

雷達降雨驅動下之 WRF-Hydro 模式校驗分析

Calibration and Validation of WRF-Hydro Driven by Radar Precipitation

國立中興大學土木工程學系

研究生

劉建均

Jian-Jun Liu

教授

陳佳正

Chia-Jeng Chen

摘 要

雷達降雨推估技術已日臻完善，如臺灣 Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors (QPESUMS) 可提供高時空解析度(0.0125° 和 10 分鐘) 之降雨資料，對於各種水文氣象應用展現其價值。本研究欲分析 QPESUMS 於分散式水文模式在極端事件下之流量模擬表現，水文模式選用 Weather Research and Forecasting Model-Hydrological modeling system (WRF-Hydro)，為天氣研究與預報(WRF)模式中水文模組的擴展，可更良好的反映水文收支和陸面-大氣互動之機制。本研究以 QPESUMS 驅動 WRF-Hydro 於高屏地區，並對模式中各地貌條件(如土地利用與土壤性質)與各項參數(如曼寧 n 值與各土壤性質參數)進行調校，藉此提高流量模擬之準確性；校驗後之模擬流量亦會與耦合 WRF-WRF-Hydro 產出之模擬流量進行比對分析。後續將會把流量結果輸入至二維水理模式中進行區域溢淹模擬分析。

關鍵詞：水文模式，水理模式，模式耦合，雷達降雨

Abstract

The technology for radar-based quantitative precipitation estimation (QPE) has significantly advanced, exemplified by Taiwan's Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors (QPESUMS). QPESUMS provides high spatiotemporal resolution (0.0125 degree and 10 minutes) rainfall data, demonstrating its value for various hydrometeorological applications. This study aims to analyze the performance of QPESUMS-driven flow simulations under extreme events using a distributed hydrological model. The chosen model is the Weather Research and Forecasting Model-Hydrological modeling system (WRF-Hydro), an extension of the hydrological module in the Weather Research and Forecasting (WRF) model, which better reflects hydrological processes and land-atmosphere interactions. The study uses QPESUMS to drive WRF-Hydro in the Gaoping area and calibrates various geomorphological conditions (such as land use and soil properties) and parameters (such as Manning's n value and soil property parameters) within the model to improve the accuracy of flow simulations. The calibrated simulated flows will be compared with simulated flows produced by the coupled WRF-WRF-Hydro model. Subsequently, the flow results will

be input into a two-dimensional hydraulic model for regional flood simulation analysis.

Keywords: WRF, WRF-Hydro, Model coupling, QPESUMS

一、前言

為了生成可靠性更高的洪水預報，提高降雨推估準確性是首要工作，現今降雨推估多依賴雷達、雨量計、遙測以及模式產製之降雨產品，然而各降雨產品時常存在偏差，若再以此降雨驅動水文、淹水模式時偏差可能會被放大(Wehbe et al., 2019)。於臺灣地區而言，Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors (QPESUMS)雷達降雨資料擁有高時空解析度，可用於分散式水文模型，如 Weather Research and Forecasting Model-Hydrological modeling system (WRF-Hydro)，能夠更好的反應降雨-逕流情勢(Lijun Chao et al., 2021)。與中尺度數值天氣預報模式(即 WRF)產製之模擬降雨相比，QPESUMS 降雨數據更能準確地預測和模擬洪水。

WRF-Hydro 為基於 WRF 之水文擴充系統，是考慮地表水及地下水橫向再分配的多尺度三維地表水文模擬系統，WRF-Hydro 可以與氣象資料獨立運行，亦能作為耦合模型進行大氣與陸地反饋之研究，許多結果表明，耦合 WRF-WRF-Hydro 可改善降水和水文的模擬(Wei et al., 2022; Givati et al., 2016)；進行單向耦合時，是將 WRF 模式輸出變數(雨量、溫度、濕度等)視為 WRF-Hydro 之輸入進行模式運算，全耦合型態是基於單向耦合上，將 WRF-Hydro 計算之土地變數回饋給 WRF，進一步影響下一個時間步運算。儘管如此，由於陸地表面模型(Land Surface Models, LSM)的複雜性，WRF-Hydro 中的一些參數是固定的，因此在逕流生成中，敏感參數的校準週期仍然是重中之重。

本研究欲校準模式中各地貌條件與參數(土地利用、曼寧 n 值與各土壤性質參數)，進行系列敏感性分析，以此提高模擬流量之準確性，校驗後之模擬流量亦會與耦合 WRF-WRF-Hydro 產出之模擬流量進行比對分析。後續將會把流量結果輸入至二維水理模式中進行區域溢淹模擬分析。

二、研究區域與資料

2.1 研究區域

本研究區域為高屏溪流域，流域面積廣達 3627 平方公里，擁有全台最大流域面積，亦為全台第二長之河川，流經高雄市及屏東縣，由荖濃溪、旗山溪、隘寮溪、濁口溪及美濃溪所組成。地理位置於北回歸線以南，東北面向中央山脈、玉山山脈及阿里山山脈，地勢由東北向西南傾斜遞減，最終流入臺灣海峽。氣候方面為夏季頻繁降雨，冬季背對東北季風溫暖乾燥，屬於熱帶季風氣候，受梅雨及颱風影響，5 月至 10 月降雨量約佔全年之 90%，降雨空間分布極不平均，流量豐枯顯著。模擬流量結果以水利署水文資訊網提供之時流量為基礎，經河川局完成年度率定曲線後，利用系統將已審核的即時水位資料轉換為即時流量值，作為驗證對象(如圖 2-1)。

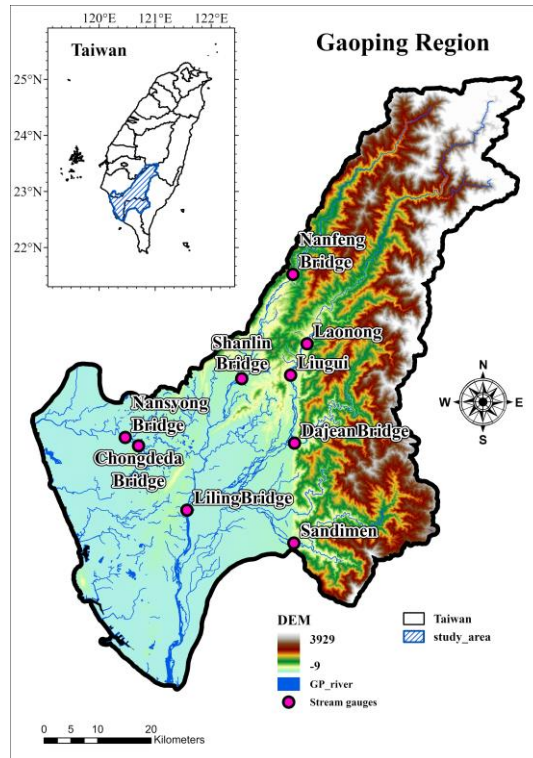


圖 2-1 研究區域

2.2 降雨量資料

本研究使用之降雨資料為中央氣象署(Central Weather Administration, CWA)與美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)共同開發建置之劇烈天氣監測系統(QPESUMS)，結合氣象雷達、雨量站等多元觀測資料及地利資訊系統，資料由最低仰角合成回波(Mosaic Hybrid Scan Reflectivity)利用回波(Z)與降雨率(R)間之關係式取得之降雨估算(Cheng et al., 2021)，經雨量站觀測修正後，產生降雨估計的格點化整合產品，時空解析度為(0.0125°和 10 分鐘)。

2.3 土地利用資料

本研究土地利用資料採用內政部國土測繪中心(National Land Surveying and Mapping Center, NLSC)公佈之 2015 年土地利用數據，此數據透過高解析度航拍影像、地籍圖、台灣通用電子地圖等多種參考圖資，並結合部分外業調查，全面且持續地調查土地利用現況的變化，以便進行合理的土地利用規劃，NSLC 將全臺土地利用型態分為十類，分別是都市和建地(Urban)、旱田(Dryland)、水田(Irrigated Cropland)、草地(Grassland)、荒地(Shrubland)、墓地(Mixed Shrubland)、林地(Mixed Shrubland)、水體(Water Bodies)、濕地(Wetland)及裸露地(Barren)(如圖 2-2)。

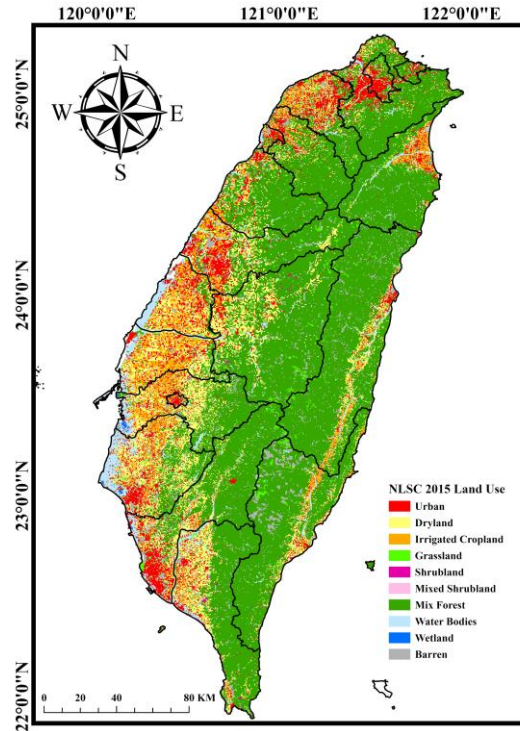


圖 2-2 台灣本島土地利用資料

三、研究方法

3.1 WRF-Hydro 模式

本研究中使用 WRF-Hydro 模式，該模式的開發改善了傳統一維陸面模型在處理複雜土地和水文過程中的限制，提供更加靈活和精確的模擬能力(如圖 3-1)。WRF-Hydro 通過整合地表流、地下流、河道流和基流模型，能夠更全面地描述水文過程的空間分佈和時間變化(Gochis et al., 2020)。這使得模型在預測降雨引發的洪水、評估水資源和土地利用變化等方面具有更高的準確性和實用性。模型的多尺度三維模擬模式進一步提高了土壤垂直結構的模擬精度，克服了僅有一層結構所帶來的局限性，從而更好地反映土壤的水分動態和能量交換過程。此外，WRF-Hydro 的耦合模式還支持與大氣模型的雙向耦合，使得模擬結果能夠更好地捕捉土地表面與大氣之間的相互作用。

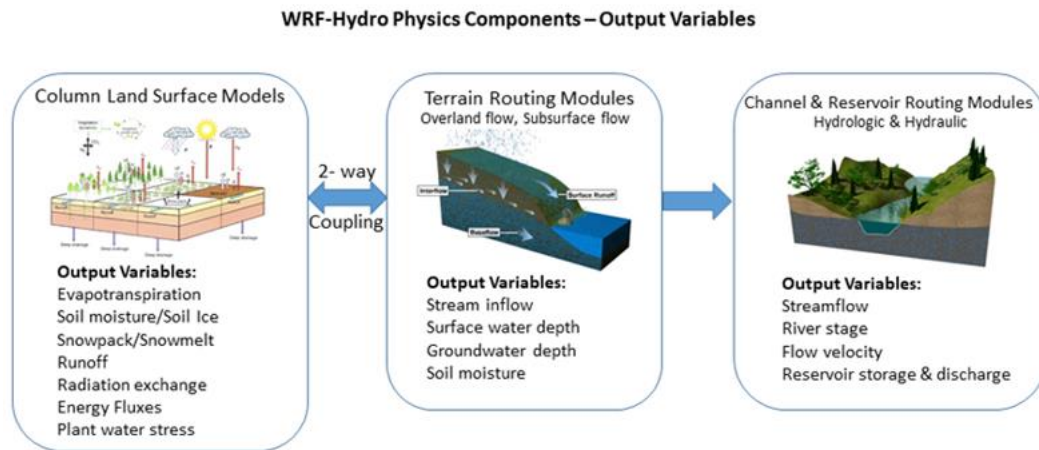


圖 3-1 WRF-Hydro 物理參數和相關輸出概念圖(資料來源：Gochis et al., 2020)

如今 WRF-Hydro 已能兼容不同尺度和解析度的地球系統模型，擴展了其在水資源管理、洪水預警及氣候變遷研究中的應用範疇。但受 LSM 複雜性的限制，在徑流生成過程中，對於敏感參數的校準周期仍然是至關重要的。如 Wang et al. (2022) 使用 Kriging with external drift (KED) 內插工具融合氣象雷達和雨量計觀測數據，用以提升 WRF 降雨強迫(Rainfall forcing)數據，而後使用融合後之數據來調校 WRF-Hydro 的關鍵參數。Lin and Cheng (2016) 利用 Global Land Data Assimilation System (GLDAS) 產品初始化土壤濕度，並且更新 WRF 由聯合國糧食及農業組織(Food and Agriculture Organization of the United Nation, FAO)依照 16 種土壤類型數據合併之土壤質地及土壤參數，更新後的數據是由行政院農業委員會根據 USDA Soil Survey Geographic Database (SSURGO) 之標準進行現地調查所彙整而成，解析度為 0.00833° ，結果顯示使用 GLDAS 產品同時調整土壤質地與參數更佳吻合觀測資料。本研究將臺灣土壤種類分為 8 類，分別是 Sand、Loamy sand、Sandy loam、Silt loam、Loam、Sandy clay loam、Silty clay loam 及 Silty clay，更新前後土壤種類如圖 3-2 所示，同時將 WRF 降雨強迫數據重新網格化為 QPESUMS 降雨數據，以此為基礎作為 WRF-Hydro 模式輸入進行調校，校驗後之模擬流量亦會與耦合 WRF-WRF-Hydro 進行比較分析

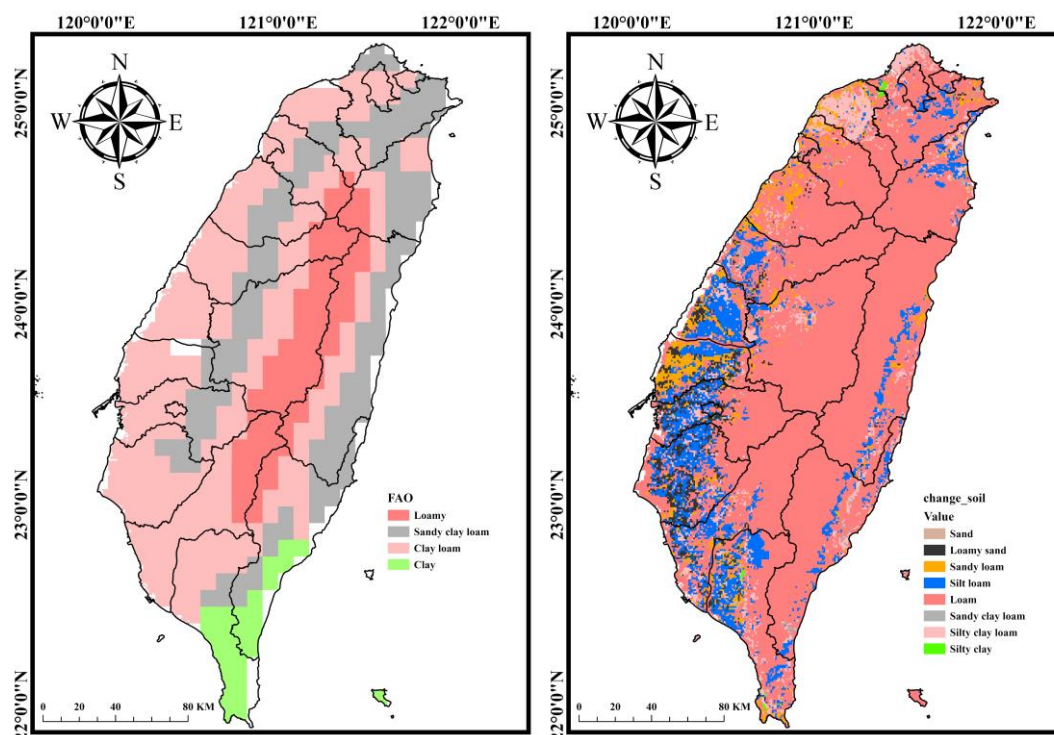


圖 3-2 更新前後臺灣土壤分類圖

3.2 模式調校

WRF-Hydro 模式中有許多水文及土壤參數，需要根據研究區域的水文特徵進行調整或校準。本研究參考 Yu et al. (2023)與 Kishné et al. (2017)，優先選擇較敏感的 6 個參數進行測試，詳細參數如表 3-1 所示。

表 3-1 較敏感參數表

Parameter	Definition	Unit
MAXSMC	Soil water content at saturation or soil porosity	m^3/m^3
SATDK	Saturated hydraulic conductivity	m/s
REFSMC	Soil water content at field capacity	m^3/m^3
DRYSMC	Soil water content threshold for ceasing evaporation from top soil layer	m^3/m^3
OVROUGHHR	Multiplier on Manning's roughness	Dimensionless
mann	Channel Manning roughness	Dimensionless

為了調校模型，本研究使用逐步方式，單獨校準表 3-1 中的所有參數，並保留校準值於後續步驟，最後根據模式運行結果與觀測值之關係進行下一步的調校。

3.3 研究成果評估

為進行研究成果之評估，本研究以前述 4 個流量測站之觀測數據作為依據，並且以相關係數(Correlation Coefficient, CC)、偏差(Bias)、方均根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)三評估指標進行驗證，其方程式如式 3-1 至 3-3 所示。

$$\text{Correlation Coefficient} = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (3-1)$$

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i) \quad (3-2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2 / n} \quad (3-3)$$

式中 O_i 為觀測數據； M_i 為模式模擬數據； $\bar{O}$ 和 $\bar{M}$ 為觀測和模式模擬數據之平均值； n 為資料總數。

四、初步成果

於模式調校前，已更新 WRF 中 FAO 4 種土壤種類(clay loam, sandy clay loam, loamy and clay)為臺灣現今的 8 種，土地利用也替換為 NLSC 公佈之 2015 年土地利用，並重新區分為 10 類。降雨數據由原本 WRF 模式產生，替換為 QPESUMS 雷達降雨數據。圖 4-1 為 WRF 原始累積雨量與 QPESUMS 雷達降雨時空分布圖，降雨事件為 2021 年盧碧颱風。經由兩種雨量驅動 WRF-Hydro 後，QPESUMS 雷達數據較能捕捉到流量變化，與測站相關係數較高，但如今 QPESUMS 雷達數據驅動之模擬流量值有明顯高估趨勢(圖 4-2)，偏差與均方根誤差皆過大，之後將會依照較敏感之參數(表 3-1)依序進行調校。

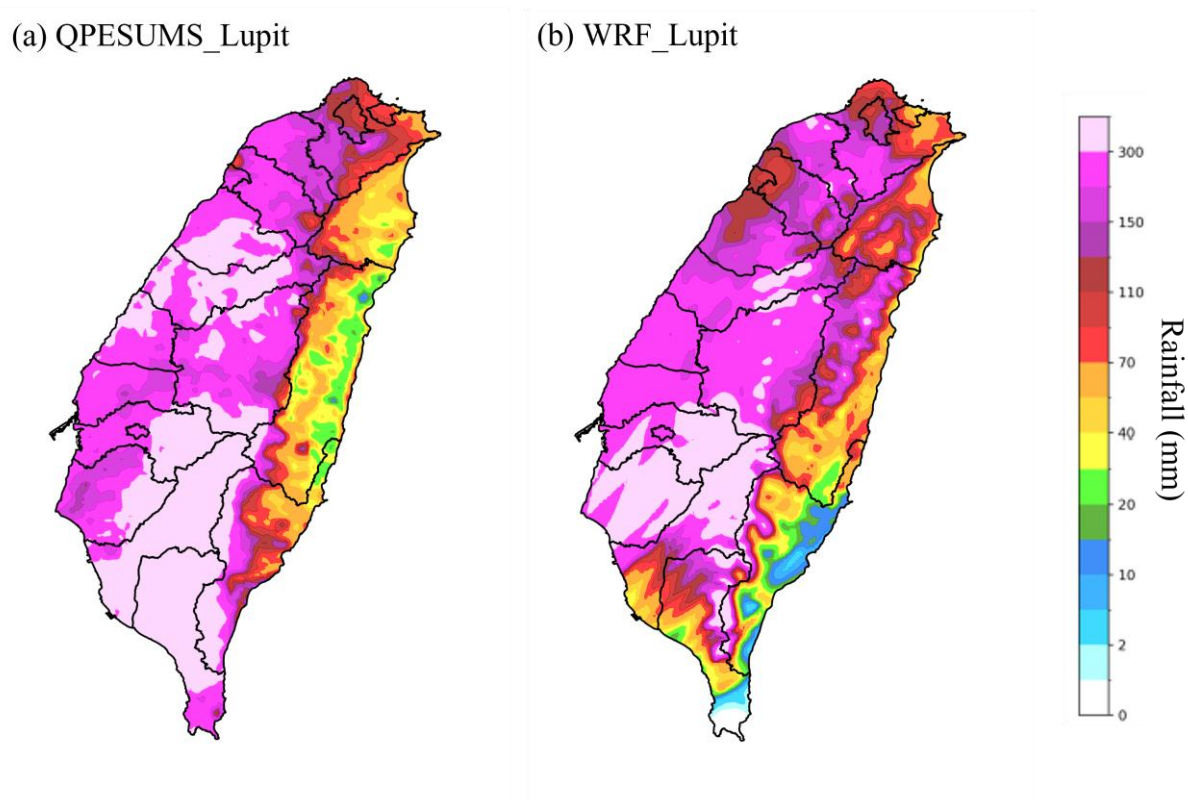


圖 4-1 2021 年盧碧颱風 84 小時累積降雨量；(a)QPESUMS、(b)WRF

表 4-1 各事件流量評估指標

Event	Gauge	Rainfall data	CC	Bias	RMSE
Lupit	Dajean Bridge	WRF	-0.200	-168.689	600.129
		QPESUMS	0.765	435.559	855.987
	Shanlin Bridge	WRF	0.177	-141.078	561.510
		QPESUMS	0.856	175.245	647.016

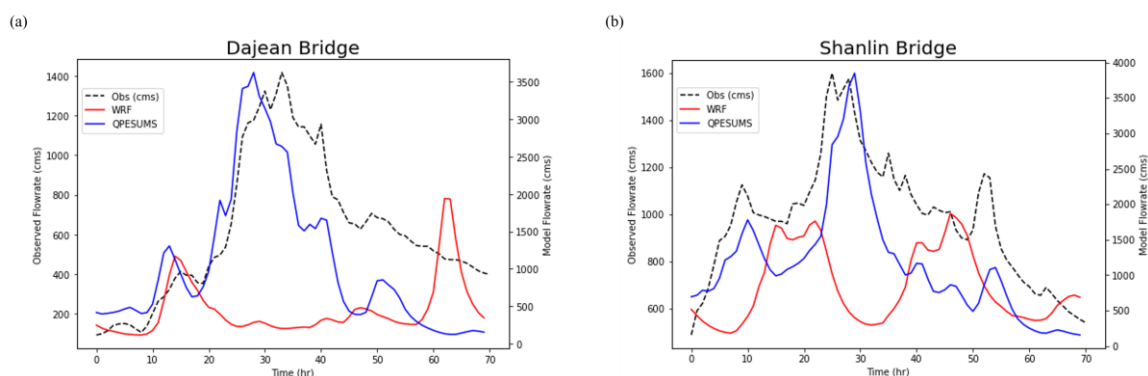


圖 4-2 2021 年盧碧颱風之流量歷線圖 (a)大津橋測站；(b)杉林大橋測站，圖中黑線為觀測流量，紅線為用 WRF 雨量驅動之模擬流量，藍線則是以 QPESUMS 驅動之模擬流量

一般而言較低的土壤含水量(SMC)會促使地表流量峰值提高，於本研究中 MAXSMC 對模擬流量非常敏感，預設值會造成流量明顯高估，因此在 MAXSMC 增加後流量峰值有顯著的下降，各評估指標相關係數(CC)由 0.765 提升至 0.850、偏差(Bias)由 435.559 降至 178.289、方均根誤差(RMSE)由 855.987 降至 525.873 m^3/s (表 4-2 及圖 4-3)。根據這些統計指標選取並固定最佳之 1.75 倍 MAXSMC，再針對下一個敏感參數進行調校。

表 4-2 盧碧颱風之大津橋流量評估指標(1)

Event	Gauge	MAXSMC Multiplier	CC	Bias	RMSE
Lupit	Dajeon Bridge	1	0.765	435.559	855.987
		1.2	0.755	458.003	808.442
		1.5	0.794	366.556	702.711
		1.75	0.850	178.289	525.873

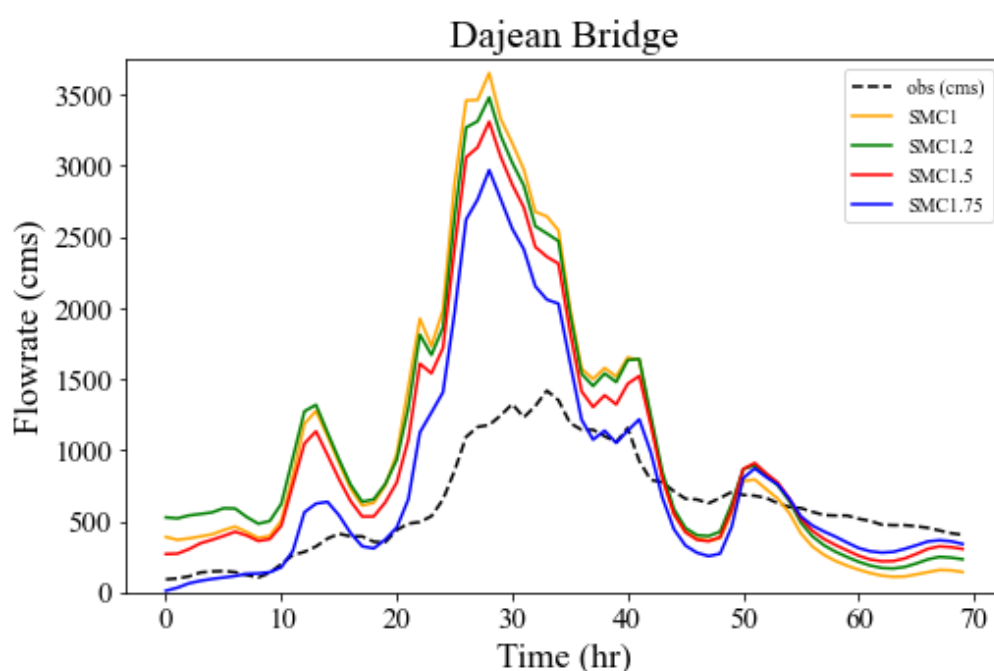


圖 4-3 2021 年盧碧颱風之調校後大津橋流量歷線圖(1)

在經過 MAXSMC 調校後之流量峰值依舊過高，下一步將針對飽和水力傳導度 (SATDK)進行調校，希求增加 SATDK 以提高水分於地下的流動速度，以降低地表逕流。統計評估結果顯示(CC)介於 0.850-0.926、偏差(Bias)介於 178.289-248.441、方均根誤差(RMSE)介於 390.817-525.873 m^3/s (如表 4-3 及圖 4-4)。總上所述，雖本研究針對 SATDK 參數調校產制之流量相較調校前，與測站觀測值之 Bias 有所增大，但對於流量變化趨勢有最佳的掌握性，且鑒於目前本研究初步成果僅針對模式之土壤參數進行調校，尚未針

對其餘參數(如 OVROUGH 與 mann)進行調校，因此後續將會持續依照本研究區域水文條件進行參數調校，以模擬更加趨近現實情況之流量數值。

表 4-3 盧碧颱風之大津橋流量評估指標(2)

Event	Gauge	SATDK Multiplier	CC	Bias	RMSE
Lupit	Dajeon Bridge	1	0.850	178.289	525.873
		1.2	0.865	189.411	469.109
		1.5	0.899	216.672	410.367
		1.75	0.926	248.441	390.817

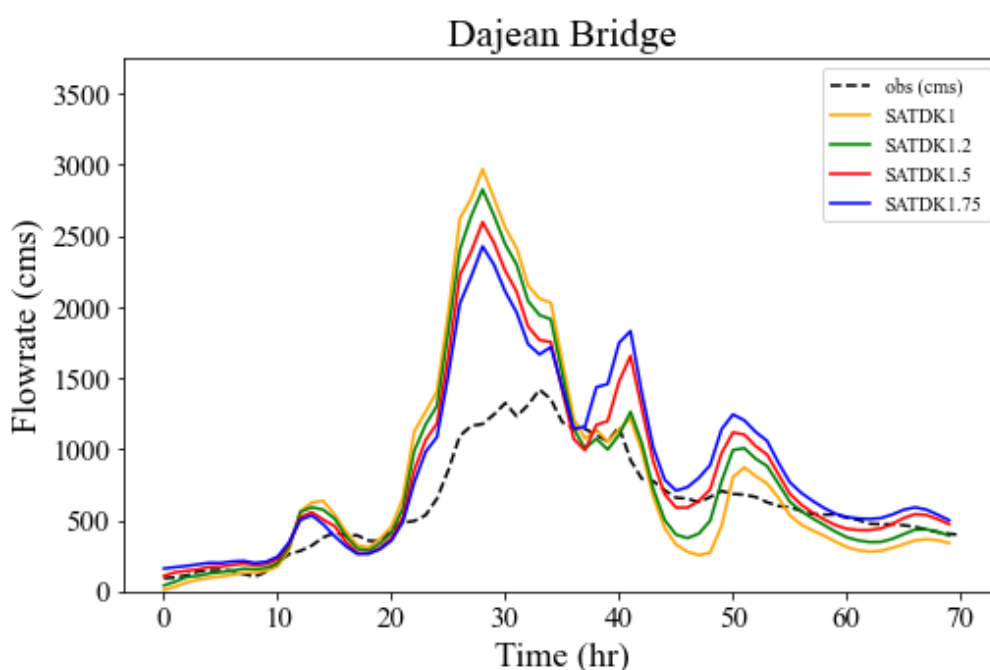


圖 4-4 2021 年盧碧颱風之調校後大津橋流量歷線圖(2)

五、小結與後續工作

截至目前為止本研究已使用 QPESUMS 作為模式降雨輸入資料，並且針對 WRF-Hydro 中兩個參數進行調校，各項評估指標均有顯著提升，相關係數(CC)由 0.765 提升至 0.926、偏差(Bias)由 435.559 降至 248.441、方均根誤差(RMSE)由 855.987 降至 $390.817\text{m}^3/\text{s}$ 。日後將會持續調校其餘敏感參數(REFSMC、DRYSMC、OVROUGH 及 mann 等)，目標是使各評估指標的相關係數(CC)接近於理想值，同時將偏差(Bias)和均方根誤差(RMSE)降到合理的範圍內，以保證模型的準確性和可靠性。

爾後利用調校完之參數配置運行完全耦合之 WRF-WRF-Hydro，並將此流量結果輸入二維水理模式如高性能計算水動力模式(Two-dimensional Runoff Inundation Toolkit for

Operational Needs, TRITON)進行區域淹水潛勢分析。期望在此耦合模式架構下，能夠結合不同數據資料，靈活地適應各種需求，並且針對不同規劃情境和土地系統變遷，提供更迅捷的即時洪災評估結果。

六、參考文獻

1. Chao, L., Zhanga, K., Yangf, L.Z., Wangd, J., Linf, P., Liangf, J., Lid, Z., and Guh, Z., “Improving flood simulation capability of the WRF-Hydro-RAPID model using a multi-source precipitation merging method”, *Journal of Hydrology*, 592, 2021.
2. Cheng, P.L., Zhang, J., Tang, Y.S., Tang, L., Lin, P.F., Langston, C., Kaney, B., Chen, C.R., and Howard, K., “An Operational Multi-Radar Multi-Sensor QPE System in Taiwan”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 102, 3, 2021.
3. Givati, A., Gochis, D., Rummeler, T., and Kunstmann, H., “Comparing one-way and two-way coupled hydrometeorological forecasting systems for flood forecasting in the Mediterranean region,” *Hydrology*, Vol. 3, 19, 2016.
4. Gochis, D.J., M. Barlage, R. Cabell, M. Casali, A. Dugger, K. FitzGerald, M. McAllister, J. McCreight, A.RafieeiNasab, L. Read, K. Sampson, D. Yates, Y. Zhang, “The WRF-Hydro® modeling system technical description version 5.1.1,” NCAR Technical Note, pp.107, 2020.
5. Kishné, A.S., Yimam, Y.T., Morgan, C.L.S., and Dornblaser, B.C., “Evaluation and improvement of the default soil hydraulic parameters for the Noah Land Surface Model” *Geoderma*, 285, pp.247-259, 2017.
6. Lin, T.S., and Cheng, F.Y., “Impact of Soil Moisture Initialization and Soil Texture on Simulated Land–Atmosphere Interaction in Taiwan”, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 17, 5, 2016.
7. Wang, W., Liu, J., Xu, B., Li, C., Liu, Y., and Yu, F., “A WRF/WRF-Hydro coupling system with an improved structure for rainfall-runoff simulation with mixed runoff generation mechanism”, *Journal of Hydrology*, 612, 2022.
8. Wehbe, Y., Temimi1, M., Weston1, M., Chaouch, N., Branch, O., Schwitalla, T., Wulfmeyer, V., Zhan, X., Liu, J., and Mandous, A.A., “Analysis of an extreme weather event in a hyper-arid region using WRF-Hydro coupling, station, and satellite data”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, pp. 1129–1149, 2019.
9. Yu, E., Liu, X., Li, J., and Tao, H., “Calibration and Evaluation of the WRF-Hydro Model in Simulating the Streamflow over the Arid Regions of Northwest China: A Case Study in Kaidu River Basin”, *Sustainability*, Vol. 15, 2023.