

桃園地區農業休耕時機之探討

Timing of Fallow in Taoyuan Area

國立台灣海洋大學河海工程學系
教授

黃文政*

Wen-Cheng Huang

國立台灣海洋大學河海工程學系
博士班研究生

周家慶

Chia-Ching Chou

摘 要

進年來桃園地區農業用水屢遭缺水移用，針對枯旱缺水時期，如何於期作施灌前判斷休耕或停灌之啟動時機，經常令管理者不知所措。尤其是當未來用水狀態不明確可供判斷盈缺時（如：九十一、九十二及九十五年之桃園地區休耕事件），將更令管理單位無所適從。本研究以桃園地區為例，基於過去乾旱預警模式發展，綜合乾旱的監測、影響、預警、應變至決策分析，檢定評估農業休耕時機決策之準確性及適度性，最後另針對休耕時機分析水庫滿足未來可靠供水之臨界蓄水量，以增輔桃園地區抗旱應變決策之參考。

關鍵詞：桃園地區，決策分析，休耕時機。

ABSTRACT

In recent years, drought events hit Taoyuan area frequently and brought immense impacts to agricultural sector. Indeed, it is difficult for decision makers to make an appropriate decision under uncertainty, in particular when alternatives differ substantially from each other. This study presents a decision analysis integrated into a drought early warning system (DEWS) for timing of fallow. For demonstration, the decision analysis procedures were effectively applied to historical years from dry condition to wet situation. The implementation of such a system proves that the decision analysis can help the water authorities to make a suitable decision while confronting drought threats.

Keywords: Taoyuan area, Decision analysis, Timing of fallow.

*通訊作者，國立台灣海洋大學河海工程學系教授，20248 基隆市中正區北寧路 2 號，b0137@mail.ntou.edu.tw

一、前言

1.1 研究動機

近年來乾旱問題日益嚴重，針對國內外乾旱的研究無論是在氣象、農業、水文或預警等方面，均有許多研究人員投入分析。不過對於現有之研究中亦可發現，從乾旱的監測、乾旱影響的程度至抗旱的預警及應變，雖有許多豐碩之研究成果，但其實對於實務上之有效應用，仍有進一步提供決策者更明確的決策訊息之需要。尤其是當缺水時期對於休耕策略之裁定，決策者於面對未來之水文狀況，究竟須抱持樂觀或是悲觀之水文狀態，這將易使決策者無所適從。特別是當下水文現況不是很明確可判斷「盈」或「缺」之可利用水源量時（如九十一年、九十二年及九十五年桃園地區一期作之決策事件），其實對決策者而言，當下須採取何用水策略將更為不知所措。因此，若能強化乾旱研究之實用性，綜合乾旱的監測、影響、預警、應變至決策分析，更進一步提供管理單位決策參考訊息，相信將有助於減少決策者抗旱決策之盲點。

1.2 研究目的

本研究以桃園地區之石門水庫供水系統為研究對象，針對期作施灌前農業休耕關鍵時刻，基於過去研究以水庫乾旱預警決策分析為研究核心，研究內容：(1)考量各乾旱影響因子排除具因果關係之影響因素後，建立水庫乾旱指標，監測現況乾旱發展程度；(2)分析水庫未來中長期水源情勢，建立水源情勢指標，評估乾旱未來發展對水庫實際供水之影響；(3)綜合分析現況與未來乾旱特性，及結合時間尺度之影響效應，建立水庫乾旱預警指標，以燈號表示方式預警，並提供抗旱之減水策略；(4)依據水庫乾旱預警指標分析，透過機率模式應用，提供期望乾旱預警指標；(5)利用大漢溪流量潛能水量分析，提供水庫滿足未來可靠供水之臨界蓄水量。

二、文獻回顧

乾旱為水文氣象水量較少時之現象，其發生

原因多為氣候因子之影響，如久旱不雨、雨水匱乏、氣溫升高等，其所帶來之損失則包含供水、經濟、社會等各種層面之影響。

就氣象、水文、農業與社會經濟各觀點而言，氣象乾旱(Meteorological Drought)係指氣候異常雨水失調時，水文循環中各部分水量低於正常狀態，乾旱早期對環境系統產生負面影響的大氣自然現象(Palmer, 1965; Jones, 1966; Changnon, 1977)。水文乾旱(Hydrologic Drought)係指地球表面水量供應匱乏或反常所致，常表示為河川逕流或水庫蓄水低於正常狀態之結果(Hudson and Roberts, 1955; Changnon, 1981)。農業乾旱(Agricultural Drought)係指某一時期因雨水不足，作物需水量與土壤含水量乾燥，而使作物不能正常生長之天然災害(Thorntwaite and Mather, 1955; Palmer, 1965; Yevjevich, 1967; Takeuchi, 1974; Tase, 1976)。而屬應變管理之經濟型乾旱(Economic Droughts)則可視為當降雨短缺導致某一區域供水系統河川流量與水庫水量不足以供應現有民生用水及作物需水時，所造成之人類生活上各方面之影響與利益損失(Changnon *et al.*, 1982)。

此外，針對指標性評估方法之管理應用，Palmer (1965)利用降雨量、溫度及土壤飽和含水量之參數進行分析，建立之帕瑪乾旱嚴重指標(Palmer Drought Severity Index, PDSI)，反應異常氣候條件之影響。Gibbs and Maher (1967)提出之十分數指標(Deciles Index, DI)，將每月降雨量資料經運算後，分成十個不同之等級，用以監控乾旱的發展技術。Shafer 與 Dezman (1982)考量土壤、水分、積雪與逕流等因素所建立之地表水供水指標(Surface Water Supply Index, SWSI)，目的在於建立考慮地區內部水資源及地理特性之指標並與 PDSI 聯合運用。相關研究可參考隸屬美國農業部之自然資源保護服務網(<http://www.wcc.nrcs.usda.gov/wsf/>)，或參考科羅拉多區域水資源網(<http://water.state.co.us/>)。McKee *et al.* (1993)發展標準化降雨指標(Standardized Precipitation Index, SPI)，應用於顯示不同時間尺度之降雨盈缺。Gommes and Petrassi

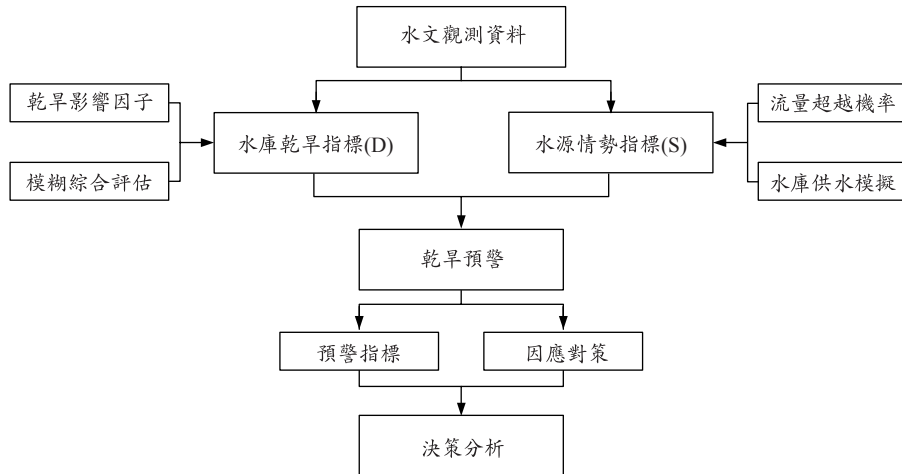


圖 1 水庫乾旱預警決策分析之研究架構圖

(1994) 提出國家型降雨指標(National Rainfall Index, RI)，常應用於比較大陸型氣候尺度與異常降雨型態之發展。

目前國內外對於評估乾旱指標之分析已有相當多之研究成果，而本研究是基於 Huang and Yuan (2004)、Huang and Chou (2005)、黃文政等 (2006)、Huang and Chou (2008)之研究基礎，主要針對乾旱的應變與管理，綜合乾旱的監測、影響、預警、應變至決策分析，建立乾旱預警評估指標並提供指標決策之分析，以期輔助抗旱應變之決策。

三、研究方法

本研究水庫乾旱預警決策分析之研究架構如圖 1 所示，茲就研究方法簡述如下。

3.1 水庫乾旱指標

1. 評估方法之應用

描述乾旱之程度與評估因子間，將存在著亦此亦彼之特性，例如水庫當下蓄水量為有效蓄水量的 70%，所反應之程度是屬於“無乾旱”或“輕度乾旱”狀態，將無法以傳統數學方式加以明確劃分。因此本研究將依據水庫具代表性之乾旱影響因子，應用「模糊集理論」進行模糊變換，將無法明確劃分之物理量(乾旱程度)藉由模糊隸屬度函數建立評估集，以反應水庫乾旱之

影響程度。

2. 影響因子之選擇

乾旱影響因子之選擇，本研究將先排除具因果關係之影響因素後，以簡單有效為原則，因地制宜地決定具代表性之水庫乾旱指標評估因子。而本研究地區，石門水庫供水區，因未有大量地下水之使用，且又無似翡翠水庫供水區有南勢溪之顯著輔助水源，因此將排除地下水與可調節流量之考量。此外，水庫集水區內降雨量、水庫入流量與水庫蓄水量三者間影響因子具明顯因果關係，而其中又以水庫蓄水量對於水庫未來之供水操作影響最為直接。因此綜上所述，本研究地區乾旱指標之建置將直接以水庫蓄水量來描述乾旱發展之嚴重程度，相關分析可參閱 Huang and Yuan (2004)。

3. 乾旱指標之評定

本研究採用國內常用之乾旱等級分類方式，將水庫蓄水量乾旱指標分為“無乾旱”、“輕度乾旱”、“中度乾旱”、“嚴重乾旱”、“極嚴重乾旱”等五個評估等級。由於一般大型水庫之操作是以規線等級之“上限”、“下限”、“嚴重下限”分別對應不同供水情況，並決定不同供水策略。因此本研究之乾旱指標(水庫蓄水量單一評估因子)乃參考現行石門水庫操作規線供水調節規則，以各操作規線之水位高度組合分配水庫蘊含之有效蓄水狀態，再經試誤加以

調整，以避免乾旱指標反應過於敏感或不足之狀況。乾旱指標評估因子(水庫蓄水量)之隸屬度函數表示如圖 2，不同評估指標等級間對應之規線水位表示如下：

$$V_1(u) = (\text{滿庫}, \text{滿庫}, \text{上限} \times 50\% + \text{下限} \times 50\%, \text{上限} \times 20\% + \text{下限} \times 80\%)$$

$$V_2(u) = (\text{上限} \times 50\% + \text{下限} \times 50\%, \text{上限} \times 20\% + \text{下限} \times 80\%, \text{下限} \times 80\% + \text{嚴重下限} \times 20\%, \text{下限} \times 50\% + \text{嚴重下限} \times 50\%)$$

$$V_3(u) = (\text{下限} \times 80\% + \text{嚴重下限} \times 20\%, \text{下限} \times 50\% + \text{嚴重下限} \times 50\%, \text{下限} \times 50\% + \text{嚴重下限} \times 50\%, \text{嚴重下限})$$

$$V_4(u) = (\text{下限} \times 50\% + \text{嚴重下限} \times 50\%, \text{嚴重下限}, \text{嚴重下限}, \text{空庫})$$

$$V_5(u) = (\text{嚴重下限}, \text{空庫}, \text{空庫}, \text{空庫})$$

其中 $V_1 \sim V_5$ 為本研究所分類之五個乾旱指標等級； u 則為各規線之水位高度的組合。其模糊決策矩陣(R)可表示如式(1)

$$R = [r_1, r_2, r_3, r_4, r_5] \dots\dots\dots(1)$$

上式中 r_j 分別為水庫蓄水量(U)對應不同乾旱程度分類($V_1 \sim V_5$)之表現值。圖 2 中 μ_j 為標準化之隸屬度函數($0 < \mu_j < 1$)，而乾旱程度等級之判定將依據模糊運算原理與最大隸屬度原則評定之。因此本研究區域乾旱指標評定可量化如圖 3 所示。

3.2 水源情勢指標

本研究水源情勢指標分析方式，乃是基於水庫未來可能入庫流量，在入庫流量假設推估的前提下，配合水庫蓄水量、取水系統架構、需水標的及水庫操作規則等因素，進行水庫供水模擬分析，以檢視乾旱未來發展所影響之缺水狀態。

1. 未來可能入流量推估

以台灣地區採旬期距之水庫操作習慣而言，未來 3 個月水庫情勢變化之時間尺度將為水庫操作管理之主要決策利用資訊。而受限於科學技術之瓶頸，目前尚無法提供準確之未來 3 個月長期距之水文預測，而一般流量預測則是常利用序率性之統計模式進行水文預測，但模式大部分分析結果較適用於短期距之預測。因此本研究利用旬流量超越機率歷時過程線之分析特性，以不

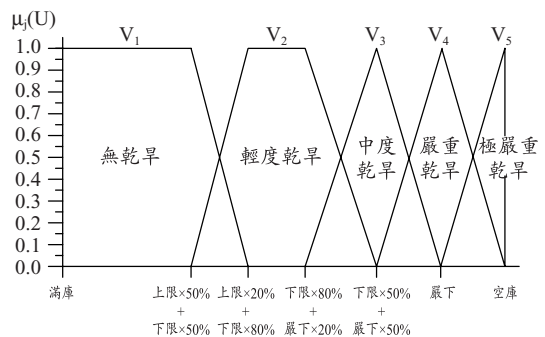


圖 2 水庫蓄水量評估因子隸屬度函數

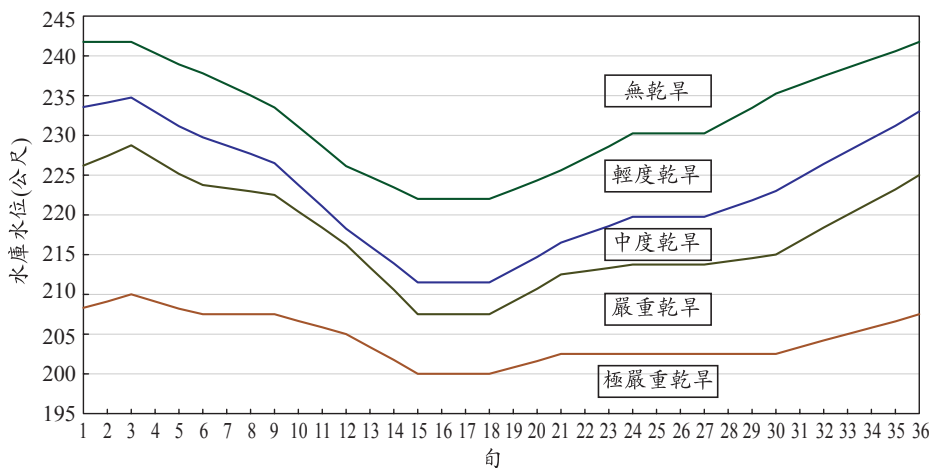


圖 3 石門水庫乾旱指標評定區間門檻值(M-5 規線修正後)

表 1 水源情勢分析等級表

用水標的評估等級		農業用水	公共用水(多目標水庫)	公共用水(單目標水庫)
未來缺水等級	1(無缺水)	0	0	0
	2(輕度缺水)	0~30%	0~10%	0~5%
	3(中度缺水)	30%~40%	10%~20%	5%~15%
	4(嚴重缺水)	40%~50%	20%~30%	15%~30%
	5(極嚴重缺水)	>50%	>30%	>30%

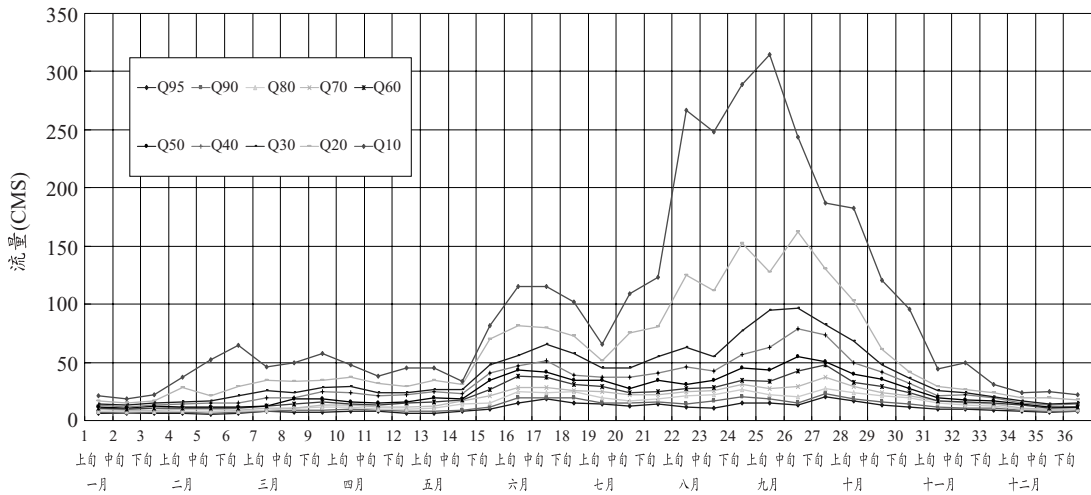


圖 4 石門水庫旬流量超越機率歷時過程線

同豐枯超越機率($Pr[Q \geq Q_p]$)下之水文狀況代表未來可能入流量推估(如圖 4 石門水庫旬流量超越機率歷時過程線)，並藉由此不同豐枯水文狀況，分析未來所有可能發生情勢之包絡分佈。

2. 水源情勢分析等級劃分

由於石門水庫之供水標的包含公共與農業用水兩個主要需水量，且兩種用水標的可容忍的缺水程度不同，因此於缺水分析時必須個別對公共與農業缺水忍受程度進行等級之劃分。本研究水源情勢分析等級之劃分，將依據經濟部水利署「旱災防救業務計畫」中所訂定之旱災等級區分內容，及「台北自來水事業處乾旱時期緊急供水應變計畫」中翡翠水庫(單目標水庫)實施限制用水之五個階段，進而擬定評估等級之假設性分類，不同缺水情況下對應之缺水等級分類如表 1 所示。

無論公共用水或農業用水標的，其未來缺水

程度即反應乾旱延續對未來水源供需之可能影響程度，故應以缺水程度分類等級較嚴重者為乾旱預警機制之參考依據。因此若石門水庫案例中兩用水標的所對應之缺水等級不同，則須以缺水狀況較為嚴重者(等級較大者)之缺水等級為代表。例：分析所得之未來 9 旬公共缺水率為 15.6%，對應缺水程度等級分類為“3(中度缺水)”；且未來 9 旬農業缺水率為 16.8%，對應缺水程度等級分類為“2(輕度缺水)”，而以缺水狀況(等級)較為嚴重者之缺水等級為乾旱預警之參考，故該次之水源供需情勢分析其缺水分類等級應歸類為“3(中度缺水)”。

3.3 乾旱預警

本研究乾旱預警分析主要涵蓋乾旱預警指標的建立及抗旱因應對策的擬定。

1. 乾旱預警指標

表 2 本研究乾旱預警等級定義之指標數值區間

預警燈號	綠燈(G)	藍燈(B)	黃燈(Y)	橙燈(O)	紅燈(R)
警戒程度	正常	警戒	提升警戒	高度警戒	嚴重警戒
數值區間	$0 \leq DAI \leq 1$	$1 < DAI \leq 1.5$	$1.5 < DAI \leq 2$	$2 < DAI \leq 2.5$	$2.5 < DAI \leq 3$

乾旱預警指標(Drought Alert Index, DAI)為綜合分析水庫乾旱指標與水源情勢指標，及結合時間尺度效應，所反應之乾旱預警，由燈號變化顯示乾旱之預警程度。目的是在乾旱真正帶來衝擊之前，能藉由乾旱預警所提供之乾旱警訊，適時發布預警警戒，並提早因應乾旱所會帶來之威脅。

本研究「水庫乾旱指標」作用為檢視乾旱發展至當下之影響程度，屬於已發生之確定事件；「水源情勢指標」則用以判斷乾旱事件於未來的發展潛勢，意即在考量現有可用水量加上未來可能之入庫流量下，是否可確保未來供水無虞，因此屬於未發生之推估狀況。而面對乾旱事件時，一般較關心的是未來某一時間內是否有發生乾旱缺水之危機，因此欲綜合「乾旱指標分析」與「水源情勢分析」以發布乾旱預警，「水源情勢分析」之影響係數應較為顯著。故 Huang and Chou (2005)經試誤評估後，本研究採用水庫乾旱指標等級(D_i)與水源情勢分析等級(S_i)之乘積(DS²)，並應用對數型式數值化壓縮，以描述預警指標之數值範圍，如式(2)所示

$$DAI = f(D, S \setminus Q_h) = \log_{n_1}(D_i) + 2 \log_{n_2}(S_i) \dots\dots\dots(2)$$

式中， $0 \leq DAI \leq 3$ ，D_i與 S_i分別為「水庫乾旱指標」與「水源情勢指標」中 5 種不同分類等級，即 $n_1 = n_2 = 5$ ，Q_h為流量超越機率從樂觀(Q₁₀)至悲觀(Q₉₅)之未來水文情勢，式(2)亦可表示為以下形式

$$DAI = f(D, S \setminus Q_h) = \log_5(D_i \times S_i^2) \dots\dots\dots(3)$$

針對 DAI 之等級表示形式，本研究仿美國防恐警訊燈號，以“綠燈”代表“安全”、“橙燈”表示為“接近危險”、“紅燈”則為“危險”之意義，制定本研究乾旱預警燈號之警訊程度變化(綠燈→藍燈→黃燈→橙燈→紅燈)，由緩

至急以漸進之階段方式代表。其中針對 DAI 之區間分佈，考慮即使水庫乾旱指標為“極嚴重乾旱”(D_i=5)，但當 S_i=1 時，亦即未來三個月供水情勢為無缺水狀態下，乾旱預警燈號理應呈現為“綠燈”之正常狀態。因此設定 $0 \leq DAI \leq 1$ 為綠燈之乾旱預警指標數值區間，而區間 $1 < DAI \leq 3$ ，則均分為另四個乾旱預警等級(藍燈、黃燈、橙燈、紅燈)，因此乾旱預警指標數值區間分佈可表示如表 2。

此外，由於抗旱的緊急程度，除了受水源需求之滿足程度的影響之外，一般亦會隨時間接近點愈接近而愈凸顯其影響之緊急程度。換句話說，若在水源已供應不足之情況下時，未來第一個月之抗早期距通常會相對比第三個月(甚至更遠期距)之抗早期距更要來的受到管理者關注及具代表意義。因此本研究乾旱預警指標(DAI)將結合時間尺度之影響效應，以進一步詮釋乾旱預警指標(DAI)之理論機制。

因此基於公式(3)，本研究將不同時間尺度下乾旱預警指標分析之示意表示如表 3。針對在 t 時刻之已知水文情勢 Q_h 下之乾旱預警指標可表示為 $\log_5(D_i S_i^2)_{Q_h}$ ，然而帶入式(3)即可得含時間效應下乾旱預警指標(DAI)計算式，如下所示

$$DAI = \sum_{i=1}^n W_i \left[\log_5(D_i \times S_i^2)_{q_t} \right] \dots\dots\dots(4)$$

其中，W_i為 t 時刻乾旱預警之影響權重 ($0 \leq W_i \leq 1$)，亦即不同時間尺度下抗旱減災之緊急程度。針對權重率定之分析，本研究透過退水曲線(recession curve)之概念(如圖 5)，定義似退水常數(recession constant)之參數λ。首先假設

$$\frac{df}{dt} = -\lambda f \dots\dots\dots(5)$$

其中，f 為 $\log_5(DS^2)$ 。因此

$$\ln f = -\lambda t + \text{constant} \dots\dots\dots(6)$$

表 3 不同時間尺度下乾旱預警指標分析之示意

θ_i	$P_i(\theta_i)$	DAI(t = 1)	DAI(t = 2)	...	DAI(t = n)
Q_{10}	$P_i(Q_{10})$	$\log_5(D_2 S_1^2)_{Q_{10}}$	$\log_5(D_2 S_2^2)_{Q_{10}}$...	$\log_5(D_n S_n^2)_{Q_{10}}$
Q_{20}	$P_i(Q_{20})$	$\log_5(D_2 S_1^2)_{Q_{20}}$	$\log_5(D_2 S_2^2)_{Q_{20}}$...	$\log_5(D_n S_n^2)_{Q_{20}}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
Q_{95}	$P_i(Q_{95})$	$\log_5(D_2 S_1^2)_{Q_{95}}$	$\log_5(D_2 S_2^2)_{Q_{95}}$...	$\log_5(D_n S_n^2)_{Q_{95}}$

註： θ_i 為不同超越機率下所對應之未來推估流量值 Q_i ； $p_i(\theta_i)$ 為不同超越機率下所對應未來推估流量之發生機率(後續說明)。

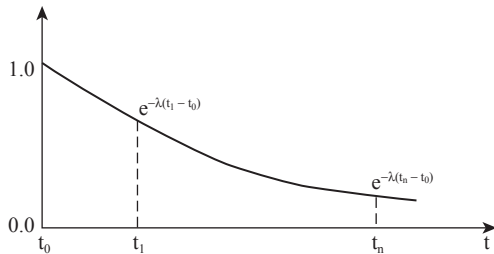


圖 5 水文退水曲線特性之示意

若假設 $f = f_0(t = 1)$ ，可得

$$f = f_0 e^{-\lambda(t-1)} \dots\dots\dots(7)$$

帶入公式(4)，即可得

$$DAI = \frac{1}{\sum_{t=1}^n e^{-\lambda(t-1)}} \sum_{t=1}^n [\log_5(D_t S_t^2)_{\theta_i}] e^{-\lambda(t-1)} \dots\dots(8)$$

然而 t 時刻乾旱預警之影響權重 W_t ，可表示為

$$W_t = \frac{e^{-\lambda(t-1)}}{\sum_{t=1}^n e^{-\lambda(t-1)}} \dots\dots\dots(9)$$

其中，權重 W_t 將會隨參數 λ 之增加而改變不同時間尺度下抗旱減災緊急程度之影響變化。如圖 6 所示，當參數 λ 遞增時 $t = 1$ 時刻之權重將會逐漸增加，相反的 $t = 3$ 時刻之權重將會隨之遞減。而此特性恰可詮釋於抗旱減災之緊急程度，除了會受水源需求量之滿足程度的影響之外，應該亦會隨著時間評估的接近點而有所緊急程度上之差異性。而本研究透過參數 $\lambda = 0.0 \sim 2.0$ 不同範圍的設定及過去歷史豐枯水文事件的分析及探討後，最後將模式參數 n 設定為 3， λ 設定為 0.2 (Huang and Chou, 2008)。

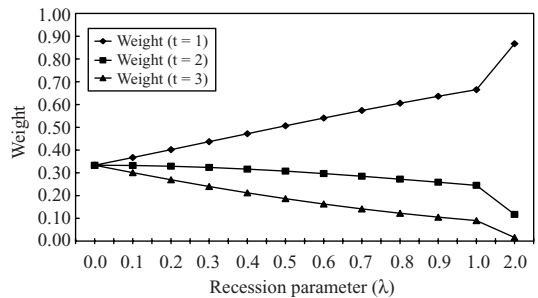


圖 6 在時間期距 $n=3$ 時參數 λ 對權重之影響

2. 抗旱因應對策

面對乾旱事件時，除須透過乾旱預警指標所反應之預警程度，以適時發布乾旱警訊外，根據乾旱預警程度採取適當之抗旱措施同樣為救旱過程中不可或缺之工作。有鑑於此，本研究綜合管理當局過去的實際抗旱操作經驗與農業用水中不同灌區的公平限水原則，並參考經濟部為統一乾旱時期自來水事業跨供水區域供水，執行停止及限制供水標準與措施所訂定之「自來水停止及限制供水執行要點」，在透過歷年的模擬分析下，研擬各預警燈號下所應採取的限水措施與建議調節供水，如表 4 所示(黃文政，2004-2006)。

3.4 決策分析

為進一步強化乾旱研究之實用性，本研究基於上述水庫乾旱預警在不同水文條件下所分析之結果，利用旬流量歷時過程線特性、旬流量資料繁衍及馬可夫鏈模型轉置矩陣，建立期望值之乾旱預警指標，求在各不同水文條件下之乾旱預警分析中，得其期望乾旱預警指標(Expected Drought Alert Index, E[DAI])，以提供乾旱決策之參考。

表 4 乾旱預警之抗旱因應對策

DAI 乾旱預警指標		農業用水	公共用水減水率 (含農業之多目標水庫)	公共用水減水率 (單目標水庫)
綠燈 (正常)	$0 \leq \text{DAI} \leq 1$	滿足供水	滿足供水	滿足供水
藍燈 (警戒)	$1 < \text{DAI} \leq 1.5$	以減供總需水量 30% 為上限，召集用水單位共同協商	滿足供水	減供用水總量 5% 以下： 離峰時段降低管壓供水
黃燈 (提升警戒)	$1.5 < \text{DAI} \leq 2$	以減供總需水量 30%~50% 為目標，召集用水單位共同協商	減供用水總量 0~10%： 離峰時段降低管壓供水 停供次要民生用水	減供用水總量 5~10%： 停供次要民生用水
橙燈 (高度警戒)	$2 < \text{DAI} \leq 2.5$	以減供總需水量 50% 以上但不全面休耕為前提，召集用水單位共同協商	減供用水總量 10%~20%： 停供大型用水用戶與不急需之用水	減供用水總量 10~30%： 停供大型用水用戶與不急需之用水 分區輪流或全區定時停水
紅燈 (嚴重警戒)	$2.5 < \text{DAI} \leq 3$	召集用水單位共同協商全面休耕	減供用水總量 20% 以上： 分區輪流或全區定時停水	減供用水總量 30% 以上： 依區內用水狀況定量定時供水

期望乾旱預警指標(E[DAI])主要發展乃架構在機率分布之應用下所建立之研究模式。如表 3 所示，將透過不同超越機率下所對應未來推估流量之發生機率($p_t(\theta_t)$)建構之。因此利用未來可能推估流量之機率分布，帶入本研究乾旱預警理論公式(4)，可得

$$E[\text{DAI}] = \sum_{t=1}^n W_t \left[\sum_{\theta_t=Q_{10}}^{Q_{95}} p_t(\theta_t) \log_5(D_t S_t^2)_{\theta_t} \right] \dots\dots\dots(10)$$

其中， $p_t(\theta_t)$ 分別為超越機率 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%及 95%之未來推估流量之發生機率。 $p_t(\theta_t)$ 機率分布建置過程，主要乃利用馬可夫過程(Markov process)轉置機率矩陣(transition probability matrix)建置所求得，而本研究使用之馬可夫鏈模型，為有限狀態、穩定的一階馬可夫鏈，系統狀態之劃分乃利用超越機率歷時過程線之特性，將旬流量代表超越機率以組中點為分界，分等為十個狀態。此外，由於石門水庫之現有流量記錄資料無法有效提供轉置機率矩陣之建置，因此本研究應用 Thomas-Fiering 模式進行流量繁衍模式的建立，進一步繁衍長期之水文時列(hydrologic time

series)並進行應用。綜上分析，將式(9)帶入即可得

$$E[\text{DAI}] = \frac{1}{\sum_{t=1}^n e^{-\lambda(t-1)}} \sum_{t=1}^n \left[\sum_{\theta_t=Q_{10}}^{Q_{95}} p_t(\theta_t) \log_5(D_t S_t^2)_{\theta_t} \right] e^{-\lambda(t-1)} \dots\dots\dots(11)$$

據此，本研究即可基於在不同水文狀況下之歷史統計特性及所分析不同情勢下之乾旱預警指標，求得期望之乾旱預警評估情勢，以增輔管理單位乾旱決策之參考。

四、結果與討論

依據以上理論發展模式，本研究針對桃園地區休耕時機，採民國 53 至 95 年期間檢定評估模式之準確性及適度性，並透過區域供水分析行分析水庫滿足未來可靠供水之臨界蓄水量。

4.1 模式發展之決策分析

1. 歷年水文特性之定義

本研究使用資料採石門水庫營運民國 53 至 95 年，計 43 年，其中石門水庫歷年平均入流量為 1443.66 百萬立方公尺。而為了解不同豐枯水文年下模式之分析特性，本研究簡易定義年流量

表 5 期望乾旱預警指標準確度分析矩陣

		實際水文狀況下之燈號					準確度
		綠燈(G)	藍燈(B)	黃燈(Y)	橙燈(O)	紅燈(R)	
模式之預警燈號	綠燈(G)	1157	75	25	3	0	91.83%
	藍燈(B)	49	25	59	9	0	17.61%
	黃燈(Y)	7	11	22	37	10	25.29%
	橙燈(O)	1	1	2	24	20	50.00%
	紅燈(R)	0	0	0	0	11	100.00%
準確度		95.30%	22.32%	20.37%	32.88%	26.83%	80.04%

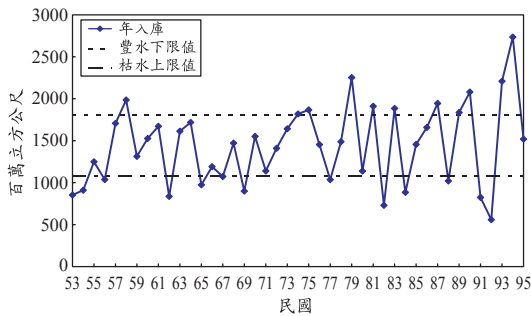


圖 7 石門水庫歷年入流量分布曲線

低於歷年平均之 0.75 倍(1082.75 百萬立方公尺)為枯水年，年流量高於歷年平均之 1.25 倍(1804.58 百萬立方公尺)為豐水年，介於兩者間則屬平水年。如圖 7 為石門水庫歷年入流量分佈特性曲線。

2. 歷年準確度之分析

針對準確度之分析，本研究以實際水文狀況下所分析之燈號與本研究模式所分析之預警燈號，進行模式發展之準確度分析。如表 5 準確度分析矩陣中所示，透過石門水庫營運開始至民國 95 年(計 43 年，1548 旬)，本研究模式(以期望值 DAI 為準)發佈之燈號完全符合實際燈號(假設流量已知條件下)之發生次數，共計 1239 旬，因此歷年平均之準確度可被計算得 80.04%。而其歷年之準確度分曲線如圖 8 所示。

依據本研究水文年定義，經統計結果可得知，豐水年準確度平均為 93.94%，其中民國 74、75、79、90 及 94 年均達 100% 準確度，而在豐水年下最低準確度亦有 83.33% (民國 58 年)。而平

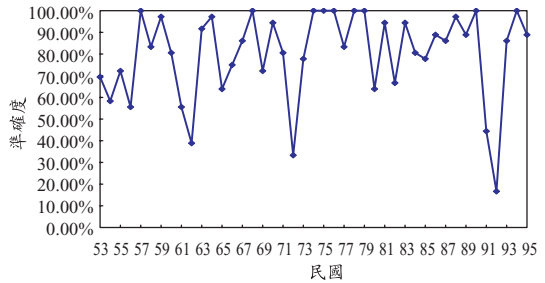


圖 8 模式發展之歷年準確度分布

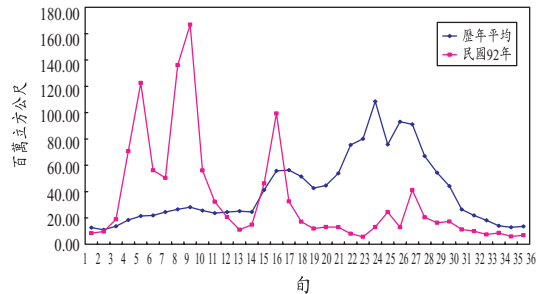


圖 9 民國 72 年與歷年平均水水量之分布特性

水年準確度平均為 82.90%，其中民國 57、68、76 及 78 年亦達 100% 準確度，而在平水年下最低準確度僅為 33.33% (民國 72 年)，此年亦為歷年第二低之準確度，而其主因為當年水文流量分布異常(如圖 9 所示)，年流量雖屬平水年不過其水水量分佈為前半年偏多，而後半年偏少，因此導致期望乾旱預警指標(E[DAI])無法有效掌握其準確性。而枯水年準確度平均僅為 64.14%，其中以民國 88 年為最高，準確度為 97.22%，而以民國 92 年為最低，準確度僅 16.67%，而其主

表 6 休耕關鍵時刻之準確度分析

分析狀態	關鍵時刻一(一月中旬)	關鍵時刻二(二月中旬)	關鍵時刻(平均)
歷年平均	74.42%	72.09%	73.26%
豐水年	81.82%	81.82%	81.82%
平水年	78.95%	73.68%	76.32%
枯水年	61.54%	61.54%	61.54%

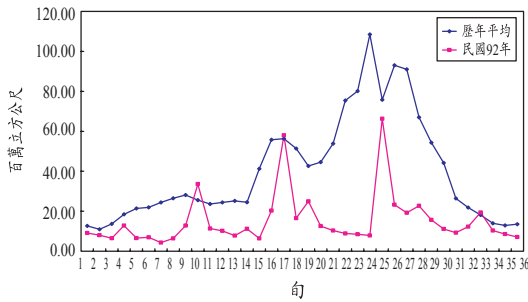


圖 10 民國 92 年與歷年平均水文量之分布特性

因為民國 92 年為歷年最枯旱之水文年，年入庫流量僅 558.33 百萬立方公尺(如圖 10 所示)，水文量分布幾乎均低於歷年平均值，因此導致期望乾旱預警指標(E[DAI])反應無法有效掌握實際現象之準確性。

3. 休耕關鍵時刻準確度之分析

由於桃園地區每當遭遇枯旱缺水，就將移用農業用水以作供水調配，因此於期作施灌前本研究模式決策之準確度將更為重要。因此本研究針對桃園地區一期作秧田：2 月、整田：3 月、本田：3-7 月之施灌特性，進而定義決策關鍵時刻一(一月中旬)即農民秧田用水前之時機，及定義決策關鍵時刻二(二月中旬)即農民最後整田用水前之時機，以作為休耕時機決策之探討。

表 6 為不同休耕關鍵時刻下本研究期望乾旱預警指標(E[DAI])在不同分析狀態下之準確度，而其與實際乾旱預警指標分析之歷年分布如圖 11 所示。而由表 6 中可得知，在歷年分析下，在關鍵時刻一期望乾旱預警指標(E[DAI])可達準確度為 74.42%，關鍵時刻二可達準確度為 72.09%，兩者平均值則為 73.26%，而相較於任一時刻下之歷年平均準確度則為 80.04%。在豐水年分析

下，本研究模式在關鍵時刻一及二則是呈現為相同之準確度，其準確度為 81.82%，而相較於任一時刻下之豐水年準確度則為 93.94%。在平水年分析下，關鍵時刻一可達準確度為 78.95%，關鍵時刻二可達準確度為 73.68%，平均值則為 76.32%，而相較於任一時刻下之平水年準確度則為 82.90%。在枯水年分析下，關鍵時刻一及二亦是呈現為相同之準確度，不過其準確度僅為 61.54%，而相較於任一時刻下之枯水年準確度則為 64.14%。

綜上分析，可發現期望乾旱預警指標(E[DAI])針對在關鍵時刻下所分析之準確度，均低於歷年整體分析之準確度。因此可進一步得知，針對桃園地區一期作休耕關鍵時刻之乾旱決策，其判斷之不確定性確更不易被掌握。

4.2 農業休耕關鍵時刻可靠供水之臨界蓄水量分析

由於農業休耕關鍵時刻為管理單位決策之重要時機，因此本研究針對此休耕之時機點，另分析其可靠供水之臨界蓄水量。

1. 分析方法

主要針對大漢溪水源系統之水源運用條件進行分析，利用未來可能不同豐枯之流量超越機率曲線，評估各水源其各狀態之推估量下未來水文發展情勢，進而了解水庫未來可靠供水之臨界蓄水量。

2. 分析原則

- (1) 大漢溪流域三峽河流量，將納入考量，限制最大取水量每日 50 萬立方公尺。
- (2) 大漢溪流域後池堰至鳶山堰側流量，將納入考量，推估量乃依據與三峽河流域之面積比推估之。

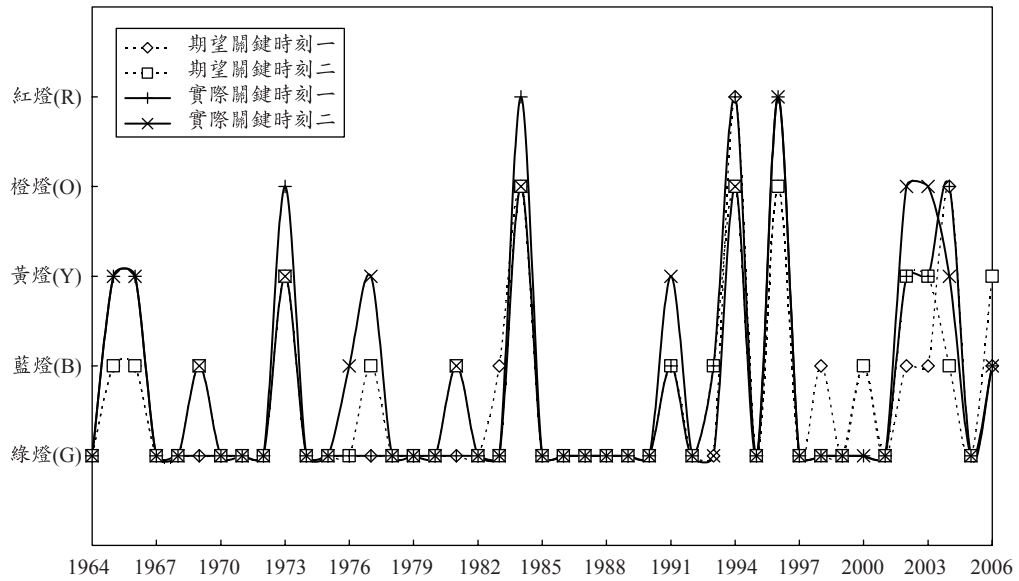


圖 11 休耕關鍵時刻乾旱預警指標之歷年分布

- (3) 計畫供水量：農業用水採 95 年石門水庫農業用計畫供水量；桃園地區公共計畫用水採民國 95 年每日為 124.89 萬立方公尺；板新地區公共計畫用水採民國 95 年每日為 95.74 萬立方公尺。
 - (4) 生態基流量：考慮後池堰至鳶山堰間之側流量進入，復加生態基流量 0.5 秒立方公尺，分析時使用之生態基流量合計 2.3 秒立方公尺。
 - (5) 大湳淨水場有二水源取得方式，其中優先使用桃園大圳取水口取水(上限每日 5 萬立方公尺)，進水口設於桃園大圳北岸，不足量再由鳶山堰經輸水管路加壓送至大湳淨水場(上限每日 30 萬立方公尺)。
 - (6) 板新淨水場原水由鳶山堰及三峽堰抽取，三峽堰設計最大抽水量為每日 50 萬立方公尺，全部送板新淨水場處理，鳶山堰原水每日 25 萬立方公尺優先送大湳淨水場，其餘水送板新淨水場。
3. 流量超越機率曲線建置

流量超越機率曲線建置採威伯法(Weibull)經驗機率公式 $P = m/N + 1$ 計算，其中 m 為由大至小各別排序之流量大小， N 表總記錄數。

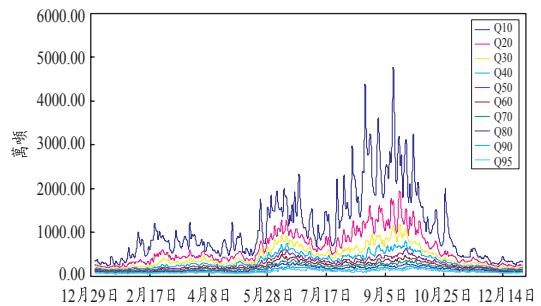


圖 12 大漢溪超越機率曲線

分析數據依據計畫「翡翠及石門水庫共同用水調度機制規劃」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2007)，使用資料自民國 47 年至 95 年，共計 49 年。如圖 12 大漢溪之流量超越機率曲線圖，其流量含括石門入庫流量、三峽河流量及後池堰至鳶山堰推估側流流量。

4. 可靠供水之臨界蓄水量分析

針對桃園地區一期作而言，供灌期間約結束於 6 月，不過一般來說桃園地區 2~4 月的降雨是決定一期稻作用水的重要關鍵，因此一期稻作如果可在 4 月前獲得充足之灌溉用水，一般則不需辦理休耕或停灌之作業。因此以下之分析期距將分別針對至四月底、五月底及六月底進行分析。

表 7 休耕關鍵時刻之水庫未來可靠供水之臨界蓄水量分析

評估期距		大漢溪不同情勢流量超越機率									單位:10 ⁴ m ³
		Q10	Q20	Q30	Q40	Q50	Q60	Q70	Q80	Q90	Q95
關鍵時刻 (一月中旬)	至四月	—	2729	11347	17065	21215	24237	26600	28529	30571	32250
	至五月	—	—	11480	19196	25197	29665	33123	36122	39339	41777
	至六月	—	—	3094	15128	23439	30060	35594	40264	45507	49267
關鍵時刻 (二月中旬)	至四月	—	539	7459	12167	15568	17956	19769	21235	22838	24069
	至五月	—	—	7592	14299	19549	23384	26292	28828	31606	33596
	至六月	—	—	—	10230	17791	23779	28764	32970	37774	41085

- 註：1. Q_p 為未來不同情勢流量超越機率($\Pr[Q \geq Q_p]$)之推估量；
 2. 石門水庫現況(96年)有效蓄水量 21963 萬立方公尺；
 3. 分析單位：萬立方公尺。

表 8 桃園地區近年一期作休耕時機之狀況

民國	石門水庫有效蓄水量 (單位:百萬立方公尺)		管理單位之決策
	關鍵時刻一 (一月中旬)	關鍵時刻二 (二月中旬)	
93 年	57.80	86.88	民國 92 年 12 月底公告桃灌區、石灌區全部休耕
94 年	217.30	195.96	滿足供水
95 年	159.16	126.40	民國 95 年 2 月底公告桃灌區休耕

而對於桃園地區二期稻作而言，由於歷史紀錄中從未發生停灌，因此本研究將不另做二期稻作休耕或停灌之假設性分析。

如表 7 所示，根據上述分析原則及方法，可求得桃園地區休耕關鍵時刻之不同水文狀態下水庫未來可靠供水之臨界蓄水量。由表中可得知，在大漢溪不同情勢流量超越機率下，關鍵時刻一(一月中旬)評估期距至四月底，當未來流量超越機率情勢小於 Q_{60} 時，則會超出水庫之供水能力，即使水庫滿庫(21963 萬立方公尺)亦將無法完全滿足未來之供水；至五月底，未來流量超越機率情勢為小於 Q_{50} 時，則會超出水庫之供水能力；而至六月底，未來流量超越機率情勢亦為小於 Q_{50} 時，則超出水庫之供水能力。關鍵時刻二(二月中旬)評估期距至四月底，當未來流量超越機率情勢小於 Q_{90} 時，才會超出水庫之供水能力；至五月底，未來流量超越機率情勢為小於 Q_{60} 時，則超出水庫之供水能力；至六月底，未來流量超越機率情勢為小於 Q_{60} 時，即超出水庫之供水能力。

如表 8 所示，針對近年桃園地區休耕時機之用水特性可發現，民國 93 年於關鍵時刻一，水庫蓄水僅 57.80 百萬立方公尺，如根據表 7 所分析之結果，至四月底及五月底，如需完全滿足未來供水，未來水文情勢則至少須大於流量超越機率 Q_{20} ，至六月底則至少須大於流量超越機率 Q_{30} ，因此同期間管理單位已公告桃園地區一期作全面休耕，以因應當時枯旱缺水之困境。民國 94 年，由於當年水文情勢豐沛，因此在休耕關鍵時刻一及二均無明確缺水之虞。民國 95 年，於關鍵時刻一，水庫蓄水為 159.16 百萬立方公尺，如根據表 7 所分析之結果，至四月底及五月底，如需完全滿足未來供水，未來水文情勢則至少須大於流量超越機率 Q_{30} ，至六月底，則至少須大於流量超越機率 Q_{40} 。同年，於關鍵時刻二，水庫蓄水為 126.40 百萬立方公尺，如根據表 7 所分析之結果，至四月底及六月底，如需完全滿足未來供水，未來水文情勢則同至少須大於流量超越機率 Q_{40} ，至五月底，則至少須大於流量超越機率 Q_{30} 。而當時管理單位則是於 2 月底公告桃灌

區一期作休耕。

以上分析主要是呈現大漢河流域，在未來不同水文流量情勢下，在休耕關鍵時刻中，水庫完全滿足未來供水之各蓄水臨界水量分析。由於此分析結果不考量實務操作上可能之抗旱減水動作(如農業用水加強灌溉管理)，因此評估結果會相較於較偏保守。不過透過此分析亦可提供管理單位作為掌握休耕或停灌啟動時機之參考。

五、結論與建議

本研究以過去乾旱預警模式發展，進行期望乾旱預警指標(E[DAI])準確度分析與水庫滿足未來供水臨界蓄水量分析，以供桃園地區休耕時機決策分析之參考。

依據分析結果顯示，本研究期望乾旱預警指標(E[DAI])歷年平均之準確度為 80.04%，豐水年準確度為 93.94%，平水年準確度為 82.90%，枯水年準確度為 64.14%。針對休耕關鍵時刻，相較於以上之準確度則均顯較低，其歷年平均之準確度為 73.26%，豐水年準確度為 81.82%，平水年準確度為 76.32%，枯水年準確度為 61.54%。此外，透過水庫滿足未來供水之臨界蓄水量分析(如表 7)，可簡易提供管理單位清楚了解在未來不同水文流量情勢下，水庫滿足未來可靠供水所需之臨界蓄水量。

此發展模式後續建議可推廣應用至其它流域，針對不同的流域特性探討模式之差異性及有效性。

謝 誌

本研究承蒙農委會提供研究經費(計畫編號：96 農科-12.1.1-利-b1(12))，及感謝經濟部水利署北區水資源局與水利署水利規劃試驗所提供資料。

參考文獻

1. 周家慶，2004，「水庫供水操作與枯旱管理之研究—以曾文烏山頭供水系統為例」，國立台灣海洋大學碩士論文。
2. 袁倫欽，2005，「水庫供水操作與乾旱預警

系統之研究」，國立台灣海洋大學博士論文。

3. 郭振泰、林國峰，1992，「台灣地區乾旱問題之回顧與前瞻」，土木水利，18(4)。
4. 黃文政、李詩茜、袁倫欽，2005，「水庫乾旱預警之建置-以石門水庫為例」，2005 氣候變遷與永續發展研討會，國立台灣大學全球變遷研究中心。
5. 黃文政、李詩茜、袁倫欽，2006，「乾旱預警系統之建置-以翡翠水庫為例」，台灣水利，54(3)。
6. 黃文政、周家慶，2005，「氣象乾旱指標之建置-以石門水庫集水區為例」，2005 水資源管理研討會，台中。
7. 黃文政，2004-2006，「乾旱期間水資源供需模式之研究—子計劃三：乾旱期間水庫集水區水資源分析模式之研發(I-III)」，國科會。
8. 黃文政，2007，「水庫集水區旬至季節降雨與水文預報實驗—子計劃五：水庫乾旱預警及決策系統之建立(I)」，國科會。
9. 經濟部水資源局，1999，「乾旱指標之建立—中部及南部區域」。
10. 經濟部水資源局，2000，「乾旱指標之建立—北部及東部區域」。
11. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2004，「乾旱潛勢分析及預測模式之建置」。
12. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2007，「翡翠及石門水庫共同用水調度機制規劃(期末報告)」。
13. Changnon, S. A. (1977) Living with Climatic Change, Phase II. Climatic Change and Potential Impacts on Water Resources. Mitre Corp., McLean, VA, 85-93.
14. Changnon, S.A. (1981) A Precursor of Future Water Problems III. The 1980-1981 Drought at Eldorado, Municipal Review, 10-11.
15. Changnon, S. A., G. Achtemeier, S. Hilberg, V. Knapp, R. Olson, W. Roberts, and P. Vinzani. (1982) The 1980-1981 Drought in Illinois: Causes, Dimensions, and Impacts. Report of Investigation 102, Ill. State Water Survey, 113.

16. Gibbs, W. J., and J. V. Maher. (1967) Rainfall deciles as drought indicators. Bureau of Meteorology Bulletin No. 48, Commonwealth of Australia, Melbourne.
17. Gommers, R., and F. Petrassi. (1994) Rainfall variability and drought in Sub-Saharan Africa since 1960. Agrometeorology Series Working Paper No. 9, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
18. Huang, Wen-Cheng, Lun-Chin Yuan. (2004) A drought early warning system on real-time multireservoir operations. *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 6, W06401.
19. Huang, Wen-Cheng, Chia-Ching Chou. (2005) Drought early warning system in reservoir operation: theory and practice. *Water Resources Research*, Vol. 41, No. 11, W11406.
20. Huang, Wen-Cheng, Chia-Ching Chou. (2008) Risk-based Drought Early Warning System in Reservoir Operation. *Advanced in Water Resources*, in press.
21. Hudson, H. E., and W. J. Roberts. (1955) 1952-1955 Illinois Drought with Special Reference to Impounding Reservoir Design. Bull 43, Ill. State Water Survey, p. 52.
22. Jay, R. L., and U. R. Robert. (1995) Drought Water Rationing and Transferable Rations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(6), 429-437.
23. Jones, D. M. A. (1966) Variability of evapotranspiration in Illinois. Circular 89, Ill. State Water Survey.
24. Johnson, W. K. and R. W. Kohne. (1993) Susceptibility of reservoirs to drought using Palmer index. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(3), 367-387.
25. McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, 179-184.
26. Moore, R. J., D. A. Jones, K. B. Black. (1989) Risk assessment and drought management in the Thames basin. *Hydrological Sciences Journal*, 34(6), 705-717.
27. Palmer, W. C. (1965) Meteorological Drought. Research Paper No.45. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
28. Shafer, B. A., and L. E. Dezman. (1982) Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas. *Proceedings of the Western Snow Conference*, 164-175.
29. Shepherd, A. (1998) Drought contingency planning: evaluating the effectiveness of plans. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124(5), 246-251.
30. Takeuchi, K. (1974). Regional water exchange for drought alleviation. *Hydrology Papers*, No.70, Colorado State University.
31. Tase, N. (1976) Area-deficit- intensity characteristics of drought. *Hydrology Papers* No.87, Colorado State University.
32. Thornthwaite, C. W., and J. R. Mather. (1955) The water budget and its use in irrigation. *Water-Yearbook of Agriculture 1955*, A. Stefferud, Ed., U.S. Dept. of Agriculture, 346-358.
33. Wilhite, D. A. (1986) Drought Policy in the U. S. and Australia: A Comparative Analysis. *Water Resources Bulletin*, 22, 425-438.
34. Wilhite, D. A. (1997) Responding to Drought : Common thirds from the past. *Journal of the American Water Resources Association*, 33(5), 951-957.
35. Wilhite, D. A. (2000) Drought planning and risk assessment: Status and future directions. *Annals of arid Zone*, 39 (3).
36. Yevjevich, V. (1967) An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers*, No.23, Colorado State University.

收稿日期：民國 97 年 2 月 20 日

修正日期：民國 97 年 3 月 25 日

接受日期：民國 97 年 3 月 26 日