

利用 WRF-Hydro 進行區域土壤含水量模擬

Simulation of Regional Soil Moisture Using WRF-Hydro

國立中興大學土木工程學系

研究生

葉錦錡

Chin-Chi Yeh

教授

陳佳正

Chia-Jeng Chen

摘 要

土壤含水量為水文氣候系統重要變量，然而臺灣現有之土壤含水量測站數量稀缺且分布不均，不利於農田水利等相關研究應用。為獲取高覆蓋率之土壤含水量資料，本研究以臺灣本島為研究區域，使用 Weather Research Forecasting model-Hydrological modeling system (WRF-Hydro)對土壤含水量進行模擬與產製。WRF-Hydro 為中尺度數值天氣預報模式(WRF)架構下之分散式水文模式，透過 WRF-Hydro 可有效進行陸面-大氣互動、流域水文及土壤含水量等模擬分析。本研究進一步將模式原始預處理資料(如土地利用與土壤質地)替換為臺灣區域資料，雨量驅動資料則使用臺灣 Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor (QPESUMS)產製之降雨資料作為輸入，並對各土壤參數進行調校。本研究選用數場顯著降雨事件進行模擬，總模擬時長為 60 小時，並將模擬前 10 小時作為模式起轉(spin up)時間，模擬結果採用後 48 小時之結果，並與水保署、中央大學及中興大學等單位設置之測站資料進行比對驗證。預期調校完成之模式將用於產製高時空解析度(2 公里或更細、小時)之全臺土壤含水量資料，成果可應用於水文氣候與災害監測等相關分析。

關鍵字: 土壤含水量、WRF-Hydro、土壤參數

Abstract

Soil moisture has been widely recognized as an important variable in the hydroclimatic system. However, the number of soil moisture gauge in Taiwan is relatively sparse and unevenly distributed. Moreover, the high spatial heterogeneity of soil moisture makes it difficult for gauge -based observation data to reflect the spatial variation pattern of soil moisture fully. To obtain more comprehensive soil moisture data, this study uses the Weather Research Forecasting model-Hydrological modeling system (WRF-Hydro) to simulate the changes in soil moisture, with the main island of Taiwan as the study area. WRF-Hydro is a coupled system that combines a mesoscale numerical weather prediction model (WRF) and a distributed hydrological model. This model can effectively perform land-atmosphere simulations and soil moisture analysis. Furthermore, this study replaces the original preprocessing and driving data

(such as land data, land use, and rainfall) in the model with actual observation data, and calibrates the soil parameters. It is expected that under this research framework, hourly soil moisture data with a spatial resolution of 2 km or higher spatial resolution can be produced, and the results can be applied to hydroclimatic modeling and disaster monitoring-related hydrological analyses.

Keywords: soil moisture; WRF-Hydro; soil parameters

一、前言

大氣與地表之間的水文系統對於天氣與氣候有顯著的影響(Chen et al., 2001)，而土壤含水量不僅為水文系統重要變量之一(Santanello et al., 2011)，也與降雨有關之土石流、乾旱及土壤侵蝕等災害有密切之關係。然臺灣現有之土壤含水量測站數量稀缺且分布不均，無法獲取高覆蓋率之土壤含水量資料。為此目前水文系統之研究多為使用數值氣候和水文模式如 Weather Research Forecasting model-Hydrological modeling system (WRF-Hydro)等。WRF-Hydro 為中尺度數值天氣預報模式(WRF)架構下之分散式水文模式，透過 WRF-Hydro 可有效進行陸面-大氣互動、流域水文及土壤含水量等模擬分析。

在使用數值模式中，土壤質地、土地利用和雨量對於準確模擬地表水文過程至關重要，因土壤的物理和水力特性會直接影響水分向下滲透進入土壤層的能力(Warrach-Sagi et al., 2008)，不一樣的土地表面覆蓋類型對地表逕流和蒸發散等水文現象造成不同變化，而有完整的覆蓋率、高時空間解析度且較符合實際模擬區域之降雨資料能提升數值模式的準確性(Chao et al., 2021)。另外，模式起轉(spun up)時間也是運行模式前須注意的要項之一，因在模式開始運行後，陸面與大氣的能量交換需經過一段時間才能達到平衡。本研究將以臺灣本島為研究區域，對 WRF-Hydro 模式原始預處理資料(如土地利用與土壤質地)替換為臺灣區域資料，雨量驅動資料則使用有更接近臺灣實際降雨情況之 Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor (QPESUMS)所產製的降雨資料作為輸入(Hung et al., 2014)，並對各土壤參數進行調校。模擬結果前 10 小時將作為模式起轉(spun up)時間，最終採用後 48 小時之結果，並與水保署、中央大學及中興大學等單位設置之測站資料和 High Resolution Land Data Assimilation System (HRLDAS)土壤含水量產品進行比對驗證。預期調校完成之模式將用於產製高時空解析度(2 公里或更細、小時)之全臺土壤含水量資料，後續可應用於水文氣候與災害監測等相關分析。

二、研究區域與資料

2.1 研究區域

本研究以台灣本島為研究區域(如圖 1)，選用三場顯著降雨事件(2009 年 8 月 8 日至 10 日莫拉克颱風、2019 年 8 月 8 日至 9 日利奇馬颱風及 2021 年 9 月 11 日至 13 日璨樹颱風)進行模擬，並以行政院農業部農村發展及水土保持署之南豐(Nanfeng)、坪頂(Pingding)及上安(Shangan)；國立中央大學水文與海洋科學研究所李明旭教授研究團隊於桃園中央大學(NCU)以及國立中興大學土木工程學系陳榮松教授研究團隊於台中東勢(Dongshi-1)、苗栗卓蘭(Zhuolan)等六處土壤含水量測站和 HRLDAS 土壤含水量產品作為研究成果驗證之對象。

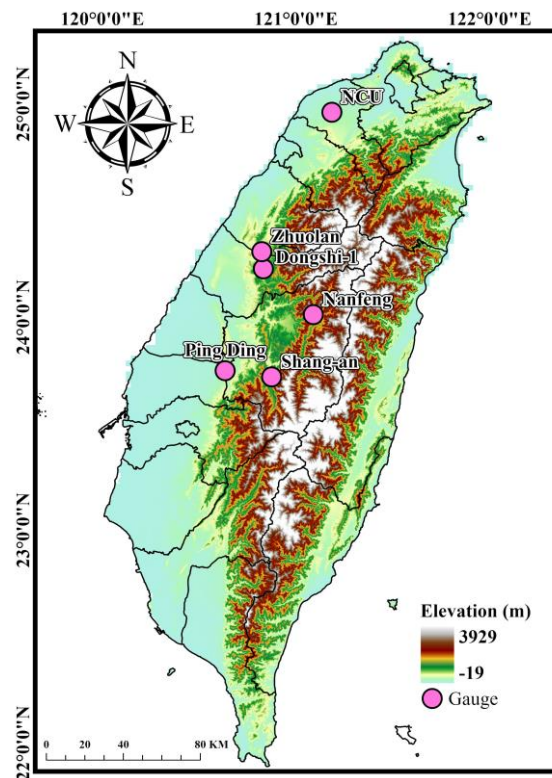


圖 2-1. 研究區域與測站點位

2.2 土地利用資料

使用來自內政部國土測繪中心(National Land Surveying and Mapping Center, NLSC)公布的 2015 年台灣土地利用資料，通過系統性分類和統計土地利用現況，對台灣的土地利用狀況進行了詳細的調查和分析。此資料是基於高解析度的航拍和遙測影像，結合地籍圖、台灣通用電子地圖等多種參考資料，以及部分外業調查結果，經過精細分析與規劃得出。

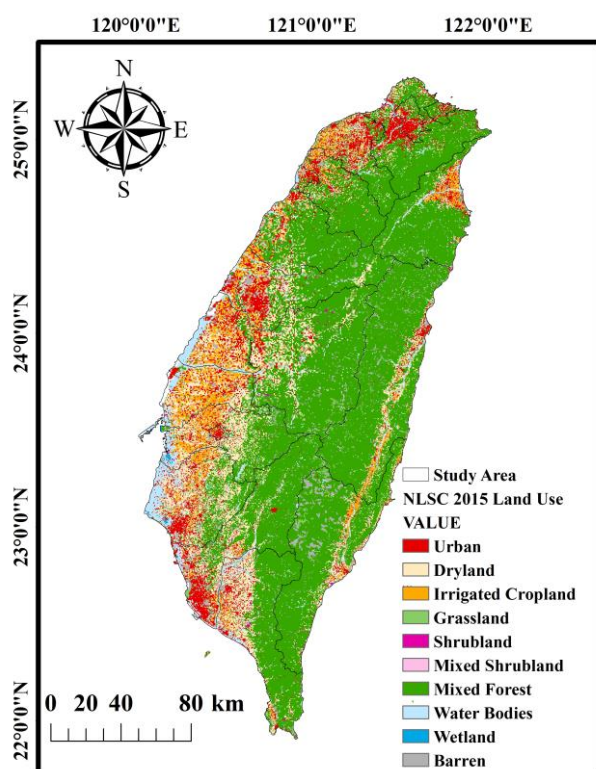


圖 2-2. 2015 年臺灣土地利用資料

2.3 High Resolution Land Data Assimilation System (HRLDAS)土壤含水量產品

HRLDAS 土壤含水量產品為交通部中央氣象署使用美國國家大氣研究中心發展之高解析度土壤資料同化系統(HRLDAS)所產製。HRLDAS 是以 Noah Land Surface Model (LSM)為核心，模式中模擬區域的土壤被分為地下 10、40、100 及 200 公分等四層，並藉由 Noah LSM 將溫度、濕度、風場、壓力、輻射通量和降水等近地表大氣驅動資料，經過土壤物理過程使能量在大氣與土壤深層達到平衡，進而得到土壤相關數據。

2.4 觀測降雨資料

交通部中央氣象署整合氣象雷達、衛星、各單位地面雨量站觀測資料，與經濟部水利署、農委會水土保持局及美國劇烈風暴實驗室(National Severe Storm Laboratory, NSSL)共同合作開發的地理資訊發展劇烈天氣監測系統(Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor, QPESUMS)，產製出空間解析度約 0.0125°、時間間距為 10 分鐘之網格降雨資料。

2.5 土壤質地資料

臺灣地區平原、山地及坡地土壤質地數據是根據行政院農業委員會的實地調查收集而成，並使用 Arc geographical information system (ArcGIS)配置成 WRF 模式中使用的資料格式。更新後的土壤質地資料中有 21 個分類，必須重新對應到原始 WRF 模式所使用的美國農業部現地調查土壤地質資料庫(Soil Survey Geographic Database, SSURGO)與聯合國糧食及農業組織(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)土壤分類系統才能在 WRF 模式中使用。

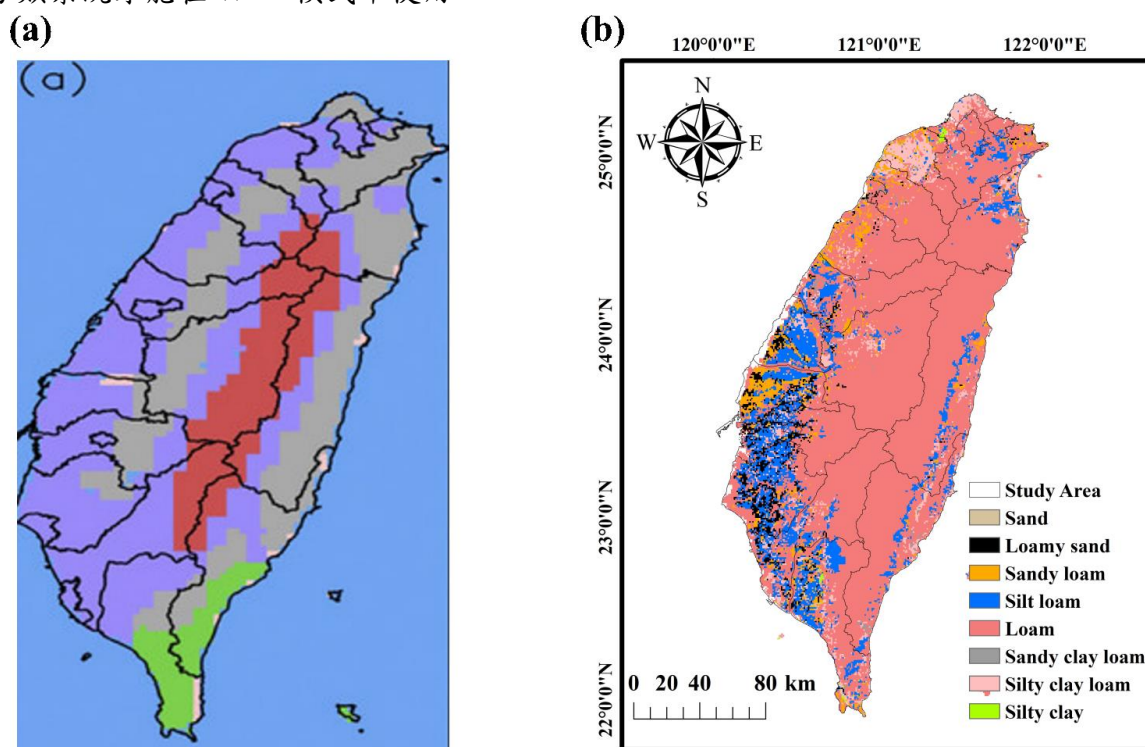


圖 2-3. (a)WRF 模式中原始臺灣地區土壤質地(Lin and Cheng, 2016)、(b)更新後土壤質地

三、研究方法

本研究在置換完 WRF-Hydro 模式中原始土地利用、土壤質地及雨量驅動資料後，將調校最大土壤飽和含水量(MAXSMC)、飽和水力傳導度(SATDK)、田間容水量(REFSMC)和凋萎點(WLTSMC)，此方法有助於在模擬強烈降雨事件下，使模型能夠更準確地反映實際水文過程，如滲透、地下水流動及地表徑流，從而提高模擬結果的可靠性。

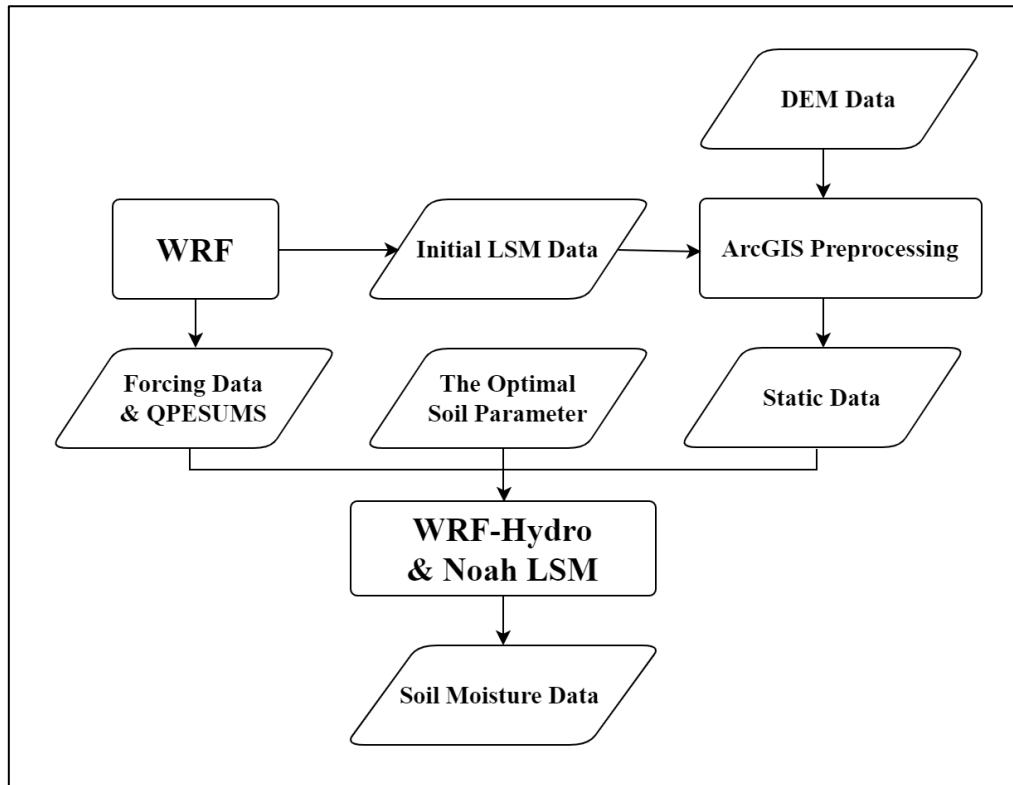


圖 3-1. 研究流程

3.1 WRF-Hydro 模式

WRF-Hydro 模式為美國國家大氣研究中心(National Center of Atmospheric Research, NCAR)在中尺度數值天氣預報模式(WRF)架構下研發之分散式水文模式，起初設計目的為透過 WRF 與 WRF-Hydro 兩模式之間耦合，藉此模擬陸地水文過程中能量從地表到大氣之間的交互作用，從而得到模擬區域內大氣和水文的變量數據。相比於單獨運行 WRF，WRF-Hydro 擁有更完善的地表、地下和河道之陸地水循環演算模式，其中對於超滲水量的再次分配和入滲能夠更準確地再現洪水歷線、逕流量及完整的水文歷線，模式中的側水流動與飽和含水層入滲演算，使模擬土壤層的物理過程與實際情況更加吻合。圖 3-2 展示了飽和土壤的側向流動過程，「ZWAT TABL」的部分代表地下水位，藍色部分表示飽和區域，箭頭標記的「QSUB」表示從一個單元格到相鄰單元格的飽和土壤水分的側向流動，而「EXFILTRATION」的則表示過度飽和土壤中的水分滲出到地表的過程。

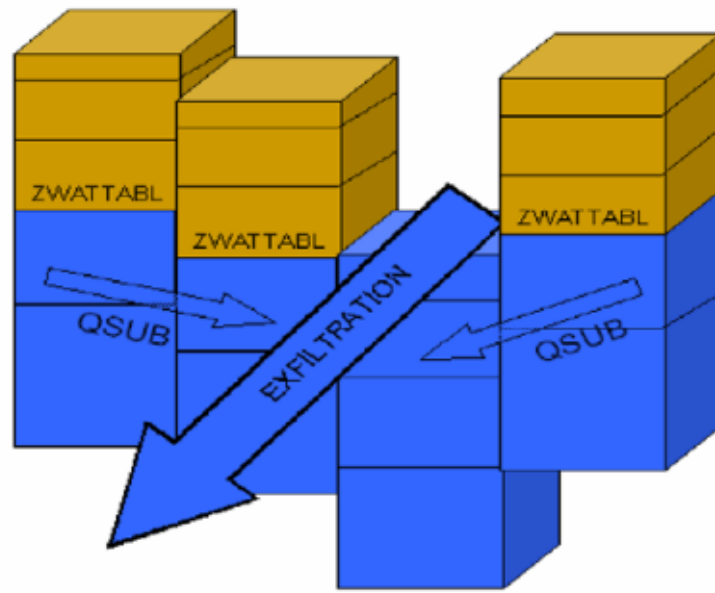


圖 3-2. 飽和地下水流分量概念圖(資料來源：Gochis et al., 2013)

此外，在運行 WRF-Hydro 前，需先使用 ArcGIS 預處理工具將數值高程資料(digital elevation model, DEM)和 WRF 預處理系統(WRF Preprocessing System, WPS)生成之 GEOGRID 文件建立成相關空間地理資訊數據，如 LDAS 網格的空間元數據文件(GEOGRID_LDASOUT_Spatial_Metadata.nc)、演算網格的 2D 文件(Fulldom_hires.nc)、2D 地下水盆地文件(GWBASINS.nc)和 1D 地下水盆地參數文件(GWBUCKPARAM.nc)等 netCDF 文件，令模式可合理地模擬漫地流、地下水流和渠道演算等物理過程。WRF-Hydro 發展至今除了能與 WRF 耦合運行外，亦能單獨運行。在模式中可對多種參數進行調整，如曼寧粗糙係數(土地利用和渠道)、土壤水力特性以及土壤參數等。本研究欲獨立運行 WRF-Hydro，將 WRF 模擬結果輸出檔中雨量部分替換為 QPESUMS 產製之數據後，作為運行模式所需之大氣驅動資料。研究亦對 MAXSMC、SATDK、REFSMC 和 WLTS MC 等土壤參數進行調校，預期調校完成之模式將用於產製高時空解析度(2 公里或更細、小時)之全臺土壤含水量資料。

3.2 研究成果評估

為評估研究之成果，本研究將以偏差(Bias)和方均根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)兩項評估指標進行驗證，而評估依據則使用前述六處土壤含水量測站之觀測數據與 HRLDAS 土壤含水量產品，其方程式如式 3-1 至 3-2 所示。

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - x') \quad (3-1)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x - x')^2 / n} \quad (3-2)$$

式中 x 為測站數據； x' 為模擬結果； n 為資料總數。

四、初步成果

將模式內原始土地利用和土壤質地置換為台灣本土數據後，從圖 4-1 得知模擬結果更符合臺灣實際情況。從表 4-1 得知在坪頂和卓蘭測站 WRF-Hydro 模擬結果較相似於觀測數據。從圖 4-2 和圖 4-3 得知調校模式內 MAXSMC 與 SATDK 等土壤參數後，1.8 倍之 MAXSMC 和 1 倍之 SATDK 更趨近測站觀測數據。

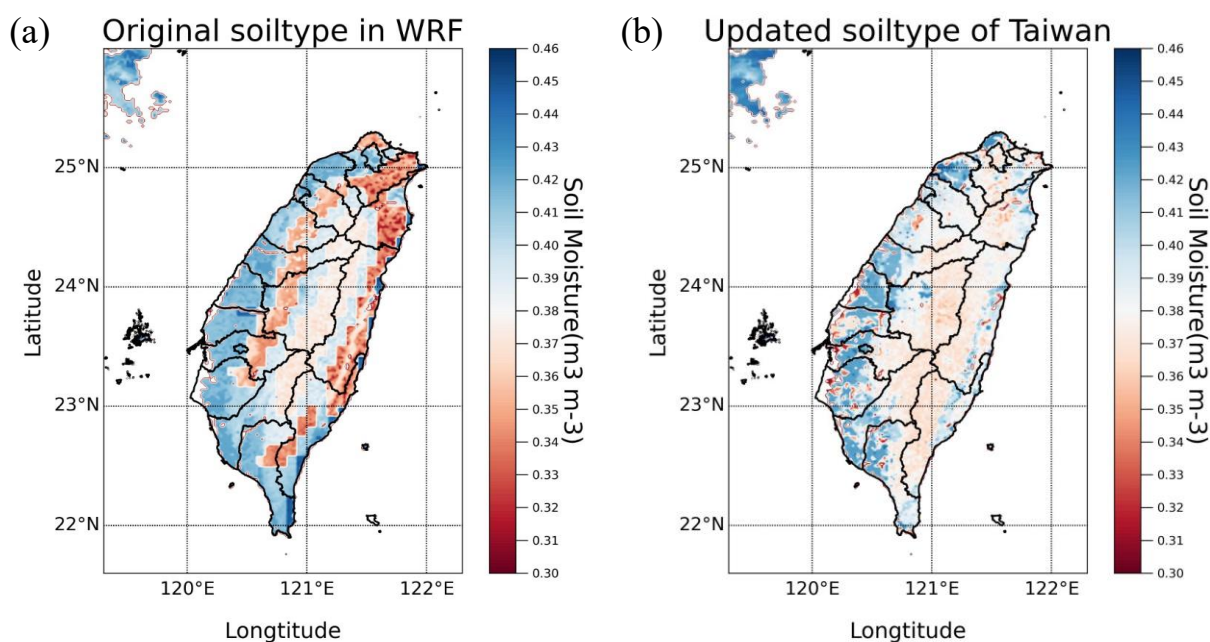


圖 4-1. 2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風土壤含水量空間分佈圖

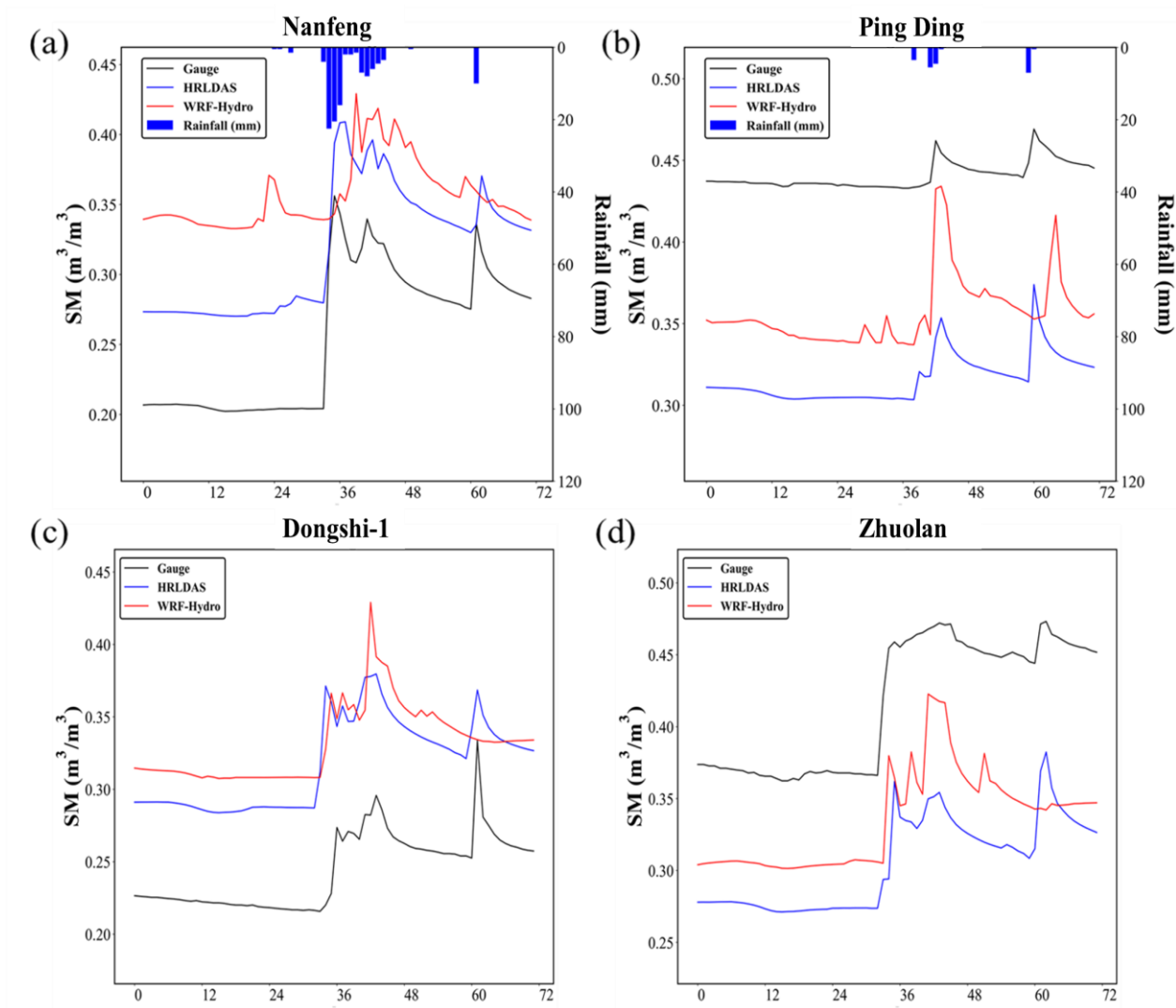


圖 4-2. 2021 年 9 月 11 日至 13 日璨樹颱風期間之土壤含水量歷線圖

表 4-1. 各測站於璨樹颱風期間之土壤含水量評估數據

Gauge	Model	Bias	RMSE
Nanfeng	WRF-Hydro	0.108	0.112
	HRLDAS	0.061	0.063
Ping Ding	WRF-Hydro	-0.078	0.080
	HRLDAS	-0.124	0.125
Zhuolan	WRF-Hydro	-0.091	0.096
	HRLDAS	-0.111	0.112
Dongshi-1	WRF-Hydro	0.098	0.100
	HRLDAS	0.074	0.075

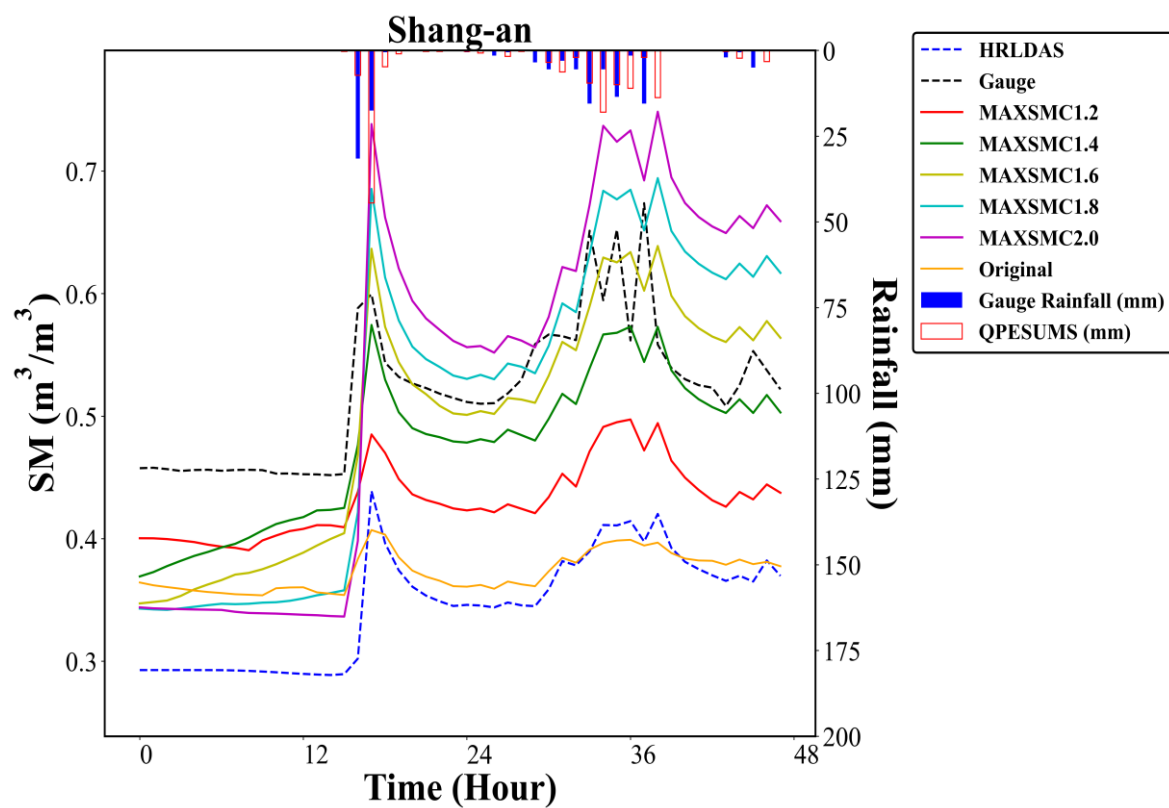


圖 4-3. 2019 年 8 月 8 日至 9 日利奇馬颱風期間上安測站各倍數之 MAXSMC 土壤含水量歷線圖

表 4-2. 利奇馬颱風期間上安測站各倍數之 MAXSMC 土壤含水量評估數據

MAXSMC 倍數	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	Original
Bias	-0.087	-0.044	-0.023	-0.006	0.015	-0.146
RMSE	0.094	0.054	0.061	0.087	0.109	0.153

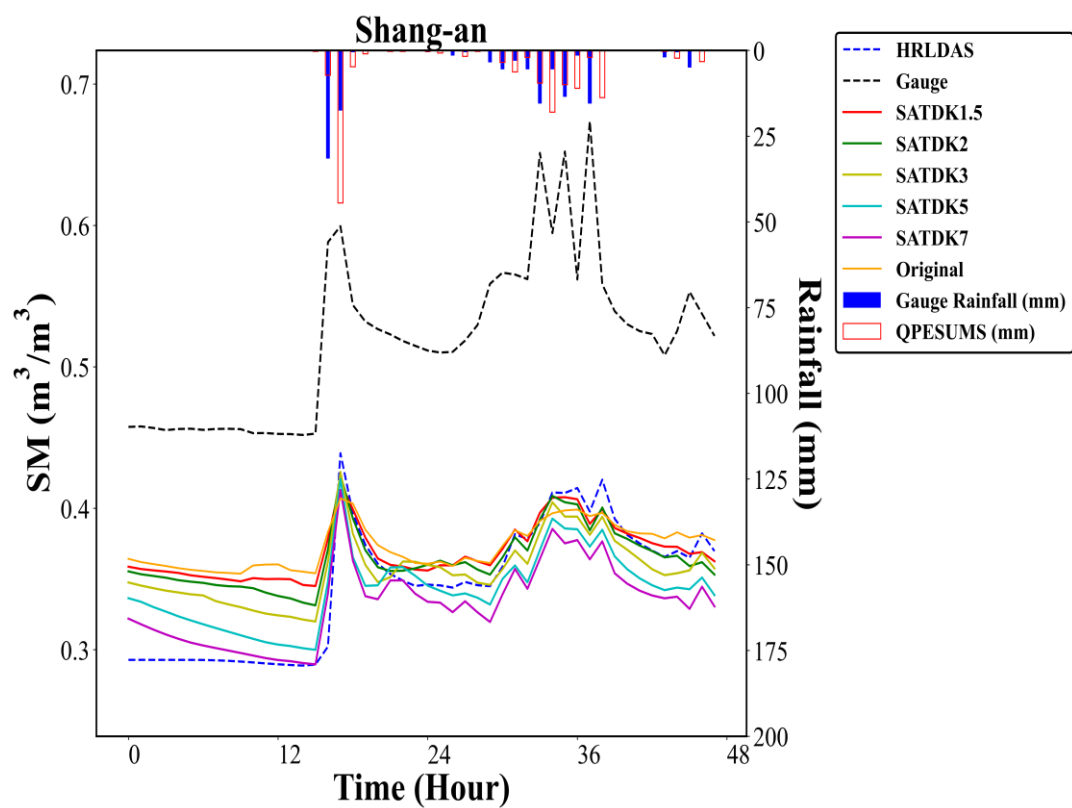


圖 4-4. 2019 年 8 月 8 日至 9 日利奇馬颱風期間上安測站各倍數之 SATDK 土壤含水量歷線圖

表 4-3. 利奇馬颱風期間上安測站各倍數之 SATDK 土壤含水量評估數據

SATDK 倍數	1.5	2	3	5	7	original
Bias	-0.150	-0.155	-0.163	-0.176	-0.186	-0.146
RMSE	0.156	0.161	0.168	0.180	0.190	0.153

五、小結與後續工作

本研究截至目前，已將模式內原始土地利用、土壤質地置換為實際測量數據以及使用 QPESUMS 產製之與降雨數據，並確定更換之必要性，亦使用 ArcGIS 預處理工具產製運行 WRF-Hydro 前所需的相關空間地理資訊數據。模式內 MAXSMC 與 SATDK 兩種土壤參數已完成調校，並確定日後使用之倍數。以下列出本研究後續工作，以達成產製高時空解析度土壤含水量之目的。

1. 持續調校其他土壤參數如 REFSMC 和 WLTSMC 等，將偏差(Bias)和均方根誤差(RMSE)降到合理的範圍內，以提升產品之精確性。
2. 將最合適之土壤參數數值用於 WRF-Hydro 與 WRF 完全耦合運行，比較完全耦合與獨立運行之土壤含水量差異。
3. 將結果應用於水文氣候與災害監測等相關分析。

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, F.Y., Hsu, Y.C., Lin, P.L., & Lin, T.H., “Investigation of the effects of different land use and land cover patterns on mesoscale meteorological simulations in the Taiwan area”, *Journal of applied Meteorology and Climatology*, 52(3), pp. 570-587, 2013.
3. Gochis, D.J., Barlage, M., Cabell, R., Casali, M., Dugger, A., FitzGerald, K., McAllister, M., McCreight, J., RafieeiNasab, A., Read, L., Sampson, K., Yates, D., Zhang, Y., “The WRF-Hydro® modeling system technical description version 5.1.1”, NCAR Technical Note, 107, 2020.
4. Hung, Y.C., Hong, J.S., Tsay, C.L., Barlage, M., Chen, F., “Evaluation of the high resolution land data assimilation system”, *Atmos. Sci*, 42, 29-47, 2014.
5. Lin, T.S., Cheng, F.Y., “Impact of soil moisture initialization and soil texture on simulated land-atmosphere interaction in Taiwan”, *Journal of Hydrometeorology*, 17(5), pp. 1337–1355, 2016.
6. Santanello Jr, J.A., Peters-Lidard, C.D., Kumar, S.V., “Diagnosing the sensitivity of local land-atmosphere coupling via the soil moisture-boundary layer interaction”, *Journal of Hydrometeorology*, 12(5), pp. 766-786, 2011.
7. Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., Grasselt, R., Simmer, C., Ament, F., “Streamflow simulations reveal the impact of the soil parameterization”, *Meteorologische Zeitschrift (Berlin)*, 17, 2008.