

氣候變遷情境下南化水庫乾旱營運策略

Reservoir Operating Strategies during Droughts of Nanhua Reservoir under Climate Change Scenarios

國立成功大學水利及海洋工程學系
碩士班研究生 侯俞安
教授 蕭政宗
Yu-An Hou Jenq-Tzong Shiau

摘要

台灣南部典型豐枯不均的降雨特性，使得水庫的營運主要依賴夏季豐沛的雨量，為了確保下一個豐水季前有足夠的穩定供水，水庫有效的營運至關重要，特別是在乾旱時期。然而氣候變遷的影響可能改變水庫入流量的特性，進而使得先前建立的水庫營運策略不再適用，探討氣候變遷對水庫營運的影響是現階段水資源規劃與管理重要的議題之一。本文旨在探討氣候變遷情境下，不同水庫營運規線的設置對台灣南部水庫供水的影響，本文以台灣南部的南化水庫和甲仙堰作為研究對象，先利用大氣環流模式 (General Circulation Model, GCM) 所輸出的雨量資料以降雨—逕流模式轉換為受氣候變遷影響的流量資料，其次計算並比較目前南化水庫的規線與最佳化規線在乾旱時期的不同缺水特性。本文所考慮的氣候變遷情境有 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5，探討不同排放情境近未來 (2021—2040) 相對於基期 (1995—2014) 水庫營運的差異，未來可建立適應性的水庫管理策略來減輕台灣南部水資源短缺的風險。

關鍵詞：水庫營運，最佳化，氣候變遷

Abstract

Reservoirs in southern Taiwan heavily rely on abundant summer rainfall for stable water supply due to uneven rainfall properties. The effective utilization and allocation of these water resources in reservoirs are important, especially during drought periods. Impacts of climate change would alter streamflow characteristics and make the predefined reservoir operating rules are not suitable. This study aims to examine differences of reservoir performance for various rule curves in southern Taiwan under various emission scenarios. This study uses the Nanhua Reservoir and Jiashian weir as an example to illustrate the proposed methodology. Affected streamflow are first obtained from the General Circulation Model (GCM) using the rainfall-runoff model. Results of shortage characteristics are calculated based on various reservoir rule curves. This study explores impacts of climate change on reservoir performances of near future (2021—2040) relative to the baseline period (1995—2014). This study considers various

climate change scenarios including SSP2-4.5 and SSP5-8.5. Construction of adaptive reservoir operating rules to mitigate negative impacts of climate change remain a future task in water resources planning and management in Southern Taiwan.

Keywords: Reservoir operation, Optimization, Climate change

一、前言

台灣南部地區為典型降雨豐枯不均的地區，降雨集中在每年 5 到 10 月之間，使得該地區水庫的營運必須依賴夏季貯存豐沛的雨量供其他季節使用。因此，水庫在乾旱時期的營運成為供水穩定的關鍵因子。全球暖化所導致的氣候變遷會改變降雨型態，進而改變水庫入流量的特性，使得依過去定常性(stationary)流量紀錄所制定的現有營運策略將不再適用受氣候變遷影響的非定常性(nonstationary)流量。透過營運策略的調整將水庫規線因應流量的變化最佳化，有助於在水資源不足時維持穩定的供水，確保乾旱期間不至於完全無水可用，降低缺水帶來的負面影響。

傳統的水庫營運標準操作策略(standard operating policy, SOP)以滿足用水需求為目的，無限水機制，滿足當下需求不考慮未來入流量的急劇變化。Hashimoto 等(1982)指出標準營運策略雖然能使總缺水量降至最低，但在入流量不足的乾旱時期可能會依需求放水，進而造成未來的嚴重缺水情況。因此管理單位會在乾旱來臨前提前限水，乾旱來臨時才不會完全沒水可用。Georgakakos (2012) 採用線性規劃方法來分析水資源的供需變化，並探討多目標優化問題，特別是如何在變動的供需情況下有效分配水資源。與此同時，Heydari 等 (2015) 則利用多目標整數規劃來解決水庫操作問題，提供有效的工具來平衡多個目標，並為決策者提供多個可選的營運策略，提高水庫營運的靈活度。這種多目標優化方法允許決策者在不同情境下選擇最合適的營運策略，以滿足永續發展的目標。

隨著氣候變遷加劇，發生乾旱機率增加，豐枯期更為明顯，調整水庫營運方法變得更为重要。在水庫營運的研究中常結合水庫規線、供水係數及限水策略。大氣環流模式 (General Circulation Model, GCM) 所輸出的雨量資料透過降雨—逕流模式轉換為受氣候變遷影響的流量資料的方法，以模擬水庫的流量變化來評估氣候變遷對水資源的影響。Thoma 等(2021)運用聯合水庫運作的多目標優化情境來最大化整個流域的效益，還能因應氣候變遷帶來的不確定性及提高水資源的利用效率。Okkan 等(2023)利用適應性限水策略 (adaptive hedging policies) 來動態調整水庫營運的配水策略，降低氣候變遷帶來的乾旱風險。Brekke(2009)提出了在氣候變遷情境下，利用模擬的方式來評估水庫營運的風險。Raje 及 Mujumdar(2010)建立優化模式來調整最佳化規線，模式考慮不同的水文條件和需求，並基於不確定性分析進行營運策略的優化。Adeloye 及 Dau(2019) 運用動態規劃最佳化規線的方法，以適應不同的氣候情境，其所使用的目標函數為最小化缺水率平方和。Thomas 等(2021)根據模擬結果，設計和更新水庫的最佳化規線，確保在面對不確定的氣候條件時，水庫營運能夠有效地管理水資源，減少缺水風險。

本研究以南化水庫及甲仙攔河堰系統作為研究對象，取用基期(1995-2014)及近未來

(2014-2040)的受氣候變遷影響的雨量數據，並透過降雨—逕流模式將雨量轉為受氣候變遷影響的流量資料，以缺水率平方和決定最佳規線，並比較不同排放情境所得最佳規線的差異。

二、研究地區與使用資料

2.1 研究區域

本文以位於台灣南部地區的南化水庫與甲仙攔河堰作為研究對象。南化水庫於民國 82 年完工，位在台南市南化區的曾文溪支流後堀溪上，主要供應台南與高雄地區的民生用水，是一座單目標水庫。其集水面積約 108.5 平方公里，設計庫容為 158 百萬立方公 (MCM)，滿水位標高為 180 公尺。除了自身集水區的流量外，還包含旗山溪甲仙攔河堰的越域引水。甲仙攔河堰於民國 88 年完工，位於高屏溪支流旗山溪上，其集水面積約為 408 平方公里，引水主要配合南化水庫的需求，最大計畫引水量為每秒 30 立方公尺 (cms)。圖一為目前南化水庫現行規線。表 1 為南化水庫及甲仙堰各月分應保留水權量、計畫需水量、生態基流量及計畫越域引水量。由於南化水庫淤積嚴重，目前最大庫容為 89.49 百萬立方公尺(2022 測)。

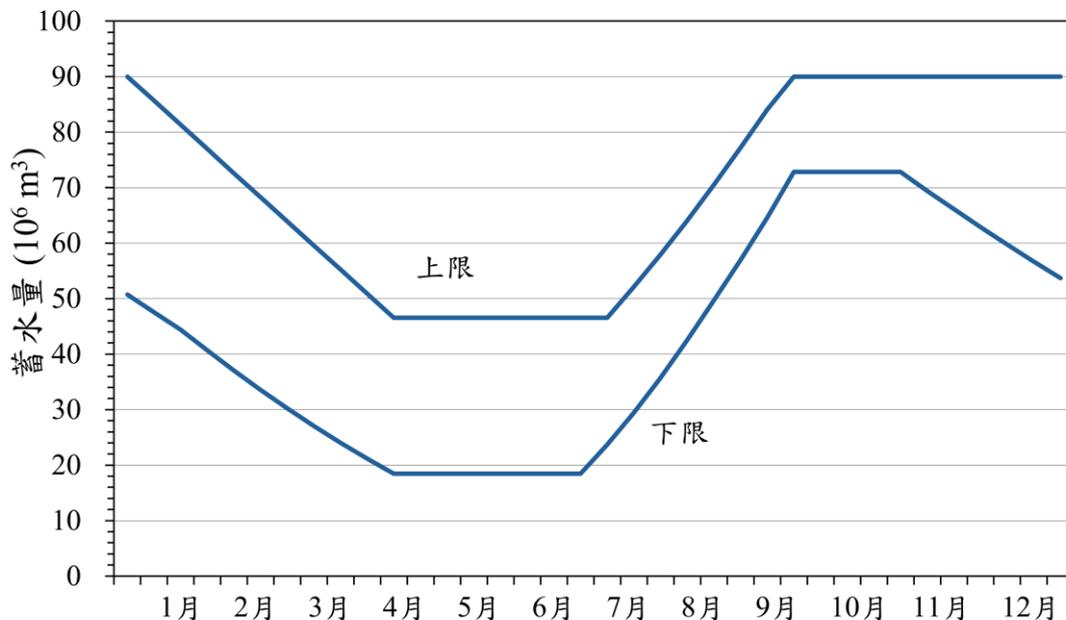


圖 1、南化水庫現行營運規線

表 1、南化水庫及甲仙堰各月應保留水權量、計畫需水量、生態基流量及計畫越域引水量

月份	南化水庫			甲仙攔河堰		
	水權保留量 (cms)	計畫需水量 (cms)	蒸發率 (mm/日)	水權保留量 (cms)	計畫越域引水量 (cms)	生態基流量 (cms)
1 月	0.20	5.52	2.88	8.32	30.0	2.71
2 月	0.21	5.69	3.69	7.42	30.0	2.71
3 月	0.26	4.85	4.31	8.16	30.0	2.71
4 月	0.26	5.51	4.93	8.09	30.0	2.71
5 月	0.27	5.58	4.86	8.98	30.0	2.71
6 月	0.72	5.95	4.10	20.62	30.0	2.71
7 月	0.72	6.02	4.57	23.45	30.0	2.71
8 月	0.72	5.90	4.14	21.39	30.0	2.71
9 月	0.72	6.30	4.12	21.38	30.0	2.71
10 月	0.71	5.75	3.78	15.08	30.0	2.71
11 月	0.42	5.94	3.00	12.58	30.0	2.71
12 月	0.25	6.11	2.69	9.20	30.0	2.71

2.2 降雨逕流模式

本文引用前期研究計畫「學門主題式計畫—南區新興水源探索與整合技術研發計畫」(2024)所建立的降雨—逕流模式來獲取受氣候變遷影響的水庫入流量，該計畫應用機器學習方法中的極限學習機 (extreme learning machine, ELM) 來建立連續型降雨—逕流模式，進行歷史日流量模擬及氣候變遷情境流量推估。極限學習機通過隨機初始化隱藏層的權重和偏置，並利用線性系統的最小平方解來計算隱藏層與輸出層之間的權重，從而快速獲得全域最佳解。

2.3 流量資料

本研究使用之雨量資料取自大氣環流模式 (General Circulation Model, GCM) 所輸出的雨量資料，透過降雨—逕流模式轉換為受氣候變遷影響的流量資料。本研究考慮兩個時段，基期為 1995-2014，近未來為 2021-2040，近未來時期另考慮兩個溫室氣體排放情境 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5，每段時長為 20 年。圖 2 為南化水庫及甲仙攔河堰基期(1995—2014)的旬平均流量，其豐枯不均現象非常明顯。南化水庫入流量約有 97.5%集中於豐水期(五至十月)，甲仙攔河堰豐枯比約為 90%：10%。由於南化水庫集水區面積較小，年平均入流量約為 233.6 百萬立方公尺，甲仙攔河堰則有 1124.6 百萬立方公尺。

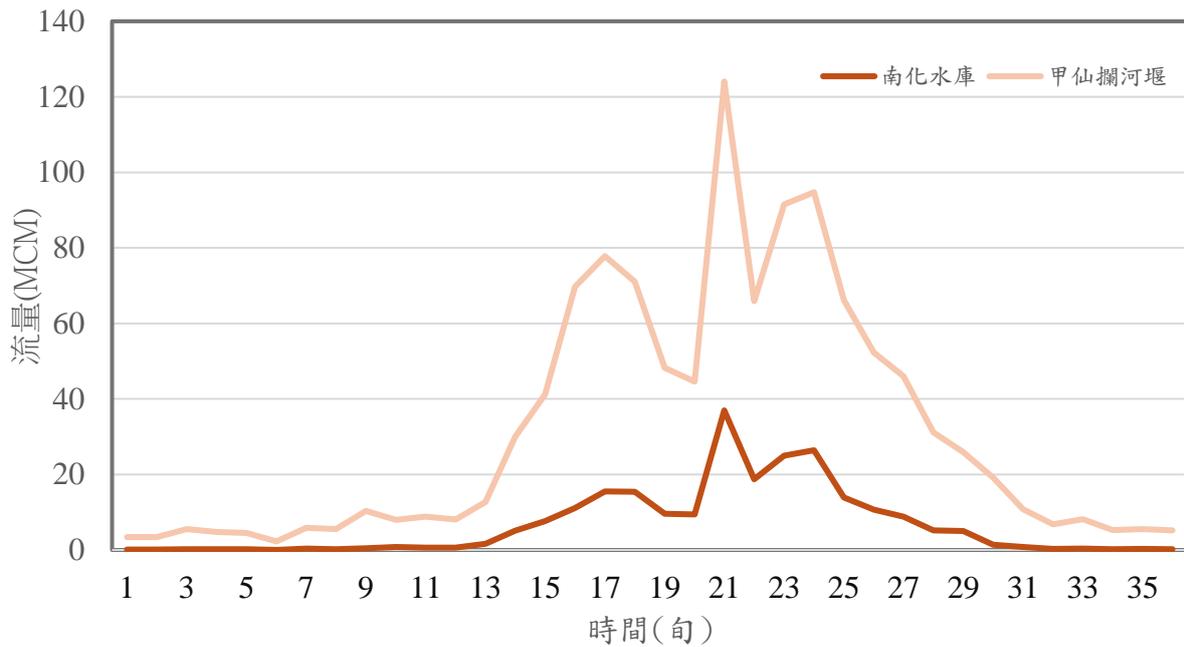


圖 2、南化水庫及甲仙攔河堰基期(1995—2014)的旬平均流量

三、研究方法

3.1 南化水庫與甲仙攔河堰營運系統模式

本研究使用位於台灣南部地區的南化水庫與甲仙攔河堰供水系統為例，探討受氣候變遷影響之水庫最佳規線，其供水系統如圖 3 所示。

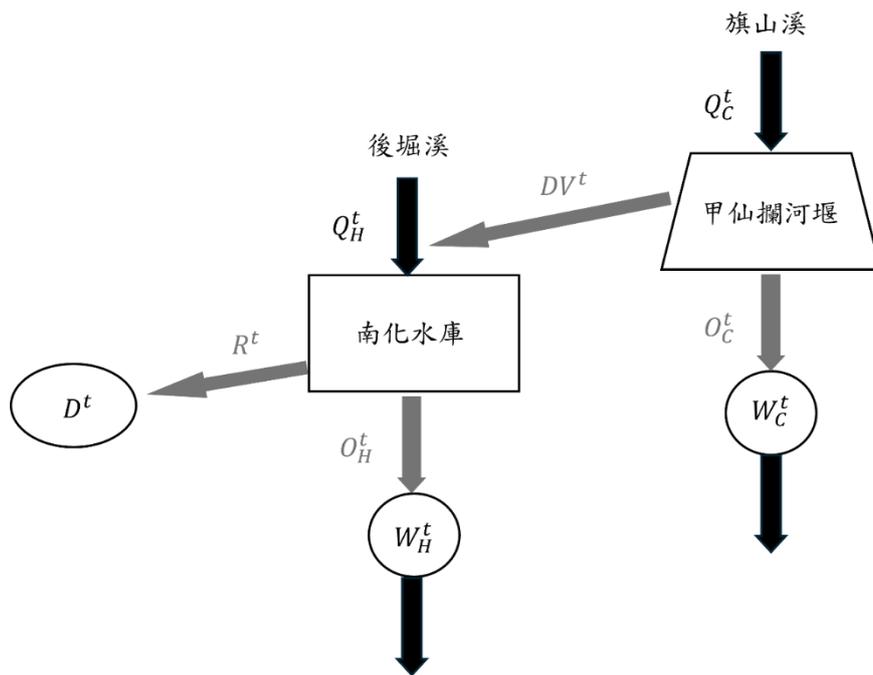


圖 3、南化水庫及甲仙堰系統營運模式

南化水庫入流量除了自身後堀溪的流量外，還需額外計算甲仙攔河堰越域引水之流量，而越域引水為旗山溪流量扣除甲仙攔河堰下游之水權保留量之外，還要考慮越域引水限制及水庫庫容限制，故實際越域引水量如下式所示：

$$DV^t = \min \left\{ \max\{Q_C^t - W_C^t, 0\}, DV_{max}^t, \max\left\{ \frac{S_{max} - S^t + D^t + E^t}{\Delta t} - \max\{Q_C^t - W_C^t, 0\}, 0 \right\} \right\} \quad (1)$$

其中 Q_C^t 表示旗山溪入流量、 W_C^t 為甲仙攔河堰下游水權保留量(包含生態基流量)、 DV^t 為越域引水量、 DV_{max}^t 為越域引水流量限制、 S^t 為蓄水量、 D^t 為南化水庫計畫需水量、 E^t 水庫蒸發量、 Δt 為演算時距，本研究以旬為水庫營運時間單位。南化水庫水平衡方程式如下所示：

$$S^{t+1} = S^t + (Q_H^t + DV^t - R^t - O_H^t)\Delta t - E^t \quad (2)$$

其中 Q_H^t 表示南化水庫入流量； S^t 與 S^{t+1} 分別為時間 t 及 $t+1$ 之蓄水量； R^t 為南化水庫供水量； O_H^t 表示放流量，其計算式如下：

$$O_H^t = Q_H^t - \max\{Q_H^t, W_H^t, 0\} + \max\{S^t - E^t + \max\{Q_H^t - W_H^t, 0\} + DV^t - R^t - S_{max}, 0\} \quad (3)$$

南化水庫供水量 R^t 由水庫蓄水量在不同規線區間所決定，可表示成：

$$R^t = \alpha_{RC}^t \times \frac{D^t}{\Delta t} \quad (4)$$

式中 α_{RC}^t 為 t 時刻水庫蓄水量對應之供應係數，其定義如下

$$\alpha_{RC}^t = \begin{cases} \alpha_1, & \text{URC}^t \leq S^t \\ \alpha_2, & \text{LRC}^t \leq S^t < \text{URC}^t \\ \alpha_3, & S^t < \text{LRC}^t \end{cases} \quad (5)$$

其中 LRC^t 與 URC^t 分別為 t 時刻水庫營運規線之上限與下限，現有營運規線如圖 1 所示，最佳規線詳下節說明。另 α_1 、 α_2 、 α_3 為不同規線區間之供水係數，現況營運之供水係數 $\alpha_1 = 1$ ， $\alpha_2 = 1$ ， $\alpha_3 = 0.7$ 。

水庫蒸發散損失量 E^t 計算式如下：

$$E^t = 0.7 \times e^t \times \frac{1}{2}(A^t + A^{t+1})\Delta t \quad (6)$$

式中 0.7 為蒸發皿係數； e^t 為每日蒸發率； A^t 與 A^{t+1} 分別為時間 t 及 $t+1$ 時的水庫蓄水面積。甲仙攔河堰水平衡方程式如下所示：

$$O_C^t = Q_C^t - DV^t \quad (7)$$

3.2 參數化水庫營運規線

最佳化水庫營運規線本研究僅考慮下限，即原上限不動，下限將以五線段來代表，以減少決策變數個數，各線段的端點以 (T_i, S_i) 表示，其中 T 及 S 分別代表旬數及蓄水量，因此下限可以 5 線段 6 端點： $(1, S_1)$ 、 (T_1, S_2) 、 (T_2, S_2) 、 (T_3, S_3) 、 (T_4, S_3) 及 $(36, S_1)$ 來表示，相關決策變數共 7 個 (T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 S_1 、 S_2 、 S_3)。另規線間之供水係數亦為決策變數，在上限之上因高蓄水量，故供水係數設為 1，上限與下限之間的供水係數為 α_2 ，下限之下的供水係數 α_3 均為決策變數，以優選模式決定其值。圖 4 為南化水庫參數化規線示意圖。本文所考慮的目標函數為最小化缺水率平方和，如下式所示：

$$\min Z = \min \sum_{i=1}^N \left(\frac{SH_i}{D_i} \right)^2 \quad (8)$$

其中 SH_i 為缺水量定義為 $SH_i = \max\{D^t - R^t, 0\}$ ； D_i 為需求量。

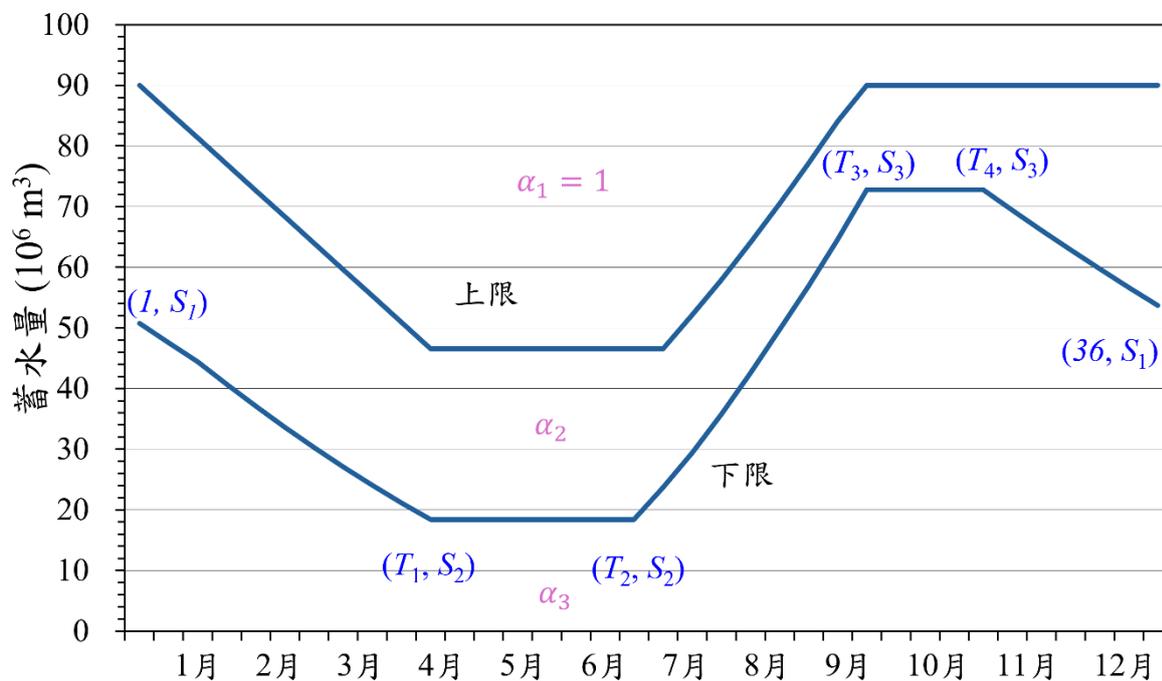


圖 4、南化水庫參數化規線示意圖

3.3 全球氣候模式及溫室氣體排放情境

將 GCM 提供的受氣候變遷影響的降雨資料透過降雨—逕流模式模擬，轉換為流量資料。這些流量資料將作為水庫操作模式的輸入，用以評估不同氣候情境下水庫的營運性能。SSP 情境是由多個國際研究組織合作開發，並由國際氣候變遷專家群體（IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change）主導。SSP 情境是模擬未來氣候變化的重要工具。本研究選擇了 IPCC 第六次評估報告（AR6）中的 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情境，分別代表中等排放路徑和高排放路徑。SSP2-4.5 對應於相對適中的氣候變化影響，而 SSP5-8.5 則代表最嚴重的氣候變化影響，兩者為本研究提供了多樣化的氣候變化情境，用以評估水庫在未來不同氣候條件下的水文行為和運營策略。針對水庫規線最佳化，本文參考了 Huang 等（2021）對東亞地區午後對流降雨的研究，選擇了 CMIP6 模式中的兩個模式（MIROC6 和 BCC-CSM2-MR）以及一個本土研發的模式（TaiESM）作為推估最佳化水庫規線的 GCM。

四、結果與討論

4.1 入流量受氣候變遷影響的變化

隨著氣候變遷，降水和溫度等氣候因素的變化導致極端事件發生頻率增加，因此在水庫管理中，了解水庫入流量的變化至關重要，因為這直接影響供水的穩定性。圖 5 和圖 6 分別顯示了後堀溪和旗山溪在基期及近未來不同排放情境年平均流量變化。由圖 5 可看出，後堀溪的年平均流量在近未來時期 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情境下，與基期相比變化幅度不大。增幅最大的情況出現在 MIROC6 模式下的 SSP2-4.5 情境，流量增加了 12.8%；而減幅最大的是 BCC-CSM2-MR 模式在 SSP2-4.5 情境下，流量減少了 7.3%。另由圖 6 顯示，旗山溪的年平均流量變化幅度與後堀溪相似，但由於旗山溪的流量較大，因此其流量變化的絕對值較高。其中，減幅最大的是 BCC-CSM2-MR 模式在 SSP5-8.5 情境下減少了 7.3%。綜合圖 5 和圖 6 的結果可知，南化水庫及甲仙攔河堰的年平均入流量約略呈現遞減趨勢，即基期流量>SSP2-4.5>SSP5-8.5。此外，MIROC6 模式的流量普遍高於 BCC-CSM2-MR 和 TaiESM 模式，顯示 MIROC6 對未來氣候變遷下流量有較高預測，也顯示不同 GCM 間的不一致性。

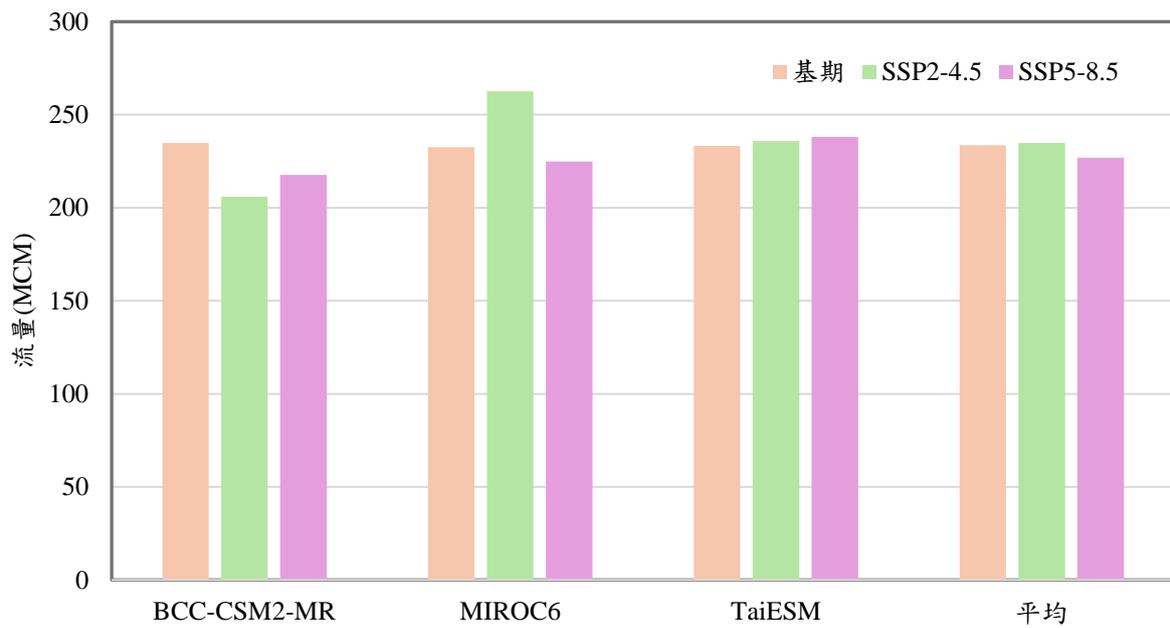


圖 5、後掘溪基期及近未來不同排放情境年平均流量

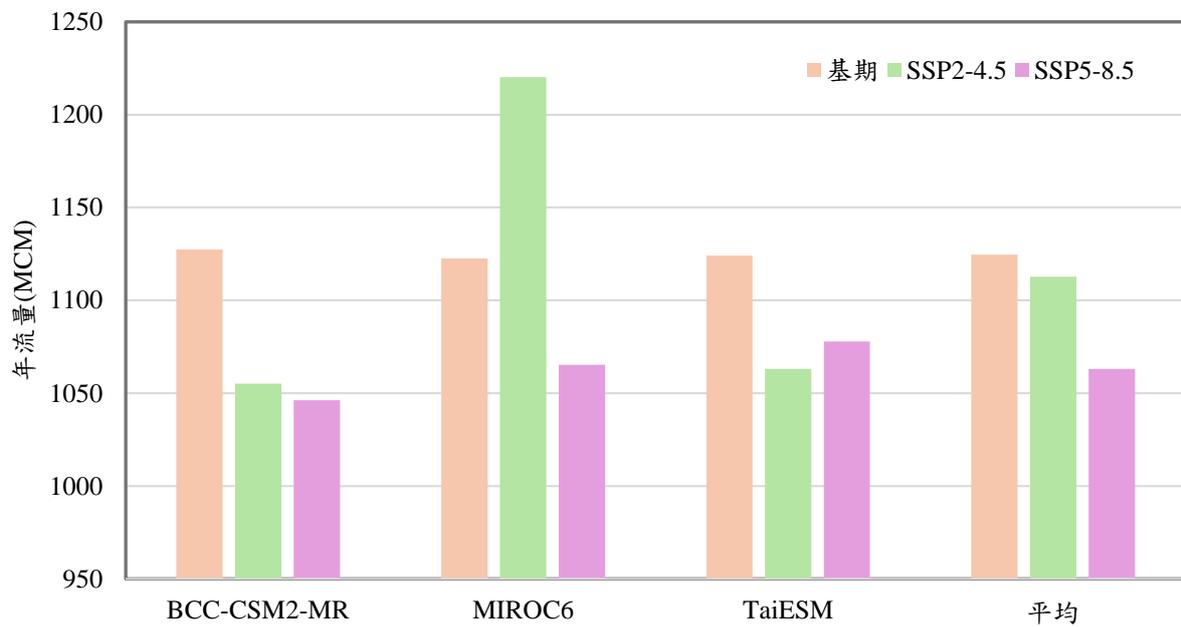


圖 6、旗山溪基期及近未來不同排放情境年平均流量

4.2 最佳化規線

以最小化缺水率平方和為目標函數所建立的水庫營運優選模式應用於基期及近未來時期各 20 年時段以推求各時段之最佳規線，所獲得最佳化規線的決策變數如表 2 所示，基期與近未來兩種情境的三個 GCM 模式所得之最佳規線與原營運規線比較分示於圖 8、9 及 10。由表 2 可知，水庫供水係數在上下限之間時出現變化，與原規線中的不限水係數($\alpha_2=1$)比較，最佳化規線在上下限之間即開始小幅度限水($\alpha_2 = 0.9$)。另由圖 8、9 及 10 圖中可以看出，各時段、各情境及各 GCM 的水庫最佳規線均較原營運規線更早開始限水。此外，最佳規線豐水期的下限普遍低於原規線的下限，此代表輕微限水(α_2)的區間變大，而較大限水區間(α_3)變小，此現象與優選模式所設定目標函數為最小化缺水率平方和有關係，此目標函數為避免較大的缺水率產生，使得最佳化規線會有較頻繁的小缺水率。值得注意的是，MIROC6 的最佳規線與另兩 GCM 模式的最佳規線略有不同，主要原因為 MIROC6 的流量與另二 GCM 的流量差異較大(如圖 5 及 6 所示)。相較之下，BCC-CSM2-MR 和 TaiESM 模式則有較一致的最佳規線。

表 2、南化水庫最佳化規線決策變數

	NAME	T1	T2	T3	T4	S1	S2	S3	α_2	α_3
	基期	BCC-CSM2-MR	6	21	23	30	36.7	5	63.1	0.9
MIROC6		13	19	27	30	48.9	5.7	74.7	0.9	0.69
TaiESM		6	20	24	30	37.3	5.6	64.2	0.9	0.69
	NAME	T1	T2	T3	T4	S1	S2	S3	α_2	α_3
	SSP2-4.5	BCC-CSM2-MR	10	21	28	29	44	6.2	77.2	0.9
MIROC6		10	21	27	30	44.2	6.9	68.4	0.9	0.69
TaiESM		10	20	27	30	40	7.2	68.5	0.9	0.69
	NAME	T1	T2	T3	T4	S1	S2	S3	α_2	α_3
	SSP5-8.5	BCC-CSM2-MR	10	21	28	31	44	5.7	72.6	0.9
MIROC6		11	20	28	29	44.3	7.5	78.5	0.9	0.69
TaiESM		9	21	27	29	45.2	7.1	67.7	0.9	0.69

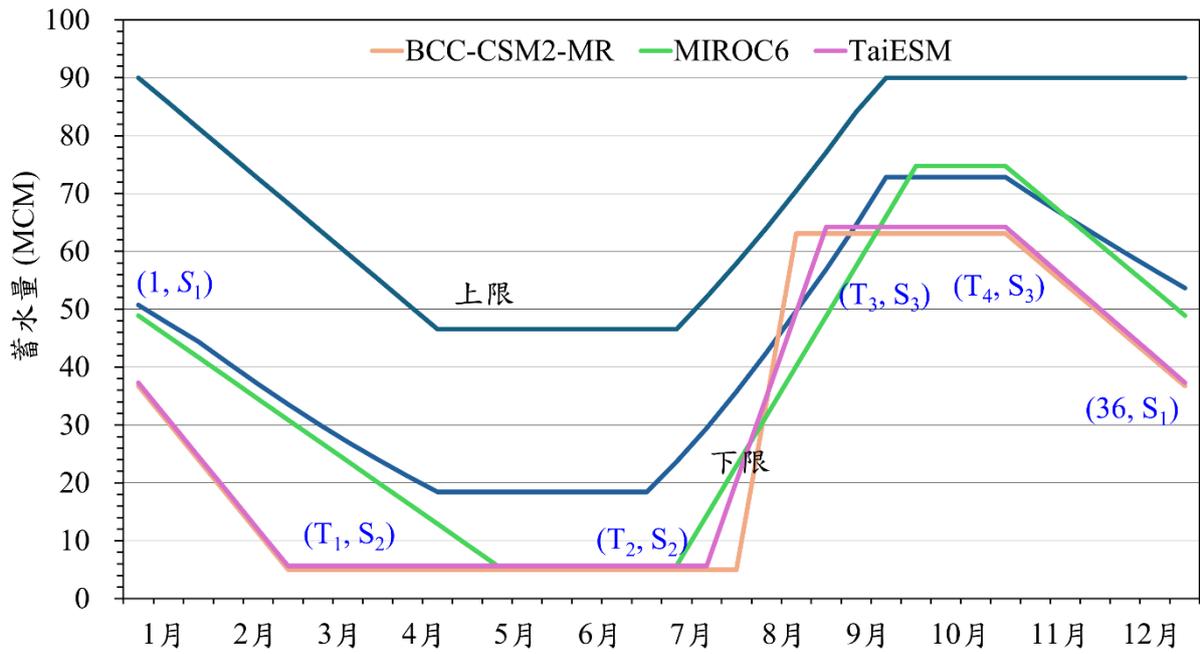


圖 8、基期南化水庫最佳化規線

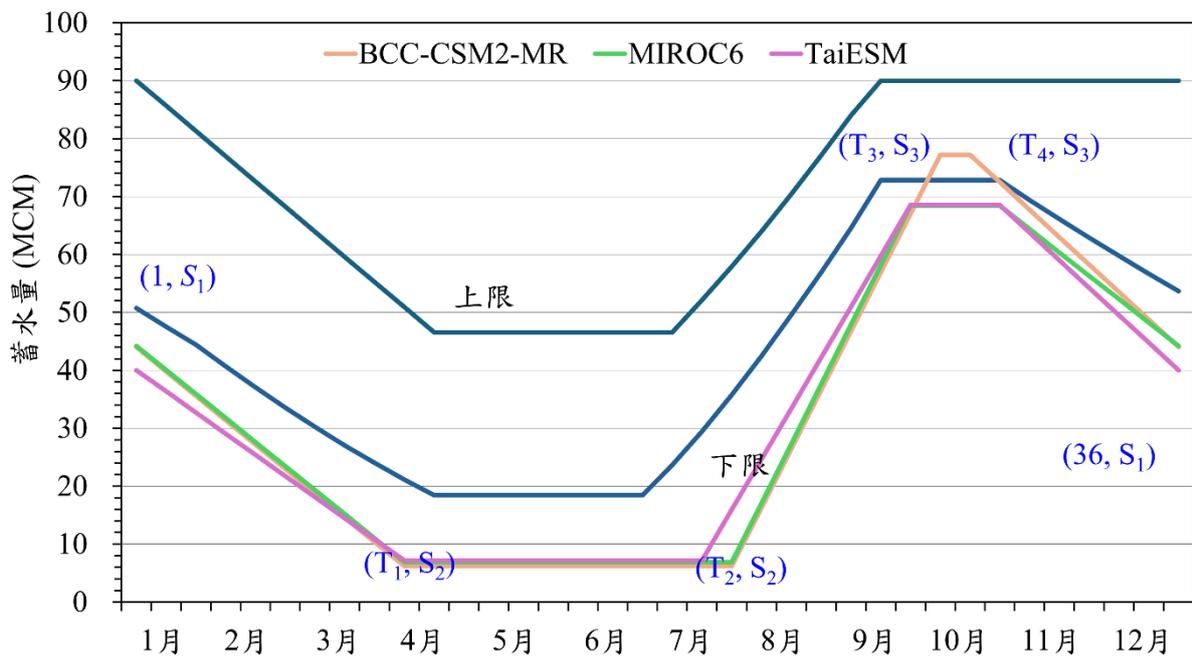


圖 9、近未來 SSP2-4.5 南化水庫最佳化規線

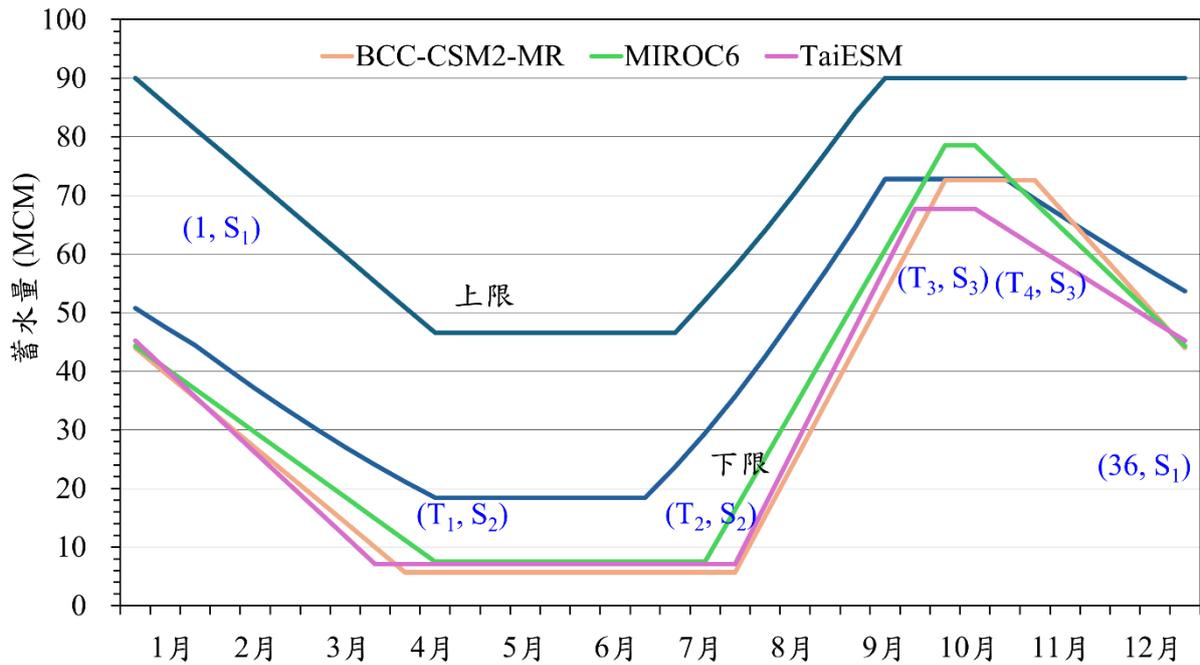


圖 10、近未來 SSP5-8.5 南化水庫最佳化規線

4.3 最佳化規線與原營運規線目標函數值比較

表 3 所示為各不同時期、情境及 GCM 的目標函數值(缺水率平方和)，基本上近未來時期不同情境的目標函數值均高於基其，顯示氣候變遷會影響水庫營運，導致缺水較基期嚴重。不同 GCM 在不同情境的目標函數值大小互異，顯示 GCM 間對未來氣候變遷流量預測的不一致性。以原營運規線應用於受氣候變遷影響的入流量時之目標函數如表 4 所示，與優選模式結果(表 3)有類似的變化，即近未來 SSP2-4.5 及 SSP5-8.5 情境的目標函數值高於基期，顯示不論使用何種營運規線，受氣候變遷影響的流量均會使水庫營運效率惡化。原營運規線的目標函數值遠大於最佳規線的目標函數值，此現象顯示本文所建議的最佳化規線可有效改善水庫營運，特別是在減少嚴重缺水方面。在不同情境及 GCM 間目標函數約可減少 34.5% — 69%。

表 3、最佳化規線不同時期不同情境目標函數

	基期	SSP2-4.5	SSP5-8.5
BCC-CSM2-MR	4.58	11.10	9.90
MIROC6	9.29	10.97	10.97
TaiESM	7.70	11.81	12.30

(單位：%²)

表 4、原營運規線不同時期不同情境目標函數

	基期	SSP2-4.5	SSP5-8.5
BCC-CSM2-MR	14.76	19.12	15.10
MIROC6	17.19	18.48	18.05
TaiESM	15.12	20.17	20.21

(單位：%²)

五、結論與建議

綜合以上分析結果可歸納出以下結論：

1. 以最小化缺水率平方和為目標函數的優選模式所獲得各時期、各情境及各 GCM 的最佳化規線及供水係數，顯示需較原規線提前限水，以避免嚴重缺水產生，因此目標函數值均較原規線低。
2. 不論是原營運規線或最佳化規線，未來時期不同情境目標函數值均較基期高，顯示氣候變遷影響河川流量，進而惡化水庫營運。
3. BCC-CSM2-MR 和 TaiESM 模式所得最佳規線較為類似，原因在於其入流量較相近，此現象顯示不同 GCM 間因流量不一致導致最佳化規線有所差異。

除本文所推導最佳化規線外，尚有以下議題可供後續研究參考：

1. 本文僅選用了 3 個氣候模式來計算最佳化規線，且只考慮了近未來的兩個情境。未來研究可以增加 GCM 模式的數量，並且延伸至遠未來的情境，進一步評估不同氣候預測下的水庫營運策略。
2. 本文僅以缺水率平方和作為目標函數，後續研究可以考慮引入更多的缺水指標，如最大缺水旬數、最大連續缺水量等作為目標函數，如此可使水庫營運策略更加全面，從而更有效因應對氣候變遷帶來的嚴峻挑戰。

六、謝誌

本文研究經費承國科會經費補助(NSTC 113-2221-E-006-059-MY2)，謹誌謝忱。

七、參考文獻

1. Adeloje, A. J., & Dau, Q. V. (2019), "Hedging as an adaptive measure for climate change induced water shortage at the Pong reservoir in the Indus Basin Beas River, India", Science of The Total Environment, 687, 554-566.
2. Brekke, L. D., Maurer, E. P., Anderson, J. D., Dettinger, M. D., Townsley, E. S., Harrison, A., & Pruitt, T. (2009), "Assessing reservoir operations risk under climate change",

- Water Resources Research, 45, W04411, <https://doi.org/10.1029/2008WR006941>.
3. Georgakakos, K. (2012), “Water supply and demand sensitivities of linear programming solutions to a water allocation problem”, Applied Mathematics, 3(3), 1285-1297, <https://doi.org/10.4236/am.2012.330185>.
 4. Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982), “Reliability, resilience, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation”, Water Resources Research, 18(1), 14-20, <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>.
 5. Heydari, M., Othman, F., & Qaderi, K. (2015), “Developing optimal reservoir operation for multiple and multipurpose reservoirs using mathematical programming” Mathematical Problems in Engineering, 2015, 435752, <https://doi.org/10.1155/2015/435752>.
 6. Huang, W. R., Chang, Y. H., Deng, L., & Liu, P. Y. (2021), “Simulation and projection of summer convective afternoon rainfall activities over Southeast Asia in CMIP6 models”, Journal of Climate, 34(12), 5001-5016, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0788.1>.
 7. Okkan, U., Fistikoglu, O., Ersoy, Z. B., & Noori, A. T. (2023), “Investigating adaptive hedging policies for reservoir operation under climate change impacts”, Journal of Hydrology, 619, 129286, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129286>.
 8. Raje, D., & Mujumdar, P. P. (2010), “Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change”, Advances in Water Resources, 33(3), 312-326, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.12.008>.
 9. Thomas, T., Ghosh, N. C., & Sudheer, K. P. (2021), “Optimal reservoir operation – A climate change adaptation strategy for Narmada basin in central India”, Journal of Hydrology, 598, 126238, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126238>.
 10. 國家科學及技術委員會補助專題研究計畫報告,學門主題式計畫—南區新興水源探索與整合技術研發計畫, NSTC 112-2221-E-006-147,(2024).