

南化水庫最佳化與模糊化營運規線對 缺水影響探討

Impacts of Optimal and Fuzzified Rule Curves on Water Deficits for Nanhua Reservoir

國立成功大學
水利及海洋工程學系
碩士班研究生

洪彥甯*

Yen-Ning Hung

國立成功大學
水利及海洋工程學系
教授

蕭政宗

Jenq-Tzong Shiau

摘 要

台灣南部地區由於降雨時間分布不均且地勢陡峭、河川湍急，故須水庫調節農、工業及民生用水需求，如何有效運用水庫供水以滿足各方需求是水資源管理的一項重要議題。目前水庫操作多依循營運規線(rule curve)，以評估不同時期水庫蓄水量之多寡，當蓄水量低時，會以減少供水的方式降低未來發生嚴重缺水的機會。然而，現有水庫營運規線因個數較少而產生階梯式之限水方式、或是早期制定的規線無法掌握目前極端的水文狀況。為改善現有水庫營運規線所造成的缺水現象，本研究考慮二優選模式，模式一為模糊化營運規線，模式二為最佳化營運規線。本文以南化水庫為例，以多準則決策方式整合 8 個缺水指標(單旬最大缺水率、缺水事件最長缺水延時、最大缺水量、平均缺水延時、平均缺水量、風險度、總水率、缺水事件頻率)為優選模式目標函數，配合遺傳演算法尋求最佳解，並與現況營運比較。分析結果顯示，二優選模式之供水效率均優於現行規線，而其中又以最佳化規線之結果較優，在 8 項缺水指標中有 6 項優於現況、7 項優於模式一。

關鍵詞：水庫規線，優選模式，模糊理論，多準則決策。

ABSTRACT

Southern Taiwan had suffered from water deficits due to uneven temporal and spatial distribution of rainfall. Reservoirs are important facilities to regulate fluctuating streamflow to offer stable water supplies in this region. Water releases from reservoirs

*通訊作者，國立成功大學水利工程系碩士班研究生，70101 台南市大學路 1 號，annie0817821993@gmail.com

are often guided by rule curves in Taiwan for assessing storage in various seasons. Water rationing is implemented to conserve water for future use in order to reduce possibilities of high deficits when water below certain level. However, finite rule curves leading to step-wise hedging rules as well as pre-defined rules curves insufficient to meet current hydrologic conditions are major reasons for low water-supply efficiency. To improve reservoir performance during droughts, two optimization models are considered in this study to construct optimal operating rules for Nanhua Reservoir located in southern Taiwan. Model I fuzzifies the current rules curves and Model II reconstructs the lower rule curve of the Nanhua Reservoir. A total of 8 water-shortage indices (maximum 10-day shortage ratio, maximum event duration, maximum event deficit, average event duration, average event deficit, risk, total shortage ratio, event frequency) are integrated into a single overall objective to derive the optimal operating rule using multi-criteria decision making. The results indicate that both optimization models have better performance than the current operation rule and Model II outperforms Model I.

Keywords: Rule curves, Optimization operation, Fuzzy theory, Multiple criteria decision making.

一、前 言

水庫主要功能為調節豐枯不均的河川流量，並提供穩定的水源，而台灣南部地區由於降雨時間分布不均且地勢陡峭、河川湍急，故須水庫調節農、工業及民生用水需求。但在嚴重乾旱時期，水庫供水有時無法滿足既定供水量而造成缺水情形發生，為避免嚴重缺水造成的負面影響，水庫管理單位常會採取限水措施，事先以小比例的限水減少供水量，以降低未來嚴重缺水發生的機會，而何時限水及限水量則是乾旱時期水庫營運策略中最重要之二項因子。

台灣地區水庫營運多以營運規線(rule curve)代表水庫不同時節水庫蓄水之豐枯情形，以利執行不同的運轉策略。營運規線將水庫分成不同區間，當水庫蓄水量處於不同區間時則有不同的供水係數；以兩條規線為例，其將水庫蓄水量分成三個區間，上限之上、上下限之間、下限之下，當蓄水量在下限以下時則會採取限水的措施。然而，當蓄水量略高於下限與略低於下限時，其蓄水量相差不大，卻因處於不同蓄水區間而有不同

之供水係數。為避免因蓄水量相差不大卻有不同供水係數而造成操作上的不易，本文將水庫規線結合模糊理論，將現行規線模糊化使得蓄水量落在規線上下時，其供水係數呈現較連續而非階梯跳躍變化。

Zadeh (1965、1988)分別提出模糊集合(fuzzy set)理論以及模糊邏輯(fuzzy logic)用於表達決策過程中的不確定性(uncertainty)。模糊理論用於水庫營運的研究約略可分為三類，第一類為模糊優選、第二類為模糊法則系統、第三類為混用模糊與其他方法，本研究採用第二類模糊法則，將水庫蓄水量建立在“if-then”的規則上，其中“if”為假設前提，例如水庫蓄水量是否為高或低；而“then”則表達符合條件的結果，高或低之水庫放水量。應用模糊於水庫操作的相關研究有 Russell 及 Campbell (1996)以繁衍資料配合定率動態規劃模式(deterministic dynamic programming)推導位於加拿大 Power 河水力發電水庫放水的模糊法則；Shrestha 等(1996)以歷史營運紀錄建立美國 Illinois 河 Tenkiller Lake 壩的多目標水庫營運的模糊法則模式；Panigrahi 及 Mujumdar (2000)

則以序率動態規劃模式(stochastic dynamic programming)建立印度 Malaprabha 水庫的單目標灌溉模糊法則；Dubrovin 等(2002)發展全模糊相似(total fuzzy similarity)模式於建立芬蘭 Päijänne 湖即時操作的模糊法則；Mousavi 等(2005)發展動態規劃與模糊法則模式以疊代方法建立伊朗 Dez 及 Karoon 水庫的放水規則；Sivapragasam 等(2008)以集群(clustering)的方式減少模糊法則的數量，並應用於印度 Periyar 及 Kovilar 水庫；Moeini 等(2011)將水庫的入流量、蓄水量及放水量予以模糊化，並以序率動態規劃建立伊朗南部地區 Dez 水庫的模糊法則。

而以水庫操作規線搭配限水的概念改善水庫缺水情況以提升供水效率相關研究有 Chang *et al.* (2010)以常用之水庫操作規線操作以避免極度乾旱之缺水情況，利用水庫規線操作及供水折扣率(限水)之概念用於多目標的水資源管理模式，並運用缺水指標(SI)值評估在規線區間折扣供水對各標的缺水影響。蕭(2000)探討乾旱時期不同水庫供水策略對缺水的影響，利用限水的概念以水庫規線、標準操作策略、定率動態規劃及序率動態規劃，探討石門水庫不同限水策略對缺水特性的影響；Tu *et al.* (2003)以混合整數規劃探討同時考量水庫運用規線與限水策略之水庫最佳管理；Tu *et al.* (2008)將原本的混合整數非線性規劃模式轉換成二次混合整數規劃，利用此模式對多目標水庫制定最佳之限水策略。

本文以台灣南部區域的南化水庫為研究區域，探討考慮限水時機與限水比例對水庫供水的影響。並考慮各缺水特性的多準則問題，針對水庫之不同缺水特性做比較，以 8 種不同缺水指標評估不同營運策略的成效，並將之整合為單一目標函數以決定優選模式之最佳解，演算結果將與現況營運比較。

二、研究地區與使用資料

本文選用南化水庫為研究對象，南化水庫位於台灣南部台南市南化區曾文溪支流後堀溪上，主要為供應台南及高雄地區用水之單目標水

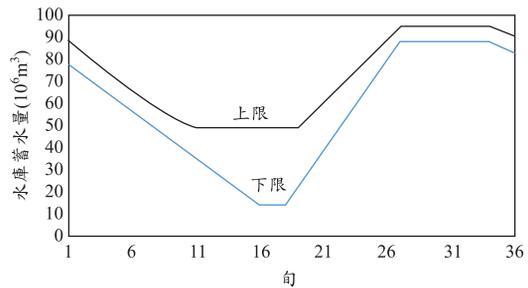


圖 1 南化水庫運用規線。

庫。於民國 82 年完工，集水面積約 104 平方公里，設計滿水位為 180 公尺、設計庫容量為 158 百萬立方公尺(MCM)。其水源除本身之集水區外，另包含旗山溪甲仙攔河堰之越域引水流量。甲仙攔河堰位於高屏溪支流旗山溪上，集水面積約 408 平方公里，其引水原則係配合南化水庫需求引水，最大輸水量為 30 cms。南化水庫與甲仙攔河堰各月份應保留水權量、計畫需水量、生態基流量及計畫越域引水量如表 1 所示。

本文以目前之有效庫容 113.817 MCM 進行研究，根據後堀溪及旗山溪在南化水庫及甲仙攔河堰處之入流量資料、水庫蓄水量、水庫運用規線等資料以作為研究分析之用，本文之研究期間為 1959 年至 2009 年，以旬為水庫演算時刻。

南化水庫之供水方式依水庫運用規線執行，根據經濟部水利署之南化水庫運用規線要點(民國 99 年 8 月 4 日)，水庫運用規線定義為執行蓄水利用運轉，依水庫水位或有效蓄水量劃定界線，以表示水庫存蓄水量之豐枯情形。

南化水庫運用規線分為上限及下限(如圖 1 所示)，上限水位為水庫有效蓄水量處於豐足狀態之最低水位，而下限水位則為水庫有效蓄水量處於缺水狀態之最高水位，其操作規則依下列規定辦理：

- (一) 水庫水位在上限以上時，依據計畫配水量供水，並得視各地區用水需求增加調配之。
- (二) 水庫水位在上限與下限之間時，依據計畫配水量供水，並得視高屏溪攔河堰取水狀況調整，以調配各地區之供水。

表 1 南化水庫與甲仙攔河堰應保留水權量、計畫需水量及蒸發率

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	7.64	2.88	8.32	1.5	2.71
2月	0.21	7.82	3.69	7.42	1.5	2.71
3月	0.25	8.15	4.31	8.16	3.5	2.71
4月	0.26	9.03	4.93	8.09	3.5	2.71
5月	0.27	9.94	4.86	8.98	3.5	2.71
6月	0.72	10.28	4.10	20.62	30.0	2.71
7月	0.72	10.46	4.57	23.45	30.0	2.71
8月	0.72	10.46	4.11	21.39	30.0	2.71
9月	0.72	10.42	4.12	21.38	30.0	2.71
10月	0.71	9.90	3.78	15.08	8.8	2.71
11月	0.41	8.88	3.00	12.58	3.5	2.71
12月	0.25	8.13	2.69	9.20	3.5	2.71

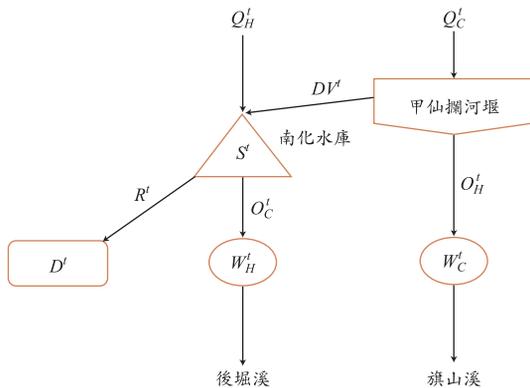


圖 2 南化水庫-甲仙攔河堰供水系統架構圖。

(三) 水庫水位在下限以下時，視各地區用水需求，與其他水源聯合運用機動調配供水，必要時應予打折供水。

三、研究方法

3.1 南化水庫及甲仙攔河堰系統之營運模式

本研究首先建立系統營運模式以了解不同水庫營運操作對供水之影響，南化水庫及甲仙攔河堰營運系統如下圖 2 所示。在進行南化水庫水平衡演算前須先計算得甲仙攔河堰實際的越域引水量，而實際越域引水量為由旗山溪入流量扣除下游保留水權量後所得之剩餘流量，除此之外

尚須考慮越域引水之限制(容量及水權量)，且引水量不能造成南化水庫溢流，在上述條件下，實際越域引水量 DV^t 可用下式表示：

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

其中 DV^t 及 DV_{\max}^t 分別為甲仙攔河堰之實際越域引水量及各月份越域引水量之限制，其值詳見表 1； Q_H^t 及 Q_C^t 分別代表後堀溪及旗山溪於 1959 年至 2009 年以旬為單位之入流量； W_H^t 及 W_C^t 分別為南化水庫與甲仙攔河堰下游保留水權量(含生態基流量)，其值詳見表 1； S^t 及 S_{\max} 分別為 t 時刻南化水庫之蓄水量及庫容量； D^t 為南化水庫計畫需水量，各月份計畫需水量詳見表 1； Δt 為演算時距，本研究採用旬為演算時距。

南化水庫之水平衡方程式可由水庫蓄水量、入流量、越域引水量、供水量以及水庫蒸發散損失量表示如下式：

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

其中 S^t 及 S^{t+1} 分別為南化水庫 t 及 $t+1$ 時刻之蓄水量，其值須介於水庫容(0 百萬立方公尺)

及庫容(113.817 百萬立方公尺)間； R^t 為水庫供水
量； O_H^t 為南化水庫放流量； E^t 為水庫在 t 時刻
之蒸發損失量，以下式推估：

$$E^t = 0.7 \times e^t \times \frac{1}{2} (A^t + A^{t+1}) \times \Delta t \dots\dots\dots (3)$$

蒸發散係數設定為 0.7； e^t 為水庫每日蒸發
率，其值詳見表 1； A^t 及 A^{t+1} 則分別為 t 時刻及
 $t+1$ 之水庫蓄水面積。在演算的過程中 A^{t+1} 仍為
未知數，故在計算的過程中須以式(2)及式(3)以疊
代之方式計算。

水庫供水量 R^t 須先考量南化水庫下游水權
保留量，再由南化水庫蓄水量、入流量及甲仙攔
河堰越域引水量決定水庫之可供水量，後依據水
庫可供水量在不同規線之位置來決定放水量，可
表為：

$$R^t = \min \left\{ \frac{C_{RD} D^t}{\Delta t}, \frac{S^t - S_{\min} - E^t}{\Delta t} \dots\dots\dots (4) \right. \\ \left. + \max \{ Q_H^t - W_H^t, 0 \} + DV^t \right\}$$

式中 C_{RC} 代表水庫供水在不同規線區間之供水係
數，定義如下：

$$C_{RC} = \begin{cases} C_{RC}^1, & URC \leq S^t \\ C_{RC}^2, & LRC \leq S^t < URC \dots\dots\dots (5) \\ C_{RC}^3, & LRC > S^t \end{cases}$$

其中 RC_1^1 、 RC_2^1 分別代表水庫運用規線之上限及
下限； C_{RC}^1 、 C_{RC}^2 、 C_{RC}^3 則代表不同規線區間之供
水係數，其值介於 0 至 1 之間，若此係數小於 1
即表示限水，現況營運之供水係數為 $C_{RC}^1 = 1$ ，
 $C_{RC}^2 = 1$ ， $C_{RC}^3 = 0.7$ 。而在優選模式中水庫營運之
供水係數 C_{RC}^2 及 C_{RC}^3 設定為決策變數。

O_H^t 及 O_C^t 分別為南化水庫及甲仙攔河堰下
游河川剩餘流量，其計算式如下：

$$O_H^t = \min \{ Q_H^t, W_H^t \} + \max \left\{ \max \{ Q_H^t - W_H^t, 0 \} \right. \\ \left. - R^t + DV^t - \left(\frac{S_{\max} + S_{\min}}{\Delta t} \right), 0 \right\} \dots\dots (6)$$

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

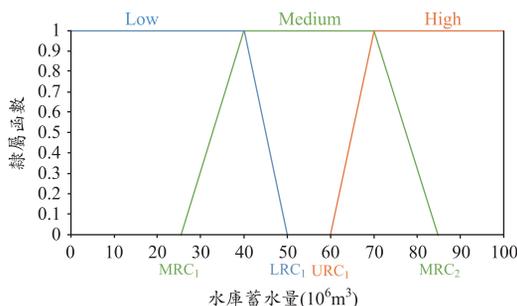


圖 3 水庫規線隸屬函數示意圖。

3.2 水庫營運優選模式

本研究建立優選模式以尋求水庫之最佳營
運策略，由於水庫規線與供水係數會影響水庫供
水之情形，因此本文將考慮兩種模式：模式一考
慮不同規線間供水係數之變動以及模糊化現行
規線，模式二則將規線下限及供水係數視為決策
變數。

3.2.1 優選模式一

由於不同規線區間之供水係數會呈現階梯
式的下降，蓄水量鄰近區間之分界時可能因蓄水
量些許增減而使得供水係數有大幅度的改變，因
此模式一將現行規線模糊化，在模糊區間內供水
係數呈現較連續地變化。本文將水庫蓄水量訂為
模糊化輸入項，以上限及下限將水庫蓄水量劃分
為高(H)、中(M)、低(L)蓄水量，其隸屬函數
(membership function)如圖 3 所示。

圖 3 所示之 H、M、L 蓄水量之隸屬函數可
用下列方程式表示：

$$\mu_{HS} = \begin{cases} 1, & S^t > URC \\ \frac{S^t - URC_1}{URC - URC_1}, & URC \geq S^t > URC_1 \dots\dots (8) \\ 0, & S^t \leq URC_1 \end{cases}$$

$$\mu_{MS} = \begin{cases} 0, & S^t \leq MRC_1 \\ \frac{S^t - MRC_1}{LRC - MRC_1}, & MRC_1 < S^t \leq LRC \\ 1, & LRC < S^t \leq URC \dots\dots (9) \\ \frac{MRC_2 - S^t}{MRC_2 - URC}, & URC < S^t \leq MRC_2 \\ 0, & S^t > MRC_2 \end{cases}$$

$$\mu_{LS} = \begin{cases} 1, & S^t \leq LRC \\ \frac{LRC_1 - S^t}{LRC_1 - LRC}, & LRC_1 \geq S^t > LRC \dots (10) \\ 0, & S^t > LRC_1 \end{cases}$$

其中 μ_{HS} 、 μ_{MS} 、 μ_{LS} 分別為蓄水量 H、M、L 時之隸屬度；URC 和 LRC 分別為規線之上限及下限； URC_1 為 H 蓄水量隸屬函數之下界； LRC_1 為 L 蓄水量隸屬函數之上界； MRC_1 和 MRC_2 則為 M 蓄水量隸屬函數之下界與上界。

而不同蓄水量之上下界 LRC_1 、 MRC_1 、 MRC_2 及 URC_1 則以參數化之方式處理，其表示式如下：

$$LRC_1 = LRC + C_1(URC - LRC) \dots (11)$$

$$MRC_1 = LRC - C_2(URC - LRC) \dots (12)$$

$$MRC_2 = URC + C_3(URC - LRC) \dots (13)$$

$$URC_1 = URC - C_4(URC - LRC) \dots (14)$$

上式中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 為本模式之決策變數，其範圍介於 0 至 0.5 之間，若此四係數均為 0，則與原規線一致。

而供水量 R^t 在水庫蓄水量為 H、M、L 時分別以下式表示：

$$\begin{aligned} \text{if } S^t \text{ is H, then } R^t &= C_{RC}^1 \times D^t \\ \text{if } S^t \text{ is M, then } R^t &= C_{RC}^2 \times D^t \dots (15) \\ \text{if } S^t \text{ is L, then } R^t &= C_{RC}^3 \times D^t \end{aligned}$$

由於某一特定蓄水量可能跨越不同蓄水界線，因此放水量可以不同蓄水界線之隸屬函數值為權重，表示如下：

$$C_{RC} = \frac{\mu_{HS} \cdot C_{RC}^1 + \mu_{MS} \cdot C_{RC}^2 + \mu_{LS} \cdot C_{RC}^3}{\mu_{HS} + \mu_{MS} + \mu_{LS}} \dots (16)$$

上式之中 C_{RC}^1 於本模式設定為 1，而 C_{RC}^2 與 C_{RC}^3 則為決策變數。故本模式中有 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_{RC}^2 與 C_{RC}^3 共 6 個決策變數。

3.2.2 優選模式二

模式二除了供水係數 C_{RC}^2 及 C_{RC}^3 為決策變數，亦將水庫規線之下限視為決策變數。為簡化決策變數之數量，上限採用現行操作方法，而將下限參數化，以線段代表，因此需要 4 個時間，

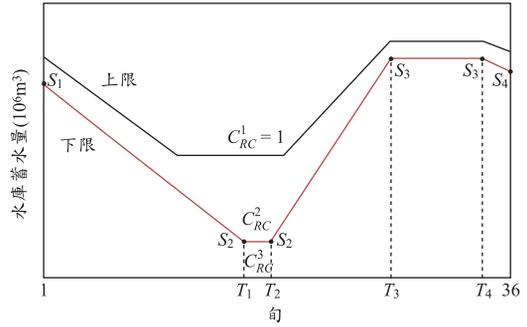


圖 4 參數化之水庫規線。

分別為 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 ；另外在蓄水量的部份亦需要 4 個決策變數來代表。因此下限之端點共六點，可表示為 $(1, S_1)$ 、 (T_1, S_2) 、 (T_2, S_2) 、 (T_3, S_3) 、 (T_4, S_3) 、 $(36, S_4)$ ，如圖 4 所示。故本模式有 C_{RC}^2 與 C_{RC}^3 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 共 10 個決策變數。

3.3 缺水指標

為了評估不同營運方式的優劣，本文將以缺水指標來評估系統之缺水情況。當水庫實際供水量無法滿足計畫需水量時則會有缺水的情形發生；考量缺水之不同特性，本文採用 8 個缺水指標作為營運方案優劣之評估準則，各指標說明如下：

(1) 單旬最大缺水率：

$$MSR = \max_t \left\{ \frac{ST^t}{D^t} \times 100\% \right\} \dots (17)$$

其中 $ST^t = \max\{D^t - R^t, 0\}$ 為每旬缺水量； D^t 為每旬計畫需水量。

(2) 缺水事件最長延時：定義為總研究期間內最長缺水事件延時，其中 L 為最長缺水事件延時。

$$\begin{aligned} MCD &= \max_t \{L, \text{if } ST^t = 0, ST^{t+1} > 0, \\ &ST^{t+2} > 0, \dots, ST^{t+L} > 0, \dots (18) \\ &ST^{t+L+1} = 0\} \end{aligned}$$

(3) 缺水事件最大缺水量：總研究期間內缺水事件之最大缺水量

$$MCS = \max_t \left\{ \sum_{t=t+1}^{t+L} ST^t, \text{ if } ST^t = 0, \right. \\ \left. \begin{aligned} &ST^{t+1} > 0, ST^{t+2} > 0, \dots, \\ &ST^{t+L} > 0, ST^{t+L+1} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (19)$$

(4) 缺水事件平均缺水延時：定義為總研究期間內總缺水句數與總缺水事件數之比值

$$ACD = \frac{TSD}{DE} \dots\dots\dots (20)$$

其中 DE 為總缺水事件數， TSD 為總缺水句數， $TSD = \sum_{i=1}^n \left\{ \begin{aligned} &1, ST^i > 0 \\ &0, ST^i = 0 \end{aligned} \right\}$ 。

(5) 缺水事件平均缺水量：定義為總研究期間內總缺水量與總缺水事件數之比值

$$ACS = \frac{TSH}{DE} \dots\dots\dots (21)$$

其中 TSH 為總缺水量， $TSH = \sum_{i=1}^n ST^i$ 。

(6) 風險度：定義為總研究期間內總缺水句數與總分析句數之比值，代表研究期間內缺水時段所佔之比例，式中 n 為總分析句數。

$$RISK = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \begin{aligned} &1, ST^i > 0 \\ &0, ST^i = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

(7) 總缺水率：研究期間(1959 至 2009 年)之總缺水量與總需水量之比值。

$$TSR = \frac{\sum_{t=1}^n ST^t}{\sum_{t=1}^n D^t} \times 100\% \dots\dots\dots (23)$$

(8) 缺水事件頻率：總研究期間內總缺水事件與總分析年數之比值，

$$DF = \frac{DE}{N} \dots\dots\dots (24)$$

式中 N 為總分析年數。

3.4 多準則決策

由於 8 個缺水指標的變化趨勢並不一致，改善一個缺水指標的同時可能會使其他指標惡化，為解決此問題，本文利用多決策準則將 8 個缺

水指標整合為單一目標函數來評估水庫缺水之影響。兩優選模式之目標函數可表示為：

$$\begin{aligned} &\min MSR, \min MCD, \min MCS, \min ACD, \\ &\min ACS, \min RISK, \min TSR, \min DF \end{aligned} \dots (25)$$

由於各缺水指標之單位與數值範圍皆不同，為將 8 個缺水指標整合成單一目標函數，本文將各目標函數正規化使其值介於 0 至 1 之間，同時以 0 為正規化後之最佳解，而 1 為最差之解，而目標函數正規化如下式：

$$OF' = \frac{OF - \min(OF)}{\max(OF) - \min(OF)} \dots\dots\dots (26)$$

其中， OF 及 OF' 分別代表原目標函數及正規化後之目標函數； $\max(OF)$ 及 $\min(OF)$ 分別代表目標函數的最大值與最小值。而正規化後之目標函數可表示為：

$$\begin{aligned} &\min MSR', \min MCD', \min MCS', \min ACD', \\ &\min ACS', \min RISK', \min TSR', \min DF' \end{aligned} \dots (27)$$

本文以 Hwang 及 Yoon (1981)所發展的 Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)來解決上述之多準則問題，其原理為距正理想解(positive ideal solution, PIS)最近且同時距負理想解(negative ideal solution, NIS)最遠之解為最佳解，其計算方式表示如下：

$$\begin{aligned} D^+ &= [\omega_1(MSR' - 0)^2 + \omega_2(MCD' - 0)^2 \\ &+ \omega_3(MCS' - 0)^2 + \omega_4(ACD' - 0)^2 \\ &+ \omega_5(ACS' - 0)^2 + \omega_6(RISK' - 0)^2 \end{aligned} \dots\dots (28)$$

$$+ \omega_7(TSR' - 0)^2 + \omega_8(DF' - 0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\begin{aligned} D^- &= [\omega_1(MSR' - 1)^2 + \omega_2(MCD' - 1)^2 \\ &+ \omega_3(MCS' - 1)^2 + \omega_4(ACD' - 1)^2 \\ &+ \omega_5(ACS' - 1)^2 + \omega_6(RISK' - 1)^2 \end{aligned} \dots\dots (29)$$

$$+ \omega_7(TSR' - 1)^2 + \omega_8(DF' - 1)^2]^{\frac{1}{2}}$$

其中 D^+ 及 D^- 代表距離正理想解與負理想解的距離； ω_i 代表第 i 項的權重指標之權重值且 $\sum_{i=1}^8 \omega_i = 1$ 。本文 8 個缺水指標平均分配權重，因

表 2 南化水庫現況、優選模式一、優選模式二之各缺水指標目標函數值

	最大值	最小值	現況營運	優選模式一	優選模式二
單旬最大缺水率(%)	100	36	100	66	52
缺水事件最長缺水延時(旬)	62	8	39	19	16
缺水事件最大缺水量(MCM)	154.59	31.12	88.50	61.61	41.21
缺水事件平均缺水延時(旬)	23.04	1.17	3.11	2.04	2.64
缺水事件平均缺水量(MCM)	32.02	3.16	4.87	6.38	7.14
風險度	0.78	0.03	0.21	0.12	0.11
總缺水率(%)	22.45	2.06	6.11	7.16	5.46
缺水事件頻率	6.33	0.20	2.41	2.16	1.47

表 3 現況與二優選模式知各缺水指標正規化目標函數值

	現況營運	優選模式一	優選模式二
整合目標函數值 C^*	0.5936	0.7563	0.8449
單旬最大缺水率	1.000	0.469	0.250
缺水事件最長缺水延時	0.574	0.204	0.148
缺水事件最大缺水量	0.465	0.247	0.082
缺水事件平均缺水延時	0.088	0.039	0.067
缺水事件平均缺水量	0.059	0.112	0.138
風險度	0.241	0.128	0.109
總缺水率	0.199	0.250	0.167
缺水事件頻率	0.361	0.319	0.208

此各指標之權重值為 1/8，由此可決定最佳方案如下式所示，最佳解為具有最大相對距離，即 C^* 越接近 1 為此結果越佳，反之越接近 0 為越差。

$$\max C^* = \max \frac{D^-}{D^+ + D^-} \dots\dots\dots (30)$$

本文以遺傳演算法(genetic algorithm, GA)為水庫優選模式尋求最佳解，遺傳演算法為模仿生物界『物競天擇，優勝劣敗』的自然進化法則以獲得優選模式的最佳解，不同於其他優選演算法之處在於其以族群(population)經複製(reproduction)、交配(crossover)及突變(mutation)的演算過程尋求最佳解，本文所使用的參數包括族群數 1000、交配率 0.8 及突變率 0.05。

四、結果與討論

4.1 現況營運結果

以 1959 至 2009 年之旬流量模擬南化水庫之現況營運(現有營運規線及供水係數)，模擬結果

表 4 南化水庫現況及二優選模式決策變數值

	現況營運	優選模式一	優選模式二
$(1, S_1)$	--	--	$(1, 61.7)$
(T_1, S_2)	--	--	$(16, 13.4)$
(T_2, S_2)	--	--	$(21, 13.4)$
(T_3, S_3)	--	--	$(28, 71.7)$
(T_4, S_3)	--	--	$(33, 71.7)$
$(36, S_4)$	--	--	$(36, 40.8)$
供水係數 C_{RC}^2	1	1	1
供水係數 C_{RC}^3	0.70	0.34	0.48
C_1	--	0.00	--
C_2	--	0.02	--
C_3	--	0.11	--
C_4	--	0.32	--

以 8 種缺水指標表示，其值列於表 2。經以單一目標函數最大化及最小化所獲得的各目標函數最大值與最小值列於表 2，相對應之指標正規化結果示列於表 3，而現況及兩個優選模式使用的決策變數則列於表 4。

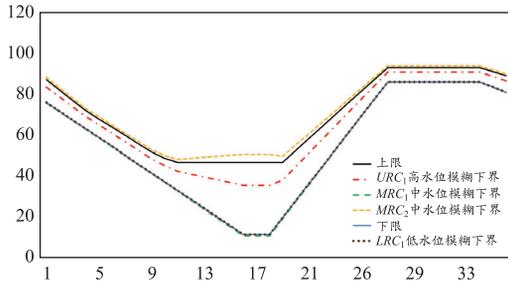


圖 5 優選模式一模糊化規線。

現況營運模擬結果顯示在 1980 年第 15 旬至 1981 年第 16 旬有一長達 39 旬的缺水事件，累積缺水量高達 88.5MCM，且 1981 年第 11 旬至 13 旬缺水率甚至達 100%，此一事件為 51 年研究期間最嚴重之缺水事件。由此可知南化水庫之現況營運規線與在下限以下之供水係數 0.7，雖然有限水之效果，但在嚴重乾旱期間的限水量並不足以使水庫貯蓄足夠之蓄水量供應未來之需求。故本研究另提出兩個優選模式以改善供水效率。

4.2 優選模式一之演算結果

本模式將現有規線模糊化，並優選規線間之供水係數，演算結果之缺水指標結果列於表 2，指標正規化結果列於表 3，使用之決策變數列於表 4。8 項缺水指標中有 6 項優於現況，而整合目標函數 C^* 為 0.7563，亦優於現況的 0.5936。

比較模式一與現況之結果，模式一在下限以下的供水係數調整至 0.34，採用較嚴格的限水機制，如此可將較多的水蓄留在水庫中以減少限水的時間並可降低較高比例缺水的發生機會；但因為限水幅度增大，導致總水率及缺水事件平均缺水量之增加，比較兩方案，總缺水率由現況的 6.11% 增至模式一的 7.16%，缺水事件平均缺水量亦由 4.87MCM 增至 6.38MCM；但最長缺水事件缺水延時則由現況的 39 旬降至 19 旬，缺水事件最大缺水量也由 88.50MCM 降至 61.61MCM。比較所有缺水指標，除上述兩個外，其餘缺水指標如缺水事件平均延時、風險度以及缺水事件頻率優選模式一均有較優的結果；且若以整合目標函數評估，優選模式一之結果優於現況營運。

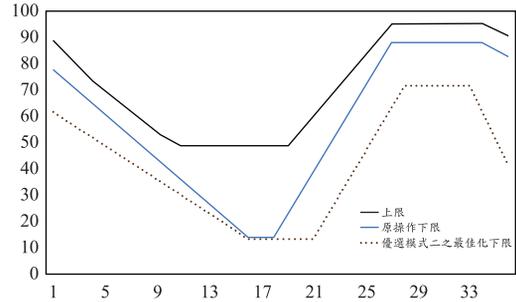


圖 6 優選模式二最佳化規線與現況營運規線比較。

而本模式除將供水係數訂為決策變數外，還另外考慮將現行規線模糊化，使得蓄水量在跨越每個區間時，不會因為些微變化而使供水係數有階梯式跳躍的變化。而經過模糊化的規線結果如圖 5 所示。在模糊的區間內供水係數呈現線性的變化，在調整過之供水係數遠低於現營運的情況下可以有較減緩缺水影響之供水。

4.3 優選模式二之演算結果

優選模式二優選營運規線下限及供水係數，演算結果將下限以下之供水係數調整為 0.48，且將原先操作規線之下限調整如圖 6 所示，由圖可知調整後之最佳規線相較於現行規線低，表示須限水的空間較小。由於不限水的區間增大，可減水限水的機會使得缺水延時得以有效的改善，由表 2 可看出缺水事件最長延時從現況的 39 旬降至 16 旬，另外除缺水事件平均缺水量外，其餘缺水指標均較現況為佳。雖然缺水事件平均缺水量為最高，但該指標定義為總缺水量與總缺水事件之比值，不論是在缺水量亦或是總缺水事件上，模式二都有較好之表現。

綜合比較三個操作方式，可發現模式二降低下限以下之供水係數，雖會提高限水限制，但同時將水庫下限下移可有效減少限水次數，故與現況相比能有更好之供水效率。模式二中除缺水事件平均缺水延時及缺水事件平均缺水量外，其餘缺水指標表現均優於模式一、而亦有 7 項優於現況；從表 2 及表 3 比較各缺水指標變化及整合目標函數，模式二之 C^* 為 0.8449 優於模式一的 0.7562 與現況的 0.5936，故可判斷優選模式二為

較有效率之供水操作模式。

參考文獻

五、結論與建議

本文研究目的為探討南化水庫模糊化及最佳化規線對缺水的影響，經比較現況及二優選模式可得以下結論。

現況營運之供水係數在下限以下為 0.7 雖有限水機制，但於乾早期間仍會造成嚴重的缺水，而若使用二優選模式則能夠有較佳之供水效率，滿足乾早期間用水需求。

優選模式一與現況之比較可發現，降低下限以下之供水係數至 0.34 並模糊化規線後不僅可將整合目標函數提升至 0.7562，相較現況之 0.5936 改善甚多且經由模糊的效應可使供水係數不會有階梯式的跳躍變化；另外優選模式二除將下限以下之供水係數調至 0.48，同時也將原操作下限調低，使得整合目標函數值提升至 0.8449，優於現況及模式一。

優選模式二較優選模式一有較佳改善能力，因其將原操作規線之下限調低，使得限水機會降低；但在缺水事件平均缺水量上，模式一有較佳之表現，其因為模糊化可使缺水量變少但會延長缺水時間。

本研究建議未來可朝以下幾個方向研究：

1. 本文所考慮之模糊化規線與最佳化規線兩優選模式，未來可考慮將兩者結合，探討其對缺水的影響。
2. 本文所探討將規線模糊化、改變供水係數、將下限最佳化，三因素可相互組合探討各變因對水庫供水效率之影響，期找出最佳之營運方法。
3. 本文僅針對水庫蓄水量進行模糊，未來可再將水庫入流量模糊化，如此可模擬更接近實際的情形，得一最適當之水庫操作方法。

謝 誌

本研究承科技部經費補助 (MOST105-2221-E-006-041)，特此表示謝忱。

1. Chang, L.C., Ho, C.C., & Chen, Y.W., "Applying multiobjective genetic algorithm to analyze the conflict among different water use sectors during drought period." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(5), 539-546, 2010.
2. Dubrovin T, Jolma AK, Turunen E (2002), "Fuzzy model for real-time reservoir operation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(1), 66-73.
3. Moeini R, Afshar A, Afshar MH (2011), "Fuzzy rule-based model for hydropower reservoirs operation." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 33(2), 171-178.
4. Mousavi SJ, Ponnambalam K, Karray F (2005), "Reservoir operation using a dynamic programming fuzzy rule-based approach." *Water Resources Management*, 19(5), 655-672.
5. Panigrahi DP, Mujumdar PP (2000), "Reservoir operation modelling with fuzzy logic." *Water Resources Management* 14(2), 89-109.
6. Russell SO, Campbell PF (1996), "Reservoir operating rules with fuzzy programming." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(3), 165-170.
7. Shrestha BP, Duckstein L, Stakhiv EZ (1996), "Fuzzy rule-based modeling of reservoir operation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(4), 262-269.
8. Sivapragasam C, Sugendran P, MarimuthuM, Seenivasakan S, Vasudevan G (2008), "Fuzzy logic for reservoir operation with reduced rules." *Environmental Progress*, 27(1), 98-103.
9. Tu, M.Y., Hsu, N.S., Tsai, F. T.C., & Yeh, W. W.G. (2008), "Optimization of hedging rules for reservoir operations." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(1), 3-13.

10. Tu, M.Y., Hsu, N.S., & Yeh, W. W.G. (2003), "Optimization of reservoir management and operation with hedging rules." Journal of Water Resources Planning and Management, 129(2), 86-97.
11. Zadeh LA (1965), "Fuzzy sets." Information and Control, 8, 338-353.
12. 蕭政宗, 「乾旱時期水庫供水策略對缺水影響分析」, 農業工程學報, 46(2), 54-74, 2000。
13. 經濟部水利處規畫試驗所, 「美濃水庫規劃檢討一、基本設計資料補充調查與檢討(一)高屏溪水源運用檢討工作」, 2002。
14. 經濟部水利署, 南化水庫運用規線要點, 2010。

收稿日期：民國 105 年 11 月 21 日

修正日期：民國 105 年 12 月 6 日

接受日期：民國 105 年 12 月 6 日