JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

南化水庫防洪防淤運轉決策支援系統：2024 凱米颱風案例應用

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR FLOOD CONTROL AND DESILTING OPERATIONS OF NANHUA RESERVOIR: A CASE STUDY OF TYPHOON GAEMI (2024)

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
兼任教授
周 乃 昉
Frederick N.F. Chou

國立陽明交通大學
土木工程學系
特聘教授兼工學院院長
林 志 平
Chih-Ping Lin

台灣自來水公司
第六區管理處南化暨
鏡面水庫管理所
主任
王 超 儀
Chao-Yi Wang

國立中興大學
土木工程學系
助理教授
李 豐 佐
Fong-Zuo Lee

多采工程顧問有限公司
董事長
李 文 生
Wen-Sen Lee

國立成功大學
水利及海洋工程學系
教授
曾 志 民
Chih-Ming Tseng

國立陽明交通大學
防災與水環境研究中心
助理研究員
吳 宜 嶺
I-Ling Wu

國立臺灣大學
水工試驗所
賴 進 松
Jihn-Sung Lai

台灣自來水公司第六區管理處
工程師
林 秉 學
Bin-Shuei Lin

台灣自來水公司第六區管理處
南化暨鏡面水庫管理所
技術士
黃 政 欽
Cheng-Chin Huang

摘　要

因應南化水庫防淤隧道完工，「南化水庫防洪防淤運轉決策支援系統」自民國 110 年起開始發展，已經歷數次颱風之應用與驗證。本文簡介此系統功能，並以 113 年凱米颱風為例，呈現其防洪與防淤成效。此系統主要功能包括：類似歷史颱風路徑比對、水庫集水區降雨與逕流預報、泥砂濃度監測與預估、防淤隧道啟動與關閉決策、水庫運轉策略優化等。透過即時監測與數值模擬，系統能有效預估颱風降雨趨勢，並推估水庫入流量與入砂量，進而提供最佳化之防洪、排砂與沖淤策略。模式應用於凱米颱風之運轉決策，結果顯示：凱米颱風期間水庫總入砂量在 500 ~ 600 萬立方公尺間，水庫管理單位透過防淤隧道與溢洪道放水各排砂約 68.2 與 5.5 萬立方公尺，對下游河道暫置淤泥之沖淤量為 183 萬立方公尺，合計共 256.7

airiti

萬立方公尺。此外，藉由開啟防淤隧道，有效減緩庫前高濁度對供水的衝擊；並藉由預估甲仙堰之可引水量，使水庫於洪水過後約一週仍可蓄滿。基於目前成果，建議未來應提升入庫砂量的精確估算，並結合機器學習方法優化防淤隧道操作策略。此外，可透過建置防淤隧道前庭之導流槽、囚砂潭或潛壩等輔助設施，提高排砂效率，同時加強區域水資源聯合調度，以確保穩定供水並促進得以積極進行排砂之條件。

關鍵詞：水庫防淤、防洪運轉、決策支援系統、凱米颱風。

* 國立成功大學水利及海洋工程學系兼任助理教授
701 台南市東區大學路 1 號，chiawenwu1977@gmail.com

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR FLOOD CONTROL AND DESILTING OPERATIONS OF NANHUA RESERVOIR: A CASE STUDY OF TYPHOON GAEMI (2024)

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

Chih-Ping Lin
National Yang Ming Chiao Tung University
Department of Civil Engineering

Chao-Yi Wang
Taiwan Water Corporation

Fong-Zuo Lee
National Chung Hsing University
Department of Civil Engineering

Wen Sen Lee
Manysplendid Engineering Consultants Co., Ltd.

Chih-Ming Tseng
National Cheng Kung University
Department of Hydraulic and Ocean Engineering

I-Ling Wu
National Yang Ming Chiao Tung University
Disaster Prevention and Water Environment Research Centre

Jihn-Sung Lai
National Taiwan University
Hydrotech Research Institute

Bin-Shuei Lin
Taiwan Water Corporation

Cheng-Chin Huang
Taiwan Water Corporation

ABSTRACT

Following the completion of the desilting tunnel of Nanhua Reservoir, the development of its decision support system was initiated in 2021 and has since been applied through multiple typhoon events. This paper provides an overview of the system and demonstrates its effectiveness in flood control and sediment routing during Typhoon Gaemi in 2024. The primary functions of the system include: selection of historical typhoons of similar tracks, rainfall and runoff forecasting, monitoring and estimation of sediment concentration at relevant locations in the reservoir, decision-making for the activation and closure of the tunnel, and optimization of reservoir operation strategies. The system was applied during Typhoon Gaemi, with results indicating that the total sediment inflow into the reservoir ranged between 5.0 and 6.0 million cubic meters. 0.682 million cubic meters and 0.055 million cubic meters of sediment were discharged through the desilting tunnel and spillway, respectively. Additionally, 1.83 million cubic meters of temporarily deposited sediment in the downstream channel were successfully flushed, resulting in a total desilting volume of 2.567 million cubic meters. Furthermore, the operation of the upstream desilting tunnel effectively mitigated the

airiti

impact of high turbidity on water supply at the dam. By accurately estimating the divertible water volume at the Jiaxian Weir, the reservoir was also refilled within one week following the flood event. Based on current findings, future improvements of the system could focus on enhancing the accuracy of sediment inflow estimation and incorporating artificial intelligence methods to optimize operation strategies. Additionally, the implementation of auxiliary structures, such as flushing channels, sediment-trap basins, or submerged weirs at the tunnel entrance, could improve sediment routing efficiency. Strengthening regional water resource coordination is also recommended to ensure a stable water supply while creating favorable conditions for proactive sediment routing operations.

Keywords: Reservoir desilting, Flood control operation, Decision support system, Typhoon Gaemi.

Wu, C.W.*, Chou, N.F., Lin, C.P., Wang, C.Y., Lee, F.Z., Lee, W.S., Tseng, C.M., Wu, I-L., Lai, J.S., Lin, B.S., & Huang, C.C. (2025). “Decision Support System for Flood Control and Desilting Operations of Nanhua Reservoir: A Case Study of Typhoon Gaemi (2024).” *Journal of Taiwan Agricultural Engineering,* 71(3), 18-41. https://doi.org/10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

一、前言

南化水庫之出流以往主要為無閘門控制之自由溢流堰，洪水期間無須人為操作，惟水庫防淤隧道已完工並於民國 110 年 8 月由台灣自來水股份有限公司(後簡稱水公司) 第六區管理處 (後簡稱六區處) 接管。為達成水庫「排砂最大化」及「供水安全」等目標，水庫管理單位自民國 110 年開始發展南化水庫防洪防淤運轉決策支援系統 (台灣自來水公司第六區管理處，2022a)，歷經 110 年盧碧、112 年蘇拉及海葵、113 年凱米、康芮等顯著颱風事件期間之應用驗證，配合上游泥砂之即時監測，決策支援系統之氣象水情預估、水庫集水區逕流模擬、泥砂入流及異重流過程之掌握、水庫運轉優化等功能已日趨成熟完善，有效達到防洪、防淤與蓄水利用之目標。

水庫運轉決策支援系統評估防淤隧道啟閉之時機，須配合泥砂於庫區運移變化之監測資訊，南化水庫管理單位亦已建置 4 處自動化高濃度泥砂觀測裝置(台灣自來水公司第六區管理處，2022b)，位置如圖 1：

1. 庫區上游邊界 (固定式測站)

   位於上游河道關山九號橋，監測水庫上游入庫泥砂濃度。

2. 庫區 (浮台測站)

   (1) 斷面 13 號站：鄰近防淤隧道入口較上游河道處。設置「庫區浮台型式」分層泥砂濃度自動化觀測儀器，以監測異重流抵達防淤隧道入口處泥砂濃度歷線與分層變化。

   (2) 斷面 3 號站：鄰近庫區壩前取水工附近，設置「庫區浮台型式」分層泥砂濃度自動化觀測儀器。

3. 防淤隧道站

   位於防淤隧道下游左側橫坑出口，建一觀測小屋，設置泥砂濃度自動化觀測儀器，利用 3 組幫浦引水至屋內，監測出庫泥砂濃度。

4. 大壩人工觀測站

   觀測點有溢洪道、公共取水口 (標高 171 公尺、標高 161 公尺與標高 151 公尺)、緊急取水設施與緊急排放口 (排砂操作時啟用)。

本文以民國 113 年發生的凱米颱風為案例，說明南化水庫運轉決策支援系統之各項功能的應用與驗證，並對精進水庫排砂量之作為提出建議，以作為系統未來持續發展擴充之基礎與展望。

二、南化水庫防洪防淤運轉決策支援系統概要

以下說明水庫運轉決策系統之主要功能。

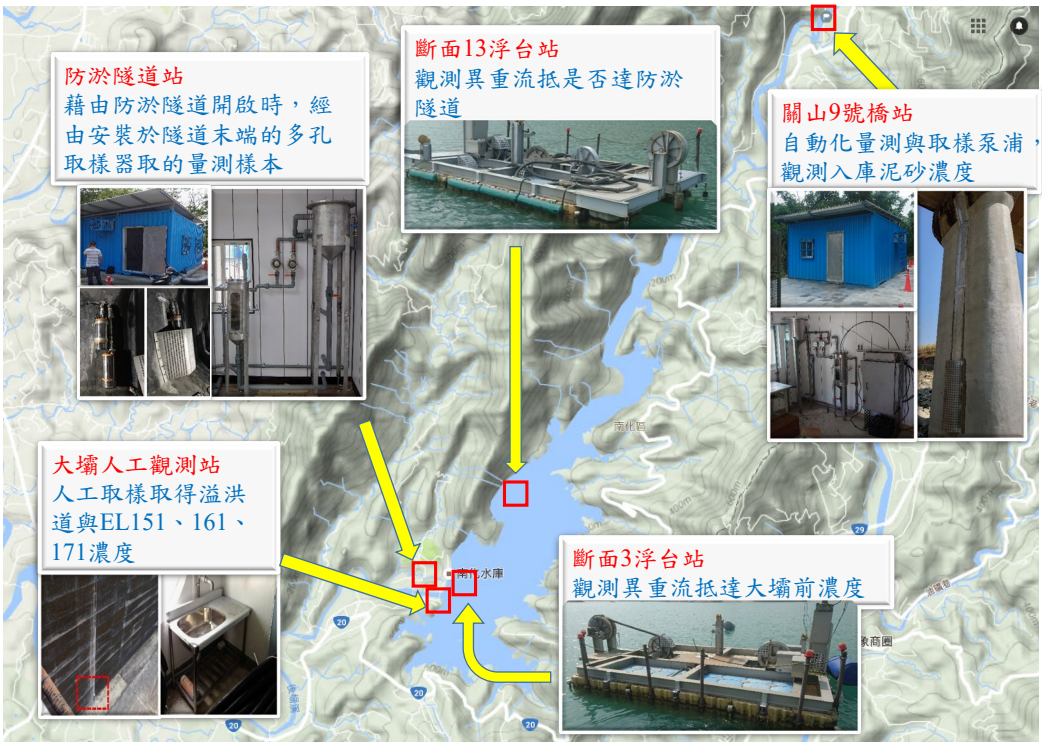


圖 1　南化水庫自動化泥砂濃度監測系統配置

airiti

2.1 類似路徑歷史颱風路徑比對

透過彙整各歷史颱風事件的降雨資料，繪製颱風中心位置與集水區降雨強度之分佈圖 (如圖 2 所示)，圖中點位為歷史颱風事件之颱風中心位置，點形則為該事件於颱風中心落於該點位時之南化水庫集水區平均時雨量。圖中右下角所示為中央氣象署 (後簡稱氣象署) 對於侵台颱風路徑之分類。由圖可知第二類及第三類侵台路徑的颱風對水庫集水區降雨影響最為顯著。決策支援系統根據氣象署對於侵臺颱風之即時路徑觀測及預測，自動對比歷史颱風路徑，篩選出相似之歷史颱風事件，作為預測未來水庫集水區降雨型態及評估颱風威脅程度之參考依據。颱風路徑之比對分析首先參考即時颱風事件路徑的颱風中心各點位座標，計算其與歷史颱風路徑的最近距離：

$$dR_j^i = \min_k \left(\sqrt{(Px_j^R - Px_k^{H_i})^2 + (Py_j^R - Py_k^{H_i})^2}\right), \quad k = 1 \ldots l_i) \qquad (1)$$

式中，dR^i_j= 即時颱風路徑中第 j 點的颱風中心座標與第 i 場歷史颱風路徑間之最近距離，$(Px_j^R,\ Py_j^R)$ =即時颱風路徑中第 j 點的颱風中心座標，$(Px_k^{H_i},\ Py_k^{H_i})$ = 第 i 場歷史颱風第 k 點的颱風中心座標，l_i= 第 i 場歷史颱風自發佈海上颱風警報開始至颱風警報解除期間之時數。其次，再針對歷史颱風事件路徑之各點位座標，計算其與即時颱風事件路徑的最近距離：

$$dH_k^i = \min_j \left(\sqrt{(Px_k^{H_i} - Px_j^R)^2 + (Py_k^{H_i} - Py_j^R)^2}\right), \quad j = 1 \ldots n+m) \qquad (2)$$

式中，dH^i_k = 第 i 場歷史颱風路徑中第 k 點的颱風中心座標資料與即時颱風路徑之最近距離；n = 即時颱風自發佈海上颱風警報開始至目前時刻之總時數；m = 即時颱風自目前時刻至估計未來颱風警報解除期間之總時數。依上述兩式，對即時颱風之預測路徑與第 i 場歷史颱風事件間之相似度指標可計算如下：

$$DF_i = \sum_{j=n+1}^{n+m} dR_j^i + \sum_{k=\lfloor a_{n+1}^i \rfloor}^{l_i} dH_k^i \qquad (3)$$

式中，a_{n+1}^i = 在第 i 場歷史颱風移動路徑中對應即時颱風第 n+1 時刻之時間點，以歷史颱風與即時颱風路徑點數之比例估計；$\lfloor a_{n+1}^i \rfloor$ = a_{n+1}^i 捨去小數點後之離散整數值。對各場颱風計算其 DF_i 值，並依結果排序後，即時自動篩選與當前颱風最相似的前五名歷史颱風，結果以網頁形式展示並同時呈現歷史事件發生時期之南化水庫集水區的降雨過程。

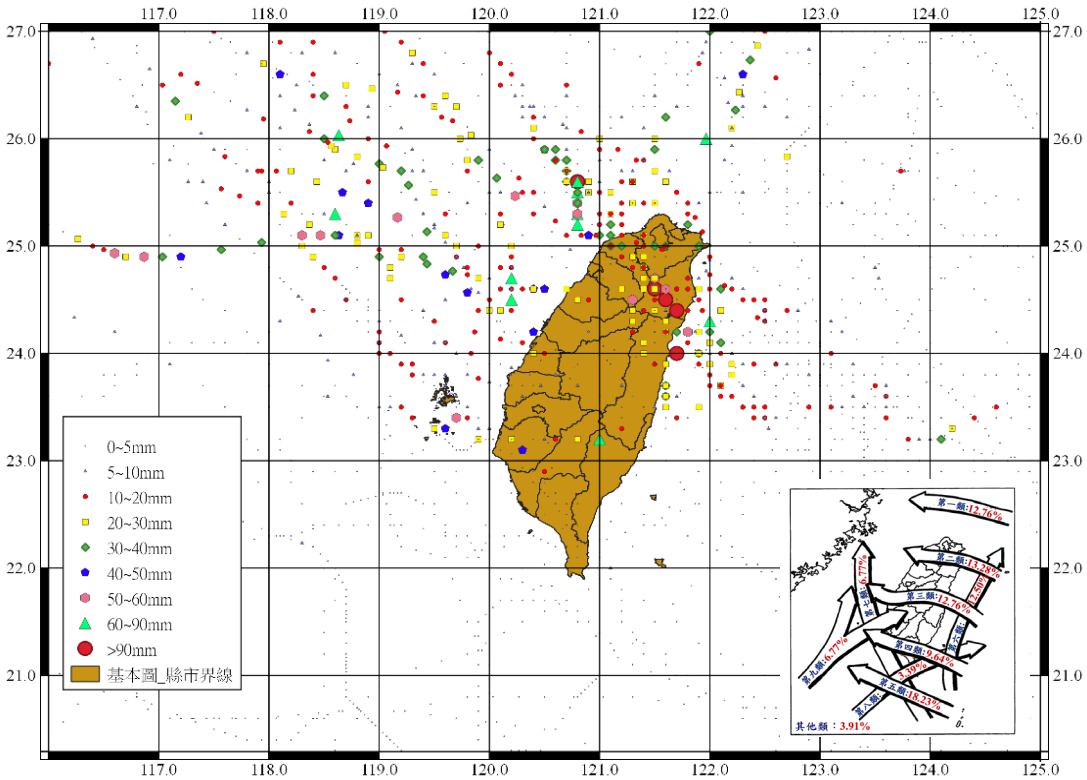


圖 2　颱風之中心位置與南化水庫集水區時降雨量關連分佈圖

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

2.2 南化水庫與甲仙堰集水區降雨預報

介接經濟部水利署水利防災組 (以下簡稱水利防災組) 提供水利署所轄單位介接之預報降雨 (經濟部水利署，2022)，其預報降雨主要來源為氣象署，本文主要採用產品為氣象署劇烈天氣監測系統雷達定量降雨預報 QPESUMS (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor)、氣象署中尺度數值天氣預報模式 WRF (Weather Research and Forecasting) 及氣象署定量降水預報 QPF (Quantitiative Precipitation Forecast)，各產品簡要說明如下：

1. 氣象署劇烈天氣監測系統雷達定量降雨預報 (以下簡稱 QPESUMS)：QPESUMS 提供雷達最低仰角 (0.5 度) 回波估計降水 (面的觀測) 與全台雨量站觀測降雨 (點的觀測) 的整合資訊。QPESUMS 系統每 10 分鐘更新，提供觀測以及未來 0 ~ 1、1 ~ 2 以及 2 ~ 3 小時的降雨強度預報值。其預報原理是利用雷達觀測風場變化率決定雨胞移動方向，較適用預報風場變化穩定的天氣系統。
2. 氣象署中尺度數值天氣預報模式 (以下簡稱 WRF)：WRF 模式為美國國家大氣研究中心 (NCAR) 所發展的中尺度數值天氣預報模式，用於執行預報作業與大氣研究工作。WRF 模式可應用於真實天氣個案模擬，或是以理想化模組做為大氣模擬條件。氣象署自 91 年開始試用及測試，於 94 年正式引進 WRF 3DVAR 客觀分析和 WRF 模式，經測試、改進及融合於中央氣象署數值天氣預報模式作業環境，建構完整的中尺度數值天氣資料同化系統，於 96 年 11 月 15 日正式上線作業，本文採適用於防災之系集預報編號 M04 的降雨預報產品，以下簡稱 WRF_M04。
3. 氣象署定量降水預報 (以下簡稱 CWA_QPF)：為 94 年 12 月 31 日正式發布之官方預報降雨產品，CWA_QPF 以大量系集資料庫配合不同延時策略及統計方法產生定量降水預報，搭配圖形化預報編輯系統 (Graphic Forecast Editor，簡稱 GFE) 產製預報降雨格點圖形及文字產品，協助預報員納入專業的主觀定量降水預報。並於 108 年 5 月 1 日起，針對颱風及大規模豪雨事件強化 CWA_QPF 產品，加密提供極短期預報降雨，由每日常態性發布 4 次提升為每日發布 8 次預報，且預報降雨產品增加前 6 小時之兩段 3 小時 (1 ~ 3 小時、4 ~ 6 小時) 極短期累積降雨。

由於 QPESUMS 預報頻率最高，每十分鐘提供最新資料，但僅提供未來 1 ~ 3 小時預報降雨，WRF_M04 預報時間長度最長，但一天只提供 4 次，且提供之時間約延遲 6~8 小時方可取得資料，CWA_QPF 為目前氣象署官方預報，原則每日提供 4 次預報，預報未來一天，故本文以南化水庫與甲仙堰集水區範圍為標的，建置網頁即時提供 WRF_M04 與 CWA_QPF、及其與雷達 QPESUMS 之組合式降雨預報。

蒐集 108 ~ 112 年間歷史案例事件，檢討南化水庫集水區預報降雨成效，如表 1 與表 2。整體而言，短延時 (6 小時) 之降雨預報以 CWA_QPF 表現較佳，可能因 CWA_QPF 資料由氣象署預報中心預報員綜整多種氣象資訊以專業主觀研判給定，較可即時隨實際天氣狀況進行更新，長延時 (24 小時以上) 之降雨預報則以 WRF_M04 表現較佳，WRF_M04 為模式考量整體大氣環境且客觀分析之數值結果，故對於長延時降雨趨勢掌握性較佳。

表 1　南化水庫歷史事件之預報降雨比較指標 (24 小時累積)

預報降雨產品	效率係數			均方根誤差 (mm)		
	颱風	豪雨	總和	颱風	豪雨	總和
CWA_QPF	0.01	**0.58**	0.47	75.11	**61.68**	66.23
WRF_M04	-5.16	0.50	**0.51**	**36.06**	67.49	**61.95**

註 1：*粗體為該項指標表現較好。
註 2：效率係數表示模擬或預報時間序列，與觀測時間序列間的擬合趨勢，其計算式如下，數值等於 1.0 表示完美擬合，亦即模擬或預測時間序列與觀測時間序列完全相等。
註 3：效率係數 ＝1−(觀測時間序列-對應模擬時間序列之平方總合) / (觀測時間序列-觀測時間序列平均值之平方總合)

表 2　南化水庫歷史事件之預報降雨比較指標(6 小時累積)

預報降雨產品	效率係數			均方根誤差 (mm)		
	颱風	豪雨	總和	颱風	豪雨	總和
CWA_QPF	0.07	**0.38**	**0.31**	23.65	**20.90**	**21.78**
WRF_M04	-1.46	0.16	0.12	**15.56**	24.25	22.33

註：*粗體為該項指標表現較好。

2.3 集水區逕流模擬與預估

運用改良修正型水筒模式 (Kadoya and Tanakamaru, 1995) 模擬集水區降雨逕流過程。將南化水庫集水區劃分為為關山九號橋上游、關山九號橋下游與水庫淹沒區等子集水區。上游子集水區的模擬流出再經過馬斯金更法之水文演算後，與下游子集水區之模擬流出及水庫淹沒區降雨體積加總後為模擬水庫總入流量。

以 17 場歷史事件之觀測資料來檢定逕流模式參

airiti

數，運用非線性優選法(Powell, 2009) 搜尋可使各場事件之平均效率係數最大化之代表性模式參數。其餘精進作為包含：

1. 納入水庫淹沒區上游之關山九號橋觀測水位，將其河道斷面的底床高程視為參數一併調校，以穩定上、下游子集水區之參數變異，避免落入局部最優解 (吳嘉文, 2000)，參數檢定之目標函數如下：

$$\begin{aligned} &Minimize \sum_{j\in \text{歷史洪水事件集合}} CE_j(I_{obs}^{\text{南化}}, I_{sim}^{\text{南化}}) \\ &+w\cdot \sum_{\substack{k\in \text{具觀測}\\ \text{水位事件集合}}} CE_k(I_{\text{水位轉換}}^{\text{關山}}, I_{\text{逕流模擬}}^{\text{關山}}) \end{aligned} \quad .....(4)$$

式中，第一項為所有檢定案例中，依南化水庫觀測進水流量 $I_{obs}^{\text{南化}}$ 及水筒模式模擬總流出水量 $I_{sim}^{\text{南化}}$ 計算的效率係數 (CE) 平均值；第二項為所有檢定案例中具關山九號橋觀測水位案例內，依觀測水位透過率定曲線轉換之河道流量 $I_{\text{水位轉換}}^{\text{關山}}$ 與降雨逕流模擬的上游第一子集水區流出水量 $I_{\text{逕流模擬}}^{\text{關山}}$ 所計算的效率係數平均值；w 則為權重因子，經測試後採取 0.7。

2. 加入依降雨臨前條件及總雨量區分類別之分類檢定參數機制 (邊孝倫, 1998)。以將歷史案例儘量平均分類為準則，設定以總雨量 400 公釐與基流量每秒 7.75 立方公尺為分類基準，第 I 組為基流量低於每秒 7.75 立方公尺、總雨量低於 400 公釐，命名為乾燥小雨，共有 6 場案例；第 III 組乾燥大雨有 5 場案例、第 IV 組濕潤大雨有 6 場案例，對各類別分別檢定代表性參數。
3. 使用卡門濾波法 (Kalman, 1960)，依即時觀測之水庫進流量與關山九號橋水位，校正更新包含水筒模式與河道之蓄水狀態 (吳依芸, 2000)。首先以狀態與觀測方程式來表達分佈型水筒模式演算過程：

$$\mathbf{S}_{t+1} = \mathbf{\Phi}_t \cdot \mathbf{S}_t + \mathbf{U}_t + w_t \quad .....(5)$$

$$Q_t = \mathbf{H}_t \cdot \mathbf{S}_t + \mathbf{V}_t + v_t \quad .....(6)$$

式中，$\mathbf{S}_t$ 表示 t 時刻系統內的狀態向量，對分佈型水筒模式為上、下游兩個子集水區水筒模式的各四層蓄水深度，以及連結上下游兩個水筒的河道蓄水量，共 9 個蓄水狀態；$\mathbf{\Phi}_t$ 為表示狀態隨時間演進的方陣；Q_t 表示 t 時刻取得的觀測向量，為南化水庫進水流量與關山九號橋水位；$\mathbf{H}_t$ 為表示觀測向量與狀態向量關連之矩陣；第 (5) 式表示下時段的狀態與本時段狀態與時段間的輸入變量 $\mathbf{U}_t$ 與隨機狀態誤差 w_t 相關，第 (6) 式表示本時段的觀測與狀態與額外控制變量 $\mathbf{V}_t$ 與隨機觀測誤差 v_t 相關，因存在狀態與觀測誤差 w_t 與 v_t，故取得 Q_t 後可計算其與模擬流量間的殘差 $\tilde{y}_t$ ：

$$\tilde{y}_t = Q_t - (H_t \cdot \mathbf{S}_{t|t-1} + V_t) \quad .....(7)$$

再依此殘差 $\tilde{y}_t$ 更新修正對狀態之估計：

$$\hat{\mathbf{S}}_{t|t} = \hat{\mathbf{S}}_{t|t-1} + \mathbf{K} \cdot \tilde{y}_t \quad .....(8)$$

式中，$\hat{\mathbf{S}}_{t|t-1}$ 為取得觀測資料 Q_t 前，由第 (5) 式依 t-1 時段相關資訊所估計之 t 時段狀態，$\hat{\mathbf{S}}_{t|t}$ 為取得觀測資料 Q_t 後對狀態的更新，$\mathbf{K}$ 為卡門增益矩陣。上述更新後的狀態估計量之誤差共變異矩陣可計算如下：

$$P_{t|t} = \text{cov}(\mathbf{S}_t - \hat{\mathbf{S}}_{t|t}) \quad .....(9)$$

假設狀態與觀測誤差 w_t 與 v_t 為服從常態分佈之隨機白噪音，其平均值為 0，共變異矩陣各為 $\mathbf{\Theta}$ 與 $\mathbf{R}$，亦即 $w_t \sim \text{Normal}(0, \mathbf{\Theta})$ 與 $v_t \sim \text{Normal}(0, \mathbf{R})$。則狀態估計量之誤差共變異矩陣可表示為：

$$P_{t|t-1} = \mathbf{\Phi}_t P_{t-1|t-1} \mathbf{\Phi}_t^T + \Theta \quad .....(10)$$

$$P_{t|t} = (I - \mathbf{K}_t \mathbf{H}_t) P_{t|t-1} (I - \mathbf{K}_t \mathbf{H}_t)^T + \mathbf{K}_t \mathbf{R} \mathbf{K}_t^T \quad .....(11)$$

為了讓更新後狀態估計值與真值間的差異 ($P_{t|t}$) 最小，最佳的卡門增益矩陣可決定如下：

$$\mathbf{K}_t = P_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T (\mathbf{H}_t P_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T + \mathbf{R})^{-1} \quad .....(12)$$

卡門濾波法之遞迴應用步驟如下：

(1) 預測：在初始時刻，依起始狀態 $\hat{\mathbf{S}}_{t-1|t-1}$ ，與預設之模式誤差統計特性 $\mathbf{P}_{t-1|t-1}$ ，運用 (5) 與 (10) 式預測 $\hat{\mathbf{S}}_{t|t-1}$ 與 $P_{t|t-1}$，同時可產出對於未來 1 小時的水庫進水流量預測 (t-1 小時預測第 t 小時)。

(2) 更新：t 時刻取得觀測資料 Q_t 後，運用 (8)、(11)、(12) 式更新 $\hat{\mathbf{S}}_{t|t}$ 與 $P_{t|t}$ ，同時產出更新後的模式模擬流量 (取得 Q_t 後的第 t 小時流量更新值)，

(3) 進入下一時段演算，設定 $t = t + 1$，重複前述步驟，直至到目前時刻。

(4) 依更新後的各水筒與河道蓄水狀態，參考未來降雨模擬未來逕流過程。

4. 整合前述各項機制，即時依降雨臨前條件與預報總降雨量，評估目前事件所屬類別，以所屬類別之代表性參數為起始猜值，參考即時時刻前期 72 小時的觀測資料，套用優選命題即時評估最適合當下情況的最佳參數。優選命題如下：

(1) 目標函數同第 (4) 式，但觀測與模擬資料僅限於即時時刻前期 72 小時；

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

(2) 限制條件：使用即時調整的新參數，模擬屬於同一類別 (考量即時事件之預估總雨量與降雨前基流量大小分類) 之歷史事件後，模擬成效不得劣化。

整合各步驟後模擬歷史 17 場檢定案例之平均效率係數可達 0.90。將前述模式與方法應用於甲仙堰集水區，考慮甲仙堰須保留下游既有水權以及環境流量，並考慮越域引水輸水容量限制後預估未來南化水庫可引水量，供研擬南化水庫放水策略時參考。模式自動計算後所呈現之資訊如表 3。

2.4 水庫入砂濃度與防淤隧道啟動條件

參考關山九號橋位址處之觀測斷面，依曼寧公式建立水位-流量率定曲線。並彙整歷年洪水觀測之含砂濃度資料，建立河川流量-輸砂量率定曲線，如圖 3。

歷年經驗顯示當防淤隧道入口上游處之 H13 浮台觀測濃度超過4,000 ppm後其濃度歷線有持續上漲趨勢，而自關山九號橋至 H13 浮台間的濃度遞減比例約 50%。依圖 4 中所示關係式推估關山九號橋處輸砂量後，進一步估計河道水量含砂濃度，顯示濃度於 8,000 ppm 時對應之流量約為每秒 110 立方公尺，再查詢水位流量率定曲線確認對應之河道水位為標高 189.8 公尺。若未能即時取得關山九號橋處之含砂濃度資料，可直接依關山九號橋的水位是否高於標高 189.8 公尺來研判可啟動防淤隧道執行調節性放水時機。依各項評析，決策是否開啟防淤隧道之標準作業流程研擬如圖 4。

表 3　甲仙堰可引水量相關計算資訊之展示案例

過去 72 小時累積降雨量 (mm)	46
預測未來 72 小時集水區累積雨量 (mm)	132
目前河川流量 (m^3/s)	7.19
未來 3 日預估甲仙堰入流體積 (萬 m^3)	802
預估未來 7 日流量低於 100 m^3/s 後之可引水量 (萬立方公尺) (上述可引水量已扣除甲仙堰對下游之保留放水量)：(萬 m^3) sum{min [max (甲仙堰入流-下游保留水量,0), 30 m^3/s]}	428
預估未來 7 日不考慮甲仙堰保留放水下之可引水量 (萬 m^3)：sum{min [甲仙堰入流, 30 m^3/s]}	1,149

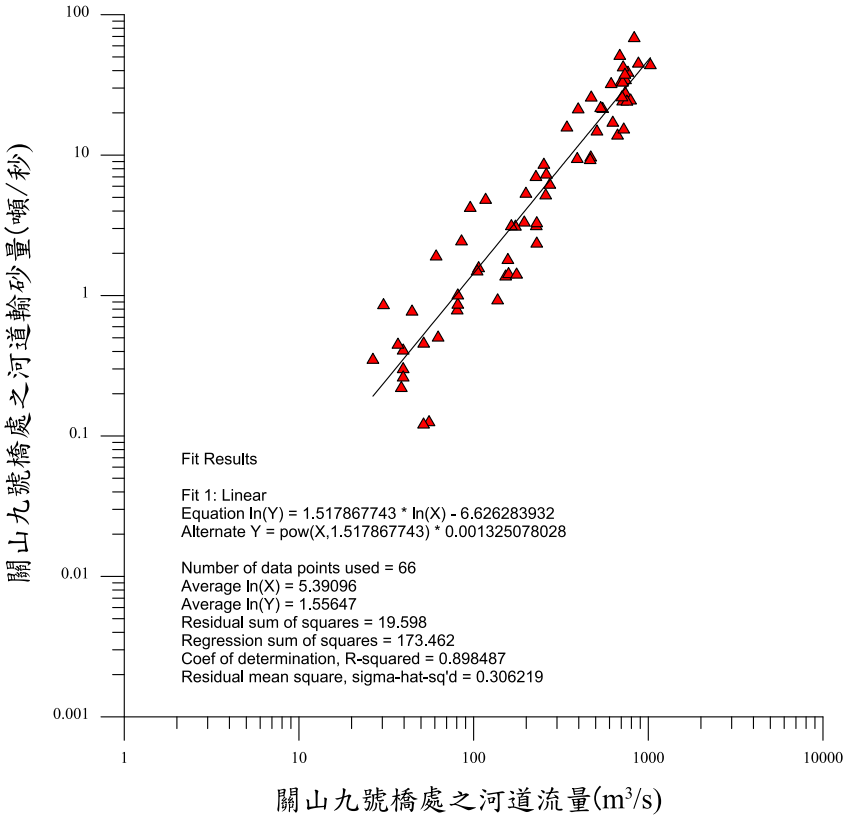


圖 3　關山九號橋流量與含砂濃度之關係

airiti

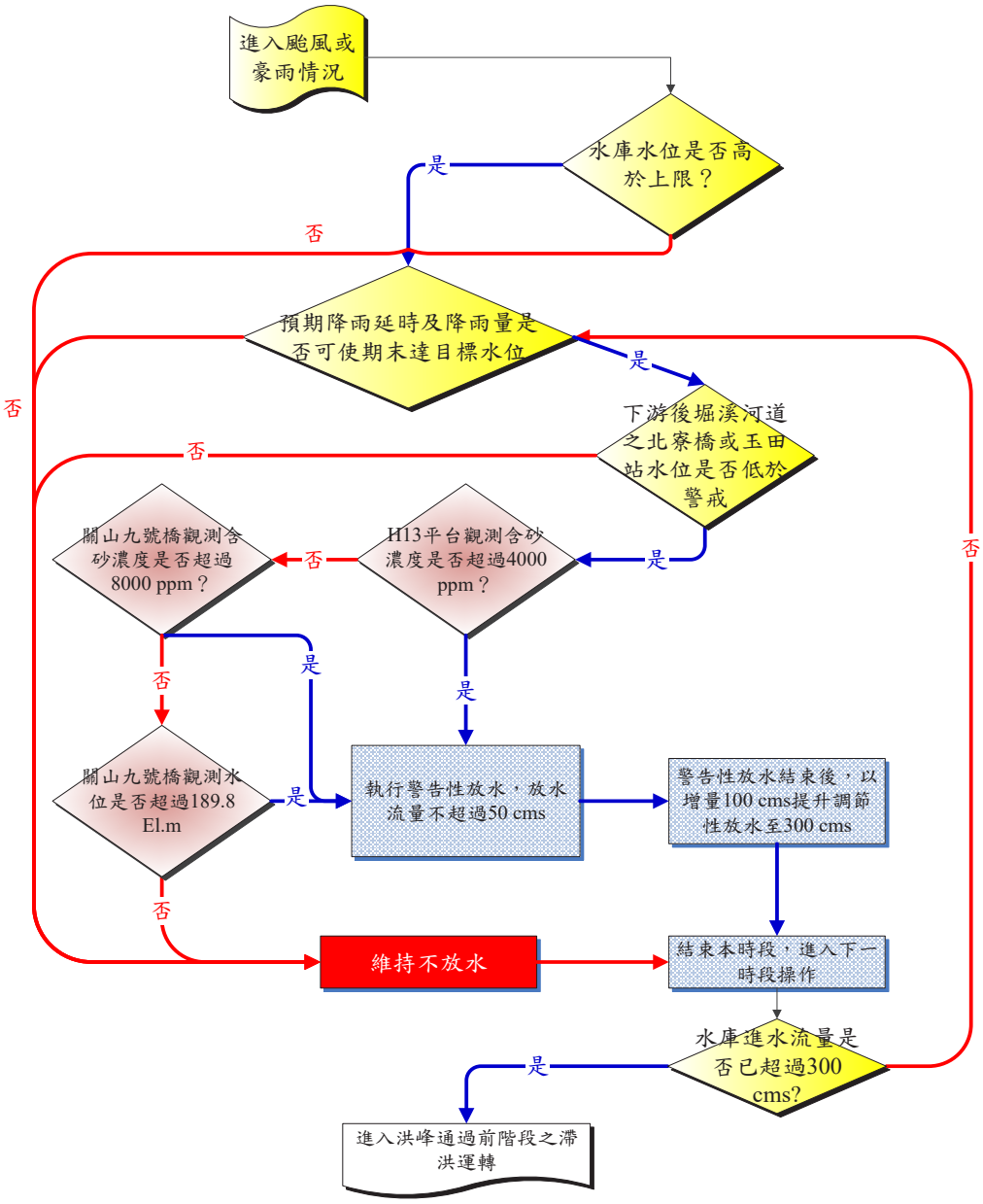


圖 4　防淤隧道啟動放水標準作業程序

2.5 水庫內泥砂運移特性與防淤隧道入口泥砂濃度預估

運用美國墾務局之 2DLAM 模式 (Lai *et al.*, 2015)，建置南化水庫二維異重流模式，參考興建防淤隧道前所進行水工模型試驗的卡玫基颱風、25 年重現期洪水案例的觀測濃度 (南區水資源分署，2014) 及民國 110 年盧碧颱風時期實際運轉紀錄與觀測濃度資料進行檢定驗證。其次，預先利用數值模式產生在大、中、小洪水 (蘇迪勒、盧碧、0620 豪雨事件)，高、中、低起始水位 (180、177、175 El.m) 與四種不同運轉放水情境 (自由溢流、以排砂為主、以沖淤為主、以減洪為主) 下的水庫入流、入砂、放水、水位與泥沙濃度變化過程。產出足夠數量及多樣性之樣本後，再運用機器學習法中的 XGBoost 模式 (Chen and Guestrin, 2016) 擬和前述各項氣象、水文、入砂與運轉特性對 H13 浮台、防淤隧道入口及溢洪道處等庫區內不同控制點處泥沙濃度間的非線性關係。XGBoost 輸出入項如下：

1. 輸出項 (學習目標)：建立三組模型，分別輸出 H13 浮台、防淤隧道入口與溢洪道處之小時泥砂濃度資料。

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

2. 輸入項目 (影響輸出項之各項自變數因子)：與輸出之濃度資料同小時或前 6 小時之 (1) 關山九號橋上游子集水區之降雨量、(2) 關山九號橋下游子集水區之降雨量、(3) 估計之關山橋河道流量、(4) 南化水庫總入流量、(5) 關山九號橋流量之含砂濃度、(6) 水庫水位、(7) 溢洪道自由溢流量、(8) 防淤隧道放水量等多項輸入特徵。

2.6 水庫運轉策略優化

水庫防洪運轉基本理念在於達成安全、減洪與蓄水利用等主要目標，合法平順釋放必要之洩放水量，並運用此必要洩水量進行水力排砂或沖淤，故自水庫洩放之每單位水量均有涉及排砂或沖淤之價值，而為最大化此諸價值，則水庫亦即需要攔蓄更充足洪水，使具有排砂條件時可以延長放水延時或增加放水流量 (Chou an Wu, 2013; Chou and Wu, 2015)。基於此理念開發水庫運轉優選模式，並區分為 1.以「減洪」為主、2.以「沖淤」為主及 3.以「排砂」為主等三類目標函數，供決策者視運轉當下之需求擇用。優選模式基於動態規劃法 (Bellman, 1957)，因應狀態與決策需要整數離散化的需求，在進行動態規劃優選分析前，先將南化水庫之入流量歷線以每秒 50 立方公尺為單位離散化。令分析即時時間點為 t_c，原觀測入流量減去供應標的水量後的歷線為 **I**，為維度為 (N-t_c+1) 之向量，其中 N 為預測流量終了時刻。離散化後的流量歷線為 $\mathbf{I^D}$，動態規劃即依 $\mathbf{I^D}$ 向量進行防洪運轉策略之優選評估。前述三類目標函數之數學命題如下：

1. 以減洪為主：目標函數為最小化最大之水庫放流+溢流量，如下

$$\begin{aligned} &Minimize \quad \max_{t}\,(\overline{O}_t^{C} + \overline{O}_t^{SP} + W_{S^+}\cdot S_t^{+}) \\ &t = t_c+1,\ t_c+2,\ \ldots, N \end{aligned} \quad \text{.....(13)}$$

式中，$\overline{O}_t^{C}$ 為第 t-1 至 t 時刻間的防淤隧道放水流量，$\overline{O}_t^{SP}$ 為第 t-1 至 t 時刻間的溢洪道自由溢流量，S_t^{+} 為第 t 時刻超過標高 180 公尺之水庫蓄水量 (如水位低於標高 180 公尺，則 S_t^{+} 為 0)，W_{S^+} 為懲罰蓄水超過標高 180 公尺之權重係數。式中最小化最大之水庫放水流量乙項反映了對減洪的要求，另限制水位儘量低於標高 180 公尺，可避免自由溢流的發生，使必要放水量儘量藉由防淤隧道放出，亦間接促進防淤。

動態規劃之狀態為水庫蓄水，以本場洪水事件可能最高之蓄水量為狀態上界，以即時蓄水 S_{t_c} 與使用者指定預降水位之較小者為下界；以 50 立方公尺/秒 *3600 秒 =18 萬立方公尺為蓄水區間，建立各時段之離散可能蓄水量。前述整場洪水演算中的可能狀態最大值，係依期初蓄水 S_{t_c}，假設防淤隧道放水流量為 0 之情境下，參考離散後的入流量向量 $\mathbf{I^D}$，演算水庫滯洪與溢洪道之自由溢流過程，最後篩選出此情境下之最高蓄水量作為狀態之最大值。分析起始狀態為經離散化後之 t_c 時刻即時觀測蓄水 S_{t_c}，終了狀態為使用者指定之目標期末蓄水，並往上、下彈性擴充五個狀態區間，共 10 個終了狀態變量，亦即期末蓄水處於目標蓄水上、下 180 萬立方公尺範圍內均認定為可行狀態區間。

動態規劃之決策為防淤隧道放水流量，自每秒 0～1000 立方公尺，以每秒 50 立方公尺為區間，建立各時段之離散可能防淤隧道放水量。故各階段於不同蓄水狀態間內共有 21 個可能放水流量決策。

採後向式動態規劃 (backward DP) 及非反轉形式 (non-invertbile) 之遞迴方程式，原因為非反轉形式在一個可能的起始狀態上僅對可能的決策數量進行窮算，因決策數量僅 21 個，小於可能狀態數量，可節省計算時間。遞迴方程式如下：

$$\begin{aligned} &V_t^i = \underset{\overline{O}_{t+1}^{C,j}}{Min}\ \max\left[\overline{O}_{t+1}^{C,j} + \overline{O}_{t+1}^{SP}(S_t^i, S_{t+1}^j) + W_{S^+}\cdot S_t^{+,i},\ V_{t+1}^j\right] \\ &t = t_c, t_c+1, \ldots, N-1 \end{aligned} \quad \text{.....(14)}$$

式中，V_t^i 為第 t 時段期初狀態所對應的後續最佳決策所產出的目標函數值，$\overline{O}_{t+1}^{C,j} + \overline{O}_{t+1}^{SP}(S_t^i, S_{t+1}^j) + W_{S^+}\cdot S_t^{+,i}$ 則為第 t～t+1 時段間決策所對應產出的目標函數值。而 $S_t^{+,i}$ 計算方式如下：

$$S_t^i = S^{SL} + S_t^{+,i} - S_t^{-,i} \quad \text{.....(15)}$$

式中，S_t^i 為第 t 時刻第 i 狀態之蓄水量，S^{SL} 為標高 180 公尺對應之蓄水量，$S_t^{+,i}$ 與 $S_t^{-,i}$ 分別係超過或低於標高 180 公尺之蓄水量。第 (14) 式乃係基於第 t+1 時段的優選結果，對於第 t 時刻的逐個狀態進行窮算，最後歸納出在第 t 時刻各個狀態的對應最優策略與目標函數值，如此可再往後回溯 t-1、t-2、…與 t_c 時刻的最優策略，最後得出整體最佳操作策略。

進行遞迴計算時需確保所採用的決策符合各項限制條件。限制條件可區分為物理、法規與操作限制等。物理限制條件有關水庫之可蓄水範圍已於狀態變量中定義，另為防淤隧道放水流量應小於對應於蓄水的最大可放水量：

airiti

$$\overline{O}_{t+1}^{C,j} \le Cap(S_t^i, S_{t+1}^j) \quad \text{.....(16)}$$

式中，*Cap* 為反應蓄水與防淤隧道放水容量之率定曲線函數。法規限制包含：

(1) 調節性放水規定

$$\overline{O}_{t+1}^{C,j} + \overline{O}_{t+1}^{SP}(S_t^i, S_{t+1}^j) \le 300 \quad t = t_c, t_c+1, \ldots, \overrightarrow{t_{NDG}} \quad \text{.....(17)}$$

式中，$\overline{O}_{t+1}^{SP}(S_t^i, S_{t+1}^j)$ 為對應起始與終了蓄水 S_t^i, S_{t+1}^j 之溢洪道自由溢流量，$\overrightarrow{t_{NDG}}$ 為入流 $\mathbf{I_D}$ 超過下游河道無害流量每秒 300 立方公尺之前一時段。

(2) 最大放水流量限制

$$\overline{O}_{t+1}^{C,j} + \overline{O}_{t+1}^{SP}(S_t^i, S_{t+1}^j) \le I_t^{\max} \quad t = \overrightarrow{t_{NDG}}, \ldots, N-1 \quad \text{.....(18)}$$

(3) 最大放水增量限制

$$\overline{O}_{t+2}^{C,j,*} + \overline{O}_{t+2}^{SP}(S_{t+1}^{i,*}, S_{t+2}^{j,*}) - \left[\overline{O}_{t+1}^{C,j} + \overline{O}_{t+1}^{SP}(S_t^i, S_{t+1}^j)\right] \le \Delta I_t^{\max} \quad t = \overrightarrow{t_{NDG}}, \ldots, N-1 \quad \text{.....(19)}$$

式中，$I_t^{\max}$ 與 $\Delta I_t^{\max}$ 分別為至 t 時刻時流量歷線 $\mathbf{I_D}$ 中的最大入流量與最大逐時入流增加量。

操作限制則為：

(1) 放水平滑

若後向式遞迴求解過程中，在 *t* 時刻後的時段間防淤隧道已經完成一次開啟與關閉，則於 *t* 時刻往前求解過程中維持防淤隧道放水流量 $\overline{O}_t^C$ 等於 0。

$$\overline{O}_{t+1}^{C,j} = 0 \quad 若 \overline{O}_{t+2}^{C,j,*} = 0，且 \overline{O}_{t+i}^{C,j,*} > 0, \quad i \ge 2 \quad \text{....(20)}$$

(2) 超高水位之懲罰

a. 若洪峰流量低於每秒 300 立方公尺：於洪峰通過後階段至終了時段前一小時，控制水位低於標高 180 公尺與目標期末水位之小者。

b. 若洪峰流量超過每秒 300 立方公尺：整場洪水過程至終了時段前一小時間均避免水位超過標高 180 公尺，以目標函數中之權重 W_{S^+} 懲罰蓄水超過標高 180 公尺之情況。超過或低於標高 180 公尺蓄水量之計算式如第 (15) 式。

運用動態規劃求解前述命題，稱為第一步驟優選分析，得出本場洪水可以調控的最小放水尖峰。其次，再進行第二步驟之動態規劃優選分析。此第二步驟命題之目標函數如下：

$$Minimize \quad W_{S^+} \cdot \sum_{t=t_c+1}^{N} S_t^+ + W_U \cdot \mathbf{U} + W_P \cdot \mathbf{P} \quad \text{.....(21)}$$

式中，W_U、W_P 分別係對控制單峰放水歷線以及控制放水不即時隨預報水情跳動之權重係數。其中，**U** 為儘量維持單峰之放水 (單調遞增與單調遞減) 之變量，其定義為：

$$\mathbf{U} = \sum_{t=t_c}^{N} \left| \overline{O}_{t+1}^{C} - \overline{O}_t^{C} \right| \quad \text{.....(22)}$$

故若防淤隧道放水不斷跳動變化，則 (22) 式將換產出較大之 **U** 值，無益於降低目標函數函數值，優選分析即會避免此種情況。(21) 式中，P 值計算如下：

$$\overline{O}_{t+1}^{C} - \overline{O}^{P} = O_{t+1}^{P+} - O_{t+1}^{P-} \quad t = t_c, \ldots, t_c+6 \quad \text{.....(23)}$$

$$\mathbf{P} = \sum_{t=t_c}^{t_c+6} O_{t+1}^{P+} + O_{t+1}^{P-} \quad \text{.....(24)}$$

(23) 式中 $\overline{O}^P$ 表示在即時時刻前一時刻之防淤隧道放水流量。O_{t+1}^{P+} 與 O_{t+1}^{P-} 分別表示了後續防淤隧道放水與 $\overline{O}^P$ 的差異量。(24) 式對即時時刻往後 6 小時加總放水流量與 $\overline{O}^P$ 的差異量，再於 (21) 式中施以懲罰係數，因此在 t_c~t_c+6 時段間會儘量維持與 $\overline{O}^P$ 相同數值的防淤隧道放水流量，其設計原因為 QPESUMS 的雷達預報雨量經常會逐時跳動，故為了避免水庫隨著即時預測的水情隨時變化放水，控制其僅有在必要時再變化放水流量。第二步驟的動態規劃優選分析考量第一步驟內的所有限制條件，再額外增加逐時採用的防淤隧道放水流量需小於第一步驟所產出的減洪最低放水尖峰流量要求。第二步驟求解得出考慮了減洪、蓄水、放水平順等諸多目標後的放水過程，再代入原始的水庫入流量序列 I 進行演算，即可求得水庫放水與蓄水變化過程。

2. 以沖淤為主

限制條件與「以減洪為主」相同，而第一階段優選之目標函數修正為：儘量降低放流量，但使其不低於沖淤有效之流量。依據現場操作經驗沖淤有效流量預設為每秒 300 立方公尺，故第一步驟之目標函數修正如下：

$$Minimize \quad \max_t (\overline{O}_t^{300+} + W_{S^+} \cdot S_t^+) \quad \text{.....(25)}$$
$$t = t_c+1, \ t_c+2, \ \ldots, N$$

$$\overline{O}_t^{C} + \overline{O}_t^{SP} - 300 = \overline{O}_t^{300+} - \overline{O}_t^{300-} \quad \text{.....(26)}$$

式中，$\overline{O}_t^{300+}$ 與 $\overline{O}_t^{300-}$ 分別為水庫總放水流量超出或不及每秒 300 立方公尺之部分。「以沖淤為主」之第二步驟動態規劃命題分析亦與「減洪」命題相仿，僅於

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

(21) 式再增加一項最大化放水超過每秒 300 立方公尺之時數，使可以進行沖淤的時數最大化。

3. 以排砂為主

異於以減洪或沖淤為主，以排砂為主之命題直接進行第二步驟之優選。目標函數為基於第 (21) 式再增加乙項為最大化洪水過程中之防淤隧道及溢洪道的總排砂量，限制條件則與前述兩類優選情境相同。排砂量的估計區分為供機器學習模式訓練之初步版本，以及整合機器學習模式後之最終版本。初步版本為：運用分佈型水筒模式所演算之關山九號橋流量，代入泥砂濃度率定曲線估計入庫泥砂濃度，再依據歷年觀測經驗假設 H13 浮台之濃度與關山九號橋濃度之 0.5 倍、H13 浮台之泥砂濃度歷線較關山九號橋處往後平移 2 小時、以及防淤隧道排砂濃度為 H13 浮台濃度之 0.5 倍。因此估計得防淤隧道排砂濃度後，將其乘以放淤隧道放水流量，可求得排砂量。最終版本之排砂濃度估計為將各項觀測與預報之降雨、入流、入砂等資訊，配合動態規劃分析時採用之水位與防淤隧道放流量等狀態及決策條件，代入 2.5 小節所述之機器學習模式求得。

圖 5 分別展示了民國 110 年盧碧颱風時期之南化水庫實際運轉過程、以減洪、沖淤與排砂 (初步版本) 為主之優化操作過程。顯示：以減洪為主者儘量降低總放水流量、以沖淤為主儘量延長放水等於每秒 300 立方公尺時數、以排砂為主之放水則隨入砂情況機動調整，三者與實際運轉差異為均建議維持水庫水位低於標高 180 公尺，於期末再提昇蓄水達標。

2.7 相關執行成果介面建置

針對各決策分析事項開發網頁介面，包含水庫基本觀測資訊查詢及未來預報降雨量與水庫進水流量之

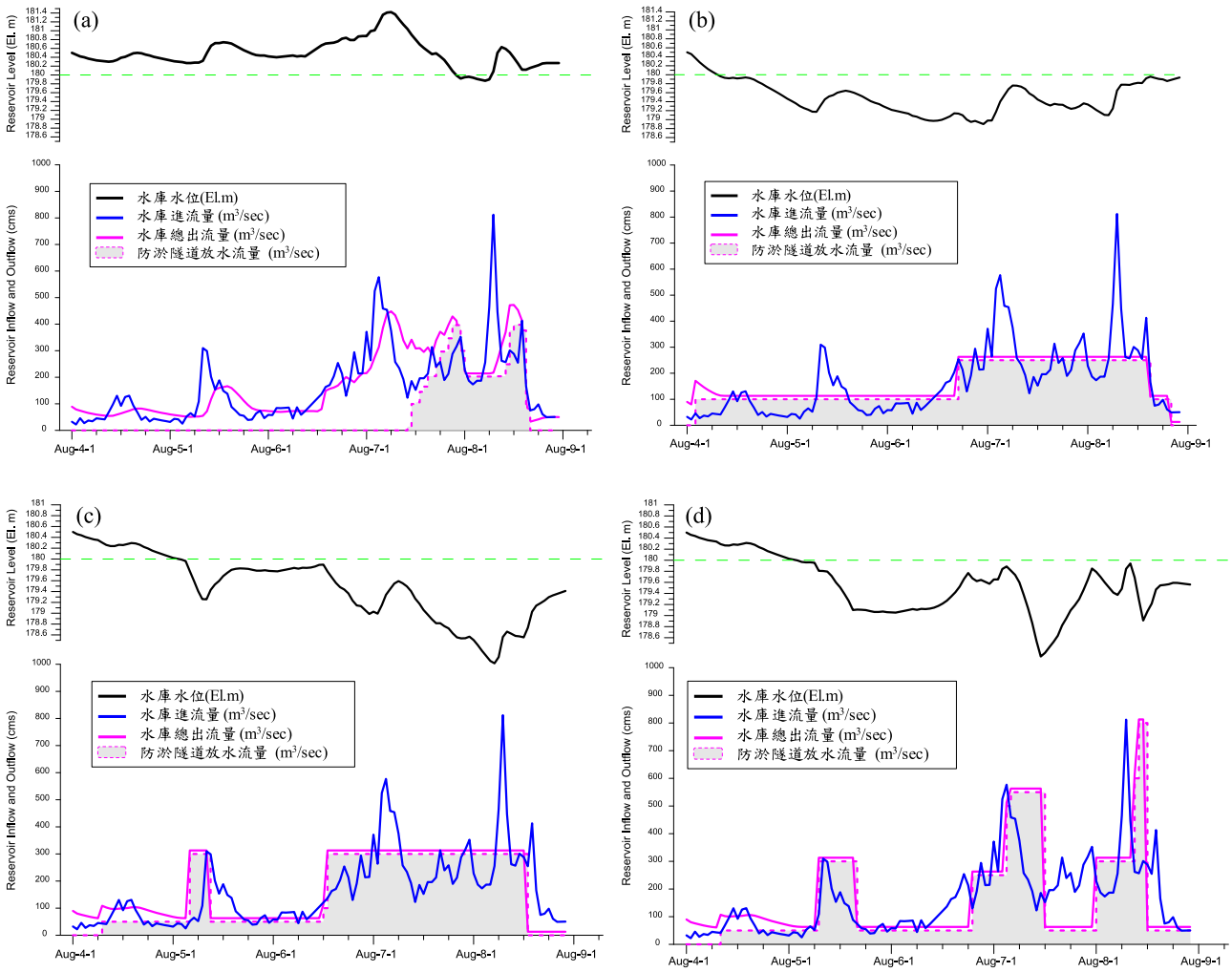


圖 5 盧碧颱風時期之實際運轉過程及優化策略：(a) 實際運轉過程、(b) 以減洪為主之優化運轉、(c) 以沖淤為主之優化策略、(d) 以排砂為主之優化策略

airiti

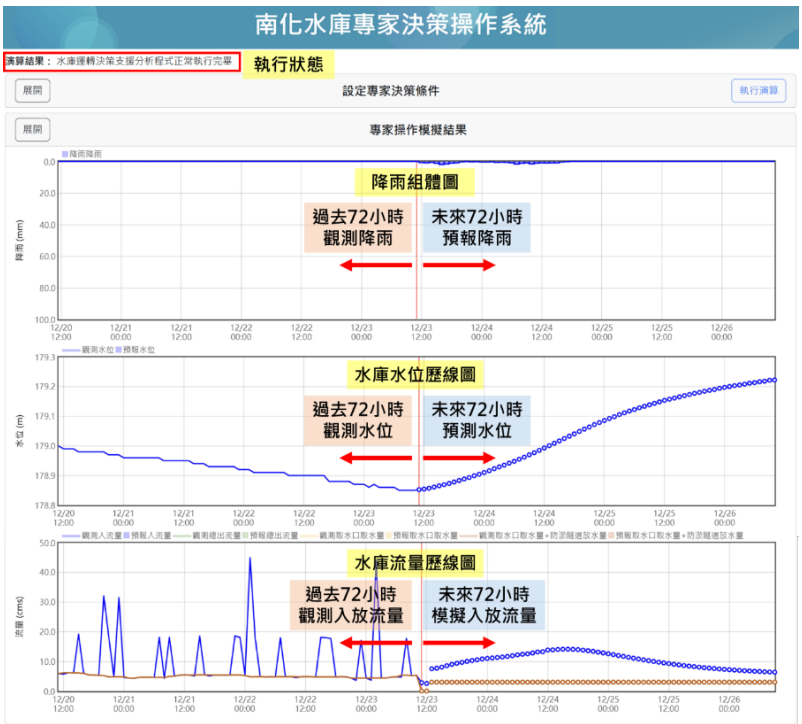
介面，以及整體防洪運轉決策支援資訊系統，於洪水過程中可自動、逐時提供未來降雨、逕流及運轉策略建議。另亦發展水庫專家決策操作系統，如圖 6，提供使用者於事件中依預測流量直接輸入擬放水量，並重新模擬演算，以瞭解水庫水位變化趨勢，提供水庫放水策略參考。

三、凱米颱風概要

凱米颱風初始為於民國 113 年 7 月 17 日在菲律賓雅浦島東北方海域生成之熱帶擾動。此擾動於 7 月 19 日晚上 8 時由氣象署將其升格為熱帶性低氣壓，後續再升格為凱米颱風，並從菲律賓東方海域向西北轉北北西移動，接近臺灣東方海域。7 月 22 日 23 時 30 分，氣象署發布海上颱風警報。23 日 11 時 30 分暴風圈接近臺灣東方海面，新北、宜蘭、花蓮及臺東地區受到威脅，並發布陸上颱風警報。25 日 0 時，颱風中心登陸宜蘭南澳，並於 4 時 20 分自桃園新屋出海。26 日 8 時 30 時，氣象署解除海上陸上颱風警報。圖 7 為凱米颱風移動路徑。

統計前述凱米颱風影響期間，自 7 月 24 日 1 時

(a)

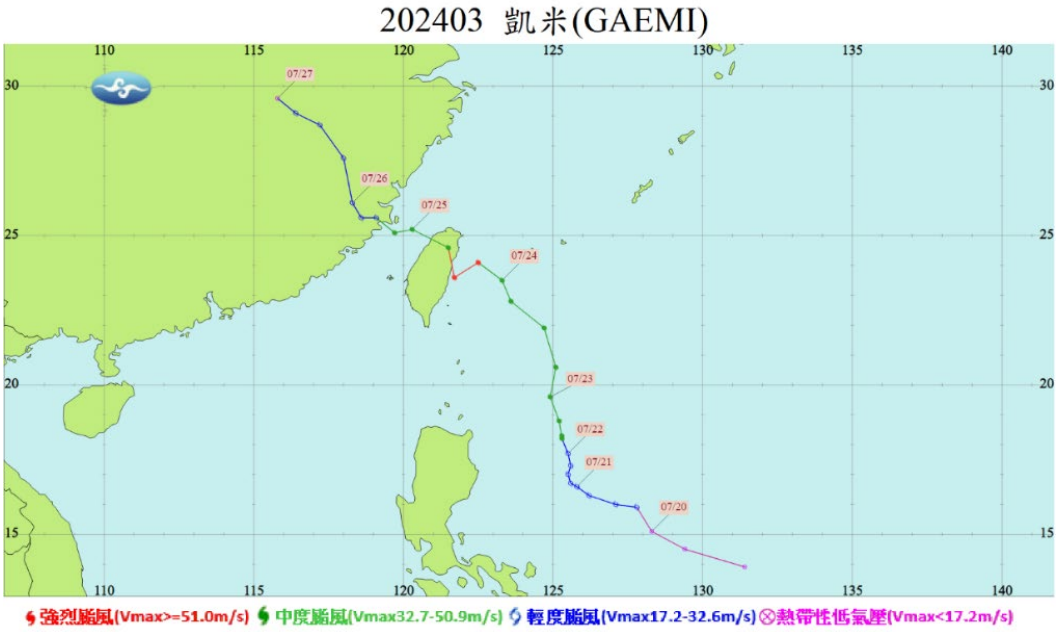


(b)

圖 6　水庫專家決策操作系統網頁：設定專家決策條件

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

至 7 月 28 日 24 時止，南化水庫集水區內之累計總降雨量為 1,355 公釐，為自莫拉克與卡枚基颱風過後降雨最顯著之事件。如圖 8 所示，南化水庫之蓄水量自 7 月 24 日 1 時之 8,651.01 萬立方公尺 (水位為標高 179.46 公尺)，至 7 月 28 日 24 時蓄水量為 8,426.76 萬立方公尺 (水位為標高 179.01 公尺)，蓄水變化量為-224.25 萬立方公尺。因凱米颱風帶來顯著降雨，故除溢洪道自由溢流量，水庫管理單位亦有開啟防淤隧道，另水庫供應南化淨水場及支援高雄之供水量，在 7 月 24 日 1 時至 7 月 28 日 24 時間溢流、防淤隧道放水、供應南化淨水場與支援高雄供水量等水量體積各為 5,992、10,557、302 與 211 萬立方公尺，合計為 17,061 萬立方公尺。



資料來源：中央氣象署，https://rdc28.cwa.gov.tw/TDB/public/typhoon_detail?typhoon_id=202403

圖 7　凱米颱風移動路徑

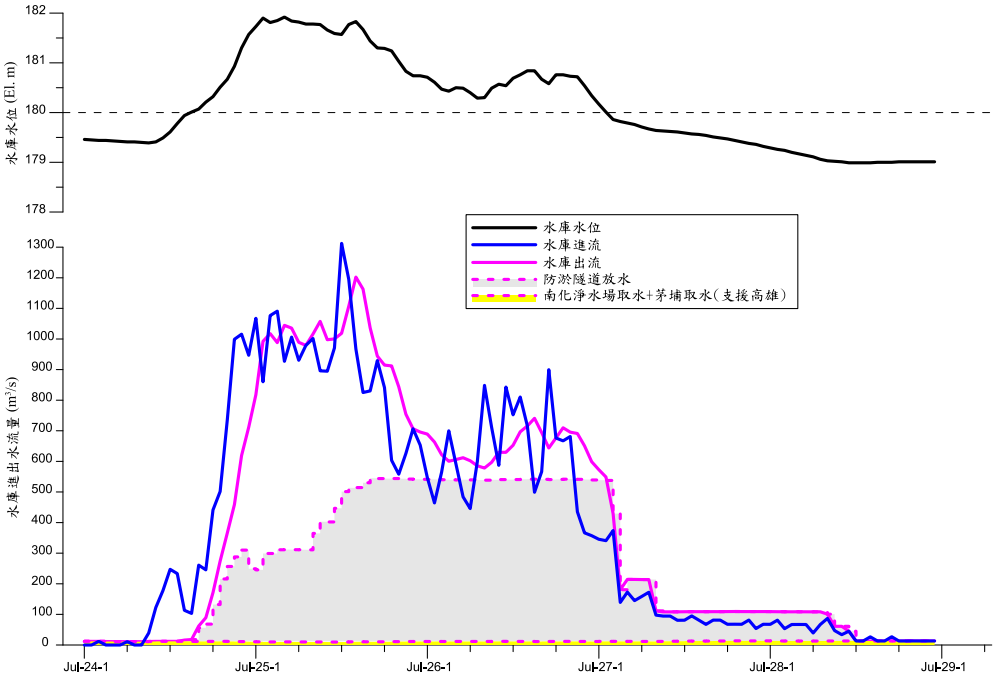


圖 8　凱米颱風事件期間南化水庫水位及操作歷線圖

airiti

四、降雨與逕流預報成效

凱米颱風事件期間，配合洪水期程正式提供水庫管理單位 6 次諮詢簡報，內容包含：各國颱風路徑研判、歷史相似路徑颱風之雨量、預估轄區水庫降雨堰壩預報資訊、降雨趨勢與未來逕流研判、及水庫防洪防淤運轉策略分析等。降雨預報部分，圖 9 為本事件期間各時間點未來 3 日預報降雨與實際發生累積雨量比對。圖中紅色線段為各時間點 QPESUMS+WRF 模式所建議之未來 3 日降雨量，黑色圓圈為提供情資時刻時所查詢之 QPESUMS+WRF 模式預報雨量，紫色星型與綠色十字架符號各為查詢 Windy 網頁所提供之歐洲 EC 與美國 GFS 模式預報雨量 (Windy.com, n.d.)，對比藍色線段則為各時間點上後續未來 3 日的實際總降雨量。顯示在洪水期初預報模式即有掌握未來降雨情勢，研判降雨會超過 1,000 公釐，隨後洪水期間降雨雖略有低估，但此種降雨尺度下仍無礙於開啟防淤隧道執行放水與排砂之決策。另 QPESUMS+WRF 模式所預報之總雨量相較於歐洲與美國模式均更貼近於實際情況。

除了 3 日總雨量外，另彙整逐 6 小時累積雨量之觀測與預測進行比對，如圖 10。顯示預報雨量雖略微低估，但仍與觀測雨量間呈現高度線性相關，誤差均方根為 38.5、效率係數值為 0.71。

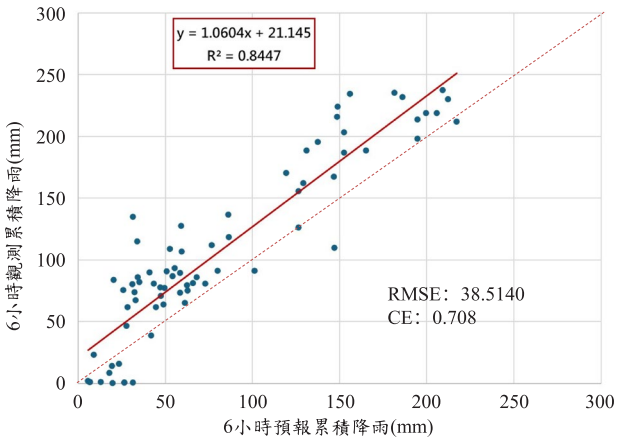


圖 10　凱米期間逐六小時累積雨量之觀測與預測比對分佈圖

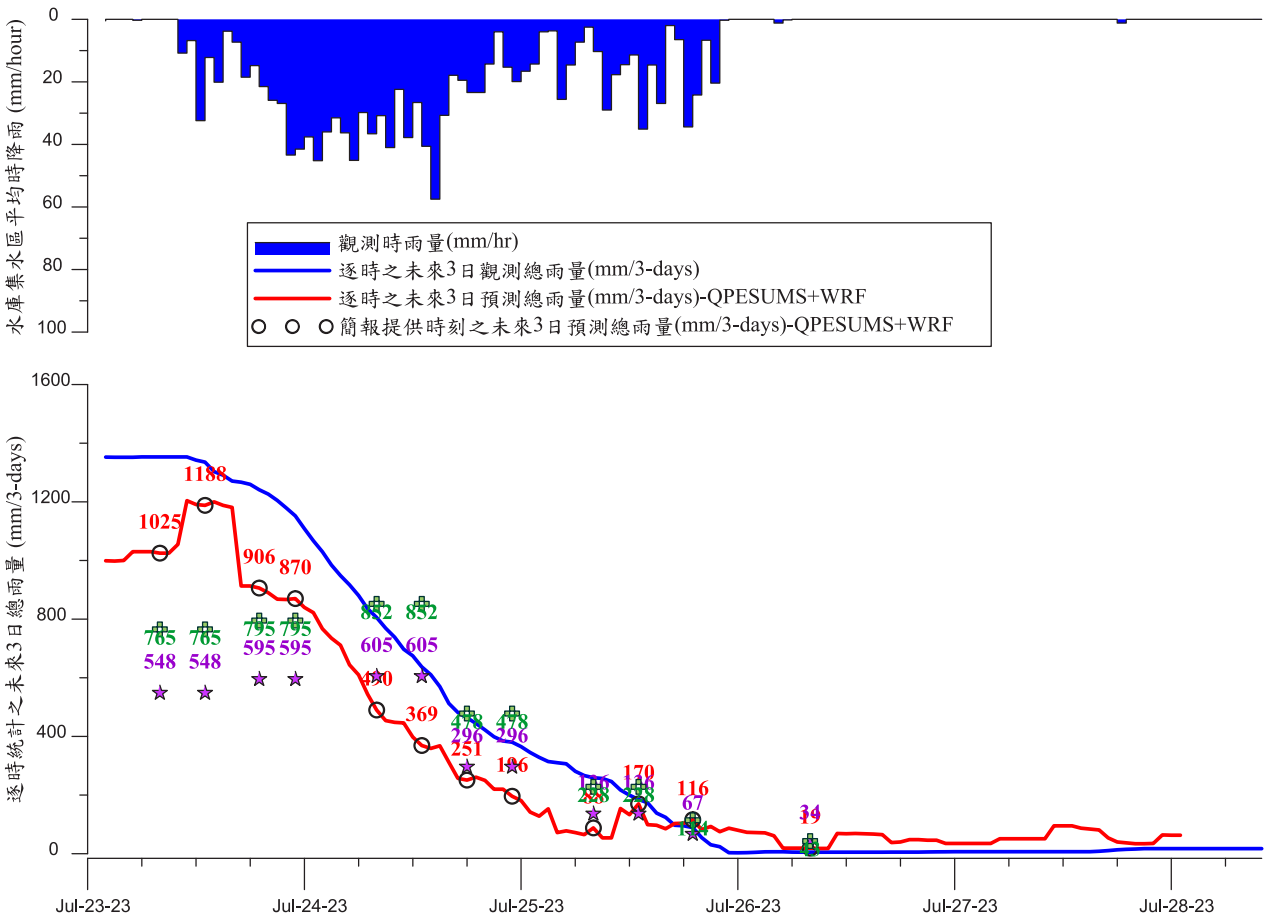


圖 9　凱米期間各時間點未來 3 日預報降雨與實際發生累積雨量比對

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

降雨量預報可靠之首因為颱風路徑自警報發佈後並無大幅變化。凱米颱風期間歷次比對建議之最類似歷史颱風均為民國 94 年之海棠颱風。海棠與凱米颱風同屬第三類侵臺路徑，歷史經驗顯示會造成雙峰型降雨與洪水。海棠颱風期間南化水庫集水區之總雨量與尖峰流量各為 1,173 公釐與 1,013 立方公尺/秒，與凱米颱風之 1,355 公釐與 1,312 立方公尺/秒均極為接近。圖 11 為海棠颱風期間南化水庫集水區之降雨逕流過程，除了符合第三類路徑呈現多峰洪水的型態，亦與凱米颱風之降雨逕流過程頗為相似。

凱米颱風事件期間，依南化水庫集水區內之各雨量站觀測雨量計算(7/24 01:00 ~ 7/28 23:00)，水庫集水區平均總降雨量為 1,355 公釐，圖 12 所示為事件期間之總雨量空間分佈圖，可知降雨中心集中在水庫上游東北側，高程越高降雨越形顯著，應是受到颱風環流及西南氣流所影響。

7/24 01:00 ~ 7/28 23:00 期間南化水庫觀測本流入流總體積為 16,843 萬立方公尺，依前述總雨量計算之逕流係數約 1.14。若以 7/23 日未開始降雨間的流量平均值每秒 3.5 立方公尺為事件發生前的集水區流出基流量，扣除基流量後修正直接逕流體積為 16,690 萬立方公尺，修正逕流係數為 1.13。圖 13 為事件期間之逐

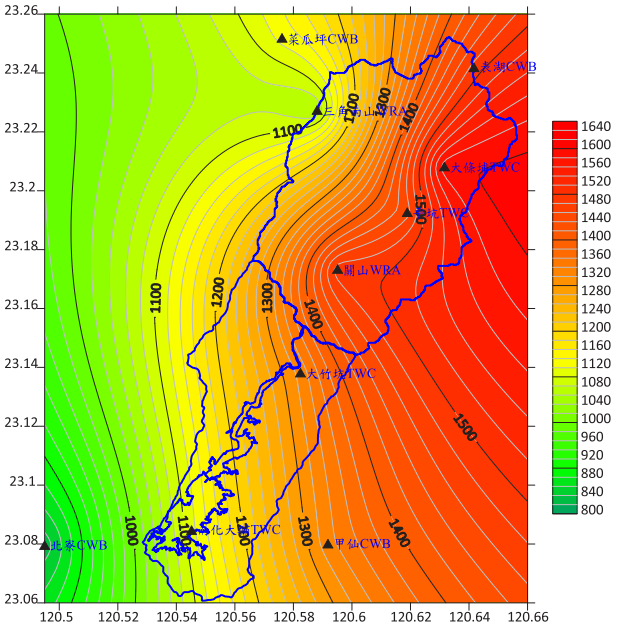


圖 12　凱米颱風期間南化水庫總雨量空間分佈圖

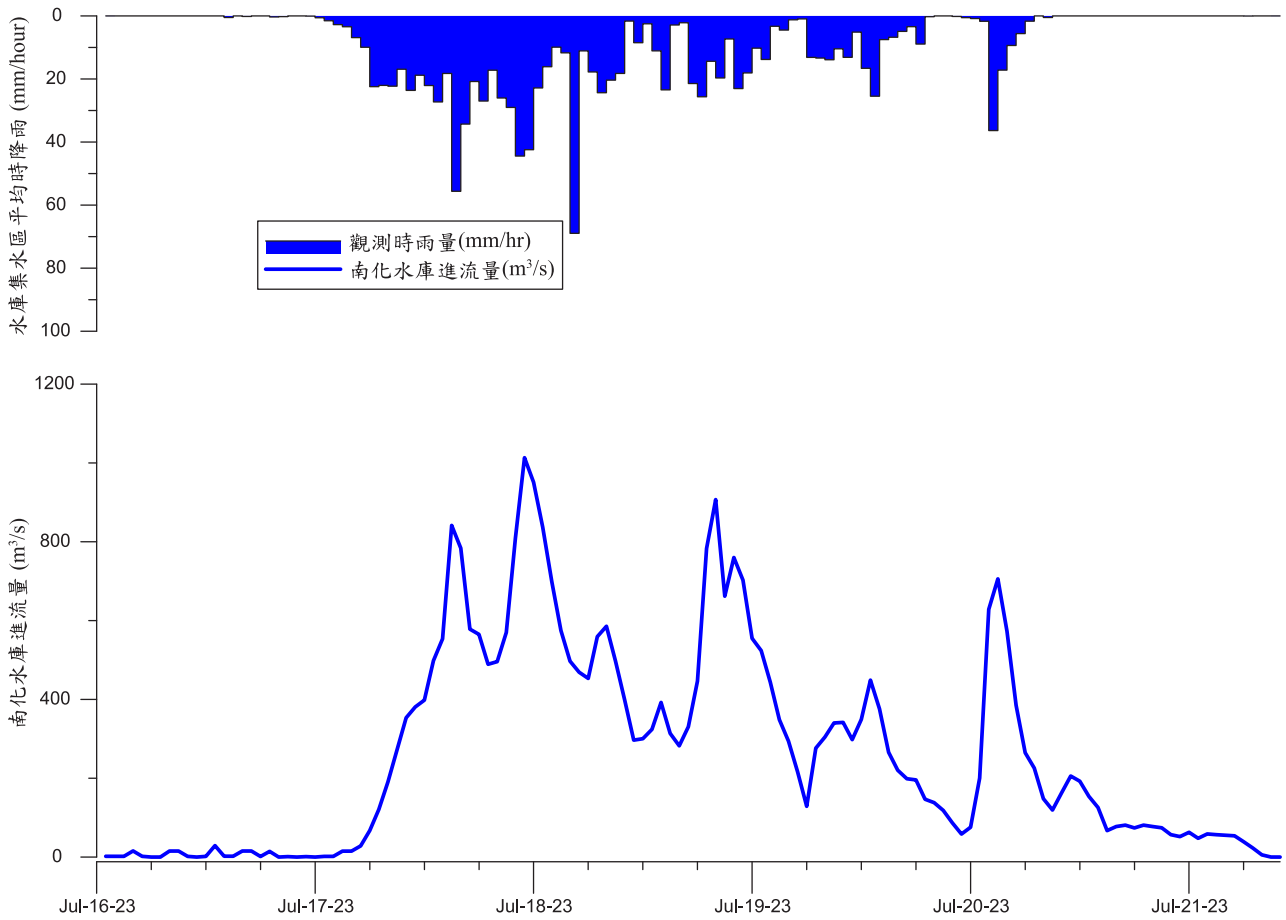


圖 11　2005 年海棠颱風期間之南化水庫集水區降雨逕流過程

airiti

時水庫觀測與模擬進水流量歷線圖，顯示若輸入觀測降雨下逕流模式模擬效率係數約有 0.935，觀測與模擬洪峰流量分別為 1,312 與 1,415 秒立方公尺，觀測與模擬之洪峰發生時間各為 7 月 25 日 13 時與 14 時，洪峰誤差及百分比分別為 103 秒立方公尺及 7.9%，模擬成效良好。

決策支援系統逐時自動提供逕流預報，實際正式提供予水庫管理單位簡報之時間計有 7 月 23 日 5 時、7 月 24 日 7 時、7 月 24 日 14 時、7 月 25 日 07 時、7 月 27 日 6 時等時刻，各項預測資料綜整於表 4。因降雨預報準確，故掌握洪水的量級與洪峰發生時間之可參考度亦高，如 7 月 24 日 14 時預估洪峰為每秒 1,329 立方公尺，預估發生時間為 7 月 25 日 11 時，如圖 14，實際洪峰流量與發生時間則為每秒 1,312 立方公尺與 7 月 25 日 13 時，顯示一日前之預估已相當準確。

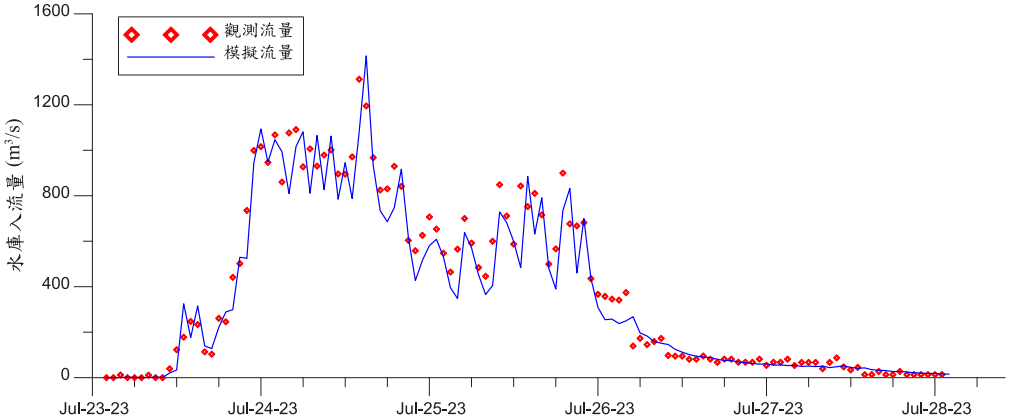


圖 13　凱米颱風期間南化水庫觀測進流與輸入全程觀測降雨下之模擬流量歷線

表 4　各即時時刻針對南化水庫集水區之逕流量預測結果

即時時刻	預測依據與成果	實際觀測
7 月 23 日 5 時	預估未來 3 日總降雨量：957 公釐， 預測未來洪峰：1030 cms (7/25 日 20 時)	未來 3 日總降雨量：1352 公釐 洪峰：1312 cms (7/25 日 13 時)
7 月 24 日 7 時	預估未來 3 日總降雨量：1025 公釐， 預測未來洪峰：870 cms (7/25 日 16 時)	未來 3 日總降雨量：1353 公釐 洪峰：1312 cms (7/25 日 13 時)
7 月 24 日 14 時	預估未來 3 日總降雨量：1188 公釐， 預測未來洪峰：1329 cms (7/25 日 11 時)	未來 3 日總降雨量：1291 公釐 洪峰：1312 cms (7/25 日 13 時)
7 月 25 日 7 時	預估未來 3 日總降雨量：544 公釐， 預測未來洪峰：1091 cms (7/25 日 4 時)	未來 3 日總降雨量：806 公釐 洪峰：1312 cms (7/25 日 13 時)
7 月 27 日 6 時	預估未來 3 日總降雨量：19 公釐， 預測未來洪峰：1312 cms(7/25 日 13 時)	未來 3 日總降雨量：5 公釐 洪峰：1312 cms (7/25 日 13 時)

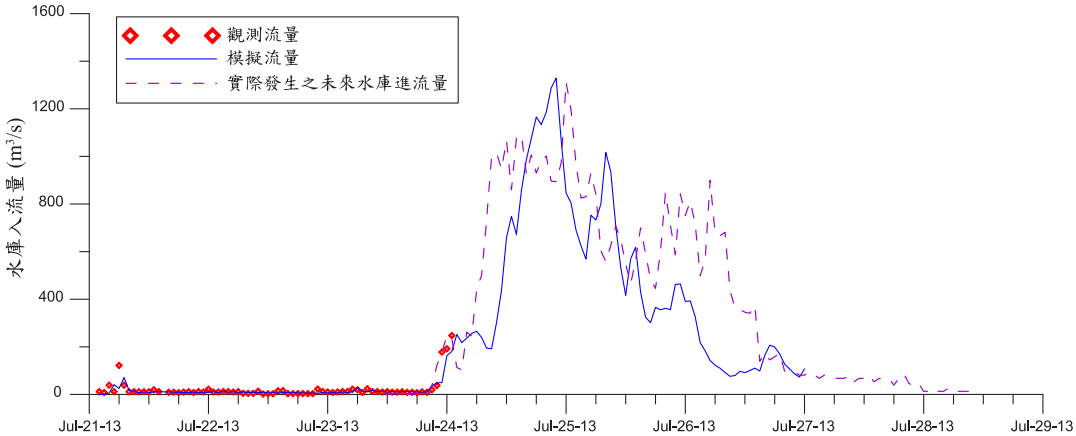


圖 14　凱米颱風 0724 14 時之水庫集水區降雨逕流模擬與預測結果

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

五、運轉決策支援過程

5.1 防淤隧道開啟時機檢核

因洪水發生前，南化水庫水位已提昇至接近標高179.5 公尺，因此於 7 月 24 日停止甲仙堰之越域引水，且 7 月 24 日早上依降雨與逕流之預報顯示水庫於午間 16 時即會發生自由溢流，因此建議於 7 月 24 日 16 時開啟防淤隧道。

南化水庫之泥砂監測團隊於關山九號橋站自 7 月 24 日 12 點 30 分開始觀測，初始觀測濃度即達 22,403 ppm，隨後泥砂濃度雖有遞減，但仍在建議之開啟防淤隧道門檻 8,000 ppm 以上，惟至當日午間 16 時，因山區山崩落石樹木倒塌嚴重，電桿傾倒，依安全考量觀測人員乃與關山村居民往嘉義大埔方向撤離，隨後關山九號橋處即無觀測濃度資料。

參考如圖 4 之排砂操作決策流程，凱米颱風事件期間的關山九號橋水位於 7 月 23 日下午 19 時起即超過標高 189.8 公尺，當下南化水庫總入流量為每秒 441.35 立方公尺，研判關山九號橋址處之濃度亦有達成圖 4 的條件。水庫管理單位綜合參考決策支援系統之即時預警以及事先歸納之標準作業程序進行操作，事後驗證開啟時機除可再提前以調控水位並促進排砂效率外，其餘之氣象、水情或泥砂等研判啟動防淤隧道之條件並無疑義。

5.2 防淤隧道放水流量調整

7 月 24 日 16 時開啟防淤隧道後，初始放水流量每秒 50 立方公尺，隨後逐漸提昇放水流量於當日 21 時至每秒 300 立方公尺。惟此時防淤隧道所測量之泥砂濃度均達 1.5 萬 ppm 以上，甚至超過 2 萬 ppm。為掌握排砂機會，7 月 24 日 22 時決策支援分析顯示可加大放流量，惟考量夜間增加放水量之風險，且當時水庫下游之北寮橋水位站觀測水位已超過一級警戒水位 (標高 74.7 公尺)，因此於 7/24 深夜至 7/25 凌晨間並未加大放流量。

至 7 月 25 日午後，壩前公共取水口各分層測量之濃度中，最底層標高 151 公尺處之測量濃度開始攀升超過 1 萬 ppm，對穩定臺南與高雄地區之供水形成壓力，為減緩取水口之濃度攀升，另此時水庫下游北寮橋之河道水位已開始消退，故增加防淤隧道之放流量，至 7 月 25 日 16 時提昇至每秒 550 立方公尺，期間水公司並啟用壩頂緊急取水設施，混合取水工取水量以維持穩定供應台南與支援高雄共 100 萬 CMD。

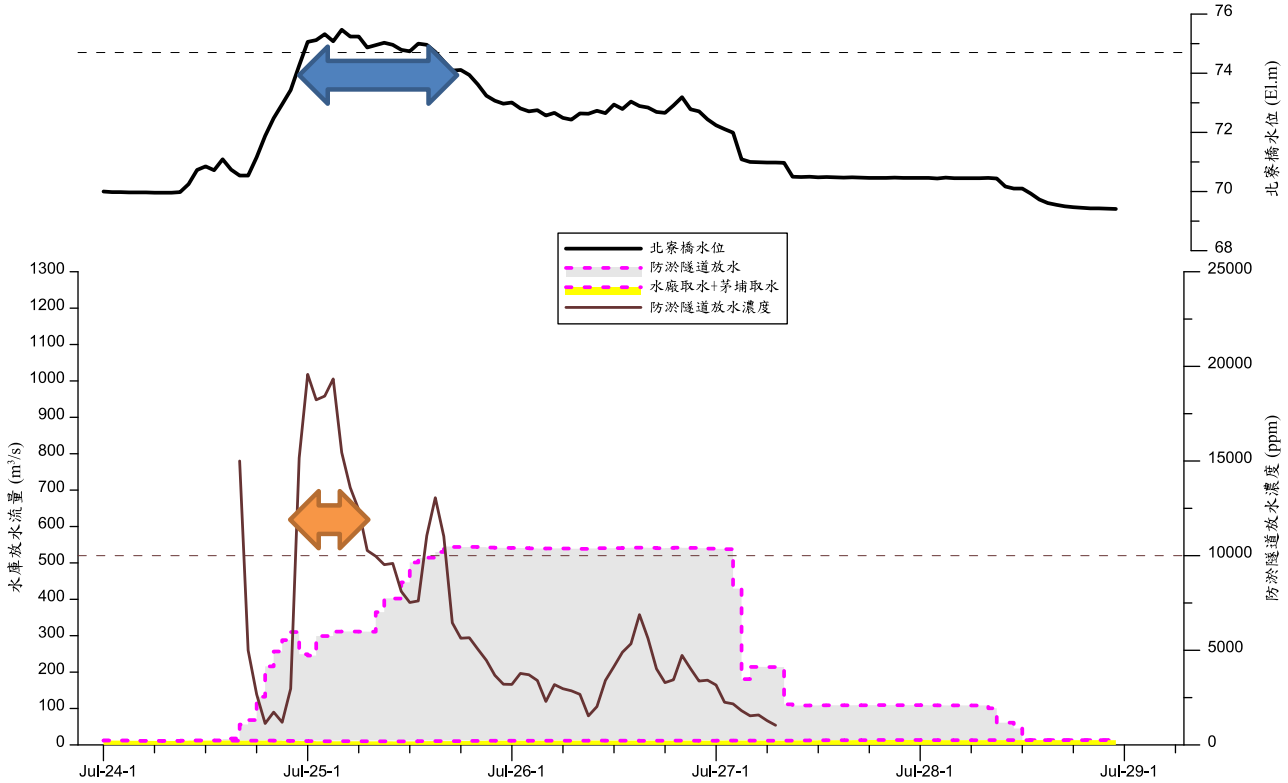


圖 15　凱米颱風期間之防淤隧道放流量與濃度及北寮橋水位

airiti

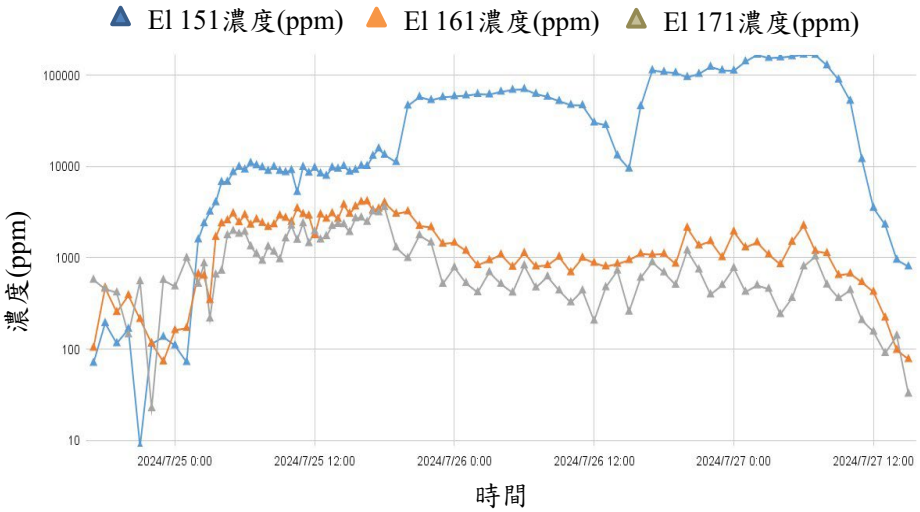


圖 16　凱米颱風期間之南化水庫大壩前公用取水口各分層觀測濃度

5.3 洪水退水段之操作建議

進入洪水退水段後，決策分析建議延長洪水末段小流量排砂時間，包含：(1) 維持每秒 100 立方公尺放水超過 24 小時，濃度約 1,000 ppm、(2) 期末南化水庫水位可調降至標高 179 公尺、(3) 8 月 5 日開始甲仙越引，預期 8/8 前重新蓄滿等。實際上水庫於 7 月 27 日 2 時開始調降放水流量，並於 7 月 28 日 12 時停止放水，期間以未超過每秒 100 立方公尺之流量放水超過 24 小時，停止放水時南化水庫水位為標高 178.99 公尺，後續亦如預期，於 8 月 5 日甲仙堰濁度降低得以開始全量引水，於 8 月 8 日後南化水庫均處於標高 179.6 公尺以上。

六、洪水期間泥砂入庫砂量與水庫防淤效益

凱米颱風期間因僅在洪水初段 (約一個下午) 於關山九號橋有觀測資料，如圖 17，監測團隊撤離後即缺乏入庫泥砂濃度觀測。對具有觀測濃度期間之資料取其平均值則濃度約 1.5 萬 ppm，乘以水庫總入庫流量體積 1.67 億立方公尺，初步推估至少有 293 萬立方公尺入庫砂量，而凱米颱風期間防淤隧道排砂量 68.18 萬立方公尺，推估排砂比 23.2%。此排砂成效與興建防淤隧道前針對卡玫基颱風案例所執行之水工模型試驗成果 (南區水資源分署, 2014) 排砂比 24.2%相去不遠，因此洪水事件結束後初期陳報之入庫砂量以 293 萬立方公尺為主。惟卡玫基颱風水工模型試驗之條件中水庫起始水位為標高 175 公尺、防淤隧道最大放流量為每秒 1,000 立方公尺，其排砂條件更優於凱米颱風的實際運轉情況，凱米颱風時期防淤隧道之排砂比理應較低，上述初步陳報之入砂量尚有檢討空間。

為更精細核對數值，將運用降雨逕流模式與關山九號橋水位流量率定曲線所推估之流量過程代入關山九號橋流量與含砂濃度之率定曲線。則代入關山九號橋水位轉換之河道流量所推估的入砂體積為 320 萬立方公尺、代入降雨逕流模式估計關山橋位置流量所推估的入砂體積為 277 萬立方公尺，與初步陳報之數字接近。惟關山九號橋流量與含砂濃度之率定曲線在高流量部分之樣本資料相當分散，此不確定性引發對於可能入砂上限之估計需求。

「南化二庫集水區潛在入庫砂源及排砂能力評估」(水利規劃分署，107 年) 計畫中曾參考各子集水區的土砂流出量 (由多期數值地形比對獲得)，建立與事件累積雨量的迴歸關係 (至 102 年康芮颱風)，如圖 18，依此迴歸關係與木瓜坑、竹子坑與平坑等子集水區邊界範圍後，代入各子集水區總雨量估計值來推估集水區產砂。另考慮莫拉克颱風過後之水土保持作為，將集水區產砂後的遞移率設定為 0.6，則估計入砂量約為 650 萬立方公尺。事後參考 113 年南化水庫的淤積測量成果，於 113 年間水庫淤積量約為 397 萬立方公尺，而 113 年全年度抽泥為 130 萬立方公尺，水力排砂量加計防淤隧道與溢洪道則約有 70 萬立方公尺，以此比對前述以集水區產砂觀點估計之水庫入砂體積應較符合實際情況。

統計 7 月 24 日 17 時後之防淤隧道放水排砂濃度，最高濃度值為 19,700 ppm，發生於 7 月 25 日 1 時

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

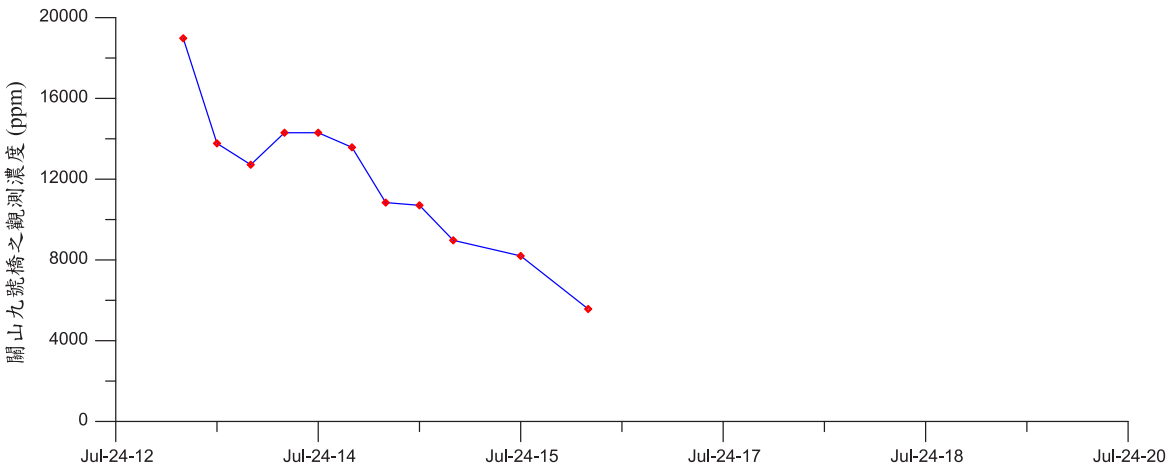


圖 17　凱米颱風期間之關山九號橋觀測濃度資料

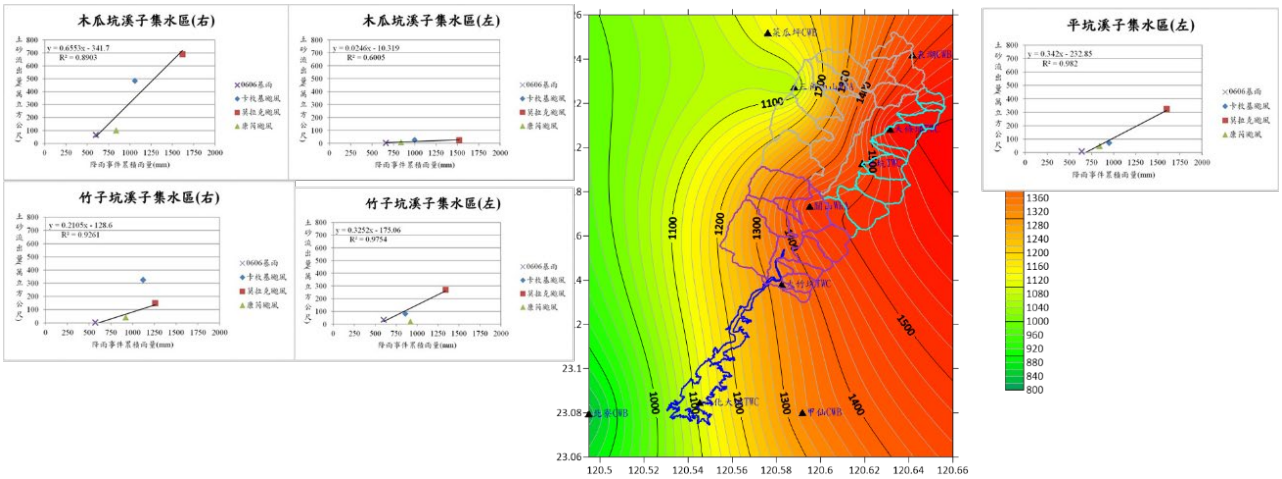


圖 18　南化水庫不同子集水區之降雨與產砂迴歸關係

30 分，溢洪道最高濃度值為 2,204 ppm，發生於 7 月 25 日 11 時。統計防淤隧道與溢洪道之排砂體積各為 68.2 與 5.5 萬立方公尺，為防淤隧道完工後排砂量最顯著之操作成果。此外，估計下游河道堆置泥砂之沖淤率超過 95%，總沖淤量為 183 萬立方公尺，合計排砂與沖淤之總防淤量達 256.7 萬立方公尺。

此外，由圖 16 可知雖然取水口處標高 151 公尺處之濃度有所攀升，但標高 161 公尺處之濃度並無顯著攀升，應為防淤隧道放水以減少高濁度蓄水於壩前蔓延之效果。

七、後續精進作為建議

圖 19 所示為凱米颱風期間之 H13 浮台與防淤隧道放水之觀測濃度，顯示防淤隧道濃度在首波尖峰發生後，隨即有持續遞減趨勢；反之，H13 浮台所觀測泥砂長時間均維持在 2 萬 ppm 左右。此現象呼應前期操作經驗：1.水庫水位超過標高 180 公尺，致使壩前的自由溢流牽動含砂水流往下游大壩方向移動，2.水流經過 H13 浮台後庫區斷面開闊，致使泥砂濃度擴散及稀釋，3.防淤隧道並未全開，其壓力流流場影響範圍有限等。

運用決策支援系統的機器學習模式推估 H13 浮台與防淤隧道之泥砂濃度所推估成果如圖 20，顯示可大致掌握泥砂變化趨勢，若以此機器學習模式所推估濃度乘以防淤隧道放水量來估計排砂量，並以最大化排砂量為目標，運用決策優選模型分析凱米颱風時期的最佳運轉策略，成果如圖 21，其建議防淤隧道即早以設定的最大放水上限每秒 600 立方公尺放水，在洪水來臨前維持水位低於標高 180 公尺，則評估防淤隧道排砂量可以自實際操作之 68.18 萬立方公尺再提昇至 88.64 萬立方公尺，此亦驗證洪水前維持低水位對排砂更有幫助。

airiti

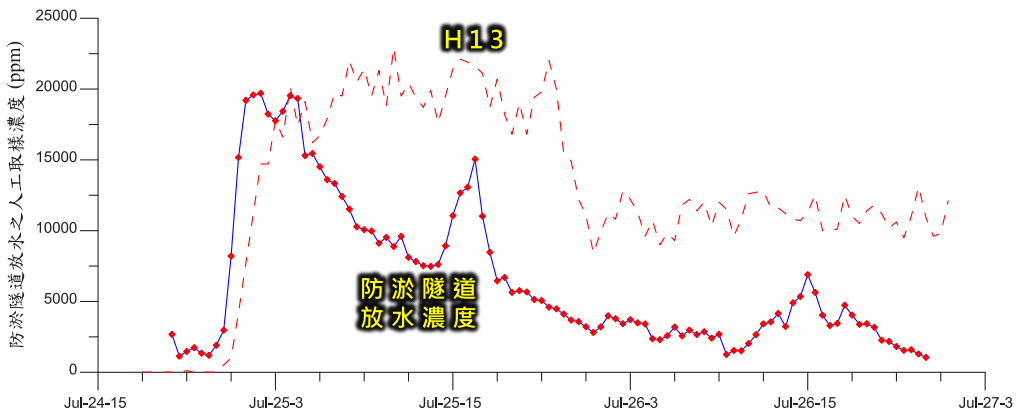


圖 19　凱米颱風期間之 H13 浮台與防淤隧道放水之觀測濃度

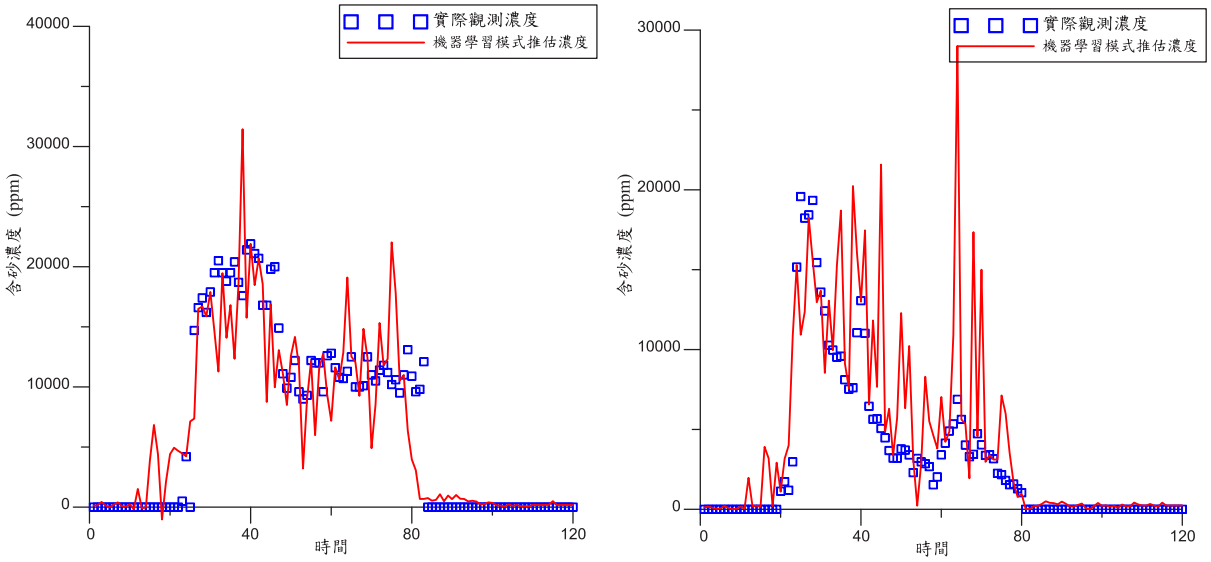


圖 20　機器學習模式推估之 H13 浮台與防淤隧道之含砂濃度

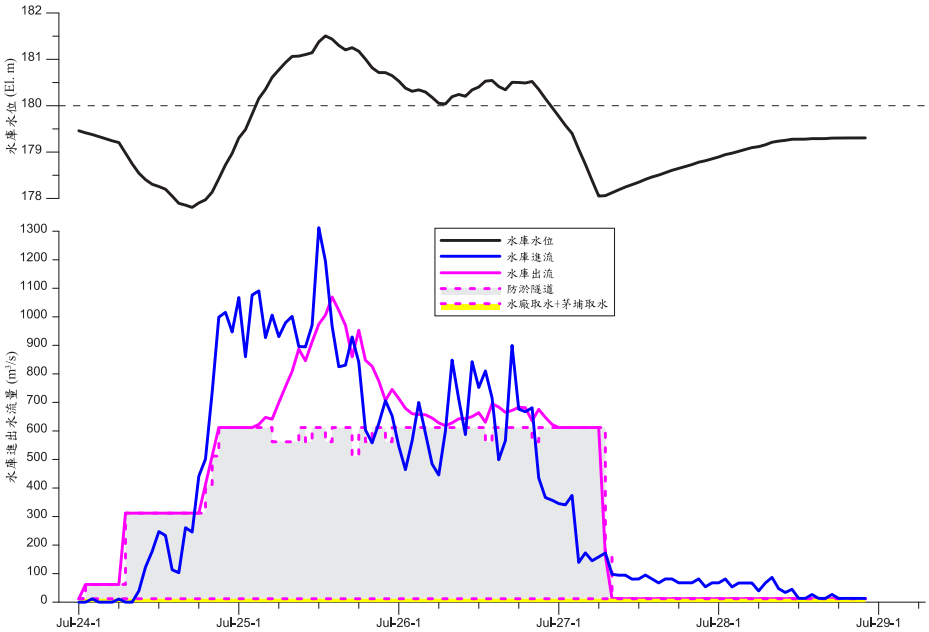


圖 21　結合機器學習與運轉優選之建議最大化排砂量放水策略

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 71, NO. 3, SEPTEMBER 2025
DOI - 10.29974/JTAE.202509_71(3).0002

八、結論與建議

本文介紹南化水庫防洪及防淤運轉決策支援系統，其主要包含：類似路徑歷史颱風比對、水庫集水區降雨與逕流預報、入砂濃度及庫區主要控制點之含砂濃度預估、水庫運轉策略優化等功能。以民國 113 年發生之凱米颱風事件為案例，說明此系統應用於決策支援之成效。

水庫之水、砂綜合管理需要長期累積之觀測數據與運轉經驗，水庫運轉決策及入庫水砂之監測相關工作及研究應持續進行，以期可達成庫容永續及供水安全之終極目標，現階段建議後續可朝下述事項重點精進：

1. 入庫砂量與水庫集水區內的崩塌位置有關，崩塌分布除了集水區內的地質條件外，亦與強降雨空間分布有關。目前對於入庫砂量之估計僅倚賴河道流量與泥輸砂量之率定曲線，在高流量或濃度時期推估之不確定性較大，未來應持續深究集水區產砂與入庫泥砂間的關係，可以預先建立集水區產砂與運移之數值模式，依據歷年觀測資料進行數值模式之檢定驗證，再參考數值模式產出樣本建立機器學習模式，即時運轉時參考降雨預報，朝得以即時、定量估計水庫入砂量之目標精進。
2. 目前決策支援系統運用庫內的泥砂運移數值模擬模式，模擬諸多洪水情境後產出數值樣本，再運用機器學習演算法建立即時運轉時得以估計H13浮台或防淤隧道入口處之含砂濃度方法。相同方法可應用於下游河道沖淤模擬，建立得以定量估計水庫放水或溢流量對於下游河道不同暫置區沖淤成效之方法，最佳期能即時評估最佳之水庫排砂與沖淤之綜合策略。
3. 歷年顯著洪水事件期間均觀察到H13浮台觀測濃度高於防淤隧道實際排出濃度現象。為提昇排砂效率，建議後續可持續研究防淤隧道入口前之導流槽、囚砂潭甚至潛壩等人工輔助設施之增加排砂成效。

誌謝

本文為台灣自來水公司第六區管理處主辦「112-113 年南化水庫運轉決策支援及泥沙運移監測」計畫之衍生成果；撰文期間承蒙主辦單位、經濟部水利署南區水資源分署、第六河川分署等提供歷年相關執行成果與相關資料，特此致謝。

參考文獻

1. 水利規劃分署「南化二庫集水區潛在入庫砂源及排砂能力評估」，2018。
2. 台灣自來水公司第六區管理處，「南化水庫防洪防淤潛壩及空排排砂水工模型─擴充試驗」，2019。
3. 台灣自來水公司第六區管理處，「110－111 年南化水庫防洪防淤運轉決策支援系統建置及汛期諮詢服務」，2022a。
4. 台灣自來水公司第六區管理處，「109－111 年度南化水庫泥砂運移監測設施維護保養與全洪程觀測委託專業服務」，2022b。
5. 吳依芸，「應用時變性水筒預測逕流之探討」，碩士論文，1999。
6. 吳嘉文，「利用集水區水位記錄改善分佈型之探討」，碩士論文，2000。
7. 南區水資源分署，「南化水庫防淤隧道工程計畫-基本設計檢討及施工監造委託技術服務」，2014。
8. 南區水資源分署，「曾文南化聯通管工程計畫－基本設計報告」，2018。
9. 經濟部水利署，「111 年水情預警資訊服務精進及資料分析應用評估」，2022。
10. 邊孝倫，「水文的空間變異性對逕流模擬影響之探討」，碩士論文，1998。
11. Bellman, Richard, Dynamic Programming, Princeton University Press. Dover Paperback edition, ISBN 0-486-42809-5, 2003.
12. Chou, F.N.F., Wu, C.W., Expected Shortage Based Pre-release Strategy for Reservoir Flood Control. *J. Hydrol*. 497, pp.1-14, 2013.
13. Chou, F. N. F. and Wu, C. W., Stage-wise Optimizing Operating Rules for Flood Control in a Multi-purpose Reservoir, *J. Hydrol*., 521, pp.245-260, 2015.
14. Chen T, Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining [Internet]. New York, NY, USA: ACM; pp.785-94, 2016.
15. Lai, Y. G., Huang, J. C., & Wu, K. W., Reservoir Turbidity Current Modeling with a Two-dimensional Layer-averaged Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(12), 2015.
16. Kadoya, M., Tanakamaru, H., Real-time Flood Runoff Forecasting with Long- and Short-term Runoff Model.

airiti

Transactions of The Japanese Society of Irrigation, *Drainage and Reclamation Engineering*. 1995(177), pp.31-41, 1995.

17. Kalman, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering Vol. 82: pp.35-45, 1960.
18. Powell, M,. The BOBYQA Algorithm for Bound Constrained Optimization Without Derivatives. Technical report, DAMTP 2009/NA06. University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom, 2009.
19. Windy.com, Weather forecast & live maps, https://www.windy.com, accessed Feb. 18, 2025.

收稿日期：民國 114 年 05 月 19 日
修改日期：民國 114 年 06 月 02 日
接受日期：民國 114 年 06 月 09 日