

# 乾旱時期水庫供水策略對缺水影響分析

## Effects on Water Shortage for Different Reservoir Releasing Policies

經濟部水資源局工程司

蕭政宗

Jenq-Tzong Shiau

### 摘要

乾旱是無可避免的自然現象，以蓄水設施貯蓄豐水期水量提供枯水期使用是最有效的長期性措施之一，但不預期的水文乾旱情況可能使水庫供水量無法滿足既定的計畫需水量。本文研究重點即為探討乾旱時期不同水庫供水策略對缺水之影響，所探討的水庫供水策略除運用規線、標準操作策略、定率動態規劃模式及序率動態規劃模式外，本文亦以水庫蓄水量及入流量轉換機率對計畫需水量的關係定義一水庫供水指數，除可代表不同時期水庫供水潛能外亦可作為水庫供水的依據。不同的供水策略所導致不同的水庫營運成效將以缺水特性來評估，本文所使用於分析的缺水特性包括缺水量、缺水延時及缺水頻率在單一缺水時刻、缺水事件及整體時程的相關缺水指數。文末則以簡化的石門水庫單目標供水系統為例說明不同的供水策略在乾旱時期的缺水特性。

**關鍵詞：**供水策略，缺水指數，水庫供水指數。

### ABSTRACT

Droughts are natural and inevitable phenomena. Storage facilities are considered as one of the most effective and long-term measures to regulate surface water. However, unexpected droughts often cause the water supplies insufficient to meet the predetermined target in a specific water supply system. In this study, the effects on water shortage for different reservoir releasing policies during drought are investigated. The reservoir releasing policies include rule curve, standard operating policy, deterministic dynamic programming, and stochastic dynamic programming. In addition, a reservoir supply index is defined in this study and used as a releasing indicator. The shortage indices used to evaluate the reservoir performance include shortage severity, duration and

frequency. Finally, a simplified Shihmen reservoir system is used as a case study to illustrate the proposed methodology.

**Keywords:** Releasing policy, Shortage index, Reservoir supply index.

## 一、前言

乾旱是無可避免的自然現象，常在社會、經濟及環境上造成巨大的損失。早期人類社會為克服乾旱所帶來的供水不足問題，利用遊牧或是以緊鄰河川、湖泊等天然水源的方式以發展人類文明，當人類社會持續進展，多元化的供水方式如以蓄水設施貯蓄豐水期多餘的水或是從水源較豐富的地區輸送至水源較匱乏的地區便成為水資源開發的主要方式。

雖然水庫的蓄豐濟枯功能被認為是減緩因乾旱所造成缺水問題最有效的長期性措施之一，但由於集水區的人為過度開發、優良壩址難覓、興建成本高昂等社會、經濟、環境保護等問題使得未來興建蓄水設施較過去為困難。在新的水資源設施開發不易的情況下，如何更有效率的利用現有日益珍貴的水資源，亦即以加強管理層面的手段來彌補開發層面的不足，便成為現今水資源管理的重要課題之一。

Werick 等(1994)指出根據過去的經驗，對減緩因乾旱所引起的缺水衝擊以預先主動(proactive)或是風險管理(risk management)較被動(reactive)或是危機管理(crisis management)為有效，亦即認定乾旱是必然發生的現象，只是無法準確的預知何時發生及其嚴重性為何，因此若能事先利用數學模式研擬完善的乾旱時期水資源運用調配計畫，並經由歷史紀錄流量或繁衍流量模擬演算驗證，以瞭解水庫供水策略在不同水文狀況時對各標的用水所造成的缺水影響，如此才能探討緊急調配水源的需求量與時效性以減緩乾旱所帶來的衝擊，並提供決策者參考。

由於無法確實預知乾旱於何時發生、發生時間長短及嚴重性，因此水庫營運有其供水無法滿足既定目標的風險存在，本文之研究重點即為探討乾旱時期不同水庫供水策略之缺水現象。乾旱

時期水庫供水策略的良窳對各標的用水的缺水影響甚大，本文將探討數種水庫供水策略，包括運用規線、標準操作策略及不同標的函數之優選模式，本文並以水庫蓄水量配合入流量轉換機率對計畫需水量之關係定義水庫供水指數作為水庫供水的依據。至於不同供水策略所導致不同的水庫營運行為將以缺水延時、缺水量及缺水頻率等缺水特性比較不同供水策略間的差異，文末則以簡化的石門水庫單目標供水系統為例說明本文所使用不同的供水策略在乾旱時期的缺水特性。

## 二、文獻回顧

水庫的營運皆有其特定的目標，水庫的供水策略為滿足各目標以求取最大的綜合效益，因此水庫在規劃階段即制定供水策略作為整體營運管理計畫的一環。對以供水為目標的水庫而言，傳統制定水庫供水策略的方法為利用模擬模式以歷史水文紀錄針對各標的需水量進行模擬，以試誤法挑選營運較佳者作為水庫的操作規線。然而實務上，水庫實際操作時之人為的經驗與判斷亦佔有重要的關鍵，但此甚難以文字或數學模式表示並納入操作規線或營運規則中。

Yeh(1985)及 Wurbs(1993)回顧了應用於水庫管理與操作的數學模式，除模擬模式外，較常用於制定水庫供水策略的方法尚有優選模式。但不論是採用模擬模式或優選模式，水庫供水來源除水庫蓄水量外，入流量亦是重要的來源。由於水庫入流量無法準確的預測，因此較保守的水庫操作策略便僅依賴水庫的蓄水量。臺灣地區現行水庫有關蓄水利用運轉都利用運轉規線(rule curve)，即利用庫容水量劃分為上限、下限及嚴重下限作為水庫供水的依據，例如「臺灣省鯉魚潭水庫運用規則」第七條就有效蓄水利用供應即依下列規定辦理：

1. 水庫水位高於下限時，公共給水、工業用水依計畫供水全額供水；
2. 水庫水位在下限以下未達嚴重下限之間時，公共給水、工業用水以百分之七十八供水；
3. 水庫水位降至嚴重下限以下時，公共給水、工業用水以百分之五十供水；

除水庫運用規線外，標準操作策略(standard operating policy, SOP)(Shih 等, 1994)亦可作為水庫供水的依據。其供水原則為儘可能滿足需水量直至空庫無法供水為止，但亦不提供多餘水量，除非滿庫而溢流。雖然水庫入流量不易準確預測，但若不將水庫入流量包含於供水策略內，無法將水資源作最有效的運用。簡俊彥等(1991)研究白河水庫乾季時期(每年的十二月上旬至翌年的五月下旬)農業用水之水量供需調配時將水庫入流量列入考慮，其建議整體考量乾季時期之水量供應調配使農業用水之總缺水量平均分配到各旬，其採用的放水策略除最低灌溉用水量外再將現況蓄水量與未來各旬的入流量預測值之和扣除應保留水量後平均分配於未來各旬。

優選模式中之動態規劃(dynamic programming, DP)為多階段的決策過程原理，因此較適合水庫營運策略的擬定，Yakowitz(1982)對動態規劃於水資源規劃與管理上之應用有詳盡的探討，Esogbue(1989)亦指出應用於水資源系統分析中動態規劃模式較其他優選模式為多。雖然系統分析於水資源管理或制定水庫供水策略上有頗多的研究，但對於乾旱時期制定水資源最佳管理策略的文獻較少。相關的文獻有 Tatano 等(1992)於研究水庫最佳操作模式時將缺水延時與缺水量同時考慮為模式之損失函數(loss function)。Sargent(1979)利用動態規劃求取不同繁衍水庫入流量系列之水庫最佳操作策略，而後再以加權平均法獲得最後的水庫最佳操作策略。Shih 等(1994)建議當水庫蓄水量加上水庫入流量條件期望值低於啟動值(trigger value)時，調配性的減供措施便開始執行。Cancelliere 等(1998)探討水文乾旱期間水庫供水系統缺水指數及水文乾旱強度間之關係。

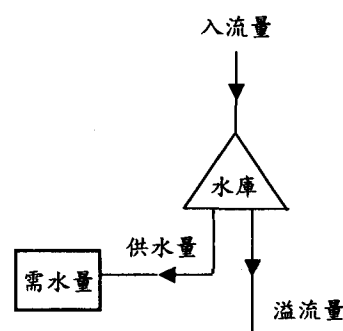


圖 1 單一水庫系統示意圖

本文之研究重點為探討水庫不同供水策略在乾旱時期的缺水影響，除比較傳統的水庫運用規線與較少運用於實際營運但計算簡單的標準操作策略外，本文亦討論優選模式中不同標的函數(objective function)對缺水現象之影響。由於水庫入流量具不確定性，本文亦探討以序率動態規劃模式在不同標的函數情況下之演算結果。除此之外，本文亦利用水庫蓄水量與入流量轉換機率(transition probabilities)對需水量之關係定義一水庫供水指數(reservoir supply index)作為水庫供水的依據。不同供水策略的缺水影響分析將以缺水特性，亦即以缺水延時、缺水量及缺水頻率在單一缺水時刻、缺水事件及整體時程相關的缺水指數，作為比較之基礎。

### 三、研究方法

#### 3.1 水庫營運行為缺水特性

本文探討單一水庫系統於乾旱時期不同供水策略之缺水影響，水庫之營運目標僅考慮供水，包括灌溉、給水等，不包括防洪及其他目標。本文所考慮的單一水庫系統如圖 1 所示，合併不同標的用水成單一需水單位，為明確表達水庫系統供需間之關係，本文將水庫放水量區分為供水及溢流量，供水為有效使用於滿足需水量之水庫放水量，而溢流量指大於需水量之水庫放水量。以圖 1 為例，每一時刻水庫之蓄水量、入流量、放水量間必需遵守水平衡方程式，如下式所示：

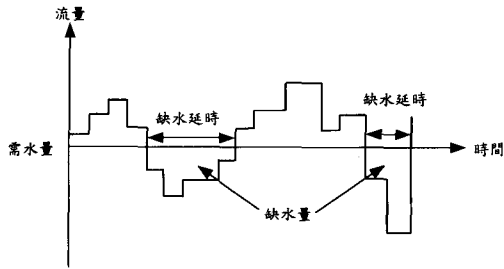


圖 2 缺水延時及缺水量之定義

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - SP_t \dots\dots\dots(1)$$

其中  $t$  : 時刻；

$S_t, S_{t+1}$  :  $t$  及  $t+1$  時刻水庫蓄水量；

$Q_t$  :  $t$  時刻水庫入流量；

$R_t$  :  $t$  時刻水庫供水量；

$SP_t$  :  $t$  時刻水庫溢流量，本文指大於需水量之水庫放水量。

本文不考慮水庫之滲漏與蒸發損失。假設水庫營運計畫之計畫供水量即代表下游之需水量，當水庫供水量無法滿足計畫供水量或需水量時即為缺水。對每一營運時刻  $t$ ，缺水量的定義如下：

$$ST_t = |R_t - D_t|, \text{ 當 } R_t < D_t \dots\dots\dots(2)$$

其中  $ST_t$  :  $t$  時刻水庫缺水量；

$R_t$  :  $t$  時刻水庫供水量；

$D_t$  :  $t$  時刻需水量。

Takeuchi (1986)及 Moreau (1991)指出雖然水庫系統營運行為的衡量可以經濟效益來評估，但有實際上的困難，因此本文以水庫供需關係之缺水行為作為水庫系統營運衡量標準。水庫運轉之放水量與需水量間之關係可以圖 2 來表示，雖然需水量在圖 2 以直線表示，但實際上可為任何數值。水庫之功能既為蓄豐濟枯，即儘量貯蓄豐水期水量供枯水期使用，亦即放水量愈接近需水量愈好，然而水庫入流量豐枯不均，致使水庫營運時而溢流，時而缺水。缺水行為可以缺水延時、缺水量及缺水頻率等三項特性在單一缺水時刻、缺水事件及整體時程等三種不同時間刻

度來衡量，相關的水庫供水系統缺水指數請參閱蕭政宗(1999)論文，本文不再贅述。本文採用以衡量水庫供水策略的缺水指數有下列：

### 3.1.1 單一缺水時刻分析

將所有缺水時刻視為獨立，所考慮的缺水指數有：

(1)平均單時刻缺水量：

所有單時刻缺水量之平均值。

(2)最大單時刻缺水量：

所有單時刻缺水量之最大值。

### 3.1.2 缺水事件分析

本文稱集合連續的缺水時刻為一缺水事件，所考慮的缺水指數有：

(1)平均缺水延時：

所有缺水事件缺水時間長度之平均值。

(2)最大缺水延時：

所有缺水事件中缺水時間長度之最大值。

(3)平均缺水量：

所有缺水事件缺水量之平均值。

(4)最大缺水量：

所有缺水事件中缺水量之最大值。

### 3.1.3 整體時程分析

整體時程可為任何較長的時段，一般均以流量紀錄長度為準，本文所稱整體時程為用於分析水庫營運特性所使用之水庫入流量紀錄長度，所考慮的整體時程缺水指數有：

(1)總缺水率：

所考慮時程內總缺水量對總需水量之比值，定義為：

$$\text{總缺水率} = \frac{\sum_{t=1}^N ST_t}{\sum_{t=1}^N D_t} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

其中  $ST_t$  :  $t$  時刻缺水量，定義詳式(2)；

$N$  : 總分析時距。

Hashimoto 等(1982)利用系統風險的觀念定義系統的可靠度、回復度、及傷害度。將此觀念應用於水庫系統營運的缺水行為則可表為：

(2)可靠度(reliability)：

定義為系統不缺水之機率，即：

$$\text{可靠度} = P(R_t \geq D_t) \dots\dots\dots(4)$$

反之系統缺水之機率稱為風險度(risk)，定義為：

$$\text{風險度} = 1 - \text{可靠度} = P(R_t < D_t) \dots\dots(5)$$

可靠度亦可解釋為所考慮時程內不缺水時段所佔之比例；反之風險度為缺水時段所佔之比例。可靠度與風險度均以機率表示，因此數值介於 0 與 1 之間。

(3)回復度(resiliency)：

回復度為測度系統一旦失敗後多快能回復常態，應用於系統缺水可定義為  $t$  時刻為缺水情況下  $t+1$  時刻不缺水之條件機率，即：

$$\text{回復度} = P(R_{t+1} \geq D_{t+1} | R_t < D_t) \dots\dots(6)$$

回復度較大，則系統一旦發生缺水情況後會很快回復常態，反之，若此數值小則意味著系統一旦發生缺水情況後將會延續一段較長之時間。回復度以條件機率表示，其值亦介於 0 與 1 之間。

(4)傷害度(vulnerability)：

用於描述系統缺水之損害嚴重程度，其定義可依營運管理者不同的考量有不同的定義，本文則定義為每一缺水事件之最大單時刻缺水量之平均值，即：

$$\text{傷害度} = \sum_{j \in \text{缺水}} s_j e_j \dots\dots\dots(7)$$

其中  $s_j$ ：每一缺水事件中之最大單時刻缺水量；  
 $e_j$ ： $s_j$ 之機率；

(5)工兵團缺水指數：

美國陸軍工兵團(1975)所發展的缺水指數亦可歸類為整體時程分析的缺水指數，其定義為：

$$\text{工兵團缺水指數} = \frac{100 \sum_{i=1}^{NY} \left( \frac{\text{年缺水量}}{\text{年需水量}} \right)_i^2}{NY} \dots\dots(8)$$

其中 NY：分析年數。

依上述定義，工兵團缺水指數數值介於 0 與 100 之間，數值愈大代表缺水愈嚴重。

3.1.4 頻率分析

(1)缺水事件發生頻率：

所考慮時程內發生之缺水事件總數對時程之比值，本文將此頻率表為每年所發生之缺水事件數。

(2)各月份缺水頻率：

所考慮時程內，不同月份所發生缺水的次數對所有年數之比值，如此可瞭解較容易發生缺水的季節。

3.2 水庫營運模式

本文用於探討乾旱時期水庫供水策略的水庫營運模式有水庫營運規線、標準操作策略(standard operating policy, SOP)、定率動態規劃模式(deterministic dynamic programming, DDP)及序率動態規劃模式(stochastic dynamic programming, SDP)等，分述如下。

3.2.1 水庫營運規線

依水庫運用規則所定的營運規線決定供水。較常用之營運規線為將庫容區分為上限、下限及嚴重下限，依水庫蓄水量處於何種規線狀態決定供水量之多寡，至於是否折扣供水則視各水庫及用水標的而定。

3.2.2 標準操作策略

標準操作策略供水的原則為儘可能滿足需求，即使蓄水量不夠亦不折扣供水，直至空庫為止，但亦不提供多餘的水量，除非滿庫而溢流。供水規則如下：

$$\begin{aligned} R_t &= S_t - S_{\min} + Q_t, SP_t = 0 \\ &\text{當 } S_t - S_{\min} + Q_t < D_t \\ R_t &= D_t, SP_t = 0 \\ &\text{當 } D_t \leq S_t - S_{\min} + Q_t < S_{\max} - S_{\min} \dots\dots(9) \\ R_t &= D_t, SP_t = S_t - S_{\max} + Q_t - R_t \\ &\text{當 } S_t + Q_t - D_t > S_{\max} \end{aligned}$$

其中  $S_{\max}$ ：水庫總容量；

$S_{\min}$ ：水庫呆容量。

由於未提供折扣供水，可能造成空庫，因此標準操作策略甚少應用於實際水庫操作，但 Hashimoto 等(1982)指出此供水策略可使水庫營

運期間總缺水量降至最低。

### 3.2.3 定率動態規劃模式

在假設歷史紀錄流量或繁衍流量系列為已知的情況下，定率動態規劃模式可以求取該段流量期間的最佳供水策略。一般定率動態規劃之數學模式如下：

$$\min_{R_t} \text{ 或 } \max_{R_t} \sum_t B(R_t) \dots\dots\dots(10)$$

其限制式為

$$\begin{aligned} S_{t+1} &= S_t + Q_t - R_t - SP_t \\ S_{\min} &\leq S_t \leq S_{\max} \\ R_t &\geq 0 \\ SP_t &\geq 0 \end{aligned} \dots\dots\dots(11)$$

其中  $B(R_t)$ ：標的函數。

限制式第一式為水庫水平衡方程式，與式(1)相同，惟本文不考慮蒸發及滲漏損失；第二式為水庫蓄水量限制式，即水庫蓄水量必須介於滿庫及呆容量間；第三式及第四式為供水量及溢流量非負值限制式。與模擬模式之最大不同處在於優選模式不論求解的技術為何都必須要有標的函數，即式(10)中之  $B(R_t)$ 。Wurb(1993)曾探討水庫營運常用之標的函數，但應用於乾旱時期水庫營運優選模式標的函數之探討則較少。配合本文前述水庫營運行為以缺水特性來評估，本文所考慮之乾旱時期水庫營運優選模式標的函數有以下：

- (1)最小化演算時程內之總缺水量，稱為 OF1，如下式所示：

$$\min_{R_t} \sum_t ST_t \dots\dots\dots(12)$$

其中  $R_t$ ：t 時刻水庫供水量；

$ST_t$ ：t 時刻缺水量，定義詳式(2)。

- (2)最小化演算時程內總缺水量之平方和，稱為 OF2，如下式所示：

$$\min_{R_t} \sum_t ST_t^2 \dots\dots\dots(13)$$

此標的函數可視為對各時刻缺水量之權重和，而所採用之權重即為該時刻之缺水量，由於

缺水量愈大，權重愈大，因此此標的函數可避免較大缺水量之缺水現象。

- (3)最小化最大單一缺水時刻缺水量，稱為 OF3，如下式所示：

$$\min_{R_t} \{ \max ST_t \} \dots\dots\dots(14)$$

此標的函數與上述標的函數不同之處在於僅最小化演算時程內最大單一缺水時刻之缺水量，而非最小化演算時程內之累積值，因此此標的函數可避免單一時刻較嚴重之缺水現象。

- (4)最小化演算時程內權重總缺水量，稱為 OF4，如下式所示：

$$\min_{R_t} \sum_t w_t ST_t \dots\dots\dots(15)$$

其中  $w_t$ ：權重，其值=1 若  $R_{t-1} \geq D_{t-1}$  且  $R_t < D_t$ ；或=  $w_{t-1} + 1$  若  $R_{t-1} < D_{t-1}$  且  $R_t < D_t$ 。

此標的函數所採用之權重與缺水事件之缺水延時有關，權重採線性增加，第一個月缺水的權重係數為 1，連續第二個月缺水的權重係數為 2，依此類推。缺水延時愈長，權重愈大，因此此標的函數可避免較長延時之缺水現象。

### 3.2.4 序率動態規劃模式

水庫入流量的不確定性在序率動態規劃模式中以流量轉換機率並增加一入流量狀態變數 (state variable) 來表示，序率動態規劃之數學模式如下：

$$\begin{aligned} F_t(S_t, Q_{t-1}^i) &= \min_{R_t} \text{ 或 } \\ \max_{R_t} \{ \sum_j P_t^{ij} [B(R_t) + F_{t+1}(S_{t+1}, Q_t^j)] \} \end{aligned} \dots\dots\dots(16)$$

其中  $P_t^{ij}$ ：流量轉換機率，當 t-1 時刻流量狀態為 i 而 t 時刻流量狀態為 j。

其限制式與定率動態規劃模式一樣，如式(11)所示。Huang 等(1991)曾探討以不同時刻入流量作為序率動態規劃模式之狀態變數間之差異，本文為避免需要預測流量，選取 t-1 時刻之入流量作為序率動態規劃模式的狀態變數。不同於定率動態規劃模式的演算結果，序率動態規劃模式並非得到單一供水系列，而是一組以入流量

及水庫蓄水量為函數的供水策略，可視不同的流量系列得到不同的演算結果，因此可應用於水庫實際操作。本文將以水庫紀錄入流量演算並與其他供水策略的演算結果比較。另由於序率動態規劃模式必須由後向遞迴演算，因此僅前述標的函數之 OF1 及 OF2 應用於序率動態規劃模式演算。

### 3.3 水庫供水指數

當水庫庫容遠大於計畫需水量時，水庫蓄水量即為一適宜的穩定供水指標。但當水庫庫容相較於需水量不甚大時，水庫營運時可供水量的決定除其所貯蓄之水量外，入流量亦占有相當重要的地位，但若因入流量不易準確預測，而放棄將入流量納入決策因數內殊為可惜。模式中考量水庫入流量不確定性的方法除前述序率動態規劃模式的型式外，定義一指標以作為供水的依據亦是另一種方法。本文以水庫入流量轉換機率配合水庫蓄水量對需水量之關係，定義一包含水庫入流量不確定性的水庫供水指數(reservoir supply index)以評估水庫能滿足需水量的潛能作為水庫供水之準則。

基本構想為水庫蓄水量加上入流量對計畫需水量即可瞭解是否有足夠的供水能力，但由於水庫入流量具不確定性，因此本文以流量轉換機率，亦即以機率形式來表示水庫供水潛能。以運轉時刻  $t$  為例說明，水庫  $t$  時刻之起始蓄水量與  $t-1$  時刻之入流量均為已知，利用流量轉換機率即可知道  $t$  時刻發生不同流量的機率，當水庫起始蓄水量加上  $t$  時刻入流量大於計畫需水量時即不會發生缺水，相對應之入流量機率和即為  $t$  時刻水庫可滿足計畫需水量之機率。相同的觀念可延伸至  $t+1$  時刻，即考慮  $t$  時刻可滿足計畫需水量之流量再以流量轉換機率估算  $t+1$  時刻之流量加上水庫蓄水量可滿足  $t+1$  時刻計畫需水量之機率和。依此類推，不同前置時刻之水庫供水指數可推估不同時刻滿足計畫供水之機率，亦即可推估未來何時可能發生缺水的機率。不同前置時期水庫供水指數的數學式如下：

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \sum_j P_t^{ij} \\ &\text{當 } Q_{t-1} = Q_{t-1}^i \text{ 且 } S_t - S_{\min} + Q_t^j \geq D_t \\ \gamma_2 &= \sum_j \sum_k P_t^{ij} P_{t+1}^{jk} \\ &\text{當 } Q_{t-1} = Q_{t-1}^i \text{ 且 } S_t - S_{\min} + Q_t^j \geq D_t \\ &\quad S_{t+1}^j - S_{\min} + Q_{t+1}^k \geq D_{t+1}, \\ &\quad S_{t+1}^j = S_t + Q_t^j - D_t - SP_t \\ \gamma_3 &= \sum_j \sum_k \sum_m P_t^{ij} P_{t+1}^{jk} P_{t+2}^{km} \quad (17) \\ &\text{當 } Q_{t-1} = Q_{t-1}^i \text{ 且 } S_t - S_{\min} + Q_t^j \geq D_t \\ &\quad S_{t+1}^j - S_{\min} + Q_{t+1}^k \geq D_{t+1}, \\ &\quad S_{t+1}^j = S_t + Q_t^j - D_t - SP_t \\ &\quad S_{t+2}^k - S_{\min} + Q_{t+2}^m \geq D_{t+2}, \\ &\quad S_{t+2}^k = S_{t+1}^j + Q_{t+1}^k - D_{t+1} - SP_{t+1} \\ &\quad \dots \end{aligned}$$

其中  $\gamma_i$ ：前置時期為  $i$  之水庫供水指數；

$P_t^{ij}$ ：流量轉換機率，當  $t-1$  時刻流量狀態為  $i$  而  $t$  時刻流量狀態為  $j$ ；

$Q_{t-1}^i$ ： $t-1$  時刻水庫入流量狀態為  $i$ 。

依此定義，水庫供水指數代表水庫供水潛能，即能滿足未來計畫需水量之機率，因此其數值介於 0 與 1 之間，數值愈大代表水庫供水能滿足預定需求之機率愈大。惟水庫供水指數的精確度仍依賴流量轉換機率而定，一般之流量轉換機率均以有限的流量狀態數來代表，狀態數愈多愈能精確的推估，但若流量紀錄不長，則無法有精確的推估值。為克服此一問題，本文採用半理論性的方法求取流量轉換機率，詳下節討論。前置時期愈長雖然可以愈早預警缺水現象的發生，但其不確定性亦愈高，選取一個合宜長度的前置時期可以事先預警可能的缺水而採取調配措施，但過長的前置時期亦可能產生許多不可靠的缺水預警，若因此而採取限水措施，不僅妨礙各標的正常的用水，亦無法提高用水效率，因此如何選取一合適的前置時期是重要的第一步，於下節中本文有一選取前置時期之建議。至於水庫供水指數低於何值時應採取限水措施亦是值得探討的

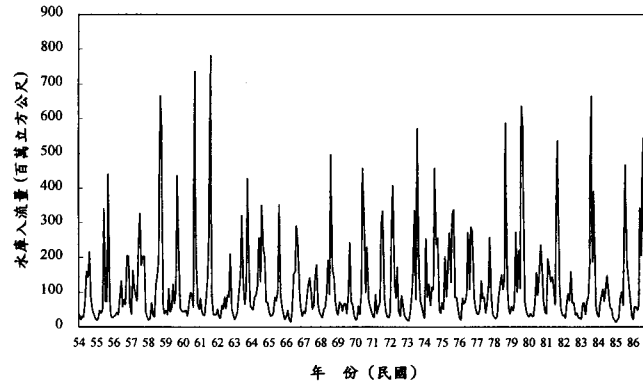


圖 3 石門水庫民國 54 年至 86 年之月入流量紀錄

問題，基本上，限水幅度的大小及期限的長短應視採取限水措施後之後續狀態而定，無法有一絕對的標準，底下的個案研究本文將有數個不同的建議方案。

#### 四、個案研究 - 以石門水庫為例

##### 4.1 石門水庫基本資料

石門水庫位於臺灣北部淡水河支流大漢溪上，於民國 53 年完工，壩高 133.1 公尺，完工時總容積 309.12 百萬立方公尺，為一包括灌溉、發電、公共給水及防洪之多目標水庫。

石門水庫自民國 54 年至 86 年間之水庫月入流量紀錄如圖 3 所示，年平均入流量為 1406.11 百萬立方公尺。根據民國 86 年之資料(臺灣地區民國八十六年蓄水設施水量營運統計報告,1999)顯示，石門水庫總容量為 251.78 百萬立方公尺，有效容量為 233.83 百萬立方公尺。

由於石門水庫兼具灌溉、發電、給水、防洪等四項功能，其運轉規則複雜，根據「臺灣省石門水庫多目標運用規則」(經濟部主管水利相關中央法規配合臺灣省政府功能業務與組織調整修訂法規(行政命令)彙編,1999)有關石門水庫運用的規則彙整簡述如下：

第二條 本水庫之運用，應協調各功能需要，以獲致最大綜合效益，並以年用法為基準，即自每年洪水期後，蓄水滿庫，經一年蓄放，至次年洪水期後復歸滿庫為

表 1 石門水庫灌溉及公共給水需水量

	灌溉用水 (cms)	公共給水 (cms)	合計 (cms)
一月	1.5	1.1	2.6
二月	15.5	1.1	16.6
三月	18.4	1.1	19.5
四月	26.3	1.1	27.4
五月	36.9	1.1	38.0
六月	38.4	1.1	39.5
七月	39.1	1.1	40.2
八月	40.3	1.1	41.4
九月	40.9	1.1	42.0
十月	36.5	1.1	37.6
十一月	2.6	1.1	3.7
十二月	0.0	1.1	1.1

止。

第三條 本水庫之運用應依據運用規線辦理之。(運用規線詳本文圖 4)

第四條 本水庫在正常運用下，水庫水位應保持在規線上限與下限之間為原則。

第六條 灌溉運用應依下列規定辦理：

一、各灌區每月平均供水量，達到計畫灌溉面積時，以附表 2 所列數值為準。(資料詳本文表 1)

五、水位低於嚴重下限時，應視實際情形限制灌溉用水，應減水範圍及次序，應隨時會同各水利會研辦。



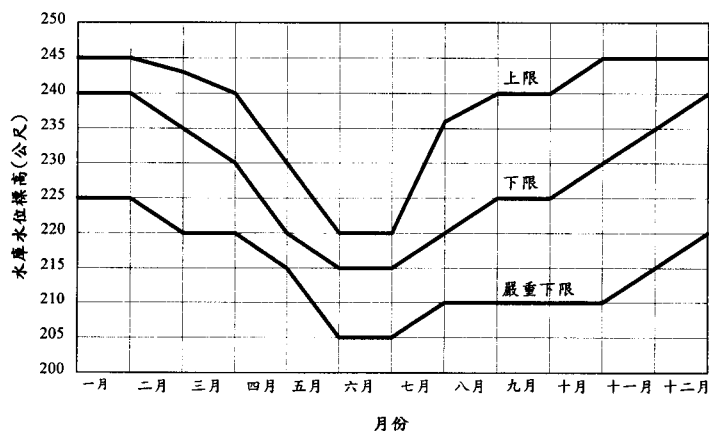


圖 4 石門水庫運用規線

第十六條 每年六月至十月底間，石門發電廠應按下游公共給水及灌溉需要之水量發電。水位超出規線上限時，應視實際情形儘量增加發電。水位低於嚴重下限時，應嚴格依照公共給水及灌溉需要水量發電。

第十七條 公共給水全年供水量，以優先保留水庫上部二公尺之容量為之。其經由水庫下游河道供水者，最大為 0.2 秒立方公尺，應由石門大圳供水者，最大為 0.9 秒立方公尺。

第十八條 每年自六月一日至九月三十日為防洪運用期間，在此期間內第一次洪水來臨前，水位應儘可能降至規線上限標高以下，如水位因攔蓄洪水而升高至標高二百四十公尺以上時，在次一次洪水來臨前，應儘可能降低至標高二百四十公尺以下。但八、九月份，在中央氣象局預測颱風有襲臺可能時，水位以溢洪道洩降至標高二百三十七.五公尺，再利用發電及永久河道放水口洩放，儘可能降至標高二百三十七.五公尺以下。

石門水庫運用規線分為上限、下限及嚴重下限，其在各月底之標高規定如圖 4 所示。由上述

可知，石門水庫之運作基本上以水庫水位，即水庫蓄水量，為主，另配合氣象局颱風預測作防洪運轉。至於枯旱時期則以嚴重下限為界，灌溉用水視實際情形限制，發電則依公共給水及灌溉需要水量發電。水庫入流量僅於防洪操作時有考慮外，並未納入其他標的供水規則決策因數內。

「臺灣省石門水庫多目標運用規則」中所記載之灌溉及公共給水量包括桃園大圳、下游河道及石門大圳輸送總量如表 1 所示。由於尚有發電標的，因此水庫實際放水量大於表列灌溉及公共給水量，而且每年總放水量因每年水文狀況均不一致而有所差異。為簡化分析過程，本文將各目標需水整合成單一需水量，且假設在演算時程內固定不變。此單一需水由石門水庫實際放水量紀錄剔除「石門水庫竣工三十週年紀念專輯」(1994)及「灌溉節水技術手冊」(1995)所記載因枯旱情形而採取限水措施之年份，取各月份灌溉及公共總供水量與發電放水量之較大者歷年平均值作為各月份之計畫需水量。各月份之計畫需水量如圖 5 所示，年總需水量則為 985.62 百萬立方公尺。以歷年供水量平均值作為計畫需水量，本文將檢討水庫在民國 54 年至 86 年間之 33 年演算期間不同供水策略在乾旱時期之缺水特性。由於未包括防洪功能於水庫供水規則內，因此模擬所得結果未必能代表石門水庫實際之營運成效。

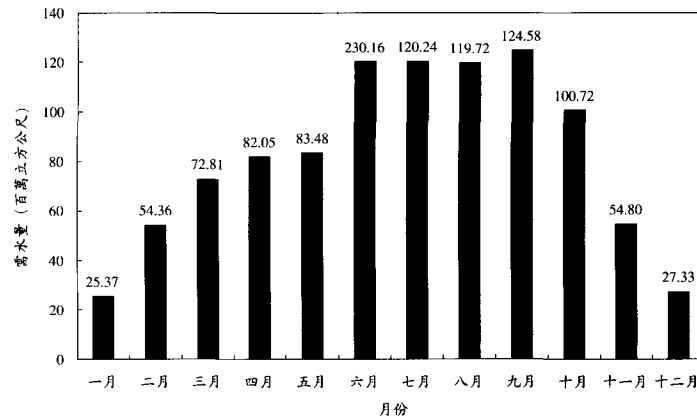


圖 5 本文使用於比較不同水庫供水策略之石門水庫計畫需水量

#### 4.2 運用規線演算結果

配合圖 4 的運用規線，將水庫蓄水量儘量保持在規線上限與下限之間，水庫計畫供水量如圖 5 所示，由於限水的幅度並未在運用規線中明定，因此本文假設水庫水位低於下限時八折供水，低於嚴重下限時則五折供水。在不考慮防洪操作之調節性洩洪及蒸發、滲漏等損失情況下，水庫起始蓄水量假設為 220 百萬立方公尺，以民國 54 年至 86 年之水庫月入流量紀錄演算水庫運轉情形，並以前述缺水特性來表示水庫營運績效，演算結果列於表 2，與其他供水策略演算結果之比較詳下節討論。

#### 4.3 標準操作策略(SOP)演算結果

標準操作策略之供水方式如式(9)所示，以水平衡方程式(式(1))為限制式，在不考慮蒸發、滲漏等損失及防洪操作的情況下，計畫供水量如圖 5 所示，水庫起始蓄水量仍假設為 220 百萬立方公尺，自民國 54 年至 86 年之水庫運轉情形以前述缺水特性來表示，演算結果列於表 2。與運用規線演算結果比較，由於本文所使用的運用規線採假設性的限水措施，因此其總缺水率、缺水事件缺水頻率、平均缺水延時及缺水量均較標準操作策略為多。由此初步比較可知，限水措施必須詳細的評估限水的機制、限水的幅度及限水的期限方能獲得應有的效果。

#### 4.4 定率動態規劃模式(DDP)演算結果

本文所使用之定率動態規劃模式假設水庫入流量系列為已知，模式中僅有一狀態變數，即為水庫蓄水量。在限制式如式(11)所示，水庫計畫供水量如圖 5 所示，水庫起始蓄水量假設為 220 百萬立方公尺及不考慮蒸發、滲漏等損失及防洪操作情況下，動態規劃模式依不同的標的函數可決定各月份不同的最佳供水量。考量前述不同標的函數，採用離散微分動態規劃(discrete differential dynamic programming) (Heidari 等，1971)方式求解，各不同標的函數之動態規劃模式演算結果列於表 2。

如預期般，OF1(最小化總缺水量)之總缺水率最小且發生缺水事件之頻率最少，但缺水事件缺水延時較長，傷害度亦較大。OF2(最小化總缺水量平方和)之風險度較 OF1 大，但每一缺水事件之各旬缺水量較 OF1 為平均，惟此點並不易由表 2 看出，詳細的比較詳後節討論，OF2 的傷害度是除了 OF3 外最小的，可見其可使嚴重缺水較為減輕。OF3(最小化最大單一缺水時刻缺水量)之單時刻最大缺水量為最小，同時也使得傷害度最小，但風險度最大且總缺水率、缺水事件最大缺水量及缺水事件最大缺水延時均較其他標的函數為大。OF4(最小化權重總缺水量)之風險度最小且回復度最大，缺水事件平均缺水延時、最大缺水延時及風險度均較其他標的函數為

表 2 運用規線、標準操作策略及動態規劃模式供水策略之缺水特性

	運用規線	SOP	DDP (OF1)	DDP (OF2)	DDP (OF3)	DDP (OF4)	DDP (OF5)	DDP (OF6)	
單時刻平均缺水量 (百萬立方公尺)	28.99	23.91	6.32	12.73	8.68	17.45	15.45	10.88	
單時刻最大缺水量 (百萬立方公尺)	99.56	67.62	37.93	39.76	11.05	118.38	81.53	120.39	
缺水事件平均缺水延時(月)	2.73	2.44	10.75	7.83	5.45	1.60	3.25	2.50	
缺水事件最大缺水延時(月)	8	6	17	13	21	4	6	9	
缺水事件平均缺水量 (百萬立方公尺)	79.07	58.43	67.99	99.69	47.27	27.91	50.21	27.20	
缺水事件最大缺水量 (百萬立方公尺)	181.50	145.10	142.73	258.73	229.47	147.12	171.23	120.39	
總缺水率(%)	5.3	1.6	1.7	5.5	6.8	1.7	5.6	1.7	
風險度	0.152	0.056	0.217	0.356	0.646	0.081	0.295	0.126	
回復度	0.350	0.409	0.081	0.121	0.180	0.594	0.299	0.400	
傷害度(百萬立方公尺)	51.78	36.29	26.16	14.28	8.61	25.36	26.15	25.28	
工兵團缺水指數	0.705	0.136	0.126	0.631	0.595	0.138	0.680	0.140	
缺水事件缺水頻率(次/年)	0.667	0.273	0.242	0.545	1.424	0.606	1.901	0.606	
各月份 缺水 頻率	一月	0.242	0.061	0.242	0.303	0.788	0.091	0.273	0.030
	二月	0.182	0.030	0.242	0.394	0.879	0.091	0.273	0.060
	三月	0.121	0.061	0.242	0.424	0.758	0.121	0.394	0.030
	四月	0.061	0.030	0.212	0.424	0.727	0.061	0.394	0.182
	五月	0.030	0.091	0.212	0.455	0.697	0.121	0.303	0.182
	六月	0.091	0.091	0.152	0.333	0.545	0.091	0.303	0.121
	七月	0.061	0.030	0.152	0.303	0.636	0.061	0.273	0.152
	八月	0.182	0.030	0.182	0.303	0.455	0.030	0.273	0.182
	九月	0.212	0.061	0.242	0.333	0.632	0.061	0.273	0.242
	十月	0.152	0.061	0.242	0.333	0.576	0.091	0.242	0.152
	十一月	0.212	0.061	0.242	0.333	0.636	0.061	0.273	0.152
	十二月	0.273	0.061	0.242	0.333	0.697	0	0	0.030

小，但單時刻平均缺水量及最大缺水量均較其他標的函數為大。雖然 OF1(最小化總缺水量)的總缺水率(1.7%)略大於標準操作策略之總缺水率(1.6%)，但並不代表 OF1 未達最佳供水策略，其間的差異主要在於演算時程最後水庫蓄水量設定的差異(標準操作策略未設定水庫最後蓄水量，而 OF1 假設最後水庫蓄水量與起始蓄水量一致)，總缺水率相近的結果也間接證實標準操作策略在演算時程內之總缺水量為最小。由以上的演算結果可知，即使水庫入流量均假設為已知，利

用優選模式將總缺水量最小化，在水庫容量、入流量變化、需求量等條件限制下，仍無法將缺水現象完全消除，在特定時間段附近會發生缺水，不同標的函數僅能在特定時間段附近對缺水量或缺水延時作若干的調整。

#### 4.5 序率動態規劃模式(SDP)演算結果

由於水庫入流量具不確定性，欲將此不確定性包含於模式內則需利用序率動態規劃模式。由於序率動態規劃僅能以後向演算，因此本文僅考

表 3 序率動態規劃模式與水庫供水指數供水策略之缺水特性

	SDP (OF1)	SDP (OF2)	RSIP I	RSIP II	RSIP III	RSIP IV	RSIP V	
單時刻平均缺水量(百萬立方公尺)	32.25	22.67	44.77	32.23	36.23	24.97	22.70	
單時刻最大缺水量(百萬立方公尺)	124.58	103.06	108.34	103.14	103.14	72.14	60.12	
缺水事件平均缺水延時(月)	1.90	2.29	1.50	2.00	1.79	3.00	4.17	
缺水事件最大缺水延時(月)	6	9	4	5	5	10	10	
缺水事件平均缺水量(百萬立方公尺)	61.41	51.81	67.15	64.46	64.70	74.90	94.59	
缺水事件最大缺水量(百萬立方公尺)	266.14	227.16	209.83	221.91	224.99	235.52	211.97	
總缺水率(%)	13.8	13.4	2.5	2.6	2.8	4.1	3.5	
風險度	0.351	0.485	0.045	0.066	0.063	0.136	0.126	
回復度	0.525	0.432	0.667	0.500	0.560	0.333	0.240	
傷害度(百萬立方公尺)	37.78	30.30	52.28	43.07	48.72	34.73	34.19	
工兵團缺水指數	2.589	2.246	0.323	0.308	0.341	0.542	0.447	
缺水事件缺水頻率(次/年)	2.212	2.545	0.364	0.394	0.424	0.545	0.364	
各月份 缺水 頻率	一月	0.091	0.576	0	0	0	0.091	0.061
	二月	0.182	0.545	0.030	0.061	0.061	0.121	0.091
	三月	0.424	0.545	0.091	0.091	0.091	0.121	0.121
	四月	0.455	0.545	0.030	0.091	0.091	0.181	0.182
	五月	0.485	0.545	0.061	0.091	0.091	0.273	0.182
	六月	0.515	0.424	0.091	0.091	0.121	0.212	0.242
	七月	0.485	0.394	0.030	0.091	0.061	0.212	0.182
	八月	0.515	0.394	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091
	九月	0.424	0.333	0.061	0.121	0.121	0.121	0.091
	十月	0.515	0.485	0.061	0.061	0.030	0.121	0.152
	十一月	0.030	0.303	0	0	0	0.030	0.061
	十二月	0.061	0.727	0	0	0	0.061	0.061

慮前述之 OF1(最小化總缺水量)及 OF2(最小化總缺水量平方和)。水庫入流量轉換機率雖可由紀錄流量求取，但由於紀錄年限不長，無法求得較精確的流量轉換機率，因此本文採用 Wang 等(1986)所建議的方法，假設各月份流量可以 Lognormal 分佈表示，且相鄰的兩個月流量具相關性，詳細的推導過程請參閱該論文，本文不再贅述。水庫入流量採用已知的 t-1 時刻的入流量可避免在模式中需要預測流量。本文將各月份流量切割成二十個狀態求取流量轉換機率，並將水庫蓄水量切割成一百五十個狀態，使用與定率動態規劃相同的演算條件，序率動態規劃模式演算結果列於表 3。

二不同標的函數間之缺水特性差異不大，由於 OF2 係最小化缺水量的平方，因此單時刻、缺水事件及整體時程之缺水量均較小，但風險度較大且回復度較小。若與定率動態規劃模式相比則整體營運相差甚多，最主要的原因就在於入流量的不確定性，序率動態規劃係在可能發生的不同流量系列間尋求一平均最佳解，而定率動態規劃模式假設入流量為已知，即無此不確定性存在。除此之外，計算技巧間的差異亦是原因之一，序率動態規劃模式中由於將狀態變數離散成有限的區間，當區間間隔愈小，可以求得愈精確的結果，但所需的計算時間與計算機容量愈大，本文並不特別針對狀態變數的離散個數進行討

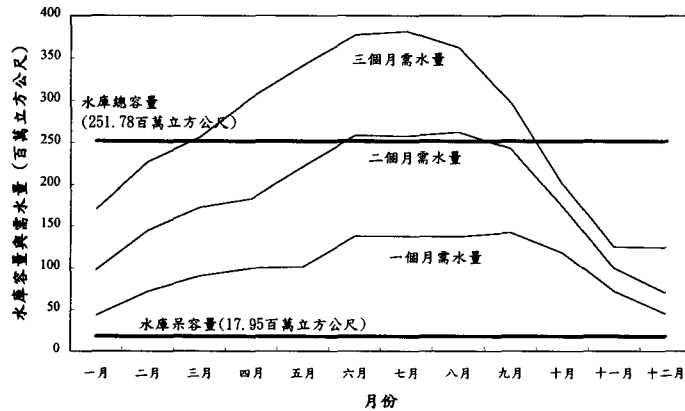


圖 6 水庫容量與各月份未來一個月至三個月需水量之關係

論，僅以上述條件作為不同水庫供水策略之比較，至於以其他方法改善序率動態規劃供水策略則於下節中討論。

#### 4.6 水庫供水指數供水策略演算結果

在探討利用水庫供水指數制定供水策略前需先選取合宜的前置時期，圖 6 為水庫容量與各月份未來一個月至三個月計畫需水量間之關係。由圖可知，當水庫滿庫時即使不計算入流量約略可滿足兩個月以上的計畫需水量，因此，水庫蓄水量是滿足未來一至二個月計畫需水量合宜的指標。若再加考慮水庫入流量的不確定性及採取較保守的營運策略，則三個月的前置時期應是合理的選擇。

Lee 等(1987)指出由於序率動態規劃模式中將狀態變數切割成有限的區間，因此對所求得之最佳供水策略仍有改善的空間。本文使用第一個水庫供水指數供水策略將利用一個月前置時期水庫供水指數來改善序率動態規劃模式所得到之供水策略，稱為水庫供水指數策略 I(簡寫為 RSIP I)，供水策略之數學式表為：

$$\begin{aligned}
 R_t &= D_t && \text{當 } \gamma_1 \geq 0.9 \\
 R_t &\leq D_t \text{ (} R_t \text{ 由 } SDP \text{ 決定)} && \text{當 } \gamma_1 < 0.9 \quad \dots(18)
 \end{aligned}$$

當一個月前置時期水庫供水指數大於 0.9 時即全額供水，亦即僅考慮一個月期程，當水庫蓄

水量加上入流量滿足需水量之機率大於 0.9 時即全額供水。而水庫供水指數選擇 0.9 的理由係流量轉換機率僅考慮二十個狀態，有誤差存在，且預估水庫供水指數達 0.9 時應該有相當高的機率可滿足計畫需水量。當水庫供水指數低於 0.9 時則由序率動態規劃模式決定供水量，此處僅考慮序率動態規劃模式之 OF1 供水策略。演算結果則列於表 3。

第二個供水策略類似於上式仍採用水庫供水指數改善序率動態規劃模式之供水策略，惟採用二個月之前置時期，稱為水庫供水指數策略 II(簡寫為 RSIP II)，供水策略如下式所示：

$$\begin{aligned}
 R_t &= D_t && \text{當 } \gamma_2 \geq 0.9 \\
 R_t &= 0.75D_t && \text{當 } \gamma_1 \geq 0.9 \text{ 且 } \gamma_2 < 0.9 \quad (19) \\
 R_t &\leq D_t \text{ (} R_t \text{ 由 } SDP \text{ 決定)} && \text{當 } \gamma_1 < 0.9
 \end{aligned}$$

本供水策略只在二個月前置時期水庫供水指數大於 0.9 時才全額供水，當一個月前置時期水庫供水指數大於 0.9 但二個月前置時期水庫供水指數低於 0.9 時，即預期一個月後可能缺水時則採限水措施，當一個月前置時期水庫供水指數低於 0.9 時則由序率動態規劃模式之 OF1 供水策略決定供水。演算結果列於表 3。

相同的，以三個月前置時期之水庫供水指數作為改善序率動態規劃模式供水策略之指標，稱

為水庫供水指數策略 III(簡寫為 RSIP III)，供水策略如下式所示：

$$\begin{aligned}
 R_t &= D_t && \text{當 } \gamma_3 \geq 0.9 \\
 R_t &= 0.75D_t && \text{當 } \gamma_2 \geq 0.9 \text{ 且 } \gamma_3 < 0.9 \\
 R_t &= 0.5D_t && \text{當 } \gamma_1 \geq 0.9 \text{ 且 } \gamma_2 < 0.9, \gamma_3 < 0.9 \dots(20) \\
 R_t &\leq D_t && \text{當 } \gamma_1 < 0.9 \\
 &&& (R_t \text{ 由 } SDP \text{ 決定})
 \end{aligned}$$

本策略採取階段性限水措施，當三個月前置時期水庫供水指數大於 0.9 時全額供水，當二及三個月前置時期水庫供水指數低於 0.9 時採五折供水，當三個月前置時期水庫供水指數低於 0.9，但二個月前置時期水庫供水指數大於 0.9 時則七成五供水，當一個月前置時期水庫供水指數低於 0.9 時則由序率動態規劃模式決定供水。式(20)仍僅考慮序率動態規劃模式之 OF1 供水策略。演算結果則列於表 3。

上述供水策略係以水庫供水指數改善序率動態規劃模式因狀態變數離散後之精確度問題，其次，考慮單獨利用水庫供水指數作為水庫供水策略的指標，首先考慮較簡單的三個月前置時期階段性限水策略，稱為水庫供水指數策略 IV(簡寫為 RSIP IV)，供水策略如下式所示：

$$\begin{aligned}
 R_t &= D_t && \text{當 } \gamma_3 \geq 0.9 \\
 R_t &= 0.9D_t && \text{當 } \gamma_2 \geq 0.9 \text{ 且 } \gamma_3 < 0.9 \\
 R_t &= 0.8D_t && \text{當 } \gamma_1 \geq 0.9 \text{ 且 } \gamma_2 < 0.9, \gamma_3 < 0.9 \\
 R_t &= 0.7D_t && \text{當 } 0.8 \leq \gamma_1 < 0.9 \text{ 且 } \gamma_2 < 0.9, \gamma_3 < 0.9(21) \\
 R_t &= 0.6D_t && \text{當 } 0.7 \leq \gamma_1 < 0.8 \text{ 且 } \gamma_2 < 0.9, \gamma_3 < 0.9 \\
 R_t &= 0.5D_t && \text{當 } 0.6 \leq \gamma_1 < 0.7 \text{ 且 } \gamma_2 < 0.9, \gamma_3 < 0.9 \\
 R_t &= 0.4D_t && \text{當 } \gamma_1 < 0.6 \text{ 且 } \gamma_2 < 0.9, \gamma_3 < 0.9
 \end{aligned}$$

不同前置時期水庫供水指數達到不同數值時採不同程度的限水措施，當三個月前置時期水庫供水指數大於 0.9 時才全額供水，當預期滿足計畫需水量的機率較低時則採較大幅度的限水。演算結果仍列於表 3。

水庫供水指數策略 V(簡寫為 RSIP V)則考慮較複雜的二門檻值，0.7 及 0.9，的三個月前置時期階段性限水供水策略，當水庫供水指數第一次

低於第一個門檻值(0.9)時，不採取限水措施，但進入監測狀態。當水庫供水指數第一次低於第二個門檻值(0.7)或連續二個月低於第一個門檻值(0.9)時則立即採取限水措施，預計滿足計畫需水量的機率較低時則採取較大幅度的限水措施，詳細的供水策略如圖 7 所示。圖 7 供水指數 $\gamma$ 的上標  $t$  表  $t$  時刻之估計值，而  $t-1$  時刻表前一時刻所估算之供水指數。演算結果亦列於表 3。

由 RSIP I、RSIP II 及 RSIP III 的演算結果可知上述供水策略可大幅改善序率動態規劃供水策略的營運，其原因不在於序率動態規劃模式所獲取的非最佳供水策略，而在於前述之狀態變數離散所造成的精確度問題。因此是採用較細的間隔但計算繁複以求取較精確的結果，亦或以較粗的間隔得到較粗略的結果再以其他方法改善以節省計算時間與計算機容量，仍是值得探討的問題。另比較三者間的差異則可發現前置時期愈長，風險度、總缺水率及缺水頻率均較大，但單時刻平均缺水量則較低，亦即可避免較嚴重的缺水現象，其原因為前置時期愈長，不確定性愈高，提前採取限水措施雖可避免嚴重缺水現象的發生，但若入流量不如預期般低，則限水措施就造成額外的缺水。RSIP IV 及 RSIP V 間之差異則不大，與 RSIP I、RSIP II 及 RSIP III 比較，雖然缺水延時及總缺水率略增，但單時刻平均、最大缺水量及傷害度均降低。

## 五、討 論

在進行討論前，各種水庫供水策略計算方法間的差異值得特別注意，例如定率動態規劃假設水庫入流量為已知，而運用規線及標準操作策略並不利用未來的入流量，序率動態規劃及水庫供水指數供水策略則將入流量的不確定性以流量轉換機率來表示。其次序率動態規劃將狀態變數離散化，因此有切割間隔數及演算精確度的問題，而定率動態規劃採用離散微分動態規劃，因此無離散間隔數的問題，另外有些供水策略採取先期限水措施，與不採取先期限水措施之供水策略也有基本上的差異。

底下就乾旱時期水庫不同供水策略的若干

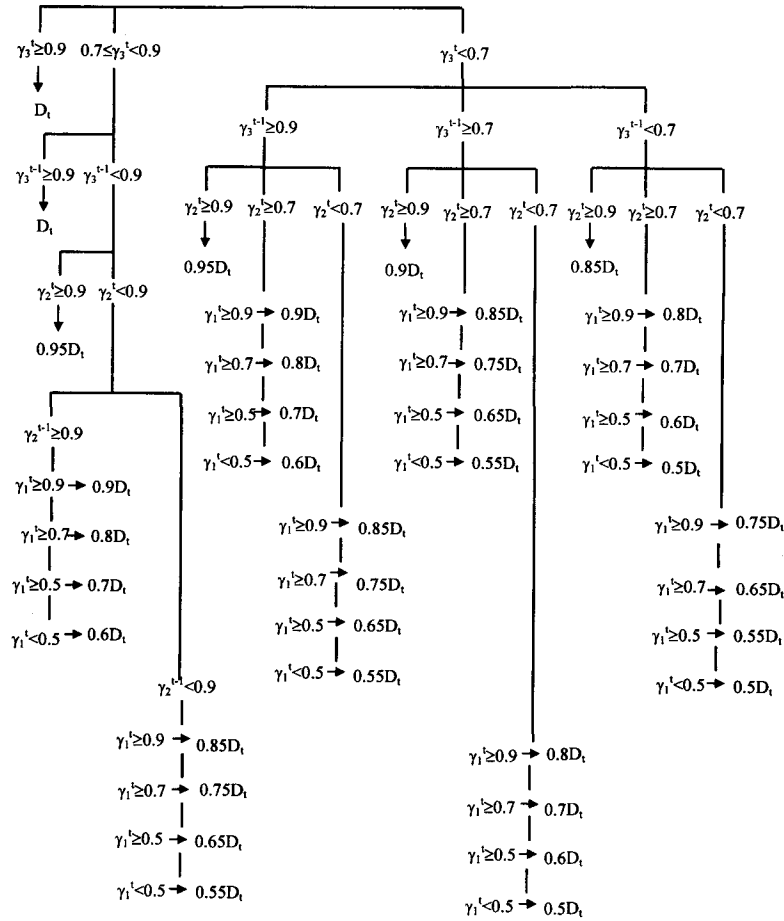


圖 7 水庫供水指數策略 V

關鍵問題，例如改變供水策略可否減少缺水現象的發生、穩定供水量及缺水風險及如何降低缺水之衝擊等，進行較深入的探討。

### 5.1 缺水現象能消滅嗎？

水庫的基本功能為蓄豐濟枯，能滿足各營運目標以求取最大的效益為最主要的營運原則，但在水庫入流量、庫容、計畫供水量及供水策略等條件限制下，有時無法滿足既定的計畫供水量。在無其他輔助水源及計畫供水量不變的情況下，改變供水策略能否使缺水現象消失為本文探討的主要目的之一。

經由前述不同供水策略的缺水分析，以定率動態規劃模式並假設在最理想的狀態下，即假設入流量為已知且目標的函數為將總缺水量最小化，缺水情況仍然存在的現象可知在水庫入流量、庫容、計畫供水量等特定條件限制下缺水現象是無法避免的。亦即不論採取何種供水策略，即使水庫入流量能準確的預測，仍然無法避免缺水現象的發生。在無法消滅缺水現象的情況下，退而求其次的方法應是瞭解供水系統的供水能力限制及一旦發生缺水後如何使缺水的影響降至最低。底下將討論不同供水策略時降低需水量以減少缺水風險及不同供水策略間的差異所造

成缺水特性的變化等問題。

## 5.2 穩定供水量與缺水風險

由於水庫入流量具不確定性，對於過高的計畫需水量有時無法滿足，因此許多供水系統均定義穩定供水量(firm yield)作為系統供水能力的衡量。較常見的穩定供水量定義為水庫在流量紀錄最乾旱時期仍能供應之最大水量(Chow 等，1988)，因此當計畫需水量大於穩定供水量時會有較高的缺水風險存在。

基本上，水庫供水能力為水庫庫容、入流量、需水量及水庫供水策略的函數。因此，即使保持水庫庫容、入流量及需水量一致的情況下，各不同供水策略的穩定供水量仍會有所不同。以前述不同的供水策略為例說明，若保持圖 5 計畫需水量各月份間之比例不變，以民國 54 年至 86 年間共 33 年的水庫月入流量紀錄演算，運用規線的年穩定供水量為 495.68 百萬立方公尺，標準操作策略年穩定供水量為 844.88 百萬立方公尺，水庫供水指數供水策略 VI 及策略 V 之年穩定供水量分別為 754.56 及 764.44 百萬立方公尺。亦即運用規線、標準操作策略、水庫供水指數供水策略 VI 策略 V 在需水量分別降低至 495.68 百萬立方公尺、844.88 百萬立方公尺、754.56 百萬立方公尺及 764.44 百萬立方公尺時在歷史紀錄流量演算情況下不致發生缺水。上述不同供水策略的穩定供水量僅為原年總供水量 985.62 百萬立方公尺之 50.3%、85.7%、76.6% 及 77.6%，各不同供水策略穩定供水量間之差異不僅反應供水策略本身的差異，亦反應採取提前限水措施與否間的差異。

但即使將計畫需水量降低至穩定供水量且保持相同的供水策略，並不意味著未來不會發生缺水，原因在於未來水庫入流量有可能發生比紀錄流量更乾旱的水文狀況，因此即使供水系統採用穩定供水量作為計畫供水量仍有發生缺水的風險存在，惟其風險較低，至於風險的評估則需藉助較長的繁衍流量演算分析。

水庫供水量採取穩定供水量，雖然造成缺水之風險性較小，但對水資源利用的效率偏低；若

採用較高的計畫供水量，雖然水資源利用效率較高，惟供水較不穩定。二者之間如何取捨應視整體供水系統是否有其他緊急備用水源及其可供水量的大小，或是可由其他供水系統調配供應而定。在制定水庫供水策略之前即應就不同需水狀況詳細評估其可能造成的缺水情況，並就系統可調配水源進行整體考慮，以提供決策者參考。

## 5.3 供水策略間之差異與特性

欲減緩缺水之衝擊應瞭解不同供水策略間之差異及缺水特性間之關連，本節先探討不同供水策略間之差異，缺水特性間之關連性於下節中討論。除本文討論的供水策略外，尚有其他的供水策略，本文無法逐一探討。本文所使用供水策略之特性簡述如下：

- (1)標準操作策略的供水原則為儘可能滿足供水，由於不採取任何限水措施，無法控制缺水的幅度，但仍可應用於水庫即時操作，惟較少使用於實際操作。
- (2)定率動態規劃模式假設流量為已知，因為所推導得之水庫供水策略僅能適用於該特定流量系列，因此無法應用於即時操作，惟其供水策略可依不同標的函數而定，可應用於篩選不適宜之供水策略。
- (3)序率動態規劃模式利用流量轉換機率，所推導得之水庫供水策略表為水庫蓄水量及入流量之函數，因此可應用於即時操作。惟本文僅使用一個月之流量轉換機率，無法預知較長期之可能供需水情況及限水幅度。
- (4)水庫供水指數策略依據不同前置時期水庫供水指數供水，雖可應用於即時操作及概略瞭解不同前置時期之缺水機率及限水幅度，惟非優選模式，無法使某項標的最佳化。

除前述表 2 及表 3 顯示不同供水策略之缺水指數外，本節將更詳細探討特定時段各不同供水策略之缺水情況。所選定之時間段為民國 61 年至 62 年，因標準操作策略在 62 年 6 月至 9 月之缺水事件缺水量為其在 33 年演算期間之最大缺



表 4 不同供水策略民國 61 年至 62 年之各月份缺水水量

單位：百萬立方公尺

年	月	運用規線	SOP	DDP OF1	DDP OF2	DDP OF3	DDP OF4	DDP OF5	DDP OF6	SDP OF1	SDP OF2	RSIP I	RSIP II	RSIP III	RSIP IV	RSIP V	
61 年	一月					4.5											
	二月					4.5				0.3	5.3						
	三月					4.5				14.0	23.5						
	四月					4.5				12.8	28.0						
	五月																
	六月									11.8							
	七月																
	八月																
	九月					17.5	11.0		23.2	37.7	85.4	58.4					
	十月				1.0	17.8	11.0		11.6		67.8	59.8					
	十一月	11.0			0.3	17.9	11.0		7.7								
	十二月	5.5			2.2	17.8	11.0										
62 年	一月	5.1			11.7	18.0	11.0		25.4								
	二月				5.2	21.9	11.0		16.3		4.5	13.1					
	三月				8.8	22.1	11.0		10.9		21.9	30.1					
	四月				24.1	22.1	11.0		6.8						16.4	12.3	
	五月				7.2	22.1	11.0				29.0	36.9		20.9	28.5	8.4	4.2
	六月	79.1	12.9	12.3	22.0	11.0	118.4	77.0		40.1	34.0	40.1	40.1	38.7	36.1	36.1	
	七月		67.6	7.6	21.4	11.0	6.6	37.6	67.1	47.0	42.3	47.0	47.0	43.8	60.1	48.1	
	八月	99.6	26.7	24.4	20.4	11.0	22.1	24.2		36.3	5.9	36.3	28.3	28.3	59.9	48.9	
	九月	31.5	38.0	37.9	17.9	11.0		18.0	38.0	87.2	58.6	86.5	85.7	85.7	12.5	31.2	
	十月	20.1													30.2	30.2	
	十一月										7.1						
	十二月										6.6						

說明：空格代表未缺水

水量，因此以此段時間作為比較不同供水策略的說明。表 4 為前述各種不同供水策略在民國 61 年至 62 年的缺水狀況，不同的供水策略在民國 62 年 6 月至 9 月間均發生缺水，由此可知存在某些時間段缺水現象無法避免，不同供水策略表現出來不同的缺水特性僅在此時間段前後調整缺水量的大小及缺水延時的長短。例如定率動態規劃模式 OF4(最小化權重總缺水量)之缺水延時最短(僅 3 個月)但有一時刻缺水最嚴重(118.4 百萬立方公尺)，OF3(最小化最大單一時段缺水量)與其他供水策略比較並無較大之單一時刻缺水且各月缺水量相當平均，但缺水延時連續長達 13

個月，OF1(最小化總缺水量)及 OF2(最小化總缺水量平方和)在缺水延時內之缺水量較為平均，序率動態規劃模式之缺水較頻繁且缺水量較大，水庫供水指數供水策略之前置時間愈長，出現之缺水次數愈多，但單時刻嚴重缺水可稍減。標準操作策略、定率動態規劃模式之 OF1、OF2 及 OF4、水庫供水指數策略 I、II 及 III 均在此時期產生 33 年演算期間之最嚴重缺水事件，雖然不同的供水策略使此一缺水事件的缺水延時長度不同、缺水總量略有差異、缺水事件內之各單一時刻缺水量並不一致，但由缺水現象仍然發生可知僅改變供水策略是無法使缺水現象消滅。

#### 5.4 缺水特性間之關連

由前述表 2 及表 3 所列不同供水策略之缺水指數可看出即使採用不同供水策略，缺水指數間仍然存在下列趨勢：

- (1) 缺水事件平均缺水延時與回復度成反比，即回復度愈大，缺水事件平均缺水延時愈短。
- (2) 單時刻缺水量與傷害度約略成正比。
- (3) 工兵團缺水指數與缺水事件缺水量約略成正比。
- (4) 缺水量與缺水延時約略成反比。

瞭解不同缺水指數間的特性及關連性方能在制定供水策略時不致改善了某項缺水指數而使另項缺水指數惡化，另外，也較容易評估供水策略是否達到預期的營運目的。

#### 5.5 利用供水策略減緩缺水影響

在缺水現象無法完全消滅的情況下，退而求其次的方法便是減少缺水的衝擊，由於缺水性質複雜，由前述不同供水策略的比較分析可知，各項缺水指數之變化趨勢並不一致。因此，若以缺水特性來評估水庫供水策略及衡量是否減緩缺水衝擊，必須先釐清水庫營運所欲達成的目標為減少何項缺水特性。

模擬模式如標準操作策略或水庫供水指數策略，由於不像優選模式具有標的函數，因此無法使某項標的最小化，所以底下將以優選模式為例說明，定率動態規劃模式 OF3(最小化最大單一缺水時刻缺水量)雖然使單一時刻缺水量減至最低，但其他缺水特性較為嚴重，OF2(最小化缺水量平方和)為對缺水量採權重可使缺水延時內之各時刻缺水量較平均且無較嚴重的單時刻缺水，OF4(最小化權重缺水量)為對缺水延時採權重可使缺水時刻較短。底下考慮同時對缺水量及缺水延時採權重以探討缺水延時及缺水量得到何種程度的減少，此標的函數稱為 OF5，如下式所示：

$$\min \sum_{R_i} \sum_t w_i ST_i^2 \dots\dots\dots(22)$$

其中  $ST_i$  :  $t$  時刻缺水量，定義詳式(2)；

$w_i$  : 權重，其值 = 1 若  $R_{t-1} \geq D_{t-1}$  且  $R_t < D_t$  ;  
或 =  $w_{t-1} + 1$  若  $R_{t-1} < D_{t-1}$  且  $R_t < D_t$  。

與前述供水策略使用相同的計算條件，演算結果列於表 2。OF5 的演算結果大部分都介於 OF2 與 OF4 之間，亦即缺水延時較 OF2 短但較 OF4 長，缺水事件平均缺水量較 OF2 少但較 OF4 大，值得注意的是總缺水率及工兵團缺水指數均較 OF2 及 OF4 為大。OF5 在民國 61 年至 62 年之缺水情況列於表 4，由於 OF5 同時對缺水延時及缺水量採權重，因此在 61 年 9 月至 62 年 9 月之缺水現象被切割成三缺水事件，即每一缺水事件之延時較短且各缺水事件之各月份缺水量均由大變小。

上述標的函數均考慮缺水量，由於各月份需水量並不相同，在某些情況下，特別是不同作物在不同生長時期所需水量並不相同，缺水率所代表的意義可能比缺水量更有意義，因此底下將考慮最小化演算時程內之總缺水率，稱為 OF6，如下式所示：

$$\min \sum_{R_i} \sum_t \frac{ST_i}{D_i} \dots\dots\dots(23)$$

其中  $ST_i$  :  $t$  時刻缺水量，定義詳式(2)；

$D_i$  :  $t$  時刻需水量。

與前述供水策略使用相同的計算條件，演算結果列於表 2。OF6 的演算結果總缺水率與 OF1 一樣是所有標的函數中最小的，回復度及平均缺水延時僅次於 OF4，但單時刻最大缺水量最大。OF6 在民國 61 年至 62 年之缺水情況列於表 4，由於 OF6 最小化總缺水率，因此僅有三缺水時刻但缺水量相對較大。

定率動態規劃模式演算結果僅適用於特定的水庫入流量系列，無法應用於即時操作，但不同標的函數的演算結果可作為制定水庫即時供水策略的參考。一般而言，水庫營運時減少缺水量比縮短缺水延時重要，但需避免單一時刻發生嚴重的缺水，因此一般均採取提前限水措施，以避免發生單一時刻嚴重缺水，雖然此會使缺水延時增長且在限水預警制度不夠可靠的情況下有

可能使總缺水量增加。傳統的水庫運用規線及本文定義之水庫供水指數策略 IV 及策略 V 基本上均遵循此一原則，惟限水的依據、限水幅度及限水期距應視各別供水系統及不同供水標的而定，且實際操作時應注意是否有限水幅度及期距超過原先預定的現象產生。

## 六、結論與建議

本文探討乾旱時期不同水庫供水策略缺水影響分析，並以單一水庫供水系統為例說明，缺水特性則以單時刻、缺水事件及整體時程考量缺水延時、缺水量及缺水頻率等相關缺水指數作為比較分析不同供水策略的基準，可獲致以下結論：

- (1) 缺水現象的產生受限於水庫容量、入流量、計畫需水量及供水策略等條件影響，僅變更供水策略無法使缺水現象消失，但不同的供水策略會導致不同的缺水特性。
- (2) 不同的水庫供水策略依據不同的準則供水對水庫整體營運行為有不一樣的影響，以缺水行為而言，提前限水雖可避免發生單一時刻發生較嚴重的缺水，但由於水庫入流量具不確定性，有時亦會因不預期的高流量使得限水措施不能發揮其功能。
- (3) 水庫營運行為之缺水特性複雜，本文以單時刻、缺水事件及整體時程檢視缺水延時、缺水量及缺水頻率等相關缺水指數，由於不同的缺水指數並未有相同的變化趨勢，因此改變供水策略必須注意是否造成其他缺水指數的惡化。
- (4) 本文利用水庫入流量轉換機率配合水庫蓄水量對需水量的關係定義水庫供水指數，不同前置時期水庫供水指數即為供水滿足未來計畫需水量之機率，亦即代表水庫供水潛能，因此可作為水庫供水的依據。
- (5) 在水庫庫容、入流量、需水量等條件均為固定的情況下，不同供水策略無法使缺水現象減少，且在特定時間段附近均會產生缺水，調整供水策略僅能在該時間段附近調整缺水量大小及缺水時間長短。

水庫供水策略所牽涉到的問題甚多，除前述本文所討論分析的情況外，未來仍值得探討的課題有：

- (1) 較小演算時距的分析，本文以月作為演算時距，由圖 6 可知水庫蓄水量對需水量而言並不大，為求較精確的供水規則，應利用較小的時距，如週或旬等，制定供水策略以減緩缺水的影響。
- (2) 配合流量預測作為水庫營運的指標，本文僅以流量轉換機率來代表流量的不確定性，未來仍可利用流量預測模式作為水庫供水的指標，惟需對預測的準確度及可能的缺水風險作進一步的探討。
- (3) 缺水特性多標的規劃模式的探討，本文所採用的優選模式僅考慮單一標的函數，由於缺水特性複雜，不同缺水指數間未必有相同的變化趨勢，應可選定幾個較重要的缺水指數利用多標的規劃模式尋求不同缺水指數間之最佳水庫供水方案。
- (4) 其他流量系列營運成效的探討，本文僅使用歷史流量紀錄系列，不僅只有單一序列，且紀錄期限亦不長，對不同水文狀況的評估應利用較長的繁衍流量系列以瞭解其完整缺水特性及供水策略的成效。
- (5) 區分供水標的，本文僅考慮單一供水標的，由於不同供水標的具有不同特性，例如生活用水之缺水容忍度較低，而灌溉用水則需考慮作物生長期不同需水量，因此供水策略宜區分不同供水標的方能符合不同需水標的之需求。
- (6) 較詳細的缺水特性分析，本文僅考慮缺水特性之平均值及最大值，對於以較長的繁衍流量所獲得的較多的缺水樣本應可以機率分佈方式表示，以確實掌握缺水行為之特性。
- (7) 水庫供水能力為庫容、入流量、需水量及供水策略之函數，在營運期間若因淤積使庫容減小、入流量紀錄增長、需水量變更等，均應適時檢討供水策略是否符合當初的水庫營運目標。

## 參考文獻

1. 簡俊彥、蔡正南、洪益發，1991，乾旱時期水庫農業用水放水量調配模式之研究，*臺灣水利*，第 39 卷，第 3 期，第 24-32 頁。
2. 蕭政宗，1999，單一水庫系統缺水特性之探討，*臺灣水利*，第 47 卷，第 2 期，第 72-91 頁。
3. 臺灣地區民國八十六年蓄水設施水量營運統計報告，1999，經濟部水資源局。
4. 經濟部主管水利相關中央法規配合臺灣省政府功能業務與組織調整修訂法規(行政命令)彙編，1999，經濟部水資源局。
5. 石門水庫竣工三十週年紀念專輯，1994，臺灣省石門水庫管理局。
6. 灌溉節水技術手冊，1995，農委會水利特刊第八號，行政院農業委員會，臺北市七星農田水利研究發展基金會。
7. Cancelliere, Antonino, Ancarani, Alessandro, and Rossi, Giuseppe, 1998, Susceptibility of Water Supply Reservoirs to Drought Condition, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 3(2), 367-381.
8. Chow, Ven Te, Maidment, David R., and Mays, Larry W., 1988, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Inc., New York.
9. Esogbue, Augustine O., 1989, Dynamic Programming and Water Resources: Origins and Interconnections, in *Dynamic Programming for Optimal Water Resources System Analysis*, edited by Esogbue, Augustine O., Prentice Hall Inc., New Jersey.
10. Hashimoto, Tsuyoshi, Stedinger, Jerry R., and Loucks, Daniel P., 1982, Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resources System Performance Evaluation, *Water Resources Research*, 18(1), 14-20.
11. Heidari, M., Chow, V. T., Kokotovic, P. V., and Meredith, D. D., 1971, The Discrete Differential Dynamic Programming Approach to Water Resources System Optimization, *Water Resources Research*, 7(2), 273-282.
12. Huang, Wen-Cheng, Harboe, Ricardo, and Bogardi, Janos J., 1991, Testing Stochastic Dynamic Programming Models Conditioned on Observed or Forecasted Inflows, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 117(1), 28-36.
13. Lee, H. L., Brill, E. D., and Liebman J. C., 1987, *Reliability of Reservoir Operation Under Hydrologic Uncertainty*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Water Resources Center, UILU-WRC-87-207.
14. Moreau, David H., 1991, A Risk-Based Model for Drought Contingency Planning, *Water Resources Bulletin*, 27(1), 117-123.
15. Sargent, D. M., 1979, Reservoir Operating Rules for Drought Conditions, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 83-94.
16. Shih, Jih-Shyang, and ReVelle, Charles, 1994, Water-Supply Operation During Drought: Continuous Hedging Rule, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 120(5), 613-629.
17. Takeuchi, Kuniyoshi, 1986, Chance-Constrained Model for Real-Time Reservoir Operation Using Drought Duration Curve, *Water Resources Research*, 22(4), 551-558.
18. Tatano, H., Okada, N., and Kawai, H., 1992, Optimal Operation Model of A Single Reservoir with Drought Duration Explicitly Concerned, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 6(2), 123-134.
19. U. S. Army Corps of Engineers, 1975, Hydrologic Engineering Methods for Water Resources Development, Vol.8, *Reservoir Yield*.
20. Wang, Dapei, and Adams, Barry J., 1986, Optimization of Real-Time Reservoir Operations with Markov Decision Processes, *Water Resources Research*, 22(3), 345-352.

21. Werick, William J., and Whipper, William Jr., 1994, *National Study of Water Management During Drought: Managing Water for Drought*, U. S. Army Corps of Engineers, IWR Report 94-NDS-8.
22. Wurbs, Ralph A, 1993, Reservoir-System Simulation and Optimization Models, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 119(4), 455-472.
23. Yakowitz, Sidney, 1982, Dynamic Programming Applications in Water Resources, *Water Resources Research*, 18(4), 673-696.
24. Yeh, William W-G, 1985, Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review, *Water Resources Research*, 21(12), 1797-1818.

收稿日期：民國 89 年 4 月 11 日

修正日期：民國 89 年 5 月 18 日

接受日期：民國 89 年 5 月 30 日