

整合展期與長期雨量預報技術建構全臺重點水庫 流量預報系統

Integration of Extended-range and Long-term Rainfall Forecasts 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

中央氣象局
氣象科技研究中心
科長

張惠玲
Hui-Ling Chang

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

中央氣象局
氣象科技研究中心
主任

洪景山
Jing-Shan Hong

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
名譽教授

游保杉
Pao-Shan Yu

摘要

本研究主要目的在於整合中央氣象局針對 ECMWF 展期雨量預報之降尺度產品 (未來 1~30 日)，以及氣象局自行發展之全球海氣耦合模式長期雨量預報產品 (未來 31~180 日)，輸入修正型 HBV 水文模式進行全臺重點水庫入流量預報，以輔助抗旱期間水庫未來蓄水量推估與水情研判。面對短期迅速變化之天氣型態 (如梅雨與颱風) 而言，在相同預報時段內展期雨量預報產品之準確度會優於長期雨量預報產品。經本研究採用 ECMWF 歷史雨量預報降尺度資料 (2000 ~ 2019) 進行歷史流量預報，亦證實預報第 1 ~ 3 旬流量結果優於採用長期雨量預報進行第 1 ~ 3 旬流量預報結果，因此整合展期與長期雨量預報產品進行流量預報，確實可顯著增加未來第 1~3 旬之流量預報效能。基此，對於水庫入流量預報未來 1~30 日可採用 ECMWF 展期雨量預報降尺度產品，而未來 31 ~ 180 日則採用長期雨量預報降尺度產品，整合前述兩種雨量預報產品輸入水文模式進行未來 1 ~ 180 日水庫入流量預報，除能提升未來 3 旬面對天氣型態快速變化之能力外，亦能兼顧長期未來第 2 ~ 6 個月之水庫入流量發展情勢。

關鍵詞：降尺度、展期雨量預報、長期雨量預報、長期流量預報。

* 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

Integration of Extended-range and Long-term Rainfall Forecasts 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

Lan-Chieh Pi

Water Resources Agency,
Ministry of Economic Affairs

Hui-Ling Chang

Research and Development
Center, Central Weather Bureau

Jing-Shan Hong

Research and Development
Center, Central Weather Bureau

Pao-Shan Yu

Department of Hydraulic and
Ocean Engineering, National
Cheng Kung University

ABSTRACT

This work integrated the calibrated ECMWF's extended-range (1 ~ 30 days ahead) and the CWB1T1's seasonal (1 ~ 6 months ahead) rainfall forecasts as the input of the HBV-based hydrological model for performing the inflow forecasting at the key reservoirs in Taiwan. The reservoir inflow forecasting can facilitate to predict the future reservoir storage and support decision-making during the drought period. In the face of short-term rapidly changing weather conditions (such as the mei-yu front and typhoon), the extended rainfall forecasts generally perform more precisely than the seasonal rainfall forecasts during the same forecasting period. This work used the calibrated (downscaled and bias-corrected) ECMWF's extended-range rainfall re-forecasts (2000 ~ 2019) as the input of the HBV-based hydrological model for forecasting the reservoir inflows. The results reveal that the reservoir inflow re-forecasts by calibrated ECMWF's extended-range rainfall re-forecasts have a better performance than those by the CWB1T1's seasonal rainfall re-forecasts for the 1 ~ 30 days lead time. Therefore, the integration of extended-range (1 ~ 30 days ahead) and seasonal (2 ~ 6 months ahead) rainfall forecasts for reservoir inflow forecasting can simultaneously reflect the short-term weather conditions as well as the long-term trend of the weather outlook.

Keywords: Downscaling, Seasonal rainfall forecasting, Hydrological model.

一、前言

臺灣年降雨量豐沛，但因豐枯懸殊且河川坡陡流短，難以完全積蓄豐水期水源以供枯水期使用。加上氣候變遷影響，水資源環境正面臨豐越豐、枯越枯之挑戰。每逢豐水期降雨偏少，乾旱情況便隨之發生，水資源系統管理與調度更加艱困。由於缺水對整個社會經濟之影響甚巨，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，長期天氣預報能力隨之成長，雨量與溫度預報之準確率大幅提升，國際間已有許多研究藉由整合雨量與溫度預報以及水文模式進行水庫與河川流量預報之技術發展。例如，Viel *et al.* (2016) 發展季節性水文預報系統，提供法國 880 多個流量站之流量預報。此季節性水文預報系統由一個季節氣候預報系統 (ARPEGE System 3 model) 與一組水文模式 (包含土壤植被大氣傳輸模式與水路演算模式整合而成，並以 1979-2007 歷史預報產品 (每次預報未來 7 個月 11 個系集) 進行流量預報效能分析，發現其具有長達幾個月的預報能力。Bell *et al.* (2017) 整合英國氣象局全球季節性預報系統 (GloSea5) 與 Grid-to-Grid 分佈型水文模型，應用至英國 17 個區域預報未來 3 個月流量，分析結果顯示使用 GloSea5 預報降雨在季節性尺度流量具有可預測性。Candogan Yossef *et al.* (2017) 整合歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 季節性預報系統 S3 (Seasonal Forecast System 3) 與分佈式全球水文模型 (PCRaster Global Water Balance)，應用至分佈世界各地 20 條河川之月流量系集預報 (預報未來 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 季節性預報系統 S4 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 季節性預報系統 S4 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性預報系統進行流量預報具有發展潛力。Foster *et al.* (2018) 採用

ECMWF 季節性預報系統 S4 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性預報系統，分析結果發現平均 57% 的時間預報能力優於現有採用歷史觀測資料之推估方法。Baker *et al.* (2019) 為讓美國水資源管理者充分利用氣候預報資訊，將大尺度格網預報資料轉換以流域尺度呈現。此研究基於轉換預報產品包括每兩週一次的 Climate Forecast System version 2 (CFSv2) 季節性預報產品，以及月和季節尺度的美北多模式系集 (North American Multi-Model Ensemble) 預報產品。轉換後的流域尺度降雨與溫度預報資料順利結合水文模式，應用至入流量與水庫水位預測，以輔助水庫管理單位規劃其未來放水管理需求。Pechlivanidis *et al.* (2020) 採用 ECMWF SEAS5 氣候預報產品 (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 個流域的季節性流量預報成效，並進一步探討季節性流量預報的品質與流域的地理、水文與氣候間之關係，以識別季節性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。Senatore *et al.* (2020) 整合歐洲地中海氣候變化中心 (Euro-Mediterranean Center on Climate Change, CMCC) 發展之全球耦合模式 CMCC-CM 季節系集預報系統與水文模式 (In-STRHyM)，每月進行一次季節性預報產出未來 6 個月的系集預報。研究區域位於義大利南部兩個中小型集水區，分析成果顯示季節預報在觀測值和預測值間存在顯著相關性，有助於研究區域的農業水資源管理。

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，最先採用中央氣象局 (以下稱氣象局) 之長期天氣展望結合水文模式進行流量預報 (吳雷根，2004；Yang *et al.*, 2005；李晏全，2006；童新茹，2011；王顥泰，2013；Yu *et al.*, 2014；經濟部水利署水利規劃試驗所，2018)，隨後陸續引進氣象局氣候模式 (二步法) 預報產品，以及全球海氣耦合模式 (一步法) 預報產品，結合水文模式進行全臺重點水庫集水區長期雨量暨流量預報 (經濟部水利署水利規劃試驗所，2019、2020、2022；楊道昌等人，2021)。由前述流量預報文獻可瞭解：氣象科學領域中，季節性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。

另外，預報範圍涵蓋 2 週到 2 個月 (Vitart, 2014) 或 10~30 天 (陳孟詩, 2010) 之展期 (extended-range) 次季節到季節 (subseasonal-to-seasonal, S2S) 預報資訊已被認為對廣泛的行業和用戶具有高度應用價值 (White *et al.*, 2017)。例如，展期 S2S 降雨和流量預報可運用在水力發電管理、公共供水管理和觸發洪水和乾旱預警與因應系統 (Arnal *et al.*, 2018; Bell *et al.*, 2017; Svensson, 2015; Vitart *et al.*, 2017; White *et al.*, 2015; White *et al.*, 2017; Quedi and Fan, 2020; Graham *et al.*, 2022)。其中，White *et al.* (2015) 介紹澳洲在展期 S2S 預報時間尺度上極端降雨和洪水預報之開發與應用，並聚焦於風險決策以提高洪水風險意識和準備工作、掌握不確定性，與瞭解人類對洪水預報和警報的反應。文中建議展期 S2S 極端洪水預報若可容易、即時提供相關預報訊息將有助於整個社會能更好準備與應對極端洪水事件。Quedi and Fan (2020) 整合 ECMWF S2S 系集預報系統與大尺度分布型水文模式 (MGB-IPH)，針對巴西巴拉那河 (Paraná River) 流域中 6 個水庫集水區進行未來 1~46 日流量預報，研究結果證實導入 ECMWF S2S 系集雨量預報進行流量預報，其精確度優於傳統採用歷史重現的預測方式。

由於長期 (季節性) 預報模式是以「緩慢變化之季節性海洋邊界條件」來驅動氣候模式進行預報，一般以海溫為邊界條件來預報一個月以上之季節變化，其季節變化特性無法反應天氣現象數天到旬之短期迅速變化。然而展期 (S2S) 預報模式產品則是以「即時天氣狀況」作為初始條件，延續初始條件之後續變化進行預報，因此較能反應數天到旬之天氣變化現象。因此，對於短期迅速變化的天氣型態 (如梅雨與颱風) 而言，在相同預報時段內展期 (S2S) 預報產品的準確度會優於長期 (季節性) 預報產品。基此，本研究主要以展期預報產品取代相同預報時段內長期預報產品之概念，整合氣象局針對 ECMWF 展期雨量預報降尺度產品 (未來 1~30 日)，以及氣象局自行發展之全球海氣耦合模式 (CWB1T1) 長期雨量預報產品 (未來 31~180 日)，輸入修正型 HBV 水文模式進行全臺重點水庫未來 1~180 日入流量預報，以輔助抗旱期間水庫未來蓄水量推估與水情研判。以下針對 (1) 水庫集水區展期雨量預報、(2) 整合展期與長期雨量預報進行流量預報、(3) 引入 ECMWF 歷史雨量預報結果進行流量預報效能分析，與 (4) 結論與未來工作，進行說明。

二、水庫集水區展期雨量預報

經濟部水利署與氣象局於民國 108 年 10 月 14 日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，由氣象局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，水利署委託氣象局代辦「水庫集水區雨量長期預報技術開發計畫」(2021~2023)，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 ECMWF 為目前公認天氣數值模式最準確的單位，預報的結果通常相當具指標性，氣象局採購 ECMWF 即時展期雨量預報及歷史雨量再預報 (Re-forecast) 資料，並完成偏差修正與降尺度。ECMWF 展期預報模式之相關基本資訊如下：

1. 模式原始解析度：前 10 天為 T639L91 (32 km)，10 天後之預報解析度降低為 T319L91 (65 km)。
2. 模式輸出資料之水平解析度：0.8° × 0.8° 經緯度網格。
3. 系集成員數量：(1) 即時預報資料：51 個系集成員；(2) 歷史再預報資料：11 個系集成員。
4. 預報長度及產製頻率：每週一、四提供即時預報及歷史再預報資料，總預報長度共有 46 天。其中歷史再預報資料隨最新預報即時產生，為 20 年於相同 46 天時段之系集預報。

氣象局針對 ECMWF 展期雨量預報產品進行統計後處理 (Statistic post-processing, SPP)，包含即時預報資料與歷史預報資料，並以高解析格點 (1 km × 1 km) 方式提供水庫與攔河堰上游集水區未來 1 至 30 日雨量預報產品。以下針對：(1) ECMWF 展期雨量預報作業化 SPP、(2) ECMWF 展期雨量預報作業化 SPP 之時空解析度，與 (3) ECMWF 展期歷史雨量再預報資料 SPP，進行說明：

2.1 ECMWF 展期雨量預報作業化 SPP

ECMWF 展期雨量預報作業化 SPP 之主要目的為針對 ECMWF 即時雨量預報資料進行偏差修正與降尺度，進而提供高解析格點 (1 km × 1 km) 即時展期雨量預報。水庫與攔河堰集水區之雨量預報值，便可從集水區範圍內的高解析格點預報值加以平均，以獲得集水區之面積雨量預報值，再輸入至水文模式進行入流量推估。

氣象局於 2021 年 12 月起接收 ECMWF 即時展期雨量預報資料 (接收頻率為 2 次/週) 並啟動作業化 SPP。每當接收一筆新的 ECMWF 即時展期雨量

預報資料，便會同時帶進同期前 20 年的歷史雨量再預報 (Re-forecast) 資料。例如，2021/06/09 接收 1 筆即時雨量預報資料，同時亦接收到同期前 20 年 (2020/06/09, 2019/06/09, ..., 2001/06/09) 之 20 筆歷史雨量再預報資料。針對 ECMWF 即時雨量預報作業化 SPP 需要大量的歷史雨量再預報資料作為訓練樣本，採用的訓練樣本包含：(1) 前 20 年與預報起始日相同日期的歷史雨量再預報資料、(2) 預報起始日前 3 週的預報資料、(3) 同季節加減 15 日的所有歷史雨量再預報資料 (1998 ~ 2020)。前述「同季節」的季節區分方式為梅雨季 (5 ~ 6 月)、夏季 (7 ~ 9 月) 與枯水季 (10 ~ 4 月)。

即時雨量預報作業化 SPP 採用類比後處理 (Analog Post-Processing, APP) 進行 (Hamill and Whitaker, 2006)，其程序為 (1) 當接收一筆即時雨量預報 (格網預報雨量場，解析度 $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$)，(2) 從訓練樣本中挑選與即時雨量預報最類似 (近似) 的 20 筆歷史雨量再預報資料 (格網預報雨量場解析度， $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$)，(3) 從挑選出的 20 筆歷史雨量再預報資料，找出其對應 (類比) 的歷史觀測雨量資料 (格網觀測雨量場，解析度 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$)，視為 20 組雨量系集預報 (Ensemble Forecasts)。前述採用對應之解析度 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 格網觀測雨量場，便可達到偏差修正與降尺度之目的。

2.2 ECMWF 展期雨量預報作業化 SPP 之時空解析度

ECMWF 原始展期雨量預報輸出之空間解析度為 $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$ ，而觀測雨量則採高解析格點 ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$)。因此，透過 SPP 後，ECMWF 展期雨量預報產品之輸出方式為直接輸出高解析格點 ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) 預報值 (臺灣含離島地區共有 42,158 個格點)。因此，在水庫與攔河堰集水區之雨量預報應用上，可採用水庫與攔河堰集水區內之所有格點的雨量預報平均，作為水庫與攔河堰集水區之面積雨量預報值。

為取得各水庫與攔河堰集水區內之高解析格點位置，需套疊高解析格點位置與各水庫與攔河堰集水區邊界圖層，確認各水庫與攔河堰集水區內之所有格點位置。以圖 1 為例，套疊石門水庫集水區邊界與高解析格點位置，計算石門水庫集水區內所有格點的預報雨量平均值，即為石門水庫集水區之面積雨量預報值。

ECMWF 展期雨量預報產品 SPP 之時間尺度採

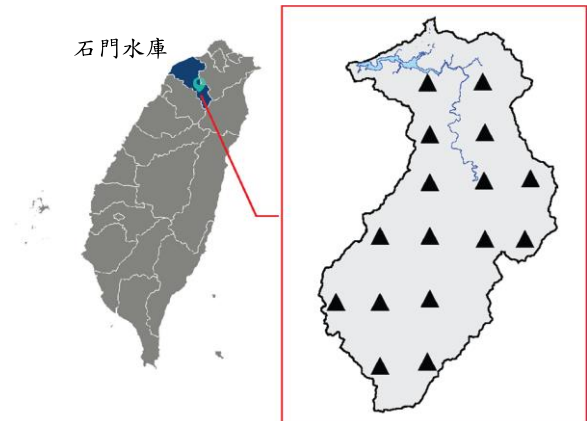


圖 1 套疊石門水庫集水區邊界與高解析格點位置 (示意圖)

用「7 日累積雨量」進行偏差修正與降尺度，並針對未來 1 至 30 天逐日的 7 日累積雨量預報值進行作業化 SPP，以提供未來第 1-7、2-8、3-9、...、23-29 與 24-30 天的 7 日累積雨量預報。未來 1 至 30 天逐日的 7 日累積雨量預報，其輸出結果包含：(1) 採用類比後處理 APP 與機率擬合平均 (Probability-Matched Mean) 方式推算之「單一決定性預報」與 (2) 20 個類比後處理 APP 校正後的系集預報 (Ensemble Forecasts)。本研究採用單一決定性預報之未來第 1-7、2-8、3-9、...、23-29 與 24-30 天的 7 日累積雨量預報值，依下列步驟轉換為：未來第 1、2、3、...、29 與 30 天逐日的日雨量預報值，再輸入至水文模式，進行未來 1 至 30 日展期流量預報。「未來 1 至 30 天逐日的 7 日累積雨量預報」轉換成「未來 1 至 30 天逐日的日雨量預報」，示意圖如圖 2 所示，方法與步驟敘述如下：

1. 計算未來第 1-7 天的 7 日累積雨量預報值的「平均日雨量值」，並將此平均日雨量值分配至未來第 1-7 天的每一天 (即未來第 1、2、3、...、6 與 7 天)。
2. 計算未來第 2-8 天的 7 日累積雨量預報值的「平均日雨量值」，並將此平均日雨量值分配至未來第 2-8 天的每一天 (即未來第 2、3、4、...、7 與 8 天)。
3. 以上述步驟的計算方式，持續將未來第 3-9、4-10、...、23-29 與 24-30 天的 7 日累積雨量預報值，分配至未來第 3-9、4-10、...、23-29 與 24-30 天的每一天。
4. 經上述步驟可計算出未來 1 至 30 天每一天的日雨量預報值：未來第 1 天有 1 筆、第 2 天 2 筆、第 3 天 3 筆、第 4 天 4 筆、第 6 天 6 筆、第 7-24 天

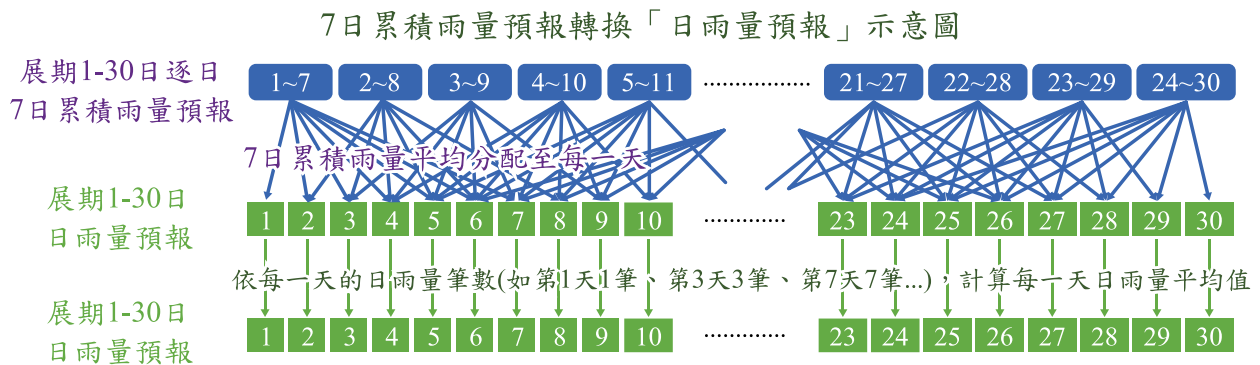


圖 2 未來 1 至 30 日逐日 7 日累積雨量預報轉換成日雨量預報

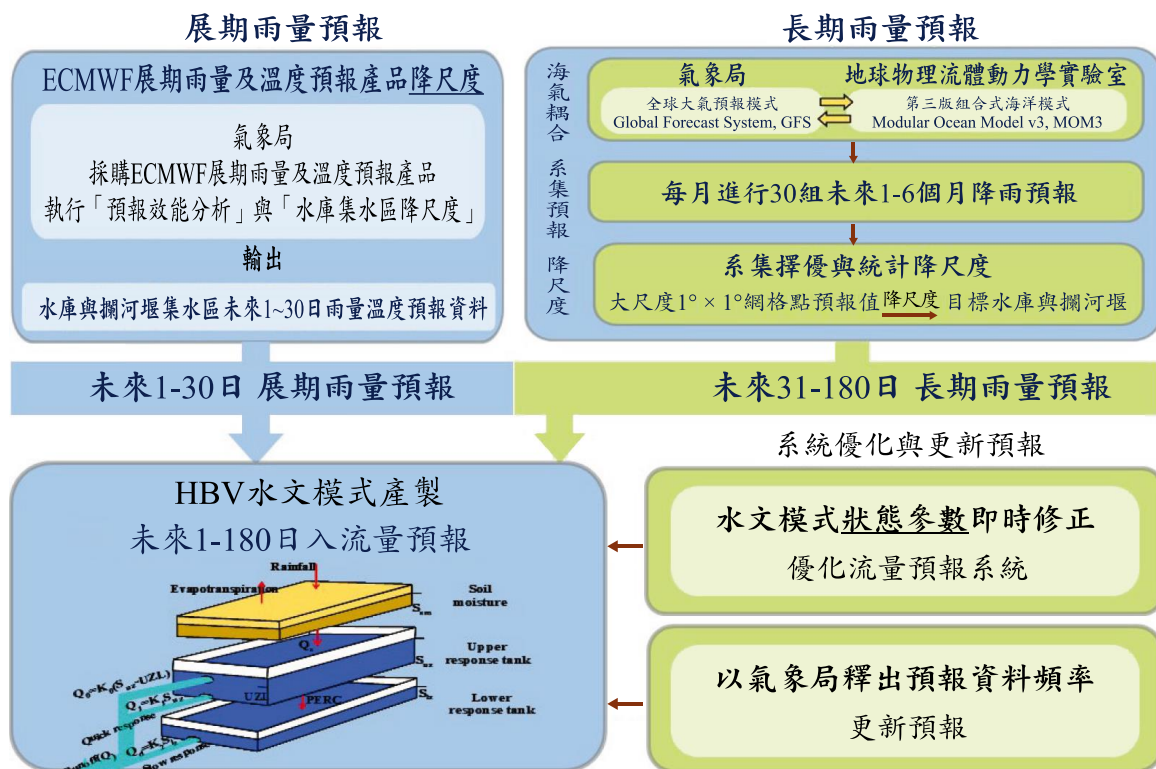


圖 3 整合展期與長期雨量預報進行流量預報之系統架構圖

每日均有 7 筆、第 25 天 6 筆、第 26 天 5 筆、第 27 天 4 筆、第 28 天 3 筆、第 29 天 2 筆、第 30 天 1 筆。

- 將前一步驟所計算的未來每一天的日雨量預報值，依每一天所分配到的預報筆數，計算每一天的平均預報值。例如，未來第 4 天的日雨量預報值有 4 筆，即平均此 4 筆預報值；未來第 24 有 7 筆預報值，則平均此 7 筆預報值。

以前述步驟便可轉換成未來第 1、2、3、...、29 與 30 天逐日的日雨量預報值，以利輸入至水文模式進行未來 1 至 30 日流量預報。

2.3 ECMWF 展期歷史雨量再預報資料 SPP

ECMWF 展期歷史雨量再預報資料 SPP 主要目的為針對歷史雨量再預報 (Re-forecast) 資料 (2000 ~ 2019) 進行偏差修正與降尺度，即將歷史雨量再預報資料以高解析格點 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 方式提供逐日的 7 日累積雨量預報。歷史雨量再預報資料 SPP 採用留一驗證 (Leave one out cross-validation, LOOCV) 方式進行，LOOCV 執行過程係針對「某一年」進行歷史雨量預報 SPP 時，會採用「其餘年」資料作為

訓練資料。例如，進行 2000 年歷史雨量預報 SPP 採用 2001-2019 年歷史雨量預報資料作為訓練樣本、進行 2001 年歷史雨量預報 SPP 則採用 2000 年與 2002-2019 年歷史雨量預報資料作為訓練資料、進行 2002 年歷史雨量預報 SPP 則採 2000-2001 年與 2003-2019 年歷史雨量預報資料作為訓練資料，以此類推。訓練資料是其餘 19 年同季節加減 15 日的所有歷史雨量再預報資料。同季節之季節區分方式為梅雨季 (5 ~ 6 月)、夏季 (7 ~ 9 月) 與枯水季 (10 ~ 4 月)。以前述方式進行歷史雨量再預報資料 SPP 便可獲得 2000 ~ 2019 年經偏差修正與降尺度至高解析格點 (1 km × 1 km) 之逐日的 7 日累積雨量預報資料，以供輸入水文模式進行歷史流量預報效能分析。

三、整合展期與長期雨量預報進行流量預報

為考量天氣型態之快速變化，採用前一節氣象局針對 ECMWF 展期雨量預報產品之降尺度成果，同時整合氣象局自行發展之全球海氣耦合模式 CWB1T1 長期雨量預報產品，輸入修正型 HBV 水文模式進行水庫與攔河堰入流量預報。整合展期與長期雨量預報進行流量預報之系統架構圖如圖 3 所示。分別獲得展期與長期經偏差修正與降尺度後之集水區預報雨量，融合展期與長期雨量預報產品，即未來 1 至 30 日雨量預報採用 ECMWF 展期雨量預報降尺度資料，而 31 至 180 日則採用長期雨量預報降尺度資料，將融合後的展期與長期的預報雨量，再輸入至修正型 HBV 水文模式，便可模擬未來 1 至 180 日的流量序列。

已發展之長期流量預報系統是採用氣象局全球海氣耦合模式 CWB1T1 長期預報產品 (雨量及溫度)，由格網點 (1° × 1°) 歷史預報值與集水區觀測值建立迴歸關係式，直接將預報值降尺度至集水區，並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，以預報水庫與攔河堰 1 至 6 個月入流量 (經濟部水利署水利規劃試驗所，2020；楊道昌等人，2021)。長期流量預報系統預報頻率已由原本每個月一次，增加至每旬一次，並於 110 年 10 月開始上線運作，啟動作業化服務，預報起始日固定為：每個月第 1 天、第 11 天與第 21 天更新最新預報結果，即每旬首日進行更新預報。同時配合氣象局提供的 ECMWF 展期雨量預報降尺度資料經轉換成未來 1 至 30 天逐日的日雨量預報後，整合展期與長期雨量預報進行流量預報，作業化進行方式說明如下 (經濟部水利署水利規劃試驗所，2022)：

以長期流量預報系統作業化預報起始日以每旬首日為基準，每旬首日 (每個月第 1 天、第 11 天與第 21 天) 定期更新預報 (預報頻率 3 次/月)。採用「最接近」預報起始日 (即每旬首日) 的 ECMWF 展期雨量預報降尺度資料 (經轉換後之未來 1 至 30 日逐日的日雨量預報)，取代長期雨量預報 (未來 1 至 180 日) 其前段未來 1 至 30 日的雨量預報結果。即未來 1 至 30 日雨量預報結果採用 ECMWF 展期雨量預報降尺度資料，而 31 至 180 日則為長期雨量預報資料。(實際取代日數會少於 30 日，視 ECMWF 降尺度預報產品之最新預報日期決定)。以前述步驟融合展期與長期的預報雨量，將融合後的預報雨量輸入修正型 HBV 水文模式，便可模擬(預報)未來 1 至 180 日的流量序列。融合展期與長期雨量預報資料進行流量預報方法之示意圖如圖 4 所示。

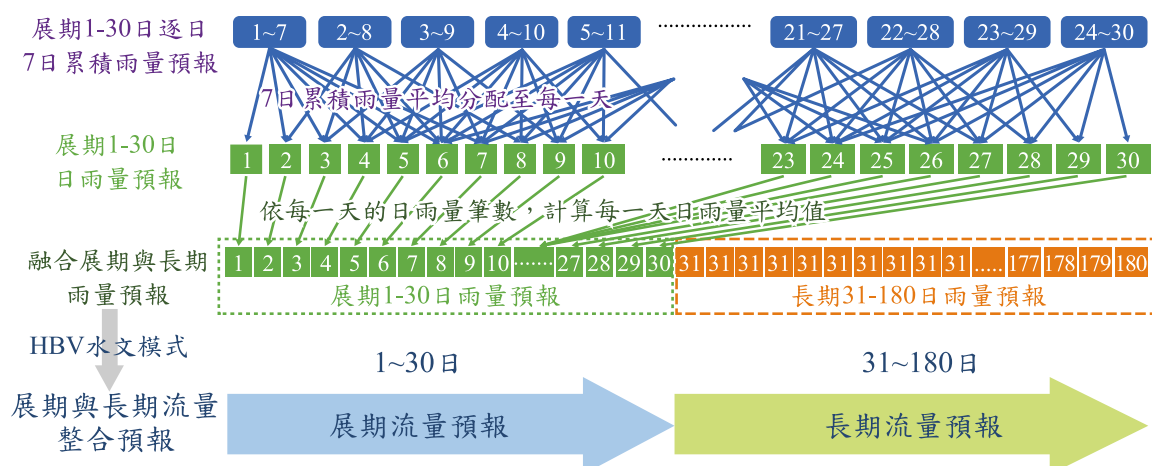


圖 4 融合展期與長期雨量預報資料進行流量預報之流程圖

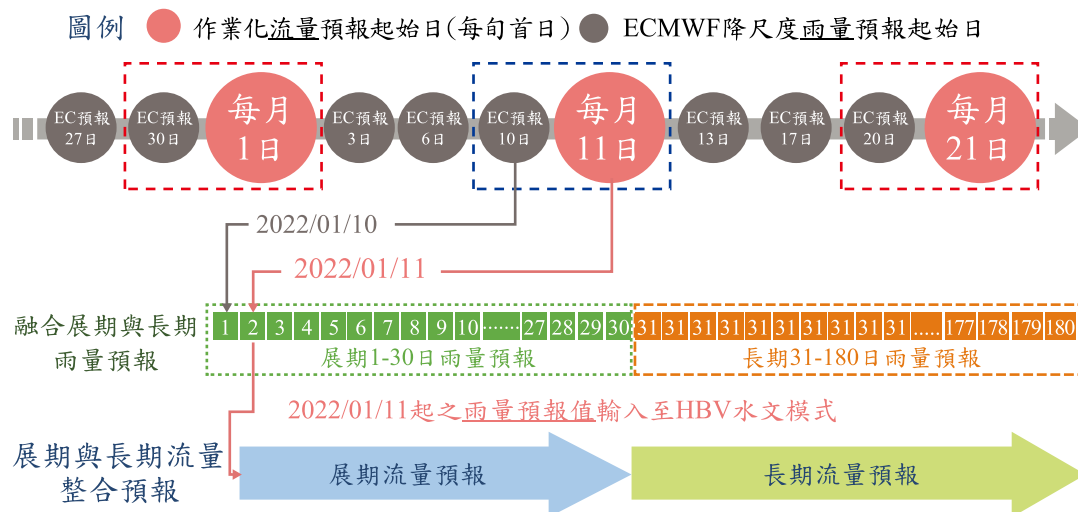


圖 5 整合展期與長期雨量預報資料進行流量預報之作業化方式

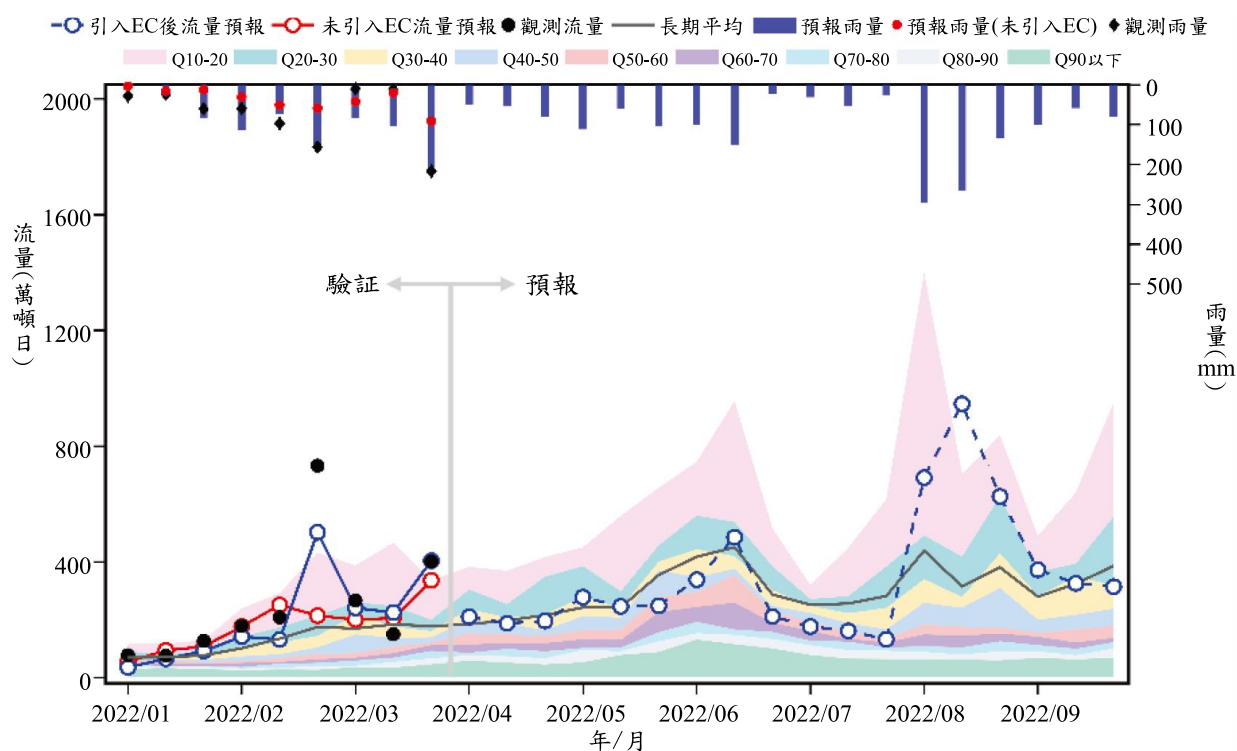


圖 6 德基水庫預報起始日 111 年 4 月 01 日之流量預報成果

整合展期與長期雨量預報資料進行流量預報之作業化方式如圖 5 所示。以 2022/01/11 作業化流量預報起始日為例進行說明：採用最接近作業化流量預報起始日 (2022/01/11) 的 ECMWF 降尺度預報資料 (2022/01/10 起未來第 1 至 30 日)，取其第 2 日 (2022/01/11) 至第 30 日的雨量預報值，取代長期雨量預報 2022/01/11 起未來 29 天的雨量預報結果。01/11 起未來 29 天後的雨量預報則延用長期雨量預

報結果，再將融合後的展期與長期預報雨量，輸入至修正型 HBV 水文模式進行流量預報。

民國 111 年 1 月 11 日起整合 ECMWF 展期雨量預報降尺度產品與長期雨量預報降尺度產品進行流量預報，每旬首日更新預報並將預報成果置於「長期水庫入流量預報暨乾旱監測」平台 (www2.hyd.ncku.edu.tw/mate/lab/季長期流量預報/首頁.htm)，供相關單位參考運用。圖 6 以德基水庫預報

起始日 111 年 4 月 01 日之預報成果 (含驗證) 為例，其中在驗證部分：紅色空心圓圈線條代表「未引入」ECMWF 展期雨量預報資料 (即採用長期雨量預報結果，以紅色實心圓圈表示) 之旬流量預報成果；藍色空心圓圈線條為「引入」ECMWF 展期雨量預報資料 (以藍色長條圖表示) 之旬流量預報成果，黑色實心圓圈則為旬流量觀測值。

圖中預報部分：預報雨量 (以藍色長條圖表示) 在第 1 ~ 3 旬為 ECMWF 展期雨量單一決定性預報結果，第 2-6 個月 (第 4 旬後) 為氣象局全球海氣耦合模式長期雨量預報之系集平均值。預報流量第 1 ~ 3 旬為採用 ECMWF 展期雨量單一決定性預報結果所模擬之流量，第 2-6 個月 (第 4 旬後) 為採用長期預報雨量各系集成員所模擬流量之系集平均值。圖中同時以不同顏色區間呈現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) 及長期歷史平均流量 (灰色線條) 供模式流量預報成果比較。

從圖中可對比 1 月第 1 旬至 3 月第 3 旬之旬流量預報結果，在 2 月的第 3 旬時，觀測流量因集水區降雨量突然增大而造成入流量迅速上升，此時引入 ECMWF 展期雨量預報資料之旬流量預報成果，較未引入 ECMWF 展期雨量預報資料之旬流量預報成果有相當明顯提升，顯示引進 ECMWF 展期雨量預報成果後，確實改善長期預報對短期劇烈天氣變化無法良好掌握之問題，有效提升長期流量預報結果在未來 1 至 30 日之預報準確度。

四、引入 ECMWF 歷史雨量預報結果進行流量預報效能分析

為針對引入 ECMWF 歷史雨量預報結果進行客觀且完整之流量預報效能分析，採用氣象局針對 ECMWF 展期歷史雨量再預報資料 (2000 ~ 2019)，輸入修正型 HBV 水文模式，進行滾動式入流量預報。配合 ECMWF 歷史雨量再預報次數，每次皆預報未來 1 ~ 30 日 (1 ~ 3 旬) 流量資料。預報效能分析方式採用「流量區間預報效能評估」方法進行歷史流量預報結果之效能評析。首先統計各水庫與攔河堰之歷年入流量預報第 1 ~ 3 旬各旬之 30 % 及 70 % 超越機率流量，例如：89 年 11 月 15 日預報第 1 ~ 3 旬 (89 年 11 月 16 日 ~ 12 月 15 日) 之日流量資料，則以歷年 11 月 16 日 ~ 12 月 15 日之入流量資料，統計預報第 1 ~ 3 旬各旬之 30 % 及 70 % 超越機率流

量，並以各旬 30 % 及 70 % 超越機率流量做為分界，區分為三個流量區間 (偏高、正常與偏低區間)。「有效預報」定義為觀測流量與預報流量位於相同流量區間。例如，89 年 11 月 15 日預報第 1 旬 (11 月 16 日 ~ 25 日) 的預報流量值與該旬的觀測流量值均位於正常區間時，此次預報為有效預報。

依據 ECMWF 歷史雨量再預報資料進行流量預報結果，與採用氣象局全球海氣耦合模式 CWB1T1 歷史雨量再預報資料進行流量預報結果，統計兩種方法預報第 1 ~ 3 旬其有效預報次數佔總預報次數之百分比，並分別以 (1) 豐水期、枯水期及全年期間以及 (2) 第 1 旬、第 2 旬與第 3 旬預報之面向，進行流量預報效能比較。

4.1 分別以豐水期、枯水期及全年期間進行流量預報效能比較

經統計前述兩種方法在各水庫與攔河堰豐水期、枯水期與全年期間預報第 1 ~ 3 旬之有效預報次數佔總預報次數百分比。豐水期間 ECMWF 歷史雨量預報產品之有效預報次數百分比大於 50 % 為：德基水庫 (57.9 %)、霧社水庫 (50.0 %)、集集攔河堰 (50.5 %) 等。大於 40 % 為：翡翠水庫 (43.0 %)、石門水庫 (47.3 %)、明德水庫 (43.9 %)、石岡壩 (41.6 %)、曾文水庫 (48.1 %)、南化水庫 (41.7 %)、高屏溪攔河堰 (42.9 %) 與牡丹水庫 (45.9 %) 等。各水庫與攔河堰於豐水期時效能表現平均值為 45.4 %，與同時期之長期流量預報第 1 ~ 3 旬結果進行比較，豐水期間各水庫與攔河堰引入 ECMWF 雨量預報降尺度產品之流量預報效能可有效提升 2.6 % ~ 13.8 % 之間，整體平均可提升 6.9 % 預報效能 (圖 7)。

枯水期間 ECMWF 歷史雨量預報降尺度產品之有效預報次數百分比大於 50 % 為：石門水庫 (60.7 %)、明德水庫 (51.8 %)、德基水庫 (59.8 %) 與集集攔河堰 (55.4 %) 等。大於 40 % 為：翡翠水庫 (48.4 %)、霧社水庫 (49.2 %)、石岡壩 (43.8 %)、曾文水庫 (45.0 %)、南化水庫 (44.3 %)、與高屏溪攔河堰 (49.6 %) 等。各水庫與攔河堰於枯水期時的效能表現平均值為 46.9 %。與同時期之長期流量預報第 1 ~ 3 旬結果進行比較，枯水期間各水庫與攔河堰引入 ECMWF 雨量預報降尺度產品之流量預報效能可有效提升 2.4 % ~ 14.9 % 之間，整體平均可提升 6.2 % 預報效能 (圖 8)。

全年期間 ECMWF 歷史雨量預報降尺度產品之有效預報次數百分比大於 50 % 為：石門水庫 (54.3 %)、

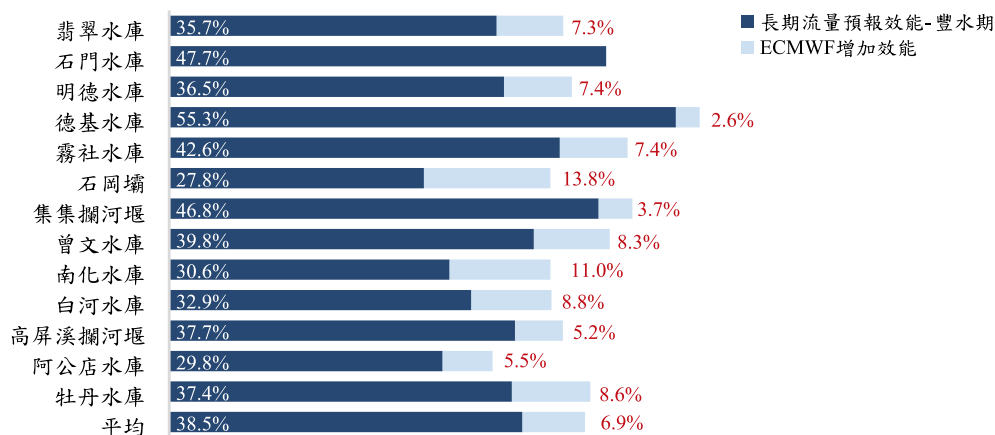


圖 7 引入 ECMWF 展期雨量預報產品進行流量預報與長期流量預報第 1 ~ 3 句之效能比較 (豐水期)

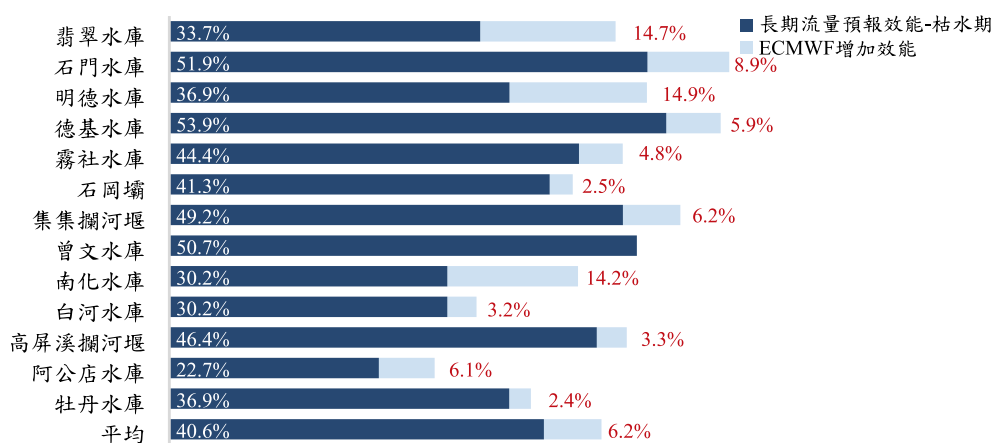


圖 8 引入 ECMWF 展期雨量預報產品進行流量預報與長期流量預報第 1 ~ 3 句之效能比較 (枯水期)

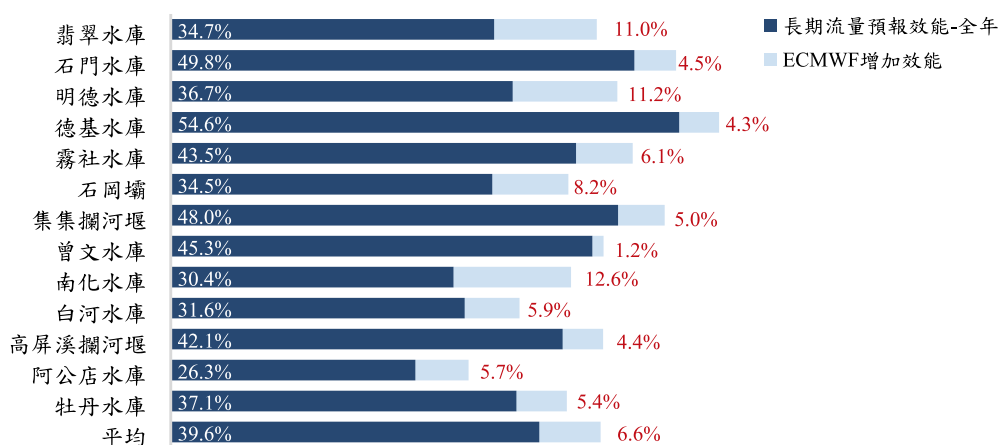


圖 9 引入 ECMWF 展期雨量預報產品進行流量預報與長期流量預報第 1 ~ 3 句之效能比較 (全年)

德基水庫 (58.9 %) 與集集攔河堰 (53.0 %) 等。大於 40 % 為：翡翠水庫 (45.8 %)、明德水庫 (48.0 %)、霧社水庫 (49.6 %)、石岡壩 (42.7 %)、曾文水庫 (46.5 %)、南化水庫 (43.0 %)、高屏溪攔河堰 (46.4 %) 與牡丹水庫 (42.5 %) 等。各水庫與攔河堰全年的效

能表現平均值為 46.1 %。與同時期之長期流量預報第 1 ~ 3 句結果進行比較，全年之各水庫與攔河堰引入 ECMWF 雨量預報降尺度產品之流量預報效能可有效提升 1.2 % ~ 12.6 % 之間，整體平均可提升 6.6 % 預報效能 (圖 9)。

4.2 分別以預報第 1~ 3 句進行流量預報效能比較

經統計兩種方法在各水庫與攔河堰每次預報第 1 句、第 2 句與第 3 句之有效預報次數佔各句總預報次數百分比。ECMWF 歷史雨量再預報產品進行流量預報在第 1 句預報結果之效能表現平均值為 52.7%。與長期流量預報第 1 句結果進行比較，預報第 1 句各水庫與攔河堰引入 ECMWF 雨量預報產品預報效能可有效提升 3.1%~17.6%之間，整體平均可提升 9.9%預報效能 (圖 10)。ECMWF 歷史雨量再預報產品進行流量預報在第 2 句預報結果之效能表現平均值為 44.8%，與長期流量預報第 2 句結果進行比較，預報第 2 句各水庫與攔河堰引入 ECMWF 雨量預報產品預報效能可有效提升 0.7%~13.2%之間，整體平均可提升 6.3%預報效能 (圖 11)。ECMWF 歷

史雨量再預報產品進行流量預報在第 3 句預報結果之效能表現平均值為 40.9%，與長期流量預報第 3 句結果進行比較，預報第 3 句各水庫與攔河堰引入 ECMWF 雨量預報產品預報效能可有效提升 0.4%~10.8%之間，整體平均可提升 3.5%預報效能 (圖 12)。

綜上分析，各水庫與攔河堰引入 ECMWF 展期雨量預報產品進行流量預報，相較於長期流量預報結果，預報效能分析綜整如表 2 所示。以豐水期表現而言，各水庫與攔河堰之預報效能可增加 2.6%~13.8% (平均值為 6.9%)；枯水期時，預報效能可增加 2.4%~14.9% (平均值為 6.2%)；而以全年來看，預報效能可增加 1.2%~12.6% (平均值為 6.6%)。另分別以不同預報前置時間 (預報第 1、2、3 句) 之結果進行分析，各水庫與攔河堰第 1 句預報效能可提升 3.1%~17.6% (平均值為 9.9%)，第 2 句預報

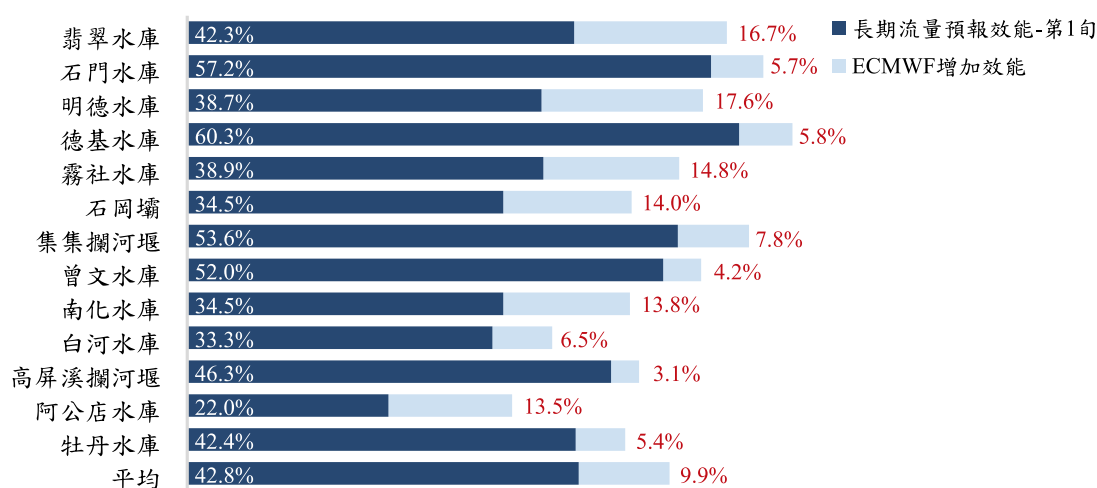


圖 10 引入 ECMWF 展期雨量預報產品進行流量預報與長期流量預報第 1 句之效能比較

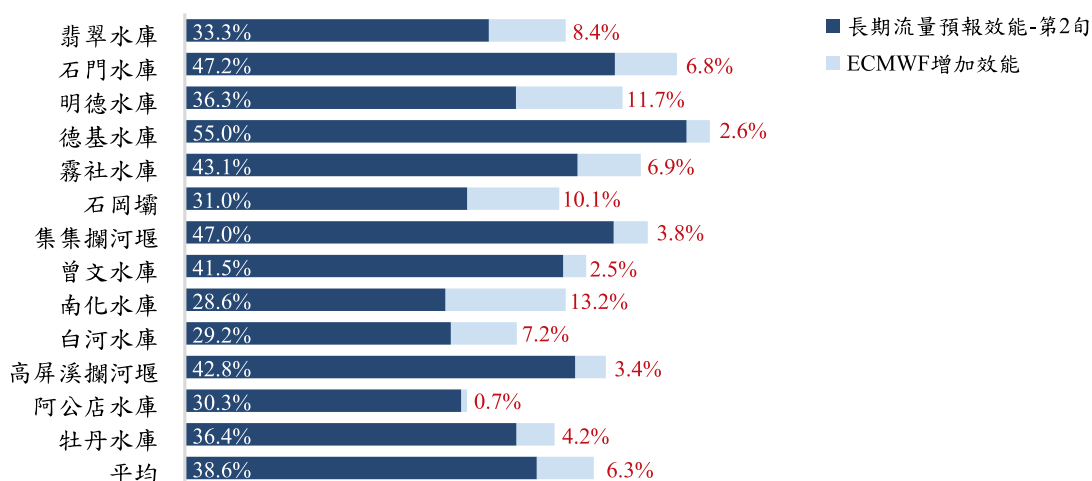


圖 11 引入 ECMWF 展期雨量預報產品進行流量預報與長期流量預報第 2 句之效能比較

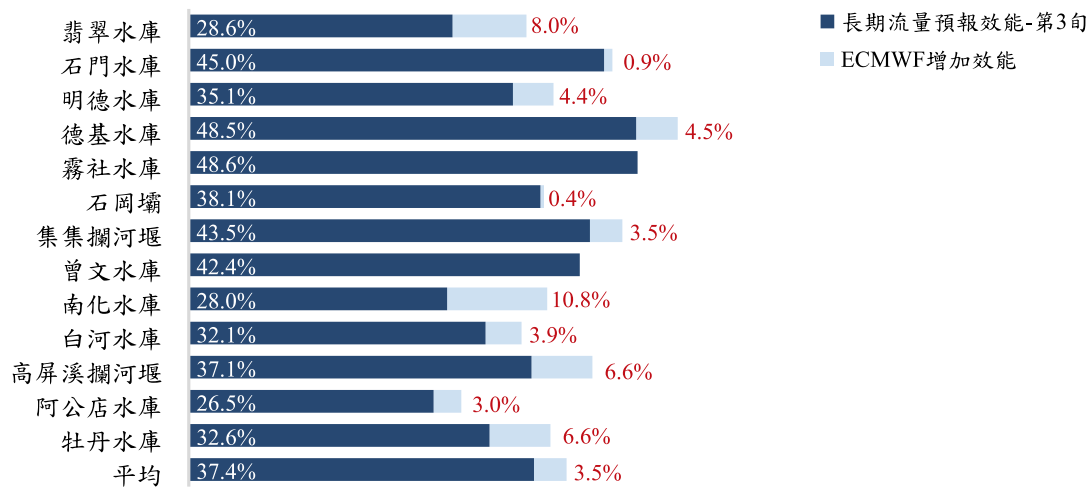


圖 12 引入 ECMWF 展期雨量預報產品進行流量預報與長期流量預報第 3 句之效能比較

表 2 各水庫與攔河堰引入 ECMWF 雨量預報降尺度產品進行流量預報之效能分析綜整表

預報效能 (相較長期流量預報第 1~3 句)	預報期間		
	豐水期	枯水期	全年
提升百分比範圍	2.6 % ~ 13.8 %	2.4 % ~ 14.9 %	1.2 % ~ 12.6 %
平均提升百分比	6.9 %	6.2 %	6.6 %
預報效能 (相較長期流量預報第 1、2、3 句)	預報前置時間		
	第 1 句	第 2 句	第 3 句
提升百分比範圍	3.1 % ~ 17.6 %	0.7 % ~ 13.2 %	0.4 % ~ 10.8 %
平均提升百分比	9.9 %	6.3 %	3.5 %

效能可提升 0.7 % ~ 13.2 % (平均值為 6.3 %)，第 3 句預報效能則可提升 0.4 % ~ 10.8 % (平均值為 3.5 %)。預報準確度依不同水庫與攔河堰集水區、不同季節 (豐、枯水期)、不同預報前置時間 (第 1、第 2、第 3 句) 會有所差異。整體平均而言，本研究引進展期雨量預報進行流量預報，相較採用長期雨量預報進行流量預報，其預報準確度約提升 6.6 %。

前述分析成果顯示：引入 ECMWF 展期 (1~30 日) 雨量預報產品，相較採用氣象局全球海氣耦合模式長期雨量預報降尺度產品，在預報水庫與攔河堰未來第 1~3 句之入流量結果，以引入 ECMWF 展期 (1~30 日) 雨量預報降尺度產品之流量預報表現較佳。因此，以展期雨量預報取代同預報時段之長期雨量預報產品進行流量預報，可顯著增加未來第 1~3 句之流量預報效能，提升掌握短期天氣型態快速變化導致入流量變化趨勢之能力。

五、結論與未來工作

本研究整合展期與長期雨量預報產品進行全臺

重點水庫流量預報，透過建置流量預報作業化程序，於每旬首日 (每個月第 1 天、第 11 天與第 21 天) 定期更新預報，採用最接近預報起始日 (即每旬首日) 之 ECMWF 展期雨量預報降尺度資料 (未來 1 至 30 日)，取代長期雨量預報其前段未來 1 至 30 日雨量預報結果，再輸入修正型 HBV 水文模式進行未來 1~180 日入流量預報，供相關單位參考運用。

經採用 ECMWF 歷史雨量再預報資料進行流量預報，與採用氣象局全球海氣耦合模式 CWB1T1 雨量預報資料進行流量預報，統計兩種方法預報第 1~3 句其有效預報次數佔總預報次數之百分比進行比較，無論以豐水期、枯水期與全年之角度，或以預報第 1 句、第 2 句與第 3 句之情況下，引入 ECMWF 展期雨量預報產品，相較採用全球海氣耦合模式長期雨量預報產品，在預報水庫與攔河堰未來第 1~3 句之入流量結果，以引入 ECMWF 展期雨量預報產品之流量預報表現較佳。因此，引進 ECMWF 展期雨量預報成果後，確實改善長期預報對短期劇烈天氣變化無法良好掌握之問題，可有效提升長期流量預報結果在未來 1 至 30 日之預報準確度。整合展期與長期雨量預報產品輸入水文模式進行未來 1~180

日水庫入流量預報，除能提升未來 3 旬面對天氣型態快速變化之能力外，亦能兼顧長期未來第 2~6 個月之水庫入流量發展情勢。

現階段流量預報成果已導入「南區水資源營運管理智慧決策系統」進行未來情境下水資源調度模擬（經濟部水利署南區水資源局，2022），輔助抗旱時期行動方案之決策參考。未來工作將引進氣象局開發的其它展期雨量預報（如美國 NCEP GEFSv12）與長期雨量預報（歐洲 ECMWF SEAS5）降尺度產品，整合多模式雨量預報產品進行流量預報，以提升預報準確性。另外，本研究採用 ECMWF 展期雨量預報產品為 7 日累積雨量預報值，以簡易平均分配方式獲得日雨量序列輸入水文模式進行流量模擬。為能進一步考量台灣的降雨型態以合理分配 7 日累積雨量預報值，未來研究可針對不同月份或季節之觀測雨量資料，採用機器學習法建立 7 日累積雨量及其每日雨量之降雨型態分布關係，以後續運用在將 7 日累積預報雨量分配至各日後輸入水文模式進行流量預報作業。

本研究引進 ECMWF 展期雨量預報對於反應快速天氣變化對流量預報之影響，相較長期預報已具成效但仍有精進空間。由於 ECMWF 與 CWB1T1 雨量預報產品為全球模式產出，對於反應快速變化的天氣系統不如區域模式預報產品，未來工作可導入由區域模式產出之未來 1 至 5 日定量降雨預報，以提升面對天氣系統迅速變化時預報水庫與攔河堰流量之準確度，朝向整合短期、中期、展期與長期雨量預報進行流量預報之目標。

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」（2021~2023）、「水庫集水區流量預報技術整合暨推廣應用」（2022），以及行政院農業委員會「農業水資源之農業氣象產品客製化研發」（2023）計畫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, “Skillful Seasonal Forecasts of Streamflow over Europe?,” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 2057-2072, 2018.
2. Baker, S. A., A. W. Wood, and B. Rajagopalan, “Developing Subseasonal to Seasonal Climate Forecast Products for Hydrology and Water Management,” *Journal of the American Water Resources Association*, 55(4), 1024-1037, 2019.
3. Bell, V. A., H. N. Davies, A. L. Kay, A. Brookshaw, and A. A. Scaife, “A National-scale Seasonal Hydrological Forecast System: Development and Evaluation over Britain,” *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 4681-4691, 2017.
4. Candogan Yossef, N., R. van Beek, A. Weerts, H. Winsemius, M. F. P. Bierkens, “Skill of A Global Forecasting System in Seasonal Ensemble Streamflow Prediction,” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 4103-4114, 2017.
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. Graham, R. M., J. Browell, D. Bertram, and C. J. White, “The Application of Sub-seasonal to Seasonal (S2S) Predictions for Hydropower Forecasting,” *Meteorological Applications*, 29(1), e2047., 2022.
7. Hamill T. H., and J. S. Whitaker, “Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasts Based on Reforecast Analog: Theory and Application,” *Monthly Weather Review*, 134, 3209-3229, 2006.
8. Meißner D., Klein B., and Ionita M., “Development of A Monthly to Seasonal Forecast Framework Tailored to Inland Waterway Transport in Central Europe,” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6401-6423, 2017.
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. Quedi, E. S., F. M. Fan, “Sub Seasonal Streamflow Forecast Assessment at Large-scale Basins,” *Journal of Hydrology*, 584, 124635, 2020.
11. Senatore A., Fuoco D., Sanna A., Borrelli A., Mendicino G., Gualdi S., “Evaluation of An Integrated Seasonal Forecast System for Agricultural Water Management in Mediterranean Regions,” In: Sergeyev Y., Kvasov D. (eds) *Numerical Computations: Theory*

- and Algorithms, NUMTA, 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11973. Springer, Cham, 2020.
12. Svensson, C., A. Brookshaw, A. A. Scaife, V. A. Bell, J. D. Mackay, C. R. Jackson, J. Hannaford, H. N. Davies, A. Arribas, and S. Stanley, "Long-range Forecasts of UK Winter Hydrology," *Environmental Research Letters*, 10(6), 064006, 2015
 13. Viel C., A. L. Beaulant, J. M. Soubeyroux, and J. P. Céron, "How Seasonal Forecast Could Help A Decision Maker: An Example of Climate Service for Water Resource Management," *Adv. Sci. Res.*, 13, 51-55, 2016.
 14. Vitart, F., and Co-authors, "The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 163-173, 2017.
 15. Vitart, F., "Evolution of ECMWF Sub-seasonal Forecast Skill Scores," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140, 1889-1899, 2014.
 16. White, C. J., S. W. Franks, D. McEvoy, "Using Subseasonal-to-seasonal (S2S) Extreme Rainfall Forecasts for Extended-range Flood Prediction in Australia," *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 370, 229-234, 2015.
 17. White, C. J., and Co-authors, "Potential Applications of Subseasonal-to-seasonal (S2S) Predictions," *Meteorological Applications*, 24, 315-325, 2017.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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。
 21. 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。
 22. 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。
 23. 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。
 24. 陳孟詩：「中央氣象局月季長期天氣展望之預報校驗」，天氣分析與預報研討會，2010。
 25. 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。
 26. 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。
 27. 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。
 28. 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。
 29. 經濟部水利署水利規劃試驗所：「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，2022。
 30. 經濟部水利署南區水資源局：「南部地區水資源營運管理智慧決策支援平台建置」，經濟部水利署南區水資源局，2022。