

臺灣水庫集水區長期雨量暨流量預報之發展

DEVELOPMENT OF LONG-TERM RAINFALL AND INFLOW FORECASTING 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

經濟部水利署
水利規劃試驗所
正工程司

畢嵐杰

Lan-Chieh Pi

經濟部水利署
水利規劃試驗所
研究員兼課長

蔡展銘

Chan-Ming Tsai

國立成功大學
水利及海洋工程學系
研究助理

龔明人

Ming-Jen Kung

國立高雄科技大學
海事資訊科技系
教授

陳昭銘

Jau-Ming Chen

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

長期入流量預報資訊可用以輔助抗旱期間水庫未來蓄水量推估與水情研判，提供主管機關抗旱決策時更為客觀之參考資訊。本文主要介紹臺灣重點水庫集水區長期雨量暨流量預報之發展演進。透過優化中央氣象局長期雨量預報產品結合水文模式，進行水庫與攔河堰長期入流量預報。目前已開發三個版本，各版本主要差異在於採用不同的氣候模式預報產品與降尺度方法。由第一版基於季長期天氣展望進行雨量與溫度繁衍，演進至第二版採用氣候模式(二步法)雨量與溫度預報產品經平地氣象站映射至集水區，再進一步演進至第三版採用全球海氣耦合模式(一步法)雨量與溫度預報產品，由格網點預報值直接降尺度至集水區，同時配合系集優選方法優選系集預報成員，並將降尺度預報值輸入水文模式以進行各水庫與攔河堰未來 1 至 6 個月入流量預報。預報效能評析結果顯示：隨版本的演進，流量預報精度亦逐步提升。

關鍵詞：氣候模式、全球海氣耦合模式、降尺度、長期雨量預報、長期流量預報。

* 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 LONG-TERM RAINFALL AND INFLOW FORECASTING FOR RESERVOIR WATERSHEDS IN TAIWAN

Tao-Chang Yang*

Department of Hydraulic and
Ocean Engineering, National
Cheng Kung University

Lan-Chieh Pi

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

Chan-Ming Tsai

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

Ming-Jen Kung

Department of Hydraulic and
Ocean Engineering, National
Cheng Kung University

Jau-Ming Chen

Department of Maritime
Information and Technology,
National Kaohsiung University
of Science and Technology

Pao-Shan Yu

Department of Hydraulic and
Ocean Engineering, National
Cheng Kung University

ABSTRACT

The long-term inflow forecasts can be used to estimate the future storage of reservoir to support decision making for preparing drought-resistance actions in advance during the dry period. The article introduces the development and evolution of long-term rainfall and inflow forecasting for Taiwan's key reservoir catchments. By optimizing the long-term rainfall and temperature forecasts of the Central Meteorological Bureau combined with the hydrological model, the long-term inflow forecasts for reservoirs are carried out. Three versions of long-term inflow forecasting have been developed. The main difference among the three versions is the use of different rainfall and temperature forecasts and downscaling methods. The first version uses the seasonal weather outlook to generate rainfall and temperature forecasts. The second version maps the forecasts by TCWB2T2 from the weather stations of flatland to the reservoir catchments. The third version downscales the grid-based forecasts by TCWB1T1 (a coupled ocean-atmosphere general circulation model) to the reservoir catchments. The generated/mapped/downscaled rainfall and temperature forecasts are then input into the hydrological model with an ensemble optimization method to carry out the 1 to 6-months-ahead inflow forecasting for each reservoir. Based on the results of effectiveness evaluation, the forecast accuracy improves with the evolution of version.

Keywords: Climate model, Global coupled ocean atmospheric model, Downscaling, Long-term rainfall forecasting, Long-term inflow forecasting.

Yang, T.C., Pi, L.C., Tsai, C.M., Kung, M.J., Chen, J.M., & Yu, P.S. (2021). "Development of Long-term Rainfall and Inflow Forecasting for Reservoir Watersheds in Taiwan." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 67(3), 18-29. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202109_67\(3\).0002](https://doi.org/10.29974/JTAE.202109_67(3).0002)

一、前言

臺灣年降雨量豐沛，但因豐枯不均，且河川坡度短，難以完全積蓄水源以供枯水期使用。隨著氣候變遷影響，水資源環境亦面臨「豐越豐、枯越枯」的挑戰，每逢豐水期降雨表現不佳時，乾旱情況便陸續發生。水資源系統之管理及調度亦因水情豐枯日益明顯，使水源調度更加艱困。由於缺水對社會經濟之影響廣泛且巨大，為因應枯旱時期可能發生之缺水危機，除積極節約用水、有效管理相關設施、建置備援水源外，抗旱過程更需頻繁依氣象預報及降雨可能情況，動態調整相關抗旱措施。因此，更精確的掌握未來可能之水情，除可降低旱災決策之不確定性，亦可強化抗旱應變能力。

近年來因科技發展迅速，長期天氣預報能力也隨之成長，雨量與溫度預報之準確率大幅提升，許多研究藉由整合雨量預報、溫度預報以及水文模式進行流量預報技術之發展。例如：Tucci *et al.* (2003)整合全球環流模式與水文模式進行 Uruguay River 集水區長期流量預報，主要先進行全球環流模式預報雨量之誤差修正，再將修正雨量輸入水文模式進行流量預報。長期流量預報相較於以月平均流量進行預報可縮減 37% 變異，而相較於以季平均流量進行預報則可縮減 54% 變異，流量預報變異有明顯改善。吳雷根(2004)與 Yang *et al.* (2005)利用氣象局發布之月長期天氣展望資料配合以旬為時間演算單位之修正型 HBV 水文模式，進行曾文水庫集水區入流量預報，並與以歷年旬入流量平均值為參考基準之傳統方法進行比較，結果顯示：利用月長期天氣展望資料預報入流量較能掌握流量變動趨勢。李晏全(2006)利用不同時間尺度(月、旬、日)之修正型 HBV 水文模式，配合氣象局發布之月與季長期天氣展望進行枯水期石門水庫入流量預報。結果顯示：不同時間尺度均可合理模擬集水區之降雨-逕流關係，且以日尺度預報結果累加成旬或月尺度可改善枯水期預報流量低估之情形。Ghile and Schulze (2009)利用 Ensemble Re-ordering Method (ERM)將南非氣象部門發布之季長期雨量機率預報轉換為日尺度雨量資料，並透過 ACRU 水文模式配合此雨量資料模擬 Mgeni 流域未來三個月流量，亦利用流量延時曲線將流量分為偏小、正常以及偏大三個區間，以預報未來在各區間發生之機率。模擬結果以 2004 年為例，濕季(10 至 3 月)皆能掌握流量之平均值、標準偏差、偏態係數等統計特性，而流量機率預報部分於 10 至 12 月與 11 至 1 月有較好的技術得分。郭俊超(2009)以小波

理論探討枯水期特性並尋找適當之海溫預報因子，再採用遺傳類神經網路模式預報枯水期季雨量，並透過三種不同時間降尺度方法測試季雨量降至小時間尺度之能力。結果顯示：預報雨量輸入至修正型 HBV 水文模式能有效預報石門水庫與曾文水庫集水區之入流量。Wang *et al.* (2011)利用歷史長期雨量資料與南方振盪指標 (Southern Oscillation Index) 配合 MWB 與 SIMHYD 兩種水文模式，模擬澳洲 North Queensland 與 Murrumbidgee 地區未來一個月與三個月之流量。結果顯示：兩種模式皆能有效模擬未來月與季之流量。童新茹(2011)利用氣象局季長期天氣展望資料配合氣象合成模式與半參數氣象資料產生器，繁衍未來三個月之可能日雨量與日溫度資料，並透過水文模式模擬未來三個月石門水庫入流量，結果顯示：兩種模式皆能掌握到未來流量變化趨勢。王顛泰(2013)與 Yu *et al.* (2014)透過整合氣象局季長期天氣展望、修正型 HBV 水文模式與水源供需系統動力模式，先進行臺灣中部地區 11 個集水區未來三個月入流量預報，再結合水源供需系統動力模式推估未來供需與缺水情勢，以進行中部地區各縣市未來三個月之缺水機率預報，提供區域性乾旱預警資訊與防救決策之參考。

由前述季長期流量預報文獻可瞭解：氣象科學領域中，長期天氣預報能力隨科技發展逐漸成長，雨量與溫度預報準確率已大幅提升。在氣象科學領域與水文科學領域協力合作之基礎下，透過精進長期雨量與溫度預報，整合水庫集水區水文模式進行入流量模擬，以提升入流量預報成效進而輔助旱災決策，已是必然趨勢。

長期雨量與流量預報在抗旱應用方面，多用於推估未來水庫蓄水量以輔助水資源系統管理與決策(如水庫放水與分配水量等)，另可依預報結果建議是否啟動乾旱緊急措施。例如：Chiew *et al.* (2003)採用季節性流量預報輔助澳洲東南部的水資源系統(Lachlan 河集水區配水系統與 Campaspe 供水系統)進行管理決策，以提升保守低風險的管理方式。應用季節性流量預報資訊於灌溉季節，可使灌溉者能做出更明智且基於風險的管理決策。Gong *et al.* (2010)在美國東部 Delaware River 流域，應用氣候因子發展季節性入流量預報，再加上自適應的水庫操作策略，可改善供水管理單位和流域利益關係者的相關決策。透過同時考慮當前蓄水量和預期的入流量，在水庫水位較低的預測期間內釋放較少水量，可提高用水效率並達到管理目標。Zhu *et al.* (2016)在美國德州 Brazos River 流域，應用每年 4 月底發布五至七月的降雨量預報，對 Brazos River 管理局管轄的三個水庫進行季節性蓄水量預測，

建議是否啟動乾旱緊急措施。Turner *et al.* (2020)指出中、長期流量預報可輔助水庫放水決策，包括減輕洪水和乾旱風險。同時應用於美國超過 300 個(約 80%)大型水庫與攔河堰，採用中、長期流量預報輔助水庫放水決策。Kaune *et al.* (2020)於澳洲 Murrumbidgee 河流域應用季節性預報數據改善水資源分配決策。同時開發決策模型以反饋模擬水庫蓄水量與水量分配間之循環。結果證實季節性流量預報有助於制定水資源分配政策，特別在灌溉季節提前制定分配給農民之灌溉用水量，以規劃更有效率之用水方式。Peñuela *et al.* (2020)於英國西南部的二座水庫聯合操作系統，採用長期季節性流量預報輔助用水管理決策。這項工作評估應用季節性預報為基礎的即時優化系統，進行改進供水系統中水庫運營之潛力。研究發現即使長期季節性流量預報不確定性很大，但預報資訊仍具有一定價值可提供輔助水資源管理決策。由前述文獻可看出：長期雨量與流量預報在抗旱決策支援確實扮演相當重要之角色。

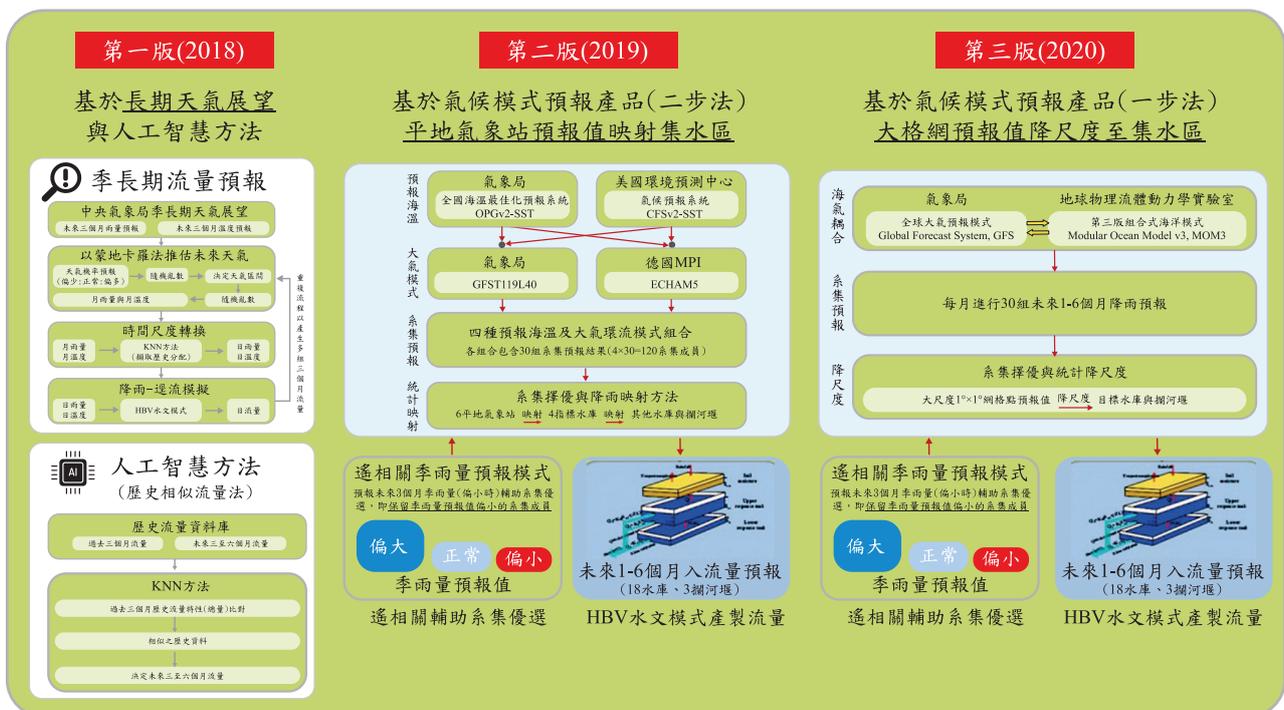
本文主要介紹臺灣重點水庫集水區長期雨量暨流量預報方法之發展演進(經濟部水利署水利規劃試驗所，2018，2019，2020)，透過優化氣象局長期雨量與溫度預報產品，結合水庫集水區水文模式，進行各水

庫與攔河堰未來 1 至 6 個月入流量預報。以下分別針對(1)國內長期雨量與流量預報方法演進、(2)第二版氣候-水文模式流量預報系統架構、(3)第三版氣候-水文模式流量預報系統架構、(4)流量預報方法效能評估，與(5)結語與未來工作等進行說明。

二、國內長期雨量與流量預報方法演進

國內長期雨量與流量預報方法演進示意圖如圖 1，各版本發展的重點主要差異在於採用氣象局不同的氣候模式預報產品與降尺度至水庫集水區之方法。以下針對各版本的預報成果與改善重點，分述如后。

第一版「天氣展望流量繁衍法及歷史流量相似法」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2018)係基於氣象局「季長期天氣展望」所發展的水庫集水區入流量預報方法，成功應用於石門水庫、德基水庫、曾文水庫與高屏溪攔河堰。由於氣象局季長期天氣展望主要以臺灣北部、中部、南部及東部為預報對象(分別以臺北、臺中、高雄及花蓮為參考氣象站)，提供未來三個月月雨量與月均溫偏小、正常與偏大之機率預報，基於前述機率預報資訊轉換成水庫集水區之預報雨量與溫



第一版：「因應氣候變遷水源設施乾旱供水風險評估」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2018)
第二版：「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)
第三版：「精進水庫集水區長期雨量暨科學化流量預報」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2020)

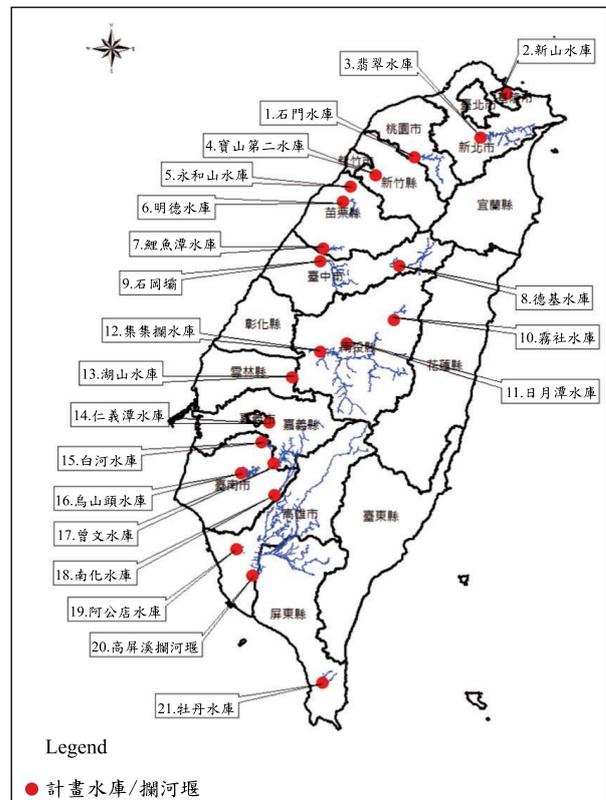
圖 1 長期雨量與流量預報方法第一、二與三版之演進示意圖

度，再輸入至修正型 HBV 水文模式進行流量模擬，除有高度不確定性外，針對枯早年枯水期間之流量預報亦有高估現象。另以人工智慧 k 鄰近法(k-nearest neighbors algorithm)學習歷史過去三個月流量趨勢進行流量預報(亦稱為歷史流量相似法)，無論是基於季長期天氣展望所發展的水庫集水區入流量預報方法，或是人工智慧 k 鄰近法，相較於傳統採用 Q80 與 Q90 的預報方式，在預報效能上均有提升。然而，在枯水期間之流量預報高估現象尚待改善。

第二版「氣候-水文模式流量預報系統(整合氣象局二步法預報產品)」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2019)採用氣象局氣候模式(二步法)預報產品針對平地氣象站所提供未來六個月雨量與溫度預報資料，透過資料映射方式轉換至目標水庫與攔河堰集水區(臺灣 18 座重點水庫與 3 處攔河堰)，作為修正型 HBV 水文模式之輸入，預報未來六個月目標水庫與攔河堰之入流量。由於氣候模式(二步法)提供 120 個系集預報，因此透過歷史預報資料發展系集優選方法(第一階段系集優選)與誤差修正模式，另針對六個平地氣象站發展遙相關季雨量預報模式(以環流、海溫、風場與 Niño3 為輸入變量，六個平地氣象站平均季雨量為輸出變量)，進一步輔助枯水期間系集優選(第二階段系集優選)，預報效能評析結果相較於第一版，流量預報準確率大幅提升，更能掌握枯早年枯水期間之流量預報。為降低平地氣象站預報值映射至水庫上游之不確定性與因應氣象局氣候模式(二步法)停止作業，需執行更為精進作法。

第三版「氣候-水文模式流量預報系統(整合氣象局一步法預報產品)」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2020)，採用氣象局全球海氣耦合模式預報產品(一步法)，由格網點預報值直接降尺度至集水區，配合系集優選方法將預報雨量與溫度產品輸入修正型 HBV 水文模式，以進行水庫與攔河堰長期入流量預報(預報對象為臺灣 18 座重點水庫與 3 處攔河堰)。由於氣候模式(一步法)提供解析度 100 公里格網點上 30 個系集預報，此版本除透過歷史預報資料發展系集優選方法(第一階段系集優選)與建置降尺度方法外，另發展各水庫與攔河堰集水區之遙相關季雨量預報模式(除了環流、海溫、風場與 Niño3 外，新增 Southern Oscillation Index (SOI)、Pacific Decadal Oscillation (PDO)及前期雨量為輸入變量，水庫/攔河堰集水區季雨量為輸出變量)，進一步輔助枯水期間系集優選(第二階段系集優選)。預報效能評析結果相較於第二版，流量預報準確率更為提升。

由於第一版基於氣象局季長期天氣展望之「天氣



圖片摘自：經濟部水利署水利規劃試驗所(2019)

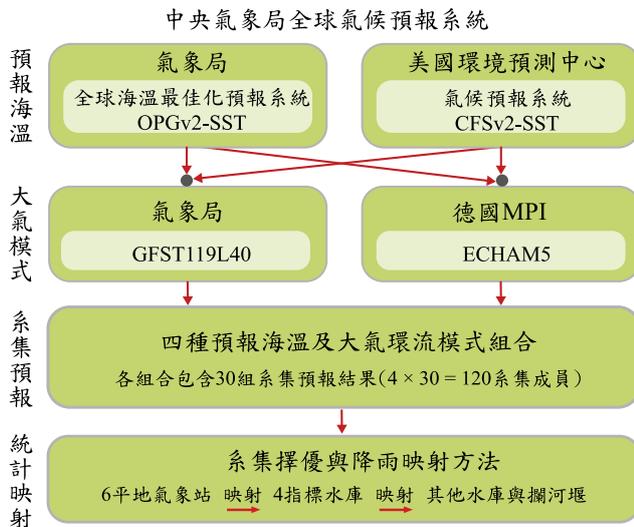
圖 2 全臺重要水庫(18 座)及攔河堰(3 處)位置圖

展望流量繁衍法」已發展多年，其理論基礎與應用實例可參考吳雷根(2004)、Yang *et al.* (2005)、李晏全(2006)、王顥泰(2013)與 Yu *et al.* (2014)，本文僅著重介紹第二版「氣候-水文模式流量預報系統(整合氣象局二步法預報產品)」與第三版「氣候-水文模式流量預報系統(整合氣象局一步法預報產品)」。

第二版與第三版主要以全臺 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 2。

三、第二版氣候-水文模式流量預報系統架構

第二版「氣候-水文模式流量預報系統(整合氣象局二步法預報產品)」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2019)係直接採用氣象局氣候預報模式(二步法)所產製



圖片摘自：經濟部水利署水利規劃試驗所(2019)

圖 3 氣候模式(二步法)長期雨量預報產品系集擇優與映射方法

之雨量與溫度預報資料(預報對象：6 個平地氣象站、4 種模式組合、未來一至六個月每個月 120 個系集預報資料)，透過平地氣象站(臺北、新竹、臺中、嘉義、臺南與高雄)之歷史降雨預報資料與觀測資料，以及集水區降雨觀測資料之相關性，發展「系集擇優與水庫集水區降雨映射方法」後，將平地氣象站預報資料映射至目標水庫與攔河堰集水區，以獲得目標水庫與攔河堰集水區未來一至六個月雨量與溫度預報資料(如圖 3)，作為修正型 HBV 水文模式之輸入，進而計算未來一至六個月目標水庫與攔河堰之入流量。

此版本採用氣象局氣候模式(二步法)於平地氣象站 1982~2011 年之降尺度歷史預報(或稱為後預報 hindcast)資料，包含兩種預報海溫模式及兩種大氣環流模式(共四種模式組合)之預報資料，每個模式組合

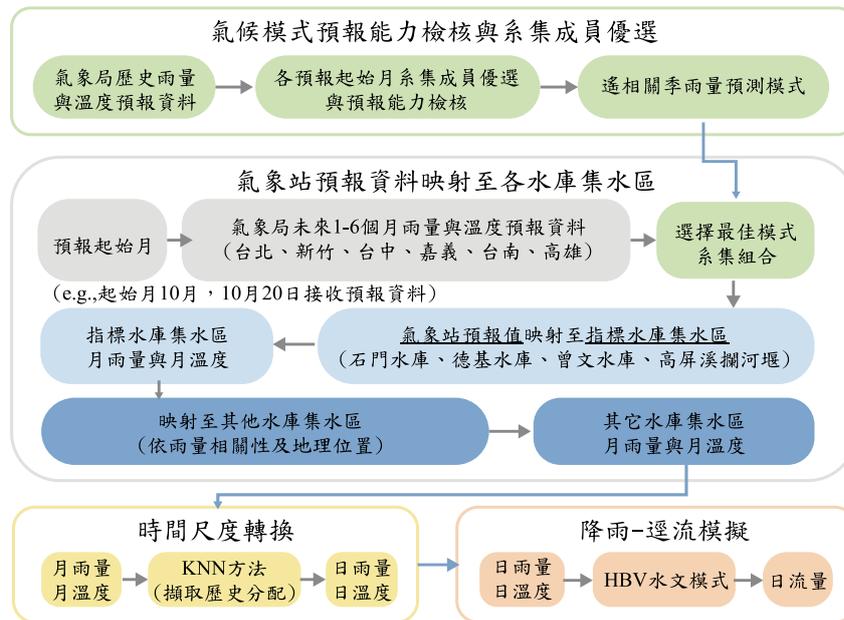
包含 30 組系集預報結果。30 組系集預報結果以每 10 日(3 種系集成員編組：01~10、11~20 與 21~30)，每 15 日(2 種系集成員編組：01~15 與 16~30)與全部 30 日(1 種系集成員編組：01~30)等 6 種系集成員編組來進行優選。透過歷史降雨觀測資料與預報資料之相關性分析，篩選每月預報之最佳模式組合及其系集成員編組(稱為第一階段系集優選)，再利用迴歸分析建立水庫集水區歷史雨量與鄰近平地氣象站歷史預報資料之迴歸式。最後再將氣象局每月 20 日提供之平地氣象站最新預報資料(forecast)，即未來一至六個月月雨量與月均溫預報值，依篩選之最佳模式組合及其系集成員編組，以迴歸式將平地氣象站未來一至六個月月雨量預報值映射至水庫集水區。而未來一至六個月月均溫預報值，則利用水庫集水區與鄰近氣象站之高程差作為調整(以每上升 100 m，溫度減少 0.6°C 為原則)以映射至水庫集水區。

上述平地氣象站與水庫集水區月雨量之映射關係，主要應用於石門水庫、德基水庫、曾文水庫及高屏溪攔河堰(稱為指標水庫)。其它 10 座水庫/攔河堰(即翡翠水庫、明德水庫、鯉魚潭水庫、石岡壩、集集攔河堰、霧社水庫、南化水庫、白河水庫、阿公店水庫及牡丹水庫)，則先分別計算與各指標水庫集水區間各月份雨量之相關係數，來決定前述 10 座水庫/攔河堰所採用之指標水庫(例如，翡翠水庫與明德水庫各月份雨量與石門水庫具有較高之相關性，因此翡翠水庫與明德水庫所採用的指標水庫為石門水庫，參見表 1)。前述 10 座水庫/攔河堰採用之指標水庫及其各月份雨量之相關係數如表 1 所示(例如，翡翠水庫與石門水庫 2 月歷史月雨量之相關係數為 0.84)。同時建立前述 10 座水庫/攔河堰與所屬指標水庫各月份雨量之迴歸式，以作為將指標水庫預報雨量映射至其它水庫/攔河堰使用。

表 1 水庫/攔河堰(10 座)所採用之指標水庫及各月份雨量之相關係數

水庫/攔河堰	指標水庫	相關係數											
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
翡翠水庫	石門水庫	0.56	0.84	0.81	0.86	0.83	0.64	0.77	0.84	0.95	0.64	0.57	0.67
明德水庫		0.99	0.97	0.98	0.81	0.88	0.81	0.69	0.88	0.92	0.76	0.88	0.71
鯉魚潭水庫	德基水庫	0.97	0.90	0.91	0.77	0.70	0.50	0.71	0.63	0.84	0.61	0.95	0.80
石岡壩		0.97	0.88	0.78	0.79	0.60	0.76	0.68	0.68	0.82	0.68	0.95	0.75
霧社水庫		1.00	0.91	0.98	0.90	0.86	0.58	0.66	0.85	0.87	0.88	0.97	0.89
集集攔河堰		0.67	0.70	0.66	0.74	0.81	0.76	0.81	0.63	0.75	0.90	0.58	0.73
白河水庫	曾文水庫	0.99	0.97	0.84	0.67	0.84	0.91	0.84	0.90	0.80	0.89	0.96	0.84
南化水庫		0.99	0.81	0.86	0.85	0.92	0.95	0.91	0.96	0.95	0.97	0.94	0.84
阿公店水庫	高屏溪	0.95	0.73	0.83	0.69	0.61	0.85	0.85	0.64	0.43	0.71	0.76	0.78
牡丹水庫	攔河堰	0.96	0.19	0.49	0.64	0.73	0.72	0.78	0.84	0.55	0.61	0.41	0.84

資料來源：經濟部水利署水利規劃試驗所 (2019)



圖片摘自：經濟部水利署水利規劃試驗所(2019)

圖 4 氣候模式(二步法)雨量及溫度降尺度預報資料映射至水庫集水區與入流量預報流程

因此，前述 10 座水庫/攔河堰集水區之雨量及溫度預報值，可分別透過(1)與所屬指標水庫各月份雨量之迴歸式與(2)高程差進行映射，即將此 4 座指標水庫集水區之雨量及溫度預報值分別透過迴歸式與高程差轉換至其它 10 座水庫/攔河堰上游集水區，以作為降雨-逕流模式之輸入。溫度在修正型 HBV 水文模式中屬於較不敏感的輸入變量，且參數率定過程中會由修正型 HBV 水文模式中的參數 C_e 來調整其偏差，因此此版本對溫度精度並無過高之要求，僅以高程差方式來進行轉換。剩餘 7 座離槽水庫，其入流量主要受人為引水控制，此版本暫以 k 鄰近法學習歷史過去三個月之引水行為進行入流量預報。

氣候模式(二步法)雨量及溫度降尺度資料映射至水庫集水區與入流量預報流程如圖 4 所示。圖中「氣候模式預報能力檢核與系集成員優選」主要針對氣候模式(二步法) 120 個系集預報，透過歷史預報與觀測資料發展第一階段系集優選方法與誤差修正模式，另針對六個平地氣象站發展遙相關季雨量預報模式(以環流、海溫、風場與 Niño3 為輸入變量，六個平地氣象站平均季雨量為輸出變量)(楊道昌等人，2019；陳弘，2019)，進一步輔助枯水期間系集優選(稱為第二階段系集優選)。圖中「氣象站預報資料映射至各水庫集水區」框內，每個預報起始月必需輸入「氣象局未來 1~6 個月雨量與溫度預報資料」，經由選擇最佳模式系集組合後，再進一步映射至指標水庫，再由指標水庫映射至其他水庫/攔河堰集水區，便可獲得各水庫/

攔河堰集水區未來 1~6 個月雨量與溫度預報資料，再經由「時間尺度轉換」與「降雨-逕流模擬」，以推求未來 1~6 個月之日流量預報資料。預報效能評析發現：此版本相較於第一版，流量預報準確率大幅提升，更能掌握枯旱年枯水期間之流量預報。

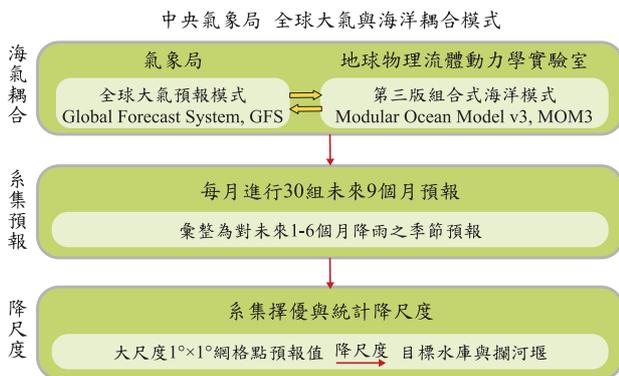
四、第三版氣候-水文模式流量預報系統架構

就水資源管理作業需求而言，上述氣象局氣候模式(二步法)預報系統雖然提供定量降雨預報值，但仍欠缺對水庫與攔河堰集水區降雨的直接預報，而是採用間接方式，經由平地氣象站預報資料透過映射關係轉換至指標水庫集水區，再將指標水庫集水區之雨量及溫度預報值分別透過迴歸式與高程差轉換至其它水庫/攔河堰上游集水區，以作為修正型 HBV 水文模式之輸入。此映射轉換過程增加不確定性，故需藉由空間降尺度方法將氣候模式大尺度網格點預報資料直接連結至目標水庫/攔河堰集水區，以符合不同區域之雨量特性。

第三版「氣候-水文模式流量預報系統(整合氣象局一步法預報產品)」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2020)，採用氣象局大氣海洋耦合模式(簡稱海氣耦合模式)預報系統，此海氣耦合模式以一步法預報方式考量海溫與大氣同一時間的交互作用，為國際上氣象預

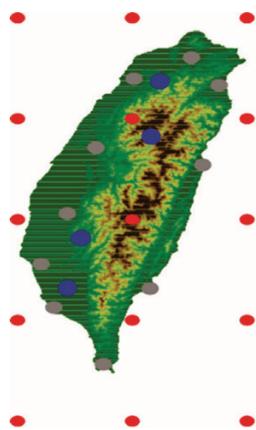
報的主流模式，亦為氣象局長期預報產品後續發展之重點。此預報系統執行 280 天大氣與海洋氣候預報，提供大尺度 $1^\circ \times 1^\circ$ 網格點每月 30 組(系集成員)未來 280 天預報，其結果可彙整為對未來 1 至 6 個月降雨之季節預報，再經由統計降尺度方法建置與系集擇優分析，將大尺度 $1^\circ \times 1^\circ$ 網格點系集預報值降尺度至目標水庫與攔河堰集水區，以提供水利相關單位做為實務管理操作之預報資訊來源(如圖 5)。

建置水庫與攔河堰集水區季節預報降尺度系統依圖 6 之空間分佈位置所示，每一個水庫與攔河堰集水區均可在其周邊尋找一步法季節預報網格點，依此可進行三種不同方式降尺度進行預報，分別是(1)距離比重法、(2)相關係數比重法，與(3)複回歸模型法。建置水庫與攔河堰集水區季節預報降尺度系統之示意圖如圖 7。



圖片摘自：經濟部水利署水利規劃試驗所(2020)

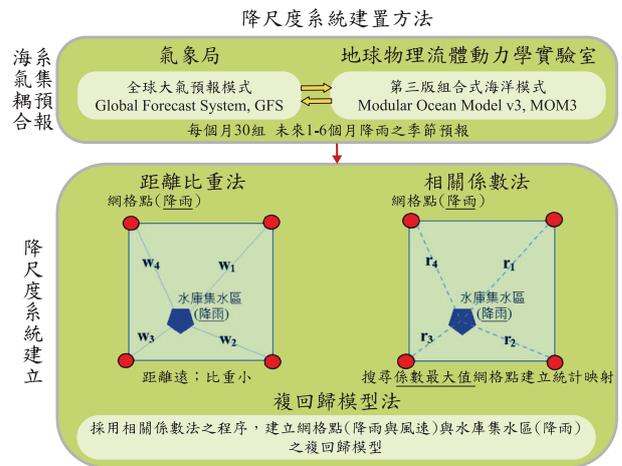
圖 5 氣候模式(一步法)長期雨量預報產品系集擇優與統計降尺度



註：氣候預報系統網格點以紅點顯示、氣象局主要測站(臺北、新竹、臺中、嘉義、臺南、高雄、恆春、宜蘭、花蓮、臺東)以灰點顯示、主要水庫與攔河堰(石門水庫、德基水庫、曾文水庫、高屏溪攔河堰)以藍點顯示。

圖片摘自：經濟部水利署水利規劃試驗所(2020)

圖 6 降雨降尺度對應之空間分佈圖



圖片摘自：經濟部水利署水利規劃試驗所(2020)

圖 7 建置水庫與攔河堰集水區季節預報降尺度系統示意圖

系集擇優分析方面，由於氣象局海氣耦合模式(一步法)預報產品每個月均有 30 組氣候預報結果，可視為 30 個系集預報樣本(系集成員)。系集成員以每 10 日(3 種系集成員編組：01~10、11~20 與 21~30)，每 15 日(2 種系集成員編組：01~15 與 16~30)與全部 30 日(1 種系集成員編組：01~30)之組合，共計 6 種系集成員編組來進行優選。

依上述系集成員編組，優先針對臺灣主要 4 個水庫與攔河堰集水區(石門水庫、德基水庫、曾文水庫及高屏溪攔河堰)進行分析，每一個目標點(水庫或攔河堰集水區)均計算 3 個降尺度方法及 6 個樣本組合，共計 18 個降尺度結果，計算預報結果與對應觀測降雨資料之相關係數，再從其中選取最高相關係數之 1~2 個樣本組(系集成員編組)做為「優選預報組合」，取其平均值做為預報結果進行預報。系集預報之樣本(系集成員)優選程序如圖 8 所示。



圖片摘自：經濟部水利署水利規劃試驗所(2020)

圖 8 系集預報之樣本(系集成員)優選程序

最後建置降雨季節預報之誤差修正系統。氣象局海氣耦合模式(一步法)歷史預報資料長度為 1982 年迄今，將其分為二個時段(1982~2011 年為訓練期，2012~2019 年為驗證期)。於訓練期以前述之距離比重法、相關係數比重法與複回歸模型法分別對 6 個不同系集成員編組進行水庫集水區之降雨降尺度預報，對未來 1 至 6 個月每個月之月雨量預報進行預報組合(即採用不同系集成員編組與不同降尺度方法之組合)，藉此優選最佳系集成員編組及降尺度方法之組合，以此優選組合對各水庫與攔河堰集水區進行降尺度預報。針對訓練期(1982~2011)之預報降雨與觀測降雨進行相關係數及回歸分析，再運用回歸方程式做為誤差修正系統，對驗證期(2012~2019)之降尺度預報結果進行誤差修正，修正後預報資料再與對應觀測資料進行比對，藉此驗證此降尺度系統及誤差修正系統之實質預報能力。

分析結果顯示：採用降雨單一變數(網格點預報雨量)之相關係數比重法，其降尺度結果優於距離比重法，與複回歸模型法(採用網格點預報雨量與風速為輸入變數)預報能力約略相當，因此第三版建議採用降雨單一變數之相關係數比重法為主要降尺度方法。此版本除透過歷史預報與觀測資料發展第一階段系集優選方法與建置降尺度方法外，另發展各水庫與攔河堰集水區之遙相關季雨量預報模式(楊道昌等人，2021；吳政諺，2020)，除採用環流、海溫、風場與 Niño3 外，新增 SOI、PDO 及前期雨量為輸入變量建立季雨量預報模式，進一步輔助枯水期間系集優選(稱為第二階段系集優選)。另外，溫度降尺度預報系統採用與雨量降尺度預報系統相同分析方法與步驟進行建置。相對雨量而言，網格點溫度歷史預報值與集水區溫度觀測資料間之相關性高，溫度降尺度結果較佳。

第三版於 2020 年 6 月底開始採用氣象局海氣耦合模式系集預報產品結合修正型 HBV 水文模式，進行未來一至六個月流量預報作業，並逐月配合氣象局提供之最新預報結果進行預報更新，同時提供歷史各旬不同超越機率流量區間(例如 Q10~Q20、Q20~Q30，...，Q80~Q90 與 Q90 以下)及長期平均流量供模式預報成果比較。各水庫與攔河堰歷史與最新預報成果均置於「長期水庫入流量預報暨乾旱監測」平台(<http://www2.hyd.ncku.edu.tw/mate/lab/> 季長期流量預報/首頁.htm)，圖資可下載供相關單位參考運用。圖 9 以德基水庫於民國 109 年 12 月底預報 110 年 1 月至 6 月水庫入流量為例。

五、流量預報方法效能評估

為進行不同版本預報結果之效能評估與比較，採用民國 88 年 1 月至 107 年 3 月期間不同版本之歷史流量預報結果與觀測流量值進行比較。由於第一版「天氣展望流量繁衍法」係基於氣象局「季長期天氣展望」資料(即未來三個月的天氣展望)，僅具有三個月的預報能力，為比較不同版本的預報效能，以下效能評估僅採用每個版本預報未來三個月之流量資料。歷史流量預報以逐月滾動方式進行，例如：民國 87 年 12 月底預報未來三個月(民國 88 年 1 至 3 月)流量，經過一個月後於民國 88 年 1 月底預報未來三個月(2 至 4 月)流量，每次流量預報之時間皆往後推一個月，以此類推至民國 106 年 12 月底預報未來三個月(民國 107 年 1 至 3 月)流量。歷史流量預報結果以「旬」為時間尺度，將每個月底預報未來三個月的日流量轉換成未來 9 旬的旬流量(視為 9 個預報次數)，因此從民國 88 年 1 月至 107 年 3 月的預報次數共計 $[(106-88+1) \times 12 + 1] \times 9 = 2,061$ 次，其中豐水期總預報次數為 1,026 次、枯水期總預報次數為 1,035 次。

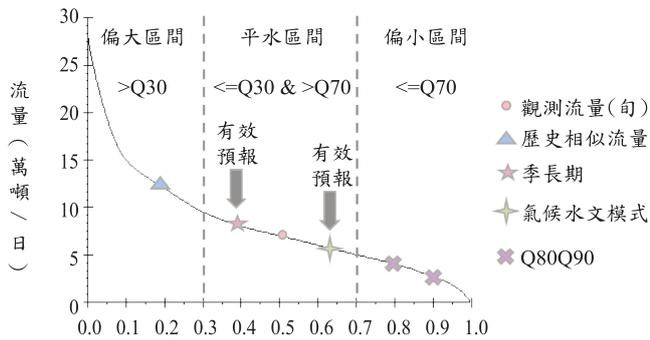
同時針對資料較完成之石門水庫、德基水庫、曾文水庫與高屏溪攔河堰集水區進行流量預報效能評估工作，即比較：(1)傳統 Q80 與 Q90、(2)第一版天氣展望流量繁衍法及歷史流量相似法、(3)第二版氣候-水文模式流量預報系統(整合氣象局二步法預報產品)、(4)第三版氣候-水文模式流量預報系統(整合氣象局一步法預報產品)之預報效能。

評估方法先將各水庫與攔河堰之歷年入流量統計各旬 30% 及 70% 超越機率流量，各旬以 30% 及 70% 超越機率流量做為分界，分為三個區間。流量大於 30% 超越機率流量定義為流量偏大區間；流量小於等於



圖片摘自：經濟部水利署水利規劃試驗所(2020)

圖 9 德基水庫民國 109 年 12 月底預報 110 年 1 月至 6 月水庫入流量



圖片摘自：經濟部水利署水利規劃試驗所(2020)

圖 10 流量預報產品預報值判定為有效預報之示意圖

30 %超越機率流量且大於 70 %超越流量定義為流量平水區間；流量小於等於 70 %超越機率流量則定義為流量偏小區間。「有效預報」定義為觀測流量與預報流量位於相同流量區間，當每旬觀測流量與預報流量位於相同流量區間則判定該次預報為「有效預報」。預報值判定為有效預報之示意圖如圖 10 所示，圖中顯示：基於季長期天氣展望與採用氣候模式結合水文模式(氣候水文模式)之預報方法，其流量預報值與觀測值均落於平水區間，因此判定為有效預報，而 Q80、Q90 與歷史相似流量之預報方法，其流量預報值與觀測值非屬同一區間則為無效預報。不同流量預報方法預報值為有效預報次數如表 2 所列。

綜上分析，第三版氣候-水文模式流量預報系統之

預報效能增加百分比如表 3 所示。「預報效能增加百分比」定義為「有效預報」次數的增量除以總預報次數。計算方式以石門水庫例，第三版預報系統相較第二版預報系統之效能增加百分比(預報期間為全年)，採用表 2 的第三版有效預報次數(874 次)減掉第二版有效預報次數(805 次)即為「有效預報」次數的增量(69 次)，再除以全年總預報次數(2,061 次)，可得預報效能增加百分比(3.4 %)。預報期間為枯水期則採用表 2 的第三版有效預報次數(433 次)減掉第二版有效預報次數(415 次)即為「有效預報」次數的增量(18 次)，除以枯水期總預報次數(1,035 次)可得預報效能增加百分比(1.7 %)。

由表 3 可看出：以全年表現而言，第三版氣候-水文模式流量預報系統之效能表現最佳，相較於傳統保守之流量推估方法(Q80、Q90)，預報效能可增加 7.9 % (曾文水庫)至 26.7 % (德基水庫)，與第二版氣候-水文模式流量預報系統相比，預報效能可增加 2.7 % (德基水庫)至 3.7 % (曾文水庫)；以枯水期表現而言，第三版氣候-水文模式流量預報系統(整合氣象局一步法預報產品)之效能亦為最佳，與傳統保守之流量推估方法表現結果相較，效能增加幅度可達 5.5 % (曾文水庫)至 28.9 % (德基水庫)，與第二版氣候-水文模式流量預報系統相比預報效能可增加 0.3 % (曾文水庫)至 3.4 % (高屏溪攔河堰)。

表 2 不同流量預報方法預報值為「有效預報」次數統計表

預報 期間	傳統		第一版 天氣展望 流量繁衍法	第二版 氣候-水文模式 流量預報系統	第三版 氣候-水文模式 流量預報系統
	Q80	Q90			
石門水庫					
全年	543	543	780	805	874
豐水期	261	261	394	390	441
枯水期	282	282	386	415	433
德基水庫					
全年	415	415	801	910	965
豐水期	231	231	385	441	482
枯水期	184	184	416	469	483
曾文水庫					
全年	734	718	690	820	896
豐水期	336	321	326	368	441
枯水期	398	397	364	452	455
高屏溪攔河堰					
全年	627	627	760	776	834
豐水期	354	354	335	312	335
枯水期	273	273	425	464	499

註：豐水期為 5~10 月；枯水期為 11 月~翌年 4 月；全年總預報次數 2,061 次、豐水期總預報次數 1,026 次、枯水期總預報次數 1,035 次。資料來源：經濟部水利署水利規劃試驗所(2020)。

表 3 第三版氣候-水文模式流量預報系統之預報效能增加百分比

水庫/攔河堰	預報期間	相較傳統 Q80、Q90 方法 效能增加 百分比(%)	相較第二版 預報系統 效能增加 百分比(%)
石門水庫	全年	16.1	3.4
	枯水期	15.0	1.7
德基水庫	全年	26.7	2.7
	枯水期	28.9	1.4
曾文水庫	全年	7.9	3.7
	枯水期	5.5	0.3
高屏溪 攔河堰	全年	10.1	2.8
	枯水期	21.8	3.4

註：枯水期為 11 月～翌年 4 月；全年總預報次數 2,061 次、枯水期總預報次數 1,035 次。資料來源：經濟部水利署水利規劃試驗所(2020)。

六、結語與未來工作

長期入流量預報資訊可輔助抗旱期間水庫未來蓄水量推估與水情研判，提供主管機關抗旱決策時更為客觀之參考資訊。目前臺灣重點水庫與攔河堰集水區長期雨量暨流量預報之發展已開發三個版本，由第一版基於季長期天氣展望進行雨量與溫度繁衍，演進至第二版採用氣候模式(二步法)雨量與溫度預報產品經平地氣象站映射至集水區，再進一步演進至第三版採用全球海氣耦合模式(一步法)雨量與溫度預報產品由格網點直接降尺度至集水區，配合兩階段系集優選方法將預報雨量與溫度產品輸入水文模式，進行各水庫與攔河堰未來 1 至 6 個月入流量預報。經由長期流量預報效能評析結果，隨版本的演進，預報精度亦逐步提升。

最新版本(第三版)採用全球海氣耦合模式(一步法)預報產品配合水文模式進行長期流量預報，此全球海氣耦合模式考量海溫與大氣同一時間的交互作用，為國際上氣象預報的主流模式，亦為氣象局長期預報產品後續發展之重點。然而經本文發展之系集優選與最佳降尺度方法優化氣象局長期雨量預報產品雖有所成效，但精確掌握未來 1 至 6 個月降雨定量預報仍有難度。為精進長期雨量預報，分析成果(包含系集優選、格網預報雨量與集水區降雨之關聯性，與預報歷史驗證結果等)已回饋至氣象局，作為未來修正氣候模式之依據(包含考量地形效應)。另考量短中期天氣型態之快速變化，以及水情嚴峻對較短周期(如每兩週)預報資料需求，後續工作擬結合氣象局次季節至季節(S2S)

預報系統(日尺度未來 1 至 45 日)預報產品與長期預報產品(月尺度未來 1 至 6 個月)並行運作。

謝誌

本文承蒙 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(MOEAWRA1070453)、「精進水庫集水區長期雨量預報暨科學化流量預報」計畫(MOEAWRA1090281)得以順利完成。計畫執行期間，特別感謝 水利署水利規劃試驗所 蔡展銘課長與畢嵐杰正工程司在計畫成果應用面之指導。另感謝 中央氣象局 張庭槐科長、陳孟詩科長、陳建河簡正在長期預報產品之提供與應用給予協助，在此一併致謝。

參考文獻

- Chiew, F. H. S., S. L. Zhou, T. A. McMahon, "Use of Seasonal Streamflow Forecasts in Water Resources Management in Texas," *Journal of Hydrology*, 270(1-2), 135-144, 2003.
- Ghile, Y. B. and R. E. Schulze, "Use of an Ensemble Re-Ordering Method for Disaggregation of Seasonal Categorical Rainfall Forecasts into Conditioned Ensembles of Daily Rainfall for Hydrological Forecasting," *Journal of Hydrology*, 371, 85-97, 2009.
- Gong, G, L. Wang, L. Condon, A. Shearman, and U. Lall, "A Simple Framework for Incorporating Seasonal Streamflow Forecasts into Existing Water Resource Management Practices," *Journal of The American Water Resources Association*, 46(3), 574-585, 2010.
- Kaune, A., F. Chowdhury, M. Werner, and J. Bennett, "The Benefit of Using an Ensemble of Seasonal Streamflow Forecasts in Water Allocation Decisions," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 3851-3870, 2020.
- Peñuela, A., C. Hutton, and F. Pianosi, "Assessing The Value of Seasonal Hydrological Forecasts for Improving Water Resource Management: Insights from A Pilot Application in The UK," *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discussion*, <https://doi.org/10.5194/hess-2020-89>.
- Tucci, C. E. M., R. T. Clarke, W. Collischonn, P.L.S. Dias and G. Sampaio, "Long-term Flow Forecasts Based on Climate and Hydrologic Modeling: Uruguay River

- Basin,” *Water Resources Research*, 39(7), SWC3-1-3-11, 2003.
7. Turner, S. W. D., W. Xu, and N. “Voisin, Inferred Inflow Forecast Horizons Guiding Reservoir Release Decisions across The United States,” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 1275-1291, 2020.
 8. Wang, E. L., Y. Q. Zhang, J. M. Luo, F. H. S. Chiew, and Q. J. Wang, “Monthly and Seasonal Streamflow Forecasts Using Rainfall-Runoff Modeling and Historical Weather Data,” *Water Resources Research*, 47(5), W05516, 2011.
 9. Yang, T. C., P. S. Yu, and C. C. Chen, “Long-term Runoff Forecasting by Combining Hydrological Models and Meteorological Records,” *Hydrological Processes*, 19(10), 1967-1981, 2005.
 10. Yu, P. S., T. C. Yang, C. M. Kuo, and Y. T. Wang, “A Stochastic Approach for Seasonal Water-Shortage Probability Forecasting Based on Seasonal Weather Outlook,” *Water Resources Management*, 28(12), 3905-3920, 2014.
 11. Zhu, J., N. Fernando, Y. Yang, C. Higgins, and A. Abel, “Application of Seasonal Rainfall Forecasts to Inform The Implementation of Drought Contingency Triggers in Selected Water Supply Reservoirs in Texas,” *Science and Technology Infusion Climate Bulletin*, NOAA’s National Weather Service, 41st NOAA Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop, Orono, ME, 3-6 October, 2016.
 12. 王顥泰：「應用季長期天氣展望預報臺灣中部地區缺水機率」，國立成功大學，水利及海洋工程研究所，碩士論文，2013。
 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. 吳雷根：「曾文水庫枯水期長期入流量預測之研究」，國立成功大學，水利及海洋工程研究所，碩士論文，2004。
 15. 李晏全：「石門水庫枯水期月與季入流量預報之研究」，國立成功大學，水利及海洋工程研究所，碩士論文，2006。
 16. 郭俊超：「結合季節雨量與水文模式於枯水期旬流量預測」，國立成功大學水利及海洋工程研究所，博士論文，2009。
 17. 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。
 18. 童新茹：「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，2011。
 19. 楊道昌、吳政諺、郭振民、曾宏偉、龔明人、游保杉：「水庫集水區季雨量遙相關分析與預報模式之建立」，*農業工程學報*，第 67 卷第 2 期，pp. 1-14，2021。
 20. 楊道昌、陳昭銘、游保杉、郭振民、蔡玫紜、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。
 21. 經濟部水利署水利規劃試驗所：「因應氣候變遷水源設施乾旱供水風險評估」，經濟部水利署水利規劃試驗所，2018。
 22. 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。
 23. 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。

收稿日期：民國 110 年 02 月 23 日
修改日期：民國 110 年 05 月 07 日
接受日期：民國 110 年 06 月 30 日