

## 考慮不同替代入流量之水庫限水策略

### Study on the Reservoir Hedging Rules for Various Alternative Inflows

淡江大學水資源及環境工程學系碩士班研究生

淡江大學水資源及環境工程學系助理教授

李皓志

Hao-Chih Lee

蕭政宗

Jenq-Tzong Shiau

#### 摘要

水庫蓄豐濟枯的功能可以提供穩定的供水，但由於需水量增加，在不預期的乾旱期間有時無法滿足既定的需水量而至產生缺水，良好的水庫操作策略可以減低因缺水所產生的負面影響。為避免嚴重缺水現象產生，採取適當的限水措施為常用的策略之一。本文考慮的水庫限水策略由二參數控制，其一為起始限水水量，其值介於零與需水量之間，另一參數為終止限水水量，其值介於需水量與需水量及庫容量和之間，當水庫可用水量(蓄水量與入流量之和)介於此二參數間時即採取限水。但由於實際入流量無法事先預知，因此本文以入流量歷史紀錄之最小值及平均值，稱為替代入流量，來代替實際入流量。本文以簡化的石門水庫供水系統為例，以總缺水率、單月最大缺水量、風險度、缺水事件最大缺水量等四項缺水指標評估不同替代入流量與限水參數之限水策略，而最佳限水策略的決定為能使此四項缺水指標同時達到最低值。分析結果顯示以平均入流量時，且限水控制參數之起始限水水量為70%之需水量，終止限水水量為需水量與70%庫容量之和為水庫最佳限水策略。

**關鍵詞：**水庫操作，限水策略，缺水指標。

#### ABSTRACT

The major function of reservoirs is to regulate surface flows and offer stable supplies. However, increasing demands and unexpected drought periods often cause the supplies from reservoirs insufficient to meet the established demands. A good reservoir operating policy can mitigate the negative impacts caused by water shortages. It is often to accept a small current deficit in order to reduce the intensity of a more severe shortage in future. In this study, hedging is controlled by two parameters, starting hedging parameter between 0 and demand, ending hedging parameter between demand and sum of demand

and reservoir capacity. When the available water in reservoirs, i.e. storage plus inflow, is between these two parameters, the hedging is initialized. Actual inflows cannot be known before ending of an analysis period, two alternative inflows, minimum and mean, therefore, are considered instead. Applied to Shihmen Reservoir and evaluated by the deficit ratio, maximum one-month shortage, risk, and maximum event shortage, the best hedging rule is determined when the four shortage indices reaching it's minimum value simultaneously. The best hedging rule suggested in this study is using the mean inflow and hedging parameters are 70% of demand and sum of demand and 70% of reservoir capacity.

**Keywords:** Reservoir operation, Hedging rules, Shortage index.

## 一、前言

水庫是水資源系統中重要的蓄水設施之一，其蓄豐濟枯的功能可以避免河川流量的季節性豐枯不均所導致供水不穩定的現象。但近年來由於經濟起飛、工商業快速發展，以至於各標的用水結構改變且需求量增加，在不預期的乾旱期間，由於水庫的蓄水容量有限，水庫的供水量常無法滿足既定的需求量，因此為降低缺水所帶來的經濟損失，水庫管理單位必須適時的採取限水措施。亦即當乾旱無法避免時，水庫管理單位希望藉由一些影響較輕微的缺水來降低未來發生嚴重缺水之風險。水庫供水的可用水量有兩個主要來源，一為水庫本身蓄水量，一為水庫的入流量，水庫之入流量具有季節性的變化，但即使在相同的季節，不同年份間的流量仍會有相當大的差異，亦即水庫入流量具有很大的不確定性。雖然水庫入流量之預測很難達到高精確度，但若能在水庫營運供水策略中考慮水庫入流量，必能提昇水資源的運用效率。

有關水庫系統限水的研究有 Hashimoto 等(1982)利用動態規劃在標的函數為最小化缺水量的條件下，以可靠度(reliability)、回復度(resilience)、傷害度(vulnerability)等指標評估水庫營運，其研究結果指出高可靠度與低傷害度是無法同時存在的，而且利用限水措施可有效降低嚴重缺水之風險，但缺水頻率會增加。Moy 等(1986)利用多目標線性規劃來研究水庫操作策略，其結

論為一個具有高可靠度與高回復度的水庫是無法防範單時刻嚴重缺水。Bayazit 及 Unal(1990)利用模擬法研究水庫操作策略若加入限水措施時的影響，利用不同的起始可用水量(SWA)及終止可用水量(EWA)來定義限水策略，其所定義之起始可用水量是介於零與標的需水量之間，終止可用水量是介於標的需水量與標的需水量和水庫有效容量和之間。Bayazit 及 Unal(1990)亦指出最大的可靠度與最小的傷害度是不會同時發生的，且其認為起始可用水量對水庫供水能力之影響較小。Shih 及 Revelle(1994)考慮水庫現有的蓄水量、入流量期望值及下游需水量之關係利用優選模式將單月最大缺水量最小化以求得供水策略，當水庫蓄水量與入流量期望值之和對需水量達到某一特定值時，水庫供水量將依優選模式所得到的結果，逐步的調整其供水量，以期將缺水所造成之傷害降到最低。Srinivasan 及 Philipose (1998)指出當水庫中的蓄水量能滿足下游需水量時仍採取限水措施，則可提高水庫的供水能力與減少平均缺水量；當水庫中的蓄水量無法滿足下游需水量時採取限水措施，則可避免未來產生無法承受之嚴重缺水。與 Bayazit 及 Unal(1990)的研究相比較，Srinivasan 及 Philipose(1998)增加考慮限水程度因子，並從不同程度限水之關係得知，利用不同的起始可用水量及終止可用水量所決定的不同程度之限水措施中，有些具有相同的供水能力。Bayazit 及 Unal(1990)、Shih 及 Revelle (1994)、Srinivasan 及 Philipose (1996)都指出較佳

的限水措施都是利用一段時間內水庫起始蓄水量和入流量之和與需水量之關係來決定限水策略。

本文研究目的為建立單一水庫供水系統之最佳限水策略，限水策略由水庫可用水量(蓄水量加入流量)為依據決定限水量之多寡，由於水庫入流量無法事先預知，因此本文以入流量歷史紀錄之最小及平均入流量，稱為替代入流量，來探討其對水庫供水能力的影響。至於限水策略之良莠則以缺水指標來評估，本文所考慮的缺水指標有單一時刻最大缺水量、缺水事件最大缺水量、總缺水率及風險度等四項，其可描述缺水特性在單一時刻、連續時刻及整體分析時程的變化，至於最佳限水策略則為此四項缺水指標能同時達到最低值的策略。最後以簡化的石門水庫單目標供水系統為例說明不同限水策略之缺水特性變化及決定不同替代入流量時之最佳限水策略。

## 二、研究方法

為探討不同的限水策略對水庫供水系統缺水的影響，本文以水庫可用水量，即水庫蓄水量及入流量之和，來定義限水策略。而何時開始限水、限水量多寡及何時結束限水則由起始限水量及終止限水量二控制參數來決定。水庫營運時實際入流量無法事先預知，因此本文考慮使用入流量紀錄之最小及平均入流量，稱為替代入流量，並配合不同限水參數來評估水庫營運及其缺水特性。另本文亦利用實際入流量來模擬水庫供水操作及其缺水情況，以瞭解在最佳情況下(未來入流量均已知)的營運情形以供比較。由於缺水特性複雜，本文將利用各種具有不同缺水特性之缺水指標來比較各供水策略之差異，以進一步評估不同替代入流量情況下之最佳限水策略。

### 2.1 單一水庫系統

本文將以單一水庫系統為例說明本文所擬定之限水策略對水庫營運的影響，單一水庫系統包括一座供水水庫及一需水點，並假設其需水量為已知，如圖 1 所示。

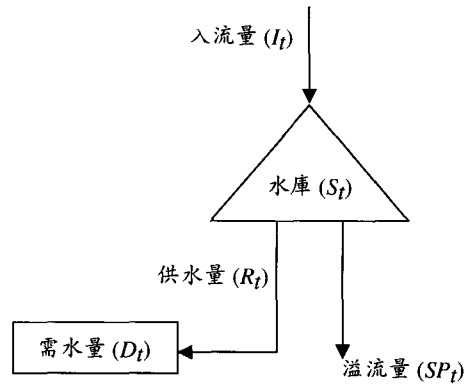


圖 1 單一水庫系統示意圖

為了清楚表達水庫系統供需之間的關係，本文將水庫的放水量分為二個部分，即供水與溢流量，其中供水是指有效使用於滿足需水量之水庫放水量，而溢流量是指大於需水量之水庫放水量。水庫營運模式中，水庫之蓄水量、入流量與放水量間之關係必須遵守水平衡方程式。水平衡方程式表示如下：

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

其中： $S_t$  及  $S_{t+1}$  為  $t$  及  $t+1$  時刻之水庫蓄水量；  
 $I_t$  為  $t$  時刻之水庫入流量；  
 $R_t$  為  $t$  時刻之水庫供水；  
 $SP_t$  為  $t$  時刻之水庫溢流量。

本文不考慮蒸發及滲漏損失。當水庫供水無法滿足需水量時即為缺水。對每一營運時刻  $t$ ，缺水量之定義如下：

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

其中： $ST_t$  為  $t$  時刻之水庫缺水量；  
 $D_t$  為  $t$  時刻之需水量。

### 2.2 限水策略

在不預期的乾旱期間，水庫供水有時無法滿足既定的需水量，此缺水現象的產生常造成許多負面的影響，為了減少嚴重缺水所產生的衝擊，提前且小幅度的限水以避免突然高比例的缺水是最常用的措施(Bayazit 及 Unal, 1990; Srinivasan 及 Philipose, 1998)。但限水機制，包括以何變數為依據決定是否限水、限水量的多寡

及限水的時間長度，需詳細評估以避免因不必要的限水而致浪費水資源。

以水庫供水系統而言，限水是當水庫仍有充裕的供水能力而不提供充足的水量，保留水庫蓄水量以供後續使用而致產生缺水。本文以水庫蓄水量與入流量之和，稱為水庫可用水量，作為決定限水及限水量的依據，本文所考慮的限水策略是由起始限水水量(圖 2 之  $PA$ )及終止限水水量(圖 2 之  $PB$ )二參數來控制，其中  $PA$  是介於 0 與各時刻需水量間， $PB$  則介於各時刻需水量與需水量及庫容量和之間。限水方式為當可用水量低於起始限水水量(以下稱  $PA$ )時，依水庫蓄水量與入流量之和供水，當可用水量介於起始限水水量( $PA$ )與終止限水水量(以下稱  $PB$ )間時採取限水，當可用水量高於終止限水水量( $PB$ )時則依需水量供水，因此不同的  $PA$  與  $PB$  值可組成不同的限水策略，即不同的限水時間及限水量。本文所定義之限水策略供水方式如下所示：

$$\text{當 } S_t + I_t \leq PA \text{ 時； } R_t = S_t + I_t, \quad SP_t = 0 \quad \dots\dots(3)$$

當  $PA < S_t + I_t \leq PB$  時；

$$R_t = PA + (S_t + I_t - PA) \times \left( \frac{D_t - PA}{PB - PA} \right), \quad SP_t = 0 \quad \dots\dots(4)$$

$$\text{當 } PB < S_t + I_t \leq D_t + C \text{ 時； } R_t = D_t, \quad SP_t = 0 \quad \dots\dots(5)$$

$$\text{當 } D_t + C < S_t + I_t \text{ 時； } R_t = D_t, \quad SP_t = S_t + I_t - R_t - C \quad \dots\dots(6)$$

其中： $PA$  為起始限水水量；

$PB$  為終止限水水量；

$C$  為水庫有效容量。

不同的  $PA$  與  $PB$  值會產生不同的限水效應，因此本文將對不同的  $PA$  與  $PB$  值進行分析以瞭解其對缺水特性之影響，並由此結果建議一最佳的限水策略。本文所考慮的  $PA$  值由 0 開始每隔  $0.1 D_t$  至  $0.9 D_t$ ，共計 10 組數值， $PB$  值則由  $D_t + 0.1 C$  每隔  $0.1 C$  至  $D_t + C$ ，亦考慮 10 組數值。當  $PA$  與  $PB$  同時為  $D_t$  時，供水策略則為 Shih 及 Revelle (1994) 所稱之標準操作策略(Standard Operating Policy，簡稱 SOP)，亦即為不限水措施。

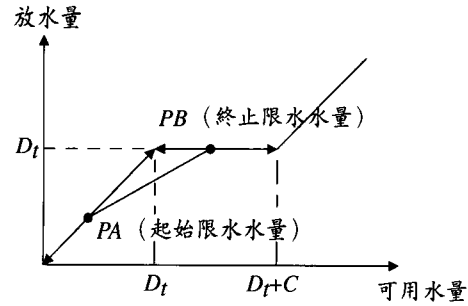


圖 2 限水策略示意圖

由於水庫入流量無法事先預知，即在  $t$  時刻開始時無法得知入流量( $I_t$ )的數值，因此本文考慮利用入流量歷史紀錄的統計特性來代替實際入流量，稱為替代入流量。本文考慮二種替代入流量，其一為每一時刻之歷史紀錄最小流量，另一為每一時刻之歷史紀錄平均流量，此二數值均可由流量紀錄中先行獲得。亦即式(3)至式(6)之入流量( $I_t$ )將因所採用的數值不同而分為以下三種狀況。

狀況一：考慮實際入流量。

狀況二：考慮紀錄最小入流量。

狀況三：考慮紀錄平均入流量。

本文將使用二種替代入流量及實際入流量分析不同限水控制參數所組成之限水策略對水庫營運之影響，並利用缺水指標進行評估，以瞭解不同入流量與限水控制參數間之關聯性，進而分析探討最佳限水策略。

### 2.3 缺水指標定義

為比較不同限水策略對水庫營運之影響，本文利用下述四項缺水指標來描述水庫供水系統之缺水行為。本文採用以衡量水庫供水策略之缺水指標其定義如下所述：

- (1) 總缺水率：所考慮整體分析時程內，總缺水量對總需水量之比值，其值介於 0 與 100% 之間。
- (2) 單時刻最大缺水量：分析時程內所有單一缺水時刻缺水量之最大值。
- (3) 風險度：水庫供水系統之缺水機率 (Hashimoto 等，1982)，可由總缺水延時對

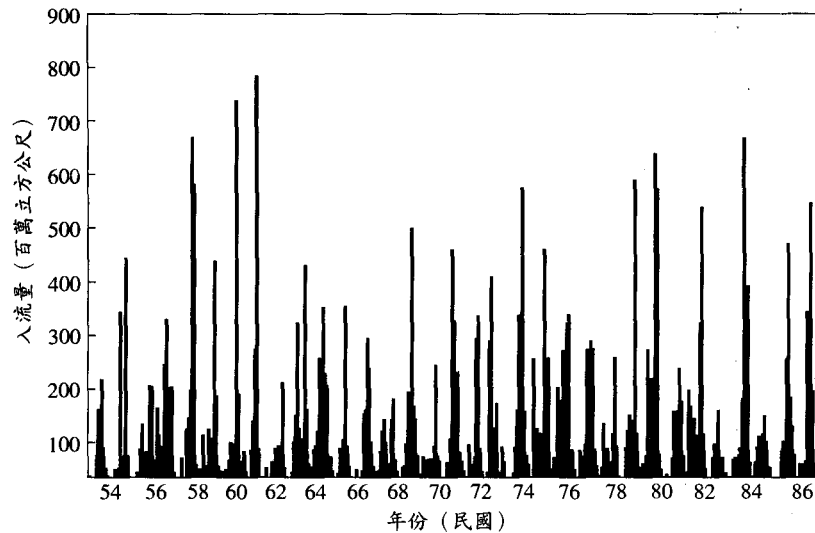


圖 3 石門水庫民國 54 年至 86 年之月入流量

總分析時程的比值來推估，其值介於 0 與 1 之間。

- (4) 缺水事件最大缺水量：本文稱連續缺水的時段為一缺水事件，缺水事件缺水量為缺水事件內各缺水時刻缺水量之累積值，而缺水事件最大缺水量為分析時程內所有缺水事件缺水量之最大值。(蕭氏，1999)。

上述四項缺水指標包括了缺水延時及缺水量在單一缺水時刻、連續缺水時刻(缺水事件)及整體時程等不同層次之缺水分析，對缺水特性可有一較完整的描述。

#### 2.4 最佳限水策略

最佳的水庫營運策略為能滿足既定的需求而不產生缺水，但若缺水現象無法避免則能讓缺水的負面影響降至最低，但如何評估缺水負面影響則見仁見智，本文以缺水指標來評估缺水情況，但由於缺水特性甚為複雜，無法有單一缺水指標能涵蓋所有的缺水特性(Takeuchi, 1986)，因此本文採用四項缺水指標：總缺水率、單時刻最大缺水量、風險度及缺水事件最大缺水量來衡量水庫營運情況，至於最佳限水策略為能讓此四項缺水指標同時降至最低之策略。

由於本文用於定義限水策略之水庫起始限

水水量( $PA$ )及終止限水水量( $PB$ )與前述四項缺水指標間之關係尚無文獻記載，因此本文先就此部份進行分析。若四項缺水指標隨  $PA$  及  $PB$  值變化的趨勢一致，則很容易得到最佳策略；但若彼此間變化趨勢不一致，則需進行更詳細的分析，但最佳限水策略之基本原則為能使四項缺水指標同時降至最低，至於分析計算方式本文以模擬模式(simulation model)進行，在不同入流量與不同  $PA$  及  $PB$  的條件下演算各不同限水策略之缺水指標，而能讓四項缺水指標同時達到最低值之  $PA$  及  $PB$  值即為本文之最佳限水策略。

### 三、個案研究

本文將石門水庫供水系統簡化為單一水庫系統，如圖 1 所示，僅供給下游特定需水者之計畫需水量，本文所使用簡化系統之相關資料如下：

- (1) 水庫有效容量為 233.83 百萬立方公尺。
- (2) 本文所使用之水庫入流量紀錄為民國 54 年至民國 86 年共 33 年，合計 396 月，流量單位亦以百萬立方公尺表示，如圖 3 所示。
- (3) 本文為簡化分析過程，將各目標需水整合成單一需水量，並且假設在演算時程內固定不變。此單一需水量由石門水庫實際放

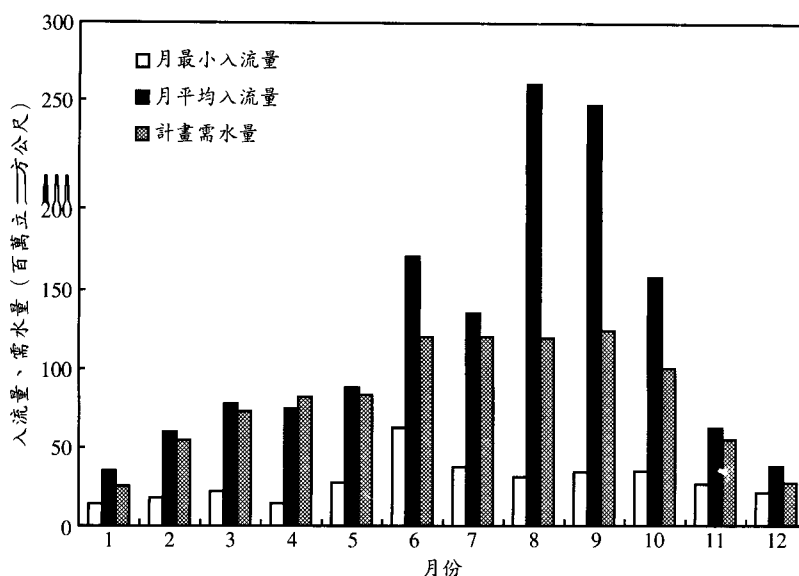


圖 4 石門水庫民國 54 年至 86 年之各月份最小及平均入流量及本文所使用之計畫需水量

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的歷年平均值作為各月份之計畫需水量，各月份的計畫需水量如圖 4 所示，年總需水量為 985.7 百萬立方公尺。

- (4) 本文使用水庫限水策略模擬水庫營運時，水庫起始有效蓄水量假設為 202 百萬立方公尺。

#### 四、結果與討論

##### 4.1 起始與終止限水水量( $PA$ 及 $PB$ )與缺水指標之關係

限水策略由起始及終止限水水量二參數所定義，所考慮的入流量有替代入流量：各月份最小及平均入流量，及供比較用之實際入流量。由於不同入流量及限水參數與缺水指標間之關聯尚不明確，在決定最佳限水策略之前須先對此關聯性進行分析，探討  $PA$  及  $PB$  值與缺水指標間之關係。

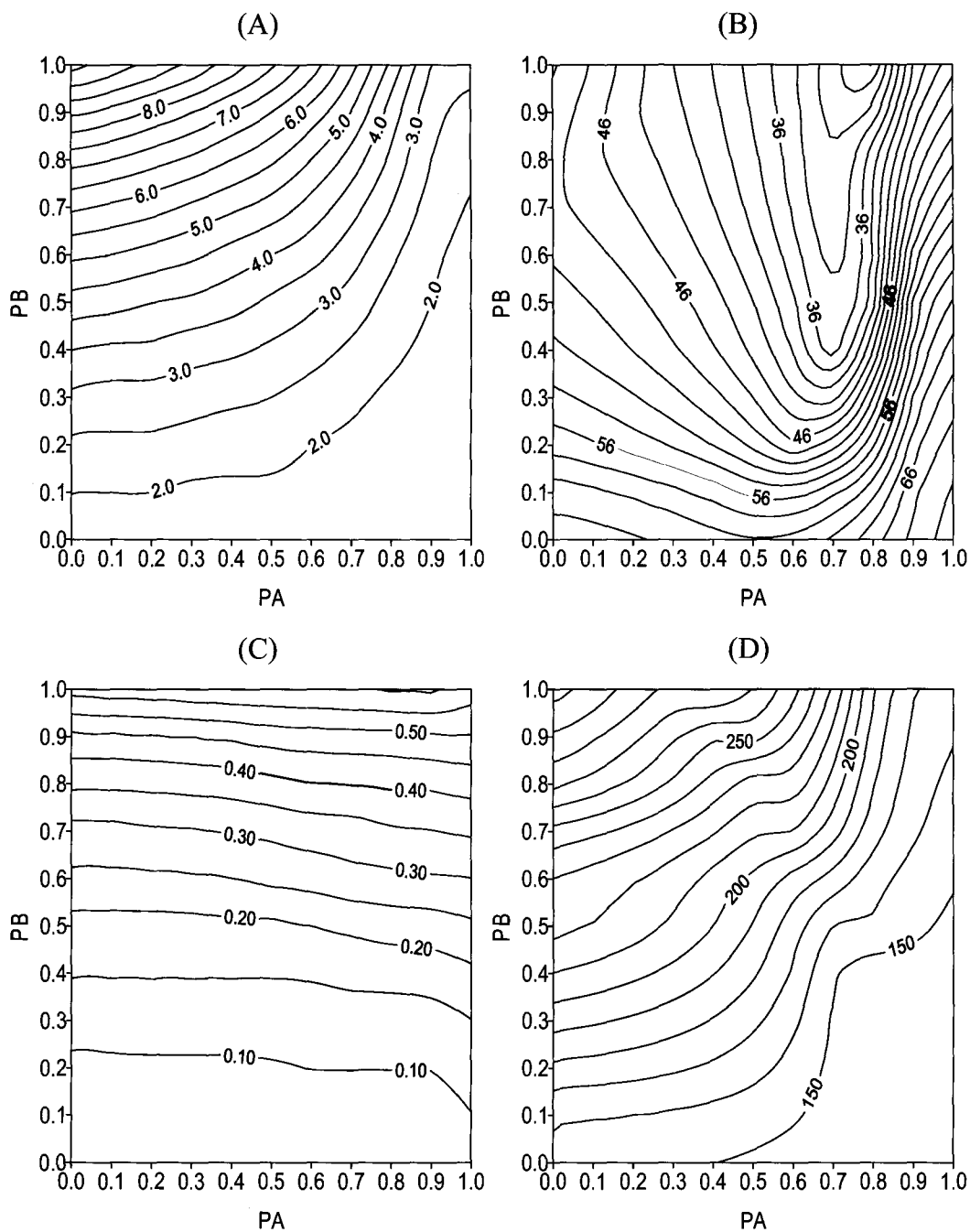
狀況一：考慮實際入流量

圖 5(A)、(B)、(C)、(D)分別為考慮實際入流

量時，總缺水率、單月最大缺水量、風險度、缺水事件最大缺水量與限水策略控制參數  $PA$  及  $PB$  之間的關係，說明如下：

- (1) 總缺水率與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 5(A)所示。總缺水率隨著  $PA$  增大而減小，但隨著  $PB$  增大而增加。即較大的  $PA$  且較小的  $PB$  值可使總缺水率較小。當  $PA$  等於  $D_i$  且  $PB$  等於  $D_i$  時，總缺水率為最小，其值為 1.6%，此即為標準操作策略(SOP)之情況。

- (2) 單月最大缺水量與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 5(B)所示。單月最大缺水量會隨  $PB$  增大而減小，而隨  $PA$  增大呈先減小後增大之趨勢，當  $PA$  值介於  $0.7 D_i$  至  $0.8 D_i$  時，單月最大缺水量有最小值。故當  $PA$  等於  $0.8 D_i$ ， $PB$  等於  $D_i + C$  時，有最小的單月最大缺水量 27.8 百萬立方公尺。造成單月最大缺水量隨  $PA$  增加先減後增的主要因為較小的  $PA$  值原本即有較大幅度的限水，當  $PA$  值逐漸增大時限水幅度即逐漸減少，但相對的調節水量以供未來使用的能力亦減低，因此不預期的乾旱，即水庫入流量較少時，雖然限水機制無大幅度限水，但不足的水庫入流量仍會使水庫供水量不足而致有較大的單月缺水量產生。



說明：(1)圖上  $PA=0.1、0.2\dots1.0$  是指  $PA=0.1D_i、0.2D_i\dots D_i$ 。

(2)圖上  $PB=0.1、0.2\dots1.0$  是指  $PB=D_i+0.1C、D_i+0.2C\dots D_i+C$ 。

圖 5 考慮入流量為實際入流量時，(A)總缺水率(%),(B)單月最大缺水量(百萬立方公尺)，(C)風險度，(D)缺水事件最大缺水量(百萬立方公尺)與限水控制參數  $PA$  及  $PB$  之關係圖

(3)風險度與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 5(C)所示。

風險度不隨  $PA$  增減而有所變化，即風險度與  $PA$  幾乎無關係，但風險度隨  $PB$  減小而減小。當  $PB$  小於  $D_i + 0.2C$  時，風險度已小於 0.1，當  $PB$  等於  $D_i$  時，風險度為 0.056。

(4)缺水事件最大缺水量與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 5(D)所示。缺水事件最大缺水量隨著  $PA$  增加及  $PB$  減小而減少。當  $PA$  等於  $D_i$ ， $PB$  亦等於  $D_i$  時，缺水事件最大缺水量有最小值 145.0 百萬立方公尺。

由上述分析可知，當  $PA$  等於  $D_i$  且  $PB$  亦等於  $D_i$  時(即不限水之標準操作策略)，總缺水率、風險度、缺水事件最大缺水量三指標會有最低值，但伴隨著最大的單月最大缺水量。若要降低單月最大缺水量，應使  $PA$  低於  $D_i$ ，當  $PA$  等於  $0.8 D_i$  且  $PB$  等於  $D_i + C$  時，單月最大缺水量達最低值，但其他三缺水指標卻比最低值增大甚多。由此可見，四缺水指標隨  $PA$  及  $PB$  變化的趨勢並不一致，總缺水率與缺水事件最大缺水量隨  $PA$  及  $PB$  變化的趨勢最接近，與風險度的變化趨勢略同，但與單月最大缺水量之變化趨勢有明顯差異。

狀況二：考慮紀錄最小入流量

圖 6(A)、(B)、(C)、(D)分別為以最小入流量為替代入流量時，總缺水率、單月最大缺水量、風險度、缺水事件最大缺水量與限水策略控制參數  $PA$  及  $PB$  之間的關係，說明如下：

- (1)總缺水率與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 6(A)所示。總缺水率隨著  $PA$  增大而減小，且隨著  $PB$  減小而減小。當  $PA$  等於  $D_i$  且  $PB$  等於  $D_i$  時，總缺水率有最小值，其值約為 3.7%。
- (2)單月最大缺水量與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 6(B)所示。單月最大缺水量有隨  $PB$  增大而減小之趨勢，但單月最大缺水量會隨  $PA$  增大而先減小，當  $PA$  值介於  $0.6 D_i$  至  $0.7 D_i$  時，會有最小的單月最大缺水量，而後會隨  $PA$  增大而增大，其原因已詳述於前。當  $PA$  等於  $0.7 D_i$ ， $PB$  等於  $D_i + C$  時，有最小的單月最大缺水量 35.3 百萬立方公尺。

(3)風險度與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 6(C)所示。

風險度與  $PA$  之關係並不明顯，即風險度不會因  $PA$  增減而有所變化，但風險度會隨  $PB$  增大而增大。因此若要以風險度決定限水參數時，只需考慮  $PB$ 。當  $PB$  等於  $D_i$  時，風險度有最小值 0.104。

(4)缺水事件最大缺水量與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 6(D)所示。缺水事件最大缺水量隨著  $PA$  增加及  $PB$  減小而減小，即較大的  $PA$  與較小的  $PB$  所組成的限水策略可有效降低缺水事件最大缺水量。當  $PA$  等於  $D_i$ ， $PB$  亦等於  $D_i$  時，缺水事件最大缺水量有最小值 211.0 百萬立方公尺。

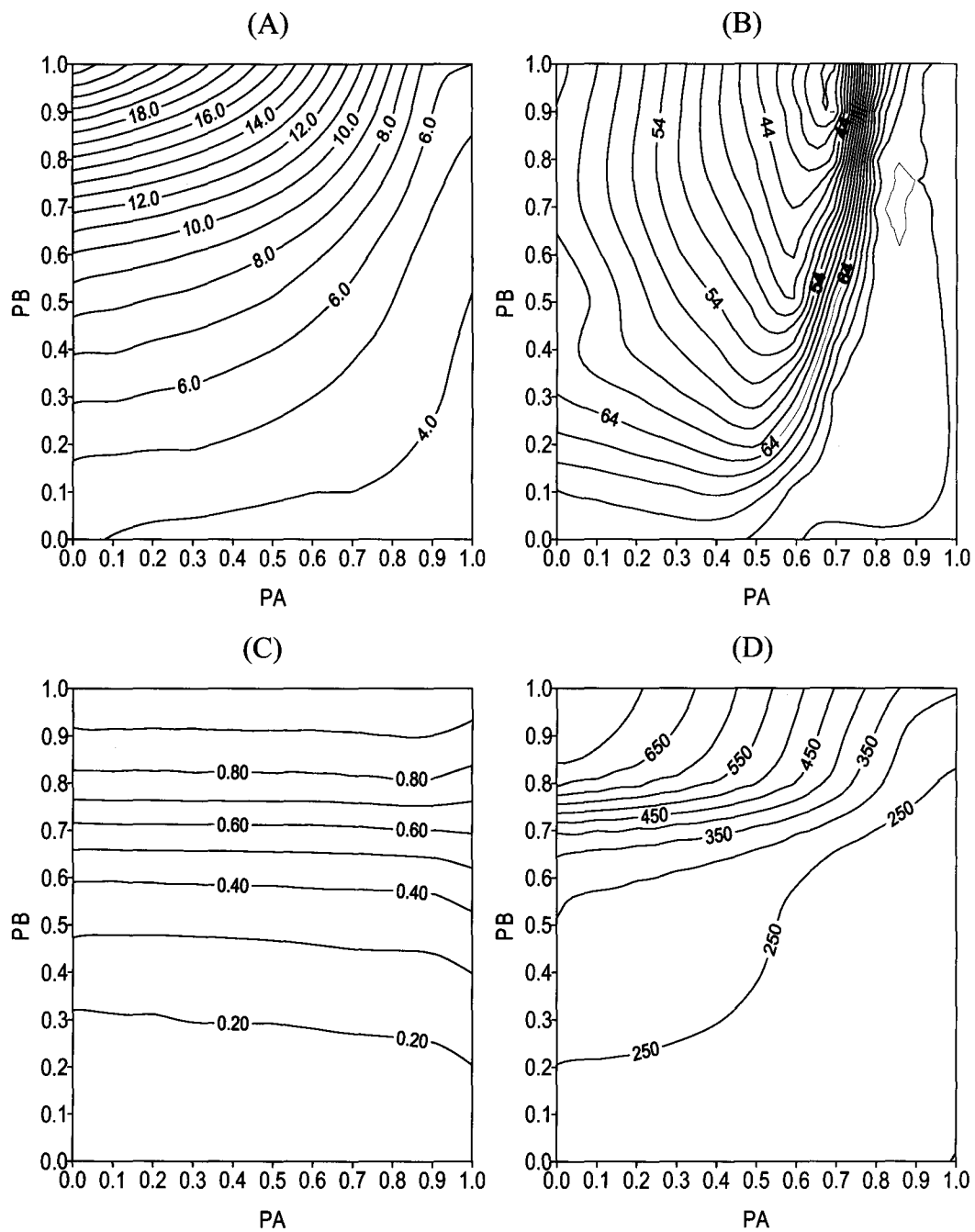
整體而言，當水庫入流量由實際流量改用歷史紀錄最小流量時，缺水特性之變化趨勢並未有很大的改變，但四缺水指標均較前述利用實際入流量時為大，即缺水較為嚴重，此即因水庫入流量不確定因素增加所致。

狀況三：考慮紀錄平均入流量

圖 7(A)、(B)、(C)、(D)分別為以平均入流量為替代入流量時，總缺水率、單月最大缺水量、風險度、缺水事件最大缺水量與限水策略控制參數  $PA$  及  $PB$  之間的關係，說明如下：

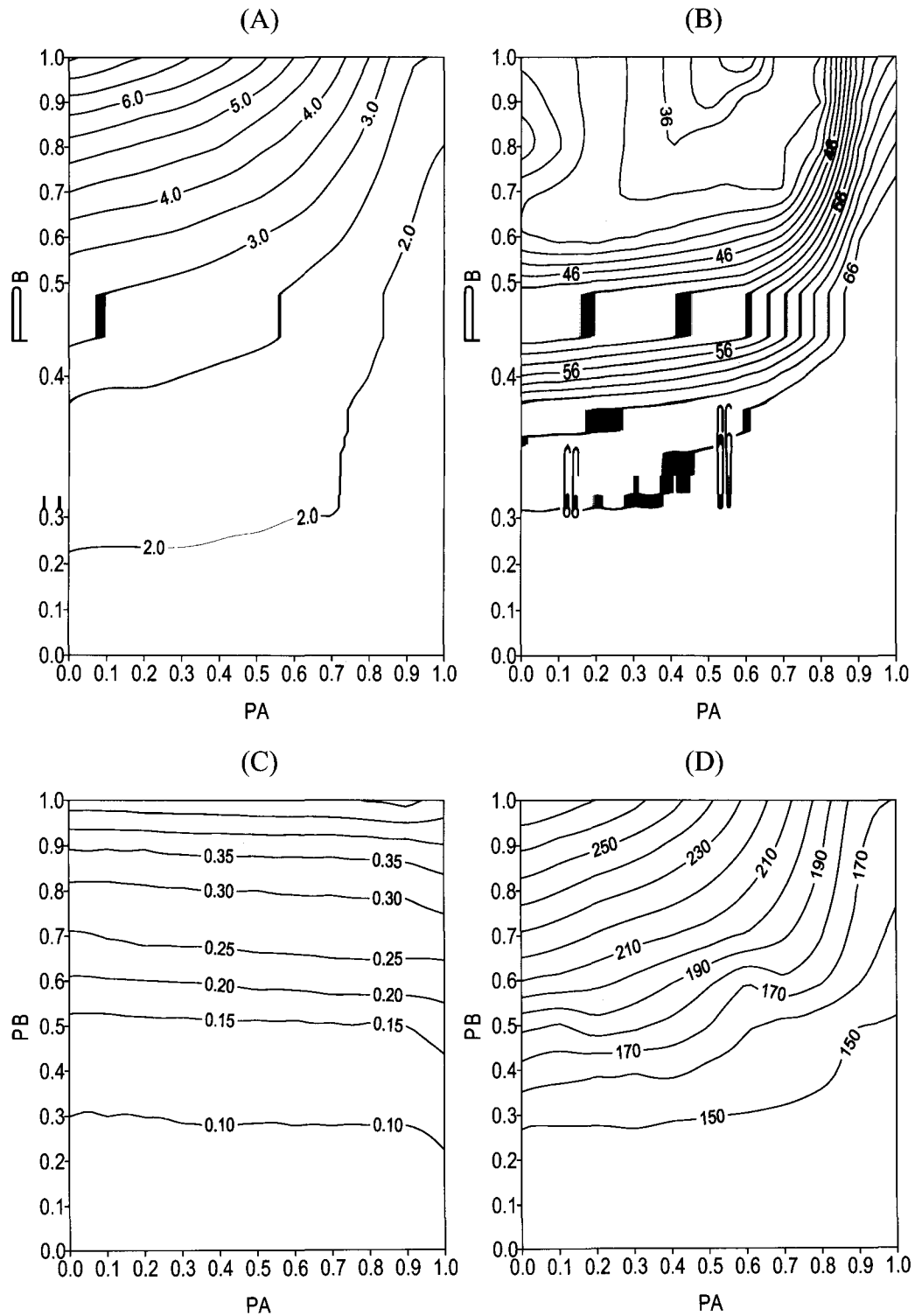
- (1)總缺水率與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 7(A)所示。總缺水率會隨  $PA$  增大與  $PB$  減小而減小。當  $PA$  等於  $D_i$ ， $PB$  亦等於  $D_i$  時，總缺水率會有最小值 1.6%。
- (2)單月最大缺水量與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 7(B)所示。單月最大缺水量會隨  $PB$  增大而減小，但其隨  $PA$  增大而有先減少後增加的趨勢，其原因已述於前。當  $PA$  值介於  $0.5 D_i$  至  $0.6 D_i$  時，會有最小的單月最大缺水量，即當  $PA$  大於  $0.6 D_i$  後，單月最大缺水量會隨  $PA$  增大而增大。因此若要降低單月最大缺水量，則限水策略之  $PA$  不可大於  $0.6 D_i$ ，且  $PB$  要愈大愈好。當  $PA$  等於  $0.6 D_i$ ， $PB$  等於  $D_i + C$  時，會有最小單月最大缺水量 29.6 百萬立方公尺。
- (3)風險度與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 7(C)所示。風險度與  $PA$  幾乎無相關性，即風險度不會





說明：(1)圖上  $PA=0.1、0.2\dots1.0$  是指  $PA=0.1 D_t、0.2 D_t\dots D_t$ 。  
 (2)圖上  $PB=0.1、0.2\dots1.0$  是指  $PB= D_t+0.1C、D_t+0.2C\dots D_t+C$ 。

圖 6 考慮入流量為最小入流量時，(A)總缺水率(%)，(B)單月最大缺水量(百萬立方公尺)，(C)風險度，(D)缺水事件最大缺水量(百萬立方公尺)與限水控制參數  $PA$  及  $PB$  之關係圖



說明：(1)圖上  $PA=0.1、0.2\dots 1.0$  是指  $PA=0.1 D_t、0.2 D_t\dots D_t$ 。  
 (2)圖上  $PB=0.1、0.2\dots 1.0$  是指  $PB= D_t+0.1 C、D_t+0.2C\dots D_t+C$ 。

圖 7 考慮入流量為平均入流量時，(A)總缺水率(%)，(B)單月最大缺水量(百萬立方公尺)，(C)風險度，(D)缺水事件最大缺水量(百萬立方公尺)與限水控制參數  $PA$  及  $PB$  之關係圖

表 1 單一缺水指標各別達最低值時，不同入流量之缺水指標及其所對應之限水控制參數

水庫入流量 缺水指標	實際入流量	最小入流量	平均入流量
總缺水率 (%)	1.6 ( $PA = D_t$ ) ( $PB = D_t$ )	3.7 ( $PA = D_t$ ) ( $PB = D_t$ )	1.6 ( $PA = D_t$ ) ( $PB = D_t$ )
單月最大缺水量 (百萬立方公尺)	27.8 ( $PA = 0.8 D_t$ ) ( $PB = D_t + C$ )	35.3 ( $PA = 0.7 D_t$ ) ( $PB = D_t + C$ )	29.6 ( $PA = 0.6 D_t$ ) ( $PB = D_t + C$ )
風險度	0.056 ( $PA = D_t$ ) ( $PB = D_t$ )	0.104 ( $PA = D_t$ ) ( $PB = D_t$ )	0.061 ( $PA = D_t$ ) ( $PB = D_t$ )
缺水事件最大缺水量 (百萬立方公尺)	145.0 ( $PA = D_t$ ) ( $PB = D_t$ )	211.0 ( $PA = D_t$ ) ( $PB = D_t$ )	145.2 ( $PA = D_t$ ) ( $PB = D_t$ )

說明：( )內為在考慮不同入流量的情況下，當各缺水指標分別達最低值時，其對應的限水策略控制參數。

因  $PA$  增減而有所變化，但風險度會隨  $PB$  增大而增加。當  $PB$  小於  $D_t + 0.3 C$  時，風險度已小於 0.1，當  $PB$  等於  $D_t$  時，風險度有最小值 0.061。

(4) 缺水事件最大缺水量與  $PA$  及  $PB$  之關係如圖 7(D) 所示。當  $PA$  愈大，缺水事件最大缺水量愈小； $PB$  愈小，缺水事件最大缺水量亦愈小，即缺水事件最大缺水量會隨  $PA$  增大與  $PB$  減小而減小。當  $PA$  等於  $D_t$  且  $PB$  等於  $D_t$  時，缺水事件最大缺水量會有最小值 145.2 百萬立方公尺。

與前述比較，當入流量改用平均入流量時，缺水指標的整體變化趨勢並未有甚大的改變，惟其缺水指標較使用實際入流量時為大，但比使用最小入流量時為小。

由上述分析可知，採用不同入流量會影響四項缺水指標的數值，以實際入流量之缺水指標值最小，平均入流量時次之，而以最小入流量時較大。四項缺水指標隨  $PA$  及  $PB$  值的變化趨勢並未因採用不同入流量而有甚大的變化，惟四項缺水指標間的變化趨勢並不一致，總缺水率與缺水事件最大缺水量均隨  $PA$  增大及  $PB$  減小而減少；單月最大缺水量隨  $PA$  增大而先減少後增加，隨  $PB$  增大而減少；風險度幾乎不隨  $PA$  增減而變動，但隨  $PB$  增大而增加。整體而言，總

缺水率與缺水事件最大缺水量隨  $PA$  及  $PB$  變化的趨勢最接近，與風險度的變化趨勢略同，但與單月最大缺水量之變化趨勢有明顯差異。

#### 4.2 最佳限水策略之評估

由前述分析可知，不同的缺水指標隨著  $PA$  及  $PB$  有不同的變化趨勢，而不同的入流量對缺水指標變化型態的影響較小。不同入流量單一缺水指標各別達到最低值時相對應之  $PA$  及  $PB$  值列於表 1，由表 1 可知不論採用何種入流量，當  $PA$  與  $PB$  均等於  $D_t$  時可使總缺水率、風險度及缺水事件最大缺水量達到最低值。為使單月最大缺水量達最低值，則  $PA$  需介於  $0.6 D_t$  至  $0.8 D_t$  之間，視不同入流量而定，而  $PB$  值等於  $D_t + C$ 。

若水庫最佳限水策略可由某單一缺水指標決定，例如最低總缺水率，則由表 1 即可決定最佳限水策略，但須注意的是其他缺水指標的變化，例如考慮水庫入流量為實際入流量時，以總缺水率或風險度或缺水事件最大缺水量最低值所選擇之最佳策略 ( $PA = D_t$ ,  $PB = D_t$ ) 雖可使此三項缺水指標達到最低值，但其單月最大缺水量卻高達 67.6 百萬立方公尺 (為所有分析情況之最大值)，而所有分析情況之最低單月最大缺水量僅為 27.8 百萬立方公尺。

本文所定義的最佳限水策略為能讓四缺水

表 2 考慮實際入流量時不同最佳限水策略之缺水指標

最佳限水策略 選擇方式 缺水指標	以最低總缺水率或風險度 或缺水事件最大缺水量為 依據 $PA = D_i, PB = D_i$	綜合考量四項缺水指標 $PA = 0.7D_i$ $PB = D_i + 0.4C$	以最低單月最大缺水量 為依據 $PA = 0.8D_i, PB = D_i + C$
總缺水率(%)	1.6	2.4	4.4
單月最大缺水量 (百萬立方公尺)	67.6	35.2	27.8
風險度	0.056	0.167	0.606
缺水事件最大缺水量 (百萬立方公尺)	145.0	150.8	190.8

指標同時達到最低值，由於四缺水指標隨  $PA$  及  $PB$  變化之趨勢並不一致，因此無法僅由表 1 所列數值決定最佳限水策略，需更進一步的分析。本文選擇最佳限水策略的步驟敘述如下：

- (1) 由於四項缺水指標隨  $PA$  及  $PB$  變化的趨勢不一致，其中總缺水率與缺水事件最大缺水量的變化趨勢最類似，風險度之變化趨勢雖與前二指標非完全一致，但差別不大，但上述三項缺水指標與單月最大缺水量變化趨勢的差別較大，因此為便於分析，將四項缺水指標分成二組，其一為變化趨勢較類似的三項缺水指標，包括總缺水率、風險度及缺水事件最大缺水量，另一組為單月最大缺水量。
- (2) 將此二組缺水指標分別繪於 X 及 Y 軸以表現其隨  $PA$  及  $PB$  變化的情況，由於第一組有三項缺水指標且單位均不相同，因此需分別繪成三張圖。圖中愈左下角的點代表有最低的二組缺水指標值，分別從三圖中選取最左下角的點，若此三點有相同的  $PA$  及  $PB$  值，則此即為同時能讓四缺水指標達最低值的最佳限水策略，若三點不一致則需再進一步檢討。詳細的分析過程依入流量的不同分實際入流量、最小及平均入流量之狀況討論之。

狀況一：考慮實際入流量

圖 8(A)、(B)及(C)分別為考慮實際入流量時單月最大缺水量與總缺水率、風險度及缺水事件最大缺水量隨  $PA$  及  $PB$  變化之關係圖。三圖之

最左下角點均在  $PA=0.7D_i$  及  $PB=D_i+0.4C$  時，其四項缺水指標分別為總缺水率 2.4%、單月最大缺水量 35.2 百萬立方公尺、風險度 0.167 及缺水事件最大缺水量 150.8 百萬立方公尺，詳表 2。表 2 亦列出僅以單一缺水指標達最低值為依據所選擇的最佳限水策略缺水指標，由表 2 所列三種限水策略的比較可知本文所建議限水策略之優越性，與最低總缺水率、風險度、缺水事件最大缺水量限水策略相比較，總缺水率、風險度及缺水事件最大缺水量分別由 1.6%、0.056 及 145.0 百萬立方公尺增加至 2.4%、0.167 及 150.8 百萬立方公尺，卻可讓單月最大缺水量由最大值的 67.6 百萬立方公尺減少至 35.2 百萬立方公尺。另與最低單月最大缺水量限水策略比較，其單月最大缺水量由最低值之 27.8 百萬立方公尺略增至 35.2 百萬立方公尺，但也使總缺水率、風險度及缺水事件最大缺水量分別由 4.4%、0.606 及 190.8 百萬立方公尺大幅降低至 2.4%、0.167 及 150.8 百萬立方公尺。本文所建議的最佳限水策略雖無法使單一缺水指標達其絕對的最低值，卻可同時使四項缺水指標達其相對的最低值。

狀況二：考慮紀錄最小入流量

圖 9(A)、(B)及(C)分別為考慮紀錄最小入流量時單月最大缺水量與總缺水率、風險度及缺水事件最大缺水量隨  $PA$  及  $PB$  變化之關係圖。與前述實際入流量狀況極為類似，三圖之最左下角點均為  $PA=0.6D_i$  及  $PB=D_i+0.5C$ ，其四項缺水指標分別為總缺水率 6.3%、單月最大缺水量 47.9 百萬立方公尺、風險度 0.331 及缺水事件最大缺

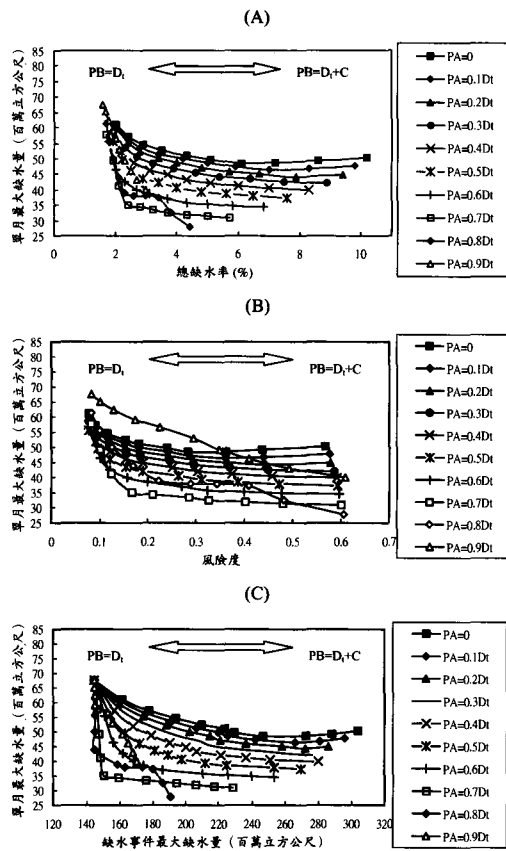


圖 8 使用實際入流量時，(A)總缺水率、(B)風險度、(C)缺水事件最大缺水量與單月最大缺水量之關係

水量 243.9 百萬立方公尺，詳表 3。以單一缺水指標最低值為依據之最佳限水策略之缺水指標亦列於表 3 以供比較。

狀況三：考慮紀錄平均入流量

圖 10(A)、(B)及(C)分別為考慮紀錄平均入流量時單月最大缺水量與總缺水率、風險度及缺水事件最大缺水量隨  $PA$ 、 $PB$  變化之關係圖。與前述二種狀況極為類似，三圖有同一最左下角點，即為  $PA=0.7D_i$  及  $PB=D_i+0.7C$ ，其四項缺水指標分別為總缺水率 2.9%、單月最大缺水量 37.9 百萬立方公尺、風險度 0.270 及缺水事件最大缺水量 191.2 百萬立方公尺，詳表 4。以單一缺水指標最低值所選擇最佳限水策略之缺水指標亦列於表 4 以供比較。

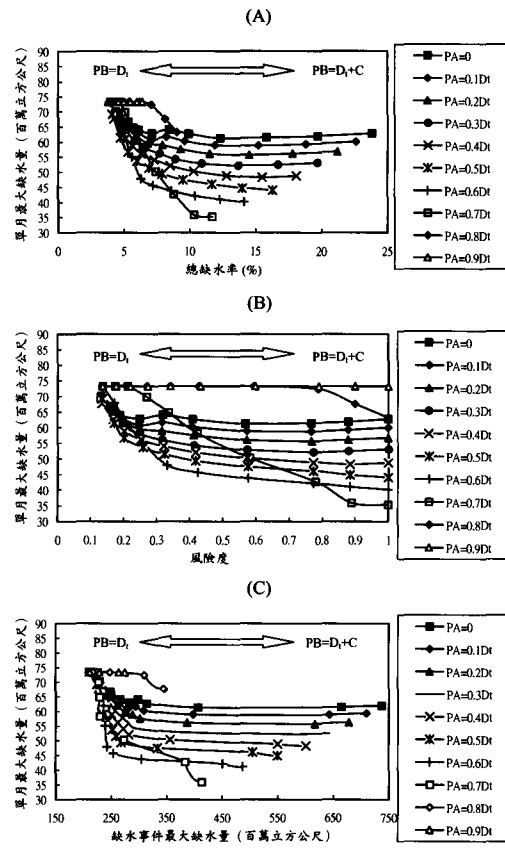


圖 9 使用最小入流量時，(A)總缺水率、(B)風險度、(C)缺水事件最大缺水量與單月最大缺水量之關係

前述三種不同入流量最佳限水策略的四項缺水指標列於表五，不同入流量的最佳限水策略均依照使四缺水指標同時達最低值之原則所選出，雖然四項缺水指標並未達其個別之絕對最低值，但能同時使四指標達到相對之最低值。由表 5 比較替代入流量為最小入流量及平均入流量的狀況，其中考慮平均入流量限水策略的四項缺水指標均優(低)於最小入流量限水策略的指標，因此本文建議考慮平均入流量且限水參數為  $PA=0.7 D_i$ ， $PB= D_i +0.7C$  為最佳限水策略。至於實際入流量在水庫營運時無法事先預知，因此僅列為參考，但其缺水指標值是三種狀況中最低。

表 3 考慮最小入流量時不同最佳限水策略之缺水指標

最佳限水策略 選擇方式 缺水指標	以最低總缺水率或風險度或缺 水事件最大缺水量為依據 $PA = D_t$ $PB = D_t$	綜合考量四項 缺水指標 $PA = 0.6 D_t$ $PB = D_t + 0.5C$	以最低單月最大 缺水量為依據 $PA = 0.7 D_t$ $PB = D_t + C$
總缺水率(%)	3.7	6.3	11.7
單月最大缺水量 (百萬立方公尺)	73.3	47.9	35.3
風險度	0.104	0.331	1.000
缺水事件最大缺水量 (百萬立方公尺)	211.0	243.9	3801.4

表 4 考慮平均入流量時不同最佳限水策略之缺水指標

最佳限水策略 選擇方式 缺水指標	以最低總缺水率或風險度 或缺水事件最大缺水量為 依據 $PA = D_t, PB = D_t$	綜合考量四項 缺水指標 $PA = 0.7 D_t$ $PB = D_t + 0.7C$	以最低單月最大 缺水量為依據 $PA = 0.6 D_t$ $PB = D_t + C$
總缺水率(%)	1.6	2.9	5.0
單月最大缺水量 (百萬立方公尺)	67.6	37.9	29.6
風險度	0.061	0.270	0.495
缺水事件最大缺水量 (百萬立方公尺)	145.2	191.2	228.2

表 5 使用不同入流量之最佳限水策略之缺水指標

最佳限水策略 選擇方式 缺水指標	實際入流量 $PA=0.7 D_t$ $PB= D_t +0.4C$	最小入流量 $PA=0.6 D_t$ $PB= D_t +0.5C$	平均入流量 $PA=0.7 D_t$ $PB= D_t +0.7C$
	總缺水率(%)	2.4	6.3
單月最大缺水量 (百萬立方公尺)	35.2	47.9	37.9
風險度	0.167	0.331	0.270
缺水事件最大缺水量 (百萬立方公尺)	150.8	243.9	191.2

#### 4.3 未來入流量的變化對最佳限水策略之影響

本文所建議限水策略的優點為無須預測未來的水庫入流量，僅由過去的入流量紀錄中求取各月份的平均入流量配合蓄水量即可決定供水量，惟各月份入流量會隨紀錄年限增長而有所變

動，但一般而言，其變動範圍會隨紀錄年限增長而漸趨變小，因此本文所建議的限水策略應可適用於未來的狀況。但為測試入流量的變化對本文所建議的最佳限水策略之影響，本文以下述方式進行分析。未來入流量會以何種方式變化不得而

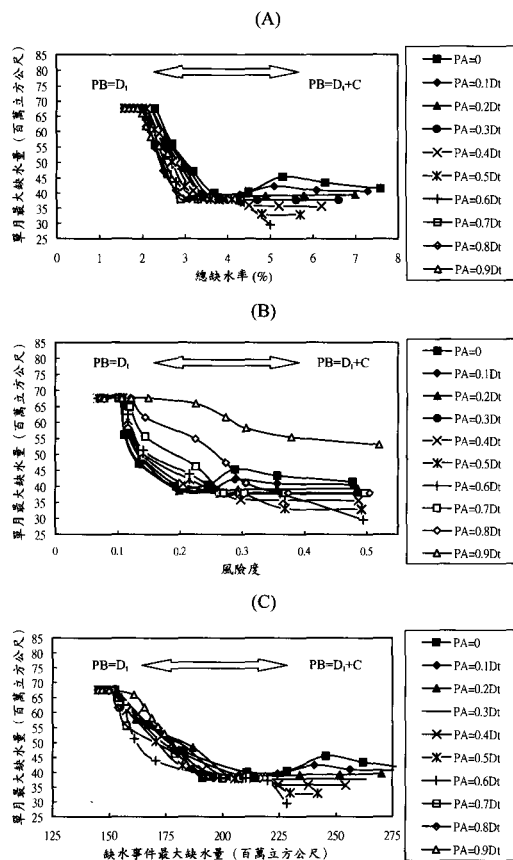


圖 10 使用平均入流量時，(A)總缺水率、(B)風險度、(C)缺水事件最大缺水量與單月最大缺水量之關係

知，但會對供水影響較大的情況為入流量減少，因此本文只分析入流量減少的情況，為簡化分析過程，本文假設各月份入流量依某比例減少，減少的情況分為乾季(11月至隔年4月)減少、濕季減少(5月至10月)及全年減少三種，即以民國54至86年共33年的入流量紀錄依前述三種情況分別減少各月份入流量來重新評估本文所建議之最佳限水策略之缺水影響，缺水特性仍以前述四項缺水指標，即總缺水率、單月最大缺水量、風險度及缺水事件最大缺水量，來衡量水庫營運情況。三種不同入流量減少的結果列於表6。

由表6可知，乾季入流量減少對缺水影響最輕微，濕季減少次之，而以全年均減少影響較

大。而四缺水指標間的變化亦不同，其中以風險度最不受影響，濕季減少入流量並不影響風險度，而乾季減少及全年減少入流量達5%亦僅使風險度增加0.003及0.015，亦即在33年間分別增加缺水延時1及6個月。總缺水率增加幅度亦有限，當乾季、濕季及全年入流量分別減少達5%時，總缺水率僅增加0.3%、0.5%及0.8%。缺水事件最大缺水量在乾季、濕季及全年入流量減少5%時，分別增加15.9、29.9及45.9百萬立方公尺。單月最大缺水量對入流量減少較敏感，當乾季、濕季及全年入流量減少5%時，單月最大缺水量分別增加5.2、19.6及24.7百萬立方公尺。未來入流量的變化未必如前述各月份入流量均全數減少，若各月份入流量有增有減，則缺水變化幅度勢必比表6所列數值更小，因此本文所建議之最佳限水策略應可適用於未來的狀況。但無論如何，當入流量紀錄增長後即應定期檢討其對原本營運策略的影響，以瞭解及掌握可能的缺水變化情勢。

## 五、結論

本文所考慮的限水策略是以二控制參數，起始限水水量( $PA$ )及終止限水水量( $PB$ )來代表，而水庫入流量之處理則分別考慮實際入流量、最小入流量及平均入流量，並對一簡化的石門水庫供水系統進行模擬，至於最佳限水策略的選取則為能同時使四項缺水指標達最低值。經由以上分析可獲致以下結論：

1. 缺水特性極為複雜，本文以總缺水率、單月最大缺水量、風險度及缺水事件最大缺水量等四項缺水指標由單一缺水時刻、連續缺水時刻(缺水事件)及整體分析時程探討缺水延時及缺水量的變化。由分析結果可知四項缺水指標隨 $PA$ 及 $PB$ 之變化趨勢並不一致，總缺水率及缺水事件最大缺水量的變化趨勢較為一致均隨 $PA$ 增大及 $PB$ 減小而減少，單月最大缺水量隨 $PA$ 增大而先減少後增加，隨 $PB$ 增大而減少，風險度不隨 $PA$ 增減而有所變動，但隨 $PB$ 增大而增加。

表 6 入流量減少對最佳限水策略缺水之影響

缺水指標		總缺水率 (%)	單月最大缺水量 (百萬立方公尺)	風險度	缺水事件最大缺水量 (百萬立方公尺)
本文建議最佳限水策略		2.9	37.9	0.270	191.2
乾季減少	月入流量減少 1%	3.0	38.1	0.273	194.4
	月入流量減少 2%	3.0	39.2	0.273	197.6
	月入流量減少 3%	3.1	40.4	0.273	200.8
	月入流量減少 4%	3.1	41.7	0.273	203.9
	月入流量減少 5%	3.2	43.1	0.273	207.1
濕季減少	月入流量減少 1%	3.0	41.3	0.270	197.2
	月入流量減少 2%	3.1	45.2	0.270	203.2
	月入流量減少 3%	3.2	49.3	0.270	209.1
	月入流量減少 4%	3.3	53.4	0.270	215.1
	月入流量減少 5%	3.4	57.5	0.270	221.1
全年減少	月入流量減少 1%	3.1	42.2	0.273	200.4
	月入流量減少 2%	3.2	47.3	0.273	209.5
	月入流量減少 3%	3.4	52.4	0.273	218.7
	月入流量減少 4%	3.5	57.5	0.275	227.9
	月入流量減少 5%	3.7	62.6	0.285	237.1

2. 本文所定義的限水策略由  $PA$  及  $PB$  二控制參數來代表,  $PA$  值介於 0 與需水量( $D_t$ )之間,  $PB$  值介於需水量( $D_t$ )與需水量及水庫有效蓄水量和( $D_t + C$ )之間。當水庫可用水量(水庫蓄水量與入流量之和)介於  $PA$  與  $PB$  之間時即採取限水。入流量部分則考慮三種不同情況: 實際入流量、紀錄最小入流量及紀錄平均入流量。至於不同入流量之最佳限水策略則是依照能使四缺水指標同時達最低值的原則來決定。
3. 本文所建議之最佳限水策略在不同入流量情況下, 其限水控制參數分別為(1)實際入流量:  $PA$  等於  $0.7 D_t$ ,  $PB$  等於  $D_t + 0.4C$ , (2)最小入流量:  $PA$  等於  $0.6 D_t$ ,  $PB$  等於  $D_t + 0.5C$ , (3)平均入流量:  $PA$  等於  $0.7 D_t$ ,  $PB$  等於  $D_t + 0.7C$ 。
4. 考慮不同入流量的最佳限水策略中, 以實際入流量限水策略之缺水現象最輕微, 但因實際水庫操作時無法事先得知入流量, 故以替代入流量處理, 其中以平均入流量限水策略的四項缺水指標均低於最小入流

量限水策略之缺水指標, 因此本文建議的水庫最佳限水策略為考慮平均入流量, 且其限水控制參數  $PA$  等於  $0.7 D_t$ ,  $PB$  等於  $D_t + 0.7C$ , 則水庫營運之總缺水率為 2.9%, 單月最大缺水量為 37.9 百萬立方公尺, 風險度為 0.270, 缺水事件最大缺水量為 191.2 百萬立方公尺。

5. 對於本文所建議的最佳限水策略是否適用於未來入流量的情況, 本文以三種減少入流量的方式來探討, 其中以乾季入流量減少對缺水影響最輕微, 濕季減少次之, 而以全年均減少影響較大。而四項缺水指標中以單月最大缺水量對入流量減少較敏感, 而總缺水率及風險度變化的幅度甚微, 整體而言, 本文所建議之最佳限水策略應可適用於未來的流量情況。

### 參考文獻

1. Bayazit, M. and Unal, E., (1990), "Effects of Hedging on Reservoir Performance", *Water Resources Research*, 26(4), 713-719.



2. Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P., (1982), "Reliability, Resilience, and Vulnerability Criteria for Water Resources System Performance Evaluation", *Water Resources Research*, 18(1), 14-20.
3. Moy, W. S., Cohon, J. L. and Revelle, C. S., (1986), "A Programming Model for Analysis of Reliability, Resilience, and Vulnerability of a Water Supply Reservoir", *Water Resources Research*, 22(4), 489-498.
4. Shih, J. S., and Revelle, C., (1994), "Water-Supply Operations During Drought: Continuous Hedging Rule", *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 120(5), 613-629.
5. Srinivasan, K. and Philipose, M. C., (1998), "Effect of Hedging on Over-Year Reservoir Performance", *Water Resources Management*, 12(2), 95-120.
6. Takeuchi, K., (1986), "Chance-Constrained Model for Real-Time Reservoir Operation Using Drought Duration Curve", *Water Resources Research*, 22(4), 551-558.
7. 蕭政宗, (1999), 「單一水庫系統缺水特性之探討」, 台灣水利, 第 47 卷, 第 2 期, 第 72-91 頁。
8. 石門水庫竣工三十週年紀念專輯, 台灣省石門水庫管理局, (1994)
9. 灌溉節水技術手冊, 農委會水利特刊第八號, 行政院農業委員會, 台北市七星農田水利研究發展基金會, (1995)

收稿日期：民國 91 年 11 月 21 日

修正日期：民國 92 年 3 月 17 日

接受日期：民國 92 年 3 月 20 日