

以遺傳演算法推導考量二衝突缺水指標之 南化水庫多標的最佳限水策略

Deriving the Optimal Multi-objective Hedging Rules for the Nanhua Reservoir with Two Conflicting Shortage Indices Using the Genetic Algorithm

國立成功大學水利及海洋工程學系
副教授

蕭政宗*

Jenq-Tzong Shiau

淡江大學水資源及環境工程學系
博士班研究生

黃景裕

Jing-Yu Huang

摘 要

本文研究目的為利用多標的遺傳演算法探討南化水庫乾旱時期最佳限水策略，限水策略以無限水機制之標準操作策略(SOP)為基礎並加入限水參數，限水策略依參數個數分為一點法、二點法、及三參數法，另依參數是否隨時間變化分為定值及時變限水策略，所考慮的參數時間變化頻率有半年、季及月變化。本文選用相互衝突的總缺水率與單旬最大缺水率作為衡量供水水庫營運效率的指標並推導 Pareto 最佳解。經應用於南化水庫分析後顯示增加限水參數個數及參數時間變化頻率可有效改善水庫限水效果，即 Pareto 鋒線往減少總缺水率及單旬最大缺水率的方向移動，且其限水效果可相互疊加，因此在所分析的十二種限水策略中以三參數法月變化限水策略為最優。以後優選最佳解為例，三參數月變化限水策略較之一點法定值限水策略可將總缺水率由 20.4%降低至 14.9%，單旬最大水率由 87.5%降低至 66%。

關鍵詞：多標的遺傳演算法，Pareto 最佳解，限水策略，缺水率，可利用水量。

ABSTRACT

This study aims to exploring the optimal hedging rules using multi-objective genetic algorithm for the Nanhua Reservoir during droughts. Hedging parameters are added in the SOP-based rules to construct water-rationing measures. One-, two-, and three-parameter hedging rules associated with constant and time-varying hedging parameters are employed to

*通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系副教授，70101 台南市東區大學路 1 號，jtshiau@mail.ncku.edu.tw

investigate effects on water-shortage characteristics. Time-varying frequencies considered in this study include semi-annually, quarterly, and monthly varying. Two conflicting shortage indices, total shortage ratio and maximum 10-day shortage ratio, are used to evaluate operation performance of a water-supply reservoir. The Pareto optimal solutions of this multi-objective optimization are searched by the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II). The proposed methodology is applied to the Nanhua Reservoir that is located in southern Taiwan. The results show that increasing time-varying frequency of hedging parameters can effectively reduce water-shortage characteristic, which are further improved by increasing numbers of hedging parameters. Thus, the three-parameter monthly varying hedging rule performs best among twelve hedging rules evaluated in this study. For example, the total shortage ratio and maximum 10-day shortage ratio of the post-optimal solution of the three-parameter monthly varying hedging rule are respectively reduced from 20.4% to 14.9% and 87.5% to 66% when comparing with the results of the one-parameter constant hedging rule.

Keywords: Multi-objective genetic algorithm, Pareto optimal solutions, Hedging rule, Shortage ratio, Water availability.

一、前言

水庫蓄豐濟枯的功能可以避免河川流量因季節性的豐枯不均而導致供水的不穩定，但由於水庫的庫容有限，在不預期且嚴重的乾旱時期，水庫供水有時無法滿足既定的計畫需水量。水庫管理單位為了避免高比例缺水所帶來生活不便及經濟損失等負面影響，均會事先採取適當的因應措施，最常見的策略為事先採取小比例的限水，即主動減少供水以保留水庫蓄水量以供乾旱時期使用，此措施可避免乾旱時期突發的高比例缺水。但不合適的限水措施，例如過早實施限水、過於頻繁的限水、限水比例過高等，不僅無法減少缺水的損失，可能還會影響供水的穩定性，因此制定完善的限水策略亦是水庫營運管理中重要的一環。

Lund 及 Reed (1995)指出限水策略是水庫營運常用的需求管理手段，惟缺乏有系統的研究。由於不同的限水策略可能會導致不同的缺水特性，因此以缺水特性配合系統分析來探討最佳限水策略在過去的研究文獻中最為常見，例如 Hashimoto 等(1982)利用動態規劃(dynamic pro-

gramming)在最小化缺水量的條件下，以可靠度(reliability)、回復度(resiliency)及傷害度(vulnerability)等指標評估水庫營運狀況；Moy 等(1986)利用多目標線性規劃來研究水庫操作策略；Bayazit 及 Unal (1990)以起始可利用水量(SWA)及終止可利用水量(EWA)定義限水策略並利用模擬法研究水庫營運加入限水措施的影響；Shih 及 ReVelle (1994)利用優選模式最小化單月最大缺水量尋求水庫最佳限水策略；Shih 及 ReVelle (1995)另以混合整數規劃(mixed integer programming)求解不連續形式之水庫最佳限水策略。Srinivasan 及 Philipose (1996)曾以序率模擬的方式探討水庫限水策略參數與缺水特性之關係；Neelakantan 及 Pundarikanthan (1999)曾發展模擬-優選模式於推導水庫多層次最佳限水策略；蕭(2000)曾以不同水庫操作策略探討其與缺水特性間之關係；Shiau (2003)另發展水庫供水指數以決定限水時機，並探討其所導致之缺水特性；Tu 等(2003)以混合整數規劃探討同時考量水庫運用規線(rule curve)與限水策略之水庫最佳管理；李及蕭(2003)探討水庫限水策略參數與不同缺水特性間之關係以決定最佳限水策略；Draper

及 Lund (2004)以最大化立即供水效益及蓄水供水未來使用效益之和來探討水庫最佳限水策略；Huang 及 Yuan (2004)與 Huang 及 Chou (2005)建立淡水河流域翡翠及石門水庫之乾旱預警系統以輔助水庫管理單位於乾旱時期供水決策之制定；Shiau 及 Lee (2005)以妥協規劃(compromise programming)最小化單月最大缺水量及總缺水率來建立最佳水庫限水策略；周及林(2006)以平均缺水率為基準建立曾文水庫之水庫運用規線；黃等(2006)結合乾旱指標及預警燈號以翡翠水庫為例建立乾旱預警系統；吳等(2007)應用多目標遺傳演算法於探討翡翠水庫包含供水及發電標之最佳營運；徐等(2008)以石門水庫為例探討水庫運用規線之上限對水庫營運缺水之影響。

前述有關水庫限水策略文獻回顧中，多數以單一缺水特性或將不同缺水特性以權重或其他方式整併成單一指標，再利用單一標的優選模式求解水庫最佳限水策略。但缺水特性間的變化趨勢並非一致(參閱蕭(2000)與 Shiau (2003))，以優選模式改善某一缺水指標，可能會使其他缺水指標惡化，但若將數個缺水指標整合成單一標的函數以求解最佳解，則無法了解缺水指標間之相互影響程度。在數理規劃上同時考量相互衝突的缺水指標即構成多標的優選問題(multi-objective optimization)，由於多標的優選問題不存在單獨一個最佳解可使其各標的值均優於其他解，因此多標的優選問題所求的是 Pareto 最佳解(Pareto optimal solution)，或稱為非優勢解(non-dominated solution)，其定義為在標的空間(objective space)無任何一解的標的函數值均優於其他非優勢解。求解多標的 Pareto 最佳解的過程遠較單一標的最佳解為繁複，近年來廣受歡迎的遺傳演算法(genetic algorithm, GA)已被證實較傳統方法更有效率求解多標的 Pareto 最佳解(Zitzler 等, 2000)。有關應用遺傳演算法於尋求水資源相關問題 Pareto 最佳解的研究包括集水區模式(Bekele 及 Nicklow, 2005；Muleta 及 Nicklow, 2005)、含水層參數檢定(Reed 等, 2003)、配水管網(Prasad 及 Park, 2004；Kapelan 等, 2005；Vamvakieridou-Lyroudia 等, 2005)、河川水質問題(Burn 及

Yulianti, 2001；Prasad 等, 2004；Yandamuri 等, 2006)、模式檢定(Kapelan 等, 2003；Khu 及 Madsen, 2005)、水庫營運(Kim 等, 2006；Reddy 及 Kumar, 2006；Chen 及 Chang, 2007；Chang 及 Chang, 2009；Shiau, 2009)、河川環境流量及水源運用(Suen 及 Eheart, 2006；Shiau 及 Wu, 2007)。

本文將利用多標的遺傳演算法建立供水水庫乾旱時期之最佳限水策略，至於衡量水庫限水策略良莠的標的函數，本文考慮二相互衝突之缺水指標，即代表長時期水庫營運效率的總缺水率及代表短時期缺水現象的單旬最大缺水率，所採用的限水策略依限水參數個數分為一點法、二點法及三參數法，另將參數是否隨時間變化分為定值及時變限水參數，參數隨時間變化的頻率包括半年變化、季變化及月變化。本文應用所建立的方法於位在台灣南部區域的南化水庫以建立其最佳限水策略，並探討不同參數個數及不同參數變化頻率的限水策略對多標的 Pareto 最佳解的影響。

二、研究方法

2.1 限水策略

在不預期且嚴重的乾旱期間，水庫供水量有時無法滿足既定的計畫需水量，限水的概念為事先採取小比例的減少供水以避免乾旱時期高比例缺水現象的發生，因此水庫限水策略必須包含評估水庫供水能力的指標，以判斷限水時機及限水比例。本文以可利用水量(water availability, WA)來代表水庫的供水能力，其定義為水庫蓄水量加上入流量並扣除蒸發量：

$$WA_t = S_t + Q_t - E_t \quad \dots\dots\dots(1)$$

其中 WA_t 為 t 時刻水庫可利用水量； S_t 為 t 時刻水庫蓄水量； Q_t 為 t 時刻水庫入流量； E_t 為 t 時刻水庫蒸發量，以下式推估：

$$E_t = \frac{1}{2}(A_t + A_{t+1})e_t \quad \dots\dots\dots(2)$$

其中 A_t 及 A_{t+1} 分別為 t 及 $t+1$ 時刻水庫水域面積； e_t 為 t 時刻之水面蒸發率。由於 A_{t+1} 無法於 t 時刻預先已知，因此需以假設值並配合疊代方式計算

得 E_t 值，詳細之計算過程說明於後。

當可利用水量低於或達到某標準時即採取限水，而此標準與限水比例即為限水策略中之限水參數。本文將以標準操作策略(standard operating policy, SOP)為基礎增加限水參數以建立限水策略，SOP 的供水原則為儘可能滿足用水需求，即使蓄水量不足也不折扣供水，直至水庫空庫為止，但亦不提供多餘水量，除非滿庫而溢流。由於 SOP 並未包含限水機制，因此無法提前限水以保留水庫蓄水量，有時會產生高比例缺水，甚至有空庫的情況發生，惟 SOP 可使水庫營運期間總缺水率及總缺水量降至最低(Hashimoto 等，1982)。因此，本文以 SOP 為基礎增加不同個數的限水參數建立不同的限水策略，以期在不過度惡化總缺水率的情況下改善其他的缺水指標。

2.1.1 一點法限水策略

為使 SOP 包含限水機制，在可利用水量低於某一特定值時執行限水，即不足量供水以保留水庫蓄水量供未來使用，當可利用水量高於此值時代表水庫供水能力充裕，則以計畫需水量供水。此一特定值即為限水參數，稱為終止可利用水量(ending water availability, EWA)，而供水比例(即 $1 - \text{限水比例}$)則以 D_t 對 EWA_t 之比值來決定，因此在已知 D_t 與 EWA_t 的條件下，不論水庫供水能力高或低，此策略之限水比例皆為固定。此法僅有一參數，即 Draper 及 Lund (2004)所稱之一點法限水策略(one-point hedging)，其供水方式如圖 1(a)及下式所示：

$$R_t = WA_t \left(\frac{D_t}{EWA_t} \right), SP_t = 0, \text{ 當 } WA_t < EWA_t \dots\dots\dots (3a)$$

$$R_t = D_t, SP_t = 0, \text{ 當 } EWA_t \leq WA_t < D_t + C \dots\dots\dots (3b)$$

$$R_t = D_t, SP_t = WA_t - R_t - C, \text{ 當 } WA_t \geq D_t + C \dots\dots\dots (3c)$$

其中 D_t 為 t 時刻計畫需水量； C 為水庫庫容； R_t 為 t 時刻水庫供水量； SP_t 為 t 時刻水庫溢流量； EWA_t 為 t 時刻終止可利用水量，其值介於 D_t 與 $D_t + C$ 之間。

當 EWA_t 為 D_t 時，則本限水策略與 SOP 一致，即無提前限水之效果。上述(3a)式代表水庫

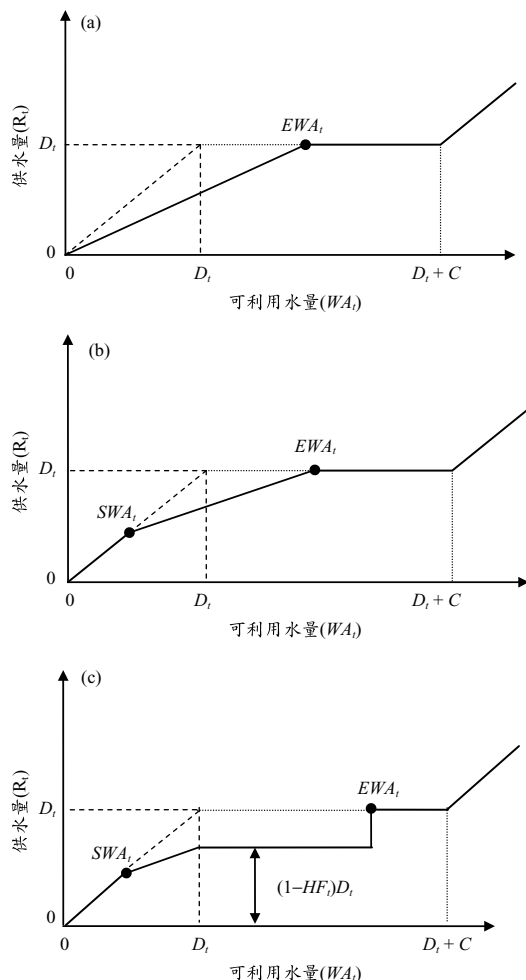


圖 1 限水策略供水示意圖，(a)一點法；(b)二點法；(c)三參數法

可利用水量低於 EWA_t 時，則限水以保留水庫蓄水量；(3b)及(3c)式代表水庫具有足夠的可利用水量，可充分滿足計畫需水量，其中(3b)式為水庫入流量較小的情況，在供應計畫需水量後水庫不為滿庫，因此不發生溢流，而(3c)式表水庫入流量較大，不僅可充分供應計畫需水量，亦因滿庫而產生溢流。至於 EWA_t 應訂為何值則與所能接受的缺水特性有關，屬於決策問題，本文將以優選模式在以特定缺水指標為標的函數條件下求取最佳限水策略。

2.1.2 二點法限水策略

前述一點法限水策略在水庫可利用水量甚

低時仍持續限水，此會使缺水率上升但所能增加的蓄水量卻非常有限，因此第二種限水策略增加一限水參數稱為起始可利用水量(starting water availability, SWA_t)，即當水庫可利用水量大於 SWA_t 且小於 EWA_t 時才採取限水措施，而供水比例則以 $(D_t - SWA_t)/(EWA_t - SWA_t)$ 來決定，但當水庫可利用水量低於 SWA_t 時，表示水庫供水能力已經甚低，不再額外限水，而以水庫可利用水量供水，僅在水庫可利用水量大於 EWA_t 時才不限水。本法具有二參數(SWA_t 與 EWA_t)，Draper 及 Lund (2004)稱之為二點法限水策略(two-point hedging)，其供水方法如圖 1(b)及下式所示：

$$R_t = WA_t, SP_t = 0, \text{ 當 } WA_t < SWA_t \dots\dots\dots(4a)$$

$$R_t = SWA_t + (WA_t - SWA_t) \left(\frac{D_t - SWA_t}{EWA_t - SWA_t} \right), SP_t = 0, \\ \text{當 } SWA_t \leq WA_t < EWA_t \dots\dots\dots(4b)$$

$$R_t = D_t, SP_t = 0, \text{ 當 } EWA_t \leq WA_t < D_t + C \dots\dots\dots(4c)$$

$$R_t = D_t, SP_t = WA_t - R_t - C, \text{ 當 } WA_t \geq D_t + C \dots\dots\dots(4d)$$

其中 SWA_t 為 t 時刻起始可利用水量，其值介於 0 和 D_t 之間； EWA_t 為 t 時刻終止可利用水量，其值介於 D_t 與 $D_t + C$ 之間。

當 SWA_t 為 D_t 或 EWA_t 為 D_t 時，則本策略與 SOP 一致。(4a)式代表水庫供水能力甚低，水庫以可利用水量全部供水而不另行限水；(4b)式代表水庫可利用水量介於 SWA_t 與 EWA_t 時，則依二點間之關係限水以保留水量；(4c)及(4d)式代表水庫供水能力大於需水量，故無須限水。至於限水策略中的二個決策變數(SWA_t 與 EWA_t)，則以優選法在特定缺水指標為標的函數條件下求解其最佳值。

2.1.3 三參數法限水策略

前述二種限水策略均不包括限水比例，即限水比例取決於水庫可利用水量(WA_t)與 SWA_t 及 EWA_t 之間的關係，因此用水者無法事先知道限水比例且限水比例無法為定值，本文所考慮的第三種限水策略為第二種限水策略增加一限水因子(hedging factor, HF)，即限水比例，代表所減少

的供水比例，即水庫可利用水量介於 SWA_t 與 EWA_t 時皆有一致的限水比例(HF_t)。本文稱此法為三參數限水策略(three-parameter hedging)，為使水庫可利用水量在 SWA_t 至 D_t 與 D_t 至 EWA_t 之間有相同的限水比例，本供水策略將較二點法限水策略多一供水規則，其供水方式如圖 1(c)及下式所示：

$$R_t = WA_t, SP_t = 0, \\ \text{當 } WA_t > SWA_t \dots\dots\dots(5a)$$

$$R_t = SWA_t + (WA_t - SWA_t) \left(\frac{(1 - HF_t) D_t - SWA_t}{D_t - SWA_t} \right), SP_t = 0, \\ \text{當 } SWA_t \leq WA_t < D_t \dots\dots\dots(5b)$$

$$R_t = (1 - HF_t) D_t, SP_t = 0, \\ \text{當 } D_t \leq WA_t < EWA_t \dots\dots\dots(5c)$$

$$R_t = D_t, SP_t = 0, \\ \text{當 } EWA_t \leq WA_t < D_t + C \dots\dots\dots(5d)$$

$$R_t = D_t, SP_t = WA_t - R_t - C, \\ \text{當 } D_t + C \leq WA_t \dots\dots\dots(5e)$$

其中 HF_t 為 t 時刻限水因子，即減少供水的比例，其值介於 0 與 100%之間。(5b)式中若 $(1 - HF_t)D_t < SWA_t$ 則改以下式計算，

$$R_t = (1 - HF_t) D_t + (D_t - WA_t) \left(\frac{SWA_t - (1 - HF_t) D_t}{D_t - SWA_t} \right), SP_t = 0, \\ \text{當 } SWA_t \leq WA_t < D_t \dots\dots\dots(5b)'$$

當 HF_t 為 0 時，本限水策略即無限水，亦即與 SOP 一致。前述(5a)式為水庫可利用水量低於 SWA_t ，因為水庫供水能力甚低，因此不額外限水；(5b)式(或(5b)')式及(5c)式代表水庫可利用水量介於 SWA_t 與 EWA_t ，則以固定比例 HF_t 減少供水以保留水庫蓄水量；(5d)及(5e)式代表水庫供水能力大於 EWA_t ，無須限水，惟(5d)式不發生溢流，但(5e)式會有溢流產生。至於 HF_t 、 SWA_t 與 EWA_t 均為決策變數，本文以優選模式求解。

上述限水策略之優點為參數化，即限水策略

中有明確之限水參數定義，因此限水之結果(以缺水指標表示)易表為限水參數之函數；另供水量隨可利用水量的連續變化，而非間斷的變化，亦較容易提昇用水效率。

2.2 時變性限水策略

水庫限水策略由限水參數組成，不同的限水參數組合將會有不同的限水效果，即缺水特性。若限水參數不隨著時間而變，則每個時刻的限水策略均為一致，本文稱為定值限水策略。由於台灣地區河川流量豐枯不均，水庫入流量在豐枯季節差異甚大，因此本文另考慮時變性限水策略，即限水參數隨時間而改變，以了解水庫營運是否因採用時變性限水策略而提昇其營運效率。本文所考慮時變性限水策略限水參數的變化頻率有半年、季及月變化，半年變化將依豐水期(五月至十月)及枯水期(十一月至隔年四月)而變；季變化則依豐枯水期各自再分為二季，即二月至四月、五月至七月、八月至十月、十一月至一月；月變化則每個月限水參數值均不相同。不同變化頻率時變性最佳限水策略將與最佳定值限水策略比較以探討參數變化頻率對限水結果的影響。

2.3 缺水指標

為比較不同限水策略對水庫營運的影響，本文用以衡量水庫限水策略之缺水指標包括代表長時期水庫營運效率之總缺水率及短時期缺水現象之單時刻最大缺水率，其定義分別如下：

(1)總缺水率：分析時程內總缺水量對總計畫需水量的比值，其值介於 0 與 100%之間，定義為：

$$TSR = \frac{\sum_{t=1}^N ST_t}{\sum_{t=1}^N D_t} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

其中 N 為總分析時刻； ST_t 為 t 時刻缺水量，定義為：

$$ST_t = \min\{R_t - D_t, 0\} \dots\dots\dots (7)$$

(2)單時刻最大缺水率：分析時程內所有單一缺水時刻缺水率之最大值，定義為：

$$MSR = \max_t \left\{ \frac{ST_t}{D_t} \times 100\% \right\}, t = 1, 2, \dots, N \dots\dots (8)$$

本文採用上述二缺水指標的主要目的為該二指標的變化趨勢並不一致，若為降低總缺水率則應盡量不採取限水措施，惟遇到嚴重乾旱時期可能會因水庫蓄水不足而使得單時刻最大缺水率增加；反之，若欲使單時刻最大缺水率下降，則應時常限水使水庫儘量保持足夠蓄水量以應付突發的乾旱情況，惟經常性的限水會增加總缺水率。另一方面，總缺水率可能會因有較長的不缺水時期而降低，此會減低嚴重缺水時期的效應；反之，若僅採用單時刻最大缺水率評估，會因只注重單一嚴重缺水事件而忽略了其他時期的供水效率，因此本文採用此二具競合的缺水指標評估水庫供水效能。

2.4 多標的優選模式

由於並非所有缺水指標的變化趨勢都是一致的，限水策略可能改善某一指標，而使另一指標惡化，若忽略此現象，則可能使得限水策略欲改善缺水影響的效果不彰。因此，本文選擇具衝突的總缺水率(TSR)及單時刻最大缺水率(MSR)二缺水指標作為優選模式的標的函數，此二標的函數均應愈小愈好，亦即：

$$\min TSR \text{ 且 } \min MSR \dots\dots\dots (9)$$

惟相互衝突的標的函數無法同時達到最小，此在數理規劃上即構成多標的優選問題，理論上並不存在單一最佳解，而是以 Pareto 最佳解來代表，本文將以遺傳演算法求解上述考量二相互衝突缺水指標之 Pareto 最佳解。

2.5 非優勢排列遺傳演算法(NSGA-II)

遺傳演算法(genetic algorithm)是模仿生物界『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。

由於多標的優選問題並不存在單獨一個最

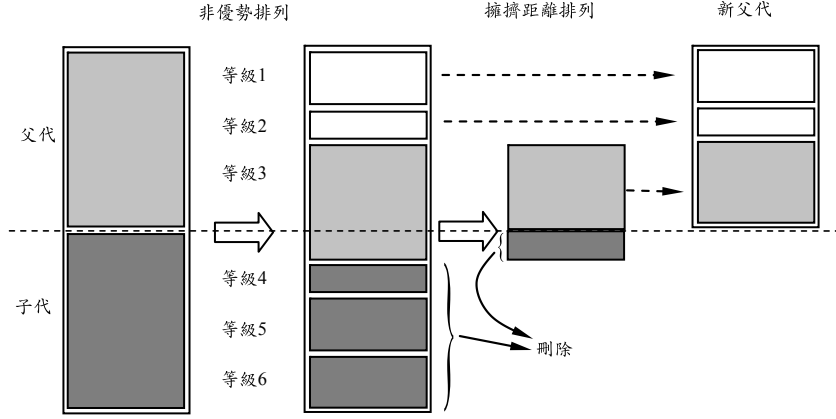


圖 2 NSGA-II 演算過程示意圖

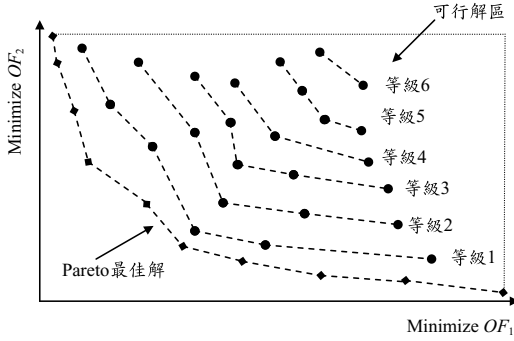


圖 3 NSGA-II 非優勢等級排列示意圖

佳解之目標函數值均優於其他解，因此多標的優選問題所求的是 Pareto 最佳解，或稱為非優勢解 (non-dominated solution)。近年來多標的遺傳演算法 (multi-objective genetic algorithm, MOGA) 發展迅速，較為常用的方法有 Knowles 及 Corne (1999) 所發展的 PAES (Pareto archived evolution strategy)、Zitzler 及 Thiele (1999) 所發展的 SPEA (strength Pareto evolutionary algorithm)、與 Deb 等 (2002) 所發展的 NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm II) 等，Deb 等 (2002) 曾指出 NSGA-II 優於 PAES 及 SPEA，因此本文將以 Deb 等 (2002) 所發展的非優勢排列遺傳演算法 (NSGA-II) 來求解考量二相互衝突缺水指標之最佳限水策略，NSGA-II 的演算過程如圖 2 所示，其演算步驟簡要說明如下：

1. 步驟一：結合族群個數為 n 的父代及子代成為

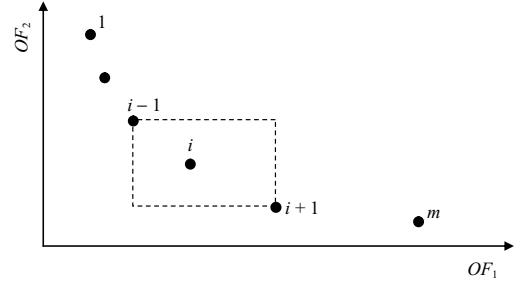


圖 4 NSGA-II 擁擠距離定義示意圖

個數為 $2n$ 的族群，並對整併後的族群依據其標的函數值執行非優勢排列 (non-dominated sorting) 以確定其隸屬的非優勢等級 (non-domination level)。以本文進行研究之最小化二標的函數為例，不同非優勢排列等級示意圖如圖 3 所示，位於較低非優勢等級族群優於較高非優勢等級，即等級 1 之族群優於等級 2，等級 2 之族群優於等級 3，依此類推。

2. 步驟二：對每一非優勢等級所包含之族群進行擁擠距離 (crowding distance) 排列，各族群依據其標的函數值定義擁擠距離如下，如圖 4 所示：

$$d_i = \frac{OF_1^{i+1} - OF_1^{i-1}}{OF_1^{\max} - OF_1^{\min}} + \frac{OF_2^{i+1} - OF_2^{i-1}}{OF_2^{\max} - OF_2^{\min}}, i = 2, 3, \dots, m-1 \quad (10)$$

其中 OF_1 及 OF_2 分別代表二不同標的函數值； $OF_1^{\max}$ 及 $OF_1^{\min}$ 為整併父代及子代後 $2n$ 族群中之 OF_1 之最大值及最小值； $OF_2^{\max}$ 及 $OF_2^{\min}$ 為

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)
1 月	0.20	7.64	2.88	8.32	1.5
2 月	0.21	7.82	3.69	7.42	1.5
3 月	0.25	8.15	4.31	8.16	3.5
4 月	0.26	9.03	4.93	8.09	3.5
5 月	0.27	9.94	4.86	8.98	3.5
6 月	0.72	10.28	4.10	20.62	30.0
7 月	0.72	10.46	4.57	23.45	30.0
8 月	0.72	10.46	4.11	21.39	30.0
9 月	0.72	10.42	4.12	21.38	30.0
10 月	0.71	9.90	3.78	15.08	8.8
11 月	0.41	8.88	3.00	12.58	3.5
12 月	0.25	8.13	2.69	9.20	3.5

2n 族群中 OF_2 之最大值及最小值； d_i 為各等級內依 OF_1 由小至大排序為第 i 族群之擁擠距離， d_1 及 d_m 則定義為 ∞ ； m 為各等級之族群數。

3. 步驟三：將非優勢等級依等級低至等級高的順序排入新的父代中至其族群數達到 n 為止，若最後一個等級無法全數排入，則依該等級每一族群之擁擠距離來決定，擁擠距離越大者優先排入，其目的為使每一等級所構成之鋒線能儘量往外延伸。

4. 步驟四：將新的父代內之族群經複製、交配及突變等過程產生新的子代。

上述步驟持續重複至標的函數達到所需的精度或指定的世代數為止，最後所得最低非優勢等級內之族群即構成 Pareto 最佳解。NSGA-II 在複製過程中是以競爭式選擇(tournament selection)的方式來選擇族群，選擇的方式是以非優勢等級作為適合度函數(fitness function)，若兩族群來自不同等級則以較低等級獲勝，若來自相同等級則以擁擠距離較大者為獲勝，獲勝的族群將進入交配池(mating pool)，再行交配及突變以產生新的族群。詳細的演算步驟及說明請參閱 Deb 等(2002)。

本文將以 NSGA-II 來建立多標的遺傳演算法水庫優選模式以推導最佳限水策略，並比較三種不同參數個數及四種不同參數變化頻率共十二種限水策略 Pareto 最佳解的差異。

三、個案研究

3.1 南化水庫及甲仙攔河堰系統概述

南化水庫位於曾文溪支流後堀溪中游，為供應台南及高雄地區自來水之單一目標水庫，其集水區面積約為 104 平方公里，原設計庫容量為 158 百萬立方公尺，呆容量為 3.45 百萬方公尺。其水源除水庫集水區流量外，另包括旗山溪甲仙攔河堰的越域引水量。甲仙攔河堰位於高屏溪流旗山溪，集水區面積約為 408 平方公里，其設計越域引水量為 30 cms。

南化水庫壩址處及甲仙攔河堰址處均無流量站的設置，因此需利用其他流量站之紀錄來推估，本文採用水利處(2002)的估算方式以推估該二處在 1959 至 1999 年的旬流量紀錄，該二處之年平均逕流量分別為 207.3 及 1,120.7 百萬立方公尺，但流量豐枯不均，豐水期(五月至十月)流量分別佔全年流量之 96.6%及 89.8%。在南化水庫及甲仙攔河堰興建之前，下游處即有引水供農業使用，此部份水權量應優先保留以保障其用水權利。南化水庫供應南台灣高雄及台南地區的生活及工業用水，平均每日約為 80 萬立方公尺，因季節性的因素，各月份的需水量略有不同，夏季用水高於冬季用水。南化水庫與甲仙攔河堰各月份應保留水權量、計畫需水量及計畫越域引水量如表 1 所列。

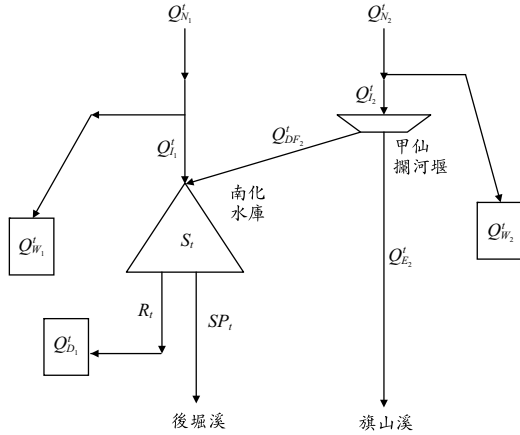


圖 5 南化水庫及甲仙攔河堰系統示意圖

3.2 水庫及攔河堰系統之營運模式

為了解不同限水策略對系統供水之影響，需先建立系統營運模式，南化水庫及甲仙攔河堰系統如圖 5 所示，其中 $Q_{N_1}^t$ 及 $Q_{N_2}^t$ 分別代表後堀溪及旗山溪在南化水庫及甲仙攔河堰處之流量，此二流量系列(1959 至 1999 年)假設為已知；由於在南化水庫及甲仙攔河堰興建之前，其下游已有引水供灌溉之用，該部份用水量需予以優先保留，以 $Q_{W_1}^t$ 及 $Q_{W_2}^t$ 分別代表南化水庫及甲仙攔河堰下游之灌溉保留水權量(其值列於表 1)，當上游流量大於此保留水權量時方有剩餘水量貯蓄於水庫及越域引水，因此水庫及攔河堰實際入流量 $Q_{I_1}^t$ 及 $Q_{I_2}^t$ 可表為：

$$Q_{I_1}^t = \max\{Q_{N_1}^t - Q_{W_1}^t, 0\} \dots\dots\dots(11a)$$

$$Q_{I_2}^t = \max\{Q_{N_2}^t - Q_{W_2}^t, 0\} \dots\dots\dots(11b)$$

甲仙攔河堰實際越域引水量除受到設計引水容量(30 cms)的限制外，尚有各月份越域引水水權量的限制(本文稱此水權限制為計畫越域引水量，其值列於表 1，以 $Q_{D_2}^t$ 來代表，則實際越域引水量 $Q_{DF_2}^t$ 可表為：

$$\begin{aligned} Q_{DF_2}^t &= \min\{Q_{I_2}^t, Q_{D_2}^t\} \\ &= \min\{\max\{Q_{N_2}^t - Q_{W_2}^t, 0\}, Q_{D_2}^t\} \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

則甲仙攔河堰之水平衡方程式可表為：

$$Q_{I_2}^t = Q_{DF_2}^t + Q_{E_2}^t \dots\dots\dots(13)$$

其中 $Q_{E_2}^t$ 為甲仙攔河堰下游河川剩餘流量。

南化水庫之水平衡方程式則包含越域引水量，如下：

$$\begin{aligned} S_{t+1} &= S_t + Q_{I_1}^t + Q_{DF_2}^t - R_t - SP_t - E_t \\ &= S_t + \max\{Q_{N_1}^t - Q_{W_1}^t, 0\} \\ &\quad + \min\{\max\{Q_{N_2}^t - Q_{W_2}^t, 0\}, Q_{D_2}^t\} \\ &\quad - R_t - SP_t - E_t \end{aligned} \dots\dots\dots(14)$$

其中 R_t 為水庫供水量， $0 \leq R_t \leq Q_{D_1}^t$ ， $Q_{D_1}^t$ 為水庫計畫需水量，其值列於表 1； SP_t 為水庫溢流量； E_t 為蒸發量，其估算詳(2)式，南化水庫日蒸發率亦列於表 1(水利處，1997)； S_t 為水庫蓄水量， $0 \leq S_t \leq C$ ， C 為庫容量。

水庫供水量 R_t 需由前述限水策略來決定，不論是一點、二點或三參數限水策略都必須藉由可利用水量 WA_t 來決定，南化水庫及甲仙攔河堰系統之可利用水量定義為：

$$\begin{aligned} WA_t &= S_t + Q_{I_1}^t + Q_{DF_2}^t - E_t \\ &= S_t + \max\{Q_{N_1}^t - Q_{W_1}^t, 0\} \\ &\quad + \min\{\max\{Q_{N_2}^t - Q_{W_2}^t, 0\}, Q_{D_2}^t\} - E_t \end{aligned} \dots\dots\dots(15)$$

計算時需先決定 t 時刻之 WA_t ，再利用限水策略決定 R_t 後，即可利用(14)式計算 $t+1$ 時刻之蓄水量 S_{t+1} ，並由(7)式計算 t 時刻之缺水量，重複上述演算步驟至全部分析時刻，即可得到演算時程內之總缺水率((6)式)及單旬最大缺水率((8)式)。計算 WA_t 時需已知 E_t ，但其中包含未知的 A_{t+1} ，因此先假設一 A_{t+1} 值以利後續之計算，依前述步驟計算得 S_{t+1} ，再以水庫容量-面積曲線推算 A_{t+1} ，若與原假設值誤差在容許範圍內則前進至 $t+1$ 時刻繼續下一時刻之計算，否則以新推估之 A_{t+1} 再重複計算 S_{t+1} 直至收斂為止，一般僅需數次疊代計算即可達到收斂狀態。

四、結果與討論

本文以 NSGA-II 求解南化水庫供水系統考量二相互衝突缺水指標(總缺水率及單旬最大缺

水率)為標的函數((9)式)之最佳限水策略,限制式除水庫系統營運模式((11)-(15)式)外,限水策略((3)-(5)式)以不同參數個數(1-3 個)與定值及時變(半年、季、月變化)參數組合成 12 種限水策略限制式。供水系統演算時刻則採用台灣地區慣用的旬,至於遺傳演算法之參數則取族群數為 1,000,交配率為 0.8,突變率為 0.05。優選模式之決策變數個數在一點法限水策略參數為定值、半年變化、季變化及月變化分別為 1、2、4 及 12 個,在二點法限水策略則增為 2、4、8 及 24 個,三參數限水策略在不同參數變化頻率之決策變數個數則為 3、6、12 及 36 個。演算代數在決策變數個數少於 12 時取為 4000,大於 12 時則取為 8000,並以各代最低非優勢等級之族群數是否已固定不變來判斷 Pareto 最佳解已達到穩定狀態。

4.1 限水參數時間變化頻率對 Pareto 最佳解之影響

多標的最佳限水策略 Pareto 最佳解以標的空間之總缺水率(TSR)及單旬最大缺水率(MSR)來表示,一點法、二點法及三參數法限水策略各不同參數變化頻率之 Pareto 最佳解分別如圖 6(a)、(b)、(c)所示。由圖可知, Pareto 鋒線(Pareto front)由左上角先往下再往右以非線性方式延伸,此顯示 TSR 與 MSR 間具有競合性,即二者無法同時最小化,亦即降低某一指標會使另一指標增加。但不論限水參數個數為何,限水策略之參數時間變化頻率較高則其 Pareto 鋒線有往左下角移動的趨勢,此結果顯示參數變化頻率較高的限水策略可得到較佳的限水結果,即較低的總缺水率及單旬最大缺水率,亦即月變化最佳限水策略優於季變化最佳限水策略,季變化最佳限水策略優於半年變化最佳限水策略,半年變化最佳限水策略優於定值最佳限水策略。Pareto 鋒線會有此趨勢的原因主要在於水庫入流量季節性豐枯不均的現象非常明顯,限水策略參數若能隨流量變化而調整,較能符合水庫入流量變化特性而有較佳的限水效果,即減少缺水並提昇水資源運用效率。

各 Pareto 鋒線的端點代表對單獨一標的最

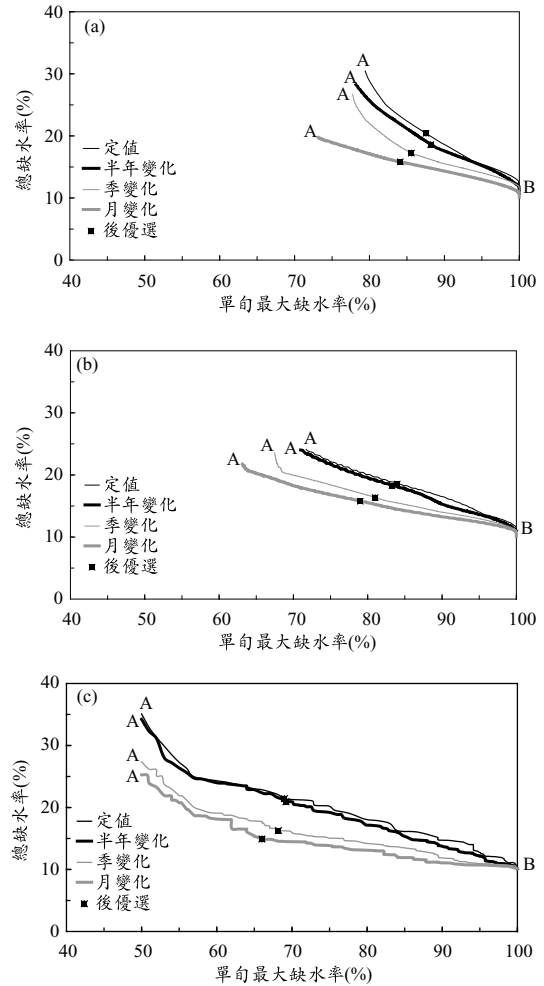


圖 6 (a)一點法、(b)二點法、(c)三參數法限水策略不同參數時間變化頻率之 Pareto 最佳解比較圖

佳化的結果,左上角點(圖 6 中各鋒線之 A 點)為最小化單旬最大缺水率的結果,因此有最低之單旬最大缺水率,但其總缺水率為最大;反之,右下角點(圖 6 中各鋒線之 B 點)為最小化總缺水率的結果,該點總缺水率為最低,但有最大的單旬最大缺水率。各不同參數個數限水策略不同參數時間變化頻率 Pareto 鋒線二端點(A 點及 B 點)之標的函數值列於表 2。不論限水策略參數個數的多寡,限水參數時間變化頻率較大的 Pareto 鋒線 A 點之標的函數值均較小,例如一點法(圖 3(a)) Pareto 鋒線 A 點之總缺水率由定值最佳限水策略之 30.5%降至月變化最佳限水策略之 19.6%;單

表 2 不同參數個數及不同參數時間變化頻率限水策略 Pareto 鋒線二端點及後優選最佳解標的函數值

	一點法											
	定值			半年變化			季變化			月變化		
	A	B	後優選	A	B	後優選	A	B	後優選	A	B	後優選
TSR (%)	30.5	10.7	20.4	28.3	10.7	18.6	26.7	10.7	17.2	19.8	10.1	15.7
MSR (%)	79.4	100	87.5	78.2	100	88.2	77.8	100	85.6	73.1	100	84.5
	二點法											
	定值			半年變化			季變化			月變化		
	A	B	後優選	A	B	後優選	A	B	後優選	A	B	後優選
TSR (%)	24.1	10.1	18.5	24.0	10.1	18.3	23.6	10.1	16.4	21.3	10.1	15.8
MSR (%)	71.7	100	84.0	71.0	100	83.3	67.5	100	81.0	64.0	100	79.0
	三參數法											
	定值			半年變化			季變化			月變化		
	A	B	後優選	A	B	後優選	A	B	後優選	A	B	後優選
TSR (%)	35.1	10.1	21.4	34.2	10.1	20.9	27.4	10.1	16.3	25.3	10.1	14.9
MSR (%)	50.0	100	69.0	50.0	100	69.2	50.0	100	68.2	50.0	100	66.0

說明：A 代表鋒線之左上端點，B 代表鋒線之右下端點。

旬最大缺水率亦由 79.4%降至 73.4%。但 B 點即使參數為月變化都無法有更進一步的改善，主要原因在於歷史流量紀錄中存在有極端的乾旱時期，以目前的計畫需水量而言，不論採用何種限水策略及參數時間變化頻率均無法逃避該旬無法供水，即該旬缺水率為 100%，例如 1963 年的第 14 及第 17 旬、1980 年的第 13 至第 18 旬、1996 年的第 8 至第 10 旬都是這種極端乾旱情況。

Pareto 鋒線上的每一個點都是最佳解，如何選擇鋒線上的點作為制定營運策略的參考則有賴決策者的經驗判斷或是以此二標的的替代經濟價值來決定，若缺乏此資訊則可以 Deb (2001) 所建議之後優選(post optimization)方式擇一作為制定營運策略之參考。本文採用後優選方法中的妥協規劃法(compromise programming approach)來決定後優選最佳解，由於各限水策略之 TSR 及 MSR 的變化範圍並不一致，因此本文將此二標的函數值標準化後以距離原點(TSR = 0%，MSR = 0%)最近的點為後優選最佳解，如下所示：

$$\min \left\{ \left(\frac{TSR - TSR_{\min}}{TSR_{\max} - TSR_{\min}} \right)^2 + \left(\frac{MSR - MSR_{\min}}{MSR_{\max} - MSR_{\min}} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

.....(16)

其中 $TSR_{\min}$ 及 $TSR_{\max}$ 為總缺水率之最小值與最大

值； $MSR_{\min}$ 及 $MSR_{\max}$ 為單旬最大缺水率之最小值與最大值。 $TSR_{\max}$ 與 $MSR_{\min}$ 即為 Pareto 鋒線 A 點之值，而 $TSR_{\min}$ 與 $MSR_{\max}$ 即為 Pareto 鋒線 B 點之值，其值均列於表 2。

各不同參數個數及參數時間變化頻率限水策略 Pareto 鋒線後優選最佳解亦列於表 2。由表列數據可知，雖非參數時間變化頻率增加即可獲得較佳之後優選最佳解，但整體而言參數時間變化頻率最高的限水策略，其後優選最佳解亦最佳，例如三參數法後優選最佳解由定值最佳限水策略的 $TSR = 21.4\%$ ， $MSR = 69.0\%$ 降低至月變化最佳限水策略之 $TSR = 14.9\%$ ， $MSR = 66.8\%$ 。

4.2 限水參數個數對 Pareto 最佳解之影響

圖 7(a)、(b)、(c)、(d)分別為參數時間變化頻率為定值、半年變化、季變化及月變化情況下，不同限水參數個數最佳限水策略 Pareto 最佳解之比較。由圖顯示，不同參數時間變化頻率之 Pareto 鋒線均有相類似特性，即增加限水參數個數均可使其 Pareto 鋒線往左下移動，即有較佳的限水效果，其主要原因為增加限水參數個數可使限水策略較能依不同水庫蓄水及入流狀況調整，特別是增加限水因子能有效的控制水庫限水的比例，因此可降低總缺水率及單旬最大缺水率。

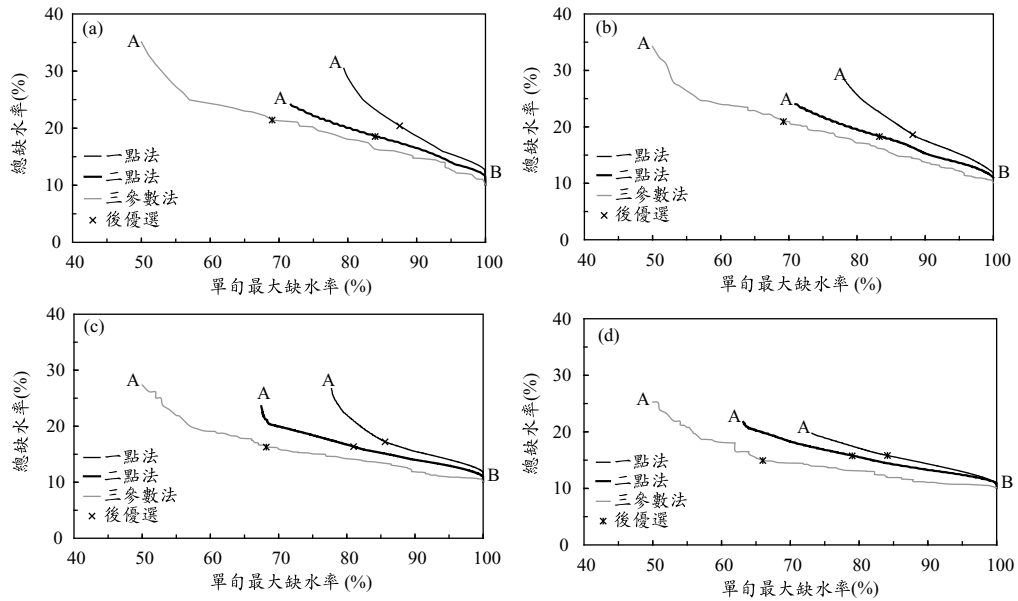


圖 7 (a)定值、(b)半年變化、(c)季變化、(d)月變化限水策略不同參數個數 Pareto 最佳解之比較圖

參數個數較多的限水策略之 Pareto 鋒線在標的空間所延伸的範圍較廣，特別是在單句最大缺水率方面，整體而言，一點法限水策略之最小單句最大缺水率介於 73.4 至 79.4% 之間，二點法限水策略則可降低至 64.0 至 71.7% 之間，三參數法限水策略更可降低至 50% 的原因主要為限水策略中包含一限水比例因子，而一點法及二點法限水策略之限水比例取決於 SWA、EWA 及 WA 間之關係，因此在不同參數時間變化頻率時之最小單句最大缺水率並不一致。各 Pareto 鋒線 B 點幾為重疊，原因已如前述，歷史流量紀錄中所存在的極端乾旱事件使得水庫無法供水，致某些句會有缺水率 100% 的情況發生。以前述後優選方式選擇代表各 Pareto 鋒線之後優選最佳解，增加限水策略之參數個數很明顯的可有較佳之後優選解，例如月變化最佳限水策略由一點法之 $TSR = 15.7\%$ ， $MSR = 84.5\%$ 改善至三參數之 $TSR = 14.9\%$ ， $MSR = 66.8\%$ 。

綜合前述分析，增加限水參數時間變化頻率及增加限水策略的參數個數均可改善限水效果，且其對減少總缺水率及單句最大缺水率的效果可相互疊加，即同時增加限水策略之參數個數

且增加其時間變化頻率可獲得較佳的限水效果，亦即使其 Pareto 鋒線愈接近原點，因此在本文所分析的十二種限水策略中以三參數月變化的最佳限水策略最優，而以一點法定值最佳限水策略的限水效果最為有限。以各 Pareto 鋒線之後優選最佳解為例，一點法定值限水策略之後優選最佳解為 $TSR = 20.4\%$ ， $MSR = 87.5\%$ ，而三參數月變化限水策略之後優選最佳解為 $TSR = 14.9\%$ ， $MSR = 66.0\%$ ，同時增加限水參數個數及其時間變化頻率對缺水現象的改善非常顯著。

五、結論與建議

本文整合時變性限水策略及多標的遺傳演算法於探討供水水庫之最佳限水策略，經應用於南化水庫系統分析後，可獲致以下結論：

1. 由於水庫入流量受季節性豐枯不均的影響至為明顯，因此限水策略參數若能隨時間而變化以符合水庫入流量季節性變化的特性可獲致較佳的限水效果。以雙標的(最小化總缺水率及單句最大水率) 優選模式所推導得 Pareto 鋒線(詳圖 6)在時間變化頻率愈高時愈往標的函數值小的方向移動，若以各 Pareto 鋒線之後優

- 選最佳解為例(詳表 2)，一點法限水策略參數由定值改為月變化可將總缺水率由 20.4%降低至 15.7%，單旬最大水率由 87.5%降低至 84.5%。
2. 增加限水策略之參數個數可有效改善限水效果，不論限水參數之時變性，三參數限水策略之 Pareto 鋒線優於二點法限水策略之 Pareto 鋒線，二點法限水策略之 Pareto 鋒線優於一點法限水策略之 Pareto 鋒線(詳圖 7)。另以 Pareto 鋒線之後優選最佳解為例說明增加限水參數個數對標的函數值之定量改善情況，季變化限水策略由一點法改為三參數法可將總缺水率由 17.2%降低至 16.3%，單旬最大缺水率由 85.6%降低至 68.2% (詳表 2)。
 3. 增加限水策略參數個數降低總缺水率及單旬最大缺水率的效果可疊加於高變化頻率時變性限水策略上，因此在本文所分析的十二種限水策略中以三參數月變化限水策略之 Pareto 鋒線最優。以後優選最佳解為例，三參數月變化限水策略較之一點法定值限水策略可將總缺水率由 20.4%降低至 14.9%，單旬最大水率由 87.5%降低至 66% (詳表 2)。

經由前述以多標的遺傳演算法探討供水水庫考慮二相互衝突缺水指標之 Pareto 最佳解，可使水庫管理單位事先了解水庫營運時總缺水率及單旬最大缺水率之關係，以制定水庫營運管理規則之參考。但於水庫即時操作(real-time operation)時會面臨無法預知未來水庫入流量的問題，水庫入流量雖可以利用預測方式來推估，但預測入流量的精確度及所導致之缺水風險仍需進一步的考量及分析。另本文所考慮之限水策略僅有一句，即僅能提前一句採取限水措施，若將時間往前延伸應會使提前限水的效果更為明顯，但往前延伸的句數對缺水指標的影響及其對 Pareto 最佳解的改變程度是值得繼續深入探討的議題。

參考文獻

1. 蕭政宗，2000，「乾旱時期水庫供水策略與缺水影響分析」，農業工程學報，第四十六卷，第二期，第 54-74 頁。
2. 李皓志、蕭政宗，2003，「考慮不同替代入流量之水庫限水策略」，農業工程學報，第四十九卷，第一期，第 61-77 頁。
3. 周乃昉、林政浩，2006，「應用平均缺水率制定水庫運用規線」，第十五屆水利工程研討會論文集，中壢，第 C49-C56 頁。
4. 黃文政、李詩倩、袁倫欽，2006，「乾旱預警系統之建置-以翡翠水庫為例」，台灣水利，第五十四卷，第三期，第 5-17 頁。
5. 吳明銘、陳莉、王泰盛、梁惠儀、陳星翰，2007，「應用多目標遺傳演算法於多目標水庫之最佳長期操作」，第十六屆水利工程研討會論文集，苗栗，第 250-255 頁。
6. 徐年盛、鄭文明、魏志強，2008，「水庫上限對枯水期缺水分險之分析」，第十七屆水利工程研討會論文集，台中，第 B1-1-B1-10 頁。
7. 經濟部水利處水利規劃試驗所，2002，「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」。
8. 台灣省政府水利處，1997，「南部區域水资源聯合運用研究(八十六年度研究報告)」。
9. Bayazit, M. and Unal, E., 1990, Effects of hedging on reservoir performance, *Water Resources Research*, 26(4), 713-719.
10. Bekele, E. G. and Nicklow, J. W., 2005, Multiobjective management of ecosystem services by integrative watershed modeling and evolutionary algorithms, *Water Resources Research*, 41, W10406, doi: 10.1029/ 2005WR004090.
11. Burn, D. H. and Yulianti, J. S., 2001, Waste-load allocation using genetic algorithms, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(2), 121-129.
12. Chang, L. C. and Chang F. J., 2009, Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system, *Journal of Hydrology*, 377, 12-20.
13. Chen, L. and Chang F. J., 2007, Applying a real-coded multi-population genetic algorithm to

- multi-reservoir operation, *Hydrological Processes*, 21(5), 688-698.
14. Deb, K., 2001, Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, John Wiley & Sons, Chichester.
15. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T., 2002, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
16. Draper, A. J. and Lund, J. R., 2004, Optimal hedging and carryover storage value, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 83-87.
17. Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P., 1982, Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation, *Water Resources Research*, 18(1), 14-20.
18. Huang, W. C. and Yuan, L. C., 2004, A drought early warning system on real-time multireservoir operations, *Water Resources Research*, 40, W060401, doi: 10.1029/ 2003WR002910.
19. Huang, W. C., and Chou, C. C., 2005, Drought early warning system in reservoir operation: Theory and practice," *Water Resources Research*, 41, W11406, doi: 10.1029/2004WR003830.
20. Kapelan, Z. S., Savic, D. A., and Walters, G. A., 2003, Multiobjective sampling design for water distribution model calibration, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(6), 466-479.
21. Kapelan, Z. S., Savic, D. A., and Walters, G. A., 2005, Multiobjective design of water distribution systems under uncertainty, *Water Resources Research*, 41, W11407, doi: 10.1029/ 2004 WR003787.
22. Khu, S. T. and Madsen, H., 2005, Multiobjective calibration with Pareto preference ordering: An application to rainfall-runoff model calibration, *Water Resources Research*, 41, W03004, doi: 10.1029/ 2004WR003041.
23. Kim, T., Heo, J. H. and Jeong, C. S., 2006, Multireservoir system optimization in the Han River basin using multi-objective genetic algorithms, *Hydrological Processes*, 20(9), 2057-2075.
24. Knowles, J. and Corne, D., 1999, The Pareto archived evolution strategy: A new baseline algorithm for multiobjective optimization, *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*, Piscataway, USA, 98-105.
25. Lund, J. R. and Reed, R. U., 1995, Drought water rationing and transferable rations, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(6), 429-437.
26. Moy, W. S., Cohon, J. L., and ReVelle, C. S., 1986, A programming model for analysis of reliability, resilience, and vulnerability of water supply reservoir, *Water Resources Research*, 22(4), 489-498.
27. Muleta, M. K. and Nicklow, J. W., 2005, Decision support for watershed management using evolutionary algorithms, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 13(6), 409-426.
28. Neelakantan, T. R. and Pundarikanthan, N. V., 1999, Hedging rule optimization for water supply reservoir system, *Water Resources Management*, 13(6), 409-426.
29. Prasad, T. D. and Park, N. S., 2004, Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 73-82.
30. Prasad, T. D., Walters, G. A., and Savic, D. A., 2004, Booster disinfection of water supply networks: Multiobjective approach, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(5), 367-376.
31. Reed, P., Minsker, B. S., and Goldberg, D. E., 2003, Simplifying multiobjective optimization: An automated design methodology for the

- nondominated sorted genetic algorithm-II, *Water Resources Research*, 39, 1196, doi: 10.1029/2002WR001483.
32. Reddy, M. J. and Kumar, D. N., 2006, Optimal reservoir operation using multi-objective evolutionary algorithm, *Water Resources Management*, 20(6), 861-878.
 33. Shiau, J. T., 2003, Water release policy effects on the shortage characteristic for the Shihmen Reservoir System during drought, *Water Resources Management*, 17(6), 463-480.
 34. Shiau, J. T. and Lee, H. C., 2005, Derivation of optimal hedging rules for a water-supply reservoir through compromise programming, *Water Resources Management*, 19(2), 111-132.
 35. Shiau, J. T. and Wu, F. C., 2007, Pareto-optimal solution for environmental flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural flow regime, *Water Resources Research*, 43, W06433, doi: 10.1029/2006WR005523.
 36. Shiau, J. T., 2009, Optimization of reservoir hedging rules using multi-objective genetic algorithm, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(5), 355-363.
 37. Shih, J. S. and ReVelle, C., 1994, Water-supply operations during drought: Continuous hedging rule, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(5), 613-629.
 38. Shih, J. S. and ReVelle, C., 1995, Water-supply operations during drought: A discrete hedging rule, *European Journal of Operational Research*, 82, 163-175.
 39. Srinivasan, K. and Philipose, M. C., 1996, Evaluation and selection of hedging policies using stochastic reservoir simulation, *Water Resources Management*, 10(3), 163-188.
 40. Suen, J. P. and Eheart, J. W., 2006, Reservoir management to balance ecosystem and human needs: Incorporating the paradigm of the ecological flow regime, *Water Resources Research*, 42, W03417, doi: 10.1029/2005WR004314.
 41. Tu, M. Y., Hsu, N. S., and 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.
 42. Vamvakieridou-Lyroudia, L. S, Walters, G. A., and Savic, D. A., 2005, Fuzzy multiobjective optimization of water distribution networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(6), 467-476.
 43. Yandamuri, S. R., Srinivasan, M. K., and Bhallamudi, S. M., 2006, Multiobjective optimal waste load allocation models for rivers using nondominated sorting genetic algorithm-II, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(3), 133-143.
 44. Zitzler, T. and Thiele, L., 1999, Multiobjective evolutionary algorithm: A comparative case study and the strength Pareto approach, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), 257-271.
 45. Zitzler, E. Thiele, L., and Deb, K., 2000, Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results, *Evolutionary Computation*, 8(2), 173-196.

收稿日期：民國 99 年 2 月 24 日

修正日期：民國 99 年 4 月 22 日

接受日期：民國 99 年 4 月 28 日