

# 增進永續且降低未來缺水風險之 水庫最佳營運策略

國立成功大學水利及海洋工程學系  
碩士班研究生 教授  
王郁婷 蕭政宗  
Yu-Ting Wang Jenq-Tzong Shiau

## 摘要

台灣地區雖然年均降雨量豐沛，但雨量時空分布不均的特性，使得穩定水源的供應需仰賴水庫發揮蓄豐濟枯的功能。由於水庫未來入流量具高度不確定性，尋求能提供長期穩定供水且不增加未來營運缺水風險的水庫營運策略，是永續水資源營運急需思考的項目之一。本研究主要目的為研擬一能降低未來缺水風險並增進水庫永續經營的最佳營運策略，本研究包括二部分，推估未來不同前置時期缺水機率及水庫最佳化營運模式。本研究以歷史流量為基礎，透過模擬法計算各時期、未來前置時期及不同起始蓄水量的缺水機率，而水庫最佳供水策略以增進永續性為目標函數，其利用可靠度(reliability)、韌性(resilience)及脆弱度(vulnerability)來評估，另為兼顧降低營運期間未來缺水風險，本研究以理想解相似性偏好排序法(TOPSIS)求解最大化水庫永續性且最小化未來前置時期缺水風險之水庫最佳營運策略。本研究以位於台灣南部區域的南化水庫及甲仙攔河堰系統為例說明，以 63 年(1959–2021)的歷史流量為基礎所獲得的研究結果顯示最佳化營運策略較現況營運為佳，且增加決策變數的時變頻率會使營運效率更進一步改善，但增長前置時期會因入流量的不確定性而使營運效率略微降低。

關鍵詞：永續，規避風險，缺水機率，營運策略

## 一、前言

台灣地區雨量充沛，但降雨時空分布不均，再加上河川湍急，逕流迅速入海，導致水資源難以有效利用，需仰賴水庫發揮蓄豐濟枯的功能，以達到水資源的穩定供應。因此，建立適當且具彈性的水庫營運策略對降低缺水風險與提升供水穩定性至關重要。Hashimoto et al. (1982)提出以可靠度(reliability)、韌性(resilience)及脆弱度(vulnerability)來評估水資源系統營運。近年來許多學者將此三指標(簡稱 RRV)整合為永續性(sustainability)，例如 Sandoval-Solis et al. (2011)將 RRV 指標應用於水資源規劃與操作決策中，以協助管理者更有效辨識供水系統的穩定性與脆弱風險；Sadeghfam et al. (2025)

將 RRV 指標引入烏爾米亞湖流域以評估並優化操作規則，使水庫供水達到長期穩定與永續的目標。統計是常用於預測或推估水資源系統缺水風險的方法，例如 Wilchfort and Lund(1997)結合長期與短期二階段線性規劃模式，推導美國加州東灣區最小化缺水之管理措施；Yu et al. (2014)利用蒙地卡羅法、HBV 水文模式及水資源動態系統模式，預測中台灣地區多個流域未來三個月的缺水機率。本文研究目的為研擬一能降低未來缺水風險並增進水庫永續經營的最佳營運策略，本研究以南化水庫及甲仙攔河堰系統為例，以 63 年(1959–2021)的歷史流量為基礎推導最佳化水庫營運策略，並探討改變決策變數的時變頻率及前置時期的長度與個數對水庫營運效率的影響。

## 二、研究方法

### 2.1、未來不同前置時期缺水機率推估

未來不同前置時期(lead time)的缺水機率是所在時刻、蓄水量、前置時期長度及入流量的函數，本研究以歷史流量紀錄推估未來前置時期的缺水機率。為避免特定水庫營運策略影響未來不同前置時期缺水機率的推估，本研究以無限水機制的標準操作策略(Standard operating policy, SOP)來決定水庫供水量。首先將歷史流量系列切割為任意起始時刻( $t = 1, 2, \dots, 36$  旬)開始之一年長度的多個流量系列，而後以模擬法計算不同前置時期( $LT = 1, 2, \dots, 18$  旬)及不同水庫蓄水量( $S^t = 0, 1, 2 \dots, 91.45$  MCM)的總缺水量，發生缺水的年數( $TSH^t > 0$ )對上總年數即為缺水機率，如下所示：

$$WSP_{LT}^t(S^t) = \frac{\sum_{i=1}^N I_i(TSH^t)}{N} \quad (1)$$

其中  $WSP_{LT}^t(S^t)$  為  $t$  時刻、起始蓄水量  $S^t$  及未來  $LT$  前置時期之缺水機率； $N$  為總模擬年數； $I_i$  為一指標函數，定義如下：

$$I_i(TSH^t) = \begin{cases} 1, & \text{if } TSH^t > 0 \\ 0, & \text{if } TSH^t = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中  $TSH^t$  為未來前置時期內的總缺水量。

### 2.2、水庫營運永續性指標

本研究引用 Hashimoto et al. (1982)的可靠度(reliability)、韌性(resilience)及脆弱度(vulnerability)來評估水庫營運的優劣，分別定義如下：

$$Rel = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n I(SH^t)}{n}, Res = \frac{\sum_{t=1}^{n-1} I(SH^t, SH^{t+1})}{\sum_{t=1}^n I(SH^t)}, Vul = \frac{\max\{\sum_t^{t+L-1} SH^t\}}{\sum_t^{t+L-1} D^t} \quad (3)$$

其中  $I(SH^t)$  為指標函數； $n$  為總旬數； $L$  為連續缺水時刻。

本研究另依 Sandoval-Solis (2011)的定義將可靠度、韌性、脆弱度整合為永續性指標 (Sustainability Index,  $SI$ )，如下式所示：

$$SI = [Rel \times Res \times (1 - Vul)]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

### 2.3、多準則決策

本文研究目的為研擬一能降低未來缺水風險並增進水庫永續經營的最佳營運策略，缺水風險以演算期程內的最大缺水機率為目標函數，如下所示：

$$XSP_{LT} = \max\{WSP_{LT}^t(S^t)\} \quad (5)$$

其中  $XSP_{LT}$  為未來前置時期最大缺水機率。

本文所建立的水庫營運優選模式為最大化永續性指標且最小化最大缺水機率，由於永續性指標 ( $SI$ ) 與未來前置時期最大缺水機率 ( $XSP_{LT}$ ) 的變化範圍並不一致，因此本研究將各目標函數正規化，使其值介於 0 至 1 之間，而 0 與 1 分別為正規化後最佳及最差解，如下：

$$SI' = \frac{\max(SI) - SI}{\max(SI) - \min(SI)}, \quad XSP'_{LT} = \frac{XSP_{LT} - \min(XSP_{LT})}{\max(XSP_{LT}) - \min(XSP_{LT})} \quad (6)$$

其中  $SI'$  與  $XSP'_{LT}$  分別代表正規化後的目標函數。

本研究以理想解相似性偏好排序法 (TOPSIS) 求解此二目標函數之水庫最佳解：

$$D^+ = [\omega_1(SI' - 0)^2 + \omega_2(XSP'_{LT} - 0)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

$$D^- = [\omega_1(SI' - 1)^2 + \omega_2(XSP'_{LT} - 1)^2]^{\frac{1}{2}}$$

其中  $D^+$  及  $D^-$  代表距離正理想解與負理想解的距離； $\omega_i$  代表第  $i$  項目標函數之權重值，本文以  $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$  來決定最佳方案如下：

$$\max D^* = \max \frac{D^-}{D^+ + D^-} \quad (8)$$

其中  $D^*$  為最大相對距離，當  $D^*$  越接近代表最佳方案解。

## 三、研究地區與資料

南化水庫位於台南市南化區曾文溪支流後堀溪上，為台南與高雄地區提供民生及工業用水需求的單一目標水庫，於民國 82 年完工啟用，原設計總蓄水量為 158 百萬立方公尺，由於淤積嚴重，民國 107 年時總蓄水量僅剩餘 91.45 百萬立方公尺。另為提升南化水庫供水穩定性，於民國 88 年興建甲仙攔河堰，將旗山溪的多餘水量以越域引水方式引入南化水庫，最大輸水量為  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 。南化水庫年計畫需水量約為 181.6 百萬立方

公尺。水庫現行營運規線如圖 1 所示。

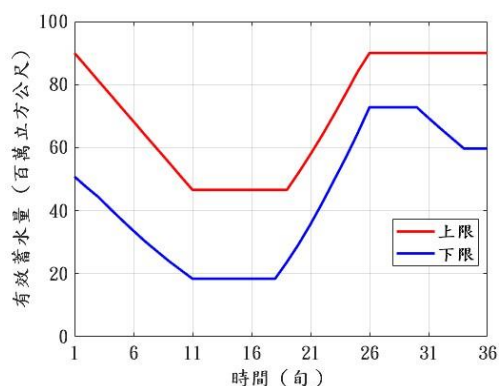


圖 1、南化水庫現行運用規線

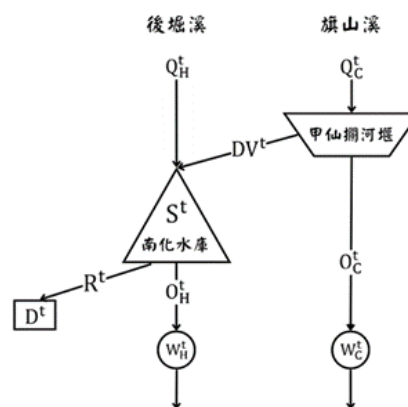


圖 2、南化水庫與甲仙攔河堰系統圖

南化水庫及甲仙攔河堰系統如圖 2 所示。甲仙攔河堰實際越域引水量由下式決定：

$$DV^t = \min\left\{\max\{Q_C^t - W_C^t, 0\}, DV_{max}^t, \max\{S_{max} - S^t + D^t + E^t - \max\{Q_H^t - W_H^t, 0\}, 0\}\right\} \quad (9)$$

其中  $DV^t$  為實際越域引水量、 $DV_{max}^t$  為最大可越域引水量、 $S_{max}$  為庫容量、 $S^t$  為南化水庫之蓄水量，本研究以旬為演算單位。

南化水庫之的水平衡方程式如下式所示：

$$S^{t+1} = S^t + (Q_H^t + DV^t - R^t - O_H^t) - E^t \quad (10)$$

水庫供水量可由水庫蓄水量在不同規線間的位置來決定，如下式所示：

$$R^t = \begin{cases} \alpha_H D^t, & URC^t \leq S^t \\ \alpha_M D^t, & LRC^t \leq S^t < URC^t \\ \alpha_L D^t, & LRC^t > S^t \end{cases} \quad (11)$$

其中  $URC^t$  及  $LRC^t$  分別代表  $t$  時刻上限與下限； $\alpha_H$ 、 $\alpha_M$ 、 $\alpha_L$  分別代表水庫蓄水量在不同區間之供水係數，其值介於 0 至 1 之間。水庫現況營運之供水係數為  $\alpha_H = \alpha_M = 1$ 、 $\alpha_L = 0.7$ 。優選模式之供水係數  $\alpha_H$  設定為 1，而  $\alpha_M$  及  $\alpha_L$  則設定為決策變數。

## 四、結果與討論

### 4.1、不同前置時期缺水機率

圖 3 所示為不同時刻、不同起始蓄水量，前置時期為 9 及 18 旬之缺水機率，由圖 3 可知枯水期之缺水風險較大，起始蓄水量需至某特定量才能降低缺水機率，豐水期因入流量較大，即使起始蓄水量較低，缺水機率亦不大。前置時期長度會影響缺水機率大小，若前置時期由枯水期延伸至豐水期，缺水機率會降低，反之，缺水機率會上升。

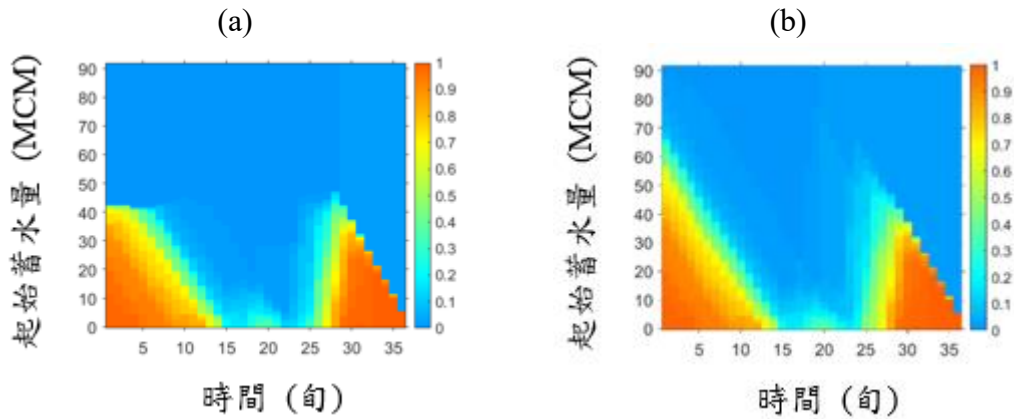


圖 3、南化水庫各時刻不同起始蓄水量之缺水機率，前置時期為(a)9 旬，(b)18 旬。

#### 4.2 現況營運與優選模式

本研究所建立的水庫營運優選模式之決策變數為 $\alpha_M$ 及 $\alpha_L$ ，本文探討決策變數在年、半年、季及月變化頻率對水庫營運的影響。另前置時期的個數及長度亦會影響水庫的營運，本文考慮前置時期的個數有 1 個及 2 個，而前置時期的長度為 3、6、9、12、15 及 18 旬。本文所建立之優選模式列於表 1，優選模式的演算成果將與現況營運(C)比較。

表 1、各優選模式目標函數代號

時變頻率	一個前置時期	兩個前置時期
年	$YLT_{l_1}$	$YLT_{l_1, l_2}$
半年	$SLT_{l_1}$	$SLT_{l_1, l_2}$
季	$QLT_{l_1}$	$QLT_{l_1, l_2}$
月	$MLT_{l_1}$	$MLT_{l_1, l_2}$

#### 4.3、單一前置時期優選模式探討

圖 4 顯示單一前置時期優選模式之目標函數隨前置時期長度的變化。結果顯示，前置時期越長，目標函數略降，例如 $YLT_3 = 0.670$ 降至 $YLT_9 = 0.667$ ，再降至 $YLT_{18} = 0.634$ ，主要原因是長前置時期流量不確定性增加，未來豐水無法補足當前缺水，因此過長的前置時期不利營運。相同前置時期長度時，增加決策變數變化頻率可顯著提升目標函數，例如 $YLT_3 = 0.670$ 增加至 $SLT_3 = 0.768$ 、 $QLT_3 = 0.774$ ，再增加至 $MLT_3 = 0.814$ ，顯示月變化優於季變化優於半年變化優於年變化。所有優選模式均優於現況營運，現況營運最佳目標函數僅為 0.370。單一前置時期的最佳優選模式為前置時期 3 旬之月變化優選模式 $MLT_3$ ，其目標函數值為 0.814。

#### 4.4、二前置時期優選模式分析

圖 5 顯示 2 個前置時期優選模式之目標函數隨前置時期組合的變化，結果與圖 4 類似：月變化優於季變化優於半年變化優於年變化模式，且均優於現況營運。不同組合中，

前置時期較長組合之目標函數較低，表示營運效率略差。在所有二前置時期優選模式中，以月變化且前置時期為 3 及 6 旬之目標函數  $MLT_{3,6} = 0.795$  為最高，略低於單一前置時期  $MLT_3 = 0.814$ ，但略高於  $MLT_6 = 0.790$ ，約介於二者中間。由此可知，考慮 2 個前置時期並未實質改善水庫營運。

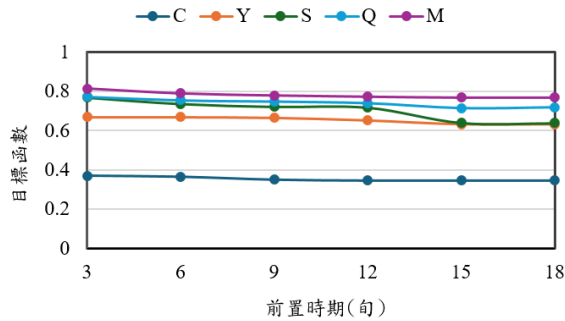


圖 4、一個前置時期優選模式之目標函數

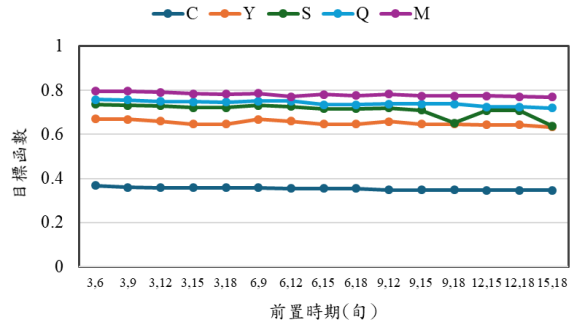


圖 5、兩個前置時期優選模式之目標函數

## 五、結論

本文旨在建立南化水庫增進營運永續且能降低未來缺水風險之最佳營運策略，單一或二前置時期優選模式均優於現況營運，決策變數變化頻率愈高，水庫營運效率愈好，而前置時期愈長會使水庫營運略微變差，因此單一及二前置時期最佳模式分別為  $MLT_3 = 0.814$  及  $MLT_{3,6} = 0.795$ ，增加前置時期個數並未實質改善水庫營運。

## 六、參考文獻

1. Hashimoto, T., Stedinger, J.R., Loucks, D.P., Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18(1), 14–20, 1982.
2. Sadeghfam, S., Shourian, M., Goharian, E., Introducing reservoir sustainability indexing to investigate reservoir operations and piloting it at the basin of Lake Urmia with sparse data. *Environmental and Sustainability Indicators* 25, 100577, 2025.
3. Sandoval-Solís, S., McKinney, D.C., Loucks, D.P., Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(5), 381–390, 2011.
4. Wilchfort, O., Lund, J. R., Shortage management modeling for urban water supply systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(4), 250–258, 1997.
5. Yu, P.-S., Yang, T.-C., Kuo, C.-M., Wang, Y.-T., A stochastic approach for seasonal water-shortage probability forecasting based on seasonal weather outlook, *Water Resources Management*, 28(12), 3905–3920, 2014.