



第二十四卷第一期 2022.7

ISSN 1606-2604

行政院新聞局局版

北市誌第2415號

發行人：賴建信

發行所：中華水資源管理學會

總編輯：陳清田

副總編輯：張煜權

出版委員會委員：王藝峰、林國華
毛振泰、李丁來
張良正、林鎮洋
陳榮松、陳憲宗
林昆賢、陳榮福
陳春宏、簡昭群

本期企劃：陳憲宗、簡昭群

李丁來、簡振源

會址：408204台中市南屯區

黎明路二段501號地下室

電話：(04) 22501383

22501642

傳真電話：(04) 22501608

電子信箱：cwrms.org@gmail.com

會刊下載網址：



目錄

特別企劃

- 水庫集水區自主健康管理芻議 1
陳映竹副教授、林鎮洋特聘教授

專論

- 專題1 提升台灣水資源韌性之乾旱管理 11
游保杉名譽教授、曾宏偉副研究員
楊道昌研究員、郭振民研究員
- 專題2 水庫蓄豐濟枯的運轉機制 21
周乃昉兼任教授、吳嘉文兼任助理教授
- 專題3 水庫操作概念探討 27
游景雲教授
- 專題4 水庫集水區非點源污染削減策略 45
劉秀鳳局長、何嘉浚副教授、陳起鳳副教授
林怡萱博士生、李仲卿課長

其它論文

- 論文1 海淡水源對南部地區供水穩定性探討-以臺南海水淡化廠為例 59
許秀真正工程司、吳哲全副工程司
- 論文2 大台北地區防災地下水井建置工程實務探討 71
陳維政副總隊長、林郁欽股長
鄧森隆三級工程師、吳佳諺四級工程師

水庫集水區自主健康管理芻議

國立臺北科技大學土木工程系所/陳映竹副教授

國立臺北科技大學土木工程系所/林鎮洋特聘教授

背景介紹

近年來由於臺灣經濟持續快速發展，各標的用水量增加，為滿足需水成長，政府改以「開源、節流、調度、備援、管理」新思維因應。對於已有之 95 座水庫，經濟部於民國 92 年 12 月 3 日訂頒「水利建造檢查及安全評估辦法」，本文於水庫安全無虞前提下，提出水庫集水區自主健康管理的作法。

水庫集水區保育係需要長期且持續進行之工作，目前各水庫集水區主要面臨之問題為土砂淤積及水質污染，故水庫集水區健康與否之評斷，可簡化成土砂及水質兩大面向，其中土砂涉及水庫淤積程度(土砂問題)，水質則多以優養化論之。因此，水庫集水區保育診斷指標(以下簡稱健檢指標)，包括「土砂診斷」及「水質診斷」二大面向，如圖 1 所示，其中「土砂診斷」指標包含森林覆蓋率、崩蝕深度、懸浮固體(SS)、淤積率四項，「水質診斷」指標包含點源污染處理率、農業非點源污染潛勢及卡爾森指標/水質指數(CTSI/WQI)三項。

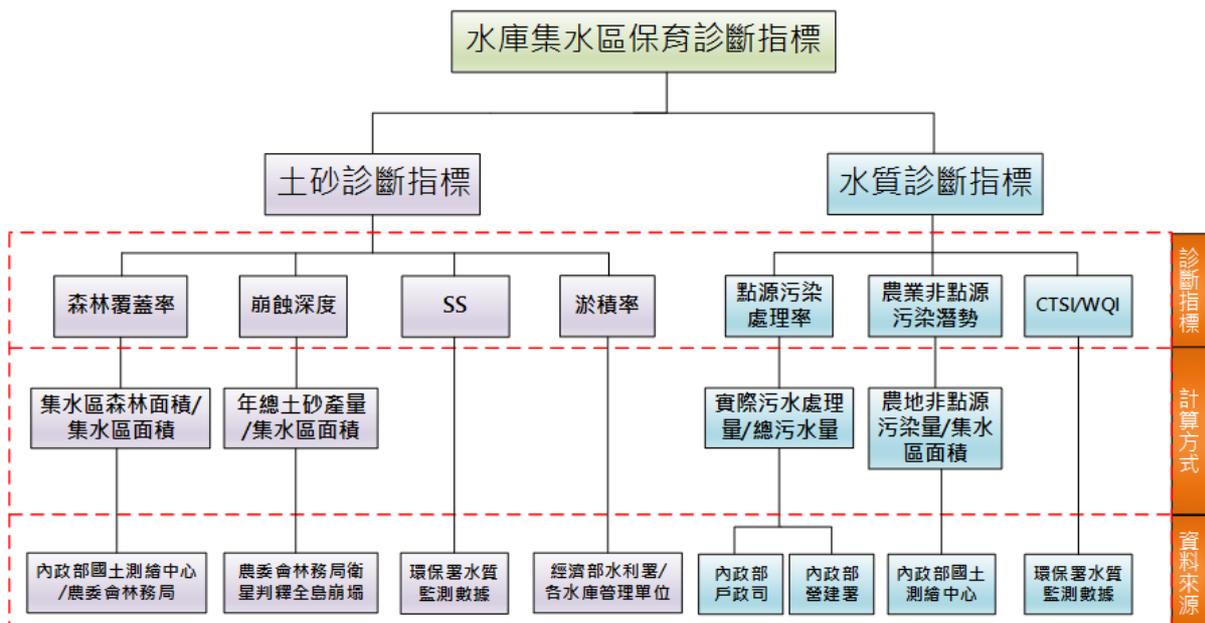


圖 1 水庫集水區保育診斷之七項指標

水庫集水區保育診斷指標（健檢指標）

「土砂診斷」指標中的「森林覆蓋率」、「崩蝕深度」可反映源頭產生土砂之原因，而「懸浮固體（SS）」、「淤積率」則為其結果，其中「淤積率」可謂最具代表性之綜合指標。各指標間仍存在相互影響關係，若森林覆蓋率減少且崩蝕深度增加，表示應加強土地管制及水土保持；若森林覆蓋率無明顯變化但崩蝕深度增加，表示應加強人為土地利用的管制問題（例如道路及建築物）。舉例來說，崩蝕深度較高之水庫集水區，其水中懸浮固體（SS）相對會較高，水庫淤積趨勢亦會較高，因此可利用崩蝕深度變化研判水庫集水區之山坡地或河岸之水土保持是否得宜。懸浮固體（SS）濃度的變化趨勢與前述之崩蝕深度及森林覆蓋率有其關聯性，若三項指標同時劣化，表示土砂應來自於上游的崩塌，此時應加強上游之崩塌地治理；但若僅森林覆蓋率與懸浮固體（SS）濃度劣化，表示土砂應來自於土壤表層之沖蝕，此時應加強上游之水土保持；一旦只有懸浮固體（SS）濃度上升，則表示土砂應來自於河道的侵蝕或淤積泥砂的運移，應加強河道治理。淤積率為表示水庫淤積之情況，由於水庫淤積率與森林覆蓋率、崩蝕深度及水庫排砂運作等息息相關，可採用歷年水庫淤積率變化情形，研判水庫淤積趨勢與上游集水區土砂保育工作執行之良窳，並檢討相關的執行策略是否須修正或強化，故淤積率是水庫集水區內土砂問題的綜合診斷指標。

「水質診斷」指標中，則以「CTSI/WQI」為代表性之綜合診斷指標，其受「點源污染處理率」、「農業非點源污染潛勢」兩項指標影響。若水庫或河川之CTSI/WQI指標不佳，應更進一步追蹤其污染來源，其中點源污染主要指水庫集水區內因生活、工廠、觀光及畜牧等固定排放口所排放廢（污）水。目前法規大都已要求位於水庫集水區內之工業、觀光及有規模之畜牧等列管事業均應設置污水處理設施，若一般污水處理設施去除營養鹽成效不佳，可改以設置去氮除磷合併式淨化槽、多層複合濾料（MSL, Multi-soil Layering）水質淨化系統等設施以加強營養鹽的去除。除了點源污染之外，非點源污染來源難以掌握故管理不易，水庫集水區之非點源污染源包括森林、社區、道路、農業等用地，營養鹽經由降雨沖刷後流入水庫，建議集水區內人為開發用地可設置非點源污染削減設施，例如人工濕地、植生滯留槽等最佳管理措施（BMPs），及實施加強合理化施肥等管理措施。CTSI/WQI為水質表現之綜合診斷指標，其中環保署對於水庫水質的監測指標以卡爾森指標（CTSI）

表示，另河川(堰、壩)之水質評估，經分析後則建議採用水質指數(WQI)，因其較RPI指標更能反應出水體水質狀況。

水庫分類

如圖2所示，全國95座水庫可經由地理位置分為本島和離島的水庫，本島水庫再依主要功能區分為公共給水、發電及灌溉水庫三類。各類水庫所適用健檢指標略有不同，公共給水用途之本島水庫，因用途對於水質的要求較高，建議適用七項診斷指標判定水庫集水區健康良窳，如新山、西勢、翡翠、石門水庫等共計33座。發電及灌溉用途之水庫建議適用「森林覆蓋率」、「崩蝕深度」、「淤積率」三項診斷指標，發電及灌溉水庫數量分別為20座及12座，但部分發電用途之水庫尾水供應公共給水，如阿玉壩之供水標的雖為水力發電，發電後的尾水配送至直潭壩供應公共給水，故稱之為間接供應公共給水之水庫合併有發電功能，此類水庫將併入公共給水水庫進行整體評析，因此剩餘單一發電、灌溉功能之水庫分別為5座及11座，如圖3所示。離島水庫建議適用「點源污染處理率」、「非點源污染處理率」、「CTSI」三項診斷指標，但離島水庫因地理環境及氣候條件因素，水庫長期處於優養狀態，使用CTSI並不能有效表現水質變化趨勢，故離島水庫水質診斷指標新增COD達成率指標，以COD濃度為25mg/L作為標準(飲用水水源水質標準)計算達成率，可較有效評估離島水庫水質之變化趨勢。

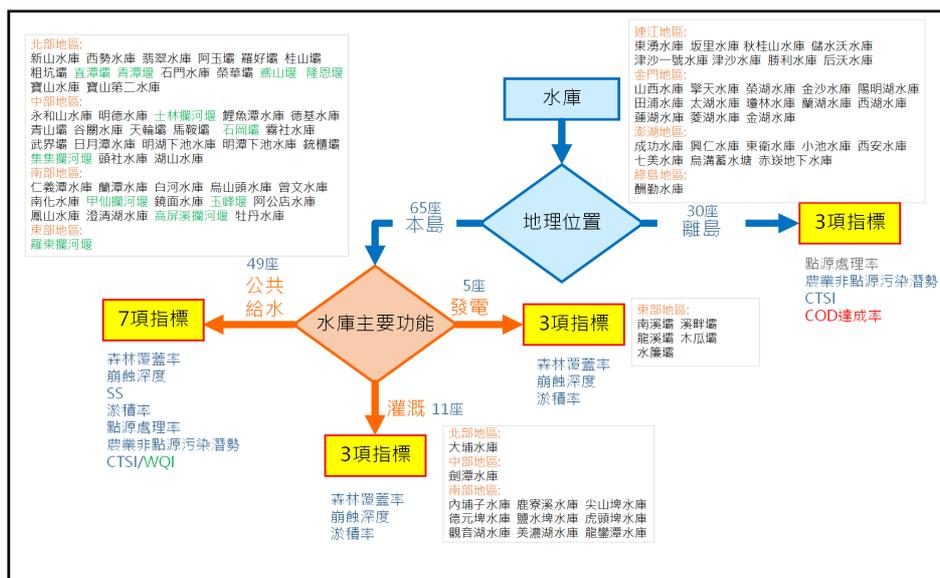


圖2 水庫分類及其適用健檢指標

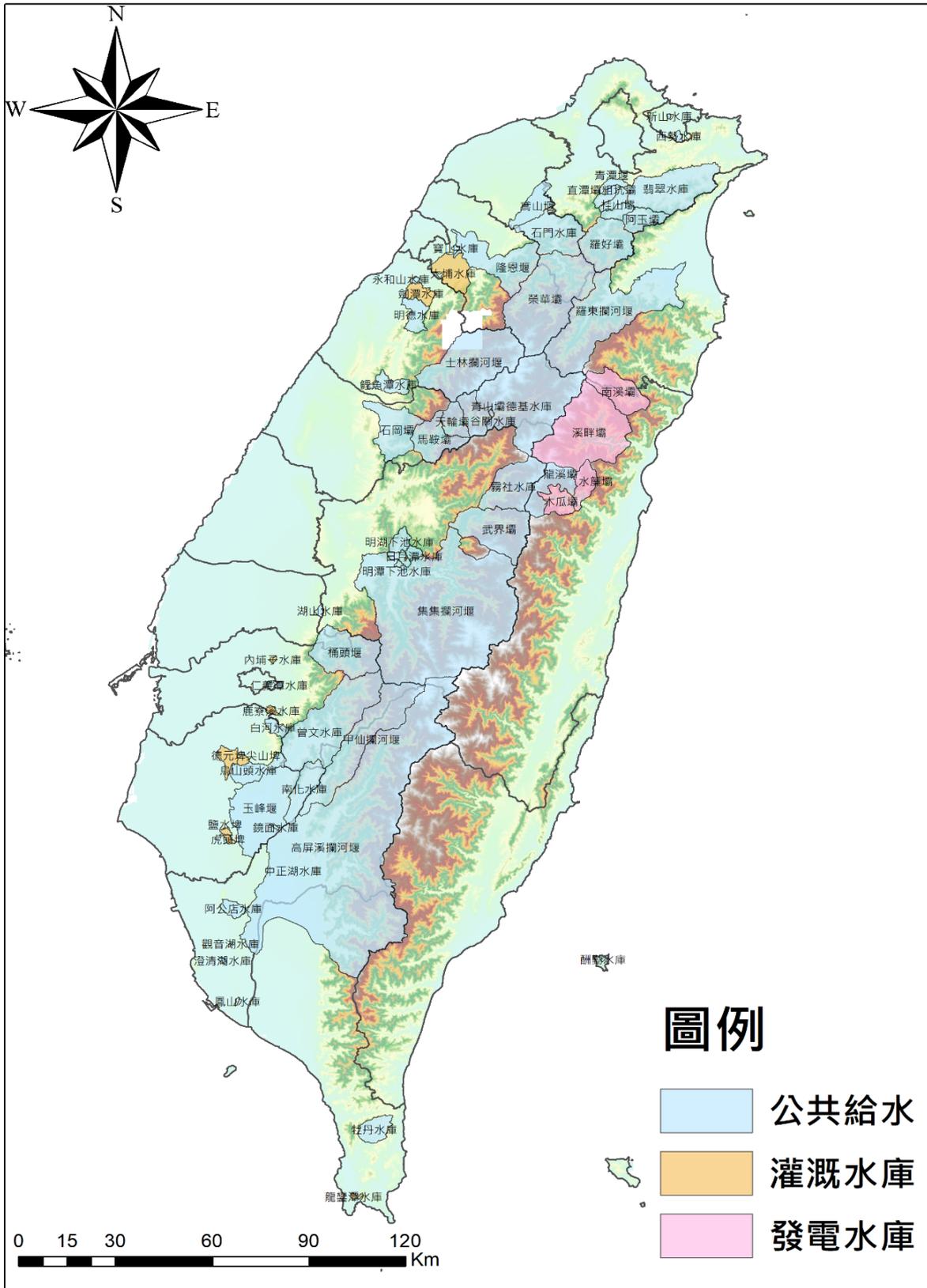


圖 3 本島水庫集水區範圍圖

健檢分級

為了更有效的評估各水庫集水區之健康良窳，需科學性的針對水庫集水區現況建立一套健檢分級標準。在水庫七項健檢指標中，經濟部水利署委託計畫（經濟部水利署，2011）曾針對水庫現況淤積程度進行分級，以了解水庫執行土砂管理的必要性及急迫性，進而將淤積率區分為低度危害(<20%)、中度危害(20—30%)、高度危害(>30%)；環保署公告以 CTSI 指標評估水庫水質營養狀態，指標分為貧養(<40)、普養(40-50)、優養(>50)，可用以評估在槽及離槽水庫之水質狀況；WQI 指標分級則參考（歐陽嶠暉、溫清光，2007）之研究，WQI 評估標準共分為為優良(WQI>85)、良好(70<WQI≤85)、中等(WQI≤70)等 6 類，本健檢則參考前三項區間標準，分級為優、中、劣等級，以評估堰型水庫之水質狀況。

其餘指標尚未有統一標準分級之參考值，經統計歷年數據分析（表 1），建議土砂三項指標「森林覆蓋率」、「崩蝕深度」及「SS」，取其平均值±1/2 標準差作為分級級距。公共給水水庫包含在槽、離槽及堰型水庫，再加上發電及灌溉水庫共 5 類水庫其集水區特性有所不同，故各類型水庫將會區分不同之分級標準。另外，因集水區內設置點源處理設施並不多；農業非點源污染差異大，故不適用取其平均值±1/2 標準差作為分級級距，經分析三項水質診斷指標之數據，建議點源處理率以 20—30%、農業非點源污染以 20—30 kg/yr/km² 作為分級級距，將會與「CTSI/WQI」指標之關聯較為顯著。

表 1 本島不同類型水庫指標分級級距

健檢指標	類型	樣本	平均值	1/2 標準差	低	中	高
森林覆蓋率 (%)	在槽	9	75.9	12.6	<63	63~89	>89
	離槽	13	49.7	9.9	<40	40~60	>60
	堰型	11	71.1	8.6	<63	63~80	>80
	發電	20	86.4	6.0	<80	80~92	>92
	灌溉	12	50.6	10.8	<40	40~61	>61
崩蝕深度(cm)	在槽	9	1.06	0.74	<0.33	0.33~1.80	>1.80
	離槽	13	0.36	0.43	0.00*	0.00~0.79	>0.79
	堰型	11	5.31	2.99	<2.32	2.32~8.30	>8.30
	發電	20	3.92	2.12	<1.80	1.80~6.04	>6.04
	灌溉	12	0.03	0.04	<0.00	0.00~0.7	>0.07
SS(mg/L)	在槽	9	5.2	1.0	<4.2	4.2~6.2	>6.2
	離槽	13	6.5	3.3	<3.2	3.2~9.8	>9.8
	堰型	11	311.8	194.7	<117	117~507	>507
淤積率 (%)					<20(優)	20~30	>30(劣)
點源處理率 (%)		-	-	-	<20(劣)	20~30	>30 *(優)
農業非點源污染潛勢 (kg/yr/km ²)		-	-	-	<20(優)	20~30	>30(劣)
CTSI (在槽、離槽)		-	-	-	<40(優)	40~50	>50(劣)
WQI (堰型)		-	-	-	<70(劣)	70~85	>85(優)
COD 達成率 (%)		-	-	-	<60	60~80	>80

*崩蝕深度不為負值，若<0.00cm 以 0.00 表之。

*若污水產生量小於 10 CMD，則直接判定為優。

健檢結果總論

依 95 座水庫健檢總體分析結果簡述如圖 4 所示，公共給水「在槽水庫」之森林覆蓋率、崩蝕深度及 SS 三項「土砂診斷」指標，中、北部水庫多屬中等、優良等級；故淤積率指標北部水庫多屬於低度危害，南部除鏡面水庫及牡丹水庫屬優良等級外，其他水庫則屬於屬中度至高度危害等級。「離槽水庫」因庫區蓄水範圍面積佔比較大，相對森林面積佔比低，故多數離槽水庫森林覆蓋率屬中等；同時庫區集水區面積不大且無陡峭山坡地，因此多數離槽水庫崩蝕深度及 SS 兩項指標屬中等、優良等級；故多數離槽水庫淤積率指標屬低度危害等級。「堰型水庫」集水區位於地理位置差異大，部分水庫位於中下游地區如鳶山堰及隆恩堰，因無明顯崩塌情形故多數水庫崩蝕深度

及 SS 低（優）等級，而部分堰型水庫集水區涵蓋上游地區如集集攔河堰、高屏溪攔河堰，故崩蝕深度及 SS 高（劣）。堰型水庫設計庫容不大，所以淤積率變化較明顯，而設置堰壩主要為了提高水位取水，故淤積程度對堰型水庫取水功能影響不大。

「水質診斷」方面，因集水區聚落較為分散不易建設污水下水道，而近年開始推動水庫集水區內設置分散式污水處理設施，故大多數水庫點源處理率仍較低，整體評估點源處理率為中、北部水庫較（優），南部水庫應需加強；本島中南部及下游平原地區較上游集水區更適合務農，故農業非點源污染潛勢以中下游地區及中南部地區相對較高。以 CTSI 綜合診斷指標評估在槽、離槽水質狀況，整體而言多數水庫為普養狀態，而翡翠水庫及日月潭水庫屬貧養（優），明德、白河、鏡面、阿公店、澄清湖及鳳山等 6 座水庫屬優養（劣）；以 WQI 綜合診斷指標評估堰型水庫水質，只有直潭壩及青潭堰屬優，集集攔河堰、高屏溪攔河堰屬於中等（劣），其餘堰型水庫則屬於良好（中等）。

單一功能發電水庫皆位於本島東部地勢陡峭之地區，因集水區無明顯人為開發故森林覆蓋率屬中、高（優）等級，但與此同時受地形及地質影響之關係，集水區內崩蝕深度則屬中、高（劣）等級，雖然淤積率仍多屬中、高度危害等級，但庫容之減少對發電水庫之影響不大，崩塌地亦多屬自然發生而非人為因素，故目前應無需投入太多人為整治工程。

單一功能之灌溉水庫大多數位於本島中南部灌溉平原之地區，故多數水庫集水區森林覆蓋率低，同時因地勢平坦故崩蝕深度亦較低，但因灌溉水庫建造時間較早，水庫已使用多年，且人為開發用地如農地因土壤沖刷影響，故多數水庫淤積率已屬於中、高度危害之等級。

離島水庫若使用 CTSI 指標評估水質則多數水庫常年屬優養狀態，不過若符合飲用水水源水質標準且淨水場加強處理與水質管理仍可作為飲用水水源（陳宜婷，2019），故藉由 COD 達成率評估健檢成效，比 CTSI 指標更能呈現分級結果且改善目標較為可及。依 COD 達成率分析結果得知，連江縣水庫皆屬中、高（優）之優良等級，澎湖縣則屬於中、低（劣）之較差等級，金門現仍屬低（劣）之較差等級。雖然離島水庫 CTSI 值受環境限制而長期處於優養狀態，但仍建議水庫管理單位以提升 COD 達成率為長期目標，以期改善飲用水水源之水質。

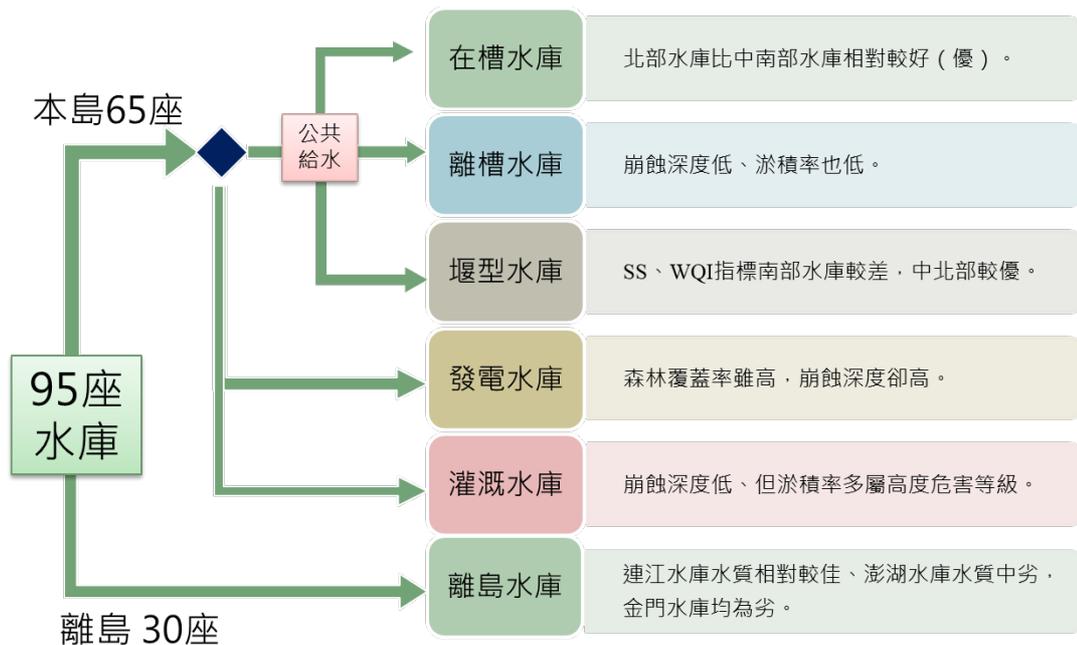


圖 4 95 座水庫健檢結果簡述

個論：以石門水庫為例

經健檢分級後可初步了解全國 95 座各類水庫集水區之間的相對狀況，但各水庫之間不應過度比較，應重視各水庫中長期健檢指標數據之趨勢變化，方可了解集水區實施保育措施之改善情形。由於健檢資料來源之限制，目前部分健檢指標如森林覆蓋率、農業非點源污染潛勢等指標仍無法逐年更新，但仍可根據有限的數據了解水庫集水區的一些變化趨勢。

以石門水庫為例(表 2)，森林覆蓋率近 2 筆數據顯示森林面積有增加趨勢，崩蝕深度則在 101 年至 104 年有下降趨勢，105 至 106 年則有上升趨勢；SS 濃度則於 104 年開始有逐漸下降趨勢；淤積率則於 106 年開始有逐漸下降趨勢。依石門水庫集水區保育實施計畫（經濟部水利署北區水資源局，2019），預估執行植樹造林 1.2 公頃、抑制土砂量 48.54 萬立方公尺及清淤量 360 萬立方公尺，且新建阿姆坪防淤隧道即將完工（每年可防淤 64 萬立方公尺）；而實際清淤量有逐年上升趨勢，水庫淤積減少與清淤量的增加明顯相關（圖 5），另外若扣除清淤量後反推上游來砂量亦有減少之趨勢，顯示先期完成集水區之土砂保育設施已達到控制土砂之成效。「水質診斷」方面，點源污染處理率近年有略增趨勢；農業非點源污染潛勢礙於資料來源無法逐年更新，農地面積約 2.7%，依單位面積污染輸出係數（4 kg/yr/ha）計算農地之總磷負荷量，每年約產生 8,235 公斤，農地非點源污染潛勢約 11 kg/yr/km²。雖然點源污染處理率及非點源污染潛勢指標變化不明顯，不過 CTSI 近年有改

善趨勢至普養狀態，但仍然接近優養標準邊緣。依石門水庫集水區保育實施計畫，預估新增低衝擊開發設施 10 處，處理農業面積約 5.2 公頃，應可部分削減石門水庫非點源污染。水質濃度會明顯受到水文及環境之影響，故所設置水質改善設施後需長期觀察，經過不同水文條件下累積監測數據方可有效的評估水質改善成效。

表 2 石門水庫集水區健檢結果

分級結果	各項指標	已彙整之數據					
		民 95-97 年 (國土測繪中心)			民 97-103 年 (林務局)		
高 (優)	森林覆蓋率 (%)	89.4			90.3		
中	崩蝕深度 (公分)	101 年	102 年	103 年	104 年	105 年	106 年
		1.08	0.94	0.99	0.75	0.83	1.19
低	SS (mg/L)	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年
		7.7	4.2	4.6	3.1	3.7	3.2
高	淤積率 (%)	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110
		33.8	34.7	34.3	34.4	34.0	33.6
低 (劣)	點源污染處理率 (%)	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年
		5.1	6.3	8.1	8.3	8.2	7.9
低 (優)	農業非點源污染潛勢	農地 (%)	面積 (公頃)	總磷 (公斤/年)	總氮 (公斤/年)	測量年份	備註
		2.71	2,059	8,235	53,528	民 95	-
普養	CTSI	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年
		53	51	48	45	47	48

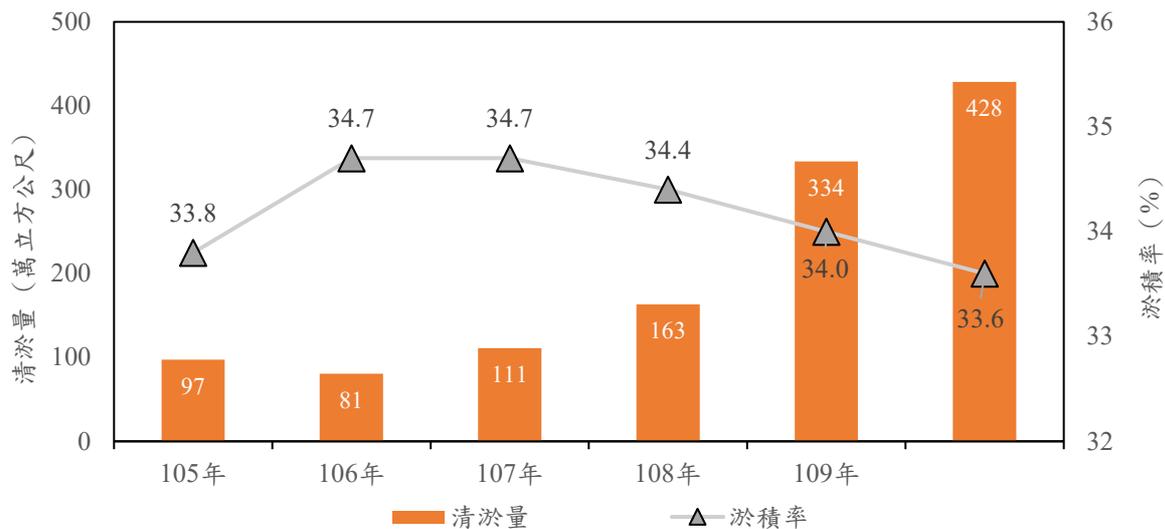


圖 5 石門水庫歷年之清淤量及淤積率變化

結語

全國 95 座水庫經過分類及健檢分級後可初步了解各水庫集水區之健康狀況，因集水區變化需經過長時間改善及觀察，個別水庫可針對健檢指標數據逐年滾動更新，但指標的分級標準則無需頻繁更新，更應重視為中長期指標數據之趨勢變化，以評估執行水庫集水區保育專案計畫之成效，並思考指標之間之影響與因果關係，以淤積率及 CTSI/WQI 指標作為兩大綜合性診斷指標，整體評估後，與同類型或環境情境相似之水庫相互學習，無需過度比較，失焦指標之自主健康管理原意。

致謝

本文的完成要感謝經濟部水利署常年支持水庫集水區保育之相關研究，研究證明「源頭管理」比「管末處理」可收事半功倍之效。我們相信唯有「水源頭」更有力，「水龍頭」才能更永續。

參考文獻

1. 林鎮洋、康世芳、陳映竹、張哲豪 (2021)，110-111 年度水庫集水區保育治理重大計畫成效評估(1/2)，經濟部水利署委託。
2. 林鎮洋、康世芳、何嘉浚、陳映竹、張哲豪 (2020)，108-109 年度水庫集水區保育治理重大計畫成效評估(2/2)，經濟部水利署委託。
3. 陳宜婷 (2019) 台灣水庫水質及其管理指標之評析 (碩士論文)，淡江大學
4. 經濟部水利署 (2011)，氣候變遷下水庫排砂對策研究總報告
5. 經濟部水利署北區水資源局 (2019)，石門水庫、榮華壩及鳶山堰集水區保育實施計畫 108-111 年
6. 歐陽嶠暉、溫清光 (2007)，中央管河川劃定水區訂定水體分類檢討計畫，行政院環境保護署委託。

提升台灣水資源韌性之乾旱管理

國立成功大學水利及海洋工程學系/游保杉名譽教授

國立成功大學水利及海洋工程學系/曾宏偉副研究員

國立成功大學水利及海洋工程學系/楊道昌研究員

國立成功大學水利及海洋工程學系/郭振民研究員

關鍵字：水資源管理計畫、乾旱管理計畫、緊急計畫。

摘要

臺灣在近年幾場嚴重乾旱事件已累積許多經驗，於水資源經營管理上充分展現出抗旱韌性與穩定性。然而隨著氣候變遷與社會經濟條件快速變化，未來勢必面對更多嚴峻之挑戰。為跳脫既有框架，思考如何進一步強化臺灣目前水資源營運管理，本文參考英國水資源經營管理架構，分別從水資源管理計畫、乾旱管理計畫以及緊急計畫三個層面重新檢視臺灣作法，藉由比對兩者異同據以瞭解臺灣目前優勢與建議未來可再精進之方向。

一、前言

英國 Affinity Water 水公司為整合水資源長期規劃與短期操作工作 (Affinity Water, 2020, 2021)，提出水資源經營管理架構(圖 1)，用以說明其面對不同程度乾旱事件所採用之因應對策，可確保於乾旱期間仍可維持一定程度之供水量。其中，水資源經營管理架構主要由三個子計畫組成，針對各個子計畫之定位與內容說明如下：

(一) 水資源管理計畫—長期供需分析

水資源管理計畫係從規劃面角度切入，考慮氣候變遷影響下未來數十年水資源供需情況，約每五年更新檢討一次，其探討項目包含：氣候變遷對於供水量影響、需水量成長以及供需缺口因應策略等。

(二) 乾旱管理計畫—短期抗旱操作

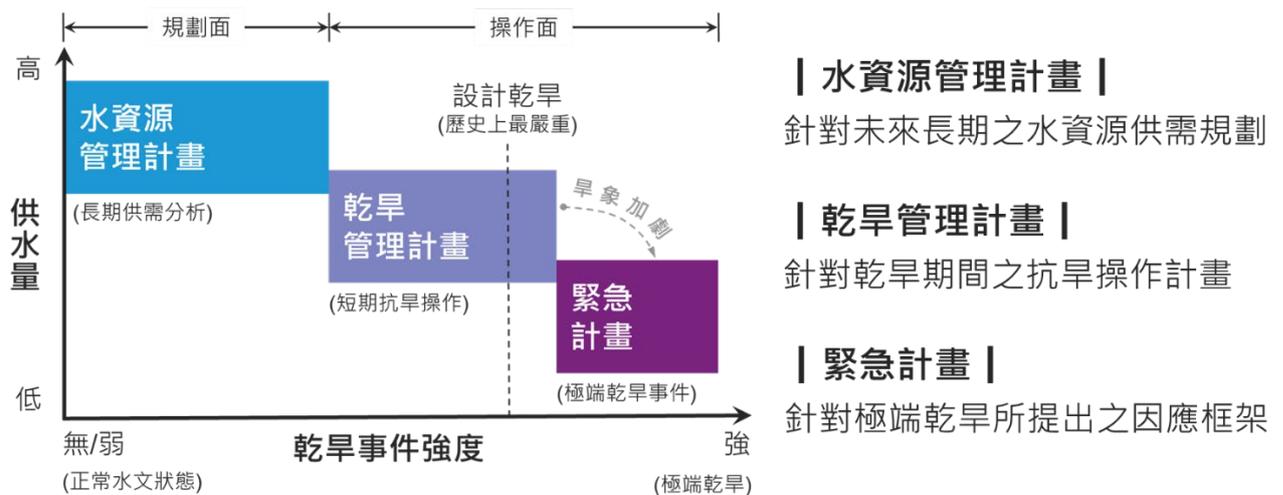
乾旱管理計畫係從操作面角度切入，針對乾旱事件發生期間擬訂應該採取之抗旱作為與執行步驟，並配合不同降雨情境預報未來一年左右之水情狀況(地下水位)，以提供抗旱期間因應措施之決策參考。

(三) 緊急計畫—極端乾旱事件

緊急計畫亦從操作面角度切入，惟其僅適用於因應歷史上前所未見之極端乾旱事件(例如：500 年一遇乾旱)，預先提出極端乾旱期間之配套措施，針對在特定區域與時間實施分區供水與定點供水，藉以確保基礎用水安全。

臺灣現行水資源經營管理架構與英國 Affinity Water 水公司作法相似，在水資源長期規劃面主要藉由水資源經理基本計畫(經濟部，民國 110 年)作為臺灣未來推動整體水資源建設之基本藍圖，推動以因應氣候變遷與社經環境之快速變化；而在水資源短期操作面則提出旱災災害防救業務計畫(經濟部，民國 109 年)，以強化旱災災害預警、預報以及推動適當救旱措施，降低乾旱對環境、經濟以及社會造成之負面衝擊。

藉由上述回顧初步瞭解英國與臺灣在水資源經營管理上所採用架構後，將基於英國水資源經營管理架構，分別從水資源管理計畫、乾旱管理計畫以及緊急計畫三個層面重新檢視臺灣作法，藉由比對兩者異同據以瞭解臺灣目前優勢與建議未來可再精進之方向。



註：圖片改繪自 Affinity Water (2021) Drought Management Plan 2022, page 23. Figure 6. Approximation of relationships between our plans.

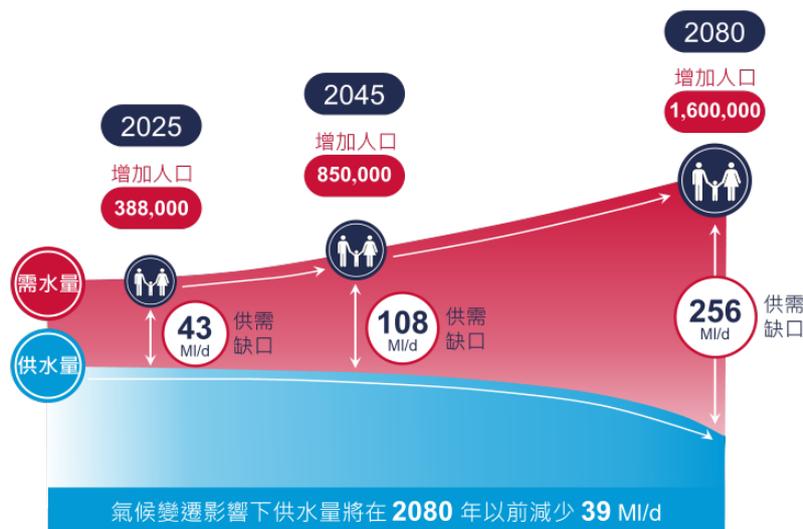
圖 1 英國 Affinity Water 水公司水資源經營管理架構

二、水資源管理計畫

英國「水資源管理計畫」(Affinity Water, 2020)主要用以說明水公司對於未來水資源之長期供需規劃，其可直接對應至臺灣「水資源經理基本計畫」，兩者作法相似皆對於未來長期供需進行檢討並提出因應對策。針對英國作法、臺灣作法以及兩者差異分析與策進建議說明如下：

(一) 英國作法

以英國中區水資源目前長期供需評估規劃為例，其主要項目包含：(1) 需水量、供水量(考慮氣候變遷影響)以及供需缺口推估(如圖 2 所示)；(2) 設定政策目標，例如：加強水資源韌性與環境生態保育；(3) 落實環境生態保育，減少生態敏感河川取水與地下水抽用；(4) 藉由降低漏水率與加強節約用水，以減少整體需水量；(5) 透過強化區域內與區域間之水源利用與調度，以增加整體供水量，並針對極端乾旱條件進行水資源韌性之定量評估。詳細整體評估規劃流程可參考 [Affinity Water \(2020\)](#)。



註：圖片改繪自 [Affinity Water \(2020\) Water Resources Management Plan: 2020-2080, page 1, executive summary.](#)

Central Region Outlook；供需缺口之單位為百萬公升/日(Million Litres per day, MI/d)，而 1 MI/d 相當於 0.1 萬噸/日。

圖 2 英國中區水資源長期供需情況

(二) 臺灣作法

臺灣目前水資源規劃面(經濟部，民國 110 年)目標係維持供水穩定、加強供水韌性以及改善供水環境，藉由優先推動流域整體經營管理、打造西部廊道供水管網以及強化科技造水等三項經營主軸，並配合開源、節流、調度、備援以及管理等五大經理策略，於後續各區域水資源經營管理相關執行措施與方案落實執行，以加強水資源利用效益、減少降雨依賴、強化區域水資源調度以及用水安全等。

(三) 差異分析與策進建議

相較於臺灣作法，英國在水資源長期規劃上更加強調環境生態保育與水資源韌性概念。在環境生態保育上主要藉由減少人為取水與避免開發，盡

量降低對於生態敏感區影響；而在水資源韌性概念上則導入極端乾旱事件進行供需衝擊分析並據以量化水資源韌性。

此外，在水資源系統供水量推估之部分，臺灣與英國皆已將氣候變遷影響納入考量(經濟部水利署，民國 106 年)，惟臺灣降雨情況具有明顯季節特性(例如：雨量主要集中於梅雨季與颱風季)，當發生季節雨量偏少或延遲情況時，容易衝擊供水穩定。故在水資源評估規劃上所採用之水文資料除考慮氣候變遷影響因子，亦有必要將臺灣本土季節降雨特性一併納入考慮，以適切反映氣候變遷與季節降雨變動對於長期水資源供需之影響。

綜合上述探討，針對臺灣未來水資源長期規劃建議可以聚焦強化以下方向：(1)氣候變遷下水資源韌性之量化評估與(2)考慮應用氣候變遷下臺灣本土季節降雨特性於水資源供需分析，說明如下：

1. 氣候變遷下水資源韌性之量化評估

配合 IPCC 研究報告，定期滾動檢討氣候變遷對臺灣乾旱之影響，並據此進行臺灣水資源韌性量化工作，彙整評估國際上韌性評估架構，提出適合臺灣應用之無因次韌性參數(無因次穩健力與無因次快速力)。

以南部區域水資源系統為例，探討水資源經理計畫之韌性提升效益(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 110 年)。初步分析結果指出：受益於水資源經理計畫推動，目標年條件下韌性參數相較於現況皆有所改善或者持平；若考慮目標年條件並導入額外備援水量，南部區域各個縣市韌性參數則皆能進一步改善。

2. 應用氣候變遷下臺灣本土季節降雨特性於水資源供需分析

臺灣本土季節降雨特性(春雨、梅雨以及颱風雨)對於水資源有相當大之影響，於分析上應綜合考量氣候變遷與季節降雨變動對於長期水資源供需影響。以臺南地區為例(經濟部水利署，民國 109 年)，氣候變遷下不同季節降雨特性組合對於水資源供需影響與經濟影響如表 1 所示，其分析結果顯示：公共用水在「梅雨偏少+颱風偏少」組合下對應之供需影響 15.4%最高，該組合發生機率約為 8.2%；而「梅雨延遲+颱風偏少」組合下對應之供需影響 13.1%為次高，該組合發生機率約為 3.7%。因臺南地區主要水源係仰賴梅雨與颱風，故上述兩種季節降雨組合均造成較高之公共用水供需與經濟影響，其屬於較為極端枯旱之水文條件，但其組合發生機率僅介於 3.7%至 8.2%。

整體而言，基於氣候變遷下不同季節降雨特性組合之供需與經濟影響分析，可直接連結臺灣本土季節降雨特性與水資源供需與經濟影響之關係，

透過此種更加細緻方式探討極端枯旱水文條件可能造成之供需影響，提供未來水資源政策在推動上作為參考資訊。

表 1 氣候變遷下不同季節降雨特性組合對於臺南水資源供需與經濟影響

情境編號	情境說明		發生機率 (%)	缺水率 (%)	經濟影響 (百億元/年)
	梅雨	颱風			
H1	偏少	偏少	8.2	15.4	108.77
H2	偏少	延遲	4.8	4.0	28.72
H3	偏少	正常	19.8	7.1	50.89
H4	延遲	偏少	3.7	13.1	92.69
H5	延遲	延遲	2.2	3.5	24.55
H6	延遲	正常	8.9	5.0	35.57
H7	正常	偏少	13.2	6.9	48.86
H8	正常	延遲	7.7	7.6	53.51
H9	正常	正常	31.6	5.7	40.07
期望值				7.2	50.74

資料來源：「因應氣候變遷水源供應與經濟影響研究(2/2)」(經濟部水利署，民國 109 年)。

三、乾旱管理計畫

英國「乾旱管理計畫」(Affinity Water, 2021)主要用以說明乾旱發生期間所採取之抗旱作為與執行步驟，可直接對應至臺灣「旱災災害防救業務計畫」。英國與臺灣在操作上採用相似方式，皆藉由乾旱監測與預警資訊進行乾旱程度研判，以決定適合抗旱因應作為。針對英國作法、臺灣作法以及兩者差異分析與策進建議說明如下：

(一) 英國作法

英國 Affinity Water 水公司在供水上約 65%來自於地下水，剩餘 35%則來自於地面水與鄰近區域支援。其地下水位在乾旱期間會有較明顯變動，屬於乾旱敏感程度較高之水源；而地面水與鄰近區域支援之水源則相對穩定，其乾旱敏感程度較低，不易受到乾旱事件影響。故其將地下水位劃分為 5 個區段，用以瞭解乾旱嚴重程度，而抗旱期間操作則依據地下水位監測結果採取對應強度之抗旱措施，以維持供水量與減少需水量。除乾旱監測外，亦配合不同降雨情境，設定降雨為長期平均值之 60%、80%、100%以及 120%情

境可能導致之地下水位變化，以預報未來一年之水情狀況(地下水位)，據以提供抗早期間因應措施之決策參考。詳細整體抗早操作流程可參考 [Affinity Water \(2021\)](#)。

(二) 臺灣作法

臺灣目前於短期抗早操作面(經濟部，民國 109 年)主要項目包含：供水水情監控、預警以及供水調度等因應措施，於乾旱事件期間協調相關供水用水單位與水庫管理單位辦理水庫出水總量管制、區域間供水調度以及農業加強灌溉管理節水等措施，並視需求召開供水情勢檢討會議，針對全臺各地區之水情進行監控與水源調配管理。

(三) 差異分析與策進建議

整體而言，英國與臺灣在短期抗早上皆以監測與預警作為基礎，再配合乾旱嚴重程度實施對應之抗旱措施。在乾旱監測之部分，兩者依據其水資源特性選用合適之監測對象，例如：英國監測地下水位，而臺灣監測水庫蓄水量；在乾旱預警之部分，兩者所採用水文資料目前仍以傳統情境假設方式為主，例如：英國採用假設降雨情境，推估未來地下水位處於何種乾旱嚴重程度之區段，而臺灣則採用超越機率流量(Q80/Q90)視為情境流量，推估未來水庫蓄水量是否低於管控值，以提出水情警訊並適切調整不同標的供水因應措施。

綜合上述探討，建議臺灣在乾旱預警上可考慮導入天氣預報產品，以更加客觀科學方式進行流量預估。另外，因應天氣系統不確定性，則可導入乾旱預警指標以觸發超前部署，在水情相對樂觀時就儘早啟動部分抗旱作為，以強化抗旱韌性與減緩乾旱持續惡化造成之衝擊。針對(1)科學化流量預報與(2)乾旱預警機制分別說明如下：

1. 科學化流量預報

為同時滿足抗早期間實務上長期預報需求與強化中(展)期預報能力之目的，經濟部水利署與交通部中央氣象局整合長期與中(展)期流量預報系統，進行整合式流量預報系統發展，其主要係以氣象局全球海氣耦合模式之長期預報產品(雨量與溫度)作為基礎資料，再採用氣象局作業化 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)展期預報降尺度產品(雨量與溫度)融合入長期預報中前段未來 1 至 30 日資料，並配合預報系集優選機制將適合之預報雨量與溫度產品輸入修正型 HBV 水文模式模擬降雨-逕流歷程，以預報水庫與攔河堰未來 1 至 6 個月入流量，用以輔助未來

水庫蓄水量變化趨勢之推估與水情研判(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年，民國 109 年，民國 110 年；楊道昌等人，民國 110 年)。

2. 乾旱預警機制

乾旱預警機制主要目的為在乾旱事件發生之前就儘早啟動超前部署，並透過加強灌溉節水管理與啟動備援水源設施等作為，有效延長水庫供水日數，以達到強化抗旱韌性之目的。一般可參考國際間乾旱預警指標作法，採用水庫集水區降雨量、入流量以及蓄水量等水文資料分別建立標準化指數，並據以建立乾旱事件分級程序，決定乾旱嚴重程度(輕微、中度、嚴重、極端)，作為是否啟動超前部署之依據(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 106、107 年)。此外，亦可將前述標準化指數與水庫水情燈號建立關聯性，預判未來第 1、3 個月水庫水情燈號(劉雅慈，民國 107 年；蔡沛宏，民國 109 年；寶藏等人，民國 109 年)。

四、緊急計畫

英國在抗旱操作期間若遇乾旱條件持續惡化且達到特定門檻值(例如：乾旱重現期達 500 年以上)，於此種情況下，其抗旱操作依據會由「乾旱管理計畫」轉換至「緊急計畫」，用以因應極端乾旱事件(Affinity Water, 2021)。緊急計畫主要係用以說明預先提出之極端乾旱配套措施，倘若發生歷史上前所未見之極端乾旱事件，水公司將在特定區域與時間實施分區供水與定點供水，藉此確保基礎用水安全。而臺灣目前在抗旱操作上較無考量此種超級大旱之衝擊，故建議可導入「設計乾旱」概念評估量化極端乾旱風險並據以進行備援能力強化。針對英國作法、設計乾旱概念以及策進建議說明如下：

(一) 英國作法

緊急計畫亦係從操作面角度切入，惟其僅適用於因應歷史上前所未見之極端乾旱事件(例如：500 年一遇乾旱)，其預先提出極端乾旱期間之配套措施，針對在特定區域與時間實施分區供水與定點供水，藉以確保基礎用水安全。

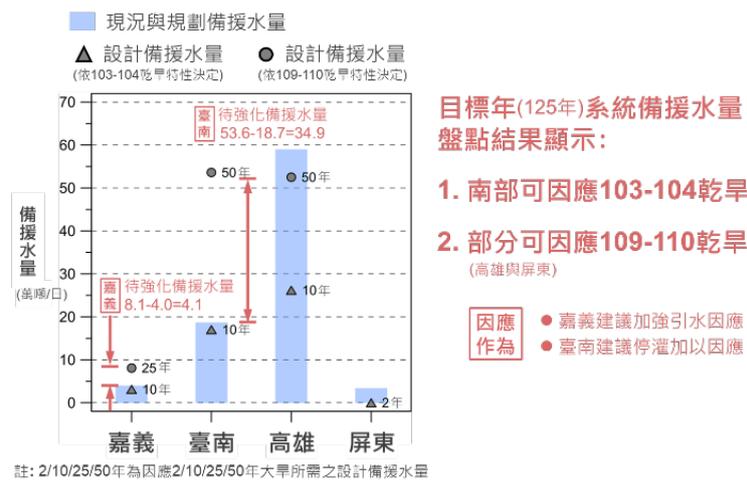
(二) 設計乾旱概念

設計乾旱概念(類比於防洪工程之設計暴雨)主要係用以量化極端乾旱事件發生時，水資源供需系統可能會面臨之極端枯旱風險(缺水量)。參考美國國家科學院與美國陸軍工兵團之作法(National Academies, 1985; USACE, 1994)，可從歷史事件中選擇出嚴重乾旱事件作為設計乾旱，以決定水資源

系統在面臨嚴峻乾旱發生時需提升之額外容量。

(三) 因應超級大旱之策進建議

為避免類似「設計乾旱」之嚴重缺水情況發生，建議採用緊急備援水量作為水資源系統應具有之合理備援水量。以南部區域為例(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 110 年)，區域內各個縣市於目標年條件下因應「極端乾旱」之待強化備援水量之評估規劃如圖 3 所示，評估結果指出：在延時固定為 120 日前提下，若參考民國 103 至 104 年乾旱特性(大約為 10 年一遇乾旱)決定極端乾旱之頻率年參數，嘉義、臺南、高雄以及屏東之緊急備援水量皆低於已規劃備援水量，故無需另外增加待強化備援水量；但若針對更加嚴峻之乾旱條件，參考民國 109 至 110 年乾旱特性(臺南乾旱事件強度大約為 50 年一遇)決定極端乾旱之頻率年參數，臺南則需增加待強化備援水量約 34.9 萬噸/日。



資料來源：「因應極端氣候水資源系統備援能力評估規劃」(經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 110 年)。

圖 3 南部區域各個縣市目標年條件下待強化備援水量之評估規劃

五、結語與建議

臺灣在近年幾場嚴重乾旱事件已累積許多經驗，於水資源營運管理上充分展現出抗旱韌性與穩定性，然而隨著氣候變遷與社會經濟條件快速變化，未來勢必面對更多嚴峻之挑戰。為進一步強化臺灣水資源韌性與穩定性，參考英國水資源經營管理架構，分別從水資源管理計畫、乾旱管理計畫以及緊急計畫三個層面重新檢視臺灣在水資源規劃與操作上作法，據以提出策進建議如下：

(一) 水資源管理計畫層面

因臺灣降雨情況具有明顯季節特性(例如：南部雨量主要集中於梅雨季與颱風季)，當季節雨量不足或有顯著差異便容易衝擊供水穩定。故在水資源評估規劃上除應定期滾動檢討全球氣候變遷影響外，亦有必要將臺灣本土季節降雨特性一併納入考慮，以適切反映氣候變遷與季節降雨變動對於長期水資源供需之影響。

此外，為瞭解水資源經理計畫推動之韌性提升效益，建議可彙整評估國際上韌性評估架構，提出適合臺灣應用之韌性參數，以更加具體方式量化水資源韌性。

(二) 乾旱管理計畫層面

於抗旱期間供水情勢分析時建議導入天氣預報產品，配合降雨-逕流模式推估未來流量，以作為科學決策之依據。此外，為因應天氣系統高度不確定性，建議配合乾旱預警機制觸發超前部署，在水情相對樂觀時就儘早啟動部分抗旱作為，以強化抗旱韌性與減緩乾旱持續發展可能造成之衝擊。

(三) 緊急計畫層面

為避免當超級大旱對於水資源系統造成不可逆之嚴重影響，建議可導入英國與美國之設計乾旱概念，採用緊急備援水量作為水資源系統應具有之合理備援水量。

參考文獻

1. Affinity Water (2020) Water Resources Management Plan: 2020-2080.
2. Affinity Water (2021) Drought Management Plan 2022.
3. National Academies (1985) Drought Management and Its Impact on Public Water Systems. Report on a Colloquium Sponsored by the Water Science and Technology Board, National Research Council, National Academies, 127pp.
4. USACE (1994) Managing Water for Drought. National Study of Water Management during Drought, Institute for Water Resources, IWR Report 94-NDS-8.
5. 范保國、陳仲廷、郭振民、楊道昌、游保杉、曾宏偉，民國 109 年，乾旱嚴重度-延時-頻率曲線發展與應用：以曾文-烏山頭系統為例，農業工程學報，第 66 卷，第 2 期，第 1 至 11 頁。

6. 陳昭銘，民國 97 年，臺灣之自然季節，水利土木科技資訊季刊，42 期。
7. 曾宏偉、楊道昌、郭振民、張廣智、郭純伶、鄭欽韓、游保杉，民國 111 年，氣候變遷下可能水文情境資料特性分析：以臺南地區為例，農業工程學報，第 68 卷，第 1 期，第 25 至 38 頁。
8. 楊道昌、畢嵐杰、蔡展銘、龔明人、陳昭銘、游保杉，民國 110 年，臺灣水庫集水區長期雨量暨流量預報之發展，第 67 卷，第 3 期，第 18 至 24 頁。
9. 經濟部，民國 109 年，旱災災害防救業務計畫。
10. 經濟部，民國 110 年，臺灣各區水資源經理基本計畫。
11. 經濟部水利署，民國 106 年，氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估(2/2)。
12. 經濟部水利署，民國 109 年，因應氣候變遷水源供應與經濟影響研究(2/2)。
13. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 106 年，因應氣候變遷水源設施乾旱供水風險評估(1/2)。
14. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 107 年，因應氣候變遷水源設施乾旱供水風險評估(2/2)
15. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 108 年，科學化流量預報與旱災決策輔助研發。
16. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 109 年，精進水庫集水區長期雨量預報暨科學化流量預報。
17. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 110 年，因應極端氣候水資源系統備援能力評估規劃。
18. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 111 年，水庫集水區流量預報技術整合暨推廣應用-第二次期中報告書。
19. 劉雅慈，民國 107 年，石門水庫乾旱預警指標之研究，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
20. 蔡沛宏，民國 109 年，判別分析與 SMOTE 應用於建構乾旱預警模式之研究，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
21. 寶藏、劉雅慈、楊道昌、郭振民、曾宏偉、游保杉，民國 109 年，結合現況與未來乾旱指標建立水庫乾旱預警模式-以石門水庫為應用案例，農業工程學報，第 66 卷，第 3 期，第 1 至 12 頁。

水庫蓄豐濟枯的運轉機制

國立成功大學水利及海洋工程學系/周乃昉兼任教授

國立成功大學水利及海洋工程學系/吳嘉文兼任助理教授

關鍵字：水庫、蓄水利用、運用規線、防洪運轉、水力排砂

摘要

傳統利用水庫調蓄功能蓄豐濟枯以穩定供應各標的所需用水，就水庫運轉作業的挑戰來看，蓄豐主要是執行防洪運轉以確保水庫安全，並在運轉結束時蓄存濟枯所需水量；濟枯則是當蓄水量有限時，及早減量供水以減輕缺水衝擊，一般是以水庫運用規線設定計畫供水量及限供水量的適用時機。本文介紹防洪運轉及運用規線的運轉機制，供相關人員參照以發揮水庫蓄豐濟枯功能，確保水庫安全並減輕缺水衝擊。

一、濟枯以穩定供水

枯水期河川流量不敷引用時傳統應對措施是設立水庫以蓄豐濟枯，蓄豐指蓄存豐水期的河川剩餘水量，在台灣特別是蓄存暴雨後的大量洪水，濟枯則是在枯水期提供蓄水補充川流水的不足，以安全穩定提供所需用水，發揮水庫的蓄水利用功能。綜上所述，水庫的合理運用目標應兼顧：(1)企求穩定供水避免發生顯著缺水，(2)在工程投資面追求用水效益。除了季節性的河川豐枯水期水量變化外，水庫運用尚需應變豐枯水年不同水資源量的情況，當乾早年發生缺水，而地下水及新興水資源尚無法完全補足供水缺口時，在缺水衝擊可承受下，適當減量供水以度過危機為地面水庫蓄水利用管理的必要作為，也是為追求用水效益所設定的工程準則。

水庫用以蓄豐濟枯的有效蓄水容量一般是基於平水年的水文過程與常態用水所需水量設計，若枯水年的年水資源量遠低於平水年，蓄水勢必顯著低於歷年同期的蓄水量，無法達成調蓄豐枯水期水量以穩定供應常態用水的目標，此現象可由水庫在不同月份的蓄水量相對於至枯水期結束尚需供應的總水量偵知，當蓄水量充足時供水無虞，否則須視可能缺水程度執行不同程度的限水。由於未能正確預知枯水期未來的水庫進水量，或真實的缺水程度，一般分成兩個限水階段應變缺水衝擊，減少不必要的限水以提高水資源利用效率。在穩定用水要求下，各階段定量的適切限水量是基於用水標的可合理承受缺水的限度設定，實際的水庫蓄水利用管理則以運用規線設定蓄水量與對應的限水標準達成穩定用水目標。

二、水庫運用規線

基於不同可能的缺水情勢，可將水庫的有效蓄水容積在不同季節或月份區分為數個區間，各區間由上而下反映對應月份的水情豐、枯狀態，並對蓄水量位於不同區間賦予對應的供水措施，各蓄水區間之間的界線即為水庫運用規線。因應蓄水量的多寡，被每一條運用規線所隔開的上、下區間，採用不同的蓄水利用作為或必要的限水標準，需要改變供水標準時，便需要設定一條運用規線以茲遵行。台灣的多目標供水水庫面臨缺水時一般採行兩階段的限水措施，相對於計畫用水量需要再設定兩條運用規線指示限水時機，通常稱為下限與嚴重下限，如果尚有防洪需要或發電標的可以調節利用蓄存在頂層蓄水空間的庫水，則在下限之上會增設一條上限以利執行。

此下以一組運用規線具有上限、下限與嚴重下限等三條規線的設計，說明各條規線與其所劃分的四個蓄水區間的意涵與供水原則。

(一) 蓄水在上限以上：

除非受限有效蓄水容量，規線上限指示可滿足計畫供水的最大所需蓄水量，因此上限區隔水情樂觀與正常的狀態。水庫蓄水在上限以上時表示蓄水相對豐盈，在滿足各計畫用水標的需求水量後，超出上限的蓄水可尋求最大化其他水資源運用效益，例如：(1)水力發電、(2)超量灌溉或促進地下水補注、(3)於多水源聯合運用系統中超量供水，以減少其他水庫出水量，降低海淡水、再生水等高成本新興水源出水量，減少引用較高濁度的川流水或是其他水質較差的水源水量等創造額外效益。

(二) 蓄水在上限與下限之間：

代表水情正常，可以依計畫用水量正常供水滿足各標的需求，若蓄水低於下限代表蓄水不足需要執行限水，因此下限區隔水情正常與不佳的狀態。

(三) 蓄水下限與嚴重下限之間：

表示水情不佳，無法充分供應各標的計畫用水量必須執行限水，但因蓄水尚未低落至嚴重下限之下，預期會發生缺水但酌加限水便可能供水至枯水期結束。管理上以打折方式供水減緩水庫蓄水的下降速率，以避免水庫蓄水用罄，防止在枯水期末各標的用水必須承受大幅度的缺水，取而代之的是使小量缺水分散在較長的期程以減輕衝擊。對家用與公共給水標的而言，自來水公司可以實施較長期的輕度節水手段，如夜間減壓供水或停止供應非必要用水等；對農業標的而言，因應減量供水農水署各區管理處實施加強灌溉管理，以有效運用有限水源持續灌溉作業。

(四)蓄水在嚴重下限以下：

水庫蓄水大幅減少表示用水情勢嚴峻，必須進一步限水，以更小的折扣供水因應。為提高用水效率，一般是綜合考量枯水期各種不同水庫進水量過程的水量利用訂出嚴重下限。但由於水文的不確定性，雖然對預設的限水標準制定嚴重下限，還是不排除面對嚴重乾旱情況可能發生空庫。實務上對此區間的缺水應變，通常會對未來的水庫進水量做保守估計，視即時水情調整折扣供水量或限水策略。之後配合河川水文發展滾動檢討，動態調整水量調度策略，甚至辦理跨標的或跨供水區的水量支援調度。蓄水在此區間時，自來水系統可能實施分區輪流供水，對水壓不足的高地調派水車送水，農業標的除了執行更嚴格的加強灌溉管理外，還可能停止灌溉部分灌區。

三、運用規線製訂

水資源運用系統以有限容量的蓄水設施調蓄自然界的豐枯水文過程，提供各計畫標的所需用水，面對乾旱水源不足無法滿足各標的所需水量時，便須實施限水以度過缺水衝擊。欲評估此一用水過程，必須對水庫的蓄水與供水過程進行模擬計算。為滿足各標的用水，水庫必須蓄存的水量為：

$$\text{水庫需要蓄存水量} = \text{標的用水量} - \text{水庫進水量}$$

從可靠供水考量，面對枯水期較小的水庫進水量，需要事先蓄存較多水量以穩定供水。適當的事先蓄存水量，或是規線蓄水量，或可參照歷史水文記錄，對標的用水量自水庫空庫反向模擬各種進水量的累計需蓄存水量，或起始蓄水量。由於有多條必要蓄水量的過程線，除可顯示規線的正确型態，也可對其歸納各規線限值的合理範圍。若模擬水源運用時同時調整各規線，蓄水過程不排除有穿過規線改變供水量的現象，原則上需要模擬測試以獲得最適的規線組。若規線較高可能經常限水，而較低的規線可能造成空庫，為避免不必要的限水，提高用水效率，適切的規線可以在上述的合理範圍內測試，縮小規線修正的搜尋範圍。

在有規線限水的條件下，測試各條規線所示的蓄水位置以確保水庫不致發生空庫，最後由整體水源運用成效，包括缺水量、延時及其發生機會，設定適當指標評比選定最適的規線組，實務上難以用單一指標評定水源運用的各面向成效，或許參照多目標分析法，以加權方式評估不同指標的共同成效，或是設定主要的運用目標或指標，再將其他指標視為限制條件，分別設定可接受的目標值，可以得到更合用的規線。台灣地區水文年的水源量豐枯差異頗鉅，在枯水年為應付大量用水需求，若水庫有效蓄水容量有限，在模擬水源運用過程中無法避免發生空庫，此種情況無法再由調整運用規線消除空庫，必須仰賴彈性的水量調度或開發新水源以穩定供水。

在水庫有足夠蓄豐濟枯的有效蓄水容積下，因應水源運用條件改變，運用規線需要及時調整，以確保水源運用效率與效益，這些影響因素包括：(1)氣候或集水區土地利用變遷等現象以致水文趨勢及不確定性改變、(2)

水庫逐年淤積有效蓄水容量減少、(3)用水需求增加或供水標的改變、(4)缺水容忍程度調整等。一般情況下上述因素在每5年至10年變動的綜合影響可能改變用水成效，便需要蒐集更新相關資料重新修訂運用規線。

四、蓄豐以達成濟枯

由於地形狹長高山林立，台灣地區河川坡陡流短，水庫的蓄水容量有限，若集水面積大，一場洪水的水量體積能夠數倍於水庫蓄水容量，此種情況下，多數無法比照大陸國家的大型水庫明確區隔蓄水利用空間與滯洪空間，為了兼顧蓄水與滯洪功能，這兩種空間往往相互重疊，執行水庫防洪運轉是利用滯洪空間調節洪水以安全滯洪、適切減災，洪水通過後則盡量裝滿蓄水利用空間促成水庫濟枯功能。

五、水庫防洪運轉

一般隨著洪水過程可以將運轉依序區分為洪水來臨前、洪峰通過前與洪峰通過後三個階段，各階段有不同的運轉特性與要求，茲分述如下：

(一)洪水來臨前階段

1. 階段期程：

始於氣象局發佈海上陸上颱風警報或豪雨特報，且水庫集水區位於警戒區範圍內時，自水庫進水流量提升至超過下游河道無害流量前結束。

2. 運轉目標：

得進行調節性放水，預降水庫水位至防洪運轉起始水位，或滯洪空間的起始值，預備充分的滯洪容積。目前多座水庫辦理抽泥作業，有將抽除之淤泥暫置於溢洪道落水池或下游河道，可利用調節性放水沖洩前期暫置淤泥，騰出空間以持續抽泥作業。

(二)洪峰通過前階段

1. 階段期程：

洪水來臨前階段結束至水庫進水洪峰發生前。

2. 運轉目標：

確保水庫安全且儘量降低最大放水量，原則上控制水庫水位不超過可接受之安全門檻，以發揮水庫滯洪功效。

(三)洪峰通過後階段

1. 階段期程：

自水庫進水洪峰發生後至各主要洩水設施閘門關閉為止。

2. 運轉目標：

延續上一階段的水庫滯洪作業，於適當時機關閉洩洪設施閘門，攔蓄洪水歷線退水段之流量，確保洪水過後水庫充足蓄水，以穩定供應各標的用水。

六、促進水庫永續利用

水庫安全是防洪運轉的首要目標，秉此主要目標，在洪峰通過前與洪峰通過後的階段兼考量減洪與蓄水等次要目標下，必須洩放的水量蓄存於庫內可能威脅大壩安全，也不具蓄水利用價值。但在現階段台灣地區水庫有減淤以維持庫容永續利用之需要，正好可以利用不需要的洩洪水量促進水力排沙，操作上得視壩前渾水濃度的時空分布，適時開啟底層放水設施，例如永久河道放水道(PRO)或防淤隧道等，實踐洩洪兼促進水力排砂。

七、防洪運轉策略

(一)洪水來臨前階段

在上述的運轉框架下，水庫防洪運轉涉及確保水庫安全、不造成人為洪水、對下游河道及滯洪地區減洪、滿足各標的用水後續需求、沖刷前期暫置河道之淤泥以及運用必要洩放水量執行水力排砂等多項目標。而於諸目標中，大壩安全必須嚴守，其次為對下游減洪及達成期末目標蓄水。故水庫於規劃、設計階段或營運後進行安全評估時，均必須檢討並設定防洪運轉起始水位(簡稱 IL)，確保自 IL 開始運轉後即使發生可能最大洪水(簡稱 PMF)，水庫滯洪過程的水位加計風浪與地震等出水高後之最高水位為設計洪水位(簡稱 DL)，仍低於壩頂防浪牆或黏土心層的高程。依此原則，若於洪水來臨前將水位預降至 IL，則即使發生可能最大洪水(PMF)仍可確保水庫安全。

在即時運轉過程中，為促進水庫的滯洪與減洪功能，兼確保蓄水滿庫的目標，決策者可參考預測之颱風總降雨量並斟酌其不確定性，與該洪水發生月份後的供水可能缺水風險等，依其對滯洪、減洪與蓄水三大目標之取捨，調整洪水來臨前階段執行調節性放水的目標預降水位(target pre-release level, 簡稱 PL)，此水位原則上等於或高於 IL，但也不排除在氣候變遷情況下置水庫安全於首位時，PL 可能略低於 IL 以酌增滯洪容積。在洪水來臨前階段終了時，運轉目標即為調節水庫水位至 PL，預期 PL 可以兼顧水庫安全、減洪與達成後續水資源運用之蓄水。

(二)洪峰通過前階段

進入洪峰通過前階段，洩洪的基本限制是不得超量放水造成人為洪水，防止加劇下游的可能災情。循此限制，洪水漲水段的部分進水流量會被滯留於庫內提升水庫水位，因而運轉目標是確保水庫安全。理論上最大化滯洪成效之安全運轉是充分運用預留之滯洪空間調蓄漲水段流量，亦即起始於 PL 進行滯洪運轉，至運轉過程中或洪峰通過前階段結束時的水庫最高水位會接近但不超過設計洪水位 DL。

惟對未來入庫洪水流量之預估具不確定性，而水庫水位必須嚴格控制低於 DL 以確保水庫絕對安全，故實務上在洪峰通過前階段之運轉可以設定並儘量調控水庫水位低於某一可接受之安全超高水位(簡稱 SL)。SL 低於設計洪水位 DL，而介於 SL 至 DL 間之蓄水容積可預備供發生超過原預期洪水的更大洪水情況滯洪使用。由於滯洪空間與蓄水利用空間部分重疊，SL 可以是高於或接近水庫正常滿水位(簡稱 NL)，故以大壩安全為前提的滯洪運轉與洪峰後欲達成目標蓄水之蓄洪運轉原則上並不衝突，在持續進水的過程中得以洩放之水量不致減少蓄水。

(三)洪峰通過後階段

洪峰通過後階段的首要運轉目標為確保關閉洩水設施閘門後可達成期望之期末目標水位(簡稱 EL)，EL 與日後蓄水利用所需蓄存的水量有關，可以是運用規線上限，故隨月份改變。惟近年來咸認為氣候變遷因素導致嚴重乾旱頻繁發生，水庫管理單位可以將每一場洪水事件都視為豐水期的最後一場洪水，在盡量蓄水的想法下直接設定 EL 為正常滿水位 NL。

為減少排洪閘門開度的調減次數，本階段運轉原則是僅用數段降低水庫放水流量的方式操作，並於溢洪道閘門關閉後調蓄洪水歷線的退水段流量使水庫水位蓄至 EL。雖然水庫水位在緩慢變動，仍可假設每段的放水均維持固定流量，再運用退水方程式估算未來可以蓄存的退水流量體積後，得到預期的水庫蓄水量或水位，若預期蓄水量低於 EL，則調減閘門開度減少水庫放水，反之則提高放水量。此操作原則亦適用於溢洪道閘門關閉後，仍維持定量放水時，例如由自來水取水口、電廠或 PRO 放水，將蓄水逐漸調至期末目標蓄水位 EL。

八、結語

經濟發展累積社會財富，台灣地區現階段穩定社經的施政措施之一是降低自然災害風險，對供水安全的要求也成為關注焦點，傳統開發水資源及擬定水庫運用規線時對缺水容忍程度的設計準則已在改變，在避免發生橙燈及紅燈的乾旱狀況要求下，所有水庫運轉所遵循的運用規線必須配合修正，並預擬標的間及跨用水區的水量調度分析機制，至少在水庫發生蓄水低於嚴重下限時可以啟動應變。

水庫防洪運轉之目標在於達成安全、減洪與蓄水，合法且儘量平順放流必要的洩洪水量，新的洩洪功效是利用此必要洩放但原本無用的洪水進行水力排砂或沖淤，欲最大化排砂或沖淤之價值，水庫需要能夠調節更充足洪水，使在有排砂條件時可以增加洩水流量或延長放水延時。

水庫操作概念探討

台大土木系教授、水工所主任/游景雲

摘要

水庫在水資源系統中，在空間上常為調配的樞紐、時間上可以調豐濟枯，因此扮演相當重要的角色。水庫無論在規劃或運轉上，其操作概念與原則經過長時間的發展，技術面上均有相當基礎，本文對過去水庫操作的發展歷程及目前的技術水準進行探討，並進一步的說明過去在水庫操作在時間調配一些概念與研究成果，並進一步的探討目前水庫操作的一些挑戰，希望藉以省思未來發展的方向與目標。

一、水庫操作技術發展

水是人類賴以維生主要自然資源，其存在與我們的生活息息相關，但隨著人類人口的快速增加，許多地區對於水的需求已經超過水資源所能負荷的程度。早期過去水利工程尚未廣泛發展的時期，基本上可獲取的取水量多僅為河川流量，也受到其地理位置的限制，因此古人多逐水而居，傍水而生。在前人奠定的基礎上，二十世紀初期相關的科學及工程發展迅速展開，相關的理論發展奠定了現代的水文及水利工程理論與分析方法基礎，至今仍廣泛的被運用在各種基礎建設的分析上。隨著人類對於水文各種物理現象的掌握，再加上社會經濟的快速發展，大量興起的農業、防洪、灌溉、交通工程等，都需要水利工程的設施予以配合，1930-1970 年代可以說是水利建設蓬勃發展的時期，這段時期在美國稱之為建壩年代 (dam building era)。各個地區的水庫數目迅速增長，單單在美國其數量就接近了 75,000 座。當然除了水庫設施外，也包含了各種的防洪、供水、排水等大型水利設施的興建。台灣隨著經濟的穩定成長，也大約在五零年代開始對於各種現代水利設施進行系統性的規劃工作，包括了石門水庫、曾文水庫與翡翠水庫的興建，大台北防洪計畫的陸續完成，都提供了台灣地區穩定經濟發展的基礎。

水資源受到天然條件的限制，因空間、時間分配不均、以致無法將水資源完全供為人類社會所使用，而水資源設施建構與操作，多半並非從無到有將水生產出來，而是增加其利用效率，有效運用有限之水資源。區域水資源系統的建構與運作，主要希望解決空間分配不均的問題，而時間上則需透過蓄水設施、調豐濟枯，以進行時間上之調配操作。空間調配上，像是台灣早期清朝時期水利設施，北瑠公、南曹公的曹公圳、瑠公圳、臺中市的貓霧揀圳、彰化縣的八堡圳，為四大水圳，然細分台北區域內水源

供應實際上還包含大坪林圳、瑠公圳、霧裡薛圳，現在新店開天宮下的引水石碇因其歷史變遷，涉及到瑠公圳水利系統的整併改組，仍有名稱上之爭議。日治時期建設的桃園大圳、嘉南大圳，也助長農業經濟發展，對於台灣農產貢獻量多，在早期這些水圳很重要孕育了台灣文明，倚靠埤圳渠道引水灌溉，生產糧食。就水資源系統的觀點，這些圳路主要功能為將水源引運到有需要的地方，以達到更有效率的運用，隨著相關技術發展，不管是國內外，更大型的引水調度工程也越來越廣為運用，甚至越域引水的相關工程也相當常見，只是規模上有所差異而已。

水資源空間上的調配包括運用河道、渠道、運河、管道、抽水站等各種措施，用於改變水資源的地域分布。另外更為重要且常見的則為時間上的調配，即是常說的調豐濟枯，設法將豐水期多餘的水量加以蓄存，以供枯水期使用，再加上需求面的差異，水庫的蓄水操作更顯重要。台灣地區雨量與世界各國相較下雖屬豐沛，年平均降雨量約為2510毫米，但因為人口密度高，每人可分配水量偏低，隨著氣候的變遷以及經濟的活動都造成台灣的降雨與用水需求在時間上與空間上分布愈來愈不均勻，豐枯懸殊水情下多倚靠水庫的有效操作及管理方能因應。臺灣地區水資源從豐枯水期水量之分配而言，北部區域的豐枯期水量比為6:4，中部區域為8:2，南部區域為9:1，東部區域為8:2；顯示臺灣地區之中、南、東區之水量過於集中在豐水期，因此臺灣南部、中部、東部地區若發生水文水量減少的現象，將因枯水期水量供水欠缺而易造成乾旱。降雨時空極不均勻的情況下，水庫在水資源利用上扮演了極其重要的角色，水庫雖主要為時間上的操作概念，然其可以儲蓄相當之水資源量體，也常為空間分配上之樞紐，在水資源系統上扮演關鍵性的角色。

水庫運用操作係依各水庫於規劃興建時之標的及功能運轉利用，一般分為單目標水庫及二種以上功能之多目標水庫。基本上運用原則以取得最高綜合效益為原則，單目標水庫之運用原則較為單純，以取得該標的之最高效益為運用原則，即防洪水庫以攔洪蓄水為原則，可於洪水前將水庫完全洩放至空庫以攔蓄最大洪水量。公共給水之水庫以滿足民生用水為原則，如蓄水量不足，灌溉水源不足可不予供應。然而多目標水庫於運用時較為複雜，因各標的於用水需求時多有牴觸，水源不足時即表示各標的用水均有缺水情況，而有限水源無法同時滿足各標的用水所需，如何取得最高綜合效益，應於水庫興建時即先加以明確訂定，並據此研訂水庫運用規線及運用規則，但隨時間變遷社會發展，也有因應而修改相關操作規線以符合所需。以石門水庫為例，水庫於民國四十四年規劃時，其運用之主要目標包括防洪、公共給水、灌溉及發電。惟此多目標功能，彼此間的權衡與最佳運用，取捨上也受政治與社會氛圍而有所差異。石門水庫依各標的功能利用水庫容量先前之優先次序，第一為防洪，其次為公共給水，再次為

灌溉，再次為發電，防洪與供水在操作上屬於不同時間尺度，防洪主要為數小時至數日之時間尺度，而水庫供水則以旬時距，庫容較大之水庫跨年操作而以年或數年作為其操作時間尺度，但發電、灌溉等則又有彼此間之競和問題。

雖然水資源系統規劃主要處理的仍為資源分配問題，建構於資源總量守恆，但其發展相較於力學為主的工程設計，時間上晚上許多，單一水庫的規劃上可以追溯到 1883 年 Rippl 發展的質量曲線分析方法(Mass Diagram Analysis) (Rippl, 1883)，雖然後來為水利界所廣泛運用的 Rippl Method 似乎並僅為其中一特例，與 Wengel Rippl 當年提出之概念其實有相當差異 (Buras, 1997)。由於其問題相似性，水資源系統分析與作業研究 (Operational Research, OR) 的發展有一定程度的關連性，作業研究為起源於第二次世界大戰期間，起初多用於軍事上的運用，運用數學模式等科學計量管理技術，用以協助制定決策。水資源的問題與架構類似，也運用相同的工具進行分析。一般來說，比較系統化的水資源系統分析發展，學界多歸於 1955 年由哈佛大學開始的 Harvard Water Program，這個計畫是想要藉由結合不同領域的學者的參與，來建立一套完整的多目標水資源系統分析規劃的方法，許多著名的學者參與其中，包括了來自工程背景的 Gordon Fair、Harold Thomas Jr.，經濟領域的 Robert Dorfman、Otto Eckstein、John R. Meyer，及公共政策的 Arthur Maass、Maynard Hufschmidt 等，當時參與的學生如 Stephen A. Marglin 與 Myron B Fiering 等，之後也都在經濟與水文的領域佔有相當重要的地位。整個 Harvard Water Program 經歷大概十年的時間，試圖包含了水資源規劃管理可能相關的知識，從政府決策、作業方法、水文合成序列到電腦模擬，並對於之後的水資源管理造成深遠的影響 (Maass et al., 1962; Reuss, 2003)。

簡而言之，水庫系統在水資源層面的管理操作與相關的模式分析，通常都是在考慮儲水量與入流量的情況下分配不同用水標的的用水量，除此之外也包括發電、防洪、環境的因素。在水資源系統分析上，如能設定量化目標，就可以透過數學模型去進行相關分析。分析技術上可簡單分為模擬分析以及最佳化分析兩種手段來進行決策依據。

模擬法 (Simulation Method) 係水資源規劃目前實務上常用的方法，規劃者依照其經驗研擬不同之方案再試算其結果，以得到較佳之供水調配方案。其優點為計算上較為簡單以反應實際狀況，惟其缺點為當系統內包含多個水源設施與供水需求時，其涉及各設施供水順序與水源分配等細節時，難以明確獲得最佳方案。須配合豐富之水資源規劃經驗加以判斷，否則所擬定的方案可能與預期目標有所差距，模擬分析方法可以將系統的特性及細節作相當仔細的探討，但在不同系統仍有一般適用性的限制。優選法 (Optimization Method) 依據數學原理找尋最大或最小之目標值，最佳化分

析方法是利用數學運算來進行決策，利用定義的決策變數使目標函數最佳化的方法，分析時利用數學方程式來描述目標函數及系統運作的程序，並利用求解技術找出使目標函數值最佳的一組決策變數，一般在利用此方法時必須對問題作合理適度的簡化，優選法用於水資源規劃方面，一般則以有明確限制式與目標函數，並可建立數學模式而配合電腦運算，求得最佳運轉規則。最佳化分析需有明確的限制式以及目標函數，與模擬模型最大的差別在於在最佳化模型中其求解較為繁複，並難以確保其全域最佳(global optimality)，此外最佳化模型中目標方程式對於結果影響相當大，在現實問題決策常牽涉複雜且無法定量，因此難以簡化成簡單的目標方程式，最佳化常難以反應現實考量，而達到需求，過去最佳化方法多運用於特殊案例或學術研究，目前由於計算速度及容量之大幅成長，水資源調配模式近年來已經朝著整合模擬模式及優選模式之方向前進，在實務上許多都是以最佳化模式協助制訂操作規則後，再以模擬模式分析不同情境下依此操作規則是否能達預期結果(USACE, 2018)。

Yeh (1985)統整討論了水庫管理操作模型的方法，也是分成最佳化以及模擬兩方面，最佳化的手法可分為線性規劃(linear programming, LP)、動態規劃(dynamic programming, DP)、非線性規劃(nonlinear programming, NLP)等，這些最佳化的手法以線性規劃最為常用，因為其所需計算資源較少可以做龐大的計算，再加上一定有全域最佳解，但其缺點在於現在的水資源系統大多為非線性問題，雖然可以利用線性化的方式將非線性問題轉化成線性問題，轉化方式可以利用分段線性或者泰勒一階展開等方式。非線性規劃一般而言可以處理非線性之限制式與目標式之問題，然當可行區域及目標方程式非凹函數時(convex)存在非全域之問題，在部分問題上非線性規劃雖貼近實際條件，但收斂速度較慢以及電腦資源必須充足，隨著時代的演進電腦性能的增強，許多非線性問題都可適當處理，然仍有先天上對於序率架構處理的限制，動態規劃則是利用將非線性問題拆解成許多相似的子問題，動態規劃理論首先Bellman (1957)所提出，也常用於水庫系統最佳操作，動態規劃在求解過程中透過子問題最佳化進而找到原先問題最佳化的狀態，常用於解決累計問題或者序列網路問題，由於動態規劃是切成許多子問題來求解，因此是屬於多目標最佳化的問題，但這類型的問題常常在計算時間上相當大，在計算上相當不易，其將決策變數劃分等級的方式容易於複雜系統發生維度障礙(Curse of Dimensionality)。

Labadie (2004)將現行的各種最佳化模型在多水庫系統上的運用進行了相當完整的闡述，最佳化模型過去因為電腦硬體以及軟體的限制，使得現實問題需要簡化相當多，往往在現實生活中較難做結合，隨著時代的演進，電腦技術的突破，最佳化模型得以進一步解決問題，如多水庫的最佳化操作需要倚靠最佳化模型進行理性的管理及操作決策，並將多水庫系統

的高維度、動態性、非線性函數、序率等特性利用現行的最佳化模型進行運算，提供相當有利的工具在最佳化的操作，也提出基因演算法及類神經網路等較新穎的演算法在複雜的水資源系統上的運用，雖然這類的啟發式演算法理論依據較薄弱，但是都能得到很好的最佳化結果；藉由在決策者與系統發展間的溝通互動增加了解，可改善最佳化模型的信賴度，以增加最佳化模型在操作上的方便性。

水資源系統、水庫規劃操作的相關研究一直與時俱進，每個時期均有學者依據當時之技術進行彙整，提出對於當時 state-of-the-art 的整合性論文，包括 Yeh (1985)、Wurbs (1993)、Labadie (2004)以及 Rani and Moreira (2010)等發表之文獻，對當時期水庫管理及操作模式進行完整的評估。由於水資源系統、水庫規劃操作有一定的特殊性，相較於防洪、排水等規劃也有計畫規模較大但數量較少的特性，整體較無固定的程序可依循，因此在實務上國內外於防洪、排水均都有較完整的手冊或技術文件，然水資源規劃較難有類似資料可參考。以美國工兵團(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)來說，1997年頒佈有工程手冊 EM 1110-2-1420，於二十餘年後才又更新該手冊 Engineer Manual on Hydrologic Engineering Requirements for Reservoirs (2018)。以台灣而言，在河川治理與區域排水上過去頒佈有「河川治理及環境營造規劃參考手冊」、「區域排水整治及環境營造規劃技術手冊」，但水資源系統分析上僅有「水資源規劃規範—水源開發規劃作業規範(草案)」。水資源規劃規範草案編訂之內容包括總則、規劃作業程序與標準、基本資料蒐集與調查、工程技術分析、社會影響評估、經濟分析、財務計畫、環境影響調查評估、方案比較與優選、水資源規劃報告之撰寫、法規及行政程序等，希望能就水資源開發計畫之規劃工作賦予原則性的工作要求與標準。在此一規範草案中提及，水資源開發計畫核定或規劃之計畫供水量(出水量)與需求量透過供需模擬分析可計算出年缺水量值，選定區位之供水潛能限制及蓄水設施之供水量、供水穩定度存有相互影響之關係，水源運用需對計畫範圍內用水現況及未來用水成長充分瞭解，再依水文資料，分析不同設施規模下之供水潛能以及區域水源調度，滿足計畫供水區域內用水需求。

技術面上，水資源規劃評價水庫操作效果可根據不同的需求可分為多種形式指標，其中較為重要的為 Hashimoto et al. (1982)所提出利用可靠度(reliability)、恢復度(resiliency)，以及脆弱度(vulnerability)等之概念，可藉以瞭解操作決策該怎麼執行，以及此系統的目的。在實際分析上，若以較全面的方式探討，可同時考慮庫容選擇、供水量、及可靠度等建立 SRY 曲線(Storage-Reliability-Yield Curve)。在台灣地區主要參考評估指標包含採用的包括缺水百分日指標(deficit percent day, DPD)，缺水指數(Shortage Index, SI)及修正缺水指數(Modified Shortage Index, MSI)。缺水指數 SI 是由美國陸

軍工兵團之水利工程中心所創，缺水指數簡單的說就是缺水率平方；缺水指數越低，並不代表每時期的缺水率或缺水量越低，而是代表每時期的缺水率較為平均，不管是 SI 或 MSI 均適合作為水資源系統規劃，其可反應出缺水的頻率、強度與延時，適合做為水資源系統規劃考慮穩定出水量時之參考，但在操作、尤其是乾旱條件下，則會依據實際面的考量進行。

在實務上、無論是水資源規劃或是運轉操作，其牽涉面向相當廣泛，包括社會、經濟、環境等。不同利害相關者的因其在意的面向不同，目標也不一定一致，有些可以量化，有些在技術面上量化有其困難性，有些目標甚至是隱性(implicit)且具有敏感性，量化與否與其重要性並不一定有直接關係。所謂最佳(optimal)決策或理性(rational)決策有時並不實際存在，且彼此間也常有一定的衝突(conflict)也難有客觀的權衡(trade-off)。

另外一個在水庫操作、實務上決策的問題來自未來資訊的不確定性，當未來的入流條件無法明確獲取時，決策相對的更加困難。因此掌握水文資訊是為水資源規劃、水工結構物設計、水資源管理及水利運轉最基本的要素。概念上運用水文預報資訊來協助相關決策，透過水利設施建構與操作，有效運用有限之水資源，降低洪旱影響，氣象或水文資訊在於水資源設施操作上之角色，主要是預知未來之入流條件，瞭解豐枯條件，以進行操作，假若在未來入流條件均已知的狀況下，實務決策將相對簡單許多。水文資訊的可靠度與品質直接影響到乾旱條件下水資源調度之操作策略，假若可完全正確預知未來之入流條件，掌握瞭解豐枯條件，則可以將水資源完全利用。水文資訊於區域水資源調配與水庫操作的價值，並非實質增加可供水量，而是提供未來條件，避免過於保守或樂觀之操作而造成水資源浪費或缺水風險。因此水文預報品質如可到達相當可靠程度時，則可以作為依據改善乾旱條件下之水資源調度，以穩定區域供水，在面臨氣候變遷極端降雨的威脅，對於時序性水文資訊與了解的掌握都必須相對提高，才能進行適當的決策分析。

二、水文預報與水庫操作

美國國家氣象局(National Weather Service, NWS) 結合 NCEP 的短期降雨預報 Eta 模式、全球模式為基礎，以及水文物理模式，發展短期的水文系集預報(Ensemble Streamflow Prediction, ESP)，ESP 結合系集預報與水文模式的優勢，其能根據不同機率分佈掌握河道內逕流量、水位及洪峰到達時間的預測，NWS 於 ESP 開發階段將其應用於 Moines River 流域之逕流量預測，並提供預測結果於試驗該流域水庫農業、發電等項目之供水調度得到良好的成果(Fread et al., 1998)；Faber and Stedinger (2001)以 ESP 預報結果為基礎，結合抽樣隨機動態規劃法(Sampling Stochastic Dynamic Programming, SSDP)分析水庫最佳化操作，顯示其結合水文機率預報能使 SSDP 的分析結果更精準的描述季節性的入庫流量提高水庫操作的效率。

在此不逐一列舉，但由於時間尺度的關係，相關運用多以防洪為考量。水文預報資訊在於水資源管理應用上，Lemos 等人(2002)利用質性雨量資料探討季節性的氣象預測在巴西 Ceará 乾旱問題中的使用情形，同時討論預報資訊在該地使用不發達的原因，包括了：預測技術程度不足、資訊失真、誤解及人為操作等。O'Connor 等人(2005)調查美國東部的水資源管理者使用氣候預報的情形，指出雖然預報資訊對水資源的管理相當重要，然而它們的使用率卻不高，資訊的可信度並非造成該現象的決定因素。Changnon 與 Vonnahme (2003)針對美國中西部於 2000 年發生的乾旱，以問卷方式調查州、區內 76 位地水資源管理者使用氣象與氣候預測的情況與影響，調查顯示大部分的管理者相信 NOAA 的預測，並也依其調整策略。Ryu 等人(2009)則以韓國錦江為觀察對象，認為中期(3 至 6 個月)的流量預測對水資源的管理極為重要，當預測有大雨或旱季時，可提早做疏洪或儲水的準備。Rayner et al. (2005)探討了水資源管理者不願使用氣象/氣候預報資訊的原因，發現由於傳統上人們傾向依賴大型基礎建設將不規律的事件當作慣例處理，因此會較不注重事前的預防。此外，組織的保守及複雜性、行政作業上的限制等也都會阻礙新資訊的應用。若可增加氣象/氣候預測的可信度與實用性，或是將管理單位整合皆有助於預測資訊的使用。

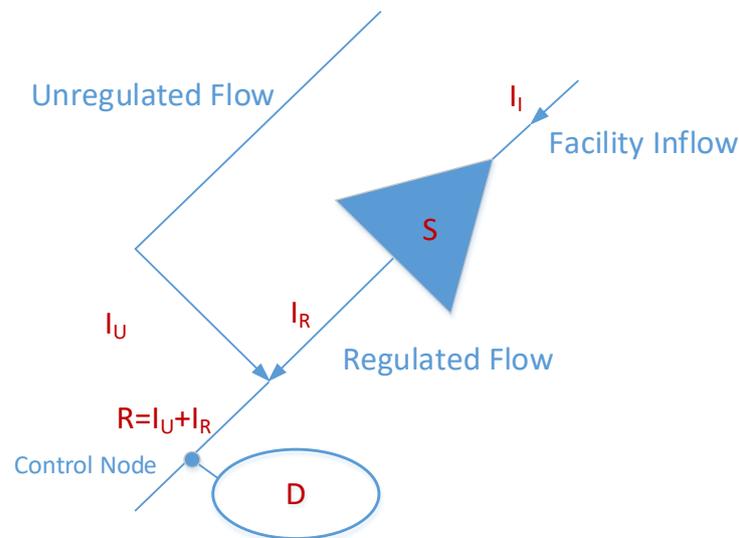
因此水文預報品質如可到達相當可靠程度時，則可以作為依據改善乾旱條件下之水資源調度，然受限於現有之預報技術，依目前預報技術於中長期預報的準確度與實際水情尚有精進空間，以台灣地區水文預報資訊是否有足以抗旱操作之量化參考基礎，在何種條件下水文預報資訊方足以作為運用基礎有值得進一步探討之必要。過去在水文乾旱規劃操作上，國內外也多採用日流量超越機率 95% (Q95)之標準作為依據，國外有採用 7 天週期 10 年回歸期(7Q10)為相關標準，在 2021 年百年大旱期間，甚至難以以 Q95 做為參考，而依據經驗法則將歷史最低流量則折減作為操作基準。水庫供水操作之主要原則為高流量時蓄水、低流量時供水。如已知未來條件水量豐沛，現有水庫則可增加供應，而反之則需量入為出，降低供水條件。目前台灣之水資源操作，主要為年間操作(inter-year)，將颱風期間之水量存蓄，其後在春季供應農、工、民生所需，至梅雨方才有較大流量入庫，至直汛期水庫蓄滿，水庫滿庫後可視為狀態重設(reset)，操作基本上與前期已無關連。假設有足夠完整資訊，則可以增加有效供水量、減少水庫滿庫溢洪的機會。簡而言之，入流資訊在水資源調配與水庫操作的價值，並非實質增加水量，而是提供未來條件，避免過於保守或樂觀之操作而造成水資源浪費，以增加供水穩定性。

雖然預報條件一直持續改善，然而期望完全準確的水文預報資訊基本上並不切實際，在水資源操作上實際面對的問題為，如何在不確定性下進行合理決策，或是評估不同不確定性下之決策品質，以避免操作上造成之

人為風險。在此一情況下，預報資料的時間尺度延長，需要相對的成本，理論上決策者當然希望越長的時間的資訊，然而越長的時間尺度相對造成資訊的不確定性，而對於目前決策有著越不顯著的影響。在多時間階段工程管理問題上，操作者通常僅需對未來一或數個時間單位做出判斷與決策，這個決策僅受於一個固定時間內的資訊所影響，雖然更長的時間資訊是可能被獲取的，但相對的這些資訊會越來越昂貴並且不可靠。因此，如何質化量化這個資訊的遞減效應對於瞭解多少時間之後的資訊可以被忽略是相當必要的(You and Yu, 2013)。水文資訊雖然有其重要性，在決策理論上，不會影響決策的資訊其實並無實際價值，透過資訊改善，於操作上增加之可供水量、因每年水文條件、各案例特性、操作決策之取水均會有所差異。舉例而言，如果入流量均大於需求，資訊並不會影響實際的水庫操作，並無任何改善效益。但如果缺水程度於操作時間內都大約一致，實際上透過水庫操作也無法有任何改善，即使知道未來可能的缺水條件也無法提前應變。而當操作時程內，入流條件有所變異，會造成部分期間缺水時，才有可能透過操作來減緩或避免缺水損失，此時對於入流資訊的掌握，才會對於水庫操作決策有所影響，而產生效益。

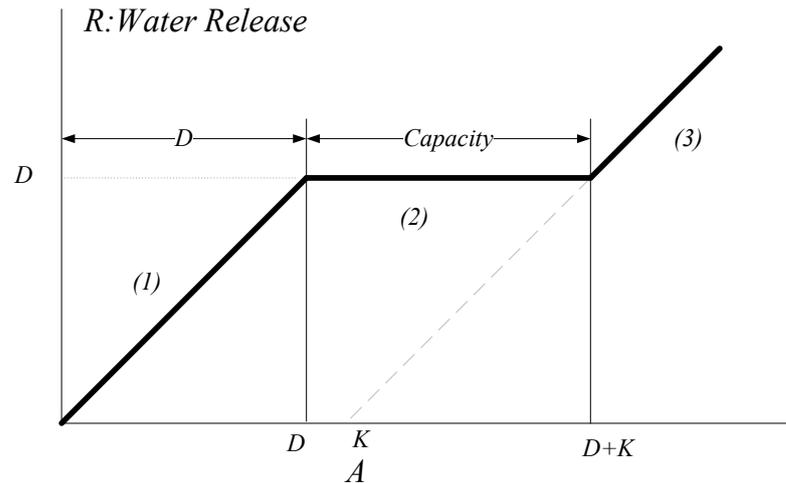
三、水庫操作的時間尺度問題探討

水庫操作的概念實際上並不複雜，基本上僅為質量守恆、解決資源分配的問題。就水資源觀點以供給面而言主要必須掌握的則是蓄水量體、未管制流量(unregulated flow)之量值。由於以供水為主之水資源調配、設施操作等，台灣多以旬為單位，故即時之通量(flux)較不重要，而是操作時距內之累計總量為主要因子，也為下個操作時距補充蓄水之量體。水資源系統因其地理位置、空間限制等，型態相對多元，然可以拆解元件簡化系統分析如圖一所示，水資源規劃操作上，其決策變數為放流量 I_R ，限制條件則是各節點之質量(資源量)守恆。在水庫操作上，為滿足供水需求，需於控制點(Control Node)供應足夠之水量，當水量不足，則會因短缺造成損失。供水之水量來自於未管制流量 I_U ，不足處則由設施蓄水放流 I_R 予以補充，在操作時則在根據現有蓄水量 S 評估，達成供給量 R ，如水量足夠時則已滿足用水需求 D 為主，是否有缺水風險需要進行減少供水($R < D$)以免未來之更大之損失，上游之來流量 I_1 ，在一般狀況下對於現階段放水供水之操作來說影響不大，然而如果要進行中長期跨時間之用水規劃與操作時，對於未管制流量 I_U 、與上游之來流量 I_1 之預測預報能力，則會有助於減少因資訊不足而造成過度放水或減供的狀況。



圖一 供水系統單元示意圖

前文已提及水庫操作之效能探討議題，在給定目標後可就入流量、水庫蓄水量、未管制流量、用水需求等進行合理分配。操作分配基本上依循水庫操作規則，在 Harvard Water Program 中對於不同的操作方式也有相當程度探討。水庫標準操作策略(standard operating policy, SOP)為大部分條件下之水庫操作條件(Maass et al., 1962; Loucks et al., 1981; Loucks et al., 2017; Stedinger, 1984)。SOP 其供水原則為儘可能滿足用水需求，即使蓄水量不足也不折扣供水，直至水庫空庫為止，但亦不提供多餘水量，除非滿庫而溢流，SOP 的水庫操作概念如圖二所示、操作原則其主要倚賴之資訊為現有之蓄水量及當下之入庫流量，兩者相加則為可運用水量(A)，為圖之橫軸。而在需水量(D)的條件下，如可運用水量小於需水量，則操作上並不會考慮未來條件，而是以滿足現有需求為優先，會將所有之可運用水量供給給使用者使用。當可運用水量 A 大於需求 D 時，水庫操作則會將滿足需求 D 後的多餘水量(D-A)蓄存於水庫內。而當多餘水量過多，超過水庫庫容(K)可以蓄存時，則會將超出庫容之水量溢流(spill)以避免水庫操作造成溢頂風險。由上說明可知 SOP 之操作規則完全不考慮未來條件及資訊，為一短視決策。由於 SOP 並未包含限水機制，因此無法提前限水以保留水庫蓄水量，有時會產生高比例缺水，甚至有空庫的情況發生，惟 SOP 可使水庫營運期間總缺水率及總缺水量降至最低，當水庫操作目標是最小化缺水量、或是損失函數與缺水量為線性關係時最小化缺水損失下，或是可靠度最高目標下，SOP 實際上為最佳操作策略(Hashimoto et al., 1982; Klemes, 1977, You and Cai, 2008a)。一般狀況下，SOP 其實為水庫操作的主要原則，在入流量充足時有一定合理性，但是其並未慮缺水了考慮後潛在缺水風險下的脆弱度與缺水量的非線性增加關係。

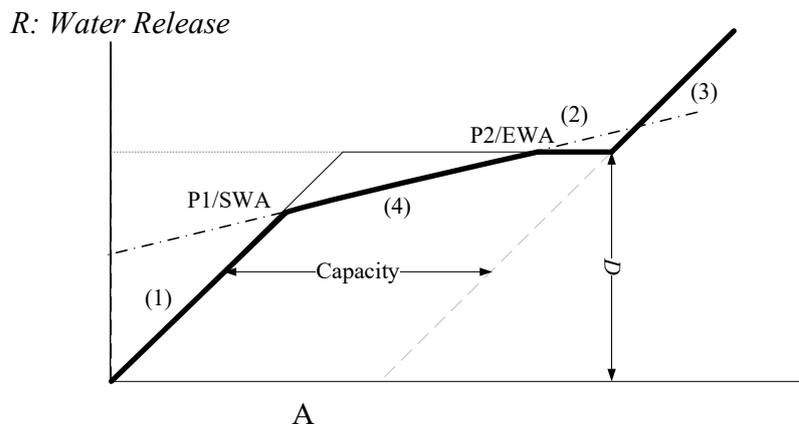


圖二 SOP 水庫操作策略示意圖

平時水庫實務操作上，以水庫標準調度規則SOP為主，在乾旱時期，才進入乾旱管理策略(Drought Management)。旱災災害係指降雨量、河川水量、地下水、水庫蓄水等水文水量減少時，因缺水對生物、環境、社會、民生及產業造成直接與間接影響所帶來之損失。直接影響如危及生物生命，農糧產量減少等。此一條件下水庫供水量會發生無法完全滿足既定的計畫需水量。水庫管理單位為了避免高比例缺水所帶來生活不便及經濟損失等負面影響，均會事先採取適當的限水因應措施，即主動減少供水以保留水庫蓄水量以供乾旱時期使用，此措施可避免乾旱時期突發的高比例缺水。水庫營運策略當然為能滿足既定的需求而不產生缺水，但若缺水現象無法避免則是要讓缺水的負面影響降至最低，合理的限水可使水庫保有充裕的供水能力而不提供充足的水量，保留水庫蓄水量以供後續使用，以避免更嚴重的缺水條件造成損失的非線性增加。

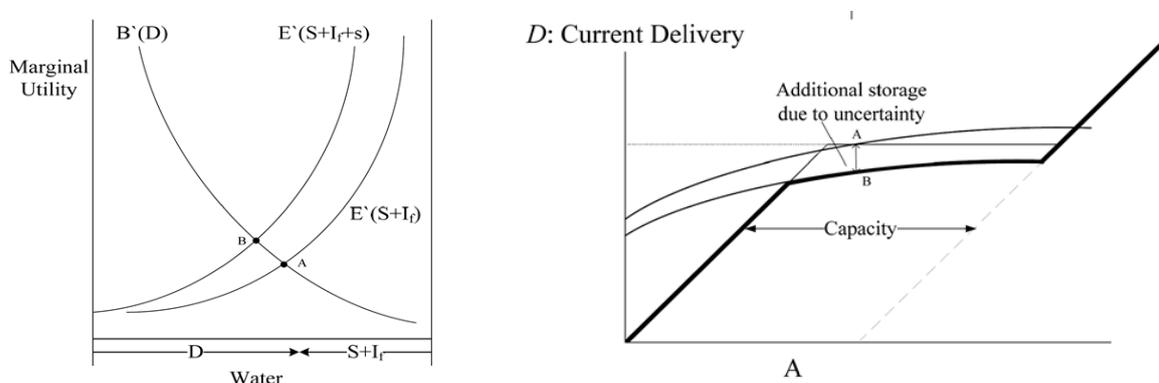
動態最佳之操作原則，常見的有水庫避險操作(Hedging operating policy)，其目的在於有效決定提前供水限縮之規模與時機而避免未來更嚴重的缺水造成重大損失，過去水庫限水操作有許多研究(Bower et al., 1962; Klemes, 1977; Stedinger, 1978; Loucks et al., 1981; Hashimoto et al., 1982)，其概念乃是動態最佳操作原則(Dynamic optimization)，達到一致性的水庫效能，而此種操作則相當倚賴對未來資訊的需求Bayazit and Unal (1990)、Shih and ReVelle (1994, 1995)到Draper and Lund (2004)及筆者(You and Cai, 2008a)過去均有一系列的相關研究。水庫避險操作之目的在於有效決定提前供水限縮之規模與時機而避免未來更嚴重的缺水造成重大損失，筆者過去提出兩階段(two-period)理論架構模式，說明概念上為考量現在與未來條件權衡，由於一般而言損失的邊際效益遞增，相較於SOP，動態操作會嘗試平均各時期的缺水條件，以使損失最小；或是以缺水指數為目標時，也會使各時期的缺水率大致相同，

以達到最佳化之條件。因此再採用動態最佳之操作時，在特定條件下，就會開始限水，如下圖三所示，類似SOP，在理論上把限水開始條件定為(SWA)，而結束條件為(EWA)。在SWA之前，因可運用水量(A)過少，考慮未來有入流可能時，全部用水都先用於現有需求。SWA與EWA之間，雖還不能完全滿足現在需求，但考量未來即使有入流也可能有相當程度缺水，會將一定水量蓄存供未來使用，則需將水資源在於現有需求與未來用水間進行最佳化之權衡。而在EWA之後，因可運用水量(A)已達一定程度，現有需求可完全滿足，蓄水量也相對豐沛時，則考慮停止限水。而SWA與EWA之間的限水操作，則為動態最佳操作與SOP的差別，實際如果能知道現在與未來入流條件，以及操作目標函數，即可分析得知最佳化操作下之限水比例。



圖三 水庫限水策略概念示意圖

上述概念是在目標函數確定及未來入流給定的條件下，然實務上未來入流在水資源規劃尺度上有其不確定性，在缺水條件下一般而言會減損其價值，因此也代表了單位用水在未來的邊際效用會更為增加，如圖四所示，給定未來效用函數時，不確定性會增加未來的邊際效益，因此現在與未來水資源分配的平衡點從 A 點移動到 B 點，也因此，考量未來入流的不確定性會使得操作者更加保守，增加一部份蓄水以因應未來的不確定性，並減少目前的供水。



圖四 入流不確定性對於操作之影響

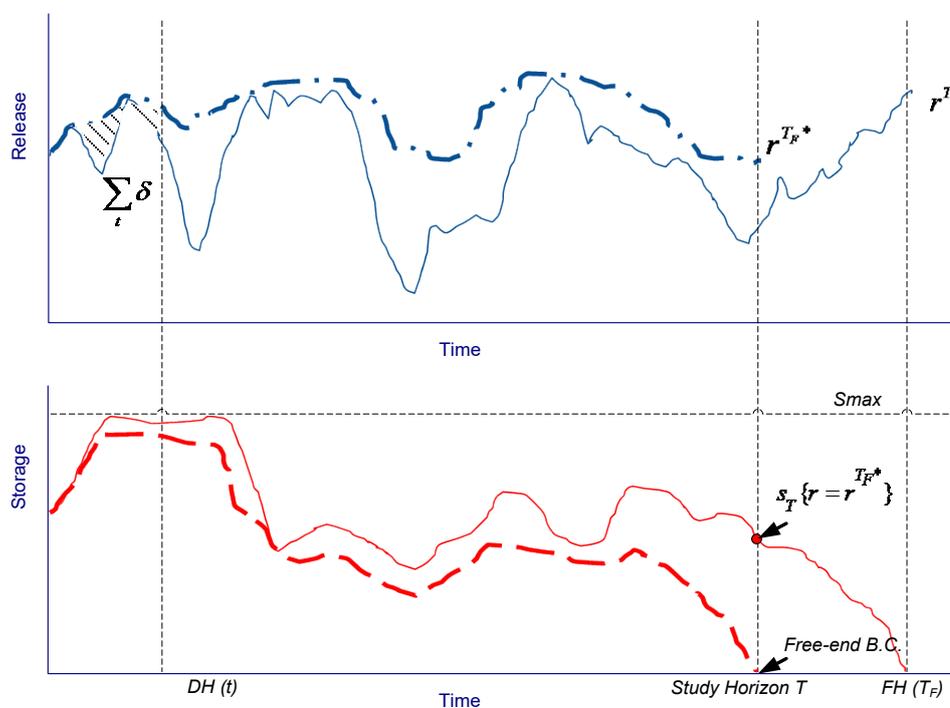
二階段的概念模式雖然能解釋避險操作的概念，然實際上所謂未來牽涉到其規劃時程的問題、也就是時間尺度的問題。時間尺度在預報與規劃上是一個相當重要的議題，牽涉到了決策時間尺度(decision horizon)與資訊時間尺度(forecast horizon)的概念(You an Cai, 2008b)，預報資料的時間尺度延長，需要相對的成本，理論上決策者當然希望越長的時間的資訊，然而越長的時間尺度相對造成資訊的不確定性，而對於目前決策有著越不顯著的影響。雖然俗諺說：人無遠慮、必有近憂，然過長的未來實際上對於目前需要下的決定，實際上常未能造成影響。在多時間階段工程管理問題上，操作者通常僅需對未來一或數個時間單位做出判斷與決策，這個決策僅受於一個固定時間內的資訊所影響，雖然更長的時間資訊是可能被獲取的，但相對的這些資訊會越來越昂貴並且不可靠。

以水庫操作來說，要進行本旬、或者是下旬的決策，在豐水期可能完全不需要未來入流的資訊，然在枯水期可能需要未來數個月的入流預估，方能有良好的決策。但對於目前操作來說，一兩年後的入流資訊，其實可能並不需要。因此可以把需要進行決策的時間範圍定義為決策時間尺度(decision horizon, DH)而其所需要的資訊時間尺度則為(forecast horizon, FH)，舉例來說，如果我們要決定下個月的水庫放流量，而發現僅未來三個月的入流預測會影響到決策，簡單來說可以說 DH 為一個月而 FH 為三個月。水庫操作上，給定決策時間尺度下所需要的資訊時間尺度關係其實相當動態，牽涉到入流的不確定性、用水需求、效用的時間偏好(折現率)、現有的水資源、蓄水量等相對關係。

筆者過去相關研究大致對於各種相關性進行分析(You and Cai, 2008b)，而其中一個相當關鍵的控制關鍵就是水庫是否滿庫，或者是在考量不確定性下，滿庫發生的可能性。過去研究大概指出，水情稍微緊張、入流量與需求大致接近時，水庫容量和流入預測的不確定性都會影響水庫蓄滿的機率，一般而言較大的水庫容量可有更大的操作彈性，因此也需要較長資訊時間尺度，而入流的不確定性反而會縮短所需的資訊時間尺度，太高的不確定性造成未來資訊對於現況操作影響有限，理性的操作反而應著眼近期的風險。但如果水情相當嚴峻的情況下，庫容與入流的不確定性對於資訊時間尺度都會影響更小，因為持續缺水的狀況下，調控的空間也更有限，日常的現實狀況也常常類似，當下的問題都難以解決、更沒有餘裕去考慮未來。另一種情況則是入流量可能持續大於需求的狀況下也類似，花有千日好的狀況其實也不太用擔憂未來，但此時不確定性會很明確的增加決策對於資訊時間尺度的需求，反映了當有相當餘力時，則會更重視因應潛在可能風險。在此一推論下，一個特殊狀況就是靜態的決策，意思是說，以當下的資訊最當下的決定即可，如SOP即是僅考慮當下的條件，當入流量均高於需求、而不確定不高時，SOP的確是可以接受的操作策略。

決策時間尺度、資訊時間尺度可以用以探討思考決策與資訊時間長度之關係，然而受限於預報技術，再需要決策的時間尺度(DH)上，並不一定有可用的資訊時間長度(FH)，從另外一個角度去思考，如果在相同決策時間上，用有限長度預報資訊，會造成多少的誤差。此一概念在作業研究領域由 Lundin and Morton (1975)提出，儘管這一概念已被廣泛接受，但在多僅為概念，缺乏明確定義，雖然學者如 Kleindorfer and Kunreuther (1978)、Morton (1981)、Sethi 和 Sorger (1991)均有延續此一議題進行討論，然均較深入探討。Chand et al., (2002)重新審視了誤差界限問題，並認為值得進一步探討。

運用決策理論的概念乃是去檢視在有限時間尺度(Study Horizon, SH)下的資訊是否造成決策的誤差，可以以下圖作為一個例子，當可用資訊延長時，更多的資訊會使得決策發生改變，如圖中放水(release)、蓄水量(storage)實線與虛線的不同，比較兩個決策間之差異是否顯著，可作為判斷決策差距的依據。圖五上半部分為放水決策變量(decision variable)、下半部分為庫容蓄水量狀態變數(state variable)，當可供決策的資訊從 FH 縮短到 SH 時，造成決策的差距，即為造成之誤差。筆者過去(You and Yu, 2013) 運用此一概念定義了 ε -optimality condition，並進一步推得誤差之收斂速率。



圖五 時間尺度對於決策之影響

運用此一條件則可檢視對於預報資訊的需求程度。簡而言之，預報資訊對於決策之影響大概與其長度成反比，當預報資料從三個時間單位延伸到四個時間單位時，其對於決策之影響將會降為 $1/4=25\%$ 。但此一條件是基於理論推導，缺乏對於預報準確性與不同問題差異性之探討，實際問題如欲進一步探討，預報品質的量化為決策評估的重要基礎，防洪規劃上，多基於運用極端值理論(extreme value theory)率定最大流量或降雨進行分析規劃，然水資源規劃上水文資料的需求更為複雜，入流量的時序變化都會影響到操作決策，目前氣象、水文數值模式預報常藉由系集的方法盡可能呈現水文之不確定性。系集預報主要提供了一個機率概念的預報基礎，然而對於系集機率預報(ensemble probabilistic forecasts, EPFs)，如何定義其預報品質，仍存在許多討論空間(Brier, 1950; Murphy, 1993)，也連帶影響到水庫操作的決策上的運用。

四、水庫操作面對的挑戰

雖然在理論上發展可以協助瞭解並思考技術層面的問題，然而實際上水庫操作處理的問題有更複雜的層面，今天的水資源規劃和管理不可避免地涉及不同的目的或目標，其中許多可能是相互衝突的。雖然在語言上會提到整合性管理、共創雙贏等願景，然實際上均牽涉到不同目標的權衡，基本上雖然有可能，但很同時難滿足所有需求，而不同目標之間的優先順序、妥協折衝等，均為價值的選擇。決策者必須在利益相關者的利益與相互衝突標準之間進行權衡及決定，目前雖然有所謂的多目標最佳化的工具，但大致方法其一為將多目標以權重比例整合成單一目標，此一方法價值的選擇在於目標函數的形式、權重等會反應出來，另外一種則是同時處理多個目標，尋找出所謂的柏拉圖最適條件(Pareto Front/Pareto Frontier)，其指資源分配的一種理想狀態，但實際上也是由多組選擇所構成，在這些選擇上一樣會有不同目標價值優先順序的問題。

在水資源規劃上、工程師常過於著重技術層面的分析，在理性假設(rational)的原則下，社會規劃代理者(social planner)以效益最大化的概念進行相關問題處理，然實際上存在的問題包括何謂社會效益最大、決策者的考量與社會效益最大化也不一定一致、再加上不同利害關係者也都有其不同的決策誘因，都會讓決策問題更加複雜。在分析規劃上如何納入社會、政治層面的問題雖然並非不可能，但某種程度上有其限制，在某個程度有政治正確的問題。目前相關的水資源系統分析技術，仍適合定位為決策支援系統(Decision Support System, DSS)，而非作為操作指引。資源分配在資訊充足目標明確上能較容易並合理達成，然未來條件的不確定性是一個考量，社會層面的不同議題也都是國內外實務上常遭遇的挑戰。水資源的管理上有許多衝突，著名的學者 Dinar 在水資源管理的衝突的議題上有許多探討(Dinar et al., 1997; Dinar, 2000; Dinar 2007)，不同水資源相關單位機構

之間，基本上還是以本身的最大利益為出發點，自然會有彼此間的衝突，然在各項議題的處理上，最主要的常仍是各單位相對的政治影響力，會有較重要的影響(Fisher and Huber-Lee, 2012; Dinar, 2007)。由於各單位為獲取自己的最大化效益，就會投入爭取，已獲取社會資源、穩定其掌控地位，在經濟上就是所謂的競租(rent seeking)，實際上反而會造成社會效益的減損。在水資源中的衝突，也會造成類似的負面影響(Anderson and Hill, 1997; Franks et al., 2014)，資源的爭取上彼此均是財務利益和政治利益之間的相互作用。同一行政體系內，如由上而下的政治決策仍常是解決問題的主要方式，但常招致許多反彈，也會有執行上的阻力，而跨國間的問題則會讓實際狀況更複雜。單一水資源系統的不同單位，決策上基於自利行為(self-interest behavior)並沒有不合理，而當與社會效益有所落差時，大多數研究建議避免政策干預的作為，部分政策干預的作為甚至會有偏頗的情形，而市場機制的誘因政策反而較為合適(Dinar et al., 1997; Rosegrant and Binswanger, 1994)

台灣依據水利法，水為天然資源，屬於國家所有，但實際上牽涉到不同單位，經濟部水利署為主管機關，負責全國河川、水利、水資源相關業務之推動及其政策、法規之擬訂與執行，另外還有農田水利署負責農田水利政策與法規之規劃、研擬、協調、執行及推動，其下還有各管理處負責各區域的灌溉業務，此外供水上還有台北自來水事業處、台灣自來水公司，此外還牽涉到各縣市政府等。而目前的水庫除水利署管理外，也包括臺灣電力公司、農水署等。雖然國內各單位多能秉持社會責任，考量國家需求來進行相關操作，但整體上難說毫無影響。以大台北區域來說，同時有翡翠水庫、石門水庫，使用者則有台灣自來水公司、台北自來水處，目前雖然有板新地區供水改善二期計畫串連翡翠水庫供、石門水庫供水區，但以台灣自來水公司而言，其第一優先仍為運用石門與鳶山堰之間的側入流，其次則為石門放水量、最後才為板新二期的水量，但由於兩個集水區水文條件及供需狀況，此一操作則會增加石門水庫供水之壓力。然使用板新二期的水量會增加公司的財務負擔，但對於大台北的水資源整體運用則有助益。以台北市政府立場而言，大部分的情形下，其實水資源是足以對外供應，然當台北水情相當嚴峻時，板新二期將？會是相當負擔，雖然目前板新二期為常態運用，但何時應停止供水，也是需思考的面向。類似的情形如台電德基水庫如何在發電與供水中間的平衡、寶山與寶二的並聯運用、桃園新竹連通管的操作時機等都是類似議題。目前規劃中的珍珠串計畫，將現有的水利調度規劃包裹，串接各地水資源，但實際上如何操作、如何達到風險分擔、資源最佳化的目的，仍有相當探討空間。此外由於國家能源轉型方面，提出強化能源安全，再生能源配比占 20%之願景，創新綠色經濟，促進環境永續及社會公平，然在高負載的狀況下，放水發電可以避免電力供應的風險、在枯水期的放水又可能增加造成未來缺水的狀

況，水電之間的決策權衡也相當困難。而豐水期考量發電的高水操作，在防洪上也會有所衝擊。

由於水資源分配所牽涉的層面廣泛，我們面臨到的問題不僅侷限於工程方面，也更深層的影響到整個生態、社會、政策與經濟發展，更甚者還造成國際間的局勢失衡。隨著氣候的變遷，水資源的取得與分配更是越來越重要的課題，在水的議題越來越多樣化的今天，如何透過不同的方法，去解決人類面臨到的水資源相關問題，將會是人類永續發展的一個重大挑戰。

參考文獻

1. Anderson, T.L. and Hill, P.J., 1997. *Water marketing, the next generation* (No. 37). Rowman & Littlefield.
2. Bellman, R. (1957). A Markovian decision process. *Journal of mathematics and mechanics*, 679-684.
3. Bower, B. T., Hufschmidt, M. M., & Reedy, W. W. (1962). Operating procedures: Their role in the design of water-resource systems by simulation analyses. *Design of water resource systems*, 443-458.
4. Buras, N. (Ed.). (1997). *Reflections in Hydrology: Science and Practice*. American Geophysical Union.
5. Chand, S., V. N. Hsu, and S. Sethi (2002), Forecast, solution, and rolling horizons in operations management problems: A classified bibliography, *Manuf. Serv. Oper. Manage.*, 4(1), 25-43.
6. Changnon, S. A., & Vonnahme, D. R. (2003). Impact of spring 2000 drought forecasts on Midwestern water management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(1), 18-25.
7. Dinar, A., 2000. The political economy of water pricing reforms.
8. Dinar, A., 2007. *Bridges over water: understanding transboundary water conflict, negotiation and cooperation*. World scientific.
9. Dinar, A., Rosegrant, M.W. and Meinzen-Dick, R.S., 1997. *Water allocation mechanisms: principles and examples* (No. 1779). World Bank Publications.
10. Faber, B. A., & Stedinger, J. R. (2001). Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts. *Journal of Hydrology*, 249(1-4), 113-133.
11. Franks, T., Kay, M. and Smith, L.E., 2014. *Water: economics, management and demand*. CRC Press.
12. Fread, DL, Ingram, J, Schaake, J, & Braatz, DT. (1999). Recent experience with ensemble streamflow prediction in the Des Moines River basin. Paper presented at the Preprints 14 th AMS Conf. on Hydrology.

13. Jeong, D. I., & Kim, Y. O. (2005). Rainfall-runoff models using artificial neural networks for ensemble streamflow prediction. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(19), 3819-3835.
14. Kleindorfer, P., and H. Kunreuther (1978), Stochastic horizons for the aggregate planning problem, *Manage. Sci.*, 24, 485-497.
15. Klemeš, V. (1977). Value of information in reservoir optimization. *Water Resources Research*, 13(5), 837-850.
16. Labadie, J. W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of water resources planning and management*, 130(2), 93-111.
17. Lemos, M. C., Finan, T. J., Fox, R. W., Nelson, D. R., & Tucker, J. (2002). The use of seasonal climate forecasting in policymaking: lessons from Northeast Brazil. *Climatic Change*, 55(4), 479-507.
18. Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2017). *Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications*. Springer.
19. Loucks, D. P., Stedinger, J. R., & Haith, D. A. *Water Resources Systems Planning and Analysis*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.
20. Lundin, R. A., & Morton, T. E. (1975). Planning horizons for the dynamic lot size model: Zabel vs. protective procedures and computational results. *Operations Research*, 23(4), 711-734. Lundin, R. A., & Morton, T. E. (1975). Planning horizons for the dynamic lot size model: Zabel vs. protective procedures and computational results. *Operations Research*, 23(4), 711-734.
21. Maass, A., Hufschmidt, M. M., Dorfman, R., Thomas Jr, H. A., Marglin, S. A., & Fair, G. M. (1962).. *Design of water resources systems*. Harvard University Press, Cambridge, 3, 1.
22. Morton, T. E. (1981), Forward algorithms for forward thinking managers, *Appl. Manage. Sci.*, 1, 1-55.
23. O'Connor, R. E., Yarnal, B., Dow, K., Jocoy, C. L., & Carbone, G. J. (2005). Feeling at risk matters: water managers and the decision to use forecasts. *Risk Analysis: An International Journal*, 25(5), 1265-1275.
24. Rani, D., & Moreira, M. M. (2010). Simulation-optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. *Water resources management*, 24(6), 1107-1138.
25. Rayner, S., Lach, D., & Ingram, H. (2005). Weather forecasts are for wimps: why water resource managers do not use climate forecasts. *Climatic change*, 69(2), 197-227.
26. Reuss, M. (2003). Is it time to resurrect the Harvard Water Program?. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(5), 357-360.

27. Rippl, W. (1883). The capacity of storage-reservoirs for water-supply. (including plate). In *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers* (Vol. 71, No. 1883, pp. 270-278). Thomas Telford-ICE Virtual Library.
28. Rosegrant, M.W. and Binswanger, H.P., 1994. Markets in tradable water rights: potential for efficiency gains in developing country water resource allocation. *World development*, 22(11), pp.1613-1625.
29. Ryu, J. H., Palmer, R. N., Wiley, M. W., & Jeong, S. (2009). Mid-Range Streamflow Forecasts Based on Climate Modeling—Statistical Correction and Evaluation 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(2), 355-368.
30. Sethi, S., and G. Sorger (1991), A theory of rolling horizon decision making, *Ann. Oper. Res.*, 29(1), 387–415.
31. Stedinger, J. R. (1984). The performance of LDR models for preliminary design and reservoir operation. *Water Resources Research*, 20(2), 215-224.
32. U.S. Army Corps of Engineers. (2018). Engineering and design: Hydrologic engineering requirements for reservoirs. Engineer manual 1110-2-1420, Washington, D.C.
33. Wurbs, R. A. (1993). Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of water resources planning and management*, 119(4), 455-472.
34. Yeh, W. W. G. (1985). Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. *Water resources research*, 21(12), 1797-1818.
35. You, J. Y., & Cai, X. (2008). Hedging rule for reservoir operations: 1. A theoretical analysis. *Water Resources Research*, 44(1).
36. You, J. Y., & Cai, X. (2008). Determining forecast and decision horizons for reservoir operations under hedging policies. *Water resources research*, 44(11).
37. You, G. J. Y., & Yu, C. W. (2013). Theoretical error convergence of limited forecast horizon in optimal reservoir operating decisions. *Water Resources Research*, 49(3), 1728-1734.
38. 經濟部水利署，(2001)，「水資源規劃規範-水源開發規劃作業規範(草案)」。
39. 經濟部水利署，(2006)，「區域排水整治及環境營造規劃技術手冊」
40. 經濟部水利署，(2006)，「河川治理及環境營造規劃參考手冊」。

水庫集水區非點源污染削減策略

經濟部水利署臺北水源特定區管理局/劉秀鳳局長

國立臺灣科技大學營建工程系/何嘉浚副教授

國立臺北科技大學土木工程系/陳起鳳副教授

國立臺灣科技大學營建工程系/林怡萱博士生

經濟部水利署臺北水源特定區管理局/李仲卿課長

關鍵字：水庫集水區、非點源污染、低衝擊開發、甲類水體標準、植生滯留槽

摘要

臺北水源特定區包含翡翠水庫集水區，其集水區內茶園面積約為553.9公頃，農地之施肥若尚未被農作物吸收，便會隨暴雨挾帶進入河川，形成農業非點源污染並對集水區河川及水庫水質造成影響。臺北水源特定區管理局自民國102年起於翡翠水庫上游坪林區推動低衝擊開發(Low Impact Development, LID)以削減茶園非點源污染，並且發展出最佳化設計準則，若以金瓜寮溪的總磷達甲類水體標準之年達標率超過85%為短期水質改善目標，則每年每公頃的茶園約需削減270 g的總磷，分析至少需於金瓜寮溪流域設置350 m²的植生滯留槽。迄民國111年已設置59座約93 m²之植生滯留槽，每年約可以減少1,728 g的總磷進入水體中，目前可以使金瓜寮溪的水質達標率從79.02%提升至81.20%。

一、前言

臺北水源特定區於民國73年依都市計畫法劃定，範圍由青潭堰取水口上溯至新店溪、北勢溪、南勢溪及各支流，涵蓋新北市之新店、烏來、石碇、坪林、雙溪等五區，面積約717平方公里，達新北市行政區域面積三分之一，包括臺北水源特定區(690.74平方公里)、新店水源特定區(24.18平方公里)、烏來水源特定區(1.53平方公里)及坪林水源特定區(0.55平方公里)等。臺北水源特定區包含新店溪上游之翡翠水庫集水區(北勢溪)與南勢溪集水區，兩溪於新店龜山匯流後稱新店溪，為大臺北地區主要自來水水源，供水範圍包括臺北市及新北市之三重、新店、中和、淡水、三芝等地區；隨「板新地區供水改善計畫二期工程」於民國109年完工，擴大供應板橋、新莊、樹林及鶯歌等地區用水，因此臺北水源特定區內水源、水質及水量之安全與潔淨，

直接影響目前大臺北地區約600萬人口及今後支援石門水庫供水區之用水品質(臺北水源特定區保育實施計畫第三期(107-111年),2017)。

為確保臺北水源特定區的水質，臺北水源特定區管理局(以下簡稱水特局)首先於特定區內興建三座污水處理廠及九處小型生活污水處理設施，依民國110年平均污水處理量約115萬立方公尺，污水系統管線總長約124公里，已納管污水處理7,010戶，污水處理率依未納戶一、二期計畫計算方式為82.78%，依內政部營建署舊制計算方式則達92.87%（依新制計算方式則為60.47%）。近年來由於生活污水處理率的提升，有效的改善並維持著水體水質，以翡翠水庫為例(詳圖1)，年平均卡爾森指數(CTSI)值小於50，且自民國102年開始CTSI值均小於40，屬貧養狀態；再者，自民國106年起總磷年平均濃度均低於10 µg/L，達成地面水體分類之甲類水體標準(詳圖2)，水質已恢復至民國80年國道五號雪山隧道施工前之水質水準，顯示翡翠水庫集水區之污染源削減與水質改善呈現良好成果。(臺北水源特定區保育實施計畫第四期(112-116年)，2022)

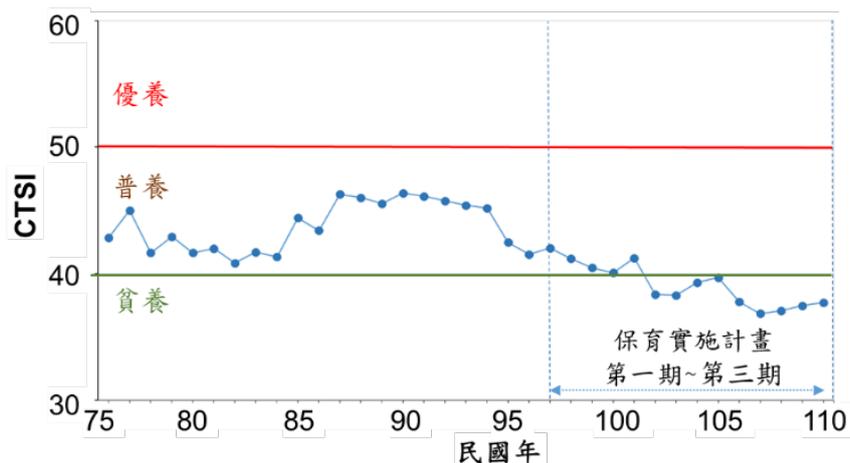


圖1 翡翠水庫CTSI年平均値

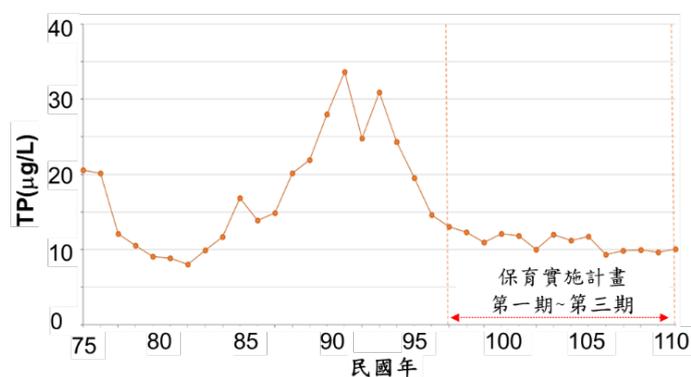


圖2 翡翠水庫總磷(TP)年平均値

若調查並分析翡翠水庫上游集水區入庫溪流自104年迄今的六項地面水體水質分類標準之甲類水體達成率，可以得知溶氧(DO)為99%、生化需氧量(BOD)為82%、pH值為99%、氨氮為(NH₃-N)為98%、懸浮固體(SS)為100%及總磷(TP)為69%。整體而言TP的達成率較低，推測應該是集水區內的非點源污染貢獻所致，而TP污染源主要為非點源之天然林地（環境背景污染源），其次為農業活動，因此若要有效提升集水區內河川的水質達成率，非點源污染的削減勢在必行。

二、非點源污染削減策略沿革

為削減翡翠水庫上游集水區之非點源污染，以提升包括北勢溪、金瓜寮溪及逮魚堀溪等三條入庫溪流的水質，因此水特局自民國90年便開始關切水庫集水區之非點源污染對水質的影響，並採用HSPF(Hydrological Simulation Program - FORTRAN)集水區模式進行非點源污染量的推估(詳圖3)。



圖3 翡翠水庫集水區非點源污染削減沿革

數值分析結果可以得知翡翠水庫上游集水區之污染貢獻量中，點源污染約佔18%，而非點源污染則約為82%，隨著近年來生活污水的接管率及小型污水廠的普及率提升，點源污染的佔比已逐年下降中，故非點源污染對水體水質的影響相形重要。水特局自民國97年參考美國環保署的作法，引進最佳管理作業(Best Management Practices, BMP)，並於民國98年完成「翡翠水庫上游集水區茶園非點源污染BMPs手冊」，針對97年於金瓜寮流域及逮魚堀流域之污染熱區所預選之十二處BMP場址，在民國100年擇二處進行人工濕地的建置，完成仁里坂第13及第14號水質淨化示範區，可處理之集水區面積計為2.0公頃，共可處理544 CMD之暴雨逕流雨水，經處理後

磷去除率可達40~55%，懸浮固體去除率可達60~75%，生化需氧量去除率可達50~60%。



(A) 13號場址



(B) 14號場址

圖4 仁里坂人工濕地

然由於採用人工濕地等集中式BMP設施來削減非點源污染所需的面積較大且場址條件要求較高，因此水特局自民國101年起導入分散式低衝擊開發(Low Impact Development, LID)來削減茶園非點源污染，並以LID設施中常見之植生滯留槽(bioretenion cell)來做為主要建置設施。自102年開始，首先針對金瓜寮河流域進行茶園面積的普查，經調查本流域共計212處茶園，總面積為83.49公頃，該年度並擇二處茶園分別設置二處面積皆為1 m²的植生滯留槽示範場址，以了解其對農業非點源污染的去除成效；於民國103年則是針對逮魚堀河流域進行普查，經調查該流域共計有164處茶園，總面積為74.6公頃，該年度並設置五處總面積達6.25 m²的植生滯留槽示範場址；另於104年則是針對北勢河流域鄰溪200 m範圍內進行普查，經調查

鄰溪200 m茶園筆數為326筆，總面積為88.4公頃，並設置一處1 m²的植生滯留槽示範場址，自民國102~104年共計設置八處，總面積為9.25 m²的植生滯留槽示範場址，且每一年均進行多次的兩天地表逕流水質採樣，以了解植生滯留槽對於農業非點源污染的去除成效。

經過三年的示範計畫之後，確定植生滯留槽對於農業非點源污染有其顯著的成效，氨氮(NH₃-N)平均可以去除70%~80%、總磷(TP)平均可以去除50%~60%、懸浮固體(SS)平均可以去除80%~90%、生化需氧量(COD)平均可以去除80%~90%，因此水特局於民國106年研提「臺北水源特定區保育實施計畫(第三期)」時，便將LID(植生滯留槽)納入農業非源污染削減之主要策略。經分析長年來三條入庫溪流的水質後，發現以大腸桿菌群及總磷未達到甲類地面水體標準的比率最高，其中總磷主要來自於農業污染，因此以總磷作為本計畫區農業非點源污染削減的特徵污染物。

三、LID之最佳化設計

為了解若全面設置LID對河川水質的改善成效，因此水特局於民國107年開始發展建置SWMM水質模式來滾動式檢討執行策略，經模式分析民國104年~108年的水質後得知，北勢溪五年來總磷的平均達標率為86.75%，逮魚堀溪為97.39%，而金瓜寮溪的達標率最低僅為79.02%(詳表1)，故特將水質目標短期達標率訂為85%，而中長期目標則訂為90%，並以金瓜寮溪流域為優先改善對象，進行LID設施的規劃設計。

表1 入庫溪流總磷年平均達標率

年份 \ 溪流	北勢溪	逮魚堀溪	金瓜寮溪
104年	91.21%	100%	82.14%
105年	86.61%	99.18%	79.23%
106年	85.95%	99.35%	78.43%
107年	88.73%	98.64%	81.37%
108年	81.24%	89.77%	73.91%
平均值	86.75%	97.39%	79.02%

待水質管理目標訂定之後，利用SWMM模式進行金瓜寮溪流域之流量與污染源之率定、驗證與分析(詳圖5及圖6)，可以得知目前總磷平均負荷量為534.74 kg/yr，若欲達到85%之短期水質目標達標率，則總磷必須削減至518.22 kg/yr，削減量為16.52 kg/yr，若將其平均分配至61.18公頃之茶園

污染熱區，則每年每公頃的茶園必須分擔270 g/ha-yr的總磷削減量；若欲達到90%之中長期水質目標達標率，則總磷必須削減至508.36 kg/yr，削減量為26.38 kg/yr，若將其平均分配至茶園污染熱區，則每年每公頃的茶園必須分擔326 g/ha-yr的總磷削減量。

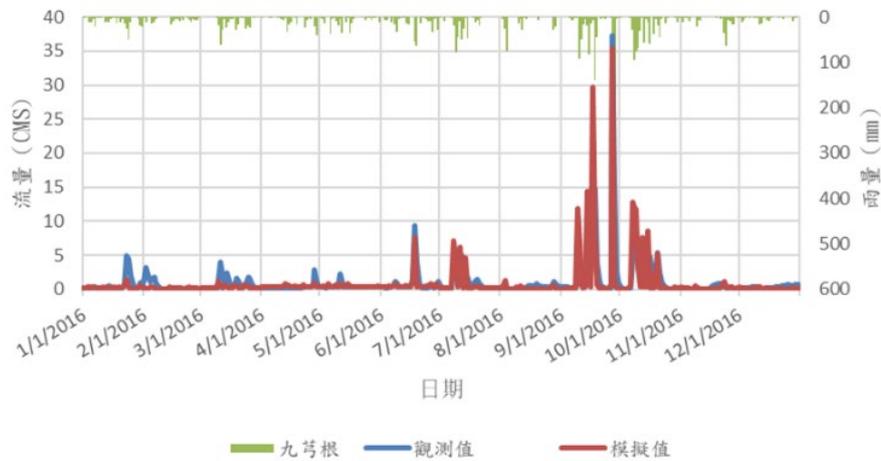


圖5 金瓜寮溪流量率定驗證結果



圖6 金瓜寮溪總磷率定驗證結果

除此之外，俟河川流域水質模式建置完成並確認水質目標及削減量之後，為落實污染削減策略，故研擬LID最佳化設計準則，首先依循上述原則得知水質管理目標及每公頃茶園削減分配量之後，接下來分析民國102~104年建置之八處植生滯留槽示範場址的水質採樣資料，進行單一茶園的水質模式建置，分析單位面積植生滯留槽的污染去除成效，以計算欲達上述污染削減分配量所需之LID面積(如圖7)，經分析後得知每平方公尺植生滯留槽每年可以削減26 g/yr的總磷，據此研析若金瓜寮溪水質欲達到85%的總磷達標率，則需設置350 m²的植生滯留槽，若欲達到90%的中長期目標則需設置600 m²。



圖7 植生滯留槽之最佳化配置圖

四、LID之現場建置

設定完成水質管理目標及策略之後，隨即進行LID的規劃設計，根據上述之茶園分析模式確定LID的最佳設置數量後，進行現地勘查及拜訪地主，以得知其設置意願及可供設置之面積，於民國107年完成2公頃的茶園LID最佳化配置並建置完成五處8 m²的植生滯留槽；民國108年則持續針對金瓜溪流域進行5公頃茶園之LID最佳化設計，並完成20 m²的植生滯留槽建置，截至民國111年底共計可完成59處，約93 m²的植生滯留槽設置，對應之水質達成目標，可以使金瓜寮溪流域之平均達成率自79.02%提升至81.20%。由於現況仍尚未達到設定之85%短期目標達成率，故水特局截至目前為止仍逐年編列相關計畫經費建置植生滯留槽等LID設施，以達到預期之水質管理目標值。

為因應坪林地區茶園之地形與地貌特性，故特別發展出四種不同之植生滯留槽型式供彈性採用：

- (一)出流型植生滯留槽(圖8)：亦可稱之為傳統型植生滯留槽，若現地場址有明顯之高程差可以於植生滯留槽之底部設置出流管，則可採用本種型式，以使淨化後的出流水可直接流入水體中，並方便進行水質採樣，以評析其水質淨化成效。
- (二)入滲型植生滯留槽(圖9)：若現地地形無明顯之高程差可供設置植生滯留槽之出流管，則可以將植生滯留槽直接埋入在逕流水的流水通路上之適當位置，以使逕流雨水可流入植生滯留槽後並往下入滲，除了可以達到水質淨化的目的外，亦可以藉此補注地下水。

(三)河階型植生滯留槽(圖10)：此型式適合設置於河岸之高灘地處，由於部份茶園緊臨著河川護岸，逕流雨水可能藉由排水孔或涵管直接流入或溢流至河川中，如此便可於排水孔或涵管之出流口處，利用河川或護岸之高灘地閒置空間設置河階型植生滯留槽，以蒐集並淨化其逕流雨水。

(四)模組化植生滯留槽(圖11)：此型式為水特局自行研發並申請專利之產品，主要為對於較偏遠且SS濃度高之茶園，因植生滯留槽容易阻塞而需時常維護管理，傳統型植生滯留槽若欲更換內填濾料則需全面挖除重填，模組化植生滯留槽則因內部再區隔成16個子單元，故可以針對阻塞的子單元進行人工更換即可。



圖8 出流型植生滯留槽



圖9 入滲型植生滯留槽



圖10 河階型植生滯留槽



圖11 模組化植生滯留槽

五、智慧化維護管理機制

因目前植生滯留槽的設置日益增多，實不宜再採用人工巡查的方式進行設施之維護管理，因此水特局自民國108年開始嘗試導入IoT的理念來協助茶園設置LID的後續管理，主要於計畫區之植生滯留槽的地表逕流入流口及出流口分別埋設一支土壤水份計，並於現地未受遮蔽處設置一處自計式雨量計，另建置一套專用之自動傳輸系統及資訊接收與展示平台(詳圖12)，一旦降雨時雨量計監測到降雨量之後，地表開始產生逕流並流入植生滯留槽之後，入流口之土壤水份計便會監測到土壤水份的變化，藉由二者間的時間差便可推算得知地表逕流發生的時間及累積降雨量；之後逕流雨水流入植生滯留槽並往下入滲後從出流口流出，出流口之土壤水份計便會監測到土壤水份的變化，入、出流口土壤水份計變化的時間差便可以推算

植生滯留槽的入滲率(詳圖13)，一旦入滲率低於設計入滲率，便可以推測該植生滯留槽可能產生阻塞而需要進行維護或更換濾料。

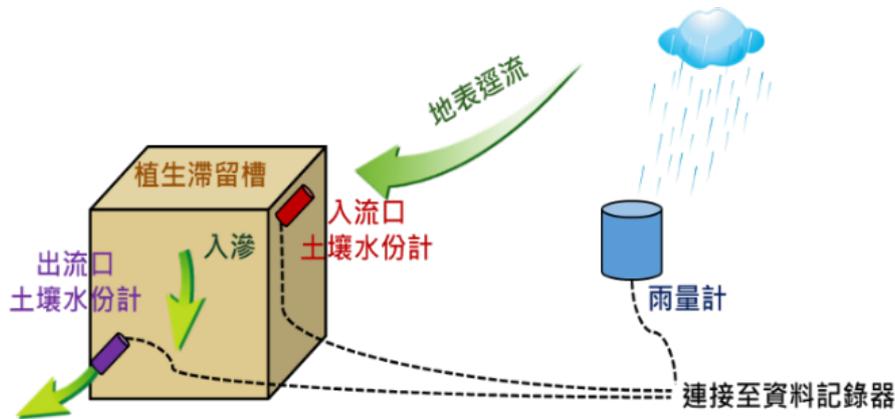


圖12 植生滯留槽IoT設施配置圖

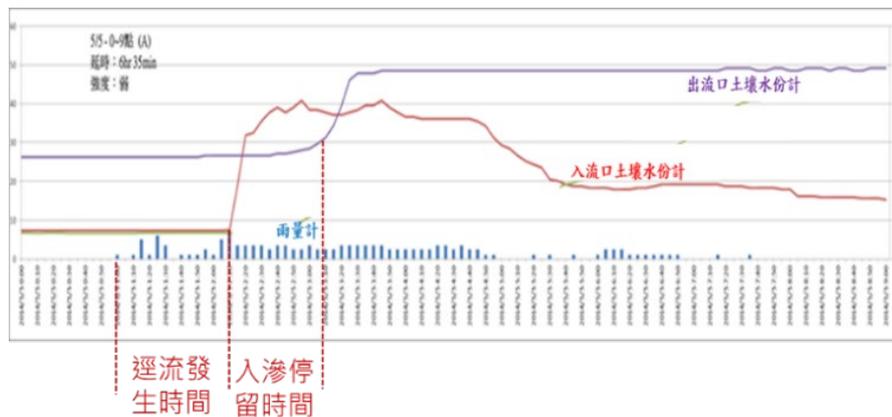
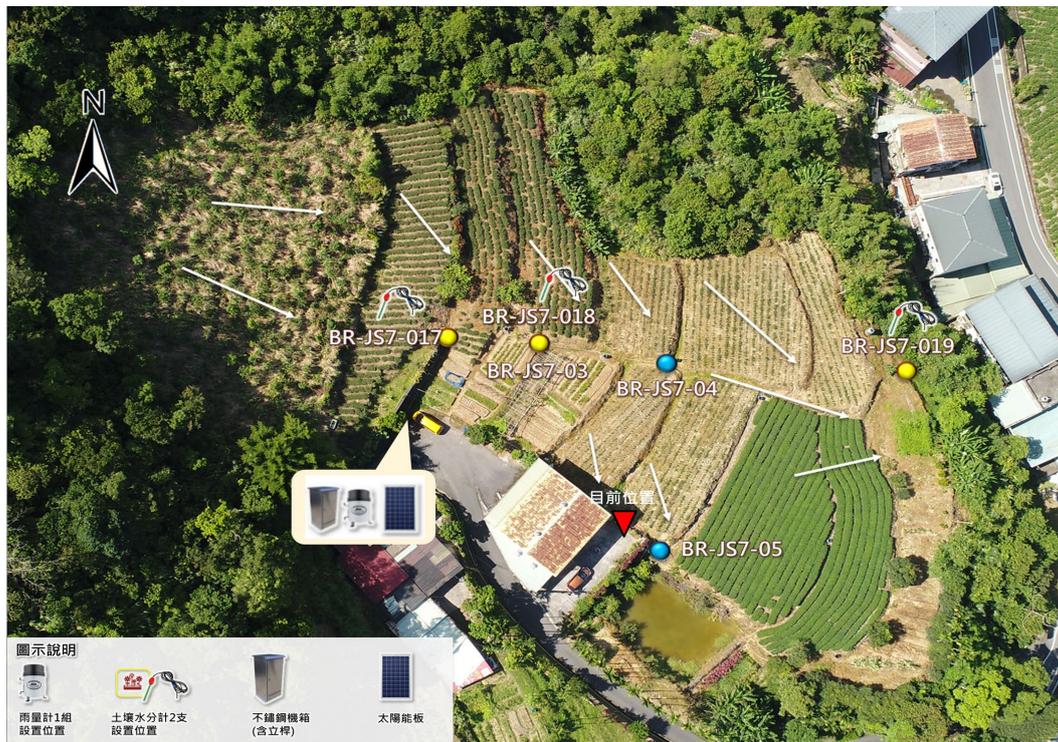


圖13 植生滯留槽IoT監測詮釋結果

水特局分別於民國108年及109年擇金瓜寮溪二處場址設置IoT智慧化維護管理實驗場(詳圖14)，以了解其設置及操作的可行性。綜合整理109年至110年的記錄後分析可以得知，坪林地地區若累積降雨量低於18.5 mm或降雨強度低於51.8 mm/hr，則茶園不會產生地表逕流，表示植生滯留槽沒有入流水；一旦累積降雨量達到地表逕流發生的門檻值，資訊平台便啟動維護管理門檻值計算，首先記錄上層水位計達到峰值的時間點，再者記錄下層水位計達峰值的時間點，並計算二者的時間差，若時間差小於16.7小時，表示植生滯留槽內部填料之滲透性係數 k 值高於 10^{-3} cm/sec，則系統出現綠色示意，表示該植生滯留槽入滲能力正常；但若時間差超過16.7小時，表示植生滯留槽可能產生堵塞($k < 10^{-3}$ cm/sec)，則系統出現紅色警示並以簡訊及電子郵件自動通知系統管理者，再由管理者進行系統的檢修與維護，其維護管理門檻值示警流程如圖15。



(A) 金瓜寮段33-35地號茶園(民108年)



(B) 金瓜寮段44-1地號茶園(民109年)

圖14 IoT智慧化維護管理實驗場址

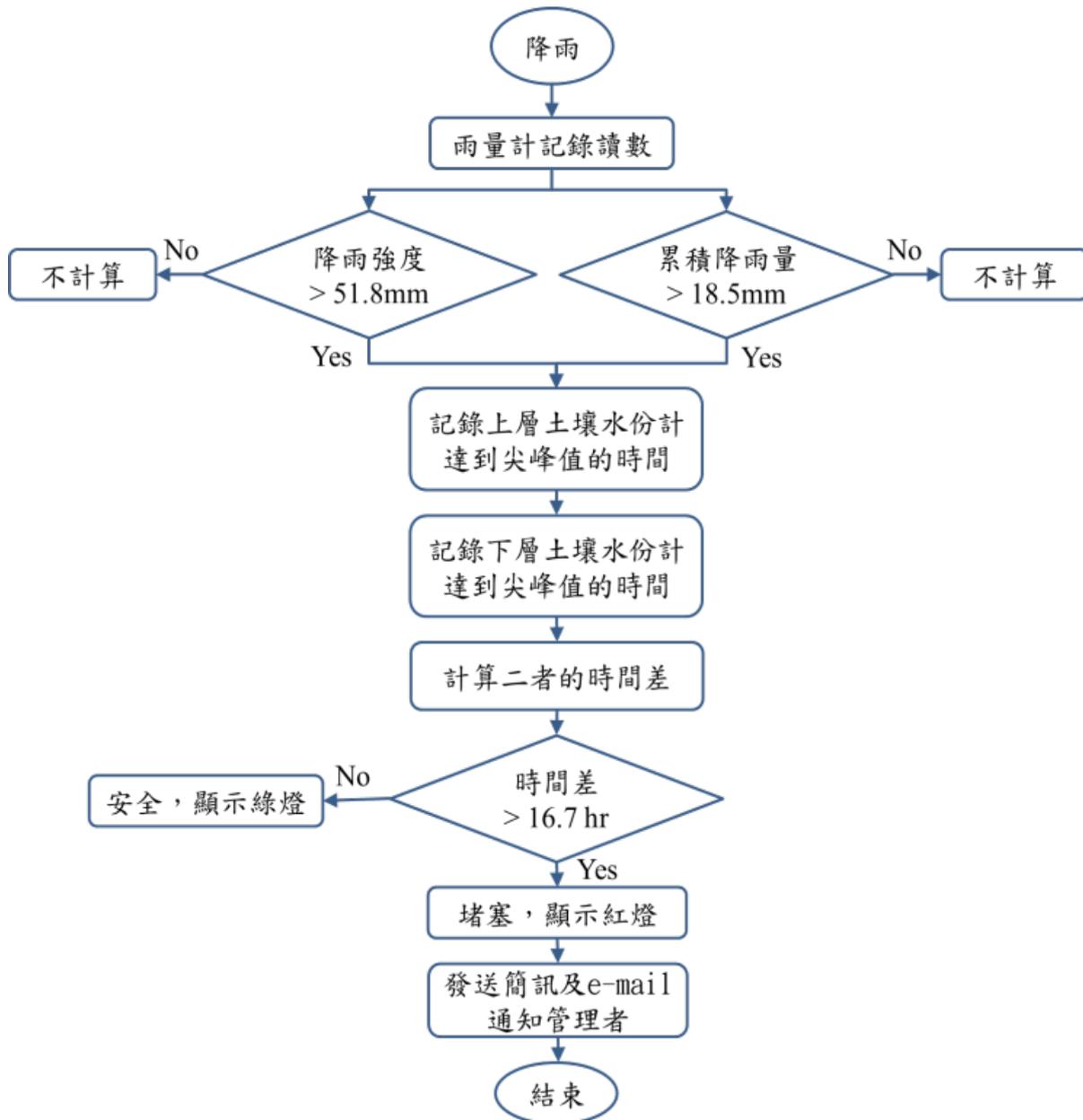


圖15 IoT系統維護管理判定流程

六、結論與建議

水特局自民國90年開始關切並著手進行翡翠水庫上游集水區之非點源污染削減策略，從早期之集中式BMP設施演化至今日之分散型LID設施，除了可以見到明顯的污染削減成效之外，亦可以減少對農地的干擾並提升農民的設置與配合意願，此一成功的案例可以提供國內其它水庫參考執行。然應用植生滯留槽來處理茶園非點源污染已行之多年，且目前已略見成效，但若欲達到短期水質目標，則應持續進行建置。

根據目前的現地調查結果顯示，植生滯留槽若能妥善的維護管理，其

使用壽命可以超過七年以上，因此對於已建置的植生滯留槽仍應持續進行有效且妥善的維護管理，以發揮其有效的非點源污染去除成果。再者，經過二年的示範建置及分析，採用IoT來做為植生滯留槽的維護管理門檻值確屬可行，因此對於較偏遠不易抵達之茶園建置LID時，可以將IoT納入基本設施中，以達到更有效的管理。

近年來由於地形限制及同意施作植生滯留槽的地主已愈來愈少，因此推行結構式LID的阻力日益增加，水特局已開始著手輔導農民施行非結構式的管理措施，包括合理化施肥、減量施肥及低磷肥料使用補助等以增加農民的配合意願。

參考文獻

1. 台北水源特定管理委員會，台北水源特定區污染源對水質之影響，經濟部水利署臺北水源特定區管理局委託，2001年。
2. 京華工程顧問股份有限公司，新店溪水源區金瓜寮溪與鱸魚堀溪之污染削減規劃及細部設計計畫，經濟部水利署臺北水源特定區管理局委託，2008年。
3. 瑞昶科技股份有限公司，金瓜寮溪與鱸魚堀溪之污染削減規劃及細部設計計畫(延續)，經濟部水利署臺北水源特定區管理局委託，2009年。
4. 國立臺北科技大學水環境研究中心，翡翠水庫上游集水區茶園非點源污染最佳管理作業(延續)，經濟部水利署臺北水源特定區管理局委託，2011年。
5. 國立臺北科技大學水環境研究中心，臺北水源特定區水質預警機制建立之研究，經濟部水利署臺北水源特定區管理局委託，2012年。
6. 國立高雄第一科技大學，金瓜寮溪流流域茶園非點源污染削減現地處理調查規劃，經濟部水利署臺北水源特定區管理局委託，2013年。
7. 國立臺北科技大學水環境研究中心，逮魚堀溪茶園非點源污染削減現地處理調查規劃，經濟部水利署臺北水源特定區管理局委託，2014年。
8. 國立臺北科技大學水環境研究中心，北勢溪茶園非點源污染削減(LID)現地處理調查規劃，經濟部水利署臺北水源特定區管理局委託，2015年。
9. 經濟部水利署臺北水源特定區管理局，臺北水源特定區保育實施計畫第三期(107-111年)，2017年。
10. 國立臺北科技大學水環境研究中心，臺北水源特定區茶園非點源污染削減(LID)現地處理設施之推廣、設置、維護及成效評估計畫，經濟部水

- 利署臺北水源特定區管理局委託，2018年。
11. 國立臺灣科技大學生態與防災工程研究中心，108年臺北水源特定區茶園非點源污染削減(LID)現地處理設施之推廣設置及成效評估計畫，經濟部水利署臺北水源特定區管理局委託，2019年。
 12. 國立臺灣科技大學生態與防災工程研究中心，109年臺北水源特定區茶園非點源污染削減(LID)現地處理設施之推廣設置及成效評估計畫，經濟部水利署臺北水源特定區管理局委託，2020年。
 13. 國立臺灣科技大學生態與防災工程研究中心，110年臺北水源特定區茶園非點源污染削減(LID)現地處理設施之推廣設置及成效評估計畫，經濟部水利署臺北水源特定區管理局委託，2021年。
 14. 經濟部水利署臺北水源特定區管理局，臺北水源特定區保育實施計畫第四期（112-116年）草案，2022年。

海淡水源對南部地區供水穩定性探討-以臺南海水淡化廠為例

經濟部水利署南區水資源局/吳哲全副工程司
許秀真正工程司

關鍵字：氣候變遷、海淡水源、多元化水資源、臺南海水淡化廠

摘要

臺灣於 110 年歷經百年大旱，向來依賴水庫「蓄豐濟枯」穩定供應各用水標的的臺南地區，已面臨到需大步調整單一水源來穩定供水思維的時刻；近年來，政府推動開源、節流、調度、備援及管理 etc 穩定供水策略，臺南地區水情雖偶有緊張情形，但透過嚴格監看水情與控管水庫出水量、超前跨區調度、擴大各項節水措施、及調度農業灌溉用水等作為，尚能安然度過缺水危機，不過部分措施，如夜間減壓供水或減量供水，已對社會產生不小的心理衝擊。而隨著高科技產業聚落於臺南地區逐漸形成，可預期公共用水需求將持續增加，僅依現有水庫水源，勢必產生嚴重供水缺口，若再加上極端氣候衝擊，將使得臺南地區缺水壓力大增，水資源多元化，將是未來維持供水穩定之必要方向。經濟部水利署多年前即開始評估海淡供水做為區域調度及穩定供水之多元水源之一，以臺南地區為例，即規劃一座產水能力每日 20 萬立方公尺之海水淡化廠，主要考量臺灣四面環海，海水豐沛，海淡水源不受水文條件影響，平時除可提供穩定水源外，枯旱期間亦能作為保險水源，減少對降雨依賴，是穩定南部地區供水之重要水源選項之一。

一、前言

臺灣年平均降雨量約 2,500 公厘，雨量非常豐沛，是全球陸地年平均降雨(約為 900 公厘)的 2.8 倍，卻在世界缺水國家排名上名列第 19 名，主要原因有二，除臺灣山脈高聳，且東西幅員窄短，降雨後逕流迅速入海，造成水資源蓄存不易外，另一原因是降雨分布在空間、時間上極度不平均，以南部地區為例，梅雨及颱風季節之降雨量約佔全年雨量的 80~90%，而枯水期間降雨機率極低，豐枯水期降雨差異明顯，造成水資源調度上極為困難。為利水資源調度，同時降低缺水壓力，臺灣早期主要透過興建水庫或大型蓄水設施來攔蓄水資源供枯水期使用，惟受限地形條件，相較於其他國家，水庫庫容不大，所能蓄存水源有限；此外，臺灣水庫多興建於

80 年代以前，近年已逐漸超過原設計使用年限，再加上地質年代輕、河川水流湍急，造成水庫集水區侵蝕嚴重，土砂易隨水流入庫，尤其 921 地震後，地質結構更為脆弱，更加重水庫淤積情形，導致既有水庫庫容減少，供水不確定性也隨之提高。

除地形、季節等先天條件受限外，近期高科技產業持續發展並陸續進駐臺南、高雄等南部地區，同時配合全球產業鏈轉型，為加速臺灣產業發展，政府也全力推動擴大產業投資政策，包括『歡迎臺商回臺投資行動方案』、『根留臺灣企業加速投資行動方案』及『中小企業加速投資行動方案』等三大投資方案及『5+2 產業創新計畫』等，使得臺南地區公共用水需求快速成長；依據「臺灣各區水資源經理基本計畫」(行政院，110 年)，臺南地區於 108 年公共用水需求約為每日 92.4 萬立方公尺，預估 125 年用水需求將達每日 120.3 萬立方公尺，若以臺南地區現況供水能力僅約每日 97.8 萬立方公尺，屆時將產生嚴重的供水缺口。此外，近年來全球受極端氣候影響，乾旱、洪災等極端事件發生頻率增加，影響幅度也隨之加大，臺灣也面臨到同樣問題，在在都加劇臺南地區水資源調配壓力。面對既有蓄水設施庫容減少、公共用水成長，及極端氣候衝擊，臺南地區亟需一穩定且足量水源來填補供水缺口，同時又能因應極端氣候影響，藉以維持供水韌性，降低水源供給的不確定性。

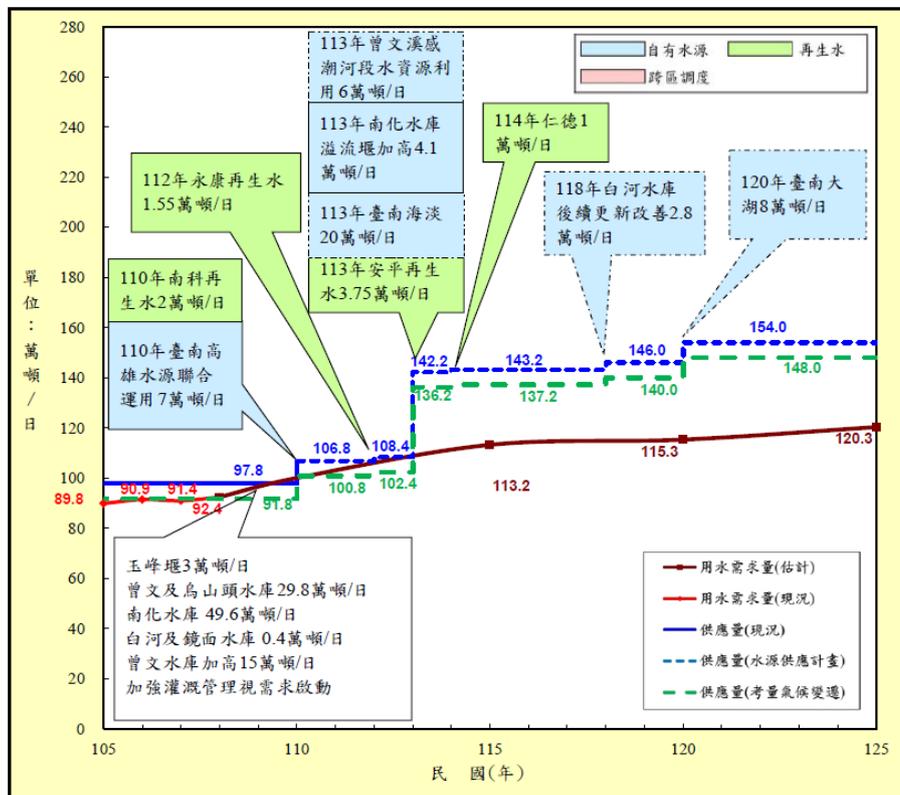
二、臺南地區供水現況與問題

(一)臺南地區供水量

圖 1 為臺南地區公共用水(即生活用水及產業用水)供水系統示意圖。依據「臺灣各區水資源經理基本計畫」(行政院，110 年)，現況臺南地區公共用水之供水能力約為每日 97.8 萬立方公尺，包括玉峰堰每日 3 萬立方公尺、曾文-烏山頭水庫每日 29.8 萬立方公尺、南化水庫每日 49.6 萬立方公尺、白河與鏡面水庫每日共 0.4 萬立方公尺，以及曾文水庫加高每日 15 萬立方公尺(詳圖 2)，主要供水水源以水庫水源為主。

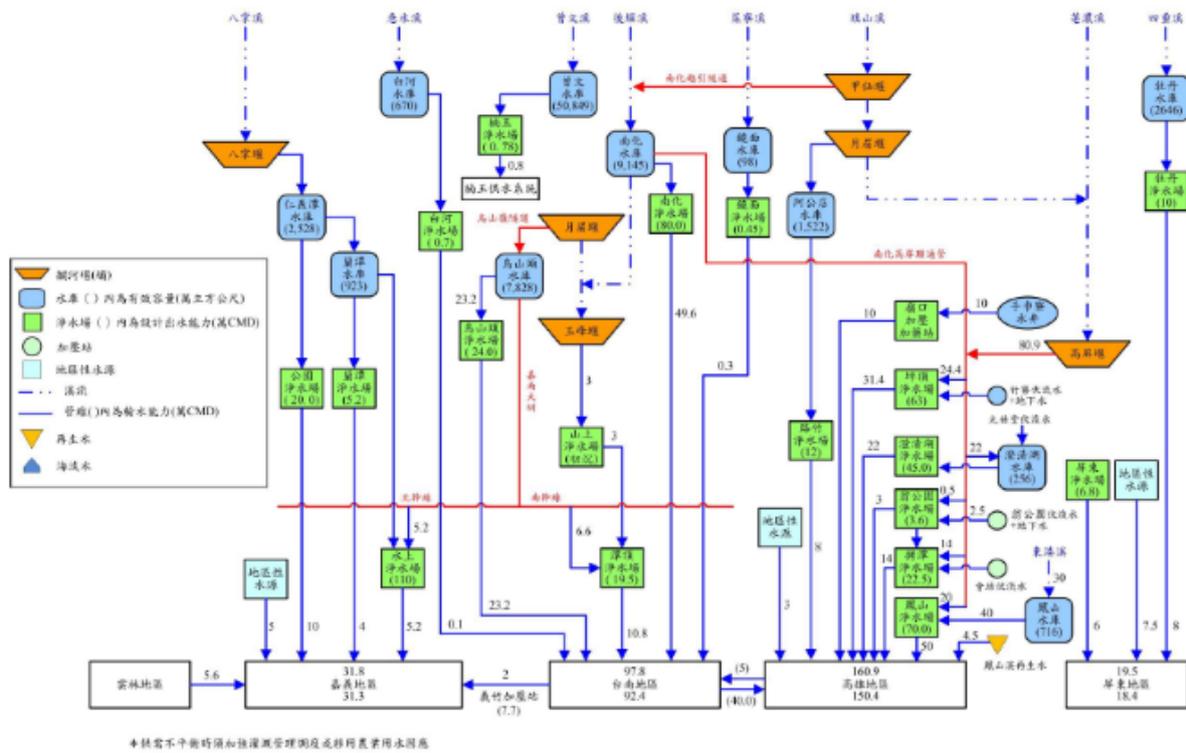


圖 1 臺南地區供水系統示意圖



資料來源：行政院，臺灣各區水資源經理基本計畫，110年

圖 2 臺南地區公共給水供需圖



資料來源：行政院，臺灣各區水資源經理基本計畫，110 年

圖 3 南部區域現況常態水源調度圖

(二)臺南地區需水量

依據南部區域現況常態水源供需調度圖(詳圖 3)，臺南地區公共用水需求約每日 92.4 萬立方公尺，其中用水約有 37%來自曾文-烏山頭水庫系統，約 54%則由南化水庫供給，用水主要仰賴曾文-烏山頭水庫，及南化水庫兩水庫系統進行供應，現況臺南地區供水能力尚能滿足用水所需。

但水資源工程建設無法一蹴可幾，單就工程週期而言，從可行性評估、規劃、設計到施工完成，至少需數年時間才能完工營運，若再加計前期溝通協調、各機關審查之行政程序、施工期間天災影響等，實際推動期程其實相當冗長，因此水資源工程常需超前佈署，才能因應後續公共用水需求成長。依據「臺灣各區水資源經理基本計畫」(行政院，110 年)，臺南地區於目標年 125 年用水需求為每日 120.3 萬立方公尺，與前述臺南地區現況供水能力每日 97.8 萬立方公尺相較，每日仍有 22.5 萬立方公尺之缺口需解決因應，推估高科技產業進駐及發展，仍是公共用水需求增加之主要因素。因應 125 年社會經濟發展用水成長所造成的用水缺口，臺南地區仍需有相當足量供水水源才能維持區域供水穩定。

(三)主要水庫淤積嚴重

現況臺南地區公共用水主要由曾文-烏山頭水庫及南化水庫兩個水庫系統進行水源供給；但兩水庫系統自完工營運至今，已有相當長的一段時間，其中烏山頭水庫於 19 年興建完成，而曾文水庫與南化水庫則分別於 62 年及 83 年完工，相關供水設施已有老化、劣化趨勢，近年來持續辦理更新改善來強化安全並提升供水效能。然如前所述，臺灣水庫集水區侵蝕嚴重，土砂沖蝕造成水庫嚴重淤積，而 98 年莫拉克風災帶來超大豪雨，集水區土石崩塌嚴重，更使得大量土砂入庫淤積，嚴重減少水庫庫容，以曾文水庫為例，62 年至 97 年間總淤積量約 1.3 億立方公尺，但莫拉克風災就增加約 9,162 萬立方公尺淤積量，整體淤積率達 22.28%；而南化水庫自 82 年至 97 年總淤積量約 4,415 萬立方公尺，莫拉克期間淤積量就增加約 1,709 萬立方公尺，整體淤積率達 32.91%；單就莫拉克颱風，曾文水庫及南化水庫整體淤積量較風災前就增加約 1.1 億立方公尺，約莫相當當時一個南化水庫有效庫容，對供水穩定性影響甚鉅。

(四)氣候變遷影響及近 10 年枯旱情形

依據「因應氣候變遷水源供應與經濟影響研究(1/2)」(經濟部水利署，108 年)成果，臺南地區重要水庫集水區降雨主要集中在梅雨季及颱風季節兩時節，以曾文水庫及南化水庫而言，兩時節總降雨量分別佔全年雨量 86.1%與 89.7%，可見這兩時節之降雨量對臺南地區水情穩定性扮演非常重要的角色；此外，該報告成果也顯示，在氣候變遷影響下，臺南地區主要水庫集水區未來於春季、梅雨季、秋季及冬季之總雨量皆有減少情況，僅颱風季之總雨量略為增加，臺南地區豐枯現象將更為懸殊。而梅雨季雨量減少現象，近 10 年來多數臺南居民也確實感受到枯旱發生頻率或延遲有增加的趨勢，如 104 年因嚴重枯旱，民生產業用水即實施水情橙燈(減量供水)之限水措施，同時停灌曾文-烏山頭水庫系統之部分灌區、107 年曾文水庫蓄水率僅剩 2%，以及 110 年曾文水庫及南化水庫蓄水率最低各僅剩約 4.3%及 8%等。以 110 年旱災為例，即罕見提前在 109 年 7 月就採行曾文-烏山頭水庫灌區二期作加強灌溉管理，且於 11 月停止秋冬甘蔗雜作灌溉，並公告停灌 110 年一期作及春季甘蔗雜作，同時進行夜間減壓(水情黃燈共計 99 天)、減量供水(水情橙燈共計 117 日)(表 1)，及彈性採取跨區水源調度及緊急抗旱等措施，始勉強度過該次乾旱危機。

表 1 109-110 年臺南市水情燈號統計表

年度	燈號	實施期間		天數
109-110	黃燈	109/11/18	110/2/24	99
	橙燈	110/2/25	110/6/21	117

考量莫拉克風災後水庫嚴重淤積，進一步分析近 10 年 (101 年至 110 年)曾文及南化水庫枯水期資料，顯示近 10 年就有 7 年(即 102、103、104、106、107、109 及 110 年)因水庫蓄水量偏低，而需採取相關民生、產業及農業用水減供措施；此外，即使提前透過農業灌溉用水調度，並辦理跨區調度供水等管控措施下，曾文水庫仍有 4 年之蓄水率是低於 10%(分別為 103 年 9.1%、107 年 2%、109 年 8.7%、110 年 4.3%)(如圖 4)，且頻率近期有增加趨勢。而南化水庫為一以公共給水為供水標的的水庫，除須負擔臺南地區 5 成以上之公共用水供水量外，尚須備援高雄地區用水，惟依據相關研究分析(經濟部水利署，108 年)，受氣候變遷影響，未來南化水庫集水區於梅雨季總雨量將減少 17.4%；考量未來梅雨季可能延遲或雨量減少，需待颱風季才有較大降雨量，若以 1 個月可供水量(不含備援供水，並考慮實際水庫操作面)作為南化水庫安全存量指標，即蓄水量約 2,800 萬立方公尺，則近 10 年低於該安全存量就有 6 年，分別為 103 年 2,227 萬立方公尺、104 年 1,220 萬立方公尺、106 年 2,719 萬立方公尺、107 年 2,023 萬立方公尺、109 年 1,142 萬立方公尺、110 年 724 萬立方公尺等，可見尋求一不受降雨影響且能穩定供水之水源方案已刻不容緩。

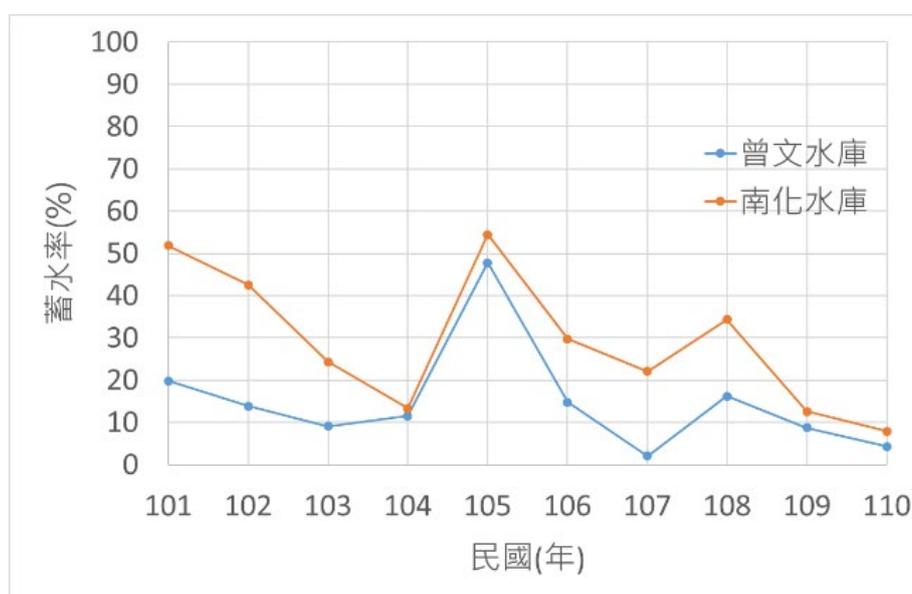


圖 4 曾文及南化水庫歷年最低蓄水率

(五)臺南地區穩定供水策略及措施

臺南地區現階段在面對枯旱期間之供水問題，主要以調度農業灌溉用水(如強化灌溉管理、停灌或休耕等)、辦理跨區調度供水(如透過甲仙堰越域引水蓄存於南化水庫、高雄水源北送支援等)，甚至在水情嚴峻時採取不同階段之限水措施，如：減壓供水(水情黃燈)、減量供水(水情橙燈)等來因應，就短期因應措施而言，雖然供水缺口可加強農業節水來填補，但並非理想的長期作法。

考量未來南部地區用水穩定，政府目前採取『管理』(如集水區保育、水庫清淤、水資源智慧化管理等)、『節流』(如降低漏水率等)、『調度』(如強化區域水資源聯合運用)、『備援』(如備援管線、防災備援井網等)及『開源』(如既有蓄水設施改善、科技造水等)等穩定供水策略，並依實際情況滾動檢討，來滿足用水需求。針對臺南地區遠程用水需求，現階段依據穩定供水策略辦理之方案，簡述如下：

- 1.管理：主要方案包括既有水利設施之更新改善及功能強化(如已完成之曾文水庫、南化水庫及白河水庫等防洪防淤隧道，以及刻正辦理之白河水庫繞庫防淤工程等，皆是透過水力排砂，減少清淤成本，維持水庫庫容)、水庫清淤(包含抽泥放淤、機械陸挖等)等措施。
- 2.節流：主要為民生、農業及產業節水，以及降低漏水率(如台水公司轄區自來水漏水率由 103 年 18.04%，改善至 109 年底為 13.9%，並預計於 120 年降至 10%以下)等作為。
- 3.調度及備援：臺南地區受限地質與水文地質條件，無大量開發伏流水及地下水之條件(經濟部水利署南區水資源局，104 年)，所以在調度備援上，以強化區域水源聯合調度運用為主，如目前施工中、預計 113 年完工之「曾文南化聯通管工程」，主要係改善曾文水庫水源須透過新烏山嶺隧道輸送至烏山頭水庫供水，無法與南化水庫水源互相調度支援之現況；聯通管完工後，將可聯合運用調度臺南地區兩個重要水庫之水資源；而長程目標是透過聯通管將曾文水庫、南化水庫及高屏溪水資源納入南部地區整體調度備援機制，對南部地區供水穩定將發揮一定助益。
- 4.開源：除傳統水資源的開發(如臺南大湖開發、白河水庫後續更新改善工程(第二階段)等)，另一重點為運用科技穩定造水(如再生水、海淡水等)，其主要優點為不受天然水文環境限制，因此即使在枯旱期間，亦可作為一穩定供水之水源。以再生水為例，乃透過水資源回收再利用，使產業有較穩定之用水環境，惟受限「再生水資源發展條例」規定，再生水不得供作

直接食用及食品業、藥品業之用水；因此，枯旱期間，再生水或許能避免產業與民搶水，但為避免生活用水不受降雨條件影響，充足且穩定之海淡水源，或許是遭遇長期枯旱時現階段唯一的方案選項。

近年臺灣地區已有梅雨季少雨或無颱風襲台(如 109 年全年無颱風過境臺灣)之情形發生，受極端氣候影響，未來更可能面臨空梅且全年無颱風之複合情境。綜整臺南地區供水現況及問題，主要在目標年 125 年，預期每日將有 22.5 萬立方公尺之供水缺口產生，是目前亟需重視並解決之用水問題。經檢視目前規劃辦理之穩定供水方案，初步僅有海淡水源能提供足夠量體滿足前述供水缺口；此外，除穩定平時水源外，海淡水源不受降雨影響之獨有特性，抗旱期間亦可作為重要之保險水源，確保臺南地區面臨特殊情境下，仍有一定水量可供應使用。

三、臺南海淡廠規劃概述

(一)國際趨勢及技術

隨著氣候變遷加劇，以及產業用水增加，全球水資源之供給能力漸顯險峻，眾多國家已將海淡水源作為新興水源選項之一。依據國際海水淡化協會(International Desalination Association, IDA)統計資料，自 89 年(西元 2000 年)以後，全球海淡水源開始大幅成長應用，截至 110 年 3 月，已有超過 180 個國家應用海淡技術產水，且全球海淡廠(含發包中)產水量合計已超過每日 1 億立方公尺，海淡水源已逐漸被視為重要水資源來源。

目前主要應用於商業行為的海水淡化技術，分為「熱能法」(如多段瞬間蒸發法(Multi-Stage Flash Distillation, MSF)、多效蒸餾法(Multi-Effect Distillation, MED)等)和「薄膜法」(如逆滲透法(Reverse Osmosis, RO)等)兩類；其中熱能法主要透過高溫將海水中之鹽分與淡水分離，進而獲取淡水，而薄膜法則是利用半透膜來分離淡水及鹽溶液。熱能法為海淡技術初期的主流，適合能源蘊藏量多之國家(如沙烏地阿拉伯)；近年來隨著薄膜製造技術提升及能量回收系統(Energy Recovery Device, ERD)逐漸成熟，耗能相對較少(表 2)之薄膜法已成為全球海水淡化之主流技術，以目前國際上產水規模最大的阿拉伯聯合大公國 Taweelah IWP 海水淡化廠(108 年發包)，產水量高達每日 90.9 萬立方公尺，即採用逆滲透技術進行產水。考量臺灣能源以進口為主，及目前全球海淡技術主流、相關建置與營運成本等，臺南海淡廠將優先評估採用逆滲透技術，並視未來科技發展，採用同等或更佳之海水淡化技術。

表 2 海水淡化技術耗能分析

項目	RO (逆滲透法)	MSF (多段瞬間蒸發法)	MED (多效蒸餾法)
電能(kWh/m ³)	2.5~4.0	3.0~4.5	1.0~1.5
熱能電當量(kWh/m ³)	-	7.1~8.1	3.3~3.6
總消耗能量(kWh/m ³)	2.5~4.0	10.1~12.6	4.3~5.1

資料來源：經濟部水利署水利規劃試驗所，嘉義、高雄及屏東海淡廠及供水方案調查規劃，110年

(二)臺南海淡廠初步規劃

臺南海淡廠除前面所述優先評估採用逆滲透技術外，目前規劃於臺南市將軍區青鯤鯓 17 公頃廢棄鹽田作為海淡廠的廠址，每日預計最大產水 20 萬立方公尺，同時併入自來水系統供民生及產業使用。

有關廠址位置選擇，主要以臺南市海岸線至台 17 線西濱快速道路間之用地作為候選範圍，再評估決定適宜廠址位置(經濟部水利署水利規劃試驗所，100 年)，其中除廠址面積需有一定大小，以開發規模每日 20 萬立方公尺之海淡廠，廠址面積需至少 8.5 公頃外(經濟部水利署水利規劃試驗所，97 年)，尚需考量條件包括：(1)土地產權取得性，主要以國有非公用土地、工業區或政府特定開發計畫區為優先考量；(2)取、排水管距離較佳，可減少輸送成本及降低管線破裂污染；(3)鄰近自來水配水池或幹管；(4)海水水質條件；(5)營運能源取得性；(6)地方政府產業發展方向；(7)環保要求與居民意願；(8)取、排水口設置地點之施工難易度，及對周遭海域生態影響程度；(9)排放口避免干擾原有漁場及養殖作業為佳。依據前述條件，部分候選廠址或因土地產權複雜，取得較為困難，或因緊鄰台江國家公園，取、排水管線需繞行通過，造成管線過長等因素，綜合評析後，以將軍區青鯤鯓廢棄鹽田作為臺南海淡廠預定廠址，廠址預定位置如圖 5 所示。

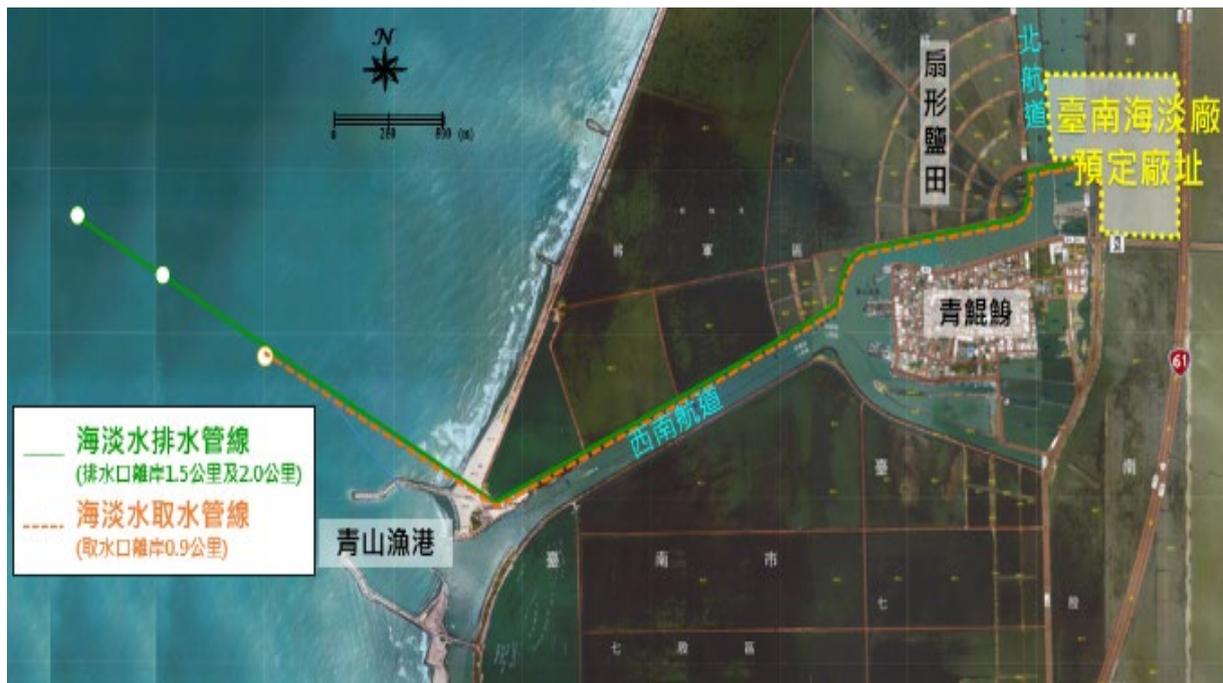


圖 5 臺南海淡廠預定位置圖

而有關海淡廠產水規模，原規劃每日 10 萬立方公尺，但水利規劃試驗所於 105 年依據當時「臺灣南部區域水資源經理基本計畫」進一步檢討，考量曾文烏山頭水庫、南化水庫及玉峰堰每日可供水源共計為 82.4 萬立方公尺，加計新增供水潛能包括：(1)海淡廠每日 10 萬立方公尺；(2)南化第二水庫每日 14 萬立方公尺；(3)臺南高雄水源聯合運用調度每日 7 萬立方公尺；(4)調用農業用水每日 16.3 萬立方公尺等進行評估，以當時目標年 120 年趨勢中成長的臺南地區，每日需水量為 111.2 萬立方公尺，如在不調用農業用水情境下，因南化第二水庫尚屬不確定之供給水源，為滿足目標年之用水需求，海水淡化廠產水規模遂檢討擴增為每日 20 萬立方公尺，若水源仍不足，則再調用農業用水供應。

進一步檢視 110 年「臺灣各區水資源經理基本計畫」，目標年 125 年以前預定新增水源包括臺南高雄水源聯合運用每日 7 萬立方公尺、曾文溪感潮河段水資源利用每日 6 萬立方公尺、南化水庫溢流堰加高每日 4.1 萬立方公尺、臺南海淡每日 20 萬立方公尺、白河水庫後續更新改善 2.8 萬立方公尺、臺南大湖每日 8 萬立方公尺及若干再生水源等，由前述新增水源可知除海淡水源外，其餘新增量體不大，且部分可能水源供給尚具不確定性，顯示因應未來水源需求，臺南地區在無足量新水源開發下，海淡廠產水規模仍需維持每日 20 萬立方公尺，才能滿足目標年 125 年之用水需求。

(三)海水淡化疑慮及因應對策

海水淡化即使有其優點，但並非全無疑慮，主要為『高耗能』及『濃排水』等議題，面對這些質疑，目前主要採取低耗能設計、節能操作，及排放優化等策略來因應。以『高耗能』議題而言，除規劃設計階段，優先評估採用能耗較低的逆滲透技術外，也建議在逆滲透單元加裝能量回收裝置(ERD)，利用濃排水仍帶有高壓能量可協助驅動逆滲透系統，減少系統為產生所需壓力的能源消耗；此外，南部地區豐水期相當於每年夏季用電尖峰時段(6~9月)，因適逢豐水期間雨水較為豐沛，將優先使用地面水源，海淡廠在設備損害可控之條件下，配合採降載產水至少 50%方式，以減少用電，降低整體能源供應系統之負擔，至於枯水期因雨水少，再以海淡水源補充地面水之不足。

而在『濃排水』議題部分，基本上不論採用何種海淡技術，皆有濃排水(鹵水排放)問題，但相較於熱能法，逆滲透法產水以壓力驅動而非熱能，濃排水溫度與海水相近，不會有水溫提高問題，對海水生態相對和善；此外，逆滲透製程後的濃排水(鹵水)其實為濃縮海水，非為汙染物或有毒物質，依據目前全球相關文獻，濃排水排放對鄰近海域之生物資源豐富度及多樣性影響並不顯著，但為避免鹵水持續累積，造成海水鹽度變化過大，目前臺南海淡廠規劃的因應作為是透過設置海洋排放管線，除排放點位遠離近岸外，也採多點分散排放方式，透過擴散傳輸作用與周圍海水混合稀釋，經採美國國家環境保護局(United States Environmental Protection Agency, USEPA)協助開發之 CORMIX 模式進行臺南海淡廠最大產水情境下之海域水質模擬，在距離排放口 100 公尺處之鹽度增加比例約僅 3~4%，相當於原海域背景鹽度自然變化範圍，顯示以海洋排放管排放鹵水，可有效降低濃排水累積疊加效應。當然鹵水再利用亦是未來可思考方向，惟現階段受限既有周邊條件，如用地取得(臺南海淡廠鄰近土地已劃入濕地範圍，不易有大面積土地作為曬鹽場地)、能源取得(臺南海淡廠鹵水鹽度約 5 度，而日曬製鹽鹵水濃度至少需濃縮到 25.5 度以上，若要提高鹵水鹽度，勢必更加耗能)、市場需求(臺灣目前食用鹽已由台鹽公司通霄精鹽廠採電析法規模生產，且產出量已足供台灣民眾使用)等，尚無鹵水製鹽可行性，後續水利署將持續辦理專案研究，蒐集國際鹵水再利用之應用，同時配合未來科技發展，如具可行性時再適時推動辦理。

四、結語

水，是人類賴以維生的三大元素之一，臺南地區近年歷經多次枯旱事件，更顯示保險水源的重要性；此外，配合高科技產業發展用水需求，可預見未來臺南地區將產生嚴重供水缺口。臺南地區受限合適壩址、環境保護、水文地質等條件，傳統水源(地面水、地下水)開發不易，但臺灣四面環海，海水充沛，且海淡水源不因天候受限，是能作為穩定公共用水供水之多元水資源之一，也能因應極端氣候衝擊。但海淡廠興建涉及耗能、鹵水排放等議題，需在規劃、設計階段溝通協調，獲取共識，以創共贏。近年來，全球海淡技術不斷創新，以目前主流之滲透法，透過能量回收裝置(ERD)裝設，相較多年前技術，能耗已有顯著降低，相信隨著技術突破，未來將可有效減少海淡產水之疑慮。面對臺南地區豐枯比差異大、氣候變遷下枯旱影響加劇，及公共用水大幅成長，海水淡化或許是目前能維持臺南地區供水穩定不得但較為可行的方式。臺南海淡廠設置，未來仍需持續溝通，化解社會疑慮，並讓海淡廠的規劃內容更為公開透明，爭取社會認同及共識，讓這座目前臺灣規劃中最大之海淡廠成為在地人最為自豪的水資源建設。

參考文獻

1. 行政院，臺灣各區水資源經理基本計畫，110年。
2. 經濟部，曾文南化聯通管工程計畫，107年。
3. 經濟部水利署，因應氣候變遷水源供應與經濟影響研究(1/2)，108年。
4. 經濟部水利署南區水資源局，曾文溪下游玉峰堰至麻善大橋河段地質調查作業，104年。
5. 經濟部水利署水利規劃試驗所，以海水淡化供應水資源之環境承載分析與發展研究(1/2)，97年。
6. 經濟部水利署水利規劃試驗所，台南海水淡化廠可行性規劃-工程可行性規劃，100年。
7. 經濟部水利署水利規劃試驗所，臺南海水淡化廠興辦計畫檢討與環境生態補充監測，105年。
8. 經濟部水利署水利規劃試驗所，嘉義、高雄及屏東海淡廠及供水方案調查規劃，110年。

大台北地區防災地下水井建置工程實務探討

臺北自來水事業處工程總隊/陳維政副總隊長

臺北自來水事業處工程總隊/林郁欽股長

臺北自來水事業處工程總隊/鄧森隆三級工程師

臺北自來水事業處工程總隊/吳佳諺四級工程師

1. 前言

受地球暖化及氣候變遷影響，颱風暴雨、旱災及地震等情形頻繁發生，臺北市政府防災政策計畫各區建置防災公園及防災學校、鄰里公園，提供災害時期避難所需維生飲用水及生活雜用水，階段性目標以先完成維生用水後考量生活雜用水，並以地下水源供應，因此規劃設置防災水井，提供緊急防災期間收容民眾之生活雜用水需求，以因應天然災害如震災及早災等，於戰備或緊急狀況時，健全防災體系。



圖 1 臺北市地區防災地下水井位置分佈圖

配合臺北市政府消防局規劃各行政區「防災公園」及「防災學校」等防災場域理念，臺北自來水事業處（以下簡稱北水處）規劃於 12 座防災公園及 55 所防災學校或附近鄰里公園，合計設置 72 口「防災地下水井」，搭配 2 套移動式淨水設施，105 年辦理委託技術服務案，106 至 107 年施工完畢，惟辦理期間發現地下水分佈情形影響出水量及水質等重要指標，並衍伸遭遇地下水水質狀況不佳時是否以移動式淨水設施處理，實際出水量與規劃目標、設計水量及鑽探結果分析比較，井位無法設置於原規劃位置，須辦理井位移點等狀況作為探討議題，期能鑑往知來，將經驗回饋爾後類似工程計畫參考。

2. 防災水井設施及規範

2.1 水井系統設施

本工程整體系統主要分為地下水井及共構儲水槽與其他等三部分(如圖 2)，地下水井部份採用 SUS304 等級管厚 6mm 之 6 吋不鏽鋼管井管、開孔率 10% 長度 6m 繞線式濾水管及 1.5 Hp 抽水機，藉以延長水井使用年限。

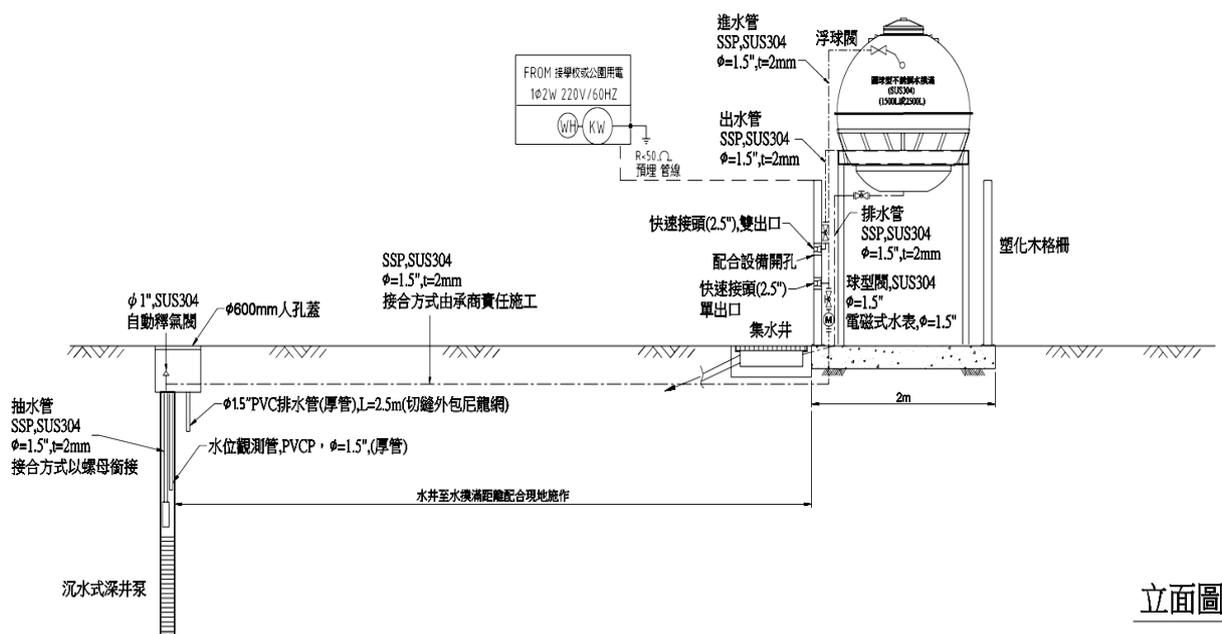


圖 2 地下水井及共構儲水槽系統配置圖

共構儲水槽部份採用之管線皆為耐震之不銹鋼波狀管線，能保障災時管線完整性，且配置 1 座 2.5 噸球型儲水槽(圖 3 照片)，於供水階段可暫存地下水，於再次啟用民眾可立刻取得所需用水。其他附屬設施電源供應，除與連接現有台電輸電線路，也配置緊急發電機，確保災害時可獨立供水；不鏽鋼儲物箱供放置延伸供水之消防軟管及具 8 座水龍頭之取水管架，其規格設計可迅速與消防車及水車可對接。



圖 3 防災水井系統共構儲水槽及取水設施配置



圖 4 下管作業確認濾管位置及標示

2.2 施工要求

防災水井工程主要工項及品管作業為下管作業、擴水洗井及施工品質檢驗，施工過程應注意事項如下：

2.2.1 下管作業

下管作業施工及相關檢查步驟如下：

1. 安裝井管及濾管：依據井體設計圖，配合井管與濾管規格及長度，繪製下管示意圖，確認濾管位置。下管時，各管由下向上依序編號拍照。如圖 4。
2. 井管接頭屬專業責任施工：每根井管或濾管需依設計圖說提供接頭，以便焊接。接口焊接處應辦理外觀檢查，不得有焊珠、焊孔或裂縫等情形，每一處焊接必須密實不得產生空隙並磨除焊接點突出。
3. 井管垂直：連接後，需能垂直放置於井孔內，井管與濾管銜接處需焊接控制環，惟不得焊接於濾孔上，以免損及濾管。控制環設置應避免影響濾石填充架橋。
4. 垂直校正：下管全程需以經緯儀或水準尺辦理垂直校正作業。
5. 保護：井管連接完成後，井管口需切割平整，並磨除銳利邊緣。井口必須加蓋處理，避免雜物進入井內造成阻塞或污染。

2.2.2 擴水洗井

擴水洗井目的為清除孔壁附近的泥餅和細粒泥砂，以發揮水井之出水性能，獲得穩定之最大出水量。使礫石濾料圈充填堅實，鞏固地層，維護井體安全。洗井擴水的基本要求係將礫石濾料填滿後隨即開始擴水以避免

泥漿脫水、凝結、沉澱而增加洗刷困難或甚至無法達成預期成效。擴水工作為藉水力上下反覆激動震盪，以沖破孔壁泥膜及濾料架橋（bridging），幫助礫石圈填充完善，使含水層與井體間水流暢通。擴水須先自上而下逐層激動，然後再自下而上反覆處理。如礫石圈因夯實沉陷時，須隨時補充礫石（在濾料填充階段執行）。擴水洗井的方法繁多，一般常用的方法有超抽法、活塞震盪法、氣提法、高壓噴射水柱法等。擴水洗井的時間 1-5 天不等，通常在透水性較好的礫石層較容易達到擴水的效果，反之，在透水性較差的細砂地層，擴水洗井之效果較不容易達成，所需要的時間也會較長。一般規範擴水應持續直至水質澄清為止，以抽出水濁度小於 5 NTU 為標準，圖 5 為現場濁度量測情形。



圖 5 擴水洗井以現場濁度量測管
理施工品質



圖 6 水井施工直度測試作業

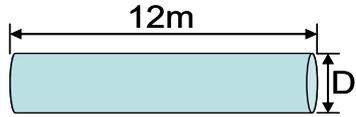
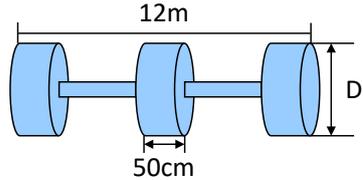
2.2.3 品質檢驗

在工程品質管理部分，水井施工品質管理參考水利署「觀測井建置與維護管理作業規範」及「鑿井技術手冊」，工程品質的管理透過查核點監督、抽水試驗、直度測試及井體攝影來確保，其他各項附屬設施則透過材料型錄查核、現場查驗及試車檢核來確保工程品質。

1. 直度測試

直度測試的目的係為了解水井施工的直度品質，確保抽水設備或任何進入井內之儀器設備能安全進出水井，不會被彎曲的井管卡在井內。根據美國 AWWA 之水井標準規範，6mm 厚 6 吋不鏽鋼井管直度測試以外徑 132mm（測管外徑不得小於井管內徑 0.5 吋），長度 12m 鋼管或三節管的測管，直接放入井內直至測試深度，能自由出入者即為合格，其測管規範標準如表 1，測試深度以抽水機之設計放置深度或濾水管頂部深度為準則，圖 6 為現場測試情形。

表 1 水井直度測試之測管型式材質與規格標準

型式	材質	規格	示意圖
全段式	鐵管 或鍍鋅 鋼管	全段之管外徑(D) \geq 132mm，長度至少 12m。	
三段式	鐵管 或鍍鋅 鋼管	測管全長至少 12m，測管前、中、末端各有一節長度至少 50 cm，管外徑(D) \geq 132mm 之鋼管，測管全段不得有撓性。	

2. 井體攝影與相關設備

實施電井測具體要求裸孔深度、數據頻率(至少每 5 公分一筆)及原始成果檔案。水井濾管安裝時每支濾管銲接前予以編號，並每 120 度環狀標記拍照，並以游標尺進行厚度量測，井體攝影為全彩、解析度 540 條(高於規範 380 條掃描線，攝影速度略低於 4 公尺/分鐘。壓力式自記水位計紀錄資料 43,600 筆(大於規範 40,000 筆)。沉水式電動抽水機經材料設備審查及廠驗，安裝後依現場出水狀況檢驗抽水機額定點、參考點及實際出水量，出水量不得小於契約設計出水量。

為掌握井體完工時性能狀況，並為日後維護作業及管理工作的參考，實務上建立防災水井基本資料，井體攝影為主要項目。新鑿水井井體攝影查驗由攝影機放入井內即開始記錄，所有拍攝影像製成光碟，作為未來運維檢查比較，井體攝影檢測實施步驟如下：

1. 檢查井深。
2. 檢查井篩(濾管)位置。
3. 檢查沉泥管位置及深度。
4. 以直度測試輔助檢查井體是否垂直。
5. 檢查井管接頭是否有漏水現象或不當磨損。
6. 檢查井管是否過度淤積、積垢或留有異物。
7. 檢查濾水管篩縫出水情形或是否有濾料嵌入。
8. 檢查井水懸浮物情況。
9. 確認井水靜水位。
10. 檢查濾水管是否變形、破裂。

3. 施工管理

3.1 水量分析

本個案工程鑽探井為 2 吋鑽孔，為了在設井前推估水量，契約規定於鑽探後井孔採呂琴試驗或微水試驗推估出水量。呂琴試驗(Lugeon test)常為配合鑽孔深度調查不同岩體一般水力特性調查方法，例如岩體透水性或水密性等。另外，微水試驗目的通常用於求取代表含水層的水力傳導係數值，該試驗與抽水試驗比較，其具有試驗所需的設備較簡單且經濟快速，較不會擾動地下水流系統或污染分佈現況的優點，但缺點只適合透水性不高的含水層，所求得的參數值只代表水井附近的水文地質特性。由此可知，微水試驗以砂土礫石層準確度較佳，黏土層、岩層則較差，故本案工程設計要求以微水試驗難以確切推估準確出水量，雖廠商以較保守值進行預估，仍有不少水井最後抽水試驗水量比鑽探水量短少。設計階段即蒐集其他地下水文資料推估指定設計出水量計有 38 口井，其餘 34 口井則需透過契約由施工廠商進行鑽探並以微水試驗推估水量，比較 72 口水井之需水量、設計量、鑽探水量及最終之抽水試驗實際出水量。以下分類比較說明，首先，設計出水量低於計畫需水量者，實際執行結果有士林官邸公園、福林國小、蘭雅國中及大湖公園等四處未符預期，其中士林官邸公園及大湖公園需求與供給差異最大，其可能原因為該址缺乏地下水資源，自然資源分布無法滿足行政區域指定需求，但也發生之後實際鑿井抽水試驗超出計畫需求量(蘭雅國中)，此情形必須尋求鄰近地區之替代位址(移井位)，但行政轄區範圍限制、用地取得、災後步行能力等議題，致使後續移點處置方案複雜化，此部分在 3.3 節探討。

其次，鑽探出水量低於設計出水量共有四處，包括東和公園、成德國中、南港公園及南港國中等，這類水井鑽探出水量低於設計出水量之差值並不多，有可能是地質含水層變化或鑽探偏差所致，此類水井低於計畫需水量時會涉及當下契約續行決策之判斷，所幸最終均能計畫需水量。最後一類，抽水試驗量低於鑽探出水量，甚至低於計畫需水量，前者涉及契約出水不足量計價及收受之爭議，後者則涉及是否續行或移井之決策判斷，依執行結果鑽探推估水量低於抽水試驗實際出水量達 8 處，占全數水井 11.1%(8/72)，占施工微水試驗井數之 23.5%(8/34)，其中士林官邸公園及大湖公園出水供應量甚至未能符合計畫需求量，而且遠低於計畫需求用水，因此造成鑿井契約執行過程波折與複雜。

防災地下水井若以抽水試驗實際出水量為基準，以原區域規劃之需水量、設計出水量、鑽探出水量為對應參數，抽水試驗實際出水量大於需水量占 91.3%、符合需水量占 4.35%、小於需水量占 4.35%(圖 7a)；抽水試驗實

際出水量大於設計出水量占 90.28%、符合設計出水量占 9.72%、小於設計出水量占 0% (圖 7b)；抽水試驗實際出水量大於鑽探出水量占 67.65%、符合鑽探出水量占 14.71%、小於鑽探出水量占 17.65% (圖 7c)，依此現地試驗結果與需水量分析多數可達到需求，而與設計出水量分析均能符合設計，另與鑽探微水試驗出水量分析仍有的接近 2 成數量的水井有落差值且並不具有規律性，進而顯示於臺北地區地質條件水井出水量不適宜以微水試驗作為估計基準。

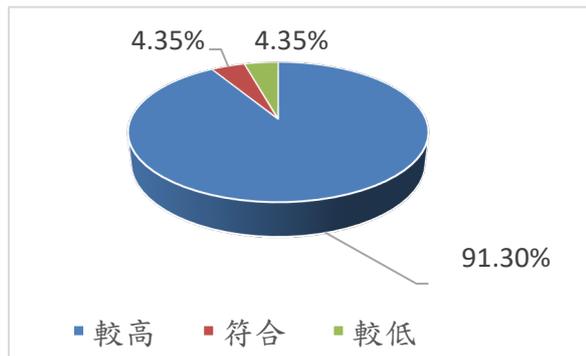


圖 7a 實際出水量與需水量比較

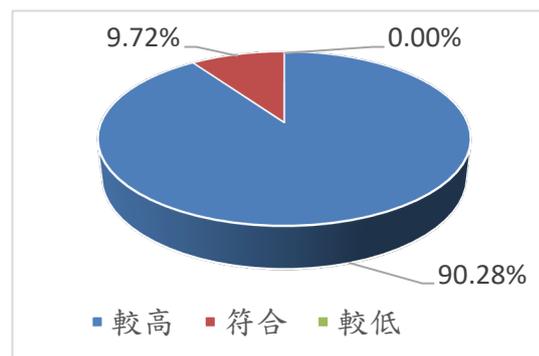


圖 7b 實際出水量與設計水量比較

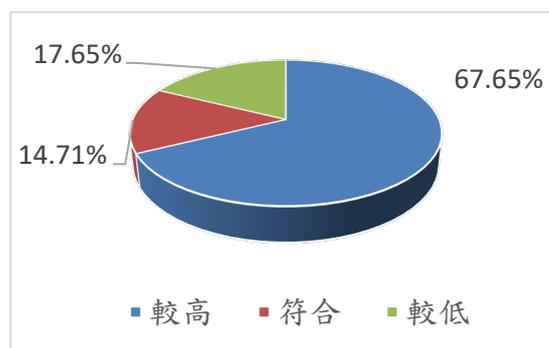


圖 7c 實際出水量與微水試驗出水量比較

依水井出水量分析檢討結果，無論是設計階段地質資料庫獲取地下水出水量作為設計出水量，或是以工程契約要求施工廠商以地質鑽探之微水試驗獲得鑽探出水量，均可能造成後續工程契約履約階段不同程度之決策困難與履約爭議，因此防災水井計畫及工程推動，建議規劃階段先蒐集地下水背景資訊，與需求端之井位要求進行位置修正調整，並取得用地同意，然後在設計階段先進行水井抽水試驗，確立出水量符合計畫需求量，且其試驗方法較精準，可避免微水試驗之高誤差困擾，若有不滿足計畫需水量時可再次修正井位，同時避免後續鑿井工程施工廠商自行鑽探評估之履約糾紛。但須配套注意者為防災水井口徑為 2 吋管，水井抽水試驗標準口徑亦為 2 吋管，因此基於節省工程經費之經濟考量，設計階段抽水試驗可採塑

膠類 PVC 管材，待後續水井工程時再改為不銹鋼井體，或者抽水試驗時保留其不銹鋼抽水井體，於新設水井工程時續用。甚至，基於節省經費或相同經費創造更多之布建服務範圍，工程設計確立出水量，工程施工僅先完成井體構造及基座，待災害發生再進一步設置抽水設備，避免抽水設備長期設於地下折舊損壞，真正需求時反而故障無法完全發揮功能。

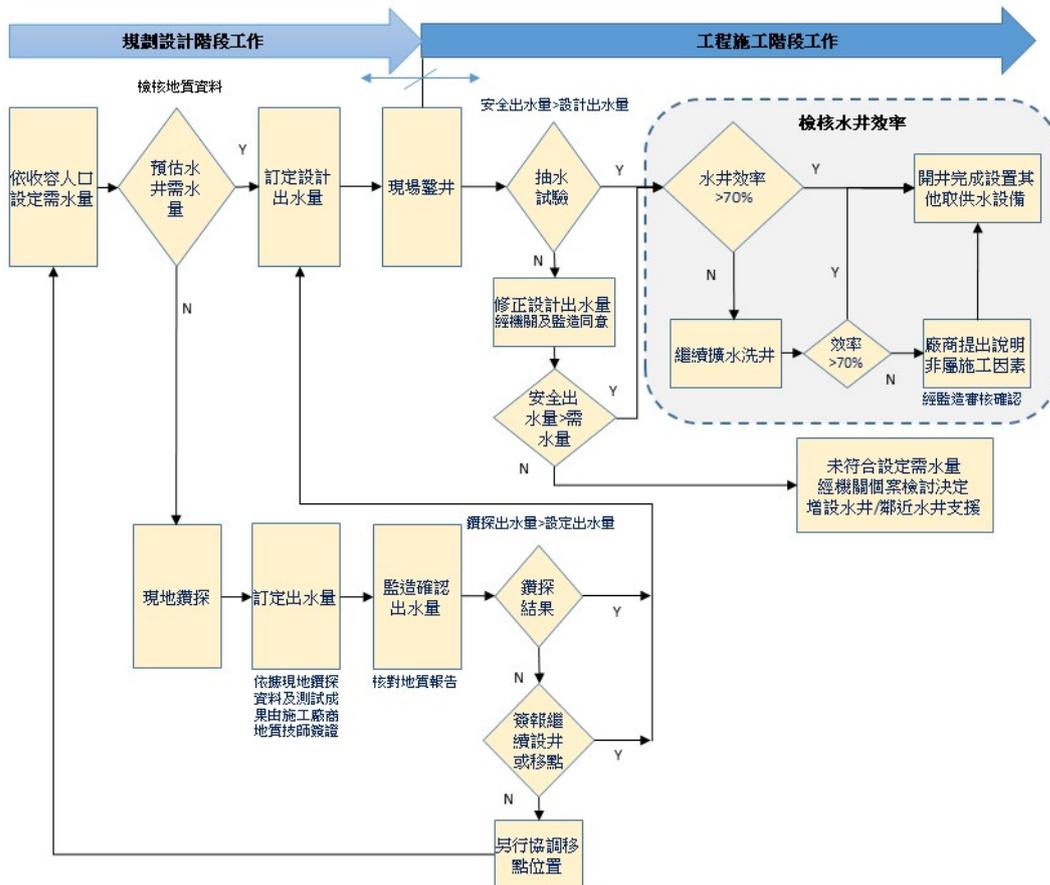


圖 8 防災水井計畫規劃設計及施工優化流程

由臺北地區地下水水量分佈情形，推估臺北地區地下水於一定深度範圍內具有集中性與部份單點區域較佳，以此 72 口防災地下水井建置完成後所得水量分佈為鑑，微水試驗出水量與實際出水量在部分井位仍有落差而未達預期，在規劃時必須考量地質條件為控制出水量之重要因素，並需較為寬裕的設計階段將各項地質與地下水相關資訊整合，因而建議於規劃設計階段優先辦理鑽探作業並將現地鑽探資料納入設計出水量綜合考量後據以提出設計數值，以拉進起始規劃需求量與實際施工執行層面對於水量的差距，避免後續施工階段面臨出水量認定的問題造成契約變更設計、工期壓力、移點程序等困境，有效提升工程契約執行面的施工效能，而擬定各階段相關工作流程為參考(圖 8)。

3.2 廢井程序

本工程所鑽 72 口防災地下水井中，其中海光公園、客家文化公園及松基公園為移點後新增設之地下水井，原先 3 口水井皆位於信義區，分別為松德公園(1)、眷村文化公園及信義國小，這 3 口水井於鑽設完成後發現爆炸性氣體濃度高於上限 30%，考量後續使用安全性，故最後仍採廢井方式處理。廢井方式依據相關作業規範辦理，為避免各地層因為鑽井貫穿不同含水層導致交錯污染水質，廢井時以每公斤波特蘭一號水泥 (type I Portland) 加入 2 %~5% 皂土，並以水灰比 1:4 之水泥皂土漿，利用灌漿機自井底處回填至井頂下方 1 公尺處為止。灌漿期間並應配合緩慢回拔套管，井頂下方 1 公尺處再以混凝土砂漿填充直至與地表高。

在規劃設計階段蒐集附近地質條件，彙整過往他案相關鑿井水量，可以降低選址後水量不足情事，若進一步將地質鑽探、探求出水量及民意蒐集納入，儘可能於地層透水性較佳區域再進行設井，便可以降低施工時井位移點機率。然而 2 吋井於地層較差區域設井試驗方式為工程技術之限制，對於執行後實際水量不如預期、其他異常情形廢井等付款條件可於契約明訂計價標準，可減少契約執行過程發生爭議的情形。

3.3 移點準則

本工程案防災水井井位配置以 12 個行政區之防災公園、防災學校、鄰里公園或其他備用防災場所，優先設置防災地下水井，提供緊急防災期間雜用水需求，於地震、乾旱或戰備等緊急狀況時，發揮防災功效。建井施工過程因土地管理單位另有其他用途無法配合設置、地質鑽探出水量不符需求、水質不利使用，此時除依原則檢視地質資料及現場設井條件外，為符合實際防災取水需求，當移點為非水質、水量因素時，表示臨近區域地層仍有取水之可能，故以距離最近可能設井點優先，滿足防災收容場所用水需求；而當移點為水質、水量因素時，表示臨近區域地層為類似水量、水質，故依盆地地質條件判斷其他適合地點，再以備用防災公園、公園綠地及學校之順序進行移井選位。

水井移點策略採一公里區域半徑為取水範圍，其標準服務半徑 300~500 公尺，半徑 1 公里 120 所學校供水站涵蓋率高，可取水量 23,350 CMD，前因考量各行政區皆須設置防災水井，故移點位置仍以同一行政區為主要，除地質因素無法設井，以相同行政區內取水量達到 300 CMD 設井。綜合上述條件，井位移點距離仍以 2 公里內為原則。

4. 結語

為滿足都市生活圈的防災用水需求，臺北市政府辦理都市防災水井工程計畫設置 72 口防災地下水井，工程執行過程因抽水試驗實際出水量與鑽探出水量差異，涉及契約出水不足量計價及收受爭議，或遭遇續行佈井或移井決策影響，因此，建置防災水井設計階段確實掌握地質與地下水文等資訊為工程執行順遂的關鍵因素。依本案施工數據顯示近 2 成防災地下水井數量之鑽探微水試驗出水量與實際有明顯差異，且不具規律性，故臺北地區不適合以微水試驗作為水井出水量估計，本研究建議防災水井建置應於規劃設計階段逐一完成井位鑽探及出水量評估，以準確設計數值發包施工，同時於工程契約明載減價收受條件，可使防災水井工程計畫執行更順遂。

由於臺北市防災地下水井建置數量多且地點分散各行政區，事先妥善規劃協調相當重要，本研究個案分析針對防災政策預期所需用水量目標及服務品質，探討工程計畫執行困難，藉此案例經驗反饋規劃設計，建立適宜防災水井工程作業流程，期能提升防災水井公共設施採購效率，滿足災時應急關鍵用水供應，強化都市整體災防系統功能。

誌謝

本研究承蒙台灣自來水股份有限公司總管理處樂育麟處長、第四區管理處林義雄副處長、張子中副處長、劉世鴻工程師、第七區管理處徐志宏副處長、黃貴麟組長、辜琪嬪工程師等先進接待參訪，經驗交流，並提供寶貴資料，給予諸多協助，特致謝忱。

參考文獻

1. 臺北市防災公園位置與維生系統建置，臺北市政府消防局網站，<https://fsm.119.gov.taipei/park.asp>
2. 臺北市地區災害防救計畫，臺北市災防資訊網
<https://www.eoc.gov.taipei/News/Details/2ac4caf4-4d84-4459-9b4d-745744717375>
3. 經濟部水利署防災及備援水井建置計畫，經濟部水利署中區水資源局網站 <https://www.wracb.gov.tw/8831/38120/40433/>
4. 台北盆地備用地下水井規劃，經濟部水利署水利規劃試驗所，2008 年。
5. 內政部自行研究案，從日本防災公園實施經驗探討我國都市公園之防災分工與建置方針成果報告，2017 年。
6. 「地下水觀測井設置作業手冊」，經濟部水利署 107 年。
7. 「地下水觀測井及觀測儀器維護作業手冊」，經濟部水利署 107 年。
8. 「地下水觀測井評核作業手冊」，經濟部水利署 107 年。



取水井



取水頭



取水頭及海管沉降

臺東深層海水試驗管工程

臺東藍金，未來之星

取水管線總長約1,400公尺、可取水深度達312公尺、可取水量約每日2,400噸



經濟部水利署南區水資源局 廣告

感謝

台灣自來水股份有限公司
 行政院農業委員會農田水利署石門管理處
 行政院農業委員會農田水利署宜蘭管理處
 行政院農業委員會農田水利署南投管理處
 行政院農業委員會農田水利署屏東管理處
 行政院農業委員會農田水利署苗栗管理處
 行政院農業委員會農田水利署桃園管理處
 行政院農業委員會農田水利署高雄管理處
 行政院農業委員會農田水利署雲林管理處
 行政院農業委員會農田水利署新竹管理處
 行政院農業委員會農田水利署嘉南管理處
 行政院農業委員會農田水利署彰化管理處

行政院農業委員會農田水利署璦公管理處
 行政院農業委員會農田水利署臺中管理處
 玖樂文創有限公司
 財團法人工業技術研究院
 黎明工程顧問股份有限公司
 經濟部水利署
 經濟部水利署水利規劃試驗所
 經濟部水利署中區水資源局
 經濟部水利署北區水資源局
 經濟部水利署南區水資源局
 (依筆畫排序)

感謝以上單位的贊助，協助本刊順利發行，特此銘謝！