

整合 ECMWF SEAS5 長期雨量預報與連續型降雨- 逕流模式進行水庫入流量預報

Integration of ECMWF SEAS5 Long-term Rainfall Forecasts and Continuous Rainfall-Runoff Model towards
Reservoir Inflow Forecasting

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

交通部中央氣象署
海象氣候組
研究員

李清騰
Ching-Teng Lee

國立成功大學
水利及海洋工程學系
助理研究員

龔明人
Ming-Jen Kung

交通部中央氣象署
海象氣候組
組長

洪景山
Jing-Shan Hong

經濟部水利署
水源經營組
科長

李亞儒
Ya-Ju Lee

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

面對未來可能陸續發生極端乾旱事件，提供主管機關進行抗旱決策時更為科學且客觀之參考資訊，發展科學化流量預報方法提供長期流量預報資訊，以進一步推估水庫蓄水量變化趨勢，輔助抗旱作為等相關決策，有其必要性。在水利署與氣象署 MOU 之共享合作成果基礎上，氣象署採用 ECMWF 第 5 代季節預報系統 (fifth generation seasonal forecast system, SEAS5) 之季節預報資料，產製臺灣重要水庫與攔河堰集水區之長期雨量預報降尺度產品，進一步提供水利署進行未來 1~6 個月水庫入流量預報。前述 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品為月尺度(預報雨量為月總雨量)，為配合水庫/攔河堰集水區水文模式之模擬時間單位(日時間尺度)，藉由 k 鄰近法將預報雨量之時間尺度由月轉換成日時間尺度，再輸入修正型 HBV 水文模式進行流量模擬。本研究採用 ECMWF 長期雨量預報降尺度產品之歷史預報成果進行各個月份滾動式流量預報(即每個月預報一次皆採用 ECMWF 長期雨量歷史預報資料進行未來 1~6 個月流量預報)，並以流量區間預報效能評估方法，評析石門水庫、德基水庫、曾文水庫與高屏溪攔河堰之長期流量預報效能。分析成果顯示：導入 ECMWF 長期雨量預報進行水庫入流量預報，其預報效能高於以 Q80 與 Q90 保守情境流量(視為預報值)之方式，有助於掌握水庫與攔河堰之長期入流量趨勢。

關鍵詞：ECMWF SEAS5、HBV 水文模式、長期雨量預報、長期流量預報。

* 通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系研究員兼任副教授
701 臺南市東區大學路 1 號，tcyang58@hotmail.com

Integration of ECMWF SEAS5 Long-term Rainfall Forecasts and Continuous Rainfall-Runoff Model towards Reservoir Inflow Forecasting

Tao-Chang Yang*
Department of Hydraulic and
Ocean Engineering, National
Cheng Kung University

Ming-Jen Kung
Department of Hydraulic and
Ocean Engineering, National
Cheng Kung University

Ya-Ju Lee
Water Resources Management
Division, Water Resources
Agency

Ching-Teng Lee
Marine Meteorology and
Climate Division, Central
Weather Administration

Jing-Shan Hong
Marine Meteorology and
Climate Division, Central
Weather Administration

Pao-Shan Yu
Department of Hydraulic and
Ocean Engineering, National
Cheng Kung University

ABSTRACT

For facing the increasing occurrence of extreme droughts in the future, the long-term reservoir inflow forecasting is an essential tool for the authorities of water resources management to estimate the reservoir water storage for 1 ~ 6 months ahead and support to decide the suitable drought relief measures when the predicted water storage is insufficient. Based on the Memorandum of Understanding on Cooperation between the Water Resources Agency (WRA) and the Central Weather Administration (CWA), the CWA uses the raw forecasting data of ECMWF SEAS5 to produce the downscaled and corrected monthly rainfall forecasts for 1 ~ 6 months ahead for the major reservoir catchments in Taiwan. These downscaled and corrected monthly rainfall forecasts are then provided to the WRA for executing reservoir inflow forecasting. The monthly rainfall forecasts are further converted to daily rainfall forecasts by the k-nearest neighbors algorithm, which are then input into the modified HBV hydrological model to simulate the inflows for each reservoir. The study uses the historical downscaled and corrected rainfall forecasts to conduct 1 ~ 6 months-ahead flow forecasting once each month and evaluates the flow forecasting accuracy for Shimen Reservoir, Deji Reservoir, Zengwen Reservoir, and Gaoping Creek Weir. The analysis results show that using the downscaled and corrected rainfall forecasting data of ECMWF SEAS5 for reservoir inflow forecasting has higher forecasting performance than the traditional method adopting Q80 and Q90 (the 80th and 90th percentiles of the flow duration curve, respectively) as the forecasts.

Keywords: ECMWF SEAS5, HBV hydrological model, Seasonal rainfall forecasting, Inflow forecasting

Yang, T.C.*, Kung, M.J., Lee, Y.J., Lee C.T., Hong J.S., & Yu, P.S. (2024). "Integration of ECMWF SEAS5 Long-term Rainfall Forecasts and Continuous Rainfall-Runoff Model towards Reservoir Inflow Forecasting" *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 70(2), 01-13. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202406_70\(2\).0001](https://doi.org/10.29974/JTAE.202406_70(2).0001)

一、前言

臺灣年降雨量雖豐沛，但因季節性分配不均且河川坡陡流短，豐水期間難以完全積蓄水源以供枯水期使用，每逢豐水期間降雨表現不佳，乾旱情況便可能發生。為因應枯旱時期可能發生之缺水危機，降低對社會經濟之影響，除積極節約用水、有效管理相關設施、啟動備援水源外，更需仰賴氣象預報以瞭解降雨可能情況，進而動態調整相關抗旱措施。基此，若能更精確的掌握未來可能之水情，除可降低抗旱決策之不確定性外，亦可強化抗旱應變能力。

近年來氣象科學領域中，短期氣候（長期天氣）預報能力隨科技發展迅速成長，雨量與溫度預報準確率大幅提升。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，整合水文模式進行水庫與攔河堰入流量模擬，以提升入流量預報成效進而輔助抗旱決策，已為必然趨勢。經濟部水利署與交通部中央氣象署於 2019 年 10 月針對水旱災應變及氣候資訊應用等事項簽署合作協議備忘錄 (MOU)，結合彼此資源與技術，由氣象署提供水資源決策所需之氣象圖資，共同合作致力達水利防減災與高效應變。在 MOU 之基礎下，水利署委託氣象署代辦「水庫集水區雨量長期預報技術開發計畫」(交通部中央氣象署，2021, 2022, 2023)，以提升水庫集水區雨量長期預報為首要目的，共同強化水利署防災監測系統效能及掌握最新水情資訊。鑒於歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 為目前公認天氣數值模式最準確的單位，預報產品相當具指標性，氣象署採購 ECMWF 第 5 代季節預報系統 (ECMWF SEAS5) 之季節預報資料，並完成偏差修正與降尺度作業，提供全臺重要水庫與攔河堰集水區未來 1 ~ 6 個月雨量預報 (交通部中央氣象署，2022)。此外氣象署亦採購 ECMWF 中期 (medium-range) 與展期 (extended-range) 預報資料，透過降尺度與偏差修正技術，產製高解析網格中期 (未來 1 ~ 9 天) 雨量預報資料 (空間解析度 1.25 km × 1.25 km) 與展期 (未來 1 ~ 4 週) 雨量預報資料 (空間解析度 1 km × 1 km)，並提供全臺重要水庫與攔河堰集水區未來 1 ~ 9 日與未來 1 ~ 4 週雨量預報作業化產品，做為水資源管理決策參考 (交通部中央氣象署，2023)。前述作業化中期、展期與長期 (季節) 雨量預報圖資均置於「新一代劇烈天氣監測系統 QPEplus」(<https://qpeplus.cwa.gov.tw/WRA/>)，提供有資料應用需求之單位申請登入查閱。

國際上亦有許多研究藉由整合 ECMWF 長期雨量

預報與水文模式進行水庫與河川流量預報。例如，Candogan Yossef *et al.* (2017) 整合 ECMWF 第 3 代季節預報系統 (SEAS3) 與分佈式全球水文模型 (PCRaster Global Water Balance)，應用至世界各地 20 條河川之長期流量系集預報 (預報未來 1 ~ 6 個月)，分析結果顯示在這些研究區域季節尺度流量具有可預測性。Meißner *et al.* (2017) 結合 ECMWF 第 4 代季節預報系統 (SEAS4) 與 LARSIM 水文模式，應用至德國萊茵河、多瑙河和易北河國際水道之月到季節尺度流量預報且將預報成果應對適當的水道管理措施，以提高航運效率。Arnal *et al.* (2018) 整合 ECMWF 第 4 代季節預報系統 (SEAS4) 與 Lisflood 水文模式，應用至歐洲 74 個區域進行未來 1 至 7 個月季節尺度流量預報，分析結果顯示導入季節預報系統進行流量預報具有發展潛力。Foster *et al.* (2018) 採用 ECMWF 第 4 代季節預報系統 (SEAS4) 降雨與溫度預報產品輸入 HBV 水文模式以預報春季洪水體積，並以瑞典北部 84 個流域來測試預報能力與發展多模型季節預報系統，分析結果發現平均 57 % 的時間預報能力優於採用歷史觀測資料之推估方法。Pechlivanidis *et al.* (2020) 採用 ECMWF 第 5 代季節預報系統 (SEAS5) 預報產品 (1993 ~ 2015 歷史預報資料和 25 個系集預報未來 7 個月) 輸入 E-HYPE 水文模式，以分析歐洲 35,400 個流域的季節流量預報成效，並進一步探討季節流量預報的品質與流域的地理、水文與氣候間之關係，以識別季節流量可預測性之關鍵驅動因素，作為評估流量可預測性及其區域化之改進方向。前述研究發現既使長期季節流量預報不確定性大，但預報資訊仍具有一定價值以輔助水資源管理決策。

整合長期雨量預報與集水區水文模式進行流量預報可運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緊急因應措施。在國內藉由整合雨量與溫度預報以及水文模式進行流量預報之技術發展，最先採用氣象署之季長期天氣展望結合水文模式進行流量預報，隨後陸續引進氣象署自行研發之氣候預報模式 (二步法) 預報產品，以及氣候預報模式 (全球海氣耦合模式) 雨量與溫度預報產品，結合水文模式進行全臺重點水庫與攔河堰集水區長期流量預報 (經濟部水利署，2018, 2019, 2020, 2022a; 楊道昌等人，2021)。除了氣象署自行研發之長期預報產品外，氣象署亦採用 ECMWF SEAS5 季節預報資料完成偏差修正與降尺度作業，提供全臺重要水庫與攔河堰集水區未來 1 ~ 6 個月雨量預報。本文主要介紹整合 ECMWF SEAS5 長期雨量預報與水文模式進行臺灣重

要水庫集水區未來 1 ~ 6 個月流量預報方法之發展與應用。以下分別針對 (1) ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品、(2) 導入 ECMWF 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報及其應用、(3) 歷史流量預報效能分析，與 (4) 結語與未來工作等進行說明。

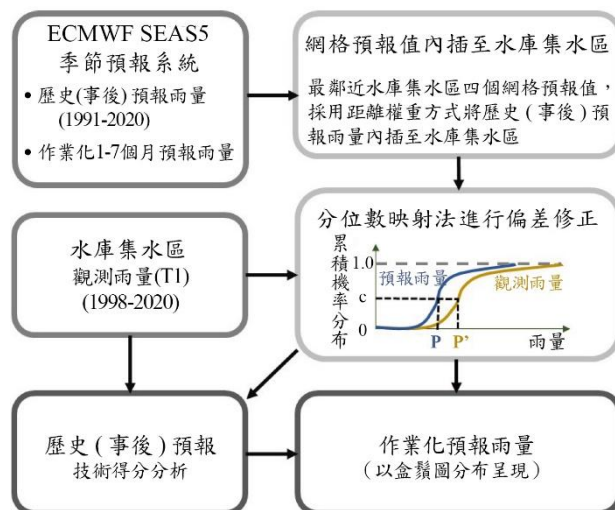
二、ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品

氣象署執行 111 年度「水庫集水區雨量長期預報技術開發第 2 期」中使用 ECMWF 第 5 代季節預報系統 (SEAS5) 之季節預報資料，產製臺灣重要水庫與攔河堰集水區之長期雨量預報降尺度產品。ECMWF SEAS5 預報系統可以提供未來即時性的季節預報資料，模式的空間解析度為 $0.4^\circ \times 0.4^\circ$ ，預報時間長度為 7 個月。

為建立水庫集水區的雨量觀測資料，以提供建立水庫集水區的雨量降尺度預報系統，採用氣象署高解析度觀測資料 T1，挑選水庫集水區範圍內的格點計算各水庫集水區的降雨量。T1 為氣象署開發之臺灣高解析降雨網格化資料，由資料較齊全之 318 測站進行降雨資料格網化，其時間解析度為日，空間解析度為 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。資料長度為 1998 迄今，每日更新最新即時資料。採用高解析度格點建立雨量觀測資料具備可考慮集水區全範圍內降雨量之優點，相較測站僅能代表單點或局部地區的降雨，對於集水區的整體區域代表性較顯不足。因 T1 資料時間長度較長且統一，採用 T1 資料建立水庫集水區降雨資料庫，進而建立水庫集水區的雨量降尺度預報系統。

偏差校正方法採用分位數映射法 (Quantile mapping)，此方法為簡單的統計後處理方法，其原理係根據觀測值的歷史累積機率分布去校正預報值的累積機率分布，並以不同月份、不同預報時間分別進行修正。由於氣象署高解析度網格化雨量資料 T1 的資料時間長度是從 1998 年開始，據此建立 1998 ~ 2020 年的觀測歷史累積機率分布，再將各水庫集水區在歷史 (事後) 預報期間 1991 ~ 2020 年的模式降尺度雨量預報所建立的預報累積機率分布對應到觀測歷史累積機率分布，便可完成偏差修正。前述「歷史 (事後) 預報」係指歷史再預報 (reforecasts) 或事後預報 (hindcasts) 之簡稱，為使用相同的預報系統進行過去數個日期的即時預報，用以瞭解預報系統之系統性誤差與驗證預報系統之準確性。

利用 ECMWF SEAS5 季節預報系統資料對水庫



圖片改繪自：「水庫集水區雨量長期預報技術開發第 2 期」(交通部中央氣象署，2022)

圖 1 ECMWF SEAS5 模式資料對水庫集水區建立未來 1 ~ 6 個月降尺度預報系統之作業流程

集水區建立未來 1 ~ 6 個月降尺度預報系統之作業流程如圖 1 所示。降尺度到水庫集水區的過程是最鄰近水庫集水區四個網格 ECMWF SEAS5 季節預報系統 1991 ~ 2020 年的歷史 (事後) 預報資料，採用距離權重方式將事後預報資料內插至水庫集水區，再利用此結果與氣象署高解析度格點資料 T1 所建立 1998 ~ 2020 年的水庫集水區觀測雨量以分位數映射法進行偏差修正，如圖中所示：原始預報雨量 P 其預報的累積機率值為 c ，對應到觀測雨量累積機率分布，在相同的累積機率 c 所對應的觀測雨量 P' ，以 P' 作為預報雨量之修正值。即以相同累積機率的觀測值取代降尺度預報值，以此方式得到偏差修正後的預報值 (交通部中央氣象署，2022)。再將偏差修正後的結果建立歷史 (事後) 預報分布並定義 6 個類別的超越機率門檻值。在預報作業應用時，也將預報系統產出的每個系集成員其雨量預報進行偏差修正後，即可根據偏差修正後的雨量預報結果與歷史 (事後) 預報分布比較，對應超越機率門檻值，即可得知該系集成員預報雨量之預報類別。根據歷史 (事後) 預報分布之超越機率在 10%、30%、50%、70%、90% 時的預報雨量設定為門檻值，劃分為以下 6 個類別：(1) 大於 10%、(2) 10% ~ 30%、(3) 30% ~ 50%、(4) 50% ~ 70%、(5) 70% ~ 90%，與(6) 小於 90%。每次預報有 50 個系集成員，各系集成員的預報結果會落在不同類別，統計每個類別的系集成員個數，便可計算預報系統之雨量預報結果在每個類別的發生機率，即為 ECMWF SEAS5 季節預報系統的 6 分類機率預報產品。

以 2024 年 2 月為初始場預報 2 月到 8 月石門水庫集水區之雨量降尺度預報為例 (如圖 2 所示) 進行說明：圖 2 中預報第 1 筆資料為當月的雨量預報，x 軸為預報月份，y 軸為預報雨量值，灰色為 1991 ~ 2020 年事後預報期間的歷史觀測雨量分布 (氣候值)，上、下兩個點分別表示歷史觀測雨量分布的最大值及最小值，灰色區帶的上限為觀測雨量值之第 75 百分位數，下限為第 25 百分位數，中間則為第 50 百分位數 (中位數)；藍色為雨量預報值之盒鬚圖，其中藍色實心代表歷史 (事後) 預報期間具有預報技術，而空心則表示無預報技術 (代表預報系統在此月份預報能力不足)。盒鬚圖最上端為預報雨量最大值，最下端為預報雨量最小值，盒狀中間部份分別代表預報雨量值之第 75 百分位數、第 50 百分位數 (中位數)、第 25 百分位數。此外，圖中的下面兩個表格為 6 個類別各分類的預報機率值與氣候門檻值，分別代表 50 個系集成員

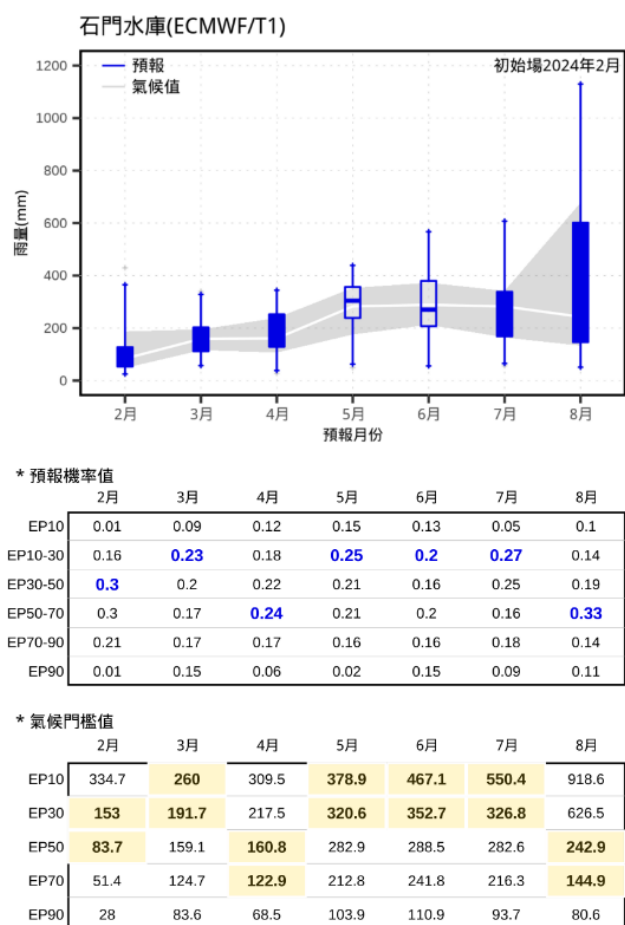
之雨量預報值在各分類中之發生機率以及各分類的雨量門檻值 (氣候門檻值)。氣候門檻值是根據 1991 ~ 2020 年事後預報期間，經偏差修正後的降尺度歷史分布所計算，在超越機率為 10 %、30 %、50 %、70 %、90 % 的對應雨量值。根據此各分類的預報機率值 (圖 2 中上表) 即可得知預報系統產出的系集成員之最大可能發生類別以及在氣候上的雨量值大小 (圖 2 中下表)。以 4 月的預報雨量為例進行說明，圖 2 中上表在 4 月的預報雨量其最大可能發生類別為歷史預報分布超越機率 50 % ~ 70 % 區間 (預報機率值為 0.24 為 6 個類別中之最大值)，對應圖 2 中下表之雨量值區間為 122.9 ~ 160.8 mm。此 ECMWF SEAS5 季節預報系統的 6 分類機率預報產品會比單純的雨量時間序列具有較高的預報參考性，亦可提供較極端雨量 (超越機率大於 10 %、超越機率小於 90 %) 的發生機率供參考。

三、導入 ECMWF 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報及其應用

上述氣象署發展之 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品為月尺度 (預報雨量為月總雨量)，為配合水庫/攔河堰集水區水文模式 (連續型降雨-逕流模式) 之模擬時間單位 (日時間尺度)，需進一步將水庫/攔河堰集水區之各系集成員雨量預報值由月時間尺度轉換為日時間尺度。

雨量時間分解 (temporal disaggregation of rainfall) 係指能將較大時間尺度雨量序列分解成較小尺度序列之方法。本研究初步採用 k 鄰近法 (k nearest neighbor, KNN) 將月雨量預報值轉換為日雨量值，此轉換方式係參考 Nowak *et al.* (2010) 採用非參數型模式進行時間尺度轉換，主要係以水文變量之歷史分布型態為基礎，再藉由 k 鄰近法將水文變量之時間尺度由月時間尺度轉換成日時間尺度 (王顥泰，2013；Yu *et al.*, 2014)。k 鄰近法屬於一無參數模式，透過重複選取歷史觀測資料，在不破壞變數時間與空間之關係下繁衍出時間序列之氣候資料 (Lall and Sharma, 1996)。由月時間尺度轉換成日時間尺度之詳細步驟說明，可參考王顥泰 (2013) 與 Nowak *et al.* (2010) 等著作。另有多數文獻提出其他雨量時間分解方法 (Deka and Saha, 2023)，未來可進一步比較不同時間分解方法之效益。

將雨量預報值從月時間尺度轉換成日時間尺度後，再輸入修正型 HBV 水文模式進行流量模擬，其流程如圖 3。



圖片來源：「中央氣象署 新一代劇烈天氣監測系統 QPEplus」 (<https://qpeplus.cwa.gov.tw/WRA/>)

圖 2 石門水庫集水區雨量降尺度預報 (2024 年 2 月為初始場預報 2 月至 8 月)

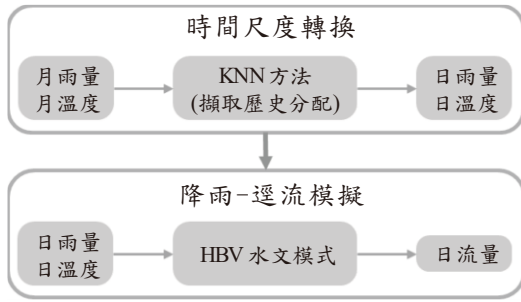


圖 3 以修正型 HBV 水文模式產製流量流程

修正型 HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) 水文模式主要用於模擬集水區之降雨-逕流機制，經相關研究計畫證實在臺灣集水區具有良好的流量模擬能力，並已採用於水庫與攔河堰長期流量預報 (經濟部水利署, 2022a) 與氣候變遷對流量衝擊評估 (經濟部水利署, 2022b) 等實務應用。

修正型 HBV 水文模式為連續型集塊模式，係將集水區降雨-逕流機制概念化為上、下兩個水桶進行長期逕流量的連續模擬。模式架構包含三個主要部分：(1) 土壤含水量作用機制，(2) 逕流反應機制，與 (3) 土壤表層與上、下水桶之水平衡方程式。以下針對修正型 HBV 水文模式進行概略說明：

土壤含水量作用機制係由土壤含水量之多寡依下式將降雨量分為提供逕流反應部分之水量與貯蓄於土壤表層之水量，其關係示意圖如圖 4 所示。

$$Q_s(t) = \left[\frac{S_{sm}(t)}{FC} \right]^\beta \cdot P(t) \dots\dots\dots(1)$$

其中， $Q_s(t)$ 為第 t 日提供逕流反應部分之水量 (mm/day)； $P(t)$ 為第 t 日之降雨量 (mm/day)； $S_{sm}(t)$ 為第 t 日之土壤含水量 (mm)； FC 為田間容水量 (mm)，待率定參數； β 為待率定參數。

貯蓄於土壤表層之水量為 $P(t)$ 扣除 $Q_s(t)$ 後之剩餘量，由土壤含水量之多寡依下式計算實際蒸發散量，其關係示意圖亦如圖 4 所示。

$$E_a(t) = \begin{cases} E_p(t) \cdot S_{sm}(t-1) / LP & S_{sm}(t-1) \leq LP \\ E_p(t) & S_{sm}(t-1) > LP \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

其中， $E_p(t)$ 為第 t 日之潛勢蒸發散量 (mm/day)； $E_a(t)$ 為第 t 日之實際蒸發散量 (mm/day)； LP 為待率定參數，為實際蒸發散量達潛勢蒸發散量時之土壤含水量，當土壤含水量大於此值時，實際蒸發散量即以潛勢蒸發散量作計算。

蒸發散量的估算部分，主要利用 Hamon 公式計算潛勢蒸發散量，只需輸入觀測溫度及日照時數等資料

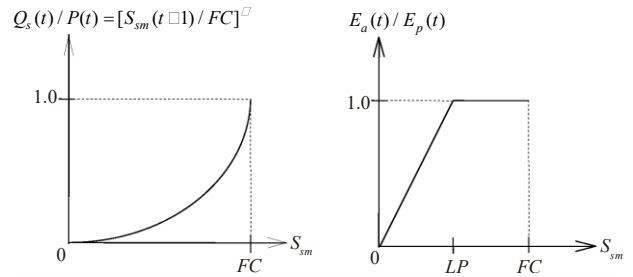


圖 4 逕流與蒸發散量受土壤含水量影響關係圖

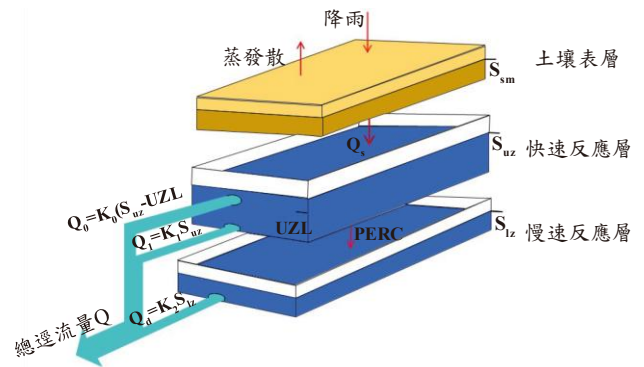


圖 5 逕流反應部分之模式架構圖

即可，於模式中利用 Hamon 公式計算潛勢蒸發散量，以進行模式參數率定。Hamon 公式如下：

$$PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_{ot}}{T_t + 273} \dots\dots\dots(3)$$

其中， PET_t 為第 t 日的潛勢蒸發散量 (cm/day)； H_t 為第 t 日的日照時數 (hr)； e_{ot} 為第 t 日的飽和蒸氣壓 (mb)； T_t 為日平均溫度 (°C)。飽和蒸氣壓為溫度的函數，可由下式表示：

$$e_{ot} = 33.8639[0.00738 \times T_t + 0.8072]^8 - 0.000019 \times |1.8 \cdot T_t + 48| + 0.001316 \dots\dots\dots(4)$$

由於實際蒸發散量估算不易，故導入 C_e 參數以進行潛勢蒸發散量之修正 (即將潛勢蒸發散量乘以 C_e)。

逕流反應機制主要將集水區降雨與逕流之機制概念化為上、下兩個水桶，上層水桶接受提供逕流反應部分之水量 (Q_s)，迅速釋放地表逕流與中間流為快速反應層，並部分提供滲漏量到下層水桶。而下層水桶接受來自於上層水桶之滲漏量後，釋出基流量為慢速反應層。由降雨量提供逕流反應部分之水量 (Q_s) 流入上層水桶後，並依下方公式計算上、下層水桶之出流量，上、下層水桶之出流量和為集水區總出流量。修正型 HBV 水文模式逕流反應部分之架構如圖 5 所示。

$$Q_u(t) = \begin{cases} K_1 \cdot S_{uz}(t) + K_0(S_{uz}(t) - UZL) & S_{uz}(t) > UZL \\ K_1 \cdot S_{uz}(t) & S_{uz}(t) \leq UZL \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

$$Q_d(t) = K_2 \cdot S_{lz}(t) \dots\dots\dots(6)$$

$$Q(t) = Q_u(t) + Q_d(t) \dots\dots\dots(7)$$

其中， $Q_u(t)$ 為第 t 日之上層水桶出流量 (mm/day)； $Q_d(t)$ 為第 t 日之下層水桶出流量 (mm/day)； $Q(t)$ 為第 t 日之總出流量 (mm/day)； $S_{uz}(t)$ 為第 t 日之上層水桶貯蓄量 (mm)； $S_{lz}(t)$ 為第 t 日之下層水桶貯蓄量 (mm)； UZL 為上層水桶孔口高度 (mm)，待率定參數，值越大表示上層水桶之貯蓄能力愈大，釋放至地表逕流量越小； K_0 為上層水桶孔口高度 UZL 之孔口係數，待率定參數，值越大表示上層水桶釋放至地表逕流量越大； K_1 為上層水桶之孔口係數，待率定參數，值越大表示上層水桶釋放至中間流量越大； K_2 為下層水桶之孔口係數，待率定參數，值越大表示下層水桶釋放至基流量越大。

土壤表層與上、下水桶之水平衡方程式主要模擬各時段之土壤含水量、上層水桶蓄水量與下層水桶蓄水量之變化，依下述三個連續方程式進行演算。

$$dS_{sm} / dt = P - Q_s - E_a \dots\dots\dots(8)$$

$$dS_{uz} / dt = Q_s - Q_u - PERC \dots\dots\dots(9)$$

$$dS_{lz} / dt = PERC - Q_d \dots\dots\dots(10)$$

其中， $PERC$ 為上層水桶至下層水桶之滲漏量 (mm/day)。

前述修正型 HBV 水文模式在進行流量預報應用前，需進行各水庫與攔河堰集水區之模式參數最佳化率定。而模式參數最佳化率定需有兩項工具：目標函數與參數搜尋法。目標函數於參數率定過程中為引導參數搜尋法之指標方向，使得各個參數在滿足限制之條件下求取最佳目標值，因此目標函數之設定也直接影響參數搜尋法是否能找到適當之參數值。根據楊道昌與游保杉 (1997) 研究顯示模糊多目標函數 (fuzzy multi-objective function, FMOF) (Yapo *et al.*, 1996) 可針對各個流量階段之目標定義其可接受之隸屬函數，並利用模糊集理論之觀點，求得同時滿足各個流量階段可接受最大誤差之目標函數。因此本研究採用 FMOF 為目標函數，配合 Duan *et al.* (1992) 提出的全域最佳化搜尋法 SCE (shuffled complex evolution method) 進行模式參數的率定。基此，蒐集各水庫與攔河堰集水區之歷史觀測雨量、溫度與流量資料，採用模糊多目標函數 (FMOF)，配合全域最佳化搜尋法 SCE 進行各水庫與攔河堰集水區之模式參數率定 (經濟部水利署，2022a，2022b)。

藉由將各水庫與攔河堰集水區所有系集成員雨量預報值由月時間尺度轉換為日時間尺度後，輸入修正型 HBV 水文模式，便可進行未來 1 ~ 6 個月流量預報。採用 ECMWF 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報作業化建置流程如圖 6 所示。

本研究自 112 年 10 月起採用各水庫與攔河堰集水區之 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品，逐月以最新雨量預報結果 (未來 1 ~ 6 個月 50 個系集雨量預報) 進行長期 (未來 1 ~ 6 個月) 流量預報更新作

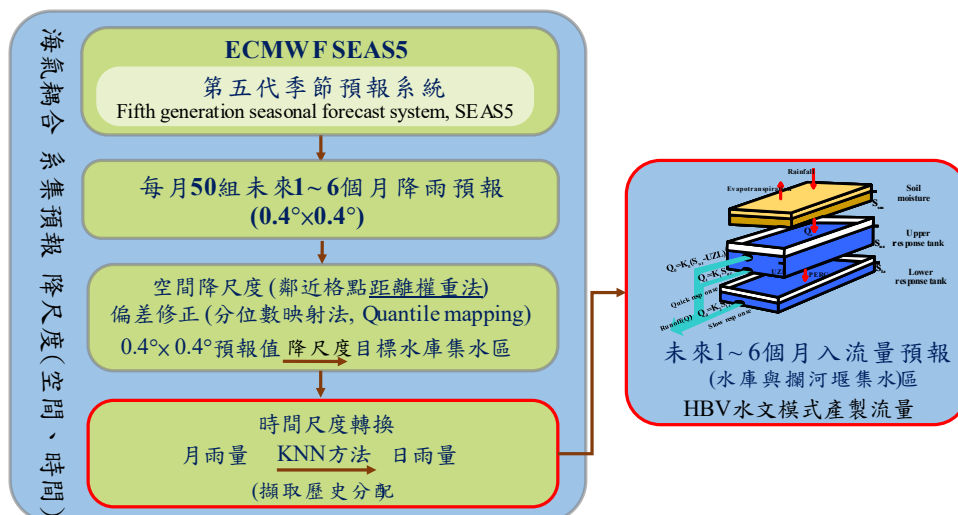


圖 6 採用 ECMWF 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報作業化建置流程

業。每次更新預報是依據各水庫與攔河堰集水區之 50 個系集雨量預報結果輸入水文模式進行 50 組未來 1~6 個月流量模擬，再由這 50 組預報流量計算未來各旬預報流量之不同分位數 (包含 30、50、70、80、90 與 95 分位數等) 預報流量值，以提供水利署各水資源分署作為水庫蓄水量推估時之參考依據。以北區水庫與攔河堰為例，表 1 為北區各水庫與攔河堰 112 年 11 月預報 112 年 12 月至 113 年 5 月未來各旬預報流量 70 分位數與 90 分位數。另以石門水庫為例說明水庫未來蓄水量推估情形，圖 7 為 112 年 12 月 7 日採用系集雨量預報之流量預報成果 (未來各旬 70 分位數與 90 分位數預報流量) 進行未來水庫蓄水量推估之示意圖。圖中 A. 枯旱情境 (Q90) 是採用各旬超越機率

90% 之歷史觀測入流量值，做為入流量推估值，亦即 12 月 7 日後的水庫入量，每旬均假設發生超越機率 90% 之歷史觀測入流量值，再以水庫操作模式進行水源供需演算，推估未來水庫蓄水量。圖中 B. 極度枯旱 (10 年最少) 是以近 10 年的最低流量，當作入流量推估值，亦即 12 月 7 日後的水庫入量，每旬均假設發生近 10 年的最低流量，乃相當保守的假設，再以水庫操作模式推估未來的水庫蓄水量。而圖中的預報區間值 (系集預報 70 分位 ~ 90 分位) 則採用本研究 ECMWF SEAS5 系集雨量預報之流量預報成果 (未來各旬 70 分位數與 90 分位數預報流量) 進行未來水庫蓄水量推估，且推估至 113 年 3 月底之水庫蓄水量相較 A. 枯旱情境 (Q90) 與 B. 極度枯旱 (10 年最少) 樂觀。

表 1 北區各水庫與攔河堰未來各旬預報流量 70 分位數與 90 分位數(112 年 11 月預報 112 年 12 月至 113 年 5 月)

區域	水庫名稱	預報流量(70分位數) 單位：萬噸/日																		
		12月			1月			2月			3月			4月			5月			
		第1旬	第2旬	第3旬	第1旬	第2旬	第3旬	第1旬	第2旬	第3旬	第1旬	第2旬	第3旬	第1旬	第2旬	第3旬	第1旬	第2旬	第3旬	
北區	新山水庫	1.3	1.7	1.4	0.9	1.4	1.2	1.5	1.2	1.3	1.5	1.2	1.1	0.8	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	0.9
	八堵抽水站	61.2	341.1	432.6	179.2	319.3	128.9	70.1	47.2	250.2	164.9	68.3	72.9	61.5	46.5	54.8	98.9	80.8	107.1	
	石門水庫	106.3	113.3	107.7	100.4	97.8	103.9	113.0	116.5	127.9	116.4	123.4	206.8	150.3	148.1	181.1	182.2	282.5	373.7	
	翡翠水庫	160.0	187.5	138.8	100.4	109.1	91.7	112.6	80.6	116.3	104.1	65.3	96.3	53.5	38.7	164.1	46.7	249.7	195.8	
	寶山第二水庫	1.1	4.3	7.8	3.2	4.6	3.5	3.9	3.2	1.8	8.9	8.8	13.6	11.6	11.5	5.2	7.4	10.0	12.1	
	上坪攔河堰	27.1	26.1	27.4	25.1	25.8	32.6	28.7	26.5	27.8	27.5	26.1	35.5	30.6	36.0	36.1	82.2	54.4	83.7	
區域	水庫名稱	預報流量(90分位數) 單位：萬噸/日																		
		12月			1月			2月			3月			4月			5月			
		第1旬	第2旬	第3旬	第1旬	第2旬	第3旬	第1旬	第2旬	第3旬	第1旬	第2旬	第3旬	第1旬	第2旬	第3旬	第1旬	第2旬	第3旬	
北區	新山水庫	0.2	0.8	0.9	0.1	0.5	0.4	0.6	0.4	0.5	0.7	0.2	0.6	0.3	0.6	0.6	0.3	0.2	0.5	
	八堵抽水站	56.7	112.0	219.7	97.4	200.3	67.7	20.5	27.0	127.1	87.5	44.0	46.7	30.5	25.2	25.9	32.0	22.0	27.5	
	石門水庫	101.5	96.4	94.5	87.2	80.6	91.6	84.7	86.4	99.7	85.1	94.6	142.4	118.9	122.1	137.8	142.9	174.3	174.2	
	翡翠水庫	114.1	125.7	105.2	65.7	55.9	64.5	80.8	57.0	65.2	83.4	51.5	53.9	42.4	29.7	59.2	33.7	125.0	97.8	
	寶山第二水庫	0.1	0.0	2.2	0.4	0.3	0.7	0.1	0.1	1.0	0.9	0.2	6.1	8.0	7.1	1.2	2.7	2.5	0.5	
	上坪攔河堰	27.0	24.8	24.3	23.4	21.7	24.9	21.2	22.3	20.2	18.6	17.2	17.9	19.3	22.7	23.5	42.8	35.9	37.8	

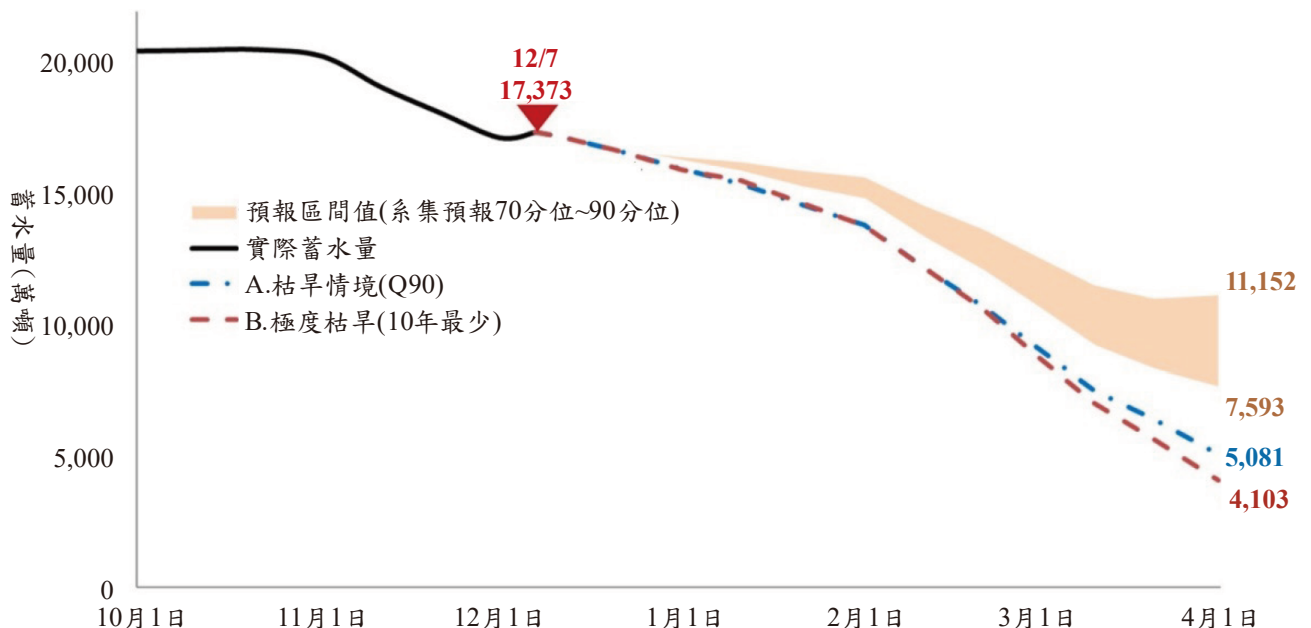


圖 7 採用系集雨量預報之流量預報成果進行石門水庫蓄水量推估 (示意圖)

四、歷史流量預報效能分析

歷史流量預報效能分析主要針對石門水庫、德基水庫、曾文水庫與高屏溪攔河堰進行，採用「流量區間預報效能評估」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 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（採用系集平均值）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」。效能評估採用歷史流量預報以逐月滾動方式進行，例如：87 年 12 月底預報未來六個月（88 年 1~6 月）流量，經過一個月後於 88 年 1 月底預報未來六個月（2~7 月）流量，每次流量預報之時間皆往後推進一個月，以此類推至 106 年 12 月底預報未來六個月（107 年 1~6 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六個月的日流量轉換成未來 18 旬的旬流量（視為 18 個預報次數）。因此本研究採用的 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品之歷史預報資料從 88 年 1 月至 107 年 6 月，期間的預報次數共計 $[(106-88+1) \times 12 + 1] \times 18 = 4,122$ 次，其中豐水期總預報次數為 2,058 次、枯水期總預報次數為 2,064 次。

採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品之歷史預報成果輸入修正型 HBV 水文模式進行歷史長期流量預報效能評析，預報結果分全年、豐水期與枯水期，分析結果如表 2 所示。分析結果顯示：在全年預報效能表現以德基水庫的有效預報 1,755 次（佔總預報次數 42.6 %）最佳，其它依序為曾文水庫的有效預報 1,678 次（佔總預報次數 40.7 %）、石門水庫有效預報 1,654 次（佔總預報次數 40.1 %）及高屏溪攔河堰有效預報 1,646 次（佔總預報次數 39.9 %）。

在豐水期時（5 ~ 10 月）預報效能表現以德基水庫的有效預報 860 次（佔總預報次數 41.7 %）最佳，其它依序為石門水庫的有效預報 827 次（佔總預報次數 40.1 %）、曾文水庫有效預報 758 次（佔總預報次數 36.7 %）及高屏溪攔河堰有效預報 690 次（佔總預報次數 33.4 %）。

在枯水期時（11 月 ~ 翌年 4 月）預報效能表現以高屏溪攔河堰的有效預報 958 次（佔總預報次數 46.4 %）最佳，其它依序為曾文水庫的有效預報 922 次（佔總預報次數 44.7 %）、德基水庫有效預報 897 次（佔總預報次數 43.5 %）及石門水庫有效預報 829 次（佔總預報次數 40.2 %）。

進一步分析採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報於不同前置時間（第 1、第 2、...、第 6 個月）之預報效能，有效預報次數及百分比（如表 3 與表 4）。分析結果顯示：石門水庫在預報第 1 個月的有效預報次數為 371 次（佔各月總預報次數 54.0 %）最高，預報第 2 個月 ~ 第 6 個月有效預報百分

表 2 採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品之歷史預報成果進行流量預報其預報值為「有效預報」次數及百分比統計表（全年、豐水期與枯水期）

水庫/攔河堰	全年		豐水期		枯水期	
	次數	百分比	次數	百分比	次數	百分比
石門水庫	1,654	40.1 %	827	40.1 %	829	40.2 %
德基水庫	1,755	42.6 %	860	41.7 %	897	43.5 %
曾文水庫	1,678	40.7 %	758	36.7 %	922	44.7 %
高屏溪攔河堰	1,646	39.9 %	690	33.4 %	958	46.4 %

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 4,122 次、豐水期總預報次數 2,058 次、枯水期總預報次數 2,064 次。

表 3 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品之歷史預報成果進行流量預報其預報值為「有效預報」次數統計表（預報第 1 ~ 第 6 個月）

水庫/攔河堰	第 1 個月	第 2 個月	第 3 個月	第 4 個月	第 5 個月	第 6 個月
石門水庫	371	273	253	259	247	251
德基水庫	337	285	272	292	289	280
曾文水庫	325	259	270	246	242	241
高屏溪攔河堰	324	264	260	258	269	271

註：全年總預報次數 4,122 次、每次滾動預報 1 ~ 6 個月，各月總預報次數為 687 次。

表 4 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品之歷史預報成果進行流量預報其預報值為「有效預報」百分比統計表 (預報第 1 ~ 第 6 個月)

水庫/攔河堰	第 1 個月	第 2 個月	第 3 個月	第 4 個月	第 5 個月	第 6 個月
石門水庫	54.0	39.7	36.8	37.7	36.0	36.5
德基水庫	49.1	41.5	39.6	42.5	42.1	40.8
曾文水庫	47.3	37.7	39.3	35.8	35.2	35.1
高屏溪攔河堰	47.2	38.4	37.9	37.6	39.2	39.5

註：全年總預報次數 4,122 次、每次滾動預報 1 ~ 6 個月，各月總預報次數為 687 次。

比略有下降 (佔各月總預報次數 36.0 % ~ 39.7 %)；德基水庫在預報第 1 個月的有效預報為 337 次 (佔各月總預報次數 49.1 %) 最高，預報第 2 個月 ~ 第 6 個月有效預報百分比略有下降 (佔各月總預報次數 39.6 % ~ 42.5 %)；曾文水庫在預報第 1 個月的有效預報為 325 次 (佔各月總預報次數 47.3 %) 最高，預報第 2 個月 ~ 第 6 個月有效預報百分比則略有下降 (佔各月總預報次數 35.1 % ~ 39.3 %)；高屏溪攔河堰在預報第 1 個月的有效預報為 324 次 (佔各月總預報次數 47.2 %) 最高，預報第 2 個月-第 6 個月有效預報百分比亦略有下降 (佔各月總預報次數 37.6 % ~ 39.5 %)。

綜上分析結果，依全年、豐水期與枯水期之效能表現而言，南部地區之曾文水庫及高屏溪攔河堰在豐水期、枯水期之效能表現呈現較明顯之差異，而中、北部地區之石門及德基水庫於豐水期、枯水期之效能表現較為平均，各水庫及攔河堰在全年之預報效能平均約為 40 %。依預報第 1 ~ 6 個月各月預報結果效能表現而言，各水庫及攔河堰皆以預報第 1 個月的效能表現最佳，有效預報百分比為 47.2 % ~ 54.0 % 之間，第 2 至第 6 個月後之效能表現相比第 1 個月略有下降，有效預報百分比為 35.1 % ~ 42.5 % 之間。

為進一步比較不同版本的流量預報結果，與水利署前期計畫 (經濟部水利署，2020) 結果進行比較說明，採用 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」係基於氣象署「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：87 年 12 月底預報未來三個月 (88 年 1 ~ 3 月) 流量，經過一個月後於 88 年 1 月底預報未來三個月 (2 ~ 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 106 年 12 月底預報未來三個月 (107 年 1 ~ 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 88 年 1 月至 107 年 3 月

的預報次數共計 $[(106-88+1)*12+1]*9 = 2,061$ 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。

比較不同版本的流量預報結果包含：(1) 保守情境流量 Q80 與 Q90、(2) 第一版天氣展望流量繁衍法、(3) 第二版氣候-水文模式流量預報系統 (整合氣象署二步法預報產品)、(4) 第三版氣候-水文模式流量預報系統 (整合氣象署 CWB1T1 預報產品) 之預報效能。不同流量預報方法預報值為有效預報之次數及百分比 (有效預報次數/總預報次數)，分別如表 5 及表 6 所列。由表中可大略看出：本研究採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報之預報效能與第三版之預報效能相當，優於保守情境流量方法、第一版與第二版。其中，第一版至第三版係配合氣象署長期雨量預報產品之更新演進，開發水庫入流量預報系統進行流量預報。隨氣象署長期雨量預報產品的預報精度提升，水庫入流量預報準確性亦隨之提升。而保守情境流量則是以各旬歷史超越機率 80 % 與 90 % 流量視為預報流量，表現較不理想 (楊道昌等人，2021)。

本研究進一步將前述採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品之歷史預報成果進行流量預報之預報效能，整理成「預報效能增加百分比」如表 7 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，採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報相較第三版預報系統之效能增加百分比 (預報期間為全年)，以表 5 中採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報之有效預報次數 (897 次)，減掉第三版有效預報次數 (874 次) 即為「有效預報次數的增量」(23 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 (1.1 %)。預報期間為枯水期則以表 5 中採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報之有效預報次數 (459 次) 減掉第三版有效預報次數 (433 次) 即為「有效預報次數的增量」(26 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 (2.5 %)。

表 5 不同長期流量預報方法之有效預報次數 (預報第 1 ~ 3 個月)

	保守情境流量	第一版	第二版	第三版	本研究
預報期間	Q80、Q90	天氣展望 流量繁衍法	氣候-水文模式 流量預報系統 (二步法)	氣候-水文模式 流量預報系統 (CWB1T1)	氣候-水文模式流量 預報系統 (ECMWF SEAS5)
石門水庫					
全年	543	766	805	874	897
豐水期	261	361	390	441	438
枯水期	282	405	415	433	459
德基水庫					
全年	415	888	910	965	894
豐水期	231	465	441	482	429
枯水期	184	423	469	483	465
曾文水庫					
全年	734	752	820	896	910
豐水期	336	379	368	441	413
枯水期	398	373	452	455	497
高屏溪攔河堰					
全年	627	751	776	834	848
豐水期	354	311	312	335	346
枯水期	273	440	464	499	502

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。

表 6 不同長期流量預報方法之有效預報百分比 (預報第 1 ~ 3 個月)

	保守情境流量	第一版	第二版	第三版	本研究
預報期間	Q80、Q90	天氣展望 流量繁衍法	氣候-水文模式 流量預報系統 (二步法)	氣候-水文模式 流量預報系統 (CWB1T1)	氣候-水文模式流量 預報系統 (ECMWF SEAS5)
石門水庫					
全年	26.3%	37.2%	39.1%	42.4%	43.5%
豐水期	25.4%	35.2%	38.0%	43.0%	42.7%
枯水期	27.2%	39.1%	40.1%	41.8%	44.3%
德基水庫					
全年	20.1%	43.1%	44.2%	46.8%	43.4%
豐水期	22.5%	45.3%	43.0%	47.0%	41.8%
枯水期	17.8%	40.9%	45.3%	46.7%	44.9%
曾文水庫					
全年	35.6%	36.5%	39.8%	43.5%	44.2%
豐水期	32.7%	36.9%	35.9%	43.0%	40.3%
枯水期	38.5%	36.0%	43.7%	44.0%	48.0%
高屏溪攔河堰					
全年	30.4%	36.4%	37.7%	40.5%	41.1%
豐水期	34.5%	30.3%	30.4%	32.7%	33.7%
枯水期	26.4%	42.5%	44.8%	48.2%	48.5%

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。

由表 7 可看出：本研究採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報之效能與第三版氣

候-水文模式流量預報系統 (CWB1T1) 效能「表現相近」，在全年及枯水期效能表現差異皆為正負 4 % 以

表 7 採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報之預報效能增加百分比

水庫/ 攔河堰	預報 期間	相較保守情境流量 Q80、Q90 方法效能 增加百分比	相較第三版流量 預報系統效能增 加百分比
石門水庫	全年	17.2 %	1.1 %
	枯水期	17.1 %	2.5 %
德基水庫	全年	23.2 %	-3.4 %
	枯水期	27.1 %	-1.7 %
曾文水庫	全年	8.5 %	0.7 %
	枯水期	9.6 %	4.1 %
高屏溪 攔河堰	全年	10.7 %	0.7 %
	枯水期	22.1 %	0.3 %

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。

內，與第三版氣候-水文模式流量預報系統相比全年預報效能相比可增加 1.1 % (石門水庫) 至 0.7 % (曾文水庫及高屏溪攔河堰)；枯水期預報效能可增加 4.1 % (曾文水庫) 至 0.3 % (高屏溪攔河堰)。惟採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報，於德基水庫預報效能分析結果相較第三版氣候-水文模式流量預報系統，效能呈現在全年減少 3.4 %，枯水期減少 1.7 %。

相較於採用保守情境流量 (Q80、Q90) 之方法，採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報之效能表現較佳，全年預報效能增加幅度可達 8.5 % (曾文水庫) 至 23.2 % (德基水庫)；以枯水期表現而言效能增加幅度可達 9.6 % (曾文水庫) 至 27.1 % (德基水庫)。

五、結語與未來工作

本研究主要採用氣象署針對 ECMWF SEAS5 季節預報資料產製的臺灣重要水庫與攔河堰集水區長期雨量預報降尺度產品，進一步結合修正型 HBV 水文模式進行水庫與攔河堰長期 (未來 1~6 個月) 入流量預報，以作為未來水庫蓄水量推估與水情研判之參考，進而協助精進入庫流量管理，以全面迅速掌握水文現況與未來供水情勢等資訊。

本研究採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報，自 112 年 10 月逐月以最新雨量預報結果 (未來 1~6 個月 50 個系集雨量預報) 進行長期 (未來 1~6 個月) 流量預報更新作業，並計算

未來各旬預報流量之不同分位數 (包含 30、50、70、80、90 與 95 分位數等) 預報流量值，以提供水利署各水資源分署進行水庫蓄水量推估時之參考。

經比較 (1) 採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品與 (2) 氣象署氣候預報模式 (CWB1T1) 長期雨量預報降尺度產品進行水庫與攔河堰入流量預報效能分析，兩者預報效能表現相當，在全年及枯水期效能表現差異皆為正負 4 % 以內。相較於以保守情境流量之推估方法 (Q80、Q90)，採用 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品進行流量預報，全年預報效能增加幅度可達 8.5 % (曾文水庫) 至 23.2 % (德基水庫)；以枯水期表現而言效能增加幅度可達 9.6 % (曾文水庫) 至 27.1 % (德基水庫)。

目前 ECMWF SEAS5 長期雨量預報降尺度產品採用距離權重方式將歷史 (事後) 預報資料內插至水庫集水區，再利用此結果與氣象署高解析度格點資料 T1 所建立歷史水庫集水區觀測雨量以分位數映射法進行偏差修正。為進一步提升此產品之預報能力，後續工作將採用其他偏差修正方法 (如相關係數法，即搜尋網格雨量預報值與集水區觀測值具有最高相關係數之網格點後，建立該點網格預報值與集水區雨量觀測值之偏差修正式)。

此外，氣象署氣候預報模式 (CWB1T1) 已運行多年，為進一步改善長期天氣預報能力，氣象署自 105 年起啟動「發展新版一步法海氣耦合氣候模式」，發展建置氣象署第二代氣候預報系統 (簡稱 CWACFSv2) 已具成效。由於臺灣的複雜地形造成降雨空間分佈不均。例如，冬季降雨集中在東北部，而梅雨季的降雨則集中在西南部，這樣的降雨分布主要是受到地形效應之影響。全球氣候預報系統 (如 CWACFSv2) 空間解析度通常較低 (0.5° × 0.5°)，僅能搭配較低空間解析度的地形資料，預報結果會導致降雨位置 (空間分布) 有明顯誤差。為提升長期雨量預報產品之預報能力，後續工作中，除採用前述的偏差修正方法外，氣象署已著手進行 CWACFSv2 結合區域波譜模式 (Regional Spectral Model, RSM) 的動力框架，藉由區域波譜模式較高的空間解析度 (12 km × 12 km)，搭載更高解析度的地形資料以有效模擬地形效應造成臺灣特殊的降雨分佈特徵。以此方式將預報資料進一步降尺度至 12 km × 12 km 並完成偏差修正，產製長期雨量預報動力降尺度產品，以提升全臺長期雨量預報之準確性。本研究後續將規劃導入 CWACFSv2 長期雨量預報動力降尺度產品，進行未來 1~6 個月水庫流量預報並評析流量預報效能，以持續提升水庫入流量預報之準確性。

謝誌

本研究承蒙 經濟部水利署「水庫集水區雨量長期預報技術開發」(2021 ~ 2024) 之經費補助得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. Arnal, L., H. L. Cloke, E. Stephens, F. Wetterhall, C. Prudhomme, J. Neumann, B. Krzeminski, and F. Pappenberger, "Skilful Seasonal Forecasts of Streamflow over Europe?," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 2057-2072, 2018.
2. Candogan Yossef, N., R. van Beek, A. Weerts, H. Winsemius, and M. F. P. Bierkens, "Skill of A Global Forecasting System in Seasonal Ensemble Streamflow Prediction," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 4103-4114, 2017.
3. Deka, P and U. Saha, "Introduction of K-means Clustering into Random Cascade Model for Disaggregation of Rainfall from Daily to 1-hour Resolution with Improved Preservation of Extreme Rainfall," *Journal of Hydrology*, 620(B), 129478, 2023.
4. Duan, Q., S. Sorooshian, and V. K. Gupta, "Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models," *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031, 1992.
5. Foster, K., C. B. Uvo, and J. Olsson, "The Development and Evaluation of A Hydrological Seasonal Forecast System Prototype for Predicting Spring Flood Volumes in Swedish Rivers," *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), 2953-2970, 2018.
6. Lall, U. and A. Sharma, "A Nearest Neighbor Bootstrap for Resampling Hydrologic Time Series," *Water Resources Research*, 32(3), 679-693, 1996.
7. Meißner, D., B. Klein, and M. Ionita, "Development of A Monthly to Seasonal Forecast Framework Tailored to Inland Waterway Transport in Central Europe," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6401-6423, 2017.
8. Nowak, K., J. Prairie, B. Rajagopalan, and U. Lall, "A Nonparametric Stochastic Approach for Multisite Disaggregation of Annual to Daily Streamflow," *Water Resources Research*, 46(8), W08529, 2010.
9. Pechlivanidis, I. G., L. Crochemore, J. Rosberg, and T. Bosshard, "What Are the Key Drivers Controlling the Quality of Seasonal Streamflow Forecasts?," *Water Resources Research*, 56, e2019WR026987, 2020.
10. Yapo, P. O., Gupta, H. V. and Sorooshian, S., "Automatic Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models: Sensitivity to Calibration Data," *Journal of Hydrology*, 181(1), 23-48, 1996.
11. 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.
12. 王顥泰：「應用季長期天氣展望預報台灣中部地區缺水機率」，國立成功大學碩士論文，2013。
13. 交通部中央氣象署：「110 年度水庫集水區雨量長期預報技術開發第 1 期」，2021。
14. 交通部中央氣象署：「111 年度水庫集水區雨量長期預報技術開發第 2 期」，2022。
15. 交通部中央氣象署：「112 年度水庫集水區雨量長期預報技術開發第 3 期」，2023。
16. 楊道昌、游保杉：「目標函數對連續型降雨-逕流模式率定之影響」，*臺灣水利*，第 45 卷第 4 期，pp. 66-73，1997。
17. 楊道昌、龔明人、畢嵐杰、蔡展銘、陳昭銘、游保杉：「臺灣水庫集水區長期雨量暨流量預報之發展」，*農業工程學報*，第 67 卷第 3 期，pp. 18-29，2021。
18. 經濟部水利署：「水庫集水區流量預報技術整合暨推廣應用」，經濟部水利署水利規劃試驗所，2022a。
19. 經濟部水利署：「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。
20. 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。
21. 經濟部水利署：「氣候變遷對重要供水水系水源水量影響分析」，經濟部水利署水利規劃試驗所，2022b。
22. 經濟部水利署：「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。