

# 利用適應性模糊推論系統建置乾旱預警指標

周乃昉<sup>1</sup>                      陳柏蒼<sup>2</sup>  
副教授                          博士生  
國立成功大學水利及海洋工程學系

## 摘 要

「區域水資源調度機制」[8]中，明訂各區域水資源局應依各水資源調度區之氣象、水文、水源及供需特性等條件背景，建立合宜之水資源預警指標(water resources early warning index, WEWI)，並建議以各主、次指標因子所屬值域區間進行評分；然於水資源時、空變異下，不易且不宜以人為試誤方式，定義不同操作時間及各資訊分量所需之切割水準；此外，欲判斷至枯水季結束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，在特定水文條件下，其彼此間之關係傳遞著未來乾旱潛勢的警訊。

本文以正常供水的預期缺水率來建置乾旱預警指標(drought early warning index, DEWI)，並將之具分為五個等級，再利用適應性模糊推論系統(Adaptive Network based Fuzzy Inference System, ANFIS)，建立採用之指標因子與未來缺水潛勢之關係。本文建構之乾旱預警模式，在曾文-烏山頭水庫系統的應用上確能有效區分乾旱等級，於實際應用驗證上，亦表現良好，並能提供預警風險之參考。

關鍵字：乾旱預警指標、適應性模糊推論系統

## 一、前言

由於台灣地區特殊的地理環境與氣候特殊，水資源之利用端賴於水源的蓄豐濟枯手段，水資源之調配利用，受豐水季水利設施蓄水情形影響甚鉅，當可供使用水量不敷人類活動所使用而發生缺水時，不但影響民生、農業，更是直接衝擊國家經濟之發展，嚴重程度則隨人口與產業的增加而驟增。

而在既有水源操作情況下，為滿足各時段的用水需求，當未來可能發生嚴重缺水情況時，利用操作的手段提早限水，期以少量缺水過程，來避免豐水季來臨前，更嚴重的缺水甚或空庫所帶來的嚴重災害。無論是水資源工程開發規劃、抑或乾旱程度的控制，所憑藉者，蓋一適於當地氣候、水文及人文活動之乾旱指標，藉顯示不同等級程度的門檻或分界值，作為工程人員工程規劃的依據及進行合宜水量調配操作參考的標準。是此，發展合宜之乾旱預警系統確有其必要性。

本文利用系統之預期平均缺水率配合「旱災災害防救業務計畫」之精神，區分枯旱預警燈號，並以之建立 DEWI，串接預警指標與枯旱預警燈號。在考量各旬水文因素與可用水量資訊所能提供之預警訊息互異，以及參考因子間值域大小交互關係所可能傳達的乾旱警訊，利用適應性模糊推論系統(Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System, ANFIS)界定各旬之變量區間，進行各旬乾旱預警指標之推論。

## 二、文獻回顧

Vlachos、Douglas(1983)[4]指出乾旱本身為非事件(non-event)，亦即其之發生無一明確起始或終了時刻，並無明顯前期氣象特徵，可以事前預防來降低災害的衝擊，因此世界各國依其國情發展為數相當的缺水指標(shortage index)來進行乾旱的描述，並試圖發展乾旱預警系統，做為施行相關因應措施之參考。

民國 92 年 10 月 8 日行政院核定頒佈「區域水資源調度機制」，其中明文確立於乾旱預警之際，所需採行之七個因子，其分別為未來氣象展望、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，中興公司之「旱災防救決策支援系統」即採行該機制所明定之七項因子，惟其之應用，係以人為主觀評分，續行各主次指標權重項試誤調整，除悖於監察院提出之乾旱預警原則-「減少人為判斷時，因身能極限衍生之誤差」[9]外，權重之訂定亦明顯重於水庫蓄水狀態偏水庫規線目前所處情況；在該系統之預警能力與預警風險無法探究的情況下，除預警之效為多方所質疑外，能提供之資訊亦難以為相關單位所應用。因此，雖官方已頒佈預警所應考量之因子，並初步建議評分方法，但國內學者仍試圖開發更為適用之預警系統，惟亦多以權重加權為之(萬、黃 1999)[7]；黃(1999)[7]採入庫逕流及水庫蓄水兩因子，以模糊變換加權法，進行模糊綜合評估[10]，黃續於(2004)[6]提出累計各等級加權後之隸屬度，以其累計過程大於原先設定之門檻值所處累計位置，判為所屬乾旱等級，在主觀設定隸屬函數、權重以及採決門檻下，人為操作色彩亦相當濃厚。

以類似於 PDSI、SWSI[1]權重加權方式，就現行

旱象種類進行綜合加權，評估該區之旱象，一般多用於旱象監測卻無預警之意；水利署制訂區域水資源調度機制之目的在於「建立各水資源調度區之水資源供需預警指標，並據以啟動適當水資源調度措施，以達到災前預警、適時應變之目標」，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，採統一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，更有難以獲致正確合理的預警指標。

### 三、研究方法與理論

#### (一)研究方法

鑑於各標的用水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，再就此缺水潛勢進行枯旱程度之等級區分，進而建立枯旱預警燈號，續與選定之指標因子進行推論模式之建立。

#### (二)評估指標設計

一般常見之乾旱指標，就供需層面而言，可分為單純探討供給面、反應氣象或水文量相對量大小的乾旱指標；以及合併考量需求面、反應特定需求下的缺水特徵指標。台灣地區大部分用水多賴於水庫系統進行蓄豐濟枯的調節，再因地區發展迅速，各標的用水需求急遽攀升，乾旱與缺水的危機處理隨之浮上檯面，所關心的層面儼然已在水量的供需利用及社經影響上聚焦。

為求指標本身能反應供給面與需求面，本文實際考量水庫運用原則，進行枯旱程度等級之區分，進而建立之乾旱預警模式及推論之燈號，並將各旬可能之缺水率與不同之水源指標因子進行模式建構，以其結果作為水庫運用之乾旱缺水指標。

##### 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 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、次要指標因子建立 WEWI。就「監測」而言，需要多樣化、不同型式的資訊比較，以反應不同層面資訊的變化，提供決策者評估參考的依據，以利相關反應政策的擬定；而預警與監測相異之處在於預警需探究未來水文序列之不確定性，評估水文過程對特定水資源調度區可能造成之缺水程度，甚至乾旱的影響。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，採統一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，更有難以獲致正確合理的預警指標。故本文嘗試在「區域水資源調度機制」與「減少人為判斷時，因身能極

限衍生之誤差」兩造原則下，選擇乾旱預警所使用之指標因子，藉以建立合宜之乾旱預警指標評估模式。

本文以「區域水資源調度機制」建議之各項指標因子就水資源調度區之氣象、水文、水源及供需特性等條件背景，排除具尺度問題之「未來氣象展望」、難以客觀描述之「水庫蓄水率」後及具相當重複資訊之因子項後，本文所研擬之乾旱預警指標所採用的評估指標因子項如下所示：

- (1)降雨量：當時之降雨量與歷年當期平均降雨量之比值。
- (2)水庫進水量：當時平均進水量與歷年當期平均進水量之比值。
- (3)水庫蓄水率：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。

##### 2. 平均缺水率 (Average Shortage Rate, ASR)

乾旱預警之目標為掌握最嚴重之缺水情況，故在蓄水利用期間，當可供水量不敷計畫需求時便發生缺水，為了避免發生空庫後完全缺水並減緩缺水衝擊，宜將預期的缺水量平均分配到未來各旬，以防止空庫發生。

對水庫供水系統而言，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，但當發生水庫空庫，表示供水量不敷需求而發生缺水。基於缺水時段可能不連續及非唯一，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。平均缺水率之計算，以單一水庫之蓄水利用為例，敘述如下：

平均缺水率之計算，以單一水庫之平均缺水率之計算為例，如蓄水利用過程中僅單一時段連續缺水，其平均缺水率表示如式(1)；倘若發生多段非連續性的間歇缺水，應在蓄水可調節之時期內調節所有可減輕之缺水，計算如式(2)。

$$ASR = \frac{a}{D_x} \quad (1)$$

$$ASR = MAX \left[ \frac{a}{D_x}, \frac{b}{D_y}, \frac{c}{D_z}, \dots \right] \quad (2)$$

式中：

$a$ 、 $b$ 、 $c$  分別為由模擬開始至  $x$ 、 $y$ 、 $z$  旬之缺水量； $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  分別為由模擬開始至  $x$ 、 $y$ 、 $z$  旬之總計畫需水量。

##### 3. 水庫供水系統預警期程設計

本研究主對現況至當年枯水期結束(5 月底)的用水情勢進行預警分析，在旬操作之水庫蓄水利用過程下，於枯水期結束保留 4000 萬噸水量，配合歷史入流量資料及需求水量，求得水庫之缺水率。

##### 4. 乾旱程度等級區分建置

為有效進行乾旱管理，通常需界定適當之乾旱指

標與指標門檻值範圍以代表區域乾旱指標，作為在乾旱各階段實施應變措施之依據。本研究主要之目的為建立含有乾旱指標及指標門檻值之乾旱預警系統，期能及早發現進而提出因應對策，將損害減至最低。

水利署「旱災災害防救業務計畫」[5]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(詳表 1)，參照該等級之區分及反應旱災情勢之缺水率，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。

對水庫水源系統而言，可以實際可供水總量與計畫供水量比值之供水率或缺水率區分各枯旱預警燈號。以曾文-烏山頭水庫系統為例，對各標的檢討不同程度的合理限水標準後，缺水率可計算如下式：

$$\text{缺水率} = 1 - (\text{計畫供水量} \times \text{劃分各標的之供水百分比}) / \text{計畫供水量} \quad (3)$$

再據以劃分各燈號區間等級，如表 2 所示，各燈號等級區間上、下限如表 3 所示。

表1 旱災災害防救業務計畫旱災等級區分

類別 等級	公共給水 (15 個分區)	農業給水 (17 個農田水利會灌區)
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%	

表2 曾文-烏山頭系統各標的用水燈號等級區分表

類別 等級	民生用水 (年計畫 1.2 億噸)		工業用水 (年計畫 0.27 億噸)		農業用水 (年計畫 9 億噸)		實供情形 (10.47 億噸)		缺水 率
	供水率	分界	供水率	分界	供水率	分界	實供	供水率	
藍燈	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0~0.75	0.75	8.22 億噸	0.79	0.21
綠燈	1.0~0.9	0.9	1.0~0.9	0.9	0.75~0.625	0.625	6.948 億噸	0.66	0.34
					0.625~0.5	0.5	5.676 億噸	0.54	0.46
黃燈	0.9~0.8	0.8	0.9~0.8	0.8	0.5~0.375	0.375	4.404 億噸	0.42	0.58
					0.375 以下	0.7 以下			
橙燈	0.8~0.7	0.7	0.8~0.7	0.7					
紅燈	0.7 以下	0.7 以下							

表3 各預警燈號對應缺水率預警值區間

燈號	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

### 5. 乾旱指標方法建立

本文調整乾旱預警所使用之指標因子，建立較為合理之乾旱預警指標評估模式。

水庫為調節河川水量以敷人類活動需求之水工構造物，故就水庫系統而言，乾旱所直接反應的為人類需求水量的滿足與否，故探討水庫旱象的預警，除應兼顧氣象、水文的脈動外，亦應同時考量到供給面的狀況，「區域水資源調度機制」亦有相同的要求；本文選用之降雨量及水庫進水量因子即具「氣象、水文」之意，而水庫蓄水情形，反應的是當下的量於預警期間內可供給的時間，故亦兼具一定程度的供給層

面考量；基於各旬水文條件並不相同，各變量因子於預警期距內，所能提供之水文資訊亦不相同，故本文將分就各旬進行模糊推論系統之建構，而於各旬評估乾旱程度之際，相同定義的評估因子，其大小並不易由人為所界定，又各因子的權重組合更難以客觀定義之，故本文以具備類神經網路自我學習特性的適應性模糊推論系統(ANFIS)進行模式的建構，藉其學習的能力調整各因子值域內，界定區間之隸屬函數，並調整權重至適當值。

### (三)理論分析-適應性模糊推論系統(ANFIS)

適應性模糊推論系統(Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System, ANFIS)在 1993 年由 Jang[2] 所提出(Jang, 1993)，其為結合 Fuzzy 與 NN 的模糊推論(Fuzzy Inference System, FIS)系統。模糊推論系統以模糊 If-Then 規則，將人類知識(knowledge)於變量區間界定與推論過程(reasoning processes)執行定性描述與分析，然並無準確的定量分析與適切的數值校正；而類神經網路雖具有極佳的自我學習(learning)能力與組織能力，卻缺乏定性知識的處理與邏輯推論過程，是以 ANFIS 組織模糊推論系統與類神經網路，結合兩種演算法的特性，發揮其互補之作用，使其具備模糊推論系統對於系統不確定性(uncertainty)與不精確性(imprecisely)的處理能力，並能藉由類神經網路發揮自我學習與組織能力，進行模式參數調整。

茲以具兩輸入值(x, y)，及一輸出值(z)之模糊推論系統為例，簡述其架構如下[3]：

一階模糊 Sugeno 模式設定 if-then 規則如下所示：

$$\text{Rule 1: If } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1, \text{ then} \quad (4)$$

$$f_1 = p_1x + q_1y + r_1$$

$$\text{Rule 2: If } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2, \text{ then} \quad (5)$$

$$f_2 = p_2x + q_2y + r_2$$

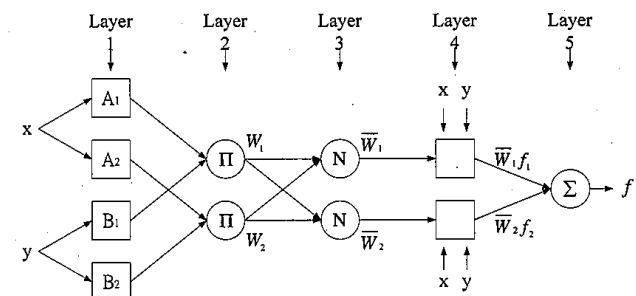


圖 1 適應性模糊類神經推論系統架構圖

第一層(輸入層)：將輸入變數映射至模糊集合，以設定之隸屬函數估算其隸屬度，如下式所示：

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \text{ for } i=1,2$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), \text{ for } i=3,4 \quad (6)$$

其中  $O_{1,i}$  為對應模糊集合之隸屬度，式中

$$\mu_{A_i} = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}}, \quad \mu_{B_{i-2}} = \frac{1}{1 + \left| \frac{y - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}}, \quad \{a_i, b_i, c_i\} \text{ 為鐘}$$

型隸屬函數的參數。

第二層(規則層)：進行變數間模糊邏輯規則之先決條件配對，利用T-norm乘積運算，計算各規則之權重值(firing strength)：

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y), i=1,2 \quad (7)$$

第三層(權重平均)：各節點計算該規則相應之所有規則權重比例。

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i=1,2 \quad (8)$$

第四層(邏輯推論層)：

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), i=1,2 \quad (9)$$

{ $p_i, q_i, r_i$ } 爲此之邏輯推論參數(consequent parameters)集合。

第五層(輸出層)：將前層訊息加總推論輸出變數值。

$$O_{5,1} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (10)$$

### 三、模式建立與應用

#### (一)研究區概述

本文以台灣南部地區曾文-烏山頭多目標水庫系統爲例，地理位置圖如圖 2 所示。曾文水庫位於曾文溪上游之柳藤潭峽谷，爲一多目標水庫，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爲原則。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，水庫有效蓄水容量爲 6 億 1,253 萬噸。

烏山頭水庫爲一離槽水庫，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，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。

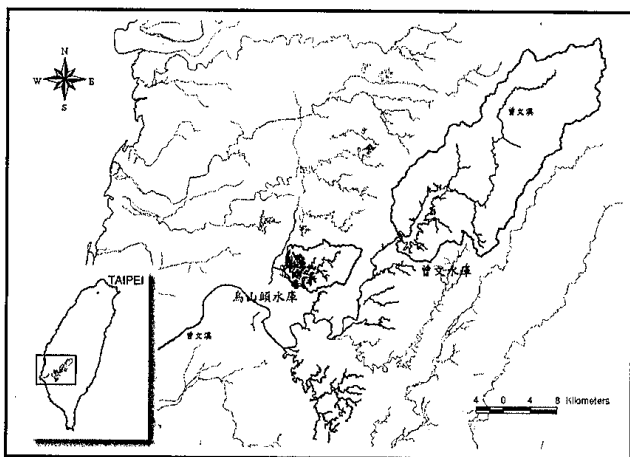


圖 2 曾文-烏山頭水庫系統地理位置圖

#### (二)研究資料處理

本文取 1975~2002 年曾文-烏山頭聯合運轉營運資料進行模式建置與驗證，由於曾文-烏山頭水庫系統係年用型水庫，其以六月初爲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旬次(例如：以日曆年旬次第十六旬爲水文年第一旬，於此類推)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，另以 2000 至 2002 水文年之水文過程進行模式成效驗證。

#### (三)評鑑標準

##### 1. 效率係數(Coefficient of Efficiency, CE)

$$CE = 1 - \frac{\sum (sim_{t,t} - est_{t,t})^2}{\sum (sim_{t,t} - \bar{sim}_{t,t})^2} \quad (11)$$

CE 值愈趨近 1，則表示模擬結果與實際資料愈密合，即精確度愈高。

##### 2. 平均絕對值誤差(Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M |sim_{t,t} - est_{t,t}| \quad (12)$$

式中  $M$  爲預測值數目； $sim_{t,t}$  爲第  $t$  時刻之模擬值； $est_{t,t}$  爲第  $t$  時刻之推估值。

由 MAE 的大小，可以瞭解推估值與模擬值的絕對誤差量。

#### (四)模式建立

首先進行水庫模擬操作，以該水文年結束爲目標操作時間，在目前曾文-烏山頭水庫系統各標的之額定需水量下，模擬各種可能之系統起始蓄水狀態(起始庫容假設以 0 爲始，逐次增加 500 萬噸，直至 69,000 萬噸爲止，共計 139 種假設)下之水庫蓄水利用，並計算各旬之可能平均缺水率。本文模擬分析水庫的水量運用過程時，忽略蒸發與滲漏，則每一旬末的蓄水量  $S_{t+1}$  以水平衡方程式計算如下：

$$S_{t+1} = S_t + I_t - D_t \quad (13)$$

式中，

$I_t$  = 第  $t$  旬入流量；

$S_t$  = 第  $t$  旬之旬初蓄水量；

$S_{t+1}$  = 第  $t+1$  旬之旬初蓄水量；

$D_t$  = 第  $t$  旬各標的需水量總和。

由於曾文-烏山頭水庫系統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，排除吾人認定具重複性質或尺度過大之因子項外，僅採計降雨量、水庫進水量及水庫蓄水率可供水日數，各指標之計算方式如三(二)節所述。

俟各指標與平均缺水率計算完成後，隨即就各旬進行適應性模糊推論模式之建置，直接以 ASR 爲預警值，預警值燈號所屬區間，如表 3 所示。

各旬 ANFIS 模式檢定及驗證評鑑結果如表 4 所

示，續以 2000、2001 及 2002 等三年資料進行驗證，驗證結果如表 5 所示。

表 4 各旬模式檢定及驗證評鑑結果

旬別	檢定		驗證		旬別	檢定		驗證	
	CE	MAE	CE	MAE		CE	MAE	CE	MAE
1	0.82	0.02	0.74	0.06	19	0.93	0.04	0.89	0.06
2	0.96	0.01	-5.70	0.27	20	0.91	0.05	0.78	0.08
3	0.83	0.04	-3.57	0.28	21	0.91	0.05	0.59	0.10
4	0.55	0.05	-13.72	0.36	22	0.91	0.05	0.85	0.06
5	0.81	0.04	-1.28	0.15	23	0.96	0.03	0.87	0.07
6	0.75	0.05	-9.35	0.22	24	0.92	0.04	0.65	0.10
7	0.82	0.03	-5.18	0.26	25	0.96	0.03	0.93	0.05
8	0.81	0.05	-0.33	0.11	26	0.96	0.03	0.89	0.05
9	0.92	0.04	0.46	0.07	27	0.96	0.03	0.90	0.05
10	0.87	0.05	0.66	0.06	28	0.94	0.03	0.93	0.05
11	0.92	0.05	0.70	0.07	29	0.94	0.03	0.94	0.04
12	0.95	0.04	0.69	0.07	30	0.90	0.03	0.94	0.05
13	0.93	0.04	0.50	0.09	31	0.93	0.02	-0.15	0.16
14	0.92	0.05	0.80	0.06	32	0.91	0.02	1.00	0.01
15	0.93	0.04	0.73	0.09	33	0.88	0.01	0.98	0.02
16	0.91	0.05	0.86	0.06	34	0.87	0.01	1.00	0.01
17	0.94	0.04	0.88	0.06	35	0.87	0.01	0.95	0.03
18	0.91	0.05	0.87	0.06	36	0.95	0.00	0.88	0.04

表 9 2000~2002 年 ANFIS 模式驗證結果

旬別	2000 年		2001 年		2002 年	
	模擬	推估	模擬	推估	模擬	推估
1	0.18 藍	0.25 綠	0.00 藍	-0.01 藍	0.35 黃	0.25 綠
2	0.18 藍	-0.07 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.34 綠	-0.23 藍
3	0.16 藍	0.50 橙	0.00 藍	0.22 綠	0.32 綠	0.05 藍
4	0.15 藍	0.38 黃	0.00 藍	0.03 藍	0.31 綠	-0.50 藍
5	0.13 藍	0.01 藍	0.00 藍	-0.01 藍	0.31 綠	0.00 藍
6	0.11 藍	0.11 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.29 綠	-0.38 藍
7	0.08 藍	0.50 橙	0.00 藍	0.00 藍	0.31 綠	-0.06 藍
8	0.06 藍	0.16 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.29 綠	0.06 藍
9	0.06 藍	-0.01 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.30 綠	0.15 藍
10	0.01 藍	0.06 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.33 綠	0.18 藍
11	0.00 藍	0.05 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.35 黃	0.20 藍
12	0.01 藍	0.05 藍	0.00 藍	0.01 藍	0.37 黃	0.21 藍
13	0.04 藍	0.09 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.41 黃	0.19 藍
14	0.03 藍	0.09 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.42 黃	0.29 綠
15	0.04 藍	0.16 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.45 黃	0.32 綠
16	0.08 藍	0.11 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.48 橙	0.35 黃
17	0.07 藍	0.13 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.48 橙	0.37 黃
18	0.07 藍	0.12 藍	0.00 藍	-0.01 藍	0.48 橙	0.36 黃
19	0.05 藍	0.12 藍	0.00 藍	-0.01 藍	0.48 橙	0.38 黃
20	0.00 藍	0.08 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.46 黃	0.30 綠
21	0.00 藍	0.08 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.45 黃	0.23 綠
22	0.00 藍	0.07 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.45 黃	0.33 綠
23	0.00 藍	0.09 藍	0.00 藍	-0.01 藍	0.45 黃	0.35 黃
24	0.00 藍	0.20 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.46 橙	0.36 黃
25	0.00 藍	0.07 藍	0.00 藍	-0.01 藍	0.44 黃	0.38 黃
26	0.00 藍	0.09 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.41 黃	0.35 黃
27	0.00 藍	0.10 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.44 黃	0.40 黃
28	0.00 藍	0.05 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.46 黃	0.37 黃
29	0.00 藍	0.05 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.46 橙	0.39 黃
30	0.00 藍	0.06 藍	0.00 藍	-0.01 藍	0.49 橙	0.41 黃
31	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.53 橙	0.07 藍
32	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.46 黃	0.48 橙
33	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.36 黃	0.32 綠
34	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.41 黃	0.40 黃
35	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.43 黃	0.35 黃
36	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.00 藍	0.42 黃	0.30 綠

#### 四、結果與討論

1. 由表 4 檢定結果可知，ANFIS 確具相當優異之區間分鑑能力，在未來水文不確定、ASR 特性限制下，仍能就建模資料作一適切之分類與推論。
2. 各旬模式所能解釋變異之程度，隨當下至枯水期結束間之水文序列，所經各旬之變異程度減小而增加，亦即各旬模式所面對之水文序列變異程度越高，模式所能解釋變異的程度將隨著降低，此係各旬推論乾旱程度所需面對之水文不確定性不同所致。
3. 第 11~29 旬之水庫進水量變異程度較低，此期間之降雨量已相對前面三個月顯著減少，因此由於連續降雨以致造成水庫溢流之機會亦相對減少，於展望至枯水季的缺水程度時，主由水庫蓄存與需求供給控制，故本區間之模式建構結果相對較優於其他部分。
4. 在「灌溉節水技術手冊」中，提到：曾文、烏山頭水庫自 10 月至翌年 5 月間屬平水及枯水期，故以 10 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；而本文建構之模式在此一時刻(水文年第 15 旬)模式檢定 CE 值可達 0.93，檢定結果如圖 2 所示，各因子隸屬函數區間如圖 3 所示，在未來水文歷程未知的情況下，如是結果已相當令人滿意。
5. 本句句末即為預警目標時刻，旬初之水庫蓄水直接影響 WEWI 的表現，故本旬各因子所屬支個隸屬函數區間，訓練前後差異不大(如圖 4)，其推論檢定 CE 值亦高達 0.95，檢定結果如圖 5 所示。就時效而言，此時模式在指出「旱象表徵」的意義已大於「預警」。
6. 各旬降雨、進流及水庫蓄水狀態，其能反應至預警期程中各種乾旱程度之資訊，各因子值域區間、大小並不一致；簡言之，長年以同一隸屬函數型態分類、界定特定值域區間並不適切。

#### 五、結論與建議

1. 本文研擬之乾旱預警模式，除預警時程實際符合台灣地區水庫之運用型態外，並較「區域水資源調度機制」中所初步建議之水資源預警模式更為客觀與實用。
2. 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。
3. 「區域水資源調度機制」中所制訂之各預警因子項，存在相當的相關性與重複估計量，故實有必要進行重複變量的簡化。
4. 人為制訂隸屬函數所屬區間係以傳統思維進行分立建構並無法真實呈現水文變量所提供之既有資訊，模式之建構實應回歸問題基本面，所欲

探討之乾旱類別以及所使用之水文資訊，實際以資料本身所能提供之資訊調整，調整隸屬函數所屬值域以及對應區間，方得續行探討其後衍生之結果。

5. 單就就水庫供水系統而言，水庫蓄水量對於目標預警時間所提供之預警訊息，僅於其水量可供給之時間，此部分已可由操作規線反應之，如欲進行長時程之乾旱預警，仍賴於未來水文水量可掌握程度，如預警方式過多依賴於水庫蓄水狀態，則建議直接以操作規線預警即可。
6. 就水庫可供調配蓄供水、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；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。

### 參考文獻

1. Alley, W.M., 1984:"The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions", *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(7), pp.1100-1109.
2. Jang, J.-S. R., 1993:"ANFIS: Adaptive- Network-based Fuzzy Inference Systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, May
3. Jang J.-S. R., SUN C.-T . MIZUTANI E., 1997 :Neuro-Fuzzy AND Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, Chapter 12, Prentice-Hall.
4. Vlachos, E., and J. L. Douglas, 1983:"Drought Impacts", in *coping with Drought* , edited by V. Yevjevich, L. V. Cunha, and E. Vlachos, pp.44-37.
5. 行政院, 2003:"旱災災害防救業務計畫", 九十二年五月二十六日第一次修正核定
6. 黃文政, 李詩茜, 2004:"石門水庫供水區乾旱指標之研究", 第十四屆水利工程研討會, B-27~B-34
7. 經濟部水資源局, 1999:"乾旱指標之建立-中部及南部區域"
8. 經濟部水利署, 2003:"區域水資源調度機制", 92.10.08.行政院核定版
9. 監察院, "第○九一二二○○二八五號糾正文"
10. 蓋蘆, 1991:實用模糊數學, 第六章, 亞東書局, 台北

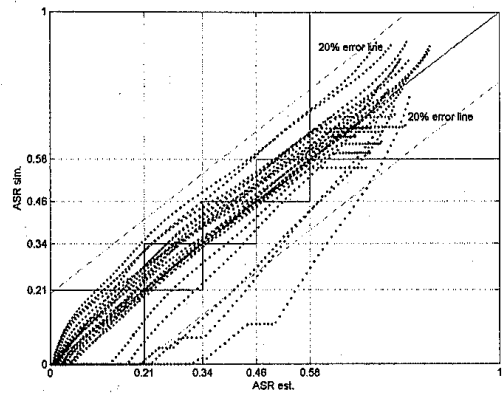


圖 2 十月下旬乾旱預警模式檢定結果

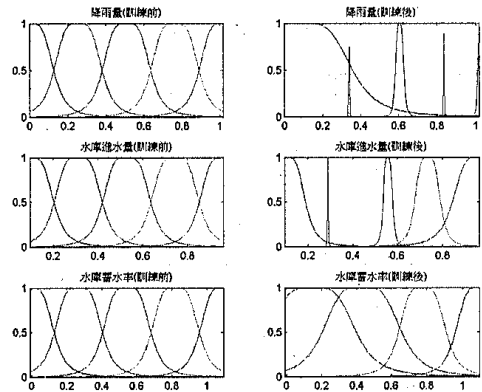


圖 3 十月下旬 ANFIS 模式隸屬函數圖

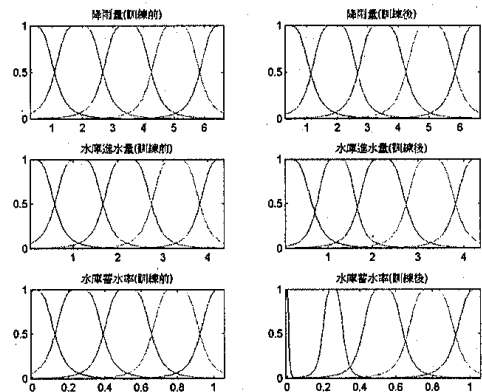


圖 4 五月下旬 ANFIS 模式隸屬函數圖

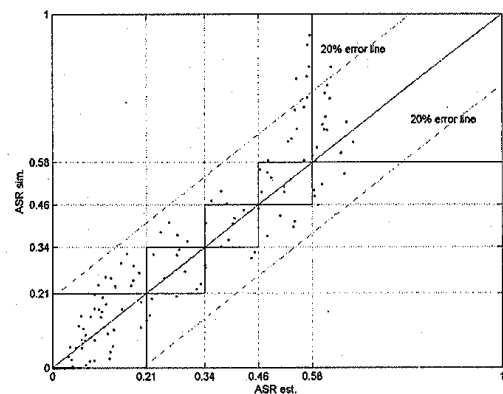


圖 5 五月下旬乾旱預警模式檢定結果