

應用短期氣候預報於春耕乾旱休耕決策之探討 -以大漢溪供水系統為例

沈孟妍

呂金璋

李明旭

水文與海洋科學研究所

國立中央大學

摘要

爲了因應乾旱可能導致的缺水問題，若能利用相關的氣候預報資訊，預先在乾旱發生前掌握未來供水與用水情勢，並考慮不同的供水策略與補償措施，評估可行之供水情形，將是本篇研究主要目的。選定歷史乾旱年2002年和2003年做爲研究年份，利用中央氣象局發佈之季長期天氣展望資料，進行石門水庫供水評估。過程中結合預報資訊與氣象資料合成模式(WGEN)，繁衍出符合預報趨勢之未來溫度及雨量資料，再投入水文模式(GWLF)中模擬研究區域內各集水區之入流量，進一步帶入以系統動力模式軟體(Vensim)所建立的大漢溪水資源系統動力模式，以求得各標的用水每旬可能之缺水率與發生缺水之機率，評估農業用水在此缺水率下可能的休耕面積與休耕補償金額，以探討氣候預報資訊之最佳應用策略。研究結果顯示季預報有一定的可信度，在預報預測機率最大區間命中實際區間的情況下，可提早掌握乾旱發生的先機，提供決策者做出適當的水資源調適措施。

關鍵字：乾旱、季節性預報、氣象資料產生器、系統動力模式

一、前言

近幾年氣候變異而引發許多極端水文事件，使得部分地區發生乾旱缺水的頻率增加，台灣地區也深受其擾。以2002年及2003年初北部地區之旱象爲例，由於降雨枯旱異常，農業仰賴的春雨遲遲沒來，使得2002年北部地區旱象長達半年之久，在乾旱期間有關單位對石門水庫部分灌區採取休耕停灌之措施，調用農業用水以支援民生及工業用水，對農業經濟造成很大的損失。因此，在面對未來氣候不確定的狀況下，爲了降低耕種後春雨供應不足之風險，若能藉由中央氣象局發佈的短期氣候預報，預先掌握未來三個月之氣象變化，再依據預報資訊模擬水庫未來供水情況，將可及早進行相關的決策分析調節水庫操作，降低因降雨減少造成的經濟損失。

二、文獻回顧

2.1 乾旱與水資源

乾旱對水庫供水上具有很大的影響，在乾旱時期入流量預測研究方面，Huang et al. (2004)利用「乾旱預警燈號」來建置乾旱時期的決策支援系統，將水庫未來的缺水程度，以燈號警訊分級呈現，並對應到不同的減供水措施，結果顯示經過作者提出改善供水的決策，成功的讓整個預警燈號有下降的趨勢。如果未來氣候條件發生改變時，灌溉用水量也

會受到影響，進而影響水資源的調配，因此若將乾旱預警運用在農業面向方面，可以合理評估灌溉需水量，Kim et al. (2011)利用多變量時間序列模式與經驗正交函數(Empirical orthogonal function)耦合來生成未來一萬年旱災發生的時間序列，搭配乾旱指標(SPI)來預測韓國未來的乾旱，應用在大壩供水對於農業脆弱度的探討，研究結果發現乾旱分佈的嚴重趨勢符合歷史實際年降雨量的分佈。

2.2 乾旱與水資源氣候預報在水資源管理與應用

國內在進行氣候預報的研究，除了各系所之大氣相關科系有進行相關研究之外，則以中央氣象局 Central Weather Bureau (CWB)爲主要的氣候預報機構。根據台灣省自來水公司第二區管理處統計，2002年發生的乾旱事件，因乾旱造成自來水公司賠償休耕補償費之損失約爲1.47億元，2003年除了農業的休耕補償金外，政府在8月至11月時移用農業用水也造成了高達2.31億元的損失。Brumbelow and Georgakakos (2001)發現若改善農業供水系統的水文預報，利潤也將隨之增加。Yao and Georgakakos (2001)與Hamlet et al. (2002)研究顯示，在氣候資訊裡加入水文的預報可以提升水利系統的收益。

2.3 系統動力模式

系統動力(System Dynamics)是由許多相關因素及彼此互動關係所構成的，其特別著重在時間過程

中因素之間因果回饋(Causal-Feedback)的彼此相互連結循環影響關係。Simonovic (2000)提到水資源系統規劃問題是很複雜的，可透過電腦模擬幫助研究者，克服對非線性與複雜互動關係的認知限制。近年來很多學者都以系統動力模式來分析水資源問題，例如：蔡耀逸(2007)，為減緩桃園地區之缺水狀況，蒐集桃園境內可用水源及淨水場操作規則，並利用Venism軟體建構桃園地區自來水供需系統動力模式，以研擬出在缺水時期實際可行之應對方案及供水型態。本研究使用Venism軟體，就現有之水資源設施以及供需關係，建立大漢溪水資源系統動力模式，探討未來各標的用水未來缺水率之變化。

三、研究區域與案例介紹

3.1 研究區域介紹

研究區域選在大漢河流域，其水資源供水系統中主要有兩處入流，分別來自大漢溪及三峽河，下面將針對這兩處集水區來做討論。

(一) 石門水庫集水區

石門水庫集水區位在淡水河流域的大漢溪中上游，流域面積約763.4 km²，平均高程為1,400公尺。石門水庫供水標的方面除農業灌溉，支援臺北縣、桃園縣及新竹縣的公共給水外，尚具有防洪、發電以及觀光等用途，集水區內主要有石門大壩、石門發電廠、鳶山堰、後池堰、石門大圳及桃園大圳等水工結構物。依經濟部水利署網頁公佈的資料顯示，石門水庫集水區內雨量站共有十四個，而區內的測站資料蒐集需要較完整且多站的日降雨量資料，因此本研究選用了其中八個測站，分別為鎮西堡、新白石、玉峰、巴陵、高義、石門、嘎拉賀及霞雲站，其分佈如圖3-1所示。分析採用之水文資料年份是由1971至2000年，共30年。

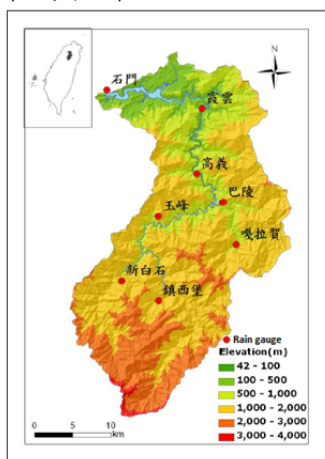


圖3-1 石門水庫集水區雨量站之相關位置圖

(二) 三峽河集水區

三峽河集水區以三峽流量站為出口，集流面積約135平方公里，平均高程為475公尺，研究所選用之雨量觀測站有三峽、大豹兩個測站，流量觀測站

為三峽(2)測站各測站相關位置如圖3-2所示。分析採用之水文資料年份是由1977至2000年，共24年。

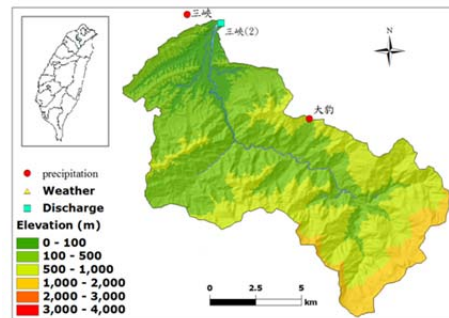


圖3-2 三峽河流量站與雨量站之相關位置圖

3.2 研究案例介紹

本研究將以2002年及2003年北部地區所發生的乾旱事件做為模擬案例，探討利用季節性預報預測春耕時期可能之缺水情況，期望在乾旱發生前預先掌握情勢，提早做出相關對策。本研究整理當時實際實行之限水措施，內容如下：

(一) 2002年乾旱事件

- 3月1日起公告石門農田水利會所屬之石門大圳灌區(石門灌區)休耕10,439公頃、桃園農田水利會所屬之桃園大圳灌區(桃園灌區)七折供水。
- 3月12日起實施第一階段限水—停供次要民生用水，減供板新地區用水10萬噸、桃園地區公共給水停供次要民生用水。
- 3月16日起公告桃園灌區五折供水。
- 4月26日起實施第二階段-夜間減壓，公共給水自5月2日起供水量為135萬噸，並實施夜間減壓。
- 5月3日起決議桃園灌區休耕15,000公頃。
- 5月13日起進入第三階段限水措施—每周供水五天半，停水一天半。

(二) 2003年乾旱事件

- 1月30日起公告桃園灌區一期作停灌，並協調石門水利會以加強灌溉管理方式，節約灌溉用水供給公共用水使用。
- 3月11日起石門灌區六折供水。
- 3月21日起石門灌區四五折供水。
- 4月1日起石門灌區一期稻作五折供水。

四、研究方法

4.1 氣象資料合成模式

研究中使用Tung and Haith(1995)所發展之溫度及降雨合成模式WGEN(Weather Generator)繁衍未來氣象資料，產生方式說明如下。

(一) 日溫度模擬模式

未來氣候條件下日溫度之模擬，由月平均溫度，透過一階馬可夫鏈做模擬(Pickering et al., 1988 ; Tung, 1995)，其方程式如下：

$$T_i = \mu T_s + \rho_s (T_{i-1} - \mu T_s) + V_i \sigma T_s \sqrt{1 - \rho_s^2} \quad (4-1)$$

方程式中 T_i 為第 i 天的溫度， μT_s 為對應該月 s 類別之平均溫度，其中由於目前僅分為偏低、正常及偏高三個類別，故 s 為1~3， ρ_s 為該月份 s 類別 T_i 與 T_{i-1} 之一階系列相關係數。 V_i 屬於 $N(0,1)$ ， σT_s 為歷史資料對應該月份 s 類別之標準偏差。假設每月的第一天溫度以該月的月平均溫度代替，於是便可利用歷史溫度資料模擬出未來新的日溫度資料。

(二) 日降水量模擬模式

模擬過程可分為降雨事件和降雨日之降雨量。降雨事件之模擬以歷史資料為演算依據，當統計各月中第 $I-1$ 日降雨時，第 I 日降雨的機率表示為 $P(W|W)$ ，不降雨表示為 $P(W|D)$ 。模擬時每日會產生一個 $(0,1)$ 間之亂數 RN 。其第 I 天降雨事件判別式如下：

- 每月第一天，當 $RN \leq$ 該月降雨機率 $P(W)$ 時，表示此日為降雨日；否則，則第 I 天不會降雨
- 若第 $I-1$ 天降雨量 >0 ，當 $RN \leq P(W|W)$ ，則第 I 天會降雨；否則，則第 I 天不會降雨。
- 若第 $I-1$ 天降雨量 $=0$ ，當 $RN \leq P(W|D)$ ，則第 I 天會降雨；否則，則第 I 天不會降雨。

降雨日之降雨量是由指數分佈方程式(4-2式)繁衍的，其中 μ_{p_s} 是對應歷史資料第 I 月份 s 類別雨天之平均降雨量， RN 為介於0~1間的隨機亂數。

$$P = \mu_{p_s} (I) \times [-\ln(1 - RN)] \quad (4-2)$$

4.2 水文模式

本研究採用GWLF(Generalized Watershed Loading Functions, Haith et al., 1992)水平衡模式模擬集水區各水文量。模式計算流程如圖4-1所示。

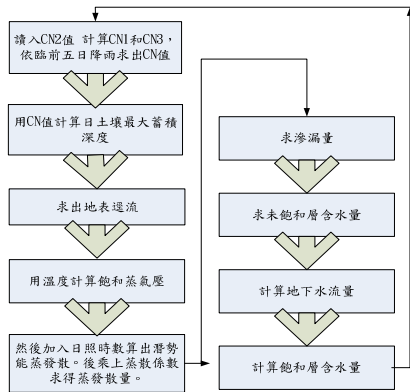


圖4-1 GWLF模式流程圖(董新茹, 2011)

研究中採用GWLF計算地表逕流量(Q)，公式如4-2式，其中 P_i 為WGEN繁衍之日平均降雨資料，日土壤最大蓄積深度(W_i)是由CN值(curve number)計算得到，計算公式如4-3式。地下水流出量(G)計算公式如4-4式，是由地下水退水係數(r)乘上飽和層含水量(S)得到。將由地表逕流量與地下水流量

相加，即可得到河川之入流量。

$$Q_i = \frac{(P_i - 0.2W_i)^2}{P_i + 0.8W_i} \quad (4-3)$$

$$W_i = \frac{2540}{CN} - 25.4 \quad (4-4)$$

$$G_i = r \cdot S_i \quad (4-5)$$

4.3 系統動力模式

本研究在分析前先界定出水資源系統範圍，再透過系統動力軟體-Vensim，考慮現有水資源設施以及其供應能力(圖4-2)，建立起大漢溪供水系統動力模式(附圖1)。

五、研究結果

5.1 以不同機率取樣法則繁衍氣象資料

研究中利用兩種不同的取樣方法，選取欲投入模式中的歷史氣象資料區間，並將模擬結果做比較。歷史氣象資料選用1971年至2000年石門水庫集水區之溫度及雨量資料，繁衍氣象資料前，必須先將歷史氣象資料以韋伯法分區間，介於累積機率0.3至0.7之間稱為正常區間，累積機率小於0.3稱為偏低區間，機率大於0.7稱為偏高區間。本節以2002年為例，預報資料選用中央氣象局2001年12月底發布之2002年1月至3月的溫度及雨量季節性預報。預報機率如表5-1所示，取樣方法可分為下述兩種。

(一) 最大機率法則：以季預報預測發生最大機率的區間，來選取符合該區間之歷史資料。

以表5-1預報1月溫度為例，預報發佈最有可能發生於偏高區間，因此挑選溫度為偏高區間歷史年溫度，做為投入氣象合成模式之溫度歷史資料；若預報中預測發生的最大機率區間有兩者相同，則選取正常區間之歷史資料。

(二) 全機率法則：以季預報預測各區間發生之機率值，來對應各區間歷史資料選取組數。

以表5-1預報1月溫度為例，預報三區間機率為0.2、0.3、0.5，假設欲合成100組溫度資料，則須在氣象合成模式中選取歷史資料偏低區間繁衍20組、正常區間繁衍30組和偏高區間繁衍50組溫度資料。

表5-1 CWB季預報(2002年1月至3月)溫度及降雨機率

	溫度			降雨		
	偏低	正常	偏高	偏低	正常	偏高
1月	20	30	50	40	30	30
2月	30	40	30	50	30	20
3月	20	30	50	30	40	30

(單位:%)

2002年的模擬結果，如附圖2所示，依照最大機率法則所衍生的資料分佈都會集中在預報最大機率之區間，而全機率法則模擬結果資料分佈的範圍較

廣，整個分佈趨勢與預報各區間機率比例相似；2月雨量預報最大機率值為偏低區間，使用最大機率法則之模擬結果大多會集中在偏低區間，實際月雨量亦屬於偏低區間，此結果稱之為命中，當預報命中實際值之區間時，表示此月氣象資料繁衍結果具有較高的可信度；但1月溫度實際值落在偏低區間中，預報最大機率卻是在偏高區間，這種預報下溫度模擬結果的可信度將會減低。

在附圖2中可以看出使用全機率法則會將歷史資料的選取範圍擴大，讓模擬結果的情況變多，不定性範圍增加，難以從分佈中看出未來的趨勢，而在「命中」情況時，是以最大機率法則預測到實際值的機率較高，故本研究在後續模擬流量時，皆以最大機率法則來使用預報資訊，做為歷史氣象資料選取之依據。

5.2 結合季長期天氣預報之流量模擬結果

將5.1節以12月底發佈之預報，繁衍出未來三個月符合當月預報趨勢的日溫度、日雨量資料投入GWLF模式中，繁衍100組未來三個月流量，再以誤差修正法(Bias Correlation)修正水文模式之誤差後，得到集水區入流量資料。2002、2003年模擬結果如圖5-1及圖5-2所示。

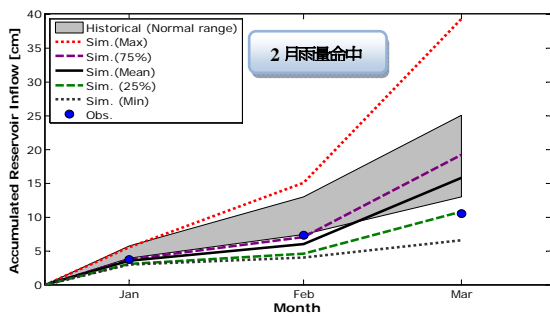


圖5-1 2002年月流量模擬(2001年12月底預報)

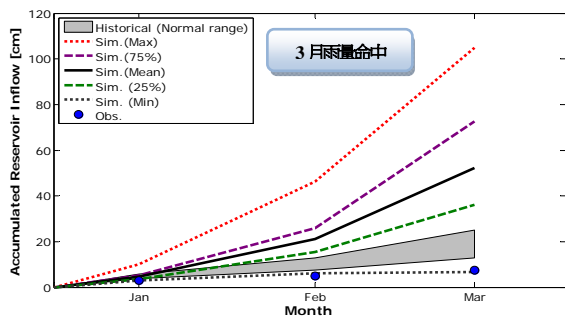


圖5-2 2003年月流量模擬(2002年12月底預報)

■ 陰影：歷史正常區間 ●：觀測值 —：100 組平均值
 - -：最大值 - -：最小值 - -：第 75 百分位 - -：第 25 百分位

對照表5-1、表5-2，2002年1月預報溫度、雨量最大機率區間為偏高、偏低區間，圖5-1中流量模擬結果大部分落在偏低區間；2月預報溫度、雨量最大

機率區間為正常、偏低區間，流量結果大都在偏低區間，1、2月的實際流量皆落在模擬結果之四分位區間內，顯示模式有掌握到流量的趨勢；3月預報溫度、雨量最大機率區間為偏高、正常區間，模擬流量有高估實際值的情況。2003年各月預報溫度最大機率區間皆為偏高區間，雨量為正常或偏高區間，整體模擬結果有高估的情況，這是因為2003年是歷史入流量較低的一年，所以由圖5-2可以看到觀測值幾乎都低於正常區間以下，而GWLF水文模式在繁衍入流量時，對降雨量參數比較敏感，因此當雨量預報不準確時，將會對流量預測造成影響。

5.3 搭配季節性預報推估農業用水缺水率

選用中央氣象局於每個月底發佈之季節性預報，以最大機率法則來繁衍氣象資料及流量資料，再將入流量投入以Vensim軟體建的大漢溪供水系統動力模式中，分析未來三個月的缺水率，缺水率公式如下式5-1。

$$\text{農業用水缺水率} = \frac{\sum_{t=1}^N ST_t}{\sum_{t=1}^N D_t} \times 100\% \quad (5-1)$$

(其中N為總分析時距，在此以旬尺度做計算，ST_t是t時刻之缺水量，為每旬模擬農業用水可供水量與灌溉計畫需水量之差值，D_t為第t旬之計畫需水量)

石門水庫操作規線的執行方式，將減供農業用水措施分成兩種，分別為：「農業用水依照原計畫供水供水(即水庫不打折供水)」和「農業用水依照原計畫減供50%(即水庫打五折供水)」兩種，表中水庫不打折供水時缺水率為0%，水庫打五折供水時缺水率為50%，表5-3及表5-4為2002、2003年的模擬結果，表中之數值代表發生此情況的機率。

(一) 12/31發佈之預報

表5-3 2002年1~9旬農業用水缺水機率

供水措施	每旬缺水機率								
	一	二	三	四	五	六	七	八	九
不打折供水	1	1	1	1	1	1	1	0.98	0.72
打五折供水	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.28
實際 實行措施							桃園灌區 七折供水	桃園灌區 五折供水	

表5-4 2003年1~9旬農業用水缺水機率

供水措施	每旬缺水機率								
	一	二	三	四	五	六	七	八	九
不打折供水	1	1	1	1	1	1	1	1	0.99
打五折供水	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01
實際 實行措施		桃園 停灌						石門灌區 六折供水	石門灌區 四五折供水

以表5-3中第九旬為例，水庫不打折供水發生機率為0.72，水庫打五折供水發生機率為0.28，機率越高表示該事件發生的可能性越高，因此本旬在依據

12月底發佈之季預報模擬下，農業用水以不打折供水的情況較有可能發生，其他各旬也有一樣的結果；而表5-4中，2003年各旬水庫都以不打折供水情況發生機率較大，表示這三個月發生不缺水的機率較大，但對照下方有關單位在當時實際實行之農業用水減供措施，兩者之間有較大的出入。

(二) 1/31發佈之預報

表5-5 2002年4~12旬農業用水缺水機率

供水措施	每旬缺水機率									
	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二	
不打折供水	1	1	1	1	1	0.48	0.17	0.45	0.62	
打五折供水	-	-	-	-	-	0.52	0.83	0.55	0.38	
實際 實行措施				桃園灌區 七折供水	桃園灌區 五折供水					

表5-6 2003年4~12旬農業用水缺水機率

供水措施	每旬缺水機率									
	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二	
不打折供水	1	1	1	1	0.84	0.53	0.42	0.69	0.7	
打五折供水	-	-	-	-	0.16	0.47	0.58	0.31	0.3	
實際 實行措施					石門灌區 六折供水	石門灌區 四折供水	石門灌區 五折供水			

上述分析結果顯示，使用12月之預報似乎沒有正確反映出1月~3月的實際缺水情況，所以再以1月底發佈之預報來模擬並分析比較，模擬結果如表5-5、表5-6，與12月預報比較重複的旬(七~九旬)後發現，可以看到表5-3第九旬發生五折供水的機率僅0.28，表5-5第九旬打五折的機率就達到0.52(當旬較有可能發生缺水)。再比較表5-4及表5-6重複的旬數，可以看到使用12月預報，第九旬五折供水的機率為0.01(幾乎不可能發生)，而使用1月底之預報從第八旬開始有缺水的情況發生，第九旬雖以不打折供水的機率較高，但五折供水的機率也很高為0.47，與當時實際的乾旱情況來比較，整體看來以1月預報對乾旱情況的掌握度是較高的。

5.4 休耕決策分析

由上述分析結果得知，決策內容將使用1月底發佈之預報來做模擬，並參考「桃園及石門農田水利會灌區決策分析流程圖(水利署，2010)」，當農業減供水量小於等於30%時，執行動態灌溉配水等措施；當農業減供水量大於30%時必須執行停灌區域分析。因此先以每旬農業用水計畫需水量減供30%作為模擬策略(代表休耕30%灌溉面積)，判斷是否能降低水庫打五折供水發生的機率，經過決策減供30%需水量後2002、2003年之模擬結果如表5-7、5-8。

表5-7 2002年4~12旬決策後農業用水缺水機率

2002年1月預報	每旬缺水機率									
	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二	
決策後										
不打折供水	1	1	1	1	1	0.95	0.63	0.82	0.9	
五折供水	-	-	-	-	-	0.05	0.37	0.18	0.1	

表5-8 2003年4~12旬決策後農業用水缺水機率

2003年1月預報	每旬缺水機率									
	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二	
決策後										
不打折供水	1	1	1	1	1	0.93	0.82	0.95	0.92	
五折供水	-	-	-	-	-	0.07	0.18	0.05	0.08	

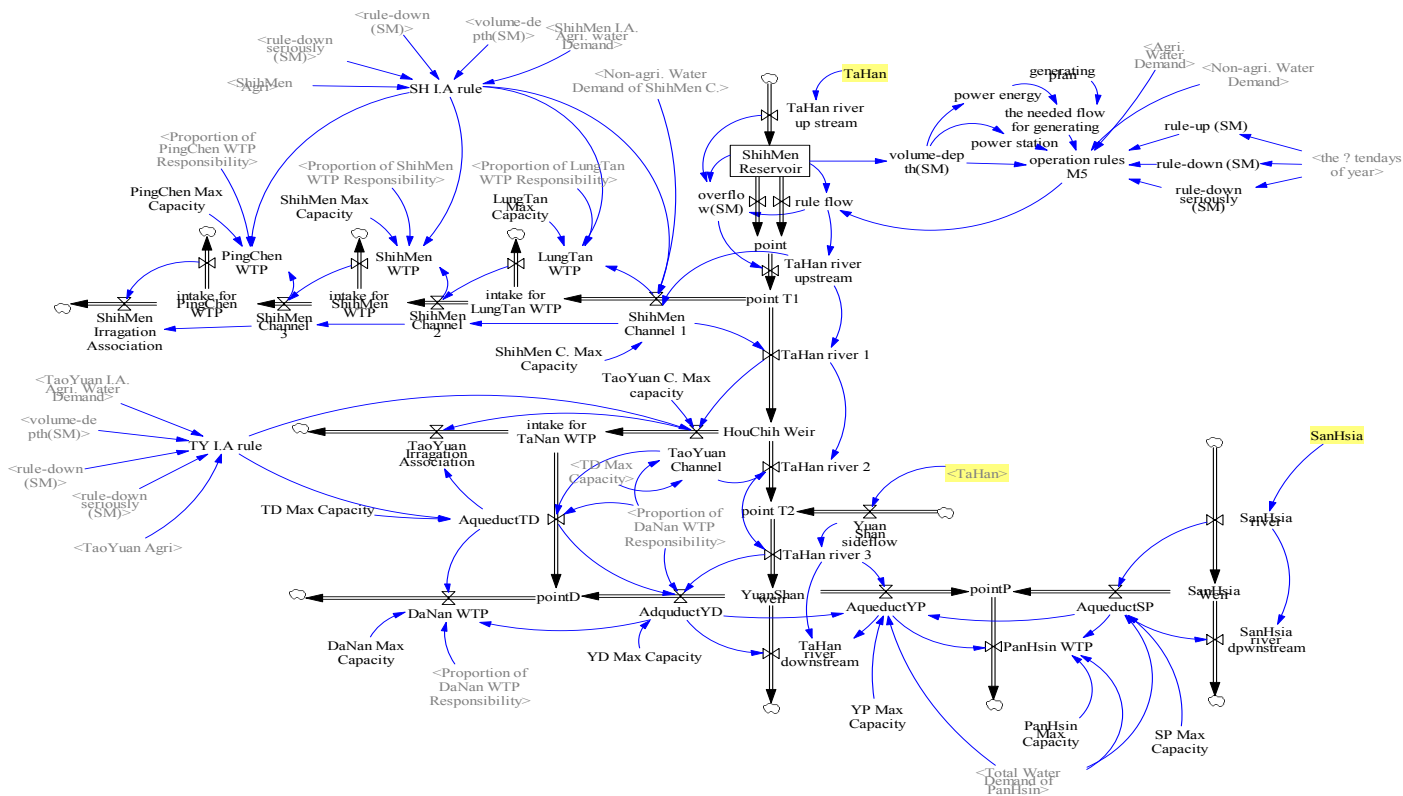
表5-7、5-8結果顯示2002、2003年打五折供水發生的機率都有明顯的下降，但第十旬打五折的機率還是不低(0.37、0.18)，所以表示減供30%農業用水計畫需水量可能不夠，減供率應大於30%，必須進行停灌休耕分析。

六、結論

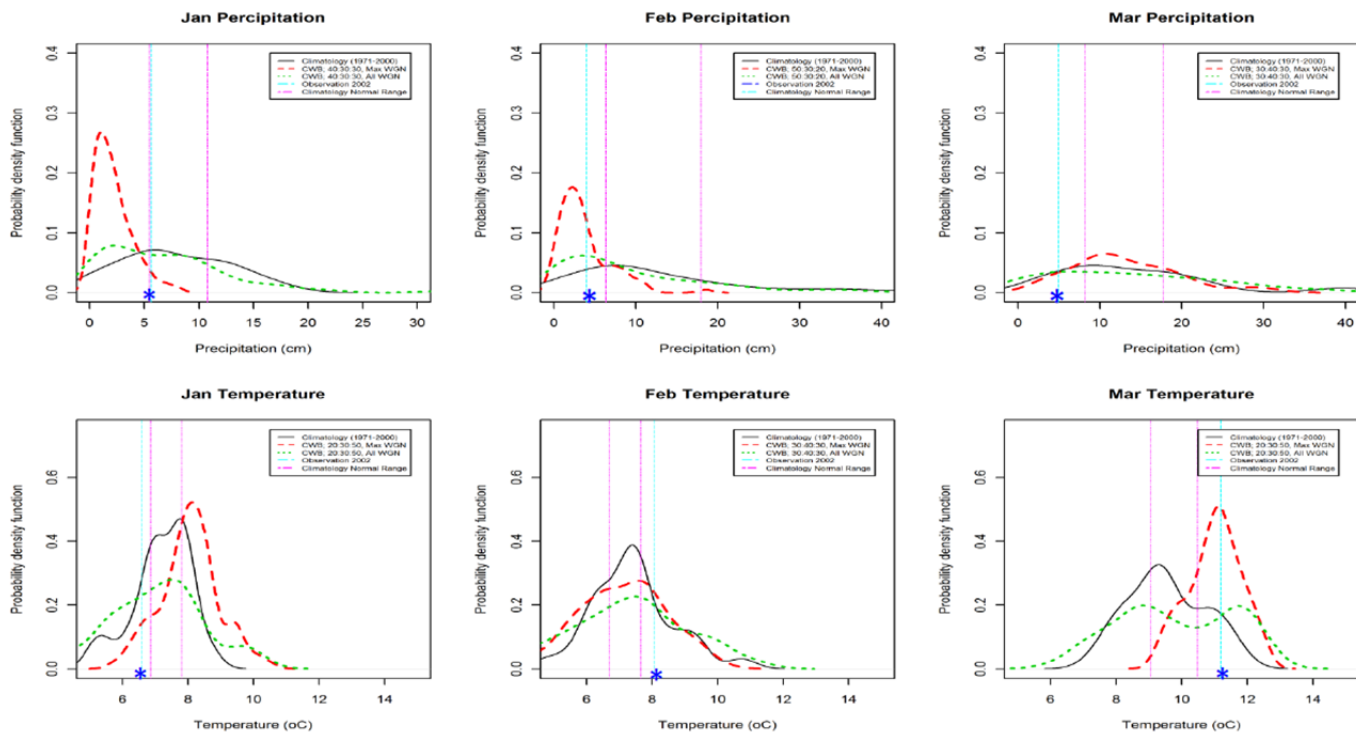
1. 研究中以兩種歷史氣象資料取樣方法(全機率、最大機率法則)提供日氣象資料繁衍，採用全機率法則所產生之溫度和雨量分佈較廣，後續流量模擬結果較發散，不確定性也較高；而採最大機率法則且在命中實際區間時，流量模擬準確性較高。
2. 結合季長期天氣預報模擬流量，除了預報與實際區間完全相反外，大多的實際流量會介於模擬流量分布的四分位區間內，而由於降雨相對於氣溫對地表逕流量多寡有較顯著影響，因此雨量預報準確與否對於未來流量能否預先掌握是很重要的因素。
3. 利用大漢溪水資源系統動力模式模擬2002與2003年的春雨乾旱事件，以2003年1月發布的預報為例，相較於12月發布的預報有較高的準確率，且更接近春耕用水時期，在農業用水管理上為較佳決策參考月份，但由於季預報仍存在相當不確定性，在水資源管理上如何利用適當備援用水以補救預測失準之決策仍是一重要課題。

七、參考文獻

1. Brumbelow, K., and A. Georgakakos, 2001. "Agricultural planning and irrigation management: The need for decision support", The Climate Report, 1(4), 2-6.
2. Haith, D. A., R. Mandel, R. S. Wu, 1992. "General Watershed Loading Function", Version 2.0, Cornell University.
3. Hamlet, A.F., D. Huppert, D. P. Lettenmaier, 2002. "Economic value of Long Lead Streamflow Forecasts for Columbia River Hydropower", Journal of Water Resources Planning and Management, 128(2): 1-101.
4. Huang, W. C., L. C. Lun, 2004. "A drought early warning system on real-time multireservoir operations", Water Resources Research, vol. 40.
5. Kim, D. H., C. Yoo, T. W. Kim, 2011. "Application of spatial EOF and multivariate time series model for evaluating agricultural drought vulnerability in Korea", Advances in Water Resources, 34:350.
6. Simonovic, S. P., 2000. "A shared vision for management of water resources", Water International, 25(1), 76-88.
7. Yao, H., and A. P. Georgakakos, 2001. "Assessment of Folsom Lake response to historical and potential future climate scenarios", Reservoir management, Journal of Hydrology, 249, 176-196.
8. 李鐵民、蘇俊明, 2004, 「九十一年石門水庫抗旱實錄」, 水資源管理季刊, 16-26.
9. 董新茹, 2011, 「結合季長期天氣預報與水文模式對石門水庫入流量」, 國立中央大學水文與海洋學研究所, 碩士論文。
10. 經濟部水利署水利建設試驗所, 2010, 「桃園地區灌溉供水與灌溉用水影響研究(2)」。
11. 蔡繼堯, 2007, 「桃園地區灌溉供水與灌溉用水影響研究」, 國立中央大學土木工程學系, 碩士論文。



附圖1 大漢溪供水系統動力模式示意圖



附圖2 2002年以最大機率法則與全機率法則模擬結果

* : 實測值
 --- : 最大機率法則 - - - : 全機率法則
 - : 歷史資料 - - - : 正常區間上下限