
初探極端氣候事件集水區複合型災害
地文特性
—致災區與受災區之指認（成果報告）

執行單位：臺北市立大學城市發展學系

執行期間：111 年 1 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：陳姿伶 助理教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 111 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考）

目錄

摘要	1
Abstract	2
第一章 研究背景與目的	3
第一節 研究背景	3
第二節 研究目的	7
第三節 研究流程	8
第四節 研究地區	10
第二章 文獻回顧	13
第一節 複合災害風險	13
第二節 土壤水文評估模式概念與案例應用	22
第三章 研究設計	29
第一節 空間關聯統計	29
第二節 土壤水文評估模式	32
第三節 參數檢定軟體 SWAT-CUP	39
第四節 氣候變遷資料產製說明	40
第五節 邏輯斯迴歸分析	42
第四章 複合災害時空關聯解析	43
第一節 災害複合特性	43
第二節 複合災害時空關聯性	48
第三節 致災區與受災區範圍	55
第五章 高屏溪流域水文及輸砂空間分佈	79
第一節 土壤水文評估模式檢定	79
第二節 高屏溪流域水文及輸砂空間分佈分析	110
第六章 高屏溪流域水文及輸砂空間預測	117
第一節 高屏溪流域氣候變遷情境下水文及輸砂空間變化分析	117
第二節 高屏溪流域坡地災害模型建立	124
第七章 結論與建議	130
第一節 研究發現	131
第二節 後續建議	132
參考文獻	133

圖次

圖 1-1 研究流程圖.....	9
圖 1-2 高屏溪流域測站及子集水區邊界	11
圖 2-1 災害相互耦合關係.....	18
圖 2-2 時空重合類型.....	19
圖 2-3 級聯災害相互關係矩陣.....	21
圖 2-4 複合災害相互關係矩陣.....	21
圖 2-5 SWAT 模式之水文模擬成果顯示介面	22
圖 2-6 SWAT 模式子集水區空間劃分示意圖	24
圖 2-7 中國三峽大壩集水區流量及非點源污染輸出模擬及來源區評估	26
圖 2-8 中國丹江口水庫集水區 1978 及 2007 年流域流量及輸砂量空間輸出	27
圖 2-9 Neshanic River 流域三種情境及其輸出量趨勢變化比對圖	28
圖 3-1 水在 Kinematic storage model 中假定之狀態.....	33
圖 3-2 SWAT-CUP 參數檢定流程	40
圖 4-1 莫拉克颱風路徑圖.....	43
圖 4-2 莫拉克颱風累積雨量圖.....	43
圖 4-3 凡那比颱風路徑圖.....	44
圖 4-4 凡那比颱風累積雨量圖.....	44
圖 4-5 尼莎/海棠颱風路徑圖	45
圖 4-6 尼莎/海棠颱風累積降雨圖	45
圖 4-7 豪雨 0823 地面天氣圖.....	45
圖 4-8 豪雨 0823 累積降雨圖.....	45
圖 4-9 歷史淹水區域.....	46
圖 4-10 歷史土石流區域.....	46
圖 4-11 莫拉克颱風災害時空關聯性分析.....	49
圖 4-12 凡那比災害時空關聯性分析	50
圖 4-13 尼莎暨海棠颱風災害時空關聯性分析	51
圖 4-14 豪雨 0823 災害時空關聯性分析	54
圖 4-15 尼莎海棠颱風致受災區區分布	56

圖 4-16 豪雨 08/23 事件致受災區分布	56
圖 4-17 莫拉克颱風致受災區分布.....	62
圖 4-18 凡那比颱風致受災區分布.....	62
圖 4-19 尼莎海棠颱風致受災區分布	63
圖 4-20 豪雨 08/23 事件致受災區分布	63
圖 4-21 杉林地區人為開墾之山坡地區	70
圖 4-22 杉林地區人為開墾之山坡地區	71
圖 4-23 杉林地區山坡裸露地及農田	71
圖 4-24 旗山市區旗山老街.....	72
圖 4-25 旗山市區河堤停車場.....	73
圖 4-26 旗山市區低矮河堤.....	73
圖 4-27 尾寮山臨近山坡之大規模崩塌	74
圖 4-28 尾寮山臨近山坡之大規模崩塌及護坡	75
圖 4-29 青葉部落邊坡及道路狀況.....	76
圖 4-30 青葉部落內街道狀況.....	77
圖 4-31 青葉部落及土石流受災地區	78
圖 5-1 杉林大橋集水區流量檢定驗證時序圖	82
圖 5-2 六龜集水區流量檢定驗證時序圖	84
圖 5-3 大津橋集水區流量檢定驗證時序圖	87
圖 5-4 三地門集水區流量檢定驗證時序圖	90
圖 5-5 里嶺大橋集水區流量檢定驗證時序圖	93
圖 5-6 杉林大橋集水區輸砂檢定驗證時序圖	98
圖 5-7 六龜集水區輸砂檢定驗證時序圖	100
圖 5-8 大津橋集水區輸砂檢定驗證時序圖	103
圖 5-9 三地門集水區輸砂檢定驗證時序圖	105
圖 5-10 里嶺大橋集水區輸砂檢定驗證時序圖	108
圖 5-11 高屏溪流域乾季地表逕流產生量之空間分佈圖	112
圖 5-12 高屏溪流域濕季地表逕流產生量之空間分佈圖	112
圖 5-13 高屏溪流域 7 月地表逕流產生量之空間分佈圖	113

圖 5-14 高屏溪流域 8 月地表逕流產生量之空間分佈圖	113
圖 5-15 高屏溪流域乾季總出水量空間分佈圖	114
圖 5-16 高屏溪流域濕季總出水量空間分佈圖	114
圖 5-17 高屏溪流域乾季輸砂分佈圖	116
圖 5-18 高屏溪流域濕季輸砂分佈圖	116
圖 5-19 高屏溪流域 7 月輸砂分佈圖.....	116
圖 5-20 高屏溪流域 8 月輸砂分佈圖.....	116
圖 6-1 高屏溪流域氣候變遷 RCP4.5L 及 RCP8.5L 流量(左)及輸砂量變化(右)	120
圖 6-2 高屏溪流域氣變 RCP4.5L (左)及 RCP8.5L (右)地表逕流變化百分比 .	122
圖 6-3 高屏溪流域氣變 RCP4.5L(左)及 RCP8.5L(右)子集水區出水量變化百分比	122
圖 6-4 高屏溪流域氣候變遷 RCP4.5L(左)及 RCP8.5L(右)地下水補注河川水量 變化百分比	123
圖 6-5 高屏溪流域氣候變遷 RCP4.5L(左)及 RCP8.5L(右)輸砂量變化百分比	123
圖 6-6 高雄市山崩地滑地質敏感區範圍圖	125
圖 6-7 高屏溪流域易發生坡地災害之地區	125
圖 6-8 邏輯斯迴歸正確預測區位圖	127
圖 6-9 災害預測分布圖.....	130

表次

表 2-1 複合災害交互關聯特性.....	16
表 3-1 各項目率定函數目標對照表	40
表 4-1 資料來源清單.....	47
表 4-2 淹水災害致災區村里統計(處數).....	58
表 4-3 淹水災害受災區村里統計(處數).....	60
表 4-4 土砂災害致災區村里統計(處數).....	65
表 4-5 土砂災害受災區村里統計(處數).....	68
表 5-1 SWAT 模式流量檢定參數說明	80
表 5-2 杉林大橋集水區流量參數表	82
表 5-3 六龜集水區流量參數表.....	85
表 5-4 大津橋集水區流量參數表.....	88
表 5-5 三地門集水區流量參數表.....	91
表 5-6 里嶺大橋集水區流量參數表	94
表 5-7 各子集水區輸砂推估迴歸式及其修正係數	96
表 5-8 SWAT 模式輸砂相關參數說明	96
表 5-9 杉林大橋集水區輸砂參數表	99
表 5-10 六龜集水區輸砂參數表.....	101
表 5-11 大津橋集水區輸砂參數表.....	104
表 5-12 三地門集水區輸砂參數表.....	106
表 5-13 里嶺大橋集水區輸砂參數表	109
表 6-1 高屏溪流域氣候變遷下各氣象測站溫度變化百分比表格	118
表 6-2 高屏溪流域氣候變遷下各氣象測站降雨變化百分比表格	118
表 6-3 自變數與計算方法.....	125
表 6-4 模型檢定表.....	127
表 6-5 分類表.....	128
表 6-6 邏輯斯迴歸式自變數表.....	129

初探極端氣候事件集水區複合型災害地文特性

—致災區與受災區之指認

摘要

全球氣候變遷所衍生的極端氣候事件衝擊世界各地，短延時強降雨事件的時空分佈特性對於全球各地區災害發生有決定性的影響。根據臺灣過去 60 年的災害統計資料，發現災害發生次數有顯著增加的趨勢，從過去每年平均 4.1 次增加至每年平均 7.8 次，顯示氣候變遷影響流域災害發生風險並將挑戰現有臺灣災害管理模式，不利於未來臺灣流域之永續發展。本計畫以高屏溪流域為研究場域，蒐集歷史複合災害資料，空間分析方法研析災害時空移轉特性及強降雨所引發的複合災害風險時空轉移特性，進一步應用評估模式(SWAT)模式建構高屏溪水文及輸砂模式，最後納入氣候變遷情境推估，模擬輸砂及逕流產生量，應用邏輯斯迴歸模式結合環境因子建立災害預測模型，期許未來能應用於域減災計畫制定之用途。

關鍵詞：氣候變遷、複合型災害、空間自相關分析、土壤水文評估模式、邏輯斯迴歸

Exploring the Terrestrial Features of Compound Disaster in Catchment Area under Extreme Climatic Events —Identifying Disaster Induced and Suffered Areas

Abstract

Global climate change has resulted in extreme climatic events and impacted seriously in the worldwide. The spatial and temporal distribution of short-delay torrential rain come with dramatic influence. According to the past sixty years' disaster statistic, the frequency has been increased from 4.1 to 7.8 annually. It seems that global climate change has profound impacts on watershed and might further challenge current disaster management strategies in Taiwan. Therefore, this project collects past disaster records in Gaoping watershed and applies spatial autocorrelation analysis to exploring the spatial and temporal shift of compound disasters. Afterwards, the study applies Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to construct the model of runoff and sediment in Gaoping watershed. In the end, the project is based upon the global climate change scenarios to simulate the runoff and sediment in Gaoping watershed, and further applies logistic regression model to predict the location of disasters in the global climate change scenario.

關鍵詞：global climate change, compound disaster, spatial autocorrelation analysis, Soil and Water Assessment Tool (SWAT), logistic regression model

第一章 研究背景與目的

第一節 研究背景

全球氣候變遷所衍生極端氣候事件衝擊世界各地，「水」為具體展現氣候變遷的關鍵媒介，尤其是短時強降雨的時空分佈特性(Kleinen and Petschel-Held, 2007; McColl and Aggett, 2007; Milly et al., 2002)。降雨為水循環中的一種型態，同時具有正面效益與負面影響，正面效益諸如濕地環境再填充、地下水挹注、支持農業與漁業活動、提供人口聚居與經濟發展等。然而，極端強降雨與土地利用變遷致水循環失調，集水區的開發改變洪峰流量及洪流歷線，都市地區因既有排水設施承载力不足下，過大洪峰流量導致嚴重洪水災害(Burby, 1999; Camorani et al., 2005)。氣候變遷下全球降雨變異，使極端天氣事件發生頻率增加，尤其是東亞地區旱澇現象交替頻繁，更造成災害發生的可能性跟規模，根據政府間氣候變化專門委員會出版與氣候變化相關之 IPCC AR6 報告，指出未來每 10 年極端降雨事件發生頻率跟規模將在地球增溫 4°C 時增加 2.7 跟 30.2 倍，且每 10 年乾旱及農業缺水發生頻率將增加 4.1 倍，全球各地區複合型洪水災害的增加預測有中等的可信度(IPCC, 2021)。除了洪災之外，極端強降雨在特定環境條件會進一步引發坡地災害，泛指土壤、岩石等地質材料受重力作用，而發生向下運動所造成破壞的行為如山崩、土石流等(國家災害防救科技中心，2019；許民陽，2012)。

災害形成具有空間性、連續性、複雜性、相關性、互動性、時效性等特性，前述特性為複合災害形成之關鍵因子(陳亮全，1997；吳瑞賢等，2008)。災害事件存在時序性(Sequential)，第一個災害事件直接引發第二個災害，爾後在特定時空環境下會潛在引發第三個或第四個災害(Eisner, 2013)。承上所述，災害存在複合特性，即單一空間同時發生數種災害事件，或是單一災害事件於不同時空下引發或加劇其他災害事件(Huang and Liu, 2014)。複合災害通常係指單一災害事件發生後引發其他類型災害，常見利用原生災害、二次災害(亦稱衍生災害)，其內涵除了原生、衍生的順序性之外，可能還包括直接或間接損害，或是無法直接區

分因果關聯性(吳杰穎等人, 2007)。故, 複合災害得進一步區分成不同類型, 以時間序列的複合災害(Compound Disaster), 或是以鏈結關係所形成的複合災害(Complex Disaster), 或是以損害經驗所衍生的複合災害(Composite Disaster)。時間序列所構成的複合災害, 由於災害發生成因的複合性, 原生災害與二次災害不易區隔, 例如強降雨在一段時間內所帶來的暴雨衍生洪災或土石流災害(Cruz and Okada, 2008)。鏈結關係所形成的災害以災害損失為核心, 評定損失極少歸因於單一災害, 且所形成的損失常出現乘數效果(Funabashi and Kitazawa, 2012)。以損害經驗關係組構的複合災害, 強調災害特徵與損害間的複雜性, 最後形成巨大災害 (Mimura et al., 2014), 例如 2011 年東日本大地震引發的海嘯, 進而引發核災事故。

有鑑於全球氣候變遷下極端氣候事件引發之災害規模與範疇, 複合災害時空的移轉特性, 全球氣候變遷與土地利用間互動關係將是關鍵議題(Zhang et al., 2018)。極端氣候事件除了流域降雨分布不均, 進一步衝擊既有水文循環, 地表逕流增加不僅威脅山坡地區土地利用, 並且顯著影響泥沙輸送情形(Shrestha et al., 2018)。土壤水文評估模式(Soil and Water Assessment Tool, SWAT)模式於 1990 年初由美國農業部所開發, 針對集水區長時間流量、泥砂量、營養鹽等進行影響評估, 已普遍應用於水資源、氣候變遷、非點源污染模擬之分析, 例如應用 SWAT 模式探討區域水資源匱乏議題(Geng et al., 2015; Vaghefi et al., 2014; Santra et al., 2013)、應用 SWAT 研析高山流域流量變化與輸砂情形(Azari et al., 2016; Yesuf et al., 2015)、或是應用 SWAT 模擬乾旱事件下土壤水循環與作物生長情形(Narasimhan & Srinivasan, 2005)等。SWAT 模式以物理性描述為基礎, 空間單元除了集水區外得再細分為水文反應單元(Hydrologic Response Unit, HRU)以反應不同土地利用、土壤性質及坡度的運送情形, 且在模擬時間上具有連續性, 故屬於長時間模擬模式, 其得模擬項目包括水文、泥砂、地表作物生長、土地利用、營養鹽循環或是污染源傳輸等(鍾閔光與林俐玲, 2015)。此外, 水文條件也是影響山區災害(如山崩、土石流)的重要因子之一(Chen et al., 2018; Kayastha et al.,

2013; Ma et al., 2018; Wei et al., 2018)。長時間大尺度的水文模擬可以建立更完整的流域模型，以了解在不同類型的強降雨條件下，不同地區的地表逕流、輸砂量等水文因子(Nilawar and Waikar, 2019; Tan et al., 2017)。而這些水文因子整合其他相關環境因子則可以建立模型，以預測在不同降雨條件下，那些地區較容易發生山崩及土石流之災害(Burnetti et al., 2018; Nikolopoulos et al., 2014)。為了可以深化相關災害的預測準確度，將水文模擬整合預測模型是一個可以試驗的方案。

綜上所述，臺灣位處颱風路徑要衝，平均每年受到至少三次的颱風侵襲，經常性受到颱洪或暴雨侵襲，加乘地理空間區位鄰近環太平洋火山帶，顯著受到災害衝擊影響。根據臺灣過去 60 年的災害統計資料，得發現災害發生的次數有顯著增加，從每年平均 4.1 次(1958-1987)增加至 7.8 次(1988-2017)(內政部消防署，2018)，除了頻率增加之外，災害事件的強度亦劇增包括極端強降雨、累積總降雨、短延時強降雨等(專諮會，2014)。氣候變遷具高度複雜性、不確定性、政經敏感性等，持續增強的災害風險除了挑戰現有災害管理模式，更會進一步衝擊永續發展。本計畫認為全球環境變遷下，迫切需要針對流域地區進行災害複合性、時空移轉性之討論，故以強降雨所引發複合災害(如坡地災害與淹水災害)為標的，以高屏溪流域為研究場域，應用空間分析方法研析災害時空移轉特性，期探索災害的時序性、鏈結性研析強降雨所引發的複合災害風險時空轉移特性，進一步應用 SWAT 模式評估氣候變遷下流域水文及輸砂行為變化，並量化氣候變遷及土地利用改變等環境變化對於流域生態及下游都市災害發生規模之影響。最後，本計畫嘗試整合相關環境因子建立災害預測模型，研究成果期利於流域災害預測及防減災計畫制定。

是以，本計畫預計研提一年期計畫，各階段操作內容如下所示：

- (一)「解構歷史強降雨衍生複合災害時空移轉特性」，以高屏溪為研究場域蒐集歷史複合災害資料，依據各項研究資料、監測資料(雨量站、衛星資料等)建構複合災害發生時序，應用空間關聯統計分析複合災害下致災因子發生時序暨空間移轉特性。
- (二)「研析極端氣候事件集水區複合型災害時空移轉情形」，本計畫以高屏溪流域為研究標的，應用 SWAT 模式模擬高屏溪水文循環、流域土壤侵蝕及河道輸砂情形，並量化氣候變遷及土地利用改變等環境變化對於流域生態及下游都市災害發生規模之影響。
- (三)「複合災害事件下致災區與受災區範圍界定」，納複合災害下致災因子的成因與致災時序，進行「致災區」與「受災區」範圍界定，研究成果期就「致災區」與「受災區」於複合災害風險下供未來災害管理研擬防減災暨調適策略之參考。
- (四)「建置災害預測模型」，綜納水文與環境因子，應用邏輯斯迴歸(Logistic Regression)建立災害預測模型，模擬可能發生災害的地區。

第二節 研究目的

本計畫「初探極端氣候事件集水區複合型災害地文特性一致災區與受災區之指認」，立基於災害的時空分佈不均特性，期應用空間關聯統計分析探討強降雨的複合災害發生時序暨空間移轉特性，進一步應用土壤水文評估模式(SWAT)模式評估氣候變遷下流域水文及輸砂行為變化，最後綜整歸納前述成果指認致災區與受災區之致災因子及區位，研究成果將納入氣候變遷情境推估，模擬輸砂及逕流產生量，進一步指認氣候情境下受災及致災地區，期利於流域災害預測及防減災計畫制定。

(一) 應用災害風險研析複合災害的發生時序暨空間移轉特性。

(二) 綜納災害時空複合性供流域災害預測及集水區範圍防減災計畫制定。

第三節 研究流程

本計畫預定研提一年期計畫，分就四個部分進行操作。首先，應用空間關聯統計分析歷史複合災害下致災因子發生時序暨空間移轉特性；應用 SWAT 模式模擬並量化氣候變遷及土地利用改變等環境變化對於流域生態及下游都市災害發生規模之影響；分析界定集水區「致災區」與「受災區」之範圍，為進一步探討坡地災害與淹水災害之致災區與受災區的空間分布，以土壤水文評估模式 (SWAT) 計算之地表逕流量及泥砂量，分析因地表逕流及泥砂量外溢形成溢流之致災區域，因此受災區域範圍係基於歷史災害之空間關聯統計分析成果，並透過歷史受災區之地表逕流及泥砂量計算可得各氣候事件期間之水文回應單元溢入量，藉此指認該氣候事件期間，每日地表逕流及泥砂溢流量皆高於當日受災區的平均量的空間分析單元為致災區；最後應用邏輯斯迴歸建立災害預測模型。本計畫研究成果期供上、中游流域災害預測及下游都市地區防減災計畫制定。

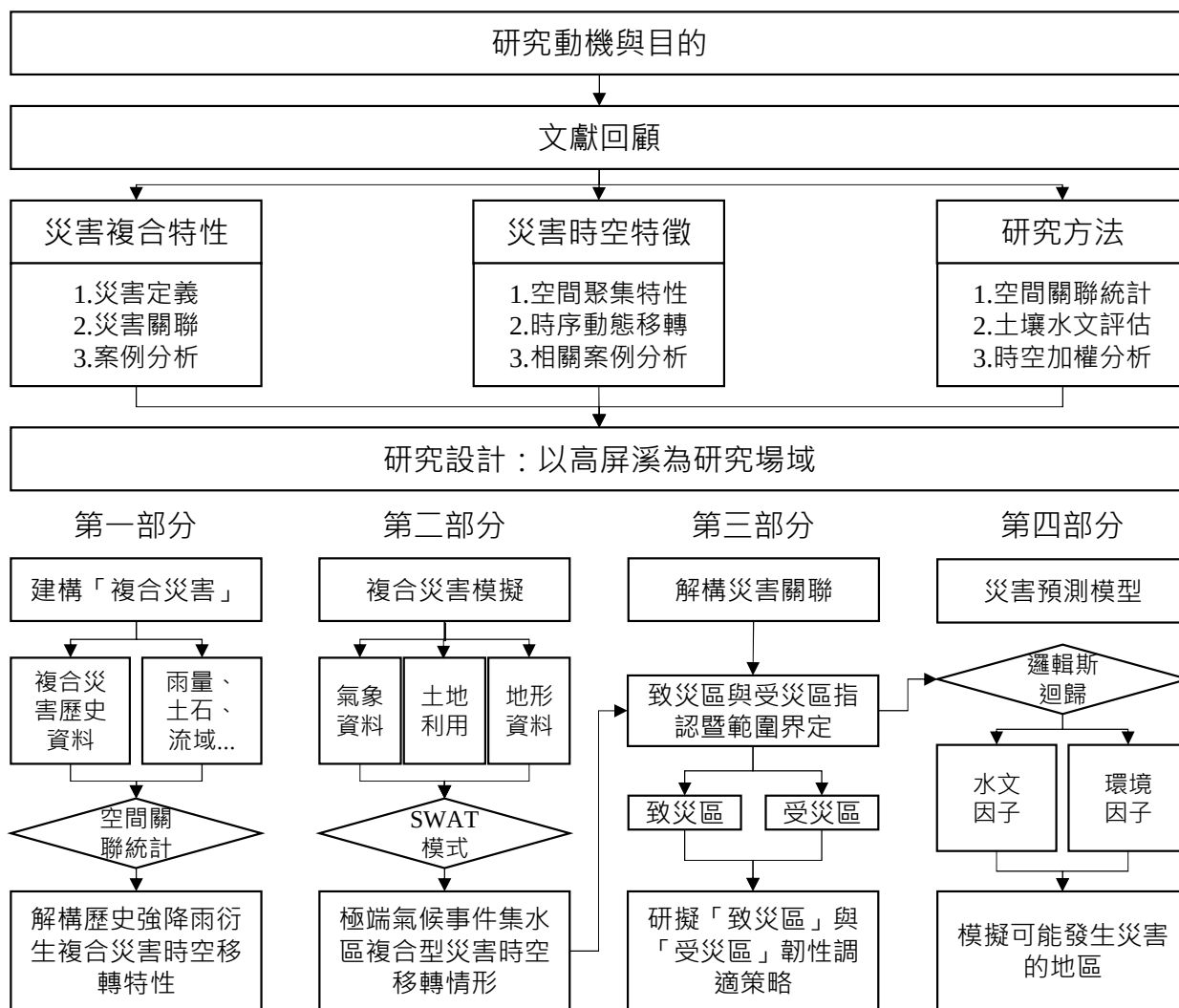


圖 1-1 研究流程圖

資料來源：本計畫繪製

第四節 研究地區

高屏溪發源於中央山脈玉山附近，流經高雄市、屏東縣，於林園區及新園鄉注入台灣海峽，全長 171 公里，流域面積 3,257 平方公里，其主要支流有荖濃溪、旗山溪、隘寮溪、濁口溪，其中以荖濃溪及旗山溪為最大。高屏溪流域地形垂直分佈由海岸起至海拔 3,666 公尺間，氣候類型變化大，沿海平原及中海拔丘陵區屬於熱帶型氣候，高山地區則屬溫帶型氣候，氣溫由西南沖積平原向東北山區遞減，形成垂直氣候帶。高屏溪流域年平均溫度約 25.1℃，平均相對濕度 75.6%；隨高度增加而降低，高山年平均氣溫略低，約在-1.1~7.9℃之間。高屏溪流域乾濕季分明，平均年降雨量約 2454 毫米，每年 5 月至 10 月因西南季風盛行及常有颱風侵襲，降雨量約占全年之 82%。高屏溪降雨之空間分佈極不平均，年雨量分佈趨勢，靠近中央山脈地區較大，平地及沿海地區則較小，自玉山之 3,042 毫米，向沿海降至 1,906 毫米。高屏溪因降雨之時空分佈極不平均，造成流量枯豐明顯。高屏溪(里嶺大橋)年平均日流量 234cms，年逕流量 74.08 億立方公尺。

本計畫蒐集杉林大橋、六龜、大津橋、三地門及里嶺大橋 2011 年至 2017 年之日流量資料，並以該資料作為模式檢定驗證使用，高屏溪流域於本計畫亦分成多個子集水區，分別對應四個支流測站於圖 1-2 所示，橘色流域邊框為杉林大橋集水區，藍色流域邊框為六龜集水區，咖啡色流域邊框為大津橋集水區，綠色邊框為三地門集水區，為了解高屏溪流域上中下游之水文及輸砂空間分佈，本計畫在高屏溪共劃分出 97 塊子集水區，後續將綜合討論各子集水區之地表逕流及輸砂輸出量。本計畫同時蒐集高屏溪流域上中下游之局屬及自動氣象測站，從上游至下游分別為阿里山、甲仙、美濃及三地門氣象站，蒐集 2008 年至 2020 年之天氣資料應用於後續模式模擬及極端降雨事件之分析。高屏溪流域土地利用如圖 1-3 所示，土地利用資料來源於國土測繪中心 2005 年之測繪成果，本計畫將高屏溪流域分為 10 大類，分別為水稻、旱作、果樹、針葉林、闊葉林、針闊葉混合林、草地、裸露地、都市和水體，整個高屏溪流域土地利用主要以針闊葉混合

林為主(佔 62%)，其次為果園(佔 9%)、闊葉林(佔 7%)以及都市(佔 6%)。高屏溪流域土壤分佈如圖 1-4 所示，土壤資料來源於農委會並於政府資料開放平台下載取得，本計畫依照表土質地將高屏溪流域分為 7 項主要土壤，分別為沖積土、石質土、岩石、崩積土、黃壤、紅壤及雜地，雜地主要是分佈在高屏溪上游地區，由於無法判別該表土質地，因此統稱為雜地，整個高屏溪流域雜地為主要的分類(佔 60%)、崩積土(佔 12%)、沖積土(佔 12%)以及石質土(佔 10%)。

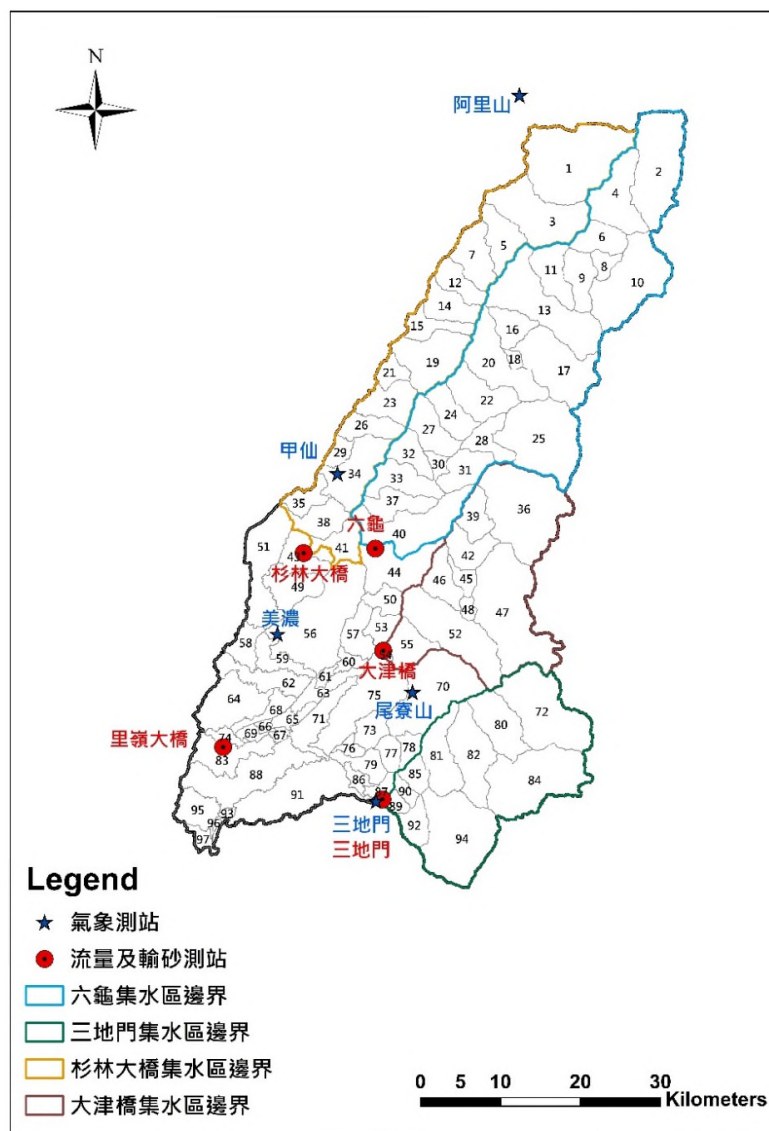


圖 1-2 高屏溪流域測站及子集水區邊界

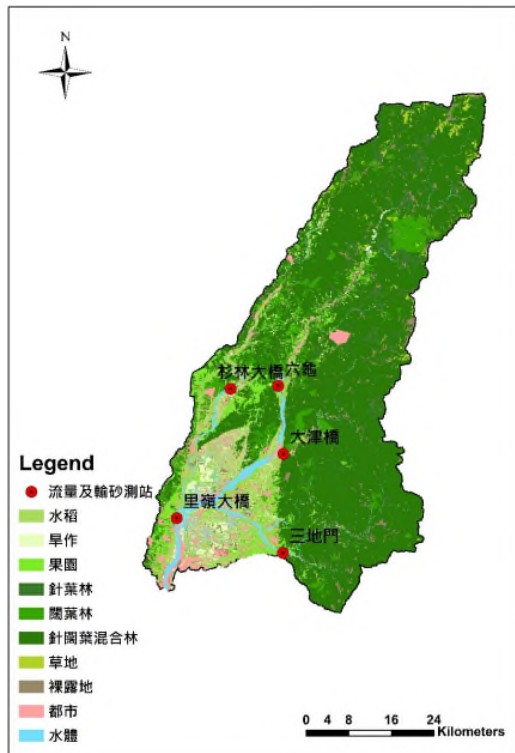


圖 1-3 高屏溪流域土地利用圖

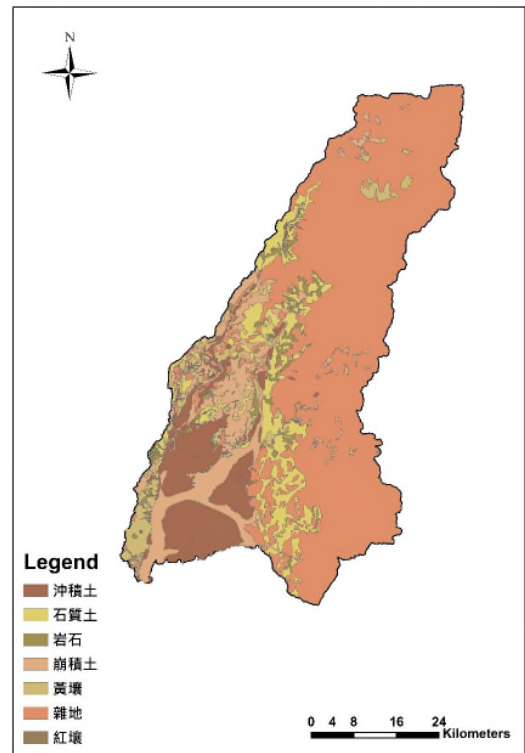


圖 1-4 高屏溪流域土壤分佈圖

資料來源：本計畫繪製

第二章 文獻回顧

第一節 複合災害風險

一、複合災害理論基礎

一連串災難性事件可能由自然事件(颱風、地震等)或是人為事件(氣爆、恐攻等)所引發,例如 2011 年日本東北地方太平洋近海地震引發超過 40 公尺的海嘯,進一步衝擊座落於沿岸的核電廠,導致大規模的地方機能癱瘓和經濟活動停止。無論是自然事件或是人為事件,常會引發二次性或三次性災害,進而對地區產生嚴峻的衝擊。複合災害(Compound/Cascading/Complex Disaster)於災害領域並非新興的專有名詞,惟隨著全球氣候變遷加劇災害事件的頻率與強度,災害的複合性與複雜度的解構有助於減緩或是進一步調適。複合災害受到重視的原因,其一為複合災害常引發各類危機,如糧食安全、飲水資源等,進一步衝擊區域甚至全球經濟運轉;其二為全球氣候變遷下極端災害事件頻傳,並非所有的極端氣候事件皆會造成嚴重衝擊,部分非極端氣候事件卻在特定地區造成嚴重衝擊(Cutter, 2016),過去常使用「十億美元災害」(Billion Dollar Disaster)形容極端災害事件,惟美國於 2008 年後幾乎每年發生 60-160 億美元災損,突顯災害的衝擊特性已超出預期界限(McPhillips et al., 2018);最後,各類災害科學、政策、理論對於複合災害定義存在不一致性,例如單一災害引發二次性災害事件常被視為複合災害或是二次性災害,各類複合災害的用語與釋義分散化資源的有效投入(Cutter et al., 2015),故系統性的解構複合災害將有助於應災、減緩與調適的落實。

(一)自然過程形成的複合災害

自然科學家長期投入於研究災害,複合災害的物理形成過程與互動潛在引發自然災害事件,天然事件直接或間接引發其他災害事件常被標示為二次性(Secondary Hazard)或三次性(Tertiary Hazard)。事實上,災害事件發生的過程可能與其他標的物產生互動效果,進而引發二次性災害,例如閃電引發大火;或是增加衍生性災害事件的發生機率,例如大火延燒改變土地植被覆蓋,

暴雨則可能進一步造成坡地災害。複合災害的互動效果可能存在空間(Spatially)與時間(Temporally)特性，時空的共振可能進一步加劇災害的衝擊效果。然而，複合災害的一次事件、二次事件或是三次事件常用災損發生作為時間點的判定，常受限於時間與空間特性出現誤判情形(Cutter, 2018)。

(二)災難性災害(Cascading Hazards)

根據美國緊急管理(U.S. Emergency Management)，災難性災害係指主要災害(Initial Hazard)引發一連串直接或間接之災害(May, 2007)。災難性災害的其中一個特性為時空的緊鄰特性(Proximity in Time and Space)，顯示特定地區或周邊環境具有充足的外力因素或是能源進而觸發後續的災害事件(Kumasaki et al., 2016)。是以，面對具時空緊鄰特性之災難性災害，災害管理方針必須跳脫簡單線性災害因果鏈(Simple Linear Hazard Causal Chain)，即有必要解析災害的物理與生物形成過程，才可以更為精準的進行災害評估並改善災害預測能力。是以，愈來愈多研究自然災害會應用系統性思考(Systematic Thinking)、過程-回應模型(Process-response Modeling)與非線性模型(Nonlinear Models)以更精準的辨認災害(U.S. National Committee for the Decade for Natural Disaster Reduction, 1991)。

(三)自然災害觸發工業災害

許多早期複合災害的研究關注於自然事件觸發其他自然災害，然而事實上自然事件可能觸發工業災害，例如地震事件造成管線破裂進而造成有毒物質外洩。Showalter and Myers (1994)首次提出「自然-科技災害」(Natech)，係指自然災害觸發科技災害，例如 2017 年美國阿科瑪工廠(Arkema Chemical Plant)發生的爆炸事件，歸因於哈維颶風於休士頓造成的洪水災害。事實上，隨著人類文明科技的快速進展，極端災害事件觸發科技災害的頻率較過往更為頻繁(Sengul et al., 2012)。是以，自然災害除了會衍生二次性或三次性自然災害之外，隨著災害發生的地理環境特性，潛在會觸發科技災害。

二、複合災害態樣

複合災害依據發生時序及空間的順序有不同定義，廣泛地複合災害定義是指在特定範圍中了解所有可能發生的危害，以及危害之間的時序性、累積性等相互關係(Gill and Malamud, 2014)。複合災害最大的特徵即為相較於單一災害，是由兩個或多個危害在空間或時間重疊下所相互影響，此外所引起的危害可能會因多重災害之間相互關係複雜性而具有相互放大、非影響效果和互斥效果(Ba et al., 2021)。而多重災害之間相互關係複雜性依據不同學者的分類有各種相互關聯的解釋，在 Tilloy et al (2018)、Angeli et al (2022)皆以文獻綜述方法，綜整複合災害之間相互關係，各學者定義如下表。依據相關論述定義，本計畫將複合災害相互關聯定義分為直接關聯與間接關聯，直接關聯分就空間複合、時間複合，空間複合定義為主要災害及二次災害具有空間重合、或是多重災害發生於同空間影響複合危害的巧合(表 2-1)。時間複合定義為主要災害觸發二次災害發生、或是主要災害所觸發的變化為引起另一個災害的因素；間接關聯分就因果關係、環境條件關係，因果關係是指災害之間具有互相影響發生機率的特性、或是加劇/減緩未來對於二次災害衝擊程度的機率、同時包含災害之間為負相關的互斥關係，環境條件關係是指因主要災害影響，而對地區之環境條件產生改變，進而影響未來受災程度。

表 2-1 複合災害交互關聯特性

構面	分類	定義		參考文獻
直接關聯	空間複合	時空重合	主要災害與次要災害於時空重合。	Gill and Malamud (2014)、Tilloy et al (2019)
		耦合	多重危害於同時間、空間發生，導致複合效應或二次災害。	Duncan et al (2016)
	時間複合	級聯效應	危害為觸發其他災害的因。	Aristizabal & Marzocchi (2012)
		觸發關係	主要災害觸發其他與主要災害相同或不同的二次災害。	Tilloy et al (2019)
		並列關係	一種或以上的觸發因素因改變而觸發一種以上的相同災害發生。	Liu et al (2016)
		系列關係	主要災害引起的觸發因素產生變化，進而引起其他災害。	Liu et al (2016)
間接關聯	因果關係	改變災害機率	主要災害可能增加或減少二次災害發生機率。	Gill and Malamud (2014)

構面	分類	定義		參考文獻
		放大(減緩)關係	主要災害加劇或減緩未來災害之影響。	Duncan et al (2016)
		互斥關係	兩種自然災害為負相關。	Liu et al (2016)、Tilloy et al (2019)
	環境條件	環境狀態	同時發生的多重災害可能使環境脆弱度改變。	Aristizabal & Marzocchi (2012)
			一種災害因衝擊改變環境條件，促使改變其他災害的影響程度。	Tilloy et al (2019)

資料來源：本計畫彙整自 Tilloy et al (2018)、Angeli et al (2022)

為了辨認複合災害關聯特性，已有研究提出時空耦合據以作為探究複合災害變遷過程，例如複合災害時空耦合機制(the spatial-temporal coupling mechanism)即是將複合災害以空間與時間序列分就同空間同時間、同空間不同時間、不同空間不同時間三種態樣(Kappes, 2011; Wang & Weng, 2020; Ba et al., 2021)(如圖 2-1 所示)。同空間同時間係指併發多重災害之情形，不同的災害在相同的時間和空間耦合，併發多重災害同時發生，如強風與暴風雪耦合、強風與暴雨耦合、地震與暴雨耦合等；同空間不同時間係指以災害損失為核心、於同空間產生影響，因複合災害損失常出現幾何級數的乘數效果(Funabashi and Kitazawa, 2012)，並且極少會歸因於單一災害；不同空間不同時間強調災害特徵與損害間的複雜性，最後形成巨大災害(Mimura et al., 2014)。

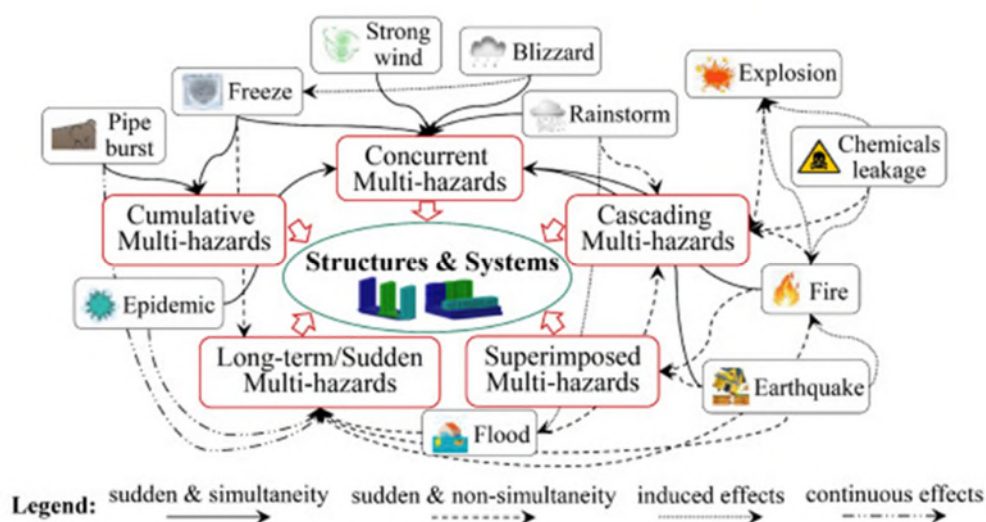


圖 2-1 災害相互耦合關係

資料來源：Ba et al (2021)

除此之外，過去研究針對時空重疊分為四種類型(如圖 2-2 所示)，包括時空重疊影響、時間重疊影響、空間重疊影響、獨立的單一危害影響。時空重疊影響係指危害在空間和時間上重疊，不同災害對同一空間產生複合災害影響；時間重疊影響係指不同的區域將同時受到不同災害影響，在空間中不會產生影響相互作用；空間重疊影響聚焦於空間在經歷既有災害後到衍生災害發生之時段中是否能回復狀態，如未恢復將會因脆弱度導致衍生災害產生更大地衝擊；獨立且單一災害影響係指在經歷既有災害後並未發生其他災害，因此災害影響可歸咎於單一之獨立災害、或是兩種以上災害在時間或空間皆不重疊，災害事件之間沒有相互作用(Angeli et al, 2022)。

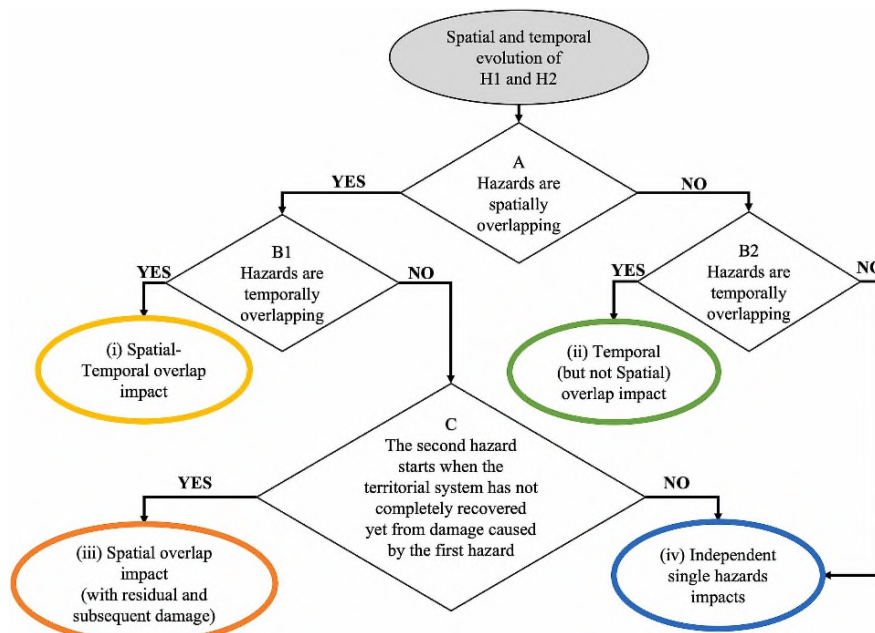


圖 2-2 時空重合類型

資料來源：Angeli et al (2022)

三、複合災害風險評估方式

災害風險評估必須有清楚的標的(Objectives)、目標(Targets)、因子(Factors)、過程(Processes)與方法(Methods)(Feng et al., 2017)，傳統災害風險評估包括四步驟：建構災害評估模式、推估災害損失、分析災害風險程度與建置災害風險地圖(Zhang et al., 2010; Shi, 2009)。過往相關研究多為討論單一災害事件之成因及影響，但對獨立災害的理解無法解釋災害的時間和空間動態變化，在氣候變遷下隨著極端氣候事件的增加，相關研究表明災害之間的複合作用會導致更多極端氣候事件增加(Coumou et al., 2018)，且複合災害事件之影響關聯呈現累積效果(Cheng et al., 2018)。複合災害依據災害之間相互關係複雜性，可將災害事件的影響關聯分為相互放大效應、非影響效應和互斥效應效果(Ba et al., 2021)，並依據不同災害條件有各種分析方法。

Tilloy et al (2019)針對多重災害以系統綜述方法進行彙整，整理各相關期刊中發表與多重災害相關之研究，集結共 146 篇相關討論，透過建立災害相互關係文獻資料庫，以確定災害相互關係和多重災害的趨勢，再透過審查量化災害相互關係的研究方法，以得出不同災害間之量化方法。第一、二部分自然災害相互關係類別的討論中，綜整了先前相關研究的定義，基於多個分類定義後，此研究將災害之間的相互關係定義重新定義為五類，分別是獨立性、觸發、級聯關係、變化條件、複合災害關聯、互斥關係。在這五類相互關係中，與獨立性和互斥性條件相比，大多研究以觸發、變化條件和複合災害類別有更多的相關討論(Kappes et al., 2012a; Gill & Malamud, 2014; Liu et al., 2016)，因此以這三類相互關係為基礎，進階歸納資料庫中之文獻，並依據多重災害時序性分為級聯災害與複合災害，分別建立了災害類別相互關係矩陣圖。在研究成果中，歸納了 14 種自然災害之間的 24 種不同相互關係，多數災害之間的關聯已被建立，但作者表示仍有些災害之間關係是模糊較不易區分，如地震和洪水之間的關係(如圖 2-3、圖 2-4 所示)。

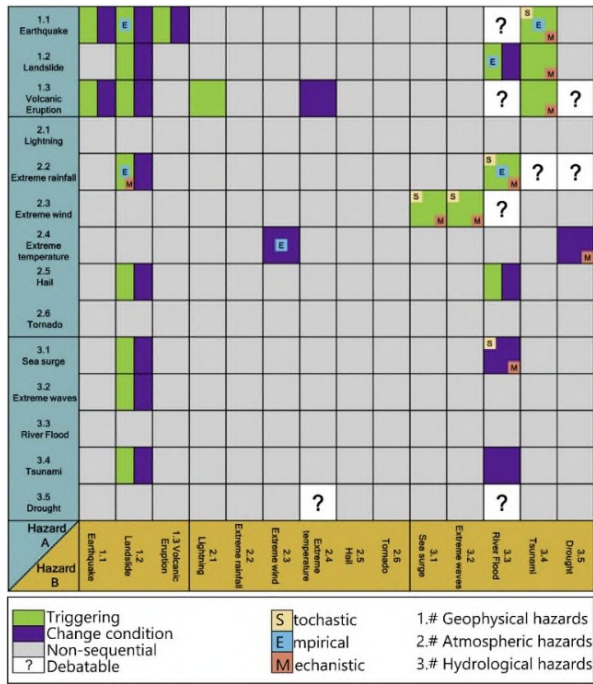


圖 2-3 級聯災害相互關係矩陣

資料來源：Tilloy et al (2019)

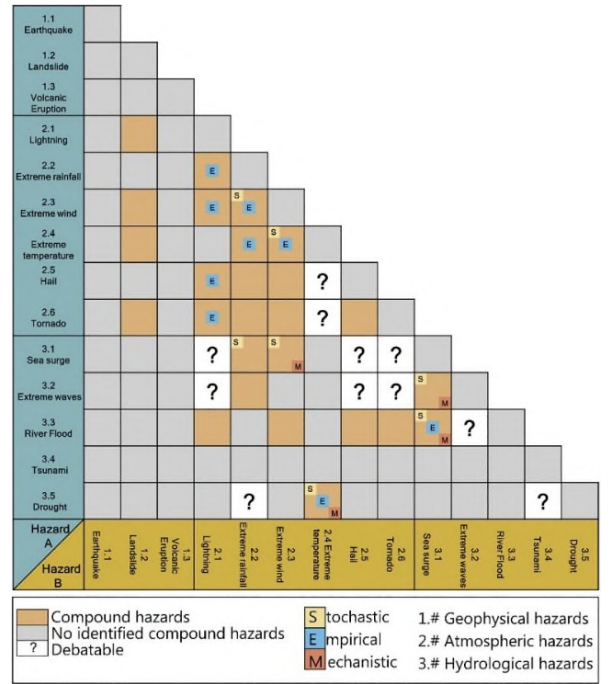


圖 2-4 複合災害相互關係矩陣

第二節 土壤水文評估模式概念與案例應用

一、土壤水文評估模式(Soil and Water Assessment Tool, SWAT)

SWAT 模式為半分布式(semi-distributed)水文模式，模式輸入資料有主要四個部分，分別為氣象資料、數值高程模型(DEM)、土壤分類、土地利用。次集水區的劃分則是透過河流交會點來繪製，透過土地利用、土壤與數值地形等環境條件，劃分次集水區以及每一個水文反應單元(Hydrological Response Unit, HRU)，並模擬各水文反應單元流量、輸砂、非點源污染等輸出量，最後將流域內所有水文單元加總量化該流域流量與非點源污染輸出量，模式可輸出流域內各水流移動途徑，氮磷循環變化等機制(如圖 2-5 所示)。

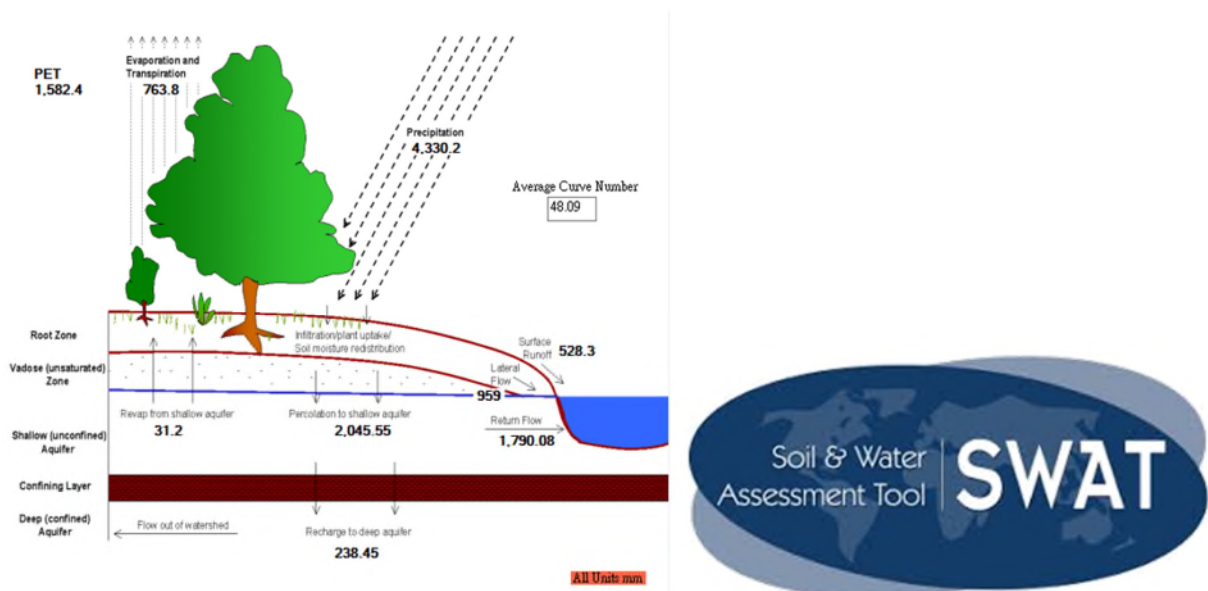


圖 2-5 SWAT 模式之水文模擬成果顯示介面

資料來源：Havel et al., 2018

根據空間輸入資料(例如土地利用圖、土壤分類圖和坡度)，依使用者定義門檻值劃分水文反應單元(HRU)，SWAT 模式內每一個 HRU 內土地利用類型、土壤分類以及坡度視為均值，模擬水文反應單元內之流量、氮磷污染輸出及河道輸砂量等數值。SWAT 模式所需的氣象資料包含降雨量、最高溫、最低溫、相對濕度、輻射量以及風速，用於計算各水文反應單元(HRU)地表逕流、側向流、潛在蒸散量(PET)、實際蒸散量(ET)、土壤含水量(SW)、河川基流補注量及泥砂輸出等數值。除了 SWAT 模式必要的建置資料，額外的人為活動資料例如農業施肥與作物收穫等也能輸入至 SWAT 模式用於計算各水文反應單元(HRU)的非點源污染輸出量、土壤含水量等成果。

SWAT 模式內流量及輸砂量雖以 HRU 為基礎進行運算，然而 SWAT 模式自身為半分散式模式，HRU 之劃分並無空間上的分布關係，為進行流域致災區之判別及空間分析，本計畫預期以子集水區作為空間特性分析之最小單元，加上 SWAT 模式能讓使用者自行增設子集水區數量及輸出各子集水區逕流及泥砂輸出等優點，益於流域致災區判釋及空間加權迴歸分析等使用，圖層輸入及子集水區劃分案例如圖 2-6 所示，每個子集水區內具有各種土地利用及土壤等特性劃分之 HRU，由於每個子集水區之水文特性及災害脆弱度皆不相同，藉由空間分析工具即可達到指認災害潛勢及計算區域脆弱度等目的(Mohammadi et al., 2021)。

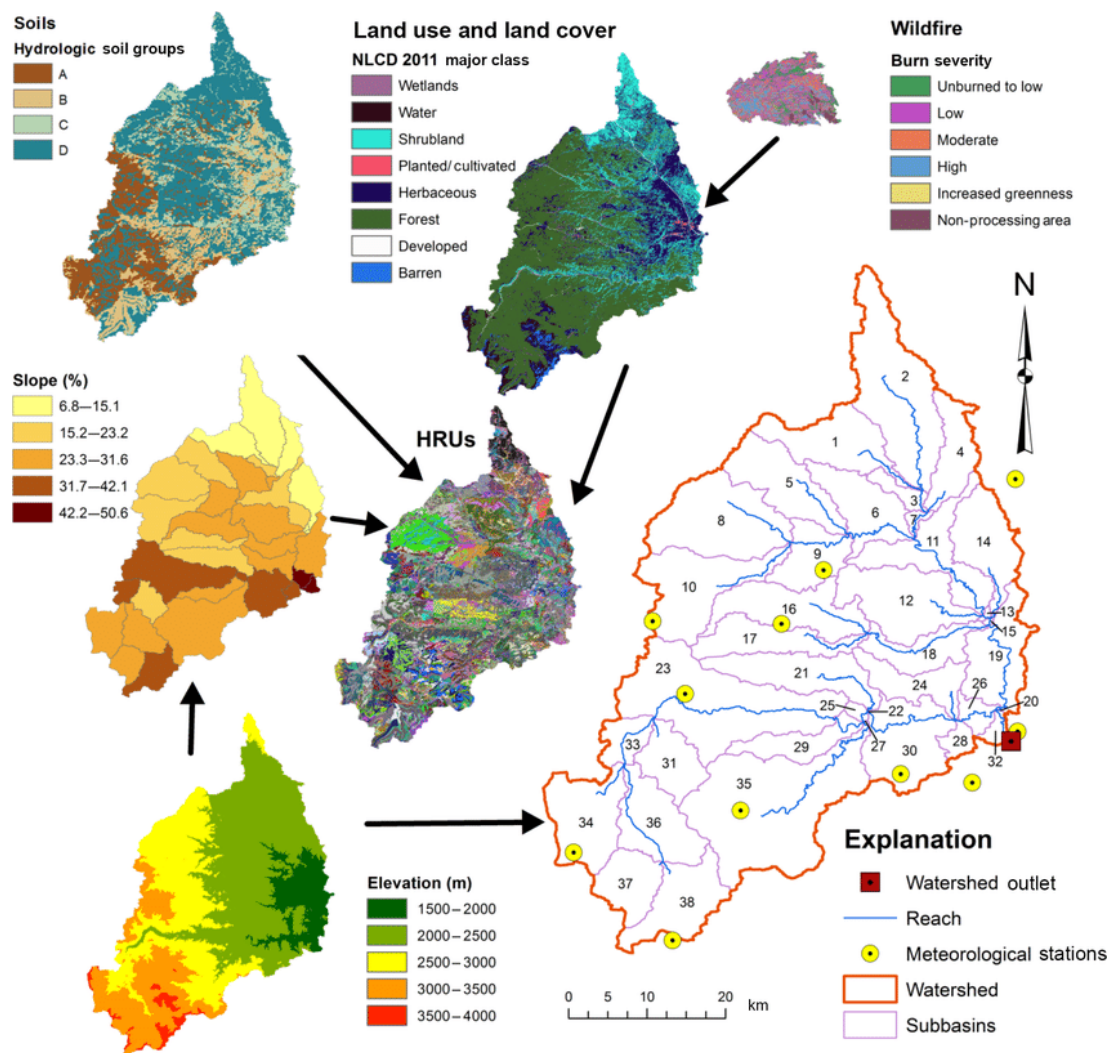


圖 2-6 SWAT 模式子集水區空間劃分示意圖

二、SWAT 應用案例

SWAT 模式為半分布式(semi-distributed)水文模式，次集水區的劃分則是透過河流交會點來繪製，考量土地利用、土壤與數值地形等環境條件，劃分次集水區以及每一個水文反應單元(Hydrological Response Unit, HRU)，並模擬各水文反應單元流量、輸砂、非點源污染等輸出量，最後將流域內所有水文單元加總量化該流域流量與非點源污染輸出量，模式可輸出流域內各水流移動途徑、輸砂及氮磷循環變化等機制 (Wellen et al., 2015)，模式使用之目的也隨之不同，包含水資源評估、非點源污染模擬以及氣候變遷等的情境分析，臺灣亦有相當的研究案例，如 Lin et al. (2022)即利用 SWAT 模式分析翡翠水庫上游集水區之非點源污染輸出，Chiang et al.(2021)模擬濁水溪流域之輸砂量，亦有相當的成效，說明 SWAT 模式於臺灣進行水資源及非點源污染模擬之可行性。

(一)水資源及非點源污染評估

全球氣候變異使臺灣旱澇發生的規模及頻率增加，水資源規劃及非點源污染防治為流域經營管理之重要議題，從過去到現在已有不少文獻應用 SWAT 模式模擬流量及流域水平衡藉以了解河川水量供應來源(Fiseha et al., 2013; Shi et al., 2007)，例如 Saha et al. (2014)利用 SWAT 模式模擬澳洲亞斯河集水區的流量，並從水移動路徑與參數了解集水區的水文特性，發現 90% 的雨水會因蒸發而損失，45% 的河川基流是來自於地下水，因此蒸發對該區域之水資源有著很大的影響，季節性差異對於流域水資源管理之影響不可輕忽。同樣的 SWAT 模式亦有使用在半乾燥地區評估水資源分布之案例，Khayyun et al.(2019)應用 SWAT 模式分析伊朗地區 Diyala 集水區的流量及水文特性，分析成果顯示流域內 8 個子集水區提供了該流域約 79% 的流量，故該 8 個子集水區的污染防治顯得特別重要，且半乾燥氣候水資源會有大量蒸發的問題，如何有效保存這些子集水區的水資源為該地區涵養水源之重要目標。

流域非點源污染與河川流量息息相關，亦同時受到上游人為活動影響而使污染來源區及制災區有所不同，Shen et al. (2014)為評估中國三峽大壩上游各子集水區水資源及非點源污染輸出量而使用 SWAT 模式進行分區建模，如圖 2-7 所示將流域各子集水區流量及非點源污染輸出進行分析，探討流域污染主要的來源以及未來潛在的災害發生地點，文獻中亦提到高山農業開墾為上游地區最主要的非點源污染來源區，為未來發生災害的高度敏感區域。Zeiger et al. (2021)使用 SWAT 模式量化美國密蘇里州西南部的 James River 集水區的非點源污染及污染來源區，發現 James River 中游的子集水區污染輸出量最高，密集都市化地區所產生的大量都市污水及牧場所產生的糞便為 James River 的主要污染來源，中游地區非點源污染管制及都市污水接管於維持 James River 永續發展有其迫切及必要性。

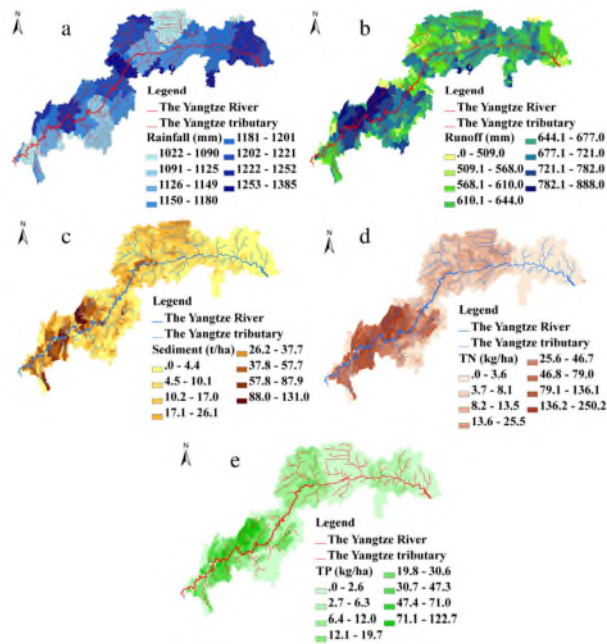


圖 2-7 中國三峽大壩集水區流量及非點源污染輸出模擬及來源區評估

資料來源：Shen et al. (2014)

(二)氣候及土地利用變遷情境分析

環境變遷及情境模擬為水資源及非點源污染模式模擬之重要目的，SWAT 模式亦常應用於流域氣候變遷之模擬評估，舉例而言，Bhatta et al.(2019)等人便應用 SWAT 模式模擬氣候變遷對於尼泊爾高山集水區水資源之影響，成果顯示隨著未來溫度上升，且降雨量減少的狀況下，尼泊爾地區的水資源缺乏狀況將更為嚴峻，以人為溫室氣體排放量之假設情境為例，在 RCP8.5 的情境下(每平方公尺的輻射強迫力增加 8.5 瓦)流域水資源整體將下降約 4~15%，影響該地區未來可利用的水資源量。Yan et al.(2013)應用 SWAT 模式模擬中國丹江口集水區 1978 年至 2007 年土地利用變化及其對於流域水質污染之影響，研究成果如圖 2-8 所示，隨著土地利用變遷丹江口流域東北方由於都市化及森林面積減少，造成該地區水流及輸砂量明顯上升，而北方由於農業開墾減少，隨著森林及草地面積的增加進而使該區域輸砂量明顯下降，研究成果顯示流量及輸砂量之變化與土地利用變遷有高度的相關性。

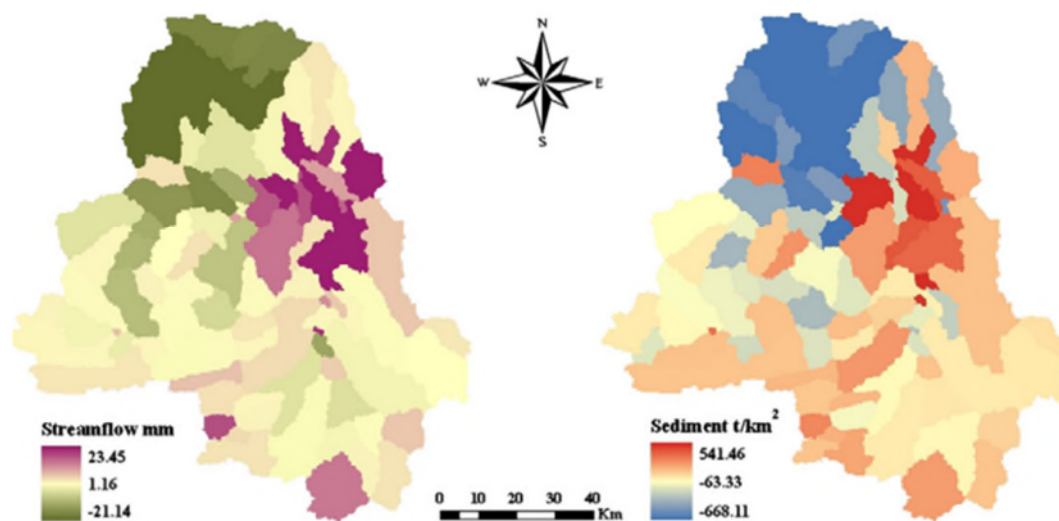


圖 2-8 中國丹江口水庫集水區 1978 及 2007 年流域流量及輸砂量空間輸出

資料來源：Yan et al.(2013)

氣候及土地利用變化於流域治理及防減災方面扮演重要角色，SWAT 模式可分析流域於氣候及土地利用變化的雙重影響，Giri et al. (2019)分析氣候變遷及土地利用改變同時發生的情境下對於美國新紐澤西州 Neshanic River 流域的影響，其成果包括單獨的氣候變化、單獨的土地利用變化以及氣候和土地利用變化的綜合評估，研究結果顯示氣候變遷對於流域的水文循環影響比都市化的影響更大，氣候變遷情境下無論是單獨還是與土地利用變化相結合的成果皆顯示流域的流量將顯著增加(與基期比較將增加 32% 和 36%)，明顯與土地利用變化預測情境下流量下降 5%相互抵銷；輸砂方面，流量增加顯著影響流域輸砂量，與之相反，土地利用變遷情境的影響主要在農業用地轉變為低密度住宅用途過程中會將泥土轉變成水泥鋪面進而使流域泥沙負荷減少，顯示氣候及土地利用變遷不一定造成災害(如圖 2-9 所示)，如何從氣候及土地利用變遷中找到維持流域永續發展之平衡對於流域治理來說更為重要。

不同流域面臨氣候及土地利用變遷的影響衝擊也不相同，根據 Azari et al.(2016)研究指出伊朗 Gorganroud 流域於未來氣候條件變化之影響下流域土壤沖蝕現象將增強，更多的土砂來源進入河道將造成下游河道淤積等的影響，隨著全球面臨未來天氣越趨極端的困境，目前大多流域還是處於威脅大於受益的狀態(Bello et al.,2019; Giri et al., 2016)，故分析流域災害事件並制定防災策略仍為全球各個國家致力發展之面向。

Parameters	Climate Change	Land use Change	Combine Climate and Land Use Change
Surface runoff	↓	↑	↓
Streamflow	↑	↓	↑
Water yield	↑	↓	↑
Groundwater	↑	↓	↑
Lateral flow	↑	↓	↑
Evapotranspiration	↓	↓	↓
Sediment load	↑	↓	↓

圖 2-9 Neshanic River 流域三種情境及其輸出量趨勢變化比對圖

資料來源：Giri et al. (2019)

第三章 研究設計

本計畫「初探極端氣候事件集水區複合型災害地文特性—致災區與受災區之指認」，預計研提一年期計畫。首先，本計畫蒐集彙整複合災害理論基礎、複合災害特性、複合災害時空移轉特性等，綜合歸納複合災害複合特性暨時空移轉特性，進一步以高屏溪流域為研究場域，蒐集因強降雨所引發之歷史災害資料，應用空間關聯統計「解構歷史強降雨衍生複合災害時空移轉特性」；第二部分，本計畫應用 SWAT 模式考量水文循環、流域土壤侵蝕及河道輸砂地等，模擬評估氣候變遷下流域水文及輸砂行為變化，以「研析極端氣候事件集水區複合型災害時空移轉情形」；綜合前述兩部分研究成果，本計畫嘗試進行「致災區」與「受災區」範圍界定，為進一步探討土砂災害與淹水災害之致災區與受災區的空間分布，以土壤水文評估模式(SWAT)計算之地表逕流量及泥砂量，分析因地表逕流及泥砂量外溢形成溢流之致災區域。受災區域範圍係基於歷史災害之空間關聯統計分析成果，致災區域範圍係透過歷史受災區之地表逕流及泥砂量計算得出各氣候事件期間之水文回應單元溢入量，並分析該氣候事件期間，每日地表逕流及泥砂溢流量皆高於當日受災區的平均量的空間分析單元，研究成果期就「致災區」與「受災區」於未來災害管理擬定防減災暨調適計畫之參考。最後，本計畫使用氣候變遷整合評估模式 TaiWAP，擬輸入氣象局觀測降雨與溫度資料，產製不同大氣模式各 RCP 情境下的降雨與溫度資料，進一步邏輯斯迴歸建立災害預測模型，就氣候變遷模擬情境進行未來災害區位的指認。

第一節 空間關聯統計

一、全域型空間自相關(Global Spatial Autocorrelation)

全域型空間自相關，採用全局空間自相關統計量 Moran's I 進行度量，目的在於探討整個研究區域中空間對象之間的關聯程度，以表明空間對象之間是否存在顯著的空間分布模式(林真真等人，2017)。Moran's I 指數反應的是空間之間是否相接觸之區域單元屬性值的相似程度。全域型 Moran's I 計算方式，是基

於統計學相關係數的共變數(covariance)關係推算得來。全域型 Moran's I 的公式：

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

其中， W_{ij} 是研究範圍內每一個空間單元 i 與 j ($j=\{1,2,3,...,n\}$) 區空間單元的空間相鄰權重矩陣。 $W_{ij}=1$ 表示 i 與 j 相鄰而以 $W_{ij}=0$ 表示 i 與 j 不相鄰。

要得知空間自相關是機遇發生抑或是非隨機分布，則可藉由 Z-score (式 2) 檢定，在一定的顯著水準 (Significance Level) 之下，判斷空間自相關程度是否達到統計顯著性(胡立諄、賴進貴，2006)。

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{var}(I)}} \quad (2)$$

二、區域型空間自相關(local spatial autocorrelation)

空間相關之區域型指標(Fischer & Getis, 2010; Anselin, 1995)，亦稱為地域 Moran's I 指標(Local Moran's I Index)，可用來識別不同空間位置上可能存在的不同空間關聯和聚集模式，找出資料間的空間異質性。由於 Global Moran's I 空間模型缺乏確定局部空間相關性的類型能力。因此，本研究進一步使用 LISA 空間聚集圖來進行探討(Li and Hong, 2019)。LISA 主要利用與鄰近地區的空間型態比較，找出其型態相似或相異的地區來定義群聚地區，並以地域型相關分布圖表示。延伸全域型空間自相關之觀念，計算每個空間點的 Moran 指標(林真真等人，2017)。統計量計算方法如下式：

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_j W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} = \frac{nz_i \sum_j W_{ij} z_j}{z^T z} = z_i^T \sum_j W_{ij} z_j^T \quad (3)$$

其中， z_i^T 和 z_j^T 是觀測值的平均值標準化觀測值。 W_{ij} 是研究範圍內，空間單元 i 與 j 區($j=1,2,3,...,n$)的空間相鄰權重矩陣， $W_{ij}=1$ 表示 i 與 j 相鄰，而以 $W_{ij}=0$ 表示 i 與 j 不相鄰。其中 W_{ij} 的設定會嘗試利用文獻進行建置，依照災害之間可能的鄰近狀況建置鄰近矩陣。

在地域型空間自相關分析中，當檢定達顯著水準，有顯著的正向區域空間自

相關時，即某地區被屬性值相似的地區所包圍，稱為空間聚集 (spatial cluster)，當地區與鄰區的觀察值都很高 (高於平均值)，可由 High - High (HH) 表示；當地區與鄰區的觀察值都很低，可以 Low - Low (LL) 表示；另外，本身觀察值高周圍低 (High - Low)、及本身觀察值低周圍高 (Low- High) 的負向區域空間自相關，即空間例外(胡立諄、賴進貴，2006；鄧志松，2005; Anselin,1995)。

第二節 土壤水文評估模式

一、地表逕流模擬

地表逕流模擬為水文研究重要的一環，是流量與非點源污染模擬研究的基礎。SWAT 模式模擬地表逕流以 SCS Curve Number 法進行估算，該方程式最早也是由美國開發並應用在小型的鄉村集水區，藉由雨水與逕流之關係建立而成，估算土地利用與土壤條件產生的地表逕流量(Rallison et al., 1982)。SCS curve number 公式為：

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{R_{day} - I_a + S} \quad (4)$$

Q_{surf} 是累積地表逕流量或超滲降雨量(mm H_2O)， R_{day} 為當天之降雨深度(mm H_2O)， I_a 是初始入滲量(mm H_2O)， S 為保留係數(mm H_2O)會因為土壤與土地利用變化而改變，而 S 參數的估算如下：

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5)$$

這裡的 CN 值為當天該地區的 CN 值，另外 I_a 為初始入滲量，通常會被設定為 $0.2S$ ，因此完整公式如下

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{R_{day} - 0.8S} \quad (6)$$

當降雨量大於 I_a 時，才會有地表逕流的發生，若小於 I_a 則會全部入滲到土中，如果用圖表來呈現 CN 值對應到之降雨-逕流轉換量。

在較大的降雨事件下，洪峰之模擬與地表逕流不同，洪峰流量是採用合理化公式進行模擬，其公式如下：

$$q_{peak} = \frac{C \times i \times Area}{3.6} \quad (7)$$

q_{peak} 是指洪峰流量($m^3 s^{-1}$)， C 為逕流係數， i 為降雨強度(mm/hr)， $Area$ 為集水區面積(km^2)，3.6 為單位換算之係數。

地表逕流產生後，流入河道需有一段延時，尤其在比較大的次集水區，更需要時間流入河道，此時河道中水量則需要考量地表逕流延遲參數來進行計算，如

下式所示：

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \times \left(1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}}\right]\right) \quad \dots\dots(8)$$

上式中 Q_{surf} 為主河道河川流量(mm H_2O)， Q'_{surf} 為次集水區當天產生之地表逕流量(mm H_2O)， $Q_{stor,i-1}$ 為前幾天儲存或延遲在次水區之地表逕流量(mm H_2O)， $surlag$ 為地表水延遲參數， t_{conc} 為次集水區之集流時間。

二、側向流模擬

除地表逕流會流入河道外，側向流同為另一個水流移動途徑，當水進入到土壤中，有些水會在表層土壤中進行流動，尤其是水力傳導度較高的土壤中，坡長與坡度都會影響側向流的計算。SWAT 模式中側向流之模擬是採用 Sloan et al. (1984)的方法，假定飽和地表下逕流與側向流都是在飽和區間平行移動，且水力傳導度與坡度需要夠達到該門檻值才會發生，該示意圖如圖 3-1 所示：

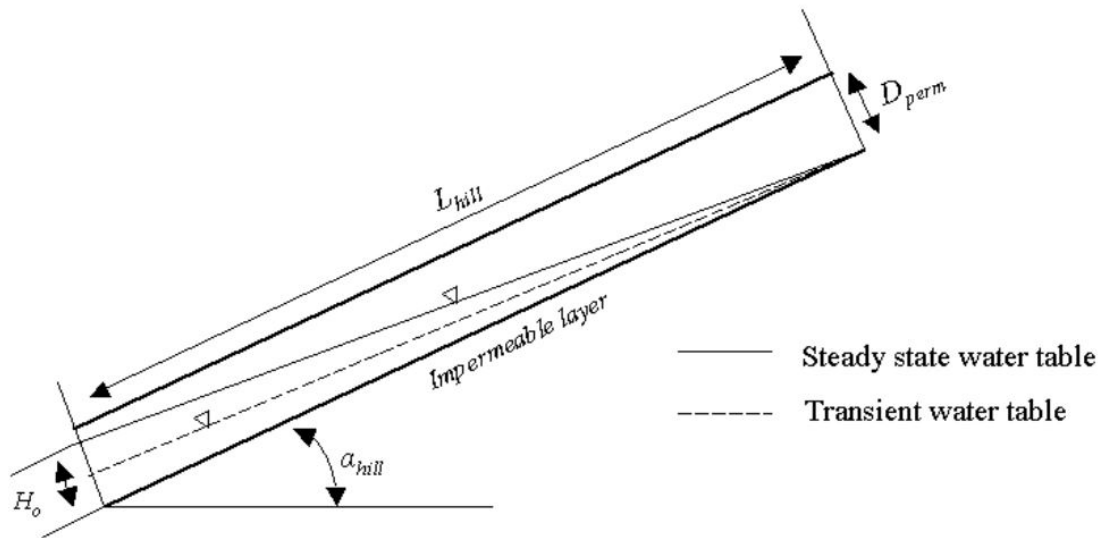


圖 3-1 水在 Kinematic storage model 中假定之狀態

資料來源：Neitsch et al (2011)

上圖中， D_{perm} 為表層可透水之土壤深度， L_{hill} 為坡長， α_{hill} 為斜坡的坡度，在 Kinematic wave 概念上，將側向流與飽和地表下逕流歸類為一起，假定水流位於飽和區與不滲透層之間，沿著邊坡底岩平行流動，在邊坡的飽和水量計算上

則是利用以下公式進行計算：

$$SW_{ly,excess} = \frac{1000 * H_0 * \phi_d * L_{hill}}{2} \quad (9)$$

$SW_{ly,excess}$ 為坡地每單位面積之飽和水層含水量(mm)， H_0 為坡地出水口顯示之飽和水層厚度(mm/mm)， L_{hill} 為坡長(m)，1000 為公尺轉換為毫米之單位轉換，側向流之計算主要由上式跟邊坡飽和水量計算等參數組合而成，如下式所示：

$$Q_{lat} = 0.024 \left(\frac{2 * SW_{ly,excess} * K_{sat} * slp}{\phi_d * L_{hill}} \right) \quad (10)$$

Q_{lat} 為邊坡側向流量(mm)， $SW_{ly,excess}$ 為坡地每單位面積之飽和水層含水量(mm)， K_{sat} 為飽和水力傳導度(mm/h)， slp 為高程單位距離。

三、淺層地下水補注河川水量模擬

淺層地下水層為河川基流補注來源，淺層地下水來源為地表水滲透，滲透過程將會把地表與土壤中的成分帶入淺層地下水層，這些過程在河川流量與水質模擬尤其重要，以下將介紹 SWAT 模式中有關河川基流補注等相關公式。

淺層地下水總水量的計算是透過水平衡，將河川基流補助與地表水滲透等進行計算，藉以了解淺層地下水總水量，公式如下：

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (11)$$

上述公式 $aq_{sh,i}$ 為淺層地下水在第 i 天的水儲存量(mm H_2O)， $aq_{sh,i-1}$ 為淺層地下水在第 $i-1$ 天的水儲存量(mm H_2O)， $w_{rchrg,sh}$ 為進入補助淺層地下水水量(mm H_2O)， Q_{gw} 為從淺層地下水流出補注河川基流之水量(mm H_2O)， w_{revap} 為土壤缺水時從淺層地下水補注回土壤的量(mm H_2O)， $w_{pump,sh}$ 這裡指的是人為抽水量(mm H_2O)。

淺層地下水主要來源為雨水，雨水除了成為地表逕流，同時還會滲透入土壤中，隨著重力往下流動，進入淺層地下水層中，其計算公式則與土壤滲透有關，該公式如下：

$$w_{rchrg,i} = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) * w_{seep} + \exp\left[-\frac{1}{\delta_{gw}}\right] * w_{rchrg,i-1} \quad (12)$$

上述公式中 $w_{rchrg,i}$ 為第 i 天進入補注的淺層地下水量(mm H_2O)， δ_{gw} 為水

流從地表流入淺層地下水的延時(天)， w_{seep} 是每天通過土壤底層的水量(mm H_2O)， $w_{rchg,i-1}$ 為第 i-1 天補注的淺層地下水量(mm H_2O)。

河川基流來自淺層地下水的補注，調節了河川乾季的水量與河川生物的存活，河川基流為淺層地下水減少的因素之一，其每日河川基流量計算方式如下：

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} * \exp[-\alpha_{gw} * \Delta t] + w_{rchg,sh} * (1 - \exp[-\alpha_{gw} * \Delta t]) \quad (13)$$

上述公式中 $Q_{gw,i}$ 為淺層地下水補注第 i 天的河川基流量(mm H_2O)， $Q_{gw,i-1}$ 為第 i-1 天的淺層地下水補注的河川基流量(mm H_2O)， α_{gw} 為退水常數， Δt 為一天經過的時間， $w_{rchg,sh}$ 為第 i 天淺層地下水層補充量(mm H_2O)， aq_{sh} 是第 i 天初始的淺層地下水儲存量(mm H_2O)， $aq_{shthr,q}$ 為發生河川基流補注之淺層地下水量門檻值(mm H_2O)。

四、土壤含水量計算

SWAT 模式中土壤含水量是以水平衡的方式計算，包含降雨、蒸發散以及土壤水流移動等等皆為土壤含水量變動因子，而土壤水平衡計算具體公式如下：

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^n (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (14)$$

上式中 SW_t 為每日最終土壤含水量(mm)， SW_0 為每日初始土壤含水量， R_{day} 為每日降雨量(mm)， Q_{surf} 為每日地表逕流產生量(mm)， E_a 為每日蒸發散量(mm)， W_{seep} 為每日土壤重力排水量(mm)， Q_{gw} 則為每日地下水補注土壤水量(mm)。藉由土壤資料庫內的特性並搭配土壤水平衡計算，即可了解每日土壤含水量之變化。

五、土壤垂直排水量及作物吸水量計算

土壤含水量變化與垂直重力排水及作物吸收等等有關，SWAT 模式中降雨及地面逕流入滲水量主要藉由 SCS Curve Number 法做計算，而重力排水速率跟作物可利用水量則是跟土壤物理性質(水力傳導度及田間含水量)及作物吸水能力有關。關於土壤重力排水計算公式如下所示：

$$\begin{aligned} SW_{ly,excess} &= SW_{ly} - FC_{ly} && \text{if } SW_{ly} > FC_{ly} \\ SW_{ly,excess} &= 0 && \text{if } SW_{ly} < FC_{ly} \end{aligned}$$

上式中 $SW_{ly,excess}$ 為土壤中可流動及入滲之水量(mm)， FC_{ly} 為土壤的田間含水量(mm)， SW_{ly} 則為土壤中的現存含水量(mm)。藉由上述公式能計算出土壤中可流動及入滲水量。實際每日土壤水入滲量計算則如下式所示：

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \left(1 - \exp \frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right) \quad (15)$$

上式中 $w_{perc,ly}$ 為土壤入滲至地下水之水量， $SW_{ly,excess}$ 為土壤中可流動及入滲之水量(mm)， TT_{perc} 則為入滲所經過的時間(times)。而除了土壤垂直入地下水的水量外，作物吸水量同樣將影響土壤含水量變化，作物於土壤吸水量的能力取決於根系生長的狀況，整體作物吸水量公式如下

$$w_{up,z} = \frac{E_t}{[1 - \exp(-\beta_w)]} \cdot \left[1 - \exp \left(-\beta_w \cdot \frac{z}{z_{root}} \right) \right] \quad (16)$$

上式中 $w_{up,z}$ 為植物能吸取的最大水量(根據不同土壤深度)， E_t 為植物每日之蒸發散量， Z_{root} 為植物根部之深度。

六、土壤沖蝕模擬分析

土壤沖蝕發生在強降雨事件，大量泥砂將隨著地表逕流進入河道，影響流域水質以及顆粒磷等營養鹽輸出量，而本計畫預期使用土壤沖蝕模式分析流域各土地利用及沖蝕來源區域之分析。SWAT 模式內土壤沖蝕模擬採用 Modified universal soil loss equation (Williams, 1995)進行運算，其公式如下所示：

$$sed = 11.8(Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \times CFRG \quad (17)$$

上式中sed為每日的土壤沖蝕量(metric tons)， Q_{surf} 為地表逕流深度(mm)， q_{peak} 為洪峰流量(m^3/s)， $area_{hru}$ 為水文反應單元面積(ha)， K_{USLE} 為土壤侵蝕參數， C_{USLE} 為土地覆蓋與管理參數， P_{USLE} 為水土保持參數， LS_{USLE} 為坡長， $CFRG$ 為土壤碎裂係數(固定的)。

七、SWAT 模式河道輸砂機制

SWAT 模式中具有輸砂於河道傳遞之模擬，該方法為 Simplified Bagnold equation，其方法將計算河道內最大的泥砂傳遞濃度及沉積濃度，最大泥砂傳遞濃度如下式所示：

$$conc_{sed, ch, mx} = c_{sp} v_{ch, pk}^{spexp} \quad (18)$$

上式中 $conc_{sed, ch, mx}$ 為河道泥砂傳遞之最大濃度， c_{sp} 為傳遞係數， $v_{ch, pk}$ 為河道洪峰流量， $spexp$ 則為泥沙傳遞指數。

泥砂於河道傳遞過程中沉積量計算如下式所示：

$$sed_{dep} = (conc_{sed, ch, i} - conc_{sed, ch, mx}) \times V_{ch} \quad (19)$$

上式中 sed_{dep} 為泥砂沉積量(ton)， $conc_{sed, ch, i}$ 為初始河道泥沙濃度， $conc_{sed, ch, mx}$ 為泥砂最大的傳遞濃度， $v_{ch, pk}$ 為河道洪峰流量。

$$sed_{dep} = (conc_{sed, ch, i} - conc_{sed, ch, mx}) \times V_{ch} \quad (20)$$

藉由上兩式即可計算河道內的泥砂傳輸量，如下式所示：

$$sed_{ch} = (sed_{ch, i} - sed_{dep} + sed_{deg}) \quad (21)$$

上式中 sed_{ch} 為河道中的輸砂量(ton)， $sed_{ch, i}$ 為初始的河道輸砂量(ton)，

sed_{dep} 為河道泥砂沉積量(ton)， sed_{deg} 為河道泥砂重新進入的量(ton)。

八、SWAT 模式空間數據計算

SWAT 模式為半分布式模式，HRU 為最小的逕流量及輸砂量計算單元，各類型 HRU 將分別計算其逕流量及泥砂輸出量，子集水區內所有 HRU 逕流量及泥砂輸出量加總即為子集水區總逕流量及輸砂量，其公式如下所示

$$SUB_{sed\ and\ flow} = \sum HRU_{sed\ and\ flow} \quad (22)$$

上式中 $SUB_{sed\ and\ flow}$ 為各子集水區輸砂量及逕流量， $HRU_{sed\ and\ flow}$ 為子集水區內各水文反應單元之輸砂量及逕流量，子集水區水文及輸砂數據將用於後續空間分析使用，模式亦可輸出子集水區內河道接受到之逕流及泥砂輸出量。

第三節 參數檢定軟體 SWAT-CUP

SWAT-CUP 為 SWAT 模式檢定之軟體，裡面包含許多檢定模式，例如 SUFI-2、GLUE 等等，其中 SUFI-2 檢定模式(Abbaspour, 2007)，可以進行敏感性分析、不確定性分析、模擬結果檢定驗證，而模式需要檢定驗證原因為水文與水質計算過程，輸入資料(雨量、風速等)、SWAT 概念性模擬、SWAT 模式參數以及觀測資料都有不確定的因素存在(Abbaspour, 2013)，而 SUFI-2 程式將彙整參數的不確定性，目的是取得最小的不確定參數的範圍，參數的不確定性模擬將產生具有不確定性的結果，從這些結果中計算出 95%可預測的不確定性範圍(95PPU)，透過利用 Latin hypercube sampling 產生出的不確定參數中，計算 2.5%與 97.5%累積分布的門檻值(Abbaspour, 2007)。

參數初始範圍較大，需透過 SUFI-2 計算出 95PPU 後產生新的參數範圍，而 SUFI-2 的反覆檢定可以減少參數的不確定性，新的參數與不確定性 95PPU 的範圍透過反覆檢定將會越來越小，而敏感性參數正是透過這步驟，找出最敏感與不敏感的參數。本計畫預計使用 SWAT-CUP 進行參數檢定，首先檢定流量參數，並使流量模擬值滿足目標函數之門檻以此完成模式參數範圍值檢定並藉由參數敏感性分析，了解影響流量之最敏感參數，流域土壤沖蝕及河道輸砂機制等參數亦與前述步驟同(如圖 3-2 所示)。目標函數用於瞭解模式模擬之準確性，本計畫預計使用 Coefficient of determination(R^2)，Nash-Sutcliffe efficiency(NES)與 PBIAS(百分比誤差)三者作為模式率定校驗的目標函數，以 Moriasi et al. (2007)所建議的門檻值來判定參數是否已經優化到最佳解(如下表 3-1 所示)，若尚未達到則會在透過 SWAT-CUP 率定出下一組更好的參數為止。

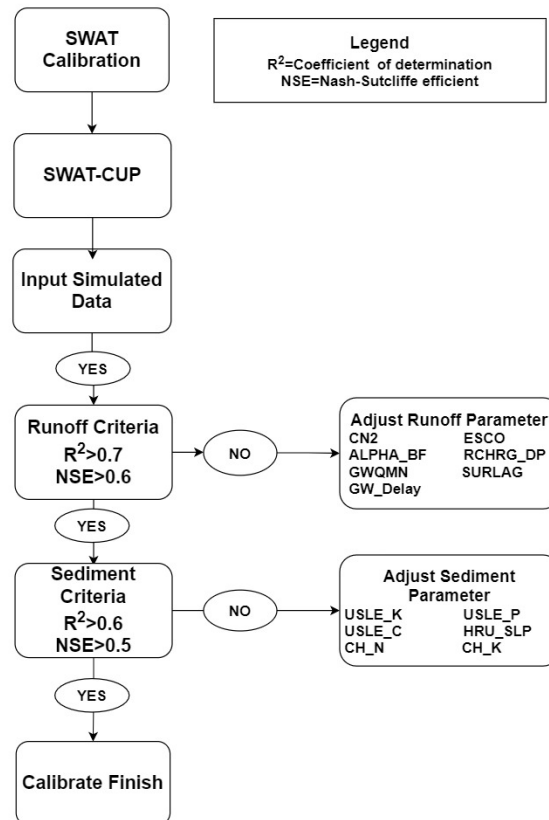


圖 3-2 SWAT-CUP 參數檢定流程

資料來源：本計畫繪製

表 3-1 各項目率定函數目標對照表

Table 9. Final performance evaluation criteria for recommended statistical performance measures for watershed- and field-scale models.						
Measure	Output Response	Temporal Scale ^[a]	Performance Evaluation Criteria			
Watershed scale			Very Good	Good	Satisfactory	Not Satisfactory
R ²	Flow ^[b]	D-M-A	R ² > 0.85	0.75 < R ² ≤ 0.85	0.60 < R ² ≤ 0.75	R ² ≤ 0.60
	Sediment/P ^[c]	M	R ² > 0.80	0.65 < R ² ≤ 0.80	0.40 < R ² ≤ 0.65	R ² ≤ 0.40
	N	M	R ² > 0.70	0.60 < R ² ≤ 0.70	0.30 < R ² ≤ 0.60	R ² ≤ 0.30
NSE	Flow	D-M-A	NSE > 0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.50 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.50
	Sediment	M	NSE > 0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.45 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.45
	N/P ^[c]	M	NSE > 0.65	0.50 < NSE ≤ 0.65	0.35 < NSE ≤ 0.50	NSE ≤ 0.35
PBIAS (%)	Flow	D-M-A	PBIAS < ±5	±5 ≤ PBIAS < ±10	±10 ≤ PBIAS < ±15	PBIAS ≥ ±15
	Sediment	D-M-A	PBIAS < ±10	±10 ≤ PBIAS < ±15	±15 ≤ PBIAS < ±20	PBIAS ≥ ±20
	N/P ^[c]	D-M-A	PBIAS < ±15	±15 ≤ PBIAS < ±20	±20 ≤ PBIAS < ±30	PBIAS ≥ ±30
Field scale						
R ²	Flow	M	R ² > 0.85	0.75 < R ² ≤ 0.85	0.70 < R ² < 0.75	R ² ≤ 0.70
d	Flow	M	d > 0.90	0.85 < d ≤ 0.90	0.75 < d < 0.85	d ≤ 0.75

^[a] D, M, and A denote daily, monthly, and annual temporal scales, respectively.

^[b] Includes stream flow, surface runoff, base flow, and tile flow, as appropriate, for watershed- and field-scale models.

^[c] Where there were no differences, PEC were grouped for the output responses.

資料來源：Moriassi et al., 2015

第四節 氣候變遷資料產製說明

全球暖化造成的天氣影響主要在溫度與雨量，溫度上升與降雨分布變化將影響流域水資源與作物生長，然而氣候變遷是屬於未來的預測，未來隨著輻射強迫力變化幅度會有不同的溫度與降雨變化，為此我們需要使用我國科技部推動之臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台之 TCCIP-AR5 資料，統計降尺度大氣

模式所估算之未來各月份的溫度與總雨量變化，並搭配氣象合成模式以產製未來 100 年每日的氣象資料，除了以單一測站進行降尺度的氣象資料，以下將針對氣象合成模式產製進行簡介。本計畫欲使用氣象合成模式(WGEN)產製未來溫度與雨量資料。氣象合成模式包含溫度與降雨兩種，皆為利用歷史資料產生未來溫度及雨量資料。

一、日尺度溫度模擬模式

特定氣候條件下之日溫度模擬，由月均溫度利用一階馬可夫鏈做模擬(Pickering et al, 1988;Wu and Haith,1993)，其方程式如下：

$$T_i = \mu_{Tm} + \rho(T_{i-1} - \mu_{Tm}) + v_i \sigma_T \sqrt{1 - \rho^2} \quad (23)$$

方程式中 T_i 為第 i 天的溫度， μ_T 為對應該月平均溫度， ρ 為該月份 T_i 與 T_{i-1} 之一階序列相關係數， v_i 屬於 $N(0,1)$ (Normal sampling deviate)， ρ_T 為歷史資料對應該月份之標準偏差。

二、日尺度降水模擬模式

日尺度降雨模擬可分成兩部份，分別是降雨事件判別與降雨量的推估。降雨事件判別是藉由歷史降雨機率做為演算基礎，統計各月第 $I-1$ 日降雨時，第 I 日降雨的機率表示為 $P(W|W)$ ；各月中第 $I-1$ 日不降雨時，第 I 日降雨的機率表示為 $P(W|D)$ 。同時會藉由產生 0 到 1 之間的亂數 RN 作為隨機機率設定，當 RN 小於或等於該月降雨機率 $P(W)$ 時，代表此日為降雨日；利用前一日之降雨情形判定為降雨日或非降雨日，依照歷史資料的 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ ，判定該日為降雨日。

降雨量值之模擬，根據洪念民（1996）可知由指數分佈（Exponential distribution）可模擬出理想的氣候資料。

$$P = \mu_p \times [-\ln(1 - RN)] \quad (24)$$

P 為降雨量(cm/day)； μ_p 為第 j 月雨天之平均降雨量(cm)； RN 為介於 0 到 1 之間的隨機亂數。

第五節 邏輯斯迴歸分析

邏輯斯迴歸類似線性迴規模式，同樣是用來建立一個應變數和多個自變數之間的關聯，其不同的點在於應變數為類別變數，像是「有和沒有」、「同意和不同意」或是「是和不是」等等。邏輯斯迴歸的自變數與應變數之間是利用指數方式進行移動，因此沒有需要符合常態分配的假設。邏輯斯迴歸被廣泛應用在不同領域，像是公共衛生(Hills & Eraso, 2021; Lemon et al, 2003)、災害管理(Cui & Han, 2019; Dokhi et al., 2017)，電腦科學(Nusinovici et al., 2020; Rymarczyk et al., 2019)等等。

邏輯斯迴歸式是透過勝算值(Odds)取自然對數(ln)而得(式 25)，其中勝算是代表事件成功機率與失敗機率的比值，在本計畫中也就代表「是災害高風險地區」和「不是災害高風險地區」的比值(式 26)。

$$\ln \frac{p}{1-p} = f(x) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k \quad (25)$$

$$\frac{p}{1-p} = e^{f(x)} \quad (26)$$

邏輯斯迴歸使用罪大概似估計法(Maximum Likelihood)求解參數。首先需要建立一個介於 0 和 1 之間的概似函數(likelihood function)，而最大概似估計就是要選擇使這一個函數達到最大的參數估計值。而在數學處理上為了方便，在進行分析的時候會將概似函數先取自然對數後再乘以-2，以-2LL(-2 Log Likelihood)進行表示。

第四章 複合災害時空關聯解析

第一節 災害複合特性

一、災害事件

本計畫以水文型態氣候事件所衍生的複合災害為標的，考量歷史災害資料、氣象因素等，擇定長延時強降雨之莫拉克颱風(2009 年 8 月 6 日至 8 月 10 日)、短延時強降雨之凡那比颱風(2010 年 9 月 18 日至 9 月 20 日)、雙颱風旋轉藤原效應之尼莎及海棠颱風(2017 年 7 月 26 日至 7 月 30 日)以及熱帶性低氣壓引起 0823 豪大雨事件(2018 年 8 月 23 日至 8 月 28 日)。

2009 年長延時強降雨莫拉克颱風，持續期間自 2010 年 8 月 6 日至 8 月 10 日，經綜整相關資料可知，颱風於 8 月 5 日形成中度颱風，並因近海地形影響，路徑轉為向西北方移動，持續影響至 8 月 8 日自桃園市新屋區離開臺灣本島(NCDR, 2009)(如圖 4-1 所示)。依據圖 4-2 累積雨量資料顯示，中央山脈以及南部地區總累積雨量破千，長延時強降雨造成 681 人死亡、18 人失蹤，莫拉克颱風所衍生的複合災害致小林村滅村，共計 474 人遭到活埋，亦是臺灣史上傷亡最慘重之侵台颱風。

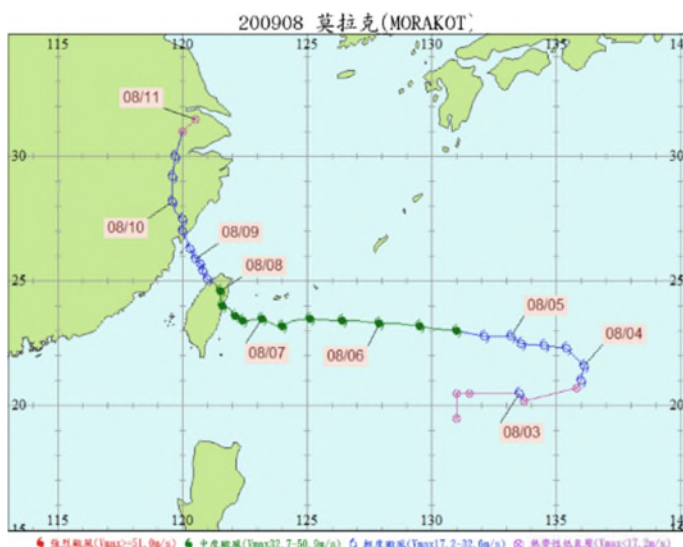


圖 4-1 莫拉克颱風路徑圖

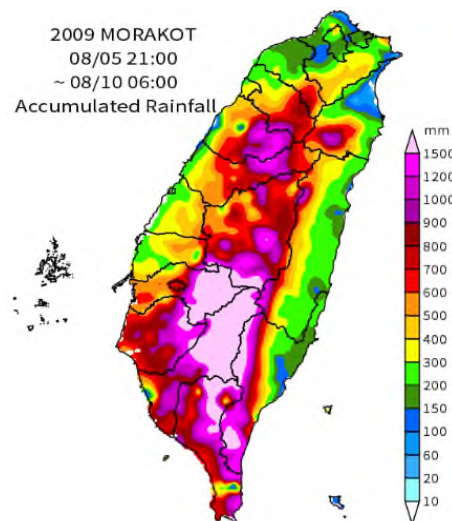


圖 4-2 莫拉克颱風累積雨量圖

2010 年短延時強降雨凡那比颱風，持續期間自 2010 年 9 月 18 日至 9 月 20 日，是自花蓮縣豐濱鄉附近登陸，受地形影響降雨集中為東部地區花蓮、台東以及南部地區臺南、高雄、屏東等縣市(如圖 4-3 所示)，災害事件期間有多處大規模淹水及坡地災害災情，據農委會統計共造成 21 億元的農業損失(NCDR, 2010)。凡那比颱風為 2010 年第一個影響台灣的颱風，且經中央氣象局預估強陣風對台灣的影響，共計 1.6 萬人撤離。依據圖 4-4 累積雨量資料顯示，雨量集中分佈於臺東、屏東與高雄山地區域。

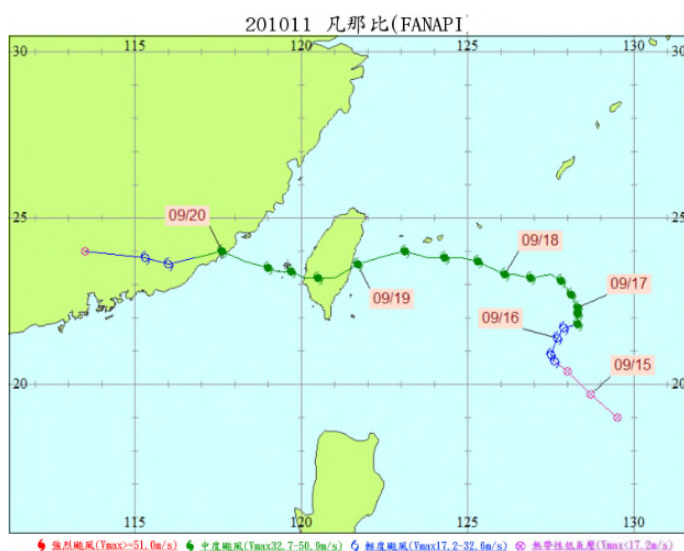


圖 4-3 凡那比颱風路徑圖

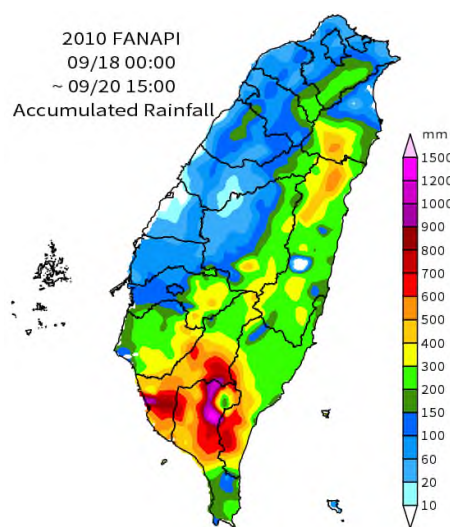


圖 4-4 凡那比颱風累積雨量圖

2017 年雙颱風旋轉的藤原效應尼莎及海棠颱風，自宜蘭蘇澳附近登陸，在臺灣南方的菲律賓東方海面形成，兩颱風登陸時間相隔不到 20 小時，持續期間為 2017 年 7 月 26 日至 7 月 30 日(如圖 4-5 所示)。依據圖 4-6 累積雨量資料顯示，尼莎及海棠颱風因藤原效應產生強烈降雨，在南部山區與平地出現強降雨，造成臺南、高雄、屏東河川下游平原區及都會區內水氾濫產生災情(NCDR, 2017)。

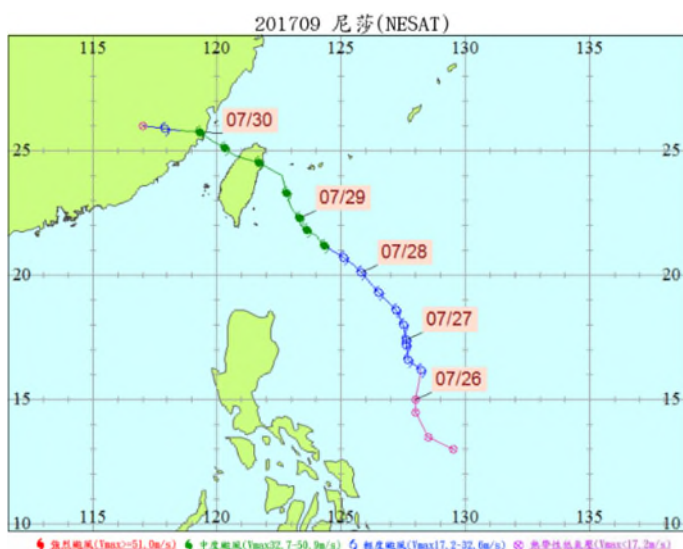


圖 4-5 尼莎/海棠颱風路徑圖

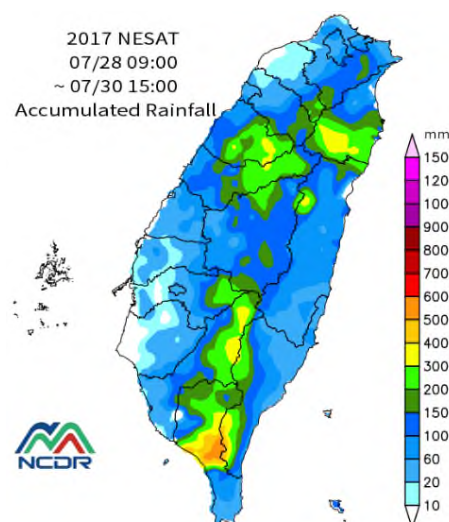


圖 4-6 尼莎/海棠颱風累積降雨圖

2018 年熱帶性低氣壓 0823 豪大雨事件，是在臺灣南方的低壓帶上所生成的鋒面，同時挾帶西南氣流自西部沿海登陸(如圖 4-7 所示)，此豪大雨重點降雨影響為西南部地區，災害事件期間有多處自主回報淹水地區、66 處坡地災害。並據農委會統計影響農業損失(NCDR, 2018)及圖 4-8 累積雨量資料顯示，長延時強降雨導致臺灣南部嘉義縣、臺南市及高雄市等地區嚴重水患，最長淹水時間長達 8 天，並造成 6 人死亡、148 人受傷、接近新台幣 8 億農損。

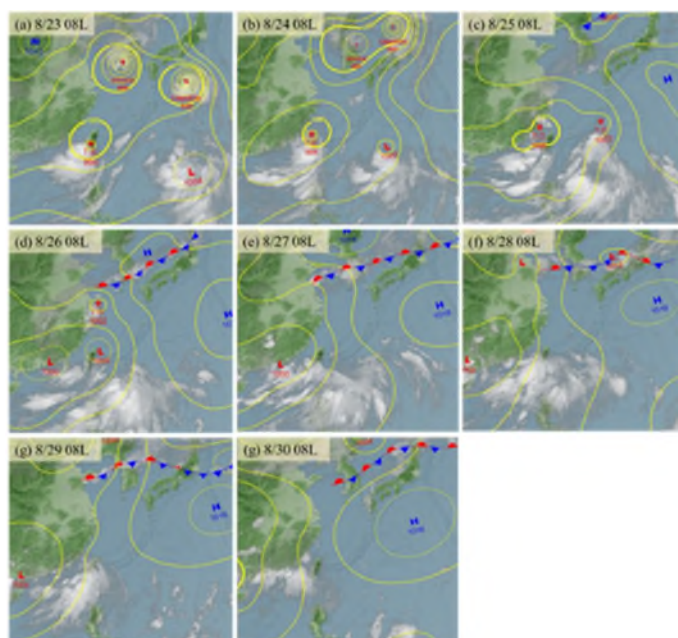


圖 4-7 豪雨 0823 地面天氣圖

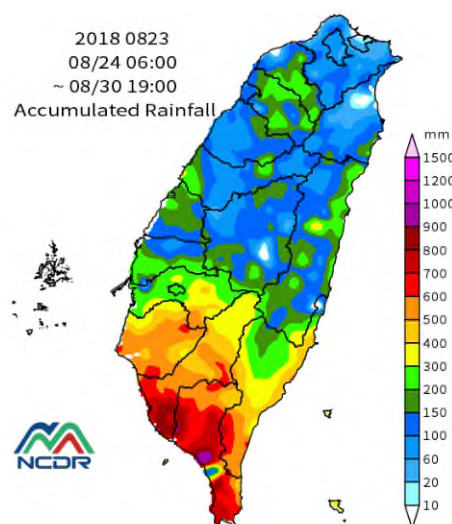


圖 4-8 豪雨 0823 累積降雨圖

二、災害空間分佈

本計畫為分析致災因子與災害之關聯，首先收集過往發生於研究地區之歷史災害空間分佈，透過取得政府資料開放平臺、國家災害防救科技中心、行政院農業委員會資料開放平台、水土保持局土石流防災資訊網、水土保持局歷史影像平台、水利地理資訊服務平台、社會經濟統計地理資訊網、及水災保全計畫資訊服務網之資料作為本次資料收集來源。惟因後續分析需解析時序動態中是否具空間移轉特性，考量土壤水文評估模型模擬以「日」為分析尺度，是以，本計畫刪除缺乏無細項敘明災害發生日期之部分資料進行分析，又因莫拉克颱風及凡那比颱風之分析中因缺乏每日淹水災害資料，無法呈現淹水災害類型的分佈，以及土砂災害及淹水災害又具有不同致災環境條件，故本計畫成果僅能初步論證災害之時序及空間移轉。

研究流程第一部份係為考量災害發生時序特性之空間關聯分析，考量資料內容及水文模型為以日為時間模擬尺度，因此將現有收集之資料依據災害發生日期進行分類，圖 4-9 及 4-10 為在無時間尺度下所討論之所有災害事件，收集與其相關的災害空間分佈。透過不同災害類型分類可發現，研究範圍之上中下游流域皆具受災地點，並依據不同災害類型各有聚集趨勢，以土石災害為例較集中於流域中游，而以淹水災害為例較集中於流域下游。

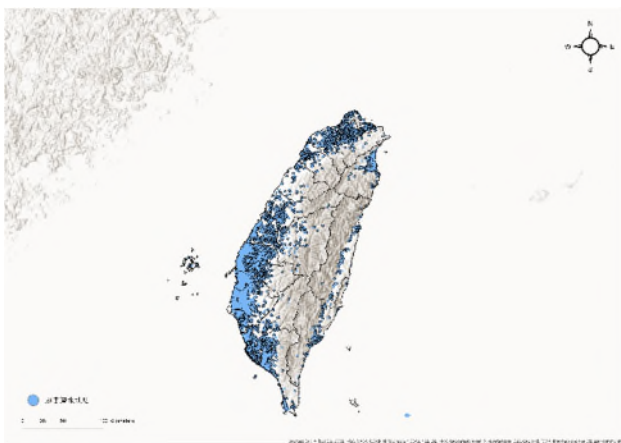


圖 4-9 歷史淹水區域



圖 4-10 歷史土石流區域

表 4-1 資料來源清單

類別	資料名稱	來源	應用
土砂	歷史影像平台	農業委員會水土保持局	適用
	土石流潛勢溪流	農業委員會水土保持局	適用
	坡地資料庫 89-109 年	國家災害防救科技中心	適用
	歷史坡地災點(97 到 102 年)	國家災害防救科技中心	適用
	歷史坡地災點(96 到 100 年)	國家災害防救科技中心	適用
	歷史坡地災害位置(100-104 年)	國家災害防救科技中心	適用
	歷史坡地災點(104~108 年)	國家災害防救科技中心	適用
	災害防救計畫	高雄市政府、屏東市政府	不適用
淹水	歷史淹水資料	經濟部水利署	不適用
	智慧水尺	經濟部水利署	適用
	歷年颱風淹水範圍	經濟部水利署	不適用
	水災保全計畫	經濟部水利署	不適用
	歷史淹水災害位置(90-104 年)	國家災害防救科技中心	不適用
	歷史淹水災害位置(104~108 年)	國家災害防救科技中心	不適用
	歷史淹水災害位置(102~106 年)	國家災害防救科技中心	不適用
	2020 年版近 5 年淹水災點資料	國家災害防救科技中心	不適用
	歷史淹水災點	高雄市政府	適用

第二節 複合災害時空關聯性

本計畫災害時空關聯性分析係透過空間自相關分析法 (Spatial Autocorrelation) 確立降雨量及災害之間的關聯，空間自相關分析法目的是探討具有空間特性的變數之間，而個別變數所產生的變化是導因於變數本質具有相關性的關聯，基於此假設下空間自相關分析即是透過將空間中變數予以量化的方式，分析變數於空間中是否具有集中(Cluster)、隨機(Random)、分散(Dispersed)的關係，而在空間自相關分析中分就全域型及區域型，區域型的空間自相關分析模式可提供各個分析之空間單元的相關性係數等數值，並判斷空間長相。為分析災害之時空動態，本計畫應用區域型空間自相關所呈現變量聚集趨勢進行分析，以土壤水文評估模式依據地形、地質、環境條件等空間資訊所建立之分析單元初步探討致災因子與災害事件之間的關聯，以及於時序變化中的空間分布，以下分就兩階段分析：包括災害事件地圖產製、區域型空間自相關分析，並計算結果可分為 HH(降雨高值且災害高值)、LL(降雨低值且災害低值)、LH(降雨低值且災害高值)、HL(降雨高值且災害低值)四種，討論降雨量與災害之間的空間關聯，並作為研究流程第三節討論致災區及受災區的分析基礎。

一、莫拉克颱風

莫拉克颱風自 8 月 6 日晚間颱風路徑轉向西南向移動，影響中南部地區並持續累積降雨量，8 月 7 日之分析結果呈現荖濃溪與隘寮溪之中游地區因持續累積雨量而反映降雨高值且災害低值(HL)之降雨特徵，而旗山溪中游地區則呈現降雨低值但災害高值(LH)的情形。8 月 8 日為颱風於高雄市、屏東縣市降下當時最大降雨量，因此上游地區出現降雨高值且災害低值(HL)，而旗山溪中游地區因發生坡地災害，因此呈現降雨低值但災害高值(LH)與降雨高值且災害高值(HH)，荖濃溪與隘寮溪之中游地區也反映降雨低值但災害高值(LH)之特徵。8 月 9 日因降雨量累積大部分上游地區皆為降雨高值且災害低值(HL)，而在旗山溪與荖濃溪中游地區則呈現降雨低值但災害高值(LH)與降雨高值且災害高值(HH)的災害

聚集特徵。8 月 10 日也持續擴大上游地區為降雨高值且災害低值(HL)、旗山溪與荖濃溪中游地區呈現災害高值的特徵(如圖 4-11 所示)。

因此可知，高屏溪的上游地區會因降雨量的累積而呈現降雨高值且災害低值(HL)的關聯，可推估上游地區由於因降雨量累積而呈現高值，降雨量與災害並不一定為正相關。反之，中游地區會因強降雨的特性，使得較容易發生土石災害，並隨著降雨量累積下，與發生災害事件呈現正相關，因此可初步理解災害好發區域以及與環境特性的關聯。

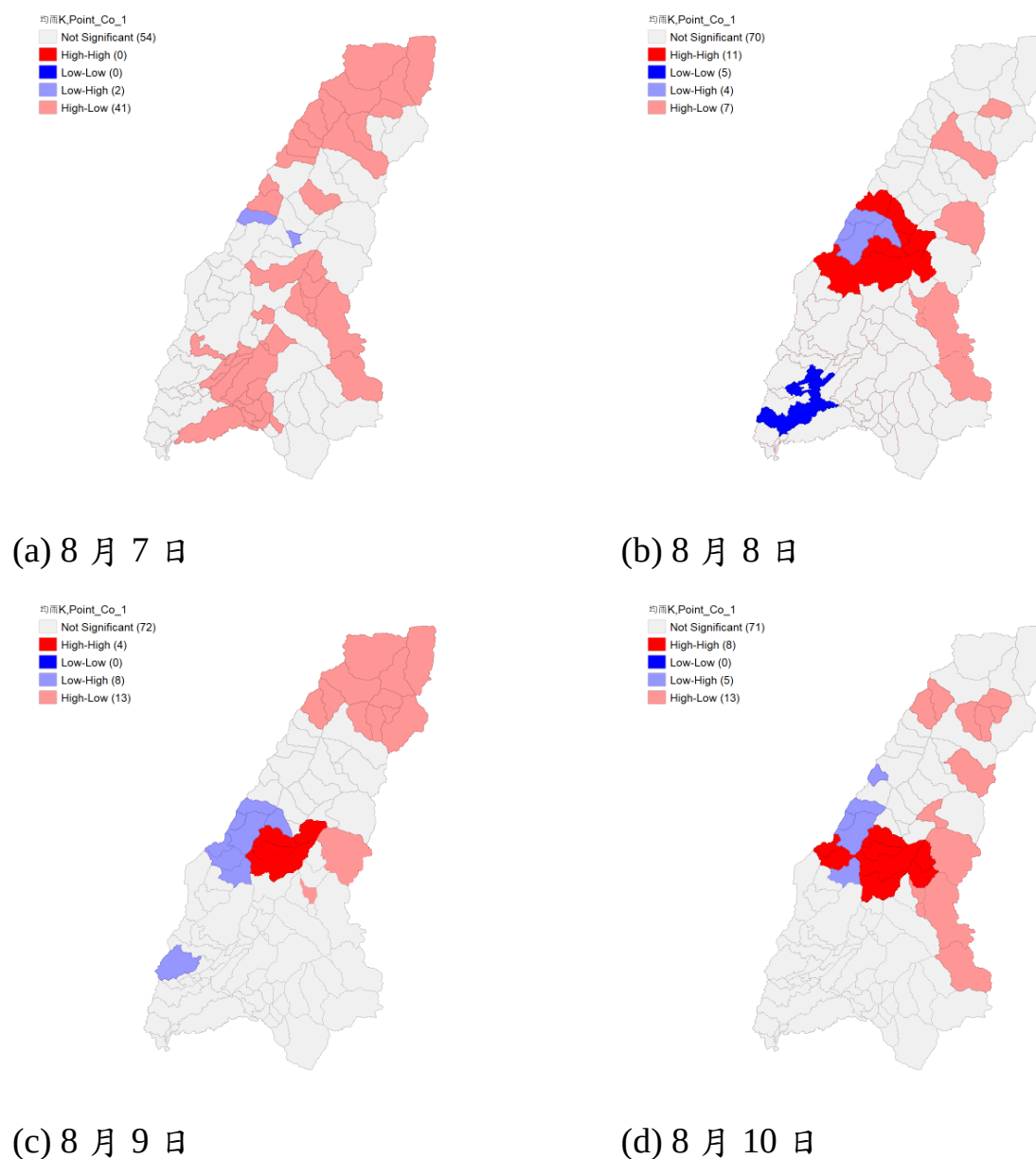


圖 4-11 莫拉克颱風災害時空關聯性分析

二、凡那比颱風

凡那比颱風登陸後轉以西南向移動，自 9 月 19 日開始影響高雄、屏東地區並使得降雨量增加，圖 4-12 為凡那比颱風災害時空關聯性分析，9 月 19 日之分析結果呈現，高屏溪主要支流隘寮溪上游及中游地區反映出降雨高值且災害低值(HL)之降雨特徵，而荖濃溪中游地區與下游地區則出現降雨高值且災害高值(HH)。9 月 20 日持續累積雨量下，旗山溪、荖濃溪與隘寮溪之中游地區降雨高值且災害低值(HL)之降雨特徵，並在下游地區為降雨高值且災害高值(HH)。

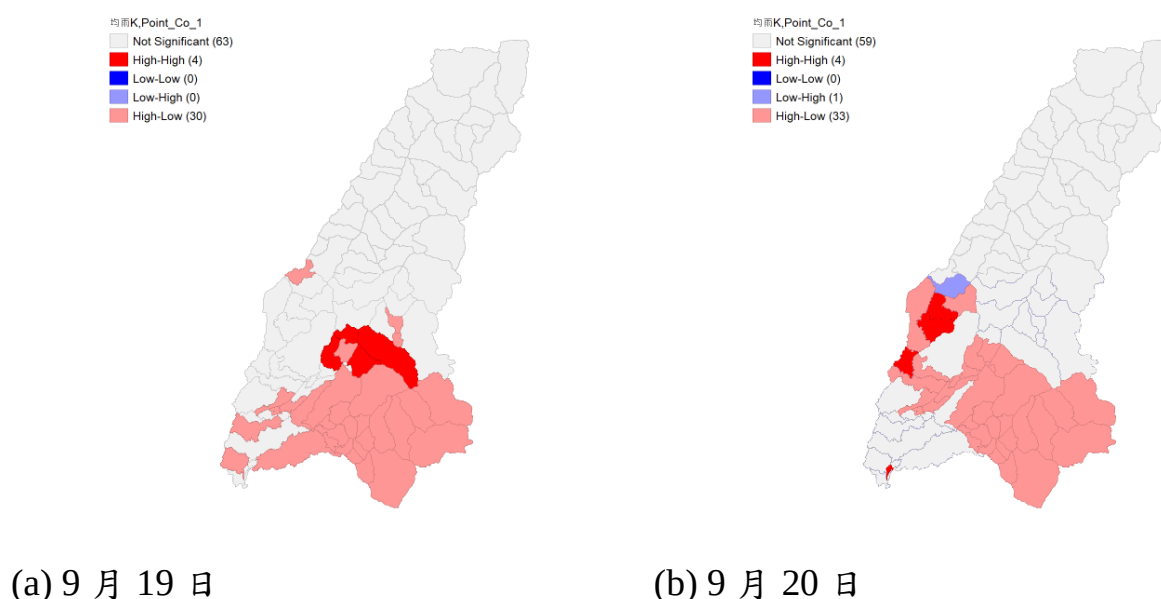


圖 4-12 凡那比災害時空關聯性分析

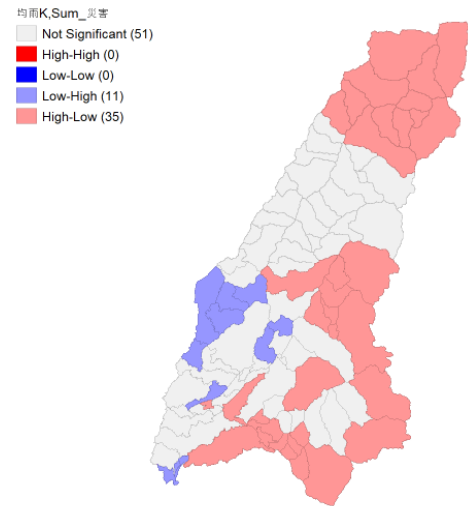
三、尼莎暨海棠颱風(NESAT)

尼莎暨海棠颱風登陸後轉以西南向移動，自 7 月 29 日於宜蘭蘇澳鎮附近登陸，即開始集中降雨量於山地地區，隨颱風登陸後轉以西南向移動，隨之影響南部地區降雨量增加，並於分析結果中可看出坡地災害空間關聯(如圖 4-13 所示)，7 月 30 日荖濃溪中游地區及隘寮溪上游地區呈現降雨高值且災害低值(HL)之降雨特徵，並且在荖濃溪中游地區出現降雨高值且災害高值(HH)的地區，而旗山溪則為降雨低值且災害低值(LL)的特性。在淹水災害空間關聯中，7 月 29 日於上游地區出現降雨高值且災害低值(HL)之降雨特徵，並且在旗山溪中游地區出現降雨低值但災害高值(LH)之受災特徵。7 月 30 日持續累積雨量下擴大中游地

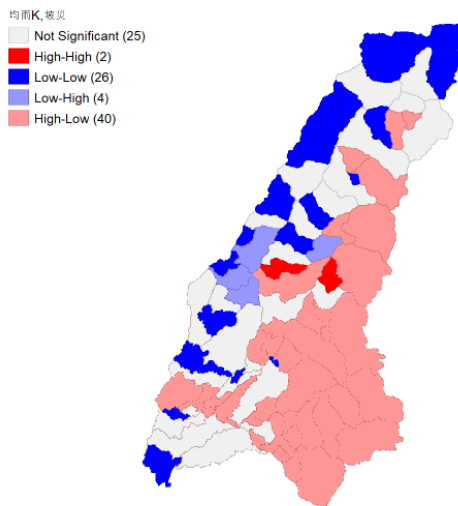
區出現降雨高值且災害低值(HL)，並且於下游地區出現降雨高值且災害高值(HH)。兩者災害類型可發現坡地災害集中於中游地區，而淹水災害多集中於下游地區，由此可證不同災害類型其影響範圍的差異。



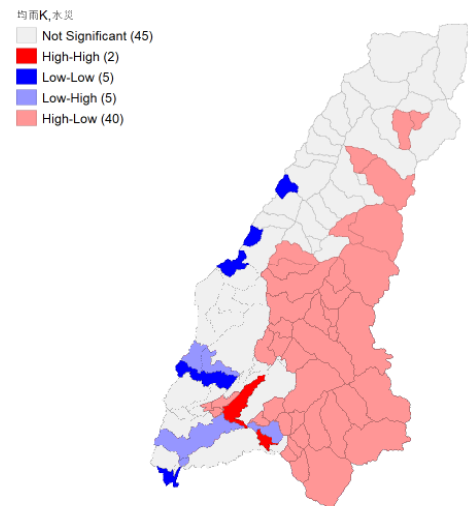
(a) 7 月 29 日坡地災害



(b) 7 月 29 日淹水災害



(a) 7 月 30 日坡地災害



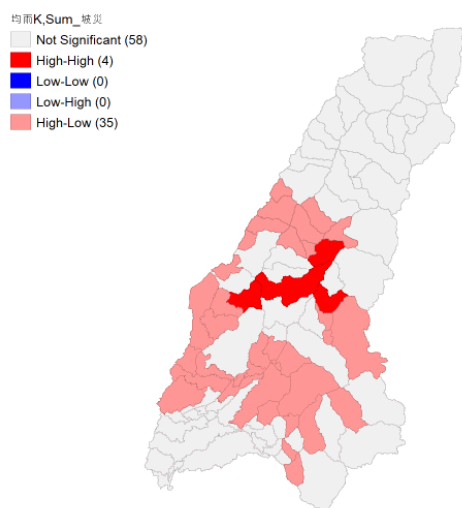
(b) 7 月 30 日淹水災害

圖 4-13 尼莎暨海棠颱風災害時空關聯性分析

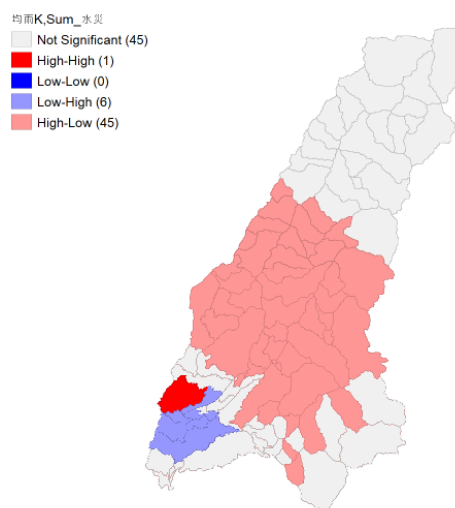
四、豪雨 0823

淹水災害空間關聯中，8 月 23 日中游地區幾乎為降雨高值且災害低值(HL)之降雨特徵，而下游地區出現降雨高值且災害高值(HH)以及降雨低值但災害高值(LH)之受災特徵。8 月 24 日中游地區維持降雨高值且災害低值(HL)之降雨特徵，並於旗山溪中游地區出現降雨高值且災害高值(HH)的特性。隨著雨量持續累積於 8 月 25 日及 8 月 28 日於擴大中下游地區出現降雨高值且災害低值(HL)，並且於下游地區出現降雨高值且災害高值(HH)。自 0823 豪雨事件顯示，坡地災害的災害高值多呈現於中游地區，而淹水災害發生於下游地區，此外中游地區多為影響降雨高值且災害低值(HL)區，上游地區則是具有災害低值的特徵。

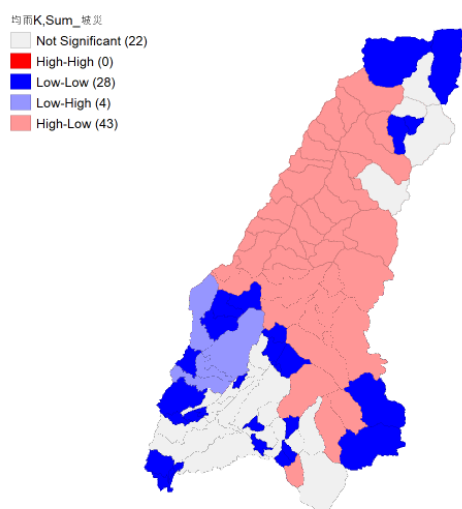
圖 4-14 的坡地災害空間關聯性分析成果顯示 8 月 23 日降雨量主要集中於南部地區，中游及部分下游地區為降雨高值且災害低值(HL)之降雨特徵，並在荖濃溪中游地區反映降雨高值且災害高值(HH)的特性。8 月 24 日中游地區擴大降雨高值且災害低值(HL)範圍，並在旗山溪中游地區出現降雨低值但災害高值(LH)之受災特徵，而上游地區及下游地區為降雨低值且災害低值(LL)的特性。8 月 25 日在雨量累積下中下游地區為降雨高值且災害低值(HL)，而上游地區為降雨低值且災害低值(LL)的特性。8 月 26 日因降雨較集中於上游地區，因此在上游地區出現降雨高值且災害低值(HL)，但隨 8 月 27 日降雨量減弱而恢復原本降雨低值且災害低值(LL)的特性。



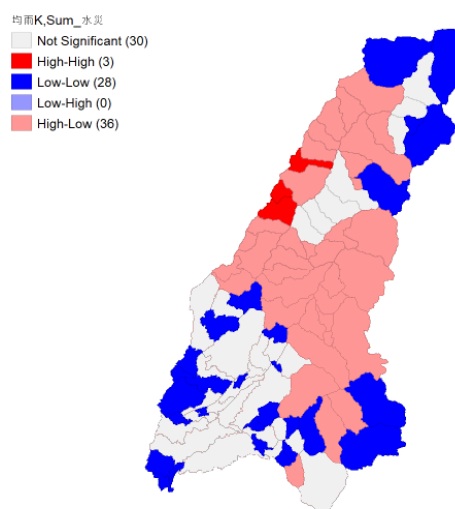
(a) 8 月 23 日坡地災害



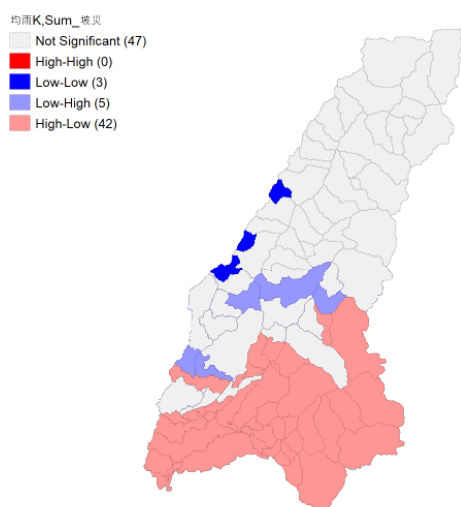
(b) 8 月 23 日淹水災害



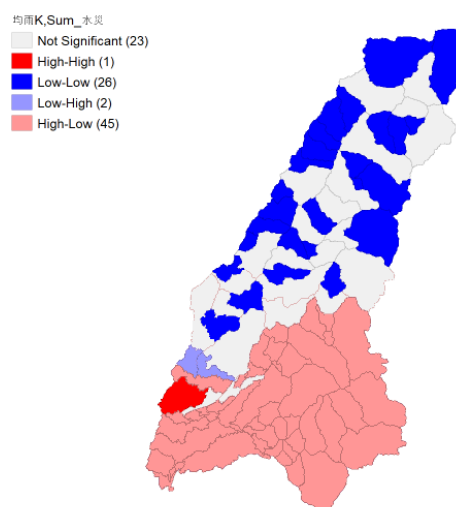
(a) 8 月 24 日坡地災害



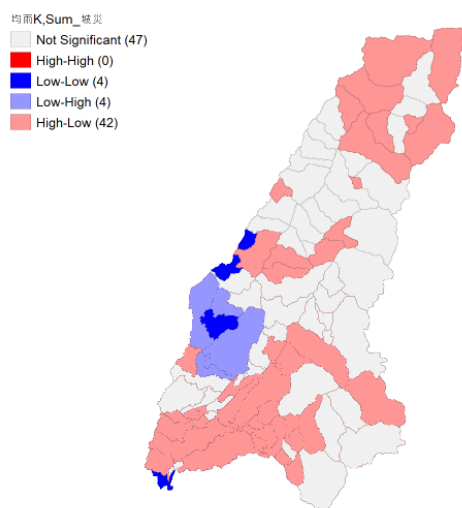
(b) 8 月 24 日淹水災害



(a) 8 月 25 日坡地災害



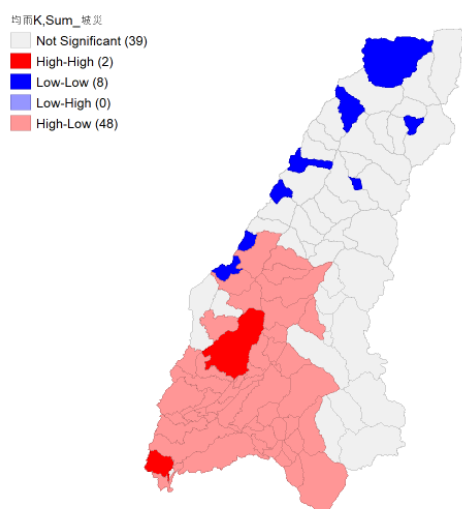
(b) 8 月 25 日淹水災害



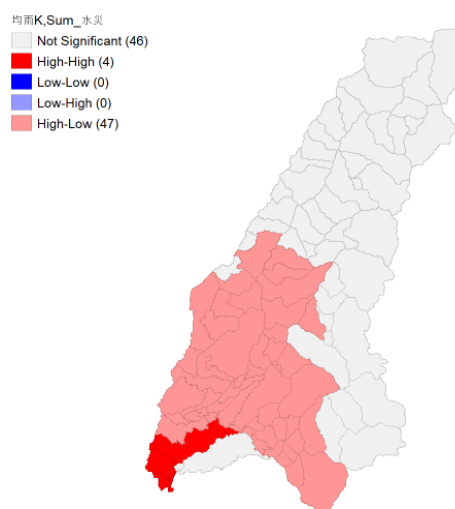
(a) 8 月 26 日坡地災害



(b) 8 月 26 日淹水災害



(a) 8 月 28 日坡地災害



(b) 8 月 28 日淹水災害

圖 4-14 豪雨 0823 災害時空關聯性分析

第三節 致災區與受災區範圍

基於第二節災害空間關聯分析的成果，呈現各氣候事件之降雨量及歷史災害的空間關聯時序變化，依據土砂災害與淹水災害之災種不同，其與高災害相關性的區位分布係具有差異。以河流段說明，在河流上游地區大多可見係屬高降雨關聯的區域，而河流中下游地區則屬高災害關聯的區域，其中根據災害類別不同高災害關聯的區域也具有差異，如土砂災害之高災害關聯區多位於中上游河段，而淹水災害之高災害關聯區多位於中下游河段且近建成地區。本計畫為進一步探討土砂災害與淹水災害之致災區與受災區的空間分布，爰此本節以土壤水文評估模式(SWAT)計算之地表逕流量及土砂量，討論高災害關聯之受災區域周邊的保全對象，並分析因地表逕流及土砂量外溢形成溢流之致災區域。

本計畫界定之受災區域範圍係基於歷史災害之空間關聯分析成果，透過歷史受災區之地表逕流及泥砂量計算可得各氣候事件期間之水文回應單元溢入量，藉此指認該氣候事件期間，每日地表逕流及泥砂溢流量皆高於當日受災區的平均量的空間分析單元為致災區，並依據災害類別適用不同數值，土砂災害以泥砂量、淹水災害為地表逕流個別討論。由於土壤水文評估模式之最小尺度計算單元係由地文條件所切分而成之水文回應單元，因此本計畫以空間解析單元 30*30 公尺的網格進行數值分派以利分析。

一、淹水災害

淹水災害為討論尼莎海棠颱風及豪雨 08 月 23 日事件，災害的致災區及受災區空間分布如圖 4-15 及圖 4-16。淹水災害之致災區分布於屏東縣的九如鄉、三地門、內埔鄉、里港鄉、長治鄉、屏東市、泰武鄉、高樹鄉、瑪家鄉、霧台鄉、鹽埔鄉，高雄市的大社鄉、大樹鄉、仁武鄉、內門鄉、六龜鄉、田寮鄉、杉林鄉、美濃鎮、茂林鄉、桃源鄉、鳥松鄉、旗山鎮、燕巢鄉等山區聚落。淹水災害之受災區分布於屏東縣的九如鄉、三地門、里港鄉、屏東市、高樹鄉、鹽埔鄉，高雄市的大社鄉、大樹鄉、仁武鄉、內門鄉、六龜鄉、田寮鄉、杉林鄉、美濃鎮、茂林鄉、鳥松鄉、旗山鎮、燕巢鄉等山區聚落。

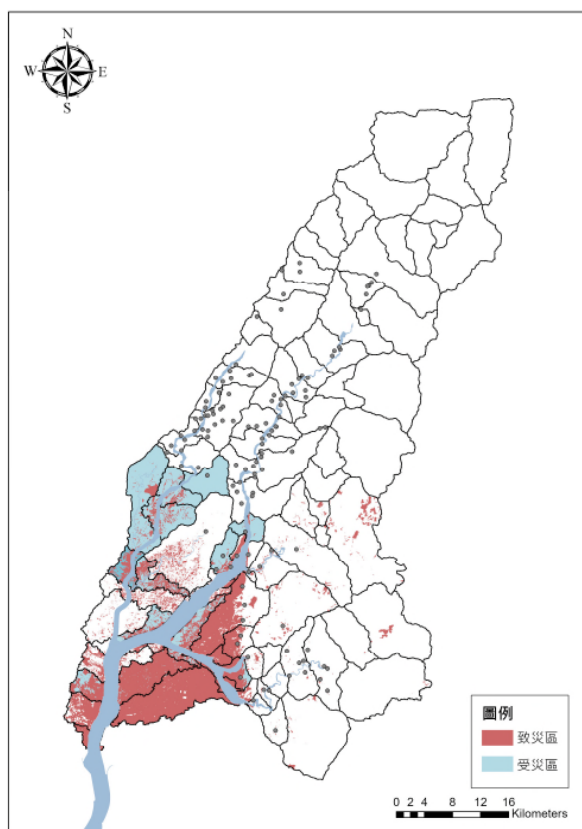


圖 4-15 尼莎海棠颱風致受災區區分布

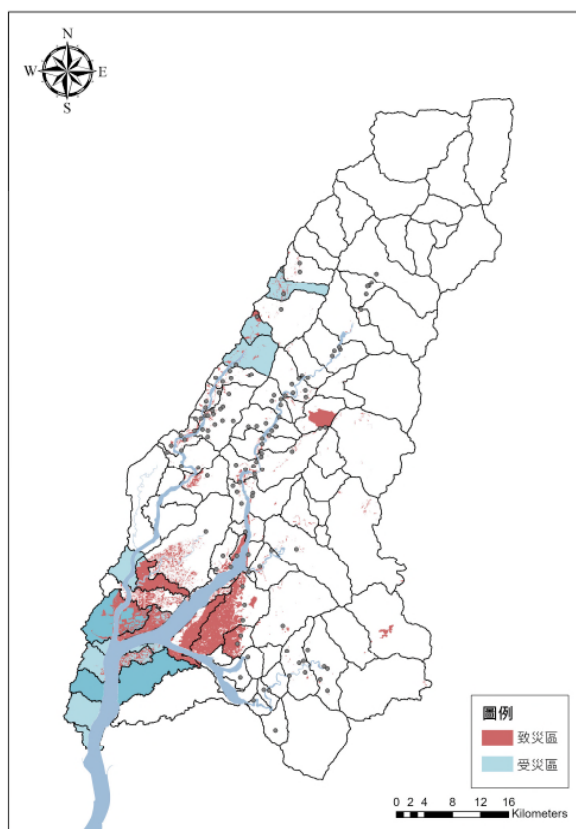


圖 4-16 豪雨 08/23 事件致受災區分布

(一)致災區

調查尼莎海棠颱風之致災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的六龜區(7處)、茂林區(3處)、美濃區(1處)，以及屏東縣的三地門鄉(11處)、霧台鄉(9處)、高樹鄉(1處)、瑪家鄉(1處)等地區具有位於致災區周邊 800 公尺範圍內之聚落，為易因致災影響之警示戶。其中高雄市以六龜區為例，分布於大津里(2處)、新寮里(2處)、新興里(2處)、新威里(1處)；屏東縣以三地門鄉為例，分布於達來村(2處)、三地村(1處)、口社村(1處)、大社村(1處)、安坡村(1處)、青山村(1處)、青葉村(1處)、馬兒村(1處)、德文村(1處)、賽嘉村(1處)，詳細村里尺度統計如表 4-2。

調查豪雨 08 月 23 日事件之致災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的六龜區(38處)、甲仙區(27處)、桃源區(17處)、杉林區(6處)、那瑪夏區(6處)、茂林區(3處)、美濃區(1處)，以及屏東縣的霧台鄉(9處)、三地門鄉(6處)、高樹鄉(1處)等地區具有位於致災區周邊 800 公尺範圍內之聚落，為易因致災影響之警示戶。其中高雄市以六龜區為例，分布於新發里(10處)、荖濃里(5處)、寶來里(5處)、文武里(3處)、興龍里(3處)、大津里(2處)、中興里(2處)、六龜里(2處)、新寮里(2處)、新興里(2處)、新威里(1處)、義寶里(1處)；屏東縣以霧台鄉為例，分布於霧台村(3處)、大武村(2處)、佳暮村(2處)、吉露村(1處)、阿禮村(1處)，詳細村里尺度統計如表 4-2。

表 4-2 淹水災害致災區村里統計(處數)

縣市	行政區	尼莎海棠淹水致災	豪雨 08/23 淹水致災
高雄市	六龜區	7	38
	大津里	2	2
	中興里	0	2
	六龜里	0	2
	文武里	0	3
	荖濃里	0	5
	新威里	1	1
	新發里	0	10
	新寮里	2	2
	新興里	2	2
	義寶里	0	1
	興龍里	0	3
	寶來里	0	5
	甲仙區	0	27
	大田里	0	4
	小林里	0	5
	西安里	0	5
	和安里	0	2
	東安里	0	6
	關山里	0	4
	寶隆里	0	1
	杉林區	0	6
	木梓里	0	3
	集來里	0	3
	那瑪夏區	0	6
	南沙魯里	0	2
	達卡努瓦里	0	3
	瑪雅里	0	1
	美濃區	1	1
	廣林里	1	1
	茂林區	3	3
	多納里	1	1
	茂林里	1	1
	萬山里	1	1
	桃源區	0	17

縣市	行政區	尼莎海棠淹水致災	豪雨 08/23 淹水致災
	拉芙蘭里	0	3
	建山里	0	3
	桃源里	0	2
	高中里	0	4
	復興里	0	1
	樟山里	0	1
	寶山里	0	3
屏東縣	三地門鄉	11	6
	三地村	1	0
	口社村	1	0
	大社村	1	1
	安坡村	1	1
	青山村	1	1
	青葉村	1	1
	馬兒村	1	1
	達來村	2	0
	德文村	1	1
	賽嘉村	1	0
	高樹鄉	1	1
	新豐村	1	1
	瑪家鄉	1	0
	瑪家村	1	0
	霧台鄉	9	9
	大武村	2	2
	吉露村	1	1
	佳暮村	2	2
	阿禮村	1	1
	霧台村	3	3

(二)受災區

調查尼莎海棠颱風之受災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的六龜區(6 處)、杉林區(4 處)，以及屏東縣的三地門鄉(2 處)等地區具有位於受災區周邊 800 公尺範圍內，為高風險之受災聚落。其中高雄市以六龜區為例，分布於新寮里(2 處)、新興里(2 處)、文武里(1 處)、新威里(1 處)；屏東縣以三地門鄉為例，分布於口社村(1 處)、賽嘉村(1 處)，詳細村里尺度統計如表 4-3。

調查豪雨 08 月 23 日事件之受災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的那瑪夏區(3 處)、甲仙區(2 處)等地區具有位於受災區周邊 800 公尺範圍內，為高風險之受災聚落。其中高雄市以那瑪夏區為例，分布於南沙魯里(1 處)、達卡努瓦里(1 處)、瑪雅里(1 處)，詳細村里尺度統計如表 4-3。

表 4-3 淹水災害受災區村里統計(處數)

縣市	行政區	尼莎海棠淹水受災	豪雨 08/23 淹水受災
高雄市	六龜區	6	0
	大津里	0	0
	中興里	0	0
	六龜里	0	0
	文武里	1	0
	荖濃里	0	0
	新威里	1	0
	新發里	0	0
	新寮里	2	0
	新興里	2	0
	義寶里	0	0
	興龍里	0	0
	寶來里	0	0
	甲仙區	0	2
	大田里	0	0
	小林里	0	2
	西安里	0	0
	和安里	0	0
	東安里	0	0

縣市	行政區	尼莎海棠淹水受災	豪雨 08/23 淹水受災
	關山里	0	0
	寶隆里	0	0
	杉林區	4	0
	木梓里	2	0
	集來里	2	0
	那瑪夏區	0	3
	南沙魯里	0	1
	達卡努瓦里	0	1
	瑪雅里	0	1
	美濃區	0	0
	廣林里	0	0
	茂林區	0	0
	多納里	0	0
	茂林里	0	0
	萬山里	0	0
	桃源區	0	0
	拉芙蘭里	0	0
	建山里	0	0
	桃源里	0	0
	高中里	0	0
	復興里	0	0
	樟山里	0	0
	寶山里	0	0
屏東縣	三地門鄉	2	0
	三地村	0	0
	口社村	1	0
	大社村	0	0
	安坡村	0	0
	青山村	0	0
	青葉村	0	0
	馬兒村	0	0
	達來村	0	0
	德文村	0	0
	賽嘉村	1	0
	高樹鄉	0	0
	新豐村	0	0

縣市	行政區	尼莎海棠淹水受災	豪雨 08/23 淹水受災
	瑪家鄉	0	0
	瑪家村	0	0
	霧台鄉	0	0
	大武村	0	0
	吉露村	0	0
	佳暮村	0	0
	阿禮村	0	0
	霧台村	0	0

二、土砂災害

土砂災害為討論莫拉克颱風、凡那比颱風、尼莎海棠颱風及 08 月 23 日豪雨事件，災害的致災區及受災區空間分布如圖 4-17 至圖 4-20。土砂災害之致災區分布於屏東縣的九如鄉、三地門、內埔鄉、里港鄉、長治鄉、屏東市、武鄉、高樹鄉、瑪家鄉、霧台鄉、鹽埔鄉，高雄市的大社鄉、大樹鄉、仁武鄉、內門鄉、六龜鄉、田寮鄉、杉林鄉、美濃鎮、茂林鄉、桃源鄉、鳥松鄉、旗山鎮、燕巢鄉等山區聚落。土砂災害之受災區分布於屏東縣的九如鄉、三地門、里港鄉、屏東市、高樹鄉、瑪家鄉、霧台鄉，高雄縣的大樹鄉、仁武鄉、內門鄉、六龜鄉、田寮鄉、杉林鄉、美濃鎮、茂林鄉、桃源鄉、鳥松鄉、旗山鎮、燕巢鄉等山區聚落。

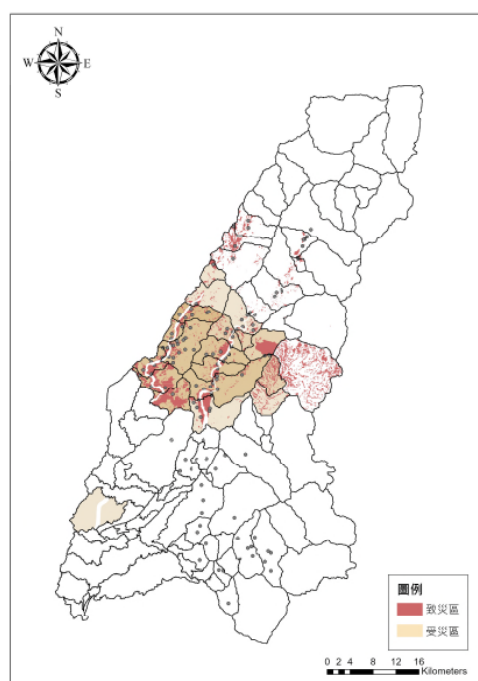


圖 4-17 莫拉克颱風致受災區分布

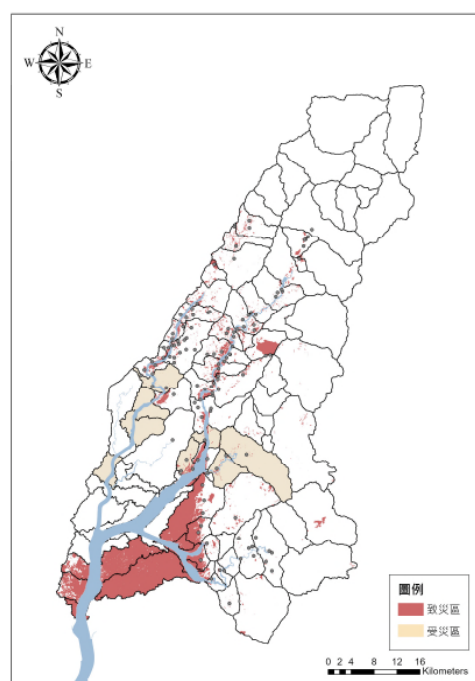


圖 4-18 凡那比颱風致受災區分布

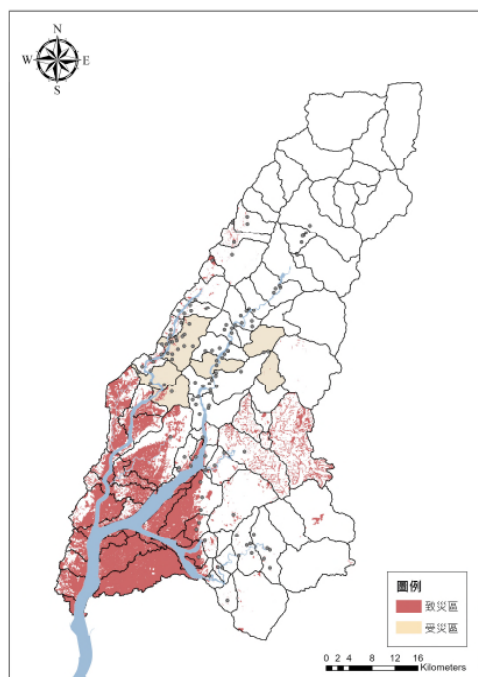


圖 4-19 尼莎海棠颱風致受災區分布

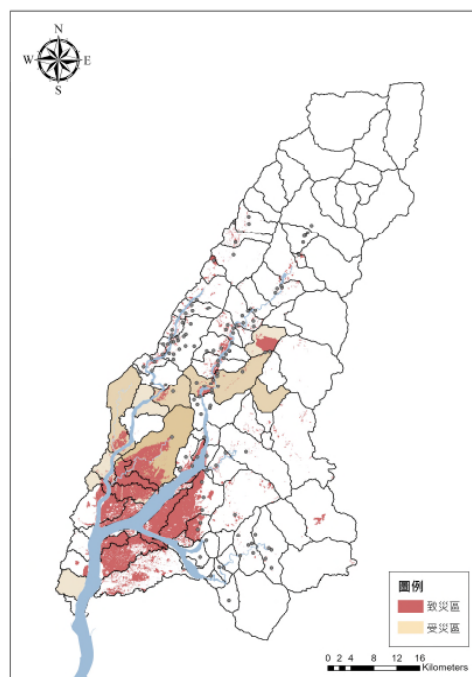


圖 4-20 豪雨 08/23 事件致受災區分布

(一)致災區

調查莫拉克颱風之致災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的六龜區(31 處)、甲仙區(28 處)、桃源區(19 處)、杉林區(6 處)、那瑪夏區(6 處)等地區具有位於致災區周邊 800 公尺範圍內之聚落，為易因致災影響之警示戶。其中高雄市以六龜區為例，分布於六龜區(31 處)、新發里(10 處)、荖濃里(5 處)、寶來里(5 處)、文武里(3 處)、興龍里(3 處)、中興里(2 處)、六龜里(2 處)、義寶里(1 處)，詳細村里尺度統計如表 4-4。

調查凡那比颱風之致災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的六龜區(37 處)、甲仙區(28 處)、桃源區(19 處)、杉林區(6 處)、那瑪夏區(6 處)、茂林區(3 處)，以及屏東縣的三地門鄉(11 處)、霧台鄉(9 處)、高樹鄉(1 處)、瑪家鄉(1 處)等地區具有位於致災區周邊 800 公尺範圍內之聚落，為易因致災影響之警示戶。其中高雄市以六龜區為例，分布於新發里(10 處)、荖濃里(5 處)、寶來里(5 處)、興龍里(3 處)、大津里(2 處)、中興里(2 處)、六龜里(2 處)、文武里(2 處)、新寮里(2 處)、新興里(2 處)、新威里(1 處)、義寶里(1 處)；屏

東縣以三地門鄉為例，分布於達來村(2處)、三地村(1處)、口社村(1處)、大社村(1處)、安坡村(1處)、青山村(1處)、青葉村(1處)、馬兒村(1處)、德文村(1處)、賽嘉村(1處)，詳細村里尺度統計如表 4-4。

調查尼莎海棠颱風之致災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的甲仙區(27處)、六龜區(7處)、杉林區(6處)、那瑪夏區(6處)、茂林區(3處)、美濃區(1處)，以及屏東縣的三地門鄉(11處)、霧台鄉(9處)、高樹鄉(1處)、瑪家鄉(1處)等地區具有位於致災區周邊 800 公尺範圍內之聚落，為易因致災影響之警示戶。其中高雄市以甲仙區為例，分布於東安里(6處)、小林里(5處)、西安里(5處)、大田里(4處)、關山里(4處)、和安里(2處)、寶隆里(1處)；其中屏東縣以三地門鄉為例，分布於達來村(2處)、三地村(1處)、口社村(1處)、大社村(1處)、安坡村(1處)、青山村(1處)、青葉村(1處)、馬兒村(1處)、德文村(1處)、賽嘉村(1處)，詳細村里尺度統計如表 4-4。

調查豪雨 08 月 23 日事件之致災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的六龜區(34處)、甲仙區(27處)、桃源區(19處)、杉林區(6處)、那瑪夏區(6處)、茂林區(3處)、美濃區(1處)，以及屏東縣的霧台鄉(9處)、三地門鄉(6處)、高樹鄉(1處)等地區具有位於致災區周邊 800 公尺範圍內之聚落，為易因致災影響之警示戶。其中高雄市以六龜區為例，分布於新發里(10處)、荖濃里(5處)、寶來里(5處)、興龍里(3處)、大津里(2處)、六龜里(2處)、新寮里(2處)、新興里(2處)、文武里(1處)、威里(1處)、義寶里(1處)；屏東縣以霧台鄉為例，分布於霧台村(3處)、大武村(2處)、佳暮村(2處)、吉露村(1處)、阿禮村(1處)，詳細村里尺度統計如表 4-4。

表 4-4 土砂災害致災區村里統計(處數)

縣市	行政區	莫拉克 土砂致災	凡那比 土砂致災	尼莎海棠 土砂致災	豪雨 08/23 土砂致災
高雄市	六龜區	31	37	7	34
	大津里	0	2	2	2
	中興里	2	2	0	0
	六龜里	2	2	0	2
	文武里	3	2	0	1
	荖濃里	5	5	0	5
	新威里	0	1	1	1
	新發里	10	10	0	10
	新寮里	0	2	2	2
	新興里	0	2	2	2
	義寶里	1	1	0	1
	興龍里	3	3	0	3
	寶來里	5	5	0	5
	甲仙區	28	28	27	27
	大田里	4	4	4	4
	小林里	5	5	5	5
	西安里	5	5	5	5
	和安里	2	2	2	2
	東安里	7	7	6	6
	關山里	4	4	4	4
	寶隆里	1	1	1	1
	杉林區	6	6	6	6
	木梓里	3	3	3	3
	集來里	3	3	3	3
	那瑪夏區	6	6	6	6
	南沙魯里	2	2	2	2
	達卡努瓦里	3	3	3	3
	瑪雅里	1	1	1	1
	美濃區	0	0	1	1
	廣林里	0	0	1	1
	茂林區	0	3	3	3
	多納里	0	1	1	1
	茂林里	0	1	1	1
	萬山里	0	1	1	1

縣市	行政區	莫拉克 土砂致災	凡那比 土砂致災	尼莎海棠 土砂致災	豪雨 08/23 土砂致災
	桃源區	19	19	0	19
	拉芙蘭里	3	3	0	3
	建山里	3	3	0	3
	桃源里	2	2	0	2
	高中里	4	4	0	4
	復興里	1	1	0	1
	勤和里	2	2	0	2
	樟山里	1	1	0	1
	寶山里	3	3	0	3
屏東縣	三地門鄉	0	11	11	6
	三地村	0	1	1	0
	口社村	0	1	1	0
	大社村	0	1	1	1
	安坡村	0	1	1	1
	青山村	0	1	1	1
	青葉村	0	1	1	1
	馬兒村	0	1	1	1
	達來村	0	2	2	0
	德文村	0	1	1	1
	賽嘉村	0	1	1	0
	高樹鄉	0	1	1	1
	新豐村	0	1	1	1
	瑪家鄉	0	1	1	0
	瑪家村	0	1	1	0
	霧台鄉	0	9	9	9
	大武村	0	2	2	2
	吉露村	0	1	1	1
	佳暮村	0	2	2	2
	阿禮村	0	1	1	1
	霧台村	0	3	3	3

(二)受災區

調查莫拉克颱風之受災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的六龜區(31處)、甲仙區(28處)、桃源區(10處)、杉林區(6處)、那瑪夏區(1處)等地區具有位於受災區周邊 800 公尺範圍內，為高風險之受災聚落。其中高雄市以六龜區為例，分布於新發里(10處)、荖濃里(5處)、寶來里(5處)、興龍里(3處)、文武里(3處)、中興里(2處)、六龜里(2處)、義寶里(1處)，詳細村里尺度統計如表 4-5。

調查凡那比颱風之受災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的六龜區(6處)、杉林區(4處)、茂林區(3處)、甲仙區(2處)等地區具有位於受災區周邊 800 公尺範圍內，為高風險之受災聚落。其中高雄市以六龜區為例，分布於新寮里(2處)、新興里(2處)、大津里(1處)、新威里(1處)，詳細村里尺度統計如表 4-5。

調查尼莎海棠颱風之受災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的甲仙區(21處)、六龜區(12處)、杉林區(5處)、桃源區(3處)等地區具有位於受災區周邊 800 公尺範圍內，為高風險之受災聚落。其中高雄市以甲仙區為例，分布於東安里(7處)、西安里(5處)、大田里(3處)、關山里(3處)、小林里(1處)、和安里(1處)、寶隆里(1處)，詳細村里尺度統計如表 4-5。

調查豪雨 08 月 23 日事件之受災區周邊山區聚落可知，分布於高雄市的六龜區(14處)、杉林區(4處)、桃源區(3處)、美濃區(1處)等地區具有位於受災區周邊 800 公尺範圍內，為高風險之受災聚落。其中高雄市以六龜區為例，新發里(4處)、興龍里(3處)、六龜里(2處)、文武里(1處)、荖濃里(1處)、新寮里(1處)、義寶里(1處)、寶來里(1處)，詳細村里尺度統計如表 4-5。

表 4-5 土砂災害受災區村里統計(處數)

縣市	行政區	莫拉克 土砂受災	凡那比 土砂受災	尼莎海棠 土砂受災	豪雨 08/23 土砂受災
高雄市	六龜區	31	6	12	14
	大津里	0	1	0	0
	中興里	2	0	0	0
	六龜里	2	0	0	2
	文武里	3	0	1	1
	荖濃里	5	0	4	1
	新威里	0	1	0	0
	新發里	10	0	6	4
	新寮里	0	2	0	1
	新興里	0	2	0	0
	義寶里	1	0	0	1
	興龍里	3	0	0	3
	寶來里	5	0	1	1
	甲仙區	28	2	21	0
	大田里	4	1	3	0
	小林里	5	1	1	0
	西安里	5	0	5	0
	和安里	2	0	1	0
	東安里	7	0	7	0
	關山里	4	0	3	0
	寶隆里	1	0	1	0
	杉林區	6	4	5	4
	木梓里	3	2	2	2
	集來里	3	2	3	2
	那瑪夏區	1	0	0	0
	南沙魯里	1	0	0	0
	達卡努瓦里	0	0	0	0
	瑪雅里	0	0	0	0
	美濃區	0	0	0	1
	廣林里	0	0	0	1
	茂林區	0	3	0	0
	多納里	0	1	0	0
	茂林里	0	1	0	0
	萬山里	0	1	0	0

縣市	行政區	莫拉克 土砂受災	凡那比 土砂受災	尼莎海棠 土砂受災	豪雨 08/23 土砂受災
	桃源區	10	0	3	3
	拉芙蘭里	0	0	0	0
	建山里	3	0	0	0
	桃源里	0	0	0	0
	高中里	4	0	0	0
	復興里	0	0	0	0
	勤和里	0	0	0	0
	樟山里	0	0	0	0
	寶山里	3	0	3	3
屏東縣	三地門鄉	0	0	0	0
	三地村	0	0	0	0
	口社村	0	0	0	0
	大社村	0	0	0	0
	安坡村	0	0	0	0
	青山村	0	0	0	0
	青葉村	0	0	0	0
	馬兒村	0	0	0	0
	達來村	0	0	0	0
	德文村	0	0	0	0
	賽嘉村	0	0	0	0
	高樹鄉	0	0	0	0
	新豐村	0	0	0	0
	瑪家鄉	0	0	0	0
	瑪家村	0	0	0	0
	霧台鄉	0	0	0	0
	大武村	0	0	0	0
	吉露村	0	0	0	0
	佳暮村	0	0	0	0
	阿禮村	0	0	0	0
	霧台村	0	0	0	0

三、現地勘查

本計畫藉由彙整過去災害事件了解過去發生過淹水及土石流之受災區，並藉由模式分析其致災區的位置，進而前往當地勘查，並發現一些造成淹水或土石流之原因及受災後的蹤跡，更清楚了解當地複合災害發生之狀況。

(一)淹水致災區

杉林地區為高屏溪上游，該地區坡度陡峭，且有不少農田裸露及建築物等不透水鋪面，將使地表逕流快速形成並往下游流動造成洪水及不少的土砂沖蝕，如圖 4-21 至圖 4-23 所示。



圖 4-21 杉林地區人為開墾之山坡地區



圖 4-22 杉林地區人為開墾之山坡地區



圖 4-23 杉林地區山坡裸露地及農田

(二)淹水受災區

旗山溪下游為旗山市區，上游產生之地表逕流皆會往下游移動，且由於旗山市區為高密度的人口聚集區，大量的水泥鋪面將使該地區面臨淹水災害之威脅，除此之外緊鄰河川的狀態下若是河川水位過高同時將造成溢淹的問題，如圖 4-24 至圖 4-26 所示。



圖 4-24 旗山市區旗山老街



圖 4-25 旗山市區河堤停車場



圖 4-26 旗山市區低矮河堤

(三)崩塌致災區

高屏溪流域中上游地區山坡皆有大大小小之山崩，本計畫實地探訪大津橋附近的尾寮山，並拍下其山崩及護坡相關工程之進行，說明該地區崩塌好發之現象如圖 4-27 至圖 4-28 所示



圖 4-27 尾寮山臨近山坡之大規模崩塌



圖 4-28 尾寮山臨近山坡之大規模崩塌及護坡

(三)崩塌受災區

高屏溪流域尤其是山地門附近之部落皆有面臨土石流災害之威脅，其中青葉部落更是受到崩塌及土石流災害影響之重點區域，本計畫即實地探訪青葉部落，拍攝其部落現況，如圖 4-29 至圖 4-31 所示。



圖 4-29 青葉部落邊坡及道路狀況



圖 4-30 青葉部落內街道狀況



圖 4-31 青葉部落及土石流受災地區

第五章 高屏溪流域水文及輸砂空間分佈

第一節 土壤水文評估模式檢定

一、高屏溪集水區流量檢定驗證成果

本研究採用高屏溪上游集水區內的 5 個流量測站資料進行集水區檢定驗證，然而上游支流測站資料於濕季有資料監測不全與損毀的情況，本計畫以較為完整的里嶺大橋下游測站資料與各測站流量資料進行迴歸，求得線性公式並進行上游集水區缺漏日流量之推估，而比對成果入流量與各個測站的 R^2 皆有 0.75 以上，顯示各支流測站與里嶺大橋測站監測流量呈現良好的線性關係，即可用於推估支流測站濕季缺損之流量資訊，表 5-1 則為本計畫使用之流量檢定相關參數及用途說明，而流量參數之選擇則參考自 Fiseha et al.(2013)及 Shi et al.(2007)等文獻，將參考文獻皆有調整之流量參數做為主要調整參數，其餘少數另有文獻使用的參數則將做為次要參數做為初步流量模擬與檢定效果不好之追加調整參數，其中 CN 值主要跟土地利用息息相關，因此將會分別調整各集水區土地利用之 CN 值，藉以區分子集水區間不同土地利用之水文特性，每個水文參數皆能說明不同的子集水區於 SWAT 模式中的水文環境條件並能做為未來跨流域參數及流域特徵比較之參考。

表 5-1 SWAT 模式流量檢定參數說明

參數名稱	參數中文	調整優先順序	用途
CN2	土地利用之 CN 值	1	地表逕流模擬
ALPHA_BF	退水係數	1	河川流量模擬
GW_DELAY	地下水補注延遲參數	1	地下水位模擬
GWQMN	地下水補注河川基流之門檻值	1	河川流量模擬
GW_REVAP	地下水補注土壤水係數	1	土壤水模擬
REVAPMN	地下水補注土壤水之門檻值	1	土壤水模擬
GW_SPYLD	地下水比出水係數	2	河川流量模擬
SHALLST	初始淺層地下水深度	2	地下水位模擬
DEEPST	初始深層地下水深度	2	地下水位模擬
SOL_K	土壤水力傳導度	2	土壤水模擬
SOL_AWC	土壤田間含水量	2	土壤水模擬
RCHRG_DP	淺層補注深層地下水係數	1	地下水位模擬
SURLAG	地表逕流延遲係數	2	地表逕流模擬
ESCO	地下水回補土壤水係數	2	土壤水模擬

資料來源：本計畫繪製

(一)杉林大橋集水區檢定驗證成果

杉林大橋集水區主要反映旗山溪之河川流量，集水區面積為 502 平方公里，流量檢定時間為 2011 年至 2013 年，流量驗證時期為 2014 至 2017 年。流量檢定成果如圖 5-1，綠色點為觀測值，橘色線為模擬值，流量檢定成果 $R^2=0.86$ 、Nash 值為 0.85，根據 Moriasi et al. (2015)文章中的目標函數之對照表，檢定目標函數位於非常好之區間範圍。流量驗證的部分，驗證成果

$R^2=0.81$ 、Nash 值為 0.7，此驗證是位於良好之區間範圍，亦符合圖 8 之檢定驗證流程門檻值。

表 5-2 為杉林大橋集水區之參數檢定成果，參數檢定方法分為兩種，一種為根據該土地利用或土壤本身屬性值進行百分比調整，另一種方法為直接調整參數數值。為保留集水區本身之土地利用及土壤分佈特性之影響，本計畫將土地利用及土壤的 CN 值、水力傳導度及田間含水量進行百分比調整，並從參數檢定過程中進行敏感度分析，了解控制杉林大橋集水區之主要參數，敏感性參數排名的*即代表 $p\text{-value}<0.05$ ，代表該參數對於流量之影響達到顯著。17 個調整之流量參數中最敏感之參數為針闊葉混合林之 CN 值(CN2_FRST)，其檢定成果為-0.39，意即減少 39%的初始 CN 值，第二敏感的參數為闊葉林之 CN 值(CN2_FRSE)，建議調整數值為-0.325，意即減少 32.5%的初始 CN 值，第三敏感的參數為果園之 CN 值(CN2_ORCD)，檢定成果為-0.285，意即減少 28.5%的初始 CN 值，前三項敏感性排名較高之參數皆說明該集水區大多土地利用入滲量較美國試驗出來的初始設定值高，臺灣地區有著更好的入滲率，也顯示出臺灣跟美國試驗環境的差異。第四敏感參數為 GW_REVAP，代表地下水補充到未飽和土壤層參數，其檢定成果為 0.125，第五敏感的參數為土壤之水力傳導度(SOL_K)，檢定成果為-0.025，意指相較於原始土壤參數，該流域的土壤水力傳導度較低(減少約 2.5%)，土壤內逕流流動速率較原始土壤性質低，顯示該集水區側向流產生速率相對較慢。藉由敏感性較高的前五名的參數，可歸納出杉林大橋集水區為入滲率相對較高之流域，雨水大多入滲到土壤，亦顯示出山區森林對於集水區之保水及減緩地表逕流沖蝕的效益，CN 值參數及土壤水含量之參數對於上游流域流量影響較大，亦反應上游集水區若開墾變更土地利用行為，將明顯改變流域水文輸出狀況，造成淹水及土壤沖蝕量增加等風險。

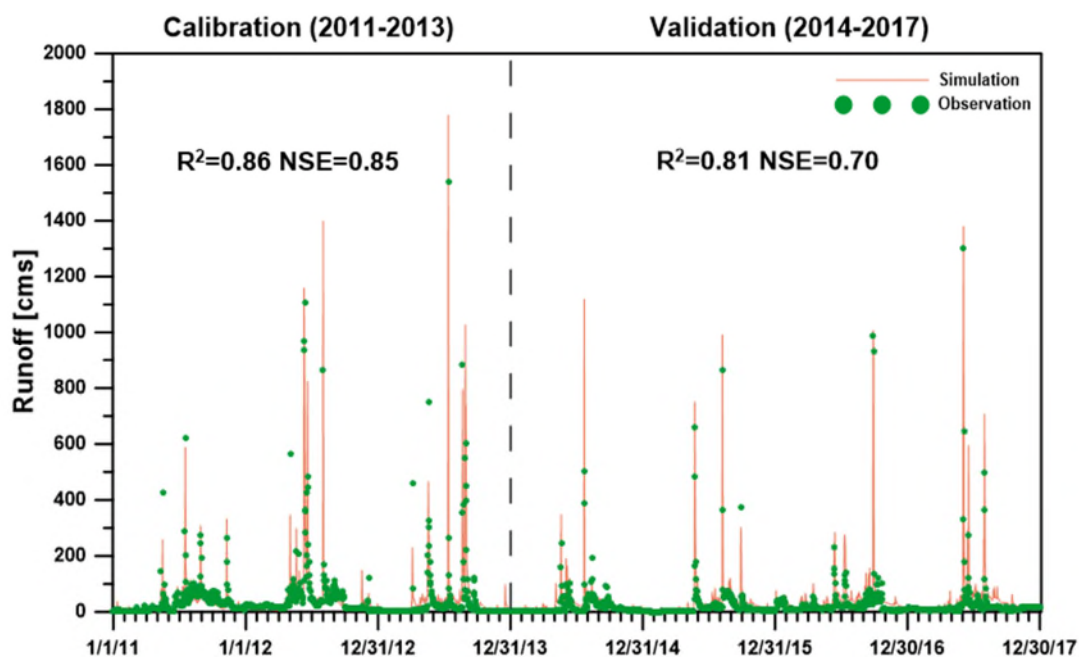


圖 5-1 杉林大橋集水區流量檢定驗證時序圖

資料來源：本計畫繪製

表 5-2 杉林大橋集水區流量參數表

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
CN2(SOYB)	Relative	8*	-0.064	-0.241	0.053
CN2(RICE)	Relative	17	0.045	-0.062	0.214
CN2(FRSE)	Relative	2*	-0.325	-0.354	0.015
CN2(FRST)	Relative	1*	-0.39	-0.396	0.001
CN2(FRSD)	Relative	6*	-0.119	-0.267	0.044
CN2(PAST)	Relative	7*	0.108	-0.027	0.32
CN2(BARR)	Relative	13	0.021	-0.052	0.246
CN2(URLD)	Relative	10*	0.172	-0.063	0.213
CN2(ORCD)	Relative	3*	-0.285	-0.339	0.02
ALPHA_BF	Replace	15	0.53	0.419	0.673
GW_DELAY	Replace	9*	26.104	23.286	69.864
GWQMN	Replace	11	3123.258	1052.501	3157.999
GW_REVAP	Replace	4*	0.125	0.002	0.131
REVAPMN	Replace	12	339.557	170.358	511.142
GW_SPYLD	Replace	14	0.098	0.068	0.289
SOL_K	Relative	5*	-0.025	-0.391	0.003
SOL_AWC	Relative	16	-0.019	-0.055	0.236
SHALLST	Default		1000	1000	1000
DEEPST	Default		2000	2000	2000

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
ESCO	Default		0.9	0.9	0.9
SURLAG	Default		4.5	4.5	4.5

資料來源：本計畫彙製

(二)六龜集水區檢定驗證成果

六龜集水區為荖濃溪的水源地，亦為高屏溪重要的水資源來源地，集水區面積為 824 平方公里，流量檢定時間為 2011 年至 2013 年，流量驗證時期為 2014 至 2017 年。流量檢定成果如圖 5-2，綠色點為觀測值，橘色線為模擬值，流量檢定成果 $R^2=0.70$ 、Nash 值為 0.66，根據 Moriasi et al. (2015)文章中的目標函數之對照表，該流域檢定目標函數位於可接受的範圍區間。流量驗證的部分，驗證成果 $R^2=0.69$ 、Nash 值為 0.67，驗證之目標函數是位於可接受之區間範圍內，符合圖 5-2 之檢定驗證流程門檻值。

表 5-3 為六龜集水區之參數檢定成果，敏感性參數排名的*即代表 $p\text{-value}<0.05$ ，代表該參數對於流量之影響達到顯著。20 個調整之流量參數中最敏感之參數為土壤之水力傳導度(SOL_K)，檢定成果為-0.345，意指相較於原始土壤參數，該流域的土壤水力傳導度較低(減少約 34.5%)，土壤內逕流流動速率較原始土壤性質低，顯示該集水區側向流產生的速率相對較慢。第二敏感的參數為針闊葉混合林之 CN 值(CN2_FRST)，檢定成果為-0.52，意即減少 52%的初始 CN 值，第三敏感的參數為裸露地之 CN 值(CN2_BARR)，檢定成果為-0.544，意指減少 54%的初始 CN 值，第四敏感的參數為針葉林之 CN 值(CN_FRSD)，檢定成果為-0.547，減少約 55%的初始 CN 值，第五敏感的參數為地下水補注延遲參數(GW_Delay)，檢定成果為 31.714，代表地表水補注進地下水的延時為 31 天左右。藉由敏感性較高的前五名的參數，可歸納出六龜集水區為入滲相對較高之流域，雨水大多入滲到土壤，與杉林大橋集水區不同的是六龜集水區裸露地的 CN 值影響程度比較高，對比土地利用分佈六龜集水區亦有較多的裸露地分佈(4%)，顯示出不同流域土地利用空間分佈的差異，亦按六龜集水區可能會有較高的土壤沖蝕量，地下水補注

延遲時間較長說明六龜集水區地下水補注速率慢，水在土壤的停留時間相對較長之特性。

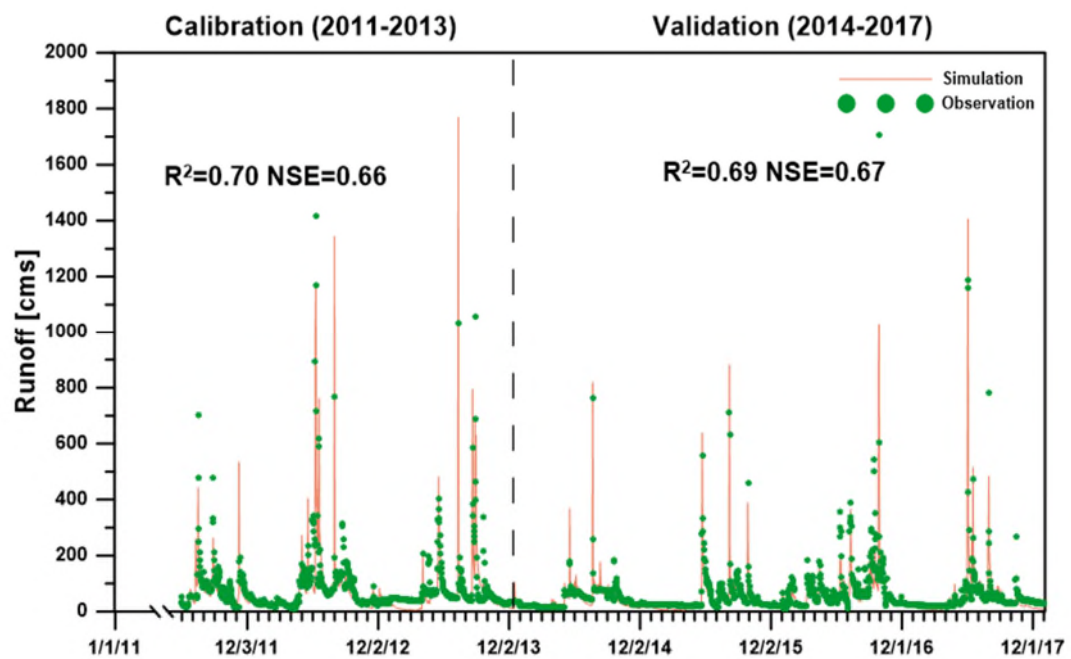


圖 5-2 六龜集水區流量檢定驗證時序圖

資料來源：本計畫繪製

表 5-3 六龜集水區流量參數表

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
CN2(SOYB)	Relative	18	0.135	0.016	0.213
CN2(RICE)	Relative	16	-0.115	-0.121	0.026
CN2(FRSE)	Relative	14	-0.464	-0.528	-0.395
CN2(FRST)	Relative	2*	-0.520	-0.536	-0.388
CN2(FRSD)	Relative	4*	-0.547	-0.549	-0.409
CN2(PAST)	Relative	6*	-0.508	-0.520	-0.395
CN2(BARR)	Relative	3*	-0.544	-0.550	-0.297
CN2(URLD)	Relative	10	-0.328	-0.362	-0.307
CN2(ORCD)	Relative	8*	0.129	0.057	0.163
ALPHA_BF	Replace	11	0.570	0.223	0.668
GW_DELAY	Replace	5*	31.714	24.872	43.539
GWQMN	Replace	20	697.026	0.000	974.181
GW_REVAP	Replace	15	0.075	0.069	0.100
REVAPMN	Replace	9	90.948	41.146	123.260
GW_SPYLD	Replace	17	0.174	0.153	0.273
SHALLST	Replace	13	3559.870	3486.076	3867.443
DEEPST	Replace	19	3306.971	2770.217	3832.046
SOL_K	Relative	1*	-0.345	-0.452	-0.131
SOL_AWC	Relative	12	0.114	0.097	0.133
RCHRG_DP	Replace	7*	0.123	0.078	0.233
ESCO	Default		0.9	0.9	0.9
SURLAG	Default		4.5	4.5	4.5

資料來源：本計畫彙製

(三)大津橋集水區檢定驗證成果

2011 年至 2013 年，流量驗證時期為 2014 至 2017 年。流量檢定成果如圖 5-3，綠色點為觀測值，橘色線為模擬值，流量檢定成果 $R^2=0.86$ 、Nash 值為 0.74，根據 Moriasi et al. (2015)文章中的目標函數之對照表，該檢定目標函數成果位於良好之區間範圍。流量驗證的部分，驗證成果 $R^2=0.85$ 、Nash 值為 0.69，驗證目標函數位於可接受的區間範圍，符合圖 5-3 之檢定驗證流程門檻值。

表 5-4 為大津橋集水區之參數檢定成果，敏感性參數排名的*即代表 $p\text{-value}<0.05$ ，代表該參數對於流量之影響達到顯著。18 個調整之流量參數中最敏感之參數為針闊葉混合林之 CN 值(CN2_FRST)，其檢定成果為-0.335，意即減少 33.5%的初始 CN 值。第二敏感的參數為土壤之水力傳導度(SOL_K)，檢定成果為-0.275，意指相較於原始土壤參數，該流域的土壤水力傳導度較低(減少約 27.5%)，顯示該集水區側向流產生速率較慢，土壤水保留在土壤時間較長。第三敏感的參數為深層地下水補充係數(RCHRG_DP)，檢定成果為 0.534，該參數控制地下水從淺層補充到深層的水量，第四敏感的參數為地下水補注延遲參數(GW_Delay)，檢定成果為 27.865，代表地表水補注進地下水的延時為 28 天左右。第五敏感的參數為針葉林之 CN 值(CN_FRSD)，檢定成果為-0.335，減少約 33.5%的初始 CN 值。藉由敏感性較高的前五名的參數，可歸納出大津橋集水區亦為入滲能力相對較好的流域，跟杉林大橋集水區不同的是大津橋集水區流量變化受到土壤水及地下水影響，除了森林地區之外，其他土地利用之 CN 值敏感程度不高，此結果導因於大津橋流域之土地利用分佈，森林面積佔了全流域約 94%，森林開墾及面積變化將對大津橋集水區水資源保存能力及其地表逕流產生量影響甚大。

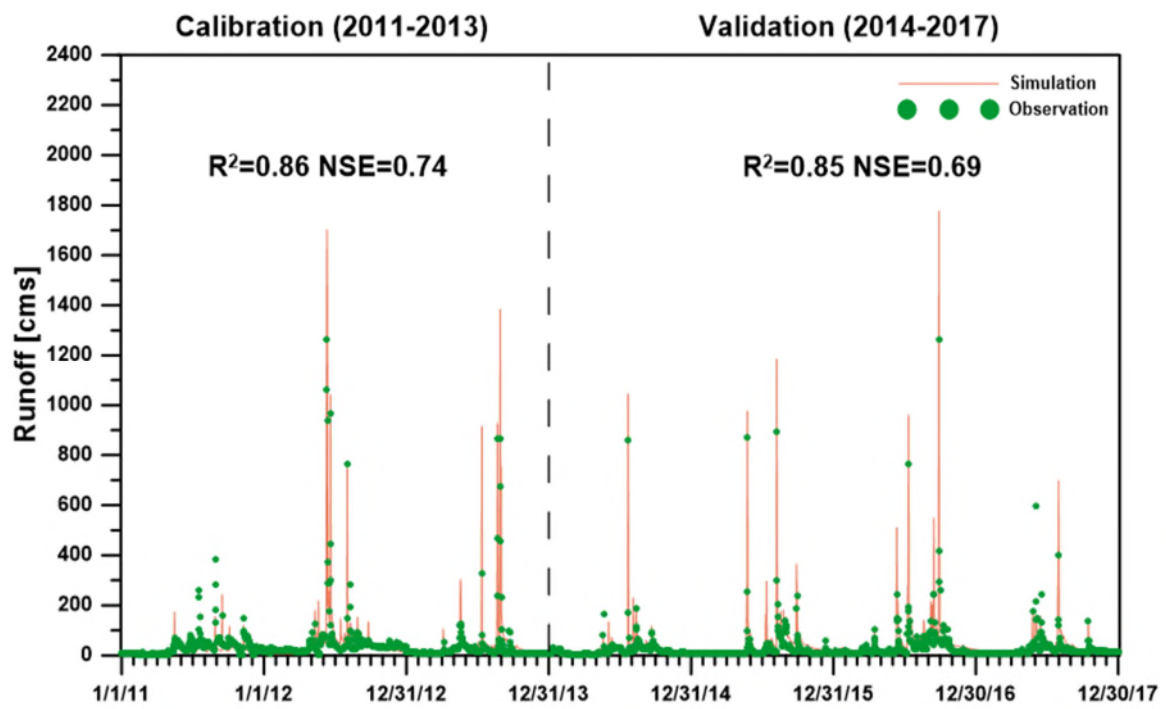


圖 5-3 大津橋集水區流量檢定驗證時序圖

資料來源：本計畫繪製

表 5-4 大津橋集水區流量參數表

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
CN2(RICE)	Relative	18	-0.300	-0.389	-0.200
CN2(SOYB)	Relative	12	-0.139	-0.170	-0.100
CN2(FRSE)	Relative	6*	-0.295	-0.333	-0.200
CN2(FRST)	Relative	1*	-0.395	-0.400	-0.200
CN2(FRSD)	Relative	5	-0.335	-0.394	-0.200
CN2(PAST)	Relative	13	-0.138	-0.202	-0.004
CN2(BARR)	Relative	7*	-0.345	-0.385	-0.195
CN2(ORCD)	Relative	11*	-0.307	-0.315	-0.245
ALPHA_BF	Replace	9*	0.252	0.200	0.640
GW_DELAY	Replace	4*	27.865	13.028	31.012
GWQMN	Replace	17	620.921	475.400	1158.600
GW_REVAP	Replace	15	0.027	0.017	0.067
REVAPMN	Replace	14	448.060	386.200	471.289
SHALLST	Replace	16	1841.914	1654.398	2551.602
DEEPST	Replace	10*	2946.167	2814.105	3604.895
SOL_K	Relative	2*	-0.275	-0.300	-0.100
SOL_AWC	Relative	8*	0.115	-0.100	0.200
RCHRG_DP	Replace	3*	0.534	0.350	0.750
GW_SPYLD	Default		0.003	0.003	0.003
ESCO	Default		0.9	0.9	0.9
SURLAG	Default		4.5	4.5	4.5

資料來源：本計畫彙製

(四)三地門集水區檢定驗證成果

三地門集水區範圍涵蓋整個隘寮溪，集水區面積為 404 平方公里，流量檢定時間為 2011 年至 2013 年，流量驗證時期為 2014 至 2016 年。流量檢定成果如圖 5-4，綠色點為觀測值，橘色線為模擬值，流量檢定成果 $R^2=0.86$ 、Nash 值為 0.85，根據 Moriasi et al. (2015)文章中的目標函數之對照表，檢定目標函數位於非常好之區間範圍。流量驗證的部分，驗證成果 $R^2=0.75$ 、Nash 值為 0.73，驗證目標函數位於良好之區間範圍，符合圖 5-4 之檢定驗證流程門檻值。

表 5-5 為三地門集水區之參數檢定成果，敏感性參數排名的*即代表 $p\text{-value}<0.05$ ，代表該參數對於流量之影響達到顯著。20 個調整之流量參數中最敏感之參數為針闊葉混合林之 CN 值(CN2_FRST)，其檢定成果為-0.428，意即減少 42.8%的初始 CN 值。第二敏感的參數為地下水補注延遲參數(GW_Delay)，檢定成果為 37.1，代表地表水補注進地下水的延時為 37 天左右。第三敏感的參數為淺層地下水初始水位 (SHALLST)，檢定成果為 2454.121，代表三地門集水區初始淺層地下水位高度達到 2454.121mm。第四敏感的參數為地下水補注河川之水位門檻值(GWQMN)，檢定成果為 1817.785mm，代表淺層地下水之水位高度需高於 1817.785mm 才能有河川基流之補注。第五敏感的參數為深層地下水補充係數(RCHRG_DP)，檢定成果為 0.406，該參數控制地下水從淺層補充到深層的水量。從前五名之參數敏感性分析顯示三地門集水區流量主要來源為地下水，淺層地下水位及發生河川基流之門檻值皆對於三地門集水區流量變化有顯著的影響，與其他集水區相比，森林之外的土地利用其地表逕流產生量對於河川流量變化影響並不顯著，森林的良好透水性及入滲將有助於補充流域之地下水位，維持乾季河川基流之穩定。

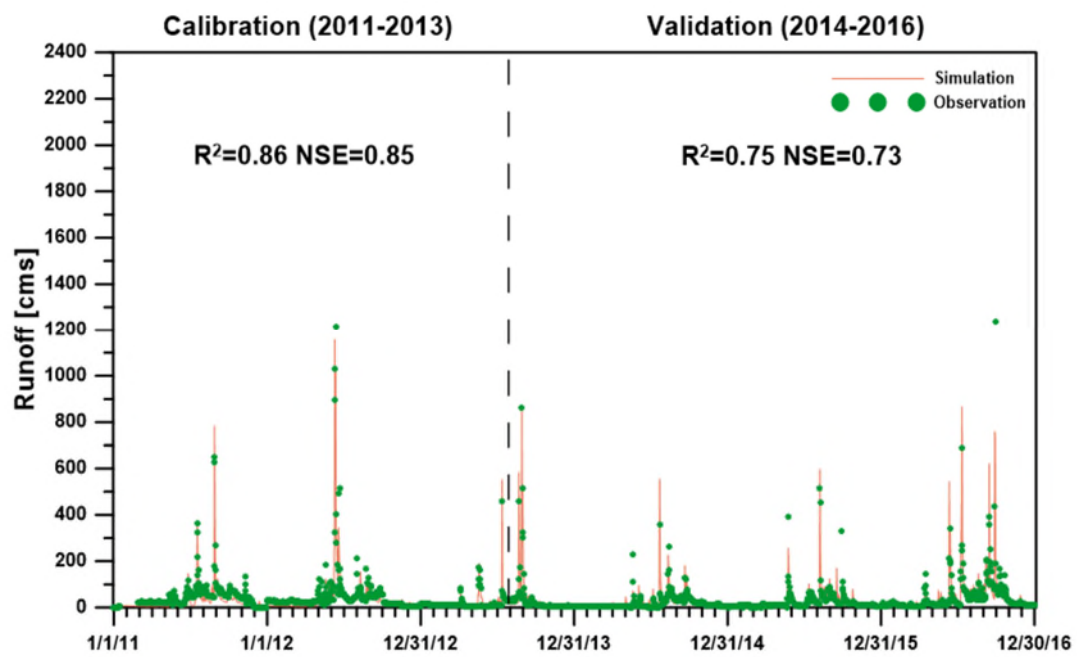


圖 5-4 三地門集水區流量檢定驗證時序圖

資料來源：本計畫繪製

表 5-5 三地門集水區流量參數表

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
CN2(SOYB)	Relative	17	0.142	0.124	0.150
CN2(FRSE)	Relative	19	-0.353	-0.566	-0.162
CN2(FRST)	Relative	1*	-0.428	-0.683	-0.225
CN2(FRSD)	Relative	12	0.345	0.187	0.500
CN2(PAST)	Relative	18	-0.104	-0.217	0.086
CN2(BARR)	Relative	7*	-0.500	-0.581	-0.162
CN2(URLD)	Relative	8	0.338	0.019	0.340
CN2(ORCD)	Relative	16	-0.373	-0.494	-0.072
ALPHA_BF	Replace	11	0.242	0.153	0.543
GW_DELAY	Replace	2*	37.100	0.052	82.473
GWQMN	Replace	4*	1817.785	1239.056	3717.555
GW_REVAP	Replace	6*	0.174	0.020	0.200
REVAPMN	Replace	10	252.363	172.576	390.872
GW_SPYLD	Replace	14	0.079	0	0.117
SHALLST	Replace	3*	2454.121	2311.626	4104.020
DEEPST	Replace	15	4635.555	2502.945	6485.411
SOL_K	Relative	13	0.138	-0.018	0.187
SOL_AWC	Relative	9	0.211	0.049	0.334
RCHRG_DP	Replace	5*	0.406	0.129	0.442
ESCO	Default		0.9	0.9	0.9
SURLAG	Default		4.5	4.5	4.5

資料來源：本計畫彙製

(五)里嶺大橋集水區檢定驗證成果

上述小節確立了上游四個支流集水區的水文參數，本計畫便針對下游地區之河川流量參數進行調整，並以最下流的里嶺大橋監測站資料進行流量檢定驗證，流量檢定時間為 2011 年至 2013 年，流量驗證時期為 2014 至 2017 年。流量檢定成果如圖 5-5，綠色點為觀測值，橘色線為模擬值，流量檢定成果 $R^2=0.87$ 、Nash 值為 0.72，根據 Moriasi et al. (2015)文章中的目標函數之對照表，檢定目標函數位於良好之範圍區間。流量驗證的部分，驗證成果 $R^2=0.86$ 、Nash 值為 0.75，驗證目標函數位於良好之範圍區間，符合圖 5-5 之檢定驗證流程門檻值。

表 5-6 為里嶺大橋集水區之參數檢定成果，敏感性參數排名的*即代表 $p\text{-value}<0.05$ ，代表該參數對於流量之影響達到顯著。22 個調整之流量參數中最敏感之參數為果園之 CN 值(CN2_ORCD)，其檢定成果為-0.384，意即減少 38.4%的初始 CN 值。第二敏感的參數為針闊葉混合林之 CN 值(CN2_FRST)，其檢定成果為-0.398，意即減少 39.8%的初始 CN 值。第三敏感的參數為闊葉林之 CN 值(CN_FRSE)，其檢定成果為-0.359，意及減少 35.9%的初始 CN 值。第四敏感的參數為大豆種植之 CN 值(CN2_SOYB)，其檢定成果為-0.247，意指減少約 24.7%的初始 CN 值。第五敏感的參數為土壤之水力傳導度(SOL_K)，檢定成果為 0.018，意指相較於原始土壤參數，該流域的土壤水力傳導度較高(增加約約 1.8%)，顯示該集水區側向流產生速率較快，土壤水保留在土壤時間較短。藉由參數敏感性分析可以發現土地利用之 CN 值為下游地區控制河川流量的主要因素，更代表著地表逕流產生量對於河川流量之高度影響性，下游地區為人為活動密集區，高度開發下將顯著增加地表逕流量並快速的影響下游河川流量，且地表逕流控制河川流量的狀況下，若遇到颱風事件將使下游地表逕流量明顯增加，增加下游都市地區之淹水潛勢。

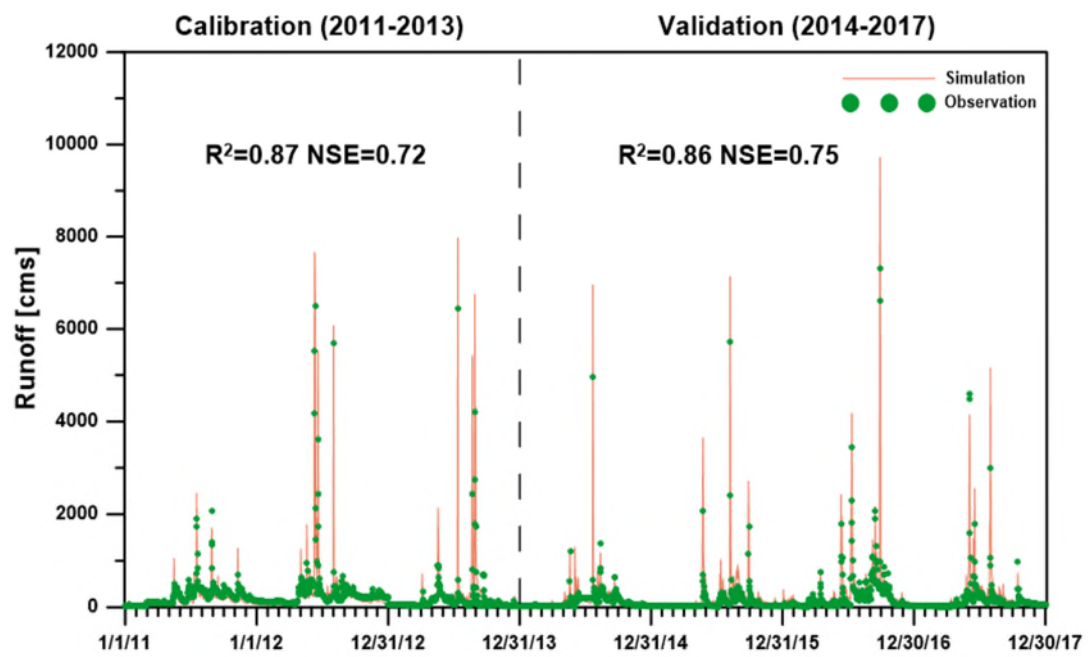


圖 5-5 里嶺大橋集水區流量檢定驗證時序圖

資料來源：本計畫繪製

表 5-6 里嶺大橋集水區流量參數表

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
CN2(SOYB)	Relative	4*	-0.247	-0.314	-0.168
CN2(FRSE)	Relative	3*	-0.359	-0.400	-0.248
CN2(FRST)	Relative	2*	-0.398	-0.400	-0.291
CN2(FRSD)	Relative	12	-0.086	-0.194	-0.048
CN2(PAST)	Relative	9*	0.095	-0.042	0.153
CN2(BARR)	Relative	10*	-0.168	-0.241	-0.122
CN2(URLD)	Relative	11*	-0.172	-0.214	-0.095
CN2(ORCD)	Relative	1*	-0.384	-0.390	-0.197
CN2(RICE)	Relative	13	-0.002	-0.010	-0.006
ALPHA_BF	Replace	7*	0.002	0	0.156
GW_DELAY	Replace	6*	25.524	24.675	52.070
GWQMN	Replace	15	1603.122	870.768	1657.399
GW_REVAP	Replace	20	0.106	0.094	0.139
REVAPMN	Replace	16	225.910	195.000	284.593
GW_SPYLD	Replace	17	0.268	0.207	0.300
SHALLST	Replace	19	1420.183	1150.043	2383.559
DEEPST	Replace	21	1472.596	1405.119	3135.281
SURLAG	Replace	18	12.363	4.306	12.923
SOL_K	Relative	5*	0.018	0.007	0.139
SOL_AWC	Relative	14	0.112	0.033	0.127
RCHRG_DP	Replace	8*	0.855	0.657	0.905
ESCO	Replace	22	0.981	0.674	1

資料來源：本計畫彙製

二、高屏溪集水區輸砂檢定驗證成果

本計畫欲了解高屏溪集水區其土壤沖蝕及河道輸砂之變化狀況，為此本計畫收集水利署 2011 至 2020 年之日輸砂濃度採樣資料，用以計算河道輸砂通量，並與河川流量進行線性迴歸，推估未採樣日期之河川輸砂量，各子集水區輸砂推估公式及其決定係數如表 5-7 所示，此外為減少線性推估所造成的誤差，線性推估公式並未放入極端值，參考 Kao et al.(2005)針對臺灣河川輸砂特性所建議輸砂推估修正方法進行校正，修正係數如表 5-7 所示，未採樣日期的輸砂量推估計算方法即為日流量代入迴歸式，並將推估輸砂量乘上修正係數以求得未採樣日期之推估輸砂量，表 5-8 則為後續各子集水區調整之輸砂參數及用途說明，有主要針對土地利用調整之水土保持(USLE_P)參數，還有各土壤類別之土壤沖蝕參數(USLE_K)，以及針對河道泥砂傳遞調整之參數 SPCON 及 SPEXP 等，參數選擇參考自多篇文獻，例如 Babaei et al. (2019)以及 Chiang et al.(2021)，除了河道傳遞相關參數外，其餘計算各水文反應單元土砂沖蝕 MUSLE 法之相關係數皆為本計畫高屏溪流域輸砂模擬主要調整的參數，河道則是於 MUSLE 相關參數調整狀況下其模擬與觀測誤差仍大時才會追加河道輸砂傳遞之相關參數，每個參數皆能說明該集水區於 SWAT 模式中的土壤沖蝕特性並能做為未來跨流域參數及流域特徵比較之參考。

表 5-7 各子集水區輸砂推估迴歸式及其修正係數

集水區	推估迴歸式	決定係數	修正係數	筆數
杉林大橋	$10.056X^{1.2253}$	0.847	1.147	193
六龜	$14.344X^{1.1255}$	0.745	1.075	125
大津橋	$7.5604X^{1.3056}$	0.655	1.202	148
三地門	$10.954X^{1.2694}$	0.781	1.19	141
里嶺大橋	$13.897X^{1.1389}$	0.869	1.058	182

資料來源：本計畫彙製

表 5-8 SWAT 模式輸砂相關參數說明

參數名稱	參數中文	調整 順序	用途
USLE_P	水土保持係數(土地利用，初始值都 1)	1	土壤沖蝕 計算
USLE_K	土壤沖蝕係數(土壤資料庫有個別的土壤值)	1	土壤沖蝕 計算
SPCON	河道輸砂傳遞之線性參數(整個調一個)	2	河道輸砂 計算
SPEXP	河道輸砂傳遞之指數參數(最小值根最大值的 範圍，公式依照經驗公式)	2	河道輸砂 計算
LAT_SED	土壤水泥砂輸出濃度	1	河道輸砂 計算
SLSUBBS N	水文反應單元(HRU)坡長	1	土壤沖蝕 計算
USLE_C	作物覆蓋參數	1	土壤沖蝕 計算
HRU_SLP	水文反應單元(HRU)坡度	1	土壤沖蝕 計算

資料來源：本計畫彙製

(一)杉林大橋集水區檢定驗證成果

杉林大橋集水區主要反映旗山溪之輸砂狀況，輸砂檢定時間為 2011 年至 2013 年，輸砂驗證時期為 2014 至 2017 年。輸砂檢定成果如圖 5-6，綠色點為採樣值，藍色虛線為輸砂推估值，橘色線為模擬值，輸砂檢定成果 $R^2=0.72$ 、Nash 值為 0.7，根據 Moriasi et al. (2015)文章中的目標函數之對照表，檢定目標函數位於可接受之區間範圍。輸砂驗證的部分，驗證成果 $R^2=0.67$ 、Nash 值為 0.66，此驗證是位於可接受之區間範圍，亦符合檢定驗證流程門檻值。

表 5-9 為杉林大橋集水區之參數檢定成果，參數檢定方法分為兩種，一種為根據該土地利用或土壤本身屬性值進行百分比調整，另一種方法為直接調整參數數值。SWAT 模式的輸砂模擬主要針對土壤沖蝕及河道傳輸兩種層面進行評估，為保留集水區本身之土地利用及土壤分佈特性之影響，本計畫將各土地利用及土壤的 USLE_K 及 USLE_C 進行百分比調整，同時百分比調整流域內各 HRU 的坡度及坡長。本計畫亦從參數檢定過程中進行敏感度分析，藉以了解控制杉林大橋集水區輸砂之主要參數，敏感性參數排名的*即代表 $p\text{-value}<0.05$ ，代表該參數對於輸砂影響達到顯著。16 個調整之輸砂參數中最敏感之參數為裸露地之 USLE_P 值，其檢定成果為 0.038，其次為各土壤的 USLE_K 值，檢定成果為-0.221，代表各種土壤類別初始 USLE_K 減少 22%。第三敏感的參數為 USLE_C，針對資料庫內各作物初始 USLE_C 值進行調整，檢定成果為-0.174，意即植物資料庫內 USLE_C 值減少 17.4%，而在 SWAT 模式內 USLE_C 最小值固定為 0.001。第四敏感的參數為草地之 USLE_P 值，檢定成果為 0.008，第五敏感參數為水稻之 USLE_P 值，檢定成果為 0.089。從參數敏感性分析顯示河川輸砂量變化跟土地利用及土壤的 USLE_C、USLE_P 及 USLE_K 等參數高度相關，該三項參數對於河道輸砂量變化相對較為敏感，此外由於裸露地的 USLE_C 值本身較高，USLE_P 參數的變化更為敏感，由此顯示杉林大橋土地利用將顯著影響杉林大橋集水區

河川輸砂量。

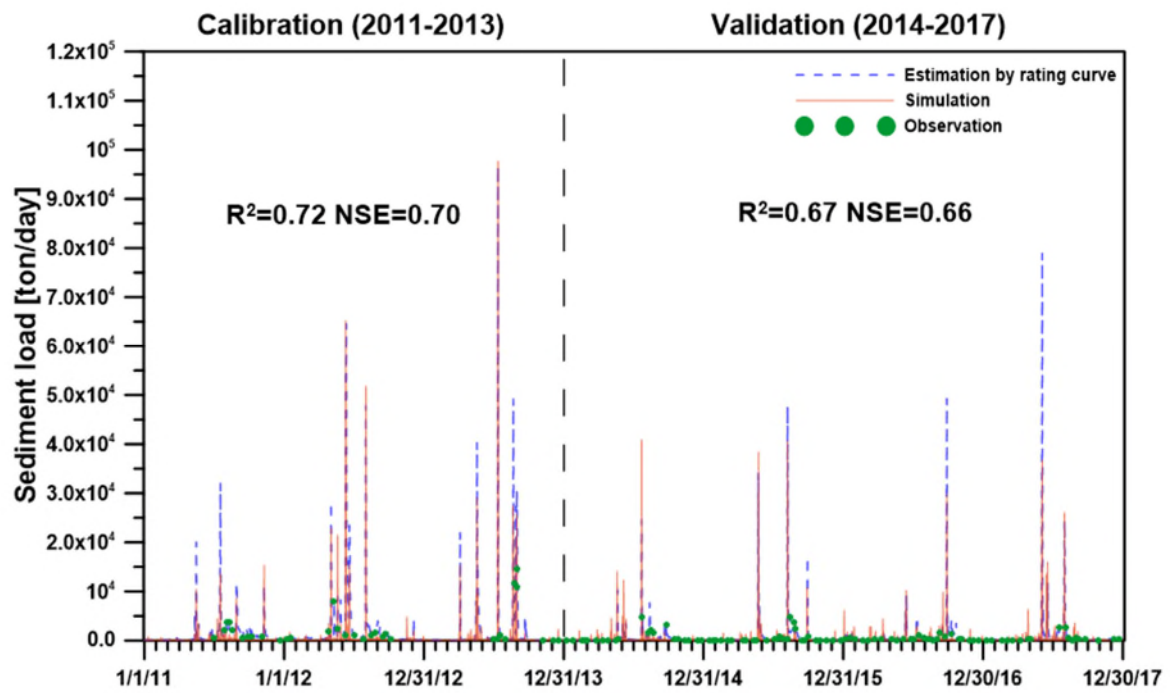


圖 5-6 杉林大橋集水區輸砂檢定驗證時序圖

資料來源：本計畫繪製

表 5-9 杉林大橋集水區輸砂參數表

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
USLE_P(FRSD)	Replace	8	0.003	0	0.016
USLE_P(FRSE)	Replace	7	0.013	0.007	0.022
USLE_P(FRST)	Replace	14	0.013	0	0.016
USLE_P(PAST)	Replace	4*	0.008	0	0.035
USLE_P(BARR)	Replace	1*	0.038	0	0.088
USLE_P(URLD)	Replace	6	0.087	0.08	0.130
USLE_P(SOYB)	Replace	9	0.056	0.026	0.075
USLE_P(ORCD)	Replace	11	0.049	0.028	0.064
USLE_P(RICE)	Replace	5	0.089	0.083	0.109
USLE_K	Relative	2*	-0.221	-0.312	-0.144
LAT_SED	Replace	13	29.493	9.385	42.214
SLSUBBSN	Relative	12	-0.033	-0.066	0.123
USLE_C	Relative	3*	-0.174	-0.248	-0.151
HRU_SLP	Relative	10	-0.204	-0.317	-0.165
SPCON	Default		0.0001	0.0001	0.0001
SPEXP	Default		1	1	1

資料來源：本計畫彙製

(二)六龜集水區檢定驗證成果

六龜集水區主要是呈現荖濃溪流域的河川輸砂狀況，輸砂檢定時間為 2011 年至 2013 年，輸砂驗證時期為 2014 至 2017 年。輸砂檢定成果如圖 5-7，綠色點為採樣值，藍色虛線為輸砂推估值，橘色線為模擬值，輸砂檢定成果 $R^2=0.69$ 、Nash 值為 0.62，根據 Moriasi et al. (2015) 文章中的目標函數之對照表，檢定目標函數位於可接受之區間範圍。輸砂驗證的部分，驗證成果 $R^2=0.70$ 、Nash 值為 0.51，此驗證是位於可接受之區間範圍，亦符合檢定驗證流程門檻值。

表 5-10 為六龜集水區之參數檢定成果，敏感性參數排名的*即代表 $p\text{-value} < 0.05$ ，代表該參數對於流量之影響達到顯著。16 個調整之輸砂參數中最敏感之參數為裸露地之 USLE_P 值，其檢定成果為 0.051，其次為各 HRU 之坡度，檢定成果為 -0.316，該調整代表針對現在的坡度減少 31.6%，第三敏感的參數為各土壤的 USLE_K 值，檢定成果為 -0.306，代表各種土壤類別土壤初始 USLE_K 減少 30.6%。第四敏感的參數為草地之 USLE_P 值，其檢定成果為 0.035。第五敏感之參數為各 HRU 坡長，檢定成果為 -0.158，代表流域內各 HRU 坡長全減少 15.8%。藉由參數敏感性分析可得知六龜集水區主要控制輸砂之參數為裸露地及草地之 USLE_P、USLE_K 及坡度，六龜集水區裸露地面積佔 4%，裸露地大多分佈於荖濃溪上游，該區域的崩塌或裸露地將成為荖濃溪流域主要的輸砂供應來源地，此外六龜集水區上游為高海拔且邊坡陡峭之山區，地形仍為控制土壤沖蝕之重要因子，上游地區的崩塌地分佈將影響河段水質並延伸出河道淤積等問題。

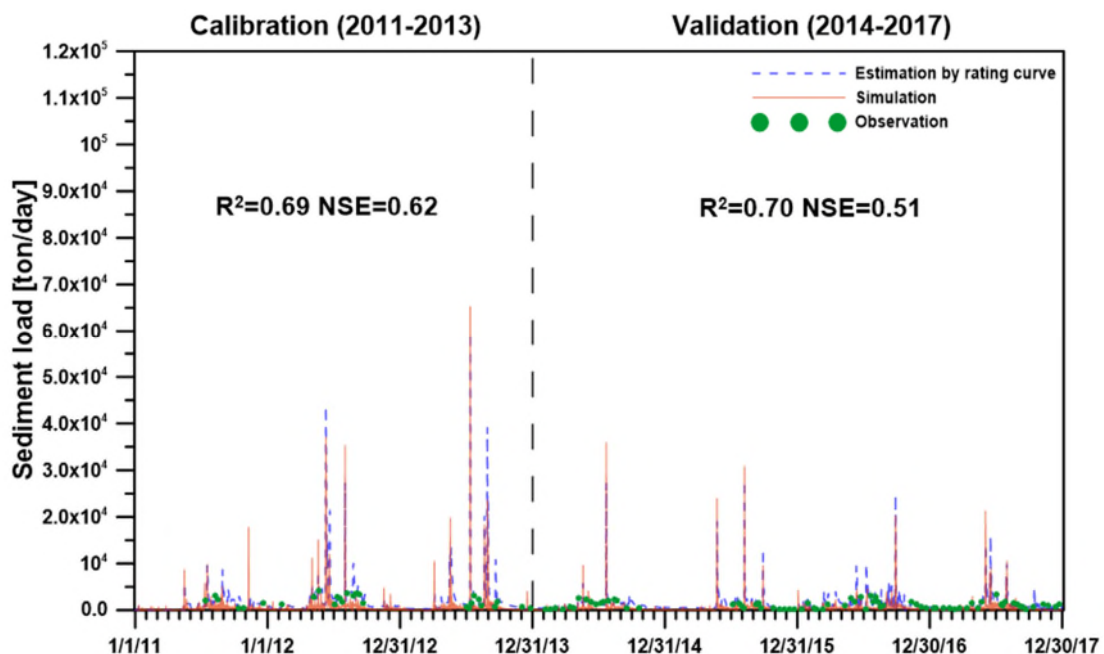


圖 5-7 六龜集水區輸砂檢定驗證時序圖

資料來源：本計畫繪製

表 5-10 六龜集水區輸砂參數表

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
USLE_P(FRSD)	Replace	9	0.010	0.004	0.015
USLE_P(FRSE)	Replace	8	0.014	0.008	0.024
USLE_P(FRST)	Replace	6	0.008	0.000	0.010
USLE_P(PAST)	Replace	4*	0.035	0.018	0.039
USLE_P(BARR)	Replace	1*	0.051	0.049	0.096
USLE_P(URLD)	Replace	14	0.073	0.064	0.121
USLE_P(SOYB)	Replace	13	0.074	0.028	0.076
USLE_P(ORCD)	Replace	12	0.101	0.070	0.110
USLE_P(RICE)	Replace	11	0.012	0.005	0.068
USLE_K	Relative	3*	-0.306	-0.372	-0.304
LAT_SED	Replace	10	215.553	179.942	219.879
SLSUBBSN	Relative	5*	-0.158	-0.181	-0.142
USLE_C	Relative	7	-0.316	-0.350	-0.243
HRU_SLP	Relative	2*	-0.417	-0.470	-0.323
SPCON	Default		0.0001	0.0001	0.0001
SPEXP	Default		1	1	1

資料來源：本計畫彙製

(三)大津橋集水區檢定驗證成果

大津橋集水區主要呈現濁口溪之河川輸砂量，輸砂檢定時間為 2011 年至 2013 年，輸砂驗證時期為 2014 至 2017 年。輸砂檢定成果如圖 5-8，綠色點為採樣值，藍色虛線為輸砂推估值，橘色線為模擬值，輸砂檢定成果 $R^2=0.70$ 、Nash 值為 0.61，根據 Moriasi et al. (2015)文章中的目標函數之對照表，檢定目標函數位於可接受之區間範圍。輸砂驗證的部分，驗證成果 $R^2=0.72$ 、Nash 值為 0.64，此驗證是位於可接受之區間範圍，亦符合檢定驗證流程門檻值。

表 5-11 為大津橋集水區之參數檢定成果，敏感性參數排名的*即代表 $p\text{-value}<0.05$ ，代表該參數對於流量之影響達到顯著。16 個調整之輸砂參數中最敏感之參數為裸露地 USLE_P 值，其檢定成果為 0.063，其次為各 HRU 之坡度，檢定成果為-0.372，該調整代表針對現在的坡度減少 37.2%，第三敏感的參數為各土壤的 USLE_K 值，檢定成果為-0.003，代表各種土壤類別初始 USLE_K 減少 0.3%。第四敏感的參數為各 HRU 坡長，檢定成果為 0.097 代表流域內坡長全減少 9.7%。第五敏感參數為針闊葉混合林 USLE_P 值，檢定成果為 0.013。藉由參數敏感性分析可得知大津橋集水區主要控制輸砂之參數為裸露地及針闊葉混合林之 USLE_P、USLE_K、坡度與坡長，說明裸露地對於河川輸砂變化的高度影響力，另由於流域內針闊葉混合林所占面積廣，森林 USLE_P 值對於流域輸砂變化亦有相當程度之解釋力，從各土地利用 USLE_P 值來看森林仍明顯小於人為開墾之土地利用，森林對於減少山坡地土壤沖蝕仍有相當程度之功效，然而坡度較陡的邊坡上森林仍可能提供相對應的輸砂量，造成流域濕季河川輸砂量明顯上升，輸砂及地形因子之相關性值得進一步關注及探討。

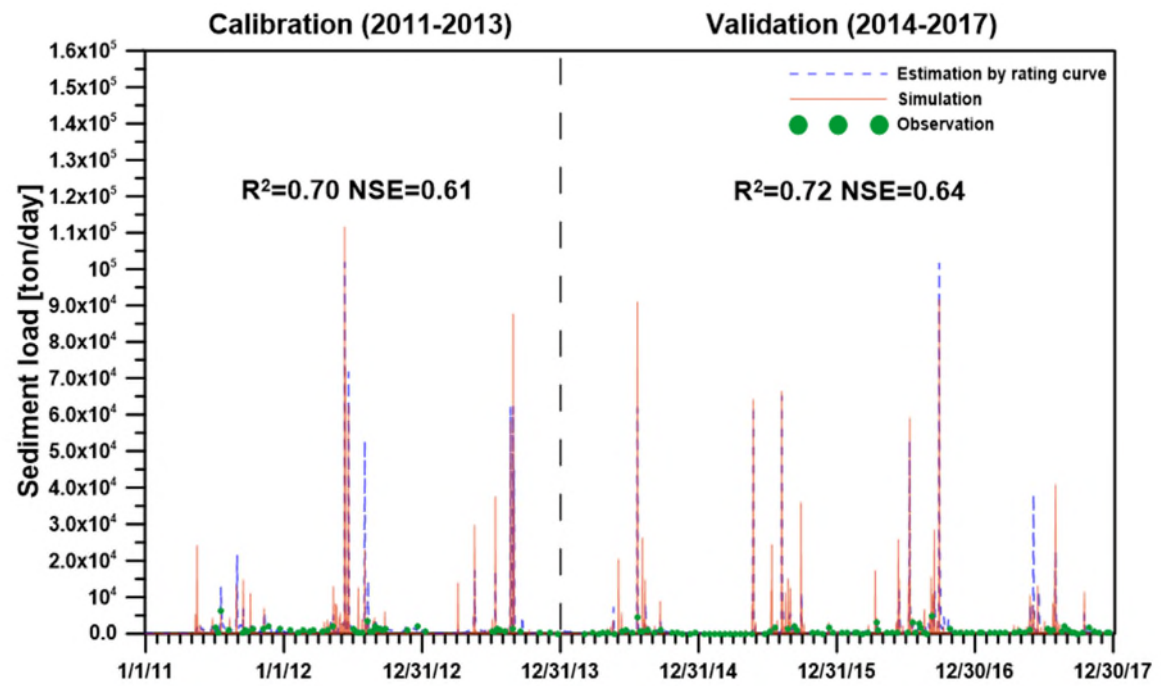


圖 5-8 大津橋集水區輸砂檢定驗證時序圖

資料來源：本計畫繪製

表 5-11 大津橋集水區輸砂參數表

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
USLE_P(FRSD)	Replace	9	0.007	0.005	0.020
USLE_P(FRSE)	Replace	11	0.014	0	0.050
USLE_P(FRST)	Replace	5*	0.013	0.007	0.020
USLE_P(PAST)	Replace	12	0.020	0.013	0.022
USLE_P(BARR)	Replace	1*	0.063	0.060	0.120
USLE_P(URLD)	Replace	13	0.066	0.050	0.100
USLE_P(SOYB)	Replace	10	0.114	0.300	0.080
USLE_P(ORCD)	Replace	14	0.054	0.030	0.080
USLE_P(RICE)	Replace	8	0.068	0.050	0.090
USLE_K	Relative	3*	-0.003	-0.016	0.068
LAT_SED	Replace	6*	75.645	67.934	79.137
SLSUBBSN	Relative	4*	0.097	0.096	0.159
USLE_C	Relative	7*	-0.174	-0.250	-0.100
HRU_SLP	Relative	2*	-0.372	-0.381	-0.244
SPCON	Default		0.0001	0.0001	0.0001
SPEXP	Default		1	1	1

資料來源：本計畫彙製

(四)三地門集水區檢定驗證成果

三地門集水區反映隘寮溪之輸砂特性，輸砂檢定時間為 2011 年至 2013 年，輸砂驗證時期為 2014 至 2016 年。輸砂檢定成果如圖 5-9，綠色點為採樣值，藍色虛線為輸砂推估值，橘色線為模擬值，輸砂檢定成果 $R^2=0.63$ 、Nash 值為 0.71，根據 Moriasi et al. (2015)文章中的目標函數之對照表，檢定目標函數位於良好之區間範圍。輸砂驗證的部分，驗證成果 $R^2=0.62$ 、Nash 值為 0.60，此驗證是位於可接受之區間範圍，亦符合檢定驗證流程門檻值。

表 5-12 為三地門集水區之參數檢定成果，敏感性參數排名的*即代表 p-

value<0.05，代表該參數對於流量之影響達到顯著。16 個調整之流量參數中最敏感之參數為裸露地 USLE_P 值，其檢定成果為 0.089。其次為各土壤的 USLE_K 值，檢定成果為-0.161，代表各種土壤類別初始 USLE_K 值減少 16.1%。第三敏感的參數為各 HRU 坡度，檢定成果為-0.208，該調整代表針對現在的坡度減少 20.8%。第四敏感參數為闊葉林 USLE_P 值，檢定成果為 0.029。第五敏感的參數為大豆之 USLE_P 值，檢定成果為 0.069。藉由參數敏感性分析可得知三地門集水區主要控制輸砂之參數為裸露地、闊葉林及大豆開墾之 USLE_P、USLE_K 及坡度，說明裸露地仍為主要的輸砂供應來源，然而三地門集水區旱作(大豆)耕作及裸露地面積比例不高(僅占 4%)，該面積之土壤沖蝕量顯著影響河川輸砂變異，說明旱作及裸露地這兩項土地利用有單位面積輸砂量較高的現象。森林約占三地門集水區總面積 50%以上，由於面積較大使森林泥砂輸出量對於河川輸砂量相對敏感，但從模式檢定數值看來森林 USEL_P 皆小於裸露地跟大豆，森林的單位面積輸砂量相對較低，暗指森林水土保持對於山坡地土壤沖蝕之重要性。地形方面，集水區內各 HRU 坡度仍為控制河川輸砂來源之重要因子，海拔高且坡度陡的區域有成為集水區主要土壤沖蝕來源區域的潛勢。

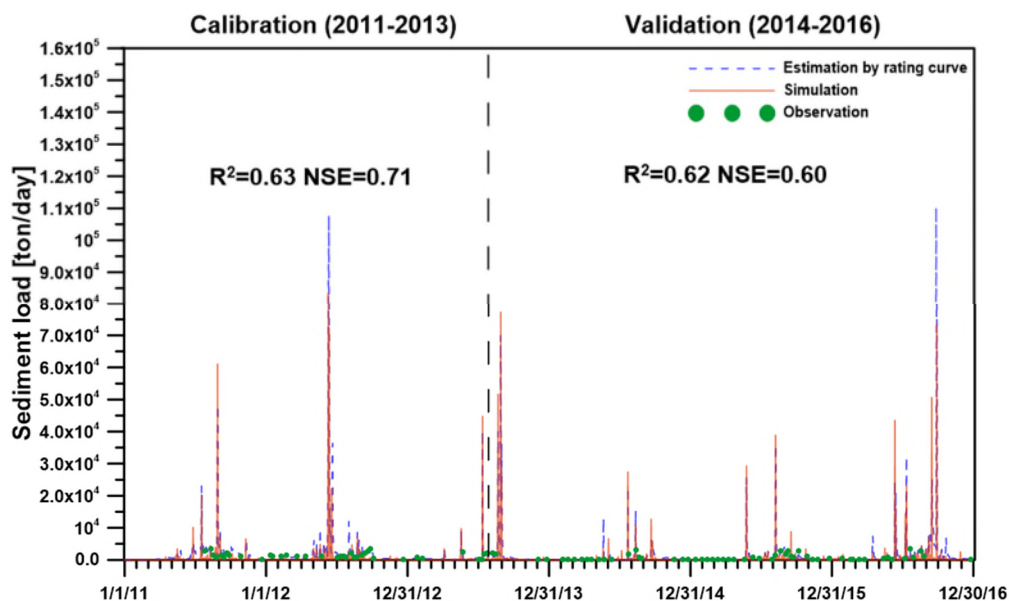


圖 5-9 三地門集水區輸砂檢定驗證時序圖

資料來源：本計畫繪製

表 5-12 三地門集水區輸砂參數表

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
USLE_P(FRSD)	Replace	12	0.020	0.008	0.026
USLE_P(FRSE)	Replace	4	0.029	0.022	0.036
USLE_P(FRST)	Replace	6	0.006	0.000	0.010
USLE_P(PAST)	Replace	7	0.081	0.050	0.100
USLE_P(BARR)	Replace	1*	0.089	0.090	0.012
USLE_P(URLD)	Replace	8	0.079	0.050	0.100
USLE_P(SOYB)	Replace	5	0.069	0.030	0.080
USLE_P(ORCD)	Replace	13	0.056	0.020	0.070
USLE_K	Relative	2*	-0.161	-0.232	-0.042
LAT_SED	Replace	10	155.748	128.665	161.197
SLSUBBSN	Relative	11	-0.281	-0.370	-0.192
USLE_C	Relative	9	-0.277	-0.300	-0.200
HRU_SLP	Relative	3*	-0.208	-0.296	-0.175
SPCON	Default		0.0001	0.0001	0.0001
SPEXP	Default		1	1	1

資料來源：本計畫彙製

(五)里嶺大橋集水區檢定驗證成果

里嶺大橋集水區為匯流四條支流之下游區域，本計畫再確認上游四條支流的參數後，參照里嶺大橋測站量測到的河川輸砂量調整其下游區域輸砂相關參數，藉以用於後續匯流後地區的輸砂量分析。輸砂檢定時間為 2011 年至 2013 年，輸砂驗證時期為 2014 至 2016 年。輸砂檢定成果如圖 5-10，綠色點為採樣值，藍色虛線為輸砂推估值，橘色線為模擬值，輸砂檢定成果 $R^2=0.66$ 、Nash 值為 0.61，根據 Moriasi et al. (2015)文章中的目標函數之對照表，檢定目標函數位於可接受之區間範圍。輸砂驗證的部分，驗證成果 $R^2=0.66$ 、Nash 值為 0.56，此驗證是位於可接受之區間範圍，亦符合檢定驗證流程門檻值。

表 5-13 為里嶺大橋集水區之參數檢定成果，敏感性參數排名的*即代表 $p\text{-value}<0.05$ ，代表該參數對於流量之影響達到顯著。16 個調整之流量參數中最敏感參數為各 HRU 之坡度，檢定成果為-0.205，該調整代表針對所有 HRU 坡度減少 20.5%。第二敏感的參數為裸露地之 USLE_P 值，其檢定成果為 0.031。第三敏感的參數為各土壤的 USLE_K 值，檢定成果為-0.14，代表各種土壤類別初始 USLE_K 減少 14%，第四敏感的參數為針闊葉混合林 USLE_P 值，檢定成果為 0.01，第五敏感的參數為大豆 USLE_P 值，檢定成果為 0.06。藉由上述前五名的敏感參數，顯示下游地區裸露地及大豆種植對於高屏溪河川輸砂量變化有顯著的影響，地形因子則以坡度的影響性最高，顯示下游位於邊坡的大豆田或裸露地將成為潛在的河川泥砂來源。比較各土地利用 USLE_P 值之大小，其參數檢定成果顯示出森林 USLE_P 值皆比人為開墾土地利用低上許多，若是高屏溪下游區域的森林面積若是再受到減少，將造成河川泥砂輸出量明顯上升，增加高屏溪流域河道淤積及水質惡化等風險。

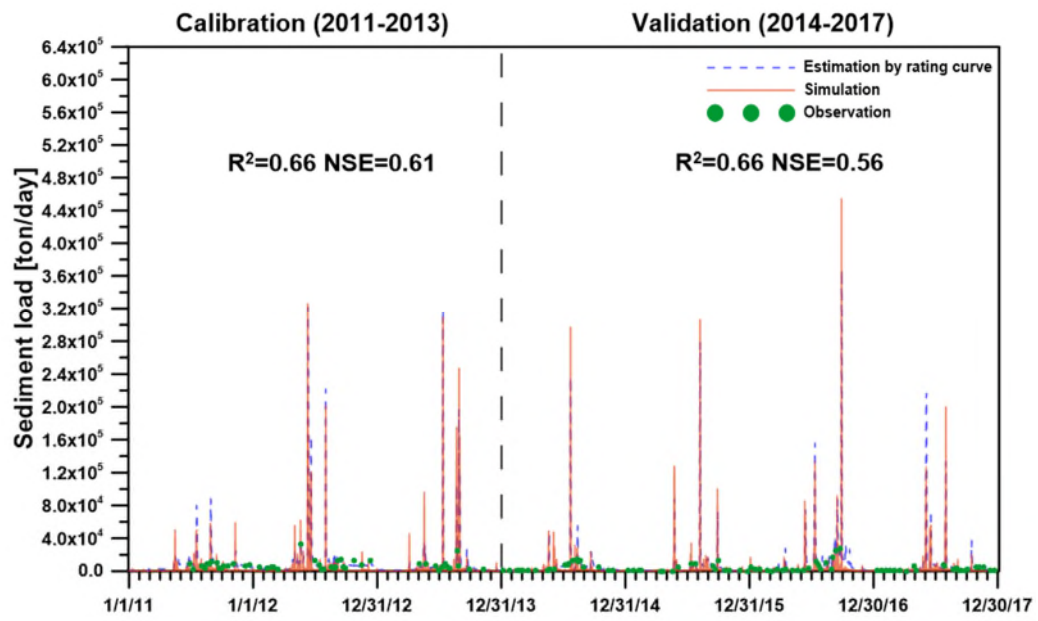


圖 5-10 里嶺大橋集水區輸砂檢定驗證時序圖

資料來源：本計畫繪製

表 5-13 里嶺大橋集水區輸砂參數表

Parameter Name	Method	Sensitivity rank	Fitted Value	Min Value	Max Value
USLE_P(FRSD)	Replace	10	0.012	0.008	0.026
USLE_P(FRSE)	Replace	12	0.035	0.022	0.036
USLE_P(FRST)	Replace	4*	0.001	0	0.01
USLE_P(PAST)	Replace	14	0.029	0.018	0.030
USLE_P(BARR)	Replace	2*	0.031	0.03	0.12
USLE_P(URLD)	Replace	16	0.086	0.05	0.09
USLE_P(SOYB)	Replace	5*	0.060	0.04	0.08
USLE_P(ORCD)	Replace	15	0.035	0.02	0.05
USLE_P(RICE)	Replace	13	0.044	0.04	0.09
USLE_K	Relative	3*	-0.140	-0.232	-0.042
SPCON	Replace	7*	0.004	0.004	0.005
SPEXP	Replace	9	1.229	1.121	1.500
LAT_SED	Replace	8*	90.613	75.000	100.000
SLSUBBSN	Relative	6*	-0.109	-0.250	0.100
USLE_C	Relative	11	-0.130	-0.250	-0.100
HRU_SLP	Relative	1*	-0.205	-0.250	0.100

資料來源：本計畫繪製

第二節 高屏溪流域水文及輸砂空間分佈分析

從 SWAT 模式於各支流之參數檢定成果顯示高屏溪流域各支流的水文特性及輸砂行為皆不相同，因此上中下游之逕流產生及土壤沖蝕具有空間差異，本計畫使用 SWAT 模式已能用於模擬高屏溪流域日流量及日輸砂量，並且其目標函數皆有達到其門檻值，說明 SWAT 模式應用於臺灣流域水資源及輸砂模擬之可行性。根據輸砂參數檢定成果，流域地形、土壤沖蝕因子以及特定土地利用之水土保持因子對於河川輸砂量具有顯著之影響，尤其是裸露地其影響性最高，並且高屏溪流域其 CN 值大多小於美國試驗之數值，說明臺灣入滲能力強，且地下水對於河川基流補注對於高屏溪流域流量具有顯著之影響性。

流域輸砂來源區主要來自於高屏溪各支流之上游地區，該區域亦為崩塌盛行區，顯示崩塌地及邊坡陡峭地區為主要的輸砂來源區，影響河道內輸砂量之多寡，濕季(尤其 8 月)其各支流上游地區的輸砂為需要關注之重點。根據地表逕流空間分析成果，顯示人為活動較多之中下游地區為主要的地表逕流來源區，亦為可能的淹水潛勢區域，尤其是颱風季所造成的強降雨，將可能造成中下游地區都市內水排放不及，增加河川洪水溢淹等災害發生機率。本節藉由高屏溪流域 2011 年至 2020 年之歷史天氣資料進行逕流及河川輸砂模擬，藉以分析高屏溪各支流及其下游逕流深度及輸砂量的空間分佈及土地利用輸出變化。

一、地表逕流深度

高屏溪流域具有顯著的乾濕季差異，洪枯流量變化也相當顯著，為了解高屏溪流域各子集水區乾濕季地表逕流產生量，本計畫應用調整好參數的高屏溪 SWAT 模式，輸出高屏溪流域 2011 年至 2020 年乾濕季各子集水區地表逕流深度，乾季代表 1 月至 4 月及 11 月至 12 月，濕季則代表 5 月至 10 月的平均數值，其地表逕流產生量之空間分佈如圖 5-11 及圖 5-12 所示，高屏溪流域乾季地表逕流空間分佈圖顯示乾季時各子集水區其地表逕流深度偏低，各子集水區之地表逕流深度皆小於 60mm，吻合高屏溪流域乾季降雨量較少之現象。高屏溪流域濕季時由於颱風及梅雨之影響，地表逕流量相較於乾季較為顯著，然而降雨空間分佈不均及各支流不同之水文特性，使高屏溪流域各子集水區濕季地表逕流產生量呈現明顯之差異(圖 5-12)，地表逕流空間分佈圖指出各子集水區地表逕流深度介於 58mm 至 287mm 之間，高屏溪流域中下游地區其地表逕流產生量較多，造成地表逕流產生量較高的原因推測與土地利用使用狀況有關，由於中下游地區土地利用大多為都市及農耕地，不透水鋪面使入滲量顯著減少，顯著增加下游地區地表逕流產生量。地表逕流量與洪災發生潛勢高度相關，都市洪患威脅的成因可分為內水及外水，根據定義外水來自河川中上游山區丘陵地的山洪，而內水便是降在都會區內部需要往外排出的水，從本計畫高屏溪流域濕季地表逕流空間分佈成果則明確指出下游地區具有一定的淹水風險，本計畫亦針對 7 月及 8 月颱風季進行地表逕流空間分佈圖之繪製，其成果如圖 5-13 及圖 5-14 所示，亦明顯發現 7 月及 8 月地表逕流空間分佈仍以下游地區居多，7 月最高可產生約 368mm 的地表逕流，8 月最高則可產生約 529mm 的地表逕流。7 月總共約 27 個子集水區地表逕流產生量超過 200mm，8 月總共約 62 子集水區地表逕流產生量超過 200mm，高地表逕流產生量之區域同時包含支流主河道，下游都市地區於颱風季節將面臨排水及河道外水溢淹等威脅。

為了解各土地利用對於地表逕流產生之影響，本計畫輸出高屏溪流域各土地利用 2011 年至 2020 年的地表逕流產生量，高屏溪流域水稻全年度平均地表

逕流產生量為 1252mm、果園約為 1108mm、大豆約為 1064mm、針闊葉混合林約為 540mm、裸露地約為 1194mm 以及都市地表逕流產生量約為 1975mm。從各土地利用產生的地表逕流量即可歸納出農業、裸露地及都市為高屏溪流域主要的地表逕流來源，且都市地表逕流產生量高於森林近 4 倍，都市亦高於果園約 1.5 倍，說明農耕地及不透水鋪面將產生大量的地表逕流，提高土壤沖蝕及非點源汙染傳遞能力，使高屏溪流域河川於濕季時將面臨水質不佳及流量暴漲等問題。

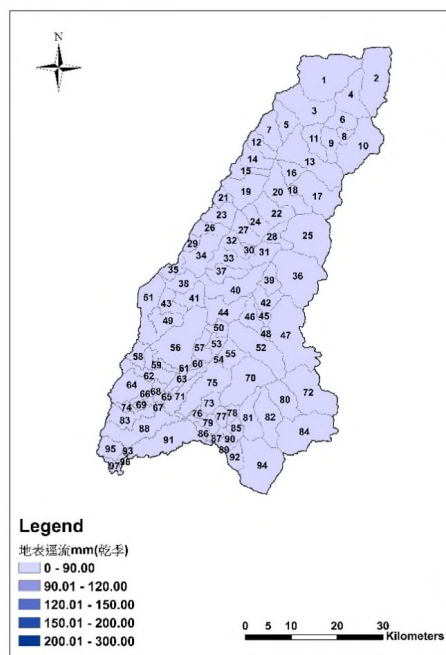


圖 5-11 高屏溪流域乾季地表逕流產生量之空間分佈圖

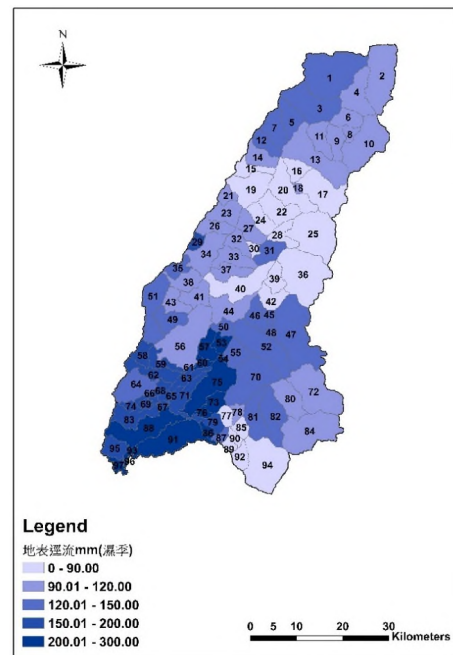


圖 5-12 高屏溪流域濕季地表逕流產生量之空間分佈圖

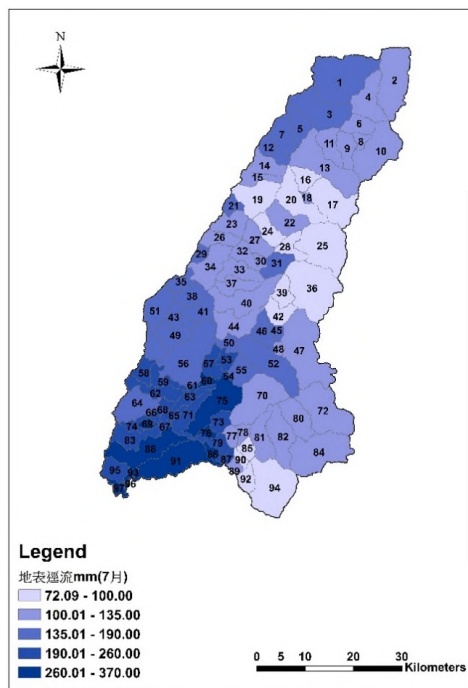


圖 5-13 高屏溪流域 7 月地表逕流產生量之空間分佈圖

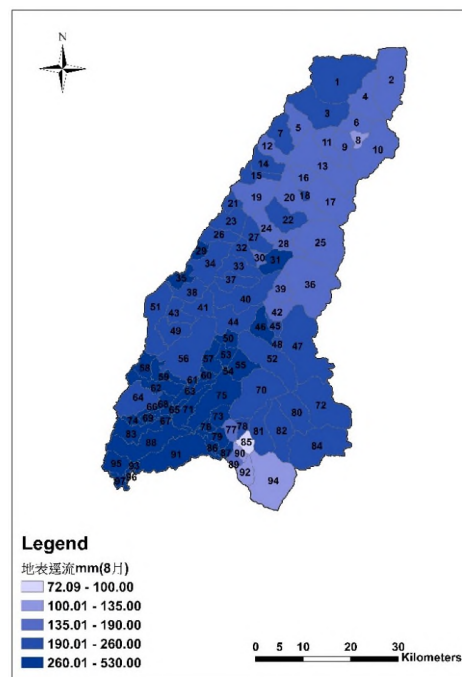


圖 5-14 高屏溪流域 8 月地表逕流產生量之空間分佈圖

資料來源：本計畫繪製

二、子集水區出水量評估

除了地表逕流量，本計畫亦彙整各子集水區總出水量，總出水量代表集水區流入到河川的水量，進入河川的水源除了地表逕流，另包含土壤水及地下水補注等來源。高屏溪流域乾季總出水量空間分佈圖如圖 5-15 所示，可以發現乾季的時候幾乎全流域總出水量皆小於 250mm，子集水區平均總出水量約為 66mm，然而到了濕季(如圖 5-16 所示)，子集水區總出水量明顯增加，尤其是上游的部分，與地表逕流產生量相比，上游總出水量增加的原因是土壤水及地下水，加上高屏溪上游支流大多以針闊葉混合林為主，證實森林具有良好的水土保持能力，能夠有效的涵養河川水源，然而下游除了對於河川水量貢獻不高之外，更甚至大部分出水量皆來自於地表逕流，造成後續額外的非點源污染沖刷並增加排水不良地區之淹水風險。根據出水量空間分析成果，可歸納出高屏溪乾濕季分明且上游集水區為相對穩定的河川水來源，下游由於人為開發程度高不利於地下水補注，其出水量以地表逕流為主，將造成高屏溪濕季水質惡化並加快下游洪峰流量的到來，不利於颱風時期高屏溪下游攔河堰之取水及都市內的防汛作業。

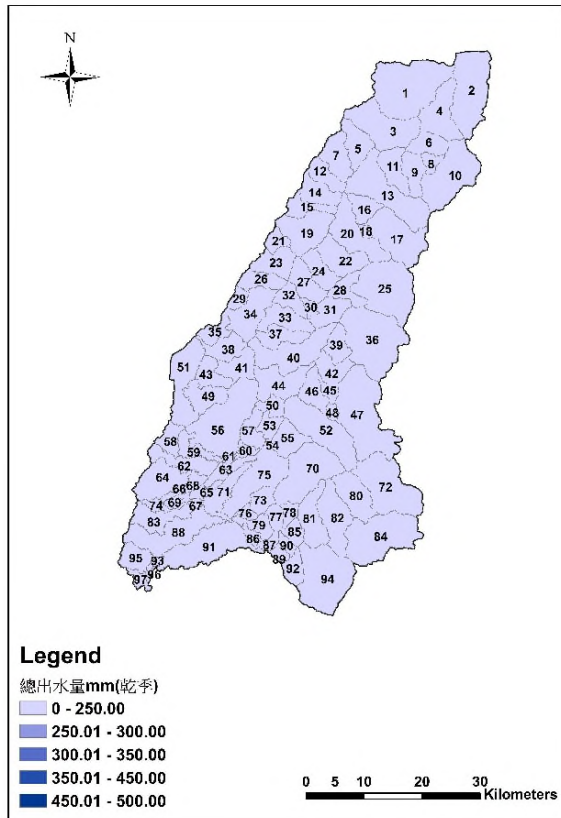


圖 5-15 高屏溪流域乾季總出水量空間分佈圖

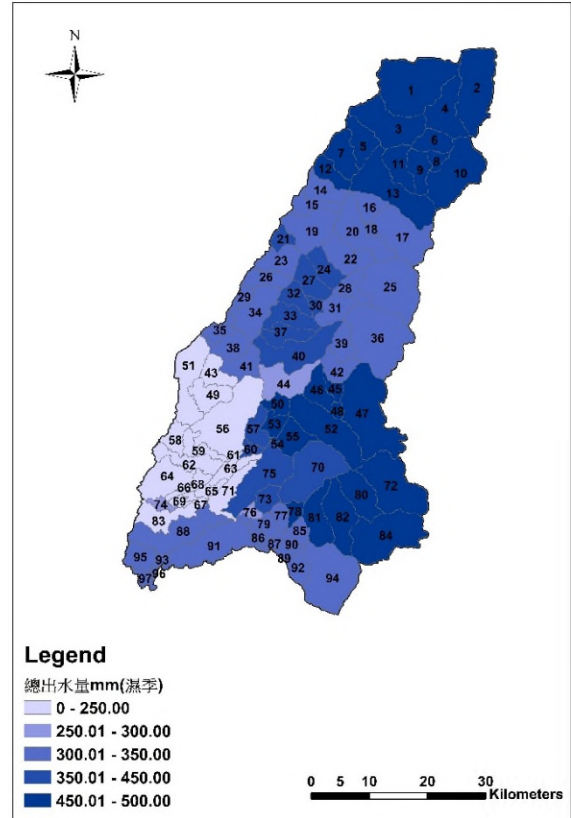


圖 5-16 高屏溪流域濕季總出水量空間分佈圖

資料來源：本計畫繪製

三、土壤沖蝕

各子集水區的沖蝕土砂進入河道受到水流輸送到下游，將影響濁度並可能造成河川淤埋等問題，為了解各子集水區土壤沖蝕狀況本計畫彙整 2011 年至 2020 年乾濕季土壤沖蝕量之空間分佈圖如圖 5-17 及圖 5-18 所示，土壤沖蝕與地表逕流產生量呈現正相關，乾季由於高屏溪降雨日數較少，地表逕流產生量不多的情況下土壤沖蝕量也相對減少，然而上游仍可以發現明顯的土壤沖蝕量，其原因是杉林大橋及六龜集水區上游有不少裸露地之分佈，且越靠近山區其降雨量較多，土壤沖蝕狀況發生機率更為頻繁。濕季時(颱風季)由於密集的強降雨事件進一步產生大量地表逕流並造成顯著的土壤沖蝕量，根據圖 51 成果亦顯示高屏溪上中游皆有顯著的土壤沖蝕量，嚴重的土壤沖蝕空間分佈多位於各支流海拔較高且坡度較陡的區域，此外由於杉林大橋及六龜集水區上游皆有不小面積的裸露地，亦產生顯著的土壤沖蝕現象，例如子集水區編號 1~13 大多皆高於

1000 噸/年的土壤沖蝕，而隘寮溪上游同樣因為邊坡陡峭，同樣具有顯著的土壤沖蝕如編號 84 及 94 號，每年將提供約 20,000 及 11,000 噸的土壤沖蝕量進入河川。本計畫亦輸出颱風季 7 月及 8 月各子集水區之土壤沖蝕狀況如圖 5-19 及圖 5-20 所示，7 月土壤沖蝕空間分佈狀況與濕季相似，8 月由於地表逕流量顯著上升而加劇上游子集水區土壤沖蝕狀況。

土壤沖蝕量與土地利用息息相關，經由本計畫 2011 年至 2020 年 SWAT 模式模擬並量化各土地利用之單位面積土壤沖蝕量，計算成果顯示土壤沖蝕量最高的土地利用為裸露地，單位面積輸砂量可達 81 噸/公頃、其次為草地 6.83 噸/公頃、大豆 3.5 噸/公頃，而果園及針闊葉天然林皆小於 2 噸/公頃，說明森林對於土壤沖蝕有其減緩效益，裸露地/崩塌地由於缺少植物根系之保護而成為高屏溪流域最主要的土砂供應來源，其單位面積輸出量高於森林約 40 倍，也同時高於大豆約 25 倍，高屏溪上游森林面積的維持及崩塌地之復育將有效減少流域河川泥砂量，減緩河道淤積及河水濁度過高等問題。藉由本計畫之空間分析能定義土壤沖蝕之來源區為杉林大橋、六龜大橋及隘寮溪等上游邊坡，亦為崩塌等災害好發生區域，後續將比對災害分佈及模式模擬數據進行邏輯斯及空間加權回歸，更細緻評估災害發生網格及其誘發條件及相關性。

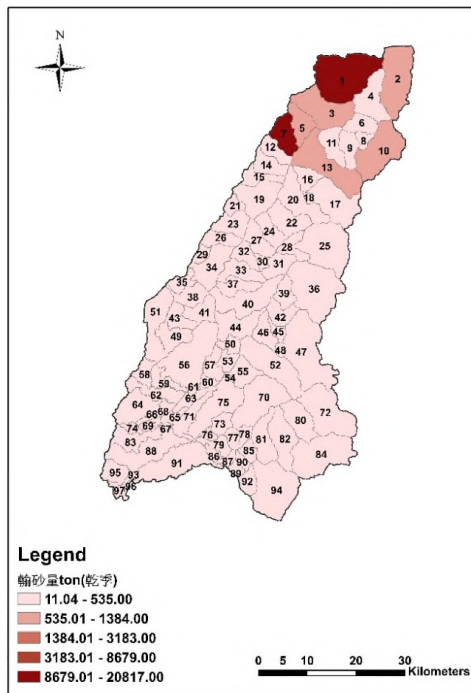


圖 5-17 高屏溪流域乾季輸砂分佈圖

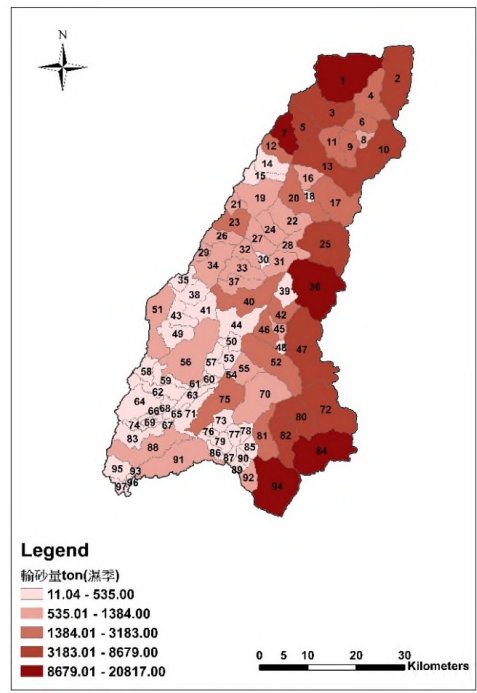


圖 5-18 高屏溪流域濕季輸砂分佈圖

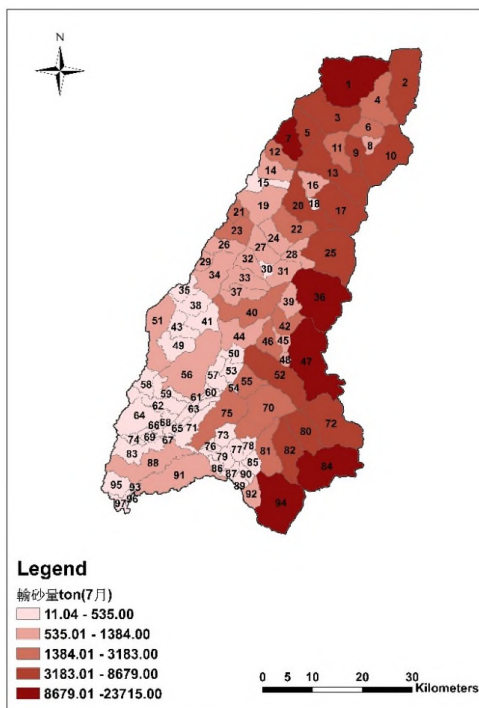


圖 5-19 高屏溪流域 7 月輸砂分佈圖

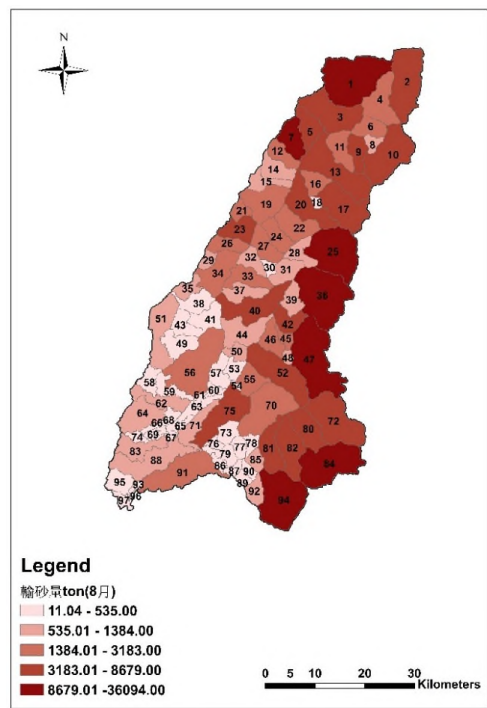


圖 5-20 高屏溪流域 8 月輸砂分佈圖

資料來源：本計畫繪製

第六章 高屏溪流域水文及輸砂空間預測

第一節 高屏溪流域氣候變遷情境下水文及輸砂空間變化分析

一、雨量及溫度變化

本計畫使用 TaiWAP 模式並利用 TCCIP AR5 統計降尺度資料產製未來 RCP4.5 及 RCP8.5 於未來世紀末之溫度及降雨資料，由於未來溫度及降雨皆有所變化，本計畫將產製的天氣資料與 Baseline 資料進行比對，其溫度變化成果如表 6-1 所示，高屏溪流域主要以三個氣象站歷史資料為基礎產製未來氣候變遷的溫度，從產製成果來看，於阿里山、三地門及甲仙的溫度於 RCP4.5L 及 RCP8.5L 皆有所上升，尤其以阿里山上升幅度最高，於 RCP4.5L 平均將上升約 18% 的溫度，RCP8.5L 將上升約 29% 的溫度，三地門及甲仙由於位在高屏溪中游，因此溫度上升幅度不高，三地門及甲仙於 RCP4.5L 分別平均將上升約 6% 及 4% 的溫度，RCP8.5L 將上升約 12% 及 11% 的溫度。

氣候變遷下降雨也隨著溫度的改變而有顯著的變化，以阿里山、三地門及甲仙三個氣象站之降雨趨勢配合 RCP4.5L 及 RCP8.5L 之情境，產製出的雨量資料與 Baseline 的成果相對比，各月份降雨大多呈現下降的狀況，除了颱風季節的 8 月及 9 月降雨量則呈現顯著的上升，這也說明未來高屏溪流域將呈現乾季越乾且極端降雨事件集中的現象，不利於流域水資源及河川生態永續發展(如表 6-2 所示)。

表 6-1 高屏溪流域氣候變遷下各氣象測站溫度變化百分比表格

月份	阿里山		三地門		甲仙	
	RCP4.5L	RCP8.5L	RCP4.5L	RCP8.5L	RCP4.5L	RCP8.5L
1	32.4	48.1	9.5	17.6	4.0	14.8
2	23.4	40.5	5.6	12.8	3.2	12.8
3	24.2	29.8	7.7	11.4	5.6	9.2
4	17.5	23.9	5.7	10.0	3.8	9.4
5	14.1	24.0	5.4	10.6	3.4	9.8
6	13.1	23.5	5.8	11.6	2.9	9.5
7	14.6	20.6	6.0	10.0	4.0	8.9
8	12.9	20.7	5.3	9.8	4.4	9.8
9	16.8	27.1	7.3	13.2	3.9	11.8
10	14.5	24.7	5.3	11.2	2.8	10.3
11	15.7	24.1	5.8	10.2	2.8	9.2
12	16.1	34.8	4.9	11.9	1.9	12.1

資料來源：本計畫彙整

表 6-2 高屏溪流域氣候變遷下各氣象測站降雨變化百分比表格

月份	阿里山		三地門		甲仙	
	RCP4.5L	RCP8.5L	RCP4.5L	RCP8.5L	RCP4.5L	RCP8.5L
1	-35.6	3.7	-54.8	-16.2	-38.5	-19.9
2	0.7	-62.5	-4.7	-61.6	17.8	-61.3
3	-48.2	-67.5	-50.6	-66.6	-50.6	-68.6
4	21.4	1.2	13.6	-0.9	6.3	-5.0
5	-24.9	-25.4	-11.7	-15.4	-8.8	-25.4
6	5.1	-22.2	3.3	-24.2	4.0	-26.9
7	-25.1	7.3	-16.3	18.8	-27.3	7.9
8	41.4	39.8	24.3	41.2	39.4	38.9
9	33.0	48.2	3.9	24.7	64.2	74.6
10	-42.2	-6.0	-31.6	-6.8	-15.1	6.8
11	-26.2	-39.8	7.4	-47.0	37.5	-58.6
12	-61.6	-83.0	-32.2	-58.5	-66.3	-78.9

資料來源：本計畫彙整

二、高屏溪流量及輸砂總量變化

本計畫以 TCCIP-AR5 統計降尺度大氣模式所估算之未來各月份的溫度與總雨量變化，並搭配氣象合成模式以產製未來 100 年每日的氣象資料，應用第五章第一節及第二節率定之參數，根據文獻中最適合臺灣南部之 HadGEM2-AO 大氣模式於 RCP4.5 及 RCP8.5 世紀末溫度及降雨預測之數據輸入至 SWAT 模式輸出數據並進行高屏溪流域流量及輸砂量變化分析。圖 6-1 為高屏溪流域氣候變遷 RCP4.5L 及 RCP8.5L 流量及輸砂量，橘色長條圖為 RCP8.5L 成果，綠色長條圖為 RCP4.5L 成果，藍色為依照 1995 至 2005 年天氣變化趨勢以該大氣模式進行氣象產製及模擬後之成果，左圖為月流量變化成果，顯示於氣候變遷降雨改變的情況下，降雨呈現乾季越乾濕季越濕的趨勢，造成高屏溪流域於未來 RCP4.5L 情境下與 Baseline 歷史狀況相比較，其乾季流量平均將下降約 10%，濕季流量平均將上升約 2.5%。於 RCP8.5L 情境下乾季流量平均將下降 18%，濕季流量平均將上升約 3%，說明於未來氣候變遷越來越嚴峻的狀態下，高屏溪流域乾季流量將明顯減少，而濕季流量整體上升幅度不大，可能造成乾季農業耕作及生活取水等供應不足等問題。右圖為月輸砂變化成果，成果顯示由於雨季乾濕季分布不均將造成乾季輸砂量明顯降低，而極端降雨事件的增加反而造成濕季輸砂量略為上升之現象，RCP4.5L 情境下乾季平均輸砂量將下降約 28%，濕季平均輸砂量將增加約 7%，於 8 月及 9 月河川輸砂量對比 Baseline 皆增加超過 50% 以上。RCP8.5L 情境與 RCP4.5L 情境相似，其乾季平均輸砂量將下降約 71%，而濕季平均輸砂量將增加約 10%，於 7 月至 9 月其河川輸砂量對比 Baseline 將明顯增加 30% 以上。

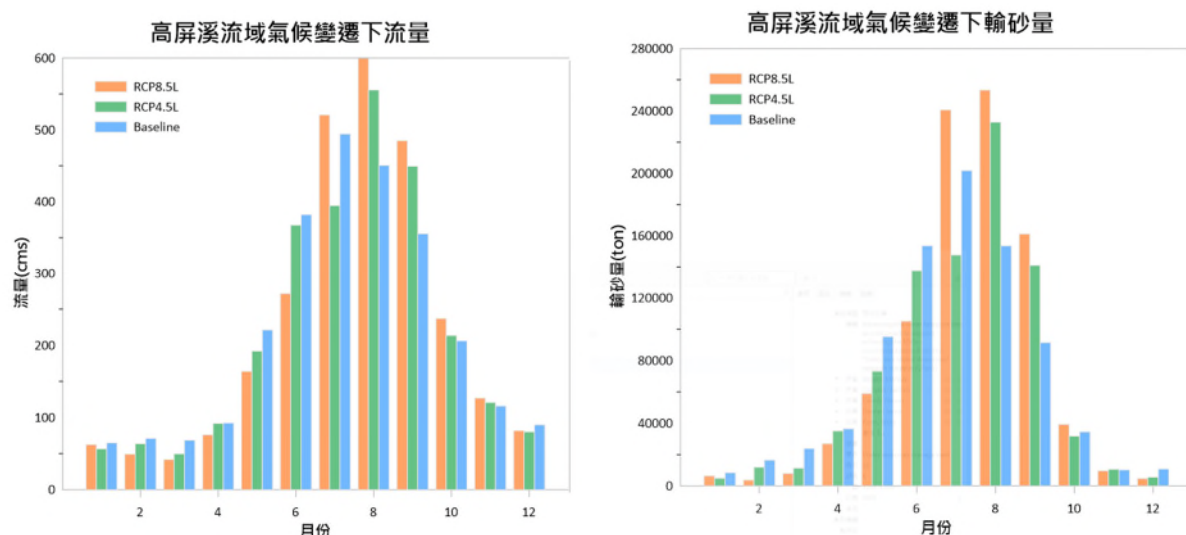


圖 6-1 高屏溪流域氣候變遷 RCP4.5L 及 RCP8.5L 流量(左)及輸砂量變化(右)
三、高屏溪流量及輸砂之空間分布變化

本計畫藉由 TaiWAP 模式產製之氣候變遷情境下 30 年之每日溫度及降雨量輸入至 SWAT 模式，輸出 RCP4.5L 及 RCP8.5L 情境下各子集水區地表逕流量，並與 Baseline 之成果進行比較，其空間變化百分比如圖 6-2 所示，由於氣候變遷情境下極端高強度降雨事件增加，因此各子集水區地表逕流產生量明顯增加，RCP4.5L 情境下全高屏溪流域皆有些許地增加，其中以中游地區地表逕流增加幅度較為顯著(介於 10~30%之間)，於 RCP8.5L 的情境下地表逕流增加最為明顯，明顯以大津橋流域及三地門流域內地表逕流量增加最為顯著，與 Baseline 相比其地表逕流增加幅度超過 40%以上，其餘中下游地區皆有介於 10%至 30%的地表逕流增加量，說明氣候變遷情境下降雨增強於未來所帶來可能之衝擊及災害。

圖 6-3 為高屏溪流域各子集水區於氣候變遷情境 RCP4.5 及 RCP8.5L 之出水水量變化百分比，圖中顯示於 RCP4.5L 情境下其高屏溪上游及山地門集水區之出水水量將顯著減少(約 1~6%)，其原因主要是由於阿里山及山地門降雨及溫度於未來將有顯著改變導致(乾季越乾濕季越濕)，中下游地區由於降雨總量增加及穩定的地下水輸出反而其出水水量有增加之現象，另從 RCP8.5L 情境成果則顯示由於流域降雨總量更為顯著增加，使高屏溪流域中下游出水水量隨之增加(約 6~15%)，由於阿里山測站位於高海拔地區其降雨分佈及溫度變化幅度較大，因此模式成

果仍呈現高屏最上游集水區出水量有減少之現象，說明高山地區面臨氣候變遷之影響，上游地區河川水量將受到嚴峻挑戰。

圖 6-4 為高屏溪流域各子集水區於氣候變遷情境 RCP4.5 及 RCP8.5L 之地下水補注河川水量，成果顯示 RCP4.5L 情境下其高屏溪上游及下游之地下水出水量將顯著減少(約 1~9%)，其原因主要跟阿里山測站降雨分佈不均以及下游多為水泥用地導致入滲量不足，使地下水未能獲取足夠的補注量造成地下水位降低影響河川基流補注量，而中游地區由於多為森林其入滲量較為穩定，因此該區域之地下水仍能有一定的補助量，維持地下水位之穩定。於 RCP8.5L 的情境下其高屏溪上游地下水補注河川水量將更為顯著減少(5~10%)，其次是中下游地區皆有較為顯著的地下水補注河川水量減少的現象，再再指出氣候變遷對於高屏溪流域降雨分佈及環境的改變所造成的衝擊，於 RCP8.5L 情境下三地門流域反而有地下水補注河川水量增加的狀況，可能是不同的大氣環流模式及情境所導致地降雨變化差異。

圖 6-5 為高屏溪流域各子集水區於氣候變遷情境 RCP4.5 及 RCP8.5L 之輸砂量變化百分比，顯示 RCP4.5L 情境下其高屏溪上游由於地表逕流及出水量之減少使土砂沖蝕量大量減少，然而中下游地區由於極端降雨事件及地表逕流之增加，也隨之造成大量的土砂沖蝕，中游地區普遍增加約 12%的輸砂量，而下游地區則可增加約 21%的輸砂量，說明氣候變遷下降雨強度增加對於流域輸砂之影響。於 RCP8.5L 的情境下其高屏溪上游仍然是會有輸砂量下降之現象，然而中下游由於降雨規模及強度地增加使土壤沖蝕量相較於 RCP4.5L 上升的更多，下游於 RCP8.5L 及 Baseline 之對比竟可增加 80%以上的輸砂量，顯示於 RCP8.5L 的情境狀態下，高屏溪流域的輸砂量及河川水質將受到更嚴峻的影響，並威脅民生及農業等供水。

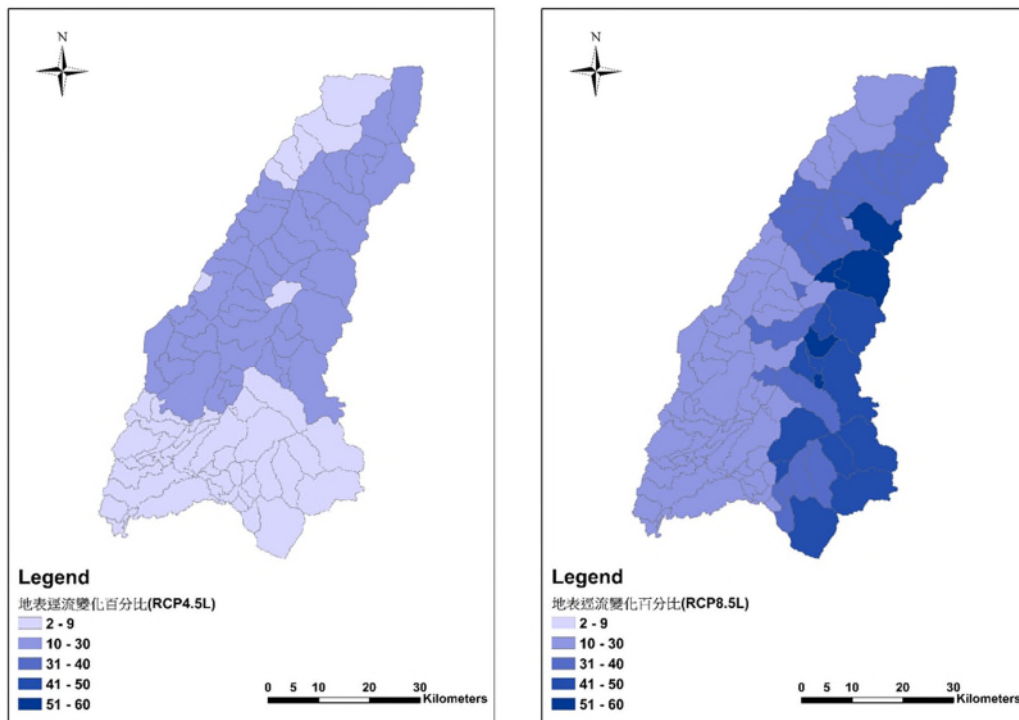


圖 6-2 高屏溪流域氣變 RCP4.5L (左)及 RCP8.5L (右)地表逕流變化百分比

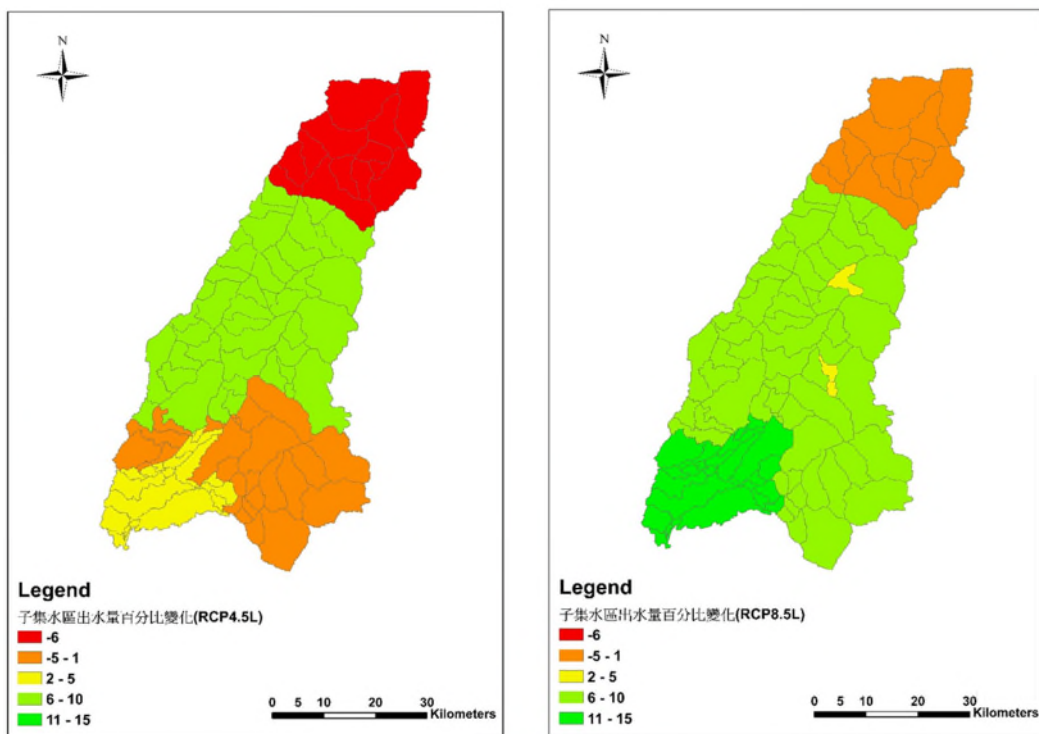


圖 6-3 高屏溪流域氣變 RCP4.5L(左)及 RCP8.5L(右)子集水區出水量變化百分比

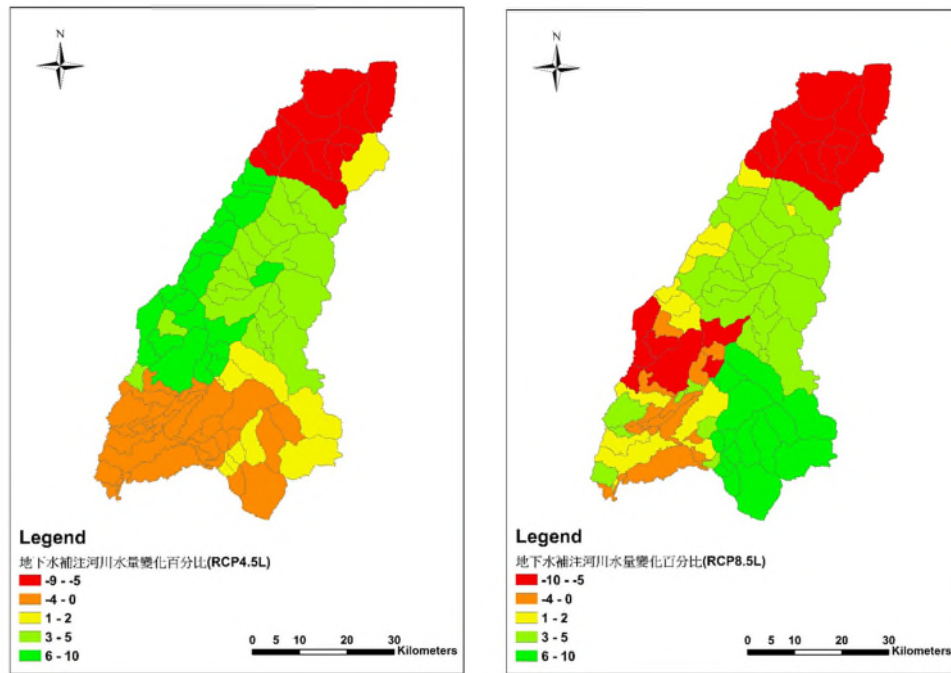


圖 6-4 高屏溪流域氣候變遷 RCP4.5L(左)及 RCP8.5L(右)地下水補注河川水量變化百分比

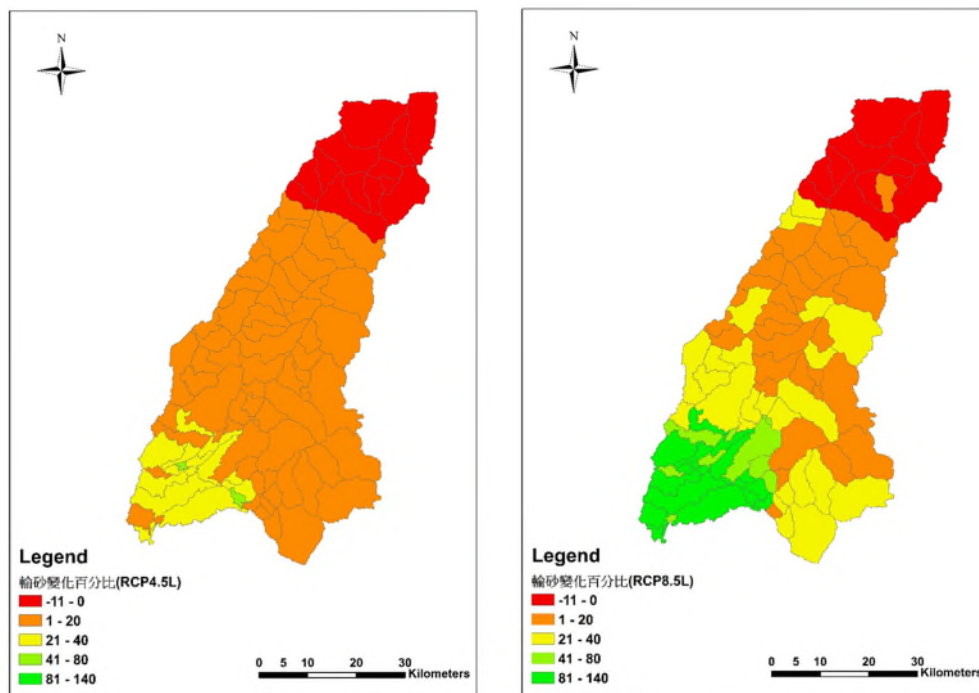


圖 6-5 高屏溪流域氣候變遷 RCP4.5L(左)及 RCP8.5L(右)輸砂量變化百分比

第二節 高屏溪流域坡地災害模型建立

一、災害模型建立

在利用多時序的資料進行空間關聯分析了解災害的空間關聯與變化，並利用 SWAT 模式了解高屏溪流域的水文及輸砂空間分佈概況後，本計畫進一步想要探討未來災害可能發生的地理區位。爰此，本計畫首先使用邏輯斯迴歸建立預測模型，並利用 SWAT 模式模擬 RCP 8.5 情境下的水文及輸砂資料進行分析，利用分析成果進行區位的指認。

(一)災害事件資料

為了建立一個具有預測潛力的模型，樣本的選擇尤為重要。本計畫使用前一部分 SWAT 模式建立的水文反應單元(Hydrologic Response Unit, HRU)做為樣本範圍，SWAT 模式劃定 HRU 的方式可以將 HRU 內的環境特徵視為具有同質性，因此適合作為邏輯斯迴歸樣本的空間範圍。在高屏溪流域中總共有 3,811 個 HRU，本計畫將使用這些樣本進行後續的模式建立。

邏輯斯迴歸的特色在於其應變數為類別變數，本計畫為建立坡地災害風險預測模型，將應變數設定為「會不會發生坡地災害事件」。預測模型的假設是在氣候條件在基礎平均的狀況下，高屏溪流域有哪些區域有機會發生坡地災害，建立完此模型才針對 RCP8.5 的降雨條件進行模擬。關於模型災害事件有無的設定是參考經濟部中央地質調查所在民國 111 年 8 月 17 日公告的山崩地滑地質敏感區草案(編號：L0006 高雄市)(如圖 6-6 所示)，本計畫將山崩地滑敏感區的資料和 HRU 的範圍進行交集(intersect)，得出每個 HRU 中山崩地滑地質敏感區的範圍。接著計算各個 HRU 中山崩地滑敏感區的面積，並和整體 HRU 的面積進行相除，得到 HRU 中山崩地滑敏感區的面積比例。最後將山崩地滑敏感區的面積比例大於 40% 的 HRU 選取出來，將其定義為發生災害風險較高的地區，並設定 1 為其應變數，代表這些區域容易發生坡地災害，圖 6-7 中總共有 784 個 HRU 被設定為益發生坡地災害的地區

(紅色區域)，3,027 個 HRU 為不易發生災害的地區(綠色區域)。

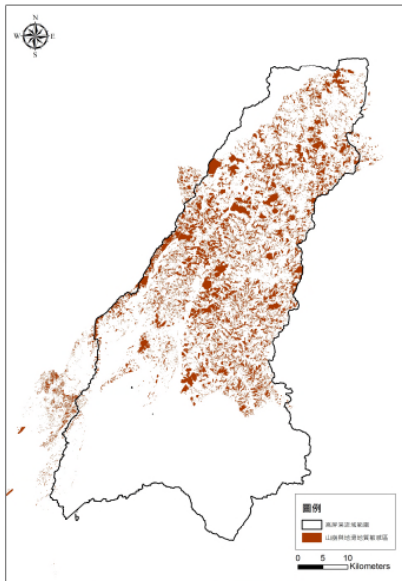


圖 6-6 高雄市山崩地滑地質敏感區範圍圖

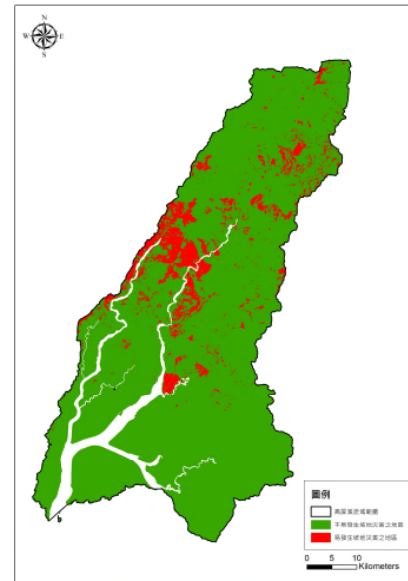


圖 6-7 高屏河流域易發生坡地災害之地區

(二)邏輯斯迴歸模型建立

在確認完 3,811 個樣本的應變數之後，本計畫選取七個和坡地災害相關的變數作為模型的自變數，其中包含 5 個 HRU 地文與水文條件之變數和 2 個由 SWAT 模式計算出來的變數，其中輸沙量以及逕流深度是由 SWAT 模式依據事實的降雨資料模擬出來的成果，其餘的資料均是由數值地形模型進行產製，每個自變數的計算方式請詳見表 6-3。

表 6-3 自變數與計算方法

自變數	計算方式	單位
平均坡度 Mean Slope	計算每個 HRU 中每個 30*30 網格的坡度平均。	百分比(%)
平均高程 Mean Elevation	計算每個 HRU 中每個 30*30 網格的高程平均。	公尺(m)
網格與河流距離之平均 Mean of distance from cell to river	計算每個 HRU 中每個 30*30 網格距離河流的平均	公尺(m)

網格與土石流潛勢溪流距離之 平均 Mean of distance from cell to potential debris flow torrent	計算每個 HRU 中每個 30*30 網格距離土石流潛 勢溪流的平均	公尺(m)
輸沙量 Sediment discharge	2020 年平均輸沙量	噸/公頃(ton/ha)
逕流深度 Runoff depth	2020 年平均逕流深度	公釐(mm)
降雨量 Precipitation	2020 年平均降雨量深度	公釐(mm)

資料來源：本計畫整理

本計畫將資料整理好後，由 SPSS 進行分析，選用條件式向前的方法進行迴歸模型的建立，此方法會逐一將自變數與應變數相關性較高的資料放入模型進行分析，經過多次地直到模型的解釋力最高後再停止。本計畫的模型經過五個的迭代，最終留下五個自變數，表 6-4 呈現分析的模型摘要與模型係數的 Omnibus 檢定。模型摘要包含「-2 對數概似」、「Cox-Snell R 平方」以及「Nagelkerke R 平方」，其中「-2 對數概似」數值越小代表模型解釋力越好；「Cox-Snell R 平方」和「Nagelkerke R 平方」越高則代表模型解釋力越好，此兩個統計值屬於虛擬的 R 平方，其數值可以做為模型解釋力的參考(表 6-4)。由 Omnibus 檢定確定本模型 p 值小於 0.001，拒絕虛無假說，代表本邏輯斯迴歸模型顯著具有預測能力。

表 6-4 模型檢定表

模型檢定	統計值
Omnibus 檢定卡方檢定/顯著性	591.507 / 0.000***
-2 對數概似	3282.229
Cox-Snell R 平方	0.144
Nagelkerke R 平方	0.255

接著利用分類表來看本模型的預測能力，表 6-5 為第五迭代產製的分類表，在總共 3,811 個樣本中 3,021 個預測正確，其中共有 128 個樣本為有災害風險之地區，2893 個樣本為非災害風險地區；另外有 790 個樣本預測錯誤，其中有 656 個應該為災害風險之地區預測為未有災害的地區，另有 134 個實際為非災害風險之地區卻預測為有災害風險之地區。整體來說邏輯斯模型的正確百分比為 79.3%，解釋力尚可接受。本計畫接著將預測正確的區位繪製成地圖(圖 6-8)，其中紅色地區為預測錯誤的區域，藍色區域為預測正確的區域。

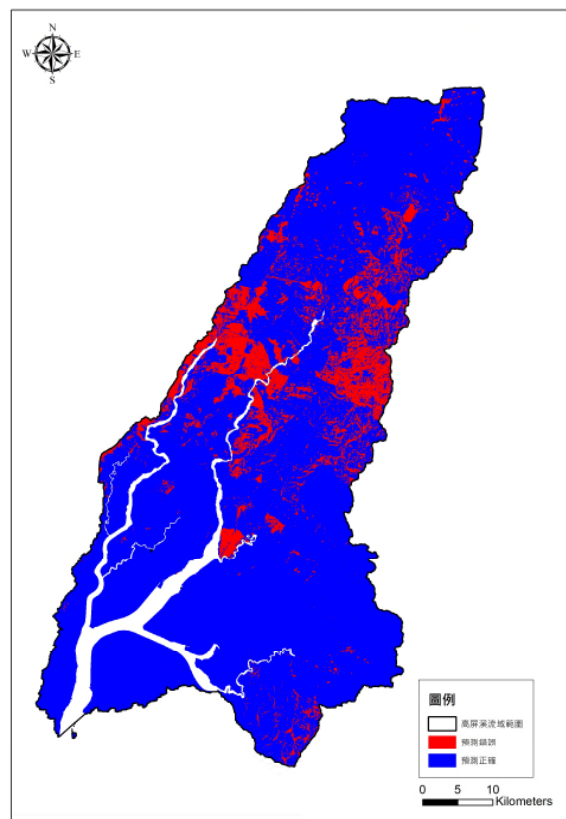


圖 6-8 邏輯斯迴歸正確預測區位圖

表 6-5 分類表

	預測災害風險地區	預測非災害風險地區	正確百分比
實際災害風險地區	128	656	16.3%
實際非災害風險地區	134	2893	95.6%
整體百分比			79.3%

邏輯斯迴歸五個迭代後刪除兩個自變項，分別為網格與河流距離之平均和逕流深度，剩下的自變項整理為表 6-6。所有的自變項都通過顯著性檢定，即代表這些變相對於災害風險都是有所關聯的，其中我們可以發現除了「網格與土石流潛勢溪流距離之平均」和「降雨量」的係數值為負的以外，所有的係數皆為正。係數為負代表該自變數對於產生災害風險是屬於負相關的，可以發現降雨量與災害風險為負相關，也再次證明因為災害移轉的關係，有高強度降雨的地區，其風險不一定最高，有時候災害可能會發生在其他地區。另外，利用 $\text{Exp}(B)$ 可以了解當自變數的改變會對勝算產生多少影響，其中輸沙量的影響力最大，其 $\text{Exp}(B)$ 為 27.713307，則代表輸沙量每上升一個單位，HRU 變成災害風險區的機率會多出 27.713307 倍。而平均坡度的 $\text{Exp}(B)$ 為 1.024584，則代表平均坡度每上升一個單位，HRU 變成災害風險區的機率會多出 1.024584 倍。反過來說，網格與土石流潛勢溪流距離之平均的 $\text{Exp}(B)$ 為 -0.000091，代表當網格與土石流潛勢溪流距離之平均增加一單位時，HRU 會增加機會變成非災害風險地區。由表 6-6 可以發現 SWAT 模式模擬出的輸沙量對於產生災害風險有著至關重要的影響力，而平均坡度次之，接著則是平均高程。本計畫進一步將邏輯斯迴歸寫成數學式以利後續預測分析，請參考式 27。

表 6-6 邏輯斯迴歸式自變數表

自變項	B	Exp(B)	S.E.	Wald	自由度	顯著性
平均坡度	0.024287	1.024584	0.001761	190.196355	1	0.000***
平均高程	0.000746	1.000743	0.000091	66.375111	1	0.000***
網格與土石流潛勢溪流距離之平均	-0.000091	0.999909	0.000013	50.783985	1	0.000***
輸沙量	3.321913	27.713307	0.616695	29.015841	1	0.000***
降雨量	-0.22447	0.798937	0.034863	41.457613	1	0.000***

$$f(x) = -0.22447 + 0.024287 * \text{平均坡度} + 0.000746 * \text{平均高程} - 0.000091 * \text{網格與土石流潛勢溪流距離之平均} + 3.321913 * \text{輸沙量} - 0.22447 \quad (27)$$

二、RCP8.5 世紀末天氣狀況模擬

在建立完邏輯斯迴歸預測模型後，本計畫進一步將利用 RCP8.5 的氣候資訊進行未來可能發生災害地區的模擬。臺灣大多時候都是夏季有較多的雨量，也比較容易在夏季產生坡地災害，因此本計畫針對夏季時間(七月到九月)的天氣狀況的平均進行模擬。本計畫使用 RCP8.5 的 10 年的七到九月天氣狀況進行 SWAT 輸沙量模擬，並計算其平均值；另外也計算 RCP8.5 的 10 年的七到九月的平均降雨量，這些數值都會成為未來區位模擬的參數。而其他的變數(平均坡度、平均高程、網格與土石流潛勢溪流距離之平均)因為在一般狀況下不會跟著時間有太大的變動，因此本計畫將其設定為同樣的數值。接著將所有自變數的數值代入式 XX 中，計算得新的 $f(x)$ ，並依據 $f(x)$ 進行分類，呈現為圖 6-9。圖 6-9 中，綠色區域為非災害風險的地區，紅色的區域為災害風險的地區。總共有 455 個 HRU

被模型預測會發生坡地災害，其空間區位大多位於河流的上游區域以及高屏溪流域的東側部分，總面積為 279.303 平方公里；而其餘的 3,356 個 HRU 則被認為較不會發生坡地災害。透過本計畫的預測模型，只要投入不同的降雨資訊，由 SWAT 模式生成輸沙量，就可以對災害可能發生的區位進行模擬，及早進行放整備工作。

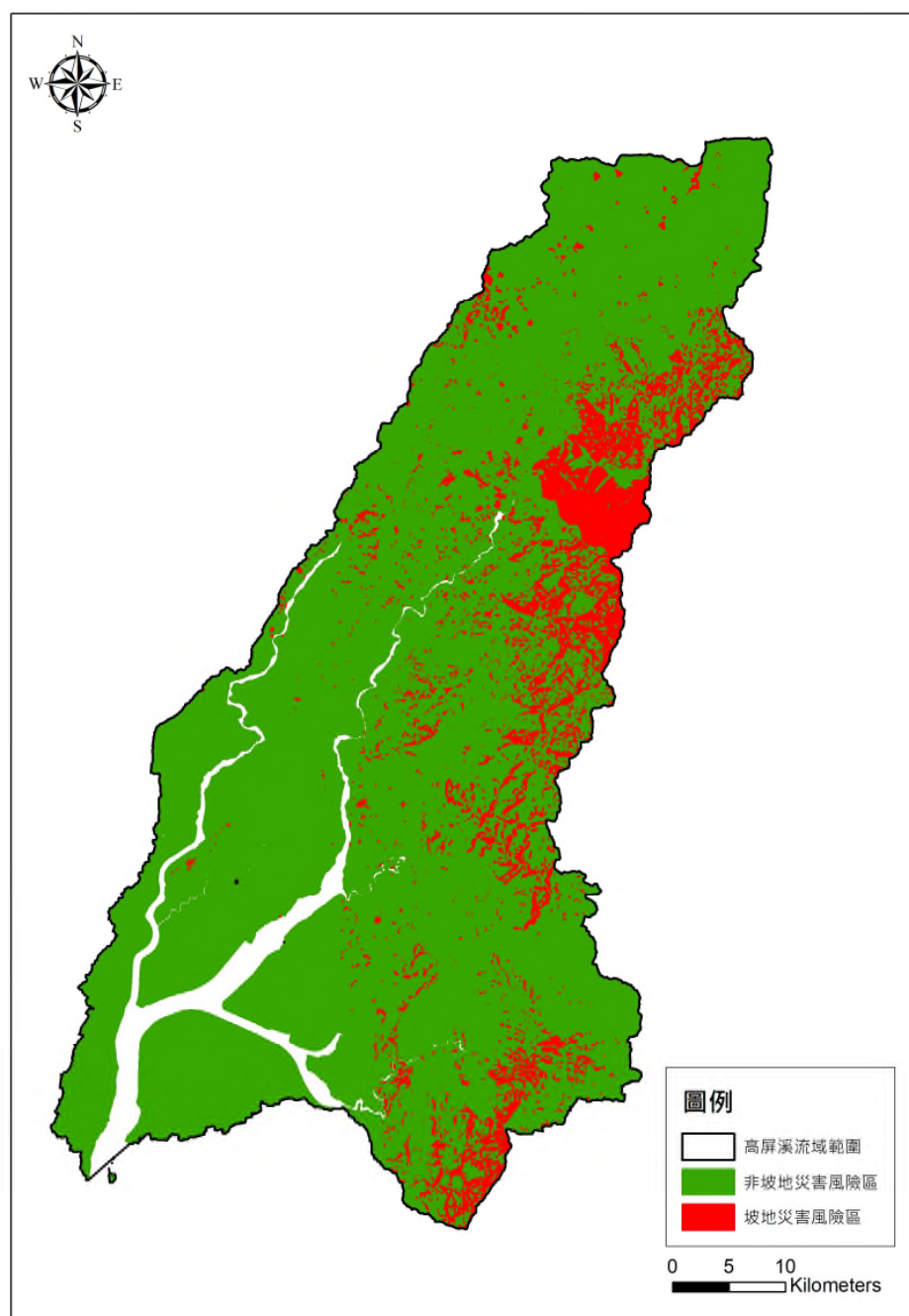


圖 6-9 災害預測分布圖
第七章 結論與建議

第一節 研究發現

本計畫立基於災害的時空分佈不均特性，期應用空間關聯統計分析探討強降雨的複合災害發生時序暨空間移轉特性，進一步應用 SWAT 模式評估氣候變遷下流域水文及輸砂行為變化，最後綜整歸納前述成果指認致災區與受災區之致災因子及區位，研究成果納入氣候變遷情境推估，模擬輸砂及逕流產生量，進一步指認氣候情境下受災及致災地區，期利於流域災害預測及防減災計畫制定。研究發現分述如下：

- 一、 依據空間關聯分析成果，土砂災害與淹水災害災種不同，其與高災害相關性的區位分布係具有差異。以河流段說明，在河流上游地區大多可見係屬高降雨關聯的區域，而河流中下游地區則屬高災害關聯的區域，其中根據災害類別不同高災害關聯的區域也具有差異，如土砂災害之高災害關聯區多位於中上游河段，而淹水災害之高災害關聯區多位於中下游河段且鄰近建成地區。淹水災害致災及受災區域範圍部分區域係為重疊，多位於中下游靠近建城地區的位置，多為呈現區域型面狀分布，而土砂災害之致災及受災區域範圍多為呈現河段往下游遞移帶狀分布。
- 二、 SWAT 模式對於臺灣高屏溪流域流量及輸砂模擬皆能達到一定之成效，並且流量 NSE 皆能達到 0.6 以上，輸砂 NSE 則能達到 0.5 以上。根據 SWAT 模式流量參數模擬成果，控制流域水文特性之參數主要是 CN 值及地下水補注相關參數，說明流域內乾季流量主要由地下水控制，濕季則是地表逕流及地下水補注量再控制，流域內的土地利用改變連帶改變 CN 值並顯著影響流域內的水流特性。根據 SWAT 模式流量參數模擬成果，控制流域土壤沖蝕特性之參數主要是 USLE_P 及 USLE_K 值及坡長坡度等參數，說明土地利用及土壤類型對於高屏溪流域土砂沖蝕之影響以及邊坡開墾將造成流域土砂輸出大幅提升。

- 三、 SWAT 模式針對高屏溪流域各子集水區地表逕流產生成果顯示地表逕流產生集中於高屏溪流域中下游地區，推測與土地利用使用狀況有關，由於中下游地區土地利用大多為都市及農耕地，不透水鋪面使入滲量顯著減少，顯著增加下游地區地表逕流產生量，並增加其洪患發生機率。SWAT 模式針對高屏溪流域各子集水區土砂沖蝕成果顯示土砂沖蝕集中於高屏溪流域上游地區，尤其是海拔高且邊坡陡峭之地區，隨著裸露地面積及濕季高強度降雨事件發生，將造成高屏溪流域上游地區輸出大量之土砂，影響高屏溪下游地區河川的泥砂濁度。
- 四、 氣候變遷下高屏溪流域極端降雨事件發生頻率增加，高屏溪流域內地表逕流顯著增加(最高可至 40%以上)，說明未來流域內淹水之潛勢將越來越明顯，地表逕流增加幅度較高的地區大多位於高屏溪流域中上游，與土壤沖蝕作用之增強息息相關。氣候變遷下高屏溪流域面臨降雨分佈不均及極端降雨事件之威脅，造成濕季河川輸砂量大幅提升約 3~7%，輸砂增加地區主要集中於大津橋及三地門中上游居多。依據邏輯斯迴歸分析結果，455 個 HRU 被模型預測會發生坡地災害，其空間區位大多位於河流的上游區域以及高屏溪流域的東側部分，總面積為 279.303 平方公里。

第二節 後續建議

本計畫就複合型災害嘗試應用歷史災害資料指認致災區與受災區，原始資料內容詳細程度、資料取得等，尚無法全面性呈現所有災害的長相，僅能作為全觀性理解。此外，SWAT 模式對於評估流域複合型災害有相當程度的效果，然而針對崩塌地計算仍是相當缺乏，於未來能考慮將崩塌帶來的泥砂量加入 SWAT 模式已求更精準分析流域內土砂輸出之狀況。

參考文獻

西文文獻：

1. Abbaspour, K. (2013). SWAT-CUP 2012: SWAT calibration and uncertainty programs-A user manual. Eawag: Dübendorf, Switzerland, 103.
2. Abbaspour, K. (2007). User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland.
3. Achia, T. N., Wangombe, A., & Khadioli, N. (2010). A logistic regression model to identify key determinants of poverty using demographic and health survey data.
4. Ashraf Vaghefi, S., Mousavi, S. J., Abbaspour, K. C., Srinivasan, R., & Yang, H. (2014). Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. *hydrological processes*, 28(4), 2018-2032.
5. Arabi, M.; Govindaraju, R.S.; Hantush, M.M.; Engel, B.A. Role of Watershed Subdivision on Modeling the Effectiveness of Best Management Practices with Swat. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 2006, 42, 513–528.
6. Aulenbach, B.T., et al., 2017. Effects of impervious area and BMP implementation and design on storm runoff and water quality in eight small watersheds. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53, 382–399.
7. Azari, M., Moradi, H. R., Saghafian, B., & Faramarzi, M. (2016). Climate change impacts on streamflow and sediment yield in the North of Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 61(1), 123-133.
8. Babaei, H., Nazari-Sharabian, M., Karakouzian, M., & Ahmad, S. (2019). Identification of critical source areas (CSAs) and evaluation of best management practices (BMPs) in controlling eutrophication in the Dez River

Basin. *Environments*, 6(2), 20.

9. Ba, R., Deng, Q., Liu, Y., Yang, R., & Zhang, H. (2021). Multi-hazard Disaster Scenario Method and Emergency Management for Urban Resilience by Integrating Experiment–Simulation–Field Data. *Journal of Safety Science and Resilience*.
10. Bhatta, B., Shrestha, S., Shrestha, P. K., & Talchabhadel, R. (2019). Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin. *Catena*, 181, 104082.
11. Bell, R., and Glade, T. (2004). Multi-disaster Analysis in Natural Risk Assessments. *Risk Analysis*, 9.
12. Bello, A. A. D., Haniffah, M. R. M., Hanapi, M. N., & Usman, A. B. (2019). Identification of critical source areas under present and projected land use for effective management of diffuse pollutants in an urbanized watershed. *International Journal of River Basin Management*, 17(2), 171-184.
13. Brunetti, M. T., Melillo, M., Peruccacci, S., Ciabatta, L., & Brocca, L. (2018). How far are we from the use of satellite rainfall products in landslide forecasting?. *Remote sensing of environment*, 210, 65-75.
14. Burby, R. J. (1999). Unleashing the power of planning to create disaster-resistant communities. *Journal of the American Planning Association*, 65(3):247-248.
15. Camorani, G., Castellarin, A., & Brath, A. (2005). Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(8-10): 561-574.
16. Chiang, L. C., Liao, C. J., Lu, C. M., & Wang, Y. C. (2021). 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.
17. Chen, S., Feng, Y., Tong, X., Liu, S., Xie, H., Gao, C., & Lei, Z. (2020).

Modeling ESV losses caused by urban expansion using cellular automata and geographically weighted regression. *Science of the Total Environment*, 712, 136509.

18. Chen, Y. C., Wu, Y. H., Shen, C. W., & Chiu, Y. J. (2018). Dynamic modeling of sediment budget in shihmen reservoir watershed in Taiwan. *Water*, 10(12), 1808.
19. Cheng, D., Cui, Y., Su, F., Jia, Y., & Choi, C. E. (2018). The characteristics of the Mocoa compound disaster event, Colombia. *Landslides*, 15(6), 1223-1232.
20. Cui, K., & Han, Z. (2019). Association between disaster experience and quality of life: The mediating role of disaster risk perception. *Quality of Life Research*, 28(2), 509-513.
21. Cutter, S. L. (2018). Compound, cascading, or complex disasters: what's in a name? *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 60(6), 16-25.
22. Cutter, S. L., Ash, K. D., & Emrich, C. T. (2016). Urban–rural differences in disaster resilience. *Annals of the American Association of Geographers*, 106(6), 1236-1252.
23. Cutter, S. L. (2016). The Changing Context of Hazard Extremes: Events, Impacts, and Consequences. *Journal of Extreme Events*, 3(2), 1671005.
24. Cutter, S. L., Ismail-Zadeh, A., Alcántara-Ayala, I., Altan,, O., Baker, D. N., Briceño, S., Gupta, H., Holloway, A., Johnston,, D., McBean, G. A., Ogawa, Y., Paton, D., Porio, E., Silbereisen, R. K., Takeuchi, K., Valsecchi, G. B., Vogel, C., and Wu, G. (2015). Pool Knowledge to Stem Losses From Disasters. *Nature*, 522, 277-279.
25. De Angeli, S., Malamud, B. D., Rossi, L., Taylor, F. E., Trasforini, E., & Rudari, R. (2022). A multi-hazard framework for spatial-temporal impact analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 73, 102829.
26. Dokhi, M., Siagian, T. H., Utomo, A. P., & Rumanitha, E. (2017). Social capital

and disaster preparedness in Indonesia: A quantitative assessment through binary logistic regression. In *Disaster risk reduction in Indonesia* (pp. 589-608). Springer, Cham.

27. Duncan, M., Edwards, S., Kilburn, C., Twigg, J., & Crowley, K. (2016). An interrelated hazards approach to anticipating evolving risk. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery.
28. Feng, H., Zhang, F., and Dai, S. (2017). Study on disaster risk assessment method system for comprehensive disaster prevention planning. *Mod. Urban Res.*, 93-98.
29. Fiseha, B., et al. (2013). Hydrological analysis of the Upper Tiber River Basin, Central Italy: a watershed modelling approach. *Hydrological processes*, 27(16), 2339-2351.
30. Funabashi, Y., and Kitazawa, K. (2012). Fukushima in review: A complex disaster, a disastrous response. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 68(2), 9-21.
31. Gai, C., Weng, W., and Yuan, H. (2011). GIS-based multi-disaster coupled comprehensive risk assessment. *Tsinghua Science and Technology*, 51, 627-631.
32. Geng, R., Wang, X., Sharpley, A., 2015. Developing and testing a best management practices tool for estimating effectiveness of nonpoint source pollution control. *Environ. Earth Sci.* 1–15.
33. Giri, S., Arbab, N. N., & Lathrop, R. G. (2019). Assessing the potential impacts of climate and land use change on water fluxes and sediment transport in a loosely coupled system. *Journal of Hydrology*, 577, 123955.
34. Giri, S., Qiu, Z., Prato, T., & Luo, B. (2016). An integrated approach for targeting critical source areas to control nonpoint source pollution in watersheds. *Water resources management*, 30(14), 5087-5100.
35. Gill, J. C., & Malamud, B. D. (2016). Hazard interactions and interaction networks (cascades) within multi-hazard methodologies. *Earth System*

Dynamics, 7(3), 659-679.

36. Grünthal, G., Thieken, A. H., Schwarz, J., Radtke, K. S., Smolka, A., and Merz, B. (2006). Comparative Risk Assessments for the City of Cologne–Storms, Floods, Earthquakes. *Natural Hazards*, 38, 21-44.
37. Havel, A., Tasdighi, A., & Arabi, M. (2018). Assessing the hydrologic response to wildfires in mountainous regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4), 2527-2550.
38. Himanshu, S. K., Pandey, A., Yadav, B., & Gupta, A. (2019). Evaluation of best management practices for sediment and nutrient loss control using SWAT model. *Soil and Tillage Research*, 192, 42-58.
39. Hills, S., & Eraso, Y. (2021). Factors associated with non-adherence to social distancing rules during the COVID-19 pandemic: a logistic regression analysis. *BMC Public Health*, 21(1), 1-25.
40. Hölbling, D., Füreder, P., Antolini, F., Cigna, F., Casagli, N., & Lang, S. (2012). A semi-automated object-based approach for landslide detection validated by persistent scatterer interferometry measures and landslide inventories. *Remote Sensing*, 4(5), 1310-1336.
41. Jensen, J. R. (2006). *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective* (No. Ed. 2). Prentice-Hall Inc..
42. Kao, S. J., Lee, T. Y., & Milliman, J. D. (2005). Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16(3), 653.
43. Kappes, M. S., Keiler, M., & Glade, T. (2010). From single-to multi-hazard risk analyses: a concept addressing emerging challenges.
44. Kappes, M. S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., & Glade, T. (2012). Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. *Natural hazards*, 64(2), 1925-1958.

45. Kayastha, P., Dhital, M. R., & De Smedt, F. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences*, 52, 398-408.
46. Keyport, R. N., Oommen, T., Martha, T. R., Sajinkumar, K. S., & Gierke, J. S. (2018). A comparative analysis of pixel-and object-based detection of landslides from very high-resolution images. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, 1-11.
47. Khayyun, T. S., Alwan, I. A., & Hayder, A. M. (2019). Hydrological model for Hemren dam reservoir catchment area at the middle River Diyala reach in Iraq using ArcSWAT model. *Applied Water Science*, 9(5), 1-15.
48. Kitanova, M. (2020). Youth political participation in the EU: evidence from a cross-national analysis. *Journal of Youth Studies*, 23(7), 819-836.
49. Kleinen, T., and Petschel-Held, G. (2007). Integrated assessment of changes in flooding probabilities due to climate change. *Climatic Change*, 81(3-4): 283-312.
50. Kumasaki, M., King, M., Arai, M., and Yang, L. (2016). Anatomy of Cascading Natural Disasters in Japan: Main Modes and Linkages. *Natural Hazards*, 80, 1425-1441.
51. Lemon, S. C., Roy, J., Clark, M. A., Friedmann, P. D., & Rakowski, W. (2003). Classification and regression tree analysis in public health: methodological review and comparison with logistic regression. *Annals of behavioral medicine*, 26(3), 172-181.
52. Liu, B., Siu, Y. L., & Mitchell, G. (2016). Hazard interaction analysis for multi-hazard risk assessment: a systematic classification based on hazard-forming environment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(2), 629-642.
53. Lin, G. Z., Hsu, S. Y., Ho, C. C., Chen, C. F., Huang, J. C., & Lee, T. Y. (2022). Application of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to evaluate the fates of

nitrogenous fertilizer in subtropical mountainous watershed tea farms. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3), 1-23.

54. Liu, A., and Wu, C. (2015). Research on Disaster Chain Risk Assessment Method Based on Complex Network. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 35, 466-472.
55. Lu, P., Stumpf, A., Kerle, N., & Casagli, N. (2011). Object-oriented change detection for landslide rapid mapping. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 8(4), 701-705.
56. Lombardo, L., & Mai, P. M. (2018). Presenting logistic regression-based landslide susceptibility results. *Engineering geology*, 244, 14-24.
57. Ma, C., Deng, J., & Wang, R. (2018). Analysis of the triggering conditions and erosion of a runoff-triggered debris flow in Miyun County, Beijing, China. *Landslides*, 15(12), 2475-2485.
58. Manogaran, G., & Lopez, D. (2018). Health data analytics using scalable logistic regression with stochastic gradient descent. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, 10(1-2), 118-132.
59. Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal, A., Gasparini, P., Mastellone, M. L., & Di Ruocco, A. (2012). Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy. *Natural hazards*, 62(2), 551-573.
60. Mastrandrea, M. D., Field, C. B., Stocker, T. F., Edenhofer, O., Ebi, K. L., Frame, D. J., ... & Plattner, G. K. (2010). Guidance note for lead authors of the IPCC fifth assessment report on consistent treatment of uncertainties.
61. May, F. (2007). Cascading Disaster Models in Post-Burn Flash Flood, in B. W. Butler and W. Cook (compilers), *the Fire Environment—Innovations, Management, and Policy*, Conference Proceedings, 26-30 March 2007, Destin, FL, USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-46CD , 443–64.
62. McColl, C., & Aggett, G. (2007). Land-use forecasting and hydrologic model

integration for improved land-use decision support. *Journal of Environmental Management*, 84(4):494-512.

63. Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A., and Delworth, T. L. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 415(6871): 514-517.
64. Mimura, N., Pulwarty, R. S., Duc, D. M., Elshinnawy, I., Redsteer, M. H., Huang, H. Q., Nkem, J. N., and Sanchez Rodriguez, R. A. (2014). Adaptation planning and implementation. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., and White, L. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 869-898.
65. Mohammadi, M., Darabi, H., Mirchooli, F., Bakhshaei, A., & Torabi Haghighi, A. (2021). Flood risk mapping and crop-water loss modeling using water footprint analysis in agricultural watershed, northern Iran. *Natural Hazards*, 105(2), 2007-2025.
66. Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785.
67. Muchlinski, D., Siroky, D., He, J., & Kocher, M. (2016). Comparing random forest with logistic regression for predicting class-imbalanced civil war onset data. *Political Analysis*, 24(1), 87-103.
68. Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for

agricultural drought monitoring. *Agricultural and forest meteorology*, 133(1-4), 69-88.

69. Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
70. Nikolopoulos, E. I., Crema, S., Marchi, L., Marra, F., Guzzetti, F., & Borga, M. (2014). Impact of uncertainty in rainfall estimation on the identification of rainfall thresholds for debris flow occurrence. *Geomorphology*, 221, 286-297.
71. Nilawar, A. P., & Waikar, M. L. (2019). Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. *Science of the total environment*, 650, 2685-2696.
72. Niraula, R., et al., 2013. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF. *Ecological Modelling*, 268, 123–133.
73. Nusinovici, S., Tham, Y. C., Yan, M. Y. C., Ting, D. S. W., Li, J., Sabanayagam, C., ... & Cheng, C. Y. (2020). Logistic regression was as good as machine learning for predicting major chronic diseases. *Journal of clinical epidemiology*, 122, 56-69.
74. Pirogova, O., Gorin, E., & Plotnikov, V. (2019). The algorithms for the environmental finance based on adjusted present value models. In *E3S web of conferences* (Vol. 91, p. 08021). EDP Sciences.
75. Pritchard, P. (2000). *Environmental Risk Management*. London: Earthscan.
76. Rallison, R. E., et al. (1982). Past, present, and future SCS runoff procedure. Paper presented at the Rainfall-runoff relationship/proceedings, International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling held May 18-21, 1981 at Mississippi State University, Mississippi State, Mississippi, USA/edited by VP Singh.
77. Runadi, T., Widyaningsih, Y., & Lestari, D. (2020). Modeling total crime and the affecting factors in Central Java using geographically weighted regression.

In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1442, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.

78. Rymarczyk, T., Kozłowski, E., Kłosowski, G., & Niderla, K. (2019). Logistic regression for machine learning in process tomography. *Sensors*, 19(15), 3400.
79. Salvatici, T., Tofani, V., Rossi, G., D'Ambrosio, M., Tacconi Stefanelli, C., Masi, E. B., ... & Casagli, N. (2018). Application of a physically based model to forecast shallow landslides at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(7), 1919-1935.
80. Saha, P. P., et al. (2014). Streamflow modeling in a fluctuant climate using SWAT: Yass River catchment in south eastern Australia. *Environmental Earth Sciences*, 71(12), 5241-5254.
81. Santra, P., et al. (2013). Modeling runoff from an agricultural watershed of western catchment of Chilika lake through ArcSWAT. *Journal of Hydro-environment Research*, 7(4), 261-269.
82. Schlögel, R., Marchesini, I., Alvioli, M., Reichenbach, P., Rossi, M., & Malet, J. P. (2018). Optimizing landslide susceptibility zonation: Effects of DEM spatial resolution and slope unit delineation on logistic regression models. *Geomorphology*, 301, 10-20.
83. Sengul, H., Santella, N., Steinberg, L. J., and Cruz, A. M. (2012). Analysis of Hazardous Material Releases due to Natural Hazards in the United States. *Disasters*, 36(4), 723-74.
84. Shen, Z., Qiu, J., Hong, Q., & Chen, L. (2014). Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges Reservoir Region. *Science of the Total Environment*, 493, 138-146.
85. Shi, P.-J., et al. (2007). The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China. *Catena*, 69(1), 31-35.
86. Shiu, C. J., Liu, S. C., & Chen, J. P. (2009). Diurnally asymmetric trends of

temperature, humidity, and precipitation in Taiwan. *Journal of climate*, 22(21), 5635-5649.

87. Showalter, P. S., and Myers, M. F. (1994). Natural Disasters in the United States as Release Agents of Oil, Chemicals, or Radiological Materials between 1980–89: Analysis and Recommendations. *Risk Analysis*, 14(2), 169-182.
88. Shrestha, N. K., & Wang, J. (2018). Predicting sediment yield and transport dynamics of a cold climate region watershed in changing climate. *Science of the Total Environment*, 625, 1030-1045.
89. Sloan, P. G., et al. (1984). Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, 20(12), 1815-1822.
90. Stumpf, A., & Kerle, N. (2011). Object-oriented mapping of landslides using Random Forests. *Remote sensing of environment*, 115(10), 2564-2577.
91. Tan, M. L., Yusop, Z., Chua, V. P., & Chan, N. W. (2017). Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, 189, 1-10.
92. Tan, M. L., Gassman, P., Yang, X., & Haywood, J. (2020). A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes. *Advances in Water Resources*, 103662.
93. Tilloy, A., Malamud, B. D., Winter, H., & Joly-Laugel, A. (2019). A review of quantification methodologies for multi-hazard interrelationships. *Earth-Science Reviews*, 196, 102881.
94. Ul Hassan, E., Zainuddin, Z., & Nordin, S. (2017). A review of financial distress prediction models: logistic regression and multivariate discriminant analysis. *Indian-Pacific Journal of Accounting and Finance*, 1(3), 13-23.
95. U.S. National Committee for the Decade for Natural Disaster Reduction, National Research Council. (1991). *A Safer Future: Reducing the Impacts of Natural Disasters* (Washington, DC: National Academy Press, 1991). Quote

from p. 14.

96. Wei, Z. L., Xu, Y. P., Sun, H. Y., Xie, W., & Wu, G. (2018). Predicting the occurrence of channelized debris flow by an integrated cascading model: A case study of a small debris flow-prone catchment in Zhejiang Province, China. *Geomorphology*, 308, 78-90.
97. Wellen, C., Kamran-Disfani, A. R., & Arhonditsis, G. B. (2015). Evaluation of the current state of distributed watershed nutrient water quality modeling. *Environmental science & technology*, 49(6), 3278-3290.
98. Xing, X., Wu, C., Li, J., Li, X., Zhang, L., & He, R. (2021). Susceptibility assessment for rainfall-induced landslides using a revised logistic regression method. *Natural Hazards*, 106(1), 97-117.
99. Yan, B., Fang, N. F., Zhang, P. C., & Shi, Z. H. (2013). Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: an assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. *Journal of Hydrology*, 484, 26-37.
100. Yesuf, H. M., et al. (2015). Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia. *Catena*, 127, 191-205.
101. Yang, J., Wang, L., and Xu, G. (2014). Fuzzy Comprehensive Evaluation of Chongqing Integrated Disaster Risk. *Earth Environment*, 42, 252-259.
102. Ye, X., Wen, J., and Deng, G. (2014). Research on the Natural Disaster Risk Assessment in Tourist Area Based on Multi-scenarios Technique: A Case in Shuzheng Village of Jiuzhai Valley. *Journal of Travel Research*, 29, 47-57.
103. Zeiger, S. J., Owen, M. R., & Pavlowsky, R. T. (2021). Simulating nonpoint source pollutant loading in a karst basin: A SWAT modeling application. *Science of The Total Environment*, 785, 147295.
104. Zhang, J., Tang, H., Tannant, D. D., Lin, C., Xia, D., Liu, X., ... & Ma, J. (2021). Combined forecasting model with CEEMD-LCSS reconstruction and the ABC-

SVR method for landslide displacement prediction. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126205.

105. Zhang, L., Nan, Z., Yu, W., Zhao, Y., Xu, Y., (2018). Comparison of baseline period choices for separating climate and land use/land cover change impacts on watershed hydrology using distributed hydrological models. *Sci. Total Environ.* 622–623, 1016–1028.
 106. Zhao, R., Zhan, L., Yao, M., & Yang, L. (2020). A geographically weighted regression model augmented by Geodetector analysis and principal component analysis for the spatial distribution of PM2. 5. *Sustainable Cities and Society*, 56, 102106.
 107. Zhao, A., and Ma, Z. (1993). Research on indicator system for natural disaster loss assessment. *Journal of Natural Disaster Science*, 3, 1-7.
-

中文文獻：

108. 王兆文、沈哲緯、林俐玲，(2013)，以國土保育觀點探討坡地利用合理性，「農業工程學報」，第 59 卷，第 1 期，頁 67-76。
109. 王豔豔、梅青、程曉陶，(2009)，流域洪水風險情境分析技術簡介及其應用，「水利水電科技進展」，第 29 卷，第 2 期。
110. 內政部消防署，(2018)，臺灣地區天然災害損失統計表(1958 年至 2017 年)。取自 <https://www.nfa.gov.tw/cht/index.php?code=list&ids=233>。
111. 孔繁恩、詹進發、邵怡誠、李茂園、葉堃生、陳連晃，(2014)，物件式分類法於高解析度航照影像萃取崩塌地之研究，「航測及遙測學刊」，第 18 卷，第 4 期，第 267-281 頁。
112. 吳俊鎡、黃均臺、吳亭燁，(2018)。南投縣仁愛鄉崩塌特性分析及崩塌風險模式建構，「中華水土保持學報」，第 49 卷，第 3 期，頁 154-166。
113. 周天穎、雷祖強、李易儒、萬絢、林冠廷，(2012)。運用空間分析技術與 Logit 迴歸法建立崩塌地發生推估機率模式之研究-以雪霸國家公園為例，「水保技術」，第 7 卷，第 3 期，頁 126-137。
114. 周佳、陳雅婷、羅敏輝、李明安、許晃雄、洪志誠、鄒治華、盧孟明、洪致文、陳正達、鄭兆尊，(2017)。臺灣氣候變遷科學報告 2017 物理現象與機制，國家災害防救科技中心。
115. 吳瑞賢、林松青、蘇文瑞、洪明瑞、廖緯璿、廖偉信、張哲豪、韋家振，(2008)，「天然災害防治導論」，台北縣：全華圖書股份有限公司。
116. 吳杰穎、邵珮君、林文苑、柯于璋、洪鴻智、陳天健、陳亮全、黃智彥、詹士樑、薩支平，(2007)，「災害管理學辭典」，五南出版社，臺北市。
117. 專諮會，(2014)，第六屆行政院災害防救專家諮詢委員會政策建議：巨災風險財務分散與轉移機制。第六屆行政院災害防救專家諮詢委員會(專諮

會)。

118. 許民陽，(2012)，臺灣西北海岸的藻礁，「地質」，第 31 卷，第 1 期，頁 22-29。
119. 行政院農業委員會水土保持局，(2017)，歷史影像平台。取自 <https://photo.swcb.gov.tw/Home/Intro>。
120. 行政院農業委員會水土保持局，土石流防災資訊網。取自 <https://246.swcb.gov.tw/Service/DownloadDebrisThreshold>。
121. 陳亮全，(1997)，嘉義瑞里地震防救災體系之運作及檢討，「結構工程」，第 13 卷，第 3 期，頁 109-117。
122. 黃韋凱、林銘郎、陳良健、林彥享及蕭震洋，(2010)。物件導向分析方法應用於遙測影像之分區及崩塌地與人工設施分類. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 15(1), 29-49.
123. 詹勳全、陳柏安、溫祐霆，(2015)，以地理資訊系統搭配邏輯斯回歸，不安定指數及支撐向量機建立山崩潛感之比較分析，「中華水土保持學報」，第 46 卷，第 4 期，頁 213-222。
124. 萬慶、魏一宏、陳德清，(1999)，「洪水災害系統分析與評估」，北京：科學出版社。
125. 蔡依純，(2002)，從土地使用規劃進行防洪管理策略之研究-以基隆河上游地區為例，國立台北科技大學建築與都市設計研究所論文。
126. 謝正倫、陳俞旭，(2011)，山區災害的挑戰與防救策略，「中華防災學刊」，第 3 卷，第 1 期，頁 7-13。
127. 謝正倫、黃敏郎、蔡在宗、張維恕，(2010)，運用福衛二號影像進行莫拉克颱風崩塌地判釋，「中華防災學報」，第 2 卷，第 1 期，頁 35-42。

128. 國家災害防救科技中心，(2019)，山崩、土石流(坡地災害潛勢)。
<https://dmap.ncdr.nat.gov.tw/主選單/熱門災害主題/山崩-土石流-坡地災害潛勢/>
129. 羅鴻傑、許世孟、顧承宇、蘇泰維、李錦發，(2010)，降雨特性對坡地穩定性影響之關聯性研究-以義興崩塌地為例，「中興工程」，第 106 期，頁 17-25。
130. 鍾閔光、林俐玲，(2015)。土壤水文評估模式之介紹，水土保持學報，第 47 卷，第 4 期，頁 1539-1550。