

臺灣水資源乾旱預警系統建置之研究

A Study on the Construction of Water Resources Drought Early Warning System

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
暨營建及防災研究中心
助理教授

陳 柏 蒼
Boris P.-T. Chen

成功大學
水利及海洋工程學系
教授

周 乃 昉
Frederick N.-F. Chou

摘 要

就預警模式/系統建置方式而言，「區域水資源調度機制」中所頒布之水資源預警指標(Water resources Early Warning Index, WEWI)，係於定義指標因子與指標間的加權關係後，以歷史乾旱紀錄進行權重試誤測定，並根據發展者對乾旱的認知，就指標等級進行人為判斷及配置，屬「就模式建置指標」；目前大部分乾旱「預警」系統亦多屬多重因子綜合指標。就合理乾旱指標模式/系統的建置而言，除需先行具體定義乾旱預警的標的、指標/預警值的意涵及乾旱等級外，並應考量「現況水情監測」與「氣候預報」兩者資料的特性進行模式的建置；而所建置的模式必須能就「決策風險來源」，提供決策者模式推論誤差及自然界隨機現象不確定性的資訊。以常識觀點，前述所言似乎更顯系統建置前置作業的重要性，然其仍缺乏實證的支持。本文以「就指標建置模式」重新檢討前述機制之合宜性，此研究的結果將對日後乾旱預警研究的發展有所助益，所提策略亦將透過個案研究來展示其可行性。

關鍵詞：乾旱，乾旱預警，乾旱預警指標，缺水率，區域水資源調度機制。

ABSTRACT

As an early drought prevention measure, the Water Resources Agency (WRA) of Taiwan decreed the "Regional Water Resources Regulations" in 2003, it demanding that regional water resource offices establish an appropriate water resource early warning

*通訊作者，逢甲大學水利工程與資源保育學系助理教授，407 台中市西屯區文華路 100 號，btchen@mail.fcu.edu.tw

index (WEWI) according to the given principles. However, this evaluation is subjective, and human error may affect the results when using trial and error to adjust the weights of the major and minor factors in the WEWI. The effectiveness of this system's warnings has been doubted, because its early warning ability and warning risk cannot be explored, and thus related organizations have had a hard time using the information that the WEWI provided.

The difference between early warning systems and monitoring systems is that the former should explore the uncertainty of future hydrologic conditions, and evaluate water shortage situations caused by hydrologic processes in a specific water supply district during a specific period. With regard to reservoir water supply systems, if it is known that a severe water shortage will occur in the future, then to fulfill the water demand during the operation period, early water-limiting measures may be used to avoid a disastrous water shortage before the next wet season arrives. Common sense seems to indicate the importance of system establishment pre-processing, but the empirical support is still lacked. Recent studies that have attempted to establish a direct relationship have not been very successful. The study review the suitability of "Regional Water Resources Regulations" according to the mechanism of established model that build up with the selected factors. The result of this study could be useful to water resources manager responsible for planning a water resources drought early warning system in local conditions.

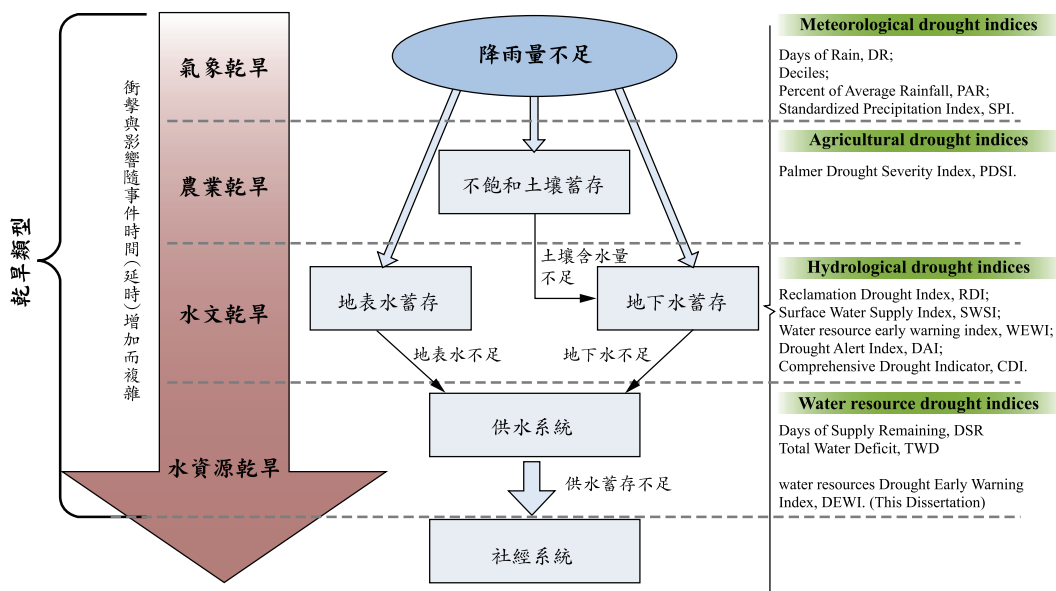
Keywords: Drought, Drought early warning, Drought early warning index, Water shortage rate, Regional water resources regulations.

一、前 言

乾旱的議題向來為世界各國所重視，因其之發生影響人數遠高於其他自然災害(Wilhite *et al.*, 2007)。然而，與其他自然災害相比，乾旱之發生或結束往往沒有明確的特徵可供定義進而預警(Vlachos and James, 1983)，也因此被認為最複雜的自然災害。時至今日，由於「乾旱潛勢」的認知目前並無一致的共識，「乾旱指標」的定義如何適切反應乾旱潛勢並與相關的反應機制作連結，仍為需行探究之議題。

一般而言，乾旱指標係以氣象、水文、水源及供需條件等項目分列或合併考量而得之，較為常見乾旱指標有：帕瑪乾旱指標(Palmer Drought Severity Index, PDSI)、標準化降雨指標(Standardized Precipitation Index, SPI)、總缺水額(Total

Water Deficit, TWD)、剩餘可供水日數(Days of Supply Remaining, DSR)、地表水供水指標(Surface Water Supply Index, SWSI)、墾拓乾旱指標(Reclamation Drought Index, RDI)等(Hayes, 2006; Heim, 2002; Keyantash and Dracup, 2002; Wilhite, 2005)，而近來廣為探討研究的大尺度氣候問題，則又將乾旱研究引領至另一個新的領域。世界各國根據其領土範圍內之氣候特性及用水屬性，以各有其自成一格的乾旱定義和指標，或以為監測，或以為預警；乾旱指標在「適時、適地」的前提下並無統一、客觀的標準，一般僅能就其屬性、定義及影響對象等，加以概括分類，綜合 Wilhite and Glantz (1985)、USISDR (International Strategy for Disaster Reduction, 2007)及 Iglesias (2009)等的看法，乾旱指標的種類可根據影響層面分為氣象乾旱(Meteorological drought)、農業乾



資料來源：Wilhite and Glantz(1985)、USISDR(2007)、Iglesias(2009)及本研究整理

圖 1 乾旱屬性定義分類

旱(Agricultural drought)、水文乾旱(Hydrological drought)及水資源乾旱(Water resource drought)等四類，各分類的相互關係如圖 1 所示。圖中，降雨量不足或相對較少為乾旱主因，是為氣象乾旱；接著，土壤含水量因缺乏降雨濕潤，進而影響而植物生長所需，是為農業乾旱；隨自然界對地表水量供應的減少，造成地表(如：河川流量、水庫、埤塘等)及地下蓄存水量的降低，是為水文乾旱；而當供水系統無法以操作手段滿足各類需求標的時，則為水資源乾旱。其中，已開發國家較為關切的社經乾旱(Socioeconomic drought)，則可視為在乾旱程度加劇的影響下，對農業、水文及水資源三類乾旱影響的總和。因此，當對水量不足的關切焦點落於社經乾旱時，「水資源乾旱」則理所當然的成為研究的主軸。

就乾旱早期預警的防制策略，民國 92 年 10 月 8 日行政院核定通過「區域水資源調度機制」(經濟部水利署，2003)做為枯旱時期規劃水資源整體調度機制的藍圖，該機制明訂臺灣地區各區域水資源局應依各水資源調度區之氣象、水文、水源及供需特性等，參考建議之主次指標因子，建立水資源預警指標(Water resource Early Warning Index, WEWI)，以做為啟動相關因應措施之對應指標。該項規定對各指標之定義與初步建議之評分方式如表 1 所示；除針對各主、次指標進行評分外，WEWI 操作者亦需由過去的操作經驗，給定各主次指標權重，其中各主指標下的次指標加總為 1，而各主指標的權重加總亦為 1，水資源供需情勢各燈號及其採行措施如表 2 所示。WEWI 值經由下式取得：

$$WEWI = \alpha^{Ma} (\alpha_1^{Mi} \cdot M_1 + \alpha_2^{Mi} \cdot M_2) + \beta^{Ma} (\beta_1^{Mi} \cdot P_1 + \beta_2^{Mi} \cdot P_2) + \chi^{Ma} (\chi_1^{Mi} \cdot Q_1 + \chi_2^{Mi} \cdot Q_2) + \delta^{Ma} (\delta_1^{Mi} \cdot I_1 + \delta_2^{Mi} \cdot I_2) + \phi^{Ma} (\phi_1^{Mi} \cdot S_1 + \phi_2^{Mi} \cdot S_2) + \varphi^{Ma} \cdot SD + \gamma^{Ma} \cdot G \quad (1)$$

式中， α^{Ma} 、 β^{Ma} 、 χ^{Ma} 、 δ^{Ma} 、 ϕ^{Ma} 、 φ^{Ma} 及 γ^{Ma} 為七個主指標之權重； α_1^{Mi} 、 α_2^{Mi} 、 β_1^{Mi} 、 β_2^{Mi} 、

χ_1^{Mi} 、 χ_2^{Mi} 、 δ_1^{Mi} 、 δ_2^{Mi} 、 ϕ_1^{Mi} 及 ϕ_2^{Mi} 為各次指標權重。

表 1 「區域水資源調度機制」之水資源供需預警指標(WEWI)評分參考範例

主指標 因子項	主指標 因子 分數	主指標 因子 權重	次指標因子項		次指標 因子 權重	次指標 因子 評分	評分原則(範例)
			代號	內容			
1. 未來氣象展望(M)		α^{Ma}	M ₁	(1) 氣象局發佈之短期天氣降雨預測情形。	α_1^{Mi}		偏多 5~10 分， 正常 5 分， 偏少 0~5 分
			M ₂	(2) 氣象局發佈之未來一季長期(三個月)天氣展望降雨預測情形。	α_2^{Mi}		偏多 5~10 分， 正常 5 分， 偏少 0~5 分
2. 降雨量(P)		β^{Ma}	P ₁	(1) 當時之降雨量與歷年(或十年)當期平均降雨量之比值。	β_1^{Mi}		>=1，5~10 分； <1，0~4 分
			P ₂	(2) 汛期結束後至當時累計之降雨量與歷年(或十年)同期平均累計降雨量之比值。	β_2^{Mi}		>=1，5~10 分； <1，0~4 分
3. 河川川流量(Q)		χ^{Ma}	Q ₁	(1) 當時平均流量與歷年(或十年)當期平均流量之比值。	χ_1^{Mi}		>=1，5~10 分； <1，0~4 分
			Q ₂	(2) 汛期結束後至當時累計總流量與歷年(或十年)同期平均總流量之比值。	χ_2^{Mi}		>=1，5~10 分； <1，0~4 分
4. 水庫進水量(I)		δ^{Ma}	I ₁	(1) 當時平均進水量與歷年當期(或十年)平均進水量之比值。	δ_1^{Mi}		>=1，5~10 分； <1，0~4 分
			I ₂	(2) 汛期結束後至當時累計進水量與歷年(或十年)同期平均累計進水量之比值。	δ_2^{Mi}		>=1，5~10 分； <1，0~4 分
5. 水庫蓄水率(S)		ϕ^{Ma}	S ₁	(1) 水庫當期蓄水狀況，係位於水庫下限或營運規線以上或以下。	ϕ_1^{Mi}		以上，6~10 分； 以下，0~5 分；
			S ₂	(2) 水庫當時平均蓄水率與歷年(或十年)水庫當期平均蓄水率平均值之比值。	ϕ_2^{Mi}		>=1，5~10 分； <1，0~4 分
6. 可供水日數(SD)		φ^{Ma}	---	水庫目前有效蓄水容量一各標的用水供水計畫下之可供水日數。	---		0~30 日，0~3 分； 30~60 日，3~7 分； 60~90 日，7~10 分
7. 地下水水位(G)		γ^{Ma}	---	當時平均地下水水位與歷年(或十年)當期平均地下水水位之比值。	---		>=1，5~10 分； <1，0~4 分
水資源供需預警指標總分							

表 2 水資源供需情勢各燈號及其採行措施

燈號	指標分數	供需情勢	採行措施
藍燈	5-10	正常	• 水源供需穩定正常
綠燈	4-5	限水預警	• 水源情況不佳，未來有缺水之虞 • 自來水事業機構加強自有水源調度 • 農業用水單位採行延後灌溉等預備措施
黃燈	3-4	第一階段限水	• 水情情況未改善，旱象逐漸明顯 • 自來水考量實施第一階段限水措施 • 農業用水考量分區輪灌等加強灌溉管理措施
橙燈	2-3	第二階段限水	• 水文、氣象持續惡化 • 自來水考量實施第二階段限水措施 • 農業用水考量總量管控或停灌等措施
紅燈	0-2	第三、四階段限水	• 水源極度不足 • 自來水考量實施第三階段限水措施 • 農業用水考量擴大總量管控或停灌等措施

資料來源：「臺灣地區水資源水情決策支援系統建置計畫總報告」(中興工程顧問股份有限公司，2007)

惟監察院就民國 91 年初桃竹地區發生農業與高科技產業缺水事件，對相關權責單位提出之糾正文(監察院，2002)中指出－乾旱預警系統建置之目的應在於「減少人為判斷時，因身能極限衍生之誤差」，然「區域水資源調度機制」中初步建議之乾旱預警系統建置方法，在無法掌握各指標之不確定性與準確性之下，仍偏向利用人為試誤方式訂定各項主次指標因子權重，似無法達成上開所言之要求；國內有多位學者嘗試在此之外，另行建立乾旱預警系統，惟所建立之乾旱評估或預警系統仍須在管理決策者的經驗之上、以線性加權方式為之，且全年適用同一套評估準則(Huang and Chou, 2005、萬象等人，2000)。如是方式同若怕碼乾旱指標(PDSI) (Alley, 1984)或地表水供水指標(SWSI)，結合水文及水資源資訊於乾旱監測之用，而非預警。

基於「區域水資源調度機制」不易操作與使用的事實，水利署 2012 年檢討旱災災害防救業務與應變機制(經濟部水利署，2012)，除提出原機制「權重給定難以客觀化，資料準確性亦難掌握，對於燈號之評估需人為調整，無法標準化，實有檢討之空間」外，與會相關專家、學者，亦提出長年以來觀察的相關見解，其可大致歸類為下列五點：

1. 指標意義所指不明

指標值本身係各指標因子計算結果加權而得，指標值僅概略設定區間而為預警等級，指標數值本身意義意義及缺水態勢所指不明，未能呈現各供水系統供需特性，包含缺水特性及水源與需求之組成等，是有衍生水源業管機關間與標的需求間未能有統一之橫向協調、縱向應變決策制定標準，以及警戒值、缺水忍受度定義等問題。

2. 水源系統特性未表

指標因子以語意表述，除因子計算難有統一標準依循外，因子間冗長表述方式未能確切規範各因子權重定義方式，水源業管單位無客觀條件可定義執行該預警系統。

3. 預警期程未能定義

旱災為缺水現象之累積，系統預警期程並未具體定義，而指標因子「未來氣象展望」針對未

來三個月氣象資訊，難與現況水情及未來水需求共同反應「未定義之預警期程」之缺水態勢。

4. 預警效果未能驗證

目前預警機制概由既有乾旱紀錄調整指標因子權重，實際預警效果未有驗證紀錄，也因此，未能呈現系統錯估風險。

5. 未有系統更新機制

前述四點共因，系統操作者無以得知何時應更新系統甚至如何更新系統，僅能以「滾動檢討」方式為之，而檢討結果如何呈現於系統更新上，亦為待解之議題。

「旱災災害防救業務計畫」(經濟部，2009)第二章、第一節，乾旱預警機制之建立定義為：

「乾旱預警作業包括水情監測及水情評估，前者將蒐集之水文資料展現給決策者參考；後者為結合水文預測及水源運用模式評估水情，即依據歷史資料、豐水期水源量、未來可能的降雨量及水庫入流量等資訊，由水量平衡計算推估出來某個時段內水庫蓄水量及可運用水源量的可能變化情形。」，區域水資源調度機制中之乾旱預警方法，除呈現既有水文資料外，餘皆未能達前述乾旱預警機制之要求。因此，就模式建置及決策制訂的觀點，由於目前已發展的乾旱指標或預警方法大多無法就未來的水文不確定性提供相關的風險資訊，以致決策者仍然以經驗法則或其他經驗方法作為轄區範圍內是否存在乾旱特徵的主要評估標準(Cuddy et al., 2005; Fowler and Kilsby, 2002; Kallis, 2008)；國內水資源業管單位更有提出直接以可供水日數或以缺水率為統一評估標準的想法(經濟部，2012)，惟目前皆未能落實。而也因目前仍無具體可供預警之機制，「旱災災害防救業務計畫」之啟動時機，與「區域水資源調度機制」之「水資源供需預警指標」，仍無法有統一標準做一結合。

以乾旱監測的角度而言，未來乾旱或缺水的評估需就不同的水文資訊分量與歷史值進行評估比較，Kallis(2008)指出「合宜的乾旱監測指標應結合氣象水文、水量供給、脆弱度(vulnerability)及可能影響等相關資訊」，以利決策者根據系統呈現的乾旱等級，制訂合宜的抗旱策略。而「乾

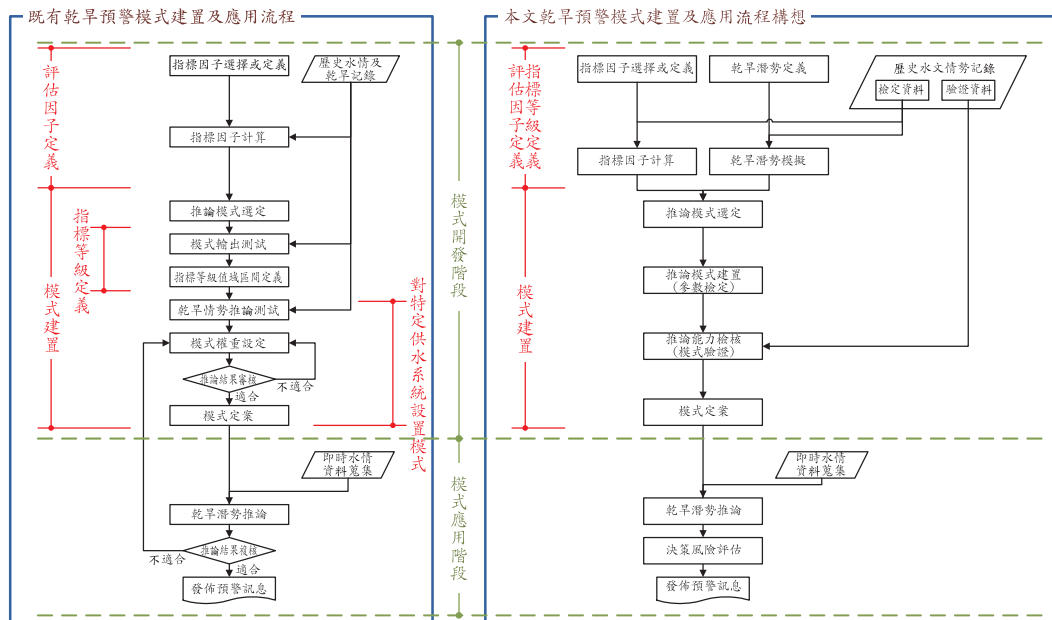


圖 2 本文乾旱預警模式建置及應用流程與既有乾旱預警模式比較

旱預警」與「乾旱監測」的差異在於前者需探究未來水文不確定性對特定供水系統在特定期間內，可能造成的缺水影響。以水庫供水系統的觀點而言，如果可預知系統在特定期間內將發生一嚴重的缺水事件，則管理決策者可就豐水季來臨前的有效庫容，在這段時間內以適量的平均限水策略，來避免災害性的乾旱事件發生。故在水文不確定性、各種水文過程對系統供水影響及各調度分區水資源供需特性差異下，採一致之評估因子與評分方式，實不適切，若再以人為試誤方式調整各項因子權重，更難以獲致正確合理、可用之預警指標。

因此，乾旱預警系統之建置應就目前水資源供需情形及未來水量之情勢分行探討，續就二者之相關進行研究。本文以此為出發點，提出水資源乾旱預警指標(water resource Drought Early Warning Index, DEWI)建置之構想，並就「區域水資源調度機制」的預警考量與「減少人為判斷時，因身能極限衍生之誤差」的原則，進行水資源乾旱預警系統之建置。

二、研究方法

本文對水資源乾旱預警系統的建置主要研究項目有三：其一，定義合宜的乾旱指標、指標因子項及乾旱預警期程。乾旱預警指標應包含供水系統的運轉特性以貼切表述系統的供水特徵；其二為建立合宜的乾旱分級標準。其應合理反映系統供水特徵下不同的乾旱等級，並與相關反應機制作連結；其三為建立乾旱預警系統。其應就現況水情以選定的指標因子、針對預警期程間可能的缺水態勢進行推論，並提供相關風險資訊，以利水資源管理者就「預警期程」間的乾旱潛勢作適切的反應政策。

為達上述研究目的，本章先行檢視既有乾旱預警模式之建置及應用流程，在描述既有乾旱預警方式與學者及水資源操作者於認知及期待上的差異後，提出本文對水資源乾旱預警指標及其推論系統建置的概念，並就水資源系統的操作特性，提出本文水資源乾旱預警指標建置原理。

2.1 既有水資源乾旱預警機制研析

「區域水資源調度機制」中所頒布之水資源預警指標(WEWI)，其模式建置及應用流程可拆解如圖 2 之左所示，就預警模式/系統建置方式而

言，既有採指標因子對乾旱預警指標進行加權評估者，係就歷史乾旱紀錄以試誤法進行模式建置，並根據發展者對乾旱的認知，就指標等級進行人為判斷及配置，屬「就模式建置指標」；此一建置過程在日後需就新增資料進行模式調整時，由於系統間指標因子的權重的變動，原配置之乾旱等級，可能因權重調整者及資料的變動，而需行重新配置，易言之，當權重調整者及模式建置資料有所更動或增加時，原建模資料實際所對應的「乾旱認知」等級，將可能異於原配置之乾旱等級；此係因模式建置前，未就「乾旱」及其「等級」先行客觀、具體定義所致。此外，對水資源管理者或決策人員而言，乾旱預警系統推論的乾旱指標，其指標的定義與預警期程，為兩個相當重要的因素。在特定的預警期程具體定義下，就定率模式而言，各評估時間至預警期程結束，輸入因子與預警指標間將呈現不同的對應關係。然而，現行乾旱預警模式多未就預警期程加以具體定義。也因此，其於實務應用上除模式建置技術層面的問題外，模式的推論能力及結果亦不免受到質疑。

鑑此，本文主張乾旱預警系統應採「就指標建置模式」的方式，亦即水資源乾旱預警系統的建置流程，步驟「指標建立」應在「模式選定」之前，此一構想如圖 2 之右所示，如是「就指標建置模式」的方式，由於指標意義與分級標準明確，且定義在推論模式/系統建置之前，故日後模式建置資料的更新，在供水系統操作方式不變的情況下，並無乾旱預警等級需行重判的問題，就既有資訊的使用與實務應用上，「乾旱預警」概念將相對較為合理與明確。

2.2 水資源乾旱預警系統建置概念

就已開發國家而言，乾旱預警所關心的面向已聚焦在水量供需利用對社會及經濟層面的影響上，亦即供水系統收支失衡造成各標的需求水量不足的損失。就水庫操作利用而言，雖根據以往水庫用水經驗所設計出的操作規線已包含既定的枯旱操作策略(羅樹孝，1995)，然其係為各評估時段間，避免正常供水可能造成缺水持續加

劇的階段性限水策略，當未來進水量不如預期而水庫水位持續降至嚴重下限以下且面臨嚴重的枯旱狀況時，階段性限水將無法有效改善豐水期來臨前的缺水困境。另一方面，如 Vlachos and Douglas (1983)所言「乾旱為「非事件」，乾旱預警目的在於「缺水事件的管理或處理」能在「乾旱的發生或持續加遽」前運作，並就預警期程間正常供水狀態下可能發生的缺水態勢，及早進行限水或標的間水量調度移用策略的制訂。因此，如何提供決策單位預警期程間正常供水下的「缺水警訊」應為乾旱預警的重點，然既有乾旱預警模式多著重於乾旱潛勢等級的呈現，並未具體的表述其所推論的「乾旱潛勢」代表的可能缺水量相對大小。此外，既有的乾旱預警系統需由人為判斷指標因子的權重，而各決策者對「乾旱潛勢」的主觀認知不一，亦往往造成決策單位使用上的困難。

目前大部分乾旱「預警」系統係以多重指標因子進行建構，但就乾旱預警系統而言，乾旱的監測與氣候的分析同時扮演著相當重要的角色(Nicholls *et al.*, 2005)。Nicholls (2005)在他的著作中，引述了兩位學者對乾旱預警系統發展的見解：其一為 Wilhite (1990)的論述，其認為乾旱預警系統應提供決策者各級乾旱預報結果的起始、持續到結束的時間，以利對預期中的乾旱情勢作出適切的反應政策；其二為 Saidy (1997)的建議，其建議乾旱預警的單位(units)應合理的反映乾旱潛勢並與反應機制作連結。此論述與建議，可視為對乾旱預警系統推論之指標值本身具體意義的要求，指標值本身所代表乾旱潛勢，其隱含的乾旱程度與延時，將為左右決策制訂的關鍵。此外，Murphy (1993)指出由於大氣系統非為定率型態，以機率型態對大氣系統進行預測為必然結果。是以，根據這些論述的觀點，乾旱預警系統的建置，可以被定義為是一個「結合機率性的氣候預測與定率性乾旱監測的結果，對能反映缺水態勢的乾旱指標作推論的系統」。根據此一推論，乾旱預警系統的建置，其最大的困難將在於結合機率預報結果在定率推論系統，而 WEWI 推論系統以人為評估的方式將機率性預報轉為

表 3 本文水資源乾旱預警系統概念成形步驟

區分			內容	概念形成步驟
模式建構基本要求	推論指標值	預警標的類別	水資源乾旱 Wilhite and Glants (1985)、USISDR (2007)及 Iglesias (2009)	定義水資源乾旱預警期程
		預警值意涵	乾旱預警系統應提供決策者各級乾旱預報結果的起始、持續到結束的時間，以利對預期中的乾旱情勢作出適切的反應政策。Wilhite (1990)	模擬供水系統正常供水下預期缺水率
			合宜的乾旱監測指標應結合氣象水文資訊、水量供給、脆弱度(vulnerability)及可能影響等因子。Kallis (2008)	根據官方旱災等級區分、考量各標的用水限水標準劃分乾旱預警等級
	指標等級	乾旱預警的單位(units)應合理的反映乾旱潛勢並與反應機制作連結。Saidy(1997)		
	評估資料	種類	應就「現況水情監測」與「氣候預報」進行整合。Nicholls <i>et al.</i> (2005)及許晃雄(2003)	定義水資源乾旱預警指標的指標因子
		特性	於大氣系統非為定率型態，以機率型態對大氣系統進行預測為必然結果。Murphy(1993)	選定定率推論模式建置指標與因子間關係
決策風險來源			1. 自然界水文現象的隨機特性； 2. 預測值與實際值之間差異(模式的推論誤差)的不確定性。(Karamouz and Vasiliadis, 1992)	估計模式推論誤差

明確得分、作為定率推論模式輸入的方式，亦為本文討論的重點之一。

綜上所述，乾旱預警模式/系統的建置應考量因素可根據「模式建構基本要求」及「決策風險來源」進行整理、歸納，如表 3 所示。該表所示的考量因素，可解釋為：對乾旱預警模式/系統的發展，在「模式建構的基本要求」下，除需先行具體定義乾旱預警的標的、指標/預警值的意涵及乾旱等級外，並應考量「現況水情監測」與「氣候預報」兩者資料的特性進行模式的建置；而所建置的模式必須能就「決策風險來源」，提供決策者模式推論誤差及自然界隨機現象不確定性的資訊。本文將實際根據上述論述，進行水資源乾旱預警指標及其推論系統的建置，茲將本文概念成形流程敘述於下。

首先，本文定義乾旱研究的課題為「水資源乾旱」，就 Wilhite (1990)、Kallis (2008)及 Saidy (1997)等對乾旱預警指標本身意義的要求，本文提出以正常供水的平均缺水率作為水資源乾旱預警指標(water resource Drought Early Warning Index, DEWI)，供水系統的「乾旱與否」，可在

定義預警期程後，以供水系統於正常供水下的平均缺水率加以描述，而乾旱的分級則可根據官方認定標準於模式建構前先行區分建置。

在指標推論系統建置的部分，由於供水系統於預警期期間乾旱發生與否主決於兩項因素：現況水情(包含現況水文狀態及蓄水條件)及未來氣候條件，前者屬定率性「監測」結果，後者則屬機率性「預報」結果。為避免定率推論模式無法展現機率性專業氣象預報對現況氣候條件的描述，而致乾旱監測資訊對 DEWI 推論的誤差與未來氣候推論誤差累加於同一模式的推論輸出中，本文建議分就定率性乾旱監測結果與機率性氣候預報結果進行定率性及序率性的 DEWI 推論。其中，定率模式主要根據選定之指標因子對預警期程內的平均缺水期望值進行推論，在現下定率乾旱預警模式皆未能有效考量預警期程內水文不確定性的情況下，推論結果可能的偏差範圍，可由模式率定過程加以探討；序率模式則考量非定率性氣候的機率性推論(亦即中央氣象局提供的季天氣展望預報資料)，就預警期程內各等級乾旱潛勢的發生機率進行推論。如是乾旱預警

系統的建置及指標推論方式有別於既有「監測式」預警模式，除系統中各模式的建置不存在「步驟回授」可能產生的潛在爭議與困擾外，亦大致符合一般對「乾旱預警系統」建置的預期與需求，預期可為決策者提供較為完整、客觀的評估結果。本文主就定率性系統的建置部分進行討論，上述模式中「具體化」乾旱潛勢的水資源乾旱指標，其建置原理於下節進行陳述。

2.3 水資源乾旱預警指標建置原理

一般乾旱指標可就供需探究的觀點分為兩個部分：單純探究供給層面及供需層面合併考量，前者用於反應氣象-水文的相對量，後者則用於反應特定用水需求下的缺水量。臺灣地區大多數供水系統仰賴於水庫的供給，此外在各區的急速發展下，各區的用水需求急速成長，於是乎乾旱和缺水的問題逐漸浮上檯面，而乾旱及缺水的探討層面亦由最基本的水源相對量轉至社經層面的影響。

為求指標本身能反映供給及需求層面，本文合併考量水庫操作規線限水規則進行乾旱預警模式及燈號的建置；鑑於各標的用水需求可以其缺水量多寡可正確反映枯旱程度，本文即以預期之平均缺水率(Average Shortage Rate, ASR)表示水庫或川流水源供水系統在枯旱時期之用水缺水潛勢，再就此缺水潛勢參考「旱災災害防救業務計畫」及水庫操作規線限水標準進行枯旱程度之等級區分，進而建立乾旱預警燈號，並建立乾旱預警指標推論模式。茲就本文指標因子的定義、平均缺水率的概念及水庫供水系統預警期程設計等部分分別敘述於後。

2.3.1 指標因子定義

為及早做出防旱對策，水利署目前規劃建立轄內各水資源調度區之水資源預警指標 WEWI，做為各區實施相關抗旱因應措施之客觀標準，初步建議以未來氣象展望、降雨量、河川川流量、水庫進水量、水庫蓄水率、可供水日數及地下水水位等七項主、次要指標(表 1)因子建立 WEWI。本文所研擬之乾旱指標所採用的評估指標因子項，係基於此一基礎之上並作適量修正，

其中排除原水利署所建議之「未來氣象展望」及「水庫蓄水率」中的「水庫當期蓄水狀況」，等二項，其不宜加入模式中一併評比的原因為：

1. 「未來氣象展望」：未來氣象展望係中央氣象局以大氣環流模式，分別就臺灣地區北、中、南、東等 4 大分區所頒佈可能降水機率之參考值，預測值本身以物理原理為基礎學理計算，其估計成果的可靠度無以得知；若貿然加入預測模式對預警指標之不確定性無法估計。此外，臺灣地區執行水資源調度並非一概粗分為北、中、南、東等四區，且降雨在時間與空間上並非均勻、等量的行為，推論之水資源調度區與分區降雨特性之降尺度問題亦需考量。
2. 「水庫蓄水率」-「水庫當期蓄水狀況」：水庫運用規線一般以歷史資料進行模擬經試誤制訂而得，各旬規線所在位置不盡相同，兩條規線之間的蓄水空間仍有相當範圍，難以單就現況蓄水位於水庫規線以上或以下之蓄水區間對整體系統的枯旱或缺水影響作一客觀量化描述。且水庫蓄水現況尚有「目前蓄水現況與歷史值比值」、「可供水日數」兩分量可提供概似且另具特性之資訊。

本文選用之指標因子項(評估要素)定義如下：

1. 降雨量因子

- (1) 降雨量因子 1 ($P_{t,y}^I$)-當時之降雨量與歷年當期平均降雨量之比值

$$P_{t,y}^I = \frac{PA_{t,y}}{\overline{PA}_t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中， $PA_{t,y}$ 第 y 年、第 t 旬平均日降雨量， $\overline{PA}_t$ 為評估基期內歷年第 t 旬平均日降雨量平均。 $PA_{t,y}$ 、 $\overline{PA}_t$ 分別定義如式(3)、(4)所示。

$$PA_{t,y} = \frac{\sum_{\delta=1}^{TD_t} P_{\delta,t,y}}{TD_t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中， $P_{\delta,t,y}$ 為第 y 年、第 t 旬、第 δ 日降雨量； TD_t 為第 t 旬日數。

$$\overline{PA}_t = \frac{\sum_{y=1}^Y PA_{t,y}}{Y} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中， Y 為評估基期之年數。

- (2) 降雨量因子 $2(P_{t,y}^H)$ -汛期結束後至當時累計之降雨量與歷年同期平均累計降雨量之比值

$$P_{t,y}^H = \frac{PS_{t,y}}{PS_t} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中， $PS_{t,y}$ 為第 y 年枯水季起始旬後至第 t 旬累計降雨量， $\overline{PS}_t$ 為評估基期內歷年第 t 旬平均累計降雨量。 $PA_{t,y}$ 、 $\overline{PA}_t$ 分別定義如式(6)、(7)所示。

$$PS_{t,y} = \sum_{\tau=\eta}^t P_{\tau,y} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中， $PS_{t,y}$ 為第 y 年枯水季起始旬後，第 τ 旬降雨量。 η 為枯水季起始旬，本文中 η 為水文年第 16 旬。

$$\overline{PS}_t = \frac{\sum_{y=1}^Y PS_{t,y}}{Y} \quad \dots\dots\dots(7)$$

2. 水庫進水量因子

- (1) 水庫進水量因子 $1(I_{t,y}^I)$ -當時平均進水量與歷年當期平均進水量之比值

$$I_{t,y}^I = \frac{IA_{t,y}}{IA_t} \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中， $IA_{t,y}$ 為第 y 年、第 t 旬平均日水庫進水； $\overline{IA}_t$ 為評估基期內歷年第 t 旬平均水庫進水量； $IA_{t,y}$ 、 $\overline{IA}_t$ 分別定義如式(9)、(10)所示。

$$IA_{t,y} = \frac{\sum_{\delta=1}^{TD_t} I_{\delta,t,y}}{TD_t} \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中， $I_{\delta,t,y}$ 為第 y 年、第 t 旬、第 δ 日水庫進水量。

$$\overline{IA}_t = \frac{\sum_{y=1}^Y IA_{t,y}}{Y} \quad \dots\dots\dots(10)$$

- (2) 水庫進水量因子 $2(I_{t,y}^H)$ -汛期結束後至當時累計進水量與歷年同期平均累計進水量之比值

$$I_{t,y}^H = \frac{IS_{t,y}}{IS_t} \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中， $IS_{t,y}$ 為第 y 年枯水季起始旬後，第 τ 旬水庫進水量； $\overline{IS}_t$ 為評估基期內歷年第 t 旬累計水庫進水量平均。 $IS_{t,y}$ 、 $\overline{IS}_t$ 分別定義如式(12)、(13)所示。

$$IS_{t,y} = \sum_{\tau=\eta}^t I_{\tau,y} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中， $I_{\tau,y}$ 為第 y 年枯水季起始旬後，第 τ 旬水庫進水量。

$$\overline{IS}_t = \frac{\sum_{y=1}^Y IS_{t,y}}{Y} \quad \dots\dots\dots(13)$$

3. 蓄水率因子($S_{t,y}^{AF}$)-水庫當時平均蓄水率與歷年水庫當期平均蓄水率平均值之比值

$$S_{t,y}^{AF} = \frac{SA_{t,y}}{\overline{SA}_t} \quad \dots\dots\dots(14)$$

式中， $SA_{t,y}$ 為第 y 年、第 t 旬平均蓄水率； $\overline{SA}_t$ 為評估基期內該旬平均蓄水率平均值。 $IS_{t,y}$ 、 $\overline{SA}_t$ 分別定義如式(15)、(16)所示。

$$SA_{t,y} = \left[\frac{S_{t,y} + S_{t+1,y}}{2} \right] / S_{\max} \quad \dots\dots\dots(15)$$

式中， $S_{t,y}$ 為第 y 年、第 t 旬旬初水庫蓄水量； $S_{t+1,y}$ 為第 y 年、第 t 旬旬末水庫蓄水量； $S_{\max}$ 水庫有效庫容。

$$\overline{SA}_t = \frac{\sum_{y=1}^Y SA_{t,y}}{Y} \quad \dots\dots\dots(16)$$

4. 可供水日數($DS_{t,y}$)-水庫目前有效蓄水容量可供水日數

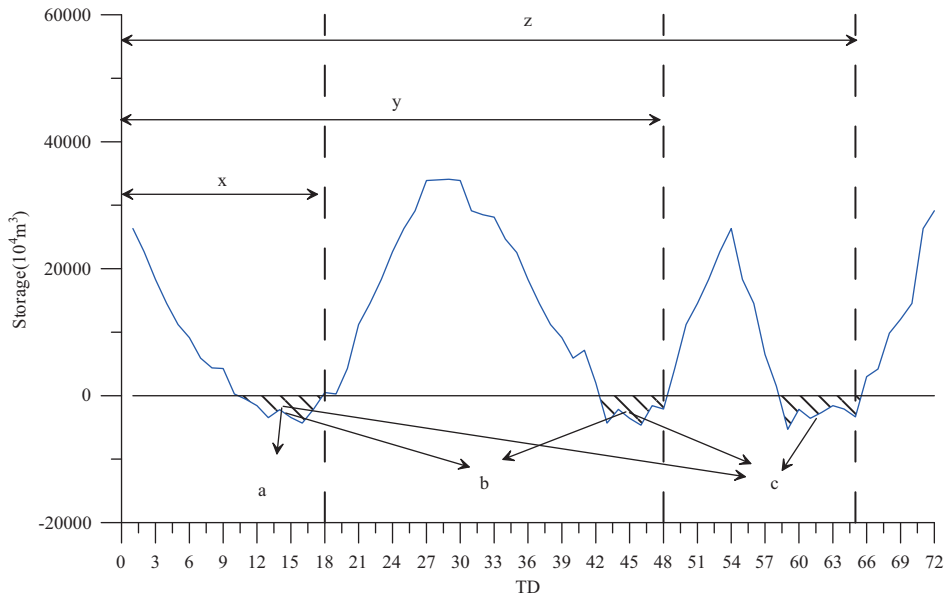


圖 3 平均缺水率計算示意圖

可以下式求得可供水日數 DS ：

$$\min \left| \sum_{\delta=d}^{d+DS-1} DD_{\delta} - S_d \right| \dots\dots\dots (17)$$

式中， DD_{δ} 為當期第 d 日為始，其後第 δ 日之
日需求水量； S_d 為第 t 旬、第 d 日當日水庫蓄
水量。

2.3.2 平均缺水率(Average Shortage Rate, ASR)

本研究利用供水系統之預期平均缺水率
(Average Shortage Rate, ASR)作為水資源乾旱預
警指標，因此，在分析過程上首先在歷史水文過
程下進行水源利用模擬，檢討在不同水文情況下
所發生之平均缺水率，作為乾旱預警指標推論模
式建置之基準。

對水庫供水系統而言，求得平均缺水率須在
某旬之特定起始蓄水量下，配合各年度之歷史進
水流量及需求水量，模擬水庫蓄水利用過程；若
蓄水歷程中沒有發生空庫則不缺水，然而在實際
情況中，由於進水流量的變動，蓄水利用過程中
可能發生多段非連續性的間歇缺水，此種情形
下，對於某一起始運轉水量而言，計算水庫系統
供水之平均缺水率應考慮水庫所能調蓄供水之
所有期間，另當水庫發生溢流時則可停止模擬。

茲以單一水庫之蓄水利用為例，平均缺水率之計
算示意圖如圖 3 所示，平均缺水率可表示為：

$$ASR = MAX \left[\frac{a}{D_x}, \frac{b}{D_y}, \frac{c}{D_z}, \dots \right] \dots\dots\dots (18)$$

式中， a 、 b 、 c 分別為由模擬開始至 x 、 y 、 z 旬
的總缺水量； D_x 、 D_y 、 D_z 分別為由模擬開始至 x 、
 y 、 z 旬的總需求水量； x 、 y 、 z 為供水旬數。

2.3.3 水庫供水系統預警期程設計

在水庫供水系統運轉的觀點，抗旱最佳的運
轉方式是在於將預期可能發生的缺水量，平均的
分配於運轉期程中，以避免災難級的旱災發生於
運轉期程內的特定時間點。對年用型水庫而言，
其運轉期程即其水庫運轉之水文年。本文將就
「評估旬」至「運轉期程結束」間的運轉條件進
行水資源乾旱早期預警的建置。由於運轉期程內
各操作旬(亦即評估旬)其至「運轉期程結束」時
程並未一致，故本文就各旬建立各自專屬之評估
模式。

2.4 水資源乾旱預警分級建置

為使乾旱管理更有效率，乾旱指標和各級乾

表 4 旱災災害防救業務計畫旱災等級區分表

等級 \ 類別	公共給水	農業給水
三級狀況	缺水率介於 10%~20%	缺水率介於 30%~40%
二級狀況	缺水率介於 20%~30%	缺水率介於 40%~50%
一級狀況	缺水率達 30%以上	缺水率達 50%以上
備 註	旬農業給水缺水率(%) = (1 - 可用水量/需水量) × 100%	

旱的指標區間界定，須能適當的反應評估區域的供需狀態；本文的主要目的在於建置包含預警指標及指標區間標準的水資源乾旱預警系統，藉以即時反應乾旱狀態進而減少損失。水利署「旱災災害防救業務計畫」依公共給水、農業用水之缺水狀況，將旱災災害等級區分為一級、二級及三級狀況(表 4)，參酌該計畫等級之區分方式、考量水庫操作規線限水規則，本文亦以水資源利用之缺水率，定義藍、綠、黃、橙、紅等五級枯旱預警燈號以呈現不同的枯旱等級。各燈號所代表及反應之訊息如下：

1. 藍燈：表示無枯旱。水資源供需達預期設計狀態，可正常運轉。
2. 綠燈：表示常態枯旱。水資源稍有不足現象，然此時已具缺水警訊，應有節約供水之預警訊息。
3. 黃燈：表示三級枯旱。水資源已有不足之訊息，且枯旱警訊發生，應有救旱措施之研擬。
4. 橙燈：表示二級枯旱。水資源已明顯不足之訊

息，且已發生枯旱缺水，應有緊急應變之救旱措施。

5. 紅燈：表示一級枯旱。此指標顯示水資源已嚴重不足之訊息，且已發生嚴重枯旱缺水，應有減少缺水影響範圍之緊急應變措施。

對水庫供水系統而言，可以實際可供水量與計畫供水量之比值所顯示之供水率或缺水率區分各枯旱預警燈號。各水庫供水系統，可參照水庫運用規線之規定，對各標的用水檢討不同程度的合理限水標準後，定義水庫系統整體供水情勢之缺水率：

$$WSR = 1 - WSP \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中， WSR 為缺水率； WSP 為供水率，係各標的用水於特定燈號下加權、加總之供水百分比。

2.5 乾旱指標因子與預警指標關係建置

水資源預警指標(WEWI)的得分計算方式(式(1))，可改寫為：

$$WEWI = \alpha_1 \cdot M_1 + \alpha_2 \cdot M_2 + \beta_1 \cdot P_1 + \beta_2 \cdot P_2 + \chi_1 \cdot Q_1 + \chi_2 \cdot Q_2 + \delta_1 \cdot I_1 + \delta_2 \cdot I_2 + \phi_1 \cdot S_1 + \phi_2 \cdot S_2 + \varphi \cdot DS + \gamma \cdot G \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中， α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 、 χ_1 、 χ_2 、 δ_1 、 δ_2 、 ϕ_1 、 ϕ_2 、 φ 及 γ 為指標因子權重。

因此一形式同於未加常數項之線性迴歸(Linear Regression, LR)模式的表述方式，本文在具體定義模式的應變數(dependent variable)為平均缺水率後，模式的建構可採線性迴歸模式進行指標因子權重的估算，因此，本文採行多變量線性迴歸模式，進行模式的建構。一般而言，兩個變數以上的線性迴歸模型可表示為：

$$y_i = \alpha + \sum_{j=1}^n c_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中， y_i 為應變數(dependent variable)第 i 個觀察值； α 、 c_i 為迴歸參數，其中 α 表模式的常數項(constant term)或截距(intercept)，而 c_i 表迴歸係數(regression coefficient)； x_{ij} 為自變數(independent variable) j 的第 i 個觀察值； n 為自變數個數； ε_i 為隨機誤差(random error)項，屬於在自變數和應變數線性關係上無法解釋的應變數變異性和變

動性。如假設誤差的期望值 $E(\varepsilon_i) = 0$ ，則(21)式的迴歸模型成為：

$$E(y_i) = \alpha + \sum_{j=1}^n c_j x_{ij} \dots\dots\dots(22)$$

2.6 評鑑指標

本文選用兩種評鑑指標對模式建構結果進行評估：

1. 判斷係數(R^2) (林等，1993)

迴歸估計最理想的情況是所有的觀測點皆落在估計的迴歸線上，此時誤差測度的部分為零，即誤差平方和(error sum of squares) $SSE = 0$ ， Y 之變異情形可完全由 X 的線性函數解釋之，也就是 Y 之總變異平方和(total sum of squares)等於迴歸變異平方和(regression)， $SST = SSR$ 。另外一種情形則與上述完全相反，即迴歸估計造成較大的誤差，而最差的狀況是所有變異皆為誤差變異，即 $SST = SSR$ ， $SSR = 0$ 。由上所述，直線迴歸模型配適的指標係數，稱為判定係數，用以衡量線性關係之強度，以 R^2 表示，定義如下：

$$R^2 = \frac{SSR}{SST}, \quad 0 \leq R^2 \leq 1 \dots\dots\dots(23)$$

式中， $SSR = \sum_{i=1}^N (Y_{est,i} - \bar{Y}_{obs})^2$ ， $SST = \sum_{i=1}^N (Y_{obs,i} - \bar{Y}_{obs})^2$ ；

$Y_{obs,i}$ 為第 i 個觀測值， $Y_{est,i}$ 為第 i 個推論值， $\bar{Y}_{obs}$ 為平均觀測值。因 $SST = SSR + SSE$ ，故式(23)可表示為：

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{obs,i} - Y_{est,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{obs,i} - \bar{Y}_{obs})^2} \dots\dots\dots(24)$$

R^2 值亦表示總變異中可藉由迴歸線解釋的比例，其值愈接近 1，表示迴歸線的解釋能力愈強，反之其值愈接近 0，則表示此組資料配適此模式並不適當。

2. 平均絕對值誤差(Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{obs,i} - Y_{est,i}| \dots\dots\dots(25)$$

式中 N 為預測值數目；由 MAE 的大小，可以瞭

解預測值與觀測值的絕對誤差量。

三、案例研究

3.1 研究案例區域概述

曾文-烏山頭水庫系統地理位置如圖 4 所示。曾文水庫位於曾文溪上游之柳藤潭峽谷，為一多目標水庫，營運標的包括：灌溉用水、家用及公共給水、工業用水、水力發電及防洪，發電以配合灌溉及給水需要為原則。水庫從民國 56 年底開始動工興建，至民國 62 年 10 月完成，於民國 63 年 1 月正式發電供水營運。水庫為分區輻壓式土石壩，高 133 公尺、長 400 公尺、壩頂標高 235 公尺、防浪牆頂標高 236.4 公尺。水庫集水面積 481.16 平方公里，滿水面積 17 平方公里，完工時總蓄水容量 7 億 800 萬噸，水庫有效蓄水容量為 6 億 1,253 萬噸。

烏山頭水庫為一離槽水庫，位於曾文水庫西南方曾文溪支流之官田溪上游，與曾文水庫串聯運用曾文溪之水資源，大壩於民國 9 年 1 月開工，至民國 19 年 5 月完工，水庫集水面積 60 平方公里，壩頂標高 66.66 公尺，滿水位標高 58.18 公尺，民國 19 年水庫完成初期，滿水位之總蓄水量 1 億 5,416 萬噸，民國 75 年測量結果，有效蓄水量 8,376 萬噸。

3.2 基本資料說明

由於 2009 年莫拉克事件後，曾文-烏山頭水庫系統庫容損失逾億立方公尺(楊等，2010)，為能呈現本文建置模式可有效反映 2002 至 2003 年間的嚴重乾旱事件，本文取 1975 至 2008 年(水文年 1975 至 2008)曾文-烏山頭聯合運轉營運資料進行模式建置與驗證。曾文-烏山頭水庫系統係年用型水庫，其以六月初為豐水季起始時間至次年五月底枯水季結束時間，故一般而言每年最低之蓄水量多數發生在枯水季結束之五月底，因此本文統一以曾文-烏山頭水庫系統之水文年句次(例如：以日曆年句次第 16 句為水文年第 1 句，餘以此類推)排序表示分析時數，採用 1975 至 1999 水文年之水文資料進行預警指標模式建置，是為本研究各句模式建置之評估基期，評估基期內曾

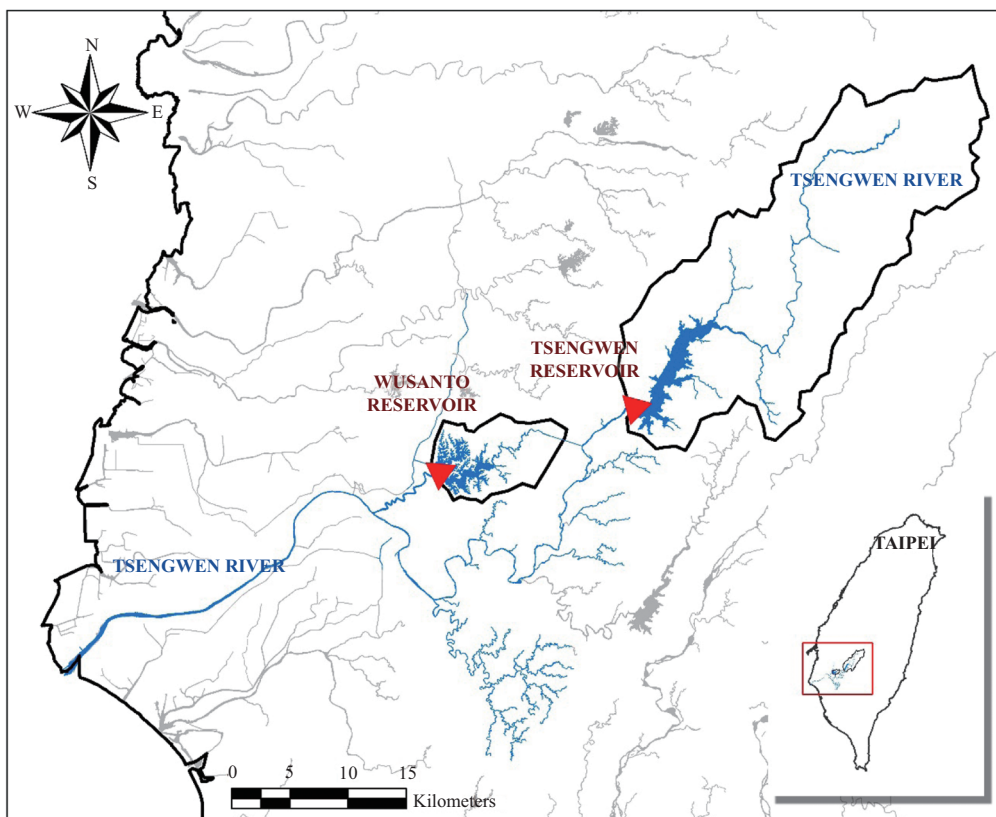


圖 4 曾文-烏山頭水庫系統地理位置圖

文-烏山頭水庫系統流量及降雨量資料統計特性如表 5 所示，續以 2000 至 2007 年水文年之水文過程進行模式成效驗證。

3.3 平均缺水率及指標因子計算

平均缺水率之計算，首要進行水庫模擬操作，本研究以評估旬所屬之水文年結束為目標操作時間，在目前曾文-烏山頭水庫系統各標之之額定需水量下，模擬各種可能之系統起始蓄水狀態(起始庫容假設以 0 為始，逐次增加 500 萬噸，直至 69,000 萬噸為止，共計 139 種假設)下之水庫蓄水利用，並計算各旬、各起始蓄水狀態下之平均缺水率。本文模擬分析水庫的水量運用過程時，忽略蒸發與滲漏，每一旬末的蓄水量 S_{t+1} ，可以水平衡方程式計算如下：

$$S_{t+1} = S_t + I_t - D_t \quad \dots\dots\dots(26)$$

式中， t 為旬別， I_t 為第 t 旬入流量， S_t 為第 t 旬之旬初蓄水量， S_{t+1} 為第 $t+1$ 旬之旬初蓄水量， D_t 為第 t 旬各標的需水量總和。

由於曾文-烏山頭水庫系統主以水庫蓄存水量供給各標的用水，且系統中無地下水之引用，故次指標因子項僅計降雨量、水庫進水量、水庫蓄水率及可供水日數，各指標之計算方式如 2.3.1 節所述。

3.4 曾文-烏山頭水庫系統水資源乾旱預警分級

曾文-烏山頭水庫系統水資源乾旱之預警分級，以水庫整體供水情勢之缺水率劃分各燈號區間等級，如表 6 所示。而模式推論值與實際模擬值的座落區間可表示如圖 5 所示；預警值燈號所屬區間，如表 7 所示。

表 5 評估基期內曾文-烏山頭水庫系統流量及降雨量資料統計特性

月別	旬別		流量資料統計特性(單位：萬噸)					降雨量資料統計特性(單位：公釐)				
	日曆旬	水文旬	最小值	最大值	中位數	平均值	標準差	最小值	最大值	中位數	平均值	標準差
六月	16	1	560.40	34387.20	6680.30	9775.38	8902.45	15.90	782.50	181.40	241.90	204.62
	17	2	499.40	12172.30	3333.80	4723.94	3339.64	3.40	348.40	84.90	111.79	88.83
	18	3	547.50	22331.00	2696.80	6042.35	6695.66	1.90	593.00	63.90	132.32	148.82
七月	19	4	817.90	67362.80	3673.10	8475.12	14026.97	2.50	1061.10	74.20	148.58	233.49
	20	5	807.80	9299.90	2355.20	2741.84	2005.13	5.90	260.60	61.40	81.97	68.12
	21	6	789.20	37888.70	2981.50	9953.30	11810.83	12.10	957.60	138.70	259.78	269.42
八月	22	7	1228.20	31538.60	5534.40	11005.77	10202.23	26.90	648.40	152.70	236.57	178.00
	23	8	1597.00	37926.80	4332.30	8992.90	8992.74	9.10	598.10	132.70	185.68	155.68
	24	9	1444.00	35059.10	5477.50	10602.15	10002.47	39.30	775.80	160.60	223.42	202.32
九月	25	10	519.60	55143.40	3366.50	7010.55	11236.94	0.30	889.90	65.20	125.67	184.92
	26	11	577.50	41169.30	2332.00	4315.28	7849.28	1.90	790.00	60.00	91.12	152.48
	27	12	1126.90	7118.10	1701.60	2465.11	1569.28	10.80	387.50	64.70	79.86	71.03
十月	28	13	632.40	5190.70	1463.90	1711.54	941.46	0.00	153.80	22.00	33.67	37.55
	29	14	439.60	7489.00	1018.10	1394.51	1394.06	0.00	202.70	9.20	25.32	42.83
	30	15	190.10	3635.90	777.00	982.36	666.66	0.00	100.50	10.20	17.93	21.60
十一月	31	16	173.80	1281.20	576.40	597.51	256.94	0.00	38.20	2.50	5.64	8.56
	32	17	244.20	1102.00	514.00	538.36	212.27	0.00	58.80	0.80	8.78	14.22
	33	18	196.80	756.20	446.60	454.97	167.28	0.00	46.00	1.40	6.77	12.29
十二月	34	19	147.70	617.90	320.00	346.73	131.81	0.00	26.90	0.00	3.56	7.28
	35	20	122.80	566.30	293.90	312.51	127.62	0.00	124.50	1.90	13.67	27.57
	36	21	146.40	666.00	283.10	360.26	175.39	0.00	139.20	9.80	17.75	28.96
一月	1	22	116.90	932.90	249.50	354.43	237.76	0.00	31.90	5.50	8.63	10.02
	2	23	79.00	744.10	217.80	293.65	187.04	0.00	80.80	3.20	13.46	20.32
	3	24	137.30	678.90	313.00	323.16	133.13	0.00	74.70	7.70	13.04	16.84
二月	4	25	97.60	809.10	321.30	331.48	186.98	0.00	113.20	2.00	17.39	32.37
	5	26	78.60	3365.40	326.80	517.92	684.52	0.00	154.90	19.60	33.00	46.23
	6	27	78.20	2437.40	276.00	404.04	489.99	0.00	112.20	12.30	18.39	23.61
三月	7	28	86.10	4502.50	217.80	489.12	883.40	0.00	159.70	9.80	20.97	34.26
	8	29	45.80	5415.20	301.70	653.88	1152.14	0.00	165.70	14.10	30.14	41.47
	9	30	90.20	5714.30	447.10	833.11	1219.13	0.00	691.30	14.80	56.98	138.59
四月	10	31	73.10	4466.30	310.50	648.38	908.06	0.10	120.20	24.20	34.27	34.74
	11	32	94.00	8255.60	385.30	1126.16	2149.54	0.00	312.30	24.30	49.64	74.64
	12	33	73.40	7320.00	502.90	1295.79	1854.53	0.00	240.30	39.20	51.12	60.87
五月	13	34	150.90	3484.90	840.30	1297.29	1003.67	0.00	215.60	50.30	69.07	64.03
	14	35	240.50	5209.80	953.60	1511.36	1386.65	7.60	262.40	71.40	86.67	69.89
	15	36	344.20	13406.70	4024.50	5217.70	4416.16	26.80	503.90	196.20	192.56	132.76

表 6 曾文-烏山頭水庫系統各標的用水在不同缺水狀況下之合理供水率及燈號等級區分建議表

等級	類別	民生用水 (年計畫量 1.2 億噸)	工業用水 (年計畫量 0.27 億噸)	農業用水 (年計畫量 9 億噸)	實際供水情形 (總計畫供水 10.47 億噸)	缺水率
		分界值	分界值	分界值	實供(億噸)	供水率
藍燈 (無乾旱)	1.0	1.0	1.0	1.0~0.75	8.22	0.79
綠燈 (常態乾旱)	1.0~0.9	0.9	0.9	0.75~0.625	6.948	0.66
黃燈 (三級乾旱)	0.9~0.8	0.8	0.8	0.625~0.5	5.676	0.54
橙燈 (二級乾旱)	0.8~0.7	0.7	0.7	0.5~0.375	4.404	0.42
紅燈 (一級乾旱)	0.7 以下	0.7 以下	0.7 以下	0.375 以下		
備 註	本表以供水可靠度表示：供水可靠度=實際供水量/計畫供水量。					

表 7 各預警燈號對應之 ASR 預警值區間

燈號別	藍燈	綠燈	黃燈	橙燈	紅燈
區間下限	0.00	0.21	0.34	0.46	0.58
區間上限	0.21	0.34	0.46	0.58	1.00

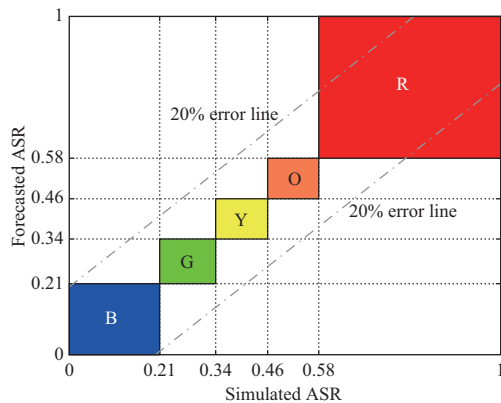


圖 5 檢定驗證散佈圖各燈號座落區間

3.5 指標因子與預警指標關係建構

基於各句水文條件並不相同，且供水系統運轉期程內各操作時間(句)甚至「運轉期程結束」時程並未一致，各指標因子能為各預警期程的乾旱潛勢提供之水文資訊亦不相同，故本研究將分就各句進行定率 DEWI 推論模式建構。因考量到指標(應變數)-ASR 在線性模式中可能存有不能為指標因子(因變數)解釋的部分，故本文線性迴

歸模式的建構採以加常數項的多變量線性迴歸模式為之，其可表示為：

$$DEWI_t = ASR_t = C_t + \beta_{1,t} \cdot P_{t,y}^I + \beta_{2,t} \cdot P_{t,y}^{II} + \delta_{1,t} \cdot I_{t,y}^I + \delta_{2,t} \cdot I_{t,y}^{II} + \phi_t \cdot S_{t,y}^{AF} + \varphi_t \cdot DS_{t,y} \quad (27)$$

式中， t 為評估句別； C_t 為常數項； $P_{t,y}^I$ 、 $P_{t,y}^{II}$ 、 $I_{t,y}^I$ 、 $I_{t,y}^{II}$ 、 $S_{t,y}^{AF}$ 及 $DS_{t,y}$ 為選用之指標因子，各因子之定義如 2.3.1 節所述； $\beta_{1,t}$ 、 $\beta_{2,t}$ 、 $\delta_{1,t}$ 、 $\delta_{2,t}$ 、 ϕ_t 及 φ_t 為選用之指標因子權重。

為避免不規則的輸入、輸出對應關係(ASR 為 0 時，仍有不同的對應輸入指標因子組合影響建模品質，因此本文在建模前先行剔除建模資料中 ASR 為 0 的部分。為使建置的模式係數能呈現指標因子與指標間的相互關係，本文在模式建置前，先將估算後的指標因子以相對大小正規化在 0~1 之間。各句模式迴歸係數如表 8 所示，檢定及驗證表現評鑑結果如表 9 所示。表 9 中顯示，各模式驗證結果普遍不好，此係模式建置時就模

表 8 各旬線性迴歸模式係數

月別	旬別		係數						
	日曆旬	水文旬	常數項	P_1	P_2	I_1	I_2	S	DS
六月	16	1	0.4588	-0.2856	-0.3506	1.2211	-0.5713	-0.6919	0.1213
	17	2	0.3307	0.3943	-0.1920	0.0512	0.1835	-0.5389	0.0447
	18	3	1.1615	-2.3165	0.7836	1.1306	-1.1014	-4.3769	3.2912
七月	19	4	0.4686	0.5348	-0.2237	-1.5157	0.2660	-1.3679	0.6330
	20	5	1.5566	0.1248	-0.2060	-1.6011	0.0588	-8.7654	6.7510
	21	6	0.8194	0.7199	-0.5499	-1.8155	0.6775	-5.6775	4.5182
八月	22	7	0.5444	-0.1552	0.1639	0.0079	-0.3657	-0.3250	-0.3194
	23	8	0.8850	-0.3483	0.1528	-0.4556	-0.2980	-3.0983	1.8535
	24	9	0.7267	0.0972	0.0075	-0.2937	-0.1725	-0.7910	-0.2212
九月	25	10	0.7484	0.0420	0.0591	-0.0968	-0.1803	-0.7590	-0.4401
	26	11	0.7972	-0.6997	-0.0200	0.5149	-0.0575	-0.7474	-0.4758
	27	12	0.7813	-0.1212	-0.0087	-0.0268	0.0207	-0.6329	-0.3725
十月	28	13	0.8133	0.0907	-0.0968	-0.2341	0.1232	-0.7341	-0.3308
	29	14	0.8094	0.0961	0.0182	-0.1522	0.0109	-0.7909	-0.3593
	30	15	0.8062	0.1576	0.0189	-0.1586	0.0344	-0.8436	-0.3381
十一月	31	16	0.8420	0.0000	0.0270	-0.0472	0.0000	-0.8464	-0.3487
	32	17	0.8543	-0.3781	0.1863	0.0170	-0.0388	-0.9274	-0.3207
	33	18	0.8704	0.0836	-0.1296	-0.1273	0.0940	-0.9339	-0.3300
十二月	34	19	0.8941	-0.0594	-0.1008	-0.1129	0.0647	-1.0688	-0.2518
	35	20	0.8730	0.1276	-0.2041	-0.1946	0.1449	-1.1939	-0.1903
	36	21	0.8168	0.0823	-0.2119	-0.1871	0.1932	-1.4000	0.0262
一月	1	22	0.7778	0.0603	-0.0832	-0.1504	0.1039	-1.9665	0.6646
	2	23	0.8941	-0.2796	-0.2095	0.0553	0.0008	-2.6031	1.2728
	3	24	0.8619	0.0904	-0.2819	0.1224	0.0167	-2.5332	1.1557
二月	4	25	0.9262	-0.1695	-0.2013	0.1130	-0.0527	-2.3933	0.8713
	5	26	0.9646	-0.1229	-0.1110	-0.3334	-0.0449	-2.4124	0.5913
	6	27	0.9299	0.1444	-0.1775	-0.6816	0.0157	-2.4180	0.3233
三月	7	28	0.9653	-0.3531	-0.2911	0.0244	-0.1183	-3.5479	1.2824
	8	29	0.9535	-0.0211	-0.3312	-0.1097	-0.1934	-4.5466	2.1824
	9	30	0.9474	0.1363	-0.1045	-0.3894	-0.2108	-5.0351	2.3991
四月	10	31	0.9660	-0.1872	-0.0364	0.0457	-0.3112	-5.0291	1.6902
	11	32	0.8852	-0.9540	0.2220	0.3679	-0.4449	-4.9872	0.5989
	12	33	0.6966	0.0271	-0.1166	-0.6690	0.2585	-6.8683	2.5868
五月	13	34	0.8495	0.0670	-0.0989	-0.5926	0.1814	-9.9514	3.8237
	14	35	0.6780	-0.0489	-0.1473	-0.7408	0.4026	0.0396	-7.1483
	15	36	0.9061	0.0069	-0.0217	-1.8089	0.0092	-20.6763	7.3301

表 9 修正前後各旬模式檢定及驗證評估結果

月別	旬別		修正前				修正後			
			檢定		驗證		檢定		驗證	
	日曆	水文	CE	MAE	CE	MAE	CE	MAE	CE	MAE
六月	16	1	0.41	0.11	-0.36	0.18	0.41	0.11	-0.35	0.17
	17	2	0.36	0.12	-5.01	0.33	0.36	0.12	-5.01	0.33
	18	3	0.09	0.33	-8.36	0.43	0.10	0.31	-6.72	0.33
七月	19	4	0.36	0.13	0.19	0.13	0.36	0.13	0.39	0.10
	20	5	0.09	0.53	-622.3	2.41	0.09	0.50	-0.40	0.14
	21	6	0.05	0.35	-3.53	0.33	0.05	0.34	0.24	0.09
八月	22	7	0.47	0.11	-0.26	0.18	0.47	0.11	0.14	0.12
	23	8	0.09	0.17	-4.12	0.38	0.10	0.16	0.37	0.09
	24	9	0.81	0.07	0.15	0.16	0.81	0.07	0.88	0.04
九月	25	10	0.85	0.07	0.36	0.15	0.85	0.07	0.91	0.03
	26	11	0.87	0.07	0.05	0.19	0.87	0.07	0.89	0.04
	27	12	0.87	0.07	0.44	0.15	0.87	0.07	0.85	0.05
十月	28	13	0.89	0.06	-6.97	0.37	0.89	0.06	0.89	0.04
	29	14	0.88	0.06	0.30	0.18	0.88	0.06	0.89	0.04
	30	15	0.88	0.06	0.30	0.19	0.88	0.06	0.83	0.06
十一月	31	16	0.87	0.07	0.46	0.16	0.87	0.07	0.93	0.04
	32	17	0.88	0.06	0.42	0.17	0.89	0.06	0.94	0.04
	33	18	0.87	0.06	0.50	0.16	0.87	0.06	0.93	0.04
十二月	34	19	0.87	0.07	-0.21	0.23	0.87	0.07	0.94	0.04
	35	20	0.86	0.07	0.18	0.20	0.86	0.07	0.91	0.04
	36	21	0.85	0.07	0.32	0.19	0.85	0.07	0.87	0.05
一月	1	22	0.84	0.07	0.54	0.15	0.84	0.07	0.91	0.04
	2	23	0.90	0.06	0.42	0.17	0.90	0.06	0.93	0.04
	3	24	0.86	0.07	0.59	0.15	0.86	0.07	0.91	0.05
二月	4	25	0.86	0.07	0.44	0.15	0.86	0.07	0.93	0.03
	5	26	0.90	0.06	0.19	0.17	0.90	0.06	0.98	0.02
	6	27	0.90	0.07	-0.25	0.24	0.90	0.07	0.97	0.02
三月	7	28	0.88	0.07	-0.12	0.24	0.88	0.07	0.96	0.03
	8	29	0.86	0.08	0.24	0.19	0.86	0.08	0.96	0.03
	9	30	0.86	0.08	0.15	0.19	0.86	0.08	0.98	0.02
四月	10	31	0.77	0.10	-0.93	0.32	0.77	0.10	0.93	0.03
	11	32	0.69	0.12	-4.96	0.53	0.69	0.12	1.00	0.01
	12	33	0.53	0.15	-5.98	0.62	0.53	0.15	0.86	0.05
五月	13	34	0.55	0.16	-14.74	0.85	0.55	0.16	1.00	0.00
	14	35	0.36	0.18	-34.62	1.06	0.36	0.18	0.87	0.04
	15	36	1.00	0.01	---	2.84	1.00	0.01	---	0.14

*因模擬 ASR 值皆為 0，故未予計算。

表 10 2000 至 2007 年水文年各旬乾旱預警模式驗證結果

月別	旬別		2000				2001				2002				2003			
			模擬 ASR		推論 ASR		模擬 ASR		推論 ASR		模擬 ASR		推論 ASR		模擬 ASR		推論 ASR	
	日曆	水文	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.
六月	16	1	0.18	B	0.22	G	0.00	B	0.10	B	0.34	Y	0.36	Y	0.51	O	0.37	Y
	17	2	0.16	B	0.58	R	0.00	B	0.42	Y	0.32	G	0.22	G	0.48	O	0.67	R
	18	3	0.15	B	0.76	R	0.00	B	0.34	G	0.31	G	0.45	Y	0.47	O	0.54	O
七月	19	4	0.14	B	0.31	G	0.00	B	0.13	B	0.34	Y	0.32	G	0.47	O	0.23	G
	20	5	0.11	B	0.10	B	0.00	B	0.37	Y	0.29	G	0.00	B	0.49	O	0.23	G
	21	6	0.09	B	0.10	B	0.00	B	0.00	B	0.31	G	0.06	B	0.52	O	0.18	B
八月	22	7	0.06	B	0.26	G	0.00	B	0.00	B	0.29	G	0.12	B	0.53	O	0.38	Y
	23	8	0.07	B	0.39	Y	0.00	B	0.00	B	0.30	G	0.06	B	0.55	O	0.40	Y
	24	9	0.02	B	0.10	B	0.00	B	0.00	B	0.33	G	0.16	B	0.55	O	0.50	O
九月	25	10	0.00	B	0.06	B	0.00	B	0.00	B	0.35	Y	0.19	B	0.56	O	0.50	O
	26	11	0.00	B	0.09	B	0.00	B	0.00	B	0.36	Y	0.19	B	0.59	R	0.53	O
	27	12	0.04	B	0.07	B	0.00	B	0.00	B	0.41	Y	0.24	G	0.58	R	0.42	Y
十月	28	13	0.03	B	0.07	B	0.00	B	0.00	B	0.42	Y	0.28	G	0.61	R	0.46	Y
	29	14	0.04	B	0.09	B	0.00	B	0.00	B	0.45	Y	0.29	G	0.62	R	0.49	O
	30	15	0.08	B	0.23	G	0.00	B	0.00	B	0.48	O	0.31	G	0.66	R	0.48	O
十一月	31	16	0.07	B	0.11	B	0.00	B	0.00	B	0.48	O	0.35	Y	0.67	R	0.54	O
	32	17	0.07	B	0.15	B	0.00	B	0.00	B	0.48	O	0.36	Y	0.67	R	0.58	R
	33	18	0.05	B	0.12	B	0.00	B	0.00	B	0.48	O	0.37	Y	0.67	R	0.54	O
十二月	34	19	0.00	B	0.11	B	0.00	B	0.00	B	0.46	Y	0.37	Y	0.66	R	0.55	O
	35	20	0.00	B	0.06	B	0.00	B	0.00	B	0.45	Y	0.31	G	0.66	R	0.52	O
	36	21	0.00	B	0.07	B	0.00	B	0.00	B	0.45	Y	0.23	G	0.67	R	0.55	O
一月	1	22	0.00	B	0.07	B	0.00	B	0.00	B	0.45	Y	0.29	G	0.67	R	0.55	O
	2	23	0.00	B	0.08	B	0.00	B	0.00	B	0.46	Y	0.32	G	0.69	R	0.58	R
	3	24	0.00	B	0.12	B	0.00	B	0.00	B	0.44	Y	0.29	G	0.69	R	0.59	R
二月	4	25	0.00	B	0.04	B	0.00	B	0.00	B	0.41	Y	0.27	G	0.67	R	0.58	O
	5	26	0.00	B	0.05	B	0.00	B	0.00	B	0.43	Y	0.34	Y	0.69	R	0.66	R
	6	27	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.45	Y	0.33	G	0.77	R	0.69	R
三月	7	28	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.46	Y	0.30	G	0.81	R	0.75	R
	8	29	0.00	B	0.02	B	0.00	B	0.00	B	0.48	O	0.34	G	0.82	R	0.83	R
	9	30	0.00	B	0.01	B	0.00	B	0.00	B	0.52	O	0.39	Y	0.82	R	0.82	R
四月	10	31	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.45	Y	0.24	G	0.81	R	0.78	R
	11	32	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.35	Y	0.38	Y	0.79	R	0.74	R
	12	33	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.41	Y	0.17	B	0.78	R	0.62	R
五月	13	34	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.39	Y	0.37	Y	0.78	R	0.78	R
	14	35	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.41	Y	0.15	B	0.72	R	0.69	R
	15	36	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.42	Y	0.00	B	0.71	R

表 10 2000 至 2007 年水文年各旬乾旱預警模式驗證結果(續)

月別	旬別		2004				2005				2006				2007			
			模擬 ASR		推論 ASR		模擬 ASR		推論 ASR		模擬 ASR		推論 ASR		模擬 ASR		推論 ASR	
	日曆	水文	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.	Val.	Sig.
六月	16	1	0.57	O	0.40	Y	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.65	R	0.00	B	0.28	G
	17	2	0.35	Y	0.36	Y	0.00	B	1.00	R	0.00	B	0.16	B	0.00	B	0.32	G
	18	3	0.00	B	1.00	R	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.47	O
七月	19	4	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.21	B
	20	5	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.20	B
	21	6	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.15	B
八月	22	7	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.38	Y
	23	8	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	24	9	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
九月	25	10	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	26	11	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	27	12	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
十月	28	13	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	29	14	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	30	15	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
十一月	31	16	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	32	17	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.02	B	0.02	B	0.00	B	0.00	B
	33	18	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
十二月	34	19	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	35	20	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	36	21	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
一月	1	22	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	2	23	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	3	24	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
二月	4	25	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	5	26	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	6	27	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
三月	7	28	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	8	29	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	9	30	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
四月	10	31	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	11	32	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	12	33	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
五月	13	34	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	14	35	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B
	15	36	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B	0.00	B

擬過程中，定義未發生乾旱之歷程 ASR 為 0，而線性迴歸則可能在此部分推論為負值所致，而各旬模式驗證期八年內僅 2002 及 2003 年為枯旱年

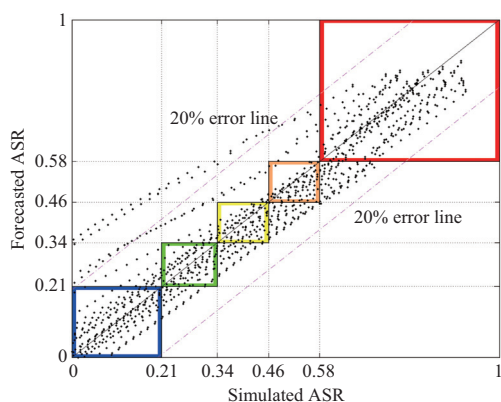


圖 6 水文年第 15 旬模式檢定推論結果散佈圖

(可參見表 10)。茲將負值的部分以 0 修正後重新計算檢定、驗證評鑑指標值，修正後結果同列於表 9 之右；模式檢定推論結果散佈圖，以水文年第 15 旬為例，如圖 6 所示。

鑑於水資源管理者或決策者需要知道推論指標對於實際情況的描述所可能隱含的風險，且「灌溉節水技術手冊」(莊光明與甘俊二，1995)中提到：「曾文、烏山頭水庫自十月至翌年五月間屬平水及枯水期，故以十月底兩水庫蓄水量作基準，計畫至一期水稻作後之灌溉，因此無種植後再行調整灌溉事宜。」，故本研究除整併 36 旬模式檢定推論結果進行預警燈號跳脫機率估算外，並單獨就十月底(水文年第 15 旬)模式檢定推論結果進行預警燈號跳脫機率估算，估算結果圖 7 及圖 8。以圖 7 為例，線性迴歸模式在 36 旬

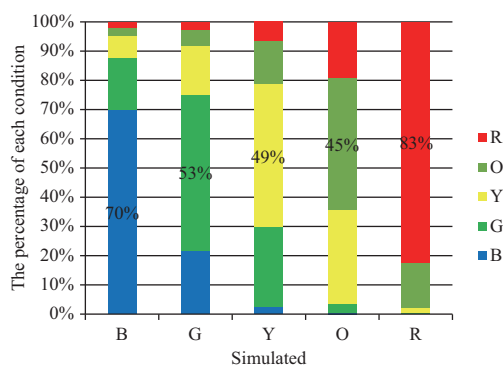
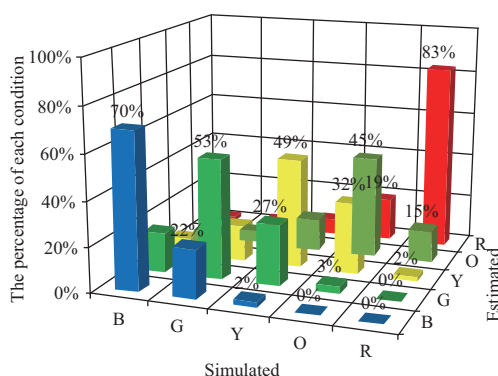


圖 7 定率模式檢定結果預警燈號跳脫百分比分布圖(36 旬模式綜合評估)

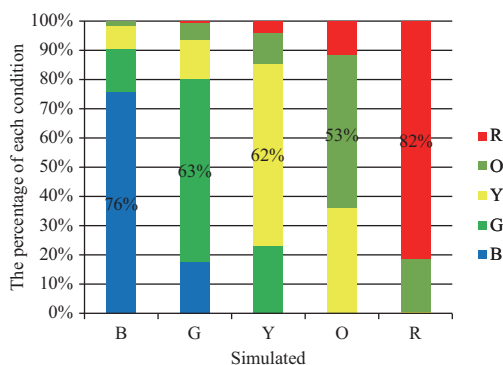
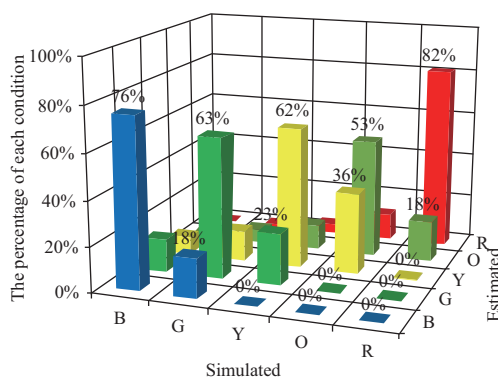


圖 8 水文年第 15 旬(十月底)定率模式檢定結果預警燈號跳脫百分比分布圖

整體的表現上，當實際(模擬)預警燈號為紅燈時，有 83% 為正確推論結果，而分別有 15% 及 2% 的結果為橙燈及黃燈；而 36 句模式綜合評估結果，藍、綠、黃、橙、紅各燈號各有 70%、53%、49%、45% 及 83% 的正確率。

在模式驗證結果部分，各句模式對水文年 2000~2007 各句的 DEWI(ASR)推論結果如表 10 所示。

四、結果與討論

4.1 模式檢定結果

本文分就水文年各句進行模式建置，就 36 句模式檢定表現而言，水文年前 8 句的推論能力相對較差；而第 10 到第 30 句則相對較好，模式檢定 CE 值皆達 0.8 以上。各句輸入、輸出變數間對應關係在這些時段中看似存在某種特性。

為評估模式整體推論結果是否與水庫進水量的統計特性有關，本文將表 8 中的模式檢定 CE 值與表 5 水庫入流量統計特性作一比較，其中，模式檢定 CE 值的趨勢與水庫進水量的標準偏差呈一定的相關，茲將模式檢定 CE 值與水庫進水

量的標準偏差同繪於圖 11。

由圖 11 可作一假設—「各句模式檢定評鑑結果與各句水庫進水量標準偏差呈現相關」，然在第 10~12 句，此假設並不成立，故再做另一推論—「模式檢定評鑑結果另與預警期間水庫供需間的特性有關」。為論證此一問題，本文作一簡單的供需特性統計比較：假設現有一水文年，其各句流量為模式建置資料(評估基期 1975-1999)各句的平均流量，模式建置資料各句的水庫入流量的平均值及最小值同各句需求水量繪於圖 12(A)。在沒有水庫的調節下，各句需求水量可由當句水庫入流量滿足的百分比繪於圖 12(B)，圖 12(B)中淺灰色部分為最小入流量與需求水量的比值，亦即各句需求水量可由最小流量滿足的百分比，而深灰色部分為各句需求水量可由句平均流量滿足的百分比；本文建置之定率推論模式係以五月底為目標預警期程，故將各句至水文年年末間，流量與總需求水量總和作一比值，結果繪於圖 12(C)。圖 12(C)中，以第 1 句為例，到水文年結束的總需求水量可由不調蓄的總假設平均入流量和滿足 55%，而可由期程間總最低流量合

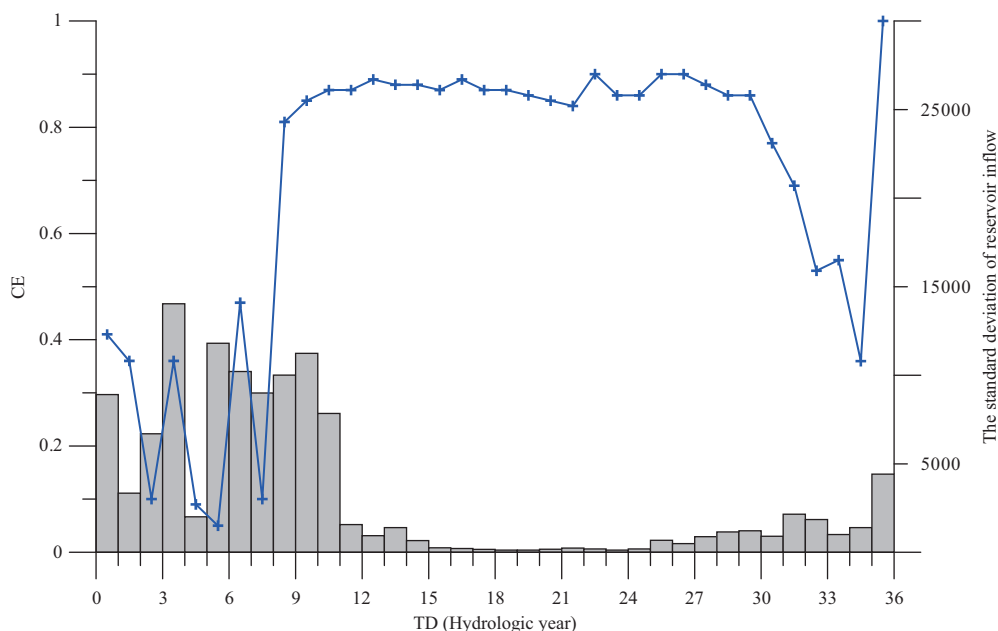


圖 11 各句模式檢定 CE 值與水庫進流量標準偏差比較對照圖

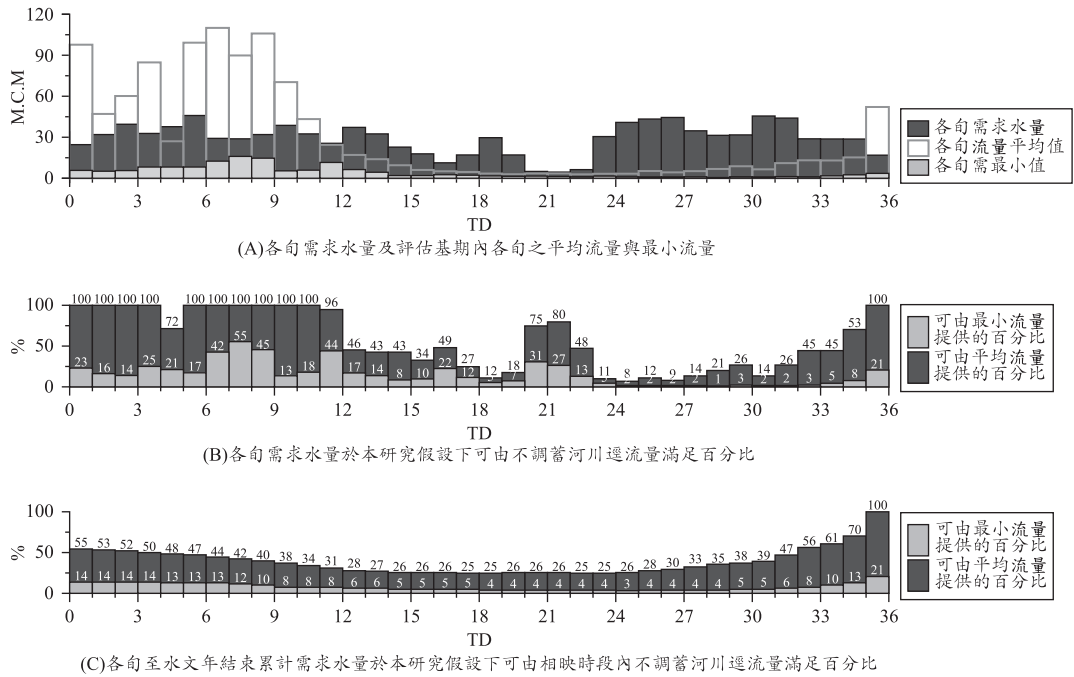


圖 12 曾文-烏山頭水庫系統年計畫需求水量水資源構成比評估分析比較圖(水文年)

滿足至 14%，而不能滿足部分則為至水文年年末間該供水系統的總需求水量在此一假設下依賴水庫調節的百分比。當然，平均流量發生於一水文年的機率是微乎其微，然圖 12(B)可顯示豐水季初期曾文-烏山頭水庫供水系統各旬的需求水量有相當高的機率可由不調蓄之河川逕流量所滿足。

由於本文所建構的定率模式主要基於各旬的水文資訊(降雨及逕流)及蓄水庫蓄水狀態對其之預警期程內的供水態勢(平均缺水率)進行預測推論，各因子對平均缺水率的推論可解釋為：當旬水文量相對歷史值的多寡，在系統既有蓄存水量下，由歷史紀錄反映出的缺水態勢期望值。在此一觀點下，對照圖 12(C)及模式表現，可解釋為：當預警期程內的總需求水量依賴水庫調節的成分相對較高時，未來逕流歷程不確定性對預警期程內平均缺水率的控制成分將相對較低，此一解釋可由表 8 各旬線性迴歸模式係數進行輔助說明，由表 8 可知，當使用線性迴歸模式就各評估旬預警期程的平均缺水態勢進行推論時，模式推

論的加權多重於指標因子—水庫蓄水率 S ，故當各預警期程內的平均缺水率與評估當旬的水庫蓄水狀態相關性愈高時，模式的解釋能力亦相對較高。此外，圖 12(C)亦可說明，在曾文-烏山頭水庫供水系統中，如果已經發生乾旱，在不對農業用水進行停供的狀態下，屆時對枯水季低流量的推估即便完全準確，對系統整體的供水調度助益將相對不大。

各模式的表現可概分為四段時期進一步探討：

1. 水文年第 1 旬到第 8 旬(日曆年六月上旬至八月中旬)

由於本文建構之預警模式係以當期之水文條件，就當下至枯水期結束時可能之缺水情勢進行推論，故除此一期間各評估時間預警期程相對較長，而未來水文歷程的水文不確定性相對較高外，乾旱預警的表現亦顯著受預警期程間水文序列之不確定影響。其中，由表 6 評估基期內(水文年 1975~1999)的水庫入流量及降雨量統計特性可知，由於此期間時處豐水季之颱風季節，水文

條件變異太大，當模式就指標因子對預警期程內的缺水態勢進行相關性建構時，模式推論的推論結果，亦將包含此一水文變異特性。

2. 水文年第 9 句到第 30 句(日曆年八月下旬至翌年三月下旬)

由於此期間的各預警期程，未來缺水態勢主控於蓄水狀態，亦即各預警期程的平均缺水率評估，在評估時間點水庫蓄水較不如預期量時，未來的供水態勢則相對容易呈現匱乏的狀態，而匱乏的程度，則主決於未來水庫進流量的多寡。然本文建置之定率乾旱預警模式，並未對未來水庫進水狀況加以預測，故僅可視為各句模式各指標因子組合，相對於歷史評估基期所呈現的期望平均缺水率，而在此期間，由於預警期程所包含的豐水期水文變異較少，且未來逕流歷程不確定性對預警期程內平均缺水率的控制成分相較於其他句別低，故模式檢定表現亦相對較好。

「灌溉節水技術手冊」指出—曾文-烏山頭水庫自每年十月至翌年五月間屬平水及枯水期，故以十月底兩水庫總蓄水量作基準，計畫至一期水稻作後之灌溉，因此無種植後再行調整灌溉之事宜。而本文所建構之定率乾旱預警模式在此一時刻(水文年第 15 句，日曆年十月下旬)之檢定的 CE 值可達 0.88；各預警燈號檢定結果如圖 6 所示，大部分預警燈號皆落在相鄰兩區間內，在未來水文歷程未知的情況下，模式在此句的表現成效堪稱良好。

3. 水文年第 31 句到第 35 句(日曆年四月上旬至五月中旬)

於此期間，因已漸入豐水季，故水庫進水量的變異程度有增加之趨勢，對於水庫操作至預警目標時刻(枯水季結束，五月下旬)的缺水態勢，在建模過程中，除水庫蓄水量外，此時期的水庫進水流量亦將加重影響平均缺水率(ASR)的推論輸出，故此段同水文年前 8 句之特性，模式所能解釋之枯旱趨勢隨水文序列變異程度的增加而減少。

4. 水文年第 36 句(日曆年五月下旬)

本句句末即為預警目標時刻，句初之水庫蓄水直接影響 ASR 的推論表現，故本句之檢定表現

為所有 36 句的模式中最優者；然就時效而言，此時模式推論結果為「乾旱與否」而非「預警」。

4.2 模式驗證結果

由於本模式係根據實際模擬之平均缺水率，以修訂之指標因子進行模式建構，模式參數取得係根據實際迴歸結果，並非人為經驗，故可進一步提供燈號預警正確與否的潛藏風險(反推模式推論結果與 ARS 模擬結果的關係)。

為比較本文所建置之定率乾旱預警模式在豐、平、枯水文年的推論能力，茲就本文用以驗證的 8 年水文年，以驗證各年水庫總入流量減去並除以評估基期各年(1975-1999)總入流量的平均值及標準差後所求得的 Z 值(Z score)，作為定義驗證年屬豐、平、枯的判斷標準，計算結果如圖 13 所示。

根據圖 13，本文以水文年 2006 年為豐水年的代表、以水文年 2001 年為平水年的代表、以水文年 2002 及 2003 為枯平水年的代表，進行模式驗證結果的比較。由於曾文-烏山頭水庫系統可能進行限水措施的時段係在日曆年十月至一月間(水文年第 13~24 句)，故將豐、平、枯水年於此一時段間的推論結果整理於圖 14 中進行比較。

由圖 14 可知，於水文年 2001~2006 曾文-烏山頭水庫系統進行限水措施的評估的時段，本文以預警期期間模擬而得的平均缺水率定義乾旱潛勢的結果，僅枯水年 2002 及 2003 呈現缺水的狀態，此一結果與實際乾旱趨勢相符。

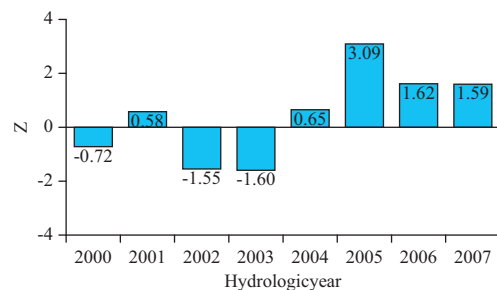


圖 13 水文年 2000~2007 曾文-烏山頭水庫系統年總入流量相對於評估基期(水文年 1975-1999)之 Z 值

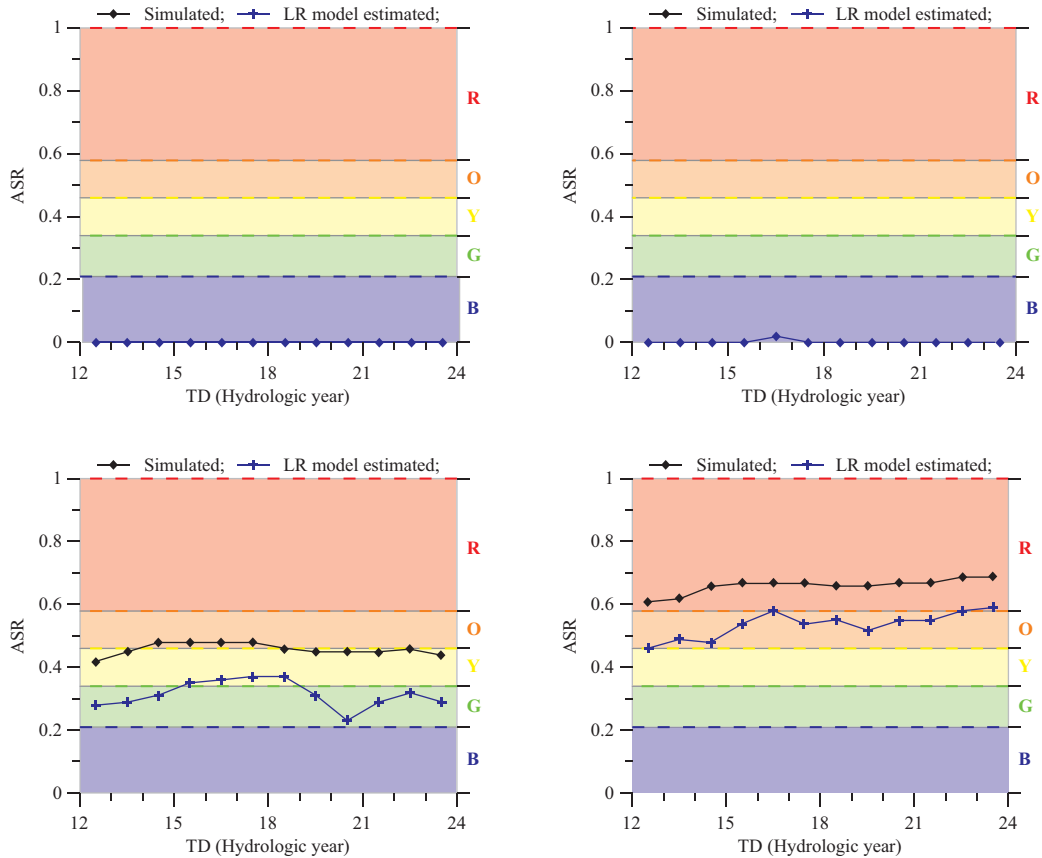


圖 14 DEWI 推論系統於豐、平、枯水文年的推論能力比較

整體而言，本文建置之各定率乾旱預警模式，在曾文-烏山頭水庫可能進行限水措施的時段，皆可根據歷史紀錄就各評估時間對期望缺水態勢做出適切推論；而在不考量預警期程內水文不確定的情況下，模式率定過程可能產生的預警等級(燈號)的錯估的風險可由建模過程進行瞭解。就功能性而言，在目前所有定率推論模式仍未能適切考量未來水文不確定性的情況下，本文建置之各定率乾旱預警模式，可較既有之定率乾旱預警方法提供較為客觀的評估結果。

4.3 DEWI 與 WEWI 系統比較

茲就本文建置之定率乾旱預警系統與「臺灣地區水資源水情決策支援系統建置計畫總報告」中提及之 WEWI 於曾文-烏山頭水庫的建置結果

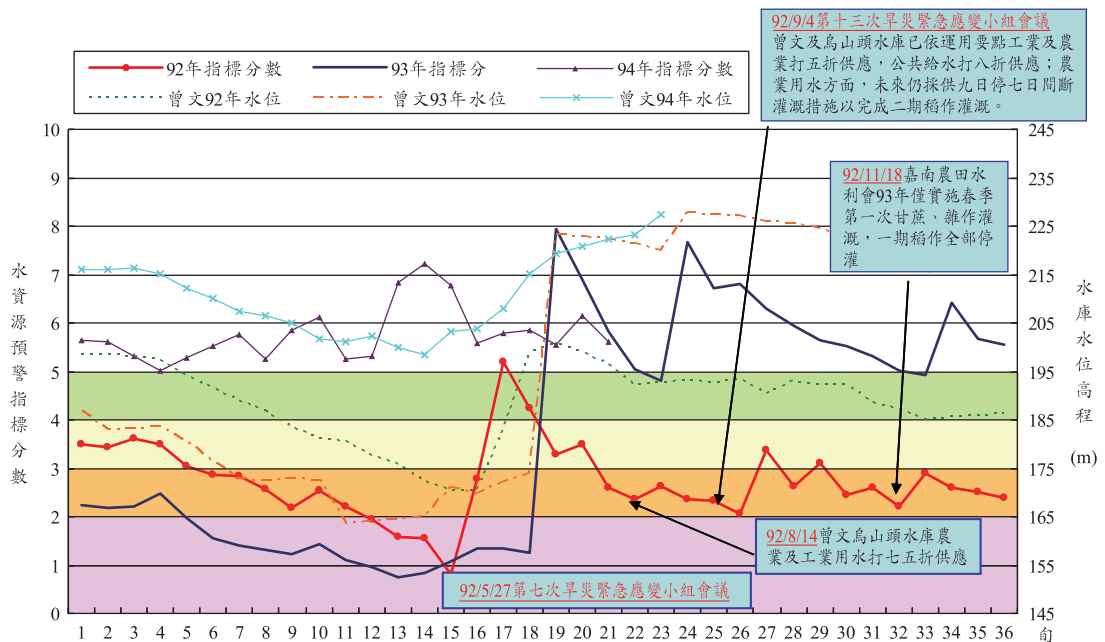
(中興工程顧問股份有限公司，2007)進行比較。曾文-烏山頭水庫供水系統 WEWI 推論模式各主、次指標權重如表 11 所示；WEWI 推論系統供需情勢分級與乾旱預警指標分數對應關係如表 2 所示；模式就曾文水庫民國 92~94 年水資源預警指標分數變化如圖 15 所示。

由表 11 可知，WEWI 根據指標因子與歷史紀錄於其乾旱等級定義的得分區間，將全年的模式建置分為豐、枯水期兩套主次指標權重，其中，中央氣象局之季長期氣象展望的主指標權重，相較於 WEWI 於曾文-烏山頭水庫供水系統所考量的其他指標因子為低，此係因大氣系統非為定率性型態，而該預報結果非為天氣型態之「必然」，故採線性加權方式使用該資料，將因其特有之不確定性造成推論結果不可預期的擾

表 11 曾文-烏山頭水庫供水系統 WEWI 推論模式各主、次指標權重

主指標	未來氣象展望		降雨量		河川川流量		水庫進水量		水庫蓄水率		可供水 日數	地下水 水位
代號	α^{Ma}		β^{Ma}		χ^{Ma}		δ^{Ma}		ϕ^{Ma}		φ^{Ma}	γ^{Ma}
豐水季	10%		10%		0%		50%		30%		0%	0%
枯水季	5%		5%		0%		30%		60%		0%	0%
次指標	次指標 因子 1	次指標 因子 2	次指標 因子 1	次指標 因子 2	次指標 因子 1	次指標 因子 2	次指標 因子 1	次指標 因子 2	次指標 因子 1	次指標 因子 2	---	---
代號	α_1^{Mi}	α_2^{Mi}	β_1^{Mi}	β_2^{Mi}	χ_1^{Mi}	χ_2^{Mi}	δ_1^{Mi}	δ_2^{Mi}	ϕ_1^{Mi}	ϕ_2^{Mi}	---	---
豐水季	55%	45%	20%	80%	50%	50%	30%	70%	5%	95%	---	---
枯水季	55%	45%	20%	80%	50%	50%	30%	70%	5%	95%	---	---

資料來源：「臺灣地區水資源水情決策支援系統建置計畫總報告」(中興工程顧問股份有限公司，2007)



資料來源：「臺灣地區水資源水情決策支援系統建置計畫總報告」(中興工程顧問股份有限公司，2007)

圖 15 曾文水庫民國 92 年迄 94 年水資源預警指標分數變化圖

動，而該擾動將與賦予的權重成正比。

就其模式「建構結果」而言，茲將圖 15 改採水文年表述的方式，改繪於圖 16，並就本文建置定率乾旱預警模式於其模式「建置評估」時段之「驗證推論」結果，整理於圖 17。由圖 16 與圖 17 的比較，就乾旱等級值域區間的定義方式而言，DEWI 與 WEWI 恰好相反，DEWI 以缺水的多寡定義乾旱等級，缺水高者等級較為嚴重；而 WEWI 則以供水影響因素加權結果定義乾旱

等級，概念上係就現況水文分量相對多寡進行乾旱級別判定，以現況水文分量相對較低者為較為嚴重之級別；就推論結果屬性而言，圖 16 為 WEWI 模式「建置」結果，而圖 17 為 DEWI 模式「驗證」結果。「臺灣地區水資源水情決策支援系統建置計畫總報告」中，附 6-41 頁提及：「建議定期另案檢討預警之準確性」，故可言 WEWI 仍未就其模式建置結果進行客觀的可行性評估。反觀定率 DEWI 推論模式的「驗證結

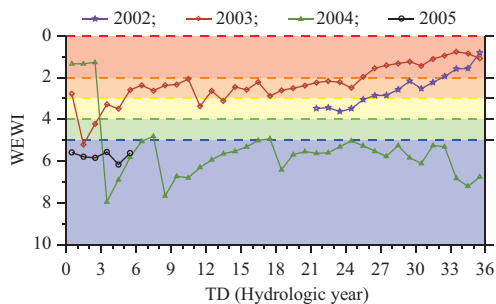


圖 16 WEWI 系統之 WEWI 值

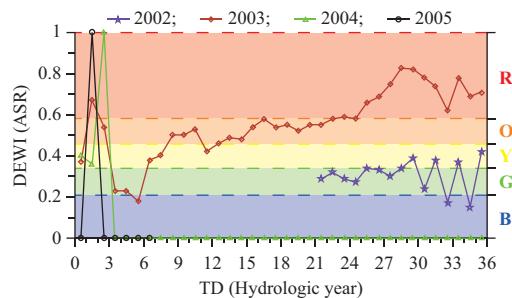


圖 17 DEWI 系統各旬模式推論之 ASR 值

果」，雖模式在評估時刻水文變異及未來水文不確定性較高之時段，模式推論值與實際模擬值的差異偏大，然此係定率推論模式就既有水情資訊(不包季天氣展望資料)下在歷史紀錄下對平均缺水率期望值推論的結果，其推論偏估為定率模式在未來水情資訊力有未逮的情況下所致，故屬合理範圍；而實際曾文-烏山頭水庫系統進行限水措施的評估時段(水文年第 13~24 旬)，大部分模式在水文不確定下的推論結果，堪稱良好，且有建模率定結果可提供決策者預測品質的誤差範圍，故就功能性而言，本文建置之定率乾旱預警模式部分，即足以取代 WEWI 推論模式。

4.5 水資源乾旱預警模式及系統分析

定率模式在不探究未來水文不確定性的情況下，其推論結果可視為模式就評估當下水庫蓄水量及水文相對量，就歷史紀錄呈現的 ASR 期望值。當線性迴歸模式考慮為不加常數項時，即以類似 WEWI 系統架構進行 ASR 的推論時，則難以就期望缺水態勢進行推論。此外，就本文定率模式建置結果，就「可視」的各指標因子係數(線性迴歸模式)而言，各旬指標因子對未來可能出現的缺水態勢，在各旬推論模式上，相對關係並不一致。故以單一規則就所有評估時間進行乾旱潛勢的推論，並不適切。而若要以各指標因子的狀態區間進行評分再續行加權，則因各評估時間面對的供水情勢及水文不確定性不同，需就各評估時間對各指標因子定義適切的狀態區間與乾旱情勢的對應關係，不能以同一標準區分狀態；且

各指標因子對未來缺水情勢可提供資訊的能力不一，除上述狀態區間定義外，亦應就相對權重進行評估。故定率水資源乾旱預警模式的建置，應在「適時、適地」的原則下，在定義各供水系統「水資源乾旱預警」應評估的指標因子、預警期程及乾旱等級後，再行評議定率乾旱預警模式的建置方式。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 就水庫可調蓄供水及操作方式與各水資源調度區之供需特性而言，並不存在通用之乾旱等級判定標準；就單一水資源調度區而言，欲判斷至未來某一時間可能發生之缺水情勢，於各旬預警所需參考之最適水文因素與可用水量資訊並不盡相同，故於水資源時、空變異下，亦不存在通用之乾旱預警模式，而需對各旬獨立進行建置。
2. 就水資源供水系統而言，適切的早期預警，有助於抗旱策略的制訂。本文以平均缺水率作為乾旱缺水指標，指標值本身意義明確，並依水資源系統供水特性定義預警期程及乾旱等級區間，可明確顯示各預警期程的缺水型態並予相關反應機制作連結，供作水資源乾旱預警參考。
3. 本文修正並選用部分 WEWI 系統所提出的指標因子，對現況至枯水季結束的可能乾旱表徵(ASR)進行預測，由檢定及驗證過程，可提供指標因子推論值(即 ASR)及實際狀況推論誤差

的風險。此一乾旱預警流程可提供決策者一統一的標準進行乾旱特徵的推論，並提供較為適切之推論結果供抗旱策略擬定之用。

4. 本文建構之乾旱預警模式案例，可供曾文-烏山頭水庫系統於每年的 11 月間，做一期作水稻之休耕面積的計畫決策參考。

5.2 建議

1. 就定率乾旱預警模式使用的指標因子而言，目前水利署建議的指標因子，存在相當多的重複資訊，未來就定率乾旱預警模式的建置，應在「適時、適地」的原則下，先行評估、議定各預警時刻最適切的指標因子，避免多餘的輸入資訊干擾模式推論的結果。
2. 本研究建置的水資源乾旱預警系統雖然在實際應用上可提供較為完整的評估資訊，然實際抗旱政策的施行上，由於水資源乾旱並非為單一的缺水問題，決策單位應就各供水區的用水結構與社會經濟影響進行通盤的考量，因地制宜的制訂抗旱策略。
3. 由於氣候變遷所造成的水文不確定性在未來應進一步討論。然氣候變遷的預報對集水區影響評估的研究，目前仍礙於大氣環流模式(GCMs)預測尺度及空間降尺度等因素。因此本文建議或可由未來可能降雨水量之機率分佈，搭配中央氣象局發佈之「未來氣象展望」，就可能水文量進行評估描述，續據以為評估預警可靠度之參考。

參考文獻

1. 中興工程顧問股份有限公司，「臺灣地區水資源水情決策支援系統建置計畫總報告」，經濟部水利署，2007。
2. 林真真、鄒幼涵，「迴歸分析」，華泰書局，pp. 39-52，2003。
3. 莊光明、甘俊二，「灌溉節水技術手冊」，農委會水利特刊，行政院農業委員會，臺北市七星農田水利研究發展基金會，1995。
4. 許晃雄，「建立乾旱監測與預警整合系統之構想」，全球變遷通訊雜誌，第 37 期，pp. 22-27，2003。
5. 淡江大學，「旱災災害防救業務與應變機制檢討之研究」，經濟部水利署，2012。
6. 萬象、廖元熙、張文綺，「應用乾旱指標於乾旱管理之研究」，第十一屆水利工程研討會，臺北，pp. O67-O72，2000。
7. 楊湘鈞、朱婉寧、藍凱誠、蔡政諺、王昭月，「立院拍板 6 年 540 億救南部曾文南化烏山頭 3 水庫」，聯合報，2010。
8. 經濟部水利署，「區域水資源調度機制」，92.10.08.行政院核定版，2003。
9. 經濟部水利署，「旱災災害防救業務計畫」，中央災害防救會報第 11 次會議核定版，2009。
10. 監察院，「第○九一二二○○二八五號糾正案文」，2002。
11. 羅樹孝，水文學辭典，茂昌出版社，1995。
12. Alley, W. M., "The Palmer drought severity index: limitations and assumptions", *Journal of climate and applied meteorology*, Vol. 23, pp. 1100-1109, 1984.
13. Cuddy, S., Letcher, R., Chiew, F.H.S., Nancarrow, B.E. and Jakeman, T., "A role for streamflow forecasting in managing risk associated with drought and other water crises", Drought and water crises: science, technology and management issues, Taylor & Francis, Boca Raton, pp. 345-365, 2005.
14. Fowler, H.J. and Kilsby, C.G., "A weather-type approach to analysing water resource drought in the Yorkshire region from 1881 to 1998", *Journal of Hydrology*, Vol. 262, No. 1-4, pp. 177-192, 2002.
15. Hayes, M.J., *Drought indices, What is drought?*, National Drought Mitigation Center, 2006.
16. Heim, R.R., "A review of twentieth-century drought indices used in the United States", *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8, pp. 1149-1165, 2002.
17. Huang, W.C. and Chou, C.C., "Drought early warning system in reservoir operation: theory

- and practice”, Water Resour. Res., Vol. 41, W11406, 2005.
18. Iglesias, A., Garrote, L. and Cancelliere, A., “Guidelines to develop drought management plans”, Coping with drought risk in agriculture and water supply systems, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 55-65, 2009.
 19. Kallis, G., “Droughts”, Annual review of environment and resources, Vol. 33, No. 1, pp. 85-118, 2008.
 20. Karamouz, M. and Vasiliadis, H.V., “Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecasts”, Water Resour. Res., Vol. 28, No. 5, pp. 1221-1232, 1992.
 21. Keyantash, J. and Dracup, J.A., “The quantification of drought: an evaluation of drought indices”, Bulletin of the American meteorological society, Vol. 83, No. 8, pp. 1167-1180, 2002.
 22. Murphy, A.H., “What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting”, Weather and Forecasting, Vol. 8, No. 2, pp. 281-293, 1993.
 23. Nicholls, N., Coughlan, M.J. and Monnik, K., “The challenge of climate prediction in mitigating drought impacts”, Drought and water crises: science, technology, and management issues, Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.
 24. Saidy, D., “Early warning and response”, International Journal for African Studies 2, <http://www.brad.ac.uk/research/ijas/ijasno2/saidy.html>, 1997.
 25. USISDR, Drought risk reduction framework and practices: contributing to the implementation of the hyogo framework for action, International Strategy for Disaster Reduction, 2007.
 26. Vlachos, E. and James, L.D., “Drought impacts”, Coping with droughts, Water Resources Publications, Littleton, Colo., 1983.
 27. Wilhite, D.A. and Glantz, M.H., “Understanding the drought phenomenon: the role of definitions”, Water International, Vol. 10, No. 3, pp. 111-120, 1985.
 28. Wilhite, D.A., “Planning for drought: a process for state government”, IDIC Technical Report Series 90-1, NE: International Drought Information Center, University of Nebraska, Lincoln, 1990.
 29. Wilhite, D., Svoboda, M. and Hayes, M., “Understanding the complex impacts of drought: a key to enhancing drought mitigation and preparedness”, Water Resources Management, Vol. 21, No. 5, pp. 763-774, 2007.
 30. Wilhite, D.A., Drought and water crises: science, technology, and management issues, Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.

收稿日期：民國 102 年 9 月 10 日

修正日期：民國 102 年 12 月 3 日

接受日期：民國 103 年 2 月 7 日