

結合水庫集水區衛星影像推估單場降雨事件入 庫土砂量-以曾文水庫為例

Estimating Sediment Yield into Reservoirs from Single Rainfall Events Using Satellite Imagery in watershed: A Case Study of Zengwen Reservoir

逢甲大學營建及防災研究中心

助理教授

助理教授

副教授

工程師

林秉賢

何智超

賴哲儂

陳思瑋

Bing-Shyan Lin

Chih-Chao Ho

Jhe-Syuan Lai

Ssu-Wei Chen

經濟部水利署水利規劃分署

分署長

科長

正工程司

助理研究員

張廣智

葛武松

趙永楠

許家銓

Chang Kuang-Chih,

Ke Wu-Sung

Chao Yeong-Nan

Hsu Chia-Chuan

摘 要

為了解主要颱風豪雨事件所產生之入庫土砂量及土砂流失熱區，進而輔助集水區土砂收支監控管理、水庫集水區土砂生產環境健檢及土砂流失熱區管理，本計畫透過集水區土砂收支模組推估單場降雨事件之入庫土砂量。

藉由光學及雷達衛星影像資訊判釋降雨事件前後集水區崩塌地新增情形，引入 Sentinel-1 雷達衛星透過 InSAR 技術，以評估新增崩塌地崩塌土砂量，並透過 MUSLE 公式推估坡面土壤沖蝕量，最後以 SRH-2D 模擬分析水庫上游集水區坡面土壤沖蝕量及崩塌土砂量等集水區土砂流失量進入主流河道後輸送至水庫之入庫輸砂量。

以曾文水庫上游之大埔壩水文觀測站為控制點，藉由大埔壩水文觀測站之流量與泥砂濃度觀測資料進行模式檢定與驗證，先比對流量趨勢變化是否符合實際變化趨勢，若未符合則重新調整輸入資料或模式參數設定，若符合則接著針對模式模擬之懸浮質進行輸砂量比對，若懸浮質總輸砂量誤差介於±20%內，則重新調整集水區土砂流失量或模式參數設定。

事件型土砂收支動態評估模組針對五場降雨事件評估誤差均在±20%內，顯示其能合理評估集水區土砂流失量及有效模擬入庫輸砂量，供水庫管理單位有效掌握水庫淤積土砂來源。

關鍵詞：集水區土砂收支，遙測技術，SRH-2D

Abstract

To understand the sediment yield and sediment loss hotspots generated by major typhoon rainfall events and to assist in the sediment budget monitoring and management of the catchment area, as well as the health check and management of sediment production environments in the reservoir catchment, this study estimates the sediment yield into the reservoir from single rainfall events through a sediment budget model for the catchment.

Using optical and radar satellite imagery to interpret the changes in landslide areas in the catchment area before and after rainfall events, this study incorporates Sentinel-1 radar satellite data and employs InSAR technology to assess the amount of landslide debris. The MUSLE formula is used to estimate surface soil erosion, and the SRH-2D model is employed to simulate and analyze the sediment yield from surface soil erosion and landslide debris in the upstream catchment entering the main river channel and subsequently transported to the reservoir.

The hydrological observation station at the Dapu Dam upstream of the reservoir serves as the control point. Observational data on flow and sediment concentrations from the Dapu Dam hydrological observation station are used to calibrate and validate the model. The flow trend changes are compared with actual trends, and if discrepancies are found, input data or model parameters are adjusted accordingly. If the trends match, the simulated suspended sediment yield is then compared. If the error in the total suspended sediment load is within $\pm 20\%$, adjustments are made to the catchment area sediment loss or model parameters.

The event-based sediment budget dynamic assessment model was evaluated for five rainfall events, with all errors within $\pm 20\%$, indicating its capability to reasonably assess sediment loss in the watershed and effectively simulate the sediment load entering the reservoir. This enables reservoir management units to effectively monitor the sources of sedimentation in the reservoir.

Keywords: Watershed Sediment Budget, Telemetry technology, SRH-2D

一、前言

水庫入庫土砂量目前主要透過庫容淤積測量與水庫清淤量分析而得，然庫容淤積測量非每年辦理，若該年度無測量資料，對於較缺乏監測資料之水庫僅能透過平均淤積量概估水庫淤積情形，且無法有效掌握土砂來源。

為了解主要颱風豪雨事件所產生之入庫土砂量及土砂流失熱區，進而輔助集水區土砂收支監控管理、水庫集水區土砂生產環境健檢及土砂流失熱區管理，本計畫以子集水區為分析單元，結合衛星影像資訊，建立水庫集水區「事件型土砂收支動態評估」技術，以分析不同子集水區之坡面崩塌、坡面沖蝕及河道輸砂之土砂量，協助相關單位掌握土砂流失熱區。

二、評估區域

本計畫選定曾文水庫集水區進行事件型土砂收支動態評估，如圖 1 所示，模組分為上游集水區與環庫集水區兩部分，再分別推估環庫集水區之入庫土砂量及上游集水區入庫輸砂量，最後兩者總和即為降雨事件之入庫土砂量。

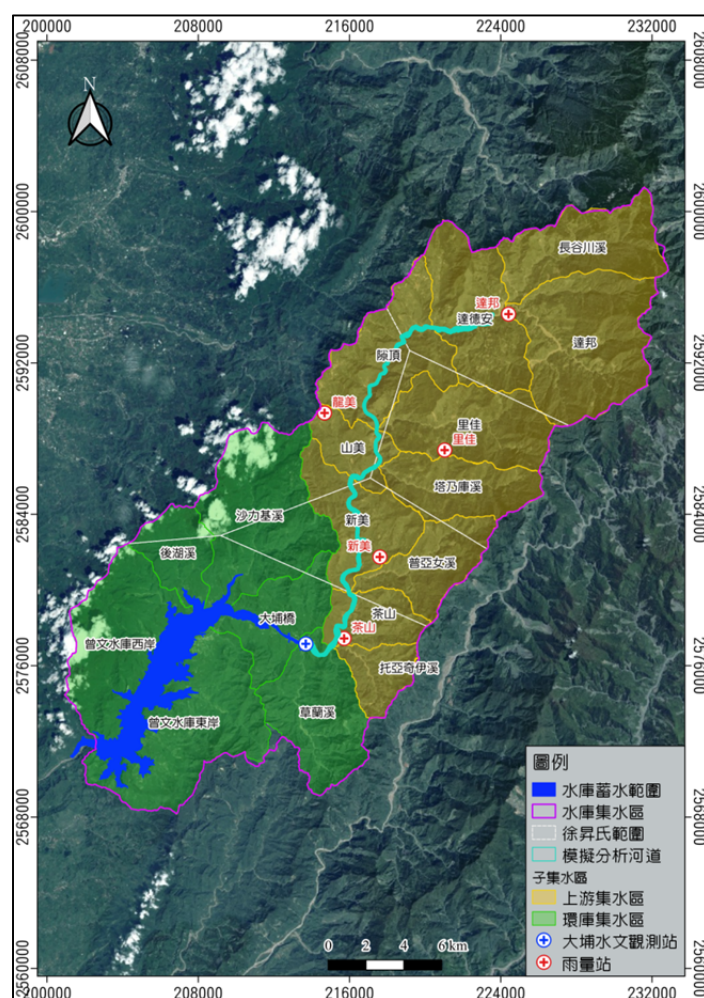


圖 1 評估區域-曾文水庫集水區

三、評估方法

(一)評估流程

本計畫選定曾文水庫集水區進行事件型土砂收支動態評估模組，模組分為上游集水區與環庫集水區兩部分，流程如圖 2 所示，首先將蒐集之降雨事件觀測資料進行彙整，並選定模式檢定與驗證場次，再分別推估環庫集水區之入庫土砂量及上游集水區入庫輸砂量，最後兩者總和即為降雨事件之入庫土砂量，如表 1 所示，上游集水區與環庫集水區執行流程說明如下：

表 1 降雨事件入庫土砂量計算說明

降雨事件入庫土砂量=上游集水區入庫輸砂量(C)+環庫入庫土砂量(D)

1.上游集水區

本計畫以水庫上游之大埔壩水文觀測站為控制點，先推估單場降雨事件中上游各子集水區遞移至主流河道之坡面沖蝕土砂量與崩塌土砂量，其總和即為集水區土砂流失量，再透過 SRH-2D 動床模式模擬分析主流河道輸送懸浮質(含新增崩塌土砂量與坡面沖蝕土砂量)及推移質土砂量，以此推估上游集水區輸送至水庫之入庫輸砂量。

為檢核模擬分析結果是否合理，藉由大埔壩水文觀測站之流量與泥砂濃度觀測資料進行模式檢定與驗證，考量泥砂濃度觀測資料之所含泥砂主要為懸浮質，因此，將針對模式模擬之懸浮質輸砂量進行比對，若事件總流量或事件懸浮質總輸砂量誤差介於±20%，則重新調整集水區土砂流失量或模式參數設定。

2.環庫集水區

環庫集水區主要針對水庫蓄水區周邊坡面為主要土砂來源為坡面土砂，因此，本計畫僅針對坡面沖蝕土砂量與崩塌土砂量配合遞移率進行推估，其總和即為入庫土砂量。

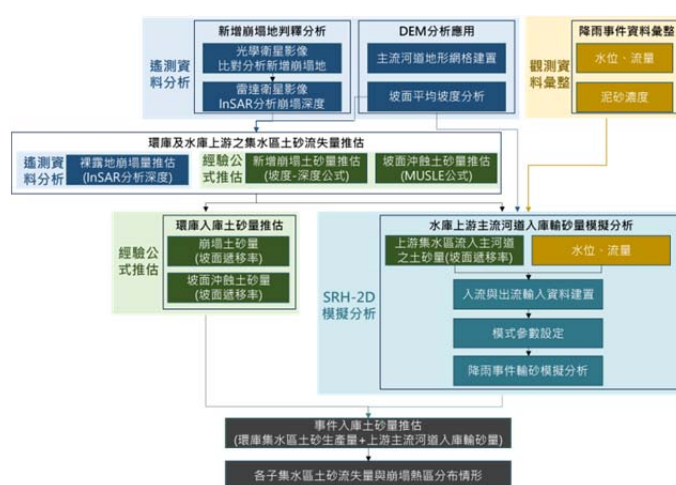


圖 2 事件型土砂收支動態評估模組執行流程圖

(二)坡面土壤沖蝕量(A)

水庫集水區坡面土壤沖蝕量採用修正土壤流失公式(MUSLE)進行計算，其公式如表 2 所示。

表 2 修正土壤流失公式

$A_s = 11.8(V_{eff} \times Q_p)^{0.56} \times K_m \times L \times S \times C \times P$	
A _s ：	單場暴雨土壤流失量(公噸)
V _{eff} ：	有效逕流量(m ³)
Q _p ：	洪峰流量(cms)
K _m ：	土壤沖蝕性指數(公噸*公頃**年/百萬焦耳*毫米*公頃)
L：	坡長因子
S：	坡度因子
C：	覆蓋與管理因子
P：	水土保持處理因子

(三)崩塌土砂量(B)

崩塌量估算基本概念乃為崩塌面積乘上對應之崩塌深度獲得崩塌推估量，如表 3 表所示，崩塌地平均崩塌深度除通過現地調查方式決定外，亦可採用適當公式推算之，如表 4 所示，雖然此法仍有許多誤差存在，但在許多規劃案無法取得降雨或地震事件前後之地貌變遷高程情況下，此法仍為許多規劃案推估集水區崩塌產生量的主要方式。

本計畫另透過 Sentinel-1 雷達衛星以合成孔徑雷達差分干涉技術(Differential InSAR, DInSAR)技術分析既有裸露地再度崩塌之崩塌深度，DInSAR 可生成衛星視距方向變形量(LOS)、地表垂直方向上的位移值(VD)和地表沿最大坡度投影的位移值(SD)，如圖 3 所示，進而以 SD 值推估裸露地之崩塌土砂量。

本計畫藉由農業部農村發展及水土保持署公開之「事件型崩塌目錄」及「全臺崩塌地圖層」圖資套繪與分析曾文水庫集水區內各子集水區新增崩塌地分布情形，再依上述公式進行崩塌土砂量計算。

表 3 崩塌土砂量公式

$V_l = D \times A_l$	
V _l ：	崩塌土砂體積
A _l ：	崩塌面積（斜面積），可透過遙測判釋而得
D：	崩塌地平均崩塌深度

表 4 邊坡坡度推估崩塌深度法

研究區域或文獻來源\坡度(度)	<20	20~30	30~40	40~60	>60
陳樹群（2010）	1.82	3.09	3.63	2.68	1.73

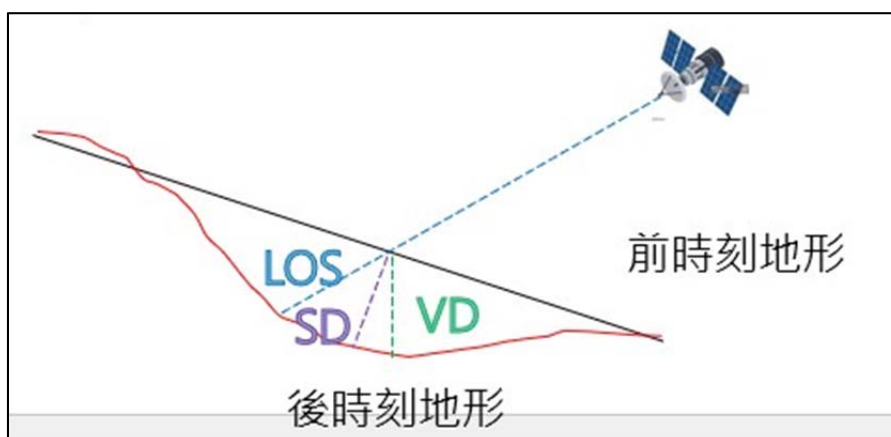


圖 3 DInSAR 生成之位移量

(四)SRH-2D 河道輸砂模式建置

1.主流河道網格建置

本計畫使用 105 年~107 年 DEM 資料進行河道地形網格建置，模擬範圍往河道外擴增 50 公尺，河道範圍內設置為寬 5 公尺*長 10 公尺之方形網格，河道範圍外 10~20 公尺三角形網格，如圖 4 所示。

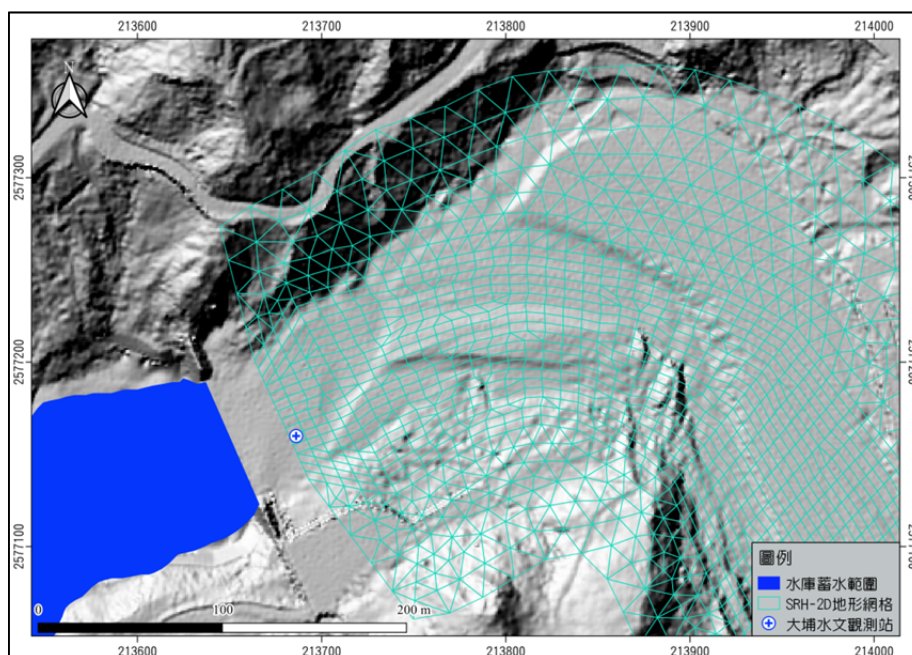


圖 4 SRH-2D 網格建置

2.模式參數設定

本計畫參照水利署南區水資源分署 102 年「曾文水庫集水區土地變異及土砂災害監測」計畫成果設定河道粒徑分布及曼寧 N 值，設定結果如表 5 及圖 5 所示。輸砂公式採用 Parker 公式，輸砂參數採用預設值。

表 5 曾文水庫上游主流河道粒徑分布與曼寧 N 值一覽表

累積百分比(%)	紫荊橋	茶山部落	山美大橋	樂野
10	2.4	0.4	0.8	0.3
20	5.8	1.8	4.2	1.0
30	12.7	9.5	9.6	5.7
40	25.6	34.0	20.1	25.8
50	39.5	80.0	38.1	57.3
65	145.5	128.0	92.5	152.2
75	181.8	154.0	176.0	188.8
90	344.5	195.0	326.0	285.2
設定河段	A 段、B 段	C 段	D 段	E 段
曼寧 N 值	0.0344	0.0330	0.0336	0.0343

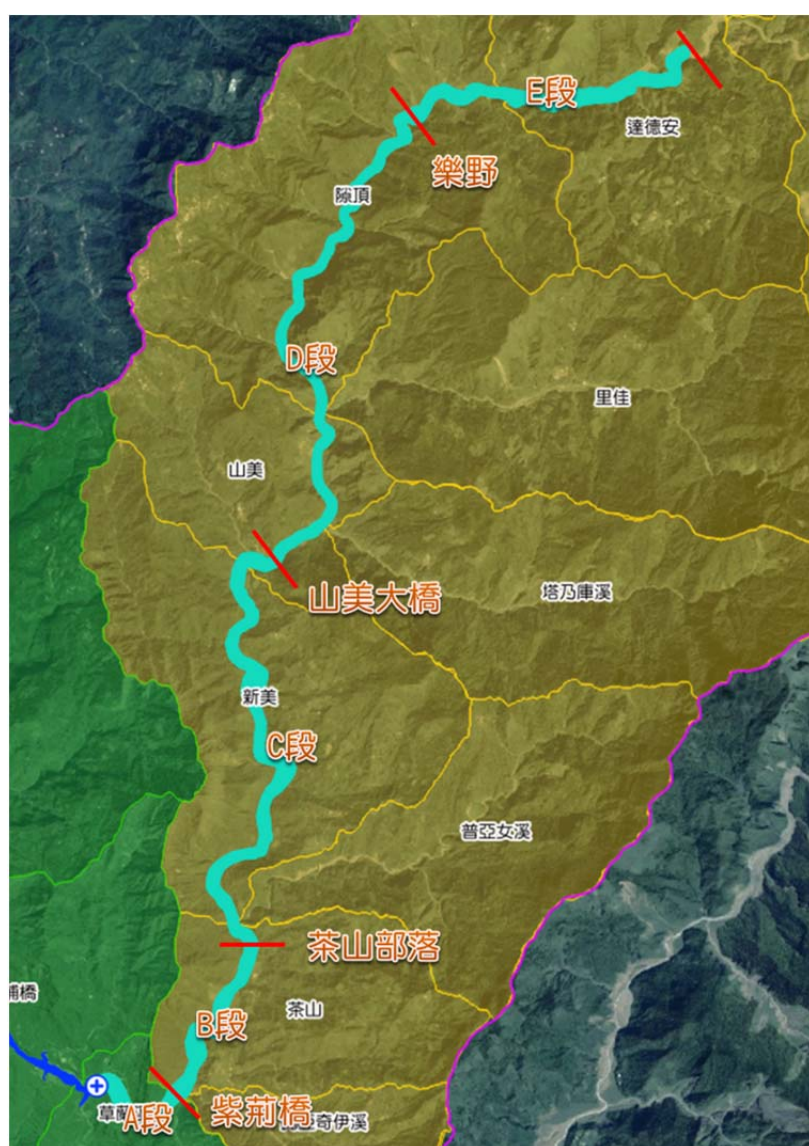


圖 5 SRH-2D 河道粒徑與曼寧 N 值設定分布圖

3. 出入流邊界設定

出入流邊界分布如圖 4 68 所示，出流邊界位置設定於大埔水文觀測站，將觀測水位歷線設為出流資料，托亞奇伊溪、普亞女溪、塔乃庫溪及烏奇哈溪入流邊界則設置於支流與主流會流口處；茶山、新美、山美及隙頂子集水區設置於集水區最上游端主流河道；達德安、長谷川溪及達邦則合併設於達邦橋下游處，入流資料依據前述各子集水區流量及土砂流失量計算結果進行設定。



圖 6 SRH-2D 出入流邊界設定分布圖

4. 模式檢定驗證

參考農村發展及水土保持署「111 年 13 座重要水庫集水區庫容有效維持保育減砂目標評估」計畫成果，因目前尚無具經濟效益且適用於野溪全洪程推移質監測儀器，於實務上仍會藉由先以濁度監測資料進行懸移質砂量計算，再藉由推移質與懸浮質之比例關係文獻配合濁度監測資料推估推移質量體，進而計算總輸砂量(懸浮質+推移質)。

本計畫藉由 SRH-2D 模擬水庫蓄水範圍上游主流河道於降雨事件中之入庫輸砂量，其採用動床模式，故輸砂量包含懸浮質與推移質，因實際監測資料僅有懸浮質，故僅針對懸浮質砂量進行檢定驗證，參考水利署南區水資源分署 100 年「曾文水庫激振式泥砂濃度觀測技術研究」計畫成果，綜整懸浮土砂粒徑區間，透過 SRH-2D 模式設定粒徑計算區間，以計算懸浮質輸砂量，再以此結果與實際監測資料進行檢定驗證。

四、評估結果

(一)子集水區土砂流失量

各子集水區於各場降雨事件中之土砂流失量如表 6 及表 7 所示，民國 110 年盧碧颱風所造成的土砂流失量為最大，上游集水區約 68 萬立方公尺，其中崩塌土砂為主要流失來源，約 45 萬立方公尺，環庫集水區土砂流失量約 33 萬立方公尺，而土砂流失量最小為民國 111 年軒嵐諾颱風，上游集水區約 2.5 萬立方公尺，環庫集水區約 0.4 萬立方公尺，降雨期間無發生崩塌。

(二)檢定驗證結果

本計畫以 SRH-2D 模擬單場降雨事件中水庫上游集水區土砂流失量遞移入主流河道後於河道中輸送至水庫蓄水範圍之入庫輸砂量，其以 110 年 3 場降雨事件泥砂濃度監測資料作為檢定場次，包含彩雲颱風、0801 豪雨及盧碧颱風，以 111 年軒嵐諾颱風及 112 年卡努颱風作為驗證場次，檢定結果如表 8 所示，其懸浮質輸砂量誤差均介於 $\pm 20\%$ 內，驗證結果如表 9 所示，誤差亦均介於 $\pm 20\%$ 內。

(三)入庫土砂量評估結果

經懸浮質輸砂量檢定驗證通過，依據 SRH-2D 模擬入庫輸砂量與集水區土砂流失量計算結果，各降雨事件入庫土砂量評估結果如表 10 所示，其中以盧碧颱風之總入庫土砂量為最多，約 96 萬立方公尺土砂輸入水庫，其上游集水區約流入 62.4 萬立方公尺，環庫集水區約流入 33.6 萬立方公尺，最小為軒嵐諾颱風，其總入庫土砂量僅有 2.7 萬立方公尺。

各降雨事件中水庫集水區內之子集水區土砂流失量與崩塌分布如圖 7 所示，結果顯示土砂主要流失區域多分布於上游子集水區(新美以上)，亦為較容易發生崩塌之區域，除因受地質影響外，主要因降雨多分布於上游區域，造成坡面較大土壤沖蝕及發生多處崩塌。

表 6 各降雨事件之子集水區土砂流失量分析結果一覽表(檢定場次)

模組	子集水區	彩雲颱風-沖 蝕量	彩雲颱風-崩 塌量	彩雲颱風-土 砂流失量	0801 豪雨-沖 蝕量	0801 豪雨-崩 塌量	0801 豪雨-土 砂流失量	盧碧颱風-沖 蝕量	盧碧颱風-崩 塌量	盧碧颱風-土 砂流失量
		A	B	A+B	A	B	A+B	A	B	A+B
上游集 水區	茶山	259	3,748	4,007	3,136	0	3,136	8,647	0	8,647
	托亞奇伊溪	1,146	0	1,146	3,158	270	3,428	8,708	8,715	17,423
	新美	2,898	0	2,898	5,064	1,197	6,261	13,359	39,056	52,415
	普亞女溪	1,630	0	1,630	2,844	72	2,916	9,656	2,338	11,994
	山美	1,015	0	1,015	3,894	2,257	6,151	8,521	38,813	47,334
	塔乃庫溪	332	2,727	3,058	8,024	2,172	10,195	34,097	72,534	106,631
	烏奇哈溪(里佳)	2,521	0	2,521	4,237	1,774	6,011	25,913	0	25,913
	隙頂	3,196	0	3,196	12,913	10,129	23,042	22,165	136,653	158,818
	達德安	1,075	0	1,075	6,608	53,425	60,033	31,463	53,425	84,888
	長谷川溪	953	0	953	5,859	79,201	85,060	27,898	79,201	107,099
	達邦	1,501	2,191	3,692	9,222	22,393	31,615	43,910	22,393	66,302
合計(流入主流)		18,819	11,117	29,937	64,959	172,890	237,848	234,337	453,128	687,464
環庫集 水區	大埔橋	713	15,053	15,765	7,521	110	7,631	24,860	4,464	29,323
	後湖溪	460	23,975	24,435	6,941	494	7,435	22,943	19,980	42,922
	草蘭溪	812	19,875	20,687	9,208	1,171	10,379	30,437	47,399	77,835
	曾文水庫西岸	3,695	14,238	17,933	11,951	352	12,303	39,504	14,241	53,745
	曾文水庫東岸	8,620	3,824	12,444	17,062	110	17,173	56,395	4,464	60,858
	沙力基溪	3,058	16,942	20,000	13,336	856	14,192	44,080	27,671	71,752
合計(流入水庫)		17,359	93,906	111,265	66,019	3,093	69,113	218,219	118,219	336,435

表 7 各降雨事件之子集水區土砂流失量分析結果一覽表(驗證場次)

子集水區	軒嵐諾颱風- 沖蝕量	軒嵐諾颱風- 崩塌量	軒嵐諾颱風- 土砂流失量	卡努颱風-沖 蝕量	卡努颱風-崩 塌量	卡努颱風-土 砂流失量
	A	B	A+B	A	B	A+B
茶山	172	0	172	5,698	0	5,698
托亞奇伊溪	175	0	175	5,822	0	5,822
新美	595	0	595	7,163	0	7,163
普亞女溪	360	0	360	835	14,607	15,441
山美	856	0	856	4,686	0	4,686
塔乃庫溪	1,010	0	1,010	900	17,193	18,094
烏奇哈溪(里佳)	1,245	0	1,245	4,612	19,675	24,287
隙頂	2,881	0	2,881	14,757	0	14,757
達德安	5,519	0	5,519	6,616	63,812	70,429
長谷川溪	4,893	0	4,893	5,867	50,736	56,602
達邦	7,702	0	7,702	9,234	38,617	47,850
合計(流入主流)	25,408	0	25,408	66,190	204,640	270,829
大埔橋	467	0	467	12,391	0	12,391
後湖溪	412	0	412	11,182	0	11,182
草蘭溪	603	0	603	17,790	0	17,790
曾文水庫西岸	725	0	725	19,560	0	19,560
曾文水庫東岸	1,040	0	1,040	29,577	0	29,577
沙力基溪	798	0	798	22,225	0	22,225
合計 (環庫集水區)	4,045	0	4,045	112,725	0	112,725

表 8 模式檢定結果

降雨事件	模式檢定		
	110 年彩雲颱風	110 年 0801 豪雨事件	110 年盧碧颱風
水庫集水區總雨量(mm)	250	237	684
事件降雨延時(h)	52	46	74
監測總流量(cms)	3,796.4	11,083.3	33,715.7
模擬總流量(cms)	3,550.5	10,711.2	33,183.1
誤差(%)	-6.5	-3.4	-1.6
監測懸浮質入庫輸砂量(m ³)	16,863.8	60,410.5	506,014.9
模擬懸浮質入庫輸砂量(m ³)	15,438.3	68,719.1	539,521.4
誤差(%)	-8.5	13.8	6.6

表 9 模式驗證結果

降雨事件	模式驗證	
	111 年軒嵐諾颱風	112 年卡努颱風
水庫集水區總雨量(mm)	113	434
事件降雨延時(h)	48	70
監測總流量(cms)	4,819.8	19,328.0
模擬總流量(cms)	4,756.6	19,236.4
誤差(%)	-1.3%	-0.5%
監測懸浮質入庫輸砂量(m ³)	18,345.4	248,073.1
模擬懸浮質入庫輸砂量(m ³)	18,466.9	221,247.6
誤差(%)	0.7%	-10.8%

表 10 各降雨事件入庫土砂量評估結果

降雨事件		110 年彩雲颱風	110 年 0801 豪雨事件	110 年盧碧颱風	111 年軒嵐諾颱風	112 年卡努颱風
上游集水區入庫土砂量 (SRH-2D 模擬結果)	C	19,229.0	87,999.3	624,072.5	23,315.4	268,407.5
環庫集水區入庫土砂量	D	111,243.6	69,123.6	336,391.2	4,024.8	112,744.8
事件總入庫土砂量	C+D	130,472.6	157,122.9	960,463.7	27,340.2	381,152.3

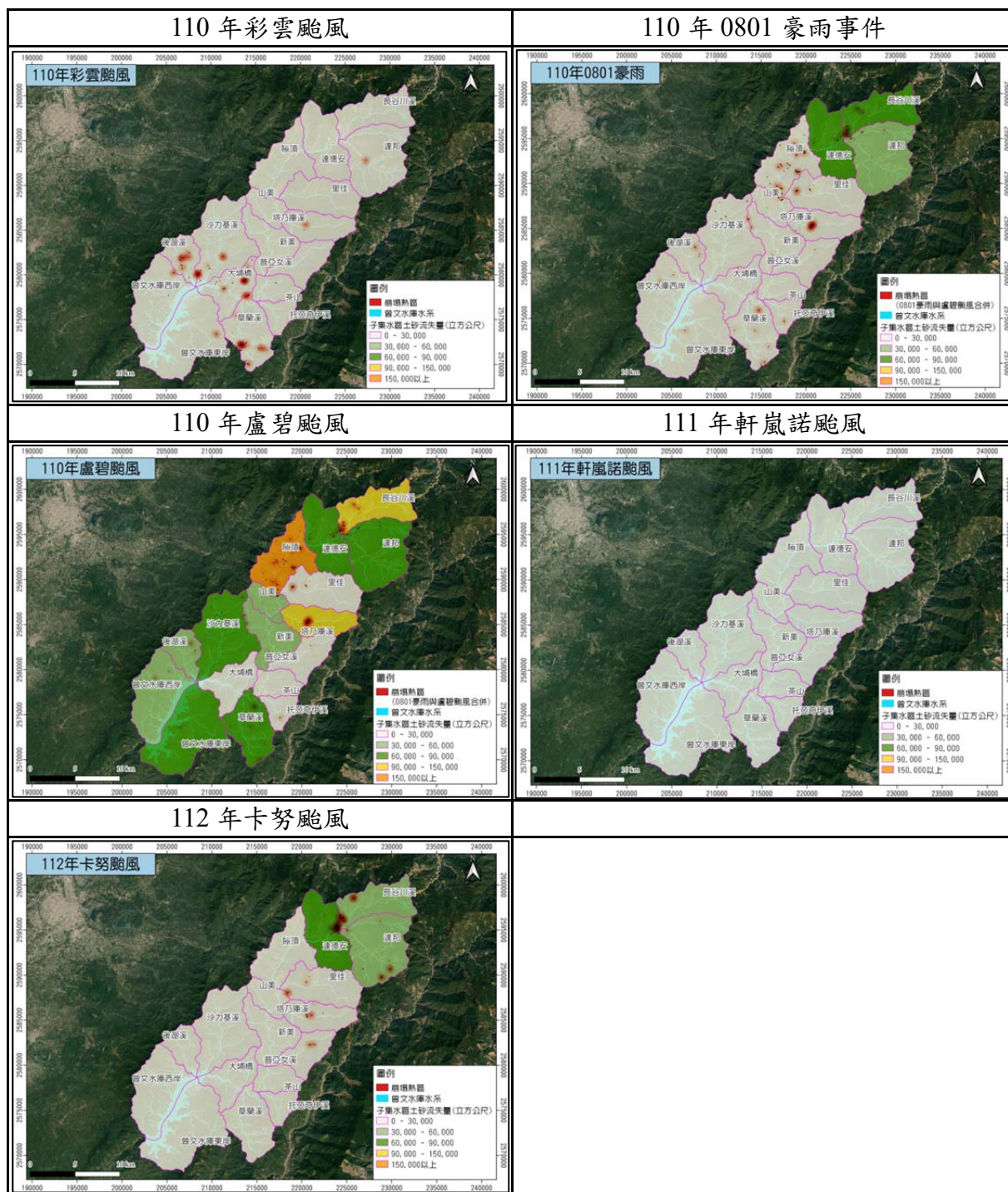


圖 7 各事件土砂分布情形與崩塌熱區

五、結論與建議

一、結論

- (一)事件型土砂收支動態評估模組針對五場降雨事件評估誤差均在 $\pm 20\%$ 內，顯示其能合理評估集水區土砂流失量及有效模擬入庫輸砂量，供水庫管理單位有效掌握水庫淤積土砂來源，但有其應用限制，因藉由 SRH-2D 模擬上游集水區土砂流失量於主流河道輸送至水庫蓄水範圍之情形，須有主流河道颱風豪雨事件之流量、水位及泥砂濃度觀測資料，且觀測位置須接近蓄水範圍。
- (二)本計畫藉由 INSAR 分析既有裸露地之崩塌深度，但因雷達影像受到大氣效應、地形遮蔽、地表反射特性影響，可能存在一定誤差(噪音)，影響分析精準度。此外，雷達波束在兩次觀測之間若經歷了大幅度的相位變化時，導致測量的相位無法準確解析。一般而言，當高程變化超過幾倍波長，干涉相位模糊就可能發生。因此，若高程變化過大，誤差將顯著提升。

二、建議

因受限於河道數值高程模型資料有限，無近年內多時期資料，導致無法針對河道沖淤情形進行檢定驗證，故建議未來可針對上游主流河道建立多時期數值高程模型資料，可進一步掌握上游主流河道土砂淤積情形，以評估規劃相關河道治理與清疏工程。

六、參考文獻

- 「曾文水庫集水區土地變異及土砂災害監測」，水利署南區水資源分署，2013 年
- 「111 年 13 座重要水庫集水區庫容有效維持保育減砂目標評估」，農業部農業發展與水土保持署，2022 年
- 「曾文水庫激振式泥砂濃度觀測技術研究」，水利署南區水資源分署，2011 年