

2018

森林集水區經營研討會論文集

Proceedings of Symposium on
2018 Forest Watershed Management

時間

107年6月21日(星期四)

主辦機關

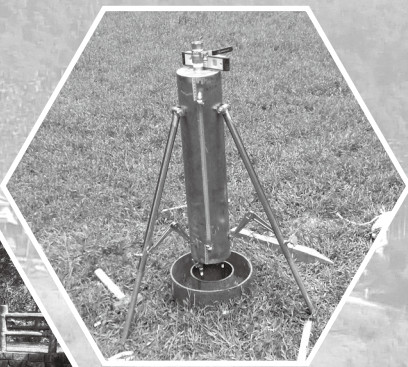
行政院農委會林業試驗所

協辦機關

行政院農業委員會林務局
行政院農業委員會水土保持局
經濟部水利署水利規劃試驗所
國立臺灣大學
國立成功大學
國立中興大學
聚禾工程顧問有限公司

地點

台北市南海路53號 林業試驗所
行政大樓4樓會議廳



封面照片(曾俊偉 提供)

目 錄

議程表.....	i
序(農委會林業試驗所所長 張彬).....	ii

講 題

1. 臺灣中部地區降雨動能推估公式建置及年降雨沖蝕指數之修訂探討..... 1
Establishment of Rainfall Kinetic Energy Evaluating Equation and Modification of Annual Rainfall Erosion Index in Central Taiwan (范正成 Jen-Chen Fan、郭嘉峻 Jia-Jun Guo、黃建霖 Chien-Lin Huang、范世億 Shih-Yi Fan、李正鈞 Cheng-Chun Lee、高百毅 Bai-Yi Kao)
2. 以主成分分析探討德基水庫集水區溪流水水化學之變異..... 17
STUDY ON WATER CHEMISTRY VARIABILITY IN THE TECHI RESERVOIR WATERSHED BY PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS (江曜宇 Yao-Yu Chiang、成允聖 Yun-Sheng Cheng、劉恩好 En-Yu Liu、劉瓊靄 Chiung-Pin Liu)
3. 應用地面光達技術評估林木收穫搬運作業對林道之影響..... 37
USING TERRESTRIAL LASER SCANNER DATA TO ASSESS THE IMPACT OF PERATIONS OF FOREST HAVESTING ON FOREST ROADS (湯適謙 Shyh-Chian Tang、謝漢欽 Han-Ching Hsieh、曾俊偉 Chun-Wei Tseng、林志交 Chih-Chiao Lin)
4. 六龜試驗林氣候狀況及極端值分析..... 53
CLIMATIC CONDITIONS OF THE LIUKUEI EXPERIMENTAL FOREST AND ITS EXTREME VALUES ANALYSIS (孫銘源 Ming-Yuan Sun、陸象豫 Shiang-Yue Lu)
5. 崩塌地植生治理後對土壤水資源涵養能力影響之研究..... 67
A STUDY ON THE INFLUENCES OF VEGETATIVE RESTORATION ON SOIL WATER STORAGE OF LANDSLIDE SOILS (蘇子豪 Tzu-Hao Su、邱予柔 Yu-Jou Chiu、陳凱琳 Kai-Lin Chen、周立人 Li-Jen Chou、林信輝 Shin-Hwei Lin、劉瓊靄 Chiung-Pin Liu)

6. 大規模崩塌潛勢區野溪河道沖刷深度觀測之研究..... 81
Measurement and Estimation of General Scour in Riverbed of Upstream Creeks (廖雯慧 Wen-Huil Liao、李正鈞 Zheng-Jun Li、范世億 Shih-Yi Fan、林柏瑋 Po-Wei Lin、張建輝 Chien-Hui Chang、詹勳全 Hsun-Chuan Chan)
7. 水庫集水區崩塌與入庫泥砂淤積來源的判釋..... 95
INTERPRETATION OF THE LANDSLIDES AND SEDIMENT SOURCES FOR THE RESERVOIR WATERSHED (吳柏翰 Po-Han Wu、吳慶現 Ching-Hsien Wu)
8. 一維與二維水理整合模式應用於堰塞湖潰壩模擬初探..... 105
A PRELIMINARY STUDY ON 1D AND 2D INTEGRATED HYDRAULIC MODEL APPLIED TO SIMULATION OF LANDSLIDE DAM BREAKING (吳振佑 Chen-Yu Wu、林家興 Chia-Hsing Lin、陳振宇 Chen-Yu Chen、嚴曉嘉 Hsiao-Chia Yen)
9. 六龜 D015 大規模崩塌區致災風險分析..... 119
RISK ANALYSIS OF DISASTER CAUSED BY LIUGUEI D015 DEEP-SEATED LANDSLIDE AREA (黃敏郎 Min-lang Huang、洪政義 Zheng-yi Hong、蔣季翰 Ji-han Jiang、劉文賢 Wen-xian Liu)
10. 莫拉克風災後之堰塞湖監測與土砂變遷分析..... 135
THE BARRIER LAKE MONITOR AND SEDIMENT CHANGE ANALYSIS AFTER TYPHOON MORAKOT (陳楠輝 Nan-Huei Chen、呂明鴻 Ming-Hong Lu、臧運忠 Yun-Chung Tsang、張偉顛 Wei-Yi Chang、施保呈 Bao-Cheng Shih、陳建良 Jian-Liang Chen)
11. 堰塞湖防災治理與管理—以龍泉溪為例..... 147
DISASTER MONITORING AND MANAGEMENT OF LANDSLIDE DAM IN THE LONGQUAN RIVER (臧運忠 Yung-Chung Tsang、林昂 Ang Lin、吳定澄 Ting-Tseng Wu、劉瓊蓮 Chiung-Lien Liu、邱欣慰 Xin-Wei Qiu、張蘇能 Su-Neng Chang、施靜惠 Ching-Hui Shih)
12. 集水區潛在滯洪保水區位之萃取及應用..... 165
EXTRACTION AND APPLICATION OF POTENTIAL SITES FOR WATER DETENTION/STORAGE ON A WATERSHED SCALE (林昭遠 Chao-Yuan Lin、張文彥 Wen-Yan Zhang、范世億 Shih-Yi Fan、蔡明發 Ming-Fa Tsai、蕭惠民 Hui-Min Hsiao)

「2018 森林集水區經營研討會」議程表

日期：107 年 6 月 21 日(星期四) 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	
8:30-09:00	報 到	
9:00-09:10	開 幕 致 詞 (林試所 張彬所長)	
時 間	講 題	主 持 人
09:10-09:35	臺灣中部地區降雨動能推估公式建置及年降雨沖蝕指數之修訂探討 (范正成、郭嘉峻*、黃建霖、范世億、李正鈞、高百毅)	林業試驗所 游漢明組長
09:35-10:00	以主成分分析探討德基水庫集水區溪流水水化學之變異 (江曜宇、成允聖、劉恩好、劉瓊霏*)	
10:00-10:25	應用地面光達資料評估林木收穫搬運作業對林道之影響 (湯適謙*、謝漢欽、曾俊偉、林志交)	
10:25-10:45	休 息/交 流	
10:45-11:10	六龜試驗林氣候狀況及極端值分析 (孫銘源*、陸象豫)	水土保持局 黃振全分局長
11:10-11:35	崩塌地治理後植生土壤水源涵養能力之研究 (蘇子豪、邱予柔、陳凱琳、周立人、林信輝、劉瓊霏*)	
11:35-12:00	大規模崩塌潛勢區野溪河道沖刷深度觀測之研究 (廖雯慧、李正鈞、范世億、林柏瑋、張建輝、詹勳全*)	
12:00-13:10	午 餐	
13:10-13:35	水庫集水區崩塌與入庫泥砂淤積來源的判釋 (吳柏翰*、吳慶現)	林務局 王昭堡組長
13:35-14:00	一維與二維水理整合模式應用於堰塞湖潰壩模擬初探 (吳振佑*、林家興、陳振宇、嚴曉嘉)	
14:00-14:25	六龜 D015 大規模崩塌區致災風險分析 (黃敏郎*、洪政義、蔣季翰、劉文賢)	
14:25-14:45	休 息/交 流	
14:45-15:10	莫拉克風災後之堰塞湖監測與土砂變遷分析 (陳楠輝*、呂明鴻、臧運忠、張偉顛、施保呈、陳建良)	中興大學 劉瓊霏教授
15:10-15:35	堰塞湖防災治理與管理—以龍泉溪為例 (臧運忠*、林昂、吳定澄、劉瓊蓮、邱欣慰、張蘇能、施靜惠)	
15:35-16:00	集水區潛在滯洪保水區位之萃取及應用 (林昭遠*、張文彥、范世億、蔡明發、蕭惠民)	
16:00-17:30	綜合座談及討論	
		張彬所長 李鎮洋局長 謝政道局長 黃宏斌教授 林昭遠教授

森林集水區經營研討會論文集

所長序

森林集水區經營，其研究範疇廣泛，舉凡政策面之土地利用管理，或治理層面的崩塌地整治、水土災害防制，乃至調查天然災害導致坡地崩塌的成因、常態性的水文監測，涵蓋面向眾多。尤其森林集水區的管理，牽涉到國土保安和水資源供應等根本性的問題，是故，有效且良好的集水區經營，可達到降低滯旱災、安定土砂、淨化水質、調節水量，以及涵養水資源的目的。

近年來，隨著全球氣候變遷狀況日益嚴重，地球各處的極端氣象事件頻率提高，天災頻仍，臺灣亦受到明顯影響。以降雨特性而論，臺灣的降雨日數逐年下降，但降雨強度卻提高；雖年累積雨量並無顯著差異，然而短時間的強降雨，導致的後果是乾季時間延長，此現象造成臺灣地區的區域性缺水，汛期無法承受過多的降雨量，則造成淹水成災的情形。取 9 年前莫拉克風災為例，臺灣南部地區逾 3 日內便累積了近 3,000 公釐的雨量，不只平地各處傳出水患災情，全臺灣的山區更有多達 3 萬公頃的崩塌地；經濟方面，風災造成的農業損失則超過台幣 195 億元。崩塌地的生成，形成的問題包含地表植被的消失和土壤沖蝕，且原生生育地的生態系被嚴重破壞，難以在短時間內復原。

九二一地震後，崩塌地區地質更加脆弱，且災區地理位置通常較偏遠，以至於治理的效率不如預期。對於有保全對象的崩塌地，可望以生態工法和永續工程加以治理復育；而沒有保全對象的崩塌地，則希望用較溫和的環境生態自然調

適方式，使該生育地的植生逐漸回到原先的演替階段。值得反思的是，臺灣本島擁有許多環境敏感的山區，並不適合過度開發利用，若為了經濟或是人們的一己之私，罔顧其環境承載力，在近或遠的將來，環境對掠奪者反撲的嚴重性，可能遠超過人們的想像。

為此，投注在集水區經營的研究，具有合理的重要性及迫切性，無論是實務性的技術發展，或是潛在危險區域的推估模擬，對現下的時間點，都有極大的價值。林業試驗所辦理森林集水區經營研討會已邁入第 11 個年頭，本次研討會有幸邀請各相關行政單位，和大學相關科系的專家，在論文報告中，提出階段性成果，以提供廣泛的討論、分享最新的訊息；在這樣的場合中，能看見年輕的研究者投入此領域，展現抱負和熱忱，延續資深學者的心血和努力，十分令人欣慰和振奮。在這個過程中，能提供彼此交流和合作的機會，並且對經營方法和策略集思廣益。期盼在兼顧生態保育和坡地水土保持的前提之下，能使森林集水區的經營策略臻於完善，也使原生的生態環境得以保全。

林業試驗所 所長

張村
謹識

2018 年 6 月 21 日

臺灣中部地區降雨動能推估公式建置及年降雨沖蝕指數之修訂探討

范正成¹ 郭嘉峻² 黃建霖³ 范世億⁴ 李正鈞⁵ 高百毅⁶

【摘要】 目前台灣評估土壤沖蝕量的方法為水土保持技術手冊中所採用之通用土壤流失公式 (USLE)，為黃俊德 (1979) 運用自計雨量資料結合美國華盛頓地區之降雨動能公式，進行年降雨沖蝕指數計算而訂定之降雨沖蝕指數。然而其使用之雨量資料較為久遠且非採用本土化降雨動能公式，與台灣現況與地文水文特性不符。爰此，本研究採用自動化雨滴譜儀，蒐集獅潭、龍安及桶頭等台灣中部三測站之雨滴粒徑資料，建立臺灣中部地區本土化之降雨動能推估公式。其後，結合各雨量站的 10 分鐘降雨資料，進行臺灣中部地區年降雨沖蝕指數之計算與修訂。再者，為提升時間與空間推估的精度，利用貝氏最大熵法 (Bayesian Maximum Entropy, BME) 進行降雨沖蝕指數於台灣中部地區之時空分布推估。

【關鍵詞】 雨滴譜儀、降雨動能、降雨沖蝕指數、空間分布推估

Establishment of Rainfall Kinetic Energy Evaluating Equation and Modification of Annual Rainfall Erosion Index in Central Taiwan

Jen-Chen Fan¹ Jia-Jun Guo² Chien-Lin Huang³ Shih-Yi Fan⁴ Cheng-Chun Lee⁵ Bai-Yi Kao⁶

【Abstract】 The universal soil loss equation (USLE) has been the most widely used

¹ 國立臺灣大學氣候變遷與永續發展研究中心

Research Center of Climate Change and Sustainable Development, NTU

² 國立臺灣大學生物環境系統工程學系，通訊作者。電子郵件: sco-phoenix@hotmail.com.tw。

Department of Bioenvironmental Systems Engineering, NTU

³ 禾騰技術有限公司

Hetengtech Company Limited

⁴ 行政院農業委員會水土保持局

Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan

⁵ 行政院農業委員會水土保持局

Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan

⁶ 行政院農業委員會水土保持局

Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan

in the world and adopted as the method in the handbook of soil and water conservation in Taiwan for evaluating soil loss. The rainfall erosion index (the R factor) in the handbook was proposed by Huang (1979) using the rainfall kinetic energy equation (Wischmeier and Smith, 1958) derived from the measured data in Washington D.C., U.S., and the average R value of 20-year period using the rainfall data obtained from 200 rainfall observation stations to establish the iso-erodent map. However, the rainfall data used for establishing the map was relatively too long ago; the rainfall kinetic energy equation was not derived from the local data; the rainfall observation stations were limited; therefore, the representation of situation, the characteristics physiographic and hydrologic conditions of Taiwan, the precision of spatial distribution, and whether the annual average R value could be used for design, need to be further studied. Accordingly, in the study, disdrometers were adopted, drop size distribution of the rainfall in central Taiwan were measured and collected to derive the kinetic rainfall energy equation for central Taiwan. Then, the rainfall data collected from stations at every 10 minutes were used to compute and revise the annual R factor of central Taiwan. In addition, spatial and temporal statistical method- Bayesian Maximum Entropy (BME) was applied to improve the precision of the spatial distribution of the R factor in central Taiwan.

【Key words】 Disdrometer, Rainfall kinetic energy, Rainfall erosion index, Spatial distribution estimation.

I、前言

台灣目前使用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE) 評估土壤沖蝕量，該公式為 Smith and Wischmeier (1978) 蒐集全美各地之土壤沖蝕數據、分析影響土壤沖蝕的各項因子，而發展出評估土壤沖蝕量之方法，也是台灣水土保持手冊中明定計算土壤沖蝕量之方法。在影響土壤沖蝕量的因子中，降雨沖蝕指數 (Rainfall Erosivity, R) 與降雨特性之相關性極高，R 指數可具體量化降雨及逕流對土壤造成沖蝕之影響程度。Wischmeier and Smith (1958) 從實測土壤沖蝕數據發現，R 指數和降雨總動能 E 與該場降雨之最大連續 30 分鐘降雨強度 I_{30} 之乘積呈正相關，其中 E 為一場有效降雨事件之全部能量，關係式如下。

$$R_j = E_j \times I_{30j} = \sum_{i=1}^{T_i} (e_i P_{ji}) \times I_{30j} \quad (1)$$

其中， R_j 第 j 場降雨事件之沖蝕指數 ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha} \cdot \text{hr}$)， E_j 第 j 場降雨事件之降雨動能 (MJ/ha)， I_{30j} 第 j 場降雨事件之最大 30 分鐘降雨強度 (mm/hr)， e_i 第 j 場降雨事件第 i 時刻之單位降雨動能 ($\text{MJ}/\text{ha} \cdot \text{mm}$)， I_i 第 j 場降雨事件中第 i 時刻之降雨強度 (mm/hr)， P_{ji} 第 j 場降雨事件中第 i 時刻之降雨量 (mm)， T_i 第 j 場降雨事件之延時， j 表示降雨事件之數目， i 表示第 j 場降雨事件之第 i 時刻。將一年中 Y 場降雨事件之沖蝕指數 R_j 相加即可得到年降雨沖蝕指數 R_y 。

$$R_y = \sum_{j=1}^Y R_j \quad (2)$$

式 1 中 e_i 為應用美國華盛頓地區之降雨動能與降雨強度關係公式得出，如式 3 與式 4。

$$e_i = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I_i \quad I_i \leq 76 \text{mm}/\text{hr} \quad (3)$$

$$e_i = 0.283 \quad I_i > 76 \text{mm}/\text{hr} \quad (4)$$

Renard, et al. (1997) 發表修正版通用土壤流失公式 (RUSLE)，其中，針對單位降雨動能的計算公式係以指數型式表現，如下式：

$$e = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.05I)] \quad (5)$$

降雨沖蝕指數須應用降雨動能公式進行推估，該指數受區域氣候特性之影響，故於美國本土以外之地區，應重新針對個別區域的氣候特性進行探討，制定適用之降雨動能公式。如 CJ Rosewell (1986)、Angulo-Martinez and Barros (2015)、Young et al. (2015) 等學者，分別在澳洲東部、Southern Appalachian Mountains 與 Daejeon in Korea 建立本土降雨動能公式，並顯示不同地區的降雨動能公式間確實存在著差異，且會因使用不同年限的降雨記錄而有所不同。此外，降雨動能與雨滴粒徑大小相關，Ferrier et al. (1995)、Tokay and Short (1996) 與 Maki et al. (2001) 指出雨滴粒徑之分佈隨不同降雨強度與不同降雨型態而有所不同。而臺灣屬於四面環海之亞熱帶海島型氣候，具有鋒面、對流與颱風等多樣氣候型態，過往相關研究並未將此氣候特性納入降雨動能公式建置的過程。

雨滴粒徑量測方法部分，Wischemeier 與 Smith (1958) 應用 Laws and Parsons (1943) 所提出之麵粉球團法量測雨滴粒徑資料並建置 USLE 之降雨動能公式，

該方法無法做到全時觀測，且其量測精度仍有改善空間，故 CJ Rosewell (1986)、Angulo-Martinez and Barros (2015)、Young et al. (2015) 等學者皆使用雨滴譜儀收集雨滴粒徑資料，以提升觀測精度。另 RUSLE 與 USLE 公式中係以單位體積進行計算降雨動能 (KE_{mm})，但近年的相關文獻如 Salles et al. (2002)、Angulo-Martinez and Barros (2015) 等，皆以單位時間進行降雨動能 (KE_{time}) 改善推估公式之準確度。

最後於 R 指數推估之部分，R 指數須依據現有雨量觀測站之歷史降雨資料進行推估，故無雨量站地點之 R 指數則需透過空間分布推估方法進行計算而得，目前台灣地區係以內插法或反距加權法進行計算。然而，此等做法未考量 R 指數在空間上分佈之特性，僅以臨近地點進行推估，可能將使推估結果有所偏差。例如，兩地點的直線距離雖極為接近，然卻分處於迎風及背風面，如此其降雨沖蝕指數可能有極大之差異。

緣於以上有關降雨動能公式與 R 指數之發展現況，台灣地區目前係使用 Wischmeier 與 Smith (1958) 於美國地區建置 USLE 公式之降雨動能公式，並未考量台灣多樣性之海島型氣候，且其雨滴粒徑資料之量測精度與 R 指數之空間分布推估仍有改善空間。因此，本研究選取台灣中部地區做為研究區域，期望能藉由提升雨滴量測之準確性，並納入不同降雨型態之因素，嘗試以單位體積降雨動能 KE_{mm} 及單位時間降雨動能 KE_{time} ，重新制定符合現況及台灣地區本土化之降雨動能推估公式。其後透過本土化降雨動能推估公式建置成果計算現有雨量站之 R 指數，考量 R 指數在空間上分佈之特性，建置台灣中部地區之 R 指數分布圖，可提供無雨量站地區之 R 指數參考。

II、材料與方法

(I) 研究材料

1. 雨滴粒徑與雨量資料蒐集

本研究建置降雨動能公式所使用之雨滴粒徑與雨量資料，係由設置於台灣中部地區之三部雨滴譜儀觀測而來觀測期間為 2017 年 4 月 1 日至 11 月 1 日，為期 7 個月，每部雨滴譜儀可紀錄每分鐘之雨滴粒徑與個數，以及雨量資料，三部雨滴譜儀分別建置於桶頭、龍安及獅潭等地區；而於建置 R 指數之雨量資料，則是蒐集台灣中部地區 197 個雨量站於 2000 年 1 月至 2016 年 12 月之雨量資料。如圖 1 所示。

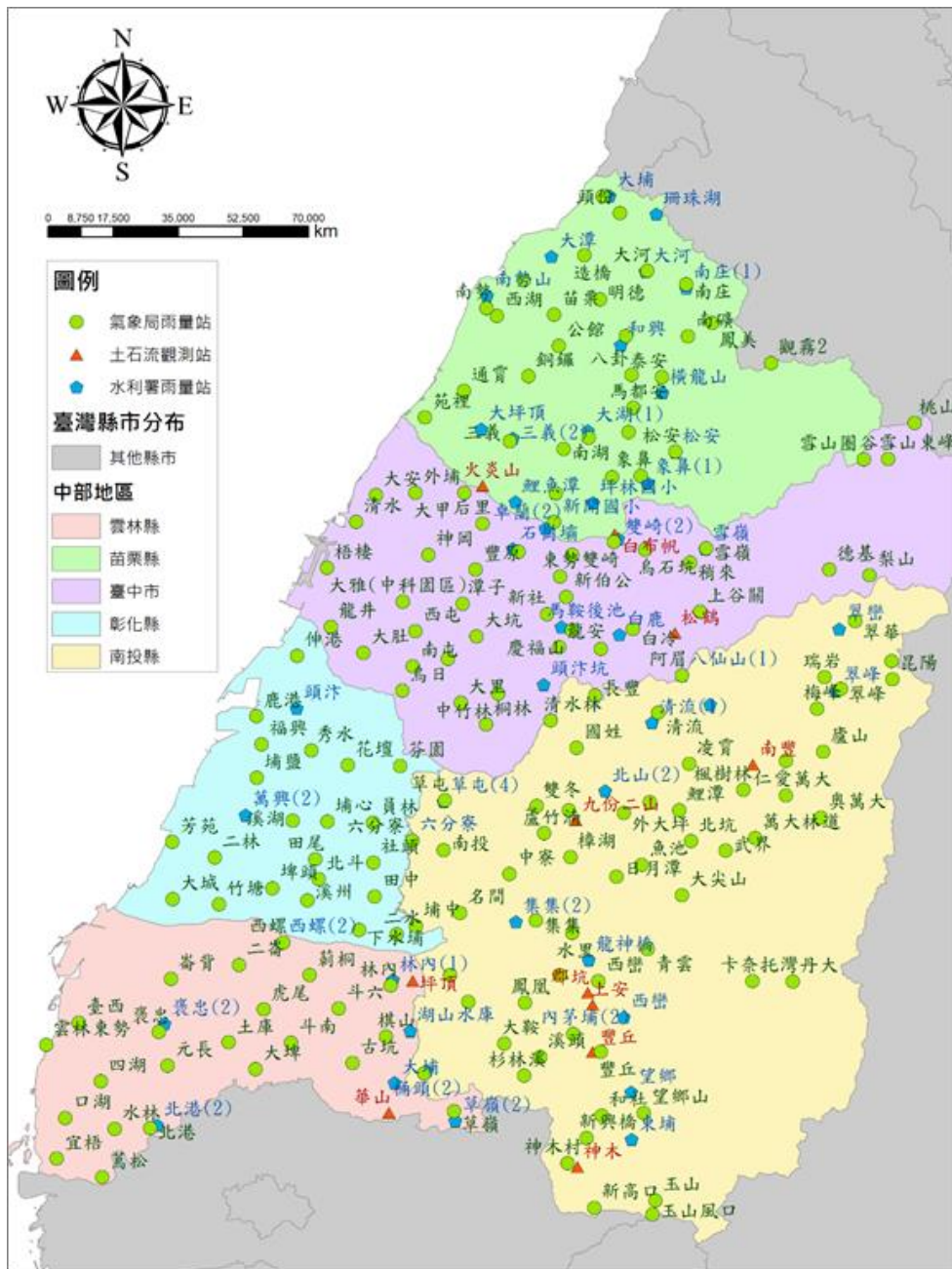


圖 1、各單位雨量測站於研究區域內分布情形一覽

Figure 1 Distribution of rain stations in the study area

2. 有效降雨事件篩選

雨滴粒徑資料與雨量資料蒐集完成後，即進行有效降雨事件之篩選，依據 Wischmeier and Smith (1978) 之定義：「一場降雨雨量大於 12.7 mm 且與該場降雨間隔 6 小時以上無降雨時，即為有效降雨」、「一場降雨雨量小於 12.7 mm，但在 15 分鐘內達 6.35 mm 時，即為有效降雨」。同時，搭配有效降雨事件發生之時間，將每場有效降雨事件中的每 10 分鐘之雨滴粒徑與雨量資料視為一個單位樣本，做為降雨動能推估公式之基礎資料。

(II) 研究方法

1. 降雨型態之判釋

不同降雨型態下的雨滴粒徑將有所差異，並可能影響後續降雨動能推估。因此本研究將各雨量站歷史雨量進行土壤沖蝕有效降雨事件篩選後，進行降雨型態判釋分析。依照台灣中部地區每年之氣候特性，本研究將降雨原因分類為冷鋒降雨、滯留鋒降雨、颱風雨及對流雨，並取得雨滴粒徑蒐集時間內之氣象圖資，如衛星雲圖、雷達回波圖與地面天氣圖等。其後依氣象圖資將各年之冷鋒、滯留鋒、颱風發生之時間與有效降雨事件比對，以得到各有效降雨事件之降雨型態。其中，若與冷鋒、滯留鋒、颱風發生時間事件皆未重疊，則該降雨事件之降雨型態為對流雨。

2. 降雨動能計算

針對所蒐集之降雨雨滴粒徑資料，首先，假設所有雨滴皆為球體，故將雨滴的粒徑代入式 6 中即可得到其體積：

$$V_{\text{olume}} = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (6)$$

其中 Volume 為雨滴體積 (cm^3)， r 為雨滴粒徑 (cm)；而每一滴雨滴的動能是將該雨滴的體積換算質量以及終端速度代入式 7 中計算而得：

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (7)$$

其中 E 為雨滴動能 (J)， m 為雨滴質量 (g)， v 為雨滴終端速度 (cm/s)；而雨滴終端速度是依照 Gunn & Kinzer (1949) 所提的公式進行計算，與 USLE 公式相同，如式 8：

$$V^2 = \frac{4}{3}gd (\rho_s - \rho)/\rho c \quad (8)$$

其中， g 為重力加速度 (980cm/s^2)、 d 為雨滴粒徑 (cm)、 ρ_s 為雨滴周圍流體密度 (g/cm^3)、 c 為拖曳係數 (drag coefficient)。

由雨滴譜儀測量的結果，即可知在一特定時間區段內各個區間所落下的雨滴個數。因此，將該時間區段內所有雨滴的動能加總，便可得到該時間區段內的總降雨動能。

3. 不同表現方式之單位降雨動能

在降雨動能依其單位之不同可分為兩種，分別為單位體積降雨動能 (KE_{mm})

及單位時間降雨動能 (KE_{time})。 KE_{mm} 是將一特定時間區段內 (或是一場降雨事件內)的總降雨動能除以該特定時間區段 (該場降雨事件)的總降雨量所得到的值。其物理意義係為在某一特定降雨強度狀況下，單位面積上每 1mm 的降雨所累積的降雨動能。而在 USLE 與 RUSLE 公式中，所使用之降雨強度與動能關係式 (E-I 關係式)，其中所稱之降雨動能皆為單位體積降雨動能 KE_{mm} 。再者， KE_{time} 則是指每隔一特定的時間間隔，即量測一次該時間內的降雨動能。物理意義係為在某一特定降雨強度狀況下，單位面積上每一特定時間間隔內所累積的降雨動能。包括 Salles et al. (2002) 與 Angulo-Martinez & Barros (2015) 等相關文獻中，皆以單位時間降雨動能 KE_{time} 進行降雨動能之探討。

單位時間降雨動能 KE_{time} 與單位體積降雨動能 KE_{mm} 公式，以及兩者之關係式，整理如式 9、式 10、式 11，其中， KE 為一場有效降雨事件之總降雨動能， P 為一場有效降雨事件之總降雨量 (mm)， T 為一場有效降雨事件之總降雨延時， I 為降雨強度 (mm/hr)

$$KE_{time} = KE/T \quad (9)$$

$$KE_{mm} = KE/P \quad (10)$$

$$KE_{mm} = KE_{time}/I \quad (11)$$

4. 年降雨沖蝕指數之空間分布推估

根據建立完成的臺灣中部地區降雨動能推估公式，將各雨量站雨量資料帶入式 1 與式 2 計算各雨量站之年降雨沖蝕指數，作為空間分布推估之基礎資料。本研究採用貝氏最大熵法進行降雨沖蝕指數在空間分布的推估，其輸入資料分為確定性資料 (Hard data) 及不確定性資料 (Soft data) 等兩種。首先，確定性資料 (Hard data) 是根據各測站之最大連續 30 分鐘降雨強度與降雨動能所推求之降雨沖蝕指數而得；而在不確定性資料 (Soft data) 方面，係在建立各測站之降雨沖蝕指數與降雨量之間的關係式後，利用雷達回波進行降水量之估計，進而再搭配該關係式求得之降雨沖蝕指數。在將所有推估資料納入後，運用資料趨勢分析的模式，將兩種資料類型的降雨沖蝕指數分離出低頻 (資料趨勢) 及高頻 (資料殘差)。其後，由兩資料的殘差分布建立之共變異數模式輸入貝氏最大熵法進行未知點的降雨沖蝕指數殘差推估，並且結合原先求得之資料趨勢得到最終降雨沖蝕指數在空間上的分布。其後，BME 模式應用至臺灣中部地區各單位測站 197 個有效雨量測站所計算而得的 2000 年至 2016 年期間之月降雨沖蝕指數，進行 2000 年至

2016 年整個中部地區月降雨沖蝕指數的時空分布推估，網格大小約為 1.3×1.3 公里，時間尺度以月為單位。最後，將推估結果產製為年平均降雨沖蝕指數。

III、結果與討論

(I) 建立降雨動能推估公式

由前述之計算方式，所計算之降雨動能公式，將至今蒐集 7 個月所蒐集之雨滴資料以不分組、不同地區、不同降雨型態、不同降雨強度等四個組別，分別探討各迴歸式之表現。最後，以迴歸關係最佳之組合，作為中部地區計算降雨動能之公式，並進一步計算降雨沖蝕指數。其結果如表 1 及表 2 所示。

由降雨動能公式建立之分析可知，無論何種組別，單位時間降雨動能 KE_{time} 與降雨強度之間的關係，皆優於單位體積降雨動能 KE_{mm} 與降雨強度之間的關係，因此在後續建置降雨動能公式的操作上，將採用單位時間降雨動能 KE_{time} 。在不分組的結果中，以二次函數之 R^2 最高；在不同地區方面，在桶頭、獅潭與龍安這三個地區，分別以冪函數、二元多項式與二次函數表現最佳，亦能獲得良好之迴歸關係；在不同降雨型態方面，梅雨、鋒面雨、西南氣流、颱風以二次函數、對流雨以冪函數的表現最佳，亦能獲得良好之迴歸關係。以上降雨動能公式在不分組、不同地區與不同型態之表現皆相近，若以此三種組別所建置的降雨動能公式進行降雨沖蝕指數的計算，所獲得的結果亦相近。因此，為便於後續推估中部地區的降雨沖蝕指數，建議整個中部地區無論是何種地區或型態，皆同樣採用不分組的分析結果，作為臺灣中部地區的降雨動能公式，並以此計算降雨沖蝕指數。

表 1 單位體積降雨動能 KE_{mm} - 分組測試，各組 R^2 最高之結果

Table 1 Performances of rainfall kinetic energy estimation equations and their highest coefficient of determinations

組別	型式	動能公式	R^2	RMSE
不分組	二次函數	$0.104788 - 0.000713 \cdot I + 0.0000000952 \cdot I^2$	0.181999	0.02658
不同地區	桶頭	$0.107666 + 0.000869 \cdot I - 0.000001340 \cdot I^2$	0.223251	0.029484
	獅潭	$0.117783 + 0.000642 \cdot I - 0.000000946 \cdot I^2$	0.095957	0.022368
	龍安	$0.099442 + 0.000258 \cdot I - 0.000000779 \cdot I^2$	0.017857	0.017506
不同降雨型態	鋒面雨	$0.075283 + 0.003297 \cdot I - 0.0000586 \cdot I^2$	0.201779	0.02349
	梅雨	$0.098526 + 0.001472 \cdot I - 0.00000508 \cdot I^2$	0.316238	0.031375
	對流雨	$0.113417 \cdot I^{0.019798}$	0.009915	0.020494
	西南氣流	$0.097906 + 0.001559 \cdot I - 0.00000566 \cdot I^2$	0.325832	0.031922
	颱風	$0.111558 - 0.00143 \cdot I + 0.0000454 \cdot I^2$	0.028372	0.016996
不同強度	$I < 5 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$	$0.097741 \cdot I^{0.044274}$	0.0009	0.02384
	I 介於 $5 \sim 10 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$	$0.045474 \cdot I - 0.03462 \cdot I \cdot \log I$	0.004708	0.026242
	$I \geq 10 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$	$0.103819 - 0.000744 \cdot I - 0.000000262 \cdot I^2$	0.231258	0.0283

表 2 單位體積降雨動能 KE_{time} - 分組測試，各組 R^2 最高之結果

Table 2 Performances of rainfall kinetic energy estimation equations and their highest coefficient of determinations

組別	型式	動能公式	R^2	RMSE
不分組	二次函數	$0.000592 + 0.017441 \cdot I + 0.000117 \cdot I^2$	0.948434	0.123391
不同地區	桶頭	$-0.00615 + 0.019204 \cdot I + 0.000106 \cdot I^2$	0.9522	0.153618
	獅潭	$0.015706 \cdot I + 0.004966 \cdot I \cdot \log I$	0.976666	0.045857
	龍安	$-0.00103 + 0.016813 \cdot I + 0.0000317 \cdot I^2$	0.953259	0.043593
不同降雨型態	鋒面雨	$-0.04056 + 0.023753 \cdot I - 0.00012 \cdot I^2$	0.94614	0.0435
	梅雨	$-0.03934 + 0.02274 \cdot I - 0.0000833 \cdot I^2$	0.957464	0.165182
	對流雨	$0.018903 \cdot I^{1.019798}$	0.963731	0.06873
	西南氣流	$-0.04318 + 0.023324 \cdot I - 0.0000793 \cdot I^2$	0.958045	0.168406
	颱風	$0.007476 - 0.015345 \cdot I + 0.0000843 \cdot I^2$	0.928561	0.030106
不同強度	$I < 5 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$	$0.01629 \cdot I^{1.044274}$	0.33393	0.015102
	I 介於 $5 \sim 10 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$	$0.016635 \cdot I^{1.044768}$	0.481164	0.032036
	$I \geq 10 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$	$0.0000147 + 0.017456 \cdot I + 0.000117 \cdot I^2$	0.936265	0.184464

(II) 臺灣中部地區降雨沖蝕指數之空間分佈特性分析

透過前述各項工作的進行，以及所建立完成的臺灣中部地區降雨動能推估公式，搭配各雨量站點實測的 10 分鐘降雨資料，即可進行臺灣中部地區年降雨沖蝕指數之計算，公式如式 (12) 所示。其中， j 為有效降雨事件數、 i 為該場有效降雨事件的特定時段、 E 為有效降雨事件之降雨總動能 (MJ/ha)、 I_{30} 為有效降雨事件之連續 30 分鐘降雨強度 (mm/hr)、 e 為單位時間降雨動能 (MJ/min-ha)、 D 為有效降雨事件特定時段的降雨延時 (min)。本研究所採用之單位時間降雨動能

公式，如式 (13) 所示。

$$R_j = E_j \times I_{30} = \sum_j \sum_i (e_{ij} D_{ij}) \times I_{30} \quad (12)$$

$$e = 0.000592 + 0.017441 \cdot I + 0.000117 \cdot I^2 \quad (13)$$

本研究經由 BME 推估平均年降雨沖蝕指數空間分布結果如圖 2 所示。由圖 2 可知中部地區的降雨沖蝕指數由沿海地區往山區增大，最大值位於台中市和平區之松鶴土石流觀測站一帶，約為 67,792 MJ-mm/ha-hr-yr。其次，分別在南投國姓鄉之九份二山土石流觀測站附近與雲林縣古坑鄉之華山土石流觀測站附近，平均年降雨沖蝕指數亦大於 25,000 MJ-mm/ha-hr-yr。

臺灣地區有關年降雨沖蝕指數之相關研究中，首先為黃俊德 (1979) 之研究結果，於台灣地區水土保持手冊沿用迄今已近 30 多年。而盧昭堯等 (2005)、蘇志強等 (2016) 及目前正在執行之「氣候變遷下台灣中南部山坡地開發行為土砂沖蝕估算模式之探討」等研究，係為使用雨量記錄時間亦較接近現況之研究。為探討不同年代及使用不同降雨動能公式等進行年降雨沖蝕指數計算之差異，茲將上述前人研究成果與本研究所計算之年平均降雨空間分布圖進行比較，並探討其變化與差異，如圖 3 所示。

首先，由黃俊德 (1979) 與本研究之年平均降雨沖蝕指數分布圖的比較而言，不同的區域年平均 R 指數有增減的情形，如最大之松鶴一帶，原先為 15,000 MJ-mm/ha-hr-yr 提升至 60,000 MJ-mm/ha-hr-yr 以上，而九份二山一帶由 15,000 MJ-mm/ha-hr-yr 增加至 25,000 MJ-mm/ha-hr-yr 左右。再者，在盧昭堯 (2005) 之結果，在中部地區之年平均降雨沖蝕指數大多介於為 10,000 至 20,000 MJ-mm/ha-hr-yr 之間，在松鶴、九份二山、華山等區域，皆低於本研究的推估結果。而該研究年平均 R 指數較高之處，位於於南投與花蓮交接一帶，大於 30,000 MJ-mm/ha-hr-yr，亦大於本研究推估之結果。究其原因，該研究利用全臺灣的雨量站進行推估，而本期計畫係以中部地區雨量站進行推估，使南投接近花蓮邊界處的推估結果有所落差。而在蘇志強 (2016) 的比較結果發現，其數值的分布與本研究相近，最大值 (60,000 MJ-mm/ha-hr-yr) 亦與本研究推估之位置相近，約位於臺中的稍來、雪嶺一帶，而本研究之最大值 (67,792 MJ-mm/ha-hr-yr) 則位於松鶴一帶。最後，正在執行中之「氣候變遷下台灣中南部山坡地開發行為土砂沖蝕估算模式之探討」計畫所推估的結果，其空間變化上主要在台中與嘉義山區為最大值，往周遭逐漸遞減。對中部地區而言，以台中市山區最高，與本研究推估之最大值所在的位置相近，其值則略低於本研究的推估結果。

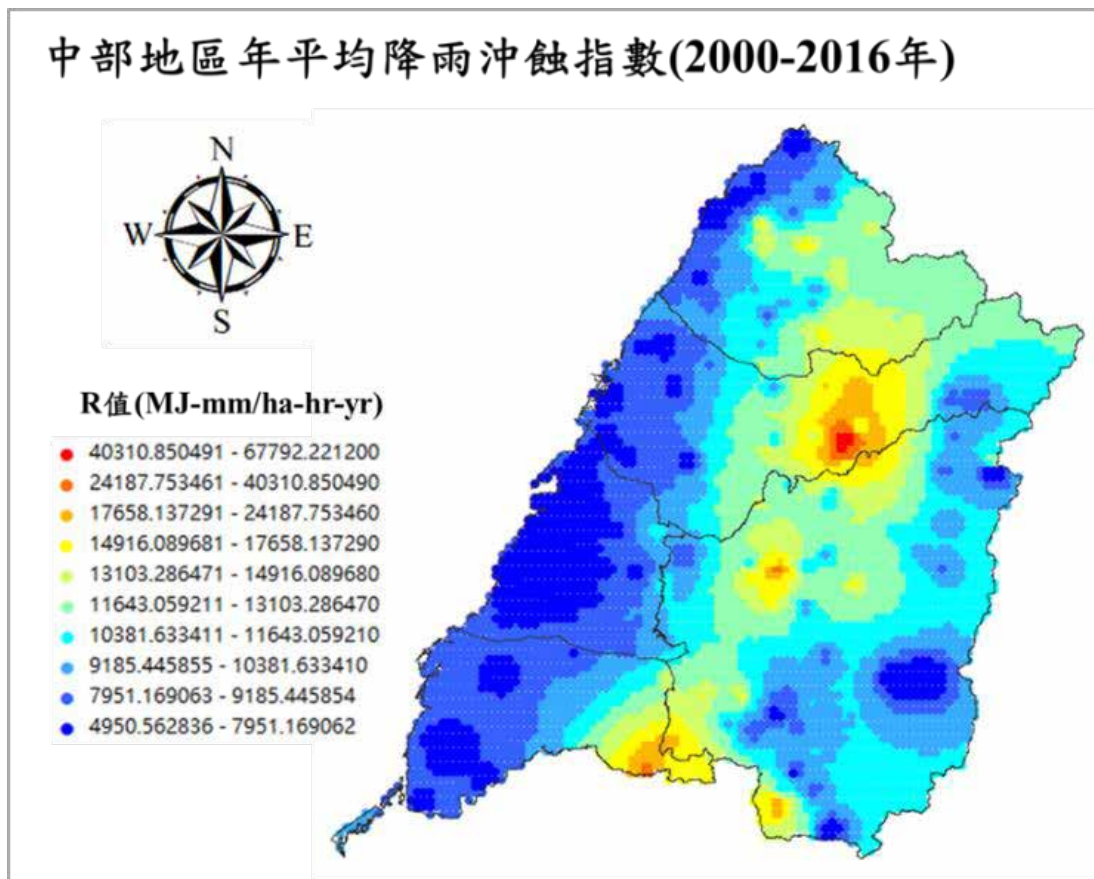


圖 2、臺灣中部地區平均年降雨沖蝕指數 (2000-2016 年)

Figure 2 The average annual rainfall erosion index in Central Taiwan (2000 to 2016)

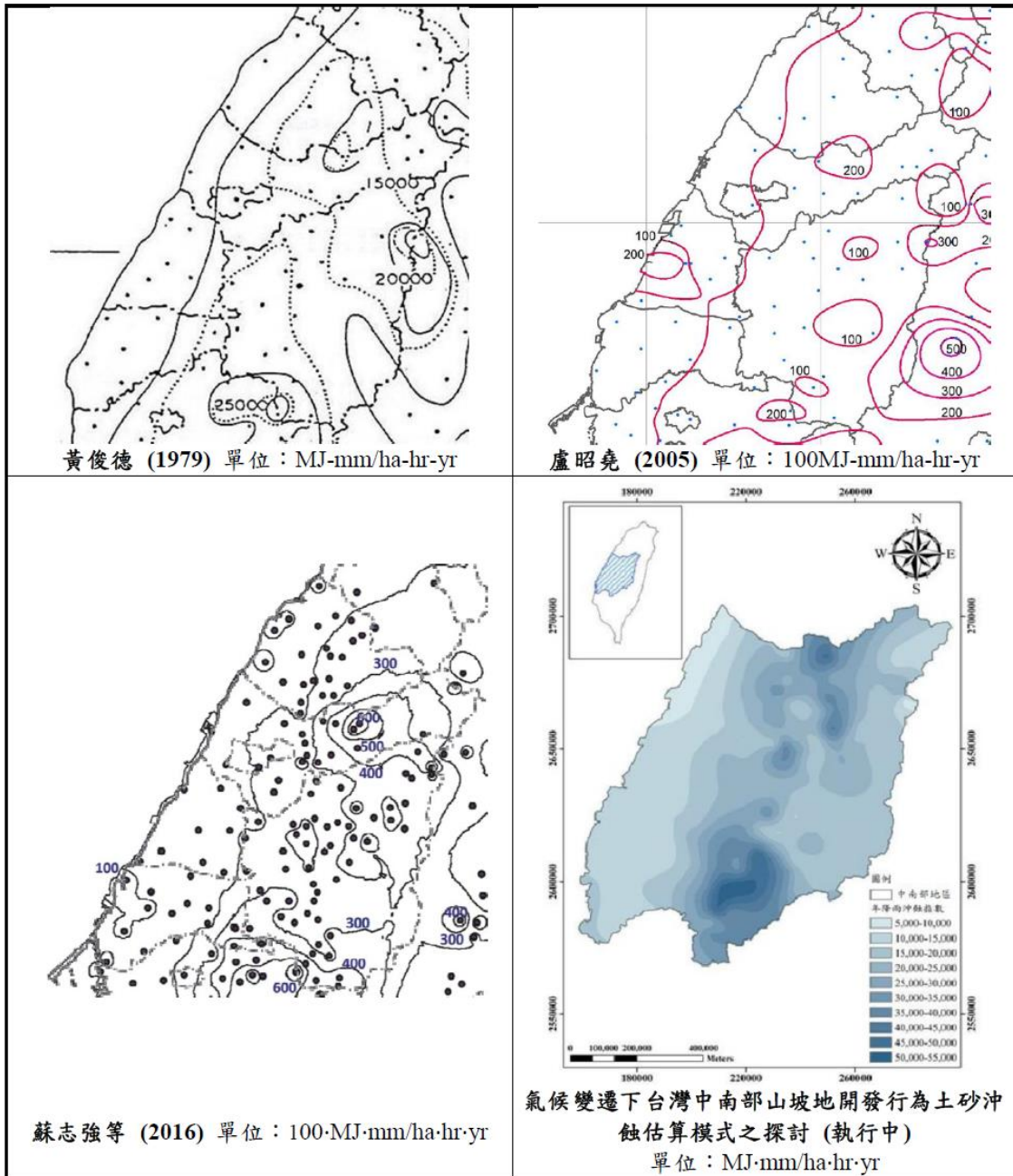


圖 3、不同研究之年平均降雨沖蝕指數空間分布圖比較

Figure 3 The comparison of spatial distribution of average annual rainfall erosion index among results of different researches

整體而言，本研究計算的年平均降雨沖蝕指數分布相較於過去的研究（黃俊德，1979；盧昭堯，2005），數值依各區域的特性在空間分布的呈現已有所不同，並且有所提升。究其原因，其一，過去雨量測站之密度較低，且山區之測站較少，故部分山區雨量較大之處，是利用低海拔之降雨沖蝕指數推估而得，因而可能有低估之情形；其二，應為受氣候變遷之影響、降雨極端化的趨勢，致使降雨沖蝕

指數有上升的現象。

而與最近的研究相比 (蘇志強, 2016; 氣候變遷下台灣中南部山坡地開發行為土砂沖蝕估算模式之探討, 執行中), 最大值皆位於臺中市山區, 空間分布十分相近, 降雨沖蝕指數的區間分布亦較為接近。其中, 最大的不同則是降雨沖蝕指數在空間上的分布, 原因應為空間推估方法的不同, 與其他研究採用空間分布推估的方式相比, 本研究採用的 BME 貝氏最大熵法可依據既有數值的時空特性進行不同時間、空間的降雨沖蝕指數推估, 使本研究修訂的降雨沖蝕指數在空間上的分布與最近兩年的研究有些微差異。而就整體推估結果而言, 中部地區降雨沖蝕指數在空間上變化的趨勢大致相近。

IV、結論

本研究透過自動化雨滴譜儀, 蒐集臺灣中部地區 (桶頭站、龍安站及獅潭站) 之雨滴粒徑資料, 藉由降雨型態的判釋, 探討不同條件下之雨滴粒徑分布特性, 並分別測試單位體積降雨動能 KE_{mm} 及單位時間降雨動能 KE_{time} 與降雨強度 I 迴歸的效果, 建立通用之臺灣中部地區本土化降雨動能推估公式, 並根據此結果建置 R 指數分布圖。本研究之成果與結論分述如下:

1. 降雨動能公式建立之部份, KE_{time} 與降雨強度之間的關係, 皆優於 KE_{mm} 與降雨強度之關係, 另在其不分組、不同地區與不同型態之表現皆相近, 為便於後續推估中部地區的降雨沖蝕指數, 建議中部地區無論是何種地區或型態, 採用單位時間降雨動能 KE_{time} 之不分組的分析結果, 作為臺灣中部地區的降雨動能公式。
2. 本研究採用的貝氏最大熵法可依據既有數值的時空特性進行不同時間、空間的降雨沖蝕指數推估, 就整體推估結果而言, 與最近兩年的研究相比, 中部地區降雨沖蝕指數在空間上變化的趨勢大致相近。本研究之年平均降雨沖蝕指數空間分布圖建置成果可提供後續工程設計之參考依據。

V、謝誌

本研究承行政院農業委員會水土保持局「台灣中部地區降雨動能推估公式建置及年降雨沖蝕指數之修訂探討」計畫 (SWCB-106-120) 之支持, 致使本研究得以順利完成, 謹此致謝。

VI、參考文獻

- 行政院農業委員會水土保持局 (2015) 水土保持手冊。
- 黃俊德 (1979) 台灣降雨沖蝕指數之研究。中華水土保持學報 10 (1), 127-144。
- 盧昭堯、蘇志強、吳藝昀 (2015) 台灣地區年降雨沖蝕指數圖之修訂。中華水土保持學報, 36 (2), 159-172。
- 蘇志強 吳佩儒 盧昭堯 (2016) 台灣降雨特性變化及降雨沖蝕指數圖修訂。中華水土保持學報, 47 (1), 1-12。
- Angulo-Martínez, M. and A.P. Barros (2015) Measurement uncertainty in rainfall kinetic energy and intensity relationships for soil erosion studies: an evaluation using PARSIVEL disdrometers in Southern Appalachian Mountains. *Geomorphology* 228, 28–40
- Ferrier, B. S., W.K. Tao, and J. Simpson (1995) A Double-moment Multiple-phase Four-Class Bulk Ice Scheme. PartII : Simulations of convective Storms in Different Large- Scale Environments and Comparisons with other Bulk Parameterizations. *J. Atmos. Sci.*, 52, 1001-1033.
- Gunn, R. and G. D. Kinzer (1949) The terminal velocity of fall for droplets in stagnant air. *J. Meteor.*, 6, 243-248.
- Lim, Y. S., J. K. Kim, J. W. Kim, B. I. Park, and M. S. Kim (2015) Analysis of the relationship between the kinetic energy and intensity of rainfall in Daejeon, Korea. *Quat. Int.*, 384, 107-117.
- Maki, M., T. D. Keenan, Y. Sasaki, and K. Nakamura (2001) Characteristics of the raindrop size distribution in tropical continental squall lines observed in Darwin, Australia. *J. Appl. Meteor.*, 40, 1939-1412.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. et al. (1997) Predicting Soil Erosion by Water – A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Agricultural Handbook No. 703, US Government Printing Office, Washington, D.C.
- Rosewell CJ (1986) Rainfall kinetic energy in eastern Australia. *Journal of Climatology and Applied Meteorology* 25, 1695-1701.
- Salles, C., J. Poesen, and S.T. Daniel (2002) Kinetic energy of rain and its functional

relationship with intensity. *Journal of Hydrology* 257(1-4), 256-270.

Tokay, A., and D. A. Short (1996) Evidence from Topical Raindrop Spectra of the Origin of Rain from Stratiform versus Convection clouds. *Journal of Applied Meteorology Science* 35, 355-371.

Wischmeier, W. H. and D. D. Smith (1958) Rainfall Energy and Its Relationship to Soil Loss. *Trans. m. Geophys. Union*, 39, 285-291.

Wischmeier, W. H. and D. D. Smith, (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537, 58 pp.

以主成分分析探討德基水庫集水區溪流水 水化學之變異

江曜宇¹ 成允聖² 劉恩好³ 劉瓊霖^{4*}

【摘要】本研究使用主成分分析簡化溪流水水化學變數，用以比較德基水庫上游 4 處集水區溪流水之水化學變異。研究集水區包含有勝溪、合歡溪、畢祿溪與成武溪，在此等集水區內共設 11 個採樣點，自 2014 年 3 月至 2015 年 12 月，每月採集溪流水水樣並測定流量，分析 Na、K、Mg、Ca、F、Cl、NO₃、SO₄、HCO₃ 等 9 項水化學特性。主成分分析負荷值顯示第一主成分在 HCO₃、Na、Mg、Ca 有較高負荷值，可解釋變異量為 46.06%，主要與來自土壤岩石風化作用的元素相關性較大，第二主成分在 NO₃、有較高負荷值，可解釋變異量為 25.15%，與植群的養分循環和農業活動有關。

【關鍵詞】水化學、主成分分析、德基水庫、農業活動、森林

STUDY ON WATER CHEMISTRY VARIABILITY IN THE TECHI RESERVOIR WATERSHED BY PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

Yao-Yu Chiang¹ Yun-Sheng Cheng² En-Yu Liu³ Chiung-Pin Liu^{4*}

【Abstract】 The aim of this study was to compare water chemistry of streamflow of different watersheds by using principal component analysis (PCA). Water samples were collected from March 2014 to December 2015 once a month at 11 samplings sites which are located at Yusheng, Hehuan, Pilu and Chengwu watersheds. Samples were analyzed for water chemical characteristics of Na, K, Mg, Ca, F, Cl, NO₃, SO₄, and HCO₃. Principle component analysis reduced dominant ions from 9 to 2 variables and classified them into two component groups. Ions of principal component 1 (PC1)

¹ 林業試驗所約聘職務代理人。10066 台北市中正區南海路 53 號。

Research Assistant, Taiwan Forestry Institute. No. 53, Nanhai Rd., Zhongzheng Dist., Taipei city 10066, Taiwan (R.O.C.).

² 林業試驗所研究助理。10066 台北市中正區南海路 53 號。

Research Assistant, Taiwan Forestry Institute. No. 53, Nanhai Rd., Zhongzheng Dist., Taipei city 10066, Taiwan (R.O.C.).

³ 林業試驗所研究助理。10066 台北市中正區南海路 53 號。

Research Assistant, Taiwan Forestry Institute. No. 53, Nanhai Rd., Zhongzheng Dist., Taipei city 10066, Taiwan (R.O.C.).

⁴ 國立中興大學森林系教授，通訊作者。電子郵件: cpliu@nchu.edu.tw

Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University. Corresponding Author. E-mail: cpliu@nchu.edu.tw

including HCO_3 , Na, Mg and Ca are highly related to elements proceeded by weathering, and ions of principle component (PC2) are mostly constituted by NO_3 which is related to agricultural activities and nutrient cycling of vegetation cover.

【 Key words 】 Water chemistry, Principal component analysis, Techi reservoir watershed, Agricultural activities, Forest

I、前言

集水區水文系統相當複雜，溪流水由不同的來源路徑造就多樣的水文狀態與溪流水水化學 (Christophersen and Hooper, 1992 ; Burns *et al.*, 2001 ; Chaves *et al.*, 2008 ; Barthold *et al.*, 2011)，影響溪流水化學的因素包括降水、土壤性質、植被類型、生物作用及人為擾動等因子 (Hornbeck *et al.*, 1997)，一般認為鄰近河川的土地使用比整個集水區土地利用，更容易影響溪流水水質 (Osborne and Wiley, 1988)，葉春國等 (2008) 探討水里溪上游集水區，以不同濱水帶分析土地利用與溪流水中硝酸鹽濃度關係，將濱水帶區分為 25、50、75 及 100 m 等 4 種不同寬度，分別與 5 條溪流水中 NO_3 離子濃度的中值及平均值進行皮爾森相關分析，研究得知，溪流中 NO_3 離子濃度與農業土地利用密切相關，其中又以 25、50 m 內之濱水帶影響較明顯，此乃由於施肥作業所致 (人工肥料或動物堆肥)，所以農業地區可被視為 NO_3 離子的貢獻區域。

主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 主要目的是做為訂定指標的依據，對多個變數決定各個變數權重而作加權平均，依此訂定總指標，能夠將資料簡化，將多個有相關的變數簡化成少數幾個獨立的主成分，且經由線性組合而得的主成分能保有原來變數最多的資訊，抽出主成分後，可將各變數原始資料轉換為主成分得點，以供進一步分析。主成分分析即是要達成 3 個重要目標：代表性、獨立性、精簡性 (陳順宇, 2005)。Ouali 等 (2009) 應用多變量統計分析十二年的水質與環境變數，PCA 分析結果將 6 項變數簡化為 3 項變數，並可以解釋 74% 變異，此研究重申 PCA 在探索複雜的水化學系統的優異性。

水壩以上雨水匯合的地形單元區稱為水庫集水區。台灣雨量雖充沛，但河川型態屬於水短流急，水資源之保存更為不易，故水庫集水區內之水質水量管理甚為重要。本次研究區域德基水庫為我國首座拱形高壩，於 1969 年 12 月開工，1973 年 12 月開始蓄水，並與石岡水庫供應大台中地區民生用水。德基水庫已開放供民眾遊憩參觀，並具截洪濟枯、灌溉、給水、遊憩等效益，實為中部地區唯一可靠的水源。然此集水區範圍內土地利用問題層出不窮，主要是因為超限利用 (王漢泉, 1990 ; 林俊全等, 2010)。張哲銘 (2004) 研究指出德基水庫上游坡地之

農業活動有逐漸增加的趨勢。雖在九二一大地震後，中部橫貫公路谷關到德基道路中斷，造成此區農產品運輸的成本大增，但仍有農地面積擴張的現象，此些農業活動對於大台中地區民生用水水源的德基水庫水質良窳的影響與否十分重要。

本研究以德基水庫上游之 4 個次集水區為研究區域，分別為有勝溪、畢祿溪、合歡溪、成武溪，應用多變量統計方法 (PCA) 分析水化學變數，瞭解德基水庫集水區水化學濃度與通量之空間與時間的變異，進一步提供決策者與各專家對德基水庫集水區經營管理之科學參考數據。

II、材料與方法

(I)研究區域

研究範圍位於德基水庫集水區內，位處台中市和平區大甲溪上游。該水庫海拔 1,400 m，是台灣海拔最高的水庫。其集水區橫跨台中市、南投縣、宜蘭縣與花蓮縣四個縣市，面積達 601.6 km²，而蓄水面積約為 454 ha，總蓄水量約為 1.73 × 10⁸ m³ (侯如真等，2010)。所包含之集水區溪流由北到南，由西向東分別有桃山溪，有勝溪，七家灣溪，南湖溪，武陵溪，司界蘭溪 (四季朗溪)，耳無溪，大甲溪，合歡溪，畢祿溪等 10 條溪流。本研究選取有勝溪、合歡溪、畢祿溪與成武溪，共 4 條溪流作為研究對象，選取原則以安全為優先考量，其次為採樣便利性及樣區間的土地利用差異性 (圖 1)。有勝溪、合歡溪、畢祿溪與成武溪面積分別約 3,324、8,396、5,745 與 790 ha，各流域依據林務局東勢林管處提供 101 年國土利用調查成果圖之 shapefile 檔、造林台帳與造林地點之數化 shapefile 檔與林務局農林航空測量所提供地面解析度為 25 cm 之彩色正射影像圖檔，並配合現場調查之點位資料進行數化。使用 ArcGIS 的 Editor 套件 Reshape Feature Tool 數化，將土地利用分為天然林、人工林、果園、菜園、建物、水體、裸露地、路地、草地，共 9 類 (表 1)。

有勝溪主要土地利用為天然林，面積 2,560 ha，占總面積 77.5%，其次為人工林，面積 569 ha，占全區面積 17.3%，第三為菜園地，面積 72 ha，占全區面積 2.2%，菜園在春夏兩季主要種植高麗菜，秋冬兩季主要種植娃娃菜及大蒜，菜園地主要分布於有勝溪中下遊的河道左側，菜園地與溪流兩者之間無森林緩衝帶。合歡溪以天然林為多，面積達 5,709 ha，占 67.7%，次要為人工林，面積 1,453 ha，占 17.3%，第三為草地，面積 563 ha，占 6.7%，主要分布在合歡山周圍。畢祿溪以天然林為主，約 4,326 ha，占 75.3%，其次為人工林，此區域大部

分果園與菜園地皆已回收造林。成武溪土地利用天然林與人工林面積相差不多，分別為 324 ha 與 371 ha，占 41.0% 與 46.9%，另外，成武溪果園所占的比例比其他集水區高，占 7.3%，果園種類包括蘋果、梨子、柿子與水蜜桃，但距離溪流水有森林緩衝帶存在。

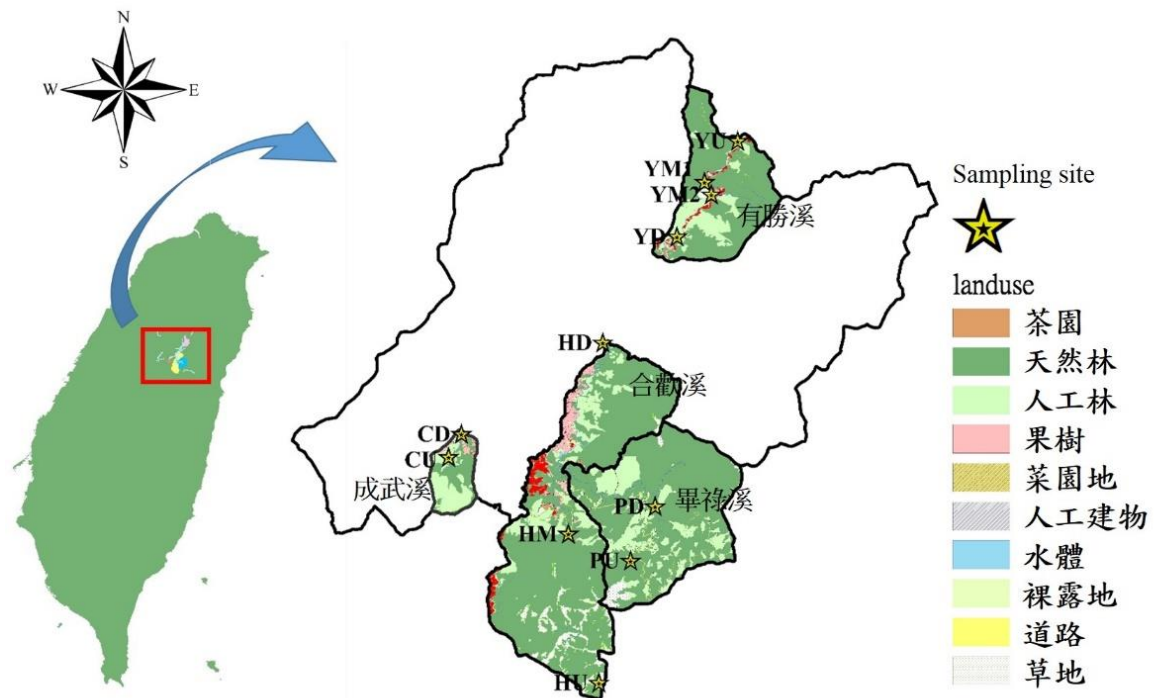


圖 1 研究區溪流與採樣點位置圖

Figure 1 Water sampling sites along streams in the studied watersheds

表 1 有勝溪、合歡溪、畢祿溪與成武溪集水區土地利用比例

Table 1 Proportion of land use types of the studied watersheds

	茶園	天然林	人工林	果園	菜園地	建物	水體	裸露地	道路	草地
有勝溪	0.0	77.5	17.2	0.6	2.2	0.1	0.9	0.0	0.6	0.9
合歡溪	0.2	67.7	17.3	4.9	1.6	0.1	0.5	0.4	0.6	6.7
畢祿溪	0.0	75.3	20.2	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.9	2.9
成武溪	1.2	41.0	46.9	7.3	0.4	0.2	1.2	0.5	1.0	0.3

(II) 溪水採樣與分析方法

有勝溪共設 4 個採樣點，由上游到下游代號分別是 YU、YM1、YM2 及 YD；合歡溪取 3 點，代號分別為 HU、HM 及 HD；畢祿溪取 2 點，代號為 PU 及 PD；成武溪取 2 點，代號為 CU 及 CD (圖 1)。取樣時間從 2014 年 3 月至 2015 年 12

月，每月採集一次，並將資料分為豐水期（4、5、6、7、8、9月）與枯水期（1、2、3、10、11、12月），2015年2月因合歡山路面結冰無法通行，故合歡溪上游未採樣，溪流水總樣本數為241筆。溪流水以瓢掬法（scooping）進行，採樣時，須注意要取得具代表性之水樣，並避免可能的污染。在取樣前，採樣瓶用擬採之水樣洗滌2-3遍。取樣後，水樣會因化學性或生物性的變化而改變其性質，故需儘速送回實驗室進行以下檢驗分析。流量部分使用 SonTek FLOWTRACKER® HANDHELD-ADV® 手持式流速測定儀進行量測，每個河川斷面至少量測三個點以上，2014年3月無測量流量，其他月份皆有測量，另外，合歡溪下游流量有時較大，無法使用手持式流速測定儀量測，因此使用合歡溪中游數值推估下游流量，關係式為： $y = 1.35x + 1.33$, $R^2 = 0.68$, $p < 0.01$, x 為中游流量， y 為下游流量。

水化學分析 Na、K、Ca、Mg、F、Cl、NO₃、SO₄ 等陰陽離子，首先將水樣通過 0.45 μm 濾膜（Gelman-science GN-6 grid 0.45 μm sterilized filter paper）後，將濾液以離子層析儀（Dionex 120, USA）分析，HCO₃ 則是將水樣以 0.01 M 硫酸滴定到 pH 4.52 後定量之，分析流程與方法均按照（American Public Health Association, APHA）所訂之標準流程分析

(III)資料處理與分析

1、通量計算

通量方面，假定密度為1，計算方式為離子濃度乘上流量，乘上86,400秒換算為日通量後，並乘上當月天數作為月輸出量，最後除以面積計算出每月每公頃輸出量，公式如：濃度 (mg L⁻¹) * 流量 (m³ s⁻¹) * 一日 (86400 s) * 當月天數 * 面積 (ha⁻¹) = kg ha⁻¹ mon⁻¹

2、統計分析

以主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 方法分析資料，原始變數經由轉軸後所得新變數稱為主成分，意即主成分為原變數的線性組合，而觀察點投影至新軸所得新座標稱為主成分得點，一般情況，若有 p 個變數 x_1, x_2, \dots, x_p ，樣本相關矩陣 R ，則可得 p 個主成分 y_1, y_2, \dots, y_p ，第 j 個主成分為 $Y_j = \alpha_j' x = \alpha_{j1}x_1 + \alpha_{j2}x_2 + \dots + \alpha_{jp}x_p$ ，其中 α_j 是 R 的第 j 個特徵值 λ_j 對應之特徵向量，特徵值即為主成分之變異數，原總變異數與新總變異數相同，即是特徵值的加總，故主成分解釋總變異的比率（簡稱解釋能力）為該特徵值除以總特徵值，主成分選取原則為保留特徵值大於1的主成分，稱為大於1法則（陳順宇，2005；Kaiser, 1960）。

III、結果與討論

(I) 溪流水水化學濃度的變異

溪流水中 Ca 、 Mg 、 HCO_3 、 Na 、 SO_4 等離子主要來源為岩石或土壤層風化作用 (金恆鏞等, 1984; Evans and Davies, 1998; Elwood and Turner, 1989; Wayne *et al.*, 1989), SO_4 亦可能由大氣沉降輸入集水區內 (Houle and Carignan, 1995)。本研究除了成武溪外, 其餘採樣點濃度皆為 $\text{HCO}_3 > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K}$, 成武溪則是 $\text{Ca} > \text{HCO}_3 > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K}$, 且是研究樣區中 SO_4 濃度最高者, CU 與 CD 分別為 1256.13 與 1373.53 $\mu\text{eq L}^{-1}$ (表 2), 金恆鏞等 (1995) 研究台灣北、中、南部森林集水區水化學, 發現溪水中 Ca 、 Mg 等元素濃度偏高, 此現象可能與土壤中 SO_4 吸附能力密切相關, 當土壤緊密吸附 SO_4 時, 增加土壤團粒表面的負電荷, 提高土壤的陽離子交換量, Ca 、 Mg 等鹽基陽離子則易與土壤結合, 因此, 土壤中鹽基陽離子的淋溶流失量將會減少, 反之, 若土壤對 SO_4 的吸附能力小, 則鹽基陽離子易被淋溶而出, 致使溪流水中 Ca 、 Mg 等元素濃度偏高, 此外, 黃鐵礦存在於台灣多數集水區 (Calmels *et al.*, 2011; Das *et al.*, 2012), 其化學風化作用下會釋出 SO_4 與 H (廖學誠等, 2002), 從水化學推斷成武溪地質可能富含黃鐵礦, 高濃度 SO_4 是導致溪流水中 Ca 濃度高於 HCO_3 的主因。

HCO_3 經常是溪水中陰離子濃度最高者, 主要由岩石風化產生, 如碳酸岩類與矽酸岩類化學風化作用 (Malina, 1996; Meyer *et al.*, 2017), 此外, 當土壤微生物活動旺盛, 其呼吸作用所排放的 CO_2 亦可提高溪水 HCO_3 濃度 (Baron, 1991)。畢祿溪 HCO_3 相對於其他溪流是較高者, PU 與 PD 分別為 2,837.11 與 2,021.21 $\mu\text{eq L}^{-1}$ (表 2), 當溪流水水化學濃度較高時, 可據此推測森林生態系內部代謝過程快、土壤中生物活動量大及岩石風化作用強, 大量的養分將經由溪流水而流失, 尤其是 HCO_3 及 SO_4 會伴隨著鹽基陽離子一同輸出, 使得溪水中 Na 、 Ca 、 Mg 等元素濃度增高 (劉瓊霏、許博行, 1998; Hornbeck *et al.*, 1997), 因此畢祿溪整體養分輸出較高。

K 由初級風化釋出後, 通常固定在伊萊石或雲母上, 且易被植群根系所吸收利用, 其循環速度相當快, 故在溪流水中的濃度一般較低 (劉瓊霏等, 2004), 然而有勝溪中下游 K 濃度較高, 經現場調查此部分應與農業活動施肥有關, 當地農業活動有施用雞糞、台肥 5 號與 43 號有機質複合肥料、尿素及氯化鉀等肥料, 其中鉀肥應是使有勝溪中下游 K 濃度較高主因, 達 49.70 $\mu\text{eq L}^{-1}$ 。

NO_3 是造成陸域水域與沿海地區水質優養化與酸化的主要原因 (Meader and

Goldstein, 2003; Wellington and Driscoll, 2004)，一般森林土壤中的 NH_4 經過硝化作用後會轉換為 NO_3 ，易於流動及淋溶，加上 NH_4 被根群吸收，因此溪流中 NO_3 的濃度比 NH_4 高 (Cirimo and McDonnell, 1997)，在氣候暖和區域，有機物分解速率較快，若發生強降雨事件，加上地勢陡峭，大量降雨所產生的地表逕流可能使林地土壤內 NH_4 及 NO_3 淋洗出來，導致溪水中 NH_4 及 NO_3 的濃度快速上升 (王立志等，1999)，在基流時 NO_3 主要透過地下水進入溪流水中 (Wagner *et al.*, 2008; Tesoriero *et al.*, 2009)，農業活動施灑氮肥往往是增加溪流水中 NO_3 的主因 (Seitzinger *et al.*, 2010)，有勝溪菜園土壤深度 15 cm，土壤水測得 NO_3 濃度高達 255 mg L^{-1} (成允聖，2016)，雖然有勝溪上下游土地利用皆以森林為主，但是分布於中下遊河岸左側濱岸帶的土地利用多為菜園，溪水與菜園彼此間並無森林緩衝帶，菜園土壤少了像森林土壤所擁有的枯枝落葉層能夠儲存養分，加上濱岸帶菜園的施肥是導致有勝溪 NO_3 相於其他溪流較高之因素，YD 平均濃度達 $119.48 \mu\text{eq L}^{-1}$ 。

F 一般在溪流水中濃度極低，甚至達到無法檢測程度，溪流中 F 主要由岩石風化產生 (Lahermo *et al.*, 1995; Meyer *et al.*, 2017)，此外，F 亦會受到人為活動所影響，如含氟的牙膏，或在無污水下水道設施的鄉村地區，化糞池可能為溪水中 F 的主要來源 (Wayland *et al.*, 2003)。Cl 的濃度與其他元素相比，其含量亦是偏低，來源主要為海鹽飛沫 (Lyons *et al.*, 2005; Calmels *et al.*, 2011)，另外，Lee 等 (2017) 研究顯示溪流水中 F、Cl 與總懸浮固體有正相關，當溪流水總懸浮固體增加時，F、Cl 濃度亦增加。與劉瓊霖 (2004) 於福山試驗林哈盆溪相比下 (F 不超過 $5 \mu\text{eq L}^{-1}$ ，Cl 平均約 $60 \mu\text{eq L}^{-1}$)，本次研究區域整體 F 濃度較高一些，最高為 CD (平均 $14.43 \mu\text{eq L}^{-1}$)，因與當地化學風化作用較高有關，而 Cl 濃度較低，最高為 HD (平均 $43.83 \mu\text{eq L}^{-1}$)，顯示研究區域內受到海鹽飛沫影響較小。

(II) 溪流水水化學主成分分析

水化學主成分分析結果僅第一、二主成分特徵值大於 1 (表 4)，故僅選取前二個主成分作為後續探討。主成分分析負荷值顯示第一主成分在 HCO_3 、Na、Mg、Ca 有較高負荷值，可解釋變異量為 46.06% (表 4)，顯示研究樣區水質受到岩石風化作用的影響較大，第二主成分在 NO_3 、有較高負荷值，可解釋變異量為 25.15% (表 4)， NO_3 為植物利用之營養元素，森林植體分解、枯枝落葉層淋洗與農業活動施撒氮肥皆是溪流水 NO_3 來源，第二主成分應與植群的養分循

環和農業活動有關，二個主成分解釋變異達 71.21% (表 4)。

圖 2 顯示各溪流水水化學於第一主成分與第二主成分的得點，有勝溪、合歡溪與成武溪第一主成分由上游往下游遞增，此些風化作用元素經過地下水層而滲流出，下游溪流水流經的路徑與時間往往比上游大，此現象與溶質累加及污染源增加有關 (陸象豫和劉瓊霏，2010)，惟畢祿溪第一主成分得點較其他流域不同，反而是上游往下游遞減 (圖 2C)，畢祿溪上游有大面積崩塌，劉瓊霏等 (2005) 曾研究 921 地震崩落地對水質之影響，結果顯示崩落地之溪流水中鹽基陽離子濃度明顯較高，其原因除植物死亡減少吸收此些陽離子，地被裸露面積增加，加上風化作用結果，增加了無機陽離子溶水的機會，除了有勝溪外，其餘溪流水在枯水期時第一主成分得點較大，有勝溪於豐水期因農業活動種植高麗菜通常會使用石灰增加土壤 pH 值，且菜園地土壤裸露，使風化作用增強，導致有勝溪第一主成分於豐水期得點較其他集水區高 (圖 2A)。合歡溪上游部分主要土地利用以草原為主，de Souza 等 (2013) 指出草原覆蓋的地區，溪流水電導度與氨氮濃度會比森林覆蓋來得高。本研究將合歡溪與其他三個集水區相比卻無此現象，合歡山上游海拔約 3,000 m，氣溫較低，亦使土壤風化作用能力下降。另外 Anbumozhi 等 (2005) 研究中亦指出草地能濾流經草地之營養鹽，並達到淨化水質之功效，合歡溪上游除了有軍營駐紮管制，皆無其他人為干擾，從溪流水化學中可得知草地對於軍營產生得廢水有達到淨化之效果，因此合歡上游第一主成分得點較低 (圖 2B)。

第二主成分得點以有勝溪中下游較高，而畢祿溪上游與成武溪整體較低 (圖 2)，有勝溪與畢祿溪由上游往下游遞增較明顯。有勝溪中下游因河道左岸多種植高冷蔬菜，農業活動施撒過多的肥料，使得有勝溪第二主成分得點比其他集水區來得高，而畢祿溪上游因有崩塌發生，使天然植群能夠更新生長，較年幼的林木對於養分需求量較大，黃正良 (2007) 研究指出氮為植物生長所需之大量元素，未達成熟期之人工林對氮的需求較高，導致上游第二主成分得點較低，成武溪第二主成分得點較低推測其原因有二，第一：位於溪流水與農業活動中間的主要土地利用以人工林為主，相較於合歡溪森林緩衝帶，此處人工林的林齡較輕，對於養分需求量較大，過多的養分流經人工林被林木吸收，因此淋溶至溪流水中的氮相對較少；第二：此處農業活動以果園為主，果園種植相較於高冷蔬菜，其養分流失的量較少，使得成武溪溪流水化學並無受到農業活動之影響。綜合以上，有勝溪、合歡溪與成武溪集水區皆有農業活動進行，但從主成分分析結果，僅有勝

溪水化學明顯有受到農業活動影響，有勝溪菜園地直接鄰近於河道左岸，而合歡溪與成武溪未直接相鄰，中間有森林緩衝帶，由水化學之差異，顯示森林緩衝帶確實有淨化水質之功效，若能輔導有勝溪農民栽種林木作為森林緩衝帶，應能改善有勝溪之水質。

(III) 溪流水水化學通量

表 3 為各溪流水養分輸出量，有勝溪與合歡溪皆由上游往下游遞增情形，而畢祿溪與成武溪則是上游往下游遞減，下游溪流水流經路徑較長且較久，加上水流匯集流量增大，故下游輸出量往往大於上游。畢祿溪如前說明，上游因崩塌造成化學元素淋溶出，導致輸出量也較大，特別是 Mg、Ca、SO₄ 與 HCO₃⁻，分別達 17.25、41.87、46.70 與 167.84 kg ha⁻¹ mon⁻¹，CD 因接近水庫累積許多土石與淤泥沉積物，一部分溪流水以伏流水的形式流入水庫中，測得地表逕流量較少，因此輸出量較低。

表 2 顯示 NO₃⁻ 在 YD 濃度是最高者，然通量則是 HD 最高，達 5.51 kg ha⁻¹ mon⁻¹ 是 YD 的 1.96 倍 (表 3)，原因推測有三，第一，森林是 NO₃⁻ 來源之一，合歡溪天然林面積達 5,709 ha，相較於林齡較輕的人工林，多數年老的天然林對於養分吸收較少，導致較多的養分流出；第二，有勝溪的基流量較合歡溪小 (表 3)，因此月通量合歡溪較大，但本次研究僅量測基流時流量，未測量強降雨事件下產生的地表逕流與中間流的流量，Chang 等 (2013) 在蓮華池研究指出颱風事件下，NO₃⁻ 輸出量占全年 40%，此部分有待未來研究調查；第三，合歡溪農業活動果園加上菜園地達 6.5%，有勝溪僅 2.8%，Huang 等 (2012) 研究指出天然林與人工林的氮輸出量約 351-1064 kg-N km⁻² yr⁻¹，而農業活動果園與菜園地約 5,456 ± 290 kg-N km⁻² yr⁻¹ 與 308,170 ± 19,241 kg-N km⁻² yr⁻¹ 是森林的數倍，因此 HD 輸出量是所有樣點中最高者。

(IV) 溪流水水化學通量主成分分析

水化學通量主成分分析結果僅第一、二主成分特徵值大於 1 (表 5)，故僅選取前二個主成分作為後續探討。負荷值顯示第一主成分 Na、K、Mg、Ca、SO₄⁻、HCO₃⁻ 有較高負荷值，可解釋變異量為 72.32%，第二主成分在 NO₃⁻、有較高負荷值，可解釋變異量為 13.62%，二個組成分解釋變異範圍效力累計共 85.94% (表 3)。從主成分得點散布圖可發現四條溪流水在豐水期時第一主成分得點較大 (圖 3)，主要因豐水期降水量多，降水補注地下水層，同時也將此些

岩石或土壤風化作用的元素帶出，使得通量較大，另外有勝溪與畢祿溪因地表裸露與崩塌，不僅濃度較高，其第二主成分得點也較大(圖 3E)。

合歡溪與 PD 通量第二主成分枯水期往豐水期增加 (圖 3B、C)，一般 NO₃ 在高流量時濃度亦會增加 (Fenn *et al.*, 1998)，整體輸出量升高，合歡溪與 PD 變化趨勢如同前人研究，而 PU 與成武溪因豐水期林木生長旺盛，林齡較輕的人工林吸收利用 NO₃ 較多，使通量第二主成分得點較低 (圖 3C、D)，但有勝溪第二主成分變化不大(圖 3A)，NO₃ 通量無明顯季節變化，雖濃度較其他溪流水高，但因流量介於其他溪流水中間，換算為通量後變化相較於其他溪流水小，因此通量第二主成分得點變化不大。

表 2 有勝溪、合歡溪、畢祿溪與成武溪水化學表

Table 2 Mean values and standard deviations of ion concentration in streams of the studied watersheds

	YU	YM1	YM2	YD	HU	HM	HD	PU	PD	CU	CD
Na	83.29 (6.20)	124.65 (11.25)	154.80 (11.79)	219.38 (34.83)	59.53 (9.95)	136.74 (24.93)	195.31 (31.24)	145.91 (32.63)	170.96 (38.77)	130.63 (16.92)	143.39 (17.74)
K	18.76 (1.43)	45.76 (5.66)	46.50 (5.25)	49.70 (4.99)	4.63 (1.27)	11.45 (2.07)	17.17 (2.51)	20.18 (3.50)	15.97 (2.80)	10.48 (3.98)	10.28 (1.67)
Mg	663.08 (73.98)	635.53 (66.70)	870.83 (169.26)	1248.76 (129.25)	222.12 (41.27)	572.57 (81.83)	972.12 (124.10)	1582.30 (293.78)	1152.01 (122.48)	674.45 (67.41)	713.28 (62.24)
Ca	864.68 (80.24)	963.15 (99.02)	1160.63 (131.49)	1591.54 (148.70)	409.19 (63.27)	1017.29 (124.58)	1498.40 (161.70)	2141.51 (233.54)	1529.91 (144.16)	1755.70 (219.63)	1913.14 (214.27)
F	4.10 (1.91)	5.25 (1.53)	12.18 (29.67)	7.70 (5.99)	2.90 (1.29)	4.84 (5.80)	6.10 (4.93)	10.94 (29.21)	14.09 (41.01)	8.65 (3.07)	14.43 (28.65)
Cl	6.47 (1.21)	23.09 (12.77)	30.32 (14.58)	39.62 (19.10)	4.76 (2.35)	23.54 (7.84)	43.83 (7.22)	4.51 (1.04)	37.65 (12.62)	11.56 (6.82)	21.20 (6.14)
NO ₃	7.55 (2.09)	88.98 (57.79)	112.02 (70.28)	119.48 (66.58)	3.43 (2.64)	63.62 (19.64)	87.98 (18.75)	7.39 (2.02)	86.33 (25.03)	5.98 (3.00)	4.79 (3.55)
SO ₄	609.53 (96.58)	532.24 (77.01)	654.10 (91.98)	901.42 (143.61)	76.87 (13.21)	286.11 (52.16)	580.92 (97.69)	1070.40 (223.53)	668.04 (129.04)	1256.13 (169.47)	1373.53 (169.03)
HCO ₃	982.82 (80.67)	1092.01 (87.35)	1395.28 (287.64)	2025.47 (174.09)	608.50 (90.69)	1327.16 (148.49)	1914.57 (209.46)	2837.11 (387.09)	2021.21 (202.13)	1425.83 (156.21)	1529.60 (145.41)

¹⁾ Y, H, P and C represent Yusheng, Hehuan, Pulu and Chengwu. U, M and D represent upstream, midstream and downstream.

²⁾ n = 22 (HU, n = 21), unit: $\mu\text{eq L}^{-1}$

表 3 有勝溪、合歡溪、畢祿溪與成武溪水化學通量表

Table 3 Mean values and standard deviations of water chemistry yield in streams of the

	studied watersheds										
	YU	YM1	YM2	YD	HU	HM	HD	PU	PD	CU	CD
Na	1.37 (1.39)	1.03 (1.18)	1.89 (3.70)	2.05 (1.89)	2.02 (1.63)	3.09 (2.10)	3.72 (2.24)	2.90 (3.07)	3.25 (3.23)	3.35 (2.32)	1.08 (1.35)
K	0.53 (0.52)	0.64 (0.69)	0.79 (1.07)	0.89 (1.01)	0.30 (0.31)	0.47 (0.35)	0.61 (0.12)	0.74 (0.83)	0.53 (0.50)	0.48 (0.38)	0.14 (0.18)
Mg	5.45 (4.65)	2.75 (3.13)	6.67 (16.00)	6.60 (7.16)	3.80 (2.89)	6.98 (4.98)	9.95 (6.60)	17.25 (19.00)	10.76 (8.51)	9.10 (6.38)	2.92 (3.81)
Ca	12.28 (11.92)	7.02 (8.20)	13.22 (28.26)	14.15 (15.60)	12.04 (9.45)	21.06 (15.49)	26.06 (18.12)	41.87 (48.08)	24.60 (21.08)	39.02 (26.31)	12.78 (16.41)
F	0.05 (0.05)	0.04 (0.04)	0.07 (0.11)	0.06 (0.07)	0.09 (0.09)	0.09 (0.10)	0.09 (0.07)	0.13 (0.22)	0.13 (0.25)	0.20 (0.22)	0.07 (0.10)
Cl	0.17 (0.18)	0.26 (0.31)	0.41 (0.55)	0.53 (0.50)	0.25 (0.27)	0.81 (0.59)	1.35 (0.98)	0.17 (0.23)	1.18 (1.37)	0.46 (0.37)	0.24 (0.30)
NO ₃	0.34 (0.38)	1.64 (1.62)	2.40 (2.66)	2.80 (2.64)	0.30 (0.38)	4.31 (3.77)	5.51 (5.39)	0.57 (0.78)	4.94 (5.74)	0.58 (0.71)	0.16 (0.29)
SO ₄	20.13 (17.90)	9.35 (11.05)	17.51 (36.46)	18.98 (19.68)	5.71 (4.72)	14.19 (10.19)	24.17 (15.96)	46.70 (51.05)	26.75 (25.25)	68.70 (47.20)	22.56 (28.73)
HCO ₃	42.66 (41.33)	25.27 (30.59)	55.53 (132.64)	56.76 (64.52)	55.46 (43.94)	85.13 (63.75)	102.06 (71.27)	167.84 (193.59)	98.38 (81.72)	99.04 (71.26)	32.31 (42.86)
流量	0.11 (0.13)	0.19 (0.26)	0.35 (0.62)	0.53 (0.70)	0.05 (0.05)	1.73 (1.45)	4.48 (3.56)	0.06 (0.08)	0.81 (0.77)	0.25 (0.20)	0.11 (0.15)

¹⁾ Y, H, P and C represent Yusheng, Hehuan, Pilu and Chengwu. U, M and D represent upstream, midstream and downstream.

²⁾ n = 21 (HU: n = 20), unit: kg ha⁻¹ mon⁻¹

表 4 溪流水濃度主成分負荷值表 (包含特徵值、解釋變異百分比、累計變異)

Table 4 Factor loadings of concentration including eigenvalue, percentage of total variance, cumulative percentage

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Na	0.89	0.24	0.02	-0.13	-0.03	0.35	-0.10	0.01	-0.03
K	0.41	0.60	-0.11	0.61	0.30	0.06	0.07	-0.04	0.01
Mg	0.89	-0.18	-0.08	0.26	-0.29	-0.08	0.00	0.15	0.05
Ca	0.83	-0.50	0.00	-0.12	0.12	-0.04	-0.03	-0.11	0.11
F	0.19	-0.10	0.97	0.14	0.00	-0.01	0.01	0.00	-0.01
Cl	0.58	0.65	0.08	-0.44	0.04	-0.01	0.17	0.03	0.02
NO ₃	0.44	0.84	0.03	-0.08	0.00	-0.26	-0.15	-0.02	-0.02
SO ₄	0.62	-0.54	-0.06	-0.10	0.54	-0.09	-0.01	0.06	-0.06
HCO ₃	0.86	-0.31	-0.12	0.08	-0.35	-0.07	0.07	-0.09	-0.09
Eigenvalue	4.15	2.26	0.98	0.70	0.60	0.20	0.05	0.04	0.02
% of total variance	46.06	25.15	10.90	7.74	6.68	2.22	0.55	0.46	0.26
Cumulative(%)	46.06	71.21	82.10	89.84	96.51	98.73	99.28	99.74	100.00

表 5 溪流水通量主成分負荷值表 (包含特徵值、解釋變異百分比、累計變異)

Table 5 Factor loadings of yield including eigenvalue, percentage of total variance, cumulative percentage

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Na	0.98	0.09	0.01	-0.04	0.04	0.16	0.09	0.04	0.00
K	0.85	0.03	-0.19	0.47	0.13	-0.01	0.00	-0.02	0.00
Mg	0.95	-0.16	-0.19	0.02	-0.17	-0.01	-0.08	0.07	-0.01
Ca	0.95	-0.24	-0.09	-0.15	-0.03	-0.03	0.03	-0.06	-0.03
F	0.59	-0.33	0.73	0.12	-0.05	-0.01	-0.01	0.00	0.00
Cl	0.75	0.61	0.15	-0.13	0.11	0.09	-0.09	-0.03	0.00
NO ₃	0.68	0.70	0.10	-0.01	-0.08	-0.16	0.05	0.02	0.00
SO ₄	0.87	-0.37	-0.03	-0.19	0.26	-0.10	-0.01	0.03	0.01
HCO ₃	0.95	-0.16	-0.15	-0.04	-0.19	0.02	0.00	-0.04	0.04
Eigenvalue	6.51	1.23	0.67	0.32	0.17	0.07	0.03	0.01	0.00
% of total variance	72.32	13.62	7.39	3.50	1.86	0.82	0.31	0.16	0.03
Cumulative(%)	72.32	85.93	93.33	96.83	98.69	99.51	99.81	99.97	100.00

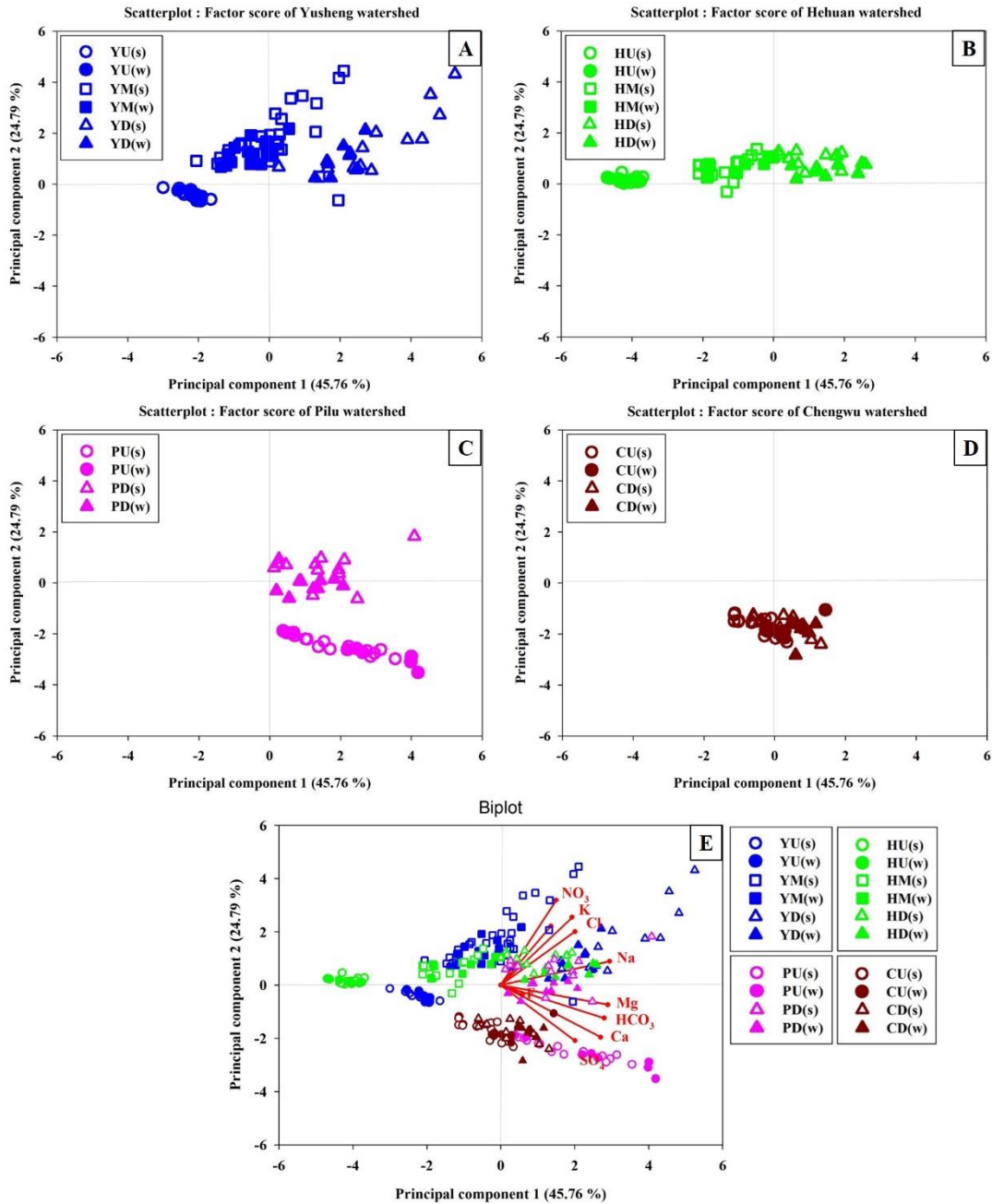


圖 2 各溪流水濃度主成分得點散佈圖。A、B、C、D 與 E 分別為有勝溪、合歡溪、畢祿溪、成武溪與全部溪流。(s) 表示豐水期，(w) 表示枯水期。

Figure 2 Projection of river concentration's factor score. A, B, C, D and E represent Yusheng, Hehuan, Pilu, Chengwu and all streams, respectively. (s) and (w) represent summer and winter

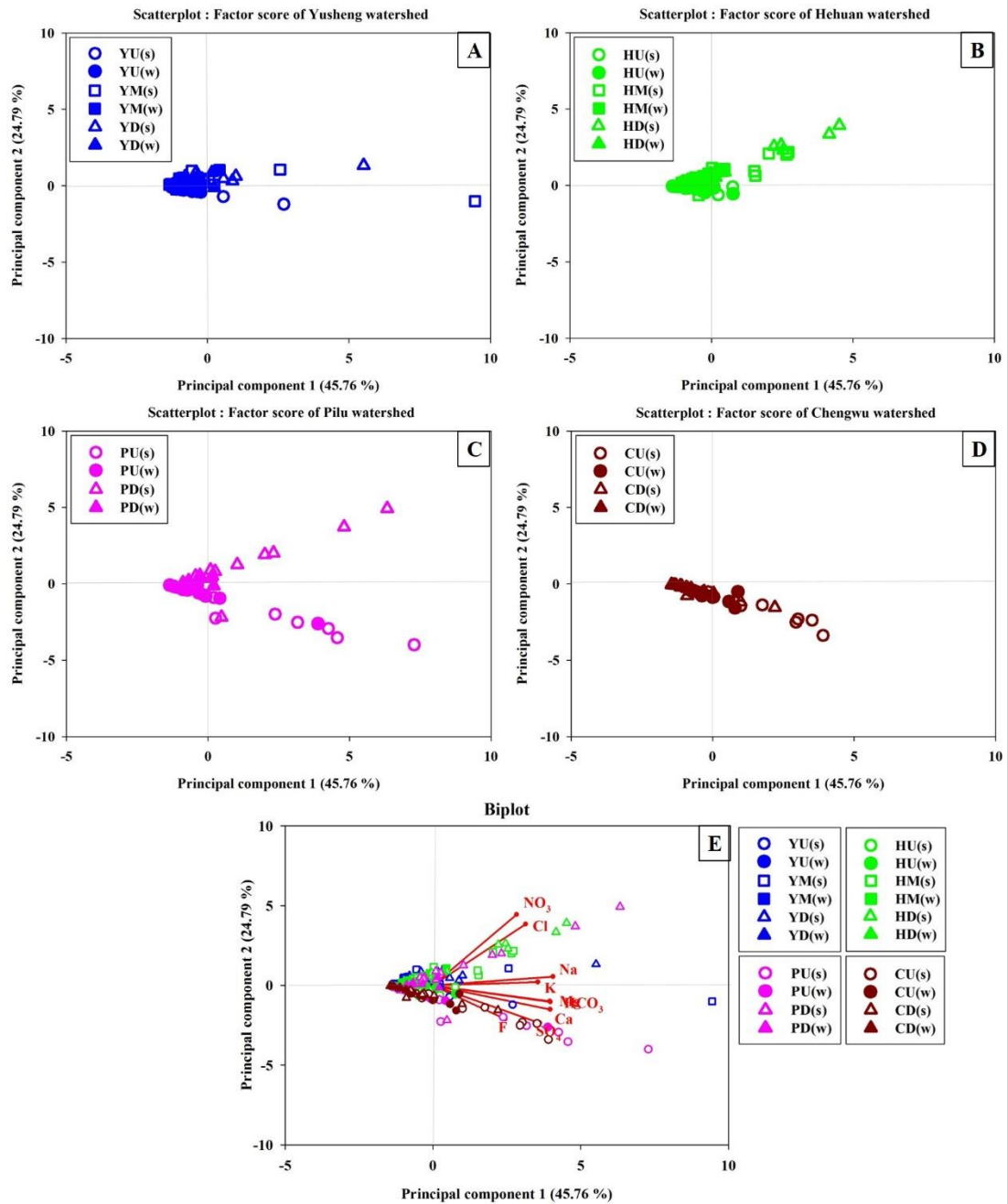


圖 3 各溪流水通量主成分得點散佈圖。A、B、C、D 與 E 分別為有勝溪、合歡溪、畢祿溪、成武溪與全部溪流。(s) 表示豐水期，(w) 表示枯水期。

Figure 3 Projection of river yield's factor score. A, B, C, D and E represent Yusheng, Hehuan, Pilu, Chengwu and all streams, respectively. (s) and (w) represent summer and winter

IV、結論

本次研究應用主成分分析將 9 項變數簡化為 2 項變數，濃度部分第一主成分可解釋變異量為 46.06%，與 HCO_3^- 、Na、Mg、Ca 受土壤岩石風化作用相關性較大，其次為第二主成分，可解釋變異量為 25.15%，與 NO_3^- 植群的養分循環和農業活動有關；通量部分第一主成分可解釋變異量為 72.32%，與 Na、K、Mg、Ca、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 相關性較大，其次為第二主成分，可解釋變異量為 13.62%，與 NO_3^- 相關性較大，透過主成分分析能夠將眾多資料簡化、精簡，並透過圖表一目了然。

1. 有勝溪中下游因農業活動施撒過多的肥料，如種植高麗菜通常會使用石灰增加土壤 pH 值，且菜園地土壤裸露，使風化作用增強，養分溶出較多，導致有勝溪濃度第一、二主成分與通量第一主成分得點較其他集水區高。
2. 畢祿溪因上游崩塌增加化學風化作用速率與天然植群的更新，使得濃度與通量第一主成分得點較高，第二主成分較低。
3. 合歡溪上游因高海拔氣溫低，使土壤風化作用能力下降，濃度第一主成分得點較低。
4. 成武溪因人工林較多，相較於天然林其林齡較輕，對於養分需求量較大，且此處農業活動以果園為主，相較於高冷蔬菜其養分流失的量較少，使濃度與通量第二主成分得點較低。
5. 本次研究僅在基流時分析溪流水水化學與量測流量，而在極端事件下，如颱風、地震，對溪流水化學的濃度與通量的變化有待未來進一步研究探討。

V、參考文獻

- 王立志、鄧子菁、夏禹九、金恆鏞、劉瓊霖 (1999) 1996 年賀伯颱風期間福山試驗林溪流水化學變化之研究。中華林學季刊 32(1): 217-232。
- 王漢泉 (1990) 德基水庫水質優養等級之研究。師大生物學報 25: 42-55。
- 成允聖 (2016) 造林對回收農地土壤及土壤水養分動態的影響。中興大學森林學系所學位論文 106 頁。
- 林俊全、鄭宏祺、鄭遠昌、任家弘 (2010) 台灣中部梨山土地利用變遷之研究。工程環境會刊 25: 93-102。
- 金恆鏞、夏禹九、黃正良、陳春雄、楊炳炎 (1984) 蓮華池試驗集水區暴雨時期水文特性及其與溪水懸浮質、養分濃度的關係。林試所試驗報告 425: 15。

- 金恆鏞、康敏捷、王明光 (1995) 蓮華池兩森林土壤之硫酸吸附現象。林業試驗所研究報告季刊 10(1): 65-74。
- 侯如真、蘇元風、洪維均、陳秋楊、鄭克聲 (2010) SPOT 衛星影像應用於德基水庫集水區歷年土地利用變遷之分析。農業工程學報, 56(4): 42-54。
- 張哲銘 (2004) 921 地震後大甲溪集水區全方位治理之研究, 國立中興大學水土保持學研究所碩士論文, 154 頁。
- 陳順宇 (2005) 多變量分析。華泰文化, 1-63。
- 陸象豫、劉瓊霏 (2010) 影響溪流水水化學的因子。林業研究專訊 17(4): 64-66。
- 黃正良、金恆鏞、廖學誠、陳明杰, 李福明 (2007) 2001 年桃芝颱風蓮華池人工林及天然林集水區溪流水化學之比較。台大實驗林研究報告 21(3): 53-63。
- 葉春國、廖學誠、詹進發、黃正良、薛美莉 (2008) 水里溪上游集水區土地利用與溪流水中硝酸鹽濃度關係之探討。中華水土保持學報 39(2): 141-153。
- 廖學誠、金恆鏞、黃正良、劉瓊霏 (2002) 1999-2000 年台灣南部六龜森林集水區溪流水離子濃度與流量關係之研究。國立台灣師範大學地理研究報告 37: 95-112。
- 劉瓊霏、許博行 (1998) 關刀溪森林集水區降水及溪水水化學。中興大學實驗林研究彙刊 20(2): 71-78。
- 劉瓊霏、何冠琳、許博行 (2005) 造林對 921 地震崩塌地土壤性質與土壤水之影響。林業研究季刊 27(3): 1-10。
- 劉瓊霏、陳春雄、金恆鏞 (2004) 以主成分分析探討福山試驗林哈盆溪集水區水化學的空間變異性。臺灣林業科學 19(4): 363-374。
- Anbumozhi, V., J. Radhakrishnan and E. Yamaji (2005) Impact of riparian buffer zones on water quality and associated management considerations. *Ecological Engineering*. 24: 517-523.
- Baron, J. (1991) *Biogeochemistry of a subalpine ecosystem*, Springer-Verlag, New York. 247p.
- Barthold, F. K., C. Tyralla, K. Schneider, K. B. Vaché, H. G. Frede and L. Breuer (2011) How many tracers do we need for end member mixing analysis

- (EMMA)? A sensitivity analysis. *Water Resources Research*. 47(8).
- Burns, D. A., J. J. McDonnell, R. P. Hooper, N. E. Peters, J. E. Freer, C. Kendall and K. Beven (2001) Quantifying contributions to storm runoff through end-member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA). *Hydrological Processes*. 15(10), 1903-1924.
- Calmels, D., A. Galy, N. Hovius, M. Bickle, A. J. West, M. C. Chen and H. Chapman (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.
- Chaves, J., C. Neill, S. Germer, S. G. Neto, A. Krusche and H. Elsenbeer (2008) Land management impacts on runoff sources in small Amazon watersheds. *Hydrological Processes*. 22(12): 1766-1775.
- Christophersen, N. and R. P. Hooper (1992) Multivariate analysis of stream water chemical data: The use of principal components analysis for the end-member mixing problem. *Water Resources Research*. 28(1): 99-107.
- Chang, C. T., S. P. Hamburg, J. L. Hwong, N. H. Lin, M. L. Hsueh, M. C. Chen and T. C. Lin (2013) Impacts of tropical cyclones on hydrochemistry of a subtropical forest. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(10): 3815.
- Cirno, C. P. and McDonnell J. J. (1997) Linking the hydrological and biogeochemical controls of nitrogen transport in near-stream zones of temperate-forested catchments: a review. *Journal of Hydrology*. 199: 88-120.
- de Souza, A. L., Fonseca, D. G., Libório, R. A., and Tanaka, M. O. (2013) Influence of riparian vegetation and forest structure on the water quality of rural low-order streams in SE Brazil. *Forest Ecology and Management*. 298: 12-18.
- Elwood, J. W. and R. R. Turner (1989) Streams: Water chemistry and ecology. In *Analysis of biogeochemical cycling processes in Walker Branch Watershed*. Springer New York. p. 301-350.
- Evans, C. and T. D. Davies (1998) Causes of concentration/discharge hysteresis and its potential as a tool for analysis of episode hydrochemistry. *Water Resources Research*. 34(1): 129-137.

- Fenn, M. E., M. A. Poth, J. D. Aber, J. S. Baron, B. T. Bormann, D. W. Johnson, and R. Stottlemyer (1998) Nitrogen excess in North American ecosystems: predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies. *Ecological Applications*, 8(3): 706-733.
- Huang, J. C., T. Y. Lee, S. J. Kao, S. C. Hsu, H. J. Lin and T. R. Peng (2012) Land use effect and hydrological control on nitrate yield in subtropical mountainous watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(3): 699.
- Hornbeck, J. W., S. W. Bailey, D. C. Buso and J. B. Shanley (1997) Streamwater chemistry and nutrient budgets for forested watershed in New England: variability and management implications. *Forest Ecology and Management*. 93(1): 73-89.
- Houle, D. and R. Carignan (1995) Role of SO₄ adsorption and desorption in the long-term S budget of a coniferous catchment on the Canadian Shield. *Biogeochemistry*. 28: 161-182.
- Kaiser, H. F. (1960) The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and psychological measurement*. 20(1): 141-151.
- Lahermo, P., J. Mannio and T. Tarvainen (1995) The hydrogeochemical comparison of streams and lakes in Finland. *Applied Geochemistry*. 10: 45-64.
- Lee, T. Y., N. M. Hong, Y. T. Shih, J. C. Huang and S. J. Kao (2017) The sources of streamwater to small mountainous rivers in Taiwan during typhoon and non-typhoon seasons. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(35): 26940-26957.
- Lyons, W. B., A. E. Carey, D. M. Hicks and C. A. Nezat (2005) Chemical weathering in high-sediment-yielding watersheds, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 110(F1).
- Malina, J. F. Jr. (1996) Water Quality. In L.W. Mays (ed) . *Water Resources Handbook*. p. 8.3-8.49.
- Meador, M. R. and R. M. Goldstein (2003) Assessing water quality at large geographic scales: relations among land use, water physicochemistry, riparian condition, and fish community structure. *Environmental Management*, 31(4): 0504-0517.

- Meyer, K. J., A. E. Carey and C. F. You (2017) Typhoon impacts on chemical weathering source provenance of a High Standing Island watershed, Taiwan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 215: 404-420.
- Osborne, L. L. and M. J. Wiley (1988) Empirical relationships between land use/cover and stream water quality in an agricultural watershed. *Journal of Environmental Management*. 26(1): 9-27.
- Ouali, A., C. Azri, K. Medhioub and A. Ghrabi (2009) Descriptive and multivariable analysis of the physico-chemical and biological parameters of Sfax wastewater treatment plant. *Desalination*. 246(1-3): 496-505.
- Seitzinger, S. P., E. Mayorga, A. F. Bouwman, C. Kroeze, A. H. W. Beusen, G. Billen and J. A. Harrison (2010) Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends. *Global Biogeochemical Cycles*. 24(4).
- Tesoriero, A. J., J. H. Duff, D. M. Wolock, N. E. Spahr and J. E. Almendinger (2009) Identifying pathways and processes affecting nitrate and orthophosphate inputs to streams in agricultural watersheds. *Journal of Environmental Quality*. 38(5): 1892-1900.
- Wagner, L. E., P. Vidon, L. P. Tedesco and M. Gray (2008) Stream nitrate and DOC dynamics during three spring storms across land uses in glaciated landscapes of the Midwest. *Journal of Hydrology* 362(3-4): 177-190.
- Wayne, F. M., W. B. Andrew, F. D. Thomas and D. McKenneth (1989) Nutrient concentration-stream discharge relationships during storm events in a first-order stream. *Journal of Hydrology*. 179: 97-102.
- Wayland, K. G., D. T. Long, D. W. Hyndman, B. C. Pijanowski, S. M. Woodhams and S. K. Haack (2003) Identifying relationship between baseflow geochemistry and land use with synoptic sampling and R-mode factor analysis, *Journal of Environmental Quality*. 32: 180-190.
- Wellington, B. I. and C. T. Driscoll (2004) The episodic acidification of a stream with elevated concentrations of dissolved organic carbon. *Hydrological Processes*, 18(14), 2663-2680.

江曜宇、成允聖、劉恩妤、劉瓊霖—
以主成分分析探討德基水庫集水區溪流水水化學之變異

應用地面光達技術評估林木收穫搬運作業 對林道之影響

湯適謙¹ 謝漢欽² 曾俊偉³ 林志交⁴

【摘要】森林經營活動如林政管理、防災救災、森林遊樂、森林撫育、林木採運等，林道設施扮演相關人員通行、物資及林產物運輸之重要角色。其中林木採運作業涉及用到大型機具及卡車於短期內對同一路面重複施予較大之干擾，為能兼顧保全林道環境及木材生產需求，因此有必要評估採運作業前後對林道之影響，以供後續道路維護之科學數據。本研究以阿里山事業區台灣杉人工林採運作業為對象，分別於林道運輸路段，集材土場及未進行林道運輸三種不同型態之林道區域，應用地面光達技術 (Terrestrial Laser Scanner) 於採運作業前後進行現地光達點雲掃描，以之製作數位高程地形模型 (Digital Elevation Model, DEM) 圖，評估採運前後之林道路面各不同處理之地形高程變化，以供林道維護管理之參考。

【關鍵詞】地面光達、林道、數值高程模型。

Using Terrestrial Laser Scanner Data to Assess the Impact of Operations of Forest Harvesting on Forest Roads

Shyh-Chian Tang¹ Han-Ching Hsieh² Chun-Wei Tseng³ Chih-Chiao Lin⁴

【Abstract】 Forest roads play an important role in activities of forest management especially in operations of timber harvesting, for the transportation of relevant personnel, materials and forest products. The operations generally repeated using large-scale trucks and machines can impose serious disturbances on specific road surface in the short term. To take into consideration of both the preservation of the environment

¹ 行政院農業委員會林業試驗所森林經營組助理研究員，通訊作者。電子郵件: stantang@tfri.gov.tw

Assistant **Scientist**, Division of Forest Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail: stantang@tfri.gov.tw

² 行政院農業委員會林業試驗所森林經營組研究員。

Senior Scientist, Division of Forest Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

³ 行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組助理研究員。

Assistant **Scientist**, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan

⁴ 中興測量公司經理。

Manager, Chung Hsing Surveying Co. Ltd.

and the demand for timber production, it is necessary to assess the impact on forest roads before and after operations of timber harvesting to provide scientific-based data for following road maintenance. This study aimed at the harvesting operations of Taiwanese Fir plantations in the Alishan working circle, selected the road sections of transportation, timber field and no-operation as analysis objects. A Terrestrial Laser Scanner was used to perform scanning for collecting light point cloud on road surfaces before and after the harvesting operation to derive the digital elevation models to assess the change of harvesting operations in topographic elevation of these three types of road. The result will support the exploration of measurement and maintenance to forest roads.

【Key Words】 Terrestrial Laser Scanner、Forest Road、Digital Elevation Model

I、前言

林道在森林經營扮演相當重要的腳色，吳順昭 (1978、1979) 指出，適當的林道體系可提高森林價值，促進更新造林事業，發揮森林多目標經營、提高森林景緻之有效利用，達成偏鄉地區之發展與振興，支援農業及其他產業，貢獻於國家經濟建設；羅紹麟等 (1995) 亦認為舉凡森林資源的開發、造林撫育、防範森林火災、病蟲害防治及發展森林遊樂事業，均有賴於林道的開闢及維護。在林道上之各項活動中，以林木採運作業對林道路面可能產生之衝擊最大，若林道路面造成程度大之損壞，對於車輛之行車安全及水土保持等保全常具有甚大之影響。

由於人工林區之林道，常肩負木材運輸之重要任務，因此予以定期維護及監測有其必要性；在林道監測方面，傳統上使用以人工搜集及量測之方法 (如沖蝕樁法)，有耗時較長、危險區域不易量測、調查人員經驗不足、取樣點無法全區覆蓋、代表性不足等缺點；由於測量科技之進步，地面光達 (Terrestrial Laser Scanner, TLS) 由於可在短時間獲取高密度、高解析度之 3D 點雲資料，因此在各式道路之路面監測已獲得廣泛之應用 (Akgul et al., 2017)。

三維雷射掃瞄 (3D Laser Scanner) 技術自 1970 年代即開始萌芽，最初由美國航太總署 NASA 所研發，為目前光達 (LiDAR) 測量儀器的前身。主要構造是一部快速準確的雷射掃瞄系統，內含一組可導引雷射光以等角速度掃瞄的反射稜鏡，雷射測距儀可主動發射雷射光 (Laser Beam)，同時接收自「自然物表面」反射之訊號進行測距，針對每一掃瞄點可測得測站到掃瞄點的斜距，配合掃瞄的水平與垂直角，可推求得每一掃瞄點相對於測站之三維空間座標 (Irish et al., 1999)。

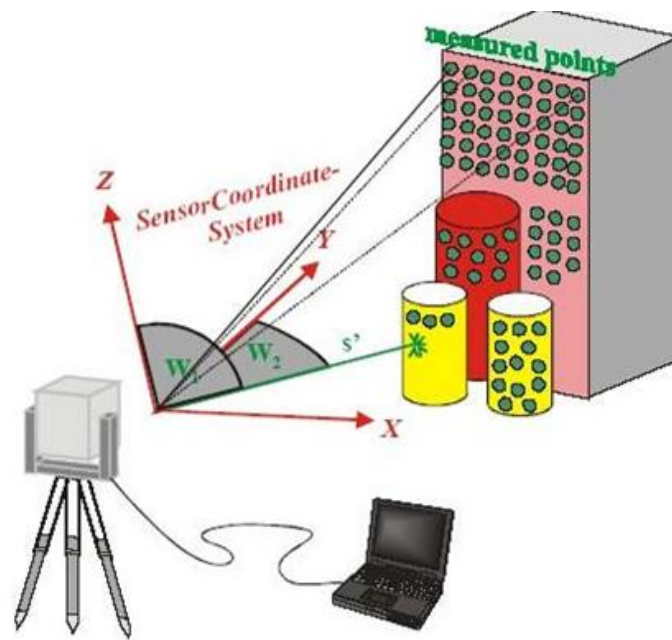


圖 1 地面三維掃瞄示意圖 (Staiger, 2003)

Fig.1 Diagram of terrestrial 3D laser scanning (Staiger, 2003)

雷射掃瞄技術發展日新月異，三維雷射掃瞄儀掃之瞄點數從早期的每秒數千點至數萬點，進而提升至目前的一百萬點；而其雷射測距精度由厘米 (cm) 等級提升至毫米 (mm) 或次毫米等級。三維雷射掃瞄儀可快速的掃瞄被測物，其測量方式為非接觸主動式測量，藉由儀器發射雷射光至被測物，來獲得高密度的掃瞄點之三維座標，為現在應用十分廣泛的一種測量方法。

上述之光達掃瞄作業可應用於道路週邊之各項交通號誌、行道樹、建築物及障礙物之即時資訊建置 (Pu et al., 2011)，道路路面評估 (Guo et al., 2015) 及林道路面、文化遺址考察、地形掃瞄、變形量量度等用途 (Akgul et al., 2017)。國內則應用於獲取林木資訊、立木位置圖 (魏浚紘等，2013)，野溪地形監測 (吳孟姍等，2013) 及邊坡露頭調查、岩體工程特性之評估 (楊濟豪等，2014)。

本研究擬應用上述之光達掃瞄技術，評估林務局嘉義林管處阿里山事業區台灣杉人工林擇伐作業，林木運輸及採運後對林道、土場等路面高程之影響，以了解採運作業之衝擊，並可供後續採運作業林道維護之參考。

II、材料與方法

(I)研究區域

本研究調查之林道位於林務局嘉義林管處阿里山事業區第 12 林班，該林分為台灣杉與紅檜混生，嘉義林管處以直營方式辦理台灣杉擇伐作業，該台灣杉人工林為 1986 年造林，至今 (2018 年) 約為 32 年生，擇伐前 664 株/ha，蓄積量為 388.72 m³/ha，株數擇伐強度為 28%，材積擇伐強度為 26%，預計疏伐立木材積為 551.26m³。

(II)研究方法

前述作業區於 2018 年 2 月初砍伐完畢，於林木開始搬運前，即前往樣點進行地面光達掃瞄作業，並於 5 月底搬運作業結束後，再前往各不同處理之同樣點位，再進行光達掃瞄作業，以評估地表之高程變化，本研究之研究方法如次所示。

1.樣區設置

為了解林道在不同之衝擊樣態下，可能產生之高程變化，本研究將林道樣區分為林木運輸區及土場作業區等不同樣態之樣點，並以未進行採運作業之一般林道區擇一樣點為對照區，各樣點之配置圖如圖 2 所示。

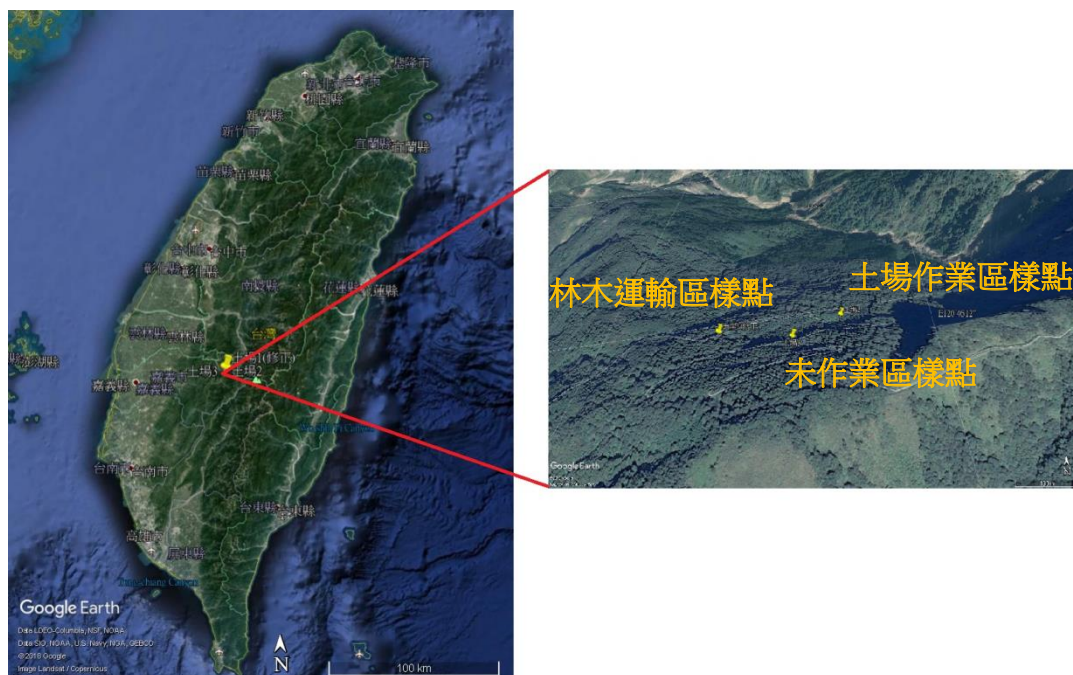


圖 2 林道各不同處理樣點位置圖

Fig.2 Location map of different treatments for forest road

2.光達掃瞄作業及資料分析

(1)地面三維光達掃瞄作業

地面光達掃瞄外業，主要分為控制點佈設、地面三維掃瞄兩部分，內業主要為光達掃瞄資料模型化建置與測量成果分析與報告撰寫，其流程如圖 3 所示。

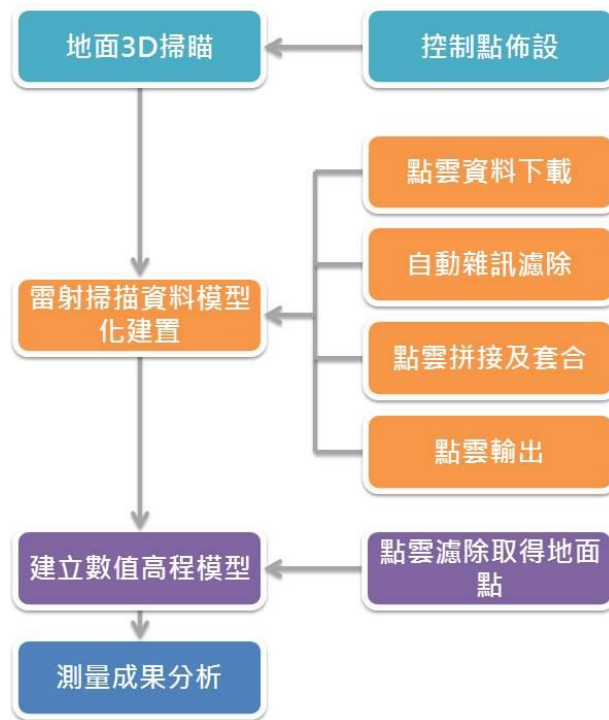


圖 3 光達掃瞄作業外業及資料分析流程圖

Fig.3 Flow chart of laser scanning and data analysis

本研究應用德國 Zoller+Fröhlich GmbH 公司所製造之 Z+F IMAGER[®] 5010 相位式三維雷射掃瞄儀，如圖 4 所示；其主要優點為測距精度高與掃瞄點數多，該儀器規格詳如表 1。



圖 4 三維雷射掃瞄儀 Z+F IMAGER® 5010

Fig.4 3D laser scanning instrument Z+F IMAGER® 5010

表 1 三維雷射掃瞄儀儀器規格表

Table 1 Specification table of 3D laser scanning instrument

項目	Z+F IMAGER® 5010 雷射掃瞄儀
測距能力	最長 187 m 最短 0.3 m
雷射測距精度	0.1~1 mm
資料獲取點數	1,000,000 pts/sec
測距雜訊 (10m)	0.5 mm rms 反射率 14% (黑色) 0.3 mm rms 反射率 80% (白色)
解析力	水平方向 0.0002° 垂直方向 0.0004°
測角精度	± 0.007° rms (水平與垂直)
雷射等級	一級安全雷射 (眼睛可直視)
回波數	單一回波
測距方式	相位式
相機	M-Cam 500 萬畫素工業相機

資料來源：Zoller+Fröhlich GmbH

於外業掃瞄中，上述之雷射掃瞄儀可視量測樣區現場狀況與目標區範圍，依所需精度選擇掃瞄模式，可儘量獲取較多點雲資料，外業三維雷射掃瞄儀器操作情形如圖 5 所示。



圖 5 三維雷射掃瞄儀外業作業

Fig.5 Field operation of 3D laser scanning

於樣區進行地面三維雷射掃瞄作業時，若掃瞄區域面積較大，無法一次將所有區域涵蓋，而必須分次及以多個不同角度才能掃瞄完成，此時需於現地擺設共軛球或覘標一同進行掃瞄，以方便後續內業測站的接合，共軛球擺設情形如圖 6 所示。



圖 6 共軛球擺設情形

Fig.6 Layout of spheres

(2)資料分析

a.自動濾除雜訊

雷射掃瞄後的點雲資料因空氣中粉塵而存在許多雜訊，及掃瞄物體之間存在著可能因水氣、灰塵等多路徑效應所產生的雜訊，因此必須設定濾除參數，以自動濾除的方法來濾除這些雜訊點，避免產生干擾，另如人員經過、大型物體所產生的雜訊則需要利用人工手動來進行濾除。



圖 7 移除雜訊前與移除後比對圖

Fig.7 Comparison chart after noise removal

b.共軛球參考點、點雲接合與座標轉換

若測定區域有多站掃瞄時，各單站掃瞄之點雲資料是建立於測站相對座標系統，由於球面為立體，故於點雲接合併接作業時，站與站間需至少有 3 個以上之共同共軛球，所以可進行三維空間點雲拼接，拼接完成後，可轉到所需座標系統，進行座標點轉換，使樣區各測點均納入相同之座標系統。

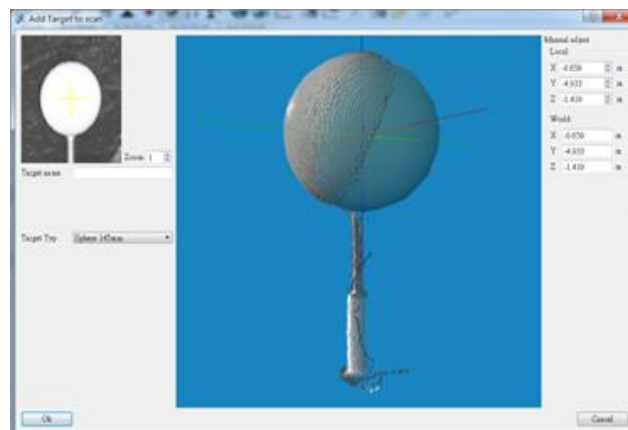


圖 8 共軛球於軟體內點選示意圖

Fig.8 Diagram of selection for sphere in software

c. 點雲模型輸出及數值高程模型製作

接合後之點雲資料可輸出成一般通用的點雲格式，至 LaserControl[®]及 Terrasolid[®]進行資料濾除，並排除雜草、樹枝、樹葉及雜訊等，以取得本研究所需的地面資訊點雲資料，再將其製作成 1 cm x 1 cm 數值高程模型成果，以利後續應用地理資訊軟體 ArcGIS[®]進行套疊分析。

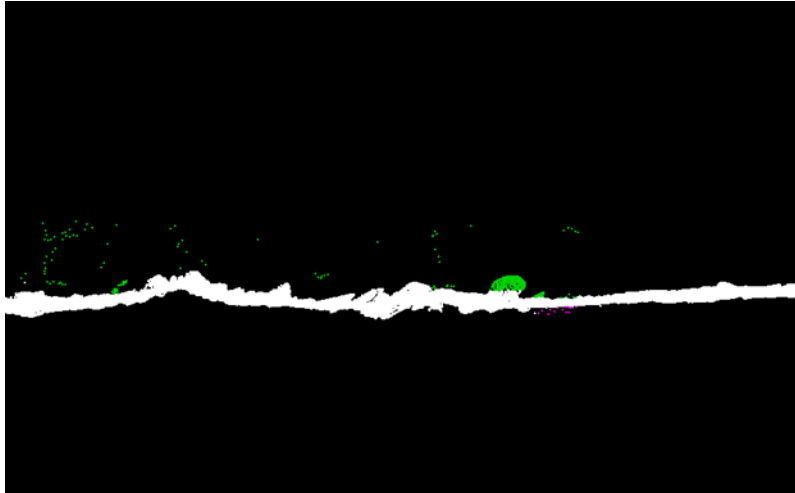


圖 9 點雲濾除

Fig.9 Filtering of point clouds

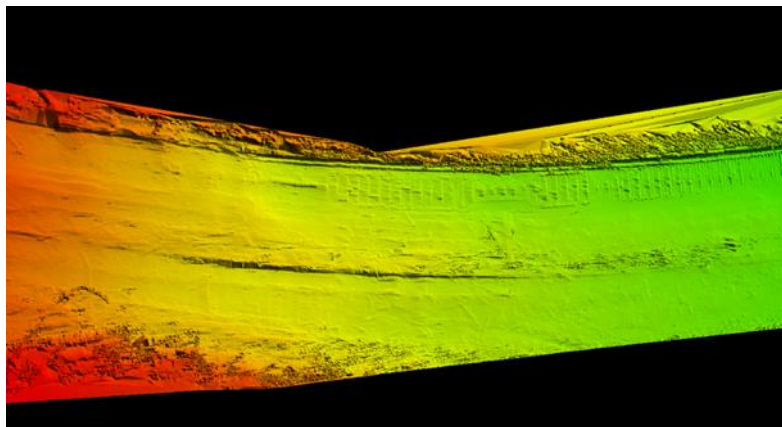


圖 10 DEM 成果示意

Fig.10 Diagram of DEM

III、結果與討論

(I) 作業材積

本研究評估之林道，主要為運輸路面及土場路面，因此須了解運輸路面及土場路面之作業材積。

本次台灣杉擇伐作業之造材規格為 3.6 m 長，共計收穫造材 1,649 根圓木，依據經濟部標準局中華民國國家標準 CNS442 進行造林木原木檢尺及材積計算，總利用材積為 375.69 m³，與之前立木材積比較，利用率為 69.78%，約與一般之林產處分作業材積利用率接近。圖 11 為圓木以 10 噸重之卡車載離作業區及工作人員於貯木場進行檢尺之情形。



圖 11 圓木以卡車運輸及貯木場檢尺

Fig.11 Logs transport by truck and measurement in wood storage yard

圓木之徑級以 11-20 cm、699 支最多，70 cm 以上、2 支最少，各徑級之支數分布圖如圖 12 所示。

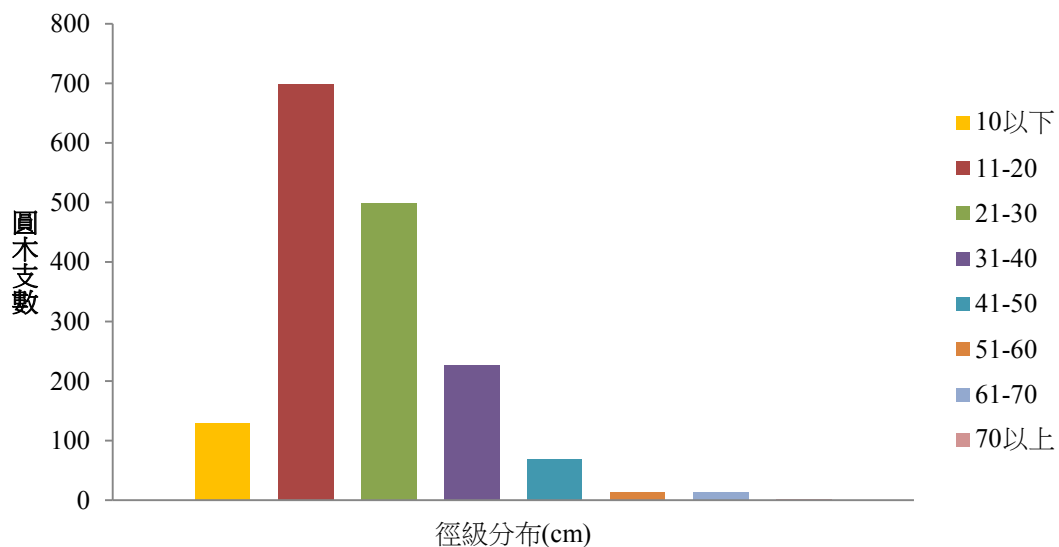


圖 12 圓木不同徑級之支數分布圖

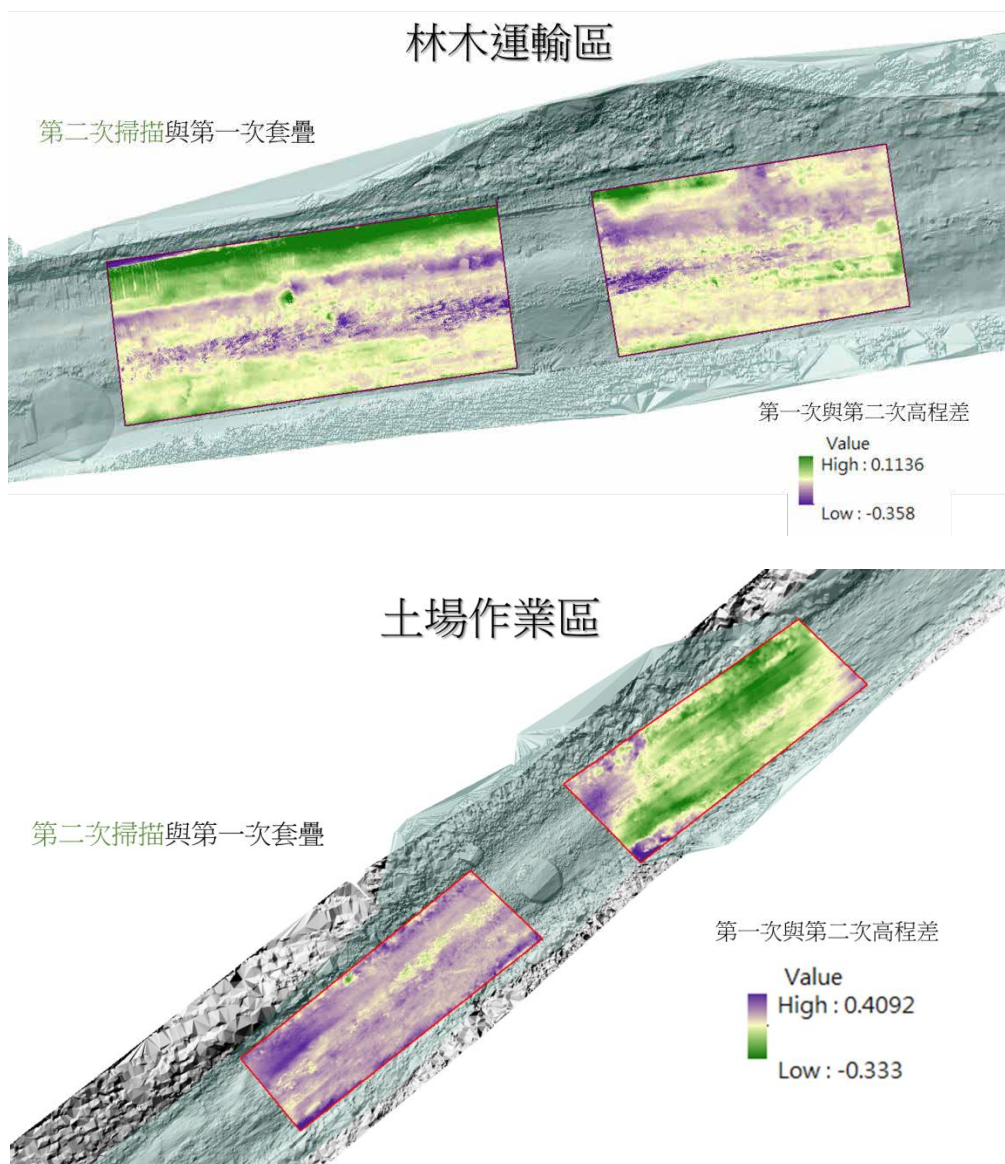
Fig.12 Distribution chart for different diameter grades of logs

由於本次作業共有 3 個土場進行集材作業，本研究取其中一個土場進行路面

光達掃瞄，該土場之集材利用材積為 52.45 m³。

(II)樣區光達掃瞄三維數值高程模型

將外業所獲取之點雲資料先進行資料下載後，進行自動雜訊 (如雜草等) 濾除，點雲接合、座標轉換、點雲模型輸出等作業，並將掃瞄資料模型化建置，於 ArcGIS[®]軟體建立數值高程模型，分別對各不同作業區第一次及第二次數值高程模型進行套疊，各處理區套疊後之數值高程模型如圖 13 所示。



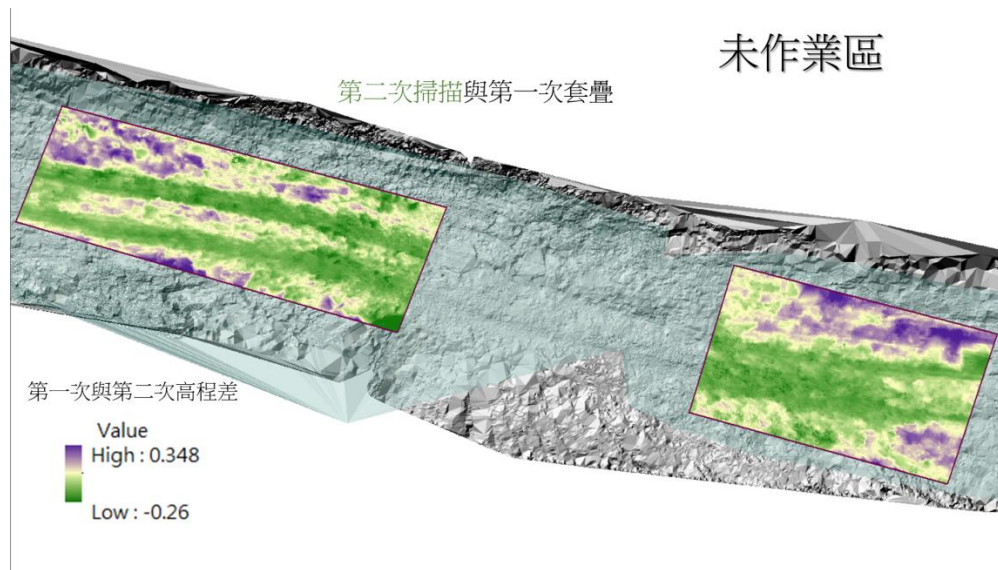


圖 13 各處理區 2 次光達掃描套疊後之數值高程模型

Fig.13 Digital elevation model after stacking two laser scanning data of different treatments

各區以方塊內之區域進行高程分析，係因其位於光達掃描測站有效距離內，且有最高之解析度，各不同處理區均有路面隆起及凹陷之情形；林木運輸區最高隆起 0.1136 cm，最低凹陷 0.3580 cm；土場作業區則最高隆起 0.4092 cm，最低凹陷 0.3330 cm；未作業區則最高隆起 0.3480 cm，最低凹陷 0.2600 cm。

(III)不同作業區之路面影響評估

於 ArcGIS®軟體計算各不同作業區所擇定範圍之面積、高程差等資訊，整理如表 2 所示。

表 2 不同作業區之路面影響評估

Table 2 Assessment of road surface influence for different treatments

	林木運輸區	土場作業區	未作業區
樣區面積 (cm ²)	261,206	467,670	927,203
樣區面積 (m ²)	26.12	46.78	92.73
平均流失高度 (cm/cm ²)	0.76	-3.86*	-4.06*
增高面積 (cm ²)	136,491	240,294	153,614
增高面積比 (%)	52.25	51.38	16.57

說明：*負值表示路面高度平均值，第二次測量較第一次測量為高。

由表 2 所示，林木運輸區之平均流失高度為 0.76 cm/cm² 最高，土場作業區

則平均增加 3.86 cm/cm^2 ，未作業區則平均增加 4.06 cm/cm^2 ；土場作業區因為斜坡路面之較低處，可能為土壤沉積處；未作業區之林道亦可能有坡面土壤流失沉積，因而造成林道路面略微增高之情形；另一方面路面增高面積比例，反而以林木運輸區 52.25%最高，土場作業區 51.38%次之，未作業區 16.57%最低，可能與林道及土場常有大型車輛進出，車輪擠壓造成路面隆起有關。

IV、結論

由於地面光達掃瞄具有短時間可獲取大範圍高密度、高解析度三維點雲資料之特性，本研究應用其技術以評估阿里山事業區台灣杉擇伐作業林木運輸、土場作業對林道路面之影響，所得結果歸納如次：

- (I) 本次擇伐作業之林道運輸作業共搬運 375.69 m^3 之利用材積，所調查之土場集材作業利用材積為 52.45 m^3 。
- (II) 各處理區將採運前及採運後之數值高程模型套疊後，可了解各觀測區域之地形變化。
- (III) 林木運輸區之平均流失高度最高，土場作業區及未作業區則有路面增高之情形。

本次作業之林道為阿里山舊公路，經開挖其林道剖面，其級配深度約 1 m 左右 (如圖 14)。



圖 14 林道剖面

Fig.14 Profile of forest road

由於級配深度較一般林道厚，因此可以說明其路面變化量較一般林道採運作

業後為少，此可供林道維護之參考。

又根據鄰近之中央氣象局阿里山測站於觀測期間 (2018 年 2 月 6 日至 5 月 21 日) 之日降雨量資料，繪製如圖 15。該段期間平均日降雨量僅 4.04 mm，為傳統之乾季，因此降雨之因素應不致造成路面變化之重要因子。

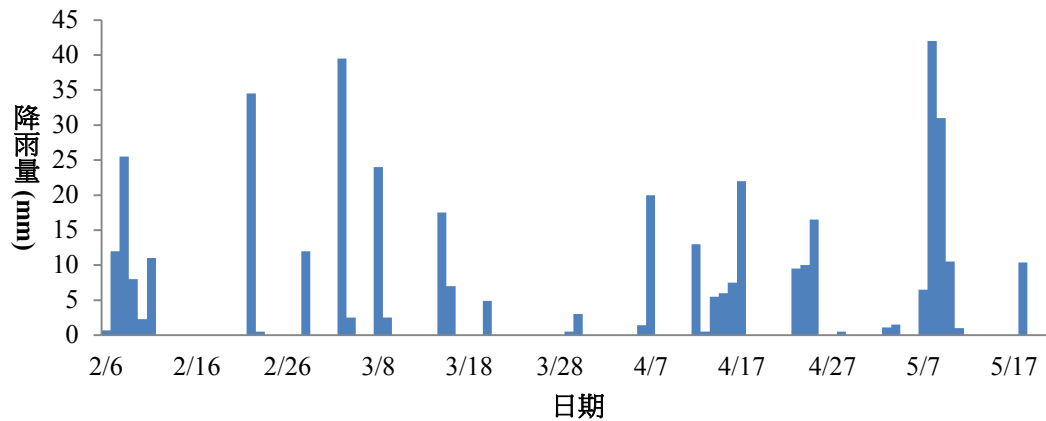


圖 15 林道觀測期間中央氣象局阿里山測站之日降雨量資料 (2018 年 2 月 6 日至 5 月 21 日)(資料來源：中央氣象局)

Fig.15 Daily rainfall amounts of the Central Weather Bureau Alishan Weather Station during monitoring period (2/6-5/21, 2018)

由於本次光達掃瞄作業之儀器測距精度可達 0.1-1 mm，因此可快速測得細微的地表變化，應用於林道之監測達到可有效辨識高程差異及獲得大面積資料之優點，除了於林道監測作業外，預期可擴展應用至山坡地土壤沖蝕之評估。

V、謝誌

本研究承行政院農業委員會林業試驗所 107 農科-10.2.1-森-G1 經費補助，謹此致謝。

VI、參考文獻

吳孟姍、陳國威、黃振全 (2013) 地面式三維雷射掃瞄於野溪地形監測之應用—以屏東縣來社溪上游段為例。社團法人中華水土保持學會 102 年度年會：1-12。

- 吳順昭 (1978) 日本林道事業之現況與發展之研究。中華林學季刊。11 (4):49-73。
- 吳順昭 (1979) 日本之林道業務。臺灣林業。5 (3):4-9。
- 曾義星、林見福、蔡漢龍、陳鶴欽、曾耀賢 (2008) 地面光達系統誤差分析及校正。地籍測量 27 (1):39-50。
- 楊濟豪、曹孟真、詹尚書、李亮瑩、王泰典、許宗傑、柯承宏、陳怡頻 (2014) 地面光達應用於露頭不連續面調查與岩體工程特性評估探討。中華水土保持學報, 45 (1):1-18。
- 魏浚紘、陳朝圳、彭炳勳、李崇誠、陳建璋 (2013) 地面光達應用於林木競爭之研究。航測及遙測學刊 16 (4):279-287。
- 羅紹麟、林喻東、周源樹 (1995) 在環境保育政策下林業行政管理之研究-適中林道密度之研究。國立中興大學實驗林研究報告。17 (1):45-75。
- Akgul M., H. Yurtseven, S. Akburak, M. Demir, H.K. Cigizoglu, T. Ozturk, M. Eksi and A.O. Akay (2017) Short term monitoring of forest road pavement degradation using terrestrial laser scanning. Measurement vol.103:283-293.
- Guo J, M.J. Tsai, and J.Y. Han (2015) Automatic reconstruction of road surface features by using terrestrial mobile lidar. Automation in Construction 58:165-175.
- Irish, J. L., and W.J. Lillycrop (1999) Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54:(2-3), 123-129.
- Pu, S., M. Rutzinger, G. Vosselman, and S. O. Elberink (2011) Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing vol.66:28-39.
- Staiger, R. (2003) Terrestrial laser scanning – technology, systems and applications. Proceedings of 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco.

湯適謙、謝漢欽、曾俊偉、林志交—
應用地面光達技術評估林木收穫搬運作業對林道之影響

六龜試驗林氣候狀況及極端值分析

孫銘源¹ 陸象豫²

【摘要】 六龜試驗林為台灣地區最大的試驗林，為能掌握此一廣大地區的氣候狀況，以供林業經營、物候、水文、育林、生態保育等方面的研究所需，林業試驗所集水區經營組早在 1980 年起即陸續在試驗林北、中、南三區分別設置了鳳崗、扇平及多納等三座氣象觀測站。本報告彙整 1986 年至 2017 年該三測站的有效電子紀錄，以月為單位呈現六龜試驗林北中南三區域的氣候狀況。六龜試驗林鳳崗、扇平、多納三測站的年平均降雨量分別為：3429.8、3435.9 及 3536.1 mm，總平均降雨量接近 3500 mm (3467.3 mm)，高於台灣年平均 2500 mm 甚多，顯示該試驗林雨量甚為豐富。然而主要的降雨多發生在 4 至 10 月 (濕季)，鳳崗、扇平及多納此期間的降雨量分別佔全年總降雨量的 92.8%、94.5% 及 94.7%，有明顯的乾濕季之分。鳳崗、扇平及多納地區年平均降雨天數 (單日降雨量 $\geq 0.5\text{mm}$) 分別為 142.5、135.1 及 126.0 天；而北部鳳崗林區年雨量稍低於南部區域，顯示試驗林降雨在南部地區較北部區域在時間分布上較為集中。試驗林鳳崗、扇平及多納三林區的年均溫分別為 16.7、20.7 及 19.7°C，由年均溫觀之，全境均屬於偏涼的氣候區，而年均溫的差異主要係受海拔高度的影響。鳳崗、扇平及多納全年度月平均溫差分別為 7.7 (12.3-20.0)、8.3 (15.8-24.1) 與 8.6 (14.7-23.3)°C，相較於林試所其他試驗林的月均溫差，六龜試驗林月均溫差相對地為低。三林區最高月均溫均以 7 月為最高，最低月均溫則均為 1 月份。鳳崗、多納及扇平 1 月平均日溫差分別為：7.04、6.87 及 6.42°C；7 月平均日溫差則分別為：5.73、6.50 及 7.32°C。其他與氣候相關且進行觀測的氣象因子尚有：濕度、日照輻射、風速與風向、蒸發量等項目，均以月統計的方式呈現該等氣象因子的物理量。另一方面，受全球暖化影響，世界各地極端氣候出現較以往更為頻繁。本報告以扇平氣象站的紀錄為基本資料，分析極端溫度及極端雨量的閾值；結果顯示 24 小時降雨量須高

¹ 林業試驗所六龜研究中心助理研究員 *通訊作者：smy@tfri.gov.tw

Liukuei Research Center, Taiwan Forestry Research Institute, 198 Chun-Shine Village, Liukuei, Kaohsiung 84443, Taiwan

² 林業試驗所集水區經營組研究員

Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

於 800 mm，方達極端日雨量的門檻值，而各月份極端溫度出現的頻率則較高。
【關鍵詞】 六龜試驗林、極端降雨、極端溫度、降雨量、溫差

CLIMATIC CONDITIONS OF THE LIUKUEI EXPERIMENTAL FOREST AND ITS EXTREME VALUE ANALYSIS

Ming-Yuan Sun^{1*} Shiang-Yue Lu²

【Abstract】 The Liukuei Experimental Forest (LEF) is the largest experimental forest in Taiwan which occupied about 10 thousand hectares of natural and artificial forest lands. For understanding the climatic conditions of this vast area to provide necessary information for forestry management, phenology, hydrology, afforestation, and ecological conservation, the Division of Watershed Management has set up three second-grade agricultural weather stations at the northern, central and southern parts of LEF since 1980 and namely Fonkang, Shanping, Donna, respectively. This report summarizes the effective electronic records of these three stations from 1986 to 2017, and presents the climatic conditions in monthly resolution for the LEF. The average annual rainfalls at the Fonkang, Shanping, and Donna stations are 3429.8, 3435.9 and 3536.1 mm, respectively. The average annual rainfall for the whole area is close to 3500 mm (3467.3 mm), which is much higher than that of Taiwan (2500 mm) and indicates that the experimental forest is rich in rainfall. However, rainfall in the LEF is occurred mostly from April to October (wet season). The rainfall in wet season accounted for 92.8%, 94.5% and 94.7% of the total annual rainfall for Fonkang, Shanping, Donna areas, respectively. It shows that the rainfall is extremely temporal uneven distributed. There is a clear wet and dry season in the LEF. The rainfall-days (defined as daily rainfall ≥ 0.5 mm) in a year for the Fonkang, Shanping, and Donna stations are 142.5, 135.1 and 126.0 day, respectively. The rainfall-day in the northern part of LEF is greater than that of the southern part while as rainfall amount is less than that of southern part, indicating that rainfall is more uneven temporal distribution in the southern part of LEF. The annual average temperatures in the Fonkang, Shanping, Donna areas are 16.7, 20.7 and 19.7°C, respectively. The whole area of LEF belongs to a cool climate zone, from the judgement of annual average temperature. The difference in annual average temperature is mainly affected by altitude. The average monthly temperature difference for Fonkang, Shanping, and Donna areas in a year cycle is 7.7 (12.3-20.0), 8.3 (15.8-24.1), and 8.6 (14.7-23.3)°C, respectively. Comparing to the monthly average temperature difference of other experimental forests of the Taiwan Forestry Research Institute (TFRI), it is relatively low in the LEF. The highest monthly average

temperature is in July and the lowest average monthly temperature is in January for the whole area of the LEF. The average daily temperature differences in January for the Fonkang, Shanping, Donna areas are 7.04, 6.87 and 6.42°C, respectively; and that of July are 5.73, 6.50, and 7.32°C, respectively. Other monitored meteorological factors in the LEF are humidity, solar radiation, wind speed and direction, and evaporation. The physical quantities of these meteorological factors are presented in monthly statistics. On the other hand, extreme climates have become more frequent in the world than ever before due to the influence of global warming. In this report, the records of the Shanping Weather Station were used as basic data to analyze the extreme temperature and rainfall thresholds for using as reference of various experimental studies. Results indicate that the 24 h accumulation rainfall must greater than 800 mm to reach the threshold of extreme rainfall for the LEF. However, the occurrence of extreme high or low temperatures are relatively high in the LEF.

【Key words】 Liukuei Experimental Forest, Extreme rainfall, Extreme temperature, Rainfall amount, Temperature difference

I、前言

林業試驗所六龜研究中心所管轄的六龜試驗林，擁有從海拔 250 至 2,600 公尺面積約 9,882.33 公頃的林地，是本所最主要的試驗研究場所。為能掌握幅員廣闊且地形複雜試驗林地氣候狀況，以提供林業經營及試驗研究所需，六龜研究中心早在民國 44 即在扇平工作站進行雨量觀測；嗣後於民國 69 年起在扇平與多納工作站著手降雨量、溫度、相對溼度、蒸發量 (A 型蒸發皿) 及雲量等氣象因子觀測，始略具氣象站規模。至民國 75 年起，鑒於試驗研究遍及全林區及電子儀器陸續問世，集水區經營組因此先後設立了六龜、鳳崗山、多納、扇平及森山等五座符合農業二級氣象站規模的測站，觀測項目包括：風速、風向、日照輻射、溫度、相對溼度及降雨量等，開啟電子儀器自動偵測、數位紀錄的時代。目前六龜研究中心所有氣象站均以 Campbell 公司出產的 CR1000 系統進行監測，每十分鐘監測各因子乙次，每小時將該時段之平均 (或總計)、最高及最低紀錄值儲存於資料匣中。本報告以自記有效資料 (1986-2017) 為基準，闡述六龜試驗林的氣候概況。

II、研究區域概況

六龜試驗廣闊的幅員內雖設有四個氣象站 (Fig. 1)，很難以此等氣象觀測站的平均狀態表達全區的氣候狀況；但可試圖將北中南分為鳳崗、扇平及多納三大林區，分別以鳳崗、扇平 (森山氣象站與扇平氣象站位置接近，惟記錄較短，故以扇平氣象站紀錄探討試驗林中部林區的氣狀況) 及多納等三氣象站的紀錄進行探討。然而溫泉溪東岸由 9 至 25 林班廣大的區域，因交通不便少有試驗在此進行，未設置氣象觀測站，對該區域的氣候狀況較不了解。

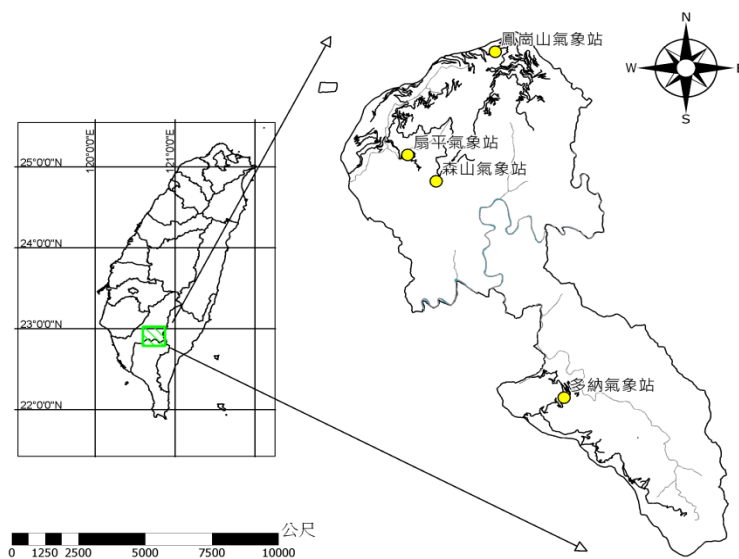


圖 1 六龜試驗林氣象站位置圖

Figure 1 Location of meteorological stations in the LEF

III、研究方法

(I) 氣象資料處理與分析

各測站監測的因子遵循感應 (sensing)、紀錄 (recording)、傳送 (transmission)、資料轉換 (translation)、檢視校正 (editing)、儲存 (storage) 等水文監測步驟，將紀錄攜回資料處理室。其中校正係將記錄經過偏移值 (outlier test) 測試 (Chow et al, 1988)，刪除或補遺明顯不合理的紀錄；儲存係以年為單元，建立資料庫檔。將所選取的資料進行總計、均值等統計分析，以呈現各項觀測因子之月紀錄與年紀錄。

(II) 極端降雨閾值推估

本報告以 50 年回歸周期扇平地區的降雨量為六龜試驗林極端降雨的門檻值，為求得不同回歸週期日降雨量，先將記錄年的最大日雨量挑選出，建立每年最大值序列 (annual maximum series)，再以極端值第一型分佈函數進行頻率分析，求得不同回歸週期之 24 小時延時之降雨量。極端值第一型分布的機率函數為 (Tomlinson, 1980 ; Lu, 2016) :

$$F(x) = \exp\{-\exp[-(x - \mu)/\alpha]\};$$

其中 $F(x)$ 變數 X 的累積機率， α 與 μ 分別為

$$\alpha = 60.5 s / \pi = 0.7796 s,$$

$$\mu = \text{Ave}(x) - 0.5572\alpha, \text{ with}$$

s 為標準偏差 (standard deviation)

相關水文事件不同回歸周期 (T) 的物理量 (XT) 可由下式推估

$$XT = \mu + \alpha yT,$$

而 $yT = -\ln[\ln(T/(T - 1))]$ 。

(III) 極端溫度閾值推估

本報告將各月份的日溫度視為常態分佈 (normal distribution)，並將落於最高與最低 2.5% 範圍的溫度視為極端溫度。常態分佈的函數為：

$$f(x) = (1/s(2\pi)^{0.5})e^{-0.5[(x-\mu)/s]^2}$$

其中 $f(x)$ 變數 x 發生的機率、 s 為標準偏差、 $\pi=3.14159$ 、 $e=2.71828$ 、 μ 為變數 x 的平均值。

將扇平測站 31 年的日溫度紀錄 (扣除遺失資料後，每月均超過 800 筆紀錄) 視為常態分佈，求得其平均值及標準偏差，再將累積分佈機率高於 97.5% 及低於 2.5% 以外發生的高溫與低溫視為極端溫度的閾值 (陸象豫，2016)。

IV、結果與討論

(I) 降雨量

六龜試驗林鳳崗、扇平、多納三測站的年平均降雨量分別為：3,429.8、3,435.9 及 3,536.1 mm，總平均降雨量接近 3,500 mm (3,467.3 mm)，高於台灣年平均 2,500 mm 甚多，顯示該試驗林雨量甚為豐富。然而主要的降雨主要發生在 4 至 10 月 (濕季)，鳳崗、扇平及多納此期間的降雨量分別佔全年總降雨量的 92.8%、94.5% 及 94.7%。事實上，試驗林 4 月及 10 月的降雨仍屬少量，若僅統計 5 至 9 月間的降雨量，則鳳崗、扇平及多納三地區此期間降雨分別佔全年總降雨量的 85.0%、86.8% 及 87.5%，顯示試驗林降雨在時間分佈極為不平均，有明顯的乾濕季之分。每年 2 至 4 月期間，北方大陸冷氣團遇到南方海洋暖氣團形成不穩定的介面 (稱之為華南雲雨區)，有利於台灣地區雲雨的發展，所降的雨水稱之為春雨 (Chen and Chen, 2006)。六龜試驗林春雨約佔全年總降雨的 7.8%，主要集中於 4 月，是每年乾季結束後，最先發生的降雨機制。春雨後的降雨機制則為梅雨，多發生於 5、6 月春夏交替之際，由於此時東北季風逐漸減弱，源自於南方熱帶海洋的西南季風逐漸增強 (西南氣流)，當其與勢力相當的冷暖氣團在華南至台灣一帶交會，遂形成一道近似滯留的鋒面系統，為華南地區帶來強度高的降雨。六龜試驗林全年大約有 30%至 37%的雨量是集中在 5、6 月的梅雨期，為試驗林僅次於颱風降雨的降雨型態。雖然此期間亦有可能遭受颱風侵襲，但歷年來 5 至 6 月侵襲台灣的颱風數目均約佔侵台颱風數目的 15%以下，故 5 至 6 月間主要的降雨機制為梅雨。

試驗林的降雨高峰集中在 7 至 9 月，此期間主要為颱風帶來的降雨。根據中央氣象局的統計，過去 100 年間平均每年約有 3.4 個颱風侵台，其中約 80%以上集中在此期間。六龜試驗林為颱風侵台時強降雨發生的熱區，颱風所帶來延時長、強度大的降雨，為造成試驗林崩塌等災害的主要原因。颱風雨的多寡，往往成為該年度降雨量多寡的決定因素。夏季另一降雨機制為地形雨，由台灣西南部海面富含水氣的氣流，受山嶺影響被迫舉升，在上升的過程中，冷卻凝結造成降雨；此種降雨多發生於夏季的午後，亦成為此期間試驗林主要降雨機制。夏季的降雨是六龜試驗林最重要的水資源，其降雨量約佔全年度降雨之 55%。而 10 月份的降雨部分為夏季雷陣雨，多發生在上旬；部分為秋颱所帶來的降雨。

(II) 降雨天數

鳳崗、扇平及多納地區年平均降雨天數 (單日降雨量 $\geq 0.5\text{mm}$) 分別約為 142.5、135.1 及 126.0 天，而北部鳳崗林區年雨量稍低於南部區域，顯示試驗林南部地區降雨比北部區域在時間分布上較為集中。此外，鳳崗、扇平及多納地區歷年平均最長無雨天數分別為 32、31 及 38 天，其中連續最長無降雨天數發生在 1995 年 10 月 10 日至翌年 1 月 18 日的多納地區，計連續 70 天無紀錄到降雨，鳳崗林區最長紀錄為 65 天，扇平地區則為 62 天。連續無降雨天數為乾旱的指標之一，顯示多納林區降雨較集中，較其他林區在更易遭受乾旱威脅。

(III) 溫度

六龜試驗林鳳崗、扇平及多納三林區的年均溫分別為 16.7、20.7 及 19.7 $^{\circ}\text{C}$ ，由年均溫觀之，全境均屬於偏涼的氣候區，而年均溫的差異主要係受海拔高度的影響。鳳崗、扇平及多納全年度月平均溫差分別為 7.7 (12.3-20.0)、8.3 (15.8-24.1) 與 8.6 (14.7-23.3) $^{\circ}\text{C}$ ，相較於林試所其他試驗林的月均溫差，六龜試驗林月均溫差相對地為低 (Lu et al., 2000)。試驗林冬季的低溫主要是受大陸冷氣團所影響，當大陸高氣壓中心達於長江流域或更南，台灣中南部地區即會受其影響，出現低溫。鳳崗、扇平與多納三林區在記錄期間最低溫則分別為：-1.2、3.0 與 -0.1 $^{\circ}\text{C}$ ，均發生在冷氣團來襲時的清晨。夏季高溫除受日照輻射量多寡影響外，亦受反聖嬰現象所帶來西太平洋高海溫影響；鳳崗、扇平及多納所記錄到的最高溫分別為：36.6、37.8 與 37.9 $^{\circ}\text{C}$ ，均發生在 7 月的中午時分。最高與最低氣溫差異甚大，然此等氣溫已屬極端溫度的範疇。三林區最高月均溫均以 7 月為最高 (少數年份最高月溫均發在 8 月，主要受該年度颱風發生的時間所影響)，最低月均溫則都為 1 月份 (少數年份最低月均溫發生在 2 月，為冷氣團較晚發生所致)，三林區月均溫、最高均溫、最低均溫等紀錄如圖 2 至圖 4 所示。1 月及 7 月的日溫度變化如圖 5 及圖 6 所示，鳳崗、多納及扇平 1 月平均日溫差分別為：7.04、6.87 及 6.42 $^{\circ}\text{C}$ ；7 月平均日溫差則分別為：5.73、6.50 及 7.32 $^{\circ}\text{C}$ 。1 月日最高溫分別發生在 12:00、14:00 及 12:00，最低溫分別發生在 06:00、07:00 及 07:00；7 月份最高溫分別發生於 12:00、14:00 及 12:00，最低溫則均發生於 06:00。每日最高溫發生時間與坡向有顯著的關係，扇平氣象站位於西向坡，午後仍可受到陽光直射，故最高溫發生時間較其它二測站延後約 2 小時，而最低溫則均發生在太陽照射之前，多為每日的清晨 6 點。

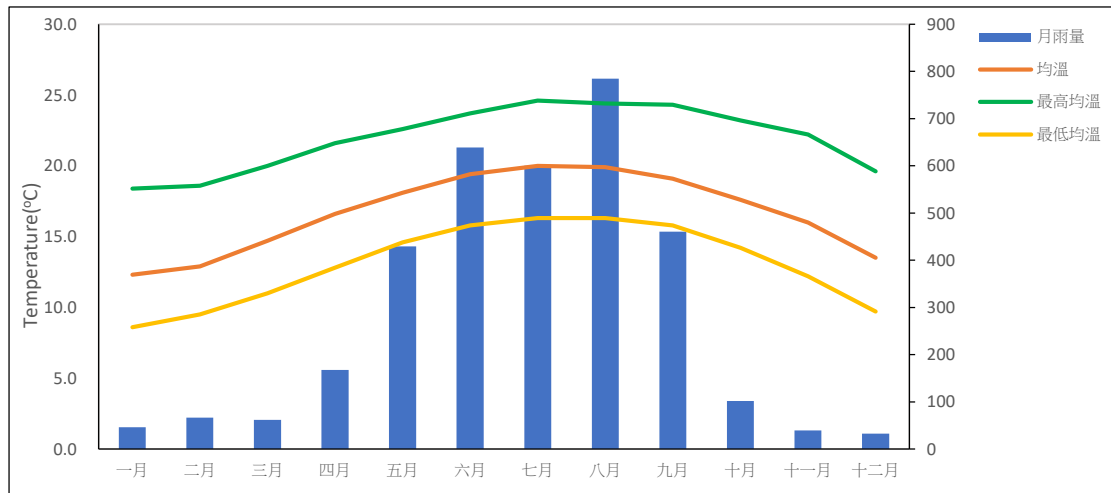


圖 2 鳳崗林區月降雨量與月平均溫度 (Jan. 1986-Dec. 2017)

Figure 2 Monthly average rainfall and temperatures of the Fonkang area (Jan. 1986-Dec. 2017)

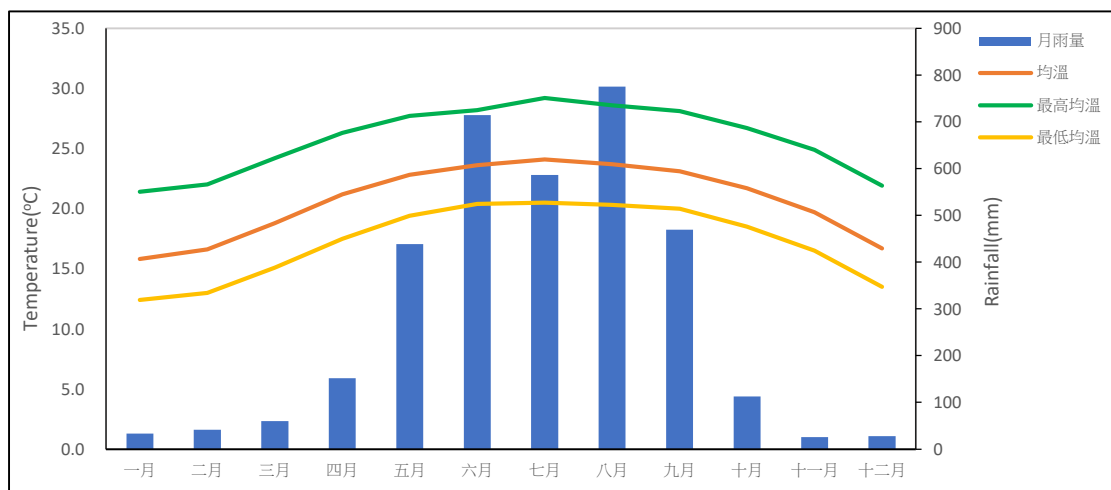


圖 3 扇平林區月降雨量與月平均溫度 (Jan. 1986-Dec. 2017)

Figure 3 Monthly average rainfall and temperatures of the Shanping area (Jan. 1986-Dec. 2017)

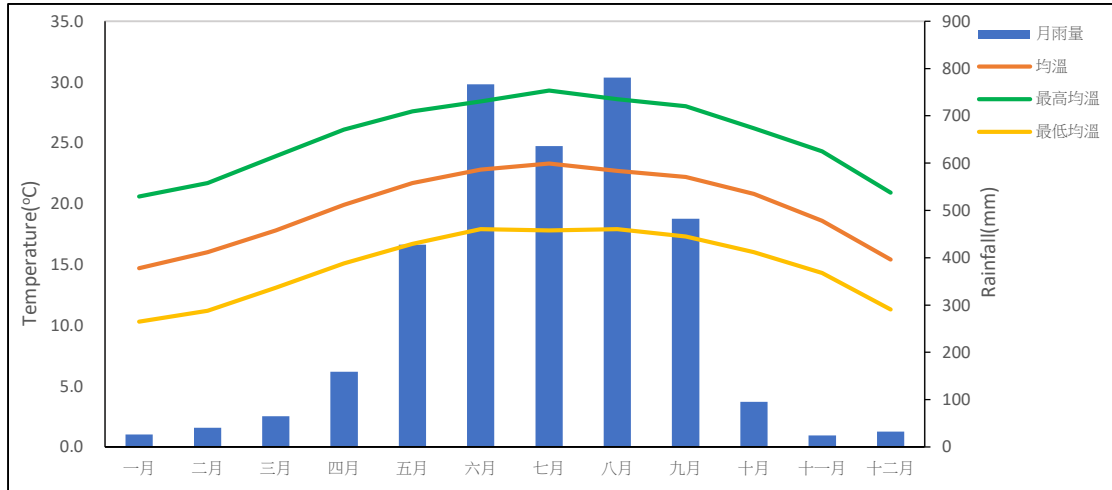


圖 4 多納林區月降雨量與月平均溫度 (Mar. 1986-Dec. 2017)

Figure 4 Monthly average rainfall and temperatures of the Donna area (Mar. 1986-Dec. 2017)

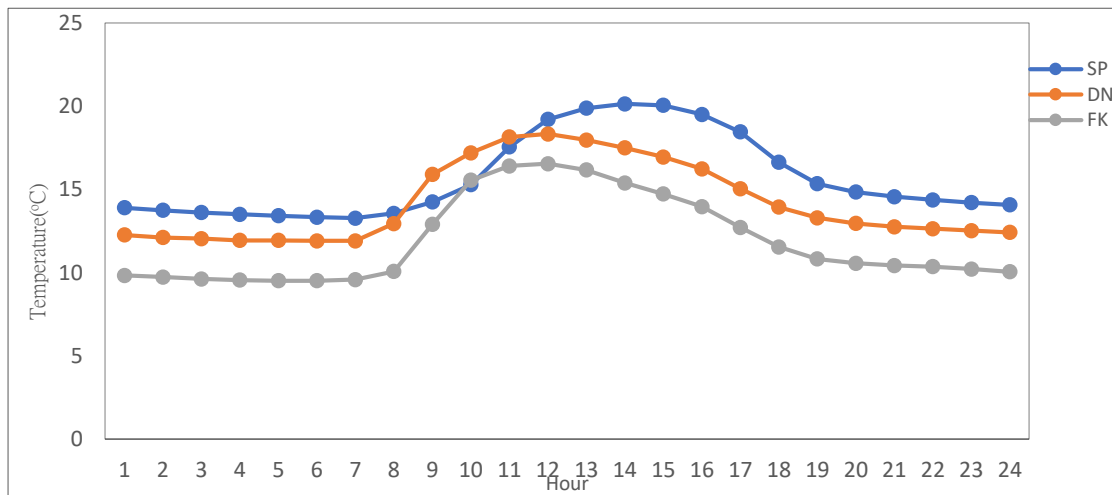


圖 5 六龜試驗林 1 月份日氣溫變化圖 (1993-2017)

Figure 5 Daily temperature fluctuations of January for the LEF

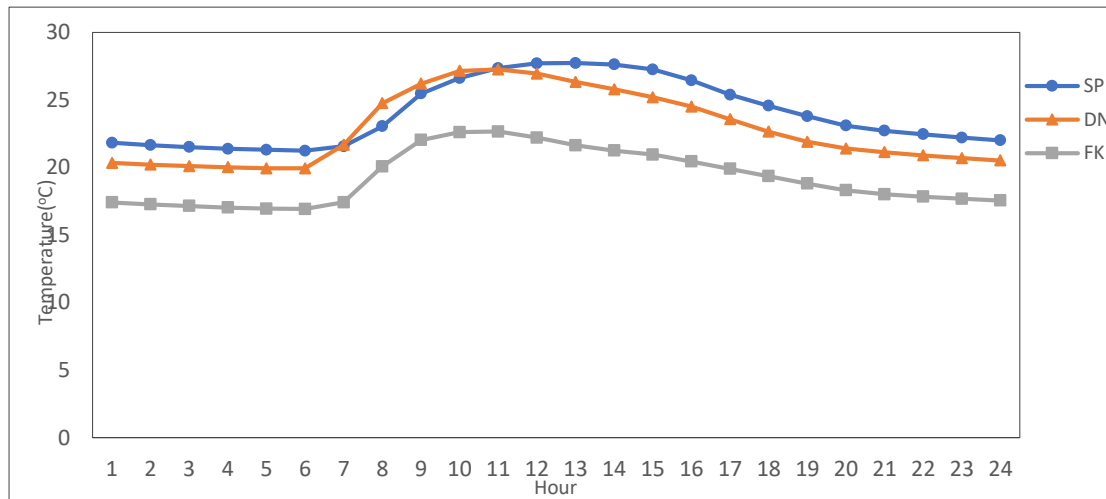


圖 6 六龜試驗林 7 月份日氣溫變化圖 (1993-2017)

Figure 6 Daily temperature fluctuations of July for the LEF

(IV) 其它氣象因子

其它與氣候相且進行觀測的氣象因子尚有：濕度 (humidity)、日照輻射 (solar radiation)、風速與風向 (wind speed and direction)、蒸發量 (evaporation) 等項目。濕度為大氣中水分含量的多寡，雖然其含量最多不會超過 5%，但對一地區的氣候會有顯著的影響；其表示法有水汽混合比、比濕、水汽壓、絕對溼度及相對濕度等多種。其中本所氣象站均採用相對溼度來表示，定義為：在一定壓力與溫度下，單位體積空氣中水汽的分子數與其飽和水汽分子數的百分比。風速則為單位時間內風之行程，通常以每秒公尺表示 (m/sec)。日照輻射 (solar radiation) 係指太陽輻射能中，近紫外線 (near ultraviolet ray，波長約 0.3~0.4 μm) 至近紅外線 (near infrared ray，波長約 3~4 μm) 波段間之輻射能。日照輻射量通常設定為單位時間 (時或日) 單位面積的輻射量累積值，通常以 MJ/m^2 (百萬焦耳/平方米) 或 cal/cm^2 (卡/平方公分， $1 \text{ MJ}/\text{m}^2 = 23.9 \text{ cal}/\text{cm}^2$ ；1 cal 為將 1 公克的水在 1 大氣壓下提升 1 攝氏度所需要的熱量，約等於 4.1855 焦耳) 為單位。蒸發是液態或固態的水變成氣態的現象，自土壤表面或自由水面因蒸發而失去之水量，稱為蒸發量。其觀測是在 1980~1990 期間於扇平及多納以 120 cm 蒸發皿進行之，採用單位為 mm/day。相關觀測因子的月統計值列於表 1。

表 1 六龜試驗林相關氣象因子月統計值

Table 1 The monthly statistics of relevant meteorological factors for the LEF

月份	相對溼度(%)			照輻射(MJ/m ²)			風速(m/s)			蒸發量(mm)	
	FK	SP	DN	FK	SP	DN	FK	SP	DN	SP	DN
Jan	86.6	85.8	84.3	355	288.1	329.6	0.67	0.7	0.57	79.5	61
Feb	88.1	86	83.4	326	292.3	314.2	0.67	0.72	0.62	71.5	94.5
Mar	88.7	84.7	85.1	373.6	354.1	375.4	0.65	0.71	0.63	99.3	95.5
Apr	91	86.9	86.2	354.4	401.4	384.2	0.61	0.76	0.67	100.5	82.6
May	92.6	89.8	89.2	336.1	420	409.2	0.58	0.76	0.64	115.4	94.9
June	93.3	89.6	89.8	340	432.3	408.3	0.67	0.74	0.7	92.9	93.6
July	93.5	89.6	89	345.7	479.2	452.9	0.67	0.77	0.8	104.1	114.7
Aug	93.3	90.2	91.2	313.1	411.5	373.4	0.7	0.71	0.78	89.1	101.1
Sep	94.2	90.3	90.8	297.4	394.8	372	0.56	0.66	0.7	82.2	57.8
Oct	92.8	89.5	90	316.5	354.3	342.6	0.52	0.64	0.6	82	74.9
Nov	89	88.1	88.1	330.2	283.4	303.4	0.57	0.63	0.59	77.2	65.5
Dec	87.1	87	86.1	319.6	254.5	295.6	0.61	0.65	0.55	72	69.5
平均	90.9	88.1	87.8				0.62	0.7	0.65		
總計				4,007.5	4,366	4,360.7				1,066.2	1,055.5

FK：鳳崗 SP：扇平 DN：多納

(V) 極端降雨閾值

以極端值第一型分佈函數進行頻率分析，求得扇平地區 2、10、25、50、100 年回歸週期最大 24 小時降雨量分別為：310.8、572.9、704.7、802.5 與 899.6 mm，而每年最大 24 小時降雨量的平均值為 337.4 mm，變動區間為 36.5 至 873.5 mm。若以降雨量超過該地區 50 年回歸週期發生的降雨量視為極端降雨量，則六龜試驗林 24 小時降雨量須達到 800 mm 上方可視為極端降雨。

六龜試驗林最大的 24 小時降雨紀錄為鳳崗地區 2009 年 8 月 8 日 02:00 至 8 月 9 日 01:00 的 1,290.0 mm (莫拉克颱風)，次為多納 2005 年 7 月 18 日 12:00 至 7 月 19 日 11:00 的 1,065.5 mm (海棠颱風)，兩者均為令人記憶猶深的致災降雨事件，也超過極端降雨門檻值甚多。中央氣象局為便於災害預報與防治，將 24 小時的總降雨量分為 (1) 大雨事件為 24 小時累計降雨量達 50 mm 以上，且其中至少有一小時強度達 15 mm 以上，(2) 豪雨事件為 24 小時累計降雨量達 130 mm 以上，(3) 大豪雨事件為 24 小時累計降雨量達 200 mm 以上，(4) 超大豪雨事件為 24 小時累計降雨量達 350 mm 以上。記錄期間鳳崗、扇平與多納三測站發生大豪雨事件均超過 12 次，幾乎每兩年就發生乙次，顯示颱風帶來的超大

豪雨在試驗林發生仍頻，為造成試驗林邊坡崩塌與林道毀損的主要原因。依據中央氣象局的定義大豪雨事件為約是在 2 年重現期距 (recurrence interval) 的降雨量，超大豪雨事件約為 5 年重現期距的降雨量。豪雨規模的降雨在台灣幾乎每年都會發生，大豪雨規模的降雨在平地可能不會年年發生，但在中海拔山區因地形作用，則幾乎每年都會發生。然而此種豪雨規模的降雨均不能視為極端降雨，故就降雨量而言，台灣地區極端降雨的門檻值相當高。

(VI) 極端溫度閾值

本報告將扇平地區的日平均溫度視為常態分佈，並將累積機率大於 97.5% 及小於 2.5% 所對應的溫度視為極端高低溫的門檻值，所求得各月份的極端溫度閾值如表 2。極端高低溫出現情形並無規律性，然極端低溫出現的日 (次) 數較極端高溫出現者明顯為高；其原因為夏季晴朗夜晚溫度驟降，秋冬季為受寒流影響，使該日平均溫度大幅降低所致。

六龜試驗林的動植物受極端溫度的影響不顯著，植物甚少因極端溫度而發生寒害 (chilling injury)、霜害 (frost injury) 和凍害 (freezing injury) 等情形，也少有因熱浪來襲，而發生野火及植物枯死的情形。

表 2 扇平地區各月份極端日均溫閾值 (°C)

Table 2 The threshold values for extreme temperatures of the Shanping area

月份	極端高溫	極端低溫	高溫發生次(天)數	低溫發生次(天)數
Jan	20.18	11.41	12	29
Feb	21.4	11.78	14	23
Mar	23.99	13.44	4	31
Apr	25.1	17.18	9	36
May	25.64	20.03	19	25
Jun	26.44	20.73	9	13
Jul	26.43	21.76	18	23
Aug	26.01	21.35	10	36
Sep	25.38	20.07	20	21
Oct	24.53	18.91	14	35
Nov	23.23	16.1	1	42
Dec	21.14	12.26	15	27

V、結論

六龜試驗林屬於降雨量高的區域，惟乾濕季明顯，尤以南部的多納林區降雨更集中於夏季。因坡度陡峭以及頁岩與片麻岩的地質結構，在高強度的降雨侵襲下，常造成坡面崩塌及道路中斷；而大豪雨等級的降雨幾乎每兩年發生乙次，因此降雨為影響試驗林經營與試驗研究的主要因子。試驗林鳳崗、扇平及多納三林區的年均溫分別為 16.7、20.7 及 19.7℃，全境均屬於偏涼的氣候區，惟受海拔高度的影響年均溫有明顯差異。極端溫度對試驗林植物生長、生態系運作的影響似乎不顯著，然乾旱及高溫二者共同作用，曾造成土壤淺薄區域的苗木枯死，但此情形屬於偶發事件。除降雨量及溫度外，試驗林內的氣象站尚監測濕度、日照輻射、風速與風向、蒸發量等項目，當可掌握試驗林的氣候狀況，俾供各項試驗研究與經營作業所需。

VI、參考文獻

- 陸象豫 (2016) 從蓮華池地區氣象紀錄談極端氣候。林業試驗所林業研究專訊 23(6)：66-69。
- Chen C.S., Chen Y.L. (2003) The rainfall characteristics of Taiwan. *American Meteorological Society* 131:1323-41.
- Chow V.T, Maidment D.R, Mays L.R. (1988) *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York 572 pp.
- Lu S.Y, Tang K.J., Ku H.Y., Huang H.H. (2000) Climatic conditions of forested Lands of Taiwan Forestry Research Institute. *Taiwan Journal of Forest Science* 15(3):429-40.
- Lu S.Y. (2016) Study of rainfall characteristics and their changes on the Hengchen Peninsula. *Taiwan Journal of Forest Science* 31(1):49-60.
- Tomlinson A.I. (1980) The frequency of high intensity rainfalls in New Zealand, *Water and Soil Tech. Publ. no. 19*, Ministry of Works and Development, Wellington, New Zealand.

崩塌地植生治理後對土壤水資源涵養能力影響之研究

蘇子豪¹、邱予柔²、陳凱琳²、周立人²、林信輝³、劉瓊霖^{4*}

【摘要】臺灣由於降雨豐沛及地形陡峻，土壤沖蝕、土石流、崩塌及地滑等坡地土砂災害頻繁發生。本研究選取全臺不同區域共 9 個崩塌地進行試驗，透過實地土壤取樣並分析其物理化學性質，以期瞭解崩塌地與鄰近森林地之土壤差異，進而探討崩塌地的土壤恢復狀況，及養分與水資源涵養之能力。結果顯示，不同種類之植生與土地利用主導了土壤的各項性質差異，進而使其水資源涵養能力產生變化。綜以各區而言，北部崩塌地（蘇樂、砂崙仔及大溪事業區）之表土入滲總水量相對較高，而南部（藤枝林道）相對較低，中部（鶴山廟、食水坑、十八股、瀨頭）及東部（大鳥部落）則介於其中。北高南低的趨勢除了因各區土壤有機質含量差異外，亦與其土壤質地組成相關。整體而言，若崩塌地的植生恢復良好，則其孔隙率、水分係數及體積含水率等皆與鄰近森林地無顯著差異，惟化學性質部分差異較大；僅蘇樂地區恢復狀況較為良好，土壤有機質及 CEC 皆較鄰近之森林地高，而在不同土地利用及復育樹種差異上，亦顯著影響土壤化學性質。然而觀察各區域崩塌地之表土入滲最高水量，可發現皆存在崩塌地測值變異較非崩塌地高的情況，顯示崩塌地的土壤均質性仍較非崩塌地為低，要持續多久方能恢復，仍有待未來長期監測。

【關鍵詞】崩塌地、土壤性質、土壤水資源涵養、植生復育

A STUDY ON THE INFLUENCES OF VEGETATIVE RESTORATION ON SOIL WATER STORAGE OF LANDSLIDE SOILS

Tzu-Hao Su¹ Yu-Jou Chiu² Kai-Lin Chen² Li-Jen Chou² Shin-Hwei Lin³
Chiung-Pin Liu^{4*}

¹ 國立中興大學森林系博士班研究生。

Graduate Student of Ph. D., Department of Forestry, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan

² 國立中興大學森林系大學部學生。

Undergraduate Student, Department of Forestry, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan

³ 國立中興大學水保系教授，台中市國光路 250 號。

Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan.

⁴ 國立中興大學森林系教授，台中市國光路 250 號，通訊作者。電子郵件：cpliu@nchu.edu.tw

Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan. Corresponding Author. E-mail: cpliu@nchu.edu.tw

【Abstract】 Landslide disasters occurred frequently in Taiwan due to the combinations of steep terrain, regular seismicity and extraordinary rainfall events. This study aimed to investigate physical and chemical properties of soils in high landslide areas in Taiwan after vegetation restoration, and to estimate the water storage capacities of topsoil. Soil samples were taken from the landslides and the nearest unaffected forest areas to evaluate influences of the capacity of water storage after vegetative restoration at different sites. The results indicated that most of the landslides have recovered well since the porosity and water content of soil is not statistically significant. However, soil chemical properties showed difference between landslide and forested areas demonstrating that nutrient cycling might be affected by landslides. In addition, total water storage of topsoil is higher in sites of northern Taiwan and lower in sites of southern Taiwan for all study sites. This phenomenon could be attributed to the difference of soil texture and organic matter content. Further information on the long-term monitoring of soil properties should be provided to investigate whether landslides are stable.

【Key words】 Landslides, Soil properties, Soil water storage, Vegetation restoration

I、前言

台灣由於位處歐亞大陸及菲律賓海板塊的邊界，地震發生頻繁，再加上豐沛的降雨及陡峭的地形，導致土壤沖蝕、土石流、崩塌及地滑等坡地土砂災害頻繁發生。政府相關部門投入大量人力與經費，從事崩塌地邊坡穩定等相關工程，及後續的植被復育工作。植被乃影響土壤化育的重要因子之一，而不同的植被因根系生長、分佈型態及分泌物之不同，或是有機物質分解速率等的差異，使土壤之理化性質產生不同的程度與特性的影響。相關性質也將會影響土壤之理化性質、水分入滲能力、水分及養分涵養量等，進而影響植被的生長和對水土資源保育之功效。

目前農試所正積極進行土壤資料之蒐集與數化工作，然而就坡地土壤進行相關研究分析者，仍相當稀少。尤其在崩塌地中，由於土壤性質之變化與植生演替皆較為迅速，若沒有建立相關規範及長期的試驗研究，將難以具體了解不同植生種類與工法對於土壤涵養水源之成效。本研究針對全臺不同區域共 9 個崩塌地進行試驗，透過實地土壤取樣並分析其理化性質，以瞭解崩塌地土壤的恢復狀況，並比較不同土地利用型態及復育樹種等是否對於土壤性質產生影響，進而探討坡地植生與土壤保育及水資源涵養能力之成效。

II、材料與方法

(I) 研究區域

本研究於全臺共 9 處崩塌地進行土壤物理化學性質分析，針對崩塌地及鄰近之森林地進行取樣分析，部分區域則針對不同土地利用、樹種及下層沉積差異等進行樣點設置。樣區位置資料如表 1，各樣點差異及探討重點分述如下：

表 1 研究地基本資料表

Table 1 Information of study sites

崩塌地名稱	行政區域	TWD97 座標	崩塌時間	崩塌面積
蘇樂崩塌地	桃園縣復興鄉	286186, 2732729	2004 年 8 月	1.3 公頃
砂崙仔崩塌地	桃園縣復興鄉	286036, 2730019	2004 年 8 月	7.8 公頃
大溪事業區 第 153 林班 6 號崩塌地	桃園縣復興鄉	287782, 2730290	2004 年 8 月	6 公頃
十八股崩塌地	苗栗縣卓蘭鎮	234669, 2689521	(潛勢區位)	35 公頃
食水坑崩塌地	苗栗縣卓蘭鎮	234372, 2689066	2006 年 6 月	6 公頃
鶴山廟上方 崩塌地	南投縣鹿谷鄉	226367, 2621443	2009 年 8 月	2 公頃
瀨頭崩塌地	嘉義縣番路鄉	214405, 2588690	2009 年 8 月	4.5 公頃
藤枝林道 3.5K 崩塌地	高雄縣六龜鄉	216100, 2545388	2009 年 8 月	14 公頃
大鳥崩塌地	台東縣大武鄉	240513, 2476848	2009 年 8 月	6.8 公頃

1. 蘇樂崩塌地

本點位於桃園縣復興鄉高義地區，位於蘇樂溪左岸崩塌坡面。本樣區的主要致災原因為 2004 年 8 月艾利颱風帶來大量豪雨與泥砂坡腳流失產生崩塌，本次崩塌地點分為兩區，為上游崩塌與舊蘇樂橋旁崩塌地；上游產生崩塌面積約 14 ha，而舊蘇樂橋旁崩塌地面積約 1.3 ha。主要工程為防砂壩、砌石擋土牆、梳子壩、坡面截排水、苗木栽植、草種撒播與自由樑框。此崩塌地具有較完整歷年植生調查資料，若能引入土壤性質監測則有助於瞭解植生演替的過程與變化。樣點亦於崩塌地與周邊森林地進行設置，以瞭解崩塌地土壤的恢復狀況。

2. 砂崙仔崩塌地

砂崙仔崩塌地位於桃園縣復興鄉，因 2004 年 8 月艾利颱風來襲，造成砂崙仔集水區桃 113 線 4k+800 處發生嚴重崩塌，崩塌面積約為 7.8 ha，此區域之崩塌地治理工程以複層式植生工法施作。工程地被主要以羅滋草 (*Chloris gayana*) 與爪哇大豆 (*Neonotonia wightii*) 噴植以快速達到植被覆蓋之效果，配合二次植生混植 6,900 株木本植物而增加樹種多樣性。此點位整治方式為複合式植生工法施作，且後續樹木覆蓋率良好，在後續現地植生及土壤調查後，能探討此施作方式對於崩塌地演替與坡面保育之影響。樣點針對崩塌地及周圍森林地進行設置，以瞭解崩塌地土壤的恢復狀況。

3. 大溪事業區第 153 林班 6 號崩塌地

本崩塌地位於桃園縣復興鄉，桃 113 線 3K 處，因石門水庫集水區地形陡峻、地質脆弱、土壤鬆軟，加上前期 921 地震造成土質鬆動，75%以上崩塌地發生於陡坡 (坡度 55%以上之林地)。受 2004 年艾利颱風帶來的大量雨量影響，造成崩塌災害。工程內容包括混凝土擋土牆、噴漿溝排水設施及掛網噴植等。因坡面上方有成熟之羅氏鹽膚木 (*Rhus javanica*) 及相思樹 (*Acacia confusa*) 母樹，成為坡面上天然下種之來源。本區樣點僅設置一處，主要目的為提供此區域土壤相關理化性質之基礎資料，提供未來針對植生演替與土壤保育及水資源涵養功能等關係的研究所需。

4. 十八股崩塌地

十八股崩塌地區位於苗栗縣卓蘭鎮，屬大安溪流域，主流為老庄溪，其保全對象為十八股聚落與食水坑聚落。十八股地區位於崩積層上方，而崩積層係前期沿順向坡層面滑動之平面型滑動之產物。區位內具有構造物裂縫、地表裂縫與陷落、地表排水路徑、坡面滲水、建物災損等。本區為崩塌地潛勢區位，周邊主要為種植果樹之土地利用，因此將樣點設置於果園內與鄰近之森林地中，以瞭解土地利用差異是否對土壤性質產生影響。

5. 食水坑崩塌地

食水坑崩塌地位於苗栗縣最南端之卓蘭鎮上新里 11 鄰地區，位處於老庄溪上游段之北側山坡地，為大安溪中游地區之典型山坡地農業作物生產區。土地多屬私有及承租地，坡地上種植梨樹 (*Pyrus pyrifolia*)、柑桔 (*Citrus reticulata*) 為主。受 2006 年 6 月 9 日之豪雨影響，邊坡發生大規模地層滑動，導致附近房屋傾倒或位移受損有 16 戶。本區水平向周邊無森林地可供取樣，因此僅於崩塌地內進行土壤樣點設置，相關分析結果與十八股地區進行整合性討論。

6. 鶴山廟上方崩塌地

本點位位於南投縣鹿谷鄉和雅村，該區因 2009 年 8 月莫拉克颱風，累計雨量達 780 mm，沖刷上方坡面導致土石大量崩落。該崩塌地崩塌面積約 2 ha，其影響範圍為 18.4 ha。主要工程有擋土牆、坡址保護工、截水溝、集水井、掛網植生等工程。鶴山廟上方崩塌地周邊主要為孟宗竹林 (*Phyllostachys edulis*) 與茶園之土地利用，故此點位主要探討崩塌地土壤性質與周邊不同土地利用之差異。

7. 瀨頭崩塌地

本點位位於嘉義縣番路鄉公興村龍美聚落南側。本區於 2009 年 8 月莫拉克颱風期間形成大規模崩塌，主要崩塌地位於龍美 1 鄰道路下邊坡，崩塌面積約 4.48 ha。相關工程包含擋土牆、截水溝、噴漿溝排水、掛網噴植等。樣點設置主要探討崩塌地與周邊森林地的土壤性質差異，據以瞭解崩塌地土壤的恢復狀況。

8. 藤枝林道 3.5 K 崩塌地

藤枝林道 3.5 k 下方走山崩塌地區位於高雄市六龜區興龍村舊潭部落上方。2009 年 8 月因莫拉克颱風登陸侵襲臺灣，造成本區的崩塌災害。工程地被主要以坡面整坡、縱橫向排水設施、坡腳設置導流牆、打樁編柵及掛網植生等。目前植生復育狀況良好，主要為山黃麻 (*Trema tomentosa*) 及相思樹二種林相，本區樣點即以此二樹種之林下土壤進行設置，目的為探討不同樹種對於崩塌地土壤的影響情況，藉此瞭解崩塌地植生與土壤性質、水資源涵養之相互關係。

9. 大鳥崩塌地

大鳥崩塌地位於台東縣大武鄉大鳥村，因 2009 年莫拉克颱風侵襲而造成大型崩塌災害，大量土砂泥流下移進入部落民宅及巷道內。崩塌的面積約 6.8 ha，其土方量約 300,000 m³，共計 14 戶房舍遭土石流淹埋，道路毀損約 200 m，農地遭掩埋約 5 ha。整治方式為土方疏濬及階段整坡施作。本區樣點同樣針對崩塌地及周圍

森林地進行設置，以瞭解崩塌地土壤的恢復狀況。

(II) 研究方法

1. 土壤取樣

本研究採取分區取樣的方式，於各崩塌地中針對崩塌地、森林地、果園、茶園及竹林等不同土地利用型態先進行區域性劃分，再於各區中設立 3-6 個樣點進行土壤取樣，主要分為擾動性土壤取樣及非擾動性土壤取樣二者。

(1) 擾動性土壤取樣

擾動性土壤樣本用於土壤化學性質分析，及物理性質中的土壤質地與水分係數，須使用開放式採樣器（土鑽、圓鋤、鐵鏟）將土壤取出並裝入夾鏈袋中。本研究中採取多點混土的方式，於各樣點周圍表層土壤（0-10 cm）進行大面積的取樣，以獲得該區域較具代表性的土壤化學性質樣本。

(2) 非擾動性土壤取樣

非擾動性土壤樣本用於分析土壤總體密度、孔隙率及體積含水率等，因須避免取樣時因擠壓導致土壤改變原始狀況。本研究採取土芯取樣法，於各樣點以人為施力的方式將 100 及 200 cm³ 之金屬土芯均勻擊打至表層土壤中（0-10 cm），再以鏟子將周圍土壤挖開後，以刮刀削平取出。

2. 土壤物理性質分析

(1) 質地分析

以比重計法進行測定，分析方法依據土壤分析手冊（中華土壤肥料學會，1995），比重計讀值之溫度高於 19.4°C，則每增加 1°C 須增加讀值 0.3，反之每降低 1°C 須減讀值 0.3。

$$\text{砂粒 (\%)} = 100 - P_s / W \times 100$$

$$\text{粘粒 (\%)} = P_c / W \times 100$$

$$\text{粉粒 (\%)} = 100 (\%) - \text{砂粒 (\%)} - \text{粘粒 (\%)}$$

P_s ：比重計初次讀值

P_c ：靜置 2 小時後比重計讀值

W ：土壤重量 (g)

(2) 總體 (容積) 密度及孔隙度

以土芯法進行測定，分析方法依據土壤分析手冊 (中華土壤肥料學會，1995) 及土壤分析實驗手冊 (李芳胤、陳士賢，2007)。一般土壤土粒密度 (真比重) 約 2.6-2.7 g cm⁻³，實務上多直接取平均值 2.65 g cm⁻³ 而不進行測定。

$$\text{總體密度 (g cm}^{-3}\text{)} = \text{烘乾土壤重} / \text{金屬土芯之容積}$$

$$\text{孔隙度 (\%)} = 100 (\%) - (\text{土壤總體密度} / \text{土壤土粒密度}) \times 100\%$$

(3) 體積含水率及水分係數

土壤體積含水率以重量法進行測定。分析方法依據土壤分析手冊 (中華土壤肥料學會，1995)、行政院環保署環境檢驗所 (NIEA S280.62C)，及土壤分析實驗手冊 (李芳胤、陳士賢，2007)。

$$\text{體積含水率 (\%)} = (\text{風乾土壤重} - \text{絕乾土壤重}) / \text{絕乾土壤重} \times 100\%$$

$$\text{水分係數 (MF)} = 1 + \text{重量水分含量} / 100$$

3. 土壤化學性質分析

(1) pH 值

使用電極法進行測定。分析方法依據行政院農業委員會農業試驗所 (TARI S501.1B)，及行政院環保署環境檢驗所 (NIEA S410.62C)，以土水比 1:1 進行測定。

(2) 電導度

使用電導度計法進行測定。分析方法依據行政院農業委員會農業試驗所 (TARI S101.1B)，並將土水比改為飽和土壤萃取液。

(3) 碳氮比

使用燃燒／紅外線測定法進行測定。分析方法依據行政院農業委員會農業試驗所 (TARI S201.1B)，及土壤分析手冊 (中華土壤肥料學會，1995)。

$$\text{碳氮比} = \text{C \%} / \text{N \%}$$

(4) 有機質含量

使用燃燒／紅外線測定法進行測定。分析方法依據行政院農業委員會農業試驗所 (TARI S201.1B)，及土壤分析手冊 (中華土壤肥料學會，1995)。

$$\text{有機質含量 (\%)} = \text{總有機碳 (\%)} \times 1.724$$

(5) 陽離子交換容量 (CEC)

使用醋酸銨法 (NH₄OAc) 進行測定。分析方法依據行政院環保署環境檢驗所 (NIEA S201.61C)、及土壤分析實驗手冊 (李芳胤、陳士賢, 2007)。

$$\text{CEC (cmolc kg}^{-1}\text{)} = \text{硫酸之滴定用量 (ml)} \times \text{N (硫酸之當量莫耳數)} \times (100/\text{土樣重}) \times 2$$

4. 統計分析

本實驗統計分析以 SPSS 20 軟體進行，位點間各樣區差異採取獨立樣本 t-test (如崩塌地與森林地)，及 One-way ANOVA (三個以上土地利用) 搭配 LSD 事後檢定進行。若前述之假設檢定未通過 (常態性、同質性)，則改以 Wilcoxon signed-rank test (二個樣本) 或 Kurskal-Wallis 檢定 (三個以上) 等無母數分析方法。

III、結果與討論

(I) 崩塌地植生復育後土壤恢復狀況

針對崩塌地植生復育後的土壤性質恢復狀況，可藉由個採樣點崩塌地區與相鄰森林地的土壤理化性質檢測來進行探討。相關位點包括蘇樂、砂崙仔、瀨頭及大鳥等崩塌地 (表 2)。首先經由土壤三角圖可知，各處崩塌地與森林地的質地皆不相同，蘇樂及大鳥二地的崩塌地砂粒含量較森林地高，黏粒含量相對較低；然而砂崙仔及瀨頭二地則出現相反的情況。一般來說，崩塌過後土壤的砂粒含量普遍會較高而黏粒會較少，與土壤結構鬆散而細顆粒較易受到沖蝕流失有關 (林俐玲與黃國鋒, 2011)。而在土壤物理性質上，僅大鳥地區之崩塌地與森林地於總體密度及孔隙率出現差異，其餘地區差異則不顯著，顯示崩塌地在水資源涵養的功能上於多數地區已逐漸恢復。然而土壤孔隙由竹下敬司 (1985) 依土壤水分勢能與孔隙直徑關係進行分類，可分為大孔隙、粗孔隙 (Coarse pore；包含中孔隙與小孔隙) 及細孔隙。大孔隙由於皆為重力水，滲透及流失速度皆快；細孔隙因毛管吸力作用而難以移動；粗孔隙則因介於二者間而較具水資源涵養之效益。此外，洪志遠與陳明杰 (2009) 亦指出，由於土壤中孔隙曲折、不連續及空氣陷入等現象，大部分的大孔隙及中孔隙並無助於水分的傳導。本研究目前僅以總孔隙率進行水資源涵養的初步推估，未來期望能針對粗孔隙率進行進一步之分析。

在土壤化學性質部分，可發現有機質、CEC 及孔隙率除了大鳥地區外，其餘各樣點內皆呈現正相關。由於地表腐質層的有機質可以改良土壤、促進團粒狀結構的產生 (曾俊偉、陳明杰, 2016)，高含量的有機質通常伴隨著較高的土壤孔隙率，

且因其吸附養分的能力強而亦具有較高的陽離子交換容量 (CEC)。林俐玲等 (2009) 於南投九份崩塌地的研究顯示，土壤有機質含量僅 0.5-5%。而本研究中僅蘇樂地區崩塌地之有機質較森林地高，且差異達三倍之多 (崩塌地約 16.29%)，顯示該地植群演替可能相當快速，大量的枯枝落葉分解為土壤提供豐富的有機質。此外，蘇樂及砂崙仔森林地之電導度顯著較高，顯示土壤礦質化作用較強。而碳氮比部分於各地區皆以森林地較崩塌地為高，土壤碳氮比與微生物發酵分解能力有關，適合植物生長之碳氮比約 20-30，過高的碳氮比如瀨頭森林地 (40.77) 可能使土壤微生物生長較緩慢。整體來說，土壤化學性質受地上部植群的影響較強，不同區域因植群種類及演替速度差異而趨勢不一，除了瀨頭地區已逐漸恢復外，蘇樂地區之崩塌地有機質含量遠較森林地高，顯示土壤能穩定地涵養養分。

表 2 崩塌地植生復育後與森林地土壤理化性質差異表

Table2 Soil physical and chemical properties of landslides and forest areas

測值\崩塌地	蘇樂 崩塌地	蘇樂 森林地	砂崙仔 崩塌地	砂崙仔 森林地	瀨頭 崩塌地	瀨頭 森林地	大鳥 崩塌地	大鳥 森林地
砂粒 (%)	81.44 (0.03)	62.11 (0.03)	68.14 (0.02)	83.47 (0.02)	58.87 (0.07)	70.83 (0.08)	61.42 (0.14)	48.63 (0.06)
粉粒 (%)	13.53 (0.03)	22.26 (0.03)	17.44 (0.02)	9.87 (0.01)	19.34 (0.02)	14.16 (0.03)	20.29 (0.08)	22.72 (0.03)
黏粒 (%)	5.03 (0.01)	15.63 (0.01)	14.42 (0.00)	6.66 (0.02)	21.79 (0.05)	15.01 (0.05)	18.29 (0.06)	28.65 (0.09)
質地 種類	壤質 砂土	砂質 壤土	砂質 壤土	壤質 砂土	砂黏 壤土	砂質 壤土	砂質 壤土	砂黏 壤土
總體密度 (g m ⁻³)	0.79 (0.33)	1.03 (0.16)	0.94 (0.46)	0.50 (0.32)	1.35 (0.30)	1.20 (0.19)	0.81 (0.04)	0.95* (0.02)
孔隙率 (%)	70.28 (0.13)	61.20 (0.06)	56.99 (0.17)	81.22 (0.12)	48.79 (0.11)	54.77 (0.07)	69.38* (0.02)	64.14 (0.01)
水分係數	1.11 (0.04)	1.08 (0.06)	1.23 (0.13)	1.19 (0.07)	1.03 (0.01)	1.02 (0.00)	1.03 (0.02)	1.04 (0.02)
體積含水率 (%)	18.31 (8.57)	19.82 (5.68)	16.99 (5.31)	21.39 (11.38)	22.29 (8.70)	24.48 (4.77)	13.74 (6.27)	19.89 (10.46)
保水量 ⁽¹⁾ (m ³ ha ⁻¹)	2,175 (374)	1,908 (241)	1,935 (522)	2,436 (357)	1,464 (343)	1,643 (216)	2,073* (126)	1,924 (127)
pH 值	6.65 (0.14)	6.75 (0.08)	6.08 (0.07)	7.17*** (0.08)	7.62* (0.07)	6.31 (0.41)	5.70*** (0.64)	4.72 (0.27)
電導度 (μS cm ⁻¹)	421.33 (40.20)	897.67*** (56.72)	138.17 (19.62)	394.67** (62.52)	87.50 (96.70)	115.63 (11.05)	135.56 (54.23)	99.61 (26.44)
有機質 (%)	16.29*** (1.60)	5.16 (0.18)	2.70 (0.13)	17.18*** (0.34)	1.48 (1.38)	2.55 (0.54)	2.72 (0.81)	4.37*** (0.90)
C/N ratio	21.03 (1.47)	27.79** (0.55)	23.72 (1.23)	32.59* (5.20)	17.35 (5.76)	40.77* (10.77)	8.03 (3.23)	11.24* (2.84)
CEC (cmolc kg ⁻¹)	56.46*** (4.10)	33.17 (1.46)	35.28 (2.94)	59.66*** (1.48)	22.95 (5.82)	26.48 (13.44)	13.96 (2.28)	18.23*** (2.26)

註：(1) 保水量為利用總孔隙率搭配地表 30 cm 土壤計算而得。統計檢定採用獨立樣本 t-test 於各位點內進行分析。(*) 表示 $P<0.05$ 、(**) 表示 $P<0.01$ 、(***) 表示 $P<0.001$ 。粗體為顯著較高者。有機質、C/N ratio、CEC：n=6；其餘測值：n=3。

(II) 土地利用及植群差異

在土地利用差異上，十八股地區的造林地及作物區在各項土壤理化性質上並無顯著差異，顯示該地區的農耕行為對於土壤性質的影響較輕，不過仍可看出在電導度、有機質、碳氮比及 CEC 的部分相對於造林地為高，而在鶴山廟地區亦可發現，人為耕種的茶園在電導度、有機質及 CEC 等顯著較鄰近竹林地或崩塌地要高，土壤物理性質則較無顯著的差異，顯示人為耕種主要透過施肥的方式增加了土壤

的有機質及無機養分，進而改變土壤的化學性質 (表 3)。此外，由於茶園地區中植體根系會大量分泌有機酸以交換土壤養分，因此導致土壤 pH 值大幅降低 (3.11)。惟茶樹適合生長在 pH 4.0-5.5 的土壤環境中，過酸的環境可能導致溶磷細菌的數量減少，進而降低了土壤中磷的有效性 (張鳳屏與楊秋忠，1994)。

而在植生復育的樹種差異上，透過藤枝林道地區的土壤性質檢測可發現，山黃麻林下土壤的電導度、有機質及 CEC 皆較相思樹要高，顯示樹種差異可能導致其根系分泌物以及對土壤養分的吸收或釋放有所不同，進而使土壤性質主要在化學特性上存在差異。惟相關測值缺乏植生復育前的土壤性質測定，在時間序列上無法斷定其確切變化，仍有待未來相關實驗提供更精準之資料以進一步探討崩塌地植生復育後對土壤理化性質的影響。

(III) 崩塌地植生復育後土壤水資源涵養

綜以各位點而言，30 cm 之表土可入滲最高水量 (即表 2、3 之保水量) 於北部崩塌地 (蘇樂、砂崙仔及大溪事業區) 相對較高，而南部 (藤枝林道) 相對較低，中部 (鶴山廟、食水坑、十八股及瀨頭) 及東部 (大鳥部落) 之崩塌地則介於其中 (圖 1)。北高南低的趨勢除了因各區土壤有機質含量差異外，亦與其土壤質地組成相關，北部崩塌地土壤砂粒所占比例普遍較高，而粒徑較大之砂粒亦有助於水分的入滲。此外，觀察各位點可發現皆存在崩塌地測值變異較非崩塌地為高的情況，顯示崩塌地的土壤受到外力擾動後，雖隨時間推移及植生復育的幫助下逐漸趨於穩定，然而在土壤的均質性上仍較非崩塌地為低。

除了土壤孔隙率及入滲最高水量於各位點 (大鳥地區以外) 崩塌地及森林地無顯著差異外，在風乾土所測定的水分係數及現地土壤的體積含水率上，亦無觀察到顯著的差異，顯示崩塌地與森林地在表土的水資源涵養上，可能已較為相近，惟仍須仰賴後續針對土壤粗孔度的實驗進行更進一步之確認。而在土壤養分涵養上，森林地由於大量的枯枝落葉形成腐植質，使土壤有機質含量普遍較高，且因礦質化作用旺盛，無機養分的含量也明顯較崩塌地高。部分區域 (如蘇樂崩塌地) 土壤有機質含量遠高於鄰近之森林地，推測可能該地的演替速度較快，枯落物的累積迅速。如岳琳豔等 (2015) 於長白山針對溫帶森林不同演替階段的土壤研究中發現，隨演替的進行，包括土壤全碳、總有機碳及全氮等含量皆會逐漸提高。

表 3 不同土地利用與森林樹種之土壤理化性質差異表

Table3 Soil physical and chemical properties of different land-uses and plant species

測值\崩塌地	十八股 作物區	十八股 造林地	藤枝林道 相思樹	藤枝林道 山黃麻	鶴山廟 崩塌地	鶴山廟 竹林	鶴山廟 茶園
砂粒(%)	63.81 (0.01)	60.61 (0.02)	51.24 (0.02)	52.31 (0.03)	63.04 (0.02)	62.27 (0.01)	59.05 (0.01)
粉粒(%)	21.75 (0.03)	22.30 (0.04)	22.93 (0.03)	21.63 (0.04)	20.89 (0.01)	25.51 (0.04)	33.45 (0.01)
黏粒(%)	14.44 (0.02)	17.09 (0.02)	25.83 (0.05)	26.06 (0.01)	16.07 (0.01)	12.23 (0.03)	7.50 (0.02)
質地種類	砂質 壤土	砂質 壤土	砂黏 壤土	砂黏 壤土	砂質 壤土	砂質 壤土	砂質 壤土
總體密度 (g m ⁻³)	1.17 (0.08)	1.11 (0.24)	1.21 (0.09)	1.41 (0.21)	0.46 (0.28)	0.49 (0.15)	0.49 (0.10)
孔隙率 (%)	55.80 (3.05)	58.00 (9.04)	54.54 (3.39)	46.91 (7.78)	51.67 (13.65)	60.24 (11.49)	61.19 (1.09)
水分係數	1.03 (0.03)	1.02 (0.01)	1.03 (0.01)	1.03 (0.00)	1.04 ^b (0.00)	1.12^a (0.01)	1.15^a (0.02)
體積含水率 (%)	10.33 (5.67)	5.56 (1.92)	12.00 (2.29)	13.41 (2.57)	41.56 (10.18)	42.29 (10.94)	42.29 (10.94)
保水量 ⁽¹⁾ (m ³ ha ⁻¹)	1,674 (90)	1,740 (270)	1,636 (102)	1,407 (223)	1,550 (410)	1,807 (345)	1,836 (33)
pH 值	5.04 (1.25)	4.82 (0.24)	5.72 (0.06)	5.13 (0.03)	4.64^a (0.09)	3.81 ^b (0.11)	3.11 ^c (0.23)
電導度 (μS cm ⁻¹)	305.00 (140.15)	134.67 (109.86)	87.23 (1.72)	147.77^{**} (11.33)	539.33 ^b (26.73)	281.23 ^b (95.53)	1148.67^a (430.98)
有機質 (%)	4.05 (0.94)	2.26 (0.86)	0.73 (0.01)	1.15^{***} (0.15)	2.63 ^b (0.21)	7.43 ^{ab} (1.91)	10.52^a (0.80)
C/N ratio	27.31 (4.31)	18.50 (4.04)	1.22 (0.17)	1.42 (0.20)	22.09^a (2.97)	17.64 ^b (1.53)	15.47 ^b (0.96)
CEC (cmol _c kg ⁻¹)	123.56 (73.68)	76.41 (52.89)	8.25 (0.54)	10.01[*] (0.68)	17.42 ^c (1.67)	31.66 ^b (3.80)	41.57^a (7.56)

註：(1) 保水量為利用總孔隙率搭配地表 30 cm 土壤計算而得。統計檢定於十八股及藤枝林道地區採用獨立樣本 t-test 進行分析，(*) 表示 $P < 0.05$ 、(**) 表示 $P < 0.01$ 、(***) 表示 $P < 0.001$ 。鶴山廟則以 ANOVA 及 LSD 或無母數分析進行 ($\alpha = 0.05$)。粗體為顯著較高者。有機質、C/N ratio、CEC：n=6；其餘測值：n=3。

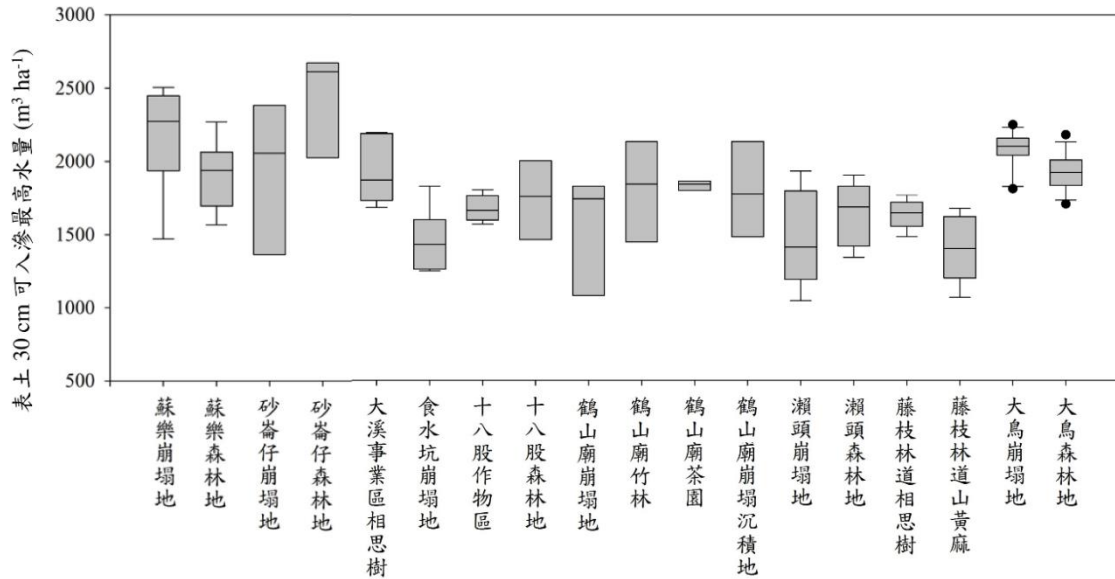


圖 1 各研究樣區之表土可入滲最高水量盒鬚圖。

Figure 1 Box plot comparison of the highest water storage volume of topsoil at different study sites.

IV、結論與展望

本研究透過全臺共 9 處崩塌地的大範圍試驗，結果顯示各位點崩塌地土壤性質狀況恢復良好，多數位點間崩塌地與鄰近未崩塌之森林地的物理性質差異皆不顯著，顯示邊坡穩定已達相當之成效。而化學性質部分，多數崩塌地區土壤養分仍較森林地為低，顯示土壤養分之維持仍有待時間的積累。坡地土壤性質受地表植生、環境因子及人為干擾等影響，其物理化學性質變化頻繁，尤其在地表大量沖蝕的崩塌地中，要能確切建立土壤與植生的交互關係並不容易。無論土壤水分或養分的涵養皆為持續性的動態變化，除了空間分布上的測定外，實有長期監測之必要性，方能精確瞭解崩塌地在植生工程施作前，及施作後植生演替不同階段中的土壤性質變化。相關研究成果除了可提供未來植生工程改善的環境依據外，亦可應用於臺灣水土資源保育的發展與評估。

V、參考文獻

- 中華土壤肥料學會 (1995) 土壤分析手冊。台灣省農林廳。489 頁。
- 竹下敬司 (1985) 森林土壤と水源かん養機能。森林立地 5(2):19-26.
- 行政院農業委員會農業試驗所 (2013) 土壤電導度測定方法 (TARI S101.1B)。
- 行政院農業委員會農業試驗所 (2013) 土壤有機質測定方法—燃燒／紅外線測定法 (TARI S201.1B)。
- 行政院農業委員會農業試驗所 (2013) 土壤酸鹼值 (pH 值) 測定方法—電極法 (TARI S501.1B)。
- 行政院環境保護署 (1994) 土壤中陽離子交換容量—醋酸銨法 (NIEA S201.61C)。
- 行政院環境保護署 (2009) 土壤酸鹼值 (pH 值) 測定方法—電極法 (NIEA S410.62C)。
- 行政院環境保護署 (2012) 土壤及底泥水分含量測定方法—重量法 (NIEA S280.62C)。
- 李芳胤、陳士賢 (2007) 土壤分析實驗手冊。新文京開發出版社。416 頁。
- 岳琳豔、鄭俊強、韓士傑、楊建華、耿世聰、陳志傑、張雪、谷越 (2015) 長白山溫帶森林不同演替階段土壤化學性質及微生物群落結構的變化。Chinese Journal of Ecology 34(9): 2590-2597.
- 林俐玲、黃國鋒 (2011) 台灣中部崩場地土壤水份滲透特性之研究。坡地防災學報 10(1): 27-41.
- 林俐玲、蔡義誌、王永琦、馮美禎 (2009) 崩場地植生復育與土壤性質之調查研究。坡地防災學報 8(1): 25-39.
- 洪志遠、陳明杰 (2009) 應用張力滲透計於林地土壤孔隙水通量之探討。中華林學季刊 42(4): 541-555.
- 張鳳屏、楊秋忠 (1994) 茶園土壤中溶磷細菌生態調查及其應用。微生物肥料之開發與利用研討會專刊 44: 115-129.
- 曾俊偉、陳明杰 (2016) 淺談土壤孔隙與水資源涵養之關係。林業研究專訊 23(6):84-87.

大規模崩塌潛勢區野溪河道沖刷深度觀測之研究

廖雯慧¹ 李正鈞¹ 范世億¹ 林柏瑋² 張建輝² 詹勳全^{2*}

【摘要】集水區邊坡常因坡腳受野溪侵蝕淘刷而造成崩塌，加以野溪多屬間歇性河川，流量豐枯懸殊，颱風豪雨期間河床劇烈變動，洪峰流量對河床之沖刷程度相當可觀；溪流沖刷觸及邊坡坡腳，容易造成邊坡不穩定、進而引發快速滑動，因此大規模崩塌潛勢區野溪河道沖刷深度觀測是山坡地防災及預警的重要課題。本研究蒐集並分析野溪河道沖刷類型、影響因子、深度評估及觀測技術等相關資料，彙整並篩選出 Lacey、Blench、Holmes、水規所、Blodgett J.C.及生態工法分析模式及設計要點研究等 6 種適用於野溪河道沖刷深度推估之經驗公式，並用於觀測結果推估比較分析。而為了改善現有觀測儀器於野溪河道觀測上之困難，蒐集現有沖刷觀測儀器之文獻，分析評估後採用「無線追蹤粒子沖刷觀測技術」進行野溪河道一般沖刷觀測，於南投縣仁愛鄉眉溪及國姓鄉北山坑溪完成三處沖刷觀測站建置，蒐集研究樣區汛期期間之現場水文水理及現地沖刷資料，進行沖刷深度推估，並依推估結果挑選較適沖刷公式進行敏感度分析，分析結果顯示以 Lacey (1930) 之沖刷深度推估經驗公式之誤差最小，以代表粒徑及流量兩因子影響沖刷深度最顯著，後續可朝此方向進一步發展台灣本土化之沖刷推估公式。

【關鍵詞】野溪、無線追蹤粒子、沖刷深度推估。

Measurement and Estimation of General Scour in Riverbed of Upstream Creeks

Wen-Huil Liao¹ Zheng-Jun Li¹ Shih-Yi Fan¹ Po-Wei Lin²

Chien-Hui Chang² Hsun-Chuan Chan^{2*}

【Abstract】 This study collected references and analyzed types, influencing factors, estimation formulas, and measurement techniques of the channel scours. The empirical

¹行政院農業委員會水土保持局。

Senior Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

²國立中興大學水土保持學系，通訊作者。電子郵件: hcchan@nchu.edu.tw

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan. Corresponding Author. E-mail: hcchan@nchu.edu.tw

estimation formulas of Lacey, Blench, and Holmes etc. were selected to estimate the scour depth and the results were compared with the measured data. In order to improve the efficiency of the existing scour depth measuring technologies, the existing estimation methods were evaluated, and the "float-out device" was selected as the scour depth measurement method. Then, three monitoring stations were built at the Mei creek and the Beishan Hang creek to collect the scouring data during flood season. The related geomorphology data and the hydrographic and hydrologic data were used to estimate the scour depth of the event. The results show that the Lacey (1930) formula has the least error among all selected formulas. Among all influencing factors, the discharge of stream and sediment size play an important role in estimating the scour depth.

【Key words】 Upstream creeks, Float-out device, Estimation of general scour depth.

I、前言

臺灣的河川屬於間歇性河川坡度變化較大，加上位於副熱帶季風地區，每年夏秋季常有颱風侵襲，挾帶相當大量的雨量，山區野溪河道遭受強烈水流沖刷使河床刷深，導致設置於河道之構造物（如：護岸、固床工等）基礎裸露、甚至破壞，造成人民生命財產重大損失。因此，若能即時得知河床沖刷深度，則有助於預警疏散及防洪等工作，減少河道周邊保全對象之危險。

本研究考慮到操作人員之安全性堪慮，於現地進行一般沖刷深度觀測時極為困難，為了改進現地沖刷觀測之技術，以無線追蹤粒子觀測技術，於現地觀測一般沖刷深度，藉由量測現地之水文水理資料，配合現有之沖刷深度推估經驗公式進行分析探討，確認該觀測技術應用於野溪河道之可行性，並將觀測結果與經驗公式推估結果進行比較，篩選適用於試驗區之沖刷深度推估公式，以作為往後構造物之興建考量依據，並期望日後將此觀測技術應用於山區野溪沖刷預警之用途。

II、文獻回顧

(I)沖刷觀測技術

本節蒐集現有不同沖刷觀測技術，彙整介紹各項觀測技術，並分析其優缺點，作為野溪河道沖刷觀測技術改進之參考。依據儀器架設方式可分為固定式與非固定式，固定式類型之儀器需透過固定附載於既有構造物，可能無法承受野溪河道洪水期間石塊與漂流木之衝擊，固定式儀器共有七種，分別為超音波沖刷測深計、

光時域反射技術 (Time Domain Reflectometer, TDR)、磁性滑動套環測深計、重錘式沖刷測深計、溫度式沖刷測深計、光纖光柵沖刷監測系統及水土界面儀；非固定式儀器則有高效率沖刷磚柱與無線追蹤粒子兩種。

超音波沖刷測深計 (圖 1-a) 其原理主要藉由超音波方式直接讀取沖刷深度，接著由接收器收取信號後解碼、傳輸，進而得知河床沖刷深度 (林其穎，2011)。光時域反射技術原本應用於農業領域，為測得土壤含水量，以及利用量測電磁波沿土壤內已知長度導線傳輸所需時間計算得出該土層土壤之介電常數，其原理示意如圖 1-b (林其穎等，2011)。磁性滑動套環測深計 (圖 1-c) 為常見的埋入型沖刷監測設備，觀測方式係於橋墩周圍欲量測沖刷深度處設置內含磁通開關之長套管，放置磁性套環於其上滑動，河床面受沖刷下降時套環跟著改變高度，以電磁感應原理得知沖刷深度變化。重錘式沖刷測深計 (圖 1-d) 之原理是藉由重錘自由落下時牽引一捲取器，此捲起器內有一數位編碼器，當此重錘由馬達上下捲動時，編碼器便有一數位訊號輸出，經由微電腦控制器讀取此資料，並計算得出重錘上升下降之距離。此外，亦有改良重錘式設計之防撞式沖刷監測設備，其原理同重錘式沖刷計，將鋼纜改成鋼管，利用鋼管本身的自重，隨著河床沖刷下降得知沖刷深度 (林呈等，2007)。溫度式沖刷測深計 (圖 1-e)，係利用河水與砂土層溫度的不同來判斷河床與水的界面以得知沖刷深度，並可利用河床深度之溫差效應得知河川水位 (林詠彬等，2005)。光纖光柵沖刷監測系統 (圖 1-f) 係於懸臂梁安裝複數個不同波長之光纖光柵感測器並予以串接，依懸臂梁受荷載之特性，假設水流為一分佈載重作用於光纖沖刷監測系統之受力面，河床底面可視為固定支承端，則於河床上方最接近河床底面之光纖光柵所量測之應變值相較於其他光纖光柵量測值為大，由此應變量測最大值之光纖光柵位置可推估河床沖刷深度。此後，為應用於現地量測，將其改良，於鐵管上挖洞，放入類似按鈕的物件，內有小鐵片作成懸臂梁構件，其上接有光纖光柵感應器，當水流沖擊按鈕物件時，光纖感測器會感受到懸臂梁構件受壓變形，而產生不同於未受水流沖擊之訊號 (林詠彬等，2005)。水土界面儀 (圖 1-g) 為直接數位式觀測，主要裝置包含感測尺與資料蒐集器，其量測精度高、訊號接收穩定，不受濁度或流速波動之影響。由於水之電阻值小於土砂之電阻值，若電極間之水體由土砂所取代，其測值立即出現顯著變化，亦即相當簡明地分辨出土水界面，從而得知河床沖刷深度變化，但於現地應用上，儀器安全之確保及觀測穩定度之問題仍有待克服 (王傳益等，2014)。高效率沖刷磚柱 (圖 1-h) 將預先編碼之建築用磚塊 (尺寸為 20 cm×10 cm×5.5 cm)，以挖土機配合中空鋼棒於枯水季或颱風前埋入河床，待洪水後或來

年枯水季再行開挖，依磚塊流失數目即可獲知短期最大沖刷深度（盧昭堯等人，2014）。無線追蹤粒子（圖 2）之主要原理為利用裝置之無線電信號發射功能，埋置於河床靜止時不會受擾動而發出信號，表示該處尚未遭受洪水沖刷；而當裝置經水流沖刷浮出時，裝置內建之部件觸動本身的發報系統，因此發送信號碼，接著再經由接收器收取信號並加以解碼，進而獲得河床動態沖刷深度；此技術可觀測動態沖刷深度之變化，且能透過遠端即時得知沖刷資訊（盧昭堯等，2014）。

本研究為即時獲得沖刷觀測資訊，沖刷觀測技術之選用需考量各項現場條件及自然環境之不確定因素，且於颱風期間進行現地人工量測具高度危險性，因此本研究根據各項沖刷觀測技術之成本、安裝設置難易度、動態監測、重複使用性及回淤量測等條件，進行野溪河道沖刷觀測方法之適用性評估比較列如表 1，由該表可知，無線追蹤粒子於野溪河道沖刷觀測之適用性較理想，因此本研究採用該方法並加以改良，以量測現地之即時沖刷深度。

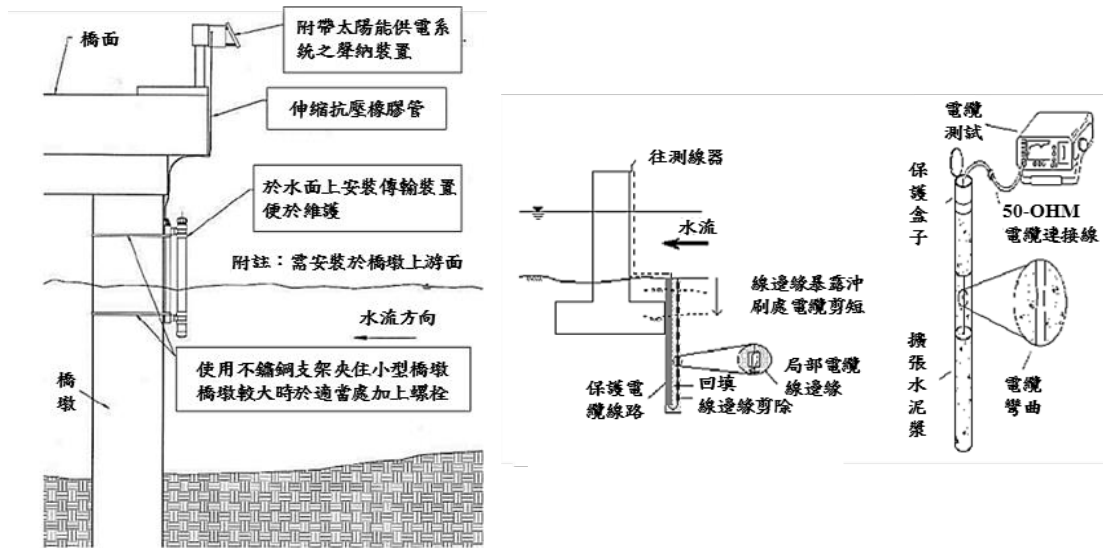
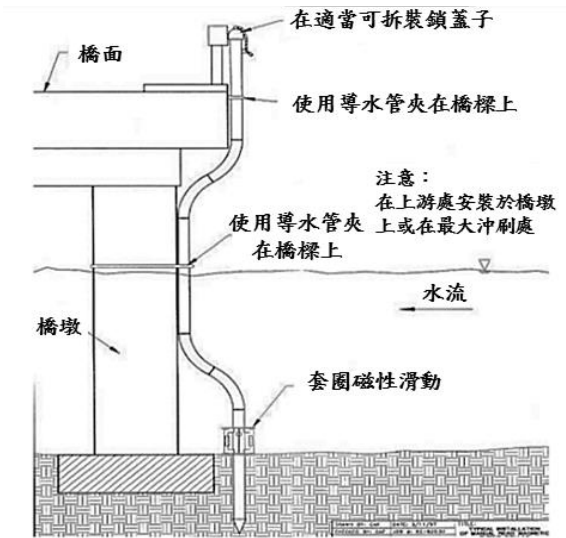
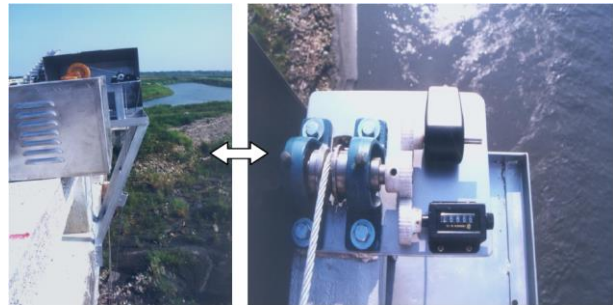


圖 1 沖刷觀測儀器

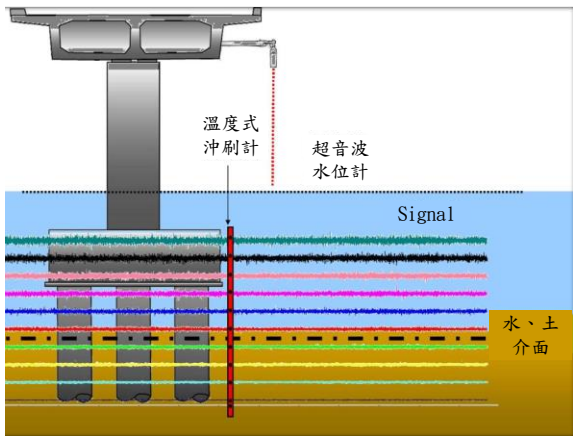
Fig.1 Technologies of scour depth measuring.



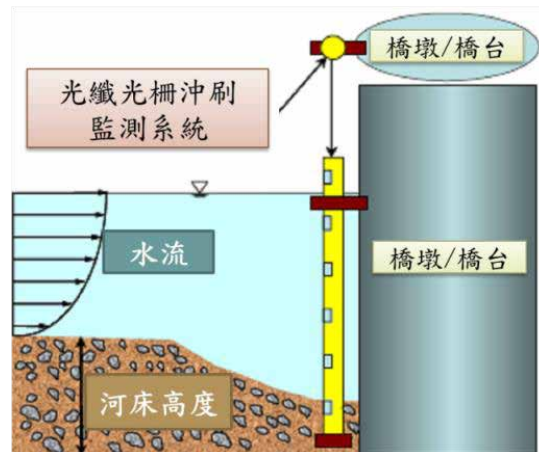
(c) 磁性滑動套環示意圖



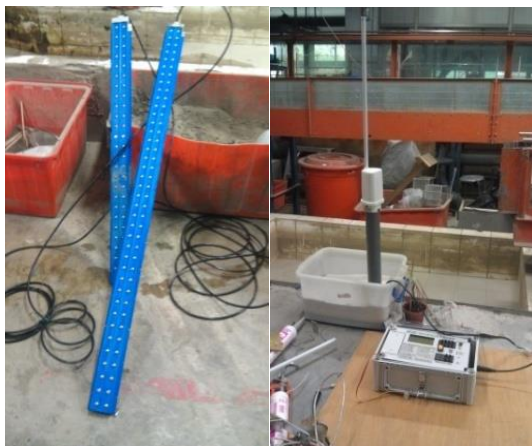
(d) 重錘式沖刷測深計



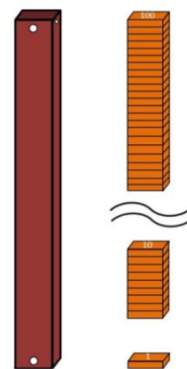
(e) 溫度式沖刷測深計示意圖



(f) 光纖光柵沖刷監測系統示意圖



(g) 水土界面儀



(h) 沖刷磚柱及輔助鋼棒

圖 1 沖刷觀測儀器

Fig.1 Technologies of scour depth measuring.

表 1 現有沖刷觀測方法於野溪河道使用之適用性評估比較

Table1 Comparison of different scour measurement techniques

觀測方法	成本	安裝 難易	動態 監測	重複性	回淤 量測	適用性
沖刷磚	○	○	×	×	×	△
無線追蹤粒子	○	○	○	×	△	○
超音波測深計	×	△	△	○	×	×
光時域反射技術 TDR	△	×	△	○	△	△
磁性滑動套環	△	×	△	×	×	×
重錘式測深計	△	×	△	×	×	×
溫度式沖刷測深計	△	×	△	△	△	×
光纖光柵沖刷監測系統	×	×	○	○	△	×
水土界面儀	△	×	△	△	△	△

註：○-Good to use、△-Fair to use、×-Bad to use。

(II) 沖刷深度推估公式

本研究蒐集現有推估一般沖刷深度之經驗公式，根據觀測所需之現地條件及公式之適用範圍進行彙整評估，篩選出較適用於野溪河道一般沖刷深度推估者，列表如表 2。以經驗公式配合現地水文水理資料推估沖刷深度，將此推估結果與現地實測結果分析比較，除了驗證研擬之沖刷觀測技術於野溪河道之可行性，也可從分析探討結果對沖刷深度推估公式進行改進修正，研提更適合臺灣山區野溪河道之一般沖刷深度推估公式，作為相關工程設計之參考。

表 2 一般沖刷深度推估公式彙整表

Table 2 Equations of general scour depth estimation

作者或出處	經驗公式	適用條件	符號說明
Lacey (1930)	$y_{ms} = 0.47 \left(\frac{Q}{f}\right)^{1/3}$	建議 $D_m \leq 1.3\text{mm}$	A=沖刷前之通水斷面積 (m ²) B=水面寬度 (m)
Blench (1969)	$y_{ms} = 1.23 \left[\frac{q^{2/3}}{D_{50}^{1/12}} \right]$	$D_{50} > 2\text{mm}$ ，卵礫石河段	D_{50} = 河床質中值粒徑 (mm)
紐西蘭鐵路 (Holmes, 1974)	$y_{ms} = \frac{y_r V_a K}{\sqrt{(A/B)}}$	橋址處之總沖刷深度 C=1.2 辮狀河川 C=1.0	D_m = 河床質平均粒徑 (mm) Q=流量 (cms)

作者或出處	經驗公式	適用條件	符號說明
水規所 (2008~2010)	$y_{ms} = 2.80 \times \frac{q^{0.80} \times S_0^{0.35} \times \sigma_g^{0.62}}{D_{50}^{0.28}}$	上游來砂充足	q=單寬流量 (cms/m)
		近似順直河段	S ₀ =河道底床之平均坡降 (%)
Blodeggt, J.C. (1986)	$y_{max} = 3.7618D_{50}^{-0.079}$	q = 4.48~23.52 (cms/m) ,	y _{ms} =洪峰附近平均沖刷深度 (m)
		S ₀ = 0.1~1.11 (%) ,	y _r =洪水和低水位之水位差 (m)
生態工法分析模 式及設計要點研 究 (2005)	$y_{max} = 1.74D_{50}^{-0.11}$	σ _g = 5.35~19.96 ,	
		D ₅₀ = 2~136 (mm) 。	
		近似順直河段	f = 1.76D _m ^{0.5}
		河床質非單一種類	K = $\sqrt{\frac{B}{4.83Q^{0.5}}}$
			V _a = C $\left(\frac{Q}{A}\right) \left(\frac{y}{A/B}\right)^{2/3}$ (流速, m/s)
		0.0015m ≤ D ₅₀ , 礫石河段	σ _g = $\sqrt{D_{84}/D_{16}}$ =泥沙粒徑分佈因子

III、研究材料與方法

(I)無線追蹤粒子動態觀測技術

「無線追蹤粒子」河床動態沖刷觀測技術，主要原理係採用 RF (Radio Frequency) 無線電原理，當充電電線（一般採同軸電纜）每秒鐘振動次數越高，在電線內傳送之訊號，就會以無線電波方式，將訊號透過電磁波散傳出去。於無線電數據器之接測範圍內，設置一無線監測端接收訊號記錄，進而利用手機電信 GPRS (General Packet Radio Service) 遠端通訊傳輸相關資料，即可於遠端得知河道現場即時之沖刷資訊。

考量研究樣區觀測特性，粒子可能於埋設時遭受擠壓而損壞，本研究將現有無線追蹤粒子進行改良，採防水及密封性良好之塑膠罐（高 12.5 cm，直徑 9.3 cm）做為外殼，除了儀器本身抗壓能力提升外，配合沖刷砂罐進行埋設時較易操作、不易晃動偏移，且塑膠罐之埋設深度也較球形易於判讀，儀器本身拆卸也較為簡易，改良後之無線追蹤粒子內部構造及零件如圖 2 所示。

河床動態沖刷監測技術示意如圖 3，將內置固定頻率之長距離超高頻雙向收發無線電數據器 (UHF Band Wireless Data Transceiver)、配置磁簧電力控制開關之鹼性電池及自製可指撥 256 碼編碼器 PCB 板之漂浮式設備 (float-out device) 移動端，預先垂直埋設於河床，當洪水發生時，河床受水流淘刷、設備因外部磁鐵

脫離開始充電，漂浮至水流表面後，儀器發送編碼及累積充電時間等訊號，待架設於護岸或橋梁處固定監測端之無線數據器接收，對照其埋設於河床之高程，即可得知颱風時期河床動態沖刷過程。

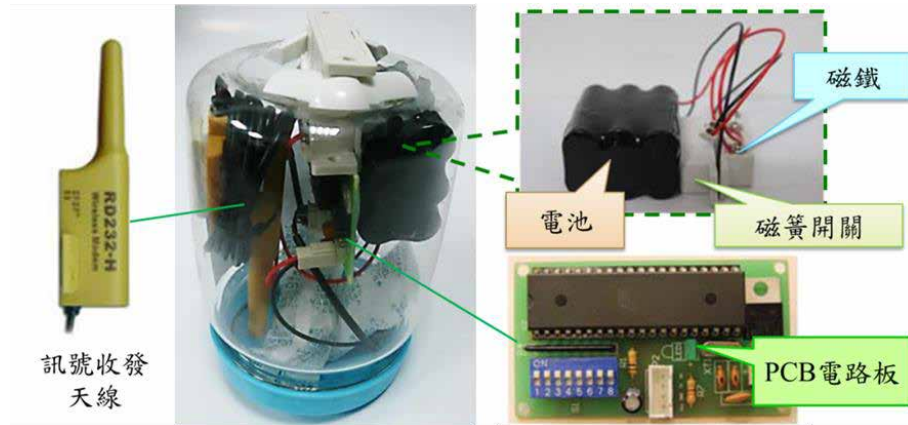


圖 2 「無線追蹤粒子」動態沖刷監測設備

Fig.2 The float-out device

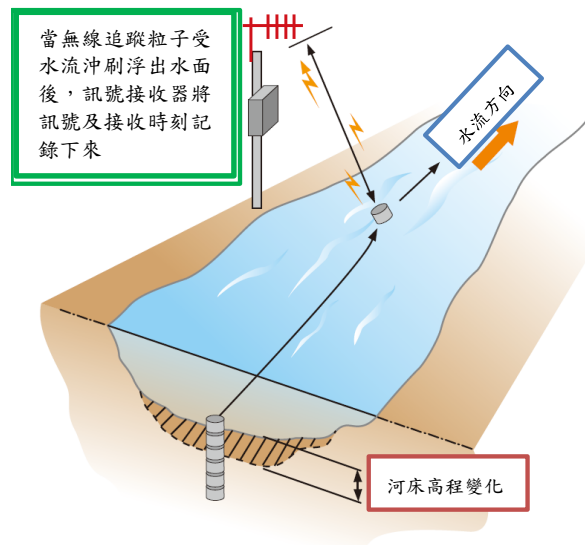


圖 3 河床動態沖刷監測技術示意圖

Fig.3 Schematic diagram of the monitoring technique of float-out device

(II) 研究樣區概述

本研究選定臺灣南投縣仁愛鄉眉溪及國姓鄉北山坑溪等三處河段進行現地沖刷深度觀測，並蒐集相關水文水理資訊以供後續推估比較之用。眉溪研究樣區如圖 4 所示，位於臺灣南投縣仁愛鄉西南側，鄰近埔里鎮市區，面積約 2,396 ha；樣區高程介於 583-1,725 m，平均高程為 996.15 m，主要分布於 600-1,000 m，約佔全區面積 54.60%；其次為 1,000-1,500 m，約佔全區面積 43.32%，樣區坡度分

布以六級坡以上分布較多，約佔本區面積之 69.97%，全區之平均坡度為 67.59%，屬於較陡之山坡地。氣象於六至九月為高溫期，但由於受高山、天然廣大林區及河川等自然調節；氣候隨海拔高度概分為副熱帶及溫帶季型氣候，全區日夜溫差極大，平均氣溫為 16°C。

北山坑溪研究樣區如圖 5 所示，位於臺灣南投縣國姓鄉南側，區內之九份二山為大規模崩塌潛勢區，面積約 3,397 ha；樣區高程介於 290-1,185 m，平均高程為 686 m，主要分布於 475-825 m，約佔全區面積 53.62%；樣區坡度分布以六級坡以上分布較多，約佔本區面積之 44.37%，全區之平均坡度為 49.18%，屬於稍陡之山坡地；氣象於六至九月為高溫期，但由於受山區、森林及河川等自然調節，氣候隨海拔高度概分為副熱帶及溫帶季型氣候，全區日夜溫差不大，平均氣溫為 22.5°C。

三處河段之降雨量多集中在 5-8 月之間，年降雨日數約為 150 天，由此可知三處河段一年中有近 1/3 有降雨，而三處河段兩岸有植生覆蓋情形，顯示其兩岸落淤較嚴重、灘地面積較大，可於兩岸灘地進行現地相關施測作業，如：河床質採樣、斷面量測及無線追蹤粒子埋設等。三處河段流路單純、河道中並無巨石影響水流造成局部化沖刷，可觀測到單純之一般沖刷現象，符合本研究觀測目的。

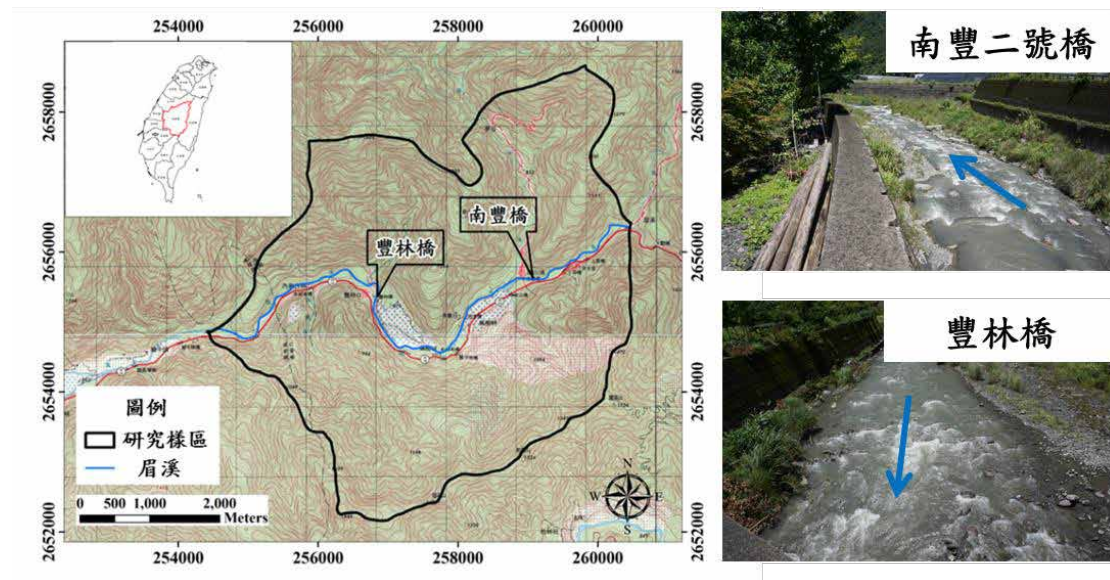


圖 4 眉溪研究樣區

Fig.4 Map of the Mei Creek

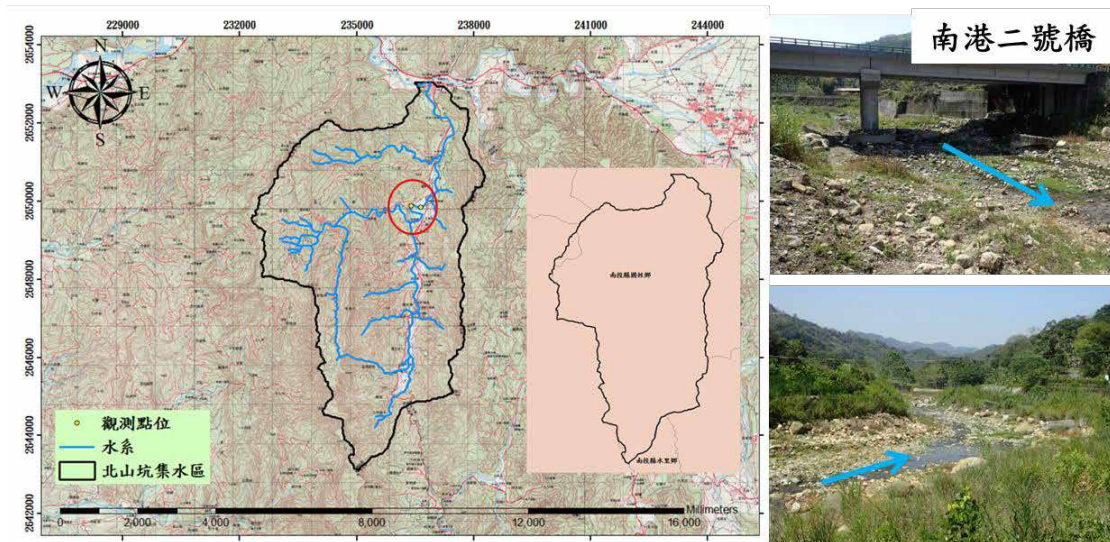


圖 5 北山坑溪研究樣區

Fig.5 Map of the Beishan Hang creek

IV、結果與討論

(I) 現地沖刷觀測結果與推估結果比較

本研究以 2017 年度之 0601、0613 豪雨事件觀測資料為例，蒐集研究樣區之實測沖刷深度資料，將研究樣區現地條件彙整如表 3，並將彙整之沖刷深度推估公式，以水位及流速觀測結果推估該場降雨事件之沖刷深度與實際觀測沖刷深度進行比較，如表 4 所示，表中流量 Q (cms) 之估算係以平均流速 V_m (m/s) 乘上河道通水斷面積 A (m^2) 得知，一般水理計算中，平均流速需考慮水流縱向流速分布，根據林穎志等人 (2011) 研究得知平均流速約為 0.85 倍之表面流速，因此這裡以 0.85 倍表面流速乘上通水斷面積估算出觀測河段之流量。

其中，表 2 前四項公式中考量流量及流速相關參數之影響，較能明確反映出不同流量時之沖刷；Blodegtt (1986) 及生態工法分析模式及設計要點研究之公式無水流參數，僅考量中質粒徑 D_{50} 對沖刷之影響，較無法有效反映動態沖刷之過程。

經結果比較可知，以南港二號橋河段 0601 豪雨事件之沖刷觀測結果與推估結果比較後發現，實測結果與 Lacey (1930)、Blench (1969) 及生態工法分析模式及設計要點研究之推估結果較為接近，其餘公式之推估沖刷深度與實測值誤差百分比在 100% 以上，特別是水規所公式之推估結果高出實測值不少，研判為該公式適用範圍原以台灣較下游之寬敞河川為主，應用於水理條件、河道特性略有不同之野溪河道時，才會出現較大的誤差。

南豐橋河段 0601 豪雨事件之實際沖刷深度與推估深度經比較後發現，亦以 Lacey (1930)、Blench (1969) 及生態工法分析模式及設計要點研究的誤差較小，其他推估公式的誤差則特別大，尤以水規所之公式誤差最多。而豐林橋河段之 0613 豪雨事件觀測到之沖刷事件，其推估比較結果以 Lacey 公式的誤差最小，其餘公式推估之誤差皆在 100%以上。

表 3 研究區於 0601、0613 豪雨事件時之水文及現地條件

Table3 Field and flow conditions of the 0601 and 0613 flood events in the study area

觀測河段	豪雨事件	最大沖刷深度 (m)	水深 (m)	流速 (m/s)	流量 (cms)	河寬 (m)	單寬流量 (m ² /s)	通水斷面積 (m ²)	中質粒徑 (mm)	底床坡降 (%)	粒徑分佈因子 σ_g
南港二號橋	0601	0.920	3.29	2.92	209.08	31.47	6.64	84.24	104.56	1.76	3.49
南豐橋	0601	0.895	0.98	2.15	46.83	25.24	1.85	25.60	33.25	2.23	5.05
豐林橋	0613	0.520	1.93	3.62	84.63	30.27	2.79	27.46	18.33	0.79	6.15

表 4 實際觀測之沖刷深度與推估值比較表

Table4 Comparison of field data and estimated results

觀測河段	公式	Lacey	Blench	紐西蘭鐵路 (Holmes)	水規所	Blodegtt	生態工法分析模式及設計要點研究
南港二號橋	推估沖刷深度 (m)	1.234	0.581	2.816	6.796	2.605	1.043
	推估值與實測值誤差百分比 (%)	34.13	36.89	206.08	638.65	183.19	13.40
南豐橋	推估沖刷深度 (m)	0.162	0.767	1.936	5.599	2.853	1.183
	推估值與實測值誤差百分比 (%)	81.84	14.33	116.27	525.55	218.68	32.23
豐林橋	推估沖刷深度 (m)	0.483	1.343	1.875	7.433	2.990	1.264
	推估值與實測值誤差百分比 (%)	7.20	158.27	260.58	1329.34	474.91	143.00

(II) 敏感度分析

根據上述推估結果與實測值之誤差分析，本研究嘗試以實測資料對 Lacey 推估公式之參數進行敏感度分析，期望能有效反映公式中參數對沖刷推估之影響，使推估結果更符合實際沖刷情形，以利未來推估公式之改進。Lacey 推估公式之參數主要包含流量 Q (cms) 及泥砂因子 f ，而泥砂因子和平均粒徑 D_m 為正比關係 ($f=1.76 \times D_m^{0.5}$)，考量野溪河道之河床質粒徑分佈變異較大，因此先將流量 Q 固定，嘗試將公式中之粒徑參數調整成其他代表粒徑 (如： D_{50} 、 D_{65} 等) 進行推估，藉此對公式進行敏感度分析。由圖 6 可知，當代表粒徑越小時，推估沖刷深度越大，此現象和河道沖刷時，河床質顆粒越細小越容易被溪水帶動之特性符合。

而 Lacey 推估公式之流量敏感度分析，則固定中質粒徑，嘗試將流量提高，分析流量對推估結果之影響。由圖 7 可知，當流量越高時，推估沖刷深度越大，與河道沖刷時，高流量溪水對河床造成較大沖刷深度之特性相符。

根據各參數之敏感度分析結果，發現代表粒徑在 30 mm 左右以下時，推估之沖刷深度急遽增加，而代表粒徑使用 D_m 、 D_{65} 及 D_{95} 分別進行推估得到之沖刷深度最接近實測值，顯示 Lacey 經驗公式使用於研究樣區時，其推估結果誤差很小，但本研究觀測到之沖刷事件僅兩場，數據上較難驗證，未來若能蒐集更多觀測資料進行推估及驗證，可以更了解該公式於樣區之適用性，並能對推估公式有更進一步的改良修正；而流量的部分，與推估沖刷深度大致呈正比關係，流量越大則推估沖刷深度越大，且河道之流量隨時間變化，可有效反映推估沖刷深度之動態變化，因此在修正推估公式時可考量時間因子對沖刷深度變化之影響，使沖刷深度推估結果更貼近現地情形，以回饋至工程設計之參考並提供實務上預警之作用。

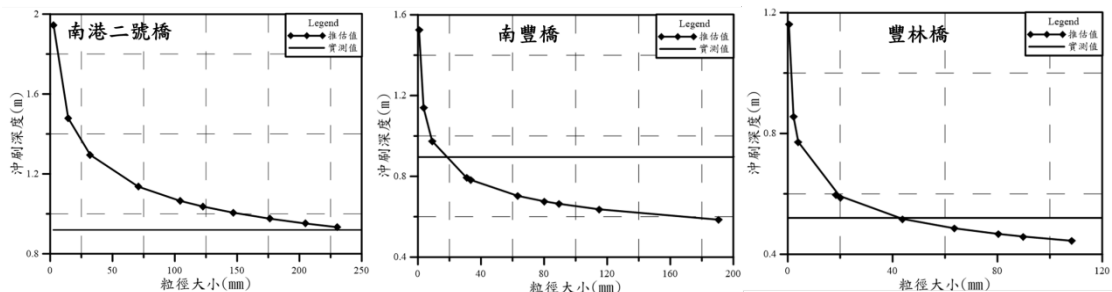


圖 6 代表粒徑敏感度分析

Fig.6 Sensitivity analysis of the diameter parameter

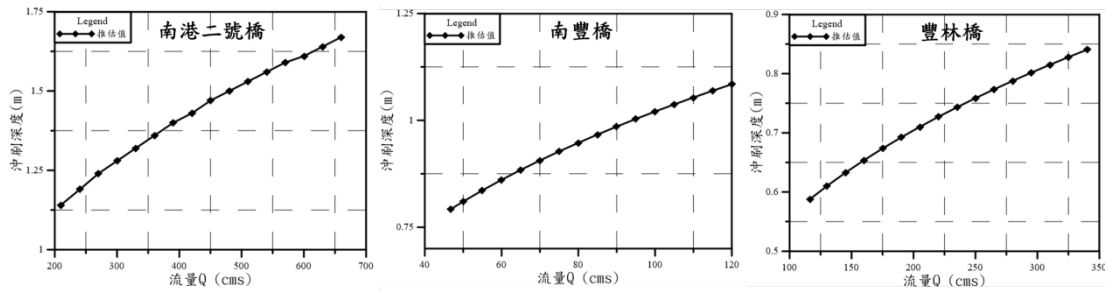


圖 7 流量敏感度分析

Fig.7 Sensitivity analysis of the discharge

V、結論

本研究利用「無線追蹤粒子動態觀測技術」進行現地即時動態沖刷觀測，獲得研究樣區實測資料，並以不同沖刷推估經驗公式配合研究樣區水文水理資料進行推估，針對實測及推估結果相互比較，並分析其中之差異，其結果得出以下幾點結論與建議。

1. 現地實測結果顯示，無線追蹤粒子沖刷觀測技術於野溪河道進行動態沖刷觀測之適用性極佳，可即時獲知河床動態沖刷過程。
2. 利用 Lacey (1930) 經驗公式進行研究樣區之沖刷深度推估，結果顯示前述經驗公式可合理推估沖刷深度，惟現地觀測資料目前僅蒐集到兩場豪雨事件，建議可持續蒐集現地沖刷觀測資料，使研究成果更為完善。
3. 分析過程中發現流量與推估沖刷深度大致呈正比關係，流量越大則推估沖刷深度越大，傳統沖刷深度推估公式發展一般採設計流量長時間作用，無法有效反映真實流量動態作用之變化，因此在未來修正推估公式時可考量時間因子對沖刷深度變化之影響，使沖刷深度推估結果更貼近現地情形。
4. 推估分析過程中發現，河床質代表粒徑之大小對沖刷深度推估也有不小的影響，當代表粒徑越小時，推估沖刷深度越大，此現象和河道沖刷時，河床質顆粒越細小越容易被溪水帶動之特性符合，但野溪河道之粒徑分布複雜，推估公式中粒徑參數之改進應可精進推估之成果。
5. 本研究研擬之觀測技術配合推估公式日後可朝野溪河道河床及邊坡即時預警系統開發應用之方向發展，使研究成果回饋於現地工程設計參考及防災預警之用。

VI、謝誌

本研究沖刷觀測設備、現地埋設及颱風沖刷觀測承蒙國立中興大學土木工程學系蘇志強博士、樹德科技大學休閒與觀光管理系楊翰宗教授及精德實業股份有限公司協助，而研究部分經費承蒙行政院農業委員會水土保持局之計畫補助，特此致謝。

VII、參考文獻

- 王傳益、林奕岑、劉韋廷、陳永康、莊旭楨 (2014) 水土界面儀於河道沖淤量測之試驗。臺灣水利 62(4): 81-91。
- 水利規劃試驗所 (2008-2010) 大甲溪河段輸砂特性試驗報告 (1/3-3/3)。經濟部水利署水利規劃試驗所。
- 林 呈、高明哲、蔡榮峻、何鴻文 (2007) 橋基沖刷災害與相關之維護管理 (2)-橋梁沖刷監測預警系統及其功能評析。台灣公路工程 33(1): 2-38。
- 林其穎 (2011) 橋梁沖刷監測預警系統建置之試驗研究。國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 林詠彬、張國鎮、陳俊仲、吳信宏、李路生 (2005) 光纖於橋梁即時沖刷監測之研發。結構工程 20(1): 111-124。
- 林穎志、朱木壽、詹勳全、高昇敬、呂珍謀 (2011) 利用實測表面流速推估高流量之研究。中華水土保持學報 42(1): 23-26。
- 國立交通大學 (2002) 生態工法分析模式及設計要點研究 (2/2)。經濟部水利署。
- 盧昭堯、王傳益、楊翰宗、蘇志強、徐偉碩 (2014) 颱風河道短期一般沖刷之觀測研究。經濟部水利署水利規劃試驗所。
- Blench, T. (1969) Mobile-bed fluviology. University of Alberta Press. Edmonton, Canada.
- Blodgett, J. C. (1986) Rock Riprap design for Protection of Stream Channels ear Highway Structures. Vol 1, Sacramental, California: U.S. Geological Survey.
- Holmes, P. S. (1974) Analysis and prediction of scour at railway bridges in New Zealand. New Zealand Engineering. 19 (11):313-320.
- Lacey, G. (1930) Stable channels in alluvium. Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 229 (1930):259-292.

水庫集水區崩塌與入庫泥砂淤積來源的判釋

吳柏翰¹ 吳慶現²

【摘要】台灣地區地質鬆散、地形陡峭以及颱風豪雨仍頻，容易引發大規模崩塌與土砂災害。暴雨期間水庫集水區崩塌產生高含砂量且挾帶大量雜物、漂流木與泥砂的洪流進入水庫，將導致水庫嚴重淤積。較粗顆粒泥砂在水庫上游段分選落淤，細顆懸浮載隨渾水逕流運移，在緩流區會潛入清水層下，形成水庫底層渾水異重流並向大壩運移。惟台灣現況水庫下層防淤通道規模不足，且進水口攔污柵易受到流木及雜物阻塞，則渾水異重流來不及排放堆疊湧昇形成渾水潭，加速水庫淤積問題。經由重大颱風事件航拍判釋，崩塌面積約 80%來自原始林，研判係樹大招風而影響邊坡穩定。因此，建議集水區崩塌風險高的區域應適度疏伐或降低林木高度，以避免原始林大範圍崩塌，而產生林木集體死亡與土砂災害。另一方面，建議集水區設置攔木壩避免生立木沈入水庫而難以打撈；建議在最寬且水深足夠的斷面，分段設置全斷面及全水深攔截網以攔截漂流木，並於進水口前再次設置全水深之攔截網，以利後續打撈作業。如此縱向分層攔阻確保進水口攔污柵通暢，則大壩附近淤積高程可以獲得有效控制，以利維持自然洩降錐，確保下層防淤通道功能與結構安全。

【關鍵詞】集水區崩塌、渾水異重流、樹大招風、水庫淤積。

INTERPRETATION OF THE LANDSLIDES AND SEDIMENT SOURCES FOR THE RESERVOIR WATERSHED

Po-Han Wu¹ Ching-Hsien Wu²

【Abstract】 Due to Taiwan's weak geologic structure, steep terrain, and frequent typhoons and heavy rain, it easily lead to large-scale landslides and debris disasters.

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所工程員，通訊作者。電子郵件:joke1125@wrap.gov.tw

Assistant Engineer, Water Resources Planning Institute, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs.
Corresponding Author. E-mail: joke1125@wrap.gov.tw

2. 經濟部水利署水利規劃試驗所正工程師。

Engineer, Water Resources Planning Institute, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs.

Floods with high sand content and including debris, driftwoods and silt are every likely happened during heavy storm events when landslides occur in the reservoir watersheds and will result in serious siltation of reservoirs. The coarse sand will precipitate in the upstream of the reservoir and the fine suspended sediment will be carried by the turbid water. The water flow containing a lot of suspended matter will submerge into the clear water layer to form the turbid density flow above the bottom of reservoir in the low velocity flow zone and the turbid density flow will gradually transport to the dam. However, the scale of the desilting channels at the low level of reservoirs in Taiwan is not sufficient and the trash racks of intake are blocked by driftwoods and debris. Then the density current piled up to form muddy lake and aggravated reservoir sedimentation. According to the aerial photograph interpretation of major flood events, nearly 80% landslide areas came from the original forest. We evaluated that tall trees catch much wind can affect the slope stability. In order to avoid the large scale collapse of primary forests that resulted in mass mortality of trees and sand disasters. It's recommended to moderately thin planting or reduce the height of the forest in the high risk of watershed landslide areas. On the other hand, to prevent the standing timber sinking into the reservoir and difficultly salvaging, it's advised to set a barrier in the watershed. When the driftwoods transported into the reservoir, it should be set a full-section and full-depth interception net in the section with the widest depth and sufficient depth. In order to facilitate subsequent salvage, we could set the full depth of the segment interception net in front of intake. The vertical layered barrier could intercept the driftwoods to keep the trash racks of intake free and the sedimentation elevation near the dam can be effectively controlled. It could be maintain the cone of depression and ensure the function and structural safety of low layer of desilting channels.

【Key words】 Watershed landslides, Turbid density flow, Tall trees catch much wind, Reservoir sedimentation.

I、前言

臺灣特有的地文、水文與森林植生條件，再加上颱風豪雨容易引發集水區原始林大面積崩塌，經由河道輸送大量土砂來源填海造地。臺灣集水區原始森林自然週期的營力下，造就早期西部海岸線往外延伸。惟現況集水區設置攔砂壩與水庫攔阻大量泥砂下移，再加上沿海地層下陷等因素，目前西部海岸線呈現退縮的

趨勢。隨著近期航拍技術進步，可以清楚地比對颱風前後崩塌位置與崩塌面積，更能佐證原始林崩塌範圍與區位。經統計民國 93 年艾利颱風及民國 98 年莫拉克颱風，分別在石門水庫與曾文水庫產生大量淤積問題。根據水庫年度淤積測量結果顯示，石門水庫民國 93 年淤積量 2,788 萬 m^3 ，接近民國 92 年以前 40 年淤積量 (5,614 萬 m^3) 的 49.66%，而曾文水庫民國 98 年淤積量 9,108 萬 m^3 ，接近民國 97 年以前 35 年淤積量 (16,674 萬 m^3) 的 54.62%。藉由航拍判釋民國 93 年艾利颱風前後，石門水庫集水區新生崩塌面積 601 ha，其中原始林地崩塌比例佔 82%，而民國 98 年莫拉克颱風曾文水庫集水區新生崩塌面積 1,482 ha 原始林地崩塌 1,139 ha，原始林地崩塌比例佔 77%。如果將水庫年度淤積量除以崩塌面積，可以概估平均崩塌深度石門水庫為 4.64 m 與曾文水庫 6.15 m，此崩塌深度約樹根影響範圍。

臺灣水庫淤積問題集中在幾場重大颱風豪雨的水文事件，且全洪程除了大量高濃度渾水逕流產生渾水異重流，下層累積高濃度渾水潭置換水庫原有清水層以致無法穩定供水，而且還伴隨大量流木與雜物影響水庫。其中活立木會隨著渾水異重流運移，較大活立木在水庫斷面開闊處沉降庫底，較小活立木運移至大壩阻塞進水口攔污柵，影響進水口供水、發電、防淤、清淤功能與結構安全，而漂浮枯木會累積在異重流潛入點下游側，至退水後段（入庫水溫上升）水庫產生表層異重流才運移至大壩附近，部分漂浮枯木來不及打撈亦會沉入庫底。

本研究藉由水庫淤積問題，衍生探討水庫集水區山坡地崩塌機制，冀期集水區治理層面減少土砂災害，以及政策面調整土地利用管理，以利維護自然資源（水土林）永續利用。

II、臺灣水庫泥砂問題

(I) 水庫淤積原因與高濁度影響

臺灣地質脆弱、地形陡峻、植生茂密，加上颱風與強降雨容易引發集水區大面積的崩塌，造成颱風期間高濃度渾水逕流，渾水逕流中挾帶泥砂、漂流木與雜物進入水庫，尤其強風強降雨所造成重大的水文事件（圖 1）。



圖 1 石門水庫於 2004 年艾利颱風造成集水區崩塌 601 ha，原始林地崩塌佔總崩塌面積的 82%，產生高濃度的渾水進入水庫。

當水庫發生重大水文事件時，全洪程高濃度底層渾水異重流是提供水庫選擇性防淤操作的機會。惟臺灣現況水庫下層防淤通道不足，再加上水庫既有下層進水口一般都設有攔污柵，很容易受流木與雜物阻塞，導致水庫洩洪過程「蓄渾排清」，水庫累積高濃度渾水潭影響供水且加速水庫淤積問題。因此臺灣水庫泥砂淤積問題集中在幾場重大颱風事件，如 2004 年石門水庫發生艾利颱風引發的缺水危機與水庫大量淤積 (圖 2、圖 3)。



圖 2 石門水庫艾利颱風尖峰流量 $8,594\text{m}^3/\text{s}$ ，為建庫以來第 2 大，溢洪道及排洪隧道均排放高濃度渾水層。



圖 3 艾利颱風 8/23 至 8/29 累計入庫水量 8.0 億 m^3 ，約為 3.4 倍的庫容，於 8/29 從高空拍攝石門水庫累積高濃度渾水潭，2004 年底水庫新增淤積量 2,788 萬 m^3 ，且影響桃園地區 18 天無法正常供水。

(II) 水庫陸挖清淤的限制條件

臺灣水庫清淤現況，以枯旱季節低水位時陸挖成本最低，其中水庫上游淤積三角洲粒徑較粗，大部分是有價骨材，可採取陸挖方式處理，惟水庫低水位清運時間有限。目前石門水庫藉由浚漂上游義興壩與羅浮增設清淤便道來提升陸挖清運量是很好方式，惟仍受既有道路交通輸運量與攔蓄的泥砂量（圖 4）條件限制，無法達到大量清淤之目標。



圖 4 石門水庫上游羅浮清淤作業 (2015.3.26)

(III) 壩前水庫清淤困難與必要性

大壩前淤積大部分是 200 號篩 (0.076 mm) 以下的細顆粒，抽泥船受限於抽泥能量與沉澱堆置空間及外運去化的問題。尤其沉澱池淤泥外運時，需要考量淤泥含水量、交通量與行車安全，再加上抽泥船清淤耗費水資源與電能，因而清淤過程產生大量的碳足跡。因此壩前清淤成本很高，惟考量維持水庫下層進水口通暢與結構安全仍是必須執行的工作。

(IV) 漂流木與雜物阻塞攔污柵的影響

目前水庫下層通道一般都有設置攔污柵，當發生下層攔污柵受流木、雜物與淤泥阻塞時，會加速渾水潭累增而影響供水與落淤量，另一方面亦會增加清淤的困難度。因此考量進水口結構安全，需要輔助潛水夫排除下層攔污柵阻塞問題。尤其進水口結構受損情況下，更添增清淤成本與困難度。一般作法會在上游集水區增設攔木壩，以及庫區斷面開闊處設置全水深攔截網與進水口前全水深攔截網，以確保進水口供水與防淤過程的通暢。

(V) 臺灣水庫淤積現況

根據水利署淤積測量成果，統計庫容超過 1,000 萬 m^3 的水庫有 23 座，總計原設計庫容 28.0 億 m^3 ，已淤積 8.3 億 m^3 (總淤積率 29.5%)，現況庫容 19.7 億 m^3 ，年平均淤積量 1,910 萬 m^3 ，年平均淤積率 0.68%，詳如表 1 所示。淤積問題逐漸降低水庫興利功能，尤其集水區攔砂壩淤滿或損毀，更凸顯入庫泥砂問題之嚴重性。

表 1 台灣水庫容量超過 1,000 萬立方公尺淤積統計表

Table 1 Amount of sedimentation for reservoirs with capacity over 10 million cubic meters of Taiwan

編號	水庫名稱	完工時間	總容積 萬立方公尺	測量時間	現況容積 萬立方公尺	總淤 積率%	年平均淤積量 萬立方公尺(%)
1	新山	88 年 2 月	1,000	104 年 5 月	997	0.26	0.2 (0.02)
2	翡翠	76 年 6 月	40,600	106 年 12 月	37,974	6.47	84.7 (0.21)
3	* 榮華壩	72 年 4 月	1,240	106 年 11 月	7	99.44	35.2 (2.84)
4	石門	53 年 6 月	30,912	105 年 3 月	20,471	33.77	197.0 (0.64)
5	寶山第二	95 年 6 月	3,218	102 年 9 月	3,212	0.19	0.9 (0.03)
6	永如山	73 年 10 月	2,957	104 年 12 月	3,023	--	--
7	明德	59 年 6 月	1,770	103 年 8 月	1,236	30.17	13.7 (0.77)
8	鯉魚潭	81 年 11 月	12,607	105 年 10 月	11,846	6.04	31.7 (0.25)
9	* 德基	62 年 6 月	23,206	105 年 12 月	18,882	18.63	98.3 (0.42)
10	* 谷關	50 年 10 月	1,710	106 年 10 月	461	73.04	22.3 (1.30)
11	* 霧社	48 年 9 月	14,860	105 年 3 月	4,366	70.62	187.4 (1.26)
12	武界	23 年 1 月	1,400	105 年 8 月	100	92.86	15.9 (1.13)
13	日月潭	23 年 6 月	17,162	105 年 12 月	14,197	17.28	35.7 (0.21)
14	* 明潭	80 年 12 月	1,440	104 年 12 月	1,252	13.06	7.8 (0.54)
15	集集攔河堰	90 年 12 月	1,005	106 年 12 月	411	59.10	37.1 (3.69)
16	湖山	105 年 4 月	5,139	105 年 4 月	5,139	0.00	0.0 (0.00)
17	仁義潭	76 年 6 月	2,911	105 年 8 月	2,643	9.21	9.2 (0.32)
18	白河	54 年 6 月	2,509	98 年 12 月	970	61.34	35.0 (1.39)
19	烏山頭	19 年 5 月	15,415	104 年 6 月	7,828	49.22	89.3 (0.58)
20	曾文	62 年 4 月	74,840	105 年 10 月	46,268	38.18	649.4 (0.87)
21	南化	83 年 3 月	15,441	105 年 12 月	9,500	38.48	258.3 (1.67)
22	阿公店	41 年 4 月	2,376	106 年 9 月	2,578	-	空庫排砂
23	牡丹	84 年 6 月	3,119	104 年 10 月	2,641	15.32	23.9 (0.77)
	合計		279,852		196,002	29.96	1,910.4 (0.68)

備註：* 為以發電為主要功能的水庫

III、水庫流木運移特性

(I) 漂浮枯木運移特性

入庫渾水明渠流在緩流區會潛入清水層下運移，形成水庫渾水異重流，示如圖 5。異重流潛入點會捲入部分清水，造成潛入點下游側產生倒流的流場。因此漂浮枯木會累積在潛入點下游側，需待退水後段低濃度溫水形成表層溫水異重流，漂浮枯木才會運移置大壩附近。

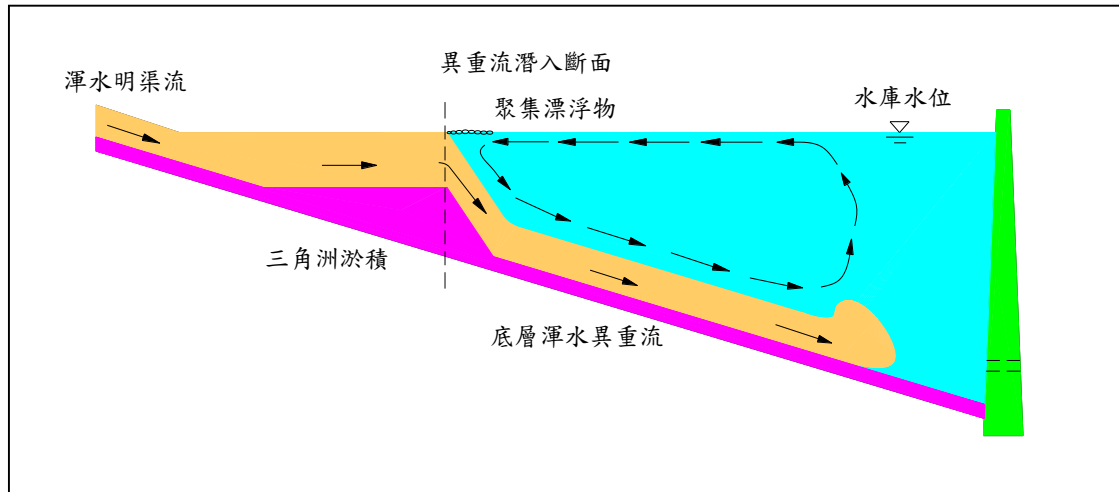


圖 5 水庫異重流運移及漂流木運移行為

Figure 5 Illustrating of transpiration of turbid density flow and driftwoods



圖 6 石門水庫溪口吊橋附近異重流潛入點下游側漂流木匯集



圖 7 石門水庫民國 93 年 9 月 2 日 (第 11 天入庫流量 8.35 億 m^3) 流木匯集大壩

(II) 生立木運移特性

集水區崩塌生立木隨洪流進入水庫，生立木一般密度大於 1.0 g/cm^3 ，因此會伴隨著水庫渾水異重流運移，樹徑較粗且密度較大的生立木會在寬闊斷面沉降，樹徑較細且密度較小的生立木會隨異重流運移至大壩各排放口，阻塞攔污柵影響進水口結構安全。如石門水庫永久河道放水口進水口 4 片攔污柵，受流木雜物阻塞再加上淤泥落淤，於民國 95 年結構受損清理維護困難。

IV、結論

1. 從傳統觀念、報章雜誌與新聞媒體，一般都會認為水庫淤積問題是水庫集水區濫墾濫伐所致。惟經過土石流發生力學特性之研究、水庫全洪程泥砂觀測，以及藉由重大颱風事件前後航拍判釋，已逐步釐清大量入庫泥砂來源係原始林大面積崩塌。另一方面，從早期台灣西部海岸往外延伸與港口內陸化，均可佐證臺灣地質、地形、植生狀態及颱風豪雨等所產生的自然營力。
2. 臺灣豐沛的森林資源應該適度管理（土石流潛勢溪流優先修剪高度及搭配鋼索道運送），避免林木集體崩塌死亡而且致災，同時可以省下進口外國木材的成本，也可提供國內林木工的工作機會，以及減輕水庫淤積問題與河道大量淤積的負擔。因此，建議修改禁止砍伐天然林的法令。

V、參考文獻

- 吳慶現 (1991) 土石流發生力學特性之研究，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
- 吳慶現、張耀澤、蔡長泰 (2002) 水庫異重流與水庫減淤操作之試驗研究，水利規劃試驗所，第十三屆水利工程研討會。
- 蔡長泰、王文江等 (2006) 水庫淤泥應用於國土保育之研究 (3/3)，經濟部水利署，2006 年。
- 蔡長泰、王文江、翁俊鴻 (2007) 水庫永續利用。工程學刊 80(6): 69-79。
- 台灣大學水工試驗所 (2008) 石門水庫漂流木及異重流運移試驗分析，經濟部水利署水利規劃試驗所
- 石門水庫相關設施水工模型試驗成果報告 (2009) 經濟部水利署水利規劃試驗所。
- 交通大學 (2010) 石門水庫水砂運移監測與異重流開發及應用研究 (2/2)，經濟

- 部水利署水利規劃試驗所。
- 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2010) 石門水庫上游主河道分洪防淤工程初步規劃及水工模型試驗—初步規劃報告。
- 台灣大學 (2014) 石門水庫及其集水區整治計畫—緊急供水暨水庫更新改善執行成效綜整，經濟部水利署北區水資源局。
- 吳慶現、吳佩儒、蔡長泰 (2014) 水庫洪流懸浮載與漂流木運移研究，第十八屆海峽兩岸水利科技交流研討會。
- Wu C. H., C. N. Chen, J. Y. Chen, C. H. Tsai and C.T. Tsai (2006) Simulation of Outflow Discharge and Suspended load in the Choshui River Basin I. The 7th International Conference on Hydroinformatics (HIC2006), Vol. III, p. 1659-1666.
- Wu C. H., C. N. Chen, C. H. Tsai and C.T. Tsai (2010) The Simulation of Inflow Discharge and Suspended Sediment Transport Rate for a Reservoir. EGU General European Geosciences Union (EGU) General Assembly , Vienna, Austria.
- Wu C. H., C. N. Chen, C. H. Tsai and C. T. Tsai (2011) An Approach to Estimating the Amount of Sediment Deposition in a Reservoir Using the Physiographic Soil Erosion-Deposition Model. International Journal of Sediment Research.

一維與二維水理整合模式應用於堰塞湖潰壩模擬初探

吳振佑^{1*} 林家興^{1,2} 陳振宇¹ 嚴曉嘉¹

【摘要】近年來在全球氣候變遷的影響下，災害事件可能擴大為複合型災害，如地震與颱風造成的大規模崩塌，導致滑落土砂達到溪谷對岸形成堰塞湖，一旦堰塞湖潰決，大量洪水伴隨土砂下移，可能形成二次災害，嚴重危及下游居民之安全。為快速評估堰塞湖潰決後，洪水對於下游保全對象影響程度，本研究採用 HEC-RAS 水理模式，以 2017 年 6 月鹿谷小半天崩塌形成堰塞湖事件為例，根據現場調查報告與數值高程模型資料，建立天然壩與溪流之數值模型。天然壩體高度為現場調查之 7 m 與可能之最大高度 17 m 兩種尺寸，分析 5 種不同潰壩延時對河道流量、水位與影響範圍，比較一維與二維模型在堰塞湖潰壩的模擬結果。從成果中顯示兩種模型對於天然壩體的位置認定方式不同，導致潰壩流量、水深的差異，而透過新增的檢視功能，將可以快速評估堰塞湖潰壩之影響範圍。在一維模式當中能提供簡易的模擬與內插成果，在初步危險度評估時能節省計算所需要的時間，而在二維模式當中，能夠克服較複雜的地形，並在淹水模擬有較好的效果，其相關成果可為未來災害事件進行潰壩風險評估之參考。

【關鍵詞】堰塞湖、HEC-RAS 模式、溢頂潰壩、水理模式。

A PRELIMINARY STUDY BASED ON HYDRAULIC ANALYSIS MODEL TO SIMULAE LANDSLIDE DAM BREAKING

Chen-Yu Wu^{1*} Chia-Hsing Lin^{1,2} Chen-Yu Chen¹ Hsiao-Chia Yen¹

【Abstract】 Due to the influence of climate change, sediment-related disaster events may develop into compound disasters, such as large-scale landslides caused by earthquakes and typhoon events lead to sediment moving into the riverbed and forming a landslide dam. Once the landslide dam is broken, lots of sediment combined with

¹行政院農業委員會水土保持局技術研究發展小組，*通訊作者。電子郵件：owen951753@mail.swcb.gov.tw
Research and Technology Development Team, Soil & Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan

²財團法人農業科技研究院。
Research Assistant, Agricultural Technology Research Institute, Taiwan

flood may rush to downstream and will seriously jeopardize the safety of downstream residents and endanger protected targets. To estimate the safety of protected targets downstream after landslide dam breaking, this study used the HEC-RAS numerical model to simulate the peak discharge after landslide dam failure. According to investigation report and digital elevation model, the landslide dam and stream numerical model of the Xiao Ban Tain slope failure at Lugu County were established. We designed two sizes of dam according to the site investigation and the maximum estimated height with top dam height of 7 m and 17 m, respectively. Simulating and comparing discharges, flow depth and influential area by one-dimensional and two-dimensional models for five different dam breach durations. Results indicated that two models have different ways to identify the position of dam failures and lead to differences of simulated discharges and water depths between those two dimensions. Through the new inspection function, it will be able to quickly assess the scope of impact of the landslide dam break. After comparing with two different dimensional models, one-dimensional model provides simple simulation and interpolation results that saving the time for calculation in the preliminary risk assessment. In the two-dimensional model, it can overcome more complex terrain and have better results in flood simulation. In the future, the simulation process will assist with risk assessment of landslide dam breaking disaster.

【 Key words 】 Landslide dammed lake, HEC-RAS model, Overtopping failure, Hydrodynamic model.

I、前言

台灣每年地震和豪雨事件頻繁，導致山坡地發生崩塌事件，當崩塌土體可抵達溪谷對岸與土體最小堆積高大於溪谷水深時，將會形成一座天然壩體，並在壩體後方蓄積水體而形成堰塞湖，若堰塞湖發生潰決，大量洪水伴隨土砂下移，可能形成土石流、洪水等二次災害，嚴重危及下游居民安全。如九二一地震在南投九份二山所造成的韭菜湖溪堰塞湖及澀仔坑溪堰塞湖，當時各界十分關注，並執行緊急工程與架設相關監測設備，經過詳細評估並確認其壩體的安全性，未來不會造成立即性的災害事件。

加上近年來在全球氣候變遷的影響下，極端降雨所導致的災害事件規模愈大，

而在山坡地上引發大規模崩塌，並導致洪水、土石流、堰塞湖等複合型災害，如 2009 年莫拉克颱風事件，豪雨造成了大規模崩塌，加上堰塞湖潰壩所帶來的洪水、土石流導致小林村滅村事件，另外在南部不同流域中，總共形成了十多個堰塞湖，其中有幾個堰塞湖同時存在於一個流域當中，若發生連續潰壩事件後果不堪設想，這也讓堰塞湖災害的緊急應變措施，需重新考量同時發生多個災區時該如何處理，也必須加強每一次事件的應變效率。根據水利署水利規劃試驗所在 2004 年統計，世界過去 285 個案例，約有二成的堰塞湖形成後在一天內就會潰決，約有三成的堰塞湖緊急應變的時間不到一星期，有一半以上的堰塞湖在一年內就會消失，這讓堰塞湖災害的處理難度更高，需在短時間內完成初步危險度評估，並建立潰壩影響範圍與預警機制，確保上、下游保全對象的安全，避免二次災害的發生。

為了能夠快速評估堰塞湖災害的危險性，除了統計回歸公式與經驗公式外，加入發展成熟的水文水理模式，將能針對壩體蓄水時間，不同潰壩情境所導致的淹水範圍等進行模擬，在初步危險度評估與詳細調查評估進行上，提供有利的參考數據，本研究以 2017 年 6 月在南投鹿谷鄉東埔蚋溪上游所發生的堰塞湖災害為例，使用 Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) 水理模式建置一維與二維之數值模型，探討一維與二維模型在不同潰壩情境模擬的成果，並如何提升在緊急應變標準作業流程中的評估作業。

II、材料與方法

(I)鹿谷小半天崩塌事件說明

本研究以 2017 年 6 月份的豪雨事件，在南投縣鹿谷鄉竹林村小半天瀑布風景區，發生的崩塌事件導致堰塞湖災害為例，推估於 6 月 3 日晚上 11 點時發生崩塌，當時的累積雨量達到 605 mm，降雨強度為 47 mm/h，在瀑布下方的河道左岸發生順向坡崩塌，並阻塞河道形成堰塞湖，崩塌土體與河川之縱剖面關係如圖 1 所示。經由民眾通報後，在專業團隊抵達現場時，堰塞湖已經發生溢流情形，由於壩體的蓄水體積不多，初步評估並無立即性的危險，天然壩體也在數月後的降雨事件消失。

根據現場調查結果如圖 2 所示，崩塌面積約為 2 ha，其中已裸露 0.5 ha，平均崩塌深度為 3 m，已崩塌土方量約為 15,000 m³，崩塌土體所造成的天然壩高約 7m，而潛在崩塌面積約為 1.5 ha，預估崩塌體積為 45,00 m³，若整個潛在滑動坡面崩塌，將可能會形成 17 m 的壩高，天然壩後方的迴水長度約為 80 m，蓄水量約為 5000 m³ 至 8000 m³。小半天瀑布上游集水區約為 475 ha，以合理化公式推估當時的入流量

約為 50 cms，而東埔蚋溪從瀑布至下游匯流口距離約為 3.5 km，河道平均坡度約 6.3%。

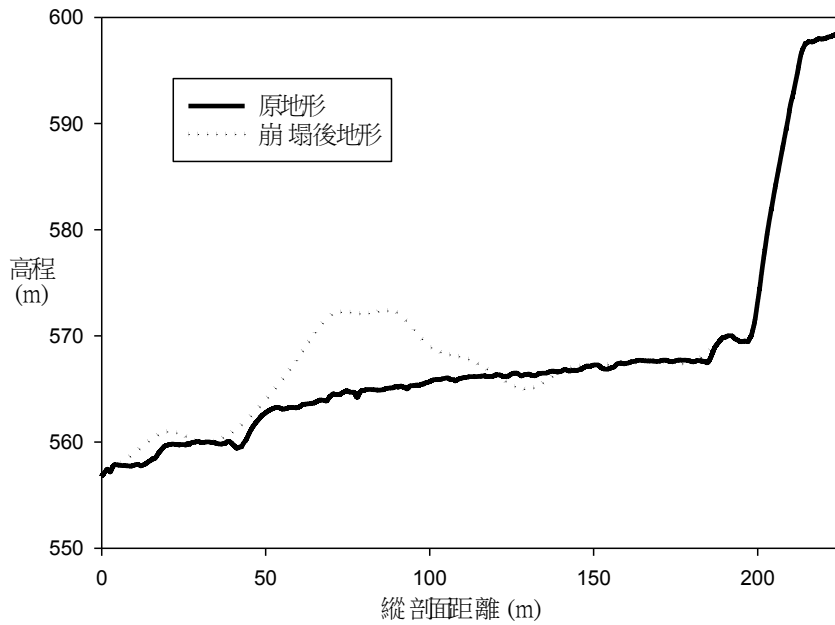


圖 1 小半天瀑布下游崩塌前、後之地形高程變化

Fig.1 Riverbed variation before and after the Xiao Ban Tain landslide dam

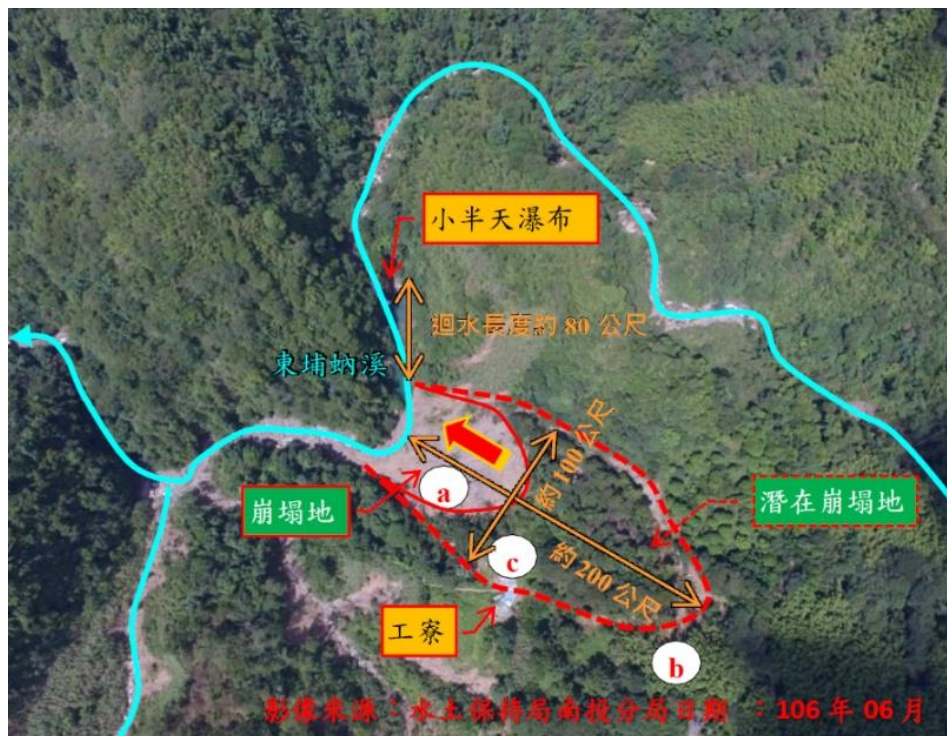


圖 2 現場災害調查空拍圖

Fig.2 Aerial-photo of Xiao Ban Tain landslide dam

(II) HEC-RAS 模式介紹

HEC-RAS 模式為美國陸軍工兵團水文工程中心所開發之河川分析系統，由於該模式發展許久和便利的操作方式，經常被使用來模擬定量流及變量流的河道水理演算，也可模擬輸砂及簡易的水質、水溫變化，其中還能模擬常見河川中的構造物如橋梁、涵管、閘門、堰等對於河道水理的影響，在進行一維河道水理演算時，常被各界所使用的模式，而在堰塞湖潰壩的模擬中，台灣學者也曾使用過 HEC-RAS 進行災害歷程重現，曾皇銘在 2011 年模擬莫拉克颱風時，在小林村發生大規模崩塌所導致的堰塞湖潰壩，對洪峰流量、水位歷線的影響變化，並以下游流量、水位測站，證明該模式可以模擬堰塞湖潰壩之情境。

在 2016 年時，HEC-RAS 推出二維水理分析功能，以及 Mapper 功能，增強對 GIS 圖資的處理能力，透過內插計算，能夠快速檢視一維及二維模擬成果之流速、水深、流場以及洪水淹沒範圍，其二維模型的建置方式以 Digital elevation model (DEM) 數值地形模型為底圖，劃設水理演算區域，並使用內建網格生成系統產生二維的網格，再透過特徵線調整地形上變異過大的區域，針對河道及洪氾區域進行詳細的模擬，其中還能連結一維河道模型，設計不同的蓄水區及水工構造物，進行潰壩等混合流況的模擬，改善複雜水系與匯流口之模擬品質，而在解算二維變量流的方程式為聖維南方程 (Saint-Venant equations) 及擴散波方程 (Diffusion Wave equations)，數值方法則採用有限體積法求解，由於國內應用其二維模型相關研究較少，本研究希望嘗試利用該功能建立堰塞湖潰壩模型，並與一維之水理模型進行比較。

(III) 一維及二維水理模型建置

本研究建置模型的範圍以小半天瀑布作為上游邊界開始至下游匯流口處，總長度約為 3.5 km，以崩塌前幾年之 DEM 資料為底圖，分別建置一維及二維之水理模型，上游邊界之入流量為推估崩塌時間之附近雨量站所測得之降雨強度，以合理化公式所推估而得之逕流量，模擬的時間從發生崩塌形成堰塞湖後 3 小時，計算間隔為每 0.5 秒計算一次，每一分鐘輸出一筆資料，由於該支流過去並沒有整治工程為原始河道，溪流兩岸也較無保全對象，所以河床之粗糙係數沒有相關調查資料，本研究採用使用者手冊所建議之範圍為 0.03 至 0.05 之間，輸入至一維河川斷面之中與二維網格之中。

在一維的模型當中，採用 ArcGIS 當中的輔助程式，約每 50 m 取一個寬度為 250 m 的斷面資料，總共建置了 69 筆斷面資料，從上游至下游依照離匯流口距離

依序編號 (如圖 3-a)。而在二維的模型當中壩體後方的蓄水區設置為純蓄水空間，避免在計算的過程中因迴水導致的計算誤差，壩體下游的部分則是以二維網格涵蓋所有可能行水區的範圍，再以特徵線將河道兩岸加強，降低計算過程中網格之間高程變異過大導致的誤差。而在網格的設定上每一格以邊長 4 m 的正方形進行自動建置，而特徵線所經過的網格再細分為邊長 2 m 的網格，最終總共建置了 21,730 個計算網格 (如圖 3-b)。

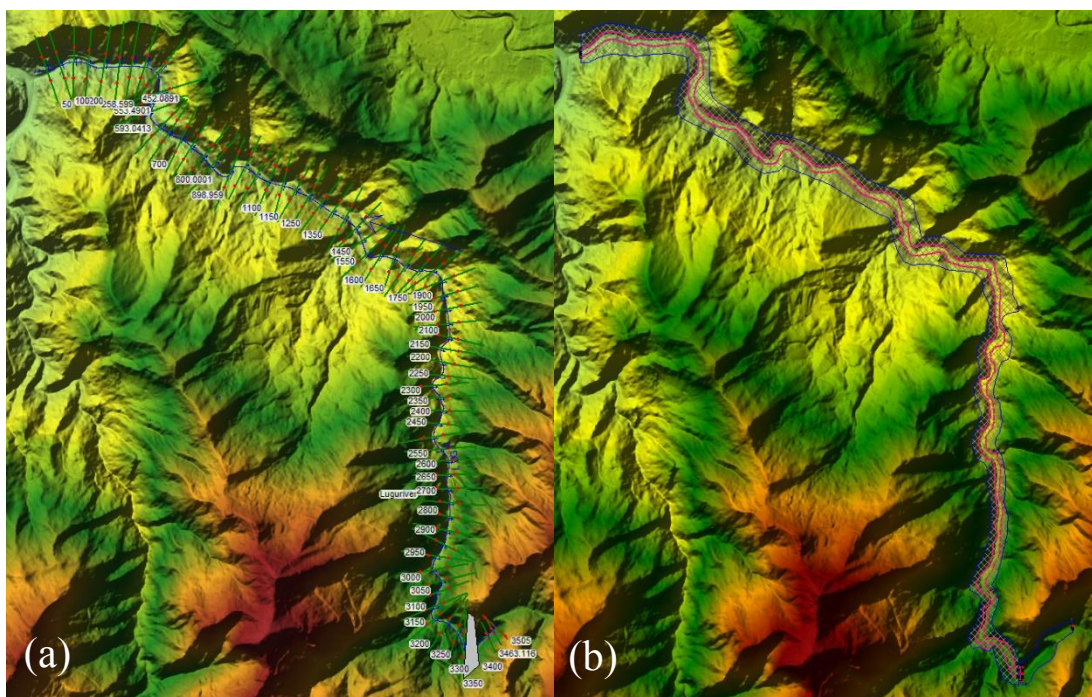


圖 3 HEC-RAS 模型建置示意圖：(a)一維模型、(b)二維模型

Fig.3 Schematic diagram of HEC-RAS: (a) one-dimensional model、(b) two-dimensional model

為了模擬河道中之天然壩體潰堤之情形，將利用 HEC-RAS 模式當中，河川構造物的天然壩或堰的功能，在一維模式中設定其與其他斷面之間的距離關係，壩體之寬度與其高程等資訊，而在二維模式中則是以地圖中設置邊界條件形式，並設定其堰的高程來當作天然壩體，而本研究是利用上游之蓄水區水位達到溢頂水位時，發生潰壩行為並將水體導向至下游二維水理網格當中。

由於並無實際壩體破壞歷程記錄，在災害發生當下也無法在短時間內完成實驗室土壤試驗，並計算壩體穩定分析得到可能之破壞類型與潰口形狀，所以通常只能進行假設來計算災害影響範圍，在模式當中針對潰壩的設定包含潰口的形狀設定、潰壩的形式、潰壩的發生條件、潰口沖刷的速度係數、壩體復原的機制等如圖 4 所示。

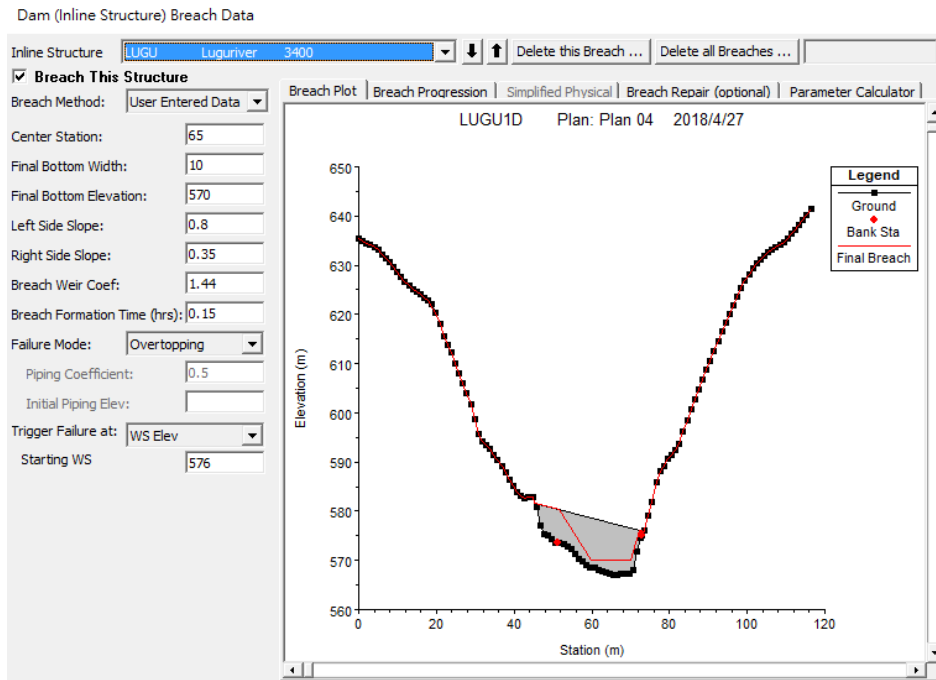


圖 4 在 HEC-RAS 中潰壩條件輸入介面

Fig.4 The input interface of landslide dam breaking conditions for the HEC-RAS model

為探討一維及二維模型在潰壩模擬中的成果比較，依據現場調查結果設計天然壩尺寸，其中將有 7 m (現況) 與 17 m (最大可能高度) 兩種壩高情境，並假設其皆會發生溢頂破壞事件，由於不知道其潰壩延時，但其為重要的影響參數，所以設定 3 分鐘、5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘、60 分鐘五種不同潰壩延時情境，探討潰壩對下游河道之流量、水位等水理數據之影響，並比較其可能之洪氾影響範圍，再針對一維及二維模擬成果進行比較，所以上述所提到之情境皆會在一維及二維中進行模擬運算，總計有 20 個情境。

此次事件之模擬範圍內並無設置流量、水位測站，所以無法進行校正或驗證，而堰塞湖這類型的事件也大多發生在流域內較上游的地方，很少能夠取得完整的監測資料，所以必須利用少許的參考數據，評估可能的災害風險，本研究希望能提供一個可能持續發展的方向，在未來若發生重大災害時，有一個平時已經熟練其相關建置方式的模式，來進行初步或細部的評估。

III、結果與討論

(I) 潰壩之流量、水位歷線

依據天然壩體之現況調查條件，與假設其潛在崩塌坡面全部破壞滑落至溪谷中，所形成之規模更大的天然壩，並模擬天然壩因溢頂破壞而導致不同延時之潰壩水理情境成果如下。在一維模式中，假設天然壩體為 7 m 高與 17 m 高，並在一開始時就發生溢頂破壞之情形，其流量變化情形在不同潰壩延時中如圖 5 所示，隨著潰壩延時愈短和高度較高的壩體，流量歷線的洪峰值愈高，其中在最極端的情境 17 m 壩高並在三分鐘內潰壩時，洪峰流量為 220 m³/s，增加約 3.5 倍的原始流量，其餘的情境當中，7 m 壩高洪峰流量超過 100 m³/s 的情境為 3 分鐘的潰壩延時，而 17 m 壩高的情境為 10 分鐘以內的潰壩延時，造成洪峰流量大於 100 m³/s，並使壩體刷深至指定高程。

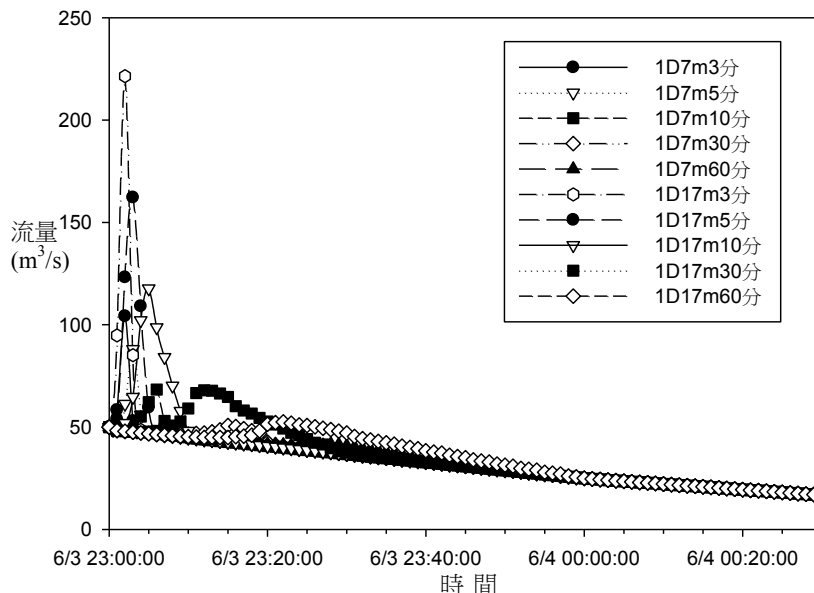


圖 5 一維模型中不同潰壩延時情境之流量歷線

Fig.5 Discharge hydrographs of different dam breach durations scenarios in 1D model

從下游邊界斷面水深變化來看，如圖 6 中顯示，最短潰壩延時與最高的天然壩體所造成的最大水位抬升量為 1 m 左右，而從發生潰壩到洪峰流量到達下游的最短時間為 8 分鐘，最長約為 35 分鐘，另外在兩種不同壩高的情境模擬結果中可以發現，在天然壩較高的情況時，後方蓄水量也較大，在相同潰壩延時下，洪峰流量到達下游的時間會比較快，相對於壩體較低的情境中更加危險。以小半天崩塌事件這個案例來說，在不同潰壩延時的模擬結果來看，對於下游流量、水位的衝擊，在現況調查 7 m 高度的壩體時，潰壩延時超過 10 分鐘以上，就不會明顯感受到洪峰到達的影響。

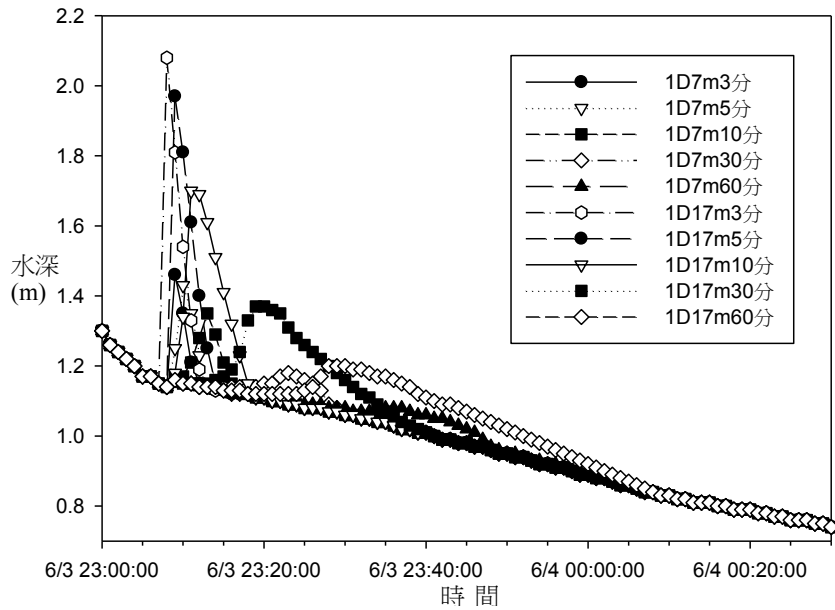


圖 6 一維模型中不同潰壩延時情境之下游水深歷線

Fig.6 Downstream boundary water depth hydrographs of different dam breach time scenarios in 1D model

在二維的模型當中，天然壩體之後方蓄水區假設為一個純蓄水空間，而當水位漫淹過天然壩體時，發生溢頂破壞，從圖 7 當中顯示蓄水區的水深變化，在壩高為 7 m 的時候，蓄水時間大約 3 分鐘，而當壩高為 17 m 時，蓄水時間約為 16 分鐘，由於蓄水空間就是天然壩體至瀑布前的空間，從入流時間至發生潰壩時間推估蓄水量在 7 m 壩高的情境中約為 1.4 萬 m^3 ，在壩高 17 m 的情境當中約為 4.8 萬 m^3 。

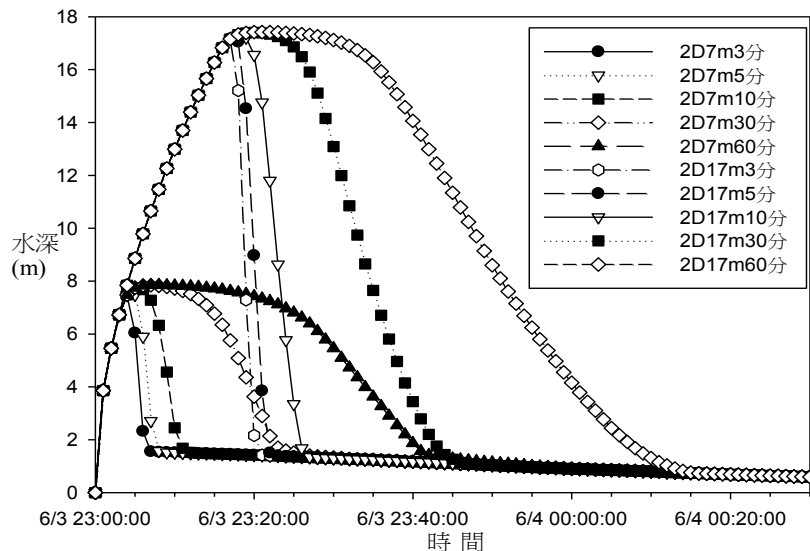


圖 7 二維模型中不同潰壩延時情境之壩體水深歷線

Fig.7 Landslide dam water depth hydrographs of different dam breach time scenarios in 2D model

從到達壩頂發生潰壩後，到潰壩結束時的水位變化也能從圖中看到所設定的破壞模式，在開始與結束時沖刷速度較慢，而中間過程較快的現象，未來如有記錄更多不同的類型的破壞歷程，將可以增加模擬的真實性。

而在二維情境中，潰壩所造成的流量歷線變化如圖 8 顯示，在兩種不同的壩高情境中，可以發現因為考量蓄水時間，所以洪峰流量明顯分為兩群，在壩高為 7 m 的情境當中，潰壩延時最短的案例中，洪峰流量接近 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ，而壩高 17 m 的 3 分鐘潰壩延時情境中，洪峰流量到達了 $440 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右的值，相較於一維模擬的結果大了一倍，探究其可能原因在於，HEC-RAS 在建置一維壩體時，是以壩體上方最近的一個斷面做為參考基準，沒辦法利用壩體所在位置的 DEM 高程來模擬，所以當初建立的模型，造成壩體後方的蓄水體積會較少的現象，在壩高為 7 m 與 17 m 時，其一維模型中的蓄水體積約為 0.54 m^3 與 1.82 m^3 ，導致在壩高與潰壩延時都和二維相同時，洪峰流量會有一個倍數的差異，這也是未來在執行初步評估時需要特別注意，模式在建立時的壩體設置位置與最近斷面的關係。

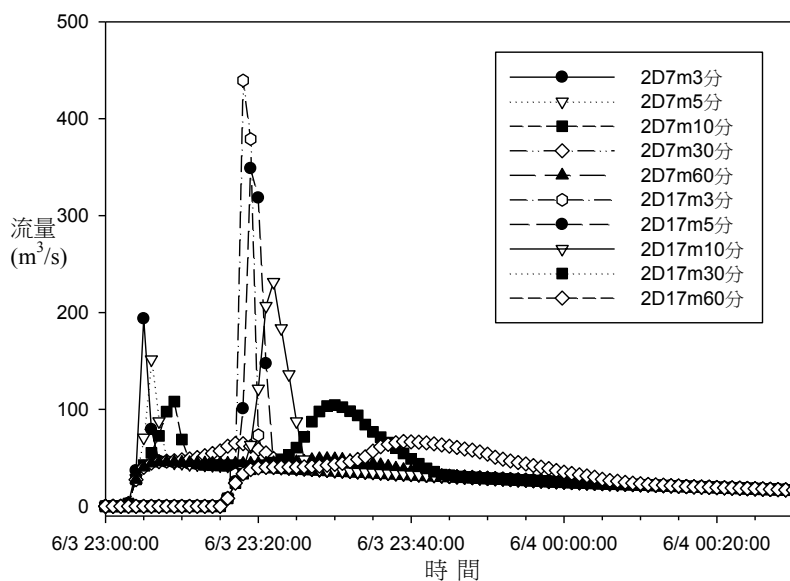


圖 8 二維模型中不同潰壩延時情境之壩體流量歷線

Fig.8 Landslide dam discharge hydrographs of different dam breach time scenarios in 2D model

在下游邊界條件水深變化的結果，如圖 9 所示，由於在二維模式建置中，本研究假設為乾床，壩體之上游蓄滿水後，發生潰壩至洪水到達下游邊界條件的時間約為 8 至 12 分鐘，而在潰壩延時大於 10 分鐘的情境當中，洪峰流量出現的時間會根據其潰壩延時設計，拉長洪峰到達時間，另外洪水所導致的水位提升相較

於一維模擬結果，最大水位增加量約為 1.2 m，這與先前所提到之壩體在兩種不同環境中設置所導致的差異也有關係。而在洪水水位的變化中可以發現某些潰壩延時較長的情境會大於潰壩延時較短的情境，這可能與乾床的設定在潰壩延時短的情況下，二維計算所造成的誤差，或是資料在輸出時，由於是每分鐘擷取一筆資料，在短延時的變化中，洪峰流量變化也較快，模式並不會輸出其時間內最大值，導致結果不符合潰壩延時愈短洪峰流量愈高的情況。

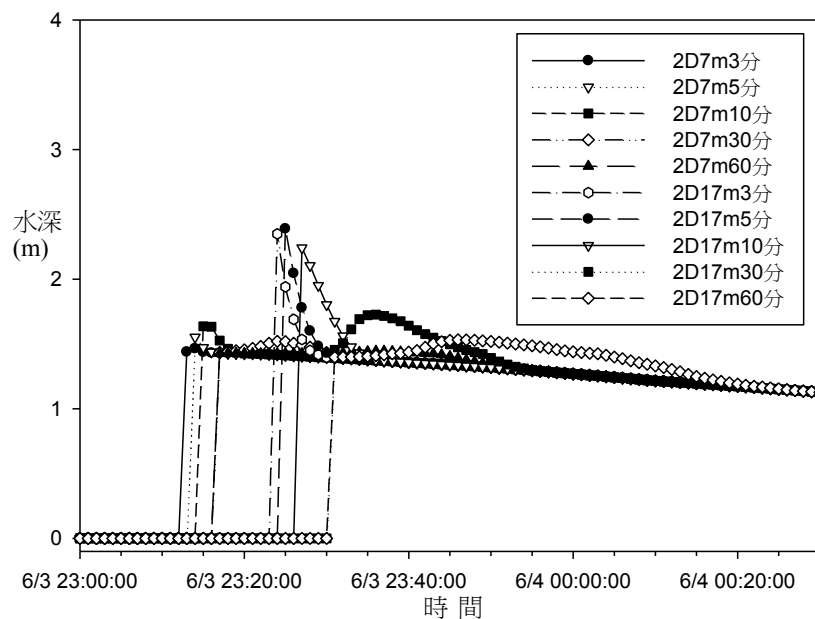


圖 9 二維模型中不同潰壩延時情境之下游邊界水深歷線

Fig.9 Downstream boundary water depth hydrographs of different dam breach durations scenarios in 2D model

(II) 潰壩影響範圍比較

利用 HEC-RAS 中內建的 Mapper 功能，可以將一維或二維模擬的結果，呈現在匯入的底圖中，或是連結線上的圖資，快速比對模擬的結果，圖 10 為由上游至下游潰壩所造成的河道最大水深，並套疊線上的衛星影像圖層，檢視是否會影響河道周邊的保全對象，除此之外能檢視隨著時間變化，河道之水理數值變化，也能夠過視覺化的方式，了解二維平面水理變化情形。

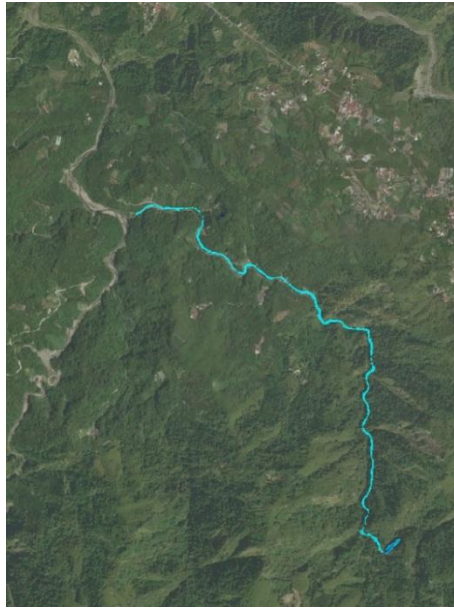


圖 10 在衛星影像中檢視潰壩的影響範圍

Fig.10 Assessing the scope of influence of landslide dam breaking in satellite imagery

利用不同圖層的開關、堆疊，能快速比較不同潰壩延時對河川水深變化與其影響範圍，如圖 11 所示，為 2D 情境中壩高 7 m 與 17 m 兩種情境，對於天然壩體後方淹水範圍的計算結果，快速比較出不同壩高的影響範圍，在 7 m 壩高的情境中，迴水面積約為 2,560 m²，而 17 m 壩高的情境當中，迴水面積約為 4,460 m²，在潰壩所造成的洪水也能利用相同的方式，比較不同的洪峰流量對於兩岸保全對象的影響，計算每一個情境當中，所增加的影響範圍。

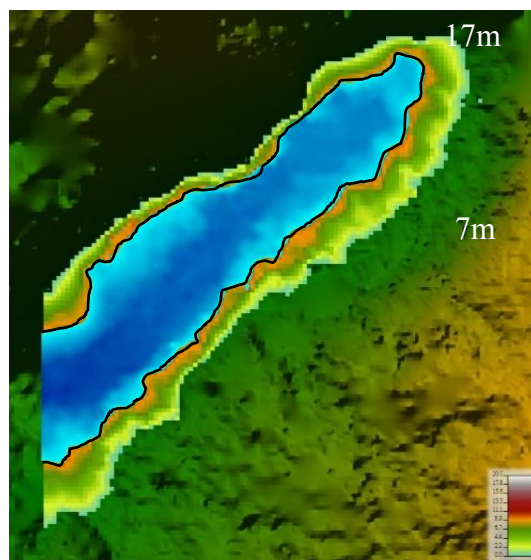


圖 11 二維模型中 7 m 和 17 m 壩高的淹水範圍比較圖

Fig.11 Inundation area of different dam height with 7 m and 17 m in 2D simulation

IV、結論

應用 HEC-RAS 模式建置一維及二維水理模型，模擬鹿谷小半天崩塌事件之堰塞湖若發生潰壩將會對下游造成的影響，其中針對不同的壩高、潰壩延時總共設計了 20 個情境，依據建置的過程與模擬的成果整理出以下幾個重點。

1. 利用模式模擬可以快速計算出符合河道地形與不同斷面或網格之水理數據，相較於過去經驗公式能獲得更多的詳細的資訊，在一維與二維的模擬結果中發現在建置模型的過程中，由於其判斷壩體位置的基準不同，可能會造成洪峰流量與水位推估上的誤差，而在二維模式當中更能完整模擬從蓄水至潰壩在每一個網格的變化。
2. 在 HEC-RAS 最新版本的模式當中，提供快速檢視成果的工具，能夠匯入圖資或是使用網路上免費之線上圖資，快速評估堰塞湖之可能上游淹水範圍、面積，在潰壩造成的洪水影響範圍也能透過不同的情境，確認對於下游保全對象的影響，這能加速初步及細部評估的速度。
3. 在一維模式當中，壩體的相關地形數據是參考最近一個河道斷面，並假設其以內差的方式與下一個河道斷面連接，而在二維模式當中是以使用者所繪製之範圍中最靠近的網格，將其設置成邊界條件，較能針對實際地形模擬天然壩體的影響。
4. 實際在使用模式的過程中，一維模式建置的時間較短，每一個情境計算的時間與調整的時間也較短，由於計算成果是斷面之間的內插，對於較寬闊的河川或是淹水的情境模擬成果較差，但在初步評估時已經能提供許多有用的資訊。二維模型雖然對於較複雜之地形與淹水能夠模擬較精細，但是建置時間與計算時間將會因模型的大小，而有極大的差異，建議在有較詳細的調查資料與足夠的建置時間時應用。

V、參考文獻

- 行政院農業委員會水土保持局 (2017) 鹿谷小半天瀑布崩塌事件速報。行政院農業委員會水土保持局。
- 行政院農業委員會林務局 (2017) 國有林地堰塞湖應變標準作業程序。行政院農業委員會林務局。
- 國立交通大學防災工程研究中心 (2004) 堰塞湖引致災害防治對策之研究。水利規劃試驗所。
- 曾皇銘 (2011) 小林村潰壩研究。國立成功大學。107 頁。
- 賴桂文 (2016) HEC-RAS 水理模式 2D 模組介紹及應用。水利技師公會。
- 謝正倫 (2009) 莫拉克颱風引致之堰塞湖。經濟部中央地質調查所。66-67 頁。
- Butt, M.J., Umar, M. and R. Qamar (2013). Landslide dam and subsequent dam-break flood estimation using HEC-RAS model in Northern Pakistan. *Natural Hazards*. Volume 65, Issue 1, p. 241–254.
- Brunner G.W. (2016) HEC-RAS River Analysis System User's Manual Versions 5.0. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- Brunner G.W. (2016) HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Versions 5.0. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- Brunner G.W. (2016) HEC-RAS River Analysis System Reference Manual. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- Carling, P., I. Villanueva and J. Herget (2010), Unsteady 1D and 2D hydraulic models with ice dam break for Quaternary megaflood, Altai Mountains, southern Siberia, *Global and Planetary Change*, Volume 70, Issues 1–4.

六龜 D015 大規模崩塌區致災風險分析

黃敏郎¹ 洪政義² 蔣季翰³ 劉文賢⁴

【摘要】 近年來運用遙感探測及地球物理技術進行大規模崩塌地的滑動及監測已逐漸成熟。六龜地區編號 D105 大規模崩塌區位曾於 2009 年莫拉克颱風時發生面積約 208 ha 的崩塌並導致土石流等災害，使高 133 線道路中斷及數戶建物受損，坡面也有多處陷落崩崖發生。本研究利用地質調查、鑽探、及高精度數值地形分析等方式，進行邊坡致災特性分析；透過坡度、水系、坡面開發史、坡面崩塌、崩崖、植生指標、坡向等因子，進行坡面斜坡單元之風險等級。分析結果顯示，高致災風險斜坡單元分布在坡度陡峭區及坡向為東南向之裸露區，此一結果與現地調查及監測所得相符。建議大規模崩塌區可用斜坡單元劃分方式進行風險分析，以作為後續監測區位篩選之參佐。

【關鍵詞】 大規模崩塌區、斜坡單元、監測。

RISK ANALYSIS OF DISASTER CAUSED BY LIOUGUEI D015 DEEP-SEATED LANDSLIDE AREA

Min-lang Huang¹ Zheng-yi Hong² Ji-han Jiang³ Wen-xian Liu³

【Abstract】 In recent years, the use of remote sensing and geophysical techniques to investigate the sliding and development of deep-seated landslide areas have gradually become mature. The Liouguei D105 large-scale landslide area was collapsed about 208 hectares and caused debris flow disasters during Typhoon Morakot hit Taiwan in 2009. Several buildings along the 133 county road were severely damaged due to mud flow

¹ 聚禾工程顧問有限公司技師，通訊作者。電子郵件:yoshi.hml@gmail.com

Technician, GeoHarvester Co.,Ltd., Corresponding Author. yoshi.hml@gmail.com

² 行政院農業委員會水土保持局台南分局秘書。

Secretary, Tainan Branch, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan.

³ 聚禾工程顧問有限公司技師。

Technician, GeoHarvester Co.,Ltd.

⁴ 行政院農業委員會水土保持局台南分局技士。

Associate Technical Specialist, Tainan Branch, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan.

and many cliffs were created due to slopes failure on the slopeland of this area. This study used geological surveys, drilling, and high-precision numerical terrain analysis to analyze characteristics of slope disasters areas, such as slope, drainage system, development history, collapsed area, cliff, vegetation index, slope direction, etc. Analysis results indicated that the high-risk slope units are in areas of steep slope and exposed collapse areas having southeast direction. The analysis results correspond to the results of on-site investigation and monitoring. Therefore, it is suggested that the slope unit classification method can be used as a reference for risk analysis for deep-seated landslide areas and as a subsequent deep-seated landslide areas monitoring screening.

【Key words】 Deep-seated landslide, Slope units, Monitoring.

I、前言

高雄市六龜區紅水仙聚落於莫拉克颱風後，邊坡斜面上發生大規模地表的滑動跡象，崩塌範圍內在土地轄管權屬而言，多為林班地，屬自然林地 (90%以上)，故在大範圍的情況下，想瞭解崩塌範圍內哪個區位可能滑動或致災，實屬不易。本研究探討大規模崩塌區內，提取較有效益之監測區或後續應防範之斜坡單元，以大規模崩塌區之斜坡單元之風險度探討，以作為後續防範未然警戒參考。

II、研究區域

本研究以六龜區紅水仙聚落上方之大規模潛勢崩塌區邊坡 (崩塌編號：六龜區 D015)為研究對象。位屬於高雄市六龜區新發里位於美輪山，約距二集團聚落北方約 2.6 km，子集水區為美輪山，位於荖濃溪流流域左岸，研究區域面積約為 228 公頃，區域位置如圖 1。

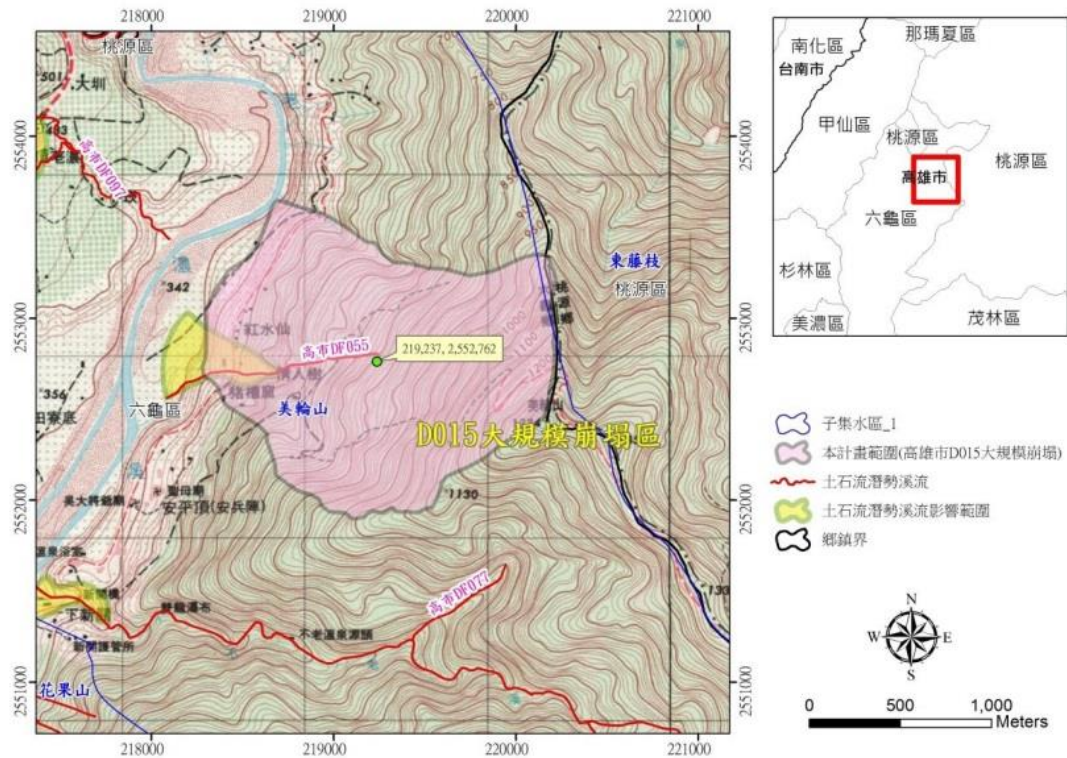


圖 1 研究區域位置圖

Figure 1 Location of the study area

II、材料與方法

(I) 研究區域現地調查分析

本研究區內平面圖如圖 2。圖 2 中調查點位照片及現地情況說明如下表 1。本研究區為由東向西傾斜之邊坡，坡面經降雨冲刷早成多處的蝕溝及崩崖，其中 3 條蝕溝已發育成野溪，其中包含中央野溪、北側野溪及南側野溪、崩塌區域冠部已有陷落崖（詳表 1 S01 照片），而坡面現況有行政院農業委員會林務局及水土保持局臺南分局監測中儀器（詳如表 1 S02 照片），研究區內有林道分布，沿林道至 S04 處，為陡峭蝕溝發育坡面，其地質材料經鑽探及現地調查為崩積土、硬頁岩為主，因崩積土膠結性差較為鬆散特性，以及較深層之硬頁岩等因素，地質應易受降雨冲刷及地震等自然營力作用而發育持續崩塌，至下邊坡面 S05 處，硬頁岩之露頭位置，硬頁岩有高角度之節理面發育，露頭周邊有岩屑滑崩情形，岩體相當破碎，為此處現生崩場地典型特徵。而至下坡之露頭坡面 S06 處，高 133 線旁之裸露邊坡，亦為硬頁岩之露頭位置，硬頁岩有三組高角度之節理面發育，部分節理亦有張裂現象，亦具備崩塌坡趾張力裂隙的特徵。從紅水仙橋 S07 處往上游拍攝，地表至地表下約 10 m 深為崩積層，地表下約 10 m 之後則為硬頁岩，具備

高角度之節理面發育。S08 處則有明顯砂頁岩互層，本處岩體尚稱完整，且出露之岩性明顯與崩塌體下方之硬頁岩不一樣。依據砂頁岩互層之位態進行研判，本砂頁岩互層應位於硬頁岩下方。

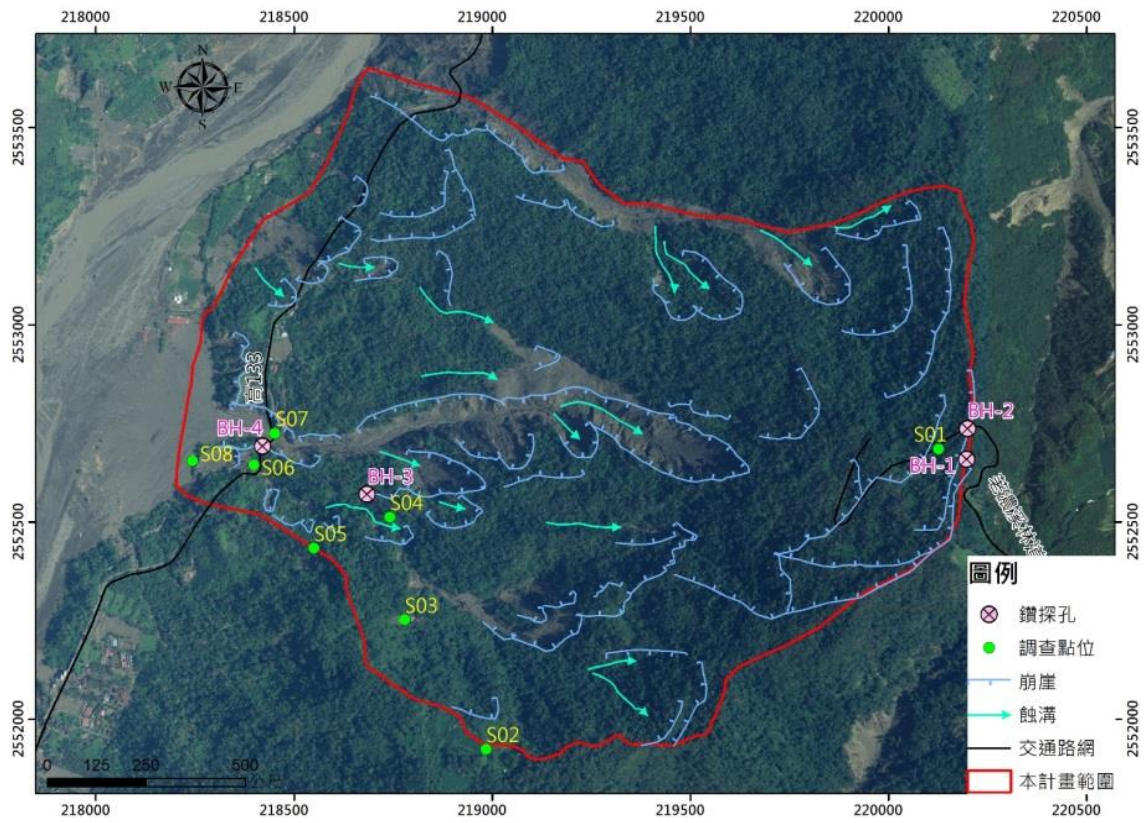










圖 2 DS015 大規模崩塌性調查成果圖

Figure 2 Survey results of large scale landslides

表 1 六龜區 D015 調查現況說明及照片

Table 1 Photos and its explanations for the Liouguei D105 landslide area

調查點 編號	現況描述	現況照片
S01	現地有明顯之新增小崩崖，崩崖沿舊有主崩崖發育，約略呈北北東-南南西走向，與主崩崖方向一致，延伸長度約為 50 m 左右，崩崖邊界落差至少 50 m	
S02	為一工寮之空地，地形相對平坦，該處並無明顯之崩塌特徵，目前林務局有設置 GPS 監測站，進行位移之地表量測作業	
S03	林道位置，地形相對平坦，該處亦無明顯之崩塌特徵，植生狀況亦為良好，顯示本處之崩塌發育特行並不明顯。	
S04	蝕溝右岸之現生崩塌，地形為陡坡地形，此處於地表至地表下約 15 m 深為崩積層，地表下約 15 m 之後則為硬頁岩，具備高角度之節理面發育，因崩積層膠結鬆散，因此易受降雨或地震作用而持續崩塌，而此亦為本區土石流潛勢溪流之主要土砂材料來源。	
S05	硬頁岩之露頭位置，硬頁岩有高角度之節理面發育，位態為 N60° W/35° S，岩體相當破碎，而露頭週遭亦有岩屑崩滑的現象。此露頭亦為本區現生崩塌地之典型特徵。	
S06	高 133 線旁之裸露邊坡，亦為硬頁岩之露頭位置，硬頁岩有三組高角度之節理面發育，位態分別為 N80° W/50° N、N60° W/65° N、N40° W/40° N，節理發育密度約 10 cm/條，顯示岩體相當破碎，部分節理亦有張裂現象，亦具備崩塌坡趾張力裂隙的特徵。	

S07	於地表至地表下約 10 m 深為崩積層，地表下約 10 m 之後則為硬頁岩，具備高角度之節理面發育。	
S08	為荖濃溪左岸之裸露邊坡，地形為緩坡地形，此為砂頁岩互層出露之位置，地層位態為 N30° E/25° E。另有一組高角度之節理發育，其位態為 N80° E/80° N，其發育密度約為 1 條/50 公分，本處岩體尚稱完整，且出露之岩性明顯與崩塌體下方之硬頁岩不一樣。依據砂頁岩互層之位態進行研判，本砂頁岩互層應位於硬頁岩下方。	

(II) 基地地質概況

1. 沖積層：本層發育於崩塌之坡趾及野溪堆積區，主要為土石因野溪之水力搬運與堆積作用所形成。
2. 崩積層：本層為舊崩塌體分布之位置，發育自坡頂至坡趾，為崩塌區之主要地層，主要由礫石及砂土組成，膠結差，亦無淘選性。
3. 硬頁岩：硬頁岩為本區主要之岩層，崩塌主要發育於本地層，而硬頁岩之頁理、節理等弱面發達，其中節理面常為高角度且有張裂現象，也常因此造成岩體破碎，有利於崩塌發育。

(III) 致災風險分析方法

本研究材料以蒐集歷史高精度數值地形，以計畫範圍內以等高線、坡向、集水區優先分區分類，再輔以運用 ArcGIS 水文地形分析模組 (ArcHydro) 進行分析集水區自動劃分相輔判釋，自動劃分的結果雖可清楚劃分集水區分界，但對於較山腹或坡度平緩區域則無法正確判斷，故需再以人工判斷修正。依據集水區及坡向劃分集水分區套繪如圖 3。

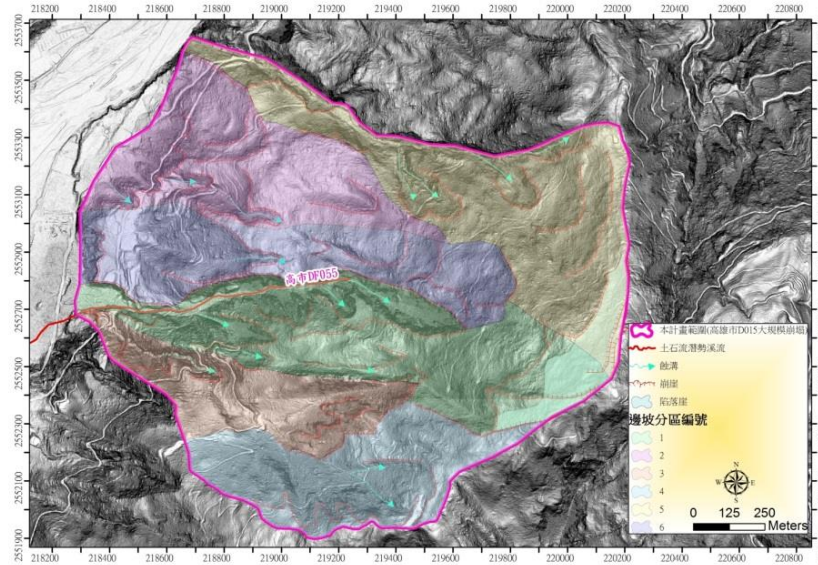


圖 3 運用數值地形進行集水分區劃分圖

Figure 3 Watershed classification by using digital elevation model

運用所蒐集之數值地形產製等高線、山體陰影圖資以及劃分之集水分區判釋斜坡單元，其結果如下圖 4。下圖 4 中套繪目前林務局及水土保持局臺南分局監測中監測鑽探孔位置。

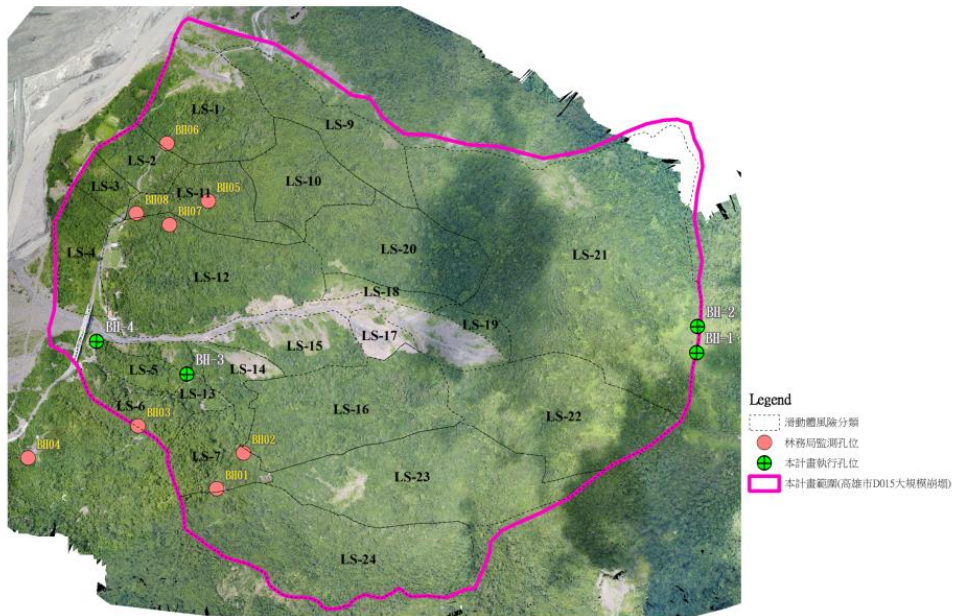


圖 4 斜坡單元劃分圖

Figure 4 Diagram map of slope units

(IV) 致災風險分析結果

在臺灣之大規模崩塌治理較名的梨山地滑地區在探討整治對策之規劃時，採以邊坡活動性分類低、中、高等三個等級作為區分，而大規模崩塌地區防災監測手冊(草案)，針對大規模崩塌活動性判釋建議分為低、中、高，依照穩定性分為三大類，邊坡具有活動性之崩塌地，持續或季節性觀察到位移稱為『活動中崩塌區位』，或邊坡常發生新的崩塌活動者，則屬高活動性區位；邊坡偶而發現新的崩塌活動，發生時間為偶發性則屬於中活動性區位；而邊坡有發生崩塌跡象，但經環境紀錄調查多為古崩塌區則屬於低活動性區位 (Crozier, 1984)。風險評估已是規劃上常用來評比空間區位上所需關注重點區的方式。各類型邊坡不穩定特徵的活動性分析分類如下表 2。

表 2. 邊坡依其不穩定特徵的活動性分析 (修改自 Crozier, 1984)

活動性	不穩定特徵	分類名稱
高	邊坡具有活動性的崩塌地，持續觀察到位移(季節性)	活動中崩塌區位
	邊坡常發生新的崩塌活動	新崩塌區位
中	邊坡偶而發現新的崩塌活動，發生間隔超過十年。	新崩塌區位
低	邊坡有發生崩塌的跡象，但在過去一百年內無發生紀錄。	古崩塌區位

致災風險分析相關研究：「環境敏感區」通稱為敏感區、危險地區、重要地區、以及脆弱地區等。地質法草案規定主管機關得將有發生地質災害之虞的地區，公告為「地質敏感區」，其目的為劃設明確之危險區域，以提供國土防災及相關土地管理利用之參考。有關山崩敏感地區劃設研究方面，國內過去的研究多以山崩發生的潛勢或潛感性為主要，也就是著重在山崩因子、權重以及統計、評分等方法的研究，相較對於製圖地形單元的適確性，則較少有討論。因此如何劃定正確山崩致災的危險範圍，在敏感區的劃設作業中特別顯得重要，有下列幾種常用方法被用來作為製圖地形單元的劃分：(1) 網格單元法(2) 地貌單元法(3) 特別條件單元法(4) 斜坡單元法(5) 行政單元法。製圖地形單元的種類並沒有絕對適用的項目，每個區劃土地的技术都有其優缺點。選擇合適的敏感度評估方法可以提高其品質。

在危險等級評估部分，潛在大規模崩塌潛勢區危險度評估主要參考國際減災

策略組織 (ISDR)建議公式：

危險度 (Risk) = 災害發生度 (Hazard) × 重要保全對象 (Vulnerability)。也就是利用證據權重法計算大規模崩塌發生度，再結合保全對象評分，進一步評估範圍內之危險度。

本研究採運用數值地形採以斜坡單元法，以地形資料之坡度、坡向、水系、歷史崩塌區、歷史崩崖區、歷史開發區位、植生指標等因子作為探討研究分析大規模崩塌區範圍內之各斜坡風險權重，作為邊坡風險潛勢等級劃分評估標準。本計畫採以 50 m × 50 m 網格於本計畫範圍內篩選各項敏感因素，切分本計畫區涵蓋範圍共計有 993 格。其各因子說明如下：

1. 坡度：利用 Arcgis 進行網格坡度分析篩選，其坡度權重屬環境風險之主要因素，故採以水土保持技術規範計算環境風險率之坡度分級，權重分數則採以其坡度序數。其坡度權重分類級序如下表 3。

表 3. 各坡度分級及對應序數表

Table 3 Classification of slope and its corresponding orders

坡度序數	坡度級別	土地單元之坡度變域 (分級範圍)
0	一級坡	坡度百分之五以下。
1	二級坡	坡度超過百分之五至百分之十五。
2	三級坡	坡度超過百分之十五至百分之三十。
4	四級坡	坡度超過百分之三十至百分之四十。
6	五級坡	坡度超過百分之四十至百分之五十五。
8	六級坡	坡度超過百分之五十五至百分之一百。
	七級坡	坡度超過百分之一百。

資料來源：水土保持技術規範，環境風險率，坡度

2. 坡向：依據現地地表地質調查其地層節理，坡面主要為由東向西走向之節理為主要方向，因此在坡面順向的風險機率而言，西、西北、西南、西北西、西南西之邊坡方向為風險性相對較高之坡向。因此本計畫採以地形坡向分析分類，其坡向均以 22.5 度為分類間距，篩選順向坡因子之坡向為北北西、北北東、北、西南、南等坡向權重給予 1，西、西北坡向權重給予為 0.5，其餘相對較低向東之權重給予 0.1。彙整如下表 4。

表 4.坡向權重分級

Table 4 Weights of slope direction

坡向	權重分
北北西、北北東、北、西南、南	1
西、西北、西北西、西南西、南南西	0.5
東、東北、東南、東北東、東南東、南南東	0.1

3. 水系：依據地形資料以地理分析套繪陰影圖以及水系分析模組，比對野溪及沖蝕溝發育位置，其意旨水流易逕流集中區域其沖蝕較劇烈，造成災害的風險成因與誘因的機率也較高，故在風險權重上鄰近野溪蝕溝之網格給予風險係數 1.0，而無鄰近野溪蝕溝之坡面則給予 0.1。
4. 歷史崩塌區：崩塌區於莫拉克颱風後僅土石流潛勢溪流周邊面積略增加崩塌，從影像上已有植生逐漸復育情況，故本計畫以歷史影像判釋分析歷史崩塌區域網格分布。主要崩塌區位於中央野溪及北側野溪集水區之兩側邊坡，崩塌裸露區坡度陡峭，故可能受降雨而再次崩塌，風險係數給予 1.0，無崩塌區則給予 0.1。
5. 歷史崩崖區：利用陰影圖判釋坡面地形崩崖區域，作為地形變異處參考，崩崖處多為風險變異發生因素較高區位，故位於崩崖處之權重係數給予 1，一般坡面則為 0.1。
6. 歷史開發區位：本研究區內以往有道路，套繪歷史影像及歷史地形陰影得以清楚判釋曾經於坡面上開發之道路，道路多為無鋪面地表，易產生逕流沖蝕的裸露區，易成為沖蝕災害誘因區域，故在歷史開發區的部分，給予風險係數值為 1，無開發屬原始坡面係數值給予 0.1。
7. 植生情形：地表植生覆蓋情況為坡面沖蝕發育的影響主要因素。本研究採 2017 年空拍影像進行常態化差異植生指標分析，其植生指標顯示值越近於 1，屬判釋為植生覆蓋茂密區域，反之則為植生較稀疏區。然而利用影像判釋時，受影像拍攝時之雲覆及陰影影像，易有色階區域誤差問題，故於判釋後再以監督式分類給予風險係數。在 NDVI 計算後，則將原來影像數值成為-1~1 之間的數值域，本研究給予 NDVI 值越接近 1 則以 NIR 為近紅外光反射；RED 為紅光反射，NDVI 之值介於-1 到 1 之間。當 RED=0 時，有最大值 1；反之，當 NIR=0 時，有最小值-1。

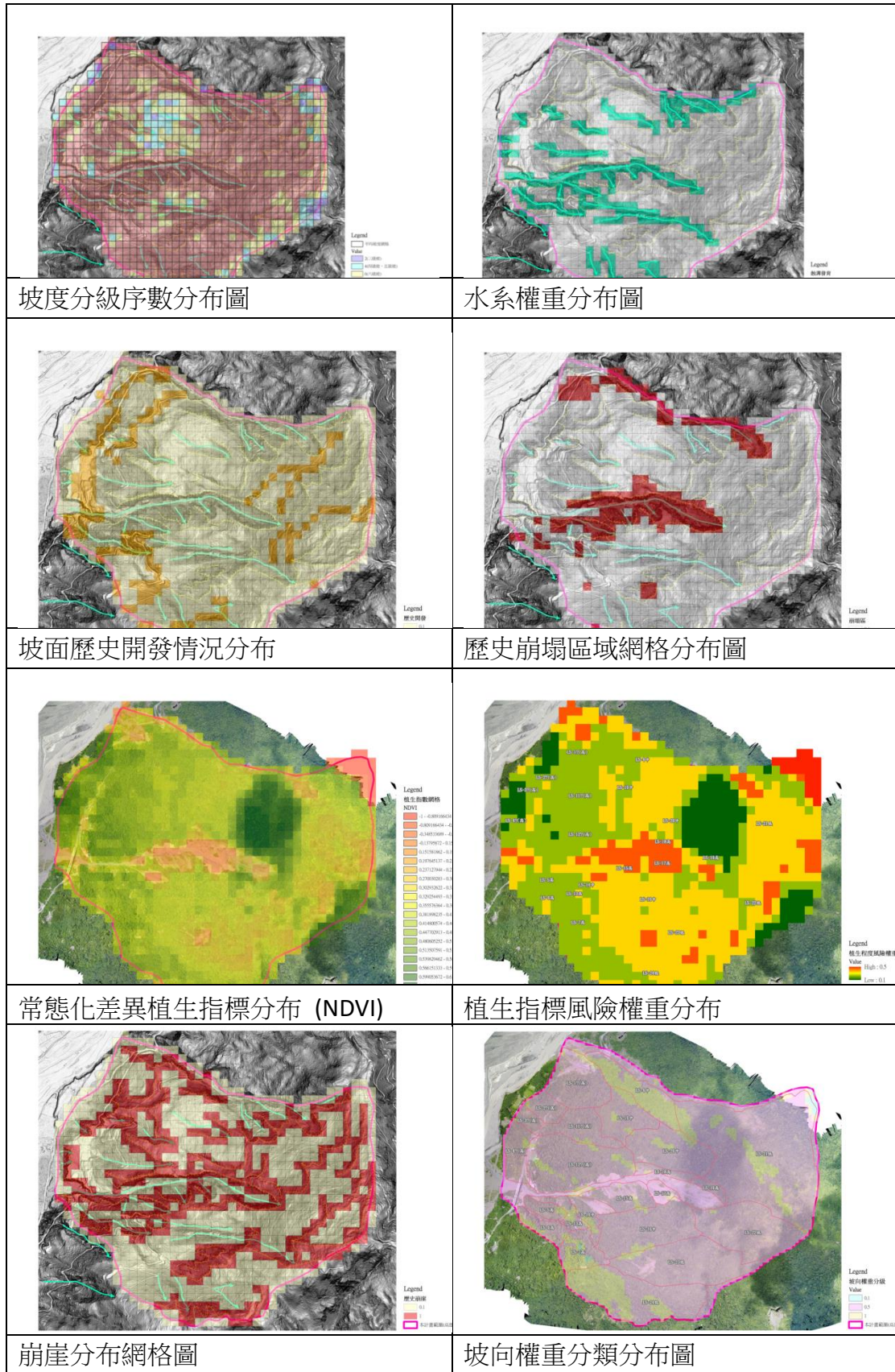


圖 5 崩塌因子分析圖

Figure 5 Flow chart of the analysis for factors of slope failure

III、結果與討論

(I) 從風險危害度來看一次性滑動可能性

由風險危害度分析結果 (如圖 6)，將各項因子之權重套疊相乘積，在套繪斜坡單元後，其計算結果風險危害度計算值級距差從 0.00001-2.4000 之間，在風險危害度的分類上，在低、中、高的風險級距分類，以 <0.0001 為低風險度，0.0001-0.01 為中風險度，0.01-2.4 為高風險度。由下圖顯示，高風險斜坡單元多分布於野溪兩側以及大規模崩塌區範圍的坡址區，其中又以 LS-5、LS-13、LS-14、LS-15、LS-16、LS-17、LS-18 等具較高的風險潛勢，從套疊各風險因子來看，高風險之斜坡單元則多屬坡度陡峭、植生稀疏裸露區、以及坡向成順向等區位，但這與中央野溪本身歷史曾發生土石流災害造成的地形較為脆弱有直接關係，這個部分無法直接得知對整個六龜區 D015 範圍是否存有一次性大規模滑動的影響，但從斜坡單元的劃分後能清楚的分辨在大規模崩塌潛勢範圍內，有幾處的邊坡可能存有較高的崩塌誘發潛勢歷史誘因。另外以本年度地質鑽探結果，本區的地層特性主要為表層崩積土以及地表下約 15 m 左右的高角度破碎硬頁岩為主，地表下高角度裂隙的特性使地下水不易蓄留，故在降雨延時短但強度強的情況時，地下水位抬升的速度快但消退的也快，此現象於本研究於現地調查鑽探孔監測時於 2017 年 7 月份尼莎颱風期間觀測到此特性 (如圖 7)。因此就本區的地質條件及特性而言，從歷史上來看，要讓本區的大規模崩塌區一次的滑動至少須達莫拉克颱風時的降雨量及降雨延時條件，才有使整體坡面發生滑動情況發生，但風險度分析的結果亦顯示在研究範圍內，可能因降雨誘發崩塌的部分，機率較高的為小型的高風險斜坡單元，此結果與莫拉克颱風時期爆發土石流災害的條件實際情況相符。

(II) 從現況調查及監測資料來看

從現況調查量測位態顯示，區內坡面露頭的地層傾向往北或南側，主要是與崩崖及蝕溝兩側的發育為主要的坡面傾向，且地層具備順向坡特性的斜坡單元為可能發生滑動的區域。透過地質鑽探顯示，本區的高角度裂隙很可能為造成本區域地下水難以蓄留的原因。

(III) 地中傾斜管及地表傾斜儀觀測成果

根據表 5 所觀測之結果顯示，BH-1 最大變動量約 11.91 mm，日平均變動量約 0.74 mm；BH-2 量測所得到之最大變動量約 6.58 mm，日平均變動量約 0.06

cm；BH-3 量測所得到之最大位移量約 19.31 mm，日平均變動量約 0.14 mm，且孔內出現多處位移；BH-4 量測所得到之最大變動量約 19.02 mm 日平均變動量約 0.13 cm，根據日本地滑對策技術協會（1979）之位移速率與邊坡穩定性判斷建議表（如表 6）顯示，BH-2 為潛在變動，BH-1、BH-3、BH-4 為準確定變動，建議可於後續計畫持續進行觀測作業，以確定其變動狀態。

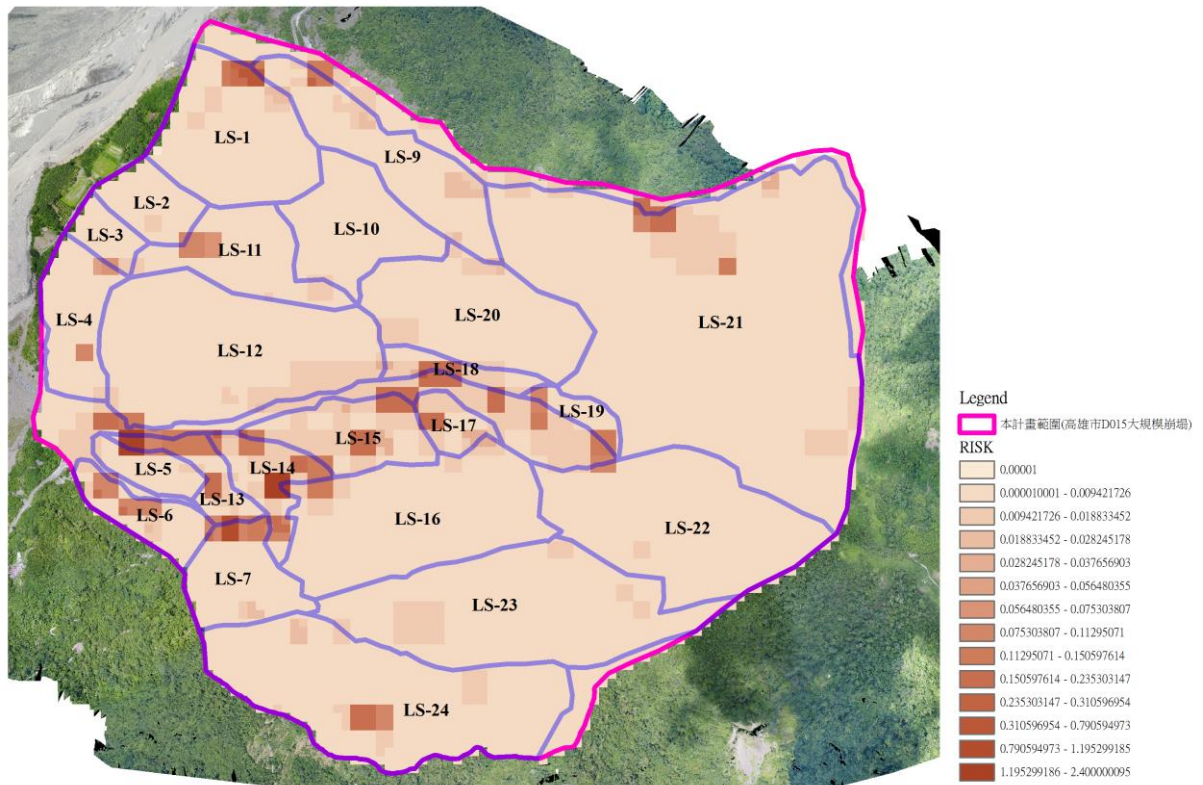


圖 6 本研究斜坡單元危害度風險分析圖

Figure 6 The analysis diagram of risk analysis for slope units of the study area

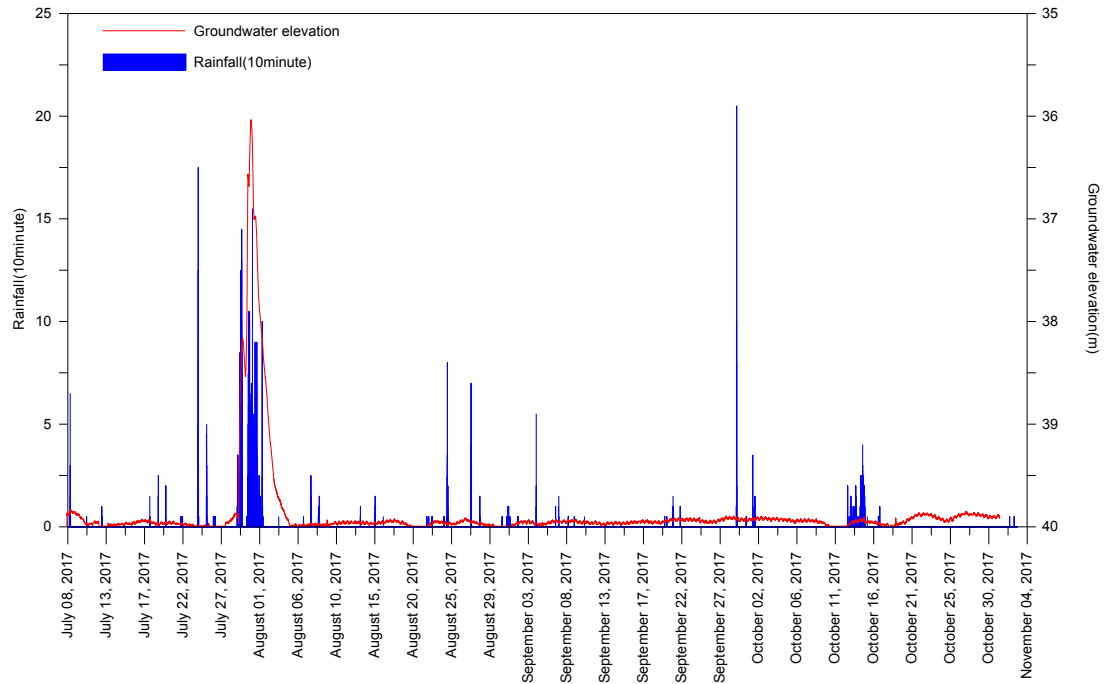


圖 7 2017 年 7 月份尼莎颱風-11 月份觀測雨量及地下水位關係情形

Figure 7 The relationship between rainfall amount and water table of the study area in July 2017 when Typhoon Nesat hit Taiwan

表 5 地中傾斜管觀測成果評估表

Table 5 Evaluation of observed variations of ground tilted tubes

孔號	最大變動量 (mm)	日平均變動量 (mm)	月平均變動量 (mm)	變動種別
BH-1	11.91	0.74	2.38	準確定變動
BH-2	6.58	0.04	1.31	潛在變動
BH-3	19.31	0.14	3.86	準確定變動
BH-4	19.02	0.13	3.80	準確定變動

資料來源：本計畫彙整

表 6 位移速率與邊坡穩定性判斷建議表

Table 6 Recommendations for the judgement of slope stability by means of displace velocity

變動種別	日變位量 (mm)	月變位量 (mm)	一定方向的 累積傾向	活動性判斷	摘要
緊急變動	20 以上	500 以上	非常的顯著	急速崩壞	崩壞型 泥石流型
確定變動	1 以上	10 以上	顯著	活潑運動中	崩積土滑動 深層滑動
準確定變動	0.1 以上	2.0 以上	略顯著	緩慢運動中	黏土滑動 回填土滑動
潛在變動	0.02 以上	0.5 以上	稍稍有	有待繼續觀察	黏土滑動崖 錐滑動

資料來源：(日本地滑對策技術協會 (1979))

IV、結論與建議

本崩塌區從歷史地貌及鑽探成果顯示，應屬牽引式滑動體，鑽探岩心及孔內攝影資料判釋上均可看出地質層次分為至少六處以上破碎裂隙以及剪裂泥部分，推測為牽引滑動體造成之滑動面與次滑動面，而針對本計畫之結論與建議分述如下：

1. 本崩塌區大規模崩塌範圍 D015 現階段仍屬受降雨誘因發生滑動或土石流潛勢區，目前主要保全為下游潤鳴山莊及高 133 線道路（紅水仙橋），故短期而言，優先以土石流防災疏散撤離為主（本區土石流雨量警戒值為 300 公厘），必要時管制高 133 線道路，以利預警與防災效益。
2. 以鑽探及邊坡穩定分析，因斜坡垂直裂隙發達地下水位較易排流，故整體看來發生一次性大規模滑動情況較不易，應多屬小型斜坡單元局部崩塌情況較顯著。
3. 崩塌風險評估方式多元，台灣較具明確地滑規模之梨山地滑區劃分危險度分 A、B、C 三等級，而本計畫區目前以梨山地滑分類方式的話，應均屬於危險度較低的 C 級，然本年度以地形坡度、水系蝕溝、曾開發情形、歷史崩崖區、崩塌裸露區、植生等因素套繪風險地圖，初步將斜坡單元分類為低、中、高風險性邊坡，以作為邊坡注意及規劃、治理輕重緩急的依據。
4. 本崩塌範圍內之土石流潛勢溪流高市 DF055，本年度 6-11 月林務局已興建系列防砂設施，期以達到淤砂填方效果，穩定上游河床及邊坡，但需注意滑動體因淤砂影響孔隙水壓上升之負面效果，建議未來可評估於壩上游區位兩岸之高致災風險邊坡設置排水工，以減少滑動誘因。
5. 整體效益評估上將未來可能投入之工作納為成本來評估，雖保全人員較少時，效益上顯示偏低，但仍有道路及零星農舍保全需求，建議仍需持續監測，依據監測資料評估後續是否投入整治，以達經濟效益。

V、謝誌

本研究承行政院農業委員會水土保持局臺南分局經費補助，謹此致謝。

VI、參考文獻

行政院農業委員會水土保持局 (2017) 水土保持技術規範。行政院農業委員會，

- 台北，257 頁。
- 山崩敏感區評估之製圖地形單元製作研究報告 (2007)。
- 行政院農業委員會水土保持局台南分局 (2015) 新發集水區 (高市 DF102 等重點區域) 細部調查規劃。
- 行政院農業委員會林務局(2012) 國有林深層崩塌致災潛勢調查評估-南部重點流域成果報告書 (高屏溪及曾文河流域)。
- 經濟部中央地質調查所 (2013) 101 年度國土保育之地質敏感區調查分析計畫成果)。
- 經濟部中央地質調查所 (2017) 潛在山崩與地滑區及影響範圍應用於地質敏感區之劃定與執行策略。
- 經濟部中央地質調查所，山崩地滑地質敏感區。
- 千木良雅宏 (2011) 大規模崩塌潛感區。
- 行政院農業委員會林務局 (2017) 國有林大規模崩塌潛勢區減災策略研擬及安全監測，第 2 次期中報告書。
- 中華防災學會、國立成功大學防災研究中心 蔡元融 (2015) 台日土砂災害之機制、預測及評估研討會「潛在大規模崩塌區影響範圍劃設方法擬定」。
- 簡榮興、黃全謚、曹鼎志 (2017) 莫拉克颱風對高雄六龜紅水仙溪之土石流災害分析。中興工程，第 134 期。
- 王文能 (2016) 崩塌的地質特性與防災。
- 青山工程顧問有限公司 (2017) 集水井工法於崩塌地地下排水有效性之精進-以梅花地滑區整治調查及設計為例。
- 行政院農業委員會水土保持局 (2016) 大規模崩塌區影響範圍劃設作業手冊 (草案)。
- 行政院農業委員會水土保持局 (2016) 大規模崩塌地區防災監測手冊 (草案)。
- 行政院農業委員會水土保持局 (2016) 大規模土砂災害集水區調適規劃作業參考手冊。
- 日本地滑對策技術協會 (1978) 地滑對策技術設計實施要領，一卷，第二期。
- Crozier, M. J. (1984) Field assessment of slope instability. *Slope instability*, 103-142.

莫拉克風災後之堰塞湖監測與土砂變遷分析

陳楠輝¹ 呂明鴻¹ 臧運忠¹ 張偉顛² 施保呈² 陳建良²

【摘要】林務局屏東林區管理處轄管之林班地集水區於民國 98 年莫拉克颱風期間新生大量崩塌地，導致大規模土砂運移及地形變動劇烈，更有數處河道土砂堆積形成堰塞湖。經歷年颱風、豪雨挾帶洪水之沖淤影響及屏東林管處經辦降挖導流後，目前堰塞湖已無蓄水，恢復河道型態。然因屏東林區管理處轄管國有林班地流域仍有大量殘存的土石及崩塌潛勢區；為監控該堰塞湖潛在危險及降低災害發生，屏東林區管理處於民國 101 年至 107 年辦理轄區堰塞湖監測等相關計劃。計劃期間建置現地監測系統，透過即時回傳現地雨量、水位及影像資訊，並配合現場調查、地形量測及影像判釋，持續監測原堰塞湖區及該管理處轄管之坡地與河道之地形變遷情形，並得以研判深層崩塌潛勢變化及新生堰塞湖發生可能性。於計劃期間利用測量成果進行地形比對後再估算土方量，得知 95 年至 105 年間旗山溪上游堰塞湖生成後民生二溪至民生一溪河段土砂淤積量由 1,140.0 萬 m³，增為 1,215.1 萬 m³，民生一溪至民生橋河段土砂淤積由 645.0 萬 m³ 增為 685.2 萬 m³，整體河道地形變化呈現兩岸支流侵蝕，主流河道堆積之趨勢。

【關鍵詞】堰塞湖、土砂監測、土砂變遷分析。

THE BARRIER LAKE MONITOR AND SEDIMENT CHANGE ANALYSIS AFTER TYPHOON MORAKOT

Nan-Huei Chen¹ Ming-Hong Lu¹ Yun-Chung Tsang¹ Wei-Yi Chang² Bao-Cheng Shih² Jian-Liang Chen²

【Abstract】 Lots of newborn landslide areas were occurred in forest compartments managed by the Forest Service, Pingtung Forest District Office (PFDO) when Typhoon Morakot hit Taiwan in 2009. Those landslides led a large-scale transportation of

¹成功大學防災研究中心

National Cheng Kung University, Disaster prevention research center

²行政院農業委員會林務局屏東林區管理處。

Council of agriculture, Executive yuan, Forestry Bureau, Pingtung Forest District Office

soils and rocks, severe terrain changes and many barrier lakes were formed due to the accumulation of large sediment on stream channel. The barrier lake has no water storage already and channels of stream have been restored to natural patterns after several years dredging by floods brought by typhoons and heavy rainfalls and diversion and digging works conducted by the Pingtung Forest District Office. However, there is still a lot of debris accumulated in slope and many potential collapse areas in compartments which are managed by PFDO. For monitoring the potential dangers of the barrier lake and reducing the occurrence of disasters, the PFDO has conducted barrier lake monitoring and other related programs from 2012 to 2018. This program has established monitoring system which can obtain information of rainfall, water level and topographical images in real time. This real time information combined with on-site investigations, topographical measurement and imaging interpretation, changes of slope land, stream system and topography of all managed compartments can be obtained and controlled. Then, the potential changes of landscapes caused by deep landslides and the possibility of occurrence of newly barrier lakes can be judged. After comparing changes of terrain, the estimated amount of sediment can be obtained. The monitoring program obtained that the sedimentation amount in the stream section between Ming-Sheng No. 1 and No. 2 creeks of the upstream of the Chi-Shan Creek were increased from 1140.0 ten thousand cubic meters to 1215.1 ten thousand cubic meters during the period from 2006 to 2016. The sedimentation amount in section between Ming-Sheng No. 1 creek and the Ming-Sheng bridge was increased from 6,450,000 cubic meters to 6,852,000 cubic meter during the same period. The overall changes in river terrain showed that erosion was occurred in tributaries and deposition was occurred in channels of the main stream.

【Key words】 Barrier Lake, Sediment Monitor, Sediment Change Analysis

I、前言

林務局屏東林區管理處（以下簡稱屏東林管處）轄管林班地集水區於民國 98 年莫拉克颱風期間新生大量崩塌地，土砂劇烈運移除了造成坡面及河床地形變動劇烈，更有數處坡面大規模崩塌及河道土砂堆積形成堰塞湖，經歷年颱風、豪雨挾帶洪水之沖淤影響及屏東林管處經辦降控導流後，目前堰塞湖已無蓄水，恢復河道型態。

然因屏東林管處轄管國有林班地流域仍有大量土石殘存及坡地崩塌潛勢區位，倘發生大規模崩塌可能造成河道阻塞形成新生堰塞湖，為持續調查監控該堰塞湖潛在危險及降低災害發生，屏東林管處於民國 101 年辦理「轄區堰塞湖監測系統設置及評估分析與對策研擬」、102 年辦理「轄管流域堰塞潛勢調查監控及評估分析與對策研擬」、103 年辦理「轄管流域堰塞潛勢調查及防災監控」、104 至 105 年辦理「國有林堰塞湖潛勢防災監控暨災害調查委託技術服務」以及 106 至 107 年執行中的「國有林大規模崩塌及相關防災監控暨災害調查委託技術服務」等計畫，民國 101 年建置現地監測系統即時回傳現地雨量、水位及影像資訊（如圖 1），同時配合現場調查、地形量測及影像判釋，持續監測原堰塞湖區及屏東林管處轄管流域坡地、河道之地形變遷以研判新生堰塞湖發生可能性及深層崩塌堰塞潛勢變化，以利掌握災害前兆並適時啟動相關防救災措施，減輕可能發生之災害風險。



圖 1 旗山溪堰塞湖監測系統

Figure 1 The monitoring system for the barrier lake in the Chi-Shan river

II、材料方法

監測期間持續蒐集並更新集水區現況資料，汛期期間重點區域變化（二溪及一溪堰塞湖）則由既設防災監測系統取得區域現況，整合相關資訊後進行土砂運移變遷分析。

(I)地形變動監測

利用不同時期數值地形以取得整體地形資料，整合航照、空載光達 (LiDAR)、無人載具 (UAV) 產製數值地形，進行比對地形變化情形。歷年數值地形蒐集行政院內政部所產製 95 年航照數值地形 (5m)、中央地質調查所 (現為內政部管理) 99 年空載光達 (LiDAR) 數值地形 (1m)、101 年航照數值地形 (2m)、102 年無人載具產製數值地形、104 年無人載具數值地形，105 年無人載具數值地形，監測期間透過地形測量成果進行地形比對 (如圖 2、圖 3)，確實掌握旗山溪堰塞湖

形成、沖刷、潰決之變遷情形，各河段 95 年至 99 年因 98 年莫拉克颱風期間旗山溪上游多處發生大幅崩塌，其中支流民生二溪發生大崩塌，崩塌土砂阻塞支流與主流匯流口形成堰塞湖，並於 99 年凡那比颱風期間支流土砂流出使堰塞湖再度堆高，利用兩期地形進行比對可知民生二溪至民生一溪河段土砂淤積 1,140.0 萬 m^3 ，101 年至 105 年累積土砂量，民生二溪至民生一溪河段土砂仍剩下 1,215.1 萬 m^3 ，民生一溪至民生橋河段土砂堆積 685.2 萬 m^3 ，堰塞湖堆積土體利用衛星影像圈繪出其堆積範圍進行計算，原民生二溪堰塞湖堆積土體仍有 355.4 萬 m^3 ，原民生一溪堰塞湖堆積土體侵蝕 707.8 萬 m^3 ，各河段歷年地形比對結果如圖 4 所示。

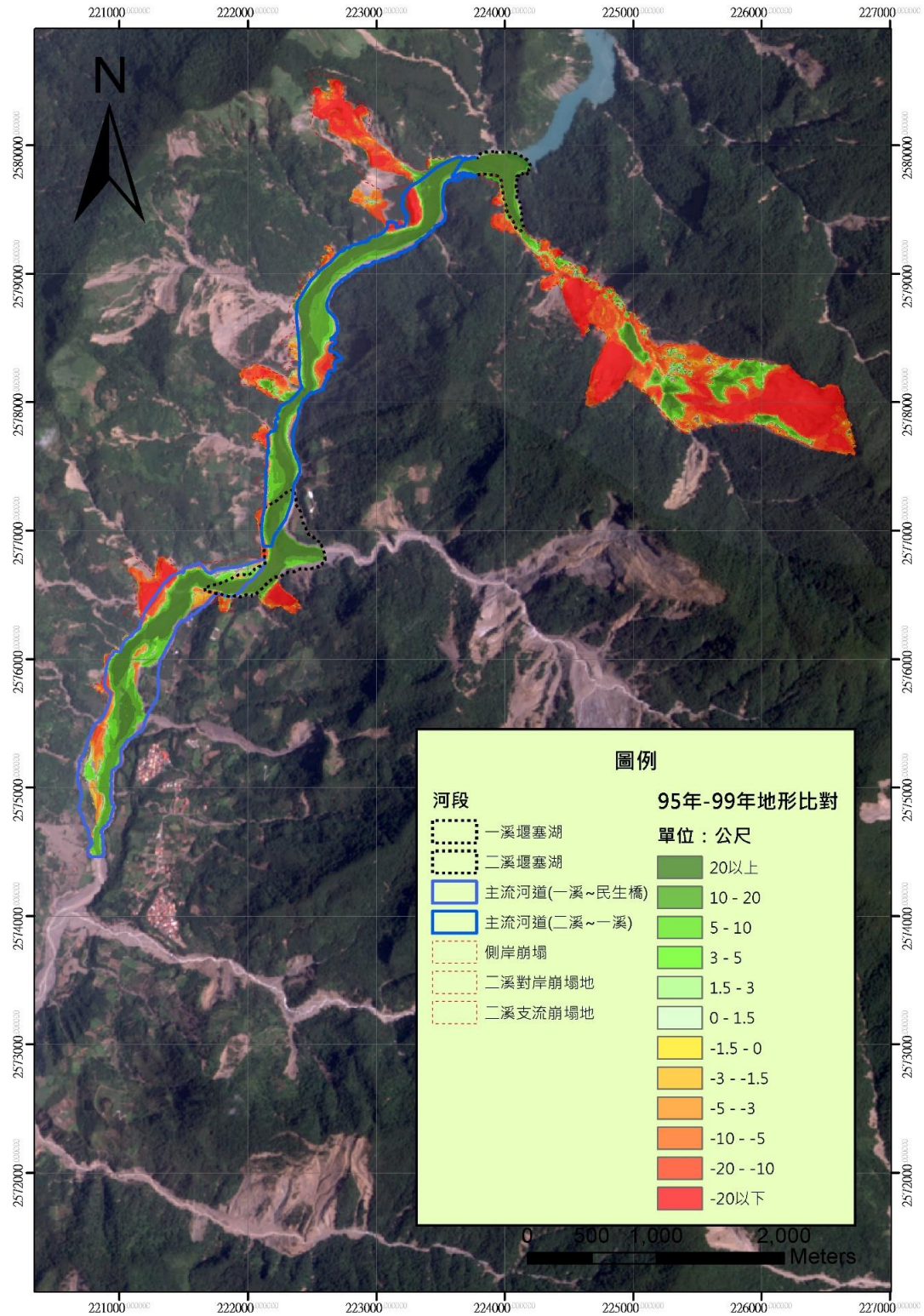


圖 2 95-99 年地形變動比對成果圖

Figure 2 Comparison results for annual terrain changes in 2006 and 2010

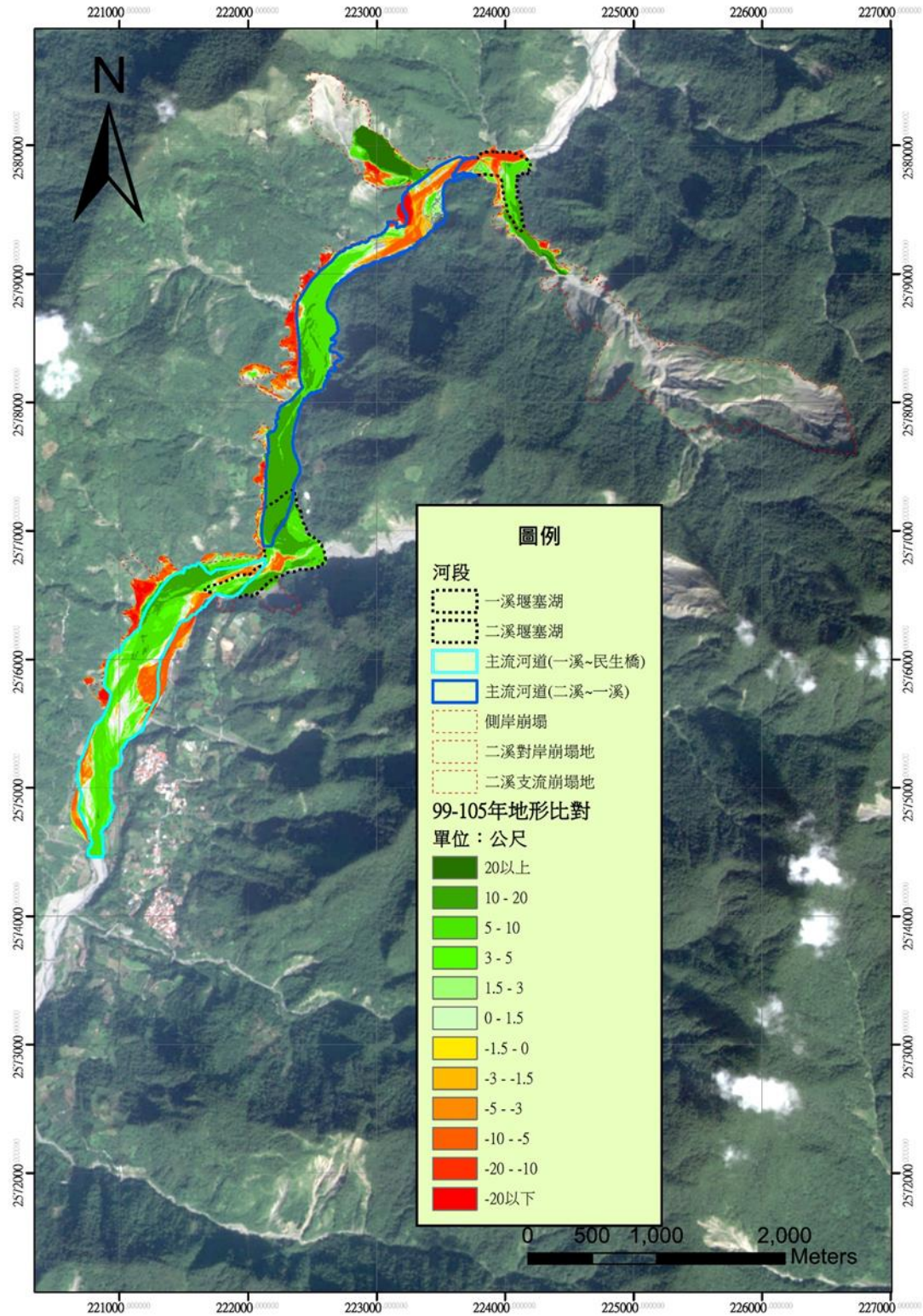


圖 3 99年至105年地形變動比對成果圖

Figure 3 Comparison results for annual terrain changes in 2010 and 2016

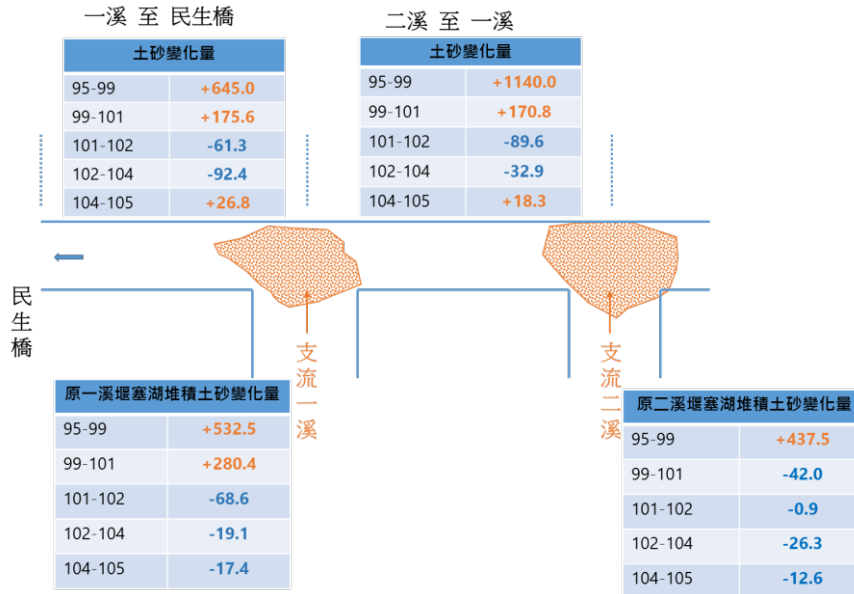


圖 4 各河段土砂變化量

Figure 4 Changes of sedimentation amount in different stream sections

(II) 集水區土砂運移趨勢分析

土砂運移趨勢分析係將集水區內之土砂運動定量模式化，模式分為數個重要的模組，包括了：(1)子集水區匯流系統模組；(2)降雨逕流模組；(3)土砂生產模組；(4)土砂輸送模組；(5)河道土砂收支(堆積或侵蝕)模組，各模組根據國內外之研究成果，發展物理式或統計式模型，成功將不同的物理運動機制，在同一集水區系統內進行演算，各機制所採用理論如下表 1 所示。

表 1 土砂收支模式採用理論

Table 1 Theories for the budget of sedimentation in stream channel

模擬現象	模擬項目	理論方法
降雨逕流	有效降雨量	SCS Method
	坡面漫地流	運動波理論
	河道水流	運動波理論
土砂生產	地表沖蝕	MUSLE
	崩塌	崩塌面積統計關係
土砂輸送	河道輸砂	輸砂公式
	土石流	平衡濃度公式

計算地形條件，採用 105 年度河道地形調查資料作為計算之起始條件，坡面崩塌裸露範圍則同以 105 年度衛星影像之判釋成果，作為起始條件。計算邊界自

旗山溪源頭處開始，計算至達卡努瓦聯外道路民生橋為止，其中包括二溪堰塞湖(支流二溪匯流口)、支流一溪匯流口與達卡努瓦聚落。

設定計算之評估節點為(旗山溪河道節點)：a. 原二溪堰塞湖，b. 原一溪堰塞湖，c. 民生橋。相關計算參數依據如下表 2 所示。

表 2 數值模擬相關計算參數

Table 2 Information used in numerical simulation

項目	計算參數依據
土砂生產量	105 年衛星崩塌率判釋、 新增崩塌面積與降雨量推估計算。
坡面土壤沖蝕	0.005-0.05，參考中央地調所成果。
降雨情境	95 年-104 年降雨資料。
坡面及坡長	5 m 數值高程模型，參考國土測繪中心成果。
地形條件與計算邊界	105 年河道地形調查資料

III、結果與討論

整體上本河段於莫拉克風災所造成崩落之土方大多仍堆積於河道上，土砂變化較劇烈之區域主要為支流與主流匯流口處，支流土砂流出所造成扇狀地持續侵蝕，使土砂流出至主流，堰塞湖溢流水道(主流河段)持續下刷切深，但在一溪與主流交匯處上游則有堆積增加之趨勢，藉由斷面測量成果發現同樣堆積情形，可佐證地形變化成果。

透過計算分析年平均土砂變遷量(詳見表 3 及圖 5)，認為重點土砂供應區包括有：(1) 原民生二溪堰塞湖上游集水區，流出之年平均土砂量高達 114.9 萬 m^3 ，成為下游河道最為主要之供應來源；(2) 民生一溪支流，年平均土砂流出量為 9.7 萬 m^3 ，整體呈現兩岸支流侵蝕，主流河道堆積之趨勢。而主流河道之重點堆積區，僅原堰塞湖上游集水區整體呈現侵蝕趨勢，自堰塞湖以下河段，則呈現堆積趨勢，土砂堆積量於一溪至民生橋河段最高，年平均土砂堆積量達 22.1 萬 m^3 。

表 3 原民生二溪堰塞湖及其下游河道年平均土砂變遷分析表

Table 3 Changes of annual average sedimentation in barrier lake of the Ming-Sheng No. 2 river and in downstream channels

主流河道節點	主流兩岸支流集水區	年平均土砂生產量 (萬立方公尺)	年平均土砂流出量 (萬立方公尺)	年平均河道沖淤量 (萬立方公尺)
二溪堰塞湖上游集水區		89.9	114.9	-25.0
	二溪支流	3.1	5.7	-2.6
一溪二溪間河道段		5.8 (+114.9+5.7)*	118.2	8.2
	一溪支流	2.7	9.7	-7.0
一溪至民生橋達卡努瓦里		7.4 (+118.2+9.7)*	113.2	22.1
合計		108.9	113.2	-4.3

* 主流河道除兩岸土砂生產量外，尚有上游河道段來砂及支流來砂量兩種土砂來源

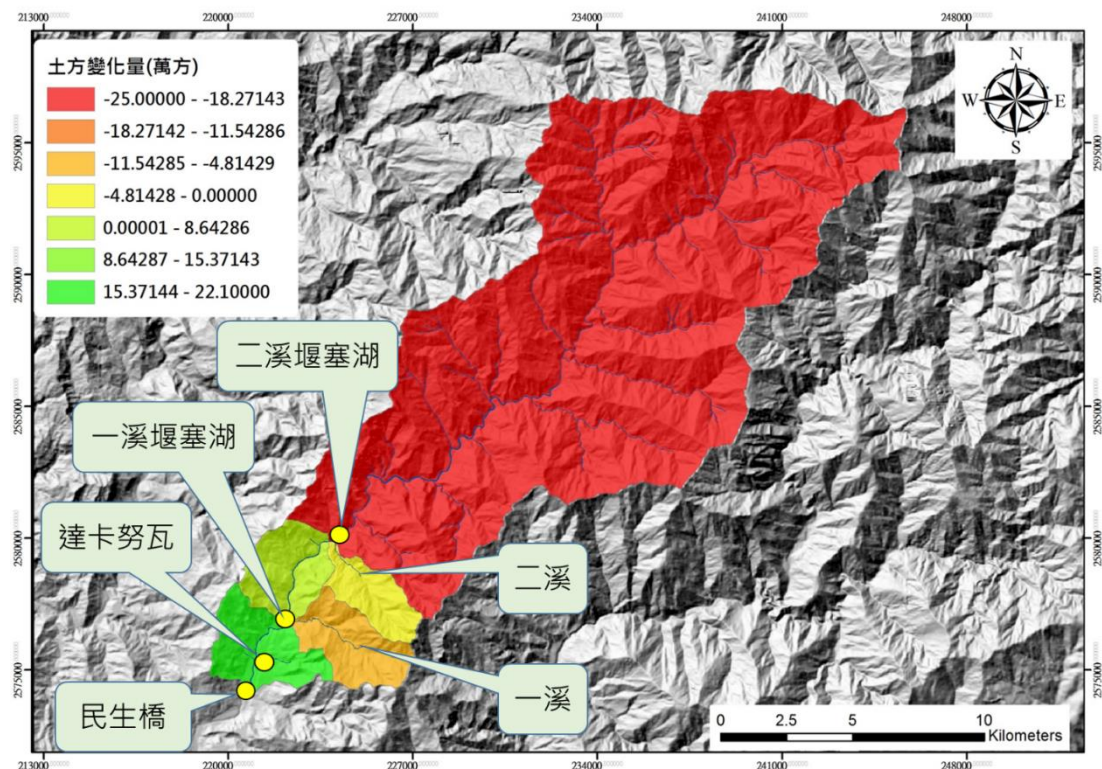


圖 5 原民生二溪堰塞湖及其下游河道年平均土砂變遷分析示意圖

Figure 5 The annual average change of sedimentation in channel of downstream of barrier lake of the Ming-Sheng No. 2 river

III、結論

(I) 堰塞湖土砂下移及大規模河道變遷災害潛勢

應用河道縱剖面之分析成果(圖 5)，莫拉克颱風造成旗山溪河道高程全面抬升，以本計畫研究範圍：二溪堰塞湖及其下游河道為例，河道抬升幅度最高處在二溪出口沖積扇處，堆積高度達 65 m，而達卡努瓦聚落處民生大橋，也有 15 m 之抬升幅度。河道坡度與寬度在莫拉克颱風後，皆有明顯的變遷情形。

莫拉克颱風後，雖二溪原堰塞湖區已逐漸由堆積轉變成為侵蝕趨勢，但因既有河道坡度 (103 年 10 月) 仍大於莫拉克颱風前之河道坡度，雖近年主要土砂變異區域多集中於主流深槽，地形變異相對較穩定，但河道流心與兩岸支流也是否已達到穩定狀態為關注之重點，另外因主流土砂持續侵蝕並下移之現象，對下游既有河階土地使用、聯外道路等造成衝擊亦為關注之重點。

(II) 一溪出口沖積扇土砂災害潛勢

一溪出口沖積扇形成於民國 101 年，與二溪出口沖積扇成為達卡努瓦聚落上游兩處重要之土砂控制節點，在原二溪堰塞湖逐漸侵蝕之情形下，一溪出口沖積扇形成上游來砂之緩衝堆積區，使來自一溪以上土砂暫時堆積於一溪至二溪河段，減緩下游達卡努瓦聚落土砂堆積之潛勢。

但因一溪集水區仍有土砂流出之現象，其出口沖積扇受到上游來砂、一溪土砂流出數縮主流，以及主流河道轉彎之綜合效應，颱風豪雨期間之流況較為複雜，較難單以河道地形調查或計算模擬，預測其沖積扇變遷過程。

若再次遭逢一溪土砂流出，因距離保全對象較近，相對於二溪，而對聯外道路、低位河階地有較大且直接之影響，另外因二溪沖積扇大幅侵蝕而減少攔阻上游來砂之情境下，目前由數值地形比對及縱橫斷面測量結果顯示土砂堆積於一溪至二溪河道，如後續一溪沖積扇大幅侵蝕，原先阻攔堆積於一溪至二溪河段之土砂，恐有相似之土砂趨勢，土砂快速下移至一溪至民生橋河段之可能，造成下游聚落之土砂災害。

(III) 達卡努瓦聚落土砂災害潛勢

達卡努瓦聚落雖位於國有林範圍外，但因其聚落緊鄰於一溪出口沖積扇下游，直接承受上游來砂造成河道變遷所造成之衝擊，旗山溪在於一溪出口沖積扇下游，一溪至民生橋河段，並無明顯河道深槽，河道變遷也呈現沖淤互現，尚未達達較為穩定之狀態。

故在河道流心尚未穩定、底床仍有聚落沖淤變遷之潛勢下，達卡努瓦聚落仍有受到土砂災害之潛勢，雖主聚落活動範圍與河道有近 90 m 之安全高差，但聯外道路橋樑為重要設施，河道兩岸河階為聚落耕作、活動範圍，仍須持續評估之土砂災害潛勢，避免因河道快速沖淤造成之河階侵蝕或掩埋等土砂災害。

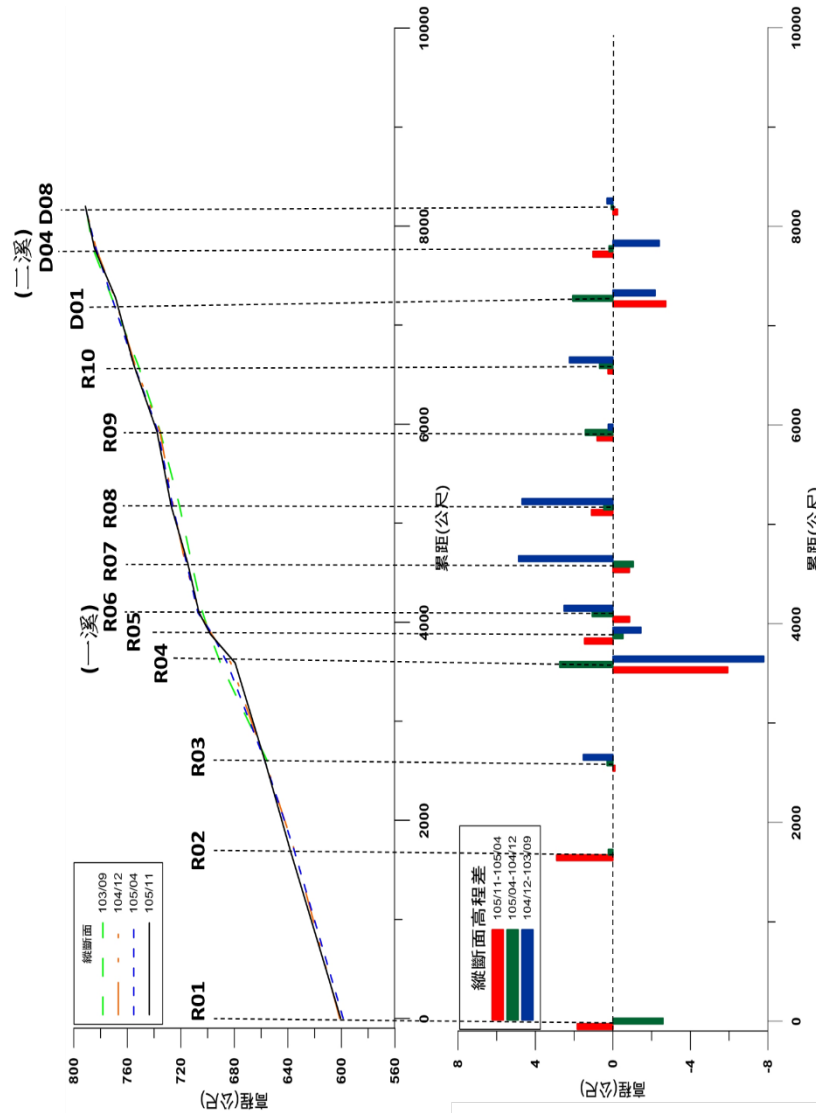


圖 6 縱斷面比對圖 (103-105 年)

Figure 6 Profile comparison chart (2014-2016)

IV、參考文獻

- 屏東林區管理處 (2012) 轄區堰塞湖監測系統設置及評估分析與對策研擬。
- 屏東林區管理處 (2013) 轄管流域堰塞潛勢調查監控及評估分析與對策研擬。
- 屏東林區管理處 (2014) 轄管流域堰塞潛勢調查及防災監控。
- 屏東林區管理處 (2016) 國有林堰塞湖潛勢防災監控暨災害調查委託技術服務。

堰塞湖防災治理與管理—以龍泉溪為例

臧運忠¹ 林昂² 吳定澄² 劉瓊蓮³ 邱欣慰⁴ 張蘇能⁵ 施靜惠⁶

【摘要】堰塞湖之天然壩體一旦發生潰決破壞，其所引致的洪水及土砂災害將對下游保全對象造成嚴重衝擊，為下游社區人員安全之莫大隱憂。2006 年臺東縣海端鄉龍泉溪下游谷口處發生大規模坡面崩塌，崩塌土石阻斷下游河道形成堰塞湖。堰塞湖形成後林務局臺東林區管理處與各權責機關積極辦理各項防減災工程措施，並於現地建置觀測系統，即時監控崩塌地與河道變化情形。2013 至 2017 年臺東林管處持續對龍泉溪崩塌地進行遙測影像判釋、地下傾斜管變位觀測、河道土砂變遷監測等工作，並對河道進行土砂變遷觀測與分析。在相關減災防治工程的規劃施行下，天然壩體並未產生明顯的破壞變異，湖區蓄水也逐漸減少並消失。往後持續透過遙測影像監控判釋顯示集水區的崩塌率由初期的 1.3% 降至 0.5%，崩塌地也未有明顯變化，其邊坡位移速率至 2014 年以後也降至潛在變動等級 (0.02 mm/day) 以下。透過無人飛行載具 (UAV) 地形監測，河道也由淤積轉為侵蝕，顯示上游的來砂量逐年減少，整體而言龍泉溪之土砂生產運移逐漸趨於穩定。

【關鍵詞】堰塞湖、遙測影像、地下傾斜管、無人飛行載具

¹ 國立成功大學防災研究中心代理主任，通訊作者。電子郵件: tyc@dprc.ncku.edu.tw
Acting Director, Disaster Prevention Research Center, National Cheng Kung University. Corresponding Author.
E-mail: tyc@dprc.ncku.edu.tw

² 國立成功大學防災研究中心工程師
Engineer, Disaster Prevention Research Center, National Cheng Kung University.

³ 行政院農業委員會林務局臺東林區管理處處長
Director, Taitung Forest District Office, Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan.

⁴ 行政院農業委員會林務局臺東林區管理處課長
Section Chief, Taitung Forest District Office, Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan.

⁵ 行政院農業委員會林務局臺東林區管理處技正
Technical Specialist, Taitung Forest District Office, Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan.

⁶ 行政院農業委員會林務局臺東林區管理處技士
Associate Technical Specialist, Taitung Forest District Office, Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan.

DISASTER MONITORING AND MANAGEMENT OF LANDSLIDE DAM IN THE LONGQUAN RIVER

Yung-Chung Tsang¹ Ang Lin² Ting-Tseng Wu² Chiung-Lien Liu³
Xin-Wei Qiu⁴ Su-Neng Chang⁵ Ching-Hui Shih⁶

【Abstract】Once the landslide dam is failure, it will possibly cause flood and sediment related disasters, and is a serious impact on downstream residents and causing great worries. In 2006, a landslide dam triggered by a large-scale landslide occurred at the mouth of valley of the Longquan River in Haiduan, Taitung. After the landslide dam was formed, Taitung Forest District Office and other authorities actively executed various anti-disaster projects. The monitoring system was established to monitor changes of the landslide and river channel in real time. Taitung Forest District Office continuously observed the landslide and river channel through monitoring system operation, remote sensing image interpretation, inclinometer observations, and river sediment estimation from 2013 to 2017. Under the various prevention and mitigation measures were implemented, the natural dam did not failure, and the water in the lake also decreased and eventually disappeared. It showed that the landslide rates decreased from 1.3% to 0.5% in the catchment area through remote sensing image interpretation. There were no obvious changes in the landslide area, and the slope displacement rate was also dropped to 0.02 mm/day after 2014. Through UAV-based terrain monitoring, it showed that the soil materials from the catchment area were decreased and the fluvial erosion was initiated. In general, the sediment production and movement in the Longquan river basin has been stabilized gradually.

【Key words】 Landslide dam, Remote Sensing Image, Inclinometer, Unmanned Aerial Vehicle

I、前言

行政院農業委員會林務局臺東林區管理處（簡稱：臺東林管處）轄區位於臺灣東南方，依山傍海，地勢陡峻。2006年7月，轄區內之龍泉溪下游谷口處開始發生小規模崩塌，翌日發生芮氏規模4.6地震，大量崩落土石阻塞河道並形成堰塞湖。堰塞湖形成之後臺東林管處成立專案小組緊急會勘，在短時間內提出緊急處理對策並規劃長期監測計畫實施之建議（臺東林管處，2006）。2007年建立土砂觀測系統，包含影像觀測系統、水文觀測系統、現地資料處理系統及資料傳輸系統，提供堰塞湖災害預警時之即時參考資訊，此外也規劃及施作短中長期處置工程，包含堆石潛壩工程、防砂梳子壩工程、溢流河道工程、崩塌堆積區護坡工程等。除各項工程施作外，也針對龍泉溪堰塞湖持續進行各種監測及其它相關評估工作，如現地調查及地形測量、土砂沖淤變化評估、減災工程效益評估、無人載具空拍監測、遙測影像判釋等（臺東林管處，2007）。2010年除了幾項監測工作持續進行外亦針對壩體進行地電阻量測，推估地表下的資訊，以了解天然壩體與原地形之交界面及壩體本身之地下水位分布情形，同時進行邊坡穩定性分析，評估天然壩的邊坡穩定性（臺東林管處，2010）。2011年辦理地質鑽探，取得岩心進行判釋，以了解崩塌地岩盤位置及地下水分布，並進行地下傾斜管變位觀測，可研判坡面是否有滑動之徵兆（臺東林管處，2011）。在歷經多次豪雨及颱風事件侵襲下均能有效控制，堰塞湖整體未發生災變，顯見整治發揮功效，湖區蓄水也逐漸減少並消失。然而目前雖無蓄積水體，但集水區與河道內仍有土砂殘存。為避免土砂下移造成之二次災害，土砂治理規劃已由原先的堰塞湖緊急處置防災需求轉變為集水區整體土砂生產、流出及河道沖淤設計規劃（臺東林管處，2014），透過歷年觀測評估崩塌區與堰塞湖區之變遷情形，進一步評估河道土砂變遷過程，及其土砂治理策略（臺東林管處，2017）。

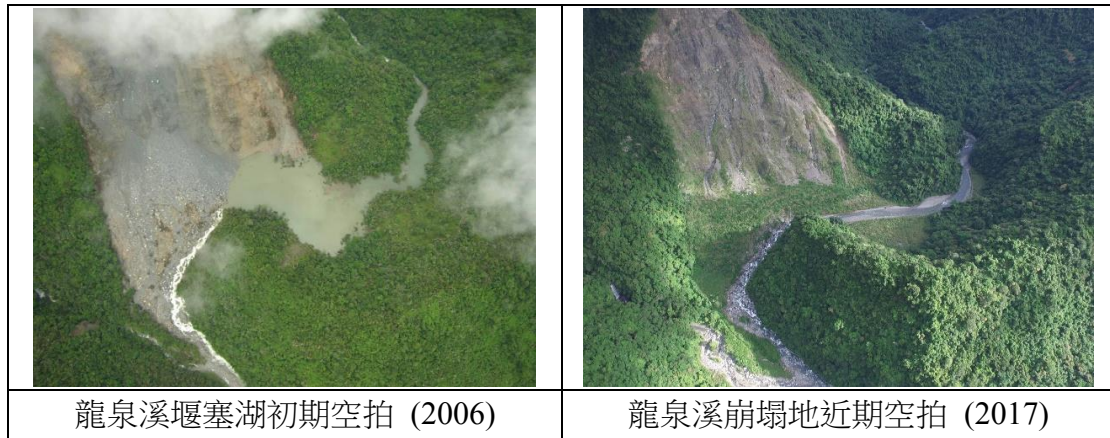


圖 1 龍泉溪堰塞湖及崩塌地

Figure 1 Locations of landslide and landslide dam in the Longquan River

表 1 龍泉溪堰塞湖及崩塌地基本資料

Table 1 Basic information of landslide and landslide dam in the Longquan River

堰塞湖基本資料		崩塌地基本資料	
湖面面積	5.4 ha	崩塌面積	16 ha
迴水長度	700 m	最大長度	520 m
最大水深	50 m	最大寬度	400 m
蓄水體積	800,000 m ³		
溢流口寬度	15 m		

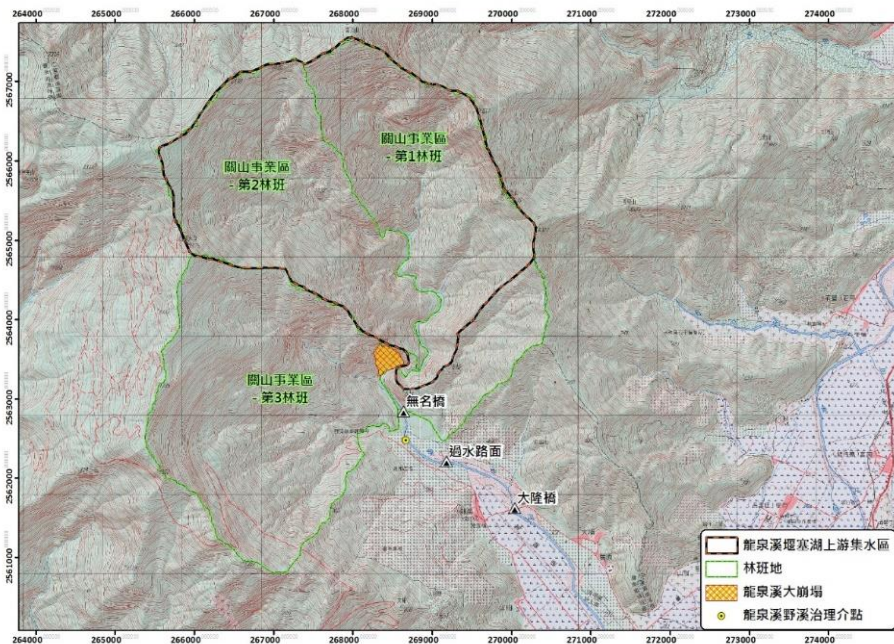


圖 2 龍泉溪上游集水區及崩塌地位置圖

Figure 2 Locations of landslide area in the upstream watershed of the Longquan River



圖 3 龍泉溪堰塞湖初期治理重大事誌

Figure 3 Early period of major governance of landslide dam of the Longquan River

II、分析方法

(I)遙測影像判釋方法

蒐集福爾摩沙衛星二號及 SPOT 衛星龍泉溪流域之衛星影像，分析龍泉溪流域內之崩塌變化趨勢。

衛星影像經進一步校正後 (LEVEL 4 與融合產品)，除可大範圍監測集水區之現況外，更可應用影像光學特性，進行崩塌裸露地之判釋工作。除前述之影像選擇、正射校正、雲層與陰影區域的濾除，進一步應用正規化植生指標 (NDVI) 進行裸露地的初步判釋，由植生分布指數畫定裸露區域，並以光譜強度分布資料去除明顯雲霧及陰影屏蔽區域，得到初步裸露地分類結果，NDVI 正規化植生指標值定義如下：

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

其中，NIR 為近紅外線波段，R 為紅色光波段。NDVI 指數介於 -1 到 1 之間，其值越大表示地表覆蓋程度越好，越低表示覆蓋程度越低，故可由 NDVI 指數判釋非植生裸露地。

先利用 NDVI 正規化植生指標進行初步判釋後，再利用已建立之流域基本資料庫，在完成初步裸露地判釋後，將其中屬於低坡度範圍之河道、人工建物與墾地等誤判區域予以濾除，並利用現場調查與既有 GIS 空間資料，將建物、道路與耕地等非崩塌地區予以濾除，最後再利用人工判釋進行最後校核確認，即可獲得正確之崩塌地判釋成果。

(II)地下傾斜管變位觀測

針對邊坡滑動面的監測系統，傾斜觀測管是最常使用也最為重要的監測系統儀器，因其可直接反應不同地層深度之滑移變位量。傾斜觀測管之構造如圖 4 (I)所示，主要為傾斜感應器及內含四個凹槽之 ABS 材質傾斜觀測管，傾斜感應器上裝有上下兩對滑輪，滑輪軸桿與探測器內置之雙軸感應器相連結，傾斜管之四凹槽位置彼此互差 90° ，分別定為 A0、B0、A180 及 B180 等四個方向，傾斜觀測管之裝設原則上以 A0 向對準滑動面方向，B0 向則垂直滑動面方向。

觀測時將傾斜感應器及滑輪組件放入傾斜管之導槽內，並以電纜連接傾斜感應器及指示器，自孔底向上至孔頂，每隔 50 cm 測定 A 軸與 B 軸(A 軸係滑動方向，B 軸則與 A 軸相互垂直)之傾斜角度，完成後旋轉 180 度再量測一次，用以消除漂移誤差而得較正確的結果。分析時和起始量測值進行比較，了解觀測期間的傾斜角度變化情形，以推測滑動面的位置和滑動量，其分析原理如圖 4 (II) 所示，其途中之轉折點即為滑動面之所在。

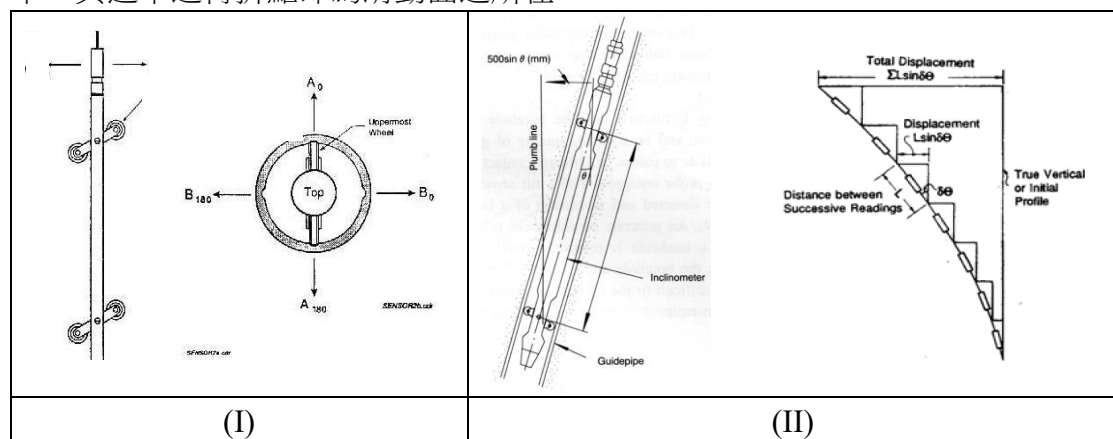


圖 4 傾斜管之構造及分析原理

Figure 4 Structure and analysis principle for inclinometer

(III)河道土砂變遷監測

本計畫利用 UAV 進行影像航拍與數值地形產製，利用歷次地形資料成果，

進行河道溪床變動差異分析，探討流域各河段歷年溪床高程變動與期間所遭遇重大水文事件之關聯性，由各期河床監測資料相互比較，即可得知河道地形變化。

為減少誤差與提高成果精度，將 UAV 拍攝影像建置之數值地形模型與當地 LiDAR 高精度數值地形模型計算取得高程差值，從高程差值可以判斷成果與已知基準的差值，將此差值平滑化後得到差值分布的趨勢，為每個結果與基準的誤差曲線，此誤差分布將再進一步對不同參數所建置的模型進行分析，除了修正模型之外亦能濾除數值地形模型裡所有低頻之雜訊。

數值地形之估算，首先將所收集之地形資料或是測量儀器所量取之地表點位進行網格模型建置，建立網格化數值高程模型（規則網格），每一個柱狀體代表一個矩形方塊的侵淤體積（圖 5），再將兩次不同時期之高程模型資料，比對各個網格之高程差值，其差值與網格平面空間大小之乘積，即為體積變化量，若後期地形減去前期地形之網格高程差為正值，表示該格網格為堆積現象，反之，若後期地形減去前期地形之網格高程差為負值，表示該格網格體積量減少，明顯為沖刷現象，最後，進行各格網計算結果加總，則可獲得體積變化量。

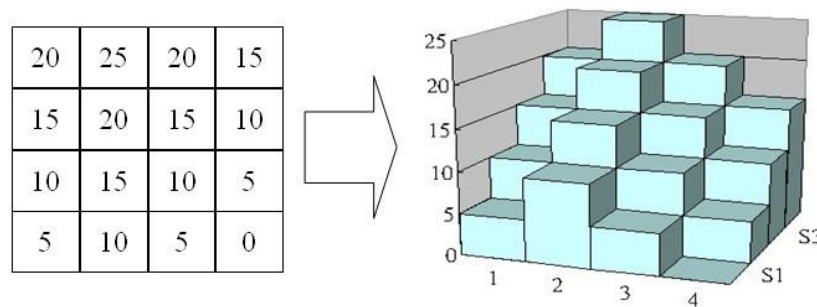


圖 5 土砂變異之矩柱體計算法示意圖

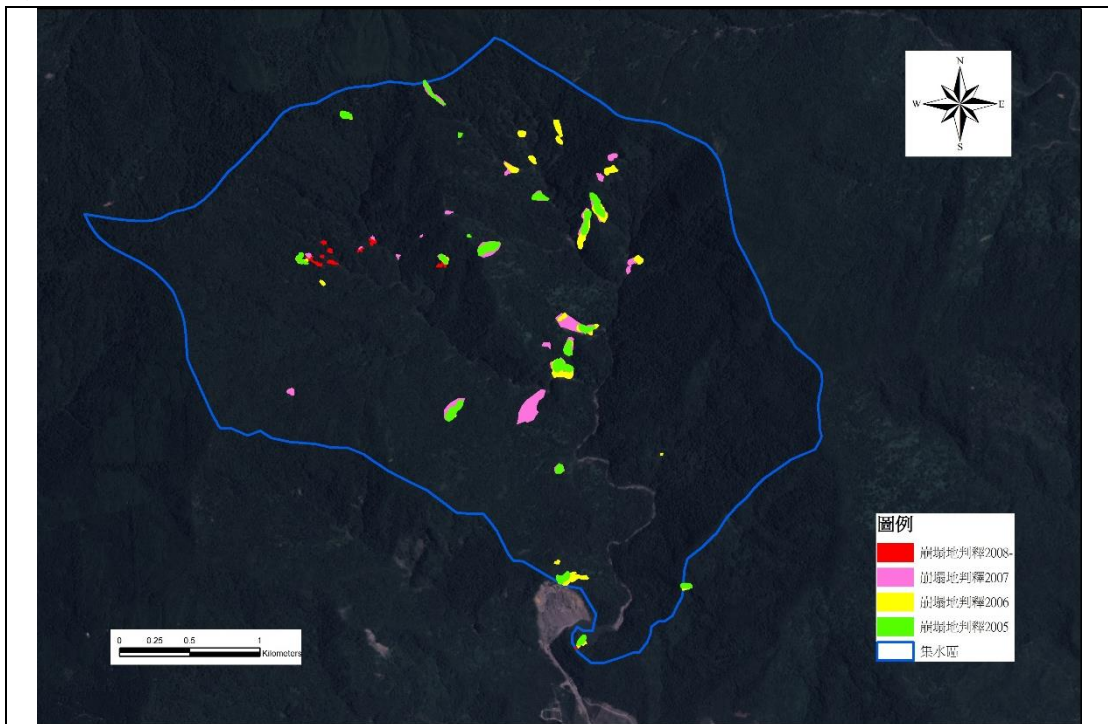
Figure 5 Schematic diagram for the calculation of sediment volume variance

III、結果與討論

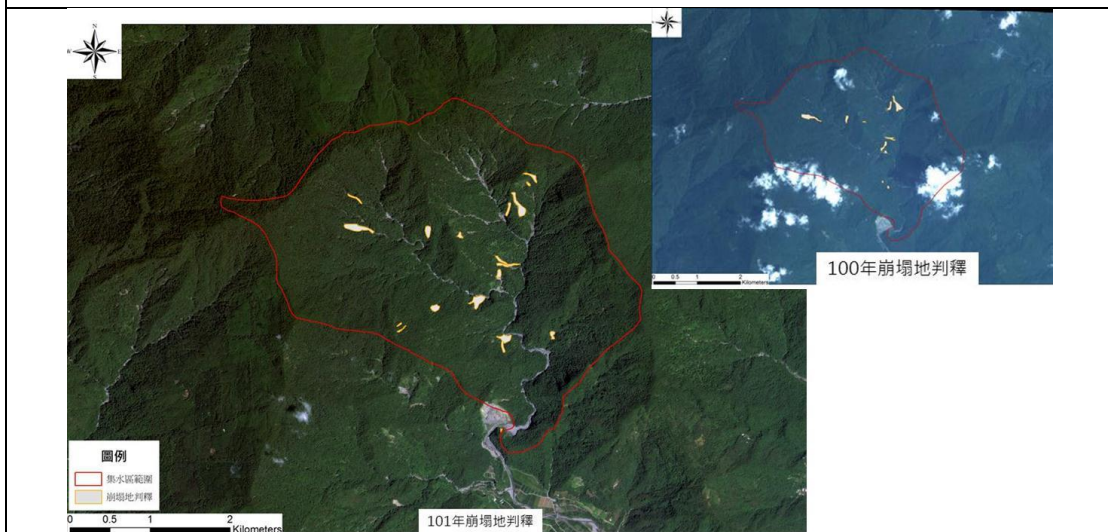
(I) 龍泉溪流域崩塌地判釋成果

龍泉溪上游集水區的崩塌地判釋成果如圖 6 所示，圖中之實線框即為龍泉溪上游集水區之範圍。經計算（表 2）從 2005 年 4 月至 2006 年 12 月（地震後）崩塌面積從 8.6 公頃升至 10.1 公頃，崩塌率從 0.7% 升至 0.8%。至 2008 年 7 月崩塌面積增至 16.3 公頃，崩塌率上升至 1.4%。至 2011 年 9 月逐漸復育，崩塌面積降為 8.7 公頃，崩塌率降至 0.7%，但 2012 年 12 月天秤颱風後（池上雨量站累積雨量 579 mm）崩塌面積回升至 11.4 公頃，崩塌率升至 1.0%。近年(2014-2017)龍泉溪上游集水區有持續植生復育之情形，2016 至 2017 年崩塌率雖然有小幅上

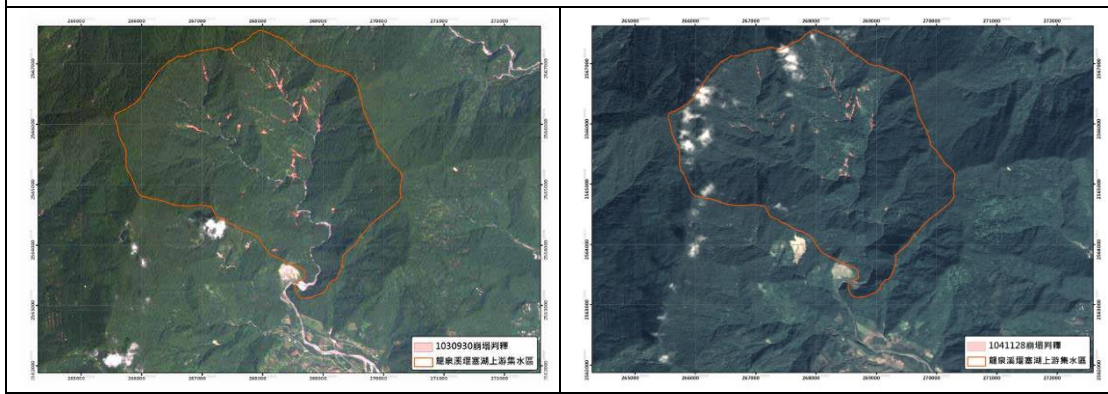
升，但整體仍維持在 0.5% 左右，無明顯變化。



2005~2008



2011~2012



2014/09

2015/11

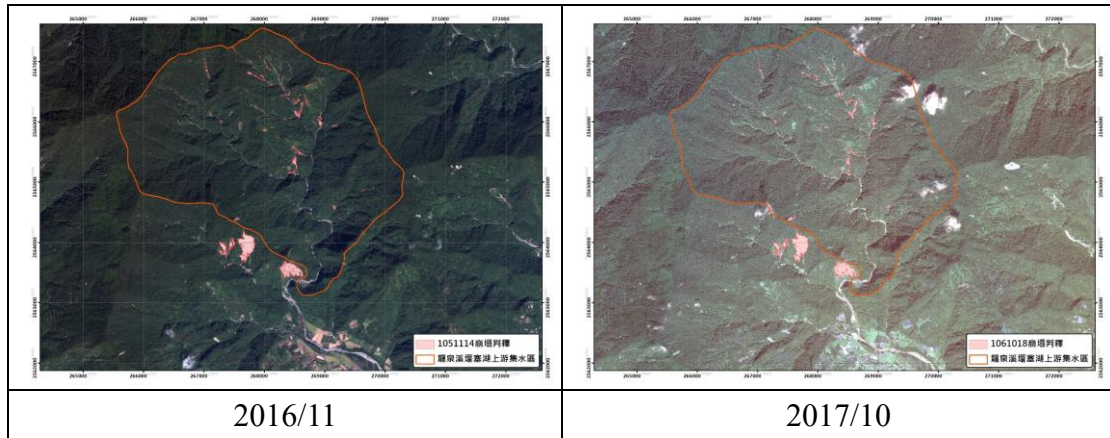


圖 6 龍泉溪崩塌區上游集水區影像判釋

Figure 6 Interpretation for images of the upstream watershed of the Longquan River

表 2 龍泉溪崩塌區上游集水區崩塌變遷

Table 2 Changes of landslide areas in the upstream watershed of the Longquan River

項次	影像時間 (年/月/日)	影像解析度 (公尺)	崩塌面積 (公頃)	崩塌率 (%)
1	2005/04/30	8	8.6	0.7
2	2006/12/23	8	10.1	0.8
3	2007/07/20	8	15.5	1.3
4	2008/07/02	2	16.3	1.4
5	2011/09/07	2	8.7	0.7
6	2012/09/05	2	11.4	1.0
7	2014/09/30	2	11.1	0.9
8	2015/11/28	2	6.2	0.5
9	2016/11/14	1.5	5.4	0.4
10	2017/10/18	1.5	6.0	0.5

(II) 地下傾斜管變位觀測成果

孔位 A 的 A+方向為南偏東 30 度、B+方向為南偏西 60 度，而 A 孔的量測結果如圖 8(I) 所示。在深度 7 m 至 15 m 處有一明顯錯動之情況，研判應是傾斜管有受到軸向的擠壓後所造成的結果；至於地表的位移的部分，至 2014/06/04 止在 A+方向的位移量為 14 mm，在 B 方向並無明顯得位移產生，且其滑動深度約在地表下 40 m 左右。然而至 2014/10/29 的量測結果可明顯看出 A+方向的位移量有回彈的現象發生，且為首次發生，推測可能和雨季有關，或因傾斜觀測管鬆動所導致。從 2015/09/09 至 2017/2/21 這段期間的傾斜變位結果則無明顯的改變，

顯示在 A 孔的變化在這段期間趨於穩定，而自 2015/12/22 至 2017/10/20，此孔位 A+方向仍持續緩慢向南偏東方向移動，2017/08/25 觀測到之位移量達 15 mm，是歷年觀測以來最大值，顯示邊坡雖趨於穩定，但淺層邊坡仍有滑動的傾向。A 孔地表下 1 m 處的合位移情形如圖 8(II) 所示。

孔位 C 的 A+方向為南偏東 40 度、B+方向為南偏西 50 度，而 C 孔的量測結果如圖 8(III) 所示。根據觀察結果在深度 20 m 處有明顯的變化，研判可能是滑動面所在。至於地表的位移的部分，至 2014/06/04 止在 A+方向的位移量為 29.7 mm 左右，並由 2014/10/29 的量測結果發現位移量回彈至 25.2 mm。2015/09/09 至 2015/12/22 無明顯變化，但 2016/10/26 至 2017/10/20 這段期間的傾斜變位結果又增至 31.8 mm，超過 2014/06/04 的結果。在 B 方向則於 2017/2/21 有較明顯的位移產生，但參考 2017/10/20 觀測結果，發現 B 方向無明顯位移，可推測趨於穩定。C 孔在地表下 26 公尺內的岩層相當破碎，且無明顯的岩層界面，若配合傾斜觀測管的變形資料，較可能的滑動深度應在 18~22 公尺附近。C 孔地表下 1m 處的合位移情形如圖 8 (IV) 所示，其合位移的情況從 2015/12/22 至 2017/10/20 有增加趨勢，增加至 33.07 mm。



圖 7 龍泉溪傾斜管監測孔位分布位置

Figure 7 Locations of the inclinometer in the Longquan River

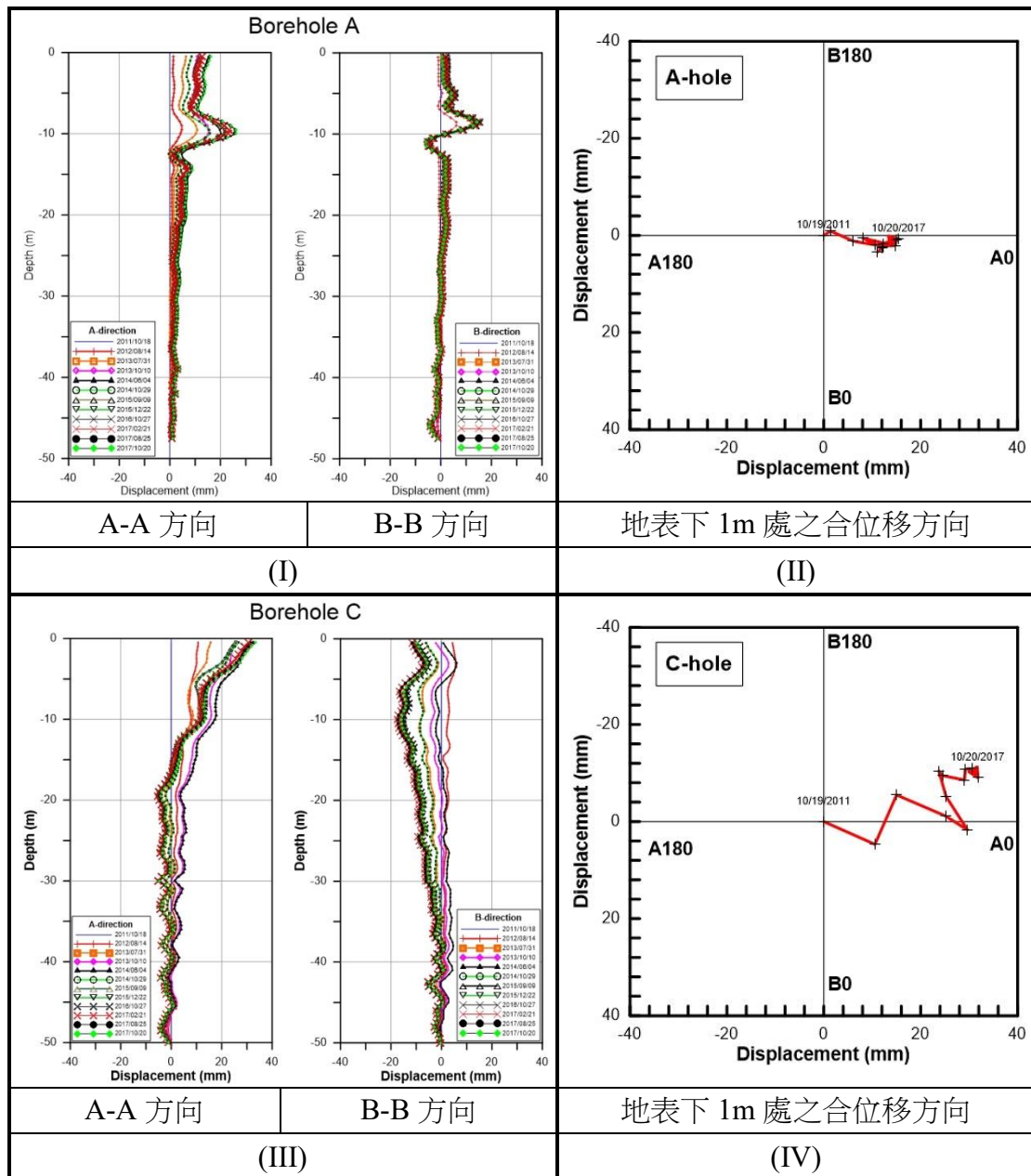


圖 8 地下傾斜管變位觀測結果

Figure 8 Results of the observed displacements of the inclinometer

彙整計算 A 孔及 C 孔地表下 1 m 處龍泉溪傾斜管量測累積合位移量情形，示意如圖 9 所示，繪製成時間－累積合位移量關係如圖 10，顯示整體而言，A 孔與 C 孔在 2012~2014 年期間的累積合位移量上升趨勢較明顯，尤其 2013 年 9 月天兔颱風(池上雨量站累積雨量 563.5 mm)前後累積合位移量上升幅度最明顯。在 2014-2017 年期間上升趨勢減緩，近年 A 孔與 C 孔的累積合位移量分別維持在 12-15 mm 和 30-33 mm 左右。

圖 11 為龍泉溪傾斜管量測歷次日位移量變化，即兩次傾斜管量測期間的位移量變化除以兩次傾斜管量測期間的日數，單位是 mm/day，詳細數據如表 3 所示。第一次的量測時間為 2011 年 10 月 18 日，以該次的量測數據做為基礎值，故此量測視為第 0 次，兩孔歷次的量測時間參考表 3，其中位移量變化較明顯的為第 3 次量測，兩次量測時間分別是 2013 年 7 月 31 日及 2013 年 10 月 10 日，約兩個半月左右，期間較大的事件為天兔颱風，A 孔及 C 孔的日位移量分別為 0.064 mm/day 及 0.129 mm/day。到了第五次量測（2014 年 10 月 29 日）以後兩孔的日位移量變化皆不明顯，最大值僅 0.015 mm/day (A 孔，2017 年 8 月 25 日) 及 0.013 mm/day (C 孔，2016 年 10 月 27 日)。

根據日本地滑對策技術協會 (1978) 針對傾斜觀測管以位移速率之大小及位移趨勢是否顯著作為分級依據，如表 4 所示。表中將不穩定邊坡之活動性大致分為四級，其中第一級為緊急變動，第二級為確定變動，第三級為準確定變動，此三類邊坡均屬確定有問題且處在活動中，需儘速提出有效的因應對策加以處理。第四級之潛在變動邊坡，若其位移方向仍有一固定趨勢時，則這類邊坡之穩定性仍具有潛在危險。目前 A、C 兩孔之日滑動速率相當低，應處於穩定狀態。

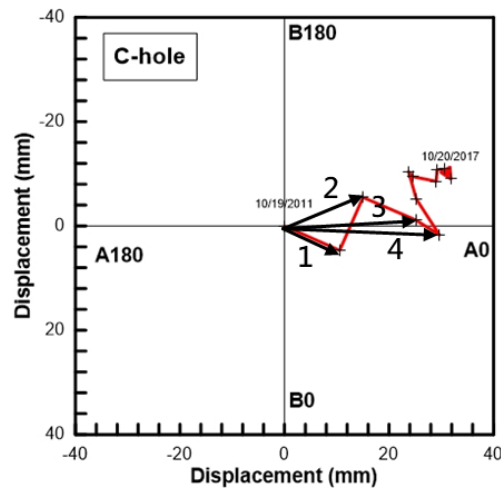


圖 9 龍泉溪傾斜管量測累積合位移量計算示意圖 (以 C 孔為例)

Figure 9 Schematic diagram for the calculation of accumulated displacements of inclinometer

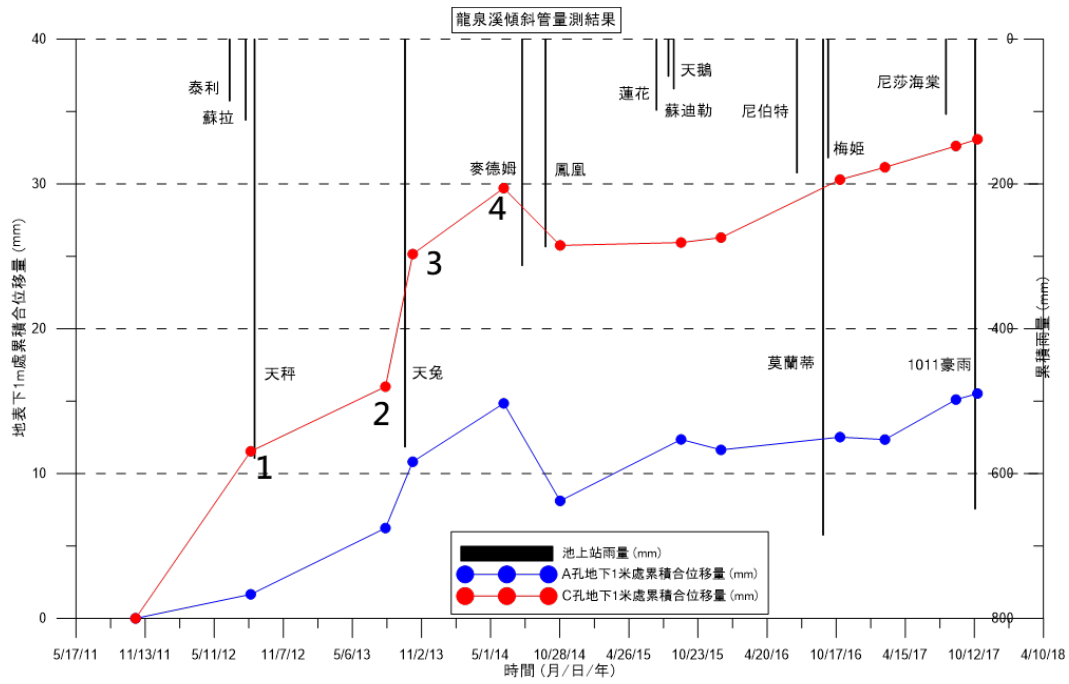


圖 10 龍泉溪傾斜管量測累積合位移量

Figure 10 The accumulated displacements measured by inclinometer in the Longquan River

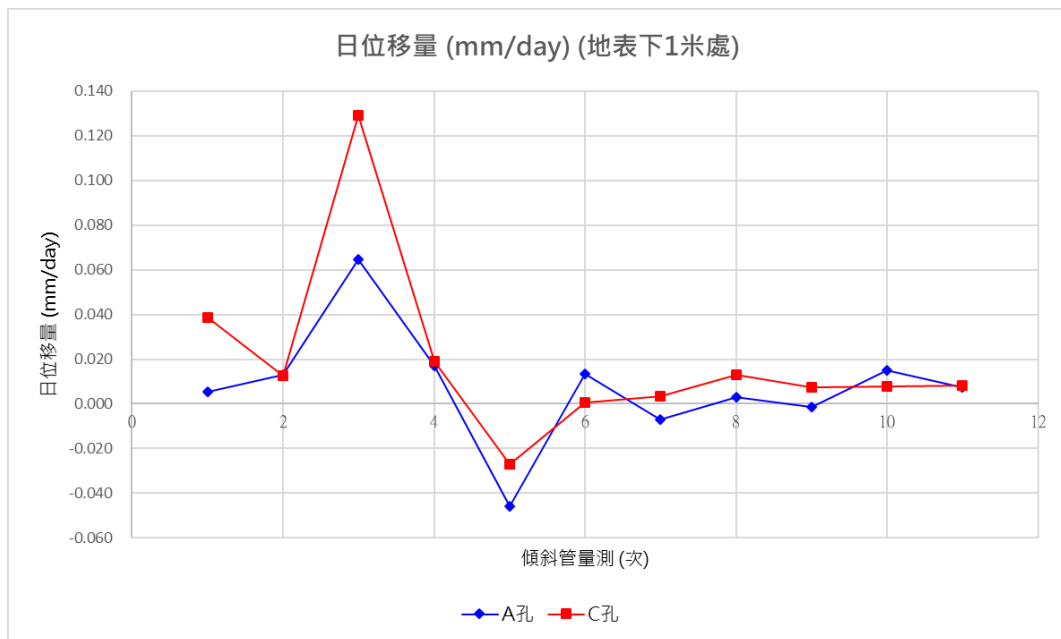


圖 11 龍泉溪傾斜管量測歷次日位移量變化

Figure 11 Daily displacements measured by inclinometer in the Longquan River

表 3 A、C 兩孔位移速率表

Table 3 Velocities of the displacements in holes A and C

日期	天數	A 孔		C 孔	
		位移量(mm)	滑動速率 (mm/day)	位移量(mm)	滑動速率 (mm/day)
2011/10/18	0	---	---	---	---
2012/08/14	300	1.658	0.006	11.534	0.038
2013/07/31	351	4.578	0.013	4.462	0.013
2013/10/10	71	4.575	0.064	9.156	0.129
2014/06/04	237	4.032	0.017	4.551	0.019
2014/10/29	147	-6.733	-0.046	-3.952	-0.027
2015/09/09	315	4.244	0.013	0.197	0.001
2015/12/22	104	-0.722	-0.007	0.340	0.003
2016/10/27	310	0.880	0.003	4.004	0.013
2017/02/21	117	-0.168	-0.001	0.850	0.007
2017/08/25	185	2.760	0.015	1.471	0.008
2017/10/20	56	0.418	0.007	0.464	0.008

表 4 位移速率與邊坡穩定性判斷建議表

Table 4 Suggestions for interpretation of displacement velocity and slope stability

變動類型等級	日變位量 (mm)	月變位量 (mm)	一定方 向的累 積傾向	活動性判斷	滑動機制
一 緊急變動	20 以上	500 以上	非常 顯著	急速崩壞	崩壞型/泥 流型
二 確定變動	1 以上	10 以上	顯著	活潑運動中	崩積土滑動 /深層滑動
三 準確定變動	0.1 以上	2.0 以上	略顯著	緩慢運動中	黏土滑動/ 回填土滑動
四 潛在變動	0.02 以上	0.5 以上	稍稍有	待繼續觀測	黏土滑動/ 崖錐滑動

資料來源：(日本地滑對策技術協會，1978)

(III)河道土砂變遷監測成果

龍泉溪於 2006 年形成堰塞湖後臺東林管處積極辦理各項防減災措施，均能有效控制且未發生重大災變，惟 2012 年 8 月經歷天秤颱風（池上雨量站累積雨量 579 mm），其高強度累積降雨造成上游集水區新增崩塌，原堰塞湖區大量土砂淤積（估計堆積土方量約 4 萬立方公尺），溢流河道至梳子壩河段原有的工程措施大部分遭沖毀，因此臺東林管處持續辦理龍泉溪河道之斷面測量及 UAV 地形監測，觀察土砂變遷之情形。

近期 2014-2017 年龍泉溪河道之土砂運動之變化情形，監測成果如圖 12 至圖 14 及表 5 所示。2014-2017 年監測分析成果說明如下：

- **原堰塞湖河段：**原堰塞湖區監測目的在於評估堰塞湖區遭土砂淤積後，河道地形之變遷。2014-2015 年部份有少量局部淤積現象，堆積量體約 8,800 m³。2015-2016 年原堰塞湖河段轉為少量侵蝕，侵蝕量體約 400 m³。2016-2017 年無明顯變化。
- **溢流道段：**溢流道區域監測目的在於評估原溢流水道之變遷情形，同時因為龍泉溪在此處急劇向左轉彎，用以追蹤轉彎處水流對於河道影響。2014-2015 年有局部少量落淤約 5,000 m³。2015-2016 年有局部侵蝕現象，計算結果約侵蝕 1,000 m³。2016-2017 年無明顯變化。
- **天然壩下游河段：**天然壩下游河段區域監測目的在於評估原天然壩體下游河道沖刷以及支流下移土砂，所造成之地形變遷及其土砂變化量。2014-2015 年植生狀態茂密完整，河道堆積量體約 5,000 m³。2015-2016 年有進行河道整理與側岸苗圃保護，整體呈現侵蝕約 4,900 m³。2016-2017 年呈現局部互有沖淤現象，經地形比對計算約堆積 393 m³。
- **梳子壩至過水路面段：**本區段河道監測目的在於掌握梳子壩下游土砂通過與淤積之情形，評估龍泉溪中、上游土砂透過梳子壩後之沖淤特性及其土砂堆積量。2014-2015 年僅河道轉向處有較明顯落淤區域，總計約 4,000 m³ 淤積量。2015-2016 年河道轉彎處有一處側岸崩塌，總計約 6,000 m³ 侵蝕量。2016-2017 年仍呈現侵蝕現象，總計約 7,000 m³ 侵蝕量。

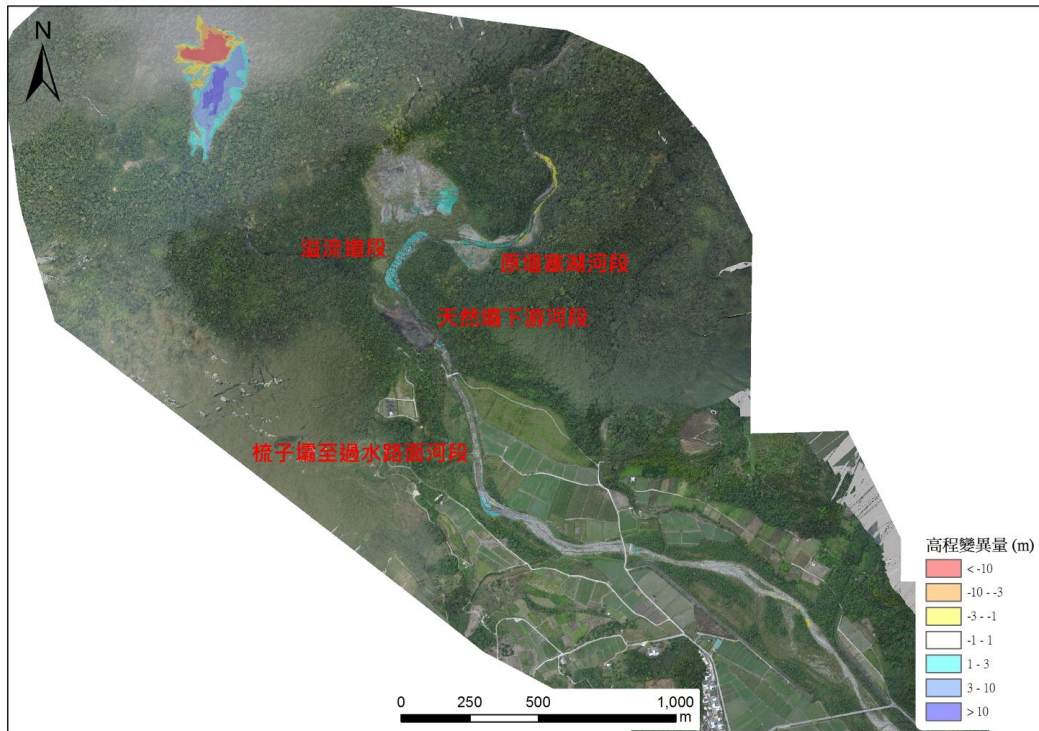


圖 12 龍泉溪堰塞湖天然壩及下游河道 2014-2015 地形監測成果

Figure 12 The monitored information of the landslide dam and channel terrain for the Longquan River during the period from 2014 to 2015



圖 13 龍泉溪堰塞湖天然壩及下游河道 2015-2016 地形監測成果

Figure 13 The monitored information of the landslide dam and channel terrain for the Longquan River during the period from 2015 to 2016

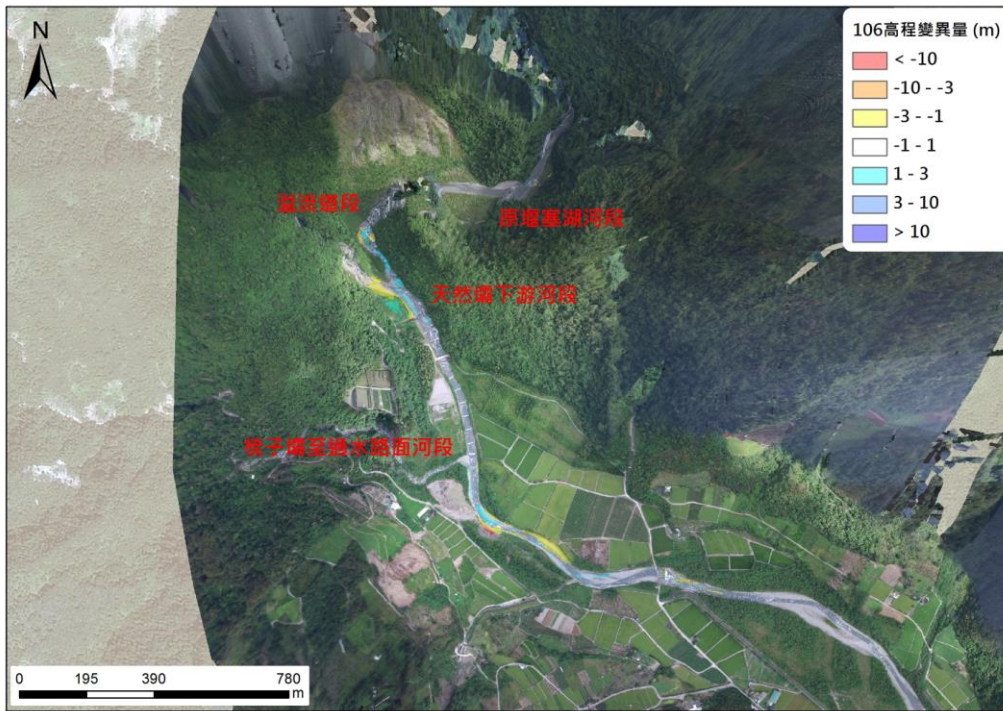


圖 14 龍泉溪堰塞湖天然壩及下游河道 2016-2017 地形監測成果

Figure 14 The monitored information of the landslide dam and channel terrain for the Longquan River during the period from 2016 to 2017

表 5 龍泉溪堰塞湖天然壩及下游河道土砂沖淤分析表

Table 5 Volumes of erosion and deposition of sediments in channel and landslide dam of the Longquan River

區段	2014-2015 沖淤變化量(m ³)	2015-2016 沖淤變化量(m ³)	2016-2017 沖淤變化量(m ³)
原堰塞湖河段	8,795	-400	無明顯變化
溢流道段	4,912	-1,000	無明顯變化
天然壩下游河段	4,974	-4,900	393
梳子壩至過水路面段	4,051	-6,000	-7,000

IV、結論

1. 透過遙測影像監測與分析顯示龍泉溪上游集水區之崩塌率近期有下降的跡象，2015-2017 年期間崩塌率皆維持在 0.5% 左右，未有明顯的上升跡象，推估上游集水區之土砂生產及運移已逐漸趨於穩定，上游供砂來源應已大幅減少。
2. 整合歷次地下傾斜井之監測成果，2013 年天兔颱風事件前後量測 A 井與 C

井地表下 1 m 處之位移量分別為 4.575 mm 與 9.156 mm，平均日變位量分別為 0.064 mm/day 與 0.129 mm/day，2014 年以後合位移增加量有逐年下降的趨勢，2017 年 10 月 20 日前後 A 井與 C 井地表下 1m 處之位移量為 0.418 mm 與 0.464 mm，平均日變位量約 0.007 mm/day 與 0.008 mm/day，可知目前土石護坡滑移坡壞之風險已大幅降低。

3. 龍泉溪河道地形變遷分析結果顯示龍泉溪原堰塞湖至過水路面以下河段已由 2014-2015 年的淤積轉為 2015-2016 年的侵蝕，2016-2017 年天然壩下游河段有少量土砂淤積，梳子壩以下河段則為侵蝕，即 2015 年以後龍泉溪河段多呈現侵蝕為主，推測上游集水區來砂量逐漸減少。
4. 因龍泉溪上游集水區已逐漸趨於穩定，未來可將土砂觀測之重點移至天然壩下游河段（梳子壩上游），觀測該河段之土砂變化情形，至於上游集水區則持續利用遙測影像判釋崩塌地之變異。

V、參考文獻

地すべり対策技術協会 (1978) 地すべり対策技術設計実施要領。地すべり対策技術協会

林務局臺東林區管理處 (2006) 關山事業區第三林班龍泉溪上游堰塞湖緊急評估及緊急對策建議。林務局臺東林區管理處。

林務局臺東林區管理處 (2007) 龍泉溪上游堰塞湖土砂觀測規劃與建置。林務局臺東林區管理處。

林務局臺東林區管理處 (2010) 龍泉溪上游堰塞湖土砂觀測系統更新及維護計畫。林務局臺東林區管理處。

林務局臺東林區管理處 (2011) 龍泉溪崩塌區土砂觀測及防災觀摩示範規劃。林務局臺東林區管理處。

林務局臺東林區管理處 (2014) 轄管重大土砂區域監測計畫。林務局臺東林區管理處。

林務局臺東林區管理處 (2017) 轄管重大土砂區域監測計畫。林務局臺東林區管理處。

集水區潛在滯洪保水區位之萃取及應用

林昭遠^{1*} 張文彥¹² 范世億² 蔡明發² 蕭惠民²

【摘要】因受全球氣候變遷的影響，極端降雨造成臺灣淹水事件頻傳，政府相關單位對於水患治理面臨極大挑戰。本研究以八卦山台地為樣區，利用各級政府建置之大數據，採用環境指標萃取集水區潛在滯洪保水區位，以土地利用變遷之思維，藉由模式推估集水區最大保水量之空間變化，篩選滯洪保水熱點區位，建立量化分析方法與評估指標，作為坡地滯洪保水空間盤查標準；並提出因應水患之坡地保育策略，供相關單位參考。

【關鍵詞】超滲降雨、環境指標、滯洪保水區位。

EXTRACTION AND APPLICATION OF POTENTIAL SITES FOR WATER DETENTION/STORAGE ON A WATERSHED SCALE

Chao-Yuan Lin^{1*} Wen-Yan Zhang¹ Shih-Yi Fan² Ming-Fa Tsai²

Hui-Min Hsiao²

【Abstract】 Under the influences of global climate change, the flood events occurred more frequently in Taiwan due to extreme rainfall. Therefore, the inundation treatment is a great challenge for each government. This study selected the Bakua terrace as the study area. Big data were adopted in this study for extracting the potential sites for water detention/storage by using environmental indicators, and the variations of maximum water storage capacity estimated by hydrologic models from the viewpoint of land use changes were applied to select hotspots for water detention/storage. Finally, a standard inventory flowchart of the water detention/storage sites was established and then the adapted conservation strategies of water detention/storage were drafted for the

¹國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

²行政院農委會水土保持局

Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Nantou 540, Taiwan, R.O.C.

*通訊作者，電子郵件: cylin@water.nchu.edu.tw

Corresponding Author. E-mail: cylin@water.nchu.edu.tw

references of related authorities.

【Key words】 Excess rainfall, Environmental indicator, Water detention/storage site.

I、前言

氣候變遷影響下，極端降雨事件頻傳，集水區淹水問題難以避免，坡地開發嚴重區位，水患影響則更為加劇，若能了解山坡地淹水成因及影響區位，配合風險分析對坡地水患治理極為重要。對水患治理而言，滯洪設施可短暫延遲洪峰發生，但面對長延時之降雨仍易造成水患，若能增加蓄洪概念，除可降低洪峰亦可使逕流入滲補助地下水。天然窪蓄區位、農塘或廢耕之水梯田等保水區位因分散於山坡地，可營造眾多小蓄洪池，亦能避免逕流集中，若能串連周遭灌、排系統，將可於坡地營造大型蓄洪系統，累積之蓄洪量體極為可觀。台灣中部地區主要產業為需水量高之養殖業及水稻田，在地面水缺乏與分配不及地區，地下水遂成為主要水源，然毫無節制地超抽地下水，已導致地層下陷，成為高潛勢淹水區位（廖垂麟，2016），而八卦山台地西側山腳路為斷層通過處，若能篩選適宜的滯洪保水區位，構築截蓄保水設施，進行周邊景觀生態及地下水補注等多功能營造，可減少下游地層下陷及洪氾之發生，達到防、減災與水土資源保育之功效。

II、材料與方法

(I)研究樣區

八卦山位於彰化市東方，坡地轄區內為八卦山台地，下游鄉鎮包含彰化市、花壇鄉、大村鄉、員林鎮、社頭鄉、田中鎮以及二水鄉，主要排水系統分別為洋仔厝排水系統及員林排水系統（圖 1），每當颱風或豪雨時，坡地之洪流湧向平原區，常因洪流宣洩不及而產生溢淹之情形。本研究以八卦山台地為樣區，萃取坡地滯洪保水空間，並檢討台地西側山腳路沿線，優選滯洪保水設施之重點營造區位，改善下游淹水問題。

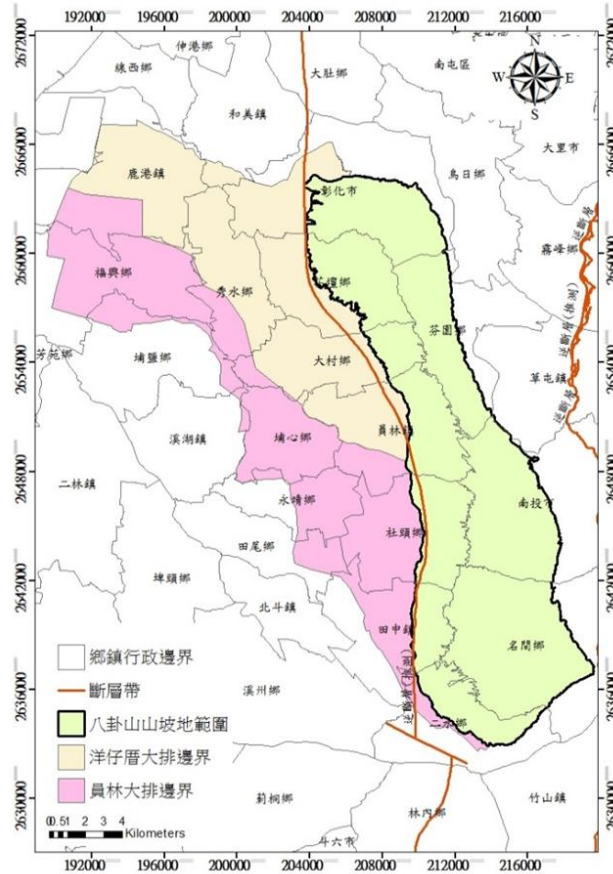


圖 1 研究樣區
Fig.1 Study area

(II)研究材料

以美國土壤保育中心(Soil Conservation Service, SCS)所提出之方法來繪製 CN 值之空間分布，該方法須土地利用與土壤質地資料，土地利用圖資由國土測繪中心提供，而土壤質地資料則源於農業試驗所。水系、地形、水源涵養區位萃取及集水區劃分，係利用內政部地政司所製作之 5x5 m 數值高程模型(表 1)。

表 1 研究材料
Table1 Study materials

圖資材料	時間	空間解析度	來源	用途
DEM	2004	5m*5m	內政部	保水空間萃取及管理分區劃分
土壤類別	2005	1/5000	農業試驗所	CN 值推估
土地利用	2008	1/5000	國土測繪中心	CN 值推估

(III)滯洪保水空間萃取

窪蓄意指短期積水，依類型可分成自然及人工窪蓄區位。自然窪蓄為坡面上天然低窪處或河道深潭處；人工窪蓄則為水庫、埤、池等滯洪設施。利用 Jenson and Domingue (1988) 提出的高差法結合斜面法，建立窪地初步流向，以門檻值或源頭追跡法萃取水系網，再以 DEM 資料計算周圍網格高程差，將水系網下游網格高程大於上游網格者視為窪蓄區位 (圖 2)，可得出窪蓄之面積、深度及上游集水區面積。天然窪蓄依其位置可分為河道型及坡面型，若窪蓄位於河道上則為河道型窪蓄，此種區位多營造為滯洪壩或滯洪池；而位於河道外之窪蓄則歸為坡面型窪蓄，此種區位多營造為農塘。為有效避免八卦山台地周遭都會區水患，利用窪蓄區位營造蓄洪設施攔截逕流，減少集水區出口逕流排放。因河道型窪蓄區位僅能以滯洪設施營造，延遲逕流排放或減少洪峰流量為目的，而坡面型窪蓄區位則可保水蓄洪，收納逕流減少逕流排放至下游，可減輕下游水患問題。

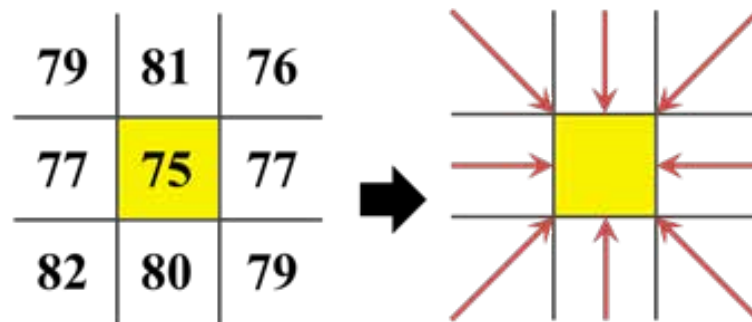


圖 2 窪蓄區位萃取

Fig.2 Extraction of depression site

集水區逕流匯集過程，平坦地亦為潛在逕流儲存區位，然並非所有土地利用皆為適當儲存區位，平坦地萃取採用內政部國土測繪中心土地利用調查資料，將交通使用、建築使用、公共設施使用及遊憩使用等相關圖資排除，而保留農業使用及森林使用等圖資，並萃取坡度緩於 5% 以下圖資，作為逕流儲留潛在區位。

(IV) 最大蓄水量差值

集水區開發區位越多，則產生之超滲降雨越多，為能儲蓄因開發造成之超滲降雨，營造滯洪保水區位有其必要。前人研究廣泛將 CN 值應用於推估集水區水源涵養能力(林忠明，2013；林昭遠等，2014；曾雪芬，2015；朱志民，2016)，且有良好成效。本研究以 SCS 法之曲線值 (curve number, CN) 計算基地開發前後之最大蓄水量 (maximum potential detention) 差值，做為滯洪保水重點營造區

位篩選指標之一。式(1)為最大蓄水量(S)與 CN 之關係式，其值受土壤類別、水文臨前狀況、土壤利用狀況與水土保持工程措施等因素所影響，本研究採 SCS 方法之 CN 值作為集水區水源涵養指標，用以探討基地開發前、後水源涵養之變化，作為滯洪保水設施設計之參考。

$$S \text{ (mm)} = 25400 / \text{CN} - 254 \dots (1)$$

(V)集水分區劃定及滯洪保水空間編碼

集水分區自動劃分理論係運用 Jenson and Domingue 方法 (1988)，建立無窪地流向，再以 O' Callaghan and Mark (1984) 建立各網格之累積流量；網格之累積流量為上游流入該網格之累積數量，而累積流量差值係計算網格與其下游網格累積流量之差。若網格之累積流量差值大於或等於使用者給定門檻值，則指定該網格為集水區出口，向上游進行追蹤可得集水區範圍。配合水系網分布，將各子集水區再細分為源頭、左岸及右岸三個坡面單元。

(VI)滯洪保水重點區位分類

為利於篩選滯洪保水重點營造區位，藉由群集分析 (K-means) 將邊坡單元依保水面積及最大蓄水量差值進行分群，將其依序分為大、中、小。最大蓄水量差值小且保水面積大之分區，係屬可將上游區外逕流水收納管理，具有異地補償之功能；最大蓄水量差值大且保水面積大之分區，則屬於自給自足型；另分區之最大蓄水量差值大但保水面積小者，歸納為需加強管理區位(圖 3)。

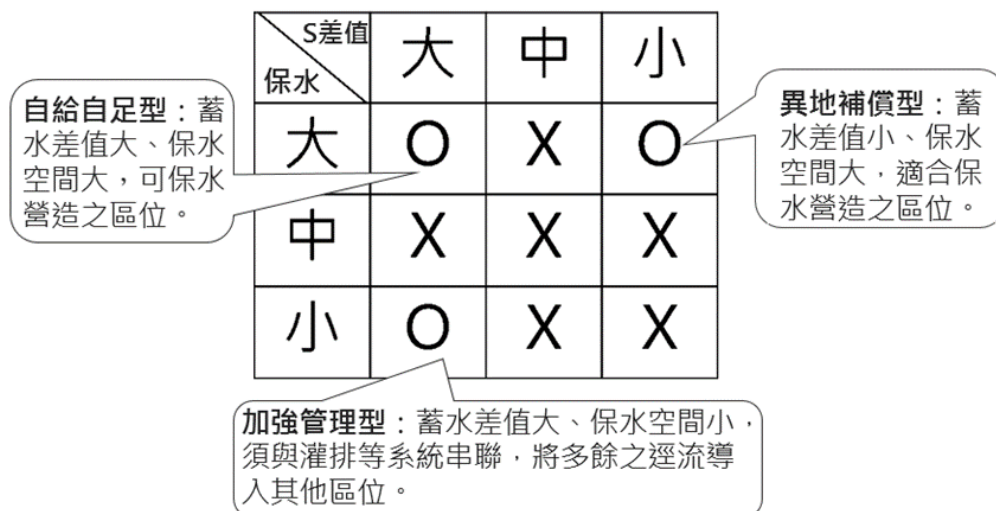


圖 3 潛在滯洪保水重點區位之分類

Fig.3 Classification of the potential water detention/storage hotspots

(VII)集水區逕流量分析

以合理化公式 (Rational Formula) 推估集水區逕流量(行政院農業委員會水土保持局, 2003)。藉由降雨強度資料, 分析不同降雨頻率年之洪峰流量。

$$Q_p = 1/360 * CIA \dots (2)$$

式中: Q_p =洪峰流量(cms); C =逕流係數; I =降雨強度(mm/hr); A =集水面積(ha)。

III、結果與討論

(I) 八卦山台地最大蓄水量之空間分布

土壤圖資經由 CN 值分類, 可獲取土壤水文模組之空間分布 (圖 4-a); 而土地利用圖資 (圖 4-c), 可分類為建地、旱田、公園、荒地、水田及果園等。為推估開發前之土地利用情形, 本研究採植群形相分類法 (邱清安等, 2008), 分析未受人為干擾情況下, 植群之空間分布 (圖 4-b)。圖 4-d, e 為開發前與現況土地利用 CN 值之空間分布。再藉由集水分區開發前後之 CN 值及其差異, 即可算出各分區開發前後之 S 及其差值之空間分布 (圖 4-f, g, h)。

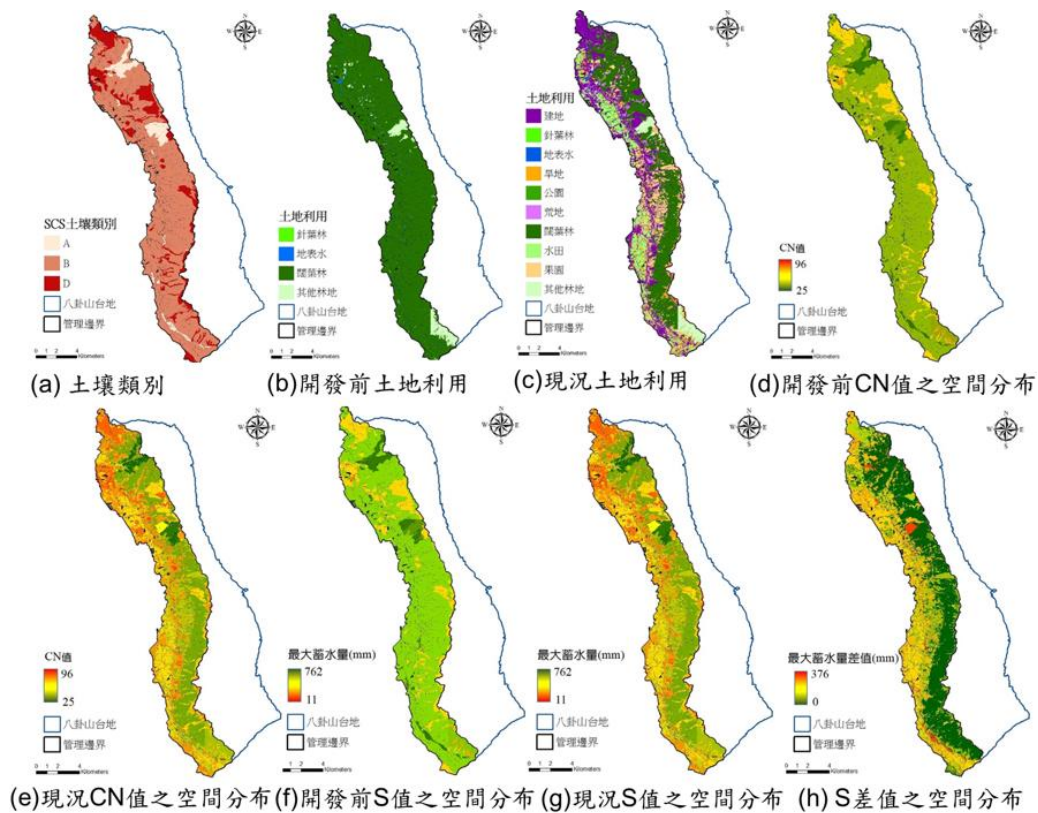


圖 4 最大蓄水量及其相關指標之分布

Fig.4 Distribution of maximum potential retention and its related maps

(II) 八卦山台地潛在滯洪保水區位之空間分布

八卦山台地窪蓄區位萃取結果，顯示窪蓄區位多位於山腳路下游（圖 5-a）。另透過土地利用圖資，將建地排除，保留農作、天然林、草地等區位，配合坡度小於 5% 萃取平坦地（圖 5-b），顯示平坦地亦多集中於山腳路下游。藉由窪蓄區位（圖 5-a）及平坦地（圖 5-b）套疊可得潛在滯洪保水區位之分布（圖 5-c），可進一步加以編碼（圖 5-d），俾利後續滯洪保水空間之營造與管理。

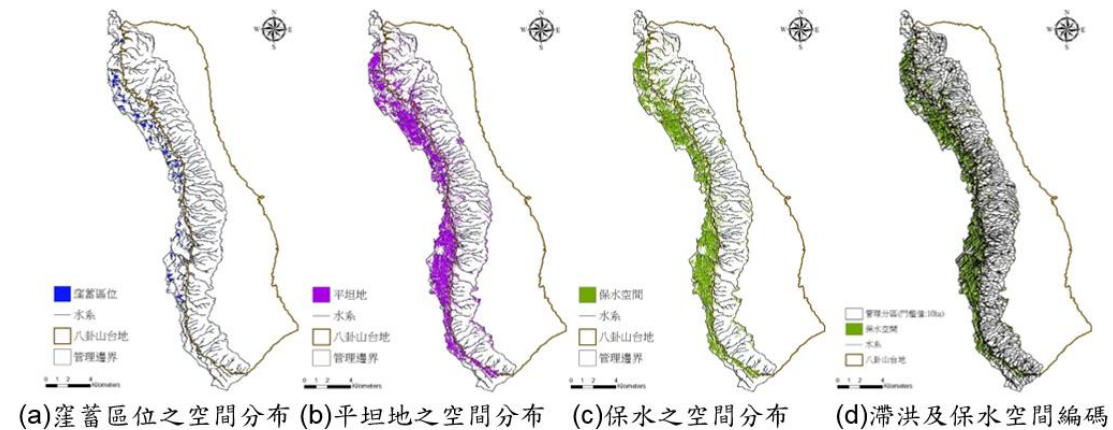


圖 5 潛在滯洪保水區位及其相關指標分布

Fig.5 Site of potential water detention/storage and its related indicators

(III) 八卦山台地滯洪保水重點營造區位

為篩選八卦山台地潛在滯洪保水之重點營造區位，可將各分區之保水空間及最大蓄水量(S)差值，以群集分析方法，依數值高低區分為大、中、小 3 類(圖 6-a, b)。分區之保水面積大者其可收納之逕流較多，S 差值大者之分區其開發度較大。由保水面積及 S 差值之排序分布可萃取重點營造區位 (圖 6-c)。

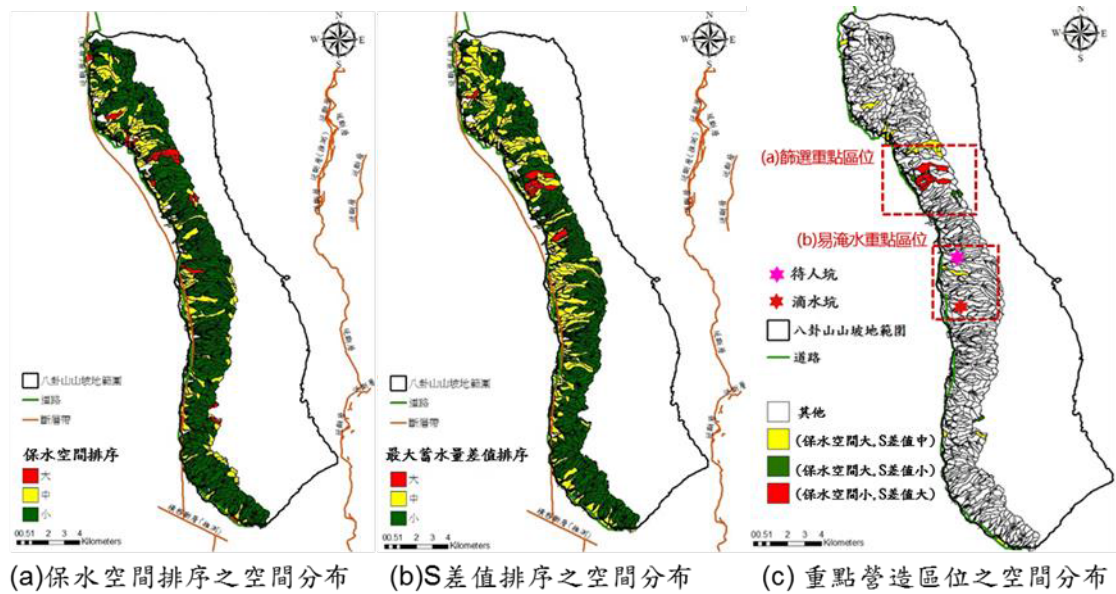


圖 6 重點營造區位及其相關指標分布

Fig.6 Distribution of construction hotspot and its related indicators

圖 7-a 顯示大葉大學附近有高爾夫球場及工廠開發，導致鄰近分區屬加強管理型（保水面積小；S 差值大），編號 402 分區因保水面積大，S 差值小，屬異地補償型之重點營造區位，因其位於大葉大學下游，可收納上游開發而產生的超滲逕流，而減緩 402 分區下游之淹水潛勢。另外待人坑與滴水坑下游為淹水重點區位（圖 7-b）。待人坑下游易淹水區位為大慶商工；而滴水坑下游易淹水區位為員田加油站。山腳路沿線常見水路共構，由山腳路剖面（圖 8）可知山腳路高程低點與東西向水路共構農路之交點為易淹水區位；而道路與野溪交點處因排水箱涵之施做而抬高高程，此區位因道路排水流向轉變，已非易淹水熱點區位。

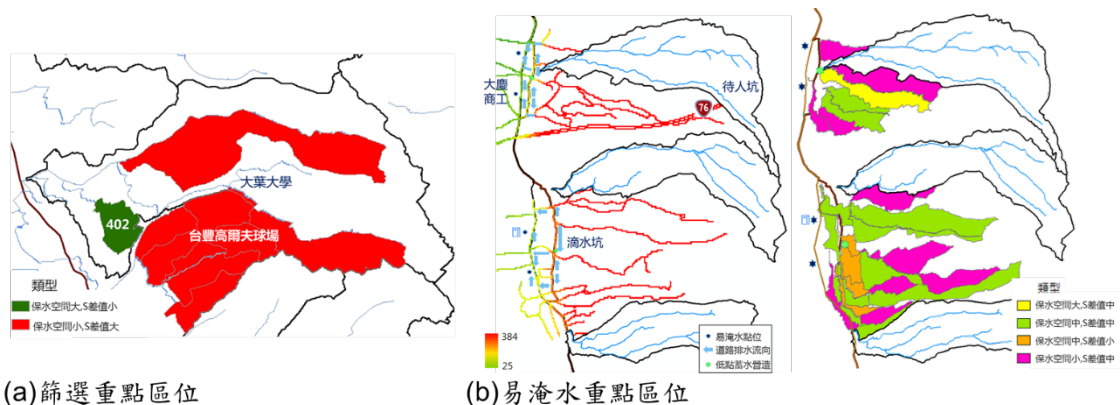


圖 7 重點區位之空間分布

Fig.7 Spatial distribution of hotspots

藉由重點營造區位配置滯洪保水設施 (圖 9)，採 50 年及 5 年之復現期距設計滯洪保水設施 (表 4)，其入流量與出流量別為 $14.90 \text{ (m}^3/\text{s)}$ 與 $10.56 \text{ (m}^3/\text{s)}$ ，經由永久性滯洪量體分析，所須量體為 $8,588 \text{ m}^3$ ，而營造區位可提供滯洪保水量體為 $14,952 \text{ m}^3$ ，因此透過本滯洪保水措施之營造可有效消除下游水患問題。

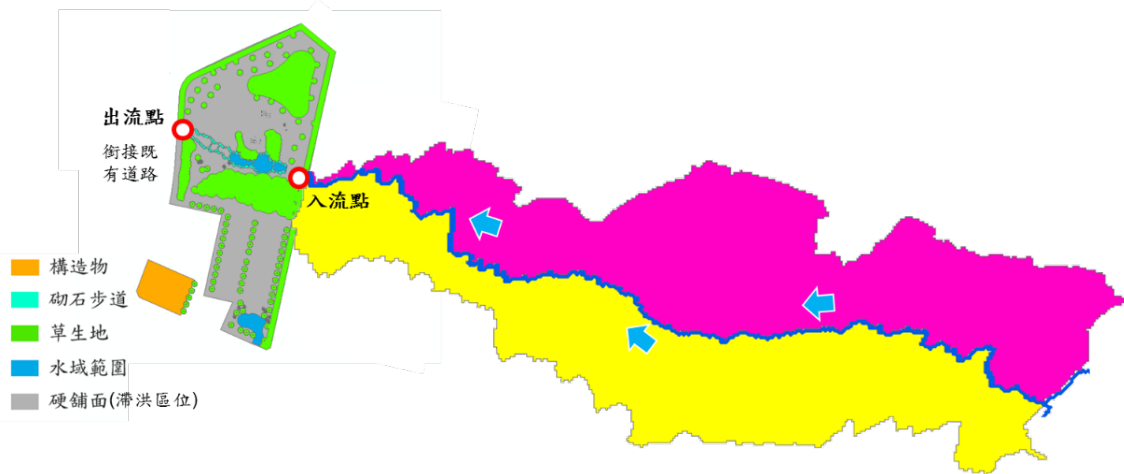


圖 10 重點營造區位配置詳圖

Fig.10 Placement details of the inundation hotspot

表 2 土地利用類別之逕流係數

Table2 Runoff coefficient of each land-use type

土地利用	面積(ha)	C 值
建地	16.86	0.95
旱田	0.28	0.60
公園	0.15	0.75
荒地	1.65	0.55
闊葉林	34.62	0.50
果園	12.22	0.60

表 3 無因次降雨分析

Table3 Dimensionless rainfall analysis

參數	數值
年平均雨量(mm)	1461.40
集流時間(min)	17.92
I_{60}^{25}	80.72
A	30.86
B	55.00
C	0.71
G	0.54
H	0.31

表 4 滯洪保水設施流量分析

Table4 Peak flow of inlet and outlet for the detention/storage facility according to planned return period

復現期距 (年)	逕流係數	降雨強度 (mm/hr)	集水面積 (ha)	洪峰流量(m ³ /s)
5 (出流)	0.64	90.88	65.78	10.56
50 (入流)	0.64	128.20	65.78	14.90

IV、結論

本研究以八卦山台地作為案例分析，並於山腳路沿線勘查淹水情況，經由調查結果顯示待人坑下游因排水問題，導致大慶商工每逢大雨為易淹水區位，因此藉由山腳路東側之重點營造區位，配置滯洪保水設施，改善待人坑下游淹水問題，分析結果顯示營造後可顯著改善下游區位淹水問題。水土保持技術規範之滯洪池設計僅涉及滯洪規範，並未考量蓄洪，颱風暴雨期間僅能確保滯洪池下游週遭之聯外排水安全，對下游末端水患並無改善效果，建議蓄洪概念宜列入水土保持技術規範規定。

V、參考文獻

- 朱志民 (2016) 應用曲線值探討大肚台地滯洪設施之量體評估。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 行政院農業委員會水土保持局 (2003)，水土保持技術規範。
- 林忠明 (2013) 因應氣候變遷集水區水源涵養區位之優選與營造。國立中興大學水土保持學系碩士學位論文。
- 林昭遠、林忠明、林政侑 (2014) 集水區水源涵養區位優選之研究。水土保持學報 46(2): 975-986。
- 邱清安、林鴻志、廖敏君、曾彥學、歐辰雄、呂金誠、曾喜育 (2008) 臺灣潛在植群形相分類方案。林業研究季刊 30(4): 89-112。
- 曾雪芬 (2015) 以環境指標優選大肚台地水資源涵養區位之研究。國立中興大學水土保持學系碩士學位論文。
- 廖垂麟 (2016) 地層下陷重點區地下水補注對策之研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- Jenson, S.K., and Domingue, J.O. (1988) Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographical Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(11): 1593- 1600.
- O'Callaghan, J.F. and Mark, D.M. (1984) The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28: 328-344.
- Soil Conservation Service (1971) National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, U.S. Department of Agriculture, Washington, D. C..



國家圖書館出版品預行編目資料

森林集水區經營研討會論文集 2018 / 曾俊偉 主編.

-- 初版 -- 臺北市:農委會林試所, 民107.06

212面; 21×29.7公分

ISBN: 978-986-05-6167-8 (平裝)

1. 林業管理 2. 集水區 3. 文集

436.12407

107009796

2018森林集水區經營研討會論文集

發行人 張彬
策劃 游漢明
主編 曾俊偉
執行編輯 何郁庭
美術編輯 許明峯
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
展售處 國家書店
10455 台北市松江路209號1樓 02-2518-0207
五南文化廣場: 台中總店
40042 台中市區中區中山路6號3樓 04-2226-0330
出版日期 中華民國一〇七年六月 初版
定價 新台幣200元整
ISBN 978-986-05-6167-8
GPN 1010700879

圖文有著作權 未經同意請勿使用