

# 2020

## 森林集水區及環境監測研討會

Proceedings of Symposium on 2020 Forest Watershed Management and Environmental Monitoring



時間：109年10月14日（星期三）

地點：林業試驗所行政大樓4樓  
（臺北市南海路53號）

主辦單位：行政院農業委員會林業試驗所

協辦單位：行政院農業委員會水土保持局、國立臺灣大學

國立成功大學、國立中興大學、國立臺灣師範大學

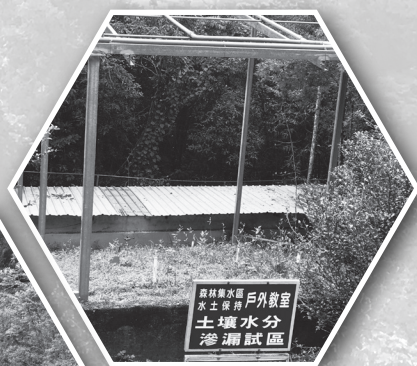
國立嘉義大學、國立宜蘭大學、國立屏東科技大學

財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心

# 2020

# 森林集水區及環境監測研討會

Proceedings of Symposium on 2020 Forest Watershed Management and Environmental Monitoring



時間：109年10月14日（星期三）

地點：林業試驗所行政大樓4樓  
（臺北市中正區南海路53號）

主辦單位：行政院農業委員會林業試驗所

協辦單位：行政院農業委員會水土保持局、國立臺灣大學  
國立成功大學、國立中興大學、國立臺灣師範大學  
國立嘉義大學、國立宜蘭大學、國立屏東科技大學  
財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心



封面照片(曾俊偉 提供)

## 目 錄

議程表.....	i
所長序.....	iii

## 講 題

1. 宜蘭雙連埤地區水體中可溶性無機氮與土地利用之關係.....	1
(江曜宇、王秋嫻、施郁庭、呂克勤、王相華)	
2. 以氣候資料為基礎的臺灣山地森林植群分布模型.....	7
(林奐宇)	
3. 都市林在夏季期間的降溫效應初探-以中和公園及台北植物園為例.....	15
(劉宇軒、施郁庭、江曜宇、王相華)	
4. 數位物候學(e-phenology)的監測與應用.....	22
(張勵婉、陳建文、鄭美如、余尚鈺)	
5. A Study of Land Cover Change Trajectory in the Taimali Stream Watershed .....	26
(Chun-Kuo Yeh, Shyue-Cherng Liaw)	
6. Enhanced physico-chemical erosion under sodium-water conditions in the mudstone catchment .....	32
(Ci-Jian Yang, Jr-Chuang Huang, Jiun-Chuan Lin, Pei-Hao Chen)	
7. 應用 open data cube 遙測資料與植生指標於海岸林變遷分析 .....	39
(曾俊偉、鍾智昕)	
8. 以數值模擬探討集水區不同土砂情境下防砂壩之減災成效.....	46
(曹鼎志、黃全謚、鐘啟榮、黃效禹、鄭耕秉)	

9. 以 GEE 雲端分析平台快速估算淹水範圍初探—以 2018 年 0823 熱帶低氣壓水災為例.....	52
(林恩如、陳振宇)	
10. 氣候變遷下日本土砂防災策略演進.....	58
(詹婉妤、林家興、陳振宇)	
11. 知本溪調節式防砂壩構築效益之探討.....	64
(許中立、邱欣蔚、王昭堡、許信智)	
12. 野火熱點空間區位萃取之研究.....	71
(莊智瑋、曾俊偉)	
13. 不同植生覆蓋對水文環境之影響.....	77
(蘇子豪、曾俊偉、龔聖皓、廖晨喬、劉瓊霖)	
14. 濱水區植生緩衝帶寬度配置及應用之研究.....	84
(吳炤緯、林昭遠)	
15. 以複合指標結合崩塌率峰線優選集水區清疏點位之研究.....	90
(林敬堯、郭振農、黃錫泉、簡志凱、林昭遠)	
16. 崩塌地特定水土保持區的調查與檢討-梅山鄉瑞里村變異檢討分析 .....	96
(陳建元、楊佩璋)	
17. 水漾森林前生今世及致災潛勢評估.....	102
(許錕安、陳俞旭、陳新發、黃光駿、林健洋)	
18. 以環境指標推估濁水河流域碳存量分布之研究.....	108
(毛玉森、林昭遠)	

## 「2020 森林集水區及環境監測研討會」議程表

日期：109 年 10 月 14 日(星期三) 地點：台北市南海路 53 號 (林業試驗所行政大樓 4 樓會議廳)

時間	議程	
08:30-09:00	報到	
09:00-09:10	開幕致詞 (林業試驗所 張彬所長)	
時間	講題	主持人
09:10-09:30	宜蘭雙連埤地區水體中可溶性無機氮與土地利用之關係 (江曜宇、王秋嫻、施郁庭、呂克勤、王相華)	臺灣師範大學 地理系 廖學誠副院長
09:30-09:50	以氣候資料為基礎的臺灣山地森林植群分布模型 (林奐宇)	
09:50-10:10	都市林在夏季期間的降溫效應初探—以中和公園及台北植物園為例 (劉宇軒、施郁庭、江曜宇、王相華)	
10:10-10:30	數位物候學(e-phenology)的監測與應用 (張勵婉、陳建文、鄭美如、余尚鈺)	
<b>10:30-10:50</b>	<b>休息/交流</b>	
10:50-11:10	A Study of Land Cover Change Trajectory in the Taimali Stream Watershed (Chun-Kuo Yeh, Shyue-Cherng Liaw)	林業試驗所 育林組 游漢明組長
11:10-11:30	Enhanced physico-chemical erosion under sodium-water conditions in the mudstone catchment (Ci-Jian Yang, Jr-Chuang Huang, Jiun-Chuan Lin, Pei-Hao Chen)	
11:30-11:50	應用 open data cube 遙測資料與植生指標於海岸林變遷分析 (曾俊偉、鍾智昕)	
11:50-12:10	以數值模擬探討集水區不同土砂情境下防砂壩之減災成效 (曹鼎志、黃全謚、鐘啟榮、黃效禹、鄭耕秉)	
<b>12:10-13:30</b>	<b>午餐</b>	
13:30-13:50	以 GEE 雲端分析平台快速估算淹水範圍初探—以 2018 年 0823 熱帶低氣壓水災為例 (林恩如、陳振宇)	國立中興大學 水土保持學系 林昭遠教授
13:50-14:10	氣候變遷下日本土砂防災策略演進 (詹婉妤、林家興、陳振宇)	
14:10-14:30	知本溪調節式防砂壩構築效益之探討 (許中立、邱欣蔚、王昭堡、許信智)	
14:30-14:50	野火熱點空間區位萃取之研究 (莊智瑋、曾俊偉)	
14:50-15:10	不同植生覆蓋對水文環境之影響 (蘇子豪、曾俊偉、龔聖皓、廖晨喬、劉瓊霏)	
<b>15:10-15:30</b>	<b>休息/交流</b>	
15:30-15:50	濱水區植生緩衝帶寬度配置及應用之研究 (吳炤緯、林昭遠)	屏東科技大學 水土保持系 許中立教授
15:50-16:10	以複合指標結合崩塌率峰線優選集水區清疏點位之研究 (林敬堯、郭振農、黃錫泉、簡志凱、林昭遠)	

16:10-16:30	崩塌地特定水土保持區的調查與檢討-梅山鄉瑞里村變異檢討分析（陳建元、楊佩璋）	
16:30-16:50	水漾森林前生今世及致災潛勢評估（許錕安、陳俞旭、陳新發、黃洸駿、林健洋）	
16:50-17:10	以環境指標推估濁水溪流域碳存量分布之研究（毛玉森、林昭遠）	
<b>17:10-17:40</b>	<b>綜合座談及討論</b>	林昭遠、許中立 王相華、陸象豫

# 森林集水區及環境監測研討會

## 所長序

臺灣地理環境與地質條件特殊，土地利用相當多元，水文環境隨土地不斷開發利用而快速變動；受極端氣象影響，在短延時高強度的降雨情況下，地表逕流與土壤沖蝕現象遠較同緯度的其他地區為嚴重，且崩塌與土石流等災害亦經常發生。在全球溫室效應導致氣候變遷的今日，極端氣候發生的頻率較以往更頻繁，世界各地水災、旱災發生仍頻，氣候變遷已然成為國際間重要議題。有數據顯示臺灣地區降雨與氣溫受氣候變遷影響亦發生顯著的變化，降雨日趨集中，豪大雨及長期無雨發生機率較以往大幅增加，對原本就經營不易的水資源及防洪防災措施，更是雪上加霜。臺灣各溪流上游的森林集水區背負著安定土砂、涵養水資源、澄清水質、調節水量與減低土壤沖蝕等水土資源保育的使命，集水區經營與治理，更需要獲得應有的重視。另由於吾人所居之生活環境受到工業發展導致的氣候變遷及空氣、土壤、水環境等汙染，對人類的生活品質造成深切的影響，藉由各相關環境因子的監測，可瞭解土地利用、氣候、汙染的變化趨勢，提供未來擬訂環境政策的參據。

森林集水區經營涉及的研究範圍非常廣泛，從降水的量及時間分布、地表逕流的產生、啟動表土沖蝕的因素、山坡地崩塌的機制，以至治理層面的水土災害防治、政策面的土地利用管理探討，環境監測涉及氣候、大氣懸浮微粒的濃度、土壤、水質變化、及生態環境變遷等，研究的範圍包羅萬象！

隨著人類社會、自然環境的變遷與水土保持密切相關的森林集水區經營，以及與人類生活密切相關的都市林、海岸林經營應當受到更高的關注。現階段研究的重點，不僅需要維護自然資源的永續利用，同時也要擔負起國土保安、坡地減災、生態保育、人類居住環境改善的重責大任，也因此擴展了研究範疇。

本所舉辦「2020 森林集水區及環境監測研討會」的目的，是希望能邀請從事森林集水區經營、水土資源保育及環境監測的研究及實務工作者，提供階段性之成果，無論是學理上的研究與改良，實務性的技術發展，或是時事上探討，對現下的時間點，都有極大的價值，希望能以拋磚引玉的方式，引起大家廣泛的討論與深入的研究及分享最新的訊息，對森林集水區及環境經營策略集思廣益並提出建言，讓相關環境保育的森林集水區經營及攸關人類生活品質的都市林、海岸林經營策略更趨完善。

林業試驗所 所長

張村  
謹識

2020 年 10 月 14 日

## 宜蘭雙連埤地區水中可溶性無機氮與土地利用之關係

江曜宇<sup>1)\*</sup> 王秋嫻<sup>1)</sup> 施郁庭<sup>1)</sup> 呂克勤<sup>1)</sup> 王相華<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組，10066 台北市中正區南海路 53 號。

\* 通訊作者，E-mail:a255001@tfri.gov.tw。

### 摘要

雙連埤野生動物保護區本身為台灣重要低海拔山區濕地，然而周遭農業活動並未在保護區範圍內而受規範，本研究旨在了解雙連埤鄰近農業活動所帶來的溶解性無機氮(DIN, Dissolved inorganic nitrogen)濃度負荷。研究在雙連埤周遭渠道設計了 15 個水質採樣點，包含湖水本身 1 點。結果顯示這些溪流/渠道入流濃度介於 12 - 44  $\mu\text{M}$  之間，以  $\text{NO}_3$  為主要成分(平均 91%)。農業地對  $\text{NH}_4$ 、 $\text{NO}_2$  與  $\text{NO}_3$  濃度的相關係數分別為，0.91、0.63、0.18；水體對三物質的相關係數為 0.22、0.39 與 -0.37。 $\text{NH}_4$  與  $\text{NO}_2$  受土地利用影響顯著，水體則為  $\text{NO}_3$  吸收端。本研究提供一個角度了解低密度開發的淺山農業村落對溪流與周圍湖泊水質的影響。

### 緒言

農業行為帶來的大量氮輸出一直是生態系統崩潰的因素之一(Foley et al., 2005; Galloway et al., 2004; Tilman et al., 2011)，氮在水體中以可溶性無機氮(DIN, Dissolved inorganic nitrogen)為主，其組成包括硝酸鹽( $\text{NO}_3$ )、亞硝酸鹽( $\text{NO}_2$ )及氨氮( $\text{NH}_4$ )，在森林生態系的養分循環中扮演重要的元素，近年來因人口成長使開發活動頻繁，增加食物需求與能源使用，使氮在生物地質化學的循環中發生巨變，常導致水體污染、酸化及優養化，影響生態系及人類的健康(劉瓊霏 & 葉學文，2001；Seitzinger et al., 2010)。台灣地狹人稠，許多土地利用從森林轉變為農業生產用途，而農業活動是氮排放的主要來源之一，例如耕種、施肥、放牧等作業常使水體中氮含量增加，因此土地利用類型常是影響水質的重要因素(Paul and Mayer, 2001; McKenzie and Townsend, 2007)。Lee 等(2013)在七家灣溪集水區的研究發現農業活動產生的 DIN 輸出量超過森林輸出量的 2 至 5 倍多，雖然臺灣森林面積覆蓋達 60%，但集約的農業活動往往排放超過其面積比例的 DIN (Shih et al., 2016)，與其他國家相比，台灣的 DIN 平均輸出量約為  $3800 \text{ kg-N km}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ，為全球平均值的 18 倍多 (Huang et al., 2016)，顯示農業活動對 DIN 排放多寡的影響甚大。

雙連埤為國家級重要濕地，其主埤塘水域及周遭環境更被列為野生動物保護區及野生動物重要棲息環境。雙連埤原為無人居住的天然湖泊，在日治時期政府招募客家人來此處開墾至今，鄰近埤塘的土地利用以農業為主，過去因觀念不足，農業活動產生的污染與外來種入侵，使水生植物種類及數量驟減，而後荒野保護協會進駐與政府部門對環境與生物多樣性的重視，致力於復育及保護當地珍貴稀有物種，期望營造一個生產、生活、生態的永續環境。目前主埤塘有相關單位進行水質監測，同時亦對周遭環境的動植物等生態環境進行調查，唯缺少較大尺度的水質資料收集與分析研究，因此本篇研究著

重於 1) 整個雙連埤地區水體的 DIN 濃度及其組成，2) 探討土地利用與 DIN 濃度及其組成之關係。

## 方法

### 一、研究區域

雙連埤位於宜蘭縣員山鄉湖西村，為粗坑溪水源頭之一，集水區面積約為 297.5 ha，海拔高度約為 470-810 m，埤塘面積約為 17 ha，原雙連埤可分為上、下埤，於日治時期開挖東西向及南北向各一條的對外水路，將埤水向外流放，使下埤陸化種植農作，現今周邊私有土地多種植農作物，包括紅菜、南瓜、番薯、高麗菜、青蔥等作物，其中以紅菜為最大宗。主要土地利用類型可區分為森林、農作地、建物、果園、水體 5 類。雖雙連埤附近 3 處流量站平均值(西門橋、福山一號橋、蘭陽橋)顯示濕季(5-10 月)的流量大於乾季(1-4, 11-12)，但於雙連埤氣象站資料顯示乾濕季降雨量僅差 856 mm，乾濕季差異較不明顯 (表 2)。

### 二、水體採樣與分析方法

本次研究分別於雙連埤地區溪流水與灌排水採樣，共設置 15 個採樣點(圖 1)，採樣時間為 2019 年 4 月至 2020 年 3 月，除了部分採樣點在乾季時無地表水採取，採樣頻率皆為每月兩次。利用瓢掬法取水樣 500 mL 後，盡速送至實驗室進行水化學分析。水樣抵達實驗室後，將水樣以 0.45  $\mu\text{m}$  玻璃纖維濾膜 (Gelmanscience GN-6 grid 0.45- $\mu\text{m}$  sterilized filter paper, Germany) 過濾後，濾紙以 105  $^{\circ}\text{C}$  烘乾後秤重以定量懸浮質 (Suspended solid, SS) 濃度。濾液以離子層析儀 (Metrohm IC system, Switzerland) 測定  $\text{NH}_4$ 、 $\text{NO}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 。

### 三、土地利用調查

先以農航所 2017 年正射影像圖找出雙連埤周邊範圍有栽植或利用情形土地予以數化(造林地除外)，數化筆數共計 221 筆，調查方式同時以空拍機及地面調查並行，先以人工判識方式逐筆判釋無人機產製數值資料確認農作及非農作項目，再進行人工現場調查方式復查所有項目。各子集水區土地利用以森林為主(63-100%)；其次為農業，其中子集水區 SLP-07 以農業為主(79%)，森林為其次(21%)，SLP-14 為雙連埤主埤塘，水體佔 100% (表 1)。

## 結果與討論

從土地利用與氮濃度的關係圖(圖 2)可發現農業與  $\text{NH}_4$  有較高的相關性(Pearson's correlation coefficient,  $p=0.91$ )，而 DIN 及  $\text{NO}_2$  則呈中度相關(相關係數分別為 0.41 及 0.63)， $\text{NO}_3$  較無相關( $p=0.18$ )。其中 SLP-07 的  $\text{NH}_4$  濃度(11.29  $\mu\text{M}$ )高於其他子集水區數倍，而此子集水區亦是農業土地利用佔比最高者，顯示農業活動對  $\text{NH}_4$  的排放影響甚大，本次試驗研究採樣點多與農地相鄰，且集水區相對小，施用的氮肥多數未經過硝化

菌的轉換，因此  $\text{NH}_4$  及  $\text{NO}_2$  較高，若從最後出水口 SLP-10 的樣點濃度來看，DIN 多以  $\text{NO}_3$  的形式溶於水中， $\text{NH}_4$  及  $\text{NO}_2$  經由硝化作用及稀釋作用後的濃度已降低許多。另外逆端源分析結果亦顯示  $\text{NH}_4$  主要來源為農業土地利用。森林與  $\text{NH}_4$ 、 $\text{NO}_2$  呈負相關，森林常被做為緩衝帶(buffer zone)擁有淨化水質功能(吳榮斌 & 羅紹麟，1999)，能夠轉化與吸收農業活動產生的營養鹽，森林土壤中的  $\text{NH}_4$  常被植物、微生物吸收利用或固定於土壤經硝化作用逐次轉為  $\text{NO}_3$ ，因此  $\text{NH}_4$  及  $\text{NO}_2$  在森林的環境中濃度極低，如 SLP-03 及 SLP-04 測值皆為 0，另外以全域平均(global mean,GM)與流量加權平均(flow weight,FW)計算森林對於  $\text{NH}_4$  排放皆為負值，可將森林對  $\text{NH}_4$  視為吸收狀態，而  $\text{NO}_3$  在不同計算方式則呈現釋出與吸收相反結果，一般森林為  $\text{NO}_3$  輸出來源之一 (Huang et al., 2012)，亦可能受到來自大氣沉降或是鄰近農業活動肥料中氨氣逸散等影響。農業地平均對雙連埤地區貢獻約  $186 \mu\text{M}$  的  $\text{NO}_3$  濃度，相當於  $6,050 \text{ kg km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  的負荷量；水體平均可去除  $263 \mu\text{M}$  的  $\text{NO}_3$  濃度，相當於  $8,546 \text{ kg km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。

SLP-03、04 的監測結果  $\text{NO}_3$  平均濃度分別為  $33.97$  與  $21.14 \mu\text{M}$ ，與福山植物園內天然闊葉林覆蓋的哈盆溪平均  $35.98 \mu\text{M}$  (未發表)相近，表示此子集水區受農業活動的影響較小。馬路、建物可間接表示都市化程度與人口數量，Shih 等(2016)研究顯示 DIN 的濃度與都市面積比例及人口數量呈現高度相關( $\rho > 0.8$ )，但在本次研究相關性相對較低，表示本區域水質受家庭廢水排放所污染程度較低。根據內政部雙連埤重要濕地保育利用計畫調查資料顯示民國 88 年有 37 戶人家居住，至今剩下不到 25 戶，且多為老農戶從事農作，在人口流失的情形下，水質所受的影響相較於城市也較微小。雖然  $\text{NO}_2$  與馬路、建物呈中度相關(相關係數分別為 0.45、0.43)，但其測值皆小於  $1 \mu\text{M}$ ，接近天然水體。

雙連埤主埤塘(SLP-14)與周邊灌排水相比，其 DIN 濃度相對較低許多，原因可能有二，一為雙連埤周遭多為天然植生覆蓋，擁有良好的緩衝效果，二為訪談鄰近雙連埤的農主，其擁有較多的環境保護意識，施肥與用藥都有控制，因此初步來看主埤塘較無氮污染的情形。然  $\text{NO}_3$  常以地下水的形式或隨強降雨產生的地表逕流進入水體中，此部分需投入相對的人力與物力進行監測調查，才能進一步探究。

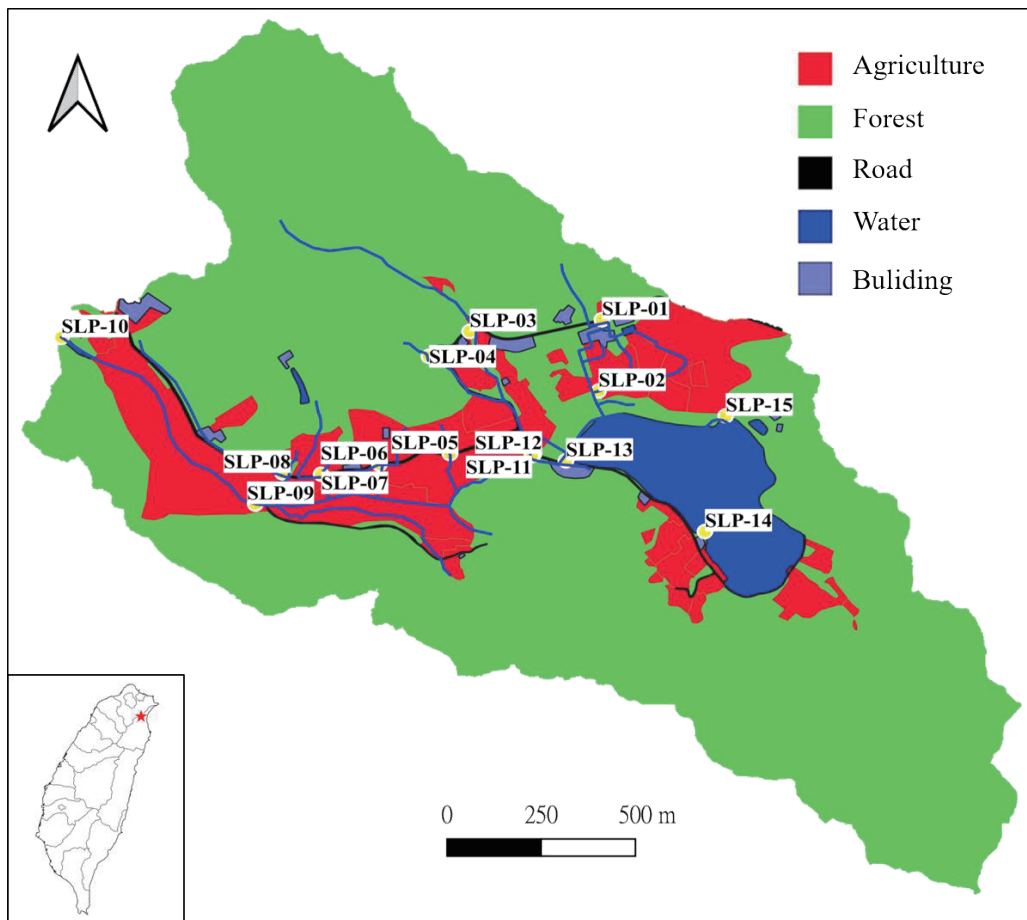


圖 1 雙連埤採樣與土地利用位置圖。

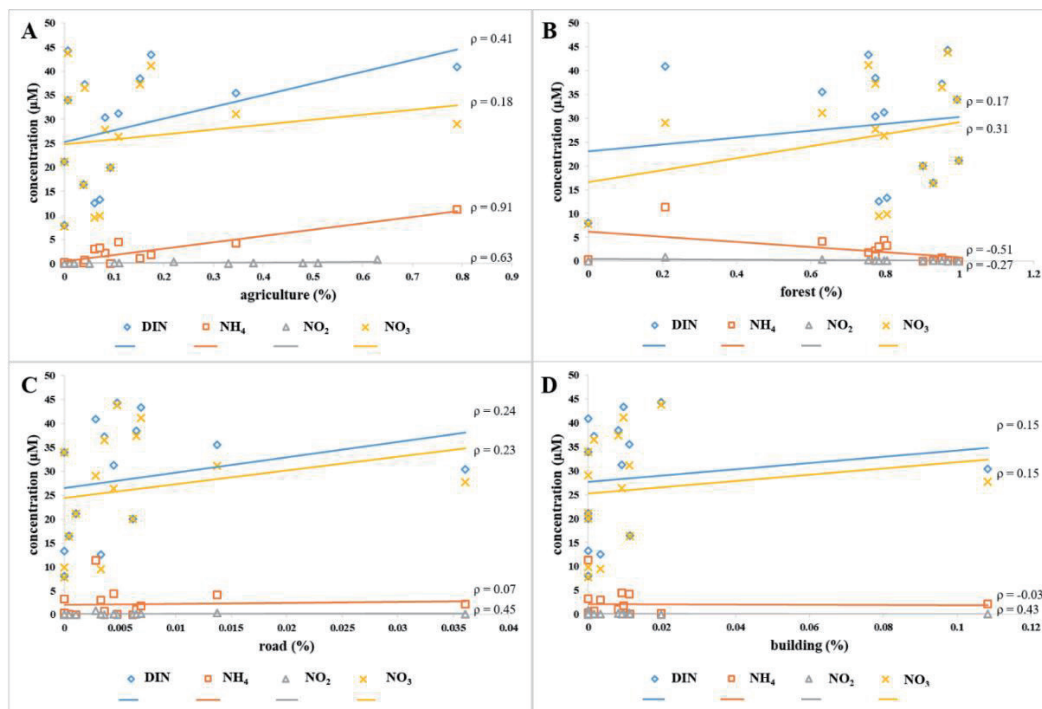


圖 2 土地利用百分比與 DIN、NH<sub>4</sub>、NO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub> 之關係圖。A : agriculture、B : forest、C : road、D : building。ρ means Pearson's correlation coefficient between concentration and land-use.

表 1 各子集水區土地利用面積比例表

site	Area (ha)	Land-use percentage				
		agriculture	forest	road	water	building
SLP-01	8.7	1%	97%	0%	0%	2%
SLP-02	2.6	8%	77%	4%	0%	11%
SLP-03	43.4	1%	99%	0%	0%	0%
SLP-04	9.4	0%	100%	0%	0%	0%
SLP-05	2.2	9%	90%	1%	0%	0%
SLP-06	4.9	35%	63%	1%	0%	1%
SLP-07	0.7	79%	21%	0%	0%	0%
SLP-08	8.4	4%	93%	0%	2%	1%
SLP-09	264.3	15%	77%	1%	6%	1%
SLP-10	297.5	17%	76%	1%	5%	1%
SLP-11	195.9	11%	80%	0%	8%	1%
SLP-12	57.2	4%	95%	0%	0%	0%
SLP-13	102.8	6%	78%	0%	15%	0%
SLP-14	17.0	0%	0%	0%	100%	0%
SLP-15	0.3	7%	80%	0%	12%	0%

表 2 鄰近雙連埤之流量站與雨量站測值

site	Discharge (2019)			Discharge (2017-2019)			Rain (2019)		
	annual	wet*	dry	annual	wet	dry	annual	wet	dry
	mm yr <sup>-1</sup>	mm season <sup>-1</sup>	mm season <sup>-1</sup>	mm yr <sup>-1</sup>	mm season <sup>-1</sup>	mm season <sup>-1</sup>	mm yr <sup>-1</sup>	mm season <sup>-1</sup>	mm season <sup>-1</sup>
雙連埤	2808	1730	1078	2773	1768	1006	3360	2108	1252

ps: Wet season: 5 月至 10 月底; dry season: 11 月至隔年 4 月。

表 3 各子集水區 DIN、NH<sub>4</sub>、NO<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 平均濃度 (μM)

site	DIN	NH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>
SLP - 01	44.30	0.16	0.33	43.81
SLP - 02	30.39	2.15	0.48	27.76
SLP - 03	33.97	0.00	0.00	33.97
SLP - 04	21.15	0.00	0.00	21.14
SLP - 05	19.99	0.02	0.01	19.97
SLP - 06	35.49	4.19	0.22	31.08
SLP - 07	40.94	11.29	0.63	29.02
SLP - 08	16.44	0.12	0.02	16.30
SLP - 09	38.44	1.03	0.11	37.30
SLP - 10	43.40	1.85	0.38	41.18
SLP - 11	31.26	4.43	0.51	26.32
SLP - 12	37.28	0.75	0.05	36.48
SLP - 13	12.55	2.98	0.02	9.55
SLP - 14	8.04	0.29	0.00	7.75
SLP - 15	13.30	3.29	0.10	9.91

## 引用文獻

- 吳榮斌、羅紹麟 (1999) 森林緩衝帶對水質改善效益之評估：以德基水庫為例。林業試驗所研究報告季刊 21(4)：47-56。
- 劉瓊霏、葉學文 (2001) 氮穩定同位素與森林生態系。林業研究季刊 23(3)：91-101。
- Foley JA, et al. (2005) Global consequences of land use. *Science* 309(5734):570–574.
- Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., Boyer, E. W., Howarth, R. W., Seitzinger, S. P., Asner, G. P., Cleveland, C. C., Green, P. A., Holland, E. A., Karl, D. M., Michaels, A. F., Porter, J. H., Townsend, A. R., and Vorosmarty, C. J. (2004) Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry* 70 : 153–226.
- Huang, J. C., Lee, T. Y., Kao, S. J., Hsu, S. C., Lin, H. J., and Peng, T. R. (2012) Land use effect and hydrological control on nitrate yield in subtropical mountainous watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(3) : 699.
- Huang, J.C., Lee, T.Y., Lin, T.C., Hein, T., Lee, L.C., Shih, Y.T., Kao, S.J., Shiah, F.K., Lin, N.H. (2016) Effects of different N sources on riverine DIN export and retention in a subtropical high-standing island. *Taiwan. Biogeosciences* 13 : 1787-1800.
- Lee, T. Y., Huang, J. C., Kao, S. J., and Tung, C. P. (2013). Temporal variation of nitrate and phosphate transport in headwater catchments: the hydrological controls and land use alteration. *Biogeosciences* 10(4) : 2617-2632.
- McKenzie, V.J., and Townsend, A.R. (2007). Parasitic and infectious disease responses to a changing nitrogen cycle. *Eco Health* 4 : 384–396.
- Seitzinger, S. P., Mayorga, E., Bouwman, A. F., Kroeze, C., Beusen, A. H. W., Billen, G., and Harrison, J. A. (2010) Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends. *Global Biogeochemical Cycles* 24(4).
- Shih, Y. T., Lee, T. Y., Huang, J. C., and Kao, S. J. (2016) Apportioning riverine DIN load to export coefficients of land uses in an urbanized watershed. *Science of the Total Environment*. 560 : 1-11.
- Tilman D, Balzer C, Hill J, Befort BL (2011) Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc Natl Acad Sci USA* 108(50):20260–20264.

# 以氣候資料為基礎的臺灣山地森林植群分布模型

林奐宇<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> 行政院農業委員會林業試驗所植物園組，100 台北市中正區南海路 53 號。

\* 通訊作者，E-mail: hylin@tfri.gov.tw。

## 摘要

氣候與森林植物的分布緊密相關，而多項研究也證實，臺灣山地的帶狀植群分化、以及部分泛域植群類型的分布，均與氣候條件高度相關，尤其受到溫度與年間降水分配差異的影響 (Su 1984; Li et al., 2013)。為瞭解臺灣森林植群與氣候的關係，進一步建立森林植群氣候棲位資訊，以及推估氣候變遷的可能影響，本論文整合臺灣既有植群調查及長期氣候資料，對於預測森林植物現生與未來分布的流程方法進行探討，作為探索臺灣森林未來分布變遷之基礎。

## 緒言

相較於傳統航遙測影像判釋或現場調查方法，森林植群氣候的棲位模擬預測，是相對簡易而迅速獲得森林植群空間分布資訊的方法。本論文使用林務局國家植群多樣性調查計畫樣區資料，以及李靜峯等人建立之森林分類架構 (Li et al., 2013)，經由 *clim.regression* (Lin et al., 2018) 產生各森林類型之氣候幅度，再利用隨機森林方法，建立 13 種與氣候相關森林類型的棲位模型並完成現生分布預測。依據 3817 個樣區交叉驗證，隨機森林對於現生植群分布預測之平均錯誤率為 6.59%，與地形高度擬合，並反映出不同森林類型交會帶之過渡現象。本論文證實高解析度、高準確度的氣候資料，配合野外調查樣本及充分的機器學習訓練，可提供良好的植群現生分布資訊，並瞭解與各種植群類型地理分布相關的氣候因子 (Lin et al., 2020)。(本研究已發表於 *Applied Vegetation Science* 23: 239-253，相關細節請參閱 DOI: 10.1111/avsc.12485)

## 方法

### 一、動態氣候降尺度模型與高解析氣候圖層之產製

氣候資料是生態研究的重要基礎，然而一般泛用氣候圖資之空間解析度以數公里至數十公里不等，難以反映山區起伏地形導致的氣溫與降水的劇烈變化。Lin 等人 (2018) 利用臺灣氣候變遷推估與資訊平台 (TCCIP) 5 公里網格氣候資料 (Weng and Yang, 2012)，經動態局部迴歸方法獲得區域範圍之海拔遞減率，作為內插校正參數，於 R 軟體設計一套自由尺度化之氣候降尺度模型，命名為 *clim.regression*。經 15 處不同海拔氣象測站實測驗證，*clim.regression* 推估月尺度氣候之平均絕對誤差為 0.56°C (月均溫)、0.79°C (月均低溫)、0.80°C (月均高溫) 及 36.26 mm (月累積降水)，改善了 TCCIP 原始資

料 54.6%–66.7% 的誤差。*Clim. regression* 共可針對歷史年度 (1960–2009) 及三個未來階段產製 73 種氣候因子，其自由尺度化、高準確度的特色，極適合在山地氣候與生態關係研究應用，為本研究採用之氣候資料來源。並選取其中 57 組氣候變量 (表 1)，包含月累積降雨、月均溫、最高溫、最低溫、季間氣候變量、溫量指數 (Su, 1984) 及冬季降水率 (Li et al., 2013) 等，作為植群分布模型之預測因子 (predictors)。

## 二、臺灣森林植群類型及點位資料

Li 等人於執行我國國家植群多樣性調查計畫期間，完成全臺 8804 個天然林植群樣區現生及歷史調查資料之彙整，並以 Cocktail determination key 及專家輔助方法，建立自動化之植群分類系統。該研究指出，利用 6574 個有效樣區資料，可將全臺分為 21 種天然森林類型，包含 12 種帶狀植群 (本島 11 種及綠島蘭嶼 1 種) 及 9 種非帶狀植群。Li 等人認為，氣候因子是影響帶狀植群分布與分化的重要因子，主導了臺灣大尺度及中性至濕性環境的森林發育與組成；另有 2 種非帶狀植群的形成受到季風的影響，其餘 7 種非帶狀植群則多為演替前期及中期植被，受崩塌干擾、地質、土壤等小尺度因子顯著的影響，或為海岸林等局部地域性植群。本論文延續 Li 等人的研究，萃取臺灣本島 11 種帶狀植群及 2 種受季風影響的非帶狀植群樣區資料，共 13 種森林類型、3824 個樣區 (表 2)，利用 *clim. regression* 對所有樣區產生 AR5 基期 (1986 至 2005 年) 氣候資料。利用此資料作為隨機森林模型訓練樣本，利用 R 軟體的 Random Forest package，計算各森林型與氣候因子的相關性。對每一種森林型，其出現與不出現樣本均經 100 次隨機重複取樣，建置多重隨機森林模型 (multiple Random Forests)，經由多模型合併與綜合評估 (majority voting)，獲得最終組合結果 (RF model ensembles)，進行 13 種森林類型的生態棲位評估與預測。

## 三、統計方法

棲位模型 (niche modeling) 是利用數學或統計過程，建立生物反應 (response) 與特徵值 (predictors) 的關係，據以描述生物的時空間分布或生態過程；藉由新的特徵值導入，例如氣候變遷情境或新地點的氣候與環境參數代入，可依據該統計關係推測生物的可能反應，諸如適存程度、潛在分布、潛在生長量等。然而，在實際狀況中，生態數據經常是多維 (multi-dimension) 的，而反應變量與特徵值可能具有連續特性、亦可能為離散特性，特徵值間也可能存在複雜的相互作用 (例如共線性)，且需解釋的生態關係可能為非線性，極為複雜，而非傳統的迴歸分析等方法能夠處理。

隨機森林 (Liaw and Wiener, 2012) 是近年一個發展迅速的方法，以決策樹 (decision tree) 為基礎，經由隨機而多重的決策樹組建與集成 (ensemble)，可以有效解決上述問題，並包含同時處理分類 (classification) 與迴歸 (regression) 的能力。決策樹是數據探勘常用的一種方法，以資料母群體為根節點，在每一層的分支點對各因子進行變異數分析，找出變異量最大的變項作為分割準則。在這個方式的迭代進行下，將獲得樹型結構，樹中每個節點表示某個決策因子與其決策門檻值，而每個二元分支代表該決策對應之資

料屬性值。最後，沿著根節點、分支點至枝條末端葉節點的過程，描述出了一組決策程序對應之數值分布或資料分類結果。

隨機森林則可視為一個包含多個決策樹的分類器：利用自助法（bootstrap）重複抽取樣本及變量組成訓練資料集（training dataset）與建構決策樹的多次重複過程，將各決策樹結果進行眾數計算（voting），經由合併每棵樹的預測結果來減少預測的方差，提高在測試資料集（testing dataset）的性能表現，是機器學習法（machine learning）用於分類和迴歸的最成功的模型之一。

雖然在類別資料的分析與應用上，尤其是物種出現與否的預測，隨機森林的訓練資料集需要同時具備出現與不出現紀錄（presence-absence data），造成建置訓練資料的些許限制，然而，這個方法通常被認為有下列優點（Zhang et al., 2014）：

1. 自助法過程引入隨機特性，對於變量及樣本進行重複取樣，使得隨機森林模型不容易陷入過擬合，在預測應用時具有較高的彈性，且具有較好的抗噪能力。
2. 能夠處理高維度的資料，不需進行變量篩選，對資料集的適應能力強：既能處理離散型資料，也能處理連續型資料。尤其面對大數據集，此方法可以處理成千上萬的輸入變量，即使預測變量數量超過觀測值數據也同樣有效。
3. 對於不平衡數據集的適應能力佳，可以得到變數重要性排序，對多元共線性不敏感。
4. 訓練完成的模型可進行保存，並擴展至未給予類別標籤的數據，對該資料集進行非監督分類，達到預測的效果。

依據隨機森林原理，針對本研究資料建立分析流程如圖 1。針對單一森林型，分別建立「出現」與「不出現」資料集，由於一般生態調查數據經常存在「不出現資料」遠高於「出現資料」的狀況，因此藉由隨機抽樣過程降低訓練資料集內「不出現資料」的比重，以 absence/presence ratio 介於 1 至 2 間為原則（Chen et al., 2004），以顧及樣本平衡及提高隨機森林的準確率（Breiman, 2001; Rehfeldt et al., 2006）。

## 結果與討論

隨機森林模型結果顯示，不同森林類型的現狀分布，分別受到不同的氣候因子影響（表 3）。整體而言，亞高山針葉林至亞熱帶森林（C1A01-C2A08）的分布與溫度因子有較高的相關：例如亞高山針葉灌叢及森林（C1A01）及冷杉-鐵杉上部山地針葉林（C1A02）之重要氣候因子均集中於春季至夏季的氣溫變量；檜木林以下的各種森林型則受到溫度及雨量因子的共同影響，但仍以溫度為主，其累積重要性約為整體模型的 60% 以上。與熱帶森林（C3A09-C3A11）分布相關的氣候因子則與亞高山及亞熱帶森林不同，以雨量所佔的影響程度較高。

以亞高山針葉灌叢及森林（C1A01）、冷杉-鐵杉上部山地針葉林（C1A02）為例，影響這兩型森林適存度的主要氣候因子為生長季起始階段的氣溫（3 月至 6 月的月均高溫），顯示高海拔植物的適存度與夏季溫度、尤其是生長季剛開始階段的溫度因子高度相關；隨海拔降低至檜木山地霧林（C2A03）、水青岡山地落葉霧林（C2A04）等溫帶型森林時，影響植群適存的關鍵氣候因子則轉移以冬末春初之氣溫為主（12 月至 2 月的

月均溫及月均高溫)，可能與多數溫帶物種度冬的冷積特性有關。櫟屬山地闊葉林（C2A05）以降至榕楠山麓闊葉林（C2A08）等亞熱帶山地闊葉林的關鍵氣候因子相對複雜而多樣，可能與亞熱帶生態系內物種多樣性及群落複雜度較高有關。本研究採用了較高層級的植群分類單元做為隨機森林的訓練樣本，雖然其下尚包含細部植群單元，但現階段僅分析產出高層級單元的氣候棲位特徵，並未建置細部植群單元的棲位模型，故在亞熱帶植群帶的分析結果獲得相對複雜而眾多的氣候因子。熱帶森林部分，表 3 顯示其適存環境與降水具有高度相關，氣溫因子的重要性則大幅降低。研判熱帶森林主要分布在氣候溫暖的南部地區，四季氣溫均高於植物生長的最低限度，不容易成為生物分布的限制因子；反而是熱帶森林終年溫暖多雨的特徵，在隨機森林的變量組成中被清楚地顯現出來，尤其是充足的春季至夏初降水，是影響熱帶森林分布的關鍵因子。

圖 2 則為利用隨機森林模型，以 100 公尺解析度，預測臺灣本島各種主要森林類型的潛在分布，經 3 分之 1 袋外樣本驗證，顯示模型錯誤率為 6.59%。如將圖 2 套入立體環境展示，則可呈現明顯的山地森林垂直分帶現象（<https://reurl.cc/Ezz5q0> 及 <https://reurl.cc/Q33K1M>，或參照文末二維條碼），顯示經由 *clim.regression* 產生與地形相符的氣候推估資料，代入生態棲位模型後，可獲得與現生狀況高度相符的垂直植被分帶模擬效果。

表 1 利用 *clim.regression* 產生之 57 組氣候變量，為本研究推估臺灣植群分布的預測因子。



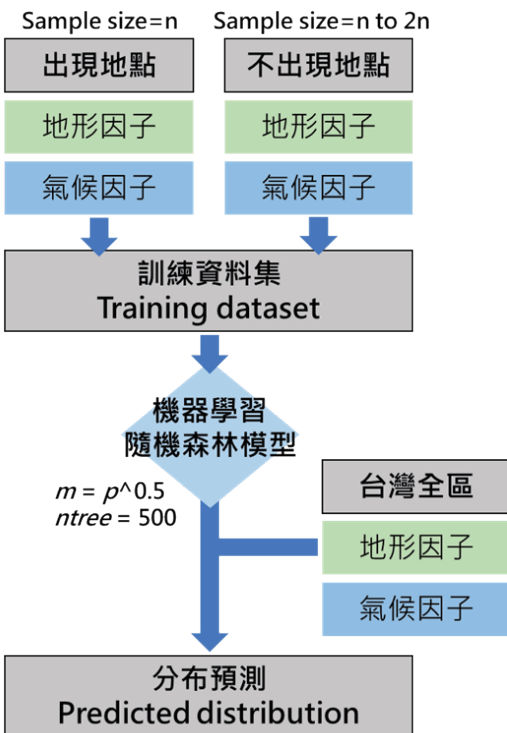
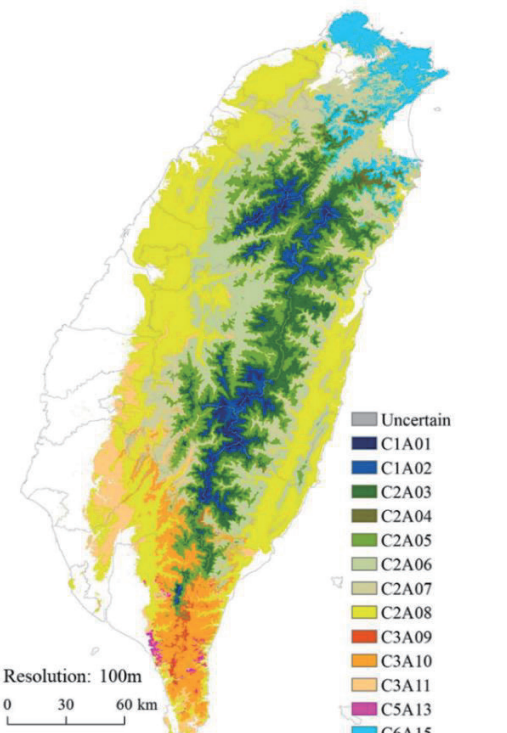
氣候因子	定義說明
Monthly precipitation (PPT1 to PPT12)	
Mean annual precipitation (MAP)	
Mean summer precipitation (MSP)	Summation of precipitation from May to September
Ratio of winter precipitation (WPR)	$(PPT12+PPT1+PPT2)/MAP$ (Li et al., 2013)
Mean monthly minimum temperature (Tmin1 to Tmin12)	
Mean monthly temperature (Tave1 to Tave12)	
Mean annual temperature (MAT)	
Mean monthly maximum temperature (Tmax1 to Tmax12)	
Temperature difference (TD)	Tave7 minus Tave1
Annual heat:moisture index (AHM)	$(MAT+10)/(MAP/1000)$
Summer heat:moisture index (SHM)	$(Tave7)/(MSP/1000)$
Warmth index (WI)	Annual summation of mean monthly temperature higher than 5°C (Su, 1984)
Precipitation deficiency (PD)	Difference between annual potential evapotranspiration and MAP (Su, 1985)

表 2 本研究採用的 13 種與氣候相關的臺灣天然森林類型及對應的樣區數。

森林類型及主要組成樹種		樣區數量
<b>C1</b>	<b>High-mountain coniferous woodlands and forests</b>	
C1A01	<i>Juniperus</i> subalpine coniferous woodlands and forests (亞高山針葉灌叢及森林)	102
C1A02	<i>Abies-Tsuga</i> upper-montane coniferous forest (冷杉-鐵杉上部山地針葉林)	89
<b>C2</b>	<b>Subtropical mountain zonal forests</b>	
C2A03	<i>Chamaecyparis</i> montane mixed cloud forest (檜木山地霧林)	543
C2A04	<i>Fagus</i> montane deciduous broad-leaved cloud forest (水青岡山地落葉霧林)	55
C2A05	<i>Quercus</i> montane evergreen broad-leaved forest (櫟屬山地闊葉林)	1058
C2A06	<i>Machilus-Castanopsis</i> sub-montane evergreen broad-leaved forest (槲楠屬-栲屬亞山地闊葉林)	359
C2A07	<i>Phoebe-Machilus</i> sub-montane evergreen broad-leaved forest (雅楠屬-槲楠屬亞山地闊葉林)	410
C2A08	<i>Ficus-Machilus</i> foothill evergreen broad-leaved forest (榕楠山麓闊葉林)	145
<b>C3</b>	<b>Tropical mountain zonal forests</b>	
C3A09	<i>Pasania-Elaeocarpus</i> montane evergreen broad-leaved cloud forest (柯屬-杜英屬山地霧林)	57
C3A10	<i>Drypetes-Helicia</i> sub-montane evergreen broad-leaved forest (鐵色屬-山龍眼屬亞山地闊葉林)	425
C3A11	<i>Dysoxylum-Machilus</i> foothill evergreen broad-leaved forest (柁木屬-槲楠屬山麓闊葉林)	27
<b>C5</b>	<b>Tropical mountain azonal forests</b>	
C5A13	<i>Illicium-Cyclobalanopsis</i> tropical winter monsoon forest (八角茴香-櫚屬熱帶季風林)	40
<b>C6</b>	<b>Subtropical mountain azonal woodlands and forests</b>	
C6A15	<i>Pyrenaria-Machilus</i> subtropical winter monsoon forest (烏皮茶-槲楠屬亞熱帶季風林)	514
<b>Total</b>		<b>3824</b>

表 3 經隨機森林變量篩選程序，選出各森林類型的重要氣候因子。

森林類型	重要因子及重要值占比
C1A01 亞高山針葉灌叢及森林	Tmax6 (37.6%), Tmax5 (34.2%), Tmax3 (15.3%), Tmax4 (12.9%)
C1A02 冷杉-鐵杉上部山地針葉林	Tmax5 (23.6%), Tmax6 (22.9%), Tmax3 (20.1%), Tave6 (12.0%), Tmax4 (10.1%), Tmax2 (7.3%), Tave5 (3.9%), Tave12 (19.9%), Tmax2 (13.1%), Tave1 (8.2%), Tmax9 (8.1%), Tave6 (5.5%), PPT12 (5.4%), Tmax11 (5.2%), PPT1 (5.0%), TD (4.7%), Tave2 (3.8%), PPT11 (3.7%), WPR (3.5%), PPT6 (3.0%), WI (2.6%), Tave3 (2.5%), Tmax12 (2.3%), PPT10 (1.8%), PPT3 (1.7%)
C2A03 檜木山地霧林	Tmax12 (21.6%), Tmax2 (19.8%), Tmax1 (18.6%), TD (11.9%), PPT1 (8.1%), Tmax11 (8.1%), PPT9 (7.6%), WPR (4.3%), Tave6 (14.1%), Tmin12 (13.4%), Tmax6 (10.2%), Tmin10 (9.6%), Tmax7 (8.2%), Tmax2 (6.7%), PPT1 (5.6%), PPT12 (5.2%), PPT3 (5.0%), PPT9 (4.6%), PPT10 (4.6%), Tave5 (3.3%), Tmin6 (2.8%), Tmax8 (2.7%), PPT11 (2.4%), PPT6 (1.8%)
C2A04 水青岡山地落葉霧林	Tmax4 (15.9%), Tmax10 (13.6%), Tmax11 (10.8%), Tmin6 (9.9%), Tmax6 (7.9%), Tmax5 (7.2%), Tmax3 (7.1%), PPT10 (6.6%), Tmax12 (6.4%), Tmax1 (4.9%), Tmax9 (4.1%), Tmax7 (2.8%), PPT8 (2.7%)
C2A05 櫟屬山地闊葉林	Tmax9 (18.7%), Tave2 (15.1%), Tmax7 (12.4%), PPT3 (10.8%), PPT7 (8.6%), PPT4 (8.3%), Tmax11 (8.0%), Tave9 (7.3%), TD (2.9%), PPT9 (2.8%), PPT8 (2.6%), PPT10 (2.5%)
C2A06 槲楠屬-栲屬亞山地闊葉林	Tmax11 (26.1%), Tmax10 (25.9%), Tmax9 (13.9%), SHM (12.1%), Tmax8 (11.6%), AHM (1.3%), MSP (3.1%), PPT5 (3.0%)
C2A07 雅楠屬-槲楠屬亞山地闊葉林	PPT4 (34.4%), PPT2 (26.4%), PPT3 (20.5%), WPR (9.1%), Tmax9 (5.0%), PPT7 (4.5%)
C2A08 榕楠山麓闊葉林	PPT3 (42.7%), PPT2 (16.0%), TD (13.6%), Tmax1 (10.8%), PPT1 (6.6%), Tmax8 (6.5%), PPT8 (3.9%)
C3A09 柯屬-杜英屬山地霧林	Tave2 (45.7%), Tmax1 (40.4%), PPT5 (13.8%)
C3A10 鐵色屬-山龍眼屬亞山地闊葉林	PPT4 (43.2%), Tmin1 (31.6%), TD (25.1%)
C3A11 柃木屬-槲楠屬山麓闊葉林	TD (48.1%), PPT11 (28.1%), PPT1 (15.1%), PPT12 (8.6%)
C5A13 八角茴香-桐屬熱帶季風林	
C6A15 烏皮茶-槲楠屬亞熱帶季風林	

	
<p>Video 1. Illustration of predicted vegetation map in north Taiwan.</p>	<p>Video 2. The detailed visualization of RF predictions at Snow Mountain region.</p>
	
<p>圖 1. 本研究建立之隨機森林架構，包含模型訓練與分布預測過程。再經多次重新取樣及建模，進行多重隨機森林總和評斷（ensemble）。</p>	<p>圖 2. 依據基礎年期氣候資料，以 100m 為解析度，利用隨機森林模型產製臺灣本島 13 種與氣候相關森林型之潛在分布圖。</p>

## 引用文獻

- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning* 45: 5–32.
- Chen, C., A. Liaw and L. Breiman (2004). Using random forest to learn imbalanced data. University of California, Berkeley.
- Li, C.-F., M. Chytrý, D. Zelený, M.-Y. Chen, T.-Y. Chen, C.-R. Chiou, Y.-J. Hsia, H.-Y. Liu, S.-Z. Yang, C.-L. Yeh, J.-C. Wang, C.-F. Yu, Y.-J. Lai, W.-C. Chao and C.-F. Hsieh (2013). Classification of Taiwan forest vegetation. *Applied Vegetation Science* 16: 698–719. <https://doi.org/10.1111/avsc.12025>
- Liaw, A. and M. Wiener (2002). Classification and regression by random Forest. *R news* 2(3) : 18–22.
- Lin, H.-Y., C.-F. Li, T.-Y. Chen, C.-F. Hsieh, G. Wang, T. Wang and J.-M. Hu (2020). Climate-based approach for modeling the distribution of montane forest vegetation in Taiwan. *Applied Vegetation Science* 23: 239–253.
- Lin, H.-Y., J.-M. Hu, T.-Y. Chen, C.-F. Hsieh, G. Wang and T. Wang (2018). A dynamic downscaling approach to generate scale-free regional climate data in Taiwan. *Taiwania* 63: 245–266.
- Rehfeldt, G. E., N. L. Crookston, M. V. Warwell and J. S. Evans (2006). Empirical analyses of plant-climate relationships for the western United States. *International Journal of Plant Sciences* 167: 1123–1150.
- Su, H.-J. (1984). Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan (II). Altitudinal vegetation zones in relation to temperature gradient. *Quarterly Journal of Chinese Forestry* 17: 57–73.
- Su, H.-J. (1985). Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan (III). A scheme of geographical climatic regions. *Quarterly Journal of Chinese Forestry* 18: 33–44.
- Weng, S.-P. and C.-T. Yang (2012). The construction of monthly rainfall and temperature dataset with 1km gridded resolution over Taiwan area (1960-2009) and its application to climate projection in the near future (2015-2039). *Atmospheric Sciences* 40: 349–369. [In Chinese with English summary.]
- Zhang, L.-L., X.-D. Wang, S.-R. Zhang, P.-S. Liu and T. Wang (2014). The basic principle of random forest and its applications in ecology : a case study of *Pinus Yunnanensis*. *Acta Ecologica Sinica* 34(3): 650–659.

# 都市林在夏季期間的降溫效應初探— 以中和公園及台北植物園為例

劉宇軒<sup>1)\*</sup> 施郁庭<sup>1)</sup> 江曜宇<sup>1)</sup> 王相華<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組，10066 台北市中正區南海路 53 號。

\* 通訊作者，E-mail: yuhsuan0423@tfri.gov.tw。

## 摘要

都市林具有調節溫度的功能，在全球暖化與極端天氣日趨頻繁的今日，其環境保育功能越來越受到重視。我們已知林木對於降低局部溫度有顯著的效果，然而，較少有針對具不同綠化覆蓋形式的都會公園進行比較測定的研究。本研究在夏季期間以樹冠覆蓋程度較低的中和公園及樹冠覆蓋程度較高的台北植物園為研究場址，藉由移動式儀器的實際觀測數據，探討 1)公園內外微氣候差異、2)兩處公園的降溫效益與 3)不同時段溫度變化。經 2020 年 7-8 月(夏季期間)分別於中和公園及台北植物園實地測量微氣候因子的初步結果，中和公園內的林下平均氣溫低於外圍道路 1.7°C；台北植物園內的林下平均溫度低於周邊道路 1.9°C，顯示台北植物園林下的降溫效果比中和公園明顯；就相對濕度而言，兩公園(中和公園、台北植物園)在林下測得相對濕度分別為 76.4%及 76.6%，均高於外圍道路 4.5%及 5.7% (差值)；就風速而言，公園林下的平均風速分別為 0.37 及 0.13 mps，均低於外圍道路 0.58 及 0.88mps。就時段而言，都市林在中午時段的降溫效應大致上較清晨、傍晚明顯。受到氣候變遷及都市熱島效應的影響，都市高溫環境將成為常態現象，如何營造都市林以減緩都市高溫對居民的衝擊，是至關重要的課題。

## 緒言

聯合國發布的 2018 年版《世界城鎮化展望》(2018 World Urbanization Prospects)中指出，目前世界上有 55%的人口居住在城市地區，到 2050 年，這一比例預計將增加到 68%。隨著都市的快速發展，人口集中化的結果，將造成都市中土地使用的需求量增加，其衍生出之都市綠地的減少、街道與建築物的龐大蓄熱量、都市透水性環境的降低...等情況，亦成為都市熱島效應(Urban Heat Island Effect)現象日漸普遍的主因。都市熱島效應主要受到：太陽輻射熱、人為產生的熱源、都市氣候環境等因素所影響，簡單而言造成熱島效應的原因乃城市與郊區能量的蓄存與散失不同所造成(Taha 1997, 陸象豫 2016)。都市熱島效應影響層面深且廣：溫度升高，能源供給壓力增加，日照時數減少，相對濕度減少降水型態改變，都市水患增加。多數植物被不透水的柏油、混凝土等人造建築取代時，同時也改變了土地的物理特性。這些改變使城市地區夜間冷卻效率降低，造成都市熱島效應。在人造熱源的排放加乘下，此效果又更為嚴重。

由於台灣的台北市為盆地地形，在高密度的居住情況及地形效應下，台北市有著相較於其他台灣都市更嚴重的熱島問題，夏季中午至夜晚尤其嚴重。例如：李魁鵬與林憲德(1999)採用移動觀測法，於台南市春季、夏季與冬季，進行都市熱島效應氣溫實測，發現夏季平均熱島強度最大；而在台北市、台中市、台南市與高雄市夏季進行實測的結果顯示，台中市、台南市與高雄市最大熱島強度出現在晚上，分別達 3.2、4.4 與 3.4°C，台北市則出現在中午，熱島強度達 4.9°C。都市林在其中扮演降溫效應的

假說眾多，例如：高樹冠覆蓋的區域傾向於與更大的綠色空間相關聯，而正是這種地面植被與樹冠的結合導致了降溫的增加(Carly 2019)。

都市林具有調節溫度的功能，在全球暖化與極端天氣日趨頻繁的今日，其環境保育功能越來越受到重視。樹木除了提供生態系服務，另一項重要的功能就是降溫，像是樹蔭可以遮蔽陽光直射，太陽輻射中有 7 成紅外光會被樹葉反射，會感覺較涼，加上白天行光合作用會吸收二氧化碳釋放氧氣，固碳作用在都市降溫有顯著的功能。然而，較少研究針對不同綠化覆蓋形式的都會公園進行測定。本研究目的為了驗證都市林在都會區扮演降溫的價值，在夏季期間以中和公園及台北植物園為研究範圍，藉由移動式儀器的實際觀測測數據，探討 1)公園內外微氣候差異、2)兩處公園的降溫效益與 3)不同時段溫度變化。

## 方法

### 一、研究區域概述

本研究以中和公園及台北植物園為範疇，分別將其區分為公園內及公園外，公園內的地景單元為森林，公園外的地景單元為道路。每種區位各取 3 個具代表性的樣點，進行微氣候觀測時以該區位的中心點位為主，並且避開邊緣效應。

中和公園，又稱「四號公園」、「八二三紀念公園」，位於台灣新北市中和區安樂里、中安街與安平路間，東北角並鄰接永貞路，是國立台灣圖書館所在地，面積約 11 公頃，全區位於中和區，而除了西南側以外，周邊亦與永和區相鄰或接近，目前是雙和地區最大的公園(圖 1 右)。

台北植物園，位於台北市中正區，佔地約 8.2 公頃，隸屬於行政院農業委員會林業試驗所，是一個備有完整植物蒐集紀錄文件，並進行科學研究、保育、展示及教育的場所。(圖 1 左)。

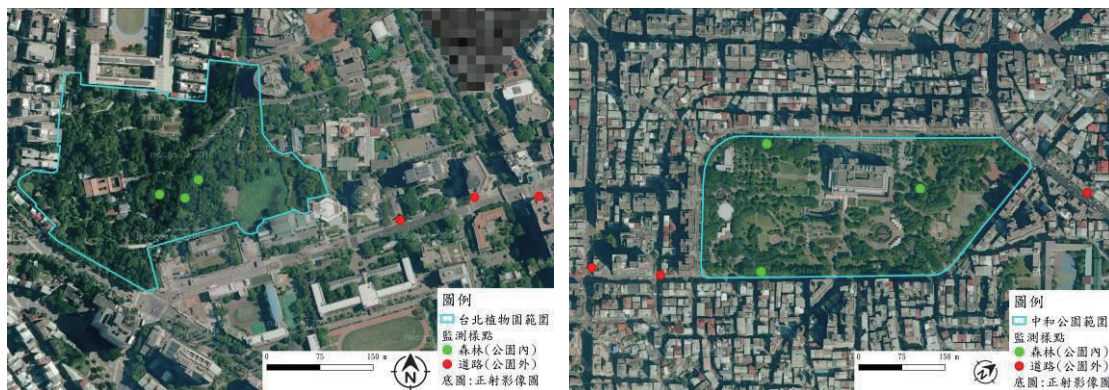


圖1.研究區域位置圖

### 二、取樣方式

一般都市環境氣候的觀測方式有下列四種：固定式氣象監測站、移動觀測法、衛星遙感探測、電腦程式模擬(林憲德等 1999、2005，歐陽嶠暉 2001，李明晃 2004，何明錦 2011，呂昱銘等 2013)。本研究採用人員移動觀測方式進行，觀測儀器使用熱指數氣象追蹤器(型號 Kestrel 5400)(Winston 2016)，測量氣溫、相對濕度、風速及 WBGT(Wet Bulb Globe Temperature，濕球黑球溫度，綜合溫度熱指數)等微氣候因子，

並以 1.5 公尺為測量高度。為確立觀測資料的準確性及代表性，觀測期間內選擇天氣晴朗、低雲量、低風速天候狀況的實測日進行測量(2020 年 7 月 15 日及 8 月 13 日於台北植物園；7 月 23 日及 8 月 14 日於中和公園)，觀測時段從上午 6 點至晚上 10 點，儀器設定間隔 10 秒記錄 1 次。兩處公園內外各取 3 個重複樣點(如圖 2)，其中道路樣點間隔 70-80 公尺，森林樣點則是選擇樹冠鬱閉良好的林下。分兩組人員同時進行，每個樣點於偶數整點(06、08、10、12、14、16、18、20 共 8 次)開始觀測，各項微氣候資料持續自動記錄 15 分鐘後，移動至下一個樣點，起迄時間均須保持同步。

WBGT 是衡量由於溫度，濕度，風速以及可見熱輻射的綜合影響而產生的人類熱逆境。室外 WBGT 是根據自然濕球溫度、黑球溫度及乾球溫度的加權總和得出的。

$$\text{計算公式 WBGT (}^{\circ}\text{C)} = 0.7 * T_{wb} + 0.2 * T_g + 0.1 * T_a$$

$T_{wb}$ ：自然(氣象)溼球溫度(從 RH、露點溫度衍生出來)； $T_g$ ：黑球溫度； $T_a$ ：氣溫



圖2.中和公園及台北植物園微氣候觀測樣點

## 結果與討論

表 1 呈現中和公園及台北植物園內外微氣候(氣溫、相對濕度、風速及 WBGT)差異；兩都市林相對鄰近道路的降溫效益與不同時段溫度變化三種研究尺度(觀測時間共有 8 個時段，本次僅取三個重要時段進行討論)。

表1.夏季期間中和公園及台北植物園微氣候因子觀測一覽表

區域	地景	時段	溫度(°C)	相對濕度(%)	風速(mps)	WBGT(°C)
中和公園	森林	6-7	27.0	82.4	0.2	25.4
		12-13	33.3	60.9	0.6	29.2
		18-19	26.1	95.7	0.1	25.7
	道路	6-7	28.0	76.2	0.5	25.8
		12-13	34.7	56.5	0.8	30.1
		18-19	28.0	92.3	0.4	27.2
台北植物園	森林	6-7	27.6	80.5	0	25.8
		12-13	33.2	63.4	0.3	29.9
		18-19	28.5	85.9	0.1	27.2
	道路	6-7	29.1	75.1	0.5	26.7
		12-13	35.3	56.6	1.3	33.3
		18-19	29.2	85.9	0.6	27.8

備註:WBGT(Wet Bulb Globe Temperature，濕球黑球溫度或稱綜合溫度熱指數)

### 一、公園內及公園外微氣候差異

#### (一)風速：

中和公園林下及道路平均風速分別為 0.4 mps (0.1 - 0.7)、0.6 mps (0.4 - 0.8)，道路高於林下約 0.2 mps。台北植物園林下及道路平均風速 0.1 mps (0.02 - 0.27)、0.9 mps (0.5 - 1.5)，道路高於林下約 0.8 mps。

整體而言公園外圍道路的的平均風速高於林下，推論因為是森林枝葉交錯阻擋風的效應，道路因受空氣流通且無遮蔽。

#### (二)相對濕度：

中和公園林下及道路平均相對濕度分別為 76.4% (59.3 - 95.7)、71.9% (54.5 - 92.3)，林下高出道路約 4.5%。台北植物園林下及道路平均相對濕度分別為 76.6% (63.4 - 88.0)、71.0% (56.6 - 87.9)，林下高出道路約 5.6%(圖 3)。

整體而言公園內的林下的平均相對濕度高於外圍道路，可推論是因為林下內有眾多水氣來源(例如湖泊、土壤、植物的蒸發或蒸散作用)，使空氣中飽和的水分子量較高，提升林內比熱以降低溫度，致使相對濕度較高。道路因收太陽輻射溫度較高，空氣流通且無遮蔽，致使道路的相對濕度低於林下。

#### (三)WBGT：

中和公園林下及道路平均 WBGT 分別為 27.3°C (25.4 - 29.2)、28.8°C (25.8 -

31.0)，林下低於道路約 1.5°C。台北植物園林下及道路平均 WBGT 分別為 27.8°C (25.8 - 30.0)、29.8°C (26.7 - 33.3)，林下低於道路約 2.0°C。

整體而言公園外圍道路的平均 WBGT 高於林下樣點，推論其原因為道路受太陽輻射導致溫度升高，林下受到枝葉遮蔽及吸收太陽輻射。兩處公園外圍道路的平均 WBGT 高於林下，其主因為道路鋪面為混凝土材質，地表水分蒸發較少，使的大量吸收太陽輻射能量，造成溫度上升現象。張效通(2011)的報告中提及，大型公園綠地週邊也是輻射冷卻較佳處，如台北植物園。這些大量綠化面積，由於遮蔭樹及蒸散的樹木，有效地改善都市熱島現象。

## 二、中和公園及台北植物園之降溫效應比較

中和公園林下及道路平均溫度 29.6°C (26.1 - 33.3)、31.3°C (28.0 - 34.7)，林下的平均溫度低於道路約 1.7°C。台北植物園林下及道路平均溫度 30.0°C (27.6 - 33.2)、31.9°C (29.1 - 35.3)，林下的均溫低於道路約 1.9°C(圖 3)，因此兩都市林對道路的降溫效果差異約 0.2°C。這是受到兩都市林本身結構完整程度的影響林下微氣候環境(Zellweger et al., 2020)產生差異。例如，在都市喬木降溫效果研究時表明：遮蔭樹可降低氣溫 0.64~2.52 °C、降低表土溫度 3.28~8.07°C，遮蔭樹之葉色、葉片厚度、葉表面質感、枝葉密度皆會影響降溫效果(林寶秀 2010)。因此都市林的功能仍須考量該處森林結構完整程度，這並非數年可以達到的功效，若管理單位能夠在設立都市林時，考慮森林結構對微氣候影響，方能盡量提昇都市林增強都市熱島效應的功能。

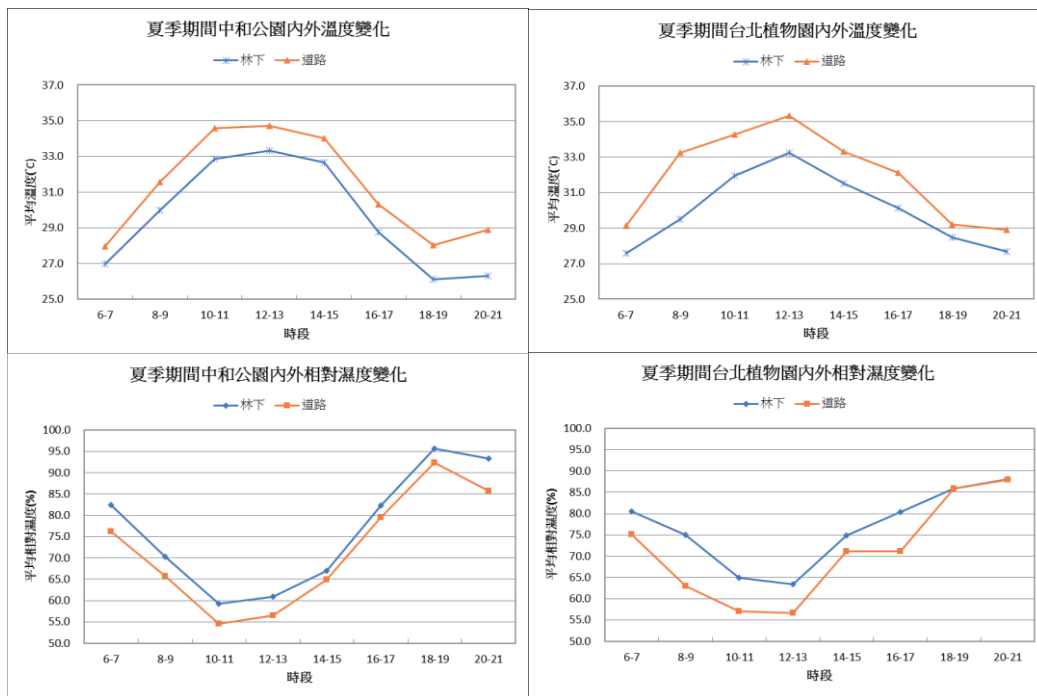


圖3夏季期間中和公園及台北植物園不同地景之溫度及相對濕度變化

## 三、公園內、外於不同時段之溫度變化

根據前人研究都市熱島效應在不同都會區有不同強度，因此本研究亦考慮了解都市林在不同時間降低周圍環境溫度的能力，結果顯示於表 1。

### (一)上午6-7點時段

中和公園林下及道路平均溫度分別為 27.0 及 28.0°C，林下低於道路 1.0°C；台北植物園林下及道路平均溫度分別為 27.6 及 29.1°C，林下低於道路 1.5°C。

### (二)上午12-13點時段

中和公園林下及道路平均溫度分別為 33.3 及 34.7°C，林下低於道路 1.4°C；台北植物園林下及道路平均溫度分別為 33.2 及 35.3°C，林下低於道路 2.1°C。

### (三)下午6-7點時段

中和公園林下及道路平均溫度分別為 26.1 及 28.0°C，林下低於道路 1.9°C；台北植物園林下及道路平均溫度分別為 28.5 及 29.2°C，林下低於道路 0.7°C。

以上現地調查結果表明，都市林相對於周遭環境降溫最明顯時間為中午或傍晚時段，兩都會公園的最大降溫時間與降溫程度並不一致。

鑒於本計畫方才起步，尚有許多不明白之處，未來將多方探討都市林降溫效應的程度、最大影響時間、影響因素等議題投入更多心力，配合政府推動與執行國家氣候變遷調適策略及行動方案，俾提供相關單位長期調適措施及經營管理參考依據。

## 引用文獻

林憲德等 (1999) 台灣四大都會區都市熱島效應實測解析(一)。建築學報 31：51-73 頁。

林憲德等 (2005) 台南地區都市規模與都市熱島強度之研究。都市與計劃 32(1)：33-48 頁。

林寶秀 (2010) 植栽綠地降溫效果之研究。博士論文，國立台灣大學園藝所。

何明錦 (2011) 戶外遮蔽因子對微氣候影響之實測與解析。內政部建築研究所協同研究報告：156 頁。

呂罡銘等 (2013) 夏季台北都市區域土地覆蓋與地表輻射熱平衡之關係。都市與計畫 40(4)：385-412。

李明晃 (2004) 都市公園與局地氣溫效應之關係研究—以台北市為例。碩士論文，中國文化大學。

張效通等 (2011) 以都市設計管制方法減緩都市住區熱環境之研究—都市綠地型態對都市熱環境之減緩影響分析(II)(第 2 年)。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。

陸象豫 (2016) 都市熱島效應。林業研究專訊 23(2)：59-61。

歐陽嶠暉 (2001) 都市環境學。台北，詹氏書局。

Carly D. Ziter, Eric J. Pedersen, Christopher J. Kucharik, Monica G. Turner (2019) Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. Proceedings of the National Academy of Scienc-

es 116(15):7575-7580.

Lin, J., C. N. Kroll, D. J. Nowak and E. J. Greenfield (2019) A review of urban forest modeling: Implications for management and future research. *Urban Forestry and Urban Greening* 43:126-366.

Stewart, I (2011) A Systematic Review and Scientific Critique of Methodology in Modern Urban Heat Island Literature. *Int. J. Climatol.* (31):200–217.

Taha, Haider (1997) Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Building* 25:99-103.

Winston T.L. Chow, Siti Nur 'Assyakirin Binte Ali Akbar, Su Li Heng, Matthias Roth (2016) Assessment of measured and perceived microclimates within a tropical urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening* 16:62-75.

Zellweger, F., De Frenne, P., Lenoir, J., Vangansbeke, P., Verheyen, K., Bernhardt-Römermann, M., Baeten, L., Hédli, R., Berki, I., Brunet, J., Van Calster, H., Chudomelová, M., Decocq, G., Dirnböck, T., Durak, T., Heinken, T., Jaroszewicz, B., Kopecký, M., Máliš, F., Macek, M., Malicki, M., Naaf, T., Nagel, T. A., Ortmann-Ajkai, A., Petřík, P., Pielech, R., Reczyńska, K., Schmidt, W., Standovár, T., Świerkosz, K., Teleki, B., Vild, O., Wulf, M., and Coomes, D. (2020) Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science*. 368:772-775, 10.1126/science.aba6880.

## 數位物候學(e-phenology)的監測與應用

張勵婉<sup>1)\*</sup>、陳建文<sup>2)</sup>、鄭美如<sup>3)</sup>、余尚鈺<sup>1)</sup>

1) 行政院農業委員會林業試驗所森林保護組，10066 臺北市中正區南海路 53 號。

2) 行政院農業委員會林業試驗所植物園組，10066 臺北市中正區南海路 53 號。

3) 行政院農業委員會林業試驗所技術服務組，10066 臺北市中正區南海路 53 號。

\*通訊作者，E-mail: liwanc@tfri.gov.tw。

### 摘要

傳統物候學的調查與監測，多仰賴於密集的人工觀察與記錄，但資料獲得常礙於時間和人力有所限制。遠程數位監測物候的新技術，節省過去傳統物候觀察所需耗費大量的人力與時間，係為結合了數位影像辨識、運算和物候學的研究；更將大量影像數據，利用人工辨識及電腦輔助進行智慧學習及運算，強化影像辨識及可信度，提升資料獲取的便利性與正確性；林業試驗所配合國家智慧生態計畫，已建立完整之生態網路監測平台，本研究在已有基礎上，以 2017 年為例，對於臺北植物園荷花池所拍攝的影像，利用 PhenoCam 進行自動判試與分析，發展數位物候(e-phenology)自動辨識與監測，以解決傳統物候學仰賴密集的人工觀察與記錄的調查限制，並提升資料獲取的便利性與正確性。

### 緒言

全世界有關植物物候監測配合長期氣候變遷的研究有許多，例如歐洲的物候攝像機網絡 (European Phenology Camera Network, EuroPhen)、日本的物候觀察眼網絡 (Japanese Phenological Eyes Network, JPEN) 以及陸地生態系統研究網絡 (Terrestrial Ecosystem Research Network, TERN)，近十年來由於人工智慧快速發展，各國家及地區對於結合長期氣候，監測陸地植物生態系的研究也日趨成熟。其中目前發展最為蓬勃的便是 PhenoCam 網絡系統 (<http://phenocam.sr.unh.edu>)；該物候生態網絡系統成立於 2008 年 (Brown, et al., 2016)，係利用固定長期的影像機拍攝影像並儲存，另配合該地區長期的氣象資料，來追蹤美洲和澳洲不同自然生態系統中植被物候的變化 (Richardson, et al., 2018)。

隨著網絡的蓬勃發展及自動監測系統的普及化，台灣各大風景區(不同海拔、不同生態棲地)的影像資料，利用網路攝影機拍攝並上傳即時影像，所提供參訪遊客出行參考已經相當普遍。而除提供即時影像外，如能在拍攝範圍內，擷取各棲地內植物物候的影像，另結合各地區氣象觀測站的氣象資料，定可了解台灣不同地區生態系物候的消長變化與環境的關係。

林業試驗所配合國家智慧生態計畫，102-105 年已建立完整之生態網路監測平台(包含聲音、生景及氣候資料的監測及倉儲)，本研究在已有基礎上，以 2017 年為例，對於臺北植物園荷花池所拍攝的影像，利用 PhenoCam 進行自動判試與分析，發展數位物候 (e-phenology) 自動辨識與監測，以解決傳統物候學仰賴密集的人工觀察與記錄的調查限制，並提升資料獲取的便利性與正確性。

## 方法

### 一、物候監測、傳輸與倉儲

試驗地點為臺北植物園內的荷花池，荷花池長約 115 m，寬約 85 m，池內有種植的荷花(*Nelumbo nucifera*)及另有其他水生植物，包括大萍(*Pistia stratiotes*)、粉綠狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)、布袋蓮(*Eichhornia crassipes*)及人厭槐葉萍(*Salvinia sp.*)等(高瑞卿、洪聖峰，2001)。本研究於荷花池邊長堤上之植物棚架架設監視攝影機(型號：VIVOTEK SD8363E)，攝影排程為每小時啟動，攝影機從起始位置開始，每 90 秒轉動 1 次並拍攝照片，共會轉動 8 次，每次轉動角度 27.5 度，一共拍攝 9 張照片後，再利用無線網路傳輸照片回虛擬機，並利用程式拼接為一張全景照(220 度)，由於拍攝時受天候狀況或直射光線影響，有時全景照片無法順利拼接完成，因此由程式自動檢視拼接完成照片尺寸要大於 4500px\*400px 才會儲存，拼接完成後的全景照片會存於林業試驗所的生態感測開放資料平台。

### 二、物候資料分析

本研究分析工具係利用 PhenoCam 平台所自行開發之程式，PhenoCam 的分析原理為分析照片中被框選位置的 RGB(紅、綠、藍)各像素的相對值(Woebbecke et al., 1995)，計算相對綠度指數(Green chromatic coordinate, Gcc)(Sonntag et al., 2012)，相對綠度指數可有效抑制圖像之間場景照明差異所導致的可變性，因此較 NDVI 指數更佳。當 Gcc 隨時間增加，則表示植被正在生長階段，反之則為枯萎、落葉等階段，由 Gcc 的計算可確實反應出植物隨季節表現的物候狀態。

本研究以臺北植物園荷花池 2017 年為研究對象，下載林業試驗所生態網路監測平台上所儲存之照片，選取每日上午 10-12 時之時段，同時過濾因天氣不佳所拍攝過暗且暗閾值(dark thresh) 15%以上之影像，總計分析影像 1008 張。

## 結果與討論

以 2017 年為例經由 PhenoCam 的分析後，可以得到荷花池相對綠度指數整年每日的變化，如圖 1 所示。荷花池在 2017 年的第 1-90 天，Gcc 大約維持在 0.35，對應 1-3 月的照片中顯示無任何水生植物；第 90-150 天的 Gcc 由 0.35 持續上升接近至 0.45，對應 3-5 月的照片顯示水生植物(主要為荷花)逐漸佔據荷花池；第 150-240 天的 Gcc 持續下降，對應 5-9 月的照片顯示荷花逐漸枯萎，其中 6 月荷花為開花盛季，因此 Gcc 略低於 5 月；第 270-360 天的 Gcc 維持在 0.35，對應 9-12 月的照片顯示荷花枯萎到池內無水的過程。

本研究經由 PhenoCam 所得到的 Gcc 時間分布，確實可以反應 2017 年臺北植物園荷花池植物物候變化。然而，Phenocam 亦有其缺點，如：無法分辨不同物種，此外，Gcc 的計算，亦受照片拍攝品質影響。整體而言，以 PhenoCam 作為中小尺度植物物候的判斷具有一定的準確度，且僅需要固定位置長時間拍攝照片及簡易的軟體操作，更降低了資料蒐集及分析的難度；因此，在遠程數位物候監測分析上，PhenoCam 具有一定的可行性。未來期望能將研究範圍擴展至全台不同植被生態系統中，將收集不同棲地之植物候影像並與氣象資料相結合，可更加了解關於陸域植物生態系統，因應全球氣候變

遷影響生物消長，造成全球碳循環的碳源和碳匯的時空變化。

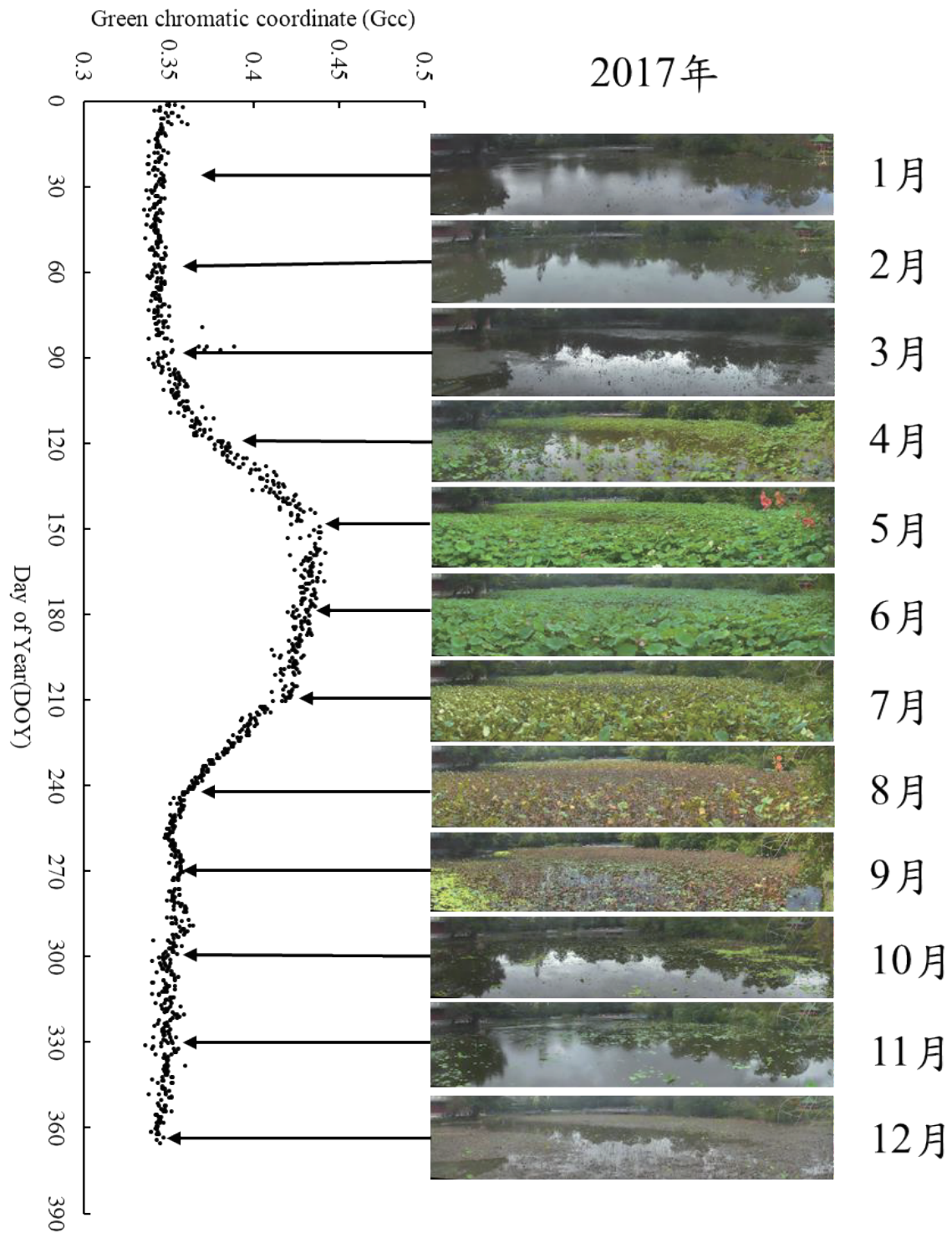


圖 1. 台北植物園荷花池相對綠度指數在 2017 年的變化分布

## 引用文獻

- 高瑞卿、洪聖峰 (2001) 台北植物園水生植物池外來種生物危害之問題與維護研究。農政與農情，107 期。
- Sonnentag, O., Hufkens, K., Teshera-Sterne, C., Young, A. M., Friedl, M., Braswell, B. H., and Richardson, A. D. (2012) Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 152: 159-177.
- Brown, T. B., Hultine, K. R., Steltzer, H., Denny, E. G., Denslow, M. W., Granados, J., and Sánchez-Azofeifa, A. (2016) Using phenocams to monitor our changing Earth: toward a global phenocam network. *Frontiers in Ecology and the Environment* 14(2): 84-93.
- Richardson, A. D., Hufkens, K., Milliman, T., Aubrecht, D. M., Chen, M., Gray, J. M., and Melaas, E. K. (2018) Tracking vegetation phenology across diverse North American biomes using PhenoCam imagery. *Scientific data* 5: 180028.
- Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Von Bargen, K., & Mortensen, D. A. (1995) Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE* 38(1): 259-269.

## A Study of Land Cover Change Trajectory in the Taimali Stream Watershed

Chun-Kuo Yeh<sup>1)</sup> Shyue-Cherng Liaw<sup>1)\*</sup>

---

<sup>1)</sup> Department of Geography, National Taiwan Normal University, 162, HePing East Road, Section 1, Taipei 10610.

\*Corresponding Author, E-mail: liaw@ntnu.edu.tw

---

### Abstract

This study applied both global and local Moran's *I* statistics to analyze the spatial autocorrelation of landslide patches in a natural disturbed watershed in eastern Taiwan. A logistic regression model validated to predict occurrence probability of change trajectory. Results showed that spatial pattern of homogeneous landslide patches presented on small scales; while heterogeneous landslide pattern was on larger scales. Landslide patches had higher positive spatial autocorrelation and indicated that as regional hotspots in study area. After the trajectory calculation and classification, two unchanged and five changed trajectories dominated the study area. The most significant transformation of land cover was from forest to landslide and channel. Among these environmental variables for logistic regression, lithology was the most important spatial determinant for the change trajectories. Curvature and aspect variables were also significant. This spatial statistical model was helpful for predicting the occurrence probabilities of the change trajectories.

### INTRODUCTION

Land cover is one of the most fundamental variables for watershed management and relates to many parts of the human and physical environments (Southworth et al. 2004). Change in land cover can transform biophysical surface features and lead to direct impacts on hydrological cycle, atmosphere, and the ecosystem services (Zomlot et al. 2017; Homer et al. 2020; Talukdar et al. 2020; Yin et al. 2020). Detection of land cover change can contribute vital information for the sustainable development and environmental protection of the watershed. Hence, it is necessary to assess land cover change at various scales for sustainable land management.

This research combines the applications of spatial autocorrelation, trajectory analysis, and logistic regression to provide more spatially explicit and detailed information on land cover change dynamics under frequent natural disturbances, by utilizing FORMOSAT-2 satellite images acquired in 2005, 2008, and 2011 within the Taimali watershed. The main objectives of this study are to (1) assess spatial autocorrelation of landslide patches using global and local Moran's *I* statistics; (2) detect the dynamics of land cover change trajectories under frequent natural disturbances; and (3) establish a spatial statistical model based on logistic regression

for projecting the occurrence probabilities of land cover change trajectories.

## **METHODS**

### **1. Study Area**

The Taimali watershed principally lies in Jinfeng Township, Taitung County of eastern Taiwan. The research area, a total area of 211.5 km<sup>2</sup>, is a typical mountainous watershed dominated by forest, and its elevation ranges from 3 m to 3,090 m at 57.6% average slope. Buildup and farmland account for less than 1.8% of the total study area. They are mostly located in the lower Taimali watershed where Jialan is the only one major settlement with a total population of about 1,400 people. On the other hand, forested land, covering 83.7% of land area, is the predominant land cover type during the study period. Forest chiefly occupies the upper and middle Taimali watershed; where the most notable land cover conversion occurs in relation to forest converting into landslides and channels over the study period. Under the influence of powerful earthquakes and typhoons, the Taimali watershed underwent remarkable land change.

### **2. Image Classification and Accuracy Assessment**

The land cover in the Taimali watershed relied on FORMOSAT-2 images obtained from the Spatial Information Research Center (SIRC) of National Taiwan University. The image classification performance was achieved by applying the ERDAS IMAGINE version 9.2 software (Leica Geosystems Inc.). Three remote sensing images with 8-m resolution, acquired in 2005, 2008, and 2011, were classified into four land cover classes: landslide patches, forest matrix, human-made patches, and channel corridors. In order to evaluate the accuracy of classification of remotely sensed data, the current study utilized stratified random sampling to produce 256 reference points, whose values conducted a consistency check with the class values of the classified image (Jensen 2005).

### **3. Spatial Autocorrelation Assessment**

For quantitative variables, Moran's *I* index is the most commonly used index to assess the global level of spatial autocorrelation (Cliff and Ord 1981; Li et al. 2009). Moran's *I* index indicates the degree of similarity or dissimilarity between the values of the variable considered and ranges approximately from +1 to -1 (Uuemaa et al. 2008). Moran's *I* value near +1 indicates clustering, while a value near -1 indicates dispersion, and 0 or near to 0 represents no spatial autocorrelation, that means a random pattern (Fernandes et al. 2011).

### **4. Method of Trajectory Calculation**

This study develops a categorical map that demonstrates the land cover change trajectories at the pixel level. Each land cover class is described as a code in the land cover raster layer as

1, 2, 3, and 4 to represent the landslide patches, forest matrix, human-made patches, and channel corridors, respectively. The trajectory layer shows a sequence of codes for each pixel, which can be called trajectory codes. Trajectory codes are established through formula calculation by applying the raster calculator in ArcGIS 9.3.1 in this study. For example, the trajectory of land covers that converts from forest to landslide, and then to landslide on a pixel over three time points is marked as 211 (forest → landslide → landslide), and so on.

## 5. Environmental Variables

One major goal of this study is to build a spatial model of probability of land cover change trajectories. Because the most remarkable change trajectory was from forested land into landslides in this study area, eight environment variables were chosen chiefly according to data availability and projection models for landslide occurrence in reference to previous studies (Lin et al. 2010, Bui et al. 2011, and Zhou et al. 2018). Eight environmental variables were selected for following analysis, including lithology, distance to faults, rainfall, distance to rivers, elevation, slope, aspect, and curvature. To obtain a better understanding of land cover change prone areas in each environmental variable, the continuous environmental variables (distance, elevation, slope, and so on) were classified into several small intervals by breakpoints in reference to previous research by Bui et al. (2011) and Zhou et al. (2018).

## 6. Logistic Regression Analysis

Each pixel of trajectory layer was reset as either value 1 if “with change” or value 0 if “without change”. Because this is a binary variable, either 1 or 0, the logistic regression model can be applied to describe the probability of land cover change.

# RESULTS and DISCUSSION

## 1. Spatial Autocorrelation

Since the amount of total landslide area increased significantly over the study period, this research focused on the spatial autocorrelation analysis of landslides using both global and local Moran's *I* statistics. These correlograms showed that higher positive autocorrelations were present for landslide occurrence at shorter lag distances for all three dates. Although the Moran's *I* values at first lag distance of  $>0$  to  $\leq 500$  m were lower than that at second lag distance of  $>500$  to  $\leq 1000$  m in 2005 and 2011, Moran's *I* obviously decreased faster before the critical scale (about 2.5 km) for all three dates. Hence, 2.5 km was discerned as a critical scale in this study. This result revealed that spatial pattern of homogeneous landslide patches occurred at small scales. Although negative spatial autocorrelations occasionally occurred over some distance lags, Moran's *I* values became lower and more stable after the critical scale. This result indicated that spatial pattern of heterogeneous landslide patches occurred at large scales.

Local Moran's *I* can identify the landslide patches with high values at its neighbors as “hotspots”. Through the spatial analysis and calculation using the PASSaGE software (Rosenberg and Anderson 2011), landslide patches with high–high spatial cluster can be

regarded as a regional hotspot. This spatial distribution of regional hotspots provided site-specific information for management of degraded areas. Totally there were 27 grids whose Z score was larger than 1.96 at the significant level of 0.05 in 2005, whereas there were 72 grids with Z score larger than 1.96 in 2011. This result indicated that the number and area of landslide hotspots were expanding dramatically from 2005 to 2011.

## 2. Land Cover Change Trajectories

There 44 different trajectories were identified, including four unchanged trajectories (84.47%) and 40 changed trajectories (15.53%). There were top seven trajectories and all of them were larger than 1% of the total study area. These trajectories included two unchanged and five changed trajectories, and occupied 95.08% of the watershed area. Among them, the most dominant trajectory was the unchanged forest cover (222) comprising 80.32% of the watershed area. The other unchanged trajectory was channel cover (444) with 3.01% of the watershed area. Moreover, the other five changed trajectories occupied 11.75% of the watershed area, including the trajectories 221 (5.14%), 211 (2.13%), 224 (1.77%), 212 (1.60%), and 244 (1.11%). The two first ones, 221 and 211, denoted the conversions from forests to landslides; whereas the trajectories 224 and 244 represented the conversions from forests to channels. Besides, the trajectory 212 signified natural revegetation on landslides or channels.

## 3. The Logistic Regression Model

Logistic regression can demonstrate the relationship between a target variable and multiple environmental variables, and project the occurring probability of land cover change trajectories. Larger absolute values of the coefficient revealed that the independent variables were the main determinant for occurrence probability of change trajectories. Among these variables, lithology with highest absolute value of the coefficient was the most important spatial determinant for the change trajectories. In this study area, the most notable change trajectory was from forest cover into landslides. Lithology, regarded as an underlying driving factor for landslide occurrence, exerted the greatest influence on trajectories of land cover change. Its negative logistic coefficient indicated that the occurrence probability of change trajectories decreased with an increase in code value of lithological classes. Thus, trajectories of change were dominated mainly by Pilushan Formation in the study area. In addition, curvature was the second critical variable with negative value of logistic coefficient for the model. The concave landform had higher occurrence probability of change trajectory; while the convex landform had lowest occurrence probability. Moreover, aspect was the third significant determinant for the change trajectory. A negative coefficient of aspect showed that eastward slopes raised the likelihood of occurrence of change trajectory, including NE, E, and SE. The eastward slopes were on the windward slope and were prone to be hit by typhoons due to facing the typhoon tracks.

## 4. Model Validation

This fittest logistic regression model was validated in the testing data set. The correct

classification percentage was calculated to evaluate the performance of the model. The predicted classification accuracy of the testing data set was 81.6% for changed pixels, 64.5% for unchanged pixels, and 72.9% for the overall predicted accuracy. The model performance of testing data set was better than that of training data set. Moreover, the AUC value was high up to 0.785, which was considered as an acceptable discrimination. It also indicated that classification result based on the logistic regression model was satisfactory.

The probability map of change occurrence was produced by applying the logistic regression model. In this study, the probability map was divided into five equal interval classes of change likelihood, including very low (0.0–0.2), low (0.2–0.4), medium (0.4–0.6), high (0.6–0.8), and very high (0.8–1.0). Among the five classes of probability, the class of very high occurrence probability covered the lowest percentage as 5.43% of the study area. In contrast, the class of very low occurrence probability had the largest percentage as 32.79% of the study area. In addition, RCI values were increasing with ascending classes. The greatest RCI value 2.68 was in class 5, but the total area was smallest. These results revealed that change trajectory considerably coincided in the zones which have higher probability of change and occupy a small area.

## References

- Bai, S. B. J., Wang, G. N., Lu, P. G., Zhou, S. S., Hou, and S. N. Xu (2010) GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology* 115: 23–31. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.09.025.
- Fernandes, M. R., F. C. Aguiar, and M. T. Ferreira (2011) Assessing riparian vegetation structure and the influence of land use using landscape metrics and geostatistical tools. *Landscape and Urban Planning* 99: 166–177. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.11.001.
- Homer, C., J. Dewitz, S., Jin, G., Xian, C., Costello, P., Danielson, L., Gass, M., Funk, J., Wickham, S., Stehman, R., Auch, K. and Riitters (2020) Conterminous United States land cover change patterns 2001–2016 from the 2016 National Land Cover Database. *ISPRS J. Photogramm* 162 : 184-199, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.02.019.
- Jensen, J. R. (2005) *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective* (3rd ed.), Prentice Hall: New Jersey.
- Lin, Y. P., H. J. Chu, and C. F. Wu (2010) Spatial pattern analysis of landslide using landscape metrics and logistic regression: a case study in Central Taiwan. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 7: 3423–3451. DOI: 10.5194/hessd-7-3423-2010.
- Rosenberg, M. S., and C. D. Anderson (2011) PASSaGE: pattern analysis, spatial statistics and geographic exegesis. version 2. *Methods in Ecology and Evolution* 2(3): 229-232. DOI: 10.1111/j.2041-210X.2010.00081.x.
- Southworth, J., D. Munroe, and H. Nagendra (2004) Land cover change and landscape fragmentation - comparing the utility of continuous and discrete analyses for a western Honduras region. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 101: 185–205.

- Talukdar, S. P., Singha Shahfahad, S., Mahato, B., and Praveen, A. Rahman (2020) Dynamics of ecosystem services (ESs) in response to land use land cover (LU/LC) changes in the lower Gangetic plain of India. *Ecol. Indic.*, 112, 106121, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106121.
- Uuemaa, E. J., Roosaare, A., Kanal, U., and Mander (2008) Spatial correlograms of soil cover as an indicator of landscape heterogeneity. *Ecological Indicators* 8 : 783–794. DOI: 10.1016/j.ecolind.2006.12.002.
- Yin, K. S., Xu, Q., Zhao, W., Huang, K. Yang, and M. Guo (2020) Effects of land cover change on atmospheric and storm surge modeling during typhoon event. *Ocean. Eng.*, 199, 106971, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.106971.
- Zhou, C. K., Yin, Y., Cao, B., Ahmed, Y., Li, F. Catani, and H. R. Pourghasemi (2018) Landslide susceptibility modeling applying machine learning methods: A case study from Longju in the Three Gorges Reservoir area, China. *Comput. Geosci* 112 : 23-37. doi: 10.1016/j.cageo.2017.11.019.
- Zomlot, Z. B., Verbeiren, M., Huysmans, and O. Batelaan (2017) Trajectory analysis of land use and land cover maps to improve spatial–temporal patterns, and impact assessment on groundwater recharge. *J. Hydrol* 554 : 558-569. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.09.032.

## Enhanced physico-chemical erosion under sodium-water conditions in the mudstone catchment

Ci-Jian Yang<sup>1,2\*</sup>, Jr-Chuang Huang<sup>1</sup>, Jiun-Chuan Lin<sup>1</sup>, Pei-Hao Chen<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>) Department of Geography, National Taiwan University, No. 1, Sec. 4, Roosevelt Rd., Taipei 10617, Taiwan.

<sup>2</sup>) German Research Centre for Geosciences (GFZ), Telegrafenberg 14473, Potsdam, Germany,

\* Corresponding Author, E-mail: d03228001@ntu.edu.tw ◦

---

### Abstract

Climate, tectonics and human impacts interact to shape the mix-state morphology that we call landscape; however, so far, attention has recently been given to the explanatory role of lithology and physico-chemical erosion. Badland landscapes formed with highly erodible, homogeneous substrates have the potential to respond measurably to the individual event on scales that are open to direct observation. Here, using high temporal resolution of suspended sediment and riverine chemistry records in the badland basin in southwestern Taiwan, we assess the mineralogical, geochemical and grain-size composition features that can be used to quantify landscape response to erosion drivers. During the typhoon period (2017), water chemistry is dominated by silicate weathering at 18 ton/km<sup>2</sup>/day, which in contrast, is higher than the carbonate weathering rate at 4 ton/km<sup>2</sup>/day. Plus, sodium adsorption ratio is covariant with river-discharge, which can be assigned to sodium-induced dissolution. Further, sodium and calcium of suspended sediment account for about 10 % of the mass loss in this even, and the current-induced dissipation may be responsible for it. We suggest that riverine chemistry can be used as a sensitive proxy for landscape change in response to individual climatic forcing events. We expect that physico-chemical reactions of clay particles in the fluvial system to provide insights on landscape response to external drivers over much shorter time scales than other topographic features.

### INTRODUCTION

Erosion-induced weathering have been shown to be a significant control on regulating carbon-cycle (Berner et al., 1983; Gaillardet et al., 1999), nutrient supply to ecosystem (Milligan and Morel, 2002), and provides a link between surface process and drivers (e.g., Calmels, 2011; Clift, 2014; Emberson, 2016; Meyer, 2017). High-standing islands (HSIs) as the major erosion contributors, i.e., the sediment discharge from Taiwan to the ocean between 1970 and 1999 added up to 384 Mt per year, which accounts for 1.9% of the world-wide total. This compares to a fraction of only 0.024% of the Earth's landmass. Rapid erosion in HSIs facilitates chemical weathering, where have been evidence that the silicate weathering rate is highest globally (Li, 1976; Carey et al., 2005; Lyons et al., 2005). Storms as the elemental form

of erosion drivers in HSIs, however, the impacts of extreme weather on chemical weathering dynamics are poorly understood and rarely documented (Meyer, 2017). Rivers as the main transportation pathways for dissolved elements and particles from the continents to the ocean, and fundamentally important to be a sensitive proxy for geomorphic processes in response to individual climatic forcing events.

Badland landscapes form in highly erodible, often homogeneous substrates that have the potential to respond measurably to an individual event on temporal scales that are open to direct observation. Badlands landscape is widely distributed in both arid and semi-arid areas worldwide, whereas badlands in subtropical climate zone are known only in Taiwan and receive annual precipitation amounts in excess of 2 m per year, which is three times higher than in other badland areas. As a result, over 105 t/km<sup>2</sup>/yr, the highest measured mean sediment yield in the world. Rapid erosion in badland areas has been attributed to their dispersive properties, which are related to high sodium contents (Faulkner et al., 2004; Mitchell, 1993; Rengasamy and Olsson, 1991; Rengasamy et al., 1984; Sherard et al., 1976). The chemistry of the pore waters extracted from a mudstone block showed that the major ions of pore water were mainly Na, Cl, and SO<sub>4</sub>, of which constituent ratios are similar to the seawater (Higuchi, 2015). This dispersion occurs between particles under this high voltage in the crust, which is rapidly slaked by intense precipitation (Nakata, 2009) and would deteriorate the land surface (Higuchi, 2015). Therefore, we also highlight the role of sodium in the physico-chemical erosion by representing surface erosion. Here, we report the erosion-induced weathering following the 2017 typhoons Nesat and Haitang that brought 579 mm of rainfall over three days, with maximum intensity of 74 mm/hr. By using 3 hours temporal resolution of suspended sediment and riverine chemistry records in the badland basin in SW Taiwan during storm events, we assess the mineralogical, geochemical and grain-size composition features that can be used to quantify landscape response to climatic drivers. We expect that physico-chemical reactions of clay particles in the fluvial system to provide insights on landscape response to external drivers over much shorter time scales than other topographic features.

## **METHODS**

### **1.1 water sampling in the storm event**

Totally 42 river samples were sampled from two sampling sites, which includes two typhoon events. All samples are collected using 1000 ml PE bottles. Two bottles would be dropped into 1 to 2 meters below the water surface of the river in each sampling. One of them was used to calculate sediment concentration. Another one was used to analyze chemical components. Therefore, samples were filtered in situ and the filtrate was preserved in refrigerator for lab analysis.

## 1.2 Anionic analysis

The analyzed anions in the river water sample include  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ . Ion chromatography (IC), also called ion-exchange chromatography, can separate each type of ions from samples depending on each ion's affinity to ion-exchange column. IC is a kind of chromatography that consists of two necessary phases, stationary phase, and mobile phase. There is no interaction between stationary phase and mobile phase. In the IC system, the stationary phase is ion-exchange column and the mobile phase is elution-solution. When the mobile phase carries the sample and passes through the stationary phase, the sample will react with the stationary phase. The affinity of each type of ions to stationary phase is based on their properties and texture. It affects the reaction between each type of ions and stationary phase. With the same force derived from mobile phase, each type of ions has different residence time in the stationary phase and leave from it in different sequence. The conductivity at different times is proportional to each type of ions' concentration. By conductivity detector, we could estimate the concentration of different anions.

## 1.3 Cationic analysis

The analyzed elements in the river water sample by ICP-OES include  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Si^{4+}$ . The ICP-OES consists of three main parts that are injection system, plasma system and an optical system. In injection system, sample needs to be in liquid form and nebulized. After injected into plasma system, with high energy of ICP torch, the nebulized sample is further gasified, atomized and ionized. Then, the ionized element in the sample is unstable and will return to ground state. In this stage, each type of element releases light with specific wavelength. The intensity of light increases with concentration of the element. The optical system can detect the intensity of light resulting from elements releasing. Hence, it is able to use intensity of light with specific wavelengths to estimate concentration of the element.

## 1.4 Sediment chemistry analysis

~0.7 g of dried sediment sample was combusted in the muffle furnace at 650°C for 2 hours and then weighted to obtain the loss on ignition. Afterward, an aliquot of ~100 mg from the residue was digested with a mixture of concentrated HF and aqua regia. After digestion and drying, the sample was dissolved in 0.3 N  $HNO_3$  for elemental determination. Major elemental concentrations of sediment samples were obtained by ICP-OES (Varian 720-ES) at GFZ German Research Centre for Geosciences.

## 1.5 The grain size of suspended load

Before grain size measurement, we must remove the non-clastic deposition, i.e., sea salt, organic matter, and carbonate. ~1 g of dried sediment sample was added about 15 ml of distilled water, and placed in a shaker and shaken at a speed of 4000 rpm for 5 minutes. The centrifuged

supernatant was poured out. The step was aimed at removing sea salt and repeating the above steps 3 times. 10 ml of a 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution was added to the sediment and placed in an ultrasonic oscillator for 24 hours to fully react H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and organic matter. After adding a second 10 ml of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (15%) to confirm the completion of the reaction, the mixture was centrifuged and the supernatant was removed for removing organic matter. The sediment was then washed by adding 30 ml of distilled water, and the supernatant was removed after centrifugation. This washing step is repeated 3 times to remove residual H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in the centrifuge tube. Add 10 ml of 10% HCl solution to the centrifuge tube, and after standing for one day, add a second HCl to confirm that the reaction is complete. Centrifuge the supernatant to remove the carbonates in the sediment. Then add 30 ml of distilled water, wash the sediment, and then pour off the supernatant after centrifugation. Repeat this cleaning step 3 times to remove residual HCl. Add 10 ml of 1% Na<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> solution and let stand for more than half a day to prepare for the machine. The grain size of sediment samples was obtained by Laser Diffraction Particle Size Analyzer LA950 at GFZ German Research Centre for Geosciences. By using LA950, we measure grains in the size range of between 100 nm to about 3 cm. (<https://www.horiba.com/at/scientific/products/particle-characterization/particle-size-analysis/details/la-950-laser-particle-size-analyzer-108/>) °

### 1.6 Calculation of sodium adsorption ratio (SAR)

Dissolved calcium and magnesium can maintain the sturdy structure of soil and therefore facilitate the water permeability. In contrast, sodium would disperse the soil particles, showing a dense structure, and the water permeability is reduced, resulting in poor drainage ability. The increasing calcium and magnesium are beneficial to the soil structure. Conversely, the increase in sodium ion content is harmful to the soil. The correction of sodium, calcium, and magnesium can be described by sodium adsorption ratio (SAR):

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\left(\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}\right)}}$$

## RESULTS and DISCUSSION

### 1.1 River and sediment chemistry and related characteristics

In Nanxiong Bridge, water temperature is about 26.8 °C during the sampling period, pH value is about 7.6 within the range from 7.21 to 8.51, conductivity ranges from 96 to 500 µs/cm, sediment concentration shows the difference ranges from 10 to 33700 mg/L, the most Cl<sup>-</sup> concentration is less than or near 1500 µM with the average of 610 µM, which is much lower than the global mean of 1316 µM (Gaillardet et al., 1999). The averaged riverine SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentration is 802 µM with the maximum of 1661µM. The averaged Na<sup>+</sup> concentration is 1681 µM with the maximum of 3386 µM, the averaged Na<sup>+</sup> is about 4.4 times higher than averaged level of other catchments in Taiwan. Mg<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup>, the averaged concentrations are

523 and 820  $\mu\text{M}$ , respectively. The averaged SAR is 8.1 with a maximum of 17.6. The averaged  $D_{50}$  is 5.60  $\mu\text{m}$  within the range from 3.91 to 8.23  $\mu\text{m}$ . Discharge shows the difference ranges from 2 to 753 c.m.s. In Guting Bridge, water temperature and pH value are of similar with Nanxiong Bridge, conductivity ranges from 99 to 930  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , sediment concentration also shows the difference ranges from 164 to 35900 mg/L, the most  $\text{Cl}^-$  concentration is 1500  $\mu\text{M}$  with the average of 492  $\mu\text{M}$ . The averaged riverine  $\text{SO}_4^{2-}$  concentration is 619  $\mu\text{M}$  with a maximum of 1504  $\mu\text{M}$ . The averaged  $\text{Na}^+$  concentration is 1565  $\mu\text{M}$  with a maximum of 3743  $\mu\text{M}$ .  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Ca}^{2+}$ , the averaged concentrations are 459 and 748  $\mu\text{M}$ , respectively. The averaged SAR is 8.2 with a maximum of 24.9. The averaged  $D_{50}$  is 5.31  $\mu\text{m}$  within the range from 3.55 to 6.80  $\mu\text{m}$ . Hourly precipitation shows the difference ranges from 0 to 64 mm/hr. The major element of the two selected sediment samples shows that calcium and sodium account for about 10 % of the mass loss in this even.

## 1.2 Time series of concentration of the selected ions in storm period

Dissolution of evaporite, i.e., halite ( $\text{NaCl}$ ) and gypsum ( $\text{CaSO}_4$ ) would increase the concentration of related ions. Therefore, the concentration of related ion would help to classify the supply condition of weathering martial, which may also represent the lithological controlling effect of each catchment. Here, we hope that the 3 hr interval of time series of concentration of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ , and  $\text{SO}_4^{+2}$  are qualified to represent the lithological martial supply condition of the two catchments, Nanxiong Bridge and Guting Bridge during the storm event. Here, we use the dilution ratio as a reference (the ion concentration at a certain time divided by the ion concentration at the first time) that values greater than 1 represent concentration, and vice versa represent dilution.

$\text{Na}^+$  in Nanxiong Bridge shows a dilution ratio of 0.85 at the early storm period, the discharge is about 2 C.M.S. at that time. The dilution ratio instead increases to 1.21-1.49 with the discharge of 34-116 C.M.S at first peak of discharge. Subsequently, it always keeps the state of dilution until the end of the event within the range from dilution ratio of 0.19 to 0.98. During the largest peak of discharge, the dilution ratio is about 0.50.  $\text{Cl}^-$  in Nanxiong Bridge also shows dilution ratio of 0.58 at the early storm period, and increases to 1.85 at first peak of discharge, then keep state of dilution until the end of storm event.  $\text{Ca}^{2+}$  in Nanxiong Bridge show positive correlation between dilution ratio and discharge, and therefore it appears a dilution ratio of 0.90 at the early of the event and then strongly diluted (dilution ratio of 0.30) at the largest peak of discharge and returned to the dilution ratio of 0.67 at the end of the event.  $\text{SO}_4^{+2}$  in Nanxiong Bridge show a dilution ratio of 0.73 at the early of the event and keep concentrating to dilution ratio of 1.07 to 1.65 at the first peak of discharge, then strongly diluted (dilution ratio of 0.39) at the largest peak of discharge and returned to the dilution ratio of 1.00 at the end of the event.

$\text{Na}^+$  in Guting Bridge shows a dilution ratio of 3.20 at the early storm period, the precipitation is about 16.5 mm/hr at that time and keep concentrating at first peak of

precipitation. After a brief dilution, it concentrates to dilution ratio of 3.00 at largest peak of precipitation (64 mm/hr). Subsequently, it keeps the state of dilution until the end of the event within the range from dilution ratio of 0.57 to 0.84 and re-concentrate to dilution ratio of 1.05 to 1.38 at the end of the storm event. Cl<sup>-</sup> in Guting Bridge also concentrates to dilution ratio of 4.32 at the early storm period, and keeps concentrate on dilution ratio of 1.61 to 1.74 at first peak of precipitation, then reaches dilution ratio of 4.21 at the largest peak of precipitation. Subsequently, it keeps the state of dilution until the end of the event within the range from dilution ratio of 0.42 to 0.71 and re-concentrate to dilution ratio of 1.00 to 1.32 at the end of storm event. Ca<sup>+2</sup> in Guting Bridge show the similar behavior of Ca<sup>+2</sup> in Nanxiong Bridge, it appears a dilution ratio of 0.86 at the early of the event and then strongly diluted (dilution ratio of 0.40) at the largest peak of precipitation and returned to the dilution ratio of 0.82 at the end of the event. SO<sub>4</sub><sup>+2</sup> in Guting Bridge show a dilution ratio of 1.89 at the early of the event and dilute to dilution ratio of 0.74 to 0.99 at the first peak of precipitation, then strongly diluted (dilution ratio of 0.45) at the largest peak of precipitation and returned to the dilution ratio of 0.95 at the end of the event.

## Reference

- Calmels, D., Galy, A., Hovius, N., Bickle, M. J., West, A. J., Chen, M. C., and Chapman, H. (2011) Contribution of deep groundwater to the weathering budget in a rapidly eroding mountain belt, Taiwan. *Earth and Planetary Science Letters*, 303 (1-2) : 48-58. doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.032.
- Carey, A. E., Gardner, C. B., Goldsmith, S. T., Lyons, W.B., and Hicks, D. M. (2005) Organic carbon yields from small, mountainous rivers, New Zealand. *Geophysical Research Letters*, 32, 15404. doi.org/0.1029/2005GL023159.
- Clift, P. D., Wan, S. and Blusztajn, J. (2014) Reconstructing chemical weathering, physical erosion and monsoon intensity since 25Ma in the northern South China Sea: A review of competing proxies. *Earth-Science Reviews*, 130 : 86-102. doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.01.002.
- Emberson, R., Hovius, N., Galy, A., and Marc, O. (2016) Chemical weathering in active mountain belts controlled by stochastic bedrock landsliding. *Nature Geoscience*, 9 : 42-47. doi.org/10.1038/ngeo2600
- Faulkner, H., Alexander, R., Teeuw, R., and Zukowskyj, P. (2004) Variations in soil dispersivity across a gully head displaying shallow sub-surface pipes, and the role of shallow pipes in rill initiation. *Earth Surface Process and Landforms*. 29:1143-1160. doi.org/10.1002/esp.1109.
- Higuchi, K., Chigira, M., Lee, D. H., and Wu, J. H. (2015) Rapid weathering and erosion of mudstone induced by saltwater migration near a slope surface. *Journal of Hydrologic Engineering* 20(6), C6014004. doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001105.
- Lyons, W. B., Carey, A. E., Hicks, D. M., and Nezat, C. A. (2005) Chemical weathering in

- high-sediment-yielding watersheds, New Zealand. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 110, 11. doi.org/10.1029/2003JF000088.
- Meyer, K. J., Carey, A. E., and You, C. F. (2017) Typhoon impacts on chemical weathering source provenance of a High Standing Island watershed, Taiwan. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 215 : 404-420. doi.org/10.1016/j.gca.2017.07.015.
- Mitchell, J. K. (1993) Volume change behavior. In: Mitchell, J.K., Soga, K. (Eds.), *Fundamentals of Soil Behavior*. Wiley. pp. 293-333.
- Nakata, E. and Chigira, M. (2009) Geochemistry of erosion processes on badland slopes. A case study of the Gutingkeng formation where mud volcanoes are distributed in southern Taiwan. *Journal of Geography* 118(3) : 511-532.
- Rengasamy, P., Greene, R. S. B., Ford, G.W., and Mehanni, A. H. (1984) Identification of dispersive behavior and the management of red-brown earths. *Australian Journal of Soil Research* 22 : 413-43. doi.org/10.1071/SR9840413.
- Rengasamy, P. and Olsson, K. A. (1991) Sodlicity and soil structure. *Australian Journal of Soil Research* 29 : 935-952. doi.org/10.1071/SR9910935.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S., and Steele, E. F. (1976) Identification and nature of dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 102 : 287-301.

## 應用 open data cube 遙測資料與植生指標於海岸林變遷分析

曾俊偉<sup>1)</sup> 鍾智昕<sup>2)\*</sup>

1) 行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組，10066 台北市中正區南海路 53 號。

2) 國立宜蘭大學森林暨自然資源學系，26047 宜蘭市神農路一段一號。

\* 通訊作者，E-mail: chchung@niu.edu.tw。

### 摘要

海岸林為沿海地區的第一道屏障，可保護沿海地區農作物及地區人民財產安全，但長期受到自然災害的干擾破壞及人為開發壓力，對於海岸林在空間上的實際分布與潛在不利生長影響來源應予以進一步瞭解。海岸林可降低強風直接侵襲的程度及減少當地居民生活的風險，農作物的耕作及收成與海岸林之保護情形有很大之關聯性。本研究透過海岸線不同的林分特徵瞭解長時間的變化趨勢，並就既有的資料評估可能的趨勢現象，應用地景生態學之空間分析原理，分析全臺海岸林地景，監測歷史防風林帶之消長及其周圍土地覆蓋型變遷對其造成之影響，並對重要不同區位之整體環境影響因子，進行整合性之評估，期能建立大尺度的海岸林監測系統，包括林分演替、健康監測及林分老化(或劣化)的評估，提供氣候變遷造成防風林的環境衝擊的資訊，並透過模擬的方式預測未來防風林之空間分佈，藉以瞭解環境因子對海岸林環境資源帶來的不確定性及各層面的深遠影響。

### 緒言

臺灣位處於近熱帶(near tropical)區域，土地範圍橫跨熱帶 (thetropics) 與亞熱帶(the subtropics) 氣候區，由於四面環海，海岸線全長達 1,139 km。臺灣地區常受季風及颱風的嚴重侵襲，海岸防風林能提供防風定砂、減輕鹽霧侵蝕及保護後方農作物生產的功能，為減緩天然災害的重要綠色生物防線。臺灣的海岸保安林面積約 11,912 公頃，是海岸與陸地重要的第一道防線，除了必須先面對乾旱、高鹽與貧瘠的生長逆境，也要對抗極端降雨與強風的侵襲。氣候變遷的環境衝擊所造成高溫與降雨分布型態改變，使得既有的海岸防風林的林木逐漸的衰老，亦使防風林木的更新不易，造成林帶破碎化，多數地區逐漸失去其整體性與防風林帶幅縮減，降低維護生活環境與農業生產的生態系統服務功能，海岸林的經營管理形成高難度挑戰。充分的瞭解海岸森林生態系統變遷與植生復育的情形，是目前海岸森林永續經營的重要課題。森林的生長受到生育地地質、周遭植被資源、氣候條件等影響，需要長時間監測與掌握大尺度植被生長狀況的空間分布情況，方可初步的掌握海岸林植被變動的趨勢。有鑒於此，相關單位應透過科學的研究方式，對於海岸林應有的配置區位及其壓力來源進行釐清。

## 方法

### 一、衛星影像光譜指標的建立及特徵選取

運用多時期 Landsat 衛星影像 7 個多光譜波段，依據雲林縣、嘉義縣、臺南市環境特性建立海岸環境林 NDBI (建物)、NDMI (濕度)、NDWI (含水量) 及 NDVI (植生) 等常態化差異指標(normalized difference indices)，選用有利的特徵選取方法，整合綜合指標，進行海岸環境林多時相的健康狀況偵測。海岸環境林健康狀況及變遷偵測，以機器學習影像分類法，進行海岸環境林健康狀況分級，偵測出變化幅度大的區域，配合空間統計分析法找出變遷的熱點區域。

### 二、海岸林地景的時空變化、植生回復力分析

植生指標動態偵測，透過不同的植生指標公式計算，將遙測光譜值轉換成反應植生、水域或環境的指標，進而探討海岸防風林與周遭地景的變遷，以及植生與環境的變化情形。針對雲林縣、嘉義縣、臺南市海岸環境林變遷幅度大之熱點區域，選用多時期衛星影像，整合植生健康指標進行海岸環境林熱點區的健康狀況監測。運用衛星影像資料監測不同時期海岸林植生動態與水域變動情形，透過長時間的衛星影像資料，結合地面調查數據，探討海岸林地景的時空變化、植生回復力，藉以釐清氣候變遷對海岸林配置區位及其壓力來源。

### 三、海岸林土地利用變遷與地景結構分析

利用本研究蒐集的圖資進行人工判釋海岸林範圍及數化建置海岸林精確位置分布圖，亦使用土地利用型圖並配合地理資訊系統，針對雲林縣、嘉義縣、臺南市海岸防風林分佈範圍，配合地面調查提高變遷判釋準確度。透過衛星影像資料，觀察各地景類型於不同時期的變化情形，另進行變遷分析與地景指數分析，以探討海岸林周圍地土地覆蓋情形與海岸林區內土地覆蓋現況。

## 結果與討論

### 一、衛星影像光譜指標的建立及特徵選取

本研究以雲林縣、嘉義縣、臺南市之沿海地區為研究對象，衛星影像自 Taiwan open data cube 下載三個縣市沿海地區之 Landsat 衛星資料分析海岸變遷情形，並利用內政部營建署 2017 年之海岸線資料，研究區域為海岸線為中心，南北向約 100 公里，向東與西延伸之 10 公里範圍(圖 1)。本研究取得 2000 年 1 月至 2019 年 12 月之 Landsat 7 影像共 457 幅與 2013 年 5 月至 2019 年 12 月之 Landsat 8 影像 151 幅，影像資料時間共計 19 年，共 608 幅 ARD 影像資料(analysis ready data)。臺灣地區之遙測影像容易受到雲的遮蔽，因此以視覺判釋的方式對影像資料進行篩選，本研究以無雲資料為主要的分析對象，篩選後 Landsat 7 影像 108 幅與 Landsat 8 影像 62 幅，共 170 幅影像資料，顯示台灣地區使用遙測影像受到雲的影響甚鉅。進一步分析各月份影像受到雲覆蓋的比例

(圖 2)，本研究區一年之雲覆蓋比例平均為 28.0%，最高的月份為 7 月(84.9%)，最低為 10 月(54.9%)。

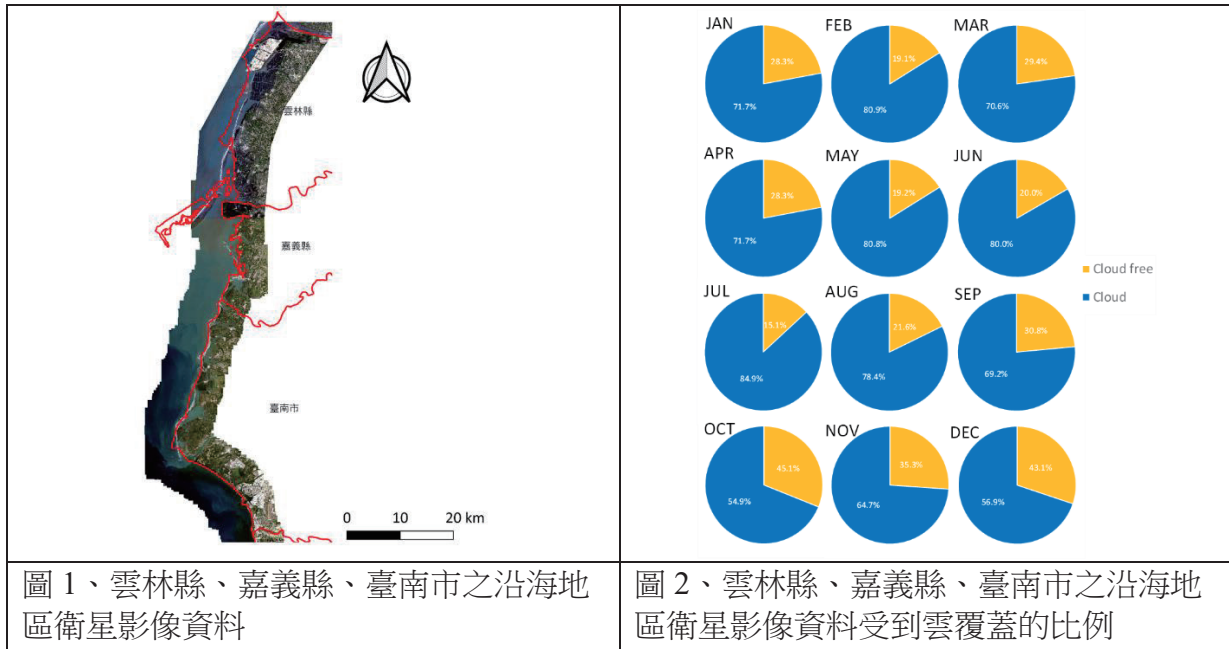


圖 1、雲林縣、嘉義縣、臺南市之沿海地區衛星影像資料

圖 2、雲林縣、嘉義縣、臺南市之沿海地區衛星影像資料受到雲覆蓋的比例

## 二、衛星影像光譜指標的建立及特徵選取

衛星影像光譜指標計算，依據海岸林環境特性由光譜指標嘗試可反映影像中建物、濕度、水體與植生資訊之指標，由 Landsat 衛星影像 7 個多光譜波段，分別計算 NDBI(normalized difference built-up index, Zha et al., 2003)、NDMI(normalized difference moisture index, USGS)、NDWI(normalized difference water index, Xu, 2006)及 NDVI(normalized difference vegetation index, Rouse et al.,1974)植生指標等，各指標的公式如下：

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$$

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

$$NDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

本研究中使用的各個指標，主要是期望藉由植生指標指數掌握海岸線 10 公里範圍內的建物、濕度、水體與植生資訊，各個指標數值範圍顯示的意義分別進行說明如下。雲林縣、嘉義縣、臺南市沿海地區 NDBI、NDMI、NDVI 與 NDWI 如圖 3~6。

(一) NDBI 指數的數值，依據 Rasul et al.,(2018)使用 Landsat8 衛星影像資料進行都市範圍的研究結果顯示，當 NDBI>0.2 時，可以顯示該像元為建築物或是裸露土壤，當 NDBI<0 時則為草地或其他。

(二) NDMI 指數的數值，Thenkabail(2016)建議 NDMI 無法單獨使用，而需要配合 NDVI 進行解釋。當 NDVI 的數值較小時，NDMI 和 NDVI 隨著亮度和濕度的增加，呈

現出相反的趨勢，而 NDMI 隨著 NDVI 的增長呈現出相似的趨勢。

(三) NDWI 指數的數值，這個指標最初使用在植被冠層的水分含量，通常數值應介於 0 到 0.2 之間，依據 McFeeters(2013)使用 QuickBird 影像針對都市的游泳池，使用 NDWI 進行偵測的研究顯示當  $NDWI > 0.3$  時即具有一定量的水體，當指標數值  $> 0.5$  通常對應即是完全的水體。

(四) NDVI 在遙測的領域廣泛的用以反映植被的狀態，依據 Montandon and Small(2008)對 NDVI 的數值分類， $NDVI > 0.6$  以上的視為覆蓋良好的密生森林(dense forest)，NDVI 數值小於 0.6 到 0.1 代表灌木、草生地或農作物， $NDVI < 0.1$  的為岩石、沙子或雪，當 NDVI 呈現為負值時，則通常為水體。

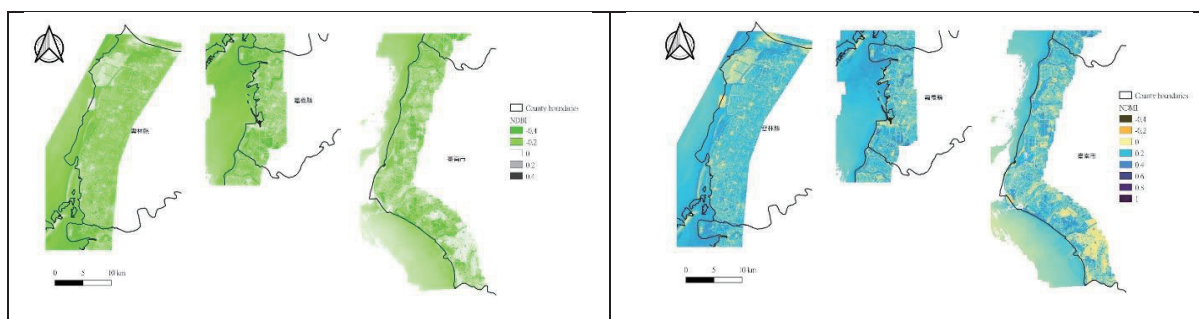


圖 3、雲林縣、嘉義縣、臺南市沿海地區 NDVI

圖 4、雲林縣、嘉義縣、臺南市沿海地區 NDMI

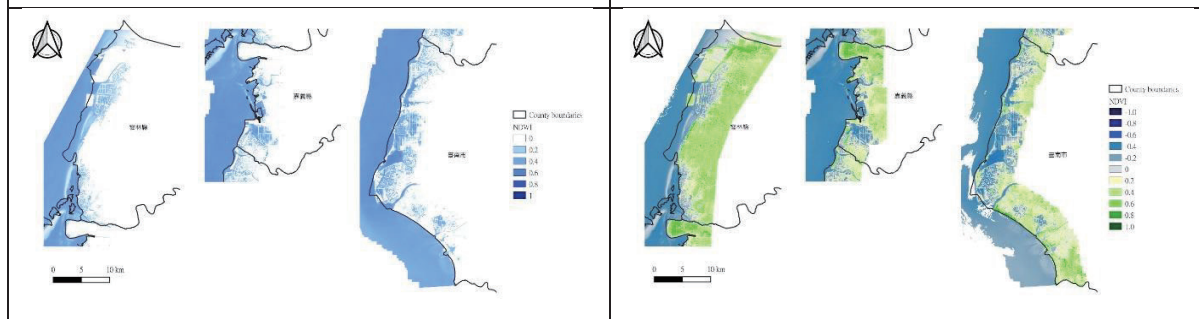


圖 5、雲林縣、嘉義縣、臺南市沿海地區 NDWI

圖 6、雲林縣、嘉義縣、臺南市沿海地區 NDVI

各指標可顯示三個縣市建物、濕度、水體與植生空間分布狀態，依據前述定義之指標，進行各種地貌分布百分率的分析。植生指標動態偵測，透過不同的植生指標公式計算，將遙測光譜值轉換成反應植生、水域或環境的指標，進而描述海岸防風林與周遭地景。各個指標間不適合進行疊加表示總體的地貌百分比，因此就各個指標所表現的地景物件進行描述。就 NDBI 而言，將  $NDBI > 0.2$  的像元抽出，並進行百分率之計算，雲林縣在沿海 10 公里範圍內的建物比例最低為 1.6%，嘉義縣次之建物比例最低為 2.2%，台南市的建物比例最高為 5.6%(圖 7)。NDVI 的部分，將  $NDVI > 0.6$  的像元，視為密生植生，雲林縣在沿海 10 公里範圍內的密生植生比例最高為 26.4%，嘉義縣次之為 12.7%，台南市的比例最低為 7.8%。NDMI 的變化比例，較不像其他指標具有一致性，三個縣市的變化差異相當大(圖 8)，較不適合作為描述地景物件之依據。NDVI 數值小於 0.6 到 0.1 代表灌木、草生地或農作物，雲林縣比例為 26.6%，嘉義縣的比例為 23.3%，台南市的比例最高為 27.9%(圖 9)。NDWI 的部分，當數值大於 0.3 時則表示為水體，雲林縣在

沿海 10 公里範圍內的水體比例最低為 49.1%，嘉義縣次之為 66.6%，台南市的比率为 71.6%(圖 10)。

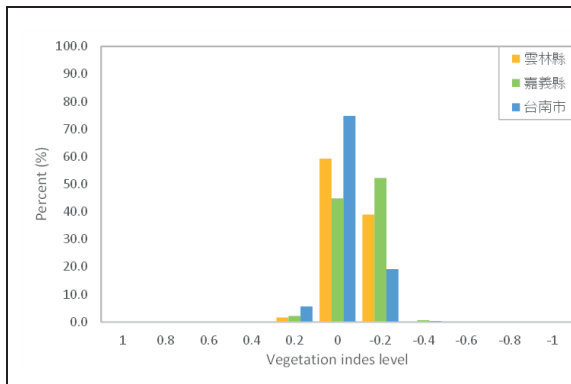


圖 7、雲林縣、嘉義縣、臺南市沿海地區 NDBI 各等級百分率

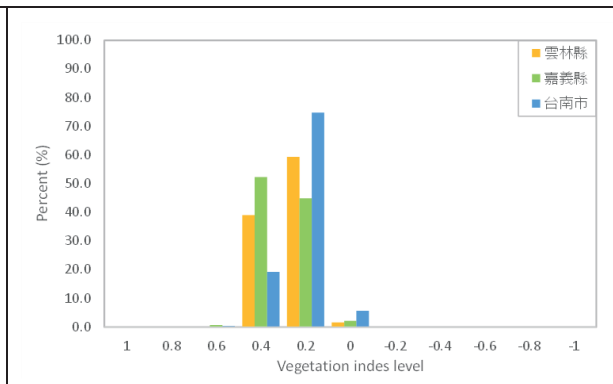


圖 8、雲林縣、嘉義縣、臺南市沿海地區 NDMI 各等級百分率

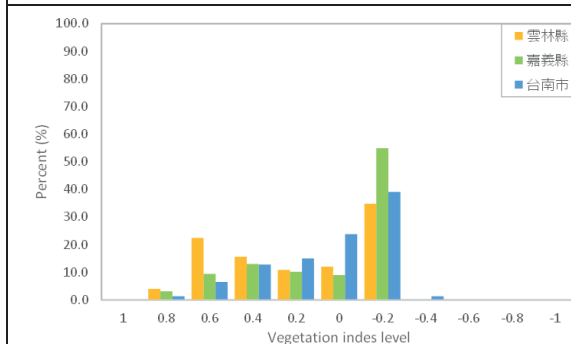


圖 9、雲林縣、嘉義縣、臺南市沿海地區 NDVI 各等級百分率

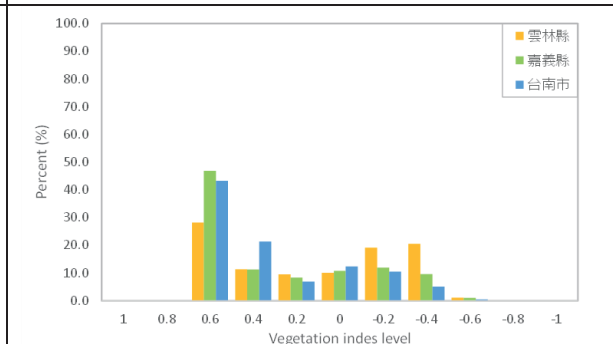


圖 10、雲林縣、嘉義縣、臺南市沿海地區 NDWI 各等級百分率

### 三、海岸林地景的時空變化、植生回復力分析

海岸林的保護功能來自於植被枝葉減風、減鹽的生態服務價值，帶狀密生的森林完整性有助於改善惡劣之生活環境。因此藉由空間統計技術，依距離海岸線距離，50m、100m、250m、500m、1000m、2000m 與 2500m 分析 NDVI>0.6 以上的區域的比百分率，藉以瞭解三個縣市海岸密生森林的空間分布狀況(圖 11)。NDVI>0.6 在雲林縣平均僅占有土地的 3.1%、嘉義縣為 3.5%、臺南市為 2.6%，顯示防風林帶在三個縣市皆相當不足，對於減風、減鹽效果有限，因應氣候變遷風險的能力，亦相對嚴重不足。在海岸林的第一線的部分，在 50 公尺處密生的森林僅 1.2~2.3%，雲林縣在距離海岸線 100m 有最高的百分續占有土地的 3.9%、嘉義縣在 1000m 為最高 5.6%、臺南市在 250m 為最高 2.6%。後續將結合前述指標與所蒐集的影像資料進行地景變遷分析，以描述植生與環境的變化情形。針對雲林縣、嘉義縣、臺南市海岸環境林變遷幅度大熱點區域，選用多時期衛星影像，整合植生健康指標進行海岸環境林熱點區的健康狀況監測。運用衛星影像資料監測不同時期海岸林植生動態與水域變動情形，透過長時間的衛星影像資料，結合地面調查數據，探討海岸林地景的時空變化、植生回復力，藉以釐清氣候變遷對海岸林配置區位及其壓力來源。

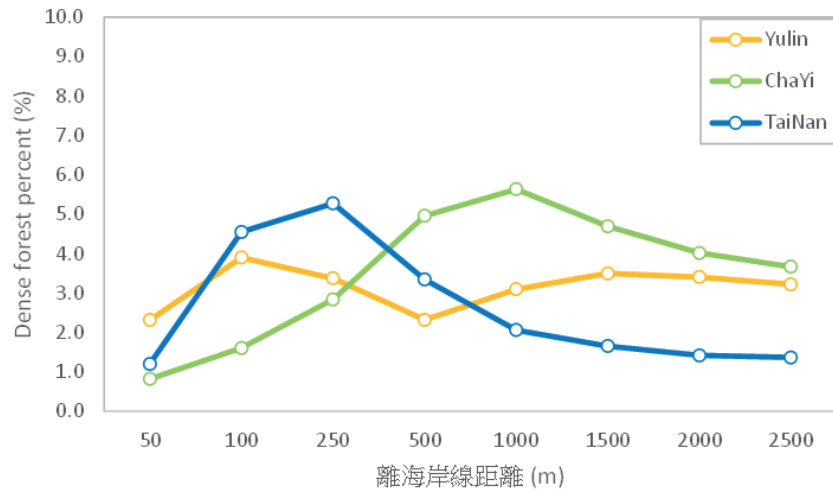


圖 11、雲林縣、嘉義縣、臺南市距離海岸線 NDVI>0.6 之百分率

#### 四、海岸林土地利用變遷與地景結構分析

後續本研究將蒐集的圖資進行人工判釋海岸林範圍及數化建置海岸林精確位置分布圖，亦使用土地利用型圖並配合地理資訊系統，針對雲林縣、嘉義縣、臺南市海岸防風林分佈範圍，配合地面調查提高變遷判釋準確度。透過衛星影像資料，觀察各地景類型於不同時期的變化情形，整合綜合指標，進行海岸環境林多時相的健康狀況偵測。進行變遷分析與地景指數分析，以探討海岸林周圍地土地覆蓋情形與海岸林區內土地覆蓋現況。海岸環境林健康狀況及變遷偵測，以機器學習影像分類法，進行海岸環境林健康狀況分級，偵測出變化幅度大的區域，配合空間統計分析法找出變遷的熱點區域。

#### 謝誌

本研究承行政院農業委員會林業試驗所 109 農科-21.4.2-森-G1 科技計畫經費補助，謹此致謝。

#### 引用文獻

- 林睿思、陳宜敏、王經文、廖天賜、楊凱愉、陳忠義、許立勳、陳財輝 (2009) 台中港區木麻黃天然更新之研究。林業研究季刊 31(2)：47-60。
- 邱祈榮、鍾智昕、黃俊元、林庭安 (2017) 應用衛星影像 Data Cube 進行植生復育監測之探討。第十二屆環境保護林經營管理研討會論文集。
- 陳財輝、呂錦明、沈慈安 (1990) 苗栗海岸地區不同齡級木麻黃防風林生長調查。林業試驗所研究報告季刊 5(1):17-24。
- 鄧書麟、許原瑞、王志斌、吳欣瑾、徐浚騰、陳宥銓、劉紋雯 (2010) 四湖海岸防風林下具天然更新潛力樹種之研究。第五屆環境保護林經營管理研討會論文集。61-70 頁。
- 謝婷如 (2016) 鰲鼓濕地明智利用之減碳效益。中興大學碩士論文。

- 鍾智昕、柯菀庭、鄧書麟、邱祈榮 (2018) 鰲鼓溼地森林變遷與植生復育監測之研究。第十三屆環境保護林經營管理研討會論文集。
- L.M. Montandon, and E.E. Small (2008) The impact of soil reflectance on the quantification of the green vegetation fraction from NDVI. *Remote Sens. Environ* 112:1835-1845.
- L.M. Montandon, and E.E. Small. (2008) The impact of soil reflectance on the quantification of the green vegetation fraction from NDVI. *Remote Sens. Environ* 112:1835-1845.
- McFeeters, S.K. (2013) Using the Normalized Difference Water Index (NDWI) within a Geographic Information System to Detect Swimming Pools for Mosquito Abatement: A Practical Approach. *Remote Sens* 5:3544-3561. <https://doi.org/10.3390/rs5073544>
- Prasad, S., and Thenkabail, J. G. L. (2016) *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. Boca Raton: Taylor& Francis. isbn: 978-143984538-7. <https://doi.org/10.1201/b11222.48>
- Rasul, A., Balzter, H., Ibrahim, G. R. F., Hameed, H. M., Wheeler, J., Adamu, B., Ibrahim, S., and Najmaddin, P. M. (2018) Applying Built-Up and Bare-Soil Indices from Landsat 8 to Cities in Dry Climates. *Land* 7(3) : 81. <https://doi.org/10.3390/land7030081>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., and Deering D.W. (1974) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Fraden S.C., Marcanti E.P. & Becker M.A. (eds.), *Third ERTS-1 Symposium*, 10–14 Dec. 1973, NASA SP-351, Washington D.C. NASA. pp. 309–317.
- USGS Landsat Surface Reflectance-Derived Spectral Indices- Normalized Difference Moisture Index. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/normalized-difference-moisture-index>
- Xu, Hanqiu. (2006) Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27(14): 3025-3033.
- ZHA, Y., GAO, Y. and NI, S. (2003) Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing* 24:583–594.

## 以數值模擬探討集水區不同土砂情境下防砂壩之減災成效

曹鼎志<sup>1)\*</sup> 黃全謚<sup>1)</sup> 鐘啟榮<sup>2)</sup> 黃效禹<sup>2)</sup> 鄭耕秉<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心，11494 臺北市內湖區新湖二路 280 號。

\* 通訊作者，E-mail: tctsao@sinotech.org.tw。

<sup>2)</sup> 行政院農業委員會水土保持局土石流防災中心，54044 南投縣南投市中興新村光華路 6 號。

### 摘要

防砂壩為控制土石流危害常見且有效之消能及攔阻工法，本研究以 2011 年南瑪都颱風屏東縣滿州鄉老佛野溪重大土砂災害為例，蒐集其災前、災後之數值地形、遙測影像及防砂設施種類尺寸，以土石流數值模擬探討集水區於不同土砂規模情境下，防砂壩等橫向構造物之減災成效。本研究以瑞士 WSL 研究所發展之 RAMMS::Debris Flow 程式模擬不同土砂量體情境下之土石流危害，比較各情境下有、無治理設施對於土石流減災之影響。模擬結果顯示治理工程可降低土石流之衝擊及災害範圍並降低災害，但於超出防砂壩設計容量之土砂量體情境下，土石流仍會溢出河道造成災害。由本研究可知，土石流之治理設施仍有其設計容量之限制，當土砂情境量體超過工程之設計規模時，仍有可能對保全對象造成災害，故除完全仰賴工程減災手段外，宜搭配軟性防災措施方可進一步降低土石流災害。

### 緒言

臺灣位於多地震、多颱風之地理位置，島上近四分之三之面積為山坡地，故為山崩、土石流等坡地災害之發生熱區(陳振宇等人 2011)。為了降低土石流災害之影響，於集水區內以防砂壩等治理設施控制土砂並抑止土石流災害為常用之工程減災手段，但此等工程治理設施對於減少災害之成效於國內目前多屬定性之描述，較少見定量之分析比較方法。

近年來土石流數值模擬之應用發展有長足進展，加以透過空載 LiDAR、UAV 無人飛行載具可更便利地取得整治後之現地地形，兩者搭配可更有效地探討整治設施對土石流災害範圍之減災效益。Chen et al. (2010)及 Lin et al. (2011)以 2004 年敏督利颱風期間於臺中松鶴社區引致之土石流災害事件為例，採用 FLO-2D 數值模式模擬敏督利颱風之情境並計算整治工程設置後降低之總風險值，以探討整治工程之效益；Bernard et al. (2019)以數值模式之方法探討義大利 Rovina di Cancia 野溪於設置梳子壩後，上、中、下游不同區段之堆積量、沖蝕量及淨變化量作整治成效之說明；Shen et al. (2020)以中國甘肅天水大溝 2013 年之土石流災害案例，以數值模擬之方式探討不同土砂量體情境下新設防砂壩對於下游之土石流減災效果。

土石流野溪可能因工程整治造成之地形、地貌變動使災害範圍不同，但不同之工程規劃配置、災害情境規模亦會造成不同程度之土石流災害。本研究挑選 2011 年南瑪都颱風時發生重大土石流災害之屏東老佛野溪(編號屏縣 DF170 之土石流潛勢溪流,圖 1)。

透過集水區不同土砂情境規模之土石流數值模擬，探討工程整治前、後災害範圍之變化，以瞭解治理設施在不同規模土砂情境下之土石流減災成效。



圖1. 南瑪都颱風老佛野溪土石流災害(來源：水保局)

## 方法

### 一、土石流數值模擬

本研究採用瑞士聯邦森林、雪與景觀研究所(WSL)開發之 RAMMS::Debris Flow 模組進行本計畫之土石流數值模擬。RAMMS 自 2005 年問世以來已開發出雪崩、落石及本研究採用之土石流模組(DF)，其中土石流模組乃應用 Voellmy-Salm 連續體模式作為理論基礎，並經瑞士開發團隊之大型實驗及現地案例比對驗證，而由其土石流模組模擬之堆積深度尚可反應土石流停淤及捲增現象(RAMMS User Manual 2017)。

RAMMS::DF 可依使用者需求選擇水文歷線輸入(hydrograph)或塊體輸入 (block release)，使用者可輸入不同重現期之降雨量(如：50、100 年等設計規範常用值)所對應之流量歷線，或某已知災害事件、經驗公式、治理標的對應之土砂量體(如老佛野溪災害事件之 20 萬  $m^3$ )，提供更彈性之情境設定。RAMMS 數值模式可由使用者於自然地地形上建置防砂壩、潛壩、護岸等治理構造物，可真實反映整治後之現地地形(李璟芳等人 2015，李璟芳等人 2016，黃全謚等人 2018)。



圖2. 老佛野溪納入整治設施後之數值地形模型

## 二、集水區土砂情境設定

本研究依災害情境、經驗公式等，設計三種不同情境之土砂流出量，併同其它 RAMMS::DF 輸入參數整理如表 1 所示。表 1 中之情境一係參考老佛野溪現地整治設施之計畫貯砂量，情境二係參考現行之土石流潛勢溪流劃設作業手冊(水保局，2019)所使用之經驗公式而推估之集水區土砂流出量，情境三則為 2011 年南瑪都颱風歷史災害事件老佛野溪之流出土砂量。

表1. 本研究選用之情境及RAMMS::DF參數表

選用參數	較小規模事件(情境一)	經驗公式推估事件(情境二)	南瑪都颱風事件(情境三)
地形條件	2m*2m	2m*2m	2m*2m
輸入總量體 $V(m^3)$	40,000	59,981	200,000
土石單位重 $\rho_g (kg/m^3)$	2,650	2,650	2,650
土石流體積濃度	0.65	0.65	0.65
土石流單位重 $\rho (kg/m^3)$	1,723	1,723	1,723
庫倫摩擦係數 $\mu$ (無因次)	0.12	0.12	0.12
紊流黏滯係數 $\xi (m/s^2)$	150	150	150

## 結果與討論

### 一、土石流情境模擬結果

將前述 3 種情境以 RAMMS::DF 模式進行模擬之結果分別以平面以及縱、橫剖面分析檢視，比對工程整治前、後之堆積範圍以及最大流動速度之分布，可觀察到以下現象：

**最大堆積範圍：**由圖 3 之模擬結果可發現，當無整治設施時三種情境之土石流流出距離約略相等，亦即在無整治設施約束時土石流大致依地形流動，並約略停止於堆積扇末端之坡度 2 度處。在考量工程設施後，各情境皆可見土石流流出長度減少約 400 公尺，但兩側之水平寬度卻無明顯縮減，推測係因土石流流經防砂壩#1 後即無明顯導流設施，因此土石流便依地形往兩側擴散堆積。

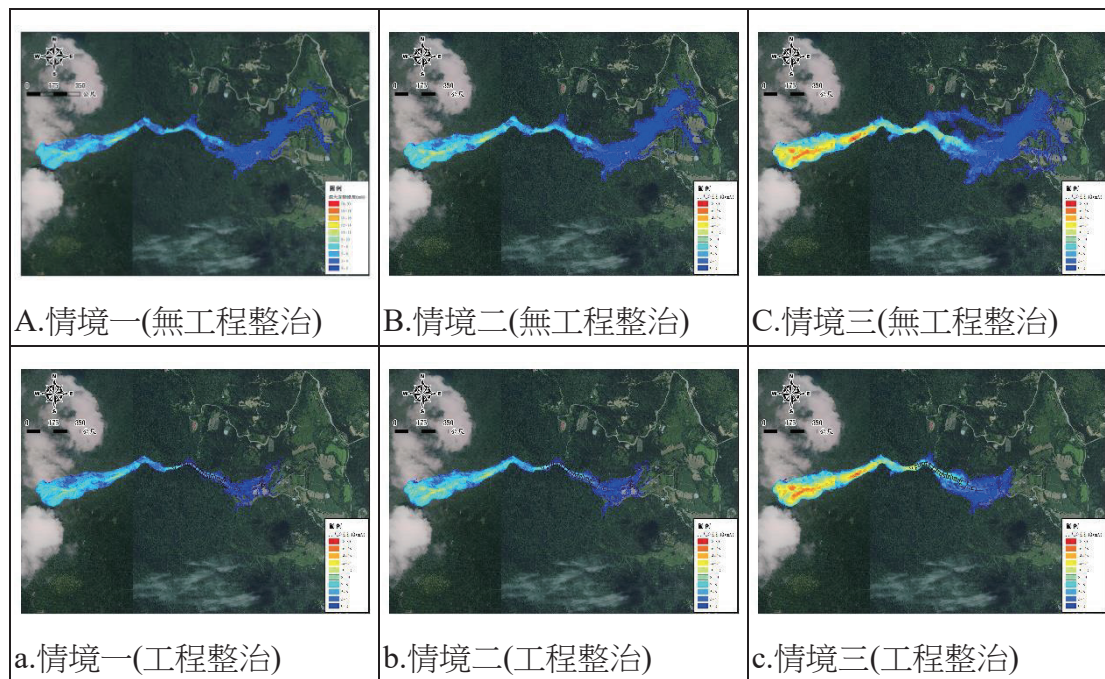


圖3. 老佛野溪各情境土石流最大流動速度與堆積範圍分布圖(各情境量體詳表1)

**最大流動速度：**由圖 3 及圖 4 中可見，於防砂壩#2 至沉砂池終點處河段(約圖 4 橫坐標 350 至 600 公尺之間)土石流通過工程整治上游側時，平均流速皆較無工程整治時減少約 50%，明顯可見藉由連續橫向構造物之設置，可達到消能減速作用，進而使下游段之土石流動儘早停止。

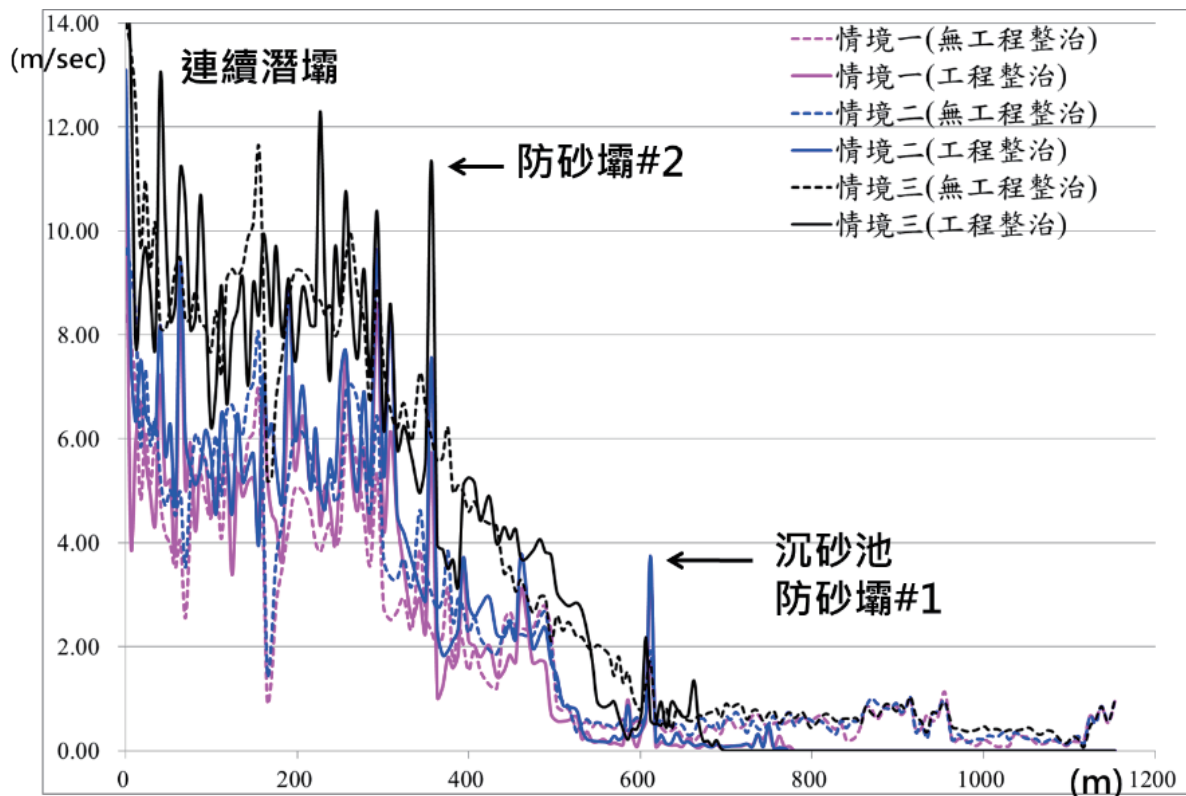


圖4. 老佛野溪各情境最大流動深度縱剖面圖

## 二、治理工程減災成效

由前述之數值模擬結果可見治理工程確可減緩土石流之災害衝擊，老佛野溪三種情境下之土石流流出距離皆約減少 400 公尺，約為既有土石流影響範圍之二分之一。於溪流流向及堆積扇縱向之流動速度亦因整治設施之攔阻使速度減緩 50%，下移之土石則大部份攔阻於整治設施後方。由老佛野溪之模擬結果可知，當土石流量體較少時，整治工程可將大部分土砂攔阻於河道內，因此溢出河道之土砂量較少，對於保全對象之危害亦較小。當土石流量體加大至超越工程設計值時，既有整治工程將遭土砂淤滿，部分土砂溢出河道，但因整治工程之設置可減少土石流流動速度、堆積深度，故對保全對象所造成之衝擊仍小於無整治工程之情形。

## 三、結論

由本研究案例可知，土石流整治設施之貯砂容量有其設計上限，上游崩塌地持續提供土砂可能減低整治工程之容砂量，一旦於短時間內發生多次土石流事件，或單次土石流之量體超過整治設施之治理容量，即可能因無足夠空間攔阻土石流，以致土石流動時於防砂壩兩側溢流而使一旁保全住戶受土石流影響，故仍應搭配封路封橋、疏散避難等軟性防災手段方能進一步降低保全對象受災之風險。

## 引用文獻

- 李璟芳、黃韋凱、曹鼎志、冀樹勇 (2015) 以微地形特徵探討崩塌引致土石流之三維數值模擬。中華水土保持學報 46(2)：96-105。
- 李璟芳、周憲德、曹鼎志、許志豪、黃郅軒、廖緯璿 (2016) 羅浮合流部落土石流案例之致災機制分析與數值模擬。中華水土保持學報 47(4)：171-184。
- 陳振宇、羅文俊、楊永祺、曹鼎志 (2011) 台灣地區土石流風險管理成效評估。地工技術 129：25-34。
- 黃全謐、許志豪、曹鼎志 (2018)，以不同數值模式進行土石流情境模擬之分析與比較。中興工程 141：45-55。
- Bernard, M., Boreggio, M., Degetto, M., and Gregoretti, C. (2019) Model-based approach for design and performance evaluation of works controlling stony debris flows with an application to a case study at Rovina di Cancia (Venetian Dolomites, Northeast Italy). *Science of the Total Environment* 688:1373-1388.
- Chen, S. C., Wu, C. Y., and Huang, B. T. (2010) The efficiency of a risk reduction program for debris-flow disasters — a case study of the Songhe community in Taiwan. *Nat. Hazards and Earth Syst. Sci* 10(7):1591-1603.
- Lin, J. Y., Yang, M. D., Lin, B. R., and Lin, P. S. (2011) Risk assessment of debris flows in Songhe Stream, Taiwan. *Engineering Geology* 123:100-112.
- Shen, W., Li, T., Li P., and Lei, Y. (2020) Numerical assessment for the efficiencies of check dams in debris flow gullies: A case study. *Computers and Geotechnics* 122:103541.
- WSL. (2017) RAMMS: Debris Flow User Manual v1.7.0.

## 以 GEE 雲端分析平台快速估算淹水範圍初探— 以 2018 年 0823 熱帶低氣壓水災為例

林恩如<sup>1,2)</sup>\* 陳振宇<sup>2)</sup>

---

1) 財團法人農業科技研究院。300-110 新竹市香山區大湖路 51 巷 1 號。

2) 行政院農業委員會水土保持局技術研究發展小組，54044 南投縣南投市中興新村光華路 6 號。

\*通訊作者。電子郵件：xupbjj@gmail.com。

---

### 摘要

颱風豪雨期間，如何快速評估淹水範圍，係防災應變、災後復建與救助金發放等工作的重要依據，因此許多單位已嘗試使用 UAV、航照及光學衛星等工具進行相關判釋。儘管 UAV 及航遙測等工具確實具有諸多優點，但前者拍攝範圍有限，後者易受雲霧等天氣影響，往往在緊急時刻未必能順利達成任務。為有效解決天候問題及快速大範圍取像與評估，本研究運用 Google earth engine(GEE)進行運算，以 GEE 資料庫中的 ready-to-use 的雷達影像 Sentinel-1 資料，針對 2018 年 0823 熱帶低壓造成台灣南部淹水災情進行淹水範圍偵測作業。結果顯示，以 2018/08/20 及 2018/08/26 之 Sentinel-1 資料為前後期影像進行比對，雲嘉南地區淹水面積約為 1,510ha，且淹水區域主要集中於部分近海鄉鎮。整體而言，GEE 平台具長時序資料庫、高效能運算力以及免費使用之特性，可提供快速、低成本方式進行初步評估分析，俾作為相關單位後續決策依據。

### 緒言

自 1957 年第一顆人造衛星-史普尼克 1 號發射以來，全球已累積了大量且多元的衛星觀測資料，但衛星資料量往往過於龐大且前處理技術門檻高，傳統單機版遙測軟體之運算量往往難以處理長時序之遙測資料量。近年來受益於雲端運算發展成熟、網格及向量資料庫建置技術提升，得以克服上述問題，如 Google 推出的 Google Earth Engine(GEE)即典型範例，該平台將資料格式、型態等進行標準化，使開放衛星資料以 ready-to-use 的方式儲存於線上平台中，使用者可於線上進行巨量資料的查詢、檢視、分析，並可將結果免費下載(Haifa T. et al, 2020)；而近年來在氣候變遷的趨勢下導致極端氣候事件數量上升，短時間強降雨的結果使旱澇現象加劇，為快速評估淹水範圍，以作為防災應變、災後復建與救助金發放等工作的重要依據，許多單位已嘗試使用 UAV、航照及光學衛星等工具進行相關判釋。儘管 UAV 及航遙測等工具確實具有諸多優點，但前者拍攝範圍有限，後者易受雲霧等天氣影響，往往在緊急時刻未必能順利達成任務。為能在氣候不佳狀況下進行大範圍的災害區域判釋、救災策略擬定以及後續補償等規劃，本研究以不易受天候情況影響之 Sentinel-1 雷達影像為判釋依據、選取近年來短時距強降雨之豪雨事件-823 熱帶氣旋為例，進行雲林、嘉義及台南地區的淹水面積判釋。

## 方法

GEE 是由 Google 建置的雲端 GIS 分析及遙測資訊視覺化平台，目前可免費(非營利用途)提供遙測資料、地形資料等，讓學術、商業以及政府單位等使用。該平台亦提供了許多 API 跟遙測資料處理工具讓使用者可彈性呼叫(如 Developer's Guides 與 Code Editor)，並建置客製化平台。其主要提供之遙測資料包括 Landsat 1-8 (1972 - present)、MODIS (2000 - present)、Sentinel 1/2/3/5 (2014 - present)截至 2018/9 止已有近 600 組 dataset，約莫 20 petabyte 的資料量(引用文獻 4)。

由於合成孔徑雷達(synthetic aperture radar, SAR)雷達衛星訊號較光學衛星不受水氣影響，故於天候不佳時進行取像作業仍可取得地表資訊。而雷達影像資料包含反射強度、相位差異以及極化特性等資訊，故各資訊之選擇與分析方法需視研究標的物之反射特性、地表粗糙度、介質特性、地形起伏等因素進行考量。本研究以 2018 年 823 熱帶低壓造成南台灣縣市淹水災情為例，使用歐盟開源衛星 Sentinel-1 雷達衛星影像，針對水災範圍進行偵測。依前人研究可知由於淹水水體具有鏡面特性，如以雷達衛星影像之 VV 極化資料可凸顯淹水與非淹水範圍間之訊號差異(邱俊穎等人，2019)，故本研究將以 Sentinel-1 雷達衛星影像為判釋材料，並以 GEE 雲端分析平台提供之功能進行相關分析，研究流程如圖 1。

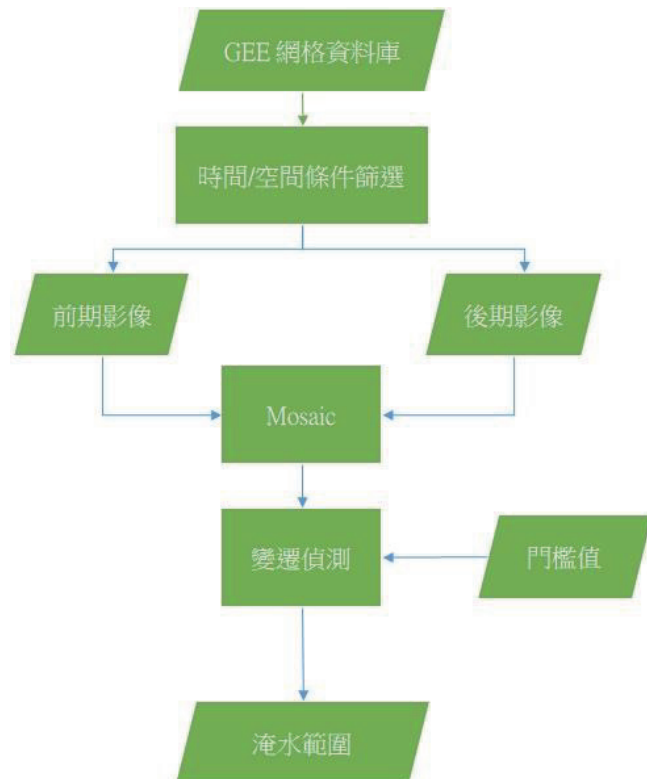


圖 1 以 GEE 結合 SAR 影像進行淹水偵測研究之流程

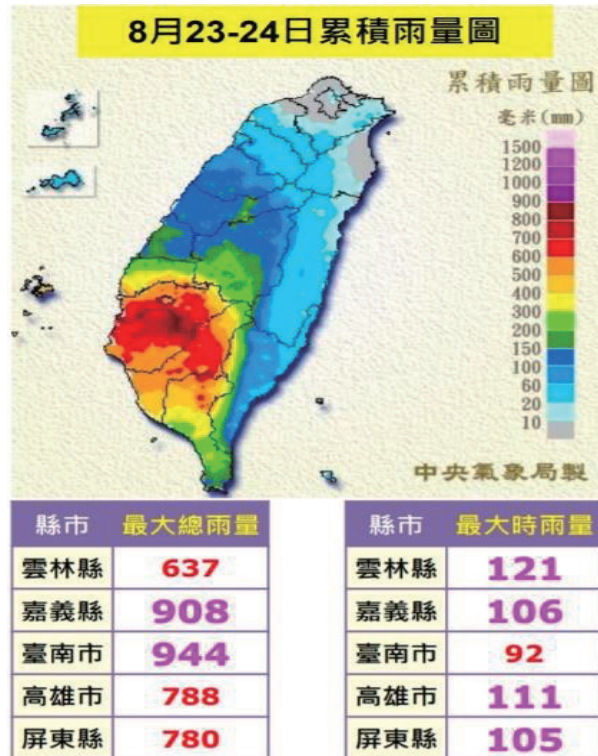


圖 2 823熱帶低壓降雨累積圖

(資料來源: 中央氣象局研析低氣壓強引發豪雨情形及氣象歷史資料)

2018 年的 0823 熱帶低壓主要降雨發生於 8 月 23-24 日間，自 GEE 雲端資料庫中搜尋雲嘉南地區 2018 年 ready-to-use 的 Sentinel-1 資料共計 87 張影像，其中事件前後時間基線最短的影像為 2018/08/20、2018/08/26，分別有 1、2 張影像，其中前者拍攝範圍集中於雲嘉南、後者拍攝範圍幾乎涵蓋全台，兩期影像交集範圍如圖 3。

儘管 GEE 中的 Sentinel-1 資料皆已於 Sentinel-1 Toolbox(引用文獻 5)進行前處理，但雷達衛星屬側視取像機制，地貌起伏在雷達視角方向本就會產生無可避免之雜訊。為以統一標準進行雜訊濾除之作業，本研究基於短時間基線(6 日)之前提，假設前後期影像取像之衛星軌道面與地表物體之相對夾角與地貌不變下，兩期影像間之紋理與強度理應相差不大，而淹水區域具鏡面反射特性，故強度值會遠低於非淹水區域，若以直方圖進行像元數值之統計可發現水體與非水體之影像數值分布具明顯差異性。基於上述原理，本研究利用 GEE 的 Code Editor 功能進行雷達影像雲端分析作業，以典型變遷偵測之作法，將前後期影像相減理應可凸顯地貌不變之區域及地形導致之雜訊的相近度，接著再前人研究中所建議之門檻值(邱俊穎 等人，2019)，大於該門檻值之區域即所判釋之主要淹水範圍(如圖 3)。

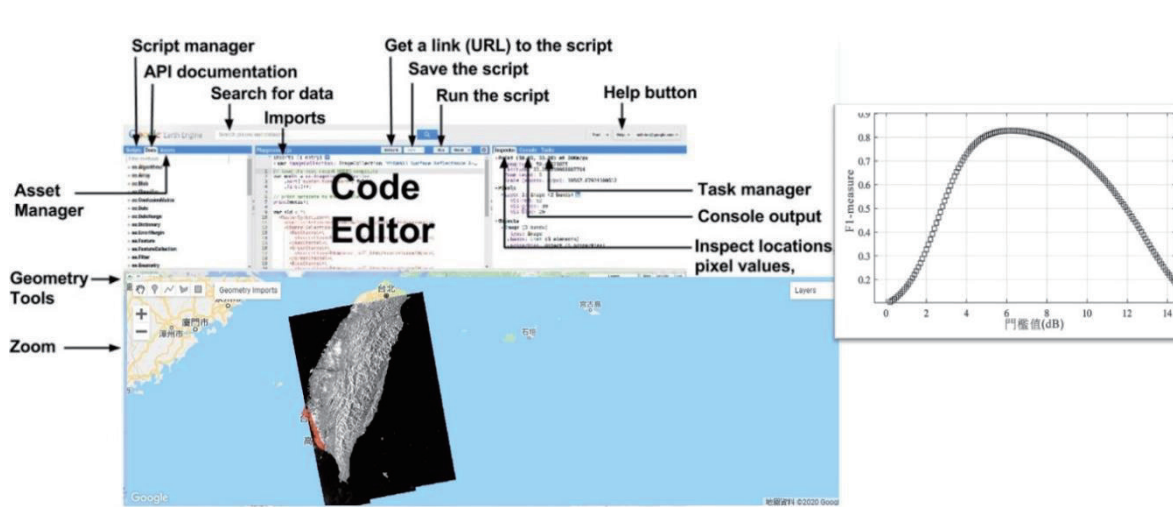


圖 3. Code Editor 功能頁面及前後期影像 Mosaic 後之影像範圍(左)；  
水體變遷偵測門檻分析(右，取自邱俊穎 等人，2019)

## 結果與討論

分析結果顯示 2018 年 0823 熱帶低壓強降雨造成之淹水範圍集中在雲林縣、嘉義縣/市及台南市，於 2018/08/26 分別仍有 466.9ha、748.1ha 及 295.1ha 的淹水面積，分布範圍多位於西部沿岸區域(如圖 4)，其中布袋鎮、水林鄉、東石鄉、口湖鄉及朴子市為雲嘉南所有鄉鎮中淹水面積最多的前五個鄉鎮(如表 1)。如以台南市為例，淹水較多的鄉鎮為鹽水、北門以及七股，其中七股區沿岸區域部分無 Sentinel-1 影像，故實際淹水面積可能高於本研究分析結果。整體而言，本研究使用 GEE 分析之結果與前人研究大致相符(邱俊穎等人，2019)，淹水總面積相差約 0.3%，其淹水熱區分布亦相符。

由於雷達影像應用於區域淹水之判釋結果，仍有兩因素易導致範圍誤判，其一為淹水範圍位於都市區域時，人工建物容易引起之角反射現象，其二為含水量高之土壤反射特徵介於水體與乾燥土壤之間，而此類型地表亦容易誤判為淹水水體。欲解決上述問題，未來可針對面積門檻的篩選以及局部區域設定門檻值，以區分出含水土壤與水體之差異。此外，針對本研究現階段使用之判釋方法，若應用於水庫或堰塞湖等大面積蓄水區域進行水體判釋，並結合 DEM 資料，可進一步探討水面表面積與蓄水深度、體積間的關係式，未來即可減少人工方式量測或架設儀器之數量，以雷達影像為主要水體監測依據，並輔以少量監測數據進行校正與驗證，以達到大範圍、近即時之監測目的。

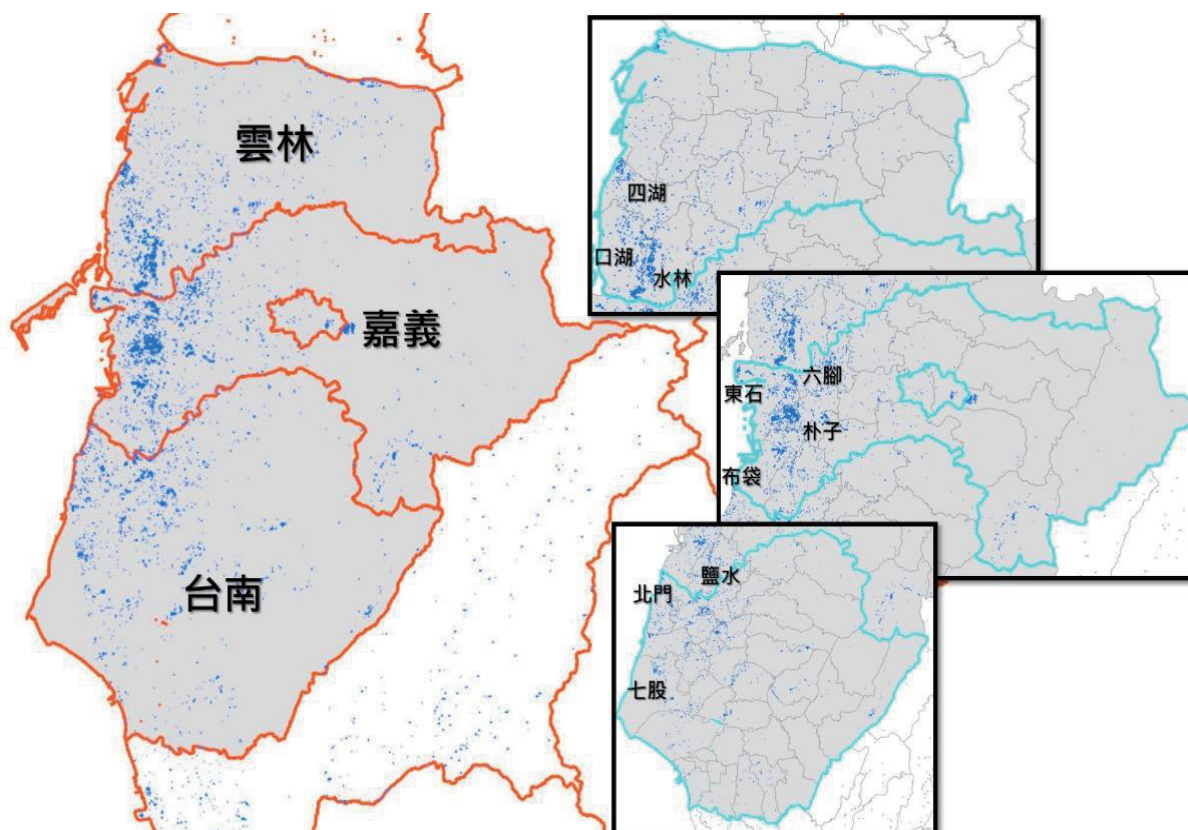


圖 4 淹水範圍分布圖，其中左圖橘色線條為縣市分界線，左圖深藍色色塊為淹水範圍，右圖亮藍色為縣市分界線，右圖淺灰色線條為鄉鎮分界線。

表 1 雲嘉南部分鄉鎮淹水面積

鄉鎮名稱	淹水面積(ha)	鄉鎮名稱	淹水面積(ha)
布袋鎮	222	朴子市	103
水林鄉	180	鹽水區	53
東石鄉	175	北門區	42
口湖鄉	142	七股區	28

GEE 平台中的資料庫目前已標準化許多開放資源衛星資料，其雲端分析之效能藉由本研究之經驗可推測一二，以雲嘉南地區共計 5,445 平方公里為例，雷達資料的搜尋、裁切、讀取、計算及成果展示，其運算時間約莫 10 秒內可完成，唯實體圖資之上傳/下載時需明顯的等待時間；整體來說，GEE 平台圖形化介面友善度與內建演算法之優化程度較傳統遙測處理軟體相比仍有落差，但其長時序資料量、高效運算力與自主發展的彈性，供各單位以快速、低成本方式評估多元遙測資料於評估災害熱點區域且分析成果可進一步供各單位進行決策之依據。

## 引用文獻

- 邱俊穎、謝嘉聲、黃宗仁、葉堃生、管立豪、胡植慶 (2019) 合成孔徑雷達影像於颱風豪雨後淹水之偵測。航測及遙測學刊 24(4)：211-222。
- 中央氣象局 (2018) 中央氣象局研析低氣壓強引發豪雨情形及氣象歷史資料，檢自 [https://www.cwb.gov.tw/V8/C/\\_](https://www.cwb.gov.tw/V8/C/_)(2018.8.30)
- Google Earth Engine - Guides, 檢自 <https://developers.google.com/earth-engine> (2020.8.20)
- GEE 應用分享, 檢自 <https://tech.swcb.gov.tw/Results/GEE>(2020.8.20)
- The Sentinel-1 Toolbox, 檢自 <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1> (2020.8.20)
- Haifa, T., Bahram, S., Masoud, M., Lindi, Q., Sarina, A., and Brian, B. (2020) Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 164 : 152-170.

## 氣候變遷下日本土砂防災策略演進

詹婉妤<sup>1)\*</sup> 林家興<sup>1,2)</sup> 陳振宇<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 行政院農業委員會水土保持局技術研究發展小組，南投市中興新村省府路 2 號。

\*通訊作者。E-mail: : abu026@mail.swcb.gov.tw

<sup>2)</sup> 財團法人農業科技研究院。300-110 新竹市香山區大湖路 51 巷 1 號。

### 摘要

台灣及日本，每年均面臨地震、颱風、豪雨及其衍生之土砂災害，造成嚴重災情。儘管歷年來台日二國均已建立土砂防災相關機制，惟面臨氣候變遷等衝擊，極端降雨事件發生規模與頻率均有逐年增加之趨勢，傳統防災機制與思維似已無法有效因應。日本近年來連續發生多起重大水災及土砂災情後，相關單位已針對近期土砂災害特徵及氣候變遷下土砂防災對策密集研商，並提出相關調適策略與作法。本研究係蒐集及分析日本近期相關重要文獻，歸納整理其核心策略，結果發現，其土砂災害調適策略可概分為 10 個項目，含括軟體、硬體、管理及自主防災等四個面向，相關結果可作為國內未來推動氣候變遷調適相關計畫及研擬土砂災害對策時參考。

### 緒言

日本國土約 70% 是山地，因地形陡峭、地質脆弱，具備土砂災害高風險之特性，再加上全球暖化所形成氣候變化異常，短延時強降雨之降雨型態轉變，局部性、突發性暴雨造成的「洪水與土砂氾濫」災害也隨之增加，造成慘重災情。依據國土交通省(2018)統計，近年來日本時雨量超過 100 毫米的短延時強降雨發生機率為 30 年前的 1.7 倍(圖 1)，同時依據推估在 RCP2.6 及 RCP8.5 情境下，未來降雨量可能增加 1.1 倍至 1.3 倍，而洪水發生機率可能上升 2 到 4 倍，意即在現在情況下 200 年一次洪水事件，在未來變成 100 年一次洪水事件，而現行治水設施防護能力將不足以因應未來氣候變遷治水安全度 (表 1，國土交通省，2018)。

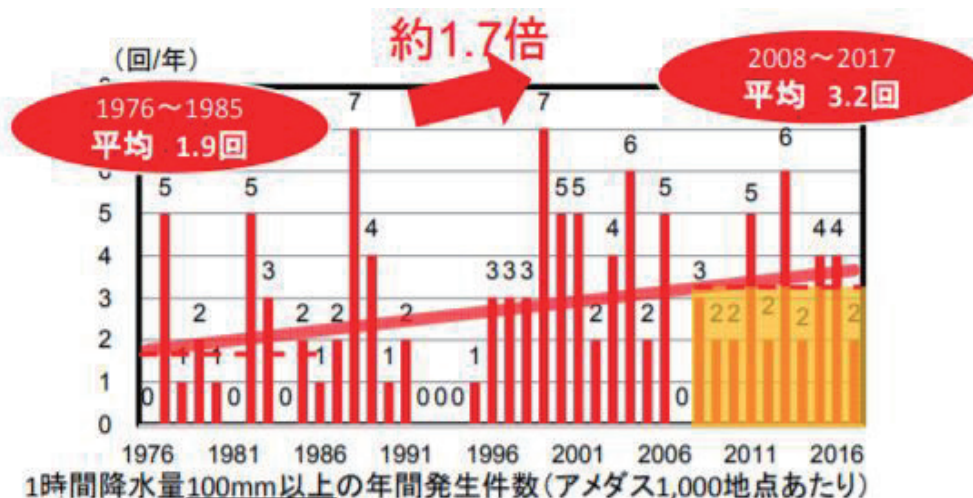


圖 1 歷史降雨量觀測值變化趨勢 (國土交通省，2018)

表 1 氣候變遷下未來降雨量及洪水發生機率之變化

**<氣候變動による将来の降雨量、洪水発生確率の変化倍率>**

前提となる気候シナリオ	降雨量変化倍率 (全国一般水系の平均値)	洪水発生確率の変化倍率 (全国一般水系の平均値)
RCP8.5(4°C上昇に相当)	約1.3倍	<b>約4倍</b>
RCP2.6(2°C上昇に相当)	約1.1倍	<b>約2倍</b>

## 方法

## 一、日本氣候變遷調適策略基本方針

針對氣候變遷可能帶來的衝擊，日本國土交通省(2015)已設定調適策略基本方針摘要如下：

- (一) 基於不確定性的適應性管理。根據氣候變動的進展，包括持續監測氣候變化狀況、最新氣候預測數據、當地社會經濟條件變化以及考慮到現有和新措施對降低風險方面之效果，以確保在適當時機選擇正確的調適策略措施。
- (二) 處理目前所出現的事件。目前日本觀察到氣候變遷伴隨短時間強降雨發生頻率增加、乾旱日數增加等現象，針對這些現象及事件，包含已實施之防災措施，基本上將其定調為調適措施並進一步推廣。
- (三) 考量納入未來之影響。儘管未來氣候變遷的影響程度和發現時間點存在很大的不確定性，但隨著氣候變遷的發展，大規模災害事件對社會將產生重大影響。因此，在考慮氣候變遷影響的對策時，需注意事件的發生頻率將因氣候變遷而產生變化，包含發生頻率低但產生大規模影響的事件，盡可能考慮各種事件並思考對應處理方法。
- (四) 考量軟、硬體之綜合措施。考慮氣候變遷影響所造成之風險程度及地域特性，綜合考量設施整備等硬體措施，以及向居民提供警戒訊息、演練、避難等各項軟體措施，並採資通訊技術(ICT)積極傳達、發布預警或避難疏散情報給居民，同時考慮使用大數據資料。
- (五) 於各種事業計畫考慮氣候變遷之影響。為有效實施調適策略，應將調適氣候變遷的影響納入各種事業計畫中，在基礎設施和系統的維護、管理及更新的同時，必需要考慮未來氣候變遷影響，對這些設施未來設計進行檢討。
- (六) 與自然環境和諧共生。根據目的地之地域特徵，利用自然環境的多樣性功能(如綠色基礎設施)，為生物提供棲息及生育場所、形成良好的景觀、抑制溫度上升，以達成與自然共生、環境和諧相處。
- (七) 考慮地域特性並推動各級地方政府、企業與居民合作。由於脆弱度及曝露度受氣候變遷的影響因地域不同而異，在推動調適策略時，應考慮地域特性不同並適時靈活調整對策，並促進地方政府、企業、居民等不同參與者之合作。

## 二、氣候變遷下土砂防災領域面臨課題

日本近年來連續發生多起重大水災及土砂災情後，相關單位已針對近期土砂災害特徵及氣候變遷下土砂防災對策密集研商，並提出相關調適策略與作法，圖 2 為近年來日本土砂災害特徵，包括：受災範圍廣且多處同時發生、颱風衍生的災害比過往事件大、土砂及洪水氾濫災害更加頻繁。本研究以文獻分析法針對所蒐集文獻內容有關氣候變遷對土砂影響等進行彙整，以瞭解目前氣候變遷下土砂防災領域所面臨之衝擊課題，綜整如表 2。

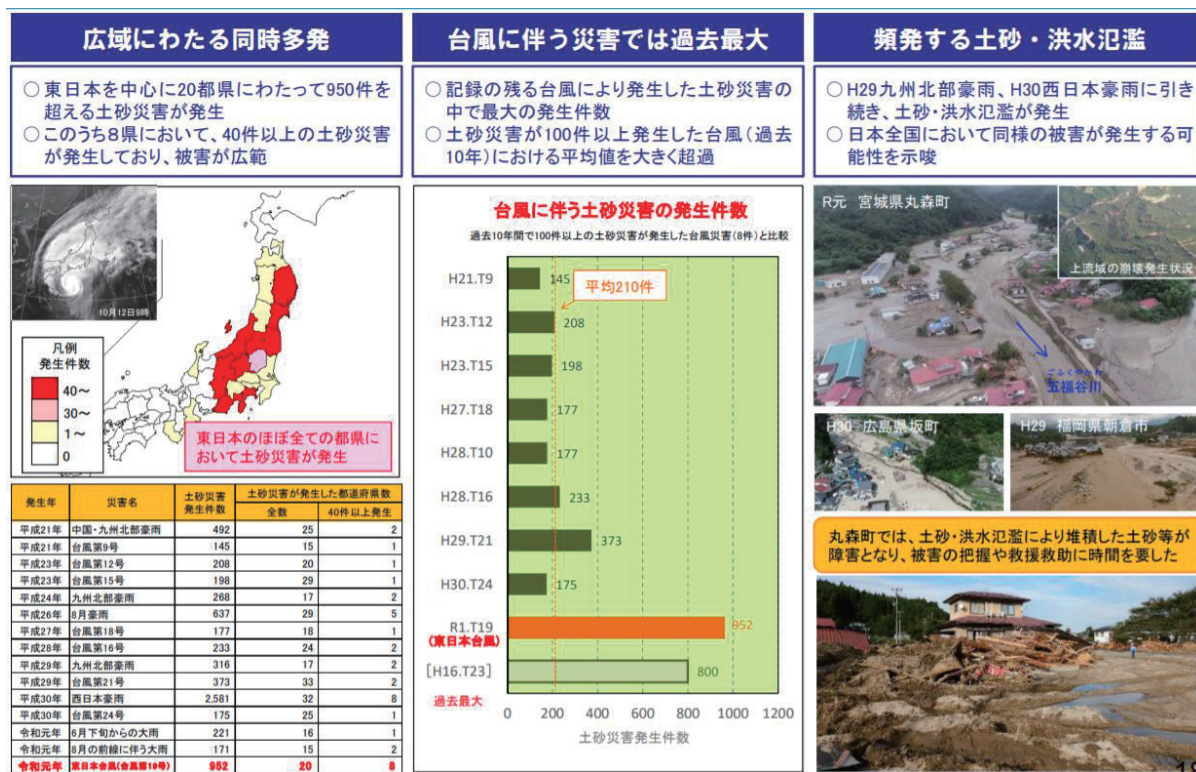


圖 2 日本近年土砂災害特徵(国土交通省，2019)

表 2 氣候變遷下土砂防災領域面臨之課題

文獻名稱	年份	氣候變遷之衝擊課題
水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について(答申) (日本国土交通省社会資本整備審議)	2008	隨雨量變化及豪大雨發生頻率增加，使得崩塌、地滑災害風險增加，土砂災害更嚴重。
国土交通省気候変動適応計画-気候変動がもたらす我が国の危機に総力で備える (国土交通省)	2015	1. 短時間強降雨増加，土砂災害發生頻率增加。 2. 突發性的局部強降雨造成土災害增加，並縮短警戒避難的時間。 3. 颱風等造成深層崩塌等災害會因颱風降雨量破紀錄而增加土砂災害。
大規模広域豪雨を踏まえた水災害対策のあり方について～複合的な災害にも多層的に備える緊急対策～(答申) (日本国土交通省社会資本整備審議)	2018	1. 逃生不及導致大量人員傷亡，由於周遭地區已處於危險之中，撤離時災難已發生因此無法順利避難。 2. 派出人員到多個地方整備局協助災害緊急應對，但由於情報有限，要對人員及資源等進行分配。 3. 災害初期很難具體掌握整體情況，並即時採取行動，例如進入私人土地清理淤砂、漂流木等。
近年の土砂災害における課題等を踏まえた土砂災害対策のあり方について(答申) (日本国土交通省社会資本整備審議)	2020	1. 在土砂災害警戒區必須建立維護預警避難系統。 2. 某些發生土砂災害地區未達到被指定為土砂災害警戒區。 3. 土砂災害警戒區的指定標準需再研議。 4. 在土砂災害警戒區，但沒有意識到土砂災害的危險。 5. 在指定完成土砂災害警戒區之後，防災地圖尚未完成，使得居民無意識到危機感，同時對於防災地圖沒有認知度。 6. 土砂災害預警發佈市村町與實際發生災害市村町之誤報率過大，正確性仍有待改善 7. 發布預警後，仍未到達危險降雨量。 8. 達到危險降雨量時，距實際發生土砂災害仍有很長時間。 9. 災難發生經過很長時間，但期間不知道危險度的變化情形。 10. 夜間發出警戒避難情報，市町村難以做出避難勸告的建議。 11. 居民不瞭解土砂災害的危險性，可能不採取避難疏散行動，在防災教育上仍不足。 12. 地方政府間對於推展防災活動並不一致。 13. 由於水災和土砂災害是同時發生的，因此很難掌握土砂災害的發生資訊，提升土砂災害發生預測的技術，包含災害發生時間等重要資訊。

## 結果與討論

面對近期日本土砂災害特徵及所面臨之課題，国土交通省等單位已分別成立相關委員會會議研提土砂防災工作之調適策略，含括軟體、硬體、管理及自主防災等四個面向，茲綜整重點如下：

- 一、防災以保護人命為優先考量，除改善硬體工程、避難處所等公共設施外，並保障社會經濟活動。此外，為更有效地使用現有設施，應適時清除防砂壩淤積土石，檢討更合理的規劃設計和材料使用，以提升設施防護力。
- 二、由於土砂災害是由複雜誘因、相互關聯的因子所致，難以準確預測其發生，故軟體防災與硬體減災對策之整合非常重要。日本依據土砂災害防止法，已推動土砂

- 災害警戒區之指定，惟在完成指定之法定程序前，仍應將其基礎調查結果盡早告知居民該處之土砂災害潛勢，同時藉由規劃災害潛勢圖和各階段行動計畫來強化預警避難系統，並對地方政府公務人員和居民進行防災教育，以培育土砂防災人才。
- 三、為因應近年來多處發生預警避難反應時間極短之土砂災害事件，應通過防災訓練和防災教育等來普及如何應對土砂災害的正確知識，並徹底通知民眾災害潛勢區及避難路線等資訊，以確保民眾能盡早遠離高風險地區。此外，除改善土砂災害警戒情報之精度外，應活用社群媒體等資訊收集和共享方式，以有效改善預警時間相對變短之災害事件。
  - 四、為因應土砂流動超過原計畫規模的情境，對於砂防設施如防砂壩等配置及構造應定期檢查，以確保能長時間發揮減災機能，並藉由軟、硬體共同運用等方式來確保居民的避難時間及場所，維護避難路線安全。
  - 五、深層崩塌的對策。利用衛星影像強化國土監測，可及早掌握深層崩塌所衍生的河道阻塞、天然壩等現象，強化危機管理的能量，此外，亦可使用新技術如空中電磁探查等以提升探查準確度。若因河道阻塞等造成嚴重災害時，應進行緊急調查並向市町村提供情報，平時須與相關單位聯合進行實際演練，並導入無人機等，以快速提升災害事件應對措施。
  - 六、在溝谷地形不明顯地區的土砂災害防災對策，應先瞭解需要提出重點對策的場所，並探討危險度評估的方法，以考慮更合理的設施構造與配置。
  - 七、土石流越過流域邊界的對策。適當的推估與模擬可能越過流域邊界的土砂量及範圍，並就模擬結果規劃相關軟、硬體對策。
  - 八、漂流木災害對策。使用高透過型防砂壩來提高捕捉漂流木效果，同時設置漂流木防止設施，並改良既有非透過型為透過型防砂壩。
  - 九、上游集水區管理。由持續累積的衛星及航空測量獲得詳細的地形資料，用以強化國土監測系統。此外，從國土管理觀點來看，為防止上游流域荒廢化，推動里山水土保持治理工程、綠化帶維護等項目，藉由軟、硬體綜合方法等各種支援措施來控制、防止土砂災害，以提高區域防災能力並振興(活化)當地社會。
  - 十、考慮災害風險的土地利用及住宅使用方式。藉由指定土砂災害警戒區域及公布基礎調查結果來促進更安全的土地利用方式。其中最重要的是確保有特別需求者(如高齡者、行動不便者、殘障者、嬰幼兒等)使用之社福設施和防災基地的安全。此外，針對災害風險特別高的地區，將指定為土砂災害特別警戒區，對其建築物之構造規則及住宅開發等進行限制措施，並促進危險地域之住宅移轉到安全地域，例如靠近懸崖之房屋進行搬遷或位於洪泛區域房屋搬遷至高台整備地上或河階台地上。

藉由日本氣候變遷情勢推估、近年土砂災害的特徵、氣候變遷對土砂災害的影響與衝擊、相關對策研析等資料，除可瞭解目前日本於氣候變遷對於河川及土砂防災對策等考量及制定過程，相關結果亦可作為國內未來推動氣候變遷調適相關計畫及研擬土砂災害對策時參考。

## 引用文獻

- 國土交通省 (2018) 異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能と情報の充実に  
向けて。異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会:1-24。
- 國土交通省 (2019) 確保具實効性避難之土砂災害対策(2019)。確保具時効性避難之土  
砂災害対策検討委員會:1-12。
- 國土交通省 (2020) 近年の土砂災害における課題等を踏まえた土砂災害対策のあり  
方について。社会資本整備審議会:1-17。
- 國土交通省 (2015) 国土交通省気候変動適応計画-気候変動がもたらす我が国の危機  
に総力で備える。国土交通省:1-24。
- 國土交通省 (2019) 因應氣候變遷防砂技術檢討會議。水管理暨國土保全局砂防部:1-4。
- 國土交通省 (2020) 因應近年來土砂災害課題之土砂災害対策作法答覆(概要)。國土交  
通省水管理暨國土保全局:1-12。
- 日本內閣府 (2015) 日本の災害対策 (Disaster Management in Japan)。DIRECTOR  
GENERAL FOR DISASTER MANAGEMENT CABINET OFFICE, GOVERNMENT  
OF JAPAN :1-49。
- 國土交通省 (2019) 令和元年の土砂災害。国土交通省砂防部:1-50。

## 知本溪調節式防砂壩構築效益之探討

許中立<sup>1)\*</sup> 邱欣蔚<sup>2)</sup> 王昭堡<sup>3)</sup> 許信智<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>國立屏東科技大學水土保持系，912 屏東縣內埔鄉學府路 1 號。

<sup>2)</sup>行政院農業委員會林務局臺東林區管理處治山課，950 臺東縣臺東市廣東路 297 號。

<sup>3)</sup>行政院農業委員會林務局集水區治理組，100 臺北市中正區杭州南路一段 2 號。

\*通訊作者，E-mail: clhsu@mail.npust.edu.tw。

### 摘要

臺東地區因位處地殼板塊接觸帶，出露的地層較為年輕與脆弱，再加上地震頻發與氣候變遷極端降雨而導致集水區的土砂災害劇增，危及下游公共設施與居住安全。過去針對災後巨量土砂所興建之防砂壩雖也發揮了抑制災害的效果，但在事過境遷土砂量減緩後，卻又顯出對溪流長期生態與溪床連續性的中斷及環境衝擊。傳統的防砂壩結構在構築時已固定，難以應付劇變的溪床土砂變動環境，因此有效經營管理集水區土砂安全運移是現今重要的課題。為改善既有防砂壩構築後難以變動的缺點，運用靈活可調節式的鋼管防砂壩，來達到滿足溪流不同時期的輸砂、防災或生態需求，是本研究的目標。2009 年 8 月莫拉克颱風侵襲造成知本溪上游集水區大量崩塌情形，崩落土砂料源逐漸往下運移，導致中、下游溪床淤積嚴重，抬高的溪床使洪水位提高，既有河溪保護工程與橋梁、溪岸邊坡與公私有地的安全受到嚴重威脅。為有效解決衍生的相關問題，本研究乃經調查評估而於知本森林遊樂區入口樂林橋的上游建立調節式防砂壩 1 座，同時嘗試降低其下游的既有防砂壩高度，期望能達到有效調整現有河床高程過高的淤積狀況。設置後經過三年的觀測發現隨著調節式防砂壩的拆卸調整，下游的溪床高度呈穩定的下降情形，且並未造成知本溫泉區段的過量淤積而釀災，未來也將持續觀察上下游單位的運作機制進行必要的調整建議，讓調節式防砂壩的構築效益得以發揮。

### 緒言

臺東的花東縱谷即是歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界處，歷經數百萬年板塊運動，造就了臺灣地形高聳陡峭，也受板塊擠壓之故，使得地震頻仍而地質破碎。再加上近年全球氣候變遷與極端降雨情形而導致集水區的土砂災害劇增，危及下游公共設施與居住安全。因此每逢雨季來臨時造成許多地區崩塌，甚至有土石流的危害，欲降低溪流土砂造成的危害，便需要在河道中施作許多防治工程。過去針對災後巨量土砂所興建之防砂壩雖也發揮了抑制災害的效果，但在事過境遷土砂量減緩後，卻又顯出對溪流長期生態與溪床連續性的中斷及環境衝擊。在舊版水土保持手冊(2006)中傳統的溪流防治工法以全封閉式防砂壩為主。全封閉式防砂壩主要是為了攔阻河道裡所挾帶的大量泥砂，更有穩定溪床坡度及控制沖蝕基準面等優點，但全封閉式壩體因無選擇性的攔阻所有泥砂，使得防砂壩很容易淤滿，失去了調節及攔蓄土砂的作用。自 2009 年 8 月莫拉克颱風後，野溪之各防砂壩有淤滿的狀況，更造成溪床抬升，若災後土砂不斷下移每年河道持續抬升，造成通水斷面不足，淹水面積則會擴大，而對於下游有人口或觀光產業密集

處造成威脅，進一步淹至農業用地、住家用地，對人民生命財產造成危害。傳統的防砂壩結構在構築時已固定，難以應付劇變的溪床土砂變動環境，因此有效經營管理集水區土砂安全運移是現今重要的課題。

Nakano et al.(2003)將鋼管壩歸類於透過性壩。傳統攔砂壩屬於不透過性之重力式混凝土壩。非透過性壩會在發生土石流前便堆積土砂，因而降低土石流捕捉之流量。另一方面，透過性壩在平常及發生中小規模溪水氾濫時不會堆積土砂，因此可確保上游擁有足夠之土砂捕捉容量，於土石流發生時得以發揮土砂調節的功能。另外，可藉由其通透性以維持水流連續性，使水棲生物自由地往來，減少自然環境的破壞。因此 1995 年起日本方面開始大量採用鋼管壩來攔阻土石流，惟其並不會以拆卸調整為訴求。陳樹群與、邱渝方(2019)提出「會呼吸的防砂壩」，係指用鋼製梳子壩拆卸組裝方便且快速的特性，在防砂壩淤滿後，應避免通過部的斷面阻塞；定期或颱風豪雨過後，立即檢查壩體內堆積狀況，必要時清除上游攔阻之土石材料，或拆除橫向功能構材，使細顆粒能隨水流流出。在下次颱風豪雨來臨時，能保有其攔蓄泥砂之空間；不僅如此，也應檢查壩體損害狀況，如腐蝕、磨損、變形等情形，破損的構材可利用其可拆卸性進行修補更換，損壞的構材則可回收再利用。將防砂壩之觀念重新思考為「蓄砂」，並加入「會呼吸的防砂壩」之概念，待蓄滿砂後再依需要調節防砂壩之高度，以調節現有溪床沖淤變化之問題。為改善既有防砂壩構築後難以變動的缺點，運用靈活可調節式的鋼管防砂壩，來達到滿足溪流不同時期的輸砂、防災或生態需求，是本研究的目標。

臺東縣知本溪於莫拉克颱風侵臺時造成上游大量崩塌情形，大量的崩落土砂料源逐漸往下移，導致中、下游河床淤積嚴重，危及知本森林遊樂區以下的各橋梁與河溪保護工程、溪岸邊坡、公私有地與附近住家安全，林務局臺東林區管理處依據專業研究建議，在知本國家森林遊樂區樂林橋上游約 500 公尺處，建置國內首座「可拆解鋼管調節式防砂壩」，用以調節土砂運移，於 2017 年啟用後，期有效調整知本溪床逐年淤高造成衍生災害情形。(許中立等，2018)

鋼管壩功能非攔砂、蓄砂，而是藉由可拆解的鋼管，調節土砂向下運移的量體，且鋼管壩採用綠色材料設計，大幅減少混凝土用量與施工時間。各鋼管組件以強力螺栓進行組合為主，鋼管壩阻砂容量可由鋼管拆卸而自由調節，因應溪流在不同狀態時期的防砂需求。另外在兼顧河川生態需求考量，鋼管採高低斷面設計以降低河床高差，營造低水流路，混凝土壩柱採粗糙面設計，供臺東間爬岩鰍、禿頭鯊等魚類洄溯。鋼管壩完成後，粗估有效調節土砂至少 50 萬立方公尺。

## 方法

### 一、地理位置

本研究設置觀測區域為臺東縣知本溪中下游流域（原係由出海口起算，惟主要探討的重點仍係新建溫泉橋至新建可調式防砂壩之間），區域位置如圖 1 與圖 2 所示。

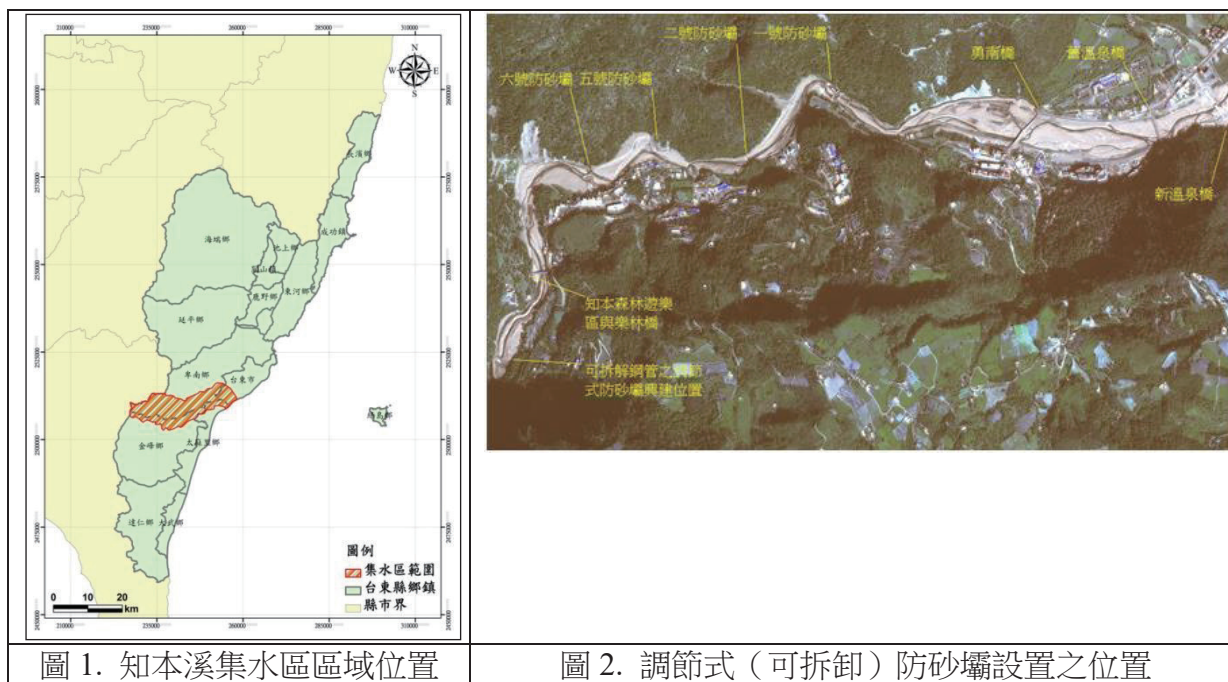


圖 1. 知本溪集水區區域位置

圖 2. 調節式（可拆卸）防砂壩設置之位置

## 二、調節式（可拆解）防砂壩介紹

防砂壩（日本稱 *sabo dam*）臺灣早期以攔砂壩稱之，主要由攔水壩的概念延伸而來，一般民眾也都對攔砂壩一詞能朗朗上口，再加上中國大陸大量使用淤地壩的名詞之故，容易誤認防砂壩主要功能就是攔蓄（阻）砂石，一旦淤滿就失去其功能，必須清淤以回復原有庫容。這也是為何一些環保團體認為政府相關單位對防砂壩清淤不力、致防砂壩興建沒幾年就淤滿、不符合經濟效益也危害生態等而強烈質疑，因此在治山防災工作上不斷強調「防砂壩」一詞正名的重要性。舊版水土保持手冊(2006)將其設置目的清楚定義為「攔阻或調節河床砂石；減少河床坡度，抑止亂流，防止橫向沖蝕；固定兩岸坡腳，防止崩塌；抑止土石流，減少災害等。」也就是說攔阻砂石、抑止土石流確實是防砂壩空庫時的重要功能，但防砂壩淤滿後也因為溪流坡度減緩而抑制了溪床的縱橫向沖蝕，又因為淤滿後對兩岸坡腳的壓制，而達到固定兩岸坡腳及防止崩塌等功能。簡言之，防砂壩不論淤滿與否都有其功能。

知本溪之調節式防砂壩(圖 3、圖 4)乃是為因應上游流域來砂量逐年增加所做之對策，透過可拆解式之鋼管，以改善現有固定式鋼管壩之缺點。此次興建的調節式防砂壩之型式，共有七個開口，每個開口有兩段鋼管，分別各為 4m 高。上游來砂與下游趨於平衡時，可視防災需求移除部份鋼管，以提供河川之基本輸砂需求，同時維持一定的防砂能力。為防患下次發生嚴重之土砂事件，可於災害事件後重新加裝鋼管。調節式防砂壩重點在強調藉由壩體透過動態評估與人為調整來經營管理河道中的土砂運移，最終目的在藉由調整過程，使河川漸趨回復自然平衡狀態。壩體的可調整性，改變了以往固定不變的思維，並透過此種新思維改善一般民眾對於工程會危害生態之老舊印象。



圖 3.知本溪之調節式防砂壩全貌



圖 4.知本溪之調節式防砂壩淤積情形

### 三、土砂變動監測與評估方法

為瞭解集水區土砂災害之成因與土砂運移情形，建壩前後均有進行土砂調查與分析工作目的，透過航拍與衛星影像計算崩塌面積。集水區的土砂生產來源又可分為兩種，即坡面上的崩塌與表土沖蝕(河道兩岸沖蝕不計)，故可透過這兩種生產機制的推估，計算集水區的土砂生產量。圖 5 為知本溪集水區的衛星影像，而各集水分區之崩塌地則是以先以影像軟體初步篩選再輔以人工圈畫方式進行。

根據行政院水土保持局(2008)「集水區整體治理調查規劃參考手冊」，本研究推估崩塌地泥砂產出總量以下式計算之：

$$V_p = D \times A_p$$

式中， $V_p$ =崩塌土砂體積、 $A_p$ =崩塌地實際面積、 $D$  =崩塌地平均崩塌厚度

崩塌地平均崩塌厚度由現地調查推估，或衛星影響判釋結果參考國內外相關學術研究之建議值推算（如表 1 所示），本研究評估崩塌厚度採用歐陽元淳(2003)方式推估知本集水區內崩塌區域之崩塌土方量。

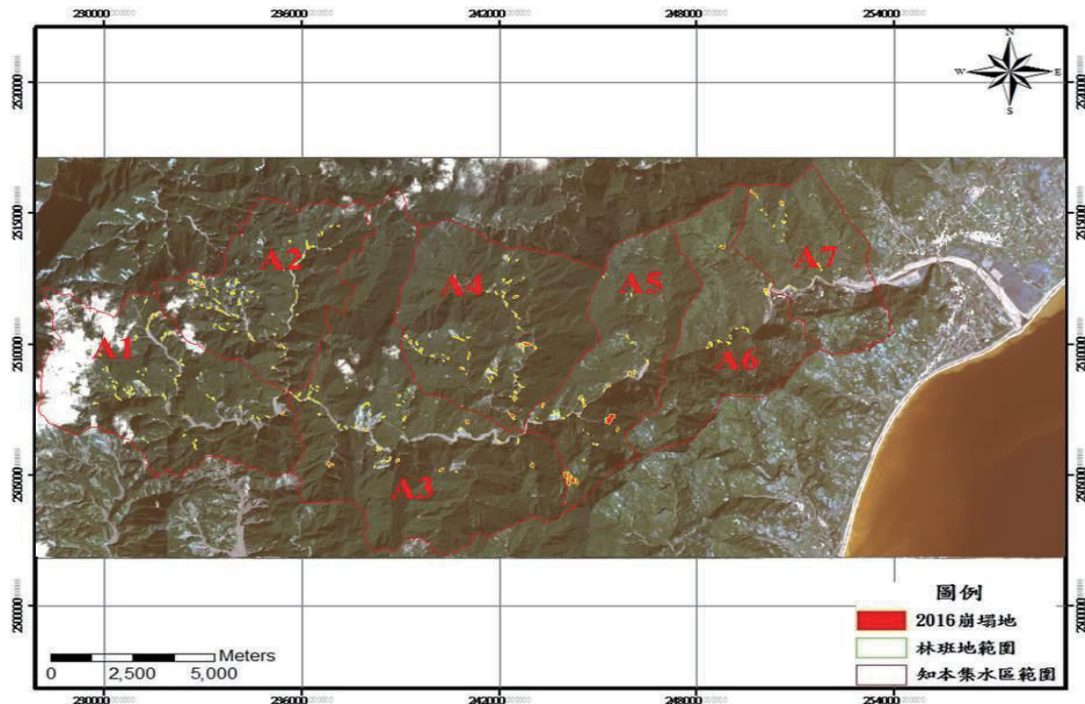


圖 5.知本溪集水區崩塌地圈畫範圍

表 1. 崩塌深度估計參考表

坡面坡度 (度)	深度 <sup>註1</sup> (m)	深度 <sup>註2</sup> (m)	深度 <sup>註3</sup> (m)	深度 <sup>註4</sup> (m)
<30	5	2	3.5	0.9
30~40	4	1.5	2.75	0.9
40~60	3	1	2	0.9
>60	2	0.5	1.25	0.9

註 1：國家災害科技研究中心  
 註 2：Khazai and Sitar(2000)  
 註 3：中興工程規劃案採用前兩者平均值  
 註 4：歐陽元淳(2003)等值法

泥砂遞移率則採用陳樹群與賴益成(1999)利用空間分布理論簡易地分析影響坡地的因子所建立的 SDR 公式進行估算。

$$SDR(\%)=165.67 \times A^{-0.24}$$

式中 A：集水區流域面積(km<sup>2</sup>)

整治效益評估方法則是利用無人飛行載具進行空拍及河道大斷面測量成果搭配進行探討，空拍應用軟體有航測影像處理軟體 Pix4Dmapper、比較 DSM 差異之工程繪圖軟體 AutoCAD Civil 3D 與 ERSI Arc Map 等。(許中立等，2019)

## 結果與討論

### 一、集水區之崩塌及土砂量體評估

本演算方式係採計上游子集水區之泥砂生產量及本區崩塌量與土壤流失量，並考量泥砂遞移率問題，求出各區泥砂生產量，如圖 6 所示。

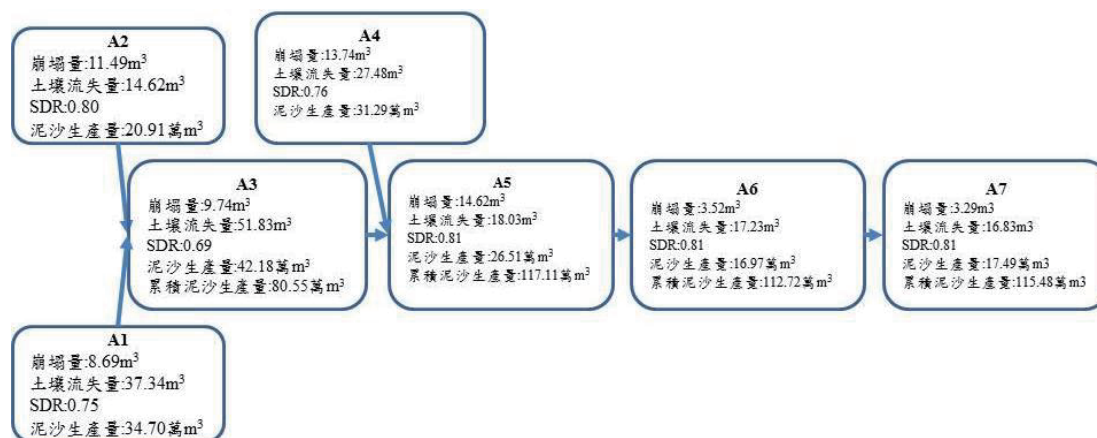


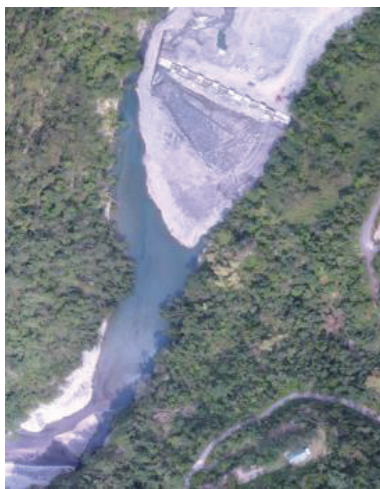
圖 6.知本溪集水區 2017 土砂演算流程示意圖

由計算結果得知，主要監測區域(A7)於 2017 年泥砂生產量約 115 萬 m<sup>3</sup>，而參考 2016

年知本溪土砂運移評估計畫計算之泥砂殘留量累加本年度新增之土砂生產量，共計約尚有 360 萬 $m^3$ 土砂量殘留於上游。又分析其中年土壤流失量約為 85 萬 $m^3$ ，由此可知，倘若知本溪無新增崩塌的情況下，每年需運移約 85 萬 $m^3$ 之土砂量，其中包含沖瀉載(wash load)、河床載(bed load)等，方能維持沖淤平衡，如圖 6 所示。

## 二、建壩後整治效益評估

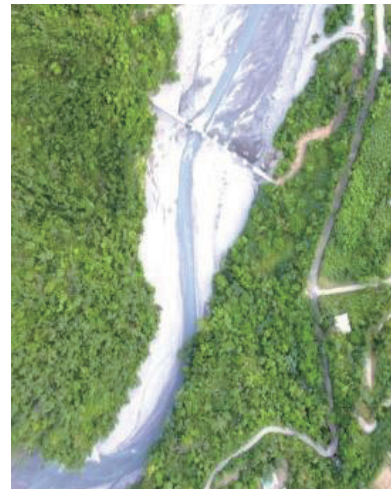
於 2017 年建壩完成前後共拍攝三次，時間點分別為 2017/03/05、2017/06/06 及 2017/07/28，因降雨對於河道沖淤有明顯的變化，其結果能看出於現有鋼管壩開口型式與拆壩（六號壩與一號壩部份打除）事件對於河道之影響如下：1.從圖 7 可得知在連續降雨後，新建壩體確實發揮其設計淤積攔截上游土砂與調整流心之功能。2.由圖 7(a)與圖 7(b)比較分析，因這次梅雨的降雨事件是在新建壩體完工後第一場遇到較大的降雨事件，下游段已有沖刷的跡象，而上游河道雖開始淤積，但仍有足夠的空間可以容納後續集水區下移土砂的淤積，淤積的情形有向上游延伸的情形（增加淤積空間），流心部份則因建壩時所需導水渠道復原而有明顯的變化。3.一般防砂壩之建立必影響河道沖淤變化，遇洪水時影響變化尤為劇烈，而本次利用知本溪 2017 年 6 月 1 日及 8 月 21 日河道大斷面測量資料，以河道測量之各橫斷面最底點繪製縱斷面圖，以瞭解可調式防砂壩造成溪床沖淤影響變化，如圖 8 所示。因上游集水區泥砂下移故溪床整體呈現淤積情況，平均高程上升 2.9m，最大高程差距為 3.47m 於 4K+900 處，可調式防砂壩之設計壩高為 8m，目前至壩頂尚餘 3.2m 淤滿。4.可調式防砂壩下游不僅淤積量降低更已出現沖刷情形，因此建議的策略(含下游壩體部份打除)可有效調節了上游與下游之輸砂平衡，也達到預期之淤砂高度，減少對防砂壩下游河川之負擔。



(a)2017/03/05



(b)2017/06/06



(c)2017/07/28

圖 7. 壩體附近空拍圖

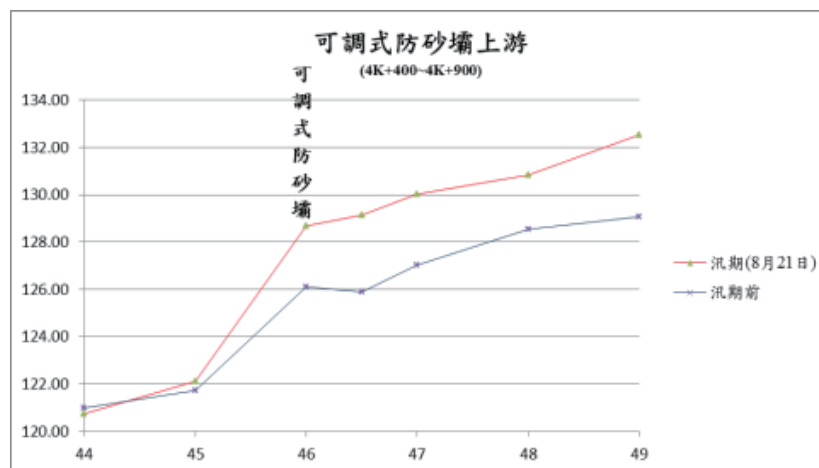


圖 8. 溪床縱斷面圖

### 三、建壩對環境生態之影響

經調查發現，建壩前後的生物類群的生物類群組成很相似，顯示壩體建造工程對於溪流生物的類群組成而言干擾不大。這說明工程開始的時機很重要，如果工程開始的時機配合生物類群的季節性變化，對於溪流中的生物而言，工程就好像經歷一場颱風洪水一樣的干擾。而群聚的分析結果也顯示，臺東間爬岩鰍、日本禿頭鯊、過山蝦在防砂壩上游及下游的月別組成越來越相似，這也說明了壩體建造工程後一條暢通的生態廊道已形成。就上述的結果來看，壩體建造工程的結果對於魚蝦、溪流生物以及哺乳類動物來說影響漸微。

### 引用文獻

- 行政院農業委員會水土保持局 (2006) 水土保持手冊。
- 行政院農業委員會水土保持局 (2008) 集水區整體治理調查規劃參考手冊。
- 陳樹群、賴益成 (1999) 河川與集水區泥砂遞移率之推估。中華水土保持學報 30(1):47-57。
- 陳樹群、邱渝方 (2019) 會呼吸的防砂壩。科學發展月刊 560:56-62。
- 許中立、邱欣蔚、張蘇能、蘇志凌、鍾宇泰 (2018) 知本溪可拆式鋼管調節壩之構築與效益。臺灣林業科學 44(4):3-9。
- 許中立、柯典佑、袁恆德、鍾宇泰 (2019) 無人飛行載具的控制點分布對空拍拼接成果之影響。坡地防災學報 18(1):1-20。
- 歐陽元淳 (2003) 水庫集水區土壤沖蝕之研究-以石門、翡翠水庫為例。國立臺灣大學地理環境資源學研究所碩士論文。
- Nakano, H., Kasai, S., Moriyama, H., and Mizuno, M. (2003) Safer and more economical steel sabo dam designs. Kobe Steel Engineering Reports 53(1):86-90.

# 野火熱點空間區位萃取之研究

莊智瑋<sup>1)\*</sup> 曾俊偉<sup>2)</sup>

1) 國立屏東科技大學水土保持系，91201 屏東縣內埔鄉學府路 1 號。

\* 通訊作者，E-mail: markchuang@mail.npust.edu.tw。

2) 行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組，10066 台北市中正區南海路 53 號。

## 摘要

野火成因複雜，野火發生時將對人民生命財產安全造成威脅，亦對坡地環境造成嚴重危害。此外，對於干擾植群演替及動植物棲地破壞等問題更不容小覷。前人研究多著重於野火發生與氣候因子間關係，對於野火熱點空間區位萃取鮮少研究，如何萃取野火熱點空間區位供後續坡地防災及決策研擬乃目前重要課題之一。本研究選用大肚山台地為研究樣區，整合 13 個環境指標及羅吉斯回歸進行野火熱點空間區位萃取模式建置，其中以 2014 年野火發生事件作為模式建置，2015 年至 2017 年野火發生事件作為驗證，結果顯示，建模之整體分類準確度屬非常好；模式驗證之分類準確度介於 73%~76%間，顯示本模式可用於野火預測之可行性；再將野火風險圖予以分類並進行單位面積野火防範百分比計算，結果顯示以中高潛勢風險以上劃定為野火熱點空間區位較為適宜；另野火風險等級與環境指標間關係，整體而言，野火易發生於低溫、低海拔、坡度平緩、距道路距離近、NDVI 及 NDWI 值較低之區位。

## 緒言

大肚山早期種植的相思樹(*Acacia confusa*)已成老齡林，近年隨著鄰近都會區發展，相思樹林緣及林內人為活動頻繁，特別是焚燒垃圾、墳葬掃墓活動、戶外休憩等因素影響，致而野火事件頻傳(林朝欽等，2005)。野火發生不僅對鄰近人民生命財產造成威脅，亦會干擾植群演替損及野生動物與微生物棲地，野火過後也將造成嚴重土壤沖蝕、土壤 pH 值上升、土壤有效性養分含量及逕流量增加、土壤含水率下降並影響水質等坡地水土保持災害(林昭遠和陳明義 1992；何承穎 1999)。因此，若能快速及合理萃取野火熱點空間區位供後續坡地防災及決策研擬參考之用，實乃有其必要性。

燃燒需有三要素，包括燃料(如木材)、助燃物(如氧氣或二氧化碳)及溫度達到物質的燃點，當火災發生時將三要素之一項移除即可將火撲滅，本研究區域火燒主要影響因子為燃料(林朝欽和邱祈榮 2002，邱祈榮等 2006，Coen 2015)，而野火燃料源主要來自於植體本身，植體於萌蘖時，因含水量高，燃點較高，迨於旱季，逐漸失去水分，枯萎後易造成燃料堆積致生火燒；因此，瞭解植群演替、競爭將有助降低野火發生頻率(張集豪 2003，何承穎 2009，黃于軒 2012)。另造成野火成因眾多，除燃料本身，發生地點、時間及氣候條件間亦具有相關性(顏添明和吳景揚，2004；林朝欽等，2005；邱祈榮等，2006；Sayada et al.，2019)。近年由於遙測資料逐漸普及，整合地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)及遙感探測(Remote Sensing, RS)技術亦逐漸被使用於環境指標(如年降雨量、相對溼度、溫度、風速、高度、坡向、坡度、土地利用、距森

林距離、距都市距離、距道路距離、距水系距離、常態化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、常態化差異水體指標 (Normalized Difference Water Index, NDWI)、常態化火燒指標(Normalized Burn Ratio, NBR)、火災天氣指數、地理位置指數等)之萃取，並應用於野火空間關係之研究上(莊翌琳等 2016, Fox et al. 2018, Santos et al. 2019, Collins et al. 2018, Hong et al. 2019)。

野火發生原因錯綜複雜，發生時常耗費大量人力物力救災，若能從預防措施著手，將對坡地防災有達事半功倍之效。而目前相關研究多著重於與氣候條件關係或預測模式之準確性來探討；爰此，本研究希冀整合環境指標與統計方法建立野火熱點空間區位萃取模式並劃定野火防範區位，俾供日後坡地防災及決策研擬參考之用。

## 方法

### 一、研究樣區與材料

研究樣區位處臺中市西側，清水海岸東側(圖 1)，海拔高約 250~300 公尺，屬東北向西南走向，月均溫 16~28°C 間，年降雨量約 1531.49 公厘，台地北有大甲溪流經，南則臨大肚溪；土壤質地多為紅壤土；大肚台地植被以大黍(*Panicum maximum*)及相思樹為主要優勢種。在空間資訊上，蒐集研究樣區內數值高程模型(DEM)、Landsat 8 衛星影像、墳墓分布、道路區位、氣候資料及歷年火災事件等資料，探討研究樣區內各環境指標與野火發生間關係。

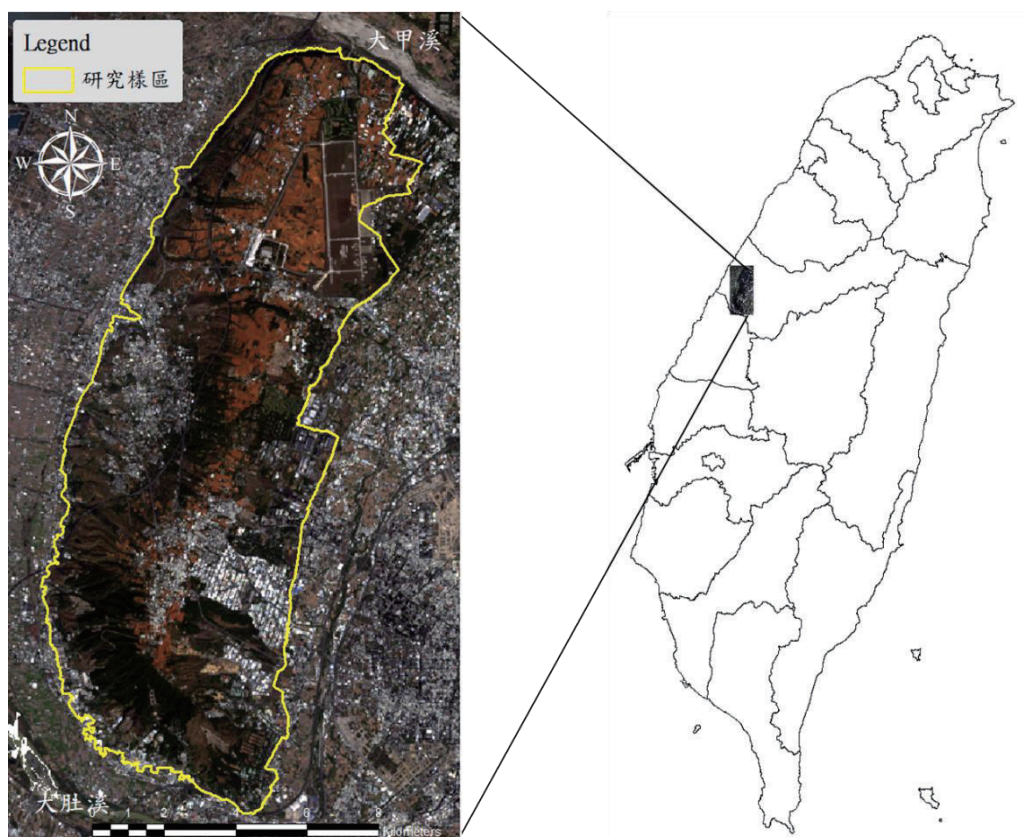


圖 1 研究區位

## 二、研究方法

### (一)野火空間資料建置

蒐集研究樣區內 2014 年至 2017 年各月份野火紀錄資料，由於目前內政部消防署建置火災資料係以案發地點鄰近地址進行紀錄，因此，本研究利用地址轉換座標建置野火空間分布圖，作為後續模式建置及驗證之用；其中 2014 年野火調查資料用於模式建置，2015 年至 2017 年野火調查資料作為模式驗證。

### (二)環境指標

野火成因複雜，目前對於環境指標應用野火預測或熱點空間區位萃取模式尚無一致性建議。本研究以所能蒐集之基礎資料進行環境指標建置，概可分為氣候環境指標(降雨量、平均氣壓、溫度、相對溼度、風速及伊凡諾夫濕潤指標)、地形環境指標(海拔高程、坡度、坡向、距墳墓距離及距道路距離)及燃料環境指標(常態化差異植生指標及常態化差異水體指標)等 3 大類。

### (三)野火潛勢區位萃取

#### 1.羅吉斯回歸

羅吉斯回歸係一種常見於自然災害空間預測之方法(Zhao et al. 2019, Hemasinghe et al. 2018, Wang et al. 2016)。野火發生與否之預測，可視為預測發生或未發生兩種事件之機率預測，資料屬於二元資料(Binary)，其機率密度函數為非線性 S 型曲線，可用羅吉斯統計模式解釋，亦即預測野火發生機率(P)為受到某些因素(x) (如氣溫、溼度等環境指標)影響的機率函數。故運用羅吉斯回歸預測火災引燃機率，為一個可行之方式((Lin 1999, 林朝欽等 2005)。羅吉斯回歸使用模式如下：

$$z = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$$

其中 Z 表示野火事件的發生(1)或不發生(0)， $b_0$  為方程式截距， $b_i(i=0,1,2,\dots,n)$  為係數， $X_i(i=0,1,2,\dots,n)$  為環境指標。推估野火發生機率，羅吉斯回歸計算如下：

$$p = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

其中 P 為發生野火機率，其值介於 0 至 1 間，當 P 值愈大，表示發生野火機率愈高。

#### 2.模式檢驗

ROC(Receiver Operating Characteristic)之 AUC(Area under the Curve)常被用來評價二元分類器(Binary classifier)的優劣，ROC 曲線為一特異圖，即縱軸為真正率(True Positive Rate, TPR)，又稱為敏感度(Sensitivity)；橫軸為假正率(False Positive Rate, FPR)，以 1-特異度(Specificity)表示。在野火分類模式中，將分為發生野火及不發生野火兩種類別，敏感度及特異度分別表示為發生野火機率及不發生野火機率。公式如下：

$$\text{敏感度} = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$\text{特異度} = \frac{TN}{TN + FP}$$

其中 TP(真正性)係指發生野火被正確分類；TN(真負性)係指發生野火被錯誤分類；FP(假正性)係指未發生野火被錯誤分類，FN(假負性)係指不發生野火被正確分類。當 AUC 值等於 1 時，表示發生野火及不發生野火均被正確分類；另 AUC 值<0.6 表示差，0.6-0.7 表示普通，0.7-0.8 表示好，0.8-0.9 表示非常好，>0.9 表示極好(Hanley and McNeil 1982, Jaafari 2018)。

### 3. 模式驗證

由於羅吉斯回歸係利用非線性 S 曲線之機率密度函數預測野火發生機率(P)，當 P 值大於 0.5 時，即發生野火，反之即野火不發生，因此，本研究以 2014 年野火事件建置野火熱點空間區位萃取模式，再將 2015 年至 2017 年各野火事件帶入已建置完成之模式計算並進行判讀，即可求得驗證準確率。

## 結果與討論

### 一、野火好發時間及成因

由每月各氣候環境指標、野火月發生次數百分比及群集分析，顯示大肚山野火易好發於月平均降雨量、月平均溫度較低且月平均氣壓較高之條件下，好發月份為歷年 9 月至翌年 4 月，其中又以歷年 1 月至 4 月為野火發生頻率最高。因大肚山台地主要優勢物種為大黍(林朝欽等 2005)；黃于軒(2012)進行相關研究時發現，大黍生長特性為濕季具有較快速萌蘖、生長且較長成果期，迨旱季時，大黍失去水分後將枯萎堆積於邊坡上，倘若火源適時提供，將有助於野火發生。另從野火每月發生次次百分比發現，歷年 9 月至翌年 4 月亦呈現相對較高現象，推測野火發生次數多寡與大黍生長習性有關。

### 二、野火熱點空間區位劃定

劃定野火熱點空間區位供後續坡地防災及決策研擬乃極為重要，結果顯示野火發生主要集中於中高風險類別，占整體面積百分比約為 12%，其次為高風險類別，占整體面積百分比約為 5%，兩者風險類別野火發生百分比合計超過 60%以上，倘若針對此兩風險類別範圍進行野火防範，即可減少 60%野火發生機率。再將野火發生百分比與野火風險等級面積百分比進行比值計算，可發現將高風險及中高風險兩類別合併計算，野火防範面積增加 1%時，即可減少約 4%野火發生機率；若將野火防範發生等級提高至中等風險以上，則野火防範面積需增加至約 37%，即野火防範面積增加 1%可減少約野火發生機率約 2%。考量有限人力物力下，本研究建議野火熱點空間區位以中高風險等級以上劃定為宜。

### 三、野火風險等級與環境指標關係

茲將各級野火風險類別與具相關之環境指標進行統計分析，發現除距墳墓距離與 NDWI 等環境指標外，各環境指標均值與野火風險等級高低大致呈現負相關。再與各環境指標空間分布圖進行交叉比對，發現發生野火風險等級隨著月平均溫度、海拔高程、距道路距離、坡度及 NDVI 值愈高，發生野火風險等級愈低，推測當溫度愈高，空氣中所能包含水氣愈高，將不利野火的發生；海拔高程及坡度則係由於海拔愈高或坡度愈陡峭，土壤水分較低不利植物生長，導致其植體生物量(燃料)偏低有關，再根據 Flatley et al. (2011)在美國大霧山國家公園進行火災研究時指出，海拔高程愈高，野火發生機率亦有呈現愈低趨勢；距道路距離推測應與人為燃燒垃圾、雜草及隨手亂丟菸蒂有關，因火源未完全熄滅，經風吹襲飄移至路旁乾枯雜草叢，將有利野火發生；NDVI 係判別植生反射量之多寡，倘地表植物生育愈旺盛，其 NDVI 值愈高，本研究係採用 2014 年 12 月 22 日衛星影像，因該時期已屬冬季，大黍多偏乾枯狀態，故在 NDVI 值上呈現較低情況，進而導致本研究野火風險等級愈高，NDVI 值呈現愈低之結果。另在距墳墓距離及 NDWI 之值不隨野火風險等級高低呈負相關部分，因一般墳墓區位多設置人口聚集偏遠處，撲滅不完善之殘餘火源恐受當時風勢大小致飄移距離有關；NDWI 則係在高風險分類呈現值略高，餘均隨發生野火風險等級愈低，NDWI 值呈現愈高趨勢，推測發生野火高風險等級區位多處道路旁或人口密集處，因種植行道樹或設置綠地導致 NDWI 值偏高，但從整體趨勢而言，仍可發現 NDWI 值愈高，植體含水量愈高，野火發生風險性有降低之趨勢。綜上可知，野火易發生於低溫、低海拔、坡度平緩、距道路距離近、NDVI 及 NDWI 值較低之區位。

### 引用文獻

- 何承穎 (2009) 大黍為何能在火燒後成功入侵大肚山地區。國立臺灣大學生命科學院生態學與演化生物學研究所。
- 林昭遠、陳明義 (1992) 利用 AGNPS 模式評估野火對森林集水區磷肥運移之影響。中華水土保持學報 23(1)：33-43。
- 林朝欽 (1999) 台灣二葉松林燃燒機率之模式推導。台灣林業科學 14(3): 339-344。
- 林朝欽、邱祈榮 (2002) 解析林火行為--2001 年梨山林火個案研究。中華林學季刊 35:183-192。
- 林朝欽、邱祈榮、陳明義、蕭其文、曾仁鍵 (2005) 大肚山地區林火危險預測模式之推導。中華林學季刊 38(1):83-94。
- 邱祈榮、曾仁鍵、楊棋明、黃文達 (2006) 灰系統理論在生物學之應用：(5)大肚山氣候因子對其林火頻率與面積之灰關聯分析。作物、環境與生物資訊 3(4)：355-360。
- 莊翌琳、蘇潘、林昭遠 (2016) 大肚台地野火風險評估模式建置之研究。水土保持學報 48 (2): 1681-1696。
- 黃于軒 (2012) 重複性火燒對淨初級生產量、土壤呼吸及土壤微生物之影響。國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系碩士論文。

- 張集豪 (2003) 大肚山防火植栽帶建立之研究。私立東海大學景觀學系碩士論文。
- 顏添明、吳景揚 (2004) 南投林區林火影響因子之探討。林業研究季刊 26(1) : 47-60。
- Coen., J. (2015) WEATHER FORECASTING -Wildfire Weather. Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition) . pp.323-331.
- Collins, L., Griffioen, P., Newell, G., and Mellor, A. (2018) The utility of random forests for wildfire severity mapping. Remote Sens Environ 216:374-384.
- Flatley, W. T., Lafon, C. W., and Grissino-Mayer, H. D. (2011) Climatic and topographic controls on patterns of fire in the Southern and Central Appalachian Mountains, USA. Landscape Ecol 26:195–209.
- Fox, D. M., Carrega, P., Ren, Y., Caillouet, P., Bouillon, C., and Robert, S. (2018) How wildfire risk is related to urban planning and fire weather index in SE France (1990–2013). Sci Total Environ 621:120-129.
- Hanley, J. A., and McNeil, B. J. (1982) The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. Radiology 143(1):29-36.
- Hemasinghe, H., Rangali, R. S. S., Deshapriya, N. L., and Samarakoon, L. (2018) Landslide susceptibility mapping using logistic regression model (a case study in badulla district, Sri Lanka). Procedia Engineer 212:1046-1053.
- Hong, H., Jaafari, A., and Zenner, E. K. (2019) Predicting spatial patterns of wildfire susceptibility in the Huichang County, China: an integrated model to analysis of landscape indicators. Ecol Indic 101:878-891.
- Jaafari, A. (2018) LiDAR-supported prediction of slope failures using an integrated ensemble weights-of-evidence and analytical hierarchy process. Environ Earth Sci 77(2):42.
- Santos, J., Gleriani, J. M., Velloso, S. G. S., de Souza, G. S. A., do Amaral, C. H., Torres, F. T. P., Medeiros, N. D. G., and Dos Reis, M. (2019) Wildfires as a major challenge for natural regeneration in Atlantic Forest. Sci Total Environ 650(1):809-821.
- Sayad, Y. O., Mousannif, H., and Al Moatassime, H. (2019) Predictive modeling of wildfires: a new dataset and machine learning approach. Fire Saf J 140:130-146.
- Wang, Y., Song, C., Lin, Q., Li, J. (2016) Occurrence probability assessment of earthquake-triggered landslides with newmark displacement values and logistic regression: the Wenchuan earthquake, China. Geomorphology 258: 108-119.
- Zhao, Y., Wang, R., Jiang, Y., Liu, H., and Wei, Z. (2019) GIS-based logistic regression for rainfall-induced landslide susceptibility mapping under different grid sizes in Yueqing, Southeastern China. Eng Geol 259:105147. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105147>.

## 不同植生覆蓋對水文環境之影響

蘇子豪<sup>1)</sup> 曾俊偉<sup>2)</sup> 龔聖皓<sup>1)</sup> 廖晨喬<sup>1)</sup> 劉瓊霖<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> 國立中興大學森林系，40227 台中市南區興大路 145 號。

<sup>2)</sup> 行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組，10066 台北市中正區南海路 53 號。

\* 通訊作者，E-mail: cpliu@nchu.edu.tw。

### 摘要

土壤滲漏試驗結果發現，杉木區及雜木區在降雨量小於 40 mm 時，二區土壤的滲漏總量皆低於總雨量的 3%，顯示樹木對於減緩地表及地下逕流的功能良好。而山茶油茶混植的地表覆蓋相對於原草生地的地表型態而言，雨水從各層土壤的滲漏整體下降約 30–50%，顯示經濟樹種的栽植亦能有效提升水分的涵養。此外在模擬降雨下的滲漏水質分析結果發現，養分離子透過土壤的滲漏淋失主要以  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{SO}_4^{2-}$  為主，其中表層土壤的  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  及  $\text{Mg}^{2+}$  亦有淋失的狀況，主要與大量的地表逕流沖刷表土豐富的養分有關。經由降雨的總輸入及土壤滲漏的總輸出計算發現，在模擬強降雨的條件下  $\text{Ca}^{2+}$  的滲漏流失會大於降雨的輸入，長期之下可能造成土壤鈣含量的下降，然而其他多數的養分離子結果皆顯示，山茶油茶混植相對於草生地而言，可以有效減緩離子的淋失，具有養分涵養的功效。

### 緒言

近年來科學家發現，極端氣象災害事件對自然環境之衝擊，經常超過森林生態系之承載力 (carrying capacity)，故呼籲各國應正視森林面對極端事件之先天限制。有鑑於此，進一步確認林地承載力及合宜之土地管理政策，除有助於提高城鄉土地及自然資源之合理配置與利用外，亦利於推動山村特色之農林產業發展輔導，改善山村經濟。本研究透過常見的二種經濟樹種進行試驗，探討不同的植生覆蓋對水文環境之影響，分析降雨後之水分於土壤中的分布與移動情形，並瞭解水質隨土壤深度分布的變化。此外也探討在模擬強降雨下經濟樹種於栽植前後的土壤滲漏狀況，分析土壤水分及養分的涵養功能。

### 方法

本研究利用林業試驗所蓮華池研究中心之土壤滲漏計試驗區進行土壤滲漏試驗及水質取樣分析。土壤滲漏計試區設計共分為 3 個小區，各小區斜距為 10.4 m，寬 5 m，坡度為 20 度。底部為不透水混凝土構造，上方鋪設礫石 15 cm 後，再回填心土及表土各 42.5 cm。各小區依其地表植生狀況可分為杉木區、雜木區及山茶油茶混植區。試驗區下方設置一儀器房，置有地表、地中及地下三個不同土壤層次之出水口，出水口端再設置小型 60 度三角堰，以壓力式水位計分別監測地表、30 公分及 80 公分深處逕流流量，進而計算單場降雨之雨量於土壤中之分布比例。混植區選定台灣山茶 (*Camellia*

*formosensis*) 及油茶 (*Camellia oleifera*) 等樹種分二側進行密植，台灣山茶株距為 0.5 m、行距為 1 m，共計 50 株；油茶株距為 1 m，行距為 1 m，共計 20 株。

本研究為考量無降雨期間之試驗需求，已架設模擬降雨裝置在混植區上方，並於側方架設雨量計進行降雨量監測，同時參考范正成、吳明峰 (1996) 的方法，以 Christiansen 於 1942 年提出的公式計算人工降雨均勻係數，結果顯示該人工降雨裝置之降雨均勻度為 80%，穩定性良好。此外，山茶油茶混植區之二樹種分別埋設 3 隻土壤管進行土壤水的收集，埋設深度為 30 cm，該土壤管底端為陶瓷結構，埋設完畢後進行抽氣使管內呈現真空，土壤水將逐漸入滲於土壤管中。而管內土壤水的收集及土壤管重新抽真空之工作，主要於模擬降雨結束後進行。

## 結果與討論

### 一、土壤滲漏試驗

本研究藉由不同植生覆蓋探討降雨於不同土壤深度的滲漏狀況，試驗分別於山茶油茶的栽植前後進行，結果顯示在天然降雨場次下，杉木區與雜木區在降雨量較低時 (雨量 < 40 mm)，地表及地下逕流普遍皆未發生，二區各層滲漏量占該區三層總合比例皆小於 3%；在雨量約 40–60 mm 時，7–14% 的雨量滲漏出現於表層或底層；而當雨量高達 163 mm 時，二區方於底層出現 30–40% 的滲漏量。綜上顯示，此二區的樹木冠層截留及土壤的水源涵養能有效的避免水分於地表或地下的滲漏 (表 1)。

而在山茶油茶混植區栽植前的草生地則發現，天然降雨各雨量場次下多呈現 50% 以上的雨量於表層滲漏，顯示該區降雨普遍以地表逕流的方式快速流失，對於水源涵養的效益較低。此外亦觀察到在少數天然降雨場次下，各層土壤的滲漏水量皆相當低，此結果主要與較低的降雨強度有關 (<10 mm/hr)，在低強度的降雨下雨水較容易留存於土壤中。而在山茶油茶栽植後的滲漏試驗結果顯示，不同降雨量或降雨強度下的表層滲漏比例皆降至 45% 以下，表明林下經濟樹種的栽植，相對於原草生地的地表型態更能減緩地表逕流的發生 (表 1)。

另外在人工模擬降雨場次下，試驗主要為模擬極端天氣型態的強降雨事件，故降雨強度皆相對於一般天然降雨為高 (平均約 50 mm/hr)，在山茶油茶混植區最初的裸漏地地表型態下，約高達 80% 的降雨量於底層快速滲漏，而當地表轉變為草生地型態後，土壤滲漏則主要出現於表層及底層，各層滲漏總量亦高達 88%。然而在山茶油茶混植後可發現，各層土壤滲漏總量降至 30–60%，主要出現於土壤的表層與底層，顯示林下經濟作物的栽植對於極端強降雨的逕流減緩及水分的涵養存在功效。此外，該區部分場次的表層土壤滲漏量相當低，主要與降雨時土壤的濕潤程度有關，當模擬降雨時若表層土壤較為乾燥，則雨水會快速由土壤吸收，導致表層的土壤滲漏量大幅降低 (表 2)。

表1. 蓮華池天然降雨土壤滲漏試驗結果

單日降雨量 (mm)	平均降雨強度 (mm/hr)	杉木區 (mm)			雜木區 (mm)			山茶油茶混植區 (mm)		
		表層	中層	底層	表層	中層	底層	表層	中層	底層
4.5	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0
		0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	69.5%	0.1%	0.1%
12.0	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	0.0	0.0
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	48.3%	0.1%	0.1%
16.5	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.8%	0.7%	0.0%
50.0	28.6	6.9	0.1	0.0	0.0	0.1	5.7	26.0	0.1	3.6
		13.8%	0.2%	0.0%	0.0%	0.2%	11.3%	51.9%	0.3%	7.2%
3.5	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%	2.2%	0.0%	0.0%
4.5	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
		0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.0%	1.3%	0.0%	0.0%
10.5	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.2%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.4%	0.2%	0.0%	0.0%
14.5	10.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	1.2	0.0	0.0
		1.2%	0.0%	0.0%	0.3%	0.6%	0.7%	8.5%	0.0%	0.0%
32.0	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	5.0	0.0	0.1
		0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	1.7%	3.0%	15.7%	0.0%	0.2%
35.0	19.1	0.6	0.0	0.0	0.1	0.1	0.9	6.4	0.0	0.0
		1.8%	0.0%	0.0%	0.2%	0.3%	2.7%	18.2%	0.0%	0.1%
40.0	17.8	2.8	0.0	0.5	0.5	0.0	1.1	11.9	0.0	0.1
		7.1%	0.0%	1.3%	1.3%	0.0%	2.9%	29.7%	0.0%	0.2%
54.0	15.1	1.1	0.3	2.0	0.5	0.1	7.2	16.8	0.0	0.7
		2.1%	0.6%	3.6%	0.9%	0.3%	13.4%	31.2%	0.0%	1.2%
109.0	34.4	0.6	0.0	0.8	0.5	1.8	6.6	47.3	0.0	9.2
		0.5%	0.0%	0.7%	0.5%	1.6%	6.1%	43.4%	0.0%	8.5%
163.0	10.6	4.9	0.2	52.0	2.1	1.0	68.1	66.6	3.1	13.7
		3.0%	0.1%	31.9%	1.3%	0.6%	41.8%	40.9%	1.9%	8.4%

註：資料分區上方為栽植前草生地試驗結果；百分比資料為該層占所屬區域總合之比例。

表2. 蓮華池模擬降雨土壤滲漏試驗結果

地表型態	降雨量 (mm)	平均降雨強度 (mm/hr)	山茶油茶混植區 (mm)		
			表層	中層	底層
裸露地	50.0	50.0	0.0	0.2	39.7
			0.0%	0.4%	79.3%
草生地	41.5	49.8	13.0	0.6	22.7
			31.4%	1.5%	54.8%
山茶油茶混植	52.0	34.7	7.9	0.0	15.1
			15.1%	0.0%	29.1%
山茶油茶混植	49.5	66.0	10.7	0.0	18.8
			21.7%	0.0%	38.0%
山茶油茶混植	51.5	61.8	1.8	0.2	15.0
			3.5%	0.4%	29.1%
山茶油茶混植	47.0	43.4	0.7	0.2	15.9
			1.5%	0.4%	33.7%

註：百分比資料為該層占所屬區域總合之比例。

## 二、土壤滲漏水質分析

透過土壤各層滲漏水的離子層析，結合流量的監測資料，可以瞭解不同植生覆蓋與土壤深度下，土壤養分的淋失狀況。透過人工模擬強降雨並進行滲漏水的水質檢測，可進而探討在林下經濟樹種栽種前後的養分淋失狀況。栽植前的草生地試驗結果如圖 1，

滲出的離子主要以  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{SO}_4^{2-}$  為主，其中表層土壤的  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  及  $\text{Mg}^{2+}$  亦有淋失的狀況，主要與大量的地表逕流沖刷表土的養分有關。山茶油茶栽植後的離子滲漏結果如圖 2，各項離子的滲出狀況與草生地結果相似，而各離子滲出的高峰時間差異主要與滲水時間的不同有關。本試驗模擬降雨的時間約為 40–60 min，而雨水在各層土壤的滲漏約在降雨結束後 30–60 min 內即會結束。

本研究將雨水中各項離子的檢測濃度以及降雨量資料，換算為單場模擬降雨各離子輸入量，再將各層土壤離子淋失量以每 10 分鐘的水質檢測結果，搭配流量監測資料進行積分計算，相關結果如表 3 所示，在主要滲出的  $\text{Ca}^{2+}$  上，滲出量皆大於降雨的輸入量 (土壤滲出 / 降雨輸入 > 100%)，顯示在長期強降雨的影響下，土壤的鈣含量可能因降雨淋失而下降。除此之外，多數離子的土壤滲出皆低於降雨的輸入，顯示在模擬強降雨的影響下，土壤的養分仍能維持而不淋失。另外在山茶油茶栽植前的草生地則發現， $\text{NO}_3^-$  滲出量會較降雨輸入量為高，故長期強降雨亦可能造成土壤中  $\text{NO}_3^-$  不斷淋失而下降，然而在栽植後的土壤滲漏結果顯示， $\text{NO}_3^-$  的滲漏相對於草生地大幅降低，且在  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  及  $\text{SO}_4^{2-}$  等亦觀察到降低的現象，顯示山茶油茶的生長對於雨水具有較佳的截留作用，除了減緩雨水從土壤的滲漏外，也存在養分的涵養功能。

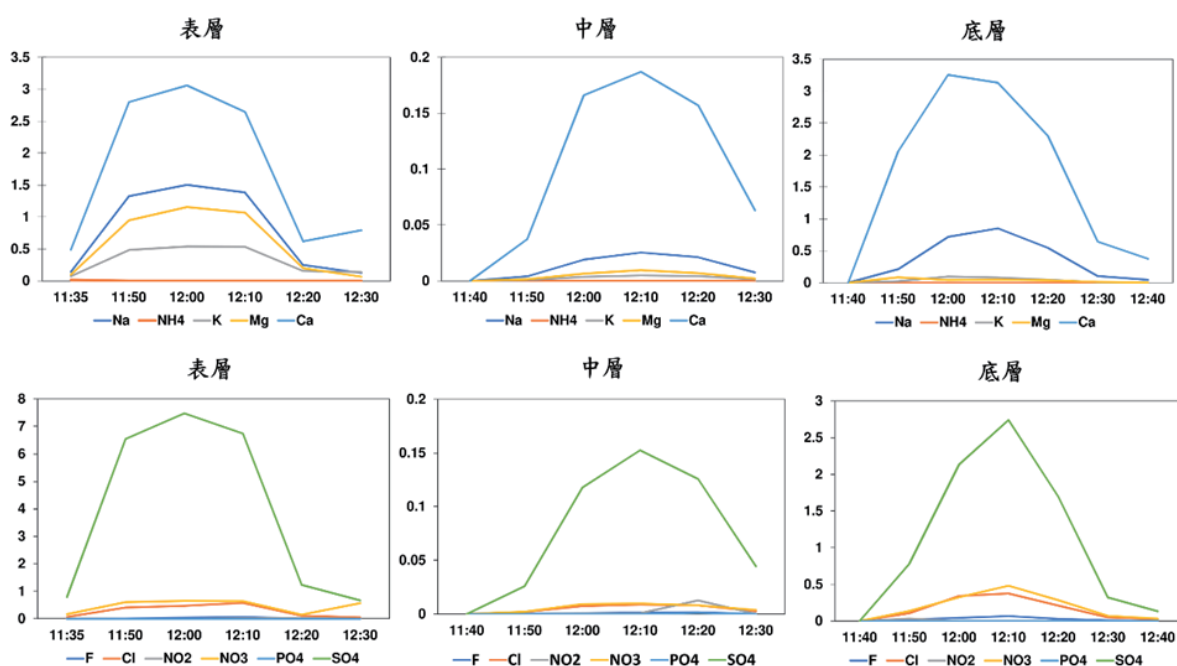


圖 1. 山茶油茶混植區栽植前土壤滲漏試驗離子淋失量趨勢圖。註：單位為  $\text{mg s}^{-1}$ 。

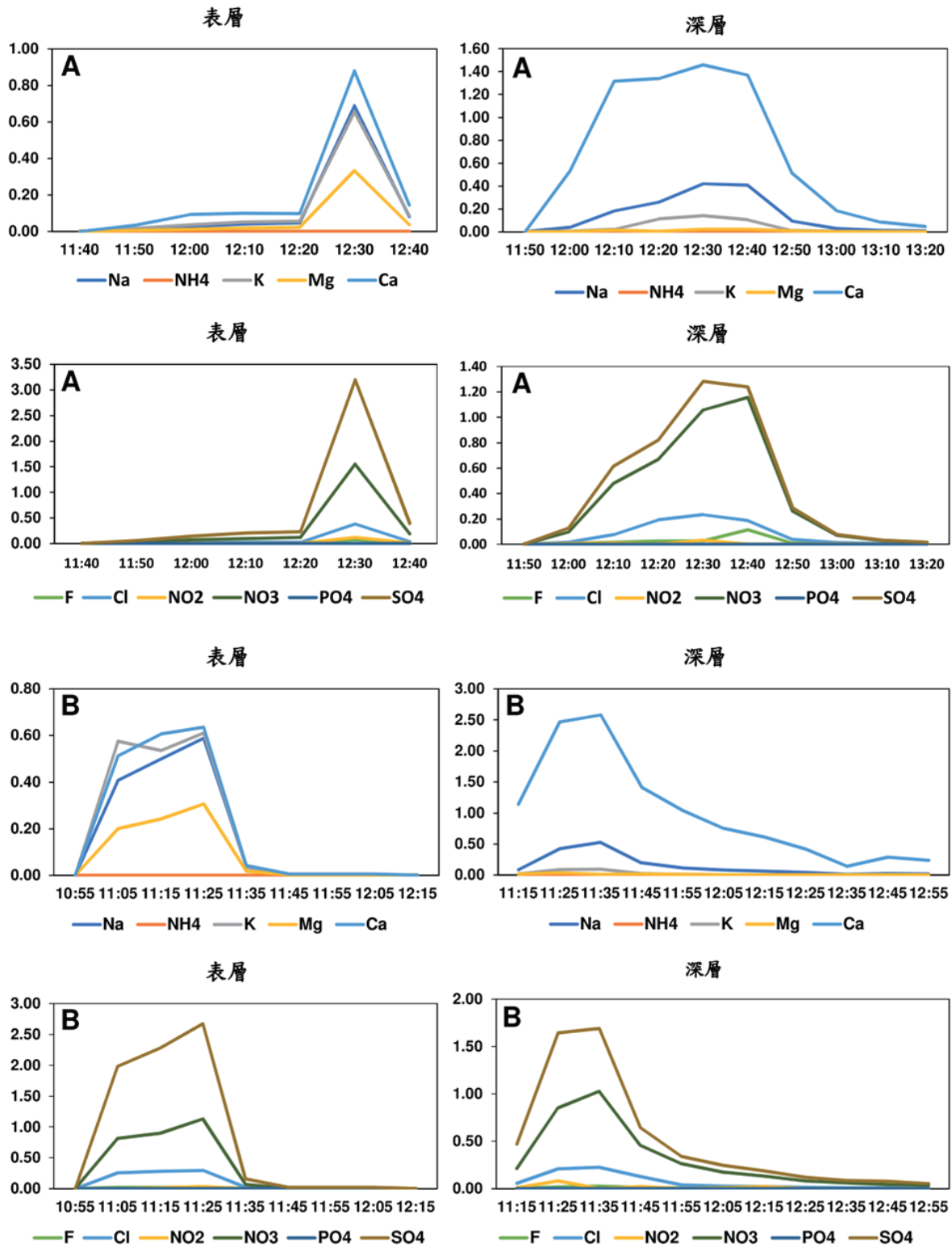


圖 2. 山茶油茶混植區栽植後土壤滲漏試驗離子淋失量趨勢圖。  
 註：模擬降雨 52.0 mm (A)；模擬降雨 49.5 mm (B)；單位為  $\text{mg s}^{-1}$ 。

表 3. 各離子於土壤滲出及降雨輸入量

地表型態		離子移動量 (g)								
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
草地	0 cm 滲出量	2.88	1.17	2.15	6.39	0.08	1.03	0.05	1.72	14.30
	30 cm 滲出量	0.05	0.01	0.02	0.37	0.00	0.02	0.01	0.02	0.28
	85 cm 滲出量	1.49	0.15	0.14	7.05	0.10	0.66	0.02	0.79	4.68
	降雨輸入量	7.52	2.99	10.69	11.57	0.06	3.74	0.15	2.39	34.35
	滲出/輸入	58.67%	44.64%	21.53%	119.34%	297.81%	45.80%	51.63%	106.03%	56.08%
山茶油茶混植 <sup>a</sup>	0 cm 滲出量	0.51	0.51	0.24	0.76	0.05	0.29	0.08	1.18	2.41
	85 cm 滲出量	0.86	0.24	0.04	4.08	0.12	0.46	0.03	2.30	2.69
	降雨輸入量	4.49	3.86	4.50	3.89	0.17	2.67	0.28	11.71	19.06
	滲出/輸入	30.57%	19.42%	6.29%	124.53%	98.20%	27.90%	37.96%	29.68%	26.79%
山茶油茶混植 <sup>b</sup>	0 cm 滲出量	2.32	1.06	0.46	1.09	0.04	0.51	0.03	1.76	4.29
	85 cm 滲出量	0.90	0.14	0.05	6.24	0.05	0.42	0.09	1.93	3.18
	降雨輸入量	4.92	3.58	3.83	2.97	0.23	2.33	0.21	6.63	16.71
	滲出/輸入	65.38%	33.33%	13.34%	246.53%	36.21%	40.20%	53.88%	55.68%	44.71%

註：<sup>a</sup> 模擬降雨 52.0 mm；<sup>b</sup> 模擬降雨 49.5 mm。

有機碳的試驗結果顯示，在山茶油茶栽植前的草地中 (108 年 2 月)，單次模擬降雨輸入總量約 5.27 g，各層土壤滲漏總量則約 4.08 g，顯示在草生地的地表型態下，土壤的有機碳養分並不會因模擬強降雨的淋洗而流失。而在山茶油茶栽植後 (108 年 11 月) 的模擬降雨 (47 mm) 試驗結果顯示，降雨總計輸入約 5.33 g 的有機碳，而各層土壤的滲漏總量約 1.85 g，顯示山茶油茶的栽植同樣可以有效的截留降雨輸入的有機碳，並大幅減緩了強降雨下的土壤有機碳養分流失。

### 三、土壤水分析

透過土壤水中各離子的濃度檢測 (表 4)，可以了解土壤的有效養分狀況。在山茶及油茶栽植養護後，分別在 108 年 7 月及 10 月的土壤水資料顯示，山茶區的土壤水所有陽離子含量皆在 10 月下降，油茶區則反之提升，顯示山茶的生長可能偏好吸收大量的鹽基陽離子；然而在硝酸態氮上 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 卻呈現相反的結果，表明油茶的生長較偏好吸收大量的氮肥，故不同的林下經濟樹種對於土壤養分的吸收特性上亦存在明顯的差異。對於逐漸下降的養分離子需要更長時間的持續監測，以確切瞭解在強降雨條件下，土壤溶液中的養分退化與植物生長的具體關係。

表 4. 山茶油茶區土壤水各離子平均濃度

測定 時間	地表 型態	離子平均濃度 (ppm)								
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
108 年 7 月	山茶	1.413 (0.190)	0.900 (0.960)	0.012 (0.007)	0.085 (0.042)	0.102 (0.052)	0.186 (0.018)	0.084 (0.119)	0.088 (0.054)	2.163 (1.016)
	油茶	1.259 (0.374)	1.095 (0.325)	0.014 (0.007)	0.191 (0.164)	0.081 (0.050)	0.619 (0.539)	0.120 (0.207)	0.326 (0.014)	3.082 (0.425)
108 年 10 月	山茶	1.192 (0.138)	0.552 (0.707)	0.007 (0.004)	0.043 (0.027)	0.097 (0.028)	0.167 (0.126)	0.103 (0.046)	0.478 (0.378)	1.268 (1.121)
	油茶	1.101 (0.137)	1.148 (0.881)	0.035 (0.046)	0.350 (0.402)	0.111 (0.118)	0.263 (0.203)	0.134 (0.022)	0.270 (0.212)	2.172 (0.149)

註：括號內為標準差。

## 引用文獻

- 黃國禎、黃俊德、徐森雄、吳嘉俊 (1994) 陡坡地逕流與滲漏水質之初步研究。中華水土保持學報 25(2): 83-93。
- 楊國賢 (2015) 不同土地利用型態下降雨-逕流分析之研究。國立中興大學土木工程學系博士學位論文 共 130 頁。
- Dunkerley, D. (2015) Percolation through leaf litter: What happens during rainfall events of varying intensity? *Journal of Hydrology* 525 : 737-746.
- Lai, X., Liao, K., Feng, H., and Zhu, Q. (2016) Responses of soil water percolation to dynamic interactions among rainfall, antecedent moisture and season in a forest site. *Journal of Hydrology* 540 : 565-573.
- Liu, X., He, Y., Zhao, X., Zhang, T., Li, Y., Yun, J., and Yue, X. (2016) The response of soil water and deep percolation under *Caragana microphylla* to rainfall in the Horqin Sand Land, northern China. *Catena* 139 : 82-91.
- Archer, N. A., Otten, W., Schmidt, S., Bengough, A. G., Shah, N., and Bonell, M. (2016) Rainfall infiltration and soil hydrological characteristics below ancient forest, planted forest and grassland in a temperate northern climate. *Ecohydrology* 9(4) : 585-600.
- Zhan, T. L. T., Qiu, Q. W., and Xu, W. J. (2016) Analytical solution for infiltration and deep percolation of rainwater into a monolithic cover subjected to different patterns of rainfall. *Computers and Geotechnics* 77 : 1-10.

# 濱水區植生緩衝帶寬度配置及應用之研究

吳炤緯<sup>1)</sup> 林昭遠<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> 國立中興大學水土保持學系，402 台中市南區興大路 145 號。

\* 通訊作者 yuanlin@dragon.nchu.edu.tw

## 摘要

濱水區植生緩衝帶(Riparian vegetated buffer strip, RVBS)之設置範圍標準不一，致使上游水庫水源、水質及濱溪亟需受保護之地區，雖有法令管制，卻不易落實。濱水區植生緩衝帶劃設寬度應兼顧兩岸保全對象安全並達過濾污染源及攔阻泥砂之效。本研究以河道重要之四條檢視線(深槽、設計水位、堤線及安全土深)作為緩衝帶劃設依據，依水系網之空間分布予以動態配置。緩衝帶配置線之基礎：(1)深槽線—可用於檢視堤岸是否受水流攻擊、(2)設計水位線—配合堤線可用於檢討河段通洪斷面是否足夠、(3)安全土深—抑制非點源污染物進入河道。本研究之濱水區植生緩衝帶配置理念可供國土生態保育綠色網絡建置之參考。

## 緒言

濱水區植生緩衝帶係指位於溪流兩側及湖泊、水庫之陸地與水域交接地帶的植生區域，由不同植被組成之水、陸域交錯群落，具物種雜異度與生態豐富度高(彭心燕, 2008)。在現今氣候變遷及人為開發影響下，包含道路、建築、農地、畜牧及人口擴張等因素，快速且劇烈的改變原有緩衝帶的結構與範圍。緩衝帶之劃設一般可依區域面積大小，分為固定寬度、變動寬度以及塊狀等三種方式(Bisson et al., 1987)。美國農業部耕地保育計畫內之緩衝帶寬度為 20~30m，森林集水區內溪流兩旁緩衝帶則為 30m；國內水土保持法則規定寬度約 30~50 公尺之間。過去不少學者針對緩衝帶寬度提出不同看法，濱水緩衝帶功能的發揮與其寬度有著密切的關係，緩衝帶寬度若不足，則無法達緩衝之功效。反之，若寬度大於實際需求，使得土地可用空間減少，不僅造成農用地經濟損失，配置成本過高導致施行困難(林羿均, 2020)。考量不同河段地文與水文變化建立具動態調整性之濱水區植生緩衝帶並合理配置，確保河床安定和顧及保全對象安全、達減災防災、有效解決坡地所產生之非點源污染並提供生物棲地品質等多項功能極為重要。

## 方法

### 一、研究樣區

濁水溪為台灣中部重要河川，流域面積約為 3,157 平方公里，發源於標高 3,220 公尺之合歡山主峰與東峰間，濁水溪全長為 186.6 公里，為台灣最長河川。濁水溪上、中、下游可概分為國有林地、山坡地及平地(圖 1)。流域地勢起伏大，坡陡流急加上季節性

雨量之豐枯分佈不均，造成水資源利用不易，為了有效利用水資源，在上游地區興建水庫蓄水。上、中游地區山坡地開發及開墾之行為，易造成水土流失，農業及家庭等所產生營養鹽和汙染物，若未有效過濾及攔阻，易造成優養化等危害水資源問題。濁水溪下游因坡度趨緩河川淤積嚴重，枯水期河床裸露，當風速過大時，河床細顆粒土砂易引發揚塵，使附近區域空氣品質受影響。

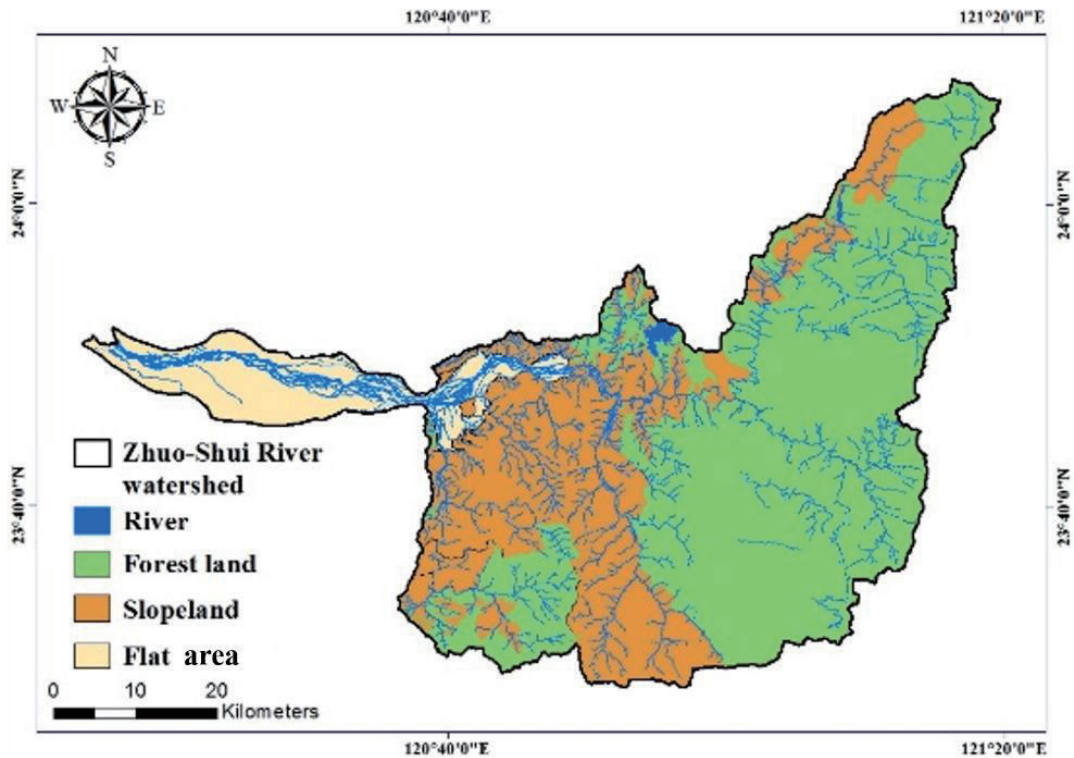


圖 1 濁水河流域權責分屬

## 二、研究流程與材料

本研究蒐集數值高程模型、衛星遙測影像、土地調查資料、設計洪水量等各機關產制之大數據並加以利用，相關使用的大數據資料如表 1。透過集水區資訊系統(WinGrid)及地理資訊系統(ArcGis)等軟體，繪製濱水區植生緩衝帶配置所需之四條檢視線，作為配置依據。透過四條檢視線之基礎，針對不同河段進行通盤檢討，研究流程可參考圖 2。

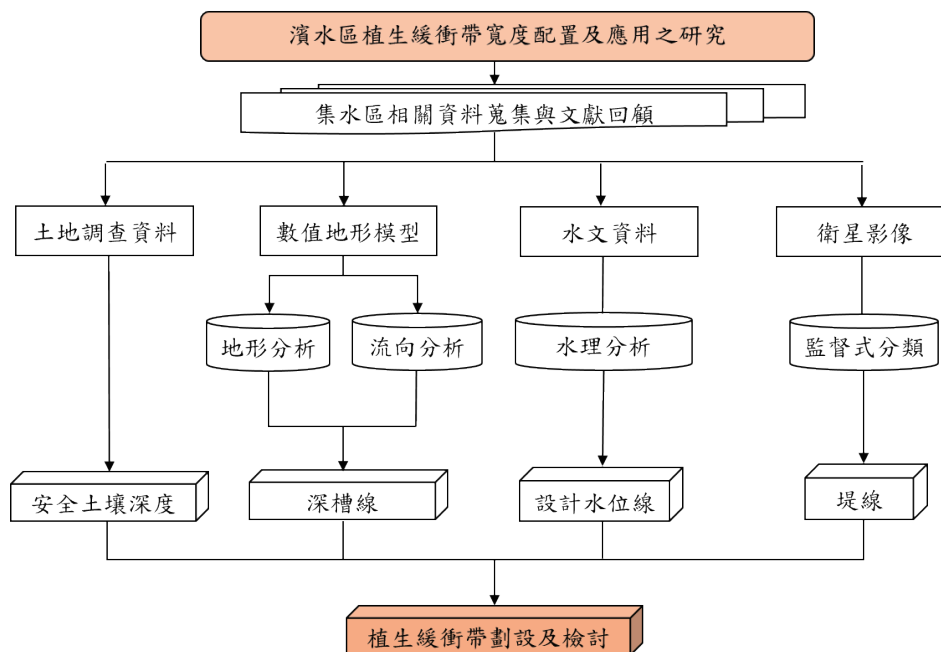


圖 2 研究流程

表 1. 研究材料

名稱	時間	解析度	來源	用途
數值高程模型	2019	10m	水利署	設計水位線、主深槽劃設
設計洪水量	2007	-	水利規劃試驗所	水理分析
衛星影像	2018	20m	太空及遙測中心	環境指標萃取
土地利用圖	2008、2011	1/5000	國土測繪中心、水土保持局	土地利用分析

### 三、四條檢視線配置方法

濱水區植生緩衝帶配置之標準依據，以數值高程模型模擬主河道之深槽線、水理分析推得設計水位線，再以水面以上垂直高度之安全土壤深度以內範圍配置，四條檢視線之萃取方法如下：

#### (1) 深槽線：

平時基流量之水流動處，供檢視河道流心是否攻擊護岸或坡腳。此區不應有開發行為，影響河道流心穩定及安全上的問題；需注重河床是否安定，如有土砂堆積需及時處理，避免引發下游更大規模的水、砂災害，此區域應保持自然通水斷面積。

#### (2) 設計水位線：

平地河川採 100 年重現期，野溪則以 50 年重現期距進行劃設，需控制在堤線內，設計水位線會隨著河道通水斷面之變動而調整，若河道淤積河床上升，此

設計水位會動態調整，據此可為水患溢堤潛勢之指標。以水理模式分析各河段設計水位線空間分布。

### (3) 堤線：

堤防線可透過河道所屬單位提供現況堤防資料，在缺乏資料時可透過遙測影像之分類方法進行判識，最大似然分類(Maximum Likelihood Classification)為影像判識最常使用的影像監督式分類法(Lillesand & Kiefer, 2000)，以 Google Earth image 為已知地覆類別圈繪訓練樣本，並計算各訓練區樣本中之光譜統計值，作為影像資料分類之依據進行分類。透過設計水位線及堤線之間關係，可用以檢視河川達設計水位時之潛勢「破口」區位，可據此盤點濱溪水患治理熱點。

### (4) 安全土壤深度：

安全土壤深度為土壤過濾營養鹽所需之土層厚度，亦指營養鹽類經過此深度的土層後可達自淨作用。參考林昭遠(2005)於七家灣溪針對不同土地利用(林地、果樹及蔬菜區)肥料及高達 46 種農藥進行試驗(Lin, 2002)並繪製營養鹽於土壤層中之衰減曲線，得各營養鹽之安全土深(表 2)。配置濱水區植生緩衝帶時，選擇最大深度之安全土深，才足以過濾各種營養鹽類，以避免污染水質。

表 2. 安全土壤深估算表

項目	交點濃度(ppm)	安全土深(m)
K <sup>+</sup>	97.48	7.39
Na <sup>+</sup>	75.23	6.15
Ca <sup>+</sup>	399.9	6.33
Mg <sup>+</sup>	32.06	4.11
EC	914.604*	1.58

\*：(μS/cm)

資料來源：林昭遠 (2005)

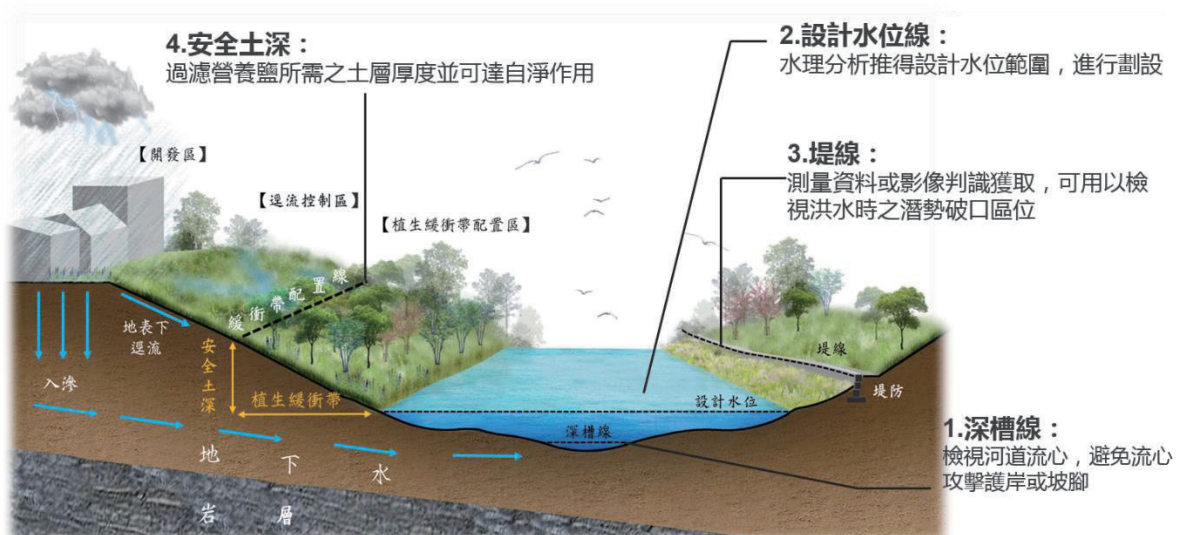


圖 3 四條檢視線示意圖

## 結果與討論

本研究以濁水溪主、支流進行四條檢視線之配置，包含深槽、設計水位(平地以  $Q_{100}$ 、山坡地以  $Q_{50}$  計算)、堤線及安全土深(最大深度 8 公尺)，針對濱水區植生緩衝帶配置之四條檢視線(圖 4)，包含深槽線攻擊兩岸坡腳、通洪斷面不足及農地與住宅於緩衝帶內等進行檢討。

濁水溪下游段農民於溪畔高灘地進行開墾種植，一方面農耕使用農藥及肥料易經滲流水進入河川污染水體；尤其汛期後，於高灘地種植西瓜等作物，噴灑農藥與殺草劑以抑制野草生長，以利進行整地，破壞原有植被致使揚塵易發生。深槽線可供檢視河道流心穩定，河岸因上游崩塌地沖刷之土石而淤積，導致流心奔竄不定且流路分歧，若流心指向兩岸時，對於河道兩岸護岸或坡腳進行攻擊，於汛期時，易成為破口發生災害，危及鄰近農地及住宅區保全對象之安全；透過現況設計水位線之檢討，經過去河川治理成效後，皆有符合設計洪水量，然河道具高度動態改變性，受到上游崩塌之土砂輸送造成河道淤積抬升，可用於檢討現況通洪斷面不足之區位。

本研究以四條檢視線之基礎下，除了具動態配置之濱水區植生緩衝帶範圍外，針對濱水區因自然與人為之間衍生的環境問題進行檢討，農業等開發行為應予以退縮確保安定河床和保全對象安全、有效解決坡地所產生之非點源污染、提供生物棲地與廊道，達土地資源永續利用；濱水區植生緩衝帶配置理念後續可供流域最佳治理區位篩選及國土生態保育綠色網絡建置之參考。

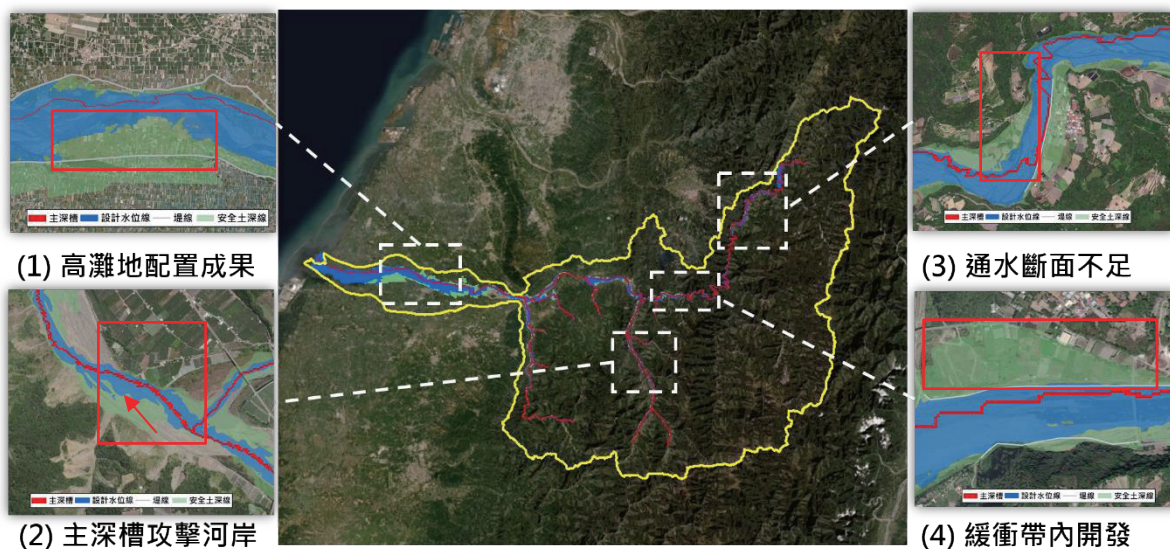


圖 4 濁水溪濱水區植生緩衝帶配置成果

## 致謝

本研究承科技部研究計畫編號(109-2621-M-005-002-MY3)經費補助

## 引用文獻

行政院農業委員會 (2016) 水土保持法。

林昭遠 (2005) 七家灣溪濱水區植生緩衝帶配置寬度之研究。水土保持學報 37(3)：

209-220。

林羿均 (2020) 以國土計畫觀點探討水庫集水區保護帶劃設標準之適宜性。國立中興大學水土保持學系碩士論文。

彭心燕、林信輝 (2008) 水庫濱水帶植生結構與環境變化之研究－以明湖水庫為例。中華水土保持學報 39(4):433-447。

Bisson, P. A., Bilby, R. E., Bryant, M. D., Dolloff, C. A., Grette, G. B., House, R. A., Murphy, M. L., Koski, K. V., and Sedell, J. R. (1987) Large woody debris in forested streams in the Pacific northwest. College of Forest Resources, University of Washington, P.143-190.

Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W. (2000) Remote sensing and image interpretation. Wiley, New York: 724.

Lin, C. Y. (2002) Modeling the width and placement of riparian vegetated buffer strips: a case study on the Chi-Jia-Wang Stream, Taiwan. Journal of Environmental Management 66: 269-280.

## 以複合指標結合崩塌率峰線優選集水區清疏點位之研究

林敬堯<sup>1)</sup> 郭振農<sup>2)</sup> 黃錫泉<sup>3)</sup> 簡志凱<sup>3)</sup> 林昭遠<sup>1)\*</sup>

1) 國立中興大學水土保持學系，402 台中市南區興大路 145 號。

2) 振禾水土保持技師事務所，231 新北市新店區安和路三段 175 巷 19 號 4 樓。

3) 行政院農委會水土保持局臺北分局治理課，231 新北市新店區精忠路 10 號。

\*通訊作者 yuanlin@dragon.nchu.edu.tw

### 摘要

莫拉克颱風重創臺灣後，政府陸續推動滾動式清疏工作。昔日清疏作業雖已執行多年，但崩塌產生之堆積土砂會因時間隨著逕流逐漸排出，因此本研究利用大數據建立複合指標，針對水保局臺北分局之轄區，提出集水區清疏點位優選評估機制。野溪清疏篩選主要考量集水區崩塌所產生之土砂，故選用「崩塌率」作為第一階段評估，第二階段則以重複清疏區位為副指標，分析結果顯示碼崙溪次集水區為優選之清疏對象。另以崩塌率峰線找出河段最大土砂堆積潛勢區位，再按治理權屬、保全對象、囚砂空間與道路可及性等四項因子，作為清疏河段優選評估，最終選定碼崙溪一、二號壩體中間為最佳清疏點位。

### 緒言

民國 98 年莫拉克颱風重創臺灣，災後釀成山區多處崩塌，崩落土石沿著流路進入野溪及下游河道，所經之處造成諸多災情。此後政府陸續頒布「加強河川野溪及水庫疏濬方案」、「整體性治山防災計畫」等各期政策，由於河段土砂淤積量體過大，各轄管單位多以危及保全對象為河道清淤(疏)之主要考量，而清淤(疏)依管轄環境有所不同，水利署所屬轄區坡度較平緩，以將淤積土石清離河床為主，水保局因屬山坡地，以疏通河道為主。至今清疏作業已執行多年，然集水區崩塌堆積之原生土砂會隨後續之強降雨逐漸排出，爆發野溪衍生土砂災害，因此以大數據建立複合指標與崩塌峰線優選集水區清疏點位，期供主管機關在集水區清疏及管理作業上有所助益。

### 方法

研究材料、分析流程以及相關文獻彙整，分別如表 1、圖 1 所示，野溪清疏點位優選分述如下：

表 1 研究材料

資料名稱	時間	解析度	來源	用途
數值高程模型	2010	5m	內政部地政司	清疏河段篩選
福衛判釋全島崩塌地圖	2016	2m	林務局	崩塌率指標
土地利用圖	2011	25cm	水土保持局	聚落距河道指標、保全對象分析
清疏點位	2008-2019	-	水土保持局	歷年清疏次數指標
道路圖資	2007	1/5000	交通部運研所	道路距河道指標
雨量資料	2007-2016	-	經濟部水利署	萃取事件與年平均雨量

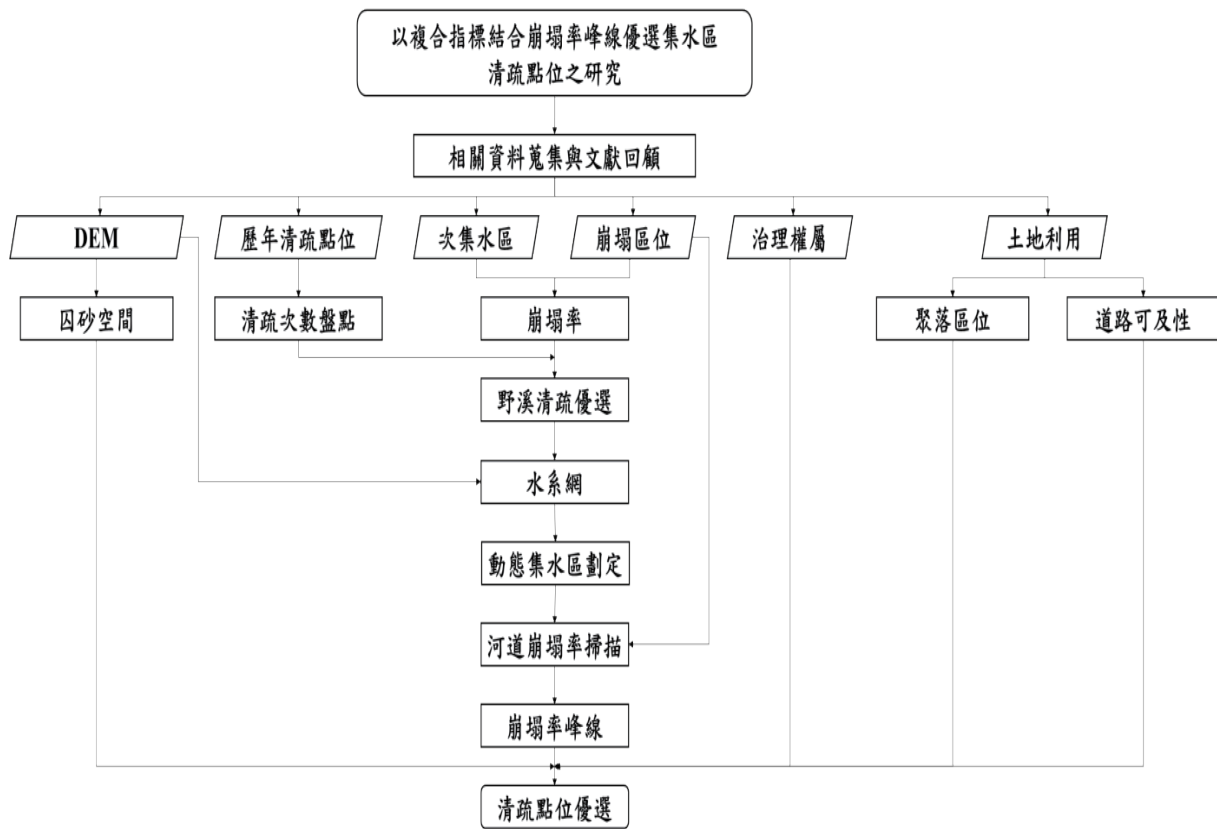


圖 1 研究流程

## 一、野溪清疏優選

以一個主指標及一個副指標作為優選參考依據，其內容如下：

### (1) 主指標—集水區崩塌率

採用林務局民國 105 年以福衛影像判釋之全台崩塌地圖資，套疊次集水區，由於次集水區面積差異甚大，不適宜直接採用崩塌面積作為指標，因此將崩塌面積與次集水區之面積比(崩塌率)做為指標。

### (2) 副指標—清疏次數

歷年清疏次數可反映該河段具高潛勢之產砂量，故蒐集水土保持局臺北分局各次集水區 97~108 年之清疏點位加以分析。

因崩塌率越高，造成河道堆積材料也越多，故先依前述崩塌率指標，萃取各次集水區之主指標值，透過 K-means 群集分析，將主指標分為 1~3 級，可得崩塌率級距最高之次集水區。若有相同之最高崩塌率級距時，再以歷年清疏次數副指標，最高次數者可視為重點清疏之野溪次集水區。

## 二、清疏河段優選

為優選次集水區內最佳清疏河段，將篩選之次集水區以五項因子作為清疏河段優選評估，其中：

### (1) 崩塌率峰線

集水區河道土砂之貢獻量與崩塌區位有極大關係，為優選次集水區清疏最佳區位，本研究以林昭遠、林文賜(2000)及 Chou et al. (2004)所發表集水區自動劃分理論為基礎，無窪地流向計算係藉由高差法(Jenson and Domingue, 1988)及斜面法計算集水區之初始流向，並輔以窪地集水區法結合 PROMETHEE 理論計算無窪地流向，再利用集水區源頭掃描，沿河道掃描崩塌率之變化，製成崩塌率峰線圖，據以了解土砂對河道之主要貢獻區位，優選重點次集水區之潛在清疏區位。

### (2) 治理權屬

在重點次集水區潛在清疏區位之分析上，為避免治理權屬問題，可套疊河川治理界點以及國有林班地範圍，將非屬水保局治理權屬之河段劃出，避免篩選之點位非屬治理範圍。

### (3) 聚落區位

河道土砂淤積若鄰近有聚落等保全對象存在，為清疏重點河段，以避免後續暴雨事件因河道淤積對保全對象造成衍生災害。

### (4) 囚砂空間

傳統以流向演算法萃取之水系網河道區位通常只有單一網格的寬度(莊永忠等, 2006)，本研究利用濕周投影法建置河道區位(沈芸聿, 2019)，配合現況航照圖配置最適濕周投影面為河寬，可得較精確之河道囚砂空間。

### (5) 道路可及性

進行河道土石清淤時，清淤機具及砂石車進出皆須有道路連接，若開闢施工便道，可能破壞濱溪生態及水土資源保育，因此篩選鄰近地區既有道路與河段之距離，據以作為清淤對象優選之參考。

## 結果與討論

由表 2 之篩選結果，當第一階段主指標級數相同時，依副指標次數較高者為優先排序，故篩選結果為宜蘭縣碼崙溪次集水區，後以此集水區進行清淤河段優選。

表 2 待清淤之次集水區指標得分結果

流域	次集水區	第一階段				第二階段	
		集水區面積 (m <sup>2</sup> )	崩塌面積 (m <sup>2</sup> )	崩塌率 (%)	分級	清淤次數 (次)	清淤優選 排序
蘭陽溪	米磨登溪	47204900	1740150	3.69	3	0	4
蘭陽溪	夫布爾溪	43221900	1369900	3.17	3	1	3
蘭陽溪	石門溪	41179600	828342	2.01	3	0	4
蘭陽溪	實谷富溪	39502800	510706	1.29	3	1	3
蘭陽溪	加納富溪	32592300	371917	1.14	3	1	3
蘭陽溪	埤南溪	46440600	469163	1.01	3	0	4
蘭陽溪	碼崙溪	25188200	227198	0.90	3	7	1
頭前溪	霞喀羅溪	28477400	251772	0.88	3	0	4
頭前溪	清泉	216284	32347800	0.67	3	6	2
淡水河	萱源	54145.90039	10690600	0.51	2	0	
淡水河	延老	132020	26709100	0.49	2	1	
蘭陽溪	梵梵溪	139202	35846700	0.39	2	0	
淡水河	大粗坑	46582.5	12772900	0.36	2	0	

依前述優選之碼崙溪次集水區，進行河道崩塌率掃描結果顯示(圖 2 a)，其峰值高點皆在國有林地，可見主要崩塌區位於源頭，崩落地土砂不穩定，不宜進行清淤，且非水保局之權則範圍。次集水區最佳清淤河段評估因子篩選(表 3)，篩選結果如圖 2 所示，清淤河段可以依據不同地環境特性，進行清淤方法調整與規劃，以航照圖與現況調查能看出篩選出之河段有大量土砂待清淤(圖 2 b)。

表 3 優選集水區清淤河段評估表

次集水區	崩塌率 (%)	治理權屬	河寬 (m)	道路距離 (m)	聚落距離 (m)
碼崙溪	0.90	水保局	300	<100	<100

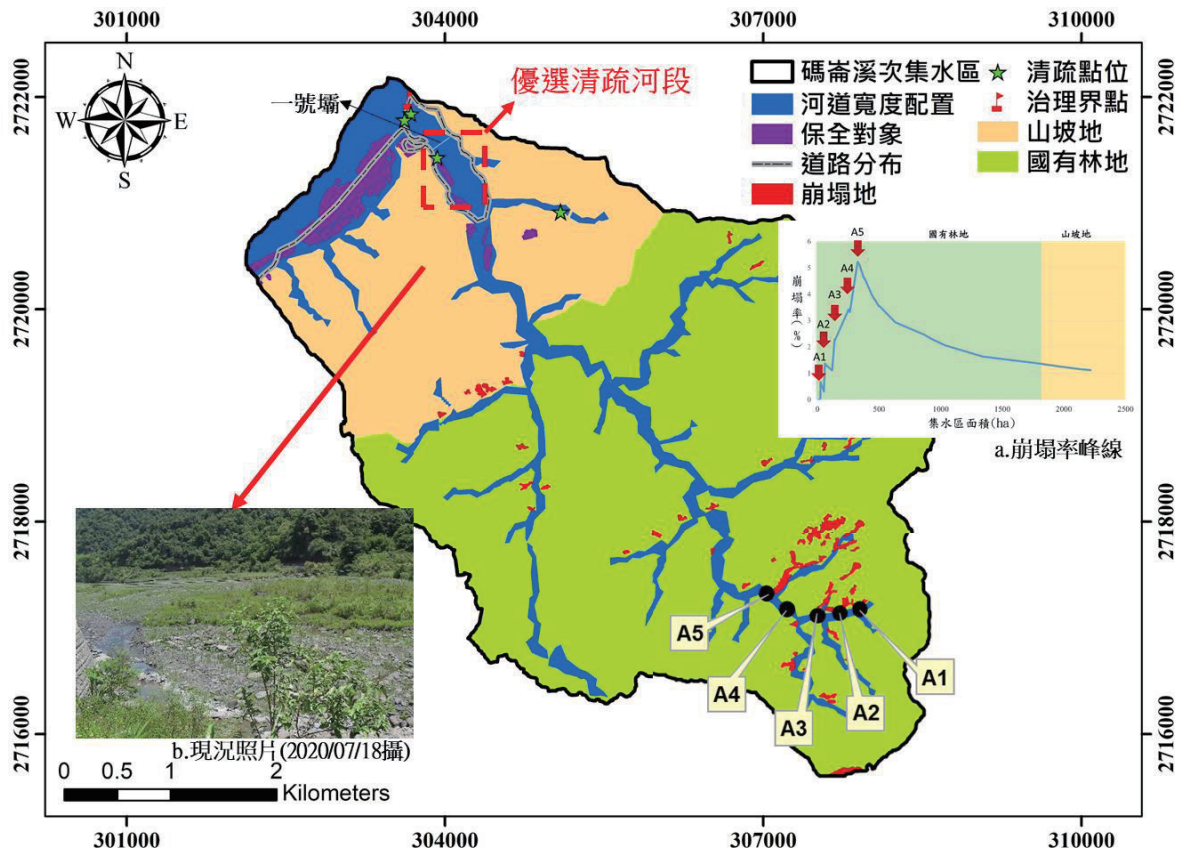


圖 2 碼崙溪次集水區清疏河段優選結果

碼崙溪次集水區長年土砂淤積嚴重，雖歷年進行清疏工作，但下游蘭陽溪主河道因權屬單位清淤順位考量，尚無清淤工程導致主、支流交界處土砂回淤，現階段無法透過水力排砂方式自然排出。為改善碼崙溪恢復河道疏砂能力，建議在碼崙一號壩上游進行清疏工程，以守株待兔方式長期定點清疏，短期間控制土砂不下移，加大碼崙橋墩之通水斷面，亦可讓碼崙溪清疏點位產生向原侵蝕作用，藉由每次暴雨以水力排砂方式漸漸疏通河道，可有效減少清疏成本。若碼崙橋下游通水斷面改善後，可適時調整碼崙一號壩之溢流口，讓主、支流河道之治理高程能順暢接軌。本研究蒐集大數據資料，加值利用建立複合指標與崩塌峰線，優選具清疏需求之集水分區，並提供最佳清疏點位，可供相關單位在清疏及管理作業上有所依據。

## 致謝

本研究承水土保持局臺北分局計畫(109 年度臺北分局保育治理專案管理計畫)經費補助。

## 引用文獻

- 行政院 (2009) 加強河川野溪及水庫疏濬方案。
- 行政院 (2011) 加強河川野溪及水庫疏濬方案(第 1 次修正)。
- 行政院農業委員會 (2006)整體性治山防災(中程)計畫 106 至 109 年度(第三期)。
- 林昭遠 (2010) 莫拉克風災國有林崩塌地處理對策研擬與治理規劃。林務局規劃報告。
- 林昭遠等 (2000) 集水區地文水文因子自動萃取之研究。中華水土保持學報 31(3)：247-256。
- 沈芸聿 (2019) 應用環境指標建置坡地降雨-逕流及泥砂產量推估式之研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 莊永忠、陳永寬、詹進發 (2006) 不同流向演算法與集流閥值對數值地型模型河川網路萃取之影響。地理研究 45：73-92。
- Chou, T. Y., Lin, W. T., Lin, C. Y., Chou, W. C. (2004) Application of the PROMETHEE technique to determine depression outlet location and flow direction in DEM. Journal of Hydrology, 287: 49-61.
- Jenson, S. K. , Domingue, J. O. (1988) Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 54(11): 1593-1600.

## 崩塌地特定水土保持區的調查與檢討- 梅山鄉瑞里村變異檢討分析

陳建元<sup>1)</sup>\* 楊佩璋<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 國立嘉義大學土木與水資源工程學系，60004 嘉義市學府路 300 號。

\* 通訊作者，E-mail: chienyuc@mail.ncyu.edu.tw。

### 摘要

1998 年 7 月 17 日芮氏規模 6.2 的瑞里地震造成瑞里地區受創嚴重，瑞里村 166 道路(原 122 道路)、瑞里大飯店及多處邊坡崩塌，水土保持局於 2002 年劃定本處為崩塌地特定水土保持區。此處崩塌地特定水土保持區長期水土保持計畫於 2004 年 10 月 28 日經農委會核定實施，嘉義縣政府於 2010 年實施第一次長期水土保持計畫五年通盤檢討迄今。本研究利用 UAS 輔助現地調查本處崩塌地特定水土保持區的現況，進行第二次 5 年通盤檢討。經現況調查、環境變異檢討(包括土壤流失量、土地利用、近年致災事件、崩塌裸露地、溪流現況、道路與橋樑現況、保全對象變異等因素)，水文環境及衛星影像邊坡監測分析通盤檢討後，不變更原長期水土保持計畫相關治理工程，惟建議加強道路維護管理措施。由於本區原劃定原因瑞里大地震影響已消除，經實施長期水土保持計畫迄今，本區目前無亟需水土保持治理之需求，且區內部分屬保安林地，已有相關管制措施，符合崩塌地特定水土保持區廢止條件。

### 緒言

1998 年 7 月 17 日 12 時 51 分 15 秒，在嘉義縣梅山鄉與竹崎鄉境內發生芮氏規模 (ML) 為 6.2 的顯著地震，震央位置在阿里山氣象站西方約十五公里處，因靠近梅山鄉瑞里村，中央氣象局遂將此地震命名為瑞里地震。根據內政部消防署的地震災情統計資料顯示，本地震總計造成 5 人死亡、27 人受傷、房屋全倒者計有 6 戶、半倒者有 45 戶，附近山區並發生山崩、落石等現象。

瑞里村瑞里崩塌地位於瑞里市區對岸，包含瑞里大飯店、圓潭龍休息站及其鄰近地區。建築區雖在山脊狹窄緩坡地上，其上下邊坡陡峻，於地震、颱風時極易崩塌或龜裂而影響建築區及 166 道路(原 122 道路)之安全，瑞里地震時，本區受創嚴重，除陡坡崩塌外，建築物亦受損。依據『水土保持法』第 16 條第 1 項第 6 款之規定(水土保持法 2016)，以及『特定水土保持區劃定與廢止準則』第 3 條第 1 項第 6 款之劃定範圍，劃定瑞里村瑞里崩塌地為崩塌地特定水土保持區。此處崩塌地特定水土保持區長期水土保持計畫於 2004 年 10 月 28 日經農委會核定實施(水土保持局 2005)，依水土保持法第 18 條第 2 項規定，嘉義縣政府於 2010 年實施第一次長期水土保持計畫五年通盤檢討迄今(嘉義縣政府 2012)，已屆第二次 5 年通盤檢討期程。

本研究區域位於嘉義縣梅山鄉瑞里村及圳南村，地理位置瑞里崩塌地特定水土保持區位於梅山鄉與竹崎鄉之交界處，粗紙坑溪上游 166 道路(原 122 道路)、瑞水公路上瑞里一號橋與瑞里二號橋之間山脊，公告面積為 90.2 公頃，區內土地主要為林務局所轄林班地，部分地區為私有地，分屬阿里山事業區 196 及 202 林班地，使用分區為森林區，用地編訂分為林業與國土保安用地；大樹腳崩塌地特定水土保持區位於虎尾溪支流華興溪之上游，西北距梅山市區約 2.3km。本區有縣 118 道路通過，可聯絡梅山、太和等地，公告面積為 31.8 公頃，其中非國有地佔 1.18 公頃，公有地除道路屬嘉

義縣梅山鄉公所外，均屬中華民國國有財產署，面積共 30.62 公頃。

瑞里崩塌地特定水土保持區在竹崎鄉東方約 10 公里處，與瑞里風景區相望。此區有 166 道路(原 122 道路-瑞水公路)通過，東沿 166 道路至太興村，向南續沿 166 道路下山可至竹崎，或於東接 162 甲道路至太平、梅山等地。本區位於光崙山向北分出之一支嶺，光崙山為最南端，也是最高點(EL.1,815 公尺)，嶺線延伸成為東界，生毛樹溪和其左岸支流溪床為北和西界，因此特定水土保持區範圍採天然地形劃定。圖 1 為梅山鄉瑞里村瑞里崩塌地特定水土保持區位置圖及衛星影像套疊圖，依天然地形圈繪，公告面積為 90.2 公頃。區內土地主要為林務局所轄林班地，部分地區為私有地，分屬阿里山事業區 196 及 202 林班地，使用分區為森林區，用地編訂分為林業與國土保安用地，其中國土保安用地屬雲林縣水源涵養林，管理機關屬林務局嘉義林區管理處。

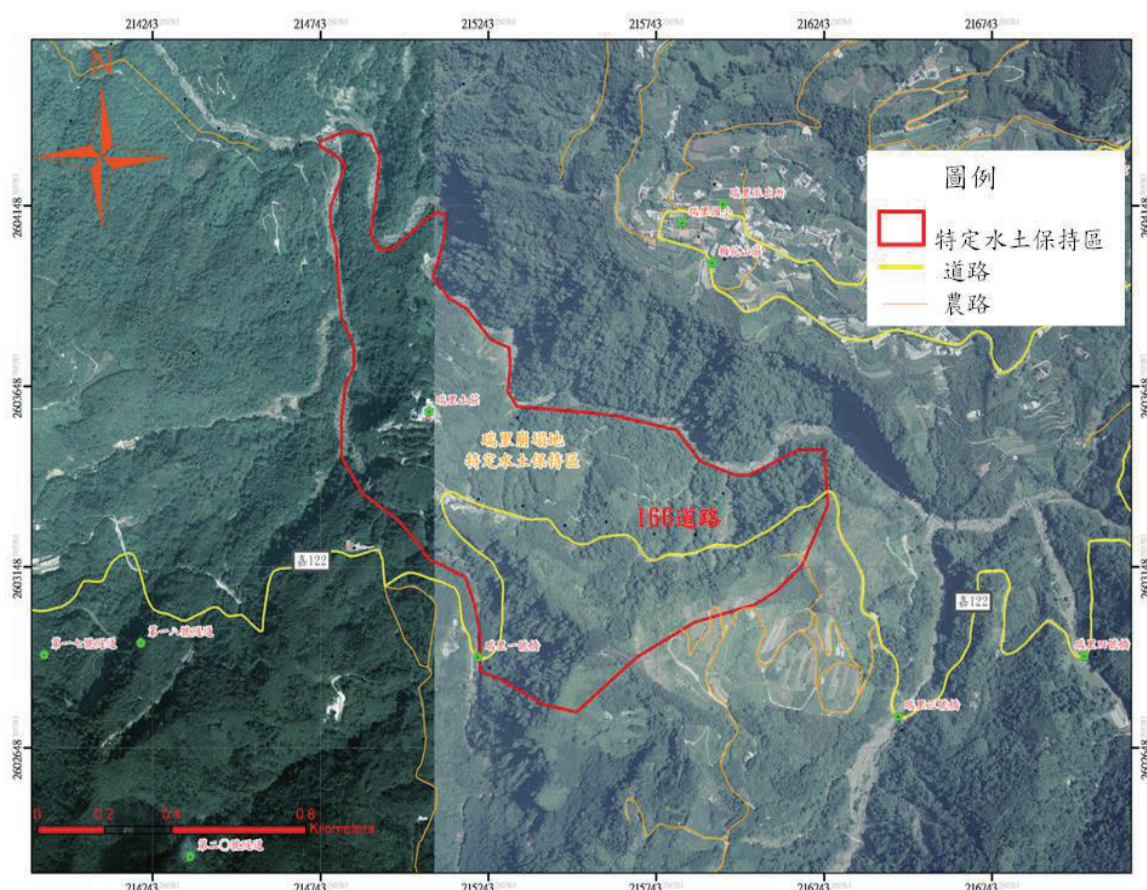


圖1. 瑞里崩塌地特定水土保持區衛星影像套疊圖

## 方法

### 一、現地調查

本計畫之工作流程如圖 2 所示。預期本計畫執行後將有助於深入瞭解嘉義縣梅山鄉瑞里村瑞里崩塌地特定水土保持區劃定區長期水土保持計畫執行成效與變異情形進行通盤檢討。崩塌地現況調查除至現地進行拍照定位與現況調查，調查使用工具包括數位相機、雷射測距儀、衛星導航與行車紀錄器、GPS、數位攝影機、無線對講機、皮尺及鋼捲尺等，並依調查表分別進行土地利用變異調查、崩塌地(含裸露地)變異調

查、坡面蝕溝變異調查、橋樑及道路現況調查、野溪調查、工程構造物現況檢視、近年災害處理情形及特定水土保持區保全對象調查(水土保持局 2016)。

## 二、無人載具輔助調查

本計畫除蒐集近年衛星影像，並利用無人飛行載具進行現地空拍影像，協助現地調查，並製作現地地形，以利環境變異判釋。

## 三、水文環境及邊坡監測分析檢討

水文分析檢討係應用最新的降雨資料，推算特定水土保持區各重現期距之設計降雨強度及洪峰流量。根據水土保持技術規範第 17 條，本特定水土保持區水文分析係採用合理化公式計算。本計畫區並利用衛星空拍資料監測計畫區現況，判釋近年崩塌地有無擴大情形。

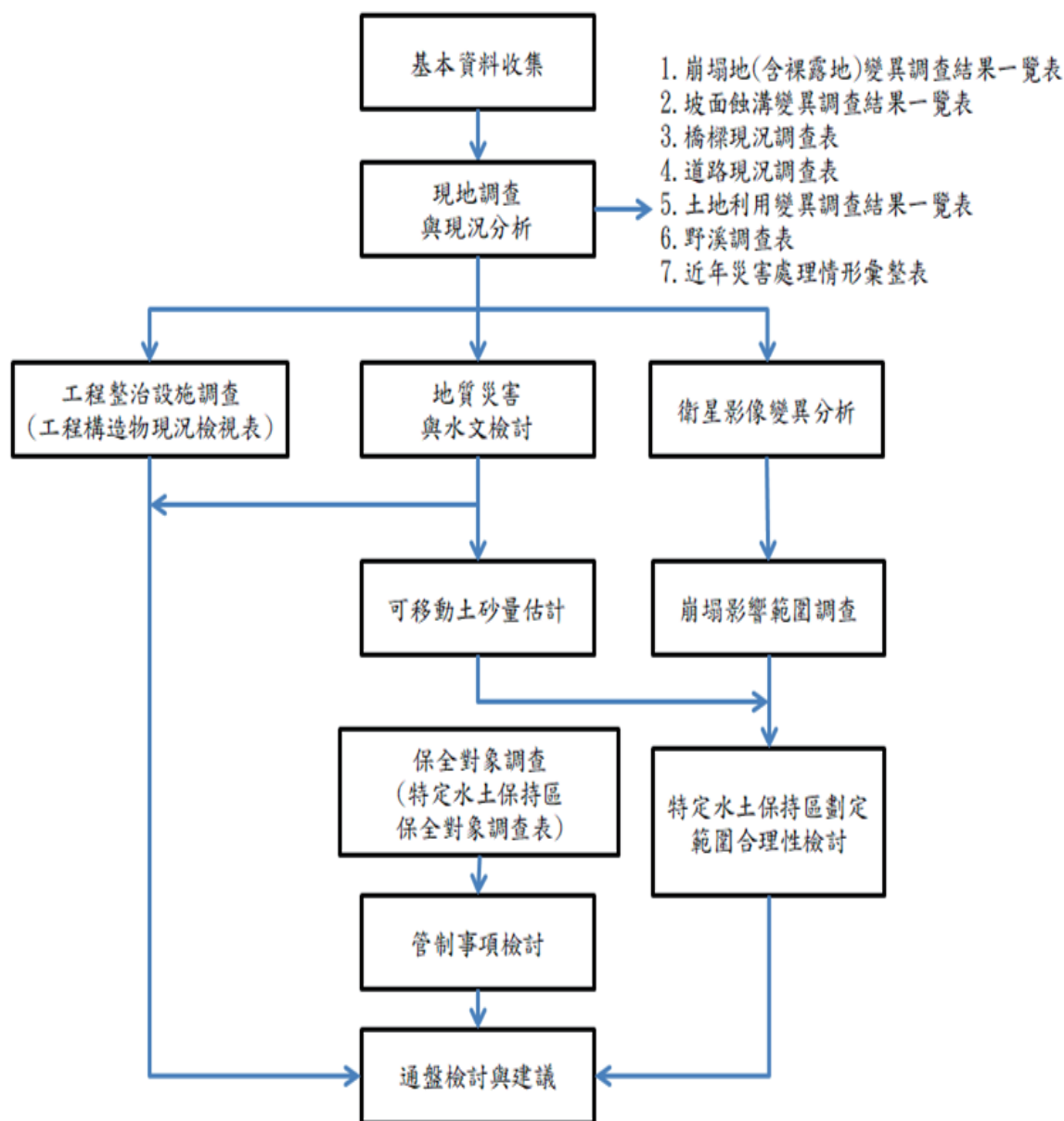


圖2. 研究執行流程圖

## 結果與討論

### 一、土地利用的調查與變異檢討分析

第一次通盤檢討調查結果(圖 3(a)、(b))，顯示本區土地利用型態陡坡區以雜木林和造林地為主，近山脊之緩坡地則以竹林為主。雜木林以天然闊葉林、針葉林和竹林之混淆林地為主，大都位於陡坡區，面積 79.22 公頃，佔全區總面積 87.82%，再其次為斷崖急陡地，分布於溪溝溪床及陡峭谷壁區，面積 5.59 公頃，佔全區總面積 6.2%。

本次調查結果(圖 3(c))，林務局依農委會已制定「檳榔管理方案」(報奉行政院 103 年 9 月 3 日核定實施)就林業用地及國土保安用地違法種植檳榔部分，優先輔導造林，故檳榔面積有減少趨勢；嘉義縣政府亦加強檳榔園是否有超限利用或違法開發行為調查。2011 年崩塌裸露地增加係因颱風豪雨造成，但 2019 年崩塌裸露地面積逐漸自然復原，統計結果詳表 1。

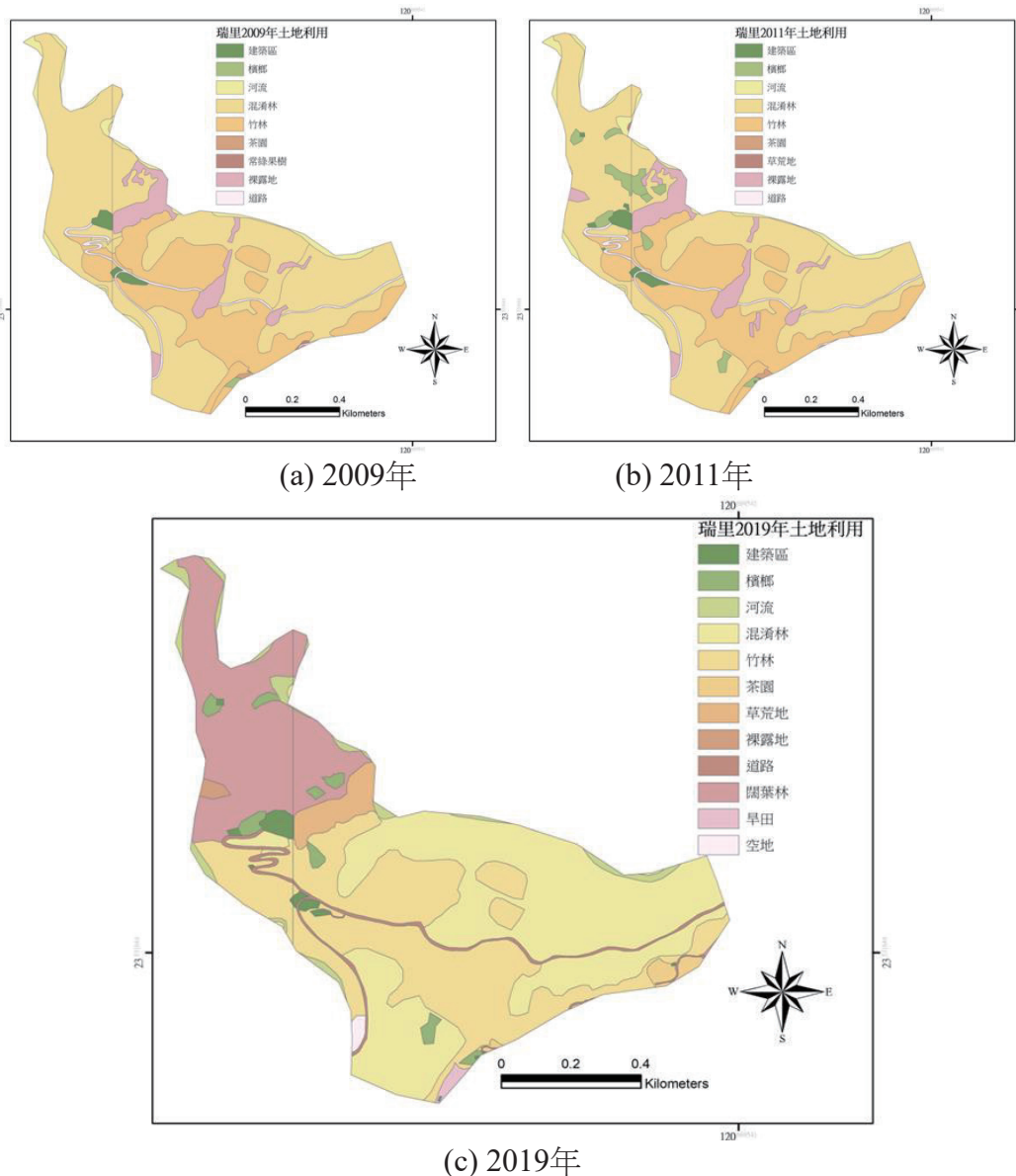


圖3. 瑞里崩塌地特定水土保持區土地利用圖(1/5,000)

(資料來源：水土保持局，2019)

表1. 瑞里崩塌地特定水土保持區土地利用變遷統計表

土地利用類型	2009		2011		2019	
	面積(ha)	百分比(%)	面積(ha)	百分比(%)	面積(ha)	百分比(%)
混淆林	55.22	61.22%	51.56	57.16%	33.82	37.49%
建築區	0.95	1.05%	1.23	1.36%	1.03	1.14%
竹林	24.00	26.61%	24.30	26.94%	27.77	30.79%
河流	2.40	2.66%	2.57	2.85%	2.36	2.62%
裸露地	5.59	6.20%	6.05	6.71%	0.31	0.34%
道路	1.74	1.93%	1.74	1.93%	1.99	2.21%
檳榔	0.13	0.14%	2.57	2.85%	1.56	1.73%
茶園	0.12	0.13%	0.15	0.17%	0.83	0.92%
常綠果樹	0.05	0.06%	-	-	-	-
草荒地	-	-	0.03	0.03%	2.24	2.48%
闊葉林	-	-	-	-	17.64	19.56%
旱田	-	-	-	-	0.34	0.38%
空地	-	-	-	-	0.31	0.34%
合計	90.20	100.00%	90.20	100.00%	90.20	100.00%

## 二、崩塌地及裸露地

本特定水土保持區建築區主因下邊坡崩塌，公路則主由其上、下邊坡之崩塌。第一次通盤檢討計畫在莫拉克風災後境內有 5 處較大新增崩塌地，主要位於區內緊鄰溪岸陡坡及道路上、下邊坡。相關位置示意圖如圖 4。

本期調查第一次通盤檢討發生之崩塌地，部分崩塌地經整治後復育良好，如第一次通盤檢討崩塌地編號 02 及本次崩塌地編號 03 所示，經調查目前有在 166 線 73K 附近，道路上邊坡有落石崩塌，而瑞里大飯店下方邊坡崩塌地雖未整治，但崩塌面積較第一次調查有變小之情形。

## 三、水土保持處理維護措施現況

第一次通盤檢討時整治的崩塌地植生復育良好；日前於計畫區內施作工程為「嘉義縣梅山鄉 162 甲線、169 線及 166 線護欄改善工程」，施做之工程內容為紐澤西護欄，數量約為 109m。經現地勘查，部分沿線邊溝及靜水池淤積，部分靜水池牆身破損。瑞里崩塌地特定水土保持區目前工程整治成效及自然復育皆良好，近年無重大災害發生，雖有零星落石崩落事件，並無直接影響保全對象之安全，部分區域位於保安林，建議後續可依據檢核廢止條件，朝特定水土保持區廢止方向辦理。

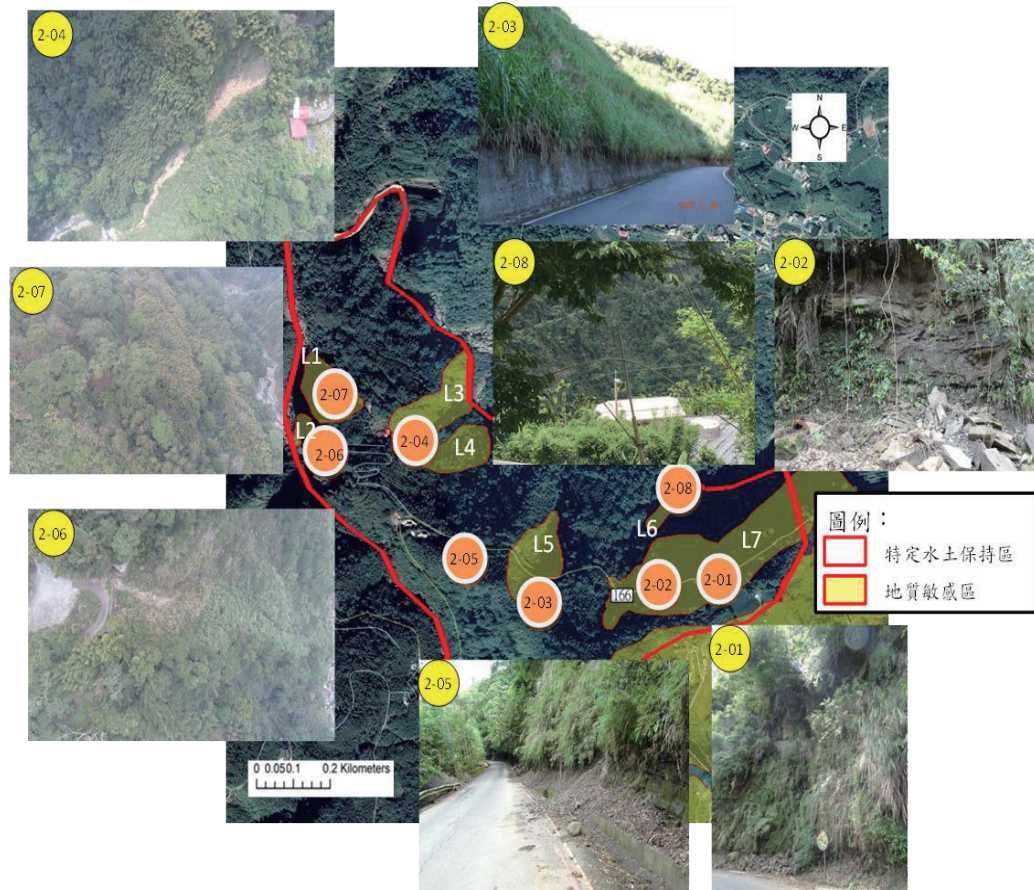


圖4. 第二次通盤檢討調查崩塌地位置圖(底圖為2018年衛星影像)(含 UAV 空拍)

## 引用文獻

水土保持局 (2005) 嘉義縣梅山鄉瑞里村瑞里崩塌地特定水土保持區長期水土保持計畫 (核定本)。

水土保持區局 (2009、2011、2019) 土地利用圖。

水土保持局 (2016) 崩塌地特定水土保持區長期水土保持計畫通盤檢討工作手冊。

水土保持法 (2016) 中華民國 105 年 11 月 30 日總統華總一義字第 10500146991 號令修正公布第 32 條條文。

嘉義縣政府 (2012) 嘉義縣竹崎鄉緞繻村(嘉-A020)土石流特定水土保持區長期水土保持計畫第一次五年通盤檢討報告。國立嘉義大學土木與水資源工程學系。

## 水漾森林前生今世及致災潛勢評估

許錕安<sup>1)\*</sup> 陳俞旭<sup>1)</sup> 陳新發<sup>2)</sup> 黃洸駿<sup>2)</sup> 林健洋<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 國立成功大學防災研究中心，710 台南市安南區安明路三段 500 號。

<sup>2)</sup> 林務局嘉義林區管理處治山課，600 嘉義市東區林森西路 1 號。

\* 通訊作者，E-mail：reteradol@dprc.ncku.edu.tw

### 摘要

88 年 921 大地震誘發石鼓盤溪上游左岸邊坡崩塌，大量崩積土石堆積坡腳與阻塞河道形成天然壩，89 年時壩體上游主要河道已明顯有水體積蓄，90 年蓄水範圍已略與現今堰塞湖體範圍相當。從地層位態與地形剖面得知，崩塌發生前已處於坡腳見光之順向坡，於地震誘發下崩落。經水文水理計算及初步模擬評估，目前堰塞湖水體約 12-20 萬方，而壩體土方殘存量約 80-100 萬方，若水體以 20 萬方於潰堤後一小時內全數流出，為 50 年重現期洪峰流量 4.6%；下游豐山村旁行天橋流深由 2.33 公尺提升至 2.39 公尺，上升 0.06 公尺(3%)。若於事件下水漾森林發生堰塞湖相關災害，依豐山村周邊環境現況，對保全住戶應無直接影響。惟須關注壩體於原有河道下游側，若開始有蝕溝發育且持續上溯，有相當機會誘發崩塌，間接驅動壩體崩壞往下游搬運，建議定期以航遙測影像進行監測，可於災害發育初期便進行相關應變作為，以達對下游保全防減災功效。

### 緒言

水漾森林海拔約 1,800 公尺，位處豐山地區石鼓盤溪流域上游，介於嘉義林區管理處阿里山事業區第 45、52 林班之間，其行政區座落嘉義縣阿里山鄉豐山村及香林村交界。為 88 年 921 大地震後，於石鼓盤溪上游左岸邊坡崩塌形成之堰塞湖，因成群樹林浸泡於湖水中，於湖面倒映大片已死亡杉林，呈現出迷幻湖光，而有水漾森林稱號。近年因景色特殊，且為阿溪(阿里山-杉林溪)縱走路線中重要營地，來訪登山遊客絡繹不絕。88 年崩塌發生後嘉義林區管理處立即啟動現勘調查作業，經初步評估後堰塞湖與壩體對下游保全住戶直接衝擊小。災後至今(109 年)已逾 20 年，期間經歷多次地震與颱風豪雨事件，雖由遙測影像間接探知，無再擴大或相關複合災害發生，但為再次確認堰塞湖及壩體現況是否安全，進行無人載具空拍與現地調查作業。

### 方法

#### 一、地文地質分析

水漾森林位處高程約 1,800 公尺，其主要集水區海拔介於 1,700 公尺 至 2,300 公尺間，鄰近至置高點有標高 2,288 公尺的鹿屈山、2,268 公尺的烏松坑山及 1,834 公尺的千人洞。主要山系與水系皆為東北-西南向，山系與地層發育與區域構造有關，水系則

與區域節理有直接關聯，由水漾森林往上游起算集水區面積約 636 公頃。

921 大地震時河道左岸發生崩塌，位於坡面上之風化土砂與岩層與因劇烈搖晃而崩落，崩積土砂堆疊於坡趾，阻塞河道形成堰塞湖壩體，至今(109 年)已經歷多場地震颱風、崩塌豪雨事件(表 1 - 表 2)，除 89-90 年崩塌範圍有局部擴大外，90 年以後崩塌裸露範圍便穩定復育植生，壩體除下游河道處有些微沖刷跡象外，整體尚稱穩定。

表 1 85-109 年主要颱風豪雨事件總降雨量表 (彙整自中央氣象局颱風資料庫)

年度	事件	雨量站	總降雨量 (mm)	年度	事件	雨量站	總降雨量 (mm)
85	賀伯颱風	阿里山	1,987	98	莫拉克颱風	豐山	1,858.5
90	桃芝颱風	草嶺	483.5	101	0610 豪雨	豐山	793.5
90	納莉颱風	阿里山	413.5	104	杜鵑颱風	阿里山	495.5
95	碧利斯颱風	草嶺	238	105	梅姬颱風	阿里山	499.4
96	聖帕颱風	阿里山	564.2	106	尼莎颱風	阿里山	243.8
96	柯羅莎颱風	奮起湖	1,127	109	0521 豪雨	外來吉	229

表 2 87-109 年南投至嘉義地區災害地震彙整 (彙整自中央氣象局地震測報中心)

年度	地點	震源 深度	規模	人口 死亡	房屋 全毀	備註
87	阿里山西方 14.2 公里	3	6.2	5	18	嘉義瑞里地震。 瑞里飯店嚴重受損,阿里山區多處公路、鐵路坍方中斷，嘉南地區多處房屋毀損。
88	日月潭西方 9 公里	8	7.3	2415	51,711	二十世紀臺灣島內規模最大地震,車籠埔斷層活動,錯動長達 80 公里。南投、臺中縣災情慘重。(集集大地震)。
88	嘉義市西偏北 2.5 公里	16.6	6.4		7	嘉義地震。
89	日月潭北偏東 40.8 公里	3	5.3	3		中橫公路中斷災情嚴重。
89	玉山北方 47.4 公里	10.2	6.7	2		中橫公路、埔霧公路落石坍方。
98	南投名間地震 站南偏東方 10.1 公里	24.1	6.2			
102	南投縣政府東 方 29.3 公里 (位於南投縣 魚池鄉)	14.5	6.5	4	19	南投地震

水漾森林位於台灣構造地質分區之西部麓山帶，整合經濟部中央地質調查所出版之流域地質圖(1/50,000，2013)與阿里山地質圖(1/50,000，2016)，周邊區域內地層以南莊層與桂竹林層為主，地層走向受鹿屈山向斜影響，自兩側往向斜軸傾沒，堰塞湖左岸坡面地層走向多以東北-西南向為主，朝西北方向傾沒，主要坡向多為順向坡，坡度較為平緩；右岸坡面多為陡峭之逆向坡，主要崩塌區域所屬地層為桂竹林層關刀山砂岩段。水系發育於桂竹林層坡度多較為平緩，於南莊層多為地勢高斷差瀑布，此現象除了與地層岩性有關外，與區域節理亦有直接關聯。

## 二、航遙測及數值地形分析

從歷年遙測影像可以觀察出，於 74 年時仍為完整林地(圖 1)，自 88 年 921 地震後崩塌裸露面積約為 30.28 公頃，於上游河道可明顯觀察出水體積蓄。90 年時主要崩塌區域仍屬土石裸露地，有局部擴大跡象，北側坡面亦有兩處小規模崩塌發育並連接至主要崩塌，整體崩塌面積約上升至 35.36 公頃。至此可從杉林差色明顯觀察出水體積蓄範圍已擴大，範圍約略和湖體最大範圍面積相當。96 年崩塌區與壩體仍維持高度裸露無明顯變化，湖體蓄水範圍因杉林明顯頹靡已略有雛型。97 年開始崩塌區顯著植生復育跡象，至今主要坡面無明顯土砂事件發生，堰塞湖壩體亦無明顯變異。

崩塌與堰塞湖形成主要因素為：1. 受控地質架構影響，主要崩塌坡面即為順向坡，且事件前經長年穩定，坡面有厚層風化層孕育，從鄰近水系與崩塌兩側較為筆直斷面可觀察出，鄰近區域型節理發達，且在強烈地震觸發下，大量風化土石崩落堆積於坡趾阻塞河道，進而水體開始蓄積形成堰塞湖；2. 壩體形成後河道兩側河岸仍屬岩盤，且兩岸距離短，土石壩體形成長度長而寬度窄，且壩高距湖面約 20-30 公尺，因此壩體相對穩定。阻塞河道後水位持續升高至目前溢流口，於溢流口下方形成新河道，新河道周邊為堅硬砂岩岩盤，經本次空拍調查始溢流口周邊岩盤僅有些許下切跡象。

## 三、斷面比對分析

事件前地形參考經建版 2 萬 5 千分之一地形圖(78 年)等高線，事件後以內政部 107 年 1 米精度光達數值地形，進行主要崩塌邊坡與河道斷面比對分析，由於地形圖精度與光達產製地形成果精度差異較大，僅做為早年地形背景基礎值參考依據，以下將針對主要崩塌地與主要河道分別進行斷面說明(圖 2)。

1. 主要崩塌：由於剖面與地層走向略為垂直，因此剖面呈現之地層傾角為約為真傾角，鄰近地層傾角約為 15 度，為低傾角順向坡。從 78 年地形可明顯觀察出，崩塌坡面坡腳受到河道發育影響，因側向侵蝕坡腳有見光跡象，坡面受 921 地震觸發崩塌前處於半穩定狀態。於崩塌事件後，大量坡面崩積物堆積於河道與坡趾，可由事件前後地形交界推估，以上為崩塌區，以下為堆積區。
2. 舊有河道剖面：從剖面上可明顯觀察出崩塌堆積區位置，藉由 107 年光達實測地形，可精確從剖面上區分崩塌堆積區與水體蓄積區，目前水位高程約海拔 1,802 公尺，壩體最高高程約為 1,835 公尺。惟壩體西側(舊有河道下游端)，若後續有蝕溝發育且持續上溯，有可能引起崩塌形成，且有進一步誘發壩體潰壞。

#### 四、水文水力分析

水文分析係以下游保全(豐山村)主要通洪斷面分析及水漾森林土石流模擬計算，由於水文分析需以多年的雨量統計資料為基礎，水土保持局及水利署之豐山站雨量資料皆不足 10 年，因此以挑選更下游水利署之草嶺(2)雨量站做為參考雨量站，資料自 54 年至 107 年，期間有 4 年資料不甚完整，統計總年數為 50 年。

參考水利署「水文設計應用手冊」，選取一草嶺(2)雨量站之 24 小時延時 SSGM 兩型，以 50 年頻率降雨作為輸入條件，以國立成功大學防災研究中心開發之開發之土砂收支管理模式進行分析，發生於降雨開始後第 14 小時，對應流量為 1,207.5 cms。設定分析情境為最大降雨時堰塞湖發生潰壩，且水體於 1 小時內全部流出。以預估之最大蓄水量 200,000 m<sup>3</sup> 進行估算，平均流出量為 200,000 m<sup>3</sup> / 3,600 sec = 55.6 cms，為 50 年重現期洪峰流量之 4.6%。

土石流模擬使用京都大學大學院農學研究科中谷加奈教授開發之土石流模式 Hyper KANAKO，依照各檢算區參數給予設計土石流流量，以歷時 30 分鐘的定量流計算區內土石堆積高度。本次模擬將起始點上游集水範圍皆納入，因此在流量可能高估的情境下，僅有少部分溪流坡度較容易觸發土石流，且主要河道坡度多平緩(約 3.9 度)，土砂材料主要堆積於模擬區域起始段轉彎處，顯示土砂材料難以直接流入湖堰塞湖體。

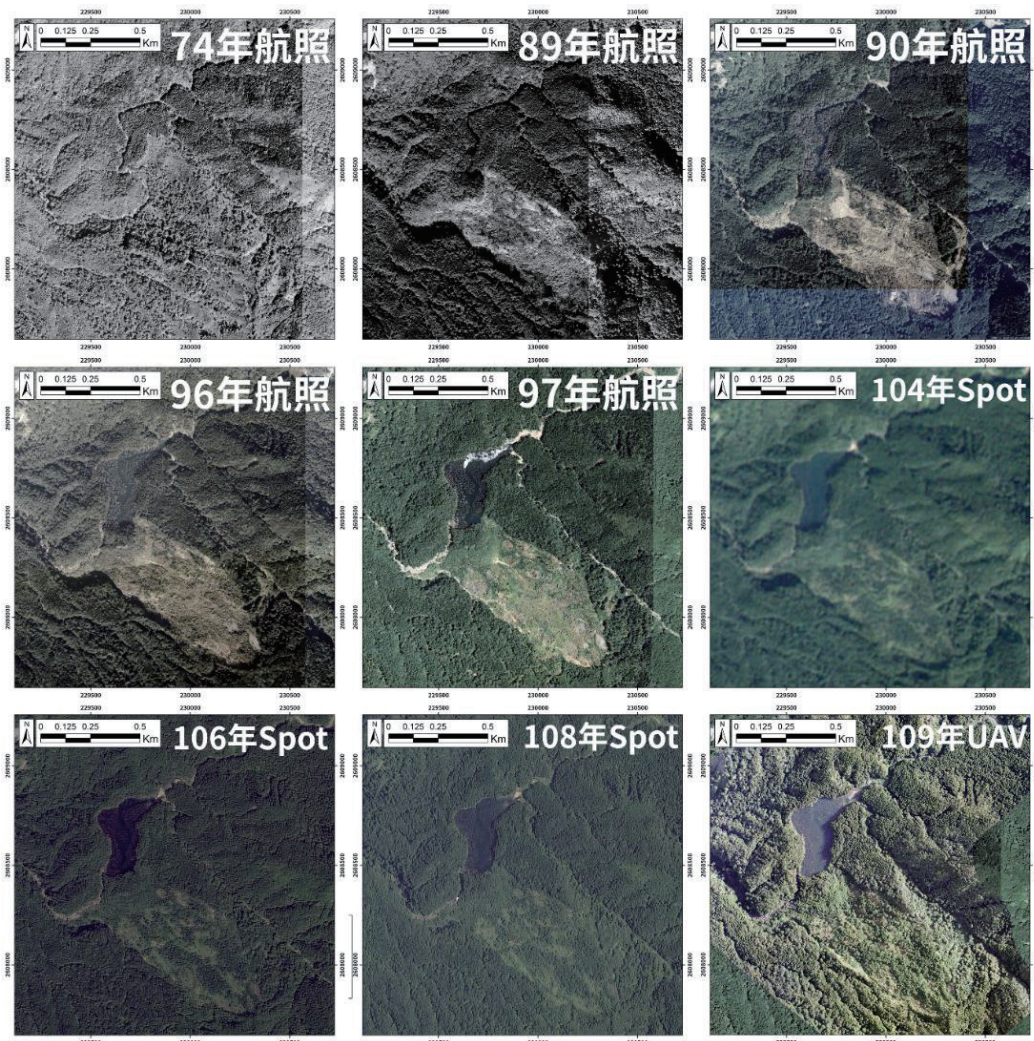


圖 1 水漾森林 74-109 年農林航空測量所航空照片、Spot 衛星及自行產製 UAV 影像

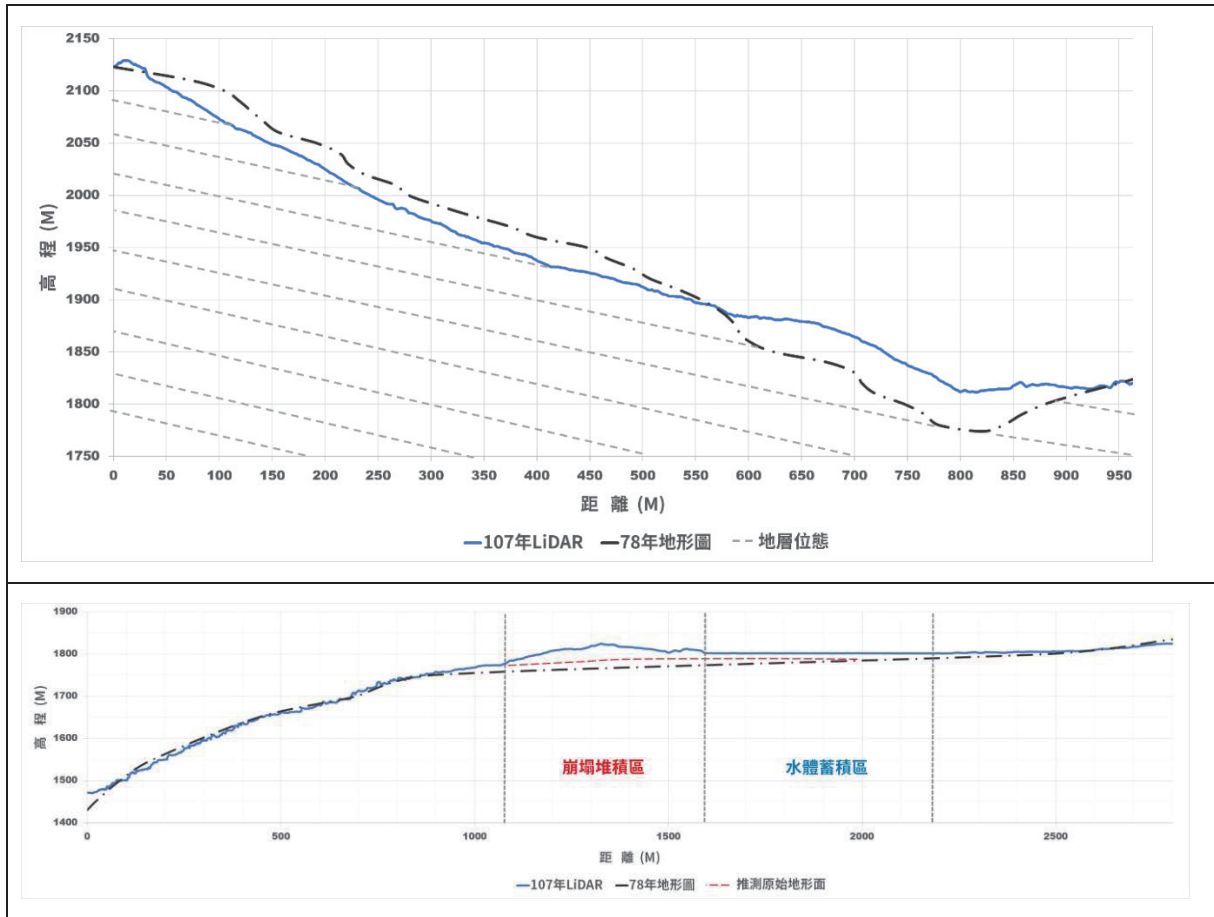


圖 2 斷面分析成果 (上圖：主要崩塌；下圖：舊有河道)

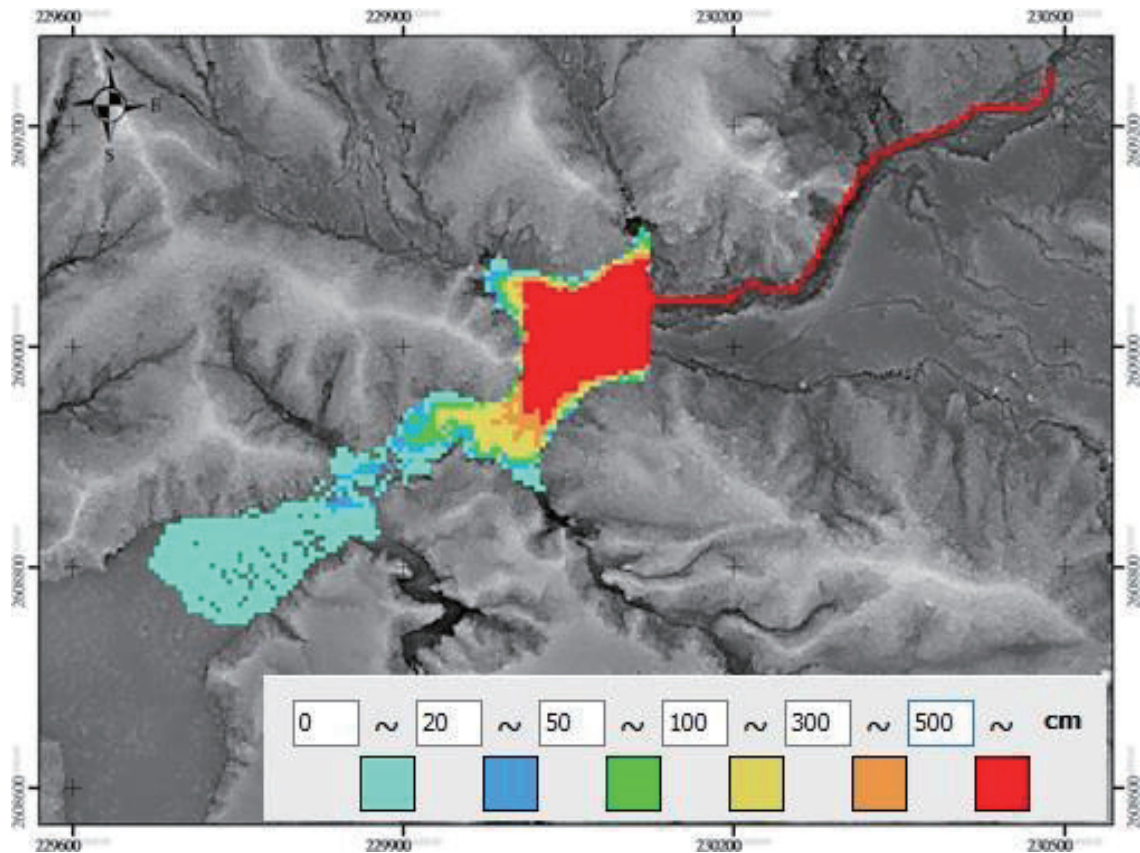


圖 3 水漾森林土石流模擬結果(30 分鐘堆積厚度)

## 結果與討論

- 一、嘉義林區管理處轄區內水漾森林(阿里山事業區第 45、52 林班)，由災害紀錄與遙測影像變異分析得知，為 88 年 921 大地震誘發邊坡崩塌，崩塌面積約 30.28 公頃，90 年擴大至 35.36 公頃，96 年後崩塌坡面與壩體明顯有植生復育，至今無裸露地出露。崩積土石堆積河道形成堰塞湖，從 89 年航照發現舊有河道已有明顯水體積蓄，至 90 年水體範圍便與最大水體範圍相近。
- 二、由空拍及現地調查成果得知，原崩塌坡面與壩體已植生復育良好，溢流口周邊亦屬密實砂岩層，災後至今(109 年)溢流口下游河道有輕微下切跡象，但出露皆屬堅硬岩盤，且地勢相對開闊，難有堵塞或快速潰堤之情形發生。
- 三、經空拍與數值地形比對，壩體現況仍屬穩定，99/107 年光達地形變異小，多為舊有崩塌坡面與壩體表層沖蝕，且壩體周邊距目前湖水面高差有 20-30 公尺，由壩體上游側溢頂潰壩機率相對低，但下游側若發育蝕溝且持續上溯，有機會觸發壩體崩塌潰壞，將大量土砂與水體往下游搬運。
- 四、透過空拍與數值地形推估，湖體水量約 12-20 萬方，壩體土砂量約 80-100 萬方。經水文水理計算，以 20 萬方水體於潰堤後一小時內全數流出，為 50 年重現期洪峰流量 4.6%。豐山村旁行天橋 50 年洪水流深為 2.33 公尺，若堰塞湖水於一小時內流出，流深由 2.33 公尺提升至 2.39 公尺，上升 0.06 公尺(3%)，兩側岸坡高與通洪能力皆足，對通洪能力無明顯影響。
- 五、模擬極端事件下災害發生後，對堰塞湖下游豐山村相關保全直接影響小，目前舊有崩塌、堰塞湖及其壩體皆處穩定狀態，短期內尚無擴大或直接致災風險，建議定期以遙測影像監測舊有崩塌坡面、堰塞湖及壩體下游，是否有明顯湖體土砂淤積、新生崩塌或蝕溝上溯發育，於可能災害事件發育初期，儘早針對後續影響因應。

## 引用文獻

經濟部中央地質調查所 (2013) 易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置:13。

陳勉銘、謝有忠、陳棋炫 (2016) 阿里山[臺灣地質圖幅及說明書 1/50,000]，經濟部中央地質調查所。

交通部中央氣象局颱風資料庫 [https://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/public/basic\\_query/](https://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/public/basic_query/) (2020.08.20.)

交通部中央氣象局地震測報中心 <https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/page/disaster> (2020.08.20.)

## 以環境指標推估濁水河流域碳存量分布之研究

毛玉森<sup>1)</sup> 林昭遠<sup>1)\*</sup>

---

<sup>1)</sup> 國立中興大學水土保持學系，402 台中市南區興大路 145 號。

\* 通訊作者，yuanlin@dragon.nchu.edu.tw

---

### 摘要

IPCC 提供簡易碳存量估算模式，配合土地利用調查資料可有效計算碳存量之空間分布，而在極端氣候事件頻繁衝擊下，地形地貌大幅度變化，碳存量迅速的消長，但土地利用調查資料及森林資源調查需花數年建立，無法即時反映現況。本研究利用衛星影像結合 DEM 資料萃取環境指標，建置濁水河流域碳存量分布式，本模式與 IPCC 模式用本土係數修正結果呈現正相關( $R^2=0.77$ )，可動態推估碳存量分布，供相關單位在碳存量空間變遷之參考。

### 緒言

在全球暖化的衝擊下，人類活動所造成的二氧化碳排放以及氣候變遷對於生態環境的影響，已在國際間倍受重視，由於森林龐大的固碳能力，植林碳匯及森林碳管理為當前林業經營的重要課題(林業試驗所，2017)。現今台灣的碳存量估算研究多為森林方面，以林木蓄積作為推估來源，再結合擴展係數、基礎密度及碳含量轉換係數估算碳存量，其餘土地多以 IPCC 所提供相關數據進行推估；而在經濟發展及極端災害的來臨下，土地利用的多變，與過去調查成果已相差甚遠，本研究利用衛星影像萃取環境指標進行分析，再與 IPCC 模式用本土係數修正結果比對，探討環境指標方法推估碳存量之適用性。

### 方法

研究分析流程及材料彙整，分別如圖 1 及表 1 所示，集水區碳存量推估模式之建置方法分述如下：

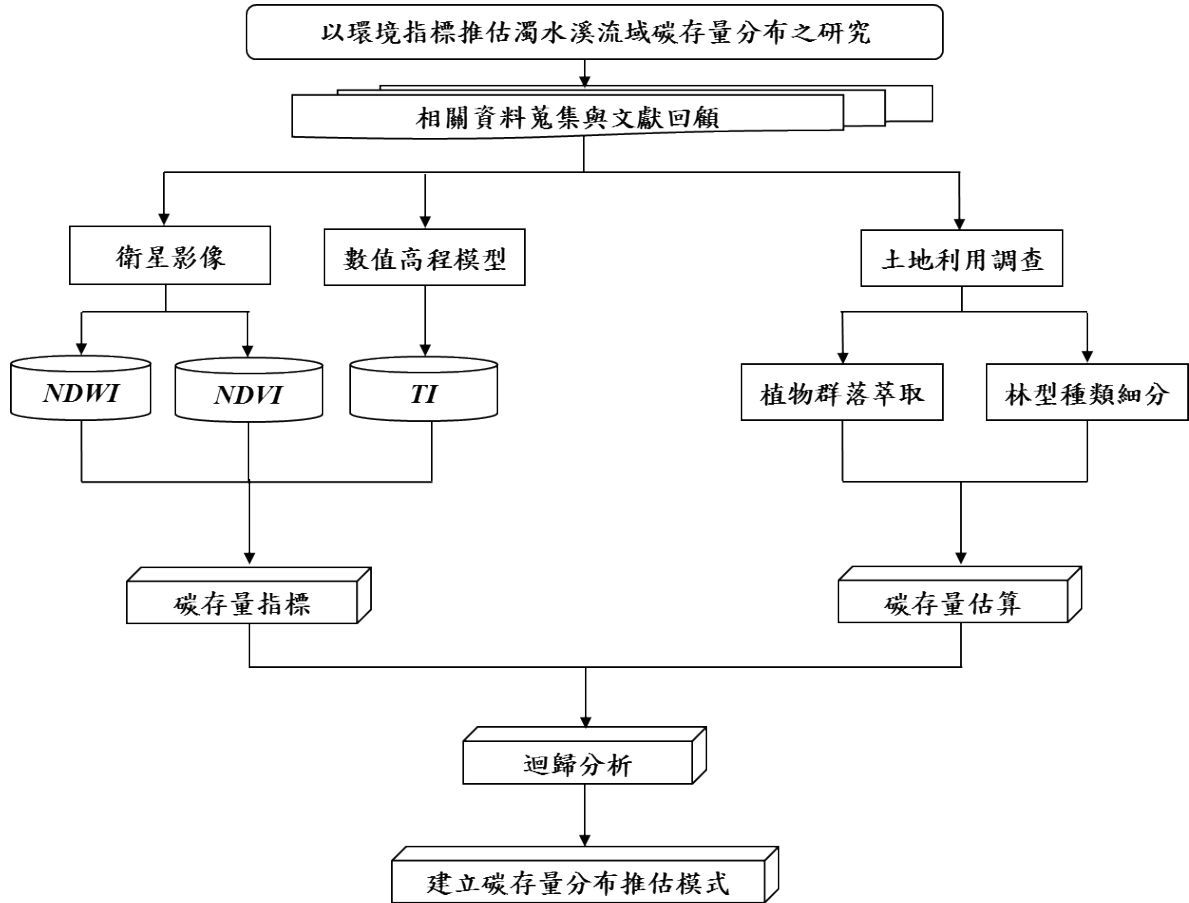


圖 1 研究流程

表 1. 研究材料

資料名稱	時間	空間解析度	來源	用途
數值高程模型	2004	20m	內政部	環境指標萃取
碳儲存量估算表	2000		IPCC	碳存量推估
衛星影像	2008	30m	USGS	環境指標萃取
土地利用圖	2008	1/5000	國土測繪中心	土地利用分析
第三次森林資源調查	1990-1994		林務局	碳存量修正
第四次森林資源調查	2008-2014		林務局	碳存量修正

### 一、試區植物群落萃取

由 IPCC 報告提出之土地利用概估碳存量，依土地利用類別萃取濁水河流域之溫帶森林、溫帶草原、溼地及耕地等區位，以溼地之單位面積碳存量最高，草原次之，耕地最少；而植物群落以森林為大宗，濁水河流域植物群落之空間分布如圖 2 所示。

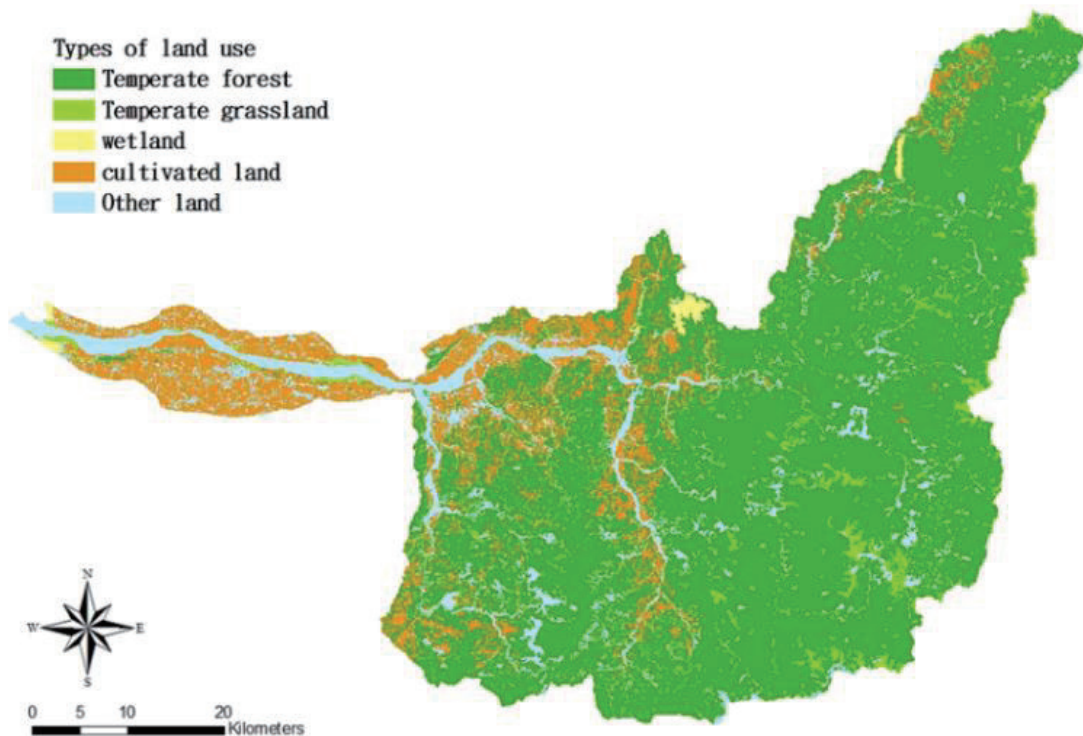


圖 2 濁水溪植物群落萃取

## 二、本土係數估算森林碳存量

將森林林型細分林相樹種，以林分層級尺度估算，其推估原則是以前 IPCC(2006)所公布為基礎，經整理後，以第四次森林資源調查之林木材積藉由木材密度換算出幹材生物量，再利用擴展係數與碳含量轉換係數推算植體碳存量，其推估公式如下：

$$Cs = A \times V \times BCEFs \times (1 + R) \times CF$$

式中： $Cs$ =林木碳儲存量； $A$ =面積(ha)； $V$ =樹幹材積( $m^3/ha$ )； $BCEFs$ =生物量轉換與擴展係數； $R$ =根莖比； $CF$ =林木碳含量比例。另根據行政院農委會林務局公布之第三次森林資源調查圖資，地上部+地下部(佔 41.1%)、枯枝落葉有機質(佔 2.2%)及土壤(佔 56.7%)，回推森林整體碳存量。

## 三、碳存量推估模式

大氣中二氧化碳的儲存，仰賴植物行光合作用，存於植物中，同時經由植物的吸收轉換作用亦能將碳存於土壤之中，另外溼地也被視為能儲存大量二氧化碳的區域，本研究以常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index,  $NDVI$ )探討植體碳存量；以地形指數 (Topographic Index,  $TI$ )探討土壤碳存量；以常態化差異水體指標 (Normalized Difference Water Index,  $NDWI$ )探討溼地碳存量。

### (1)常態化差異植生指標

常態化差異植生指標可判斷地表受植生覆蓋程度，利用植物吸收紅光行光合作用，反射近紅外光之特性，可用於判別地表植生覆蓋程度 (Rouse et al., 1973)。

NDVI 其計算式如下：

$$NDVI = \left( \frac{NIR - R}{NIR + R} \right)$$

式中  $NIR$  為近紅外光， $R$  為紅光，其值介於-1~1， $NDVI$  越大代表植生覆蓋良好，主要為森林分佈區域，反之  $NDVI$  低，則為裸露地及水體。並將  $NDVI$  線性轉換為 0~1，其中 1 為植生覆蓋良好區域，反之則越少。

### (2) 地形指數

地形指數(topographic index,  $TI$ )亦稱為地形濕度指數(Wilson & Gallant, 2000)。其計算式如下：

$$TI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \theta}\right)$$

式中： $A_s$  =單位寬度集水面積， $\theta$  =網格坡度。其概念為坡度陡使水迅速往低處流動，因此入滲量較小，故土壤中含水量可能較低(穆婧等，2013)；反之平坦地區，坡度平緩，逕流留在地表時間較長，相對的入滲時間亦較久，土壤含水量較大，該區土壤亦較容易堆積，產生較厚的土層，由此可知當  $TI$  越大，土壤深度則較深；反之則較淺。

### (3) 常態化差異水體指標

常態化差異水體指標可判斷地表含水量多寡，此概念由 Xu(2006)提出，利用  $GREEN$  綠光波段對水體有一定穿透力，可反映地形、沙洲、沿岸沙壩等特性。 $NDWI$  其計算式如下：

$$NDWI = \left( \frac{GREEN - SWIR1}{GREEN + SWIR1} \right)$$

式中  $GREEN$  為綠光， $SWIR1$  為短波紅外光， $NDWI$  可依波段的的不同，反映植體與水體的含水多寡，其中綠光對水體有極佳穿透性，適用於判斷水體含水程度； $NIR$  則反映植物光合作用，故適用判斷植體含水程度。 $NDWI$  數值越大，含水量越高，如河川湖泊或海洋等水域匯集處，其數值越小則表示越乾燥的區域。

## 結果與討論

### 一、森林碳存量估算

利用本土係數估算森林植體碳存量共計 18,513,886.57 噸，枯有機質 991,010.96 噸、土壤計有 25,541,055.47 噸，共計 45,045,952.73 噸，與 IPCC(2000)公佈之估算溫帶森林碳存量 34,646,311.45 公噸比較，將兩者差值與本土係數估算值之比值，算出約有 23% 的誤差率。

$$\begin{aligned} \text{誤差率} &= \frac{|\text{IPCC} - \text{本土係數估算值}|}{\text{本土係數估算值}} \times 100\% \\ &= \frac{|34,646,311.45 - 45,045,952.73|}{45,045,952.73} \times 100\% = 23\% \end{aligned}$$

因 IPCC 所提供之溫帶森林參考數據為美國溫帶落葉林之平均值，緯度分布及氣候條件樹種生長速率會較台灣林木慢，故採用 IPCC 溫帶森林數據計算時，會較台灣森林呈現低估情形，因此 IPCC 鼓勵各國在採用轉換係數計算時，盡可能使用各國之資料，以提高其估算時之準確度(IPCC, 1996)。

## 二、碳存量推估模式

試區碳存量之分布可藉由網格單元之環境指標加以推估，利用碳儲存之概念可簡易的建置推估模式：

$$CSI = (NDVI + NDWI) \times TI$$

式中，*CSI* 為碳存量指標，*NDVI* 為植生指標，*TI* 為地形指數，*NDWI* 為含水指標。目前台灣估算碳存量方面僅對森林有較多的研究，全國森林資源調查工作較為繁瑣，需耗時多年才可完成，且需配合 IPCC 推估模式，推估其餘土地利用地所儲存碳量，而面臨極端氣候衝擊下，大規模災害頻繁發生，現況地貌已改變，以土地利用情形估算碳存量無法反映現況，本研究利用環境指標可即時建立碳存量之空間分布(圖 3)。圖 4 顯示本模式與 IPCC 之推估值整體解釋率達 77%，可知植生、土壤及含水量對碳存量具有高影響力，在應用上可透過相關分析進行單位轉換。本研究發展此推估式，可快速地推估集水區不同時期碳存量之空間變化，提供相關單位在集水區碳存量管理上之參考。

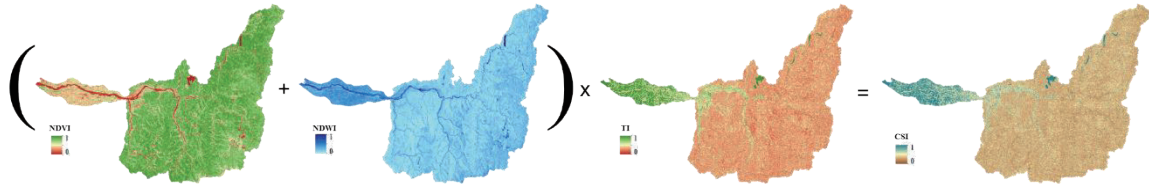


圖 3 利用環境指標建立碳存量之空間分布

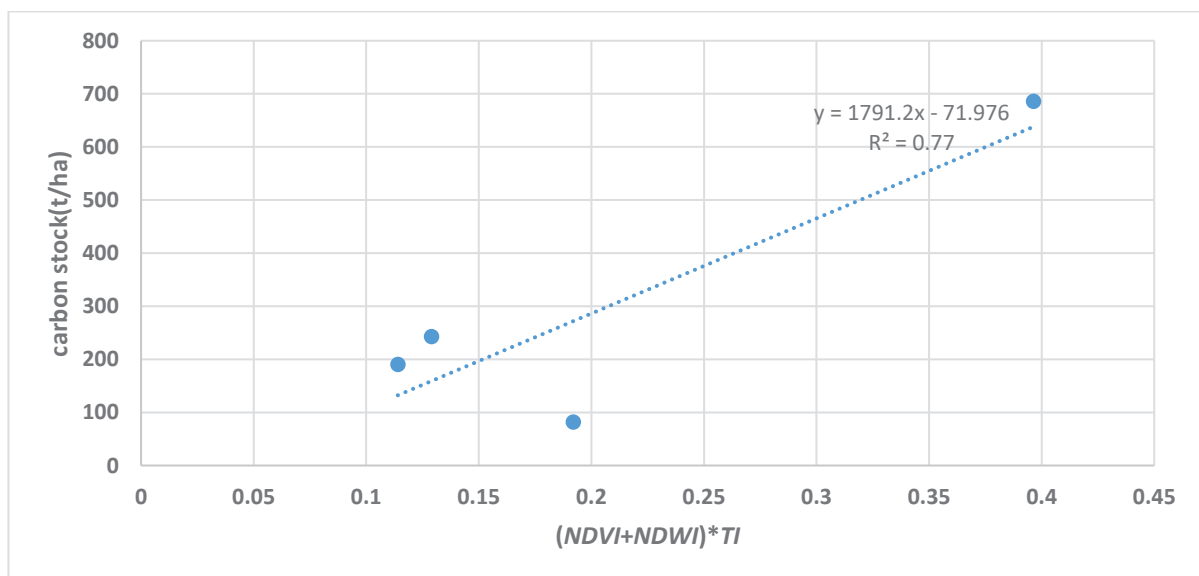



圖 4 單位面積碳存量與指標模式之關係

## 致謝

本研究承科技部研究計畫編號(109-2621-M-005-002-MY3)經費補助

## 引用文獻

- 行政院農業委員會林務局 (1995) 第三次台灣森林資源及土地利用調查，第 258 頁。
- 穆婧、林昭遠 (2013) 集水區崩場地環境指標分析與崩塌潛感推估。中華水土保持學報 44(2):121-130。
- Wilson, J. P. and J. C. Gallant (2000) *Terrain analysis : Principles and Applications*. John Wiley and Sons. Inc. pp.51-58.
- IPCC (1996) Chapter 5, Land-use Change and Forestry Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. The Intergovernmental Panel on Climate Change, Blacknell. pp.5.6-5.75.
- IPCC (2000) *Land Use, Land Use Change, and Forestry* Cambridge University Press, Cambridge .
- IPCC (2006) Volume 4: agriculture, forestry and other land use (AFOLU). Chapter 5: Cropland *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* ed H Eggleston, L Buendia, K Miwa, T Ngara and K Tanabe (Kanagawa: IGES). pp. 66.
- Rouse, J. W., Jr. R.H. Haas, J. A. Schell and D.W. Deering (1973) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC 1978-1. Remote Sensing Cent., Texas A&M Univ., College Station.
- Hanqiu, Xu. (2006) Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery.”*Int. J. Remote Sens* 27 (14) : 3025-3033.



## 國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

森林集水區及環境監測研討會 2020 = Proceedings of  
symposium on 2020 Forest Watershed Management and  
Environmental Monitoring / 曾俊偉主編. -- 初版 --

臺北市：農委會林試所, 民109. 10

面；21×29.7公分

ISBN：978-986-5455-03-3（平裝）

1.林業管理 2.集水區 3.文集

436.12407

109014011

## 2020 森林集水區及環境監測研討會

發行人 張彬

策劃 王相華

主編 曾俊偉

執行編輯 王秋嫻

出版單位 行政院農業委員會林業試驗所

10066 臺北市中正區南海路53號

電話: 02-2303-9978

傳真: 02-2314-2234

網址: <http://www.tfri.gov.tw>

印刷 麥克馬林有限公司

電話：(02)8287-5310

出版日期 中華民國一〇九年十月 初版

定價 每冊新臺幣540元

展售處 國家書店：松江門市

10455臺北市松江路209號1樓 (02)2518-0207

五南文化廣場：臺中總店

40042臺中市區中山路6號 (04)2226-0330

ISBN：978-986-5455-03-3（平裝）

GPN：1010901328

圖文有著作權 未經同意請勿使用