關非工程措施，如雨水下水道普查作業、抽水站延壽健檢作業、都市總合治水後續推動宣導推廣事項，及全台雨水下水道溢淹示警作業計畫。

此外為能整合營建署所轄各項治水策略，應透過前瞻性之研究計畫方式，以新都市計畫區或重劃地區為對象，透過跨域整合方式，導入洪水基準線及建築防洪設計基準線概念，配合道路斷面設計及低衝擊開發設計方式，利用道路兩側與人行道間之空間承納暴雨流量，提昇都市排洪能力，另融合智慧城市(Smart City)發展研擬建構都市地區雨水下水道系統新型防災管理架構。

#### 六、智慧防災加強風險管理

為建全全國性之雨水下水道監測預警系統，各縣市應依據都會區防災預警需求，辦理監測設備裝設、防災系統建置之相關規劃，以

降低都市計畫區淹水損失風險，保護人民生命財產安全。系統數據可與營建署辦理之雨水下水道淹水預警系統進行整合，除透過預報及分析提前預警之功能外，另可據以檢定驗證規劃執行單位提出之都市排水系統水理模式正確性，以提升水理分析及改善方案研擬成果之可靠度外，透過本署「全台雨水下水道溢淹示警作業平台」，進行淹水示警作業，以降低都市計畫區淹水損失風險，保護人民生命財產安全。

### 參考文獻

1. 流域綜合治理計畫截至 107 年底執行情形及績效報告，經濟部、內政部、行政院農業委員會，108 年 4 月。
2. 流域綜合治理計畫截至 106 年底執行情形及績效報告，經濟部、內政部、行政院農業委員會，107 年 6 月。
3. 全國防洪保護標準相關指標訂定，內政部營建署，107 年 10 月。
4. 總合治水推動策略(含設施選用分析)，內政部營建署，106 年 7 月。
5. 都市總合治水技術服務團委託專業服務案第四年期末報告書，108 年 6 月。
6. 滯洪池整體執行成效報告，內政部營建署，107 年 9 月。
7. 0823 熱帶性低氣壓水災事件說明及對策報告，內政部營建署，107 年 8 月。

圖與表

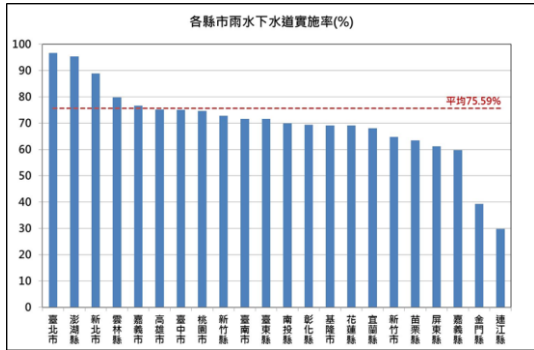


圖 1 台灣各縣市雨水下水道建設實施率

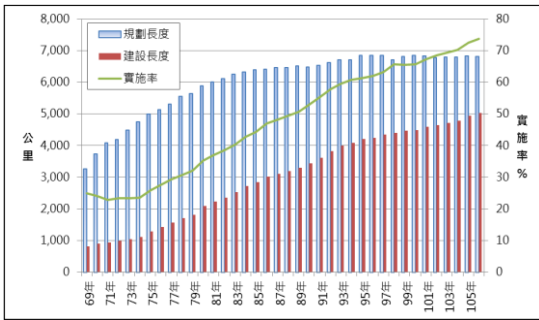


圖 2 歷年雨水下水道系統規劃幹線建設實施率

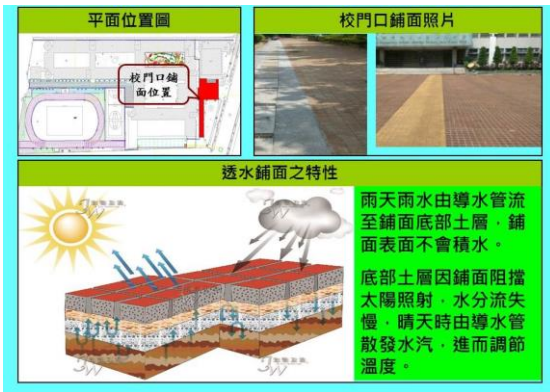


圖 3 透水鋪面施工說明

圖 4 抽水站管理平台網頁建置



圖 5 雨水下水道普查成果展示系統效益評估



圖 6 都市總合治水推動網頁

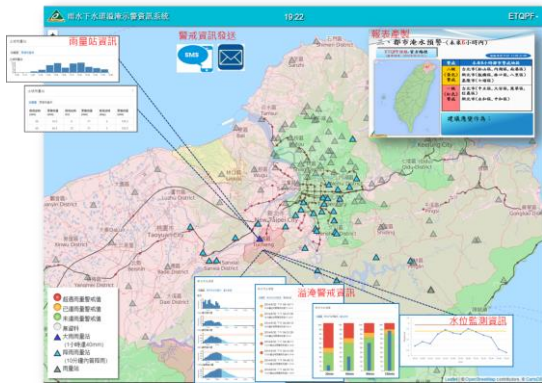


圖 7 溢淹示警系統介面展示



圖 9 滯洪池蓄水情形(資料來源：台北市政府)



圖 8 大里區中興路下水道工程改善成果



圖 10 抽水站及滯洪池發揮功能現況照片(資料來源：新北市政府)

表 1 歷年辦理雨水下水道系統規劃及檢討規劃案件數統計

縣市統計	民國年						案件數
	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99	100-107	
宜蘭縣		5	6	2	7	10	30
基隆市		1		2		1	4
新北市	1	8	16	19	3	2	49
臺北市	1						1
桃園市	2	6	12	8	1	2	31
新竹縣		5	4	4	2	8	23
新竹市		1	3		2		6
苗栗縣		4	8	7	3	3	25
臺中市	1	6	10	9	5	3	34
南投縣	1	2	5	9	5	3	25
彰化縣	2	7	14	7	3	4	37
雲林縣		10	8	3	9	3	33
嘉義縣		3	13	4	2	4	26
嘉義市			1		1		2
臺南市	3	10	18	6	1	5	43
高雄市	1	7	13	6	6	6	39
屏東縣		3	15	7	1	1	27
臺東縣		1	4	7		2	14
花蓮縣		5	6	5	1	9	26
澎湖縣		1	1	1	1		4
金門縣					1	2	3
連江縣						2	2
小計	12	85	157	106	54	70	484

表 2 高雄市 0823 滯洪池最大滯洪量統計

滯洪池	行政區	8/23 滯洪量(萬噸)	滯洪率(%)
典寶溪 A 區	岡山	40.85	95
典寶溪 B 區	岡山	99.75	95
山仔頂溝	大寮	20.25	90
前峰子	岡山	31.88	85
獅龍溪	仁武	18	90
本安里	三民	0.67	80
永安	永安	15.3	90
寶業里	三民	9.5	95
本和里	三民	10.45	95
柴山	鼓山	4.55	70
鳳山圳	鳥松	15.3	85
北屋	仁武	2.52	90
八卦里	仁武	1.35	90
總滯洪量/平均滯洪率		270.37	91.5



## 不同地籍面積逕流減量效益探討 -以淡海新市鎮特定區為例

顏志羽<sup>1</sup>、董娟鳴<sup>2</sup>、傅金城<sup>3</sup>、李雅鈞<sup>4</sup>

### 摘要

近年來由於極端降雨帶來的雨量，使都市基礎設施無法負荷，造成都市水患增加，因此臺灣參考國外治水案例，以都市暴雨管理作為調適策略，並設置低衝擊開發設施(Low Impact Development, 簡稱 LID)作為因應土地開發的防洪實行手段。相較傳統工程以快排快乾的策略，將土地開發的基地逕流快速排出並集中至下游地區，都市暴雨管理利用低衝擊開發設施保留各基地的降雨量，以減少並分散逕流量的產生，可減少都市中雨水下水道的負擔，並降低因河川水位上升，使雨水下水道宣洩不及產生倒灌的情況。

根據文獻可以發現都市暴雨管理的概念，是透過不同尺度的規畫而完成的。但因為臺灣的都市開發工作、土地開發部門與地政部門之間較少建立相關協調機制，使得土地開發規劃無法連結，僅出現在現行基地保水法規的逕流總量計算。然而在土地開發的實際操作上，由於涉及地下開挖率與地籍的劃分下，使得地下開挖面積與低衝擊開發設施重疊，將影響到土地開發後減洪設施的實際效益。此外，地籍的切割較為複雜且破碎，影響土地開發後減洪設施的施作面積與地主的開發意願，因此規劃後的低衝擊開發設施實際作用有待研析。

本研究為檢驗土地開發後設置低衝擊開發設施的效果，將依照不同的情境建模進行模擬及分析，並根據模擬結果分析出不同的土地開發方式對於低衝擊開發設施的影響。本研究以淡海新市鎮特定區第一期計畫區為例，探討不同地籍面積在留設開放空間設置低衝擊開發設施，其逕流減量效果在 2 年~10 年重現期降雨事件下能滿足多少的逕流減量效果。由分析結果顯示，隨著重現期雨量的增加，逕流分擔量逐漸縮減，且在短延時強降雨事件下須搭配滯洪池設施。此外，隨著地籍面積的形狀、大小及不同設施作為，在低重現期雨量時，確有其減洪效果。

**關鍵字：**水文模擬、低衝擊開發設施、土地開發、地籍面積

<sup>1</sup> 銘傳大學都市規劃與防災學系碩士研究生

<sup>2</sup> 銘傳大學都市規劃與防災學系專任副教授

<sup>3</sup> 國家災害防救科技中心副研究員 jcfu@ncdr.nat.gov.tw

<sup>4</sup> 國家災害防救科技中心專任佐理研究員

## 壹、研究背景

近年來氣候變遷為台灣帶來極端降雨，使傳統下水道工程無法負荷，因此台灣參考國外都市暴雨管理的治水方式處理都市內水型水災，而此概念需要將水路與土地結合考量，但台灣都市計畫、土地部門與地政單位無法連結，實際上對於暴雨管理規劃能否如預期減少內水水災對都市帶來的風險有待探討，因此本研究以淡海新市鎮特定區第一期計畫為例，利用該計畫區的帶狀退縮空間作為設置低衝擊開發設施的區域，並根據文獻整理出適合設置在該地點的低衝擊開發設施為透水鋪面，且因為透水鋪面不排擠其他設施的施作空間，較能被利害相關者接受，施作透水鋪面的可行性較高。

土地開發方面，僅需要符合該區域之土地使用管制規則即可開發，因此單一地號之地籍基地若符合上述面積規範及可單獨開發，但台灣的地籍劃設複雜且狹長，將影響帶狀退縮開放空間在單一地號之地籍基地上的留設面積，因此本研究將模擬範圍內之單一地號地籍分成單邊矩形、街角矩形、囊底路形共三種基地型態。

將上述資料作為設定依據，使用SWMM模擬三種情境的逕流變化，情境一為「開發前」此情境假設為操作範圍原始狀態，不透水率為零；情境二為「開發後」，假設為操作範圍依照淡海新市鎮特定區第一期計畫區之都市計畫圖開發後之狀態，土地轉變為硬鋪面，此處以水泥鋪面作為設定參數；情境三為「開發後設置透水鋪面」，此情境為情境二的狀態下，僅在帶狀退縮開放空間設置透水鋪面；最後比較三種情境的逕流變化，得出不同基地型態的逕流減量效果。

## 二、研究方法

### 一、地理資訊系統(GIS)

使用GIS進行研究範圍的住宅區圖層的套疊、面積與長度計算後，使用上述資料分析基地的排水系統，擇定出SWMM模擬的操作範圍並整理範圍內的參數資料，再根據操作範圍內的地籍圖將單一地號之地籍基地分類成不同的基地型態，套疊帶狀退縮開放空間後得出各型態的特性，單邊矩形基地為僅有一側臨道路的帶狀退縮開放空間基地型態；街角矩形基地為基地位於臨雙向路側，且有兩側臨路的帶狀退縮開放空間；囊底路形位於囊底路旁並有兩種以上不同尺寸的帶狀退縮開放空間(圖1)。

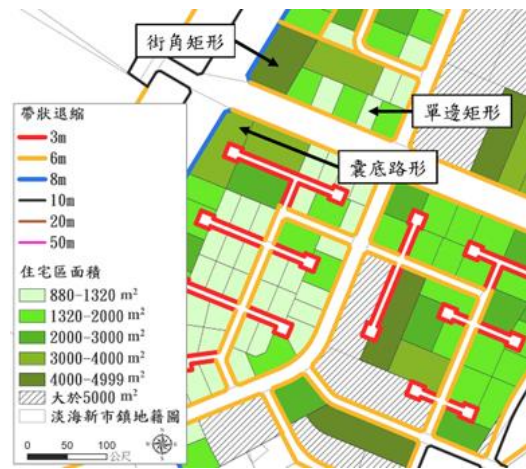


圖1、基地型態示意圖

### 二、雨水管理模型(SWMM)

使用整理出的環境資料建置SWMM模型，並參考暴雨洪水管理模型-EPA SWMM用戶教程(中國水利水電科學研究院, 2011)之附錄設定部分參數；降雨事件使用兩年、五年、十年進行模擬；最後模擬三種情境的逕流變化，情境一為「開發前」此情境假設為操作範圍原始狀態，不透水率為零；情境二為「開發後」，假設為操作範圍依照淡海新市鎮特定區第一期計畫區之都市計畫圖開發後之狀態，土地轉變為硬鋪面，此處以水泥鋪面作為設定參數；情境三為「開發後設置透水鋪面」，此情境為情境二的狀態下，設置建築保水規範與僅在帶狀退縮開放空間設置透水鋪面；最後比較三種情境的逕流變化，得出不同基地型態的逕流減量效果。

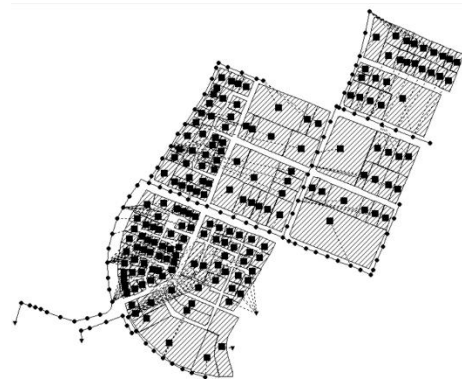


圖2、SWMM模型建置

### 三、模擬條件

本研究SWMM模擬的子集水區面積大小，以單一地號之地籍基地且符合最小土地開發面積做為劃設依據，並將模擬結果以不同基地型態進

行洪峰流量差異的比較，以減少影響因素；經整理後本研究將操作範圍內之基地型態歸類成單邊矩形、街角矩形與囊底路形，共三種；此外本研究設置的低衝擊開發設施為透水鋪面，並僅設置在臨道路旁的帶狀退縮開放空間，最後以兩年、五年和十年重現期的降雨事件作為模擬參數。

### 參、模擬結果

由模擬結果可知，在兩年、五年與十年重現期的降雨事件下，由數據分析各基地型態在設置透水鋪面後可回復的逕流減量變化，單邊矩形平均可回復54%~68%的洪峰流量，街角矩形基地可比開發前減少20%-72%的洪峰流量，囊底路形基地可比開發前減少70%-100%的洪峰流量。

透過圖3~圖5可知單邊矩形在三個重現期洪峰流量增加的部分較設置透水鋪面後減少的洪峰流量多，顯示單邊矩形基地設置的透水鋪面不足以負擔開發後增加的洪峰逕流，且隨著降雨事件增加，其逕流減量效果在十年重現期時有降低的狀況；街角矩形基地在各降雨事件下減少的洪峰逕流量為三種基地型態中最高者，且皆大於開發後增加的洪峰流量，代表街角矩形基地設置的透水鋪面可負擔開發後增加的洪峰逕流，但隨著降雨事件增加其逕流減量效果有趨緩的狀況。

囊底路型基地由前述可知，較開發前減少的洪峰流量大於街角矩形基地，但根據圖3~圖5可發現，囊底路形基地增加的洪峰流量為三種基地型態中最低者，而各降雨重現期中，囊底路形基地設置透水鋪面後可減少的洪峰流量，皆大於該型態基地增加的洪峰流量，因此使該基地型態比開發前減少的洪峰流量高於街角矩形，此外，囊底路型基地的逕流減量效果在十年重現期時有降低的狀況。

因此，由前述可知囊底路形基地與街角矩形基地在帶狀開放空間設置透水鋪面可負擔開發後增加的洪峰逕流，並提供額外的保水能力，其中囊底路形的逕流減量效果較街角矩形基地高，但隨著降雨重現期增加兩者差異越不明顯

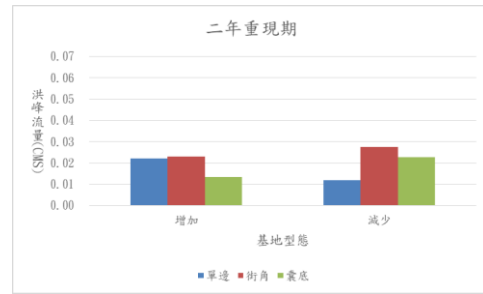


圖3.二重現期增減的洪峰流量變化

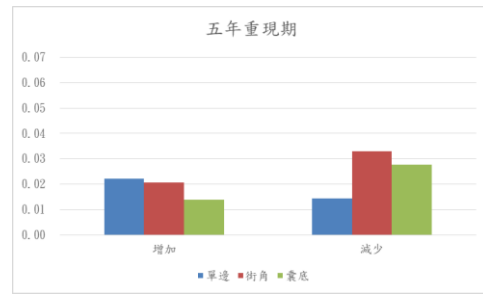


圖4.五重現期增減的洪峰流量變化

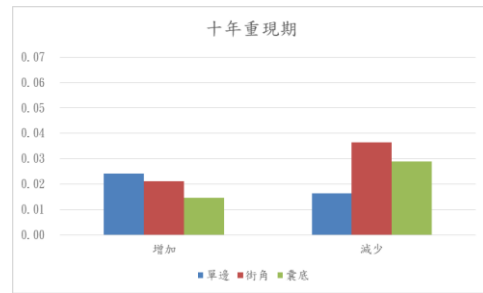


圖5.十重現期增減的洪峰流量變化

將前述增減的洪峰流量相減後得出各基地型態的就流減量效果，透過圖3可知，各基地型態的逕流減量效果隨著降雨重現期越大逕流減量的程度趨於緩和，顯示透水鋪面在較大的降雨重現期事件中逕流減量的效果會降低。

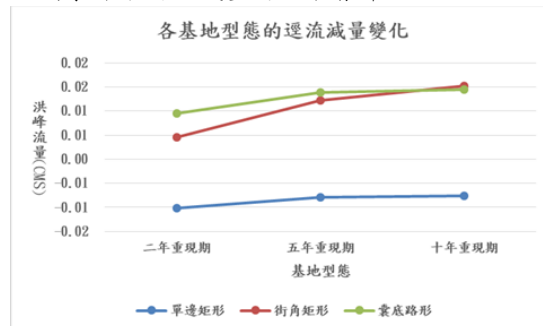


圖6.各降雨重現期增減的逕流減量變化

根據各基地型態的特性，單邊矩形基地僅有一側帶狀退縮開放空間，而街角矩形與囊底路形基地為具有兩側或兩側以上的帶狀退縮開放空間，可設置透水鋪面面積比例較多(表1)，由此

可推論各基地型態影響帶狀退縮開放空間留設的位置，進而影響透水鋪面設置比例，使基地的逕流減量效果受到影響。

表1.透水鋪面比例

基地型態	透水鋪面比例
單邊矩形	5%~23%
街角矩形	7%~41%
囊底路形	3%~40%

#### 肆、結論

本研究以淡海新市鎮特定區第一期計畫排水分區後段-2進行模擬分析後的結論如下:

1. 由模擬結果可知，單邊矩形平均可回復54%~68%的洪峰流量，街角矩形基地可比開發前減少20%-72%的洪峰流量，囊底路形基地可比開發前減少70%-100%的洪峰流量
2. 囊底路形與街角矩形基地在帶狀開放空間設置透水鋪面可負擔開發後增加的洪峰逕流，並提供額外的保水能力，其中囊底路形的逕流減量效果較街角矩形基地多，但隨著降雨重現期增加兩者差異越不明顯
3. 透水鋪面在較大的降雨事件中逕流減量的效果會降低。
4. 各基地型態影響帶狀退縮開放空間留設的位置，進而影響透水鋪面設置比例，使基地的逕流減量效果受到影響。

#### 伍、建議

1. 可設置其他適合袋裝退縮空間的低衝擊開發設施種類，並比較不同的設施逕流減量效果。
2. 可探討透水鋪面設置比例對基地逕流減量效果的影響。

#### 陸、參考文獻

[1]Lashford.C, Charlesworth.S, Warwick.F &

Blackett.M (2017). Modelling the flood riskreduction potential of different SuDS devicesusing Micro Drainage, Prague, Czech Republic.

[2]呂韋儒(2017)。暴雨管理策略應用於都市設計地表逕流減量功效之研究以淡海新市鎮第一期發展區中心開發區為例，銘傳大學都市規劃與防災學系研究所碩士論文，未出版，桃園。

[3]洪鈺翔、吳杰穎(2015)。低衝擊開發設施減少洪峰流量之效果：以南投竹山(含延平地區)都市計畫區為例，銘傳大學都市規劃與防災學系碩士論文，未出版，桃園。

[4]內政部營建署(2014)。水環境低衝擊開發設施操作手冊，台北:內政部營建署。

[5]吳重漢(2013)。暴雨管理納入土地使用管制之研究—以基隆河集水區七堵地區為例，國立高雄大學都市發展與建築研究所論文，未出版，高雄。

[6]中國水利水電科學研究院(2011)。暴雨洪水管理模型~EPA SWMM用戶教程，北京:中國水利水電科學研究院。

[7]淡海新市鎮特定區第一期細部計畫建築物及土地使用分區管制要點。(2014年2月7日)。

[8]全國法規資料庫。https://law.moj.gov.tw/。2018年5月25日。

[9]環境資源資料庫。https://erdb.epa.gov.tw/。2018年9月16日。

[10]TGOS 地理資訊圖資雲服務平台。https://www.tgos.tw/tgos/Web/MetaData/TGOS\_Query\_MetaData.aspx。上網日期:2018年7月15日。

[11] 政府資料開放平台。https://data.gov.tw/dataset/25539。上網日期:2018年10月13日。

[12] 內政部營建署全球資訊網。https://www.cpami.gov.tw。上網日期:2018年3月10日。

## 路面淹水感測器空間配置方案之分析

陳春錦<sup>1</sup>、林宜虹<sup>2</sup>、張哲豪<sup>3</sup>、許至聰<sup>4</sup>、吳祥禎<sup>5</sup>、賴進松<sup>6</sup>、張明瑞<sup>7</sup>、

張向寬<sup>8</sup>

### 摘要

由於物聯網設備低度耗能與微型體積，應用在路面淹水感測器的設計規格上，展現出不用外接市電以及不佔土地空間兩項實務優點，使得淹水觀測具有相當可行性。另一方面，過去評估淹水災害影響範圍具有其困難度，導因於傳統收集資料方式非常受限，在災中有限人力物力情況下，難以精確描繪出受災之空間區段。前述路面淹水感測器的出現，正能夠提出解決方案。有別於傳統口耳相傳的量化困難，或是只有最大淹水深度的靜態描述，透過各個空間位置上淹水水位動態過程的記錄與傳遞，可以具體反映真實環境淹水情況。透過此記錄與淹水模擬結合，更可以由點而面，隨時間歷程顯示淹水範圍。

現階段地方政府在水利署的支持下，正積極佈設大量物聯網規格的路面淹水感測器，以期能夠建立完整的觀測網。然而，佈設位置的有效性，就成為規劃上一個重要的評估。本研究以歷史暴雨事件為基礎，根據其時空隨機性來反演大量暴雨情境，並結合高效能淹水模擬，評估出發生淹水的高機率格網位置；考量宜蘭地區平坦地形的因素，萃取出路堤分割影響，將各淹水格網對應為到路堤區段；最後以路面淹水流動特質，劃分出相對獨立的淹水範圍，以高機率的路堤區段來定義感測器佈設位置。此一評估法則包含水流全動力物理法則，以及空間特徵區隔，能夠有效化繁為簡，評估找出合宜的路面淹水感測器位置。

**關鍵字：**路面淹水感測器、多情降兩模擬、巨量淹水資料庫、

---

<sup>1</sup> 陳春錦：宜蘭縣政府水利處處長

<sup>2</sup> 林宜虹：交通大學博士班研究生

<sup>3</sup> 張哲豪：台北科技大學土木工程系副教授

<sup>4</sup> 許至聰：財團法人國家實驗研究院，國家高速網路與計算中心，副研究員

<sup>5</sup> 吳祥禎：財團法人國家實驗研究院，國家高速網路與計算中心，副研究員

<sup>6</sup> 賴進松：國立臺灣大學水工試驗所研究員

<sup>7</sup> 張明瑞：國立臺灣大學氣候變遷與永續發展研究中心博士後研究員

<sup>8</sup> 張向寬：國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心助理研究員

## 壹、前言

過去關於淹水狀態描述，在災中受限於人力、物力情況下，難以精確描述受災之空間區段，抑或是只有最大淹水深度之靜態描述。在物聯網設備路面淹水感測器的出現後，正能替上述情況提出解決方案，透過各個空間位置上淹水水位動態過程的記錄與傳遞，可以具體反映真實環境淹水情況。藉由此記錄與淹水模擬結合，更可以由點而面，隨時間歷程顯示淹水範圍。地方政府在水利署支持下，正積極佈設大量物聯網規格的路面淹水感測器，以期建立完整的觀測網，因此，佈設位置的有效性則是一重要評估。

## 貳、研究方法

本研究以宜蘭縣蘭陽溪流域為研究場址，以過去發生在流域的歷史暴雨事件為基礎，根據其時空隨機性來反演大量暴雨情境，建立降雨巨量資料庫，並結合數值模式描述流域狀態，模式依據蒐集流域內之地文、水文資料、以及高精度 DEM 輔以調整，使模式具一定正確性與敏感性，且通過一連串的調校也使模式能達到高效能運作，結合巨量降雨產製多情境淹水圖；透過大數據對淹水分佈進行空間統計分析，以及考量研究區域之地形因素加入路堤區塊，找出合宜之路面感測器位置，研究流程如圖 2。

### 一、隨機降雨分布演算

本研究主要根據降雨在時空隨機性及相關性衍生大量暴雨情境，並結合高效能淹水模擬，評估出發生淹水的高機率格網位置，因此在建立淹水的高機率格網位置評估機制前，需先發展可考量降雨在時間及空間相關性之區域降雨情境模擬機制。Wu et al. (2006) 定義降雨序列主要由不同場次之降雨事件所組合而成，而各降雨事件又由不同降雨延時、降雨量、雨型

及事件間隔時間所組成，故降雨事件發生次數 (number of rainstorm)、降雨延時 (storm duration)、降雨量 (rainfall depth)、雨型 (storm pattern) 及事件間隔時間 (inter-event time) 為組成降雨序列之基本元素，稱之為降雨特性，如圖 1。Wu et al. (2006) 以多變量蒙地卡羅方法為基礎，針對各降雨事件之統計特性而發展一套隨機降雨序列模擬機制 (Stochastic Rainfall Series Generation model, SRS) 並依降雨特性將模式區分成三部份：(1) 降雨事件發生次數之模擬；(2) 降雨延時、降雨量及事件間隔時間之模擬；及 (3) 雨型之模擬。因本研究主要著重於不同強度降雨事件對淹水熱點界定之影響，故只針對降雨特性中之組成降雨組體圖之因子 (降雨延時、總降雨量及雨型) 進行分析與模擬。

因降雨特性中同一場事件之總降雨量隨測站位置而有所差異，故可視為空間變數，另雨型 (即無因次降雨比率) 除了同一單站內各時間點之降雨比率值不同可被視為時間變數外，同一時間點之不同站的無因次降雨比率值亦有所不同，亦可被視為空間變數，故雨型應屬於時間及空間變數。因此，區域降雨序列模擬機制主要以 SRS 法為基礎，並考量測站/QPE 格網點之降雨特性在時間上的相關性外，亦考量不同測站/QPE 格網點間降雨特性之空間相關性下發展而成，模式首先建立降雨特性在時間及空間相關性結構後，分別進行降雨特性之時間及空間變數模擬，之後在組合成降雨事件之降雨組圖衍生值。

### 二、高效能淹水數值模式

#### (一) 模式更新與調整

本研究區域範圍為宜蘭縣蘭陽溪流域，以水利規劃試驗所第三代淹水潛勢圖 Sobek 數值模型為基礎，模式當中水系主要包含明渠河道與下水道兩大部份，模式中水系分布如圖 3，蒐集蘭陽溪流域內相關之地文資料與參考縣政府近年來工程更新資料，以此將既有模式更新

至接近現況環境。完成模式更新後，則針對模式中水文、地文、結構物，輔以高精度數值地形模型細化淹水模式，進行整體性高效能調校，提升模擬成果正確性與敏感度。

#### (二) 高機率網格篩選

將 3000 組降雨事件以 SOBEK 二維淹水模式進行情境模擬並將成果統計分析，在剔除淹水深度未滿 0.1 公尺的成果後，依據每一個 20m DEM 網格內發生過淹水次數進行篩選，統計成果如圖 4，可以得出淹水次數差異的分佈圖，單一網格在經過 3000 次情境模擬後，發生淹水次數越多，代表在目前模式狀態下，該網格其淹水發生的機率相對高。

### 三、路面淹水感測器位置

#### (一) 獨立淹水區塊劃分

若使用高機率網格進行感測器篩選，二維淹水模式使用 DEM 網格為 20m 網格，對應至真實情況略顯細緻，為在感測器數量限制下能有效分佈，將進一步把淹水分佈情境變化與路堤效應納入考量。淹水分佈受地形、降雨情境影響，會具有其範圍性。

於本研究中模式模擬 DEM 是固定的，經上述輸入 3000 降雨情境後可得 3000 場不同情境之淹水範圍，從中隨機挑選 15 場淹水情境，首先針對各場情境中將淹水區塊挑出，再將各場情境的淹水區塊合併，分析水的流動範圍與各淹水區塊間之交互影響，在考慮多種情境淹水下的空間變化，挑選出獨立淹水區塊與其最大影響範圍，如圖 5。

#### (二) 高機率路堤區塊篩選

考慮路堤效應影響下，以蘭陽溪流域範圍的交通村里圖層為基礎，剔除交通用途與河道經過處後的路堤區塊做為後續空間分析之圖資。

首先將路堤區塊圖與高機率網格進行套疊統計，得到各路堤區塊中平均淹水次數與最大淹水次數。接著將統計後的路堤區塊套疊獨

立淹水區塊，對應出各個路堤與其關聯之淹水區塊，於每一個獨立淹水區塊中挑出平均淹水次數最多的路堤區塊，如圖 6。

#### (三) 感測器點位篩選

得到在多情境淹水分析底下平均淹水次數最多的路堤後，則可在該路堤區塊中進行感測器點位選址。經由高機率網格統計，可得在 3000 場淹水情境下各網格之淹水次數，因此套疊路堤區塊與高機率網格後，即可得到在空間統計中最易發生淹水之點位。

完成全流域的感測器點位篩選後，可搭配過去歷史災點統計分析熱點，提出感測器位置與優先序建議，感測器位置挑選如圖 7。

### 參、結論

一、降雨巨量資料為分析過去 15 場發生於蘭陽溪流域的歷史降雨事件，以降雨總量、延時及雨型三種參數進行多變量蒙地卡羅空間分佈演算，結合經過更新與高效能調校之流域模式，產製出多情境淹水潛勢數據。降雨與淹水巨量資料皆與蘭陽溪流域有高度接合，具有流域特性之時空間分佈特色與物理意義。

二、考量流域地勢平坦納入路堤區塊，搭配分析巨量淹水資料而得之獨立淹水區塊，可明確劃分出各淹水區塊影像之路堤範圍，可先排除同一淹水來源區塊重複設置多支路面淹水感測器之可能性。再透過分群概念，挑出各淹水區塊中，統計下最易發生淹水之路堤區塊。

三、高機率網格為統計巨量淹水資料下之淹水熱點，再套疊最易發生淹水之路堤區塊，即可挑選出區塊中的淹水熱點，在考量研究區域特性同時，於該點佈設路面淹水感測器應亦可捕捉不同淹水區塊之淹水歷程。

四、根據此研究流程挑選之路面淹水感測器位置可涵蓋流域內高機率淹水之位置，於後續進行感測器回傳記錄與模擬數值比對時，內插感測器數值成面資料應可更貼近淹水模擬分佈情

況。

參考文獻

1. Wu, S.J., Tung, Y.K, and Yang, J.C. (2006) "Identification and stochastic generation of representative rainfall temporal patterns in Hong Kong territory." *Stoch. Eviron. Res and Risk Ass.* , 20(3), 171-183.

圖與表

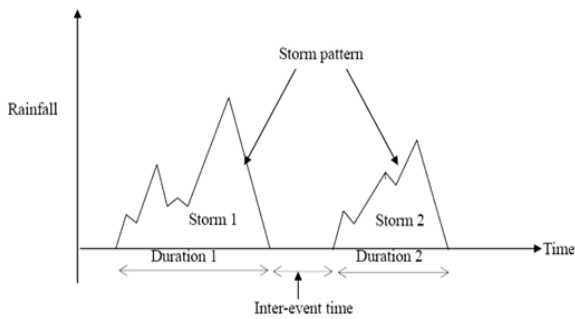


圖 1 降雨特性之定義(Wu et al., 2006)

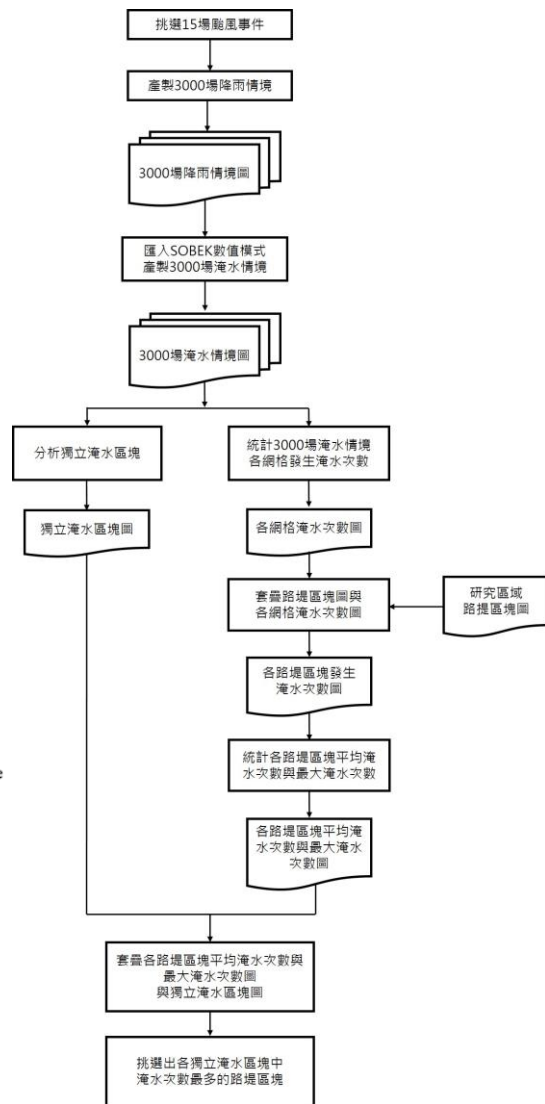


圖 2 研究流程

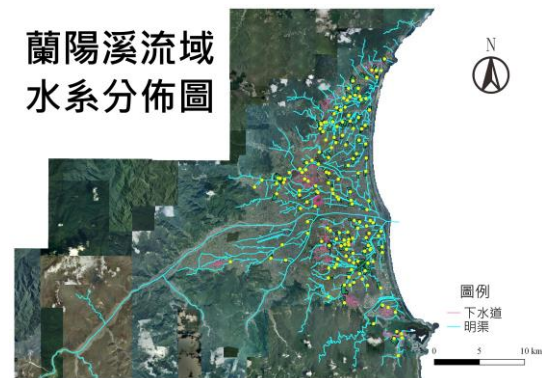


圖 3 蘭陽溪流域分佈



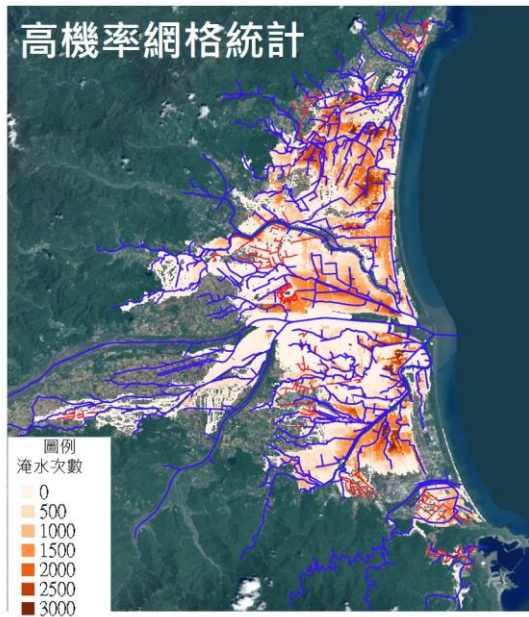


圖 4 蘭陽溪流域高機率網格

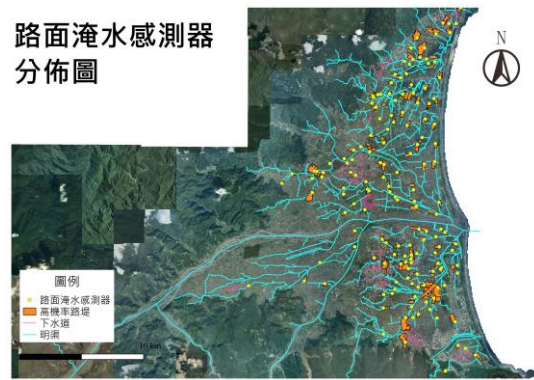


圖 7 路面淹水感測器位置

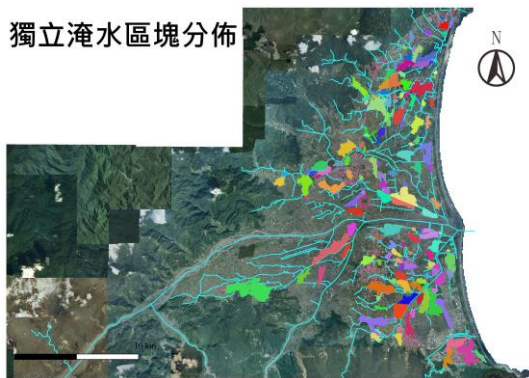


圖 5 獨立淹水區塊

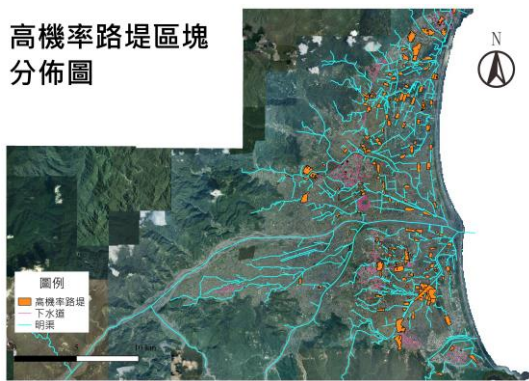


圖 6 高機率路堤區塊

## 農田水利於災害前中後之災防應變作為

謝儒震<sup>1</sup>、王泰盛<sup>2</sup>、涂鏡松<sup>3</sup>

### 摘要

近年全球各地水災、風災、旱災與震災等災害頻傳，農田水利亦同受豪雨、颱風、乾旱及地震等天然災害侵襲之威脅。為此，農田水利會(以下簡稱水利會)每年均依規定進行各會轄區內所屬閘門之安全檢查及農田排水清淤作業與埤塘安全檢查，期藉由不斷改進防災業務之辦理方式，加強災前預防措施，提升水利會災害防救及緊急應變能力，視時調度資源加速受災區域之災後復原情況，達到減災目的。

水利會透過災前之防災作為，加強災前之相關整備措施，如閘門安全檢查、農田排水清淤作業、埤塘安全檢查等，並辦理農田水利防災應變演練，提供氣象預報分析與即時訊息傳遞通報等，以提升水利會對災害預防成效，達成減災目的。在災害應變當中，相關防災訊息可藉由資訊平台(如通訊軟體 Line 群組、Line 官方帳號推播、簡訊發布平台與災情通報系統等)，提供全國水利會及工作站等防災應變管理人員，獲取即時氣象資訊或相關防災資訊等，以利水利會適時調度工作站之災中應變作為與災後現勘作業；水利會於災中如遇災害發生，亦可透過資訊平台(如通訊軟體 Line 群組與災情通報系統等)快速傳遞災害資訊，並適時給予防災相關人員緊急應變策略建議等；災害發生過後，可透過無人飛行載具突破空間地形等障礙，快速記錄災害現況，以減少耗費的時間及人力。期望透過災害前中後之災防應變作為，加強災害前之整備措施，提升防災業務執行效率，強化災害防救功能，適時調度資源與後續修復作業，減少因天然災害所造成之損害，以保障水利會灌溉事業轄區內生產環境及農作物。

**關鍵字：**農田水利、颱風、豪雨、防災應變

---

<sup>1</sup> 財團法人農業工程研究中心+助理研究員

<sup>2</sup> 財團法人農業工程研究中心+副研究員

<sup>3</sup> 行政院農業委員會+技正

## 壹、前言

臺灣地處亞熱帶，並位於環太平洋地震帶上，每年常遭受颱風、豪雨、乾旱及地震等天然災害侵襲之虞。加上，地勢山高水急，每遇颱風或豪雨季節，大量雨水自高山宣洩而下，往往對平原低窪地區造成相當嚴重的災情，對農田水利會(以下簡稱水利會)所轄之灌排渠道等水利設施造成嚴重威脅。根據中央氣象局歷年資料統計，自西元 1911 年至 2017 年間，此 107 年間共有 368 個颱風侵襲臺灣，平均每年有 3 個至 4 個，而最多曾受到 7 次颱風侵襲。而當中主要災損比例以農業損失占 52% 居首位，水利設施損失占 26% 次之，大多是由於 7 月至 10 月之颱風(占 85%)及豪雨(包括梅雨，占 11%)所造成，其所造成的臺灣氣象災害損失即達 96%，可見颱風及豪雨引起之災害對臺灣經建成長危害非常大。為此，期望透過防災應變作為，加強災害前之整備措施，提升防災業務執行效率，強化災害防救功能，減少災害所造成損害，以保障水利會灌溉事業轄區內生產環境及農作物。

## 貳、災害來臨前農田水利之主要

### 災前整備作為

目前有關農田水利之災前整備作為主要有設施整備抽查、防災應變演練、預報分析與即時通報等，並經由研析結果成為防災資訊，於颱風/豪雨事件前提供水利會做為重點區域之調度防災資源與防災整備佈署之參考，以利防災業務作業，達到防救減災之目的。其主要內容如下：

#### 一、設施整備抽查

由於水(風)災在農田水利所造成之危害，主要為農田水利設施開門之損毀及農地之侵害；目前全國水利會灌溉面積約 37 公頃，灌溉渠道

總長度約 4.5 萬公里，排水路長度約 2.6 萬公里，合計灌排總長度達 7.1 萬公里，為降低颱風天然災害對於農民賴以為生之農地危害及農田水利設施之損壞，因此，辦理年度防災整備業務，即於汛期前(4 月底前)至全國水利會辦理列管防災開門安全檢查暨列管農田排水清淤抽查訪評工作，透過抽查訪評業務，加強水利會對於防災開門安全檢查與農田排水清淤工作之重視，並徹底執行相關工作，以確保農田水利設施正常且可減少生產環境受災之風險，如圖 1 所示。後續彙整抽查訪評所見缺失，持續追蹤各水利會於汛期來臨前完成之改善作為，並列管追蹤未完成改善之處所，直至改善完成為止，如圖 2 所示。

#### 二、防災應變演練

臺灣每年五月起已漸步入颱風季節，颱風所帶來豪大雨，往往造成重大災情發生，各水利會為減少災害發生，於防汛期間執行防汛任務，督導巡防轄區各主要進、排水口、制排水開門、各主要灌排渠道、水工構造物及附屬水利設施等之搶修、搶險工作，並成立緊急應變小組蒐集傳遞、聯繫災情消息及救災有關事項，為使各水利會於平時維護水利建造物及面對水、旱災害威脅時，尤其為數眾多的水庫與埤池之控制水門及壩堤災害，能應用正確、有效方式辦理緊急災害防救作業，以妥善處置及應變，故邀請水利防災技術應用領域之專家與學者，辦理年度水利會防災應變演練，期以提升管理人員緊急應變之相關知能，並加強防災及救災應變之熟練度，增益水利會同仁辦理農田排水與水開門，以及水庫埤池等水利設施之操作維管的安全性及應變效率，如圖 3 所示。

#### 三、預報分析

年來數值天氣預報(Numerical Weather Prediction, NWP)是全世界氣象研發及作業單位積極發展的客觀預報技術，此技術是依大氣的物理特性及動力原理，將描述大氣運動及天氣

系統發展的方程組以差分方程表示後的模式，利用超級電腦的快速運算進行大氣的結構分析，並推估天氣系統的未來演變，所得的資料可以產製大範圍天氣系統的預報圖，為發布逐日天氣預報的重要參考資訊。經由中央氣象局或國家災害防救科技中心(NCDR)發布之天氣預報分析颱風豪雨臨前氣象狀況，如圖 4 所示，並提出預警提醒訊息，以掌握颱風豪雨最新氣象現況並提早因應可能的變化。亦即當颱風事件來臨前，綜整中央氣象局、國家災害防救科技中心(NCDR)等相關單位氣象資訊，研判可能具備致災高風險之水利會轄區，以利事先預防，減輕災害。

#### 四、即時通報

於發布颱風海上警報或豪雨特報且農委會暨所屬機關成立應變小組期間，於網路通訊平台(Line 群組或 Line@官方帳號)提供中央氣象局或國家災害防救科技中心(NCDR)發布之氣象資訊等資料，供防災應變管理人員及時收看，以利防災工作進行，如圖 5 所示。為提供情資予全臺水利會相關防災人員，藉由網路通訊平台(Line 群組或 Line@官方帳號)，於颱風/豪雨來臨前，即以手機通訊軟體(Line)通報各水利會之相關防災人員，目前已約有 256 位人員加入「農田水利天然災害防救」Line@官方帳號，倘遇天氣不穩定狀況，可即時收到預報之天候動向訊息與颱風警報資訊等颱風情資研判資訊，以利水利會與所屬工作站防災同仁參閱，如圖 6 所示。

### 參、災害來臨時農田水利之主要

#### 應變作為

目前有關農田水利之災中防災應變作為主要有災情通報系統、防災推播與即時通訊作業，以及遠端勘災作業等，可於颱風/豪雨事件前提供水利會做為重點區域之調度防災資源、

防災整備佈署與災後復原作業之參考，以利防災業務推動，達到防救減災之目的。其主要內容如下：

#### 一、災情通報系統

為使颱風豪雨災害應變期間，農田水利會緊急應變小組之管理、通報作業機制得以資訊化，使災情通報之即時資訊經由系統平台得以掌握，因此建置「農田水利災情通報系統」(以下簡稱本系統)，以強化災情資訊掌握的效能與效率，如圖 7 所示。目前系統可提供依照不同權限，不同角色及裝置皆可於平台進行資料交換及取得權限範圍內的可視資料。由於為使災情通報能即時且不受限於地理位置影響，而不易進行資料傳輸及整合，系統亦提供民眾速報及手持裝置通報之功能，以更利於即時的通報資訊傳遞和發佈。系統首頁為使用者一開始進入本系統之頁面，因此於首頁中將提供公告資訊、雨量資訊、淹水警戒等重要資訊內容，並於左下角位置提供使用者登入之連結。系統目的為符合使用者線上填報操作便利，透過簡單、快速、清楚明瞭、功能流暢及完善之系統，提供各水利會及工作站防災人員於各地透過網路至系統上完成災損填報，並使管理者在有網路的地方，就可以輕易使用電子設備(手機、平板或電腦)獲取各地災況，給予災中緊急應變建議，如圖 8 所示。因此，透過運用科技及資訊化設計，完成災情通報系統建置，可提供監督單位及全台各水利會各地淹水警戒及即時雨量資訊，且使用者於災中時期亦可透過系統填報各地災害，使管理階層掌握各地災況，即時建議應變措施，避免災損擴大，提升各水利會轄管之範圍的防災決策功效，輔助相關管理單位進行決策擬定，使有效執行防災減災，以保障水利會灌溉事業轄區內生產環境及農作物。

#### 二、防災推播與即時通訊作業

為使各水利會防汛人員即時獲取最新相關氣象資訊及農委會公告之應變訊息，於利用通

訊軟體 Line 建立農田水利災害防救之官方帳號。初步於 106 年度新增農田水利災害防救 Line 官方帳號完成，並於 107 年度正式推廣使用。此 Line@官方帳號主要提供氣象相關資訊的推播功能，以廣播方式將任何大小事的資訊傳達給加入此官方帳號的使用者，藉使防災人員即時獲取最新相關資訊。如圖 9 所示。

為提供多管道發布即時訊息之傳遞途徑，於災害來臨前，除透過 Line 群組、Line@推播平台、災情通報系統等發布相關天氣資訊及農委會長官交辦通知事宜，亦透過簡訊發布平台廣播及發布最新天氣資訊或相關防災訊息等，俾利應變小組防災管理人員提早做好準備，有效執行防災減災，以保障水利會灌溉事業轄區內生產環境及農作物。如圖 10 所示。

### 三、遠端勘災作業

無人機是沒有人員在駕駛艙操作的飛行器，正式名稱為「無人飛行載具」(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)。無人飛機最早出現於 1917 年，主要應用於軍事用途，後來逐漸用於作戰、偵察及民用遙測飛行平臺；隨著資訊科技的迅速發展無人飛行載具系統的性能不斷提高，應用領域也隨之迅速拓展，由於具有輕便、隱蔽性好、機動靈活、低成本等特點，目前世界各國已發展各種用途，無論是娛樂傳播、農林漁牧業、地質資源探勘、基礎建設檢查、緊急災難應變、環境監測、空間資訊、警備巡防…等，均使用無人機搭載攝影機對於目標環境進行災害監控、環境探勘等觀察行為。

無人飛機機動性極高，安全而且價廉，容易獲得極高的地面解析度影像，無人飛機同時酬載具備定位定向導航系統、自動飛行控制、即時影像、無線通訊系統及多種感測器等功能模組，使得空間資料的蒐集與調查更加便利而快速，大幅提昇了空間資訊取得之時效，對於災害發生後，可把握適合空照天候，立即執行航攝作業，進行災區航攝影像蒐集，可迅速掌

握災情，爭取時效，通盤瞭解災區狀況，也可對於保全的例行巡邏，異常狀況的即時追蹤。

近年無人機應用於災害已相當頻繁，可列為標準現勘配備工具之一。因此，針對天然災害造成農田水利設施受損，除透過防災減災之技術發展控制災損外，亦可藉由無人機加速災害判釋，快速紀錄並突破空間障礙，可加速災損勘災，以減少所耗費的時間與人力。若現場災損情形可透過空拍影像分析後所產生之 GIS (Geographic Information System) 災損判釋成果，提供災損查報所需之空間輔助圖資，以協助地方人員進行勘災作業並加速災後復耕。

### 肆、災害發生後農田水利之主要

#### 復原作為

颱風/豪雨在農田水利所造成之危害，主要為農田水利設施損毀及農地浸害，災害發生後，除彙整災情通報系統各水利會所提報之災情，並透過災情通報狀況表(含災情照片、災情說明、災情統計等)掌握災損情形，並彙整各水利會之災害搶修工程概要表及申請災害搶修經費補助明細表，概估搶修經費，利於適時調度資源與後續修復作業。

全國水利會除了可有效管理調度農業用水外，在國家整體水利防災系統當中也扮演重要角色。未來仍需持續強化農田水利於災害前中後之防災應變作為，除增加預報頻率與準確度分析，提供更精確之氣象預報資訊達到更精準地對不同時間之不同水利會發布警戒外，並增加科技防災利器，以提供更多元之參考資訊。此外，因氣象資訊隨時變化，因此，期望透過災害前中後等一系列防災應變作為，減少災害所造成之損失，強化災害防救能力，提升水利會之災害防救體系與災害預防功能，確保農民灌溉用水權益，以保障水利會灌溉事業轄區內生產環境及農作物。

### 參考文獻

1. 行政院農業委員會(2018)，107 年農田水利天然災害防救業務之研析與推動計畫。
2. 行政院農業委員會(2017)，106 年度農田水利天然災害防救業務推動計畫。
3. 行政院農業委員會(2016)，105 年度農田水利天然災害防救業務推動計畫。
4. 行政院農業委員會(2015)，104 年度農田水利天然災害防救業務推動計畫。
5. 行政院農業委員會(2014)，103 年度農田水利天然災害防救業務推動計畫。
6. 行政院農業委員會(2013)，102 年度農田水利水災災害防救業務推動及災情通報系統建置計畫。
7. 鄭文吉(2013)，雲端服務的類型～IaaS、PaaS 和 SaaS，農業世界雜誌，第 360 期，第 92-99 頁。
8. 行政院農業委員會(2012)，101 年度農田水利水災災害防救業務推動及災情通報系統建置計畫。
9. 行政院農業委員會(2011)，100 年度農田水利水災災害防救業務推動及災情通報系統建置計畫。
10. 行政院農業委員會(2010)，99 年度農田水利水災災害防救業務推動及災情通報系統建置計畫。
11. Zhang, J. X., Gu, Z. M., Zheng, C. (2010), Survey of research progress on cloud computing, Application Research of Computers, pp. 27-2.
12. 行政院農業委員會(2009)，農田排水改善及執行評估委託服務。
13. 行政院農業委員會(2009)，98 年農田灌排設施維護管理經費評估及水閘門資料庫建置。
14. 行政院農業委員會(2008)，水文自動測報技術於灌溉管理應用之研究。

15. 行政院農業委員會(2007)，工程品質督導及天然災害減災策略推廣。
16. 農業工程研究中心(2007)，『農田水利灌溉管理之電子化應用』。
17. 農業工程研究中心(1996)，水文、灌溉監測系統自動化推廣方法之研究。
18. 農業工程研究中心(1985)，桃園農田水利會灌溉管理現代化之研究(桃園大圳灌溉系統遙測遙控工程規劃)，

### 圖與表



圖 1 農田水利會設施抽查

屏東農田水利會改善情形追蹤表




名稱： (缺失情形) 清除淤積、清除雜物 田洋排水	 <p style="text-align: center;">改善前照片</p>
說明： (改善作法) 雇用挖土機清理	 <p style="text-align: center;">改善中照片</p>
說明： (改善結果) 清理完畢	 <p style="text-align: center;">改善後照片</p>

圖 2 農田水利會缺失改善情形追蹤



# 第二十三屆兩岸水利科技交流研討會

**災情通報系統**  
Disaster Information Notification

行政院農業委員會  
COUNCIL OF AGRICULTURE, EXECUTIVE YUAN

協動作業小組專線  
(03) 4521314  
#242 王泰盛 #241 謝儀霞  
#222 謝嘉儀 #245 鄭桂其  
#247 蔡裕竹 #243 鄭世才

水利會淹水警戒  
水利會 淹水警戒 水利會 淹水警戒

宜蘭	雲林
北基	嘉南
桃園	高雄
石門	屏東
新竹	台東
苗栗	花蓮
台中	七嘉
南投	瓊公
彰化	

資料來源 經濟部水利署

系統登入

**防災公告資訊**  
107年度農田水利會防災、抗旱及震災應變研討會-線上報名(已截止) 附件下載 2018-08-08  
107年度農田水利會災情通報系統操作研習-線上報名(已截止) 附件下載 2018-06-08  
107年度農田水利會防災應變演習操作會議-線上報名(已截止) 附件下載 2018-03-14  
106年度各水利會防災應變演習評語  
系統備用調整紀錄及常見問題QA 2017-09-27  
2017-07-05

**防災雨量資訊**  
Disaster Information

雨量站	雨量	更新時間	區域水利會
1 嘉義縣東石鄉_鰲鼓	28.5mm	2018/09/11 11:15	
2 雲林縣莛寮鄉_後寮寮	17.5mm	2018/09/11 11:15	
3 新北市新店區_新店	10.5mm	2018/09/11 11:15	
4 新北市瑞芳區_五分山站	6mm	2018/09/11 11:15	
5 南投縣仁愛鄉_詞眉	4.5mm	2018/09/11 11:15	
6 宜蘭縣蘇澳鎮_烏石鼻	3.5mm	2018/09/11 11:15	
7 宜蘭縣南澳鄉_東澳嶺	3.5mm	2018/09/11 11:15	
8 台北市_台北	3.5mm	2018/09/11 11:15	
9 宜蘭縣南澳鄉_觀音海岸	3mm	2018/09/11 11:15	
10 臺南市柳營區_新營	3mm	2018/09/11 11:15	

資料來源 中央氣象局

Website designed by 財團法人農業工程研究中心 © 2017 聯絡人: 資訊組 陳嘉儀 03-4521314 #222

圖 7 災情通報系統首頁

目前所在位置: 首頁 > 通報列表

通報農委會

連結

編號	姓名	電話	Email	受損地點	受損描述	通報時間	
1	邱			苗栗縣 三灣鄉	林內圳導水路淤積及臨時土堤沖毀	2019/8/9 下午 06:35:00	查詢
2	邱			苗栗縣 南庄鄉	三灣農林共同溝可堪臨時土堤沖毀	2019/8/9 下午 06:32:00	查詢
3	邱			苗栗縣 南庄鄉	南莊圳導水路引水處沖毀	2019/8/9 下午 06:28:00	查詢
4	張		j5521@ms27.hinet.net	苗栗縣 銅鑼鄉	臨時導水路及攔河堰沖毀	2019/8/9 下午 05:19:00	查詢
5	邱			苗栗縣 頭份鎮	豪雨致致進水口水導水路埋沒及臨時攔河堰沖毀	2019/8/9 下午 05:15:00	查詢
6	邱		mustdare@hotmail.com	苗栗縣 頭份鎮	豪雨致致進水口水導水路埋沒及臨時攔河堰沖毀	2019/8/9 下午 05:10:00	查詢
7	徐			苗栗縣 後龍鎮	水尾中圳掩埋	2019/8/9 下午 04:52:00	查詢
8	徐			苗栗縣 後龍鎮	水尾中圳掩埋	2019/8/9 下午 04:51:00	查詢
9	徐			苗栗縣 頭份鎮	臨時攔河堰沖毀	2019/8/9 下午 04:42:00	查詢
10	苗栗竹南工作			苗栗縣 頭份鎮	攔河堰沖毀	2019/8/9 下午 04:41:00	查詢

首頁  
所有事件  
最新通報  
救災機器配置  
抽排運送  
資料下載  
颱風資訊  
水庫資訊  
通報列表  
通報列表 (App)  
閉門列表  
抽排列表  
復建列表

圖 8 通報資訊列表

農田水利天然災害防救

中央氣象局分署

農田水利天然災害防救

圖 9 官方帳號發布之訊息圖示

簡訊簡訊內容

簡訊內容

接收人選取設定

圖 10 簡訊發布平台



## 議題 C.水環境與水生態

## 海底管道流致振动计算分析

俸维晓<sup>1</sup>，许立<sup>2</sup>

### 摘要

海底管道是重要的运输线，由于海洋地形变化非常复杂，在海流作用下管道附近的海床容易发生冲刷现象，从而导致管道悬空。海流流经悬跨段管道时会进一步诱发管道涡激振动，使管道产生相应应力，发生位移，甚至造成结构性的破坏。

文章以跨海输水管群为研究对象，研究了管道的流致振动响应情况。

通过建立三维双向流固耦合模型，利用 realizable k-epsilon 湍流模型模拟流场运动，使用扩散光顺的网格光顺方法，对边界运动导致的计算域变化进行网格更新和网格重构，对跨海管道群在受到横向来流作用的情况进行分析，得到了管道附近流场特性。分析了管道在不同流场下的应力分布，以及在各流场下位移变化。对单根管道布置和管道群布置两种情况下的流场变化、振动机理进行了比较分析。并结合管道固有频率和涡旋脱落频率大小对管道共振、悬跨长度问题进行分析。

**关键词：**海底管道、流固耦合、振动、位移变化、应力分布、realizable k-epsilon 模型

# 低衝擊開發設施於台北市降雨型態下之設置效益探討

郭遠錦<sup>1</sup>

## 摘要

低衝擊開發設施發源於美國馬里蘭州，現已廣泛使用於台北市公有設施，包含學校、公園以及動物園等地。低衝擊開發設施之主要功用在於改變土地使用類型，增加地表滲流量並以窪蓄方式蓄留小部分地表逕流，以消滅地表逕流強度，進而提升雨水下水道餘裕量。

台北市近年降雨特性為降雨強度大、降雨分布不均，以民國 104 年 6 月 2 日暴雨為例，台灣大學站所測得之最大降雨強度達 130mm/hr，造成 8 件 30 公分以上積水通報，主要集中在大安及文山區。民國 105 年 6 月 17 日暴雨，南港舊庄國小測得最大降雨量為 113mm/hr，造成 6 件 30 公分以上積水通報，主要積水位置在信義、南港一帶。民國 106 年 6 月 2 日暴雨，內湖站測得 90mm/hr 時雨量，造成 14 件積水通報，主要集中在中山、內湖及北投地區。

由於台北市降雨型態具特殊性，與歐美地區降雨類型顯著不同，因此本研究擬以實際台北市降雨紀錄所獲得之降雨類型，探討現行低衝擊開發設施在台北市降雨型態下之設置效益以及適用性，進而建議適合台北市降雨環境之低衝擊開發設施，以及現行低衝擊開發之適用範圍，以達設置之最佳效益。

**關鍵字：**台北市降雨類型、低衝擊開發設施、都市排水

<sup>1</sup> 台灣世曦工程顧問股份有限公司正工程師兼計畫工程師

# 應用二維真實孔隙微模型進行孔隙介質中多相流殘餘量之研究

彭俊維<sup>1</sup>、姚建州<sup>2</sup>、林子維<sup>3</sup>、許少瑜<sup>4</sup>、張良正<sup>5</sup>

## 摘要

本研究以實際孔隙微模型進行多相流實驗並且觀察孔隙介質中殘餘量與流量之間的關係，利用 Xray CT 所掃描之二維實際孔隙製成 PDMS 微模型，分別進行汲取及排退，藉由改變注入流量並使用高速相機紀錄照片來進行影像分析。此外，本研究在次汲取的實驗過程中亦同時可觀察新水與舊水之置換作用。本研究應用實際孔隙微模型分析，比較過往文獻之微模型實驗結果及了解孔隙介質中殘餘相的形成機制。

**關鍵字：**多相流、微模型、汲取及排退、殘餘相、新水與舊水

<sup>1</sup> 台灣國立交通大學碩士生

<sup>2</sup> 台灣國立交通大學碩士生

<sup>3</sup> 台灣國立交通大學碩士生

<sup>4</sup> 台灣國立台灣大學助理教授

<sup>5</sup> 台灣國立交通大學教授

# 氣候變遷對水稻種植期距與灌溉用水量影響之研究 Study on the Growth Period and Field Irrigation Water of Paddy Rice under Climate Change

陳清田<sup>1</sup>、張進發<sup>2</sup>、陳信喜<sup>3</sup>

Ching-Tein Chen, Jin-Fal Chang, Hsin-Hsi Chen

## 摘要

受氣候變遷之影響，糧食安全儼然成為全球重要議題，本研究以台灣重要糧食生產區台南為研究區域，首先選用台灣地區常用之CSIRO-MK3、GFDL-CM2.0、GFDL-CM2.1、UKMO -HADCM3、IPSL-CM4等5種大氣環流模式，探討其於短中長期氣候變遷於A1B情境下，台南地區氣溫及降雨量之影響，進而利用相關係數、相對均方差與效率係數等指標，評析Modify Blaney-Criddle及Hamon之推估式，其與Penman-Monteith推估式之差異性，以建立適切之參考作物需水量推估式，最後以累積生長日度數觀點，建立水稻於短中長期不同氣候情境下，作物生長日數、抽穗期開花期程、作物需水量及灌溉用水量，以有效因應氣候變遷及提升灌溉用水調配效能。研究結果顯示，Hamon估算式於推估參考作物需水量之準確性較Modify Blaney-Criddle為佳；於短中長期不同氣候情境下，台南地區一、二期作水稻生長日數及抽穗開花期皆有縮短趨勢，在生長日數以一期作長期氣候後情境下縮短15天(-12.0%)為最大，在抽穗開花期以一期作長期氣候後情境下縮短8天(-16.3%)為最大；於作物需水量則有增加之趨勢，於灌溉用水量則有減少之趨勢，此成果可供不同氣候情境下水稻灌溉用水營運管理與調配利用之應用。

**關鍵字：**糧食安全、氣候變遷、作物需水量、灌溉管理

<sup>1</sup> 國立嘉義大學土木與水資源工程學系副教授

<sup>2</sup> 國立嘉義大學土木與水資源工程學系碩士

<sup>3</sup> 國立嘉義大學土木與水資源工程學系碩士生

## 利用深度學習追蹤魚群活動行為之研究

林志憲<sup>1</sup>

### 摘要

淨水場之地面原水取自於河川，隨著社會安全與環境保護意識提升，政府與民間對於賴以維生的水資源莫大重視。由於環境變遷，工業廢水排放、機器故障、恐怖行動、農藥使用及毒魚等行為均可能造成水體汙染，進而危害人類。傳統檢測水源毒性汙染係由人員定期觀測養魚箱魚群行為做為判斷，但觀測間隔期間卻是空窗期；而現場取樣送實驗室檢驗卻是緩不濟急。因此利用電腦計算在養魚箱的魚群行為監測將是研究方向。

於淨水場現有的養魚箱前，架設網路攝影機傳送及記錄影像，將影像以電腦視覺處理萃取出魚群特徵，搭配人工智慧深度學習辨識魚群數量、活動軌跡及行為，以作為後續毒性汙染的預警機制，或供未來生物活動行為監測記錄的工具。

**關鍵字：**人工智慧(*artificial intelligence*)、深度學習(*deep learning*)、魚體行為(*fish behavior*)、電腦視覺(*computer vision*)、養魚箱(*Aquarium*)

<sup>1</sup> 台灣自來水公司+工務課長

## 曝氣增氧設備之葉扇形式對水中溶氧分佈及流場之影響研究

陳以容<sup>1</sup>、侯文祥<sup>2</sup>、黃大緯<sup>3</sup>

### 摘要

傳統戶外養殖池的增氧方式，多以曝氣水車增加水中溶氧，養殖池的水中溶氧高低與分佈，關係著水產養殖生物順利收成與否。養殖池中因大面積水體關係，有氧氣分布不均水流動性不佳或整個水區氧氣不足等情形產生。因此，養殖業者在養殖池中配置曝氣設備，除了讓養殖池之水質能保持穩定，還能供給氧氣與減少分層現象發生。

台灣戶外養殖池用的曝氣設備大多以葉輪式水車為主，葉輪式水車係以轉動葉輪將池水推動揚起，促使養殖池水與空氣中氧氣接觸產生增氧效果，並且帶動水體循環。以溶氧分佈結果分析增氧效益，葉輪式水車之高溶氧擴散範圍出現在表水層，但隨著水深越深及距離水車越遠其溶氧擴散越低，所造成的流場將溶氧往水下及往水表流場後方傳遞之效率有限。因此，本研究針對曝氣設備的增氧方式進行實驗分析與探討。

本研究將曝氣設備葉扇方式改變，從傳統的垂直式攪動曝氣改為水平式曝氣，葉扇形狀及配置也有所不同，先以 CFdesign 模擬葉扇攪動產生的水流流場分析，再以 3D 列印出 1:20 比例的模型進行實驗室測試，確認模擬水流流場分佈與小型流場實驗分佈一致後，進行 1:1 比例實體製造應用，並於 2018 年 5 月取得發明專利。本研究發明之曝氣設備，2HP 增氧水深可達 4M，增氧速率於 5000 噸水體僅需 5 分鐘可從 2ppm 提升至 6.5ppm，水流呈現水平擴散不會產生漩渦攪動底泥，沒有使底層營養鹽揚起的顧慮，可應用於景觀湖泊，深水河道，廢水汙水廠及養殖池等場域，值得推廣。

**關鍵字：**曝氣增氧設備、溶氧、流場、葉扇形式、水車

<sup>1</sup>國立台灣大學生物產業機電工程學系博士候選人

<sup>2</sup>國立台灣大學生物環境系統工程學系教授

<sup>3</sup>江蘇綠陵百農可生物科技有限公司董事長

## 都市快速淹水模擬應用與即時模擬

王嘉和<sup>1</sup>、游翔麟<sup>2</sup>、張倉榮<sup>3</sup>、王嘉瑜<sup>4</sup>、林吉堃<sup>5</sup>、謝正義<sup>6</sup>

### 摘要

近年來發生極端降雨事件有增加趨勢，短延時強降雨的暴雨強度越來越大，如 2015/06/14 公館雨量站 131.5mm/hr、2015/07/23 劍潭雨量站 114.5mm/hr、2015 年蘇迪勒颱風 104.5mm/hr、2016/06/17 茶場雨量站 113.5mm/hr、2017/06/02 三芝雨量站 112mm/hr、2018/09/08 挹翠雨量站 138mm/hr，這些強降雨嚴峻考驗排水設施的排水能力，使得都市區域積淹水災害事件頻傳，而淹水模擬結果可提供防洪防災工作之參考，可有效降低災害帶來的生命財產損失，但現今都市淹水模式因計算時間較長而導致其仍無法大量運用於即時積淹水預報，多為利用設計雨型以及雨量進行災前的淹水潛勢分析，缺乏時效性，難以做到即時預警應變之應用。

本研究以快速都市淹水模式進行快速積淹水模擬，可在 15 分鐘內完成 6 小時降雨之都市積淹水模擬，有利於即時積淹水評估以大量淹水模擬，因此，可結合各種降雨觀測以及預報資料等數據資料進行即時積淹水評估以及各種情境暴雨內澇淹水模擬分析，以進一步評估預警應變作為預佈、應急、提醒等做為之參考。

**關鍵字：**淹水模擬、及時演算、淹水潛勢、災害預警、降雨預報

<sup>1</sup> 臺灣大學氣候變遷及永續發展研究中心工作單位 助理研究員

<sup>2</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 博士生

<sup>3</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 教授

<sup>4</sup> 臺灣大學氣候變遷及永續發展研究中心 研究助理

<sup>5</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 研究助理

<sup>6</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 副教授



## 都會區快速淹水模擬模式與下水道模式結合與應用

林吉堃<sup>1</sup>、游翔麟<sup>2</sup>、王嘉和<sup>3</sup>、張倉榮<sup>4</sup>

### 摘要

近年來發生極端降雨事件的頻率增加，使得都會區淹水災害事件頻傳，藉由淹水模擬結果提供防洪防災工作之參考，可有效降低災害帶來的生命財產損失。現今都會區淹水模式因其二維傳統漫地流模式的計算時間較長而導致其仍無法大量運用於即時預報，目前多運用於災前特定降雨情境下的淹水潛勢評估。

本文以細胞自動機(Cellular automata)之理論發展二維快速漫地流模式，利用簡易之水體傳輸規則來近似動量方程式，並將其與一維雨水下水道模式耦合，此兩模式間為雙向交互演算，以此建構都會區快速淹水模式。本文以臺北市文山區木柵次分區為研究區域，透過兩場短延時強降雨事件進行傳統漫地流模式以及快速淹水模擬模之比較，結果顯示，快速淹水模式能得到與都會區傳統淹水模式非常相近的結果，且運算速度上其模擬時間只需要都會區傳統淹水模式的15%，顯示本文所發展之都會區快速淹水模式能取代都會區傳統淹水模式。

**關鍵字：**細胞自動機、二維快速漫地流模式、交互演算、都會區快速淹水模式

<sup>1</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 研究助理

<sup>2</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 博士生

<sup>3</sup> 臺灣大學氣候變遷及永續發展研究中心工作單位 助理研究員

<sup>4</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 教授

## 都會區快速淹水模式之水理演算改進：納入具空間變異的曼寧糙度值

游翔麟<sup>1</sup>、張鈞淳<sup>2</sup>、張倉榮<sup>3</sup>、王嘉和<sup>4</sup>、林吉堃<sup>5</sup>、王嘉瑜<sup>6</sup>

### 摘要

現今都會區淹水模式發展已臻成熟，其多以求解淺水波方程式之二維傳統漫地流模式耦合一維雨水下水道模式，兩模式間為雙向交互演算機制，可合理模擬都會區之淹水狀況。然而因其計算時間較長而導致其仍無法大量運用於即時積淹水預報。以基於細胞自動機概念發展的二維快速漫地流模式(WCA2D 模式)耦合雨水下水道模式(SWMM)所建構的都會區快速淹水模式，可得到與都會區傳統淹水模式非常相近的模擬結果而演算時間只需後者之 15%，具有相當的潛力來應用於即時淹水模擬演算上，然其內的 WCA2D 模式尚只能考慮全區相同的曼寧糙度值。

本研究對於 WCA2D 模式的水理演算機制，在出流計算時考量兩種交換邊界的曼寧糙度值使用方法：採用中心細胞的曼寧糙度值，此為目前 WCA2D 模式所使用之方法，稱為方法 A；採用兩細胞間曼寧糙度值的算術平均值，稱為方法 B。採用方法 A 的 WCA2D 模式因此亦可考量依土地利用給定的曼寧糙度值，然只能使用方法 A。本研究將 WCA2D 模式出流計算時所使用的權重值納入對曼寧糙度值的考慮，本研究稱此修改後之模式為 MNWCA2D 模式，MNWCA2D 模式可採用方法 A 與方法 B 來計算。

為決定考量具空間變異曼寧糙度值的最佳方式，本研究以臺北市文山區木柵次分區為研究區域。透過兩場短延時強降雨致災事件來評估不同的模式情境：採用全區相同曼寧糙度值的 WCA2D 模式(稱此模式情境為模式 1)、採用依土地利用給定曼寧糙度值的 WCA2D 模式(水理演算時使用方法 A，稱此模式情境為模式 2)、採用依土地利用給定曼寧糙度值的 MNWCA2D 模式(水理演算時使用方法 A，稱此模式情境為模式 3)與採用依土地利用給定曼寧糙度值的 MNWCA2D 模式(水理演算時採用方法 B，稱此模式情境為模式 4)等四種。結果分析上，由淹水面積指標來評估：此四個模式情境之優劣順序依序為模式 4、3、2、1；由調查淹水深度來評估：模式 1 與 2 皆高估甚多且此兩者結果相近，模式 3 與 4 皆與調查淹水深度相當接近並以模式 4 最為接近。以上結果顯示，本研究發展的 MNWCA2D 模式可準確應用於都會區之淹水模擬。

**關鍵字：**淹水模擬、即時演算、曼寧糙度值

<sup>1</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 博士生

<sup>2</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 碩士生

<sup>3</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 教授

<sup>4</sup> 臺灣大學氣候變遷及永續發展研究中心工作單位 助理研究員

<sup>5</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 研究助理

<sup>6</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 研究助理

## 堵塞因子對都會區淹水之影響

王嘉瑜<sup>1</sup>、李承芄<sup>2</sup>、張倉榮<sup>3</sup>、王嘉和<sup>4</sup>

### 摘要

都會區之排水方式通常是由收水器人孔和側溝收水器先收集雨水，若遇到強降雨發生垃圾及落葉堆積造成堵塞現象，使得收水器無法達到設計之收水效果，都有可能造成都會區的積淹水，因此，本研究考量堵塞因子來精進淹水模式的正確性。

本研究在淹水模式內設置不同堵塞率，模擬出何種堵塞率較接近真實都會區堵塞之情形。以臺北市士林區街上次分區及後港分區為研究區域，以兩場短延時事件及一場長延時事件進行模擬與分析，結果顯示，當堵塞率達到 20%時為最接近真實都會區之淹水情況，可作為都會區堵塞因子之設置參考。

**關鍵詞：**淹水模式、雨水下水道、堵塞率

- <sup>1</sup> 臺灣大學氣候變遷及永續發展研究中心 研究助理
- <sup>2</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 碩士
- <sup>3</sup> 臺灣大學生物環境系統工程學系 教授
- <sup>4</sup> 臺灣大學氣候變遷及永續發展研究中心 助理研究員

## 水庫泥砂來源的判釋與因應

吳柏翰<sup>1</sup>、吳慶現<sup>2</sup>、陳春宏<sup>3</sup>

### 摘要

臺灣地質鬆散、土壤肥沃、地形陡峭與氣候適宜植生茂密，再加上颱風豪雨，容易引發水庫集水區大規模崩塌與土砂災害，產生洪流挾帶高濃度渾水、雜物、流木與泥砂入庫，大量泥砂與流木佔據庫容，且影響水庫操作與清淤浚深。較粗顆粒泥砂在水庫上游段分選落淤於三角洲，細顆懸浮載隨渾水逕流運移，在緩流區會潛入清水層下運行，即形成水庫底層渾水異重流向大壩運移。惟臺灣現況水庫下層防淤通道規模不足，且進水口攔污柵易受到流木及雜物阻塞，則渾水異重流來不及排放堆疊湧昇形成渾水潭，溢洪排放上層清水以致加速水庫淤積問題。水庫淤積集中在幾場重大水文事件，即水庫集水區產生大規模崩塌事件。

經由重大颱風事件航拍判釋，崩塌面積約 80% 來自原始林，研判係樹大招風而影響邊坡穩定。因此，建議集水區崩塌風險高的區域應適度疏伐或降低林木高度，避免原始林大範圍崩塌，而產生林木集體死亡與土砂災害。另一方面，建議集水區設置攔木壩避免生立木沈入水庫難以打撈；進入水庫漂流木建議選擇在最寬且水深足夠的斷面，進行分段全斷面及全水深攔截網，進水口前設置全水深之攔截網，以利後續打撈上岸。如此縱向分層攔阻確保進水口攔污柵通暢，則大壩附近淤積高程可以獲得有效控制，以利維持自然洩降錐，確保下層防淤通道功能與結構安全。

**關鍵字：**集水區崩塌、樹大招風、水庫淤積、林木資源管理

<sup>1</sup> 水利規劃試驗所 副工程司

<sup>2</sup> 水利規劃試驗所 正工程司

<sup>3</sup> 水利規劃試驗所 所長

## 沼液產製腐植酸應用於種植與養殖環境之改善

何勝惟<sup>1</sup>、潘述元<sup>2</sup>、徐偉展<sup>3</sup>、張尊國<sup>4</sup>

### 摘要

畜牧生產主要提供人類蛋白質來源，養殖過程也同時產生糞尿等排泄物，當畜牧業規模化、企業化生產的大量糞尿超過環境的涵容能力 (Assimilative Capacity)，再加上民眾環保意識抬頭，對環境品質要求提高下，畜禽糞尿恐必朝資源化回收利用，厭氧發酵回收沼氣能源，伴隨之沼液濃縮物含有大量腐植質、腐植酸、碳、氫、氧、氮及硫等多種化合物亦具有許多功效。多價酚型化合物之腐植酸 (Humic Acid，簡稱 HA) 是天然有機弱酸，分子活性特殊結構具有酸性、親水性、離子交換性、鏈結性、高縮合性、吸附能力、緩衝、及催化等能力；同時，研究指出腐植酸亦可活化細胞，讓養殖類生物提高抵抗疾病與促進生長，更可吸收排泄物及殘餌腐敗物所產生之氨 (NH<sub>3</sub>) 及硫化氫 (H<sub>2</sub>S) 等物質。本研究擬探討沼液中有效成分 (例如：HA、N、P、K、激素等) 及其化學性質，並嘗試將實驗室精煉之腐植酸實際應用於水產養殖及農業友善種植上；從建立的水產養殖生態循環系統中，尋找出沼液產製經濟化及加值應用，落實循環生物經濟，建立學理機制到實際應用之驗證，以有效改善養殖與農業集約式發展所面臨問題。

**關鍵字：**沼液、腐植酸、電化學分離、水產養殖、循環經濟

<sup>1</sup> 台灣大學生物環境系統工程學系 博士班研究生

<sup>2</sup> 台灣大學生物環境系統工程學系 助理教授

<sup>3</sup> 台灣大學生物環境系統工程學系 博士候選人

<sup>4</sup> 台灣大學氣候變遷與永續發展研究中心 教授

## 高低地分線治理概念應用於嘉義縣排水系統成效探討

施國順<sup>1</sup>、陳文俊<sup>2</sup>

### 摘要

2018 年 0823 豪雨事件造成台灣南部發生淹水災情，其中又以嘉義縣沿海鄉鎮之淹水災況更為嚴重，事後產官學相關單位分別進行了檢討與研究，政府亦緊急編列相關預算積極進行各項應急、復建及治理工程，期能因應未來之水患事件。由於嘉義縣在「易淹水地區水患治理計畫」及其他相關治水計畫龐大經費之投入下，仍有淹水問題之發生，導致部分治人物或民眾提出治水效益之質疑。事實上過去政府投入於嘉義縣之治水努力已獲得良好的成效，惟在極端水文事件的衝擊下，治理觀念須時時檢討，再加上受限於人力、經費及工期等問題下，無法全面將所有之排水皆整治至設計之保護規模，導致局部地區仍有淹水問題。本文即針對「易淹水地區水患治理計畫」、「流域綜合治水計畫」於嘉義縣實施之治理概念及治理成效進行探討，期能讓社會大眾了解嘉義縣治水工程之成效，並將治理觀念再持續精進推廣至其他之排水上。嘉義縣在「易淹水地區水患治理計畫」中之治理觀念係採高低地分線方法辦理，實施範圍內之排水系統計有六腳鰲鼓排水、塭港排水等九條排水，計畫期程內投入約 53.02 億元辦理整治，其中高低地分線以西為 39.65 億元，約佔嘉義縣治理工程經費 75%。整治後歷經多次颱風、豪雨皆有明顯之淹水改善，其中以 105 年 9 月 28 日梅姬颱風及 106 年 7 月 28 日至 30 日尼莎暨海堂颱風之治理成效更為顯著。未實施高低地分線治理前，最大總淹水面積達 3240 公頃，高低地分線下各項治理工程施作後，最大之淹水總面積為 906 公頃，改善了 2334 公頃，即採用高低地分線治理之成效顯著。為因應氣候變遷、地層下陷及鄉鎮開發等變異，經檢討嘉義縣轄高低地分線可再推廣應用至其他排水系統，即整治原則擬延伸至台 19 線，使高低地分線以西嚴重地層下陷區之低窪地可達於 10 年保護標準不淹水。

**關鍵字：**高低地分線、區域排水、淹水、豪雨、地層下陷

<sup>1</sup> 經濟部水利署第五河川局工務課課長

<sup>2</sup> 嘉義大學土木與水資源工程學系副教授

## 亞熱帶森林的地表阻抗及蒸發散 Surface Resistance and Evapotranspiration above a Subtropical Forest

謝正義<sup>1</sup>、張倉榮<sup>2</sup>

### ABSTRACT

This study presented a two-year data set of sensible heat and water vapor fluxes above a humid subtropical montane Cypress forest, located at 1650 m a.s.l. in northeastern Taiwan. The focuses of this study were to investigate 1) the diurnal and seasonal variations of canopy resistance and fluxes of sensible heat and water vapor above this forest; and 2) the mechanism of why a fixed surface (canopy) resistance could work when implementing the Penman-Monteith equation for diurnal hourly evapotranspiration estimation.

Our results showed distinct seasonal variations in canopy resistance and water vapor flux, but on the contrary, the sensible heat flux did not change as much as the water vapor flux did with different seasons. The seasonal variation patterns of the canopy resistance and water vapor flux were highly coupled with the meteorological factors. Also, the results demonstrated that a constant (fixed) canopy resistance was good enough for estimating the diurnal variation of evapotranspiration using Penman-Monteith equation. We observed a canopy resistance around 190 (s/m) for both the two warm seasons; and canopy resistances were around 670 and 320 (s/m) for the two cool seasons, respectively.

In addition, our analytical analyses demonstrated that when the average canopy resistance is higher than 200 (s/m) and under a general meteorological condition, the Penman-Monteith equation is less sensitive to the change of canopy resistance; hence, a fixed canopy resistance is suitable for the diurnal hourly evapotranspiration estimation. However, this is not the case when the average canopy resistance is less than 100 (s/m), and variable canopy resistances are needed. These two constraints (200 and 100) were obtained based on purely analytical analyses, and can be applied to any kind of vegetation surface.

***Keywords: Evapotranspiration, Canopy resistance, Penman-Monteith equation, Eddy-covariance***

<sup>1</sup> Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan. \*Corresponding author: hsieh@ntu.edu.tw

<sup>2</sup> Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan.

## 改良生物滯留池填料對暴雨逕流中營養鹽去除績效評估

# Performance Evaluation of Modified Bioretention Systems for Enhanced Nutrient Removal in Stormwater Runoff

潘述元<sup>1</sup>

### 摘要

生物滯留池 (Bioretention) 設計彈性且可結合景觀營造，透過暴雨逕流之引導及入滲，可有效達到降低暴雨逕流及推遲洪峰抵達時間；同時，滯留池內鋪設之天然材料，可去除逕流中污染物，例如：營養鹽及重金屬等，達到水質淨化功能，為常見非點源水污染之最佳管理措施。儘管生物滯留池已廣泛應用於暴雨逕流控制與其營養鹽去除，需同時有效去除磷與氮仍是大挑戰。本研究應用底灰基改質材料作為生物滯留池基材，並改良生物滯留池設計，評估不同暴雨強度與污染濃度等參數，進行營養鹽（包括：氮與磷）深度去除之績效評估。本團隊理念主要係期能將鹼性固體廢棄物（例如：飛灰等）有效地資源化，轉化作為有價值材料，並應用於綠色基礎設施。本研究結果顯示，開發之基質改良型生物滯留池對於營養鹽去除有顯著提升；以磷為例，於所有測試條件下，其去除效率皆可達 90% 以上。以氮為例，當降雨重現期距為 2a 時，改良型生物滯留池對於總氮與總凱氏氮之去除效率分別為 58% 及 66%。於相同降雨重現期距下 (2a)，當逕流營養鹽濃度增加時，基質改良型生物滯留池對於總氮與總凱氏氮之去除效率顯著增加，分別可達 70% 及 82%。本研究亦針對不同指令引數對於各種污染物去除效果進行關聯性分析；同時，將基質改良型生物滯留池透過等溫吸附模型進行模擬，用以研析於不同設計與操作條件下，改質飛灰基材對於營養鹽之吸附速率與最大吸附容量，並作為優化滯留池設計參數參考。分析結果顯示，此改質飛灰基材對於磷鹽之吸附行為較符合 Langmuir 模型。最後，根據本研究相關結果研擬改良型生物滯留池對於城市暴雨逕流管理 (Stormwater Management) 及優化水與能源鏈結 (Water-Energy Nexus) 之策略，以作為城市綠色基礎設施與海綿城市規劃之部分基礎；未來本團隊將進一步研析多種不同固體廢棄物作為基材改良之總體評估（從工程、環境、經濟等角度），及其於城市尺度下對水與能源鏈結優化之重要性。

**關鍵字：**低衝擊開發、綠色基礎設施、底灰、等溫吸附模式、水與能源鏈結

<sup>1</sup> 台灣大學生物環境系統工程學系 助理教授 (E-mail: sypan@ntu.edu.tw)



## 建筑屋面雨水有压回补地下水理念与潜力评估

王兆庚<sup>1</sup>，郭祺忠<sup>1,2\*</sup>，练继建<sup>1</sup>，陈亮<sup>1</sup>

### 摘要

城市雨水回补地下水对增加城市地下水资源、减轻内涝灾害具有重大意义。屋面雨水水质较好，且具有高水头特点，并无需外界提供电能、不占据多余空间，可实现雨水收集、快速净化，形成屋面雨水有压回补地下水模式，增加地下水回补率。但该技术理念首次提出，仍处于研究阶段，故本文以天津大学新校区为研究区，通过水泵加压回补地下水的现场数据推导出了半经验公式，选取与实地状况基本相符的渗透率等相关参数，对该模式进行相关计算与潜力评估。利用天津市暴雨公式计算了不同降雨重现年及历时的设计雨量，并计算出本模式应用于研究区的不同设计情况下的回补率。计算结果显示，回补率与降雨历时（建筑屋面汇水或滞留时间）呈正相关关系；假设建筑屋面雨水滞留时间为 24 h 时，25 年一遇以内降雨回补率大于 90%，50 年一遇和 100 年一遇降雨回补率达 85% 以上。本文论证了该种模式具有很强的应用价值，对雨水回补地下水技术研究有一定的参考价值。

**关键词：**海绵城市；屋面雨水；有压回补；半经验公式；降雨历时；滞留时间；回补率

<sup>1</sup> 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室，天津 300354

<sup>2</sup> 罗格斯大学 土木与环境工程系，新泽西州，美国 08854

\*通讯作者: [qguo@rutgers.edu](mailto:qguo@rutgers.edu)

## Concept and assessment of utilizing rooftop rainwater for pressurized groundwater recharge

WANG Zhaogeng<sup>1</sup>, Qizhong GUO<sup>1,2\*</sup>, LIAN Jijian<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>1</sup>

(*1 State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2 Department of Civil and Environmental Engineering, Rutgers University, Piscataway, NJ 08854, USA*)

**Abstract:** Urban groundwater recharge with rainwater is of great significance for increasing urban groundwater resources and alleviating water-logging problems. The rooftop rainwater has good water quality and high pressure head. It can be collected and treated rapidly and then recharged into the groundwater under pressure without external power demand and without occupying extra space area. However, this concept is proposed for the first time and is still under research. Therefore, this study took the Beiyangyuan Campus of Tianjin University as the research site to perform calculations and assess potentials for this rainfall utilization mode. The semi-empirical formula was developed from field test data of groundwater recharge under pump pressure. The realistic parameter values were selected in the calculations. The design rainfall intensity of different rainfall recurrence intervals and durations was calculated by using the rainstorm formula for Tianjin, and the rainwater replenishment rate was quantified for this rainfall utilization mode at the study site under different design conditions. The quantification results show that the replenishment rate is positively correlated with the rooftop rainwater detention time. Assuming the rooftop rainwater detention time 24h, the rainwater recharge rate is greater than 90% for rainfall smaller than the 25-year storm; and for the rainstorms with recurrence interval of 50 or 100 year, the rainwater recharge rate is over 85%. This study demonstrates that this rainwater utilization mode has a high application value and can serve as a reference for research on technologies for the groundwater recharge with rainwater.

**Key words:** sponge city ; rooftop rainwater ; pressurized groundwater recharge ; semi-empirical formula ; rainfall duration ; detention time; rainwater recharge rate

*\*Corresponding author: qguo@rutgers.edu*

## 海口大同溝的水動力水質數值模擬

趙建華<sup>1</sup>，張豔軍<sup>2</sup>，董文遜<sup>3</sup>，吳金津<sup>4</sup>，王素描<sup>5</sup>，王鑫<sup>6</sup>

### 摘要

隨著經濟的迅速發展和城市化的推進，城市內水體黑臭現象嚴重，全國各地開展了黑臭水體治理工程。為檢驗治理效果及為治理提供相關的技術支撐，需要構建適用的水質類比模型。本文根據海口大同溝區域受閘門影響，污染源為面源，雨旱季分明的特點，基於二維淺水控制方程及水質遷移轉化方程，建立了海口大同溝水動力水質數值模型。分別用 2018 年 6~7 月及 2018 年 8 月的流量、水位及水質資料進行模型校準及驗證，類比了期間海口大同溝的水動力及水質變化過程，其中率定期模擬結果的平均絕對相對誤差為 31.7%，驗證期的為 25.9%，模擬誤差在 30% 附近。模型的類比效果尚可，模型中針對缺乏運行參數的閘門類比，提出了一種動態控制出流的方式，具有一定的效果及應用價值。

**關鍵字：**海口大同溝，水動力水質模型，閘門

<sup>1</sup> 武汉大学，研究生

<sup>2</sup> 武汉大学，副教授，硕士生导师

<sup>3</sup> 武汉大学，研究生

<sup>4</sup> 武汉大学，研究生

<sup>5</sup> 武汉大学，研究生

<sup>6</sup> 武汉大学，研究生

## 壹、前言

隨著經濟迅速增長和城市化快速發展，水環境問題日益嚴峻。2016 年中國環境狀況公報中的地表水質監測資料顯示，河流水質處於 V 類及其以下的占比超過 15%；湖泊水質在 V 類及其以下的占比超過 13%，設置監測的 108 個湖泊中富營養化率近 25%<sup>[1]</sup>。不少水體出現水華、赤潮現象，有的流經城鎮的水體甚至出現黑臭現象，不僅水體正常功能遭到破壞，還對周圍土壤、空氣等環境造成危害，影響居民生活品質。

海口大同溝水系包括東西湖和大同溝，它們分別是海口市龍華區的重要景觀水體及排洪排澇通道，沿途流經繁華商業區及黨政辦公機關。但水體近年來遭受不同程度污染，水體黑臭現象嚴重，部分水體水質檢測結果為劣 V 類<sup>[2]</sup>。針對海口大同溝水系出現的污染，相關政府部門進行過多次治理，可效果卻不盡如人意。為徹底改善大同溝水系的水環境，海口市政府於 2016 年啟動了海口水環境綜合整治工程<sup>[2]</sup>，大同溝水系也包括其中。對水質情況的準確把握，可以為整治工作的開展提供指導，也可以對整治工作前後的效果進行對比評價，在專案長期運行時，需要對水質進行預報，提前決定應急方案，以方便對水質進行控制，這些情況都要求對水系水質進行模擬，得到可信的水質資料。

目前國際上常用的基於水動力原理的水質類比模型（軟體）有美國的 SMS、WASP 系列及 EFDC 模型，荷蘭的 Delft3D 模型以及丹麥的 MIKE 系列等<sup>[3,4]</sup>，模型的發展從一維發展為複雜的三維類比，單因數模型發展為多介質綜合模型<sup>[5]</sup>，國內的水質研究除利用上述國外開發的模型外，還有一些自己開發的模型，例如武漢大學的張豔軍開發的基於 DEM 的水質水量模型<sup>[6]</sup>，南京水科院開發的 CJK3D 軟體<sup>[7]</sup>等。其中可以基於閘門出流公式而模擬閘壩對水流作用的模型有 MIKE 系列、CJK3D 軟體等。此外，還有其他學者在研究閘門對水質的影響，如竇明<sup>[8]</sup>在沙潁河流域上進行閘控河段水質轉化機制研究，陳煉鋼<sup>[9]</sup>在淮河中游河網建立了閘控河網水文-水動力-水質耦合數學模型。

本文所研究的海口大同溝水動力水質數值類比基於 DEM 的模型，不完全考慮物理機制類比閘門作用，在二維尺度上進行水動力水質的數值模擬。

## 貳、研究區域概況

海口東西湖及大同溝（ $110^{\circ}19'21.1''$  ~  $110^{\circ}20'35.2''$  E， $20^{\circ}1'56.3''$  ~  $20^{\circ}2'19.6''$  N）地處低緯度熱帶北緣，屬於熱帶海洋氣候，全年平均氣溫為  $23.8^{\circ}\text{C}$ ，最高平均氣溫約  $28^{\circ}\text{C}$ ，最低平均氣溫約  $18^{\circ}\text{C}$ ，冬半年以東北風為主，夏半年以東風為主，年平均風速  $3.4$  米/秒<sup>[10]</sup>。東西湖位於海口人民公園，其總面積約  $7.5$  萬平方米，蓄水量約為  $8.8$  萬立方米，平均水深約  $1.8$  米，匯水面積約  $3.25$  萬平方米<sup>[11]</sup>，污水匯流面積  $1.38$  萬平方米，東西湖除地面徑流匯入外，還有人工地下水補給源，補水口目前有兩個，分別位於東湖博愛路南、西湖圍格（位置示意圖 1 中的藍色圓點），補水量人工控制。大同溝源自東西湖，是龍華區內重要的排洪排澇通道，經“三面光”改造後，河道斷面為矩形斷面，其全長約  $1.7$  千米，平均寬度  $18\sim 20$  米，河堤高度  $2.0\sim 2.5$  米，平均深度約  $1.8$  米<sup>[12]</sup>，為防止受潮影響而水流倒灌，出口處設置閘門。

根據研究區域的長期監測結果，污染因數主要為 COD、總磷、總氮及氨氮，其中氨氮超標最嚴重，結合工程考核指標及監測資料的完整性，本文選取 COD 及氨氮進行研究，研究所需的水下地形資料、水質監測資料由鐵漢生態項目組提供，監測點位均勻分佈於大同溝及東西湖內，東西湖內三個點位、大同溝內三個（位置示意圖 1 中的綠色方點）。

## 參、模型原理

本文從二維淺水控制方程組和水質遷移轉化方程出發，結合 DEM 資料特點，採用有限體積法對方程組進行離散，並用 SIMPLEC 演算法確定流場的求解順序及方法，最後由交替方向隱式法（ADI 演算法）求解水質方程組。

### 一、控制方程

模型的水動力類比基於笛卡爾坐標系下的平面二維淺水控制方程組，其包括連續性方程

及  $x$ 、 $y$  方向上的動量方程<sup>[13]</sup>，分別如方程(1)、(2)、(3) 所示：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2+ghz)}{\partial x} + \\ & \frac{\partial(huv)}{\partial y} = fhv + \rho_a C_{Du} |\overline{u_w}| u_w + \\ & \varepsilon_x h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - gn^2 \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \\ & \frac{\partial(hv^2+ghz)}{\partial y} = fhu + \\ & \rho_a C_{Dv} |\overline{v_w}| v_w + \varepsilon_y h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \right. \\ & \left. \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - gn^2 \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $x$ 、 $y$  分別為從原點計的河道縱向、橫向距離； $u$ 、 $v$  分別為  $x$ 、 $y$  方向上的流速； $t$  為時間； $h$  為水深； $z$  為水位； $q$  為河段區間入流； $g$  為重力加速度； $c$  為河段中某種污染物的濃度； $f = 2\Omega \sin\varphi$  為柯氏力係數； $\varphi$  為緯度； $\Omega = 2\pi / (24 \times 3600)$  為地轉角速度； $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$  分別為  $x$ 、 $y$  方向上的渦動粘滯係數； $n$  為河槽糙率係數； $u_w$ 、 $v_w$  分別為風速  $w$  在  $x$ 、 $y$  方向上的分量； $\rho_a C_D$  為風應力係數， $\rho_a$  為空氣密度， $C_D$  為阻力係數。

水質模擬基於平面二維水質對流擴散方程（平面二維水質遷移轉化基本方程）<sup>[13]</sup>，其運算式如下：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(uch)}{\partial x} + \frac{\partial(vch)}{\partial y} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_y h \frac{\partial c}{\partial y} \right) + h \sum S_i \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $E_x$ 、 $E_y$  分別表示  $x$ 、 $y$  方向的綜合擴散係數； $\sum S_i$  為河段水體污染物的源漏項，本文主要考慮自然降解；其餘符號意義同前。

## 二、數值求解

鑒於 DEM 柵格為規則的矩形網格的特點，採用有限體積法離散方程，採用幹濕法處理動邊界，並由 SIMPLEC 演算法求解流場，然後使用交替方向隱式法 (ADI) 進行差分，最後採用三對角陣演算法 (TDMA) 直接求解方程。

## 肆、水動力水質模型的構建

### 一、研究區域網格化

數值模型計算的區域為東湖東岸至大同溝的出流斷面，綜合考慮東西湖及大同溝的實際地形特徵、區域大小以及數值模型求解的複雜程度，設置網格為尺寸為 2m 的正方形網格，得到共計  $1071 \times 342 \approx 366300$  個網格，由於水體邊界以外的格點被統一處理為無效值，並不會參與模型計算，實際的計算區域有約 30900 個網格。

### 二、初始條件

設置一個初始全域水位作為水位計算初值；初始水質濃度由控制測點的實測濃度來進行插值，其中兩端的值移植最近的測點濃度；另設啟動時水體靜止，即初始速度設為零。

### 三、邊界條件

#### (一) 入流邊界

入流邊界條件由流量過程線形式給出。

排污口：根據工程要求，所有雨汙匯流口都要進行截流，除暴雨情況下雨汙水會從溢流井流出來及從附近路面匯流直接進入水體外，污染物不再直接排入水體，而是經由一體化設備處理後統一排入水體。

故在晴天只有一體化設備排入口；在暴雨天設溢流口及匯流口（位置示意圖 1），溢流、匯流口的污染物負荷資料由合作單位珠江水利委員會方面根據面源模型計算給出。

補水口：補水時間為每天（晴天）的 23:30~次日 6:30，補水流量為  $800\text{m}^3/\text{h}$ 。

## (二) 出流邊界

因大同溝受潮影響，出口斷面處有一閘門（中航閘）控制，但由於缺乏閘門運行的相關參數，假設其出流仍滿足二維淺水方程組，但把其設置為一動態邊界，界的性質由閘門的啟閉狀態決定：

當閘門開啟時其為出流邊界，其邊界條件由水位過程線給出；當閘門關閉時為固壁邊界，邊界條件同前述。

## 三、參數取值

本模型涉及的主要參數有糙率、渦動黏滯係數、污染物擴散係數及污染物降解係數，這些係數的選取是否得當直接關係到模擬的流場、濃度場的準確性。但由於海口大同溝水系屬於市內水系，水系全長僅約 2 公里，相關研究資料幾乎沒有，參數主要根據相關經驗公式來估算初值或初始範圍，再由模型率定得到。

根據相關研究文獻及典型河道糙率取值表<sup>[15-18]</sup>，模型的糙率取值範圍：0.015~0.022；渦動粘滯係數採用混合長度（摻長）模型公式<sup>[13]</sup>計算，取為 0.1 m<sup>2</sup>/s；風阻力係數根據 Wu Jin 公式<sup>[19]</sup>計算： $C_D = (0.8 + 0.065w) \times 10^{-3}$ ；污染物綜合擴散係數根據埃爾德提出的公式<sup>[13]</sup>計算得到，取值範圍：0.5~1.0 m<sup>2</sup>/s；各污染物的降解係數根據實驗室試驗法得到，其中 COD 的降解係數的取值範圍為 0.132~0.272/d，氮氣的降解係數的取值範圍為 0.011~0.047/d。

## 伍、模型參數率定與驗證

### 一、率定方案概述

根據研究區域地形、氣候、水文及水質特徵，結合已有的地形資料及監測資料，建立合適的二維水動力水質模型，綜合考慮主要污染因數、監測資料及檢查指標要求，選擇 NH<sub>3</sub>-N 和 COD 進行模擬（其中大同溝內測點缺 COD 資料）。選擇率定期為 2018 年 6~7 月，根據第 3 章所述建立水動力水質模型，並根據實測資料進行模型參數率定，即在參數的合理範圍內，多次設置模型參數，並對比分析模擬結果，選擇誤差相對最小的一組參數設置作為模型參數。

## 二、率定結果

在模型率定過程中，發現晴天的模擬結果普遍偏低，分析認為水體周圍存在未完全攔截的排污口或暗排口，根據多次類比，晴天所有的排污口位置示意圖 3。

經過多次參數選擇對比，得到一組類比效果較好的模型參數，各參數的取值見表 1。率定期各污染物的模擬結果及平均絕對相對誤差統計結果見圖 2、圖 3 及表 2。

由模擬結果及相對誤差統計表可見，NH<sub>3</sub>-N 模擬結果的平均絕對相對誤差為 35.6%，COD 模擬結果的平均絕對相對誤差為 27.8%，整體平均絕對相對誤差為 31.7%。

## 三、驗證方案概述

利用已建立的二維水動力水質數值模型，以及前述率定得到的模型參數，選擇驗證期 2018 年 8 月，對 NH<sub>3</sub>-N 和 COD 分別進行類比分析，驗證模型的準確性。

## 四、驗證結果

率定期各污染物的模擬結果及平均絕對相對誤差統計結果見圖 4、圖 5 及表 3。

由模擬結果及相對誤差統計表可見，NH<sub>3</sub>-N 模擬結果的平均絕對相對誤差為 32.5%，COD 模擬結果的平均絕對相對誤差為 19.3%，整體平均絕對相對誤差為 25.9%。

## 五、結果分析

模型的校準及驗證結果表明：

率定期模擬結果的平均絕對相對誤差為 31.7%，驗證期的為 25.9%，模擬誤差在 30% 附近，模型的類比效果一般。

分析認為模擬效果一般的原因有：

（一）由於大部分數據來源於水質自動檢測儀器，儀器監測資料存在劇烈跳動。

（二）閘門出流不符合二維淺水方程，導致閘門作用模擬不完全符合實際。

（三）晴天人為添加的排污口假設每天一致，且均勻排放，排放參數為人工率定，與實際情況有較大差別。

## 陸、結論

本文根據海口大同溝區域受人工影響大，污染源為面源，雨旱季分明的特點建立海口大同溝水動力水質模型，模型可根據實測水質資料及預測污染負荷資料類比水質變化過程，且具有一定精度，能夠為治理工程提供資料及技術支援，而本文針對缺乏運行參數的閘門，提出一種動態邊界的處理方法，具有一定的應用價值前景。

## 參考文獻

1. [2016 年中國環境狀況公報]，中華人民共和國生態環境部網站，<http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201706/P020170605833655914077.pdf>。
2. 孫令正(2017),[海口龍華區全面啟動東西湖大同溝水環境整治]，南海網，<http://www.hinews.cn/news/system/2017/04/28/031087342.shtml>。
3. 敏樊,兆林顧(2010)，[水質模型研究進展及發展趨勢]，上海環境科學，06，266-269。
4. 彭琴,牟新利,張麗瑩,等(2010)，[二維水質模型及應用研究進展]，化學工程與裝備，03，123-124。
5. 陸莎莎,時連強(2016)，[水質模型研究發展綜述]，環境工程，34，S1，78-81。
6. 張豔軍,雒文生,雷阿林,等(2008)，[基於DEM的水量水質模型演算法]，武漢大學學報(工學版)，05，45-49。
7. 路川藤,黃華聰,錢明霞(2016)，[長江口北槽丁壩壩田區潮流及污染物遷移擴散特徵]，河海大學學報(自然科學版)，44，03，265-271。
8. 竇明,米慶彬,李桂秋,張永勇(2016)，[閘控河段水質轉化機制研究 I:模型研製]。水利學報，47，04，527-536。
9. 陳煉鋼,施勇,錢新,樂震宇,金秋(2014)，[閘控河網水文-水動力-水質耦合數學模型——I.理論]，水科學進展，25，04，534-541。
10. [海口城市介紹]，中國天氣網，<http://www.weather.com.cn/cityintro/101310101.shtml>。2018-05-10。
11. [東西湖概況]，中新網海南，<http://www.hi.chinanews.com/zt/2017/0506/56768.html>。2018-05-10。
12. [大同溝概況]，中新網海南，<http://www.hi.chinanews.com/zt/2017/0506/56769.html>。2018-05-10。
13. 雒文生,李懷恩(2009)，[水環境保護]，北京：中國水利水電出版社，90-91，132-133，66-74。
14. 陶文鈞(2001)。[數值傳熱學(第二版)]，西安：西安交通大學出版社，90-256。
15. 梁永亮(2013)，[馬踏湖水流水質數學模型及其應用研究]，青島理工大學。
16. 林玉茹(2014)，[鄱陽湖水流特性與水環境特徵研究]，武漢大學。
17. 李繼選(2005)，[基於有限體積法的二維水流水質模擬及其視覺化研究]，合肥工業大學。
18. 趙昕,張曉元,趙明登,等(2009)，[水力學]，北京：中國電力出版社，186-187。
19. J Wu (1982), “Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane”, Journal of Geophysical Research Oceans, 87 ,C12, 9704-9706.

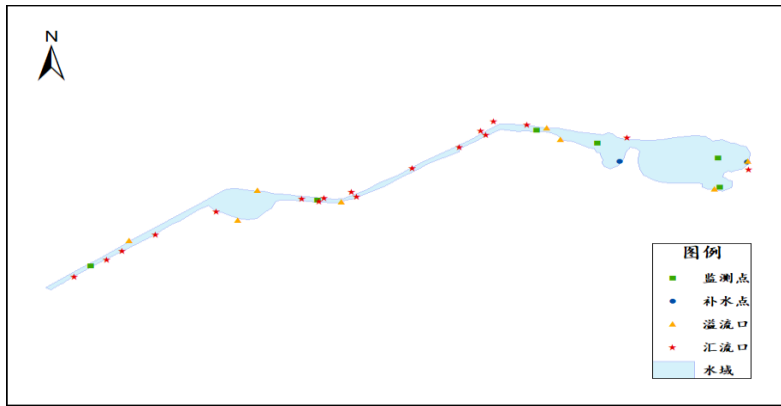


圖 1 特殊點位置示意圖

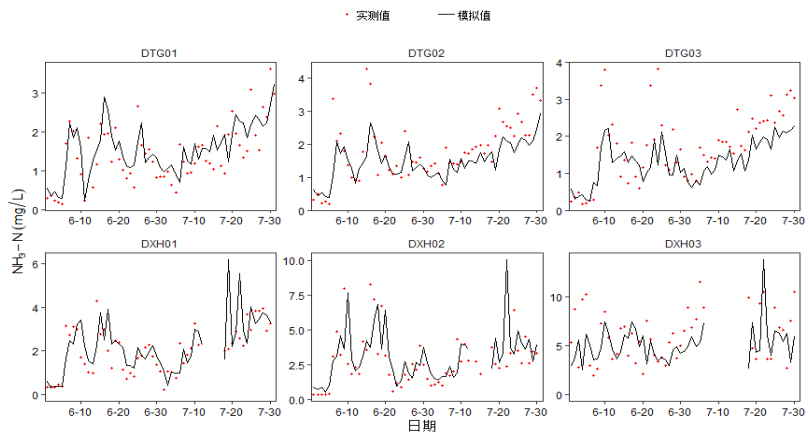


圖 2 率定期  $\text{NH}_3\text{-N}$  模擬結果

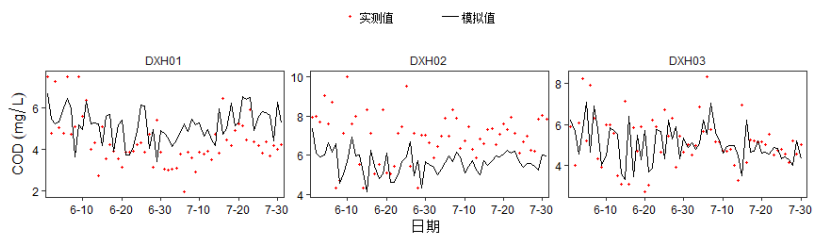


圖 3 率定期 COD 模擬結果



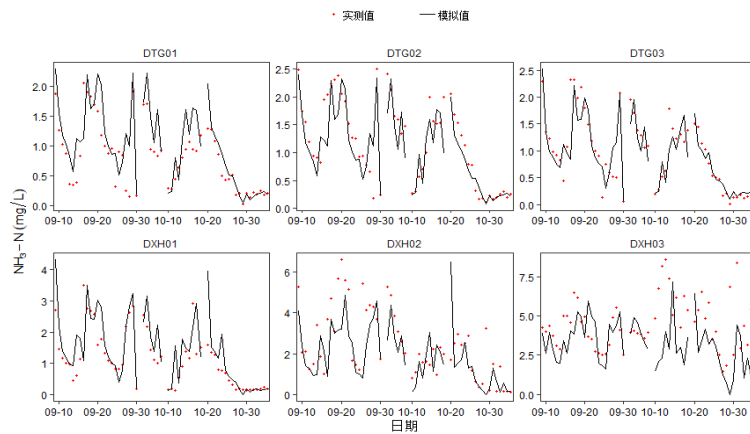


圖 4 驗證期 NH<sub>3</sub>-N 模擬結果

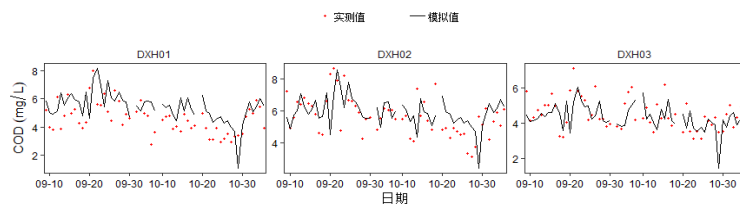


圖 5 驗證期 COD 模擬結果

表 1 參數率定結果

參數名	符號	取值	單位
糙率	$n$	0.018	-
橫向渦動粘滯係數	$\epsilon_x$	0.1	$m^2/s$
縱向渦動粘滯係數	$\epsilon_y$	0.1	$m^2/s$
縱向擴散係數	$E_y$	0.8	$m^2/s$
氨氮的綜合降解係數	$K_{NH_3-N}$	0.029	$d^{-1}$
高錳酸鹽指數的綜合降解係數	$K_{COD}$	0.202	$d^{-1}$

表 2 率定期模擬結果平均絕對相對誤差統計

	DXH03	DXH02	DXH01	DTG03	DTG02	DTG01	平均值
NH <sub>3</sub> -N	35.6%	30.7%	36.8%	34.4%	39.6%	36.6%	35.6%
COD	26.5%	21.6%	35.4%	-	-	-	27.8%
平均值	31.1%	26.2%	36.1%	34.4%	39.6%	36.6%	31.7%

表 3 驗證期模擬結果平均絕對相對誤差統計

	DXH03	DXH02	DXH01	DTG03	DTG02	DTG01	平均值
NH <sub>3</sub> -N	40.1%	37.3%	34.6%	25.9%	19.1%	38.1%	32.5%
COD	16.0%	13.8%	28.1%	-	-	-	19.3%
平均值	28.1%	25.6%	31.4%	25.9%	19.1%	38.1%	25.9%

## 滇池流域水環境承载力與水資源可持續利用研究

馬巍<sup>1</sup>、陳欣<sup>2</sup>、成國標<sup>2</sup>、蔣汝成<sup>2</sup>

### 摘要

容量總量控制是有效落實“水十條”和河(湖)長制的重要抓手,水資源可持續利用是加強流域水環境綜合治理、河湖水質保護和湖泊水生態修復的基本需求。本文以滇池流域變化條件下的水資源條件和獨特的水迴圈過程為背景,研究確定了滇池主要入湖河流的環境流量需求,重新核算了入湖河流環境流量保障條件下湖泊的水環境容量,提出了主要河流入湖水質的分時和分區控制濃度限值,並研究制定了多水源補給條件下滿足主要河流環境流量與入湖水質需求的流域水資源可持續利用方案,可為滇池流域全面推進河湖長制和流域河湖水環境品質持續性改善提供科學的技術支援。

**關鍵字：**環境容量；環境流量；水環境承载力；水質目標；水資源可持續利用；滇池

### 壹、引言

水污染物總量控制概念源自日本的“封閉性水域總量控制”,技術方法引自美國的水質規劃理論。我國在經歷了上世紀七八十年代水污染物總量控制研究的起步階段後,於1988年確定了從濃度控制向總量控制方向發展,總量控制隨即納入國家和流域的宏觀目標總量控制管理<sup>[1]</sup>,並逐步形成了我國水環境污染物總量控制技術體系和管理流程<sup>[2]</sup>,並科學地服務于“水十條”、“河(湖)長制”等重大計畫與政策措施的有效落實。

湖庫水資源在保障區域生產生活用水、維繫生態系統平衡、發展生態旅遊及提供水產品等方面發揮著至關重要的作用,但過度的水資源開發利用和滯後的水污染治理及水質保護措施導致我國當前的湖庫水質污染問題突出。滇池作為我國河湖水體污染治理的典型代表,近年來為解決流域匱乏的水資源條件無法有效支撐昆明城鎮化快速發展帶來的清潔水資源短缺、河湖生態環境用水被嚴重擠佔、滇池水資源多次重複利用等帶來的湖泊水質狀況持續惡化問題,快速實施了掌鳩河、清水海及牛欄江等外流域引水工程<sup>[3]</sup>,湖泊生態環境用水已得到有效改善,滇池水質持續惡化趨勢已得到有效控制且湖泊整體水質企穩向好。但伴隨著滇池整體水質的逐步改善,局部湖灣和旱季河流入湖口區水景觀視覺效果差、水質淨化廠大量尾水外排、牛欄江來水如何優化配置以最大限度地發揮其綜合效益以及流域內多種水資源如何合理利用等問題日益凸顯,亟需以流域水資源變化條件下的滇池水環境容量與流域現有的多水源條件為依據,研究滿足其容量總量控制和入湖河流環境流量需求的多水源利用方案,以適應新時期全面推進河湖長制的管理需求,並促使滇池水生態系統功能逐步恢復並最終實現其良性迴圈。

### 貳、研究方法

滇池流域地處長江、珠江、紅河三大水系分水嶺地帶,位於金沙江一級支流普渡河的源頭區,

<sup>1</sup> 中國水利水電科學研究院 水環境所,北京 100038

基金項目: 國家重點研發計劃(2017YFC0505305)

作者簡介: 馬巍(1976-),男,四川平昌人,博士,教高,主要從事水環境模擬、水生態修復與調控研究。

E-mail: 79658466@qq.com

<sup>2</sup> 雲南省水利水電勘測設計研究院,雲南 昆明 650021

毗鄰昆明主城區下游，流域面積 2920km<sup>2</sup>。滇池是雲貴高原上最大的高原淡水湖泊，環湖有 37 條入湖河流及溝渠（流域水系見圖 1），海口河是滇池唯一的天然出口，後因昆明主城區防洪和湖泊水質保護需要，於 1996 年在草海西岸建設了西園隧道排水通道，並由海埂節制閘將滇池分割為草海和外海兩部分，其中外海是主體，水面積約占滇池的 96.7%，蓄水量占滇池總湖容的 98.5%[4]。

滇池三面環山，湖面風場相對較為穩定，常年以西南風為主且年際變化不大。考慮到滇池西岸為高出湖水面 500m 的西山，東、南、北部地勢相對平坦，當西南風吹過滇池湖面時，受西山遮擋影響，湖面風場十分複雜。因此採用反映西山複雜地形影響下中小尺度准三維氣流動力學模式進行湖區三維風場模擬（見圖 2）[3]，為滇池水動力模擬提供湖面風場邊界條件。

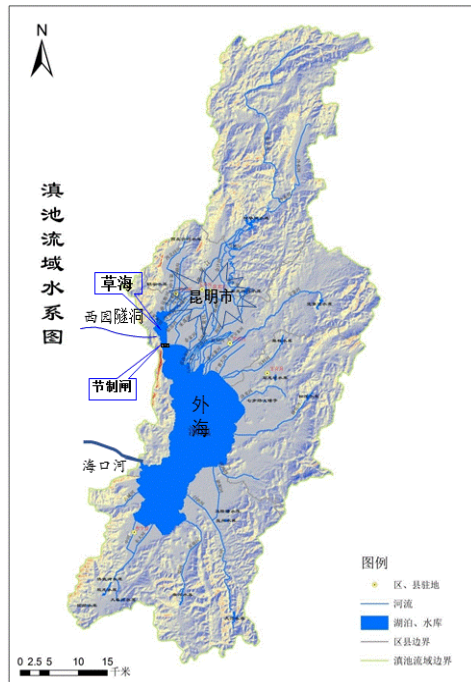


圖 1 滇池流域水系圖

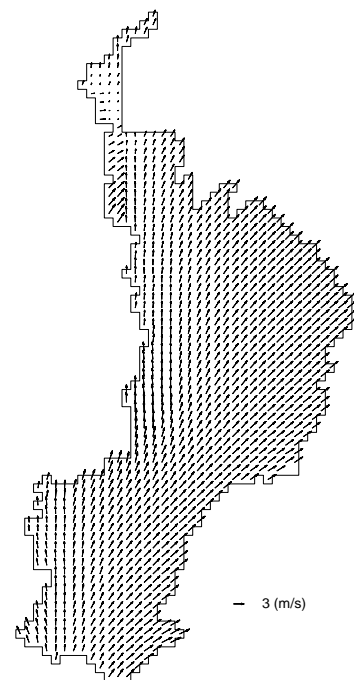


圖 2 滇池湖面風場模擬圖（SW）

滇池是雲貴高原上最大的高原淡水湖泊，水面面積 309km<sup>2</sup>，平均水深 5.05m，屬典型的大型淺水湖泊。根據國內外大量淺水湖泊的研究成果[5,6,7]表明，風是滇池水流運動的主驅動力，其湖流運動以風生湖流為主、吞吐流為輔，入湖污染物在風生湖流和吞吐流的牽引與驅動作用下完成在湖體內的遷移擴散，故滇池湖泊水流運動及污染物在水體中的遷移擴散過程可分別用平面二維水流運動方程和對流擴散方程進行數學描述[5][6][8]，其中模擬指標主要包括 CODMn、TP、TN。各類污染物指標的生化反應項均可作一級簡化處理[1]。

採用矩形網格（尺寸為 500m×500m）對滇池進行計算單元劃分，採用變數交錯佈置的方式在計算網格上對上述方程進行離散，其中對流項採用迎風格式，擴散項採用中心差分，用反覆運算法求解離散方程組。利用滇池 2014 年和 2015 年湖內 10 個常規水質監測點的水質資料和同期的水文氣象資料及污染源資料，對滇池水環境數學模型進行了率定與校驗。結果（見圖 3、圖 4）表明，滇池水環境數學模型能夠較好地反映滇池的風生湖流形態與入湖污染物的時空變化特徵，類比精度較高，可為滇池湖流類比、水環境容量計算和入湖河流水量與水質配置提供可靠的技術手段。

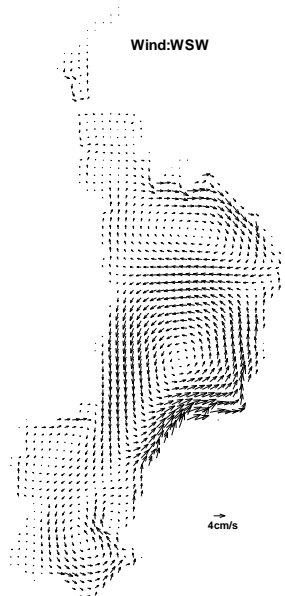


圖 3 滇池流場圖（西南風）

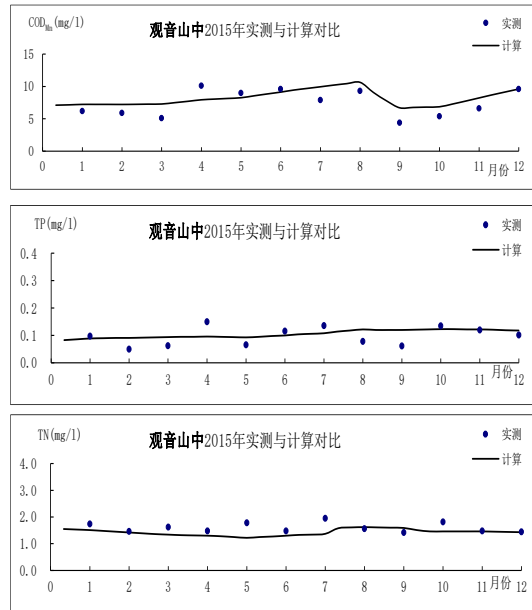


圖 4 2016 年滇池水質模擬效果(觀音山中站)

### 參、滇池流域水環境承载力研究

#### 一、資料來源

資料來源於滇池保護條例、雲南省水功能區劃、滇池流域水環境功能區劃、雲南省水文水資源局昆明分局、昆明市環境監測中心、國家氣象局、昆明市氣象局、滇池流域管理局、牛欄江—滇池補水工程調度中心、牛欄江—滇池補水工程入湖實施方案（雲政複[2012]37 號）和《雲南省環境狀況公報》、《昆明市國民經濟和社會發展統計公報》和《中國水資源公報》[1]。滇池草海和外海的污染指標 CODMn、TN、TP 的水質目標採用《地表水環境品質標準》(GB3838-2002)的湖庫IV和III類水質標準，分別為 10mg/L、1.50 mg/L、0.10 mg/L 和 6 mg/L、1.00 mg/L、0.05 mg/L。

#### 二、計算條件

在滇中引水工程建成通水前，滇池流域水資源配置格局已基本形成，其水資源條件由本區來水和掌鳩河、清水海、牛欄江外流域引水共同組成，合計水資源總量為 14.50 億 m<sup>3</sup>[1,3]。同時為加快滇池水質改善進程，外海北部環湖截汙工程將昆明主城區大量的水質淨化廠尾水（約 110 萬 m<sup>3</sup>/d）經截汙幹管導向西園隧道排向滇池下游，流域內經濟社會發展與滇池水環境品質失去了必然聯繫，滇池流域的水迴圈過程不閉合（見圖 5），即支撐滇池流域經濟社會發展的水資源多來源於外流域引水，同時城區內絕大部分生產生活退水經水質淨化廠處理達標後又經環湖截汙工程直接排向滇池下游，不再與湖泊發生直接的水力聯繫與污染物質交換，故滇池的入湖負荷量無法客觀反映流域人口與經濟規模，滇池水環境容量也無法與流域人口和經濟規模建立相應的回應關係，故滇池流域水環境承载力僅為狹義的水環境承载力，以湖泊水環境容量來約束入湖河流的水質濃度，以入湖河流的生態環境流量需求來指導多水源（本區來水、上游水庫泄水、牛欄江補水和水質淨化廠尾水）的合理利用，從而實現流域河湖水質的持續改善和多水源的可持續利用。

在現有的水資源條件和流域水迴圈格局下，以典型枯水年（P=90%）為設計水文條件，並考慮多水源對入湖河流生態環境流量的滿足程度，按照滇池流域水污染防治“十三五”規劃提出的規劃目標要求“滇池水質穩定在IV類，關鍵性指標達到III類”，研究滇池水環境承载力及其總量目標約束條件下的滇池入湖河流水質限制濃度管理方案。

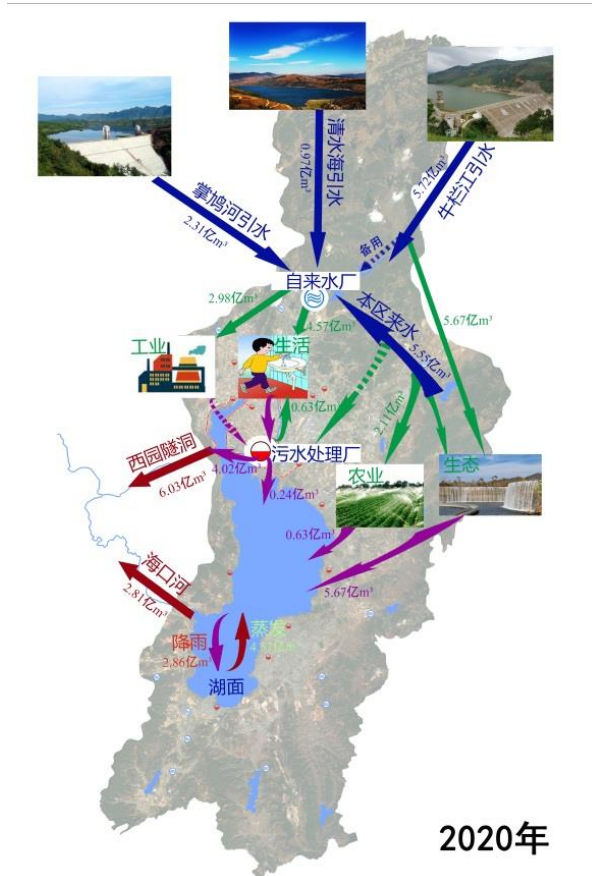


圖 5 滇中引水工程通水前滇池流域水迴圈示意圖

三、滇池水環境容量及其時空分佈特徵

為保障各主要入湖河道的生態環境安全和維持基本的流水景觀，滇池環湖入湖河道的生態環境需水總量為 5.87 億 m<sup>3</sup> (18.60m<sup>3</sup>/s) [9]。在典型枯水年設計水文條件、牛欄江—滇池補水工程和入湖河流生態環境需求滿足條件下，遵照滇池保護條例的調度運行規程[10]，為了使滇池水質達到規劃水質保護目標（外海：Ⅲ類；草海：Ⅳ類）並滿足其水質濃度限值，計算得到滇池湖泊水環境容量和入湖河流分區水質目標濃度限值，其結果分別見表 1 和表 2。

表 1 入湖河流生態環境流量保障下滇池水環境容量及其組成 單位：噸/年

	滇池			外海			草海		
	TP	TN	COD <sub>Mn</sub>	TP	TN	COD <sub>Mn</sub>	TP	TN	COD <sub>Mn</sub>
陸域	125	2961	6661	107	2583	5700	19	378	961
內源*	169	2594	4511	163	2502	4351	6	91	158
降雨降塵	37	441	487	35	425	470	1	15	17
合計	331	5996	11659	305	5510	10521	26	484	1136

\*：滇池內源釋放的COD<sub>Mn</sub>含湖區藻類因光合作用合成的有機污染物量。

表 2 滇池入湖河流分區水質濃度控制限值 單位：mg/L

分區	旱季			雨季		
	TP	TN	COD <sub>Mn</sub>	TP	TN	COD <sub>Mn</sub>
草海	0.14	3.0	6	0.12	2.5	6
外海	0.15	2.5	5	0.10	2.2	5
盤龍江	0.06	2.0	4	0.06	2.0	4

在當前的流域水迴圈過程與多水源配置滿足入湖河流環境流量需求條件下，滇池 CODMn、TP、TN 3 指標的水環境容量分別為 11659t/a、331t/a、5996t/a，其中湖面降雨降塵入湖的 CODMn、TP、TN 分別為 487 t/a、37t/a 和 441 t/a，分別約占滇池水環境容量的 4.2%、11.1%和 7.3%；湖泊內源釋放的 CODMn、TP、TN 分別約為 4511t/a、169t/a 和 2594 t/a，約占滇池水環境容量的 38.7%、51.1%、43.3%；在考慮湖面降塵、湖泊內源釋放和湖面水量蒸發擠佔了滇池水體的大部分容量後，分配給陸域入湖污染物的水環境容量分別為：總磷 125 t/a、總氮 2961 t/a、高錳酸鹽指數 6661t/a，同時水環境容量的年內及空間分佈差異十分顯著（見圖 6）。由於內源釋放（包括湖面藻類合成有機物）和降雨降塵負荷短期內很難有效控制，故從總量控制角度將對陸域點源和流域面源治理提出更嚴格的控制與管理要求，即 TP 和 CODMn 應執行比水功能區劃（草海入湖河流Ⅳ類、外海入湖河流Ⅲ類）更嚴格的水質濃度限值（見表 2）。

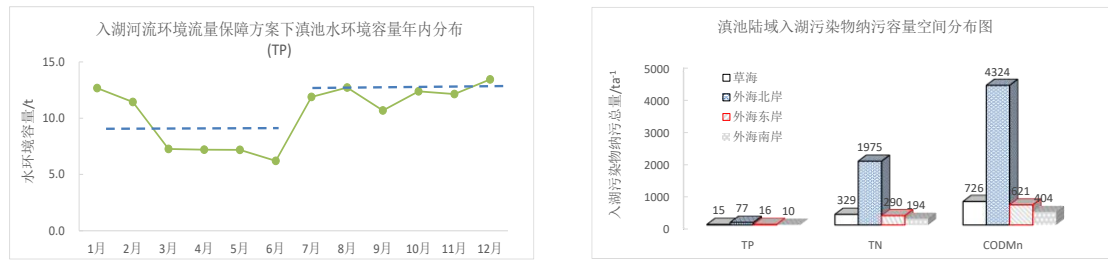


圖 6 滇池水環境容量年內變化特徵（以 TP 為例）

### 肆、滇池流域水資源可持續利用方案

#### 一、入湖河流多水源配置的水質要求

對於一條生態系統健康的河流而言，河流對入河污染物都具有一定的稀釋與自淨能力，在河段區間無大量污染物匯入情況下，河流沿程水質濃度將呈現自上而下逐漸降低的趨勢。針對滇池流域入湖河流源短、水少，且沿程不斷有城鎮生活廢污水、城市非點源或農業農村面源負荷匯入的情況，各入湖河流有限的自淨能力無法有效消納沿程污染物匯入而導致沿程水質濃度的升高。故為滿足基於容量總量控制需求提出的入湖流水質濃度限值，在確定入湖河流多水源配置的水質需求時，現階段至少應不低於表 2 中提出的入湖流水質濃度控制限值，遠期將在入湖河流單位河長水體自淨能力研究的基礎上，通過工程措施截斷點源入河途徑，並厘清非點源污染物對河流水質的貢獻率，以入湖河流為單元，研究提出滿足其入湖水質濃度限值需求的多水源配置水質要求，從而為滇池流域水資源配置優化與水資源可持續利用提供更科學的支撐。

#### 二、滿足入湖河流環境流量需求的多水源可配置水量分析

按照上游水庫下泄水量、臨近汙水處理廠尾水再利用、牛欄江引水的先後順序分析主要入湖河流環境用水的多水源配置方案。由於大河、柴河、東大河和古城河位於滇池南岸，距離牛欄江—滇池補水工程出口較遠，同時滇中引水工程在枯水季節基本無多餘水量補給滇池生態環境用水，故本次暫不考慮牛欄江來水對上述河流生態環境補水的可行性。多水源方案下滇池各主要入湖河流可用的多水源情況詳見表 3 所示。

表 3 滇池流域各主要入湖河流多水源可配置水量 單位：m<sup>3</sup>/s

序號	河流名稱	多水源配置需求	多水源可用水量		
			上游水庫下泄	汙水處理廠尾水	牛欄江
1	新運糧河	0.59	/	0.71	0.59
2	老運糧河	1.04	/	2.52	1.04
3	大觀河	1.18	/	/	1.18
4	西壩河	0.30	/	/	0.30

5	船房河	0.94	/	1.45	0.94
6	盤龍江	1.95	0.63	0.51	1.95
7	大清河	0.72	/	/	0.72
8	寶象河	1.70	0.06	1.41	1.70
9	馬料河	0.75	0.03	/	0.75
10	洛龍河	0.86	/	0.57	0.86
11	撈魚河	1.09	0.03	0.15	1.09
12	大河	0.00	0.05	0.21	0.00
13	柴河	0.00	0.13	/	0.00
14	東大河	0.00	0.06	/	0.00
15	古城河	0.00	/	0.10	0.00
合計		11.12	0.99	7.63	11.12

在多水源配置方案基本可行條件下，本區各水庫可向下游河流下泄生態流量為 0.99m<sup>3</sup>/s，就近利用水質淨化廠尾水水量約為應大於 7.63m<sup>3</sup>/s（現狀），牛欄江來水可覆蓋範圍的配置水量約為 11.12m<sup>3</sup>/s。從各主要入湖河流的環境流量需求滿足程度來看，除外海南部的大河、柴河、東大河和古城河外，其餘各主要入湖河流的環境流量均可得到較好滿足。

### 三、滇池流域水資源可持續利用方案

根據滇池水體富營養化治理需求，並結合昆明市水質淨化廠尾水資源可利用程度與尾水水質提標的相關性分析結果（見圖 7），均表明 TP、TN 兩指標是控制滇池水體富營養化水準並制約滇池流域污水處理廠尾水資源化利用的關鍵因素，在當前的污水處理水準（TN 指標濃度 8~10mg/L）條件下 TN 指標濃度是制約尾水資源規模化利用的關鍵。當尾水中的 TP 指標濃度提升到地表 II 類水質濃度限值（≤0.10mg/L）時將不再成為滇池流域尾水資源化利用的制約因素，而將尾水中 TN 指標濃度降低到 3~4mg/L 是滇池流域利用較為豐富的尾水資源補給入湖河流環境用水並實現滇池水質持續性改善的限制性要求。

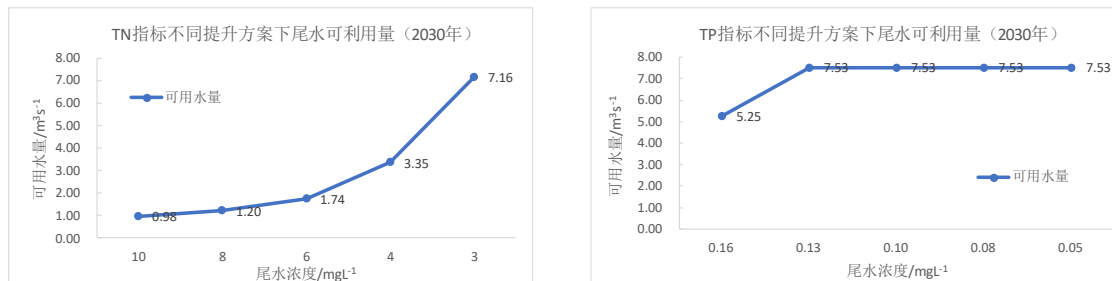


圖 7 昆明主城區水質淨化廠尾水水質提升與尾水資源可利用量變化關係

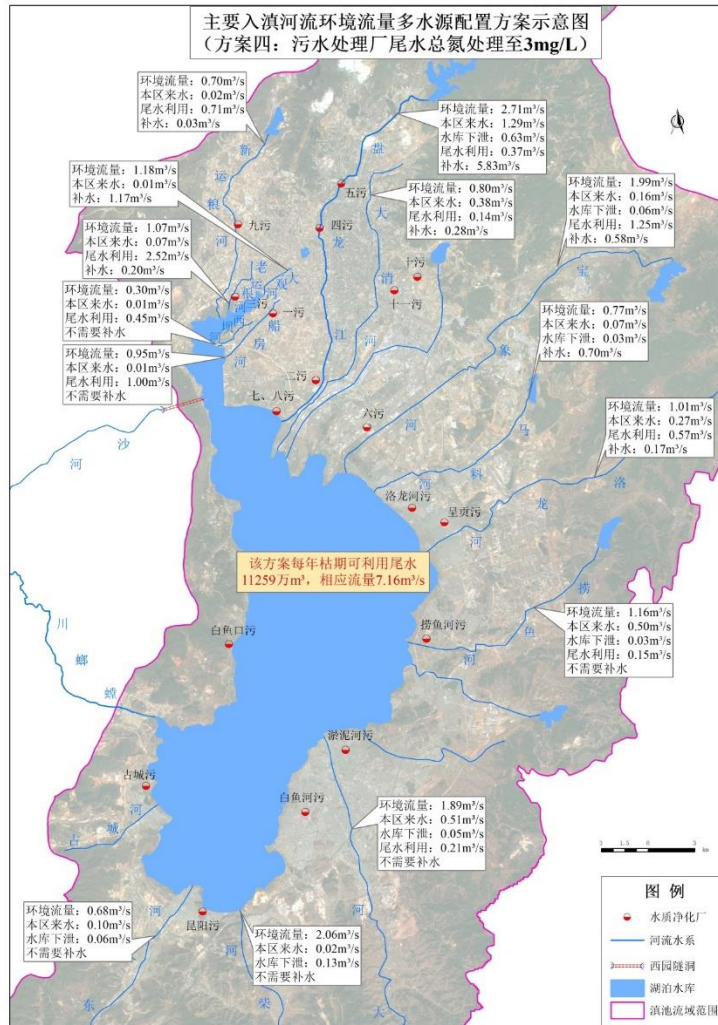


圖 8 尾水水質 TN≤4mg/L 時的滇池入湖河流環境流量多水源配置方案圖

隨著昆明市主城區各水質淨化廠出水中 N、P 負荷濃度的逐漸降低，可用於入湖河道環境用水的尾水量將逐步增大，相應地可減少入湖河流環境用水對外流域補水的需求，即當尾水中的 TN 指標濃度從目前的 10mg/L 逐步降低到 3.0mg/L 時，旱季可減少牛欄江來水的环境補水量為 11259 萬 m<sup>3</sup>，約占可利用尾水資源量的 95.1%，並可減少旱季入湖河流對牛欄江來水的环境補水需求約 7.16m<sup>3</sup>/s，其多水源可持續利用方案詳見圖 8 所示。

### 伍、結論和建議

(1) 滇池外海北部環湖截汙工程將昆明主城區大量的汙水處理廠尾水(約 110 萬 m<sup>3</sup>/d)經截汙幹管導向西園隧道排向滇池下游，致使流域內經濟社會活動與滇池水環境品質失去了必然聯繫，入湖負荷量無法客觀反映流域人口與經濟規模，湖泊水環境容量也無法與流域經濟社會活動建立相應的關係，故滇池流域水環境承载力為狹義的水環境承载力，可以湖泊水環境容量來約束入湖河流的水質濃度，以入湖河流的生態環境流量需求來指導多水源的合理利用，從而實現流域河湖水質的持續改善和多水源的可持續利用。

(2) 在現有的水迴圈過程及本區來水、上游水庫泄水、臨近區水質淨化廠尾水和牛欄江來水等多水源保障滇池主要入滇河流環境流量需求條件下，滇池 CODMn、TP、TN 3 指標的水環境容量分別為 11659t/a、331t/a、5996t/a，扣除湖面降雨降塵、湖泊內源釋放和水面蒸發擠佔掉大部分容量後，分配給陸域入湖汙染物的水環境容量分別為：CODMn 6661t/a、TP125t/a、TN2961



t/a，同時滇池水環境容量的年內及空間分佈差異十分顯著。

(3) 在入湖污染物總量約束及時空分佈格局下，提出了分區入湖河流的季節性水質濃度限值要求，即旱季入草海和外海的 CODMn、TP、TN 指標濃度限值分別為 6.0mg/L、0.15mg/L、3.0mg/L，5.0mg/L、0.15mg/L、2.5mg/L；雨季入草海和外海的 CODMn、TP、TN 指標濃度限值分別為 6.0mg/L、0.12mg/L、2.5mg/L，5.0mg/L、0.10mg/L、2.2mg/L；牛欄江來水的 CODMn、TP、TN 指標濃度限值分別為 4.0mg/L、0.06mg/L、2.2mg/L。各入湖河流的水質濃度限值明顯嚴于水環境功能區劃確定的水質目標濃度值。

(4) TP、TN 是控制滇池水體富營養化水準並制約滇池流域污水處理廠尾水資源化利用的關鍵因素，當尾水中的 TP 濃度提升到Ⅱ類水質濃度限值 ( $\leq 0.10\text{mg/L}$ ) 時將不再成為本區尾水資源化利用的制約因素，而將尾水中 TN 指標濃度降低到 3~4mg/L 是滇池流域利用較為豐富的尾水資源補給入湖河流環境用水並實現滇池水質持續性改善的限制性要求。按照上游水庫來水、污水處理廠尾水再利用、牛欄江引水的先後順序原則，當尾水中的 TN 濃度從目前的 10mg/L 逐步降低到 3.0mg/L 時，旱季可減少牛欄江來水的環境補水量為 11259 萬 m<sup>3</sup>，約占可利用尾水資源量的 95.1%，並可減少旱季入湖河流對牛欄江來水的環境補水需求約 7.16m<sup>3</sup>/s。

### 參考文獻：

- [1]姚雲輝，馬巍，施國武，蔣汝成，成國標. 滇池入湖河流水質目標精細化管理需求研究[J],長江科學院學報，2019,36(4):
- [2]劉莊，劉愛萍，莊巍，張麗等.每日最大污染負荷(TMDL)計畫的借鑒意義與我國水污染總量控制管理流程[J],生態與農村環境學報，2016,32(1):47-52.
- [3]馬巍，浦承松，謝波、周豐等. 牛欄江—滇池補水工程改善滇池水環境引水調控技術及應用[M], 中國水利水電出版社，2014 年 5 月.
- [4]石建屏,李新·滇池流域水環境承載力及其動態變化特徵研究 [J],環境科學學報，32(7):1777-1784.
- [5]馬巍,浦承松,羅佳翠,陳欣. 池水動力特性及其對北岸藍藻堆積驅動影響[J],水利學報，2013，44(增刊 1): 22-27.
- [6]馬巍，廖文根，匡尚富，禹雪中. 大型淺水湖泊納污能力核算的風場設計條件分析[J],水利學報，2009，40(11):1313-1318
- [7]薑恒志,崔雷,石峰,劉思國,劉志華.風場、地形和吞吐流對太湖流場影響的研究[J],水力發電學報，2013,32(6):
- [8]駱輝煌,李翀,蔣豔,楊智.南四湖風生流數值模擬研究[J], 南水北調與水利科技,2011,9(3):15-20.
- [9]馬巍，陳欣，蔣汝成、周豐等. 滇池流域水環境承載能力與水資源可持續利用研究[M], 中國水利水電出版社，2019.
- [10]昆明市人民政府.滇池保護條例[M]，2010.

## 城市河流水生態與水環境治理探討

朱夢珊<sup>1</sup>

### 摘要

城市河流是城市形成與發展的重要資源與生態環境載體，但城市化進程的加快，導致河流水生態與水環境治理面臨污染控制難，水資源短缺，水生態系統失衡和人類活動劇烈影響等多方面的挑戰，如何治理和恢復健康良好的城市河流水生態與水環境，充分發揮河流功能成為河流治理研究的熱點。本文指出河流對城市經濟發展及人類生產生活的重要性，分析判斷城市河流水生態與水環境問題成因主要是人類活動在污染物排放、水資源過度開發、農業活動及城市化建設等方面對河流的污染破壞。在明確河流治理的目標是實現河流防洪、水質、水環境及生態系統同步改善與提升，建設生態自然的河流水環境基礎上，結合國內外已有研究進展，探討分析水生態修復技術、攔源截汙、清淤疏浚、河湖水系聯通等工程措施以及河長制等相關政策措施在河流水環境治理與水生態修復中的應用，為城市河流治理修復提供一定的理論研究基礎。

**關鍵字：**城市河流、水生態、水環境、治理、修復

<sup>1</sup> 福建省水利投资开发集团福鼎水务有限公司员工

## 壹、前言

全世界超過 70% 的城市誕生在河流兩岸，河流是城市繁榮發展不可或缺的組成部分，不僅是城市防洪蓄水、航道水運的重要載體，還承擔著調節氣候、灌溉農田、生態景觀等功能，與人類生活和生產密切相關。但近年來，城市化發展快速，導致城市河流水質惡化、水量減少、水環境發生改變、水生生態系統平衡遭到破壞，直接或間接影響人民生活水準及身體健康，阻礙城市化的可持續發展。而上海黃浦松江段死豬事件、安徽池州河水污染致千畝田變荒地等水環境污染事件時有發生，河流水體污染問題十分嚴重，因此必須加強對河流水環境與水生生態的治理和保護，做好水生生態環境保護工作，實現城市的可持續發展。

綜上所述，本文研究分析河流水生態及水環境污染問題，總結各種河流治理修復技術及應用情況，以期為日後開展河流生態修復及治理工作提供參考借鑒依據。

## 貳、水生态與水环境問題及成因

### 一、河流水環境與水生生態問題

據我國生態環境部 2019 年 4 月統計結果顯示(生態環境部, 2019), 全國主要河流斷面中, I 類河流斷面僅占 8.3%, 而有 11.2% 河流斷面為 V 類或劣 V 類水質標準, 水體富營養化、黑臭、水華現象頻發, 其流域內水源已不能直接使用, 全國水污染情況嚴重, 城市水環境受損嚴重。同時, 隨著城市化進程加快, 河流開發利用嚴重, 遠超 40% 生態警戒線, 導致河流生態基流不足, 枯季斷流。而城市河流的嚴重渠化、硬化致使河流水土流失嚴重, 水生生物多樣性降低, 河流水生生態系統失衡。

### 二、成因分析

#### (一) 水資源開發過度

水資源是河流發展的必要條件, 是所有水問題根本, 但近年來我國水資源開發過度, 已超過河流自身水資源量的 50% (河流水資源開發利用率通常不高出其水資源量的 40%), 黃河流域甚至達到 106%, 嚴重擠佔生態流量, 河流自淨能力銳減。

#### (二) 農業污染

中國是農業大國, 而化肥、農藥的過度使用導致水體污染、富營養化等問題日益嚴重。據 2018 年統計結果顯示, 我國化肥年施用量達 5900 萬噸左右, 占全球化肥年使用量 30%, 遠超世界平均水準。我國每年約有 50%~70% 化肥流失而造成水體富營養化和酸化, 不僅嚴重威脅居民飲水安全, 也對水生生態系統平衡造成破壞(叢曉男、單菁菁, 2019)。

#### (三) 城市化建設發展

城市發展離不開土地建設, 為滿足城市需求, 盲目填埋河流、侵佔水面, 進行管道改造, 導致河道走向改變, 河流生態系統失去平衡, 調蓄和自淨功能逐步減弱, 城市內澇發生幾率進一步增加。

#### (四) 污水直排

城市規模的不斷擴大致使工廠及企業數量迅速增加, 用水量隨之提高, 而其產生的大量汙廢水未經規範化處理或直接排入河流, 導致水體受到污染, 河流內原有魚蝦和水生植物基本消失, 水葫蘆等外來引進植物大量繁殖, 破壞河流自然狀態, 嚴重威脅河流內生態鏈條的完整性, 致使河流生物多樣性和生態穩定性下降。

#### (五) 垃圾亂倒, 淤泥堆積

沿岸居民環保意識薄弱, 為求生活方便沿河隨意傾倒垃圾, 而河岸及河內垃圾未及時清理, 導致垃圾污染進一步擴大。部分河流由於沖刷積累及治理措施不當, 河內垃圾及淤泥逐漸堆積, 造成內河堵塞, 水質惡化, 調蓄、洩洪和航運能力降低。

## 參、水生態與水環境治理措施

### 一、攔源截汙

攔源截汙是內源治理和生態修復的基礎和前提，是水體治理的重點之一。為改善河流水生態環境污染問題，應加大力度堅持從源頭整治，建立汙水處理設施，優化汙水管網佈設，實行雨汙分流，提高汙水處理廠處理規模和技術能力。同時，及時清理河道兩岸垃圾，從源頭上直接減少河流污染物，降低對河流水質的污染。在 1858 年泰晤士河“大惡臭”事件後，英國政府開始嚴格控制污染物的排放及建設汙水處理廠，並採用專業化監管體系和系統性治理措施，最終使泰晤士河恢復工業革命前的狀態。

### 二、水生態修復技術

水生態修復技術利用恢復生態學和水生生態學對被污染和受損水生態及水環境進行恢復重建，有效改善河流水質，恢復流域內自然生物食物鏈，提高生態系統完整性。

#### (一)河岸生態修復

河岸生態系統聯結陸地和水生生態系統，邊緣效益顯著，對河流變化極為敏感。傳統的河岸設計通常為直立式，並採用混凝土、砌石等方法修建，僅考慮其耐久性而破壞了河岸帶植物群落，阻斷河岸與水體中物質交換，影響物種生長繁殖，導致自然河岸的生態系統功能改變，河流水生生物棲息環境被破壞。生態護坡修復是目前常用的河岸生態修復技術，是一種修復天然河岸或具有天然河岸滲透性的人工護岸，主要有植物型護坡、生態石籠護坡，植物型生態混凝土護坡等類型(周崔巍、陳文學，2016)。生態護坡通過種植根系發達的植被，利用植物與岩石或土體之間相互作用，對邊坡進行防護加固，防止水土流失，截留降雨。同時，生態護岸的植被能夠改善生態環境功能，促進

有機污染物降解，改善河岸水生生物棲息地環境，亦可達到一定的景觀效果。楊星等(楊星、王蔚，2015)利用生態護岸截汙效率計算模型對常熟市金徑塘河道採用的新型生態護岸進行分析計算，得出其綜合截汙效率達 75.4%。長江南京段河岸修復工程實施後(陳輝、錢海峰，2018)，形成穩定的生態護岸結構，具備防洪、降解污染物和淨化水質的能力。

#### (二)水質生態修復技術

水質淨化是河流水生態修復最重要的任務之一，主要包括生態浮床技術、人工濕地技術和生物修復技術。

##### 1. 生態浮床技術

生態浮床技術結合綠化技術與漂浮技術，利用無土栽培技術在水體中種植適宜生長的水生植物和陸生植物，具有工程量小，易維護，使用時間長，治汙效果好，不會造成二次污染，能夠實現資源可持續性利用等優點。人工構建的生物浮床，能夠有效吸收富營養物質，降低河流 COD 值，改善水質，為水生動植物提供良好的生長環境，因此常用於河流水生態環境的治理。De Stefani 等利用生態浮床技術淨化義大利東北部某自然公園受污染水體(De Stefani G, 2018)，實驗結果表明，浮床對水體中 COD、BOD、TP 的去除率分別達到了 66%、52%、65%。莫福金等選用組合型生態浮床技術研究其對富營養化水體的治理效果(莫福金、馬華菊，2019)，結果表明該組合型生態浮床對 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 的去除率分別為 82.04%、80.74%、和 85.07%，具有良好的水質淨化效果。

##### 2. 人工濕地技術

人工濕地技術是類比天然濕地，利用基質、微生物、水生動植物與水體形成完整的生態系統，通過物理、化學、生物的綜合作用實現水質淨化的目的。賈麗娜等構建了人工濕地中試工程對合肥塘西河污染水體進行淨化(賈麗娜、張發宇，2016)，結果表明複合人工濕地

淨化系統對低污染水體具有較好的淨化效果：在溫度不低於 10°C 時，總氮、氨氮、總磷、COD 和葉綠素 a 的平均去除率分別為 61.09%、90.58%、58.81%、33.23% 和 70.26%。人工濕地適用於水量不大，水質變化較小的河流，具有能耗低、針對性強、維護簡單，具有一定生態效益和經濟效益的優點，但其存在土地面積佔用大，建設成本高等缺點。

### 3. 生物修復技術

生物修復技術是通過水生動植物和微生物的新陳代謝作用，吸收、轉化、降解水體中有機污染物及氮磷等營養物質，實現淨化水質、恢復生物生態群落，增加種群多樣性的目的。包括微生物修復技術、水生植物修復技術和水生動物修復技術。

微生物修復技術是現階段應用最廣泛的生態修復技術之一，但其在應用中需嚴格控制微生物種類及數量，以防止造成二次污染。Yan 等(Yan Jiao, 2011)向富氮廢水水體中投加經生物強化的硝化細菌，結果表明，TN和氨氮的去除率分別從 25.9%、34.5% 提高到 50.3%、60.1%，且通過與特定細菌進行生物強化，可以在去除氮的同時，有效地分佈硝化細菌，從而顯著改善污染水體水質與生態環境。

水生植物修復技術是在植物忍耐以及超量累積某種化學元素為理論的基礎上，利用植物呼吸及揮發作用去除水中污染物而達到水質淨化的目的，植物修復技術被認為是一種較為綠色的修復技術。

水生動物修復技術是在水體中投放對相應污染物有忍耐能力的魚類、蝦類及蟲類等水生動物，形成完整食物鏈，吸收分解水中有機污染物，淨化水質，改善河流水生態環境。

#### (三) 水量修復技術

水量修復技術分為生態調度和生態調水 2 種方式。

生態調度利用水利設施泄放適當流量而有

效協調包括水庫防洪、蓄水在內的河流利害矛盾，確保河流生態、生產及日常生活各方面用水需求，保障河流水生態環境。2001 年黑河實行全線閉口和集中下泄等措施，在一定程度上恢復了河流下游水生態環境，確保下游生活用水量。

生態調水通過調控一系列水利設施將清潔水源引入污染河流，補充河水量，稀釋污染水域，改善水域生態環境，提高河流自淨能力。生態調水雖能在一定程度上稀釋污染水體，但未從根源上解決河流污染問題，因此其是在河流短期缺水時的應急處理措施。張航等對生態調水後的清溪河進行分析(張航、馮民權，2015)，結果表明調水後的清溪河水質有明顯改善，污染帶減小，但停止生態調水後，若未採取截汙措施，污水直接排入水體，將影響河流水質。陳剛等(陳剛、桑學鋒，2018)通過水力聯繫將外流域引調水與水庫水、湖泊水、地下水、外調水等水資源整合為一個有機整體，恢復滇池自然水系迴圈，結果表明滇池入湖污染負荷降低，滇池生態環境修復進程加快。

### 三、清淤疏浚

通過清淤疏浚的方式可永久性去除沉積於河底的富含有機污染物的淤泥，保證河流的暢通性，提高防洪減災能力，改善河流水質。常見的清淤技術有水下清淤技術、排幹清淤技術和環保清淤技術(王海霞，2019)。連州市將清淤作為河道整治的根本，通過清淤治理從根本上解決了河道淤塞、大水遭災、平時少水或斷流的狀況。實施河道清淤疏浚應結合具體情況，定期定點精確清淤，防止打破原有自然生態平衡和造成二次污染，盡可能保護水體底部結果和生態平衡。同時，收集的垃圾與淤泥應進行分類和環保處理，淤泥為工程廢棄物，根據標準盡可能進行二次利用，實現資源可持續利用，如：陶粒製作、淤泥制磚等。

#### 四、河湖水系聯通

河湖聯通修復主要是將濕地、湖泊及河流等水系通過人工措施或自然迴圈等手段，聯通成水網體系，恢復河流橫向與縱向的流動性及連續性，提高河流的調蓄能力和防汛抗旱能力，改善水質和水生態環境，實現水資源的可持續性利用。張燦等利用 MIKE11-維水動力學模型及相關計算方法對洮兒河白城境內的河湖聯通系統進行界定(張燦、劉建衛，2018)，結果表明在發生 20 年一遇及以下量級洪水時，可保證河道全線安全引水，同時，河湖聯通系統加強了河道內外的水力聯繫及河道內外供需水的相互影響。

#### 五、推行河長制

2016 年 12 月，中共中央辦公廳和國務院辦公廳聯合印發《關於全面推行河長制的意見》，其主要涵蓋了六個方面的內容：水環境治理、水資源保護、水污染防治、水域岸線管理和水行政執法監督。採取“河長制”模式，真正把治水管水責任落到實處，明確目標和工作職責，構建科學有序的管理制度，從根源上杜絕河流污染問題，提高河流水質，改善河流水環境，維持水體生態系統平衡，保障居民生活用水安全。河長制是解決日益嚴重的河流水生態環境問題的一項改革性措施，能最大程度發揮各相關機構協調、監督、檢測作用，加大水污染治理力度。朱喜調查研究無錫市自 2007 年創建並發展河長制、治理河湖的成效(朱喜，2018)，結果表明實行河長責任制度後，無錫市河湖水質和水生態系統明顯改善，且太湖連續九年正常供水，無錫入太湖的 17 條主要河道全部消除劣 V 類評級。

#### 六、加大宣傳力度，發展生態產業

相關部門應充分利用新聞媒體、網路等手

段，加強節約用水、水環境保護、水生態文明建設宣傳教育，提高居民文明用水護水觀念，加大公眾在河流水環境與水生態建設參與度。

加強生態農業建設，大力推廣低毒、低殘留和高效的農藥，減少農藥使用量，提倡使用有機肥。同時，相關部門應提倡農民採用高效節水灌溉技術，並組織專業技術人員指導村民使用安裝節水灌溉設施，盡最大可能減少河流灌溉用水浪費現象。

政府應加強科技創新能力，引進新技術，加大工業汙廢水管理力度，推行清潔生產生活和制度審核制度，發展生態產業，減少工業污染負荷，整治化工、冶金、造紙等重點污染行業。同時加大力度完善相關法律法規，強化河流水環境與水生態監測法律制度，嚴厲懲處破壞河流水安全行為。

#### 肆、結論

城市河流在城市的建設與發展中具有極其重要的作用，既是重要的水利設施也是城市生態系統的重要組成部分，與人類生存發展關係密切，因此，必須大力加強對河流水生態與水環境的治理修復。河流整治是一項長期工程，必須結合實際，研究分析不同治理技術的適用性，將多種修復技術優化組合，採取創新思維，以保護河流水生態環境為原則進行河流整治，減少人為因素破壞，改善河流水環境污染和水生態系統失衡現狀，恢復河流原始功能，實現生態環境的可持續發展。

#### 參考文獻

1. 生態環境部(2019)，「2019 年 4 月全國地表水水質月報」。
2. 叢曉男、單菁菁(2019)，「化肥農藥減量與農用地土壤污染治理研究」，江淮論壇，第 2 期，第 17-23 頁。

3. 崔巍、陳文學等(2016), 「我國河流生態護岸建設及相關問題探討」, 水利水電技術, 第 47 卷, 第 10 期, 第 119-123 頁。
4. 楊星、王蔚 (2015), 「生態護岸面源污染物截汙效率簡化計算模型」, 中山大學學報(自然科學版), 第 54 卷, 第 5 期, 第 90-95 頁。
5. 陳輝、錢海峰等 (2018), 「長江南京段河岸帶生態修復思路及技術體系研究」, 江蘇水利, 第 1 期, 第 32-35 頁。
6. De Stefani G, Tocchetto D, Salvato M, Borin M (2011), "Performance of a floating treatment wetland for in-stream water amelioration in NE Italy", *Hydrobiologia*, 第 674 卷, 第 1 期, 第 157-167 頁。
7. 莫福金、馬華菊等(2019), 「組合型生態浮床處理富營養化景觀水體研究」, 化工技術與開發, 第 48 卷, 第 3 期, 第 47-51 頁。
8. 賈麗娜、張發宇等(2016), 「複合人工濕地對低污染城市河流的深度淨化效果」, 中國給水排水, 第 32 卷, 第 23 期, 第 80-84 頁。
9. Yan Jiao, Qingliang Zhao, Wenbiao Jin (2011), "Bioaugmentation of a biological contact oxidation ditch with indigenous nitrifying bacteria for in situ remediation of nitrogen-rich stream water", *Bioresource Technology*, 第 102 卷, 第 2 期, 第 990-995 頁。
10. 張航、馮民權等(2015), 「基於生態調水清滌河水環境效應研究」, 西安理工大學學報, 第 31 卷, 第 1 期, 第 83-90 頁。
11. 陳剛、桑學鋒等(2018), 「多源水聯合調度重構滇池流域健康水迴圈模式」, 湖泊科學, 第 30 卷, 第 1 期, 第 57-69 頁。
12. 王海霞(2019), 「中小河道治理中清淤及淤泥處理技術初探」, 農業科技與資訊, 第 11 期, 第 41-42 頁。
13. 張燦、劉建衛 (2018), 「洮兒河河湖連通系統洪水資源利用邊界閾值研究」, 南水北調與水利科技, 第 16 卷, 第 4 期, 第 66-73 頁。
14. 朱喜 (2018), 「無錫市建立河長制十年成效回顧」, 水資源開發與管理, 第 4 期, 第 16-22+59 頁。

## 福建省魚道研究新進展

楊首龍<sup>1</sup>，鄭文勇<sup>2</sup>，鄭國富<sup>3</sup>，王樂樂<sup>4</sup>，柯明輝<sup>5</sup>

### 摘要

總結分析了福建省正在建設的閩江莒口水閘工程、教江霍口水庫工程、泉州白瀨水利樞紐以及九龍江新建西溪水閘的過魚設施最新研究成果，涵蓋了低水頭和高水頭不同水力條件。通過現場調查、資料採集和魚類游泳能力測試，初步摸清了福建省主要河流及河口魚的種類分布及行為特點，提出魚類體重與其特徵泳速沒有明顯相關關係的觀點，給出魚類體長與體重的相互關係；通過大比尺正態物理模型、二維及三維數學模型等手段，分析工程前後水流流動特性的變化與魚類行為特性；提出了由長短隔板和S型過魚孔組成的新型仿生態魚道體型；研究了不同消能形式對集魚平台水流特性的影響；通過實驗觀察概化魚在魚道中的適應性及上溯習性。

**關鍵詞：**水力學、流場、水位場、魚種、游泳能力、進魚口、魚道結構、集魚平台

---

<sup>1</sup> 福建省水利水電勘測設計研究院，副總工、教授級高級工程師

<sup>2</sup> 福建省水利投資開發集團有限公司，總工、教授級高級工程師

<sup>3</sup> 福建省水產研究所，副所長、研究員

<sup>4</sup> 福建省水利水電勘測設計研究院，工程師

<sup>5</sup> 福建省水利水電勘測設計研究院，工程師



## 壹、前言

福建省海岸线长 3324km，位居全国第二位，主要江河闽江、九龙江、晋江、敖江均独立入海，鱼类资源十分丰富。伴随着海峡西岸经济的高速发展，闽江河口建成了水口水电站，九龙江河口建成了西溪-北溪-南溪水闸群，晋江建成了金鸡桥闸。这些工程措施带来巨大社会效益的同时，也使河口鱼类的生境发生了很大变化，如何在发挥工程效益的同时，为鱼类考虑一个上溯洄游的条件，建设鱼道成为首选。本文阐述了正在建设的四座河口工程（见图 1），即福建省平潭及闽江河口水资源配置（一闸三线）工程（距闽江河口 50km）、霍口水库工程（距敖江河口 61km）、白濑水利枢纽工程（距晋江河口 115km），新西溪桥闸（距九龙江河口 21km）在鱼类资源调查和鱼道技术研究方面的最新成果。



图 1 福建省拟建鱼道分布图

## 贰、鱼类资源调查及行为特性研究

### 一、福建省主要入海河流鱼类资源调查

闽江是福建省第一大河。2014 年 4 月至 7 月与 4 月至 8 月，福建省水产所分别对闽江下游（竹岐大桥下游）以及大樟溪干流界竹口水电站以下鱼类资源进行了调查，其中闽江下游从竹岐大桥至河口共设 9 个调查断面，大樟溪干流从界竹口水电站以下共设 6 个断面。调查结果表明：闽江下游河段共有鱼类 59 种，隶属于 11 目 27 科 50 属。其中，鲤形目种类最多，有 20 种，占调查总种数的 33.90%；其次为鲈形目 19 种，占总种数的 32.20%；鲇形目 8 种，占总种数的 13.56%；闽江重要支流大樟溪干流界竹口水电站以下共有鱼类 60 种，隶

属于 5 目 13 科 47 属。2019 年 3 月 23 日至 3 月 24 日，对福建省第二大江九龙江河口北溪水闸上游石洲、扶摇，下游新石洲三个断面进行鱼类资源调查、共发现鱼类 34 种，958 尾，其中鲤形目占 53.13%，鲇形目占 11.27%，鲈形目占 8.35%，鲇形目 7.10%。晋江为福建省第三大江，通过各河段 5 个调查点，以及西溪中下游、东溪下游、晋江干流直至入海口 7 个调查点，进行实地生境观察和采样发现，晋江流域共有鱼类 89 种，分属于 10 目 23 科 68 属，其中河口鱼类 26 种。鱼类以鲤形目（47 种）和鲈形目（20 种）为主。从目的水平上看，仍以鲤形目种类数最多，其次为鲈形目。福建入海河流珍稀鱼类有花鳗鲡，为濒危物种，国家二级保护野生动物；鲟鱼、温州光唇鱼为濒危物种；香鱼为易危物种，福建省级重点保护水生野生动物。九龙江河口北溪水闸下游新石洲断面和敖江的塘坂、观音阁、浦口均发现日本鳗鲡。另外，福建主要河流还有中国特有鱼种：革条副鱖、半刺厚唇鱼、温州光唇鱼、拟腹吸鳅、叉尾鮠、粗唇鮠、团头鲂、似[鱼骨]、中间鳅鮠、台湾白甲鱼、圆尾斗鱼、乌鳢、斑鳢、暗色沙塘鳢等 14 种。

### 二、鱼类行为研究

敖江流域 2013、2014 和 2015 年现场采集鱼类 32 种，共计 810 尾，其中鲱形目 41 尾、鳗鲡目 4 尾、蛙形目 11 尾、鲤形目 477 尾、鲇形目 53 尾、鲈形目 26 尾、鲈形目 168 尾、鳢形目 30 尾。体长 3~36.5cm，体重 1.5~750g，研究表明：鱼类的身长与重量存在相关关系，如图 2 所示。

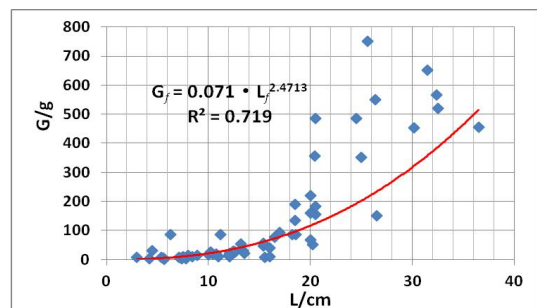


图 2 鱼类体长与体重关系

鱼的不同目类体长与体重关系可由式（1）~（8）确定：

$$\text{鰻鱺目: } G_{anguilli} = 0.018 \cdot L_{anguilli}^{3.4595} \quad (1)$$

$$\text{鯉形目: } G_{cyprini} = 0.062 \cdot L_{cyprini}^{2.5548} \quad (2)$$

$$\text{鱈形目: } G_{perci} = 0.0235 \cdot L_{perci}^{2.9084} \quad (3)$$

$$\text{鮎形目: } G_{siluri} = 0.9676 \cdot L_{siluri}^{1.6209} \quad (4)$$

$$\text{蛙形目: } G_{salmoni} = 1.0974 \cdot L_{salmoni}^{1.2739} \quad (5)$$

$$\text{鯔形目: } G_{clupei} = 0.0615 \cdot L_{clupei}^{1.8226} \quad (6)$$

$$\text{鰱形目: } G_{mugiloidei} = 0.0018 \cdot L_{mugiloidei}^{3.7064} \quad (7)$$

$$\text{鰈形目: } G_{pleuronecti} = 0.0001 \cdot L_{pleuronecti}^{4.7493} \quad (8)$$

式中: G 为不同鱼类重量, g; L 为鱼类长度, cm。

2017年5月1日至2017年6月3日在敖江流域获取185尾的试验鱼,其中鲤形目占85.94%,包括细鳞鲷、银鲷、宽鳍鱲、黑脊倒刺鲃、半刺厚唇鱼,鮎形目占14.06%,主要为粗唇鲃,试验鱼体长6~31.5cm,体重3~489g。研究表明:除半刺厚唇鱼的感应流速与体长有一定相关性外,其他鱼种体长与感应流速相关性不大,不仅如此,临界泳速、突进泳速与鱼类体长相关性也不大。通过丹麦 Loligo System 公司 SW10200 型环形试验水槽测试不同鱼类游泳能力,见图3,半刺厚唇鱼感应流速0.12~0.21m/s、临界泳速0.48~1.64 m/s、突进泳速0.67~1.72 m/s,粗唇鲃感应流速0.13~0.22 m/s、临界泳速0.6~1.2 m/s、突进泳速0.77~1.4 m/s,黑脊倒刺鲃感应流速0.09~0.25 m/s、临界泳速0.24~1.44 m/s、突进泳速0.6~1.7 m/s,宽鳍鱲感应流速0.08~0.19 m/s、临界泳速0.36~0.96 m/s、突进泳速0.53~1.32 m/s,细鳞鲷感应流速0.11~0.22 m/s、临界泳速0.28~1.34 m/s、突进泳速0.48~1.72 m/s,长薄鳅感应流速0.13~0.23 m/s、临界泳速0.4~1.56 m/s、突进泳速0.45~1.92 m/s。



图3 鱼类游泳能力测试

## 参、天然河流流动特性与进鱼口

### 设置

#### 一、莒口闸下水流条件及鱼道进口设置

拦河闸坝建成之后,尽管考虑了过鱼设施,但建闸前后水流的结构和流动特性均发生深刻变化,如何在认识工程前后水流条件客观变化的基础上,尊重鱼类行为特性,尽量创造鱼类熟悉喜欢的水流环境,并结合工程自身功能提高诱鱼效果,使目标鱼类尽快找到进鱼口,是进鱼口设置重要关键技术,如果目标鱼类无法找到进鱼口,那么再好的鱼道设计也是徒劳的。福建省平潭及闽江口水资源配置(一闸三线)工程,从大樟溪莒口拦河闸上游取水,并从闽江干流竹岐取水口引水补充后引水往平潭综合实验区、福清市、长乐市、福州南港片等地。大樟溪莒口拦河闸共设置14个16×12(宽×高)孔,闸孔从左岸至右岸依次编号,其中左岸1~2#孔和右岸8~14#孔为先启孔,河中3~7#孔为后启孔,在14#孔右侧设置生态放水孔。鱼道位于右岸,为仿生态鱼道,总长1351.7m,进口位于坝轴线下游534m处,设高低进鱼口,进鱼口宽1.0m,高低进鱼口底高程分别为-0.2m、-2.2m,见图4。图5,6给出了下泄流量219 m<sup>3</sup>/s,同样遭遇下游低水位时,工程前后工程区域流速云图,工程后12~14#后启孔开启下泄216 m<sup>3</sup>/s、鱼道下泄3 m<sup>3</sup>/s,可以看出区域内水流结构发生深刻变化。莒口工程区域目标鱼类的感应流速为0.18~0.25m/s,仿自然鱼道进口诱鱼流速为0.45~0.5m/s,工程后右岸流速均小于0.45m/s,但进鱼口附近则达到0.56 m/s,存在流速梯度,目标鱼类易于识别,图7给出进鱼口附近水流结构。

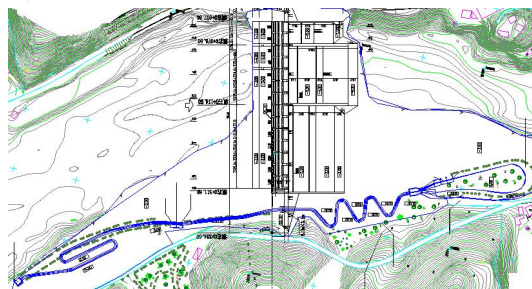


图4 莒口拦河闸枢纽布置

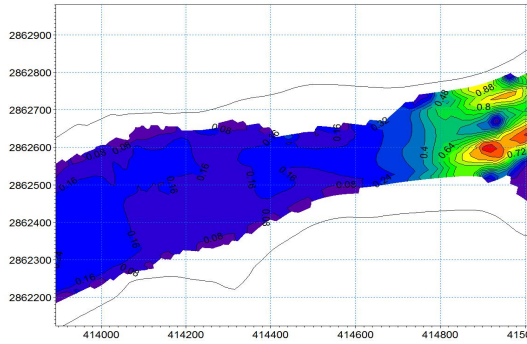


图 5 工程前工程区域天然河道流速云图

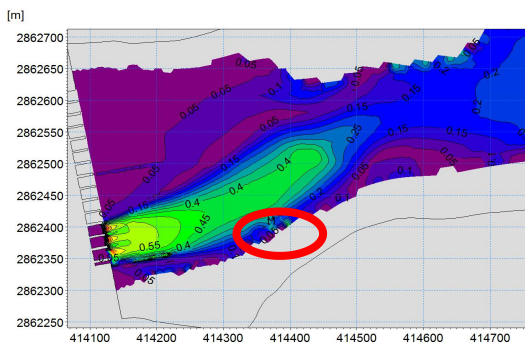


图 6 工程后工程区域流速云图

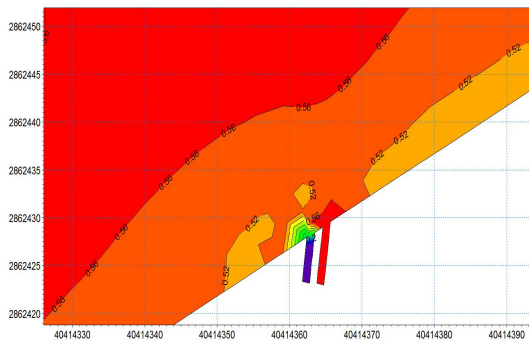


图 7 鱼道进口细部流速云图

## 二、霍口鱼道进口水力学试验

水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院和水利部福建水电勘测设计研究院针对霍口枢纽下游河道及进鱼口水流流场结构分别进行了数值模拟和物理模型试验研究。正态物理模型包括大坝、电站厂房以及上下游部分河道。模型上边界取坝址上游约 300m 处，模型下边界取大坝下游约 1200m 处，比尺 1: 80，如图 8。物理模型考虑了三台机组满发  $Q=110.07 \text{ m}^3/\text{s}$ 、三台发电机组满发+大王里河 10 年一遇下泄流量  $Q=240.07 \text{ m}^3/\text{s}$  以及

三台发电机组满发+溢洪道下泄 2 年一遇下泄流量  $Q=1530 \text{ m}^3/\text{s}$  等三种工况。数值模拟共考虑生态泄流量  $5.61 \text{ m}^3/\text{s}$ 、河道尾水位 113.01m，生态泄流量  $10.24 \text{ m}^3/\text{s}$ 、河道尾水位 113.29m，一台小机组满发  $Q=18.43 \text{ m}^3/\text{s}$ 、河道尾水位 113.66m，一台小机组+一台大机组满发  $Q=64.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 、河道尾水位 115.72m，二台机组满发  $Q=92.64 \text{ m}^3/\text{s}$ 、河道尾水位 116.16m 以及三台机组满发  $Q=110.07 \text{ m}^3/\text{s}$ 、河道尾水位 116.36m 等五种工况。研究发现：原设计进鱼口易受泄洪冲渣淤积与电站发电水流影响，不利鱼类上溯，将进鱼口由 0+399m 移至 0+911m 桩号处。进鱼口下移后，生态泄流量  $10.24 \text{ m}^3/\text{s}$  工况下，进鱼口下游侧水深仅有 0.3~0.4m，对于枢纽主要过鱼对象水深偏浅，建议在进鱼口下游 150m 范围内，开挖底宽 15m、深度小于 0.5m 的沟渠，以增加水深，优化后生态泄流量  $5.61 \text{ m}^3/\text{s}$ 、河道尾水位 113.01m 条件下，进鱼口附近流速 0.28m/s，三台机组满发  $Q=110.07 \text{ m}^3/\text{s}$ 、河道尾水位 116.36m，进鱼口附近最大流速 0.96 m/s，可满足鱼类上溯要求。见图 9。

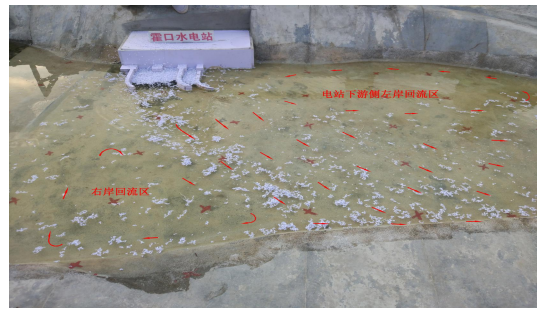


图 8 霍口枢纽下游河道及进鱼口水流流场结构物理模型试验研究

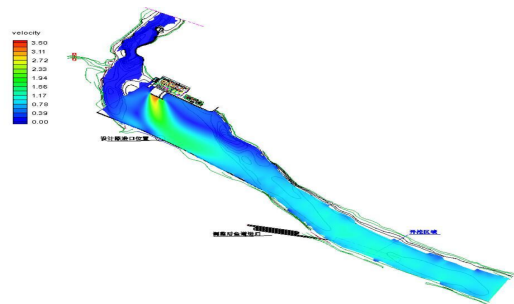


图 9 修正后霍口鱼道进口位置及流速云图 (三台机组满发  $Q=110.07 \text{ m}^3/\text{s}$ ，河道尾水位 116.36m)

## 肆、仿生态鱼道

### 一、新型仿生态鱼道结构形式

莒口拦河闸仿生态鱼道底坡  $i=1:136$ ，每个池室池长 4.5m，最大宽度为 3.85m。池室断面采用下部矩形，上部梯形的复式断面型式，断面底宽 2m，底部矩形高度 0.5m，一侧边壁竖直，一侧衔接 1: 0.5 的斜坡，池室标准结构采用长隔板和短隔板交错布置和带孔过鱼挡墙形式，长隔板长度 1m，短隔板长度 0.4m，过鱼竖缝宽度 0.4m，过鱼挡墙厚 0.8m，墙中开孔并设置 S 型通道，过鱼挡墙空洞率 38~40%，S 型通道由 2 个半径为 0.402m 的圆弧组成，过鱼孔直径 12cm，见图 10。该新型仿生态鱼道的显著特点是：能够创造多种适合目标鱼类行为特点的流速区，其独特的结构形式特别适合鳗鲡目鱼类的上溯要求。

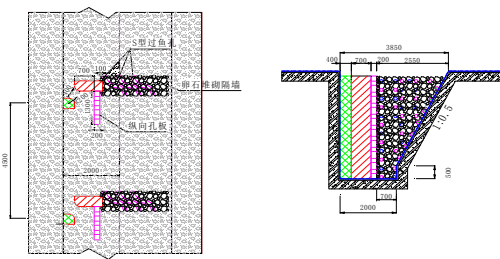


图 10 新型仿生态鱼道体型

### 二、仿生态鱼道正态物理模型

莒口拦河闸仿生态鱼道正态整体物理模型主要包括上游鱼道出口段及出口附近衔接区域，鱼道槽身部分、过坝段、汇合池、下游鱼道进口段及进口附近衔接区域等，模型比尺

1: 12，模型总长度 108.5m，见图 11。共研究上游为正常高水位 9.0m 和 7.8m，下游低进口水位为 1.8m 和 -0.11m，下游高进口水位为 3.53m 和 1.8m，共八组不同水位组合。主要研究成果包括两个方面，一是给出鱼道进口、汇合闸、过坝段、观察室、鱼道出口的最优体型，二是鱼道的整体水力特性、确定补水流量和补水型式，见表 1、表 2。成果表明，鱼道内水流条件较好，能满足鱼类上溯需求。

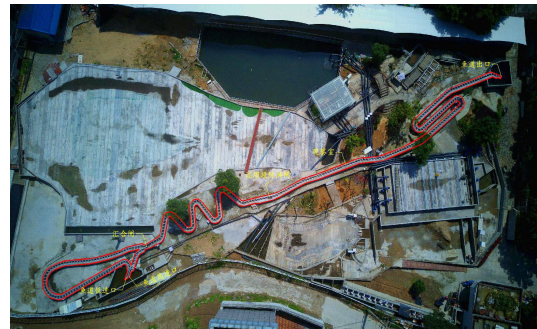


图 11 无人机拍摄的莒口工程鱼道物理模型

表 1 莒口鱼道各工况补水流量

工况	补水流量 (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	进口主流流速 (m·s <sup>-1</sup> )	汇合口主流流速 (m·s <sup>-1</sup> )
1	进口 0.50	0.36~0.47	
2	进口 0.83	0.32~0.46	
3	进口 0.83	0.27~0.50	
4	槽身 0.50 进口 0.83	0.23~0.37	0.18~0.26
5	进口 0.50	0.40~0.50	
6	槽身 0.50 进口 0.83	0.40~0.50	0.18~0.29
7	槽身 0.50 进口 0.50	0.28~0.44	0.26~0.30
8	槽身 0.83 进口 0.83	0.22~0.38	0.21~0.26

表 2 莒口鱼道各运行工况水流特性

(水位单位: m, 流速单位: m/s, 流量单位: m<sup>3</sup>/s)

工况	流量	出口水位	进口水位	出口流速	观察室流速	过坝段流速	汇合闸流速	进口流速 (无补水)	
低进口	1	0.61	9.0	-0.11	0.23~0.34	0.40~0.50	0.24~0.29	0.18~0.33	0.26~0.29
	2	0.58	9.0	1.80	0.22~0.31	0.40~0.43	0.22~0.28	0.18~0.28	0.10~0.14
	3	0.12	7.8	-0.11	0.22~0.29	0.45~0.48	0.19~0.38	0.19~0.29	0.05~0.09
	4	0.11	7.8	1.80	0.19~0.28	0.43~0.45	0.18~0.23	0.08~0.12	0.03~0.07
高进口	5	0.56	9.0	1.80	0.26~0.34	0.42~0.45	0.23~0.27	0.20~0.37	0.22~0.34
	6	0.43	9.0	3.53	0.29~0.33	0.42~0.45	0.20~0.22	0.05~0.20	0.13~0.16
	7	0.14	7.8	1.80	0.19~0.29	0.40~0.43	0.19~0.25	0.03~0.12	0.09~0.10
	8	0.12	7.8	3.53	0.18~0.28	0.42~0.45	0.18~0.22	0.03~0.08	0.05~0.07

### 三、活鱼试验

莒口拦河闸仿生态鱼道主要过鱼对象规格体长大多在5~59cm之间,整体模型中测试鱼采用锦鲤100条,体长3cm左右的50条,体长5cm左右的30条、体长8cm左右的20条。研究表明:鱼类克服流速不完全遵循与体长成比例的关系,所以这里称其为概化测试鱼,用来观察鱼在鱼道中的适应性及其上溯习性。试验前先将100条试验鱼置于进口水池暂养24h,让试验鱼适应水流条件,24h后开展试验。试验过程中每隔30min统计区间的数量。试验水流条件为上下游水头差最大的工况,即库水位9.0m,鱼道进口水位-0.11m。观察鱼的游泳情况,不同体长的小鱼均能从隔板竖缝中顺利地上溯,如图12所示。根据试验观察,鱼类的通过率受到水流条件、天气、气温影响,且随着对水流的熟悉程度的增加,通过率迅速增大。第一天,试验鱼处于适应期,早上9点到下午5点,才上了1条鱼,大约花费时间8个小时。第二天,鱼类有点适应,早上9点到下午5点,上了12条鱼。第三天,鱼类通过率迅速提升,到试验结束时,只剩余34条未通过。3天时间,过鱼对象的通过率达到66%,表明不同体长的概化测试鱼均能顺利上溯,说明莒口鱼道池室结构能够较好地满足设计要求,过鱼效果良好。



图12 鱼类通过性试验

### 伍、集鱼平台

福建霍口水库工程是教江干流6级开发中的第二级,拦河坝最大坝高91.0m,工程上下游最大水位差77.42m,库水位变幅18.4m,下游水位变幅1.18m,霍口水库过鱼设施采用仿生态鱼道+工程鱼道的方式,鱼道全长4.15km。并应用两个出口+一个小型升鱼机的组合形式

以适应库水位的变幅,鉴于升鱼机的集鱼平台的水流条件对整个升鱼机系统高效运行至关重要,南科院做了比尺1:12.5升鱼机的集鱼平台局部物理模型试验,见图13,以研究集鱼平台、升鱼斗池水力特性、消力池布置形式、鱼道与集鱼平台交接处水流条件。提出了升鱼斗池与消力池之间设置拦鱼栅,在集鱼平台设置移动赶鱼栅,升鱼机引水道管径0.6~0.8m,消力池长5~6m,宽2.5m、深2m;斗池长2.5m、宽2.5m;集鱼平台长12m等工程措施。



图13 霍口升鱼机集鱼平台局部物理模型试验

福建泉州白濑水利枢纽工程坝址位于安溪白濑乡,最大坝高107.70m,枢纽布置见图14。白濑升鱼机集鱼平台运行是通过引水管将水流射入消力池中,经消能后形成适宜水流进入集鱼斗池、集鱼槽以及诱鱼口,如图15、16所示。集鱼平台的作用是暂存、归集过鱼对象,是过鱼流程中连接诱鱼口和转运平台的重要组成部分。集鱼槽中水流速度要大于鱼类的感应流速,避免鱼类迷失方向;同时要小于鱼类的持续游泳速度,避免鱼类产生疲劳。根据白濑工程过鱼对象的特点,控制集鱼平台的流速范围为0.2m/s~0.35m/s,控制诱鱼口的流速 $\leq 0.5$ m/s。福建省水利水电勘测设计研究院采用FLOW-3D软件进行三维数值模拟,模型计算范围为200m<sup>2</sup>,集鱼平台网格尺寸为0.1m,消力池、诱鱼口段采用嵌套网格技术进行局部加密,加密尺寸为0.05m,共设置三个BLOCK,网格数量约为70.84万个。

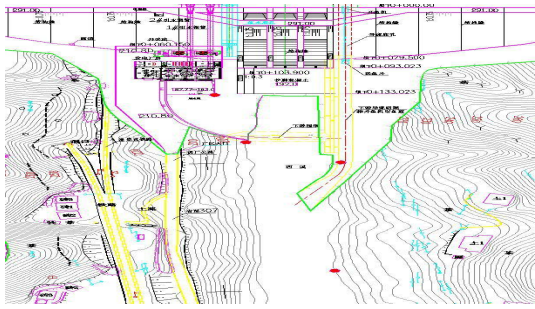


图 14 白瀨水利樞紐布置圖

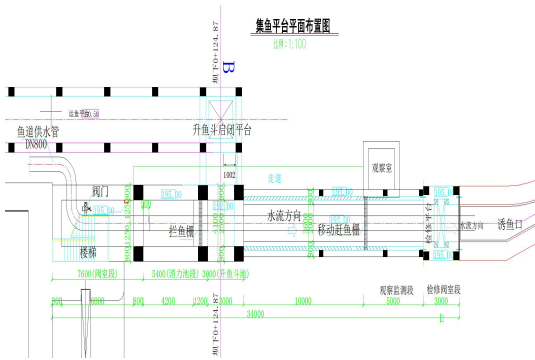


图 15 白瀨集魚平台平面圖

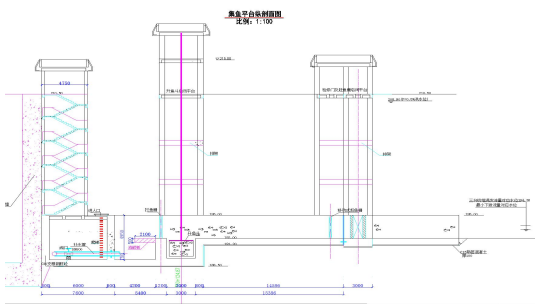


图 16 白瀨集魚平台縱剖面

数学模型研究了引水流量为 0.7、1.0 和 1.4  $m^3/s$ ，诱鱼口高水位 194.5m 和低水位 193.27m 条件下，消力池上方加设消能板、消能孔板、消能缝等工程措施后，集鱼平台至诱鱼口的水流特性。为降低施工和后期的运行维护难度，最终推荐设消能板的集鱼平台方案，收到较好效果，图 17、18 给出引水流量 0.7 $m^3/s$ ，诱鱼口水位 193.27m 时，集鱼平台引水管剖面及平面（中部）流场云图。当诱鱼口低水位 193.27m(最小生态流量)，引水流量为 0.70 $m^3/s$  时，集鱼槽中流速为 0.27 m/s ~0.29m/s，诱鱼口流速为 0.40 m/s ~0.48m/s；当引水流量增大至 1.00 $m^3/s$  时，集鱼槽流速为 0.39 m/s

~0.41m/s，诱鱼口流速达到 0.60 m/s ~0.68m/s。研究表明：随着下游水位的变化，集鱼平台引水流量变化范围为 0.70~1.40 $m^3/s$  为宜，这样，诱鱼口可不再单独设置补水措施。

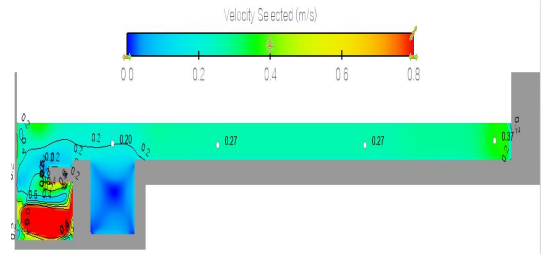


图 17 白瀨集魚平台引水管剖面流速云圖

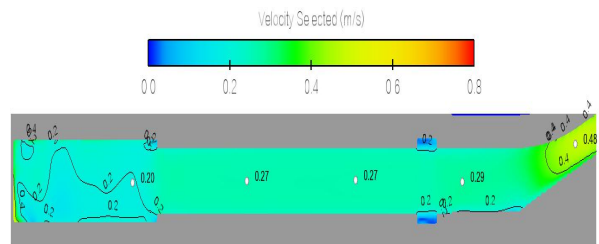


图 18 白瀨集魚平台中部平面流速云圖  
(高程 192.6m)

## 陆、结语

1、根据新近的福建省主要江河及河口鱼类调查初步结果，鲤形目和鲈形目占比较大，前者占 33.9~58.9%，后者占 20.7~32.2%，鱼类感应流速 0.08~0.25m/s，突进泳速 0.45~1.92m/s，鱼类体长与体重相关性良好，但体长与鱼类的特征泳速相关性差。调查中发现敖江存在珍稀鱼类国家二级保护野生动物花鳗鲡，九龙江河口北溪水闸下游新石洲断面和敖江的塘坂、观音阁、浦口发现少量日本鳗鲡，福建主要河流河口发现有鲟鱼、温州光唇鱼等濒危物种存在。

2、在进鱼口设计中应十分重视工程前工程区域的水流特性，充分利用工程自身功能创造目标鱼类熟悉的水流环境，并在进鱼口与天然河流之间形成流速梯度是目标鱼类是否能够顺利发现进鱼口的关键。

3、下部为矩形、上部为倒直角梯形的复合鱼道断面，长、短隔板相间，带 S 型通道孔洞的过鱼挡墙新型仿自然鱼道结构形式，能够创造出适合不同鱼类特别是鳗鲡目需求的流速区域，概化鱼实验表明，过鱼效果良好。

4、对于上下游水头差或库水位变化较大的过鱼设施，应采用集鱼平台转运鱼类效果较好。消能工设计是确保集鱼平台、升鱼斗池、鱼槽、诱鱼口适宜水流条件的关键。

5、河口第一道拦河闸是阻断江海连通的最重要屏障，如闽江河口的莒口水闸、九龙江河口的新西溪水闸、晋江河口的金鸡拦河闸等，其鱼道布设对于江海不同区域鱼类遗传交流、洄游性和半洄游性鱼类质量提升以及鱼类种群多样性具有特别重要的意义。

### 参考文献

- 1.福建省水利水电勘测设计研究院（2017），「福建省霍口水利枢纽过鱼设施水力学模型试验研究」。
- 2.福建省水利水电勘测设计研究院（2019），「福建省白濑水利枢纽升鱼机集鱼平台数值模拟试验研究」。
- 3.福建省水利水电勘测设计研究院（2019），「福建省莒口拦河闸枢纽工程过鱼设施水力学模型试验研究」。
- 4.南京水利科学研究院（2017），「福建省霍口水利枢纽工程过鱼设施水力学模型试验研究」。

# 人為干預強烈河段穿江地鐵極限沖刷深度研究

黃梅瓊<sup>1</sup>

## 摘要

河道的極限沖刷深度是穿江地鐵設計的關鍵參數之一，地鐵過江隧道埋設過淺，容易上浮，造成巨大安全隱患；過深，則造成投資大量浪費。尤其在人為干預強烈的河段，河床演變受上游築壩和無序人類采砂的影響，極限沖刷深度更是難以確定。以閩江穿江地鐵 2 號線為例，創造性地提出基於已探明的河沙蘊藏量，以當量埋深為基礎，模擬人類采砂，定量研究人為干預作用對極限沖刷深度的影響。研究表明，人為干預對河床演變的影響遠大于天然水動力的作用，人為干預作用下地鐵 2 號線過江河段最低河底高程為南港-12.81m，北港-10.08m。研究成果提高了人類活動干擾劇烈河段確定河床極限沖刷深度的準確性和可靠性，為地鐵設計提供科學依據，保障地鐵過江運行安全。

**關鍵字：**人為干預、穿江地鐵、極限沖刷深度

<sup>1</sup> 福建省水利水電勘測設計研究院，工程師



## 壹、前言

一方面，上游電站的建成，使電站大壩以下河道的來水來沙條件發生顯著變化，另一方面，隨著經濟社會的快速發展，沿江開發建設力度加大，砂石建築用料需求量大增，河流遭受大規模采砂，致使河道水動力及邊界條件發生深刻變化，河床不斷下切。在這種人為干預強烈河段規劃建設穿江地鐵，如何合理確定地鐵極限埋深，既能保證地鐵運營安全又能控制投資是必須解決的關鍵問題之一。穿江地鐵極限埋深是基於工程所在區域河段的河床極限沖刷深度確定的，近年來國內外已有一些研究。史英標等人對錢塘江河口過江隧道河段河床最大沖刷深度進行了研究，張為等人對長江下游過江隧道河段最大沖刷深度進行可預測研究，均取得較好的研究成果，但他們對河床最大沖刷深度的確定都是基於現狀河床地形，而忽視了實際河道目前及未來采砂的主要因素。吳門伍等人考慮了人工采砂對南寧過江隧道河段極限沖刷深度的影響，但其只是在現狀河床地形基礎上通過降低尾門控制水位來模擬下游河床高程降低的情形，模擬不夠貼合實際，效果不夠理想。本文以閩江穿江地鐵2#線為例，開展人為干預強烈河段穿江地鐵極限沖刷深度的研究，為此類問題的研究提供科學依據。

## 貳、概況

福州市軌道交通2號線位於東西向城市發展副軸，起于閩侯上街沙堤站，至鼓山下院站，穿越烏龍江後，經金山金祥路，後再穿越閩江北港，終點站鼓山下院，全長26.2公里，與城市“東擴南進、沿江向海”的發展方向相吻合，見圖1。閩江下游河道具有豐富砂卵石資源，河床上部地層中，中砂、細砂、砂夾圓礫和卵石層的埋深較大。上世紀60~80年代閩江下游河道處於淤積狀態，90年代以來閩江下游河道進入劇烈沖刷時期，除南港局部略有淤積外，沖刷在河床演變過程中起主導作用，特別是自2003年以來，河床沖刷尤為劇烈，其原因與人類干預使河道形態異常變化導致水流條件惡化有關。



圖1 福州市地鐵2號線佈置圖

## 參、模型設計

二維水動力及泥沙數學模型工作範圍從水口電站壩下至出海口全河段，模型單元數68583個，節點數36327個，模型糙率0.02~0.04，泥沙中值粒徑取0.23~0.65mm。模型見圖2；地鐵2號線過江段局部網格劃分見圖3。



圖2 閩江下游數學模型範圍

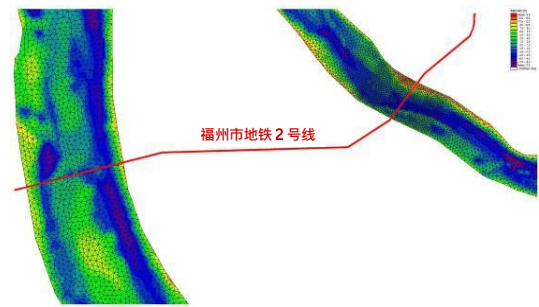


圖3 地鐵2號線過江段網格劃分

洪水標準採用300年一遇，相應水口大壩下泄流量39900m<sup>3</sup>/s，考慮閩江下游兩岸堤防不溢洪，東海邊界採用水口大壩下泄308 m<sup>3</sup>/s流量的實測大潮潮位過程。

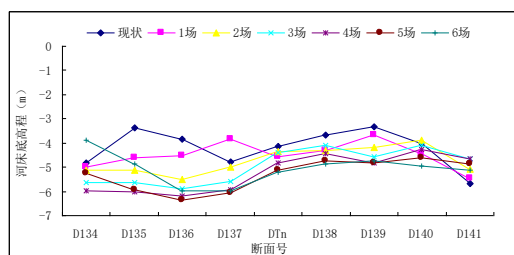
## 肆、水動力作用下極限沖刷深度

### 一、洪水持續作用

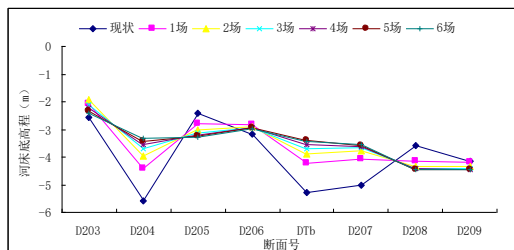
福州歷史上大洪災有1609年5月洪水歷

時 5 天，1948 年 6 月洪水歷時 6 天，1968 年 6 月洪水歷時 6 天，1992 年 7 月洪水歷時 3 天，1998 年 6 月洪水歷時 15 天，2006 年 6 月洪水歷時 7 天；據閩江歷史勘测資料：1952~1989 年間閩江下游河道河床演變由自然冲刷引起，1952 年與 1989 年河道深泓線、洲灘以及斷面形態發生了深刻變化，這並非一場洪水所能決定的，期間閩江經歷了六場大洪水作用（1952 年、1961 年、1962 年、1968 年、1982 年、1984 年）。綜合閩江歷史災難性洪水場數、洪水歷時以及河床演變，針對閩江下游河道因人為干預使河道凹凸不平，坡度不定的特殊性，確定設計洪水連續作用六場，每場洪水歷時 7 天，將閩江歷史災難性洪水重演。

採用 300 年一遇洪水標準，相應水口大壩下泄流量 39900m<sup>3</sup>/s，考慮閩江下游兩岸堤防不溢洪，東海邊界採用梅花站日實測平均潮位過程。通過研究發現：在經歷 6 場洪水過程中，河床的沖淤變化處於持續動態過程中，河床並非一直下切的，南港河床基本在前四、五場洪水作用下逐步刷深，之後開始淤積或基本穩定，北港河床較為穩定。稀遇洪水水位高、流量大，造床作用強，在其連續作用下，河道整體變得光滑，地鐵 2 號線過江段南港最深點發生在橋園洲大橋附近左側主河槽，高程為 -6.51m；北港最深點發生在尤溪洲大橋附近主河槽，高程為 -5.45m。成果如圖 4 所示。



(a) 南港



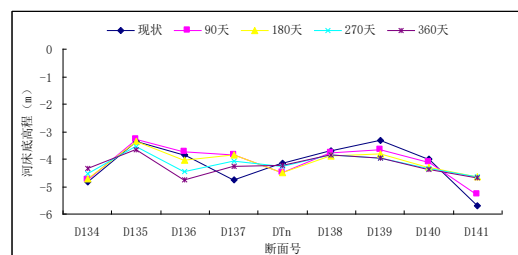
(b) 北港

圖 4 南北港典型斷面在 6 場洪水作用連續過程中最低河底高程演變趨勢

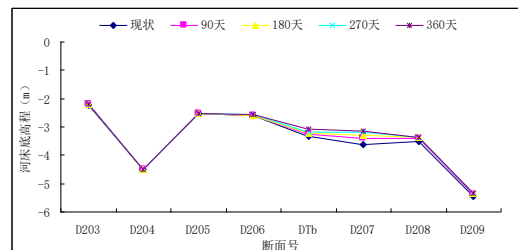
## 二、大潮連續多次作用

90 年代水口大壩建成後，上游來沙量明顯減小，伴隨著經濟建設的快速發展，閩江下游出現大規模無序采砂，築壩與采砂造成河床下切，水動力條件發生劇烈變化，下游水位下降明顯，使得閩江下游河道納潮量容積大幅擴大，給潮水侵入創造條件。福州穿江地鐵 2 號線南北港過江河道均處於感潮區，潮汐每天兩次往返淘刷作用突顯，因此進行潮汐作用對河床演變的影響分析十分必要，但現有地鐵過江行業僅對洪水作用進行闡述，忽略了經常性潮汐的長期影響，本文對經常性不利的潮汐作用進行科學概化：水口大壩下泄 308 m<sup>3</sup>/s 流量，東海邊界採用梅花站實測大潮潮位過程，最大潮流量可達 16000m<sup>3</sup>/s，作用 3 個月、6 個月、9 個月和 12 個月等不同工況。

通過研究發現：在大潮連續作用一年過程中，由於潮位比較低，一些沙洲無法淹沒，潮汐造床作用不如洪水，對地鐵 2 號線南北港研究區域整體河床演變影響較小，但對於深槽的淘刷作用較明顯。地鐵 2 號線過江段南港最深點高程為 -6.78m，位於橋園洲大橋下游約 700 處的右岔河槽；北港最深點高程為 -6.77m，位於金山大橋上游順壩尾部附近。可見，經常性不利潮汐對河道最不利冲刷深度的影響與稀遇洪水連續作用相當。成果如圖 5 所示。



(a) 南港



(b) 北港

圖 5 南北港典型斷面在大潮連續一年作用過程中最低河底高程演變趨勢

### 三、洪潮交替作用

人類干預條件下的閩江下游河道，福州穿江地鐵2號線過江段在洪水與潮汐作用下河床演變效果差異較大，因此首次採用洪潮交替作用進行河床演變預測的方法，即先徑流後潮汐、先潮汐後徑流作用的研究，探索洪季以洪水為主、枯季以大潮為主的河床演變規律，由此確定的最不利沖刷深度較前人更全面，更接近實際情況。

先徑流後潮汐：閩江下游河道在經過稀遇洪水連續6場作用後，河床已經比較穩定，之後再經歷大潮連續作用半年，整體河床變化不大，僅在南北港主河槽區域泥沙有所淘刷。地鐵2號線過江段南港最深點高程為-5.07m，位於橘園洲大橋上游約400m的主河槽；北港最深點發生在尤溪洲大橋附近左側主河槽，高程為-5.00m。成果如圖6所示。

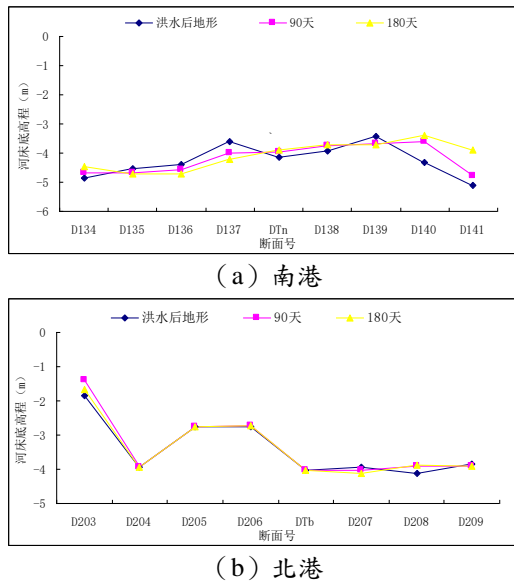


圖6 南北港典型斷面在先徑流後潮汐作用過程中最低河底高程演變趨勢

先潮汐後徑流：閩江下游河道在大潮連續作用半年後，河道深槽發生淘刷，之後再經歷6場洪水連續作用，洪水造床作用強，河床整體下切形態與單一洪水連續作用相似，泥沙運動填補了一些深坑。地鐵2號線過江段南港最深點發生在橘園洲大橋附近左側主河槽，高程為-6.86m；北港最深點發生在尤溪洲大橋附近左側主河槽，高程為-4.38m。成果如圖7所示。

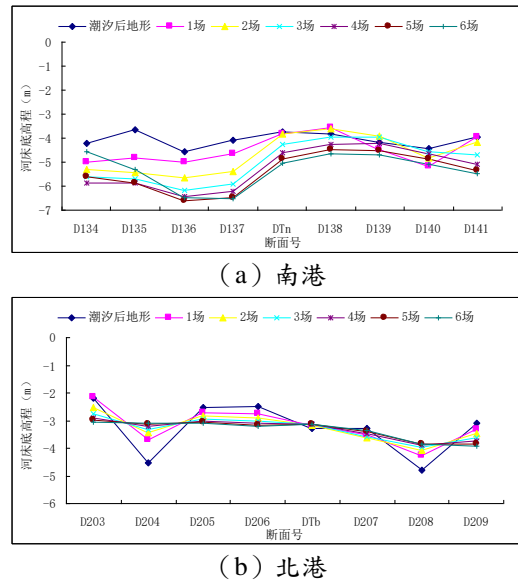


圖7 南北港典型斷面在先潮汐後徑流作用過程中最低河底高程演變趨勢

統計天然水動力作用下福州地鐵2號線過江區域河床極限沖刷深度見表1，可見天然洪潮水動力作用下，各工況河床沖刷極限差異不大，福州地鐵2號線過江段南港極限沖刷深度高程為6.78m，北港極限沖刷深度高程為6.77m。

表1 天然水動力作用下過江段河床沖刷深度  
單位：m

工況	河床沖刷深度高程	
	南港	北港
300年一遇洪水作用6場	-6.51	-5.45
典型大潮作用1年	-6.78	-6.77
典型大潮作用1年後洪水作用6場	-6.86	-4.38
6場洪水後典型大潮作用半年	-5.07	-5.00

### 伍、人為干預作用下極限沖刷深度

由閩江下游河道演變歷程可知，上世紀60~80年代閩江下游河道處於淤積狀態，90年代以後由於築壩和采砂使閩江下游河道水砂條件發生深刻變化，河道劇烈下切，人為干預對河道演變起了至關重要的作用。根據水口壩下至馬尾佈置的93個斷面，300個鑽孔的勘測結果在摸清閩江下游“閩江砂”的儲量和分佈基礎上，計算出河沙當量埋深，即該河段沙層總面積與該河段河沙總寬度的比值，創造性地提

出了以當量埋深為基礎的河床演變定量分析方法，然後進行不同分區、不同深度的方案組合，類比人類干預的各種可能性，共 13 種工況，考慮篇幅，選出人類干預條件的 4 種可能較不利工況進行敘述。

工況 2：考慮閩江下游幹流、南港按砂平均當量埋深采砂下切，北港保持現狀。

當南港按砂平均當量埋深采砂下切後，河床已經基本處於比較穩定的狀態，再經歷 300 年一遇洪水連續六場作用過程中，沙洲邊緣泥沙沖刷，河床整體變得光滑但垂直深度並沒有大的變化，地鐵 2 號線過江段南港河底高程為 -12.53m；北港河床比較穩定，主河槽泥沙淤積，沙洲邊緣沖刷，地鐵 2 號線過江段北港河底高程為 -8.17m。成果如圖 8 所示。

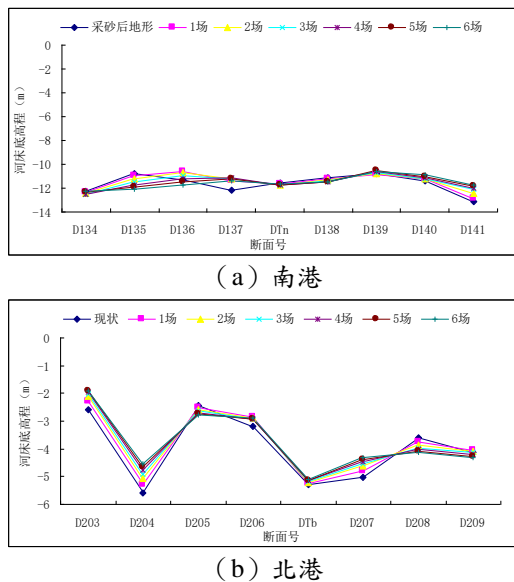
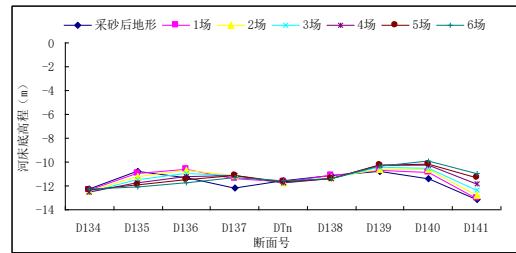


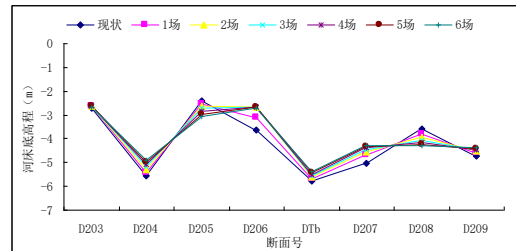
圖 8 工況 2 南北港典型斷面在 6 場洪水連續作用過程中最低河底高程演變趨勢

工況 11：考慮閩江下游幹流、南港按砂平均當量埋深采砂下切，北港拆除涉水建築物包括洪山橋舊橋墩、解放大橋橋基潛壩、丁壩。

該工況在 300 年一遇洪水連續六場作用過程中，南港河床演變趨勢與工況 2 相似，沙洲邊緣泥沙沖刷，河床整體變得光滑但垂直深度並沒有大的變化，地鐵 2 號線過江段南港河底高程為 -12.53m；北港拆除涉水建築物後分流比僅增加 0.32%，泥沙沖淤與現狀變化不大，河床比較穩定，地鐵 2 號線過江段北港河底高程為 -6.53m。成果如圖 9 所示。



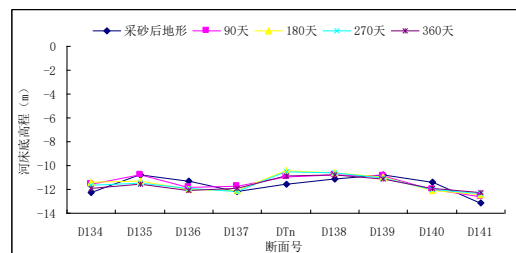
(a) 南港



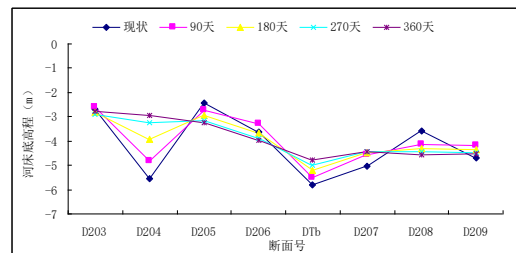
(b) 北港

圖 9 工況 11 南北港典型斷面在 6 場洪水連續作用過程中最低河底高程演變趨勢

該工況在大潮連續一年作用過程中，由於閩江幹流、南港采砂以及北港拆除涉水建築物，潮動力增強，潮位比較低，僅在河槽較低處發生淘刷，潮汐造床作用不及洪水，但是潮汐長期作用對於深坑的淘刷作用較明顯，如南港橋園洲大橋右側上游丁壩區域最大淘刷量達 4.13m，北港金山大橋下游約 580m 的丁壩區域最大淘刷量為 2.57m，地鐵 2 號線過江段南港河底高程為 -12.81m，地鐵 2 號線過江段北港河底高程為 -7.68m。成果如圖 10 所示。



(a) 南港

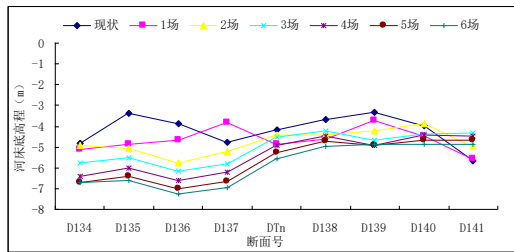


(b) 北港

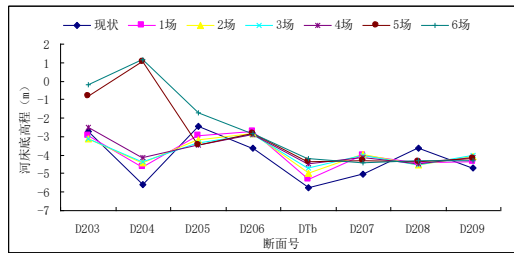
圖 10 工況 11 南北港典型斷面在大潮連續一年作用過程中最低河底高程演變趨勢

工況 12：考慮閩江下游幹流按砂平均當量埋深采砂下切，南港保持現狀，北港拆除涉水建築物包括洪山橋舊橋墩、解放大橋橋基潛壩、丁壩。

該工況在 300 年一遇洪水連續六場作用過程中，南港整體河床基本在前四、五場洪水作用下逐步刷深，之後開始淤積或基本穩定，地鐵 2 號線過江段南港河底高程為-7.53m；由於此工況南港不采砂，北港拆除涉水建築物，因此北港上游來沙量增大，北港局部主河槽出現了大幅度淤積，北港河底高程為-5.48m。成果如圖 11 所示。



(a) 南港

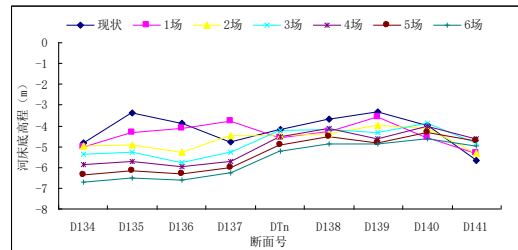


(b) 北港

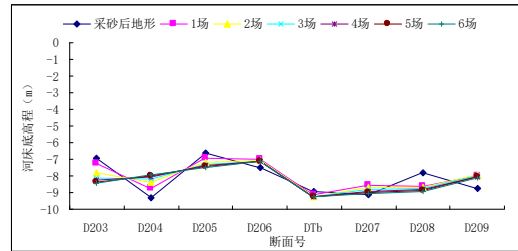
圖 11 工況 12 南北港典型斷面在 6 場洪水連續作用過程中最低河底高程演變趨勢

工況 13：考慮閩江下游幹流按砂平均當量埋深采砂下切，南港保持現狀，北港拆除涉水建築物包括洪山橋舊橋墩、解放大橋橋基潛壩、丁壩，北港河道采砂挖深 4m 且地鐵 2 號線過江段河底高程下切至-10.0m。

該工況在 300 年一遇洪水連續六場作用過程中，南港河床演變趨勢與工況 12 相似，基本在前四、五場洪水作用下逐步刷深，之後開始淤積或基本穩定，地鐵 2 號線過江段南港 3.6km 範圍內河底高程為-6.97m；北港河道采砂挖深 4m 且地鐵 2 號線過江段河底高程下切至-10.0m 後，河床很穩定，地鐵 2 號線過江段北港河底高程為-10.08m。成果如圖 12 所示。



(a) 南港



(b) 北港

圖 12 工況 13 南北港典型斷面在 6 場洪水連續作用過程中最低河底高程演變趨勢

統計人為干預作用下地鐵 2 號線過江段河床極限冲刷深度見表 2，分別考慮南港、北港最不利演變運行工況，地鐵 2 號線過江段南港極限冲刷深度高程為-12.81m，北港極限冲刷深度高程為-10.08m。可見人為干預對河床演變的影響遠大於天然水動力的作用。

表 2 人為干預作用下過江段河床冲刷深度

單位：m

工況	南港	北港	備注
工況 2 洪水作用	-12.53	-8.17	閩江下游幹流、南港按砂平均當量埋深采砂下切，北港保持現狀。
工況 11 洪水作用	-12.53	-6.53	閩江下游幹流、南港按砂平均當量埋深采砂下切，北港拆除涉水建築物
工況 11 潮汐作用	-12.81	-7.68	包括洪山橋舊橋墩、解放大橋橋基潛壩、丁壩。
工況 12 洪水作用	-7.53	-5.48	考慮閩江下游幹流按砂平均當量埋深采砂下切，南港保持現狀，北港拆除涉水建築物包括洪山橋舊橋墩、解放大橋橋基潛壩、丁壩。
工況 13 洪水作用	-6.97	-10.08	考慮閩江下游幹流按砂平均當量埋深采砂下切，南港保持現狀，北港河道采砂挖深 4m 且地鐵 2 號線過江段河底高程下切至-10.0m，北港拆除涉水建築物。

## 陸、結語

本文通過以福州地鐵2號線為例，對人類干預強烈河段，分別研究地鐵穿江區域在天然水動力和人為干預作用下的河床極限沖刷深度，創造性地提出了以當量埋深為基礎的河床演變定量分析方法，研究表明人為干預對河床演變的影響遠大于天然水動力的作用，如果墨守陳規，一味拘泥于“純天然”河流水動力對河床演變影響的研究，將會嚴重脫離客觀現實。成果提高了人為干預強烈河段河床最不利沖刷深度確定的準確性和可靠性，避免了人為干預給穿江地鐵帶來的水動力風險，有效控制了專案投資，經濟效益顯著。

## 參考文獻

- 1.南京水利科學研究院（2017），「錢塘江河口過江隧道河段極端洪水沖刷深度的預測」。
- 2.中國長江三峽開發總公司（2011），「長江下游過江隧道河段最大沖刷深度預測研究」。
- 3.珠江水利科學研究院（2012），「南寧過江隧道河段極限沖刷深度預測」。
- 4.長江岩土工程總公司（2013），「某穿越長江輸油管道工程中河床沖刷深度計算」。
- 5.浙江省水利河口研究院（2011），「錢江通道段河床最大沖刷深度的綜合分析」。
- 6.長江科學院（2010），「武漢漢江過江隧道河床演變及最大沖深預測」。

## 基於人工神經網路的丹江口水庫氨氮遙感反演方法研究

王鑫<sup>1</sup>，肖彩<sup>2</sup>，薛澤宇<sup>3</sup>，蒲前超<sup>4</sup>，蔣婷<sup>5</sup>，趙建華<sup>6</sup>，王素描<sup>7</sup>

### 摘要

丹江口水庫作為南水北調中線工程的水源地，其水質狀況直接影響到受水區經濟發展和居民用水安全。本研究針對丹江口水庫現狀水質監測存在的耗時耗力、成本高、監測點有限等現象，基於遙感技術和智慧演算法的基本理論，利用高解析度遙感資料和實測水質資料研究典型水質參數氨氮的遙感反演技術。將遙感反演模型應用於丹江口水庫，獲得 2007-2009 年丹江口水庫氨氮水質時空分佈圖。結果表明，人工神經網路模型能有效地反演丹江口水庫氨氮的時空分佈情況，率定期和驗證期的平均相對誤差分別為 3.56%和 19.20%；研究時段內，丹江口水庫水質總體上趨好，氨氮濃度均低於地表水環境品質 II 類標準限值，且豐水期明顯高於枯水期。水質遙感反演作為一種非傳統性的監測手段，具有空間全覆蓋、快速和成本低等傳統水質監測難以比擬的優點，能夠作為實測資料的有益補充，極具有深入研究和推廣的價值和必要。

**關鍵字：**丹江口水庫，水質遙感反演，氨氮

<sup>1</sup> 武汉大学，研究生

<sup>2</sup> 长江水资源保护科学研究所，高级工程师

<sup>3</sup> 武汉大学，研究生

<sup>4</sup> 长江流域水资源保护局丹江口局，高级工程师

<sup>5</sup> 长江流域水资源保护局丹江口局，高级工程师

<sup>6</sup> 武汉大学，研究生

<sup>7</sup> 武汉大学，研究生

## 壹、引言

丹江口水庫是漢江中上游的特大型水利工程，水量十分豐富且水質優良，具有防洪、供水、發電以及航運等多種綜合效益<sup>[1]</sup>。該水庫作為南水北調中線工程的水源地，2014年底正式向北京、天津、河北和河南等受水區提供生產生活用水，庫區水質的好壞直接影響到南水北調中線工程沿線二十多個大中型城市及庫區周邊的經濟發展和居民用水安全<sup>[2]</sup>。因此對丹江口水庫的水質狀況開展監測研究具有十分重要的現實意義。

目前，丹江口水庫的水質監測手段主要是在特定斷面或點上實行人工採樣監測或自動監測站監測<sup>[3,4]</sup>。這兩種監測方法在精度上有一定準確性，但耗時耗力、成本較高，且有限的監測斷面不足以完全反映丹江口庫區的水質時空分佈情況，導致難以全面快速準確地定位污染源和敏感區，一定程度上影響了水資源保護管理工作的有效開展。遙感監測技術作為一種非傳統性質的監測技術<sup>[5]</sup>，具有空間全覆蓋、快速和成本低等突出優勢<sup>[6]</sup>，十分適合丹江口水庫這種大範圍水域的水質快速監測需求<sup>[7]</sup>。

遙感監測技術是指利用遙感波段資訊與水質指標的光譜特性，建立反演模型預測水質指標濃度<sup>[6]</sup>。自上世紀70年代初期開始，遙感技術逐漸應用到陸地水體的研究中，國內外諸多學者開展了大量水質遙感反演研究，均取得了不錯的效果<sup>[8]</sup>。如聞建光等<sup>[9]</sup>基於Hyperion星載高光譜遙感影像，運用波段比值法、一階微分處理技術構建了太湖葉綠素a濃度的反演模型；呂恒等<sup>[10]</sup>提出利用TM影像反演太湖葉綠素a濃度的最佳波段組合是TM3/(TM1+TM4)；Shi等<sup>[11]</sup>從實測資料中發現MODIS-Aqua影像與總懸浮物在645nm的波長處具有極強的相關性，據此發展了適應性極強的總懸浮物經驗反演模型，並在太湖取得了良好的效果；吳川等<sup>[3]</sup>採用統計回歸方法建立遙感反演模型，反演丹江口水庫葉綠素a、TP和水體透明度，證明水質遙感反演具有實際應用價值。本文以丹江口水庫為研究物件，基於遙感技術和智慧演算法的基本理論，利用高解析度遙感資料和實測水質資料研究典型水質參數氮氣的遙感反演技術。將遙感反演模型應用於丹江口水庫，獲得2007-2009年丹江口水庫氮氣水質時空分佈圖。分析和評價遙感反演模型的準確性和可靠性，並將最終結果作為實測資料的有益補充。

## 貳、資料獲取與處理

### 一、水質監測斷面及監測資料獲取

以典型水質參數氮氣為研究物件，選取的實測水質資料為2007年9月15日、2008年9月1日，2009年7月18日，2009年10月22日，2009年11月23日五日丹江口水庫三個監測斷面（浪河口斷面、丹江口壩上斷面、陶岔斷面）的水質監測資料，斷面位置示意圖見下圖1，水質資料來源於長江水資源保護局丹江分局。

### 二、遙感影像資料獲取與預處理

研究選用Landsat5 TM衛星影像資料作為丹江口水質遙感資料資訊源。Landsat5重訪週期為16天，即同一地點的遙感影像更新頻率為16天。Landsat5 TM影像包含7個波段，分別為Blue、Green、Red、NIR、SWIR1、LWIR、SWIR2，各個波段具體參數見表1。本研究從USGS等網站，獲取了與實測資料時間同步的Landsat衛星影像資料。

遙感成像時，由於各方面因素的影響，使得遙感影像存在一定的幾何畸變、大氣消光、輻射量失真等現象，這些畸變和失真現象影響了影像的品質和應用，需對其進行遙感影像預處理，主要包括輻射定標和大氣校正<sup>[12]</sup>。本研究採用ENVI5.1專業軟體進行遙感影像預處理。首先，用ENVI裡的Radiometric Calibration工具進行輻射定標，將原始影像無量綱DN（Digital Number）值轉換為輻射亮度值；然後，用ENVI裡的FLAASH Atmospheric Correction Model工具進行FLAASH大氣校正，消除大氣中水蒸氣、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>等對原始影像產生的影響。完成預處理後，影像的反射率發生了明顯的變化（圖2），預處理後，反射率更接近真實情況。

## 參、反演模型構建

### 一、多元回歸模型

根據前述基礎資料，採用水質遙感反演常用的多元線性回歸模型構建水質遙感反演模型，得到反演公式（1）。

$$C = 0.065 \times e^{0.587(B1/B3)} \quad (1)$$

由多元回歸模型誤差表2中可知，回歸模型的率



定期和驗證期的平均相對誤差分別為 8.5%和 23.6%。效果較佳，能夠用於水質遙感反演。

## 二、人工神經網路模型

神經網路的全稱是人工神經網路 (Artificial Neural Network, ANN)，它採用物理上可實現的器件或電腦來類比生物體中神經網路的某些結構和功能，並應用於工程領域<sup>[13]</sup>。人工神經網路可看成是簡化了的人腦的數學模型，由大量處理單元 (神經元) 廣泛連接而成<sup>[14]</sup>。神經網路的著眼點不在於利用物理器件完整的複製生物體中的神經細胞網路，而是抽取其中可利用的部分來克服目前電腦或其他系統不能解決的問題，如學習、控制、識別和專家系統等<sup>[13]</sup>。由於水中各水質指標相互影響，常規反演方法難以有效地考慮這部分因素從而建立更加符合實際的反演模型，而人工神經網路類似於人腦，非常適合模擬這種錯綜複雜的關係，故而採用人工神經網路模型反演氨氮濃度是可行的<sup>[15]</sup>。

本研究通過 MATLAB 工具箱裡的 Neural Fitting 功能構建人工神經網路模型。其中，模型的初始閾值、學習速率等使用工具箱中的預設值，演算法從 Levenberg-Marquardt、Bayesian-Regularization、Scaled Conjugate Gradient 3 種神經網路演算法中優選一種。因每次計算時神經網路預設選擇的初始權值不同，需訓練多次後選擇相關性最好的網路作為反演網路。本研究總共 18 個有效樣本點，其中 14 個用於模型率定，4 個用於模型驗證。將資料登錄模型中計算，各個演算法的類比效果見表 3。從表中可知 Levenberg-Marquardt 演算法的類比效果最佳。

Levenberg-Marquardt 演算法的誤差分析見表 4。從表中可知，模型預測效果總體較好；率定期出現過擬合現象，模擬效果極佳，平均相對誤差為 3.56%；驗證期平均相對誤差為 19.20%，相較於率定期效果稍差。相較於多元回歸模型的 8.5%和 23.6%而言，神經網路模型反演效果更為精準，更能模擬實際情況。

## 肆、結果與討論

### 一、水質反演結果

為得到 2007-2009 年的水質分佈，需先通過 ENVI 中的監督分類和圖像掩膜方法提取丹江口水庫水體區域，如圖 3 所示，僅對識別出來的水體區域進行氨氮遙感反演。

本研究共選取了四副遙感影像進行氨氮濃度反演，分別是 2007 年、2008 年、2009 年丹江口水庫豐水期影像及 2007 年丹江口水庫枯水期影像。將構建的人工神經網路模型應用於丹江口水庫水體區域，得到丹江口水庫反演氨氮濃度分佈如圖 4 所示。

從圖 4 可以得出以下結論：

(一) 年內分佈上，丹江口水庫豐水期氨氮濃度明顯高於枯水期，其中尤以丹庫最為明顯。究其原因，可能是豐水期相較於枯水期，雨水沖刷作用造成的面源污染大增，大量有機氮、無機氮隨雨水沖刷進入河流再彙集於水庫中，導致氨氮濃度升高，進一步說明面源污染是影響氨氮濃度的重要因素。

(二) 年際分佈上，2007 年到 2009 年之間，丹江口水庫的氨氮濃度整體上有下降趨勢。說明近年來，有關部門對於丹江口水庫流域實施的一系列環境保護與修復措施取得了較為明顯的成果。

(三) 總體上，從氨氮的角度上看，丹江口水庫水質優良，氨氮濃度普遍優於地表水 II 類水質標準，滿足我國飲用水水源地水質要求，且南水北調中線工程陶岔渠首附近，水體氨氮濃度能夠滿足地表水 I 類水質標準，飲用水水源地一級保護區的要求，為受水區沿線的城市供水安全提供了保證。

## 二、討論

本文仍有部分局限性，值得未來進一步研究改進，包括：

(一) 如因實測資料採樣頻率有限及其與遙感影像過境時間匹配困難，導致可用水質資料有限，使計算結果存在一定的誤差。

(二) 人工神經網路演算法作為一種經典的分類演算法，類比效果較好，然而存在過擬合問題<sup>[16,17,18]</sup>。究其原因可能是因數據有限導致訓練樣本比較少造成的<sup>[19]</sup>。這種過擬合問題雖然會導致模型預測可靠性有所降低<sup>[19]</sup>，但是，考慮到水質遙感反演資料匹配困難和電腦領域深度學習演算法的快速發展，人工神經網路仍然是一種值得繼續研究和開發的演算法。

水質遙感反演作為一種非傳統性的監測手段，具有空間全覆蓋、快速和成本低等傳統水質監測難以比擬的優點，能夠作為實測資料的有益補充，極具有深入研究和推廣的價值和必要。本文以 Landsat 衛星影像和現場實測水質資料為資料來源，建立氨氮的人工神經網路模型對丹江口水庫 2007-2009 年水質進行遙感反演，結果表明，人工神經網路模型反演丹江口水

庫氨氮時空分佈準確性和可靠性良好，率定期和驗證期的平均相對誤差分別為 3.56% 和 19.20%，反演結果可以作為實測資料的有益補充；丹江口水庫水質整體上趨好，氨氮濃度均低於二類水要求，且豐水期明顯高於枯水期。

### 參考文獻

1. 馬嘉悅 (2006), 「丹江口水庫供水調度研究」, 太原理工大學。
2. 劉秀花、胡安焱 (2008), 「漢江丹江口水庫水質變化趨勢研究」, 人民長江, 15, 39, 36-38。
3. 吳川、張玉龍、張克榮、葉琛、張全發 (2013), 「丹江口水庫水質的遙感監測」, 南水北調與水利科技, 6, 11, 75-80。
4. 朱玉霞, 張傑, 劉銳, 王英才 (2014), 「基於 HJ-1 衛星的丹江口庫區水質遙感監測研究」, 環境科技, 5, 27, 52-58。
5. 孫青玲, 黑永雪, 郭磊 (2013), 「地表水水質常規監測問題分析」, 資源節約與環保, 8, 140-140。
6. Liu J, Zhang Y, Yuan D, Song X (2015), "Empirical Estimation of Total Nitrogen and Total Phosphorus Concentration of Urban Water Bodies in China Using High Resolution IKONNS Multispectral Imagery", Water, 11, 7, 6551-6573。
7. 王學軍, 馬廷 (2000), 「應用遙感技術監測和評價太湖水質狀況」, 環境科學, 6, 21, 65-68。
8. 王愛華 (2008), 「農區水體水質參數的遙感模型研究」, 南京農業大學。
9. 聞建光, 消青, 楊一鵬, 柳欽火, 周藝 (2006), 「基於 Hyperion 資料的太湖水體葉綠素 a 濃度遙感估算」, 湖泊科學, 4, 18, 327-336。
10. 呂恒, 江南, 羅激蕙 (2006), 「基於 TM 資料的太湖葉綠素 A 濃度定量反演」, 地理科學, 4, 26, 472-476。
11. Shi K, Zhang Y, Zhu G, et al (2015), "Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250m MODIS-Aqua data", Remote Sensing of Environment, 164, 43-56。
12. 洗翠玲 (2017), 「基於遙感的香溪河水質模擬方法研究」, 武漢大學。
13. 劉騰 (2012), 「既有混凝土結構適用性耐久性評估系統的研究及應用」, 華南理工大學。
14. 王野喬 (1997), 「遙感及多源地理資料分類中的人工神經網路模型」, 地理科學, 2, 17, 105-112。
15. 王建平, 程聲通, 賈海峰, 王志石, 鄧宇華 (2003), 「用 TM 影像進行湖泊水色反演研究的人工神經網路模型」, 科學環境, 2, 24, 73-76。
16. 邵華 (2013), 「正則化神經網路與提前終止反覆運算的比較分析」, 科技通報, 10, 29, 112-114。
17. 朱海婷, 楊甯, 王博 (2014), 「基於人工神經網路的風電功率預測優化演算法」, 上海電力學院學報, 3, 30, 203-207。
18. 沙毅, 陳曦, 張立立, 朱立春 (2017), 「基於 ELM 神經網路的 FAST 節點位移預測研究」, 東北大學學報 (自然科學版), 5, 38, 630-633。
19. 包月英, 開小明 (2004), 「基於神經網路模型評價高技術專案投資風險」, 合肥工業大學學報 (自然科學版), 7, 27, 851-854。

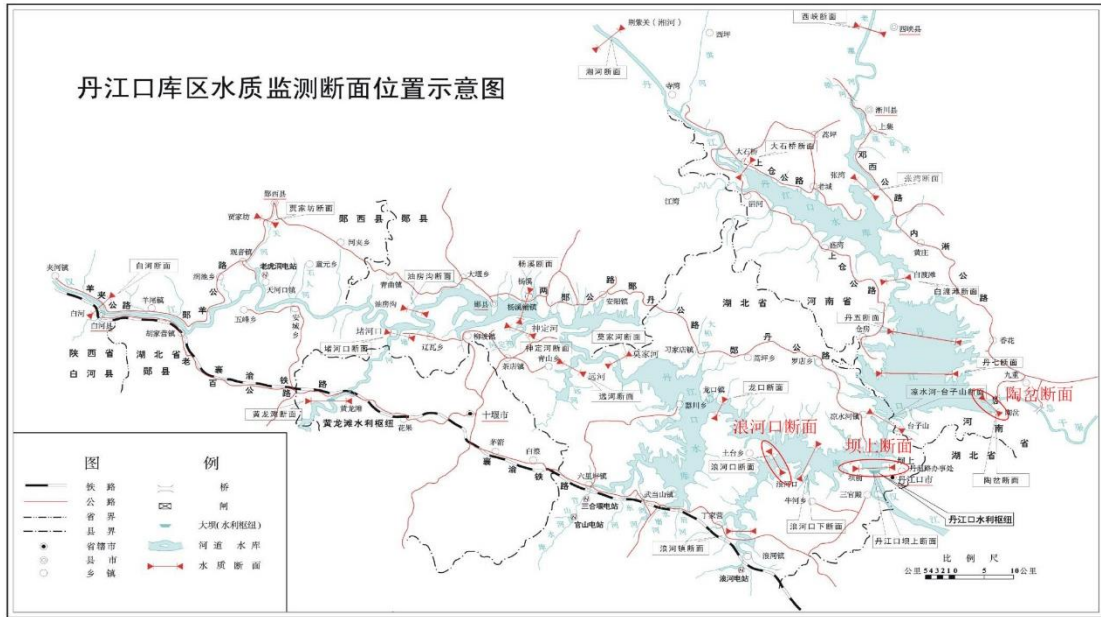


圖 1 丹江口水庫水質監測斷面位置示意圖

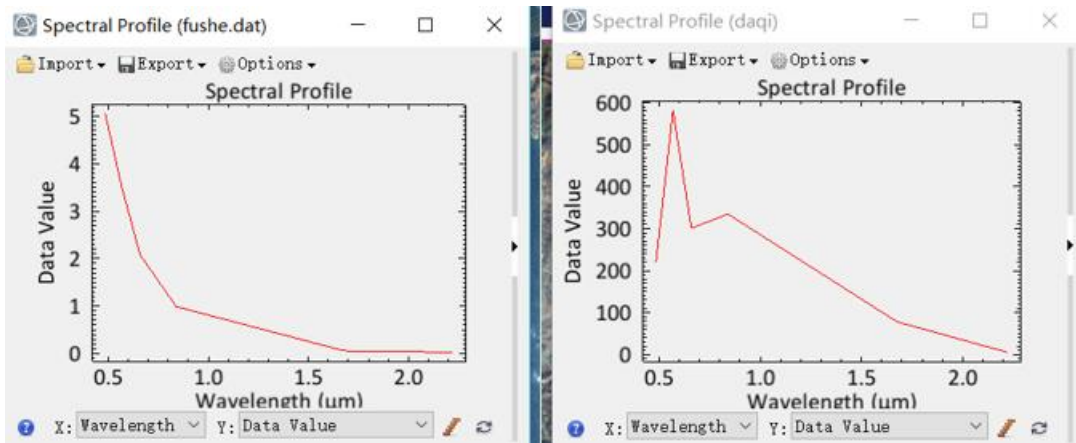


圖 2 遙感影像預處理對比圖 (左為處理前, 右為處理後)

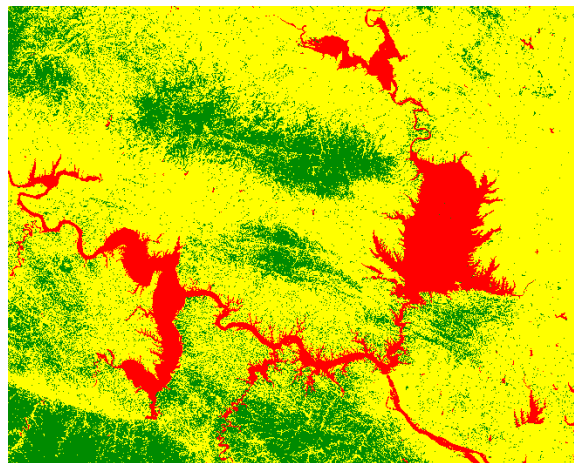


圖 3 丹江口水庫提取

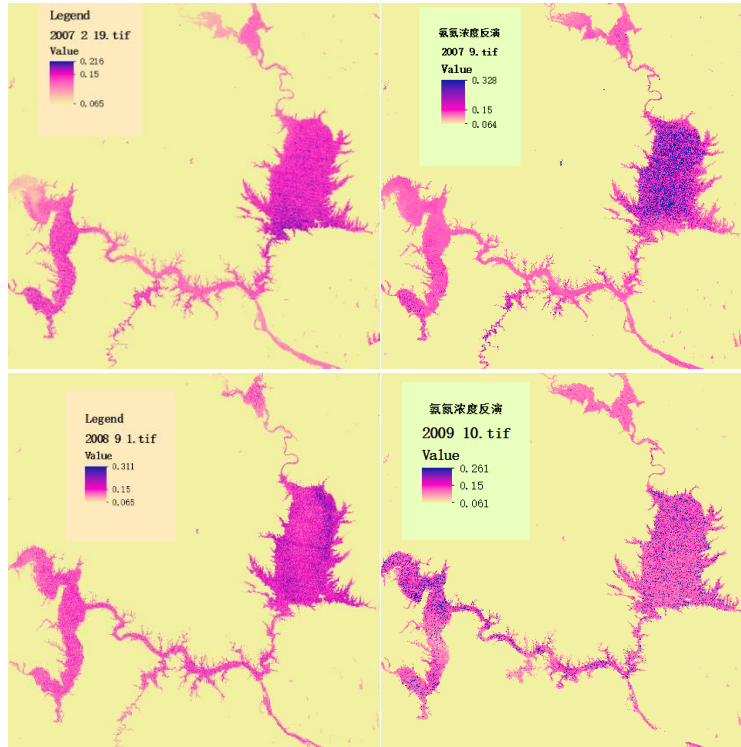


圖 4  $\text{NH}_3\text{-N}$  在不同時期的空間分佈圖

表 1 Landsat-5 波段參數表

波段號	波段	頻譜範圍( $\mu\text{m}$ )	解析度(m)
B1	Blue	0.45—0.52	30
B2	Green	0.52—0.60	30
B3	Red	0.63—0.69	30
B4	NIR	0.76—0.90	30
B5	SWIR 1	1.55—1.75	30
B6	LWIR	10.40—12.5	120
B7	SWIR 2	2.08—2.35	30

表 2 多元回歸模型誤差表

分類	實測值	預測值	相對誤差	分類	實測值	預測值	相對誤差
率定期	0.14	0.136	2.7%	率定期	0.1	0.105	4.6%
	0.14	0.141	0.6%		0.14	0.116	20.2%
	0.15	0.135	11.3%		0.08	0.079	1.7%
	0.11	0.133	17.4%		0.09	0.095	5.8%
	0.11	0.121	9.0%		0.12	0.111	8.4%
	0.15	0.124	21.2%		平均相對誤差		
驗證期	0.15	0.152	1.6%	驗證期	0.08	0.125	36.1%
	0.14	0.144	2.8%		0.09	0.127	29.2%
	0.13	0.146	10.7%		0.12	0.114	5.5%
	0.08	0.088	9.4%		平均相對誤差		

表 3 不同演算法神經網路的類比效果

演算法		R	R for all
率定期	Levenberg-Marquardt	0.999999	0.90959
驗證期		0.971070	
率定期	Bayesian-Regularization	0.716823	0.47916
驗證期		-0.97201	
率定期	Scaled Conjugate Gradient	0.999555	0.89858
驗證期		0.78863	

表 4 人工神經網路模型誤差表

分類	實測值	預測值	相對誤差	分類	實測值	預測值	相對誤差
率定期	0.14	0.140	0.20%	率定期	0.09	0.092	2.08%
	0.14	0.139	0.81%		0.12	0.121	0.51%
	0.15	0.154	2.72%		0.09	0.082	9.00%
	0.11	0.112	1.64%		0.11	0.107	2.44%
	0.15	0.143	4.74%		平均相對誤差		3.56%
	0.15	0.145	3.59%	0.1	0.128	28.07%	
	0.14	0.126	9.78%	0.08	0.101	26.07%	
	0.13	0.138	5.86%	驗證期	0.11	0.125	13.41%
	0.14	0.133	5.05%		0.13	0.118	9.27%
	0.08	0.079	1.43%		平均相對誤差		19.20%

## 南四湖健康評估及問題探討

趙豔紅<sup>1</sup>、詹道強<sup>2</sup>、王秀慶<sup>3</sup>、於百奎<sup>4</sup>

### 摘要

南四湖作為淮河流域重要湖泊，是山東省重要的水源地，也是南水北調東線工程的重要輸水通道和調蓄湖泊，對南四湖進行生態健康狀況評估是對其進行開發治理和維護湖泊健康可持續發展的基礎。本文根據《湖泊健康評估指標、標準與方法（試點工作用）》，對南四湖入湖流量變異程度、湖岸帶調查、河湖連通狀況、水資源開發利用、防洪、公眾滿意度等指標進行了評估。評估結果為：入湖流量變異程度指標賦分為 7.7 分，健康狀況為病變狀態，表明南四湖水文情勢受人類活動影響的程度比較大；湖岸帶狀況賦分為 39.0 分，健康狀況為不健康；河湖連通狀況賦分為 13.2 分，屬於連通性比較差的狀況，健康狀況為病變狀態；水資源開發利用指標賦分為 0 分，健康狀況為病變狀態；防洪指標賦分為 94.8 分，健康狀況為理想狀態；公眾滿意度指標賦分為 78 分，健康狀況為健康。本文從河湖健康評估實踐的角度分析了存在的問題，並提出建議：一是建議今後繼續探討更適合南四湖入湖流量變異程度分析的天然徑流還原方法；二是建議探索無人機、衛星遙感等先進監測手段與大資料、GIS 等資訊處理技術相結合的方式，從全湖尺度及時獲取湖岸帶變化動態，提高資料的多樣性和連續性；三是建議補充完善南四湖水資源監控能力建設，建立完善的水文水資源監測體系，提高水資源監測、計量監督和資訊化管理水準，實現對取、用、耗、排水的動態監測和全過程管理。

**關鍵字：**南四湖、健康評估、探討

### 壹、前言

河流是人類文明和文化的發源地，是人類進行社會經濟活動的基礎，自古以來，人類澤水而居，因水而興。但在過去的幾十年，隨著工業文明的興起，人類對河湖開發利用及干擾程度顯著增強，河流生態系統逐步退化，河湖健康問題迫在眉睫。河湖健康應該是河湖的自然結構狀況、生態環境功能和社會服務功能的均衡健康[1]。開展河湖健康評估工作，可為建成河湖健康保障體系提供有力支援。

2010 年水利部建立了統一、全面的河流、湖泊健康評價體系[2-3]，在全國開展重要河湖健康評估試點工作。近年來，我國學者對不同水體開展了河湖健康評價研究，例如張浩[4]等對海河流域河湖健康進行了評估，探索了適宜海河流域的河湖健康評估技術體系；周婭[5]等以太湖為例從河湖健康評估實踐的角度，分析了太湖流域水系治理現狀及問題。

南四湖位於山東省，地處華北平原與黃淮平原的交界區域。由南陽湖、獨山湖、昭陽湖和微山湖等 4 個串聯湖泊組成[6]，是我國北方東部平原地區最大的淡水湖，不僅是山東省重要的水源地之一，也是集防洪、除澇、水產、航運、旅遊等功能於一身的多功能湖泊。近年來，隨著地區經濟不斷發展，南四湖出現了諸多問題：湖泊調蓄能力變差，水質污染嚴重，湖泊多處嚴重淤積，水土

<sup>1</sup> 沂沭泗水利管理局+高工

<sup>2</sup> 沂沭泗水利管理局+教高

<sup>3</sup> 沂沭泗水利管理局+工程師

<sup>4</sup> 沂沭泗水利管理局+工程師

流失等。這些問題容易誘發一系列生態環境地質問題及生態問題，如不加以控制和改善，勢必會對地區的水資源利用和工農業經濟發展產生制約作用，無法實現南四湖的可持續利用。從湖泊保護和水資源可持續利用角度出發，開展南四湖健康評價對促進區域生態環境的良性迴圈、保護南四湖流域水資源具有重要的現實意義。本文對南四湖入湖流量變異程度、湖岸帶調查、河湖連通狀況、水資源開發利用、防洪、公眾滿意度等指標進行了評估與討論。

## 貳、評估方法及等級

### 一、評估方法

#### (1) 南四湖入湖流量變異程度

入湖流量過程變異程度指環湖河流入湖實測月徑流量與天然月徑流過程的差異。收集南四湖主要入湖河流代表站 2017 年實測月均徑流量、代表站控制斷面以上的耗水量、蓄變數、引水量等資料，根據天然徑流還原的相應規範和技術要求，計算南四湖主要入湖河流代表站 2017 年的天然徑流量。在計算各代表站天然徑流量的基礎上，依據流量變異程度指標，計算南四湖入湖流量變異程度，並予以賦分和評價。

#### (2) 湖濱帶調查

湖濱帶狀況評估包括：湖岸穩定性、湖濱帶植被覆蓋率、湖濱帶人工干擾程度三個方面。

岸坡穩定性根據湖岸侵蝕現狀評估。評估指標包括：岸坡傾角、湖岸高度、基質特徵、岸坡植被覆蓋度和坡腳沖刷強度；湖濱帶植被覆蓋度重點評估湖濱帶陸向範圍喬木（6m 以上）、灌木（6m 以下）和草本植物的覆蓋狀況；湖濱帶人工干擾程度是對湖岸帶及其鄰近陸域典型人類活動進行調查評估，並根據其與湖岸帶的遠近關係區分其影響程度。

#### (3) 河湖連通狀況

河湖連通狀況重點評價主要環湖河流與湖泊水域之間的水流暢通程度。調查收集南四湖主要出入湖河流開壩建設及調控狀況、斷流情況；分析計算 2017 實測出入湖徑流量與多年平均實測年徑流量，以及主要入湖河流水質達標情況。根據調查分析所得資料，對主要環湖河流逐條進行河流順暢狀況判定及賦分。

#### (4) 水資源開發利用指標

收集南四湖流域的現狀開發利用情況，根據水資源綜合規劃、水資源公報等相關資料，分析計算南四湖流域的地表水資源量及近三年的地表水供水量。計算南四湖的地表水資源開發利用率，並採用概念模型公式對水資源開發利用指標進行賦分。

#### (5) 防洪指標

選擇湖泊防洪工程完好率作為湖泊防洪評價指標。收集南四湖堤防概況、環湖口門工程現狀及設計資料，防洪工程現狀及規劃防洪標準，分析堤防開壩完好情況，堤防工程達成率和環湖口門工程達成率。

#### (6) 公眾滿意度指標

公眾滿意度反映公眾對評估湖泊景觀、美學價值等的滿意程度。該指標採用公眾參與調查統計的方法進行。對所在地區的公眾，當地政府、水利、環保等相關部門發放公眾參與調查表，通過對調查結果統計分析，確定評估公眾對水庫的綜合滿意度。

## 二、評估等級

健康狀況評估中，100-80 分為理想狀態（優），80-60 分為健康（良），60-40 分為亞健康（中），40-20 分為不健康（差），20-0 分為病變狀態（劣）。

## 參、指標計算與評估

### 一、南四湖入湖流量變異程度指標計算與評估

根據南四湖 18 條主要入湖河流 2017 年逐月天然徑流量還原計算成果及實測徑流量資料，根據流量變異程度評判指標公式計算，南四湖入湖流量變異程度指標計算值為 3.84，見表 1。根據南四湖入湖流量過程變異程度指標賦分標準（見表 2）進行賦分，南四湖入湖流量過程變異程度指標賦分為 7.7 分。

### 二、南四湖湖濱帶調查指標計算與評估

確定本次湖岸帶調查監測 10 個監測點位，見圖 2。湖岸帶狀況現場調查、監測分別於 2018 年汛前、汛期各進行一次。將汛前、汛期湖岸帶狀況賦分平均後得出南四湖湖岸帶狀況 2018 年整體賦分。南四湖湖岸帶狀況賦分為 39.0，其中岸坡穩定性、湖岸植被覆蓋度、湖岸帶人工干擾程度三項分指標賦分別為 52.1、20.1、59.0，見表 3。

### 三、南四湖河湖連通狀況指標計算與評估

在 17 條有實測資料的環湖河流基礎上增加界河、洙水河、鄭集河、大沙河、鹿口河等 5 條較大入湖河流作為賦分的主要環湖河流，其中鄭集河、大沙河入湖口附近設有水閘控制。對於無實測資料的環湖河流，入湖口附近未設置水閘控制的視為全年順暢；入湖口附近設有水閘控制的河流則根據 2017 年斷流阻隔時間對河流順暢狀況賦分。採用水文比擬法得到無實測資料河流各月徑流量和年徑流量資料。經計算，2017 年南四湖河湖連通狀況賦分為 13.2 分，見表 4。

### 四、南四湖水資源開發利用指標計算與評估

根據南四湖 1956~2010 年系列多年平均水資源量及近 3 年供水量的平均值來計算南四湖水資源開發利用指標，經計算，南四湖地區地表水資源開發利用率為 76.8%，見表 5。按照概念模型公式計算水資源開發利用指標賦分，水資源開發利用率超過 60% 得 0 分，因此南四湖水資源開發利用指標賦分為 0 分。

### 五、南四湖防洪指標計算與評估

選擇湖泊防洪工程完好率和湖泊蓄泄能力作為湖泊防洪評價指標。其中，南四湖防洪工程完好率為 91.5%，賦分 82.5 分；南四湖蓄泄能力為 100%，賦分 100 分。根據湖泊防洪指標變數表，見表 6，按指標運算式  $FLDr = FLDEr \times FLDEw + FLDVr \times FLDVw$  計算，南四湖防洪指標賦分為 94.8 分。

### 六、南四湖公眾滿意度指標計算與評估

採用公眾參與調查統計的方法進行。對評估南四湖所在地區的公眾，當地政府、水利、環保等相關部門發放公眾參與調查表，通過對調查結果的統計分析，公眾對南四湖的評估在基本滿意到滿意之間，綜合確定公眾對南四湖的評估賦分為：78 分。



## 肆、結論

南四湖作為淮河流域重要湖泊，是山東省重要的水源地，也是南水北調東線工程的重要輸水通道和調蓄湖泊，對南四湖進行生態健康狀況評估是對其進行開發治理和維護湖泊健康可持續發展的基礎。本文對南四湖入湖流量變異程度、湖岸帶調查、河湖連通狀況、水資源開發利用、防洪、公眾滿意度等指標進行了評估，結論如下：

南四湖入湖河流入湖流量變異程度指標計算值為 3.84，賦分為 7.7 分，健康狀況為病變狀態，表明南四湖水文情勢受人類活動影響的程度比較大；湖岸帶狀況賦分為 39.0 分，健康狀況為不健康；河湖連通狀況賦分為 13.2 分，屬於連通性比較差的狀況，健康狀況為病變狀態；地表水資源開發利用率為 76.8%。水資源開發利用指標賦分為 0 分，健康狀況為病變狀態；防洪指標賦分為 94.8 分，健康狀況為理想狀態；公眾滿意度指標賦分為 78 分，健康狀況為健康。

## 伍、存在問題及建議

一、入湖河流月徑流量還原計算中，資料資料來源於水文年鑒水量調查成果，還原方法採用的是水文計算中計算天然徑流的傳統方法—分項還原法，計算成果符合計算規範，但是由於南四湖流域涉及引黃及南水北調等工程，例如梁濟運河後營站等，情況複雜，受人類活動影響較大，傳統的方法與南四湖入湖流量變異程度分析不協調，導致入湖流量變異程度賦分偏低。建議今後繼續探討更適合南四湖入湖流量變異程度分析的天然徑流還原方法。

二、湖岸帶狀況現場調查監測手段較為傳統，獲取的資料類型較單一，資料量較少，直觀展示仍然以圖片或照片為主。建議探索無人機、衛星遙感等先進監測手段與大資料、GIS 等資訊處理技術相結合的方式，從全湖尺度及時獲取湖岸帶變化動態，提高資料的多樣性和連續性。

三、南四湖沿湖眾多取水口門，大部分未建立取用水監管設施和取水計量監測設施，取用水資料收集難度大，取用水情況難以掌握。建議補充完善南四湖水資源監控能力建設，建立完善的水文水資源監測體系，提高水資源監測、計量監督和資訊化管理水準，實現對取、用、耗、排水的動態監測和全過程管理。

## 參考文獻

- [1]傅春，劉傑平，等.河湖健康與水生態文明實踐[M].北京：中國水利水電出版社,2016.
- [2] 水利部水資源司.《河流健康評估指標、標準與方法（試點工作用）》[R]. 2011.
- [3] 水利部水資源司.《湖泊健康評估指標、標準與方法（試點工作用）》[R]. 2011.
- [4]張浩，高曉月，周緒申，等.海河流域河湖健康評估探索與展望[J].中國水利,2018（06）:40-42.
- [5]周婭，吳東浩，翟淑華.河湖健康評估對水系治理的啟示—乙太湖為例[A].加強城市水系綜合治理 共同維護河湖生態健康—2016年第四屆中國水生態大會論文集,2016:275-279.
- [6]鄭大鵬，等.沂沭泗防汛手冊[M].徐州：中國礦業大學出版社,2003.

圖與表

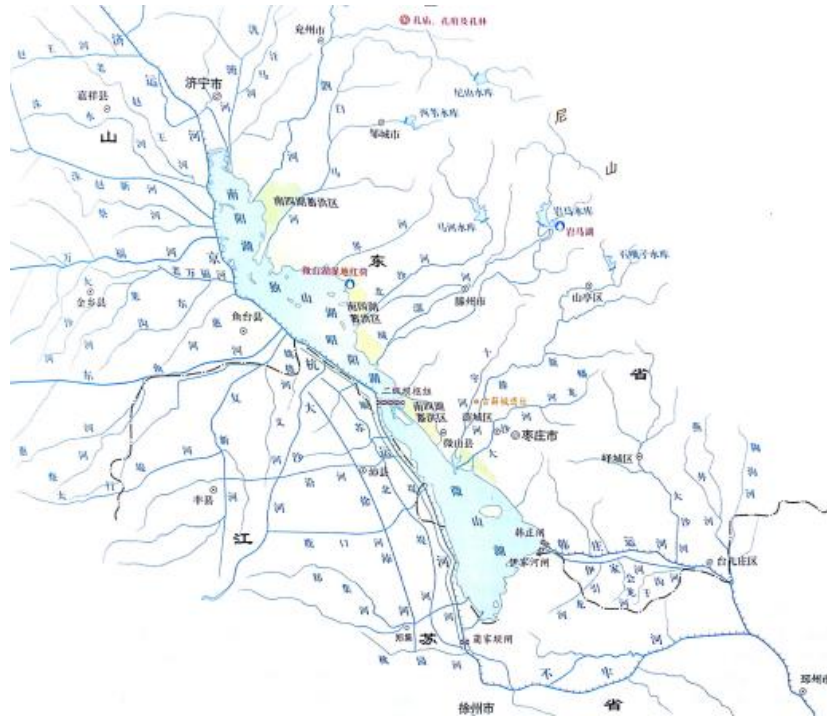


圖 1 南四湖流域圖

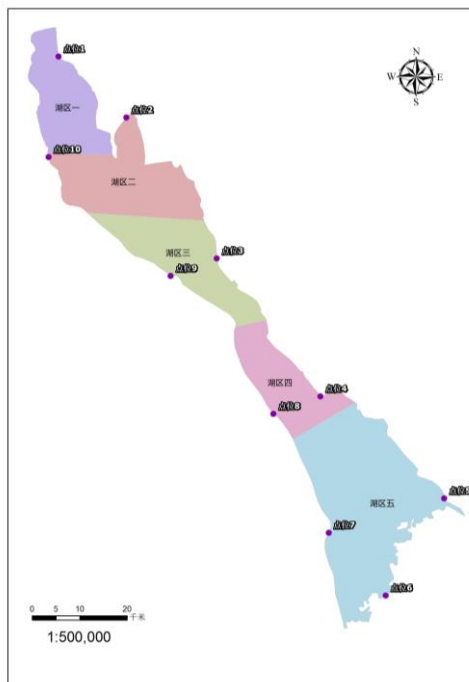


圖 2 南四湖湖濱帶調查斷面示意圖

第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

表 1 南四湖入湖流量變異程度指標計算表

年份	2017				
	實測徑流量 (萬方)	天然徑流量 (萬方)	(天然-實測) (萬方)	【(天然-實測)/天然平均】	【(天然-實測)/天然平均】 <sup>2</sup>
1月	1321	1788	467	0.06093	0.00371
2月	701	798	96	0.01259	0.00016
3月	1366	2003	637	0.08317	0.00692
4月	1345	2029	684	0.08932	0.00798
5月	517	27874	27356	3.57180	12.75777
6月	976	519	-457	-0.05964	0.00356
7月	25281	21034	-4247	-0.55453	0.30751
8月	18914	17102	-1812	-0.23657	0.05597
9月	1942	10234	8292	1.08263	1.17208
10月	1295	1597	301	0.03934	0.00155
11月	1407	1568	161	0.02102	0.00044
12月	334	5367	5032	0.65703	0.43169
全年徑流量	55400	91911	36511	4.8	14.74933
全年平均	4617	7659	3043	0.4	
FD	指標計算值				3.84

表 2 南四湖入湖流量過程變異程度指標賦分表

指標值	賦分
0.05	100
0.1	75
0.3	50
1.5	25
3.5	10
5	0

表 3 南四湖湖岸帶狀賦分計算表

監測點	分指標賦分			湖岸帶狀賦分 (RS)
	岸坡穩定性 (BKS)	湖岸植被覆蓋度 (RVS)	湖岸帶人工干擾程度 (RD)	

第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

點位 1	55.5	26.5	25.0	33.4
點位 2	49.1	11.6	55.0	31.9
點位 3	53.8	28.0	55.0	41.2
點位 4	55.4	34.9	40.0	41.3
點位 5	58.0	19.0	80.0	56.6
點位 6	61.1	24.4	35.0	36.3
點位 7	43.1	14.6	80.0	38.1
點位 8	42.8	10.5	90.0	38.5
點位 9	50.2	18.3	75.0	40.4
點位 10	52.2	10.8	55.0	32.2
平均	52.1	20.1	59.0	39.0

表 4 南四湖河湖連通狀況賦分計算表

序號	河名	Wn	Rn	Wn*Rn	$\sum Wn*Rn/\sum Rn$
1	洸府河	0	0	0	/
2	泗河	30	8660	259800	/
3	白馬河	2.5	95	237.5	/
4	城河	12.5	3437	42962.5	/
5	梁濟運河	5	4320	21600	/
6	洙趙新河	10	11321	113210	/
7	萬福河	5	7159	35795	/
8	東魚河	7.5	7253	54397.5	/
9	複新河	0	0	0	/
10	北沙河	23	1126	25898	/
11	十字河	20	10407	208140	/
12	沿河	0	0	0	/
13	沙河	0	0	0	/
14	界河	100	899	89900	/
15	洙水河	100	1524	152400	/
16	大沙河	0	0	0	/
17	鄭集河	0	0	0	/
18	鹿口河	100	0	0	/
19	韓莊運河	7.5	42889	321667.5	/

20	伊家河	2.5	1520	3800	/
21	老運河	0	0	0	/
22	不牢河	0	0	0	/
	Σ		100610	1329808	13.2

表 5 南四湖流域地表水資源開發利用率

項目	資料系列
	1956-2010 年
地表水資源量 (億 m <sup>3</sup> )	26.2
近三年平均供水量 (億 m <sup>3</sup> )	20.1
地表水資源開發利用率	76.8%

表 6 湖泊防洪指標變數表

防洪指標	賦分	賦分範圍	權重	權重
防洪工程完好率	FLDEr	0-100	FLDEw	0.3
洪水調蓄能力	FLDVr	0-100	FLDVw	0.7

# 淮河流域某市水污染總量控制及水生態修復

馮露<sup>1</sup>、許可<sup>1</sup>、劉錦雯<sup>2</sup>

## 摘要

本文通過淮河流域某市水環境實測資料及現狀的分析，對水功能區劃分和主要河流的特徵建立一維水質模型，計算各條河流不同水量條件下的動態納汙能力，並與現狀排汙量進行對比，給出規畫水準年污染總量控制和水環境保護方案，提出利用濕地和土壤滲濾功能進行水生態修復技術措施。

**關鍵字:**水污染總量 水生態修復 納汙能力 削減量 水功能區

## 壹、淮河流域某市水環境現狀

水環境是自然界中水的形成、分佈和轉化所處空間的環境，是圍繞人群空間及可直接或間接影響人類生活和發展的水體，其正常功能的各種自然因素和有關社會因素的總體。

淮河流域某市地處安徽省北部，是黃淮海平原上最具特色的區域，本文以該市內典型河流為研究物件，進行了河水與地下水原型水質監測，結合現場地質勘探、土工試驗和室內土槽試驗，獲得了大量有價值資料。根據2008年水質監測評價，區域內達到Ⅲ類水以上的河段占35.7%，能滿足生活飲用水源標準；Ⅳ類水的河段占28.6%；Ⅴ類水的河段占14.3%；劣Ⅴ類水的河段占21.4%。35.8%以上的地表水為污染水，只能適用於農業和一般景觀用水。由於廢水的大量排放，造成河流水資源品質嚴重不足。監測結果表明，蕭灘新河水質已超過《地表水環境品質標準》Ⅴ類水體標準，水質處於重污染狀況；沱河、滄河為Ⅳ類水體，也受到一定污染。

## 貳、水環境實測資料分析

### 一、污染物在地下水中的削減量

本次野外採集的蕭灘新河及濱河地帶地下水取樣歷時半年，經歷汛前枯水、汛期降雨和汛後蓄水，由於降雨過程中雨量時空分佈不均，加之節制閘控制流量的影響，河水污染物濃度變化較大，當河道污染物隨河水穿過河道底泥進入地下土壤飽和水的過程中，由於底泥和土壤介質的吸附和複雜的離子交換作用，污染物濃度迅速衰減，使地下水污染物含量大大降低，並且處在比較穩定狀態。

### 二、污染物隨時間變化關係

有機污染是河道污染的主要成分，氨氮和高錳酸鹽指數是有機污染的綜合指標〔3〕。從氨氮和高錳酸鹽指數濃度隨距離變化關係可以看出河水污染物濃度遠大於地下水污染物濃度，而且在土壤介質中衰減很快。在2009年7月10日至12月18日16組水樣檢驗資料中，河水污染物濃度隨時間變化幅度很大，地下水污染物濃度比較穩定。該地區7至9月份是汛期，降雨比較頻繁，而且分佈不均，這可能是造成河水污染物濃度變化幅度較大的直接原因。地下水污染物濃度變化幅度小說明土壤介質對污染物吸附降解作用明顯。

<sup>1</sup> 安徽省·水利部淮委水利科學研究院，合肥，230000

<sup>2</sup> 南水北調東線江蘇水源有限責任公司，南京，210009

## 參、水功能區劃分

地表水水功能區劃採用二級體系，即一級區劃（流域級）、二級區劃（省級、市級）。淮河流域某市境內主要蕭灘新河、沱河、澮河 3 個水系 16 條主要河流與人工溝渠，總長度 402.6km，共劃分 19 個一級區，其中：16 個開發利用區，3 個緩衝區。區域內主要河流、水庫及採煤坍塌區水功能二級區在一級區劃 22 個開發利用區內進行，共劃分為 26 水功能二級區，其中：10 個工業用水區，9 個農業用水區，1 個漁業用水區，3 個景觀娛樂用水區，3 個過渡區。

## 肆、河流納汙能力計算

### 一、模型選擇與建立

淮河流域某市主要河流屬底坡緩的長河道型河流，且河寬水淺，降水季節，在閘門開啟水體流動情況下，污染物在垂直水流方向很快摻混均勻，故可以採用一維模型。

每個功能區納汙能力為：

$$W = \int_0^L d_w = \int_0^L dC_w Q = [C_s - C_0 \exp(-\frac{kl}{u})] \exp(\frac{kl}{2u}) Q \quad (1-1)$$

該模型是一種理想化的一維模型，不考慮混合過程，並且認為納汙能力在計算河段內均勻分佈，利用該模型計算出的納汙能力反映的是河段的一種自然屬性。

### 二、綜合降解係數 K 的確定

河道內污染物的生物降解、沉降和其他物化過程，可概括為污染物綜合降解係數 K，通常通過水團追蹤試驗、實測資料反推、類比法等方法確定。實測資料率定法計算污染物降解係數，首先需選取試驗河段，分析上、下斷面水質監測資料，通過分析確定河段平均流速，利用合適的水質模型計算污染物降解係數，採用臨近時段水質監測資料驗證計算結果，確定污染物降解係數。

本文選取的計算模型參數採用實測資料率定法，實測資料率定法常用二斷面法，即選擇穩定均勻混合並且無支流口和排污口的河段，測得上下兩斷面污染物的濃度、流速和長度，即可求出  $k$  值。

$$k = \frac{u}{x} \ln \frac{C_1}{C_2} \quad (1-2)$$

水利部淮河水利委員會對淮河流域 50 個河段的  $k$  值進行試驗，通過對  $k$  值的分析，得到對  $k$  值影響最大的是因素是河段的平均流速，其次是水溫，由相關性分析得到 COD 和氨氮的綜合衰減係數可用下面的關係表示：

$$k_{COD} = 0.025 + 0.66u \quad (1-3)$$

$$k_{NH_3-N} = 0.8k_{COD} \quad (1-4)$$

綜合各種影響因素，確定各條河流  $k$  的取值，計算結果如表 1-1 所示。

表 1-1 綜合降解係數  $k$ 

河名	綜合降解係數 $k$	
	COD	氨氮
蕭灘新河	0.8731	0.6985
龍河	0.8736	0.6989
岱河	0.8924	0.7139
沱河	0.5371	0.4297
閘河	1.7850	1.4280
澮河	0.8350	0.6680

### 三、納汙能力計算成果

河流納汙能力是指在設計流量條件下，滿足水功能區水質目標要求和水體自然淨化能力，核定的水功能區污染物最大允許負荷量。為了全面反映不同水量條件下河流納汙能力的變化，本項目的計算區間涵蓋河道豐水期和枯水期的各種保證率的水量。其計算成果可為實施人工調節流水量的非工程措施來控制污染濃度提供技術支援。

根據上述模型選擇、參數的確定，計算出淮河流域某市主要河流在不同流量下納汙能力，見表 1-2 和圖 1-1。

表 1-2 不同設計流量下各河流納汙能力

河名	不同設計流量下各河的納汙能力 (t/a)									
	5%		50%		75%		90%		95%	
	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮
蕭灘新河	3373.3	181.7	1605.3	58.6	1524.6	56.4	1381.3	51.7	1312.5	49.2
龍河	1315.4	132.7	634.9	44.9	632.2	26.9	577.8	12.1	554.5	11.7
岱河	3502.2	217.2	1690.3	71.4	1507.6	63.3	1259.1	52.4	1184.1	49.1
沱河	5306.1	320.2	2614.4	104.2	2002.6	80	1567.6	62.3	1418.1	56.3
閘河	2113.5	110.4	1034.4	35.4	815.5	31.5	787.9	28.1	728.1	26.3
澮河	7006.9	343.1	3491.1	113.7	2795.1	94.7	2500.8	75.1	2250.7	69.5



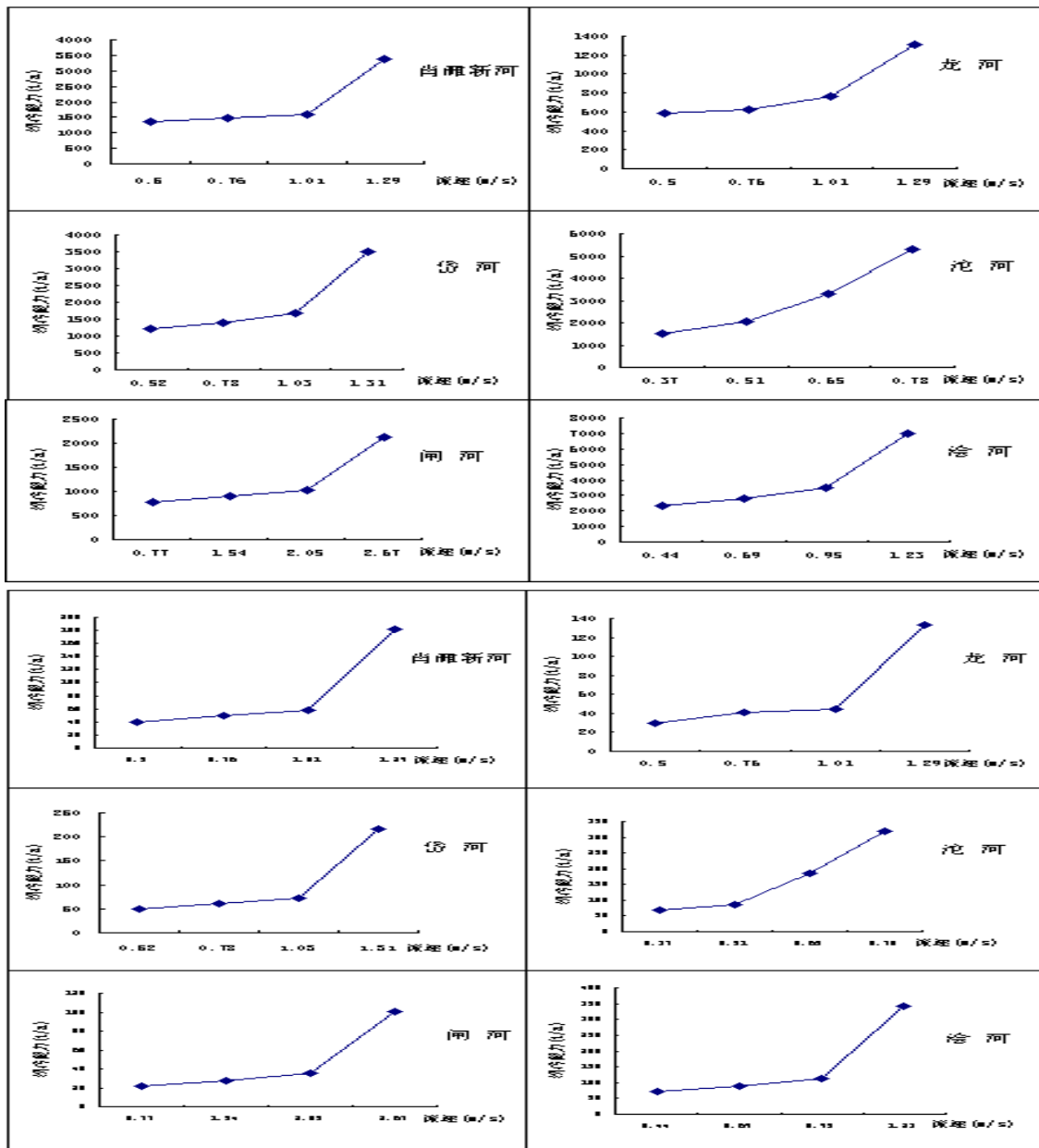


圖 1-1 河流不同流量下 COD、氨氮納汙能力

### 伍、地表水污染總量控制方案

根據淮河流域某市的經濟技術發展水準和治汙規劃，制定淮河流域某市各功能區水質目標值，從而確定規劃水準年削減量=污染物排放量-最大允許排放量。現狀排汙量小於功能區最大允許納汙能力，控制排放量按現狀排放量控制，不計算削減量。

淮河流域某市各功能區不同流量下污染物入河控制量及削減量計算成果如下表。

表 1-3 50%設計流量下各河入河控制量和削減量

功能區名稱	納汙能力 (t/a)		入河排放量		入河控制量		削減量	
	COD	氮 氮	COD	氮 氮	COD	氮 氮	COD	氮 氮
閘河保護區	117.3	4.2	281.4	19.8	117.3	4.2	164.1	15.6
閘河開發利用區	1034.4	35.4	588.9	41.1	588.9	35.4	0	5.7
龍岱河開發 1	643.9	14.9	974.5	66.8	643.9	14.9	330.6	51.9
龍岱河開發 2	1690.3	71.4	2567.2	156.3	1690.3	71.4	876.9	84.9
蕭灘新河	1605.3	58.6	2141.1	168.9	1605.3	58.6	535.8	110.3
南沱河緩衝區	226.5	23.4	146.4	16.6	146.4	16.6	0	0
南沱河開發區	2614.4	104.2	2176.1	90	2176.1	90	0	0
滄河緩衝區	878.3	8.3	363.8	10.5	363.8	8.3	0	2.2
滄河開發區 1	1795.8	45.4	1113.6	15.6	1113.6	15.6	0	0
滄河開發區 2	3491.1	113.7	3052.4	127.8	3052.4	113.7	0	14.1

表 1-4 75%設計流量下各河入河控制量和削減量

功能區名稱	納汙能力 (t/a)		入河排放量		入河控制量		削減量	
	COD	氮 氮	COD	氮 氮	COD	氮 氮	COD	氮 氮
閘河保護區	141.3	5.3	281.4	19.8	141.3	5.3	140.1	14.5
閘河開發利用區	815.5	31.5	588.9	41.1	588.9	31.5	0	9.6
龍岱河開發 1	632.2	6.9	974.5	66.8	632.2	6.9	342.3	59.9
龍岱河開發 2	1507.6	63.3	2567.2	156.3	1507.6	63.3	1059.6	93
蕭灘新河	1524.6	56.4	2141.1	168.9	1524.6	56.4	616.5	112.5
南沱河緩衝區	178.3	8.3	146.4	16.6	146.4	8.3	0	8.3
南沱河開發區	2002.6	80	2176.1	90	2002.6	80	173.5	10
滄河緩衝區	805.5	14.6	363.8	10.5	363.8	10.5	0	0
滄河開發區 1	1502.6	42.8	1113.6	15.6	1113.6	15.6	0	0
滄河開發區 2	2795.1	94.7	3052.4	127.8	2795.1	94.7	257.3	33.1

表 1-5 90%設計流量下各河入河控制量和削減量

功能區名稱	納汙能力 (t/a)		入河排放量		入河控制量		削減量	
	COD	氮 氮	COD	氮 氮	COD	氮 氮	COD	氮 氮
閘河保護區	152.8	5.8	281.4	19.8	152.8	5.8	128.6	14
閘河開發利用區	787.9	28.1	588.9	41.1	588.9	28.1	0	13
龍岱河開發 1	577.8	12.1	974.5	66.8	577.8	12.1	396.7	54.7
龍岱河開發 2	1259.1	52.4	2567.2	156.3	1259.1	52.4	1308.1	103.9
蕭灘新河	1381.3	51.7	2141.1	168.9	1381.3	51.7	759.8	117.2
南沱河緩衝區	119.5	3.8	146.4	16.6	119.5	3.8	26.9	12.8
南沱河開發區	1567.6	62.3	2176.1	90	1567.6	62.3	608.5	27.7
滄河緩衝區	696.6	17.7	363.8	10.5	363.8	10.5	0	0
滄河開發區 1	1195.9	37.8	1113.6	15.6	1113.6	15.6	0	0
滄河開發區 2	2500.8	75.1	3052.4	127.8	2500.8	75.1	551.6	52.7

表 1-6 95%設計流量下各河入河控制量和削減量

功能區名稱	納汙能力 (t/a)		入河排放量		入河控制量		削減量	
	COD	氨 氮	COD	氨 氮	COD	氨 氮	COD	氨 氮
閘河保護區	155.5	5.9	281.4	19.8	155.5	5.9	125.9	13.9
閘河開發利用區	728.1	26.3	588.9	41.1	588.9	28.1	0	13
龍岱河開發 1	554.5	11.7	974.5	66.8	554.5	11.7	420	55.1
龍岱和開發 2	1184.1	49.1	2567.2	156.3	1184.1	49.1	1383.1	107.2
蕭灘新河	1312.5	49.2	2141.1	168.9	1312.5	49.2	828.6	119.7
南沱河緩衝區	104.1	2.6	146.4	16.6	104.1	2.6	42.3	14
南沱河開發區	1418.1	56.3	2176.1	90	1418.1	56.3	758	33.7
滄河緩衝區	659.3	17.9	363.8	10.5	363.8	10.5	0	0
滄河開發區 1	1108.1	36	1113.6	15.6	1108.1	15.6	5.5	0
滄河開發區 2	2250.7	69.5	3052.4	127.8	2250.7	69.5	801.7	58.3

## 陸、水生態修復

### 一、水生態保護的意義

現階段，由於該市大範圍的湖泊、河流受到不同程度的污染，使水資源利用價值大大降低，不僅影響工農業的正常生產，還威脅到人民群众的飲水安全。面對嚴峻的形式，我們應當本著全面落实“水利工程補短板、水利行業強監管”的水利改革發展總基調，全面實施水污染總量控制制度，推行政府調控，加強水體生態修復與治理，以期達到水生態與自然的和諧平衡。

目前，基於水體生態修復與生物治理技術為主的城市河道水環境治理及改善工作受到地方及流域主管部門的重視，通過一系列富有成效的水生態修復技術，不僅為河道水環境治理提供了可靠的依據，同時也為同類河道治理的工藝設計及運行提供了參考。

### 二、水生態修復內容

#### (一)保持水量改善水質

水量水質是維持河流湖泊健康生態的基本條件，應通過水資源的合理配置和水利工程優化調度來維持枯水季節河流湖泊的最小生態需水量。

#### (二)構建濱湖濕地

根據當地的自然環境、水系特點和水體深度，將水淺面小的坍塌區連接到水深面大的坍塌區，或開挖疏浚加大湖水深度，棄土回填湖濱成淺水濕地，建設改造成平原濕地蓄水湖泊複合體。

#### (三)控制河湖水體富營養化

控制措施主要有：(1)水質控制措施；(2)水體流動和曝氣措施；(3)生物措施：建立水生生態系統。

### 三、水生態修復技術

#### (一)濕地技術

是由土壤基質及其淺水潮濕環境和水生植物、微生物、魚蝦類等水中棲息的動物共同組成的生態系統，它通過物理、化學、生物作用的優化組合起到汙水處理淨化環境的作用。

#### (二)水生動植物生態控制技術

根據水質水量等實際情況，對河道適宜投放動植物，通過食物鏈等生態自然規律，組合形成動態的生態控制技術。

#### (三)微生物控制技術

近年來通過研究表明，向水體中投放適當的生物菌種能顯著改善水體環境，同時有效降低水體中 COD、氨氮、總磷等污染物指標。淨水菌群的投放能有效的將一些污染物吸收和轉化，變成無毒害或者毒害化較低的無機營養元素，可以避免水生生物帶來的二次污染。

#### (四)土壤滲濾技術

是一種以土壤為介質的淨化處理污水的方法，通過農田、林地、草地、蘆葦等土壤—微生物—系統過濾、物理吸附、化學反應、離子交換、生物氧化和植物吸收等綜合作用，固定與降解污水中各種污染物，使水質得到不同程度的改善，同時通過不同營養物質和水分的生物地球化學迴圈，促進綠色植物生長，實現污水資源化與無害化。

## 柒、結論和建議

通過對淮河流域某市水環境歷史和現狀的調查，獲得 2006 年以來的最新水量水質和主要河流污水排放資料。據此對主要河流不同流量條件下的動態納汙能力及污染物入河控制量及削減量進行計算，得出以下結論建議。

- 1、水資源總量不足，用水矛盾突出；
- 2、水環境形勢嚴峻，水生態亟須改善；
- 3、強化水功能區管理，控制入河排汙量，建立優美水環境保障體系；
- 4、加強生態環境修復與改善，實現人與自然和諧共處。

## 參考文獻

- [1]錢嫦萍等.生物修復技術在黑臭河道治理中的應用.水處理技術,2009.13-16.
- [2]李焯主編.環境水力學進展.武漢:武漢水利電力大學出版社,1999.106-276.
- [3]金光炎著.水文水資源隨機分析.北京:中國科學技術出版社,1992.85-97.
- [4]夏繼紅,嚴忠民著.生態河岸帶綜合評價理論與修復技術.北京:中國水利水電出版社,2009.67-99.
- [5]董志勇編著.環境水力學.北京:科學出版社,2006.95-98.
- [6]曲格平.關於水環境可持續利用戰略的幾點思考.首屆九寨天堂國際環境論壇論文集,2005.129-131.

### [作者簡介]

馮露，女，1986 年 11 月生，工程師，主要研究方向水利工程管理、水環境保護等，51341231@qq.com。

## 智慧化水井實務系統管理

林育如<sup>1</sup>、李宗仰<sup>2</sup>、吳益裕<sup>3</sup>、葛武松<sup>4</sup>、盧冠宇<sup>5</sup>

### 摘要

經濟部水利署為協助地下水管制區各縣市政府推動違法水井處置作業及多個縣市逐步推動水井之申報納管、複查履勘及輔導合法，因此開發建置「水井管理資訊網」來協助支援整個服務的資訊化程序及相關作業。隨者水井各項業務之推動，需求逐步增長及調整，資訊系統的各项功能亦日趨完整及多元，同時資料量亦隨之大幅增加。近年來，世界各國刻正整合資通訊技術(ICT)、物聯網技術(IoT)及大數據(Big-Data)等現代化科技來建構各種智慧化應用，此已經成為國際趨勢，因此利用該等科技於水利產業發展已趨成熟階段。

本文描述了水井推動實務過程之各項資訊化服務(功能)，特別是彰化及雲林兩個縣市配合申報納管、水井複查及輔導合法之程序進行，已完成一個完整的推動作業，透過實際推動的經驗可以回饋至資訊平台的因應及調整，使接續的縣市推動更具效率及便利。同時，針對智慧化等相關技術及方法在水井管理方面之可能應用，提出討論及評估，如：交談機器人(ChatBot)、無線射頻技術(RFID)及事件簿分析(如：輿情分析)等，藉由水利背景專業、實務推動經驗及資訊科技專長的統合，更有助於水井智慧化管理的真正推展。

**關鍵字：**水井管理、資訊系統、智慧化應用

<sup>1</sup> 經濟部水利署水利行政組副工程司

<sup>2</sup> 恆知科技有限公司執行長

<sup>3</sup> 經濟部水利署水利行政組組長

<sup>4</sup> 經濟部水利署水利行政組科長

<sup>5</sup> 恆知科技有限公司專案經理

## 壹、前言

經濟部水利署為協助地下水管制區各縣市政府推動違法水井處置作業，同時配合雲彰地區既有水井納管及複查等作業，針對已開發建置之「水井管理資訊網」，須持續辦理系統之維護與功能擴充，以提供縣(市)政府有效執行水井管理之資訊化平台。再者，「雲彰地區地層下陷具體解決方案暨行動計畫」之既有申報納管水井複查作業完成後，配合增訂地下水管制辦法第十七條之一辦理輔導合法作業，基於中央主管機關立場，研定納管水井輔導合法作業規範，協助地方政府推動納管水井輔導合法業務，因此辦理「地下水管理實務推動計畫」及「水井管理實務推動計畫」[1-4]，以賡續強化實務推動地下水管理所需重要基本資訊之技術、行政支援輔助系統工具，逐步落實水井抽水之計量管理機制，提高地下水管理相關作業效能。

「水井管理資訊網」之前身為「違法水井處置作業整合性資訊管理系統」，係於99年開始開發建置，提供水井處置的各項資料建置與相關處置所需之資訊管理平台。在101年度，為配合雲彰地區水井列案納管、複查、裝置辨識標籤及後續處置管理作業需求，因此將99年度所開發之資訊系統予以整合及擴充，完成「水井管理資訊網」之新的資訊管理平台，藉以提供更為完整性及全面性的服務。從102年度起，除了持續維護提升原有功能之外，並配合雲彰地區水井納管作業實務需求，於資訊系統中新增多項相關功能，逐步建構健全水井管理所需的整合性功能。

## 貳、從申報納管、水井複查至輔

### 導合法[4]

行政院100年8月16日核定「雲彰地區地層

下陷具體解決方案暨行動計畫」規劃健全水井管理策略項下先就雲林、彰化地區進行各標的水井清查，再予以分類、分級，再依環境敏感程度及替代水源取得條件，規劃管理、管制計畫，循序納管或處置，以兼產業用水需求、民眾生計，並顧及地下水水資源保育條件，逐步降減地下水超量抽用對地層下陷之負面效應。彰雲二縣茲依申報納管、水井複查、輔導合法即回歸法制之進程辦理未合法登記水井管理作業，如圖1所示。至於宜蘭縣、臺中市、高雄市及屏東縣等縣市，亦依相關法令規定辦理水井納管申報、複查、輔導合法作業中。

水井管理之良窳攸關地下水資源環境發展，健全之水井管理將有助於地下水資源在總量管理目標下之有效運用，其主要管理架構概為：

1. 水井納管輔導合法：落實水權規定，健全水井管理，掌握區域抽水量。
2. 水位監控與警示：以嚴密之地下水水位觀測及警示機制，落實地下水管理，管控區域地下水抽用情形，避免發生超抽狀況、紓緩地層下陷。
3. 地下水可用水量評估：評算區域地下水可用水量，供縣府核發水權量參考，落實「抽不超補」之總量管制，以保育地下水永續經營。
4. 違法水井查處及廢棄水井封填：加強違法水井查處，建立政府施政公信力；積極封填廢棄水井，減少地面污染物隨水流進入地下含水層或避免人為灌注污染物可能性。
5. 資訊系統建置與管理：掌握實際水井空間分布配合計量設備安裝估算實際抽水量，以及研判核發水權量是否適宜。
6. 地面地下水資源聯合調度：供地面地下水資源聯合調度基本參據，使水資

源利用趨向最佳化。

本文將針對第5項之資訊系統建置與管理予以說明。

## 參、系統架構及模組功能

### 一、系統架構

「水井管理資訊網」之系統架構，如圖2所示，在逐年的推動過程中，已納入行動化應用的考量、規劃及APP開發。「水井管理資訊網」已開發完成Web服務(Web Service)，它是一種服務導向架構(Service-Oriented Architecture, SOA)的技術，透過標準的Web協議提供服務，可確保不同平台的應用服務可以相互操作。[5]

### 二、模組功能

「水井管理資訊網」目前(108年度)所提供之所有模組功能名稱，如圖3所示。該系統提供完整的操作機關、權限及使用平台的設定，操作機關包含：水利署及各縣市政府，權限包含：系統管理者、水利署主管及承辦人員、縣市政府主管及承辦人員、承辦單位、合作單位(執行廠商)、監驗單位及其他單位等。使用平台包含：PC及APP等。透過該等設定，提供相對應的模組及功能。

1. [水井資料]模組：對於尚未辦理申報納管之縣市，使用[資料新增]及[資料維護]兩個子模組來進行水井資料管理。對於辦理申報納管之縣市，則使用[列案新增]、[列案維護]、[列案履勘]及[輔導合法]等子模組來進行水井資料管理。針對水井複查階段，提供監驗單位之[複查管理]子模組，可以進行複查檢核、成果統計及抽檢比對等作業。針對輔導合法階段，提供監驗單位之[輔導審核]子模組，可以進行輔導合法書件之審核作業。
2. [外部資料]模組：主要是由[台電資料]、[變異資料]及[水權匯入]等三個

子模組所構成。台電資料是指台電公司每個月所提供的查獲魚塭竊電/違章用電資料表，內含用電地址、通訊地址及是否有發現水井構造物等資訊。變異資料是指指內政部營建署所提供的變異點查處彙整資料表，內含使用不同期影像所辨識的變異類型、查證結果、參考地號及相關文號等資訊。水權資料是指係指由水權系統所提供的水權資料，內含所屬縣市、鄉鎮市區、水權人姓名、狀照號碼、用水標的、引水地點、水權起始年限及水權終止年限等資訊。該等模組提供資料匯入、現地查察(查處)及資料統計等功能。

3. [填塞作業]模組：可依據各種設定的評分因子，進行處置排序作業。
4. [資料查詢]模組：包含水井資料的多样化查詢、統計報表及統計繪圖等。
5. [支援功具]模組：提供現地之照相、讀取行動條碼、現地定位及現地地圖等行動化作業，另提供坐標轉換之即時計算。再者，由於水井管理的多样化問題，因此開發[Q&A]子模組來提供各類問題及答覆。
6. [系統管理]模組：包含了[權限設定]、[系統維護]及[參數設定]等子模組，該等模組屬於後台管理權責，特別是[參數設定]子模組，提供系統之相關參數的快速佈署，可以即時配合需求進行調整與擴充。
7. 行動管理APP：在現場可透過APP，進行水井標籤的自動辨識、手動輸入水井標籤號碼、水井清單、水井地圖、水井資訊及水井照片等資訊的即時調閱。

## 肆、進階應用之探討

### 一、交談機器人(ChatBot)應用於Q&A

為因應及配合水井管理程序逐步完整及多元、多樣化的各類問題，擬於水井管理資訊網(WellMIS)中建置[Q&A]模組，提供各式問題之答覆。WellMIS之使用對象，目前以中央主管機關、各縣市政府及委辦計畫之執行廠商為主，但考量[Q&A]模組在後續亦可提供給民眾查詢，因此亦將其納入，該模組之架構如圖4所示。

目前所開發之[Q&A]模組，包含下列特色：(1)具備完整後台，可以隨時增減及調整Q&A內容。(2)具備Q&A之分類排序及強大的字元(關鍵字)即時搜尋、即時過濾、即時標示與即時顯示能力。(3)針對日期/時間標記、地點標記及分類標記等，另行標記及建置資料表單，強化Q&A文件的正確性及即時性管理，同時提升後續導入交談機器人的完整架構及內容。(4)依據水利背景專業、實務推動經驗及資訊科技專長，更有利於建構友善的交談機器人環境。

為能提供更便利之Q&A環境，因此評估導入交談機器人的可行性。所為交談機器人是經由對話或文字進行交談的電腦程式，能夠模擬人類對話，通過圖靈測試。本文以Google公司之DialogFlow服務來嘗試建構對話式介面，進而執行水井管理的各種常見問題回答及協助使用者處理簡單的要求。

DialogFlow是Google提供的自然語言處理服務，能夠將文字轉換成電腦看得懂的結構性資料，再傳遞給後端介接的Web Service處理。DialogFlow是採用基於意圖(Intent-based)的對話，當自然語言處理(Neuro-Linguistic Programming, NLP)算法使用意圖(Intent)和關鍵字(Entities)進行對話時，通過識別用戶聲明中的名詞和動詞，然後與它的字典交叉引用，讓Bot可以執行有效的操作。

以水井管理資訊網之目前[Q&A]模組的所

有問答集資料為基礎，建構水井管理Q&A之交談機器人，如圖5所示之範例。雖然透過文字交談可以協助回答，但在實際應用場域時，由於會詢問水井相關問題者，主要是較年長之農民，因此採用閩南語音交談之回答，可能較為適切，雖然語音之交談機器人已屬成熟且可應用之階段，但對於閩南語之轉譯仍有待克服，此為後續採用的主要思考點之一。

### 二、無線射頻技術(RFID)之水井辨識標籤

經濟部水利署於101年至104年辦理三年期「健全水井管理策略與查察管理技術提昇研究計畫」[6~8]，經由三年期整體計畫循序推動，依循「雲彰地區長期地層下陷具體解決方案」指導原則，完成雲彰地區既有水井納管複查籌備工作，協助雲彰兩縣府自101年9月起陸續公告實施既有水井申報納管作業，至102年12月31日截止收件，彰化縣及雲林縣分別受理153,659件及162,124件，並於103年起以3年時間，推動納管水井複查確認及裝置辨識標籤作業，依據統計資料(106年08月17日)顯示，已有256,810口功能確認正常之納管水井裝置了辨識標籤[4]。

此處所使用的辨識標籤為快速反應(Quick Response, QR)碼，亦可稱為行動條碼或二為條碼，但辨識標籤的種類很多，在最後確認及採用QR碼之前，已針對傳統標籤及數位標籤進行了多種類及多面向之比較與評估[1]。報告中，主要建議仍以無線射頻辨識系統(Radio Frequency Identification, RFID)標籤及QR碼作為應用於水井量體識別之主要技術。在年度規劃、測試及評估時，針對各種條件、相關人員訪談及委員建議等等，同時配合主客觀條件，進行了綜合的比較及說明，並對採用何種技術提出建議。

RFID雖具有非可見性的辨識讀取，但成本高且功能、設備易受特定廠商等限制；QR碼唯一缺點是在需要見到Tag才能做辨識讀取，但成



本非常低廉且讀取設備(Reader)大眾化,不限於特定廠商機種,所以在相對之下,QR碼在技術成本及經濟效益均遠比RFID來的好,也就是QR碼的C/P值(Capability/Price)遠高於RFID,因此,在水井量體上附貼標籤並用於協助調查上,建議採用QR碼技術。

但隨著RFID技術的進步、價格下降、感應距離拉長及通用化,在無需見到Tag情況下,目前RFID是否可以成為水井辨識標籤的另一種選擇?以現況而言,提出下列觀點:(1)現有QR碼為被動式,需至水井處看見標籤再讀取資訊,改成長距離RFID標籤(被動式,有效距離20m~40m),利用人員移動或車載移動之RFID Reader,可在水井附近或沿路進行水井搜索。(2)第1點之RFID Reader,若由無人飛行載具(UAV)掛載,搜尋效率及範圍可大為提升。(3)對於未有貼附標籤之水井,可能為「違法水井」(部分為辨識標籤脫落),可透過民眾舉報或縣市政府人員使用APP即時定位、即時拍照及即時記錄,將資訊即時上傳雲端及後台,進行後續處理(置)或管理。因此,本研究認為無線射頻技術(RFID)標籤做為另一種水井辨識標籤,已具備一定的可行性及優勢。

### 三、[事件簿]模組

輿情是指在一定的社會空間內,圍繞中介性社會事件的發生、發展和變化,作為主體的民眾對作為客體的社會管理者及其政治取向產生和持有的社會政治態度。它是較多群眾關於社會中各種現象、問題所表達的信念、態度、意見和情緒等等表現的總和。

針對所開發之資訊系統,可增加[事件簿]模組,提供各種事件之背景說明、位置、評估、衝擊及事後事實陳述等,可以與該系統之資料進行關聯分析,提供主管支援決策之用。

在系統的其他模組中,特別是計量資料與時間序有關之模組,可將[事件簿]模組的相關成果予以(導)入,瞭解或分析事件對計量資料的

相關(關聯)性、影響性、衝擊性及因果等。

在[事件簿]模組下,包含下列兩個子模組,分別是:(1)[事件簿管理]子模組:進行事件之管理維護,提供<新增>、<修改>、<刪除>及<影像上傳>等功能。(2)[事件簿統計分析]子模組:針對所設定之日期/時間起訖範圍,進行各種計量(如:事件分類)之統計量計算及顯示。統計分析項目,包含:(1)事件時間序列圖(TSP)、(2)事件位置空間分布圖、(3)事件衝擊強度空間分布圖及(4)事件次數及百分比圖表。圖6呈現了[事件簿統計分析]子模組之統計量計算及顯示的示意圖,該等事件資訊若與水井資料(如:輔導合法水井口數等)相互比對關聯,將可提供許多實際推動過程的重要訊息。

## 伍、結語

1. 本文描述了基於水井推動實務過程所建構開發之「水井管理資訊網」的系統架構及各項資訊化服務(功能),特別是彰化及雲林兩個縣市配合申報納管、水井複查及輔導合法之完整程序。
2. 透過彰化及雲林之實際推動經驗,各種資訊服務可回饋至資訊平台,系統的優化可使接續推動之縣市在執行上更具效率及便利。
3. 在水井管理方面之智慧化相關技術及方法,本文提出了幾個應用面之探討,包含:交談機器人(ChatBot)、無線射頻技術(RFID)及事件簿分析(如:輿情分析)等,主要目地在於水井智慧化管理的真正推展及提供各種加值服務。

## 參考文獻

1. 經濟部水利署 (2016), 地下水井管理實務推動計畫, 經濟部水利署(委辦機關), 國立成功

- 大學(執行機關)，台北。
2. 經濟部水利署 (2017)，106年度水井管理實務推動計畫，經濟部水利署(委辦機關)，財團法人成大研究發展基金會(執行機關)，台北。
  3. 經濟部水利署 (2018)，107年度水井管理實務推動計畫，經濟部水利署(委辦機關)，亞磊數研工程顧問有限公司(執行機關)，台北。
  4. 經濟部水利署 (2019)，108年度水井管理實務推動計畫，期中報告，經濟部水利署(委辦機關)，亞磊數研工程顧問有限公司(執行機關)，台北。
  5. 李宗仰、朱木壽、鹿悌君、陳建銘、吳嘉恆、林育如 (2016)，條碼與定位在行動化水井管理之評估及應用，第二十屆海峽兩岸水利科技交流研討會，臺灣臺北，共8頁。
  6. 經濟部水利署 (2012)，健全水井管理策略與查察管理技術提昇研究計畫(1/3)，經濟部水利署(委辦機關)，財團法人成大研究發展基金會(執行機關)，台北。
  7. 經濟部水利署 (2013)，健全水井管理策略與查察管理技術提昇研究計畫(2/3)，經濟部水利署(委辦機關)，財團法人成大研究發展基金會(執行機關)，台北。
  8. 經濟部水利署 (2015)，健全水井管理策略與查察管理技術提昇研究計畫(3/3)，經濟部水利署(委辦機關)，財團法人成大研究發展基金會(執行機關)，台北。

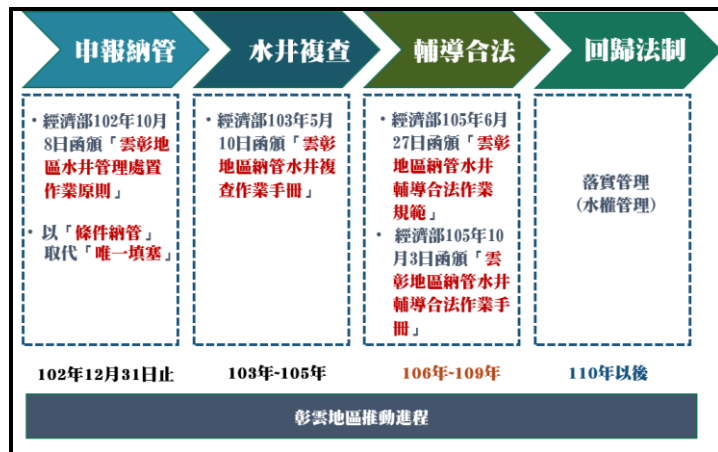


圖1 彰雲地區既有未登記水井管理歷程

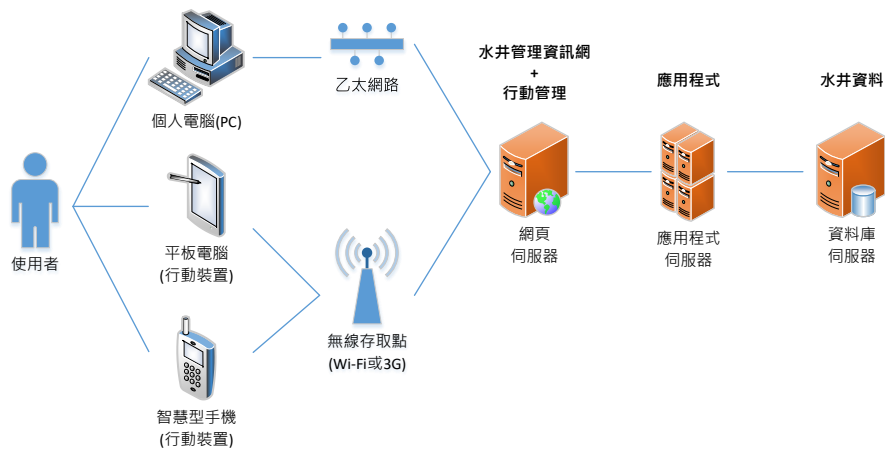


圖2 「水井管理資訊網」之系統架構

# 第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

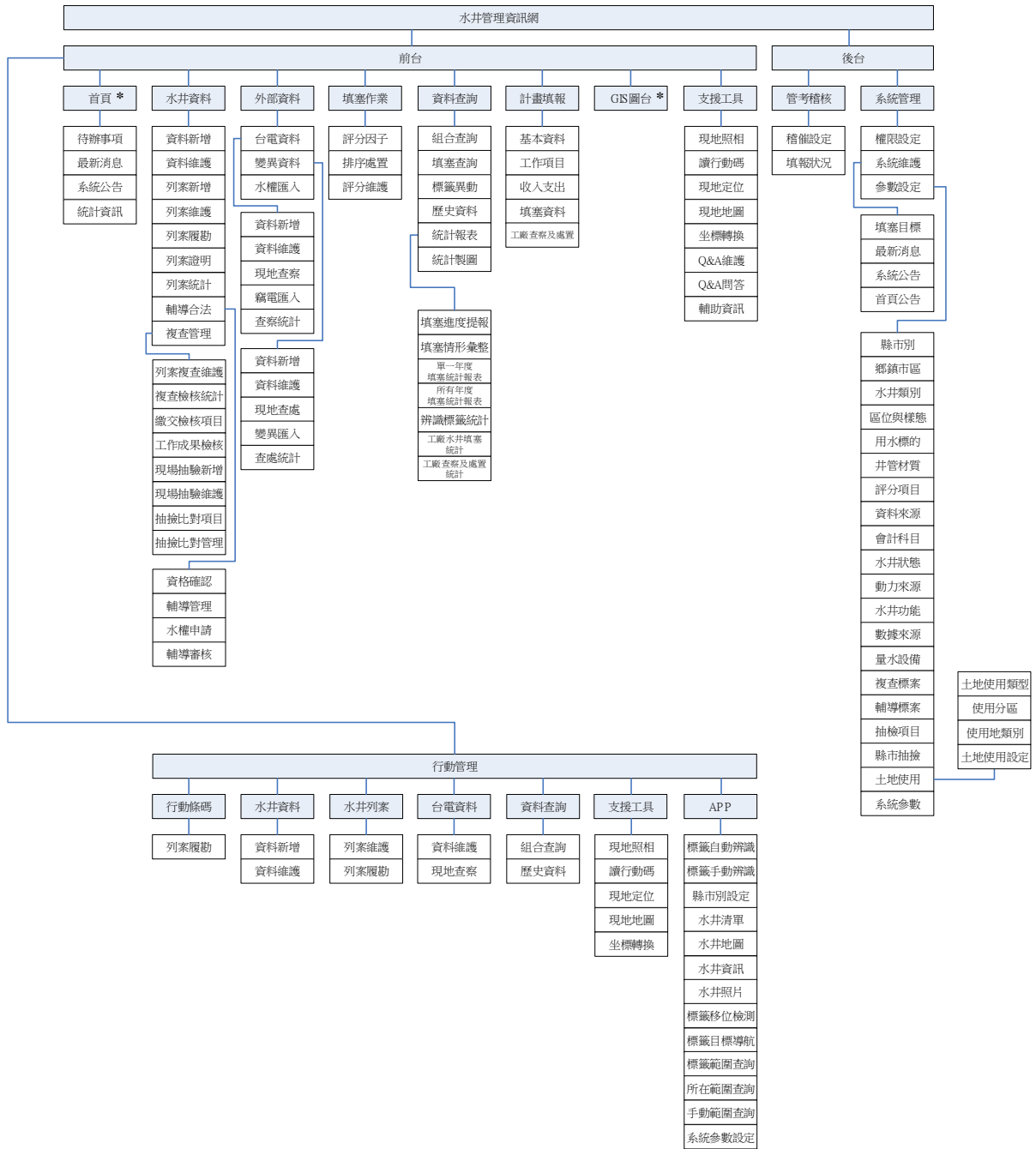
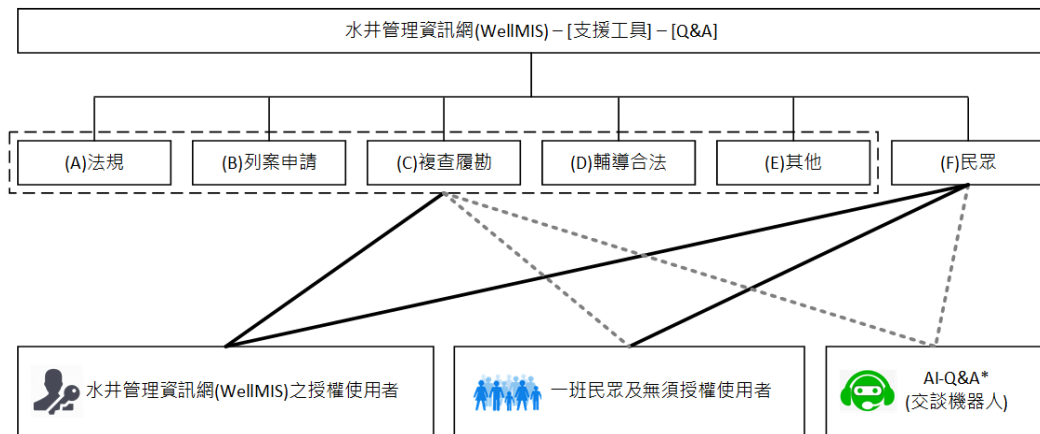


圖3 現行「水井管理資訊網」所提供之模組功能



\* AI-Q&A 為後續發展之預規劃，可透過輸入文字或語音之交談模式，藉由人工智慧(AI)之交談機器人(ChatBot)提供答覆。

圖4 [Q&A]模組之內容分類及使用者架構



圖5 使用DiagFlow建構水井Q&A之交談機器人的範例



(a) 事件時間序列圖

(b) 事件次分類之次數及百分比統計圖

圖6 [事件簿統計分析]子模組之統計量計算及顯示範例(示意圖)

## 議題 D.水利資訊、政策與教育

## 應用衛星影像建立植生判釋模式-以臺北市為例

王泰盛<sup>1</sup>、陳莉<sup>2</sup>、鄭桂英<sup>3</sup>

### 摘要

因遙感探測 (Remote Sensing) 技術的發展，帶動許多專家學者開始廣泛運用此項技術於水體水質之監測、土地利用情形與地表覆蓋物之判釋，而遙測技術是運用搭載於衛星上之感測器進行遙測，搭載於衛星之感測器種類繁多，所以因需求之不同而去選擇相對應之衛星。然而，在土地利用判釋上使用方法多元，且因衛星影像尺度不一，皆有其優缺點，造成不易選擇。因此，本研究導入統計方法，強化判釋能力，以 SPOT-5(含綠光、紅光與近紅外光，與短波紅外光等共 4 個多光譜波段)之 2014 年臺北市衛星影像為例，並於影像上選取 192 個樣本點當作真值資料，因主要為植生判釋，故將水體之資料扣除，再將資料筆數分為 2/3 為訓練樣本與 1/3 為測試樣本，依據其多光譜之反射值來做影像之判釋，且分析方法選用邏輯迴歸(Logistic Regression)，將感測器之多光譜之反射值當作變數，而將取樣點之現地資料作為實際值，並將土地型態分類為植生與非植生，以邏輯迴歸建立預測模式，以誤差矩陣分析影像判釋之精度，結果顯示邏輯迴歸所建立之預測模式，可達到預期之準確度，提供快速地判釋能力。

**關鍵字：**遙感探測、統計方法、植生判釋、邏輯迴歸、誤差矩陣

---

<sup>1</sup> 財團法人農業工程研究中心+副研究員

<sup>2</sup> 中華大學土木工程學系+教授

<sup>3</sup> 財團法人農業工程研究中心+技師

## 公私協力推動機制研究—以區域排水參與式調查為例

顧玉蓉<sup>1</sup>、曾國柱<sup>2</sup>、林政億<sup>3</sup>

### 摘要

台灣地狹人稠，多數區域排水與產業、經濟發展及民眾生活空間重疊範圍高，人類與區域排水環境交互關係頻繁，區域排水的環境及生態品質優劣，端賴公部門數年為週期的調查頻度及密度似顯不足，且近年來民眾自主參與公共事務的風氣亦為世界趨勢，因此本研究以「區域排水情勢調查作業手冊(草案)」內所述及可由民眾操作之「參與式調查」為基礎，選定客雅溪排水、冷水坑溪排水、南屯溪排水、隘寮溪排水及水尾溪排水幹線等5處區域排水為案例，搭配開發之「i水APP」及「區域排水生態及情勢調查資料庫」，結合區域排水周邊民眾、社團及企業嘗試推動「參與式調查」，並據以修正為可執行性較高的參與式調查作業流程與方法，以增加民眾參與區域排水環境管理的實際可介入機制，提高區域排水環境參數的調查頻度與密度，並完成「區域排水參與式調查操作手札、摺頁、影片」，除提昇民眾關心區域排水環境關注度及民眾自主調查能力外，參與社區及團體亦將之納入其原本社團活動中，初步達成公私協力之階段性成果，更有助於未來長期推動區域排水公私協力機制。

**關鍵字：**區域排水、民眾參與、參與式調查、公私協力

---

<sup>1</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所副研究員

<sup>2</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所副所長

<sup>3</sup> 經濟部水利署水利規劃試驗所工程員

## 蒙地卡羅模擬機器學習法在疏濬工程專案預測之應用

林季葦<sup>1</sup>、劉家瑄<sup>2</sup>、洪毓茹<sup>3</sup>、吳益裕<sup>4</sup>、李友平<sup>5</sup>、傅旭昇<sup>6</sup>、周瑞生<sup>7</sup>

### 摘要

政府近年對河川疏濬工程相關議題日漸重視，水利署也致力於掌控各工程計畫執行成效，但由於疏濬工程本身不確定性高且時有工期延誤、預算超額等問題。於訪談過程中，發現疏濬工程承辦人員面臨新標案時，採用的成本及工期估算方式主要為參考去年曾承辦過的案例。但近年因氣候變遷、台灣地震、颱風等天災頻傳，地貌常發生變化，若僅參考去年之案例進行推估，恐無法一併學習多年累積工程案例之態樣，且於工程起始階段，工程資訊定義或有其不確定性及缺漏，易導致最終非預期的成本與工期變異。本研究參詢水利署資深工程人員及學者專家意見後，針對工程起始階段時的初期工期(成本)進行推估，首要蒐集河川局自民國 102 年至 107 年疏濬工程支出標、收入標結算書與驗收證明書等歷史資料數據，接續以專家會議與統計分析，辨識影響疏濬工程工期(成本)因子，初步篩選砂、石、土比例、平均土石價、疏濬總量、工程標總工期與工程標總成本，應用蒙地卡羅模擬技術結合機器學習法，針對疏濬工程工期(成本)構建一具機率資訊的風險量化模型。然，由於有效資料不足，故首先採取統計學的拔靴法處理資料量有限之困境，以可及的歷史工程資料作為母體進行案例重複抽取，擴增資料庫，進行人工智慧建模。在確立最佳化模型後，結合蒙地卡羅模擬法以隨機抽取變數機率方式建構風險量化模型，茲以評估初期工期(成本)風險。最後，為便捷工程管理單位使用簡易性，進而開發一視覺化介面，對工程潛在的完工天數及工程總成本進行機率推算。研究成果可供工程管理單位掌握河川疏濬工程專案成本工期的關鍵影響因子，亦能藉由操作開發之視覺化預測介面，初期快速地量化工程標工期與成本及其對應之風險機率。

**關鍵字：**疏濬工程、採售分離、工期(成本)推估、機器學習、風險評估、預測系統開發

<sup>1</sup> 國立台灣科技大學營建工程系碩士生

<sup>2</sup> 國立台灣科技大學營建工程系碩士生

<sup>3</sup> 國立台灣大學土木工程系博士候選人

<sup>4</sup> 經濟部水利署水利行政組組長

<sup>5</sup> 經濟部水利署第四河川局局長

<sup>6</sup> 元嵩管理顧問股份有限公司顧問

<sup>7</sup> 國立台灣科技大學營建工程系特聘教授 \*通訊作者:jschou@mail.ntust.edu.tw



## 無人機對農漁業之實務應用案例

王泰盛<sup>1</sup>

### 摘要

無人機(UAV)通常指稱無人飛行器，通常使用遙控、導引或自動駕駛來控制。過去多為軍事用途如偵查敵情等，但 UAV 目前發展已由最早從最高端的軍事用途切入到最低端的消費者市場，未來最大的想像空間是商業運用上的發展潛力，故隨著技術進步與商業化，近年 UAV 應用也相當廣泛，如國土探勘、救災應變、資源探勘、環境監控、氣象偵測、物流遞送及商業攝影等市場。目前在臺灣也獲得相當高度的關注，不光是娛樂性質商品市場上，在商業應用中佔有一席之地。隨著 UAV 相關科技的演進，國外已可見到許多於農業生產面的相關應用，其他的應用還有像是消防救災、地景測繪、宅配快遞、森林調查、天然資源探勘、野生動物觀察等等多種應用，仍逐漸有許多創新的應用案例在發生著。因此，本中心也積極發展 UAV 於農漁業之實務應用，如工程紀錄、地形分析、災害探勘與作物判釋等應用，且已有相關成果案例，故本研究以多元案例分析，說明本中心於農漁業應用領域，提供分享參閱。隨著技術成熟，零配件成本降低，以多旋翼 UAV 為主小型民用無人機，已成為市場熱點，於未來本中心將承襲著這些資訊技術之應用成果，更精進 UAV 優勢，提供農漁業之延伸應用發展。

**關鍵字：**無人機、工程紀錄、地形分析、災害探勘、作物判釋

---

<sup>1</sup> 財團法人農業工程研究中心+副研究員

# 臺灣地下水水井與水權管理現況與願景-以彰化、雲林地區為例

林建文<sup>1</sup>、林育如<sup>2</sup>、吳益裕<sup>3</sup>、朱木壽<sup>4</sup>、王聖璋<sup>5</sup>

## 摘要

地下水資源為臺灣重要的用水來源，約佔每年總用水量之 30%，然而地下水因開發便利、成本低廉、操作自主性高，因此，為促進產業發展與經濟成長，臺灣自 1950 年代起引進美國機械鑿井技術，其後臺灣地下水水井數量大量增加，其中又以彰化與雲林地區(以下簡稱彰雲地區)水井數量居全臺之冠，依據水利法規定，地下水屬公有財，其使用須受政府合理的管理與管制，然而前述地下水水井大多未具水權，且確切的水井數量、地點、抽水量難以掌握，已成為地下水及整體水資源運用與管理之重大議題。由於既有但尚無取得水權之水井採取封井填塞做法，恐影響彰雲地區農民生計與農業產量，因此經濟部水利署以「條件納管」取代「唯一填塞」之做法，自 2013 年起推動彰雲地區既有水井申報納管工作，依據統計結果顯示彰雲地區既有水井共約 30 餘萬口之多，並依行政院核定之「雲彰地區地層下陷防治方案暨行動計畫」，規劃於 2020 年前完成納管水井輔導合法作業，然而推動過程面臨相關問題，包括法規制度的競合、縣市政府面對的輿論壓力、各標的用水的合理水權量、及地下水資源供需平衡等問題，皆考驗廣大用水群眾對於政策的接受程度，本文擬彙整各項問題已研議推動的各項因應對策，此外，隨著近年來人工智慧的演算法(Algorithm)、大數據(Big data)、計算力(Computing)快速發展，本文亦將研提未來智慧管理導向之地下水資源管理願景，做為地下水資源管理與運用的施政參考，以落實地下水資源永續利用。

**關鍵字：**納管水井、地下水、水資源管理、輔導合法、水表、簡易型抽水監測設備

---

<sup>1</sup> 業興環境科技股份有限公司計畫經理

<sup>2</sup> 經濟部水利署水利行政組副工程司

<sup>3</sup> 經濟部水利署水利行政組組長

<sup>4</sup> 成功大學水工試驗所研究員

<sup>5</sup> 業興環境科技股份有限公司部門經理

## 解析文獻資料擷取水利深化知識之探討-以 1963 年葛樂禮颱風侵襲石門水庫為例

黃國文<sup>1</sup>、林弘毅<sup>2</sup>、劉志光<sup>3</sup>、李方中<sup>4</sup>、顧雅文<sup>5</sup>、簡佑丞<sup>6</sup>、李協展<sup>7</sup>、  
柯思好<sup>8</sup>、詹明修<sup>9</sup>、林軍廷<sup>10</sup>

### 摘要

水利工程為一長期規劃建設及管理之事業，歷經不同時期統治更迭，常留下數量相當龐大之文獻資料。這些文獻可經由設定各類主題及目的，解析擷取各層面之水利深化知識，並可作為水利工程人員重要參考資料。為水利工程實務教育，提供理論操作及現場資料驗證之完整案例。

本研究以 1963 年葛樂禮颱風侵襲石門水庫為例，進行解析文獻擷取深化知識之探討。1963 年葛樂禮颱風為石門水庫帶來最大 10,200 cms 流量，在後池沖刷出一個投潭深洞，經全面地形測量，得知潭底平均高程約 105 m。比較投潭深洞與水工模型試驗淘坑的地形等高線，發現兩者的水流投射距離、深洞大小與深度，相當吻合。傳統溢洪道投潭水深(D)經驗公式， $D=1/5\sim 1/3H$ ，其中 H 為水庫水位與投潭水位之高差。經葛樂禮颱風現地驗證後，得知石門水庫溢洪道投潭水深  $D=1/3H$ 。葛樂禮颱風來襲，雖為一場難以防治之天災，但也是石門水庫溢洪道投潭水深之全尺寸原型試驗(現地試驗)，讓我們瞭解無論數值模型或物理模型(水工模型)試驗，皆須以現地資料驗證，其成果方為可信之模擬。依據前述經驗，建議於後續水庫安全評估時，考量再次進行水工模型試驗，並以(歷史)文獻所載資訊進行驗證，以因應氣候環境變遷所產生之水文及地文之變異。由葛樂禮颱風侵襲石門水庫之歷史文獻解析案例得知，水利工程籌備興建及管理過程，留下之豐富檔案文獻，經由解析獲得之深化水利知識，可提供水利專業人員作為重要參考資料。

**關鍵字：**文獻、水利深化知識、石門水庫、葛樂禮颱風

---

<sup>1</sup> 國立臺灣大學水工試驗所研究員

<sup>2</sup> 經濟部水利署北區水資源局養護課課長

<sup>3</sup> 經濟部水利署北區水資源局養護課正工程師

<sup>4</sup> 國立臺灣大學水工試驗所專案計畫研究員

<sup>5</sup> 中央研究院台灣史研究所副研究員

<sup>6</sup> 日本東京大學文化財研究所客員研究員

<sup>7</sup> 國立臺灣大學水工試驗所計畫研究專員

<sup>8</sup> 國立臺灣大學水工試驗所計畫研究專員

<sup>9</sup> 國立臺灣大學水工試驗所技士

<sup>10</sup> 國立臺灣大學生物環境系統工程學系技正

## 臺灣西部平原旱田之水理特性觀測與模式參數探討

石欣軒<sup>1</sup>、張向寬<sup>2</sup>、程于芬<sup>3</sup>、賴進松<sup>4</sup>

### 摘要

由於臺灣地區之區域排水的水路系統細緻複雜且水工構造物眾多且地表土地使用之型態多樣，無法透過現今水文水理數值模式中慣用之參數值來正確顯現，為達到提升數值模式模擬結果的精確度，透過單一土地利用觀測區域選定，以求數值模式在進行水文水理分析的單純化。本研究擇定雲林縣臺西鄉火燒牛稠排水之旱田作為觀測區域，其耕種作物與土地利用單純，透過蒐集此實驗區相關水文及地文資料，進行水文與地文資料的觀測並搭配 SOBEK 模式建置，擇定適用於臺灣西部平原旱田之水理適用參數。觀測部份，在旱田區內設置雨量站、水位站、水位流量站及入滲量測站，為得長時間觀測之完整資料，以提供模式之檢定驗證；SOBEK 模式部份，根據現場監測資料探討模式參數本土化數值的適用性，針對旱田特性決定其入滲出流量的逕流曲線值(Runoff Curve Number, CN)進行校驗，並以 2018 年三場降雨事件之現場監測資料率定出旱田模式合理的 CN 適用範圍。

**關鍵字：**實驗基地、水文監測、旱田、SOBEK 水理模式

---

<sup>1</sup> 國立台灣大學氣候天氣災害研究中心 專任助理

<sup>2</sup> 國立台灣大學氣候天氣災害研究中心 助理研究員

<sup>3</sup> 國立台灣大學氣候天氣災害研究中心 專任助理

<sup>4</sup> 國立台灣大學水工試驗所 研究員

## 日本時期臺灣的水利糾紛案例研析

李方中<sup>1</sup>、李協展<sup>2</sup>

### 摘要

臺灣總督府於 1901 年頒布〈臺灣公共埤圳規則〉(16 條)、接著陸續公布〈臺灣公共埤圳規則施行規則取扱手續〉(7 條)、〈臺灣公共埤圳規則施行規則〉(28 條)、〈臺灣公共埤圳聯合規則〉(3 條)，代表著臺灣的水利組織從清代的民間自治性組織，走向官方的公共化與法制化組織。因此水利糾紛的對象從個人對個人，轉變成個人對組織或組織對組織，複雜程度大增；此外，也由於水利糾紛無法私下解決，必須由官方裁決，留下不少私人記載或檔案。故本文擬以私人日記為主軸，如：林獻堂《灌園先生日記》、張麗俊《水竹居主人日記》，並參照水利會及水利工作站(時稱水利組合)的紀錄、法院判決書，考察臺灣在日本時期的水利糾紛案例(時人多稱為「水利妨害」)，藉此了解水利組織公共化和法制化後所帶來的影響。

**關鍵字：**水利糾紛、水利規約、官方態度、公共化、法治化

---

<sup>1</sup> 臺灣大學水工試驗所，專案計畫研究員

<sup>2</sup> 臺灣大學水工試驗所，計畫研究專員

## 以多屬性決策分析方法訂定 提昇企業志工投入公共防洪警報系統之策略

楊嘉麗<sup>1</sup>、黃啟祐<sup>2\*</sup>、謝明昌<sup>3</sup>、楊禮璋<sup>4</sup>、黃偉棣<sup>5</sup>、陳郁甯<sup>6</sup>、林晏竹<sup>7</sup>

### 摘要

近年來，由於全球暖化，氣候變遷日益嚴重，導致極端暴雨與洪水漸增，如何觀察所造成的洪災，並即時因應，成為各國政府亟須解決之問題。目前雖然有衛星與遙測等先進觀測技術，唯以相關技術觀測偏遠山區之洪災，效率遠不如以人員即時觀測為佳。由於公部門之人力資源亟為有限，無法派遣足夠人力擔任相關任務，因此，政府擬招募志工，於偏遠地區就地觀察洪患狀況，並即時回報。雖然個人志工非常熱心，但提供的洪災訊息多元，非常容易造成混亂，因此，由企業志工擔任相關任務，未必可行。企業志工為來自某個公司或組織，志願參與社會，慈善和環境活動的一群員工，為近年興起之概念。由於政府人力資源有限，個人志工整體素質較難控制，導入素質整齊、且較能理解特定任務需求的企業志工，為導入志工制度，準確觀察洪災、即時報告的可行方案。因此，善用企業志工，觀察水患動態，已經成為近年來，公部門收集偏遠山區洪災訊息之新興策略。惟企業志工對於參與洪災的調查與通知的積極度有待提昇，且過去少有研究探討，如何提昇企業志工於洪災觀察與報告之參與度，因此，本研究擬導入多準則決策(Multiple Criteria Decision Making)方法，訂定提昇企業志工投入公共防洪警報系統之策略，以減少洪災所造成的人員傷亡與財產損失。為達此目的，本研究以資訊系統成功模式(information success model)和公私協作模式(public-private partnership, PPP)為理論基礎，定義混合多準則決策分析模型，以推導影響企業志工投入公共防洪警報系統之關鍵要素與要素間之因果關係，並以之定義提昇企業志工投入洪災觀察之策略。本研究將以企業志工參與台灣公部門公共防洪警報系統為例，實證本分析架構之可行性，研究結果可以作為改善政府政策之依據。

**關鍵字：**資訊系統成功模式(information success model)、災害通知系統、洪水災害、公私協作模式(public-private partnership)、多準則決策(Multiple Criteria Decision Making)

---

<sup>1</sup> 國家高速網路與計算中心正工程師  
<sup>2</sup> 國立臺灣師範大學工業教育學系優聘教授  
<sup>3</sup> 經濟部水利署第九河川局局長  
<sup>4</sup> 國立臺灣師範大學工業教育研究所研究生  
<sup>5</sup> 國立臺灣師範大學工業教育研究所研究生  
<sup>6</sup> 國立臺灣師範大學工業教育研究所研究生  
<sup>7</sup> 國立臺灣師範大學工業教育研究所研究生

## 智慧水管理—精進田間灌溉管理

李皓志<sup>1</sup>、周乃昉<sup>2</sup>、羅守枝<sup>3</sup>

### 摘要

受氣候變遷加劇豐枯水文極端趨勢及家用及公共給水用水需求成長等影響，臺灣南部地區於現況及未來均處水資源供需失衡之高風險狀態，常態水情即依賴水利會執行加強灌溉管理節約用水未雨綢繆，嚴重乾旱水情更甚必要時需仰賴農業用水休耕停斷以維持其他用水標的供水穩定。政府單位為因應此問題，積極推動建置智慧灌溉系統，協助水利會執行灌溉運作，可提升灌溉系統水量分配效率及協助現地工作站人員或掌水工省時省力執行分水。智慧灌溉系統包含；1.於灌區小給水路末端設置水位流量感測設備，2.藉傳輸設備與物聯網技術將即時之田間水文、氣候資料傳輸至雲端資料庫，3.建構中央智慧管理平台，依據即時感測資料評估各輪區目前灌溉用水分配是否得宜及可能對應之調整策略，4.藉傳輸設備與物聯網技術將決策建議資訊回饋現地操作人員調整參考，亦可由系統於遠端遙控分水箱等設備，重新調整輪區內水量分配，5.輪區水量分配妥適下若仍有節餘水量，可配合上游幹支分線水門控制將節餘水量蓄存於上游蓄水設施。

嘉南農田水利會現行灌溉制度為精密輪灌制度搭配加強灌溉管理，現行制度實務上經常遭遇困難包括：部分農民未依灌溉制度耕作作物或既使依規定種植水稻但未依灌溉制度規劃之時間插秧種植、兼職農民不易配合精密輪灌配水計畫、政策補貼水租導致部分農民抱持有水儘量引取心態易造成水量分配不均、分水箱設備簡易容易被農民擅自更動調整。水利會現行灌溉系統行之有年，且與農民存在一定程度之配合默契，智慧灌溉系統僅針對現行制度落實不易之處提供協助，透過感測資料提出之決策建議亦可由水利會、掌水工、農民之回饋據以修正調整，將現地管理人員之經驗智慧逐步納入系統。智慧灌溉系統功能包括：田間給水路進出水量監測設備、田間給水路中用來阻水或分流之控制設備、輪區水門自動控制設備。

智慧灌溉系統可協助水利會工作站即時掌握田間水量分配情況，透過機動調整提高田間水量分配效率，解決水頭水尾水量分配不均現象，田間水量分配妥適下可再依現地給水路末端感測資訊調整輪區水門開度，提高水量利用效率。其次遠端可遙控電動化設備可節省工作站人員或掌水工執行給水路水量分配操作所需付出之時間與精力，長期而言工作站人員或掌水工配合智慧灌溉系統可達省時省力目標，提高現地管理作為執行效率。

<sup>1</sup> 國立成功大學水科技中心水資源與規劃管理組組長

<sup>2</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

<sup>3</sup> 經濟部水利署南區水資源局經管課課長

## 智慧水務城市供水管網及時監控系統

# The “smart water” application on urban water network distribution real-time monitoring and control system

Jeffrey C. Y. Cheng Ph.D., P.E<sup>1</sup>

### Abstract

The “smart water systems” have been introduced to China since 2010 summer in EXPO 2010, which could be the leading way to improve the urban water distribution problems. In the network age of “4G” going to be “5G”, leveraging recent advances in technologies surrounding the Internet devices, urban water distribution systems are poised to transform water supplies management by enabling ubiquitous real-time sensing and control.

This paper introduces the methodology of urban water pipeline data, database creation and management, GIS and BIM applications, EPA-NET2 hydraulic and water quality model creation, real-time sensing, and control application. Moreover, combined them into a completed real time urban water distribution monitoring program, the program is not only able to monitor the metro water distribution but also utilize artificial intelligence (AI) and machine learning to predict the potential issues in the system and provide the optimized solution.

***Key word: Smart Water system, water distribution system, Non-Revenue Water (NRW), EPA-NET, urban water database***

---

<sup>1</sup> St. Cloud State University Associate Professor, Hydrologist & Environmental Engineer



# 中华水文化背景下长江委精神的形成、实践及思考

李长德<sup>1</sup>

## 摘要

世代炎黄子孙在从事治水、用水、管水、护水等一系列与水有关的活动中创造了以水为中心的物质和精神的宝贵财富，形成了独特的中华水文化。在深厚中华水文化的滋养下，长江委凝练形成了长江委精神。

本文以长江委精神为例，说明水文化建设对促进水利建设的重要性和巨大价值，深入论述了长江委精神的形成和丰富内涵，并在此基础上提出对长江水文化建设的思考和建议。文章分三部分，第一部分是论述长江委精神是对大禹治水精神的传承，特别是对治水过程中所体现出的高尚的情操、优良的作风、科学的思路的传承，在不同的时代，水利精神呈现出不同的面貌，但其核心内涵始终是一脉相承的。第二部分论述了长江委精神“团结、奉献、科学、创新”的丰富内涵，以团结为基石，凝聚发展合力；以奉献为责任，勤勉无私付出；以科学为生命，求真务实求精；以创新为动力，锐意开拓进取，构成了长江委精神体系。第三部分提出对加强长江水文化建设的思考，围绕新阶段治江工作定位，加强长江水文化建设；围绕服务人水和谐关系构建，加强长江水文化建设；围绕提升流域水利工程文化内涵，加强长江水文化建设；围绕凝聚发展合力，加强长江水文化建设，希望对促进长江水文化建设，促进长江水利发展和保护有所裨益。

**关键字：**长江委精神、传承、弘扬、践行

---

<sup>1</sup> 长江委文明办主任

水是萬物之源，生命因水而誕生，人類的生存、繁衍、發展都离不开水。中華文明幾千年來生生不息、綿延不絕，也是以水為載體和源泉。在歷史的長河中，水潤澤了土地，滋養了文明，但也帶來了種種災難。世世代代炎黃子孫在從事治水、用水、管水、護水等一系列與水有關的活動中創造了以水為中心的物質和精神的寶貴財富，形成了獨特的中華水文化。在深厚中華水文化的滋養下，長江委凝練形成了“團結、奉獻、科學、創新”的長江委精神。長江委精神已深深融入長江委人的血脈和靈魂，成為鼓舞和激勵長江委人攻堅克難、推動長江大保護和服務流域經濟社會發展的強大精神動力。下面，我結合中華水文化和大家一起來探討一下長江委精神的形成、實踐以及思考。

## 壹、長江委精神是對大禹精神的

### 傳承

追溯中國歷史，从古至今，流傳最久遠，影響最深刻的有關治水的事跡便是大禹治水。從水利的角度來看，大禹堪稱中華民族治水的先驅和典範，在漫漫十三年的治水過程中所體現出的高尚的情操、優良的作風、科學的思路，鑄就了千古傳頌、世代傳承的“大禹精神”。正如周恩來所說，“大禹在人類向自然作鬥爭中打響了第一炮，大禹的耐苦奮鬥的精神足資模仿。”時光流轉，朝代更迭，世事變遷，“大禹精神”却從未淹沒在歷史的塵埃之中，而是以其頑強的生命力和非凡的感召力，賦予了一代又一代中華兒女戰勝水患災害的力量，並在此過程中不斷升華、凝練，被賦予更深刻的內涵。可以說，無論是“大禹精神”的本源，還是後世對它的發揚光大，都是中華民族寶貴的精神財富，是中華水文化的精髓。

在中華民族源遠流長的治水實踐中，治水文化的精神不斷傳承、升華，成為中華水文化的精髓。雖然在不同的時代背景下，水利精神呈現出不同的面貌，但溯其本源，其核心內涵始終是一脈相承的。

1995年，長江委人展開了一場有關長江委精神的討論，最終提煉出“團結、奉獻、科學、創新”的長江委精神。“團結”，就是長江委人講大局、識大體，上下拧成一股繩，心往一處想，勁往一處使，充分發揮整體優勢，團結協作，共謀發展。“奉獻”，就是長江委人愛崗敬業，樂於奉獻，不講個人利益，不計個人得失，將畢生精力和聰明才智奉獻給水利事業。“科學”，就是長江委人崇尚科學，重視實踐，勇於和善於總結實踐經驗，從實踐中尋找規律，用科學指導實踐。“創新”，就是長江委人勇於探索，善於思考，不固步自封，不斷充實自己、超越自己，推動技術水平不斷提高。

長江委精神既有鮮明的時代特徵，也是對歷史和傳統的繼承，進一步豐富了“大禹精神”的時代內涵。

## 貳、長江委精神是長期治江實踐

### 的生動反映和體現

近70年來，長江委人肩負起長江代言人的神聖使命，承擔著守護長江的重要職責，始終保持政治堅定、團結奮鬥的品格；始終保持追求真理、崇尚科學的精神；始終保持忠於職守、敢於擔當的操守；始終保持勤於探索、勇於創新的氣魄；始終保持淡泊名利、無私奉獻的情懷，認真履職，為保護好長江、治理好長江，確保一江清水澤被後世、永續利用，為經濟社會長期穩定發展做出了不可磨滅的貢獻。

### 一、以團結為基石，凝聚發展合力

長江委作為水利系統中專業最齊全的單位

之一，分工精細、精誠團結、凝心聚力、追求完美是長江委始終以大氣魄、大手筆立於不敗之地的法寶。

在近 70 年輝煌的治江歷程中，無論是應對 1954 年、1998 年、2016 年、2017 年等歷次大洪水，參加汶川地震、玉樹地震、舟曲泥石流等重大水利應急救災，組織編制流域綜合規劃以及諸多區域規劃、專業規劃和專項規劃，組織申報重大科研項目，還是開展長江規模以上入河排污口現場核實、長江干流岸線保護和利用專項檢查、小型水庫安全度汛專項督查等重要專項行動，長江委人精誠團結，堅決貫徹落實上級各項部署要求；加強頂層設計，積極謀求各方面利益訴求的最大公約數，畫好最大同心圓；理順管理機制，切實解決“統的不够、分的無序”問題，建立權威高效、協調統一、科學規範、運行有效的管理體系；在治江事業中奪取了一次又一次的勝利。

## 二、以奉獻為責任，勤勉無私付出

“上善若水，水善利萬物而不爭”，“江河能成其大，因其善下之”。上乘境界的善如同水一樣，滋潤萬物而不與萬物相爭，停留在最低處，默默無聞。自成立以來，一代又一代長江委人披荊斬棘、風餐露宿，嘔心瀝血，與流域人民一道，逐步構建起長江流域防洪減災體系、水資源綜合利用體系、水資源與水生態環境保護體系和流域綜合管理體系，譜寫了壯麗的治江事業發展篇章，開創了長江治理開發與保護的新紀元。

為了治江事業，長江委人不計得失，立足崗位，無怨無悔，忘我付出。他們中，有的長年跋涉在崇山峻嶺、有的長期堅守在野外一線、有的默默值守在監測站點、有的挑燈夜戰在平凡崗位……無論是老一輩治江人，還是新時代長江委人；無論是院士、大師，還是默默無聞的工程師；無論是科研人員，還是普通職工，都

將個人的潛能發揮到極致。在 98 年抗洪搶險中，長江委幹部職工與沿江廣大軍民一道同洪水展開了艱苦卓絕的殊死搏鬥，以嚴謹負責的科學態度，發揮技術優勢，圓滿地完成了參謀、督導和協調等各項工作任務，經受了重大考驗，為奪取抗洪搶險的全面勝利做出了突出貢獻；汶川“5·12”特大地震發生後，長江委舉全委之力，及時部署，廣泛動員，先後派出 260 餘名專家和工作人員奔赴災區開展工作，他們冒着生命危險，殫精竭慮，晝夜奮戰，連續奮戰一個多月，圓滿完成了四川境內 300 多座震損水庫、13 座水電站、10 餘處堰塞湖及重慶、湖北兩省市震損水利工程的現場查勘和技術指導工作，為消除唐家山堰塞湖險情提供了重要的技術支撐，為奪取唐家山堰塞湖排險避險雙勝利起到了關鍵性的作用，為創造世界上處理大型堰塞湖的奇蹟作出了突出的貢獻，譜寫了中國治水史上新的輝煌；長江委人傑出代表、中國工程院院士鄭守仁，數十年如一日戰鬥在水利建設工地，他年近古稀、身患疾病，但仍堅守在條件艱苦的工地上，被稱為“工地院士”；三峽庫區遷建選址和地質論證的總負責人崔政權大師，跑遍 5600 公里庫區淹沒線附近的山山水水，只為百萬移民找到安穩家園。愛崗敬業、無私奉獻的精神，在長江委人身上得到生動體現。

## 三、以科學為生命，求真務實求精

“繩鋸木斷，水滴石穿”。水是至柔的，然而它以其鍥而不舍、始終如一的行為，從一點一滴的改變開始，最終卻積沙成塔，集腋成裘，塑造了萬里山川。從遠古的大禹治水，到現代的長江三峽、南水北調等一批特大型水利工程的建設，從事水利工作的人員從來都尊重科學，注重技術，講求實效，從來不搞虛假的“花架子”，這是由水自身的特性所決定的，並逐漸成為水文化核心的價值理念之一。作為

流域机构，长江委人始终秉承“科技立委、人才强委”战略，始终坚持实践第一的工作作风。长江委主任林一山非常重视实践，他为长江委科技队伍坚持实践第一的工作方法奠定了坚实的基础。他四次进入川西、青藏高原考察，四攀巴颜喀拉山，六进内蒙。1989年，为了探查西部调水路线，已78岁高龄的他，还先后翻越海拔3500米的三座高山，奔波于高原荒漠。举世瞩目的三峡工程在设计、施工人员的共同努力下，建设质量登上新台阶，单元工程合格率100%，各项数据均在工程设计标准范围之内，“特别是大坝混凝土达到了没有出现一条大的裂缝的理想状况”；南水北调中线工程全力确保工程质量和工程进度，力破膨胀岩、大坝新老混凝土结合等重大技术难题，阶段工程质量评定合格率同样是100%。在雅砻江锦屏一级水电站大坝工程建设过程中，面对世界级工程建设难题和挑战，长江委人以“如履薄冰、如临深渊”的工作态度，严格监理，确保了大坝工程质量，该项目喜获第十五届中国土木工程詹天佑奖。长江委人不唯上、不唯书、不唯洋、只唯实的工作作风，影响了无数水利人，形成了长江委重视实践、重视第一手资料的优良传统，造就了一大批既有理论水平又有实践经验的院士、大师和各类高级技术人才。

#### 四、以创新为动力，锐意开拓进取

“水无常势”。从事水利工作，不用发展的眼光，创新的思想去指导水利工作，而仅仅靠僵化的思想和固化的行为必然会在自然规律和不断发展的实践面前碰的头破血流。无论是古代的都江堰，还是当代的三峡工程、南水北调工程，都是解放思想、开拓创新的杰出典范。长江委有着敢于创新的优良传统。建委之初，长江委人发扬团结一致、开拓创新精神，仅用75天就成功修建了可蓄纳荆江过量洪水54亿立方米的大型水利设施荆江分洪工程，

速度之快令中外水利界赞叹不已，创造了水利工程建设史上的奇迹。1958年组织建设的汉江丹江口水利枢纽，不仅是汉江的重要防洪工程，也奠定了今天南水北调中线工程的水源工程之基；同年在湖北蒲圻（现赤壁市）兴建的陆水水利枢纽（开展三峡试验坝施工及一系列试验），从理论和实践上直接推动了三峡工程的开工兴建等等。

新世纪新阶段，长江委坚持科技立委、技术创新，以“没有最好，只求更好”为目标，把创新热情和科学态度结合起来，富有创造性地做好本职工作。建成当今世界规模最大、功能最全的长江防洪大模型并已投入使用，建立了水利部岩土力学与工程重点实验室等重点实验室和湖北省大坝安全诊断及加固工程技术研究中心，开工建设了水生态与生物资源研究试验基地；攻克了三峡和葛洲坝等工程一系列重大技术难题，水工技术应用达到世界领先水平；承担了一批国家自然科学基金项目、部委重大科技创新项目等，开展了健康长江评价指标体系研究、三峡建成后长江中下游防洪形势和对策研究等一大批治江战略及重大技术问题研究并取得积极进展。

#### 参、加强长江水文化建设的思考

长江水文化是中国水文化的重要组成部分。结合长江委精神的凝练和传承，就加强长江水文化建设提出如下思考。

##### 一、围绕新阶段治江工作定位，加强长江水文化建设

长江水文化的一个核心内容就是教育和引导人们尊重自然规律，这与我们尊重自然规律，确立以人为本、人水和谐的科学治水理念是一致的，与治江工作所遵循的“在保护中发展”的治江总体思路要求是一脉相承的。长江委确定的新阶段治江工作定位是“抓保护促发展、补短板强监管”。在今后的工作中，对于长

江水文化的研究，应着眼新时期治水主要矛盾的变化，切实落实水利改革发展总基调，紧紧围绕治江工作中心任务，不断形成有价值的研究成果，更好凝聚发展共识和发展合力，更好服务“四个长江”建设。

## 二、围绕服务人水和谐关系构建，加强长江水文化建设

呼吁全社会都来进一步关注长江、爱护长江，是加强长江水文化建设一个重要目标。应加大力度宣传国情水情，促进社会公众从文化角度认识人与自然和人与水的关系，努力树立人水和谐的理念，提高全社会的水意识，包括水资源意识、水生态意识、水危机意识、节水意识、政策法规意识等，积极引导流域社会构建人水和谐的生产生活方式，推动流域社会走上生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展之路。

## 三、围绕提升流域水利工程文化内涵，加强长江水文化建设

水利工程，特别是大型水利工程是向社会公众展示水文化的重要窗口。长江流域大型水利工程众多，社会关注度也很高。作为流域管理机构，应当立足自身职能，抓好水利工程建设，突出文化品位。通过研究长江水文化，弘扬长江水文化，在工作中改变一些传统的有局限性的观念，如长期以来，在水利建设上主导思想是工程坚固、实用，而缺乏对工程美感、工程与环境的协调性的追求，缺少高层次的文化品位。通过加强水文化建设，转变思想观念，更加注重水工程的文化内涵和人文色彩，大力提升新建水工程的文化品味，打造富有中国特

色的水利建筑艺术精品，充分展现现代水利治水兴水的人文关怀和文化魅力，努力创造人与水、水与环境、水与文化的和谐统一。

## 四、围绕凝聚发展合力，加强长江水文化建设

文化是一种凝聚力。任何一个行业，如果没有自身行业的文化，没有自身特色的先进思想、精神支柱，就没有团结奋斗的思想基础，难以实现可持续发展。从大禹治水“劳身思虑，过门不入”的千古佳话开始，在中华民族源远流长的治水实践中，治水文化的精神不断传承、升华，成为水文化的精髓。正是这种精神的力量，激励着一代代水利工作者，努力创造水利事业的辉煌。加强长江水文化建设，应大力弘扬“忠诚、干净、担当，科学、求实、创新”的新时代水利精神和“团结、奉献、科学、创新”的长江委精神，引导水利干部职工始终保持精诚团结、与时俱进、开拓进取的精神状态，为实现水利事业新发展而努力奋斗。

在文化与经济和政治相互交融、文化影响力和重要性日益彰显的今天，多元开放、兼容并包的水文化必将为水利事业又好又快发展提供强有力的文化支撑和保障。加强长江水文化建设是一个系统工程，要持续发力、稳步推进，传承长江水文化，推动长江水文化创造性转化和发展，不断增强水利人的文化自信和精神力量，更好推动水利事业发展，造福人民。

## 近現代水利發生、發展及分期

譚徐明<sup>1</sup> 周波<sup>2</sup>

### 摘要

19 世紀 50 年代以來，中國水利面臨前所未有困局，也走到了歷史轉捩點。論文以河工變革為切入點，從社會和自然因素各層面，篩選出具有標誌意義的事件，對中國水利從古代到近現代轉捩點以時間定位。論文指出：河工管理體系是古代國家水行政管理的核心，隨著 20 世紀初期的解體，持續數千年的古代水利遂走向終結。19 世紀中葉至 1920 年代，從江河河口水道管理事權旁落，到長江、黃河、海河、珠江流域機構的成立，這是近代水利發生和發展的基本脈絡。20 世紀 30 年代以統一水政為標誌，形成了國家、地方和流域完善的水利行政體系，完成了現代水利的奠基

**關鍵字** 近代 現代 水利 行政體制 河工 分期

---

<sup>1</sup> 譚徐明，中國水利水电科學研究院副總工，教授級高級工程師。

<sup>2</sup> 周波，中國水利水电科學研究院，高級工程師。

中國水利如何從古代步入近現代？迄今為至水利的歷史分期，多沿用中國通史的時段劃分兼以工程技術為標準。水利是與社會與自然關係密切的人類活動，在技術領域繼承與變革是相輔相成的。現代水泥的高壩未必完全取代砌石的堰壩。在“水”的利用中，不會因為歷史久遠而失去根本的治水之道。技術是日新月異，而科學是超越時代的。本文從 19 世紀 50 年代以來漕運、河工變革為切入點，從社會和江河演變等層面，篩選出具有標誌意義的事件，以期對中國水利古代、近代和現代有清晰的分期節點。

## 壹、1850—1900：漕運末路中的水行政體系解體

元明清大運河即今所稱的大運河或京杭運河，是運河為中樞的水運體系，將黃河、淮河、海河水系諸水聯繫起來，構成以北京為目的地的糧食轉運骨幹水道，河工管理體系關乎漕運暢通，國家水利最重要管理環節。河工管理體系形成於西漢，其時設河堤謁者為中央派出督導黃河堵口或河防大工的官員。唐在中央水部下建都水監，類似今天流域管理管理機構的性質，構架起直屬中央的河工組織管理體系。明改都水監為總理河道衙門，清稱河道總督，簡稱河道，河道下設分司，雍正朝改為既按河道又跨行政區設置的四河道總督，各河道總督直接對皇帝負責，河工管理更為集權。及至清末為直隸（駐天津，管理北京、天津境內運河及永定河）、北河（駐臨清，河北境內運河及海河南系諸河）、東河（駐濟甯，山東、河南境內運河、黃河）、江南（駐淮安清江浦，江蘇境內運河及黃河、淮河）四河道。清代河道下設道-廳-汛三級。河道總督往往領有軍銜，可以調度數省兵役從事河工修守。與河道管理體系並存的是漕運體系，負責漕糧押運，及過閘、淺的交通組織各閘壩啟閉，兩者互為倚重。數省並舉跨行政區域的河工與漕運是數千年集權體制下運轉最為持久的環節。

19 世紀以來黃河進入了大改道的遷徙，幾乎年年都有決溢。不僅黃淮運交匯嚴重淤塞，黃河泛道更在江蘇徐州、宿遷間，山東曹縣、張秋間屢屢沖斷運河。河防大工頻舉，漕運維艱，水利成為舉國關注的大事。至道光時黃淮交匯的清口已經淤廢，原本盱眙淮安段自南而北流的淮河已經難出清口，屢屢在高家堰決口。不得不在每年三月北上行漕時在這段黃沙堆積的水道上，開挖起水塘，一塘一次放入上百隻漕船，然後再開塘，被

稱為“灌塘行運”。如此艱難的過淮穿黃捱至道光六年（1826）不得不試行漕行海運。咸豐元年至同治四年（1851-1864）太平軍攪動半個中國，清廷平定動亂而元氣大傷，河工經費大幅削減。咸豐元年（1851）淮河改道，五年（1855）黃河改道，長江以南漕路中斷。太平軍拒有江南 10 年，江南運河亦中斷，漕糧全部經由海運北上。平定太平軍後，以山東總督丁寶楨為首及山東籍官員建議復黃河故道，重整漕運的議論在同治朝一時成為主流。<sup>[1]</sup>但是，光緒朝以李鴻章為首革新派大臣及江蘇地方官，則要停河運全部海運主張一時也引起朝廷上下關注。兩種主張在清末官場上各執一端不相上下。<sup>[2]</sup>自同治朝起漕運以海運為主，年均運輸量一百至二百萬石間，通過運河的只有長江以北漕米約年十萬石。光緒十三年（1887）黃河在鄭州決口，主流經由賈魯河、渦河入淮。下游北行水道斷流，當年全部停河運。次年，李鴻章主持鄭州堵口，黃河重歸北行水道。十五年（1889），山東巡撫張曜請復河運，此後運量有所增加，最多時達到二十萬石，不及 18 世紀運量的 5%。而維繫這樣的運量已是異常艱辛。工程失修多年，黃河北行後張秋南北運口動輒淤塞。光緒二十年（1894）以來兩江總督張之洞、學士瑞澂等紛紛建言停漕，改以糧折銀。終止漕運可謂動了集權體制的根本，遭到戶部堅決反對。二十四年（1898）慶親王奕劻上奏光緒帝直陳不可，稱河運、海運同停，江南沙船及山東沿河窮民、津通同時失業，變革不可不急；二是北京已經米價高漲，閭閻乏食，停漕將更人心惶惶。由是罷漕呼聲高漲，依然“皆不許，仍照常起運”。<sup>[3]</sup>次年，山東、河北義和團起，阻斷山東以北運河。光緒二十七年（1901）被迫廢糧折銀，糧食調運全歸於商辦。次年撤漕運總督，兩千多年的漕運制度終於走到了盡頭。

清末漕運走向直接關乎以保障運河暢通為目的的河工體系存廢。從中央到地方河工管理制度解體的開始應是咸豐十年（1860）即淮河 10 年、黃河改道 5 年之後，裁江南河道為發端。是年裁江南河道及隸屬淮揚、淮海二道，並淮徐河道改為淮徐揚海兵備道，仍駐徐州，兼管原三道所屬河工。將黃河原徐州至淮安各廳所屬之管河州同、州判、縣丞、主簿、巡檢等一併裁撤，各工段汛地，改由各由所屬州縣官管轄。<sup>[4]</sup>兩年後禦史劉其年更提出了裁河東河道總督，並減河工經費的建議。劉其年直陳河工貪腐，稱：用於常規歲修不過十之一二，其餘皆被河道、廳、

汛及地方截留。太平軍起後，河工之費欠發多年而河道上下官吏習于奢華，工程隳廢卻無人過問，裁東河總督河工改屬地方，可省經費養廉、俸祿並各屬陋規所費數萬之多。<sup>[5]</sup>光緒二十六年（1900），運河沿線義和團起，義和團骨幹成員多是運河沿線社會底層的河工，山東運河不通，河工不舉的數十年，成千上萬的人陷入了困頓，一起事便是破壞極大的暴動。次年裁運河道及河東河道總督，運河、黃河河工改歸地方會辦。<sup>[6]</sup>自是，河運遂廢。運河、黃河、淮河、永定河等由國家經辦的水利事務全部為地方所屬，再無關乎全域。從中央到地方河工管理體系的解體，也是一個時代的終結。

## 貳、河口管理事權旁落與現代水利技術奠基

1911年，在國家積弱，人民極貧中爆發的辛亥革命推翻了滿清，中華民國以共和體制取代了最後一個專制王朝。1914年全國水利局成立。全國水利局並無統領全國水利的事權。江河治理在交通部，農田水利屬防洪屬內務部，而河口浚治在外交部。河口水道為列強所控制，幾乎癱瘓的黃淮運河防體系，以及連續數年的北方大旱和南方江河洪水困境，這樣的情勢決定了從管理機制到技術不同於前朝的水利走向。

### 一、口岸開放與水道事權旁落

19世紀40年代鴉片戰爭以後，國門大開，首先是英國人以水道疏浚治理為由，最早在上海設置河道管理局，水利事權在上海長江口旁落。這一事件對中國現代水利影響一是西方水利工程技術因此進入中國，二是刺激了黃河、淮河、運河治理前期工作開展，河道為管理機構得以重建。

道光二十三年（1843年）《中英五口通商章程》實施後，廈門、上海、寧波、福州、廣州開埠，其後天津、武漢相繼成為通商口岸，口岸大開後，列強各國更圖謀將水事管轄權延伸到內地。為了使吳淞江口外的各國大型商船出入黃浦江，1901年《辛丑合約》中設置黃浦江河道局（1911年改為浚浦局）作為和約附款，河道局決策層由上海道、稅務司、領事團、租界工部局組成的理事會。英國人戴萊克（J.de Rigke）為總工程師，這是握有河工事權的職位，其後總工程師一職都是由外國人把持。名義上河道局是主持長江口至上海水道疏浚工程的機構，實際是擁有長江下游水道的管轄權，並將業務伸向了中游和上游，自光緒六年至宣統三年（1880-1911）浚浦局先後在重慶、宜昌、城陵磯、

沙市、漢口、九江、蕪湖、南京、鎮江、吳淞設置水文或水位站。江河水道管理事權放開後，英法兩國在到長江下游、中游，開展了持續數十年的水道查勘，地形測量，甚至在沿江防洪工程規劃和建設中握有話語權。

浚浦局佔有黃浦江和長河口水道管理事權，是對中國主權的侵犯。光緒三十一年（1905年）中國政府要求收歸國有，1911年黃浦河道局改稱浚浦局，隸屬外交部，卻依然外人把持，新機構的暫行章程第七條規定：“浚浦局許可權之所及，應以黃浦及揚子江向上，海潮之所及。在此界內洪水線間，不得浚浦局之允許，不能自由有所建設影響河流之物”。這一條款激起政商界不滿，1923年內政部提出成立淞滬港務局，收歸浚浦局事權，但是直到1945年抗戰結束後黃浦江河道事權才正式收歸國有。

黃浦河道局的運營機制被沿用到天津海河口。光緒二十三年（1897）北洋大臣王文韶與英法領事、海關、外商僑會共同簽署協定，在天津成立海河工程局，專事渤海大沽至天津海河疏浚和整治，與上海不同的是其時的北洋政府承擔了大部分的工程費用。1929年海河整理委員會成立，接管了海河工程局的疏浚和制導工程建設。董事會成員由內政部、財政部、外交部、建設委員會和河北省和天津市政府，以及海河工程局、領事團構成。這個機構中中方擁有了較多事權，但是總工程師仍是外方承擔。1933年撤海河工程局，海河整理委員會改組為整理海河善後工程處，至此海河口的主權收回。

19世紀末期以來除長江口、海河口外，其他河口的疏浚整治，同樣受制於人。遼河營口港雙檣子整治工程從光緒三十四年（1908）至1920年，12年間先後聘請過英國、美國和日本人主持，經過整治遼河下游從營口港入遼河，可以深入內地50多公里。1914年至1920年廣東珠江口的三角洲疏浚工程，也是控制在西方各國駐廣州領事館及海關手裡，不得不一直聘請上海浚浦局外國人出任總工程師，除疏浚外甚至查收西江、東江防洪工程。

### 二、西風東漸下的技術變革

上海和天津河道局疏浚和河工治理為帶來工程設備和技術，尤其是河道測量、水文測量，這對於有數千年河工治理和管理歷史的中國有極大的衝擊。19世紀中期至20世紀初期無論是清政府，還是民國政府將西方的測量視為水利變革的法寶，引入到長江、黃河、淮河、珠江水道測量中，中國最早的



測量技術人員由此而培養起來，在山東總督吳大澂主持的黃河河南閿鄉至山東利津河口的測繪，就集合了津、滬、閩、粵的人才，光緒十九年（1893）湖廣總督張之洞在長江荊江段測繪是由廣東測繪委員會中的中國人會完成的。

19世紀中葉在黃淮改道、運河中斷、河口制導事權外落的情勢下，大江大河測量和整治成為國人重振水利事業的突破點。1909年江蘇諮議局在淮安清江浦設水利公司，後改稱導淮測量處，2年後完成了江蘇段淮河和運河測量，1911年導淮計畫書發佈。1914年全國水利總局局長張謇與美國紅十字會簽訂2000萬美元借款協定作為導淮工程經費。美國紅十字會派出工程師團考察後提出了運河整治計畫，中方意見不同而不了了之。全國水利局和順直水利委員會於1916年、1917年兩次向美國借款900萬，編制運河治導規劃，美國工程師團再次結隊考查山東、江蘇。然而運河沿線含蘇、皖、魯、冀四省，各省對水利工程有各自利益訴求，國貧民窮，靠借款的運河治導工程且沒有地方政府的配合，在美國工程師團的兩次考查之後，“運河之疏治既成畫餅。”〔7〕1911年以後相繼成立的揚子江水道討論會，順直水利委員會、導淮委員會、廣東治河處無不以水道整治為首要使命。但是，民國之初的中國南北離心，要在互不統屬的各省協同治江治河，同樣更是天方夜譚。

1921年孫中山《實業計畫》發佈，這是一個以國家工業化為目標的國民經濟發展規劃。興建北方、東方、南方三大海港，整治長江、黃河、海河、淮河、珠江、運河六大水道在實業計畫中放在了首要位置。此前50年，在西方列強開放河口海岸的壓力下，水利事權旁落。在全面收回主權的目標下，大江大河水道整治是《實業計畫》的主要部分。彼時美國為首的西方國家在大壩工程技術的突破，開啟了江河水能開發新時代。孫中山《實業計畫》中，水利的內涵在水運、防洪、灌溉之外，開闢出水力發電的新領域。《實業計畫》是中國水利由近代進入現代承前啟後的里程碑，

### 三、水旱災害肆虐下的水行政 體系重構

自19世紀50年代起，縱貫中國東部的大運河淪為區間水道，清道光朝以來導淮大小工程，因為河道總督裁撤而不了了之，彼時從中央到地方水利行政已經全面癱瘓。

黃河下游改道後50年間幾乎沒有寧日。決口位置向上游至開封-鄭州，多次改道再入淮河；下游入海水道更是一年內就有無數次改道。黃泛區範圍北涵蓋華北平原，河務不再聽命中央而分屬河北、河南、山東。淮河改道歸江後，同樣造成了淮揚運河以東裡下河漬澇不消的災區。19世紀以來隨著黃河河道日益淤廢，淮河北支泗沂沭河逐漸演變為獨立水系。在入海水道形成進程中的19世紀後期，泗、沂、沭諸水河失故道，下游入中運河、歸入駱馬湖，出六塘河與黃河故道並流東入海，但有汛期諸河並漲則沭陽、響水間水漫四野。

同樣在這50年大江大河發生了迄今為止為有水文記載以來的大洪水。1860年長江大水，是年夏川江洪峰與漢江相遇，水災範圍自宜賓至宜昌，四川屏山縣城大小船隻皆可行船，湖北宜昌、公安、江陵遭遇淹城之災。宜昌段洪峰流量 $92000\text{s/m}^2$ 。1870年長江上游發生大範圍長時間降雨，幹流宜昌段洪水 $110000\text{s/m}^2$ ，超過長江多年平均4倍，是1954年大水的2倍，水文調查和洪水分析是800年最大。1915年大水珠江同樣是有洪水記錄以來的最大洪水。1915年珠江的西江、北江、東江三江併發洪水，下游三江堤圍大多潰決，多路洪水湧入廣州城，城區最大水深近2米。這場“乙卯年大水”淹沒農田650多萬畝，災民380萬，傷亡人數逾10萬人，廣州城河浮屍千餘。〔8〕自1855年黃河改道以來，同治、光緒兩朝陸續興建的下游堤防到了清代分屬河南、河北、山東地方政府管理，幾乎年年決口，年年堵口。1933年黃河出現了改道以後的最大洪水，黃河陝縣最大流量達到 $23000\text{m}^3/\text{s}$ ，黃河在河南蘭封決口，主流改道南侵，黃泛區面積12000平方公里，陝西、河南、山東、江蘇、安徽67縣受災，死亡人口18300人。決口後的當年冬天，數十萬災民棲息于風天雪地之中。〔9〕

1850至1900年的50年間北方乾旱肆虐，連年災荒。光緒三年、四年（1877-1878）連續兩年陝西、山西、河南大旱。光緒二十六年（1900）陝西、河南大旱，宣統元年（1909）陝西、甘肅大旱，1920至1921年陝西、山西、河南、山東、河北五省大旱。這些特大連年乾旱，加上清末民國初年政府和社會賑災乏力，造成了上千萬的災民和上百萬人口死亡，並因此出現了中國歷史時期最後一次持續數十年數省移民大潮，河南、山東災民主要流向東北，山陝甘三省則遷移至內蒙、新疆，即近代闖關東，走西口災難

性移民。自此北方農村陷入深度貧困而地方灌排工程數十年無人過問。

1927年結束了北京和廣東兩個政府對峙以後，南京成為國民政府的都城。1927年至1931年，3年間江淮和黃河流域嚴重的洪水災害，以及陝西、甘肅連年乾旱，不得不將防洪與灌溉問題提上議事日程。1934年國民政府改全國水災救濟委員會為全國水利委員會，隸屬全國經濟委員會。這個機構將內政部主持的防洪、交通部主持的水道整治，事業部主持的農田水利，統屬各異的各流域委員會悉數歸於全國水利委員會，所有河口海港劃歸交通部。19世紀末期以來，河道管理的亂局終於歸於流域管理的體系內。其實這是中國傳統水行政管理體制的回歸。地方政府建設廳下設置省市縣水利局。並對國家、地方的水利事權、經費規定了各自權責。這次機構改革，稱為“統一水政”。〔10〕30年代統一水政，在行政架構上既有繼承也有變革。全國水利委員會統籌全國水利事業，下設各江河水道委員會，江河水道整治、防洪、水力開發歸於流域機構。各地方水利歸地方管轄，受全國水利委員會的專業監管。40年代全國水利委員會隸屬關係和名稱還有調整，職能和行政體系沒有大的變動了。

20世紀30至40年代，孫中山的《實業計畫》得到實際推進。其時大多數從國外留學歸國技術人才進入政府水行政或建設管理機構中，逐漸取代了外國人對水利工程技術的壟斷專行。國家水利的重點由水道整治進入水力開發，1940年代宜昌三峽水電規劃、長江上游水力資源勘察相繼開展。1915年第一代用庚子賠款官派留學生李儀祉先生，將水利引入大學教育中，創辦了中國第一水工試驗所，中國水利已經全面與世界接軌。1935年李儀祉先生辭去了黃河水利委員會委員長職務，在陝西出任水利局局長，他主持建成了中國第一個現代灌溉工程—涇惠渠，以此為開端現代意義的農田水利工程起步。抗戰期間，全國水利技術人才全部聚集西南，這是現代水利重要試驗階段期，小水電站、小型農田水利工程，以及各江河幹流水文站成倍增加，成為20世紀50年代以後水利發展重要的技術儲備。

### 肆、結語

鴉片戰爭以後中國遭遇2000年未有之大變革，以河工管理為核心的傳統水利首先面臨體制的挑戰。19世紀50年代至20世紀40年代，以黃河、淮河改道為發端，江河形勢、

發生了重要改變，國家水利行政同樣經歷了從古代到近代和現代的轉折。

第一個轉折發生在1901年漕運終止，最後河道總督裁撤。自漢代以來國家水利管理的重要使命始終是確保糧食徵收和漕運暢通。前者以地方行政為依託實現，後者則是直接聽命中央或皇帝本人的河工管理體系實現。儘管1850年黃淮改道前後清口樞紐基本廢棄，太平天國運動中斷了江南運河和淮揚運河十餘年，但是大運河這條南北水路依然維持。漕運制度由清政府宣告終結，這一支撐中樞地區的糧食和其他物資供應制度的消失，標誌著秦漢建立的中央集權政治制度的終結，漕運制度的崩潰，也是國家傳統水行政制度的解體，是古代水利的終結的標誌性事件。

近代水利開端是19世紀中葉在黃淮改道、運河中斷的情勢下，導淮治黃工程開始和重構全國水利管理行政體系。鴉片戰爭以後國門大開，英、法、美順勢而入，以長江、海河、遼河航道整治為由，數十年地形和水文測量，形成了對中國江河越俎代謀之勢。1911年以後相繼成立的揚子江水道討論會，順直水利委員會、導淮委員會、廣東治河處無不以水道整治為首要使命。江河整治與全國水道重構成為成為民國初期水利事業的重點，並對《實業計畫》制訂有深刻的影響。《實業計畫》近代與現代交集的里程碑，此前上溯至19世紀50年代西方列強控制了我國的河口海岸，江河水道事權旁落，此後20世紀20年代以後，河口海岸主權地位被逐漸回歸。

進入現代水利的標誌性事件是1934年“統一水政”。統一水政是中國傳統水行政管理體制的繼承與發展。19世紀中期以來，江河水道、河防管理的亂局，終於歸於流域管理的體系內。30年代至40年代以後，所有江河水道事權歸於中國，而在工程技術領域結束了外人控制的歷史，完成了水利由近代到現代轉折。

### 參考文獻

〔1〕丁寶楨、文彬：同治十一年十一月二十八日奏摺：“仍以堵合銅瓦廂，使河復淮徐故道為正辦。計有四便：不須棄地業民；不煩創築堤岸；廳汛裁撤未久，制尤可考，人才亦尚有遺；漕艘灌塘渡黃，無難徐復舊規。黃既治而運亦可治，斯為一勞永逸之計也。”《再續行水金鑿》黃河卷三〔M〕，湖

北人民出版社，1391~1396 頁。

[2]《清穆宗實錄》卷三五五 [M]，第 7 冊，中華書局，1986 年影印本，696 頁

[3]《再續行水金鑒》運河卷五十六 [M]，第 1769-177 頁。

[4]《清文宗實錄》卷三二二，中華書局影印本，1987，74~775 頁。

[5] 劉其年：同治元年十一月初十奏摺《為河工經費宜加裁減事》，《再續行水金鑒》黃河 [M]，第 1261~1263 頁，湖北人民出版社，2004；《清穆宗實錄》卷四八，中華書局影印本 [M]，1987，1312 頁。

[6]《再續行水金鑒》光緒二十七年，運河 [M] 第 5 冊，湖北人民出版社，2004，

1799 頁。

[7] 李儀祉，五十年來中國之水利，1921。引自《李儀祉水利論著選集》[M]，水利電力出版社，1988 年，第 652 頁

[8] 珠江水利委員會，《珠江水利簡史》，第一章，水利電力出版社 [M]，1990.第 39 頁

[9] 水利部黃河水利委員會，《黃河水利述要》第十章 [M]，水利電力出版社，1982，第 372 頁

[10] 1934，全國經濟委員會：《統一水利行政及事業辦法綱要》，引自李書田《中國水利問題》[M]，商務印書館，1936，第 503-504 頁。

## 都江堰灌溉工程遺產及其可持續發展經驗分析

劉建剛<sup>1</sup>、譚徐明<sup>2</sup>、鄧俊<sup>3</sup>、周波<sup>4</sup>、李雲鵬<sup>5</sup>、關見朝<sup>6</sup>

### 摘要

都江堰灌溉工程遺產是一個無壩引水工程，已有 2200 多年的歷史。它既是一項歷史意義重大的水利工程，在中國統一中發揮了重要作用，又是一項將自然創造的活力與人類工作的科學美完美結合起來的建設工程。它利用不同的地形、水系和水勢，無壩配水、備用河道和排沙，因地制宜，自流灌溉。都江堰的價值和貢獻不僅在於工程作用的發揮，更重要的是，在於傳承千年的治水思想和水文化：“乘勢利導，因時制宜”的治水原則，“三字經”、“八字訣”、“八字格言”的治水規則，構成了都江堰水文化豐富而珍貴的內涵。這是古蜀文化最珍貴的遺產。它不僅影響和啟迪世世代代治水的人們，而且伴隨著工程的持續利用和發展而不斷豐富，給人類社會的可持續發展以新的啟示。

**關鍵字：**都江堰灌溉工程遺產，可持續發展，經驗，無壩引水工程

---

<sup>1</sup> 中國水利水電科學研究院高級工程師

<sup>2</sup> 中國水利水電科學研究院副總工，教授級高級工程師

<sup>3</sup> 中國水利水電科學研究院高級工程師

<sup>4</sup> 中國水利水電科學研究院高級工程師

<sup>5</sup> 中國水利水電科學研究院工程師

<sup>6</sup> 中國水利水電科學研究院高級工程師

## 壹、前言

都江堰渠首樞紐工程位於都江堰市。都江堰水利工程始建於西元前 256 年，2200 多年來對經濟社會發展起到了巨大的支撐作用，留下了豐厚的水文化遺產，是我國水利發展史上的里程碑。都江堰水利工程為成都平原提供了水量豐沛的水量，具有灌溉、防洪、水運之利的溝渠，造就了成都平原“水旱從人，不知饑饉”天府之國的繁盛景象，使成都平原自 2 世紀起成為中國西部的糧倉，並奠定了成都在中國西南的政治、文化和經濟中心地位。

都江堰水利工程建在岷江進入成都平原的起點，岷江是長江一級支流，全長 711km，在成都平原的中游段長 216km，占流程 30%，河道比降從 10‰ 過渡到 1‰，此處岷江坡降 8.2‰ 左右，左岸是二王廟古滑坡帶，離堆是地質構造的產物。

都江堰水利工程現狀灌溉四川省 7 市 38 縣 1065 萬畝農田（見表 1），在四川省國民經濟和社會發展中具有極為重要的地位和作用。

## 貳、沿革

“歷代治蜀者均以治水為重”，在歷朝歷代，都江堰水利工程都在不斷建設和發展。(1) 工程創建及完善期。西元前 256 年蜀郡守李冰興建都江堰水利工程，通過築建魚嘴、開鑿寶瓶口將岷江水引入平原腹地，主要用於防洪、航運和灌溉。西元 662 年飛沙堰建成，標誌著都江堰水利工程渠首的三大主體工程佈局的成型。(2) 面積相對穩定時期。唐宋時期，隨著國運的昌盛，都江堰水利工程的灌溉面積迅速擴大，灌區發展到 12 個縣。到 20 世紀 40 年代末，都江堰水利工程灌溉成都平原 14 個縣的 282 萬畝農田。(3) 高速發展階段。1949 年至今，都江堰水利工程進行了大規模改造，發展迅速，灌溉面積已發展到了現在的 7 市 38 個縣

1065 萬畝。

## 參、灌溉系統

都江堰水利工程是利用自然、完善自然的工程典範，這一延續 2200 多年的灌溉工程代表了古代中國水利工程的卓越技術成就。都江堰水利工程體系是由渠首樞紐、灌區各級引水管道、塘堰和農田等所構成的工程體系。都江堰水利工程體系營造了成都平原河流縱橫、池塘湖沼密佈的水環境。渠首工程體系主要由魚嘴分水堤、飛沙堰溢洪道、寶瓶口進水口三大部分和百丈堤、人字堤等附屬工程構成，是都江堰水利工程的引水樞紐，充分利用了岷江河道地形和河勢，科學地解決了江水分流、排沙、控制進水流量和洩洪等問題，以最少的工程設施取得了多方面的效益。渠首工程一直隨著歷史的發展而改進和完善，見證了都江堰水利工程水利可持續發展的歷史。從魚嘴分水開始，在歷史上均依靠竹籠、木椿修築的導流堤、溢流堰控制水量，沒有一處閘門，卻讓岷江水經過一道道堰分派別流，經過田間地頭、房前屋後滋潤萬物。灌區現有幹渠及分幹渠 111 條，長 3664km；萬畝以上的支渠 260 條，長 3234km；支渠以下的末級管道 34000 餘 km。

## 肆、都江堰管理經驗

歷史時期，多類型的管理使都江堰水利工程的管理有序且充滿活力。都江堰水利工程的管理既有高度集中的行政管理體系，由省、府（道）、縣政府的水利官員形成對渠首、幹渠級河（堰）、支渠級河（堰）水行政管理；也有用水戶參與的鄉村水利組織，負責田間溝渠的管理。這種官方和民間的管理系統，使所有的受益方都負有各自的管理責任或承擔相應的負擔。都江堰水利工程管理制度基本延用至今，當前工程實行統一管理和分級管理、專業管理和群眾管理相結合的管理體制。省水行政主管部門

是都江堰水利工程主管機關。其設立的都江堰水利工程管理局負責都江堰水利工程灌溉工程的統一管理和渠首樞紐的具體管理，灌區各管理處負責職責範圍內的幹渠、分幹渠及各支渠分水樞紐等水利工程的管理。

都江堰上下兩千年的持續運用，衍生出豐富的灌溉文化。這美輪美奐的建築是都江堰的堰廟——二王廟。3世紀時東漢王朝為鼓勵農耕，將李冰作為水神列入國家祀典，在岷江左岸修建了李冰祠。李冰成為蜀地人民世代祭祀的水神。10世紀以後水神廟演變成道教場所，李冰祠改為祭祀李冰和道教二郎神的二王廟。宗教借助灌溉工程擴大自己的影響，而都江堰的管理同樣依靠宗教架起了灌區水管理中官方與民間溝通的橋樑。作為堰廟的二王廟是古代灌區用水戶共同的精神家園。冬春歲修開工和竣工的儀式在這裡舉行，官民在這裡共同祭祀水神李冰，這些儀式和活動凝聚了灌區人民的力量、化解了用水衝突。一年一度的清明開水節是成都平原灌溉的節日。

## 伍、價值和經驗分析

都江堰水利工程體系營造了成都平原河流縱橫，池塘湖沼密佈的水網體系。從魚嘴分水開始，在歷史上均依靠竹籠、木樁修築的導流堤、溢流堰控制水量，沒有一處閘門，卻讓岷江水經過一道道堰分派別流，經過田間地頭、房前屋後。這一延續2200多年的灌溉工程代表了古代中國水利工程的卓越技術成就。

### 一、在工程設計、建設技術、工程規模等方面領先於時代

都江堰水利工程的規劃、設計和施工都具有比較好的科學性和創造性。渠首工程體系主要由魚嘴分水堤、飛沙堰溢洪道、寶瓶口進水口三大部分和百丈堤、人字堤等附屬工程構成，是都江堰水利工程的引水樞紐，“乘勢利導、因時制宜”，充分利用了岷江河道地形和河勢，

科學地解決了江水分流、排沙、水運和洩洪等問題，體現了人與自然和諧共處的發展理念。

### 二、獨特且具有建設性意義

都江堰水利工程始建於西元前256年，2200多年來對經濟社會發展起到了巨大的支撐作用，留下了豐厚的水文化遺產，是我國水利發展史上的里程碑。都江堰水利工程為成都平原提供了水量豐沛的人工水道，具有灌溉、水運之利的溝渠造就了成都平原“水旱從人，不知饑饉”天府之國的繁盛景象，使成都平原自2世紀起成為中國西部的糧倉，並奠定了成都在中國西南的政治、文化和經濟中心地位。戰國末年都江堰水利工程的初創為岷江水利的發展奠定了良好的基礎。西漢以來都江堰灌區迅速發展，渠首逐漸完善，灌溉管道向成都平原迅速延伸，形成了縱橫平原的河流。灌區類似天然河流的水道，為成都平原不僅提供了灌溉，也帶來了行洪和舟楫之利。發達的區域經濟奠定了成都平原在祖國西南政治文化經濟的中心地位。三國至後唐五代十國，成都五次成為割據政權的中心，與動亂的中原相比，富庶的成都平原充滿了勃勃生氣，這片樂土由此而享有“天府之國”的美譽。

### 三、是可持續性運營管理的經典範例

都江堰水利工程採用的官方和民間結合的管理機制和歲修制度沿用至今，保障了灌區的可持續發展，為當代水利工程管理提供了歷史借鑒。都江堰水利工程治水技術和制度的不斷發展，形成了獨具特色的堰工技術和歲修制度，總結出的“深淘灘低作堰”的治水原則和治水理念，孕育出極具魅力、內涵豐富的都江堰水文化。都江堰水利工程的管理既有高度集中的行政管理體系，由省、府（道）、縣政府的水利官員形成對渠首、幹渠級河（堰）、支渠級河（堰）水行政管理；也有用水戶參與的鄉村水利組織，負責田間溝渠的管理。這種官方和民間的管理系統，使所有的受益方都負有各自的管理責任

或承擔相應的負擔，同時多類型的管理使都江堰水利工程的管理有序且充滿活力。

## 陸、效益分析

都江堰水利工程是世界上持續運用的有2200多年歷史的水利工程，它既是在中國統一事業中發揮過作用的有著悠久歷史意義的水利工程，又是一座生機勃勃科學美妙的自然造化與人工斧鑿渾然天成的建築物；其巨大效益一直延續至今，是對環境有良好作用的人與自然和諧的水利工程的典範。都江堰水利工程的成效主要包括以下幾個方面。

### 一、生產效益

都江堰水利工程是全國第一個灌溉面積突破一千萬畝的特大型灌區，目前，灌區已發展為一個由渠首水利工程樞紐、灌區各級引水管道、各類工程建築物和大中小型水庫、塘堰等構成的巨大工程系統，形成了都江堰水利工程特色的引、蓄、堤相結合的工程格局。經過歷代特別是1949年後的建設發展，都江堰水利工程已發展為引蓄結合、配套完善的特大型水利工程體系。灌區現有幹渠及分幹渠111條，長3664km；萬畝以上的支渠260條，長3234km；支渠以下的末級管道34000餘km。現有大型水庫3座，中型水庫21座，加上小型水庫和其他小微型蓄水設施，總蓄水量為24.71億m<sup>3</sup>。目前，都江堰水利工程幅員面積2.32萬km<sup>2</sup>，灌溉四川省7市38市（縣、區）的1065萬畝農田，同時兼顧提供生活用水、生產用水和生態用水。都江堰水利工程以占全省不到5%的土地面積，覆蓋了全省20.7%的有效灌面，糧食總產量、農業總產值占全省的27.1%和26.4%，都江堰水利工程已成為四川省經濟社會最繁榮發達的腹心地區。

### 二、社會經濟效益

都江堰水利工程除了保障灌區農業用水外，還具有城鎮工業和生活用水、防洪、發電、水

產、養殖、種植、旅遊、環保等多目標綜合服務功能，在四川省國民經濟和社會發展中具有極為重要的地位和作用。都江堰水利工程人口占全省的27.5%，工業總值占全省的44.6%，國民生產總值占全省的44.3%。全省經濟十強縣中有九個位於都江堰水利工程。都江堰水利工程為四川糧食安全、經濟發展和社會穩定發揮了極為重要的作用。都江堰水利工程是四川省國民經濟發展不可替代的水利基礎設施。

### 三、生態效益

古代都江堰水利工程的堰或河既是灌溉輸水渠、排水渠也是水路通道，它們塑造了成都平原河流，滿足成都及周邊14個縣城及集鎮供水、水運、環境和防洪的多種需求，並對城市規劃和發展有潛在的影響，如成都以河流為骨架的街區格局便是例證。都江堰水利工程水系為成都平原提供了品質較高的景觀環境、人居環境和生態環境。隨著城市化進展，今後都江堰水利工程的工程效益和社會效益應在城市供水和環境保障方面有更大的發揮。

都江堰水利工程的建成從根本上改善了成都平原的城鄉生態環境。自唐以後，歷代先後修建的摩訶池、金水河、禦河、府河、磨底河、清水河等構成了成都市發達的城市水系，“釜者汲，垢者沐，道渴者飲，纜者泔澠，園者灌。濯錦之官，浣花之妹，雜選而至，歡聲萬喙，莫不鼓舞”，市內有各類橋樑192座。西蜀大地在都江堰水利工程的潤澤下，林竹修茂、河流縱橫、湖泊星羅、堰塘棋布，呈現出“水綠天青不起塵，風光和暖勝三秦”的美麗景象。

## 柒、結論

都江堰灌溉系統是世界上歷史最悠久的無壩引水工程。工程科學解決了灌溉、防洪、供水等問題，是人與自然和諧共存、人類可持續發展的工程範式，是典型的生態水利工程。它既是一項歷史意義重大的水利工程，在中國統一

中發揮了重要作用；又是一項將自然與人類活動的科學、完美結合起來的建設工程。都江堰灌溉遺產集防洪、灌溉、供水等功能於一體，長期的歷史中保持著它的有效性，其巨大的利益一直持續到今天，是水利工程的一個優秀範例，對環境有良好的影響，實現人與自然的和諧。

### 參考文獻

1. 譚徐明. 都江堰水利工程史. 中國水利水電出版社. 2009
2. 譚徐明. 論宋以前都江堰水利工程的演進. 水利史研究室成立五十周年紀念學術論文集. 北京：水利電力出版社，1986.
3. (北魏) 酈道元. 水經注. 巴蜀書社，1985.
4. 宋史·河渠志五. 二十五史河渠志注釋本.
5. 元史·河渠志. 二十五史河渠志注釋本.
6. 全國經濟委員會報告彙編. 全國經濟委員會叢刊. 第 30 種.
7. 都江堰水利工程管理局外江處處志. 1983.
8. 四川省政府訓令. 建四字 12659 號. 1948.
9. 民國二十八年都江堰水利工程堰工討論會記錄. 四川省都江堰水利工程管理局檔案館藏.
10. (清) 丁寶楨. 丁文誠公奏稿.
11. 四川省水利局都江堰水利工程流域測量隊. 堰工調查表.
12. (清) 王來通. 灌江備考· 天時地利堰務說.
13. 都江堰水利工程管理處. 都江堰水利工程的過去與現在. 1963.
14. (清) 楊燮, 錦城竹枝詞. 引自：袁庭棟. 巴蜀文化. 瀋陽：遼寧教育出版社，1998.
15. 周鬱如. 都江堰水利工程灌溉區域及水量之分配調節述要. 存都江堰水利工程管理局檔案室. 1936.
16. 四川省水利局. 辦理救濟都江堰水利工程內外江尾堰缺水經過情形報告. 存都江堰水利工程管理局檔案室. 1936.
17. 禹貢. 十三經注疏. 中華書局影印本，1979.
18. 《華陽國志·蜀志》，四部叢刊初編本
19. (西漢) 揚雄. 蜀王本紀. 引自 (清) 嚴可均校輯. 全上古三代秦漢三國六朝文·全漢文. 中華書局，1958.
20. 趙世暹. 李冰守蜀的年代問題一校正《華陽國志》誤字所造成的混亂. 水利史研究室成立五十周年學術論文集. 水利電力出版社，1986.

### 圖與表



圖 1 都江堰渠首位置示意圖



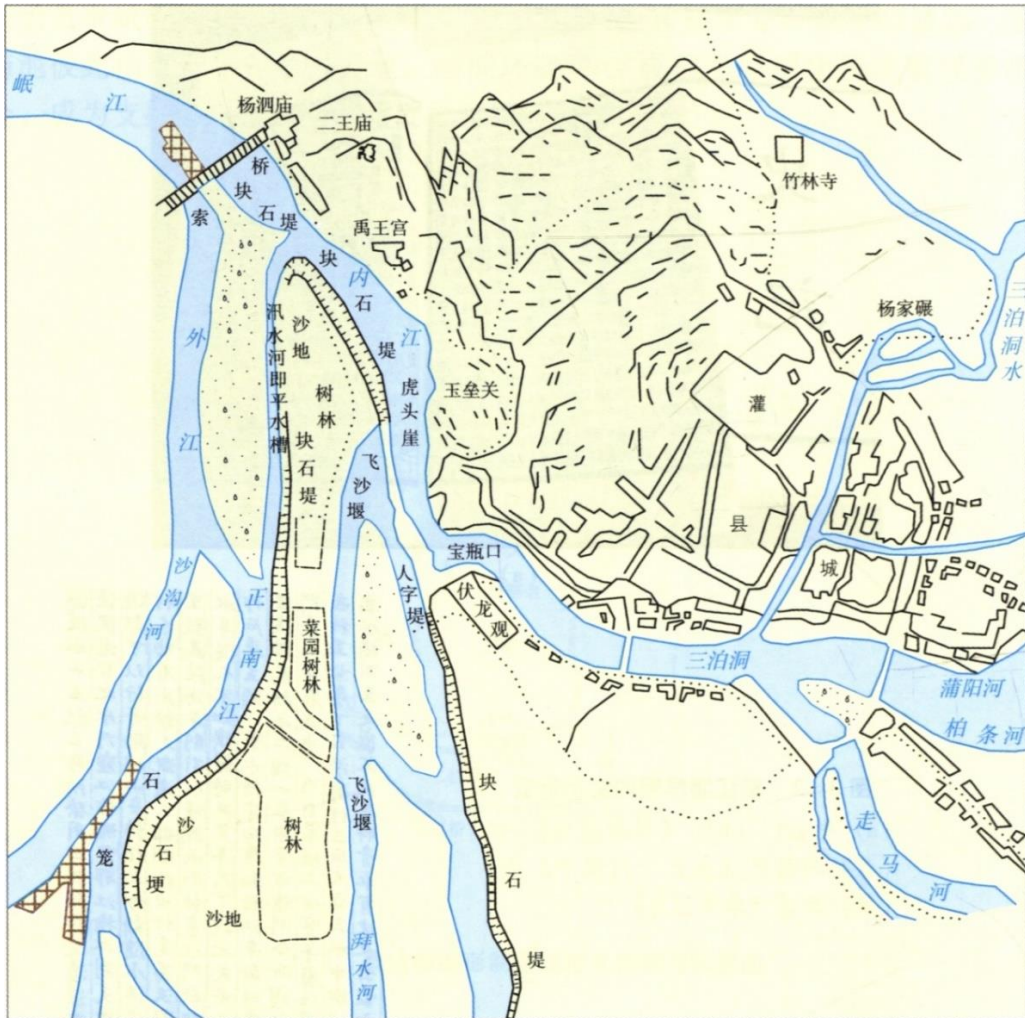


圖 2 1910 年的都江堰水利工程渠首樞紐

第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

表 1 都江堰水利工程灌溉範圍

城市	區(市)縣
成都市	都江堰水利工程、郫縣、彭州、溫江、雙流、天府新區、新津、龍泉驛區、新都、青白江、金堂、崇州、大邑、邛崃、簡陽市、武侯區、青羊區、金牛區、錦江區、成華區、高新區
眉山市	彭山、仁壽、青神、東坡區
德陽市	廣漢市、什邡市、綿竹市、旌陽區、羅江縣、中江縣
綿陽市	安縣、涪城區、三台縣
遂寧市	射洪縣、大英縣
資陽市	雁江區
樂山市	井研縣

表 2 灌溉遺產清單

遺產	名稱	數量	地點
渠首樞紐工程	魚嘴	1	都江堰市
	飛沙堰	1	都江堰市
	寶瓶口	1	都江堰市
幹渠及分幹渠	合計	111	
	蒲陽河	1	都江堰市
	柏條河	1	都江堰市
	走馬河	1	都江堰市
	江安省	1	都江堰市
	沙溝河	1	都江堰市
	黑石河	1	都江堰市
支渠		260	
支渠以下各級末級管道		若干	
支渠及以下管道重要工程	楊柳河	1	都江堰市
	白馬堰	1	都江堰市
	楊柳河	1	溫江區
	大朗堰	1	溫江區、雙流區、新津縣
	古佛堰	1	雙流、彭山、仁壽
	九裡堤	1	金牛區
	朱李火堰	1	什邡縣
	千功堰	1	崇州市、大邑縣、新津縣、邛崃縣
	火燒堰	1	高新區
	諸葛井	1	青白江區
	三泊洞	1	都江堰市
祭祀建築	二王廟	1	都江堰市
	伏龍觀	1	都江堰市
	水利府	1	

## 鄂爾多斯市黃河南岸灌區農業水價改革實例分析

李和平<sup>1</sup>、鄭和祥<sup>1</sup>、劉海全<sup>2</sup>、郝海榮<sup>2</sup>

### 摘要

為構建灌區長效良性運行機制，形成可持續發展的灌區農業水價秩序，亟需推進農業水價改革；以內蒙古鄂爾多斯市黃河南岸灌區農業水價改革為例分析，其主要改革措施包括：確定農業初始水權、構建農業水價形成機制、建立農業用水精準補貼和節水獎勵機制以及健全完善灌區量水設施。通過確定農業初始水權為灌區灌溉管理奠定堅實的基礎，有助於節水灌溉的推廣應用，也為灌區下一步的水權轉換提供了根據；在農業供水成本測算的基礎上確定供水價格，並在此基礎上引入超定額累進加價制度，是推進農業水價改革的前提；在明確精準補貼適用範圍的同時，形成穩定的精準補貼資金來源和補貼標準，從而建立精準補貼機制，有助於農業水價改革的推行。

**關鍵字：**灌區；農業水價改革；初始水權；節水獎勵機制

---

1 水利部 牧區水利科學研究所 副所長 教授級高級工程師

1 水利部 牧區水利科學研究所 副主任 高級工程師

2 杭錦旗水務和水土保持局 局長 工程師

2 杭錦旗水務和水土保持局 總工 工程師

## 壹、引言

農業是用水大戶，也是節水潛力所在。長期以來，我國農田水利基礎設施薄弱，運行維護經費不足，農業用水管理不到位，農業水價形成機制不健全，價格水準總體偏低，不能有效反映水資源稀缺程度和生態環境成本；價格杠杆促進節水的作用未得到有效發揮，不僅造成農業用水方式粗放，而且難以保障農田水利工程良性運行。農業水價綜合改革是農業節水工作的“牛鼻子”，事關農業可持續發展和國家水安全。加快推進農業水價綜合改革，建立健全農業水價形成機制，提高農業用水效率，努力緩解我國日益尖銳的水資源供需矛盾，十分必要而緊迫。

2016年1月國務院辦公廳印發《關於推進農業水價綜合改革的意見》，推進農業水價綜合改革有序開展；2017年中央1號檔明確指出：全面推進農業水價綜合改革，加快建立合理水價形成機制和節水激勵機制；2017年6月國家發展改革委、財政部、水利部、農業部、國土資源部等五部門印發《關於扎實推進農業水價綜合改革的通知》，扎實推進農業水價綜合改革。

推進大中型灌區農業水價綜合改革，構建農田水利良性運行的長效機制，直接關係到國家糧食安全、農民增收減支、節水型社會建設以及水管體制改革的大局。以鄂爾多斯市杭錦旗黃河南岸灌區農業水價綜合改革為例進行分析，該灌區作為內蒙古重要的引黃自流灌區，高效節水灌溉面積44.39萬畝，屬於大型灌區。隨著黃河來水量的不斷減少，水資源的短缺已嚴重影響灌區人民生活 and 社會經濟的發展；與此同時，杭錦旗作為傳統的農業旗縣，2015-2016年農業用水占全旗用水總量的60%以上，目前灌區“跑、冒、滴、漏”的問題較為突出，水資源短缺和浪費的並存現象已成為杭錦旗黃河南岸灌區實現可持續發展的基礎性制約因素。農業價格綜合改革是一項系統工程，涉及水管體制改革、政府投入政策調整、農民仲介組織發育等方方面面，需要統籌規劃，扎實推進，協調運作。在當前擴大內需和進行農業綜合改革的大背景下，積極穩妥地推進農業水利工程供水價格綜合配套改革，不僅是鞏固農業基礎、建設社會主義新農村的迫切需要，同時也是有效地利用價格杠杆調節灌區、協會、農民之間利益關係和實現科學管水、用水的治本之策，符合市場經濟規律和各方長遠根本利益。

本文結合2017年杭錦旗農業水價綜合改革實施方案的具體要求，通過總結多年來杭錦旗灌區運行的成功經驗和方法，編制完成了《杭

錦旗農業水價綜合改革實施方案》，該方案獲相關部門批復，並被杭錦旗人民政府採納。

## 貳、研究區概況

### 一、研究區概況

杭錦旗黃河南岸灌區位於鄂爾多斯高原西北部，東西長197km，南北寬166km，總土地面積18914.5km<sup>2</sup>；東與達拉特旗、東勝區相鄰，西南與烏審旗、杭錦旗接壤，北部與巴彥淖爾市隔黃河相望；該區域是一個以蒙古族為主體、漢族占多數的少數民族地區。

研究區屬於中溫帶大陸性氣候，常年乾少雨，冬季漫長而寒冷，夏季溫和而短促。春秋氣溫變化劇烈，春季風沙天氣多，氣候乾燥，蒸發量大，日照充足。年平均氣溫為5.6℃，年際氣溫變動在4.7~7.0℃，變幅為2.5℃。1月平均氣溫-18.0℃，極端最低氣溫為-32.1℃。7月平均氣溫為27.5℃，極端最高氣溫為38.7℃，積溫為2725.9℃。年平均日照時數3129.5h，全年無霜期約140d，多年土壤最大凍結深度1.5m。多年平均降水量為281.2mm，降水集中在6~8月份，占全年降水量的68%，由於降水年際變率大，多數時間處於乾旱狀態。年平均蒸發量為2630.0mm，是年平均降水量的9.4倍，由於年降水量少且蒸發量大，造成乾旱。多年平均風速4.1m/s，冬春兩季為大風季節，且攜沙量大，最大風速24.3m/s，風力強，沙塵天氣多，每年沙暴日數在21~55d之間。土壤為灌淤潮土和風沙土；種植作物主要為玉米和葵花。

### 二、研究區工程情況

研究區位於鄂爾多斯市黃河南岸灌區，具體位置位於杭錦旗建設灌域的吉日嘎朗圖鎮和昌漢白灌域的巴拉貢鎮，涉及8個村，分別是吉日嘎朗圖鎮的麻迷圖村、巴音村和光茂村；巴拉貢鎮的昌漢白村、興建村、朝凱村、山灣村和巴音格村。項目區主要種植作物為玉米，利用黃河水進行渠灌、滴灌，灌水渠系為幹渠、分幹渠、支渠、斗渠和農渠5級管道，專案區管道已全部襯砌。

## 參、改革的必要性和影響分析

### 一、改革的必要性

1. 推進農業水價綜合改革有利於形成正常的農業水利工程水價秩序，提高水資源的承載能力，緩解水資源短缺的矛盾，從而保護供用雙方的合法權益，合理地利用和保護水資源，推進節水型社會建設；有利於解決灌區渠系上游大水漫灌與下游缺水矛盾，減少因農民爭水而造成的水事糾紛；有利於多元化籌措農田水利工程建設資金，減輕各級政府財政壓力，進一步改善農業生產條件，迅速改變農業的弱質

產業地位，穩步增加農民收入。

2. 推進農業水價綜合改革，有利於構建成本約束機制，促進杭錦旗黃河灌排管理局加強內部管理，提高水費收繳率，解決水費收繳難的問題。同時，通過擴大有效灌溉面積，提高水資源利用率，實現節水增效，增強企業自我管理、自我積累、自我發展的能力，從而更好地為農業用水需求提供服務，最終的受益者應該還是農民。反之，如果不及時進行水價綜合改革，管理局長期低於成本運行，勢必導致管理局陷入發展困境，更談不上對水利工程的維修、更新和改造，以至於影響管理局的正常供水，那麼受害的不只是管理局，最終農民也是間接的受害者。

3. 推進農業水價綜合改革，有利於農民節水減支，減輕農民負擔。通過水價改革，真正做到放水到田、按量計征水費，客觀上可以調動農民節水的積極性，並減輕農民的直接負擔。實行市場化運作後，管理局作為水商品的經營主體，理應承擔起水利工程改造和管護責任，將減少農民在水利工程上的投工投勞，減輕農民的間接負擔。另外，水價綜合改革還能促進水資源的合理利用，增加有效灌溉面積，提高農田灌溉的保障率，減輕農民額外隱性負擔。

通過調查，近年來，杭錦旗在水利工程建設與管理及產權劃分、水價改革試點等方面做出了大量工作，取得了初步成效，為全面開展農業水價綜合改革積累了一定的經驗，這在一定程度上也會保證農業水價綜合改革的順利實施。

## 二、農業水價綜合改革的影響

### (一) 實施改革對農業的影響

近年來，黨中央、國務院高度重視糧食安全問題，支持糧食發展的政策力度不斷加大，糧食穩定發展的政策框架基本建立，農民種糧積極性大大提高，糧食生產出現重要轉機，基本實現了糧食供求的緊平衡，但這一基礎並不鞏固。針對杭錦旗黃河南岸灌區而言，耕地面積不穩定、農業灌溉水資源的日益趨緊、農業基礎條件較差、提高農業綜合生產能力等均是當前灌區農業發展面臨的難題。這會極大促進了農業水價綜合改革的步伐，特別是靠近庫布齊沙漠周邊的農業生產的基礎條件比較薄弱，自然氣候對糧食生產的影響極大。通過農業水價綜合改革，發展有效灌溉面積，改善農田灌排條件，可為深化灌區管理體制和運行機制改革，提高農業綜合生產能力，減少極端氣候對糧食生產的影響，增加水土資源的產出效率和效益。

### (二) 實施改革對經濟的影響

農業水價改革和末級渠系改造涉及農業種

植效益和灌溉成本，關係農民增收減負大局，事關農民切身利益。由於灌溉工程老化失修，渠系水利用係數低，輸水灌溉過程中水量損失較為嚴重。同時，由於末級渠系水價沒有納入政府管理範圍，一些地方搭車收費、截留挪用、拖欠水費的問題較為突出。較高的水費和末級渠系不配套造成的供水保證率不高，直接涉及農業的支出，使農民對水費收取產生誤解。要解決這一問題，就得從“增收”和“減支”兩個方面來入手。所謂“增收”就是通過改善灌溉條件，提高單位耕地的種植效益，讓農作物生長需要灌溉時能澆上水，澆夠水，可以有效提高農民種糧收益。所謂“減支”就是降低農業用水成本，減輕農民負擔。而要達到這兩方面的目的，就必須推進農業水價綜合改革，加大財政對農業灌溉的支持力度，加快農田水利建設步伐。通過農業水價綜合改革，推行農業供水終端水價，避免多頭收費現象，使農民心中有數，放心用水，並可以起到遏制亂加價、隨意搭車收費的作用，使水費收取工作形成一種良性機制，有利於水利工程可持續運行，提高灌溉服務品質，經濟效益顯著。

### (三) 實施改革對社會的影響

農業水價綜合改革是改革農業供水管理體制，保證工程良性運行，促進農業節水增效，保障國家糧食安全的必然選擇。通過農業水價綜合改革，建立農民用戶協會，並依法登記，使農民用戶協會成為能夠獨立承擔民事責任的民事主體；通過建立完善的規章制度來規範用水戶的供用水行為，並全面培訓來提高協會骨幹的綜合管理能力和全體用水戶的民主意識、守法意識、參與意識、節水意識，使農民用戶協會成為灌區末級渠系工程產權主體、投入主體和運行管理主體，最終實現農民用戶自治，充分發揮了用水戶協會在灌區運行管理中的作用，促進了節水型社會的建立。

## 肆、改革措施

### 一、農業初始水權計算

隨著黃河南岸灌區水權轉換工程的建設，各灌域的水權指標也發生了變化，如何保障水權轉換後實現總灌溉量控制、定額管理，確保長期有效運行，必須制定科學合理的水權分配方案，並嚴格執行，本次專案區水權分配根據水權轉換節水改造項目後用水定額，結合實際用水量，最終確定專案區農業初始水權。

本次項目區總面積 5419.7hm<sup>2</sup>，其中建設灌域 3263.2hm<sup>2</sup>，昌漢白灌域 2156.5hm<sup>2</sup>；按灌溉形式分渠灌面積 2606.5hm<sup>2</sup>，滴灌面積 2813.2hm<sup>2</sup>，見表 3。建設灌域和昌漢白灌域的灌溉定額和灌溉水利用係數見表 1 和 2，各灌

區不同灌溉方式下的灌溉定額、管道水利用係數、灌溉水利用係數等主要參數與內蒙古自治區水利勘測設計院組織編制的《鄂爾多斯黃河南岸灌區水權細化方案》一致，根據定額和面

積計算得出專案區初始水權為 3833.9 萬  $\text{m}^3$ ，見表 3。農業初始水權的確定為灌區灌溉管理奠定了堅實的基礎，有助於節水灌溉的推廣應用，也為下一步的水權轉換提供了根據。

第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

表 1 灌區引黃灌溉定額詳表

灌 區	項 目	渠 灌	滴 灌
建設、昌漢白	灌溉水利用係數	0.52	0.57
	淨灌溉定額 (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	9107.3	5190.0
	毛灌溉定額 (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	4735.8	2958.3

表 2 各級管道水利用係數表

灌區	項目	管道水利用係數					渠系水 利用係數	田間水 利用係數	灌溉水 利用係數
		幹渠	分幹渠	支渠	斗渠	農渠			
建設 昌漢 白	渠灌	0.8	0.85	0.93	0.95	0.97	0.583	0.90	0.52
	滴灌	0.8	0.85	0.93	0.95	-	0.601	0.95	0.57

表 3 項目區初始水權計算表

灌域	地點	灌溉面積 (hm <sup>2</sup> )	滴灌面積 (hm <sup>2</sup> )	滴灌毛定額 (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	渠灌面積 (hm <sup>2</sup> )	渠灌毛定額 (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	初始水權 (萬 m <sup>3</sup> )
建設 灌域	白音村	893.7	426.7	5190	467.0	9107.3	646.8
	廣茂村	746.7	553.3	5190	193.3	9107.3	463.3
	麻迷圖	1622.9			1622.9	9107.3	1478.0
昌漢 白灌 域	朝凱村	940.5	940.5	5190			488.1
	興建村	320.8	320.8	5190			166.5
	昌漢白村	338.5	338.5	5190			175.7
	山灣村	323.3			323.3	9107.3	294.5
	白音格村	233.3	233.3	5190			121.1
合計		5419.7	2813.2		2606.5		3833.9

## 二、農業水價形成機制

### (一) 供水成本

專案區執行農業終端水價，其價格由灌區國有水管單位供水價格和農民用水協會末級水價兩部分組成。杭錦旗黃河南岸灌區現狀渠系工程由水權轉換節水改造工程投資建設，投資單位為用水企業，按照水權轉換節水改造工程批復，工程使用年限 25 年，之後由還可實施水權轉換，由用水企業繼續投資進行節水改造，以獲得水權，所以本灌區不考慮全成本水價。

國有水管單位農業供水價格主要有折舊費、維修成本、人員工資、水資源費、管理費用組成，其中：折舊費和大修理費：杭錦旗黃河南岸灌區現狀渠系工程由水權轉換節水改造工程投資建設，投資單位為用水企業，所以本灌區水價成本中不考慮折舊費，同時也只考慮國家投資的維修費；人員工資及福利費參照當地實際執行。計算得出國管水利工程供水價格 0.128 元/m<sup>3</sup>，高於省級主管部門批復的國管水價 0.104 元/m<sup>3</sup>（支口水價），存在 0.024 元/m<sup>3</sup> 差價，說明該灌區運行管理成本相對較高。

末級渠系水價：專案末級渠系改造工程建設費用由國家投資，根據杭錦旗人民政府關於杭錦旗黃河南岸灌區建設灌域末級渠系農業水價實行政府指導價的批復，末級渠系實行政府指導價，確定為不超過 0.020 元/m<sup>3</sup>；本項目建議執行末級渠系不超過 0.020 元/m<sup>3</sup> 的指導價。

農業供水終端水價：農業供水終端水價包括國管水價和末級渠系水價兩部分，即農業供水終端水價 = 國管水價/末級渠系平均水利用係數 + 末級渠系水價；本項目區末級渠系平均水利用係數為 0.93。因此本專案執行不高於 0.132 元/m<sup>3</sup> 的農業供水終端水價。

### (二) 供水價格確定

本專案區供水價格確定為實行終端水價為不超過 0.132 元/m<sup>3</sup>，其中國管水價為 0.104 元/m<sup>3</sup>（支口水價），考慮本項目末級渠系平均水利用係數為 0.93，實際終端國管水價為 0.112 元/m<sup>3</sup>；末級渠系供水價格 0.02 元/m<sup>3</sup>，國管水價和末級渠系水價能基本達到運行維護水準。

### (三) 推行超定額累進加價制度

在計量設施配套和合理確定農業用水定額的基礎上，實行超定額累進加價制度，農田水利工程產權制度改革鼓勵用水戶節約用水，對灌溉用水實行總量控制、定額管理，對超量用水實行累進加價，對節約用水給予獎勵。試點區農民用水者協會每年用水量超出分配量的 10% 以內，超出部分國有水利工程水價增加 0.01 元/m<sup>3</sup>，超出分配量的 20% 以內，超出部分國有水利工程水價增加 0.02 元/m<sup>3</sup>，超出分配量的 30% 以內，超出部分國有水利工程水價增加 0.03

元/m<sup>3</sup>，超出分配量的 30%，不再供水。

## 三、建立農業用水精準補貼和節水獎勵機制

### (一) 建立精準補貼機制

建立穩定精準補貼的資金來源及補貼標準：財政補貼農民農業用水水費支出的資金及建立節水獎勵基金的資金均來源於水資源費收入和其他財政補貼等。通過節水改造專案，節約了水資源，灌溉管理單位可以從水權轉換維修養護費中獎勵補貼專案區，鄂爾多斯市人民政府以正式檔下發鄂爾多斯市人民政府關於建立黃河南岸灌區節水補貼獎勵機制的批復，批復中具體獎勵標準為滴灌每畝每年獎勵 25 元，噴灌每畝每年獎勵 15 元，畦田改造每畝每年獎勵 8 元，滴灌帶每畝每年補助 80 元。節水獎勵補貼直接獎勵給用水戶，所需資金全部由鄂爾多斯市市政府承擔。

明確精準補貼的適用範圍：本精準補貼僅適用於農業水價綜合改革專案區，此範圍之外的區域暫不予補貼和獎勵。制定精準補貼的實施辦法：建立灌溉面積台賬，並由農戶、水務局核查人員、管理所段人員、鄉鎮代表簽字確認，作為水費分攤和財政補貼資金發放的依據；以實際核查的灌溉面積為基數予以補貼，補貼對象為專案區農戶，實行直補。水務部門要積極組織農民用水協會加強測流量水的監督，與水管部門做好“共測互監”工作和“水量、水費、水價、面積、補貼資金”的五公開工作，做好面積核查及水費攤收、決算等台賬建設，做好水費公平、公正、公開、合理、合法的分攤，做好歷年拖欠水費的清繳，對於惡意拖欠水費的農戶，堅決杜絕享受任何的水費補貼政策。將精準補貼設立台賬，專戶儲存，專款專用。節水調節基金由杭錦旗水務局負責管理發放。

### (二) 建立農業用水節水獎勵機制

專案建成後，農民用水戶協會真正發揮了作用，減少了灌溉管理單位管理成本，灌溉管理單位可以從水費中獎勵協會，用於協會發展。試點區農民用水者協會每年用水量節約分配量的 10% 以上，獎勵用水者協會水費 5 萬元，每年用水量節約分配量的 20% 以上，獎勵用水者協會水費 7 萬元，每年用水量節約分配量的 30% 以上，獎勵用水者協會水費 10 萬元，獎勵水費用於協會管理維護支出或對用水戶水費進行補貼。

### (三) 推行水權轉讓交易

開展水權交易，鼓勵用水戶對節約的水量進行轉讓，政府可對節約用水量進行了回購，保障用水戶獲得節水效益。水權轉讓必須保障糧食基本生產用水和生態用水。在試點區由杭



錦旗黃河灌溉管理局負責本灌區水權交易、轉讓、收儲等相關事情審批。同一農民用水者協會內部的轉讓，由協會內部組織統一協調，用水戶之間平等協商轉讓。不同農民用水者協會的轉讓，需要灌區管理單位審批，記錄轉讓的時間、水量、價格等資訊。灌區管理單位可對農民用水者協會節約的水量進行收儲，農民用水者協會節約水量達到 10 萬  $m^3$ ，一次收儲時間達到 10 年的，收儲費 0.5 元/ $m^3$ ，一次收儲時間達到 20 年的，收儲費 0.7 元/ $m^3$ ，一次收儲時間達到 30 年的，收儲費 1.0 元/ $m^3$ ，收儲費用一次付清。收儲的費用 98% 分配到節水戶，留協會 2% 用於管理費用，該收儲方案中的價格作為試點僅適用於本項目，與杭錦旗政府印發實施方案的價格略有不同。灌區管理單位對本專案收儲的水權和灌區節約的水量可進行整合打包，由政府或水行政主管部門指導向其它行業轉讓，並報上級水行政主管部門審批。

#### 四、配套供水計量設施建設

為促進專案區農業節水，理順灌溉管理體制，對專案區內配備量水計量設施。流量站採用全自動流量即時線上監測方式，實現對管道斷面流量流速的即時線上監測，並且將流量資訊等資料通過無線傳輸方式傳送到中心站房。

即時採集現場中的流速等資訊，會同斷面資料能及時獲得流量資訊，並將其存在業務資料庫中。具有較強的即時性和較高的處理效率，對訪問的回應時間要短；採集介面的即時性好，能滿足其應用的需要；採集介面的即時性不能影響控制系統的性能。採集通信方式在具備條件的場合，實現冗餘；採集軟體要有容錯處理機制；即時資料庫系統具有容錯能力，根據具體的硬體條件實現冗餘。

完整性、標準化資訊的傳輸與處理遵循標準化的協定，以保證資訊的相對完整性與一致性。對採集方式、採集設備儘量採用統一標準和型號，堅持系統的開放性和可擴展性。建立一個開放的、標準的、可擴充、易管理、升級的即時資料庫系統，不僅僅要做到配置上的先進，更主要的是開發上和應用上的先進。安全性、可靠性 在操作上嚴格許可權管理。系統應提供審計跟蹤功能，記錄所有使用者操作過程，對出現的系統安全問題提供調查的依據和手段；系統應具備事務日誌功能；保證在惡劣天氣條件下能正常運行，確保採集通信通道暢通。

為實現用水協會便於管理的目標，安裝自動量水設備 101 套，其中建設灌域各級渠系上安裝 26 套量水系統，其中超聲波感測器量水系統 11 套，一體化測控閘門量水系統 15 套；昌漢白灌域安裝 75 套電磁流量計量水系統。

#### 伍、結論

1. 推進農業水價綜合改革有利於形成正常的農業水利工程水價秩序，有利於構建成本約束機制，有利於農民節水減支，減輕農民負擔。

2. 農業初始水權的確定為灌區灌溉管理奠定了堅實的基礎，有助於節水灌溉的推廣應用，也為下一步的水權轉換提供了根據；建立農業用水節水獎勵機制，並充分發揮農民用水戶協會的作用，鼓勵用水戶對節約的水量進行轉讓，政府對節約用水量進行回購，以保障用水戶獲得節水效益。

3. 在農業供水成本的測算的基礎上，通過政府定價的方式確定供水價格，並在此基礎上推行超定額累進加價制度，是實現農業水價改革的前提和基礎；在明確精準補貼的適用範圍的同時形成穩定的精準補貼資金來源和補貼標準，從而建立精準補貼機制，有助於農業水價改革的推行。

#### 參考文獻

1. 李穎、孔德帥、吳樂 (2017), 「農業水價改革情景中農戶的節水意願—基於河北省地下水超采區的實地調研」, 節水灌溉, 第1期, 第99-105頁。
2. 朱強、王曉雪 (2016), 「淺析農業水價綜合改革的問題與對策」, 遼寧農業科學, 第1期, 第58-61頁。
3. 劉小勇 (2016), 「農業水價改革的理論分析與路徑選擇」, 水利經濟, 第34卷, 第31-34頁。
4. 姜文來, 劉洋, 伊熱鼓 (2015), 「農業水價合理分擔研究進展」, 水利水電科技進展, 第5期, 第191-195頁。
5. 張建勝 (2015), 「甘肅省農業水價改革的實踐與思考」, 中國水利, 2015, (18): 18-23。
6. 崔延松, 魯紅衛, 任傑 (2014), 「我國東中西部地區農業水價改革模式選擇與管理訴求」, 中國水利, 第2期, 第19-21頁。
7. 徐萍 (2013), 「安徽省農業水價改革情況綜述」, 江淮水利科技, 第1期, 第5-9頁。
8. 徐璿, 毛春梅 (2013), 「我國農業水價分擔模式探討」, 水利經濟, 第31卷, 第19-22頁。
9. 孫梅英, 王福田 (2010), 「農業灌溉水費計收與補貼並舉的探討」, 中國水利, 第22卷, 第22-24頁。
10. 馮廣志 (2010), 「完善農業水價形成機制若干問題的思考」, 水利發展研究, 第8期, 第26-29頁。

## 莆田水文化遺產的時空分佈特徵研究

鄧俊<sup>1</sup>、譚徐明<sup>2</sup>、李雲鵬<sup>3</sup>、萬金紅<sup>4</sup>、劉建剛<sup>5</sup>

### 摘要

水文化遺產屬於人類文化遺產的重要組成部分，分為物質類文化遺產和非物質類文化遺產，其中水利工程遺產是水文化遺產的主體內容。福建省莆田市水文化遺產的發展與城市在歷史上的發展地位有很大的關係，水利工程遺產也是莆田水文化遺產的主體部分，並衍生出了豐富的非物質水文化遺產。莆田物質類水文化遺產的空間分佈以河流為骨架，主要分為五個遺產集聚區域。在時間分佈上，清代最多，次之為宋代和明代。莆田水資源變化巨大，眾多水文化遺產的功能也發生了轉變或消失，亟需進行高效的保護和管理。

**關鍵字：**水文化遺產、時空分佈、保護與管理、莆田

---

<sup>1</sup> 中国水利水电科学研究院+高工

<sup>2</sup> 中国水利水电科学研究院+教高

<sup>3</sup> 中国水利水电科学研究院+高工

<sup>4</sup> 中国水利水电科学研究院+高工

<sup>5</sup> 中国水利水电科学研究院+高工

## 壹、前言

莆田市位於福建省東部沿海中部地區，北緯 24°59′ -25°46′、東經 118°27′ -119°40′，莆田市地勢依山面海，西北部山巒疊嶂，中部丘陵起伏，東南部地勢平坦。境內水系發達，木蘭溪和萩蘆溪為境內兩大主要水系。河流大都來源於北部山區，流域面積 50km<sup>2</sup> 以上河流有 30 條，坡陡流急，年際流量變化大，最大值與最小值之比為 4~6 倍；年內汛枯相差懸殊，汛期（4~9 月）占全年水量的 80~90%。莆田市轄 4 個區、1 個縣，分別為城廂區、涵江區、荔城區、秀嶼區和仙遊縣，另轄 2 個管委會。莆田市隸屬海峽西岸新興港口城市、世界媽祖文化中心，自古為閩中政治、經濟、文化中心。

木蘭溪是莆田的母親河，幹流全長 168 公里，流域面積 1732 平方公里，是閩中的最大溪流，為福建省八條主要水系之一。南北洋河網地處木蘭溪下游，縱橫交錯於福建省四大平原之一的南北洋平原。萩蘆溪是莆田市第二大河流，匯九鯉湖溪、苔溪、長嶺溪、漁滄溪等溪水，注入木蘭溪出海。延壽溪幹、支流總長 189 公里，集雨面積 709 平方公里，是木蘭溪最大的支流。

## 貳、区域水利开发史

莆田自陳光大二年（568 年）置縣，營建城池，興修水利，圍海造田，形成以木蘭溪為主渠的興化平原格局。興化水利肇始于唐，盛建于宋，壞於明清。清咸豐年間局部修復，到民國時期又多廢弛失修。

莆田歷史上的水利建設，大致可以分為三個階段：一是從唐中葉至五代時期，以開塘蓄水為主；二是從北宋至南宋時期，以築陂開圳為主；三是從元代至明中葉，以改造溝渠系統及擴建海堤為主。

### 一、唐代水利事業興起——以塘溉田

初南北洋平原的西部還是一片鹽沼，貞觀初期潮汐還能夠上湧至北洋的史華橋和澄堵山，而當時南洋的地勢還要更低些。唐初，莆田地區丘陵、平原已有較多的開發，水利工程建設也相繼發展。

唐代是莆田地區社會、經濟、文化發展的重要時期，在水利建設方面突出表現在築塘和圍海造田最早、最多，居福建之冠。這一時期莆田地區水利工程建設，主要是依靠挖築一些中小型平塘來解決田土灌溉的用水之需。唐貞觀以後，政府在南北洋平原上相繼開挖了諸泉、永豐、瀝潯、橫塘、國清、韻洋等不同規模的水塘，最大的水塘溉田五千畝左右，最小的也溉田近千畝（見表 1）。這些水塘在當時全國來說頗為有名，但是水塘畢竟規模小，蓄水有限，不足備旱，如遇早歉，民眾仍難免於流離之苦。

唐中期以後，莆田的水利開發進入了新階段。唐建中年間（780—783 年），邑人吳興開始塍海築堤為田，並在延壽溪下游，疊石建成延壽陂，引水北上，溉田數萬畝。這是莆田先民築堤阻潮和大規模利用溪水溉田的開端。可見，延壽陂是唐中期南北洋平原上建成比較完備的綜合性水利灌溉樞紐工程。唐元和年間（806—820 年），觀察使裴次元又在南洋築堤，圍海造田，在距城東 20 裡的紅泉宮，築堰蓄水，組織百姓墾田數千畝，歲收達數萬斛。至此，南北洋平原在唐代已初步形成。在唐代，莆田的水利建設基本上是以築塘造田為中心而展開的，直到宋代水利灌溉系統才得以完善。

### 二、兩宋基本格局形成——平原初現

五代十國時期，福建一直處於封建割據、戰亂頻繁的狀態，賦役頻繁，經濟凋敝，百姓生活疾苦，所以水利建設在此時沒有新的發展。莆田地區除太和塘外，未建太多的水利工程。太和塘的創修者是偽閩太守何玉，他發動

群眾開鑿太和塘灌田，直到太平陂築成，才廢為田。

宋太平興國二年（977年），陳洪進獻所掌泉、漳兩郡及所轄十四縣，莆田納入宋朝版圖。宋代，我國經濟重心逐漸南移，這個時期莆田的經濟、文化日益繁榮。從宋太平興國二年至祥興二年，莆田先民進一步利用溪流築陂溉田，在前人的基礎上，相繼在菽蘆、延壽、木蘭三溪上築成南安、太平、使華、木蘭等陂塘。一方面開挖溝渠，引溪水灌溉田地，縱橫遍佈南北洋平原，受益田地數十萬畝。另一方面在瀕海地方，建立洋埕、林墩、陳壩、蘆蒲、慈壽等諸多通海斗門，如遇洪水，洩水入海以防滲災。

宋太平興國二年至元豐六年（977-1083年）的一百零六年中，莆田先民在木蘭、延壽、秋蘆三大溪中建成木蘭、泗華、太平、南安等四大陂，受益面積10多萬畝。宋紹熙時（1190—1194年）莆田有名可查的小陂塘有五十一處之多。據府志載，莆、仙兩縣到宋淳佑二年（1242）已有陂壩685處，除灌溉萬畝的古陂外，較著名的還有杜陂、白葉陂、館洋陂、蘇洋陂、百從壩等。這些大小引水工程是置縣歷史上的主要水利設施，它對開闢利用興化平原和解決廣大山區的農田灌溉，發展農業生產，繁榮社會經濟方面，起到了很大的作用。

### 三、元代莆田水利建設——北洋完善

元延佑二年（1315年），總管郭朵兒、張仲儀在木蘭陂左岸建萬金陂門，開渠進入北洋與延壽溪水匯合，擴大灌溉數萬畝，又增強了抗旱能力。南北洋水域相連，開木蘭陂北渠，木蘭溪之水可溉北洋，北洋諸塘漸廢。南北洋水量以三七為則。北洋三大水系相通，引木蘭溪水與延壽溪、菽蘆溪太平陂渠匯合。

### 四、明清民國海堤建設及溝渠拓展

南北洋水系溝渠逐漸發育成形，優化農田制度，大興屯田；沿海地區大量開墾“埭田”，

耕地面積迅速擴展。明代修復完善了大量水工設施：“春則築陂瀦水，以備乾旱；秋則開陂，以通舟楫”（見圖1）。

莆田市海岸線綿長。到宋頤甯至元豐間李長者建成木蘭陂後，南北洋海堤乃逐漸完備。

## 五、近現代莆田水利發展

興建庫渠。建設了大規模水庫和水渠，解決了興化平原外沿海地區的農田灌溉需求：外渡水渠、東圳水渠、東圳水庫。1958年6月建東圳水庫及東圳水渠。東圳渠系工程有幹渠1條，全長89公里，支渠11條，總長87公里，直達平海、忠門一帶。1971年12月建外渡水渠，連通外渡水庫與東圳水庫，總長約33公里。

## 參、水利遺產調查及現狀分析

### 一、水利遺產構成

經過長期的水利建設和圍海造田，興化平原逐漸形成了三大相對獨立的水利系統，即以木蘭陂為樞紐的南洋水利系統，以延壽陂、太平陂、使華陂為樞紐的北洋水利系統，以南安陂為樞紐的九裡洋水利系統。因地制宜、因勢利導的構建了完備的陂、陡門、涵的三級水利控制系統，其間以溝渠相連。莆田水利系統框架見圖2。

莆田水利遺產類型主要有：水利工程、橋樑、宗教建築（主要包括媽祖祭祀以及祭祀治水功臣的廟宇）、生活用水設施（古井等）、摩崖石刻、碑刻等。

#### （1）陂

陂——河流之上用於集蓄、灌、排功能一體的壩堰設施，發揮重要的引水功能，莆田境內歷史上及現存有大量的陂壩。

興化平原四大陂（木蘭陂、泗華陂、南安陂、太平陂）灌溉13.8萬畝，佔據原莆田縣境內灌溉農田面積的66%，佔據莆田市境內灌溉農田總面積的45%。見圖3。

#### （2）陡門

陡門：所以泄水也，既有溝矣，必用斗門，以資宣洩，水準則閉閘而蓄水。

涵洞：以佐陡門所不及，故涵又次之，有木石二種，木小而石大，古有定額。

溝：溝洫古周官遺制也，既有陂以蓄水，必需溝以導水，故溝之。

陡門：民國時期，南洋陡門共計 10 處（大陡門 4、小陡門 6），北洋陡門共計 23 處（大陡門 4、小陡門 19）。至今仍保留有多處陡門，仍然發揮調節作用（見圖 4）。

涵洞：涵洞是水利系統的終端，亦是容易產生糾紛和盜用水權的設施。官員的主要職責之一即是確定官方的涵洞，禁止私泄渠水（見圖 5）。

神廟祭祀組織：眾籌眾營的古代水利共治形式是中國傳統社會自治組織模式的典型範例。

## 二、水利遺產調查

通過對莆田市文物三普資料的篩選，結合莆田市歷代水利志、水利史料，共篩選出莆田市相關水利遺產 157 處，其中：

按照區縣分：仙遊縣 39 處，城廂區 18 處，涵江區 54 處，荔城區 20 處，秀嶼區 26 處。

按照類別分：水利工程 30 處，橋樑 41 處，宗教建築 60 處（主要包括媽祖祭祀以及祭祀治水功臣的廟宇），生活用水設施 22 處（古井等），摩崖石刻 3 處，碑刻 1 處。

按照保護等級分：全國重點文物保護單位 2 處（木蘭陂、鎮海堤），省級文物保護單位 4 處（延壽橋、鞏溪宮、寧海橋、平海天后宮），市、縣級文物保護單位 57 處，無保護級別 94 處。

按照年代分：唐 8 處，宋 32 處，元 5 處，明 17 處，清 78 處，民國 4 處，近現代 13 處。

## 肆、结论与建议

水利開發是莆田城市發展的主線。以木蘭

陂為代表的水利工程體系是中國先民最高治水文明與智慧的體現。“八山一水一分田”的地理格局使得福建先民——在山區開墾荒地，向山要糧，在沿海圍墾灘塗，與海爭地。莆田沿海平原的大規模開發，始自唐代中葉，至元明之際基本完成。這一開發進程是以興修水利和圍海造田為主要標誌的，水利建設構成了莆田平原開發史的主線。

莆田水文化遺產的類型及時空分佈特徵與歷史發展的脈絡相印證。

## 參考文獻

- 1.王紹鴻，曾從盛·福建興化平原的形成與古地理環境 [J]·地理學報，1991，46(3):341—342·
- 2.福建省地方誌編纂委員會·八閩通志 [M]·福州:福建人民出版社，1990：493·
- 3.陳養池·莆田水利志 [M]·臺北:成文出版有限公司，1974：265
- 4.周瑛，黃仲昭·重刊興化府志 [M]·蔡金耀，點校·福州:福建人民出版社，2007：1358
- 5.陳抗，鐘文，張忱石·永樂大典方志輯佚:第一冊 [M]·北京:中華書局，2004:1116—1122·

## 圖與表

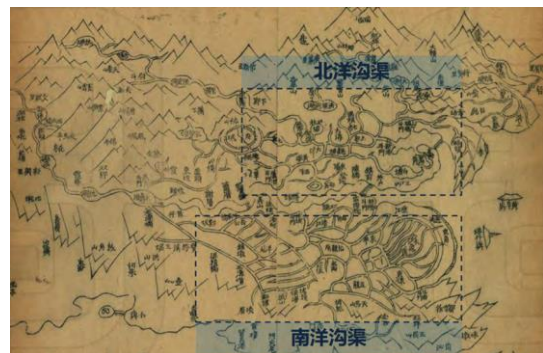


圖 1 1876 年全莆水道圖-《莆田水利志》

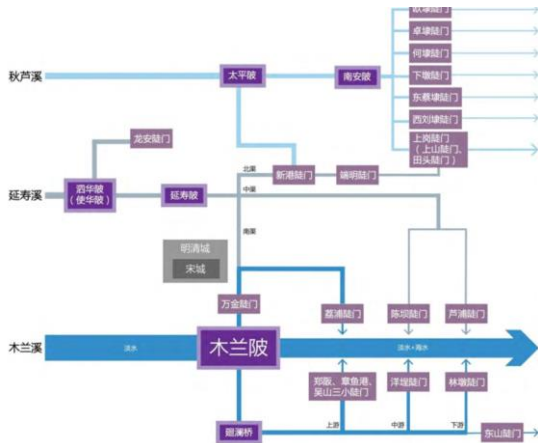
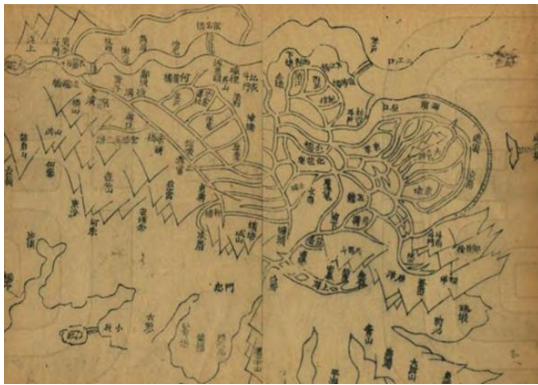


圖 2 莆田水利系統框架圖

圖 3 1876 年木蘭陂圖--《莆田水利志》



圖 4 陡門現狀圖



莆禧古城現存涵洞 (左圖, 北門附近; 右圖, 東門附近)

圖 5 涵洞現狀圖

表 1 唐代莆田地區陂塘建設情況一覽表

名稱	創修年代	所在地	塘面積	灌溉畝數	備註
諸泉塘	貞觀元年	城西一裡	周回三裡	40 餘頃	亦稱小塘
永豐	貞觀元年	縣西南二裡	周回一裡中有島	100 餘頃	
瀝潯	貞觀元年	縣南五裡	周回一裡	140 餘頃	
橫塘	貞觀五年	縣東南二十裡 (安樂裡)	周回二十裡	200 餘頃	木蘭陂築成, 廢
新塘		縣東南二裡 (莆田裡)			木蘭陂築成, 廢
國清塘	貞觀中	縣東南二裡 (景德里)	周回三十裡	500 餘頃	木蘭陂建成後唯留此塘以備大旱
頓洋塘	貞觀五年	縣東北四十裡 (永豐裡)	周回一十裡	200 餘頃	廢為田
西沖塘		待賢裡	水闊三十丈	28 餘頃	廢為田
陳塘					木蘭陂築成, 廢為田
唐坑塘					廢為田
許塘					廢為田

資料來源：《新唐書》、《八閩通志》、弘治《興化府志》。其中“新塘”“陳塘”“唐坑塘”“許塘”“西沖塘”所建年代無考，始建于唐時期，在宋時被廢為田。

# 征地統一年產值標準和區片綜合地價綜述

劉卓穎<sup>1</sup>、王磊<sup>2</sup>

## 摘要

2004年以來，國家及有關部委陸續出臺了一些政策規定，要求各省級人民政府公佈實施並適時更新調整征地統一年產值標準和區片綜合地價，作為各行各業工程建設征地補償的依據。本文梳理了征地統一年產值標準和區片綜合地價的政策背景、概念和內涵，分析了鐵路、水利等基礎設施建設征地補償標準現狀，以各省級人民政府歷次公佈實施的政策為基礎，統計、整理、分析了征地補償標準的總體情況，分析、測算了征地補償標準更新與調整的變化趨勢及幅度，提出了評價和建議。

**關鍵字：**統一年產值、區片綜合地價、征地補償標準、公佈與實施、增幅

2004年8月，《中華人民共和國土地管理法》修訂版公佈施行。其中第四十七條規定，“徵收耕地的土地補償費，為該耕地被徵收前三年平均年產值的六至十倍。徵收耕地的安置補助費，按照需要安置的農業人口數計算。需要安置的農業人口數，按照被徵收的耕地數量除以征地前被徵收單位平均每人佔有耕地的數量計算。每一個需要安置的農業人口的安置補助費標準，為該耕地被徵收前三年平均年產值的四至六倍。徵收其他土地的土地補償費和安置補助費標準，由省、自治區、直轄市參照徵收耕地的土地補償費和安置補助費的標準規定。”，“土地補償費和安置補助費的總和不得超過土地被徵收前三年平均年產值的三十倍。”第五十一條規定，“大中型水利、水電工程建設徵收土地的補償費標準和移民安置辦法，由國務院另行規定。”《中華人民共和國土地管理法》是我國各行各業工程建設計算征地費用、進行征地補償的最基本和最主要的依據。隨著中國經濟社會的快速發展，為合理利用土地，保護被征地農民合法權益，維護社會穩定，國家層面針對征地補償提出了征地統一年產值標準和區片綜合地價概念，並相繼出臺了相關政策和規定。

## 壹、政策背景

2004年10月，為正確處理保障經濟社會發展與保護土地資源的關係，嚴格控制建設用地增量，努力盤活土地存量，強化節約利用土地，深化改革，健全法制，統籌兼顧，標本兼治，進一步完善符合中國國情的最嚴格的土地管理制度，國務院發佈了《國務院關於深化改革嚴格土地管理的決定》（國發[2004]28號），其中要求“省、自治區、直轄市人民政府要制訂並公佈各市縣征地的統一年產值標準或區片綜合地價，征地補償做到同地同價，國家重點建設項目必須將征地費用足額列入概算。大中型水利、水電工程建設征地的補償費標準和移民安置辦法，由國務院另行規定。”

2006年9月，國務院公佈施行《大中型水利水電工程建設征地補償和移民安置條例》（國務院令第四七十一號），第二十二條規定，“大中型水利水電工程建設徵收耕地的，土地補償費和安置補助費之和為該耕地被徵收前三年平均年產值的16倍。”，“徵收其他土地的土地補償費和安置補助費標準，按照工程所在省、自治區、直轄市規定的標準執行。”

2008年6月，國土資源部下發《關於切實做好征地統一年產值標準和區片綜合地價公佈實施工作的通知》（國土資發[2008]135號），通知中要求，“原則上全國從2009年1月1日起實施新的征地補償標準。”同時，要求各地國土資源部門要“建立征地補償標準的更新機制，適時更新征地補償標準，

<sup>1</sup> 水利部水利水电规划设计总院，教授级高级工程师。

<sup>2</sup> 广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院，工程师。

把握好調整幅度和週期。征地補償標準原則上應每2~3年更新一次，逐步提高；經確認補償標準不需要進行調整的，也要予以重新公佈。新的征地補償標準提高幅度低的地區，要適應當地經濟社會發展水準及時更新。”

2010年6月，國土資源部下發《關於進一步做好征地管理工作的通知》(國土資發[2010]96號)，要求全面實行征地統一年產值標準和區片綜合地價。同時，再次強調“各地應建立征地補償標準動態調整機制，根據經濟發展水準、當地人均收入增長幅度等情況，每2至3年對征地補償標準進行調整，逐步提高征地補償水準。目前實施的征地補償標準已超過規定年限的省份，應按此要求儘快調整修訂。未及時調整的，不予通過用地審查。”

2015年1月，中共中央、國務院發佈《關於加大改革創新力度 加快農業現代化建設的若干意見》(中發[2015]1號)。意見中提出，“創新投融資機制，加大資金投入，集中力量加快建設一批重大引調水工程、重點水源工程、江河湖泊治理骨幹工程，節水供水重大水利工程建設的征地補償、耕地占補平衡實行與鐵路等國家重大基礎設施項目同等政策。”

2017年4月，國務院發佈《國務院關於修改〈大中型水利水電工程建設征地補償和移民安置條例〉的決定》(國務院令 第679號)，修改第二十二條規定為，“大中型水利水電工程建設徵收土地的土地補償費和安置補助費，實行與鐵路等基礎設施專案用地同等補償標準，按照被徵收土地所在省、自治區、直轄市規定的標準執行”。

## 貳、概念及內涵

在《關於開展制訂征地統一年產值標準和征地區片綜合地價工作的通知》(國土資發[2005]144號)中隨文下發了《征地統一年產值標準測算指導性意見》和《征地區片綜合地價測算指導性意見》(暫行)，其中明確了征地統一年產值標準和區片綜合地價(以下簡稱“年產值和區片價”)的概念、內涵及基本原則。年產值和區片價對應的是不同區域，不相重複，而征地補償標準應包含征地補償費和區片價兩部分。

### 一、征地統一年產值

征地統一年產值標準是在一定區域範圍內(以市、縣行政區域為主)，綜合考慮被徵收農用地類型、品質、等級、農民對土地的投入以及農產品價格等因素，以前三年主要農產品平均產量、價格為主要依據測算的綜合收益值。

統一年產值標準是計算征地補償費用的主要依據。征地補償費用在統一年產值標準的基礎上，根據土地區位、當地農民現有生活水準和經濟社會發展水準、原征地補償標準等因素確定相應的土地補償費和安置補助費倍數進行計算。

統一年產值標準適用於集體農用地徵收補償測算，集體建設用地徵收補償和國有農用地補償測算可參照執行。

### 二、征地區片綜合地價

征地區片綜合地價是指在城鎮行政區土地利用總體規劃確定的建設用地範圍內，依據地類、產值、土地區位、農用地等級、人均耕地數量、土地供求關係、當地經濟發展水準和城鎮居民最低生活保障水準等因素，劃分區片並測算的征地綜合補償標準，原則上不含地上附著物和青苗的補償費。

征地區片綜合地價測算範圍重點在土地利用總體規劃確定的城市、集鎮建設用地規模範圍內，但各地可以根據征地需要和實際情況擴展到城市郊區或更大範圍。



## 參、征地補償標準現狀

### 一、鐵路等基礎設施建設征地補償標準

2014年4月，為科學有序推進鐵路建設，進一步深化鐵路建設路地合作機制，更好發揮地方政府作為征地拆遷實施主體在組織實施、協調、監管等方面工作優勢，依法合規推進征地拆遷工作，維護社會和諧穩定，提高鐵路投資效益和資金使用效率，中國鐵路總公司提出《中國鐵路總公司關於加強鐵路建設專案征地拆遷工作的指導意見》（鐵總計統[2014]97號），其中要求，“征地拆遷工作堅持依法合規和維護被征拆人合法權益的原則，征地拆遷補償標準一般執行國家和省級人民政府頒佈的有關規定和標準。經省級人民政府授權後，可執行地市級人民政府制定的補償標準或採用由具備資質的評估機構的市場評估價”。

### 二、水利水電工程建設征地補償標準

水利水電工程是國民經濟發展的重要基礎設施，具有很強的公益性、基礎性、戰略性，多年來是國家重點扶持的公益性基礎設施建設項目。同時，水利水電工程建設又具有投資大、占地多、移民規模大、安置任務重等特點，在為我國國民經濟發展和社會進步發揮巨大效益的同時，也不可避免地產生巨大的土地佔用和大量的非自願性工程建設移民。根據水利部門的初步統計，“十一五”和“十二五”期間水利水電工程建設征地規模分別達到21.4萬公頃和50萬公頃。水利水電工程建設征地補償和移民安置已成為工程的重要組成部分之一，得到國家和社會各界的高度關注。

按照《土地管理法》國務院令 471 號的規定，長期以來，水利水電工程建設征地補償標準採用“土地補償費和安置補助費之和為該耕地被徵收前三年平均年產值的16倍”，做到了有法可依，依法而行，為做好大中型水利水電工程建設征地補償和移民安置工作，維護移民合法權益，保障工程建設的順利進行以及社會的和諧穩定做出了積極貢獻。

但近些年來，隨著國家上述征地補償標準和用地政策的不斷提高和調整，與其他行業工程建設相比，水利水電工程征地補償標準明顯偏低，觸動了群眾切身利益，引發了一些社會矛盾，阻礙了水利水電工程的順利建設和合法用地。按照中發[2015]1號和國務院令 679 號的規定，2015年以來國家批復的水利工程建設征地補償標準已採用了各地公佈實施的年產值和區片價。

## 肆、公佈與實施

因政策影響及行業工作性質，水利部門長期關注各地年產值和區片價的公佈與實施，並成立課題組進行專題研究，對全國24個省級人民政府（不含北京、上海、江蘇、新疆、西藏、陝西、吉林）歷次年產值和區片價的公佈和實施情況進行了全面、系統的統計、整理和分析。

### 一、總體情況

據統計，截至2019年6月，各地按照國家及有關部委的要求，均由省級人民政府公佈或批准公佈年產值和區片價，且進行了多次更新與調整，共計公佈67次；其中24個省級人民政府均於2010年（含，以下同）之前完成首次公佈，集中於2009年和2010年（20個）；僅廣東省於2010年完成第二次公佈，其他23個於2011~2019年（主要集中於2012~2014年，17個）陸續公佈；16個省級人民政府至今已公佈實施第三次，集中於2014~2016年（10個）；3個省級人民政府已公佈實施第四次，主要集中於2017年和2019年。第二次更新、調整公佈平均週期為4年，第三次為3.6年，第四次為3.7年，其中週期最長為7年（天津），最短為2~3年（廣西、河北、浙江等）。公佈實施的最小區域範圍一般為行政村級（13個）、鄉（鎮、街道）級（8個）、縣（市、區）級3個。

各省級總體公佈實施情況統計詳見表1。

第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

表 1 各省級總體公佈實施情況統計

序號	區域	公佈次數 (次)	公佈間隔(年)			最新公佈區域最低單位		
			第 1~2 次	第 2~3 次	第 3~4 次	縣	鄉 (鎮)	村
1	天津	2	7					√
2	河北	3	3	3				√
3	浙江	3	3	2				√
4	福建	4	6	2	4			√
5	山東	3	4	3				√
6	廣東	3	4	6			√	
7	海南	2	5				√	
8	山西	3	4	5			√	
9	安徽	3	2	3				√
10	江西	3	2	4				√
11	河南	3	4	3				√
12	湖北	2	5					√
13	湖南	3	3	5		√		
14	內蒙古	3	2	6		√		
15	廣西	4	3	3	3			√
16	重慶	2	5				√	
17	四川	2	5				√	
18	貴州	4	3	2	4		√	
19	雲南	2	5				√	
20	甘肅	3	3	5				√
21	青海	2	5					√
22	寧夏	2	6				√	
23	遼寧	3	6	2		√		
24	黑龍江	3	2	3				√
	第一次發佈	24						
	第二次發佈	24						
	第三次發佈	16						
	第四次發佈	3						
	合計	67				3	8	13
	平均		4.0	3.6	3.7			

二、統一年產值及補償補助倍數

經對 24 個省級最新公佈的政策進行統計、整理和分析，有 12 個省級涉及年產值。

各省級年產值中位值的平均值為 1774 元/畝（713~3613 元/畝），高限區（數值較大的前 3 個，以下同）的平均值為 4287 元/畝（2326~9390 元/畝），低限區（數值較小的後 3 個，以下同）的平均值為 1049 元/畝（107~2259 元/畝）。

各省級土地補償補助倍數中位值的平均值為 21.0 倍（16~25 倍），上限平均值為 26.9 倍（16~31 倍，僅江西省突破了 30 倍），下限平均值為 18.0 倍（16~25 倍）。根據部分省級公佈的政策中明確的土地補償費倍數和安置補助費倍數分析，土地補償費倍數均小於安置補助費倍數，前者約為後者的 60%。

征地補償費用一般為年產值與補償補助倍數之積。各省級征地補償費中位值的平均值為 37226 元/畝（17831~81356 元/畝），高限區的平均值為 100921 元/畝（49400~262920 元/畝），低限區的平均值為 22467 元/畝（3200~47439 元/畝）。

### 三、區片綜合地價

經對 24 個省級最新公佈的政策進行統計、整理和分析，有 21 個省級涉及區片價。

各省級區片價中位值的平均值為 54442 元/畝（25333~90993 元/畝），高限區的平均值為 199601 元/畝（71654~400000 元/畝），低限區的平均值為 33566 元/畝（7267~53900 元/畝）。

各省級年產值、補償補助倍數以及征地補償費、區片價統計、分析見表 2。

表 2 各省級統一年產值及區片綜合地價統計

序 號	區域	統一年產值 (元/畝)			補償補助倍數之和			征地補償費 (元/畝)			區片綜合地價 (元/畝)		
		高限 區	中位 值	低限 區	高限 區	中位 值	低限 區	高限區	中位 值	低限 區	高限區	中位 值	低限 區
1	天津										256000	79000	28000
2	河北										365000	72700	37400
3	浙江										245000	56834	37000
4	福建										198000	40000	35750
5	山東										237000	55000	50000
6	廣東										116000	43333	31333
7	海南	5161	3613	2259	26	22	21	134186	81356	47439			
8	山西	9390	1536	662	28	25	17	262920	37500	13902			
9	安徽	2540	1800	1500	29	22	18	54000	39600	35400	108500	60250	45600
...													
24	黑龍 江										167334	25333	7267
	平均	4287	1774	1049	26.9	21.0	18.0	100921	37226	22467	199601	54442	33566

### 四、各類土地

根據原國土資源部的規定，各地政策基本上針對耕地（僅江西、湖南等區分水田、水澆地或旱地）進行公佈，其他農用地（包括園地、林地、草地、設施農用地等）則一般以耕地為基數（1），採用不同的係數作為補償標準。根據部分省級公佈的政策中明確的各類土地補償標準進行統計、分析，園地補償係數約為 0.94，林地約為 0.76，草地約為 0.80，其他土地中的設施農用地約為 0.91，而裸地、鹽鹼地等無收益土地補償係數大致為 0.57。值得關注的是，農村宅基地的補償係數達到了 0.88。此外，部分省級人民政府對集體建設用地或未利用地的補償標準並未明確，而已明確標準的各省級之間差別較大。

## 五、國有土地

根據原國土資源部的規定，各地政策基本上針對集體土地的補償標準進行測算和公佈，僅廣東、山西、安徽、江西等 9 個省級在檔中明確國有土地（包括國有農林牧漁場）的補償標準“參照集體土地標準執行”或“參照鄰近區域（屬地）集體土地標準執行”，其他各省級對國有土地補償標準均未予明確。

### 伍、更新與調整

對 24 個省級人民政府多次公佈的年產值和區片價進行統計、計算與分析，近年來各地歷次征地補償標準的更新週期、調整幅度不一。為了較為準確反映征地補償標準的變化，預測未來變化趨勢，將歷次調整幅度結合其更新週期，折算為年均指標（增幅）進行分析和研究。

各省級年產值中位值的年均增幅為 3.08%（0.00~11.35%），高限區的為 2.32%（0.00~8.22%），低限區的為 3.43%（0.00~13.09%）。大部分地區主要針對年產值進行了調整和提高，且重點關注了標準偏低區域，因此，低限區增幅高於其他區域。而個別地區年產值不予調整，僅調整了補償補助倍數。

據初步不完全統計，土地補償費和安置補助費倍數變化不大。

各省級征地補償費中位值的年均增幅為 3.32%（0.00~12.52%），高限區的為 2.70%（0.00~11.32%），低限區的為 4.17%（0.00~12.00%）。

各省級區片價中位值的年均增幅為 4.47%（-1.02~10.24%），高限區的為 2.12%（0.00~6.90%），低限區的為 8.02%（1.01~27.93%）。各地區針對區片價均直接進行了調整，且重點提高了標準偏低區域，而個別地區甚至對原偏高標準進行了適當調減。

綜合分析，征地補償標準（包括征地補償費和區片綜合地價）年均增幅為 4.3%。

全國征地補償標準年均增幅測算、分析結果見表 3。

表 3 征地補償標準年均增幅

區域	統一年產值			征地補償費			區片綜合地價		
	高限區	中位值	低限區	高限區	中位值	低限區	高限區	中位值	低限區
平均	2.32%	3.08%	3.43%	2.70%	3.32%	4.17%	2.12%	4.47%	8.02%

### 陸、評價及建議

根據上述分析可知，由各省級人民政府發佈實施的年產值和區片價基本上以縣、鄉（鎮）、村級行政區域為單元，反映了一定區域內綜合考慮了土地類型、品質、等級、區位、投入及產出、現有生活水準和經濟社會發展水準等多種因素後的土地價值，體現了公平、公正、公開以及同地同價的基本原則，歷次補償標準的變化（增幅）趨勢也基本上與各地的區位和經濟社會的發展相協調，作為當前我國水利、鐵路、交通等基礎設施及其他行業工程建設合法、科學計算征地補償費用的依據是完全合適的。需要說明的是，在本次工作過程中，存在著部分資料年限過久、資料不全、代表性不強等問題，且限於與土地有關資料缺乏，特徵值（如中位值、高限區等）的測算、分析方法不盡科學、合理，在一定程度上影響了成果的準確性，有待進一步核實和完善。但經與安徽、江西、黑龍江等省國土部門的相關成果相比，部分征地補償標準的絕對值和增幅測算基本一致，成果比較合理、可靠。

此外，根據課題組調研，結合工作實踐，認為征地補償標準本身尚存在一些問題。

一是更新週期較長，與工程建設征地需求不協調。按照原國土資源部的要求，各地第一次發佈年份集中在 2009 和 2010 年，第二次發佈則散佈於 2012~2016 年，第三次發佈主要集中於 2015、2016 和 2018 年，僅有 3 地發佈了第四次，平均發佈週期與要求的 2~3 年調整提高一次相比較為滯後。建

議各地結合經濟社會發展水準，及時適時調整更新、公佈實施新的征地補償標準，與水利、鐵路等基礎設施工程的建設週期和用地需求相適應。

二是部分相鄰區域補償標準差別過大，易引發矛盾。在各地已發佈的征地補償標準中，部分相鄰區域（包括省際、縣際、鄉際、村際）區位相近但補償標準存在差別，部分差別過大，挫傷農民積極性，引發被征地農民不滿（如黑龍江省、甘肅省）。建議各地調整時儘量協調平衡、統籌考慮。

三是更新調整物件不當，缺乏科學性。在歷次的更新調整中，大部分地區通過不斷地提高耕地（農用地）年產值以提高征地補償費。根據有關資料和研究成果，我國耕地（土地）的單產和產出存在著一定的上限，而調整後一些區域的年產值或繼續提高年產值，已出現或面臨年產值（即使不考慮種植成本）嚴重偏離實際的問題。建議今後在調整征地補償標準時，儘量結合區域區位、土地供求關係、經濟發展水準、城鎮居民生活水準等因素，適當調整補償補助倍數，或擴大區片價區域範圍，科學、合理調整征地補償標準。

四是大部分地區未明確建設用地或未利用地補償標準，實施中不便操作。各地征地標準政策一般僅適用於集體農用地，對建設用地特別是宅基地、工業企業用地以及未利用地和國有土地基本未予明確。隨著《物權法》等法律法規的推進以及土地權屬的確定，在計算建設用地等征地補償費用時方法、原則不統一，實施中操作不便，極易引發社會矛盾。建議各地更新發佈時儘量明確各類土地補償標準或提出相關原則。

五是平均增幅偏高，與經濟社會發展水準不協調。根據以上統計分析與測算，征地補償標準年均增幅達到 4.3%，與國家明確的“十三五”期間以及今後一段時期內的經濟社會發展增速相比，征地補償標準增幅相對偏高，將更加加大水利等基礎設施的建設成本，加重政府性財政支出負擔。經測算，水利工程若採用各地 2015 年前公佈的征地補償標準，征地補償費用總體將提高 73%（參見筆者《同地同價政策對水利工程土地補償補助費用的影響》，2011 年 6 月，《水利水電科技進展》第 31 卷第 3 期）。再繼續執行新一輪的征地統一年產值和區片綜合地價標準，考慮水利工程的建設週期和政策公佈週期，征地補償費用將繼續增加 40~70%。

劉卓穎（1969-），男，博士，河南鄭州，教授級高工，主要從事水利水電工程建設征地及移民安置規劃設計和諮詢工作，[liuzhuoying@giwp.org.cn](mailto:liuzhuoying@giwp.org.cn)，13522856956

## 珠江水量調度立法必要性分析

張旭<sup>1</sup>、王晗<sup>2</sup>

### 摘要

珠江是我國七大江河之一，由西江、北江、東江以及珠江三角洲諸河四大水系組成，涉及滇、黔、桂、粵、湘、贛等六省（自治區）和香港、澳門特別行政區以及越南東北部，總面積 45.37 萬平方公里。多年來珠江流域水利建設取得了巨大成就，但水資源時空分佈不均，部分地區水資源和水環境承載能力、防洪能力等與經濟社會發展需求不協調問題依然突出。為應對相關問題，珠江委已連續 15 次成功組織實施珠江枯水期水量調度，確保澳門、珠海等珠江三角洲地區供水安全，並多次通過應急調度成功解決或減緩流域突發水污染事故引發的供水危機。但由於“多龍管水”及法規層面調度主體不明，致使流域統一調度存在管理權缺位，統一調度中存在政令難通，行政效能低的問題。

根據法律法規、國家政策及強化水資源管理工作的要求，本文從支撐粵港澳大灣區繁榮穩定發展，保障國家戰略順利實施；貫徹落實水法，強化依法治水管水；解決水量調度過程中暴露的諸多矛盾，保障調度順利實施；建立水量調度長效機制，將實踐證明的有效措施上升為法律四方面論述了加快珠江水量調度立法的必要性。並提出珠江水量調度立法的思路建議。

**關鍵字：**珠江、立法、水量調度

---

1 水利部珠江水利委員會綜合技術中心，高級工程師

2 水利部珠江水利委員會綜合技術中心，工程師

## 壹、概況

珠江是我國七大江河之一，珠江流域涉及滇、黔、桂、粵、湘、贛等六省（自治區）和香港、澳門特別行政區以及越南東北部，總面積 45.37 萬平方公里（其中我國境內 44.21 萬平方公里），多年平均水資源量為 3385 億立方米。在黨和國家的關心重視下，多年來珠江流域水利建設取得了巨大成就，但新老水問題交織，流域水利發展不平衡不充分的問題依然突出，部分地區水資源和水環境承載能力、防洪能力等與經濟社會發展需求不協調，成為影響流域可持續發展的重要制約因素。主要水問題包括：

一是水資源時空分佈不均。流域水資源量總體豐沛，但枯水期徑流量僅占全年的 11~33%，其中 1 月份的水量僅占年水量的 2%。流域上游地區為喀斯特地貌，“盛水的盆子”先天不足；中游地區部分河流山高水低，利用成本高；下游珠江三角洲地區受自然條件限制，無條件建設大型攔蓄水工程，供水水源高度依賴客水。

二是水生生態系統功能受損。珠江流域水生生態環境總體良好，但人類活動導致的負面生態效應一直存在。受圍墾與灘塗開發、城市建設、開壩阻隔、采砂等影響，部分濕地萎縮、生態水量不足、生境破碎化、魚類產卵場減少與功能減退。

三是突發水污染事件時有發生。隨著流域城鎮化、工業化和農業現代化進程加快，產業向上中游轉移，沿江礦產企業、石油化工、有色金屬、危化碼頭等密集佈局，對飲用水源安全構成嚴重威脅，突發水污染事件時有發生。2010-2013 年，流域連續 4 年突發重金屬污染事件，其中 2012 年 1 月龍江鎘污染直接影響供水人口約 150 萬人，2013 年 7 月賀江鎘、鉍污染直接影響供水人口約 10 萬人，下游珠江三角洲

地區及澳門均對此表示關注。

## 貳、珠江水量調度實踐及存在問題

多年來，珠江水量調度已成為緩解流域重大水問題的主要措施之一。2005 年以來，珠江委已連續 15 次成功組織實施珠江枯水期水量調度，並開展了魚類繁殖期水量調度（試驗）、水污染應急調度等其他調度工作。

### 一、珠江枯水期水量調度

珠江枯水期水量調度涉及西江天生橋、光照、龍灘、岩灘、百色以及北江飛來峽等水庫（電站），具有調度歷時長、供水線路長、涉及面廣、影響因素多等特點。歷次水量調度，除需做好技術支撐外，還需開展大量行政協調工作，兼顧多方利益。調度工作大致可分為三個階段。一是 2005、2006 年的“被動應急，壓制鹹潮”。應對鹹潮上溯，緊急實施壓鹹補淡應急調水，緩解了澳門及珠江三角洲地區春節期間的供水緊張局勢。二是 2007—2010 年的“主動應對，統籌兼顧”。這期間珠江壓鹹補淡開始轉變調度思路，變應急為主動，探索開展整個枯季的水量統一調度，為之後幾年水量調度創造了良好條件，積累了豐富的調度實踐經驗。三是 2011—2018 年的“水量配置，統一管理”。在總結前兩階段調度實踐經驗的基礎上，組織編制了《珠江枯水期水量調度預案》，並經國家防總批復實施。

經過 15 年的探索與實踐，珠江水量調度由被動應急轉變為主動調控，由最初調水壓咸發展成兼顧電力、航運、生態的多贏並舉，由單一水庫補水發展到多元化水庫聯合調度，並形成“打頭壓尾”“避漲壓退”“動態控制”等一套先進的流域壓咸調度技術，以及“前蓄後補”和“總量控制”的流域水資源管理模式。珠江水量調度以其科學的工作模式、顯著的調水成效，已為各相關方所認可。14 次水量調度累計向珠海主城區供水 9.58 億立方米，向澳門

供水 3.86 億立方米。

針對調度時間長、涉及部門多、利益矛盾大的困難，珠江防總辦建立了全面的協調機制和不同層次工作組。為協調好水量調度工作中存在的各種客觀矛盾，珠江防總從方案編制到實施，不斷與貴州、廣西、廣東各省（區）及電力、航運、供水等有關部門溝通協調，力求通過及時有效的溝通協調，共同克服困難，確保調度工作順利實施。珠江三角洲受水地區建立了“三方例會”機制，每旬集中補水結束後，由珠江防總辦召集，廣東省及澳門特區相關部門參與，三方進行情況通報，確保搶淡補庫工作順利開展。

## 二、其他水量調度

為減緩西江幹流梯級工程開發建設對魚類繁殖的影響，2016 年至今連續 3 年實施魚類繁殖期水量調度（試驗），在確保流域防洪安全的前提下，充分利用流域兩洪資源、統籌兼顧各方需求，通過優化紅水河龍灘、岩灘、橋鞏，柳江紅花，鬱江西津，潯江長洲等主要水電站以及其他相關電站的調度，調節西江幹支流控制斷面洪水過程，為目標魚類產卵繁殖提供更優越的生境條件。

2010 年、2012 年、2013 年流域先後發生了廣東北江鉅污染，廣西龍江鎘污染，賀江鎘、鉅污染，珠江委及時啟動應急調水，通過上游水庫（電站）聯合調度，在較短時間內緩解了突發水污染事件對供水安全的威脅，發揮了流域機構在處置跨省水污染事件中的綜合調度和協調作用。

## 三、調度管理中存在的問題

多年的水量調度工作，有力保障了區域供水安全，但也存在統一調度管理權缺位、法制保障缺失等問題。

一是“多龍管水”及法規層面調度主體不明，致使統一調度管理權缺位。近年來，流域幹支流大型梯級工程逐步建成，但各類工程分

屬不同地區和行業，利益共同點難以平衡，水調與電調、航運等矛盾突出。目前水庫（電站）興利調度由電網、電廠負責，由各省（區）相關部門負責調度，沒有形成協調上下游、左右岸的利益平衡體系，沒有建立分級調度規則，不能確保流域供水安全和生態安全目標的實現。

二是缺乏法律保障致使統一調度中政令難通，行政效能低。目前實施的珠江水量調度，缺乏法律保障機制和責任追究機制，受利益驅動，違反調度指令情況時有發生，影響行政效能。例如，2006 和 2007 年，龍灘水電站和長洲水利樞紐在調度關鍵期分別發生了違規截流事件。事後，唯一手段只能發文通報，對電力企業並未形成規範、警示作用。

## 參、珠江水量調度立法的必要性

近年來，習近平總書記關於治水和生態文明建設發表了一系列重要講話，提出了“節水優先、空間均衡、系統治理、兩手發力”的治水方針，《國務院關於深化泛珠三角區域合作的指導意見》（國發〔2016〕18 號）明確提出“加快制定出臺珠江水量調度條例”，《粵港澳大灣區建設三年行動方案（2018—2020 年）》也將制定《條例》列為重點任務之一。

（一）制定《條例》是支撐粵港澳大灣區繁榮穩定發展，保障國家戰略順利實施的要求

一是貫徹落實粵港澳大灣區發展規劃綱要的需要。粵港澳大灣區人口約 7000 萬人，地區生產總值約 10 萬億人民幣，是我國開發程度最高的區域之一，但本地水資源可利用量嚴重不足，蓄水工程供水量僅占 21%，可供水量受制于天然來水以及上游供水。中央要求建設富有活力和國際競爭力的一流灣區，對大灣區水資源安全保障提出了更高的要求。為保障大灣區水安全，須按照《粵港澳大灣區發展規劃綱要》要求，加快制定珠江水量調度條例。



二是事關“一國兩制”國策的順利實施，支撐港澳地區長期繁榮穩定發展的要求。目前，香港約 70% 用水通過東江水量調度提供，澳門約 97% 用水通過西江、北江水量調度提供。因咸潮引發的供水安全問題，曾引起珠海、澳門及珠江三角洲社會各界人士的極大關注，甚至曾因用水問題出現市民集會遊行的情況，不解決好飲水問題，可能影響到港澳地區經濟穩定發展和社會安定團結。因此，有必要通過制定《條例》，從法律層面保障流域水量統一調度順利實施，支撐港澳地區長期繁榮穩定發展。

三是落實國務院已批相關規劃的需要。經國務院批准同意的《珠江流域綜合規劃（2012-2030 年）》《珠江流域及紅河水資源綜合規劃》《保障澳門、珠海供水安全專項規劃》均明確提出制定珠江水量調度條例，建立珠江水量調度的長效機制，加強對流域梯級水庫群的水資源統一調度管理。

(二) 制定《條例》是貫徹落實水法，強化依法治水管水的要求

《水法》規定，國家對水資源實行流域管理與行政區域管理相結合的管理體制，實施流域水量分配和水資源統一調度，其第 46 條明確規定：“縣級以上地方人民政府水行政主管部門或者流域管理機構應當根據批准的水量分配方案和年度預測來水量，制定年度水量分配方案和調度計畫，實施水量統一調度；有關地方人民政府必須服從。”目前，西江、北江、東江水量分配方案已基本完成，為落實《水法》關於水量調度的制度設計，全面落實水量分配方案，實施水量統一調度，合理配置生活、生產和生態用水，嚴格流域用水總量和重要斷面水量下泄控制，有必要通過制定《條例》，建立符合珠江實際的水量調度管理制度，明確水量調度許可權、責任和程式，強化水資源監管要求。

(三) 制定《條例》是解決水量調度過程中

暴露的諸多矛盾，保障調度順利實施的要求

多年的水量調度工作，有力保障了流域區域供水安全，但調度實施過程中協調難、效能低等問題十分突出。首先，珠江中上游各類水庫電站分屬不同地區和行業管理，牽涉部門多，協調工作难度大，調度實施過程中違反調度紀律、不執行調令的情況時有發生，單靠行政措施難以達到應有的效果。其次，珠江上中游的骨幹水庫電站大多未賦予水資源配置的功能，相關法律賦予流域管理機構在常態下調度水資源的職權不清晰，過多採用臨時性應急調度行政措施，不利於形成長效機制。第三，由於缺乏制度規範，批准程式複雜，水量調度啟動時間與條件無法相互保證，當應急措施啟動後，可能存在上游水庫無水可調或水量不足等情況，影響電廠生產效益，加重電網調度難度。因此，有必要通過制定《條例》，從法律層面協調有關利益主體的關係，推進珠江水量調度工作規範化和制度化，保障水量調度高效與有序開展。

(四) 制定《條例》是建立水量調度長效機制，將實踐證明的有效措施上升為法律的要求

多年水量調度積累了豐富的實踐經驗，為制定《條例》奠定了堅實的基礎。2005 年至今，珠江委連續 15 年組織實施珠江水量統一調度，並自 2016 年起開始實施西江幹流魚類繁殖期水量調度。通過多年調度實踐，形成了“打頭壓尾”“避漲壓退”“動態控制”等一整套成熟的流域壓咸調度技術體系，以及“前蓄後補”“總量控制”的流域水資源管理模式，逐漸探索出了上下聯動、協調有效的調度管理組織體系，以及適合珠江實際的流域水量統一調度實施程式，明確了保障調度目標實現的主要控制性工程和控制斷面，基本形成了一套有效的資訊報送和監督檢查方式，實現了供水、發電、航運、生態等多目標共贏。但是，上述行之有效的行政措施缺乏法律保障，難以形成長

效機制。因此，有必要通過制定《條例》，將這些被實踐證明的有效措施法制化。

## 肆、建議

加快珠江水量調度條例立法，要注重流域特點，針對主要問題，完善條例框架設計，同時要將調度管理實踐經驗總結提升並學習其他流域立法經驗。

一是注重體現流域特點。針對珠江水資源總體豐富，時空分佈不均的特點，建立適應於流域水情的水量分配和用水總量控制制度，通過河道斷面控制和區域用水總量控制管理，主動約束、規範人的行為，合理配置河道內、河道外用水，保障流域的供水安全和生態安全。

二是堅持問題導向。針對珠江流域水資源分佈與經濟社會發展佈局不一致的問題，以及粵港澳大灣區水安全面臨的水資源、水生態、水災害問題，完善大灣區取用水管理制度。通

過節水管理、用水管理，抑制大灣區不合理用水需求，推動大灣區城市經濟增長和轉型升級；同時建立流域水資源統一調度制度，通過流域西、北、東江聯合調度，合理配置流域水資源，保障流域經濟社會發展合理用水，尤其是保障粵港澳大灣區發展用水。針對目前調度中遇到的職責許可權不清、操作性不強、行政效能低等問題，設定水量調度分級管理、大灣區用水總量控制和協商制度、後汛期蓄水管理制度等，明確管理許可權和職責，以及調度程式和措施等，規範珠江水量調度管理。

三是注重實踐經驗的總結提升。條例要在總結十五年珠江水量調度工作經驗基礎上，結合珠江流域重要跨省江河水量分配及用水總量管理工作經驗，因河施策，將最嚴格水資源管理制度、河長制有關要求和水利部強監管的工作總基調總思路轉化為法律制度納入其中。

## 中國傳統灌溉工程特征及遺產保護策略

李雲鵬<sup>1</sup>

### 摘要

灌溉工程的發展對農業經濟和人類生計具有基礎支撐地位，世界灌溉工程遺產的設立對保護人類灌溉文明、傳承灌溉農業文化、挖掘推廣可持續灌溉的曆史經驗發揮了重要作用。特有的自然環境和社會發展使灌溉工程在中國得以長期持續發展，創造了類型豐富、型式多樣的傳統灌溉工程，並對中國社會經濟和文化發展產生了深遠影響；在當前大力推動文化強國和鄉村振興戰略實施的背景下，灌溉工程遺產保護具有多重現實意義。本文以我國已申報成功的世界灌溉工程遺為例總結了中國傳統灌溉工程的基本特征，闡釋了當前發展形勢下灌溉工程遺產保護的理論與現實意義，並提出保護策略建議。

**關鍵字：**灌溉工程遺產、水利遺產、水利史、鄉村振興、生態水利工程

---

<sup>1</sup>中國水利水電科學研究院水利史研究所所長助理、水利部減災中心水利史研究部主任，高級工程師

## 壹、前言

2014年以來，隨著“世界灌溉工程遺產”名錄設立和持續評審收錄，古代灌溉工程及其科學與文化價值受到越來越多的關注和研究。中國作為農業大國，灌溉發展的歷史與中華文明的歷史同樣悠久。特有的自然氣候條件，使灌溉成為中國農業經濟發展的基礎支撐，歷史上產生了數量眾多、類型多樣、區域特色鮮明的灌溉工程，許多至今仍在發揮功能。灌溉工程遺產是中華文化遺產的重要組成部分，歷史灌溉水系是許多古城、古村鎮的重要環境保障和文化基因。科學保護灌溉工程體系、挖掘傳承區域特色水利歷史文化，是鄉村振興戰略實施的重要環節。延續至今的灌溉工程遺產都是生態水利工程的經典範例，以世界灌溉工程遺產的申報與可持續保護利用為契機，深入挖掘並向世界展現中國灌溉歷史文化，研究總結其科學技術、文化價值及管理經驗，對助推鄉村振興、生態文明建設和水利工程的可持續發展，具有重要現實意義。

## 貳、世界灌溉工程遺產

農業在人類文明發展史上具有重要地位，在世界大部分地區灌溉工程對農業的發展至關重要。世界灌溉工程遺產的設立，大大推動了對人類灌溉文明的挖掘與傳承。

### 一、緣起與發展

世界灌溉工程遺產（World Heritage Irrigation Structure，簡稱WHIS）是國際灌排委員會（The International Commission on Irrigation and Drainage，簡稱ICID）在全球範圍內設立的世界遺產項目，目的為梳理和認知世界灌溉文明的歷史演變脈絡，在世界範圍內挖掘、采集和收錄傳統灌溉工程的基本信息、了解其主要成就和支撐工程長期運用的關鍵特性，總結學

習可持續灌溉的哲學智慧，保護傳承利用好灌溉工程遺產。國際灌排委員會成立於1950年，是以國際灌溉、排水及防洪前沿科技交流及應用推廣為宗旨的國際組織，目前成員包括74個國家和地區委員會，覆蓋了全球95%的灌溉面積。2012年在澳大利亞阿德萊德召開的國際灌排委員會執行理事會上，由時任國際灌排委員會主席、中國水利水電科學研究院總工程師高占義發起，國際灌排委員會執行理事會批准並啟動了設立“世界灌溉工程遺產”的相關工作；2013年在土耳其馬丁召開的國際灌排委員會執行理事會討論通過了遺產申報評選的標準、程序、管理辦法，形成初步管理和技術框架；2014年開始正式在全球範圍內啟動遺產的組織申報和評選，每年公布一批。截至目前已公布5批，共計來自中國、日本、巴基斯坦、斯里蘭卡、泰國、韓國、澳大利亞、墨西哥、意大利等9個國家的75項工程列入世界灌溉工程遺產名錄，中國有17處灌溉工程入選。

### 二、遺產標準

世界灌溉工程遺產的申報項目，須由ICID會員國家或地區委員會推薦，每個國家（或地區）每年申報不得超過4項，並經由國際專家組評審，最終在國際灌排委員會於當年召開的國際執行理事會上通過並正式公布。世界灌溉工程遺產分為兩類：至今仍在發揮灌溉功能（List A）；已不能發揮歷史功能但仍具有“檔案”價值的遺址（List B）。

申報世界灌溉工程遺產的工程歷史須在100年以上；工程型式可以是引水堰壩、蓄水灌溉工程、灌渠工程，或水車、桔槔等原始提水灌溉設施、農業排水工程，以及古今任何關於農業用水活動的遺址或設施等。除此之外，工程還必須在以下一個或幾個方面具有突出價值：

a)是灌溉農業發展的里程碑或轉折點，為農業發展、糧食增產、農民增收做出了貢獻；

b)在工程設計、建設技術、工程規模、引水量、灌溉面積等方面（一方面或多方面）領先于其時代；

c)增加糧食生產、改善農民生計、促進農村繁榮、減少貧困；

d)在其建築年代是一種創新；

e)為當代工程理論和手段的發展做出了貢獻；

f)在工程設計和建設中是注重環境保護的典範；

g)在其建築年代屬於工程奇蹟；

h)獨特且具有建設性意義；

i)具有文化傳統或文明的烙印。

## 參、中國灌溉工程遺產及其特點

中國是灌溉大國，也是灌溉古國。由於受季風氣候控制，中國絕大部分地區都需要灌溉工程來調節水資源的時空配置，以此支撐農業發展。自然環境的多樣性，促成中國曆史上建造了數不勝數、類型多樣的灌溉工程。<sup>[1]</sup>作為農業國家，曆史上中國的經濟版圖也與灌溉工程建設分布密切相關。<sup>[2]</sup>據調查統計，目前仍有超過 400 多項古代灌溉工程或系統至今仍在發揮效益。<sup>[3]</sup>截至 2018 年，中國已申報成功的世界灌溉工程遺產項目共計 17 處，是擁有遺產工程類型最豐富、灌溉效益最突出、分布範圍最廣泛的國家。這些灌溉工程遺產集中代表了中國傳統灌溉工程的特點和價值。

### 一、中國的世界灌溉工程遺產

中國積極支持參與世界灌溉工程遺產的申報與保護工作，國際灌排委員會歷史工作組（Working group on history of irrigation, drainage and flood control，簡稱 WG-HIST）成員、中國水利水電科學研究院副總工程師譚徐明連續 5 年作為世界灌溉工程遺產國際評審專

家委員會委員，中國提交的第一批世界灌溉工程遺產申報文本被國際灌排委員會作為範本推廣。在相關技術團隊紮實的基礎研究工作和專業的遺產分析闡釋分析支持下，自 2014 年開始中國連續申報的 5 批共計 17 個項目全部入選遺產名錄（見表 1）。

中國的世界灌溉工程遺產項目分布廣泛（見圖 1），工程類型多樣，涵蓋了有壩引水、無壩引水、蓄水灌溉、井灌、圩田、梯田及古老的傳統提水機械設施等，其中多項遺產發揮綜合水利效益，它們在環境適應性、系統規劃和低影響開發、精細的結構設計、生態型材料構件，以及灌溉管理等方面具有鮮明特色，也具有廣泛的代表性。這些遺產延續使用成百上千年，不少工程在中華文明發展史上具有重要地位，其中體現出來的傳統水利科學技術、建設與使用經驗、傳統治水用水的哲學，以及灌溉管理機制，對現代灌溉的建設和發展依然具有借鑒價值。

### 二、傳統灌溉工程特征

以已列入世界灌溉工程遺產名錄的古代灌溉工程為例，一定程度上反映出中國傳統灌溉工程的一些普遍基本特征。

#### （一）因地制宜

因地制宜是傳統灌溉工程的普遍特點。中國地域廣闊，不同地區的地形地貌、水文水資源等自然地理條件千差萬別，灌溉工程也因所處環境的差異而表現出不同的工程布置、工程型式、結構材料。以灌溉工程遺產為例，其所處地域涉及西北內陸乾旱半乾旱區、南方多雨地區和沿海地區，地形涵蓋平原、丘陵、山地、盆地、湖塗、窪澱等，相應的灌溉工程型式呈現顯著的多樣性與適應性。芍陂利用局部窪地建設三面塘堤成為放射形的蓄水灌溉工程系統；都江堰、甯夏引黃灌渠、鄭國渠、東風堰、長渠等曆史上採用不同形式的無壩引水方

式，；都江堰、通濟堰、漢中三堰、槎灘陂、姜席堰等大多在河流出口建成有壩引水工程灌溉平原盆地耕地；堰壩型式及體系布局也因其所處地形水系環境的差異而不同；它山堰、木蘭陂則因近距海邊，建成拒鹹蓄淡灌溉工程灌溉濱海平原，木蘭陂由于河流洪枯水位變率太大而在堰上又設閘以調節排洪能力，而諸暨趙家鎮則利用地下水埋深淺、回補快的特點採用桔槔井灌溉方式；<sup>[4]</sup>建于高山丘陵上的紫鵲界梯田充分利用了當地土壤地質基礎和豐富的水資源條件，綜合開發水土資源，灌排工程體系充分利用了天然溪流溝澗和條塊梯田進行布置。各地遺產的管理模式也因工程特點、區域文化背景的差異表現出多樣性。中國傳統灌溉工程的多樣性並不是因為追求多樣性而存在，而是在不同的條件下，綜合考慮自然、社會、文化等條件，灌溉、生活用水的統籌協調，以及生態環境的保護和培育，通過最少的工程設施、創造最為適合的工程型式，達到最大的水利效益。

## (二) 系統規劃

優秀傳統灌溉工程體系的規劃往往表現出廣闊的視野和突出的系統性，而工程的效益往往也是多方面的。這個系統性表現在充分考慮地形、地質、水系以及社會條件和需求等所有相關因素，在此基礎上的規劃設計的灌溉工程體系是各組成部分的有機整體、而非單體工程的生硬組合，如紫鵲界梯田、諸暨桔槔井灌等在山水林田湖草的系統思維下對地形地貌的改造和對溝溪水資源和地下水的充分利用，通濟堰渠首樞紐攔河壩、通船閘、排沙閘、進水閘、葉穴排洪閘等工程設施的有機規劃與布置<sup>[5]</sup>；工程系統與自然地理環境的系統整合、而非對環境的硬性改造，如芍陂對局部窪地和自然水系的充分利用；系統考慮區域水土統籌開發和各類用水的統籌供給，如太湖溇港對區域排水灌溉系統的統籌規劃、木蘭陂和它山堰兼有阻

攔鹹潮上溯和蓄積淡水以供灌溉和灌區生活用水的功能，靈渠在水運功能保障的基礎上又充分開發了其灌溉供水效益<sup>[6]</sup>。

## (三) 和諧共生

傳統灌溉工程往往表現出與環境、生態的高度和諧，不僅是低影響開發模式的典範，也塑造出優美的水利景觀。優秀傳統灌溉工程遺產或系統往往採用相對溫和的取水方式和工程型式，最突出的就是如都江堰、甯夏引黃、鄭國渠等的傳統無壩引水型式；有壩引水如通濟堰、它山堰、槎灘陂、漢中三堰等也往往採用低壩引水樞紐型式，以及諸暨桔槔井灌利用地下水的方式，實現水利工程設施滿足灌溉效益的同時對自然環境產生最低程度的影響<sup>[4,5]</sup>。對自然環境並非生硬粗暴的改造，而是遵循自然規律的適度優化，太湖溇港就是通過系統的排水網絡優化沿湖灘塗的生境，發展圩田農業，兼有航運之利，造就了“蘇湖熟、天下足”的繁盛和“人生只合住湖州”的美譽。另外，傳統水利工程常用的幹砌石結構、木椿基礎等材料與構件，相對現代工程常用的鋼筋混凝土等材料，與生態環境具有較好的融合度，長期運行也很少對土壤、河流生態產生負面影響。在這種開發建設理念和技術下，人工渠系大多逐漸融合為自然地理環境的有機組成部分，並且呈現出類似自然水系的生態環境特性。

## (四) 與時俱進

從長久的歷史維度來看，灌溉工程遺產大都表現出與時俱進的特點。許多古代灌溉工程能夠延續使用幾百年乃至上千年，與它們能夠隨著區域環境和社會需求的歷史變化而演變，具有密切關係。鄭國渠與東風堰類似，隨著引水河床的逐漸下切，為了保障引水充足渠首逐漸向上遊遷移，以實現自流引水的目的。芍陂的蓄水面積、水門及渠系隨著歷史進程也發生了巨大改變，總的來說就是隨著人口的增加逐漸圍墾陂塘、灌區耕地逐漸擴大，同時塘堤、

水門、渠系等蓄水灌溉工程體系逐漸完善，區域水資源人工調控能力逐漸提高。<sup>[7]</sup>靈渠也是在湘桂走廊區域社會經濟發展進程中，隨著常住人口的增加和農業生計需要，在水運渠系上逐漸發展起灌溉工程設施，水利功能隨社會需求的增加而拓展。<sup>[6]</sup>一些灌溉工程的管理規章、制度隨著社會的發展、工程體系的演變也逐漸增補、細化和完善，最典型的就是通濟堰和芍陂<sup>[7,8]</sup>。

#### (五) 有效管理

完善的灌溉管理是灌溉工程能夠延續成百上千年的基本保障。傳統灌溉管理可以分為工程管理和用水管理兩個方面，按照管理實施者可分為官方和民間兩個層面；總的原則是政府主導、民間參與，兼顧灌區上下遊的供水公平。通濟堰三源輪灌的管理制度是兼顧灌區各處灌溉用水的典範。<sup>[8]</sup>官方與民間結合的管理制度是在中國傳統社會結構和文化土壤中產生的。由士大夫擔任的地方官員具有興修水利、造福百姓的職責意識和文化傳統；水利公共工程將灌區社會聯接為共同體，由農村士紳階層組織實施歲修等共同義務並協調用水公平。在此基礎上，官方主持大的工程修建，並以政府權威制定和發布“堰規”，指導民間組織實施渠系的日常維護和用水管理。朝代更疊，只要基層社會組織結構未發生巨變，這一管理模式就會延續有效。中國古代的灌溉工程普遍有歲修制度，即在冬春農業用水需求不高時，對灌排渠系、開壩湖塘等進行系統清淤和維修，保障農業用水工程能夠正常運行。芍陂早在三國時期就已建立了歲修制度<sup>[7]</sup>。中國古代灌溉管理的另一個突出特點是以水神崇拜和祭祀儀典為紐帶凝聚政府與民衆，通過紀念工程的創建者和突出貢獻者，使所有利益相關者建立保護遺產、感恩工程的共識，曆史上的都江堰開水節是典型代表<sup>[9]</sup>。在每年的祭祀活動中往往同時舉行年度的管理會議，也通過這種具有宗

教特性的活動加強了管理制度的權威性、管理人員責任的神聖性。

## 肆、灌溉工程遺產保護意義及策略

保護灌溉工程遺產具有重要的文化和現實意義。科學、全面認知灌溉工程遺產的價值和特性，立足當前國家社會經濟文化發展需要，合理確定遺產保護利用管理的宏觀策略。

### 一、保護意義

在當前國家社會經濟發展階段，灌溉工程遺產的科學保護和合理利用對區域社會經濟發展和水利行業改革發展，都具有突出的現實意義。

#### (一) 文化意義

水利是中華民族發展的基礎，水利文化也成為中華文化體系的基礎性構成。兩千多年來灌溉工程一直是中國農業文明發展的基礎支撐，也是中華民族生存之本。灌溉工程遺產是中國文遺產體系中的重要組成，灌溉文化也為中華文化的發展繁榮產生了重要影響。都江堰等成為中華文明的代表性水利工程之一，其所承載的治水哲學成為中華文化尊重自然、順應自然傳統哲學觀的象徵。因此，灌溉工程遺產的保護對深入挖掘和傳承中華民族的優秀傳統文化，增強公眾的文化自信和國家文化軟實力，具有重要現實意義。近年來，世界灌溉工程遺產在國內的影響力逐步擴大，已經成為水利文化面向社會傳播的主要載體；同時隨著國際影響力的擴大，也成為中國水利文化走出去的主要載體，對向世界講好中國故事、講好中國水故事，具有重要的文化意義。

#### (二) 助力鄉村振興

灌溉工程遺產是全域和綜合概念，其構成包括灌溉工程體系及相關遺產、灌區生態環

境，因此與灌區鄉村的農業經濟發展關係密切。2018年中央“一號文件”及《國家鄉村這些振興戰略規劃》都明確提出，要“劃定鄉村建設的曆史文化保護線，保護好文物古迹、傳統村落、民族村寨、傳統建築、農業遺迹、灌溉工程遺產”，將傳承發展提升農村優秀傳統文化作為實施鄉村振興戰略的重要內容。<sup>[10] [11]</sup>深入挖掘灌溉工程遺產曆史文化，以渠系為脈整合灌區內各類文化旅遊資源，推動全域旅遊、休閒農業、觀光農業發展，發展灌區高品質特色農產品，打造世界灌溉工程遺產文化品牌，可以成為推動遺產灌區鄉村振興的有效途徑。

### (三) 助推生態文明建設

灌溉工程遺產能夠持續運行成百上千年，充分體現了其良好的生態環境效應，是經過曆史檢驗的優秀生態水利工程。一些古代灌溉工程成為塑造或優化區域生態環境基礎的水利工程，如甯夏引黃古灌區、太湖溇港、木蘭陂等，其生態功能甚至比灌溉效益更重要。2018年5月，習近平在全國生態環境保護大會上的講話將都江堰作為大型生態水利工程的優秀代表。<sup>[12]</sup>正是由於都江堰的修建，從根本上改變了成都平原的防洪形勢，重塑了成都平原的水系格局，成為“天府之國”的生態基礎。2018年2月水利部印發《加快推進新時代水利現代化的指導意見》，明確將“加強水利遺產保護與利用，保護、傳承、弘揚好傳統水文化，豐富水生態文明建設內涵”作為水利現代化建設的重要內容。<sup>[13]</sup>運用水利史研究的“曆史模型”理論方法，深入挖掘和總結以灌溉工程遺產為代表的生態水利工程建設理念、治水哲學、工程技術特征和運行管理等優秀經驗，為水利現代化進程中生態水利工程建設管理提供參考，對當前生態文明建設和社會經濟可持續發展具有重要現實意義。

### (四) 遺產保護效益

灌溉工程遺產除了承載厚重的曆史文化之外，曆經千百年至今仍在發揮著不可替代的水利效益。以目前中國17處世界灌溉工程遺產的灌溉效益為例，現狀灌溉面積合計約152萬ha，相當於七十多個大型灌區（見表2）。保護維護好這些遺產灌區，比新建灌區投入的經濟成本和管理成本都要低得多，而其水利效益則十分可觀。結合當前水利建設管理體系和水利文化建設發展需要，將灌溉工程遺產納入有效管理，基於保護傳承的理念利用好灌溉工程遺產，應成為當前農水利建設發展的重要工作之一。除此之外，這些遺產對灌區生態環境的維系功能一直延續且不可或缺，同時由於這些遺產地優越生態景觀資質和獨具特色的深厚曆史文化，以及世界遺產的品牌效應，其旅遊、特色農業、以及帶動鄉村經濟的價值逐漸顯現，社會文化服務功能越來越凸顯。

## 二、保護策略

國家和遺產地政府、相關行業部門應重視灌溉工程遺產的保護管理和合理利用，結合鄉村振興、生態文明和文化建設，從政策、制度、規劃、技術和實施等層面推進灌溉工程遺產可持續保護，在新時期充分發揮遺產的綜合價值。本文從宏觀策略方面提出如下建議：

### (一) 加強保護管理

目前灌溉工程遺產普遍存在保護管理缺位的情況。作為還在發揮水利功能的灌溉工程遺產，作為管理主體的水利部門其管理和保護職責主要考慮工程結構安全和灌溉效益的正常發揮，而對其遺產屬性、曆史遺存、文化價值關注不夠。部分已公布為文物保護單位的灌溉工程遺產或構成要素，相關文物部門主要起到保護監管的作用，限于專業差異等原因也難以有效實施保護管理。還有不少灌溉工程遺產如古代鄉村灌溉工程、一些灌區中屬於鄉村或農戶管理層面的遺產元素，在政府層面沒有明確的



保護管理主體。這也是目前水利工程遺產保護管理普遍存在的問題。建議結合機構改革進一步創新管理體制機制，打破或跨越行業、部門藩籬，可以從法定職責上明確水利部門對水利遺產的保護管理職能，並加強水利、文物保護、文化旅遊等之間跨部門務實協調和協作，將灌溉工程遺產納入有效的保護管理序列。

#### (二) 科學適度修復

在社會經濟發展和城鄉基礎設施建設進程中，大部分灌溉工程遺產的歷史形態受到不同程度的破壞或改變。在其遺產價值逐漸被重視、文化功能要逐漸強化的過程中，灌溉工程遺產修復成為普遍需求，同時作為“在用”的水利工程，工程結構的經常性維護、維修也不可避免。遺產修復的基本目標是在保障工程安全有效發揮灌溉功能的基礎上，適度修復或重建已經破壞或消失的歷史科技文化載體，以滿足科普教育的需要。在灌溉工程遺產修復中，應注意如下幾個原則：適度原則，基于遺產現狀和有限目標進行修復，很多時候完全修復至初建形態或某一歷史形態是不可能的，也不一定對延續遺產工程的生命有利；修復方案應有歷史依據，不能憑空想象或生搬硬造；修復的遺產風貌應與周邊環境景觀協調；工程修復或維修時，在滿足結構安全的前提下，應盡量採用或恢復傳統結構、材料，這也對生態環境有利。

#### (三) 合理綜合利用

遺產的合理利用是最好的保護。應統籌協調發揮灌溉工程遺產的水利功能、科普教育和文化傳播功能、旅遊等帶動社會經濟發展的功能，以促進遺產的可持續保護。遺產利用應以遺產安全為前提，灌溉功能的持續發揮是遺產綜合利用的基礎和核心，但不宜盲目擴大引水量及灌溉規模；其他利用方式應立足于遺產的本身特質與功能價值，嚴格控制與遺產價值無關甚至破壞遺產價值形象的商業開發；對文化

旅遊、休閒農業、遺產品牌及相關產品開發要科學引導、有序發展，並建立約束和管理機制。

#### (四) 系統展示宣傳

目前絕大多數灌溉工程遺產的科普教育社會文化服務功能尚未充分發揮。目前，世界灌溉工程遺產已經成為中國傳統水利文化社會傳播的重要載體，應從水利行業文化建設層面加強進一步對世界灌溉工程遺產的系統展示宣傳，比如結合世界水日、中國水周、世界遺產日等策劃組織專題展覽，開展形式多樣的專題宣傳科普活動，向社會公眾展現中華民族悠久的治水歷史和水利科技成就。各遺產地政府應努力提升遺產的展示傳播條件，系統規劃布設遺產實地展示解說設施、改善遺產參觀考察的基礎服務條件，並通過主體網站、專題公眾號等新媒體擴大遺產歷史科技文化價值傳播的廣度與效率，使灌溉工程遺產切實發揮社會文化服務功能的同時，也對遺產地區域社會經濟文化發展產生積極影響。

#### (五) 深入研究挖掘

關於灌溉工程遺產的基礎研究和保護理論與技術研究目前都比較薄弱，這對遺產的科學保護、修復及展示利用都有所局限。目前亟需系統開展灌溉工程遺產的基礎理論、保護修復技術的專題研究，形成灌溉工程遺產界定及構成體系分析、價值評估體系方法、遺產修復工程技術及標準規範、遺產文化展示技術體系、遺產綜合同一管理理論等成套理論與技術成果，為灌溉工程遺產具體保護工作提供基礎支撐。同時，針對部分遺產歷史演變、工程科技特征、管理制度等基礎性問題或難題，鼓勵各方學者開展專題研究、跨學科合作，摸清基本學術問題。深入挖掘不同類型灌溉工程遺產的生態環境影響機理及價值，總結可持續灌溉管理經驗，為現代水利可持續發展提供歷史參考。

## 伍、結論與建議

灌溉工程對人類農業文明發展至關重要，灌溉工程遺產保護和灌溉歷史文化的挖掘具有重要意義，對中國這一農業文明古國尤為如此。通過申報世界遺產使這些傳統優秀灌溉工程得到行業、政府和社會關注，能夠促進遺產的科學保護和合理利用，推動相關研究的發展和優秀經驗的推廣，充分發揮灌溉工程遺產的綜合價值。充分認識灌溉工程遺產的特征與價值，深入開展跨學科基礎研究，以灌溉工程遺產為切入點推進水利遺產的系統保護、有效管理和合理利用。建議加強灌溉工程遺產保護利用管理的宏觀謀劃，針對灌溉工程遺產的“在用”特點和發展特性，研究不同于一般文物的保護理論與保護修複展示技術，形成系列技術標準、規範，切實指導灌溉工程遺產保護利用和管理工作。

## 參考文獻

1. 譚徐明·中國灌溉與防洪史[M]·北京：中國水利水電出版社，2005。
2. 冀朝鼎·中國曆史上的基本經濟區與水利事業的發展[M]·北京：中國社會科學出版社，1981。
3. 王英華，譚徐明，李雲鵬，劉建剛·在用古代水利工程與水利遺產保護與利用調研分析[J]·中國水利，2012（21）：5-7,17。
4. 李雲鵬，譚徐明，周長海，周長榮，萬金紅，劉建剛·浙江諸暨桔槔井灌工程遺產及其價值研究[J]·中國水利水電科學研究院學報，2016,14（6）：437-442。
5. 李雲鵬，陳方舟，王力，鄧俊，萬金紅·灌溉工程遺產特性、價值及其保護策略探討——以麗水通濟堰為例[J]·中國水利，2015（1）：61-64。

6. 李雲鵬·靈渠水利工程體系及其曆史文化特征[J]·中國防汛抗旱，2018，28（07）：63-68。
7. 周波，譚徐明，李雲鵬，萬金紅·芍陂灌溉工程及其價值分析[J]·中國農村水利水電，2016（9）：57-61。
8. 陳方舟，譚徐明，李雲鵬，王力，鄧俊·麗水通濟堰灌區水利管理體系的演進與啓示[J]·中國水利水電科學研究院學報，2016,14（4）：260-266。
9. 曠良波·都江堰灌溉工程遺產體系、價值及其保護研究[J]·中國防汛抗旱，2018，28(9): 72-76。
10. 中共中央、國務院·關於實施鄉村振興戰略的意見[Z]·中發〔2018〕1號。
11. 中共中央、國務院·國家鄉村振興戰略規劃（2018-2022年）[Z],2018。
12. 習近平·推動我國生態文明建設邁上新台階[J]·求是，2019（3）。
13. 水利部·加快推進新時代水利現代化的指導意見[Z]·水規計[2018]39號。

## 圖與表

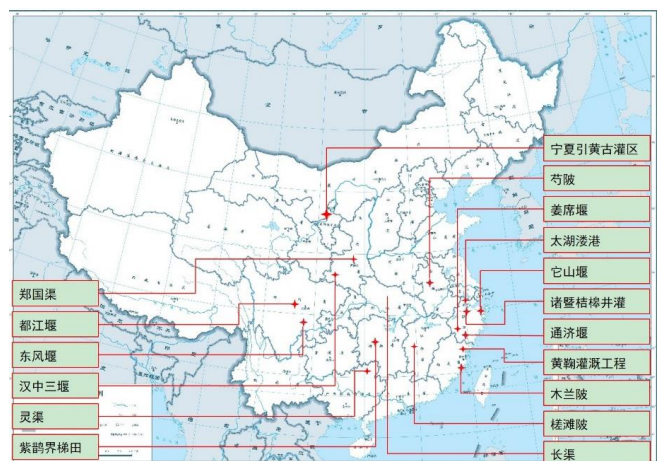


圖 1 中國申報成功的世界灌溉工程遺產分布  
（截至 2018 年）

第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

表 1 中國申報成功的世界灌溉工程遺產

年份	遺產名稱(所在地)
2014	東風堰(四川夾江)，通濟堰(浙江麗水)，木蘭陂(福建莆田)，紫鵲界梯田(湖南新化)
2015	芍陂(安徽壽縣)，它山堰(浙江寧波)，諸暨桔槔井灌(浙江諸暨)
2016	鄭國渠(陝西)，太湖溇港圩田(浙江湖州)，槎灘陂(江西泰和)
2017	寧夏引黃古灌區(寧夏)，漢中三堰(陝西漢中)，黃鞠灌溉工程(福建寧德)
2018	都江堰(四川)，靈渠(廣西興安)，姜席堰(浙江龍游)，長渠(湖北襄陽)

表 2 中國已有世界灌溉工程遺產的現狀灌溉面積彙總表

序 號	遺產名稱	灌溉面積(ha)	序 號	遺產名稱	灌溉面積(ha)
1	東風堰	5153	10	鄭國渠	97000
2	木蘭陂	10867	11	寧夏引黃古灌區	552000
3	通濟堰	2000	12	漢中三堰	14500
4	紫鵲界梯田	6416	13	黃鞠灌溉工程	1333
5	芍陂	44900	14	都江堰	710000
6	它山堰	13829	15	靈渠	4333
7	諸暨桔槔井灌工程	27	16	姜席堰	2333
8	槎灘陂	3300	17	長渠	20000
9	太湖溇港	28000	合計		1515992

# 我國水生態文明建設實踐與思考

## ---以江蘇省宿遷市為例

殷淑華<sup>1</sup>、葉志才<sup>2</sup>、葉麗華<sup>3</sup>、陸毅<sup>4</sup>

### 摘要

為持續深化和推進水生態文明建設進程，落實黨的十八大關於生態文明建設總體布局，水利部部署了兩批105個水生態文明城市建設任務，宿遷是第二批其中之一。在我國水生態文明總體總布局框架下，以江蘇省宿遷市為例，介紹了水生態文明建設的總體思路，從水資源高效利用管理、河道水環境質量提升和維護河湖健康方面分析了宿遷水生態文明的主要成效。總結了宿遷水生態文明建設的實踐創新，創新性的發展了“河長制”，創立了市、縣、鄉、村四級全部配齊河湖警長并制定考核體系；創新發展了片長，對小水塘、小微水體等四級河湖警長，對未覆蓋的水域進行監管；推行行政執法與刑事司法銜接創新生態監管機制，確保河湖生態健康。強化生態文明治水核心，堅持全流域治理理念，健全健全生態文明保障機制體制，強化科技支撐，是推動我國生態文明可持續發展的核心保障。

**關鍵字：**水生態文明、全流域治理、長效責任制、宿遷

---

<sup>1</sup> 中國水利水電科學研究院，業務主管，教授

<sup>2</sup> 江蘇省宿遷市水務局，副局長，高級工程師

<sup>3</sup> 江蘇省宿遷市水務局，處長，高級工程師

<sup>4</sup> 江蘇省宿遷市水務局，節水辦主任，高級工程師

## 壹、前言

黨的十八大報告首次將生態文明建設納入建設有中國特色社會主義的總體布局，其中水生態文明是生態文明建設的重要內容。為落實和進一步推進水生態文明建設，2013年以來，水利部先後分兩批啓動了105個水生態文明建設城市，通過水資源管理制度落實、水環境保護、水生態修復、水安全保障和水文化建設等六個方面，開展水生態文明建設試點工作。本文以江蘇省宿遷市水生態文明城市建設為例，通過總結建設工作的實踐經驗和建設成效，為全國生態文明建設提供借鑒和技術支撐。

## 貳、宿遷市水生態文明建設概況

### 一、宿遷市概況

宿遷市位於江蘇省西北部，地處淮、沂沭泗流域下游，境內河網交織，水系密布，擁有洪澤湖、駱馬湖兩大天然淡水湖泊。作為江蘇省最年輕的地級市，地處沿東隴海綫經濟帶、沿海經濟帶、沿江經濟帶的交叉輻射區，擁有27.7%的河湖水面、24.4%的森林覆蓋率，既是“水產之鄉”，也是“楊樹之鄉”和“花卉之鄉”，水生態優勢得天獨厚。

### 二、宿遷市水生態文明建設簡況

宿遷市是水利部啓動的第二批水生態文明城市之一，通過制度、工程與能力建設，宿遷市基本形成了科學嚴格的水資源管理體系，健康優美的水生態修復體系，清潔良好的水環境保護體系，長效穩固的水安全保障體系，集約高效的水節約推動體系和古今交融的水文化傳承體系（體系圖見附圖1），實現了生態效益、社會效益和經濟效益的協同發展和全面提升，基本形成了“一核、兩湖、三片、四廊、多點”的水生態文明建設總體布局。

## 參、宿遷市水生態文明主要成效

### 一、以“三條紅綫”促進水資源管理

市政府以國家級水生態文明城市試點建設為抓手，出臺了《關於實行最嚴格水資源管理制度的實施意見》和考核辦法，明確分工和責任，年初下達任務，年末開展考核，考核結果通報至各縣區政府（管委會），形成具有宿遷特色的水資源“三條紅綫”管理體系。

全面開展“節水三同時”制度，推動節水設施工程建設。對部分工業園區、重點用水戶開展用水審計，查找用水薄弱環節，推動節水技改，持續推進水資源的有效利用，保障水資源管理成效。

### 二、以生態理念提升河道水環境質量

按照全域規劃、全域設計、全域配套、全域修復、全域清流的“五全”治理思路，市委、市政府出臺《加快推進全市生態河道建設的實施意見》，編制《宿遷市生態河道建設技術導則》，在全市開展百條生態河道建設。把提升污水收集處理能力作為河湖治理的關鍵性和根本性舉措，重點區推進域控源截污、污水收集管網等建設，城市污水處理實現一級A排放標準，城市污水處理率達94.53%；全市鄉鎮污水處理廠2017年底前實現鄉鎮全覆蓋；同時開展河道截污納管、黑臭水體治理，啓動重點河道生態示範河道建設，著力恢復和提升河流的生態功能。

### 三、以依法行政維護河湖生態健康

加大水行政執法力度，全面實施河湖禁采。先通過清理畜禽養殖場，關閉排污口，拆除圍網，清理碼頭、拆除違建，清除阻水障礙，特別是重點打擊洪澤湖、駱馬湖非法采砂，建立高位協調推進機制，紀檢、公安、屬地協同聯合執法多管齊下，配足執法人員、配強執法裝備，限期驅離、限期收購拆解，著力打好依法行政“攻堅戰”，維護河湖持續健康。

水生態建設以點帶面、引領示範，水環境治理和水生態修復工作成效顯著，特色鮮明，特別是駱馬湖，實現了水清、湖安、岸綠的新面貌，重要的水生態指示性物種“銀魚”“魚汛”于2015年重現，標志著經過多年治污工作後駱馬湖水質提升明顯，水生態環境顯著改善。

#### 四、打造宿遷市特色水文化

2014年6月，大運河成功入選世界文化遺產名錄，成為我國第46個世界遺產項目。“大運河”文化遺產由隋唐宋時期以洛陽為中心的隋唐大運河、元明清時期以北京、杭州為起始的京杭大運河以及從寧波入海與海上絲綢之路相連的浙東運河三條河流組成，涉及沿綫8個省市27座城市的27段河道和58個遺產點，是世界上開鑿時間較早、規模最大、綫路最長、延續時間最久的運河，被國際工業遺產保護委員會在《國際運河古迹名錄》中列為最具影響力的水道。大運河宿遷段（中運河）是大運河浙東運河的重要環節，結合宿遷河流悠久歷史文明、城市特色文化與河流景觀，運河沿綫先後建設了宿遷歷史博物館、宿遷水文化展示館、宿遷水利遺址公園和泗陽媽祖文化園等文化基地，打造了蓋世英雄楚霸王項羽故居——項王故里，多方位呈現了因水而興的宿遷歷史和現在。其中，宿遷水利遺址公園創成國家級水情教育基地，宿遷水文化展示館創成省級節水教育基地，泗陽媽祖文化園更是千里運河上首座媽祖文化園，充分體現了京杭大運河發達的漕運文化，對助力大運河申遺起到關鍵性作用。

#### 肆、宿遷市水生態文明實踐創新

一、以“全流域治理”統領水生態建設  
宿遷市全面貫徹“生態+”理念，積極探索“生態優先、綠色發展”新路徑，切實踐行‘綠水青山就是金山銀山’生態立市理念，按照“控源截污、內源治理、疏浚活水、生態修復、長效管理”的技術路綫，以“一河一策”生態

河道創建為抓手，全力推進“治河、治污、治亂”三大治河舉措，強化“長效管護、履職會辦、督導考核”三項生態河道建管工作機制；通過“強化生態引領、強化控源截污、強化典型示範、強化河長履職、強化建管機制”等多個強化措施，建立健全河湖長效管護機制。

#### 二、健全健全河湖管控長效責任制

河長制是水生態文明的重要舉措之一，也是當前治水工作的一個重要抓手。“四級河湖警長”是宿遷市對河長制的創新和發展，以“河湖警長制”為抓手，創建了河湖管護體制機制創新試點，全國首創市、縣、鄉、村四級全部配齊河湖警長并進行考核；創新發展了片長，對小水塘、小微水體等四級河湖警長，對未覆蓋的水域進行監管，實現市域水體河湖警長監管全覆蓋，切實把“黨政主導”落實到位。各級河長履職盡責，充分摸清河湖家底，啓動“一河一策”河長手冊編制，建立長效保潔機制，落實經費和專職隊伍，通過定期巡查，一綫交辦，逐級督辦，形成良性的河湖管理保護格局，為水生態文明建設與管理提供强有力的制度保障。

#### 三、推行行政與刑法銜接創新機制

行政執法是生態河湖長期健康安全的保障，針對洪澤湖和駱馬湖的特點，宿遷市委市政府統籌國土資源、環保、水利等部門的涉水行政執法職能，認真研究解決河湖保護重點、難點和熱點問題，確立“打、巡、停、查、拆”五項工作舉措，對涉河涉湖違法犯罪進行打擊；創新設立“生態巡迴法庭”，實時、現場依法審理生態案件。宿遷市創新開展的行政執法與刑事司法相銜接的工作機制，為水生態文明健康長效管理提供了强有力的執法保障。

#### 伍、結語

##### 一、強化生態文明治水核心

生態文明建設是推動水利現代化的核心內

容和重要舉措，宿遷水生態文明城市建設成效表明，水利部大力推進水生態文明建設，有效促進了我國自然生態系統的健康循環和城鄉人居環境的改善。宿遷水生態文明建設中“生態水利”、“資源水利”和“民生水利”三者和諧統一，協調發展，為我國水生態文明建設起到積極的示範作用。

## 二、堅持全流域治理理念

堅持全流域系統治理理念，緊密圍繞水生態系統的基本功能，全面分析水患災害的調節和防護功能、水資源供給和保障功能、生態系統的維護功能、生態景觀功能和文化載體功能，結合當地實際，因地制宜、科學制定水生態文明建設方案，依托專項治理和修復保護工程，穩步推進水生態文明建設。

## 三、健全健全生態文明保障機制體制

生態文明建設需要完善的機制體制保障，更需要強化科技的支撐力度。繼續推動建立水生態文明長效運行機制，將水生態文明建設作為一項長期任務，繼續完善水生態文明建設的目標體系、考核辦法、獎懲機制，加強專項指標評估和政府績效考核；強化環境審批，嚴格環境准入，建立有效的源頭防控體系；河湖管理和獎勵與問責機制。

## 四、強化科技支撐

科學技術就是生產力。在進一步鞏固水生態文明建設成果的基礎上，強化科技支撐力度，加強推廣和應用低影響開發建設模式；進一步完善防災減災預警信息系統，全力提升信息化精準化水平；提升全過程水質實時監控水平；強化科技精準支持，提升行業生態文明創新驅動。

## 參考文獻

- 1.中國水利水電科學研究院 (2018),「宿遷市水生態文明建設評估報告」。
- 2.張建雲,李雲,王小軍 (2016),「我國水生

態文明建設的認識和思考」,中國水資源,第19期,第8-11頁。

- 3.陳進 (2013),「水生態文明建設的方法與途徑探討」,中國水資源,第4期,第4-6頁。
- 4.陳明忠 (2013),「關於水生態文明的若干思考」,中國水利,第15期,第1-5頁。

圖與表

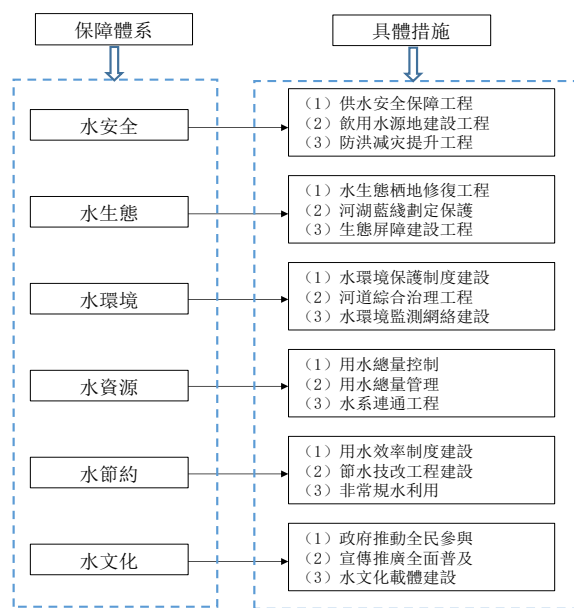


圖 1 宿遷市水生態文明建設體系圖

# 黄河基层信息化项目实施与展望

李杲<sup>1</sup>，邢天明<sup>1</sup>，董栋<sup>1</sup>，孙扬帆<sup>2</sup>

## 摘要

近几年，作为河南河务局市局级信息化试点单位，焦作河务局认真分析治黄业务，特别是基层防汛方面的工作需求，不断推动基层信息化与治黄业务深度融合。笔者首先从专网升级与覆盖、坝岸险情监测、防汛决策与云视频会商等几个方面，介绍了2013年8月—2018年5月焦作河务局等单位开展的“坝岸险情智能监测系统”项目，并对已开展或即将开展的项目进行了展望。该局按照“科技牵引、信息融合、共建共享、多元筹资”的原则，多措并举，提高基层信息化工作建设水平，取得了很好的成效。

**关键词：**专网升级与覆盖；坝岸险情监测；防汛决策；云视频会商；基层；黄河；信息化

## 壹、概述

近几年，焦作河务局作为河南河务局市局级信息化试点单位，认真分析治黄业务，特别是基层黄河防汛方面的工作需求，不断推动基层信息化与治黄业务深度融合。按照“科技牵引、信息融合、共建共享、多元筹资”的原则，多措并举，提高基层信息化工作建设水平，取得了一定成效。为改变“巡查靠人眼、决策靠电话”的防汛工作现状，2013年8月—2018年5月焦作河务局等单位开展了“坝岸险情智能监测系统”的研发与应用工作。该系统是国家公益性项目“坝岸变形监测系统”的延续与升级，“坝岸变形监测系统”是清华、台湾新竹交大两所知名大学和河南河务局、焦作河务局共同研发的项目，后因成本和实用性等原因，停滞在实验阶段。“坝岸险情智能监测系统”研究内容包括专网升级与覆盖、坝岸险情监测、防汛决策与云视频会商等几个方面。

## 贰、实施

### 一、专网升级与覆盖

近几年，焦作河务局3次对基层黄河专网进行升级改造，2次对移动信息采集系统进行升级，3次对基层黄河专网管理系统进行研发、扩展与更新，2016年5月基本完成了焦作黄河河道、堤防、涵闸等防洪工程的专网覆盖。项目采用“混合型网络结构”构建网络基础，以自主研发的“新型储备应急信息采集装置”和“基层黄河专网管理系统”为支撑，完成了防洪工程网络覆盖，实现了“黄委-省-市-县-班组-防洪工程”六级网络访问，为“智慧黄河”基础数据采集、传输提供了“快速通道”，为治黄业务提供了电信级的技术与服务。项目采用“光纤+无线+备用线路”的混合型网络结构，实现了干支路网络接入和传输的灵活性，提高了骨干网络传输带宽和系统安全性、可靠性，采用定制专用天线转换器进行传输协议转换，提高了抗环境干扰能力，从物理上减少了设备间相互干扰；研制的新型储备应急信息采集装置实现了现场数据采集，数据传输，网络覆盖等功能，提高了数据的采集、传输的及时性和稳定性，将网络接收设备和便携式升降杆作为防汛备件，为基层实现信息化提供了保障；研发的基层黄河专网管理系统，实现了对网络设备的一体化管理，使网络易管可控；根据防洪工程位置、原有通信基站位置、接入设备数量和覆盖设备性能，采用点对点和大角度覆盖设备用于专网无线覆盖，且两种覆盖设备可共用AP，完成了防洪工程的网络覆盖。

<sup>1</sup> 河南黄河河务局 焦作黄河河务局，河南 焦作 454000

<sup>2</sup> 焦作黄河河务局 温县黄河河务局，河南 温县 454850



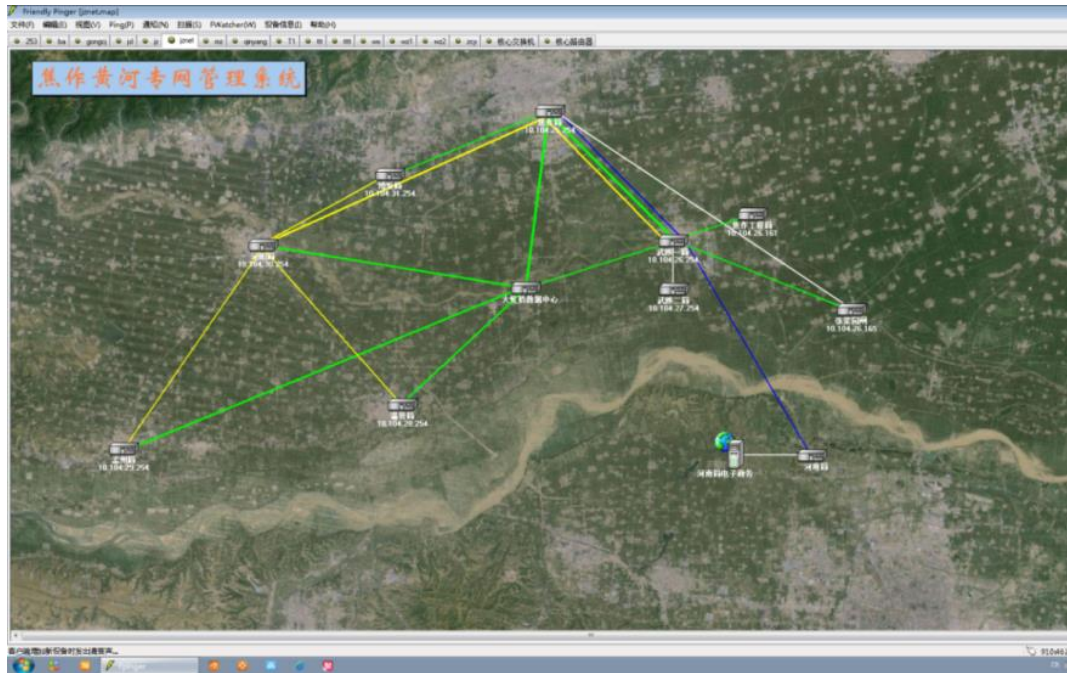


图 1 改造后焦作河务局网络结构

## 二、坝岸险情监测

“黄河坝岸险情监控报警报险系统”项目实施分两个阶段，第一阶段研发了集监控、报警和报险三种功能为一体的智能监测系统，实现了黄河坝岸险情的远程实时监测及工程现场的信息采集，为险情的及时、有效抢护和保障黄河防洪工程安全提供了重要技术手段；第二阶段对坝岸监测供电及传感系统关键技术进行了改进，改进后的供电及传感系统更便于坝岸监测系统的推广和系统的稳定运行。研发过程中应用多项现代信息技术，改变了“巡查靠人眼、决策靠电话”的防汛工作现状，并在河南黄（沁）河多处防洪工程中得到应用。系统单坝建设成本 10 万元，价格优势明显且维护、操作简便，安装后可实现险情的“抢早抢小”，节约抢险资金。该系统研发的基于高分子聚合物的传感系统，可将数据实时上传至监测系统，实现对防洪工程险情的远程实时监测，险情发生后可持续保持监测能力；研发的黄河坝岸险情报警报险系统，可实现不同部位的自动报警，并与视频监控系统联动进行远程险情确认，能自动生成出险时间、地点、部位、现场图片等相关信息的险情数据包，且具备多级审核功能；研制的新型移动信息采集装置，可针对突发险情进行现场实时监测，实现环境信息采集、数据传输、音视频转播等功能。在推广与应用过程中，对供电及传感系统关键技术进行了改进，使用智能型太阳能控制器和纯正正弦波逆变器，对供电系统重新设计，有效提高了对坝岸监测系统的供电保障率；采用铰连接配合电动葫芦，改进了太阳能供电系统安装支架，保证了黄河防洪工程监测、监控等系统的稳定运行；采用聚脂塑钢线替代碳纤维线作为传感线，并在根石上打孔，传感器安放在玻璃钢表箱内可保护传感器，运行维护方便，监测系统运行稳定。



图2 黄河坝岸险情监控报警报险系统(大玉兰)主界面

### 三、防汛决策与云视频会商

“基层防汛决策与云视频会商系统”项目实施分两个阶段，第一阶段研发了集互动式电子防洪预案、图形化河势信息、实时工情水情灾情为一体的基层黄河防汛指挥决策支持系统，并使用“无线网络传输”、“H.265 编码”等技术，研发了防洪工程现场便携式视频会商装置，通过软件开发，实现了黄河防洪工程现场与市、县级指挥中心视频会商功能；第二阶段采用“云视频会商”技术通过集成开发，使系统可通过黄河内网、地方公网、手机 4G 等多种通道回传数据，大幅提高信号保障率以及系统适应能力，不需要 MCU 即可组织会议，可实现抢险现场网络覆盖、内网数据传输、内网语音电话等功能，并在焦作河务局及华龙公司异地项目部全面推广。该项目使用计算机编程、数据采集、人机交互技术，研发了适用于市、县、现场三级的黄河防汛指挥决策支持系统，实现了报险、监控、物资管理、视频会商、数据采集系统和防洪预案的高度融合，为各级决策提供了信息支持；通过流量预警自动弹出相应量级防洪预案，并在实景图上标注河道水边线、工程靠溜等最新河势信息，实现人机互动，结合实时险情自动生成抢险方案，为科学防汛决策和有效抢险指挥提供更为直观、可靠的信息；使用“无线网络传输”、“H.265 编码”等技术，研发防洪工程现场便携式视频会商系统，实现黄河防洪工程现场与市、县级指挥中心视频会商功能；通过集成开发，使系统可通过黄河内网、地方公网、手机 4G 等多种通道回传数据，可在视频会商过程中提供电子白板、文档演示、远程桌面控制、文件共享、视频播放等功能。



图3 基层黄河防汛指挥决策支持系统首页

截止 2018 年底，“坝岸险情智能监测系统”先后取得黄委科技进步奖 2 项、厅局级进步奖 6 项、国家发明专利（实审阶段）4 项、软件著作权 2 项、实用新型专利 7 项，通过黄委三新认定 7 项，在公开发行的国内期刊上发表论文 14 篇，参加国际学术交流 7 篇。

## 参、展望

### 一、采取的措施

焦作河务局按照“科技牵引、信息融合、共建共享、多元筹资”的原则，多措并举，扎实推进焦作治黄信息化工作建设水平。一是做好顶层设计，统筹规划，实现焦作治黄工作与信息化的深度融合，为“智慧黄河”建设提供基础数据，以信息化倒逼管理规范；二是加强部门协作，以需求为导向，以科技为牵引，提高项目实用性和前期工作质量；三是信息资源共享，最大限度的利用、整合现有资源，做好信息资源整合共享和应用工作；四是进一步强化网络安全工作，全力保障汛期通信网络及焦作治黄各项业务信息系统安全运行；五是大力做好基层信息化工作，摸清基层信息化现状及需求，信息化建设要与黄委信息化总体建设相衔接；六是多元筹资，通过申请国家资金、利用社会资金、自筹资金的渠道多元筹措资金，加快信息化建设步伐；七是加强领导，注重信息化队伍人才建设，逐步建成一支“年轻化、专业化、专职专岗”信息化人才队伍。

### 二、继续做好推广应用工作

“专网升级与覆盖”项目已焦作河务局局属各单位及防洪工程全面完成推广应用，并在河南河务局局属各单位一线班组完成推广应用，下一步将进一步加大推广应用力度，并实时对专网再次升级。

“坝岸险情监测”项目已在河南黄（沁）河多处防洪工程中得到应用，下一步将进一步加大推广应用力度，在河南黄（沁）河重点防洪工程全面推广应用。

“基层黄河防汛指挥决策支持系统”项目已在大玉兰、温县河务局和焦作河务局三级部署，下一步将在焦作河务局局属各水管单位及重点防洪工程全面推广应用；“基层云视频会商系统”项目已在焦作河务局局属各单位完成推广应用，下一步将在焦作河务局局属各业务部门之间全面推广应用。

### 三、全力做好今年新项目的研发

#### （一）道路限高设备智能管理系统

“道路限高设备智能管理系统”项目，结合黄河防汛实际需要，设计适用于黄河防洪工程的网络传输及电力、控制系统，通过安装在杆体的摄像机、姿态传感器、远程继电控制器等原件，经过系统开发，最终实现防汛道路限高设备智能报警、远程升降、视频监控、批量控制、精细化管理的整体解决方案。系统具备高度可视化界面，易于使用管理，可实现多级联动等功能，为“智慧黄河”提供稳定、可靠的基层数据采集、数据传输、数据反馈平台。

#### （二）沁河砂场智能管理系统

2017年12月以来，为实现对沁河河道采砂管理的规范化、精细化、长效化，全力推进河长制和沁河采砂试点工作，把科学监管作为规范河道采砂的重要前提和根本遵循，研发了沁河砂场智能管理系统。该项目主要采用闸杆、监控、ETC相结合的方式通过车型、计次的方式实现对出场运输车辆进行计量，数据同步传输到数据中心，通过平台对话框实现一车一报量，并实现计量统计功能，有效监控砂场开采量；为有序开采和规范管理，积极探索采砂管理新秩序，杜绝私采滥挖、越界开采等违法采砂行为，项目采用GPS卫星定位系统，通过电子地图和软件设置电子围栏，同时在砂场作业设备上安装GPS卫星定位设备，实现对砂场作业设备实时管控。

“基层云视频会商系统”项目在上面已进行了介绍，不再赘述。现“道路限高设备智能管理系统”、“基层云视频会商系统”和“沁河砂场智能管理系统”三个项目已完成研发，将作为今年重点科技项目申报河南河务局进步奖，并进一步加大推广应用力度。

### 四、对基层信息化项目展望

可以预见，各种基层黄河防汛、工管、水资源等信息化技术如：“模块化坝岸险情智能监测系统”“基层黄河水情监测查询分析系统”、“防汛物资追踪调度系统”、“基层引黄供水智能管理平台”“黄河险情数据分析数据库”、“基层治黄业务综合管理平台”等项目将伴随信息化

与治黄工作深度融合，对治黄业务向“智慧黄河”升级发展产生深远影响。

#### 肆、结语

基层黄河防汛、工管、水资源等综合业务信息化是信息化与治黄工作深度融合的必然趋势，是“智慧黄河”的一种体现。焦作河务局将更好地发挥自身优势，以基层信息化建设、黄河防洪工程信息化项目为基础，推进治黄事业的“互联网+”进程。

# 供给侧结构性改革视角下河湖管护动力机制发展分析 ——基于河长制的思考

李晓晓<sup>1</sup>

## 摘要

供给侧结构性改革是我国经济发展新常态下的战略选择,一切与发展有关的议题都要在这个战略框架下讨论和谋划。在此框架下,诸多领域的发展动力得到拓展和延伸。本文探讨在此框架下河湖管护动力机制的发展演化方向。本文采用理论分析方法,结合实践经验,基于当前全面推行的河长制,分析了河湖管护动力的演化方向。研究认为,河湖管护动力方向基本路线是,由单一由政府主体河湖管护外生性动力机制、到多主体参与的内生性动力机制,最终发展为全社会参与、自动良性循环的内生性动力机制。河长制初步实现了河湖管护动力机制向前发展的推动。河湖管护动力机制向前进一步发展演化需要供给侧改革下一系列制度综合发力,包括完善法规、严格执法,统一规划、产业协同、促进监督、考核和评价、发挥市场机制动力等。

**关键字:** 供给侧结构性改革; 河湖管护; 动力机制; 河长制

---

<sup>1</sup> 水利部发展研究中心, 经济师

## 壹、前言

2015年11月，习近平总书记在中央财经领导小组第十一次会议上首次提出“供给侧结构性改革”，自此“供给侧结构性改革”成为我国“十三五”期间引领经济发展新常态和应对综合国力竞争新形势的重大举措。一切与发展有关的议题都要在这个战略框架下讨论和谋划。在此框架下，诸多领域的发展动力得到拓展和延伸。长期以来作为政府职能一部分的河湖管护，在此框架下也有了新的动力机制的发展演化方向。2016年11月，中办国办印发《关于全面推行河长制的意见》，标志着河湖管理动力机制向前发展迈出了重要步伐。在供给侧结构性改革框架下，在河长制推动下，河湖管理动力机制将进一步向前发展演化。

## 貳、河湖管护动力机制

河湖作为维系城乡发展的重要基础设施，承担着防洪、供水、生态、景观、休闲、人文等多种功能，关系着人们生产生活各方面的公共福祉。河湖管护直接关系这一公共福祉的实现程度。河湖管护动力机制关系河湖管护的持续运转。

根据动力机制的内涵，我们可以将河湖管理动力机制界定为：推动河湖管护所需动力的产生机理，以及维持和改善这种作用机理的各种经济关系、组织制度等所构成的综合系统的总和。简单的说，就是能够推进河湖管护的各种力量及其之间的相互关系。动力机制组成要件可简化分为动力要素和作用机理。动力要素根据作用方式的差异可以分为外生性动力要素和内生性动力要素。

## 參、供给侧结构性改革下河湖管

### 护动力机制发展

#### 一、政府GDP考核下的动力机制

作为生态环境和资源组成部分的河湖，从公共经济学角度来看，河湖产品具有公共产品属性。河湖管护具有明显的正外部性和公益性，一般认为很难依靠调节市场机制提高管护效率和水平，历来作为政府职能的一部分。长期以来政府承担着提供河湖公共产品供给第一责任人的职责。在生态环境公共产品供给中，政府的滞后性、权力寻租性等“政府失灵”行为等越来越成为社会指责的地方，带来的是日益严峻的水体污染、河道断流、湖泊萎缩、生态退化等问题。这一模式下的河湖管护动力机制以社会需求为动力诱因。对于第一责任人的政府而言，在GDP追赶的考核指挥棒下，社会需求动力诱因是外生要素，缺乏自循环作用机理。

#### 二、供给侧结构性改革下河湖管护动力机制发展

供给侧结构改革是我国经济发展新常态下的必然选择。在长期的需求管理策略下，我国出现需求乏力，但并不是消费能力疲弱导致，而是在很大程度上受供给抑制，一是供给结构升级缓慢、创新能力不足等问题抑制居民现实消费需求；二是供给方式不够优化、供需信息不对称导致潜在需求难以转换为有效需求；三是公共产品和公共服务供给不足也制约了消费需求的增长；四是由于缺乏相应的技术设备和原材料供给，资本难以形成对中间品的有效需求。供给侧结构性改革通过生态资源的高效利用，在环境污染的治理和生态建设中尽可能降低资源、能源的消耗，减少对环境的破坏，同时达到同样的产出效果。资源、能源、环境在

经济发展中是必要的投入，以较小的投入获得更多的产出，这是生态文明建设中供给侧改革的核心所在。

从供给侧结构性改革的要义看，在“五位一体”战略布局下，绿色发展成为供给侧结构性改革的突破口。绿色发展理念打破了简单把发展与保护对立起来的思维束缚，指明了实现发展和保护内在统一、相互促进和协调共生的方法论，深刻揭示了自然资源和自然生态作为生产力内在属性的重要地位，阐明了生态环境与生产力之间的关系。

从满足消费端来看，供给侧改革的出发点是去掉过剩的产能，提供真正需要的产品，提高消费的有效性，而当前的绿色消费产品和服务需求正是这样的消费需求，生态环境是百姓最需要的公共产品。习近平总书记强调，从政治经济学的角度看，供给侧结构性改革的根本，是使我国供给能力更好满足广大人民日益增长、不断升级和个性化的物质文化和生态环境需要，从而实现社会主义生产目的。良好生态环境是供给侧结构性改革的题中应有之义，也是评价供给侧结构性改革成效的重要标准。这一改革框架对政府的环境职能提出了新的更高要求。

从供给端来看，供给侧改革的核心是通过制度改革提高全要素生产率，以实现经济可持续发展。提高全要素生产率正是供给侧改革的要义所在。技术、环境等都是全要素生产率下的生产要素。一系列制度改革促进环境生产要素的生产率提升。如政府机构改革、行政审批制度改革可以通过简政放权、激发市场活力、提高企业效率和效益、减少对资源环境的依赖，同样的资源环境消耗有了更高的产出，环境生产率提升；资源产权制度改革、环境制度改革可以直接达到节约资源、保护环境的效果，资源环境作为生产要素在价格机制作用下生产率提升；科技创新制度改革，释放全社会

创新活力，倡导技术创新、机制创新，开创绿色生产消费模式，绿色生产成为企业的研发创新指引。

从供给侧结构性改革和绿色发展的要义看，优质的河湖资源成为生产要素的一部分。在供给侧结构性改革框架下，河湖管护从产品提供的消费端和供给端产生了新的作用机制。满足人们优质的河湖产品成为市场需求的一部分，同时作为生产要素的一部分。在这一作用机制下，河湖管护同时有了外生动力要素和内生动力要素。其中，外生动力要素是对政府而言。在满足人们升级的消费需求、提供人们需要的公共产品的国家战略引导和要求下，对于具有“私利”性的政府行动而言，政府的河湖管护动力加强，初步建立了政府职能下的河湖管护作用循环机制。从满足消费需要的企业端看，生态产品融入到市场机制作用下，有了新的生产动力机制（见图1）。绿色发展理念和供给侧结构性改革框架下一系列制度形成协同发力的综合作用，对企业产品端形成引导和压力机制，促进企业在河湖管护的环境生产要素下，通过产品的绿色化获得市场认可、社会声誉和经济利益等，从而完成了内生性动力机制运转的关键环节构建。

## 肆、河长制促进河湖管护动力机制演化

2016年12月中共中央办公厅和国务院办公厅印发《关于全面推行河长制的意见》，在全国全面推行河长制。河长制的基本内涵是由各级党政负责人担任河长，建立省、市、县、乡四级河长体系。其中各省（自治区、直辖市）设立总河长，由党委或政府主要负责同志担任；各省（自治区、直辖市）行政区域内主要河湖设立河长，由省级负责同志担任；各河湖所在市、县、乡均分级分段设立河长，由同级



负责同志担任。2017年11月中央深改组审议通过的《关于在湖泊实施湖长制的指导意见》延续了这一思路。

“河长制”是在我国严峻的河湖生态环境问题下的行政管理体制创新。河长制围绕河湖管护“职能交叉、权责不清”的核心症结，通过“统一领导、协同作战、明确责任、加强考核”，强化政府河湖管护职责。河长制通过追责效应、协同效应、执行效应等作用机理，促进河湖水环境治理。

河长制抓住当前阶段河湖管护的核心问题，提供的不仅仅是解决河湖问题的一时之策。从促进河湖管护动力机制转变的作用看，河长制有着更为深远的意义。

河长制是供给侧结构性改革框架下的制度改革的一部分。是对政府河湖管护职能外生性动力的现实强化。这一强化机制以严格的考核为动力来源。然而，在河长制掀起的河湖治理氛围和政府职能履行的催化下，来自社会的动力机制也逐步建立。河长制不仅让辖区乡（镇）、村、居委会干部加入到管理队伍，通过河长公示牌公布河长手机号码、环保热线、手机随手拍、举报有奖等形式，让广大群众参与进来，有的地方还吸收环保志愿者、群众代表等参与巡河督查等活动，与企业、第三方服务组织和社会力量汇聚成了一道河流环境防治的强大推力。部分地区往前进一步延伸，建立社会自发性参与的动力机制。在浙江省丽水市章村乡，在对黑臭河、垃圾河治理后，探索了以“河权承包到户”为主要形式的河道经营权改革，让山区“死水”变“活水”，变政府被动治水为全民主动治水，有效解决了农村河道长效管护的问题。浙江省德清县雷甸镇共有四百多户种养殖户，涉及约两万亩种养殖面积。在推进农业水产尾水治理的工作中，引导党员种养殖大户包干自身养殖场周围小微水体，聘请一批种养殖户为民间网格“河长”，鼓励和引

导党员养殖户抱团联动参与剿灭劣V类水体攻坚战，倒逼农业生产走上了生态养殖的道路。河长制下促生的河湖管护内生性动力作用机制如图3。

新制度经济学认为，人们总是在特定制度下做出理性选择，制度对于人们行为选择具有决定意义。河长制这一制度创新对社会各方产生了理性选择下的内生动力机制。一些地方的创新做法从调动公民参与的积极性出发，激发全社会的河湖治理活力，建立河湖治理长效机制。在这一过程从，河长制实际充当了外生性动力向内生性动力转化的催化剂作用。当追逐个人私利有助于实现公共福祉时，就实现了制度的激励相容（见图2）。河长制作为供给侧结构性改革的一部分，抓住当前河湖管护的症结，以短期快速的行动，从启动河湖管理的政府职能的外生性动力，激发了市场、社会的内生性动力。在这一启动下，河湖管护在一系列供给侧结构性改革框架下，可以期望其走上自我实现的良性循环。

## 伍、河湖管护动力机制发展方

### 向——循环动力机制

河湖管护在绿色发展和供给侧制度改革的一系列制度框架下，由单纯的政府一方主体通过外生性动力推动，到河长制下开始初步推动的多方参与的内生性动力作用运转，在这一方向下，可以预期，在经济新常态背景下，按照供给侧改革的设计继续向前发展，河湖管护将朝着更为全面的动力机制发展，最终动力机制是一个以内外生要素为形成基础，以市场需求、社会需求等需求为动力诱因，以政府政策支持、社会协同发力为发展路径的良性循环动力。总之，要通过制度设计、宣传教育等使各主体承担其应有职责，形成一个河湖管护共同体：政府重点做好制定法律法规、政策、标准、

规划,开展试点,提供公共服务等工作;企业努力提高效率,降低资源能源消耗,减少环境污染;各种社会组织应发挥自身优势,开展各种形式的推进河湖管护的活动等;居民应树立河湖保护意识,尽量减少资源能源消耗,减少浪费,控制排放等。

这一自循环动力机制的发展需要完善的制度和执行体系。一是完善环境法规,严格环境执法。在河长制成功经验的辐射下,严格资源环境的问责体系和机制,在山水林田湖体系下,建立资源保护的合力。以法律制度形式明确环境问责的主体、对象、内容、程序、方式、结果运用等一系列制度,用法治的手段将地方政府对辖区环境质量负责的要求落到实处。同时,加大执法力度,提高违法成本,通过强化河湖资源环境破坏的执法力度,使河湖环境管理从被动应对向主动防控转变,从控制局地向区域联防联控转变,全面提升水环境保护的精细化、信息化和专业化水平。二是实施统一规划、产业协同。秉承“河长制”以地方政府领导为环境治理第一责任人的思路,从建立河湖管护自循环动力机制着眼,同时处理好经济发展与环境治理的关系,将环境保护和经济发展置于同等重要的地位,统一规划产业布局,实施产业升级,发展绿色高效的模式。三是完善对水环境治理的监督、考核和评价机制,充分发挥媒体宣传、教育、监督作用,营造群众参与的社会氛围。考核、监测、重点违法案件查处向群众公开,接受社会监督。四是充分发挥市场机制动力,强化的河湖管护自循环动力机制。建立流域环境治理投入多元机制,大力鼓励社会资金投入河流环境治理,从产业政策、税费、金融信贷等方面激活节水、节能及资源合理利用。

## 參考文獻

- 1.陈雷(2016),「落实绿色发展理念全面推行河长制河湖管理模式」,人民日报,2016年12月12日15版。
- 2.郭力,陈浩(2013),「我国城市化动力机制的阶段差异」,城市问题,第1期,第16-19页。
- 3.李佐军(2016),「推进供给侧改革建设生态文明」,党政研究,第2期,第5-8页。
- 4.江小国、洪功翔(2016),「我国供给侧改革的逻辑背景分析」,经济问题探索,第10期,第36-42页。
- 5.易志斌(2010),「基于相容利益理论的流域水污染府际合作治理探讨」,环境污染与防治,第9期,第88-91页。
- 6.王书明,蔡萌萌(2011),「基于新制度经济学视角的“河长制”评析」,中国人口资源与环境,第9期,第8-13页。
- 7.曾广录,李映辉(2013),「论公共产品供给中政府规制的价值逻辑」,求索,第1期,第189-191页。

圖與表

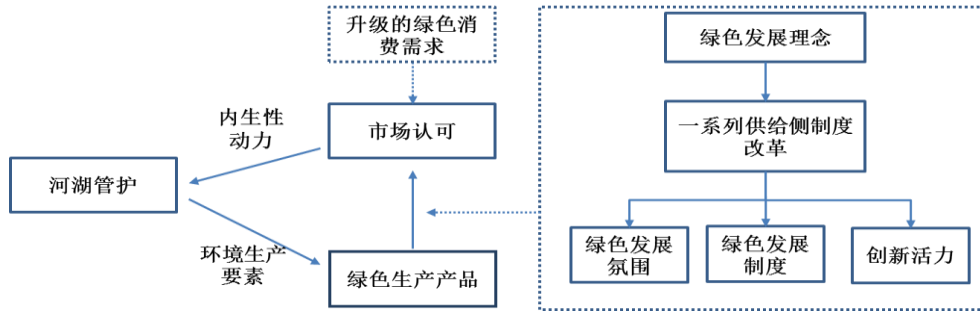


图 1 企业河湖管护的内生性动力作用机制

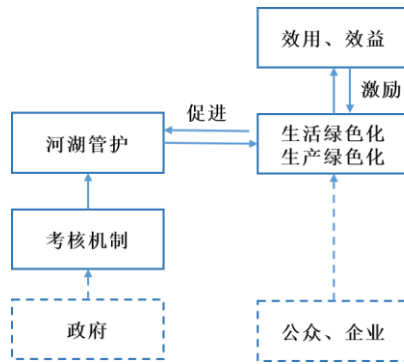


图 2 河长制下促生的河湖管护内生性动力作用机制

## 道路限高設備智能管理系統研發與應用

董棟<sup>1</sup>，李杲<sup>1</sup>，邢棟<sup>2</sup>，孫揚帆<sup>2</sup>

### 摘要

為有效保護防汛道路避免大型貨車碾壓，實現搶險專用車輛快速安全通過，體現“水利工程補短板，水利行業強監管”的總基調，焦作河務局於2018年啟動“智能限高系統”項目。該系統結合黃河防汛實際需要，設計適用於黃河防洪工程的網絡傳輸及電力、控制系統，通過安裝在杆體的攝像機、姿態傳感器、遠程繼電控制器等原件，經過系統開發，最終實現防汛道路限高設備智能報警、遠程升降、視頻監控、批量控制、精细化管理的整體解決方案。系統具備高度可視化界面，易於使用管理，可實現多級聯動等功能，實現了限高設備的智能管理與遠程調度的有機結合，為“智慧黃河”提供穩定、可靠的基層數據採集、數據傳輸、數據反饋平台，提高了工程管理信息化水平，促進信息化與治黃工作的深度融合。

**關鍵詞：**智能限高系統；集成管理；姿態傳感器；控制系統、報警記錄；網絡透傳；視頻監控

---

<sup>1</sup> 河南黃河河務局 焦作黃河河務局，河南 焦作 454002

<sup>2</sup> 焦作黃河河務局 溫縣黃河河務局，河南 溫縣 454850

## 壹、前言

防汛道路管理一直存在一个难题：如何在有效保护防汛道路及抢险专用路段，避免大型货车碾压的同时，实现抢险专用车辆快速安全通过。其面临的主要问题包括：设备安装地点偏僻，网络及电力无法保证，起闭频率不高但及时性较强，起闭操作及碰撞事故无法有效记录并留存证据等。

基于以上问题，防汛道路管理目前仍处于被动巡查，粗放式管理模式。在汛期无法做到及时调度，影响抢险效率；在日常管理中容易出现管理漏洞，放入违禁车辆造成抢险路面损坏。

为解决这个难题，同时体现“水利工程补短板，水利行业强监管”的总基调，武陟第二河务局联合焦作河务局于 2018 年 10 月启动“智能限高系统”项目。

## 貳、方法

根据防汛道路管理特点：设备安装地点偏僻、网络及电力无法保证、起闭频率不高但及时性较强、需要分级管理、起闭操作及碰撞事故要及时记录等问题，将系统分为两部分：

### 一、智能限高设备

现场设备分为：杆体、电力系统、智能控制系统、视频监控系统四部分。

#### (一)杆体

杆体设计跨度为 6-8 米，高 5.9 米，限高升降范围 2.3 米-4.5 米，横杆重 400 公斤，单交流电机配合传动轴启动能力 600 公斤，功率 370w，配备机械限位器，防止设备自损。

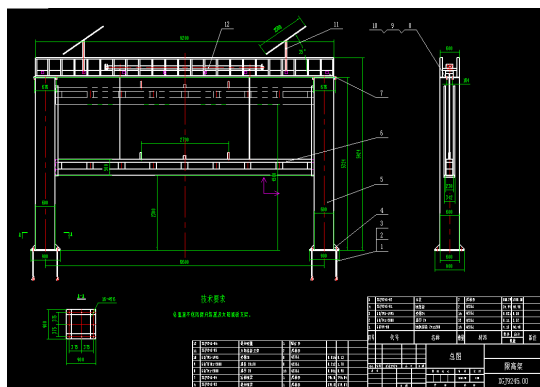


图 1 限高杆设计

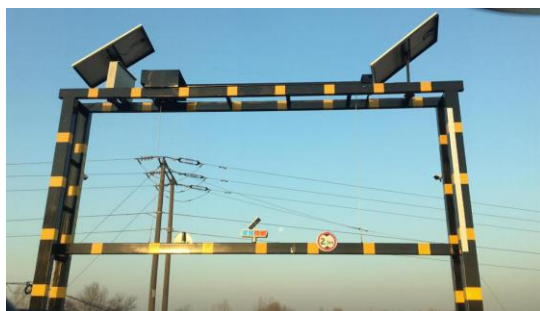


图 2 智能限高杆安装完成图

#### (二)电力系统

现场如能提供 220V 交流电，可直接引入系统使用。如不能提供，可搭配定制太阳能供电系统。该系统包括两块 300W 单晶硅太阳能面板，定制动力锂电池，可确保在滩区恶劣环境中持续使用 48 小时（日起闭次数小于 20）。定制太阳能控制器及交直流逆变器，可实现馈电后自动待机，待第二天电量充满后自动启动。如馈电时需紧急起闭，可使用手动或移动外置电源紧急起闭横杆。



图 3 电力系统安装图

(三) 智能控制系统

该系统为自主研发，具备网络传输、网络透传、电机控制、数据交换、姿态传感等功能。

系统具备标准 tcp/ip 协议网络接口，可接入黄河专网、地方宽带等网络，也可使用联通、移动 4G 网络，使用“网络透传”技术连接后台系统，从而实现该系统在滩区道路的任意位置安装布设。

使用姿态传感器，以 20Hz 的频率采集杆体的角度、角速度及加速度，通过网络传输至远程管理系统，经过分析后实现碰撞报警。

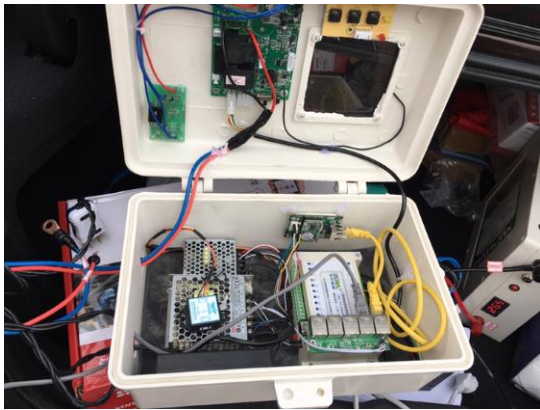


图 4 智能控制系统调试图



图 5 姿态传感器数据采集

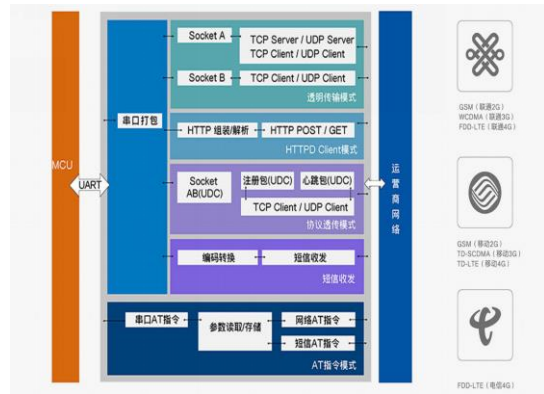


图 6 数据传输原理图

(四)、视频监控

限高设备视频监控有两个需求：1、获取车辆牌照信息。2、现场及杆体监视。

为满足以上需求，项目组进行了优化设计，采用两台摄像机，安装于杆体立柱上。一台 8mm 焦距摄像机拍摄车辆牌照，另一台 180 度鱼眼摄像机可覆杆体及两侧道路 40 米范围，相较传统 3 台普通摄像机的设计，可大幅降低现场视觉死角。另外，因减少一台摄像机，网络带宽、电力等消耗也随之减少，可降低整体造价及后期维护成本。



图 7 180 度鱼镜头拍摄画面



图 8 8mm 焦距镜头拍摄画面

## 二、智能管理系统

研发的系统管理平台，具备图形化管理界面，多用户权限管理，用户操作记录，手机 app 端、碰撞报警记录、语音、短信报警，实时视频监控等功能。

系统主要界面及功能如下

### (一)系统登陆界面

可确认登陆人员身份信息。具备系统管理员（可添加设备、增加人员、更改系统设置等）和操作员（控制设备升降，填写报警记录等）两种权限。



图 9 系统登陆界面

### (二)系统主界面

系统主界面使用地图加图标的方式显示设备的具体位置，直观易懂。设备可根据需要动态添加，并具备报警闪烁、当前模式（升、降）、设备在线状态等信息提示功能。



图 10 系统主界面

### (三)设备控制界面

点击地图上点击限高设备图标可进入设备控制界面，该界面可显示视频监控、碰撞报警记录、升降记录等信息，每条记录均配有现场图片作为辅证。在报警发生时也需进入该界面确认报警信息。



图 11 设备控制界面（视频监控）



图 12 升降、碰撞记录及对应照片

### (四)系统设置界面

该界面可进行人员管理、系统信息、报警电话、碰撞系统敏感度（可根据设备单独设定）等设置，对设备参数进行调整。



图 13 系统设置界面

#### (五)手机 APP 远程控制界面

该系统提供手机 APP 控制功能，使用人员需在服务器端注册后方可登陆。APP 系统提供设备选择、在线状态、设备状态、现场查看等功能。操作人员的每次操作均自动记录在服务器端，并自动截取现场图片相互印证，避免出现责任不明，证据不足等管理漏洞。

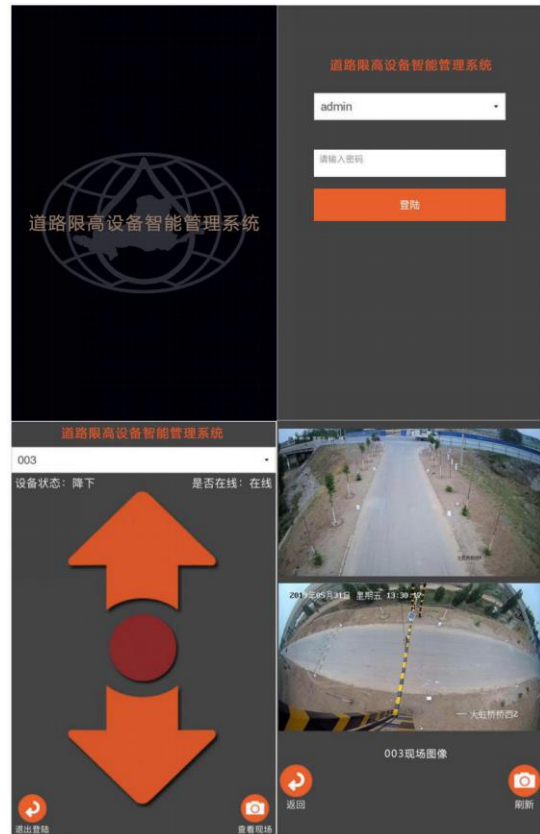


图 14 手机 APP 控制界面

### 三、主要创新点

该系统使用网络透传、姿态传感器、远程控制、智能算法等技术，实现了信息化的道路限高设备方案，提供了一种适用于防汛道路的智能化管理设施。

通过姿态传感器采集加速度、角速度、角度等信息，配合自研智能算法，实现了准确度高，适应性强的智能碰撞报警功能，大幅提高系统的可靠性及稳定性。

通过道路限高设备智能管理系统的研发，实现多台设备集中管理、分级管理、操作及报警信息匹配现场图片并自动记录、语音、短信报警及 APP 云端控制功能，大幅强化了管理能力，探索了一种防汛道路信息化、智能化的管理模式。

### 参、应用

该系统对正、侧面碰撞、非正常提升等工



况均可准确识别，实现使报警准确率 95%以上。运行期间武陟第二河务局水政执法人员，根据碰撞报警及时出警，及时寻获多起碰撞事故嫌疑人，面对视频、图片等信息，肇事者均供认不讳，共追回损失人民币 2000 余元，起到了极大的震慑和宣传作用。



图 15 事故现场抓拍



图 16 碰撞报警记录

该系统实现了强大的管理能力，所有升降操作，无论局端远程控制，还是手机 APP 操作，均会在服务器端生成操作记录，并对应现场照片，管理责任非常明确，因此可将控制权交付有需要的一线工作人员，如洒水车司机、工程车驾驶员、水政等相关工作人员，方便使用的同时，又可有效遏制违规操作、私自放行等行  
为发生，减少管理人员负担的同时提高系统利用率。该系统支持分级管理，可接入上级管理系统，实现跨地区全局管控，极大的提高了设备的管理能力，实现了设备管理与远程调度的有机结合，有效提高工程管理能力的同时大幅提高抢险通过保障率。

#### 肆、结论

该系统可应用于各种类型的道口路闸，除防汛道路外，也可用于公共道路、城市出入、码头渡口等需要交通管制的地点，经过简单改造也可成为仓库、园区、旅游景区的门禁系统，其强大的管理能力及智能碰撞分析算法，填补了市场空白，具备广阔的市场推广前景，也为防汛道路管理提供了一种智能、高效的管理模式。

## 沁河口監控佈設與壩岸監測系統應用

孫揚帆<sup>1</sup>，李杲<sup>2</sup>，邢天明<sup>2</sup>，董棟<sup>2</sup>

### 摘要

2017年4月，為實現對沁河入黃情況實施有效監管監控，焦作河務局在沁河入黃河段佈設了三處監控點，並推廣應用了壩岸險情智慧監測系統。通過採用三個監控點的佈設方案，實現了對沁河入黃河段在小水、大水、回水情況下河勢的有效監控。通過在沁河老龍灣險工7垛安裝應用壩岸險情智慧監測系統，在發生險情時能實現自動報警報險，使防汛工作人員能夠在最短時間內及時發現各種險情，並採取相應措施，節約人工投入，提高工作效率。還可協助開展河道巡查、垃圾治理、泵站引水情況、水尺觀測、班組日常管理、水法宣傳等防洪日常管理工作。

**關鍵字：**監控；壩岸險情監測；沁河口；黃河；太陽能供電；無線傳輸

---

<sup>1</sup> 焦作黃河河務局 溫縣黃河河務局，河南 溫縣 454850

<sup>2</sup> 河南黃河河務局 焦作黃河河務局，河南 焦作 454002

## 壹、研發背景

武陟嘉應觀灘岸坍塌河段位於東安控導工程與桃花峪控導工程之間，2014年、2015年、2017年汛前，經上級同意，武陟第一河務局結合當地政府對嘉應觀不利河勢段坍塌嚴重的灘岸採取了應急防護措施，共修建了9個垛，垛體為土工織物填土結構。在2017年修築7-9垛時，擬在應急度汛工程2垛和8垛上安裝2處監控，用於監測嘉應觀坍塌灘河段黃河的河勢情況。後因兩處監控點距離較近，並考慮到需要同時監控沁河口入黃情況，經河南河務局同意，對原監控點佈設方案予以調整，改為在嘉應觀應急度汛工程2垛、白馬泉引黃泵站渠首和沁河老龍灣險工7垛各佈設一處監控點。2017年4月，對三處監控點進行了設備安裝並投入使用，三點一線，實現了對該河段沁河入黃在小水、大水和回水狀態下的河勢情況的有效監控。

## 貳、研發過程

### 一、監控點佈設

三處監控點均安裝前端高清攝像裝置進行圖像資訊採集，嘉應觀應急度汛工程2垛監控點和沁河老龍灣險工7垛監控點均採用太陽能供電，白馬泉引黃泵站渠首由電網供電。三處均通過5.8G寬頻無線接入設備進行資料傳輸，接入黃河內網，構建了現場-縣局-市局三級傳輸結構，可在電腦和手機端進行畫面切換、放大等操作，並能隨時檢索重播。沁河老龍灣險工7垛監控點同時應用了壩岸險情智慧監測系統，當該險工發生險情時，該系統可實現自動報警。通過三個監控點的聯合佈設，實現了對該河段區間沁河入黃情況，小水、大水、回水情況和河勢情況的監控，以及老龍灣險工險情自動報警功能。

#### (一)嘉應觀應急度汛工程2垛監控點

該監控點主要監控黃河流量在 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 以下小水時，該河段黃河河勢情況和沁河入黃口的河勢情況。該監控點硬體設施由河南河務局瑞達公司安裝，採用太陽能系統供電。前端監控設備採用海康威視球形攝像機，安裝在6米高的懸臂鋼結構上，在實現對嘉應觀灘區塌灘現象監控的同時，可實現圖像採集和水位觀測。並通過無線接入設備，將資料傳輸至武陟第一河務局，實現河勢監控。



圖1 嘉應觀應急度汛工程2垛監控點

#### (二)白馬泉引黃泵站渠首監控點

該監控點位於嘉應觀應急度汛工程2垛監控點的西側，兩地相距約7公里，當黃河流量達到 $7000\text{m}^3/\text{s}$ 大水時，會在此河段區間內發生漫灘現象，導致河勢變寬，黃沁河交匯處隨之移至白馬泉渠首附近，此監控點正是起到監控大水河勢變化情況的作用。

白馬泉引黃泵站渠首監控點由焦作河務局安裝，供電方式採用網電，前端監控設備採用海康威視球形攝像機，安裝在15米高的水泥杆上，實現對水情、河勢的畫面監控，班組工作人員可隨時查看檢索。通過無線傳輸，將資料傳輸至武陟第一河務局，實現河勢監控。並為白馬泉引黃泵站班組提供無線網路，可登錄電子政務內網、訪問互聯網、撥打黃河內線電話，解決班組上網問題，並

有助於班組對供水工作中引水情況、人員情況等日常工作的監管。



圖 2 白馬泉引黃泵站渠首監控點

### (三)沁河老龍灣險工 7 垛監控點

該監控點位於白馬泉引黃泵站渠首西側約16公里，此處是一個“老口門”，當沁河上游來水較大時，易在此處發生大溜頂沖從而引發該處險工出險。同時，老龍灣位於沁河入黃口西側，當黃河大水時，黃沁河交匯處會向西移至白馬泉，與老龍灣距離縮減，黃河水會湧進沁河河道發生回水現象，水位湧高同樣會引發險情。

焦作河務局正是考慮到此處為險情多發地段，所以在老龍灣佈設了監控點。該監控點採用太陽能系統供電，前端監控設備採用海康威視球形攝像機，安裝在12米高的水泥杆上，並通過無線傳輸設備將監控畫面傳輸至市縣局，實現河勢和險情監控，監控畫面還可監控水尺，通過畫面縮放可實現遠端讀數。同時，該監控點還安裝應用了壩岸險情智慧監測系統，如若發生險情，可在第一時間實現自動報警報險。



圖 3 沁河老龍灣險工 7 垛監控點

## 二、設備佈設

### (一)球形攝像機

3處前端監控均採用海康威視球形攝像機，300萬高清圖元，20倍光學變焦，150米夜視，水準方向可360°連續旋轉，支援自動翻轉，無監視盲區。

### (二)供電方式

白馬泉引黃泵站渠首監控點由電網進行供電。

嘉應觀應急度汛工程2垛和沁河老龍灣險工7垛監控點均採用太陽能供電。太陽能供電系統由太陽能光伏元件、蓄電池、逆變器、控制器等部分組成，是集太陽能和蓄電池多種能源技術以及智慧控制技術為一體的複合可再生能源發電系統，能充分利用黃（沁）河灘區豐富的太陽能資源。採用該方式無需敷設電力線纜，施工簡單，可在任何位置佈設，便於提高管理效率和後期維護。同時綠色環保，是一種節能、零污染排放的供電方式。

### (三)資料傳輸方式

三個監控點均採用 5.8G 寬頻無線接入設備接入黃河內網，構建了現場-縣局-市局三級傳輸結構。採用無線傳輸方式較光纖線路鋪

設，一次性投資成本低，無需佈線，擴容能力強，便於維護，不受地理環境限制。

### 三、主要創新點

通過採用三個監控點的佈設方案，實現了對沁河入黃河段在小水、大水、回水情況下河勢的有效監控。

在沁河老龍灣險工 7 垛安裝應用壩岸險情智慧監測系統，在發生險情時能實現自動報警報險，通過對傳感系統和供電系統的改進，更便於該系統的推廣應用。

通過佈設資訊化智慧監測系統，使防汛工作人員能夠在最短的時間內及時發現各種險情，並採取相應措施，節約了人工投入，提高了工作效率。

### 參、推廣應用及效益

壩岸險情智慧監測系統應用：2017年4月將壩岸險情智慧監測系統推廣應用到沁河老龍灣險工7垛，該系統使用“即時資料採集”、“物聯網”、“遠距離無線網路覆蓋”、“智慧型網路視頻監控”等技術，結合防汛實際需要，實現了壩岸監控、查險、報險、資訊採集等整體解決方案。系統具備高度視覺化介面，易於使用管理，可實現多級聯動等功能，為黃河防汛搶險提供高度自動化、智慧化的險情監測手段。

在推廣應用過程中，對該系統的傳感系統部分進行了改進。改為用聚脂塑鋼線作為傳感線，選擇用衝擊鑽在根石上打孔，使採樣點佈設拆卸和安裝方便，感測器安放在玻璃鋼表箱內可保護感測器。同時，通過對太陽能供電系統安裝支架的改進，使設備易於安裝；通過使用智慧型MPPT太陽能控制器和純正正弦波逆變器，實現了對太陽能供電系統的即時監測和遠端控制，確保了黃河防洪工程監測、監控等系統的穩定運行。

通過三個監控點的佈設和壩岸險情智慧

監測系統的應用，可以對沁河入黃情況實施有效監控，實現發生險情搶早搶小，同時，還可以應用到防洪工程日常管理中，例如河道巡查、垃圾治理、泵站引水情況、水尺觀測、班組日常管理、水法宣傳等，經濟社會效益顯著。

### 肆、結論

通過對嘉應觀應急度汛工程2垛、白馬泉引黃泵站渠首和沁河老龍灣險工7垛三個監控點的佈設，做到了對該河段沁河入黃在小水、大水和回水狀態下的河勢情況的有效監控，可實現險情“早發現、早報告、早搶護”，使決策層能迅速全面掌握現場情況，協助及時做出科學的調度指揮方案。推動基層黃河防汛資訊化與治黃工作進一步融合，不斷向“智慧黃河”邁進。

## 山區聚落災害孤島即時示警系統之建置

蔡元芳<sup>1</sup>、潘嘉豪<sup>2</sup>

### 摘要

山區聚落聯外道路因土石流、洪水崩塌等災害發生而導致聯外道路中斷，形成猶如孤島的狀態，視為發生災害孤島效應，使得區域內無法與外界聯繫，進一步導致災時災後區域內人員無法第一時間獲得物資與醫療援助。在極端氣候的影響下導致發生極端事件，加上台灣特殊之地文條件，自然災害發生的頻率增加，山區因聯外道路稀少，孤島的發生則時有所聞。2015年蘇迪勒重創台灣，新北市烏來造成嚴重災情，土石流、山崩等災害發生，造成烏來地區對外主要聯絡道路新烏路中斷，使烏來地區呈現孤島狀況。若能整合相關過去災害孤島歷史資料與研究，並以即時雨量、防災資訊結合孤島預測理論，最終以平台方式將資訊視覺化，將有助於一般民眾防災意識與相關防災單位決策參考。因此本研究建置一災害孤島為主題之平台，此平台三個主要資訊功能包含歷史災害孤島資訊，即時道路與孤島狀況與災害孤島示警劃分。歷史資訊以曾發孤島村里資訊為主，包含村里地文、社會資訊與災害歷史，並以脆弱度韌性力指標進行風險地圖的呈現。即時道路狀況以介接道路災害共通示警(Common Alerting Protocol,CAP)達成，並以此為基礎進行即時孤島村里的辨別。災害孤島示警劃則結合即時雨量資訊，並整合災害孤島降雨驅動指標(Rainfall Triggering Index,RTI)、機器學習(Machine Learning)之監督式學習(Supervised Learning)演算法、道路災害共通示警將全台進行即時災害孤島示警劃分，並以2017年尼伯特颱風事件進行驗證，結果均對真實發生孤島村里給予正確示警等級。

**關鍵字：**災害孤島、機器學習、災害共通示警、災害警戒值

---

<sup>1</sup> 台北教育大學社會與區域發展學系教授

<sup>2</sup> 台北教育大學社會與區域發展學系研究生

## 壹、緒論

### 一、研究動機

台灣經常受到自然災害的侵擾，如地震、颱風、進而引發的土石流、山崩地滑等自然災害。李自強、丁聖峯於 2012 提出，臺灣位置因素以及地文特性等，使其面臨颱風降雨事件等高強度降雨時，往往造成嚴重的複合式災害，如洪澇、山洪、邊坡崩落、崩塌與土石流等。這些災害的發生除了直接衝擊人民之生命財產安全外，更間接影響到山區村里的生活情況，如對外交通、通訊與維生系統中斷。

當一山區聚落呈現孤島狀態時，與外界交通中斷而無法與外界交流，可能造成糧食不足與醫療救援困難等情形的發生。風險溝通方式如常見的電視、廣播報紙等手段，隨著資訊科技技術的發展與普及，資訊的傳播速度效率越漸上升，相關資訊技術越漸成熟。科技的發展能加強災害管理能力與提升其效率，因此若能運用資訊科技等方式預測孤島的發生並將孤島災害資訊的統整於一平台呈現呈現，將能有效提升山區村里聚落自主防災意識與加強相關單位災前減災工作之效率。

### 二、研究目的

依據上述之動機，鑒於近年來資訊科技於災害防救上之應用，是故本研究冀望以網際網路空間資訊平台方式建置以災害孤島為主題之網頁系統平台，此平台具備三大功能，1.結合孤島歷史資料建置災害孤島地理資訊功能 2.以道路功通示警為基礎的災害孤島事件識別功能 3.透過過往災害孤島相關文獻資料配合即時資訊建置山區聚落即時災害孤島示警功能，運用此系統平台一般民眾等相關使用者可以直接透過自身網路進行瀏覽災害孤島歷史與即時相關資訊。因此研究主要目的分述如下：

(一) 收集過往災害孤島研究文獻資料，包含災害災害孤島發生歷史、災害孤島預測理論、建立一災害孤島資料庫以作為系統平台基礎。

(二) 將孤島降雨驅動指標模型、災害孤島機器學習模型、道路共通示警為基礎的災害孤島辨識模型，並以蘇迪勒事件為案例進行驗證。

(三) 將過往災害孤島模型綜整並建立一示警模式，以災害孤島為主題之系統資訊平台，使得使用者可了解災害孤島歷史，當前可能發生災害孤島事件之村里與全臺山區村里之孤島警示狀態。

## 貳、文獻回顧

### 一、災害孤島

孤島一詞依教育部國語辭典解釋為獨立的小島。常用以比喻孤立的地區。各級政府執行因災形成孤島地區疏散撤離及收容安置標準作業流程中提及孤島地區形成原因，因土石流、淹水及風災災害發生後，使道路與橋梁中斷、造成對外交通及聯繫中斷，而形成孤島地區；而如今許多學界專家已有對於災害孤島之描述，與探討孤島發生之情形之可能原因與因素。潘運行 (2016) 將孤島定義為一地區內連外道路因災害，造成道路或橋梁中斷或封閉無法通行，使居民與外界實質上的阻隔。蔡元芳、林庚翰、潘運行、劉政婷 (2017) 提及，孤島效應此現象重點在於某地區的所有對外交通因受複合式災害影響而中斷，使區域內外界無法以陸路進出，導致區域形成猶如陸地上的孤島。本研究將透過相關資料介接 (災害共通示警)，對道路系統中斷處進行系統判斷，故本研究將孤島效應視為一山區聚落，因對外主要道路 (省道) 中斷，使區域與外部區與形成道路

上之阻斷，形成交通上實質之中斷，形成孤島之狀態。

## 二、災害預警

### (一)、淹水警戒

台灣水災中央災害防救業務主關機關為行政院經濟部，淹水預警發布則為其部下之水利署。雨量為淹水警戒重要因素，淹水警戒以經驗方式，警戒制定根據歷史淹水與歷史雨量資料。淹水警戒分級分為二級，分別為二級警戒與一級警戒，觀測雨量到達該鄉鎮其中一項警戒值即發布一級警戒，而當雨量達到略低於警戒值 10 至 60 毫米則發布二級警戒（經濟部水利署，2018）。

### (二)、土石流警戒

目前台灣以降雨驅動指標（Rainfall Triggering Index, RTI）模式訂出各鄉鎮的土石流警戒基準值，降雨驅動指標以兩項變數相乘以作為指標。RTI 模式是一種非線性的方式，RTI 模式採取的兩種雨量變量（I 與 R），如式 1，其中 I 為降雨強度，代表該降雨事件中最大降雨強度（mm/hr），而 R 為有效累積雨量，代表該降雨事件中最大時雨量發生時之前的有效累積雨量（mm/hr），而兩變量相乘可得 RTI（mm<sup>2</sup>/hr），其中 t 則為與場中最大時雨量發生時間點。台灣土石流警戒發布由水保局統一進行發布，警戒分級分為黃色警戒與紅色警戒，其發布時間為海上陸上颱風發布後每日 5、11、17、20、23 時發布，必要時則不定時發布（水土保持局，2016）。

$$RTI = R_{t-1} \times I_t \quad (1)$$

### (三)、道路警戒

台灣陸上交通事故災害中央災害防救業

務主關機關為行政院交通部，重點監控路段及橋樑預警則為其部下之公路總局進行發布。交通部公路總局以橋樑流域管理與山區道路風險管理這兩概念為基礎，訂定重點監控路段及橋樑的預警值、警戒值及行動值。綜觀上述，可知台灣目前多數災害警戒多以雨量進行警戒發布之依據，且通常為 2 階層至 3 階層。國內預警等級劃分上大多將等級多以三階層等級為主，如土石流警戒：無警戒、黃色警戒、紅色警戒。本研究認為避免等級劃分過多導致增加一般民眾與防災決策者決策之複雜程度，因此後續示警劃分將以三階層為主，並以雨量為重要孤島警示劃分判斷基礎。

### (四)、災害共通示警

依據國家災害防救科技中心的共通示警協議 Common Alerting Protocol（CAP）說明文件中說明，共通示警協定（Common Alerting Protocol, CAP）是一種國際性的公眾示警交換格式標準，為一種基於 XML，可延伸標記式語言（eXtensible Markup Language）之簡稱，可用於各類災害緊急警報與大眾示警於各式網絡中交換傳播，CAP 設計的目的是為了提供所有類型的警報與預警通知一個開放、非專有的數位訊息交換格式，目前尚未有孤島相關文獻對於道路災害共通示警之利用，自此本研究將以共通示警進行介接以進行後續系統平台之建置。

## 參、災害孤島示警模型之建立

### 一、示警村里範圍

本研究示警村里參考蔡元芳等人（2017）之研究，彙整全台曾發生孤島效應之村里，共 114 個山區聚落，與劉玫婷（2018）訂定之山區聚落範圍，標高在一百公尺以上者，以及標高未滿一百公尺，而其平均坡度在百分之五以上者，再將上述選擇與 114 個山區聚落周遭村



里，亦即高程 450 公尺以上者，最後選出共 382 個村里，其中 114 個村里為有發生孤島效應歷史之村里，268 個村里為發生孤島效應之村里，最後採用當作本研究之研究範圍(圖 1)，總計共 382 個村里為本研究範圍。

## 二、 災害孤島RTI理論模型

本研究延續蔡元芳等人(2017)之研究，其透過仿效土石流與洪水災害，制定出災害孤島參考警戒值及警戒線，其作法為首先針對全台灣曾發生過災害孤島事件的村里透過新聞報導搜尋，整理出台灣曾發生孤島效應的 114 個村里，村里分布大多集中於中央山脈附近，透過群集分析並依照樣本的 6 個災因變項，分別為村里平均高程、村里平均坡度、村里與地質品感面積比值、道路暴露於土石流潛勢溪流之長度與道路暴露於洪水潛勢之長度，後進行群集分析，群集結果可分為 8 群，分析針對 2004 年至 2015 之颱風降雨事件，由於孤島確切發生時間無法確定，因此假設每場降雨達最大降雨強度時即發生災害孤島事件，找出各村里歷史累積雨量 (R) 與最大時雨量 (I)，使用 RTI 理論方式建構災害孤島降雨警戒值，最終得出 6 組災害孤島警戒值，各組警戒值又因樣本分佈的原因可分為下限之  $RTI_{min}$ 、與  $RTI_{30}$ 、 $RTI_{50}$ 、 $RTI_{70}$ ，並以此警戒值作為災害孤島警戒的判斷基準之一。

## 三、 災害孤島機器學習預測模型

本研究為延續劉政婷(2018)之研究，其利用機械學習 (Machine Learning) 之監督式學習法 (Supervised Learning) 建構孤島災害預測模型，研究流程如圖 2，首先建立空間基本的資料庫，為了建立災害孤島指標特徵資料，其步驟為資料預處理、模型之訓練、模型評估、與最後的預測模型，最終目的為預測颱風時期台灣山區村里發生孤島事件之機率，而預測模式包含 K-近鄰演算法 (K Nearest

Neighbor,KNN)、羅吉斯回歸 (Logistic Regression)、支援向量機 (Support Vector Machine,SVM) 與決策樹 (Decision Tree)。其研究最終結論為支援向量機在災害孤島預測上較為適切，因此本研究也將利用支援向量機進行後續研究。

## 四、以道路災害共通示警為基礎的災害孤島辨識模型

此災害孤島辨識模型主要著重於道路實際情形從而進行災害孤島的辨識，辨識是以地理空間關係進行，主要為利用道路災害共通示警之資料，並針對曾易形成孤島村里進行關鍵道路的探討，以各村里之關鍵道路與災害共通示警為基礎進行災害孤島辨識。因易行成孤島村里大多位於中央山脈附近，聯外道路稀少且多數以省道形式，且道路災害共通示警來源為交通部公路總局所，後續關鍵道路之探討將以省道形式進行探討，而又山區村里具空間連續性，因此先依省道形式進行獨立區域的劃分再依序進行村里關鍵道路探討。最終本研究將全台灣易形成孤島村里區分為 34 個獨立區域，其部分村里因聯外道路非省道或通阻關係與省道較無相關，最終此辨識功能可針對台灣 86 處山區村里進行孤島之辨識。

## 肆、 災害孤島示警模型之驗證

### 一、 蘇迪勒案例

2015 年 8 月 8 日 4 時 40 分蘇迪勒颱風中心由花蓮秀林鄉登陸，期間帶來短時程強降雨全臺更有多處村里應道路中斷而形成與外界交通中斷形成孤島，根據潘運行(2017)之孤島發生歷史之調查，蘇迪勒造成新北市烏來區福山里、信賢里、烏來里、孝義里、新北市三峽有木里、南澳鄉金洋村等 6 處發生發生災害孤島。

## 二、災害孤島RTI理論模型驗證

蔡元芳(2017)災害孤島RTI之理論所訂定之災害孤島雨量警戒線僅針對台灣曾發生災害孤島之山區村里所訂定,即為本研究所稱之易行成孤島村里,易行成孤島村里全台共114處。模擬方式將其間之歷史雨量資料以網頁前端輸出及進行模擬,以程式語言JavaScript為基礎進行邏輯演算,進行每小時模擬計算每小時之降雨強度與累積雨量相乘之數值,以判斷各易行成孤島村里是否與量數值大於各自孤島警戒數值。最後進行初步的示警,當該村里之雨量數值(累積雨量與降雨強度相乘數值)大於RTI<sub>min</sub>且小於RTI<sub>50</sub>,給予黃色示警,當與量數值大於RTI<sub>50</sub>則給予紅色示警,當與量數值小於RTI<sub>min</sub>則給予綠色示警,至模擬結束,全台共24村里達到黃色示警等級以上。

## 三、災害孤島機器學習預測模型驗證

機器學習模型預測災害孤島是針對一般山區村里與易形成孤島村里進行預測,一般山區村里全台灣共268處,易形成孤島村里全台共114處,兩者合計共佔全台共382處。模擬方式將其間之歷史雨量資料(累積雨量與降雨強度)以機器學習之模型支援向量機(Support Vector Machine,SVM)進行災害孤島發生機率計算,此部分採用Python程式語言實現,以求得每小時之孤島發生機率,並依照發生機率給予初步示警分級,初步分級階級分為三級,發生機率小於50%給予示警等級為綠色示警,發生機率大於50%且小於80%給予黃色示警,發生機率大於80%則給予紅色示警,至模擬結束,全台共16村里達到黃紅示警。

## 三、以道路災害共通示警為基礎的災害孤島辨識模型驗證

模擬方利用民生示警公開資料平台所提供之蘇迪勒颱風之歷史CAP資料近行模擬,

當該村里之聯外道路有中斷處,給予黃色示警,當該村里之聯外道路皆中斷則給予紅色示警,其餘情形給予綠色示警,至模擬結束,全台共35村里達到黃紅示警。本研究進行道路災害共通示警模擬中,同時進行蘇迪勒道路災害共通示警之即時性探討,當一災害實際發生,但若災害資訊傳播速度不彰,其資訊即時性與後續防災效率也將受到影響,在蘇迪勒事件中,災害共通示警災害性封閉資訊共發出97則,其發送時間與生效時間之差值最大值為59小時,最小值為1小時,平均值18.21小時。

## 伍、災害孤島示警模式建立

前述進行各災害孤島模式之模擬驗證,其示警分級方式如表1,建立與模擬驗證後,其結果如表2所示,機器學習模型總共判斷13處為達黃色示警,5處紅色示警;災害孤島RTI預測模型總共判斷21處達黃色示警,5處達紅色示警;道路災害共通示警為基礎的災害孤島辨識模式判斷22處達黃色示警,6處達黃色示警,利用蘇迪勒事件模擬驗證後可得知本研究所設定之各模型分級方式可對大多真實發生孤島村里正確反應,因此將採取此分級方式建構災害孤島示警模式。本研究將結合三者進行最終模式的確定,若以各模式示警等級說明:有任一模型判斷為紅色示警,模式最終判斷示警為紅色示警。有任二模型判斷為黃色示警,模式最終判斷最終為紅色示警。僅一模型判斷為黃色示警,模式最終判斷最終為黃色示警。

## 伍、系統平台建置

本研究欲建置一災害孤島資訊平台,並以過去孤島相關災害孤島文獻為基礎,並介接即時雨量資訊、道路災害共通示警、政府開放資料等資訊,輔以網頁前端之技術,以WebGIS

系統平台方式呈現，以下就系統平台之開發技術系統功能依序說明。系統平台開發以網站平台作為主要方式，平台技術結合 HTML、CSS、JavaScript、jQuery、Bootstrap 與地圖函式庫等現代網站前端技術進行，後端部分利用 PHP 與 Python 實現。以下則說明本系統三大功能之內容：

- (一)、災害孤島地理資訊展示功能:功能模組展示資料型態以靜態資料，主要進行災害孤島地理相關資訊展示，其展示對象為易形成孤島村里之災害孤島相關資料，並參考潘運行(2017)之災害孤島與研究陳毓樺(2017)易形成孤島村里風險之研究，整合上述之資料主題，以系統方式建置山區災害孤島村里資料，使用者可經由系統平台災害孤島資訊展示功能(圖 3)。
- (二)、災害孤島事件村里識別功能:此功能此針對易形成孤島村里進行系統進行識別，功能基礎為以道路災害共通示警為基礎的災害孤島便是模型進行(圖 4)。
- (三)即時災害孤島示警功能:此功能基礎為災害孤島機器學習模型、災害孤島 RTI 理論與道路災害共通示警為基礎的災害孤島示警系統，針對全台 382 個村里進行即時孤島示警建議。(圖 5)。

## 六、結論與建議

### 一、結論

本研究建置一災害孤島為主題之系統平台，並結合災害孤島機器學習預測模型、災害孤島 RTI 理論與道路災害共通示警為基礎的孤島辨識功能三者，建構了即時台灣山區聚落災害孤島示警功能的系統，此系統可針對全台易形成孤島村里與一般山區村里進行即時的示警建議。因此本研究的結論為：

- (一)、本研究將全台 114 處易形成孤島村里以省道形式進行關鍵道路的探討，依道路形式分

為 34 個獨立區域，再以區域尺度下去探討各村里之關鍵道路，最終探討 86 處村里之關鍵道路，並以此作為孤島辨識與即時災害孤島示警之應用。

- (二)、在蘇迪勒事件模擬中，災害孤島機器學習預測模型、災害孤島 RTI 模型與道路災害共通示警為基礎的孤島辨識模型三者所建構之孤島示警模式可針對多數蘇迪勒事件中事實發生孤島的村里給予正確的示警。

- (三)、在蘇迪勒模擬事件中，亦測試了道路災害共通示警之即時性效能，發現道路災害共通示警其發送時間與生效時間之差值最大值為 59 小時，最小值為 1 小時，平均值 18.21 小時。

- (四)、本研究建置一災害孤島為主題之系統平台，本平台有三大主要功能，分別為 1. 災害孤島地理資訊展示功能 2. 災害孤島事件村里識別功能 3. 即時災害孤島示警功能，並以 2016 尼伯特事件驗證即時災害孤島聚落示警功能之效能，最終皆對真實事件中上發生孤島之村里雄市桃源區拉芙蘭里、復興里、梅山里等 3 處給予紅色示警。

### 二、建議

本研究利用過去相關災害孤島文獻並結合相關開放資料建置一災害孤島為主題之平台，其中檢討了台灣易形成孤島村里聯外道路，但因為配合系統平台實現因此僅以省道尺度檢討各村里之關鍵道路，後續研究可針對更小等級之道路等級進行檢討，如縣道、鄉道、市區道路等，並可針對其餘一般山區村里進行聯外道路檢討，完整山區聚落聯外道路之探討。

至 2017 尼伯特颱風事件後，直至 2019 年 6 月，台灣尚未有相比之嚴重的颱風事件，未來可利用新的颱風事件驗證本研究所建置之即時台灣山區聚落災害孤島示警功能是否依然能確實對真實發生災害孤島之村里進行正確示警建議。

### 參考文獻

1. 丁聖峯 (2012)。運用災害風險概念探討臺東縣山坡地聚落易致災性。國立東華大學自然資源與環境學系碩士論文，花蓮縣。
2. 李自強 (2012)。社區自主防備災推動之探討--以高雄市茂林區萬山部落為例。國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所碩士論文，高雄市。
3. 陳毓樺 (2017)。山區聚落易形成孤島事件之綜合評估。國立臺北教育大學社會與區域發展學系碩士班碩士論文，台北市。
4. 楊樹榮、施尊穎、黃春銘、鄭錦桐、黃文洲、陳振宇 (2010)。莫拉克後旗山溪流域內聚落孤島效應評估。第三屆水保技術研討會。
5. 劉政婷 (2018)。以機器學習理論結合空間資訊建立災害孤島預測模式。國立臺北教育大學社會與區域發展學系碩士班碩士論文，台北市。
6. 蔡元芳、林庚翰、潘運行、劉政婷 (2017)。災害孤島潛勢風險分群與降雨警戒值探討。第二十一屆海峽兩岸水利科技交流研討會，2017年10月23日~10月24日，江西。

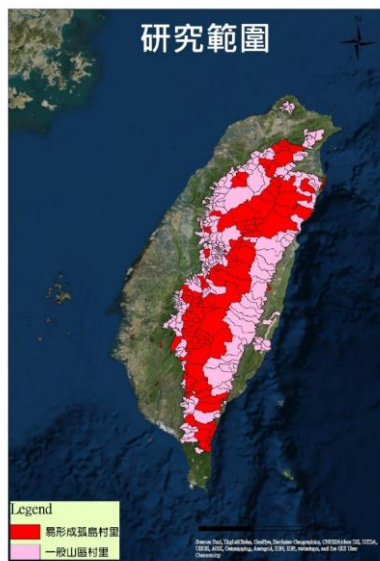


圖 1 本研究之研究範圍

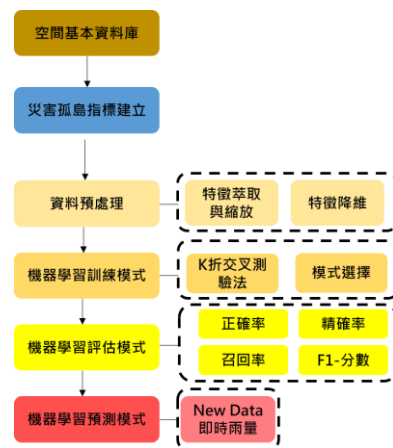


圖 2 災害孤島預測模式建構流程圖

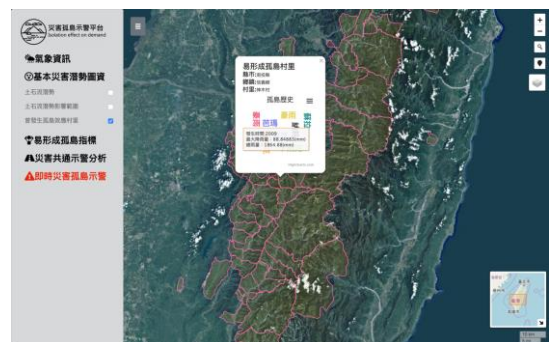


圖 3 災害孤島地理資訊展示功能示意圖

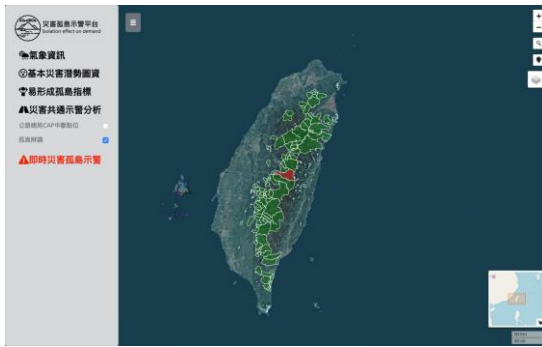


圖 4 災害孤島事件村里識別功能示意圖



圖 5 即時災害孤島示警功能示意圖

表 1 示警分級表

示警等級	機器學習模型預測模式	災害孤島RTI預測模式	道路災害共通告示警為基礎的災害孤島辨識模式
綠色示警	發生機率小於50%	R I 乘機小於RTI <sub>min</sub>	辨識無關鍵道路受阻
黃色示警	發生機率大於50%且小於80%	R I 乘機大於RTI <sub>min</sub> 且小於RTI <sub>50</sub>	辨識有關鍵道路受阻
紅色示警	發生機率大於80%	R I 乘機大於RTI <sub>50</sub>	辨識關鍵道路全數受阻

表 2 蘇迪勒模擬驗證結果表

真實發生災害孤島村里	機器學習模型預測模式	災害孤島RTI預測模式	道路災害共通告示警為基礎的災害孤島辨識模式
新北市烏來區福山里	X	V	V
新北市烏來區信賢里	V	V	V
新北市烏來區烏來里	V	V	V
新北市烏來區孝義里	V	V	V
新北市烏來區忠治里	V	V	V
新北市三峽有木里里	V	V	V
宜蘭縣南澳鄉金洋村	V	V	X

## 圖籍資料管理數位化與雲端應用研究

鍾承泰<sup>1</sup>、賴金聲<sup>2</sup>、吳瑞濱<sup>3</sup>

### 摘要

經濟部水利署管理之各項圖籍資料與民眾權益息息相關，近年致力於協助各單位於各項業務執行，整合中央管河川圖籍、排水圖籍、海堤圖籍等資料，建立各類最新公告圖籍於單一入口雲端地理資訊系統整合平台，使各種最新公告圖籍更容易比對其相關性，並且配合國土資訊系統發展政策、考量相關需求單位對於圖籍精確度之要求、及重製老舊圖籍之既定政策，經過近年逐步建置，於 2009 至 2011 年度辦理『河川圖籍資料庫應用系統\_地籍底圖更新建置計畫』、2012 至 2018 年度分別辦理『圖籍資料庫系統維護計畫』，將所轄中央管河川圖籍、海堤圖籍、排水圖籍與地政機關地籍圖結合，並透過管理數位化，藉由網際網路提供與地政機關地籍圖相同精度的圖籍查詢服務，包括「圖籍綜合查詢」、「歷年河川區域公告文件查詢下載」、「最新圖籍公告資訊」、「行動版圖籍查詢及 QR code 創新應用」等；另外，建置「河川、排水及海堤圖籍產製輔助應用程式」，提供中央管河川圖籍重製作業製圖使用，在河川區域劃定及檢討變更擔任數位化重要角色；另建置「河川大斷面測量資料庫」將歷年河川大斷面測量成果資料整合數位管理與雲端應用。圖籍資料管理數位化與雲端應用之整體成果將提供河川、排水與海堤之治理規劃、管理及環境敏感區位查詢等參考應用。未來將增設水利圖資與雲端運用中心加以落實，並透過資料標準的研訂提供、儲存、流通、共享的雲端整合平台，涉及本研究圖籍資料管理整合系統包括圖籍紙本實體及數位檔管理系統(RFID 創新應用)、圖籍典藏管理系統(圖籍上架、更新、下架典藏等水利圖籍資料集中保管)及水利空間資料雲端應用服務系統(提供外單位下載使用開放資料)等。

**關鍵字：**河川圖籍、排水圖籍、海堤圖籍、河川大斷面

---

<sup>1</sup> 河川勘測隊助理工程司

<sup>2</sup> 擎雲科技企業股份有限公司副總經理

<sup>3</sup> 河川勘測隊隊長

## 壹、前言

水利署為配合國土資訊系統發展政策，於101至107年度分別辦理『圖籍資料庫系統維護計畫』，將所轄中央管河川圖籍、海堤圖籍、排水圖籍與地政機關地籍圖結合，並透過網際網路提供與地政機關地籍圖相同精度的圖籍查詢服務。近年建置之系統逐步整合為「圖籍資料整合系統(網頁版)」、「圖籍資料整合系統(行動版)」、「河川、排水及海堤圖籍產製輔助應用程式」，提供水利署河川、排水、海堤管理及環境敏感區位查詢等參考應用，成效良好。

水利署從早期圖籍資料數位化建檔、圖資精度提升、系統開發，到近期數值法重製作業、系統整合開發、及未來雲端供應，圖籍資料管理整合服務建置基礎已非常完整(如圖1所示)。

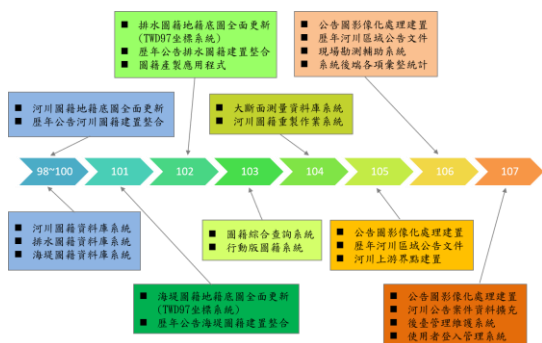


圖1 圖籍資料庫建置歷程

## 貳、圖籍資料數位化

水利署經近十年逐步將河川圖籍、排水圖籍、海堤圖籍等資料數位化後，圖籍資料庫已非常完整(如表1所示)，提供水利署在河川、排水、海堤管理上更加完善。

表1 圖籍資料庫內容

資料類別	資料內容
河川	公告案件名稱、日期
	勘測報告
	土地異動清冊

資料類別	資料內容
	索引圖
	公告圖、界址坐標成果表、分幅圖、地籍參考圖、影像參考圖、公告圖影像
	說明書
	測量原圖
	KML
	公告文件
	河川大斷面樁位資料
	河川大斷面測點資料
排水	公告案件名稱、日期
	勘測報告
	土地異動清冊
	索引圖
	分幅圖
海堤	測量原圖
	公告案件名稱、日期
	勘測報告
	土地異動清冊
	索引圖
	分幅圖
測量原圖	

## 參、雲端服務環境架構

圖籍資料雲端系統建構在水利署資訊室虛擬主機(VM)上，其設置有應用程式伺服器虛擬主機(圖籍資料庫系統相關程式檔案)、資料庫伺服器虛擬主機、檔案伺服器虛擬主機(包括公告案件資料、系統圖籍、點誌記、測量成果報告書等)。河川勘測隊各分隊/各河川局使用者使用「圖籍產製輔助應用程式」進行圖籍建置及轉檔，再利用「河川圖籍資料庫更新上傳功能」將圖資上傳到「應用程式伺服器虛擬主機」進行資料檢核，最後將資料及檔案分別儲存到「資

料庫伺服器虛擬主機」及「檔案伺服器虛擬主機」中。其環境架構如圖 2 所示、軟體服務架構如圖 3 所示。

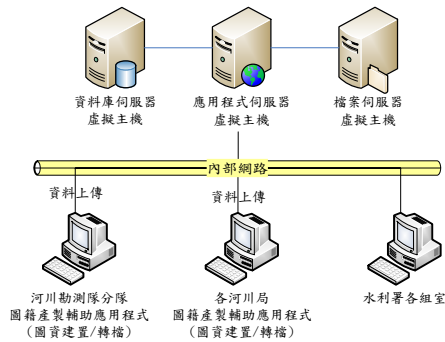


圖 2 雲端服務環境架構圖

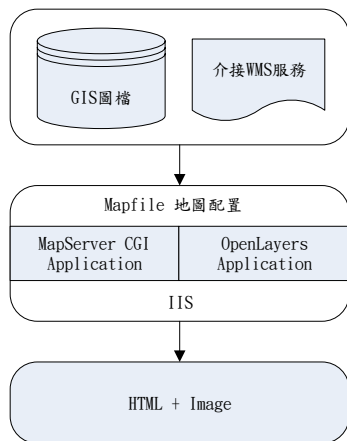


圖 3 軟體服務架構圖

以下章節為「圖籍資料整合系統(網頁版)」、「圖籍資料整合系統(行動版)」、「河川、排水及海堤圖籍產製輔助應用程式」之說明。

#### 肆、圖籍資料整合系統(網頁版)

「圖籍資料管理整合系統(網頁版)」結合了歷年建置之「圖籍綜合查詢」、「河川大斷面測量資料庫」、「歷年河川區域公告文件查詢下載」、「後臺維護管理」、「使用者登入管理」等系統而來，本系統為河川圖籍、排水圖籍、海

堤圖籍、大斷面資料之核心，提供相關單位查詢使用，對於圖籍業務管理及勘測作業助益良多。本系統 GIS 軟體平台採用 MapServer 搭配 Openlayers(自由軟體架構)、程式開發工具為 Microsoft Visual Studio、資料庫軟體為 Microsoft SQL Server、作業系統為 Microsoft Windows Server。

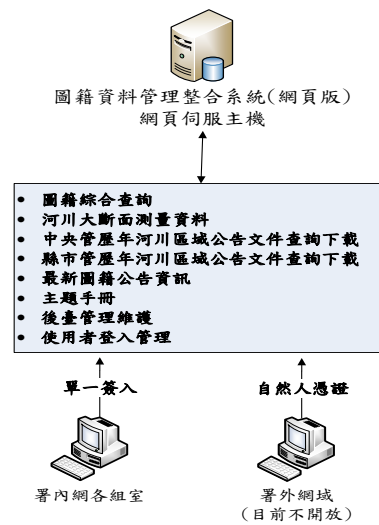


圖 4 圖籍資料管理整合系統(網頁版)架構圖



圖 5 河川圖籍/地籍圖/航照圖套疊



圖 6 歷年河川公告案件查詢

#### 伍、圖籍資料整合系統(行動版)

「圖籍資料管理整合系統(行動版)」為提供



在外出差及作業人員能夠及時掌握資訊，整合斷面樁 QR code 應用(查詢斷面樁資訊、調閱點誌記等功能)、公告圖籍 QR code 應用、公告案件資訊等。本系統採用之 GIS 軟體平台、程式開發工具、資料庫軟體、作業系統與圖籍資料管理整合系統(網頁版)相同。

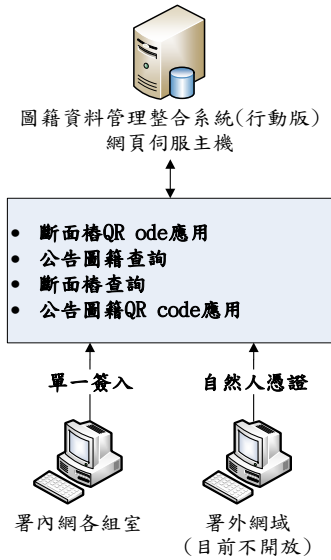


圖 7 圖籍資料管理整合系統(行動版)架構圖



圖 8 斷面樁 QR code 應用



圖 9 公告圖籍即時查詢調閱(外業)

### 陸、圖籍產製輔助程式(單機版)

「河川、排水及海堤圖籍產製輔助應用程式(單機版)」因河川區域劃定及檢討變更程序有可能因業務需要而調整，或者設計更簡便之製圖方式，逐年擴充建置，主要提供水利署圖籍重製作業製圖使用，為水利署在河川區域劃定及檢討變更數值化作業中，擔任不可或缺之客製化工具。本應用程式使用之 GIS 軟體平台為 AutoCAD Map、程式開發工具為 lisp 及 VBA、作業系統為 Microsoft Windows。



河川、排水及海堤圖籍產製輔助應用程式

- 案件資料夾建立
- 地籍資料處理
- 假分割宗地管理
- 河川區域線輔助工具
- 河川圖籍繪製工具
- 河川圖籍產出

圖 10 圖籍產製輔助應用程式(單機版)架構圖

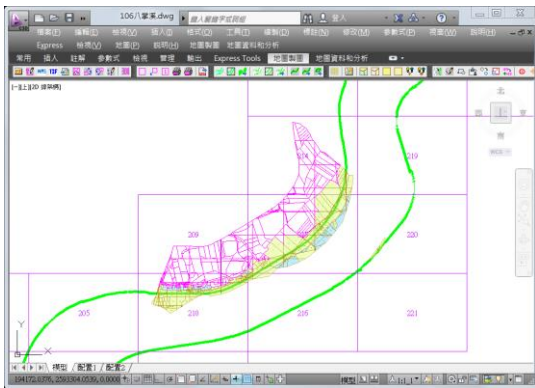


圖 11 圖籍重製作業製圖平台

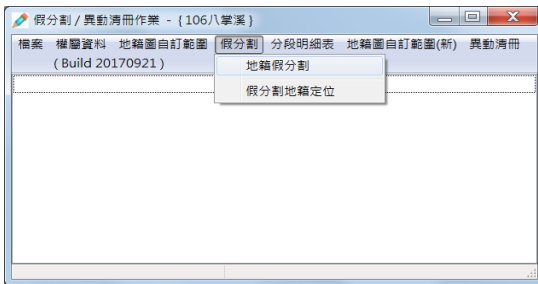


圖 12 圖籍重製\_假分割作業

表4 本次劃入及劃出河川區域土地面積分段明細表							
單位：平方公尺							
嘉義市		嘉義市地政事務所		湖東段		IA0119	
登記地號	登記面積	假編地號及面積*		公/私	公有地管理者		
原址地號	原址地號A	原址地號B	原址地號C				
1	1171.00	170.65	860.34	138.84	公	嘉義市政府	
1-1	1355.00	194.22	967.69	191.67	公	經濟部水利署	
2	3623.00		3612.38		公	嘉義市政府	
2-1	336.00		336.95		公	嘉義市政府	
3	663.00		662.90		私		
3-1	803.00		802.65		公	經濟部水利署	
4	54.00		54.52		私		
4-1	459.00		457.71		公	經濟部水利署	
5	1249.00		1238.86		私		
5-1	3466.00	1.24	3460.68		公	經濟部水利署	
6	714.00		715.64		私		
6-1	58.00		55.82		公	經濟部水利署	
7	3749.00		3727.17		私		
7-1	377.00		377.84		公	經濟部水利署	
7-2	662.00		666.89		公	經濟部水利署	
8	287.00		281.34		私		
8-1	3174.00		3178.42		公	經濟部水利署	
8-2	211.00	208.70	0.23		公	嘉義市政府	

圖 13 圖籍重製\_劃入及劃出作業

### 柒、未來展望

因應組織改造後之經濟及能源部水利署業務整合與推動，以及配合行政院推動中興新村閒置辦公室活化，將原財政部國庫署中部辦公室(南投市光華路9號)規劃建置「水利圖資與雲端運用中心」，並透過資料標準的研訂提供、儲存、流通、共享的雲端整合平台，涉及本研究

圖籍資料管理整合系統包括圖籍紙本實體及數位檔案管理系統(RFID 創新應用)、圖籍典藏管理系統(圖籍上架、更新、下架典藏等水利圖籍資料集中保管)及水利空間資料雲端應用服務系統(提供外單位下載使用開放資料)等。

未來「水利圖資與雲端運用中心」定位為各業務組室水利實體圖集中存放管理場所，以及水利空間網路地圖服務的窗口，並且依據業務所需提供雲端空間圖資運算服務，落實各業務單位(含組室及所屬機關)能多以空間資訊提供決策參據，可藉由發展共通性空間化工具，輔以各業務單位(含組室及所屬機關)業務執行。

### 參考文獻

1. 經濟部水利署－「河川圖籍數化建置系統」之程序及規範。
2. 經濟部水利署－「101 年度圖籍資料庫系統維護計畫」成果報告書。
3. 經濟部水利署－「102 年度圖籍資料庫系統維護計畫」成果報告書。
4. 經濟部水利署－「103 年度圖籍資料庫系統維護計畫」成果報告書。
5. 經濟部水利署－「104 年度圖籍資料庫系統維護計畫」成果報告書。
6. 經濟部水利署－「105 年度圖籍資料庫系統維護計畫」成果報告書。
7. 經濟部水利署－「106 年度圖籍資料庫系統維護計畫」成果報告書。
8. 經濟部水利署－「107 年度圖籍資料庫系統維護計畫」成果報告書。
9. 經濟部水利署－「水利署及所屬機關地理資訊圖資管理作業規範」。

## 智慧化疏濬工程管理之研究

邱婉婷<sup>1</sup>、李易唐<sup>2</sup>、沈維霖<sup>3</sup>、吳益裕<sup>4</sup>、劉俊志<sup>5</sup>

### 摘要

台灣河川受地質及地形條件影響，呈現河流短促、河床坡陡、河川湍急、上游侵蝕旺盛、下游堆積快速等河川特性，經濟部水利署為避免淤積砂石影響河川水文之流徑並保障周邊人民的生命財產安全，河道疏濬工程乃河川整理治理之重點工程之一。為有效管制砂石清運，水利署目前多採取採售分離政策，嚴密管制外運土石數量，配合現行法規，透過體積及斷面檢測、地磅管制站、監視系統及保全人員 24 小時監管等方式掌握土石外運情形。然而目前管理方法著重於疏濬工程之出入口管制，疏濬工區中的重型機具作業主要透過測量人員進行地形檢核或巡守人員現地督導進行管控，以避免業者有盜採砂石或超深置換等違規事宜，執行過程中將花費大量測量、保全及巡守人力。

本研究藉由開發物聯網設備搭配無人飛行載具作業流程以進行河川疏濬工程管理，首先將感測器安裝於挖土機上，並透過網路通訊、LoRa 或 NB-IoT 等傳輸技術即時將量測資訊回傳至伺服器端，接著以網頁式地理資訊系統(WebGIS)將挖土機即時作業資訊一覽無遺，包含挖土機定位資訊及挖掘深度等，本研究經初步測試成果，挖土機於作業過程中之定位誤差可在 10 公分內，挖掘深度之誤差可在 25 公分內，管理者能夠遠端掌握現場作業情形。除此之外，管理人員進行現場工程督導、定期巡守或有違規疑慮發生時，可透過無人飛行載具以航空攝影測量技術進行現場地形測量，快速蒐集資訊，以保全完整記錄。本研究提出以物聯網技術及無人飛行載具之相互搭配，藉此達到智慧化管理的目標。

**關鍵字：** 河川疏濬、智慧監控、物聯網、無人飛行載具

---

<sup>1</sup> 經濟部水利署水利行政組副工程司

<sup>2</sup> 陶林數值測量工程有限公司專案經理(通訊作者)

<sup>3</sup> 陶林數值測量工程有限公司執行長

<sup>4</sup> 經濟部水利署水利行政組組長

<sup>5</sup> 經濟部水利署水利行政組科長

## 壹、前言

台灣河川受地質、地形、氣候及地理位置等天然條件影響，河川上游大都坡陡流急，下游趨緩，且河川溪源，地質大多為黏板岩及頭嵙山層，質地脆弱易於風化，導致河川輸砂量多，呈現上游侵蝕旺盛、下游堆積快速的河川特性，為避免淤積砂石影響河川水文流徑，並保障河道週邊生命財產安全，河川疏濬工程係為河川整治的重點工程之一。

為有效管制砂石清運，經濟部水利署目前多採取採售分離政策，嚴密管制外運土石數量，配合現行法規，透過體積及斷面檢測、地磅管制站、監視系統及保全人員 24 小時監管等方式掌握土石外運情形。然而目前管理方法著重於疏濬工程之出入口管制，疏濬工區中的重型機具作業主要透過測量人員進行地形檢核或巡守人員現地督導進行管控，以避免業者有盜採砂石或超深置換等違規事宜，執行過程中將花費大量測量、保全及巡守人力。

本研究藉由開發物聯網監測設備搭配無人飛行載具作業流程以進行河川疏濬智慧化工程管理。首先安裝感測器於挖土機上，並透過網路通訊、LoRa 或 NB-IoT 等通訊技術即時將量測資訊回傳至伺服器端，接著以網頁式地理資訊系統(WebGIS)呈現挖土機即時作業資訊，包含挖土機定位資訊及挖掘深度等，讓管理人員能夠快速掌握作業情形，若有疑慮事件發生，即可啟動無人飛行載具監控機制，由現場人員操作前往事件地點紀錄並確認狀況，大幅減少舟車往返時間並提升作業效率。

## 貳、研究目的

本研究期望透過科技方法快速取得挖土機作業資訊，以進行工程管理。透過監測設備需達到兩點目的，分別為挖土機挖掘深度偵測及挖土機挖掘位置定位，且可分別預計達到平面測量精度小於 1.5 公尺及高程精度小於 50 公分，為此試驗多項監測科技與設備，並選出能

最佳符合目標且經評估穩定度較佳之方案使用。

## 參、監測設備作業原理

本研究經過多項監測儀器設備的搜索、測試與試驗後，整合多項符合目標需求的監測技術與設備，並安裝於挖土機上進行試驗。

本研究安裝於挖土機上的主要設備包含三組電阻尺、兩組 GNSS 接收儀及一組 LoRa 通訊設備，以下分別針對各項作業原理進行說明。

### 一、電阻尺

為了即時偵測挖土機挖掘時的動作，以推算挖土機的挖掘深度，首先分解挖土機結構，如圖 1 所示，其主要透過油壓操作挖土臂作挖掘動作，因此於挖土機挖掘過程中採用電阻尺量測挖臂油壓缸，透過大臂、小臂及挖斗三個部分的挖臂油壓缸伸縮的即時量測，藉此推算挖土機的挖掘深度，電阻尺如圖 2 及圖 3。

### 二、GNSS 接收儀

GNSS 適合作為車輛機具定位追蹤的工具，然而在坊間 GNSS 依據定位精度的不同有多種等級，本研究目的除了將 GNSS 作為挖土機定位追蹤外，亦作為深度挖掘之基礎水平高程及位置值，因此為了符合所訂定之平面及高程精度，採用測量級 GNSS，並以差分定位進行即時定位解算，確保挖掘深度計算時具有高精度的基準值，另外透過兩組 GNSS 解算方位值，挖土機上的安裝如圖 4 所示。

由於採用差分定位解算，因此需設立 GNSS 基站，而疏濬工程中，出入口管制站為了讓地磅站資料能夠即時將過磅資料傳輸回管理中心，因此規範出入口管制站需建立網路傳輸，且此區域一般相距土石採區不會太遠，因此適合在此建置固定式 GNSS 基站，如圖 5 所示。

### 三、LoRa 通訊設備

LoRa 是物理層或無線調製用於建立長距離通信鏈路，許多傳統的無線系統使用頻移鍵控(FSK)，可以有效滿足低功耗的需求。LoRa

是基於線性調頻擴頻調製，不僅保留了與 FSK 調製相同的低功耗特性，並增加了通信距離、提高了網路效率，以及消除了干擾。

LoRa 技術基於線性 Chirp 擴頻調製，延續了移頻鍵控調製的低功耗特性，大大增加了通信範圍。Chirp 擴頻調製已經在軍事和航天通信方面應用了幾十年，因為它具有長距離傳輸，以及很好的抗干擾性，而 LoRa 則是用作商業用途。

一般資料傳輸以 4G 網路通訊較佳，然而河川疏濬區域可能因地處偏遠，不易接收到 4G 網路訊號，因此建置 LoRa 通訊進行資料傳輸，先將數據資料傳輸至出入口管制站，再透過出入口管制站透過網路等連外傳輸方式將資料回傳至管理中心。

#### 肆、挖土機挖掘深度解算

本項工作原理係量測挖土機油壓桿長度以推算挖土機即時運動姿態，因此先以側面建立挖土機平面坐標系，如圖 6 及圖 7。以 O 為原點，藍色線段為固定值，需透過量測進行率定，L1、L2 及 L3 為電阻尺角度編碼器所量測之數據，並透過率定後解算為 OI、FH 及 CE 長，以此推算 OP 向量之高度，接著透過與 GNSS 率定之相對方位進行坐標轉換至地圖坐標系統，即可推估挖掘深度。

本研究以每秒一筆的頻率進行感測器偵測、回傳與解算，首先分析 3 組電阻尺於挖掘過程中的數值分析，如圖 8 所示，顯示挖土機於挖掘過程中，能夠從裝設在液壓桿的感測器量測數值趨勢判斷挖土機目前動作，未來可透過大數據分析挖土機目前動作。

挖土機實際挖掘過程中採每秒 1 筆紀錄感測數值，並同時透過系統解算與紀錄挖掘深度，作為資料後續分析、紀錄等用途，挖掘深度起算點為挖斗斗尺尖端，因此在挖掘過程中會有上下移動的過程，如圖 9 所示。未來可透過紀錄一段時間內挖掘最深的數值超過門檻達

一定次數後作為警示的依據。本研究透過 5 次挖掘試驗，於指定區域挖掘深度不等的土方，並以 GNSS 量測其挖掘前後深度並比較兩者深度值差異，將成果整理於表 1，成果顯示其絕對值平均值約為 5 公分，絕對值標準差約為 7 公分，成果顯示其具有相當高的潛力作為挖掘深度監測之技術。

#### 伍、無人飛行載具的導入

疏濬工程管理以無人飛行載具進行空拍，進行工程進度的紀錄與掌握，取代人力驅車或徒步巡視，增加管理效率。另外亦可製作數值地表模型與正射影像，進行比對與分析，以掌握地形與地物之變異（超挖、越界開挖）情形。

無人飛行載具導入疏濬工程管理的案例已越來越普遍，透過產製之空拍影片、正射影像及數值地表模型進行後續於 GIS 系統上的分析比對，除此之外，數值地表模型亦可作為挖掘偵測系統之初始地形，透過初始地形與規畫地形的導入，未來可讓管理者及挖土機操作者快速了解目前作業進度，進一步提升操作者作業效率。

#### 陸、挖土機監測系統

本研究透過「圖臺儀表板系統」結合「後臺管理系統」呈現疏濬工區的空間資訊、工程資訊、出料資訊與相關輔助應用地圖等資訊整合，並透過疏濬機具上的感測層設備資訊之蒐集、回傳、演算與呈現，能了解疏濬機具之行為，並結合無人飛行載具之定期航拍正射影像、地表高程模型、三維疏濬工區影像模型與空拍影像等，全面掌握陸地與空中監測資訊，初步系統建置如圖 10 所示，透過監測系統可方便讓管理人員於遠端了解現場狀況，並期望未來由系統達到自動警示的效果；此外，由於科技日新月異，未來出現新的監測技術適合應用於河川監控時，亦可納入系統共同呈現。

#### 柒、研究困難

為達到此目的，本研究試驗多種現有監測



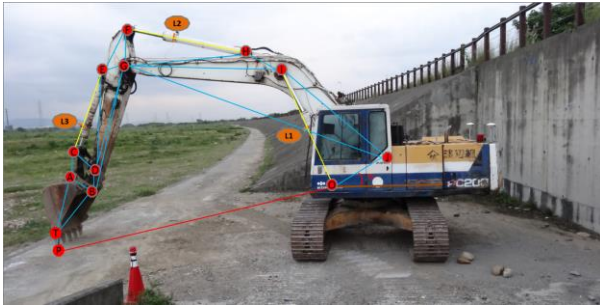


圖 6 挖土機重要點位及長度率定示意圖

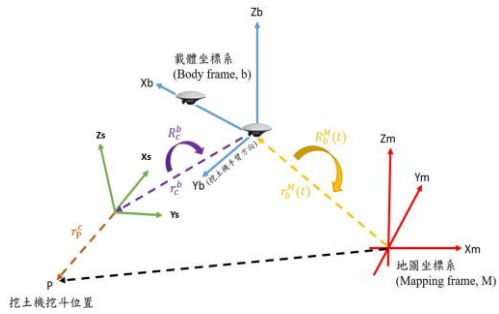


圖 7 挖土機坐標轉換示意圖

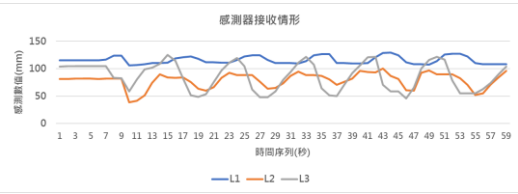


圖 8 電阻尺感測器動態數值分析

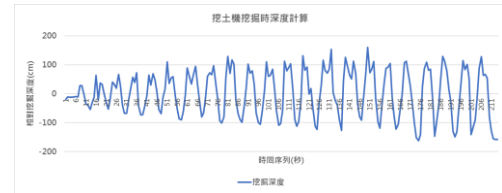


圖 9 挖土機挖掘深度計算成果範例圖

表 1 挖土機運動姿態之採集與監控技術挖掘成果

案例	實測值 (GPS 測量) (單位:cm)	挖土機運動姿態之採集與監控 技術 (單位:cm)	差值 (單位:cm)
1	72.1	67	-5.1
2	70.0	75	5
3	82.8	87	4.2
4	109.0	109	0
5	102.1	91	11.1
絕對值平均值			5.08
絕對值標準差			6.93



圖 10 挖土機監測系統初步建置示意圖

# 屏東縣政府推動地下水管制區合法畜牧產業納管水井 輔導合法計畫論文

江國豐<sup>1</sup>、張嘉宏<sup>2</sup>、林宜菁<sup>3</sup>、林育如<sup>4</sup>、李友平<sup>5</sup>

## 摘要

200 早期申辦畜牧場登記證須先申請農業用地容許作農業設施使用，惟容許使用審查簽辦單僅原則規定略以「依水利法應檢附水權登記證者……」，致未及檢附水權登記證者亦可核發容許使用再取得畜牧場登記證。行政院農業委員會 103 年 10 月函示請地方政府限期依相關規定辦理水權登記。

上述畜牧場如非位於地下水管制區可依水利法申請興辦水利建造物及水權登記，如位於地下水管制區，則非屬「地下水管制辦法」第五條所許可鑿井之用水標的，值此之際，該辦法修訂第十七條可使管制區內九十九年八月四日前已存在地下水井可納管輔導合法化，此亦為經濟部水利署推行重大政策之一。

為配合中央政策，屏東縣政府整體考量產業制度，土地使用管制規定，排除污染整治管制場址，嚴謹審查地下水井存在時間證明文件，以利推動本計畫。

本計畫預期效益：1. 早期中央農業與水利法規競合而產生地下水管制區合法畜牧場卻無水權之問題，提供有效對策。2. 輔導名冊畜牧場取得水權後，即可辦理畜牧場登記證變更作業，改善場內設備環境以提升廢污水及空氣品質，亦可設置畜禽場太陽能光電系統，以應政府 2025 年 20GW 綠能產業政策。3. 不合法畜牧場與在納管名冊但無法取得水權畜牧場將自然被淘汰，可收保育水資源成效。

**關鍵字:** 水井、納管、水權、畜牧業

---

<sup>1</sup> 屏東縣政府水利處處長

<sup>2</sup> 屏東縣政府水利處水利行政科科長

<sup>3</sup> 屏東縣政府水利處約用人員

<sup>4</sup> 經濟部水利署水利行政組副工程司

<sup>5</sup> 經濟部水利署第四河川局局長(前水利署水利行政組組長)



## 壹、計畫緣起

早期申辦畜牧場登記證須先申請農業用地容許作農業設施使用，惟容許使用審查簽辦單僅原則規定略以「依水利法應檢附水權登記證者……」，致未及檢附水權登記證者亦可核發容許使用再取得畜牧場登記證。依行政院農業委員會 103 年 10 月函示請地方政府限期依相關規定辦理水權登記。

上述畜牧場如非位於地下水管制區可依水利法申請興辦水利建造物及水權登記，如位於地下水管制區，則非屬「地下水管制辦法」第五條所許可鑿井之用水標的，值此之際，該辦法修訂第十七條可使管制區內九十九年八月四日前已存在地下水井可納管輔導合法化，此亦為經濟部水利署推行重大政策之一。

為配合中央政策，屏東縣政府整體考量產業制度，土地使用管制規定，排除污染整治管制場址，嚴謹審查地下水井存在時間證明文件，以利推動本計畫

## 貳、計畫策略

屏東縣政府水利處配合農業處辦理合法畜牧業納管水井輔導合法計畫，係由農業處提供本縣地下水管制區於九十九年八月四日前已取得畜牧場登記證、畜禽飼養登記證或農業用地容許作畜牧設施使用等官方文件之畜牧場，可資明確佐證地下水井於九十九年八月四日前既存條件，亦符合產業制度及土地使用管制規定，再排除污染整治管制場址後，水利處比對篩選建立本縣 1,066 家畜牧場名冊為納管水井輔導合法化輔導對象，俟公告本計畫後，該名冊場家於期限內申報地下水井，本府派員履勘複查後，依水利法規公告 15 日無異議後核發水權狀。

由於地下水管制辦法第十七條「管制區內於 99 年 8 月 4 日前既存地下水井」，為必要條

件，其證明文件須特別謹慎，以避免產生諸多態樣爭議性致訴願或行政訴訟，本計畫採納機關所出具官方證明文件並先篩選建立輔導名冊，可大幅減少爭議；另於本計畫實施期間，該名冊畜牧場申報後即進行履勘複查、公告及核發水權狀作業，則可大幅提升行政效率，以符民需。

## 參、依據法規

- (1) 水利法第 27 條、第 46 條、第 93 條、第 93-4 條。
- (2) 水利法施行細則第 64 之 1 條。
- (3) 地下水管制辦法第 17 條。
- (4) 參卓「雲彰地區納管水井輔導合法作業規範」。

## 肆、計畫實施期間

中華民國 106 年 7 月 20 日至 110 年 7 月 19 日計四年。

## 伍、實施對象

本縣地下水管制區於 99 年 8 月 4 日前已取得畜牧場登記證、畜禽飼養登記證或農業用地容許作畜牧設施使用之畜牧場。

## 陸、前置作業與審核程序

- (1) 本計畫獲經濟部水利署備查後，屏東縣政府農業處邀集輔導名冊畜牧場，水利處闡明本計畫內容，公告本計畫後實施。
- (2) 輔導名冊畜牧場申請補鑿井許可及水權登記，須依照「納管水井申請興辦水利建造物，水權登記應備書件一覽表」，填妥興辦水利建造物、水權登記申請書，備齊地下水井規模、規費繳納及量水設備證明等相關文件，提送屏東縣政府水利處(水利行政科)辦理。
- (3) 屏東縣政府水利處審核書件齊備或

通知並補正後，即排定履勘複查地下水井，如無待補正事項則公告 15 日無異議後核發水權狀，該水權不得逾三年可展限並註記自來水等其他水源可滿足需求，限期停用、填塞水井及廢水權。

### 柒、適時檢討

為因應經濟部水利署新公告調整本縣地下水管制區或農業處補提符合本計畫實施對象之畜牧場名冊，或有延長計畫期程必要者，屏東縣政府公告調整本計畫後據以辦理。

### 捌、罰則與除外規定

- (1) 本計畫輔導名冊畜牧場未於實施期間取得水權，屏東縣政府稽查未合法水井並依水利法第 93-4 條辦理。
- (2) 本計畫輔導名冊畜牧場配合屏東縣政府所定期限申報納管地下水井者，符合水利法施行細則第 64 條之 1 具不可歸責性，免為水利法第 93 條擅行取水裁處對象。

### 玖、預期效益

- (1) 早期中央農業與水利法規競合而產生地下水管制區合法畜牧場卻無水權之問題，提供有效對策。
- (2) 本計畫加速審核程序，輔導名冊畜牧場取得水權後，即可辦理畜牧場登記證變更作業，改善場內設備環境及廢污水及空氣品質。
- (3) 跨域增值效益可設置畜禽場太陽能光電系統，以應政府 2025 年 20GW 綠能產業政策。
- (4) 不合法畜牧場或在納管名冊但無法取得水權畜牧場將自然被淘汰，可收保育水資源成效。
- (5) 階段性成果：截至 108 年 7 月 25 日，本計畫輔導 1,066 家畜牧場，已核發 222 件水權狀。

## 三維實境模型輔助河川區域劃設研究

施双鳳<sup>1</sup>、李易唐<sup>2</sup>、沈維霖<sup>3</sup>、吳瑞濱<sup>4</sup>

### 摘要

河川區域範圍之劃設係考量河川洪水自然流經地區，為讓土地所有權人了解其範圍內之土地有漫淹及遭受洪患之虞，並避免因範圍土地過度開發或不當使用造成更大災害，使其蒙受生命財產損失，因此水利主管機關依水利法、河川管理辦法等法規劃定河川區域並公告之，以進行管理。透過劃定之河川區域確認河川管理範圍，現行河川區域劃設作業主要包含外業測量、水文分析及水理計算、河川區域劃定及審查作業。過去對於河川區域劃定審查會議時，產製之圖資為二維平面圖，不易了解現況，須安排審查委員進行現勘了解，因此整體審查時程曠日廢時，雖然近年水利主管機關已要求管理機關以市售商用型無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)透過空中錄影搭配現地拍照方式記錄現況，讓審查委員能更加了解河川現況，然而飛行錄影亦無法完全紀錄反映整體情形，因此本研究基於對河川區域劃設法令及勘測作業技術之瞭解，進行河川區域三維實境模型建模輔助河川區域劃設之可行性評估。

由於市售商用型無人飛行載具有別於傳統航拍飛機與中大型無人飛行載具，具備購置成本低、容易取得之優點，本研究採用市售商用型無人飛行載具(UAV)，測試以航空攝影測量技術，進行河川區域測量作業；並透過 UAV 攝影測量產製大面積之地形圖、正射影像、數值地表模型(Digital Elevation Model)及三維實境模型，探討成果圖資之精度是否能應用於輔助外業測量作業，進一步降低外業人力風險，節省計畫支出，更能透過三維實境模型保存當時期的河川樣貌，於審查會議時套繪相關圖資、照片及影片提供審查委員了解河川現況，除此之外，亦能作為未來河川管理及相關工程規劃之重要參考依據。

**關鍵字：** 河川區域劃設、無人飛行載具、三維實境模型

---

<sup>1</sup> 經濟部水利署河川勘測隊正工程師

<sup>2</sup> 陶林數值測量工程有限公司專案經理(通訊作者)

<sup>3</sup> 陶林數值測量工程有限公司執行長

<sup>4</sup> 經濟部水利署河川勘測隊隊長

## 壹、前言

過往進行河川勘測業務時，常以有人機搭載專業級測量型相機以航空攝影測量搭配地面測量方法執行測繪作業。而近年來由於無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)領域科技進步快速，民間以普遍使用 UAV 進行各領域專業業務，如防救災協助、警備監控、定期巡查與測量製圖等，本研究期試驗以 UAV 配合航空攝影測量與地面測量法進行河川勘測業務，並透過 UAV 產製之成果圖資，如地形圖、正射影像、數值地表模型(Digital Surface Model, DEM)與三維實境模型等不僅作為河川區域劃設過程分析基礎，更能以視覺化方式呈現河川區域劃設成果，能作為河川區域劃設審查會議輔助資料。

UAV 應用發展除了硬體操控門檻降低外，坊間許多商業應用軟體的出現亦帶來許多商業應用，如 Pix4D Pix4Dmapper、Agisoft Photoscan 及 Bentley Systems ContextCapture 等，因應數位影像特徵匹配技術的提昇並搭配運動回復結構法(Structure From Motion, SfM)(Westoby, Brasington et al. 2012)，解算 UAV 於空中攝影時每張影像之位置與姿態，近年來已有多項研究指出以 UAV 進行航空攝影測量作業能達到千分之一比例尺製圖精度規範(李易唐 2016)，應能符合河川區域劃設測繪需求，在實務上，雖一般 UAV 能作業效率相比有人機較差，但其雲下作業能力、高機動性與作業門檻較低的優點能體現在河川區域劃設業務上，更甚者近年來因氣候變遷，強降雨發生機率提升，易導致河川區域地形變化，於測繪業務執行期間可能造成困擾，對於局部或作業面積較小區域能夠以 UAV 進行補測作業更能提升測繪業務的效率。

## 貳、UAV 設備介紹與研究方法

本研究作業流程圖如圖 1 所示，為達到所需要的製圖精度，航線設計方式及影像處理流

程與有人機航空攝影測量作業流程相去無幾，但由於一般 UAV 載具受酬載能力、IMU 規格、相機規格與相機雲台等限制影響製圖精度，因此雖 UAV 影像處理軟體提供高度自動化的處理程序，然而處理過程中的成果亦需加以檢視、編修與檢核方能符合所需製圖精度。

### 一、研究使用設備與試驗區域

本研究採用 UAV 設備需易於推廣，因此建議具備操作簡易、採購便利、相機穩定及安全性高等特點，因此選擇大疆創新(DJI)產品 Phantom 4 Pro V2 進行試驗，列舉其規格如表 1 所示，其單趟航次飛行續航力可達到 30 分鐘，相機採全局快門(Global Shutter)，並可固定焦距等相機拍攝設定需求；影像處理軟體則分別採用 Agisoft Photoscan 作為影像匹配、相機率定及影像外方位解算軟體，接著透過 Bentley System ContextCapture 建置三維實境模型。

本研究試驗區域為草湖溪約一公里河段，河寬約為 180 公尺，而為了模擬河川區域勘測作業，河川區域可能因地形等因素而有所變更，因此試驗範圍依河川區域線向兩岸延伸 50 公尺為試驗範圍，面積約為 40 公頃，試驗位置與範圍如圖 2 所示。

### 二、航線規畫

為滿足 UAV 航空攝影測量作業，需以棋盤式航線配合垂直攝影進行設計，並達到同航帶中，影像前後重疊度達 60% 以上，相鄰航帶間影像重疊度需達 40% 以上，以此提升空中三角測量解算可靠度及解算精度。另外相機曝光設定與 UAV 飛行速度等皆需互相配合才能拍出穩定的影像品質，本研究 UAV 航線規畫示意如圖 3 所示，飛行時相關參數設定如表 2 所示。

另外本研究建置三維實境模型，除了垂直攝影外，亦需針對如橋梁及水門等現地重要設施進行環繞傾斜攝影拍攝，以補充多視角攝影，藉以豐富三維實境模型成果內容細節，傾斜攝影作法示意如圖 4 所示。

### 三、控制測量作業

進行 UAV 航空攝影時透過 GNSS 取得初始坐標，但尚需於試驗區內建置足量且分布合理之航空控制點，控制點可將整體空中三角解算成果套合至地面坐標系統外，亦可作為精度檢核使用。控制測量方法採用 e-GNSS 系統下之 VBS-RTK 方法進行控制點坐標量測。

### 四、影像方位計算

UAV 一般因成本或酬載能力等因素而所搭載的設備不如傳統航測有人機，可能導致影像傾斜角度較大或 GNSS 量測之坐標用於空中三角測量之初始位置誤差較大，皆可能導致傳統航測軟體進行空中三角測量解算失敗或誤差過大。近年來由於數位影像匹配技術發展快速，配合 SfM 技術解算 UAV 影像外方位參數，並透過地面控制點加以約制以取得良好成果。

### 五、立體測繪作業

立體測繪作業係於影像工作站上將 UAV 影像經過立體觀測原理模擬後，進行三維空間中的立體量測作業。由於是模擬 UAV 於空中攝影的視角，因此需計算取得高精度之影像外方位及內方位資訊才能讓觀測者看出立體感，進而執行測繪作業。

由於外業工作長期受天候因素影響作業進度，本研究中期望採用立體測繪作業於地形圖測繪時能夠減輕外業人力負擔，協力分工；立體測繪於人眼所見之處進行測量，外業測量可彌補影像遮蔽處等，提昇地形圖建置之效率，提高因天候因素而有工期問題之容錯率。

### 六、數值地表模型

UAV 影像處理軟體透過所 UAV 影像與空中三角測量解算成果進行密匹配運算，取得大量三維量測點，透過這些三維量測點可內插建置數值地表模型、反推進行影像正射糾正及內插三角網格建置三維實境模型等。

數值地表模型(DSM)係表示地球表面可見光無法穿透的最上層表面的數值模型，一般包

含植被及建物等，因此透過 UAV 空中攝影影像經密匹配所產製之數值模型多為數值地表模型，因此需配合立體測繪作業與調繪補測方式補足地表量測才能夠進一步建置數值地形模型 (DEM)，較能提供後續水理演算之需求。

### 七、正射影像產製

利用產製之數值地表模型針對各張影像進行正射糾正，即修正影像上因高差位移所導致之影像不合理與變形現象，接著透過色彩調和與無縫鑲嵌將各張正射影像進行拼接而成完整範圍影像。

### 八、三維實境模型建置

將密集點雲進行三維網格(3D Mesh)組成，並以拍攝影像進行貼圖，其模型細緻程度依據點雲密度與影像解析度影響，林秋芬(林秋芬 2015)與楊明德(楊明德, 陳韋廷 et al. 2015)等人研究顯示利用控制點與尺度轉換方式能夠增加模型精度，讓三維實境模型不僅作為現況保存紀錄，亦可提供視覺化且全面性的現況參考資料。

## 參、成果與結論

本研究透過 UAV 進行航空攝影測量輔助河川區域劃設業務，除提供勘測作業效率提升，透過所取得的圖資資料，能應用於審查會議中進行視覺化現況參考資料。

### 一、控制測量成果

本研究採用 e-GNSS 系統之 VBS-RTK 進行控制測量，快速取得航空標之三維坐標，其作業示意如圖 5 所示。本研究共計布設 12 個控制點，其分布情形如圖 2，其中測區四周需至少一點以完整包覆測區，並於測區均勻分布方式布設控制點，然而河川區域環境複雜，多處兩岸可能因無堤防、防汛道路等亦於布設控制點處，測區中間因高灘地與深槽亦不易布設控制點，因此需因地制宜，盡量於合適區域設置控制點，並增加控制點幾何分布，本研究控制測量成果表如表 3 所示，成果顯示測量成果平

面精度小於 1 公分，高程精度小於 2 公分，能作為於 UAV 航空攝影測量控制點進行空中三角測量平差計算。

## 二、立測地形圖

透過立體量測產製測區範圍內之地形圖如圖 6 所示，截取局部地區如，其已完成大量地形圖測繪作業，然而局部區域依舊需經過調繪補測補足，如橋梁墩柱、橋下高灘地與植被覆蓋之高程點等，而由於 UAV 航測的高程誤差較大，未必能符合河川大斷面測量規範，因此建議斷面測量作業以傳統水準測量作業為佳。

## 三、數值地表模型

由 UAV 可快速產製數值地表模型(DSM)，進而透過人工編修刪除建物、植被等點雲並加入地面測量之地形點後產製數值地形模型(DEM)，DSM 成果如圖 8，而 DEM 成果如圖 9 所示，其網格尺寸皆為 1 公尺，兩者明顯差異為河川兩側建物在 DEM 上已經過處理，此 DEM 成果經檢核後能透過 GIS 軟體切斷面後應用於水理演算。

## 四、正射影像

UAV 航空攝影測量與傳統地面測量最大差異在於正射影像的提供，傳統地面測量完成後虛購置衛星影像或有人機航測影像作為底圖，但時間上可能會有差距或地面解析度不高導致不易符合現況，而 UAV 航測能搭配當時期拍攝影像產製正射影像作為基礎底圖，測繪成果更能反映當時現況。除此之外，能夠透過正射影像進行數化與量測，獲取所需資訊，草湖溪正射影像成果如圖 10 所示，接著將前述立測地形圖套疊至正射影像上後如圖 11 所示。

## 五、三維實境模型

前述正射影像與數值地表模型成果僅能以垂直視角了解現況與測量，而三維實境模型則可視為將現況以三維方式完整保留，讓使用者無需至現地即可隨意瀏覽，並可採上帝視角了解現況，三維實境模型成果如圖 12 所示，其

中透過三維實境模型可無需至現地便了解排水口等位置、大小等資訊，如圖 13 所示，因此適合於部分區域透過產製三維實境模型提供給河川區域劃設審查委員了解現況，以上帝視角快速了解各個區域。

然而三維實境模型亦具有侷限性，如植被、水面等易飄動或均值區常因影相匹配錯誤導致模型有變形、破洞等不合理現象，範例如圖 14 所示，另外透過影像量測地物點的問題在於因牆角、牆面等資訊缺乏，因此在建物邊角部分容易產生變形等現象，如圖 15 所示，因此三維實境模型雖提供良好視覺化現況呈現方法，但如需進行較精確量測亦需搭配其他測量成果進行較為妥適。

三維實境模型由於經由密匹配點雲並採用三角網格組成，雖紋理較細緻且豐富，但檔案過大造成操作所需電腦硬體負擔較重，也是目前在呈現上較大的困境，未來若能提升展示效能，且將過去常用向量資料以合適方式套疊至模型上，則能更容易滿足使用者進行圖資查詢與現況瞭解等需求。

## 六、結論與建議

利用無人飛行系統產製影像取得高解析度之影像，經過傳統航測作業原理立體測繪成果可滿足地籍圖 1/1000 比例尺之平面精度規範，亦可縮編套合在 1/2400 或 1/2000 河川圖籍上。

利用航照影像產製 DSM 於牆角部分會有顯著差異，建議利用地面控制點或量測特徵線作約制並以後續編修降低誤差。

彩色三維模型由現況拍攝航照影像產製密集點雲，其產製出與現況擬真之模型成果，並與其他現地測量資料與水文資料套疊，透過展示於平台上應能達到於室內現勘之目的。

## 參考文獻

1. Westoby, M. J., J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey and J. M. Reynolds (2012).

"Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications." *Geomorphology* 179: 300-314.

2. 李易唐 (2016). 多相機攝影系統影像拼接之精度分析. 碩士論文, 國立成功大學.
3. 林秋芬 (2015). 無人飛行載具真實三維建模精度評估. 碩士論文, 國立台北大學.
4. 楊明德, 陳韋廷 and 黃凱翔 (2015). "應用 UAV 影像建置現地堰塞壩三維模型." *中華水土保持學報* 46(2): pp. 88-95.

重量	1388g	鏡頭焦距	8.8mm
軸距	350mm	照片尺寸	3:2 寬高比： 5472 x 3648
像元尺寸	1 英吋 CMOS	最大續航力	約 30 分鐘



圖 2 本研究試驗區位置示意圖

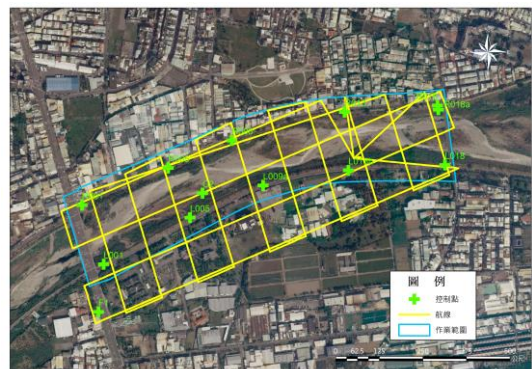


圖 3 本研究 UAV 航線規劃示意圖

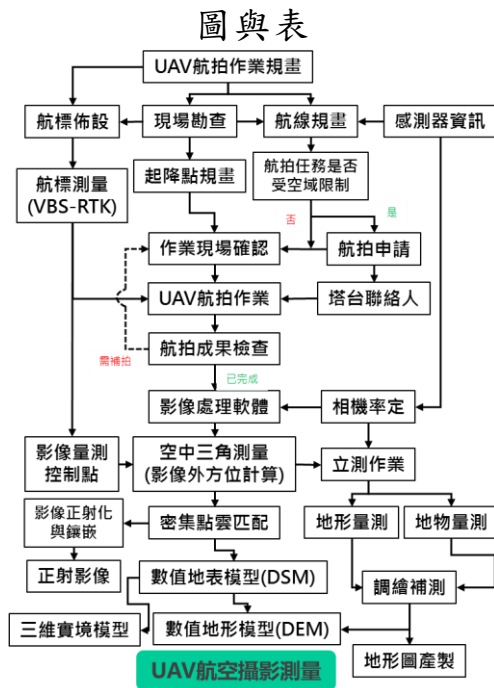


圖 1 本研究作業流程圖

表 1 DJI Phantom P4 Pro V2 規格表

表 2 UAV 航拍相關參數設定表

草湖溪飛航參數設定表			
飛行航高	200m	飛行航次	4+4 (垂直+傾斜)
地面解析度 (GSD)	5.75cm	控制點數量	12 個
影像張數	570 張	飛行速度	27m/s



圖 4 環繞傾斜拍攝方法示意圖



圖 5 VBS-RTK 控制測量作業示意圖

表 3 控制測量成果表

點名	E	N	H	平面精度 (m)	高程精度 (m)	PDOP	衛星數
F1	2663575.622	219425.664	57.156	0.008	0.018	2.0	13
L001	2663711.937	219440.518	57.951	0.006	0.013	1.9	14
L005	2663845.476	219688.397	59.374	0.008	0.015	1.4	16
C2	2663915.565	219724.363	55.472	0.006	0.012	1.4	16
L009a	2663937.881	219898.094	60.484	0.009	0.016	1.7	14
L013b	2663980.785	220142.784	63.654	0.007	0.015	1.6	14
L018	2663996.213	220419.539	68.059	0.006	0.013	1.8	13
R008	2664066.624	219808.108	62.619	0.007	0.015	1.8	13
R005	2663987.656	219625.449	60.620	0.005	0.010	1.5	14
R001	2663881.059	219378.533	57.723	0.005	0.010	1.4	16
R013	2664147.790	220131.767	65.936	0.006	0.012	1.3	15
R018	2664166.792	220398.182	68.317	0.008	0.015	1.7	13

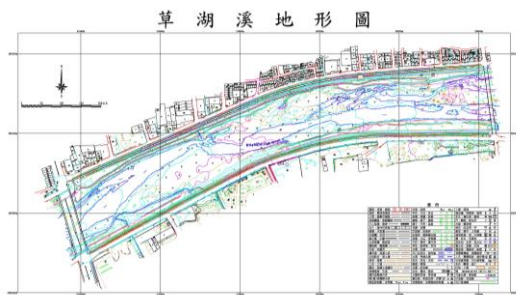


圖 6 草湖溪立測地形成果圖



圖 7 草湖溪立測地形成果局部放大圖



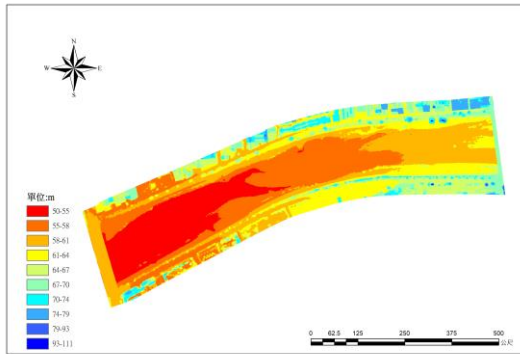


圖 8 草湖溪數值地表模型成果圖

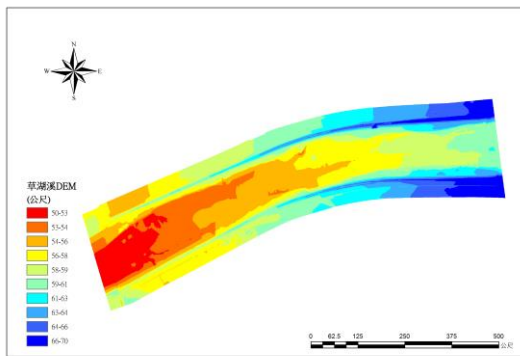


圖 9 草湖溪數值地形模型成果圖

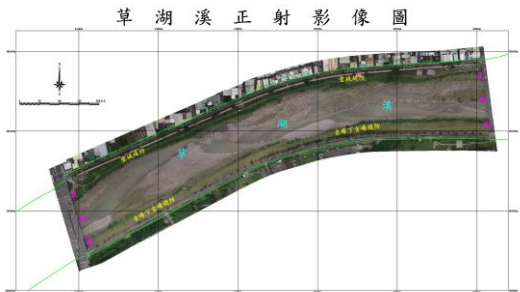


圖 10 草湖溪正射影像成果

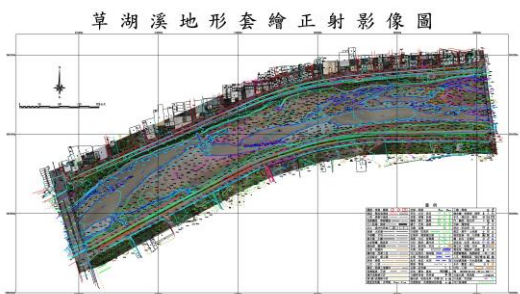


圖 11 草湖溪正射影像套疊地形圖成果



圖 12 草湖溪三維實境模型成果



圖 13 草湖溪三維實境模型排水口範例



圖 14 三維實境模型變形與破洞範例

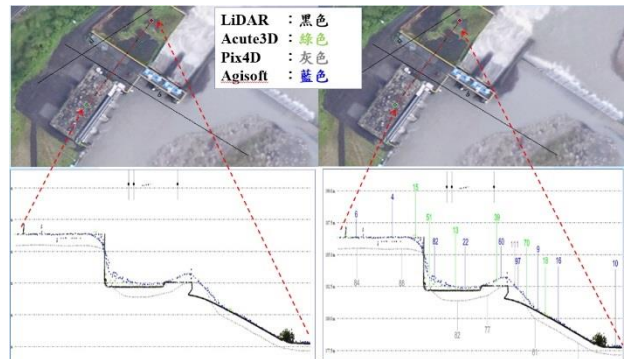


圖 15 UAV 以影像處理量測地物點與光達測量成果比較

## 國民政府遷台前的水利法子法 -從水利法規彙編第一集及水利法規輯要談起

李方中<sup>1</sup>

### 摘要

《水利法》是在抗戰期間於民國 31(1942)年在重慶公布，而於次年施行的。民國 34(1945)年抗戰勝利，《水利法》通行全國，並及於臺灣。當時的《水利法》中央主管機關「水利委員會」先於民國 33(1944)年印行了《水利法規彙編》第一集，再因抗戰勝利，全國亟待重建，而於民國 35(1946)年編印《水利法規輯要》，供應全國遵行。兩份法規資料詳細刊載了《水利法》立法後初期的相關子法。

民國 38(1949)年，國民政府退守臺灣，《水利法》歷經 14 次修正，現行子法名稱與上述法規資料刊載的已完全不同。相對的，在大陸地區，1988 年訂定舊版《水法》，2002 年訂定新版《水法》，至今有 2 次修改。新版《水法》中，有若干規定，其精神與《水利法》仍有相通之處。由兩份法規資料所刊載之《水利法》立法後初期的相關子法，可以看出《水利法》這部在中國近代確立不再以運河為水利系統中第一優先的思想後的第一部水法，對於海峽兩岸水利及水法發展的承先啟後的作用，以及發展方向變化的軌跡。

**關鍵字：**水利法規彙編、水利法規輯要、水利法、水法

---

<sup>1</sup> 臺灣大學水工試驗所專案計畫研究員

## 壹、前言

在大陸地區，歷史上，對中央政府而言，水利均以漕運為重。直至晚清漕運終結及累積了傳入的西方工程技術、制度及法律，經過近百年的發酵、消化，產生必須對整個中國的水利事業及法規制度做一個全面整理的共識。

根據記載，國民政府自民國 16(1927)年在南京時期即著手起草《水利法》，並有民國 22(1933)年、23-24(1934-1935)年，以及 29(1940)年等 3 個版本的《水利法草案》。最後，於抗戰期間，民國 31(1942)年 6 月 20 日在重慶市的獨石橋立法院議場通過《水利法》，並經國民政府於同年 7 月 7 日公布次年 4 月 1 日施行。

清代並無統一水法，《水利法》是中國在面臨水利管理的大變局後，經過數十年醞釀所完成的一部以河川系統為管理治理軸心所建立的現代化水法。

公布時的《水利法》共 9 章 71 條，但其企圖心很強，包含了：防洪、排水、備旱、澆田、放淤、保土、洗鹼、給水、築港、便利水運或發展水力等 11 種水利事業。整部《水利法》是以「水權」、「水利建造物」及「水道」等三個主軸給予各水利事業廣泛性的規定。其中只有第七章「水道防護」是比較偏向防洪、排水兩種水利事業的特別規定，而沒有給予其他水利事業比較詳細的規範。

這樣的一部《水利法》，其條文文字的抽象程度很高；相對的，直接的可操作性就比較低，必須靠相關子法的大量補充，或者開放納入大量的新增條文，甚至新訂相關法律，才能補充規範之不足，提高可操作性。

然而，《水利法》公布後，當時在大陸訂有那些子法？其內容為何？資料的搜尋非常困難。所幸，筆者在成功大學總圖書館搜尋得在大陸時期印行的《水利法規彙編》第一集及《水利法規輯要》，其中有當時子法的完整資料。圖

1 及圖 2 分別是兩份法規資料封面之照片。因此，本文除簡介兩本資料的內容，並嘗試還原當時的制度構想，初步探討《水利法》分別對臺灣及大陸水利發展的影響。

## 貳、水利法規彙編第一集

### 一、內容

民國 33(1944)年，當時的《水利法》中央主管機關「水利委員會」印行了《水利法規彙編》第一集，其內容分為(一)通則、(二)組織、(三)服務、(四)業務及(五)附錄的五大類。茲將其重要內容整理如表 1，重要法規的公布、施行或修正日期註明於備註欄。

編印《水利法規彙編》是一個制度性作法，持續至今，經濟部水利署目前仍每一年至兩年蒐集最新的相關法規，編印《水利法規彙編》。

### 二、重要趨勢分析

由表 1 的內容，可以看出一些當時的重要趨勢：

1. 屬於《水利法》子法的，只有 4 部，包括：《水利法施行細則》、《灌溉事業管理養護規則》、《水權登記規則》及《水權登記費征收辦法》。《管理水利事業辦法》及《修正整理江湖沿岸農田水利辦法大綱》及其執行辦法的發布是在《水利法》公布之前；《興辦水利事業獎勵條例》本身是一部獨立的法律；《水利建設綱領》其實是政策宣示；《獎助民營水力工業辦法》並不是依據《水利法》的規定所發布的。因此，都不是《水利法》的子法。
2. 雖然身處戰時，當時的國民政府對於發展水利非常重視。除了《水利法》及其子法，以及通過了幾個重要的江河的水利委員會的組織規程外，《指定職業學校設置中等水利科辦法》、《舉辦水利科短期職業訓練班辦法》、《行政院水利委員會設置水利講座辦法》、《行政院水利委員會任用專科以上

學校水利工程系組畢業生辦法》、《行政院水利委員會水利獎學金實施辦法》及《行政院水利委員會征求水利著述及製造辦法》等行政法規的發布，都十足反映出政府是從各個層面，同時加強水利人才的培養及進用。

3. 發展水利的重大目的之一是發展農業，這在戰時更有其必要。除了《修正整理江湖沿岸農田水利辦法大綱》及其執行辦法是在「七七事變」後不久後即發布的外，《灌溉事業管理養護規則》對於管理養護機的建立及管理的內涵予以規範(規則第 2 章及第 3 章)、《中國農村水力實業特種股份有限公司章程》以公司型態協助發展水利、增進農產、促進農村工業化(章程第 2 條)。更重要的是「五、附錄」所示的農業貸款的推動做法非常具體，《農貸協議書藍本》及《農田水利貸款合約藍本》都是由中國農民銀行貸款給各省政府，貸款名目內容包括：農業生產、農業運銷、農村副業、農業推廣及農田水利；貸款地區分為：普通區、戰區、邊區、收復地區等。與《戰區及邊區農貸暫行辦法》對照，顯示支持的對象深入戰區。

在表 1 中，還有兩部法規值得特別一提。首先是《管理水利事業辦法》。《管理水利事業辦法》是在《水利法》公布之前，由行政院於民國 30(1941)年 5 月 31 日頒布，宣告管理全國水利事務之權責(辦法第 1 條)由經濟部移轉至行政院水利委員會(辦法第 2 條)。其規定內容比較接近於組織法。其次是《水利建設綱領》。《水利建設綱領》在性質上是由經濟部在主管水利時，於民國 29(1940)年《水利法》尚未公布前，所做的政策宣示，其內容分為 3 篇 35 點，以下稱為 29 年版《水利建設綱領》。篇名依序為「根本篇」19 點、「當前篇」10 點及善後篇 6 點。其中，「當前篇」及「善後篇」分別列出抗戰期間

及預期戰爭勝利後的水利工作重點，並特別提到黃河決口預訂在「抗戰結束後一年內堵復」；而「根本篇」則是標誌著國家的水利基本政策，顯然也是《水利法》立法過程中所一併探討的。

## 參、水利法規輯要

### 一、發行的背景

水利委員會因抗戰勝利，全國亟待重建，除了繼續準備編輯《水利法規彙編》第二集外，並於民國 35 年 2 月編印《水利法規輯要》，供應全國遵行。在序言中說明：「方今戰事結束，水利建設事業正在併力進行，爰擇其最重要之法規為興辦水利事業人員及一般民眾所宜知者，…，另編為水利法規輯要以資流傳而作準繩，亦或當世所急需歟。」

### 二、與水利法規彙編比較

比較《水利法規輯要》中所刊法規為《水利法規彙編》第一集所無或經更新者，列如表 2。表 2 中只有《臨時用水執照核發規則》屬於《水利法》的子法，也因此表示，至民國 35(1946)年 2 月止，狹義的《水利法》子法共有 5 部。此外，表 2 中，《臨時用水執照核發規則》是行政院 33(1944)年 8 月 15 日核准備案的，在時間上比行政院 33(1944)年 9 月 29 日公布的《灌溉事業管理養護規則》還早約 1 個半月，但並未如《灌溉事業管理養護規則》一同收錄在《水利法規彙編》第一集中，原因未見說明。

其中比較特殊的是《水利建設綱領》。根據《水利法規輯要》記載，該版《水利建設綱領》是經中國國民黨「第六屆中央執行委員會第一次全體會議通過」，以下稱為 34 年版《水利建設綱領》。以當時國民黨以黨領政的作法而言，中央執行委員會通過的綱領，對於行政機關是有一定的拘束力，具有「準」法律意義，也無礙於經濟部民國 29(1940)年發布時是政策性文件的意義。34 年版是修訂於《水利法》公布之後，仍可做為對照參看《水利法》規範的重要

文件。與 29 年版《水利建設綱領》不同的是，34 年版《水利建設綱領》刪除了「當前篇」及「善後篇」，只保留了「根本篇」，並將原有的「各河上游地帶應注重防止土壤之沖刷」刪除外，其餘各點文字及順序略作調整，也廢除篇名。34 年版《水利建設綱領》除了 18 點內容外，還附有《水利建設綱領實施辦法》。此辦法逐點的說明綱領各點的實施辦法。值得一提的是，日本是在民國 34(1945)年 8 月 15 日由日皇宣布投降，但在該年的 5 月 30 日中央執行委員會即已通過 34 年版《水利建設綱領》，將「當前篇」及「善後篇」予以刪除，表示當時執政黨對於抗戰終將勝利已有確信。

## 肆、與大陸地區水利發展的關連

### 一、流域管理作法的確立

《水利法》第 4 條：「中央主管機關按全國水道之天然形勢『劃分水利區』，呈請行政院核定轉呈國民政府公布之。」「劃分水利區」的意涵就是進行「流域管理」。配合上《水利法規彙編》第一集所刊的：《導准委員會組織法》、《黃河水利委員會組織法》、《揚子江水利委員會組織法》、《華北水利委員會組織法》、《珠江水利局組織規程》、《江漢工程局組織規程》及《行政院水利委員會涇洛工程局組織規程》等組織法規，就很明確的瞭解當時已有 4 處水利委員會及 3 處水利或工程局的編制。

對照大陸地區現況的「長江水利委員會」、「黃河水利委員會」、「淮河水利委員會」、「海河水利委員會」、「珠江水利委員會」、「松遼水利委員會」及「太湖流域管理局」等 7 處管理委員會，雖然與民國 34(1945)年前後的 7 處水利委員會及水利、工程局不完全一樣，但對於大江大河進行「流域管理」，這個原則已經在《水利法》公布時予以確立。大陸地區現行的《水法》第 15 條第 1 款也明定了「流域范围内的区域规划应当服从流域规划」的原則。

### 二、水權制度的建立

《水利法》建立了脫離地權且以流量為準的水權制度，跳脫了歷史上長期的「水隨地走」且採比例分配的取水制度。《水利法規彙編》第一集所刊的：《水權登記規則》及《水權登記費征收辦法》，以及《水利法規輯要》所刊的《臨時用水執照核發規則》補充了「水權登記業務掌理機關」以及「登記費以每一用水標的為一單位」的兩個重要規定。大陸地區現行《水法》採行「向水行政主管部门或者流域管理机构申请领取取水许可证」(第 48 條)延續了水權脫離地權，並由政府負責核發的原則。

### 三、各流域的發展原則

「劃分水利區」除了進行「流域管理」外，34 年版《水利建設綱領》另給予建設的意涵，將全國分為 11 處水利建設分區：松花江、遼河、白河、黃河、內海、淮河、揚子江、浙閩、珠江、瀾滄江及雅魯藏布江等。並給予一些重要流域的治理原則指導：

1. 黃河應以防洪灌溉為主。
2. 揚子江應以航運水力為主，儘先實施。仍應顧及洪水之調節及灌溉之利用。
3. 導准工程以十年完成全部工事為目標。
4. 珠江應改造完成個堤防系統，並輔以涵閘操縱水流。
5. 灌溉事業以西北各省的黃河流域及內海流域為經營之重心，其次為白河流域及西南各省之揚子江流域及瀾滄江流域等。
6. 優先在白河、黃河、揚子江、浙閩及珠江各流域，開發水電力。

大陸地區近年的水利建設，與上述原則若合符節。

### 四、其他單位與任務的延續

《水利法規彙編》第一集中，除了《中央水利實驗室組織規程》，還刊載了《中央水利實驗室辦事細則》及《中央水利實驗室設計考核委會辦事細則》。現在的「水利部南京水利水文

自動化研究所」前身即是「中央水利實驗處南京水工儀器實驗室」。

除了《行政院水利委員會征求水利著述及製造辦法》外，《行政院水利委員會各處室科處務規則》第 8 條規定技監室第 3 組掌理事項，包括「水利文獻之徵集及研究事項」。反映出中華民族重視歷史的精神。現在的水科院「水利史研究所」即承擔著這個任務。

## 伍、與臺灣地區水利發展的關連

### 一、流域管理

由於流域的空間尺度相差太大，臺灣地區並沒有依據《水利法》關於「劃分水利區」的規定進行法律上的劃設及公告，但在實務上，10 所河川局及 3 所水資源局其管轄範圍都是以河川流域為範圍來劃分的，且包含一個以上的河川流域。

### 二、水權制度

臺灣地區水權制度自民國 37(1948)年開放水權登記後，即係依據《水利法》的水權規定辦理各項水權業務至今。雖然《水利法規彙編》第一集所刊的：《水權登記規則》及《水權登記費征收辦法》，以及《水利法規輯要》所刊的《臨時用水執照核發規則》等在大陸時期所訂定的子法在臺灣地區都已廢止，但「水權登記業務掌理機關」以及「登記費以每一用水標的為一單位」的兩個重要規定都已透過修法而納入《水利法》，並已另訂臺灣地區所需要的相關子法。

### 三、流域發展

雖然《水利建設綱領》有提到臺灣，並將臺灣納在浙閩流域的範圍內，但實際上當時對於臺灣了解太少，遑論提出計畫原則。臺灣經過日本統治 50 年，日人對台建設有詳細的規劃，因此，實際上的重要水利建設構想還是基於日人的規劃。

### 四、其他單位與任務的延續

民國 39(1950)年，經濟部中央水利實驗室

分別與臺灣大學及臺灣省立工學院(現為成功大學)合設「台北水工試驗室」及「台南水工試驗室」，延續了中央水利實驗室的任務。兩試驗室現在分別改名為「臺灣大學水工試驗所」及「成功大學水工試驗所」。

臺灣省文獻委員會在民國 90(2001)年前後，曾經委由當時的「經濟部水資源統一規劃委員會」主任委員吳建民任總編纂，完成一部《臺灣地區水資源史》。但水利史研究的任務在臺灣並無機關正式的延續此工作。

## 五、水利法子法的變動

除了上述原因，臺灣地區的水文及地文條件與大陸地區相差太多，加上整體法學及法制的進步，因此，《水利法規彙編》第一集及《水利法規輯要》所刊的《水利法》5 部子法，除了《水利法施行細則》外，在臺灣已全部廢止，另行訂定。即使是沒有廢止的《水利法施行細則》，其內容也已經過大幅修正。

## 陸、兩本法規資料的價值

### 一、充分的補充了當時子法規資料的缺口

在此之前，完全看不到有此時期的《水利法》子法規或相關研究。

### 二、各子法對水利法的重要補充解釋

僅就筆者所見者說明如下：

1. 有許多重要內容在日後修法時提升納入《水利法》。以《水利法》的條文計算共有 10 條來自各子法。這也表示中央主管機關，至少在修法當時，仍保有此時期的子法規資料，只是機關外無法查到。
2. 《臨時用水執照核發規則》對於理解《水利法》水權制度中的「臨時使用權」的制度構想有所認識。對於「臨時使用權」在臺的實際操作以及未來的修正，提供思考方向。
3. 《灌溉事業管理養護規則》是對原始版《水

利法》第 2 條中 11 種水利事業中的「溉田」事業的完整補充。特別注意到機關間的分工，「溉田」事業與「天然水道及水權登記」有關者，其中央水利主管機關在當時是「水利委員會」，而其他與「天然水道及水權登記」無關者，其「溉田」事業之中央水利主管機關是「農林部」。

4. 《利用義務勞動興辦水利實施辦法》並不是《水利法》的子法，而是屬於《國民義務勞動法》的子法。「水利」屬於義務勞動事項之一。相對應於《水利法》第 10 條，此辦法合理限縮了工作範圍，並保障人民工資及工時合法權益。
5. 由 34 年版的《水利建設綱領》及其實施辦法的綱領十的內容，可以了解「免予水權登記」的法律規定與「普遍發展灌溉」的政策目的是相搭配的。此點可以供目前處理全國違法水井政策的參考。
6. 對中央水利主管機關公布《水利法》各版本的校正參考。

### 參考文獻

1. 譚徐明(2019)，「中國水利近代行政體制變革到現代水利的演變」，土木水利，第 46 卷，第 1 期，第 12-17 頁。
2. 李方中、李協展(2018)，「水利法的形成過程及其相關討論」，第二十二屆海峽兩岸水利科技交流研討會論文集，北京， pp.D323-D331。
3. 李協展、李方中(2019)，「水利法的形成過程——以水利法草案、水利會議的討論為限」，土木水利，第 46 卷，第 1 期，第 45-52 頁。
4. 李方中(2019)，「立法初期各子法對水利法的重要補充解釋」，土木水利，第 46 卷，第 1 期，第 53-64 頁。

5. 吳建民總編纂(2000-2001)，「臺灣地區水資源史」，臺灣省文獻委員會。

### 圖與表

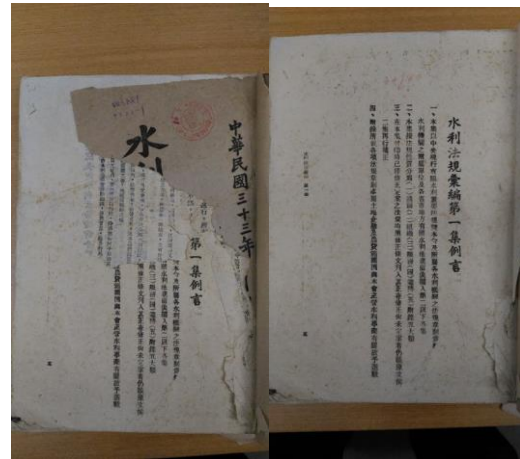


圖 1 水利法規彙編第一集

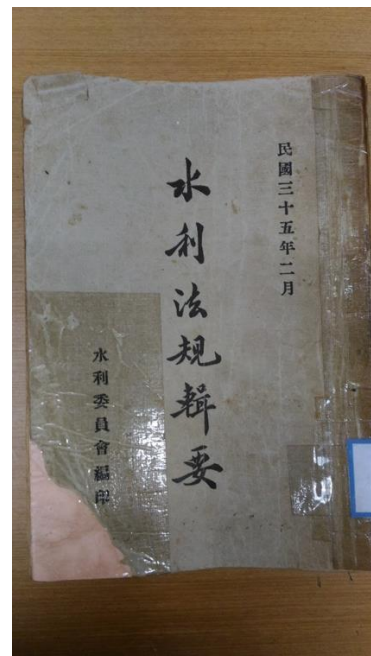


圖 2 水利法規輯要

第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

表 1 水利法規彙編第一集重要內容

類別	法規數量	重要或代表性法規	備註
一、 通則	11	管理水利事業辦法	行政院 30 年 5 月 31 日頒布 33 年 10 月 19 日修正
		水利法	國民政府 31 年 7 月 7 日公布 32 年 4 月 1 日施行
		水利法施行細則	行政院 32 年 3 月 22 日公布 32 年 4 月 1 日施行 33 年 9 月 16 日修正公布
		興辦水利事業獎勵條例	國民政府 32 年 7 月 29 日公布
		灌溉事業管理養護規則	行政院 33 年 9 月 29 日公布
二、 組織	28	導淮委員會組織法	國民政府 31 年 10 月 17 日修正公布
		黃河水利委員會組織法	國民政府 31 年 10 月 17 日修正公布
		揚子江水利委員會組織法	國民政府 31 年 10 月 17 日修正公布
		華北水利委員會組織法	國民政府 31 年 10 月 17 日修正公布
		珠江水利局組織規程	行政院 32 年 9 月 3 日令准修正並轉呈國民政府備案
		江漢工程局組織規程	行政院 32 年 9 月 3 日令准修正並轉呈國民政府備案
		行政院水利委員會涇洛工程局組織規程	行政院 32 年 9 月 3 日令准修正備案
		中央水利實驗室組織規程	行政院 32 年 12 月 12 日令准備案
		行政院水利委員會水利示範工程處組織規程	行政院 32 年 5 月 6 日令准修正備案
		中國農村水力實業特種股份有限公司章程	32 年 9 月 23 日該公司董事會通過
三、 服務	35	行政院水利委員會分層負責辦事細則	本會 30 年 9 月 29 日公布
		黃河水利委員會辦事細則	行政院水利委員會 33 年 6 月 15 日修正備案
四、 業務	36	水利建設綱領	經濟部 29 年 1 月 9 日令行
		水權登記規則	行政院 32 年 6 月 23 日核准 行政院水利委員會 32 年 7 月 29 日公布施行
		水權登記費征收辦法	行政院 32 年 11 月 2 日核准 行政院水利委員會 32 年 11 月 22 日公布
		修正整理江湖沿岸農田水利辦法大綱	國民政府 26 年 10 月 28 日核准
		修正整理江湖沿岸農田水利辦法大綱執行辦法	國民政府 26 年 10 月 28 日核准
		獎助民營水力工業辦法	行政院 33 年 5 月 20 日核准並轉立法院備查 行政院水利委員會 33 年 6 月 1 日公布
		行政院水利委員會任用專科以上學校水利工程系組畢業生辦法	本會 31 年 9 月 1 日公布
		指定職業學校設置中等水利科辦法	行政院 32 年 5 月 11 日核準備案
		舉辦水利科短期職業訓練班辦法	行政院 32 年 5 月 11 日核準備案



第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

		行政院水利委員會設置水利講座辦法	本會 32 年 5 月 15 日修正實施
		行政院水利委員會水利獎學金實施辦法	本會 31 年 7 月 25 日施行 32 年 5 月 15 日修正實施
		行政院水利委員會征求水利著述及製造辦法	行政院 33 年 1 月 28 日核准 本會 33 年 2 月 18 日公布
五、 附錄	10	辦理各縣小型農田水利貸款暫行辦法綱要	31 年 10 月 27 日四聯總處第 142 次理事會議通過
		農貸準則	32 年 1 月 14 日四聯總處第 158 次理事會議通過
		農貸辦法綱要	32 年 2 月 4 日四聯總處第 161 次理事會議通過
		農貸協議書藍本	32 年 2 月 4 日四聯總處第 161 次理事會議通過
		戰區及邊區農貸暫行辦法	32 年 3 月 18 日四聯總處第 167 次理事會議通過
		農田水利貸款合約藍本	行政院 33 年 3 月 2 日令准備案

表 2 水利法規輯要中新增或修正法規

類別	法規名稱	備註
修正	水利建設綱領 附水利建設綱領實施辦法	34 年 5 月 30 日第六屆中央執行委員會第一次全體會議通過
新增	利用義務勞動興辦水利實施辦法	行政院 34 年 3 月 1 日修正備案
新增	臨時用水執照核發規則	行政院 33 年 8 月 15 日核准備案

# 青年優秀論文競賽

## 南方灌區現代化建設新思考

史源<sup>1</sup>、白美健<sup>2</sup>、劉群昌<sup>3</sup>

### 摘要

灌區由灌溉水源工程、灌溉排水渠、溝及控制建築物和量測水設施系統及灌溉農田組成。灌區作為國家糧食安全的重要支撐和農業發展基礎，國家一直高度重視其發展。本文在歸納分析大陸南方灌區特點和發展趨勢的基礎上，結合灌區現代化內涵，提出南方灌區現代化發展總體要求；圍繞供水、配水、田間生態灌排水、資訊化和體制建設等方面，給出了新的工程佈局思路和想法，並對灌區現代化建設推進措施給予了一定建議。

**關鍵字：**南方灌區、灌區現代化、工程佈局、新思考、推進措施

---

<sup>1</sup> 中國水利水電科學研究院，高級工程師

<sup>2</sup> 中國水利水電科學研究院，教授級高級工程師

<sup>3</sup> 中國水利水電科學研究院，教授級高級工程師

## 壹、前言

灌區由灌溉水源工程、灌溉排水渠、溝及控制建築物 and 量測水設施系統及灌溉農田組成。灌區作為國家糧食安全的重要支撐和農業發展基礎，國家一直高度重視其發展，70 年來，大陸灌區建設與管理取得了舉世矚目的成就，農田灌溉面積由 1949 年的 1593 萬  $\text{hm}^2$  發展到 2016 年的 6714 萬  $\text{hm}^2$ ，位列世界第一，保障了我國糧食安全供給和社會經濟發展。2018 年國家《關於實施鄉村振興戰略的意見》中明確提出“加快灌區續建配套與現代化改造”，近 15 年來，圍繞灌區現代化建設的探討很多，多數側重在資訊化建設，部分圍繞管理體制改革實踐等。灌區作為一個社會綜合體，直接服務於“三農”，其現代化建設包括工程、資訊、體制等多方面，其功能除了灌溉和工業生活供水外，對水生態環境改善、生態景觀提升和宜居鄉村建設的助力也至關重要。

灌區的建設與管理包括水源工程、輸配水工程、田間灌溉工程和排水工程的建設與管理。大陸南北方自然地理條件差異巨大，所屬灌區現代化建設內容和工程佈局難以按相同模式考慮，故本文旨在結合南方灌區特點和新形勢下三農發展需求，有針對性的提出灌區現代化建設內容設置和工程佈局中應該考慮的問題，並結合大陸國情和灌區現代化發展的階段要求，對灌區現代化建設推進措施給予一定建議。

## 貳、南方灌區特點和發展趨勢

南方地區總體“水多地少”，降雨豐富，自然水系發達，地形複雜。相較於北方灌區，南方灌區突出特點和發展趨勢如下：

### （一）灌溉水源多元化

由於降雨豐富，自然水系發達，南方灌區灌溉輸配水系統多為長藤結瓜形式，自然水系和水庫/塘堰等成為灌溉水源的重要組成部分，形成分散水源供水特點。

### （二）作物種植結構多樣化

南方地形複雜，耕地主要分為水田和旱地，水田以種植水稻為主，原有灌溉系統主要針對水稻灌溉需求進行工程佈局，旱地主要種植小麥、玉米、花生、蔬菜和水果等。隨著南方經濟快速發展和農村勞動力日益短缺，南方土地流轉後形成集約化經營已成為一種必然趨勢，流轉後的土地以種植效益較高的經濟作物為主，作物灌溉時空需求發生了極大變化，既有灌溉系統佈局已沒法滿足新形勢下的作物灌溉需水時空要求。

### （三）灌溉工程利用率低，維護困難

南方灌區降雨豐富，灌溉對於產量的貢獻率遠低於北方灌區，在農民極度依賴土地收入的年代，灌溉工程利用程度相對較高，且容易組織農民進行日常維護，但隨著外出務工人員增多，灌溉工程利用率急劇降低，年久失修問題日益嚴重，面對最後一公里問題時依舊採用傳統的管道整治和襯砌是否合理，值得斟酌。因此灌區現代化建設時為確保工程能長久發揮效益，省工易維護等必須作為重點因素考慮。

### （四）灌區排水問題面臨更大挑戰

南方降雨豐富，農田排水問題突出，一方面雨季農田中過多的水分若不能及時排出則嚴重影響田間勞作和作物生長，另一方面農業灌溉施肥、施藥後，土壤中的肥和藥極易隨農田排水運移進而影響到河流、湖泊和海洋的生態環境，因此南方灌區現代化建設時節水控排減汙等生態灌排系統的建設必須被重視。

## 參、南方灌區現代化建設發展總體要求

正如茆智院士在都江堰建堰 2260 周年學術論壇上所講“灌區現代化發展方向是現代化節水型生態灌區，灌區現代化是一個有起點無終點的過程，是與體制、制度改革相結合，在技術、管理上提升灌溉系統的過程，其目標是對勞動力資源、水資源、經濟資源和環境資源

的利用以及改進對農民的配水服務”。

因此，南方灌區現代化建設總體要求可概括為“供水可靠，配水靈活，用水高效，管理智慧，運維專業，生態良好”，既考慮為現代農業灌溉服務的基本功能，也兼顧助力鄉村振興戰略實施的外延功能，並結合當前南方灌區發展趨勢和民情特點，充分利用高新技術，從工程，資訊和管理融合出發，圍繞水源供水、過程配水、田間生態高效灌排水、和科學管水四個環節進行建設規劃，構建起安全可靠的灌區供水體系、靈活精準的灌溉配水體系、生態高效的灌排工程體系、智慧可靠的灌區自動監控體系、科學完備的水管理保障體系，大大提升灌區的現代化服務水準。

#### 肆、南方灌區現代化建設內容和佈局新思考

從灌區現代化的內涵和建設總體要求可知，灌區現代化不僅僅是資訊化，其建設應包括工程提升，資訊技術應用和管理體制完善等多方面。基於南方灌區特點重點探討其灌區現代化建設工程佈局和建設內容方面的一些想法。圖一給出了灌區現代化建設工程佈局思路。

(一) 灌區供水方面，基於連通工程形成供水面源

根據南方灌區分散水源供水特點，工程佈局時考慮通過串並連工程將灌區內自然水系、人工水系、水庫、塘堰/蓄水池、泵站等進行連通，形成全域範圍內的供水面源，確保到每個行政村都有灌溉供水水源。

(二) 灌區配水方面，以村為界建微型灌區，配水龍頭到田間

以行政村為管理單元，基於“一村一微型灌區”的原則，每個村建成一個相對獨立的高微生灌區，在每個微型灌區內，以供水面源為首，結合每個村社會經濟、地形、作物種植佈局、灌溉配套工程現狀和未來產業發展趨勢，規劃佈局管網或渠管結合配水系統，實現給水

栓到地頭，大大提高農業灌溉用水的便捷程度；在灌溉系統首部配備相應量控設施，作為灌溉用水計量徵收水價依據。在工程建設的分步推進中可逐個村進行建設，工程建好後在後續灌溉運行管理、工程運維，以及農業水價綜合改革實施等方面都可以每個微型灌區作為獨立管理單元，利用行政管理團隊來進行灌溉工程相關業務的協管，從而使得灌溉系統的建設和運維管理易組織。

(三) 田間生態灌排水方面，節灌控排減汙重生態

密切結合南方灌區目前作物種植結構調整後灌溉需求和田間控排減汙及生態景觀提升要求，佈局田間高效節水灌溉和生態排水工程。對於田間種植果樹、蔬菜或花卉等高經作物的田塊，選擇適宜的高效節水灌溉及水肥一體化技術進行建設；對於稻田等糧食作物，則配水栓到地頭，田間灌溉方式可由農戶自由選擇。對於規模化經營的園區，可先行示範推廣智慧化灌溉控制系統，在讓農民真正受益於新技術的省工增產增收的好處的同時，以期通過示範帶動作用，逐步實現農業灌溉現代化；對於水田灌溉區，需結合現有排水系統和自然水系分佈情況，從生態健康發展和景觀提升的角度，佈局田間生態排水工程，減少農田面源污染，改善專案區內人居環境，促進美麗鄉村建設。

(四) 灌區資訊化方面，關鍵節點布監控，運行管理智慧化

從水源到田間的全過程的各個環節中，在關鍵的控制、配水和管理節點，及示範區等關鍵位置佈置自動量測和監控設施，基於灌區資訊化管理平臺，實現資料的自動採集、方案的智慧決策和智慧控制，最終實現灌區運行管理智慧化。

(五) 灌區管理體制方面，與時俱進建機制

著重探討農業與灌溉管理一體化託管模式。根據灌區社會經濟發展趨勢，勞動力資源、

水資源供需發展變化、以及國家在水利發展改革方面的政策導向，與時俱進創新工程投融資、工程建設管理、工程運行管護、水費計量監控、水權控制分配、資訊化管理體系建設等機制體制，實現灌區建設投資多元，水費計收精準，設備運行高效，工程管護專業。針對不同經營主體的特點，比如合作社、大戶、公司企業等，分別制定政府管理部門與經營主體之間的合作運維制度。鑒於灌溉只是作物產出農產品整個過程中的一個環節，與播種、施肥施藥及農藝措施等農業管理環節密切相關，不同地區針對當地特點，示範探討將農業與灌溉管理整合的一體化託管模式，讓託管企業參與農作物產出農產品進入市場的全過程，以期獲得盈利點。

## 伍、灌區現代化建設推進措施建議

灌區現代化是一個與社會經濟發展和灌區用水需求變化相適宜的不斷推進的過程，可否進入現代化建設階段與灌區水利工程基本現狀、地區社會經濟發展水準、農田經營主體發展現狀、農業種植結構變化等密切相關，不可一哄而上。具體推進措施建議如下：

(一) 加強宣貫培訓，因地制宜分區制定建設導則

全國各地水務部門需要加強灌區現代化內涵及建設必要性等方面的宣傳培訓，引起全民知曉重視；全國各灌區自然條件差異極大，需要分地域制定相關建設指導意見。

(二) 選取典型試點，分批逐步推進

各地區有必要採取條件成熟灌區，秉持建一處成一處的原則逐步推進，儘量避免搞平均，撒胡椒麵的做法。

(三) 重視頂層設計和整體佈局

灌區現代化建設是一項系統的綜合性專案，必須從灌區功能和現代化發展目標出發，對灌區現代化建設內容進行整體佈局，提出分

期實施計畫，確保現代化建設專案在整體佈局下分階段有序推進。

(四) 集中投資，加強試點灌區建設

對於所選典型灌區，側重投資，確保灌區現代化建設工程能根據規劃所提的投資計畫向前推進，避免規劃完就不了了之的情況發生，力爭建成示範效應顯著的精品工程，為後續大面積推進提供建設管理和運行管護經驗。

(五) 創新運維管理體制與機制，加強建後管護培訓

相比傳統灌區管理，灌區現代化運行管理技術要求較高，為使灌區現代化工程能持續發揮作用，各灌區必須在工程建設完成前，結合灌區實際情況探索出一條適宜的運維管理方式，同時灌區儘量能配備資訊化和自動控制方面的專業人員，對資訊化管理部分實行專人專管。

## 陸、結語

本文大陸地域廣闊，各灌區自然地理條件和用水需求差異較大，各區域灌區發展策略需要結合當地客觀條件，因地制宜制定。南方灌區由於其降雨豐富、地形複雜、作物用水時空差異大、農田控排減汙任務艱巨等特點，其灌區現代化建設規劃佈局時必須綜合工程、資訊、體制和生態環境等多方面，針對南方灌區特點和實際發展需求，融入新的建設思路，按照整體規劃設計，分階段實施的策略穩步推進。

## 參考文獻

1. 高占義 (2019), 「我國灌區建設及管理技術發展成就與展望」, 水利學報, 第 50 卷, 第 1 期, 第 88-96 頁。
2. 水利部農村水利水利司(1999), 「新中國農田水利史略」
3. 金永堂 (1998), 「南方地區管灌節水技術情況與經驗」, 中國農村水利水電, 第 4 期, 第 27-29 頁。

4. 羅琳 (2016), 「適應現代農業發展的現代化灌區發展對策研究」, 中國農村水利水電, 第 8 期, 第 10-14 頁。
5. 茆智 (2002), 「提倡建設一個節水型、生態型灌區」, 中國水利, 第 18 期, 第 22-23 頁。
6. 水利部水利水電規劃設計總院 (2014), 「全國現代灌溉發展規劃」

圖與表

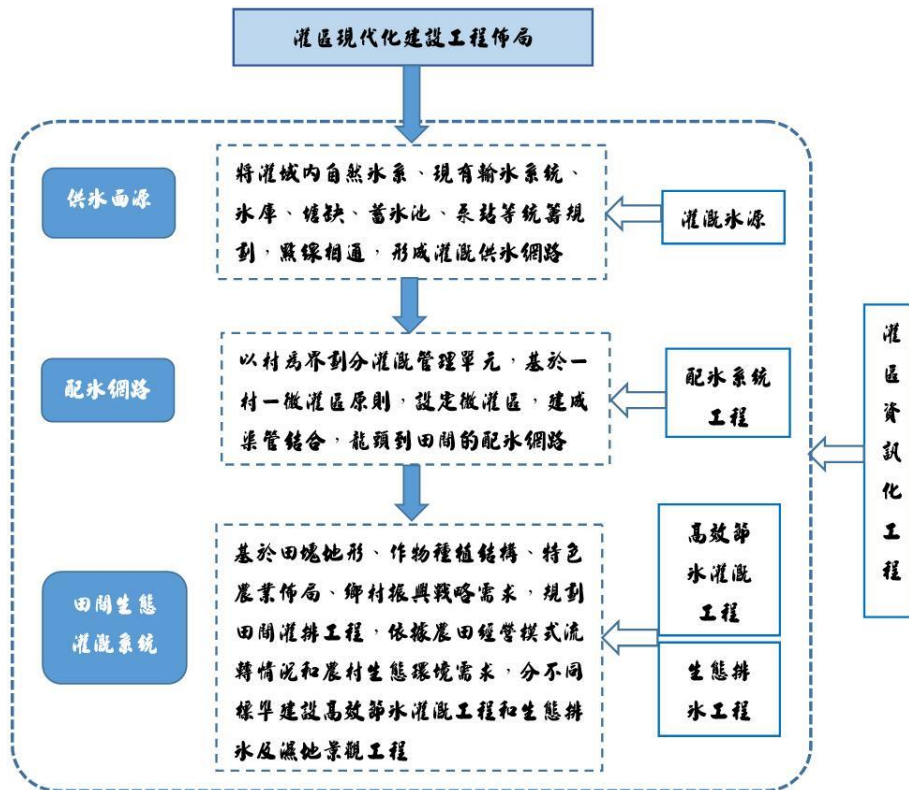


圖 1 灌區現代化建設工程佈局思路

# 水文和一維水動力耦合計算的城市雨洪粗模初步研究 ——以深圳河流域為例

李敏<sup>1</sup>

摘要

近年來，由於全球氣候變化和城鎮化發展，由強降雨引起的城市洪澇（城市雨洪）事件頻繁發生。目前，城市雨洪數值模擬技術已經成為各城市應對雨洪問題的關鍵手段。在總結城市雨洪模型現狀基礎上，為兼顧模擬精度和計算效率，本文針對深圳河流域構建了基於水文和一維水動力耦合計算的城市雨洪模型，其中地表產匯流過程採用水文學方法進行描述，主要河道（包括蓋板河）採用一維水動力方法進行處理，同時，該模型也支援多種閘壩操作方式。本文中應用該模型對某一歷史場次降雨進行了模擬，並採用兩個水文測站的水位資料對類比結果進行了驗證。結果表明，該模型可以有效地類比目標場景下河道內的水流過程。本文為初步研究，模型精度還有待進一步提高。

**關鍵字：**城市雨洪模型、一維河網、水文產匯流

## 壹、引言

### 一、背景

據統計，二十世紀末至本世紀初，全球氣候變化導致的極端降雨事件發生的頻率呈現增長趨勢（Kundzewicz et al., 2014）。與此同時，隨著城市化進程的進一步推進，城市道路和建築物等不透水層占比不斷增加，致使降雨徑流量加大，產匯流時間縮短，增大了城市洪澇風險（張建雲等，2014）。近些年，城市洪澇事件的頻繁發生推動了各大城市在雨洪管理體系建設方面的不斷發展。目前，城市雨洪數值模擬技術已經成為各城市應對雨洪問題的關鍵手段。通過城市雨洪模型的產匯流計算可以描述目標場景下的洪澇演進過程，進而能夠為城市洪澇風險評估、排水設計優化、洪澇預報、應急預案制定、事故分析等諸多方面提供平臺支援和資料支撐。

### 二、城市雨洪模型現狀

依據地表產匯流計算原理的不同，當前城市雨洪模型大致可以分為以下三類。

第一類稱為快速淹沒模型（Lhomme et al.,

2008, Jamali et al., 2018），其原理可表述如下，在地形資料基礎上將二維地表劃分成若干影響區（Impact Zones）用來代表局部窪地，依據水流由高向低的運動原理及水量平衡法則計算特定情境下的洪水淹沒範圍。這類模型的優點是計算速度快、穩定性高，但是對淹沒範圍的表達是靜態的，不能描述洪水的運動過程，因此不能預測洪峰到達時間等資訊。

第二類是以 SWMM 模型為代表的水文和水動力耦合計算模型（Niazi et al., 2017）。該類模型將研究區劃分為若干匯水區；針對各匯水區，採用水文學方法進行產匯流計算；並將研究區內排水系統進行一維概化，通過求解聖維南方程進行水動力計算，同時承接上述匯水區出口水量，實現二者的耦合計算。該類模型充分考慮了匯水區內部的水文特性，如透水性、蓄滯性等，經過率定，可以較好地模擬城市降雨徑流過程。由於對匯水區內地形及匯流過程進行了基於水文學方法的概化處理，所以只能給出關鍵位置的洪澇過程。

第三類模型是以小尺度的二維水動力網格為計算單元，同步進行基於水文學方法的產流計算和基於水動力學方法的地表匯流計算（Glenis et al., 2018），通過耦合地下管網模型，

<sup>1</sup> 中国水利水电科学研究院，工程師



可以實現雨洪全過程模擬。理論上，這類模型最符合雨水運動的物理機制，且計算單元的尺度較傳統水文模型中的匯水區大大減小，因此能夠充分考慮城市複雜下墊面水文水力要素的空間變異性，能夠盡可能真實的反映地表各處的積水過程，在城市地表洪澇過程精細模擬方面最具潛力。但是該類方法對地形資料精度要求較高，建模過程複雜，且計算量較大。

### 三、現實考慮

如上所述，各類模型都有其優缺點，因此不同的模型有其各自的適用場景。第一類模型可以應對需要快速給出最終淹沒範圍的需求，第二類模型適用於排水系統和河湖調度的類比，第三類模型則適用於城市雨洪過程的精細化模擬。本文的研究目標是構建一套城市雨洪模型，兼顧類比精度和計算效率，且能夠為城市雨洪應急管理提供技術支援。在城市雨洪的應急管理方面，城市排水系統和河湖調度的管理是非常重要的。因此，本文將借鑒第二類模型的思路構建水文和一維水動力耦合計算的城市雨洪模型，相對於第三類模型，我們稱之為粗模。

## 貳、模型構建

### 一、總體構架

模型包括兩部分，分別是水文模型和一維水動力模型。在水文模型中，首先依據地表分水線將研究區劃分為若干匯水區（或稱子流域），然後進行產匯流的計算。一維水動力模型則用於描述研究區內降雨在主要河道裡的匯流過程。分析各匯水區與一維河網之間的空間匯流關係，將經水文模型計算得到的匯水區出口流量以側向入流的形式加到相對應的河道斷面上或者以邊界入流的形式加到河道節點上，從而實現二者的耦合。

### 二、水文模型

#### （一）產流計算

本研究在產流計算中主要考慮降雨、截留、填挖和入滲過程，所採用的產流公式如下

$$R = P - I_R - I_T - I_S \quad (1)$$

其中  $R$  為產流量； $P$  為降雨量； $I_R$  為植被截留

量，其大小與降雨量有關，計算公式為  $I_R = a + bP^n$ ，式中  $a$ 、 $b$ 、 $n$  為待定參數； $I_T$  為填挖量； $I_S$  為入滲量，採用霍頓公式計算，即  $I_S = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$ ，式中  $f_0$  和  $f_c$  分別為初始入滲率和穩定入滲率， $t$  為時間， $k$  是與土壤特性相關的經驗常數，也稱入滲衰減係數。

#### （二）匯流計算

水文匯流計算主要包含兩部分內容，分別是單元面積的坡面匯流和單元面積以下的河道匯流。水文計算中涉及的河道是後面一維水動力模型中不予考慮的細小河道。對於單元面積的坡面匯流採用滯後演算法，計算公式為

$$Q(t) = Q(t-1) \times CS + Q(t-L) \times (1-CS) \quad (2)$$

其中  $Q$  為單元面積出口流量， $CS$  為河網水流消退係數； $L$  為河網匯流滯時。河道匯流計算採用馬斯京根分段連續演算法，即

$$Q(t) = C_0 \times I(t) + C_1 \times I(t-1) + C_2 \times Q(t-1) \quad (3)$$

其中  $Q$  和  $I$  分別是出流和入流， $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  是馬斯京根參數  $K$ （蓄量參數）和  $X$ （入流和出流對槽蓄影響的相對比重）的函數，其和等於 1。

### 三、一維水動力模型

#### （一）控制方程

本研究採用一維守恆形式的聖維南方程，即

連續性方程：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4)$$

動量方程：

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) + gAS_f = 0 \quad (5)$$

其中  $A$  為過水面積； $Q$  為流量； $q$  為側向入流量； $g$  為重力加速度； $z$  為水位； $S_f = \frac{n^2 V |V|}{R^{4/3}}$

為摩阻坡降，式中  $V$  為流速， $n$  為糙率， $R$  為水力半徑。該方程適用於明渠無壓非恒定流，在實際應用中，尤其對於城市排水系統，存在很多蓋板河或稱為暗涵，為了使模型同時能夠描述暗涵中的有壓水流，本研究採用 Preissman

窄縫法近似處理閉合斷面的情況（胡昌偉，2013）。因此，本研究中的水動力模型兼具處理無壓和有壓流兩種情況的能力。

#### （二）數值求解方法

如圖 1 所示，最簡單的河網模型由三部分構成，分別是河段、斷面和結點。河段是虛擬存在的，在建模過程中，起到關聯其他模型要素的作用。結點位於河段兩端，用於內外邊界條件的計算或設置。河段上可以佈設斷面以及閘、壩等水工要素，其中斷面是最基本的要素，對於上述控制方程的求解也是針對斷面進行的。控制方程的待求量為  $A$  和  $Q$ ，模型採用交錯網格格式，即在斷面處佈置流量  $Q$ ，在斷面中間佈置  $A$ （及水位  $z$ ），並且採用有限差分法求解動量方程，採用有限體積法求解連續性方程，其中動量方程的最終離散形式為

$$\begin{aligned} Q_m^{n+1} = & Q_m^n \\ & - \left( \frac{2Q}{A} \right)_m^n \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{m+1}^n - Q_{m-1}^n) \\ & - g A_m^n \frac{\Delta t}{\Delta x} (z_{m+1}^n - z_{m-1}^n) \quad (6) \\ & + \left( \frac{Q^2}{A^2} \right)_m^n \frac{\Delta t}{\Delta x} (A_{m+1}^n - A_{m-1}^n) \\ & - g \Delta t \left( \frac{n^2 |Q| Q}{AR^{4/3}} \right)_m^n \end{aligned}$$

式中下標  $m$  代表空間位置， $n$  代表時間步， $\Delta t$  和  $\Delta x$  分別是時間步長和空間步長；基於有限體積法的連續性方程的最終離散形式為

$$A_m^{n+1} = A_m^n + \left( q + \frac{\Delta Q}{\Delta x} \right) \Delta t \quad (7)$$

上述方程組的閉合還需要根據斷面形狀構建過水面積與水位的關係式。

#### 四、工程調度

模型涉及的工程調度包括水庫調度和河道上的閘壩調度，其中前者是放在水文模型中考慮的，後者是在一維水動力模型中進行考慮的。

在水文模型中，水庫計算的基本公式是基於水量平衡推導而來的，即

$$\begin{aligned} V^{n+1} - V^n = & \frac{1}{2} (Q_{in}^n + Q_{in}^{n+1}) \Delta t \\ & - \frac{1}{2} (Q_{out}^n + Q_{out}^{n+1}) \Delta t \quad (8) \end{aligned}$$

式中  $V$  為  $n$  時段始末水庫的蓄水量， $Q_{in}$  和

$Q_{out}$  分別代表入庫和出庫的流量。水庫泄流量（出庫流量）一般採用堰流或者孔流公式進行計算。當前模型支援的調度方式有給定閘門調度以及給定出庫調度。

一維水動力模型主要是針對河道上的閘、壩調度進行處理，閘、壩作為上述河段概念中的附屬物，與河道斷面具有同地位，所不同的是，在斷面處的計算是採用有限差分法求解聖維南方程中的動量方程，而在閘、壩的情況下，則採用相應的堰流或者孔流公式計算流量。當前支援的調度方式有閘門（壩）升降度、給定流量等，同時支持依據某處水位、流量進行自動控制，以及支持擋潮閘的設置。需要注意的是，如果水庫存在於河段中間，則該水庫是被當作零維水體在水動力模型中進行處理的，其出入庫流量是通過其所連接的閘門進行控制的，並通過水位或者流量關係與河段計算進行耦合。

## 參、實例計算與分析

### 一、研究區概況

深圳河流域處於沿海地區，屬於南亞熱帶海洋性季風氣候區。區域內降雨時空分佈不均，容易形成局部暴雨。深圳河是深圳市和香港特別行政區界河，發源于梧桐山牛尾嶺，自東北向西南匯入深圳灣，一級支流有 5 條，分別是蓮塘河、沙灣河、布吉河、福田河和皇崗河。本文考慮的流域面積約 295.4km<sup>2</sup>，其中深圳側（右岸）177.3km<sup>2</sup>，涉及福田、羅湖城市中心區，香港側（左岸）118.1km<sup>2</sup>。圖 3 展示了本文研究區的範圍，以及所涉及的水系和水庫。

### 二、模型構建

如圖 3 所示，本研究將深圳河流域劃分成了 59 個匯水區，各匯水區承接降雨，並且進行基於水文學方法的產匯流計算，計算得到的出口流量以邊界條件或側向入流的方式進入一維水動力模型。如圖 3 所示，一維水動力模型涵蓋了流域內的主要河流，涉及斷面 1083 個，斷面間距最大不超過 150 米，考慮的水閘有 11 座，另外，由於深圳水庫位於河流中間（上接沙灣河和梧桐山河，下接深圳水庫排洪河），因此將其作為零維水體納入一維水動力模型的計算。

### 三、降雨事件模擬

#### (一) 降雨資料處理

本研究擬針對 2017 年 9 月 3 號的降雨事件進行模擬，共收集了深圳市 63 個降雨測站的五分鐘間隔資料，圖 4 展示了研究區內某測站所監測的降雨過程，該測站位於草埔水位監測站向北約 1.6 千米，其降雨總量 73.2 毫米。模型構建需要將測站資料轉化為各水文分區上的面雨量，具體做法如下：基於 63 個降雨測站構建泰森多邊形，依據生成的泰森多邊形與水文分區的空間疊加情況，按面積計算各測站對分區內降雨量的貢獻大小（權重），從而可以得到各分區的面雨量過程。

#### (二) 邊界條件設置

在一維水動力模型中，有兩類邊界條件需要設置。一是上游邊界，如上所述，在該類邊界處，一維水動力模型承接來自水文計算的流量結果；二是下游邊界，在本研究中，深圳河口是唯一的下游邊界，在此處，潮位過程（見圖 5）將作為水位邊界條件對計算進行約束。

#### (三) 模型計算及結果驗證

模型類比的起始時刻為 9 月 3 號 15h20，模擬時長為 29.67 小時。本文選取了兩個水文測站（鹿丹村測站和草埔測站）的水位資料對模型結果進行了初步的驗證。鹿丹村測站位於深圳河上，距深圳河口約 8.6 千米，距布吉河入口（在測站上游）約為 100 米；草埔測站位於布吉河中上游，距布吉河入深圳河河口約 6.2 千米。圖 6 展示了鹿丹村測站實測資料與附近斷面上的模擬值的比較。從圖中可以看出，該處的水位受潮位影響（即，受邊界條件的控制）比較大，且因其距離布吉河入口較近，布吉河入口水閘的調度方式對此處水位的類比值有一定的影響：當布吉河入口水閘設置為擋潮閘時（即，當閘上游水位高於其下游水位時，閘門處於開啟狀態，否則為關閉狀態），類比水位偏高。圖 7 展示了草埔測站實測資料與附近斷面上的模擬值的比較。從圖中可以看出，該處水位受降雨的影響較大，水位峰值的出現與降雨峰值（前後雙峰）基本一致。從以上比較可以看出，本模型可以準確的類比河道內水位變化趨勢。

### 肆、結論

本研究構建的基於水文和一維水動力耦

合計算的城市雨洪模型，可以有效地類比目標場景下河道內的水流過程，並支持閘壩的調度，有望為城市雨洪管理中河湖調度提供參考。本模型為兼顧精度和計算效率，採用水文學方法對地表產匯流過程進行計算，作為初步研究，匯水區劃分較粗，模型精度有待進一步提高。

### 參考文獻

1. Kundzewicz Z W, Kanae S, Seneviratne S I, et al. (2014), 「Flood risk and climate change: global and regional perspectives」, Hydrological Sciences Journal, 59(1): 1-28。
2. 張建雲, 宋曉猛, 王國慶, 等 (2014), 「變化環境下城市水文學的發展與挑戰——I. 城市水文效應」, 水科學進展, 25(4): 594-605。
3. Lhomme J, Sayers P, Gouldby B, et al. (2008), 「Inundation modelling recent development and application of a rapid flood spreading method」, Flood risk management: research and practice, CRC Press, 30-39。
4. Jamali B, Löwe R, Bach P M, et al. (2018), 「A rapid urban flood inundation and damage assessment model」, Journal of hydrology, 564: 1085-1098。
5. Niazi M, Nietch C, Maghrebi M, et al. (2017), 「Storm water management model: performance review and gap analysis」, Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 3(2): 04017002。
6. Glenis V, Kutija V, Kilsby C G (2018), 「A fully hydrodynamic urban flood modelling system representing buildings, green space and interventions」, Environmental Modelling & Software, 109: 272-292。
7. 胡昌偉 (2013), 「太湖流域洪水風險模擬研究」, 中國水利水電科學研究院

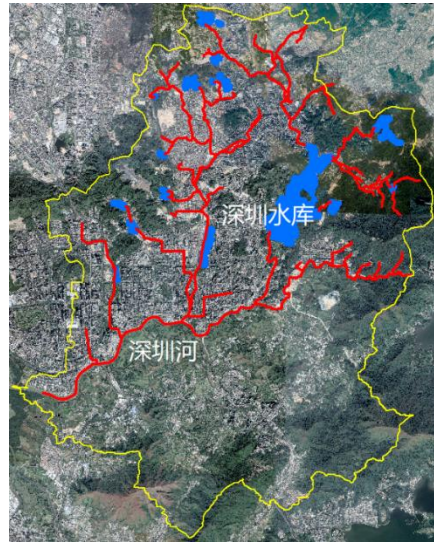
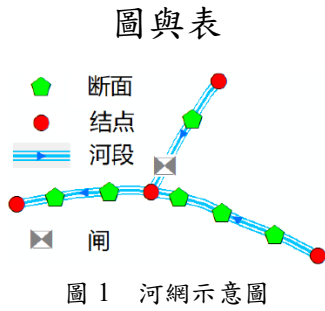


圖 2 深圳河流域範圍 (■ 水庫，— 水系，□ 研究區範圍)

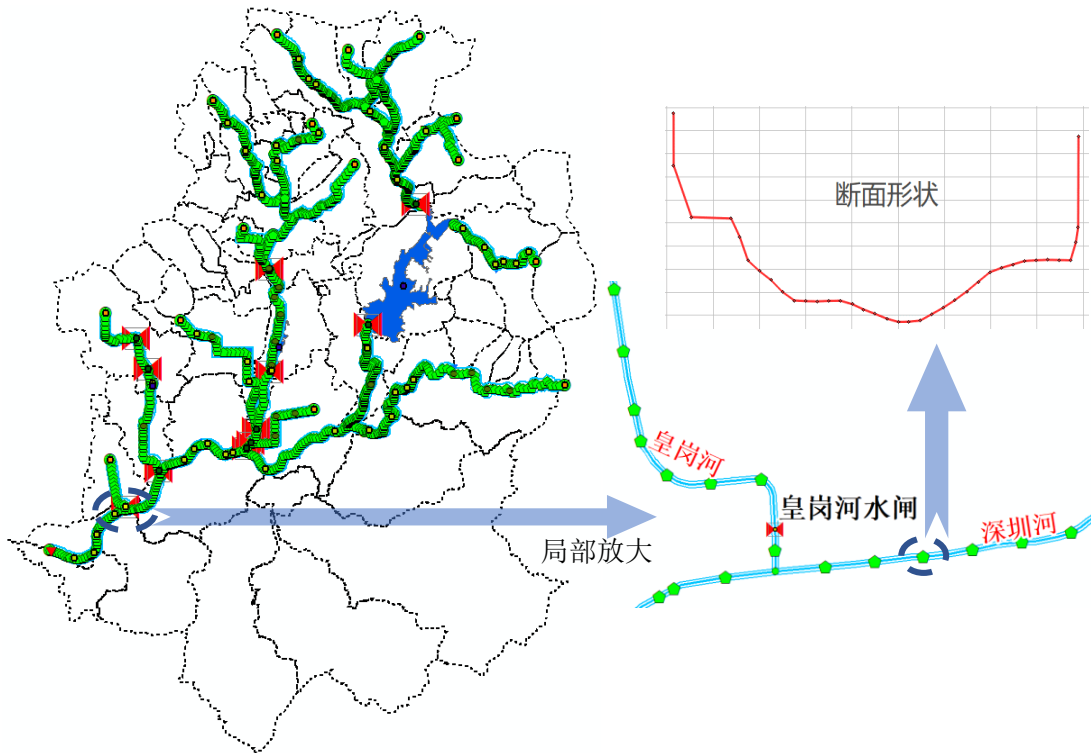


圖 3 水文分區及一維河網模型 (□ 匯水區，■ 零維水體，— 河段，● 断面，◻ 閘，● 結點)

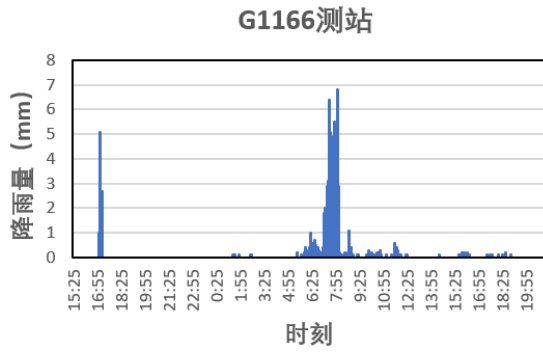


圖 4 G3558 測站的降雨過程

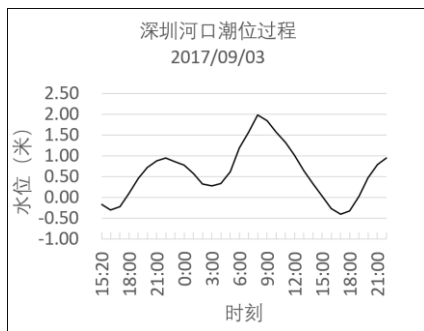


圖 5 下游邊界條件

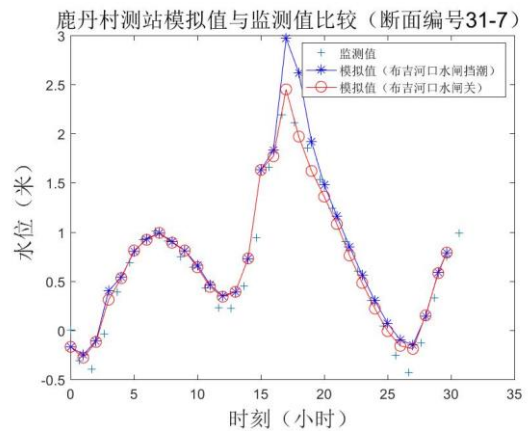


圖 6 鹿丹村測站模擬值與監測值比較

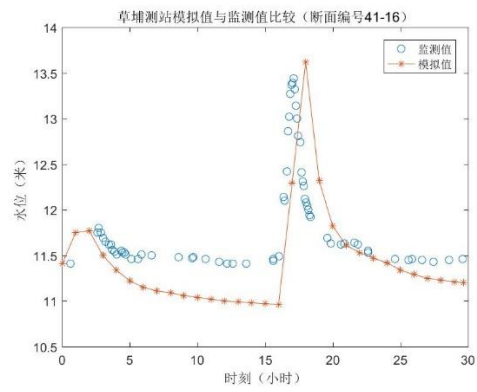


圖 7 草埔測站模擬值與監測值比較

# 基于可恢复性和可持续性的海绵城市指标评价体系的构建

梁昌梅<sup>1</sup>，张翔<sup>2</sup>，徐晶<sup>3</sup>，王瑶<sup>1</sup>

## 摘要

为了应对气候变化和城市化导致的一系列城市水问题，我国提出建设自然存积、自然渗透、自然净化的海绵城市。现阶段对于海绵城市建设的评价指标主要是集中于径流控制率，污染物控制率以及花费，然而对于海绵城市建设后的可恢复性和可持续的研究较少，因此本文构建了一套具有可恢复性和可持续性的评价指标体系，为我国建设具有可恢复性和可持续性的海绵城市提供指导。本文构建了一套新的海绵城市指标评价体系，主要有海绵城市建设的可恢复性、水安全、水资源、水环境以及可持续性这五个方面，共有恢复力、溢流量、洪水持续时间、水力指数、径流控制率、雨水利用率、污染物控制率、社会满意度、温室气体的排放以及花费这 10 个指标。多目标分析的方法主要利用改进的层次分析法确定权重，然后利用 TOPSIS 法对各个备选方案进行打分，得出更加合适的方案。以西宁市为例，设置了三种不同的海绵城市的建设方案 (S1,S2,S3)，对三种建设方案进行综合评价，得出 S1 是最合适的方案。运用到我国海绵城市建设中，可以有效地甄选出最合适的建设方案。

关键词：海绵城市 可恢复性 可持续性 指标体系

## 壹、前言

水资源是城市可持续发展的重要因素。然而受气候变化以及城市化进程的影响，洪涝灾害及水环境问题频发，城市水问题愈演愈烈，严重威胁着社会经济的可持续发展[1][2]。为了缓解城市水问题，2013 年，习总书记提出“提升城市排水系统时要优先考虑把有限的雨水留下来，优先考虑更多利用自然力量排水，建设自然存积、自然渗透、自然净化的海绵城市”。随后，武汉、白城、西宁、镇江等 30 个试点城市先后开展了海绵城市的建设[3]。

国内外关于海绵城市建设方案的效果评估的研究有很多，Mao et al(2017)从径流控制率、污染物削减率及花费的角度出发，评估了不同 LID 设施组合下的最佳性价比[4][4]；Yang et al(2018)从水量平衡、溢流量、洪涝减少风险以及地表污染物削减这几个方面，评价了不同单个 LID 设施对城市环境的影响[5]；Wang et al(2018)从径流与污染物控制的角度，

评价了 LID 设施在未来气候变化以及城市化进程中的效果变化[6]。从上述的研究可以看出，对于海绵建设的效果评估主要集中于径流控制、污染物削减以及花费这三个方面。

然而，海绵城市的建设不仅仅只是提高了径流控制，污染控制；Thuy Nguyen et al(2019)提出海绵城市的建设不仅仅可以缓解城市水问题，还可以把城市变得更具有可恢复性、可持续性、更加适宜居住[7]。Chang et al(2018)提出海绵城市的是具有可恢复性和可持续性的水资源管理政策,进一步讨论了海绵城市建设所带来的社会效应、环境效益、水文效益等[8]。Hao Wang et al(2018)分析了海绵城市建设的关键要素，指出“resilience”是最能囊括海绵城市概念的词，它具有“海绵”的特征[9]。因此海绵城市的建设的可恢复性和可持续性也是十分重要的指标，但是以往的研究都很少涉及。

本文构建了一套新的海绵城市指标评价体系，主要有海绵城市建设的可恢复性、水安全、水资源、水环境以及可持续性这五个方

<sup>1</sup> 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室+博士研究生

<sup>2</sup> 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室+教授、博导

<sup>3</sup> 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室+副教授

面，共包含 10 个指标，将指标体系运用到西宁市，假设三种建设方案，利用改进层次法计算多目标分析的权重，TOPSIS 法计算三种方案的得分，得出更加适宜的建设方案，此次结果可以为我国建设更加具有可恢复性和可持续性的海绵城市提供依据。

## 貳、评价方法

本次海绵城市指标体系的提出主要是依据我国现阶段实行的评估指标以及相关文献，主要包括了 5 个方面，分别是可恢复性、水安全、水资源、水环境、可持续性，其中恢复力是表征研究区受极端降雨条件影响从受灾中恢复的能力；水安全主要从溢流量、持续时间以及水力指数三方面进行量化；水资源从径流控制率以及雨水利用率，水环境主要是污染物控制率，可持续性主要是通过社会满意度、温室气体的排放以及花费这三个指标实现。改进层次法和 TOPSIS 用于甄选出更具有恢复性和持续性的方案。

### 一、指标体系的构建

#### (一)可恢复性

城市排水系统的可恢复性是一项十分重要的指标，可恢复性指的是排水系统在受到灾害后，可以迅速恢复到原始状态的能力[2]。其计算公式如下所示[10]：

$$R_0 = 1 - \frac{V_{TF}}{V_{TI}} \times \frac{t_f}{t_n} \quad (2-1)$$

$R_0$ 为系统的可恢复性指数， $V_{TF}$ 指总洪量， $V_{TI}$ 指系统的总入流， $t_f$ 指节点洪流发生平均所持续的时间， $t_n$ 指的是总持续时间。 $R_0$ 的范围是 0-1，其值越接近 1，则表明恢复性越强，在极端降雨条件，恢复的越快。本文计算的可恢复性是在极端降雨条件下  $T=100$ -year 时，管网的受损程度。

#### (二)水安全

##### (1) 洪量

洪量的计算主要是在极端条件下 ( $T=100$ -year)，各节点的洪量之和。

$$V = \sum_{i=1}^m V_i \quad (2-2)$$

$m$ 指节点积水的数量， $V_i$ 指第  $i$  个节点的积水总洪量。

##### (2) 洪水持续时长

$$T = \frac{\sum_{i=1}^m T_i}{m} \quad (2-3)$$

$m$ 指节点积水的数量， $T_i$ 指第  $i$  个节点积水所持续的时间。

##### (3) 水力指数

$$N_i = 100\% \times \frac{H_i^{US}}{G_i} \quad (2-4) \quad (2-5)$$

$$N = \frac{\sum_{i=1}^m N_i}{m}$$

$H_i^{US}$ 指的是第  $i$  根管道的上游最大淹没深度， $G_i$ 指的是第  $i$  根管道的埋深， $m$ 指的是管道超载的数量， $N$ 指的是管网的水力指数。水力指数是用来表征节点溢流的程度，范围是 0-1，其值越接近 1 则表明在极端降雨条件下，排水管网被淹没的程度越高[11]。

### (三)水资源

#### (1) 年径流控制率

年径流量控制率是我国海绵城市建设的重要考核指标之一，对于年径流控制率量化的研究有很多，本文采用较为简单的径流控制计算。

$$V = 1 - \frac{V_r}{R} \times 100\% \quad (2-6)$$

$V_r$ 指总的年地表径流量， $m^3$ ； $R$ 指的总的年降雨量， $m^3$ 。

#### (2) 雨水利用率

$$W = \frac{W_{in} + W_s}{R} \quad (2-7)$$

$W_{in}$ 指入渗量， $m^3$ ； $W_s$ 指 LID 最终的蓄水量， $m^3$ ； $R$ 为总的降雨量， $m^3$

### (四)水环境

水环境主要利用污染物控制率表征，本次研究主要是计算 TSS 在暴雨过程中的控制率。

$$P_{SS} = \frac{M_{LID}}{M_t} \times 100\% \quad (2-8)$$

$P_{SS}$ 指污染物 SS 的控制率； $M_{LID}$ 指的 LID

設施所控制的污染量, kg;  $Mt$ 指降雨中 SS 的總值, kg。

(五)可持續性

(1) 溫室氣體排放

本研究的溫室氣體排放主要是由於污水處理廠處理雨水所產生的, 此次溫室氣體主要關注  $CO_2$  的排放[12]。

$$V_{CO_2} = w \times Se \times EF \quad (2-9)$$

$V_{CO_2}$ 指  $CO_2$  的年排放量, t/a;  $w$ 指污水處理量, t/a;  $Se$ 指污水處理過程中的比能耗, 取值一般為 0.14~0.28KWh/t;  $EF$ 指污水處理電能消耗的  $CO_2$  排放因子, 一般取值為 0.997kg  $CO_2$ /KWh。

(2) 社會滿意度

通過統計居民對 LID 設施安裝的意見反饋, 可以得出, 居民們對透水鋪裝的意見較大, 綠化改造也稍有不滿, 對雨水桶較為滿意。據此對 LID 設施滿意度進行量化。社會的滿意度共 5 分, 很好為 5 分, 不錯為 3 分, 一般為 1 分。

$$S = \frac{5a+3b+c}{a+b+c} \quad (2-10)$$

$a, b, c$  分別指透水鋪裝, 雨水桶以及生物滯留池的數量。

表 1 LID 設施打分表

海綿設施	很好	不錯	一般
	5 分	3 分	1 分
透水鋪裝(PP)			*
雨水桶(RB)	*		
生物滯留池(BR)		*	

(3) 花費

海綿設施的花費主要考慮建設的整個周期, 利用生命周期的計算方法 (LCC)。

$$f_{r,t} = \frac{1}{(1+s)^t} \quad (2-11)$$

$$SV_n = (1 - \frac{s}{n})OMC \quad (2-12)$$

$$PVC_{y,t} = IC_y + \sum_{t=0}^n f_{r,t} \times OMC - f_{r,n} \times SV_n \quad (2-13)$$

$PVC_{y,t}$ 指某個海綿設施的總花費;  $IC_y$ 指建設成本;  $OMC$ 指維護的成本費用;  $f_{r,t}$ 指在  $t$  年的折扣率;  $SV_n$ 殘值(salvage value); 上式中  $i$  根據經驗取值為 1,  $s$  取值為 5%[13]。

二、多目標分析決策分析

本研究採用改進層次分析法與 TOPSIS 法相結合的方法, 改進層次分析法較好的將主觀和客觀結合, 在創建判斷矩陣時, 根據現實的政策需求, 確定判斷矩陣, 在一致性檢驗時, 利用最優傳遞矩陣的概念, 使之自然滿足一致性要求, 直接求出權重。TOPSIS 法能充分利用原始數據的信息, 能充分反映各方案之間的差距, 客觀真實的反映實際情況。計算步驟如下所示:

(1) 將各個指標標準化

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (i=1,2,3,\dots,m; j=1,2,3,\dots,n) \quad (2-14)$$

(2) 利用改進層次法計算各項指標的權重

(3) 確定理想解和反理想解

$$A^+ = (\max_i v_{ij} | j \in J_1), (\min_i v_{ij} | j \in J_2), i=1, 2, 3, \dots, m = v_1^+ \dots v_n^+ \quad (2-15)$$

$$A^- = (\min_i v_{ij} | j \in J_1), (\max_i v_{ij} | j \in J_2), i=1, 2, 3, \dots, m = v_1^- \dots v_n^- \quad (2-16)$$

(4) 計算距離尺度

$$S^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

$$S^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (2-17)$$

(5) 計算理想解的貼近度

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)} \quad (2-18)$$

參、研究區實例

一、研究區概況

西寧市位於中國西北部的青海省, 地處在湟水及三條支流的匯合處。屬於大陸高原氣



候。平均气温为 7.6°C，年平均降雨量为 410mm，降雨量 90%发生于 4 月至 8 月。西宁市试点区处于经济开发区，面积 21.2km<sup>2</sup>，试点区域西南高、东北低，共有六种不同的土地利用类型，如道路，绿地，路面等。道路，停车场和屋顶等不透水区域占总面积的 30%以上。

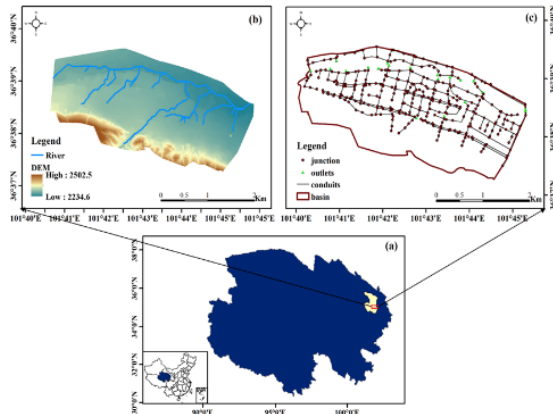


图 1 研究区地理位置

## 二、海绵城市设计方案

为了满足研究区海绵城市建设年径流控制率达到 80%的目标，本研究选用了透水铺装 (PP)、雨水桶(RB)及生物滞留池(BR)三种较为常见的海绵设施，设置了三种不同的海绵城市建设方案 (表 2)，利用上述构建的指标体系对这三种海绵城市建设方案进行评价。

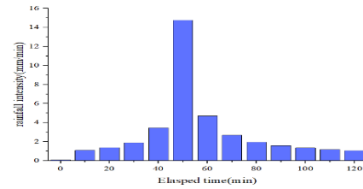
表 2 三种海绵城市建设方案

方案	海绵设施	LID 设施的分布	描述
S1	PP+RB	子汇水区 42-67 72-105	50%的透水铺装和 30%的雨水桶布设在居民区
		169-181 215-224	
S2	PP+RB+BR	子汇水区 42-67 72-105	50%的透水铺装、30%的雨水桶以及 20%的生物滞留池布设在居民区
		169-181 215-224	
		子汇水区 42-67 72-105	50%的透水铺装、30%的雨水桶以及 20%的生物滞留池布设在居民区以及商业区
S3	PP+RB+BR	128-162 169-181 183-	桶以及 20%的生物滞留池布
		209 215-224	

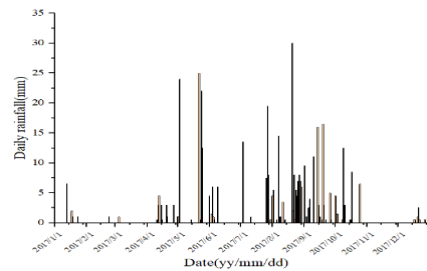
## 三、降雨条件设置

基于评价体系指标的定义及计算方法采用不同的降雨方式，恢复力和水安全采用极端降

雨情况下，本文选择 T=100years 计算；水资源、水环境、可持续指标采用 2017 年的年降雨计算。



(a) 重现期 T=100-year 的降雨



(b) 2017 年的日降雨量

图 2 降雨条件的设置

## 四、SWMM 模型的构建

通过收集研究区的土地利用、管网、DEM 等基础资料，构建了 SWMM 降雨径流模型，将研究区划分了 272 个子汇水流域,310 个节点,311 个管道,17 个排水口。海绵设施的参数设置主要是依据 SWMM5.0 的使用手册以及相关的参考文献得出；本次采用霍顿公式计算入渗量，曼宁公式计算地表径流，动力波用于计算管网水流演进。

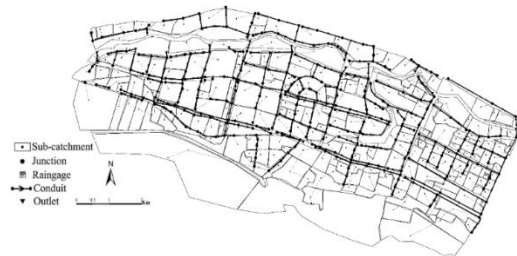


图 3 SWMM 的子汇水区的划分

## 肆、結果與討論

### 一、模型的率定與驗證

由於研究區排水口較多，故以 1 號雨水排水口為例，收集 1 號排水口的流量數據，對其所控制的匯水區構建 SWMM 模型，並進行參數率定。對於模型率定期，觀測值和模擬值比較表明 NSE 和  $R^2$  分別為 0.69 和 0.75。模擬值準確捕捉峰值時間，並且峰值流量與觀測值相差不大；在驗證期，NSE 和  $R^2$  分別為 0.50 和 0.72，這些結果表明 SWMM 模型適用於描述研究區域的水文響應。

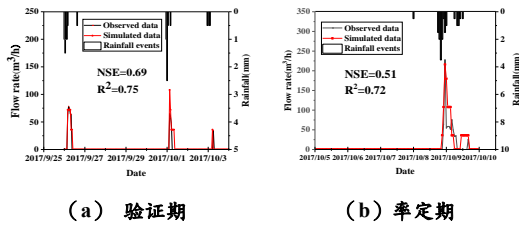


圖 4 模型的驗證與率定

### 二、各類指標的計算結果分析

#### (1) 可恢復性

0.7 認為是恢復力的最小閾值[10]，從計算結果可以看出，在百年一遇的暴雨強度下，三種建設方案的恢復力都比較高，都在 0.9 之上（圖 5），這可能與研究區的氣候條件與土壤性質有關，研究區為大陸性高原半干旱氣候，降雨量較小，土壤較為乾燥，入滲量較大，即使在極端降雨條件下，恢復力仍然較高。

在三種建設方案下，可恢復性的大小無明顯變化，表明在研究區內，海綿設施的建設對於可恢復性能力的影響較小。

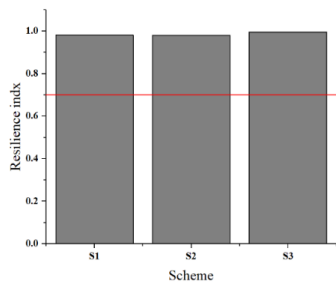
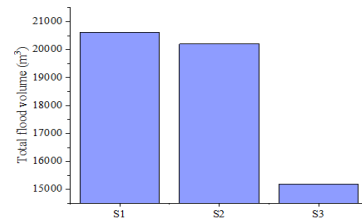


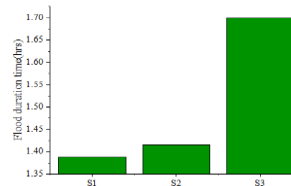
圖 5 三種建設方案的恢復力

#### (2) 水安全

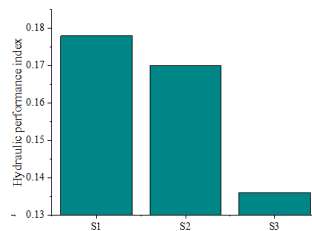
在極端降雨條件下，三種建設方案在水安全方面表現差異較為明顯。三種建設方案的總洪量分別為： $20620\text{m}^3$ 、 $20202\text{m}^3$ 、 $15196\text{m}^3$ ，相較於 S1，S2 和 S3 的總洪量分別減少了 2.02%，26.30%。從上述結果可以看出，增加海綿設施的佈設可以有效的減少洪量；洪水持續時長分別為：1.38h、1.42h、1.70h，相較於 S1，S2 和 S3 的洪水持續時長增加了 1.95%，22.48%。由此可以看出生物滯留池的佈設增加了洪水的持續時長，這主要是由於生物滯留池主要是起到蓄水的功能，對於排澇作用較差；三種建設方案的水力指數分別為 0.178，0.17，0.136，相較於 S1，S2 和 S3 的水力指數分別降低了 4.49% 和 23.6%，結果表明隨著海綿設施佈設的增加，降低了節點溢流的風險，提高了排水管網的能力。



(a) 總洪量



(b) 洪澇持續時間



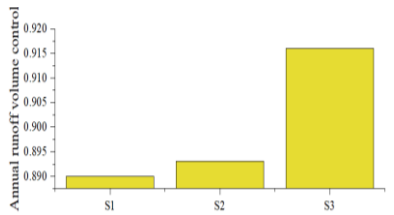
(c) 水力指數

圖 6 三種建設方案的水安全計算結果

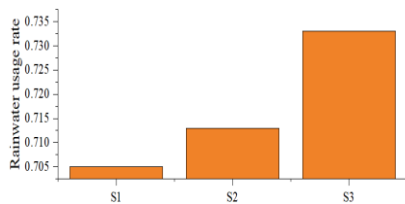
#### (3) 水資源

在年降雨條件下，三種建設方案在水資源方面表現也有差異。三種建設方案的年徑流控

制率分別為：0.89、0.893 以及 0.916，相較於 S1，S2 和 S3 的年徑流控制率增加了 0.3%和 2.92%；三種方案的雨水利用率分別為：0.705、0.713 以及 0.733，相較於 S1，S2 和 S3 的雨水利用率分別增加了 1.13%、3.97%。從上述結果可以看出，三種建設方案條件下的年徑流控制率以及雨水利用率均較高，增加海綿設施的建設，可以增加年徑流控制率和雨水利用率。



(a) 年徑流控制率



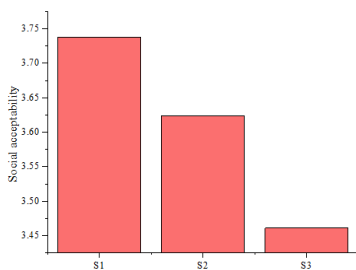
(b) 雨水利用率

圖 7 三種建設方案的水資源計算結果

#### (4) 水環境

在年降雨條件下，三種建設方案在水環境方面表現也有差異。SS 的控制率分別為：0.193、0.206 以及 0.239，相較於 S1，S2 和 S3

可以看出，S3 雖然對於城市排水系統能力提升的效果最好，但是花費遠遠超過了 S1 和 S2。



(a) 社會滿意度

的污染物控制率增加了 6.74%和 23.8%，從上述結果可以看出，海綿設施的建設對於污染物控制率影響較大，增加海綿設施的佈設可以有效地提高污染物控制率。

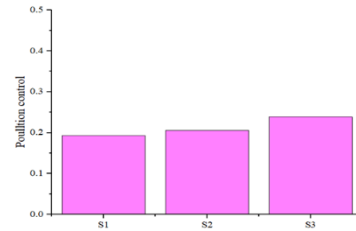
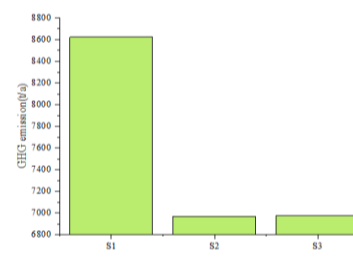


圖 8 三種建設方案的水環境計算結果

#### (5) 可持續性

對於三種方案海綿城市的建設，可持續性的差異也較為明顯。社會滿意度分別為 3.738、3.624 以及 3.461，從結果可以看出，隨著透水鋪裝以及生物滯留池佈設的增加，社會滿意度逐漸下降。溫室氣體排放量分別為：8623、6972 以及 6977，S2 和 S3 相較於 S1 溫室氣體的排放量減少了 19.1%，S2 和 S3 排放量變化不大，主要是由於研究區的污水處理廠只處理居民區的所排放的雨水，對於 S3 佈設的商業區的雨水未經過污水處理廠。三種方案的花費差距也較為明顯，分別為：24838、36540、62916 萬元，S2 和 S3 相較於 S1 分別增加了 47.11%和 153.3%，



(b) 溫室氣體的排放

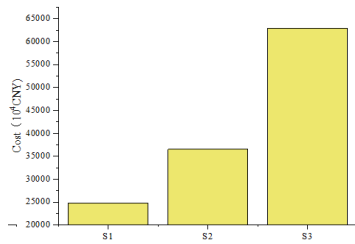


图 9 三种建设方案可持续性的计算结果

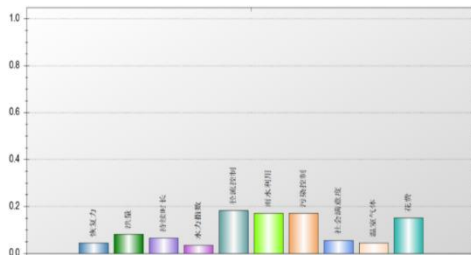


图 10 各个指标权重的分布

### 三、综合评价结果

利用改进层次法的权重分布如图 10 所示，年径流控制率、雨水利用率、污染控制率以及花费占了相对较大的比重，这与我国所实行的

《海绵城市建设指南》的政策相一致，因此本文认为计算的权重较为合理。

通过各类指标的计算（表 3），利用 TOPSIS 法对三种建设方案进行评分比较，S1 的最终得分为 0.742，S2 为 0.635，S3 为 0.258，综上所述，S1 是性价比最高的建设方案。

表 3 三种建设方案的 TOPSIS 打分结果

指标(单位)	S1	S2	S3	权重
R	0.982	0.981	0.996	0.05
V(m <sup>3</sup> )	20620	20202	15196	0.085
T(hrs)	1.388	1.415	1.7	0.065
N	0.178	0.17	0.136	0.035
K	0.89	0.893	0.916	0.182
W	0.705	0.713	0.733	0.171
P	0.193	0.206	0.239	0.171
S	3.738	3.624	3.461	0.055
G(t/a)	8623	6972	6977	0.044
C(104CNY)	24838	36540	62916	0.152
TOPSIS 得分	0.742	0.635	0.258	
排名	S1>S2>S3			

### 伍、结论

本文主要基于建设具有可恢复性和可持续的海绵城市，构建了一套评价指标体系，以南宁市为例，对三种海绵城市建设方案进行综合评价，得出更适合的方案。

构建的评价指标体系，主要从恢复力、水安全、水资源、水环境以及可持续这五个方面，10 个指标。其中恢复力是表征研究区受极端降雨条件影响从受灾中恢复的能力；水安全主要从溢流量、持续时间以及水力指数三方面进行量化；水资源从径流控制率以及雨水利用率，水环境主要是污染物控制率，可持续性主要是通过社会满意度、温室气体的排放以及花费这三个指标实现。构建的评价指标体系可以为我国建设具有可恢复性和可持续性的海绵城市提供参考。

### 参考文献

[1]M. Wang, C. Sweetapple, G. Fu, R. Farmani, and D. Butler, "A framework to support decision making in the selection of sustainable drainage system design alternatives," *Journal of Environmental Management*, vol. 201, pp. 145–152, 2017.

[2]A. Casal-campos, S. M. K. Sadr, G. Fu, and D. Butler, "Reliable , Resilient and Sustainable Urban Drainage Systems : An Analysis of Reliable , Resilient and Sustainable Urban Drainage Systems : An Analysis

- of Robustness under Deep Uncertainty,” *Environmental Science & Technology*, vol. 52, no. September, pp. 9008–9021, 2018.
- [3] H. Li, L. Ding, M. Ren, C. Li, and H. Wang, “Sponge city construction in China: A survey of the challenges and opportunities,” *Water (Switzerland)*, vol. 9, no. 9, 2017.
- [4] X. Mao, H. Jia, and S. L. Yu, “Assessing the ecological benefits of aggregate LID-BMPs through modelling,” *Ecological Modelling*, vol. 353, no. April 2015, pp. 139–149, 2017.
- [5] J. Liu, W. Kuang, Z. Zhang, X. Xu, Y. Qin, J. Ning, W. Zhou, S. Zhang, R. Li, C. Yan, S. Wu, X. Shi, N. Jiang, D. Yu, X. Pan, and W. Chi, “Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s,” *Dili Xuebao/Acta Geographica Sinica*, vol. 69, no. 1, pp. 3–14, 2014.
- [6] M. Wang, D. Qing, J. Su, J. Wen, and S. Keat, “Assessing hydrological effects and performance of low impact development practices based on future scenarios modeling,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 179, pp. 12–23, 2018.
- [7] T. Thuy, H. Hao, W. Guo, X. C. Wang, N. Ren, and G. Li, “Science of the Total Environment Implementation of a specific urban water management - Sponge City,” *Science of the Total Environment*, vol. 652, pp. 147–162, 2019.
- [8] N. Chang, J. Lu, T. Fong, M. Chui, and N. Hartshorn, “Land Use Policy Global policy analysis of low impact development for stormwater management in urban regions,” *Land Use Policy*, vol. 70, no. November 2017, pp. 368–383, 2018.
- [9] W. Hao, M. E. I. Chao, L. I. U. Jiahong, and S. Weiwei, “A new strategy for integrated urban water management in China : Sponge city,” vol. 61, no. 3, pp. 317–329, 2018.
- [10] S. N. Mugume, D. E. Gomez, G. Fu, R. Farmani, and D. Butler, “A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems,” *Water Research*, vol. 81, pp. 15–26, 2015.
- [11] S. Bennis, J. Bengassem, and P. Lamarre, “Hydraulic Performance Index of a Sewer Network,” vol. 129, no. July, pp. 504–510, 2003.
- [12] “降低中小型污水处理厂能耗的有效途径.pdf” .
- [13] C. Mei, J. Liu, H. Wang, Z. Yang, X. Ding, and W. Shao, “Science of the Total Environment Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed,” *Science of the Total Environment*, vol. 639, pp. 1394–1407, 2018.

## 旋流豎井有壓洩洪洞的集排氣措施研究

薛瀧輝<sup>1</sup>

### 摘要

福州市江北城區（鼓樓區、台江區、晉安區）位於福州盆地的中心地帶，西北東三面群山環抱，南臨閩江北港，現有城區排澇標準僅 2~5 年一遇。為緩解福州市江北城區排澇壓力，提高排澇標準，現圍繞江北城區西北東三面修築 12 座截洪壩，分區域攔截山洪後，分別由 12 條洩洪支洞匯入兩條洩洪主洞，將山洪直接排入閩江北港。工程採用旋流豎井有壓洩洪洞，旋流豎井攜入的氣體將在水準洩洪支洞內逐漸分離逸出，在隧洞頂部形成移動氣囊。氣囊在洩洪主洞內不斷彙集，在出口釋放的過程中可產生較大的水流振盪和尾水位波動，甚至產生氣爆現象，危害出口結構安全。本文以鱔溪截洪樞紐為例，通過水工模型試驗研究，對旋流豎井有壓洩洪洞沿程壓強分佈、旋流空腔、摻氣漩渦及水氣分離形態進行深入分析，並結合試驗結果提出豎縫整流箱、帶有穩流擋板的集氣室等集排氣措施，為旋流豎井有壓洩洪洞的集排氣設計提供詳實的資料支撐。

**關鍵字：**旋流豎井、有壓洩洪洞、集排氣、豎縫整流、穩流擋板、集氣室

---

<sup>1</sup> 福建省水利水电勘测设计研究院，工程師

## 壹、前言

福州市江北城區（鼓樓區、台江區、晉安區）位於福州盆地的中心地帶，西北東三面群山環抱，南臨閩江北港，總集水面積 160km<sup>2</sup>，其中高程低於 10.0m（羅零高程，下同）的面積有 78.5km<sup>2</sup>，山地和平原約各占 50%。

汛期，來自西北東三面的山洪匯入江北城區，由城區內河水系排往閩江北港。現有城區排澇標準僅 2~5 年一遇，內澇問題嚴峻。為緩解福州江北城區排澇壓力，提高排澇標準，現圍繞江北城區西北東三面修築 12 座截洪壩，分區域攔截山洪後，分別由 12 條旋流豎井有壓洩洪支洞匯入兩條（東線和西線）洩洪主洞，將山洪直接排入閩江北港，截洪樞紐平面佈置請參閱圖 1。



圖 1 截洪樞紐平面佈置圖（圓山以西為西線）

工程上旋流豎井洩洪洞多數採用無壓洞形式，如國內最早應用旋流豎井消能工的四川沙牌水電站。當旋流豎井銜接有壓洩洪洞時，需採取有效的工程措施使旋流豎井攜入的氣體平穩地排出洩洪洞，從而避免氣體在出口釋放過程中產生強烈的水流振盪和尾水位波動，甚至產生氣爆現象，危害出口結構安全。針對旋流豎井有壓洩洪洞，孫雙科等人提出採用豎向壓板技術優化洞內流態，並以多孔平板技術解決出口排氣問題，但上述技術仍有局限性；張建民等人提出在洞中設置排氣孔、擋坎、壓坡等技術措施調整水流，使洞中水流平穩過渡、平順銜接，但該技術存在排氣不徹底的問題。

本文以鱔溪截洪樞紐為例，通過設置豎縫整流箱、帶穩流擋板的集氣室及排氣井等設施，

實現旋流豎井有壓洩洪洞流態改善和集排氣目的。

## 貳、工程概況

鱔溪截洪樞紐位於福州市江北城區山洪匯流東線中部，由截洪工程、排洪連接工程、控制閘及主洞洞線工程等組成。工程等別為 I 等，洩洪隧洞（含洩洪支洞、洩洪主洞）、控制閘、截洪壩等永久性主要建築物按 1 級建築物設計，次要建築物按 3 級建築物設計。

截洪壩壩高 6.0m，堰頂高程 36.00m，庫容 5,472m<sup>3</sup>。防山洪標準為 50 年一遇，洪峰流量為 92.3m<sup>3</sup>/s。5 年一遇山洪洪峰流量為 48.8m<sup>3</sup>/s，低於 5 年一遇標準的山洪不經由洩洪洞排泄。魁岐出水口尾水位為 1.35m~7.12m。

## 參、旋流豎井洩洪洞結構設計

鱔溪截洪樞紐泄水建築物由控制閘、進口引水段、渦室、豎井、消力井、洩洪洞組成，旋流豎井洩洪洞平剖面佈置請參閱圖 2、圖 3。

閘門寬 7.5m，進口底高程為 31.00m。進口引水段為壓力短進水口明渠引水道，底坡  $i=1/3$ ，全長 18.4m（水準投影），頭部採用直段，後接 1/4 橢圓收縮段，橢圓曲線與渦室相切，曲線方程見式（1）。

$$\frac{x^2}{15.5^2} + \frac{y^2}{10.5^2} = 1 \quad (1)$$

渦室直徑 7.15m，總高度 9.0m。豎井直徑 5.5m，底部設消力井，總長 34.67m。洩洪支洞為圓形斷面，直徑 5.0m，底坡  $i=0.005$ ，總長 260.0m，尾部與洩洪主洞相連。

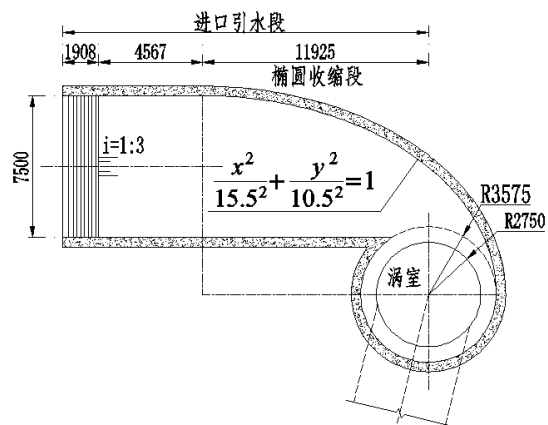


圖 2 進口引水段平面圖

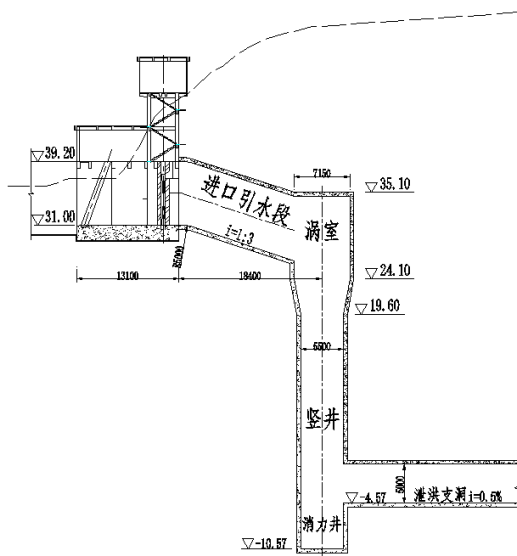


圖 3 旋流豎井洩洪洞剖面圖

### 肆、洩洪流態分析

#### 一、模型設計與製作

試驗採用正態模型，按重力相似準則進行設計，各比尺如下：幾何比尺 $\lambda_L = 20$ ；流速比尺 $\lambda_V = \lambda_L^{0.5} = 4.47$ ；流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_L^{2.5} = 1,788.85$ ；時間比尺 $\lambda_T = \lambda_L^{0.5} = 4.47$ ；糙率比尺 $\lambda_n = \lambda_L^{1/6} = 1.648$ 。

為便於試驗中觀測洩洪流態，試驗模型採用有機玻璃製成，並沿程佈置若干測壓管，測

壓管佈置位置請參閱圖 4。經查，模型中建築物高程誤差小於 $\pm 0.3\text{mm}$ ，地形高程誤差小於 $\pm 2\text{mm}$ ，平面距離誤差小於 $\pm 5\text{mm}$ ，確保模型與原型幾何相似。

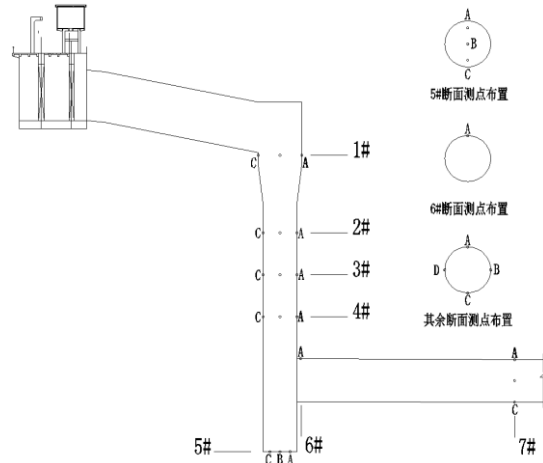


圖 4 測壓管佈置

#### 二、試驗成果分析

##### (一) 沿程壓強分佈情況

50 年一遇洪峰流量 ( $92.3 \text{ m}^3/\text{s}$ )，分別遭遇魁岐出水口高尾水位 (7.12m)、低尾水位 (1.35m) 工況，洩洪支洞沿程壓強分佈請參閱表 1、表 2。

表1 50年一遇洪峰流量遭遇高尾水位工況沿程壓強 (單位: m H<sub>2</sub>O)

測點	1#斷面	2#斷面	3#斷面	4#斷面	5#斷面	6#斷面	7#斷面
A	5.82~5.86	13.02~13.12	19.32~19.38	24.54~25.48	40.28~40.38	26.20~26.30	26.50~26.58
B	3.74~3.78	13.20~13.24	19.28~19.34	25.70~25.72	39.20~39.24	-	29.15~29.25
C	4.40~4.46	13.80~13.90	17.16~17.28	25.18~25.30	40.52~40.64	-	31.79~31.88
D	5.26~5.32	14.08~14.16	19.08~19.18	23.42~23.60	-	-	29.23~29.33

表2 50年一遇洪峰流量遭遇低尾水位工況沿程壓強 (單位: m H<sub>2</sub>O)

測點	1#斷面	2#斷面	3#斷面	4#斷面	5#斷面	6#斷面	7#斷面
A	4.28~4.30	0.66~0.80	15.58~15.72	21.08~21.40	35.44~35.52	19.70~20.60	20.80~20.98
B	1.32~1.52	1.54~1.96	12.28~12.38	21.60~21.72	33.40~33.44	-	23.39~23.59
C	2.82~2.90	3.06~3.42	14.24~14.58	20.28~20.90	35.10~35.80	-	25.88~26.05
D	2.46~2.48	1.96~2.18	15.50~15.74	18.10~18.58	-	-	23.33~23.59



渦室上部壓強較小，但流速也較小，且隨著高程降低壓強迅速增大，因此不存在空蝕危害。豎井壁面均為正壓，因旋轉水流並非均勻地佈滿豎井壁面，所以同一高程豎井壁面各點壓強並非一致。水準支洞洞頂壓強遠大於有壓隧洞運行所要求的 2m 水柱，壓強分佈形態正常。消力井底部壓強較大，強分佈均勻，由於尾水位較高，消力井水墊很深，利於消能和底板保護。

## (二)洩洪流態

橢圓收縮型渦室進口可使豎井形成穩定旋流。當尾水位較高時，旋流空腔及底部摻氣漩渦高於水準洩洪支洞，氣體不會隨水流進入洩洪支洞，支洞形成有壓滿管流。旋流空腔及摻氣漩渦將隨尾水位的降低而降低，當摻氣漩渦低於洩洪支洞進口頂高程時，氣體將隨水流進入支洞，並沿程逐步逸出，在洞頂形成有壓氣囊。試驗表明，洩洪流量越小，尾水位越低，洩洪支洞攜入的氣體越多。5 年一遇洪峰流量遭遇低尾水位工况消力井及支洞進口流態請參閱圖 5。

福州市江北城區山洪截排工程由 12 座截洪樞紐組成，各洩洪支洞內的氣囊將在洩洪主洞內不斷彙集，大量氣體在出口釋放的過程中可產生較大的水流振盪和尾水位波動，甚至產生氣爆現象，危害出口結構安全。因此，需增設集排氣措施，提前排出氣體。



圖 5 小流量低尾水位工况消力井及支洞進口流態

## 伍、集排氣措施研究

### 一、設置豎縫整流箱

豎井旋流作用下，小流量低尾水位時消力井水氣摻混劇烈。旋流進入水準支洞後流向紊亂，水流波動劇烈，氣體需經較長距離才能全部逸出，彙集到洞頂。為了穩流，使氣體在較短距離內逸出並集中於洞頂，在豎井與水準洩洪支洞連接處設置豎縫整流箱。豎縫寬 1.7m，長 20.0m，箱體寬度由 1.7m 逐漸擴大至 5.0m，底板採用倒坡， $i=1/3.39$ ，高程由 -10.57 逐漸升高並與洩洪支洞銜接。為簡化施工，豎縫整流箱與集氣室之間的洩洪洞採用方形倒角隧洞。豎縫整流箱及方形倒角隧洞結構設計請參閱圖 6。

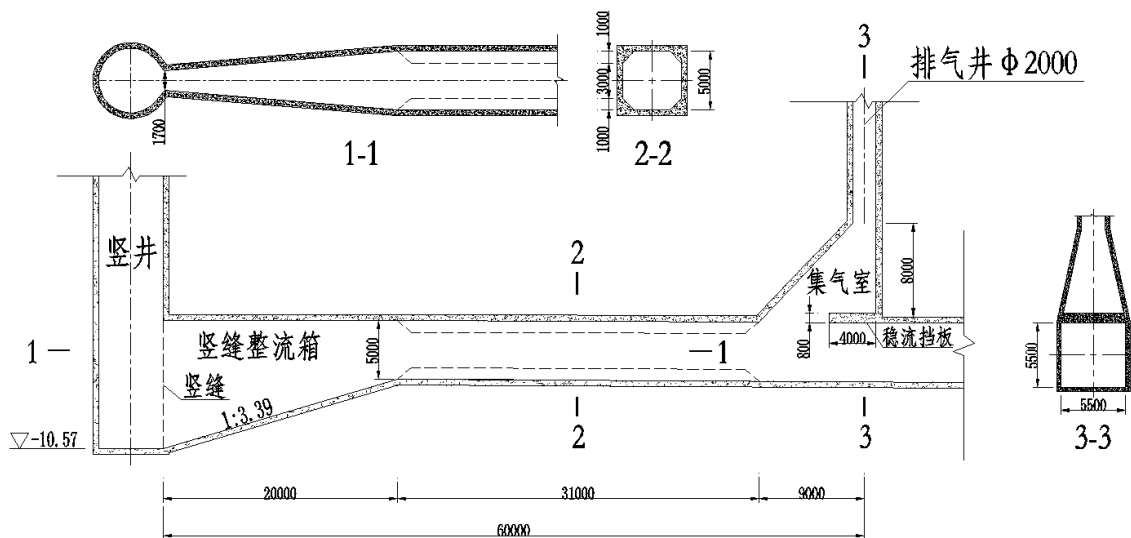


圖 6 集排氣設施結構設計

增設豎縫整流箱後，豎井旋流分層由豎縫進入水準支洞，在整流箱的束窄和流向調整下，水流迅速平穩，水流攜帶的氣體在較短距離內逸出並彙集至洞頂。

## 二、設置集氣室及排氣井

在距離豎井約 51.0m 處的洩洪支洞頂部設置長 9.0m、高 8.0m 的變截面集氣室，集氣室頂部設 1 直徑 2.0m 的排氣井，集氣室底部採用 5.5m 寬的方形隧洞，其後通過漸變段與直徑 5.5m 的圓形隧洞相連。集氣室、排氣井結構設計請參閱圖 6。

設置集氣室後，逸出的氣體逐步匯入集氣室，大部分氣體經排氣井排出支洞。當旋流豎井攜入較多氣體時，有壓氣囊匯入集氣室並由

排氣井釋放過程中會產生強烈的水體振盪，回落的水流將攜帶部分氣體再次進入洩洪洞。

## 三、在集氣室增設穩流擋板

為解決集氣室排氣過程中產生的水體振盪問題，使彙集的氣體盡可能排除乾淨，在集氣室底部遠離支洞進口端設置 1 長 4.0m、寬 5.5m 的水平穩流擋板，結構形式及佈置位置請參閱圖 6。穩流擋板一方面可以減小集氣室流速，減弱集氣室水體振盪，達到穩流作用；另一方面可有效避免氣體隨水流回落而再次進入洩洪洞。

增設穩流擋板後，進入洩洪支洞的氣體可全部由集氣室、排氣井排出。集排氣設施及排氣效果請參閱圖 7。



圖 7 集排氣設施及排氣效果

## 陸、結語

本文對鱓溪截洪樞紐旋流豎井有壓洩洪洞沿程壓強分佈、旋流空腔、摻氣漩渦及水氣分離形態進行深入分析，並結合試驗結果提出集排氣措施，為旋流豎井有壓洩洪洞的集排氣設計提供了詳實的資料支撐。

1、旋流空腔及摻氣漩渦隨尾水位的降低而降低，當摻氣漩渦低於洩洪洞進口頂高程時，氣體將隨水流進入水準洩洪洞，並沿程逐步逸出，在洞頂形成有壓氣囊。洩洪流量越小，尾

水位越低，洩洪洞攜入的氣體越多。

2、在豎井與水準洩洪洞連接處設置豎縫整流箱，可使豎井旋流分層由豎縫進入水準洩洪洞，在整流箱的束窄和流向調整下，水流將快速平穩，水流攜帶的氣體在較短距離內可逸出並彙集至洞頂。

3、旋流豎井有壓洩洪洞可通過在洩洪洞頂部設置集氣室和排氣井將攜入的氣體排出。但當旋流豎井攜入較多氣體時，有壓氣囊匯入集氣室並由排氣井釋放過程中會產生強烈的水體振盪，回落的水流將攜帶部分氣體再次進

入洩洪洞。

4、集氣室增設水平穩流擋板可有效減弱有壓氣囊釋放產生的水體振盪，避免氣體隨水流回落而再次進入洩洪洞，確保氣體經集氣室、排氣井排除乾淨。

### 參考文獻

- 1.孫雙科，劉之平等（2000），「下游高水位條件下導流洞改建為旋流豎井式洩洪洞的水力學問題研究」，水利學報，第10期，第22-27頁。
- 2.張建民，任成瑤等（2012），「淹沒出流型漩流豎井洩洪洞新型連接型式及水力特性研究」，水力發電學報，第31卷，第5期，第96-101頁。
3. 栗帥，張建民等（2014），「淹沒型旋流豎井洩洪洞流態過渡的數值模擬研究」，四川大學學報（工程科學版），第46卷，第4期，第13-19頁。
- 4.衛勇，匙召君等(2007)，「豎井旋流洩洪洞的水力設計」，水力發電學報，第26卷，第3期，第88-92、119頁。。
5. 福建省水利水電勘測設計研究院（2018），「河口城市漩流豎井群聯合洩洪關鍵技術研究與應用」。
6. 福建省水利水電勘測設計研究院（2018），「福州市江北城區山洪防治及生態補水工程鱔溪排洪支洞水工物理模型試驗研究報告」。

# 基于改进预泄能力约束法的水库汛限水位分期动态控制域确定及应用

任明磊<sup>1,2</sup>，何晓燕<sup>1,2</sup>，丁留谦<sup>1,2</sup>，王海军<sup>3</sup>，李辉<sup>1,2</sup>，谭亚男<sup>1</sup>，

## 摘要

汛限水位动态控制域是水库汛限水位动态控制研究的关键内容，亦是动态控制方案实施的基础。预泄能力约束法是确定汛限水位动态控制域的主要方法,但该方法主要考虑洪水预报信息进行预蓄预泄，并不适用于洪水汇流速度快、依据洪水预报信息决策时效短的水库，因此，本文提出考虑未来48h降雨预报信息的改进预泄能力约束法，并结合水库分期汛限水位，研究水库汛限水位分期动态控制域确定方法。以山西省漳泽水库为例，结合现有分期汛限水位，采用改进预泄能力约束法确定了水库汛限水位分期动态控制域，成果在2013--2016年的水库调度实践中取得了较好的应用效果。

**关键词：**改进预泄能力约束；汛限水位动态控制域；分期

## 壹、研究背景

水库汛限水位动态控制研究自2001年国家防汛抗旱总指挥部办公室布置开展工作以来，经过多年基础理论研究及试点水库应用研究取得了很大进展，已从原来整个汛期固定单一汛限水位发展为分期汛限水位，进而发展到汛限水位动态控制。汛限水位动态控制域的确定是汛限水位动态控制研究的关键内容之一，亦是动态控制方案实施的基础。

目前，水库汛限水位动态控制域确定的主要方法之一即为预泄能力约束法<sup>[1]</sup>，水利工程水利计算规范(SL 104-95)允许洪水预报条件较好、预报方案完善、预报精度较高的水库进行洪水调节计算时可适当考虑预报预泄，但预泄能力约束法仅局限于考虑洪水预报信息，一般不考虑气象预报信息。

实际上，随着我国气象、降雨预报水平的提高，尤其是“风云”系列气象卫星的成功发射，降雨预报信息准确率不断提高，水文及气象部门亦积累了大量可利用的降雨预报数据。因此，针对洪水汇流速度快、依据洪水预报信息决策时效短的水库，本文提出考虑降雨预报信息的改进预泄能力约束法,根据所依据降雨预报信息的预见期、精度、泄流能力、下游允许水库出流等确定水库汛限水位动态控制域上限值；并与水库分期汛限水位相结合，研究各分期内水库汛限水位动态控制域的确定。

## 貳、短期降雨预报精度分析方法

短期降雨预报精度分析内容主要包括未来24h、48h各量级降雨预报信息准确率、漏报率、空报率等特征指标值，以及某一量级降雨预报情况下实际发生降雨量的频率分布规律<sup>[2]</sup>。

按照气象部门的习惯，按表1对降雨等级进行划分，不同等级降雨预报准确率计算方法如下：

$$\eta = n/m \times 100\% \quad (1)$$

<sup>1</sup> 中国水利水电科学研究院，北京 100038

<sup>2</sup> 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心，北京 100038

<sup>3</sup> 水利部水土保持监测中心，北京 100055

收稿日期：2016-08-16

基金项目：国家自然科学基金青年基金项目(51509268)；

中国水利水电科学研究院国际水利水电科技发展动态调研专项(JZ0145C042016)

作者简介：任明磊（1983-），女，河北平泉，博士，高级工程师，主要从事洪水资源化研究。

E\_mail: renml@iwhr.com

式中： $m$ 为发布预报次数； $n$ 为降雨实际值落于预报等级相应值域内的次数。

表 1 降雨等级

等级	无雨	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
值域(mm)	0	0.1~10	10.1~25	25.1~50	50.1~100	100.1~200

不同等级降雨预报漏报率计算方法为：

$$\beta = u/m \times 100\% \quad (2)$$

式中： $m$ 为发布预报次数； $u$ 为发布预报中漏报(降雨实际值大于预报等级值域上限)的次数。

不同等级降雨预报空报率计算方法为：

$$k = v/m \times 100\% \quad (3)$$

式中： $m$ 为发布预报次数； $v$ 为发布预报中空报(降雨实际值小于预报等级值域下限)的次数。

$$\eta + \beta + k = 1$$

已有研究成果的对比分析表明：降雨定性分级预报如未来 24h 无雨或小~中雨预报准确率已在 90%以上，目前这些信息在汛限水位动态控制中已达到可利用程度<sup>[2]</sup>。某一量级降雨预报条件下实际发生降雨量的频率分布规律，采用频率分析法计算。例如，预报无雨条件下实际发生大暴雨的频率即为预报无雨而实际发生大暴雨的次数占预报无雨总次数的比例。文献[2]通过大量实例研究认为：某一量级降雨预报条件下实际发生降雨量的频率分布符合 PIII 型分布，可采用矩法估计其统计参数，由于本文不涉及实际发生降雨量频率计算，因此，不在此详述其计算公式，具体可详见参考文献[3]。

## 参、改进预泄能力约束法

### 一、基本思想

本文所述改进预泄能力约束法是考虑降雨预报信息的预泄能力约束法<sup>[4]</sup>。该方法的基本思想是：基于降雨预报信息可利用性研究成果，按照洪水起涨前水库水位必须降至原设计汛限水位的原则，在降雨预报有效预见期内，依据预报信息的有效预见期、预报精度、水库泄流能力、下游允许水库出流量等综合确定汛限水位动态控制域上限值，原设计汛限水位作为动态控制域下限值。

### 二、计算汛限水位动态控制域上限步骤

水库汛限水位动态控制域上限值的影响因素主要包括：面临时刻的水情、雨情、工情信息；降雨预报预见期、有效预见期；有效预见期内的入库流量；有效预见期内水库泄流能力；下游河道允许预泄流量；水库调度决策与反馈信息传递时间、闸门操作时间等。

改进预泄能力约束法确定汛限水位动态控制域上限分以下 4 个步骤：

#### (一)计算有效预见期

按照式(4)、式(5)计算有效预见期，即：

$$T_y = T_R - T_{cu} \quad (4)$$

$$T_{cu} = T_c + T_j + T_z \quad (5)$$

预见期指从发布预报的时刻至预报事件发生所间隔的时间。有效预见期指降雨预报预见期扣除信息传递、信息反馈、调度决策、闸门操作时间等。对一次洪水而言，水库极限预泄时间指从洪水开始起涨到预泄流量达到下游安全流量的时间<sup>[2]</sup>。式(4)中， $T_y$ 表示有效预见期； $T_R$ 为考虑短期降雨预报信息的极限预泄时间(对一次洪水而言，从洪水开始起涨到预泄流量达到下游允许安全流

量的時間即為水庫一次洪水極限預泄時間<sup>[2]</sup>； $T_{cu}$ 為預報信息傳遞時間、信息反饋時間、調度決策時間、閘門啟閉時間等之和； $T_c$ 為降雨預報信息傳遞時間、 $T_j$ 為信息反饋、調度決策傳播時間、 $T_z$ 為閘門操作時間。

### (二)有效預見期內水庫平均出流及入流

採用降雨預報信息，則有效預見期 $T_y$ 期間平均入庫流量 $Q_{in}$ 即為發布大雨及以上量級降雨預報信息後，有效預見期內的平均入庫流量 $Q_{in}$ ；為安全起見，常根據降雨預報有效預見期內最大入庫流量（指發布降雨預報信息至降雨發生這段時間內的最大入庫流量）確定，可按式(6)計算：

$$Q_{in} = \max Q_{ink} (k = 1 \dots m) \quad (6)$$

式(8)中， $Q_{ink}$ 為各次發布大雨及以上量級降雨預報後有效預見期內的最大入庫流量， $m$ 為發布大雨及以上量級降雨的次數。

有效預見期 $T_y$ 期間平均出庫流量 $q_{out}$ 通常取下游防洪控制斷面最低一級防洪目標安全過流量所允許的水庫安全泄量 $q_{an}$ 。

### (三)有效預見期內允許預蓄水量計算

根據有效預見期內平均入庫流量 $Q_{in}$ 、有效預見期期間平均出庫流量 $q_{out}$ ，按式(7)計算原設計汛限水位 $Z_d^0$ 以上的預蓄水量 $w_{yx}$ 。

$$w_{yx} = (q_{out} - Q_{in})T_y, q_{out} \leq q_{an} \quad (7)$$

### (四)汛限水位動態控制域上限值 $Z_d^+$ 的計算

已知原設計汛限水位所對應的庫容 $V(Z_d^0)$ ，根據 2.2.3 步驟求得可預蓄水量 $w_{yx}$ ，以 $V(Z_d^0) + w_{yx}$ 值查求水位-庫容關係曲線，用式(8)確定汛限水位動態控制域上限值 $Z_d^+$ 。

$$Z_d^+ = f[V(Z_d^0) + w_{yx}], Z_d^+ \leq Z_{XL} \quad (8)$$

式(8)中， $Z_{XL}$ 為興利蓄水位； $f[*]$ 為水庫庫容-水位關係。

## 三、水庫汛限水位分期動態控制域確定

對於汛限水位分期控制（即設置有分期汛限水位）的水庫，已知主汛期汛限水位 $Z_d^{01}$ 、前後汛期分期汛限水位 $Z_d^{02}$ 及二者所對應的庫容 $V(Z_d^{01})$ 、 $V(Z_d^{02})$ ，根據 2.2.3 步驟求得的可預蓄水量 $w_{yx}$ ，以 $V(Z_d^{01}) + w_{yx}$ 值、 $V(Z_d^{02}) + w_{yx}$ 值查求水位-庫容關係曲線，用式(9)、式(10)分別確定主汛期、前後汛期汛限水位動態控制域上限值 $Z_d^{+01}$ 、 $Z_d^{+02}$ 。

$$Z_d^{+01} = f[V(Z_d^{01}) + w_{yx}], Z_d^{+01} \leq Z_{XL} \quad (9)$$

$$Z_d^{+02} = f[V(Z_d^{02}) + w_{yx}], Z_d^{+02} \leq Z_{XL} \quad (10)$$

原主汛期汛限水位 $Z_d^{01}$ 作為主汛期汛限水位動態控制域下限值<sup>[5]</sup>；前後汛期分期汛限水位 $Z_d^{02}$ 作為前後汛期汛限水位動態控制域下限值。

## 肆、實例應用

### 一、漳澤水庫概況

漳澤水庫壩址位於山西省長治市北郊，是海河流域漳河上游濁漳河南源干流上的一座控制性工程，水庫流域如圖 1 所示。該水庫是一座以防洪、灌溉、工業和城市供水為主，兼顧養魚、旅遊等綜合利用的大(II)型水庫工程，控制流域面積 3176 km<sup>2</sup>，總庫容 4.27 億 m<sup>3</sup>。水庫按百年一遇洪水設計，兩千年一遇洪水校核，正常蓄水位 902.4m，設計洪水位 903.61m，校核洪水位 908.45m。汛期為 6--9 月，其中主汛期(7 月 15 日--8 月 15 日)汛限水位為 901.0m，前汛期(6 月 1 日--7 月 14 日)、後汛期(8 月 16 日--9 月 30 日)汛限水位為 901.5m。洪水主要由暴雨形成，集中在 7 月中旬至 8 月中旬，且暴雨洪水發生次數較少，一般一年只發生一次或兩次。根據漳澤水庫 1956 年至 2007 年來用水情況分析，汛期發生棄水的年份有 26 年，汛期多年平均棄水量 4200 萬 m<sup>3</sup>，占來水量的 26.4%。因此，由上述分析可知，漳澤水庫在現行汛限水位分期控制方案下汛期棄水量較大，洪水資源有進

一步利用的空間。有必要對漳澤水庫實施汛限水位實時動態控制，以期提高汛末蓄滿率，充分利用寶貴的水資源。



圖 1 漳澤水庫流域

二、漳澤水庫流域短期降雨預測可利用性成果分析

選用漳澤水庫以上流域長治市氣象台 2004 年至 2008 年 6 月 1 日至 9 月 30 日的未來 24h、48h 降雨預測數據及漳澤水庫控制流域實際日降雨數據進行精度分析<sup>[6]</sup>，結果分別列於表 2-5。

表 2 長治市氣象台未來 24h 無雨、小雨、中雨各量級降雨預測信息分析

未來 24h 降雨預測	無雨、小雨預測	中雨預測
發布預測次數	1057	101
準確率(%)	93.3	23.8
空報率(%)	-	70.3
漏報率(%)	6.7	5.9
實際發生無雨、小雨的頻率(%)	93.3	63.4
發生中雨的頻率(%)	6.5	23.8
實際發生大雨的頻率(%)	0.2	5.9
實際發生暴雨的頻率(%)	0	0
實際發生大暴雨的頻率(%)	0	0

表 3 長治市氣象台未來 48h 無雨、小雨、中雨各量級降雨預測信息分析

未來 48h 降雨預測	無雨、小雨預測	中雨預測
發布預測次數	1021	148
準確率(%)	93.1	18.9
空報率(%)	-	75.6
漏報率(%)	6.9	5.5
實際發生無雨、小雨的頻率(%)	93.1	62.8
發生中雨的頻率(%)	6.5	18.9
實際發生大雨的頻率(%)	0.3	4.1
實際發生暴雨的頻率(%)	0.1	1.4
實際發生大暴雨的頻率(%)	0.0	0

表 4 長治市氣象台未來 24h 大雨及以上量級降雨預報信息分析

未來 24h 降雨預報	大雨預報	暴雨預報
發布預報次數	47	11
準確率(%)	21.3	54.5
空報率(%)	74.5	45.5
漏報率(%)	4.2	-
實際發生無雨、小雨的頻率(%)	46.8	9.1
發生中雨的頻率(%)	27.7	36.4
實際發生大雨的頻率(%)	21.3	0
實際發生暴雨及以上量級降雨的頻率(%)	4.2	54.5

表 5 長治市氣象台未來 24-48h 大雨及以上量級降雨預報信息分析

未來 48h 降雨預報	大雨預報	暴雨預報
發布預報次數	41	6
準確率(%)	14.6	33.3
空報率(%)	78.1	66.7
漏報率(%)	7.3	-
實際發生無雨、小雨的頻率(%)	53.7	33.3
發生中雨的頻率(%)	24.4	16.7
實際發生大雨的頻率(%)	14.6	16.7
實際發生暴雨及以上量級降雨的頻率(%)	7.3	33.3

根據短期降雨預報精度分析結果，根據參考文獻 2，可以得出如下結論：漳澤水庫流域以上未來 24h、48h 無雨、小雨、中雨短期降雨預報信息在汛限水位動態控制中是可以利用的；鑒於大雨及以上量級降雨樣本個數較少（未來 24h 降雨預報大雨及以上量級樣本數 58，未來 48h 降雨預報大雨及以上量級樣本數 48），當發布大雨及以上量級降雨預報信息時，將水庫水位降至原設計汛限水位，水庫進入防洪調度階段。

在利用改進預泄能力約束法確定水庫汛限水位動態控制域上限時，若採用未來 24h 降雨預報信息，則降雨有可能發生在最不利時刻，即未來 24h 降雨預報之初，則此種情況下短期降雨預報可利用的預見期則為 0h；因此，考慮漳澤水庫有效預泄時間的約束，本文在確定汛限水位動態控制域時利用的是漳澤水庫以上流域未來 48h 短期降雨預報信息。

### 三、漳澤水庫汛限水位分期動態控制域確定

根據第 2.2 節及第 3 節介紹的計算步驟，漳澤水庫基於改進預泄能力約束法的水庫汛限水位分期動態控制域確定如下：

#### (一)有效預見期

根據短期降雨預報可利用性分析成果，漳澤水庫確定汛限水位動態控制域時利用的是水庫以上流域未來 48h 短期降雨預報信息。實際降雨有可能發生在未來 48h 降雨預報的最不利時刻，即未來 24-48 小時降雨預報的 24 小時之初，因此，降雨預報信息的可利用預見期為 24h。考慮到信息傳遞、預泄決策調令傳達及實施時間、閘門操作時間等，有效預見期取為 20h。

#### (二)有效預見期內水庫入流及出流

漳澤水庫汛限水位動態控制研究採用的是未來 24-48h 降雨預報信息，即水庫相關流域氣象台發布未來 24-48h 無雨、小雨、中雨量級降雨預報信息時，水庫可控制庫水位在汛限水位動態控制域上限；發布未來 24-48h 大雨及以上量級降雨預報信息後，水庫開始預泄並轉入防洪調度階段。水庫在有效預見期內的入庫流量即為發布未來 24-48h 大雨及以上量級降雨預報信息之後的入庫流



量。偏于安全考慮，在確定漳澤水庫汛限水位動態控制域時，將有效預見期內的最大入庫流量作為水庫預泄時的入庫流量。統計漳澤水庫流域 2004-2009 年發布大雨及以上量級降雨預報信息之後，有效預見期內的最大入庫流量，結果如表 6 所示。

由表 4 可見，水庫流域 2004 年~2009 年發布大雨以上量級降雨預報信息有效預見期內的最大入庫流量為 28.1m<sup>3</sup>/s，為安全起見，取為 30 m<sup>3</sup>/s。

有效預見期 T<sub>y</sub> 期間平均出庫流量 q<sub>out</sub> 首先考慮下游防洪控制斷面安全過流量所允許的水庫安全泄量 300m<sup>3</sup>/s；另外，有效預見期內水庫出庫流量亦受城市供水與灌溉日平均出流約束，根據漳澤水庫設計年供水量 10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>，水庫供水出流取 5m<sup>3</sup>/s；綜合上述兩方面因素，漳澤水庫 T<sub>y</sub> 期間平均出庫流量 q<sub>out</sub> 取為 305 m<sup>3</sup>/s。

表 6 2004 年~2009 年發布大雨及以上量級降雨預報信息後有效預見期內的最大入庫流量

日期	有效預見期內最大入庫流量(m <sup>3</sup> /s)	日期	有效預見期內最大入庫流量(m <sup>3</sup> /s)
2004·06.30	4.7	2006·08.28	4.2
2004·07.10	9.0	2006·09.03	12.7
2005·06.05	1.5	2007·07.28	1.8
2005·06.25	1.3	2007·08.08	10.2
2005·07.02	3.5	2007·08.27	7.2
2005·07.22	4.2	2007·08.28	6.9
2005·07.31	1.4	2008·07.21	2.9
2005·08.16	2.5	2008·08.19	2.5
2005·09.19	7.7	2008·08.28	2.6
2005·09.20	28.1	2009·06.17	2
2005·09.28	8.5	2009·07.07	6.9
2006·07.02	3.8	2009·08.16	1.6
2006·07.31	5.8	2009·08.17	1.6
2006·08.14	5.6	2009·08.20	1.1

(三)漳澤水庫汛限水位分期動態控制域

根據(一)及(二)確定的有效預見期及有效預見期內水庫出流及入流，有效預見期 20h 內可預泄水量為 19.8×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> [(300+5-30) m<sup>3</sup>/s×3600s×20]。

對主汛期而言，在原設計汛限水位(901.0m)對應的庫容基礎上增加水量 19.8×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>，此時對應的水位為 901.75m，此水位即為改進預泄能力約束法確定的主汛期水庫汛限水位動態控制域上限；原設計汛限水位 901.0m 為主汛期水庫汛限水位動態控制域下限。

對前後汛期而言，在水庫現行分期汛限水位 901.5m 對應的庫容基礎上增加水量 19.8×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>，此時對應的水位為 902.2m，此水位即為改進預泄能力約束法確定的前後汛期水庫汛限水位動態控制域上限；分期汛限水位 901.5m 為分期汛限水位動態控制域下限。

綜上所述，漳澤水庫基於改進預泄能力約束法確定的水庫汛限水位分期動態控制域計算成果如表 7 所示：

表 7 漳澤水庫基於改進預泄能力約束法確定的水庫汛限水位分期動態控制域

有效預見期(h)	下游安全泄量(m <sup>3</sup> /s)	城市及灌溉供水日均出流量(m <sup>3</sup> /s)	有效預見期內入庫流量(m <sup>3</sup> /s)	可預泄水量(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	動態控制域(m)
20	300	5	30	19.8	前後汛期：901.5~902.2 主汛期：901.0~901.75

## 四、漳澤水庫汛限水位分期動態控制域應用效果

漳澤水庫汛限水位分期動態控制域研究成果經海河流域水利委員會批准，應用在 2013 年、2014 年、2015 年、2016 年的調度實踐中。根據漳澤水庫 2013 年-2016 年水庫水情統計，歷年前汛期、主汛期、後汛期水庫水位平均值如表 8 所示：

表 8 漳澤水庫 2013-2016 年汛期各分期內平均水位、入庫流量及出庫流量

年份	前汛期			主汛期			後汛期		
	平均水位(m)	平均入庫流量(m <sup>3</sup> /s)	平均出庫流量(m <sup>3</sup> /s)	平均水位(m)	平均入庫流量(m <sup>3</sup> /s)	平均出庫流量(m <sup>3</sup> /s)	平均水位(m)	平均入庫流量(m <sup>3</sup> /s)	平均出庫流量(m <sup>3</sup> /s)
2013	901.59	12.3	13.8	901.41	31.4	41.9	901.43	3.6	1.4
2014	901.78	3.2	14.5	901.04	3.7	4.5	901.61	5.8	2.7
2015	901.23	3.0	9.4	901	2.6	2.7	901.10	2.3	1.4
2016	901.34	4.4	10.6	901	12.3	17.4	901.21	2.4	1.4

與漳澤水庫原汛限水位分期控制方案相比，2013 年全汛期增加需水量 1319 萬 m<sup>3</sup>，前汛期、主汛期蓄水量分別增加 237 萬 m<sup>3</sup>、1082 萬 m<sup>3</sup>；2014 年全汛期增加蓄水量 1134 萬 m<sup>3</sup>，前汛期、主汛期、後汛期分別增加 739 萬 m<sup>3</sup>、105 萬 m<sup>3</sup>、290 萬 m<sup>3</sup>；2015 年、2016 年由於來水偏枯，因此汛期蓄水量並未增。根據長治市 2014 年國民經濟和社會發展統計公報，長治市人均日生活用水量 162.7 升，人均年生活用水量 59m<sup>3</sup>。漳澤水庫通過實施汛限水位動態控制方案，與原汛限水位分期控制方案相比，在 2013 年、2014 年可以分別多解決 22 萬人、19 萬人的生活用水，且漳澤水庫管理局年均供水收入分別增加 1583 萬元、1361 萬元。

## 伍、結論

針對洪水匯流速度快、依據洪水預報信息決策時效短的水庫但又迫切需要进行汛限水位動態控制研究的水庫，本文在對水庫流域短期降雨預報信息可利用性進行統計分析的基礎上，採用改進預泄能力約束法研究了汛限水位分期動態控制域，並將研究成果在全國汛限水位動態控制研究第二批試點水庫之一山西省漳澤水庫進行應用。結果表明：採用改進的預泄能力約束法確定的漳澤水庫汛限水位分期動態控制域成果經海河流域水利管理委員會批准，在 2013 年、2014 年、2015 年、2016 年的水庫調度實踐中取得了較好的應用效果。

## 參攷文獻

- [1] 水利部長江水利委員會.SL104-95 水利工程水利計算規範[M].北京：中國水利水电出版社，1996.
- [2] 王本德，周惠成.水庫汛限水位動態控制理論與方法及其應用[M].北京：中國水利水电出版社，2006.
- [3] 中國水利水电科學研究院.漳澤水庫汛限水位動態控制研究[R].北京：中國水利水电科學研究院，2012.
- [4] 周惠成，王本德，王國利等.水庫汛限水位動態控制方法研究[M].大連：大連理工大學出版社，2006.
- [5] 張艷萍.基於洪水分類的水庫汛限水位動態控制域研究及其風險分析[C].大連：大連理工大學，2012.
- [6] 任明磊，何曉燕，黃金池，李輝.基於短期降雨預報信息的水庫汛限水位實時動態控制方法研究及風險分析[J].水利學報，2013，44(增刊 1)：66-72.

## Research and application of staged dynamic controlling domain of limited reservoir water level in flood season based on the improved pre-discharge capacity constrained method

Ren Minglei<sup>1</sup>, He Xiaoyan<sup>1</sup>, Ding Liuqian<sup>1</sup>, Wang Haijun<sup>2</sup>, Li Hui<sup>1</sup>, Tan Yanan<sup>1</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. The Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

**Abstract:** Dynamic controlling domain of limited reservoir water level in flood season is the key content of the research of dynamic control of limited reservoir water level in flood season, and also is the foundation of implementing the scheme for dynamic controlling. Pre-discharge capacity constrained method is the main method for determining the dynamic controlling domain of limited reservoir water level in flood season, however, this method mainly considers flood forecasting information in the procedure of pre-storage & pre-discharge, and does not applicable for the reservoirs those with short flow concentration time and low accuracy of flood forecasting scheme. Therefore, this paper proposes the improved pre-discharge capacity constrained method which considers 48-hours rainfall forecasting information, and studies on the determining method of staged dynamic control domain of limited reservoir water level in flood season; on the basis of the method, Zhangze Reservoir in Shanxi province is considered as engineering background, combining with existing staged limited reservoir water level in flood season, the improved pre-discharge capacity constrained method is adopted to determine the staged dynamic control domain of limited reservoir water level in flood season for Zhangze Reservoir. The achievement has been approved by the Haihe River Water Conservancy Commission, and achieved preferable application result in the practice of reservoir operation of year 2013, 2014, 2015 and 2016.

**Key words:** improved pre-discharge capacity constrained method; dynamic controlling domain of limited reservoir water level in flood season; staged flood season

## 地面地下聯合營運最佳規劃模式研究

王明聲<sup>1</sup>、陳韻宇<sup>2</sup>、張良正<sup>3</sup>、何智超<sup>4</sup>、黃芹濼<sup>5</sup>、王詠綸<sup>6</sup>、陸挽中<sup>7</sup>

### 摘要

台灣西部之部分沖積扇平原具有豐沛的地下含水層，含水層中大量土壤孔隙所構成之蓄水空間，若能將地下水豐富之含水層視為地下水庫並與地面水庫聯合利用，則可充分發揮整體系統之調蓄功能。

本研究乃整合線性與非線性規劃方法及地下水數值模式(MODFLOW)，發展地面地下聯合營運最佳規劃模式，並以濁水溪沖積扇為應用區域進行模式檢測及聯合營運之效益與影響分析。整體模式採逐時刻優選，其中非線性規劃法串聯並計算地面與地下兩系統之整體最佳解，地面水系統本身則以線性規劃進行最佳供水調配，地下水系統則嵌入完整之 MODFLOW 模式進行模擬。模式中地面水庫分層參考水庫之操作規線，地下水庫則以監控井所定義之管理水位進行分層操作，此管理水位在符合永續營運的原則下，定義出地下水庫可利用的空間，地面水庫與地下水庫之間乃採用「指標平衡」的調配原則，以達到兩系統間最佳之供水效益。

本研究針對研究區域的水文地質及地下水位現況研擬地下水之營運情境，設定抽水及補注區為濁水溪沖積扇扇頂及名竹盆地之濁水溪主流河畔，補注區則為濁水溪沖積扇嚴重地層下陷區及黃金廊道，地面水庫則以湖山水庫為主。分析結果顯示於僅地面水調配年平均總缺水量為 25,379.6 萬立方公尺/年，相較於聯合營運後，年平均總缺水量為 19,887.8 萬立方公尺/年，可減少 5491.8 萬立方公尺/年的缺水量。而抽水及補注區地下水庫年平均供水量為 22,42.7 萬立方公尺/年，地陷補注區年平均補注量為 26,66.4 萬立方公尺/年，故經聯合營運後，地下水庫年平均供水量佔年需求量約 0.9%，即可降低 2.18%之缺水比例，因此聯合營運後之效率甚高。其中，抽水補注區之名竹地下水庫年增補注量為 169.8 萬立方公尺/年，扇頂上游地下水庫年增抽水水量為 173.8 萬立方公尺/年，扇頂下游地下水庫年增抽水水量為 2238.7 萬立方公尺/年。並且經聯合營運後，湖山水庫期末蓄水量皆有抬升之現象，湖山水庫期末蓄水量位於下層之時刻數減少 12 個時刻數，並且期末蓄水位位於呆水位以下減少 24 個時刻數，減緩水庫供水壓力，達到本研究之預期目標。而地層下陷補注區之地下水位最高抬升幅度約 13.9 公尺，可減緩長期地下水位較低之問題。

綜合上述分析，聯合營運後降低濁水河流域缺水問題，水庫蓄水量增加，並且地下水位抬升顯著，對於地面水與地下水系統皆有相當之效益，此結果可為區域水資源經理之重要參考。

**關鍵字：**地面地下聯合營運、最佳化優選模式、指標平衡

<sup>1</sup> 國立交通大學土木工程學系研究生

<sup>2</sup> 國立交通大學土木工程學系研究生

<sup>3</sup> 國立交通大學土木工程學系教授

<sup>4</sup> 逢甲大學水利工程與資源保育學系助理教授

<sup>5</sup> 國立交通大學土木工程學系研究生

<sup>6</sup> 中央地質調查所資源地質組組長

<sup>7</sup> 中央地質調查所資源地質組技正

## 壹、前言

台灣的地質環境變動劇烈，地面水工結構物維護困難且壽命短，而台灣地下水源豐沛且地下含水層可蓄儲水量無淤積問題，水量與水質皆比地面水庫穩定。目前地下水資源在台灣地區整體水資源供應上已約占三分之一的總用水量，可見地下水資源是項重要的水源之一，惟欠缺更完善的營運管理機制。例如位於台灣中部之濁水溪沖積扇，部分地區地下水資源豐富，但於不當的區域使用地下水後，導致超抽地下水、地層下陷等問題。因此建立完善地面水與地下水資源緊密聯合操作機制，並且因地制宜之營運策略乃是目前水資源整合必需目標。

本研究考量地面與地下水系統間，緊密互動的聯合操作營運方式，地面水源補注至地下水系統內的水資源營運型態。因此本研究發展聯合營運模式，以非線性規劃優選模式連接線性地面水調配模式(GWSM)以及非線性地下水模擬模式(MODFLOW)，建立地面地下水資源聯合營運的優選耦合模式。本模式水源調配以維護環境生態保育為優先，並採用「指標平衡」的供水概念，使地面水水庫與地下水庫動態之供水規則，達到此兩系統之間的蓄水平衡，並且蓄存豐水時期之地面水剩餘水量，達到蓄豐濟枯目標，善用地下水庫亦即地下含水層的蓄存空間，進而達到地面地下水資源聯合營運之最大效益。

## 貳、研究流程

本研究之研究流程架構，主要分為兩大步驟，第一為地面地下聯合營運模式發展，第二為模式實例應用。詳細說明如下：

### 一、地面地下聯合營運模式發展

本研究整合線性地面水調配模式與地下水模式，並加入「指標平衡」的供水概念，考量地面與地下水庫各指標(分層間蓄水比例)之平衡，當不同水庫規模及入流量有差異時，可以更合理的分配供水來源。

模式之目標函數各目標項以權重大小反映其在操作上之重要程度。模式考量之目標函數為(1)地下水位限制之處罰函數項(2)各供水標的缺水率(3)地面及地下水庫之指標差及(4)地面及地下水庫空庫率。

### 二、聯合營運模式應用-以濁水溪流域為例

本研究將整合後的聯合營運模式應用於濁水溪流域，並探討此地區聯合營運後的可行性與改善效益。詳細說明如下：

#### (一)建立濁水溪流域地面地下聯合營運系統圖

蒐集研究流域內地面的重要水工構造物、供水標的以及營運要點，並且研擬流域內地下水庫的供水情境，整合建立濁水溪流域地面地下聯合營運的調配系統圖。

#### (二)建立濁水溪流域地面水資源調配模式(GWSM)

根據前述的調配系統圖，建立系統對應的關係矩陣，並以線性地面水調配模式(GWSM)進行地面水源最佳調配方案。

#### (三)建立濁水溪地下水數值模式(MODFLOW)

蒐集研究流域內的水文地質參數等資料，應用地下水數值模式 MODFLOW，建立濁水溪沖積扇數值模式，並以 Python 的 Flopy 模組，連接地下水模式與上層的優選模式。

(四)濁水河流域地面地下聯合營運水資源調配模式建立

整合濁水溪地面水調配模式與地下水數值模式，以非線性規劃法優選出濁水河流域逐時刻之最佳地面及地下決策變數，如地面水庫放水量、地面水系統補注量以及地下水庫抽水量。其中並以 Python 及其中的 Flopy 模組，連接非線性規劃模組與下層之 GWSM 地面水調配模式與 MODFLOW 地下水模式。

## 參、模式實例應用

為探討濁水河流域於地面地下聯合營運之下，是否能減緩本流域缺水問題，以及維持濁水溪地下水資源永續的經營的理念，因此針對地面水單獨營運與地面地下聯合營運之調配方案進行成果比較與分析。

### 一、營運方式比較

#### (一)地面水單獨營運

以濁水河流域內的重要水工設施進行地面水資源調配。水工設施包括湖山水庫及集集攔河堰及淨水場等，依據各水庫營運規則進行地面水調配。公共用水為最優先考量的供應標的，其次為農業灌區需求。

#### (二)地面地下水聯合營運

本研究修正濁水溪聯合營運調配情境研擬，將名竹盆地與濁水溪扇頂區設定為抽水補注井群(ASR Well)，名竹與扇頂井群依流場方向，設置於濁水溪主流兩側，彰化沿海、雲林地區以及黃金廊道仍維持地層下陷補注區，由人工補注井方式注入地下水含水層二，其地下水可供水量評估之抽水及補注區域示意圖，如圖 1 所示。

由於營運地下水庫須掌握地下水位之變化情形，因此所選擇操作與管理地下水庫之監控井群，需掌控地下水位之變化。則本研究在選取監控井時，優先會選擇在地下水庫井群內現有之監控井(實際地下水位站)。而本研究建

置抽水補注區(文章後段都以營運區代稱此類可抽水可補助之區域)地下水庫與地層下陷補注區地下水庫的監控井群性質不同，營運區地下水庫採用鄰近抽水補注之虛擬監控井，而地層下陷補注區則採用現有地下水位站作為監控井。由於，營運區地下水庫鄰近之實際地下水位站因距離較遠，導致無法反映地下水系統之變化。因此本研究採用監控井群，如名竹地下水庫與扇頂上游、扇頂下游地下水庫採用河道兩畔之虛擬井群，分別依流場方向設置；而彰化沿海、雲林地虛及黃金廊道補注區地下水

庫採用實際的地下水位站作為監控井，彰化補注區採用西港站作為監控井、雲林補注區採用元長站作為監控井、黃金廊道則採用九隆站作為監控井。

本研究將六座地下水庫(三座營運區地下水庫與三座地層下陷補注區地下水庫)分別與地面湖山水庫進行指標平衡。

### 二、地面地下水聯合營運模式建置

濁水河流域聯合營運模式優選模擬時距採用月模擬；其中地面水模式採用日模擬，由於地面水系統於各時刻的水量變化差異變化幅度大，而地下水模式則為月模擬，由於抽取或補注地下水含水層，其部分地下水位變化幅度較小，因此抽水量與補注量採用月變化作分析。

建置地面水調配模擬模式前，須蒐集研究流域內地面水的重要水工設施蓄水容量、地面水資源操作規則，以及需求量等資訊，並且維持生態保育的原則。而建立濁水溪地下水模式則需包括模擬範圍與邊界條件的設定、地層分層與數值網格設定、水文地質參數分區設定、起始水位設定以及河川演算套件等。

彙整濁水河流域內水工設施與地下水情

境研擬後，建立濁水溪地面地下水資源聯合營運調配系統概念圖，如圖 2 所示。

### 三、案例及成果分析

濁水河流域經聯合營運後，營運區名竹地下水庫年增補注量為 169.8 萬立方公尺/年，扇頂上游地下水庫年增抽水水量為 173.8 萬立方公尺/年，扇頂下游地下水庫年增抽水水量為 2238.7 萬立方公尺/年，而相較於僅地面水單獨應運，聯合營運後每年可減少 5491.8 萬立方公尺/年之缺水量，經聯合營運後，地下水庫年平均供水量佔年需求量約 0.9%，即可降低 2.18% 之缺水比例，因此聯合營運後之效率甚高，缺水量統計表可參考表 1 所示。並且三座地層下陷補注區地下水庫經聯合營運後之增補注量為 2666.4 萬立方公尺/年。

以及可參考圖 3 統計聯合營運下，三座營運區地下水庫最佳增抽水水量與增補注量時序變化圖(淨流量為補注量減去抽水量之淨值，其中正值為補注量大於抽水量、負值為抽水量大於補注量)，缺水發生期間與增抽水量的趨勢大致相符，以及增抽水與增補注之趨勢相反，於豐水期地面剩餘流量補注至地下水庫內，達到蓄豐濟枯之預期目標。相對的，可參考圖 4 聯合營運下，三座地層下陷補注區地下水庫最佳增補注量時序變化，豐水期地面系統有剩餘流量期間與增補注量之趨勢大致相符，藉由補注之行為使抬升地層下陷區地下水位，減緩該地區因超抽地下水後造成水位甚低之長期問題。

本研究情境設定為營運區(ASR 區)地下水庫與地層下陷補注區地下水庫，共同與湖山水庫進行指標平衡。因此經聯合營運後，由圖 5 湖山水庫與營運區地下水庫之水庫指標變化時序圖所示，營運區地下水庫與湖山水庫指標趨勢大致相似，於豐水期間 ASR 區地下水庫與地面湖山水庫指標將近至滿庫，即將地面水系統的剩餘流量補注至地下水庫內，達到蓄豐

濟枯之目標；枯水期間為降低標的缺水問題，湖山水庫與 ASR 區地下水庫共同供應至需求端，因此，湖山水庫蓄水位較低，同時 ASR 區地下水位亦下降，達到本研究所考量的指標平衡供水的原則與調配規則。

湖山水庫與地層下陷區地下水庫經聯合營運後水庫指標變化如圖 6。於豐水期時段(6 月~10 月)經由與湖山水庫指標平衡後，補注區地下水位幾乎抬升至滿庫；於枯水期(11 月~5 月)湖山水庫指標低，依指標平衡原則，補注區地下水庫本應抽水降低水位，惟補注區並無抽水設定，模式最佳選擇只能為不補注，因此，此時段補注區之地下水位乃維持原始水位。且經由聯合營運後，於枯水期間增加地下水庫抽水水量後，降低缺水問題亦減緩湖山水庫之供水壓力，圖 7 為地面水調配與聯合營運後湖山水庫之期末蓄水量變化圖。

最後為探討營運地下水系統後所造成的地下水位變化影響，因此本項目呈現地下水庫內實際地下水位站之水位變化，分別呈現該區地下水庫鄰近之地下水位站原始水位、管理水位與聯合營運後模擬水位變化。首先呈現營運區監控井與實際地下水位變化，以名竹地下水庫為例；再說明地層下陷區地下水位變化，以彰化地層下陷補注區地下水位為例。

由圖 8 名竹地下水庫內監控井 2 地下水位變化圖所示，由於本研究於此區地下水庫有補注行為，因此可以由補注後的水位使下個時刻可以更有效的運用含水層空間，並且由圖 5 新民(1)地下水位站變化圖所示，聯合營運後地下水位變化幅度大，原因之一為新民站位於抽水與補注井群附近約 1.5 公里以內，因此抽水補注行為導致水位變化的敏感程度較大，惟由於有補注作用，因此整體水位趨勢與營運前差異

不大，因此由新民站水位變化成果可得，本研究選定之監控井群可適當操作及管理地下水庫。以及由圖 9 彰化地層下陷區地下水庫監控井西港站水位變化圖所示，聯合營運下，於豐水時期經過補注行為後，地下水位皆有抬升之趨勢，符合本研究之預期；而枯水時期，聯合營運後之地下水位受到指標平衡之影響，使得水位並未大幅抬升，接近原始水位。地層下陷補注區地下水位抬升幅度，西港(2)最高抬升幅度為 13.9 公尺、元長(1) 最高抬升幅度為 8.1 公尺、九隆(2)最高抬升幅度為 5.7 公尺，因補注區位於侷限含水層，因此對於水位之影響較為顯著，亦減緩長期地下水位較低之問題。

#### 肆、結論

1. 本研究發展地表地下水資源聯合營運最佳規劃模式，其中地下水系統則是嵌入完整的地下水數值模式，解決線性響應矩陣所無法呈現之抽水補注對地下水位的非線性之影響。

2. 本研究定義管理地下水庫之監控井群設置，可直接掌握地下水位變化的情形，有效運用地下水資源。

3. 經本研究聯合營運之結果顯示，可確實減緩標的缺水之問題，並且降低地表水庫供水的壓力，且加入指標平衡概念後，由地表與地下水庫指標一致性可得，本模式確實緊密連接地表水與地下水系統間互動關係。

4. 本研究探討濁水河流域兩種情境模擬，僅地表水調配與聯合營運之情境。經聯合營運後，地下水庫年平均供水量佔年需求量約 0.9%，即可降低 2.18%之缺水比例，因此聯合營運後之效率甚高。

5. 經由水位抬升幅度之統計而言，地層下陷補注區內之西港站、元長站以及九隆站地下水

位最高抬升幅度，分別為 13.9 公尺、8.1 公尺，以及 5.7 公尺，由地陷區地下水位抬升顯著的成果，可減緩地層下陷區長期地下水位較低之問題。

#### 圖與表

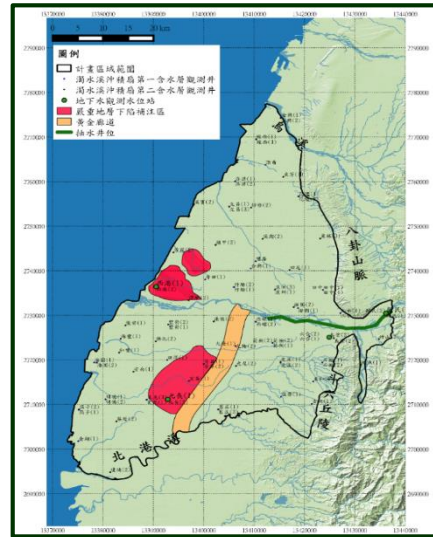


圖 1、濁水河流域聯合營運抽水及補注區域示意圖

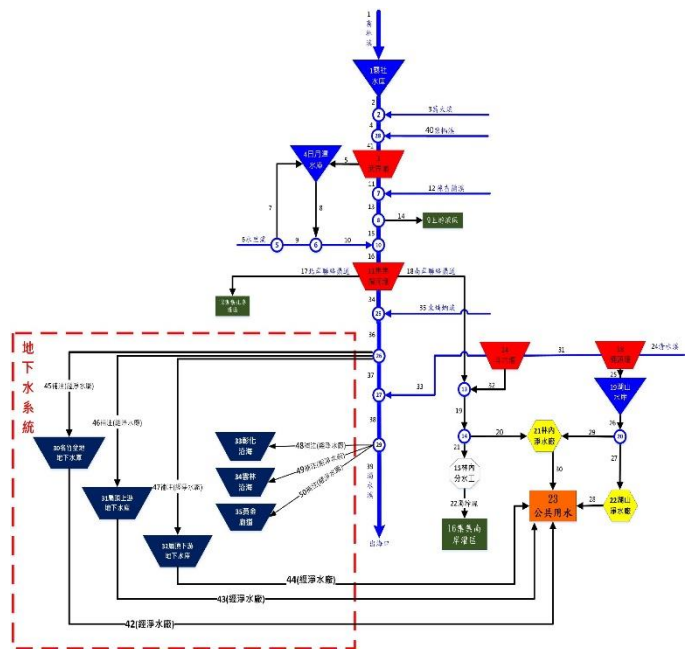


圖 2、濁水河流域地面地下水資源聯合營運調配系統概念圖



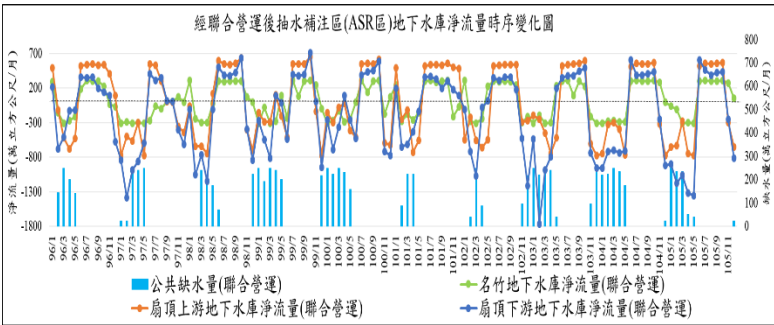


圖 3、聯合營運後營運區地下水庫淨流量時序變化圖

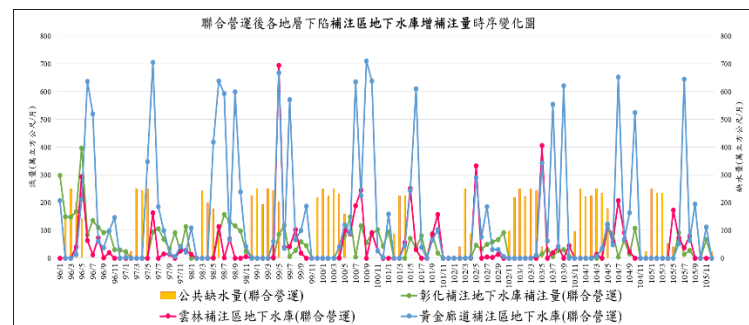


圖 4、聯合營運後各補注區地下水庫增補注量時序變化圖

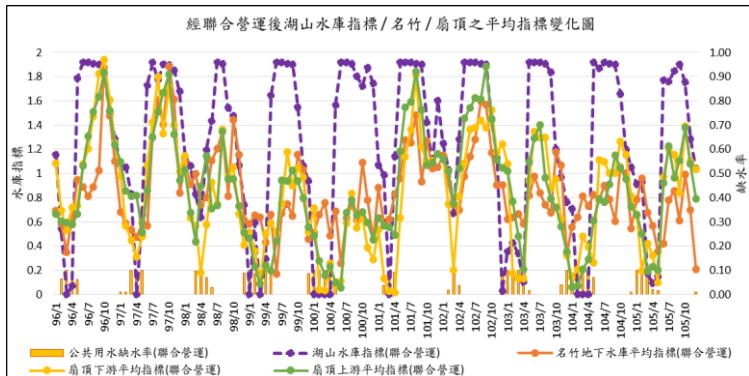


圖 5、聯合營運後湖山水庫指標/名竹/扇頂上游/扇頂下游地下水庫之平均指標變化圖

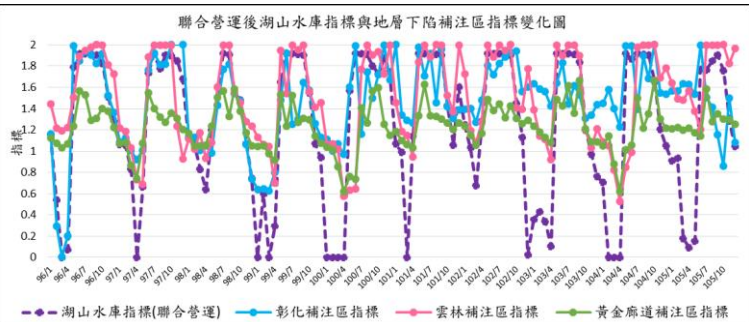


圖 6、聯合營運後湖山水庫指標與補注區地下水庫指標變化圖

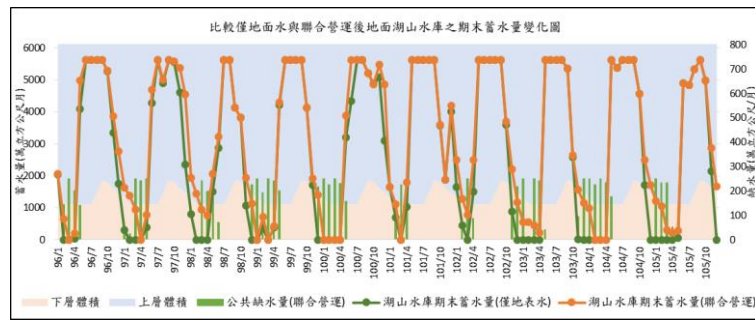


圖 7、比較僅地面水與聯合營運後地面湖山水庫之期末蓄水量變化圖

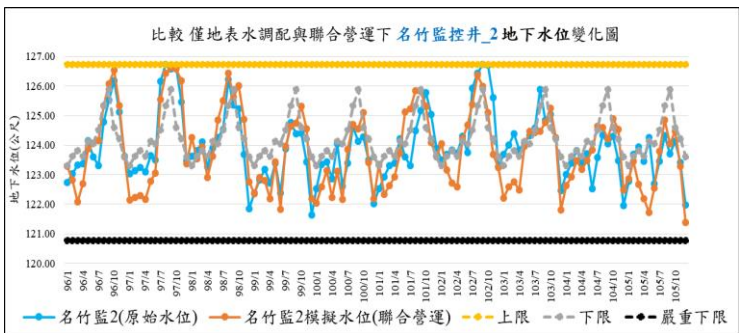


圖 8、比較僅地表水調配與聯合營運下名竹監控井 2 地下水水位變化圖

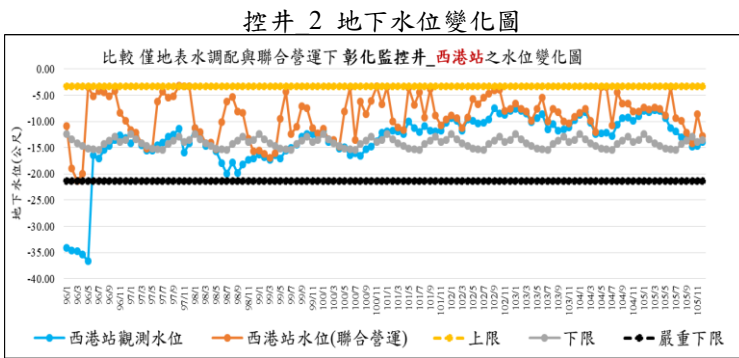


圖 9、比較僅地表水調配與聯合營運下彰化監控井\_西港站之水位變化圖

## 整合智能監管與雲端技術進行灌溉圳路系統管理

徐偉展<sup>1</sup>、張尊國<sup>2</sup>、何勝惟<sup>3</sup>、潘述元<sup>4</sup>

### 摘要

灌溉水體常因製程來源混雜，導致污染系統介入而造成水質具多變性。過去藉由連續自動監測及雲端監控系統之整合，能有效掌握污染潛勢圳路之水質及可疑污染源查察管理，甚至遇突發污染事件時，能立即採取因應措施，以保護農業灌溉水資源；另一方面，本團隊致力研發縮時膠囊技術，可於圳路現地進行長期監控，能有效針對單一污染事件進行點、線、面之分級管理，以研擬通盤性改善策略。本研究採用人工智慧（AI）進行智能監管整合，能取得連續性大數據，經由實測結果，對於水質重金屬採樣，亦較傳統人工單點單次之採樣模式，更利於較佳時機取得代表性之水樣。現況之水質自動監測資訊如經系統平台整合，可簡化操作，便於管理者一次取得水文及水質整合資訊，提高灌溉管理之決策效率。有鑑於此，若能妥善運用連續式自動監測設備以定常性對灌溉系統進行監管，配合縮時膠囊進行機動式佈放監測調查，並整合運用現行水門管理實務層面，未來可將原建置之 AI 智能監管系統作為雲端技術管理之基礎，發展灌溉圳路系統管理之策略，並提供有效解決水源污染之改善方案。

**關鍵字：**縮時膠囊技術、連續自動監測、重金屬、灌溉管理、改善策略

---

<sup>1</sup> 台灣大學生物環境系統工程學系 博士候選人

<sup>2</sup> 台灣大學氣候變遷與永續發展研究中心 教授

<sup>3</sup> 台灣大學生物環境系統工程學系 博士班研究生

<sup>4</sup> 台灣大學生物環境系統工程學系 助理教授

## 壹、前言

臺灣農地總面積達 85 萬公頃，約佔國土面積約 23%，隨工業規模、都市聚落逐漸擴張，區域排水欠缺整體規劃，造成農業灌溉渠道與都市排水系統混用，導致重金屬等污染管制物質進入渠道，導致灌溉水質惡化及衍生出農地土壤重金屬污染及食安問題。灌溉水體常因工農混雜而致污染介入使水質具多變性，管理上可藉由連續自動監測及雲端監控系統之整合，將能有效掌握污染潛勢圳路水質及可疑污染源查察管理，甚至遇突發污染時能採取及時因應措施以保護農業水資源。

### 一、水質基本指標自動監測

對於工業廢水非法介入灌溉系統之情事，常發生於夜間、假日、大雨等不同時段，如僅以人工定期採樣監測水質，受限於採樣頻率及時機，恐難以有效掌握水質實際狀況。有鑑於此，水質連續自動監測及自動採樣系統在灌溉水質管理上，除可掌握不同時段、天候狀態下之水質異常變動特性外，亦可作為包括採樣證據保全、通知即時稽查、上游工業廢水異常排放時提供預警、採取應變及改善措施等各種因應方案。

### 二、水質重金屬自動監測技術

電化學法以溶出伏安法為主要分析反應(如圖 1)。由於不同的重金屬有不同溶出電勢，由伏安圖譜(如圖 2)中溶出電流峰位置進行分析即可獲知溶液中所含重金屬離子的種類，而溶出電流峰的大小與該金屬離子的濃度成正比，據此可獲得重金屬離子濃度資訊<sup>[2]</sup>。

## 貳、研究方法

### 1. 基本型測站建置

2016~2018 年度「農業生產環境安全管理研發

計畫」，建立灌溉水質自動監測網路，廣設水質自動監測站，結至 2018 年度，全台共已建置完成 61 處灌溉水質自動監測站(如表 1 包含基本測站，重金屬測站)，全臺所監控水源對應之灌溉面積約達 8,700 公頃<sup>[3]</sup>。

自動監測系統之水質傳感器設置於野外，受環境及儀器因素，可能造成感測數據異常，故須定期進行儀器設備之維護與校正，並將可能受環境及儀器因素影像產出之異常數據進行修正，參考美國地質調查局(USGS)所制定有關水質自動監測之指導與標準<sup>[8]</sup>。自動監測結果產生誤差來源主要包含：髒污誤差、偏移誤差兩大部分，總誤差值為二者之總和如公式(1)。

$$E_T = |E_f| + |E_d| \dots \dots \dots (1)$$

其中， $E_T$ ：總誤差值； $E_f$ ：髒污誤差； $E_d$ ：偏移誤差。

髒污誤差修正(Corrections for Fouling)，有以下三種方法，當維護期過程水質穩定時，使用公式(2)修正。

$$C_f = M_a - M_b \dots \dots \dots (2)$$

其中， $C_f$ ：髒污誤差修正值； $M_a$ ：清潔後監測值； $M_b$ ：清潔前監測值。

當維護過程水質較不穩定時，可使用公式(3)修正。

$$C_f = (M_a - M_b) - (F_e - F_s) \dots \dots \dots (3)$$

其中， $C_f$ ：髒污誤差修正值； $M_a$ ：清潔後監測值； $M_b$ ：清潔前監測值； $F_e$ ：維護作業結束現場儀器(Field Meter)讀值； $F_s$ ：維護作業開始現場儀器(Field Meter)讀值。

## 參、結果討論

### 一、水質基本指標自動監測成果

將測站區分為兩類型，分別為水源型測站與圳路型測站。水源型測站，作為水源水質監控，有水量大、水質穩定之特性；圳路型測站，作為圳路是否有異常介入之水質監控，水量相對較小、水質變異程度相對複雜。

水源型測站 EC 變異程度相對穩定，此類型 EC 管理閾值，主要採用趨勢圖觀察法，圖 5 為水源型測站 EC 管理閾值設定案例。圳路型測站 EC 變異程度相對複雜，則以移動平均線變化率作為管理閾值取代單一限值，移動平均線變化率變化率高代表有突發性污染介入情形。圳路型測站 EC 管理閾值設定案例如圖 6 所示。

以彰化三家村排水測站 2018 年 2 至 3 月 pH 值變化趨勢為例，在清潔前 pH 感測器監測值為 10.3，清潔後監測值為 8.5，修正前後數據比對如圖 7。

以臺中八寶圳牛稠支線測站於 2018 年 10 月至 2019 年 1 月之 EC 值變化趨勢為例，在清潔前 EC 感測器讀值為 1,184  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，清潔後讀值為 381  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，水質穩定數值無變化，使用公式 5，以髒污誤差百分比修正法進行數據修正，計算如下，修正前後數據比對如圖 8。

$$\%Cf = \frac{(Ma - Mb) - (Fe - Fs)}{Mb} \times 100$$

$$100 = \frac{(381 - 1184) - 0}{1184} \times 100 = -67.8$$

改良重點包含設備安裝固定方式及機型選用修改，強化移機機動性布設機動性。設備可攜式改良安裝方式如圖 9 所示。

### 二、重金屬自動監測結果

桃園三塊厝支線測站：三塊厝支線為大型印刷電路板工廠華通電腦廢水排放水體，使本測站普遍性發生銅超標現象，圖 10 為三塊厝支線 2019 年 4 月重金屬濃度連續變化情形。桃園黃墘溪線測站：黃墘溪為中壢工業區污水處理廠之排放水體，使本測站銅有略為偏高現象，但尚符合灌溉用水水質標準圖 11 為黃墘溪測站 2018 年 9 月重金屬濃度連續變化情形。桃園新街溪測站：新街溪測站上游有大型印刷電路板工廠金像電子廢水排放，屬銅、鎳有偏高趨勢，偶爾發生同超過灌溉水質標準情形，圖 12 為新街溪測站 2019 年 4 月重金屬濃度連續變化情形。

臺中詹厝園圳重金屬測站：受圳路沿線家工廠排放影響，本站重金屬以鎳、鉻最易發生超標，圖 13 臺中詹厝園圳三塊厝支線 2019 年 4 月重金屬濃度連續變化情形。

彰化新圳重金屬測站：新圳取水自洋子厝溪，受上游金屬加工業排放影響，本站以鎳之污染特徵最為顯著，圖 14 為彰化新圳 2019 年 4 月重金屬濃度連續變化情形。

高雄涵口圳測站：涵口圳水源取自區域排水，周邊有工廠聚落廢水排入此區排，本站以鎳、鉻之污染特徵最為顯著，圖 15 為高雄涵口圳測站 2019 年 4 月重金屬濃度連續變化情形。

## 肆、結論

### 1. 自動監測確能提升水質監測管理效率

整體而言，可有效補強現有人工監測採樣頻度與強度之不足。水質自動連續監測較傳統定常性監測之另一特性在於可提供即時監測指標資訊，如能善加運用，配合水利會水質實驗室檢測分析能力提升，可能對於水質管理作業之精進發揮很大的助益，包括啟動採樣證據保全、通知即時稽查、甚至上游工業廢水異常排

放時可提供預警與迴避措施等。另水質自動監測系統所有操作功能皆可透過雲端資料平台進行，管理者不受時間及空間限制，即時掌握設備現況、水質狀態、控制自動採樣設備運作，當水質變化達預警條件時，系統可即時以簡訊及電子郵件通知管理者，以採取相關應變措施。自動採樣時間及條件涵蓋具有多樣性包含不同時間及不同自動監測指標值條件下自由設定，且可遠端控制採樣，降低人工採樣之時間及成本，故可提升整體水質監測及管理效率。

### 2. 自動監測資源應予整合分享

農田水利會多有建置水文自動測報及灌溉水質管理系統，現況之水質自動監測資訊如經系統平台整合，可簡化操作，便利管理者能一次性取得水文及水質整合資訊，提高灌溉管理之決策效率。後續更可進一步與環保單位水質監測資訊進行資料交換，跨單位監測資源分享整合，等同採取聯合監測模式，以利環保單位更有效執行污染源追查，積極提高管理作為之時效。

### 3. 結合灌溉管理之後續功能擴充

農田水利會在灌溉管理需求已從過去「量」的供給提昇至「質」的確保，即時資訊最大的意義在於是否可採取即時有效的行動方案以採取應變及改善措施，例如當圳路顯示監測數據顯示水質不良時，暫時關閉水門停供之操作是否具備實務可行性？現行污染潛勢圳路支線取水口及迴歸水取水口水門型式，現況仍以手動操作為主，如遇水質短期惡化時，因實務上難以克服 24 小時人力待命需求之限制，無法滿足即時應變之需求。目前選用之水質自動監測主機即已預留模組化擴充功能，除既有之水質監測模組外，另可連接水文(如水位計、流量計)及氣象(如雨量計)監測模組、設備控制模組(如控制水門啟閉之開度計)，所有監測資訊及水門啟閉控制，皆可由遠端進行監控及操作。故若

能妥善運用自動監測設備之模組擴充機制，就現行水門管理實務層面思考予以整合運用，未來或可經濟地將原建置系統硬體作為基礎工具，發展灌溉管理之整合性解決方案。

## 參考文獻

1. 梁秋萍、吳孟洋、陳慎德、吳嘉倫，2016，農田水利會灌溉水質自動監測系統之執行成效及展望，第二十屆海峽兩岸水利科技交流研討會。
2. Fundamentals of Stripping Voltammetry. Princeton Applied Research, OVA7000 On-line Metal Monitor. Modern Water.
3. 國立台灣大學，105~107 年，建立灌溉水質自動監測網及監測技術，期末報告，行政院農業委員會。
4. 瑞昶科技，103~105 年，灌溉水質連續自動監測與分析委託專業服務計畫，期末報告，農田水利會聯合會。
5. Continuous Real-Time Water Quality of Surface Water in the United States. USGS.
6. Online Water Quality Monitoring Resources. US EPA.
7. Eduardo J. Miles. 2009. Continuous Monitoring Station: Selection, Assembly & Construction. Virginia Institute of Marine Science.
8. Guidelines and Standard Procedures for Continuous Water-Quality Monitors: Station Operation, Record Computation, and Data Reporting. U.S. Geological Survey.
9. 淡江大學，104~106 年，灌溉水質監測調查及技術輔導計畫，期末報告，行政院農業委員會。

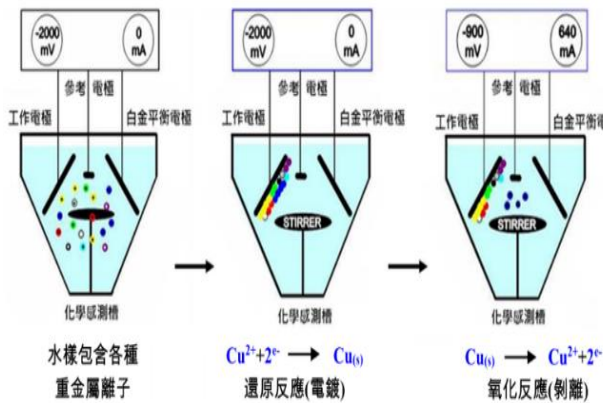


圖 1 溶出伏安法三階段反應勢

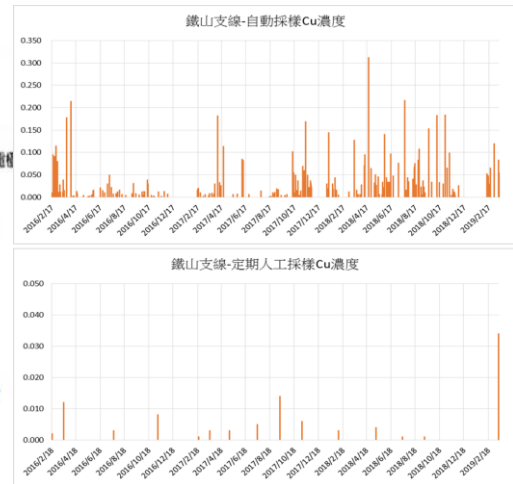


圖 4 自動採樣與人工定期採樣比對Cu檢測差異案例

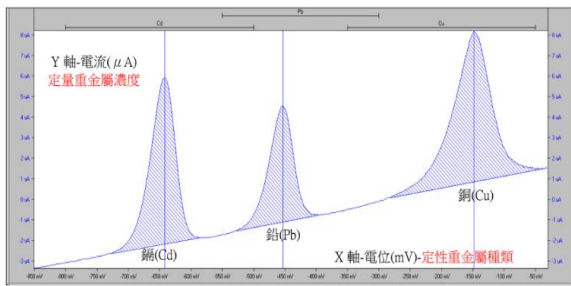


圖 2 溶出伏安法圖譜

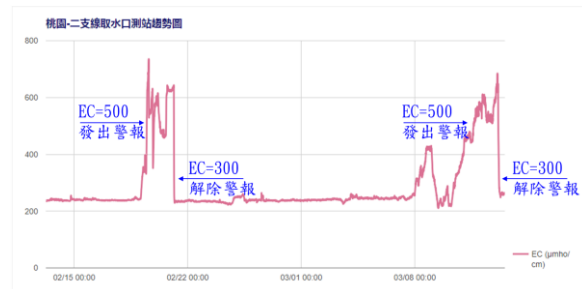


圖 5 水源型測站 EC 管理閾值設定案例

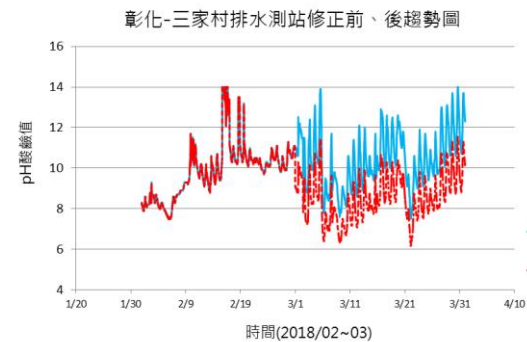


圖 7 彰化三家村 pH 監測數據修正案例

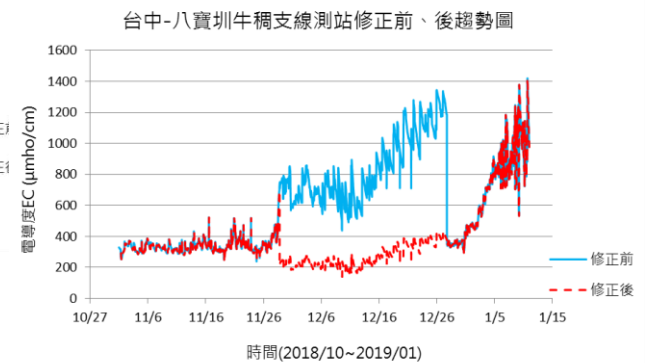


圖 8 臺中八寶圳 EC 監測數據修正案例



圖 10 桃園黃墘溪測站重金屬變化(2018/9)

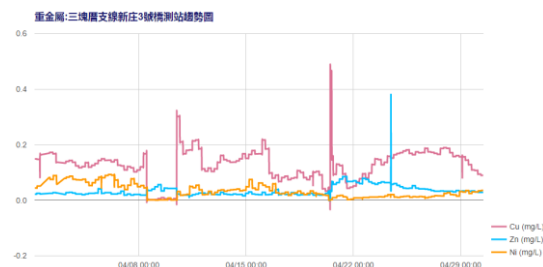


圖 11 桃園三塊厝支線測站重金屬變化(2019/4)

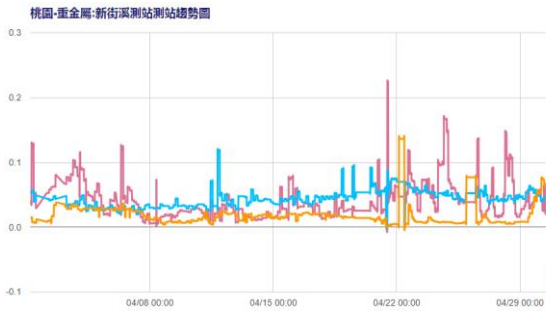


圖 12 桃園新街溪測站重金屬變化(2019/4)

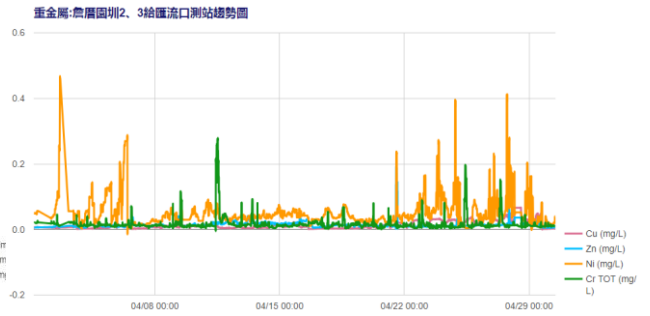


圖 13 臺中詹厝園圳測站重金屬變化(2019/4)

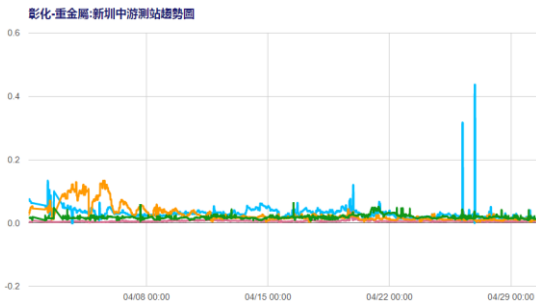


圖 14 彰化新圳中游測站重金屬變化(2019/4)

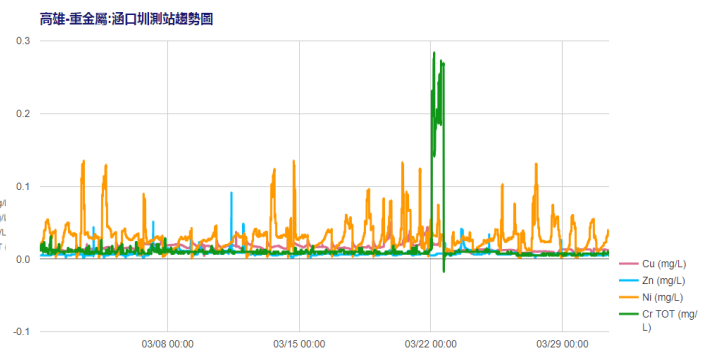


圖 15 高雄涵口圳測站重金屬變化(2019/4)

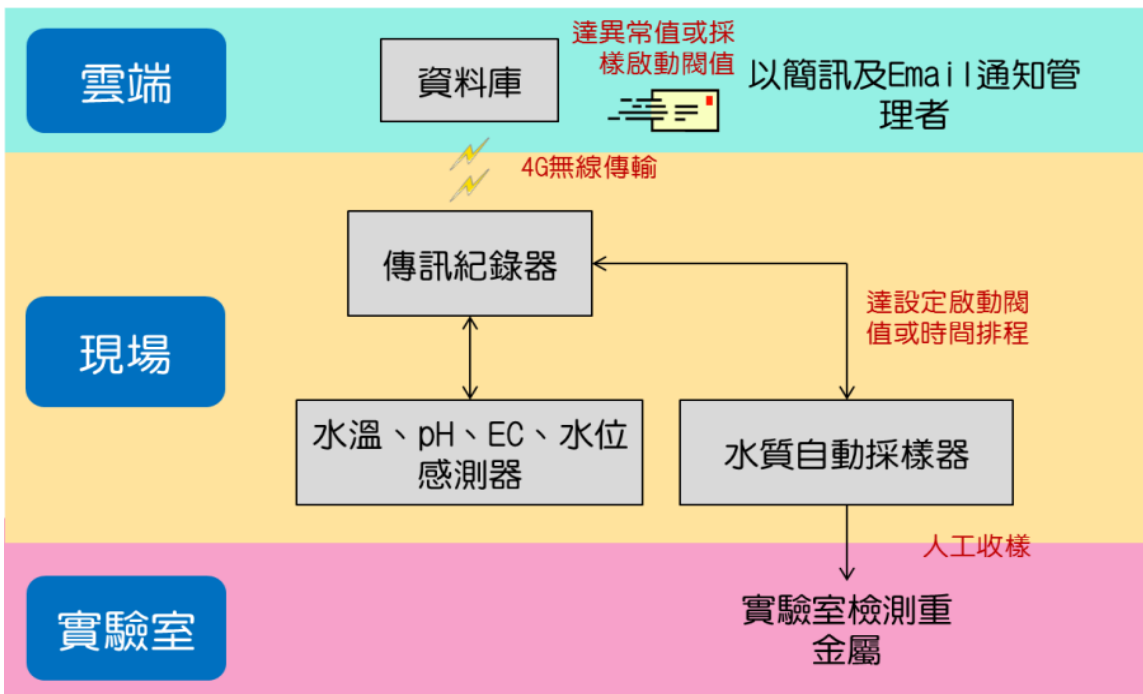


圖 3 基本指標自動監測組成架構

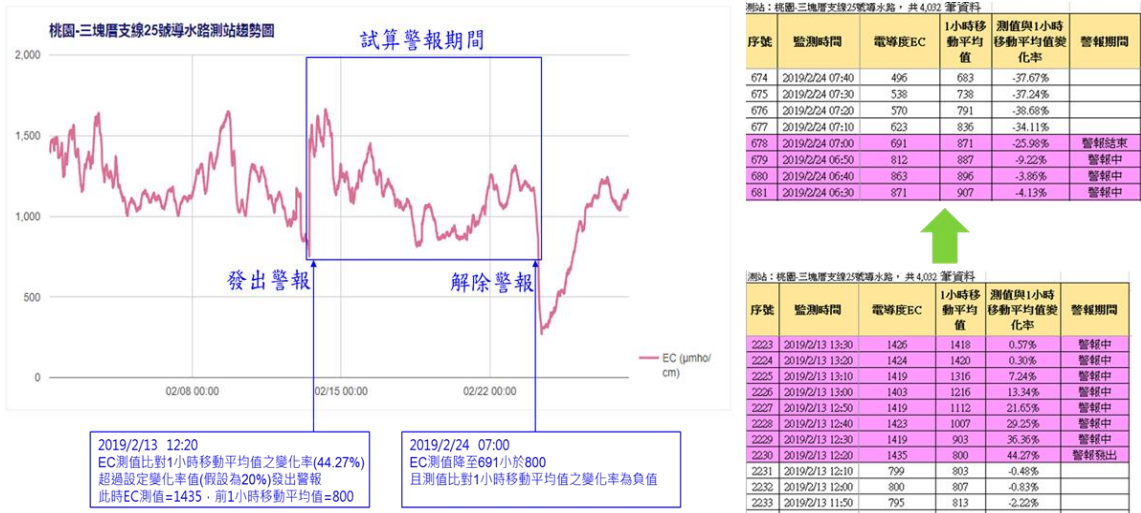


圖 6 水源型測站 EC 管理閾值設定案例



圖 9 自動監測設備可攜式改良方式



第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

表 1、全臺灌溉水質自動監測站設置現況

項次	水利會轄區	測站位置	水源	自動採樣	監測項目	座標	採購單位
1	桃園水利會	坑子口圳取水口	南崁溪		pH、EC、水溫	25.081168, 121.271556	桃園會
2		蘆竹排水滲眉埤匯入口	蘆竹排水		pH、EC、水溫	25.069437, 121.263607	桃園會
3		三塊厝支線 25-3 號河水堰	三塊厝支線	V	pH、EC、水溫	25.029873, 121.240884	桃園會
4		徐厝排水導水路取水口	徐厝排水	V	pH、EC、水溫	25.057562, 121.275492	桃園會
5		新屋溪 70-4 號河水取水口	新屋溪		pH、EC、水溫	24.994274, 121.084755	桃園會
6		新街溪 36 號河水堰取水口	新街溪		pH、EC、水溫	25.017521, 121.229744	桃園會
7		紅毛圳取水口	茄荖溪		pH、EC、水溫	24.881568, 120.990477	桃園會
8		老街溪 42 號河水取水口	老街溪		pH、EC、水溫	24.997522, 121.215173	桃園會
9		二支線取水口	桃園大圳	V	pH、EC、水溫、水位	24.967969, 121.273407	台大
10		老街溪 6-14 號取水	老街溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.991676, 121.214848	台大
11		茄荖溪上游	茄荖溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.966881, 121.288432	台大
12		下中福排水	下中福排水	V	pH、EC、水溫、水位	24.975563, 121.268558	台大
13		埔心溪 24 號導水路	埔心溪	V	pH、EC、水溫、水位	25.022946, 121.254812	台大
14		埔心溪 25-7 號導水路	埔心溪	V	pH、EC、水溫、水位	25.039952, 121.240753	台大
15		三塊厝支線 25 號導水路	三塊厝支線	V	pH、EC、水溫、水位	25.037453, 121.231535	台大
16		洽溪 6-5 號取水	洽溪	V	pH、EC、水溫、水位	25.007356, 121.199792	台大
17		新街溪 34 號導水路	新街溪	V	pH、EC、水溫、水位	25.001574, 121.231123	台大
18		新街溪上游	新街溪	V	pH、EC、水溫、鎘、鉛、銅、鎳、鋅	24.985094, 121.233615	台大
19		三塊厝支線新莊 3 號橋	三塊厝支線	V	pH、EC、水溫、鎘、鉛、銅、鎳、鋅	25.028117, 121.241714	台大
20	石門水利	環頂支渠廣興分渠取水口	石門大圳		pH、EC、水溫	24.925484, 121.193321	石門會

第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

項次	水利會轄區	測站位置	水源	自動採樣	監測項目	座標	採購單位
21	會	員樹林支渠下游	石門大圳		pH、EC、水溫	24.925695, 121.301538	石門會
22	新竹水利會	廣源記圳取水口	霄裡溪		pH、EC、水溫	24.842456, 121.143842	新竹會
23		汀甫圳牛埔溪支線取水口	牛埔溪		pH、EC、水溫、水位	24.791934, 120.944283	新竹會
24		汀甫圳牛埔溪支線下游	牛埔溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.793355, 120.936127	新竹會
25		汀甫圳八輪支線	汀甫圳	V	pH、EC、水溫、水位	24.794295, 120.930989	台大
26		苗栗水利會	山仔坪圳中游	中港溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.677558, 120.883261
27	臺中水利會	詹厝園圳取水口	頭汴坑溪		pH、EC、水溫	24.100933, 120.697931	台中會
28		苑裡圳山柑支線第35給水取水口	新復溝	V	pH、EC、水溫	24.407002, 120.656677	台中會
29		大突寮圳一給取水口	大里溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.092111, 120.685132	台大
30		大突寮圳一給下游	大里溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.091148, 120.679059	台大
31		詹厝園圳中興大排取水口	中興大排	V	pH、EC、水溫、水位	24.093346, 120.683662	台大
32		詹厝園圳1給水	頭汴坑溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.082849, 120.676231	台大
33		八寶圳牛稠支線	大甲溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.230905, 120.724396	台大
34		八寶圳上埤支線	大甲溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.212149, 120.726657	台大
35		詹厝園圳2、3給匯流處	中興大排	V	pH、EC、水溫、鎘、鉛、銅、鎳、鋅、鉻	24.089002, 120.672452	台大
36		彰化水利會	東西二圳嘉犁支線取水口	烏溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.087371, 120.542958
37	東西二圳公厝支線取水口		烏溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.076729, 120.521812	聯合會
38	東西三圳鐵山支線取水口		烏溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.095102, 120.525158	聯合會
39	四、六股圳分水門		烏溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.118988, 120.528587	聯合會
40	新埤舊圳取水口		番雅溝	V	pH、EC、水溫、水位	24.100158, 120.477654	聯合會
41	新圳取水口		洋子厝溪	V	pH、EC、水溫、水位	24.077984, 120.492720	聯合會
42	東西三圳中游		烏溪	V	pH、EC、水溫、水	24.095481,	聯合

第二十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會

項次	水利會轄區	測站位置	水源	自動採樣	監測項目	座標	採購單位
					位	120.539323	會
43		金屯圳取水口	石筍排水	√	pH、EC、水溫、水位	24.005270, 120.555883	聯合會
44		泉成圳(彰水路)	就濁水溪	√	pH、EC、水溫、水位	23.911862, 120.474895	台大
45		安東二排	安東二排	√	pH、EC、水溫、水位	24.046264, 120.487384	台大
46		公厝支線南圳分線	烏溪	√	pH、EC、水溫、水位	24.075564, 120.508459	台大
47		三家春排水	三家春排水	√	pH、EC、水溫、水位	24.005636, 120.553144	台大
48		番雅溝支線取水口	番雅溝	√	pH、EC、水溫、水位	24.097100, 120.512381	台大
49		新圳中游	洋子厝溪	√	pH、EC、水溫、鎘、鉛、銅、鎳、鋅、鉻	24.092403, 120.477308	台大
50		湖內二仁圳取水口	二仁溪	√	pH、EC、水溫、水位	22.892527, 120.254613	聯合會
51		五甲尾溝為隨抽水站	五甲尾溝	√	pH、EC、水溫、水位	22.813590, 120.302225	台大
52		仕隆圳取水口	後勁溪		pH、EC、水溫	22.729136, 120.303386	高雄會
53		涵口圳	區排		pH、EC、水溫、鎘、鉛、銅、鎳、鋅、鉻	22.900377, 120.236183	台大
54		湖內二仁圳幹線下游	二仁溪		pH、EC、水溫、水位	22.899641, 120.234653	台大
55		灣裡圳取水	阿公店溪		pH、EC、水溫、水位	22.800297, 120.286489	台大
56		托子支線取水	阿公店水庫		pH、EC、水溫、水位	22.815125, 120.325266	台大
57		托子支線中游	阿公店水庫		pH、EC、水溫、水位	22.810709, 120.310449	台大
58		大埔支線下游	阿公店水庫		pH、EC、水溫、水位	22.822486, 120.307677	台大
59		曹公圳導水路幹線	高屏溪		pH、EC、水溫、水位	22.645365, 120.419526	台大
60		曹公新圳幹線上游	高屏溪		pH、EC、水溫、水位	22.631031, 120.387717	台大
61		曹公舊圳幹線上游	高屏溪		pH、EC、水溫、水位	22.651379, 120.382769	台大
	高雄水利會						

## 融合人工智慧與數值模式於水庫泥砂濃度 前期預警之研究

黃振家<sup>1</sup>、鍾秉宸<sup>2</sup>、何昊哲<sup>3</sup>、方熙廷<sup>4</sup>、譚義績<sup>5</sup>

### 摘要

因氣候變遷所導致之極端水文事件於近年頻仍發生，因颱風、豪雨所造成之水砂災害強度亦顯著提升，本研究以智慧化水砂管理為終極目標，提出一套融合人工智慧與數值模式之水庫泥砂濃度前期預警系統。本研究以石門水庫為研究範圍，首先利用數值模式分析未來水砂的時間及空間分布資訊，再將相關資訊提供予具備學習能力之機器人進行未來時刻壩前排水排砂量體之預測。研究成果顯示，本研究所提出的前期預警系統能夠合理預測未來 0.5 至 3 小時的壩前懸浮泥砂濃度並進一步推估排砂量體。本研究希冀在上游第一筆量測資料取得時即以最快速度預報石門庫區包含洪水及泥砂可能造成之災害規模，提升現有前期預警系統之精度及應變時間。

**關鍵字：**智慧化水砂管理、人工智慧、數值模式、泥砂濃度、前期預警系統

---

<sup>1</sup> 台灣大學土木工程學系

博士後研究員

<sup>2</sup> 京都大學

博士後研究員

<sup>3</sup> 台灣大學土木工程學系

助理教授

<sup>4</sup> 台灣整合防災工程技術顧問有限公司

專案經理

<sup>5</sup> 氣候天氣災害研究中心

特聘研究員

## 壹、前言

近年來，極端洪水事件頻繁發生並對水庫永續發展造成極大影響，了解水庫中泥砂運移型態並執行適當的防淤措施為至關重要的課題 (Sivakumar, 2002)。然而，水庫泥砂運移為極其複雜的運動機制。自上游集水區由洪流夾帶而下的高濃度泥砂水流會在庫區形成異重流現象，若未能了解異重流之運動機制及排砂時機，多數泥砂將落淤至庫底並影響水庫的儲蓄能力。準確掌握異重流泥砂濃度在水庫管理有相當重要影響 (Halbe et al., 2013)。然而，異重流的運動機制相當複雜，想要有效並準確掌握泥砂濃度變化相當困難。因此，本研究利用機器學習技術 (神經網絡, NN) 進行異重流泥砂濃度預測。

要發展一個奠基於機器學習的預測模式必須具備足夠質量的測量數據。然而，颱風期間的實測資料通常不足，使用不完整的量測資料對於想構建可靠的預測模式是相對困難的。因此，本研究採用相對穩定的數值模式搭配實測資料優化數據質量 (Huang et al., 2019)，用來推估異重流運移行為及濃度變化。此外，SRH2D 已應用於石門水庫的小規模物理模型，並取得了合理的結果。

機器學習已成功應用於不同領域的即時預測。NNs 在過去幾年中也曾應用於大時間尺度 (日) 的泥砂濃度問題 (Zounemat-Kermaniet al., 2016; Malik et al., 2017)。然而，颱風期間短延時且激烈變化的泥砂濃度是否能夠準確預測為甚少被提出的課題。因此，本研究融合數值模式和機器學習，以克服缺乏高質量泥砂濃度測量數據所造成之困難。

本研究主要目的是提供颱風期間之半小時泥砂濃度的即時預報資訊。透過結合集數值模式和機器學習的兩階段預測方法。在第一階段採用 SRH2D 來研究異重流的運動行為及泥砂

濃度變化。上述具備時空變化關係的模擬成果可做為第二階段中機器學習法的輸入資訊。本研究利用石門水庫進行多場颱風預測，以證明本方法的預測性能。相關成果有望為水庫操作提供有效資訊。

## 貳、兩階段前期預警系統

為了實現半小時泥砂濃度預測的目標，本研究採用兩階段預測方法。在第一階段中，數值模式利用三場歷史颱風事件之實測數據進行檢驗。並得到異重流運移的時間-空間關係，再將此關係代入歷史颱風中 (2007-2016)，藉此獲得大數據以提供第二階段機器學習訓練之用。本研究在第二階段所使用的機器學習法為 MGSVM。相關建模參數符合柏拉圖最優解並確認為最優輸入組合。本研究所使用之數值模式及機器學習相關說明如下所示。

### 一、懸浮泥砂濃度運動機制模擬

本研究採用之 SRH2D 為二維層平均異重流模式 (Lai et al., 2015) 採用質量守恆方程和動量方程計算水理運動現象。在泥砂運移方面則採用非平衡輸砂方程和底床高度變化方程進行模擬。此外，沖淤潛勢可通過計算泥砂濃度結合運移方程來計算 (Engelund and Hansen, 1972; Hassanzadeh et al., 2011)。基於上述控制方程，可透過 SRH2D 模擬異重流運移速度、到達時間和泥砂濃度。最後可通過三個驗證的案例來計算異重流時空變化。相關成果再進一步提供予第二階段機器學習法使用並啟動半小時泥砂濃度預測機制。

### 二、半小時懸浮泥砂濃度預報

本研究所提出之預報模式結合 MOGA 與 SVM 方法流程，詳細過程說明如下：

(1) 染色體編碼 (Chromosome encoding)：遺傳演算法的首要工作即為將問題的搜尋空間解編碼成基因變數。編碼方式為實數 (real) 編碼。

(2) 產生初始解：染色體初始解大小定義為

$N_p$ ，且初始染色體同時也隨機產生。菁英組與暫時菁英組也同時設置並歸零。

(3)適合度值(Fitness value)：對於每個染色體，模式表現皆可計算出指標 CE 與 MAE，即為目標函數。每個染色體的分數值皆可由式(12)計算而得，式(12)即為適合度值。

(4)精英策略(Elitist strategy)：暫時精英組中的非超越解會被置入精英組中，而暫時精英組會重新設置。精英組內的解也會重新確認非超越解，而被超越解則被移除。

(5)終止測試(Termination test)：迭代次數為停止條件，當迭代次數滿足則演算法停止。反之，則到步驟 6。

(6)選取(Selection)：為創造新的子代，選取是演算法中的一個步驟。本文使用一般常見的輪盤法(roulette wheel method)。較高分數值的染色體較易從母體中被選取進入交配池。

(7)交配(Crossover)：交配即是用於創造一對子代染色體。全部交配池中的染色體皆被選擇，並藉由多點交配方式進行交配。

(8)突變(Mutation)：突變主要是為了尋找整體最佳解，它能引進新的基因以避免搜尋過程中過早收斂而陷入局部最佳解。

## 參、研究區域

### 一、石門水庫

本研究選擇大漢溪上游之石門水庫為研究地點。石門水庫為兼具發電、給水、灌溉之多功能水庫。石門水庫的相對位置如圖 1 所示。在經歷幾次嚴重的颱風事件後，石門水庫已經失去了 32.63% 的蓄水量。根據量測數據 (UGI, 2015)，年平均產砂量為 353 萬立方米。此外，上游集水區保育約能減少 11 萬  $m^3/yr$ 。圖 2 為石門水庫歷年之淤積泥砂量體圖。

### 二、監測資料

石門水庫的觀測資料相對完整。目前沿著庫區總共設置了 8 個觀測平台分別為：S32、

S24、S20R、S20L、S15、S12R、S12L 和 S07)，其相對觀測之水平及垂直點位如表 1 所示。壩前六個出水工則包含溢洪道、排洪隧洞，石圳、電廠改建防淤隧道、發電進水口、永久河道放流口。本研究採用石圳和發電進水口為預報點位，相關位置資訊如圖 3 所示。表 2 列出本研究使用的 2008 年至 2016 年的颱風事件。其中蘇迪勒、杜鵑及梅姬颱風用於驗證第一階段的數值模式，所有颱風事件則用於預報模式之訓練和測試。

## 肆、研究成果

表 3 比較蘇迪勒、杜鵑及梅姬颱風之異重流運移時間，其到達壩前的模擬及實測值誤差皆小於 0.5 小時，由此可知，模式可合理地描述異重流的時間變化量。

表 4 比較蘇迪勒、杜鵑及梅姬颱風之異重流尖峰濃度之模擬與實測誤差值。整體而言，異重流濃度沿運移距離呈現下降趨勢。比較壩前濃度之量測和模擬值分別為：6,387 和 5,623 ppm (蘇迪勒颱風)；5,037 和 5,375 ppm (杜鵑颱風)；7,385 和 7,141 ppm (梅姬颱風)。根據量測和模擬值的近似成果可知，模擬結果可用於推估石門水庫異重流運動在不同颱風事件的空間變化。

表 5 為第二階段的預報模式之性能評估表，在此利用不同指標比較不同出水工 (石圳、發電進水口) 進行預報成果評估。並了解在 0.5 到 3.0 h 皆有合理的成果，特別是在 0.5 到 1.5 h 能夠準確地預測濃度變化。本研究最後比較不同出水工的總排砂體積，相關的成果亦呼應表 5 之成果，在 0.5 到 1.5 h 能夠準確地預報排砂量體，相關結果如圖 4 所示。

## 伍、結論

本研究所提出之兩階段預測方法可提供颱風期間半小時泥砂濃度即時預報。在第一階

段，數值模式可合理地描述異重流的物理運動機制。此外，合理的時空變化模擬成果可被應用於第二階段之預報模式訓練及測試之用。在石門水庫進行實際應用後，可展示半小時預報模型的性能。

本研究成果清楚地表明，預報模式具有良好的性能，可以產生合理預報值。在此基礎上，對未來工作的重要意義可以歸納為以下兩點為：(1) 所提出的預報方法能夠進一步整合水庫操作方法，有效緩解颱風期間的泥砂淤積並有利於保持水庫的蓄水能力；(2) 本預報模式可應用於石門水庫壩前不同高度出水的預報工作。且獲得準確的 0.5 到 1.5 小時之前期預報成果，它將有助於有效地評估沉積物濃度的變化，並進一步提供排砂的更新操作。

### 參考文獻

- 1.Engelund, F., and Hansen, E. 1972. "A monograph on sediment transport in alluvial streams (3rd Edition)". Copenhagen: Technical Press.
- 2.Halbe, J., Pahl-Wostl, C., Sendzimir, J., & Adamowski, J. (2013). Towards adaptive and integrated management paradigms to meet the challenges of water governance. *Water Science and Technology*, 67(11), 2651-2660.
- 3.Hassanzadeh, H., S. Faiznia, M. S. Bajestan, and A. Motamed. 2011. "Estimate of sediment transport rate at karkheh river in Iran using selected transport formulas." *World Appl. Sci. J.* 13 (2): 376–384.
- 4.Huang, C. C., Lai, Yong. G., Lai, J. S., and Tan, Y. C. (2019) "Field and Numerical Modeling Study of Turbidity Current in Shimen Reservoir during Typhoon Events", *Journal of Hydraulic Engineering*. 145(5).
- 5.Lai, Y.G., Huang, J.C., Wu, K.W., 2015.

Reservoir turbidity current modeling with a two-dimensional layer-averaged model. *J. Hydraul. Eng.* 141 (12), 04015029(1–15).

- 6.Malik, A., Kumar, A., Piri, J., 2017. Daily suspended sediment concentration simulation using hydrological data of Pranhita River Basin, India. *Comput. Electron. Agric.* 138, 20–28.
- 7.Sivakumar, B. (2002). A phase-space reconstruction approach to prediction of suspended sediment concentration in rivers. *Journal of Hydrology*, 258(1-4), 149-162.
- 8.UGI, 2015, "Feasibility Study of Amouping Desilting Tunnel Project for Shimen Reservoir Summary Report", Northern Region Water Resources Office.
9. Zounemat-Kermani, M., Kişi, Ö., Adamowski, J., Ramezani-Charmahineh, A., 2016. Evaluation of data driven models for river suspended sediment concentration modeling. *J. Hydrol.* 535, 457 – 472.

圖與表

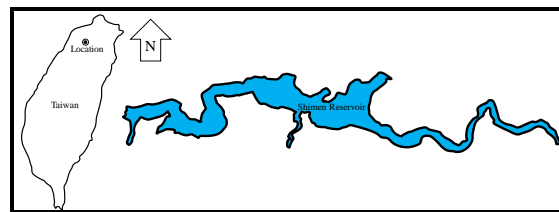


圖 1 石門水庫相對位置圖

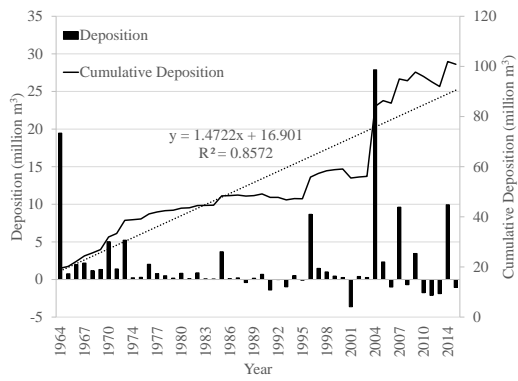
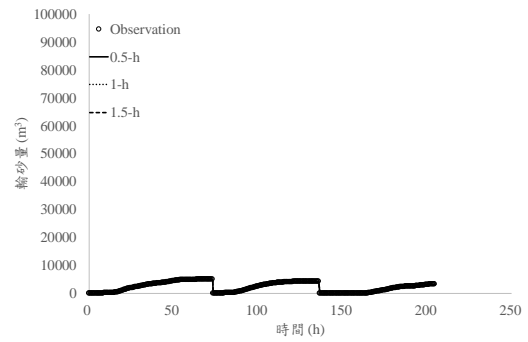


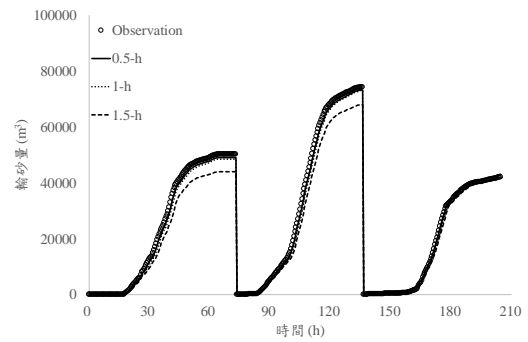
圖 2 石門水庫淤積量體圖



圖 3 壩前出水工相對位置圖



(a)



(b)

圖 4 (a)石圳；(b)發電進水口累積排砂量 (2016 颱風事件)

表 1 監測點位斷面及高程列表

位置 斷面	NO.1 (m)	NO.2 (m)	NO.3 (m)	NO.4 (m)	NO.5 (m)	NO.6 (m)	NO.7 (m)	NO.8 (m)
S24	242.0	238.0	234.0	231.0	228.0	225.0	-	-
S20R	243.0	241.0	240.0	239.0	236.0	233.0	230.0	227.0
S20L	242.0	240.0	239.0	236.0	233.0	230.0	227.0	224.0
S15	236.0	229.0	226.0	223.0	220.0	217.0	214.0	211.0
S12R	236.0	231.0	226.0	221.0	216.0	211.0	206.0	201.0
S12L	236.0	226.0	221.0	216.0	211.0	206.0	201.0	196.0
S07	235.0	225.5	220.5	215.5	210.5	205.5	200.5	195.5



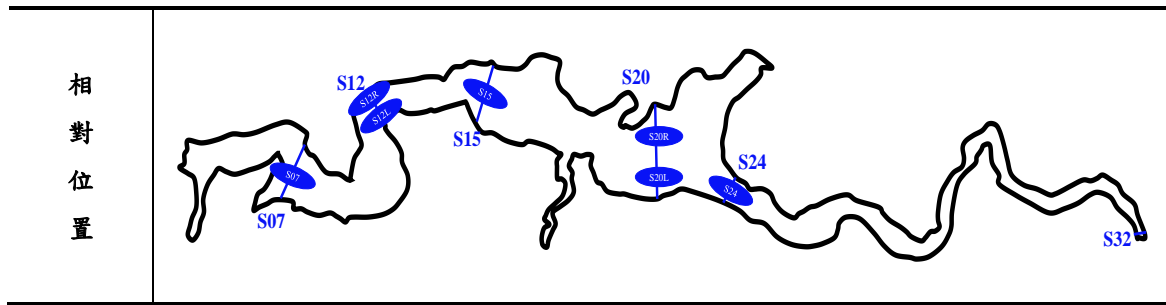


表 2 歷史颱風列表

年份	2008	2008	2008	2009	2012	2013	2013	2015	2015	2016
事件	鳳凰	辛樂克	薔蜜	莫拉克	蘇拉	蘇力	潭美	蘇迪勒	杜鵑	梅姬
總入流量 ( $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ )	123.6	945.5	271.7	227.9	425.4	237.2	165.3	247.1	196.0	248.6
總出流量 ( $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ )	120.0	619.3	201.4	143.3	425.6	212.0	150.6	211.27	165.2	258.1
尖峰流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	2,039	3,447	3,292	1,837	5,588	5,457	2,412	5,634	3,802	4,267
總入砂量 ( $10^6 \text{ m}^3$ )	0.66	7.69	1.52	0.68	2.64	3.36	1.19	0.91	0.69	1.30
總出砂量 ( $10^6 \text{ m}^3$ )	0.08	1.06	0.23	0.11	0.42	1.17	0.50	0.33	0.26	0.26

表 3 異重流運移時間比較表

斷面	累距	蘇迪勒		杜鵑		梅姬	
		量測	模擬	量測	模擬	量測	模擬
S20-S15	7,700 - 5,800	3	3.64	-	4.4	3.5	4.16
S15-S12	5,800 - 4,200	1.5	1.15	1	0.98	1	1.29
S12-S07	4,200 - 1,200	2	1.74	0.5	0.79	1.5	1.27

表 4 異重流濃度變化比較表

斷面	累距	蘇迪勒		杜鵑		梅姬	
		量測	模擬	量測	模擬	量測	模擬
S20	7,700	11,100	6,861	-	6,404	6,562	7,197
S15	5,800	4,500	7,599	3,647	7,613	5,042	10,550
S12	4,200	6,850	6,030	3,112	6,098	6,010	7,691
S07	1,200	6,387	5,623	5,037	5,375	7,385	7,141

表 5 石圳與發電進水口之評估指標表

延時 (h)	石圳			發電進水口		
	<i>CE</i>	<i>CC</i>	<i>CSI</i>	<i>CE</i>	<i>CC</i>	<i>CSI</i>
0.5	0.994	0.997	70%	0.992	0.996	48%
1	0.983	0.991	50%	0.975	0.987	34%
1.5	0.975	0.987	45%	0.963	0.982	29%
2	0.968	0.984	39%	0.952	0.976	22%
2.5	0.960	0.980	37%	0.938	0.969	18%
3	0.952	0.976	31%	0.924	0.962	17%

## 地下水補注敏感區之補充調查成果：以臺中盆地為例

林榮潤<sup>1</sup>、林燕初<sup>2</sup>、周柏儀<sup>3</sup>、柯建仲<sup>4</sup>、梁嘉宏<sup>5</sup>、賴慈華<sup>6</sup>、黃智昭<sup>7</sup>

### 摘要

為確保地下水資源之永續利用，經濟部中央地質調查所與水利署過去廿年來已投入相當多經費與人力建置平原區觀測井網，蒐集水文地質及地下水位和水質基本資料，除了獲得基本水文地質架構及掌握主要海相與陸相的沉積環境分布範圍，也確認臺灣平原區九大地下水資源區之蘊藏潛能。然而，因過去調查多偏重於區域的整體地下水資源蘊藏量推估，對於平原區各重要地下水補注區之淺層水文地質架構與水力特性研究資料仍相當不足，為實質活化臺灣整體水資源的利用，本研究執行地下水補注敏感區之補充水文地質調查與試驗，以提供後續地下水庫活化與資源再利用之詳細評估，提高水資源管理及經營效能。以 2015 與 2018 年度臺中盆地為例，進行了一系列的水文地質補充調查，包括：地質鑽探、井測試驗、岩心紀錄與判釋、鑿井作業、抽水試驗等，並繪製鑽孔地質剖面圖，以掌握平原區各重要地下水分區之水文地質架構與地下水流動特性。此外，有鑑於單點的補充調查資料仍可能不足，本研究創新嘗試各項多尺度的調查成果，包括：遙測技術、地下水訊號模擬、地下水模式與水質檢測等方法，進而探討臺中盆地的地下水層之特性與補注邊界劃設之可行性。目前透過補充調查成果及相關資料佐證，已提出臺中盆地地下水補注敏感區之劃分邊界結果。

**關鍵字：**水資源、地下水補注區、臺中盆地

---

<sup>1</sup> 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心正研究員

<sup>2</sup> 經濟部中央地質調查所資源地質組技士

<sup>3</sup> 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員

<sup>4</sup> 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員兼組長

<sup>5</sup> 經濟部中央地質調查所資源地質組技佐

<sup>6</sup> 經濟部中央地質調查所資源地質組科長

<sup>7</sup> 經濟部中央地質調查所主任秘書

## 壹、前言

地下水為臺灣水資源重要來源之一，根據經濟部水利署統計，目前臺灣地區地下水供水為水庫供水量 1.3 倍(經濟部水利署，2010)。有鑑於地下水補注區為地下水之水源地，行政院環保署於 1998 年提出國家環境保護計畫，明訂應調查研擬地下水天然補注區範圍，建立補注區水質保護及污染管制措施。然而地下水系統埋藏於地下，在缺乏水文地質基本資料及長期地下水水質和水位觀測資料的情況下，地下水天然補注區範圍之劃定及保育工作是目前亟需進行的重要課題。

經濟部中央地質調查所(以下簡稱地調所)自 1992 年起開始推動「臺灣地區地下水觀測網整體計畫」，全程 3 期共 17 年，投入大量人力與物力，建置觀測井網及蒐集水文地質及地下水位和水質基本資料。而地下水重要補注區範圍的界定，需先瞭解各區之地下水資源現況及掌握其地下水位的變化、水文地質架構、水文地質參數、補注來源、水質地化背景及地下水流模式等，進而評估出主要補注區之範圍。未來再配合適切的水資源管理調配策略，除了可確保穩定地下水補注量外，亦可避免地下水遭受汙染，從而維持地下水質與量的永續經營。

為補足精確的地下水補注邊界，需明確掌握沖積平原或盆地的阻水層分布情形。本研究以臺中盆地為例，進行主要地下水補注區之補充水文地質調查作業。透過新增 7 處地質鑽探與岩心紀錄分析，以建立鑽井位置之地下地質剖面；此外，於盆地南北兩側的豐洲與草屯站及烏溪沿岸新增的福田站與嘉興站，進行抽水試驗。整合上述區域地質資料與水文地質特性，來瞭解臺中盆地地下水水文地質特性與補注模式。

## 貳、研究區域

臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊之交界帶，其板塊運動造成平原區面積約為全島的三分之一。於重要地下水資源蘊藏區中，地下水分區可劃分為：臺北盆地、桃園中壢台地、新苗地區、臺中地區、濁水溪沖積扇、嘉南平原、屏東平原(包括恆春平原)、蘭陽平原、及花東縱谷地區。本研究區以臺中地區為例(圖 1)，茲將區域概況說明如下：

### 一、地形與地理概況

臺中盆地位於后里、大肚山與八卦山等台地及豐原丘陵之間，由大甲溪與烏溪聯合沖積而成，主要可分為豐原、太平與烏溪沖積扇，為臺灣西部晚新生代沉積盆地的一部份。地勢方面，臺中盆地南北兩側較高，皆順著河流往盆地中心而趨緩，其南北縱長約 45 公里，東西向寬度於北端豐原附近約為 10 公里，中央近烏日匯流口至太平約為 15 公里，係盆地內最寬之處，而南端逐漸銳減，至濁水溪北岸之名間鄉則約為 1 公里。

### 二、水文與氣象

根據中央氣象局氣候年報(2013)，當年度臺中年平均氣溫為 23.6 度，較當地的氣候平均值 23.3 度高 0.3 度。其中 2 月平均氣溫 19.4 度，較氣候平均值 17.3 度高 2.1 度，12 月平均氣溫 17.1 度，較氣候平均值 18.1 度低 1 度，為當年度與氣候值差異最明顯之月份。年總雨量為 2,133 毫米，較氣候平均值 1,773 毫米多 360 毫米。其中 8 月總雨量 763 毫米，比氣候平均值 302 毫米多 1.5 倍(461 毫米)；6 月總雨量 72.6 毫米，比氣候平均值 331.2 毫米少 78.1%(258.6 毫米)，為當年度與氣候值差異最明顯之月份。

### 三、水文地質架構

未固結岩層可依據岩性歸納成：(1)礫石層、(2)極粗、粗及中砂層、(3)細及極細砂層、(4)粉砂、泥及黏土層等四類含水層。前三種為

良好的地下含水層，而粉砂、泥及黏土層透水性較差，為一阻水層。依據臺中盆地地質鑽井之地層剖面圖(圖 2)，盆地北側及南側之含水層主要均由礫石所組成，無明顯之阻水層存在。另根據水利署(2011)分層觀測井之水位記錄資料可知，盆地北側之觀測站，包括四張犁、啟聰及中山，及盆地南側的新街等觀測站，地下水水位高程及變動特性一致，故無明顯之分層效應。因此在盆地南側及北側均可以視為單層之水文地質構造。而盆地中間之霧峰及烏日有較明顯及較厚的泥層出現，近烏溪出八卦山台地及大肚山台地之局部區域有較厚之泥層，形成一自由含水層及兩個拘限含水層，且有自噴的現象，而東側霧峰一帶，泥層之數量及層厚都增加，亦有兩層阻水層存在。

#### 四、水力參數與地下水流動特性

地下水之流向主要由盆地周緣之大甲溪、烏溪及貓羅溪，向大肚山脈及八卦山脈間之隘口流動。水力坡降在豐原沖積扇約為 0.00682、太平沖積扇北面與南面分別約為 0.00545 與 0.00513、及烏溪沖積扇北面與南面分別約為 0.005 與 0.0025，而筏子溪北段與南段分別約為 0.00606 與 0.0133，故整體顯示盆地北側的水力坡降較南側大，且在筏子溪南段有一明顯的高水力梯度變化之區域。另根據各站井的水力參數可知，臺中盆地淺層的含水層之水力傳導係數高，透水性佳，約每秒  $6.18 \times 10^{-3}$  至  $2.0 \times 10^{-5}$  公尺之間。深層之水力傳導係數之變異則較大，整體而言盆地內側透水性仍相當良好，而盆地邊緣透水性則明顯較差。

### 參、研究方法

本研究流程如圖 3 所示，主要分為：(1)資料蒐集、(2)水文地質鑽探、調查與抽水試驗，以及(3)地下水層特性及補注邊界評估等階段。各調查與試驗工作項目可提供地層對比與水力參數分析，並蒐集臺中盆地既有及本研究所得

的水文地質資料，建構出完善的水文地質剖面與架構圖。此外，本研究創新整合遙測技術、地下水訊號模擬、地下水模式與水質檢測等方法，進而分析與評估出臺中盆地的地下水層特性，以提出地下水補注邊界之成果。

#### 一、資料蒐集

除了基本圖資之外，本研究蒐集了臺中盆地既有鑽探資料、地下水位、水質與水力參數等，進而綜整本次補注調查成果(財團法人中興工程顧問社，2015;2018)，繪製臺中盆地地下水地質剖面圖及評估地下水層特性與補注潛勢，以劃設適當的補注邊界。

#### 二、水文地質鑽探、井測與抽水試驗

根據上述資料蒐集與評估，初步瞭解臺中盆地阻水層之分布範圍，故於潛在的地下水補注區邊界中，進行共 7 處地質井(樹子腳、田寮、四德、東園、溪尾、福田、嘉興)之鑽探、取樣、岩心紀錄與孔內地球物理探測分析工作，以及 4 站(豐洲、草屯、福田、嘉興)雙井抽水試驗，進行分級、定量抽水試驗。其成果可提供岩心地層對比、井測數據與地層關係、及補注邊界內外的水力特性之差異。

#### 三、創新技術整合與評析

有鑑於單點的補充調查資料仍可能不足，故本研究嘗試各項多尺度的調查成果，進而探討補注邊界劃設之可行性，茲將各項調查方法概述如下：

##### (一)地下水水質

江崇榮等人(2005)指出透過地下水中硝酸鹽氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )濃度的檢測可做為釐定補注區範圍的指標，若以硝酸鹽氮濃度大於 0.5mg/l 為臨界指標，地下水硝酸鹽氮高濃度之區域為易被污染區，也可視為是地下水快速補注區，陳文福等人(2010)認為地下水金屬離子濃度與地下水之氧化還原狀態有關，在氧化狀態的含水層地下水的鐵濃度很低(通常 < 0.1 mg/l)，而當地下水中的溶氧隨著時間推移逐漸耗盡，氧化鐵

因微生物還原作用轉成二價鐵，即導致地下水中鐵濃度升高。故本研究蒐集上述兩項水質成果，進行評估。

#### (二)地下水流動模擬分析(HYDRUS)

透過地下水數值模式可檢視高水位與高水力坡降分布區域，用以判定本區沖積扇頂的地下水來源補注區。本項分析工作採用 HYDRUS-2D/3D 數值模式進行全區地下水位檢核與地下水流動態模擬，並繪製出研究區域的地下水流網。

#### (三)Visual Signal 時頻分析

地下水位的觀測可反應水文循環、降雨補注及地下水含水層系統特性，本研究採用逸奇科技所研發 Visual Signal 時頻分析軟體之 EarthScience 模組及抽補強度分析模組，將影響地下水系統的因子：降雨、自然補注、人為抽水與自然流失等，以及各項已知條件包含地下水位、降雨強度與抽水強度等數據輸入模式中，由地下水系統模型方程式推得自然流失係數、降雨補注轉換係數及抽水轉換係數參數。

#### (四)遙測成果與 WetSpss 模式

應用遙測技術進行區域內的地下水補注熱點之判釋，透過影像處理與地表地貌分類，及相關水文因子條件分析，可獲得非都市發展之地下水補注區。其次，使用具物理概念的 WetSpss 水收支平衡模式，進行區域的地下水補注率評估。最後，結合上述兩項成果，提出可行的高潛勢補注區之範圍。

#### (五)地下水補注量估算

依據 Su(1994)與 Rutledge(2000)所提之地下水位變動法(Water-Table Fluctuation Method, WTF)，利用地下水位變化結合現地抽水試驗獲得之比出水率( $S_y$ )，進一步估算出地下水單位面積補注量(表 1)。

$$r = S_y \times \Delta H \quad (\text{式 1})$$

上式中  $r$  為單位面積補注量 [ $L^3/L^2$ ]， $S_y$  為比出水率 [ $L^3/L^3$ ]，而  $\Delta H$  為地下水位變化量 [ $L$ ]。

#### 四、地下水層特性及補注邊界評估

綜合上述調查成果，本研究提出一套具整合性及系統性的多元評估方法，建置地下水補注邊界劃分流程，如圖 4 所示。其邊界劃分判定及驗證可分為地質與地下水特性評估，以進行綜合分析與劃設等工作，完成地下水補注邊界劃分。最後，則依據水文地質架構進行邊界修訂與確定。

### 肆、結果與討論

#### 一、地下水層特性與補注邊界判定

首先，透過 HYDRUS-2D/3D 數值模式進行臺中盆地的地下水位檢核與地下水流動態模擬，而為了觀察高地下水位與高水力坡降範圍來檢視地下水主要補注潛勢區，本研究於 2014 年 7 月 24 日麥德姆颱風事件襲台後所造成的地下水位變動為例繪製臺中盆地地下水位等水位線(圖 5)可知，臺中盆地北側豐原沖積扇頂區地下水頭最高，如豐洲站與四張犁站之間水力坡降估計約為 0.006m/m，說明該區段地下水流動路徑與空間較充裕，降雨至地表後可快速補注含水層；而自四張犁站向南至霧峰站之間水力坡降估計約趨緩至 0.0032m/m，此說明地下水流動至此已通過豐原沖積扇頂區補注邊界。相對地盆地南側新街站至草屯站之間水力坡降估計約為 0.0037m/m，其水力梯度變化並不顯著。

根據岩相與沉積環境判釋，可明顯地判釋初步的補注邊界位於烏日、新增鑽孔、及太平與霧峰之外圍處，如圖 6 所示。該區域屬於陸相大甲溪沖積的石英礫石與砂質礫石為主，偶夾薄層細礫砂土及一或兩層厚層泥層，岩相有：礫岩相的砂質顆粒支持礫岩相(Gs)、砂岩相厚層砂岩相(Sm)、泥岩相平行紋理泥岩向(Mp)、塊狀泥岩相(Mm)、及砂泥互層相砂泥薄互層相(SMt)，屬於瓣狀河平原沉積環境的 Gs 岩相組合。因此，根據上述地下水流場模擬分析產製的地下水流網，臺中盆地地下水可快速

補注的區域大致以水位高程 52.5m 做為邊界，約座落於地表等高線 60m 處，此邊界上游地下水位高程低於地表高程，而邊界下游地下水位高程則高於地表高程，顯示有受壓含水層之特性，此現象可由樹子腳等站鑽探有湧水情形作呼應。

## 二、補注邊界位置驗證

透過行政院環境保護署全國環境水質監測網地下水質測站等 16 處測站及水利署臺中地區分層觀測井地下水質資料之硝酸鹽氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )與鐵離子(Fe)兩種地下水水質檢測指標，進行補注區判釋與驗證之工作。從上述初步的補注邊界空間分布，兩項水質皆符合前人研究之論述。

另由單位面積補注量估計結果(表 1)來看臺中盆地北側豐原扇頂區的補注效益較顯著，單位面積補注量達 2.60m，而臺中盆地南側烏溪扇頂區補注效益則較低，其單位面積補注量約為 1.12m，不及北側豐原沖積扇的一半。整體而言，豐洲與草屯站位於初步補注邊界上游處，其北段的地下水補注量較為豐富。

而蒐集式 2 參數，輸入 WetSpss 模式計算(圖 7)，發現臺中盆地補注率分布情形係以盆地北半部年補注率較大。另搭配遙測影像判釋(圖 8)地下水補注區之成果可知，包括：豐原、旱溪上游區段、大里溪上游區段、廓子溪與頭汴溪交會處、烏溪草屯段與貓羅溪上游等，亦即豐原沖積扇、太平沖積扇與烏溪沖積扇等地，為臺中盆地地下水補注率效應相對較強的區域。該區域亦分布在初步補注邊界之上游，亦驗證此補注邊界之可行性。

$$R_v = P - I - S_v - T_v \quad (\text{式 2})$$

其中，P 代表季節性平均降雨量[ $\text{LT}^{-1}$ ]、I 代表植被截流量[ $\text{LT}^{-1}$ ]、 $S_v$  代表植被下的地表逕流量[ $\text{LT}^{-1}$ ]、 $T_v$  代表實際蒸散量[ $\text{LT}^{-1}$ ]而  $R_v$  代表地下水補注量[ $\text{LT}^{-1}$ ]。

## 三、地下水補注邊界劃分成果

透過上述水力梯度與水文地質架構所初步

劃設的補注邊界，以地下水水質與地下水補注量分析、以及空間水力參數評估與補注潛勢分析，皆驗證該補注邊界之上游符合地下水補注之特性。因此，依據初步的補注邊界，使用水文地質架構幾何概念評估方法，進行補注區邊界修訂(圖 9)，以符合整體水文地質架構特性。

## 伍、結論

本研究除了彙整既有資料之外，透過新增的 7 處地質細部判釋成果與 4 站的抽水試驗，以及綜合各項新增的多尺度調查成果，初步先依據岩心判釋出補注邊界，再透過水質、水量及水文模式等成果驗證，進而依據水文地質架構與空間分布修正出適當的地下水補注邊界。其成果顯示，臺中盆地地下水補注邊界可分為南北兩段：北段約於南屯區沿著地形等高線 45m 往東南方，經過樹子腳與田寮北側於大里國小附近，轉折東北方沿著頭汴坑溪於太平與大里站之間至麓山帶；南段則約於八卦山東側彰化芬園鄉沿著地形等高線約 55m，往東北方沿著烏溪沖積扇地形起伏至臺中霧峰區麓山帶。在地下水管理方面，冀期符合地質法規，讓臺中盆地地下水補注區能確保有穩定地下水補注量，避免地下水遭受汙染，以達到地下水質與量的永續經營。

## 參考文獻

1. Rutledge, A.T., (2000). Considerations for use of the RORA program to estimate ground-water recharge from streamflow records. U.S. geological survey open-file report 00-156, pp.44.
2. Su, N., (1994). A formula for computation of time-varying recharge of groundwater, Journal of Hydrology, 160, pp.123-135.
3. 交通部中央氣象局 (2013), 「102 年觀測年報」, 交通部中央氣象局。

- 4.江崇榮、陳瑞娥、賴慈華、黃智昭 (2005),「濁水溪沖積扇地下水區之補注水源評估」,第二屆資源工程研討會論文集,第86-91頁。
- 5.財團法人中興工程顧問社(2015),「地下水水文地質與補注模式研究-104年度地下水主要補注區補充地質調查」,經濟部中央地質調查所。
- 6.財團法人中興工程顧問社(2018),「水文地質調查及觀測井建置北段山區及地下水補注敏感區(1/4)」,經濟部中央地質調查所。
- 7.陳文福、呂學諭、劉聰桂 (2010),「台灣地下水之氧化還原狀態與砷濃度」,農業工程學報,第56卷,第2期,第57-70頁。
- 8.經濟部水利署 (2010),「臺灣地區水資源開發綱領計畫」,經濟部水利署網站資料 (<http://www.wra.gov.tw>)
- 9.經濟部水利署水利規劃試驗所 (2011),「臺中盆地地下水資源利用調查評估總報告」,經濟部水利署水利規劃試驗所。

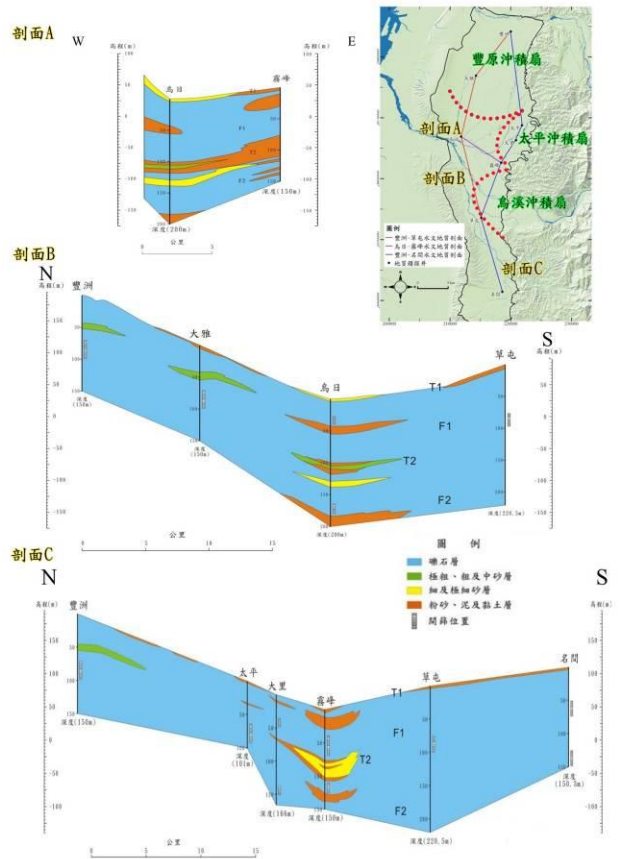


圖 2 臺中盆地水文地質剖面圖

圖與表

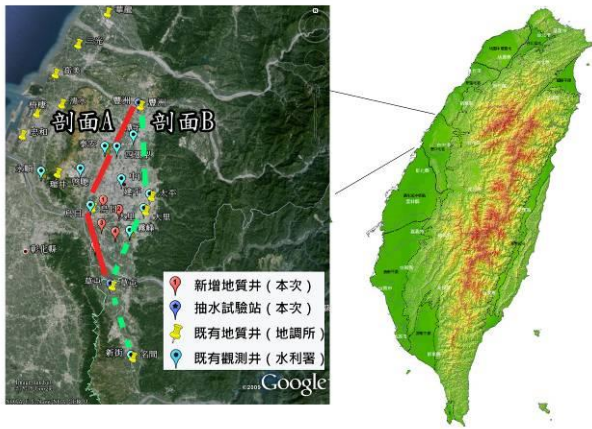


圖 1 臺中盆地與場址分布圖

表 1 抽水試驗結果估算之單位面積補注量

站名	比出水率 (S <sub>y</sub> )	地下水位變化量 (ΔH) [m]	單位面積補注量(r) [m]
豐洲	0.192	13.54	2.60
草屯	0.173	6.48	1.12

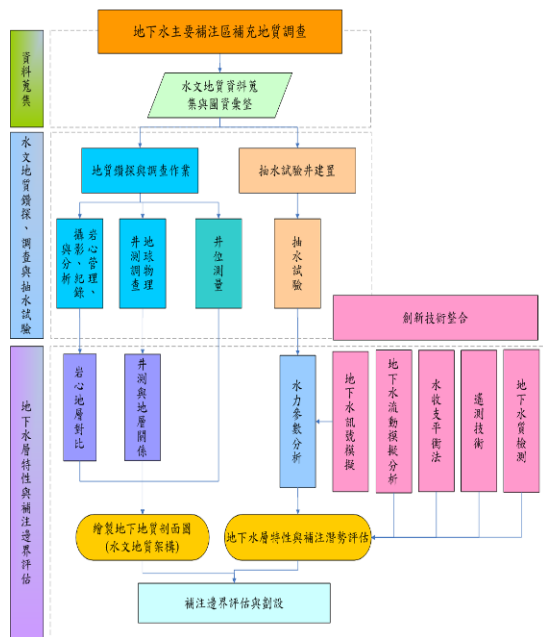


圖 3 研究方法與流程圖



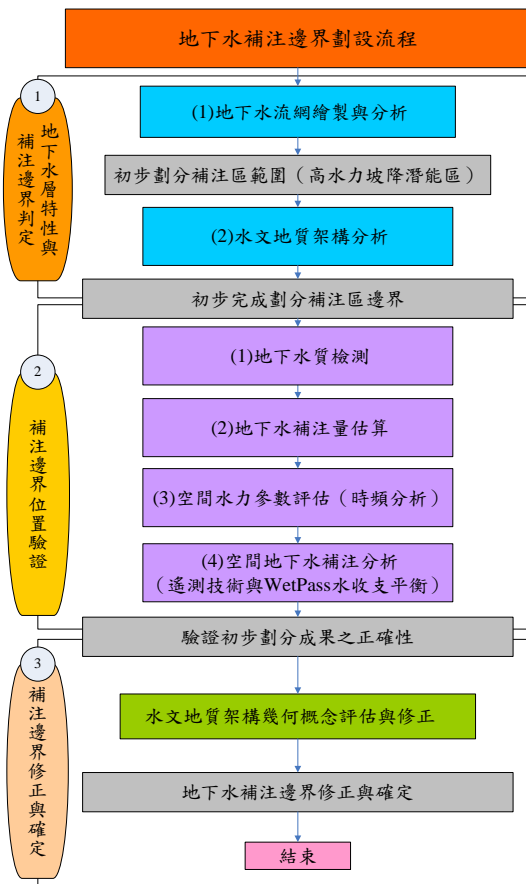


圖4 創新整合多尺度調查成果應用於地下水補注區之劃設流程

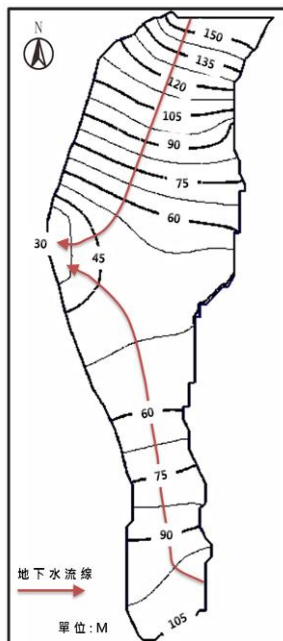


圖5 颱風襲台後臺中盆地地下水位等水位線圖

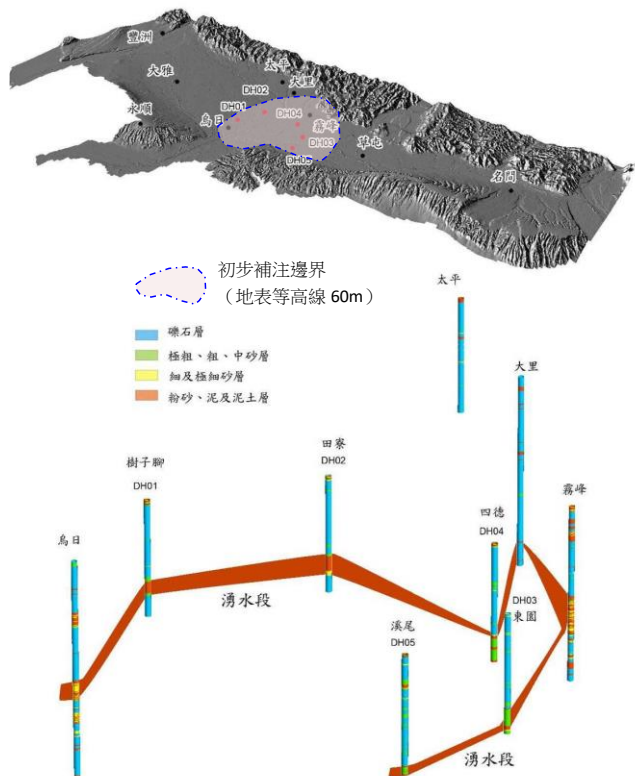


圖6 三維地質柱狀圖與阻水層分布圖

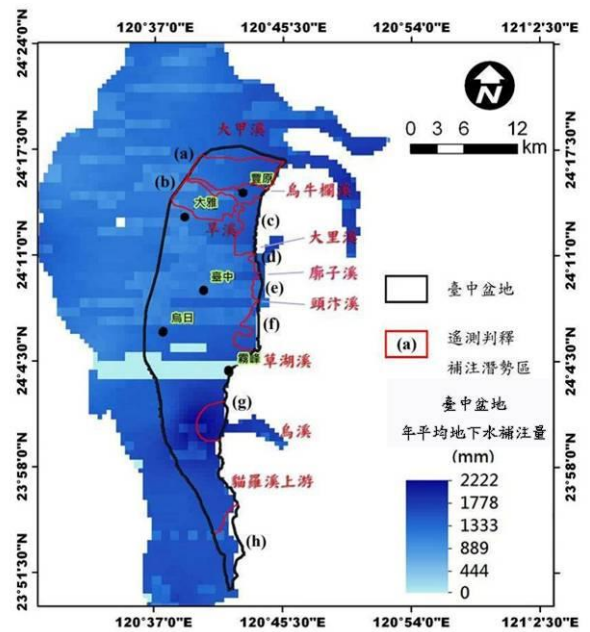


圖7 WetSpss地下水年補注率與遙測判釋成果

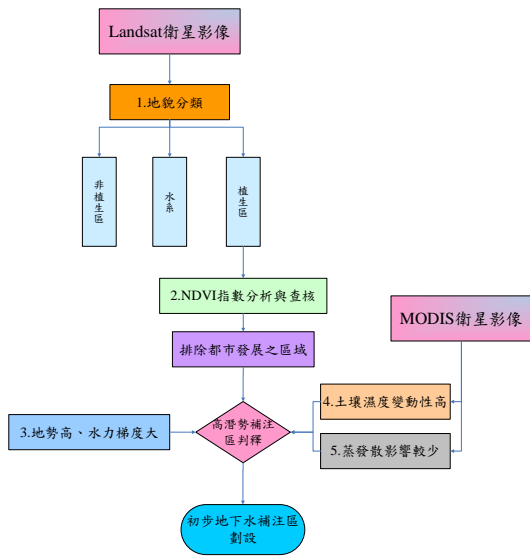


圖8 遙測技術應用於高潛勢補注區判釋流程

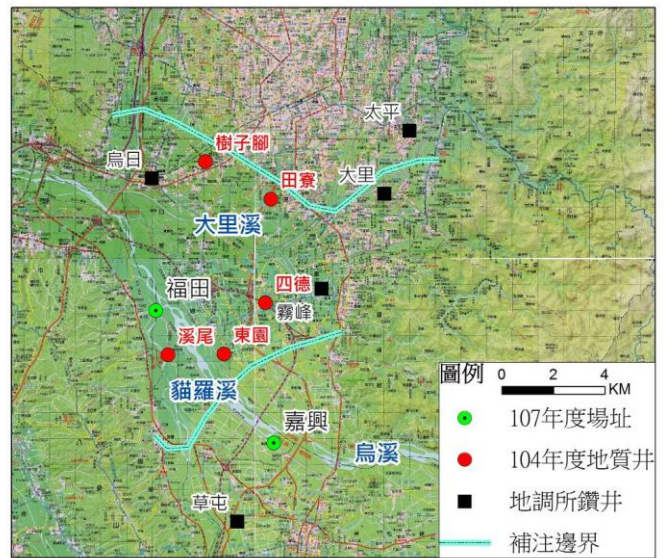


圖9 臺中盆地地下水補注區邊界之劃分成果

