

應用模擬法探討流域水資源之 多元整體開發利用策略

INVESTIGATING THE INTEGRATED COMPREHENSIVE WATER RESOURCES DEVELOPMENT AND
MANAGEMENT STRATEGIES OF A RIVER BASIN WITH SIMULATION APPROACH

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
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
兼任教授

周乃昉
Frederick N.F. Chou

國立成功大學
水利及海洋工程學系
教授

陳憲宗*
Shien-Tsung Chen

摘要

本文以模擬法探討河川流域水資源之多元整體開發利用策略，研究區域為嘉義與北臺南地區之水資源系統，模擬八掌溪及其支流赤蘭溪的多元水源聯合運用及調配情境，探討河川剩餘流量整體開發利用之優選方案。本文運用通用性廣域水資源運用模擬模式 (Water Resources Allocation Simulation Model, WRASIM)，建置嘉義地區仁義潭、蘭潭、白河與鹿寮溪水庫為串聯、並聯混合的多水庫聯合運用型態之水資源系統，藉由適當設定水量分配優先順序，模擬多組多水庫間不同蓄水平衡的運用策略，再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 下之供水能力，作為評量各方案成效之主要指標。研究成果歸納較佳的運用方案為：白河水庫執行空庫排砂期間 (第 14 至 20 旬)，澧水溪水源優先引進白河水庫，其次為鹿寮溪水庫；白河水庫非執行空庫排砂期間，澧水溪水源優先引進鹿寮溪水庫，其次為白河水庫；再者竹山堰水源優先蓄於仁義潭水庫，保留蘭潭水庫空間以調蓄赤蘭溪可引水量。模擬結果顯示前述策略可「最小化溢流量以最大化可供水量」，同時確保白河水庫之空庫排砂成效不受水源運用影響。

關鍵詞：模擬法、水資源多元整體開發、通用性廣域水資源運用模擬模式。

* 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

701 台南市東區大學路 1 號 · chen@gs.ncku.edu.tw

INVESTIGATING THE INTEGRATED COMPREHENSIVE WATER RESOURCES DEVELOPMENT AND MANAGEMENT STRATEGIES OF A RIVER BASIN WITH SIMULATION APPROACH

Chia-Wen Wu

National Cheng Kung
University
Department of
Hydraulic and Ocean
Engineering

Yu-Chi Yen

National Cheng Kung
University
Department of
Hydraulic and Ocean
Engineering

Frederick N.F. Chou

National Cheng Kung
University
Department of
Hydraulic and Ocean
Engineering

Shien-Tsung Chen*

National Cheng Kung
University
Department of
Hydraulic and Ocean
Engineering

ABSTRACT

This paper explored the inter- and trans-basin water allocation of four reservoirs in Chiayi and North Tainan areas by using simulation approach. It investigated the integrated comprehensive water resources development and management strategies to improve the efficiency of water resource utilization through increasing the exploitation of surplus from the Bachang and Chilan Rivers. The Water Resources Allocation Simulation Model (WRASIM) was used to establish the water resources system for the study area, including the Renyitan, Lantan, Baihe, and Luliaoqi Reservoirs. By setting the priorities of water allocation, WRASIM simulated various operational scenarios for optimal water resources planning and management strategies. The performances of different scenarios were evaluated according to the increased yield under the shortage index of 1.0. Results show that the optimal strategy is to store the water in Baihe Reservoir during the 14th to 20th ten-days during the period when the reservoir is required to perform empty flushing. The remaining surplus from the diversion weir at the upstream Chilan River during other periods can be diverted toward the Luliaoqi Reservoir. For the serially connected Renyitan and Lantan Reservoirs, the operation strategy is store the water in the upstream reservoir with high priority, so that the downstream reservoir can have available storage to water diverted from Chilan River. The aforementioned strategy minimizes the overall spillage and maximizes water supply yield, and can ensure the function of empty flushing in the Baihe Reservoir.

Keywords: Simulation approach, Integrated water resources planning, Water Resources Allocation Simulation Model (WRASIM).

Wu, C.W., Yen, Y.C., Chou, N.F., & Chen, S.T.* (2025). "Investigating the Integrated Comprehensive Water Resources Development and Management Strategies of A River Basin with Simulation Approach." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 71(3), 63-74. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202509_71\(3\).0004](https://doi.org/10.29974/JTAE.202509_71(3).0004)

一、前言

臺灣因地形坡陡流急致水源不易留存，且降雨時空變異顯著，須透過水庫蓄豐濟枯以穩定供水。然氣候變遷加劇水文豐枯變異與提升極端事件頻率，致使既有水庫供水面臨挑戰，而新水庫推動不易，故經濟部及所屬水利規劃分署於「臺灣各區水資源經理基本計畫」(經濟部，2021) 中提出「打造西部廊道供水管網」(珍珠串計畫)，藉由串聯既有水源進行空間上水量的調配，增加攔蓄本來會溢流的水量，以提升水資源利用效率 (謝清發，2008)。

目前推動的珍珠串計畫，包含「板新二期及大漢溪水源南調桃園計畫」、「桃園－新竹備援管線工程計畫」、「石門水庫至新竹聯通管工程」、「大安大甲溪聯通管工程計畫」、「臺中至雲林區域水源調度管線改善計畫」、「雲嘉南灌溉系統濁幹線與北幹線串接工程」、「曾文南化聯通管工程計畫」等，可區分上游原水端的水源串聯與下游清水端的管網聯繫。前者藉由空間上調配剩餘流量，提升水資源運用效率；後者延伸各水源的跨區供水範圍，加強區域間相互支援能力。本文以上游原水端的水源串聯為研究對象，此種串聯型態於起點的越域引水處需要確保所引取為

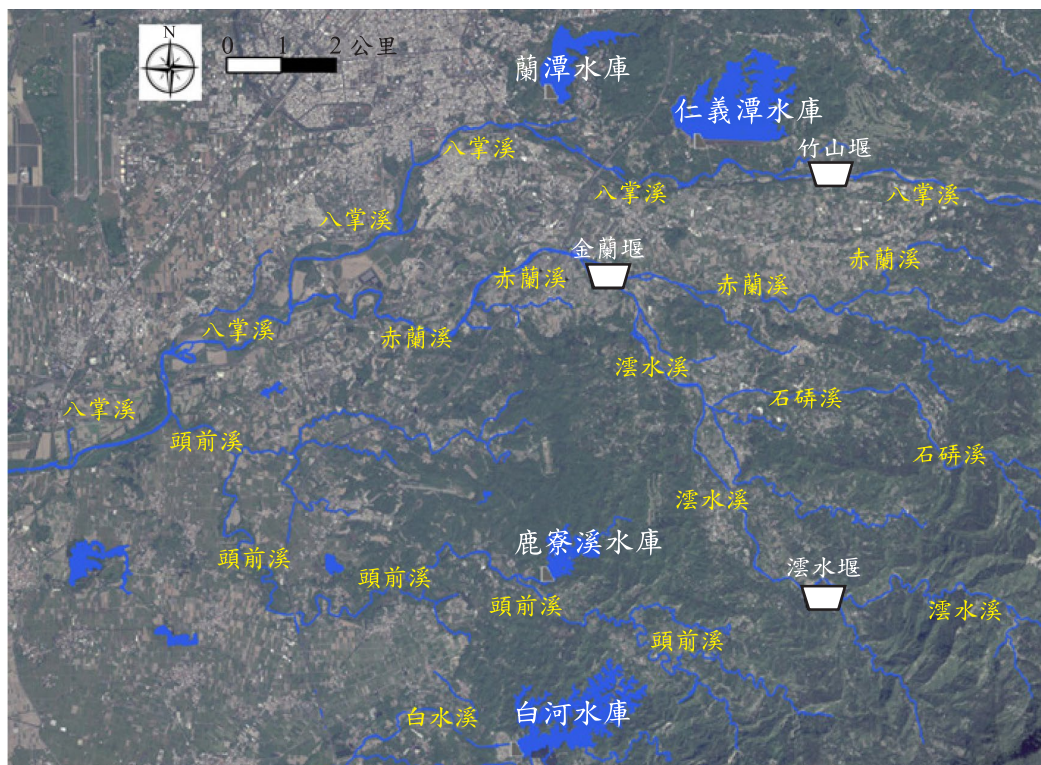
既有系統的剩餘流量，對終點處則需要重新檢討水庫運用策略，提升越域引水取得水量的利用效率，避免攔蓄越域引水水量後僅增加該水庫在後續洪水期間的無效溢流量。對於上游引水地點位處之流域，若有多個引水計畫需要同時取用其剩餘流量，則需要研擬最適合引水策略，以達上述增進水源運用效益之目標。

本文以位於八掌溪流域的仁義潭、蘭潭、鹿寮溪水庫，以及急水溪流域的白河水庫之聯合運用為案例，採用模擬法模擬多組水資源聯合運用及調配情境，建議河川剩餘流量整體開發利用之最佳越域引水策略。

二、研究區域與文獻回顧

2.1 研究區域概述

本文之研究對象為嘉義與北臺南地區之水資源系統，包含八掌溪與急水溪流域之水資源設施；研究區域中參與聯合運用模擬分析的水資源設施，有位於八掌溪流域的仁義潭、蘭潭水庫、位於八掌溪支流頭前溪的鹿寮溪水庫，以及位於急水溪流域的白河水庫，詳如圖 1；仁義潭、蘭潭水庫之水源主要來自既有的竹山堰之引水，本文亦納入規劃中的澧水堰及金蘭堰，



背景圖片來源：經濟部水利署「水利空間資訊服務平台」

圖 1 研究區域河川水系及水資源設施

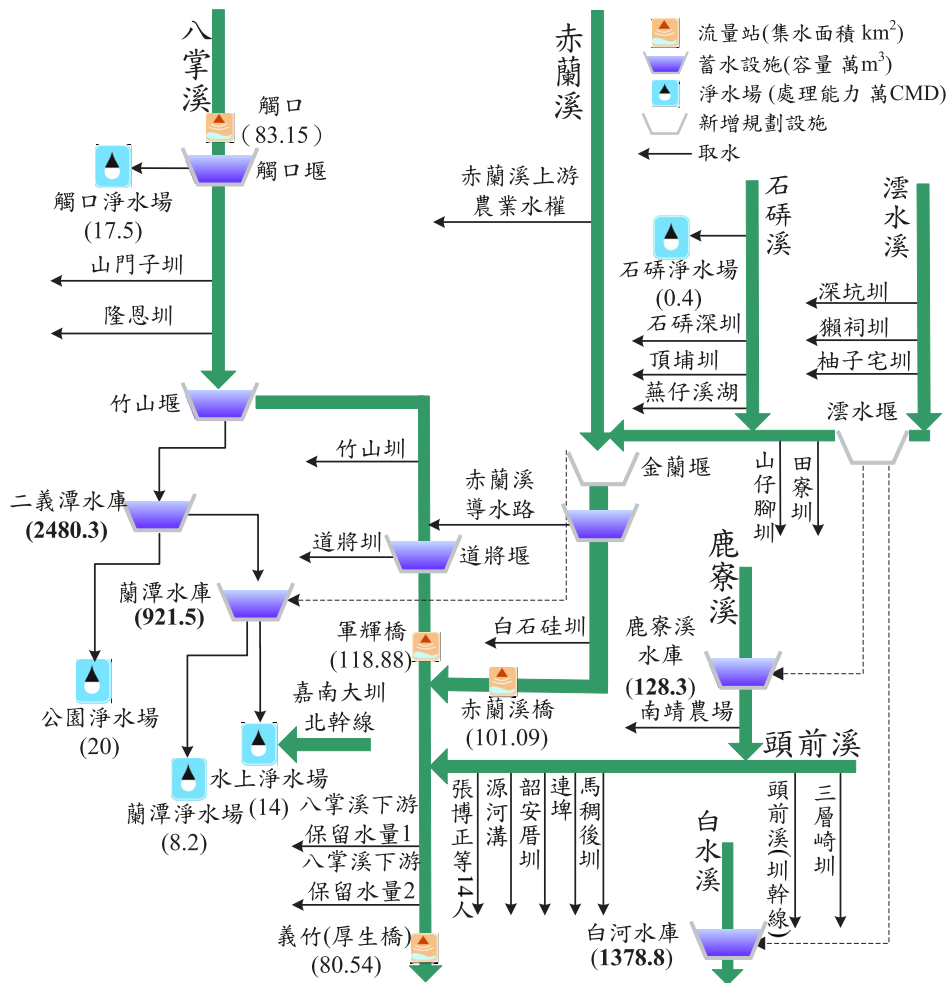


圖 2 八掌溪河系取水、蓄水及淨水設施空間關係圖

探討八掌溪支流赤蘭溪與澧水溪的水資源多元開發利用策略。研究區域之河川水系及水資源設施之關聯，詳如圖 2。

依最新淤積測量成果，仁義潭、蘭潭、白河及鹿寮溪水庫有效蓄水量各為 2,465.7 萬、921.8 萬、1378.8 萬及 71.4 萬立方公尺。仁義潭及蘭潭水庫供應嘉義地區家用及公共給水；白河水庫供水標的包含供應糞箕湖及東山灌區，灌溉總面積約 988.02 公頃，並供應白河與東山地區之家用及公共給水每約日 0.19 萬立方公尺；鹿寮溪水庫目前庫容有限，僅輔助下游白河區馬稠後地區約 260 公頃農田之灌溉。

白河水庫後續更新改善工程計畫於民國 106 年經行政院核定，108 至 111 年為第一階段：增設繞庫防淤工程，配合清淤工程及河道放淤達成庫容 1,250 萬立方公尺之目標；112 至 116 年為增設越域引水工程，自八掌溪支流赤蘭溪上游之澧水溪上設置澧水堰引水，並配合蕉坑取水工程，達成庫容 2,000 萬立方公尺之目標，此外，為排除白河水庫年入庫土砂量以達

永續經營之目標，除恢復有效庫容外，包含新設繞庫防淤隧道、越域引水設施及空庫排砂，以有限水源條件，提高水力排砂量，以維持庫容永續利用可行性（行政院，2017）；其中，為確保二期作及農業總供水量不受影響，空庫排砂期設計為第 14 至 20 旬（南區水資源分署，2015）；另，水利規劃分署規劃對鹿寮溪水庫進行更新改善（水利規劃分署，2015），藉清淤恢復庫容，建議恢復庫容為 1,526 萬立方公尺，並同樣規劃自澧水堰越域引水，以增加水庫供水能力。

依據民國 110 年「臺灣各區水資源經理基本計畫」（經濟部，2021），現況 108 年嘉義地區之家用及公共給水需求每日 31.3 萬立方公尺，目標年 125 年為每日 34.9 萬立方公尺，每日增加 3.6 萬立方公尺，另近年產業發展迅速，預期未來產業用水需求將大幅增加。因此，水利規劃分署現正規劃於赤蘭溪與澧水溪匯流口下游設置金蘭堰（水利規劃分署，2024a），進行越域引水至蘭潭水庫。因赤蘭溪水源規劃由前述三個水庫競相引水，如何研提最佳越域引水策略更形重要。

2.2 文獻回顧

仁義潭、蘭潭、鹿寮溪與白河水庫為串聯、並聯混合的多水庫運用型態，如何考慮各水庫容量、水源與供應需求之條件，研擬蓄水平衡策略為提升聯合運用效率之關鍵。Lund and Guzman (1999) 針對串聯、並聯水庫的不同水資源系統布置以及不同水庫主要運用標的，歸納各自對應的合適運用策略，一般性的運用目標為最小化溢流量以最大化可供水量，以儘量發揮水庫蓄豐濟枯之效。上、下游串聯水庫的特點為上游水庫與其集水區均被包絡在下游水庫集水區之中，但下游水庫之部分集水區僅能由該水庫調蓄，對此系統型態，Sheer *et al.* (1986) 認為最佳操作方式為儘可能優先蓄滿上游水庫，Lund *et al.* (1999) 進一步提出在豐水期儘可能優先蓄滿上游水庫，枯水期則是優先以下游水庫供水。而並聯水庫的特點為各水庫有獨立之集水區，各水庫間有共同供水區，另各自水庫可能有獨立之供水區，Clark (1950) 曾對此型態之系統提出 New York City 規則 (NYC rule)，原則為在豐水期儘可能讓每座水庫保持在相同的溢流機率 (Clark, 1950)，而 Wu (1988) 建議各水庫相對於各自的用水需求，在枯水期末蓄水能維持相同的可用水日數。

本文研究對象的仁義潭、蘭潭、白河及鹿寮溪水庫間的實際配置，與一般文獻中的簡易概念不盡相同；仁義潭與蘭潭水庫雖是上下游串聯的水庫，但 Lund and Guzman (1999) 所探討的為在槽水庫，而仁義潭與蘭潭水庫是離槽水庫，其於竹山堰之最大取水量為每秒 25 立方公尺，兩水庫係以人工輸水路連結，最大輸水容量為每秒 4.5 立方公尺，不像 Lund and Guzman (1999) 的案例為興建於天然河道上的上下游水庫，因此水庫間串接的輸水容量較不受限。另白河、鹿寮溪及蘭潭水庫雖屬並聯水庫，但卻經由越域引水路而共用赤蘭溪或支流澗水溪的水源，且各水庫獨立供水區或獨立運用標的特性亦迥異，而以往的研究僅是聚焦於並聯水庫對共同供水區之供水為主。

Labadie (2004) 彙整諸多優選法於多水庫系統之最佳運用規則推估之應用，運用規則型態為水庫蓄水量與放水供應下游用水需求之關係 (storage-release rule)，此關係可為條件式、回歸式、機器學習模式，或是類似於台灣水庫常用之運用規線。推求最佳規則的方法，則有 (1) 顯性隨機優選 (explicit stochastic optimization)：直接在優選法中考量水文序率變化並得出最佳策略，如序率動態規劃法；(2) 隱性隨機優選 (implicit stochastic optimization)：對長期或多組水文序列進行定率式之動態優選，再運用回歸或機器學習方

法自優選結果中萃取出最佳策略，以及 (3) 模擬與優選法之連結：基於運用規則建立模擬模式，再與外部的非線性優選法連結，反覆迭代測試求得最佳策略。

本文案例分析重點為上游引水點之剩餘流量需優先配置於哪座水庫內，其次為哪座水庫蓄水優先供應需求，型態與前段所述的水庫蓄水與下游供應放水的規則不同。另本文僅採用模擬法，藉由測試多組多水庫間不同蓄水平衡的運用策略，再予歸納較佳的運用趨勢，作為後續優化策略研究的基礎。

三、模式建置

3.1 八掌溪與急水溪水資源系統 WRASIM 模式建置

本文運用成功大學周乃昉教授與吳嘉文博士所發展之通用性廣域水資源運用模擬模式 (Water Resource Simulation Allocation Model，簡稱 WRASIM 模式) (水利規劃分署，2006；Chou and Wu, 2014)，WRASIM 以最小成本網流規劃法為基礎，其命題為針對一個由節點與箭線所構成之網路，在要求進出節點的水量守恆，以及水量在箭線上的流動符合上限之限制條件下，尋求網路內最小總成本的水量流動方式。網流規劃主要特點為：(1) 可將待分析問題與分析結果，直接清楚地以節點與箭線所構成之網路圖形表達；(2) 由於水資源網路結構的特殊性，可藉以建立特殊的演算法，其計算效率優於線性規劃問題；(3) 在節點一箭線所構成的特殊架構下，藉由適當設定成本係數來反應水量分配優先順序，可建立以供需求為導向的配水概念。

WRASIM 模式的水資源網路圖形是指由許多節點與方向箭線所組成的連結圖形，假設以 $G(N, A)$ 代表一水資源網路圖形， N 、 A 分別為 G 內所有節點與箭線的集合；其中，節點可能代表某處位置，而箭線則為節點間具方向性的連結，其上具有水流流動，並假設 N 之節點總數為 n ， A 之箭線總數為 m 。對於一個流量循環守恆的純網流問題，水流在 G 中流動之限制條件為：流入與流出某一節點之流量應相等，而每條箭線具有流量上、下限的限制。此外，每條箭線均被賦予一單位流量的成本係數。最小成本網流之分析目標是要在符合節點流量進出守恆、每條箭線流量符合上、下限的情況下，找出整體網路的最小成本流動分佈，其數學命題如下 (Ahuja *et al.*, 1993)：

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

subject to

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

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

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 i 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) 上流量的下限值， u_{ij} 為箭線 (i,j) 上流量的上限值。

應用網流規劃所建立的水資源分配模式，一般可分為單位時段水量分配與跨時段水量調度兩類。跨時段之水量調度分析之前提，乃係假設在分析時段內的系統入流序列均為已知或已經由預測而得，依據系統的起始蓄水量，在所有的分析時段內，求出水資源的最佳時空配置方式。而針對單位時段水量分配之課題，其作法乃係以網路的概念，來表達水資源系統於單位時段內，在空間上的水量分配問題，模式可求出依據特定水源運用規則操作下的最佳調配方式，但並不對水庫蓄水進行跨時段之優選調度，演算時仍是採用觀測或繁衍之水文序列來進行長期的逐時段水量分配模擬，並藉由模擬結果評估系統在特定設施布置及

操作策略下之期望供水量及缺水量。本文即是針對單位時段水量分配之課題，以 WRASIM 建置研究區域之逐日水源運用模擬模式，其水資源系統之網路架構如圖 3 所示。

3.2 水量分配順序設定

WRASIM 模式將水資源系統以網路架構表示，除了代表實體系統之節點與箭線外，模式以虛擬之箭線代表模擬單位時段內的系統入流量、水庫期初與期末蓄水、需求水量、水庫蒸發、輸水損失、淨水損失，與系統流失至最終接受水體之剩餘流量等水量，並對系統中的虛擬需求或蓄水箭線設定合適之成本係數，使其相對大小符合水權、水庫運用要點等規定之各需求與蓄水的配水優先順序。依照最小成本網流規劃之優選命題，模式可求得符合優先順序要求之配水結果。此處所定義的箭線成本係數 c_{ij} 代表水量流動的優先順序，因此亦稱之為配水順序係數。一般在應用時，會設定一終端節點代表供水系統最下游之最終接受水體，如圖 3 中的台灣海峽節點，單位時段內流入此終端節點之流量會再循著虛擬終端箭線離開實體系統，此虛擬終端箭線之上限與成本係數預設為一極大值，如 999，以確保在分配水量時，非必要不會讓水流入此終端位置；分析此箭線上之流量結果，即可視為單位時段內無法利用而流入最終接受水體之系統剩餘流量。

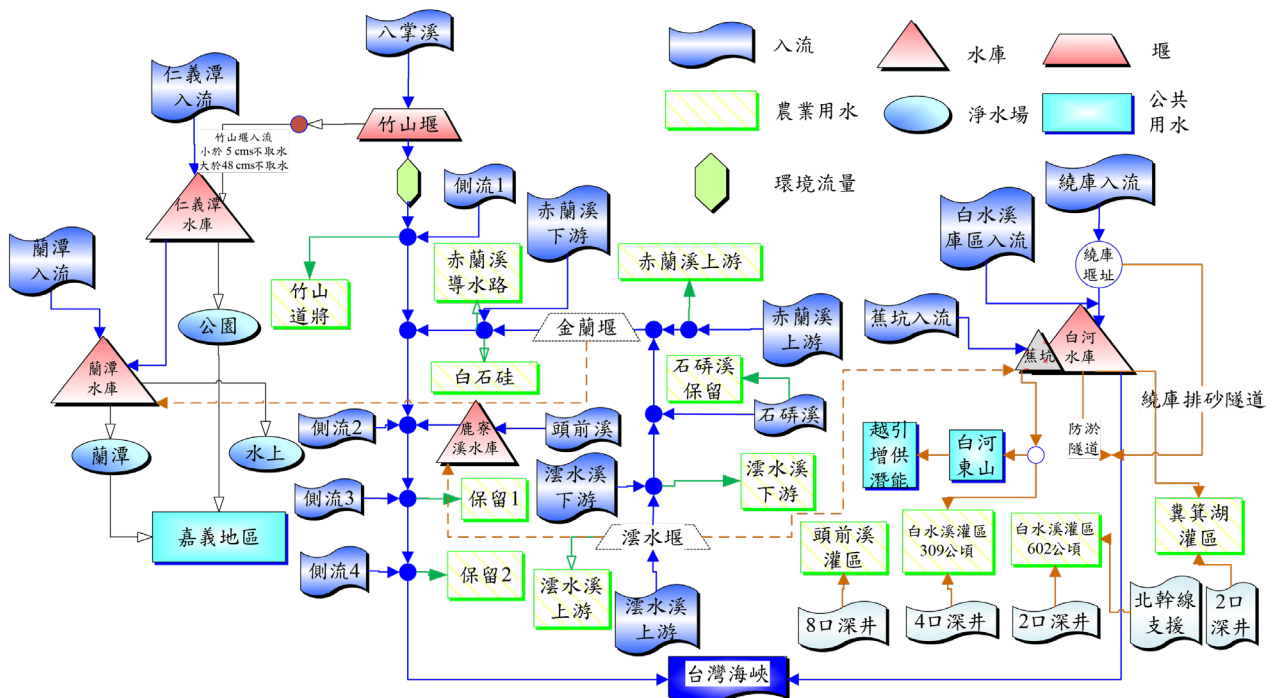


圖 3 運用 WRASIM 模式建置研究區域水資源系統之網路架構

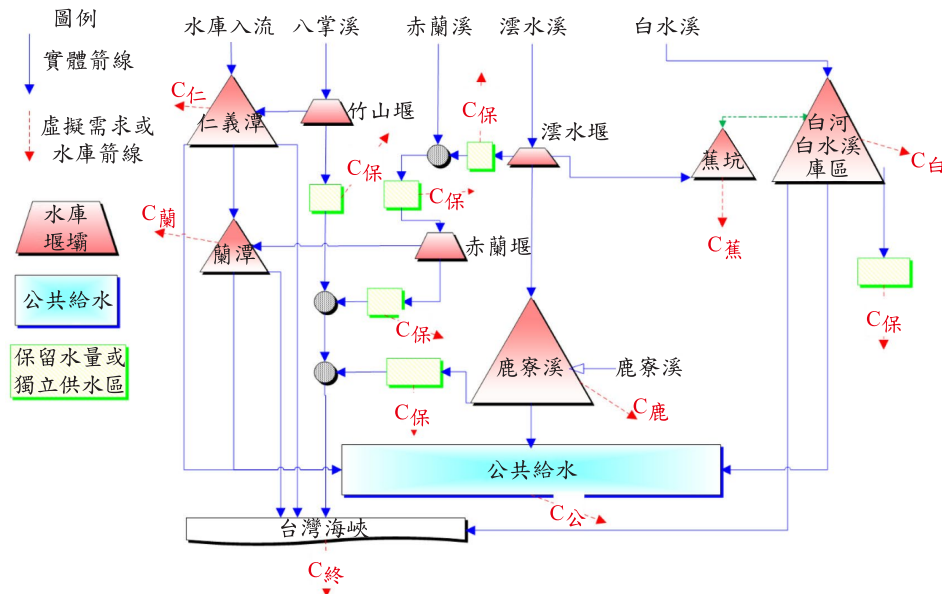


圖 4 水量分配順序之網線架構 (本圖將鹿寮溪水庫簡化縮小)

圖 4 為針對圖 3 進行簡化後的系統各需求與水庫之虛擬箭線配水示意圖，圖中虛擬箭線所標示變數為成本係數 c 。網流模式在節點—箭線所構成的特殊架構下，可以依據藉由適當設定成本係數來反應水量分配優先順序。Chou and Wu (2014) 曾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，分別為：(1) 川流水系統依據需求優先順序分配、(2) 多目標水庫依據運用規線配水、(3) 特殊偏好之供水路徑、(4) 越域引水僅引用既有系統之剩餘流量。本文所模擬系統為綜合前述第 (1)、(2)、(4) 點之原則，在此系統之水量分配順序具體說明如下：

1. 河段之環境流量、各堰壩下游之保留水量、各水庫之獨立供水區域等；
2. 各水庫共同供應之公共給水需求；
3. 各水庫蓄水優先順序；
4. 進入台灣海峽之溢流量。

因此，各虛擬箭線成本係數之大小順序應符合下述原則：

$C_{\text{保留}} < C_{\text{公共}} < (C_{\text{鹿寮溪水庫}}、C_{\text{蕉坑}}、C_{\text{白河}}、C_{\text{仁義潭}}、C_{\text{蘭潭}})$
 $< C_{\text{終端}} \dots\dots\dots (4)$

第(4)式中，因保留水量順序優先於公共給水與水庫蓄水，因此依最小成本的目標函數進行配水後，得以確保各水庫僅引取越域引水處的剩餘流量；本研究之 $c_{\text{保留}}$ 設定為5， $c_{\text{公共}}$ 設定為120。另對於各水庫的蓄水順序尚未指定，透過更改其順序，可模擬不同情境，例如：

1. 情境一 ($c_{\text{蕉坑}} < c_{\text{白河}} < c_{\text{鹿寮溪水庫}} < c_{\text{蘭潭}} < c_{\text{仁義潭}}$)

依各越域引水計畫提出時間之順序，白河水庫更新改善計畫中所提之澧水溪越域引水較鹿寮溪水庫越域引水更為優先，其次為金蘭堰越域引水至蘭潭水庫，故蘭潭水庫順序次於鹿寮溪水庫。另外，蕉坑為白河水庫內相對獨立的蓄水區域，亦為其空庫排砂期間的備用水源，故給予最高優先順序。而水庫近年操作為提升蓄水率指標與增加仁義潭水庫自竹山堰引水之機會，傾向優先蓄滿蘭潭水庫，因此仁義潭水庫順序置於最後。本情境中，*C*_{蕉坑}、*C*_{白河}、*C*_{鹿寮溪水庫}、*C*_{蘭潭}、*C*_{仁義潭}分別設定為 190、200、210、330、340。

2. 情境二 (
- $c_{\text{蘭潭}} < c_{\text{仁義潭}} < c_{\text{鹿寮溪水庫}} < c_{\text{蕉坑}} < c_{\text{白河}}$
-)

考量嘉義地區供水以蘭潭與仁義潭水庫為主，且鹿寮溪水庫亦單純以蓄水利用為主，因此將蘭潭與仁義潭水庫之蓄水順序提至最優先，評估是否得以增加供水量。本情境中，*C*_{蘭潭}、*C*_{仁義潭}、*C*_{鹿寮溪水庫}、*C*_{蕉坑}、*C*_{白河}分別設定為 130、140、150、190、200。

3. 情境三，針對白河水庫區分空庫排砂與蓄水利用期：

- (1) 空庫排砂期($c_{\text{蕉坑}} < c_{\text{鹿寮溪水庫}} < c_{\text{仁義潭}} < c_{\text{蘭潭}}$)

空庫排砂期間對白河水庫之白水溪庫區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，而為了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。另為了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；本情境之 $c_{蕉坑}$ 、 $c_{鹿寮溪水庫}$ 、 $c_{仁義潭}$ 、 $c_{蘭潭}$ 分別設定為 150、190、230、240。

(2) 蓄水利用期 ($c_{\text{鹿寮溪水庫}} < c_{\text{蕉坑}} < c_{\text{白河}} < c_{\text{仁義潭}} < c_{\text{蘭潭}}$)

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澧水溪剩餘流量引導至鹿寮溪水庫蓄存；本情境之 $c_{\text{鹿寮溪水庫}}$ 、 $c_{\text{蕉坑}}$ 、 $c_{\text{白河}}$ 、 $c_{\text{仁義潭}}$ 、 $c_{\text{蘭潭}}$ 分別設定為 150、190、200、230、240。

3.3 評估指標

台灣之水資源規劃主要以缺水指數 (shortage index, SI) 來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下，缺水的經濟損失約略與年缺水率的平方值呈比例。SI 之計算公式如下：

$$SI = \frac{100}{NY} \sum_{i=1}^{NY} \left(\frac{dy_i}{Dy_i} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

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。SI 廣被應用於台灣的水資源規劃作業，為評估水資源系統可靠供水量之依據，分析上係針對水資源系統的主要供水標的，藉迭代測試不同的需求水量，並經反覆模擬，直至對模擬缺水所統計的 SI 值等於 1.0，此時稱此需水量為系統之供水能力，代表系統依此水量供應時，在水庫庫容維持不變且歷史水文過程可能重現的假設下，該用水標的所承受的缺水風險為 SI 等於 1.0。

本文討論藉由區域間之原水聯通以儘量攔蓄剩餘流量，故以最大化可運用量或最小化剩餘流量為目標。因此模擬如第 3.2 節所述之不同情境時，以系統供應共同供水區 (嘉義地區公共給水需求) 於 SI 值等於 1.0 之供水能力，作為評量各方案成效之主要指標。

四、模擬結果與討論

水源運用模擬之主要運用條件為配水順序，如第 3.2 節所述；其餘水文、庫容、各標的用水需求等條件

主要參考「赤蘭溪水源運用工程可行性規劃(期中報告)」(水利規劃分署，2024b)，另白河水庫與鹿寮溪水庫之運用原則參考「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)及「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)，前述三本計畫報告之水源運用均採 WRASIM 模式；另系統內重要控制點之流量，竹山堰與金蘭堰之流量係參考水利署第五河川分署之觸口與赤蘭溪橋站之觀測流量進行推估，惟此兩站近年觀測資料略有異常，故採修正型水筒模式 (Kadoya and Tanakamaru，1988) 進行降雨逕流模式建置與流量補遺，另白河水庫於每年固定於第 14 至 20 旬執行空庫排砂，其空庫排砂量採中國清華大學沖砂經驗公式 (IRTCS，1985) 推估。

為求務實以最不偏離現實條件評估，本文與前期個案之演算條件略有不同，說明如下列二點。

- 1. 「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) 考慮白河與鹿寮溪水庫在不同規劃階段之不同可能庫容，本文對白河水庫採現況庫容 1,379 萬立方公尺、鹿寮溪水庫採「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) 建議之 1,526 萬立方公尺。
- 2. 「赤蘭溪水源運用工程可行性規劃 (期中報告)」(水利規劃分署，2024b) 對八掌溪流域水資源系統與白河及鹿寮溪水庫聯合運用系統係採個別演算，因該計畫目的為評估金蘭堰越引計畫成效，故白河與鹿寮溪水庫自澧水溪之引水僅作為評估金蘭堰越域引水時之邊界限制條件。本文將前述二水資源系統整併，同時進行水源調配以探討最佳聯合運用策略。

本文模擬研究區域於民國 64 年至 112 年不同情境下的逐日水資源供需情形，參考第 3.2 節所述之三種情境，將各情境演算之供水能力比較整理如表 1，各水庫平均每旬自赤蘭溪引水量及農業供灌與剩餘水量比較繪製如圖 5 至圖 7，蘭潭及仁義潭水庫平均每旬蓄水量繪製如圖 8 至圖 10 及鹿寮溪水庫不同情境

表 1 不同情境下供水能力比較

情境	SI=1.0 之供水能力 (萬 m ³ /日)	共同供水區由各水庫供應水量 (萬 m ³ /日)					自赤蘭溪引水量 (萬 m ³ /年)			白河空庫排砂量 (萬 m ³ /年)	赤蘭溪灌區可取得供水量 (萬 m ³ /年)	白河水庫灌區可取得供水量 (萬 m ³ /年)
		仁義潭	蘭潭	鹿寮溪	白河	總供應水量	白河	鹿寮溪	蘭潭			
1	23.53	10.80	4.19	4.43	2.88	22.30	1778	745	418	19.0	13.99	7.29
2	24.50	8.56	3.28	8.06	3.21	23.11	400	2069	292	10.7	13.99	6.85
3	25.10	11.73	4.46	5.61	2.13	23.93	1196	1261	838	18.8	13.99	7.32

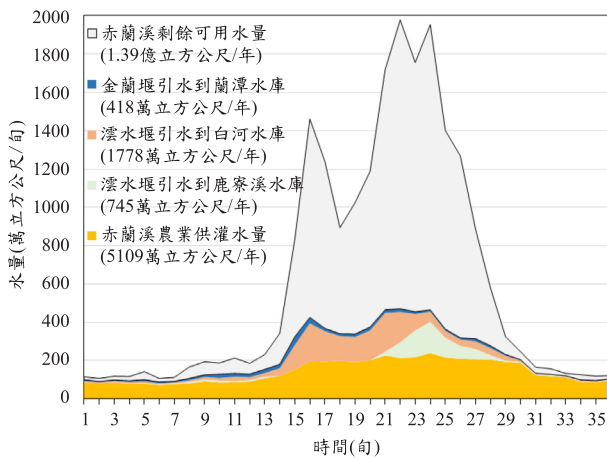


圖 5 各水庫平均每旬自赤蘭溪引水量及農業供灌與剩餘水量比較 (情境一)

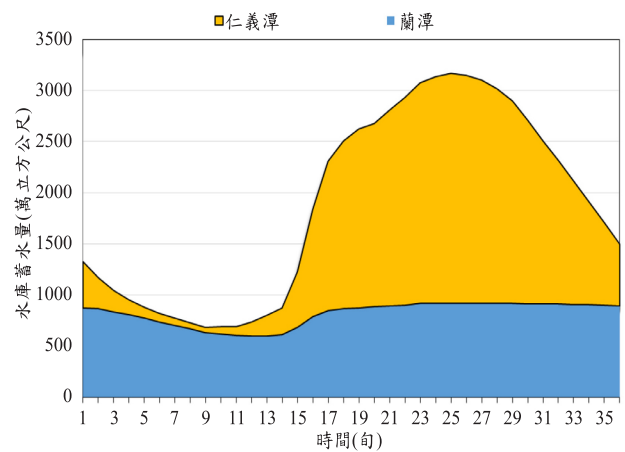


圖 8 蘭潭及仁義潭水庫平均每旬蓄水量 (情境一)

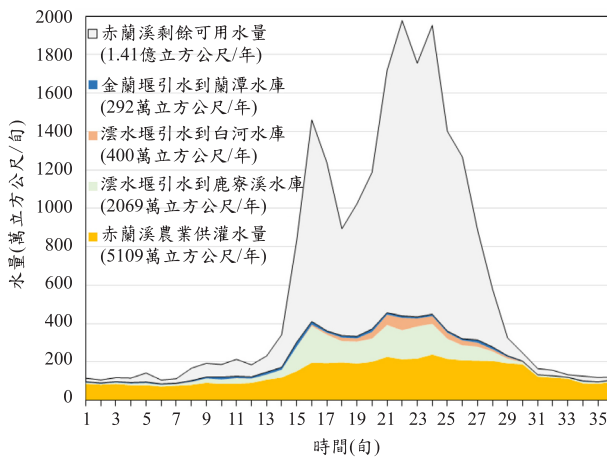


圖 6 各水庫平均每旬自赤蘭溪引水量及農業供灌與剩餘水量比較 (情境二)

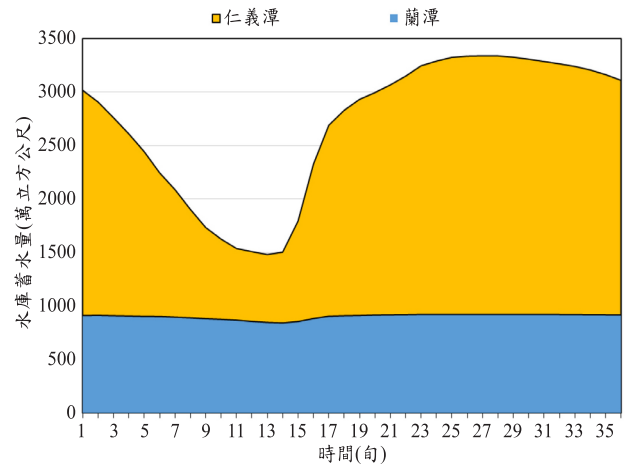


圖 9 蘭潭及仁義潭水庫平均每旬蓄水量 (情境二)

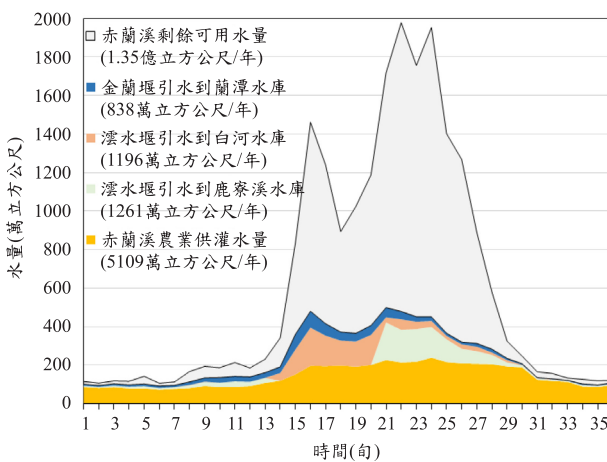


圖 7 各水庫平均每旬自赤蘭溪引水量及農業供灌與剩餘水量比較 (情境三)

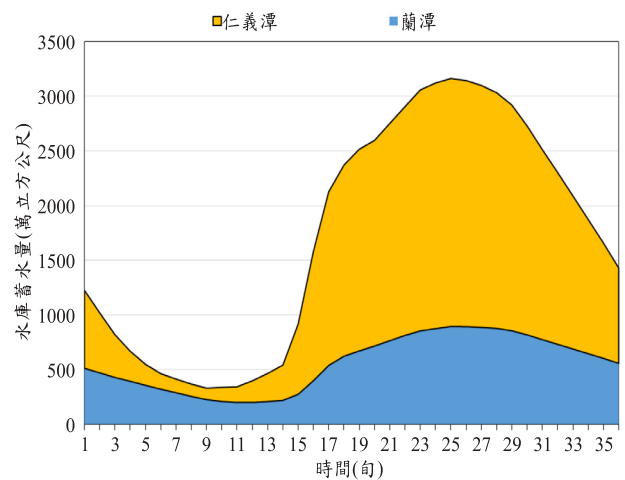


圖 10 蘭潭及仁義潭水庫平均每旬蓄水量 (情境三)

下平均每旬蓄水量比較繪製如圖 11 所示，水源運用模擬結果及各情境特性討論如下。

1. 三種情境下，赤蘭溪灌區可取得之供水量皆為每年 13.99 萬立方公尺，係因其配水順序置於最優先，得

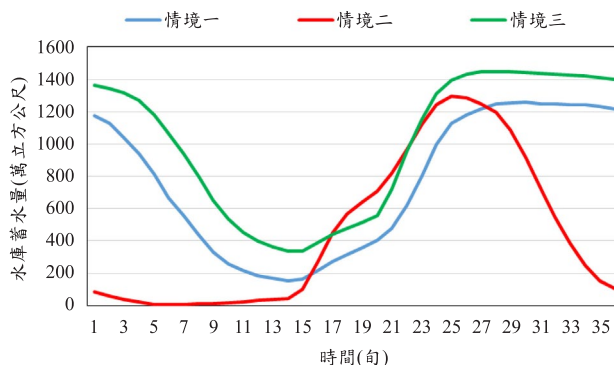


圖 11 鹿寮溪水庫不同情境下平均每旬蓄水量比較

以確保各水庫僅引取越域引水處的剩餘流量。

2. 情境二雖以蓄水為主，但情境三在 $SI = 1.0$ 時之供水能力為每日 25.1 萬立方公尺，仍優於情境二的每日 24.5 萬立方公尺。且情境二之白河水庫空庫排砂量明顯受影響，顯示情境三為較佳策略。
3. 情境三將蘭潭與仁義潭水庫蓄水順序置於最後，但相較於情境二，情境三可自金蘭堰引水量卻更多。原因為情境二優先蓄水於蘭潭水庫，而竹山堰水源亦被調配至蘭潭水庫，致使可再引蓄金蘭堰之水量受限。而情境三雖優先允許上游之澧水堰越引，但金蘭堰之可引水量卻為三種情境方案中的最高者，顯示金蘭堰之可引水量較不受澧水堰引水影響，原因為：
 - (1) 白河水庫固定於第 14 至 20 旬間執行空庫排砂，無論前期蓄水多寡於空庫期間初始均需洩空。空庫期間之引水為促進排砂成效，且即使蕉坑蓄滿仍持續越引，因此所有澧水溪可引水量均導入白河水庫。但澧水堰跟金蘭堰的剩餘流量發生時間重疊，均在豐水期，而金蘭堰集水面積 (88.86 km^2)，超過澧水堰集水面積 (20.45 km^2) 之四倍，故即使豐水期澧水堰有越域引水操作，金蘭堰址仍可有引水量，且澧水堰引水時仍須保留下游農業水量與環境流量，並非所有水量均引入白河或鹿寮溪水庫。
 - (2) 由圖 7 所示，金蘭堰主要引水時機為豐水期初，與白河水庫空庫期略有重疊。空庫期結束後雖優先蓄水於白河或鹿寮溪水庫，可能影響下游可引水量，但此期間下游金蘭堰越引水量需求已降低，因蘭潭水庫多已蓄滿且於竹山堰可持續引水。
4. 本系統的各水源量於各旬的變化，均呈現梅雨期與颱風期雙峰的型態，故歸納運用重點為：
 - (1) 旱澇交替之際，保持蘭潭水庫仍有可蓄水空間，

增加利用赤蘭溪剩餘流量，竹山堰剩餘流量可由庫容較大的仁義潭水庫調蓄。

- (2) 白河水庫以空庫排砂為主，空庫勢必影響水庫整年度可穩定供應水量，故未空庫時期，應優先由鹿寮溪水庫調蓄澧水堰剩餘流量；而因白河水庫空庫期間，鹿寮溪水庫仍須增加負擔共同供水區用水，故蓄水消耗相對較快，於 8 月後的颱風時期，鹿寮溪水庫得以攔蓄更多的頭前溪或澧水溪剩餘流量。

五、結論與建議

本文探討嘉義與北臺南地區水庫串聯、並聯的不同水資源系統布置，以及不同的水庫運用標的，以模擬法測試多組多水庫間不同蓄水平衡的運用策略，作為優化策略研究的基礎。經利用 WRASIM 模式進行水資源系統的最佳化模擬，本文歸納較佳的水資源運用策略為：(1) 旱澇交替之際，保持蘭潭水庫仍有可蓄水空間，增加利用赤蘭溪剩餘流量，竹山堰剩餘流量可由庫容較大的仁義潭水庫調蓄。(2) 澧水堰水源在第 14 至 20 旬，以輔助白河水庫空庫排砂為主，其餘時期應優先由鹿寮溪水庫調蓄澧水堰剩餘流量。(3) 金蘭堰之可引水量受上游澧水堰之操作影響極為有限，其定位為可儘速於豐水期初提昇蘭潭水庫蓄水量，另在乾旱時期亦可增加調度農業用水來穩定公共給水供應之選項。

本文之分析聚焦於如何安排四座水庫在不同月份的蓄水優先順序，來反應八掌溪主流水源取用的順序。多水庫蓄水順序的配置類似於美國陸軍工兵團 HEC-5 模式採用的指標平衡法 (郭蒼霖, 2000; 蔡明澤, 2002; Hydrologic Engineering Center, 1989) 或是更周延的蓄水平衡曲線 (王晶玉, 2004; 嚴顯, 2004)。未來可再深究更完備的聯合運用規則，如聯合運用規線與對應的折扣供水規定等。

白河水庫更新改善計畫包含一系列的水庫防淤作為 (空庫排砂、異重流與渾水水庫排砂、繞庫排砂與清淤)，參考 Kondolf *et al.* (2014) 所彙整的水庫防淤策略，白河水庫幾乎涵蓋了最小化庫內淤積 (minimizing sediment depositions) 的各項對策。此外，藉由與澧水堰及與鹿寮溪水庫的聯合運用，更貼近促進排砂的水資源調適對策，且示範了水與砂的鍊結關係，並非僅侷限於物理上水、砂運移間的相互牽動，而是水庫排砂或沖淤與水源利用之目標或限制息息相關；也因為有餘裕的水源供應，才能採更激進有效的水庫防淤作為，使整體系統得以邁向永續。

誌謝

本文為水利署水利規劃分署主辦「赤蘭溪水源運用工程可行性規劃」計畫之衍生成果（計畫編號：MOEAWRA 113120）；撰文期間承蒙執行單位黎明工程顧問股份有限公司、水利規分署及南區水資源分署等提供歷年相關執行成果，台灣自來水公司第五區管理處及農田水利署嘉南管理處協助提供水源運用相關資料，特此致謝。

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，「八掌河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」(期中報告)，2024b。
7. 王晶玉，「兼具人工及天然渠道串接之水庫聯合運用規則研究」，碩士論文，國立成功大學水利及海洋工程學系，2004。
8. 行政院，「前瞻基礎建設計畫」，2017。
9. 南區水資源分署，「白河水庫越域引水工程初步規劃」，2015。
10. 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。
11. 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，第 1 至 21 頁，2001。
12. 郭蒼霖，「遺傳演算法於多水庫最佳操作規線優選之應用」，碩士論文，國立交通大學土木工程系，2000。
13. 經濟部，「臺灣及離島水資源經理基本計畫」，2021。
14. 經濟部，「臺灣各區水資源經理基本計畫」，2021。
15. 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。
16. 蔡明澤，「越域引水水庫聯合操作規線與打折供水最佳化之應用－以寶山與寶山第二水庫為例」，碩士論文，國立中央大學土木工程學系，2002。
17. 謝清發，「淺談水庫再生計畫」，自來水會刊，第 27 卷，第 1 期，第 39 至 42 頁，2008。
18. 嚴顯，「單目標並聯水庫蓄水利用規則研究」，碩士論文，國立成功大學水利及海洋工程學系，2004。
19. Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., and Orlin, J. B., "Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications," Prentice-Hall, Upper Saddle River. New Jersey, 1993.
20. Beard, L. R., "Estimating Long-term Storage Requirements and Firm Yield of Rivers," IUGG Berkeley General Assembly, 1963.
21. Clark, E. J., "New York Control Curves," *Journal AWWA*, 42(9), pp. 823-827, 1950.
22. 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.
23. Hydrologic Engineering Center, "HEC-5: Simulation of Flood Control and Conservation Systems," U.S. Army Corps of Engineers, Documentation and User's Manual, Davis, California, 1989.
24. IRTCES (International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation), Lecture Notes of the Training Course on Reservoir Sedimentation, Tsinghua University, Beijing, China, 1985.
25. Israel, M. and Lund, J., "Priority Preserving Unit Penalties in Network flow Modeling," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125, pp. 205-214, 1999.
26. 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.
27. Kondolf, G. M., Gao, Y., Annandale, G. W., Morris, G. L., Jiang, E., Zhang, J., ... & Yang, C. T., "Sustainable Sediment Management in Reservoirs and Regulated Rivers: Experiences from Five Continents," *Earth's Future*, 2(5), pp. 256-280, 2014.
28. Labadie, J. W. and Baldo, M., "Discussion of: Priority Preserving Unit Penalties in Network Flow Modeling," by Israel, M. and Lund, J., *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125, pp. 67-68, 2001.
29. Labadie, J. W., "Optimal Operation of Multireservoir

- Systems: State-of-the-art Review,” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), pp. 93-111, 2004.
30. Lund, J. R., “Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel,” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(3), pp.143-153, 1999.
31. Sheer, D., Dan Sheer’s “Reservoir Operating Guidelines. School of Civil and Environmental Engineering,” Cornell University, Ithaca, N.Y., 1986.
32. Wurbs, R. A., “Modeling River/reservoir System Management, Water Allocation, and Supply Reliability,” *Journal of Hydrology*, 300, pp. 100-113, 2005.
33. Wurbs, R. A., “Reservoir-system Simulation and Optimization Models,” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(4), pp. 445-472, 1993.
34. Wu, R. S., “Derivation of Balancing Curves for Multiple Reservoir Operation M.Sc.” Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering., Cornell University, Ithaca, N.Y, 1988.
- 收稿日期：民國 114 年 05 月 04 日
修改日期：民國 114 年 05 月 11 日
接受日期：民國 114 年 05 月 19 日