

水庫集水區季雨量遙相關分析與預報模式之建立

Development of Teleconnection-based Seasonal Rainfall Forecasting Models for Reservoir Watersheds in Taiwan

國立成功大學
水利及海洋工程學系
研究員兼任副教授

楊道昌*
Tao-Chang Yang

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
碩士

吳政諺
Cheng-Yen Wu

經濟部水利署
水利規劃試驗所
正工程司

畢嵐杰
Lan-Chieh Pi

國立成功大學
水利及海洋工程學系
副研究員兼任助理教授

郭振民
Chen-Min Kuo

國立成功大學
水利及海洋工程學系
名譽教授

游保杉
Pao-Shan Yu

摘要

本研究主要目的在於發展枯水期間全臺 18 座水庫及 3 處攔河堰集水區之遙相關季雨量預報模式。採用大尺度環流、海溫、臺灣鄰近風場、Niño3、SOI 及 PDO 等指標及各集水區月雨量作為候選輸入變量，各集水區未來三個月總雨量為輸出變量。利用複回歸分析、支撐向量機及隨機森林等三種模式建構方法進行建模，分別優選出各集水區不同預報起始月(10 月至 3 月)之最佳輸入變量組合，以完成各集水區遙相關季雨量預報模式之建置工作。分析結果顯示：三種模式建構方法中以隨機森林之整體表現最佳。為求實務應用之簡便性，進一步優選北、中及南部地區在不同預報起始月之區域最佳變量組合，建構區域最佳遙相關季雨量預報模式。經比較(1)單純以前期月雨量為輸入變量、(2)環流、海溫、風場與 Niño3 為輸入變量，及(3)區域最佳輸入變量組合之預報表現，可發現本研究提出之區域最佳輸入變量組合其預報表現最好。模式建置成果可提供未來長期降雨趨勢資訊，作為抗旱期間相關因應措施之決策輔助參考。

關鍵詞：遙相關、季雨量預報、複回歸分析、支撐向量機、隨機森林。

* 通訊作者，財團法人成大研究發展基金會、成功大學水利及海洋工程學系，研究員兼任副教授
701 台南市東區大學路 1 號，tcyang58@hotmail.com

Development of Teleconnection-based Seasonal Rainfall Forecasting Models for Reservoir Watersheds in Taiwan

Tao-Chang Yang*

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

Cheng-Yen Wu

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

Lan-Chieh Pi

Water Resources Planning Institute, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs

Pao-Shan Yu

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

ABSTRACT

In order to support decision making for preparing drought-resistance actions in advance during the dry period, the study developed the teleconnection-based seasonal rainfall forecasting models for the 18 reservoir watersheds and 3 dam watersheds in Taiwan. The monthly climatic teleconnection indices, including circulation, sea surface temperature, wind field, Niño3, Southern Oscillation Index (SOI), and Pacific Decadal Oscillation (PDO), and antecedent monthly rainfall of watershed were used as the candidates of model input variables and the seasonal rainfall as the output variable. Multiple regression analysis, support vector machine, and random forests were adopted for model construction and different combinations of the input variables were used for finding the optimal combination for each watershed and each forecast-beginning month (from October to March). Comparison results show that the RF-based forecasting models perform the best. Further, for application convenience, the regional optimal teleconnection-based seasonal rainfall forecasting models were developed for northern, central, and southern Taiwan. It reveals that the proposed models perform better than the models which use (1) the antecedent monthly rainfall as input variable and (2) circulation, sea surface temperature, wind field, and Niño3 as input variables.

Keywords: Teleconnection, Seasonal rainfall forecasting model, Multiple regression analysis, Support vector machine, Random forests.

Yang, T.C.*, Wu, C.Y., Kuo, C.M., Tseng H.W., Pi L.C. & Yu, P.S. (2021). "Development of Teleconnection-based Seasonal Rainfall Forecasting Models for Reservoir Watersheds in Taiwan." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 67(2), 1-14. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202106_67\(2\).0001](https://doi.org/10.29974/JTAE.202106_67(2).0001)

一、前言

近年來受到氣候異常影響，枯水期間經常春雨短缺或延遲，往往造成嚴重缺水事件。而水庫是臺灣重要的水資源設施，具有蓄洪濟枯之功能，如能掌握枯水期間水庫與攔河堰集水區未來可能發生雨量與變化趨勢等資訊，以輔助抗旱期間相關因應措施之決策，對水資源管理將有莫大助益。

大氣遙相關(climatic teleconnection)(簡稱遙相關)是指相隔一定距離的氣候異常變化現象間之聯繫，一個區域的環流異常可以引起距離遙遠的另一個區域的環流異常，這種遙遠距離的大氣環流變化與異常間的相關聯即為遙相關。其來源可追溯至二十世紀初，Gilbert Walker 發現降水少的弱印度季風通常伴隨著南半球太平洋東部的大溪地氣壓減弱、澳洲北部達爾文的氣壓增加，且與太平洋的貿易風減弱現象同時發生，於是將東、西太平洋有週期性年際變化的振盪命名為「南方振盪」(Southern Oscillation; Walker, 1923; Walker and Bliss, 1932)。南方震盪所反映的即是聖嬰現象，雖然聖嬰現象看似只會影響熱帶的大氣系統，但當熱帶西太平洋洋面溫度有變化時，也會影響到中緯度地區。於是赤道洋面溫度的效應就這樣傳到了地球上的另一個角落，導致那個地方的天氣及氣候的變化。由於聖嬰現象為大氣及海洋交互作用而產生，Bjerknes(1969)發現了南方振盪和聖嬰現象兩者有反相位的關係，因此將聖嬰與南方振盪相伴的熱帶海洋一大氣變化現象，統稱為「聖嬰-南方振盪」(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)現象。國際上用以反映聖嬰現象之觀測指標(稱為 ENSO 指標)主要有三類：(1) Niño 指標、(2)南方振盪指標(Southern Oscillation Index, SOI)、(3)多重 ENSO 指標(Multivariate ENSO Index, MEI)。採用 ENSO 指標探討聖嬰-南方振盪現象對於臺灣降雨特性之遙相關機制已有許多相關文獻(許晃雄與陳圭宏，1994；盧孟明，2000；蕭政宗，2000；陳昭銘等人，2002；朱錦紅等人，2004；黃文揚與徐南蓉，2005；許晃雄，2010；郭志豪，2012；李明安，2015；林國龍等人，2008、吳定澄等人，2015)。上述文獻大都著重於探討聖嬰-南方振盪現象對於臺灣降雨特性之影響。另外，亦可採用比較直接影響臺灣降雨之大尺度氣候因子(如環流與海溫)與鄰近臺灣風場等資料進行枯水期臺灣降雨之遙相關機制分析。

為能預先掌握枯水期的降雨變化以超前部屬相關抗旱行動，紓緩乾旱可能帶來之衝擊，經濟部水利署「科學化流量預報與旱災決策輔助研發」計畫(經濟部水利署水利規劃試驗所，2019)已分析並確定大尺度環

流、海溫、臺灣鄰近風場與 Niño3 對臺灣乾季雨量之影響，進而發展西半部平地氣象站(臺北、新竹、臺中、嘉義、臺南與高雄)平均季雨量預報模式。前述變量組合(即大尺度環流、海溫、臺灣鄰近風場與 Niño3)亦進一步應用於石門水庫集水區發展季雨量預報模式(陳弘，2019；楊道昌等人，2019)，分析成果均有不錯表現。除了採用前述變量組合(即大尺度環流、海溫、臺灣鄰近風場與 Niño3)發展季雨量預報模式外，納入其他影響臺灣枯水期降雨之遙相關指標建置預報模式應可一步提升預報精度。

廖志翔(1995)使用 11 月至 4 月的 SOI 和 Niño 3 指標，並統計這兩個指標與臺灣西部地區春季降雨之關係，發現 2 月和 3 月雨量與前一年的 11 月至當年 3 月的 SOI 呈現負相關，而與 Niño 3 呈現正相關，又兩者間以 SOI 與臺灣西部地區春季降雨的相關性較高。Hung *et al.* (2004)分析臺灣北部 4 個測站雨量資料及太平洋年代季振盪(Pacific Decadal Oscillation, PDO)，發現自 20 世紀初以來，北部春雨(2 月到 4 月)與 PDO 具有顯著相關，當 PDO 在正相位時，西太平洋偏冷而東太平洋偏暖，這個較暖的海溫會在菲律賓邊海形成一個反氣旋流動，導致臺灣西北部的氣壓槽增強，進而導致北臺灣有更多的春雨，而當 PDO 為負相位時，則造成相反的結果，使北臺灣春雨減少。Kuo *et al.*(2016)亦以 1960 至 2009 年間每個月的網格雨量資料，由經驗正交函數分析後，發現當 PDO 呈正相位時，臺灣春雨隨之增加。

上述文獻(廖志翔，1995；Hung *et al.*，2004；Kuo *et al.*，2016)所提及 SOI 及 PDO 與臺灣枯水期雨量具有顯著關聯性，因此，為提升水庫與攔河堰集水區於枯水期間雨量預報之能力，本研究進一步延伸前述採用大尺度環流、海溫、臺灣鄰近風場與 Niño3 發展季雨量預報模式之成果，再加入 SOI 與 PDO 為輸入變量，以發展各水庫與攔河堰集水區之季雨量預報模式。

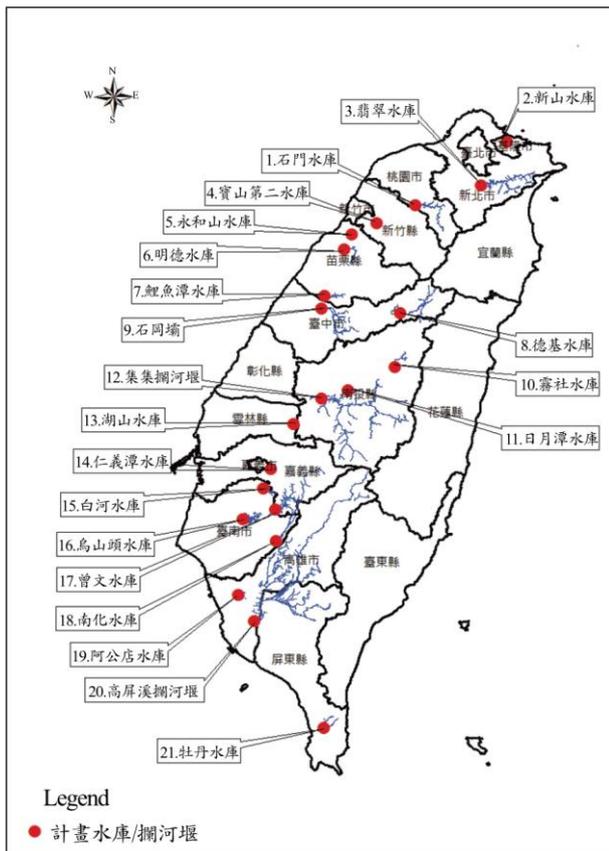
由於枯水期間不同水庫與攔河堰集水區之季雨量與遙相關指標的相關性不盡相同，為提升季雨量預報模式預報能力，將以最佳化方式優選與各集水區季雨量關聯性最高之遙相關指標作為輸入變量，以分別建置各集水區之季雨量預報模式。因此，本研究採用大尺度環流、海溫、臺灣鄰近風場、Niño3、SOI 及 PDO 等指標及各集水區月雨量共 7 個變量作為候選輸入變量，各集水區未來三個月總雨量為輸出變量，利用複回歸分析(multiple regression analysis, MRA)、支撐向量機(support vector machines, SVM)及隨機森林(random forests, RF)等三種模式建構方法進行建模，並進一步優選北、中及南部地區在不同預報起始月(10 月至 3 月)之區域最佳變量組合，建構區域最佳遙相關季雨量預報

模式。

二、研究區域與分析資料

本研究以全臺 18 座水庫及 3 處攔河堰為分析對象。由北而南為：新山水庫、翡翠水庫、石門水庫、寶山第二水庫、永和山水庫、明德水庫、鯉魚潭水庫、德基水庫、石岡壩、霧社水庫、日月潭水庫、集集攔河堰、湖山水庫、仁義潭水庫、曾文水庫、白河水庫、南化水庫、烏山頭水庫、高屏溪攔河堰、阿公店水庫及牡丹水庫，空間分布如圖 1，並蒐集各水庫及攔河堰集水區從 1982 至 2018 年之集水區面積雨量紀錄。各集水區面積雨量資料來源為「臺灣地區主要水庫蓄水量報告表」(http://fhy.wra.gov.tw/ReservoirPage_2011/StorageCapacity.aspx)。

另採用 6 種遙相關指標(包含大尺度環流、海溫、臺灣鄰近風場、Niño3、SOI 與 PDO)作為預報模式之輸入變量，並取其 1982 至 2018 年紀錄，其中，大尺度氣



圖片來源：經濟部水利署水利規劃試驗所(2019)

圖 1 全臺重要水庫(18 座)及攔河堰(3 處)位置圖

候因子(大尺度環流、海溫與臺灣鄰近風場)之資料來源主要取自美國 National Centers for Environmental

Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR)再分析資料，計算方式詳參楊道昌等人(2019)與陳弘(2019)之研究；Niño3 與 SOI 為國際上用以判斷聖嬰現象的觀測指標(ENSO 指標)，資料來源取自美國 Climate Prediction Center 網站資料(<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>)；PDO 則為太平洋 20°N 以北海面溫度年代際變化的主要型態，其海溫配置與聖嬰現象非常類似，不同的是聖嬰現象振幅較明顯的區域以赤道地區為主，而太平洋年代際振盪的配置振幅較大的地方則以北太平洋為主；PDO 指標值則取自日本氣象廳網站資料(<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>)。

三、遙相關季雨量預報模式架構

本研究選用大尺度環流、海溫、臺灣鄰近風場、Niño3、SOI、PDO 與研究區域(18 座水庫及 3 處攔河堰集水區)月雨量共 7 個模式輸入變量，以及各集水區未來三個月之季雨量作為模式輸出變量，利用三種模式建構方法(MRA、SVM 及 RF)，發展各集水區「不同預報起始月」之遙相關季雨量預報模式。

前述「預報起始月」於本研究中定義為 10 月到 3 月。當預報起始月為 10 月，使用 10 月之模式輸入變量預報 11 月至翌年 1 月之季雨量；起始預報月為 11 月，則使用 11 月之模式輸入變量預報 12 月至翌年 2 月之季雨量，以此類推。因此，預報未來 $t+1 \sim t+3$ 個月累積雨量值(季雨量)，則使用 t 月之模式輸入變量， t 月即為「預報起始月」。

模式架構與分析流程如圖 2，分析流程概略區分三大步驟：(1)決定各集水區最佳輸入變量組合與整體最佳之模式建構方法、(2)推求各區域(北、中及南部地區)之區域最佳變量組合，與(3)區域最佳變量組合預報表現之綜合評析，分述說明如下：

3.1 決定各集水區最佳輸入變量組合與整體最佳之模式建構方法

由於上述 7 個模式輸入變量於各集水區不同預報起始月之特性不盡相同，為優化季雨量預報能力，以所有模式輸入變量組合(即， $C_1^7 + C_2^7 + C_3^7 + C_4^7 + C_5^7 + C_6^7 + C_7^7$ ，共 127 種組合)之方式，搭配三種模式建構方法(MRA、SVM 及 RF)，決定各集水區於不同預報起始月表現最佳之變量組合，以建立全臺 18 座水庫及 3 處攔河堰集水區之季雨量預報模式。6 個預報起始月(10 月至 3 月)搭配 21 個集水區(18 座水庫及 3 處攔河堰

集水區)，共計發展 126 個季雨量預報模式。

接著以評鑑指標(均方根誤差與相關係數)比較三種模式建構方法(MRA、SVM 及 RF)，在此 126 個季雨量預報模式的整體表現，找出整體表現最佳之模式建構方法。

3.2 推求各區域(北、中及南部地區)之區域最佳變量組合

由於各集水區於不同預報起始月具有不同的最佳變量組合與季雨量預報模式。為求實務運用簡便性及模式預報精度間取得平衡，故將各集水區依地理位置歸屬至北、中及南部地區，再計算不同預報起始月各變量組合之「區域平均」預報表現，以分別推求北、中及南部地區不同預報起始月之區域最佳變量組合。前述「區域平均」係指區域內所有集水區之平均預報表現。

3.3 區域最佳變量組合預報表現之綜合評析

為探討區域最佳變量組合作為模式輸入變量之預報表現，將與(1)單純以前期雨量作為輸入變量及(2)前人研究(陳弘，2019)以大尺度環流、海溫、臺灣鄰近風場與 Niño3(以下簡稱：環流+海溫+風場+Niño3)等四

個輸入變量之預報結果進行比較，並評析在不同預報起始月與不同區域，預報精度改善之程度。

分析資料年限為 1982 至 2018 年枯水期(共計 37 年)，建模驗證方式採取留一驗證(leave-one-out cross-validation)。留一驗證只使用樣本中的一筆資料作為驗證集，而剩餘的當作率定集，例如以 1982 年資料為驗證集，1983 至 2018 年資料則為率定集；再以 1983 年資料為驗證集，1982 年與 1984 至 2018 年資料則為率定集。持續執行直到樣本中的每一筆資料都被當作過驗證集，此與 k-摺交叉驗證(k-fold cross-validation)概念相同，採用留一驗證時，k-摺交叉驗證的 k 值即為樣本個數。

前述三種模式建構方法(MRA、SVM 及 RF)中，SVM 及 RF 兩種機器學習法在水文領域已有不少應用成果，相關文獻與詳細理論參見林焜詳(2016)、陳思尹(2016)、陳仲廷(2019)、陳弘(2019)與吳政諺(2020)。以下僅針對 SVM 與 RF 進行扼要介紹：(1) SVM 是由 Vapnik (1995)根據統計學習理論所提出的機器學習方法，以解決多維度函數問題。主要基於結構風險最小化法則，找出最佳分類超平面，將資料區分成兩個類別。最初 SVM 主要應用於處理二元分類問題，之後漸漸的應用於多類別分類，並延伸至回歸的問題。(2) RF 為 Breiman and Culter (2001)所提出的一個整體

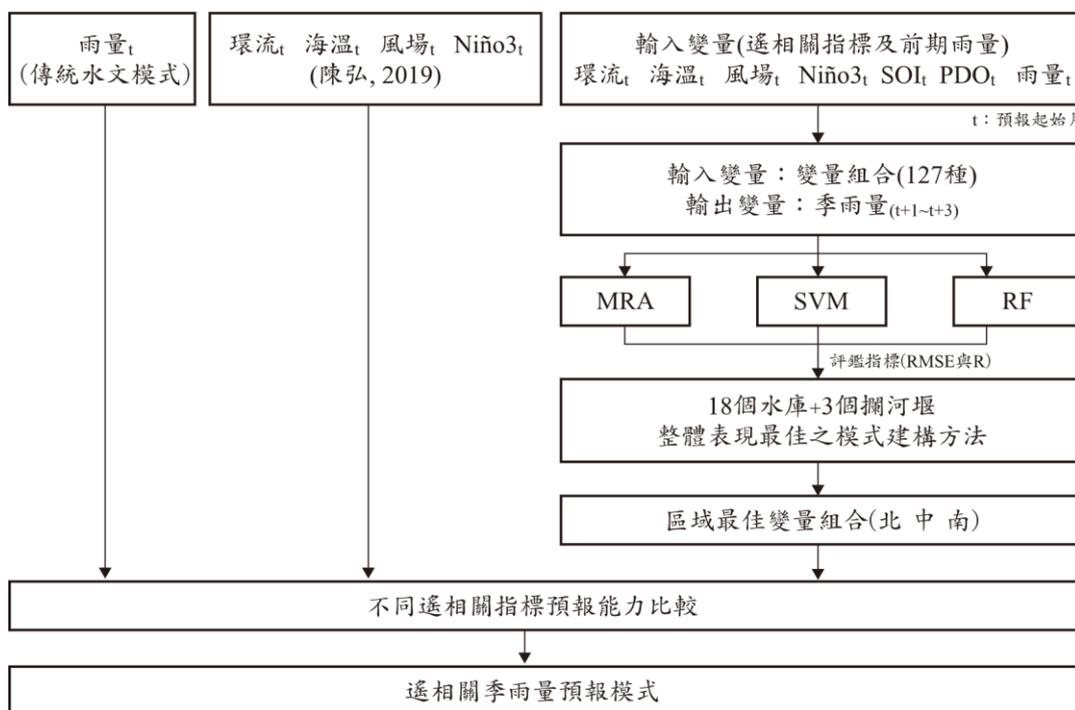


圖 2 遙相關季雨量預報模式之詳細架構與流程

式學習方法。此演算法主要是透過分類迴歸樹 (Classification And Regression Tree, CART)為基礎，而

CART 是使用遞迴二元分割來建構決策樹，為一種能處理分類及迴歸問題的演算法，其在處理連續型資料時採用迴歸樹，而在處理間斷型資料時則採用分類樹。RF 計算效率極高且無過度擬合之問題，其準確率已被許多文獻證實優於其他演算法(Prasad *et al.*, 2006；Chen, 2012；王盼，2014)。

四、分析結果

4.1 季雨量預報模式建構方法之比較

本研究採用 MRA、SVM 及 RF 進行遙相關季雨量預報模式之建置，並比較三種建構方法之預報能力，以得到最適合之模式建構方法。大尺度環流、海溫、臺灣鄰近風場、Niño3、SOI、PDO 與研究區域(18 座水庫及 3 處攔河堰集水區)月雨量共 7 個模式輸入變量，以 127 種變量組合方式，分別作為輸入變量對各預報起始月之各水庫與攔河堰以留一驗證建模(資料年限：1982 年至 2018 年)。如此經評鑑指標比較，可找出不同建構方法在各個水庫與攔河堰各預報起始月最適合之變量組合，再分別由均方根誤差(RMSE)及相關係數(R)比較三種模式建構方法之預報能力。以各預報起始月 18 座水庫及 3 處攔河堰之 RMSE 平均後，率定結果如圖 3 所示。圖中，X 軸為不同起預報始月，左側 Y 軸為 RMSE (單位：mm)，右側 Y 軸為 R，柱狀圖分別表示不同建構方法之 RMSE，折線圖則表示不同建構方法之 R。整體而言，RF 之 RMSE 及 R 皆優於 MRA 及 SVM。

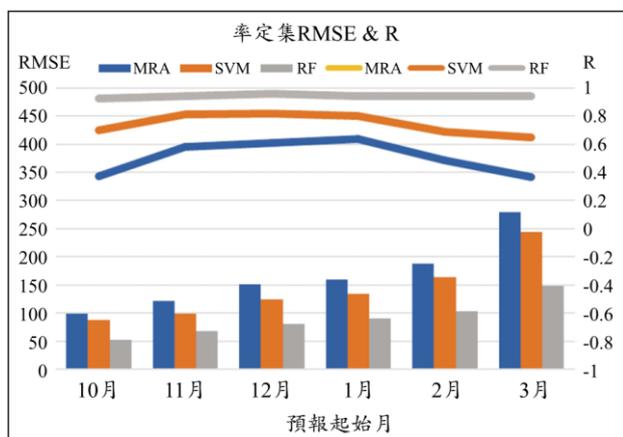


圖 3 各建構方法於不同預報起始月之均方根誤差與相關係數

因此後續分析採用 RF 作為季雨量預測模式之主要建

表 1 預報起始月(10 月)三種輸入變量(雨量、環流+海溫+風場+Niño3，與區域最佳變量組合)預報模式之分析結果評鑑指標

構方法。

4.2 區域最佳變量組合之預報表現

由於 18 座水庫及 3 處攔河堰集水區在各預報起始月(10 月至 3 月)均有一最佳變量組合之季雨量預報模式，總計(18+3)×6=126 個模式，為在實務應用簡便性上及模式預報準確度間取得平衡。故依地理位置將各集水區歸屬為北、中及南部地區，北部區域水庫及攔河堰包含：新山水庫、翡翠水庫、石門水庫、寶山第二水庫及永和山水庫；中部區域水庫及攔河堰包含：明德水庫、鯉魚潭水庫、德基水庫、石岡壩、霧社水庫、日月潭水庫、集集攔河堰及湖山水庫；南部區域水庫及攔河堰包含：仁義潭水庫、曾文水庫、白河水庫、南化水庫、烏山頭水庫、高屏溪攔河堰、阿公店水庫及牡丹水庫。

最後分別於各預報起始月(10 月至 3 月)將所有經組合後的模式輸入變量組合(127 組)之評鑑指標結果以各區域(北、中及南部地區)平均，即為各輸入變量組合(127 組)之區域性平均評鑑指標，再選出在各預報起始月中各區域(北、中及南部地區)表現最佳之變量組合，以下稱之為區域最佳變量組合。

為了比較區域最佳變量組合與(1)傳統水文模式中以前期雨量為輸入為變量及(2)過去研究(陳弘，2019)使用之 4 個遙相關指標組合(環流+海溫+風場+Niño3)之預報表現差異，以評鑑指標均方根誤差(RMSE)進行比較，結果如表 1 至表 6 所示，分別為不同輸入變量組合(前期雨量、環流+海溫+風場+Niño3、區域最佳變量組合)應用於不同預報起始月(10 月至 3 月)之季雨量預報區域評鑑指標(RMSE)。結果顯示，在季雨量預報模式各預報起始月(10 月至 3 月)結果中，最佳變量組合之各月份均方根誤差 RMSE 均優於以 4 指標(環流+海溫+風場+Niño3)及前期雨量指標建模之結果。而由表 7 分別列出了各預報起始月的區域最佳變量組合，可發現在各預報起始月的輸入變量組合中，Niño3 為出現最頻繁之變量，於北部區域出現於 5 個月份；於中部區域也出現於 5 個月份；於南部區域則 6 個月份皆有出現，表示 Niño3 對臺灣枯水期之雨量預報甚是重要。另外，選用區域最佳變量組合相較於單一集水區最佳變量組合，勢必會犧牲些許預報能力，經分析後發現：兩者預報表現差異不大(吳政諺，2020)。

而由圖 4 至圖 7，以 RMSE 呈現了不同水庫與攔河堰以三種輸入變量(前期雨量、4 指標及區域最佳變量組合)建模的單一水庫率定及驗證表現，以臺灣 4 個

輸入變量	北部區域水庫		中部區域水庫		南部區域水庫	
	率定集	驗證集	率定集	驗證集	率定集	驗證集
	RMSE (mm)					
雨量	116	219	68	130	32	64
環流+海溫+風場+Niño3	111	211	67	122	30	56
區域最佳變量組合	97	187	59	112	28	54

表 2 預報起始月(11 月)三種輸入變量(雨量、環流+海溫+風場+Niño3，與區域最佳變量組合)預報模式之分析結果評鑑指標

輸入變量	北部區域水庫		中部區域水庫		南部區域水庫	
	率定集	驗證集	率定集	驗證集	率定集	驗證集
	RMSE (mm)					
雨量	129	250	115	225	43	71
環流+海溫+風場+Niño3	117	234	95	191	28	53
區域最佳變量組合	109	222	90	181	26	49

表 3 預報起始月(12 月)三種輸入變量(雨量、環流+海溫+風場+Niño3，與區域最佳變量組合)預報模式之分析結果評鑑指標

輸入變量	北部區域水庫		中部區域水庫		南部區域水庫	
	率定集	驗證集	率定集	驗證集	率定集	驗證集
	RMSE (mm)					
雨量	143	277	151	304	51	104
環流+海溫+風場+Niño3	119	246	123	248	37	75
區域最佳變量組合	110	229	115	230	31	62

表 4 預報起始月(1 月)三種輸入變量(雨量、環流+海溫+風場+Niño3，與區域最佳變量組合)預報模式之分析結果評鑑指標

輸入變量	北部區域水庫		中部區域水庫		南部區域水庫	
	率定集	驗證集	率定集	驗證集	率定集	驗證集
	RMSE (mm)					
雨量	131	249	157	299	68	124
環流+海溫+風場+Niño3	119	236	140	277	42	88
區域最佳變量組合	115	227	134	264	39	75

表 5 預報起始月(2 月)三種輸入變量(雨量、環流+海溫+風場+Niño3，與區域最佳變量組合)預報模式之分析結果評鑑指標

輸入變量	北部區域水庫		中部區域水庫		南部區域水庫	
	率定集	驗證集	率定集	驗證集	率定集	驗證集
	RMSE (mm)					
雨量	129	251	165	332	89	171
環流+海溫+風場+Niño3	120	241	150	299	79	160
區域最佳變量組合	107	224	136	278	73	150

表 6 預報起始月(3 月)三種輸入變量(雨量、環流+海溫+風場+Niño3，與區域最佳變量組合)預報模式之分析結果評鑑指標

輸入變量	北部區域水庫		中部區域水庫		南部區域水庫	
	率定集	驗證集	率定集	驗證集	率定集	驗證集
	RMSE (mm)					
雨量	149	301	213	420	176	337
環流+海溫+風場+Niño3	126	253	186	372	151	300
區域最佳變量組合	123	249	184	354	148	292

主要水庫(石門水庫、德基水庫、曾文水庫及高屏溪攔河堰)集水區為例，X 軸為不同預報起始月，Y 軸為 RMSE(單位:mm)，可看出區域最佳變量組合之 RMSE 皆小於前期雨量及 4 指標(環流+海溫+風場+Niño3)之 RMSE，證實區域最佳變量組合可提升季雨量預報表現。

圖 8 及圖 9 分別為率定集及驗證集以「前期雨量」及以「區域最佳變量組合」建立季雨量預報模式之 RMSE 進步百分比。計算方式為使用前期雨量之 RMSE 減掉區域最佳變量組合之 RMSE，再以此差值除上前期雨量之 RMSE，可得相較於前期雨量之區域

最佳變量組合 RMSE 進步百分比。由分析結果可看出：整體而言，區域最佳變量組合之預報結果優於以前期雨量之預報結果，僅少數水庫於部分預報起始月有負值(代表以前期雨量作為輸入變量有較佳的預報表現)。在率定集中(圖 8)，RMSE 進步百分比於北部平均約 15%，而在預報起始月 12 月則有 23%；中部平均約 15%，但在預報起始月 11 月及 12 月則可接近 25%；而在南部區域，於預報起始月 11 月、12 月及 1 月約可達 40%，其餘預報起始月則約在 15%；而在驗證集(圖 9)中，北部與中部區域平均約 15%，而在南部區域預報起始月 11 月、12 月及 1 月約可達 35%。

表 7 各區域水庫於不同預報起始月之區域最佳變量組合

起始月	北部區域水庫	中部區域水庫	南部區域水庫
10 月	海溫+Niño3+SOI	Niño3+PDO	Niño3+SOI+雨量
11 月	環流+風場+Niño3 +PDO+雨量	風場+Niño3+雨量	風場+ Niño3
12 月	海溫+Niño3+PDO+雨量	海溫+Niño3+SOI +PDO	Niño3+雨量
1 月	環流+風場+SOI+雨量	SOI+雨量	Niño3+SOI
2 月	海溫+Niño3+SOI	海溫+Niño3+SOI+PDO	海溫+Niño3+SOI+PDO+雨量
3 月	環流+海溫+Niño3	海溫+Niño3	海溫+風場+Niño3

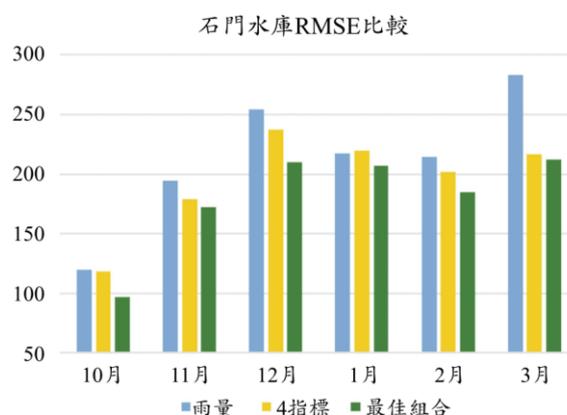
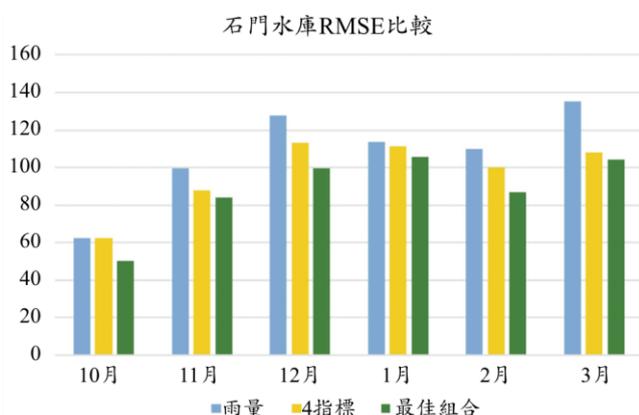


圖 4 石門水庫各預報起始月不同輸入變量建構模式之 RMSE(左圖：率定集；右圖：驗證集)

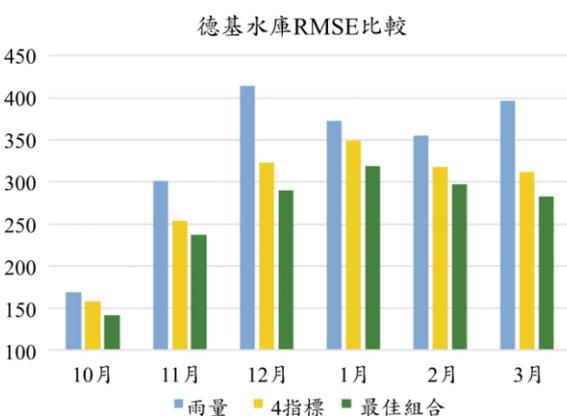
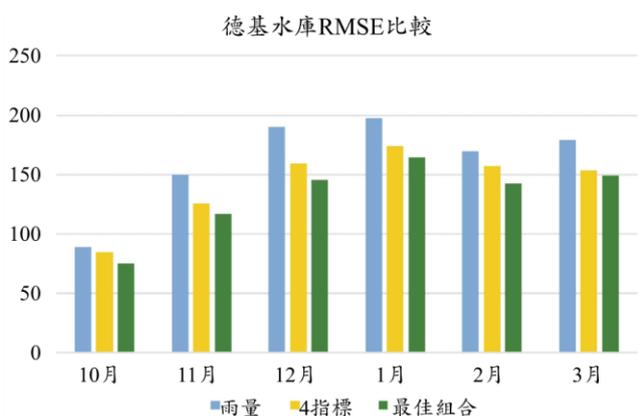


圖 5 德基水庫各預報起始月不同輸入變量建構模式之 RMSE(左圖：率定集；右圖：驗證集)

圖 10 及圖 11 分別為率定集及驗證集以「4 指標(環流+海溫+風場+Niño3)」及以「區域最佳變量組合」建立季雨量預報模式之 RMSE 進步百分比。計算方式為使用 4 指標(環流+海溫+風場+Niño3)之 RMSE 減掉區域最佳變量組合之 RMSE，再以此差值除上 4 指標(環流+海溫+風場+Niño3)之 RMSE，可得相較於 4 指

標(環流+海溫+風場+Niño3)之區域最佳變量組合 RMSE 進步百分比。由分析結果可看出：整體而言，區域最佳變量組合之預報結果優於以 4 指標(環流+海溫+風場+Niño3)之預報結果，僅少數水庫或攔河堰於部分預報初始月有負值(代表 4 指標作為輸入變量有較佳的預報表現)。在率定集(圖 10)中，RMSE 進步百

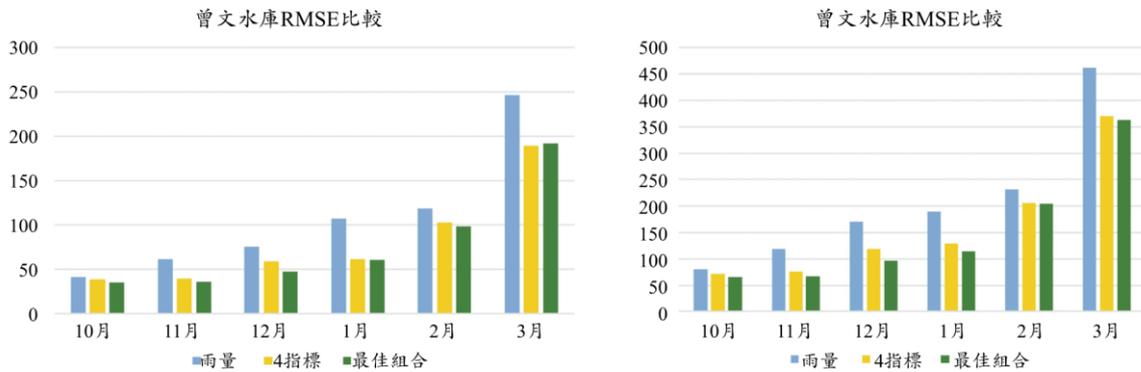


圖 6 曾文水庫各預報起始月不同輸入變量建構模式之 RMSE(左圖：率定集；右圖：驗證集)

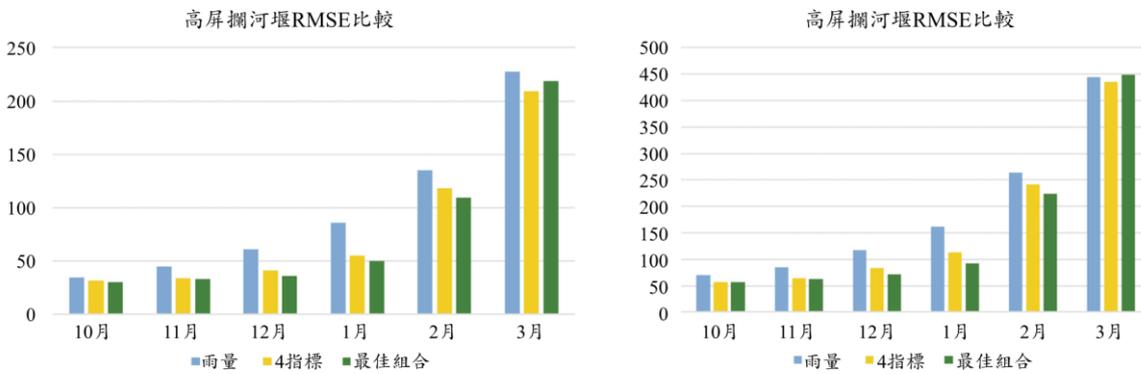


圖 7 高屏溪攔河堰各預報起始月不同輸入變量建構模式之 RMSE(左圖：率定集；右圖：驗證集)

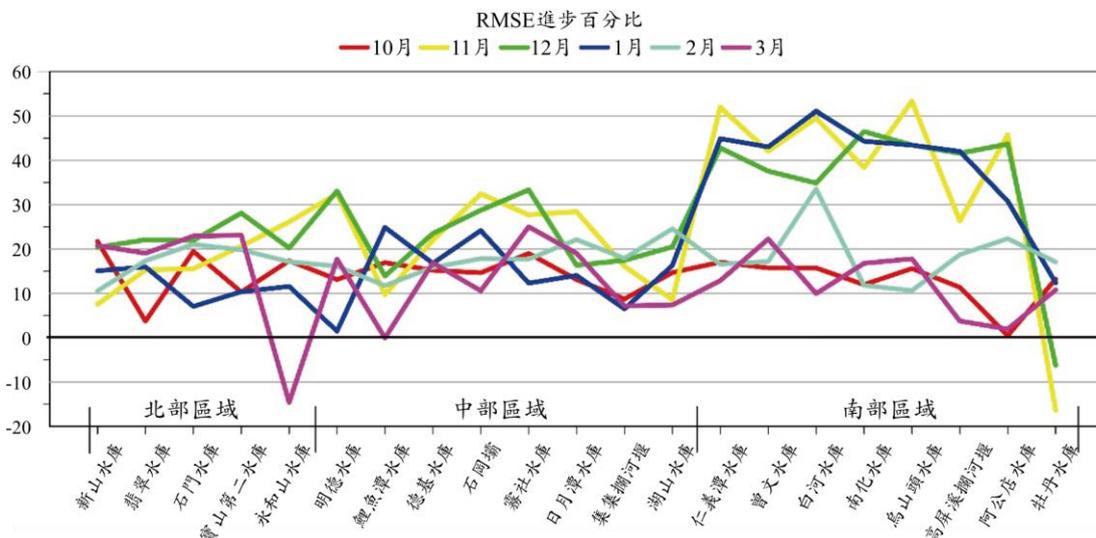


圖 8 各水庫與攔河堰不同預報初始月前期雨量與區域最佳變量組合比較之 RMSE 進步百分比(率定集)

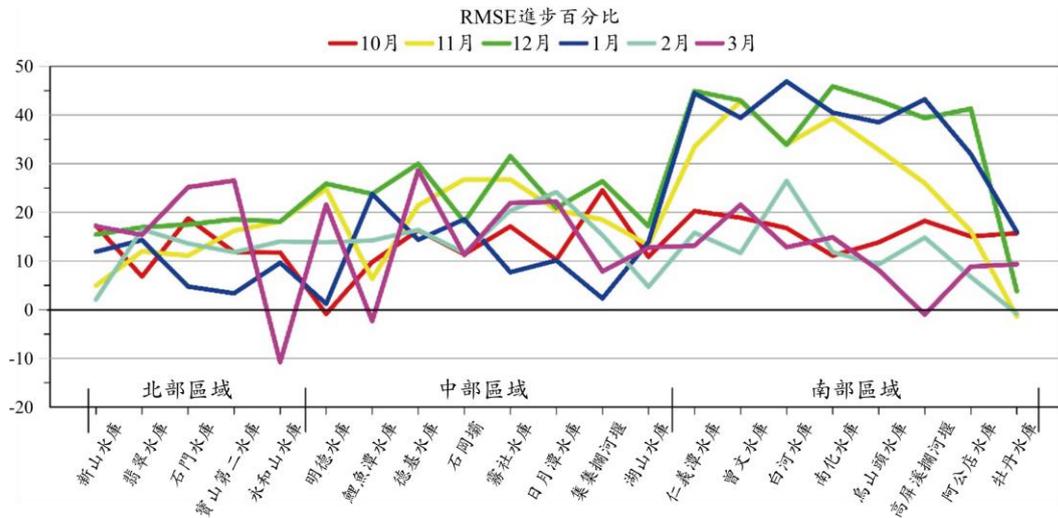


圖 9 各水庫與攔河堰不同預報初始月前期雨量與區域最佳變量組合比較之 RMSE 進步百分比(驗證集)

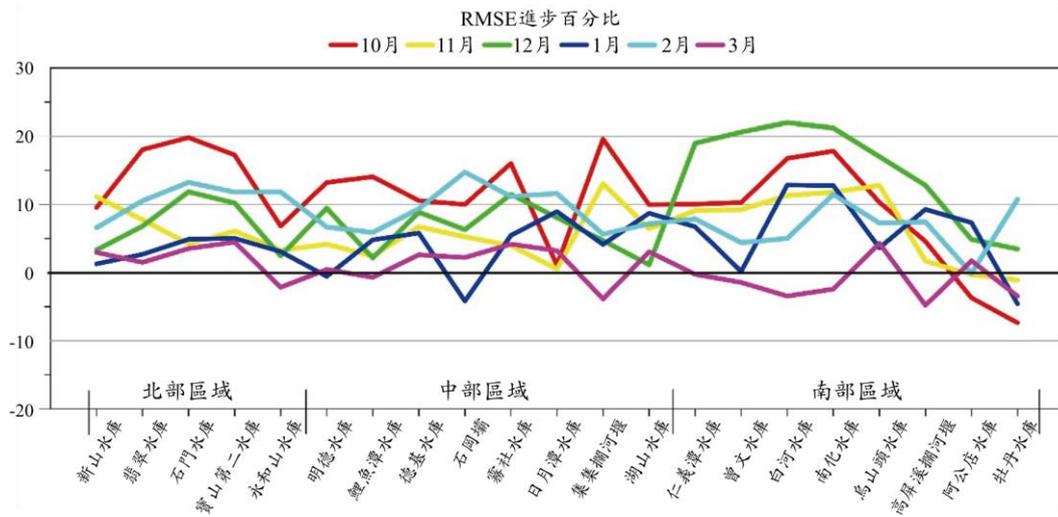


圖 10 各水庫與攔河堰不同預報初始月 4 指標(環流+海溫+風場+Niño3)與區域最佳變量組合比較之 RMSE 進步百分比(率定集)

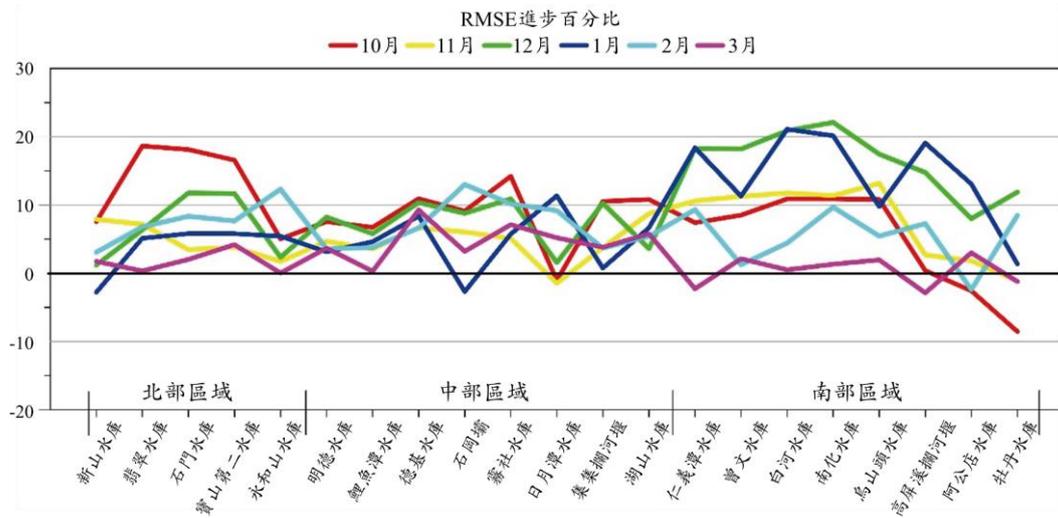


圖 11 各水庫與攔河堰不同預報初始月 4 指標(環流+海溫+風場+Niño3)與區域最佳變量組合比較之 RMSE 進步百分比(驗證集)

分比於預報初始月為 10 月、12 月及 2 月時，各水庫及攔河堰平均約可達 10 %，在預報初始月為 11 月、1 月時，各水庫及攔河堰平均約為 5 %；而在驗證集(圖 11)中，預報初始月為 10 月、12 月及 1 月時，各水庫及攔河堰平均約為 10 %，在預報初始月為 11 月、2 月時，各水庫及攔河堰平均約為 7 %。

由前述分析結果可得知：整體而言，區域最佳變

量組合優於 4 指標(環流+海溫+風場+Niño3)建立之預報模式(RMSE 進步百分比約 5 %至 10 %)，更勝於以前期雨量建立之預報模式(RMSE 進步百分比 15 %至 40 %)。

圖 12 至圖 13 以預報初始月份(12 月與 1 月)分別預報 1~3 月與 2~4 月總雨量為例來呈現春雨期間預報能力，以季雨量預報值之時間序列圖方式呈現區域

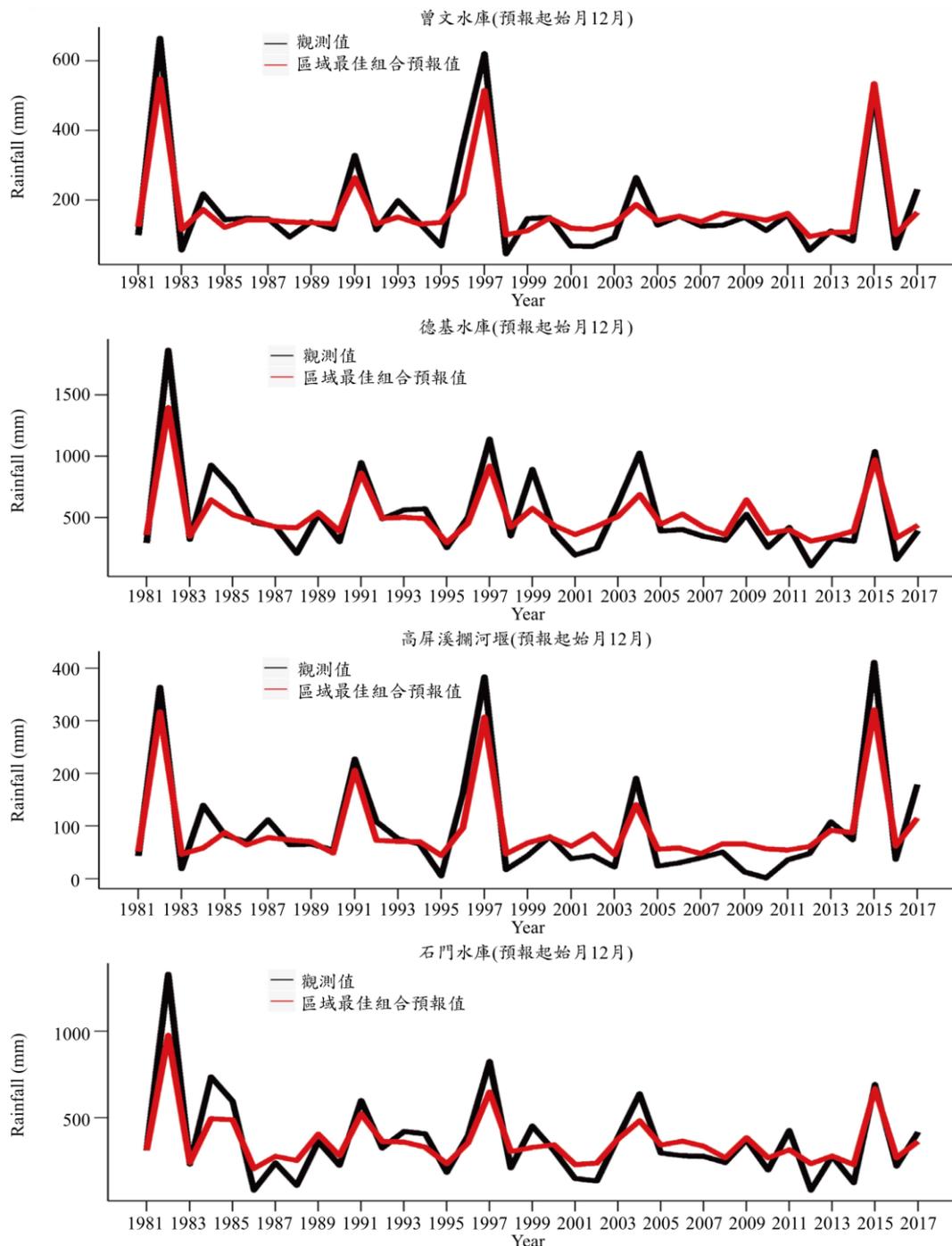


圖 12 預報初始月(12 月)區域最佳輸入變量組合之季雨量預報模式 1-3 月雨量預報值(石門水庫、德基水庫、曾文水庫與高屏溪攔河堰)

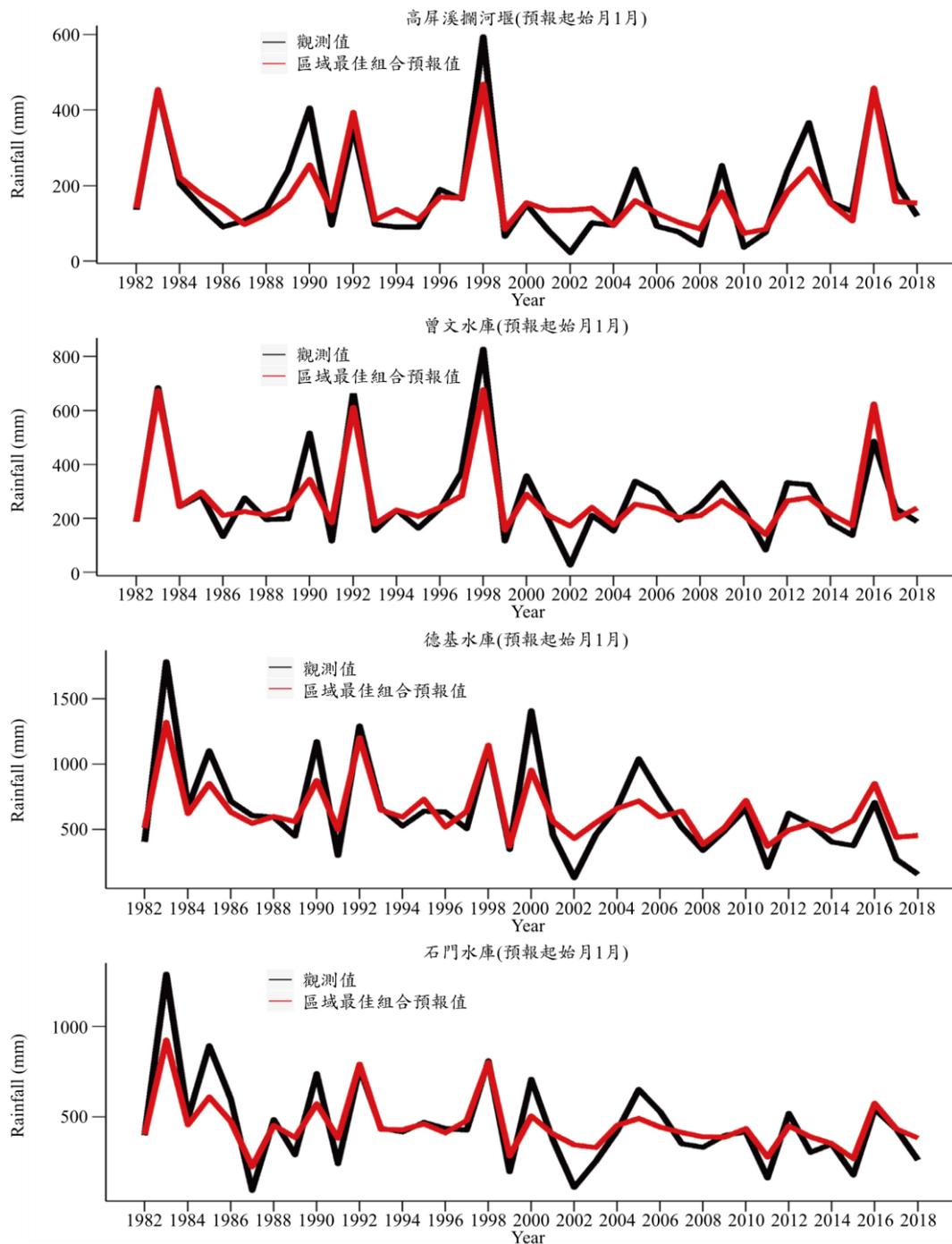


圖 13 預報初始月(1 月) 區域最佳輸入變量組合之季雨量預報模式 2-4 月雨量預報值(石門水庫、德基水庫、曾文水庫與高屏溪攔河堰)

最佳組合建模之單一水庫或攔河堰預報表現。圖中 X 軸為年份，Y 軸為季雨量預報值(單位為 mm)，並以石門水庫、德基水庫、曾文水庫與高屏溪攔河堰等四個集水區為例來呈現不同地理位置之預報能力。由圖可看出以區域最佳變量組合作為輸入變量之季雨量預報模式具有一定的預報表現。其它水庫與攔河堰在不同預報初始月之預報成果可參考相關研究(吳政諺，

2020；經濟部水利署水利規劃試驗所，2020)。

五、結論與未來工作

本研究以大尺度環流、海溫、臺灣鄰近風場、Niño3、SOI、PDO 與水庫(或攔河堰)集水區月雨量(共

7種變量)作為模式輸入變量,採用 MRA、SVM 及 RF 等三種模式建構方法,發展全臺 18 座水庫+3 處攔河堰集水區之遙相關季雨量預報模式。為優化季雨量預報能力,將前述模式輸入變量組合成 127 種組合,進一步優選各水庫與攔河堰集水區不同預報起始月之最佳變量組合與建置最佳之季雨量預報模式。

綜合本研究分析結果,發現(1)採用 MRA、SVM 及 RF 等三種模式建構方法,以 RF 作為模式建構方法其整體預報表現最佳。(2)分別採用 A.區域最佳變量組合、B.前期雨量及 C.環流+海溫+風場+Niño3 作為模式輸入變量,經 RF 建模後比較三者之季雨量預報表現,分析結果以區域最佳變量組合為模式輸入變量時表現最佳。

本研究以遙相關指標作為輸入變量,相較於以前期雨量作為輸入變量之傳統預報方法,預報結果有顯著的提升。未來可以針對枯水期不同月份及不同地區之雨量特性蒐集更多相關的遙相關指標(例如:Madden Julian Oscillation)(Hung, 2014),並搭配輸入變量組合方式搜尋最佳之輸入變量建模以提升預報表現。針對遙相關指標資料,未來可進一步採用資料預處理技術(例如,小波轉換或奇異譜分析),將時序資料分解為不同頻率的訊號,以達到消除雜訊或提取出與季雨量相關性更高的訊號,作為模式輸入變量,進而提升預報能力。

另外,本研究發展之枯水期季雨量預報模式其核心建模工具僅採用三種方式(MRA、SVM 及 RF),並以兩種評鑑指標(RMSE 及 R)進行評比,尚有加強空間。未來工作除可採用更多的機器學習方式來建立預報模式外,並加入其它評鑑指標(如 MSE 與 CE 等),來優選最佳的機器學習方法,以提升預報能力。目前本研究僅針對枯水期發展季雨量預報模式,為能延伸應用至豐水期,如何掌握未來有利/不利颱風生成發展環境以反映颱風變化情形及其影響臺灣降雨之程度,有必要進一步分析與探討。未來工作可嘗試進行豐水期間水庫集水區降雨與大氣因子之遙相關機制分析,藉由遙相關機制分析建立豐水期季雨量預報模式,以提供豐水期間長期降雨預報資訊。

謝誌

本研究承蒙 經濟部水利署水利規劃試驗所經費補助「精進水庫集水區長期雨量預報暨科學化流量預報」計畫(編號:MOEAWRA1090281)得以順利完成,計畫執行期間,特別感謝 蔡展銘課長與畢嵐杰正工程

可在計畫成果應用面的指導。另外,感謝中央氣象局提供地面氣象站資料與其他大氣相關資料,在此一併致謝。

參考文獻

1. Bjerknes, J., "Atmospheric Teleconnection from the Equatorial Pacific," *Monthly Weather Review*, 97, 163-172, 1969.
2. Breiman, L., and A. Cutler, "Random Forests," *Machine Learning*, 45(1), 5-32, 2001.
3. Chen, J., M. Li, and W. Wang, "Statistical Uncertainty Estimation Using Random Forests and Its Application to Drought Forecast," *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 1-12, 2012.
4. Hung, C. W., H. J. Lin, and H. H. Hsu, "Madden-Julian Oscillation and the Winter Rainfall in Taiwan," *Journal of Climate*, 27(12), 4521-4530, 2014.
5. Kuo, Y. C., M. A. Lee, and M. M. Lu, "Association of Taiwan's Rainfall Patterns with Large-Scale Oceanic and Atmospheric Phenomena," *Advances in Meteorology*, 2016, 1-11, 2016.
6. Prasad, A. M., L.R. Iverson, and A. Liaw, "Newer Classification and Regression Tree Techniques-Bagging and Random Forests for Ecological Prediction," *Ecosystems*, 9(2), 181-199, 2006.
7. Vapnik, V. N., *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer-Verlag New York, 1995.
8. Walker, G. T. and E. W. Bliss, "World Weather V," *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, 4, 53-84, 1932.
9. Walker, G. T., "Correlation in Seasonal Variations of Weather, VIII, Preliminary Study Of World Weather," *Memoirs of the India Meteorological Department*, 24, 75-131, 1923.
10. 王盼:「基於隨機森林模型的需水預測模型及其應用」,水資源保護,第30卷第1期,pp. 34 至 37, 2014。
11. 朱錦紅、柯文雄、許晃雄:「臺灣降水變化及其季節性異常的環流機制」,環境保護學會學刊,第27卷第1期,pp. 72 至 89, 2004。
12. 吳定澄、許友貞、李忠潘:「聖嬰-南方震盪現象對臺灣氣溫及雨量之影響」,海洋工程學刊,第15卷第1期,pp. 57-65, 2015。

13. 吳政諺：全臺主要水庫之遙相關季雨量預報模式，國立成功大學水利及海洋工程學系，碩士論文，2020。
14. 李明安：「聖嬰現象對臺灣天氣系統的影響」，臺灣氣候變遷調適科技整合研究計畫電子報，第 12 期，2015。
15. 林國龍、張毓堯、范光龍：「2002-2003 年聖嬰現象對臺灣雨量的影響」，環境保護學會學刊，第 31 卷第 1 期，2008。
16. 林焜詳：支撐向量機與隨機森林應用於颱風時雨量預報之比較，國立成功大學水利及海洋工程學系，碩士論文，2016。
17. 許晃雄、陳圭宏：「臺灣地區低頻大氣變化與熱帶海洋及大氣的關係」，氣象科技中心技術報告彙編，第 014 號，pp. 33-5，交通部中央氣象局，1994。
18. 許晃雄：「乾旱環境下的莫拉克颱風」，臺大校友雙月刊，第 69 期，pp. 39-42，2010。
19. 郭志豪：應用 ENSO 對臺灣南部乾旱之機率預報，國立成功大學水利及海洋工程學系，碩士論文，2012。
20. 陳弘：遙相關月雨量預報模式應用於石門水庫乾旱預警，國立成功大學水利及海洋工程學系，碩士論文，2019。
21. 陳仲廷：結合缺水量預測與 SDF 曲線建構缺水應變方案，國立成功大學水利及海洋工程學系，碩士論文，2019。
22. 陳思尹：應用機器學習法於 QPESUMS 即時雨量預報，國立成功大學水利及海洋工程學系，碩士論文，2016。
23. 陳昭銘、汪鳳如、呂芳川、郭漱冷：「聖嬰現象與 1998 年臺灣異常氣候：全年偏暖與春雨偏多現象」，大氣科學期刊，第 30 期，pp. 331-350，2002。
24. 黃文揚、徐南蓉：「以全球海水表面溫度預測臺灣附近之夏季降雨量」，中國統計學報，第 43 卷第 4 期，pp. 371-386，2005。
25. 楊道昌、陳昭銘、游保杉、郭振民、蔡玫紘、陳弘：「臺灣春雨遙相關機制與可預報性探討」，農業工程學報，第 65 卷第 4 期，pp. 1-11，2019。
26. 經濟部水利署水利規劃試驗所：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。
27. 經濟部水利署水利規劃試驗所：精進水庫集水區長期雨量預報暨科學化流量預報，經濟部水利署水利規劃試驗所，2020。
28. 廖志翔：臺灣地區春季降雨分析及聖嬰／南方振盪 (ENSO) 關係之探討，八十四年度研究報告第 CW84-1A-04 號，交通部中央氣象局，1995。
29. 盧孟明：「聖嬰現象與臺灣異常氣候關係之探討」，大氣科學，第 28 卷第 2 期，第 91 至 114 頁，2000。
30. 蕭政宗：「聖嬰現象與臺灣地區降雨量之相關性分析」，農業工程學報，第 46 卷第 1 期，pp. 93-109，2000。