

應用 WRF 與 GSSHA 模式於泥沙起動機制之研究

Analyzing Inception of Sediment Discharge Using WRF and GSSHA Models

國立中興大學土木工程學系

研究生

副教授

呂玟怡

陳佳正

Wen-Yi Lu

Chia-Jeng Chen

摘要

降雨會啟動泥沙運移之過程，並降雨產生之逕流亦有輸送泥沙之能力，造成集水區與河道內會不斷的有侵蝕、搬運與沉積的現象發生，最終匯集到集水區出口。本研究利用中尺度數值天氣預報模式 Weather Research and Forecasting Model (WRF)模擬不同降雨事件之雨量，並結合水文模式Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA)於石門水庫集水區探討泥沙的起動機制，並模擬集水區因降雨事件所產生之泥沙量。GSSHA模式為一個基於物理的全分散式水文模式(fully distributed hydrologic model)，模式以網格表示集水區內地表與地下物理特徵的空間變化，計算地表與河川中水的流動，藉此模擬集水區中降雨-逕流和泥沙輸送的過程。本研究運用WRF與GSSHA模式，預期能更了解從降雨到泥沙起動以至於輸送的物理機制外，亦希求可達到輸沙量之預報。

關鍵詞：WRF、GSSHA、泥沙起動

Abstract

Rainfall is the key to trigger the sediment discharge process, and runoff generated by rainfall is responsible to sediment transport. Incessant erosion, transportation, and deposition that take place over the river channels in a catchment will eventually produce collectable sediment discharge at the catchment outlet. In this study, the Weather Research and Forecasting model (WRF) was used to simulate different rainfall events that were used to drive the Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis model (GSSHA) to investigate the inception mechanism of sediment motion and simulate the amount of sediment discharge in the Shimen Reservoir watershed. The GSSHA model is a physically based, fully distributed hydrologic model that uses grids to represent the spatial variation of surface and subsurface physical characteristics in a catchment, and calculates the overland flow routing and channel flow, thereby simulating the processes of rainfall-runoff and sediment transport. Using WRF

and GSSHA is expected to better understand the physical mechanisms from rainfall to sediment initiation and transportation, as well as to achieve the forecasting of sediment discharge.

Keywords: WRF, GSSHA, Sediment incipient motion

一、前言

近年因極端氣候造成降雨事件愈發頻繁，加上台灣地質條件破碎，高強度降雨侵蝕地表使得輸送到下游的泥沙量增多，而水流中攜帶大量的泥沙顆粒會影響到水質、減少水庫的庫容量，對於缺水的台灣有嚴重的影響，因此探討泥沙起動的機制有其必要性。為了探討降雨起動泥沙的過程，多數研究利用水文模式模擬集水區特定事件的輸沙量，如 Chiang et al. (2021)利用修正 Soil Water Assessment Tool (SWAT)模型，SWAT-Twn 模擬台灣中部濁水溪流域的泥沙輸送量，相較於 SWAT，SWAT-Twn 考慮到崩塌地面積對於年產沙量的影響，結合台灣通用土壤流失公式(Taiwan Universal Soil Loss Equation, TUSLE)，可以更有效的模擬濁水溪集水區的泥沙輸送。Sith and Nadaoka (2017)使用 GSSHA 及 SWAT 模式，在日本石垣島一個小型農業型集水區進行每小時河流流量與懸浮沉積物濃度的預測，比較兩模式的性能，以選擇適合此流域的模式，經過這項研究顯示，與半分散式模型(semi-distributed)的 SWAT 相比，全分散式模型(fully distributed)的 GSSHA 作為具有網格單元的全分散式模型，在短期事件預測泥沙濃度方面提供更好的結果。本研究欲利用 GSSHA 探討集水區因降雨而起動的泥沙量，並達到輸沙量預測之目的。

在利用 GSSHA 模擬輸沙量之前，需要輸入選定事件之雨量資料，由於地面測站的觀測儀器容易因為豪雨造成損壞，又目前降雨產品種類多元，本研究使用美國國家航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)全球降水量測任務(Global Precipitation Measurement mission, GPM)第 6 版，以衛星觀測的方式，提供全球的降雨及降雪觀測資料，相對於地面測站的觀測，衛星降雨提供時間解析度更高的觀測資料。不同的降雨產品各有優缺點，本研究欲利用不同的降雨產品結合水文模式，探討不同降雨產品及情境下，降雨與泥沙起動之間的關係，並期望以此模式的架構下，能夠預測未來集水區事件發生時的輸沙量。

二、研究區域與資料

本研究區域選定石門水庫上游之玉峰集水區(如圖 1)，石門水庫為台灣北部的主要水庫之一，位於桃園市境內，玉峰集水區則是位於新竹縣尖石鄉境內，其河川經下游的高義、霞雲測站後匯入石門水庫。玉峰集水區海拔高度約為 709.5 公尺至 3522.6 公尺，面積約為 344.72 平方公里，區內有兩大支流，分別為泰崗溪與白石溪，主要由東南方與西

南方延伸至集水區北方之玉峰測站。

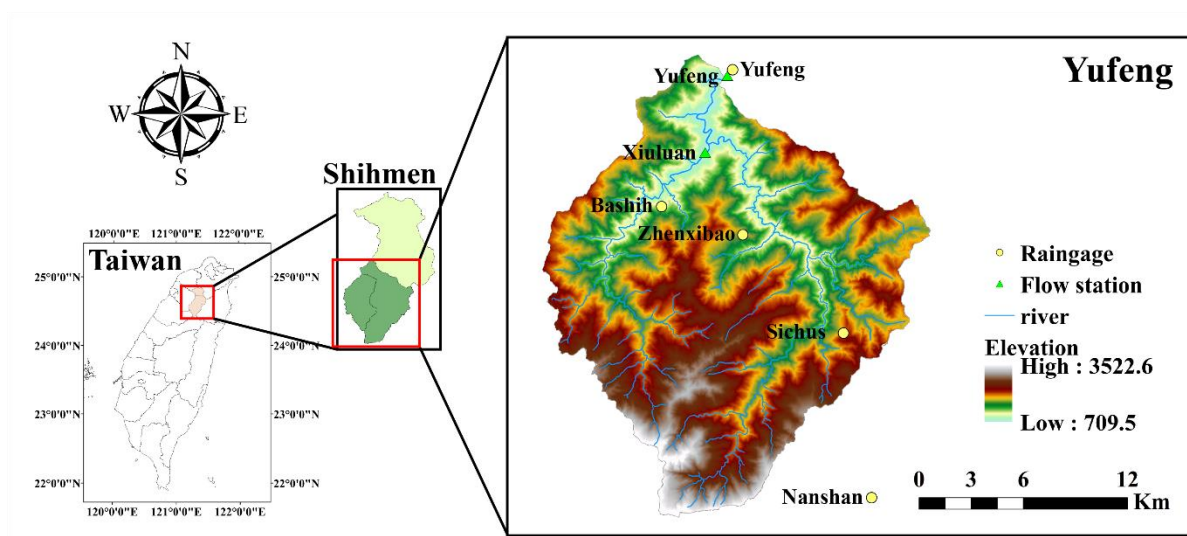


圖 1. 玉峰集水區

本研究事件選擇上，使用水文資訊網之觀測雨量資料及觀測流量資料作為事件篩選依據，並匯入模式中用於模式的參數校正及驗證。本研究使用的降雨資料來自中央氣象局(Central Weather Bureau, CWB)局屬測站與自動測站，其測站為位於地面上的單點測站，時間解析度為小時資料；流量資料取自經濟部水利署水文資訊網，為集水區內測站之小時觀測資料；事件發生當下，懸移質實測資料取得不易，因此採用石門水庫上游集水區流量與含沙量量測及水文資料數化庫建立(經濟部水利署北區水資源局，2010)報告書中之各水位流量站流量-輸沙量率定公式，其實測懸移質資料採樣時間為 2007 年 7 月至 2010 年 12 月，於平常時期與颱風時期兩部分進行，分別繪製出各年度流量-輸沙量率定曲線及其公式；土地利用資料使用內政部國土測繪中心(National Land Surveying and Mapping Center, NLSC)公布之資料，將土地使用現況進行系統性的分類與統計，以影像資料，如航拍正射影像、衛星影像等作為調查底圖，搭配台灣通用電子地圖、地籍圖與前期國土利用現況調查成果等各式圖資，產製出土地利用之現況資料；土壤資料來自於農業試驗所之土壤調查資料，因研究區域內土壤調查皆為無資料，為了補遺土壤資料，本研究採用石門水庫集水區內最大面積比土壤作為無資料區域之土壤。

三、 方法

(一) 全球降水量測任務(Global Precipitation Measurement mission, GPM)

全球降水量測任務(GPM)第 6 版是美國國家航空暨太空總署(NASA)目前正在執行的任務之一，任務內容為以衛星觀測的方式，提供全球的降雨及降雪觀測資料。在前一代熱帶降雨量測任務(The Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)成功的基礎上，GPM 搭載了先進的雷達與輻射計系統，從太空中測量地球上的降水變化，與 TRMM 的降水

雷達相比，GPM 衛星先進的技術，對於小型降雨、降雪事件更為敏感。GPM 綜合多衛星檢索(Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM, IMERG)具有三種模式，分別為 Early run、Late run 與 Final run，其延遲時間與準確性皆有不同，Early run 將所有衛星觀測資料進行互相校準、合併與插值計算，其延遲時間為 4 小時，Late run 是加上微波觀測數據進行校正，延遲時間為 12 小時，Final run 是利用全球降水氣候中心(Global Precipitation Climatology Centre, GPCC)的月測量資料進行分析校正，延遲則為 2.5 個月，本研究主要使用之資料為 IMERG Final run。

GPM 資料時間解析度為 30 分鐘，以 10 公里乘 10 公里的網格呈現，本研究以網格降雨方式，將資料匯入 GSSHA 模式內，分別觀察地面測站之降雨資料與網格降雨對於泥沙起動的影響，並計算匯集到秀巒及玉峰測站時的泥沙量差異。

(二) Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA)模式

由美國陸軍工兵團(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)所開發的 GSSHA 模式，具有模擬地表、河道內水流與泥沙輸送的能力，為 CASC2D 水文模式更改並優化後的產品。GSSHA 模式為基於物理的全分散式水文模式(Fully Distributed Hydrologic Model)，透過網格化地表與地下物理特徵的空間變化，能夠計算地下水與地表水之間的作用關係，並透過數學方法建立土壤侵蝕模型，以描述土沙顆粒從地表脫離、輸送至沉積的過程(Johnson et al., 2000)。根據水文模式模擬的過程與參數的設定，基於物理的水文模式可以更進一步分為半分散式(semi-distributed)與全分散式(fully distributed)兩類(Yin et al., 2020)，半分散式水文模式是將集水區區分成細小的基本元素，如山坡、渠道等；全分散式水文模式則是將集水區分成特定大小的網格，以網格的方式記錄集水區內各地的物理特徵，可以顯示出更細微的地表變化，以利模式做計算。

GSSHA 模式使用顯式有限體積法(Explicit Finite Volume Method)計算一維的渠道水流與二維漫地流，該方法計算進入網格體積的通量與離開網格體積的通量相同，因此模式是守恆的，與複雜的隱式有限差分法或有限元素法相比，此方法在計算上更為簡單。在一維的渠道水流方面，模式透過計算網格單元與鄰近網格之間的摩擦斜率作為水面的高程差，如式(3-1)，並使用曼寧公式計算兩個網格間水頭與流量的關係(式 3-2)。於二維的漫地流計算時，模式沿用 CASC2D 的原始計算方式，將一維渠道水流的方法應用於二維的漫地流當中，除了上述方式，模式另外增添交替方向顯示法(alternating direction explicit scheme, ADE)與帶有預測校正步驟的交替方向顯示法(ADE scheme with an additional predictor-corrector step, ADEPC)，兩方法都採用梯度差分來計算流量的變化。

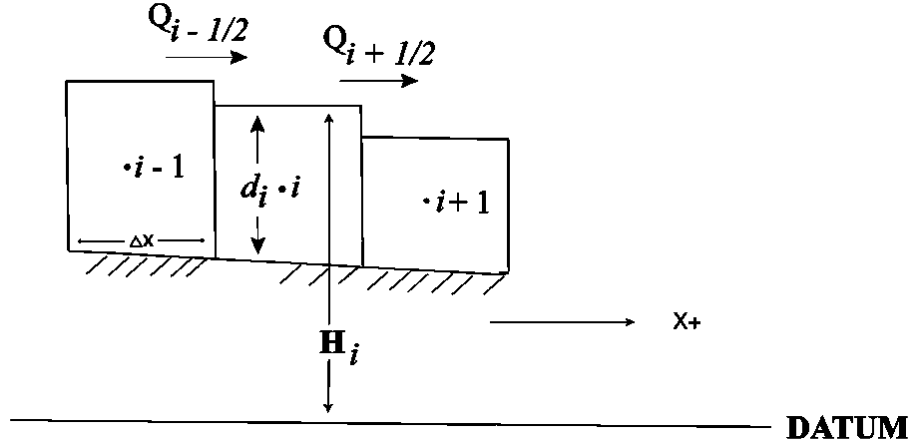


圖 2. 一維渠道水流計算示意圖(資料來源：Downer & Ogden, 2004)

$$S_{f_{i+1/2}}^n = S_{0_{i+1/2}} - \frac{d_{i+1}^n - d_i^n}{\Delta x} \quad (3-1)$$

式中 S_f 為摩擦斜率， S_0 為地表 x 方向的坡度， i 為網格編號， d 為該網格之水深(m)， Δx 為網格長度(m)， n 為計算的時間階段。

$$Q_{i+1/2}^n = \frac{1}{n} A_i^n (R_{ij}^n)^{2/3} (S_{f_{i+1/2}}^n)^{1/2} \quad (3-2)$$

其中 Q 為 x 方向網格間的流量(cms)， n 為曼寧粗糙係數， A 為渠道斷面積(m^2)， R 為水力傳導度(m)， j 為下一個網格編號。

GSSHA 模式在計算地表顆粒分離時，分為兩階段進行，首先是因降雨撞擊地面上，雨滴撞擊時會破壞土壤的內聚力，使土沙顆粒分離，此機制與降雨動量、地表特徵、植被覆蓋、冠層覆蓋及地表水深有關(Wicks & Bathurst, 1996) (式 3-3)；另一階段為地表逕流所造成的土沙顆粒分離，此分離的主要因素取決於水流施加於土沙顆粒的剪應力與臨界剪應力的大小(式 3-4)，地表逕流施加的剪應力作用於土沙顆粒上，破壞了顆粒間的鏈結後，顆粒即會開始起動，此兩階段為泥沙起動的過程，模式藉由降雨分離與逕流分離的機制，計算泥沙起動的量後，在進行後續的輸送階段。

$$D_R = K_I C_W C_G C_i M_R \quad (3-3)$$

其中 D_R 為雨滴撞擊的分離能力率($kgm^{-2}s^{-1}$)， K_I 為被雨滴撞擊的土侵蝕因子(J^{-1})， C_W 為水深修正因子， C_G 為冠層覆蓋因子， C_i 地表覆蓋管理因子， M_R 為降雨動量平方 $[(kgms^{-1})^2m^{-2}s^{-1}]$ 。

$$D_c = a(\tau - \tau_{cr})^b (1 - G/T_c) \quad (3-4)$$

其中 D_c 為逕流分離能力率($kgm^{-2}s^{-1}$)， a 、 b 為經驗係數， τ 為逕流剪應力(Pa)， τ_{cr} 為臨

界剪應力(Pa)， G 為土沙荷重($kgm^{-2}s^{-1}$)， T_c 為地表逕流的泥沙輸送率($kgm^{-2}s^{-1}$)。

在沉積物輸送能力方面，研究發現 CASC2D-SED 在沉積物運輸的公式上有部分缺陷，如缺乏沉積物脫離限制，導致模式會有高估沉積物產量的情形(Charles W. Downer et al., 2015)。GSSHA 模式被導入了 CASC2D-SED 修正過後的沉積物輸送公式，除了最初使用的 Kilinc and Richardson (KR) Equation (1973)(式 3-5)之外，還另外新增了 Engelund-Hansen (EH) Equation(式 3-6)，此公式依照泥沙顆粒大小分級，分別計算各級別的泥沙輸送量，和由 Everaert & Landforms(1991)於水槽試驗推導的 Slope and Unit Discharge (SUD) Method(式 3-7)、Shear Velocity (SV) Method(式 3-8)、Unit Stream Power (USP) Method(式 3-9)、Effective Stream Power (ESP) Method(式 3-10)，這五種新增的沉積物輸送公式皆考慮了不同的泥沙輸送條件，如沉積物開始運動時的臨界剪應力、沉積物顆粒大小的分布和坡度等。

$$q_s = 25.5q^{2.035}S_f^{1.664}\frac{K}{0.15} \quad (3-5)$$

其中 q_s 為泥沙輸送的單寬流量($kgm^{-1}s^{-1}$)， q 為單寬流量(m^3s^{-1})， S_f 為摩擦斜率， K 為綜合因子，其值介於 0 至 1 之間，由土壤可蝕性、植被和土地利用綜合影響組成。

$$G_i = KF_i \frac{0.05BV^2h^{3/2}S_f^{3/2}}{(s-1)^2D_i\sqrt{g}} \quad (3-6)$$

其中 G_i 為 i 級別泥沙的輸沙率(m^3s^{-1})， K 為校正係數， F_i 為 i 級別泥沙佔整體泥沙的比例， B 為水流寬度(m)， V 為水流平均流速(ms^{-1})， S_f 為摩擦斜率， s 為 i 級別泥沙之比重， D_i 為 i 級別泥沙的平均尺寸(m)， g 為重力加速度(ms^{-2})。

$$T_c = aS_f^bq^c \quad (3-7)$$

$$T_c = d(u_* - u_{*cr})^e \quad (3-8)$$

$$T_c = 0.316(100S_fV)^{2.59}D_{50}^{-0.39} \quad (3-9)$$

$$T_c = 4.61^{-7}\Omega^{1.75}D_{50}^{-0.56} \quad (3-10)$$

其中 T_c 為泥沙輸送的單寬流量($gcm^{-1}s^{-1}$)， S_f 為摩擦斜率， q 為單寬流量(m^3s^{-1})， u_* 為剪力速度(cms^{-1})， u_{*cr} 為臨界剪力速度(cms^{-1})， V 為水流平均流速(ms^{-1})， Ω 為有效河流功率， a 、 b 、 c 、 d 、 e 均為經驗參數。

(三) 評估方式

本研究使用之資料包含中央氣象局(CWB)局屬測站與自動測站所之觀測雨量資料及

GPM 綜合多衛星檢索(IMERG) Final run 的降雨數據進行模擬，並與經濟部水利署水文資訊網之觀測流量進行模式輸出的評估。

為評估模型的性能，本研究採用 2 個指標，每個指標都有其適用之處。判定係數 (coefficient of determination, R^2) 顯示有關於觀測值與模擬值之間的線性關係(式 3-11)，其值介於 0 至 1 之間， R^2 值越大，表示觀測值與模擬值之間的相關性越高；另一個評估指標為納什效率係數(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE) (式 3-12)，NSE 為一個歸一化的統計指標，其值介於負無窮至 1 之間，NSE 值越大，表示模型能更好的模擬出結果。根據 Moriasi et al. (2015)之研究，在模擬事件時的流量，評估指標為 $0.7 < R^2 < 0.85$ 、 $0.7 < NSE < 0.8$ 時，即可被認為是另人滿意的模型。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y^{mean})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \quad (3-1)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right] \quad (3-12)$$

其中 Y_i^{sim} 為 i 時間之模擬流量， Y^{mean} 為平均觀測流量， Y_i^{obs} 為 i 時間之觀測流量。

四、 初步結果

本研究首先以中央氣象局(CWB)的地面測站做事件的率定及驗證，率定事件選定 2008 年 9 月 27 日時發生的薔蜜颱風，圖 3 為 GSSHA 模式率定之結果，在秀巒測站模擬與觀測流量的 R^2 值為 0.86，NSE 值為 0.74，玉峰測站的 R^2 值為 0.9，NSE 值為 0.84。於驗證模型時，選定事件為 2010 年 2 月 15 日的小型降雨事件及 9 月 18 日的凡那比颱風事件；圖 4 為模式驗證凡那比事件之結果，秀巒及玉峰測站的 R^2 值分別為 0.82 與 0.88，NSE 值為 0.74 與 0.81；圖 5 為降雨事件驗證結果，因降雨事件與颱風事件降雨量差距甚大，以模擬結果來看，流量變化皆有隨之起伏，但模擬之峰值流量大小與觀測流量皆有落差，模擬結果較不理想。根據 Moriasiet al. (2015)之研究，本研究模型的率定及驗證結果，在颱風事件的模擬上為可以被信任的模型。

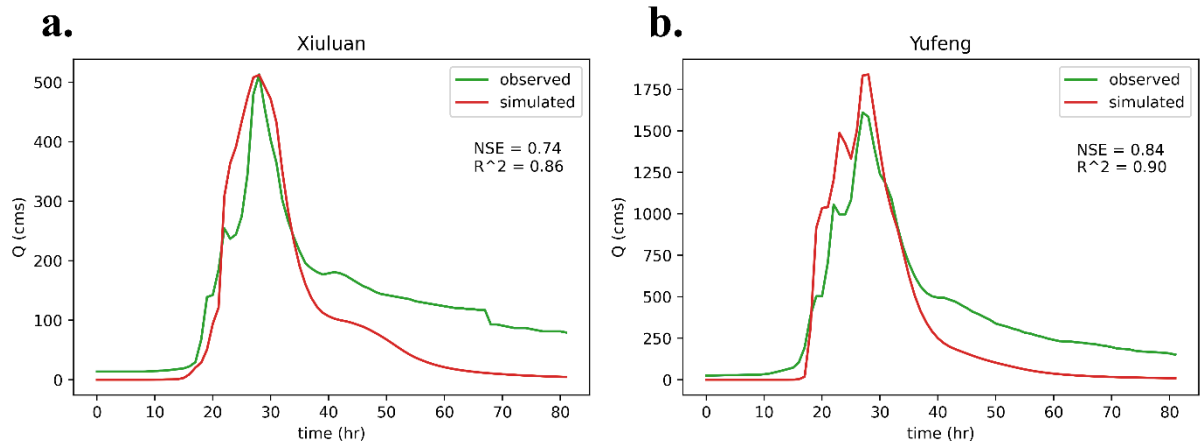


圖 3. 舊蜜颱風事件流量率定結果 (a)秀巒測站 (b)玉峰測站

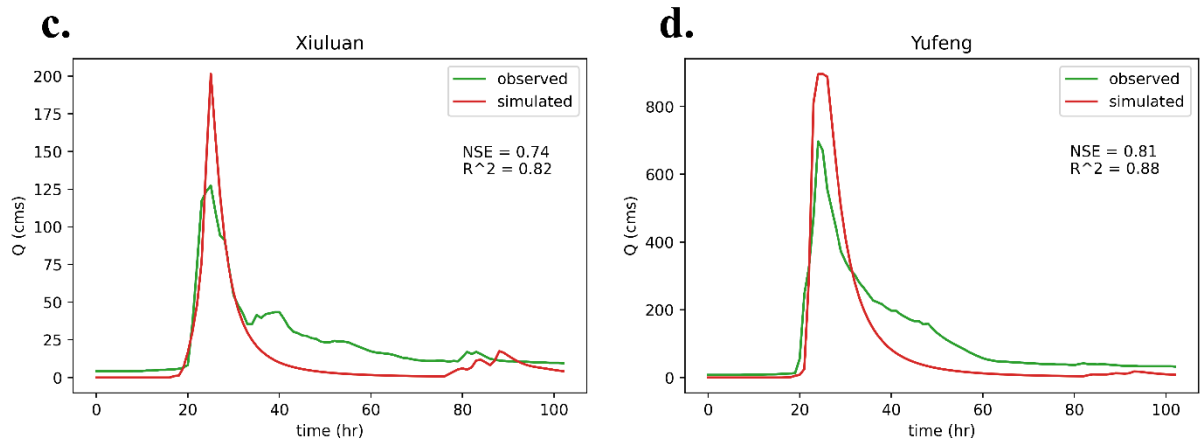


圖 4. 凡那比颱風事件流量驗證結果 (c)秀巒測站 (d)玉峰測站

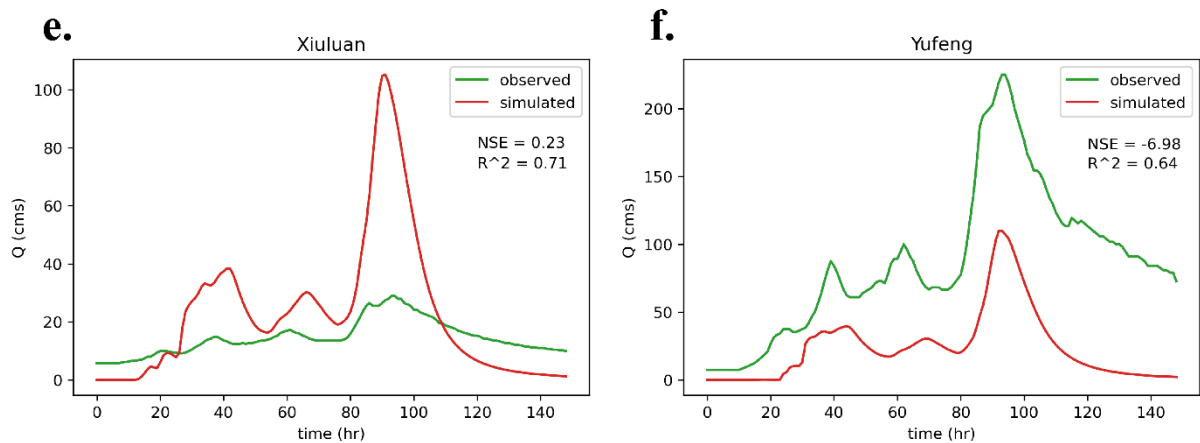


圖 5. 降雨事件流量驗證結果 (e)秀巒測站 (f)玉峰測站

在輸沙模擬部分，目前集水區率定是選用舊蜜颱風作為輸沙量的率定事件，而輸沙量觀測資料則是採用石門水庫上游集水區流量與含沙量量測及水文資料數化庫(經濟部水利署北區水資源局，2010)報告書中，秀巒及玉峰水位流量站之流量-輸沙量率定公

式，輸沙量率定曲線是以流量作為基礎計算得出，因此輸沙量峰值與流量相同皆為單峰。圖 6 為薈蜜事件的率定結果，在秀巒測站模擬與觀測流量的 R^2 值為 0.60，NSE 值為 0.59，玉峰測站的 R^2 值為 0.52，NSE 值為 -0.14。輸沙量目前正處於率定階段，後續將會持續調整模擬參數，使模擬與觀測的輸沙量趨近。

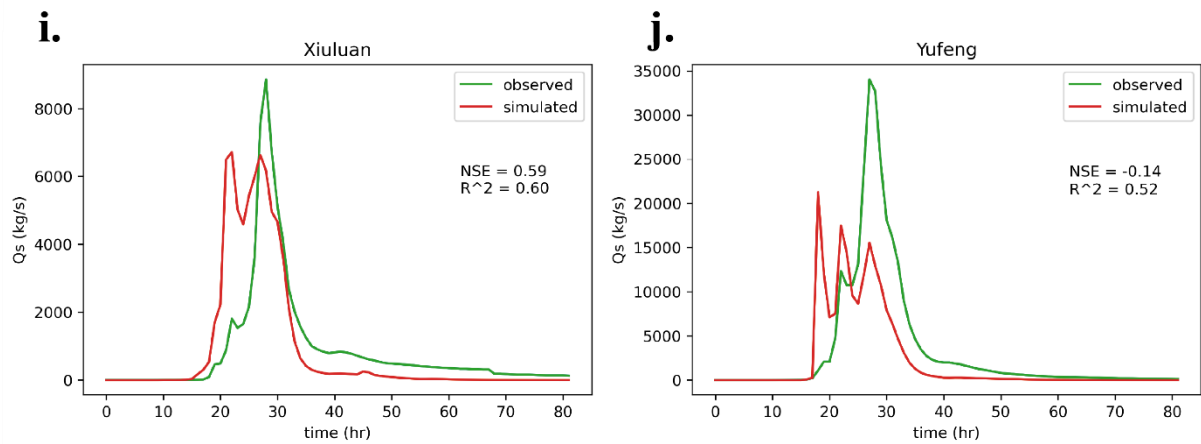


圖 6. 薈蜜颱風事件輸沙量率定結果 (i)秀巒測站 (j)玉峰測站

GPM 所量測之降雨量會因為衛星的觀測誤差，降雨量略小於地面測站所觀測得出的降雨資料，本研究目前先以率定完成之地面測站薈蜜颱風事件參數設置，並將薈蜜颱風之 GPM 降雨資料匯入模式中，以模擬集水區之流量變化。圖 7 為以 GPM 降雨資料模擬薈蜜颱風事件之流量結果，兩測站流量以測站率定結果參數設置模擬下，皆為低估的狀態，後續將持續率定及驗證各事件之 GPM 降雨資料。

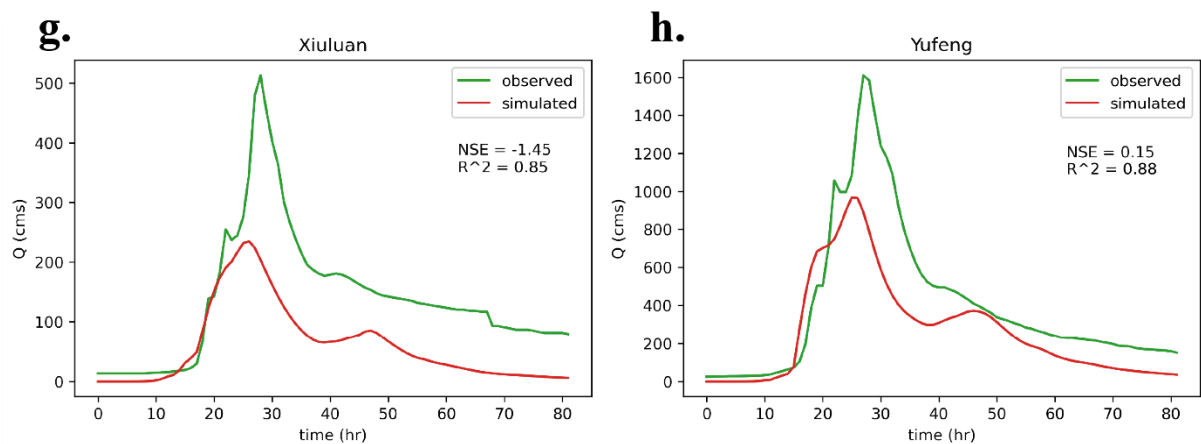


圖 7. 以 GPM 降雨資料模擬薈蜜颱風事件之流量變化 (g) 秀巒測站 (h) 玉峰測站

五、 小結與後續工作

本研究目前已完成了中央氣象局(CWB)局屬測站與自動測站所觀測雨量資料的率定及驗證。在其他降雨產品方面，WRF 模式部分，已產製出運行模式所需的相關空間

地理資訊；GPM 衛星降雨部分，已將資料單位進行換算，並將其轉為 GSSHA 模式可匯入的形式，匯入模式進行測試，後續將率定及驗證 GPM 所匯入之資料；輸沙部分，目前透過影響集水區輸沙量之敏感參數進行測試，了解敏感參數對於泥沙起動與輸沙量的影響。以下列出本研究後續工作，以達成進行輸沙量預測之目的。

1. 以中央氣象局測站所觀測之雨量資料作為模式之輸入，進行輸沙量敏感參數之測試，並以秀巒及玉峰集水區之輸沙量率定曲線進行驗證。
2. 運行 WRF，將其產製出的降雨資料耦合 GSSHA 模式，比較流量之觀測值與模擬值，進行率定及驗證後，再測試輸沙敏感參數以模擬集水區之輸沙量。
3. 將 GPM 降雨資料耦合 GSSHA 模式，確認其網格資料確實為集水區之降雨資料後，再進行流量的率定及驗證，並模擬集水區的輸沙量。
4. 在此耦合各降雨產品和水文模式的架構下，期望對集水區不同型態之降雨事件進行輸沙量之預測。

六、 參考文獻

1. 財團法人農業工程研究中心，「石門水庫上游集水區流量與含砂量量測及水文資料數化庫建立」，經濟部水利署北區水資源局，84-85，2010。
2. Chiang, L. C., Liao, C. J., Lu, C. M., & Wang, Y. C., “Applicability of modified SWAT model (SWAT-Twn) on simulation of watershed sediment yields under different land use/cover scenarios in Taiwan,” *Environmental monitoring and assessment*, 193(8), 1-23, 2021.
3. Downer, C. W., & Ogden, F. L., “GSSHA: Model to simulate diverse stream flow producing processes,” *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(3), 161-174, 2004.
4. Downer, C. W., Pradhan, N. R., Ogden, F. L., & Byrd, A. R., “Testing the effects of detachment limits and transport capacity formulation on sediment runoff predictions using the US Army Corps of Engineers GSSHA model,” *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(7), 04014082, 2015.
5. Engelund, F., & Hansen, E., “A monograph on sediment transport in alluvial streams,” Technical University of Denmark Østervoldgade 10, Copenhagen K, 1967.
6. Everaert, W., “Empirical relations for the sediment transport capacity of interrill flow,” *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(6), 513-532, 1991.
7. Johnson, B. E., Julien, P. Y., Molnar, D. K., & Watson, C. C., “THE TWO-DIMENSIONAL UPLAND EROSION MODEL CASC2D-SED 1,” *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 36(1), 31-42, 2000.

8. Li, Z., Yang, D., & Hong, Y., “Multi-scale evaluation of high-resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River,” *Journal of Hydrology*, 500, 157-169, 2013.
9. Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P., “Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria,” *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785, 2015.
10. Sith, R., & Nadaoka, K., “Comparison of SWAT and GSSHA for high time resolution prediction of stream flow and sediment concentration in a small agricultural watershed,” *Hydrology*, 4(2), 27, 2017.
11. Van, L. N., Le, X. H., Nguyen, G. V., Yeon, M., Jung, S., & Lee, G., “Investigating Behavior of Six Methods for Sediment Transport Capacity Estimation of Spatial-Temporal Soil Erosion,” *Water*, 13(21), 3054, 2021.
12. Wicks, J. M., & Bathurst, J. C., “SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system,” *Journal of Hydrology*, 175(1-4), 213-238, 1996.
13. Yin, D., Xue, Z. G., Gochis, D. J., Yu, W., Morales, M., & Rafieeiniasab, A., “A process-based, fully distributed soil erosion and sediment transport model for WRF-Hydro,” *Water*, 12(6), 1840, 2020.