

應用長期氣候預報於乾旱風險管理系統之架構

Establishing Drought Risk Management System Based on Long-term Weather Forecasting

童慶斌
生物環境系統工程學系副教授
水工試驗所特約副研究員

劉子明
生物環境系統工程學系研究生

國立台灣大學

摘要

近年來世界各地不斷發生極端水文事件，除了極端降雨造成洪水災害，而乾旱事件亦嚴重影響民生、農業與工業用水，並對人民造成相當的災害與損失。洪水災害多可利用即時水文氣象資料建立預警系統，然而乾旱卻因為無明顯之初期現象而難以利用即時水文與氣象資料建立預警系統。因此，本研究提出利用長期氣象水文預測資料來建立乾旱預警與風險管理系統。此乾旱風險管理系統主要是利用區域大氣環流模式預測台灣未來十二週的氣象資料，由預測之氣象資料，推算水資源系統中未來可能之河川流量與需水量，進而建立水資源系統動力模式評估發生乾旱之可能性。因此，本系統包括集水區流量模式、需水量推估模式、與水資源系統動力模式。利用系統分析未來十二週中每週的水資源供需平衡變化趨勢，評估其變化趨勢是否較同一時間之歷史預測資料高或低，藉此判斷未來是否缺水，以適時發出乾旱警訊，提供相關單位提早進行乾旱決策與管理。利用單一缺水事件累積缺水量為指標來訂定啟動乾旱管理。乾旱預警系統架構仍需進一步與歷史資料進行驗證，唯氣象預報模式的不確定性以及降尺度的方法必須再進一步改進，使乾旱預警系統能趨於完善。

關鍵字：氣候預報，乾旱預警，風險管理，水庫操作規線

一、前言

水資源乾旱的發生與氣候有極大之關係。若能預測氣象的變化，由氣象變化得知未來可能之乾旱發生，便能即早進行決策，以降低未來可能之衝擊。目前對於乾旱的定義相當多種，最常使用的為利用連續無降雨日或與降雨量相關之方法定義。雖然乾旱的發生跟降雨具有極大的關係，然而利用降雨等相關方法定義乾旱卻無法完整反應出水資源系統供需失衡所發生乾旱之嚴重程度。水資源系統中包括了需求面及供給面，均會受到乾旱時期天氣之影響，此外，水資源系統亦包括水庫與淨水廠等水利設施之容量與調配能力。因此單單只用降雨來定義乾旱的發生，往往忽略了因為供需失去平衡而造成供水不足所造成之水資源乾旱。本研究目的即在於探討如何利用水資源系統動力模式、河川流量模式、需水量推估模式，結合長期氣象預測資料與實際氣象資料進行供需水模擬，預測未來可能之供水能力與潛在用水需求，進而利用累積缺水量來判定是否發生乾旱之風險，並考慮預測不確定下啟動適當管理措施，以提供決策者及早進行風險管理。

水資源乾旱可能會逐漸嚴重化，當發現已經面臨嚴重乾旱威脅時，最佳的決策時機卻早已過去，因此乾旱預警系統之目的即在於能及早得知乾旱的來臨，並考慮在預測之不確定性下提早進

行風險管理決策。能越早得到可靠預警，所能補救的籌碼則越多。以 2002 年北部地區的乾旱為例，頭前溪及石門灌區一期作之休耕補償的金額以每公頃 4 萬 6 千元為基準，已育苗者每公頃加 9100 元，已整田者每公頃再加 7000 元，而對於已耕種之稻作因供水不足與休耕者，視其損害情況最高可補償 9 萬元(李鐵民，2002)。圖 1 為 2002 年石門水庫運用歷線及各項限水措施時程，在一開始對於未來氣候未知的情形之下，於不同階段實施了不同之限水與休耕措施。休耕補償方面，若能越早進行休耕規劃，則可以顯著減少補償金額。在用水調配方面，若能及早進行水的調配計畫與休耕規劃，便能使乾旱對於民生、農業與工業用水的威脅減到最輕。然而 2002 年之各項限水措施則顯示了因為對於未來氣候的未知，而選擇了走一步看一步的方式，以致於錯失了及早進行規劃的良機。

針對可能發生乾旱及早進行規劃與發佈休耕的最佳時間應為稻作育苗之前，以石門灌區為例，一期作相當於一月，而二期作則相當於六月。然而對於執政者而言，要單單只依靠氣象局發布未來三月之降雨情形來決定與發布未來之休耕與調配之政策，風險實在太大。因為除了氣象預測資料需要進一步與台灣歷史資料進行迴歸分析以及誤差的探討，以瞭解預測之不確定性與決策可能面臨之風險，如此才能有效的應用於未來乾旱

之預測，並依據分析在可能之不確定性下擬定風險管理策略。整體而言，為了提早針對未來可能發生之乾旱進行決策與管理，需要建立結合長期氣象預測資料之乾旱預警系統，透過歷史資料與氣象預測資料的分析，在乾旱發生之前 1~3 個月提供決策者進行風險管理。

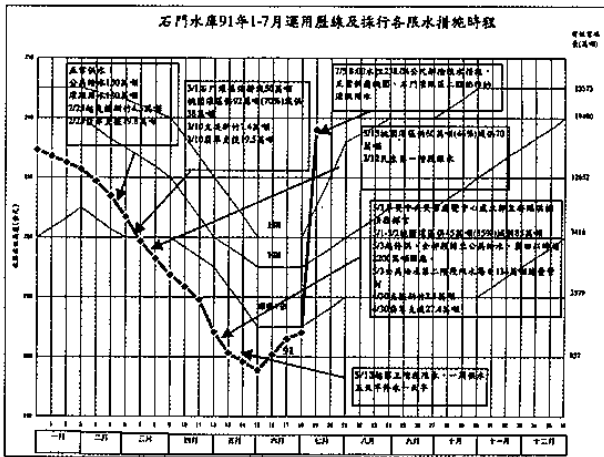


圖 1. 石門水庫 91 年 1-7 月運用歷線及採用各限水措施時程(李鐵民, 2002)

二、國內外相關研究

國外目前已積極展開將長期氣象預測資料應用於水資源與農業生產管理之研究上，包括 Hamlet & Lettenmaier (1999) 利用 National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA) 氣象預測中心提供預測長度 6 個月的氣象預測資料，以 El Niño and Southern Oscillation (ENSO) 與 Pacific Decadal Oscillation (PDO) 兩種大氣現象作為分類，針對美國 Columbia River 進行流量的預測。Hamlet et al. (2002) 更進一步的利用先前的研究成果，進而推估水力發電的效益以及經濟上的影響。此外，於 International Research Institute (IRI) 亦推動許多長期氣候預報的計畫與推廣應用，例如 “Water Resources Management in the Mahaweli River Basin in Sri Lanka”，乃將長期氣象預測資料應用於斯里蘭卡的 Mahaweli River 的水資源管理；另 “Applications of Climate Prediction to Decision-Making in Agriculture and Water Resources Management” 乃針對非洲進行氣候、水文與農業的監測，並進一步做季節和年之間的預測，以應用於農業灌溉與水資源管理的決策支援。此外，尚有其他水文、集水區、水庫與農業等預測等應用，詳細情形可參考 IRI 網頁 (<http://iri.columbia.edu/>)。

乾旱預警與乾旱的定義是分不開的，台灣地區有關乾旱預警系統的文獻除了主要以預警系統為架構之文章之外，另外對於台灣地區乾旱之定義與研究之文獻亦或多或少有涉獵到。在台灣乾

旱特性研究與乾旱定義研究中，王如意及趙啓迪 (1990) 參考國內外相關文獻，定義降雨量小於 0.5mm 者視為不降雨日，而連續 50 日以上不降雨稱之為小旱，連續 100 日以上不降雨，謂之大旱。而在水庫營運區域內，當水庫低於規線嚴重下限下之時間稱為乾旱期。虞國興與莊明德 (1992) 針對台灣乾旱特性研究，分析各雨量站持續日降雨量小於 0.0, 0.6, 2.0 及 5.0mm 切割水準 (truncation level) 之日數及其間之總降雨量。蕭政宗 (2001) 以連續累積降雨量為變數，並考慮乾旱的相對性特性，定義台灣地區之氣象乾旱為連續 30 日累積降雨量低於同時期之第二個十分位數且乾旱量累積達 130mm 以上。其中第二個十分位數指的是降雨累積機率 0.2 所對應之累積降雨量，而乾旱量則為在切割水準下之累積缺水量。

在乾旱預警研究與乾旱時期入流量預測研究中，簡俊彥等 (1991) 研擬乾旱時期水庫運轉模式，利用已知水庫旬入流量，推估下一旬各不同發生機會百分率之入流量，以提供水庫管理當局各種不同機率風險之決策選擇。張炎銘 (1991) 嘗試以雙月連續最大不降雨日及雙月合計雨量當做指標，求出歷年迴歸週期為五年、十年、二十年的值當做輕度、中度與強度乾旱警報標準值。之後張炎銘 (1992) 為了使分析方法較為簡單，以適合基層水文測站人員了解與使用，以月平均雨量離差相對於月平均雨量比值定義月豐缺水數，提出以單月之豐缺水數及累計月豐缺水數兩項指標，當作發佈乾旱警報的數值依據。劉清源 (1995) 利用克利金法預測歷年水庫之旬入流量，再以水庫水位低於規線下限與嚴重下限定義輕度乾旱與嚴重乾旱，並預測未來一個月內是否有輕度或嚴重乾旱發生。

綜合以上之乾旱研究相關文獻，在乾旱定義上多為氣象或水文上之定義，如降雨量與降雨日以及水庫之水位等。而在乾旱預警系統上多為利用即時之降雨、入流量或水庫水位資料發佈乾旱預警。然而乾旱之發生實際應考慮供給面與需求面，因此本研究擬定結合長期氣象預測資料進行乾旱預測，利用水資源供水系統動力模式，模擬供水區之供水平衡，同時考慮供給面與需求面之平衡來定義缺水，再由缺水事件累積缺水量來判定乾旱發生之風險。

在乾旱管理部分，本研究提除以多規線操作來應付不同水資源狀態，水庫操作規線最佳化方法利用近年來有著相當成功發展的遺傳演算法 (Genetic Algorithms) 來處理。由於其強大的空間搜尋能力，自 Holland (1975) 推出至今，已廣被學術界各不同領域所應用，Gen and Cheng (2000)；探討其深受吸引學者專家應用的原因，不外乎其合乎自然法則的精神，以字串模擬，並且可修正及可改善性高，所得到的結果也令人激

賞，因此在工程設計管理、生物科技、水資源方面都多有所例，如 Forrest (1993)、Wang (1991)、陳莉 (1995)、Tung et al. (2003) 等。

三、台灣乾旱管理之挑戰

台灣的氣候條件屬於亞熱帶季風區之氣候，多溫暖潮濕，年雨量達 2510 公釐，為台灣水資源的主要來源。而台灣雨量雖然豐沛，但台灣地區人口稠密，每人每日平均分配雨水量僅世界平均值的七分之一，且台灣降雨量大多集中在豐水期，佔全年的 78%，且多為颱風暴雨，尤以南部地區豐枯水期流量比約為 9：1，豐枯水期之間隔甚為明顯，使得水資源調配更加困難。由於台灣用水主要仰賴水庫蓄水供給，在豐水期間由於水量充足，因此水庫多有充分的蓄水。然而在枯水期卻因降雨不足，而使水庫補充不足，因而缺水事件頻傳，此現象由以南部最為明顯。近年來因氣候異常，多有極端氣候產生，在豐水期極端降雨可能帶來洪水，水庫可能被迫預留更多蓄積空間，因而影響隨後枯水期之供水能力。

自工業革命以來，溫室氣體大量排放導致溫室效應加強，並引發全球溫暖化 (global warming) 之危機，主要溫室氣體包括 CO₂、N₂O、CH₄、與 CFCs 等，其中以二氧化碳對溫室效應影響最大。加強溫室效應可能造成全球氣候變遷，各地區雨量及溫度因而改變。童慶斌(2002)利用 IPCC 報告彙整之 SRES 氣候變遷預設情境，模擬未來氣候變遷衝擊下，因為各季節氣溫與降雨量改變的程度不同，將可能造成豐水期平均河川流量增加以及枯水期平均河川流量減少的局面。而本來豐枯水期流量差異已經很大，將因為氣候變遷的影響，更增加水資源調配的困難，也同時造成乾旱發生的機率增加。而豐枯水期量差異的增加，現有的水庫操作規則以及水資源調配方案勢必難以適用，因此乾旱風險管理也將面臨更大的挑戰。

台灣由於本身水資源調配困難，加上最近極端氣候事件頻傳，以及未來受氣候變遷衝擊影響，更突顯乾旱管理的困難。

四、應用長期氣候預報於乾旱風險管理系統之架構

本研究提出乾旱風險管理系統架構如圖 2 所示，主要乃利用預測之氣象資料代入 GWLF 集水區流量模式模擬河川流量以及農業灌溉需水量模式計算農業灌溉需水量，並結合民生與工業需水資料代入水資源系統動力模式中，藉由水資源系統動力模式模擬水資源系統中於預測時段內之供水量，同時由供水量與需水量之差來判斷缺水

量，進而界定缺水延時與缺水程度來發布乾旱警報。其中 GWLF 模式主要扮演的角色即為模擬水資源系統上游入流量，代入水資源系統動力模式中，求得在經過水庫操作與淨水廠之運轉下對於水資源區之供應水量。而農業灌溉需水量、民生與工業需水量則扮演水資源系統中下游之需求的角色，藉由供水與需水的關係來判定缺水與乾旱的發生。以下將針對氣象預測模式、集水區流量模式、需水量推求及水資源供水系統動力模式分別介紹。

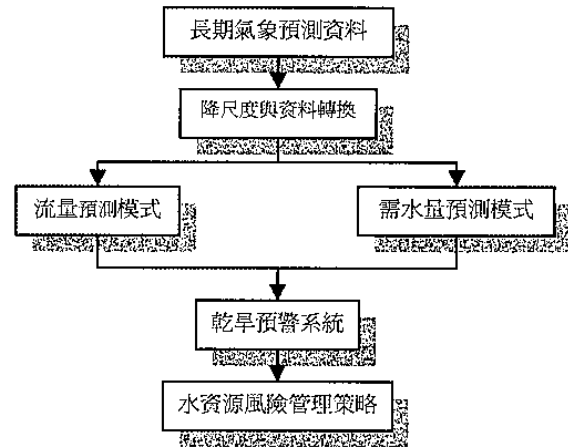


圖 2. 研究架構圖

1. 氣象預測模式

本研究之乾旱風險管理系統所需之氣象預測資料可利用 IRI 全球預測資料，或如台灣大學大氣系氣候/水文研究室所分析之降尺度預測資料等。其預測之氣象資料為每週發佈一次預測資料，而每次預測之氣象資料為 12 週(或更長)預測資料。本研究之乾旱預警系統以 12 週為一預測時間長度。結合氣象預測資料概念圖如圖 3 所示。

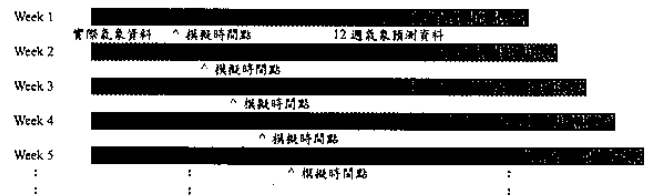


圖 3 實際氣象資料與預測氣象資料結合與每週預測概念圖

2. GWLF 集水區流量推估模式

GWLF (Generalized Watershed Loading Functions) 模式包括集水區流量推估之水平衡模式，此模式能反應氣候變化及土地利用對流量之衝擊，其參數可根據集水區之土地利用以及土壤特性決定，可以降低評估結果之不確定性。

3. 需水量推估

農業灌溉用水

農業灌溉用水之推估必須考慮溫度的變化與耕作之時期，一年之中農業灌溉需水隨著會隨時間有所不同，如圖 4 為 1995-1999 模式推估出桃園地區農業灌溉用水之平均變化。在農業灌溉用水之推估乃使用連宛淪 (2000)、童慶斌與連宛淪(2000)所發展之農業灌溉需水量模式。本模式是利用田間水平衡之觀念所建構，並且針對水田灌溉特性建立一灌溉用水評估模式，模式利用 Hamon 公式計算作物之潛能蒸發散量，即作物需水量，再透過田間水平衡關係估算田間需水量，最後考慮輸水損失下決定灌溉需水量。

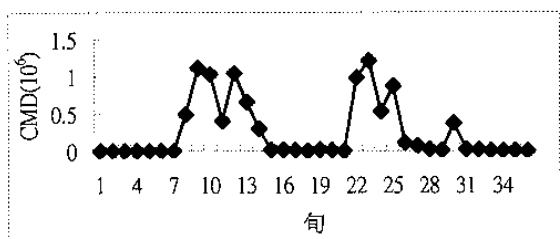


圖 4 桃園地區一年中平均農業灌溉旬需水量(以 1995-1999 模式模擬平均)

民生用水

本研究針對生活用水之需求推估採用以下的公式：自來水配水量=人口數×普及率×每人每日用水量/售水率。其中普及率為實際供水人口佔行政區人口之百分比，公式為：用水人口數÷供水區人口數×100%。每人每日用水量為：售水量÷ [(上年底供水人口數+本年底供水人口數)/2]/365 天。售水率係指售水量與出水量之比值。(陳明業，2002)

工業用水

水資會於民國 63 年開始逐年向有關機構蒐集相關資料，以單位面積日用水量級工業面積推估工業用水量，其採用之估算方式如下：年需水量=單位面積用水量×工業面積×年工作天數

4.水資源供水系統動力模式

本研究之乾旱預警以系統動力模式學建立水資源系統評估模式，以陳明業(2002)所建立之北區之水資源系統動力模式為例，依照水資源供水系統之實際狀況，結合系統動力學理論，運用系統動力動態學之軟體 Vensim，建構水資源系統動力模式。北區水資源供水系統可分為台北(新店溪系統)、石門以及板新(大漢溪系統)二個供水區，水資源系統架構圖如圖 5 所示。

5.乾旱風險指標

在建立乾旱預警系統之前，首先必須先針對水資源供水系統之歷史資料模擬結果進行統計分

析，並建立乾旱指標以評定風險等級。本例經由模式模擬之後可求得台北供水區歷年之供需水情形，如圖 6 (僅列 1995-1999)。

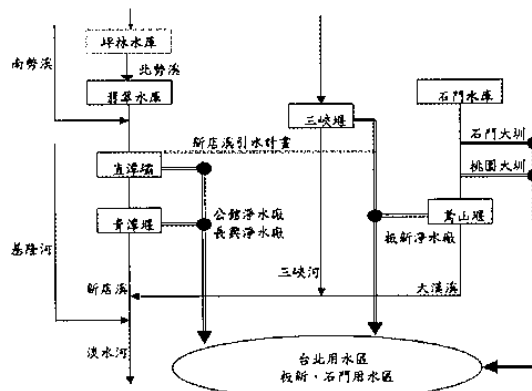


圖 5 北區水資源系統架構圖

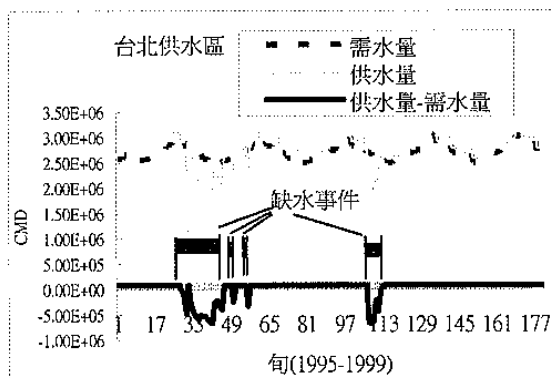


圖 6 台北供水區 1995-1999 模擬之需水量、供水量與缺水(供水量-需水量)(童慶斌等，2002)

然而缺水並非就代表乾旱發生。乾旱的發生跟缺水事件之累積缺水量與缺水延時有關，每一個缺水事件之累積缺水量與延時必須達到一定的門檻值才會發生不同程度之乾旱。為了將缺水量與缺水延時同時考慮進來，統計分析上乃以每一缺水事件之累積缺水量進行統計。分別針對三個供水區統計其 1978-1999 年間之缺水事件之累積缺水量，求其累積缺水量機率分布曲線，如圖 7。

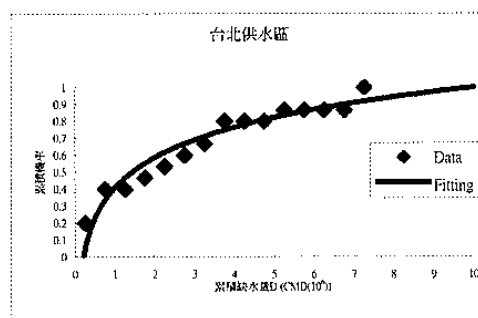


圖 7 台北供水區累積缺水量機率分布曲線

表 1 為台北區不同累積機率所對應累積缺水量。由於越嚴重之乾旱其出現之機率越小，因此可以由累積機率來分別訂出乾旱之等級。然而如何訂出不同乾旱等級所相對應之累積機率及累積缺水量，必須同時考慮到該乾旱對於各層面所造成的災害及損失。此部份應該配合各層面之乾旱損失權重，進一步優選出適合的累積機率來代表不同等級之乾旱。

表 1 台北區不同累積機率所對應累積缺水量

累積機率	台北供水區(10 ⁶ CMD)
0.9	6.77
0.8	4.58
0.7	3.10
0.6	2.10
0.5	1.42
0.4	0.96
0.3	0.65
0.2	0.44
0.1	0.30

6. 水資源風險管理策略

當預測發生一定程度乾旱時，即可啟動乾旱風險管理策略。管理策略可以是更改水庫操作、休耕轉作、或水資源調配等。本研究先就水庫的操作管理策略方面提出說明，以往許多水庫常利用長期水資源資料決定最佳化的操作規線控制放水，其結果為確保缺水期望值最低，但難因應極端氣象水文。另一種操作方法為即時控制方式 (Real-time control)，如 Wardlaw and Sharif (1999) 對多水庫操作的研究，即採取此方式來操作水庫放水，其優點為能有效在不同狀況下應付需求要求，即時改變水庫的放水策略，但缺點為將損失跨年間之調節能力。

本研究希望利用初步發展成功之多組操作規線方法，結合長期氣象預測與乾旱預警，一組為乾旱時期啟動，一組為平時操作使用。以單一組的操作規線來進行控制水庫放水時，雖然整體時期缺水情形降低，但會有許多不符民眾接受性的狀況產生，例如在水庫高水位時期就需打折供水，或者在一般非乾旱時期就需要打折扣供水等。因此本研究擬將模擬時期之所有缺水事件加以分析，有效的區分一般與乾旱時期之差異後建立另外一組操作規線，應付缺水較嚴重事件時期，也就是說以兩組操作規線來取代原先只有一組操作規線之方式。以下即為本研究初步發展成功之兩組操作規線。

另外將 M5 與雙時期操作規線比較如表 2 所示，總時期之目標函數缺水指數有明顯降低之外，而在一般時期(即以兩組規線之一般規線組操

作之時期)也為雙規線組較佳，代表了以雙規線組作為操作方式者不但能在任何狀況有最佳的控制水量外，在為數較多的一般狀況也能讓民眾有充裕水量可用。而表 3 的結果更顯示雙規線組可有效預防水庫盡可能不會降低至呆水位而造成嚴重缺水之情況。

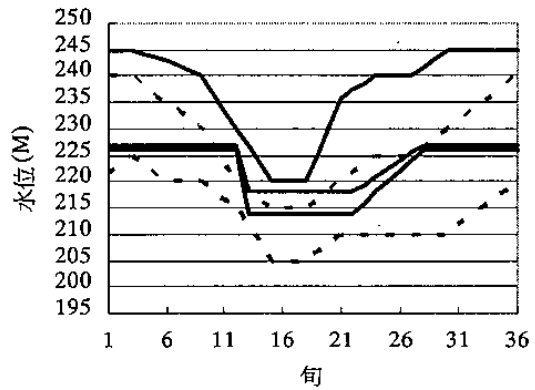


圖 8. 最佳規線之乾旱規線組(粗線)與 M5 規線(虛線)，(折扣率 0.51)

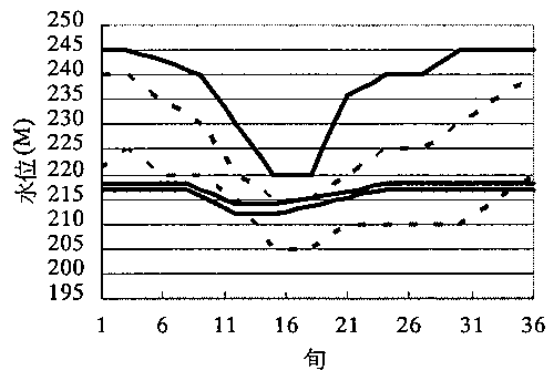


圖 9 最佳規線之一般規線組(粗線)與 M5 規線(虛線)，折扣率 0.77)

表 2 缺水指數與總缺水量

總時期	M5	雙規線
SI(旬)	5.08	4.78
總缺水量(萬噸)	370482	418629
一般時期	M5	雙規線
SI(旬)	0.85	0.75
總缺水量(萬噸)	59798	60166

表 3 模擬時期水庫水位至呆水位天數

規線組	M5	雙規線
水位至呆水位天數	1390	1022

五、結論與建議

目前此乾旱預警及風險管理系統已初步建立完成，但卻未實際利用預報資料演算過，並模擬實際可能之乾旱風險管理。由於預報之氣象資料共有 12 週，因此對於決策者而言，更提供了 8 旬的決策緩衝時間，充分發揮了預警系統的功能。而目前提出的雙時期水庫操作規線更能提供乾旱時期一個較佳的水庫操作方法，並能減少整個時期以及乾旱時期缺水的情形。未來在實際演算上，應該朝向自動預測、演算與發佈警報並提供決策單位相關之決策選擇。而氣候預報模式之不確定性，必須進一步透過氣候型態分類以及降尺度方法改善預報之準確性，

六、參考文獻

1. Forrest, S., Genetic algorithms: principles of natural selection applied to computation. Science, 261: 872-878, 1993.
2. Gen, M., and Cheng, R., Genetic Algorithms and Engineering Optimization. John Wiley & Sons, Inc, New York, 2000.
3. Holland, J. H., Adaptation in Natural and Artificial System. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press, 1975.
4. Hamlet, A.F. & Lettenmaier, D.P., Columbia River Streamflow Forecasting Based on ENSO and PDO Climate Signals. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.125, No.6, pp.333-341, 1999.
5. Hamlet, A.F. Huppert, D. & Lettenmaier, D.P., Economic Value of Long-Lead Streamflow Forecasts for Columbia River Hydropower. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.128, No.2, pp.91-101, 1999.
6. Tung, C. P., S. Y. Hsu, C. M. Liu, and J. S. Li., Applying Genetic Algorithm to Optimize Operation Rules for the LiYuTan Reservoir in Taiwan. Submitted to Journal of American Water Resources Association. 39(3), pp.649-657, 2003
7. Wang, Q. J., The genetic algorithms and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research, 27(9): 2467-2471, 1991.
8. Wardlaw, R., and Sharif, M., Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation. Journal of Water Resources Planning and Management, 125(1): 25-33, 1999.
9. 王如意、趙啓迪，「區域乾旱之模擬及其應用於曾文溪流域農業水資源之規劃」，台灣水利，第 38 卷，第 4 期，15—35 頁，1990。
10. 李鐵民，「抗旱的醒思」，水資源管理 2002 研討會，1 頁—17 頁，桃園，2002。
11. 張炎銘，「建立乾旱警報系統初論」，台灣水利，第 39 卷，第 4 期，73—84 頁，1991。
12. 張炎銘，「再論乾旱警報系統之建立」，台灣水利，第 40 卷，第 3 期，56—65 頁，1992。
13. 連宛淪，「氣候變遷對水稻灌溉需水量及產量之影響」，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文，2000。
14. 陳莉，『以物件導向之遺傳演算法優選水庫運用規線之研究』，國立台灣大學農業工程研究所博士論文，1995。
15. 陳明業，「淡水河水資源系統動力模式與永續管理策略之研究」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2002。
16. 童慶斌、連宛淪。2000。氣候變遷對灌溉需水量之影響。中國農業工程學報，第 46 卷，第一期。
17. 童慶斌等，「氣候變化綱要公約國家通訊衝擊調適資料建置 — 氣候、水文、生態部分 (一)」，環保署，2002
18. 童慶斌，陳嘉和，劉子明，「結合長期氣象預測資料建立乾旱預警系統」，水資源管理 2002 研討會，桃園，2002 年。
19. 虞國興、莊明德，「台灣乾旱特性之研究」，台灣水利，第 40 卷，第 4 期，20—33 頁，1992。
20. 劉清源，「乾旱臨前時距預測之研究」，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文，1995。
21. 簡俊彥、蔡正男、洪益發，「乾季時期水庫運轉模式之研究—入流量預估研究」，台灣水利，第 39 卷，第 4 期，50—59 頁，1991。
22. 蕭政宗，「以連續累積降雨定義氣象乾旱之研究」，台灣水利，第 49 卷，第 3 期，52—64 頁，2001。