

應用季節性氣候預報於水庫蓄水量預測

Application of Seasonal Climate Forecast to Reservoir Storage Prediction

台灣大學生物環境系統工程學系
教授

童慶斌

Ching-Pin Tung

台灣大學生物環境系統工程學系
博士生

劉子明*

Tzu-Ming Liu

中央大學水文科學研究所
助理教授

李明旭

Ming-Hsu Li

摘 要

乾旱的發生緩慢且不易察覺，爲了及早預知乾旱的來臨，本研究嘗試利用中央氣象局的季節預報資料，進行水庫蓄水量預報之研究，提供決策者能針對未來可能發生之乾旱及早準備以及規劃。本研究利用解析機率模擬法，以石門水庫爲研究對象，利用禁忌搜尋法優選出降雨機率分佈與水庫蓄水增加量的機率分佈之轉換關係，並以均勻分佈隨機變數進行蒙地卡羅模擬。經由 2001 年四月~2003 年十月的所有預報資料模擬結果得知，預報可信度相當不錯。並模擬 2002 年與 2003 年乾旱事件，結果顯示由預報結果可提早掌握乾旱發生的先機，提供決策者作出更完善的乾旱調適策略。最後針對 2006 年一月~三月的預報進行水庫蓄水量預報模擬，顯示 2006 年一月~三月的蓄水量將逐漸減少，應隨時注意未來氣候的變化，並擬定對策以減少乾旱發生帶來之衝擊。未來將隨著氣象局季節預報的更新，同時進行水庫蓄水量的預報。

關鍵詞：禁忌搜尋法，蒙地卡羅模擬，乾旱預警。

ABSTRACT

There is always no premonition when the draught happening. In order to predict the coming draught, and have more time to get ready and plan for it, the seasonal climate forecast of Central Weather Bureau is used to predict the future water storage of a reservoir. In this study, the analytical probability simulation is applied to the Shihmen reservoir. The approach of Tabu search is used to search the transformation function between the probabilities of the precipitation and probabilities of the increase of the reservoir storage. The uniform random sampling is applied to the Monte Carol Simulation.

*通訊作者，台灣大學生物環境系統工程學系博士生，106 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，tedliu13@gmail.com

From all the simulation in April 2001 to October 2003, the result showed that the opportunity of knowing a coming draught event at an early date is provided, and the decision maker make better strategies for the coming draught. In the end, the future water storage of the Shihmen reservoir in January to March 2003 is forecasted. There will be reducing water storage in the future three month in the forecast. The variety of the weather is still need to be concerned and the strategies of the draught need to be drew up to reduce the impact of the future draught. In the future, the forecast of the water storage of Shihmen reservoir will be updated by following the update of the seasonal forecast of the Central Weather Bureau every month.

Keywords: Tabu search, Monte Carol simulation, Draught warning.

一、前言

水資源長久以來一直是人類不可缺乏的資源，而由於過度的開發，造成近年來世界各地不斷發生極端水文事件，極端的降雨事件會造成洪水災害，對於人民的生命及財產有著莫大的威脅，另一方面，乾旱事件的發生，不但嚴重影響民生、農業與工業用水，水量的供應不足，對社會、經濟、生態等方面都將是一大考驗，並對人民造成相當的災害與損失。民國九十年九月納莉颱風造成全台灣災情嚴重，並創下多項紀錄，但在隔年民國九十一年卻發生了水資源供應不足的情形，足以說明近年來的極端水文事件已對人民的生活造成嚴重的傷害。一般洪水災害多可利用即時水文氣象資料建立預警系統，透過建立洪水、淹水模式、及研發洪水潛在致災區域評估方法等，對各河川流域的防洪預警及災害防救作一有效的管理；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。近兩年(民國 91 及 92 年)初，台灣北部因為面臨久旱影響，連水庫也逐漸見底，造成農田遲遲無法進行灌溉犁田插秧；甚至竹科也深受其害，對整體國家經濟衝擊之大，顯而易見。而台北地區又因人口稠密，乾旱衝擊的非僅經濟命脈，更直接影響廣大民生問題。乾旱的發生往往沒有前兆，當乾旱已經面臨威脅時，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，以提早進行決策。而

能越早預警，所能補救的籌碼則越多。

國外利用季節預報資料進行水資源預測已經有相當的成果，Landman et al.(2001)利用正準相關分析法(Canonical Correlation Analysis, 簡稱 CCA)將美國海洋-陸地-大氣研究中心(Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, 簡稱 COLA)的預報資料降尺度(downscaling)到地面測站，並模擬北非在聖嬰(El Niño Southern Oscillation, 簡稱 ENSO)影響下河川流量的變化，進一步應用在河川流量預測上。Wood et al. (2002), Wood et. al (2004a)將全球波譜模式(Global Spectral Model, 簡稱 GSM) 6 個月提前期(lead time)的預報資料，利用分散水文模式—入滲容積變量模式(Variable Infiltration Capacity, 簡稱 VIC)以昇尺度(upscaling)的方式模擬美國各地的河川流量，並進行預測。而 Hemlet & Lettenmaier (1999)及 Hemlet et al. (2002)則是利用聖嬰現象以及太平洋十年週期振盪(Pacific Decadal Oscillation, 簡稱 PDO)此兩種大時間尺度氣候型態進行分類，利用大氣環流模式(General Circulation Models, 簡稱 GCMs)的資料預測河川流量以及應用於水力發電與經濟層面的探討。而國內則有楊道昌等(2003)利用中央氣象局(Central Weather Bureau, 簡稱 CWB)的月預報資料進行曾文水庫入流預測。

二、CWB 氣候預報資料

2.1 預報資料概述

國內在進行氣候預報的研究，除了各大學之

大氣相關科系有進行相關研究之外，則以 CWB 為國內主要的氣候預報機構。在 CWB 網站上，點選網頁上選單中的「氣候」，可以看到有月長期展望以及季長期展望。此乃 CWB 的長期預報課所負責的重要業務，並定期於每月中及月底發布月長期展望，於每月底發布季長期展望。月長期展望乃預報未來一個月內，每一句可能的溫度與降雨情況；季長期展望則是預報未來三個月內，每個月可能的溫度與降雨情況。無論是月預報或是季節預報，網頁上的預報內容均會對於過去的氣候以及未來可能的氣候做一概述，然後再以“偏低”、“正常”以及“偏高”的出現機率方式來進行預報。

“偏低”、“正常”以及“偏高”其實是利用過去的統計資料分別將氣溫與雨量化分成三個區間。以氣溫為例，在 2001 年之後，月預報的三個區間乃是利用各測站 1971~2000 年間的資料進行統計；2001 年之前，則是利用 1961~1990 年間的資料進行統計。在「去趨勢」修正之後，將每年同一句的平均氣溫加以排序，並計算其累積機率。以累積機率 30% 以下的氣溫定義為偏低，大於 30% 小於等於 70% 的氣溫範圍稱為正常，而大於 70% 的氣溫則稱為偏高。若是季預報，則分別利用各站的每一年同一月間日平均氣溫加以統計，以求得各站每月的“偏低”、“正常”以及“偏高”的值。而雨量的部分，則分別利用句累積雨量與月累積雨量進行統計。分別求得各站於每月的“偏少”、“正常”以及“偏多”的值。預報區域則將台灣分成北中南東四區進行預報，分別以台北、台中、高雄及花蓮等四個氣象站為參考氣象站。

2.2 預報方法

中央氣象局長期預報課採用的雨量季節預報方法乃以統計方法為主，動力模式預報結果與主觀判斷為輔。過去曾採用的統計方法包括有迴歸法、條件機率法、非線性類似法、週期法、CCA、馬可夫概念分析。然而目前採用的方法只剩下條件機率法、週期法以及 CCA。另外，人為主觀判斷的方法如類型法與綜觀大氣追蹤法亦曾經作為預報的方法之一。參考的動力預報包括

日本氣象廳一個月(分三個旬平均)的系集預報結果，美國國家環境預測中心(National Centers for Environmental Prediction, 簡稱 NCEP)全球模式 10 天預報結果，美國的國際氣候與社會研究所(International Research Institute for Climate and Society, 簡稱 IRI)和歐洲中等長度氣象預報中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 簡稱 ECMWF)全球系集(Ensemble)預報系統 9 個月預報結果。預報結果乃參考統計模式與動力模式的結果，由長期預報課的數位專家分別提出個人預報，再將每個人的預報結果經由協商與討論，而成為一份預報結果並發布出去。

2.3 預報內容

CWB 的氣候預報包括月預報以及季預報等。月預報內容乃利用統計模式與動力模式結果，經由主觀判斷預報未來三旬的旬預測值的變化範圍以及屬於偏低、正常或是偏高。月預報的準確度較高，因此其預報的方式可告知明確的範圍。而季節預報內容如圖 1 所示，採較保守的機率預報方式，原因在於氣候的不確定性大，月以上的預報準確度因而降低，因此以分別告知偏低、正常以及偏高的發生機率的方式預報。並說明機率越大發生的機會越大，可信賴度也越大；機率小的類別可信賴度較小，但仍有發生的機會。

季節性預報的不確定性較高，因此其預報的內容是採用出現機率的方式預報，亦即預報未來每個月出現偏低、正常及偏高的機率分別是多少。以 2002 年 1 月預報為例，北部 1 月預報雨量出現偏少的機率為 40%，正常的機會是 30%，偏多的機會則是 30%，顯示 1 月雨量將是偏少的雨量機會較大。

三、研究方法

由於季節預報資料具有相當之不確定性，且其預報資料的型式亦以氣溫區間以及降雨量區間的方式預報。因此，CWB 季節預報資料於水庫入流以及水庫水位的預測將可利用風險分析的方式應用於水資源管理上。

雨量機率預報

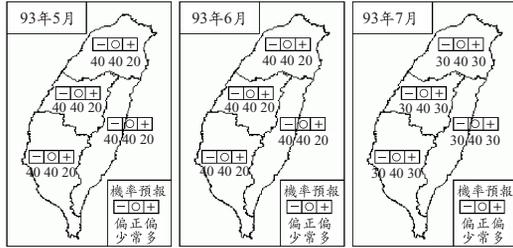


圖 1 CWB 網站上雨量季預報內容

有關水庫操作風險分析方法可分為三大類型(萬象，1990；Croley, 1981)：

1. 經驗法(empirical method)：以流量累積曲線法配合歷史流量或合成流量資料，分析水庫操作問題。
2. 解析法(analytical approach)：利用隨機變數之機率分布與轉換關係，以數學方式直接推導出水庫操作問題上各種現象之機率分布。
3. 系統分析模式法(system analysis method)：利用系統分析的方法，配合決策理論，解決水庫操作上有關風險之問題。

將各類水庫操作風險分析方法分類成以上三大類型，如表 1 所示。

3.1 資料分析

在使用 CWB 季節預報資料之前，必須針對此預報資料的應用合理性進行評估。CWB 季節預報資料中提供未來三個月可能雨量預測值區間，而預報的內容主要乃以台北、台中、高雄及花蓮四站為參考測站進行預報，在應用之前必須針對此資料做出“區域相似”的假設。由於氣候的變化跟氣候型態有直接的關係，例如鋒面的來臨，季風的影響等。當某種氣候型態影響台灣時，鄰近的區域將會有相似程度的影響，亦即同樣北部區域都會受到此氣候型態的影響，只是影響程度的不同而已。由於 CWB 預報資料只以台北、台中、高雄及花蓮為參考對象，因此在集水區模擬上將遇到無法直接獲得所需雨量站預報資料的情況。因此，基於區域相似的假設，本研究將假設同一區域的雨量站將有同樣的預報程

表 1 各種水庫操作風險分析方法分類表(萬象，1990)

類 型	名 稱
經驗法	• 流量累積曲線法
解析法	• 解析機率模式 • 資訊價值模式 • 貝氏(Bayesian)決策理論模式
數理規劃與 模擬模式	• 蒙地卡羅模擬法 • 機遇限制型線性規劃 • 機遇限制型動態規劃 • 可靠度規劃 • 產出變異數分析法 • 多目標規劃

度，亦即北部地區預報為偏高時，相同區域雨量站的預報都以偏高為預報結果。針對此假設，我們將探討北部區域的區域相似性，分別分析台北測站的歷年雨量資料以及石門水庫周圍的幾個測站的雨量資料。使用資料為 1972~1985 年各站的月降雨資料，進行分析比較之前，必須先將各資料針對 12 個月進行標準化：

$$\frac{P_m - \bar{P}_m}{\sigma_{P,m}} \dots\dots\dots(1)$$

其中 P_m 為測站第 m 月降雨量， \bar{P}_m 為測站第 m 月的平均降雨值， $\sigma_{P,m}$ 為資料於第 m 月的標準偏差，而 $m=1\sim 12$ 。經過標準化之後，再計算各站之互相關係數。如表 2 所示，可以看出各測站之間的相關係數都相當高，各站與台北測站的相關係數也都在 0.78~0.85 之間，顯示各站與台北測站之相關性都不錯，符合區域相似的假設。因此就計算 CWB 季預報資料是以台北為參考站，同樣也可以應用於北部石門水庫周圍各站的預報上。

3.2 解析機率模擬法

本研究將以解析機率模擬法，由降雨機率分佈與水庫蓄水增加量的機率分佈之轉換關係，利用均勻分佈隨機變數進行蒙地卡羅模擬。所謂解析機率模擬法便是假設已知降雨發生機率分布與造成水庫蓄水增加量的機率分佈關係具有一定的轉換關係存在，如圖 2 所示。

表 2 台北測站以及石門水庫周圍各站的月雨量互相關係數(統計 1972~1985 年資料)

	台北	巴陵	長興	大溪	嘎拉賀	高義	三光	霞雲	十一份
台北	1.00	0.85	0.81	0.80	0.85	0.82	0.84	0.81	0.78
巴陵	-	1.00	0.85	0.79	0.96	0.94	0.98	0.89	0.79
長興	-	-	1.00	0.84	0.84	0.89	0.85	0.94	0.87
大溪	-	-	-	1.00	0.79	0.80	0.78	0.80	0.94
嘎拉賀	-	-	-	-	1.00	0.91	0.93	0.87	0.77
高義	-	-	-	-	-	1.00	0.94	0.93	0.83
三光	-	-	-	-	-	-	1.00	0.89	0.80
霞雲	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.81
十一份	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00

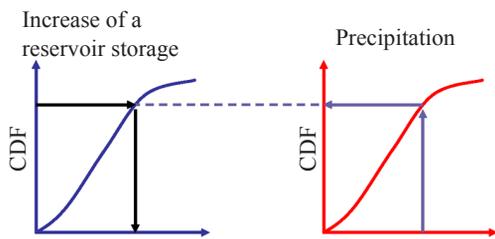


圖 2 解析機率模擬法示意圖

然而降雨機率分佈是否與水庫蓄水增加量的機率分佈具有一定的關係呢？透過三個測站與石門水庫蓄水增加量的關係來討論。同樣將水庫蓄水變化量標準化後與三個測站的標準化雨量分別討論之。

1. 如圖 3 所示，為 1972 年的三個測站與石門水庫蓄水增加量標準化後的變化圖。基本上三站整體變化趨勢大致與石門水庫蓄水量變化趨勢一致，但是標準化後的值的大小差異極大，如 1972 年三月，三個雨量站的標準值均接近，但是水庫蓄水變化量標準值卻遠超過三個雨量站，顯示水庫蓄水變化量不會剛好與降雨量大小是對等的。然而有些月份的降雨量與水庫蓄水變化量是接近的，如 1972 年一、二、四、六、七、九、十、十二月，顯示各月的情况不盡相同。
2. 不同年份同樣月份的比較結果顯示，如圖 4 所示，1973 年三月石門水庫蓄水量與三個測站便有接近的標準化值。而 1972 年水庫蓄水變化量標準值卻遠超過三個雨量站，

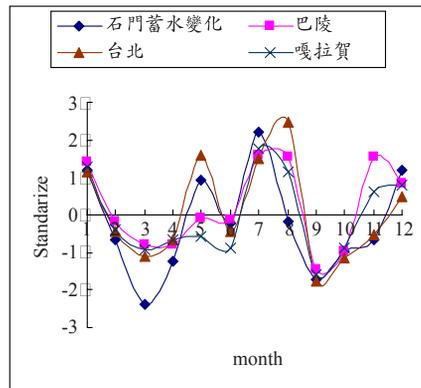


圖 3 1972 年石門水庫蓄水增加量與三個測站降雨標準化後變化圖

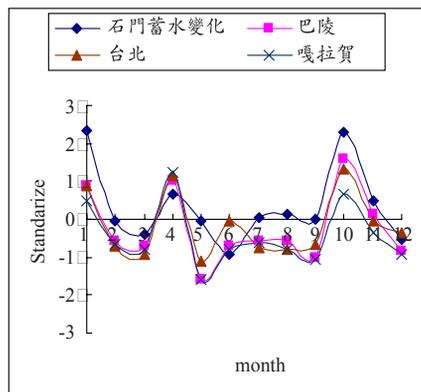


圖 4 1973 年石門水庫蓄水增加量與三個測站降雨標準化後變化圖

顯示同月不同年的雨量與水庫蓄水變化量的比例是不盡相同的。計算 1972~1985 年各月三個站與水庫蓄水變化量的相關係

表 3 三個站與水庫蓄水變化量的相關係數(統計 1972~1985 年資料)

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
台 北	0.71	0.84	0.57	0.63	0.69	0.67	0.71	0.47	0.05	0.72	0.48	0.33
嘎拉賀	0.64	0.86	0.50	0.72	0.48	0.75	0.79	0.74	0.26	0.68	0.63	0.30
巴 陵	0.73	0.84	0.46	0.77	0.57	0.65	0.79	0.72	0.25	0.86	0.40	0.32

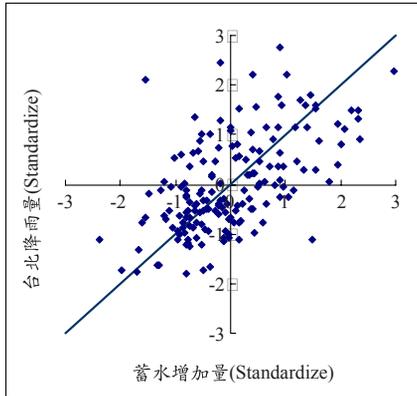


圖 5 1972~1985 年台北測站降雨與石門水庫蓄水增加量標準化後資料散佈圖

數可看出(如表 3)，有些月份的相關係數相當低，以台北站而言，八、九、十一、十二月的相關係數均在 0.5 以下，顯示這些月台北測站與石門水庫蓄水變化量之間的關係並不顯著。若直接觀看台北測站的降雨與石門水庫蓄水增加量的 1972~1985 年資料散佈圖，如圖 5 所示，可以看出雖然資料點趨勢變化接近 45°角，但是關係並不够集中，顯示若直接利用機率轉換的方式求得降雨與水庫蓄水增加量之間的關係，勢必有相當的誤差存在。因此，有必要以其他方式，修正或推求降雨與水庫蓄水增加量的機率分佈轉換關係，以增加模擬的可信度。

3.3 降雨與水庫蓄水增加量轉換關係

針對以上結果，本研究提出以下四種推求降雨機率分佈與水庫蓄水增加量機率分佈之轉換關係。

1. 方法 A：假設水庫的蓄水量增加量機率分布曲線與降雨的機率分布曲線相同，直接

以機率分佈對應關係進行轉換。如 CWB 預報降雨正常值區間為累積機率 30%~70%之間，則水庫的蓄水增加量亦以累積機率 30%~70%之間為正常值區間。因此，直接推求水庫蓄水增加量累積機率 30%以及 70%所對應的水庫蓄水增加量，即為 CWB 預報氣候為正常值時，水庫蓄水增加量的範圍。

2. 方法 B：方法 A 假設水庫的蓄水量增加量機率分布曲線與降雨的機率分布曲線具有相同的分佈，然而實際上兩者仍存在誤差，因此必須透過誤差修正(Bias Correction) (Murphy, 1999)，使兩者具有相同的機率分佈曲線。

$$\frac{(S_m - \bar{S}_m)}{\sigma_{S,m}} = \frac{(P_m - \bar{P}_m)}{\sigma_{P,m}} \dots\dots\dots(2)$$

$$S_m = \left(\frac{\sigma_{S,m}}{\sigma_{P,m}} \right) (P_m - \bar{P}_m) + \bar{S}_m \dots\dots\dots(3)$$

其中 S_m 為水庫第 m 月的蓄水增加量， \bar{S}_m 為水庫第 m 月的平均蓄水增加量， $\sigma_{S,m}$ 為水庫蓄水增加量第 m 月的標準偏差， P_m 、 \bar{P}_m 及 $\sigma_{P,m}$ 同公式(1)定義。令 S_m 等於修正值 $S_{m,BC}$ ，則

$$S_{m,BC} = \left(\frac{\sigma_{S,m}}{\sigma_{P,m}} \right) (P_m - \bar{P}_m) + \bar{S}_m \dots\dots\dots(4)$$

本研究利用石門水庫 1972~2000 年的每月水庫蓄水增加量以及台北氣象站每月降雨資料進行統計，分別求得每月蓄水增加量的累積機率分佈曲線，以及台北氣象站的月降雨累積機率分佈曲線，並利用誤差修正得到修正過後的累積機率分佈曲線，如圖 6 所示。可以看出水庫的蓄水增加量

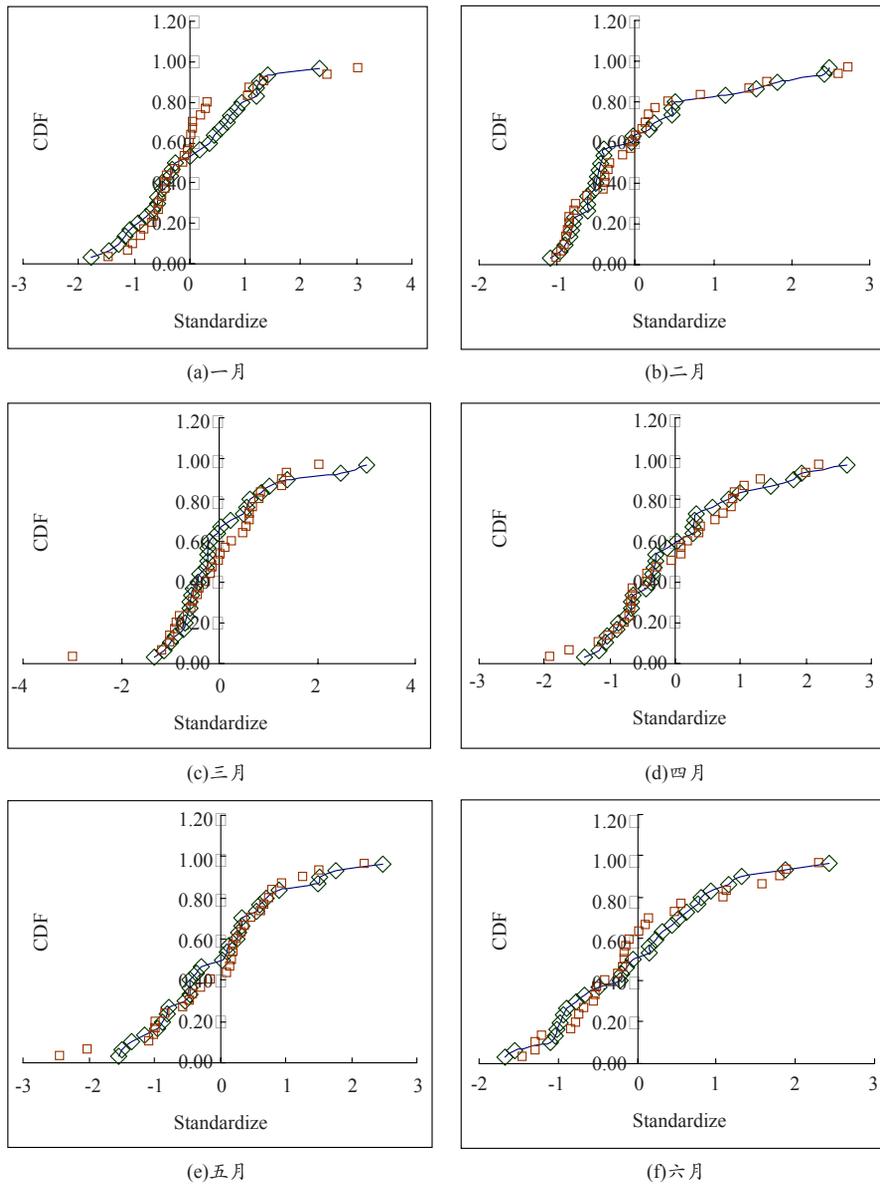


圖 6 台北測站降雨、石門水庫蓄水量變化以及修正誤差之後的石門水庫蓄水量變化之累積機率分佈曲線 (統計資料為 1972~2000) (◇ 台北測站降雨, □ 石門水庫蓄水量變化, ——石門水庫蓄水量變化(誤差修正))

累積機率分布曲線與降雨的累積機率分布曲線在修正前並非具有相同的分佈，在修正之後才会有相同的累積機率分佈曲線。經過修正之後，便以修正過後的水庫蓄水增加量累積機率 30%~70% (0.3~0.7) 所對應的區間為正常值區間。

3. 方法 C: 以台北氣象站雨量落於正常值區間時，石門水庫蓄水增加量亦屬於正常值區間的想法，統計各年台北氣象站各月雨量落於正常值區間時，所對應之石門蓄水變化量。由最小的蓄水變化量代表正常值區間的最小值，由最大的蓄水變化量代表正

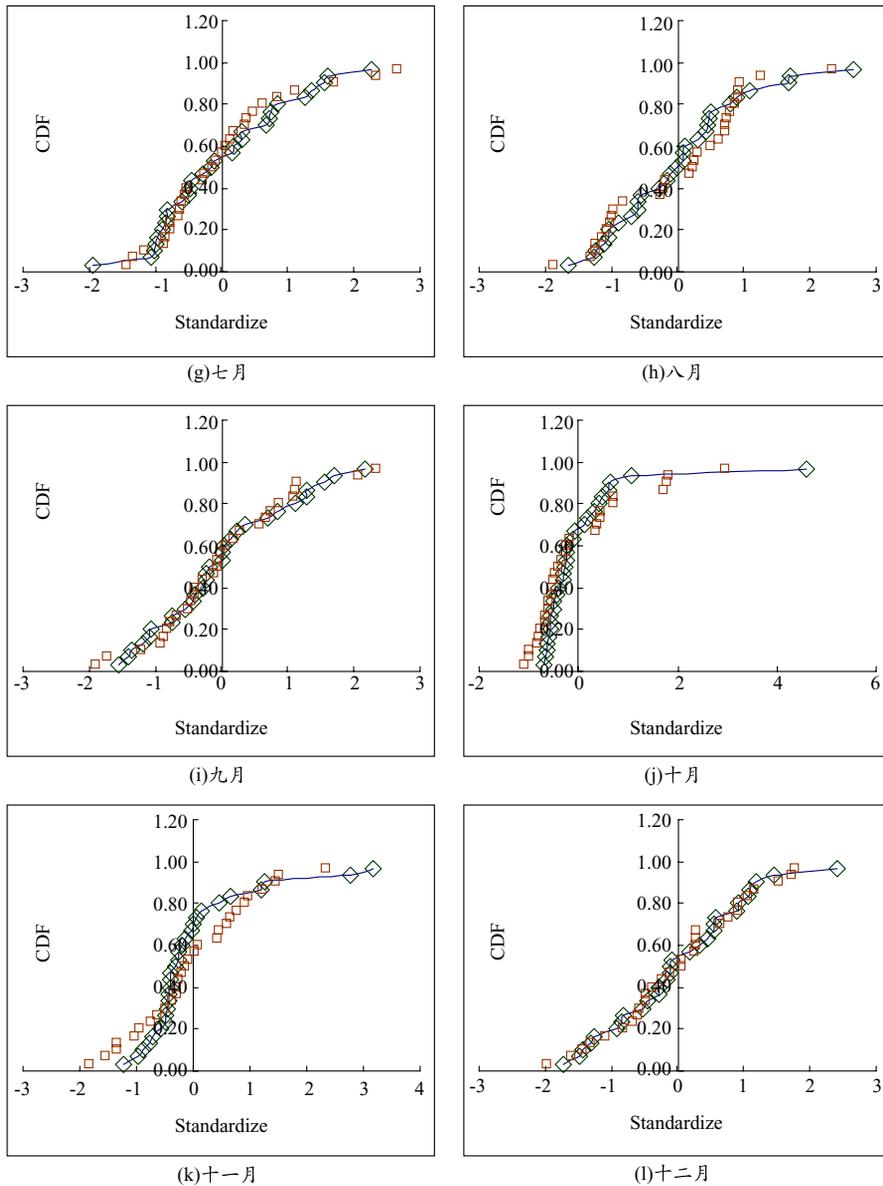


圖 6(續) 台北測站降雨、石門水庫蓄水量變化以及修正誤差之後的石門水庫蓄水量變化之累積機率分佈曲線(統計資料為 1972~2000) (◇ 台北測站降雨, □ 石門水庫蓄水量變化, ——石門水庫蓄水量變化(誤差修正))

常值區間的最大值。

4. 方法 D：利用優選的方式，優選水庫蓄水變化量的正常值區間。當台北氣象站屬於某一區間時，石門水庫蓄水增加量亦屬於同一區間，則稱之為準確。統計各年同一月份準確的比例，即為準確率。此方法乃

利用禁忌搜尋法(Tabu search)(Tung & Chou, 2002)，以方法 B 求得之石門水庫蓄水增加量正常值區間為初始值，移步大小為 100 ($10^3 \text{ m}^3/\text{月}$)，以各月的最大準確率為目標函數，優選各月水庫蓄水變化量的正常值區間。

表 4 四種方法之石門水庫蓄水增加量正常值區間(30%~70%)(單位：10³m³/月)

月份	方法 A		方法 B		方法 C		方法 D	
	30%	70%	30%	70%	30%	70%	30%	70%
1	-5051	5810	-5645	16124	-20771	23085	-2400	16100
2	-34811	-1522	-29907	2455	-37856	-6125	-38100	-3500
3	-41208	-238.5	-42924	-14302	-56809	48400	-42900	-18000
4	-35599	10239	-36110	-1594	-80258	21257	-135900	-1600
5	-22981	11826	-25359	6957	-81105	29564	-96700	-7400
6	-10083	22716	-20865	40608	-44433	90895	-16000	2300
7	-45373	7131	-56844	25550	-84187	33995	-45000	-30400
8	-26400	51071	-9620	38051	-38667	59198	26000	51500
9	-11063	46758	-12804	35308	-32747	141542	20300	141600
10	-24965	21243	-20726	9255	-35611	24475	-34400	21300
11	-18090	1871	-17524	-8990	-33324	2985	-117500	3000
12	2421	17943	3246	16719	-10232	28972	3300	29000

表 5 四種方法以 1972~1986 年資料檢定結果(準確率)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
方法 A	0.60	0.47	0.53	0.40	0.47	0.60	0.53	0.53	0.27	0.67	0.53	0.47	0.51
方法 B	0.73	0.47	0.60	0.47	0.47	0.40	0.47	0.53	0.33	0.53	0.47	0.47	0.49
方法 C	0.53	0.67	0.60	0.40	0.40	0.33	0.40	0.47	0.53	0.80	0.67	0.53	0.53
方法 D	0.80	0.73	0.67	0.60	0.73	0.73	0.73	0.67	0.67	0.80	0.73	0.60	0.71

表 6 四種方法以 1987~2000 年資料驗證結果(準確率)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
方法 A	0.50	0.36	0.64	0.43	0.50	0.29	0.14	0.43	0.50	0.36	0.64	0.36	0.43
方法 B	0.43	0.36	0.64	0.36	0.50	0.57	0.36	0.57	0.43	0.50	0.64	0.36	0.48
方法 C	0.57	0.29	0.29	0.57	0.43	0.43	0.43	0.21	0.21	0.29	0.64	0.36	0.39
方法 D	0.47	0.80	0.40	0.67	0.33	0.53	0.33	0.47	0.33	0.53	0.53	0.60	0.50

四種方法皆以 1972~2000 年資料進行統計、運算或演算，所得到的結果如表 4。利用 1972~1986 年資料進行檢定，再以 1987~2000 年資料驗證。表 5 為檢定的結果，以方法 D 的結果最好；而表 6 為驗證的結果，雖然方法 B 於 3、5、6、8、11 月份有較優於方法 D 的結果，但是平均而言仍以方法 D 有較高的準確率。而台灣乾旱多發生在春季，對於乾旱預警而言，一至六月的氣候預報能力比其他月份重要得多。而驗證結果中，方法 D 一至六月的準確率平均值有 0.53，方法 B 只有 0.48，因此仍以方法 D 有較好的結果。整體而言，方法 D 所推求的石門水庫蓄水增

加量正常值區間有較好的結果，亦即利用優選的方式推求的結果最佳。因此，本研究將以方法 D 優選的石門水庫蓄水增加量正常值區間作為解析機率模擬法中，降雨正常值所對應的水庫蓄水增加量正常值。而以歷史資料最小值至水庫蓄水增加量正常值區間下限對應降雨偏少值，以歷史資料最大值至水庫蓄水增加量正常值區間上限對應降雨偏多值。

四、結果與討論

4.1 歷史乾旱事件模擬

由中央氣象局所提供的季節預報資料包括

從 2001 年三月到 2003 年十月，在此將以此預報資料模擬 2002 年初以及 2003 年初的乾旱時期水庫蓄水量變化。

分析中央氣象局預報資料，以第 97 號預報—2002 年一月預報為例，其偏少、正常以及偏多的降雨發生機率為別為 40%、30%、30%，雖然降雨偏低的發生機率較大，但是發生降雨屬於正常值以及偏多的亦分別佔有 30%。因此，同時考慮有 30%的機率落在降雨正常值以及 30%的機率落在降雨偏多的蒙地卡羅模擬，將使得模擬結果的信賴區間變大，同時也影響了預測平均值。因此，模擬過程將以最大發生機率的預報區間代表預報的氣候，以 2002 年一月預報為例，其偏少、正常以及偏多的降雨發生機率為別為 40%、30%、30%，則代表氣候預報為偏少。

利用蒙地卡羅模擬法模擬時，將利用均勻亂數選取變數的方式，於對應預報氣候的水庫蓄水變化量區間取樣(re-sampling)，共模擬 1000 次。由模擬結果求得 95%信賴區間以及平均值。以下將分別針對 2002 年以及 2003 年乾旱事件進行模擬。

A. 2002 年乾旱事件

2002 年乾旱事件對台灣北部來說應該仍是記憶猶新，因為長期的缺水，造成北部各地限水多時。為了能夠應付民生用水，政府亦支付了龐大的補助費進行休耕策略。只是，氣候的未知性讓決策者無法事先預知未來的缺水情形，以及訂出完善的策略。因此，若能提早預知未來三個月水庫的可能蓄水量，必能提供決策者更完善的調適策略。2002 年一月至六月的 CWB 季節預報經過取最大發生機率預報偏少、正常以及偏多，如表 7 所示。模擬結果如圖 7~12 中，由模擬平均值可以看出水庫蓄水量預報的變化趨勢，藉由同時間的水庫操作規線，可以了解該時期水庫運轉的規則。由於水庫操作規線亦為不同等級蓄水量下的放水規則，因此可以藉由水庫操作規線來判別蓄水量或是乾旱的等級。利用燈號來判別乾旱警戒等級，當蓄水量低於嚴重下限時，則以紅燈表示；當高於嚴重下限，低於下限時，則以黃燈

表 7 CWB 第 97~102 號預報內容(2002 年一月~六月)取最大機率值氣候值結果

NO. 97 (一月預報)	一月	二月	三月
	偏少	偏少	正常
NO. 98 (二月預報)	二月	三月	四月
	正常	偏少	正常
NO. 99 (三月預報)	三月	四月	五月
	偏少	正常	正常
NO.100 (四月預報)	四月	五月	六月
	偏少	正常	正常
NO.101 (五月預報)	五月	六月	七月
	偏少、正常	正常	正常
NO.102 (六月預報)	六月	七月	八月
	偏少、正常	正常	正常

來表示；當高於下限時，則以綠燈來表示。將預測平均值與實際水位的乾旱警戒燈號進行比較如表 5 所示。第 97 號預報模擬結果中，前 7 旬的結果均可預測出水位低於等於下限且高於嚴重下限的黃燈，只有 8、9 旬預測水位為偏高；第 98 號預報模擬結果中，前 4 旬預測結果一樣，之後的 5 旬預測結果為偏高；第 99 號預報模擬結果中，只有第 15 旬預測結果不一樣，其他 8 旬均預測準確；第 100 號預報模擬結果中，第 15~18 旬預測結果不一樣，其他 5 旬均預測準確。而第 101 號以及 102 號的結果並不理想，六、七、八月的預測結果均不好，主要原因在於七月的颱風帶來了龐大的水庫入流量，一下子使水庫滿水。颱風屬於極端值，因此難以利用解析機率模擬法模擬。

由預報的結果來看，二月初的時候就可以預報四月時候的警戒燈號為紅燈，亦即蓄水量低於嚴重下限。此時正值插秧時期，若能即時利用此預報結果，適時的作出決策，必能減少不必要的開銷，並使水資源達到最大利用。

B. 2003 年乾旱事件

繼 2002 年乾旱年之後，2003 年也是一個乾旱年，只是 2003 年的乾旱似乎不似 2002 年乾旱那樣嚴重。2003 年一月至六月的 CWB 季節預報如表 11 所示。模擬結果如圖 13~18。將預測平均

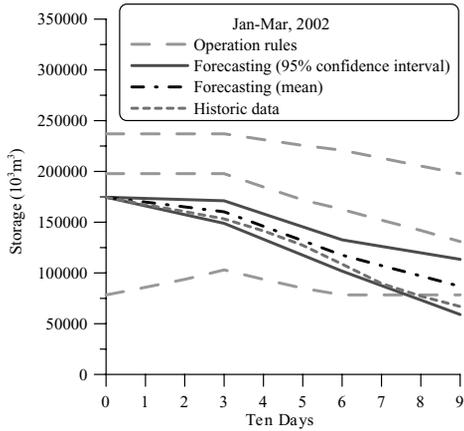


圖 7 No.97 石門水庫蓄水量預報結果圖

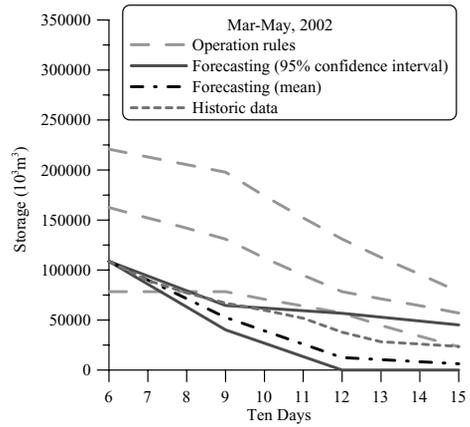


圖 9 No.99 石門水庫蓄水量預報結果

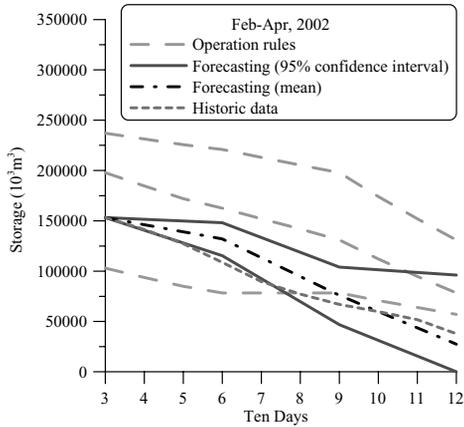


圖 8 No.98 石門水庫蓄水量預報結果

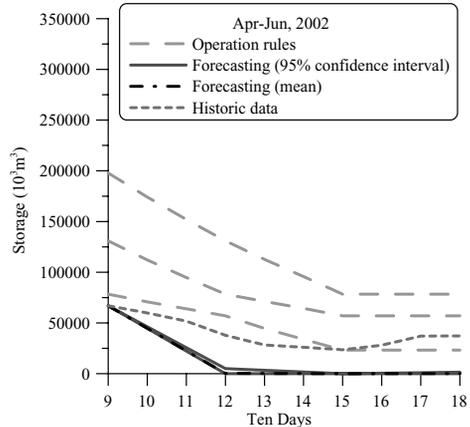


圖 10 No.100 石門水庫蓄水量預報結果

表 8 應用 CWB 第 97 號、98 號預報模擬之乾旱警戒燈號(R：紅燈，Y：黃燈，G：綠燈)

No.	旬	1	2	3	4	5	6	7	8	9
97	預測	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	實際	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	R	R
是否準確		○	○	○	○	○	○	○	×	×
No.	旬	4	5	6	7	8	9	10	11	12
98	預測	Y	Y	Y	Y	Y	R	R	R	R
	實際	Y	Y	Y	Y	R	R	R	R	R
是否準確		○	○	○	○	×	○	○	○	○

值與實際水位的乾旱警戒燈號進行比較如表 5 所示。第 109 號預測中，二月與三月的預報為偏多以及正常、偏多的預報，然而預報並不準確，使得模擬的蓄水量與實際有較大的落差。而第 110

表 9 應用 CWB 第 99 號、100 號預報模擬之乾旱警戒燈號(R：紅燈，Y：黃燈，G：綠燈)

No.	旬	7	8	9	10	11	12	13	14	15
99	預測	Y	R	R	R	R	R	R	R	R
	實際	Y	R	R	R	R	R	R	R	Y
是否準確		○	○	○	○	○	○	○	○	×
No.	旬	10	11	12	13	14	15	16	17	18
100	預測	R	R	R	R	R	R	R	R	R
	實際	R	R	R	R	R	Y	Y	Y	Y
是否準確		○	○	○	○	○	×	×	×	×

號預測則能準確預測變化趨勢，實際蓄水量均落在 95%信賴區間內，而前六旬均能預測準確，只有最後一個月的預報有落差。第 111 號~第 113 號預報的結果不甚理想，預報結果偏向於缺水，

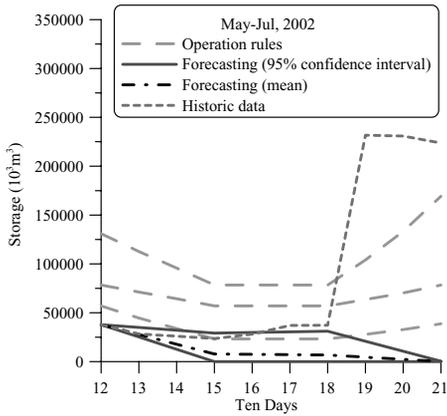


圖 11 No.101 石門水庫蓄水量預報結果

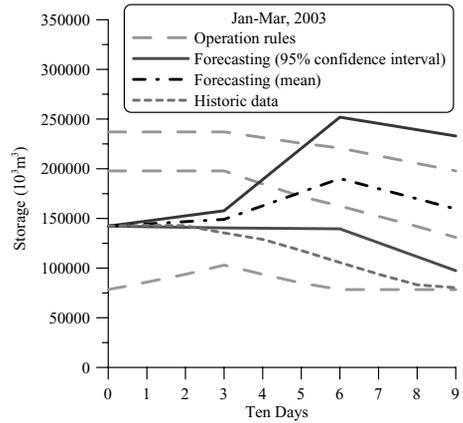


圖 13 No.109 石門水庫蓄水量預報結果

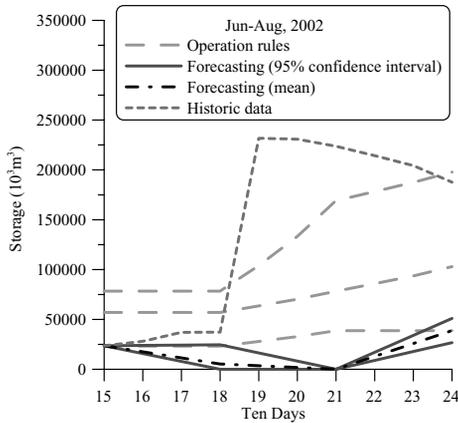


圖 12 No.102 石門水庫蓄水量預報結果

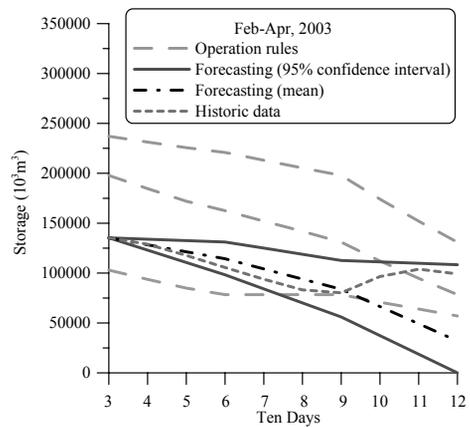


圖 14 No.110 石門水庫蓄水量預報結果

表 10 應用 CWB 第 101 號、102 號預報模擬之乾旱警戒燈號(R：紅燈，Y：黃燈，G：綠燈)

No.	旬	13	14	15	16	17	18	19	20	21
101	預測	R	R	R	R	R	R	R	R	R
	實際	R	R	Y	Y	Y	Y	G	G	G
是否準確		○	○	×	×	×	×	×	×	×
No.	旬	16	17	18	19	20	21	22	23	24
102	預測	R	R	R	R	R	R	R	R	R
	實際	Y	Y	Y	G	G	G	G	G	G
是否準確		×	×	×	×	×	×	×	×	×

可是實際水位卻多落於操作規線之下限以上。第 114 號的預報結果由表 14 來看，第一個月以及第三個月均預測準確，只有第二個月不準。由圖 18 來看，第一個月，也就是六月的時候雨量較多，

表 11 CWB 第 109~114 號預報內容(2003 年一月~六月)取最大機率值氣候值結果

NO. 109	一月	二月	三月
(一月預報)	正常	偏多	正常、偏多
NO. 110	二月	三月	四月
(二月預報)	正常	正常	正常
NO. 111	三月	四月	五月
(三月預報)	正常	正常	偏少
NO. 112	四月	五月	六月
(四月預報)	正常	正常	正常
NO. 113	五月	六月	七月
(五月預報)	正常	正常	正常
NO. 114	六月	七月	八月
(六月預報)	正常	偏少、正常	正常

表 12 應用 CWB 第 109 號、110 號預報模擬之乾旱警戒燈號(R：紅燈，Y：黃燈，G：綠燈)

No.	旬	1	2	3	4	5	6	7	8	9
109	預測	Y	Y	Y	Y	G	G	G	G	G
	實際	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
是否準確		○	○	○	○	×	×	×	×	×
No.	旬	4	5	6	7	8	9	10	11	12
110	預測	Y	Y	Y	Y	Y	Y	R	R	R
	實際	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	G	G
是否準確		○	○	○	○	○	○	×	×	×

氣候值應屬於偏多，而 CWB 預報為正常，使得第一個月的蓄水量預報有所落差，進而影響後面二個月的預報結果。

試著以實際的氣候值重新模擬五月~七月以及六月~八月，如圖 19、20。與圖 17、18 比較之，可以發現由實際氣候值模擬的結果，平均蓄水量均接近實際蓄水量。因此，CWB 預報若能準確，將可以得到接近實際蓄水量的模擬結果。

4.2 可信度分析

由以上的結果顯示，CWB 的預報結果將影響模擬的結果。在預報準確度的不確定因素之下，究竟模擬的結果有多少的可信度？我們利用 CWB 提供的 2001 年四月到 2003 年十月預報資料進行模擬與統計。由於預報的長度為三個月，亦即九旬預報長度，因此將分別計算每一旬的可信度：

$$\text{可信度} = \text{成功的次數} \div \text{模擬次數}$$

利用水庫操作規線區分成三個區間，分別為低於嚴重下限區間，低於下限以及高於嚴重下限區間，以及高於下限等三個區間。當模擬的水庫蓄水量落在實際蓄水量同一區間時，則代表預測準確或成功。依此計算各預測旬的成功次數，分別求得可信度如表 15 所示。第一預報旬的可信度最高，而前四個預報旬的可信度均達到 0.7 以上。第七、八、九預報旬的可信度雖然較低，但仍大於 0.5，顯示第七、八、九預報旬的可信度仍然比用猜的可信度還要來的高。

4.3 2006 年一~三月預報

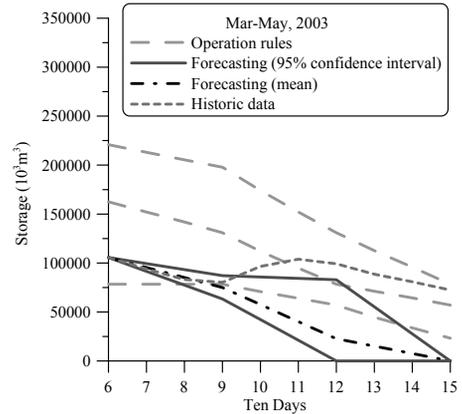


圖 15 No.111 石門水庫蓄水量預報結果

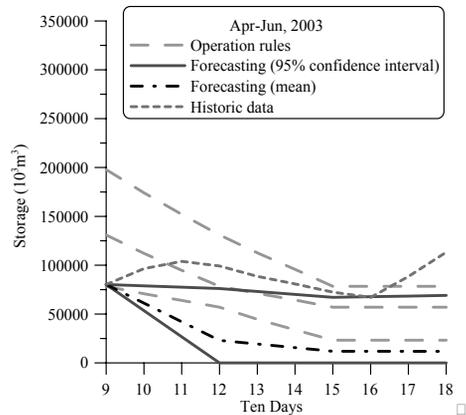


圖 16 No.112 石門水庫蓄水量預報結果

表 13 應用 CWB 第 111 號、112 號預報模擬之乾旱警戒燈號(R：紅燈，Y：黃燈，G：綠燈)

No.	旬	7	8	9	10	11	12	13	14	15
111	預測	Y	Y	R	R	R	R	R	R	R
	實際	Y	Y	Y	Y	G	G	G	G	G
是否準確		○	○	×	×	×	×	×	×	×
No.	旬	10	11	12	13	14	15	16	17	18
112	預測	R	R	R	R	R	R	R	R	R
	實際	Y	G	G	G	G	G	G	G	G
是否準確		×	×	×	×	×	×	×	×	×

本研究最終的目的在於利用 CWB 季節預報資料進行水庫蓄水量預報以及乾旱預警，因此未來將隨著 CWB 季節預報資料的發布與更新，同時進行水庫蓄水量預報的發佈與更新。在此利

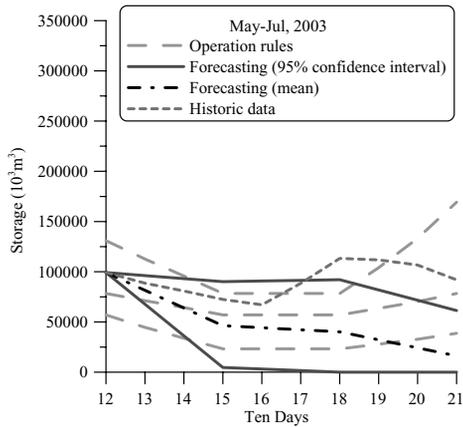


圖 17 No.113 石門水庫蓄水量預報結果

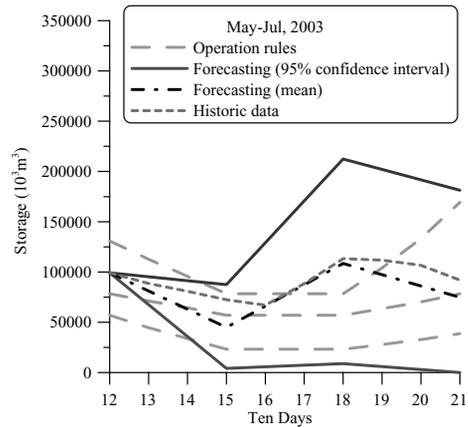


圖 19 2003 年五、六、七月石門水庫蓄水量以實際氣候值模擬結果

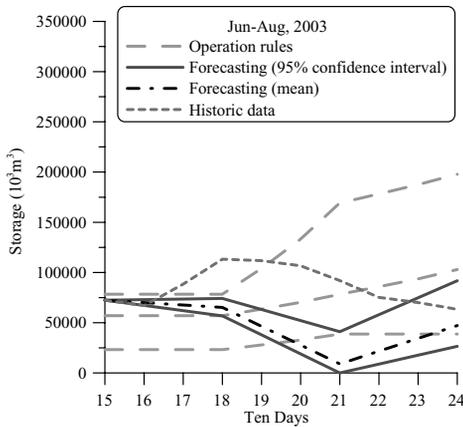


圖 18 No.114 石門水庫蓄水量預報結果

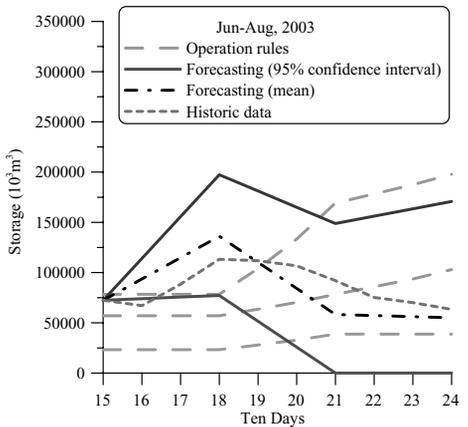


圖 20 2003 年六、七、八月石門水庫蓄水量以實際氣候值模擬結果

表 14 應用 CWB 第 113 號、114 號預報模擬之乾旱警戒燈號(R：紅燈，Y：黃燈，G：綠燈)

No.	旬	10	11	12	13	14	15	16	17	18
113	預測	G	Y	Y	Y	Y	Y	Y	R	R
	實際	G	G	G	G	G	G	G	G	G
是否準確		○	×	×	×	×	×	×	×	×
No.	旬	16	17	18	19	20	21	22	23	24
114	預測	G	G	G	Y	R	R	Y	Y	Y
	實際	G	G	G	G	G	G	Y	Y	Y
是否準確		○	○	○	×	×	×	○	○	○

表 15 本研究方法預報石門水庫蓄水量之各預報旬可信度

預測旬	1	2	3	4	5	6	7	8	9
可信度	0.87	0.74	0.74	0.74	0.68	0.61	0.58	0.52	0.55

用最新的 CWB 季節預報，如表 16 所示，進行石門水庫蓄水量預報模擬，如圖 21 所示。結果顯示今年一月~三月將會有蓄水量逐漸減少的趨

勢，以警戒燈號來表示的話，一月~三月的警戒燈號均為黃燈。然而模擬結果顯示，從二月底開始，95%信賴區間開始有部分低於嚴重下限水位。因此仍需注意未來發生乾旱的可能，並隨時注意氣候變化以及用水調度，以因應並減少乾旱帶來的衝擊。

表 16 CWB 第 145 號預報 – 2006 年一月~三月

月 份	一 月			二 月			三 月		
	偏少	正常	偏多	偏少	正常	偏多	偏少	正常	偏多
發生機率	40%	40%	20%	40%	40%	20%	40%	40%	20%
氣候值	偏少、正常			偏少、正常			偏少、正常		

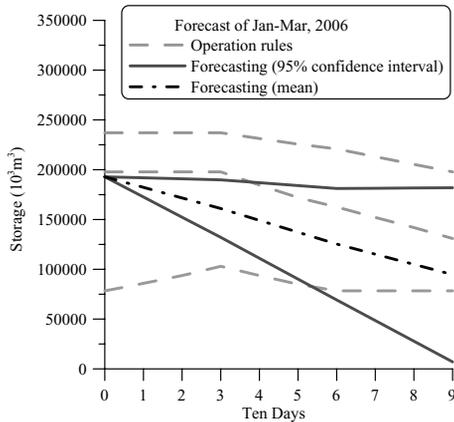


圖 21 2006 年一、二、三月石門水庫蓄水量預報結果

五、結 論

本研究嘗試以中央氣象局季節預報資料進行石門水庫蓄水量預報。利用解析機率模擬法，由降雨機率分佈與水庫蓄水增加量的機率分佈之轉換關係，以均勻分佈隨機變數進行蒙地卡羅模擬，而降雨機率分佈與水庫蓄水增加量的機率分佈之轉換關係乃利用禁忌搜尋法優選出來。

利用 2002 年以及 2003 年中央氣象局預報資料進行 2002 年與 2003 年乾旱事件的模擬，結果顯示利用季節預報資料進行水庫蓄水量模擬，可以由預報結果提早掌握乾旱發生的先機，提供決策者作出更完善的乾旱調適策略。然而氣候預報的不確定性也必須考慮。

利用 2001 年四月~2003 年十月的所有預報資料進行模擬，求得本研究針對石門水庫蓄水量預報的可信度。第一預報旬的可信度最高，達到 0.87，而前四個預報旬的可信度均達到 0.7 以上。第七、八、九預報旬的可信度雖然較低，但仍大於 0.5，比用猜的可信度還要來的高。

針對 2006 年一月~三月的預報進行水庫蓄

水量預報模擬，顯示 2006 年一月~三月的蓄水量將逐漸減少，並有可能使水位低於嚴重下限。應隨時注意未來氣候的變化以及擬定對策，以減少乾旱帶來的衝擊。

誌 謝

本研究承蒙中央氣象局委託研究計畫(編號：MOTC-CWB-93-6M-04)補助，及中央氣象局長期預報課以及盧孟明博士提供寶貴意見與資料，於此敬表由衷感激。

參考文獻

- Hamlet, A.F. & Lettenmaier, D.P., (1999), '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.
- Hamlet, A.F., Huppert, D., & Lettenmaier, D.P., (2002), '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.
- Landman, W.A., Mason, S.J., Tyson, P.D, Tennant, W.J.(2001), 'Statistical Downscaling of GCM Simulations to Streamflow,' *Journal of Hydrology*, Vol.252, pp.221-236.
- Murphy, J (1999), 'An Evaluation of Statistical and Dynamical Techniques for Downscaling Local Climate,' *Journal of Climate*, Vol.12, pp. 2256-2284
- Tung, C. P. and C. A. Chou. (2002), 'Application of Tabu Search to Groundwater Parameter Zonation,' *Journal of American Water Resou-*

- rces Association. 38(4):1115-1126. SCI (NSC 89-2313-B-002-248)
- Wood, A.W., Maurer, E.P., Kumar, A., & Lettenmaier, D.P. (2002), 'Long Range Experiment Hydrologic Forecasting for the Eastern U.S.' Journal of Geophysical Research, Vol.107, D20, 4429.
- Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V. and Lettenmaier, D.P., (2004), Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, Climatic Change Vol. 62, Issue 1-3, 189-216
- 萬象(1990),「水庫即時優選操作與風險分析之研究」,台灣大學土木工程學研究所博士論文。
- 楊道昌、陳姜琦、吳雷根、游保杉(2003),“結合水文模式與氣象資料預報長期逕流量之研究”,農業工程學報,第四十九卷,第一期,第 23-33 頁。

收稿日期：民國 95 年 1 月 9 日

修正日期：民國 95 年 2 月 23 日

接受日期：民國 95 年 3 月 1 日