

應用動態調度法初步探討跨流域調度之水資源韌性

INVESTIGATING WATER RESOURCES RESILIENCE OF INTER-BASIN ALLOCATION USING DYNAMIC SCHEDULING

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士候選人

顏 昱 淇
Yu-Chi Yen

國立成功大學
水利及海洋工程學系
兼任助理教授

吳 嘉 文
Chia-Wen Wu

國立成功大學
水利及海洋工程學系
教授

陳 憲 宗*
Shien-Tsung Chen

國立成功大學
水利及海洋工程學系
兼任教授

周 乃 昉
Frederick N.F. Chou

摘 要

本研究以動態調度法探討跨流域水資源系統之韌性，運用通用性廣域水資源運用模擬模式 (Water Resources Allocation Simulation Model, WRASIM)，建構嘉義與北臺南地區之水資源聯合調度系統，涵蓋八掌河流域之仁義潭、蘭潭與鹿寮溪水庫，以及急水河流域之白河水庫，形成串聯與並聯混合之多水庫聯合運用架構。本研究設定水量分配優先順序，模擬多組不同蓄水平衡之操作策略，以系統供應共同供水區 (嘉義地區公共給水需求) 於缺水指數等於 1.0 條件下之最大供水能力作為評估基準；並進一步採用 WRASIM 模式之動態調度功能模組，以年可靠度與年缺水日數百分比為主要評估指標，設定年缺水日數百分比不超過 1,500 % -day 為可容忍情境，分析最嚴重枯早年缺水期間跨時段與跨用途水資源調度之最適策略，評估系統於極端情境下之韌性調適能力。研究結果顯示，在有效的動態調度操作策略下，水資源系統可展現一定程度的緩衝與調適功能，不僅能強化水源分配之平衡性，亦可透過豐水期末適當蓄水以支應翌年枯水期用水，顯示動態調度有助於提升跨流域水資源系統之整體韌性。

關鍵詞：水資源韌性、動態調度、跨流域水資源管理、缺水忍受門檻。

* 國立成功大學水利及海洋工程學系教授
70101 台南市東區大學路 1 號 · chen@gs.ncku.edu.tw

INVESTIGATING WATER RESOURCES RESILIENCE OF INTER-BASIN ALLOCATION USING DYNAMIC SCHEDULING

Yu-Chi Yen

National Cheng Kung University
Department of Hydraulic and Ocean Engineering

Shien-Tsung Chen*

National Cheng Kung University
Department of Hydraulic and Ocean Engineering

Chia-Wen Wu

National Cheng Kung University
Department of Hydraulic and Ocean Engineering

Frederick N.F. Chou

National Cheng Kung University
Department of Hydraulic and Ocean Engineering

ABSTRACT

2

This study investigates the resilience of an inter-basin water resource system using a dynamic scheduling approach. The Water Resources Allocation Simulation Model (WRASIM) was applied to construct a joint water allocation system serving Chiayi and northern Tainan, incorporating Renyitan, Lantan, and Luliaoshi Reservoirs in the Bachang River Basin and Baihe Reservoir in the Jishui River Basin, configured as a mixed serial–parallel multi-reservoir system. Priority rules for water allocation were defined, and multiple operational strategies with different storage balance conditions were simulated. System performance was evaluated based on the maximum water supply capacity of the public water supply in Chiayi under a shortage index of 1.0. The dynamic scheduling module of WRASIM was further employed, using annual reliability and deficit percent day (DPD) as key indicators, with an annual DPD threshold of 1,500 %–day defined as the tolerable limit. Optimal spatiotemporal and cross-purpose allocation strategies during the most severe drought years were analyzed to assess system resilience under extreme conditions. Results indicate that effective dynamic scheduling enhances system buffering and adaptive capacity, improves the balance of water allocation, and allows adequate end-of-wet-season storage to support subsequent dry-season demand, demonstrating that dynamic scheduling contributes to improved water resources system resilience.

Keywords: Water resources resilience, Dynamic scheduling, Inter-basin water resources management, Shortage tolerance threshold.

一、前言

臺灣地形多山且坡度陡峭，河川短促、流速快，水資源不易蓄積，加上降雨在時間與空間上的分布高度不均，使得水庫成為調節水量、維繫穩定供水之關鍵設施。近年來，氣候變遷加劇降雨與水文條件之不確定性，極端降雨與長延時乾旱事件發生頻率顯著提高，對既有水資源系統的供水穩定性與調度彈性構成嚴峻挑戰。另一方面，受限於環境衝擊、社會共識及用地條件，新建水庫之可行性日益降低，使得如何透過既有水庫與水源系統之整合運用，提升整體供水效益，成為當前水資源治理的核心課題。

基於此背景，行政院於 2021 年 8 月核定經濟部「臺灣各區水資源經理基本計畫」(2021)，提出「打造西部廊道供水管網，強化區域調度」之政策主軸，強調透過跨流域、跨區域之水源連結，整合既有水庫與河川水源，提升水資源調配彈性，使原本於豐水期溢流而未能利用之水量，能透過系統整合與操作策略予以有效蓄存利用。水資源管理已不再僅著眼於單一水庫或單一流域之供需平衡，而是朝向跨流域聯合運用與整體系統最佳化的調度模式發展。

傳統水資源規劃作業，通常以缺水指數 (shortage index, SI) 評估水資源系統之可靠供水量，對於模擬系統缺水量 SI 等於 1.0 時所對應的需水量，稱為系統之供水能力，表示規劃上設定對缺水的容忍程度為 SI 等於 1.0。然而，缺水指數雖能反映長期平均缺水程度，但未能明確描述缺水事件的延時性、恢復能力與缺水內涵差異，亦無法設定系統可承受乾旱衝擊之性能門檻。

此類規劃指標主要呈現長期統計平均特性，對於單一枯旱事件的動態演變歷程與風險變化，尚無法反應即時管理決策對緩解風險之成效。雖然現行實務操作已具備定期滾動式檢討機制，但面對氣候變遷加劇的水文不確定性，傳統指標難以反應「滿足當期各標的需求」與「保留水量以應對未來風險」間之權衡，且管理上仍缺乏一套能整合不同用水標的對缺水容忍特性(如農業與民生)之量化評估程序。這使得決策過程往往難以精確掌握最佳的啟動時機與調度規模，而必須依賴經驗法則或較為保守的策略以確保系統安全。

事實上，台灣的乾旱與其對於缺水的衝擊，主要源自於豐水期的水庫入流不足，而此現象根源於該年度豐水期缺少颱風侵襲，以致未帶來顯著的降雨，使水庫於豐水期末無法維持於高水位；而枯水期流量驟減，供水僅得依賴水庫蓄水支應，故形成缺水風險。現行水資源管理對水庫多採用高水甚至滿水運轉，即

為因應此風險的保守作為，但管理上有時於豐水期末或枯水期初過於保守，影響了農業標的在此階段的供應(如稻作於二期作抽穗期或一期作整田插秧期之用水)。依前述討論，對於乾旱水資源調度的分析應該要符合實務操作上，對於豐水期至枯水期末整體供水考量之動態架構，同時對於缺水風險的量化亦應朝更細緻量化，且適合各標的用水特性之目標精進。

前述討論衍生出進一步量化「水資源韌性 (water resources resilience)」的需求，所謂水資源韌性，係指水資源系統在遭受大規模水文擾動(如乾旱或極端氣候事件)時，能夠維持一定的供水量，並於擾動後，在短時間內回復至正常供水，同時具備因應未來不確定性之調適能力。換言之，水資源韌性不僅關注「是否缺水」，更重視「缺水程度是否可忍受並可快速回復」。此外，提升韌性的作為可廣泛包含開發新設施之工程作為，以及妥善進行水資源調度之管理作為。本研究以「跨流域與跨時段」之水資源動態調度管理作為，探討跨流域調度之水資源韌性，此概念具有明確之性能門檻(缺水容忍度)，作為調度決策與供水管理之依據。

為提升整體供水系統之韌性，動態調度 (dynamic scheduling) 是將水資源系統分析視為一個連續運作的過程，而非單一時間點的操作，強調在整個分析期程內的持續調度與修正，同時考量時間與空間維度，進行跨流域與跨時段之整體水量配置，使水庫調蓄功能得以充分發揮，以達到在分析時程內之最佳水資源利用。相較於靜態或逐日獨立調度方式，動態調度更有助於在乾旱情境下設定合理的供水目標與調度門檻，強化系統對長延時乾旱的承受能力。

本研究以八掌溪流域之仁義潭、蘭潭、鹿寮溪水庫，以及急水溪流之白河水庫之跨流域聯合運用為案例，透過動態調度分析多組跨流域水源調配情境，並探討在既定缺水可忍受門檻下，如何透過跨時段調蓄與越域引水策略，提升整體供水系統之韌性。吳嘉文等人 (2025) 於前期研究已指出本區域較佳之多元水資源開發與調度方向，本研究則進一步以水資源韌性為核心觀點，檢討既有評估指標之限制，並透過動態調度分析，提出更能兼顧供水穩定性與系統調適能力之調度策略，期能作為未來區域水資源管理與決策之參考。

二、文獻回顧

適當的缺水評估指標可作為水資源規劃與設計的

重要依據，協助掌握供需狀況與風險程度，目前常見之缺水評估指標包括：缺水率 (deficit rate, DR)、缺水百分率日數 (deficit percent day, DPD) (Japan Water Resources Development Public Corporation, 1997)、缺水指數 (shortage index, SI) (Beard, 1963) 以及一般化缺水指數 (generalized shortage index, GSI) (Hsu, 1995) 等。臺灣自 1985 年起即採用缺水指數 (SI) 作為水資源規劃評估工具，並應用於如南化水庫等多項計畫，其優點為能呈現長期缺水的發生頻率、程度與嚴重性，具指標性與應用價值。

在眾多缺水指標中，缺水率 (DR) 係指缺水量 (計畫供水量減去實際供水量) 相對於計畫供水量的比率，因其計算簡單、可即時反映供需落差，常用於即時或歷史用水情勢分析。惟 Chen *et al.* (2019) 指出，該指標無法呈現缺水事件的持續時間 (延時) 與發生頻率，限制其在整體供水系統風險評估上的適用性。

缺水百分率日數 (DPD) 則著重描述缺水期間的持續性與強度，DPD 為缺水率與缺水日數的乘積 (單位：%-day)，適合用來界定缺水的可忍受程度。然而，DPD 僅反映缺水總量與延時性，並未納入發生頻率與系統恢復能力等要素，亦缺乏對長期供水穩定性的解釋 Chen *et al.* (2019)。

缺水指數 (SI) 為評量水源運用模擬之缺水程度，SI 為 Beard (1963) 提出，其立論為在缺水衝擊可由最佳管理作為調適緩和，缺水的經濟損失約略與年缺水率的平方值呈比例，SI 雖具備整合性，用以評估整體缺水程度，但其指標值可能對不同的缺水型態無法清楚辨識。例如，在模擬 10 年情境下，SI = 1.0 可能源自 2 年各 22.5% 之缺水，亦可能為 4 年分別為 20%、20%、10%、10% 之缺水情形，故同樣的 SI 值可

能有不同缺水內涵。因此，若僅以 SI 作為單一指標，難以精準掌握系統供水可靠性與缺水時的嚴重情況 (吳嘉文等人，2024)。

為補強上述限制，Hashimoto (1982) 提出水資源韌性三指標：可靠度 (reliability)、回復度 (resiliency) 與脆弱度 (vulnerability)，分別對應系統缺水事件之發生頻率、持續時間與嚴重程度。可靠度指系統處於非失敗狀態之機率，可用「 $1 - (\text{缺水日數} / \text{總日數})$ 」計算；回復度為發生缺水至恢復常態供水之時距；脆弱度則為缺水時期之平均日缺水率，反映系統失敗時之損失程度；水資源韌性三指標組合有助於全面理解供水系統在干擾情境下之應變與承受能力。

此外，Moy *et al.* (1986) 提出「最大缺水延時」作為韌性指標，認為缺水持續時間越長，代表系統回復能力越差；Kundzewicz *et al.* (1995) 則指出「平均缺水延時」可能受短期缺水事件平均後低估整體風險，導致評估結果無法反映風險隨系統惡化而遞增的特性；Kjeldsen *et al.* (2004) 亦指出平均缺水延時無法與系統實際變化保持一致性，恐造成評估結果的誤判。

Wang *et al.* (2009) 整合多位學者觀點，歸納水資源韌性應涵蓋三大層面：(1) 系統門檻 (performance threshold)：即水資源系統在遭受干擾時，是否能透過調度與備援維持供水標的不進入失敗狀態；(2) 回應與回復能力 (response and recovery)：即系統在發生缺水後能否在可接受時間內恢復至正常供水，並避免社會經濟乾旱程度惡化；(3) 適應能力 (adaptive capacity)：涵蓋災前預警、災中限制擴散與災後復原；系統門檻、回復能力、缺水延時之概念示意如圖 1。Simonovic *et al.* (2021) 進一步提出水資源韌性的 4R 框架，包括穩健力 (robustness)、資源力 (resourcefulness)、

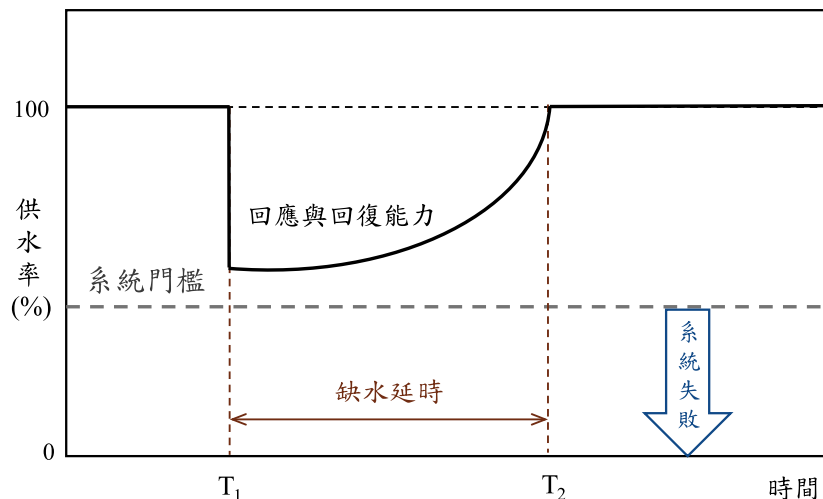


圖 1 水資源韌性概念示意圖 (Wang *et al.*, 2009)

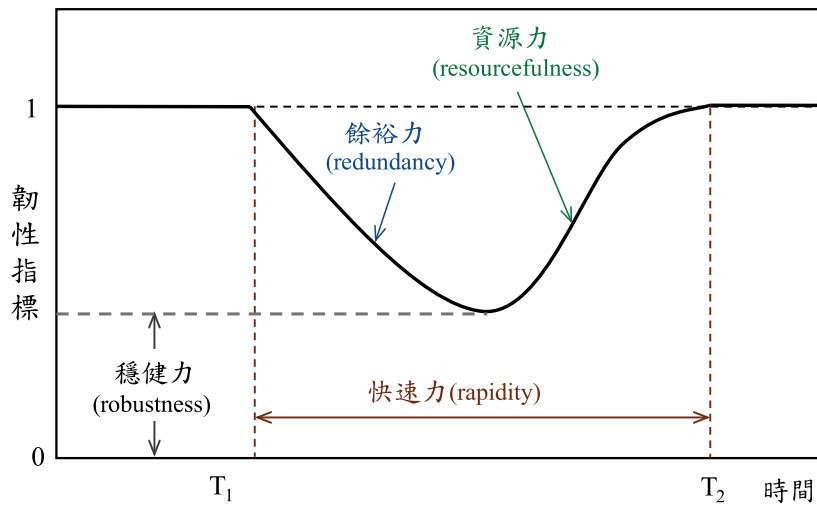


圖 2 水資源韌性 4R 概念示意圖 (Simonovic et al., 2021)

快速力 (rapidity)與餘裕力 (redundancy)，強調從水資源擾動開始至回復為穩定狀態的全週期的韌性評估指標，概念示意如圖 2。

綜上所述，傳統缺水評估指標如缺水率 (DR)、缺水百分率日數 (DPD) 與缺水指數 (SI) 在描述水資源供需現況與長期趨勢方面雖具參考價值，但評估水資源受擾動時之系統韌性方面仍具侷限性。為補強傳統缺水評估指標不足，本文採用採用「年可靠度」與「年缺水日數百分比」為核心評估指標，並結合缺水忍受程度門檻進行系統性探討。依據台灣省水利局於民國 1982 年對國姓水庫與建民水庫之研究，與東京 1964 年奧運缺水調查經驗，家用及公共給水缺水忍受度，可採缺水百分率日數 (DPD) 來表示，並設為約 1,000 至 1,500 %–day (Hwang, 1986)。另參考吳嘉文與周乃昉 (2024) 對台灣自來水公司之操作經驗，當缺水率低於 5%時，可透過夜間減壓調節；當缺水率介於 5%至 10%時，則需進行分區供水；若超過 10%至 20%，則可能進一步實施定時定量限水措施，民眾感受則顯著提升。故本文設定年缺水日數百分比不超過 1,500 %–day 為可容忍範圍，意即每日缺水率於整個枯水期 (約五個月) 均控制在 10%以下，對應之年平均缺水率約為 4%。

儘管上述指標 (SI、DR、DDP、RRV、4R 等) 皆能從不同面向描述系統狀態，但在面對氣候變遷下之長延時乾旱 (prolonged drought) 時，需導入一套能明確「韌性」的量化評估。本研究參採 Wang et al. (2009) 歸納之水資源韌性面向，並引用 Simonovic et al. (2021) 針對乾旱特性所轉化之 4R 詮釋，建立一套能明確界定「系統門檻」與「回復能力」之量化評估體系：

- (1) 對應「系統門檻 (performance threshold)」與「穩健性 (robustness)」：基於缺水容忍度之年可靠度。Wang et al. (2009) 定義的系統門檻係指系統遭受干擾時，能否維持供水不進入失敗狀態，而 4R 架構中之穩健性為：系統在經歷移用農業用水與啟動備援水源後，於最嚴重枯旱年能防止公共給水進入失敗狀態之程度。因此，本研究對於公共給水標的採用「最嚴重年缺水日數百分比」作為此面向之核心指標。設定最嚴重年缺水日數百分比超過 1,500 %–day (即相當於枯水期每日缺水率 < 10%) 視為不可容忍之失敗事件。若系統能將極端年之缺水強度控制在此範圍內，即代表具備足夠之穩健性，能抵抗極端干擾而不致崩潰。
- (2) 對應「回復力 (response and recovery) 與「快速力 (rapidity)」：枯水期末蓄水狀態與回復時間。韌性之另一關鍵在於干擾結束後之系統復原速度。Wang et al. (2009) 強調系統需在可接受時間內恢復至正常狀態；而 4R 架構中之快速力，指枯水期結束後水庫蓄水的回升速度。由於 DPD 指標僅反映缺水嚴重度，無法描述旱象結束後之復原力，因此以「枯水期末 (5 月 31 日) 之水庫蓄水量」以及「蓄水量回復至正常供水所需時間」作為回復力參考。此指標能具體量化系統是否因過度透支而喪失回復力，或能否藉由調度，快速脫離高風險失敗狀態。
- (3) 綜合韌性評估架構：綜上所述，本研究不再依賴單一指標，而是建立一套涵蓋「系統門檻」與「回復能力」之雙重韌性評估體系：系統門檻以「年可靠度」及「最嚴重年缺水日數百分比」，檢視系統在

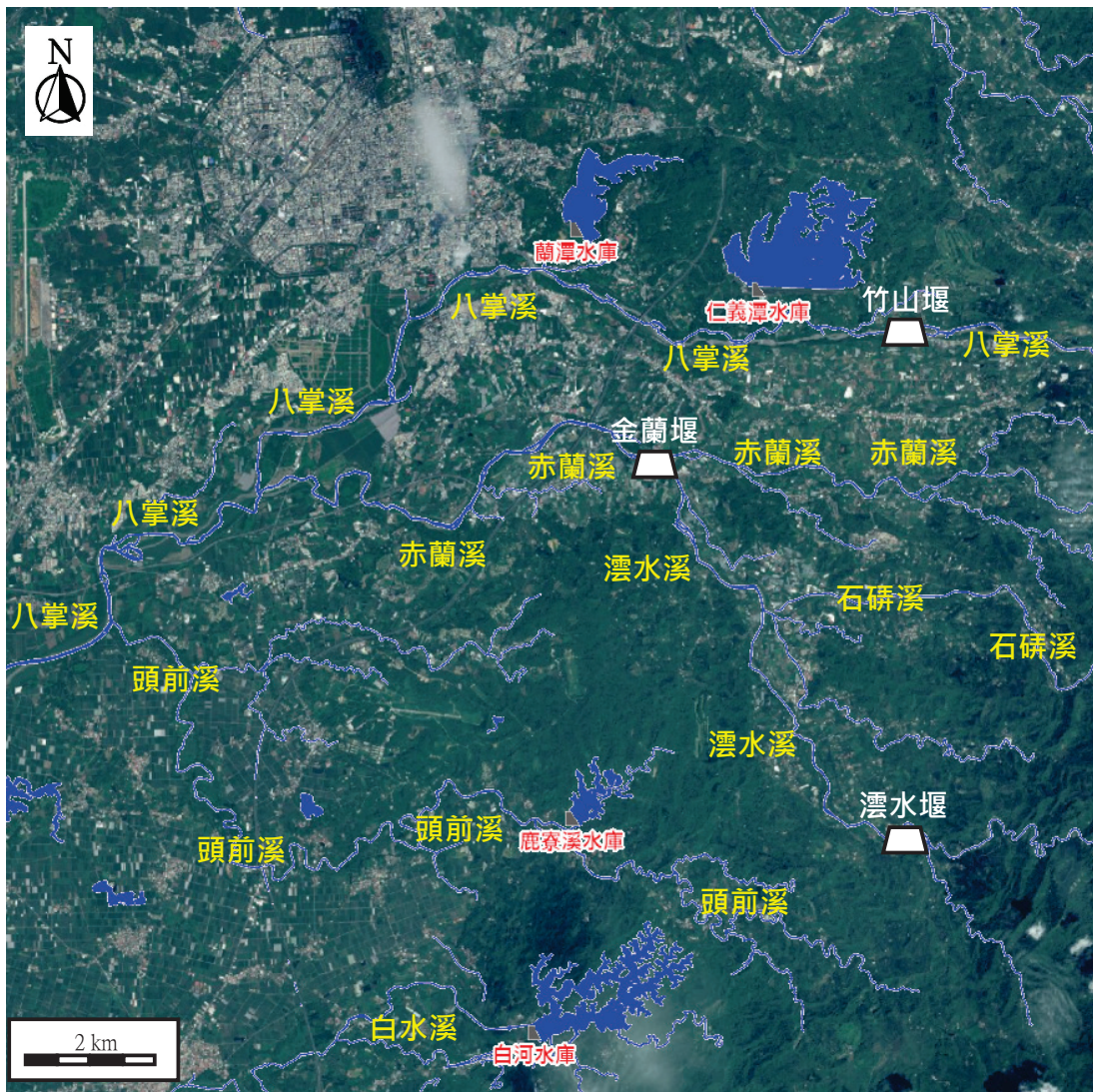
極端壓力下是否具備「穩健性」，確保不越過系統門檻（失敗）；回復能力以枯水期末蓄水量與回復時間，檢視系統之「快速力」，確保缺水後能迅速重回安全供水量。此架構將應用於後續動態調度分析中，具體量化水資源系統之韌性表現。

三、研究區域

本研究以嘉義及北臺南地區之水資源系統為對象，涵蓋八掌溪與急水河流域的水資源設施，納入跨流域聯合運用模擬分析的設施包括：八掌河流域的仁義潭水庫與蘭潭水庫、八掌溪支流頭前溪的鹿寮溪水庫，以及急水河流域的白河水庫，詳細位置如圖 3 所

示。仁義潭與蘭潭水庫的主要引水來源為現有竹山堰，此外，本研究亦納入規劃中之澧水堰及金蘭堰，探討赤蘭溪與澧水溪兩條支流之水資源開發的多元利用策略。本研究探討之跨域水資源系統，整體河川水系與水利設施關聯圖詳見圖 4。

近期的淤積調查顯示（農水署嘉南管理處，2023），仁義潭、蘭潭、白河與鹿寮溪水庫目前有效蓄水容量分別為 2,465.7 萬、921.8 萬、1,378.8 萬及 71.4 萬立方公尺。嘉義地區的家用及公共給水主要由仁義潭與蘭潭水庫供應；白河水庫則是用來支應糞箕湖及東山灌區，總灌溉面積約 988 公頃，另亦提供白河與東山地區每日家用及公共用水，約 0.19 萬立方公尺；鹿寮溪水庫蓄水能力有限，主要輔助白河區馬稠後灌區 260 公頃農地之灌溉。



背景圖片來源：經濟部水利署「水利空間資訊服務平台」

圖 3 研究區域河川水系及水資源設施

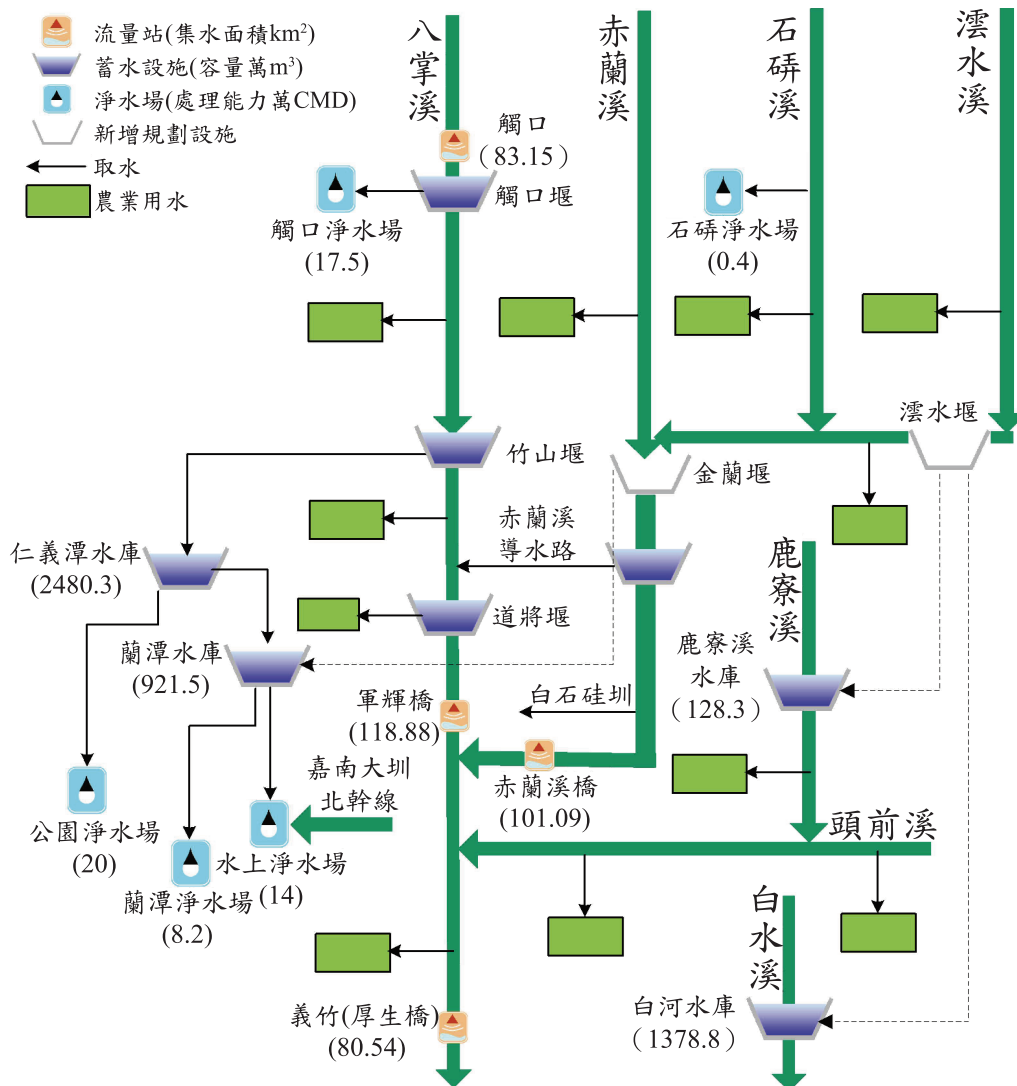


圖 4 八掌溪河系取水、蓄水及淨水設施空間關係圖

行政院於 2017 年核定白河水庫的整建與改善工程計畫，第一階段於 2019 年至 2022 年間推動，為達成 1,250 萬立方公尺的有效庫容目標，重點包括增設繞庫防淤設施、執行清淤與河道疏濬作業。第二階段 (2023 至 2027 年) 則進行越域引水工程，從赤蘭溪上游之澧水溪設置澧水堰及相關取水設施，配合蕉坑取水工程，進一步提升庫容至 2,000 萬立方公尺。為實現白河水庫長期穩定運作與土砂排除，相關措施亦包括建設繞庫防淤隧道、越域引水系統與空庫排砂機制，在有限水源條件下，提升水力排砂效率，以確保庫容永續利用 (行政院，2017)。為避免影響二期作及農業整體用水量，規劃每年第 14 至 20 旬進行空庫排砂作業 (南區水資源分署，2015)。此外，鹿寮溪水庫在水利規劃分署的規劃下，將進行水庫改善，預期透過清淤恢復鹿寮溪水庫至 1,526 萬立方公尺之庫容，並規

劃自澧水堰進行越域引水，以提升其供水效能 (水利規劃分署，2015)。

依照「臺灣各區水資源經理基本計畫」(經濟部，2021) 內容，嘉義地區於 2019 年的每日家用及公共給水需求約為 31.3 萬立方公尺，預估至 2036 年將提升至每日 34.9 萬立方公尺，增加量為每日 3.6 萬立方公尺。除此之外，區域內產業快速發展，將提升未來工業用水的潛在需求。為因應上述需求成長，水利規劃分署評估於赤蘭溪與澧水溪交會處下游興建金蘭堰，計畫將水源引至蘭潭水庫 (水利規劃分署，2025)，以增加整體水資源調配能力，而金蘭堰規劃之越引容量為每秒 2 立方公尺。惟考量赤蘭溪流域之水源可能同時作為仁義潭、蘭潭、鹿寮溪水庫之引水來源，如何擬定兼顧多元設施的最適越域引水策略，為規劃重點之一。

四、模式建置

4.1 八掌溪與急水溪水資源系統 WRASIM 模式建置

本文運用「通用性廣域水資源運用模擬模式」(Water Resource Simulation Allocation Model, 簡稱 WRASIM 模式) 分析八掌溪與急水溪水資源系統 (參考圖 4), WRASIM 模式為國立成功大學周乃昉教授與吳嘉文博士所發展, 成功應用於許多水資源系統模擬與分析 (如: 水利規劃分署, 2006; Chou and Wu, 2014; 吳嘉文等人, 2025)。WRASIM 模式將水資源系統映射為由節點與箭線所構成之網路, 以最小成本網流規劃法為基礎, 其命題為要求進出節點的水量守恆, 以及在箭線上的水量流動符合輸水上限之限制條件下, 尋求最小總成本的網流水量。網流規劃特點包含: (1) 直接以節點與箭線所構成之網路圖形表達待分析問題與結果; (2) 藉由水資源網路結構的特殊性建立特殊的演算法, 其計算效率優於線性規劃問題; (3) 藉由適當設定節點-箭線所構成的特殊架構之成本係數來反應水量分配優先順序, 以建立供應需求為導向的配水概念。

在 WRASIM 模式中, 水資源系統被抽象為由多個節點與具方向性之箭線所構成的網路圖形, 可表示為 $G(N, A)$, 其中 N 為節點集合, A 為箭線集合。節點通常對應於集水區或特定水利設施, 而箭線則代表節點間具有方向性之連結路徑, 模擬水流於其上的傳遞。在此圖形中, 節點總數為 n , 箭線總數為 m 。此一網路流動問題屬於純網流模型, 並假設所有節點均需滿足流量守恆條件, 即每一節點之流入量必須等於其流出量。同時, 每條箭線皆受到流量上下限之約束, 並附有單位流量成本。此類問題的主要分析目標在於尋求符合上述條件下之最小總成本流量配置, 亦即最小成本網流規劃 (minimum cost network flow programming) 問題。該模型之數學式與解法可參考 Ahuja *et al.* (1993) 所提出之相關理論, 其數學命題如下:

$$\text{Minimize } \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot x_{ij} \dots\dots\dots(1)$$

Subject to

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} = 0, \text{ for all } i \in N \dots\dots(2)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij}, \text{ for all } (i, j) \in A \dots\dots\dots(3)$$

式中, N 、 A 分別為所有節點與箭線的集合, i 、 j 為節點代號, x_{ij} 為自節點流至節點 j 之間箭線 (i,j) 的流量, c_{ij} 為箭線 (i,j) 上每單位水量的流動成本係數, l_{ij} 為箭線 (i,j) 的流量下限值, u_{ij} 為箭線 (i,j) 的流量上限值。因本研究之系統為純網流模型, 所有節點均滿足「流入量等於流出量」之守恆條件, 故式 (2) 等號右端項為零。

4.2 水量分配順序設定

八掌溪與急水溪水資源系統 (圖 4) 的系統建置及水量分配順序設定情形, 詳見發表於《農業工程學報》的前期研究「應用模擬法探討流域水資源之多元整體開發利用策略」(吳嘉文等人, 2025), 該研究依 Chou and Wu (2014) 彙整臺灣水資源系統內通用、常見之水量分配型態及對應的成本係數設定原則; 本文據以針對白河水庫區分「空庫排砂」與「蓄水利用」時期, 設定模擬情境如下:

(1) 空庫排砂期 (水庫蓄水順序: 蕉坑、鹿寮溪、仁義潭、蘭潭)

白河水庫於空庫排砂期間 (第 14 至 20 旬) 的蓄水箭線之上限歸零, 使其不予蓄水, 故白水溪來水均被釋放以進行空庫排砂。而為確保白河水庫於空庫排砂期之備援供水與促進排砂成效, 故提升蕉坑蓄水為最優先; 另為促進可以調蓄金蘭堰址處剩餘流量之蘭潭水庫蓄水空間, 竹山堰之引水量優先蓄水於仁義潭水庫, 枯水期則優先利用蘭潭水庫供水。

(2) 蓄水利用期 (水庫蓄水順序: 鹿寮溪水庫、蕉坑、白河、仁義潭、蘭潭)

考量白河水庫於來年仍須進行空庫排砂, 故於蓄水利用期優先將澗水溪剩餘流量引導至鹿寮溪水庫蓄存。

4.3 缺水時期之動態水資源調度

動態調度 (dynamic scheduling) 係指在水資源管理過程中, 同時考量時間與空間維度, 針對整個調度期程之入流、水庫蓄水與用水需求進行整體性之水量配置規劃。相較於靜態調度僅針對單一時段或每日獨立進行模擬, 動態調度可將多個時段納入同一演算架構, 藉由網流模式或最佳化方法, 求解出符合系統運作條件下, 整段模擬期間的最佳水量分配策略。此方法能充分發揮水庫調蓄功能, 提升整體供水穩定性與資源運用效率, 尤適用於面對長期、跨季節或資源分布不均等調度情境, 為目前水資源調度分析中之進階

規劃工具 (Loucks and van Beek, 2017; 吳嘉文等人, 2024)。

本研究採用 WRASIM 模式中具備動態調度功能之 WRASIM-D 模組, 進行嘉義與北台南地區在缺水時期之水資源配置規劃。WRASIM-D 模組以平面網路水量分配架構為基礎, 並延伸至時間序列面向, 構建時空立體網路, 使得水庫蓄水量可於各時段間進行傳遞, 進而實現跨日調蓄與配水之整體最佳化 (吳嘉文等人, 2024)。WRASIM-D 模組的核心為在每一分析時段內複製整體水資源系統結構, 並於同一水庫在不同時段間建立期末蓄水連線 (carryover storage arc), 使水量可於時間軸上進行移動, 空間平面網流架構如

圖 5 所示之時空立體網路架構, 透過此立體網路架構, 原本僅能針對單一時間點的空間配水問題, 即可轉化為考量時間連續性的最小成本網路流動問題, 有效模擬水資源系統中各儲水設施之時空調蓄功能。

此外, WRASIM-D 模組配水邏輯亦考量需求之優先順序設定。在模型操作上, 各用水需求於不同時段被細分為數個等級 (如圖 6 所示, 將需水量自 10% 至 100% 劃分為 10 級), 每一級別分別由虛擬需求箭線表達, 並賦予不同之優先係數, 模型將依據此順序進行配水, 使不同時段下重要用水需求可被優先滿足。此設計可提升水資源調度策略對多時段穩定供水之適應性與靈活性。

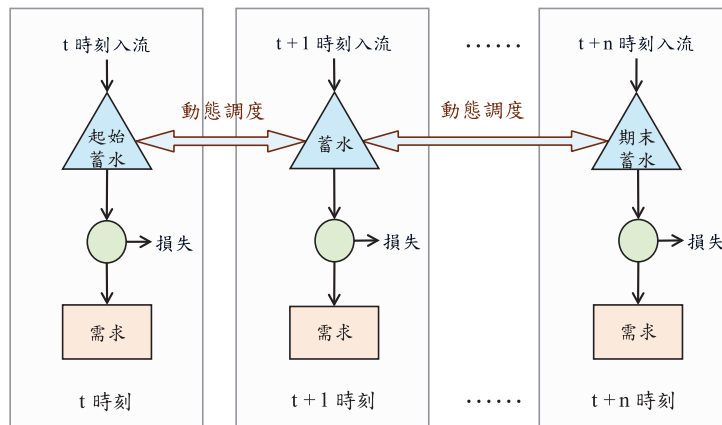


圖 5 WRASIM-D 之動態網路架構

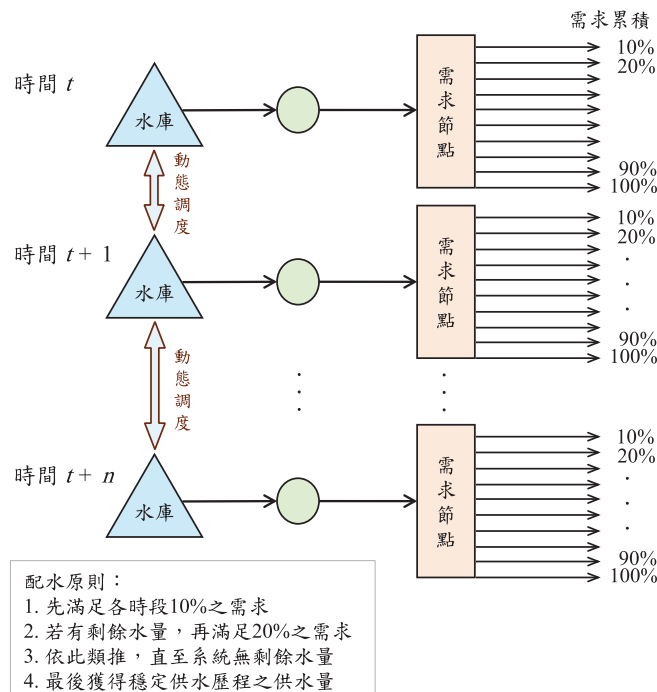


圖 6 WRASIM-D 之優先配水架構

WRASIM 模式的基本設定是以逐日演算方式，針對 n 日模擬期程重複進行 n 次靜態網流分析；而 WRASIM-D 模組則透過系統架構的 n 倍複製與時空連接線設計，將整體調度策略整合為一次性網流求解問題，求解效率與分析整體性皆更具優勢。

本研究調度分析之年度期程為水文年度 6 月 1 日至翌年 5 月 31 日，探討某失敗年度（即供應公共標的需求後產生明顯缺水之年度）之水資源供需與韌性特性，並根據 Wu and Chou (2024) 之研究方法設定多階段用水優先順序如下：

(1) 水庫蓄水安全儲備

首先維持蕉坑水庫滿庫 (429.95 萬立方公尺) 與仁義潭水庫高水位 (400 萬立方公尺以上)，以因應調度結束後的豐水期初，首波洪水延遲發生之情況。

(2) 環境流量需求

每日環境基流量須被滿足，含竹山堰下游保留水量每秒 0.33 立方公尺及鹿寮溪生態基流量每秒 0.02 立方公尺。

(3) 公共供水保障

滿足每日公共用水標的至 96%，以維持 DPD 值低於 1500 為目標（若每日缺水 4%，則一年度的 DPD 為 $4\% \times 365 \text{ day} = 1,460 \text{ \%–day}$ ），可不進入分區供水。

(4) 農業基本灌溉

依作物不同生長期需水彈性，設計各時段灌溉保障水量，包含整田插秧期需達 85%、本田期 50%（供 5 停 5 之輪灌）、抽穗期 85%，並整體達到約 68% 計畫灌溉水量以避免停灌。如針對各期作間的計畫配水量進行統計，前述維持灌溉必要水量約占計畫配水總量之 65% 至 70%；亦即如未能滿足本段所述之維持灌溉必要水量，則有執行停灌之需要。此外，為使各時段水量分配均勻，進一步將本段所述之維持灌溉必要水量區分為 5 等分，動態配水時分別依序滿足各組之維持灌溉必要水量。

(5) 蓄水水位提升

當基本需求滿足後，逐步提升至管控蓄水量（仁義潭 1,000 萬立方公尺，蕉坑 429.95 萬立方公尺），其後依序滿足：公共標的全量之需求、整田插秧期間之灌溉需求、旱作 8 成需求、抽穗期之灌溉需求。

(6) 其餘水量分配

若仍有剩餘水量，則依序滿足更高需求階段，如灌溉全量稻作、旱作 8 成需求，以及最終的庫容上限蓄存（鹿寮溪 1,526 萬立方公尺與仁義潭 2,465.7 萬立方公尺）。當水庫蓄水已達前述上限後，因水情樂觀，後續得進一步全量供應本田時期之灌溉需求。

4.4 評估指標

本文模擬如第 4.2 節所述之情境時，設定不同需求水量進行模擬，並計算缺水指數 (SI)。SI 之計算公式如下：

$$SI = \frac{100}{NY} \sum_{i=1}^{NY} \left(\frac{dy_i}{Dy_i} \right)^2 \dots\dots\dots(4)$$

式中， NY 為模擬分析的總年數， Dy_i 為第 i 年之需水總量， dy_i 為第 i 年之缺水總量。本文針對水資源系統中的主要供水對象進行分析，透過逐次調整其用水需求量，並配合反覆模擬過程，直至模擬結果所計算出的缺水指標 (SI) 達到 1.0 為止。此時所對應的需求量，即可視為該系統在水庫蓄水容量維持不變，且歷史水文條件可重現的前提下，所能提供的供水能力；在此水準下，供水對象所面臨的缺水風險程度可視為 $SI=1.0$ 。而後統計在 $SI=1.0$ 下之缺水過程，依據水文年區分，以前述「年可靠度」及「最嚴重之年缺水日數百分比」做為水資源韌性之探討指標。若模擬過程中，某一水文年度對公共用水的供水發生不可忍受之缺水情況，則採用動態優選分析，評估該年度的最佳跨時空及跨標的之水資源調度策略，以調適該年度公共標的不可忍受的缺水狀態。而缺水日數百分比計算公式如下：

$$DPD = \sum_{t=1}^c \left[\left(\frac{d_t}{D_d} \right) \times 100(\%) \right] \dots\dots\dots(5)$$

式中， d_t 為某年內第 t 日之缺水量； C 為一年之日數； D_d 為日需求量。本研究設定家用及公共給水標 DPD 的可接受門檻為 1,500，若某年度的 DPD 超過此一門檻，水資源系統於該年度即視為失敗。

農業用水量最大之水稻種植，依過去經驗，缺水 20% 通常可接受，缺水 20% 至 35%，在加強灌溉管理下尚可忍受，缺水大於 35% 就可能須考慮局部或全區停灌。故若某期作期間所統計的平均缺水率超過 35%，此時可視為不可容忍之缺水，對農業標的用水而言該年度即視為失敗。此指標公式如下：

$$DR_{(k,i)}^A = \frac{\sum_{j \in I_{k,i}} \max(D_{j,i}^A - S_{j,i}^A, 0)}{\sum_{j \in I_{k,i}} D_{j,i}^A} \dots\dots\dots(6)$$

式中， $DR_{(k,i)}^A$ 為模擬期程內第年第期作之農業用水平均缺水率； $D_{j,i}^A$ 與 $S_{j,i}^A$ 為模擬期程內第 i 年第 j 日農業標的之日需水量與供水量，其中供水量小於需水量； $I_{k,i}$ 則為第 i 年第 k 期作期間之日數。

對於公共給水標的缺水忍受度之年可靠度可計算

如下：

$$\alpha = 1 - \frac{\sum_{i \in F} N_i}{NY}, \begin{cases} i \in F \text{ 時, } N_i = 1 \\ i \notin F \text{ 時, } N_i = 0 \end{cases} \dots\dots\dots(7)$$

式中， α 為用水標的之常態供水可靠度、 NY 為統計缺水之總年數、 N_i 為模擬過程中第 i 年度之 0 或 1 的變數， F 表示第 i 年度公共給水標的發生不可容忍之缺水；若 DPD 超過可接受門檻 1,500 時 ($i \in F$)， $N_i=1$ ；若未超過 $DPD = 1,500$ 之門檻時 ($i \notin F$)， $N_i=0$ 。

4.5 常態運用模擬及缺水調度優選並用之整體分析流程

常態運用模擬及缺水調度優選並用之整體分析流程如圖 7 所示，首先針對常態用水進行逐日模擬，由逐日的供需情形，以水文年來計算第 4.4 節所述之各評估指標，如 SI 、 DPD 、缺水率、可靠度等，接著針對最嚴重乾旱年進行動態調度優選，透過調度農業用水後，可維持公共用水不進入分區供水，並進行水資源韌性之穩健力及回復力評估，穩健力為評估調度後公共用水是否超過系統門檻 ($DPD = 1500\% \text{-day}$)，若超過即失敗；「回復力」以回復至第 4.3 節所蓄之水庫蓄水安全儲備量所需之時間。

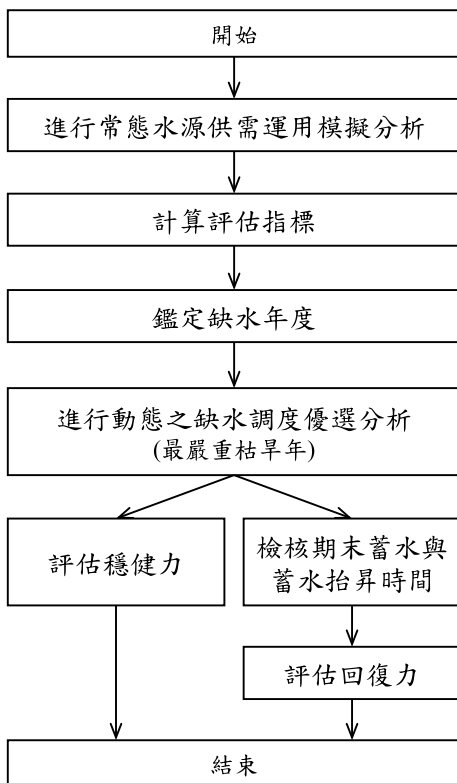


圖 7 常態模擬及缺水調度優選分析流程圖

五、模擬結果與討論

本研究之水源運用模擬，主要依據第 4.2 節所界定之配水優先順序進行設計，其他條件如水文數據、庫容限制及各用水標的需求量，則參考相關規劃報告與前期研究成果進行設定。主要參考資料包括「赤蘭溪水運用工程可行性規劃」(水利規劃分署, 2025)，以及針對白河與鹿寮溪兩座水庫運作所依據之「鹿寮溪水庫更新改善規劃－因應白河水庫更新計畫之檢討」(水利規劃分署, 2019) 與「白河水庫防淤排砂及越域引水策進方案研擬與補充地質調查」(南區水資源分署, 2018) 等規劃報告，上述各水資源系統分析皆採用 WRASIM 模式進行模擬。

在水文資料處理方面，控制點流量之設定以竹山堰與金蘭堰為代表，其日流量係依據觸口與赤蘭溪橋流量觀測資料進行推估，惟部分觀測紀錄存有異常資料，因此本研究引入修正型水筒模式 (Kadoya and Tanakamaru, 1988) 建立降雨逕流關係，進行補遺流量資料並提升模擬合理性。

為求以最接近現實的條件來評估水資源系統，本文與前期研究 (吳嘉文等人, 2025) 之演算條件略有不同，係採用更新之資料進行系統條件設定，說明如下：

(1) 水庫庫容條件

白河水庫之庫容參考「白河水庫防淤排砂及越域引水策進方案研擬與補充地質調查」(南區水資源分署, 2018)，採現況容量 1,379 萬立方公尺；鹿寮溪水庫則採用「鹿寮溪水庫更新改善規劃」(水利規劃分署, 2019)所建議之容量 1,526 萬立方公尺。

(2) 系統範疇與模擬整合

前述「赤蘭溪水運用工程可行性規劃」(水利規劃分署, 2025) 中，針對八掌溪流域與白河—鹿寮溪聯合系統之分析係採個別模擬方式，主要評估金蘭堰越域引水對系統之效益，其模擬架構中，澆水溪引水量僅作為邊界條件設計。相較之下，本研究則將兩系統進行整併模擬，透過聯合調度方式探索整體最佳化運用策略，強化系統整體韌性與水資源調配效率。

本研究針對研究區域於 1975 年至 2023 年期間，在不同情境下的逐日水資源供需情形進行模擬分析，公共用水需求包含八掌溪流域之嘉義地區及急水溪流域之白河東山。依據第 4.2 節所述情境，將水資源系統的供水與缺水狀況，以水文年區分整理如表 1。嘉義地區公共用水需求的歷年缺水百分率日數 (DPD) 如圖 8 所示；最嚴重乾旱年 (2022 年) 嘉義地區生活用水、八掌溪農業用水、赤蘭溪農業用水之供需過程及調度結

表 1 水資源系統模擬供水與缺水概況

區域	用水標的	需求水量 (10 ⁴ m ³ /day)	缺水指數 (SI)	年可靠度 (%)	最大年 DPD (%-day)	
嘉義地區	公共用水	25.1	1.0	73	17,920 (2022 年)	
	農業用水	八掌溪	21.4	0.7	98	—
		赤蘭溪	17.7	5.3	56	—
白河東山	公共用水	0.19	0.2	94	5,916 (2020 年)	
	農業用水	7.39	0.1	100	—	

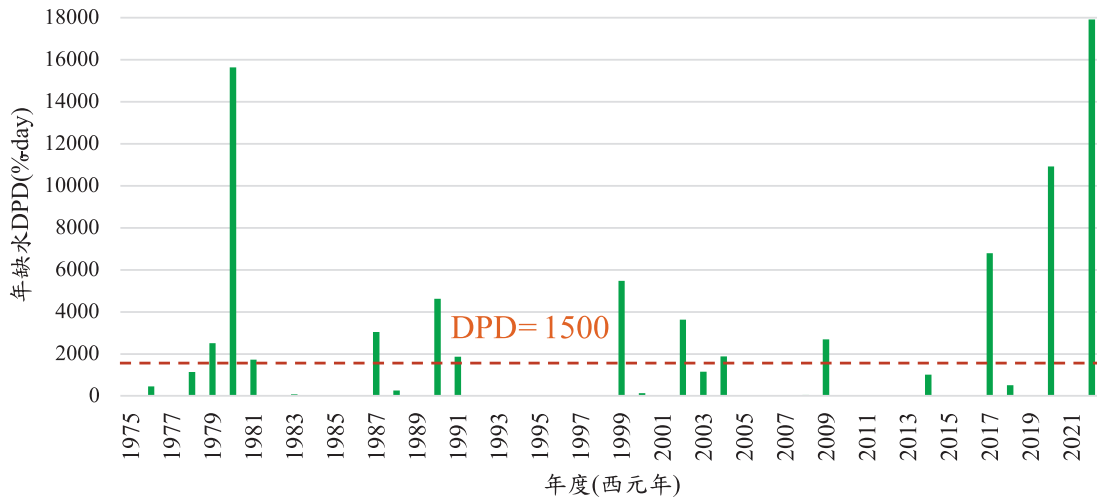


圖 8 模擬公共標的需求之歷年缺水百分率日數

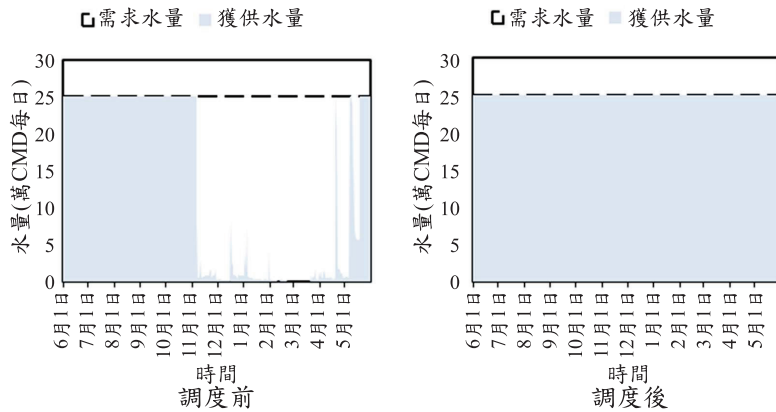


圖 9 最嚴重乾旱年嘉義地區用水供需過程

果分別繪於圖 9、圖 10、圖 11，討論情形如下文。白河及東山地區用水狀況，最嚴重乾旱年 (2020 年) 白河地區生活用水及白河東山灌區農業用水的供需過程分別如圖 12、圖 13。蘭潭及仁義潭水庫在最嚴重乾旱年 (2022 年) 的動態調度與蓄水量見圖 14，討論情形如下文。白河水庫及鹿寮溪水庫最嚴重乾旱年 (2022 年) 之動態調度蓄水量分別如圖 15 及圖 16。以下將依據模擬結果及各情境特性進行詳細討論。

5.1 模擬方案之韌性成效評估

由表 1 與圖 8 可見，嘉義地區水資源系統對公共用水之供需特性約為每 10 年有 3 次 DPD 缺水之頻率 (DPD 超過 1500 %-day)，可靠度為 0.73，一般乾旱年度的缺水百分率日數 (DPD) 可維持在 4,000 以下，對應平均缺水率約為 11% (4,000 DPD/365 day)；顯著乾旱的三年分別為 1980 年、2020 年及 2022 年，其中最

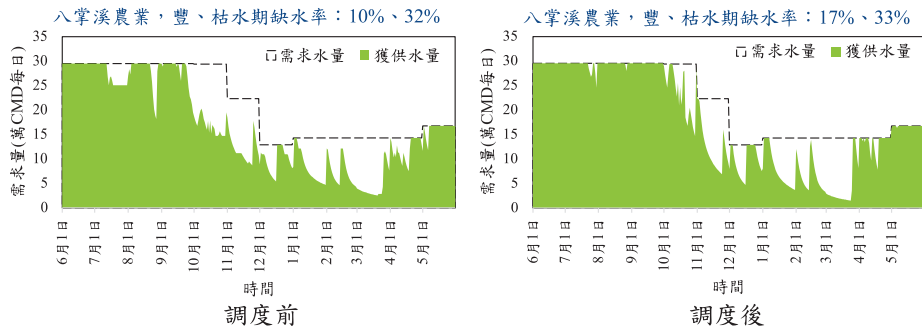


圖 10 最嚴重乾早年八掌溪農業用水供需過程

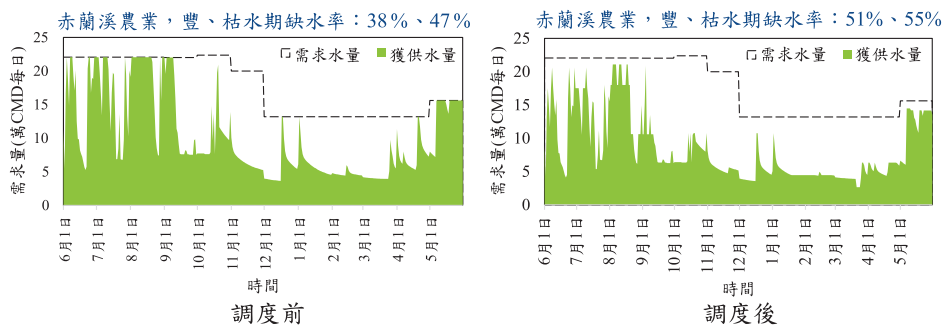


圖 11 最嚴重乾早年赤蘭溪農業用水供需過程

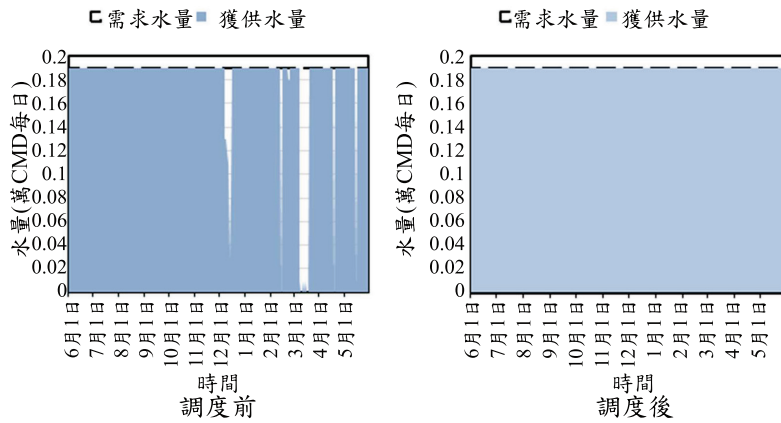


圖 12 最嚴重乾早年白河地區用水供需過程

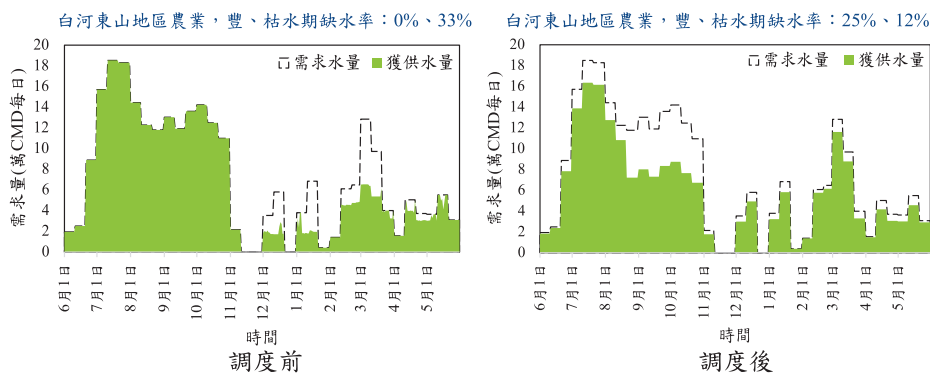


圖 13 最嚴重乾早年白河東山灌區農業用水供需過程

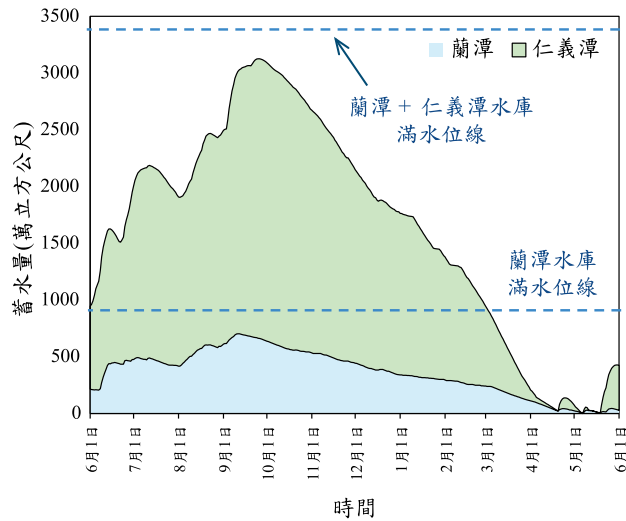


圖 14 最嚴重乾旱年蘭潭及仁義潭水庫動態調度後蓄水歷程

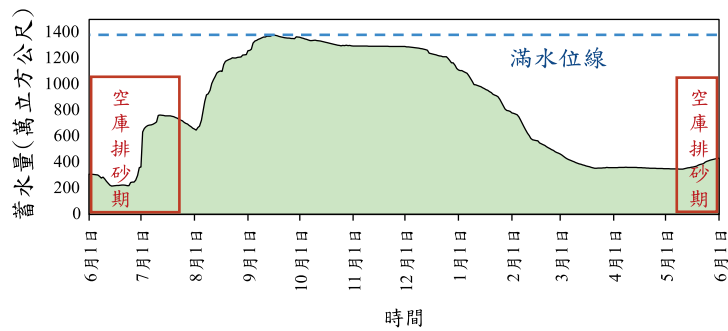


圖 15 最嚴重乾旱年白河水庫動態調度後蓄水歷程

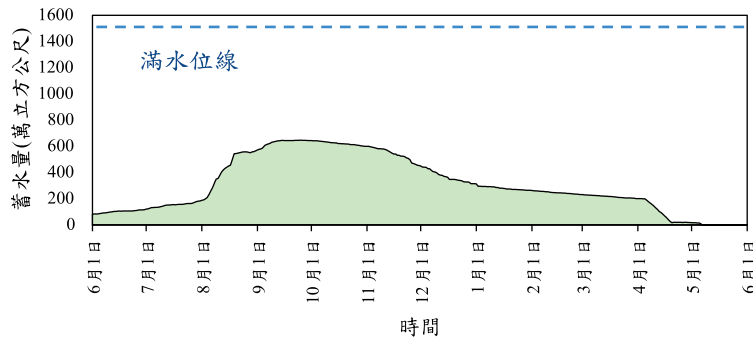


圖 16 最嚴重乾旱年鹿寮溪水庫動態調度後蓄水歷程

大的 2022 年 DPD 達 17,920 %–day，對應年平均缺水率約為 49%。白河東山灌區水資源系統對公共用水之供需特性約為每 20 年有 1 次缺水之頻率，可靠性為 0.94，最大的 2020 年 DPD 達 5,916 %–day，對應年平均缺水率約為 16%。造成嘉義地區與白河東山區域差異較大原因，可由其標的需水量得知；系統設置上，白河東山區域的公共需水量為每日 0.19 萬立方公尺，嘉義地區的公共需水量為每日 25.1 萬立方公尺，因此

遭遇乾旱時，在有限的蓄水量及入流量供給下，供水標的需求較大的嘉義地區，乾旱嚴重程度較大。若依據本文界定之韌性架構進行評估，嘉義地區系統展現出較弱之韌性特質，具體論述如下：

(1) 對應「穩健力」之不足：依據 Wang *et al.* (2009) 之定義，韌性首重系統防止進入失敗狀態之能力。嘉義地區在極端乾旱年之「最嚴重年缺水日數百分比」高達 17,920 %–day，是本研究設定之韌性門檻

(1,500 %–day) 的 11.9 倍；相比之下，白河東山地區僅為 3.9 倍。此數據顯示，嘉義系統在面臨極端擾動時，缺乏足夠的穩健力來將缺水衝擊控制在可容忍範圍內，造成嚴重衝擊。

- (2) 對應「回復力」之不足：系統失敗後，回復力則是韌性的關鍵。觀察最嚴重枯旱年 (2022 年) 動態調度前之蓄水 (圖 9)，嘉義地區之蘭潭與仁義潭水庫於枯水期末 (5 月 31 日) 之蓄水量幾乎耗盡，導致系統在面對次年梅雨延遲或空梅時，回復力不足。此種「庫容透支」現象，使得系統需花費極長的時間等待豐水期強降雨方能回復至運用規線下限之上，顯示其快速力顯著不足，一旦失敗便難以在短期內重回安全供水狀態。

綜上所述，供水標的需求量較大的嘉義地區，於枯旱期間需依賴更高比例的庫容進行調蓄以提供緩衝空間，即需要更高之冗餘力 (redundancy)。然而在初始蓄水條件相近的情境下，嘉義地區因需水量龐大，導致既有設施之調節容積不足以吸收擾動，在穩健力 (最嚴重年 DPD 過高) 與回復力 (期末蓄水耗盡) 指標上均未能達標，從而反應出其整體韌性評估結果劣於白河東山地區。

5.2 動態調度方案之韌性成效評估

本節針對嘉義地區與白河東山區域，透過動態調度模型優選後之成果進行討論，並依據前述建立之韌性評估架構 (門檻與回復力)，說明經過動態調度優選後對於改善水資源系統韌性之具體成效。

嘉義地區八掌溪流域最嚴重枯旱年 (2022 年) 之水資源供需過程如圖 9、圖 10、圖 11，經動態調度法進行跨流域水資源水量調配後，最嚴重年之缺水百分日數由 17920 %–day 降至 0 %–day，證實動態調度能緩解極端乾旱下的缺水嚴重程度，透過跨流域與時段的水量調配，強化系統對長延時乾旱的承受能力；然而因優先供應生活用水的調度需求，農業用水缺口有所增加。透過金蘭堰越引水路調節機制，赤蘭溪水資源得以於乾旱期間參與調度，促使八掌溪與赤蘭溪之間水源調配更為均衡，能有效將極端年之缺水衝擊控制在系統韌性門檻 1500 %–day 之內。而白河東山區域於 2022 年之水資源供需過程如圖 12 與圖 13，經動態調度法調配後，緩解了公共用水缺口，最嚴重年之缺水百分日數由 5916 %–day 降至 1460 %–day，然而因優先供應生活用水的調度需求，農業用水缺口有所增加；調度前後，各農業區於豐、枯水期農業之缺水率如圖 10、圖 11、圖 13 所示。

八掌溪流域於最嚴重枯旱年經動態調度後，白河、仁義潭、蘭潭水庫蓄水可於 9 月中旬接近滿庫狀態，蓄水量維持至 10 月下旬，隨後於 10 月下旬開始下降直至翌年枯水期末。此現象有別於前期研究「應用模擬法探討流域水資源之多元整體開發利用策略」(吳嘉文等人, 2025) 一文中所述「各水源量於各旬變化呈現梅雨期與颱風期雙峰型態」，顯示在嚴重乾旱期間，梅雨及颱風季的降雨延後或缺乏所導致的乾旱現象。動態調度即是反應透過水資源管理介入，盡可能延後、減緩並消除公共缺水問題；圖 14、圖 15、圖 16 即為運用水資源系統動態調度的韌性成果。基於上述運用動態調度之分析成果，歸納八掌溪與急水溪水資源系統的運用重點如下：

(1) 枯水季期間，停止澆水堰引水，充分利用蘭潭水庫蓄水空間引入赤蘭溪剩餘流量，並將竹山堰剩餘流量導入仁義潭水庫調蓄，強化系統之回復力。

(2) 在無額外水源供應情況下，於每年五月底，水庫應保有足夠蓄水量以供應一定天數的需求標的，透過水資源系統韌性因應梅雨及颱風期降雨之不確定性。

此外，本研究之動態調度策略不僅是數據上的優化，更具體回應了韌性架構中的穩健力與快速力二大面向，提出水資源系統的操作邏輯：

(1) 確保「穩健力 (robustness)」：動態調度之首要目標為維持系統之性能門檻，透過枯水期停止澆水堰引水、改由蘭潭引入赤蘭溪剩餘流量等操作，其核心目的在於確保公共給水之最嚴重年之缺水百分日數不超過 1,500 %–day。模擬結果顯示，即便在天然入流量嚴重不足之情境下，透過跨區域聯合調度，系統仍能維持在可容忍範圍，展現了對抗極端之穩健性。

(2) 提升「快速力 (rapidity)」：傳統基礎設施 (如電力、管網) 之回復力多指受損設施之修復速度；然而缺水之回復具有「滯延性」，水資源回復取決於水庫蓄水之回補速度。本研究歸納之操作重點：「於每年五月底 (枯水期末)，水庫應保有足夠蓄水量」，其本質即在於提升系統之快速力。

若系統在枯水期末將庫容耗盡 (如未調度前之情境)，其回復常態供水將完全依賴次年之首場豪雨，回復時間充滿高度不確定性，但透過動態調度預留枯水期末蓄水 (如圖 14、圖 15、圖 16 所示)，調度後水庫在 5 月底可維持之總蓄水量較調度前多，確保系統在面對連續乾旱 (如次年無梅雨) 時，能大幅縮短「回復至庫區正常供水之蓄水量」，此外，調閱模式最嚴重枯旱年逐日供需歷程及水庫蓄水歷程，若以回復時間來看，第 4.3 節之水庫蓄水安全儲備量須達 830 萬立方公尺，於枯水期間，動態調度前，於 2022 年 11 月

7日起民生用水無法滿足需求水量，至2023年5月31日皆未回復到水庫蓄水安全儲備量，直至2023年6月17日才達水庫蓄水安全儲備量，延時223日；動態調度後，於2023年3月29日起民生用水無法滿足需求水量，至2023年5月28日回復到水庫蓄水安全儲備量，延時61日，兩者相差162日。此一策略將韌性從單純的「當期不缺水」，延伸至「確保次期快速復原」之考量，具體回應Wang *et al.* (2009) 之「回復力」與Simonovic *et al.* (2021) 之「快速力」。

5.3 綜合討論與研究展望

傳統水資源規劃以統計平均值（如缺水指標SI）為準，難以因應如2022年之長延時極端乾旱。本研究之必要性在於結合「動態調度」與「韌性門檻」：透過管理手段之介入，在極端情境下實施跨流域、跨時段的水量置換，將系統狀態維持在可容忍之「韌性門檻」內。這種以農業用水調蓄公共給水之「適應韌性」，即為本文分析之核心目的。然本研究之水資源系統模擬，存在以下限制：

- (1) 水文歷程：本研究之水資源系統模擬，採用歷史水文資料，尚未加入未來水庫進水量及河川流量之預測。
- (2) 經濟成本：本研究量化水源調度造成之農業用水缺口，但未探討實際休耕補償之經濟成本與農民配合意願。
- (3) 水源範疇：本研究針對地面水之聯合調度運用，未完整計入地下水、回歸水等貢獻，可能略微低估系統整體之抗旱潛力。

基於本研究之分析成果與限制，建議未來研究可朝以下方向延伸：

- (1) 韌性評估方法之多維度擴充：建議未來研究可整合Huang *et al.* (2024) 提出之「抗性、回復力、適應力」三構面架構，並導入Mehran *et al.* (2018) 之多變量標準可靠韌性指標，將本研究之最嚴重年之缺水百分比日數與可靠度指標，與上述框架結合，可更全面地量化系統在極端氣候與長期變遷情境下之綜合韌性表現，並評估指標動態化與智慧水網結合之預警潛力。
- (2) 農業轉型與經濟效益優化調度：建議後續可深入探討農業轉型策略，如：林正順 (2019) 提出之枯水期轉作小麥對水資源韌性之影響，透過調整WRASIM-D模式中之需水量，並納入作物產量與收益之經濟模型，可在兼顧區域水資源性能門檻（韌性）的前提下，尋求最大化經濟效益之跨標的操作策略，藉此提升農業用水之調適彈性與經濟可行性。

六、結論與建議

本研究以動態調度法探討嘉義與北臺南地區水庫，以串聯與並聯方式構成之跨流域水資源系統之韌性，首先透過模擬法測試在缺水指標等於1.0條件下系統之供水能力，接著統計缺水過程，並依據水文年分類，以「年可靠度」與「最嚴重年度缺水日數百分比」作為水資源韌性指標，進一步對最嚴重枯旱年進行動態優選分析，評估當年度最佳之跨時空與跨標的水資源調度策略，藉以調適該年公共用水標的所面臨之不可忍受缺水情境，進行區域水資源韌性之探討。主要研究發現如下：

- (1) 金蘭堰越引水路於乾旱期間，有助於引導赤蘭溪水源參與調度，提升八掌溪與赤蘭溪間水源調配之平衡性。
- (2) 蘭潭與仁義潭水庫可在豐水期末累積一定水量，支援翌年枯水期用水，顯示動態調度操作策略之優勢。

此外，動態調度優選模擬結果指出，不同跨時空與跨標的調度方案所造成之缺水影響具有顯著差異，顯示調度策略選擇與空間時序調配之重要性。本研究所採用之韌性評估架構係建構於Hashimoto *et al.* (1982) 提出之水資源韌性三指標架構，並結合吳嘉文等人 (2024) 針對台灣自來水系統之操作經驗，設定缺水忍受門檻（年缺水百分率日數1,500%—day），作為模擬成果判釋與調度成效評估之依據。結果顯示，動態調度有助於運用水資源系統韌性，強化系統對長延時乾旱的承受能力。

參考文獻

1. 水利規劃分署，「通用性區域水資源調度與供需分析模式建立(3/3)」，2006。
2. 水利規劃分署，「鹿寮溪水庫更新改善規劃—環境影響評估」成果報告書（規劃階段），2015。
3. 水利規劃分署，「鹿寮溪水庫更新改善規劃—因應白河水庫更新計畫之檢討」，2019。
4. 水利規劃分署，「八掌溪流域蓄水設施調查規劃」，2021。
5. 水利規劃分署，「嘉義公館滯洪池與赤蘭溪水源運用工程規劃」，2024a。
6. 水利規劃分署，「赤蘭溪水源運用工程可行性規劃」，2025。
7. 行政院，「前瞻基礎建設計畫」，2017。

8. 吳嘉文、周乃昉, 「水安全初探—水庫容量設計與缺水風險」, 中國土木水利工程學刊, 第 36 卷, 第 4 期, 頁 365-376, 2024。
9. 吳嘉文、周乃昉, 「基於水、能源與糧食交織概念之台中地區水安全行動方案分析」, 中國土木水利工程學刊, 第 37 卷, 第 1 期, 頁 11-26, 2024。
10. 吳嘉文、顏昱淇、周乃昉、陳憲宗, 「應用模擬法探討流域水資源之多元整體開發利用策略」, 農業工程學報, 第 71 卷, 第 3 期, 頁 63-74, 2025。
11. 林正順, 水稻—小麥輪作對節水效能與經濟效益影響之研究, 碩士論文, 國立嘉義大學土木與水資源工程學系研究所, 2019。
12. 南區水資源分署, 「白河水庫越域引水工程初步規劃」, 2015。
13. 南區水資源分署, 「白河水庫防淤排砂及越域引水策進方案研擬與補充地質調查」, 2018。
14. 周乃昉、吳嘉文, 「通用性廣域水資源運用模擬模式」, 農業工程學報, 第 56 卷, 第 1 期, 頁 1-21, 2001。
15. 經濟部, 「臺灣及離島水資源經理基本計畫」, 2021。
16. 經濟部, 「臺灣各區水資源經理基本計畫」, 2021。
17. 農田水利署嘉南管理處, 「112 年度烏山頭及白河水庫淤積測量」, 2023。
18. Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., and Orlin, J. B., Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications, Prentice-Hall, Upper Saddle River. *New Jersey*, 1993.
19. Beard, L. R., Estimating Long-term Storage Requirements and Firm Yield of Rivers. *IUGG Berkeley General Assembly*, 1963.
20. Chou, N. F. and Wu C. W., Determination of Cost Coefficients of a Priority-based Water Allocation Linear Programming Model — A Network Flow Approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(5), pp.1857-1872, 2014.
21. Chen, B. P.-T., & Chen, C.-S., Feasibility Assessment of a Water Supply Reliability Index for Water Resources Project Planning and Evaluation. *Water*, 11(10), 1977, 2019.
22. Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P., Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation. *Water Resources Research*, 18(1), pp.14-20, 1982.
23. Hsu, S. K., Shortage Indices for Water-resources Planning in Taiwan. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121, pp.119-131, 1995.
24. Huang, Y., Xu, Y., Zhang, Y. and Chen, M. Assessment of Water Resources System Resilience in the Yellow River Basin: A Framework Based on Resistance, Recovery, and Adaptability. *Water*, 16(3), 414, 2024.
25. Hwang, J. S., An Appraisal of Reservoir Planning and Shortage Tolerances in Taiwan. Proceedings of the Third Conference on Hydraulic Engineering, Taipei, Taiwan, 30-31 May, pp. 51-64, 1986.
26. Japan Water Resources Development Public Corp, Drought Assessment; Mizu to Tomoni 159, Tokyo, Japan, 1977.
27. Kadoya, M. and Tanakamaru, H., Flood Run-off Forecasting with Long and Short Terms Run-off Model. Proc. of 6th Congress Asian and Pacific Regional Division, *International Association for Hydraulic Research*, pp. 624-631. Kyoto, 20-22 July, 1988.
28. Kjeldsen, T. R. and Rosbjerg, D., Choice of Reliability, Resilience and Vulnerability Estimators for Risk Assessments of Water Resources Systems. *Journal of Hydrological Sciences*, 49(5), pp.755-767, 2004.
29. Kundzewicz, Z. W. and Kindler, J., Multiple Criteria for Evaluation of Reliability Aspects of Water Resources Systems. In: Simonovic, S. P., Kundzewicz, Z., Rosbjerg, D., and Takeuchi, K. (eds.), *Modelling and Management of Sustainable Basin-Scale Water Resources Systems*, IAHS Press, Wallingford, U.K., pp.217-224, 1995.
30. Loucks, D. P. and van Beek, E., Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications, 2nd ed., Springer, 2017.
31. Mehran, A., AghaKouchak, A. and Nakhjiri, N. A Multivariate Approach to Assess Water System Vulnerability Under Climate Change. *Water*, 10(2), 164, 2018.
32. Moy, W.-S., Cohon, J. L., and ReVelle, C. S., A programming Model for Analysis of the Reliability, Resilience, and Vulnerability of a Water Supply Reservoir. *Water Resources Research*, 22(4), pp.489-498, 1986.
33. Simonovic, S., Systems Approach and Performance-based Water Resources Management. *Water International*, 46, pp.1-12, 2021.

收稿日期：民國 115 年 01 月 15 日
修改日期：民國 115 年 01 月 25 日
接受日期：民國 115 年 02 月 20 日