

利用跨尺度天氣預報決定解除限水時間—— 以民國 100 年石門水庫為例

Releasing Water Rationing Based on the Cross-Scale Weather Forecast: A Case Study of Taoyuan Area in 2011

國立中央大學
水文與海洋科學研究所
碩士班研究生

黃 群 展

Qun-Zhan Huang

國立中央大學
水文與海洋科學研究所
教授

李 明 旭

Ming-Hsu Li

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授

童 慶 斌

Ching-Pin Tung

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
助理教授

許 少 瑜*

Shao-Yiu Hsu

摘 要

乾旱時期限水措施往往需要等到水情已經足夠明朗後才解除。然而，根據歷史天氣紀錄，多數情境具備提早解除限水的條件。以民國 100 年石門水庫限水為例，本研究利用月、季天氣預報與氣候平均預測，並考慮不同天氣預報命中率下，探討解除限水的時刻，以及決策時機。歷史資料顯示，民國 100 年石門水庫的限水停止約到六月底。以 100 年實際入流量推算，約可於第十四旬(五月上旬)解除限水。本研究顯示，當季預報命中率為 100%時，採用完美短期氣候預報資訊最早可於三月上旬決定五月中旬時解除限水。然而當季預報命中率下降至 60%時，非完美短期氣候預報資訊顯示，在四月中下旬時，即可推測可望於五月中旬時解除限水。依實際 CWB 目前月、季長期天預報能力所假設的降雨預報情境下，仍具有提早解除限水的潛力，在本研究案例中約可提早 1 個月解除限水。

關鍵詞：長期天氣預報，天氣繁衍模式，GWLF 水文模式，系統動力模式，天氣預報不確定性。

ABSTRACT

Usually, water rationing against drought period is terminated after a significant amount of rainfall in the watershed of reservoirs. However, based on the historical weather records, it seems that the rationing can be terminated earlier. In this study, we

*通訊作者，國立中央大學水文與海洋科學研究所助理教授，32001 桃園市中壢區中大路 300 號，syhsu@ntu.edu.tw

employed the CWB monthly weather outlook, CWB seasonal weather outlook, and climatological weather forecast to determine the time of terminating water rationing for different hit-rates of weather forecasts. We used Shimen reservoir and the drought event in 2011, phase 1 water rationing had executed from March 1 to June 30, as our case study. Based on the reservoir inflow records in 2011, the rationing can be terminated as early as the middle May (14th ten-day). According to the weather outlooks (seasonal rainfall outlook) with the accuracy of 100%, we make decision in the early March, that the normally supply can start from middle May. With the accuracy of seasonal rainfall outlook of 60%, in the middle and late April, the termination of rationing in middle May can be estimated. Based the weather forecasts with current forecast system in Taiwan, the water can be supplied normally 1 month ahead.

Keywords: Long-term Weather Outlooks, Weather Generator, General Watershed Loading Functions, System Dynamic Model, Weather Forecast Uncertainty.

一、前言

台灣處於季風帶與颱風衝擊區上，具有豐沛的年降雨量約二千五百毫米。然而降雨集中於雨季：五、六月的梅雨季與夏季(七至九月的颱風為主)，以至於汛期(五至十一月)過後各主要水庫水位開始下降。台灣水庫能有效儲水量為 19 億立方公尺，供給每年約 43 億用水量。在此降雨與儲水條件下，以致台灣時常受旱災威脅。傳統評估水庫水情多利用歷史入流量的超越機率，然而在環境變遷的影響下，氣溫與降雨型態改變不易掌握，增加水資源管理困難度(黃文政, and 周家慶, 2008; 吳瑞賢 *et al.*, 2015)。因此，天氣與氣候預報資訊，對於水資源管理更顯得重要。(Brumbelow, and Georgakakos, 2001; Yao, and Georgakakos, 2001; Hamlet *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 2014; 吳瑞賢 *et al.*, 2015)。

於台灣，許多研究將長期天氣預報投入於乾旱事件的因應決策考慮。過去長期天氣預報應用已具相當成果。如 Yang *et al.* (2005)利用中央氣象局(CWB)月預報，預測水庫入流量，結果顯示結合氣象預報之入流量預測誤差會比傳統的預測方式來得小。Yu *et al.* (2014)利用 CWB 季天氣

展望，發展未來一至三個月缺水風險預報系統，其結果顯示季長期天氣預報能提早顯示缺水風險。沈孟妍(2012)利用 CWB 短期氣候預報分析乾旱春耕決策。於沈孟妍(2012)的基礎上，吳瑞賢 *et al.* (2015)探討加入 CWB 短期氣候預報於休耕決策應用，能降低決策失敗機率。

從回顧天氣預報應用於水資源相關研究中可知，此類研究大多利用水文模式結合長期天氣預報，預測未來水庫、水壩入流量，或進一步建立水資源系統的系統動力模式(System Dynamic Model, SDM)預測水資源分配。水文模式與長期天氣預報的連結則為「天氣繁衍模式」，能依設定天氣條件，繁衍出符合此條件之每日天氣序列。天氣預報能量化成入流量、水庫水位，提供更早且更明確之水情判斷(Yang *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 2014; 吳瑞賢 *et al.*, 2015)。

在預報能力方面，陳孟詩(2010)分析 CWB 月長期天氣展望之校驗結果顯示，降雨方面，第一周與 1 至 4 周預報準確率約在 0.45 以上，第二周則 4 成以下；溫度方面則有 5 成以上。季長期天氣展望之校驗結果顯示，溫度預報準確率皆於 0.55 以上。季預報，雨量預報方面第一個月，準確率約 0.47，第二個月約 0.43，第三個月約為 0.40

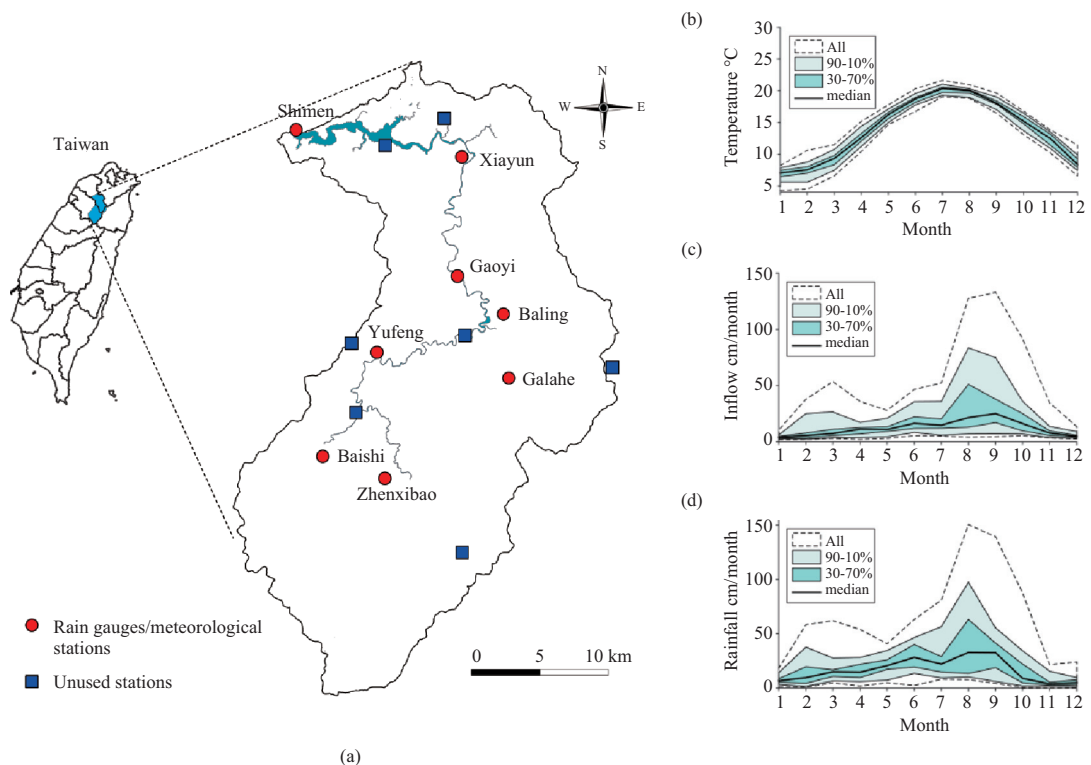


圖 1 研究地區。(a)石門水庫集水區。歷史(1982-2011)、(b)溫度、(c)降雨，與(d)入流量分布。以十一月至四月為乾季，於此同時入流量亦較少，為乾旱事降較常發生之期間。

以上。Kusunose and Mahmood (2016)曾表示不將天氣預報不確定性納入模式中，其結果將與實際反映有所偏差。

由於天氣條件與天氣預報的不確定性，限水措施往往需要等到水情已經足夠明朗後才解除。如民國 100 年乾旱事件，從 3 月初實施一階限水，直到 6 月底才解除。然而回顧當年石門水庫入流量顯示，政府應可更早解除限水。另外「經濟部水利署災害緊急應變小組作業要點」中對於「緊急應變小組」的解除保留相當的彈性。而天氣預報於「解除限水」是否能有幫助則尚未明確提及。若能提早解除限水，則能降低對於人民對於忍受缺水之不便的時間長度，同時減少對於工業生產影響。

於此基礎上，我們以民國 100 年乾旱事件與石門水庫水資源系統為例，利用不同尺度之天氣預報，結合水文模式與水資源系統之系統動力模

式預測石門水庫水位。並以滾動式預報方式，搭配不同限水決策，每周預估未來石門水庫水位。以未來水庫水位超越機率為依據，決定是否可解除限水。並以兩個時間點：「決策時間」與「解除時間」，評估短期氣候預報於解除限水的效用。以及探討同樣決策下，不同預報準確率所推估決策成功機率。根據本文案例與假設，顯示已目前短期氣候預報命中率，約可提早 27 天解除限水。

二、研究案例介紹與情境假設

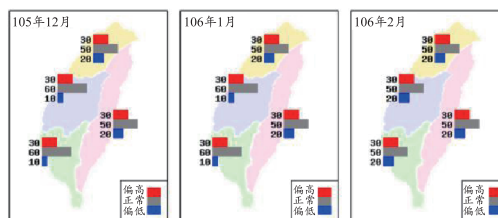
2.1 研究區域：石門水庫

石門水庫位於桃園市大溪區、龍潭區、復興區，與新竹縣關西鎮之間，以土石堤岸壩體攔截大漢溪中游，有著面積約 763 平方公里集水區，收集約 2300 毫米年雨量(圖 1)，為北台灣重要水資源之一。以每日約 90 萬公噸，供給桃園地區、

氣溫預報	第1週 (12月3日-12月9日)	第2週 (12月10日-12月16日)	第1-4週 (12月3日-12月30日)	雨量預報	第1週 (12月3日-12月9日)	第2週 (12月10日-12月16日)	第1-4週 (12月3日-12月30日)
	偏低 正常 偏高	偏低 正常 偏高	偏低 正常 偏高		偏少 正常 偏多	偏少 正常 偏多	偏少 正常 偏多
北部	0:60:40	30:50:20	10:60:30	北部	30:60:10	20:60:20	30:50:20
中部	0:60:40	20:50:30	10:60:30	中部	0:100:0	0:80:20	30:50:20
南部	0:40:60	20:50:30	10:60:30	南部	0:100:0	0:80:20	30:50:20
東部	0:60:40	30:50:20	10:60:30	東部	30:60:10	20:60:20	30:50:20

北部、中部、南部及東部分別以臺北、臺中、高雄及花蓮為參考氣象站。

(a)



(b)

圖 2 CWB (a)月長期預報，與(b)季長期預報範例。

板新地區、以及湖口等地區之民生、工業與公共用水，以及供給 67 萬公噸予農業灌溉用水。

水庫滿水位為 245 公尺，呆水位 195 公尺。集水區主要降雨時節為三、四月春雨，五、六月梅雨季，與七至十月颱風事件，汛期為五月至十月，枯水期則由十一月至隔年四月。降雨型態直接影響水庫入流量，使豐枯期差異明顯(圖 1c、d)。

2.2 中央氣象局長期天氣展望介紹

中央氣象局提供月、季長期天氣展望，預測台灣北中南東四地區未來氣溫與降雨趨勢，並發布於氣象局網頁上。月長期天氣展望發布於每周五 (http://www.cwb.gov.tw/V7/forecast/long/long_month.htm)，預報未來四周之雨量與氣溫類別機率，預報時間範圍分別為：第一周、第二周，以及第一至四周(圖 2a);季展望於每月月底公布(http://www.cwb.gov.tw/V7/forecast/long/long_season.htm)，預報未來三個月台灣北中南東四地區之每月降雨、氣溫類別機率(圖 2b)。類別分做三者：偏低(B)正常(N)以及偏高(A)，以 30 年雨量/溫度小至大排序後，依 30%-40%-30% 比例劃分而得(陳孟詩，2010)。

由於北部預報是以台北氣象站為參考氣象站，為了更加合理使用天氣預報於石門集水區中。童新茹(2011)分析了 1971 至 2000 年台北氣象站與石門水庫集水區八座雨量站：八德、玉峰、新白石、鎮西堡、高義、石門、嘎拉賀以及雲霞；與七座氣溫站：石門、十一份、巴陵、玉峰、霞雲、高義與復興，在雨量與氣溫相似性都有 0.5 以上。因此童新茹認為北部預報也適用於

石門水庫集水區。

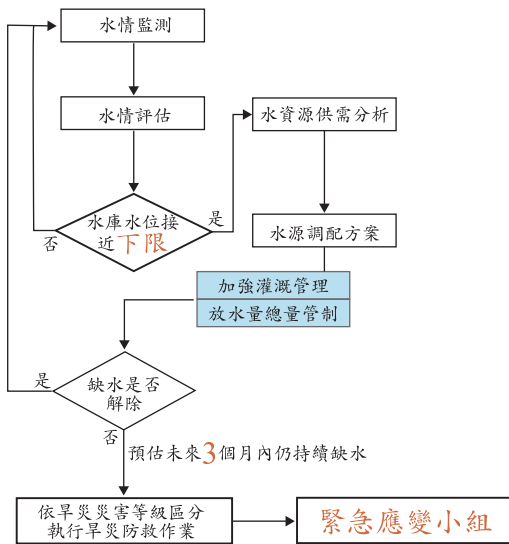
2.3 缺水事件：民國 100 年缺水事件

民國 100 年的旱災，石門水庫供水地區之限水措施，由三月上旬直到六月二十九日，歷經三個月。

依據「石門水庫全球資訊網」中 100 年大事紀要描述(經濟部水利署北區水資源局，2011)：在民國 100 年一、二月降雨量明顯偏少。二月下旬，北水局在入流量超越機率 80% 下，預估四月上旬石門水庫水位將會落於嚴重下限以下。CWB 季長期天氣預報顯示未來降雨偏少的可能性較高。於三月一日起民生與工業用水每旬總量 1200 萬噸打九折供水，農業用水三月中下旬 75 折為供應上限。以穩定供水至六月底為目標，四月一起桃園地區實施一階段限水，農業用水部分：三月中下旬以計畫量 75 折供應，四月上中旬以計畫量 7 折供應為供應上限，四月下旬以計畫量 65 折為供應上限。旱象因五月中旬梅雨鋒面減緩，直至六月底米雷颱風外圍環流及多日午後雷陣雨，且已進入豐水期而解除限水。

2.4 情境假設

依 101 年經濟部水利署「北區水源調配作法、警戒方式」簡報內容(圖 3)，水庫下限水位為水資源系統是否缺水的判別依據(水位貼近下限)。若預估三個月內持續缺水(水位未回升)，則依災害等級區分執行旱災防救作業。另外水情燈號則是一階一階發布或解除(圖 4)。於 100 年缺水事件，燈號為一階限水之黃燈，故水情轉為樂觀



北區水源調配作法、警戒方式-經濟部水利署(101)

圖 3 應變小組成立機制。

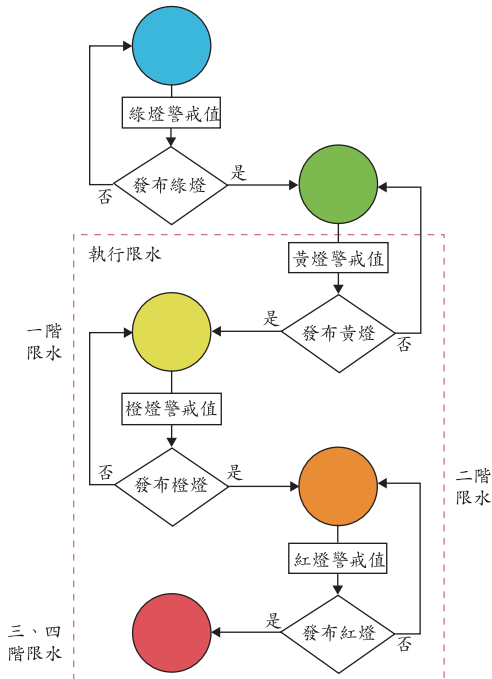


圖 4 水利署水情燈號。黃、橙與紅燈為執行限水之燈號。

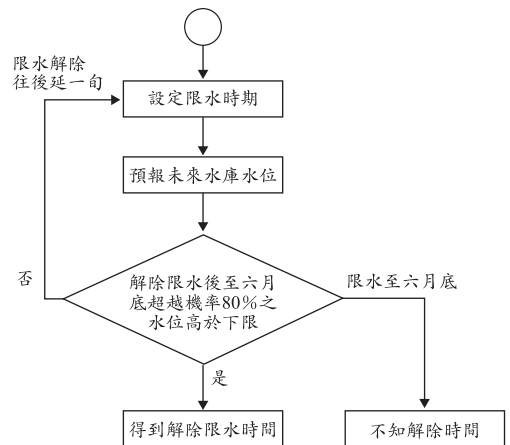


圖 5 本研究「解除時刻」決定流程圖。已水位超越機率 80%為高於下限為限水標準。

表 1 模式設定供水打折率

旬數	7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-18
農業用水打折率	1.00	0.75	0.70	0.65	0.65	0.85
非農業用水打折率	0.9	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85

時即回復正常供水。據此我們假設：

解除限水條件：

如圖 5，本研究以模式預測 80%超越機率之水位，於解除限水後至六月底前能高於下限，方能解除限水。此條件下所作決策約有八成成功率。

限水程度：

農業與非農業用水有各自供水打折率。農業部分採用當年所公布的打折率(表 1)。非農業則以民國 100 年實施之總量管制打九折的基礎上，調整第十至十八旬為 0.85。圖 6 顯示此設定所得模式模擬結果，與現實水位大致相符。本文使用模式於第三、節介紹。

天氣預報：

我們以當時期，實際石門集水區天氣類別作為預報，氣溫部分假設為完美預報。月長期天氣預報部分，皆假設為完全命中(完美預報)。季長期天氣預報降雨預報部分，假設為非完美預報，

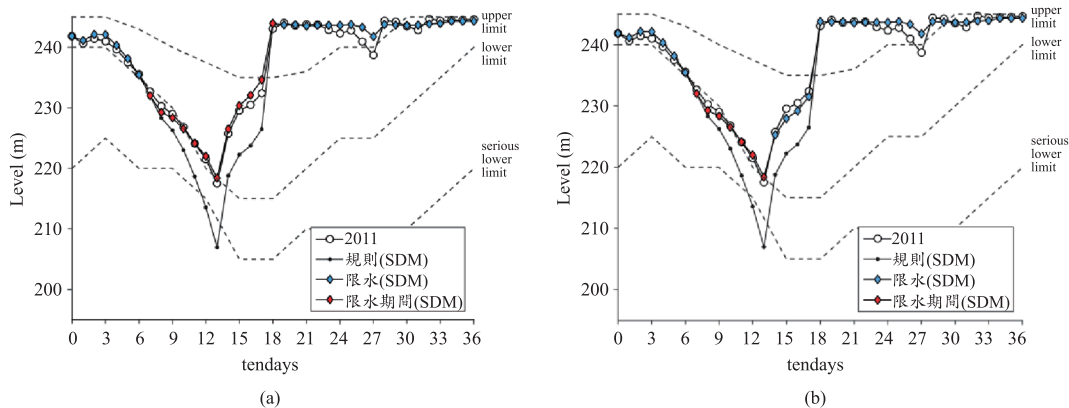


圖 6 民國 100 年(西元 2011 年)實際水位與以實際入流量模擬結果。(a)設定供水打折率模擬結果，與實際水位大致相符。(b)已知入流量下可於第十四句起解除供水。

表 2 預報與預報命中率假設

Forecast \ Outcome	B	N	A
B	g	$1 - \frac{g}{2}$	$1 - \frac{g}{2}$
N	$1 - \frac{g}{2}$	g	$1 - \frac{g}{2}$
A	$1 - \frac{g}{2}$	$1 - \frac{g}{2}$	g

表 3 參考月、季長期天氣預報預報校驗結果(陳孟詩，2010)，降雨預報命中率假設

月預報	r1	r2	r4
	0.49	0.39	0.47
季預報	r1	r2	r3
	0.48	0.44	0.41
r：降雨。數字為 lead-time。			

利用表 2 此聯列表，獲得不同命中率(g)之季降雨預報。此假設的預報情境可大致代表著預報命中率(g)下，天氣預報給予的天氣展望期望值。本文中假設命中率情境有 1、0.8 與 0.6。

另外依據天氣預報校驗結果(陳孟詩，2010)，本文另外有設定月、季降雨預報命中率(填於表 3 中)。以推估貼近實際預報能力的天氣預報，對於提早解除限水的幫助。

三、方 法

3.1 滾動式水庫水位預報

如圖 7，「滾動式跨尺度天氣預報水位架構」為每周預報一次水位，預報發布日後一個月內使用月天氣展望，發布後一或二個月使用季天氣展望。超過季長期天氣展望預報長度外的時間範

圍，皆採用氣候平均。集水區逕流量利用 GWLF (Haith *et al.*, 1992; Tung, and Haith, 1995)模擬，此水文模式輸入為日溫度，與日雨量序列的天氣資料。此天氣序列採用 Pickering *et al.* (1988)提出的隨機式「天氣繁衍模式(weather generator, WGEN)」，依預報情境繁衍出該天氣情境下之日溫度與日雨量序列。水庫水位則藉由建立水資源動態模式(即水資源系統之系統動力模式)模擬。水位機率分佈則以蒙地卡羅法，重複繁衍天氣序列(第 3.3 節)與水位模擬(第 3.4 節)求得。本文水位機率分布結果皆為 2000 組模擬所得。

3.2 GWLF

GWLF (Generalized watershed loading function, Haith *et al.* (1992))為集塊式模式，視整個集水區

	月天氣展望				季天氣展望								氣候平均		
發布	第一周	第二周	第三周 第四周		第二月				第三月				第N月		
2011年	3/5- 3/11	3/12- 3/18	3/19- 3/25	3/26- 4/1	4/2- 4/8	4/9- 4/15	4/16- 4/22	4/23- 4/29	4/30- 5/6	5/7- 5/13	5/24- 5/20	5/21- 5/27	5/28- 6/3	6/4- 6/10	6/11- 6/17
3月4日															
3月11日															
3月18日															
3月25日															
4月1日															

圖 7 「滾動式跨尺度天氣預報水位架構」每周預報一次水位，預報發布日後一個月使用月天氣展望，發布往後一至二個月使用季長期天氣展望，之後採用氣候平均。

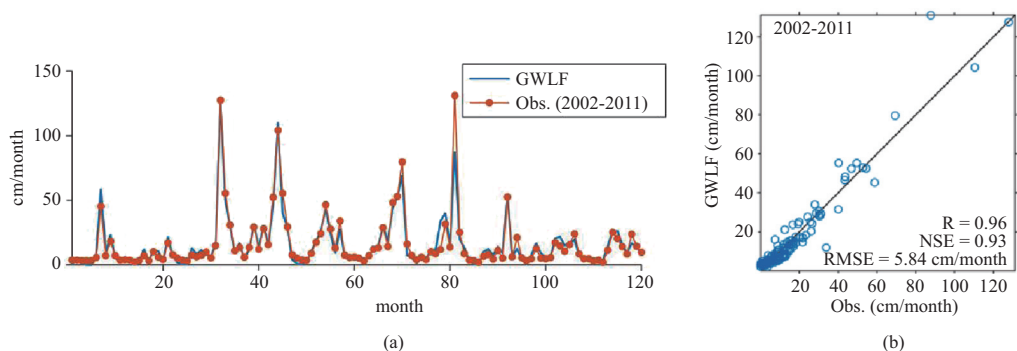


圖 8 GWLF 校驗結果(a)模擬與實際觀測入流量相近，其(b) NSE = 0.93。

為一個空間單元，考慮每日集水區水文系統平衡。始於降雨落於地表成為地表逕流 SW_t (cm/day)，此由 SCS 法(Soil Conservation Service, 1972)計算，而剩餘水分滲入土壤中後，以 Hamon (1961)的蒸發散模式計算集水區蒸發散 ET (cm/day)，以及「線性水庫模式」推估地下水出水 GW_t (cm/day)。由於土壤濕度會影響蒸發散，林思達(2009)利用折減係數(隨土壤含水量而變)修正 GWLF 中的蒸發散計算。而水庫入流量 Q_t (cm/day)則為

$$Q_t = SW_t + GW_t \quad \dots\dots\dots(1)$$

以上符號中，下標 t 代表為時間(day)。模式預測水庫入流量結果顯示圖 8，具有相當不錯的 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)係數得分(0.93)。

3.3 天氣繁衍模式

本研究採用 Pickering *et al.* (1988)所提出的 Weather Generator Model (Pickering *et al.*, 1988; Tung, and Haith, 1995)繁衍每日氣溫與雨量序列。此繁衍模式以歷史日溫度與日雨量統計特性，以一維 random walker 繁衍符合過往歷史特性之每日溫度與每日雨量。故每次繁衍所得每日降雨與每日天氣序列，皆是於設定之天氣類別中隨機生成的。因此利用蒙特卡羅法，重複生成天氣序列資料，便能涵蓋天氣類別之不確定性。

每日平均日溫 T_i (°C)方面，由一階自我迴歸模型(first order autoregressive)生產

$$T_i = \mu_T + \rho(T_{i-1} - \mu_T) + v_i \cdot \sigma_T \sqrt{1 - \rho^2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

v_i 為一標準常態隨機變數(random standard normal variate)， μ_T (°C)為月平均溫度， σ_T 為日溫標準差， ρ 為日溫第一階自關係數(lag-one autocorrelation)可由式(3)估算

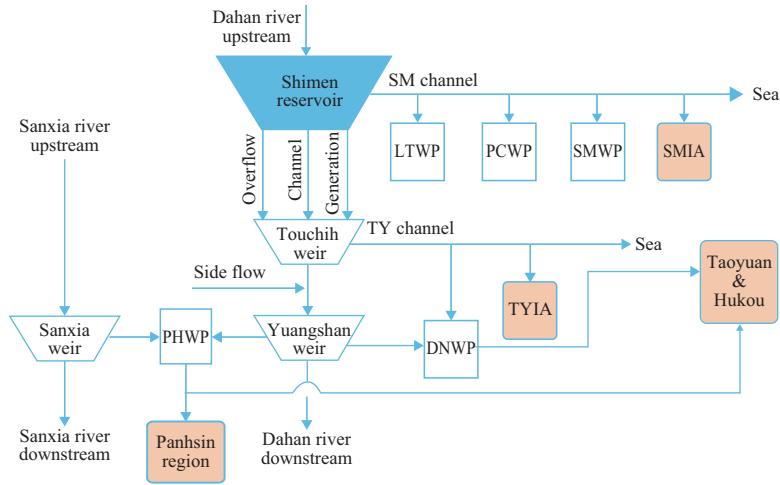


圖 9 石門供水系統架構。以桃園地區、板新地區為主要供水區域。

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots(3)$$

降雨方面則分為兩項工作，a)決定降雨事件發生，與 b)降雨量。降雨事件由一亂數 RN ($0 \leq R \leq 1$) 是否小於月平均降雨事件機率 $P(W)$ ，決定第一天是否降雨，或 RN 小於降雨事件條件機率： $P(W_i|W_{i-1})$ 、 $P(W_i|D_{i-1})$ 決定 t 日是否下雨，其中 W 代表下雨事件發生， D 為無降雨事件發生，下標 t 與 $t-1$ 標示發生日與前一日。若該日降雨，雨量可由歷史雨量累積次數分布 F 決定，常用累積次數分布曲線有：式(4)指數分布，與式(5)Weibull distribution (Selker, and Haith, 1990)。

$$F(x; \mu_m) = 1 - e^{-\mu_m x} \dots\dots\dots(4)$$

$$F(x; \lambda, k) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \dots\dots\dots(5)$$

此類曲線需要該時期雨天之雨量期望值 μ_m 或其他比例參數 λ 與形狀參數 k ，由參數優化決定。在此使用自然對數分布，並以一亂數 RND 決定降雨量

$$P = \mu_m \times [-\ln(1 - RUD)] \dots\dots\dots(6)$$

3.4 石門水庫水資源系統動態模式簡介

系統動力學(system dynamics)始於城市資源分配問題，系統動力模式(system dynamics modeling, SDM)亦被應用於水資源研究中(沈孟妍,2012；Yu *et al.*, 2014；吳瑞賢 *et al.*, 2015)。藉由了解與設定一系統運作規則，系統動力模式(system dynamics modeling, SDM)模擬事物(資源)於系統中的分布變化，而模式結構包含“level”、“rate”與“auxiliary”(Forrester, 1969)。“Level”描述「量」的多寡、“Rate”描述「量」於不同位置上的轉換率，而“Auxiliary”則用來加入其他分配條件、操作規則。

本研究於沈孟妍(2012)建立的大漢溪供水系統之系統動力模式的基礎上，改進模式並加入供水打折率之設定。建立模式架構如圖 9，此 SDM 中“Level”以水庫水量(水位)為主，並有四種“Auxiliaries”描述此系統操作規則：

1. 石門水庫操作規線(水利署發佈之「石門水庫灌溉與給水運用要點」)：
 - (a) 水庫水位標高在上限以上時，依據計畫配水量供水，並得視各標的用水需求增加調配之。
 - (b) 水庫水位標高在上限與下限之間時，依據計畫配水量供水。

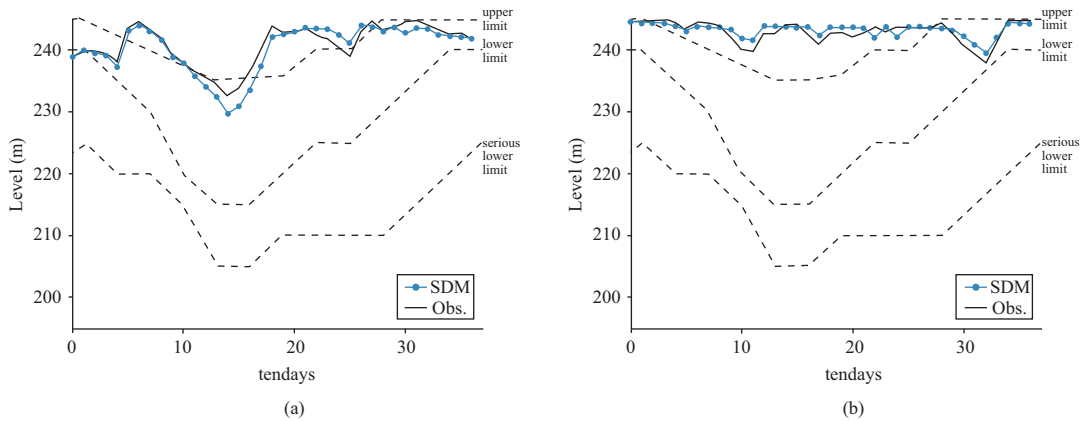


圖 10 (a)民國 99 年與(b)101 年非缺水年，實際水位(Obs.)與以實際入流量模擬結果(SDM)，顯示本文使用水資源系統動態模式能應用於模擬預測水庫水位。

- (c) 水庫水位標高在下限與嚴重下限之間時，依據計畫配水量供水為原則，為因應可能之持續枯旱，北水局得邀集相關單位預先協商配水量減供措施。
 - (d) 水庫水位標高在嚴重下限以下時，農業用水依據計畫配水量百分之五十供水為原則，家用及公共給水、工業用水依據計畫配水量百分之八十供水為原則，其實際減供水量由北水局邀集相關單位協商之。
2. 水資源系統設備設計上限：包含庫容上限、呆水位，水道設計流量，淨水廠(WP)設計處理量等。
 3. 供水上限：包含入流量上限與水權(計畫用水量)。
 4. 供水打折率：用以描述限水措施。

雖然本文水資源系統結構，將實際供水系統簡化，仍可以抓住非缺水年的實際水位變化情形(圖 10)。因此基於民國 100 年實際限水措施，可以藉由整體供水打折率，大致求得當年限水情形，同時應用於本文限水情境中。

四、結果與討論

本節將討論不同天氣預報命中率下，對於解除限水之幫助，以及對於天氣預報不確定性，對於決策成功的機率高低影響。

4.1 歷史入流量推估解除限水時刻

利用當年實際入流量推估，可於第十四句起解除限水(圖 10b)。民國 100 年乾旱事件，從三月初實施一階限水，直到六月底米雷颱風外圍環流所帶來降雨量後才解除限水。此表示於此乾旱事件中，約有一個半月(五月中至六月底)的時間是不必特別限水的。同時不論預報情境，最大提早解除限水天數應約為 50 天。

4.2 不同命中率之天氣預報的「決策時間」與「解除時刻」

利用天氣預報，預估未來水庫可能水位，如圖 11 與圖 12。依本研究方法，於決策失敗機率 80%下， $g = 1$ 時，二月二十六日並無法決定何時解除供水(圖 11)；而到了三月二十六日時，可決定十四句起解除供水(圖 12)。故「決策時間」為三月二十六，而「解除時刻」為第十四句。而依陳孟詩(2010)校驗結果所假設預報命中率，所得模擬結果顯示，於六月三日後，可決定即日起解除限水(圖 13)。於圖 14 中，整理本文所有情境下($g = 1, 0.8, \text{ and } 0.5$)之「決策時間」與「解除時刻」。當 $g = 0.8$ 時，可於四月一日決定十四句起解除限水。當 $g = 0.6$ 時，四月十五日時可以決定十四句起解除限水。於四月底後，「決策時間」與「解除時刻」大致相同。

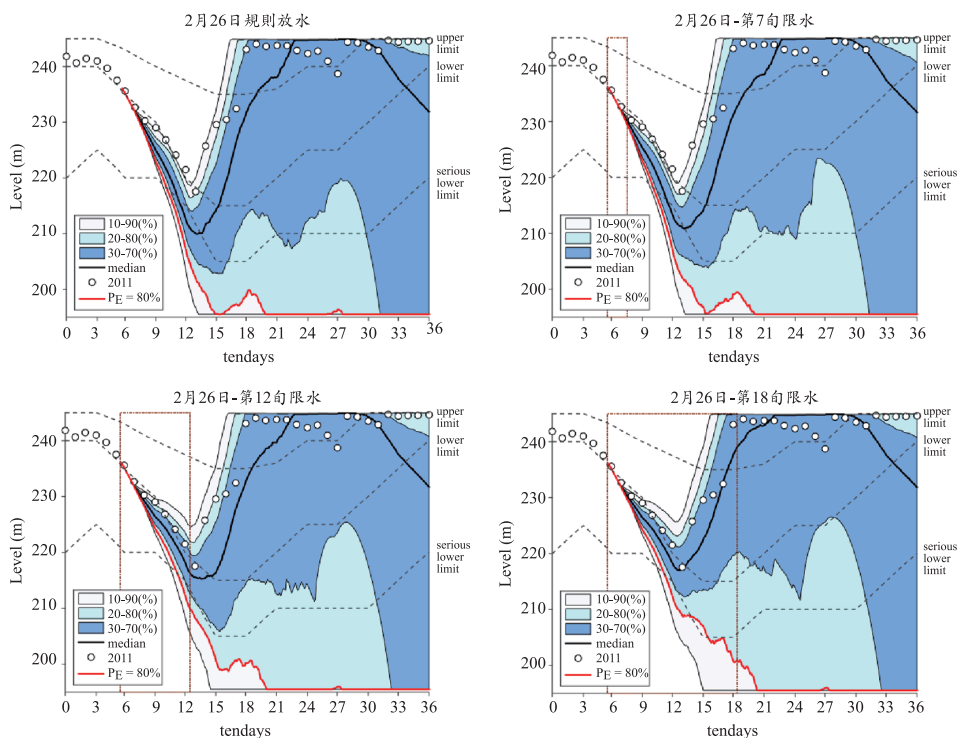


圖 11 類別預報 100%準確下，於二月二十六日無法決定何時解除限水。

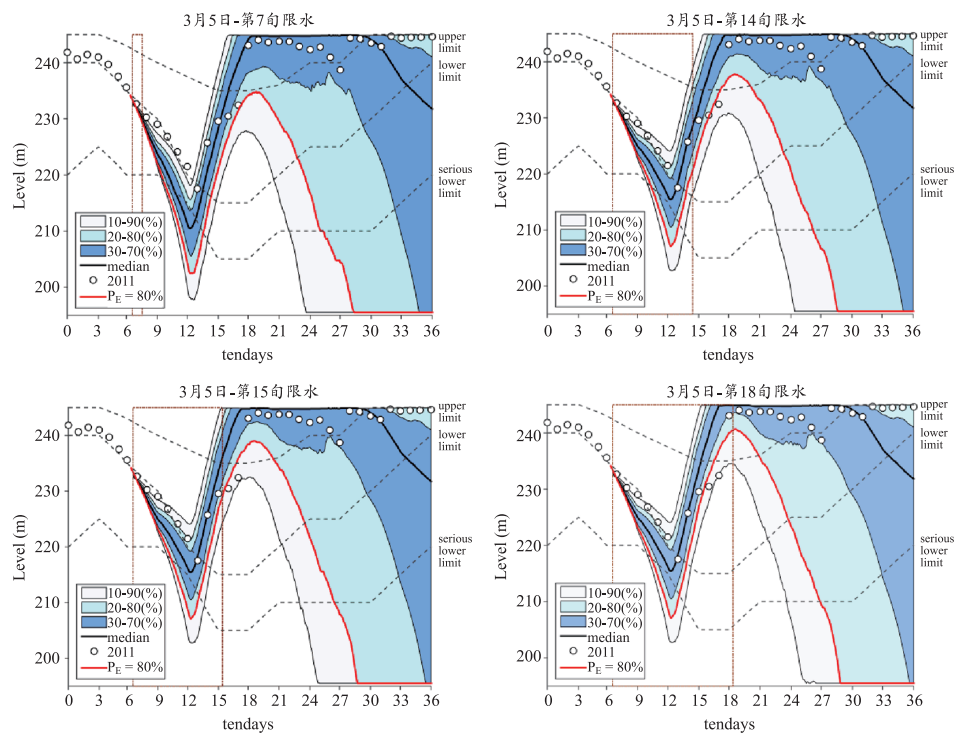


圖 12 類別預報 100%準確下，於三月五日可決定第十四旬起解除限水。

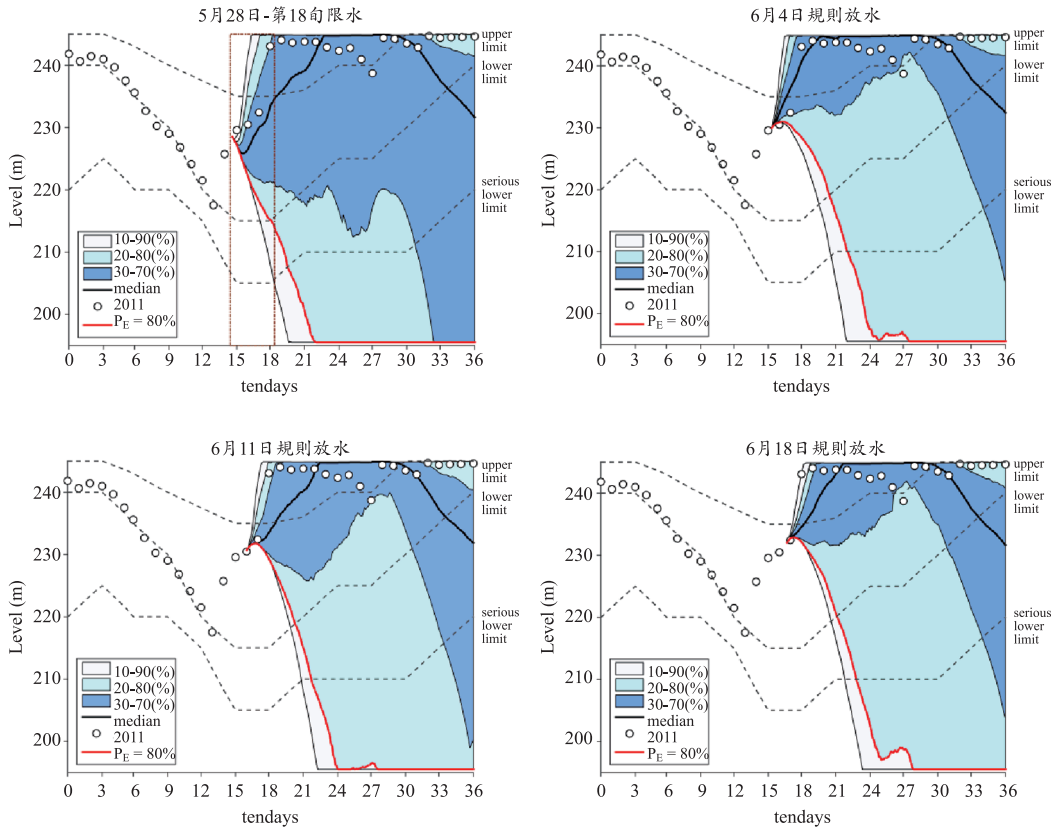


圖 13 類別預報準確率依陳孟詩(2010)校驗結果假設下，於六月三日後，可決定即日起解除限水。

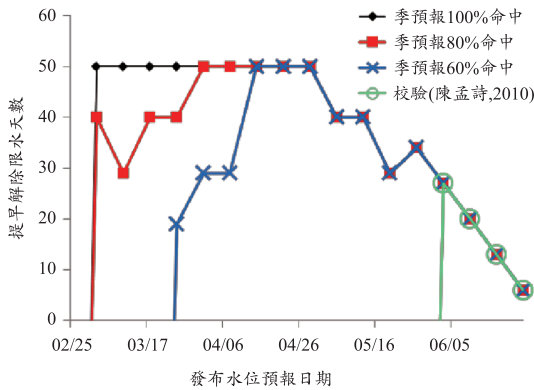


圖 14 季預報命中率對「決策時間」與「解除時刻」影響。隨預報命中率下降，「決策時間」與「解除時刻」延後。

隨著季長期降雨預報品質下降，對於未來水

位愈不確定，使得「決策時間」及「解除時刻」開始往後延(圖 14)。如 $g = 1$ 時，三月二十六日時，可決定提早 50 天解除限水；然而 $g = 0.6$ 下，於三月二十五日時只能提早 20 天。隨著時間的推移，月、季長期天氣展望預報的時間範圍往後平移，使得原本較為不確定之未來天氣，變得較能掌握。如圖 15(c)超越下限水位機率逐漸提高，尤以高準確率預報明顯。因此在五月中旬前，解除限水的提早天數開始增加，而最早能提早 50 天解除限水。過了四月，天氣預報涵蓋範圍為五至七月。五月中旬後至六月底，降雨條件多為正常-偏高。模擬結果顯示，不論季長期天氣預報準確率 1、0.8 或 0.5，趨勢上水庫蓄水量逐漸增加，使「決策時間」與「解除時刻」大致相同。

雖本文案例顯示，於季長期天氣預報(降雨)準確率 60%下，可提早 50 天解除限水。然而，

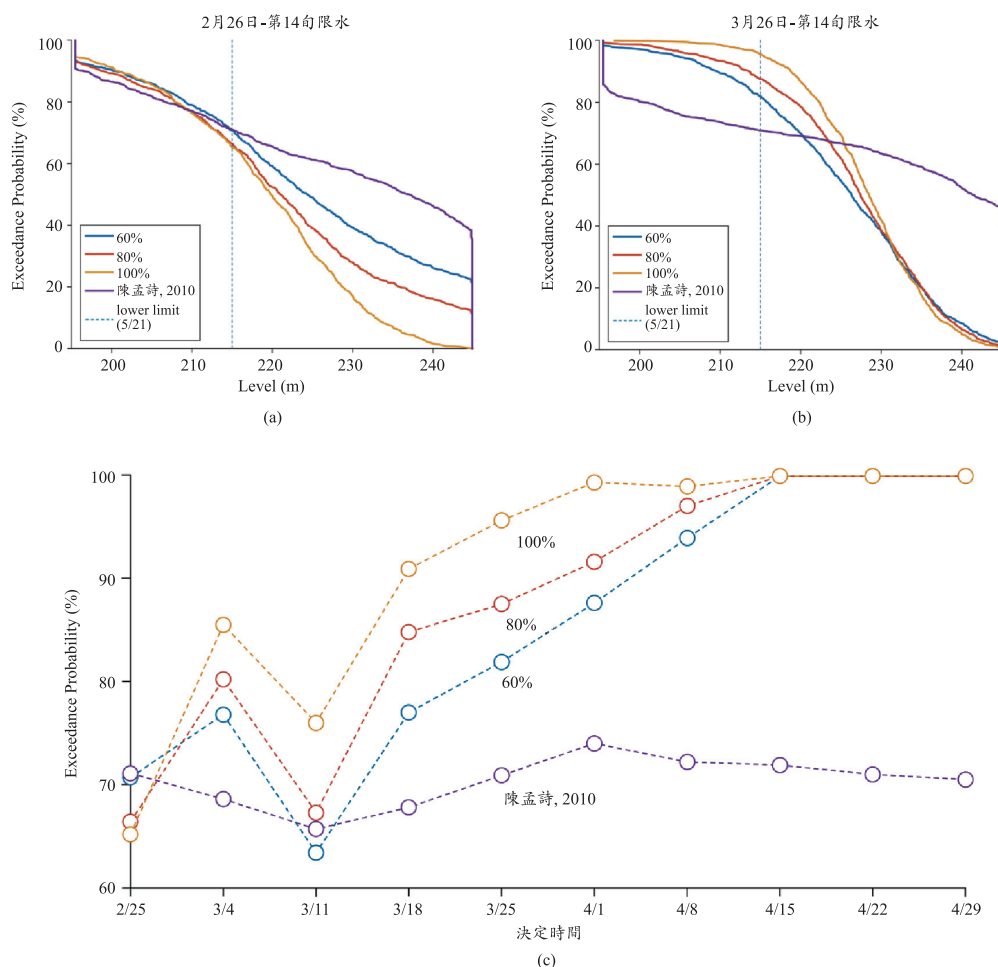


圖 15 不同命中率的天氣預報於同樣決策(限水至第 14 句)，五月二十一日時水位超越機率曲線：(a)二月二十六至第十四句限水，(b)三月二十六至第十四句限水，以及各個決策時間對應(c)超越下限水位機率。(a, c)於長期天氣預報範圍外時，完美預報顯示此時下決策成功機率是最低；(b, c)進入長期天氣預報長度範圍後，顯示若使用同樣決策，期望成功機率隨著命中率將低而下降。(c)對於實際命中率之天氣預報，時間的推進對於決策成功率提升幫助不大。

利用陳孟詩(2010)預報校驗所得預報命中率，所假設的雨量預報，六月三日之後才能決定能不能解除限水。相對於其他預報情境，本情境於月預報部分是非完美預報，在預報領先長度一個月內發散較快，於更長領先长度的水位預報結果更加模糊。

4.3 不同預報準確度於解除限水最大效益

仿照預報資訊價值的量化方式，評估預報效

益可利用此預報能否提供比無預報更多的好處，而預報的精進空間則為與完美預報下可得的效益差異(Carlsson, and Fullér, 1999)。於成功機率 80%下，完美長期天氣預報最大可提早約 50 天解除限水；對於 80% 命中率的季預長期天氣預報最大可提早約 50 天；而 60%命中率之季預長期天氣報也是約 50 天。似乎並沒有甚麼因為命中率提高而提早解除限水。唯實際預報命中率之預報情境，有 23 天的進步範圍，對於提早解除限

水決策幫助快有 1 個月。

以最早決定出最早「解除時刻」之「決策時間」為代表。與完美預報結果(3 月 4 日)相比, 80% 命中率之天氣預報晚 28 天; 60% 命中率之天氣預報晚 42 天; 而實際預報命中率之預報情境, 則晚了 91 天。依本文案例, 預報準確率提高後, 主要貢獻於可以更早獲得「決策時間」。這或許表示, 受限於自然條件, 預報準確率提高可能無法提供更早恢復供水依據, 但可以讓決策者、工廠更早知道何時可恢復供水, 並提前準備恢復正常供水工作。

4.4 不同天氣預報命中率應用之失敗機率

於天氣預報不確定性(命中率), 藉由表 2 所假設預報情境所考量, 可將其當作長期下來對於天氣展望的期望值。故, 所預測水庫水位大致可當作此預報命中率下的期望分布。前 4.2 節為考慮 80% 成功機率下所做決策, 而本節考慮若做相同決策時的決策失敗機率。

圖 15(c)顯示各個天氣預報情境(不同準確率), 同樣限水決策(限水至五月中旬)下, 於五月二十一日時水位超越下限水位的機率。本小節以此超越機率作為決策成功機率。

在季長期天氣預報未涵蓋五月時(決策時刻為二月二十五日), 二月二十五日下決策失敗機率約在 7 成至 6 成, 另外可以發現命中率越高, 顯示失敗機率也越高。當五月二十一日在季長期天氣展望範圍內後, 結果顯示不考慮天氣預報命中率而進行決策, 預估高於下限水位機率逐漸降低, 表示成功機率隨著預報的命中率降低而提降低。如果「決策時間」為三月二十五日, 決定五月下旬回復供水, 完美預報認為有 9 成以上的機率於五月二十一日水位超越下限; 命中率 80% 之季降雨預報, 超越機率約 87%; 命中率 60% 之季降雨預報, 超越機率約 82% 以上; 對於實際預報命中率而言, 超越機率約 70% 以上。隨著時間的推進, 決策成功率大致是提升的, 且預報命中率越高, 顯示決策的成功機率越高。

實際天氣展望, 可能給予明顯趨勢, 或給予十分保守的預測(接近氣候統計), 反應天氣預報

單位對於來天氣條件掌握程度的信心。但如果應用時缺乏了天氣預報不確定性的考慮, 模式結果對於高命中率天氣預報與低命中率天氣預報並無分別。若將不確定性納入, 模式預測結果才能顯示出對於預報命中率 60% 以下的天氣預報, 無法於三月二十六日決定五月中旬可以恢復供水。

五、結 論

本研究應用不同時間尺度天氣預報, 結合水文模式及水資源系統之系統動力模式, 推算未來水庫水位, 並應用於「恢復供水時機」的分析。結果顯示, 天氣預報資訊有機會讓決策者提早決定解除限水時機。天氣預報能力明顯地決定「決策時間」與「解除時刻」。以不同季降雨預報命中率之情境下, 隨著預報命中率逐漸下降, 「決策時間」與「解除時刻」延後。而過了最早「解除時刻」後, 「決策時間」大致也為「解除時刻」(圖 14)。依實際目前 CWB 月、季長期天氣預報能力所假設的降雨預報情境下, 仍具有提早解除限水的潛力, 在本研究案例中約可提早 1 個月解除限水。然而實際決策涉及不同部門、地區, 決策過程是較為複雜的, 本文提出的方法能否應用於實際決策中能待評估。且面對不同限水程度, 需進一步探討如何決策恢復供水。此外, 天氣預報不確定性加入決策中, 能提供更被接受與合理應用的水庫水位機率預測結果。

六、謝 誌

感謝氣象局提供資料。

參考文獻

1. Brumbelow, K., Georgakakos, A., 2001, "Agricultural planning and irrigation management: The need for decision support". The Climate Report, 1(4), 2-6.
2. Carlsson, C., Fullér, R., 1999, "Capital budgeting problems with fuzzy cash flows". Mathware and Soft Computing, 6(1), 81-89.
3. Forrester, J. W., 1969, "Urban dynamics" (Vol. 114): MIT press Cambridge.

4. Haith, D. A., Mandel, R., Wu, R. S., 1992, "GWLF, generalized watershed loading functions, version 2.0, user's manual". J Dept. of Agricultural and Biological Engineering, Cornell University, Ithaca, NY.
5. 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, 128(2), 91-101.
6. Hamon, W. R., 1961, "Estimating potential evapotranspiration". Journal of the Hydraulics Division, 87(3), 107-120.
7. Kusunose, Y., Mahmood, R., 2016, "Imperfect forecasts and decision making in agriculture". Agricultural Systems, 146, 103-110.
8. Pickering, N. B., Stedinger, J. R., Haith, D. A., 1988, "Weather input for nonpoint-source pollution models". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 114(4), 674-690.
9. Selker, J. S., Haith, D. A., 1990, "Development and testing of single-parameter precipitation distributions". Water Resour. Res., 26(11), 2733-2740.
10. Soil Conservation Service. 1972, "National Engineering Handbook, section 4: Hydrology": United States Department of Agriculture, available from U. S. Government Printing Office, Washington, D.C.
11. Tung, C.-P., Haith, D. A., 1995, "Global-Warming Effects on New York Streamflows". Journal of Water Resources Planning and Management, 121(2), 216-225.
12. Yang, T.-C., Yu, P.-S., Chen, C.-C., 2005, "Long-term runoff forecasting by combining hydrological models and meteorological records". Hydrological Processes, 19(10), 1967-1981.
13. Yao, H., Geogakakos, A., 2001, "Assessment of Folsom Lake response to Historical and Potential Future Climate Scenarios: 2. Reservoir Management". Water International, 249, 176-196.
14. Yu, P.-S., Yang, T.-C., Kuo, C.-M., Wang, Y.-T., 2014, "A Stochastic Approach for Seasonal Water-Shortage Probability Forecasting Based on Seasonal Weather Outlook". Water Resources Management, 28(12), 3905-3920.
15. 吳瑞賢, 蔡明君, 黃群展, 許少瑜, 2015, 「結合氣候季預報評估桃園地區一期作於不同決策時機停灌休耕之風險」, 台灣水利, 63 卷 4 期, 1-11。
16. 沈孟妍, 2012, 「應用短期氣候預報於春乾旱休根決策之探討-以大漢溪供水系統為例」, 國立中央大學水文與海洋科學研究所, 碩士論文。
17. 林思達, 2009, 「改良 GWLF 模式應用於翡翠水庫入流量模擬」, 國立中央大學水文與海洋科學研究所, 碩士論文。
18. 陳孟詩, 2010, 「中央氣象局月季長期天氣展望之預報校驗」。「天氣分析與預報研討會」發表之論文, 台北市。
19. 童新茹, 2011, 「結合季長期天氣預報與水文模式推估石門水庫入流量」, 國立中央大學水文與海洋科學研究所, 碩士論文。
20. 黃文政, 周家慶, 2008, 「桃園地區農業休耕時機之探討」, 農業工程學報, 54 卷 2 期。
21. 經濟部水利署北區水資源局, 2011。石門水庫全球資訊網—100 年大事紀要。 Retrieved 10-August, 2016, from <http://www.wranb.gov.tw/lp.asp?ctNode=895&CtUnit=426&BaseDSD=7&mp=4>。

收稿日期：民國 106 年 1 月 18 日
 修正日期：民國 106 年 1 月 20 日
 接受日期：民國 106 年 2 月 6 日