

# 結合現況與未來乾旱指標建立水庫乾旱預警模式 - 以石門水庫為應用案例

DROUGHT WARNING MODEL BASED ON COMBINATION OF CURRENT AND FUTURE DROUGHT INDEXES  
— A CASE STUDY FOR SHIHMEN RESERVOIR

國立成功大學  
水利及海洋工程學系  
博士候選人

**寶 藏**

**Pa Ousman Bojang**

經濟部水利署  
第七河川局  
工程員

**劉 雅 慈**

**Ya-Cih Liu**

國立成功大學  
水利及海洋工程學系  
研究員

**楊 道 昌\***

**Tao-Chang Yang**

國立成功大學  
水利及海洋工程學系  
副研究員

**郭 振 民**

**Chen-Min Kuo**

國立成功大學  
水利及海洋工程學系  
博士後研究員

**曾 宏 偉**

**Hung-Wei Tseng**

國立成功大學  
水利及海洋工程學系  
特聘教授

**游 保 杉**

**Pao-Shan Yu**

1

## 摘 要

本研究採用降雨量與水庫蓄水量作為乾旱影響因子，發展石門水庫適用之乾旱預警指標，參考世界氣象組織於乾旱等級劃分之作法，分析乾旱預警指標與歷史事件之關係。進一步應用區別分析作為分類方法，以現況乾旱預警指標、未來乾旱預警指標以及未來水情燈號之關係建立乾旱預警模式，最後採用 2014 至 2015 年乾旱事件作為案例模擬。期望在乾旱來臨前，藉由乾旱預警模式提供決策者相關資訊，儘早啟動超前布署，透過加強灌溉節水管理與啟動備援水源設施等作為，能夠延長水庫供水日數，有助於紓緩乾旱對社會經濟之衝擊，全面提升抗旱韌性。

經由乾旱預警指標與歷史事件進行比對分析，發現標準化降雨量指標(SPI)、標準化流量指標(SFI)與標準化水庫蓄水量指標(SRSI)皆能明確地反映歷史乾旱事件，確立乾旱預警指標於歷史乾旱事件具有一定之掌握度後，應用於乾旱預警模式之建置。於乾旱預警模式中，最佳之現況乾旱預警指標組合為 SPI1 與 SRSI1，並導入未來氣象條件(未來乾旱預警指標)進行未來燈號判別，結果顯示：加入未來乾旱預警指標有助於提高未來水情燈號之準確率，且不論是在率定年(1958-1997)或驗證年(1998-2017)之乾旱預警模式，對於未來燈號判別皆為枯水期間表現較豐水期間佳。

**關鍵詞：**水庫系統、乾旱預警模式、乾旱指標、超前布署。

\* 通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系研究員

臺南市東區大學路 1 號 · tcyang58@hotmail.com

## DROUGHT WARING MODEL BASED ON COMBINATION OF CURRENT AND FUTURE DROUGHT INDEXES — A CASE STUDY FOR SHIHMEN RESERVOIR

### Pa Ousman Bojang

Department of Hydraulic and  
Ocean Engineering, National  
Cheng Kung University

### Ya-Cih Liu

The 7<sup>th</sup> River Management  
Office, WRA

### Tao-Chang Yang\*

Department of Hydraulic and  
Ocean Engineering, National  
Cheng Kung University

### Chen-Min Kuo

Department of Hydraulic and  
Ocean Engineering, National  
Cheng Kung University

### Hung-Wei Tseng

Department of Hydraulic and  
Ocean Engineering, National  
Cheng Kung University

### Pao-Shan Yu

Department of Hydraulic and  
Ocean Engineering, National  
Cheng Kung University

## ABSTRACT

2

This study aims to develop a drought early warning model based on the standardized drought indices (SDIs) for the water resources system of Shihmen Reservoir in northern Taiwan. Different hydrological variables (e.g., rainfall, reservoir inflow and storage) were used as the basis of SDIs to characterize and monitor drought condition for water resources system. The SDIs, including Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Streamflow Index (SSI), and Standardized Reservoir Storage Index (SRSI) calculated by the historical rainfalls, reservoir inflows and storages, respectively, were analyzed. It is found that the value of SDIs can clearly reflect the situations of historical drought events. Further, the discriminant analysis was adopted to establish the drought early warning model based on the relationship among current SDIs, future SDIs and future regime lights. In the drought early warning model, the best combination of drought warning indices include current SDIs (*i.e.*, SPI1, SRSI1) and future SDIs (*i.e.*, SPI1 and SPI3) for predicting the future regime lights. The results show that adding future SDIs can improve the prediction accuracy of future regime lights. For both the calibration period (1958-1997) and the verification period (1998-2017), the drought early warning model reveals satisfactory performance for predicting future regime lights. The prediction performances during the dry season are better than those during the wet season.

**Keywords:** Reservoir system, Early warning model, Standardized drought indices, Pre-preparedness.

## 一、前言

隨著社會經濟之產業結構發生變化、人口數逐漸增多，各項用水之需求量逐漸增加，但是水庫逐漸淤積且庫容逐年減少，導致石門水庫一年需要滿庫四次才能滿足供水區之用水量，相當於水庫之蓄水量需要每三個月滿庫一次。當乾旱發生時，水庫在供水操作上常面臨打折供水之情況，對於民生、農業、工業之損害相當嚴重。因此，建立一個有效之乾旱預警模式，提供相關決策者規劃與研擬調適策略之參考，有助於降低因水資源短缺對社會經濟所造成之衝擊，進而全面提升抗旱之韌性。

乾旱預警為短期抗旱之重要環節，國際間乾旱預警指標相關文獻如表 1 所列，乾旱預警指標可應用於監測乾旱情況、決定乾旱程度以及判斷乾旱應變啟動與否。另外，國內於乾旱監測與預警方面之研究近期內亦有豐碩成果。譬如，袁倫欽(2005)利用模糊理論與水庫供水模擬建立現況乾旱指標，並導入未來可能水庫入流量分析未來缺水情勢，進而建立乾旱預警指標，依據乾旱嚴重程度與缺水等級分為五種等級燈號，建置乾旱缺水之預警系統。呂季蓉(2006)運用標準化降雨指標(Standardized Precipitation Index, SPI)演算台灣南部地區之各空間等值圖，驗證 SPI 於空間上乾旱監測能力，且 SPI 可適切反應區域上之乾旱發生情況，進而採

用一期作乾旱將 SPI 分為乾旱與非乾旱群集，建立農業乾旱監測模式。簡均任(2013)採用 Bhalme and Mooley Drought Index 代表氣象型乾旱、Palmer Drought Severity Index (PDSI)代表農業型乾旱以及 Surface Water Supply Index (SWSI)代表水資源乾旱，並結合中央氣象局氣候統計降尺度預報進而計算未來之乾旱指標作為乾旱預警相關資訊。羅萬倫(2015)探討梅雨(5 至 6 月)對石門水庫水資源之衝擊，利用中央氣象局季長期天氣展望資料建立短期氣候預報，以水文模式推估水庫入流量，並以各旬水庫水位所對應之乾旱預警燈號作為乾旱程度判定指標。

一般將乾旱分為四種類型，包含氣象、水文、農業及社會經濟等四種乾旱，本研究中探討之乾旱係針對水源設施供水匱乏導致缺水之水文乾旱。主要採用區別分析為理論基礎，並以石門水庫為研究對象，發展乾旱預警模式以預判未來第一個月與第三個月之水情燈號，強化其在乾旱期間預判水庫水情之實用性。研究過程中除透過現況乾旱預警指標(如 SPI 與 Standardized Reservoir Storage Index (SRSI))來瞭解現況氣象與水庫蓄水情況，進一步導入未來乾旱預警指標(如未來第一個月之  $SPI1_f$ 、未來第三個月之  $SPI3_f$ )，來同時掌握現況與未來的氣象與水庫蓄水情勢，更可提升預判乾旱發生情勢之精確性，以提供超前布署抗旱因應作為其操作時機之參考。

表 1 國際間乾旱預警指標相關文獻

國家	作者	指標名稱	採用因子	說明
美國	McKee <i>et al.</i> (1993)	標準化降雨量指標 Standardized Precipitation Index (SPI)	雨量	採不同時間尺度(3、6、12 月)，以 Gamma 分布進行降雨資料擬合，再將累積分布函數對應至標準化常態分布 Z 值，進而決定乾旱嚴重程度(輕微、中度、嚴重、極端)
美國	Palmer (1965)	Palmer 乾旱強度指標 Palmer Drought Severity Index (PDSI)	雨量 溫度	基於土壤內平衡方程式，以月溫度與月降雨資料作為輸入，決定水份距平指標並據以劃分乾旱嚴重程度(輕微、中度、嚴重、極端)
美國	Shafer and Dezman (1982)	地表供水指標 Surface Water Supply Index (SWSI)	蓄水量 雨量、溫度 流量、積雪	參考 PDSI 相關作法並新增供水相關資料(水庫蓄水量、流量、積雪等)，以推估集水區尺度乾旱情況
日本	Gusyev <i>et al.</i> (2015)	標準化水庫蓄水指標 Standardized Reservoir Storage Index (SRSI)	蓄水量 流量	同時考慮流量與水庫蓄水率，以 Gamma 分布進行資料擬合，再參考 SPI 方式決定標準化常態分布 Z 值，進而決定乾旱嚴重程度(輕微、中度、嚴重、極端)
韓國	Byun and Wilhite (1996)	有效乾旱指標 Effective Drought Index (EDI)	雨量	基於降雨資料進行計算，並透過標準偏差將指標標準化，將乾旱情況分成中度、嚴重、極端等程度
義大利	Telesca <i>et al.</i> (2012)	標準化流量指標 Standardized Streamflow Index (SSI)	流量	以月流量為基準參考 SPI 方式決定標準化常態分布 Z 值，亦可配合觀測流量或預測流量計算 SSI，決定乾旱嚴重程度(輕微、中度、嚴重、極端)

## 二、研究區域與分析資料概述

石門水庫集水區之年平均降雨量約為 2,410 mm，主要降雨集中於每年 5 月至 10 月間，佔全年總降雨量之 80%，大部份為颱風及梅雨帶來之雨量；在氣溫方面，集水區內氣溫受到海拔高度之影響所以各地變化較大，平均氣溫約為攝氏 14.3 至 21 度之間，於七月份時約 19.3 至 27.1 度之間為最高溫，於一月份時約 7.6 至 14 度之間為最低溫；在濕度方面，各月份之平均濕度約在 80%~88%，年平均濕度約在 84%，雖然冬季濕度高於夏季但差異不大，故乾濕季節變化不甚明顯；在蒸發散方面，年平均蒸發散量約在 691 至 1,217 mm 之間，大致上夏季蒸發散量較冬季大。

本研究採用的水文資料主要為石門水庫集水區內之雨量與流量資料。在雨量資料部分，採用石門水庫上游集水區雨量站之歷年資料，雨量站包含：石門、霞雲、高義、巴陵、玉峰、鎮西堡、白石、嘎拉賀、西丘斯山、長興、復興、三光、秀巒，總共 13 個測站，資料年限為 1958 至 2017 年之日降雨量。集水區內之平均日降雨量，採用所選取之雨量站經繪製徐昇網，並配合選取之各站面積權重計算得其面積雨量，各測站與研究區域關係位置如圖 1；在流量資料部分，蒐集大漢溪流域 1958 至 2017 年之逕流量，石門水庫入流量採用石門水庫營運報表紀錄，年平均流量約為 14.87 億立方公尺，豐水期為 5 月至 10 月，其流量約為 11.23 億立方公尺，為全年水源量之 76%，三峽河入流量採用三峽(2)流量站資料與三峽攔河堰取水量相加後之還原資料估算，年平均流量約為 2.58 億立方公尺，豐水期為 5 月至 10 月，其流量約為 1.76 億立方公尺，為全年水源量之 68%。

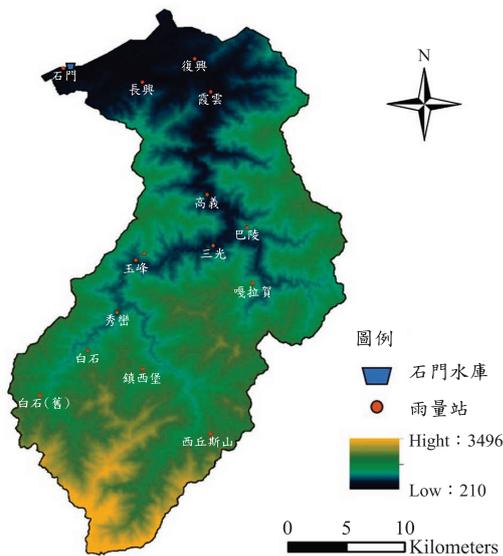


圖 1 雨量站與研究區域關係位置

本研究採用大漢溪及三峽河水資源供水模擬系統分析成果(劉雅慈, 2018)，此水資源供水模擬系統內主要水源設施為：石門水庫、鳶山堰、三峽堰以及中庄調整池。此系統以日時間尺度為操作單位，根據各水源設施之運轉操作規線與各標的需水量，模擬水源設施之操作與運轉，得到水源設施每日之蓄水量、溢流量、供水量及蒸發量等。本研究以前述石門水庫模擬之蓄水量採用於建立乾旱預警指標。

## 三、分析方法

分析方法主要為：(一)乾旱預警指標、(二)乾旱預警燈號與(三)乾旱預警模式。首先進行乾旱預警指標分析，蒐集、解釋並分析乾旱影響因子趨勢與關鍵指標；接續分析乾旱預警燈號，統計歷史乾旱預警燈號；最後結合現況與未來預警指標，應用區別分析(Discriminate analysis)分析建立乾旱預警模式。分析方法分別說明如后：

### 3.1 乾旱預警指標

乾旱影響因子可分為兩大類：第一類乾旱影響因子為直接影響水源設施供水之相關因子，如降雨量、入流量以及水庫蓄水量等，可採用前述水文資料發展研究區域適用之乾旱預警指標；第二類乾旱影響因子則為聖嬰指標或大尺度氣候因子。本研究主要分析第一類直接影響水源設施供水之乾旱影響因子，分別採用降雨量、入流量以及蓄水量等水文資料，建立計畫區域之標準化降雨量指標(SPI)、標準化流量指標(SSSI)以及標準化水庫蓄水量指標(SRSI)，前述指標將作為乾旱預警指標並發展乾旱預警機制，用於輔助預判乾旱發生情勢，以提供超前部署抗旱因應作為其操作時機之參考。

乾旱預警指標主要係採機率分布進行水文資料之擬合，再參考標準化降雨量指標之計算流程推求標準化指標 Z 值(劉雅慈, 2018)，並可依據世界氣象組織(World Meteorological Organization)之標準化降雨量指標使用者指南(Svoboda *et al.*, 2012)進行乾旱等級劃分，將乾旱預警指標之數值進行乾旱分級進而決定乾旱嚴重程度，例如：中度乾旱、嚴重乾旱、極端乾旱。指標計算流程主要可分成兩步驟：(1)以適合之機率分布進行水文資料之擬合(降雨量與入流量採用 Gamma 分布，蓄水量採用一般極端值分布)，其主要係藉由動差法、最大似似法等參數推估方法推求機率分布之參數，待

參數決定後即可得知該機率分布之累積機率函數、(2)藉由常態機率分布之累積機率反函數將該機率分布之累積機率函數對應至常態分布之 Z 值，其即為具有標準化與常態化之乾旱預警指標值。前述步驟(1)中，本研究運用 Kolmogorov-Smirnov 適合度檢定 Gamma 機率分布於所採用雨量與入流量資料之適合性，以及一般極端值分布於所採用蓄水量資料之適合性，以判定所使用之機率分布是否合理(劉雅慈，2018)。

依據 SPI、SSI 與 SRSI 之數值進行乾旱分級後，再將乾旱預警指標之时序變動情況與歷史事件進行交互分析，確認前述乾旱指標是否能明確地反映歷史乾旱事件，若確立乾旱預警指標於歷史乾旱事件具有一定之掌握度後，將可應用於後續乾旱預警模式之建置。

### 3.2 乾旱預警燈號

確立乾旱預警指標對於歷史乾旱事件具有一定的掌握度後，為建立乾旱預警指標(包含：SPI、SSI 與 SRSI)與水情燈號之關係，本研究參考枯旱警戒值對應之水情燈號作為啟動相關措施之依據。枯旱警戒值與水情燈號概述如下：

石門水庫之枯旱警戒值(圖 2)係作為石門水庫供水區水情通報之參考，其由石門水庫運用要點所訂水庫操作規線與區域內氣象、水文、水源以及供水系統等特性，研訂綠、黃、橙、紅各階段水情燈號之警戒值。一旦達各階段之警戒值時，即依程序邀集各供水與用水單位召開水源調度協調會議，並參考未來氣象展望後，決定所需採取措施與是否轉變燈號，並滾動檢討因應措施與燈號內容。本研究採用水資源供水模擬系統(劉雅慈，2018)模擬之月平均蓄水量進行水情燈號辨識，分析資料年限為 1958 年 1 月至 2017 年 12 月，結果如表 2 所示。於一月至六月中，若降雨量不足，容易導致石門水庫蓄水量不足且面臨打折供水與限水之情況，

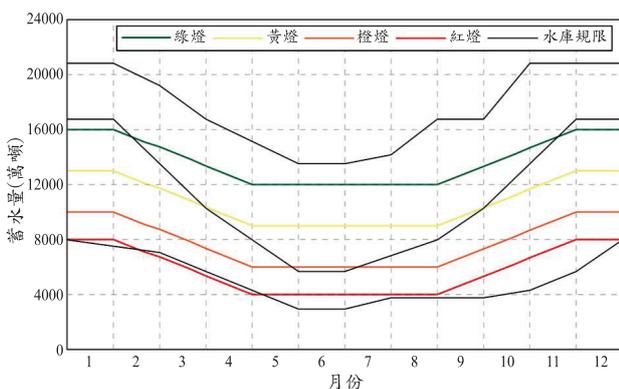


圖 2 石門水庫枯旱警戒值

表 2 各月份各級燈號之次數統計

月	正常	綠燈	黃燈	橙燈	紅燈
1	28	14	6	2	10
2	24	15	6	7	8
3	16	11	12	9	12
4	17	8	12	8	15
5	18	4	10	9	19
6	30	7	6	6	11
7	37	10	5	5	3
8	42	7	5	3	3
9	46	5	5	3	1
10	51	5	1	1	2
11	40	7	8	2	3
12	33	11	5	4	7
總和	382	104	81	59	94

所以黃燈、橙燈以及紅燈出現次數增加；於七月至九月時常面臨颱風侵襲台灣，石門水庫之降雨量豐沛導致蓄水量充足，該月份之燈號多數為正常；於十月至十二月中，石門水庫之蓄水量尚充足，該月份之燈號中正常與綠燈佔多數。

### 3.3 乾旱預警模式

為發展合適之乾旱預警機制，本研究應用區別分析(Discriminate Analysis)，分析乾旱預警指標與未來水情燈號之關係，透過不同時間尺度之現況 SPI、SSI 與 SRSI)進行變數組合，並導入未來乾旱預警指標(如未來第一個月之 SPI<sub>1f</sub>、未來第三個月之 SPI<sub>3f</sub>)，如此可同時掌握現況氣象與水庫蓄水情勢與未來氣象情勢，更可提升預判乾旱發生情勢之精確性，以提供超前布署抗旱因應作為其操作時機之參考，透過加強灌溉節水管理與啟動備援水源設施等作為，增加供水量並有效延長水庫供水日數，以提升抗旱韌性。

區別分析又稱為判別分析，而線性判別模式(Linear Discriminate Analysis, LDA)(Fisher, 1936)是區別分析中最為常用之主要工具。區別分析可利用有辨別力的變數，推導出一個可呈現兩群間差別的線性區別函數，用此規則來判別一個新觀察點應歸屬的類別。本研究將區別分析應用於水資源乾旱預警方面，若水情燈號進入綠燈時表示水庫供水情勢緊張，所以於乾旱預警模式中將水情燈號分為兩類，一類為「水情正

常」(無水情燈號)，另一類則為「水情警戒燈號」(包含綠燈、黃燈、橙燈與紅燈)，其表示水情緊張或是進入限水階段之狀況。將水情燈號進行分類，再利用分類變數當因變數(水情正常與水情警戒燈號)，多個計量的區別變數當自變數(如不同時間尺度之 SPI、SSI 或 SRSI)，建立區別函數，如：

$$d = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \dots\dots\dots (1)$$

其中，d 為分類變數值(或稱區別分數)， $x_i$  為區別變數， $b_i$  為區別係數。建立區別函數後，利用區別函數可將新觀察的區別變數值進行適當分類。

本研究使用之分類變數為「水情正常」與「水情警戒燈號」；區別函數則是分類變數所對應之預測因子。將不同時間尺度之 SPI、SSI 與 SRSI 進行組合作為模式輸入變數，並依據分類變數(水情正常與水情警戒燈號)進行線性判別分析，並分別建立預測未來第一個月燈號之模式與預測未來第三個月燈號之模式(區別函數)。並採用 Wilks' Lambda 來檢定區別函數的判別能力(張紹勳與林秀娟，2018)。

Wilks' Lambda 又稱「U 統計量」，因其分配呈現「U」字形。當分別看每一個變數時，Lambda 即為組內離均差平方和( $SS_{within}$ )與總離均差平方和( $SS_t$ )的比，即總變異數中可由組內變異數來解釋的比例。

$$\text{Lambda} = \frac{SS_{within}}{SS_t} \dots\dots\dots (2)$$

若所有的組平均數均相等時，則 Lambda 等於 1；若 Lambda 接近 0，表示總變異大多是由於組間平均數的差異所引起。因此，Lambda 越大，表示各組平均數愈沒有差異；Lambda 越小，表示各組平均數差異愈大。當 Wilks' Lambda 值越小表示區別函數的區辨性越佳，且 p 值小於 0.05 即達到顯著水準。

## 四、分析結果

### 4.1 乾旱預警指標與歷史事件比對分析

為確認乾旱預警指標於歷史乾旱事件具有一定之掌握度，以利應用於乾旱預警模式之建置，本研究依據 SPI、SSI 與 SRSI 之數值進行乾旱分級後，再將乾旱預警指標之時序變動情況與歷史事件進行交互分析。石門水庫集水區於 1958 年 1 月至 2017 年 12 月期間之月尺度水文變量資料(包含月雨量、月平均入流量與月平均蓄水量)轉換為 SPI、SSI 與 SRSI，共計三種標準化之乾旱預警指標。其中，根據相關性分析結果指出：SPI 與 SSI 之相關係數高達 0.75，月雨量與月平均入流量之相關係數高達 0.91，兩者具有高度相關。為避免模式輸入變量具重複訊息，SPI 與 SSI 僅選擇 SPI 作為代表輸入變量。因此，本研究最後選擇 SPI 與 SRSI 作為輸入變量，以進行乾旱預警模式之建置。

參考世界氣象組織於乾旱等級劃分之作法 (Svoboda *et al.*, 2012)，依據乾旱預警指標之數值進行乾旱分級(表 3)，例如：當乾旱預警指標介於 -1.49 與 -1.00 之間，則將其歸類為中度乾旱。此外，亦將不同時間尺度之 SPI 與 SRSI 對應各個等級之次數列於表中。因此，在石門水庫地區之歷史乾旱事件中，發生嚴重乾旱之年份分別為 1973、1977、1980、1983-1984、1993-1994、1995-1996、2002-2004、2014-2015。前述歷史乾旱事件，SPI 多介於 -1.0 至 -2.0；SRSI 多介於 0.0 至 -2.0，SPI 與 SRSI 亦有有低於 -2.0 之極端乾旱事件發生。

近年來最嚴重之乾旱事件為 2002 至 2004 年，SPI1 出現 -3.15 屬於極端乾旱等級；SPI3 出現 -2.21 屬於極端乾旱等級；SPI6 出現 -2.32 屬於極端乾旱等級，明顯看出此時段之連續三個月與六個月累積降雨量相較於歷史同期雨量有偏低之情況；SRSI1 出現 -1.97 屬

表 3 乾旱預警指標之乾旱等級劃分參考值

水情狀態	極度乾燥 (極端乾旱)	非常乾燥 (嚴重乾旱)	中度乾燥 (中度乾旱)	正常狀態	中度溼潤	非常溼潤	極端溼潤
範圍	~ -2.00	-1.99~ -1.50	-1.49~ -1.00	-0.99~0.99	1.00~1.49	1.50~1.99	2.00~
次數統計	SPI1	11	32	77	480	72	19
	SPI3	14	29	72	483	64	20
	SPI6	19	30	60	483	72	15
	SRSI1	4	43	92	480	94	0
	SRSI3	8	40	79	467	102	4

表 4 乾旱預警模式之輸入變數組合

變數 組合	SPI1	SPI3	SPI6	SRSI1	SRSI3
1	O			O	
2		O		O	
3			O	O	
4				O	
5	O				O
6		O			O
7			O		O
8					O

註：O 指選用該變數。

於嚴重乾旱等級；SRSI3 出現-2.17 屬於極端乾旱等級。次等嚴重之乾旱事件發生於 2014 至 2015 年，SPI1 出現-1.56 屬於嚴重乾旱等級；SPI3 出現-1.56 屬於嚴重乾旱等級；SPI6 出現-1.59 屬於嚴重乾旱等級，顯示此時段之連續三個月與六個月累積降雨量偏少；SRSI1 出現-1.43 屬於中度乾旱等級；SRSI3 出現-1.35 屬於中度乾旱等級。前述分析結果顯示：SPI 與 SRSI 皆能明確地反映歷史乾旱事件，將應用於後續乾旱預警模式之建置。

由於 SPI 與 SRSI 皆能明確地反映研究區域之歷史乾旱事件嚴重程度，本研究將不同時間尺度之標準化降雨量指標(SPI1、SPI3、SPI6)與標準化水庫蓄水量指標(SRSI1、SRSI3)組合作為模式輸入變數，其變數組合如表 4 所示。依據分類變數(水情正常與水情警戒燈號)進行線性判別分析，並分別建立預測未來第一個月燈號之模式與預測未來第三個月燈號之模式(區別函數)。

#### 4.2 預測未來第一個月燈號之乾旱預警模式

本研究使用不同時間尺度之現況乾旱預警指標組合進行未來第一個月燈號判別分析，採率定年(民國 47-86 年)資料進行模式(區別函數)建立，以及驗證年(民國 87-106 年)資料作為預警模式之驗證使用。表 5 顯示不同現況乾旱預警指標組合對未來一個月燈號判別之整體準確率，結果發現：率定年之平均整體燈號判別正確率中，當乾旱預警指標之組合有 SRSI1 時(組合 1 至 4)，其準確率明顯高於 SRSI3 之組合(組合 5 至 8)，且相較於僅有標準化水庫蓄水量指標之組合(組合 4 與組合 8)，加入標準化降雨指標之組合(組合 1 至 3、組合 5 至 7)有助於提高整體判別之正確率。

由於未來第一個月之水庫水情狀況與現況之乾旱預警指標息息相關，用現況乾旱預警指標預測未來水

表 5 不同現況乾旱預警指標組合對未來一個月燈號判別之整體準確率

組合 月份	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.95	0.90	0.87	0.87	0.82	0.87	0.82	0.79
2	0.88	0.85	0.87	0.83	0.82	0.85	0.85	0.79
3	0.90	0.90	0.82	0.78	0.87	0.92	0.77	0.74
4	0.93	0.93	0.92	0.90	0.90	0.88	0.92	0.75
5	0.93	0.95	0.92	0.93	0.95	0.95	0.90	0.88
6	0.88	0.88	0.85	0.85	0.80	0.93	0.79	0.75
7	0.80	0.78	0.78	0.83	0.78	0.83	0.78	0.78
8	0.90	0.88	0.73	0.70	0.78	0.85	0.78	0.65
9	0.88	0.90	0.88	0.88	0.85	0.93	0.85	0.83
10	0.93	0.88	0.90	0.90	0.90	0.93	0.90	0.85
11	0.95	0.88	0.85	0.85	0.80	0.63	0.55	0.55
12	0.95	0.83	0.83	0.83	0.65	0.70	0.70	0.63
平均	0.90	0.88	0.85	0.84	0.83	0.85	0.80	0.75

情燈號時，各月份之模式準確率多數高於 80%，最佳之現況乾旱預警指標組合為組合 1 (SPI1 與 SRSI1)，平均整體判別正確率高達 90%。率定年之豐水期間(5 至 10 月)之整體平均準確率表現良好，皆高於 80% (圖 3a)；率定年之枯水期間(11 至 4 月)之整體平均準確率表現良好，皆高於 90% (圖 3b)。枯水期之表現較於豐水期佳。

本研究進一步於現況乾旱預警指標組合 1 中加入未來乾旱預警指標(未來第一個月之 SPI1<sub>f</sub>)，發現平均整體燈號判別正確率可由未加入前的 90% 提升至 94%。此分析結果顯示：加入未來乾旱預警指標確實有助於提高未來第一個月水情燈號之準確率。前述提及未來第一個月之 SPI1<sub>f</sub> 是基於完美預報(perfect forecast)之假設，在率定年與驗證年期間均以實際雨量值作為預報值進一步轉換成 SPI1<sub>f</sub>。

未來第一個月燈號之預測結果在率定年之平均整體燈號判別正確率為 94%，驗證年之平均整體燈號判別正確率為 92%。驗證年之豐水期間(5 至 10 月)之整體平均準確率表現良好，皆高於 85% (圖 4a)；驗證年之枯水期間(11 至 4 月)之整體平均準確率表現皆高於 80% (圖 4b)。針對前述預測未來第一個月燈號之乾旱預警模式，均採用 Wilks' Lambda 來檢定區別函數的判別能力。檢定結果顯示：各月份預測未來第一個月之預警模式(區別函數)皆通過 Wilks' Lambda 檢定，表示其具有顯著之判別能力。

在預測未來第一個月燈號之乾旱預警模式中，現

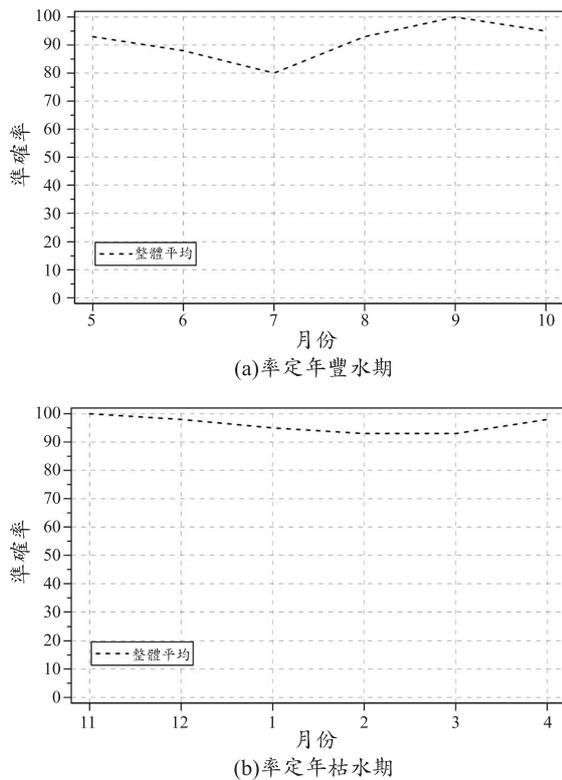


圖 3 同時考量現況與未來指標判別未來第一個月燈號之準確率(率定年)

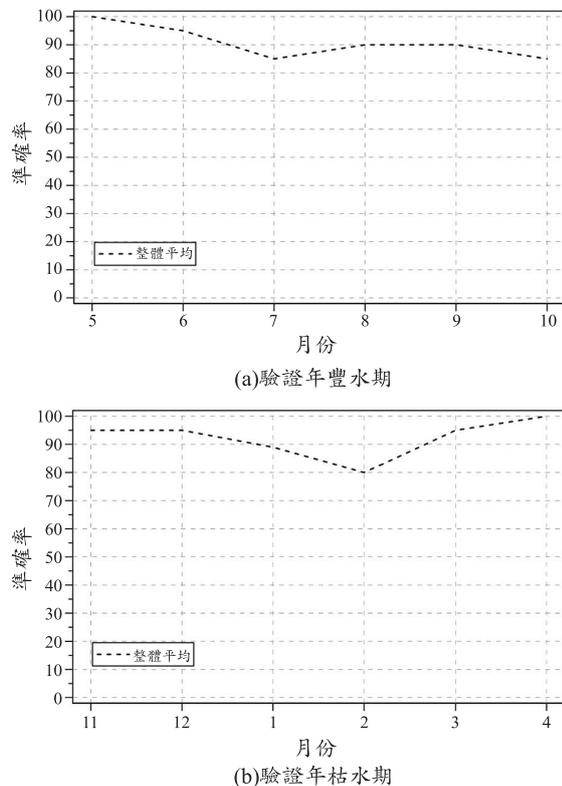


圖 4 同時考量現況與未來指標判別未來第一個月燈號之準確率(驗證年)

況乾旱預警指標為 SPI1 與 SRSI1，並加入未來乾旱預警指標(未來第一個月之 SPI1<sub>t</sub>)進行未來之燈號判別，且不論是在率定年或驗證年中，枯水期間表現較豐水期間佳。

#### 4.2 預測未來第三個月燈號之乾旱預警模式

本研究使用不同時間尺度之現況乾旱預警指標組合進行未來第三個月燈號判別分析，採率定年(民國 47-86 年)資料進行模式(區別函數)建立，以及驗證年(民國 87-106 年)資料作為預警模式之驗證使用。表 6 顯示不同現況乾旱預警指標組合判別未來第三個月燈號之整體準確率，從表中可發現：率定年之平均整體燈號判別正確率中，當乾旱預警指標之組合有 SRSI1 時(組合 1 至 4)，其準確率略高於 SRSI3 之組合(組合 5 至 8)，且相較於僅有標準化水庫蓄水量指標之組合(組合 4 與組合 8)，加入標準化降雨指標之組合(組合 1 至 3、組合 5 至 7)有助於提高整體判別之正確率。

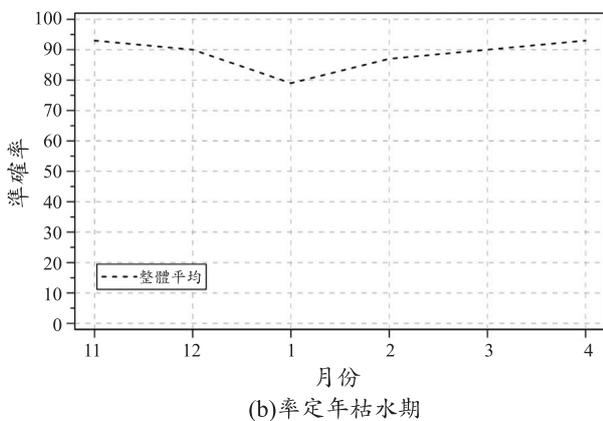
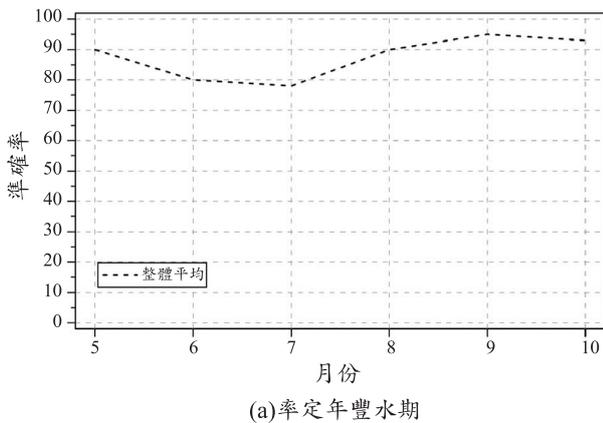
由於未來氣象之不確性高，僅用現況乾旱預警指標進行未來第三個月燈號之預測較為不準確，不同現況乾旱預警指標組合之平均整體判別正確率約 70%左右。其中，最佳之現況乾旱預警指標組合為組合 1 (SPI1 與 SRSI1)，其平均整體燈號判別正確率為 73%，於此現況乾旱預警指標組合中，進一步加入未來乾旱預警指標(未來第三個月之 SPI3<sub>t</sub>)，平均整體燈號判別正確率可提升至 88% (如表 7 所示)。此結果顯示：加入未來乾旱預警指標有助於提高未來第三個月水情燈號之準確率。前述提及未來第三個月之 SPI3<sub>t</sub>是基於完美預

表 6 不同現況乾旱預警指標組合判別未來第三個月燈號之整體準確率

組合月份	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.77	0.67	0.64	0.64	0.72	0.56	0.56	0.56
2	0.74	0.72	0.79	0.72	0.69	0.77	0.72	0.69
3	0.77	0.79	0.74	0.74	0.74	0.79	0.74	0.74
4	0.70	0.72	0.69	0.73	0.67	0.69	0.72	0.77
5	0.78	0.82	0.77	0.73	0.79	0.82	0.74	0.72
6	0.75	0.63	0.69	0.58	0.70	0.58	0.69	0.58
7	0.65	0.65	0.67	0.65	0.65	0.63	0.67	0.65
8	0.68	0.65	0.64	0.65	0.68	0.65	0.64	0.65
9	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
10	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
11	0.65	0.75	0.63	0.63	0.63	0.65	0.63	0.63
12	0.65	0.53	0.55	0.53	0.60	0.55	0.55	0.58
平均	0.73	0.71	0.70	0.68	0.71	0.69	0.69	0.68

**表 7 僅用現況指標與加入未來指標未來第三個月燈號判別整體準確率(率定年)**

月份	變量 SPI1+SRSI1	現況指標 加入未來指標 SPI <sub>3f</sub>	增減率
1	0.77	0.79	0.02
2	0.74	0.87	0.13
3	0.77	0.90	0.13
4	0.70	0.93	0.23
5	0.78	0.90	0.12
6	0.75	0.80	0.05
7	0.65	0.78	0.13
8	0.68	0.90	0.22
9	0.75	0.95	0.20
10	0.85	0.93	0.08
11	0.65	0.93	0.28
12	0.65	0.90	0.25
平均	0.73	0.88	0.15



**圖 5 同時考量現況與未來指標判別未來第三個月燈號之準確率(率定年)**

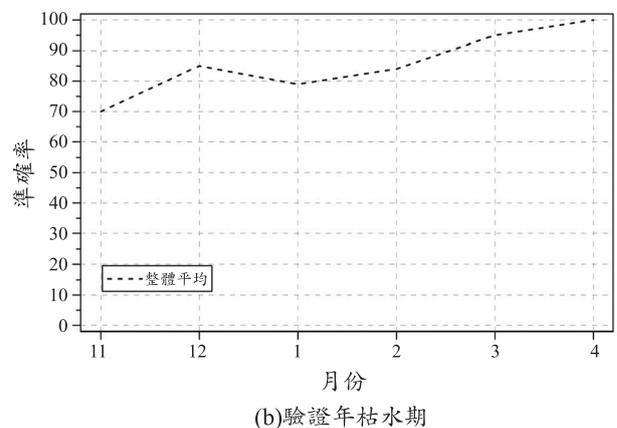
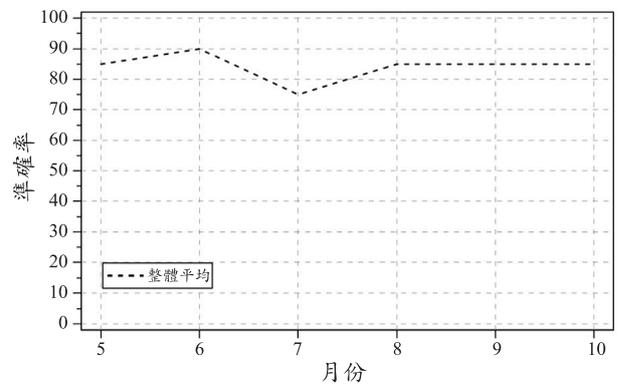
報之假設，在率定年與驗證年期間均以實際雨量值作為預報值進一步轉換成 SPI<sub>3f</sub>。此外，所建立預測未來

第三個月燈號之乾旱預警模式(區別函數)皆通過 Wilks' Lambda 檢定，表示其具有顯著之判別能力。

未來第三個月燈號之預測結果在率定年之豐水期間(5 至 10 月)之整體平均準確率表現良好，除了七月為 78%以外，其餘月份皆高於 80% (圖 5a)所示；率定年之枯水期間(11 至 4 月)之整體平均準確率表現良好，除了一月為 79%以外，其餘月份皆高於 80% (如圖 5b)。

於率定年中，枯水期之表現較於豐水期佳。前述率定年之平均整體燈號判別正確率為 88%，而驗證年之平均整體燈號判別正確率亦有 85%。驗證年之豐水期間(5 至 10 月)之整體平均準確率表現良好，除了七月為 75%以外，其餘月份皆高於 80% (圖 6a)；驗證年之枯水期間(11 至 4 月)之整體平均準確率表現良好，除了十一月為 70%與一月為 79%以外，其餘月份皆高於 80%(圖 6b)。

在預測未來第三個月燈號之乾旱預警模式中，現況乾旱預警指標為 SPI1 與 SRSI1，並加入未來乾旱預警指標(未來第三個月之 SPI<sub>3f</sub>)進行未來之燈號判別，且不論是在率定年或驗證年中，枯水期間表現較豐水期間佳。



**圖 6 同時考量現況與未來指標判別未來第三個月燈號之準確率(驗證年)**

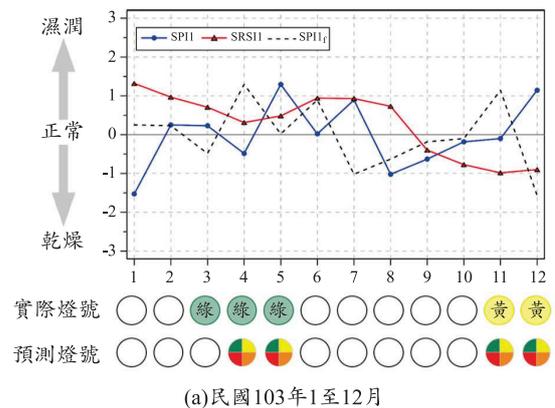
#### 4.4 民國 103 至 104 年乾旱事件之案例模擬

近年來影響較嚴重之乾旱發生於民國 103 至 104 年，本研究選用此乾旱事件作為乾旱預警模式之案例模擬。經此次枯旱石門水庫集水區降雨與歷年平均價值比較發現：民國 103 年 9 月至民國 104 年 4 月之累積降雨量為 684.6 毫米，相較於歷年平均值 1,266.3 毫米減少 581.7 毫米，而且除民國 103 年 12 月，其他月份皆低於歷年平均值。石門水庫桃園供水區於民國 103 年 11 月 27 日、板新供水區於民國 103 年 12 月 8 日起，實施一階限水即夜間減壓供水；民國 104 年 2 月 26 日實施二階限水；4 月 8 日起更實施「供五停二」的三階限水措施，至 6 月 8 日解除一階限水。

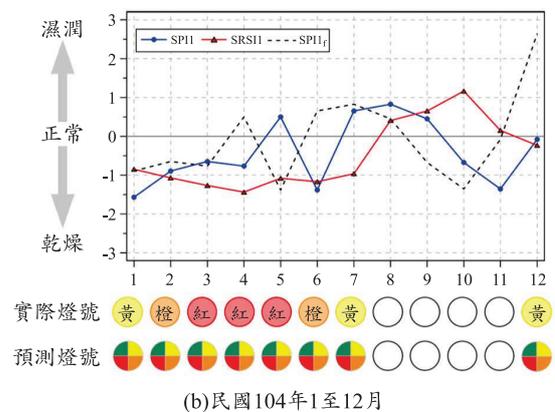
由乾旱預警指標 SPI 與 SRSI 來檢視民國 103 年之水情狀況，圖 7a 顯示：民國 103 年(2014 年)初降雨量少，造成現況 SPII 值低、現況 SRSII 持續下降，實際燈號於 3 月份由水情正常進入綠燈，表示水庫之水情緊張。於颱風季之降雨量相較於歷史同期雨量有偏低之狀況，顯示 8 月、9 月以及 10 月連續三個月之現況 SPII 皆小於零，使現況 SRSII 於 7 月後持續下降直至 11 月為整年中最低值，而實際燈號於 11 月由水情正常進入黃燈，未來指標 SPII<sub>f</sub> 於 11 月值至隔年 3 月皆為負值，顯示未來氣候將會持續惡劣使旱象加劇。圖 7b 顯示：民國 104 年(2015 年)春雨量不足，使現況 SPII 自 1 月至 4 月皆為負值、現況 SRSII 為負值並持續下降，5 月之梅雨鋒面帶來雨水後，未來指標於 5 月後連續三個月為正值，顯示未來氣候將帶來豐沛雨量，現況 SRSII 為負值但是持續上升，顯示水庫之蓄水量逐漸趨於穩定。由於實際燈號為大漢溪及三峽河水資源供水模擬系統之模擬結果，模擬過程中不包含人為操作，所以直至 8 月才解除缺水之情況。

在預測「未來第一個月燈號」(如民國 103 年 10 月預判 11 月之警戒燈號)之乾旱預警模式中，使用現況之乾旱預警指標為 SPII 與 SRSII，並加入未來乾旱預警指標(未來第一個月之 SPII<sub>f</sub>)進行未來燈號判別。在預測未來燈號方面，民國 103 年 11 月為乾旱事件之起始時間，民國 104 年 8 月為乾旱事件之結束時間，於預測未來第一個月燈號之乾旱預警模式皆能夠準確預測，結果顯示此乾旱預警模式有顯著之成效，石門水庫之乾旱預警指標、實際水情燈號以及預測水情燈號之關係如圖 7 所示。

在預測「未來第三個月燈號」(如民國 103 年 8 月預判 11 月隻警戒燈號)之乾旱預警模式中，使用現況之乾旱預警指標為 SPII 與 SRSII，並加入未來乾旱預警指標(未來第三個月之 SPII<sub>f</sub>)進行未來燈號判別，其中

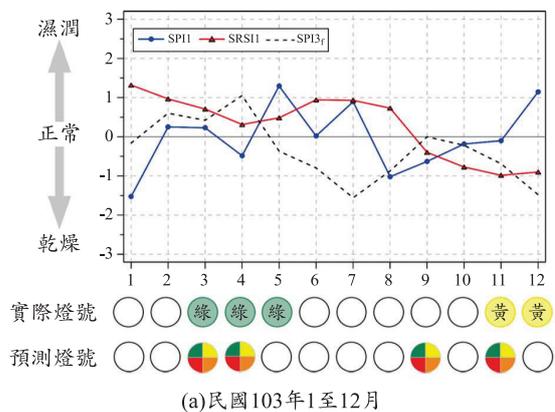


(a) 民國 103 年 1 至 12 月

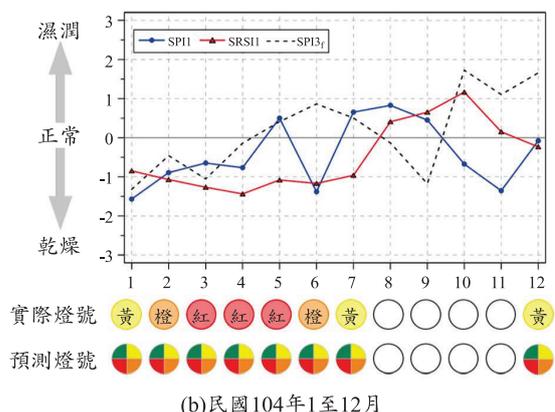


(b) 民國 104 年 1 至 12 月

圖 7 乾旱預警指標與未來第一個月之預測燈號



(a) 民國 103 年 1 至 12 月



(b) 民國 104 年 1 至 12 月

圖 8 乾旱預警指標與未來第三個月之預測燈號

加入未來乾旱預警指標有助於考量未來之氣候情況，增加判別準確度。民國 103 年 11 月至民國 104 年 8 月期間，除了民國 103 年 12 月外，其它月份皆能夠準確預測，結果顯示此乾旱預警模式有相當成效。石門水庫之乾旱預警指標、實際水情燈號以及預測水情燈號之關係如圖 8 所示。

## 五、結論與未來工作

本研究採用區別分析為理論基礎，並以石門水庫為研究對象，發展乾旱預警模式，強化其在乾旱預判之實用性。研究過程中除透過現況乾旱預警指標(如 SPI 與 SRSI)來瞭解現況氣象與水庫蓄水情況，進一步導入未來乾旱預警指標(如未來第一個月之 SPI<sub>1f</sub>、未來第三個月之 SPI<sub>3f</sub>)，來同時掌握現況與未來的氣象與水庫蓄水情勢，分析結果證實：加入未來乾旱預警指標有助於提高水情燈號預判之準確率，不論在率定或驗證年期間所建立之乾旱預警模式均有良好表現。

在預測未來第一個月與未來第三個月燈號之乾旱預警模式中，除了使用現況之乾旱預警指標(SPI<sub>1</sub> 與 SRSI<sub>1</sub>)，並分別加入未來第一個月之 SPI<sub>1f</sub>與未來第三個月之 SPI<sub>3f</sub>，來進行未來燈號判別。本研究中採用未來第一個月之 SPI<sub>1f</sub>與未來第三個月之 SPI<sub>3f</sub>均是基於完美預報之假設，即在率定年與驗證年期間均以實際雨量值作為預報值進一步轉換成 SPI<sub>1f</sub>與 SPI<sub>3f</sub>，因此並無建立 SPI<sub>1f</sub>與 SPI<sub>3f</sub>的預測模式。在實際應用時，前述 SPI<sub>1f</sub>與 SPI<sub>3f</sub>可透過整合中央氣象局氣候模式長期雨量預報資料，利用氣候模式長期雨量預報結果來計算 SPI<sub>1f</sub>與 SPI<sub>3f</sub>，便可輸入乾旱預警模式中，進行未來第一個月與未來第三個月燈號之研判工作(經濟部水利署，2019)。

惟隨著預判前置時間越長，預判燈號難度越高，分析結果亦顯示未來第三個月燈號之判別準確度低於未來第一個月燈號之判別準確度。因此，本研究建議在進行乾旱預警時，可以同時使用預測未來第一個月燈號之乾旱預警模式與預測未來第三個月燈號之乾旱預警模式，若是兩個乾旱預警模式之燈號皆判別為水情警戒燈號，即表示水情緊張，建議儘早啟動超前布署，可透過加強灌溉節水管理或啟動備援水源設施等增加水庫蓄水量以提升抗旱韌性。另外，本研究目前採用區別分析為理論基礎發展乾旱預警模式，未來工作可嘗試其他區別分析方法，例如隨機森林、支撐向量機與非線性判別分析等，以比較不同方法所建立模式之判別準確度。

## 謝誌

本研究承蒙 經濟部水利署水利規劃試驗所經費補助「科學化流量預報與旱災決策輔助研發」計畫(計畫編號:MOEAWRA1070453)得以順利完成，計畫執行期間，特別感謝水利規劃試驗所 蔡展銘課長與 畢嵐杰正工程師在計畫成果應用面的指導。

## 參考文獻

1. Byun, H. R. and D. A. Wilhite, "Daily Quantification of Drought Severity and Duration," *Journal of Climate*, 5, 1181-1201, 1996.
2. Fisher, R. A., "The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems," *Annals of Eugenics*, 7(2): 179-188, 1936.
3. Gusyev, M. A., A. Hasegawa, J. Magome, D. Kuribayashi, H. Sawano, S. Lee, "Drought Assessment in the Pampanga River Basin, the Philippines. Part 1: A Role of Dam Infrastructure in Historical Droughts," *Proceedings of the 21st International Congress on Modelling and Simulation*, Broadbeach, Queensland, Australia, 2015.
4. McKee, T. B., N. J. Doesken, J. Kleist, "The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales," *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, 179-184, 1993.
5. Palmer, W. C., "Meteorological Drought," *Research Paper No. 45*, US Weather Bureau, Washington, DC., 1965.
6. Svoboda, M., M. Hayes, D. Wood, *Standardized Precipitation Index User Guide*, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2012.
7. Shafer, B.A., L. E. Dezman, "Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas," *Proceedings of the Western Snow Conference*, Colorado State University, Fort Collins, CO, 164-175, 1982.
8. Telesca, L., M. Lovallo, I. Lopez-Moreno, S. Vicente-Serrano, "Investigation of Scaling Properties in Monthly Streamflow and Standardized Streamflow Index Time Series in the Ebro Basin (Spain)," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(4), 1662-1678, 2012.
9. 呂季蓉：「台灣南部地區長期乾旱趨勢分析之研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文，2006。

10. 袁倫欽：「水庫供水操作與乾旱預警系統之研究」，國立臺灣海洋大學河海工程學系博士論文，2005。
11. 張紹勳、林秀娟：「多變量統計之線性代數基礎：應用 SPSS 分析」，五南出版社，2018。
12. 經濟部水利署：「科學化流量預報與旱災決策輔助研發」，經濟部水利署水利規劃試驗所，2019。
13. 劉雅慈：「石門水庫乾旱預警指標之研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文，2018。
14. 簡均任：「乾旱指標結合氣候統計降尺度預報於石門水庫供水之乾旱預警應用」，國立中央大學水文與海洋科學研究所碩士論文，2013。
15. 羅萬倫：「短期氣候預報在石門水庫梅雨期之水資源管理應用」，國立中央大學水文與海洋科學研究所碩士論文，2015。

收稿日期：民國 108 年 12 月 05 日

修正日期：民國 109 年 02 月 13 日

接受日期：民國 109 年 04 月 01 日