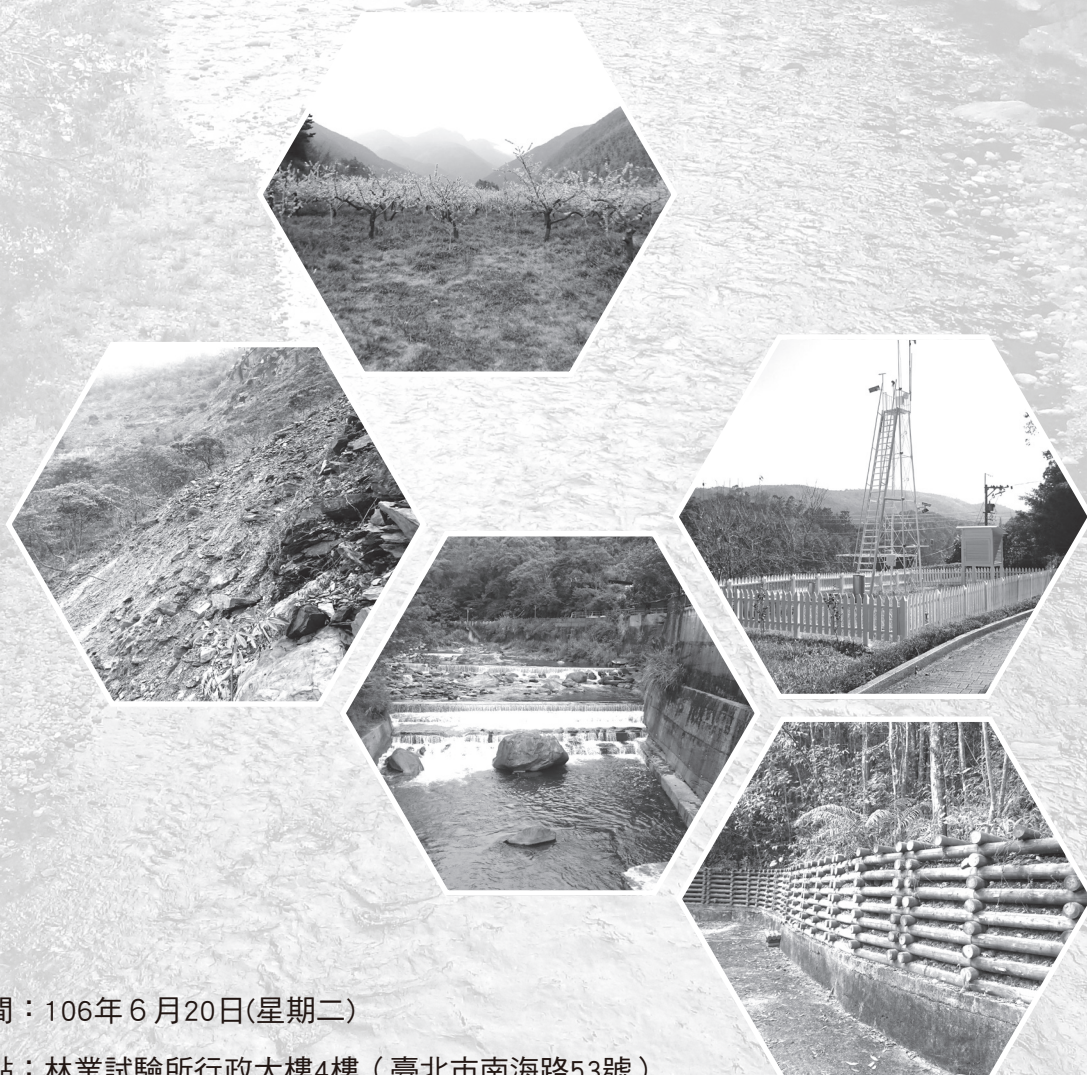


# 2017

## 森林集水區經營研討會論文集

Proceedings of Symposium on 2017 Forest Watershed Management



時間：106年6月20日(星期二)

地點：林業試驗所行政大樓4樓（臺北市南海路53號）

主辦單位：行政院農業委員會林業試驗所

協辦單位：行政院農業委員會林務局、水土保持局、經濟部水利署

臺灣大學、成功大學、中興大學、臺北科技大學、淡江大學、臺北大學、屏東科技大學  
文化大學、華梵大學、逢甲大學、臺北市應用地質技師公會、中興工程顧問社

# 目錄

---

議程表.....	i
序（農委會林業試驗所所長 黃裕星）.....	ii
國有林土砂殘留二次災害潛勢評估—以莫拉克颱風後（2008～2015年）為例.....	1
EVALUATING THE RISK OF SECONDARY GEOHARZARDS IN NATIONAL FOREST- A CASE STUDY IN POST- TYPHOON MORAKOT PERIODS（沈哲緯 Che-Wei Shen、邱昱嘉 Yu-Jia Chiu、黃子健 Zee Ken Christopher Wong）	
重要水庫集水區土砂生產演變評估.....	19
SIMPLIFIED SEDIMENT BUDGET FOR MAJOR RESERVOIR WATERSHEDS IN TAIWAN（蔡明發 Ming-Fa Tsai、黃景滄 Jiing-Tsang Huang、何幸娟 Hsing-Chuan Ho、林伯勳 Bor-Shiun Lin）	
大崙山區豪雨特性之初步研究.....	33
PRELIMINARY STUDY OF EXTREMELY HEAVY RAINFALL AT TA-LUN MOUNTAINS（曹舜評 Shun-ping Tsao、林珈仔 Chia-Yu Lin）	
集水區土砂流失、模擬及預報分析—以石門水庫集水區為例.....	45
THE RESEARCH OF THE MONITORING, SIMULATION AND FORECAST ANALYSIS OF SOIL LOSS FOR SHIHMEN RESERVOIR WATERSHED（林書豪 S.H. Lin、傅桂霖 G.L.Fu、蔡明發 M.F. Cai、林琮文 C.W. Lin、蔡易達 Y.D. Cai、連惠邦 H.P. Lian）	
應用多元空間資訊製作水里溪集水區崩塌潛勢圖.....	63
USING MUTIRESOURCE GEOSPATIAL INFORMATION TO DERIVE LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAP OF SHUILI WATERSHED（謝漢欽 Han-Ching Hsieh）	
基於長期崩塌目錄所建立之治山防洪治理單元量化分級方法.....	75
A QUANTITATIVE APPROACH FOR CLASSIFYING GOVERNANCE UNIT OF WATERSHED MANAGEMENT AND FLOOD MITIGATION BASED ON A LONG-TERM LANDSLIDE INVENTORY（劉正千 Cheng-Chien Liu、柯明勳 Ming-Hsun Ko、溫慧霖 Huei-Lin Wen、傅桂霖 Kuei-Lin Fu、張舒婷 Shu-Ting Chang）	

自來水水質水量保護區實施水源保護環境信託之可行性研究.....	93
ASSESSING THE FEASIBILITY OF SOURCE WATER PROTECTION ENVIRONMENTAL TRUST POLICY (王國樑 Kuo-Liang Wang、葛餘恕 Yu-Sue Ge、李仲卿 Chung-Chin Lee、林鎮洋 Jen- Yang Lin、陳起鳳 Chi-Feng Chen、康世芳 Shyh-Fang Kang、郭玲惠 Ling-Hwei Kuo)	
以植生指標劃定集水區崩場地土砂二次災害潛勢之研究.....	113
DELINEATION OF SECONDARY DISASTER POTENTIAL CAUSED BY WATERSHED LANDSLIDES USING VEGETATION INDEX (林昭遠 Chao-Yuan Lin、陳宏宇 Hung-Yu Chen、 涂富鈞 Fu-Jun Tu)	
大型防砂壩下游冲刷坑形成原因探討.....	131
FORMATION OF SCOUR HOLE AT DOWNSTREAM AREA OF LARGE-SCALED CHECK DAM (黃宏斌 Hung-Pin Huang)	
蓮華池地質敏感區位地質特性與崩坍潛勢之研究.....	143
STUDY ON THE POTENTIAL COLLAPSE AND GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AT THE LIENHUACHIH GEOLOGICAL SENSITIVE AREA (曾俊偉 Chun-Wei Tseng、王豐仁 Feng-Jen Wang)	
臺東土石流特定水土保持區之劃定補償效益探討.....	159
THE STUDY ON INDEMNIFYING BENEFIT ANALYSIS OF DESIGNATED DEBRIS FLOW SPECIFIC ZONE FOR SOIL AND WATER CONSERVATION PREVENTION IN TAITUNG COUNTY (許中立 Chung-Li Hsu、陳淑慈 Shu-Tzu Chen)	
台灣南部地區降雨量與降雨沖蝕指數之時間與空間變化.....	183
TEMPORAL AND SPATIAL VARIATIONS OF RAINFALL AND RAINFALL EROSIVITY IN SOUTHERN TAIWAN (李明熹 Ming-Hsi Lee、廖怡雯 Yi-Wen Liao)	



# 2017 森林集水區經營研討會

日期：2016 年 6 月 20 日 (星期二)

地點：台北市南海路 53 號 (林業試驗所行政大樓 4 樓會議廳)

## 議 程 表

時 間	議 程	
08:30-09:00	報 到	
09:00-09:10	開 幕 致 詞 (林試所 黃裕星所長)	
時 間	講 題	主持人
09:10-09:35	國有林土砂殘留二次災害潛勢評估—以莫拉克颱風後 (2008~2015 年) 為例 (沈哲緯、邱昱嘉、黃子健)	林業試驗所 游漢明組長
09:35-10:00	重要水庫集水區土砂生產演變評估 (蔡明發、黃景滄、何幸娟、林伯勳)	
10:00-10:25	大崙山區豪雨特性之初步研究 (曹舜評、林珈仔)	
10:25-10:45	休 息 / 交 流	
10:45-11:10	集水區土砂流失、模擬及預報分析—以石門水庫集水區為例 (林書豪、傅桂霖、蔡明發、林琮文、蔡易達、連惠邦)	水利署 王國樑組長
11:10-11:35	應用多元空間資訊製作水里溪集水區崩塌潛勢圖 (謝漢欽)	
11:35-12:00	基於長期崩塌目錄所建立之治山防洪治理單元量化分級方法 (劉正千、柯明勳、溫慧霖、傅桂霖、張舒婷)	
12:00-13:10	午 餐	
13:10-13:35	自來水水質水量保護區實施水源保護環境信託之可行性研究 (王國樑、葛餘恕、李仲卿、林鎮洋、陳起鳳、康世芳、郭玲惠)	林務局 王昭堡組長
13:35-14:00	以植生指標劃定集水區崩塌地土砂二次災害潛勢之研究 (林昭遠、陳宏宇、涂富鈞)	
14:00-14:25	大型防砂壩下游沖刷坑形成原因探討 (黃宏斌)	
14:25-14:45	休 息 / 交 流	
14:45-15:10	蓮華池地質敏感區位地質特性與崩坍潛勢之研究 (曾俊偉、王豐仁)	水土保持局 徐森彥組長
15:10-15:35	臺東土石流特定水土保持區之劃定補償效益探討 (許中立、陳淑慈)	
15:35-16:00	台灣南部地區降雨量與降雨沖蝕指數之時間與空間變化 (李明熹、廖怡雯)	
16:00-17:30	綜合座談及討論	黃裕星所長、 孫明德副局長、 黃宏斌教授、 林昭遠教授

# 序

---

森林集水區經營涉及的研究範圍非常廣泛，從降水量及時間分布，到地表逕流的產生、啟動表土沖蝕的因素、山坡地崩塌的機制，以至於治理層面的水土災害防治、政策面的土地利用管理等，均是研究範疇。森林集水區多位在河川上游，其經營的良窳，關係著河川中下游的水資源供應及國土保安；良好的集水區經營，可以有涵養水資源、調節水量、安定土砂、淨化水質、減輕旱澇災害的功效。

近年來由於全球氣候變遷的影響，世界各地極端氣象事件頻傳，臺灣亦難倖免。臺灣的降雨特性已逐漸變成短延時的強降雨，而無降雨日數逐年遞增。雖然年累積雨量豐沛且變異不顯著，但在短時間強降雨的特性下，乾季時間拉長，導致區域性缺水；但汛期卻又面臨水澇成災的窘境。令人印象深刻的案例如 2009 年的莫拉克風災，南臺灣地區在短短 3 天內，即降下近 3,000 公釐雨量，造成全臺山地 3 萬多公頃的崩場地，亦釀成平地嚴重水患，農業災損超過新臺幣 195 億元。又如 2015 年 3 月的旱災，日月潭 9 隻青蛙全部露出，雖成著名景象，但亦代表著旱災可能即將到來的警訊。臺灣因為降雨時空分布不均及地形陡峻等特性，能利用的水資源本就不多，受到極端氣候的影響，無疑是雪上加霜。

由於崩塌災區多半地處偏遠，地質與地形條件惡劣，致許多地區未能進行治理。我們不禁要重新檢視，對於臺灣許多環境敏感山區，是否一定要開發利用，還是應尊重環境生態的承載力，讓大地適當的休養生息；但另一方面，如何顧及百姓生計，以及山村部落的安全永續，在在都是難題。對於有保全對象的崩場地，可採用適當可行的工程與生態方法積極治理，而沒有保全對象的崩場地，可以環境生態自然調適方式，讓崩場地逐漸達到自然穩定狀態，再以人工輔導方式誘導植生演替，恢復青山綠水的山林原貌。

行政院鑑於水資源為國家經濟發展重要基礎，攸關全民安全及生活品質，面對氣候變遷的挑戰，於本年 3 月提出前瞻基礎建設計畫，將水環境建設列入重要的施政方向，兼顧防洪、水資源及水環境等需求，以「水與發展」、「水與安全」及「水與環境」為三大建設主軸。林業試驗所除配合政策之外，為探討森林集水區受到全球氣候變遷的影響，對臺灣水土資源未來可能造成的負面效應，特辦理本研討會針對極端氣候影響下的集水區經營、防災及泥砂輸送等議題，邀集行政院農業委員會林務局、水土保持局及經濟部水利署等相關行政機關，及臺灣大學、成功大學、中興大學、臺北科技大學、淡江大學、臺北大學、逢甲大學、屏東科技大學、華梵大學、文化大學等大學相關科系，以及業界之中興工程顧問社與臺北市應用地質技師公會等，從事森林集水區經營及水土資源保育研究及實務工作的專家學者，提供階段性之成果，提供大家廣泛的討論與深入研究的平台，對集水區經營方法及策略集思廣益，建立彼此交流、合作的機會，在兼顧保育、生態及坡地水土保持前提下，讓河川上、中、下游森林集水區的經營與生態環境的保全更趨完善。

林業試驗所 所長

黃裕星

謹識



# 國有林土砂殘留二次災害潛勢評估—以莫拉克颱風後 (2008 ~ 2015 年) 為例

沈哲緯<sup>1</sup> 邱昱嘉<sup>2\*</sup> 黃子健<sup>3</sup>

【摘要】近年極端降雨現象頻繁出現，所誘發的災害事故也引起各界關注，臺灣因人口密度高且地質脆弱之故，易引發大型災害且對保全對象造成龐大損失，因此建立一個災害潛勢評估有一定必要性。本研究針對國有林內受新增崩塌及土砂二次災害影響下之保全對象作災害潛勢評估，內容分別為 1. 崩塌潛勢評估模式的建立；2. 殘留土砂數值模擬與驗證；3. 國有林保全對象災害潛勢評估。研究利用坡度、坡向、地形曲率、地形指數、距離斷層距離、地質條件與雨量因子共 7 類，建構崩塌潛勢評估模式。以極端降雨事件 -- 莫拉克颱風導致的新增崩塌地為模式率定基礎，以 2008 ~ 2014 年之新增崩塌地做驗證模式。接著基於崩塌潛勢評估模式，模擬 100 年重現降雨情境，將結果作為保全對象災害潛勢評估依據。最後採斜坡單元作為分析單元，崩塌潛勢網格則作為成果，把統計完成之斜坡單元進行潛勢分析，套疊保全對象圖層，為不同保全對象進行災害潛勢分級。本研究以旗山溪與荖濃河流域為例，將此流域之山坡地劃分為 13,630 個斜坡單元，得出的結果為 3,410 個為低潛勢、6,453 個為中潛勢，餘下之 3,767 個為高潛勢。此模式除了可協助預估土砂崩塌之高潛勢區域，亦可協助經營管理者進行防災治理規劃上的決策依據及減災方案，同時達到永續發展之目的。

【關鍵詞】殘留土砂、二元迴歸、災害潛勢評估、國有林

## EVALUATING THE RISK OF SECONDARY GEOHAZARDS IN NATIONAL FOREST- A CASE STUDY IN POST- TYPHOON MORAKOT PERIODS

Che-Wei Shen<sup>1</sup> Yu-Jia Chiu<sup>2\*</sup> Zee Ken Christopher Wong<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣大學土木工程學系博士候選人及財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心正研究員

<sup>2</sup> 國立臺灣大學水工試驗所助理研究員。\* 通訊作者：yujiachiu@ntu.edu.tw.

<sup>3</sup> 國立臺灣大學水工試驗所研究助理

**【 Abstract 】** In recent years, the extreme precipitation has occurred frequently and caused a lot landslide disasters in Taiwan. Taiwan as a high population density and geological vulnerability, therefore easily to cause large-scale of disaster. It is required to develop methodologies for analyzing the potential risk to evaluate the possible location with landslide disasters. In this case will include the followings: (1) Establish landslide prediction model; (2) Numerical simulation and verification of residual sediment; (3) Evaluation the Risk of Secondary Geohazards in National Forest's protection targets. To investigate the landslide prediction, we choose slope, aspect, curvature, topographic index, the distance to fault, geologic conditions and rainfall to establish landslide prediction model. In addition, we use extremely highly rainfall event- the new landslides caused by Typhoon Morakot is based on the pattern to apply our model, newly increased landslide sites in the year 2008~2014 will configure our model validation. Besides that, we also use the 100-years recurrence circumstance to analyze geohazards risk of protected objects and mapping these features to predict the hotspots of geohazards in the near future. For example, Qishan River and Laonong River watershed were chosen as the research areas. The slope basin we divided into 13,630 slope units, the result is 3,410 unit are low potential, 6,453 unit are medium potential, and 3,767 are high potential. In this study, we expected the model can be estimated areas with high potential for landslide occurrence. Lastly, we also hope provide benefit policy for disaster reduction and emergency preparedness, to achieving the sustainable development goals.

**【 Key words 】** Residual Sediment, Regression Model, Disaster Occurring Potential, National Forest

## I、前言

近年來受全球氣候變遷之影響，導致極端降雨現象在臺灣頻頻出現，2004 年至 2010 年的颱風侵襲事件中，皆出現單日近 1,000mm 累積降雨情況，所誘發的災害事故也引起各界關注。臺灣因人口密度高且地質脆弱之故，易引發大型災害且對保全對象會造成龐大損失，尤其在 2009 年莫拉克颱風重創臺灣中南部，挾帶近 3,000 毫米的總雨量使中南部山區多處山崩、土石流及橋樑毀損，造成接近 700 人的死亡。這種大型災害造成社會成本與人民生命財產損失龐大，甚至是非政府所能承受之後果損失（如小林村土石流事件）。

另外，根據水土保持局之「防止土石流二次災害暨復原重建作業手冊」所提出，地震、颱風與洪水災害過後，災地之鬆軟地質與大量雨水，是引發土石流的關鍵因素，邊坡滑動或土石流災害後，土砂的穩定性依舊不足，很容易因外界營力的再次介入（如雨水入滲、地震），再次發生崩塌或土石流。因此在災後儘速

進行二次災害的防治作業，才能降低殘留土砂二次災害造成之生命財產損失。然而，回顧國內外相關文獻，發現目前尚無針對土砂二次災害潛勢開發的評估模式與分析流程，因此建立一個災害潛勢評估儼然已是一項重要且刻不容緩之議題。

本研究延續林務局 2015 年「國有林土砂殘留量及二次災害潛勢影響評估」計畫中之「國有林殘留土砂二次災害潛勢評估」為基礎，針對流域內之國有林受新增崩塌及土砂二次災害影響下之保全對象作災害潛勢評估。截至 2015 年底，全台各流域崩塌土砂生產量以高屏河流域的 7 億 5,871 億立方公尺為最多，且旗山溪與荖濃溪是莫拉克風災之重災區，故本研究選擇這兩個流域作為研究區域。

## II、研究區域概述

本研究以高雄市的旗山溪與荖濃河流域作為研究對象，荖濃溪與旗山溪為高屏溪三大支流之一，荖濃溪全長 137 公里，流域面積達 1,373 平方公里，而旗山溪又稱楠梓仙溪，全長 129 公里，流域面積為 842 平方公里。荖濃溪發源於玉山東峰東側及秀姑巒山西南側，旗山溪則發源於玉山西南山麓之西山，兩溪呈現北北東—南南溪走向延伸，在嶺口兩溪合流後，改稱「高屏溪」，為南臺灣地區主要農業、民生用水之重要來源之一。荖濃溪與旗山溪之地形高山聳立，海拔高度相差懸殊，使得懸崖峭壁，溪流湍急。荖濃溪流經花蓮縣卓溪鄉、南投縣信義鄉及高雄縣茂林區、美濃區、六龜區及桃源區；旗山溪則流經高雄市甲仙區、那瑪夏區、桃源區及嘉義縣阿里山鄉。旗山溪北從帖布帖開溪南至南莊，河谷兩側分佈許多河階地，反映出旗山溪於上游之沖積及下切之特性，聚落大多分佈於河階地上（龔琪嵐、齊士崢，2004）；荖濃溪溪流兩側坡度陡峭，河階地形較為不發達，雖然聚落同樣分佈於河岸兩側，但數量較旗山溪少（吳亭燁、陳樹群，2016）。兩河皆出現河道蜿蜒，遷徙不定之現象，荖濃溪坡度大於 55% 之區域佔流域總面積的 50.25%，旗山溪則佔了 54.6%，屬坡度較陡之流域。

旗山溪與荖濃河流域因坡度陡峭，且多脆弱面及風化作用影響，其斷層、節理及破裂等地質作用亦因地震頻傳而加劇，尤其在 921 地震後更趨嚴重，每年颱風過境南臺灣後，流域內易有崩塌及土砂災害的情況發生。莫拉克颱風造成旗山溪流域的小林村邊坡獻肚山地滑，以及荖濃溪上游之新發部落也土石流災害，造成接近 700 人的死亡，流域內許多建物也達到無法居住的程度。

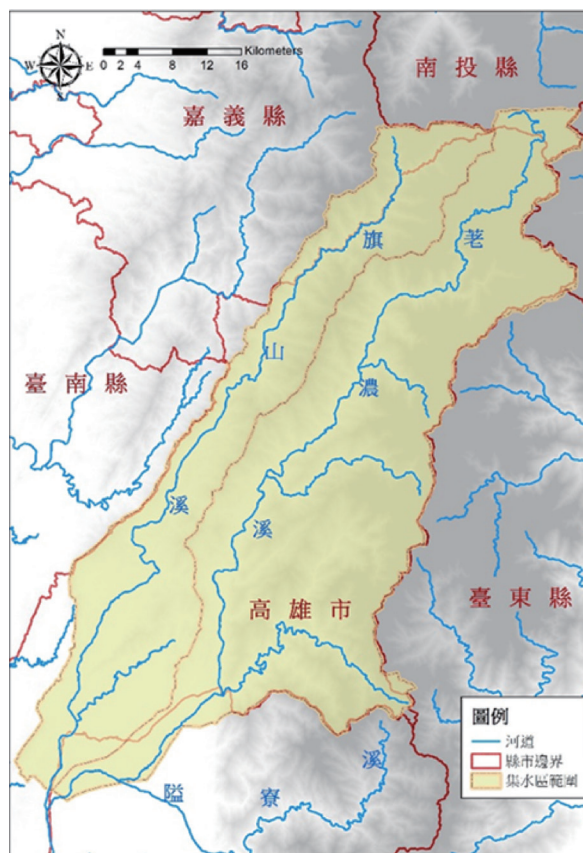


圖 1 研究樣區  
Fig.1 Research area

### III、研究方法

#### (I) 崩塌潛勢及影響範圍率定

##### 1. 崩塌潛勢分析模式

崩塌潛勢模式是用來評估邊坡是否會產生崩塌或其發生崩塌之機率。一般線性迴歸僅能找出一組推估值與觀測值具有最小平方和之參數，二元迴歸模式為具有處理二元性的資料型態，找出一組具有最大可能性的參數，即預測值最符合觀測值，且能同時處理量化變數與類別參數 (categorical variables)。也因二元迴歸模式的參數較易取得、使用較為方便且可得到具可靠性之準確率，目前廣泛被應用於國內、外之崩塌潛勢評估 (Wang and Bai, 2010; Chang et al., 2007; Chang and Chiang, 2009; Chauhan, 2010)，故本研究採用二元迴歸作為評估模式。

本研究參考相關研究 (Chang et al., 2007；經濟部水利署水規所，2011~2012；內政部建研所，2013 及林務局，2013) 崩塌潛勢模式 (或稱山崩潛勢評估模式)

選擇的因子，變數中包含地形因子、地質因子（地層、斷層等）、人文因子（道路開發、土地利用等）及水文因子（雨量等）四項。二元迴歸模式為統計計算方式，雖然缺乏力學基礎及序率之概念，較不具有物理意義，無法得知造成崩場地之力學、物理現象與崩塌物理機制。但二元迴歸模式能結合水文、地文、人文因子，處理崩塌與未崩塌的二元資料，將輸入於模式中之大量參數量化並轉換成崩場地發生機率。

## 2. 參數選擇

基於上述，本研究將所有可取得及量化之因子代入二元迴歸統計中，以 2009 年度新增崩場地作為應變數 (dependent variable)，地形參數則作為獨立變數 (independent variables)，基於 95% 信賴區間進行顯著性統計，各變數 p-value 小於 0.05 視為顯著性高的原則，剔除不顯著的因子後，再重新率定各因子權重，直到所有因子都達顯著水準。經實際率定以坡度、坡向（餘弦）、地形曲率、地形指數、距離斷層距離、地質條件與雨量因子（誘發因子，為必要因子）共 7 個因子，建構全臺崩塌潛勢模式。各項因子值域及顯著水準分析結果如表 1 及表 2。

表 1 顯著山崩潛感因子統計量

Table1 Statistics of significant landslide susceptibility factors

變數	範圍	平均值
坡度 [°]	0 ~ 83.0	19.5
坡向餘弦 [-]	-1 ~ 1	0.07
地形曲率 [m-1]	-19.3 ~ 37.2	0.07
地形指數 [-]	0 ~ 18.9	6.6
距離斷層距離 [km]	0 ~ 124.6	9.0
最大 24 小時雨量 [mm]	151 ~ 1,245	412
地質 (類別變數)	-	-

表 2 山崩潛感因子顯著性分析結果 (數值變數)

Table2 Analysis of significant landslides susceptibility factors (numerical variables)

變數	係數	P-value
坡度 [°]	0.054	< 0.01
坡向正弦 [-]	0.510	< 0.01
地形曲率 [m-1]	-0.145	< 0.01
地形指數 [-]	0.209	< 0.01
距離斷層距離 [km]	0.010	< 0.01
最大 24 小時雨量 [mm]	0.00375	< 0.01
常數	-24.473	-

## (II) 崩塌潛勢評估模式之建立及驗證

### 1. 模式建立方法

為評估新增崩塌可能帶來的土砂，本研究採用二元迴歸模式建立崩塌預測模式 (Chang et al., 2009)，二元迴歸統計分析 (Menard, 2002) 將各影響崩塌因子之參數代入二元迴歸統計，計算各參數之係數而得下式：

$$\text{Logit}(y) = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots e \quad (\text{式 1})$$

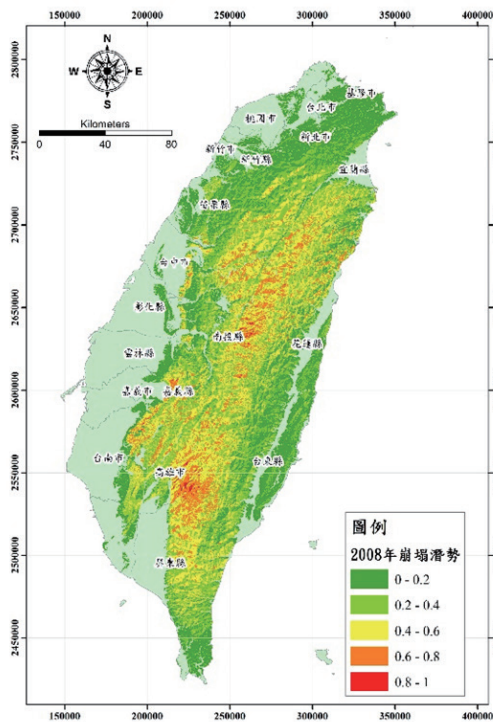
在式(1)中， $y$ 為獨立變數、 $x_i$ 為解釋變數(地形或降雨參數)及 $b_i$ 為迴歸係數。將計算所得之獨立變數以下式計算，可得各統計面積單元發生崩塌之機率，如式(2)所示， $P$ 為崩塌發生機率：

$$P = \frac{\exp(a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots)}{1 + \exp(a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots)} \quad (\text{式 2})$$

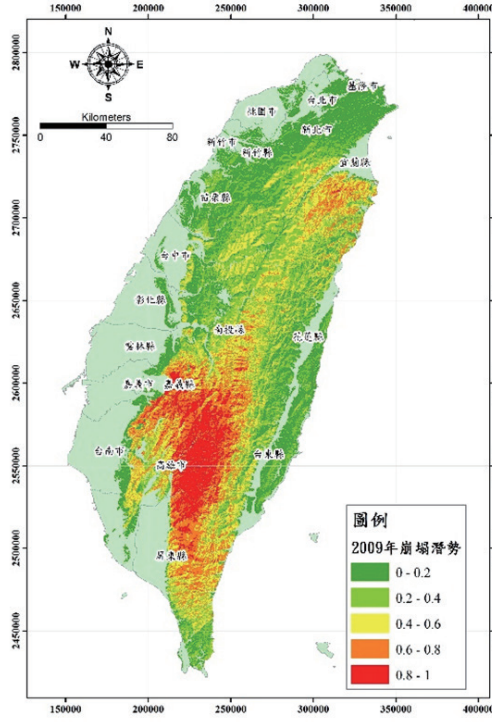
模式率定和驗證方面，降雨誘發崩塌潛勢評估模式以 2009 年度之新增崩塌地為模式率定基礎，主要是 2009 年莫拉克颱風新增崩塌地為近年國有林最大規模之颱風事件，以此事件率定可反映極端降雨事件特性及掌握主要崩塌熱區，可避免因採用罕見崩塌事件(崩塌地較少且局部發生的颱風事件)僅能反映局部區域崩塌及分布特性，致使崩塌潛勢模式無法應用於全國國有林。

率定後，本研究再以 2008、2013 與 2014 年度的全臺新增崩塌地進行模式驗證，各年度新增崩塌地如圖 2 所示。模式率定與驗證方法則以修正成功率 (Modified Success Rate, MSR) 評估模式之優劣。修正成功率則由 Huang and Kao (2006) 提出評估模式率定之預測成效，並採其建議模式率定與驗證達 70% 以上視為穩定模式之判斷，利於模式建置與後續分析模擬之用。修正成功率係考量正確崩塌地與非崩塌地的判釋率，修正成功率公式如下：

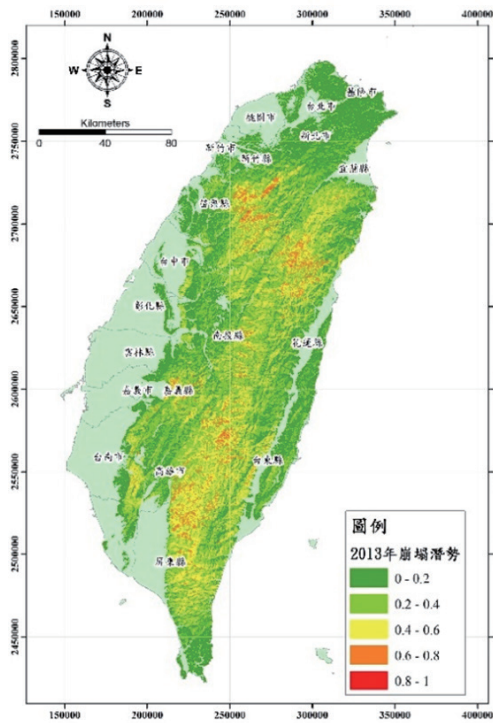
$$\text{修正成功率} = (\text{正確崩塌地判釋率} + \text{非崩塌地判釋率}) / 2 \quad (\text{式 3})$$



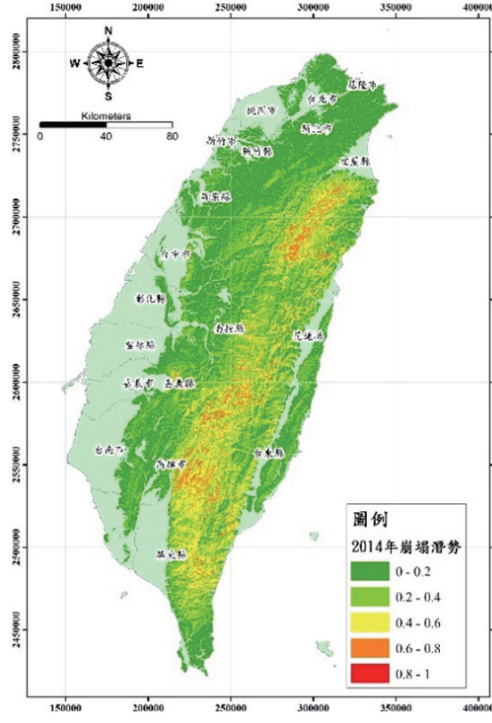
(a) 2008年崩塌潛勢（驗證事件）



(b) 2009年崩塌潛勢（率定事件）



(c) 2013年崩塌潛勢（驗證事件）



(d) 2014年崩塌潛勢（驗證事件）

圖 2 崩塌潛勢模式率定(2009年)與驗證結果

Fig.2 Landslide susceptibility model rating(2009) and verification results

## 2. 模式的建立與驗證

本研究參考 Chang et al. (2009) 及經濟部水利署水規所 (2011、2012) 崩塌災害潛勢分析選擇因子，將坡度、坡向(餘弦)、地形曲率、地形指數、距離斷層距離、地質條件與雨量因子山崩潛感因子視為自變數，2009 年新增崩場地視為應變數，經過二元迴歸運算，可得到崩塌機率模式如式 4，其中地質為類別因子，其各類迴歸係數如表 3，將  $Logit(y)$  的計算結果帶入式 1，則可計算出崩塌機率，2008 年與 2009 年之崩塌潛勢計算結果與該年度新增崩場地套疊結果如圖 2。

$$\begin{aligned} Logit(y) = & 0.054[Slope] - 0.855[AspCos] \\ & - 0.145[Cur] + 0.209[Topo] + 0.01[Dis\_fault] \\ & + 0.00375[R_{m24}] + [Geo] - 24.473 \end{aligned} \quad (式 4)$$

由圖 2 的結果顯示，崩塌預測模式確實能夠反映崩塌之空間分布，2009 年之崩場地大多集中在中、南部地區，而模式預測結果也顯示此區具有較高的崩塌潛勢。2008 年之崩場地(深色)主要分布於中央山脈、雪山山脈及玉山山脈與高潛勢的崩塌位置相當吻合。

由修正成功率評估模式預測成效，以 2009 年崩場地進行模式率定(表 3)，非崩場地預測成功率為 76.4%；崩場地預測成功率為 84.4%；修正成功率為 80.4%。以 2008 年崩場地進行模式驗證(表 4)，非崩場地預測成功率為 84.9%；非崩場地預測成功率為 58.8%；修正成功率為 71.8%。2013 年及 2014 年雨量分布與新增崩場地進行驗證，驗證結果顯示修正成功率達 75.0% 與 79.7%，表示模式成功率在可接受範圍內，也相對穩定可靠，將有助推估不同情境下新增崩塌土石生產量分布，利於合併考量土石流運移模擬殘留土砂分布，即可進行二次土砂災害潛勢模擬工作。

表 3 地質因子 (類別變數) 二元迴歸係數表

Table3 Logistic regression coefficient of geological factors (categorical variable)

地層名稱	係數	地層名稱	係數
沉積層	16.071	大桶山層等	18.545
澳底層	17.942	片麻岩	17.622
錦水頁岩	18.838	變質石灰岩	18.844
卓蘭層	20.209	黑、綠色片岩	18.875
恆春石灰岩	-1.046	黑色片岩	18.571
西村層、佳陽層	18.879	臺地堆積	16.297
瑞芳群	18.456	頭崙山層	17.136
利吉層及墾丁層	18.966	卑南山礫岩	-1.545
十八重溪層	19.594	都巒山層	18.103
畢祿山層	19.436	五指山層	15.604
三峽群	18.766	野柳群	18.470
十八重溪層	18.490	安山岩	19.484
四稜砂岩等	19.102	玄武岩	0.000
達見砂岩	18.984	基性火成岩	18.948
大港口層	19.341		

註：其中恆春石灰岩及卑南山礫岩因崩塌樣本較少，故迴歸係數呈現負相關。

表 4 模式率定結果預測成功率

Table4 Accuracy rate of model rating prediction results

觀察值 \ 預測值	非崩塌地 (%)	崩塌地 (%)	非崩塌地成功率 (%)	崩塌地成功率 (%)	修正成功率 (%)
非崩塌地	76.4	23.6	76.4	84.4	80.4
崩塌地	15.6	84.4			

表 5 模式驗證結果預測成功率

Table5 Accuracy rate of model verification results

年度	觀察值 \ 預測值	非崩塌地 (%)	崩塌地 (%)	非崩塌地成功率 (%)	崩塌地成功率 (%)	修正成功率 (%)
2008	非崩塌地	84.9	15.1	84.9	58.8	71.8
	崩塌地	41.2	58.8			
2013	非崩塌地	82.1	17.9	82.1	67.8	75.0
	崩塌地	32.2	67.8			
2014	非崩塌地	81.9	18.1	81.9	77.8	79.7
	崩塌地	22.2	77.8			

### (III) 二次土砂災害模擬與驗證

圖 3 為二次土砂災害潛勢概念圖，當颱風豪雨誘發崩塌土砂，往下邊坡移動後，部分進入河道的土砂量，則為土石移出量；其餘的土砂因為驅動力小於等於土石流之降伏應力時，而殘留在邊坡上，該區域之土砂總量則為土砂殘留量。當下一次颱風豪雨來臨時，新崩塌產生的土砂和殘留的土砂混和後，增加殘留土砂的驅動力，使坡面之土砂重新分配，形成二次土砂災害。模擬過程中，納入新增崩場地土砂生產量，把殘留量作為土砂料源的輸入條件進行模擬，將對土砂殘留於坡面之土砂生產、運移與流動進行較完整的描述與評估。

圖 4 為旗山溪與荖濃溪的二次土砂災害模擬結果，旗山溪與荖濃溪集水區在 100 年重現期之雨量分別為 689 mm 與 742 mm，產生新生崩塌面積分別為 0.3 及 2190.3 公頃，新生崩塌量共計 4,055 萬立方公尺。新增崩場地大多聚集於荖濃溪上游坡度較陡峻之處，其新生崩塌量共計 4,054 萬立方公尺的土砂，模擬結果也顯示，有大量土砂殘留於坡面和野溪上，如桃源里和小林村一帶之野溪和邊坡，新增崩場地及土砂殘留分佈情況詳見圖 3。從表 6 的模擬結果顯示，本研究所使用之情境設定，對於崩場地土砂產量的預測，得以反應集水區內大量新增崩場地新生崩塌產生的土砂可能會造成邊坡與野溪土砂淤積並造成土砂災害。

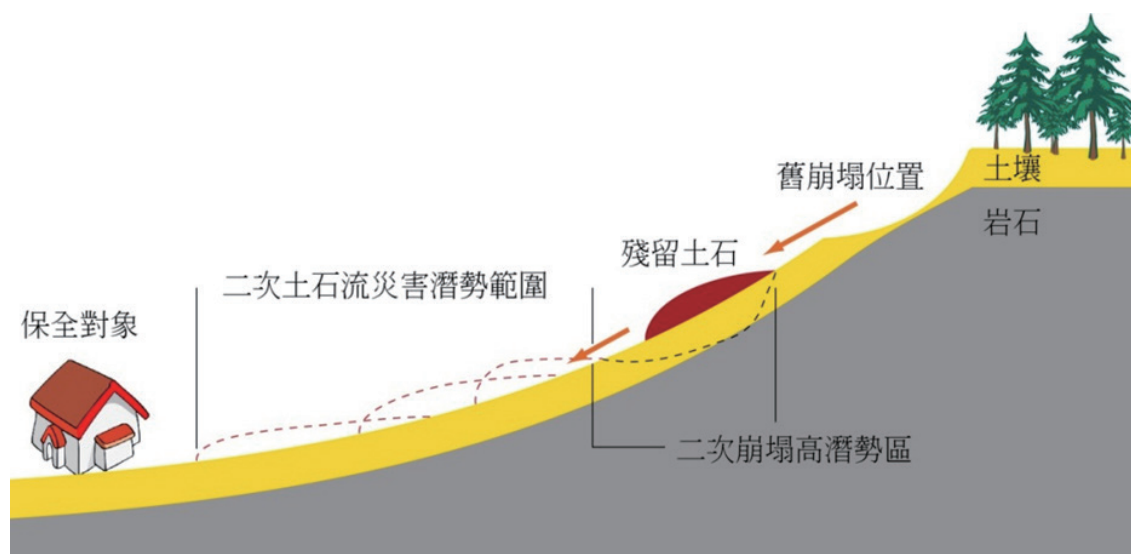


圖 3 土砂二次災害潛勢概念圖

Fig.3 Concept of geohazards residual sediments

表 6 殘留土砂和二次土砂災害模擬統計表

Table6 Sediment disaster simulation statistics of residual and geohazards residual sediments

集水區	流域土砂殘留量 (萬立方公尺)			雨量 (mm)	二次土砂災害		二次土砂災害 分析結果驗證	
	坡面 或 野溪	河道	總計		新增 崩塌面積 (公頃)	新增 崩塌量 (萬立方公尺)	新增崩塌量 實測值 (萬立方公尺)	模擬值 / 實測值
旗山溪	11,678	5,277	16,954	689	0.3	1	4,568	112%
荖濃溪	14,514	8,043	22,557	742	2,190.0	4,054		

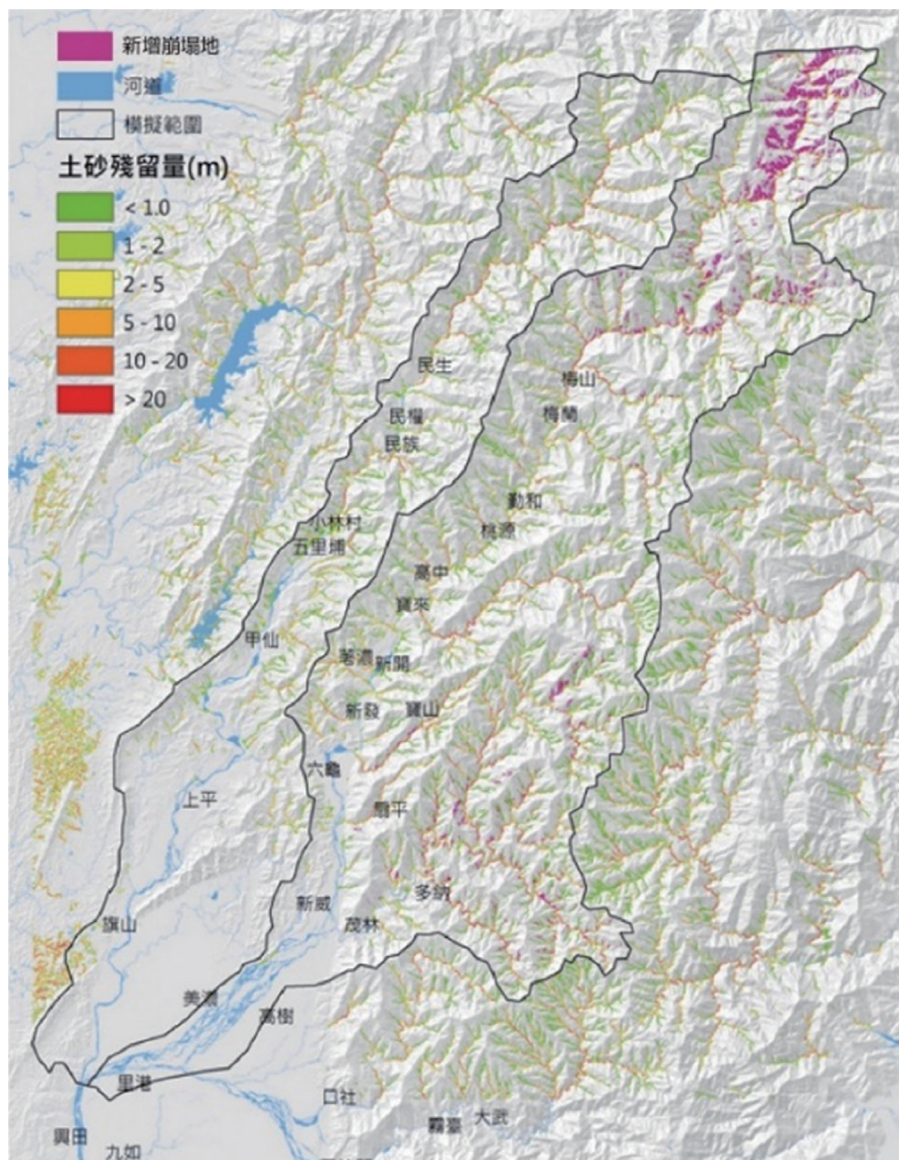


圖 4 旗山溪與荖濃溪二次土砂災害模擬結果

Fig.4 Geohazards residual sediments simulation results of Qishan River and Laonong River

## (IV) 國有林保全對象潛勢評估

本研究基於林班地內斜坡單元崩塌潛勢分級成果，套疊保全對象圖層，針對國有林內保全對象作災害潛勢評估分級，所考量的保全對象包含國有林地內之暫准建地及路網，分析尺度以 100 年重現期崩塌潛勢分級結果為主，保全對象之災害潛勢評估分析流程如圖 5 所示。

### 1. 斜坡單元圖資產出

斜坡單元為一符合地形邊界的分析單元，引誘地形邊界控制，故斜坡單元不會跨越山脊線與水系，有利於山崩管理，可避免因上中下潛勢不同，而產生管理配套不一致的問題。斜坡單元的產製與分析，是參考地調所 (2009) 建議之「集水區重疊法」。本研究之斜坡單元二次災害堆積土砂分佈圖是計算斜坡單元內二次土砂災害堆積平均深度及累積土砂量（單元內各網格之土砂體積），以了解每個邊坡因殘留土砂及新增崩塌土砂量作用下，向下邊坡運移堆積之土砂量及堆積深度，圖 6 及圖 7 為相關成果，可見土壤堆積之土砂量及深度多分佈於上游和地勢陡峻之地，阿里山鄉、信義鄉、桃源區與茂林區都是深受二次土砂災害影響影響之區域。斜坡單元崩塌潛勢圖則是計算每個斜坡單元內的崩塌機率之平均值完成，作為保全對象潛勢評估之基礎圖資。本研究考量國有林地 2008 至 2014 年崩場地目錄，參考曾發生崩塌之斜坡單元崩塌潛勢閾值 (林務局，2012)，大於等於閾值者為高潛勢斜坡單元，閾值以下依據平均崩塌潛勢均分為中潛勢與低潛勢，綜合各類崩塌潛勢結果，可了解每個邊坡發生崩塌之可能性，斜坡單元崩塌潛勢分級圖如圖 8 所示，荖濃溪區域多為中高潛勢，旗山流域之低潛勢區域分佈於下游的甲仙區、杉林區、美濃區與內門區。二次土砂災害堆積土砂量亦為高潛勢評估依據，考量堆積深度至少達一層樓高（3 公尺），故堆積深度大於 3 公尺的斜坡單元且有影響保全對象時，該保全對象將列為高潛勢保全對象，可能遭受土石流等二次災害之影響，造成人命及財產損失。

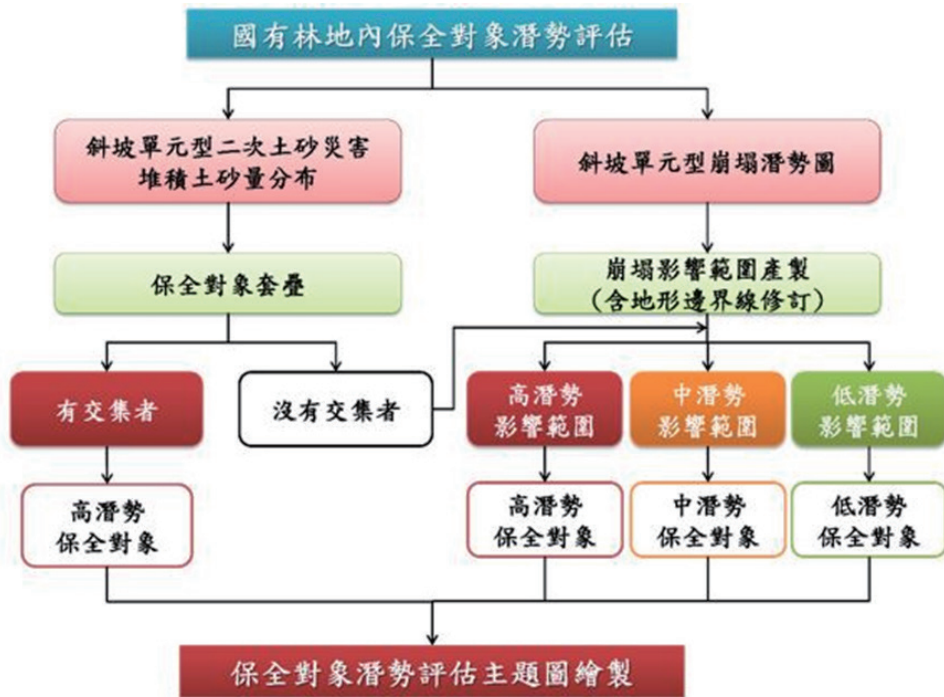


圖 5 國有林地保全對象潛勢評估流程

Fig.5 The process of evaluation the risk of secondary geohazards in national forest's protection targets

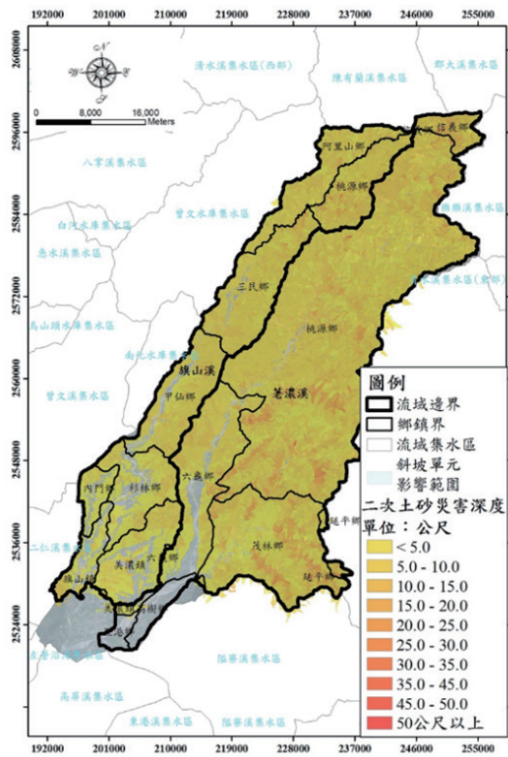


圖 6 單元二次土砂災害堆積深度分布圖  
Fig.6 The residual sediments accumulation depth distribution of geohazards residual sediments

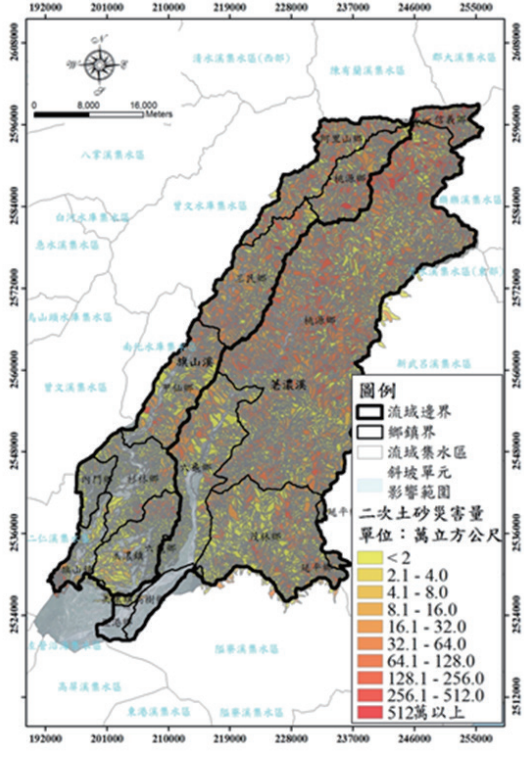


圖 7 斜坡單元二次土砂災害土砂量分布圖  
Fig.7 The residual sediments distribution of geohazards residual sediments in slope units

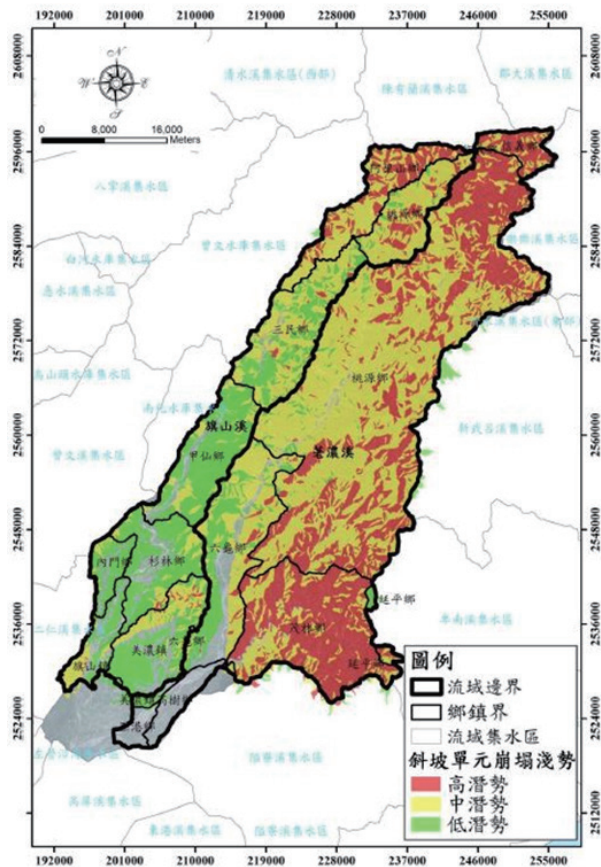


圖 8 斜坡單元崩塌潛勢圖  
Fig.8 Landslide susceptibility mapping of slope units

## 2. 保全對象潛勢分析結果

圖 9 與圖 10 為旗山溪與荖濃溪建築物潛勢分級與路網潛勢分級結果，該結果係以全國斜坡單元 100 年重現期崩塌潛勢分級結果為主套疊保全對象圖層進行保全對象災害潛勢評估，其成果屬於極端降雨情境下之保全對象受崩塌影響之潛勢結果。本研究對國有林範圍之保全對象做潛勢分級，提供相關單位進行災害防治及優先治理順序之參考。套疊結果如圖 9 所示，旗山溪與荖濃溪之暫准建物多為高潛勢，又以旗山溪流域中游高雄市甲仙區佔居多，杉林區、美濃區也有為數不少的高潛勢建築物分佈，主要集中在旗山溪流域中至下游位置，未來亦須注意殘留土砂對旗山溪中下游之溪流兩側建築物影響。荖濃溪之暫准建物數量雖少，但受影響之建物大多亦為高潛勢，主要分佈在荖濃溪沿岸，又以高雄市六龜區居多。流域內之林道與步道也為高潛勢分級，這顯示流域內的保全對象易受到極端降雨事件之影響，發生崩塌危機。

圖 10 則顯示路網潛勢分析結果，流域內林區道路、步道多為高潛勢，以高雄市甲仙區、杉林區、美濃區和桃源區範圍為主。歸納旗山溪與荖濃河流域之結果，高潛勢斜坡單元與河道彎曲處為主要高潛勢保全對象分佈區域。

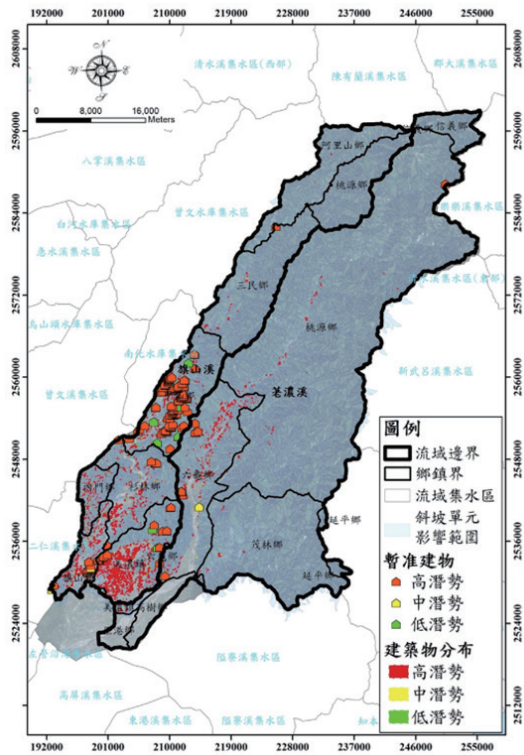


圖 9 旗山溪與荖濃溪建築潛勢風險圖  
Fig.9 Landslide risk assessment of buildings in Qishan River and Laonong River watershed

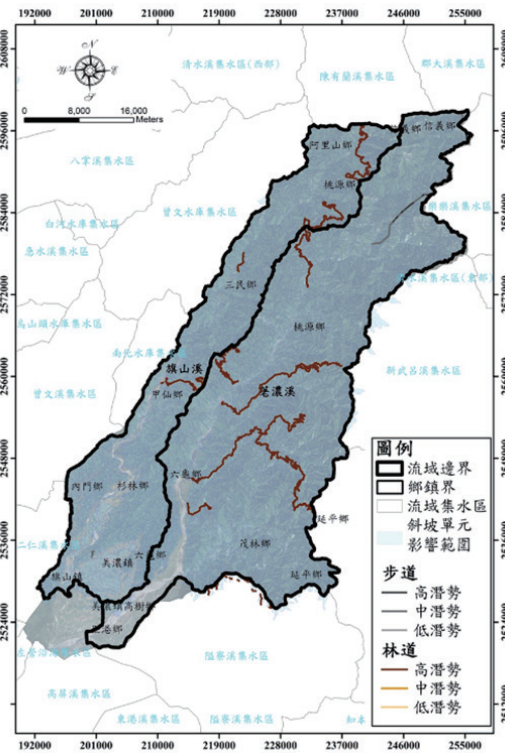


圖 10 旗山溪與荖濃溪路網潛勢風險圖  
Fig.10 Landslide risk assessment of road network in Qishan River and Laonong River watershed

#### IV、研究結果與論

本研究以坡度、坡向、地形曲率、地形指數、距離斷層距離、地質條件與雨量因子建構全臺崩塌潛勢評估模式，將旗山溪流域及荖濃溪流域作為研究樣本，研擬全國尺度崩塌潛勢模式，模式率定非崩塌預測成功率為 76.4%；崩塌地預測成功率為 84.4% 及針對國有林保全對象做災害潛勢評估，修正成功率為 80.4%。此模式經歷多場驗證可證實是相對穩定可靠，將有助於推估不同情境下崩塌土石生產量及二次土砂災害潛勢。本研究基於崩塌潛勢評估模式，以 100 年重現期崩塌潛勢分級結果為保全對象做災害潛勢評估。保全對象潛勢分析結果影響土砂處理策略及防救災作為，相關分析結果為旗山溪與荖濃河流域的 13,630 個斜坡單元

中，有 3,410 個為低潛勢、6,453 個為中潛勢，餘下之 3,767 個為高潛勢。分析結果也顯示分布在旗山溪流域之暫准建物、建築物及路網分佈，大多屬高潛勢。旗山溪與荖濃溪之野溪目前有遷徙不定的情況，應持續注意整體流域內高潛勢斜坡單元與河道蜿蜒度較高區域對路網保全對象之影響。

位處高潛勢斜坡單元之保全對象，未來若遭遇極端降雨事件時，坡體有滑動潛勢的可能，進而影響其保全功能及安全性。但這不代表高潛勢斜坡單元一定會發生滑動，這仍需進一步由小尺度邊坡穩定分析做確認，以利相關單位作災害防治及檢測管理之參考。目前，減災與持續監測是相關單位對於高潛勢區域需立即著手進行之事項，將「一次大量發生災害之防止」改為「多次小量發生災害之控制」，以減少土砂災害影響範圍，減緩其衝擊力與潛在風險，並規劃緊急避難場所。同時採取「災害基本控制」策略，針對災因進行控制，避免擴大，不予全面處理，改採基本控制。對於現有工程方法無法克服地區，應採自然復育，並加強防災應變計畫。對於居住於高潛勢之居民，需加以防災減災教育宣導，加強緊急應變能力及務必讓居民熟捻疏散避難路線，有關邊坡土地的利用亦需加強管理，限制開發。各種土砂防治之原則應包含多項措施，其具體實施需考量土砂災害類型特性、規模和保護對象之重要性，進行整體規劃與交互運用，才能發揮最大功效。

## V、參考文獻

- 日本國土交通部砂防部，2001，土砂災害防治法，日本國土交通省砂防部出版。
- 行政院農業委員會水土保持局，2010，99 年莫拉克災區山坡地聚落安全調查，行政院農委會水土保持局委託計畫。
- 行政院農委會林務局，2013，國有林莫拉克風災土砂二次災害潛勢影響評估，行政院農委會林務局委託計畫。
- 行政院農委會林務局，2015，國有林土砂殘留量及二次災害潛勢影響評估，行政院農委會林務局委託計畫。
- 吳亭燁、陳樹群，2016，非直進式土石流流動案例探討災害影響區之劃定，中華水土保持學報，47(1):24-35。
- 經濟部水利署水利規劃試驗所，2010。強化高屏溪流域因應氣候變遷防洪調適能力研究計畫 (1/2)。

- 經濟部水利署水利規劃試驗所，2011。強化高屏河流域因應氣候變遷防洪調適能力研究計畫 (2/2)。
- 經濟部水利署水利規劃試驗所，2012。淡水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫 (1/2)。水利署水利規劃試驗所委託研究計畫。
- 龔琪嵐、齊士崢，2004，楠梓仙流域的河階地及地形演育，地理學報，38：47-62。
- Chang, K., Chiang, S. & Hsu, M., 2007, Modeling typhoon- and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression, *Geomorphology*, 89(3): 335-347.
- Chang, K. & Chiang, S., 2009, An integrated model for predicting rainfall-induced landslides, *Geomorphology*, 105(3): 366-373.
- Chauhan, S., Sharma, M., & Arora, M. K., 2010, Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model. *Landslides*, 7(4): 411-423.
- Huang, J. C., & Kao, S. J., 2006, Optimal estimator for assessing landslide model performance, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(6), 957-965.
- Menard, S., 2002, *Applied Logistic Regression Analysis*, Thousand Oaks, CA: Sage.
- Wang, Z. & Bai, H., 2010, Reverse logistics network: A review, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, December 7-19, Macau, 1139-1143.



## 重要水庫集水區土砂生產演變評估

蔡明發<sup>1</sup> 黃景滄<sup>1</sup> 何幸娟<sup>2\*</sup> 林伯勳<sup>2</sup>

**【摘要】**本文以土砂收支觀點並考量水文環境因素，以水庫庫區入流點為終點，由上游至下游簡化計算水庫集水區土砂生產、主流河道土砂沖淤等項目，以供土砂防治之參考。經分析結果可知，白河、牡丹、明德、霧社、德基等 5 座重要水庫集水區，單位降雨量土砂生產量皆呈現下降趨勢；顯示治理措施已發揮原有設計功效，有效調節颱風豪雨期間土砂生產，落實延長水庫使用年限及穩定供水。建議未來應持續監控來砂變化，以強化水庫集水區保育治理，有效維持水庫容量，達國土資源永續利用。

**【關鍵詞】**土砂生產、土砂運移、水庫集水區。

## SIMPLIFIED SEDIMENT BUDGET FOR MAJOR RESERVOIR WATERSHEDS IN TAIWAN

Ming-Fa Tsai<sup>1</sup> Jiing-Tsang Huang<sup>1</sup> Hsing-Chuan Ho<sup>2\*</sup> Bor-Shiun Lin<sup>2</sup>

**【Abstract】** This study developed a simplified sediment budget analysis based on sediment production, sediment control and sediment delivery combined with the hydrological environmental factors for a reservoir watershed scale. The analyzed results showed that the amount of sediment transport has remained in rational levels in Baihe, Mudan, Mingde, Wushi and Deji reservoir watersheds. It also proved that the sediment control measures have developed high remediation efficiency when subjected to the typhoons. These observations can serve as the basis information for effectively managing reservoir watersheds, planning of disaster prevention works and reducing risk of rapid sedimentation in reservoirs during the flood season.

**【Key words】** Sediment budget, Sediment transport, Reservoir watershed.

---

<sup>1</sup> 行政院農業委員會水土保持局。

Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Nantou 540

<sup>2</sup> 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心。\* 通訊作者電子郵件：hcho@sinotech.org.tw

Disaster Prevention Technology Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Taipei 114

\* Corresponding Author. E-mail: hcho@sinotech.org.tw

## I、前言

臺灣地形、地質及氣候環境特殊，使得集水區砂源供應十分豐沛；有鑑於近年氣候變遷影響，極端天氣發生機率日益增加，強降雨短延時之雨量，造成水庫集水區發生大規模土砂災害，大量土砂流入水庫，造成水庫淤積，減少水庫壽命。以流域角度而言，土砂生產、運移及堆積等三項機制，從上游至下游屬於一貫性連續運動；若屬正常供砂，可適時補注河道，維持河道穩定性及保持水路不變；反之，屬於異常供砂，將造成河相及深槽改變、河道嚴重淤積，亦使原有生態棲地喪失或縮減，危及人類居住安全；另更直接威脅公共給水、灌溉、發電、防洪及觀光功能之水庫。水庫屬人為構造物，上游集水區產生不穩定土砂，以挾砂水流形式遞移進入水庫為必然現象，土砂淤積係屬無法避免；且因重要水庫設施缺乏排砂設施，水庫淤滿屬最終宿命。因此，如何有效量化評估水庫集水區土砂環境，實為水庫永續發展重要課題之一。

由於水土資源為人民生活及國家發展必要之資源，為因應氣候變遷造成水庫集水區上游土砂問題，有效串接評估水庫蓄水範圍以上子集水區出流口至庫區入流點土砂生產運移演變，本文以土砂生產觀點並考量水文環境因素，以水庫庫區入流點為終點，由上至下簡化計算水庫集水區土砂生產、土砂防治、主流河道土砂沖淤等，整合土砂生產量體運移演變，強化流域整體經營思維，供相關單位辦理土砂保育經營管理應用參考。

## II、文獻回顧

欲有效提升水庫水源涵養能力及減少水庫淤積，需明確掌握集水區土砂供應來源及其量體，才得以解決集水區土砂災害演變次生問題。一般而言，水庫集水區入庫砂源除主河道長期堆積沉積物外，產砂來源另可分為伴隨降雨隨機產出之土壤沖蝕量，以及因降雨或地震等擾動產生之坡面崩塌量等兩種（水保局，2011a）。土壤沖蝕量及坡面崩塌量會因豪雨誘發及地表逕流帶入河道，或經其他介質流入下游或進入水庫內，為直接造成水庫濁度及淤積量升高與影響水庫供水能力及水庫容量之重要因素。

### (I) 土砂生產

坡面沖蝕量多寡受制於地表狀況、土壤性質、坡度緩急、地質條件、降雨強

度大小、逕流速度等不同內在條件與外在營力影響，常以土壤流失經驗公式或統計迴歸方式進行估算(陳樹群等，1998、2009；林俐玲，2008、謝正倫，2008；許振崑等，2009；林伯勳等，2010；何幸娟等，2012)。崩塌量體估算可利用傳統地形測量至現地量測堆積面積及高程，以估算現場崩塌地堆積體積，但傳統地形測量過於耗費人力且耗時，無法提供即時數據；水土保持技術規範(2003)第二章第五節「泥砂生產調查」之第38條規定：「崩塌量調查方法，應由實測或部分配合推估實施之。新增崩塌地得利用實際勘查或利用航照圖判斷，亦得利用衛星影像分析，以進行崩塌量之調查」。故可藉由不同時間歷史衛星影像判釋之崩塌地，將所獲得總崩塌面積乘上平均崩塌土壤厚度或利用數學積分計算(如圖1)，獲得單場或特定時期之崩塌量(陳信雄，1995；Khazai and Sitar, 2000；陳樹群，2006；蕭震洋等，2009；何幸娟等，2010、2012)。

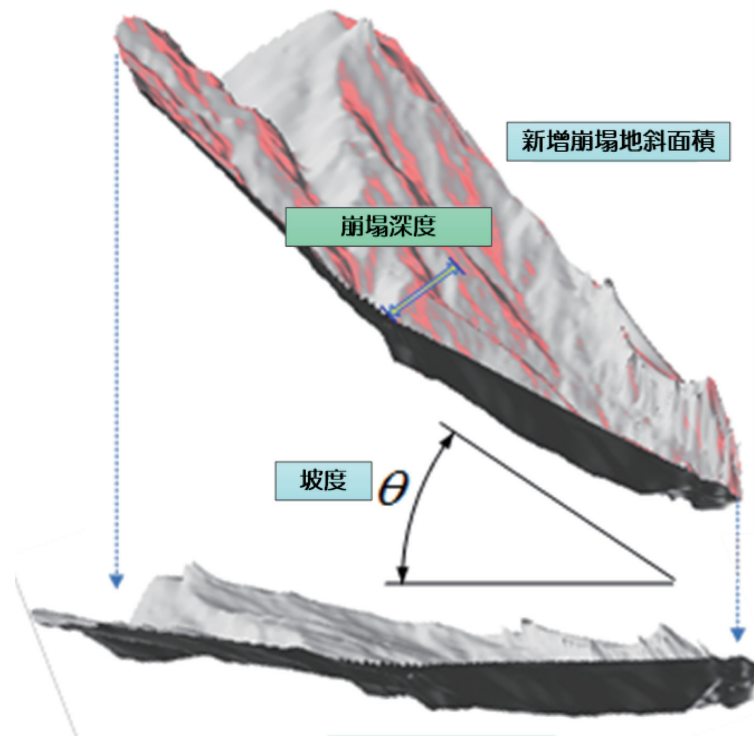


圖 1 崩塌面積與坡度相對關係示意圖

Fig.1 Schematic layout for landslide area and its corresponding slope

## (II) 土砂防治

當土砂量體進入河道成為河道沖淤材料後，即沿河道向下游輸送；水砂運移過程會造成不同河段沖刷或淤積之河床變動(謝正倫，2009)。為對前述崩塌及沖蝕等可能發生災害的過剩土砂予以調節，維持土砂均衡流出，水庫權責單位依

據「水庫集水區保育綱要」，針對災害源頭區研擬各項保育計畫，另針對泥砂生產量高之崩塌裸露地、野溪及水土嚴重流失區域，辦理保育工程及崩塌裸露地復育，以減少水庫淤積問題。水土保持工程之防砂機能，旨在抑制坡地土砂大量生產，加速穩定邊坡，使表層土壤得以維持正常沖蝕環境，降低野溪斷面與坡降之激烈變動。受颱風豪雨事件作用而有大量土砂流出集水區時，水土保持防砂工程不僅可以發揮減緩土砂生產量體，同時也起著調節溪流水流攜出土砂量體之功能，以避免引發下游溪流底床土砂之強烈沖淤變化。水庫上游集水區常以防砂壩抑制溪床及兩岸土砂生產(如圖2)，使其調節並保持均衡的流出土砂(陳信雄等，1989)，即為土砂防治量。目前國內較為常用土砂防治量演算模式，包含幾何演算法及經驗演算法等兩類(松村和樹等，1988；張三郎，1996；陳正炎和張三郎，1996；許振崑等，2011、2012；水保局，2012a、2012b；連惠邦和蔡易達，2013；賴承農等，2014)；幾何演算法通常與結構體幾何尺寸、淤砂坡度及結構體所佔腹地面積密切相關(林務局，1991、1992)，此法較能精確掌握各類防砂量組成及容量多寡，惟需蒐集構造物幾何尺寸及調查淤砂參數演算防砂量，資料準備時間相對冗長。經驗演算法係根據以往構造物經驗及相關調查案例，透過統計迴歸方式建構一套經驗式，簡化防砂工程幾何尺寸與淤砂參數之關係，可快速演算防砂量，初步提供工程人員實務應用之參考數據，進行事前分析與規劃應用，解決設計規劃或實務應用之因窘(渡邊正幸等，1980；水山高久等，1995；張三郎，1996；曾耀生和黃宏斌，2004；連惠邦，2000)。

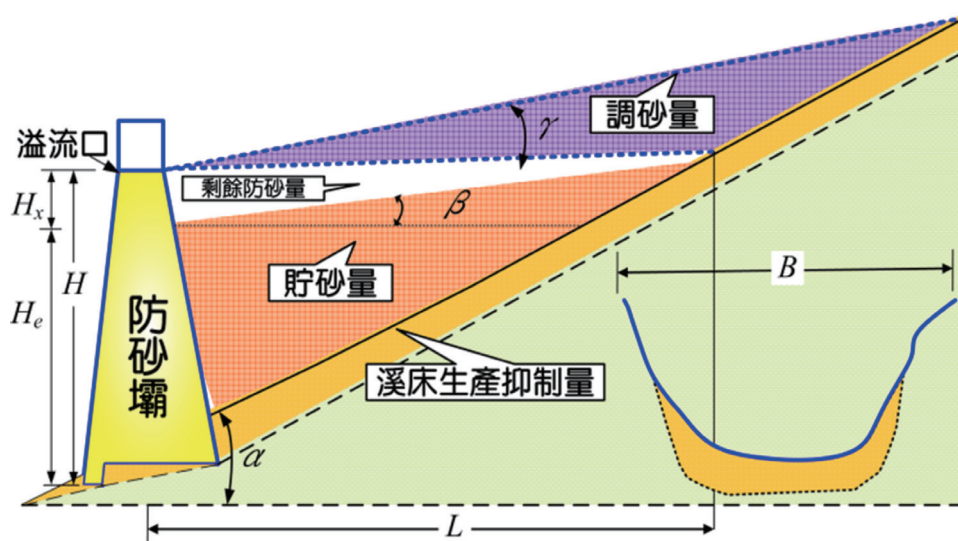


圖 2 防砂壩土砂防治示意圖 (摘自：林伯勳等，2016)

Fig.2 Schematic layout for sediment control volume of check dam

### (III) 河道沖淤

水土保持防砂設施除可直接攔阻土砂外，隨壩體攔蓄空間逐漸淤滿，進以調整河道坡度趨緩，遂改變整體輸砂能力，達到降低或維持一定土砂遞移效果。影響河道輸砂量多寡主因包含有土砂生產量體變化以及河道輸砂能力 (Fuller et al., 2003)。土砂遞移過程中，若於河道存有防砂設施則大顆粒材料將被攔阻，剩餘部分則被水流挾帶並遞移至下游，再合流至主河道。根據上述土砂生產過程，上游土砂總產量與下游堆積量之相對關係，即稱為土砂遞移率。集水區土砂遞移率在過去研究中，並無細分並釐清崩塌或沖蝕率所佔比例，亦即無法探討河道及坡面上因不同運動機制，所引致之土砂遞移變化差異。土砂遞移率因土壤類型及粒徑大小、排水狀況、河道形態、植生覆蓋程度、暴雨類型及堆積泥砂再遞移等種種因素，以及時間因素造成地形貌變化，而土砂遞移率亦隨之不同。由於土砂遞移率變化主要受到集水區的地文與水文特性以及土地利用型態等不同而有所改變，較難找出最合適的量化公式。故常以「輸砂經驗式」或「土砂收支分析」方式，計算式推估河道土砂變化量 (舒彩文和談廣鳴，2009；水保局，2012c；何幸娟等，2013)。常用輸砂經驗式有何黃公式 (黃宏斌和何智武，1992) 及 Schoklitsch 公式 (Schoklitsch, 1934) 等。然採用輸砂經驗式計算時，須有大量現場調查數據進行率定與驗證。在水土保持工程實務應用上，為整合集水區土砂生產、土砂遞移以及土砂堆積等河道土砂輸送過程，可透過土砂收支 (Sediment Budget) 分析概念，探討河道沖淤行為；集水區土砂收支分析係結合集水區土砂生產與土砂運移演算之整合概念。欲建立可靠度佳且合理之土砂收支模式需透過長期監測與有效水文資料建立，才能確切說明集水區土砂收支過程，分析河道沖淤行為及運移歷程，供以作為水庫防淤整治規劃參考。

### III、評估方法

為有效串接評估水庫蓄水範圍以上子集水區出口至庫區入流點之土砂生產運移演變，本文以土砂生產觀點並考量水文環境因素，將水庫集水區境內，庫區入流點以上子集水區簡化為單一集水區系統，並視庫區入流點為此單一集水區系統之土砂生產量出口 (如圖 3)，由上至下嘗試以實際環境監測資料，簡化水庫集水區土砂生產量、土砂防治量、土砂入庫量、主流河道土砂淤積量等土砂運移計算，如下式 (1) 所示。

$$\begin{aligned} \text{土砂入庫量} &= \text{土砂生產量} - \text{主流河道土砂淤積量} \\ &= (\text{土砂流失量} - \text{土砂防治量}) - \text{主流河道土砂淤積量} \quad \text{式(1)} \end{aligned}$$

式中各項評估課題與分析方式，條列如下：

1. 土砂生產量：為子集水區出口，匯流進入主流河道之土砂量；即土砂流失量與土砂防治量差值。係評估庫區入流點以上子集水區於坡面供砂料源產量（山坡地範圍），追蹤水文活動影響土砂演變趨勢及監測土砂產量變動幅度。
2. 土砂流失量：為因崩塌或沖蝕作用所流失且匯流進入野溪之土砂量。
3. 土砂防治量：為野溪河道因構築防砂設施所發揮防、攔砂之防治量。係實質量化水保局投入保育治理措施後，「直接治理之既有砂源減少量」與「間接影響之潛在砂源穩定量」等土砂防治效益；據以量化評估水土保持措施土砂防治成效。
4. 土砂入庫量：為主流河道遞移進入庫區入流點之土砂量，以水庫歷年淤積測量成果求得。可說明上游集水區保育治理措施對於水庫土砂入庫量控制成效。
5. 土砂淤積量：為土砂運移過程中，主河道淤積土砂量。因考量土砂遞移為動態，不易量化，可以河道斷面調查成果、主流輸砂量等方式推估。本文考量分析範圍內未有長時之依時性實測數據，故以前述評估體積量差值求得。

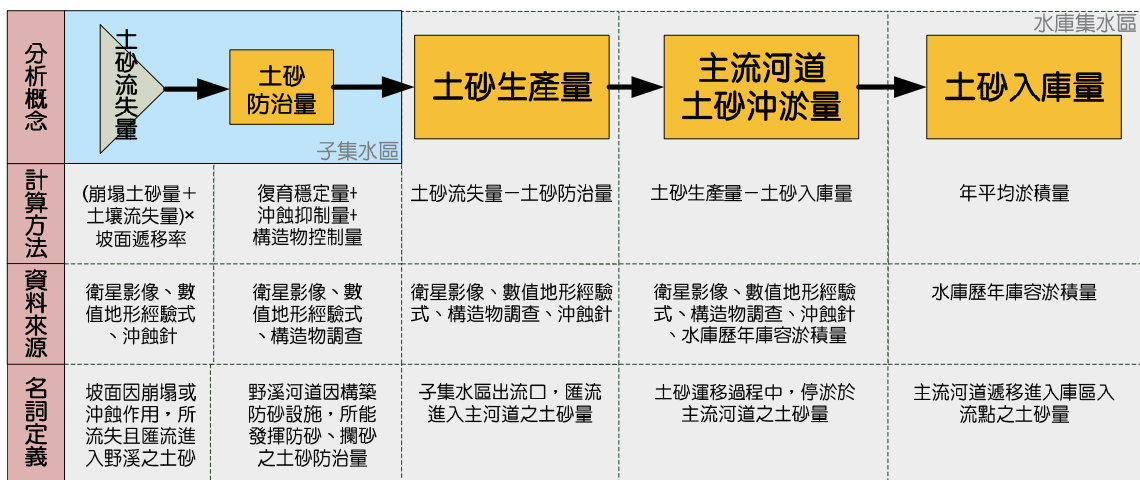


圖 3 土砂生產分析概念示意圖

Fig.3 Conceptual diagram of sediment budget evaluation

綜以上述，歸納本文工作分析目的、簡化方式、假設條件、分析方法、評估重點等，如下。

### (I) 分析目的

受限於監測範圍及監測資料有限，嘗試以局部實測數據推演至水庫集水區，簡化並量化評估水庫集水區土砂生產量、土砂防治量、土砂沖淤量、土砂入庫量等，串接土砂運移演變情況。

### (II) 簡化方式

1. 為快速計算評估，本文將水庫集水區境內，庫區入流點以上子集水區簡化為單一集水區系統，並視庫區入流點為此單一集水區系統之土砂生產量出口；如圖 4 所示。
2. 考量分析範圍內未有河道斷面或輸砂量等，長時之依時性實測數據，無法瞭解主河道實際土砂沖淤量，故視年平均淤積量為土砂入庫量，據以推演評估主流河道土砂淨沖淤量及沖淤趨勢，供相關單位辦理土砂保育經營管理應用參考。

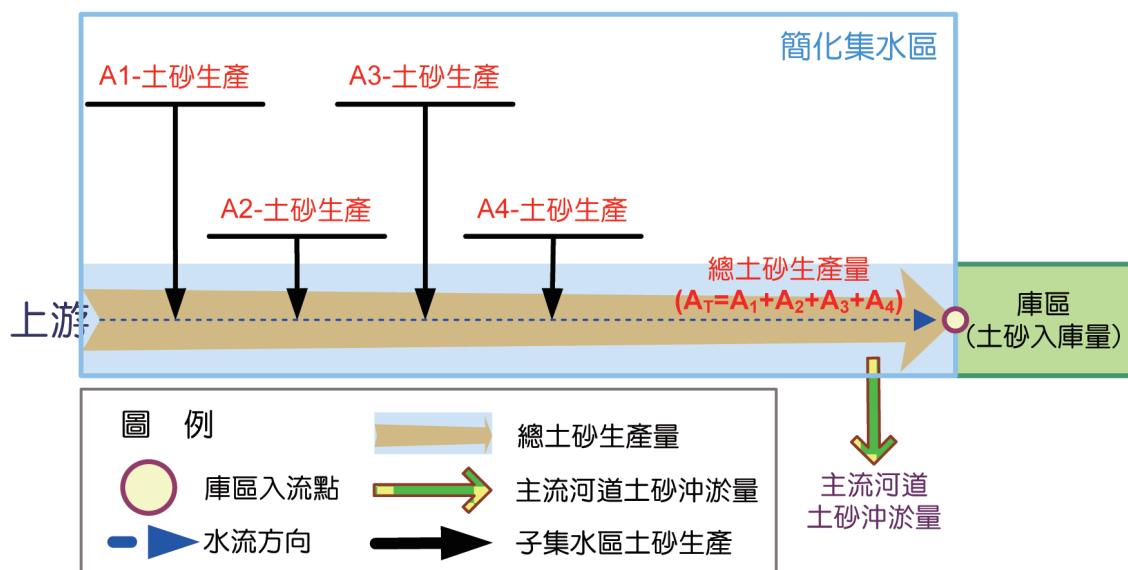


圖 4 土砂運移計算簡化系統示意圖  
Fig.4 Simplified procedure of sediment budget evaluation

### (III) 假設條件

1. 假設坡面土砂流失量完全匯入野溪河道；即坡面土砂遞移率為 1。並且忽略各子集水區內，最後一座防砂壩至出流口間河道土砂沖淤情況。

2. 坡面土砂流失量係為點源崩塌土砂量及非點源土壤流失量之總和。其中當年度新增崩塌引致土砂視為崩塌土砂量；另既有裸露崩塌範圍，視為裸露區域土壤流失，其餘集水區範圍則視為植生區域土壤流失。
3. 由於本文僅計算山保條例山坡地範圍土砂生產等演變，故以等比例方式，將庫容年平均淤積量分別乘上山坡地範圍所占面積比例，藉以推估分析區域之土砂入庫量。

#### (IV) 分析方法

以實測數據為分析基礎，簡化、拆解並計算水庫集水區土砂生產量、土砂防治量、土砂入庫量、主流河道土砂沖淤量。

#### (V) 評估重點

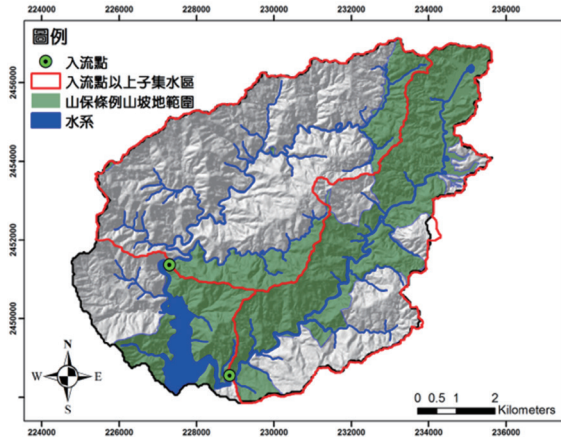
透過比較前、後年度，集水區單位降雨量下土砂生產量，直接反應不同水文條件下，土砂生產程度是否有趨緩現象。

### IV、案例分析

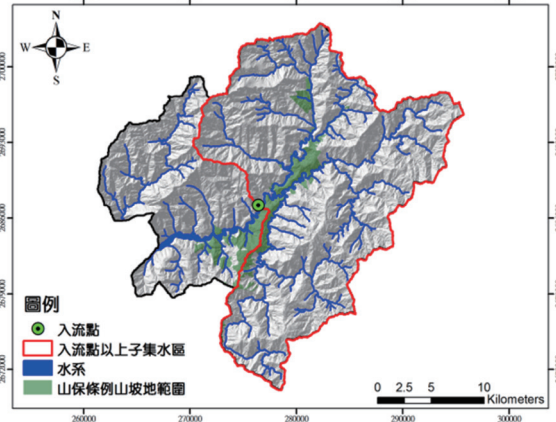
基於前述分析架構與概念，本文以牡丹、德基、霧社、明德及白河等 5 座水庫集水區境內，庫區入流點以上且涉及山保條例山坡地範圍之子集水區為分析範圍（如圖 5），假設坡面土砂流失量完全匯入野溪河道情況下，簡化計算 102 年至 104 年期間，水庫集水區土砂生產演變，如表 1 所示。茲依土砂生產演變以及保育治理與水庫減淤成效，歸納表中觀察重點，如下：

#### (I) 土砂生產演變

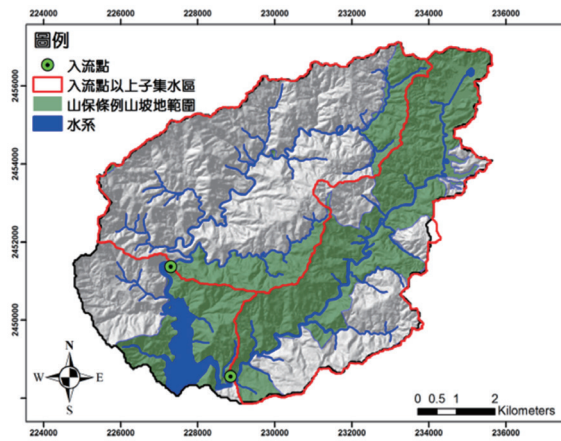
基於前述分析架構與概念，本文由簡化之水庫集水區土砂生產演變分析成果顯示，近年水庫蓄水範圍以上，子集水區土砂生產量以霧社水庫較高，介於 53.63 至 65.48 萬方之間；其次為德基、明德水庫，介於 9.99 至 40.58 萬方之間；白河、牡丹等水庫較低，介於 5.53 至 16.84 萬方之間。另 104 年水庫集水區主河道土砂運動上，除白河呈現沖刷趨勢外，餘明德、德基、霧社、牡丹等四座水庫主河道呈現淤積情況。



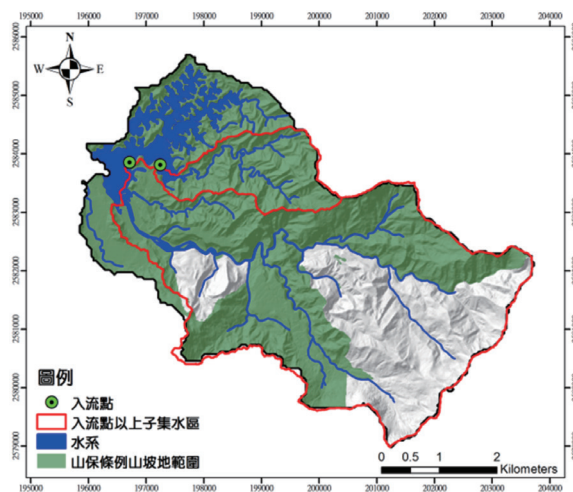
(a) 牡丹水庫



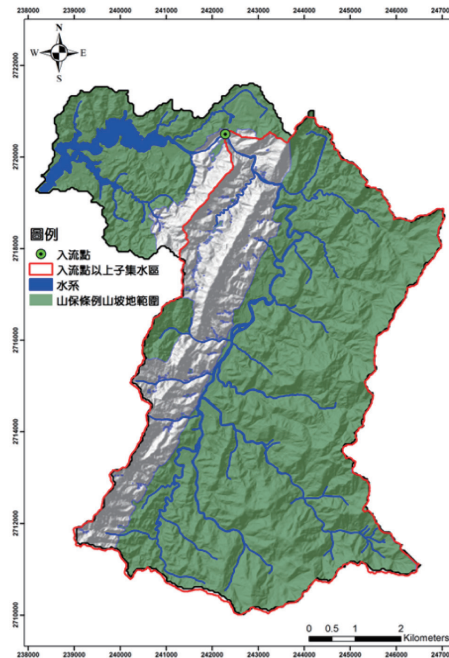
(b) 德基水庫



(c) 霧社店水庫



(d) 白河水庫



(e) 明德水庫

圖 5 水庫集水區簡化分析範圍

Fig.5 Simplified study area of major reservoir watershed

表 1 五座水庫集水區山坡地範圍土砂生產演變評估彙整表

Table1 List of sediment budget evaluation result of five major reservoir watershed

年度		水庫集水區				
		白河	霧社	德基	明德	牡丹
坡面土砂流失量 ( $10^4\text{m}^3$ ) (A)	102 年	22.32	99.96	47.52	42.53	28.32
	103 年	28.38	123.70	50.20	42.19	28.14
	104 年	24.49	75.10	45.84	42.98	28.83
土砂防治量 ( $10^4\text{m}^3$ ) (B)	102 年	16.99	36.71	37.53	8.86	19.05
	103 年	11.54	58.22	13.20	3.89	19.05
	104 年	16.74	21.47	35.51	2.40	18.31
土砂生產量 ( $10^4\text{m}^3$ ) (C=A-B)	102 年	5.33	63.25	9.99	33.67	9.27
	103 年	16.84	65.48	37.00	38.30	9.09
	104 年	7.75	53.63	10.33	40.58	10.52
土砂沖淤量 ( $10^4\text{m}^3$ ) (D=A-B-E)	102 年	-18.86	16.38	-0.08	24.37	0.98
	103 年	-7.35	18.61	26.93	29.00	0.80
	104 年	-16.44	6.76	0.26	31.28	2.23
土砂入庫量 ( $10^4\text{m}^3$ )(E)	年平均	24.19	46.87	10.07	9.30	8.29
年平均降雨量 (mm) (F)	102 年	3,671	2,399	2,599	2,887	2,475
	103 年	2,204	2,348	2,336	1,525	1,880
	104 年	2,870	2,064	1,802	1,719	2,276
單位降雨量 土砂生產量 ( $\text{m}^3/\text{mm}$ ) (G=C/F)	102 年	14.52	263.60	38.42	116.62	37.45
	103 年	76.41	278.90	158.43	251.26	48.34
	104 年	27.01	259.82	57.37	236.07	46.22

註 1：由於本文僅計算山保條例山坡地範圍土砂演變，故以等比例方式，將水庫庫容年平均淤積量乘上山坡地範圍所占面積比例，藉以推估分析區域之土砂入庫量。

註 2：坡面土砂流失量 = (新增崩塌土砂量 + 裸露區域土壤流失量 + 植生區域土壤流失量) × 坡面遞移率。假設坡面土砂流失量完全匯入野溪河道情況，即坡面土砂遞移率為 1。

註 3：土砂沖淤量為負值，表示主河道為沖刷運動，土砂輸出大於輸入；反之則表示主河道為淤積，土砂輸入大於輸出。

## (II) 保育治理與水庫減淤成效

考量土砂生產與水文條件具高度相關性，本文納入水文因子，以各水庫集水區年平均降雨量正規化水庫集水區土砂生產量，透過比較前、後年度（即 103 與 104 年），集水區單位降雨量土砂生產量，直接反應不同水文條件下，土砂生產程度是否有趨緩，以評估近年保育治理對於水庫減淤成效。由表 4-4.1 可知，104 年白河、霧社、德基、明德、牡丹等 5 座水庫集水區，上游集水區單位降雨量土砂生產量皆呈現下降趨勢，顯示治理措施已發揮原有設計功效，有效調節颱風豪雨期間土砂遞移，落實延長水庫壽命及穩定供水。

## V、結論

本文針對水庫蓄水範圍以上子集水區，有系統的運用實際監測數據，簡化並拆解水庫集水區土砂運移計算，包含土砂生產量、土砂防治量、土砂入庫量，並在遵守質量守恆概念下，整合評估主流河道土砂沖淤趨勢，供以相關單位辦理土砂保育經營管理應用參考。由案例分析顯示，白河、牡丹、明德、霧社、德基等 5 座水庫集水區，單位降雨量土砂生產量皆呈現下降趨勢。惟因主河道土砂沖淤及河道瓶頸段，仍需以河道斷面或數值高程模型等此類高程資料，始能實際監測並追蹤河道高程變動情況。建議未來仍應持續監控來砂變化，評估水土保持需求，以強化水庫集水區保育治理，有效維持水庫庫容，達國土資源永續利用。

## VI、參考文獻

- 水山高久、小橋澄治、水野秀明 (1995) 格子型ダムピタ流砂量減少率に関する研究，新防砂，第 196 號，第 8-13 頁。
- 行政院農業委員會水土保持局 (2003) 水土保持技術規範。
- 行政院農業委員會水土保持局 (2011a) 曾文水庫集水區多元尺度環境調查與保育治理成效評估。
- 行政院農業委員會水土保持局 (2012a) 水土保持防砂工程防砂整備之推估與應用。
- 行政院農業委員會水土保持局 (2012b) 曾文水庫達邦壩上游集水區防砂目標下之保育治理措施及土砂變遷監測計畫。
- 行政院農業委員會水土保持局 (2012c) 石門水庫集水區保育治理後續追蹤與評估。
- 何幸娟、林伯勳、尹一帆、冀樹勇、施美琴、尹孝元 (2010) 應用遙測技術結合空載 LiDAR 探討神木地區莫拉克颱風引致土砂災害及產量評估，水保技術第 5 卷，第 4 期，第 191-203 頁。
- 何幸娟、林伯勳、冀樹勇、鍾啟榮、邱世宜 (2012) 石門水庫集水區崩塌時空變遷與保育治理成效探討，水保技術，第七卷，第三期，第 174-188 頁。
- 何幸娟、林伯勳、張玉焄、冀樹勇、簡以達、蔡明發 (2013) 以河道監測調查結合遙測影像評估莫拉克颱風事件後曾文水庫集水區河道沖淤演變，第 13 屆大地工程研討會，雲林。
- 松村和樹、中筋章人、井上公夫 (1988) 土砂災害調查。

- 林伯勳、何幸娟、陳建宏、冀樹勇、施美琴、尹孝元 (2010) 神木集水區降雨引致土壤沖蝕量調查與監測，第十九屆水利工程研討會，國立雲林科技大學，台北，第 M9-M15 頁。
- 林俐玲 (2008) 土壤沖蝕指數估算公式之研究，中華水土保持學報，第 39 卷，第 4 期，第 355-366 頁。
- 林務局 (1991) 台灣省早期防砂壩現況調查報告。
- 林務局 (1992) 台灣省近期防砂壩現況調查報告。
- 張三郎 (1996) 治山防洪計畫之展望，坡地防災研討會 文集。
- 許振崑、林伯勳、鄭錦桐、高丞璋、冀樹勇、黃文洲、尹孝元 (2009) 結合 3S 技術於石門水庫集水區不同植生坡面沖蝕量調查，水保技術，第 4 卷，第 3 期，第 191-203 頁。
- 許振崑，林伯勳，柯傑夫，鐘啟榮，邱世宜 (2011) 石門水庫集水區防砂效益評估及結構物健檢，100 年中華水土保持學會年會及學術研討會摘要集，中興大學水土保持學系，12 月，第 II -11 頁。
- 許振崑、林伯勳、洪世勳、冀樹勇、邱世宜、鐘啟榮 (2012) 石門水庫集水區防砂設施儲砂量調查及淤砂坡降評估，水保技術，第 7 卷，第 3 期，第 162-172 頁。
- 連惠邦 (2000) 土石流梳子壩之設計方法，中華水土保持學報，第 31 期，第 4 卷，第 257-265 頁。
- 連惠邦、蔡易達 (2013) 水土保持防砂工程防砂量計量模式之建立與應用，中華水土保持學報，第 44 期，第 4 卷，第 351-362 頁。
- 陳正炎、張三郎 (1996) 量線作用於滯洪設施之模擬，中華水土保持學報，第 27 期，第 3 卷，第 235-244 頁。
- 陳信雄 (1995) 崩場地調查與分析。
- 陳信雄、陳明杰、李錦育 (1989) 防砂工程學，臺灣大學森林學系。
- 陳樹群、簡如宏、馮智偉、巫仲明 (1998) 本土化土壤沖蝕指標模式之建立，中華水土保持學，第 29 卷，第 3 期，第 233-247 頁。
- 陳樹群、吳俊毅、吳岳霖、王士豪 (2009) GIS 圖層及修正因子建置台灣通用土壤流失公式 (TUSLE) - 以石門水庫集水區為例，中華水土保持學報，第 40 卷，第 2 期，第 185-197 頁。
- 曾耀生、黃宏斌 (2004) 土石流特定水土保持區劃定範圍之探討，農業工程研討會。

- 渡邊正幸、水山高久、上原信司 (1980) 土石流對策砂防設施に關する檢討，新防砂，第 115 號，第 40-45 頁。
- 舒彩文、談廣鳴 (2009) 河道沖淤量計算研究與發展，泥沙研究，第 4 期，第 68-73 頁。
- 黃宏斌、何智武 (1992) 台灣東北部上游集水區泥砂來源與河道沖淤之研究 (二)，80 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，林業特刊，第 40 號，第 239-284 頁。
- 蕭震洋、謝寶珊、高丞瑋、林伯勳、鄭錦桐 (2009) 石門水庫集水區不同時期崩場地變遷分析與探討，中國地球物理學會與中華民國地質學會 98 年年會暨學術研討會。
- 賴承農、許振崑、林伯勳，張玉焱、冀樹勇、簡以達、蔡明發 (2014) 曾文南化烏山頭水庫集水區河道土砂防治效益量化評估，中興季刊，第 122 期，第 35-44 頁。
- 謝正倫 (2008) 水庫濁水現象之研究 - 子計劃一水庫集水區細微土砂來源之空間分布特性之分析，國科會研究成果報告，計畫編號 NSC 95-2625-Z-006-003。
- 謝正倫、蔡元融、林彥均、陳俞旭、邱禎龍 (2009) 應用動床演算於流域土砂收支模式之研究，2009 流域地質與坡地災害研討會論文集。
- Fuller, C. W., Willett, S. D., Hovius, N., and Slingerland, R. (2003) Erosion Rates for Taiwan Mountain Basins: New Determinations from Suspended Sediment Records and a Stochastic Model of Their Temporal Variation, *The Journal of Geology*, Vol. 111, pp. 71-87.
- Khazai, B. and Sitar, N. (2000) Assessment of Seismic Slope Stability Using GIS Modeling, *Geographic Information Sciences*, Vol. 6(2), pp. 121-128.
- Schoklitsch, A. (1934) Geschiebetrieb und die Geschiebe-fracht, *Wasserkraftunt Wasserwirtschaft*, Jgg. 39, Heft4.



# 大崙山區豪雨特性之初步研究

曹舜評<sup>1\*</sup> 林珈仔<sup>2</sup>

**【摘要】**華梵大學位於台灣東北部丘陵區的大崙山上，屬於地質敏感區，對災害之預防有迫切之需求。因豪雨易造成災害，本研究之重點在分析大崙山區豪雨特性，希冀作為坡地安全分析之基礎。研究中以華梵校區西側氣象站 2004 年至 2016 年之降雨資料為基礎，利用降雨事件分場及中央氣象局豪雨分級之定義，選取出 34 場豪雨等級之降雨事件，34 場豪雨之累積雨量與延時約略成正比，平均降雨強度與延時呈冪律反比關係。除了 1 場降雨發生於 12 月外其餘發生於 5~10 月間。梅雨鋒面有 4 場、東北季風 1 場、西南季風與鋒面共伴 2 場外，其餘 27 場均為颱風或颱風與其他氣象條件共伴產生。在颱風豪雨事件中，颱風路徑以第 1、2、3 類路徑最多，共有 17 場；此三類路徑在大崙山區降下豪雨的機率高達 6~8 成，此可提供大崙山區坡地安全一項重要之參考訊息。

**【關鍵詞】**豪雨、梅雨鋒面、東北季風、西南季風、颱風

## PRELIMINARY STUDY OF EXTREMELY HEAVY RAINFALL AT TA-LUN MOUNTAINS

Shun-ping Tsao<sup>1\*</sup> Chia-Yu Lin<sup>2</sup>

**【Abstract】** Huafan University is located at Ta-Lun mountains which is in the hilly region of northeastern Taiwan. In this study the rainfall data from 2004 to 2016 of the Huafan weather station are analyzed. By using the definition of the Extremely Heavy Rainfall from Central Weather Bureau and the definition of rainfall events, we collected 34 extremely heavy rainfall events, which were mostly occurred from May to October except one rainfall event was occurred in December. These 34 rainfall events include 4 Meiyu events, 1 northeast monsoon, 2 southwest monsoon accompanied with fronts, and the remaining 27 events were all classified as typhoons or accompanied with other weather conditions. According to Center Weather Bureau, these 27 typhoon are classified into ten typhoon tracks. There were 17 typhoon rainfall events which belong to typhoon track 1, 2, and 3 and hence, it indicated that the probability of heavy rainfall affected by track 1, 2, and 3 is about 60~80 percent.

**【Key words】** Extremely heavy rainfall, Meiyu front, Northeast monsoon, Southwest monsoon, Typhoon

<sup>1</sup> 華梵大學環境與防災設計學系助理教授，通訊作者。電子郵件：sptsao@cc.hfu.edu.tw  
Assistant Professor, Department of Environmental & Hazards-Resistant Design, Huafan University. Corresponding Author, E-mail: sptsao@cc.hfu.edu.tw

<sup>2</sup> 華梵大學環境與防災設計學系研究生。  
graduate student, Department of Environmental & Hazards-Resistant Design, Huafan University.

## I、前言

降雨落於集水區上游，不管是在地表上流動之水流，或是滲入土壤及岩層形成地下水，均是地表水資源之來源。但對於集水區上游坡地而言，地形起伏變化大，降雨及其所產生的逕流，對地表的沖蝕比平地更劇；滲入土壤岩層的水分，若遇上不穩定的地質結構，極易在坡地上產生崩塌、地滑等災害。降雨強度有大有小，並非每次降雨均發生災害，偶有未降下豪雨亦有坡地災害的產生，例如 2010 年 4 月 25 日國道三號 3.1K 處即在未降雨情況下產生崩塌，但相較而言未降雨產生災害畢竟是少數狀況。就一般狀況，坡地災害多半發生在降雨強度大、延時長之豪雨時。在臺灣自春入夏以至秋季，梅雨鋒面、颱風常帶來豪雨，造成部分地區山崩、地滑、土石流或洪水災害，此相關課題一直是大地、水保等方面之學者專家長期以來研究之對象。交通部中央氣象局曾在 93 年 11 月訂定「大雨」及「豪雨」雨量值；104 年 9 月 1 日配合近年來的降雨災害，修訂了「大雨」及「豪雨」之定義，以提供各地區各類災害警戒之用。在中央氣象局的定義中豪雨 (extremely heavy rain) 是指 24 小時累積雨量達 200 毫米以上，或 3 小時累積雨量達 100 毫米以上之降雨。大豪雨 (torrential rain) 是 24 小時累積雨量達 350 毫米。若 24 小時累積雨量達 500 毫米以上則稱為超大豪雨 (extremely torrential rain)，但此定義僅及於達此定義即為豪雨，並未考慮一場雨之界定及其累積雨量。本研究擬以降雨事件分場方式來探討大崙山區豪雨之特性，以供區域坡地安全分析之基礎資料。

華梵大學位於台灣東北部基隆新店丘陵區之大崙山上，行政區隸屬新北市石碇區，海拔約在 430~570 公尺間。經濟部中央地質調查 2015 年公布之新北市山崩與地滑地質敏感區中，本校西側部分校區及校外私人土地被列為敏感區位之一，故本校在坡地災害預防上有迫切之需求。實際上，本校在創校不久，為瞭解本校坡地狀況，即由總務處設置傾斜管，並定時進行地形測量，以了解坡地是否有所變動。1999 年本系成立後，由系上氣象、大地、水保、水利等各專業之教師積極投入校區環境與坡地安全之調查。設置氣象站、傾斜管、傾度盤、混凝土應變計等設施，定期量測數據；並進行建築物、擋土牆及地表裂縫之調查，作為校區環境監測及坡地安全維護之參考。

當資料收集到一定數量，即可進行分析，近年來已開始進行各類氣象、降雨及坡地安全分析。曹舜評與李汴軍 (2014) 曾使用 2003~2013 年之小時雨量資

料，以年選最大值法，初步建立大崙山區降雨強度—延時—頻率曲線公式 (Annual Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves, AIDF)，另建立週遭石碇及火燒寮雨量站之 IDF 公式，三站一齊比較。曹舜評與李汴軍 (2015) 為配合傾斜管變位資料定期之月觀測值，自華梵大學氣象站 2002 年 7 月至 2014 年 12 月之小時雨量資料中，以月選最大值法，選取不同延時之最大降雨強度，建立月降雨強度—延時—頻率曲線公式 (MIDF)，作為討論月傾斜變位之基礎數據。鄭清江等 (2015) 探討颱風警報期間之累積雨量與華梵大學 29 支傾斜管之變位量之關係，訂定出其中 9 支傾斜管變位 5mm 之降雨門檻值，其值分別在 315 至 495mm 之間。曹舜評與林惠鈴 (2016) 利用 2014 年 ~2015 年降雨資料，分析颱風雨量與地下水位之關係，以了解地下水受降雨影響之程度。

坡地災害產生的原因，從降雨強度、降雨延時、總降雨量均有影響，再加上地質、地形、植生與人為開發交互作用，更加複雜。因為降雨記錄最容易量測，且為致災之主因之一，對地下水位變化、地層結構的影響亦是持續的，故多有學者自此角度探討坡地災害之預警。

本研究從降雨事件分場之角度出發，藉用中央氣象局豪雨分級之定義，檢視大崙山區前山氣象站 2004 年 ~2016 年之小時雨量記錄，挑選出豪雨事件，探討這些豪雨之特性，以作為日後研究地下水位變動或坡地安全分析之基礎。

## II、材料與方法

### (I) 研究區域與基本資料

華梵大學位居大崙山區，校舍建物集中於西側校區，學生活動多於此區進行，此區坡地之安全甚為重要，一直為校方所重視。本系在校區內設有三處氣象站，前山氣象站位於西側校區，校門口停車場旁調度室之樓頂 (圖 1、圖 2)，2002 年 4 月設置觀測塔作為前山氣象站之基礎，5 月開始量測風速風向，7 月增加降雨量量測，2003 年元月再增氣溫之量測，至今仍持續觀測中，本研究即以此氣象站之資料進行分析。

降雨資料雖自 2002 年 7 月開始觀測，但在 2002 年，因為初設置，資料量未足一年；2003 年又因儀器故障，造成資料缺失遺漏較多，故本研究之分析以 2004 年到 2016 年共計 13 年之小時雨量進行分析。

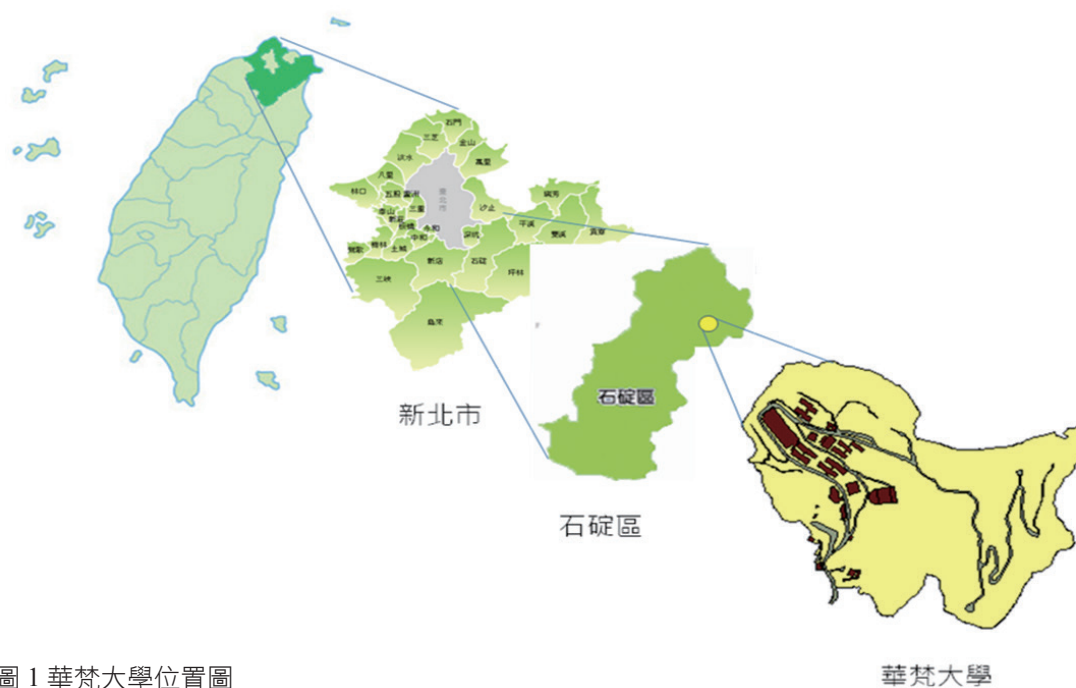


圖 1 華梵大學位置圖  
Fig.1 Location of Huaifan University and weather stations



圖 2 西側校區之前山氣象站  
Fig.2 The weather station

## (II) 分析方法

本研究由華梵氣象站 2004 年~2016 年之小時雨量資料中，篩選豪雨事件，並探討豪雨之基本性質，其步驟如下：

- (1) 先以中央氣象局豪雨之定義，從雨量記錄中計算並篩選出 3 小時累積雨量超過 100mm 及 24 小時累積雨量分別超過 200mm、350mm 及 500mm 之時間點，並分別界定為豪雨、大豪雨及超大豪雨，在此處僅找出達到豪雨定義之降雨時間，尚未將降雨事件分離。
- (2) 降雨事件界定：接著利用前後 6 小時未降雨作為降雨事件雨場分割的標準；即連續性降雨若前 6 小時及後 6 小時連續無雨，則視為一場雨，降雨中間若暫時無雨，小於 6 小時，仍算在同一場雨中，依此決定出豪雨之降雨事件。
- (3) 在每一場雨中計算其總累積雨量、降雨延時及平均降雨強度，並找出 1 小時最大雨量，此相當於 1 小時最大降雨強度，另配合前述 3 小時最大累積雨量及 24 小時最大累積雨量，作為降雨事件之基本性質。
- (4) 由中央氣象局氣候監測報告 (2004~2016) 中，找出每場豪雨事件之氣象條件。氣象條件分為颱風、梅雨鋒面、東北季風、颱風或颱風外圍環流與東北季風共伴、颱風與西南季風共伴、與西南季風與鋒面共伴，共計分為六種類型。
- (5) 依延時、年、月及颱風路徑等探討不同氣象條件下總累積雨量之特性。

## III、結果與討論

在本研究中將華梵大學前山測站 2004 年至 2016 年 13 年之小時雨量資料，經由中央氣象局豪雨分級及降雨事件雨場分割之處理，在 13 年間取得 34 場豪雨以上之降雨事件。

圖 3 是 34 場豪雨事件中，每一場雨連續 24 小時最大累積雨量與 3 小時之最大累積雨量之關係圖。圖中三條橫虛線，由下至上分別為 200mm 豪雨界線、350mm 大豪雨界線及 500mm 超大豪雨之界限，24 小時累積雨量低於 200mm 但 3 小時累積雨量大於 100mm，仍定義為豪雨，故繪以縱線為界限，在其右側之事件仍屬豪雨。34 場豪雨事件中超大豪雨事件僅有 1 次，大豪雨有 7 次，其餘 26 次為一般豪雨，其中有 3 次是依連續 3 小時最大累積雨量大於 100mm 界定。

圖中以不同形狀之符號代表氣象條件所降下的雨量。實心圓點為單純颱風雨之資料，菱形為梅雨季節之豪雨，三角形為東北季風，正方形空心符號為颱風外圍環流與東北季風共伴之降雨，實心正方形為颱風或其外圍環流與西南風共伴，

十字型為西南風與鋒面共伴。由颱風降雨所造成的豪雨事件有 20 場，梅雨鋒面占 4 場，單純的東北季風只有 1 場，颱風或其外圍環流與東北季風共伴有 6 場，颱風與西南季風共伴有 1 場，西南氣流與鋒面同時作用有 2 場。若將颱風外圍環流與其他氣象條件共伴計入，則與颱風相關的降雨事件可達 27 次，相當於 8 成的豪雨與颱風有關。由圖中可見颱風類型之豪雨事件，24 小時最大累積雨量與 3 小時最大累積雨量大約成正比，代表颱風豪雨之持續性。梅雨、東北季風、西南季風與鋒面相關之豪雨事件，多在圖中之右下角，包含 3 場以 3 小時累積雨量定義為豪雨，這些豪雨均為短延時強降雨之事件，在 3 小時內即降下極大之雨量。

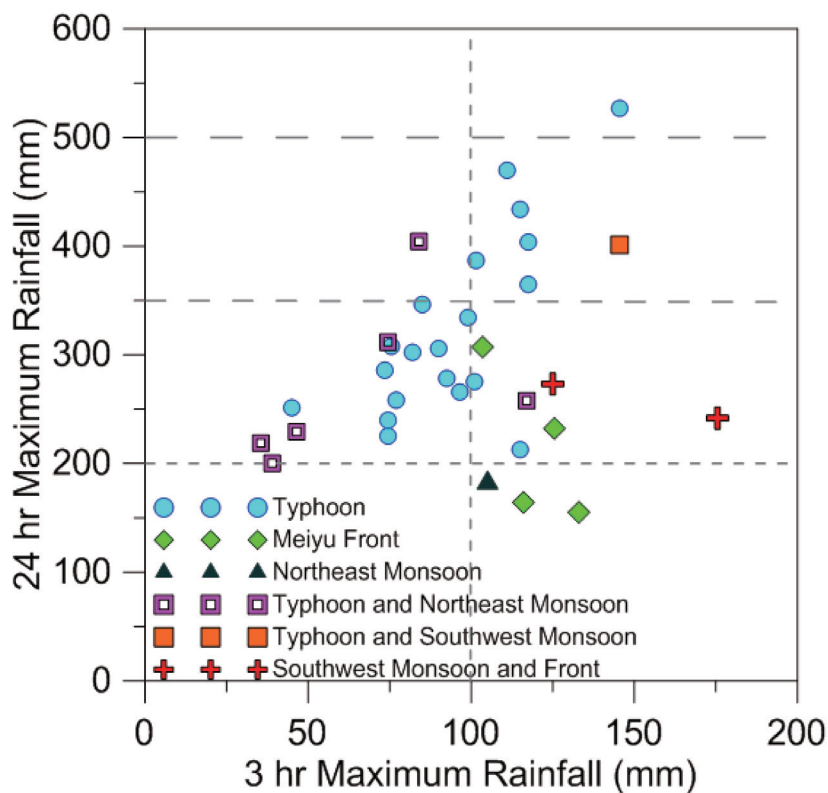


圖 3 豪雨事件 24 小時最大降雨量及 3 小時最大降雨量關係圖

Fig.3 Relationship between 24 hour maximum rainfall and 3 hour maximum rainfall

圖 4 是豪雨事件總累積雨量與降雨延時之關係圖，圖形大致呈正相關，即延時愈長，總累積雨量愈大。由圖中可看出梅雨、東北季風雨及西南季風集中在圖 4 的左下方，屬短延時總累積雨量小之降雨。在延時大於 40 小時，長延時高累積雨量區，均是與颱風有關之降雨事件。在右側有兩場偏離群集的降雨，均是颱風與東北季風共伴有關，一是 2010 年 10 月 17 日~23 日的梅姬 (MEGI) 颱風，影響期間超過 5 天，其前段路徑在太平洋菲律賓海域由東向西前進，穿越菲律賓後轉向北前進，由台灣西側北上，在轉向前後，造成台灣東北部降下豪雨。另一是 2011 年 9 月底至 10 月的奈格 (NALGAE) 外圍環流和東北季風共伴，此颱風亦由

菲律賓海域，由東向西穿過菲律賓，離台灣甚遠，但其外圍環流在東北季風共伴下，在台灣東部及北部降下豪雨。

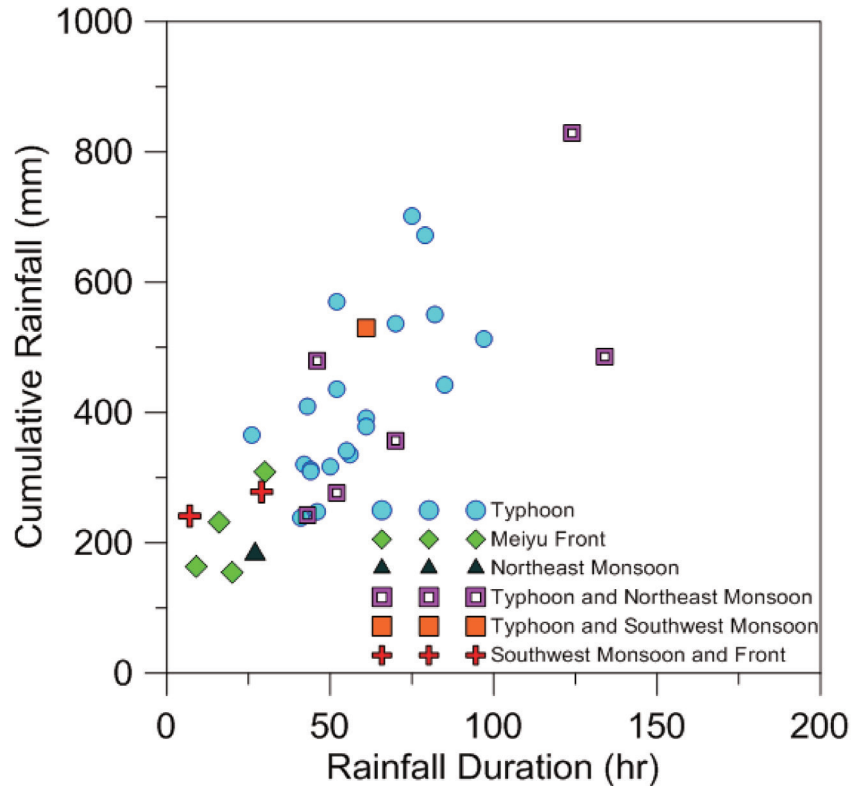


圖 4 豪雨事件累積雨量與降雨延時關係圖

Fig.4 Relationship between cumulative rainfall and duration of heavy rainfall events

圖 5 為豪雨事件平均降雨強度與延時關係圖，與一般頻率分析利用不同延時降雨強度建立的降雨強度—延時—頻率曲線 (IDF) 相似，差別只在於此處的降雨強度是用整場豪雨事件的總累積雨量除以總延時，即圖 4 每場豪雨事件之縱坐標除以橫坐標。圖中可見有延時愈短，平均降雨強度愈高的現象。由圖可見在梅雨季節，常在短延時內下了一定量的雨水，總雨量不見得最多，但因為時間短，所以突顯了降雨強度較大，即短延時具有強降雨，這在坡地上常導致崩塌等事件。

圖 6、圖 7 則從時間角度來看豪雨事件之特性。圖 6 為歷年豪雨事件總累積雨量圖，圖中可見每一年至少有一場豪雨事件。2004 年最多，有 6 場豪雨，其中兩場累積雨量分別為 436.5mm 與 443mm，在圖中幾乎重疊。2005 年及 2016 年均只有一場豪雨事件。

圖 7 為不同月份豪雨事件累積雨量圖，其中 7 月到 10 月是豪雨產生的主要

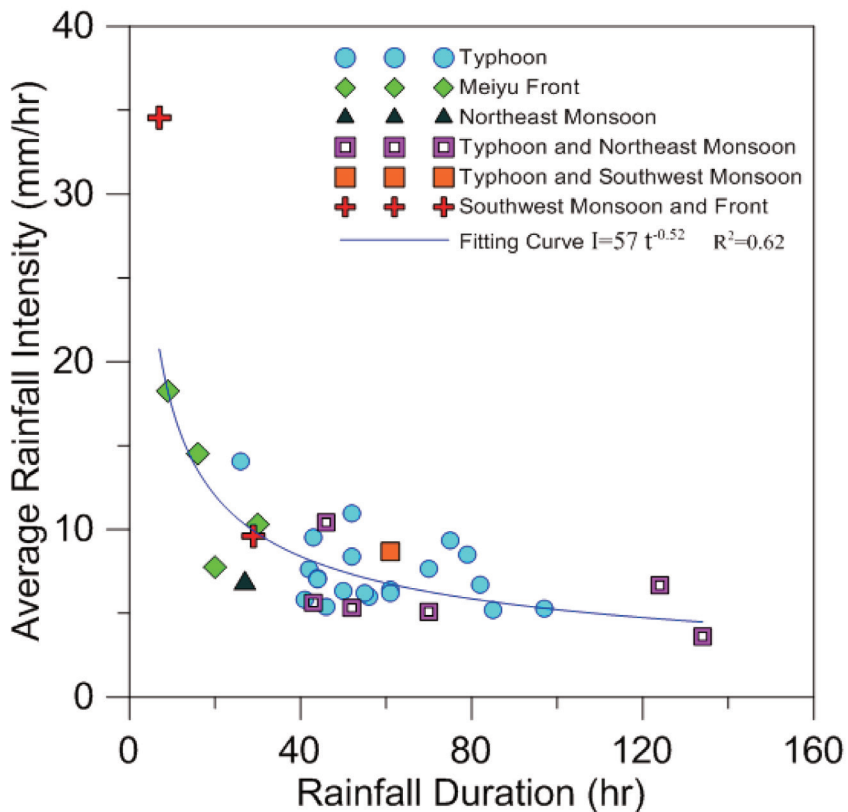


圖 5 豪雨事件平均降雨強度與降雨延時關係圖  
 Fig.5 Relationship between average rainfall intensity and rainfall duration

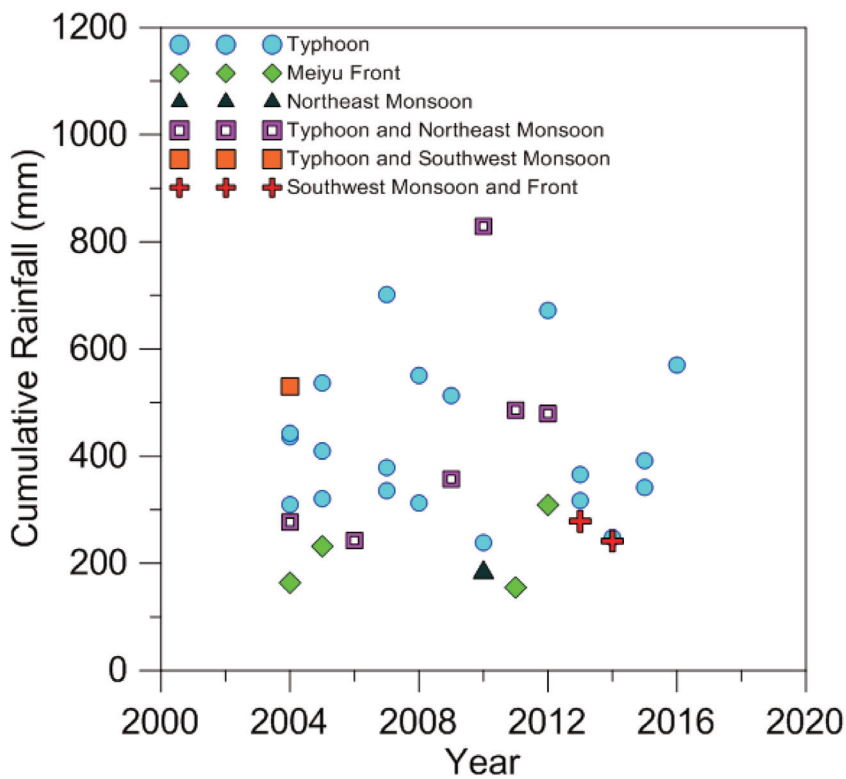


圖 6 歷年豪雨事件之累積雨量圖  
 Fig.6 Cumulative rainfall of heavy rainfall from year 2004~2016

月份，此為颱風最盛期，除了 2 場與東北季風有關外，其餘均為颱風降雨，合計有 26 場，占了 76.5%。5~6 月則合計有 5 場，主要為梅雨鋒面所造成之降雨，其中有一場是西南季風與滯留鋒面共伴，此期間之總累積雨量均在 300mm 以下。12 月則有 1 場，此為 2004 年 12 月 3 日南馬都颱風所造成的豪雨，累積雨量亦在 300mm 左右。至於 11 月、1 月~4 月在使用資料之期間，尚未發生豪雨等級之降雨。

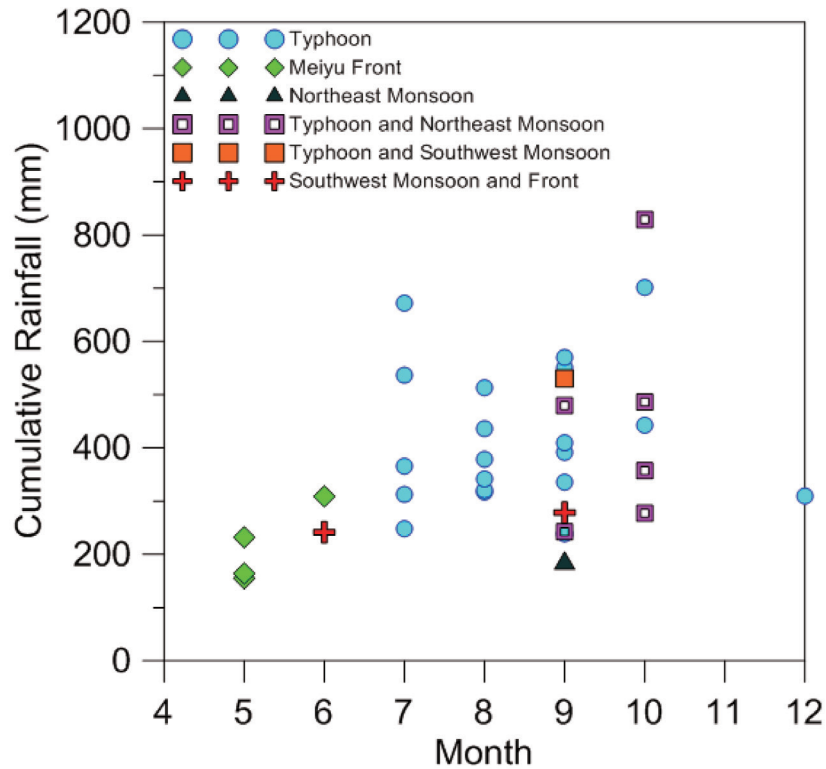


圖 7 2004~2016 年不同月份豪雨事件之累積雨量圖

Fig.7 Relationships between Cumulative rainfall of heavy rainfall events and month

圖 8 是以颱風路徑來看各類豪雨之累積雨量，中央氣象局將侵襲台灣的颱風大致分為九類，另有第 10 類為其他類 (如圖 9)，即無法以 9 類來區分時，即歸在其他類，本研究即以此來審視在大崙山區之豪雨特性。圖 8 中另有第 0 類，表示為梅雨、東北季風等與颱風無關之降雨。圖 8 中顯示路徑 1、2、3 及 10 之颱風最多，分別有 4 場、5 場、8 場及 5 場。由中央氣象局之資料顯示，自 2004 年至 2016 年，曾發佈颱風警報之颱風屬第 1 類路徑的有 5 次，第 2 類有 8 次，第 3 類有 11 次，則在大崙山區第 1 類颱風造成豪雨的機率為 80%，第 2 類的機率為 62.5%，第 3 類為 72.7%。

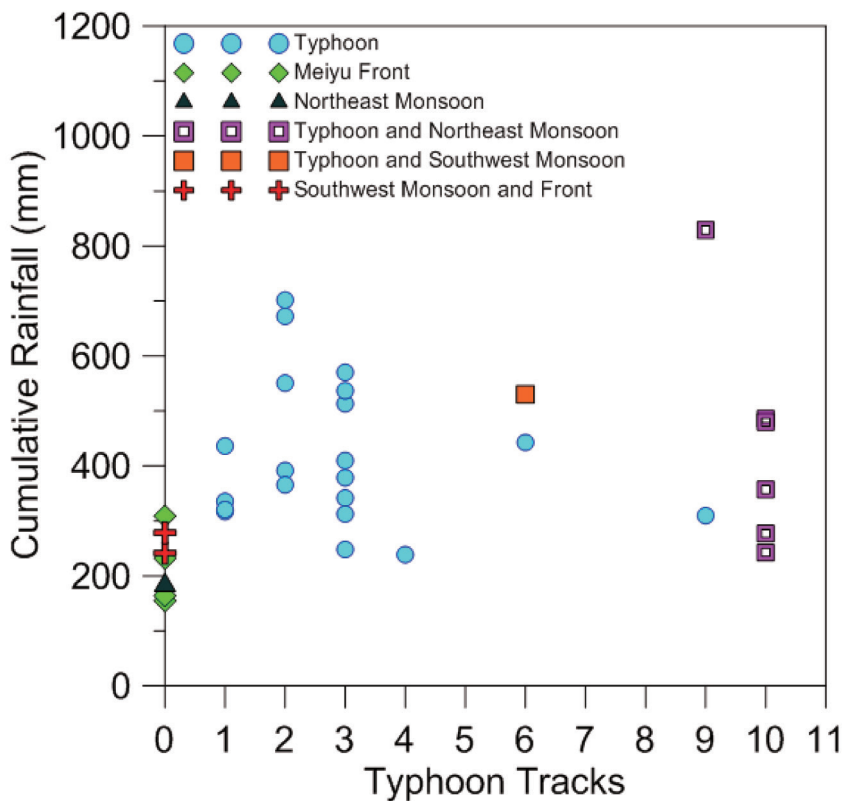


圖 8 2004~2016 年颱風路徑與豪雨事件之累積雨量圖  
 Fig.8 Relationships between Cumulative rainfall of heavy rainfall events and typhoon tracks

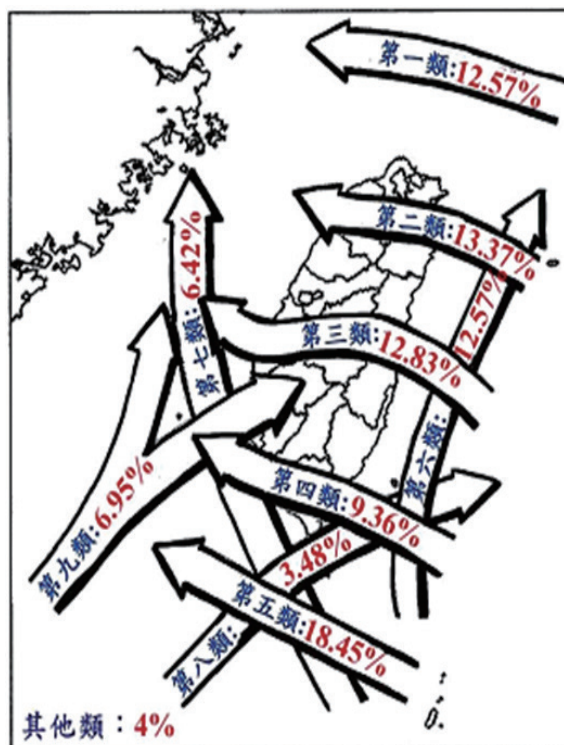


圖 9 侵台颱風路徑分類 ( 引用自中央氣象局 )  
 Fig.9 Map of Typhoon tracks(Central Weather Bureau)

## IV、結論

本研究以華梵大學前山氣象站 2004 年至 2016 年之小時降雨資料為基礎，將降雨以前後 6 小時未降雨作為降雨雨場之分割，並參考中央氣象局豪雨等級之定義，篩選出華梵大學前山氣象站達豪雨以上等級之雨場，進一步以分場之豪雨事件來探討降雨特性。在研究中並將氣象條件分為颱風、梅雨鋒面、東北季風、颱風外圍環流與東北季風共伴、颱風與西南風共伴、西南季風與鋒面共伴等 6 種。

分析所得之豪雨事件共計 34 場，在時間上多發生於 5~10 月之間。其中超大豪雨僅有一場，大豪雨有 7 場，其餘為一般豪雨。各項性質中，總累積雨量與延時大略成正比，平均降雨強度與延時具有冪律反比關係。

從氣象條件來區分，除梅雨有 4 場、東北季風 1 場、西南季風與鋒面共伴 2 場外，其餘 27 場均為颱風或颱風與其他氣象條件共伴產生。

颱風相關之豪雨事件，累積雨量多在 200mm 以上，降雨延時多高於 40 小時，平均降雨強度在 5~15mm/hr 之間。在颱風路徑上，以 1、2、3 號路徑最多，分別有 4 次、5 次、8 次。若考慮 2004 年至 2016 年，曾發佈颱風警報之颱風，則第 1 路徑類颱風造成豪雨的機率為 80%，第 2 類的機率為 62.5%，第 3 類為 72.7%。梅雨鋒面及東北季風，多屬短延時強降雨之事件，此有助於在進行坡地安全監測及分析時參考。

## V、謝誌

本研究承蒙科技部 MOST 105-2632-M-211-001 計畫提供經費補助，謹此誌謝。

## VI、參考文獻

曹舜評、李汴軍 (2013) 大崙山區降雨頻率分析之研究，2013 森林集水區研討會論文集：27-40。

曹舜評、李汴軍 (2014) 大崙山區降雨強度—延時—頻率公式之建立，2014 森林集水區研討會論文集：41-54，2014 年 5 月 29 日，台北。

曹舜評、李汴軍 (2015) 大崙山區月降雨強度—延時—頻率曲線之建立，2015 森

林集水區研討會論文集：37-48，2015年5月22日，台北。

鄭清江, 曹舜評, 李仁鐘, 陳修, 陳崗熒, 楊嘉瑜, (2015), 颱風豪雨驅動坡地變位  
門檻值之制定與防災應變系統整合之研究, 2015年海峽兩岸水土保持學術研  
討會論文集：310-331, 2015年9月1-8日, 。

曹舜評、林惠鈴, (2016), 華梵校區颱風降雨與地下水位關係之初步探討, 2016  
華梵大學藝術設計學院設計與文化學術研討會論文集, 2016年5月13日,  
台北。

交通部中央氣象局 (2017) 颱風百問。

<http://www.cwb.gov.tw/V7/knowledge/encyclopedia/ty000.htm>

交通部中央氣象局 (2004~2016) 氣候監測報告。

<http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/watch/watch.htm>

交通部中央氣象局 (2017) 颱風資料庫

<http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/typhoon>

# 集水區土砂流失、模擬及預報分析

## — 以石門水庫集水區為例

林書豪<sup>1\*</sup> 傅桂霖<sup>2</sup> 蔡明發<sup>3</sup> 林琮文<sup>4</sup> 蔡易達<sup>5</sup> 連惠邦<sup>6</sup>

**【摘要】**本研究不僅引用高精度立體地圖判釋水庫集水區土砂來源之潛感區位分布，使土砂主要來源得以掌握，更能夠有效率地導入保育治理措施於需治理區位，有效地抑止並降低入庫土砂量；同時，以集水區土砂運移物理模型結合河道一維動床數值模式 (CCHE1D)，建立了水庫集水區不同降雨量條件下 (含極端降雨) 之土砂生產量公式，並據以導出入庫土砂量之預報模式，讓集水區保育治理措施與入庫土砂量之間得以具體量化的關係表示。此外，本研究應用水庫歷年土砂淤積測量資料，以單位降雨量於集水區所生產之總土砂量為評量指標時發現，隨著歷年集水區保育治理措施的導入，該指標呈現逐年下降之趨勢，顯示各種保育治理措施已發揮了保土蓄水之功能，可以抵禦較大的降雨動能而生產較少的土砂。

**【關鍵詞】**高精度立體地圖、數值模擬、入庫土砂量預報模型

### THE RESEARCH OF THE MONITORING, SIMULATION AND FORECAST ANALYSIS OF SOIL LOSS FOR SHIHMEN RESERVOIR WATERSHED

S.H. Lin<sup>1\*</sup> G.L.Fu<sup>2</sup> M.F. Cai<sup>3</sup> C.W. Lin<sup>4</sup> Y.D. Cai<sup>5</sup> H.P. Lian<sup>6</sup>

**【Abstract】** This project planning not only uses the high accuracy three-dimensional map for the first time to interpret the distribution of the latent location of the source of sand, so that the main sources of soil and sand can be grasped and effectively managed, effectively restraining and reducing the amount of sand into the reservoir. At the same time, CCHE1D, the formula of soil and sand production under different rainfall conditions is established, and the forecasting model of the imported sand is derived, which can be expressed quantitatively. This is an

---

<sup>1</sup> 逢甲大學營建及防災研究中心專案工程師 (通訊作者：linsh@mail.fcu.edu.tw)

<sup>2</sup> 水土保持局保育治理組組長

<sup>3</sup> 水土保持局保育治理組水庫保育科科長

<sup>4</sup> 水土保持局保育治理組水庫保育科工程師

<sup>5</sup> 逢甲大學土木及水利工程博士班研究生

<sup>6</sup> 逢甲大學水利工程與資源保育學系教授兼任逢甲大學營建及防災研究中心主任

important progress in the prediction of soil and sand production.

In addition, the project uses the soil sediment accumulation measurement data of the reservoirs in the past years. When the total soil and sand produced by the unit rainfall in the catchment area is taken as an index, it is found that, with the introduction of conservation measures, The trend of decline shows that various conservation measures have played a function of soil and water conservation, can withstand greater rainfall kinetic energy and produce less soil sand.

**【Key words】** high - precision three - dimensional map , numerical simulation , reservoir entry sand prediction model

## I、前言

水庫濁度及泥砂淤積問題一直是水資源利用之重大議題，亦為水庫集水區保育治理之首要課題之一。為了有效降低水庫之泥砂淤積、濁度上升及延長水庫使用壽命，水土保持局已於上游集水區實施大規模之保育治理措施，雖已收減淤降濁之成效，惟未深入探討降雨、逕流、保育治理措施及入庫泥砂量體等多變量間之量化關係，以及欠缺高精度 LiDar 立體圖資及其相應之數值模擬分析技術，難以在既有保育治理設施之條件下，預測降雨和集水區土砂流失間的關聯性，以作為後續保育治理實施強度之依據。因此，為正確尋找後續保育治理及設施維護之作為，以石門水庫為研究區，製作降雨事件前、後 LiDar 高精度立體圖資，研判區內各種土砂流失潛感區分布及其現況治理成效，同時建立降雨、逕流、保育治理措施及入庫泥砂量體等多變量模式，推估及預報各重現期距降雨條件下之入庫泥砂量，以作為水庫保育治理與減淤降濁成效之參採。

## II、研究方法

本研究進行石門水庫集水區之基礎資料分析，選定重點研究區域，製作高精度立體地圖、現地調查及監測，依據上述資料建立產砂分析模式(集水區土砂收支模式)，並推估現況各降雨條件及工程預案分析，求得其工程效益，最後推估全石門水庫集水區之土砂流失、生產、入庫及水庫淤積量，研究流程如圖 1 所示。

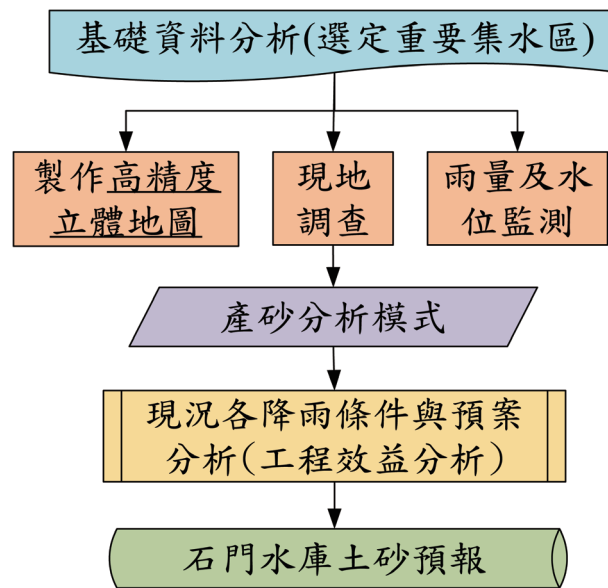


圖 1 研究流程圖  
Fig.1 Research flow chart

### III、研究成果

#### (I) 基本資料蒐集及彙整分析

在土壤侵蝕理論中，土壤侵蝕量、土壤流失量及土砂生產量是一組概念完全不同的術語。土壤侵蝕量(尤指水力侵蝕量)係指在外營力(雨滴或逕流)作用下，坡面土壤分離位移的總量，而土壤侵蝕量中被輸移離開某一特定坡面或田面的數量，稱為土壤流失量(soil loss)；土砂生產量(sediment yield)則是指遷移至某一流域或集水區特定出口斷面的土壤流失量，如圖 2 所示。例如，大部分坡面具有地形的不規則性，使侵蝕和沉積同時存在，於是在坡面選定點的侵蝕量往往不同於此坡面基部的土壤流失量。由於侵蝕物質在搬運過程中不能避免地有沉積發生，在一般情況下侵蝕量與流失量是不相等的。在田面邊界和水路邊緣則有更多的土壤沉積，因此減少了集水區的土砂生產量。

1. 重要集水區：本研究選定石門水庫集水區之 3 處獨立野溪集水區「匹亞溪」集水區、「蘇樂溪」集水區及「砂崙仔溪」集水區作為重點研究區域，分布如圖 3 所示。
2. 土砂流失分析：將歷年崩塌資料進行分析，結果顯示全石門水庫集水區之土砂流失皆以颱風事件為主要因素，土砂來源及分布以林班地為主(林班事業區)，水土保持局轄管之山坡地占一成左右，土砂來源與河道距離，以近河岸(200m 以內)為主，達七成以上，如圖 4 所示。
3. 歷年治理抑制成效：水土保持局之歷年治理工程與石門水庫淤積量進行交叉分

析，並考量單位降雨能量，呈現逐年下降趨勢，表徵水土保持局之治理有著明顯成效，如圖 5 所示。

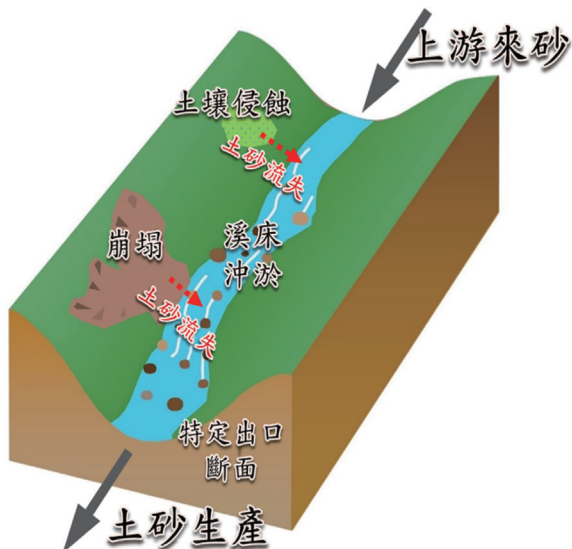


圖 2 集水區土壤流失及生產示意圖  
Fig.2 Sediment budget in watersheds

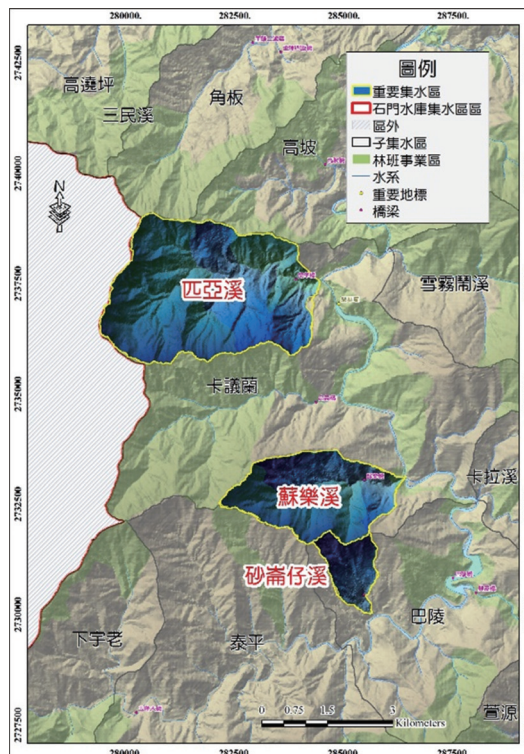


圖 3 重要集水區分布圖  
Fig.3 Distribution of Research Area

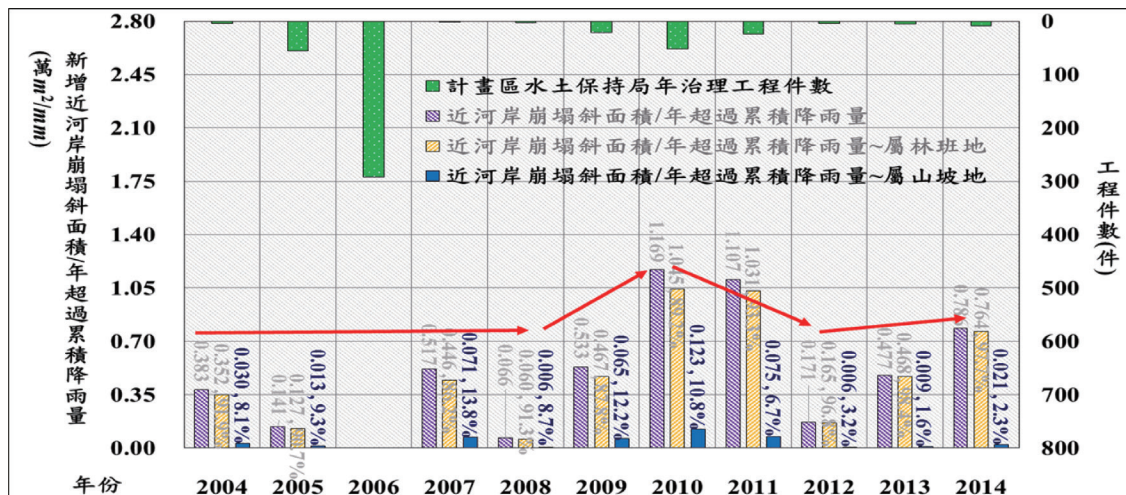


圖 4 歷年治理對土砂流失抑制成效趨勢圖

Fig.4 Trend of Annual Control on inhibit of Soil loss

資料來源：政府開放平台－衛星判釋崩塌；年超過累積降雨為該年 100mm 以上降雨之總合。

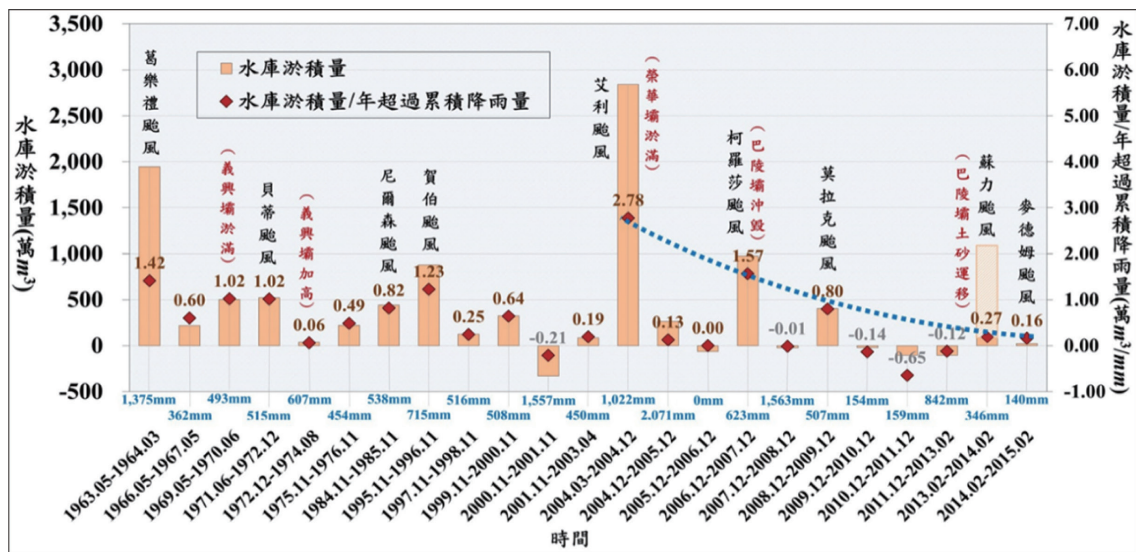


圖 5 歷年治理對土砂流失抑制成效趨勢圖

Fig.5 Trend of Annual Control on inhibit of Soil loss

資料來源：北區水資源局；年超過累積降雨為該年 100mm 以上降雨之總合。

## (II) 應用 LiDar 資料製作高精度立體地圖

為清楚了解集水區中潛在土砂流失區域，本研究製作重要集水區之高精度立體地圖，此圖不僅具有清晰可辨的立體效果，可剝除地表植生和樹木，展現地表實際起伏變化，故能清楚簡易地辨識各種微地形分布。

1. 高精度立體地圖：於 2016 年 10 月中旬進行空載光達測量之 LiDar 製作，如圖 6 至圖 8 所示，可觀察到三個重要集水區之微地形土砂流失潛感區，包含蝕溝、河岸及河溪堆積物、崩崖、大規模崩場地等。
2. 蘇迪勒颱風 (105 年度) 之重要災區情形：105 年 8 月蘇迪勒颱風所造成之兩處土砂重災區—嘎色鬧及合流部落，輔以高精度立體地圖分析是否仍有潛在土砂來源。在水土保持局相關單位工程治理改善後，已恢復穩定，附近居民相對無虞，如圖 10 及圖 11 所示，原災害範圍已無明顯土砂潛勢區域。

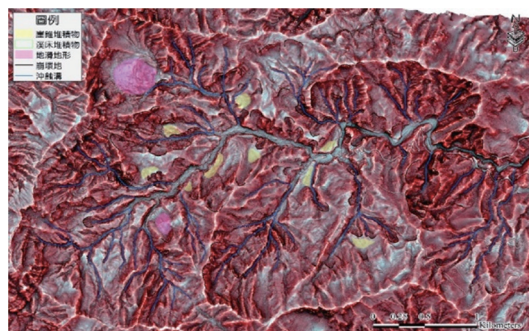


圖 6 高精度立體地圖—匹亞溪

Fig.6 high-precision three-dimensional map- Pai Ya River

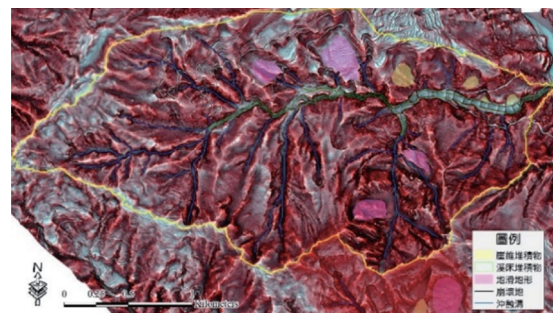


圖 7 高精度立體地圖—蘇樂溪

Fig.7 high-precision three-dimensional map- Su Le River

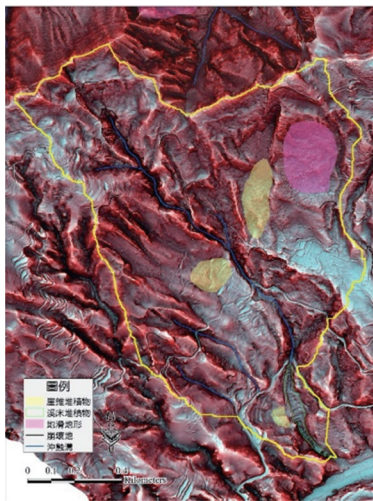


圖 8 高精度立體地圖－砂崙仔溪

Fig.8 high-precision three-dimensional map- Sha Lun Zi River

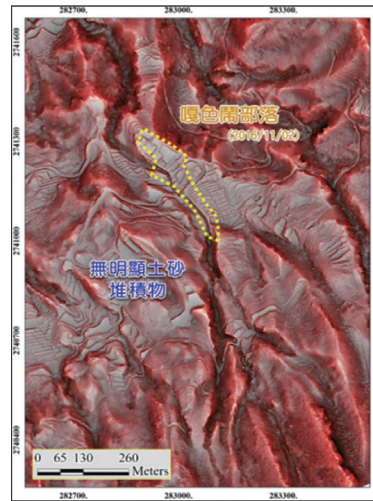


圖 9 高精度立體地圖－嘎色開部落

Fig.9 high-precision three-dimensional map- Ka Su Nu Tribe

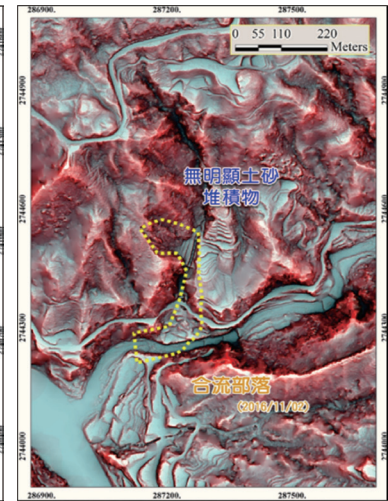


圖 10 高精度立體地圖－合流部落

Fig.10 high-precision three-dimensional map- He Liu Tribe

### (III) 現地調查作業

有別於以往現地調查，本研究更著重於潛在的土砂變遷及影響，不單單只針對現地或衛星影像中輕易可以看到者，故藉助於高精度立體地圖，得以充分反映集水區既有及潛在的各項問題。

現地調查區位選定及調查方面，每個重要集水區各選定高精度立體地圖判釋之六處相對重要點位進行調查及判釋複驗，作為治理需求評估之參考，如圖 11 至圖 13 所示，並依據現地調查結果，進行集水分區劃分，如圖 14 至圖 16 所示。

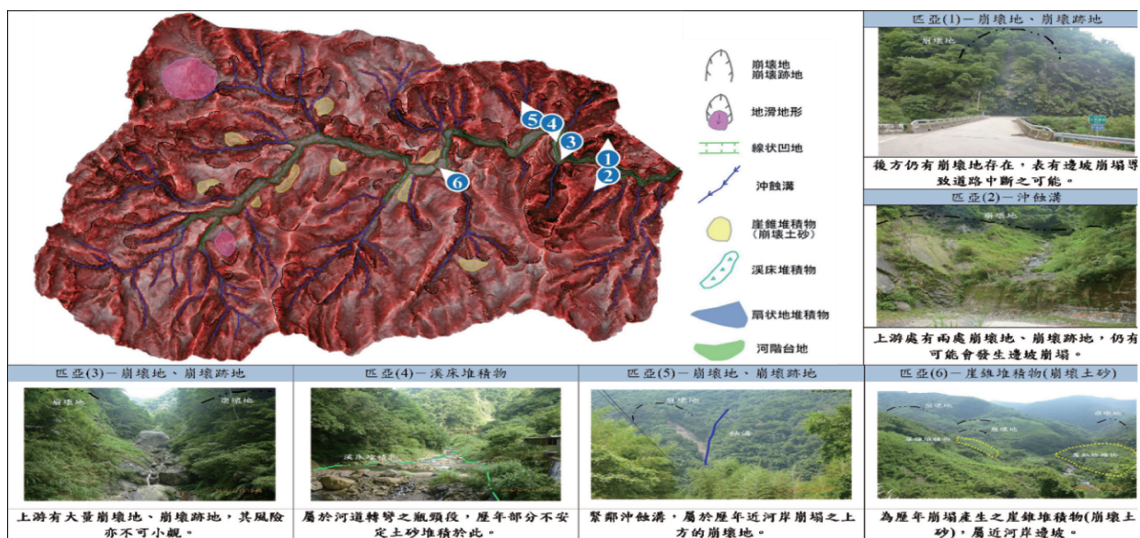


圖 11 重要集水區現地調查作業與評估－匹亞溪

Fig.11 Survey in Research area and Evaluation-Pai Ya River

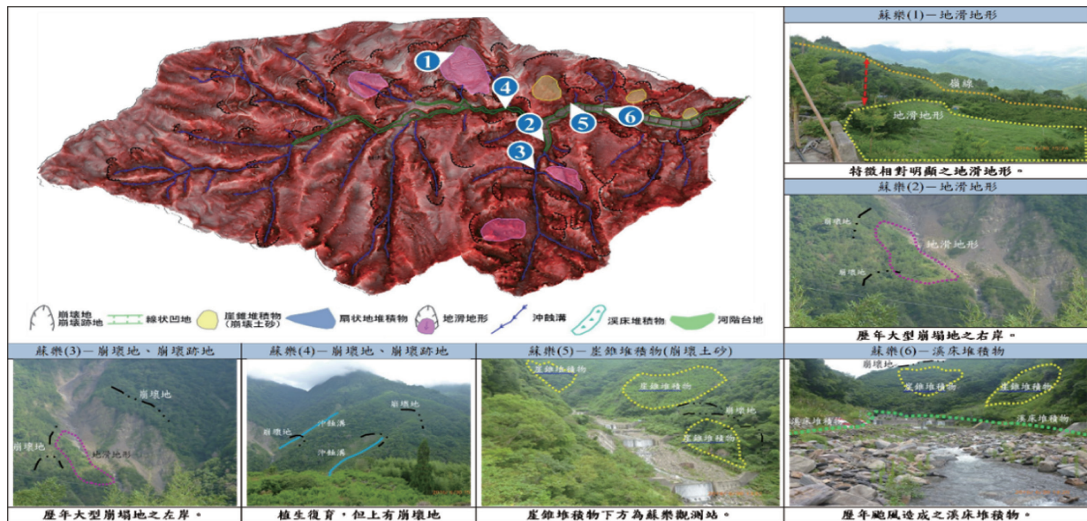


圖 12 重要集水區現地調查作業與評估—蘇樂溪  
Fig.12 Survey in Research area and Evaluation-Lun Zi River

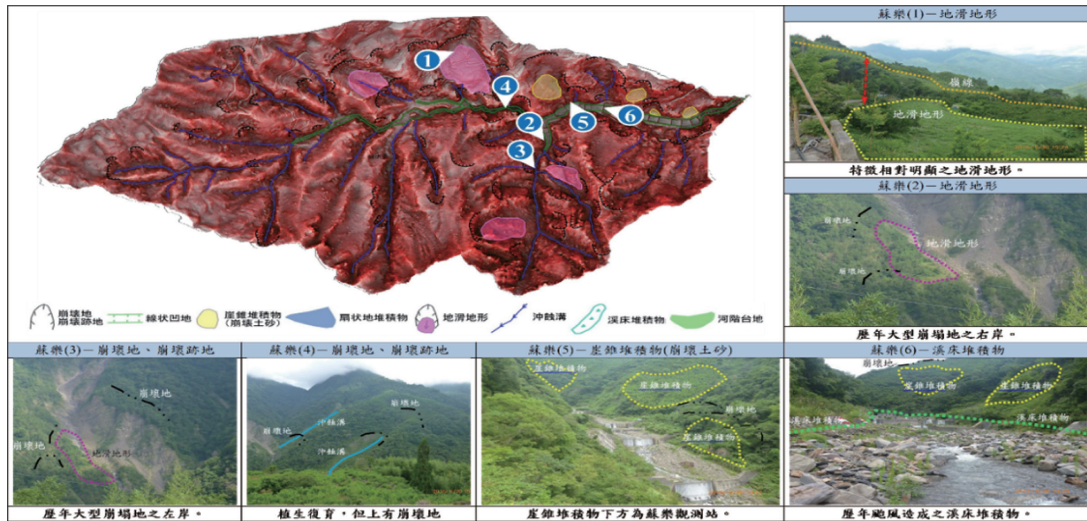


圖 13 重要集水區現地調查作業與評估—砂崙仔溪  
Fig.13 Survey in Research area and Evaluation-Sha Lun Zi River

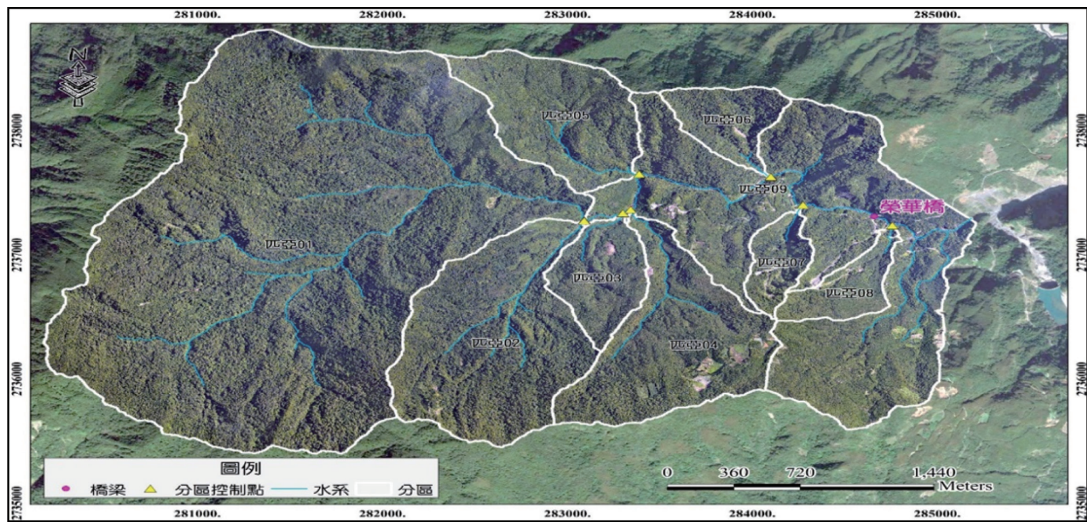


圖 14 重要集水區分區圖—匹亞溪  
Fig.14 Distribution of Research Area- Pai Ya River

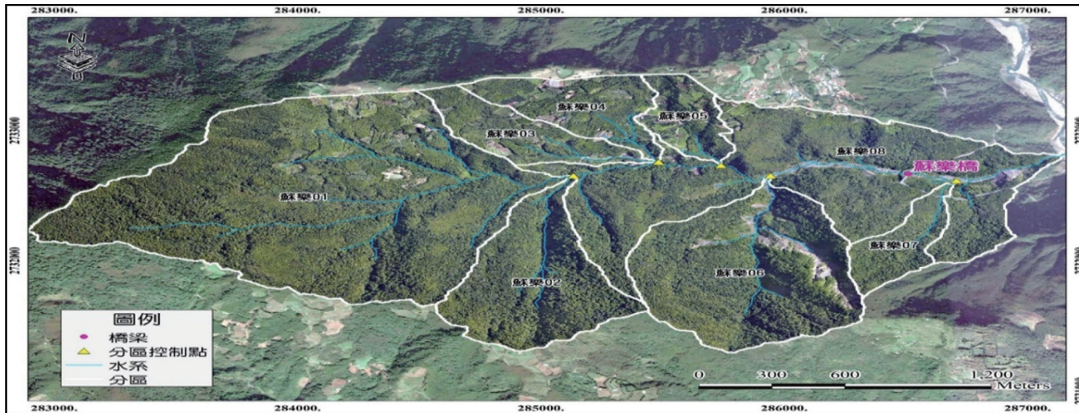


圖 15 重要集水區分區圖－蘇樂溪

Fig.15 Distribution of Research Area- Su Le River

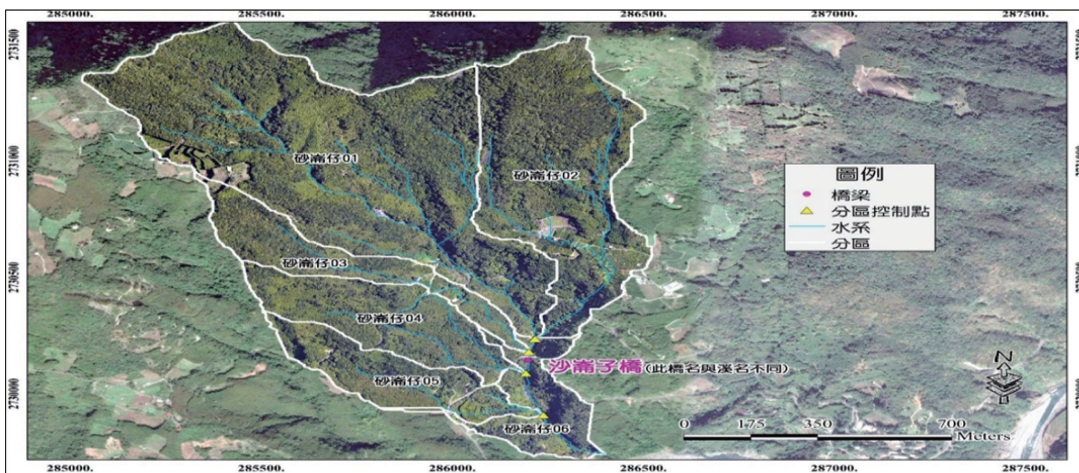


圖 16 重要集水區分區圖－砂崙仔溪

Fig.16 Distribution of Research Area-Sha Lun Zi River

(IV) 水庫集水區監測與分析

於重要集水區架設雨量及非接觸式水位觀測站，研究區最具規模事件為 2016 年梅姬颱風－累積雨量約 347mm-538mm，如圖 17 至圖 19。其餘僅零星降雨(尼伯特颱風約 40mm、莫蘭蒂颱風約 100mm 及馬勒卡颱風約 150mm)。

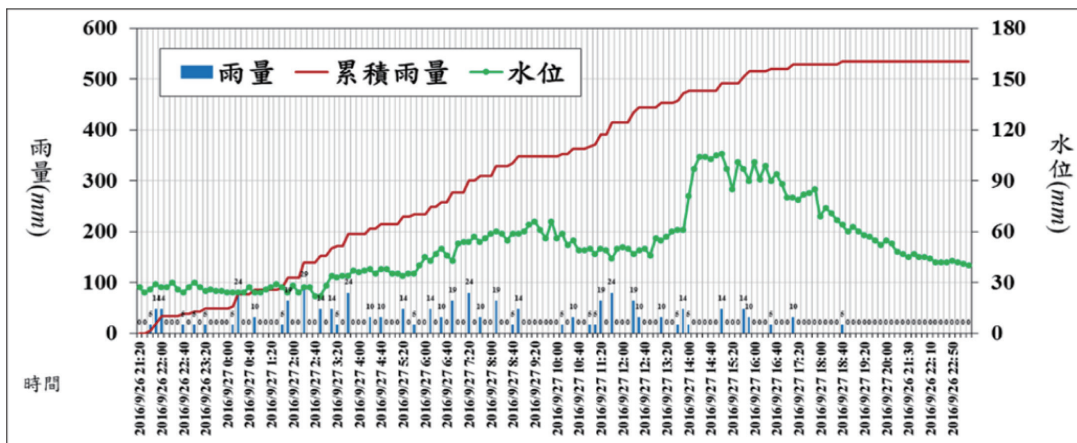


圖 17 梅姬颱風之雨量及水位歷線圖－匹亞溪

Fig.17 Typhoon Mei Ji's rainfall and stage-Pai Ya River

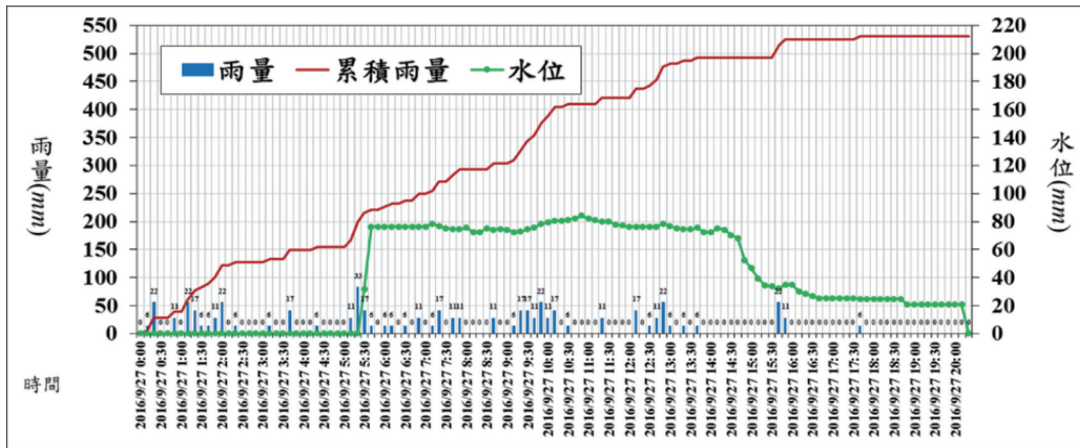


圖 18 梅姬颱風之雨量及水位歷線圖—蘇樂溪  
Fig.18 Typhoon Mei Ji' s rainfall and stage-Lun Zi River

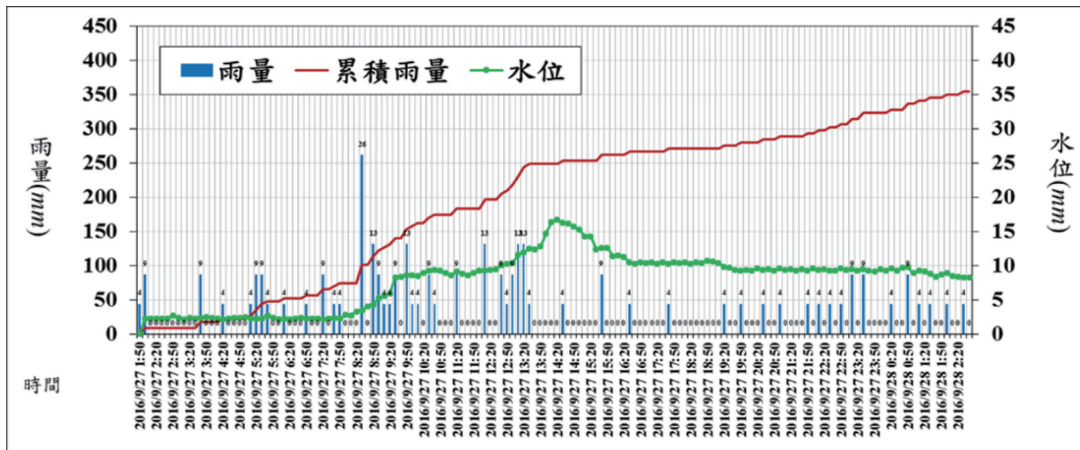


圖 19 梅姬颱風之雨量及水位歷線圖—砂崙仔溪  
Fig.19 Typhoon Mei Ji' s rainfall and stage-Sha Lun Zi River

### (V) 產砂分析模式建立

選定產砂數值模式為 CCHE1D，可有效反映河道及工程構造物變化，並建構集水區產砂模型，坡面區（離河岸）以沖蝕為主，以漫地流輸送不起造床作用，河道造床土砂係以近河岸重力侵蝕為主，以及構築完整之數值模式檢定驗證流程，流程如圖 20 所示。

1. 選定三個重要集水區控制斷面，每區各三處（含觀測站架設位置），共計九處，並完成汛期前後之測量，位置如表 1 所示。
2. 重要集水區之產砂分析模式建立：以 2013 年至 2016 年汛期後等 5 場颱風事件之產砂分析，如圖 21 所示，針對三處重要集水區提出單場降雨量 (Rfs, mm) 與土砂生產量 (Ov, 集水區某特定出口斷面流出的總土砂量,  $10^4\text{m}^3$ ) 關係式：

$$\begin{aligned} \text{土砂生產量}_{\text{蘇樂溪}} &= 0.0065Rfs + 0.5884 \\ \text{土砂生產量}_{\text{匹亞溪}} &= 0.0140Rfs - 1.8633 \\ \text{土砂生產量}_{\text{砂崙仔溪}} &= 0.0020Rfs + 0.5238 \end{aligned}$$

表 1 控制斷面位置資訊  
Table 1 The location of Control-section

溪流名稱	斷面名稱	X(TWD97)	Y(TWD97)	類型	所在位置
匹亞溪	匹亞斷面 1	283411	2737689	構造物上游面	主流 (觀測站)
匹亞溪	匹亞斷面 2	284208	2737290	構造物下游面	支流 (鋼便橋)
匹亞溪	匹亞斷面 3	284632	2737260	構造物上游面	主流 (匯流後)
蘇樂溪	蘇樂斷面 1	286146	2732710	構造物下游面	主流
蘇樂溪	蘇樂斷面 2	286258	2731710	構造物下游面	主流 (觀測站)
蘇樂溪	蘇樂斷面 3	286493	2732650	構造物上游面	主流 (蘇樂橋)
砂崙仔溪	砂崙仔斷面 1	286019	2730510	構造物下游面	主流
砂崙仔溪	砂崙仔斷面 2	285324	2730331	構造物上游面	主流 (觀測站)
砂崙仔溪	砂崙仔斷面 3	286187	2730120	構造物上游面	主流 (匯流後)

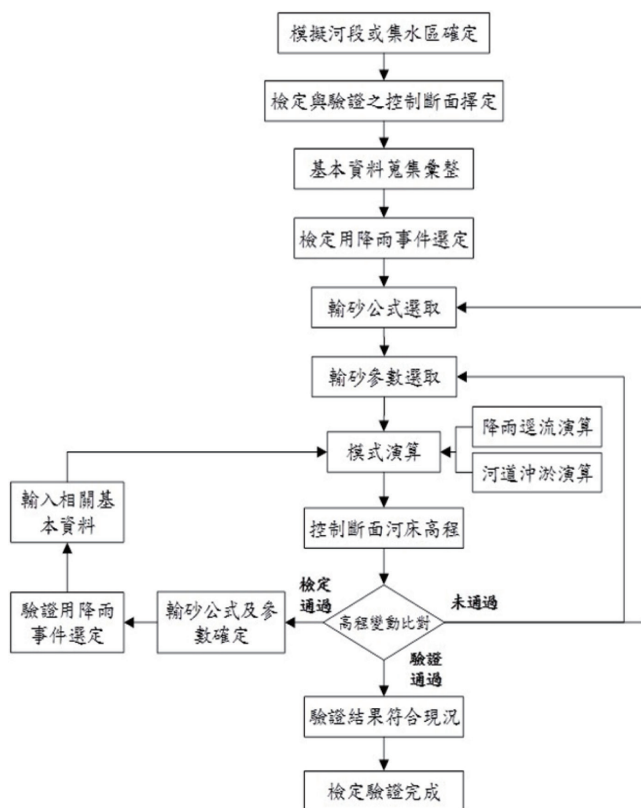


圖 20 產砂分析模式檢定驗證流程  
Fig.20 The process Sediment budget in watersheds by numerical model



圖 21 產砂分析模式分析事件  
Fig.21 The times of identification and validation of the model

## (VI) 建立入庫土砂量預報模型

延續上述重要集水區單場降雨量 (Rfs, mm) 與土砂生產量 (Ov) 之關係式，配合河道遞移率及囚砂率，推估重要集水區可能之水庫淤積量，如表 2 所示。

1. 延續上述已建置之蘇樂溪集水區模型中，配置工程構造物，並推估土砂抑制量及演算其工程效益；結果顯示「上游防砂治理」97 元/m<sup>3</sup> 相對傳統「水庫清淤」500 元/m<sup>3</sup> 對於水庫淤積量單位處理的成效更佳，如表 3 及表 4 所示。

表 2 現況各重現期距一日暴雨土砂量推估表  
Table 2 1-day rainfall Frequency Analysis of Sediment Projections

項目名稱－蘇樂溪 <sup>註 1</sup>	5 年	10 年	50 年	100 年
單場累積降雨量 (mm)	476.8	593.7	803.8	874.6
土砂生產量 Ov( 萬 m <sup>3</sup> )	3.688	4.448	5.813	6.273
入庫土砂量 ( 萬 m <sup>3</sup> )	1.713	2.066	2.700	2.914
水庫淤積量 ( 萬 m <sup>3</sup> )	1.002	1.208	1.579	1.704
項目名稱－匹亞溪 <sup>註 2</sup>	5 年	10 年	50 年	100 年
單場累積降雨量 (mm)	462.2	567.4	766.3	839.0
土砂生產量 Ov( 萬 m <sup>3</sup> )	4.608	6.080	8.865	9.883
入庫土砂量 ( 萬 m <sup>3</sup> )	2.715	3.582	5.223	5.823
水庫淤積量 ( 萬 m <sup>3</sup> )	1.587	2.094	3.054	3.405
項目名稱－砂崙仔溪 <sup>註 3</sup>	5 年	10 年	50 年	100 年
單場累積降雨量 (mm)	427.6	533.5	766.2	864.3
土砂生產量 Ov( 萬 m <sup>3</sup> )	1.379	1.591	2.056	2.252
入庫土砂量 ( 萬 m <sup>3</sup> )	0.813	0.937	1.211	1.327
水庫淤積量 ( 萬 m <sup>3</sup> )	0.475	0.548	0.708	0.776

註 1：蘇樂溪之河道土砂遞移率採 46.45%( 距離 12.52km<sup>2</sup>；高差 42m)。

註 2：匹亞溪之河道土砂遞移率採 58.92%( 距離 7.18 km<sup>2</sup>；高差 96.6 m)。

註 3：砂崙仔溪之河道土砂遞移率採 47.08%( 距離 23.46km<sup>2</sup>；高差 318.0m)。

註 4：石門水庫之囚砂率採 58.47%，「氣候變遷下水庫排砂對策研究 (2/2)，經濟部水利署」。

表 3 蘇樂溪集水區現況與預案後各項土砂量體彙整計算表

Table 3 The current and prediction situation of Sediment Projections - Lun Zi watersheds

項目		重現期距		
編號	溪谷區 (近河岸) 土砂流失項目	5 年	10 年	50 年
A <sub>1</sub>	溪谷區 (近河岸) 土砂流失量 (萬 m <sup>3</sup> )(現況)	3.434	4.299	5.853
A <sub>2</sub>	溪谷區 (近河岸) 土砂流失量 (萬 m <sup>3</sup> )(預案)	2.321	3.076	3.959
A <sub>3</sub> =A <sub>1</sub> -A <sub>2</sub>	工程降低溪谷區 (近河岸) 土砂流失量 (萬 m <sup>3</sup> )	1.113	1.223	1.894
編號	土砂生產項目	5 年	10 年	50 年
B <sub>1</sub>	土砂生產量 (萬 m <sup>3</sup> )(現況)	3.688	4.448	5.813
B <sub>2</sub>	土砂生產量 (萬 m <sup>3</sup> )(預案)	2.676	3.336	4.091
B <sub>3</sub> =B <sub>1</sub> -B <sub>2</sub>	工程降低土砂生產量 O <sub>vc</sub> (萬 m <sup>3</sup> )	1.012	1.112	1.722
編號	入庫土砂量項目	5 年	10 年	50 年
C <sub>1</sub>	入庫土砂量 (萬 m <sup>3</sup> )(現況)	1.713	2.066	2.700
C <sub>2</sub>	入庫土砂量 (萬 m <sup>3</sup> )(預案)	1.243	1.550	1.900
C <sub>3</sub> =C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>	工程降低入庫土砂量 (萬 m <sup>3</sup> )	0.470	0.516	0.800
編號	水庫淤積量項目	5 年	10 年	50 年
D <sub>1</sub>	水庫淤積量 (萬 m <sup>3</sup> )(現況)	1.002	1.208	1.579
D <sub>2</sub>	水庫淤積量 (萬 m <sup>3</sup> )(預案)	0.727	0.906	1.111
D <sub>3</sub> =D <sub>1</sub> -D <sub>2</sub>	工程降低水庫淤積量 (萬 m <sup>3</sup> )	0.275	0.302	0.468

表 4 蘇樂溪集水區防砂壩工程預案之工程效益分析表

Table 4 The Efficiency Analysis of Check Dam Lun Zi watersheds

預案防砂壩：高 8m，長 25m 工程費用 (Price)：4,567,500 元	5 年	10 年	50 年	工程土砂降低量 (萬 m <sup>3</sup> )	單位成本工程土 砂降低量 (元 /m <sup>3</sup> )
	X <sub>n</sub>	Y <sub>n</sub>	Z <sub>n</sub>	E=10X <sub>n</sub> +5Y <sub>n</sub> +Z <sub>n</sub>	P/E
降低近河岸土砂流失量 (萬 m <sup>3</sup> )	1.113	1.223	1.894	19.1	24
降低土砂生產量 (萬 m <sup>3</sup> )	1.012	1.112	1.722	17.4	26
降低入庫土砂量 (萬 m <sup>3</sup> )	0.470	0.516	0.800	8.1	57
降低水庫淤積量 (萬 m <sup>3</sup> )	0.275	0.302	0.468	4.7	97

- 以計算完成集水區推估未計算之區域，進而發展水庫淤積量預測模型 (採比面積法)，顯示若再發生如艾利颱風 (1,022mm) 的降雨，相應產生的單位降雨之水庫淤積量已降低了 42.8%(2.78 → 1.59)，表徵近 10 年來水土保持局的相關治理，已發揮相應成效，如圖 22 所示。
- 配合產砂分析模式成果並考量河道遞移率及水庫囚砂率，推估三個重要集水區之可能之對水庫產生之淤積量 (貢獻量)，並依此完成建立全石門水庫之入庫土砂量預報模型，如圖 23 所示。

$$\text{石門水庫}_{\text{上游集水區土砂流失量}} = 44.208 * e^{0.0048Rfs}$$

$$\text{石門水庫}_{\text{入庫土砂量}} = 20.529 * e^{0.0048Rfs}$$

$$\text{石門水庫}_{\text{土砂淤積量}} = 12.011 * e^{0.0048Rfs}$$

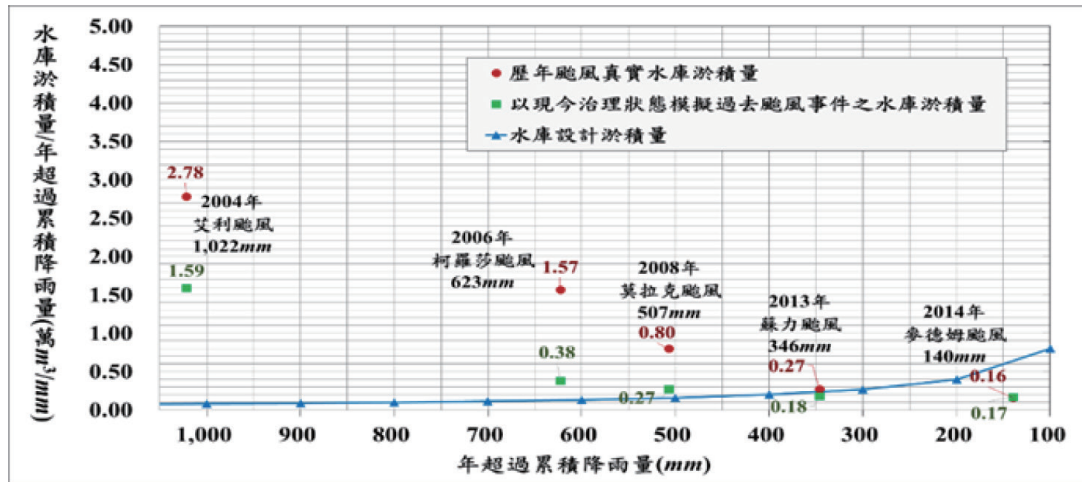


圖 22 石門水庫集水區歷年颱風與預測推估之水庫淤積量關係圖

Fig.22 Sedimentation volume of Shihmen Reservoir Watersheds Annual typhoon and prediction situation of Sediment Projections

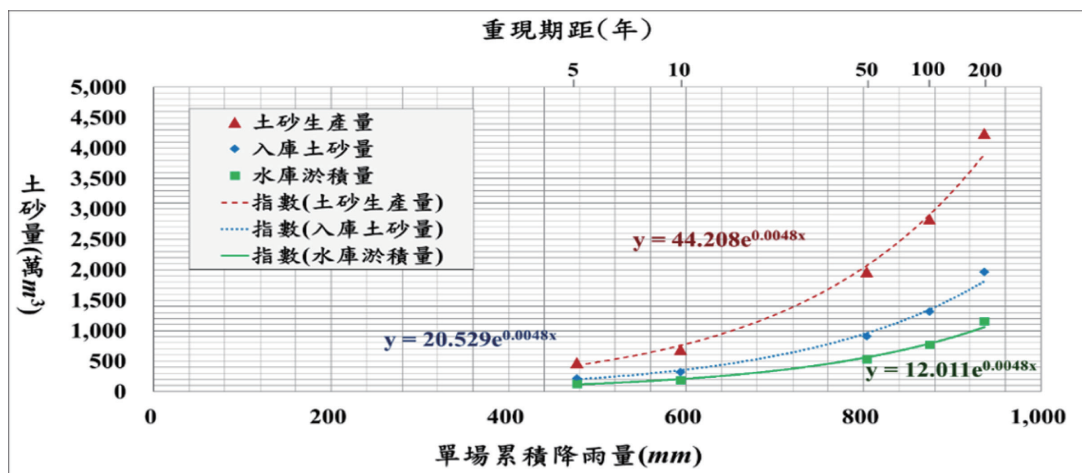


圖 23 石門水庫集水區之水庫淤積量預測推估分析圖

Fig.23 Sedimentation volume of Shihmen Reservoir Watersheds prediction situation Analysis of Sediment Projections

### (VII) 治理區求評析與區位

結合前述各項分析，以重要集水分區為單元建立治理需求評析指標，考量土砂來源、對保全對象（道路、保全住戶及水庫）的影響以及工程能量，定為土砂指標、保全對象指標及工程指標等三種類型，如表 5 及表 6 所示。

以所建立的治理需求評析指標，計算各重要集水分區之治理需求，排序結果依次為匹亞 01(44 分)、蘇樂 06(38 分) 及蘇樂 05(36 分)，皆屬於治理需求高，為前三大相對需要治理之熱點。

表 5 治理需求評析指標評分方式  
Table 5 Analysis of Engineering demand index

評估類別	評估項目	給分方式	給分	計算方式	相關項目
	崩塌率	崩塌率 < 0.06%	20	最新崩塌地面積 / 集水分區面積	基本資料蒐集及彙整分析
		$0.06\% \leq \text{崩塌率} < 0.3\%$	40		
		$0.3\% \leq \text{崩塌率} < 0.9\%$	60		
		$0.9\% \leq \text{崩塌率} < 4\%$	80		
		崩塌率 $\geq 4\%$	100		
土砂指標	土砂流失潛勢分布率	土砂流失潛勢分布率 < 1%	20	高精度立體地圖所判釋之地滑地形及崖錐堆積物之面積 / 集水分區面積	應用 LiDar 資料製作高精度立體地圖
		$5\% \leq \text{土砂流失潛勢分布率} < 10\%$	40		
		$10\% \leq \text{土砂流失潛勢分布率} < 15\%$	60		
		$15\% \leq \text{土砂流失潛勢分布率} < 20\%$	80		
		土砂流失潛勢分布率 $\geq 20\%$	100		
	土砂生產率	土砂生產率 < 0.2%	20	2015 年之集水分區土砂生產量 / 集水分區逕流體積	集水區產砂分析模式建立
		$0.2\% \leq \text{土砂生產率} < 0.5\%$	40		
		$0.5\% \leq \text{土砂生產率} < 1.0\%$	60		
		$1.0\% \leq \text{土砂生產率} < 3.0\%$	80		
		土砂生產率 $\geq 3.0\%$	100		
	對水庫影響程度	河道土砂遞移率 < 40%	20	出口至水庫之河道土砂遞移率	建立入庫土砂量預報模型
		$40\% \leq \text{河道土砂遞移率} < 70\%$	50		
		河道土砂遞移率 $\geq 70\%$	100		
保全對象指標	保全戶數密集度	保全戶數密集度 < 20	20	集水分區保全戶數 / 集水分區面積 (km <sup>2</sup> )	現地調查作業
		$20 \leq \text{保全戶數密集度} < 50$	50		
		保全戶數密集度 $\geq 50$	100		
	聯外道路密集度	聯外道路密集度 < 2000	20	聯外道路長度 (m) / 集水分區面積 (km <sup>2</sup> )	現地調查作業
		$2000 \leq \text{聯外道路密集度} < 5000$	50		
		聯外道路密集度 $\geq 5000$	100		
工程指標	工程能量	高	0.1	現地調查及工程管考系統	現地調查作業
		中	0.3		
		低	0.5		

表 6 治理需求評析指標加權方式  
Table 6 Analysis of Engineering demand index of Weights method

評估指標類別	評估項目	分項權重 (%)	給分	得分 (= 給分 × 分項權重)
土砂指標 (100%)	崩塌率	40	-	-
	土砂流失潛勢分布率	40	-	-
	土砂生產率	20	-	-
保全對象指標 (100%)	對水庫影響程度	50	-	-
	保全戶數密集度	30	-	-
	聯外道路密集度	20	-	-
總得分				-
治理需求評析指標分數 (= 總得分 × 工程指標 (0.1、0.3 或 0.5))				-

## IV、結論與建議

### (I) 結論

本研究係整合集水區土砂運移物理模型和一維河川動床數值模式，發展嶄新的河川水系土砂收支(土砂流失與生產關係)演算模式，同時結合實時降雨、水位、斷面測量及保育治理資料進行參數檢定及驗證，建立集水區土砂收支之規律及關係：一為於集水區之現況條件下，推估不同重現期之降雨量及實際降雨量，可能造成的土砂流失量與生產量及其關係式。二為應用於水庫上游集水區時，可據以推估不同重現期之降雨量可能造成的入庫土砂量、淤積量及其土砂來源，以集水區保育治理預案及成效評析(包含集水區粗、細泥砂顆粒運移特性)之量化依據，並將各研究成果彙整如下。

1. 基本資料蒐集及彙整分析：以土砂流失及生產以颱風豪雨事件為主，土砂來源以近岸崩塌為主，近岸崩塌約 90% 以上集中於林班地範圍。以水庫實測淤積量反推上游入庫土砂量及水土保持保育治理成效得知，呈現逐年下降之趨勢，表徵水庫集水區保育治理之成效。
2. 應用 LiDar 資料製作高精度立體地圖：選定匹亞溪、蘇樂溪及砂崙仔溪製作高精度立體地圖，且經由專業判釋取得研究區內崩場地、各級蝕溝、崖錐堆積物、河溪工程構造物、溪床堆積物、扇狀地、河階台地、道路分布等各種微地形地貌之空間分布，這將有助於集水區保育治理、土砂運移變遷、土砂來源、環境

變異預測及非工程防災措施等面向的分析與應用。

3. 現地調查作業：以高精度立體地圖判釋成果，選擇 6 處重點區，驗證可信度，提供後續保育治理需求評估與選定依據。
4. 水庫集水區監測與分析：建置 3 站觀測站，監測 2016 年梅姬颱風事件。
5. 產砂分析模式建立：選定 CCHE1D 建立模式，採 2013 年至 2016 年颱風及斷面測量檢定驗證模式，通過嚴謹的過程，建立重要集水區之單場累積降雨量與土砂生產量關係。
6. 建立入庫土砂量預報模型：以產砂分析模式成果考量河道遞移率和水庫囚砂率，推估入庫土砂量（貢獻量）關係。顯示，若艾利颱風再發生，現今治理套入相同降雨，單位降雨之水庫淤積降低 42.8%，近 10 年水土保持局治理發揮成效。
7. 治理需求評析及區位：結合前述各項分析，考量土砂來源、保全對象以及工程，建立治理需求評析指標，計算集水區之治理需求，排序依次為匹亞 01、蘇樂 06 及蘇樂 05，依此結果以利將來相關人員勘查規劃。

## (II) 建議

1. 已針對石門水庫上游集水區之提出產砂分析模型、入庫土砂量預報模型及入庫土砂淤積量預報模型，惟因時程關係，建議後續應持續監測相關水文地文數據，反覆驗證模型準確性，以提升模型之適用性。
2. 本研究僅針對石門水庫上游集水區完成相關分析及模型建置工作，惟全臺仍有許多面臨淤砂問題嚴重之水庫，建議應以本研究相關執行方式，滾動更新檢討分析其他水庫集水區，完成全臺水庫集水區之產砂、淤砂預報模型。
3. 高精度立體地圖之建置及應用成果，完成判釋微地形土砂流失潛感及潛變區，可作為調查、規劃、土砂分析及未來預防治理等之參考，且因政府相關單位（如中央地質調查所等）戮力建議全臺高精度數值地形資料（如 LiDAR），可由此完整性資料，全面性將全臺重要水庫集水區建置高精度立體地圖，並進行土砂流失潛感及潛變區微地形判釋，以建構地圖式大數據資料庫。

## V、參考文獻

石門水庫集水區泥砂調查分析及監測技術之研究 (行政院農業委員會水土保持局，2008)

行政院農業委員會水土保持局，石門水庫集水區坡地災害潛勢及整治評估 (行政院農業委員會水土保持局，2008)

石門水庫集水區豪雨誘發土砂災害之變化歷程與機制探討 (行政院農業委員會水土保持局，2009)

104 年度石門水庫集水區執行成效追蹤 (行政院農業委員會水土保持局，2015)

Model CCHE1D Version 3.0 – Technical Manual(NCCHE，2002)



## 應用多元空間資訊製作水里溪集水區崩塌潛勢圖

謝漢欽<sup>1\*</sup>

**【摘要】**本研究以包含日月潭的水里集水區為試驗地範圍，以 2004 年至 2015 為時間尺度，選擇 6 期福衛二號衛星遙測、1 期法國 Pléiades 衛星影像，應用影像分割技術之半自動崩裸地萃取程序完成 7 個時期試驗區域的崩場地調查。另外從政府開放資料申請及下載與崩場地有關土地利用調查、數值地形、氣象及災害等的地理資訊圖層。應用地理空間分析技術，完成試區的崩場地變遷分析及熱點分析。應用不安定指數統計分析方法，選出地形粗糙度分級圖、坡度分級圖、山坡地土壤分類圖、NDVI 分級圖、五萬分一地質分類圖，以及 12 年期平均降雨量分級圖，共 6 個指標，計算個別指標的權重；以各指標分級或分類的不安定評分分數，求得水里溪集水區崩塌潛勢機率圖，將水里溪集水區崩塌潛勢機率圖分成低、中低、中、中高、高 5 級，其中處在第 5 級區位的崩塌發生機率值大於 0.5 以上，必須加以注意。本崩塌潛勢分級圖，可供後續結合各種土地利用型圖、社會經濟地理資訊，評估崩塌風險之用。

**【關鍵詞】**開放資料、崩塌潛勢、不安定指數法。

## USING MULTISOURCE GEOSPATIAL INFORMATION TO DERIVE LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAP OF SHUILI WATERSHED

Han-Ching Hsieh<sup>1\*</sup>

**【Abstract】** This study selected the Shuili watershed as experimental area. The following approaches were reached: (1) Integrated multiple scale and temporal Formosa Satellite II remote-sensed images and geographic thematic layers to build the geographic information spatial data base for landslide change analysis and locating hot spots of landslides during 2004 to 2015. (2) Applied image segmentation technique and geospatial analysis methods to extract landslide areas from 2004 to 2015 to understand the dynamic change of landslide area.

---

<sup>1</sup> 行政院農業委員會林業試驗森林經營組研究員，通訊作者。電子郵件：mickey@tfri.gov.tw  
Senior Scientist, Division of Forest Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail: mickey@tfri.gov.tw

(3) Derived the landslide susceptibility map with Instability Index statistical method for the Shuili watershed. The landslide susceptibility map classified into 5 grades will be favorable for the village natural disaster warning and providing the thematic layer for land use planning and socio-economic resilience evaluation.

【Key words】 open data、landslide susceptibility、instability index method.

## I、前言

受到全球氣候變遷影響，使得極端氣象事件發生頻仍，分布於農林山村地區之不同土地利用型，暴露在颱風、暴雨及人為活動之影響下，容易發生崩塌 (landslide) 及土石流 (debris flow) 等危害，常造成當地生命及財產的損失。不僅增進了當地的生態與社會系統的脆弱度 (vulnerability)，同時也減低了當地的生態服務功能之綜合資源承載量 (carrying capacity)、進而提高山村經濟生產損失以及居民生活安全性的風險。因此如何蒐集各項環境影響與致災啟動因素之地理空間資訊，藉由先進的空間資訊分析技術，有效製作山村地區不同土地利用型之崩塌潛勢 (susceptibility) 分析圖，進而以不同時空尺度研究崩塌危險度 (hazard) 等級及危險區域 (hazard zone) 劃分，以及脆弱度估算 (vulnerability estimation)，最終對崩塌災害風險進行評估 (risk assessment)，從評估結果提出因應的調適策略，作為有科學基礎的決策依據，為當前重要的課題。

本研究選擇中尺度水里溪集水區為試驗地範圍，以過去 12 年為時間尺度，於不同空間及時間尺度下整合不同時期衛星遙測、各項土地利用調查、數值地形、氣象、天然災害、環境敏感區劃等多尺度空間與圖籍資料。應用空間統計分析技術，分析並製作極端氣象天然災害事件導向之集水區崩塌潛勢分區分級圖。期望本崩塌潛勢分級圖，可供後續結合各種土地利用型圖、社會經濟地理資訊，評估崩塌風險之用。

## II、研究材料和方法

### (I) 地理資訊蒐集與建置

從 2005 年至 2015 年間挑選水里溪集水區 6 期無雲福衛二號影像，製作 NDVI、以及水里溪集水區 2015.04.14 法國法國太空公司 Pléiades 衛星影像 (圖 1) 的 NDVI、GI 指標及主軸轉換。向內政部申請取得水里溪集水區 5m 及 1m 數值

高程及表面高圖層，向水土保持局申請取得 2011 年南投縣山坡地土地利用型圖等。完成由國家防災科技中心取得 1km 歷年月雨量資料內插處理。以及從內政部地理資訊圖資雲服務平台下載及申請有關水里溪集水區與崩塌潛勢分析相關的 5 萬分一地質圖、坡地土壤圖、崩場地類型調查圖、順向坡區位圖、土石流潛勢溪、災害發生歷史圖資、地質敏感區位劃分等地理資訊圖資。

## (II) 崩場地判釋調查

以崩場地自動萃取程序的建立，先以 Pléiades 衛星影像 0.5 公尺高解析度衛星影像的兩個植生指標進行主成分分析，選取第一主成分影像，以減低山區地形陰影的影響，進行影像分割及物件萃取出水里溪集水區的崩裸地，最後以高解析度數值地形套合、展繪成 3D 立體模型，以人為判讀方式選出水里溪集水區 2015 年 4 月 14 日的崩場地。本崩場地半自動萃取程序可節省人力，並能避免人為主觀選取邊界的缺點，達成大面積、多時期崩場地地理主題圖層的製作。主要處理程序為，以區塊形狀方形比指標，濾除指標值大於 0.65，其區塊形狀接近方形及圓形的非植生區塊，並以區塊面積小於 0.04 公頃為門檻值濾除小面積非植生區塊（視為雜訊），最後以非植生覆蓋區塊的平均坡度，將坡度低於 15 度，屬於平坦地區非植生覆蓋區塊分離出來，使得所得的區塊分布為坡度大於等於 15 度的陡坡區塊（內含崩場地）。將此崩裸地與數值地形展成 3D 模型，以人為判別方式選取崩場地區塊，完成水里溪集水區崩場地地理資訊圖層。此外，依此分析程序，完成 6 期福衛二號崩場地萃取成果，供後續崩塌潛勢分之研究。

## (III) 崩場地變遷分析

達成含日月潭地區之水里溪集水區，全區總面積 8,362 公頃。1975 年至 2015 年共 19 期崩場地判釋及崩場地分布地理資訊圖層。其中，以航照判釋完成 1975、1984、1990、2005、2009 年，6 個年期崩場地分布圖。以法國 SPOT 影像自動萃取 2004 年崩場地。以福衛二號影像半自動萃取 2005 年至 2015 年間共 12 期崩場地，完成地理資訊圖層製作。總計完成 2,445 公頃崩場地調查，全部崩場地個數為 464 筆，以折線圖顯示歷年崩場地變遷情形。總筆數面積不如預期，分析結果顯示本區各年期崩場地總面積占全區比率皆低於 0.25%，因此崩場地分布，對本集水區的衝擊相對地很小。另以福衛二號 2004 年至 2015 年崩場地發生頻度之核機率密度估計 (kernel Density estimation) 完成崩場地熱點分析，顯示各期

間崩塌地位置變遷分析空間資訊。將試區 2007 年至 2015 年 6 期福衛二號之崩裸地聯集，運用 Getis-OrdGi\* 方法計算，完成試驗區崩塌地之空間統計之熱點分布圖。

#### (IV) 崩塌潛勢分析與分級

應用不安定指數統計估計方 (instability index method)，Pléiades 衛星影像判釋所得崩裸地、以水土保持局 2011 年調查的崩裸地，以及由國家防災資訊科技中心提供歷年地面調查所得的水里集水區崩屑滑動區塊及落石崩塌空間分布圖，聯集 4 個圖層的崩裸地區塊；以 2004 年至 2015 年為分析的時間尺度。藉由蒐集的各項地理資訊圖層，以地理資訊空間分析方法製作了水里溪集水區 15 個，具有 5m 空間解析度之崩塌地發生空間指標圖層：(1) 平均降雨量分級圖 (2) 坡度分級圖 (3) 海拔高分級圖 (4) 坡向分級圖 (5) 地形粗糙度分級圖 (6) NDVI 分級圖 (7) 山坡地土壤分類圖 (8) 土壤深度分級圖 (9) 五萬分一地質分類圖 (10) 離道路分級圖 (11) 距離主流分級圖 (12) 距離支流分級圖 (13) 距離活動斷成分級圖 (14) 距離順向坡分級圖 (15) 距離土石流潛勢溪分級圖。

經由各個指標的變異係數排序，選出個別指標變異係數大於 90% 以上的指標當作有力影響崩塌地發生的有效解釋指標，依序選出地形粗糙度分級圖、坡度分級圖、山坡地土壤分類圖、NDVI 分級圖、五萬分一地質分類圖，以及平均降雨量分級圖，共 6 個指標，計算個別指標的權重，以各指標分級或分類的不安定評分分數，將水里溪集水區 6 個指標影像相乘，最後求得水里溪集水區崩塌潛勢機率圖，以 Natural Break 直方圖統計分類方法，將水里溪集水區崩塌潛勢機率圖分成低、中低、中、中高、高 5 級，其中處在第 5 級區位的崩塌發生機率值大於 0.5 以上，必須加以注意。期望本崩塌潛勢分級圖，能供其他計畫進一步運用。

### III、結果與討論

#### (I) 崩塌地調查與變遷分析

本研究試區含日月潭地區之水里溪集水區，全區總面積 8,362 公頃。從 1975 年至 2015 年共 19 期崩塌地判釋及崩塌地分布地理資訊圖層。其中，以航照判釋完成 1975、1984、1990、2005、2009 年，6 個年期崩塌地分布圖。以法國 spot 影像自動萃取 2004 年崩塌地。以福衛二號影像半自動萃取 2005 年至 2015 年間共

12 期崩塌地，完成地理資訊圖層製作。總計完成 2.445 公頃崩塌地調查，全部崩塌地個數為 464 筆，以折線圖顯示歷年崩塌地變遷情形。總筆數面積不如預期。分析結果顯示本區各年期崩塌地總面積占全區比率皆低於 0.25%，因此崩塌地分布，對本集水區的衝擊相對地很小。

為了求得時間與空間尺度的一致性，本研究另以福衛二號 2004 年至 2015 年崩塌地，為後續崩塌地變遷分析的依據。有關崩塌地變遷的時間變遷，本研究依據崩塌地發生的空間位置及面積大小為變數，採用崩塌地發生頻度之核機率密度估計 (kernel density estimation)，以最適之 350m 為何密度函數的搜尋半徑，完成崩塌發生頻度 2 的熱點分析，顯示各期間崩塌地位置變化熱點最明顯共有 3 處。此外，將試區 2007 年至 2015 年 6 期福衛二號 (完全無雲影像品質良好) 之崩裸地聯集，運用 Getis-OrdGi\* 方法計算，完成試驗區崩塌地之空間統計之熱點分布圖。本圖以 z 分數分布顯示出研究區崩塌面積大且集中的熱點區共有兩處。兩種熱點分析方法各有目的，而一般所稱的 Hot Spot 應該是指後者。

## (II) 崩塌潛勢圖的製作

本研究充分運用從政府開放資料，綜合崩塌地有關土地利用調查、土壤、地質、數值地形、氣象及災害等的地理資訊圖層，進行空間分析。應用不安定指數統計分析方法 (圖 2、圖 3)，各項指標的各級面積崩塌比率之變異數 (coefficient of variation) 大小，能選出有利於崩塌潛勢的分析的主要影響指標。研究中從 15 個相關指標 (圖 4) 中選取了 (1) 地形粗糙度分級圖、(2) 坡度分級圖、(3) 山坡地土壤分類圖、(4) NDVI 分級圖、(5) 五萬分之一地質分類圖，以及 (6) 平均降雨量分級圖，共 6 個指標 (圖 5)。本方法可依據過區發生的崩塌地所在的位置進行個別指標分級的不安定分數，並以變異數所佔權重當作不安定分數指數值，計算個別指標的權重，以各指標分級或分類的不安定評分分數，求得水里溪集水區崩塌潛勢機率圖，本圖示一個連續數值，將機率從 1 到 10 分顯示表達，將訓練用的聯合崩塌地圖層進行套疊分析，發現有 82% 的崩塌地區塊落在機率大於 5 分的區位。再將水里溪集水區崩塌潛勢機率圖分成低、中低、中、中高、高 5 級 (圖 6)，其中處在第 5 級區位的崩塌發生機率值大於 0.5 以上，必須加以注意。本崩塌潛勢分級圖可與其他地理資訊圖層相疊加以驗證，目地在於提供後續結合各種土地利用圖 (圖 7)、社會經濟地理資訊，評估崩塌風險之用。

## IV、結論

本研究應用影像分割技術之半自動崩裸地萃取程序完成 7 個時期試驗區域的崩場地調查方法，可免除過多人為主觀判釋的缺點，適用於大面積的衛星影像判釋，可節省時間及人力成本。能充分運用從政府開放資料，綜合崩場地有關土地利用調查、土壤、地質、數值地形、氣象及災害等的地理資訊圖層，進行空間分析。應用不安定指數統計分析方法，各項指標的各級面積崩塌比率之變異數大小，能選出有利於崩塌潛勢的分析主要指標，從 15 個相關指標中，選取 (1) 地形粗糙度分級圖、(2) 坡度分級圖、(3) 山坡地土壤分類圖、(4) NDVI 分級圖、(5) 五萬分一地質分類圖，以及 (6) 平均降雨量分級圖，共 6 個指標。本方法可依據過去發生的崩場地所在的位置進行個指標分級的不安定分數，並以變異數所佔權重當作不安定分數指數值，計算個別指標的權重，以各指標分級或分類的不安定評分分數，求得水里溪集水區崩塌潛勢機率圖。再將水里溪集水區崩塌潛勢機率圖分成低、中低、中、中高、高 5 級，其中處在第 5 級區位的崩塌發生機率值大於 0.5 以上，必須加以注意。本崩塌潛勢分級圖可與其他地理資訊圖層相疊加以驗證，目地在於提供後續結合各種土地利用圖、社會經濟地理資訊，評估崩塌風險之用。

## V、參考文獻

- 蘇苗彬、陳毅輝、方俊傑 (2009) 應用不安定指數法於坡地崩塌之潛勢分析。水保技術。4(1):9-23。
- 顧承宇等 (2012) 氣候變遷下機端降雨引致廣域坡地災害評估技術之研究。中華水土保持學報。43(1):75-48。
- 謝承憲、蘇昭郎、吳佳容 (2010)，「災害風險評估技術指引」，國家災害防救科技中心技術報告，台北。
- 殷坤龍、張桂榮、陳麗霞、高華喜、汪洋 (2010) 滑坡災害風險分析。北京：科學出版社。
- 楊明德、黃奕達、黃凱翔、張益祥 (2012) 利用崩塌潛勢圖作風險評估之應用 - 以陳有蘭溪流域為例。中華水土保持學報。43(1):1-11。
- 陳樹群、周憲德、許銘熙、林沛練、葉克家、林聖琪、柯明淳、傅金城、于宜強、鄭兆尊、張智昇、王安翔、張駿暉、葉森海、黃成甲、李欣輯 (2011)，「颱風災害風險評估理論與方法之研究」，國家災害防救科技中心技術報告，台北。

- 陳樹群、吳俊億、謝政道 (2012) 崩塌危害分析模型之建立 - 以台北水源特定區為例。中華水土保持學報。43(4):332-345。
- 潘國樑 (2007) 山坡地的地質分析與有效防災。台北：科技圖書公司。
- 林務局 (2014) 運用光學影像於全島崩場地判釋與災害分析。林務局委託成大研究發展基金研究承國報告 (102-103)。
- 水土保持局 (2014) 103 年氣候變遷衝擊下坡地災害風險評估及調適能力之研究。水土保持局委託台灣大學生物環境系統工程學系研究。報告編：SWCB - 103 - 082。
- Asch, T.V. et al. (eds.) (2014) Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance, Advances in Natural and Technological Hazards Research. Springer Dordrecht Heidelberg New York London.36. Australian Geomechanics Society (2007) Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. Ref: AGS(2007a).
- Ozdemir, A. (2011) Landslide susceptibility mapping using Bayesian approach in the Sultan Mountains (Ak, sehir, Turkey). Nat Hazards 59:1573-1607.
- Pardeshi, S.D. et al., (2013) Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. Springer Plus 2013,2:523-48. Rees, W.E. (1992) Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out, Environment and Urbanization 4(2): 121-130.
- Teeuw, R. M. (ed.) (2007) Mapping Hazardous Terrain using Remote Sensing. Special Publication 283, Geological Society. The Geological Society, London.
- Westen, C.J., C. Enrique, and S.L. Kuriakose (2008) Spatial data for landslide susceptibility, hazard and vulnerability assessment: An overview, Engineering Geology. 10:1016- 11.
- Fell R., J. Corominas, C. Bonarrd, L. Cascini, E. Leroi, and Savage, WZ. (2008) Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. Eng Geol. 102:85-98.
- Guo, DH. and Mennis, J. (2009) Spatial data mining and geographic knowledge discovery—An introduction, Computers, Environment and Urban Systems 33:403–408.

## VI、附圖表

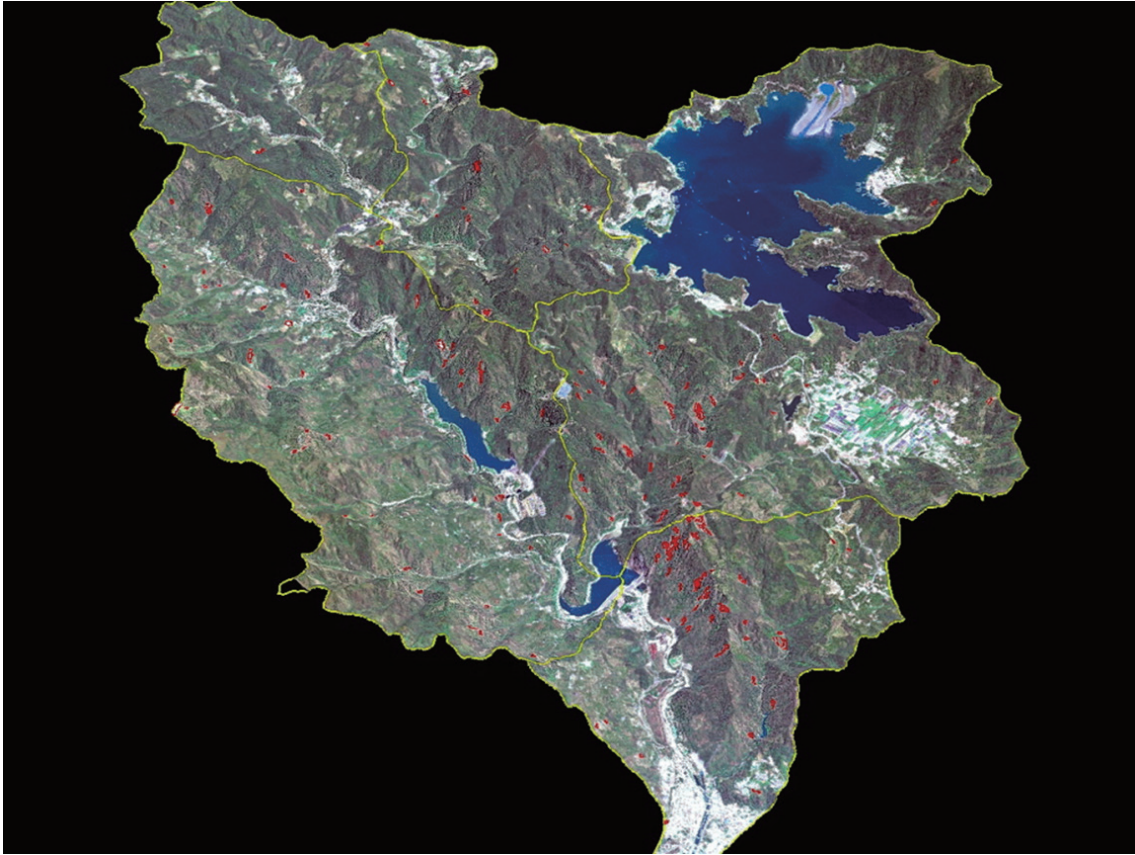


圖 1 南投縣水里溪集水區 (面積 8,362 公頃) 2015.04.14 法國 Pléiades 衛星全色融銳化融合影像，空間解析度 50cm。結合數值地形模型 (DTM) 展示立體透視圖。應用影像分割技術萃取的紅色多邊形，代表坡度大於 15 度、面積大於 0.04 公頃的崩塌地及土壤裸露區塊。

Fig.1 Pansharpen fusion image of Pléiades satellite with spatial resolution of 50 cm at Shuili watershed with 8,362 hectares in Nantou County. Showing one 3D perspective view of the watershed with 5 m spatial resolution digital terrain model (DTM). Red polygons in the picture presented distribution of landslide and soil bared areas extracted by image segmentation procedure in this study, which area more than 0.04 hectare and average slope more than 15 degrees.

### 不安定指數法

不安定指數是計算崩塌網格之密度 (蘇苗彬, 1998), 其目的在評估較易崩塌之地區, 計算步驟如下:

$$(1) \text{ 崩塌潛勢潛感因子分級 } Z_i = Q_i / \sum Q_i$$

$$Q_i = Q_{\text{landslide}} / Q_{\text{total}} \quad (1)$$

式子說明:

$Z_i$  = 為各個因子之崩壞網格之密度或百分比

$Q_i$  = 為崩塌的崩壞比

$Q_{\text{landslide}}$  = 為該分級崩塌網格數目

$Q_{\text{total}}$  = 為該分級之網格總數

$$(2) \text{ 崩塌潛感因子評分}$$

求得崩塌百分比之後, 為了求得各單一因子之評分值, 將各分級之崩塌百分比對應至 1~10 間, 以得各因子評分值。

$$D = \frac{9(Z_i - Z_{\min})}{(Z_{\max} - Z_{\min})} + 1 \quad (2)$$

圖 2 不安定指數法統計計算

Fig.2 Instability Index statistical method

### 崩塌潛感因子權重計算

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\%$$

式子說明:

$V$  = 為變異係數 (Variance)

$\sigma$  = 為標準差 (Standard deviation)

$\bar{X}$  = 為平均值 (Mean)

$$W_i = \frac{V_i}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots + V_i}$$

式子說明:

$W_i$  = 表示單一因子之權重

$V_i$  = 為單一因子之變異係數

### 崩塌潛 潛勢值之疊加

$$D_{\text{total}} = D_1^{w_1} \times D_2^{w_2} \times D_3^{w_3} \dots \times D_i^{w_i}$$

式子說明:

$D_{\text{total}}$  = 為山崩之潛感值

$D_1, D_2, \dots, D_i$  = 為山崩潛感因子之評分值

圖 3 不安定指數法因子權重與綜合潛勢機率計算

Fig.3 Weight of each impact factors and potential probabilities calculated by Instability Index statistical method.

崩塌潛勢影響指標	變異數 V(%)	權重 W(%)
1.地形粗糙度	157.64	21.22
2.平均坡度	134.95	18.16
3.山坡地土壤分類圖	129.60	17.44
4. NDVI	123.53	16.63
5.五萬分之一地質分類圖	106.75	14.37
6.平均雨量	90.54	12.18
7.土壤深度	111.55	
8.距斷層距離	67.76	
9.海拔高	67.70	
10.距支流距離	57.84	
11.距主流距離	48.33	
12.坡向	46.52	
13.距土石流潛勢溪	44.22	
14.距道路距離	41.51	
15.距順向坡距離	27.01	

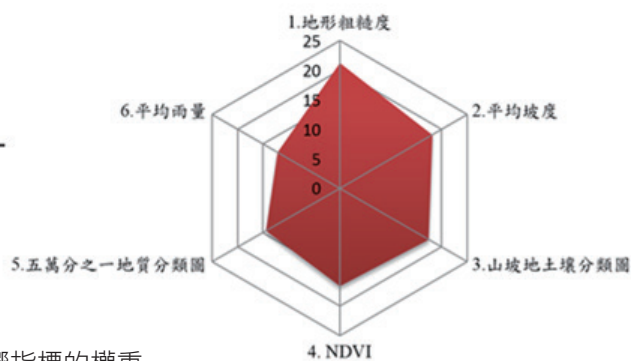


圖 4 15 個崩塌潛勢指標選取及前 6 個影響指標的權重

Fig.4 Weight of 6 obvious impact factors selected from 15 landslide impact factors.

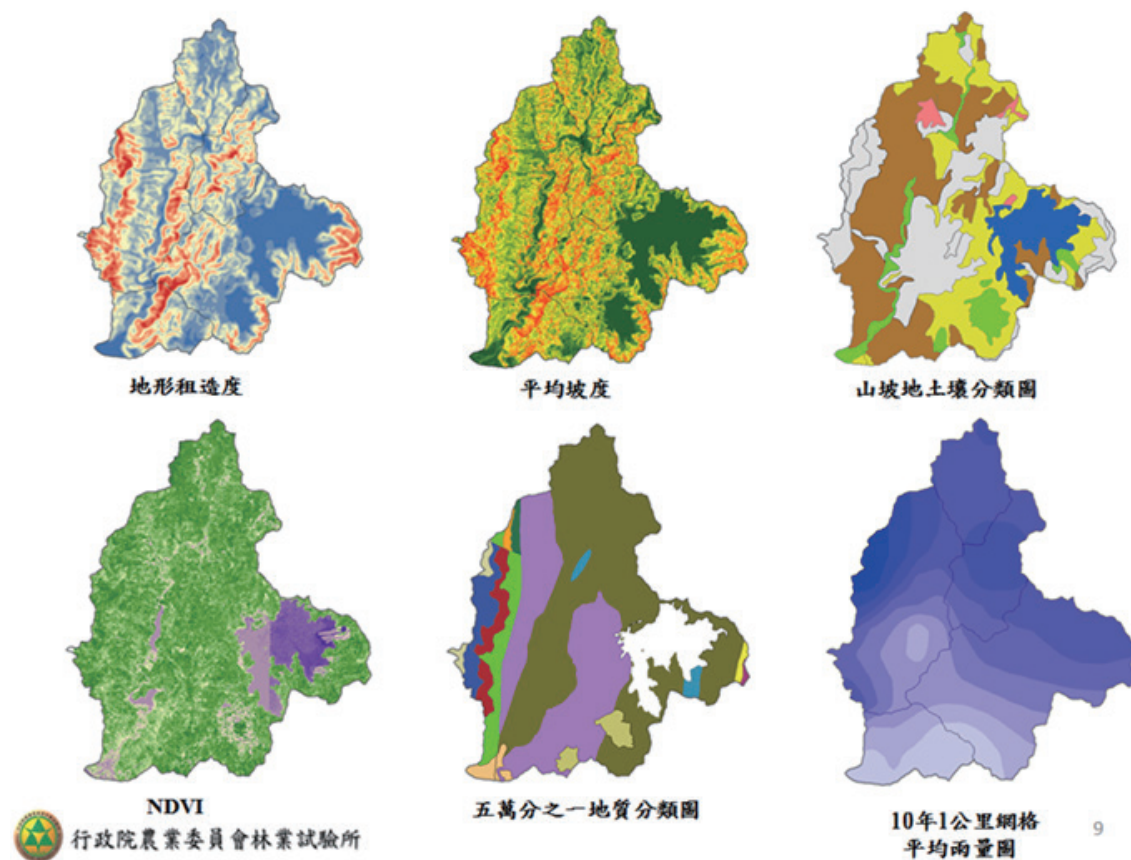


圖 5 前 6 個影響指標分級 (分類) 圖

Fig.5 Classification (or category) map of 6 obvious impact factors.

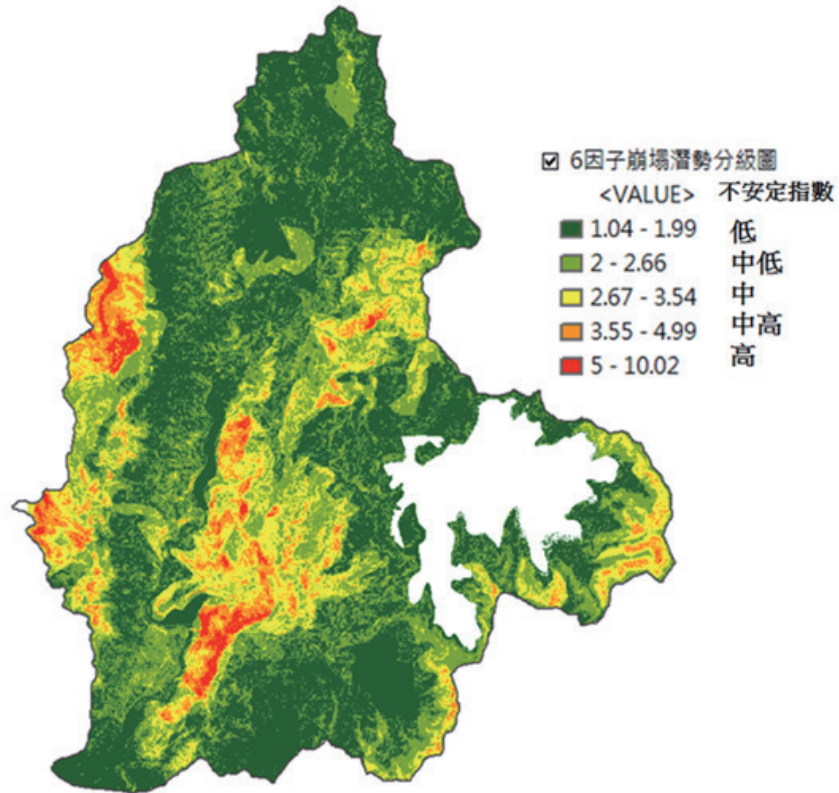


圖 6 崩塌潛勢機率 5 等分級圖  
Fig.6 Landslide susceptibility map classified into 5 grades.

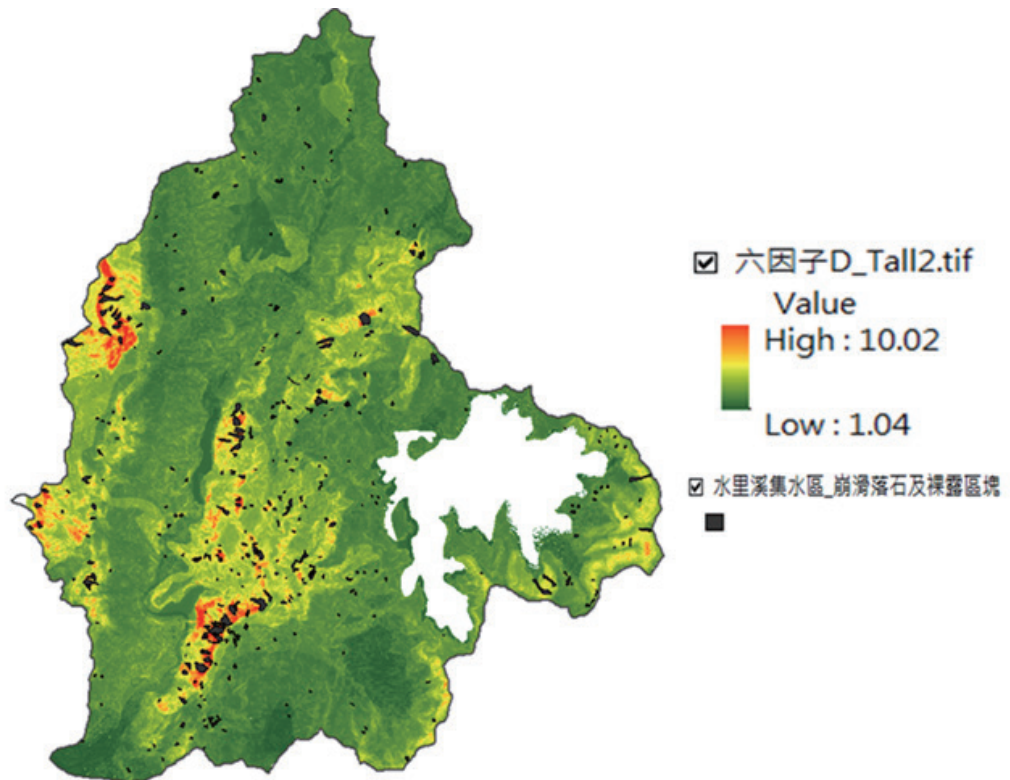


圖 7 崩塌潛勢機率圖與水里溪集水區歷年崩滑落石及裸露地區塊套疊圖  
Fig.7 Landslide susceptibility map of Shuili watershed overlaid with landslide rock fall and bared areas.



# 基於長期崩塌目錄所建立之治山防洪治理單元 量化分級方法

劉正千<sup>1,2\*</sup> 柯明勳<sup>1</sup> 溫慧霖<sup>1</sup> 傅桂霖<sup>3</sup> 張舒婷<sup>3</sup>

【摘要】受到極端氣候之影響，颱風豪雨之強度與頻率更難以測度，進而加劇了森林集水區崩塌發生的潛勢與危害。欲強化其經營與管理工作，需掌握崩場地之長期變化，並以科學量化的方法實施分級，據以擬定治理之對策。本文運用水土保持局集水區普查與林務局所建置台灣地區 12 年期詳盡之崩塌目錄，依照最適集水區的概念進行群組，並根據各區歷年崩塌面積及其標準差，計算每一個最適集水區之不安定指標，再依照自然斷點方式，區分為地表穩定、崩塌低活動、崩塌不穩定、崩塌嚴重、與大規模崩塌等 5 種區域。以水土保持局臺北分局轄區的新竹縣五峰鄉清泉子集水區為例，共有 4 條土石流潛勢溪流於 2004 年艾利颱風期間發生大面積土石崩塌，經水文分析後共有 22 個最適集水區。套疊 2005 年至 2016 年間之崩塌目錄，顯示主要崩場地均發生於艾利風災期間，之後崩場地逐漸復育，偶有零星崩塌之發生，唯 2008 年土場部落附近發生地滑現象，災情較為嚴重。有二處大規模崩塌區域，歷年平均崩塌率達 10% 以上，屬上游材料區，而連接土場部落、清泉部落、民都有部落的上坪溪兩側，則有多處大面積崩塌，屬崩塌嚴重區域及崩塌不穩定區域，整體崩塌率 2~5%。根據各最適集水區長期崩塌目錄所計算之不安定指標，確可提供治山防洪治理單元所需之量化分級方法。

【關鍵詞】森林集水區、崩塌潛勢、崩塌目錄、治山防洪、不安定指標、量化分級

---

<sup>1</sup> 國立成功大學全球觀測與資料分析中心

Global Earth Observation and Data Analysis Center, National Cheng-Kung University

<sup>2</sup> 國立成功大學地球科學系，電子郵件：ccliu88@mail.ncku.edu.tw

Department of Earth Science, National Cheng-Kung University, Email：ccliu88@mail.ncku.edu.tw

<sup>3</sup> 行政院農業委員會水土保持局

Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, The Executive Yuan of the Republic of China

## A QUANTITATIVE APPROACH FOR CLASSIFYING GOVERNANCE UNIT OF WATERSHED MANAGEMENT AND FLOOD MITIGATION BASED ON A LONG-TERM LANDSLIDE INVENTORY

Cheng-Chien Liu<sup>1,2\*</sup> Ming-Hsun Ko<sup>1</sup> Huei-Lin Wen<sup>1</sup> Kuei-Lin Fu<sup>3</sup> Shu-Ting Chang<sup>3</sup>

**【Abstract】** Extreme weather makes it difficult to estimate the intensity of typhoon rainfalls, which results in aggravating landslide potential and hazards in forested watersheds. To increase the efficiency of operations and management, it is needed to monitor landslide evolvement continuously, assess quantitatively the classification of landslides, as well as, establish landslide management plans. In this paper, landslide data sheets over 12 years defined by Soil and Water Conservation Bureau and Forestry Bureau are used. In order to accomplish the goal, the first step is to classify the watersheds by the optimum size. The second step is to determine unstable coefficients based on landslide areas over years and their standard deviation. The last step is to distinguish landslides into five types by using natural breaks classification: stable zone, high stability zone, low stability zone, severe landslide zone, and large-scale landslide zone. Take the Qingquan watershed in Wufeng Township, Hsinchu County for example, large-scale landslides occurred in four potential debris flow torrents when Typhoon Aere hit Taiwan in 2004. The Qingquan watershed is classified as 22 optimum watersheds after being processed by hydrologic analysis. The result from overlaying landslide data sheet of these 22 optimum watersheds from 2005 to 2016 shows major landslides occurred mostly during typhoon Aere. After typhoon Aere, vegetation recovery in the landslide zones was getting better, despite landslides occurred sporadically. Only in 2008, landslides occurred near Tuchang bulao caused severe damage. Two large-scale landslide zones, where the average rate of landslide occurrence is higher than 10%, are Debris-flow source areas. Several large-scale landslides occurred by two sides of Shangping Creek flowing through Tuchang bulao, Qingquan bulao, and Minduyou bulao, which are defined as low stability zone and severe landslide. Unstable coefficients determined by the long-term landslide data sheet of each watershed can serve as a tool to quantify the classification measures of mountain management and flood control of management units.

**【Key words】** forest watershed, landslide susceptibility, landslide inventory, watershed management and flood mitigation, unstable index, quantitative classification

## I、前言

台灣是自然災害頻發的熱點之一，尤其是受到來自土砂災害的威脅，為高居全世界前三名之高風險地區 (Dilley et al. 2005)。近年來受到全球氣候急遽變遷之影響，不僅改變了颱風豪雨之強度與頻率，更加劇了大規模崩塌發生的潛勢與危害 (Gariano and Guzzetti 2016)，類似 98 年莫拉克颱風所導致台灣山區大規模土石滑落與崩塌的事件，勢必將愈趨頻繁。土砂崩落與運移原為山區之自然現象，但因為台灣地質條件特殊，地狹人稠，一旦發生災害，所造成之損失極少侷限為單一災害，往往會直接或間接導致其他次要的災害，也就是所謂的「複合型災害」，再加上許多地區都有保全對象的考量，如何因應氣候變遷的威脅，推動整體性治山防災工作，據以防範土砂災害與其衍生之複合型災害威脅，保護人民的生命財產安全，是有為政府應戮力以赴的目標。

整體性治山防災之推動，是以「水、土、林、動、人」思維，考量「治山」、「防災」、「保育」及「永續」等四個面向，針對「土石流監測及預報」、「水庫集水區保育」、「治山防災」及「山坡地監督與管理」四大主軸，共同推動山坡地水土保持工作。為避免投入過度治理資源，並有效應用寶貴經費，山區之治山防洪工作是根據所劃設之治理單元，並予以區分為健檢維護區 (A 區)，分期治理區 (B 區)，基本保護區 (C 區)，山坡地內其他地區 (D 區)，再根據需求及保全對象評估整治工作。唯目前採用的分級原則，主要是根據前期治理是否有成效來加以判定。欲引進科學量化的方法實施分級，需全面掌握治理區內之地貌變遷與崩場地之長期變化，方能持續追蹤評估各項治理工程之成效。運用高空間分辨率衛星影像所建置台灣地區 12 年期詳盡之崩場地目錄 (Liu 2015, Liu et al. 2015)，提供了全台灣森林集水區與各重點治理區之崩場地位置、面積及數量等資訊，是一個對治理單元實施量化分級理想的資料來源。

本研究提出一個基於長期崩塌目錄所建立之治山防洪治理單元量化分級方法，依序說明如何依照最適集水區的概念對崩場地進行群組，並根據各區歷年崩塌面積及其標準差，計算每一個最適集水區之不安定指標。再依照自然斷點方式，區分為地表穩定、崩塌低活動、崩塌不穩定、崩塌嚴重、與大規模崩塌等 5 種區域。

再以新竹縣五峰鄉清泉子集水區為例，針對年間之變化進行分析，找出崩塌持續惡化、穩定、或已恢復植生之區域，證明根據最適集水區之長期崩塌目錄計算不安定指標，確可提供治山防洪治理單元所需之量化分級方法。

## II、多年期崩塌目錄

為建置台灣全島崩場地資料庫，協助治山防災、劣化地復育與防災救災等業務，林務局自 2011 年起，委辦了三期共七年的「運用光學衛星影像於全島崩場地判釋與災害分析」計畫。利用台灣自主控制的福衛二號，以其機動靈活的取像能力與高時空分辨率的影像特性，挑選了 2005-2016 年、每年 1-7 月間所獲取雲覆率較低之影像，使用「福衛二號影像自動處理系統」(Liu 2006) 與「遙測影像崩塌及陰影區專家輔助圈繪系統」(Liu 2015)，進行福衛二號影像處理與崩塌判釋工作，建置台灣全島之山坡地範圍，每年一期、共 12 期的「地區型」崩塌目錄。

一般現地調查崩場地的方式需耗費大量人力與時間，無法快速提供全面性的資料；若以人工方式在航空照片上直接圈繪 (Singhroy 1995, Singhroy, Mattar, and Gray 1998, Kumar, Martha, and Roy 2006)，雖然崩塌判釋的精度最高，但無可避免地會引入人工描繪邊界時產生的誤差，也需要耗費許多的人力與時間；而採用監督式分類法 (Nichol and Wong 2005b, a, 周毓嘉 2005, 洪瑞鄉 2005)、非監督式分類法 (Dymond et al. 2006)、及比值影像 (Cheng, Wei, and Chang 2004) 等自動分類的方法，雖可節省相當的人力與時間，準確度卻受到限制，無法提供可靠的崩塌目錄。

「遙測影像崩塌及陰影區專家輔助圈繪系統」(Liu 2015) 透過正規化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、綠度指標 (Greenness) 與全色態強度，可以自動且準確地圈繪非植生區域與暗區，如圖 1 所示。再以區域增長 (Region Growing) 的概念，將非植生區域與暗區圖層中不相連的資料分離成獨立的單元，使其具有獨立之空間屬性，如地理資訊與面積等。判釋人員依據判釋準則、專家判釋經驗及前期影像、全島假彩色立體圖、航遙測圖資供應平台等輔助資訊，對獨立的崩塌潛勢單元進行選取與切割，以精確率定出崩場地所在，快速選定並輸出陰影與崩塌區之向量圖層。不但可以大幅改善人工圈繪所需時間，更同時保有人工判釋等級的精度。經與農航所以人工判釋於相近日期在相同地區所拍攝之 25cm 航照圖的成果，進行準確度的交叉檢核後，得到崩塌判釋之平均整體準確度達 98%(林恩如 et al. 2013)。

應用福衛二號於 2005-2016 年間拍攝的影像與所建置之多年期崩塌目錄，為林務局委辦計畫之產出成果，可逕向林務局申請使用。經徵得林務局之同意，已將多年期崩塌目錄以向量圖磚的方式，發佈於水土保持局所建置的土砂災害空間資訊系統上 (<http://246gis.swcb.gov.tw>)，如圖 2 所示。

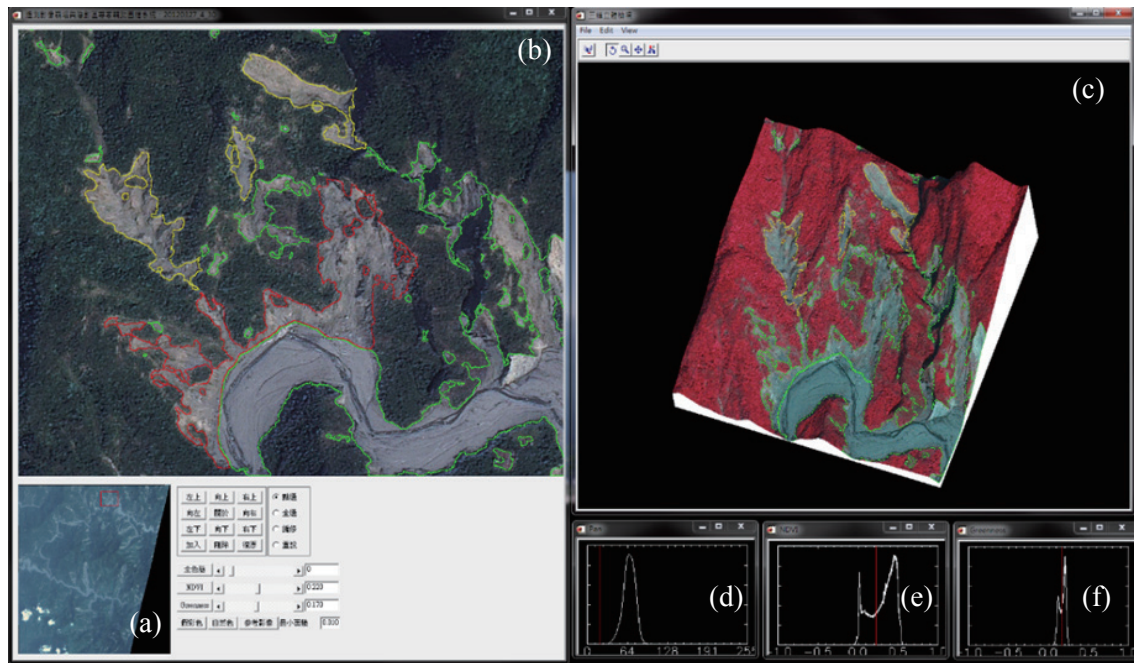


圖 1 遙測影像崩塌及陰影區專家輔助圈繪系統介面與操作說明。(a) 福衛二號真實自然色影像，紅色框線範圍以原解析度和線性對比增揚的方式呈現於 (b)，同樣以原解析度和標準假彩色組合，套疊在該區域之數值高程模型上，可在 (c) 視窗中自由平移、旋轉和縮放。該範圍之 (d) 全色態強度直方圖、(e) NDVI 直方圖、與 (f) Greenness 直方圖。紅色線段為系統所決定之局部閾值，據此自動圈繪出非植生區域（綠線）與暗區（白線），再由判釋人員依據判釋準則、專家判釋經驗及前期影像、全島假彩色立體圖、航遙測圖資供應平台等輔助資訊，快速選定（紅線）並輸出陰影（藍線）與崩塌區（黃線）。

Fig.1 Introduction to Expert Landslide and Shaded Area Delineation System and user interface.(a)True-color FORMOSAT-2 image; (b)In red frame, proposed image enhancement algorithms, maintaining same resolution as (a); (c)Standard false color composite processing of a digital terrain model could be transposed, rotated and scaled; (d) Histogram of the panchromatic image; (e) Histogram of NDVI; (f) Greenness histograms. The red line is defined by a local threshold determined by the system. The green line (non-vegetation area) and white line (shaded area) also are defined in the same method. Image interpreters would hit the red line, and export the blue line (shaded area) and the yellow line (landslide area) based on some data, such as the interpretation policy, expert experience, early stage images, 3D false color image of Taiwan, images from Taiwan Image Service and Supplier System.

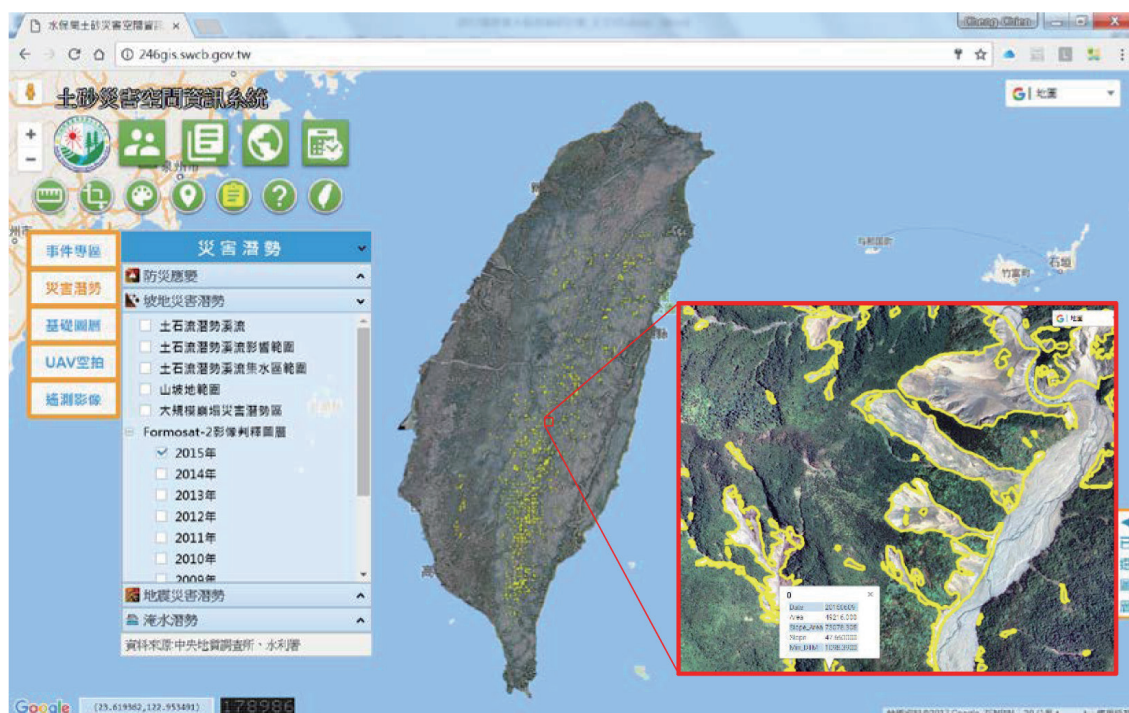


圖 2 應用福衛二號於 2005-2016 年間拍攝的影像與所建置之多年期崩塌目錄，已徵得林務局之同意，以向量圖磚的方式，發佈於水土保持局所建置的土砂災害空間資訊系統 (<http://246gis.swcb.gov.tw>)。

Fig.2 Applied of satellite images shoot by FORMOSAT-2 from 2005 to 2016, and landslide data sheets of years. Vector tiles approved by Forestry Bureau are shared to the system built by SWCB.

### III、治山防洪治理單元量化分級方法

#### (I) 治山防洪治理單元分級

行政院農業委員會水土保持局主管全國上游坡地水土保持及治山防洪工作，為有效應用經費，避免投入過度治理資源，已依「治山防洪分級制度」分類劃分「集水區治理單元」，並採用集水區內保全對象、土石流潛勢溪流及崩塌率等土砂災害潛勢做為治理優先順序編列經費辦理，其分級原則與執行策略如表 1 所示。唯其中幾項判定的關鍵原則，例如發生段的崩場地是否復育並已達穩定？輸送段的瓶頸段是否已打通而不再重複發生？堆積段的溪床變動是否已達穩定或堆積仍然嚴重且沖淤潛勢高？這些原則都與所謂的「穩定」條件有關。然而究竟需要根據多長的觀測時間？多廣的觀測範圍？才能判定為「穩定」？這些問題都需要提出一種可以具體量化「穩定」條件的方法來客觀加以解決。

探討崩場地系統時，經常使用坡度或集水區等不同單元來劃分範圍，但若從不同觀點出發，所劃分的範圍也會隨之而有所不同。例如從土石流災害的觀點來

看，可分為土石材料發生段、輸送段及堆積段等；但若從地質條件的觀點來看，則會用崩塌地的岩層屬性、岩體結構及崩塌原因來進行分類及劃分範圍。為避免不同認定者做出不同的決策，應該要考量子集水區之水地文特性，提出一個放諸四海皆準且全面一致的「集水區治理單元」劃分方法。

表 1 治山防洪治理單元量化分級表（資料來源：行政院農業委員會水土保持局流域綜合治理計畫網站 <http://cmp.swcb.gov.tw>）

Table1 Table of quantified the classification measure of mountain management and flood control of management units.

類別	分級原則	執行策略
健檢維護區 (A 級)： 經評估前期治理已有成效，致災風險低	發生段：崩塌地已穩定 輸送段：瓶頸段已打通 堆積段：溪床變動已穩定	● 進行構造物健檢及維護 ● 持續辦理集水區監測 ● 持續辦理防災疏散避難
分期治理區 (B 級)： 前期治理尚未完成，經評估已初具成效，致災風險已降	發生段：崩塌地尚未復育完成 輸送段：瓶頸段局部打通 堆積段：溪床沖淤潛勢高	● 持續配合治理計畫分年分期辦理，並滾動管理 ● 配合防災疏散避難
基本保護區 (C 級)： 經評估前期治理無明顯成效，致災風險高	發生段：崩塌地大難以復育、治理工程無法進駐 輸送段：土砂產量大 瓶頸段重複發生 堆積段：溪床堆積嚴重	● 尚未遷居前，採低強度治理工法處理 ● 如有需求，採臨時性防減災及災害基本控制 ● 強化防災疏散避難

## (II) 最適集水區

對山區之治山防洪工作而言，劃分「集水區治理單元」的最主要目的，是為了掌握崩塌地的時空變化，以量化其是否達成「穩定」的條件，並據以分級，依治理優先順序編列經費辦理。但考量實際產製崩塌目錄的衛星影像來源，於不同拍攝時期會有不同程度雲影遮蔽效應的限制，導致同一塊崩塌地在不同時期的影像上可能會有大小不同的變化，甚至因部分區域被遮蔽而變成兩塊或更多塊的小崩塌地。因此若單就一塊崩塌地去探討其隨時間的變化，所產生的噪訊會蓋過真正變化的趨勢，尤其是那些崩塌地一變多、多合一的情形，根本無法合理加以分析。而再從治理的角度來考量，也必須跳脫以單一崩塌地為單位的思考方式，將水地文特性相近的崩塌地加以群組，分區治理。因為那些介於崩塌地之間，尚未發生崩塌的區域，往往就是未來是否會擴大或反覆發生崩塌的關鍵，同樣需要規

劃、監控、與治理。因此，劃分「集水區治理單元」的工作，其實就等同於建立崩塌地群組的方法。

本研究提出根據「最適集水區」的觀念來群組崩塌地的作法。首先由數值高程模型進行「累積流量分析」，尋找合適的「水系流量門檻值」來劃定集水區，直到包含重大崩塌地（10 公頃以上）的集水區數量可以達到最大值，此「水系流量門檻值」所劃分的集水區，便是「最適集水區」。此作法的詳細操作流程如圖 3 所示。根據「最適集水區」的觀念來群組崩塌地的方法，是由基本的水文觀點出發，在臺灣地區所使用的數值高程模型的精度及解析度都很高，相對其他水地文資料也比較容易取得，即使是對於不同的研究地區，計算的結果都具有一致性及再現性。在林務局委辦的「運用光學衛星影像於全島崩塌地判釋與災害分析」計畫中，「最適集水區」的觀念便首次被提出，用以探討崩塌地的年際與年間變化，並修正陰影對崩塌面積的影響。「最適集水區」的範圍，與林務局所訂定各事業區之「林班」界相當一致。

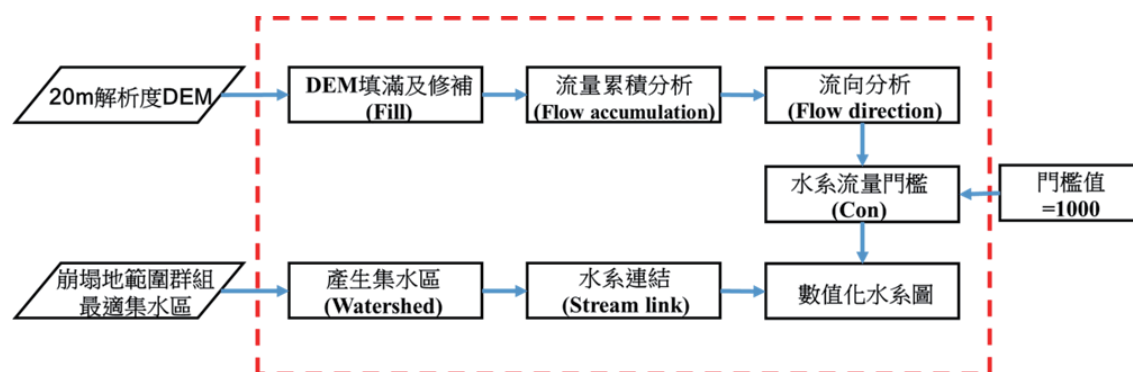


圖 3 應用「最適集水區」群組崩塌地，進而劃分「集水區治理單元」的流程

Fig.3 The procedure of classifying watershed management units based on the optimum watershed size

### (III) 不安定指標

就觀測範圍大小而言，可以根據前述所劃分的「最適集水區」來探討；就觀測時間區間而言，則應該盡可能地使用所有可獲取觀測資料的時間區間— 2005-2016 年。對這些時空範圍所得到的崩塌地變動資訊進行分析，就可以得到具體量化山坡地是否達成「穩定」的條件。要注意的是各「最適集水區」的範圍大小不同，考慮不同時期陰影的不同影響，需對崩塌面積進行陰影修正。而所求得各區域內崩塌地的總面積也不應該直接加以比較，因為已經有長達 12 年的崩塌目錄，可以透過計算「最適集水區」內歷年崩塌面積之「標準差」，就可以了解該區崩

場地變動的趨勢。若標準差的值較小，代表該區崩場地歷年變動範圍小，相對比較穩定；若標準差的值較大，則代表該區崩場地歷年變動範圍較大，相對也比較不穩定。

本研究建議使用五級的「不安定指標」(unstable index) 來分別代表不同程度的穩定情形，如表 2 所示。將所關注的整個研究區域內、所有「最適集水區」歷年崩場面積的標準差進行統計分析，以自然斷點(Natural Breaks) (Jenks 1967) 的方法計算「不安定指標」，便可以決定整個研究區域內各「最適集水區」相對的穩定程度。需要特別強調的是，以自然斷點法所決定的門檻值並非絕對值，主要用途為評估研究區域內，易發生崩塌的熱點，這些門檻值並不一定適用於其他的研究區域。但是如果將全台灣山坡地範圍的所有資料一併加以分析，的確可以得到一組絕對的門檻值。使用這些門檻值，就可以量化分析各治理單元地貌變異程度，評估易崩塌熱點，並於各治理工程竣工後，長期追蹤上游崩塌材料區之最新狀況，以評估現行治理與未來規劃之策略。

表 2 不安定指標分級表  
Table2 Grading scale chart of unstable coefficients

不安定指標	分級	說明
1	地表穩定區域	歷年來未發生崩塌或偶有零星崩塌之穩定區域，且自然復育良好不易受災害破壞
2	崩塌低活動區域	雖曾有災害發生崩塌，但崩塌面積變化較小或明顯復育情形之區域
3	崩塌不穩定區域	發生過災害區域，產生之崩塌面積較大或災害後復育情形較不明顯之區域
4	崩塌嚴重區域	崩塌面積大或歷年反覆發生崩塌之區域
5	大規模崩塌區域	發生嚴重災害區域，產生大規模崩塌之區域

#### IV、結果與討論

以臺北分局的新竹縣五峰鄉清泉子集水區為例，該區為民國 93 年艾利颱風重災區，區內有四條土石流潛勢溪流發生大面積土石崩塌，主要保全對象為土場部落、清泉部落、民都有部落。經水文分析後清泉子集水區共有 22 個最適集水區，套疊民國 94 年至 105 年間所判釋的崩塌圖層，如圖 4 所示，區內主要崩場地發生於艾利風災時，隨後崩場地逐漸復育，偶有零星崩塌之發生，唯民國 97 年土場部落附近發生地滑現象，災情較為嚴重。

透過不安定指標的計算及分級，可以得到表 3，從圖 8 可清楚的看到崩塌危害程度及影響的範圍，清泉子集水區有二處大規模崩塌區域，歷年平均崩塌率達 10% 以上，屬上游材料區，而連接土場部落、清泉部落、民都有部落的上坪溪兩側，有多處大面積崩塌，屬崩塌嚴重區域及崩塌不穩定區域，整體崩塌率 2~5%。依照現行之治理單元分級原則，清泉子集水區主要範圍都被分級為「治理中期之分期治理區」(B+ 區)。根據本研究提出之方法，分別計算 22 個「最適集水區」之「不安定指標」，部分區域屬地表穩定區域，而另有部分區域為崩塌嚴重區域，該分析結果的資訊對現行治理與未來規劃，提供另一層面的考量。

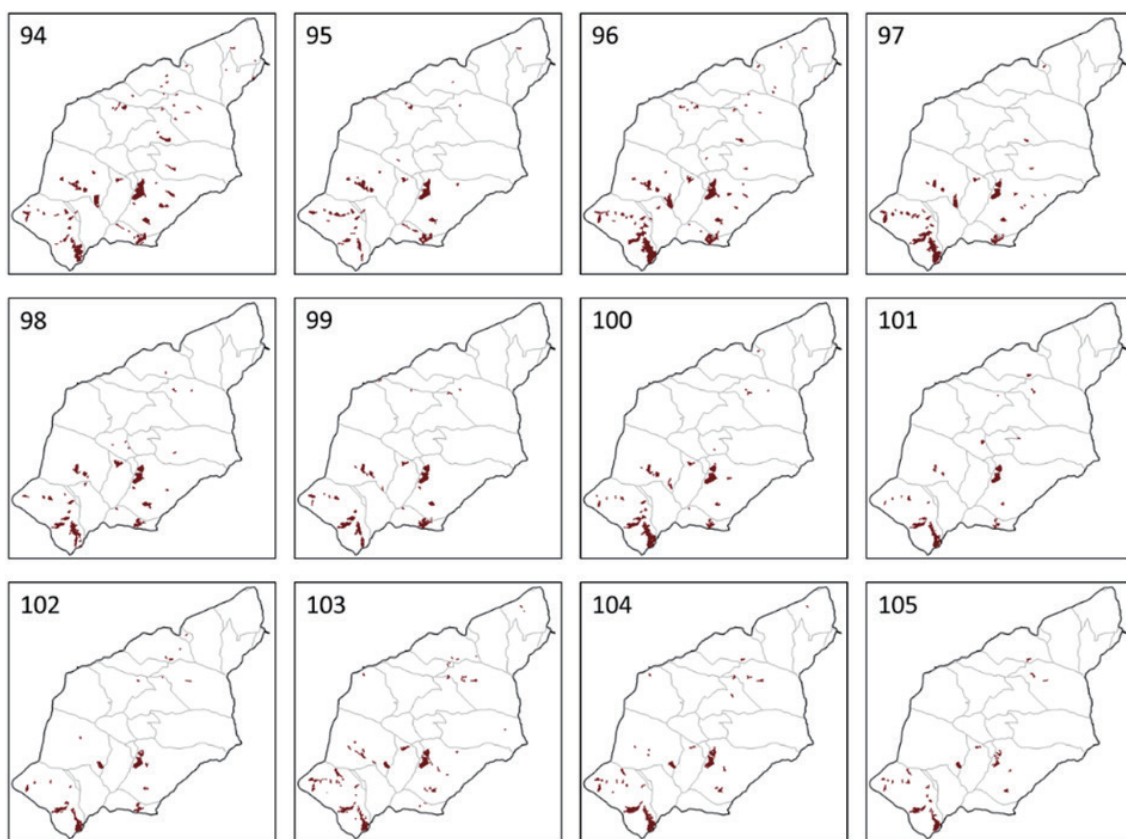


圖 4 新竹縣五峰鄉清泉子集水區之「最適集水區」與歷年崩塌地之空間分布

Fig.4 Locations of landslides over years of 22 optimum watersheds of the Qingquan watershed in Wufeng Township, Hsinchu County.

再將其不安定指標分級結果套疊至 Google Earth，配合歷年影像及地形來呈現大規模崩塌區域，以編號 22253 最適集水區為例 (圖 5)，集水區面積 298.04 公頃，艾利颱風後崩塌面積為 16.24 公頃，之後 96、97 年崩塌擴大至 29.58 公頃佔全集水區的 10%，直至 105 年仍有 13.98 公頃的崩塌地，不安定指標 5，屬「大規模崩塌區域」應特別關注的上游材料區。

表 3 新竹縣五峰鄉清泉子集水區之「最適集水區」歷年崩塌面積及其不安定指標  
Table3 Landslide hazard areas of years and the unstable coefficients of 22 optimum water-sheds of the Qingquan watershed in Wufeng Township, Hsinchu County.

編號	集水區面積	歷年崩塌面積 (公頃)												標準差	不安定指標
		94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105		
20894	11.23	0.37	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01110	4
21735	324.94	9.36	5.81	9.98	6.36	3.81	4.11	4.75	1.46	2.56	4.05	2.71	1.80	0.00843	4
21897	372.25	18.69	11.93	14.92	11.09	11.71	11.19	10.75	7.65	7.41	10.33	9.08	3.93	0.01003	4
22062	108.72	1.13	1.11	1.52	1.04	2.51	1.14	0.95	0.00	0.00	1.30	0.54	0.70	0.00620	4
22253	298.04	16.24	10.24	29.37	29.58	15.86	15.17	21.38	14.67	12.43	16.27	19.87	13.98	0.02062	5
20610	150.57	0.53	0.42	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.16	0.00	0.00128	2
20759	11.29	0.18	0.00	0.29	0.33	0.00	0.00	0.21	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.01130	5
20928	163.21	0.47	0.10	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.70	0.71	0.36	0.36	0.38	0.00162	3
21045	89.31	0.32	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00126	2
21084	106.23	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00029	1
21100	155.90	1.84	1.10	1.42	0.00	0.00	0.39	0.00	0.10	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00420	3
21191	270.83	1.16	0.23	0.50	0.00	0.51	0.18	0.70	0.47	0.29	1.27	1.09	0.83	0.00153	2
21414	145.41	2.46	0.00	1.47	0.54	0.00	0.27	0.00	0.00	0.10	0.42	0.70	0.00	0.00520	3
21704	277.64	0.83	0.00	0.32	0.36	0.21	0.00	0.00	0.20	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00089	2
22057	76.77	4.40	5.41	5.81	4.12	3.36	5.82	2.34	1.40	2.07	0.23	0.00	0.00	0.02899	5
22061	7.39	0.12	0.12	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00853	4
22191	117.37	0.06	0.21	0.39	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00120	2
21628	73.18	0.00	0.16	0.00	0.00	0.39	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00327	3
20713	175.81	0.00	0.00	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00073	2
21512	58.93	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00098	2
21793	10.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00026	1
21320	207.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.22	0.00	0.00040	1

以編號 21735 最適集水區為例 (圖 6)，該集水區面積 324.94 公頃，崩場地發生於土場溪支流及潛勢溪流竹縣 DF044，由歷年崩塌曲線圖來看從 94 年 9.36 公頃，至 98 年 3.81 公頃之後崩場地漸趨穩定，從大面積的崩塌到反覆發生者，不安定指標 4，屬「崩塌嚴重區域」。

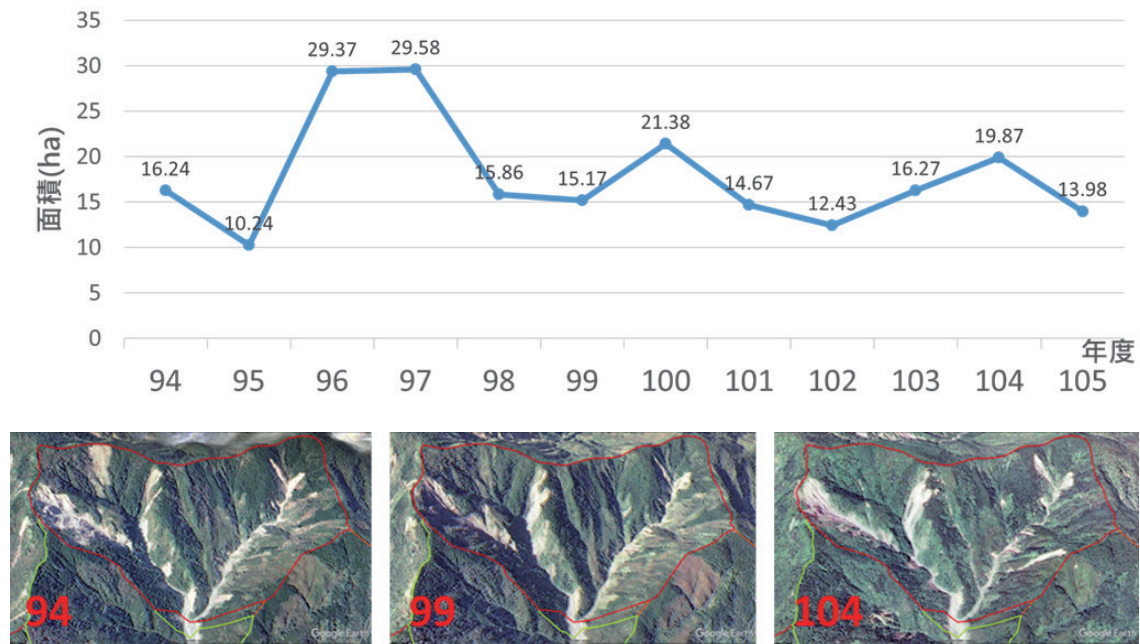


圖 5 新竹縣五峰鄉清泉子集水區編號 22253 之「最適集水區」歷年崩塌面積，與 94、99、104 年之衛星影像。此區之不安定指標 5，屬「大規模崩塌區域」

Fig.5 Landslide hazard areas of years of optimum watershed, No.22253, of the Qingquan watershed in Wufeng Township, Hsinchu County, and its satellite images in 2005, 2010 and 2015. The unstable coefficient is 5, and classified as large-scale landslide zone.

再以編號 20713 最適集水區為例 (圖 7)，該集水區面積 175.81 公頃，麥巴來溪屬背風區域受強降雨事件影響較小，只有在 96 年河岸邊坡發生 0.45 公頃的崩塌地，其他時期則地表穩定無大災害，不安定指標 2，屬「地表穩定區域」。

圖 8 為應用本研究所建立之「治山防洪治理單元量化分級方法」，對新竹縣五峰鄉清泉子集水區所屬之 22 個最適集水區量化分級成果。由 2005-2016 年之多年期崩塌目錄可以發現，清泉子集水區內的確發生過為數可觀的崩塌事件，但是崩塌地的空間分布並不平均，主要是集中在幾個「最適集水區」。斜線網格所示即為根據現行之治理單元分級原則，分級為「治理中期之分期治理區」(B+ 區)的區域，其大部分的區域其實都屬於相對穩定的區域，只有幾個「最適集水區」才是崩塌地空間分布較集中之處。再計算各區之「不安定指標」，則可以量化各區崩塌地隨時間變動的趨勢，凸顯出崩塌熱點的區位，找出崩塌持續惡化、穩定、或已恢復植生之區域。本研究證明根據最適集水區之長期崩塌目錄計算不安定指標，確可提供治山防洪治理單元所需之量化分級方法。

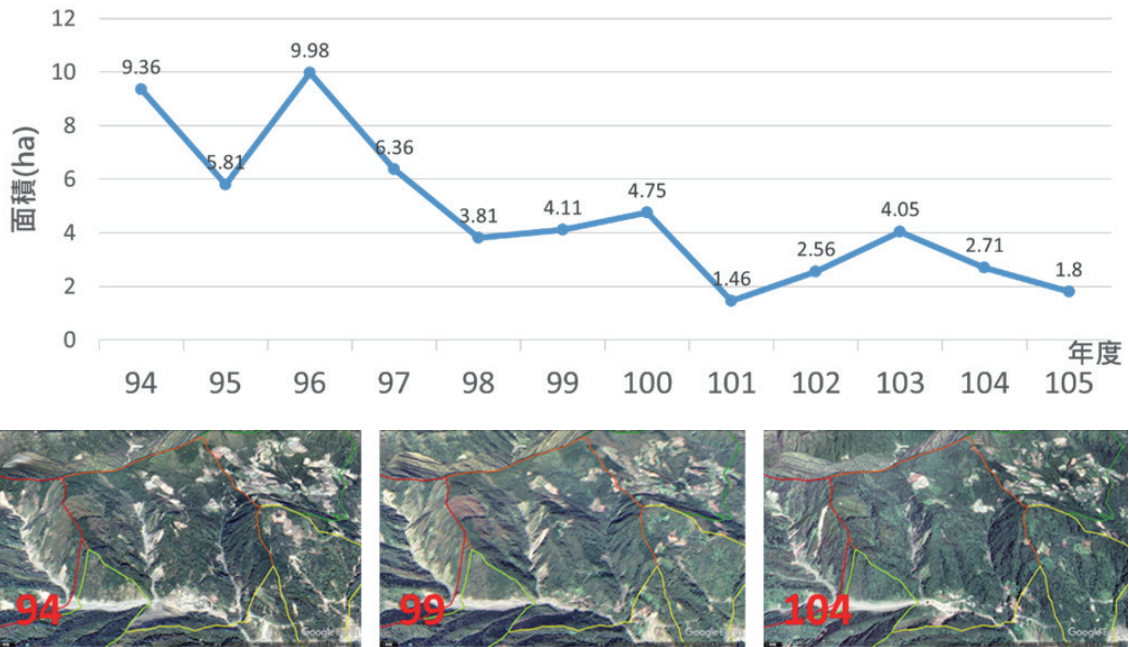


圖 6 新竹縣五峰鄉清泉子集水區編號 21735 之「最適集水區」歷年崩塌面積，與 94、99、104 年之衛星影像。此區之不安定指標 4，屬「崩塌嚴重區域」

Fig.6 Landslide hazard areas of years of optimum watershed, No. 21735, of the Qingquan watershed in Wufeng Township, Hsinchu County, and its satellite images in 2005, 2010 and 2015. The unstable coefficient is 4, and classified as severe landslide zone.

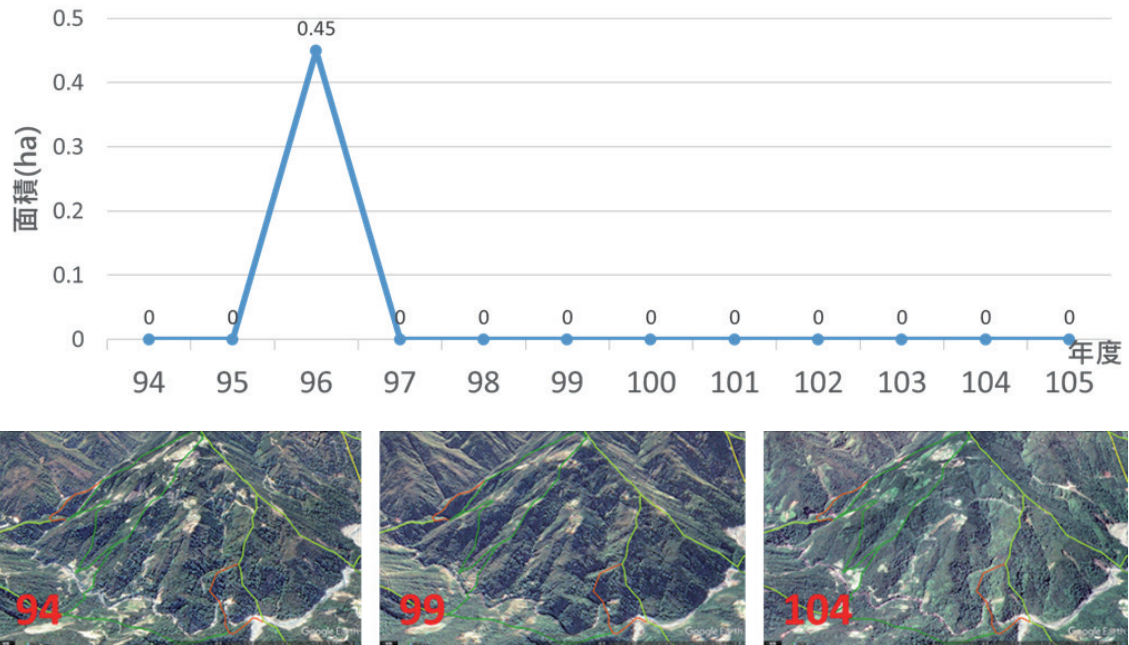


圖 7 新竹縣五峰鄉清泉子集水區編號 20713 之「最適集水區」歷年崩塌面積，與 94、99、104 年之衛星影像。此區之不安定指標 4，屬「地表穩定區域」

Fig.7 Landslide hazard areas of years of optimum watershed, No. 20713, of the Qingquan watershed in Wufeng Township, Hsinchu County, and its satellite images in 2005, 2010 and 2015. The unstable coefficient is 4, and classified as stable zone.

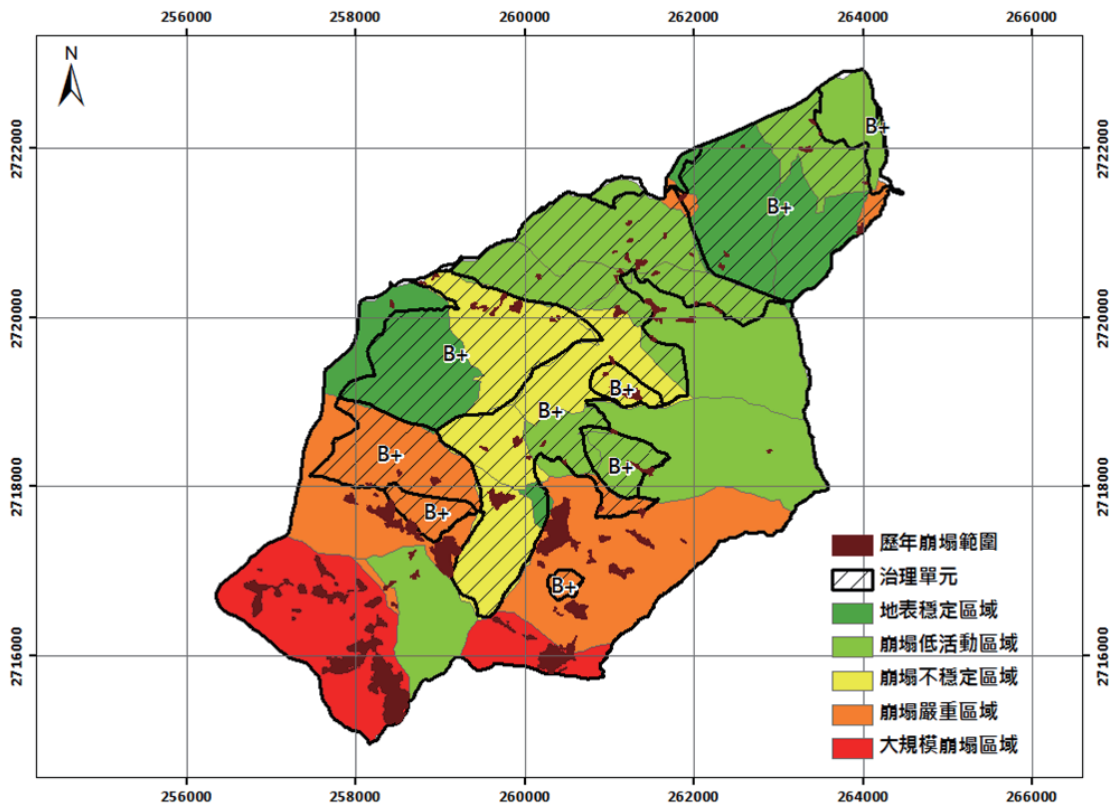


圖 8 應用本研究所建立之「治山防洪治理單元量化分級方法」，對新竹縣五峰鄉清泉子集水區之量化分級成果

Fig.8 The outcome of applying the classification qualified measures of mountain management and flood control of management units to watersheds of the Qingquan watershed in Wufeng Township, Hsinchu County.

## V、結論

本研究提出了一個基於長期崩塌目錄所建立之治山防洪治理單元量化分級方法。由新竹縣五峰鄉清泉子集水區的例子證明，不安定指標的確可以量化各區崩場地隨時間變動的趨勢。不過以自然斷點法所決定的門檻值並非絕對值，主要用途為評估研究區域內，易發生崩塌的熱點，這些門檻值並不一定適用於其他的研究區域。未來將會使用全台灣山坡地範圍的所有資料一併加以分析，得到一組絕對的門檻值。使用這些門檻值，就可以量化分析各治理單元地貌變異程度，評估易崩塌熱點，並於各治理工程竣工後，長期追蹤上游崩塌材料區之最新狀況，以評估現行治理與未來規劃之策略。

相較於整個集水區的範圍，治理工程所及的區域多集中在主要發生崩塌區域的附近，若直接將治理的面積與崩塌的總面積、甚至是整個集水區的總面積加以

比較，不容易凸顯治理的成效。若應用本研究所使用的方法將整個集水區先劃分為數個「最適集水區」，由「不安定指標」找出幾個崩塌不穩定或嚴重之區域，分析這些區域在治理工程前後崩塌面積的變化，並根據重大災害發生前到工程治理後的時間區間來計算標準差，就可以明顯看到這些「最適集水區」的「不安定指標」值明顯降低，便可以凸顯治理的成效，達成定量評估的目標。

在應用福衛二號於 2005-2016 年間拍攝的影像與所建置之多年期崩塌目錄時要特別注意，於不同拍攝時期會有不同程度雲影遮蔽效應的限制，因此即使是根據「最適集水區」來統計分析崩場地的面積，還是需要同時考慮陰影的影響，對崩場面積進行修正，才能得到崩場地真正變化的趨勢。此外，治山防洪工作的重點除了掌握發生段之崩塌情形外，對於輸送段瓶頸是否打通，以及河道變異情況，都需要完整考量。因此「不安定指標」之計算，也應該同步考量河道與植生面積之變化。而除了探討因為自然災害所造成的崩場地之外，如何量化人為開發的影響以及保全對象的重要性，是未來值得繼續發展的方向。

## VI、誌謝

本文承行政院農業委員會水土保持局「氣候變遷下山坡地環境監測與變遷分析」（編號：1060104002B）計畫之支持，致使本研究得以順利完成，作者在此表達謝意。

## VII、參考文獻

- 周毓嘉. 2005. “東沙島土地覆蓋變遷之研究.” 碩士論文, 海洋環境資訊學系, 國立台灣海洋大學.
- 林恩如, 劉正千, 張智華, 鄭依凡, and 柯明勳. 2013. “運用福衛二號高時空分辨率多光譜影像於台灣全島崩場地判釋與災害分析.”
- 洪瑞鄉. 2005. “SPOT 衛星影像應用於桃園海岸林植生監測.” 碩士論文, 森林環境暨資源學研究所, 國立台灣大學.
- Cheng, K. S., C. Wei, and S. C. Chang. 2004. “Locating landslides using multi-temporal satellite images.” In *Monitoring of Changes Related to Natural and Manmade Hazards Using Space Technology*, 296-301. Kidlington, Oxford, U.K.: Elsevier.

- Dilley, Maxx, Robert S. Chen, Uwe Deichmann, Arthur L. Lerner-Lam, Margaret Arnold, Jonathan Agwe, Piet Buys, Oddvar Kjekstad, Bradfield Lyon, and Gregory Yetman. 2005. Natural disaster hotspots: a global risk analysis.
- Dymond, J. R., A. G. Ausseil, J. D. Shepherd, and L. Buettner. 2006. "Validation of a region-wide model of landslide susceptibility in the Manawatu-Wanganui region of New Zealand." *Geomorphology* 74 (1-4):70-79. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.08.005.
- Gariano, Stefano Luigi, and Fausto Guzzetti. 2016. "Landslides in a changing climate." *Earth-Science Reviews* 162:227-252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>.
- Jenks, George F. 1967. "The Data Model Concept in Statistical Mapping." In *International Yearbook of Cartography*, 186-190.
- Kumar, K. V., T. R. Martha, and P. S. Roy. 2006. "Mapping damage in the Jammu and Kashmir caused by 8 October 2005 M-w 7.3 earthquake from the Cartosat-1 and Resourcesat-1 imagery." *International Journal of Remote Sensing* 27 (20):4449-4459. doi: 10.1080/01431160600702376.
- Liu, Cheng-Chien. 2006. "Processing of FORMOSAT-2 daily revisit imagery for site surveillance." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44 (11):3206-3214.
- Liu, Cheng-Chien. 2015. "Preparing a landslide and shadow inventory map from high-spatial-resolution imagery facilitated by an expert system." *Journal of Applied Remote Sensing* 9 (1):096080-096080. doi: 10.1117/1.JRS.9.096080.
- Liu, Cheng-Chien, Ming-Hsun Ko, Yi-Ting Lin, Chung-Shiou Huang, and Chen-Yu Chen. 2015. "Nowcasting of landslides." *SPIE Newsroom*, 27 May 2015.
- Nichol, J., and M. S. Wong. 2005a. "Detection and interpretation of landslides using satellite images." *Land Degradation & Development* 16 (3):243-255.
- Nichol, J., and M. S. Wong. 2005b. "Satellite remote sensing for detailed landslide inventories using change detection and image fusion." *International Journal of Remote Sensing* 26 (9):1913-1926.
- Singhroy, V. 1995. "SAR INTEGRATED TECHNIQUES FOR GEOHAZARD

ASSESSMENT.” In *Natural Hazards: Monitoring and Assessment Using Remote Sensing Technique*, edited by R. P. Singh and R. Furrer, 67-78.

Singhroy, V., K. E. Mattar, and A. L. Gray. 1998. “Landslide characterisation in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images.” In *Remote Sensing: Inversion Problems and Natural Hazards*, edited by J. Susskind, V. Singhroy and S. Tanaka, 465-476.



# 自來水水質水量保護區實施水源保護環境信託之 可行性研究

王國樑<sup>1</sup> 葛餘恕<sup>1</sup> 李仲卿<sup>1</sup> 林鎮洋<sup>2</sup> 陳起鳳<sup>3\*</sup> 康世芳<sup>4</sup> 郭玲惠<sup>5</sup>

**【摘要】**自來水水質水量保護區受到自來水法規定，禁止有貽害水質水量之行為，且基於受限者得償之精神，具有水源保育與回饋金制度，用水人依用水量徵收水源保育與回饋費，用於上游保護區保育工作與回饋補償。環境信託是將環境信託給專業管理單位，透過民眾參與的積極力量，設計對該信託環境或土地最友善的保育方式，甚至可永久經營的目標。本文收集國內外相關實施經驗，嘗試將環境信託作法導入目前的自來水水質水量保育做法，探討其可行的運作機制，包含法令依據、經費來源、執行現況等各面向的建議，提出我國適用的水源保護環境信託制度。此制度中的委託人、受託人、監督者與管理者都應具有相關規定條件，使此制度經費受到良好的使用與監督，且信託做法也應集中對水源保育有直接幫助者。水源保護環境信託制度強調公私部門的合作，由公部門以獎助方式提供保育經費，由具有水源保育的非營利組織單位執行信託保育工作。此外，委託人之私有地地主也可與受託人合作執行保育。本文提出三種可行方案，包含經費來源、法律規定以及運作機制，都有相對應的建議，提供未來自來水水質水量保護區新的保育實施方式。

**【關鍵詞】**環境信託、自來水水質水量保護區、水源保育

## ASSESSING THE FEASIBILITY OF SOURCE WATER PROTECTION ENVIRONMENTAL TRUST POLICY

Kuo-Liang Wang<sup>1</sup> Yu-Sue Ge<sup>1</sup> Chung-Chin Lee<sup>1</sup> Jen-Yang Lin<sup>2</sup> Chi-Feng Chen<sup>3\*</sup>  
Shyh-Fang Kang<sup>4</sup> Ling-Hwei Kuo<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 經濟部水利署保育事業組

<sup>2</sup> 台北科技大學土木系教授

<sup>3</sup> 文化大學土地資源系副教授，\* 通訊作者：cqf2@faculty.pccu.edu.tw。

<sup>4</sup> 淡江大學水資源與環境工程系教授

<sup>5</sup> 台北大學法律系教授

**【 Abstract 】** The drinking water protection area is under the protection of the Water Supply Act and any practices damaging water quantity or quality are limited or banned. In order to compensate the limited right of people living in these area, the drinking water users have to pay a fee for conservation and compensation purpose. Environmental trust is strengthening the force of local professional groups on sustainable environment protection. This study is aimed to analyze environmental trust strategy and to assess its feasibility on implementing drinking water protection area. Suggestions for legislation, institution, and finance modification are made. Special conditions should be designed for client, trustee, supervisor, and manager to ensure the budge use. Trust practices are also focus on providing direct benefits for source water conservation. Source water protection environmental trust emphasizes the cooperation between public and private organizations, which is public government provide financial assistance and private groups execute trust tasks. Three alternatives are suggested in the study as a new conservation measure for drinking water protection areas.

**【 Key words 】** Environmental trust, Drinking water protection area, Source water conservation.

## I. 前言

近年受到氣候變遷的影響，水資源穩定供應的挑戰更劇，水資源保育的工作愈顯重要。自來水水質水量保護區（以下簡稱保護區），依自來水法第 11 條規定管理，且設計水源保育與回饋之機制，下游用水人應繳交水源保育費用，做為上游水源地居民及土地受限的補償，以及水源地相關的保育措施。然而，保護區範圍廣大，受到相關單位管理人力有限、水資源環境變遷等影響，且歷年在水源保育與回饋之使用上屢生爭議，亦宜有妥適之因應對策，針對土地之使用管制，現階段除土地受限補償之機制外，宜有更多元化且同時符合水資源保育需求之作法，並促進水源保育與回饋費之有效運用。

保護區之管理，除政府機關之努力外，民眾對於在地環境之認同與關心，亦為重要之因素。國外實施環境信託，即為公私協力的一種方式，透過民間團體的專業與人力，結合在地居民共同保護環境，不僅強化民眾對於環境及保育工作之認同，也有助於保護區之管理效率。環境信託在國外行之有年，此制度是否能引進作為保護區的保育方式之一，為本研究探討課題。

行政院環境保護署於 2003 年 5 月已經頒布「環境保護公益信託許可及監督辦法」，但受限於經費來源、整合不足及欠缺法令依據等因素不易推動，迄今僅有一個案例。本研究對象為保護區的環境信託，為與環保署制度有所區隔，本文

採用「水源保護環境信託」為名。水源保護環境信託，其政策動機主要目的為改善現有水源保育與回饋制度之困難，加強現有水源保育制度的效能。主要政策動機可歸納為以下三點：（1）水源地保育需要更多的非工程措施，加入地方協力的非工程作法，提高保育工作效率。（2）改善保育與回饋制度失衡現象，現有水源保育與回饋費的使用項目不均，若能增加非工程保育措施，使費用使用於當地的保育工作，可平衡此費用的支用項目，提高費用正當性。（3）加強公私協力作法，公部門人力經費有限，保護區範圍廣大，恐無法提供適時適地的全面性保護。透過環境信託，將私有土地在信託期間進行正面管理，可保證該土地在信託期間不會有貽害水質水量之行為，達到水質保護效果。更重要為，此管理保護工作由地方專業團體組織來執行，達到公私協力保護環境的最終目標。

## II. 國內外環境信託實施經驗

國外環境信託最早開始於一百多年前英國的國民信託（National Trust），英國國民信託歷經一百多年，其中亦有不同發展階段，至較新的美國與澳洲經驗。國外環境信託的發展，從最開始的民間對民間的做法（英國），轉變到民間執行，政府提供部分資助（日本、美國、加拿大、澳洲）方式，在英國國民信託早期年代，由於經費拮据，也曾修改法令，讓地方政府有法源依據提供經費，協助國民信託的操作。政府制訂相關法令，投入部分經費鼓勵環境信託，並成立環境信託基金以及專責管理機關，此作法與從水源保育與回饋制度提供經費推動環境信託，理念相同。

以下簡要說明英國、日本以及我國自然谷環境信託案例經驗：

### 1. 英國 - 國民信託 National Trust

西元 1884 年後，工業革命帶動英國整體經濟的繁榮與興盛，發展的過程中卻造成環境污染和古蹟破壞，英國國民信託的想法於是誕生。三位慈善家 Octavia Hill、Robert Hunter、Hardwicke Rawnsley 於 1895 年成立英國國民信託以扮演國家守護者的角色，其主要目的在於保護歷史古蹟和綠地。

1907 年由羅伯特·亨特先生（Robert Hunter）起草《國民信託法案》（National Trust Act）並由英國國會通過。該法第 4 條第 1 項明定國民信託的宗旨係為保護自然環境與歷史文化資產；同條第 2 項明定可以以購買、獲贈的方式取得土地、

建築物或其他財產來達成國民信託的宗旨；最重要的是在第 21 條給予國民信託宣告名下信託財產是不可讓渡（inalienable）的權力。《國民信託法案》的通過更確認該組織「推動以造福全體國民、土地之美與歷史資產之永久保存」之宗旨，鼓勵個人或團體委託或捐贈歷史遺產、土地、房地產等，交予信託組織經營管理。此信託為註冊的慈善團體，其作業完全與政府分開獨立。但該信託執行過程中，其相關法規亦陸續修改，以幫助此信託執行更順利，除了一開始的信託財產不可讓渡，提高民眾捐贈的意願外，之後增加建物、政府財政支援等，而後未來使繼承城堡或莊園的後代貴族願意捐贈城堡古蹟，英國的財政法亦修改遺產稅的規定，使得後代繼承城堡或莊園但付不起巨額遺產稅的人，可以轉而委託給國民信託，但自己仍可住在該城堡中。

國民信託組織的財產取得和經營的方式有以下 4 種：

- (a) 捐贈（donation）：捐贈者將財產直接捐贈給國民信託組織。
- (b) 遺贈（bequest）：預立契約，在所有權擁有者過世後，將信託財產捐贈給國民信託組織。
- (c) 契約信託（covenanted）：針對信託財產簽訂契約，國民信託組織依著約定，行使信託財產及其環境進行保護、經營和管理。
- (d) 購置（purchase）：國民信託組織直接對保護的財產，以購置的方式能夠取得，並進行經營管理。

該信託經費的來源有：會費、捐贈、遺贈以及從商業運作所獲得的收入。商業運作的收入來源包括：該信託組織所經營的 61 家酒吧和旅館。國民信託組織通過向 350 萬會員收取會費，每年可以獲得近 2 億英鎊的收入；以及向遊客收取門票、禮品銷售等的旅遊觀光收入。國民信託組織將管轄的這些土地、海岸線和歷史建築，及其花園，變成現代人瞭解歷史、度假休閒，如觀光、徒步、單車、露營、衝浪等等的最好的場所，把有效地開發和利用做到了極致。其中，將農田草場出租給農戶，又收取了管理費用，又使得農田草場不至於荒廢。另外，該協會擁有 6 萬多志工，節約了大量的人力成本。

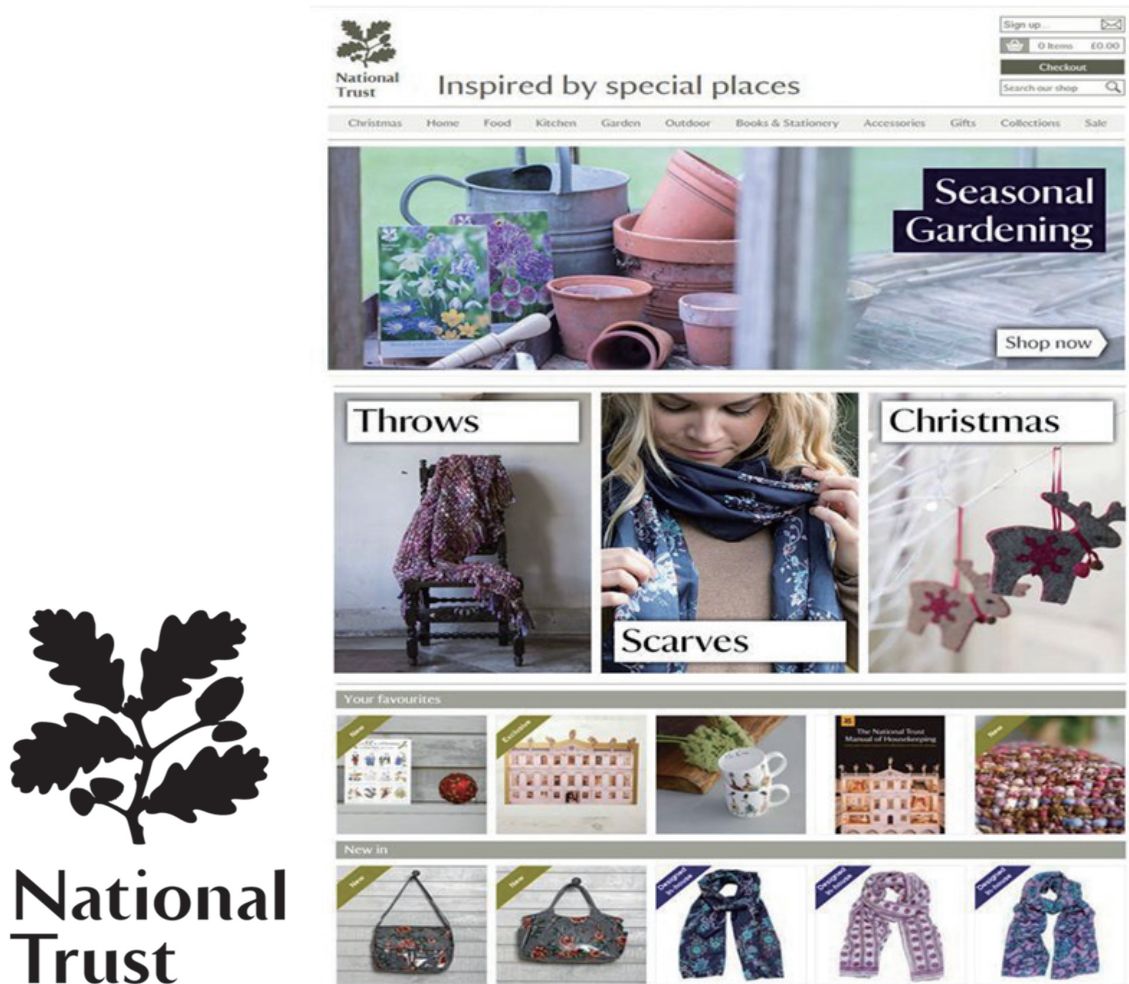


圖 1 英國國民信託標誌以及相關銷售商品  
Fig.1 National Trust and their products

迄今英國國民信託組織所擁有的信託資產有：土地 61 萬 2 千餘英畝（約 24 萬 8 千公頃）、歷史建築物 215 棟、庭園 130 處及海岸線 704 英哩、31 處自然保護區、7 個被列入聯合國教科文組織世界自然和歷史文化遺產名單的湖區鄉村景觀（ Lack district）和埃夫伯裡巨石陣（Avebury stone circle）等。多數的受託個案都為永久信託（held in perpetuity），對資源保護長遠規劃，提供了可信賴的保證。該組織發展至今百年歷史，會員超過 350 萬人，為英國最大的私人地主，也是全英國最具規模與影響力的環境自然與文史保育團體之一。

英國國民信託收入與支出資料，參考該會的 2014 年度報告，英國國民信託收入分為兩大項目一般收入與公益活動收入，一般收入中包含自一般捐款、特定項目收入（企業及可再生能源收入、酒店收入）、投資收益，如圖 2（A）。由於該協會經營已久，主要收入來自會員會費以及經營相關保護地點的營收（視為公

益收入)，比例超過 60%，第二主要來源則接受一般捐款，幾乎已無接受公部門的補助。英國國民信託支出亦分為兩大項目，一般支出與公益活動支出，一般支出包含了企業成本、投資管理等，而公益活動支出包含活動營運、財產維護、收購、宣傳等，屬於經營以及維護信託保護土地及建築物的成本支出，如圖 2 (B)。

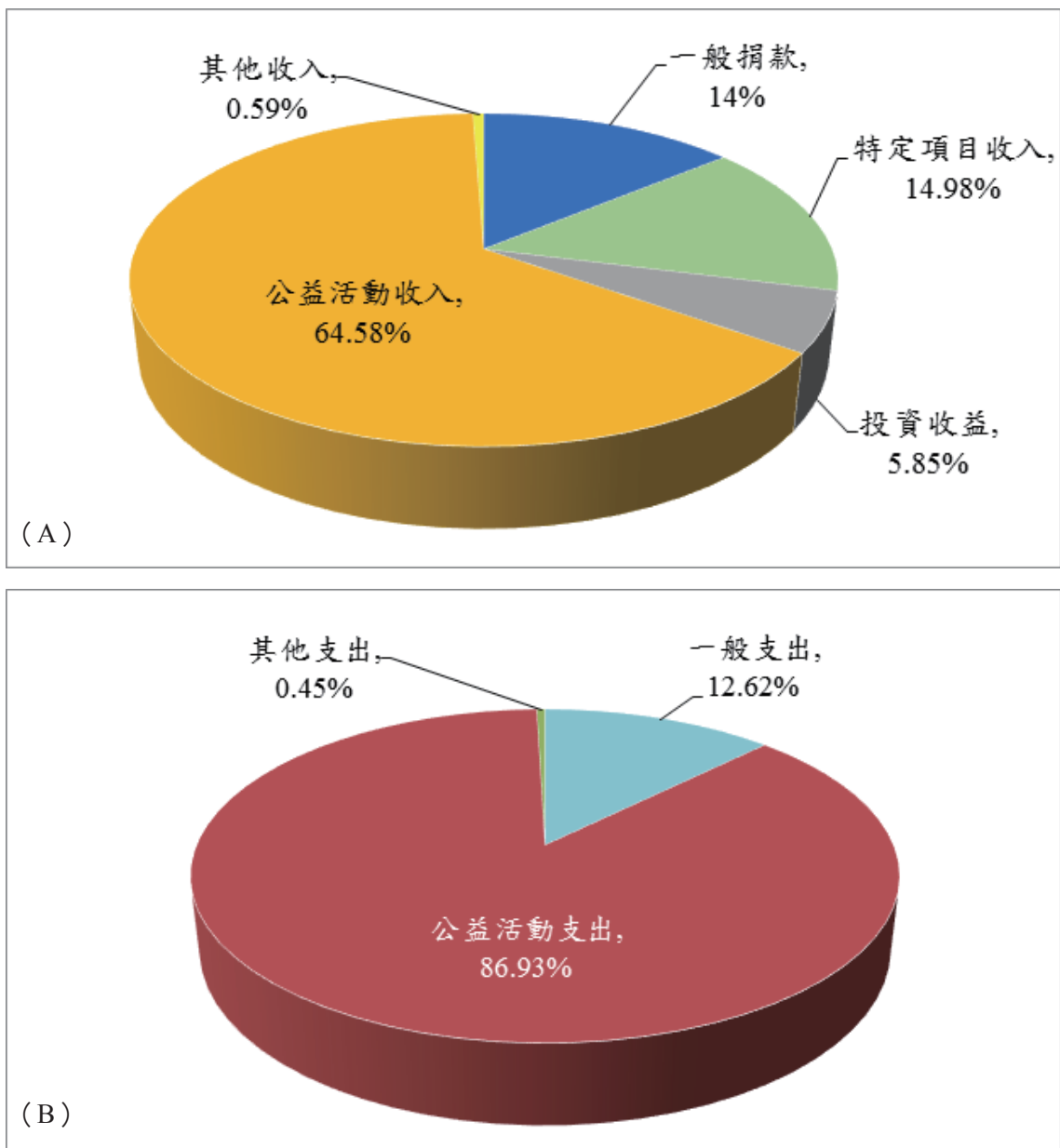


圖 2 (A) 英國國民信託 2014 年度經費收入來源，(B) 英國國民信託 2014 年度經費支出項目  
Fig.2 (A) Annual income analysis and (B) annual outcome analysis of National Trust in 2014.

## 2. 日本龍貓森林—財團法人トトロのふるさと財団

日本國民信託開始於 1964 年，市民與市政府合作設立「財團法人鎌倉風致保存會」，共同出資購買一部分土地，迄今雖已 50 年，但日本目前仍無國民信託法或環境信託法。但有鑑於日本全國各地國民信託團體與活動日趨增加，環境省自然環境局於 2004 年委託公益社團法人日本國民信託（National trust）協會出版「國民信託手冊」（環境省自然環境局，2004），指導民間團體如何推動國民信託。並於 2008 年修訂稅制法，將公益社團法人與公益財團法人亦納入適用對象，使各級地方政府、企業、團體及個人之募款或捐款可納入所得扣除對象，對後續募款或捐款活動助益甚大。

龍貓（となりのトトロ）為動畫大師宮崎駿於 1988 年之作品，主角龍貓居住的森林以東京近郊的埼玉縣狹山丘陵為藍圖。現實生活中，狹山丘陵因鄰近東京都，都市化的影響造成當地住宅需求增加，使當地的自然景色遭受破壞與威脅。為保護當地環境，龍貓故鄉基金會正式於 1990 年成立，號召民眾以捐款方式保護龍貓的家，並利用這些經費一共買下土地，從 1990 年至今以買下 31 塊土地（圖 3）。龍貓故鄉基金會，主要經費來源是以一般民眾募集、捐贈及會員所繳交之會費為主，另外其官方網站中也有販售龍貓的相關商品，例如：衣服、森林種子項鍊、月曆等。根據日本公益財團法人龍貓基金會 2014 年度年度報告，龍貓基金收入主要分為投資收益、會費、事業收益、補助金、一般捐款，其中收入來源為事業收益 52%，包含龍貓商品販賣、設施使用收入等。第二收入來源為一般捐款 27%。龍貓基金支出分為事業費、管理費及其他支出，其中其他支出包含了維護損壞資產、事業稅等等。而事業稅為製造販賣相關商品所需的各項成本（如圖 4）。



圖 3 龍貓森林信託地點（圖片來源：公益財団法人トトロのふるさと基金）  
Figure 3 The environmental trust locations of Totoro Forest (source: 公益財団法人トトロのふるさと基金)

龍貓故鄉基金會除了維護管理山地區裡的雜木林、溼地等，以維持多樣性山林的棲地經營管理，同時號召志工組成「想為龍貓森林做些什麼小隊（トトロの森で何かし隊）」，每月第一個星期日，會在預定的場所集合，進行林木管理作業，這樣的志工活動提供給有心守護山林的人實作機會。所保存下的土地，也是環境教育活動的良好場域。龍貓故鄉基金會於狹山丘陵提供預約導覽解說服務、協助辦理此地相關的活用學習活動、室內課程等，讓龍貓森林的管理運用經驗，能夠傳達給更多的人了解。

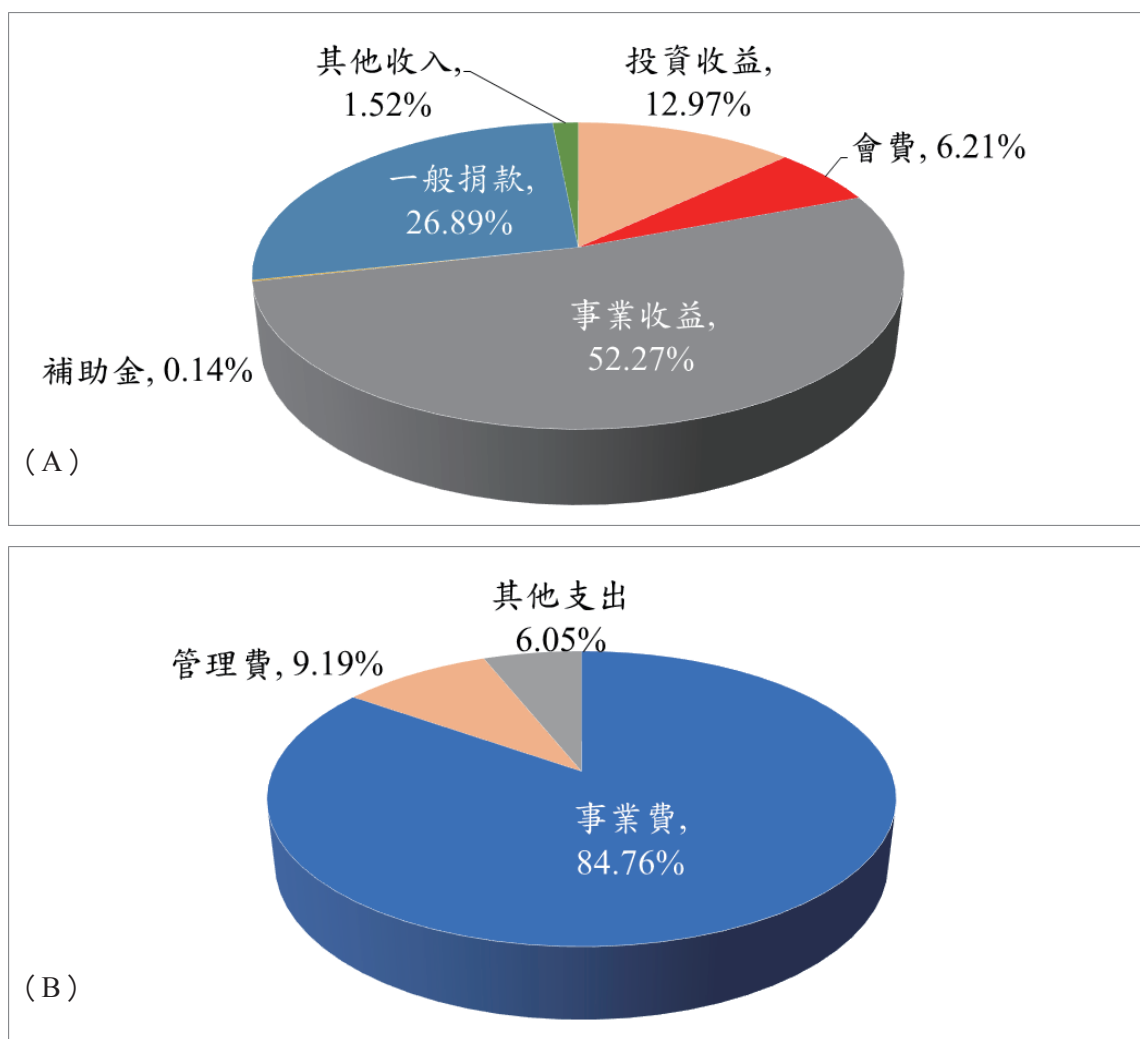


圖 4 (A) 日本龍貓森林 2014 年度經費收入來源，(B) 日本龍貓森林 2014 年度經費支出  
Fig.4 (A) Annual income analysis and (B) annual outcome analysis of Japanese Totoro Forest in 2014.

### 3. 國內環境保護公益信託自然谷環境教育基地

竹科前工程師吳先生、與兩位家庭主婦吳女士、劉女士買位於新竹縣芎林鄉與橫山鄉交界稜線上的南何山，占地 1.2 公頃之地，命名為自然谷。3 位地主將自然谷以公益信託方式委託荒野保護協會管理，為國內第一起環境信託案例，2011 年正式成為「環境保護公益信託自然谷環境教育基地」。國內的公益信託受到「信託法」以及「環境保護公益信託許可及監督辦法」保障委託人與受託人之間的法律關係。此案例中自然谷原地主為委託人，荒野保護協會為受託人，將自然谷作為環境教育使用。環保署是目的事業主管機關，協助雙方辦理申請許可，並扮演第 3 方角色替委託人監督受託人，落實環境公益信託活動。於 2014 年起，受託人改由台灣環境資訊協會執行相關任務。

自環境資訊協會接手公益信託自然谷環境教育基地，統計 2014 年度之經費收入及支出。2014 年度經費收入包含一般捐款、定期定額捐款、專案捐款及專案收入（圖 5），其中佔的比例最多為專案捐款，然而此項捐款為公益信託資產價值，包含了自然谷之土地、雨水回收設備及太陽能系統設備，非金錢，較無法與其他捐款或專案計畫相比，在經費結餘時無法納入計算。很明顯國內環境信託案例的經營幾乎全部仰賴捐款，且為專案捐款項目，非一般大眾捐款。因此在經營上較為辛苦。2014 年度經費支出包含了薪資支出及業務支出，業務支出包括租金、講座鐘點費、文具用品、印刷、餐費、辦公器材、交通等。此案主要支出為人事薪資費用（圖 5）。

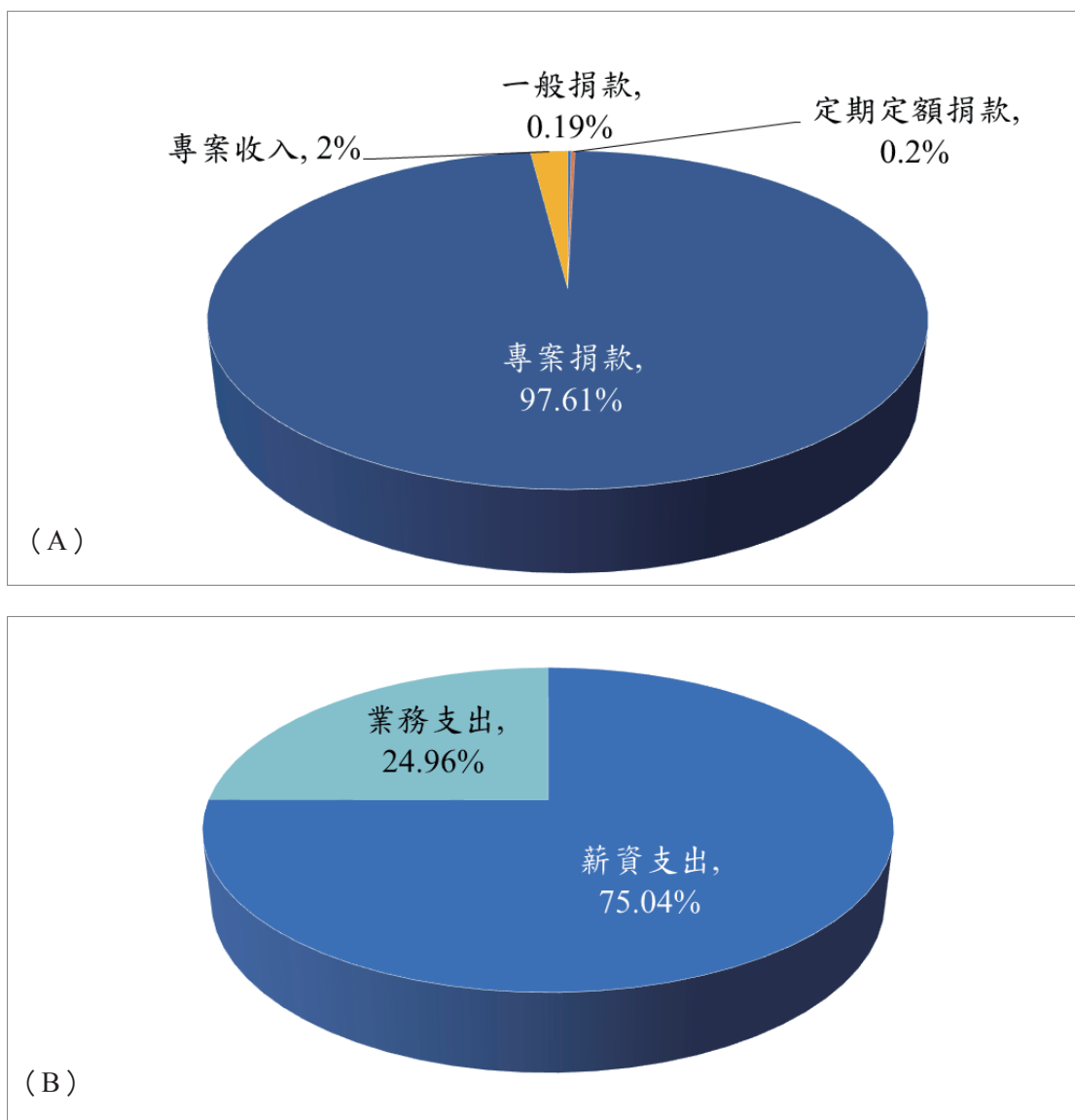


圖 5 (A) 國內自然谷基地 2014 年度經費收入來源，(B) 國內自然谷 2014 年度經費支出  
 Fig.5 (A) Annual income analysis and (B) annual outcome analysis of Natural Valley case in Taiwan in 2014.

目前國內外的環境信託運作機制有明顯差異，整理如表 1。其中最大差異點為法令與經費支援。國際上推動環境信託，如英國、美國、澳洲皆訂有專責的法令，雖國內亦有許可與監督辦法，但此辦法並無經費管理與機制。國際環境信託會成立專責基金管理單位，值得本研究參考。另外大眾捐款於環境信託時，若有稅制優惠可提高民眾意願，如日本經驗，在修改稅制優惠後，民眾捐款金額明顯提高。但須注意，在日本經驗中，可接受捐款的團體本身須經過嚴格的審定。

表 1 國內外環境信託運作機制比較  
Table 1 Comparison of local and international environmental trust.

面向	國外	我國
法規	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 環境信託法（美國、加拿大、澳洲）</li> <li>◆ 指導手冊（日本）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 許可及監督辦法</li> <li>◆ 手冊（環保署）</li> </ul>
經費	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 政府基金（美國、加拿大、澳洲、日本）</li> <li>◆ 民間募集</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 民間募集</li> </ul>
管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 基金專責管理單位（法定）</li> <li>◆ 民間組織</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 民間組織</li> </ul>
用途	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 多樣化（生態保育、資源保護等相關）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 環境教育、生態園區</li> </ul>
誘因	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 稅制優惠</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 無</li> </ul>

### III. 水源保護環境信託運作機制建議

環境信託乃「信託」的一種，是以環境保護且達成公共利益為目的之公益信託。「水源保護環境信託」則是在水源保護區內執行環境信託。「信託」是一個管道，主要是以集合民間資金與資源為手段，而其終極目的，是環境保護與生態保育。

水源保護環境信託運作機制的各項關係人如圖 6 所示，且定義與說明如下：

(1) 委託人：水源保護區內私有土地所有權人

委託人以水源保護區內的土地所有權人為對象，且以私有地為主。公有地的管理與規劃目前已有相對應的主管及目的事業主管機關負責，所以此制度委託人限制在水源保護區內的私有土地地主。由於土地所有權將轉移給受託人，因此雙方須簽定契約，受到法律保障。當契約期限到期後，土地所有權將再轉移回給原地主。

## (2) 受託人：具有執行受託目的（水源保育）之專業組織，當地優先

受託人是具有可執行水源保育環境信託目的任務的非營利組織，但此組織不限於水源保護區內，水源保護區外的其他相關團體亦能參與此計畫。若同時有多項計畫提出，應優先考慮當地團體，一方面對於該土地的瞭解程度較高，另一方面可回饋於地方。受託人必須是經過政府立案登記之團體，避免以個人名義提出申請，無實際執行能力。受託人申請計畫時，應提出過去有相關經驗證明，再由管理委員會進行審查。

## (3) 目的事業主管機關：行政院環境保護署（經濟部水利署）

國內環境信託的主管機關是行政院環境保護署，但水源保護區之主管機關為經濟部水利署，且該經費由經濟部水利署水源保育與回饋費支出。然而，未來兩署將合併在環境資源部，目的事業主管機關將直接改為環境資源部，為使事權統一，不建議經濟部水利署另定執行辦法。

## (4) 管理委員會：設置在主管機關下獨立運作之委員會

此基金會採獨立於既有專戶運用小組之外之管理委員會，由此管理委員會負責水源保育環境信託基金的使用與審查。審查受託人的計畫申請，確保經費合理使用。

## (5) 信託監察人

信託監察人的角色定位在監察受託人是否確實執行信託內容。但此監察人不介入事前主管機關管理信託基金方式，也不介入信託計畫的決定。監察人是在此信託計畫通過補助後，定期監察受託人的執行狀況，並提出相關建議。在公益信託中，由於受益人為不特定對象，信託監察人則為代受益人行使有關的權利，監督受託人（或單位）。由於此機制中已設計管理委員會，此委員會亦具有審查受託人的權利，因此信託監察人除了請其他專業法人或專家外，亦可由管理委員會成員擔任。

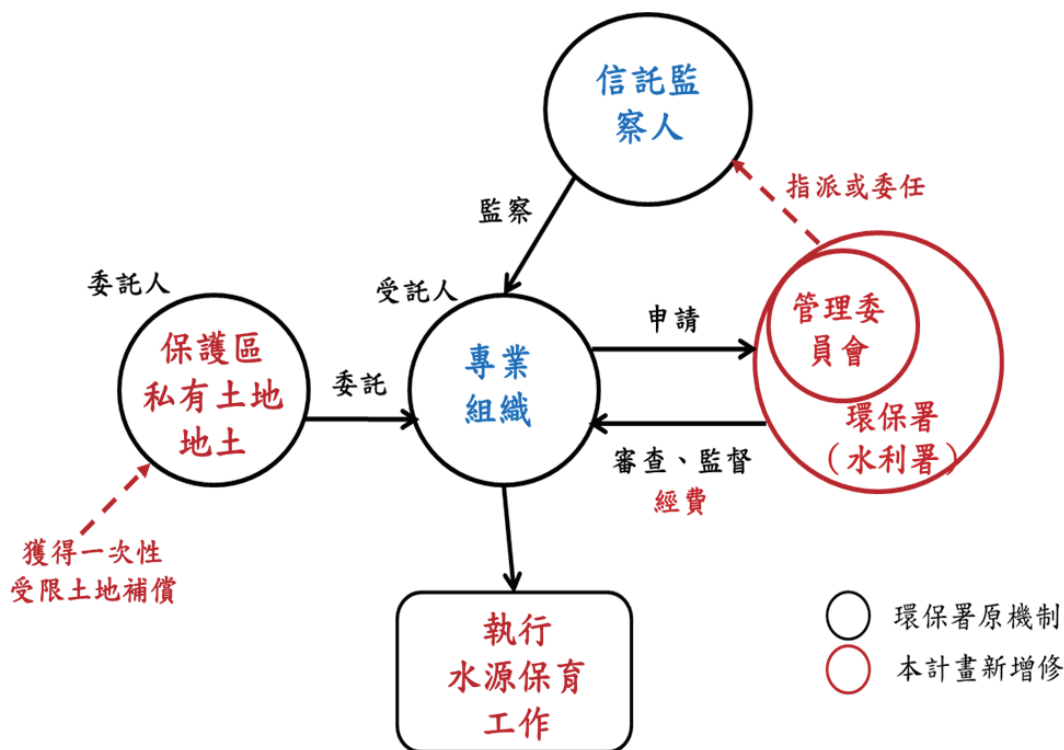


圖 6 水源保護環境信託運作關係圖

Fig.6 Suggested operational mechanism of source water protection environmental trust.

## 水源保護環境信託配套措施：

### (一) 法規面

#### 1. 許可及監督辦法

目前環境信託的執行母法根據為信託法中的公益信託，在公益信託的規範下，各主管機關可視需求制訂執行辦法，如環保署之「環境保護公益信託許可及監督辦法」。在保護區內執行環境信託，建議仍應依照現行辦法執行，不須另訂執行辦法環境信託。

#### 2. 自來水法源保育與回饋運用管理機制（含相關行政規則）修正或新（增）訂條文

##### (1) 由水利署行政費補助（獎勵）環境信託（立即可行）

運用水源保育與回饋費於環境信託，在既有的自來水法水源保育與回饋運用與管理相關條文中，勢必須部分調整。但保護區內環境信託的經費來源若從水利署行政費支出，則不需調整現有法令，只要符合自來水法第 12 條之 2 支用項目規定即可。

## (2) 水源保育與回饋執行計畫項目增列子項目環境信託（短程）

若從水源保育與回饋經費提撥部分比例進行各區的環境信託，則需檢討現有相關法令，如自來水法、自來水法施行細則、水源保育與回饋收費辦法、水源保育與回饋補助辦法等，深入檢討調整方式。短期內建議修改水源保育與回饋費執行計畫項目，由於環境信託工作與原自來水法第 12 條支用項目的第八款有關，皆屬水資源保育工作，因此執行環境信託工作只要再子細項加入增加環境信託項目即可。換言之，水源保育與回饋業務提報計畫第八款支用項目，於第八款支用項目之子項目增列環境保護公益信託，且於該子項目增列細項目：受託人管理費、信託財產管理所需費用、水資源保育所需費用。

## (3) 水源保育與回饋費增列環境信託（中長程）

自來水法第 11 條：「自來水事業對其水源之保護，除依水利法之規定向水利主管機關申請辦理外，得視事實需要，申請主管機關會商有關機關，劃定公布保護區，依本法或相關法律規定，禁止或限制左列貽害水質與水量之行為」。推動水源保護區環境信託不得增加保護區背景污染量，且應以減少環境負荷為目的，故環境信託目的能降低禁止或限制貽害水質與水量之行為，應與自來水法第 11 條內容無衝突之處，不影響原自來水法第 11 條法相關限制之範圍。

修改母法自來水法第 12-2 條第 3 項內容，在條文中納入固定比例要求。第一項水源保育與回饋費納入中央主管機關水資源相關基金管理運用，專供水質水量保護區內辦理水資源保育與環境生態保育基礎設施、居民公共福利回饋、受限土地補償及環境保育公益信託之用，其支給順序與比例，由中央主管機關，另定之，但水資源保育相關費用之比例，不得少於各水質水量保護區分配總額之百分之五十；該區內土地所有權人有將其財產權，依法委託受託人進行環境保育公益信託者，其相關費用，優先支給。

此外，於支用項目增列環境保育公益信託之相關費用事項，補償對象以私有土地所有權人或相關權利人為優先，包含土地所有人將其土地委託受託人進行環境保育公益信託者。支用於環境保育公益信託之經費，由中央主管機關，依其環境保育公益信託之之範圍與規模，分配運用於受託人、監察人與相關機關。

然而，增列水資源保育相關費用比例與環境保育公益信託之經費，涉及自來水母法之增訂，影響層面廣且修法費時。綜合法規面之配套措施，於不影響水源保育與回饋費既有支用分配，建議以先由水利署行政費補助（獎勵）環境信託，

及於水源保育與回饋執行計畫項目增列子項目環境信託。視環境信託推動成效，再檢討推動自來水法母法修法與否。

## （二）管理面

水源保護區環境信託制度中，為使水源保育與回饋費用或其他財源能合理且有效使用於環境信託，需設立基金管理委員會審查並監督委託人與受託人之權利義務及環境信託執行內容。有關基金管理委員會之組成與任務（基金之管理及運用）等，可參考水利署水資源作業基金收支保管及運用辦法、或環保署環境教育收支保管及運用基金管理辦法等。劃設自來水水質水量保護區之劃設與水源保育與回饋費明訂於自來水法，經濟部為自來水法中央主管機關，因此建議經濟部水利署，研訂「水源保護區環境信託基金收支保管及運用辦法」，推動水源保護區環境信託。

## （三）財務面

由英國、美國與日本等國推動環境信託經驗，穩健的財務為成功地推動環境信託之最重要因素，推動環境信託初期有賴政府補助（獎勵）經費，但國內目前尚無政府補助（獎勵）民間水源保護區環境信託案例。參考國內水資源作業基金收支保管及運用辦法、環保署環境教育收支保管及運用基金管理辦法，顯示基金來源如下：

1. 政府編列預算提撥至基金。
2. 基金孳息。
3. 相關收入（如罰鍰、使用費、出售、水源保育與回饋費等）。
4. 人民、事業或團體之捐助。

因此，經濟部水利署研訂「水源保護區環境信託基金收支保管及運用辦法」，可參考上述基金明訂基金來源，讓水源保護區環境信託財源有法源依據，尤其環境教育基金之來源包含人民、事業或團體之捐助，但水資源作業基金則無。水源保護區環境信託乃環境保護公益信託，對人民、事業或團體之捐助應導入稅制優惠，以增加合理誘因。此外，建議水利署依「水資源作業基金公益支出經費編列及執行管考要點」，補助水源保護區之環境保護公益信託。水源保護區環境信託之補助項目建議如表 2 所示。

表 2 水源保護環境信託之建議補助項目

Table 2 Suggested practical methods of source water protection environmental trust

作法	適用土地類型	主要目的
植樹造林	荒化土地	植樹，強化水土保持以及創造生態環境。
有機農業	生產型農地	減少農業污染。
農地活化	農地	活化土地資源、結合在地傳統文化、減少農作污染。
生態保育	不特定土地類型	進行生態調查、生態系統復育、物種保存、棲地改善等。
環境教育	不特定土地類型	設計環境教育相關課程與活動。
土壤管理	不特定土地類型	復育與改善土壤品質。
其他 (含巡查)	不特定土地類型	其他可改善水質、水量、環境、生態等作法。

依(1)既有法規規定，如信託法、自來水法、環保署環境信託監督辦法等(2)經費來源，如水源保育與回饋費、水資源作業基金、其他可能經費等，以及(3)民眾意願，如委託人地主的意願，以及受託人專業團體的執行意願等。結合法規與經費配套，建議未來在國內操作水源保護環境信託有三個可行方案(圖7)：

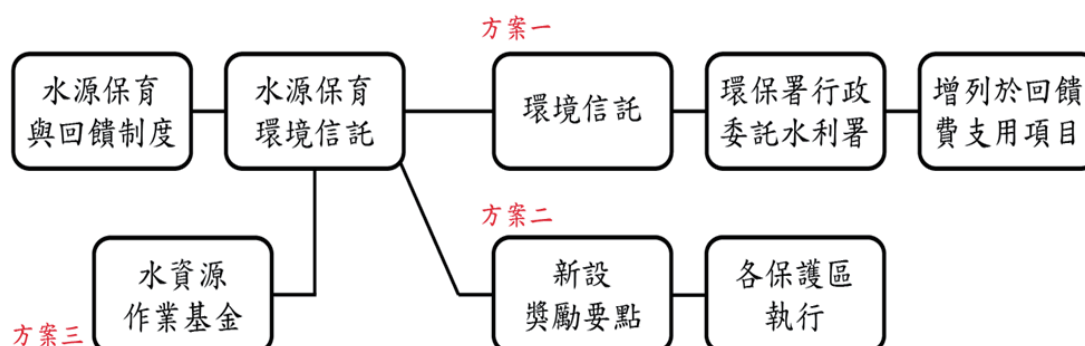


圖 7 水源保護環境信託可行方案建議

Fig.7 Alternatives of source water protection environmental trust

- (1) 方案一：依循傳統環境信託作法（法規限制較多；短中期可操作）
  - a、即延續傳統方式之環境信託運作機制
  - b、遵行信託法與環保署環境信託辦法（需有環保署行政委託水利署執行之程序）
- (2) 方案二：獎勵作法（具彈性，立即可行；短期可操作）

- a、另外設立獎勵要點（同植樹保林等獎勵要點）
  - b、運作機制中不須設立監察人與管理委員會
  - c、由各區專戶運用小組自行監督審查
- (3) 方案三：經費由水資源作業基金支用（擴大經費；長期操作目標）
- a、由水資源作業基金管理委員會支應水源保育環境信託基金，因此由該委員會負責監督審查
  - b、此運作機制不須設立監察人
  - c、操作上需增列水源保育環境信託於該基金認定項目

三種方案的操作機制略有不同，如方案二跟方案三都由既有機關進行監督，因此不需要另設監察人。下圖（圖 8-10）為三種方案的操作機制示意圖。

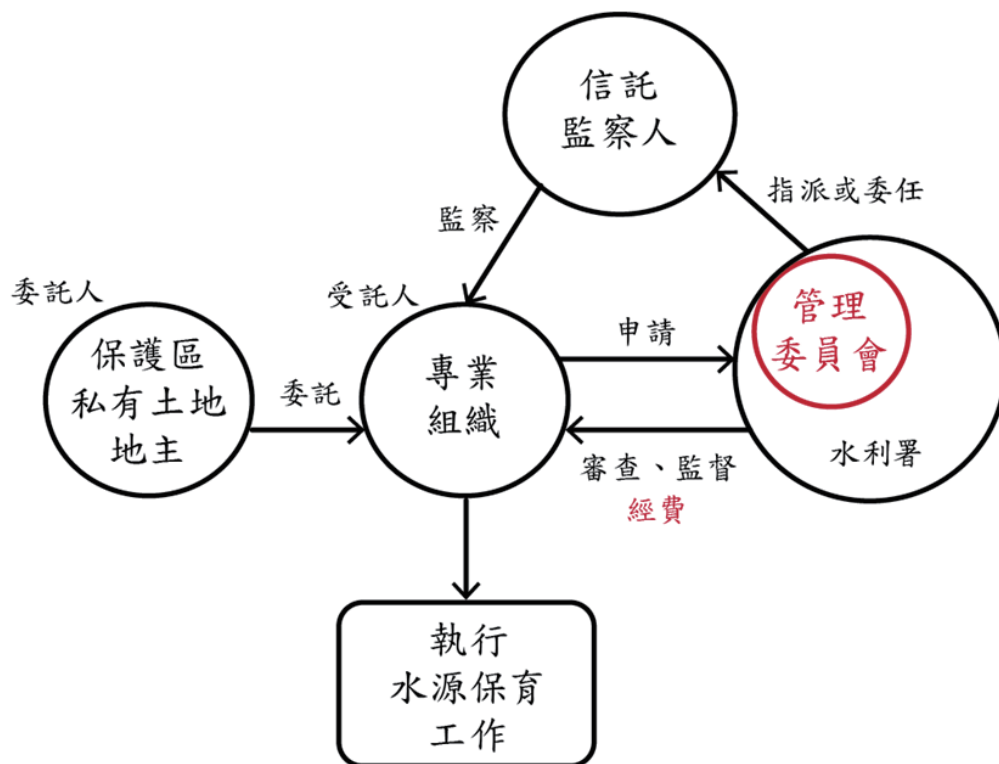


圖 8 方案一 水源保護環境信託基本機制

Fig.8 Alternative 1: basic mechanism

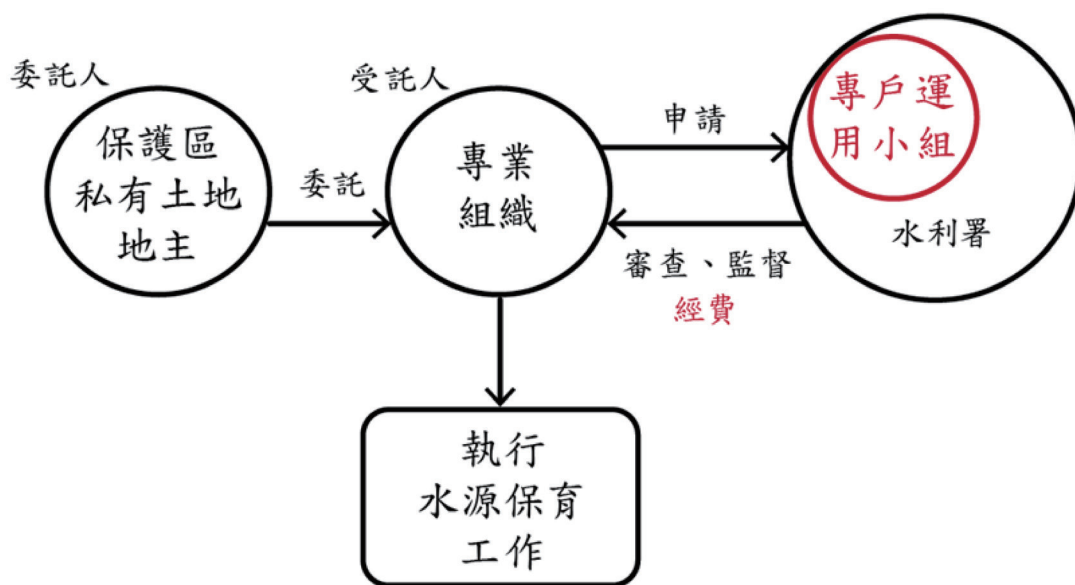


圖 9 方案二 獎勵機制

Fig.9 Alternative 2: reward/subsidy mechanism

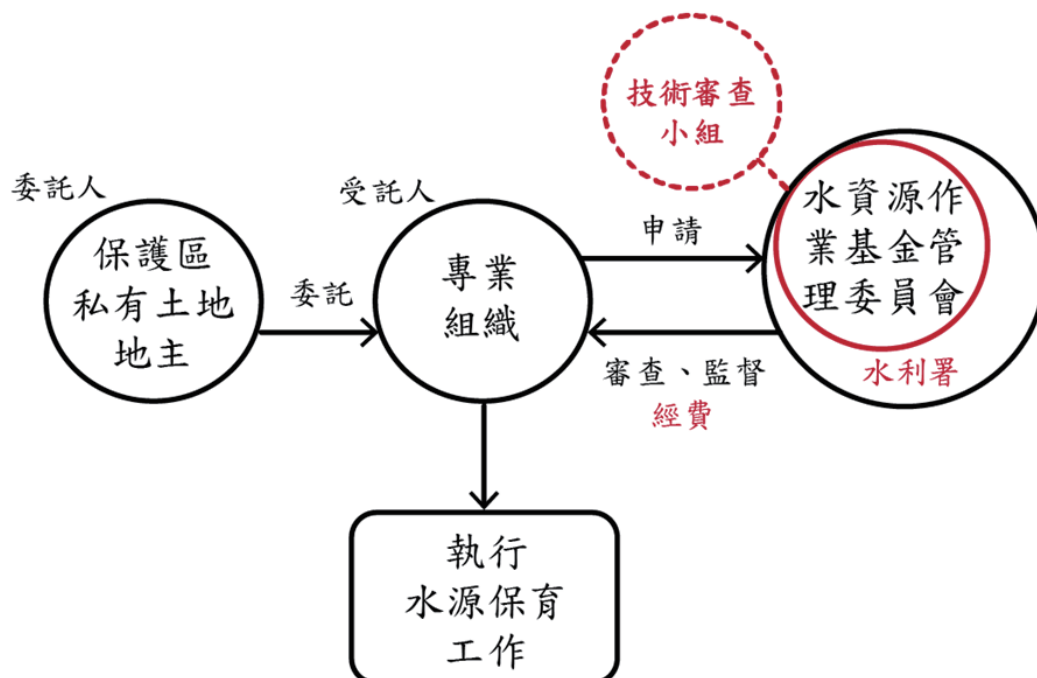


圖 10 方案三 納入水資源作業基金

Fig.10 Alternative 3: combining with Water Resource Practice Fund

## IV. 結論與建議

水源保護環境信託在法規與經費的配套下，可以作為政府水源保育的方式之一。但此制度最大的困難點，在於大多數民眾對土地所有權的轉移具有抗拒心態，且國內土地所有權的轉移程序繁雜，需透過專業人士辦理。因應國人對土地管理的心態不同，且大眾對於環境信託的不熟悉，實施土地所有權轉移的水資源環境信託作法恐不易推動，因此建議初期可採用階段性作法，委託人與受託人之間可以土地所有權轉移，也可採用土地無償使用協議作法，並加強民眾對此制度的認識。

環境信託之關係人都在信託契約的法律保障下，契約期間內，受託人依信託內容執行水源保育相關工作，契約時間結束後，此信託關係終止，土地所有權回到委託人，受託人不能再使用該土地。若信託契約所約定目的無法達成時，依信託法第 62 條，信託關係因信託行為所定事由發生，或因信託目的已完成或不能完成而消滅。而水源保護環境信託內之受託人與監察人的資格應符合信託法規定以及具有水源保育專業知識與能力，信託執行項目則應與水源保育有直接相關者，例如植樹造林、友善農業、生態保育、環境教育、土壤管理、環境體驗以及其他等七項。

水源保護環境信託，由公部門提供經費，私部門執行，創造公私協力的有效管理，且此經費可支持在地保育團體經營保育工作。經費使用並在管理委員會的專業監督下，使其達到最主要的水源保育目標。不過，現有水源保育與回饋費作為行政費額度有限，若要積極推動，短、中程可修訂自來水法相關行政規則，據以籌措財源。

## V. 參考文獻

林鎮洋、陳起鳳、康世芳、郭玲惠，2014，《水源保育與回饋環境信託制度研究（1/2）》，臺北：經濟部水利署。

林鎮洋、陳起鳳、康世芳、郭玲惠，2015，《水源保育與回饋環境信託制度研究（2/2）》，臺北：經濟部水利署。

林鎮洋、陳起鳳、康世芳、郭玲惠，2016，《水資源環境信託推動規劃》，臺北：經濟部水利署。

The National Trust，<https://www.nationaltrust.org.uk/>。

公益財団法人トトロのふるさと基金 <http://www.totoro.or.jp/index.html>。

環境信託中心－臺灣環境資訊協會，<http://teia.tw/zh-hant/env-trust>。

環境資訊協會自然谷環境信託基地，<http://teia.tw/zh-hant/natural-valley>。

## 以植生指標劃定集水區崩場地土砂二次災害潛勢之研究

林昭遠<sup>1\*</sup> 陳宏宇<sup>1</sup> 涂富鈞<sup>1</sup>

**【摘要】**集水區崩塌發生後，崩落堆積於坡面之土砂容易造成二次災害，因此集水區崩場地堆積區位之劃定極為重要。崩場地堆積區位之劃定，傳統上常以崩塌事件前、後之數值高程模型加以運算，但礙於數值高程模型製作曠日費時且成本高取得不易。利用衛星影像雖可經濟且快速地繪製崩塌區位，但卻無法有效萃取堆積區位，故以植生復育指標判釋集水區崩場地之堆積區位為本研究重點。以小林村與九份二山等大規模崩場地為研究樣區，在「演替初期之植生復育率，堆積區與滑落區應有顯著差異」之假說下，以災後數期之衛星影像計算崩場地之植生復育率，配合 K-means 群集分析劃分植生復育之良窳。結果顯示災後約一年時間即可藉由植生復育指標有效地劃分滑落及堆積區，經與數值高程模型驗證，小林村樣區之整體精確度達 61.5%，九份二山則達 69.8%。

**【關鍵詞】**崩場地萃取、植生復育率、二次災害

## DELINEATION OF SECONDARY DISASTER POTENTIAL CAUSED BY WATERSHED LANDSLIDES USING VEGETATION INDEX

Chao-Yuan Lin<sup>1\*</sup> Hung-Yu Chen<sup>1</sup> Fu-Jun Tu<sup>1</sup>

**【Abstract】**The collapses with large scale volume which caused lots of depositions could become the potential source of secondary disaster and affect the protected targets in the watersheds. Areas of collapse and deposition were traditionally extracted from the digital elevation model (DEM) of per- and post- disaster. However, it is hard to create the post-disaster DEM because of expenditure consideration. Therefore, watershed landslides were instead extracted from satellite images. The method of landslide delineation using vegetation index is still disable to distinguish the deposition areas from the landslides. This study introduced vegetation recovery rate as index to effectively delineate the areas of collapse and/or deposition for watershed landslides. The large-scale landslide at Xiaolin village and Chiufengershan, were

---

<sup>1</sup> 國立中興大學水土保持學系。\* 通訊作者。電子郵件：cylin@water.nchu.edu.tw  
Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University. \*Corresponding Author. E-mail: cylin@water.nchu.edu.tw

selected as study areas. Based on the hypothesis of “at the initial phase of plant succession in a landslide area, the vegetation recovery rates should show significant difference at the sites of collapse and deposition” , the vegetation recovery rate derived from several phases of post-disaster satellite images coupled with K-means cluster analysis are employed to delineate the deposition areas of the slope failures. Results show that the collapse and deposition areas can be effectively delineated for about one year after the slope failure. The delineation is verified using DEM, and the overall accuracy is 61.5%, 69.8% at Xiaolin village and Chiufengershan respectively.

**【 Key words 】** Landslide extraction, Vegetation recovery rate, Secondary disaster

## I. 前言

臺灣受菲律賓海板塊及歐亞大陸板塊擠壓，地震頻繁且地質破碎複雜，氣候上則位處東亞沿岸，受到大陸及海洋型氣候影響，夏季有西南季風帶來溫暖而潮濕之氣流，使得降雨集中在五、六月的梅雨季及七到九月的颱風季，因此地震與降雨為造成台灣山區崩塌與土石流的主要外力。近年更是因極端氣候影響，降雨時間減少，但強度卻愈來愈強且集中，高頻率年的極端事件有逐漸增加的趨勢，大規模崩塌災害的發生更是時有所聞，其所造成之保全對象與社會經濟的損失難以估計(許晃雄等，2011)。

透過航遙測影像萃取之崩場地僅可萃取災害區位，無法劃分滑落及堆積區，直接計算崩塌體積會有導致高估之情形。在崩場地萃取與崩塌量推估時，也常採用災害前、後期之數值高程模型 (DEM) 兩者相減，但數值高程模型製作成本偏高且不易取得。

崩塌發生後，土砂及植被一同滑落至下邊坡及河道堆積，坡面上之殘留土砂成為二次災害的材料來源。一旦再發生高強度的降雨事件，隨即成為崩塌及土石流原料，危及均勻邊坡及下游地區之保全對象生命及財產的安全。因此，針對坡面殘留土砂及保全對象的集水區治理工作為重要之課題。

本研究利用國立中央大學太空及遙測研究中心所提供的 SPOT 衛星影像針對九份二山與小林村兩處大規模崩場地，計算崩塌區之植生復育率，進行長時序之崩場地變遷分析，藉以找出滑落及堆積區合理之劃分時間與植生復育門檻值，最後以崩塌事件前、後期 DEM 作為驗證。

## II. 材料與方法

### 1. 研究樣區

#### (1) 九份二山

九份二山崩塌地位於南投縣國姓鄉南港村，九二一大地震造成九份二山發生大規模的順向坡岩體滑動情形，其崩塌之滑落與堆積區總面積達 195ha，共 39 人遭土石崩塌掩埋。滑落區高程在 500~1000m，面積約為 102.5ha，崩塌深度為 30~50m；堆積區面積約為 92.5ha，阻塞澀仔坑及韭菜溪而形成堰塞湖（水土保持局，2008）。

#### (2) 小林村

小林村崩塌地位於高雄縣甲仙鄉小林村，莫拉克颱風所帶來超過 200 年重現期距的強降雨引起獻肚山大型山崩，導致土石直瀉而下掩埋小林村，其崩塌之滑落與堆積區總面積達 276.53ha，造成超過 400 人遭土石崩塌掩埋。災害前後滑落區之最大高程差達 85.6m，面積約為 109.01ha；堆積區面積約為 167.52ha，土石崩塌堆積到對岸，堵塞楠梓仙溪並在南峰橋附近形成堰塞湖，隨後即溢流並發生潰壩（公共工程委員會，2010）。

### 2. 研究材料

研究用影像為國立中央大學太空及遙測研究中心之 SPOT 衛星影像，產品前處理等級為 Level 3，經過輻射校正及幾何校正。本研究為對大規模崩塌地做長時間的監測，採用災前、災後、及災後二到三年評估期之多期影像進行監測分析。因各期影像之輻射值不盡相同，因此須對各期影像進行輻射校正，使其能維持固定之品質。而崩塌地位置亦因各影像而有些許誤差，須以正確的地面控制點予以幾何校正。

九份二山崩塌地因 921 大地震而產生，故研究採用 1999/04/01 及 1999/09/27 之衛星影像作為災前、災後影像；以 1999/11/20、2000/01/07、2000/6/21、2000/08/10、2000/10/05、2000/10/29、2000/12/24、2001/01/17、2001/02/18、2001/03/06、2001/12/03 等共 11 期之衛星影像（圖 1）作為評估期。

小林村因莫拉克颱風所導致崩塌，故研究採用 2009/6/8 及 2009/9/26 之衛

星影像作為災前災後之影像；以 2010/3/19、2010/7/16、2010/8/1、2010/9/22、2010/11/25、2010/12/24、2011/1/27、2011/3/13、2011/5/9、2011/6/10、2011/7/5、2011/8/16、2011/11/28、2012/1/19、2012/3/17、2012/5/14、2012/7/9、2012/10/25 等共 18 期之衛星影像 (圖 2) 作為評估期。

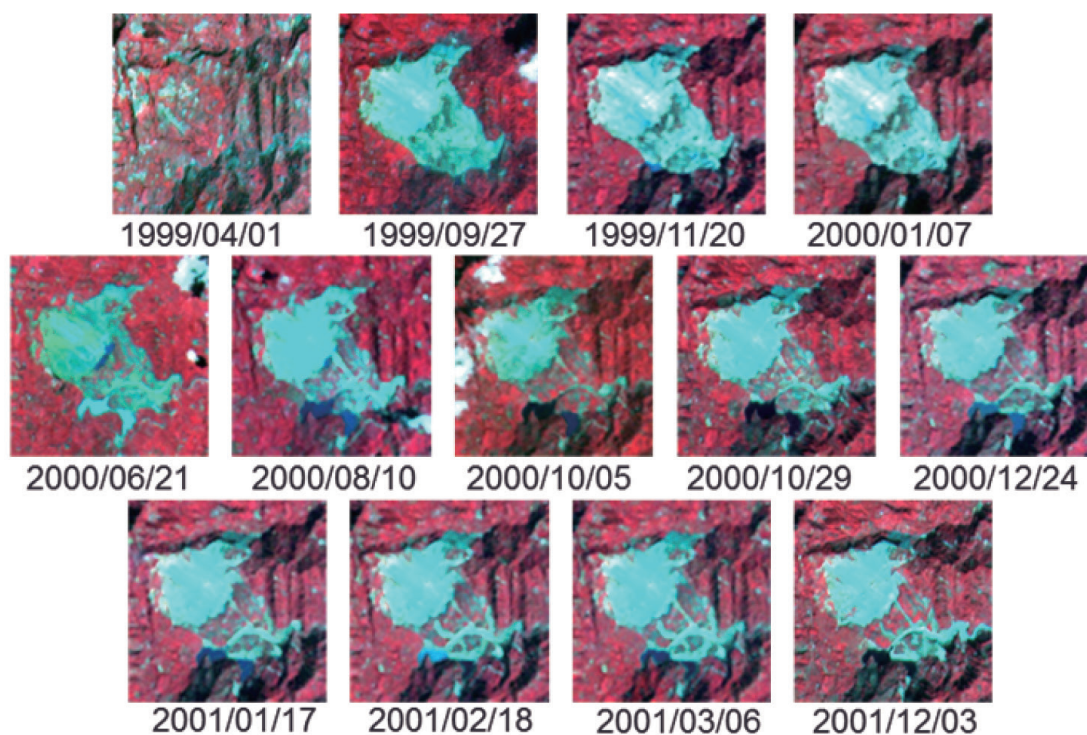


圖 1 九份二山多期衛星影像

Fig.1 Multi - temporal satellite images of Chiufengershan

### 3. 研究流程

先蒐集崩塌土砂災害及二次災害的相關文獻與衛星影像、土地利用、DEM 等相關圖資。再以萃取之兩崩場地，計算植生復育率，以 K-means 區分植生復育良好與不良之區位，由良好區位經長時間變遷之趨勢劃定門檻值找出適當之評估期，以此劃分堆積區，最後以災害前、後數值高程模型以相減法進行驗證 (圖 3)。

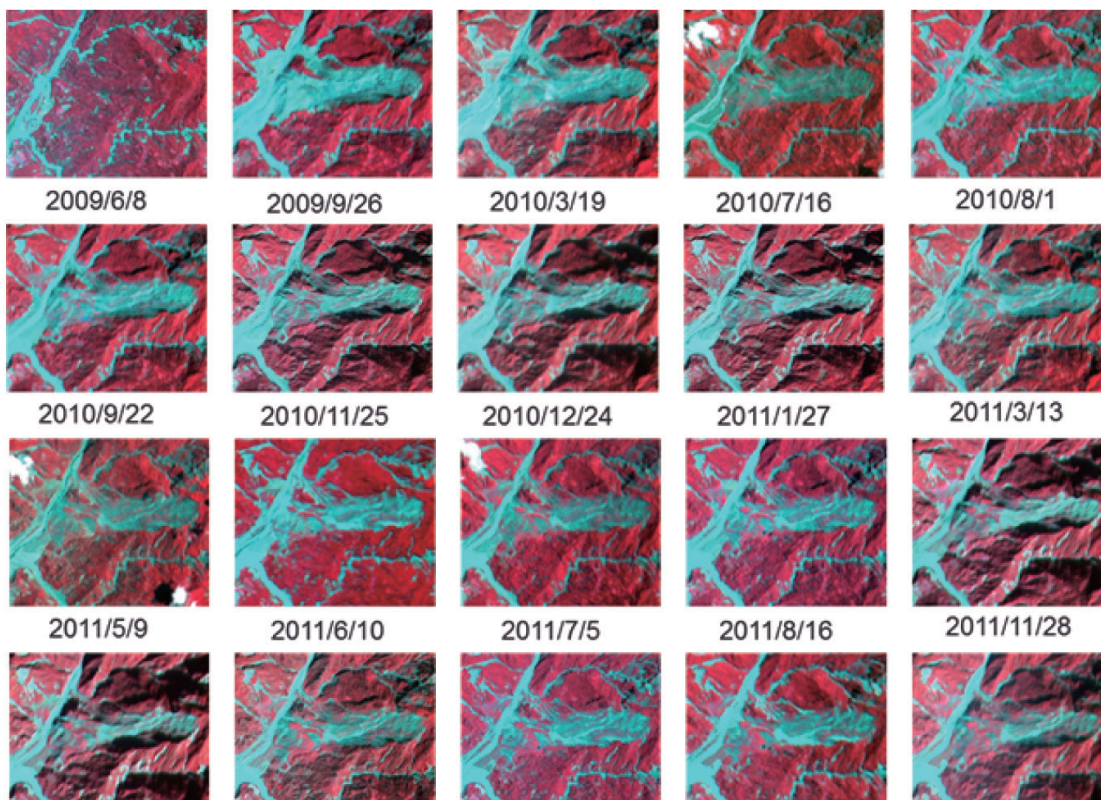


圖 2 小林村多期衛星影像  
Fig.2 Multi - temporal satellite images of Xiaolin village

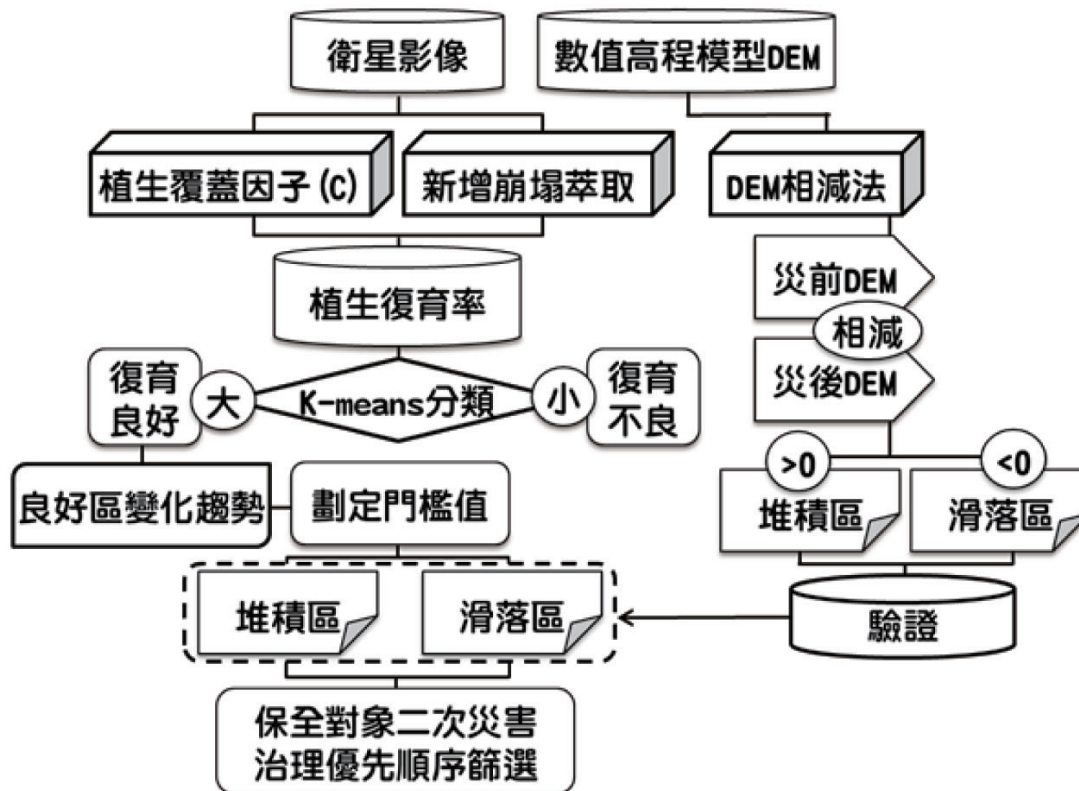


圖 3 研究流程  
Fig.3 Flowchart of the study

#### 4. 研究方法

##### (1) 崩塌區位萃取

影像相減法 (Image Subtraction) 應用於災害前、後影像之崩場地變遷偵測，可以快速獲得新增的崩場地區。先利用崩場地種子點獲得崩場地之初始門檻值，經由調整崩場地之變遷百分比，快速萃取崩場地之資訊，藉由航照圖進行比對 (圖 4)，計算變遷之門檻值、崩場地區及面積 (林昭遠、莊智瑋，2009)。

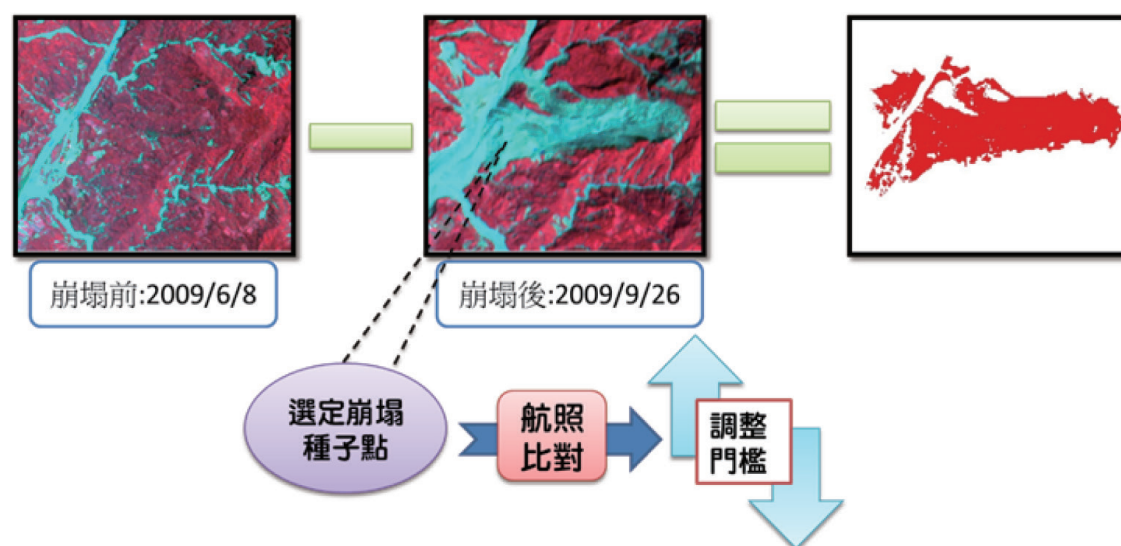


圖 4 崩塌區位萃取示意圖  
Fig.4 Illustration of landslide site extraction

##### (2) 滑落及堆積區劃分

滑落區因土壤層及其上覆蓋的植生發生崩落，並滑動至較平緩處堆積，故滑落區缺乏土壤層，且大多地勢較陡，災後植生不易復育，以植生復育率較低者可將其判定為滑落區；堆積區則是因崩塌的土石及植生一同匯聚此處，其地勢也較平緩，災後植生容易生長，以植生復育率較高者可將其判定為堆積區。

本研究據此特性利用災前、災後及評估期三期衛星影像計算崩場地之植生復育率，以探究災後植生復育的情形，並由 K-means 劃分兩個集群，植生復育率大者，表示其崩場地災後植物生長良好，已逐漸恢復成植群，即為堆積區；植生復育率較小者，其災後植物生長不良，還是呈現裸露的情況，即為滑落區。

##### A. 常態化差異植生指標

一般而言，健康的綠色植物，其葉綠素不僅會反射大部分近紅外光的波段，

也會吸收紅光的波段 (Rouse et al., 1974)，藉由影像光譜之特性探討自然物理現象，常需配合其光譜反射特性進行選用，計算比值或差值即所謂的植生指標。常態化差異植生指標 (NDVI) 常被用於評估一地區綠色植物的生長狀況、植物覆蓋率與生物量等，計算方式為  $NDVI=(NIR-R)/(NIR+R)$ ，NIR 為近紅外光，R 為紅光，其值介於 -1~1，越大表示植物生長越好、植被覆蓋越佳。

#### B. 植生覆蓋因子 (C)

C 值依地表上不同種類之植物、生長狀況、季節、覆蓋程度而定；由於取得上之困難，無直接可利用之資料，可由遙測影像結合地表實際狀況推估。將 NDVI 經由線性反轉，可得到每個地表單元特定的利用類型，但更精確的 C 值需要現地調查而得 (Lin et al. 2002)。本研究為能快速取得 C 值評估植生復育率，利用 Lin et al.(2006) 之植生指標轉換公式進行評估，其計算式為  $C=(1-NDVI)/2$ 。

#### C. 植生復育率

為探討崩塌後續植生復育情形，需選用災害前、後期及評估期之衛星影像共三期進行植生復育率評估，植生復育率係以崩塌區位災前之植生覆蓋因子 ( $C_1$ ) 為參考值，計算任一評估期之植生覆蓋因子 ( $C_3$ ) 恢復至災前之百分比，其計算式為  $VRR=(C_2-C_3)/(C_2-C_1) \times 100\%$  (林昭遠等，2001)，式中 C 為植生覆蓋因子； $C_1$  為崩塌前之植生覆蓋因子； $C_2$  為崩塌初期之植生覆蓋因子； $C_3$  為評估期之植生覆蓋因子。

#### D. K-means 群集分析

群集分析 (Cluster analysis) 為資料採礦 (Data mining) 的一種，是依據物件本身的資料，依其關係資訊為基礎分成數個群集，將各相似物件歸類為相同集群，在群集分析中評估物件之間相似性極為重要 (施雅月、賴錦慧，2008)。群集分析主要有分層法 (Hierarchical) 與非分層法 (Non-hierarchical) 等兩大型式，本研究使用非分層法之 K 平均法 (K-means)，先將所有觀察值分為 K 個集群，依各觀察值和各中心點的距離分配，再計算各群集新的中心點，重複步驟直到不再重新分配為止 (楊志堅、張家榮，2000)。

#### E. 堆積區門檻劃定

利用移動平均 (Moving Average, MA) 之概念，將 K-means 劃分之各評估期植生復育良好區域面積繪製趨勢圖，判釋其堆積區植物生長達成穩定的時間點。移動平均法為分析時間序列的一種工具，將一定項數時序內的觀察值取其平均值，

逐項計算可得趨勢線，可以反映其長期變化之趨勢。本研究選用簡單移動平均法將各時期以 K-means 劃分之堆積區面積取其移動平均，以利了解堆積區植生復育之趨勢，再以趨勢變化最大的點將其訂定為堆積區之植生復育達到穩定的點。其計算式為，式中  $D_i$  為一期之復育良好區面積； $D_n$  為  $n$  期之復育良好區面積； $n$  為移動平均的項數。

#### F. 實際滑落及堆積區驗證

以災害前、後兩期之數值高程模型 DEM 相減，所得之高程差即為實際崩場地之土石崩塌堆積情形，可將其差值為負區域表示為滑落區；差值為正區域則表示為堆積區。以此作地真資料驗證植生復育率劃分法得到之滑落及堆積區準確程度。

### III. 結果與討論

#### 1. 崩場地萃取結果

將災前、災後衛星影像以影像相減法配合變遷門檻值，可萃取各事件之崩場區位 (圖 5、圖 6)。九份二山之崩場地面積為 207.62 公頃，其 Kappa 精度為 0.88；小林村之崩場地面積為 240.63 公頃，其 Kappa 精度為 0.90。



圖 5 九份二山崩場地  
Fig.5 Chiufengershan landslide



圖 6 小林村崩場地  
Fig.6 Xiaolin -village landslide

## 2. 滑落及堆積區劃分

### (1) 崩塌地植生復育變遷

由 K-means 將各評估期劃分之復育不良區及復育良好區 (圖 7 及圖 8)，結果顯示，其崩塌地變遷之情形，在評估期影像之選取上，若太接近災害發生之時間 (少於半年) 會發生無法正確分類之情形。如 1999/11/20 及 2000/01/07 兩期之影像，因其崩塌地之整體光譜值與崩塌後之影像 (1999/9/27) 接近，K-means 分類之結果並無法有效區分植生復育良好及不良區域，表示其滑落區及堆積區的植生皆無明顯之復育跡象。如圖 7、8 所示，其大部分之崩塌地被分類為植生復育率較大之區位，僅少部分邊緣區位被分類為復育不良區，與實際崩塌之現狀不符，故以 K-means 在這段評估期內無法有效將復育良好與不良區位分類。自 2000/06/21 評估期影像劃分之情形可看出崩塌地上邊坡，滑落區之發生段植生復育情形較差，僅有邊緣部分有些微植生入侵生長；而下邊坡之植生復育情形較佳，可劃定為崩塌之堆積區位。

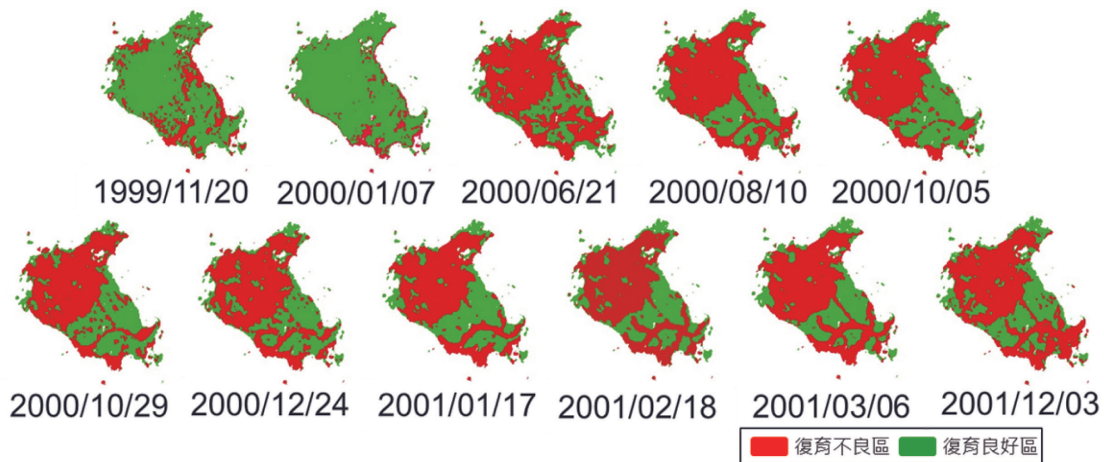


圖 7 九份二山崩塌地之復育良好及不良區位之時空分布

Fig.7 Spatial-temporal distribution of good and/or poor vegetation recovery at Chiufengershan landslide

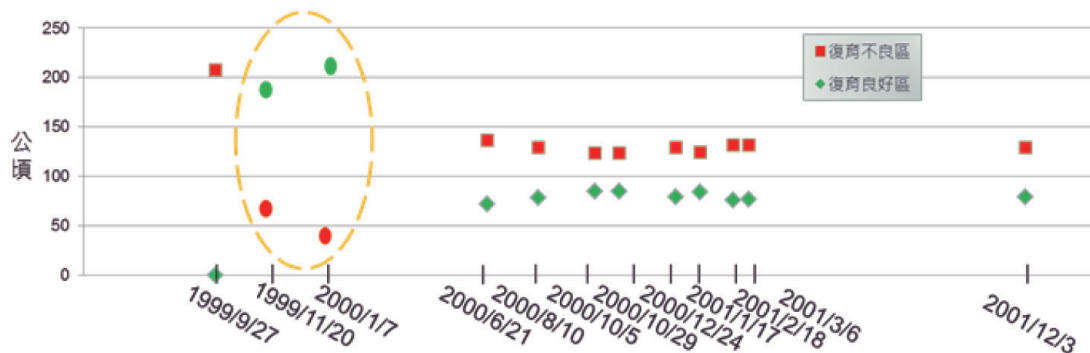


圖 8 九份二山崩塌地復育良好及不良區面積之時間序列

Fig.8 Time series of good and/or poor vegetation recovery at Chiufengershan landslide

小林村之崩塌地以 K-means 將各評估期劃分之復育良好區及復育不良區 (圖 9 及圖 10)，結果顯示其崩塌地變遷之情形，小林村崩塌地之大量土石向下滑落至河道及一部分土砂沖到對岸，由各評估期之分類結果可看出，崩塌地上邊坡長期以來，因地表裸露，植生生長不易，多呈現低植生復育率，僅有少部分區域有植生入侵生長，遂可將其劃定為崩塌發生之滑落區；而崩塌地下邊坡及崩塌地對岸邊坡，皆因土砂堆積而有明顯之植生復育，故可劃定為堆積區；此外，河道兩岸尚有崩塌地植生恢復較差，推測應為崩塌發生後河道擴寬使得堆積之土石被河水沖走，且長期有水流流動，因此雖應屬崩塌之堆積區，但植生復育不佳使得在 K-means 劃分上將其判定為滑落區。



圖 9 小林村崩塌地之復育良好及不良區位之時空分布

Fig.9 Spatial-temporal distribution of good and/or poor vegetation recovery at Xiaolin -village landslide

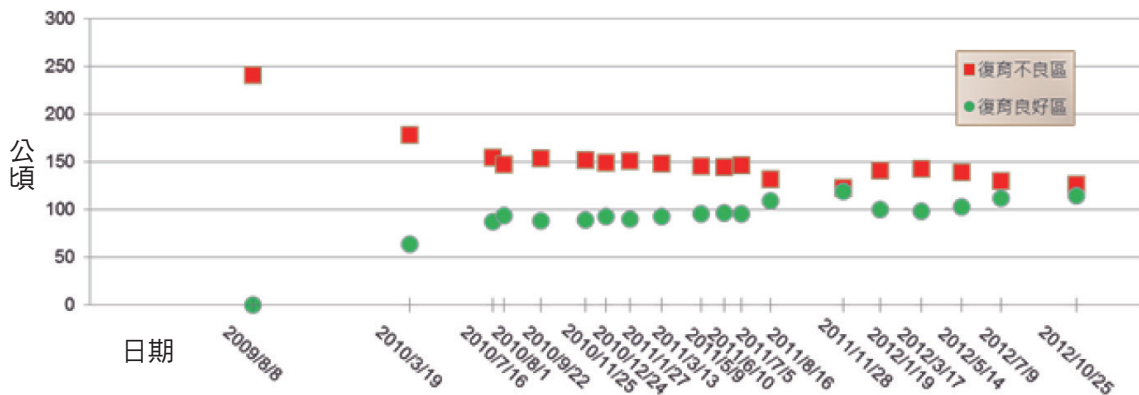


圖 10 小林村崩塌地復育良好及不良區面積之時間序列

Fig.10 Time series of good and/or poor vegetation recovery at Xiaolin-village landslide

## (2) 堆積區門檻劃定

由 K-means 劃分各評估期復育良好區之時間序列，以移動平均法測繪其變化趨勢圖，將移動平均斜率變化最大的時間點定為堆積區劃定之門檻，九份二山之復育良好區面積趨勢變化於 318 天 (圖 11)；小林村之復育良好區面積趨勢變化於 358 天 (圖 12)。由趨勢圖及移動平均之斜率變化中可看出各崩場地之復育良好區面積在移動平均變化最大的時間點後已無太大變動，表示復育良好區面積前、後兩期變化不大而穩定。

由兩處崩場地樣區之結果顯示，其植生復育良好區達成穩定的時間點約為一年左右，兩處崩場地以此時間劃分之成果 (圖 13 及圖 14) 可看出大部分區域皆已可明顯區分區滑落及堆積區。評估期時間選取上滑落區尚需時間將岩盤風化為土壤，抑或是人為植生導入才可使植生復育率上升，因此若選定之評估期太長，實際之滑落區會因此被判定為堆積區，計算崩塌體積時會造成低估之情形；若選取時間與災害時間太接近亦會因堆積區植生復育並無明顯優於滑落區之情形致無法有效劃分 (圖 7)。將一年訂為選取災後崩場地滑落及堆積區劃分門檻之時間點，即可由災後一年之衛星影像作為植生復育評估期適當之時間，供後續劃分滑落及堆積區之用。

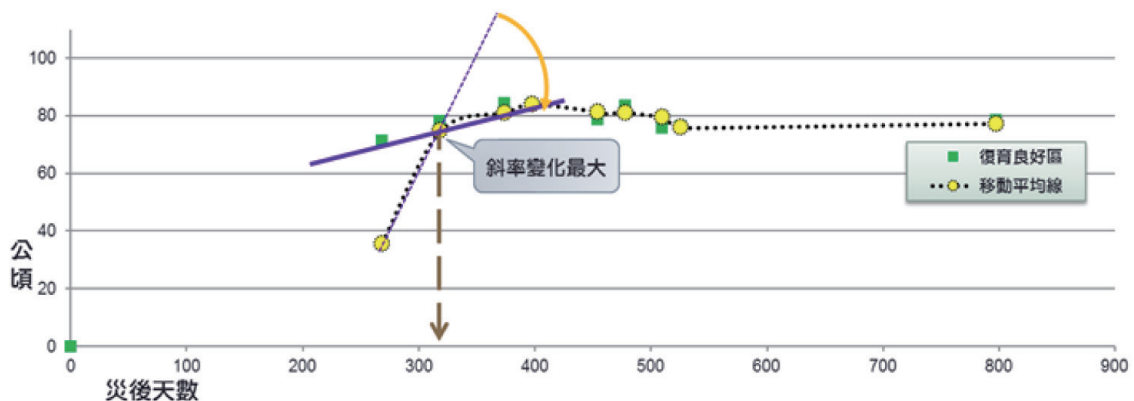


圖 11 九份二山崩場地復育良好區劃定門檻

Figure 11 Delineation threshold of good recovery for Chiufengershan landslide

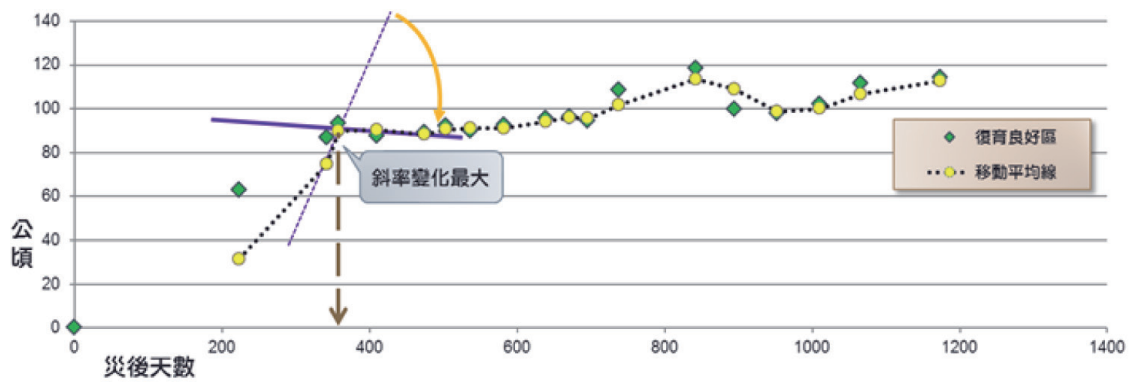


圖 12 小林村崩塌地復育良好區劃定門檻  
Figure 12 Delineation threshold of good recovery for Xiaolin-village landslide



圖 13 九份二山崩塌地滑落及堆積區劃分  
Fig.13 Delineation of collapse and deposition sites at Chiufengershan landslide



圖 14 小林村崩塌地滑落及堆積區劃分  
Fig.14 Delineation of collapse and deposition sites at Xiaolin-village landslide

### (3) 劃分結果與驗證

#### A. 實際滑落及堆積區

由 DEM 相減法將 921 大地震災害前後之 DEM 相減可得到高程之差值，差值為正表示災害過後，高程增加，即為崩塌土石堆積的區位，由圖 15 可知藍色的部分為差值為正的區域，表示崩塌之土石由上邊坡向下堆積在下邊坡，造成高程提升，最大堆積深度達 110m；差值為負表示災害過後，高程減低，即為崩塌土石滑落的區位，由圖 15 可看出棕紅色的部分為差值為負的區域，表示崩塌的土石向下滑落，呈現裸露，使得高程降低，最大滑落深度達 91m。

高程之差值由 DEM 相減法將莫拉克颱風災害前後之 DEM 相減可得到，差值

為正表示災害過後，高程增加，即為崩塌土石堆積的區位，由圖 16 可知左方接近河道藍色的部分為差值為正的區域，表示崩塌由上邊坡向下滑落在下邊坡河道處堆積，造成高程提升，最大堆積深度達 90m；差值為負表示災害過後，高程減低，即為崩塌土石發生滑落之區位，由圖 16 可看出棕紅色的部分為差值為負的區域，表示右側為崩塌土石向下滑落處，呈現裸露，使得高程降低，最大滑落深度達 91m。

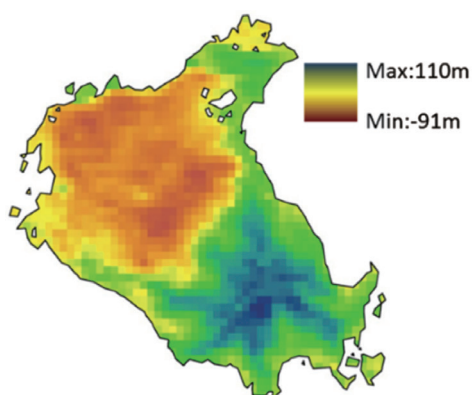


圖 15 九份二山高程差值  
Fig.15 Elevation difference calculated from DEMs (pre/post- landslide) of Chiufengershan.

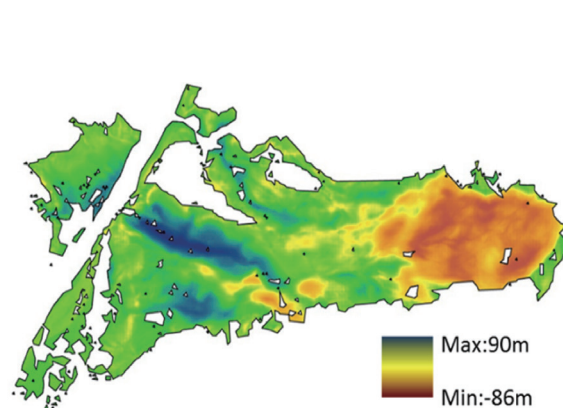


圖 16 小林村高程差值  
Fig.16 Elevation difference calculated from DEMs (pre/post- landslide) of Xiaolin-village.

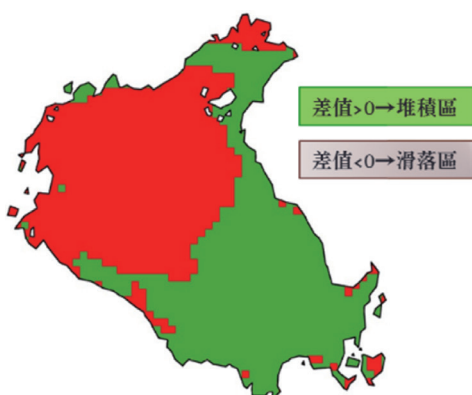


圖 17 九份二山滑落及堆積區  
Fig.17 Sites of collapse and deposition at Chiufengershan landslide

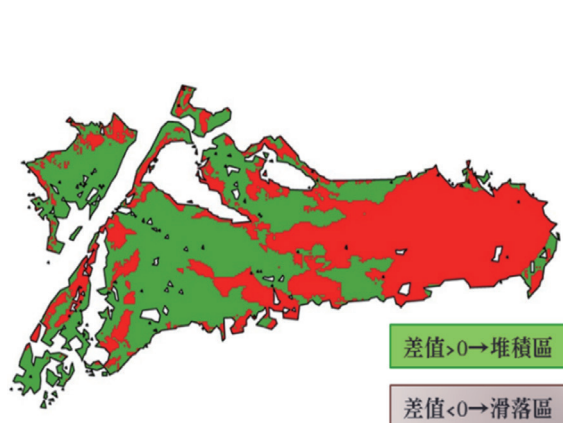


圖 18 小林村滑落及堆積區  
Fig.18 Sites of collapse and deposition at Xiaolin-village landslide

## B. 精準度評估

由前述堆積區門檻劃定之結果，以一年為評估期，九份二山取 2000/08/10 之 VRR 劃分成果 (圖 13 及圖 14) 比對實際 DEM 劃分成果 (圖 17 及圖 18) 進行精準度評估，由表 1 可得知堆積區精確度為 73.7%，滑落區則為 67.4%，整體精確度達 69.8%。

小林村之一年評估期以 2010/08/01 之 VRR 劃分滑落及堆積區成果比對實際 DEM 劃分成果進行精準度評估，由表 2 可得知堆積區精確度為 64.59%，滑落區則為 59.70%，整體精確度達 61.5%。

表 1 九份二山崩場地精準度評估

Table 1 Accuracy assessment of Chiufengershan landslide

		實際 DEM 劃分		總和	
		堆積區	滑落區		
VRR 劃分	個數	堆積區	5,700	7,732	
		滑落區	4,219	8,733	
	總和		9,919	10,765	20,684
	%	堆積區	73.7%	26.3%	100%
滑落區		32.6%	67.4%	100%	

69.8% 個原始組別觀察值已正確分類。

表 2 小林村崩場地精準度評估

Table 2 Accuracy assessment of Xiaolin-village landslide

		實際 DEM 劃分		總和	
		堆積區	滑落區		
VRR 劃分	個數	堆積區	6,023	9,325	
		滑落區	5,939	8,799	
	總和		9,919	11,962	12,101
	%	堆積區	64.59%	35.41%	100%
滑落區		40.30%	59.70%	100%	

61.5% 個原始組別觀察值已正確分類。

### C. VRR 劃分與 DEM 劃分比對

由前述所得兩處崩塌復育良好區變化顯著之時間點可發現，植生復育良好區面積約在一年左右即開始趨於穩定，堆積區之植生因有深厚的土層及原崩塌地之植生倒伏，草本植物入侵時間快速，約一年即有大面積的覆蓋。一般植物生長所需如陽光、土壤養分、水分等，崩塌所形成的堆積區提供植物生長良好且深厚的土壤養分立地條件。流水於坡面產生逕流，亦提供植物生長所需的水分來源，如圖 4 21，小林村以 VRR 劃分出的結果，在下邊坡處實際崩塌土石堆積的區位，有坡面沖蝕所形成的沖蝕溝，因植生復育不良被誤判為滑落區，但其所帶來的水分亦提供鄰近區域植物生長。靠近河道區域更是導致 VRR 劃分堆積區誤判主要區位，小林村及九份二山皆在河道堆積區位因鄰近河流長期受到河水沖蝕，致堆積之土壤漸漸被帶走，植物亦不容易生長（圖 19 及圖 20）。

原本茂密植生覆蓋的山坡地經外力作用地震、暴雨等發生大規模的崩塌形成岩盤裸露的崩塌地。滑落區及堆積區土壤性質有極大的差異，且滑落區多發生於山脊嶺線，坡度也較陡，植生立地條件差，植生復育不易。由圖 21 及圖 22 可看出，小林村及九份二山發生崩塌滑落的區域，以 VRR 劃分之結果大多為植物復育不良情形，九份二山滑落區邊緣有部分區域被判釋為堆積區。原因為崩塌地邊緣區域植物仍生長良好，植被由此區位入侵生長。大部分的滑落區皆須經土壤風化沖蝕改良植生立地條件或是人為植生工程才能有較好的復育情形。

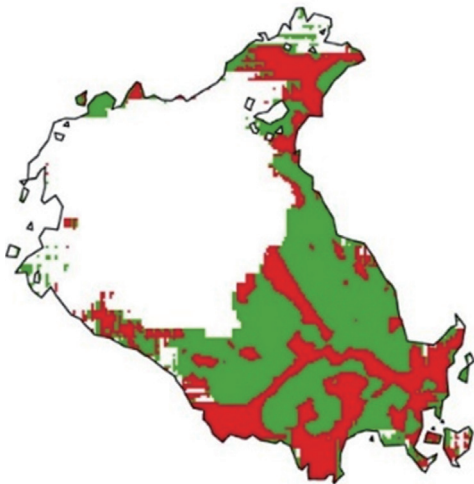


圖 19 九份二山堆積區 VRR 劃分情形  
Fig.19 VRR delineation at the deposition area  
extracted from DEM (Chiufengershan)



圖 20 小林村堆積區 VRR 劃分情形  
Fig.20 VRR delineation at the deposition area  
extracted from DEM (Xiaolin-village)

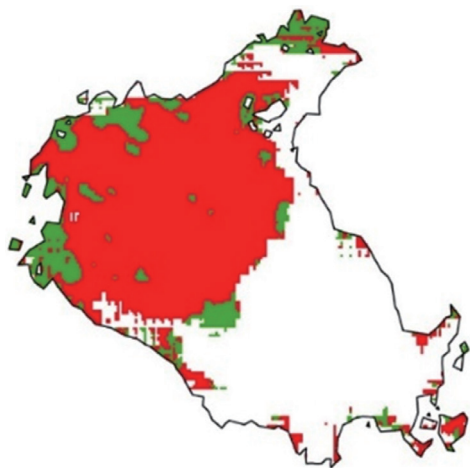


圖 21 九份二山滑落區 VRR 劃分情形  
Fig.21 VRR delineation at the collapse area  
extracted from DEM (Chiufengershan)

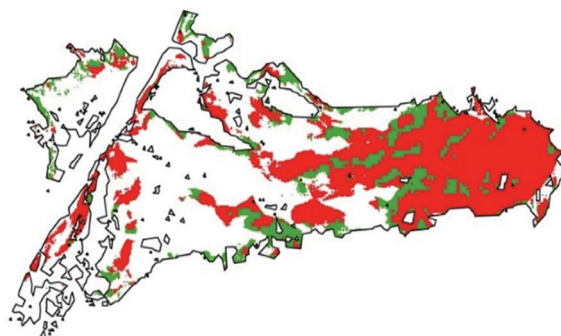


圖 22 小林村滑落區 VRR 劃分情形  
Fig.22 VRR delineation at the collapse area  
extracted from DEM (Xiaolin-village)

#### IV. 結論

坡地因受外力作用(地震、暴雨、河岸沖刷、道路開闢等)形成崩塌裸地，在崩場地植生演替過程，會先由草本植物作為優勢植被入侵，自然入侵演替的時間約為 1~3 年。但若以植生工程進行復育，評估其草本群落成果的時間約為 1 至 2 年。本研究僅需找出滑落及堆積區植生復育程度有顯著差異的時間點即可判釋滑落及堆積區。故以九份二山與小林村崩場地作為研究樣區，利用堆積區有較深土壤且植生復育較佳之特性，將災前災後影像萃取崩塌區位並以衛星影像萃取 NDVI，進而推估植生復育率，據此劃定崩場地之滑落區及堆積區。將堆積區面積之時間序列以移動平均法計算其斜率變化，可將變化點最大之時間點作為堆積區劃定之門檻，經比較兩處樣區，其衛星影像評估期時間點以一年為佳。

#### V. 參考文獻

公共工程委員會 (2010)，「莫拉克颱風高雄縣甲仙鄉小林村及那瑪夏鄉、桃源鄉致災原因調查報告」。

水土保持局 (2008)，「九份二山崩場地成果觀測計畫成果彙編」。

林昭遠、吳瑞鵬、林文賜 (2001)，「921 震災崩場地植生復育監測與評估」，中華水土保持學報 32(1)：59-66。

- 林昭遠、莊智瑋 (2009), 「921 地震崩場地特性及變遷監測分析」, 921 地震對生態影響與回復研討會論文集 11-32。
- 施雅月、賴錦慧 (2008), 「資料探勘」, 培生教育出版社。
- 許晃雄、陳正達、盧孟明、陳永明、周佳、吳宜昭 (2011), 「臺灣氣候變遷科學報告」, 行政院國家科學委員會 311-353。
- 楊志堅、張家榮 (2000), 「群集分析介紹」, 進修通訊年刊 6 : 42-49。
- Lin, C.Y., Lin, W.T. and Chou, W.C., (2002). "Soil erosion prediction and sediment yield estimation: The Taiwan experience." *Soil & Tillage Research*, 68 : 143-152.
- Lin, W.T., Lin, C.Y. and Chou, W.C., (2006). "Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by catastrophic earthquake: A case study in Central Taiwan." *Ecological Engineering*, 28 : 79-89.
- Rouse, J. W., Jr. Haas, R. H., Schell, J. A. and Deering D. W. (1974), "Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS," *NASA SP-351, 3rd ERTS-1 Symposium*, Washington, DC, 309-317.



## 大型防砂壩下游沖刷坑形成原因探討

黃宏斌<sup>1\*</sup>

**【摘要】**當規劃設計橫向構造物如防砂壩形成河床高差時，因為水流勢能轉換為動能之關係，以射流狀態向下游沖擊，除非河床質是堅硬岩盤或是耐沖擊之構造物，否則防砂壩下游沖刷坑之產生係為自然現象。沖刷坑之大小、規模受到地形、地質和工程構造物本身設計等因子所影響。依據現場勘查結果可以推論沖刷坑形成之可能原因有：防砂壩、水墊或護坦基礎高程設計較高、消能塊不足以抵擋水流沖擊、護坦厚度不足、副壩重疊高設計未考慮河床坡度、護坦設計未考慮管湧等。

**【關鍵詞】**防砂壩、沖刷坑、水墊、護坦、副壩、消能設施

### FORMATION OF SCOUR HOLE AT DOWNSTREAM AREA OF LARGE-SCALED CHECK DAM

Hung-Pin Huang<sup>1\*</sup>

**【Abstract】** When designing the traversed construction as check dam resulting in height difference on riverbed, associated with transferring from potential energy to kinetic energy, jet flow impacts downstream riverbed to form scour hole unless hard rock. The dimension and scale of scour hole depends on factors of topography, geology and artificial construction. In accordance with field investigation, the formation of scour hole might be the reasons of higher foundation elevation of check dam, water cushion and apron constructions, insufficient resistance of energy dissipation block to jet flow, insufficient thickness of apron, overlapping height of subsidiary dam without consideration on riverbed slope, designing of apron without consideration of piping problem.

**【Key words】** Check dam, scour hole, water cushion, apron, subsidiary dam, energy dissipators.

---

<sup>1</sup> 國立臺灣大學生物環境系統工程學系教授，通訊作者。電子郵件：benhuang@ntu.edu.tw  
Professor, Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University. Corresponding Author. E-mail: benhuang@ntu.edu.tw

## I、前言

1964 年臺灣省省主席黃杰先生有鑑於保護臺灣山林，免於土壤沖刷，開始推動水土保持工作，臺灣省政府農林廳林務局和山地農牧局（水土保持局前身）和其他機關借鏡奧地利和日本之治山防災技術，在森林和山坡地地區為了防止河床縱、橫向沖刷、控制野溪流心、減緩河床坡度、調節砂石或固定崩塌地坡腳，構築大型防砂壩。五十幾年來，這些大型防砂壩發揮了當初規劃設計之功能，但是，防砂壩下游沖刷坑刷深、擴大導致防砂壩壩基、側牆底部掏空；水墊、護坦破損；消能塊、拋塊石流失等狀況也增加不少困擾和維護經費。

## II、前人研究

### (I) 沖刷坑形成之評估因子

野溪沖刷坑形成是跌水射流沖擊力和溪床抗沖力之抗衡結果，如果沖擊力大於抗沖力，沖刷坑就會產生；反之，如果沖擊力小於抗沖力，沖刷坑就不會發生。野溪溪床地質是抗沖力之主要因子；地形坡度則是沖擊力因子，其中，寬闊溪床是抗沖力因子；而窄縮溪床則是增加沖擊力因子之一。另外，就是非自然因素，如人工構造物之消能設施或措施等。

#### 1. 溪床地質

一般而言，岩盤是最佳抗沖材料，如果岩盤走向和沖擊方向垂直時，抗沖力會比平行狀態時好。當然，岩盤之劈理、節理太多或高度風化也會降低抗沖力。其中，火成岩、變質岩之抗沖力會較沖積岩強；而沖積岩層中之砂岩抗沖力又會較頁岩強，形成沖刷坑之機會較小。

礫石、砂、坩土和黏土中，因為粒徑大小關係，大粒徑礫石之抗沖力一般會較小粒徑黏土之抗沖力大，產生沖刷之機會小或是沖刷坑尺寸會較小。

如果堰壩底部是深厚沖積土石時，滲流曲線不會被拘限、扭曲，堰壩上下游水位差產生之滲流壓力容易掌握並做因應。如果堰壩底部下方存在不透水層時，滲流曲線容易被拘限、扭曲，堰壩前趾處之滲流壓力會增加，容易有管湧發生之可能。

#### 2. 溪床地形

河流沖刷力決定於河床坡度陡峻或平緩；同樣坡度之河床由寬變窄，流速增

加，沖刷力變大；由窄變寬，流速降低，沖刷力變小。而跌水射流沖擊力則和跌水高度；堰壩上之接近流速，以及尾水高度有關，坡度越陡，流速越快，沖刷力越大；堰壩之跌水高度越高，沖擊力會越大。因為水流能量自高處之勢能轉換為動能撞擊低處之河床成為必然發生之現象，如果沒有適當之工程設計或輔助設施，沖刷坑自然就會形成。

如果地形條件與水舌形狀相符，且尾端翹起如洩洪道時，清水流狀態下之沖擊力可以降到最小；含砂水流因為水流中之砂、礫、石會和溢洪道表面發生摩擦、撞擊作用導致磨損、破壞，因此，防砂壩下游坡面經常會採用較陡坡面設計，避免水流中之砂、礫、石撞擊、磨損。

### 3. 工程構造物

防砂壩之溢流跌水高度越高所形成沖射流之沖擊力越大，因此，有構築系列矮壩代替高壩之規劃出現，以降低沖擊力。由於構築防砂壩會在野溪河床縱斷面形成一道高差，除非是沖擊到堅硬岩盤、護坦或水墊，否則這道高差跌水之沖擊力就可能會在下游處形成沖刷坑。野溪經常夾帶大量砂、礫、石，所以，防砂壩之消能設施無法像一般水壩或攔河堰規劃設計齊口戽斗或槽口戽斗式溢洪道等沿壁射流之消能設施。如何設計垂直式或近垂直式跌水工和消能設施，消除或降低由勢能轉換成動能之消能設施就成為另外一個課題。

#### (II) 文獻回顧

沖刷坑深度之研究方面：陳正炎 (1987) 以均勻粒徑進行水工試驗，提出沖刷坑剖面除以最大坑深後可得到一餘弦雙曲線沖刷坑剖面之結論。陳正炎等 (1993) 循陳正炎 (1987) 試驗模式變換粒徑大小進行不同渠道坡度試驗，獲得無因次最大刷深模式。蘇重光等 (1993) 以自由射流理論建立防砂壩下游天然河床局部沖刷之沖刷深度變化，並得到壩下游最大沖刷深度受到相對速度及沖刷福祿數影響之結論。吳金洲 (1990) 以自由沖射流理論、連續方程式與 Navier-Stokes 方程式，配合渠槽試驗求得自由射流與貼面射流之最大刷深模式。陳聖文 (2000) 以渠槽試驗並和宋爾寧 (1999) 回歸式比較，得到無因次沖刷坑深度與跌水數、渠床坡度模式。林宏宇 (2001) 透過渠槽試驗探討堰壩下游鋪設護坦、水墊以及副壩下游之沖刷情形，並得到各種消能設施最適合之尺寸與佈置方式。陳佳裕 (2007) 針對不同跌水高、粒徑、流量探討清水流過壩對下游渠床之沖擊力、沖刷坑深、水流沖擊位置與沖刷前後能量消減等物理特性。

關於沖刷坑最大坑深之研究可分為兩個方向，分別為因次分析以及沖射流理論。陳正炎 (1987)、陳正炎等 (1993)、陳聖文 (2000) 以及林宏宇 (2001) 認為河床沖刷過程極為複雜，僅能以因次分析代替物理模式描述；而吳金洲 (1990) 則根據沖射流理論，跌水之能量經由碰撞、混合及摩擦，機械能轉換為熱能，演繹出沖射流進入沖刷坑內之水體後，主流速度會隨水深增加而漸減之結論，接著蘇重光等 (1993) 沿用吳金洲 (1990) 理論，以連續方程式及能量方程式改善了水舌厚度、速度以及近底流速之求取困難度。其他模式如：Damle (1966)、Rajaratnam & Chamani (1995)。

這些研究都是基於防砂壩或跌水下游是可沖刷河床條件所得到之成果，因變數為沖刷坑長度和深度，自變數中：與河床地質有關之因子為河床粒徑大小，與河床地形有關之因子為坡度、流量或壩上游水深、尾水深；與工程構造物有關之因子則為壩高。這些研究又分有坡度和無坡度兩大類，雖然水土保持手冊建議水墊和護坦工程之設計坡度為水平；但副壩與主壩間之河床坡度並非水平。與這些研究不同的是，美國聯邦公路局所發展之箱涵出口之無凝聚性土壤沖刷坑模式多了集流時間項，而且，沖刷坑深度和集流時間成正比。相關主要模式如表所示，從各家模式結構知：沖刷坑深度與流量成正比，與河床質粒徑大小成反比。同時，當溢洪口或箱涵底部高程增加時，沖刷坑深度會加深、加寬、長度縮短。

防砂壩之消能設施一般以水墊、護坦或副壩為主，其設置目的為保護壩址安全之構造物，必要時可以在截水牆下游再加拋石、混凝土塊等防止沖刷。水土保持手冊對於防砂壩下游設置消能設施之要件是沒有沖刷坑產生，從水土保持手冊摘錄之重點知：

防砂壩之消能設施：

1. 水墊工程：適合溢洪水頭較高，壩高在七公尺以上及下游河床質容易被沖刷區域。
2. 護坦工程：：適合溢洪水頭較低、壩高在七公尺以下及下游河床質容易被沖刷區域。
3. 副壩：一般規劃在河川流量大、河床質粒徑粗大、地質良好區域。

### III、現場勘查

本研究依據消能設施型式，分拋塊石、消能塊、水墊和護坦四大類。其中，消能塊亦可歸類為拋塊石，只是塊石不像消能塊形狀、重量都一樣。同樣地，水墊和護坦工程都是標準靜水池之其中一種樣式，只是水墊有水檻，護坦沒有水檻（黃宏斌、馬國宸，2015、2016）。

#### (I) 拋塊石或放置消能塊

消能塊、拋塊石都是以其自身重量作為底床泥砂之護甲層；同時抵擋沖射流之沖擊力，由於鋪設方式係散佈在跌水下方，塊石或消能塊間之孔隙形塑出透水鋪面。在防砂壩下游處隨機置放塊石或消能塊保護基腳係常見之工法，如果防砂壩所形成之沖射流無法移動塊石或消能塊時，則塊石或消能塊足以保護底床不被沖刷或形成沖刷坑，雖然如此，沖射流仍然會穿過塊石或消能塊間隙沖刷河床，尤其是接近防砂壩壩基處之塊石或消能塊間隙產生淘刷時，導致塊石或消能塊陷落，進而危及防砂壩基礎安全。

當保護壩基之塊石或消能塊被沖射流沖離原規劃位置時，靠近壩基處就會出現沖刷坑。一般而言，低壩沖射流因為沖刷力小，較不易產生沖刷坑；高壩則較易產生沖刷坑。當塊石或消能塊固定在防砂壩壩基處不被沖走時，水流挾砂力有可能在塊石或消能塊下游處之河床才開始發揮沖刷作用，亦即會在鋪設塊石或消能塊下游處產生沖刷坑。如果塊石或消能塊被水流帶走時，則會在沖刷坑下游處隨機落淤。

#### (II) 水墊和護坦工程

混凝土水墊或護坦為不透水構造物，以混凝土鋪面抵擋跌水沖擊力並且覆蓋在河床泥砂上面，防止沖刷現象發生。護坦頭部厚度設計主要在減少堰壩產生之上頂力和跌水射流漩渦產生之沖刷力，因此護坦頭部之厚度及其水密性非常重要，而且護坦與堰壩之接合處必須以鋼筋或鋼骨連接以防止脫落或產生裂縫，堰壩前趾設置截水牆也可以增加滲流長度以降低滲流壓力或上頂力。護坦厚度不足時，不僅會被跌水射流之沖擊力破壞，水流中夾雜之礫石撞擊也會產生沖刷坑。護坦長度不夠長時，射流會打在護坦下游處，水躍長度也可能超出護坦範圍，導致護坦下游河床沖刷坑發生現象。

### (III) 副壩

水土保持手冊建議副壩係規劃在地質良好區域，可是沒有考慮主、副壩間河床坡度和主壩截水牆深度，以至於坡度較陡野溪之副壩重疊高度不足而產生沖刷坑，嚴重者甚至淘空主壩壩基。

## IV、結果與討論

依據現場勘查結果可以推論沖刷坑形成之可能原因有：防砂壩、水墊或護坦基礎高程設計較高、消能塊不足以抵擋水流沖擊、護坦厚度不足、副壩重疊高設計未考慮河床坡度、護坦設計未考慮管湧等。

沖刷坑大致上呈現兩類形式：一類是離防砂壩一段距離後才在其下游處形成之沖刷坑；另一類是緊鄰防砂壩所形成之沖刷坑。一般而言，沖刷時間越長，沖刷坑之上緣就越緊鄰防砂壩。

當規劃設計橫向構造物如防砂壩形成河床高程差時，因為水流勢能轉換為動能之關係，以射流狀態向下游沖擊。藉由渠槽試驗結果瞭解壩高越高、河床粒徑越小、河床坡度越陡，以及沖刷時間越長等因素，都會造成沖刷坑越深之結果。亦即在沖積河川或野溪條件下，射流形成下游處之沖刷坑是無法避免的，雖然如此，為了保護構造物安全，有時候必須規劃適當之消能設施限制沖刷坑發展。

另外，政府單位經常在上游剛發生崩塌，大量砂石自上游陸續輸送下來，河床屬於暫時堆積狀態時，就為了保護民眾生命財產安全被要求急著施做永久橫向構造物，如防砂壩、潛壩、副壩、固床工，以及水墊或護坦等，導致橫向構造物高程設計偏高；當上游來砂量減少、河床慢慢穩定後，經常會發生橫向構造物基礎淘空現象。

## V、結論

當規劃設計橫向構造物如防砂壩形成河床高差時，因為水流勢能轉換為動能之關係，以射流狀態向下游沖擊，除非河床質是堅硬岩盤或是耐沖擊之構造物，否則防砂壩下游沖刷坑之產生係為自然現象。沖刷坑之大小、規模受到地形、地質和工程構造物本身設計等因子所影響。

依據現場勘查結果可以推論沖刷坑形成之可能原因有：防砂壩、水墊或護坦

基礎高程設計較高、消能塊不足以抵擋水流沖擊、護坦厚度不足、副壩重疊高設計未考慮河床坡度、護坦設計未考慮管湧等。

## VI、謝誌

本研究承行政院農業委員會水土保持局經費補助，得以順利完成，特此致謝。

## VII、參考文獻

- 林宏宇，2001，「消能設施對防砂壩下游局部沖刷影響之研究」，中興大學土木工程研究所碩士研究。
- 吳金洲，1990，「堰壩溢流水舌對下游河床沖刷之研究」，逢甲大學土木及水利工程研究所碩士研究。
- 陳正炎，1987，「投潭水作用下渠床沖刷剖面之研究」，台灣水利，35 卷 1 期，pp.35~52。
- 陳正炎、郭信成、鐘文傳，1993，「堰壩投潭沖刷特性因子之研究」，中華水土保持學報，24 卷 2 期，pp.18~89。
- 陳正炎、蔡建文，1995，「堰壩投潭水流沖擊力之研究」，中華水土保持學報，26(2)，pp.135~144。
- 陳佳裕，2007，「防砂壩下游水流沖擊力與局部沖刷現象之探討」，國立臺灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
- 陳聖文，2000，「防砂壩下游帶工佈置之試驗研究」。
- 黃宏斌、馬國宸，2015，「水土保持防砂構造物沖刷坑形成機制與防治方法之探討 (1/2)」，行政院農業委員會水土保持局研究報告。
- 黃宏斌、馬國宸，2016，「105 年水土保持防砂構造物沖刷坑形成機制與防治方法之探討」，行政院農業委員會水土保持局研究報告。
- 蘇重光、連惠邦，1993，「防砂壩下游天然河床受壩頂溢流沖刷之研究」，台灣水利，第 41 卷第二期，PP35~41。
- Damle, P.M., Venkatraman, C.P. and Desai, S.C., 1966, "Evaluation of scour below skijump buckets of spillways," Golden Jubilee Symposia Model and Prototype Conformity 1, Central Water and Power Research Station, pp. 154-163.
- Rajaratnam, N. and Chamani, M. R. 1995, "Energy loss at drop", Journal of

Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.33, No.3, pp.373~384.

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular No. 14, 3rd edition. 2006.

## VIII、附錄

表 1 沖刷坑深度無因次參數模式表(無坡度)

Table 1 Dimensionless models of scour-hole depth (without slope parameter)

作者	無因次參數模式
陳正炎(1987)	$\frac{h_s}{H} = 0.28 \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.48} \left( \frac{D}{H} \right)^{-1.07}$
陳正炎(1987)	$\frac{h_s}{H} = 7.894 \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.254} \left( \frac{y_t}{H} \right)^{0.214}$
陳佳裕(2007)	$\frac{h_s}{H} = 0.931 \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.63} \left( \frac{D}{H} \right)^{-0.702}$
Damle(1966)	$\frac{h_s + y_t}{H} = 0.55(gy_0)^{0.25} \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.25} \left( \frac{y_0}{H} \right)^{-0.25}$
Hartung(1957)	$\frac{h_s + y_t}{H} = 25.75 \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.32} \left( \frac{D_{95}}{H} \right)^{-0.32}$
Kotoulas(1967)	$\frac{h_s + y_t}{H} = 1.73 \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.35} \left( \frac{D_{90}}{H} \right)^{-0.4}$
Schoklitsch(1932)	$\frac{h_s + y_t}{H} = 4.75(gy_0^{5.8})^{0.285} \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.285} \left( \frac{D_{90}}{H} \right)^{-0.32}$
U.S. Department of Transportation (2006)	$\left[ \frac{h_s}{R}, \frac{W_s}{R}, \frac{L_s}{R}, \frac{V_s}{R^3} \right] = C_s C_h \left( \frac{\alpha}{\sigma^{1/3}} \right) \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^\beta \left( \frac{t}{316} \right)^\theta$

表 2 沖刷坑深度無因次模式表(有坡度)

Table 2 Dimensionless models of scour-hole depth (with slope parameter)

作者	無因次參數模式
陳正炎等(1993)	$\frac{h_s}{H} = 1.69 \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.368} \left( \frac{D}{H} \right)^{-0.316}$
	$\frac{h_s}{H} = 4.10 \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.320} \left( \frac{D}{H} \right)^{-0.257} S^{0.216}$
陳聖文(2000)	$\frac{h_s}{H} = 12.46 \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.461} e^{5.332S}$
吳金洲(1990)	$\frac{h_s + y_t}{H} = 4.05y_0 +$
	$6.53y_0 \log \left( \begin{array}{l} 0.159(S_s - 1)^{-1.5} \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{1.5} \left( \frac{y_0}{H} \right)^3 \left( \frac{D}{H} \right)^{-1.5} + \\ 0.093 \left( (S_s - 1)^{-1.5} \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.5} \left( \frac{y_0}{H} \right)^{-1} \left( \frac{D}{H} \right)^{-1.5} \end{array} \right)$
林宏宇(護坦 2001)	$\frac{h_s}{H} = 3.99 \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.478} \left( \frac{L_s}{H} \right)^{-0.043} e^{13.179S}$
林宏宇(水墊 2001)	$\frac{h_s}{H} = 3.72 \left( \frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.377} \left( \frac{L_s}{H} \right)^{-0.013} \left( \frac{y}{H} \right)^{0.265}$

南澳北溪災害防治二期工程(柑子坑)



照片 1 水墊工程  
Pic.1 Water cushion



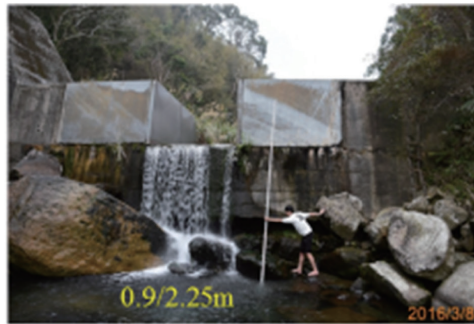
小礮溪二支流及冷水坑  
野溪設施補強維護工程



小礮溪潛壩下游護坦

照片 2 護坦工程  
Pic.2 Apron

花園溪(油羅山橋)副壩

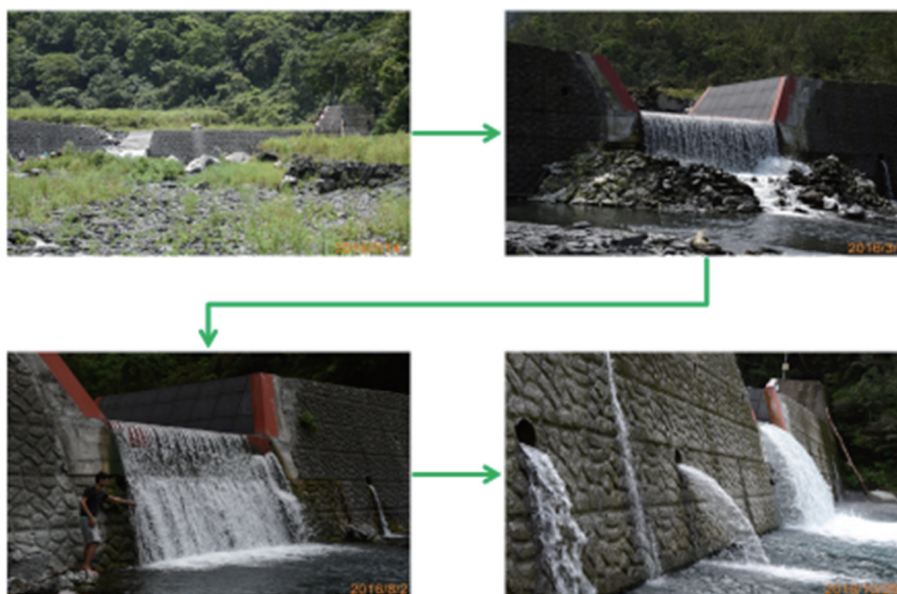


照片 3 副壩  
Pic.3 Subsidiary dam

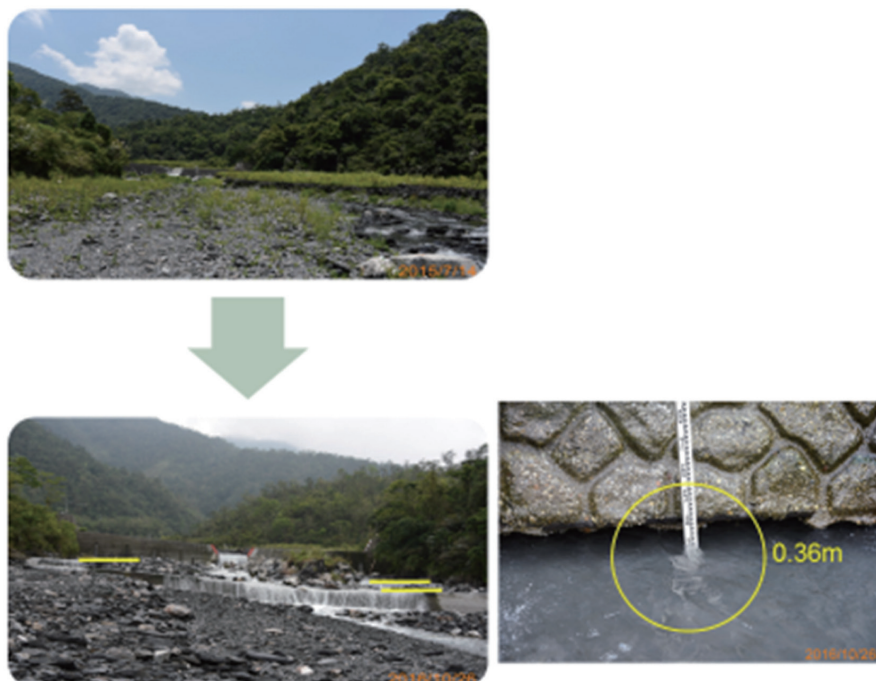
南澳北溪右岸治理工程



照片 4 水墊工程厚度破壞  
Pic.4 Destruction of water cushion



照片 5 防砂壩沖淤過程 (1)  
Pic.5 Scour and deposition process of check dam (1)



照片 6 防砂壩沖淤過程 (2)  
Pic.6 Scour and deposition process of check dam (2)

## 蓮華池地質敏感區位地質特性與崩坍潛勢之研究

曾俊偉<sup>1</sup> 王豐仁<sup>2\*</sup>

**【摘要】**林業試驗所蓮華池地區於民國 103 年底由中央地質調查所劃設為山崩地滑地質敏感區，公告之主要目的在於減輕一旦崩塌所造成的災害。近年極端氣候情況之影響，地質敏感區可能發生崩塌的機率大增，其後續影響與處理對策等均值得進一步探究。本研究根據相關環境地質資料與文獻，探討蓮華池地區山崩地滑地質敏感區之地質條件與活動潛在性。利用地質鑽探及相關力學試驗，進行地質鑽探 5 孔，獲取岩芯以進行岩性判釋與分析；同時進行標準貫入試驗、土壤單軸試驗、土壤直接剪力試驗、岩石單壓試驗、岩石弱面直剪試驗以獲取地層力學特性。並於鑽探完成後安裝傾斜管，進行實際之邊坡潛在活動性監測。研究結果顯示，蓮華池地區山崩地滑地質敏感區，地表以表土層與崩積層為主，岩層露頭稀少，其岩性以石英質砂岩、粉砂岩為主，層面傾角高陡（層面傾角約  $56^{\circ} \sim 72^{\circ}$ ），節理發育密集，並有局部剪裂現象呈破碎夾泥狀態。研判若無開挖坡址導致岩層出露之情形下，沿層面順向滑動之潛勢較小；再由鑽探岩芯判釋，研究區地表下岩層有明顯局部剪裂現象，呈破碎夾泥狀態，且深度達鑽探調查深度（25 公尺），故潛在破壞機制可能以表層岩屑崩滑破壞與砂土層（軟弱材料）圓弧型滑動為主。經由為期半年（汛期期間）之地中傾斜管實際觀測成果顯示：本計畫邊坡地中傾斜管觀測變位量皆在數公釐（mm）之內，且無固定方向趨勢，顯示變位量應屬一般監測誤差，研判監測邊坡並無滑動之跡象。而經由岩芯判釋、地質剖面研析顯示：地質敏感區位置邊坡較高處（BH-1 孔區域）具厚度約 17~20 公尺之崩積層，其膠結不佳，雖目前觀測仍屬穩定狀態，惟建議該區仍為本地質敏感區之較有深層滑動潛勢之區域。

**【關鍵詞】**地質敏感區、破壞機制

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 台北市應用地質技師公會常務監事，通訊作者。

Geologist, Taipei Association of Professional Applied Geologists. \*Corresponding Author. E-mail: geodennis99@gmail.com

# STUDY ON THE POTENTIAL COLLAPSE AND GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AT THE LIENHUACHIH GEOLOGICAL SENSITIVE AREA

Chun-Wei Tseng<sup>1</sup> Feng-Jen Wang<sup>2\*</sup>

**【 Abstract 】** According to the survey data of the Central Geological Survey, there is a geological sensitive area near the Lienhuachih area and they designated this area as potential landslides area. The main purpose of the geological sensitive area announcement is to mitigate the damage caused by any possible collapse. The impacts of extreme weather increased significantly in recent years, and therefore the probability of the occurrence of landslide in the geo-sensitive areas is also increased, its follow-up influences and treatment strategies are worthy of further exploration. Based on the relevant environmental geological data and literature, this study explores the geological conditions and potential of the geologic sensitive area of landslide in Lienhuachih area. In this study, geological drilling data(5 holes) and related mechanics tests were used to obtain the core for lithologic interpretation and analysis. At the same time, Using soil test and rock test to obtain the mechanical properties of the formation. And after the completion of drilling to install the tilt pipe, the actual potential of slope activity observed. The results show that the geologic sensitive area of landslide in Lienhuachih area is mainly characterized by topsoil and sediments, and the outcrops of the strata are rare, and the lithology is mainly composed of quartz sandstone and siltstone. The inclination angle is steep ( $56^{\circ} \sim 72^{\circ}$ ), joint development, and local. The results of the observation of the tilt pipe during the period of six months (during the flood season) show that the observed displacement is within a few millimeters (mm), and there is no observed trend direction, there is no signs of sliding. The slope should be stable without change. BH-1 pore area with a thickness of about 17 ~ 20 meters of the collapse layer, the cement is poor, although the current observation is still Is stable, but it is recommended that the area is still in potential of the region of the deeper sliding.

**【 Key words 】** Geological sensitive area, Failure mechanism.

## I、前言

臺灣因位於歐亞板塊及菲律賓板塊交接處，為一板塊聚合的接觸型式，在板塊不斷擠壓之下，六百萬年前開始浮出海平面，且不斷的隆起抬高，致使地層彎曲和斷裂，然而這是造山運動不可免的現象，所以地形陡峭、地質脆弱；加上臺灣位於北太平洋西部及南中國海所形成颱風常經之路徑上，颱風常帶來大量水氣，加上山區地形效應，易於形成豪大雨；聚合板塊的地質特性加上颱風、地震、

豪雨等外力侵襲，所以時常有崩塌、地滑、土石流等天然災害。林肯大郡順向坡、88 風災、國道 3 號順向坡等重大地質災害事件，更引起重大傷亡，有鑑於此，民國 100 年，經濟部劃設地滑地質敏感區，其中包括山崩與地滑地質敏感區的劃設公告，以提醒國人對於地質環境調查的重要性。

本研究旨在瞭解林業試驗所蓮華池試驗林地所處地質敏感區崩塌的穩定性潛勢，其潛在之崩塌危險性，因該區域平常並無頻繁之開發行為，故甚少有人在此進行鑽探、地表地質調查等工作，故本研究於蓮華池附近區域選擇一處地質敏感區進行鑽探、地表地質調查及傾斜管觀測，期望能了解該處地質敏感區位是否具有崩塌潛勢，若能對該處崩塌潛勢與潛在之發生機制有所了解，則對於後續影響、處理對策等，均值得進一步參考。

## II、研究區域地質特性

### (I) 研究區域概況及地質特性

研究區位於水里溪上游區域，位置在農業委員會林業試驗所蓮華池試驗林區域內，基地位置如圖 1 所示。經由套繪經濟部中央地質調查所公布之南投縣山崩與地滑地質敏感區資料，屬於公告之山崩與地滑地質敏感區範圍位置 (如圖 2 所示)。



圖 1 研究區位置圖

Fig.1 Study Location

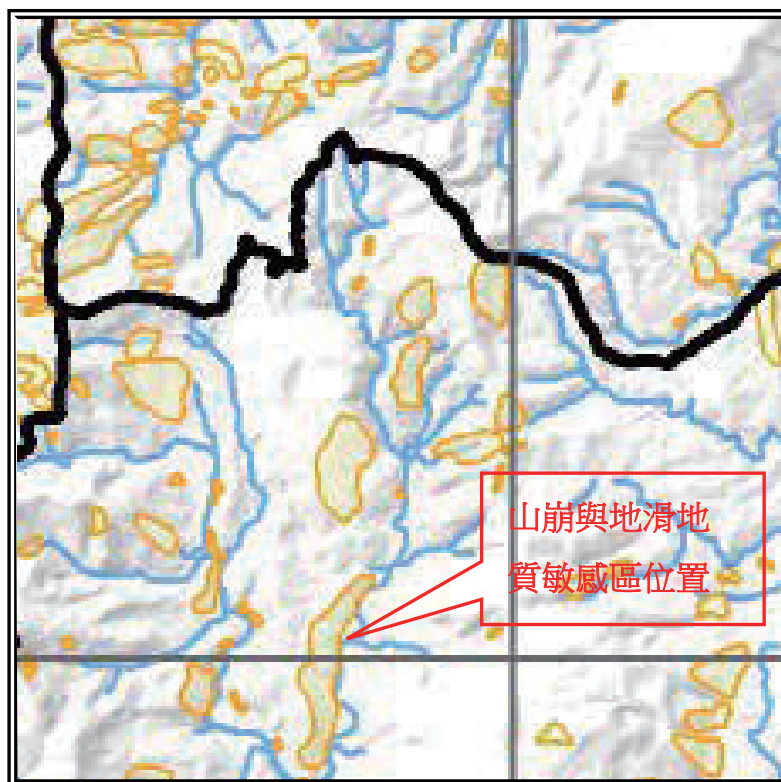


圖 2 研究區域山崩與地滑地質敏感區位置圖

Fig.2 Location of the area

1. 交通情形：研究區由埔里地區經台 21 線南下往日月潭方向，經桃米社區轉投 66 縣道可抵達。
2. 地形：研究區海拔高度介於 576~925 公尺之間，屬中低海拔高度地區。
3. 土壤：為趨向紅化作用之黃壤，土壤可分為正淡瘠弱育土 (Typic Dystrochrept) 及正簡極育土 (Typic Hapludult) 兩類，前者化育自頁岩，含 36 % 至 46 % 的粘粒。表土 pH 值 4.2，到深度 1.2 公尺處增至 5.0。鹽基飽和度不超過 10 %。粘粒主要成分為間層水雲母 - 蛭石，幾乎無石英存在。表土坩粒的粘土礦物種類與粘粒相同，惟尚有少量的長石類或綠泥石，但是心土的坩粒含蛭石量並不顯著。後者化育自砂岩，其含砂粒量皆超過 60 %。表土 pH 值為 4.4，到深度 1 公尺處增至 4.8。鹽基飽和度亦不到 10 %。粘粒成分的粘土礦物種類與前者相同，為所含之間層水雲母 - 蛭石量較少。坩粒主含石英及少量的水雲母 (黃正良等，2002)。
4. 地層：依據中央地質調查所相關文獻圖資顯示，研究區為始新世至漸新世的白冷層，白冷層主要岩性為為厚層至塊狀粗粒至礫質長石砂岩與石英砂岩，夾厚

度不一的頁岩。

5. 地質構造：研究區鄰近之地質構造為東北側之桃米坑向斜、與南側之車埕斷層。桃米坑向斜向斜呈北北東方向延伸，向斜兩翼均由白冷層構成。此向斜北段之西翼接外盤安背斜之東翼，岩層之位態各地變化頗大，其距離研究區約 1.5 公里遠；車埕斷層為水里坑斷層之一分支，從水里東北方自水里坑斷層分出，大體沿著水里溪以北北東方向延展，推測本斷層為一東側相對上昇之逆斷層，斷距或層位落差不大，其距離研究區約 1 公里遠。
6. 氣候特性：試驗區年平均降雨量約 2285.0mm，較臺灣年平均降雨量 2510mm 略少，月降雨量分布極不平均，乾濕季節分明，4~9 月為濕季，降雨量佔全年的 84.08%，10 月至翌年 3 月降雨量佔全年的 15.92%，其中 11 月份降雨量最少。年平均氣溫 20.8℃，年溫差 10.4℃，年平均皿蒸發量約為 939.1mm，年平均相對溼度為 87.1%(陸象豫等，2008)。降雨型態主要為 3、4 及 5 月份的鋒面雨和夏季對流雨與颱風帶來之暴雨。每年 6 月為降雨量最高峰，平均為 510.3mm，佔全年總降雨量的 22.33%，11 月降雨量最少，僅 24.4mm (黃正良，2013)。蓮華池集水區氣候因子如表 1 所示。

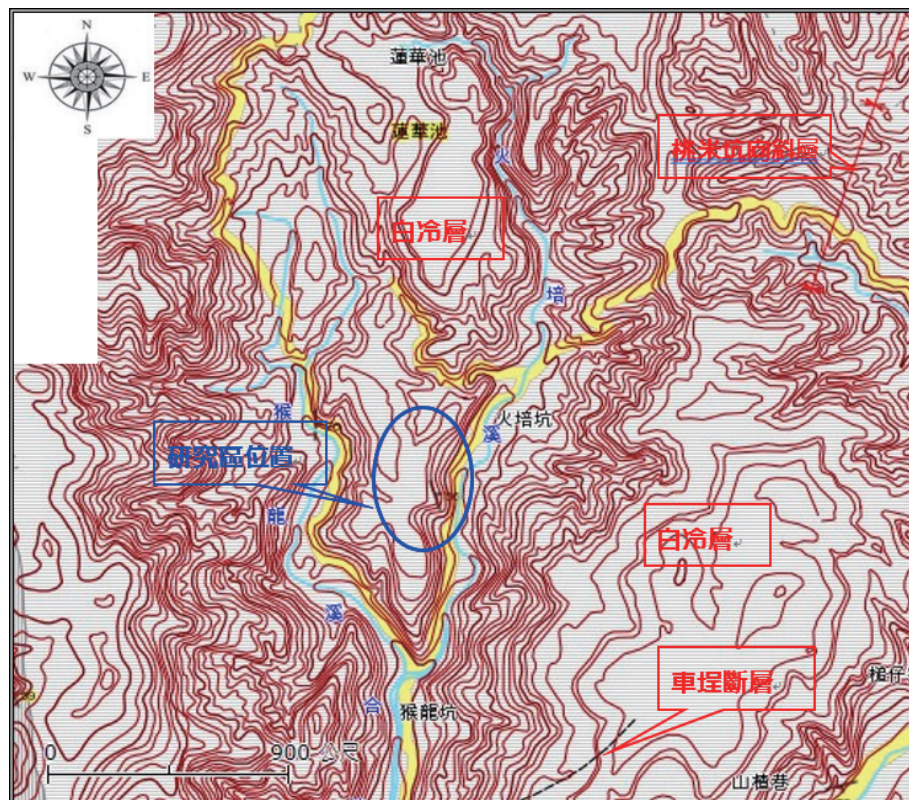


圖 3 區域地質圖 (套繪自中央地質調查所地質圖幅埔里圖幅, 2000 年)

Fig.3 Regional geological map



圖 4 研究區影像圖 (套繪 google 影像, 2000 年)  
Fig.4 Image of the study area

表 1 蓮華池集水區氣象因子

Table1 Meteorological Factors in the Lienhuachih watersheds.

	Avg. Rainfall (mm)	Avg. Daily Temp. (°C)	Avg. Relative Humidity (%)	Avg. ET. (mm)
Jan.	47.7	14.8	85.8	55.7
Feb.	86.1	16.1	87.1	56.7
Mar.	103.6	18.3	87.0	75.5
Apr.	138.2	21.1	87.2	83.5
May	322.4	23.2	88.4	84.5
Jun.	510.3	24.4	88.4	86.5
Jul.	373.1	25.2	86.3	108.2
Aug.	404.2	24.8	88.0	97.2
Sept.	196.0	24.1	88.0	89.9
Oct.	45.8	22.4	86.8	83.4
Nov.	24.4	19.5	86.5	65.6
Dec.	33.3	16.1	85.4	52.4
Avg.		20.8	87.1	
Total	2285.0			939.1

(陸象豫等, 2008)

### 試驗區植群概述：

研究區為天然闊葉林，為次亞熱帶常綠林，主要由樟科與殼斗科植物所構成之樟櫛林 (lauro-fagaceae forest)。另有稀有及保育樹種，包括桃實百日青 (*Podocarpus nakaii*)、台灣紅豆樹 (*Ormosia formosana*)、柳葉山茶 (*Camellia salicifolia*)、垢果山茶 (*Camellia furfuracea*)。(黃正良，2010)

## (II) 研究方法

本研究之內容包括研究區之地表地質調查、地質鑽探、力學試驗、現場地下水位監測、邊坡穩定性(地中傾斜管)監測等工作。在研究區內選定潛在崩場地範圍之適當地點，進行地層鑽探；採獲岩芯進行岩性判釋；並取岩芯樣本於實驗室進行物理和力學試驗；於潛在崩場地坡面裝置傾斜管以供定期監測其變動量。同時依據鑽探岩芯判釋、與力學試驗資料分析崩場地結構、地層特性、傾斜變動量，以便了解該山崩與地滑地質敏感區之潛在破壞機制、潛在崩塌範圍、與實際的穩定性情形。工作包括：

1. 鑽探位置及放樣：鑽探孔位 5 處 (BH-1-BH-5)，鑽孔位置如圖 5 所示，各鑽孔深度在 20-25 公尺之間，總深度 120 公尺 (如表二所示)。鑽探作業施作：包括現場鑽探移機架搬運、給水設備、標準貫入試驗、劈管取樣、岩芯箱及彩色照片、薄管取樣等項目。
2. 室內各項試驗：包括土壤一般物理試驗、岩石單壓試驗、岩石弱面直剪試驗等。
3. 地表地質調查、地質剖面繪製，研判潛在破壞機制、潛在崩塌範圍。
4. 傾斜管埋設及監測：於各鑽孔安裝傾斜管，埋設裝置完成後，俟其狀態穩定時作其基準值量測；爾後施作為期半年 (汛期期間) 之地中傾斜管實際觀測。



圖 5 鑽孔位置圖  
Fig.5 Locations of drilling holes

### III、結果與討論

#### (I) 地質鑽探岩芯判釋、試驗成果、與地質剖面研析

經由岩芯判釋成果，將研究區鑽探岩芯綜整說明如下：

1. BH-1 孔：0~3 公尺：表土層；3~20 公尺：崩積層；20~25 公尺：砂岩，粗粒，黃棕色至淺灰色，有風化與破碎現象。
2. BH-2 孔：0~1.1 公尺：風化岩屑；1.1~15.7 公尺：細砂岩至頁岩；15.7~25 公尺：粉砂岩。其中多處位置有破碎夾泥現象。
3. BH-3 孔：0~4.95 公尺：表土層；4.95~20 公尺：粉砂岩至頁岩，灰黑色。
4. BH-4 孔：0~2 公尺：表土層；2~25 公尺：粉砂岩至中粒砂岩，灰至淺灰色，其中多處位置有破碎夾泥現象。
5. BH-5 孔：0~3 公尺：表土層；3~25 公尺：粉砂岩，灰至灰黑色；其中局部位置有破碎夾泥現象。

彙整岩芯之岩石力學試驗結果，研究區域之粗粒砂岩單強度約為 21.42kg/

cm<sup>2</sup>；粉砂岩單強度約在 44.71~133.80 kg/cm<sup>2</sup>，岩石弱面直剪試驗 C<sub>p</sub> 約在 0.89~1.49 kg/cm<sup>2</sup>， $\phi$  p 約在 33.1° ~34.2°，Cr 約在 0.41~0.67 kg/cm<sup>2</sup>， $\phi$  r 約在 20.7° ~27.3°。

綜整地表地質調查與岩芯判釋成果，繪製研究區之地質剖面，如圖 7 與圖 8 所示，成果顯示：研究區地表表面為厚度約 1.1~3 公尺之表土層，其下為細砂岩、粉砂岩以及頁岩，其中 BH-1 地表以下 3~20 公尺為崩積層，由鬆散之岩塊、砂土等組成，其下方岩層為粗粒砂岩層。研判潛在崩塌地位置在 BH-1 號孔上方稜線至 BH-1 號孔下方約 30 公尺處範圍，未達 BH-2 號孔位置。

表 2 現場鑽探取樣工作數量統計表  
Table2 Test items of each drilling hole

鑽孔編號	鑽孔深度 (公尺)	標準貫入 試驗 (次)	劈管取樣 (次)	土壤一般 物理試驗 (組)	岩石單壓 試驗 (組)	岩石弱面 直剪試驗 (組)	傾斜管安 裝 (公尺)
BH-1	25	12	8	8	1	0	25
BH-2	25	1	1	1	1	1	25
BH-3	20	4	2	2	1	1	20
BH-4	25	2	2	1	1	0	25
BH-5	25	8	7	7	1	1	25
合計	120	27	19	19	5	3	120

## (II) 崩坍潛勢區地質特性

經由套繪研究區位置之環境地質資料(中央地質調查所「地質資料整核查詢系統/環境地質圖」)，崩坍潛勢區及鄰近區域具有岩屑崩滑與順向坡之潛勢可能(如圖 6)。將環境地質圖資與現地情況調查對比顯示，數處岩屑崩滑潛勢面積皆小，皆沿著道路上邊坡發育，研判應與道路開挖擾動有關，且目前多已由道路護坡工程噴漿保護，噴漿保護區域再次滑動的可能較小，但因為研究區地表表土層局部夾有岩屑並有崩積層存在，並不排除研究區域內無工程保護位置仍有發生岩屑崩滑之可能。順向坡潛勢範圍面積稍大，同時由現地地表勘查顯示，研究區域地表多為林木草地等覆蓋，地層以表土層與崩積層為主，岩層露頭稀少，量測之層面位態為 N10° W~20° E/56° ~72° E，層面傾角高陡，高於或接近邊坡坡面，研

判沿層面順向滑動之潛勢較小，若無開挖坡址導致岩層出露之情形下，較無形成順向滑動之潛勢。

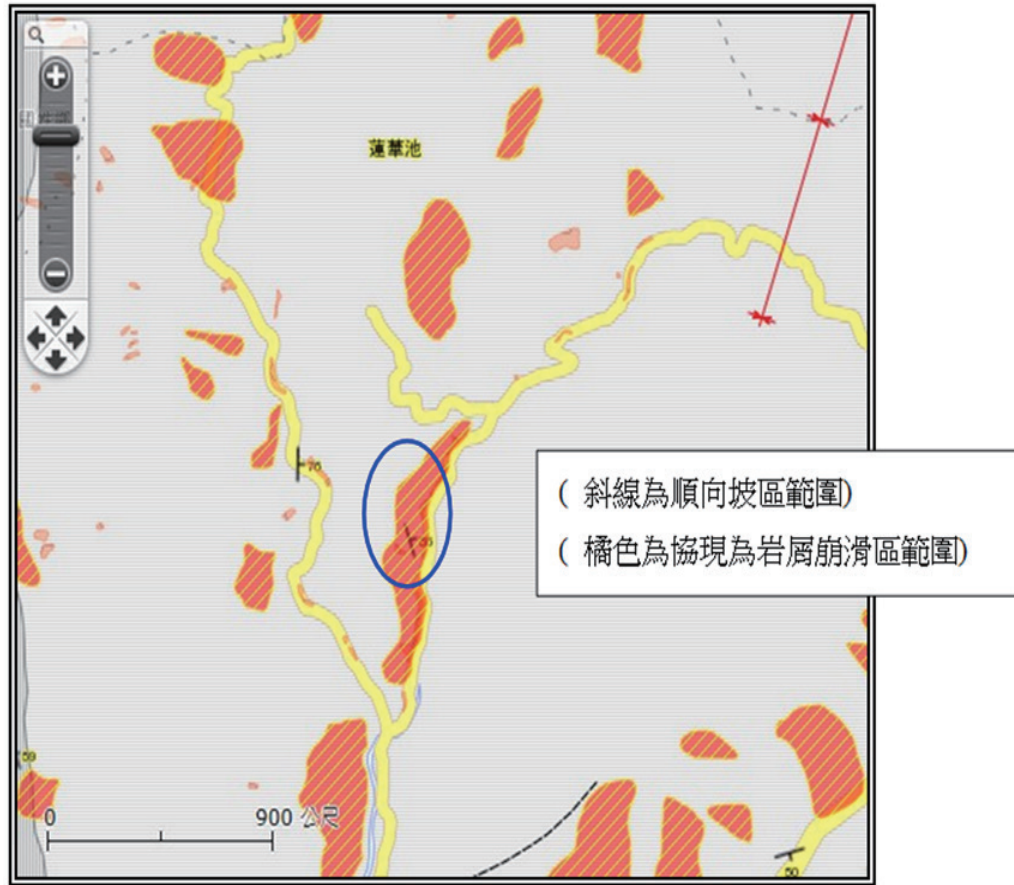


圖 6 環境地質圖  
Fig.6 Geological map

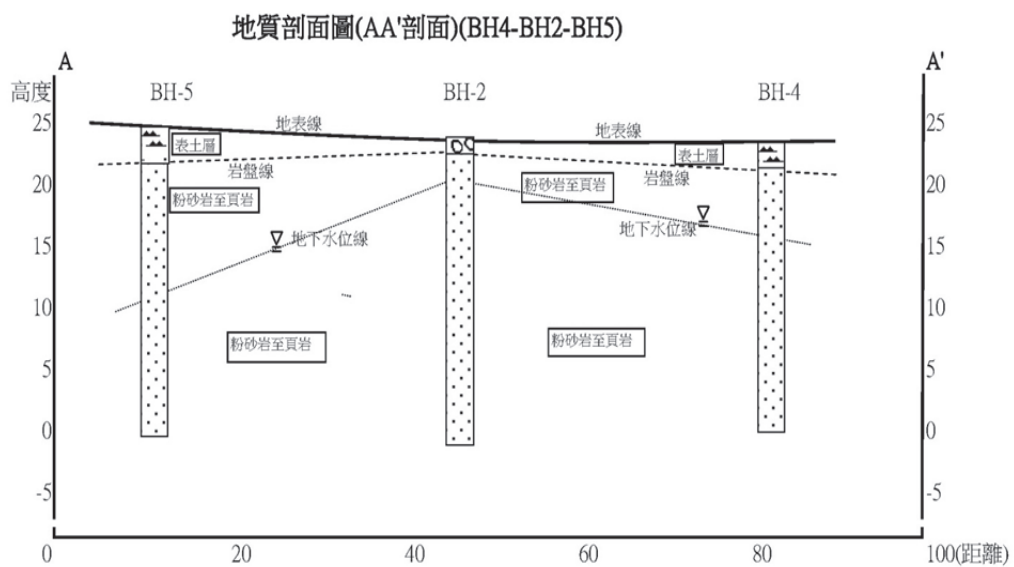


圖 7 地質剖面圖 (A 剖面)(橫剖面)  
Fig.7 Geological characteristics of profile A

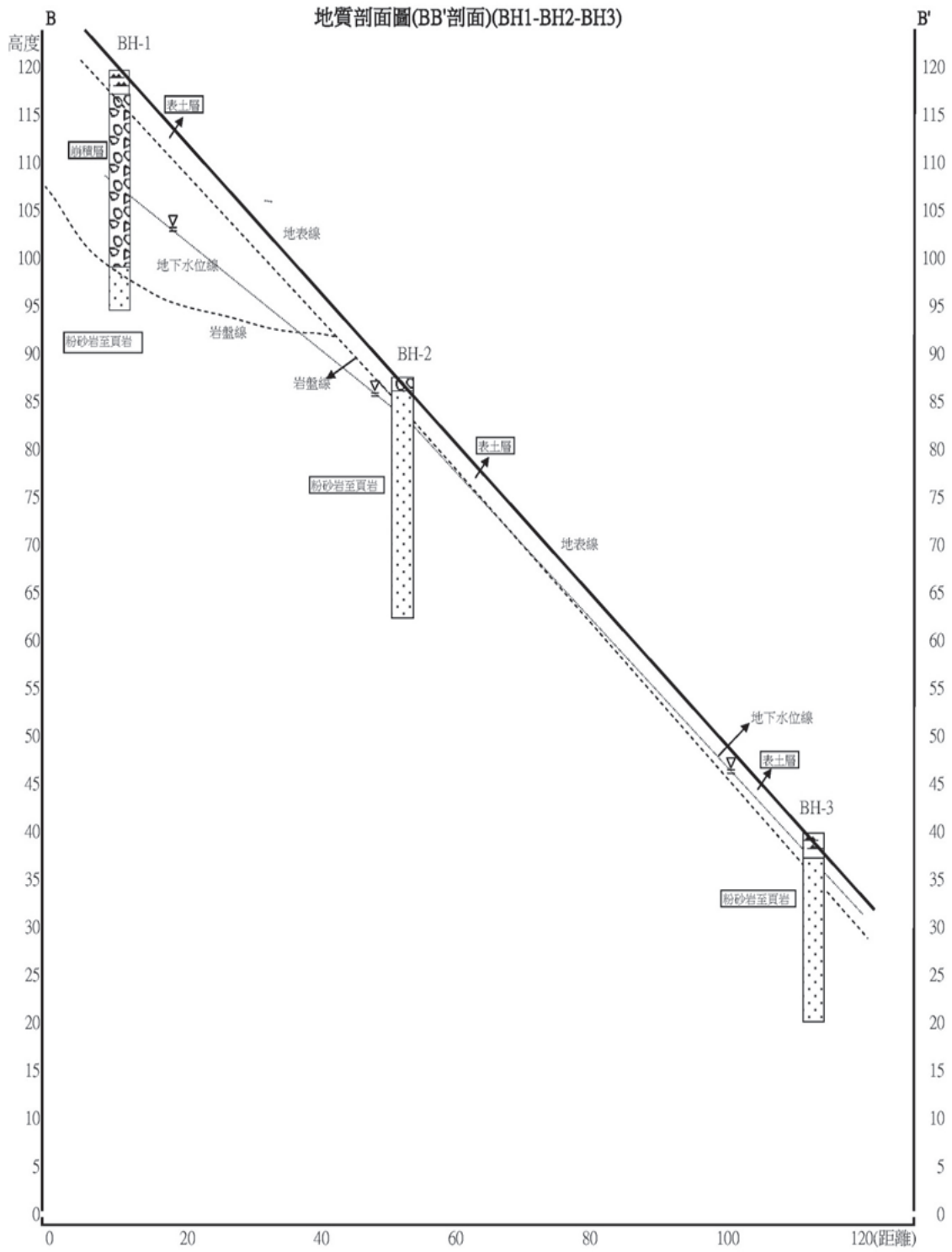


圖 8 地質剖面圖 (B 剖面)(縱剖面)  
Fig.8 Geological characteristics of profile B

### (III) 地質敏感區地下水位與降雨監測成果

經由現地裝設於地質敏感區之鑽孔來量測地下水位，並配合該區域降雨統計，將之彙整如圖 9 所示。其中由 2016 年一整年的雨量監測顯示，整年中主要最大降雨為 6~9 月，主要降雨後水位升高明顯，主要降雨結束後約 2 週時間地下水位才逐步下降。

### (IV) 地質敏感區邊坡穩定性監測成果

經由現地裝設於地質敏感區之傾斜管監測，原則上每隔 30 日內觀測一次，惟於防汛期之 7、8、9 月每 15 天量測一次，總計完成 10 次之量測作業。地中傾斜管觀測成果 (如圖 10~11) 顯示：本計畫邊坡地中傾斜管觀測變位量皆在數公釐 (mm) 之內，且無固定方向趨勢，顯示上述變位量應屬一般監測誤差，研判本計畫邊坡並無滑動之跡象，邊坡處於穩定狀態。在無特殊外力影響情形之下，邊坡應穩定無變化。

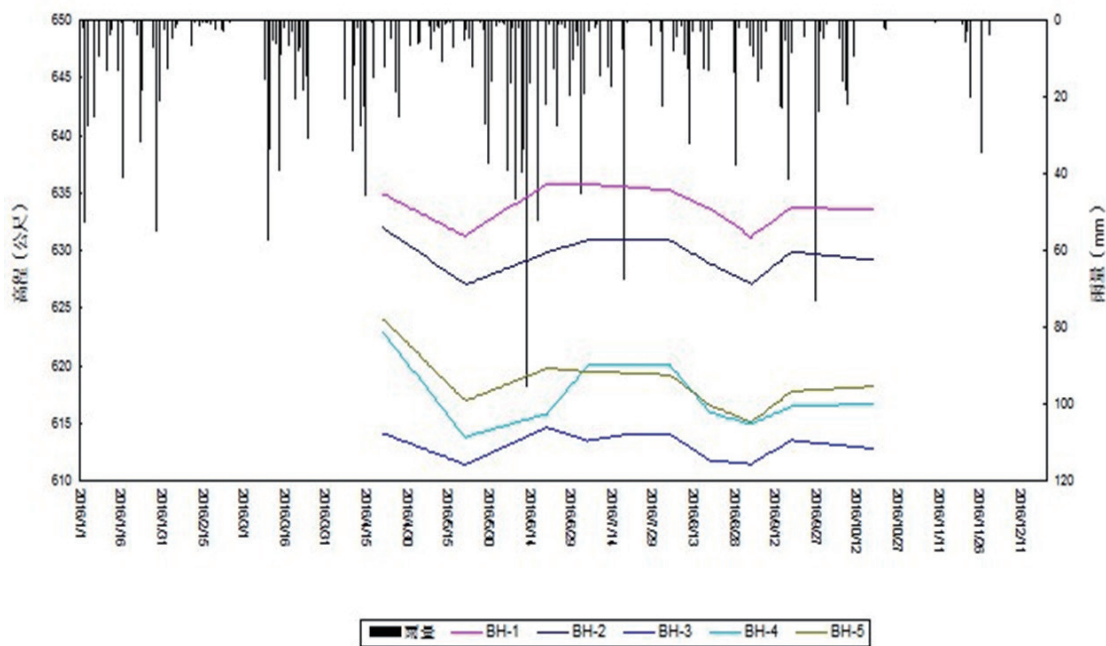


圖 9 地下水位與降雨統計圖  
Fig.9 Ground water level and rainfall amounts

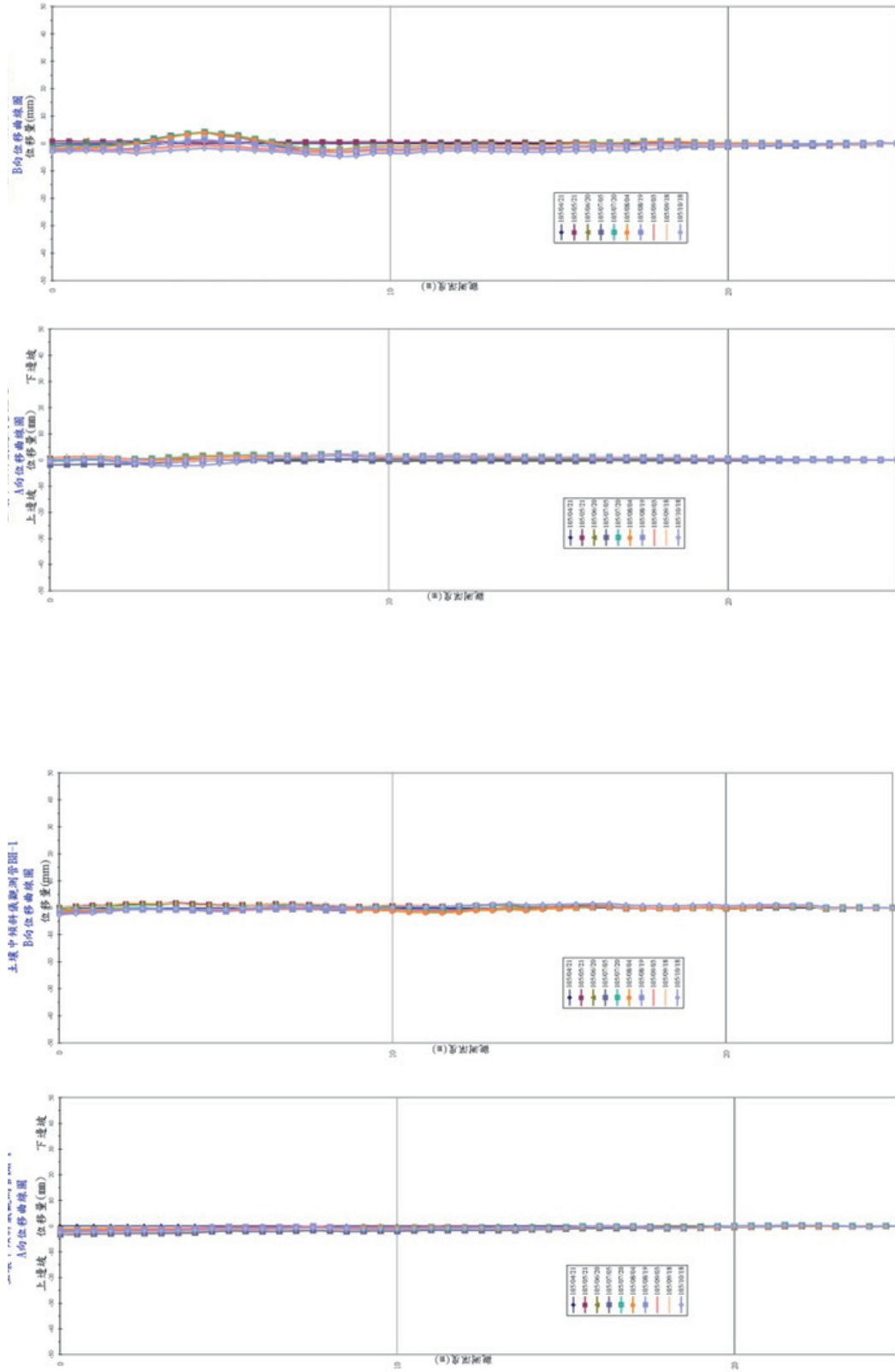


圖 11 地中傾斜管觀測成果圖 (BH-2 孔)  
Fig.11 SIS curve(Hole BH-2)

圖 10 地中傾斜管觀測成果圖 (BH-1 孔)  
Fig.10 SIS curve(Hole BH-1)

## IV、結論

1. 由地質鑽探岩芯判釋，可以精確輔助配合研判潛在崩塌地位置與範圍，由於 BH-1 地表以下 3~20 公尺為崩積層，配合地質剖面的研析，研判潛在崩塌地位置在 BH-1 上方稜線至 BH-1 下方約 30 公尺處範圍，未達 BH-2 位置。
2. 由於潛在崩塌地位置大致為地下 0~3 公尺為表土層，地表下 3~20 公尺為崩積層由鬆散之岩塊、砂土等組成，其下方岩層為粗粒砂岩層，考量崩積層有約為 17 公尺的厚度，研判潛在崩塌地之破壞機制並非為順向坡，應較有可能為深層滑動（圓弧型破壞）。
3. 彙整岩芯之岩石力學試驗結果，研究區域之粗粒砂岩單強度約為  $21.42 \text{ kg/cm}^2$ ；粉砂岩單強度約在  $44.71 \sim 133.80 \text{ kg/cm}^2$ ，岩石弱面直剪試驗  $C_p$  約在  $0.89 \sim 1.49 \text{ kg/cm}^2$ ， $\phi_p$  約在  $33.1^\circ \sim 34.2^\circ$ ， $C_r$  約在  $0.41 \sim 0.67 \text{ kg/cm}^2$ ， $\phi_r$  約在  $20.7^\circ \sim 27.3^\circ$ 。研判其中鄰近潛在崩塌地之岩體（粗粒砂岩）有受到部分擾動影響，致較為破碎且強度較差；其於位置之粉砂岩細砂岩則無受影響現象。
4. 整年中主要最大降雨為 6~9 月，颱風季節為最主要影響降雨之因素；主要降雨後水位升高明顯，主要降雨結束後約 2 週時間地下水位才逐步下降。
5. 邊坡地中傾斜管觀測變位量皆在數公釐 (mm) 之內，且無固定方向趨勢，顯示上述變位量應屬一般監測誤差，研判邊坡並無滑動之跡象，處於穩定狀態。在無特殊外力影響情形之下，邊坡應穩定無變化。

## V、誌謝

本研究承行政院農業委員會 105 農科 -17.1.2- 森 -G1 計畫經費補助，試驗工作期間承蒙蓮華池研究中心同仁協助，謹此致謝。

## VI、參考文獻

- 工研院能資所（1992）崩塌地調查、規劃與設計手冊（地滑篇）。水土保持局委託編撰。76-77 頁。
- 中央地質調查所，「地質資料整核查詢系統 / 環境地質圖」網頁。<http://gis.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/index.cfm>。
- 中央地質調查所，地質敏感區基地地質調查與地質安全評估手冊 (2016)。

- 中央地質調查所，臺灣地質概論 - 臺灣地質圖說明書 (1984)。
- 陳培源 (2006) 台灣地質：9-1~10-16。
- 陳明杰、曾俊偉 (2013) 契約林地混農林業使用可行性及對水資源涵養影響之研究。臺大實驗林研究報告 27(3)：171-188。
- 陳明杰、曾俊偉、周明德 (2004) 應用食鹽水檢層法於九份二山崩場地地下水特性之研究。中華林學季刊 37 (3)：269-281。
- 陸象豫、黃良鑫、黃惠雪 (2008) 林業試驗所蓮華池研究中心氣象資料彙整 (1997-2007)。行政院農業委員會林業試驗所，林業叢刊第 183 號。
- 黃正良 (2010) 蓮華池天然闊葉林及杉木人工林試驗集水區水文與水質特性之探討。國立台灣大學森林環境暨資源學系博士論文。
- 黃正良、陳明杰、曹崇銘、黃志堅、傅昭憲、吳家慈 2013 蓮華池試驗集水區杉木人工林及天然闊葉林植群之比較研究。嘉大農林學報 10(2)：16-38。
- 曾俊偉、陳明杰、林介龍、曹崇銘 (2015) 農村地區不同土地利用對土壤水資源涵養量之初探。2015 森林集水區經營研討會輪文集：85-96。



## 臺東土石流特定水土保持區之劃定補償效益探討

許中立<sup>1\*</sup> 陳淑慈<sup>2</sup>

【摘要】依據水土保持法第三章第十五至二十一條規定，特定水土保持區劃定目的為保護山坡地、地質敏感區、崩塌、地滑、土石流及水源地等敏感環境，由主管機關針對亟須保護、保育的土地劃定之，嚴格限制破壞情形或全面禁止任何開發行為，是目前相關管制法令中最为嚴格者。特定水土保持區內禁止任何開發行為，卻又無任何補償措施，在民眾意識逐漸抬頭地今日易造成反彈，因此至目前公告劃定與廢止準則以來僅劃定了 74 處。特定水土保持區亦是目前少數具有天然災害風險管理精神之法定區域，但不管是地方行政機關或者是一般民眾，往往並未完全認識災害管理之精神，也增加了特定水土保持區劃定工作的困難度。政府在推行特定水土保持區的劃定過程中，常引起當地民眾的反彈或抗爭；若政府強制繼續執行，必須付出額外的執行成本或無經費給予補償，如此很可能得不到地方民眾支持，所以大多採暫緩執行劃定的策略。但若有災害發生，政府就必須付出更多災後整治和其他相關社會成本，如此情況正是經濟學之外部性問題。本文是以經濟學中之外部性理論為基礎針對臺東地區三處土石流特定水土保持區加以討論，並依據外部效果內部化方式，評估相關補償效應，以降低未來政府在劃定特定水土保持區時所要付出之執行成本。

【關鍵詞】水土保持法、特定水土保持區、土石流、外部性、外部效應。

### THE STUDY ON INDEMNIFYING BENEFIT ANALYSIS OF DESIGNATED DEBRIS FLOW SPECIFIC ZONE FOR SOIL AND WATER CONSERVATION PREVENTION IN TAITUNG COUNTY

Chung-Li Hsu<sup>1\*</sup> Shu-Tzu Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立屏東科技大學水土保持系教授，通訊作者。電子郵件：clhsu@mail.npust.edu.tw  
Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology.  
Corresponding Author. clhsu@mail.npust.edu.tw

<sup>2</sup> 國立屏東科技大學水土保持系助理。  
Assistant, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology.

**【 Abstract 】** Since the mapping and repeal act of designated specific zone for soil and water conservation prevention had promulgated on March 25, 1996, government had been completed the investigation and proposition of reservoir watershed, debris flow and landslide areas continuously in 74 zones. According to the chapter 3 in soil and water conservation law, the designated specific zone for soil and water conservation prevention mapping projects restricts the rights of excessive landuse, it causes lots of inextricable problem in promoting the policy. Besides, the designated specific zones for soil and water conservation prevention are one of a few statutory areas with the concept of nature disaster risk management in Taiwan. The executive offices or locals usually can't recognize the essential policy, which consequently increases the difficulty in its implementation. This research also illustrated the new strategies and proposed future directions of this policy. The measures of restriction often cause the inhabitants of the area to against and disobey. By the way, government had to afford the extra cost of execution to eliminate the inhabitants' resistance. Unfortunately, the result is always more and more fighting from residents and makes the government stops the related measures. If there are some disasters happening in this period, government eventually must pay more money and other related social costs to remedy the destruction from disasters. That is what we talking about the externality theory in the economics. The essay adopts the externality theory in the economics to discuss it and according to the method of solving externality problem to establish related indemnifying benefit measures. To see the government whether reduces the costs of defining the boundary of a hazard potency of debris flow.

**【 Key words 】** Soil and water conservation law, Specific zone for soil and water conservation prevention, Externality, Indemnifying benefit.

## I、前言

臺灣之山坡地地形勢陡峭、地質年代新而脆弱、又位於北半球西太平洋颱風生成區附近，每遇颱風侵襲、鋒面或梅雨季時就容易因大量的降雨而引發坡地土砂災害。其次因都市土地利用已趨於飽和，人口不斷向坡地遷移，以致於山坡地大規模的開發，不合理的利用加速災害的發生。坡地土砂災害中又以土石流(debris flow)所造成之危害為最，每當發生土石流災害，不僅造成人民生命財產的重大損失，搶修、複建的措施和相關衍生的問題也造成政府很大的負擔，更耗損難以估計的社會成本。

政府為有效管理山坡地問題，從 1950 年代起就積極展開山坡地的水土保持工作及制訂相關的法令。1961 年訂頒「臺灣省農林邊際土地宜農、宜牧、宜林分類標準」，1994 年公佈實行「水土保持法」，最近內政部研擬立法之「國土

計畫法」，顯見歷年來政府為因應實際需要，不斷的修改或增訂山坡地的管理制度，只為了促進土地合理的利用、減少災害的發生。特別是「水土保持法」立法通過後，為山坡地水土資源保育奠定較完整的法律制度，同時也對山坡地災害危害最大的土石流災害列為規範的重點之一。近年來政府積極調查土石流潛勢溪流編冊列管，且依不同危險程度劃分不同管理方式，對評定影響較為嚴重的土石流潛勢溪流劃定為土石流特定水土保持區 (specific zone for soil and water conservation prevention)，投入專款進行整治，期能降低土石流的危害。

土石流本身具有高度的不確定性，目前的知識領域尚且無法精準預測其發生的時間與規模，工程防治方法也無法完全防止土石流的發生。雖然災害的主因是天災，但對現行的山坡地管理制度也有值得再省思之處。為減少人員傷亡與財產損失，藉由對潛在土石流影響範圍劃設為特定水土保持區工作的推動，以落實山坡地的保育、利用與管理，成為工程防治方法之外的另一思考方向。

臺灣這幾年來對土石流特定水土保持區的劃定與管理一直都有在進行，自1994年公佈實施「水土保持法」、1995年「水土保持法施行細則」及1996年「特定水土保持區劃定與廢止準則」制定法源依據（顏秀峰與蘇正炎，1998）。自早期劃定作業相關規範與準則研擬工作至劃定草案與手冊實際執行，逐年檢討修正劃定技術。近年來也面臨執行層面之諸多問題，包含：工程面之治理對策究竟成效如何評量、非工程面之土地管理計畫中土地開發管制措施界定、治理後劃定範圍合理性的檢討（水庫集水區全區劃定的需要性檢討）與修訂技術規範訂定相關處理評估原則等問題，均急待進一步的創新研究。

本研究乃對於現行土石流管理制度之土石流特定水土保持區劃定必要性進行探討，而以臺東縣已劃定公告之五處特定水土保持區中三處土石流類為例，依經濟學中的外部性理論 (externality theory) 進行研究，分析其補償轉換價值，期結果可作為未來劃定補償執行工作時之決策參考。

## II、研究材料與方法

### (I) 研究區域概況

臺東縣特定水土保持區至目前為止僅公告有五處，其中土石流特定水土保持區計有三處（2017年公布臺東縣的土石流潛勢溪流計166條），另外二處為崩塌地特定水土保持區。其劃定依據為「水土保持法」第十六條第一項第五、六款之

規定，並依「特定水土保持區劃定與廢止準則」第三條第一項第六款，劃定公告為「特定水土保持區」。以下則為各區之簡要說明。（行政院農業委員會水土保持局，2017）

### 1. 華源土石流特定水土保持區

位於臺東縣太麻里鄉，為臺東縣編號 NO.32 之土石流潛勢溪流之集水範圍（目前編號改為東縣 DF125），劃定面積為 290.34 公頃，集水區面積約為 338 公頃，高程介於海拔 15~941 公尺以上，溪流全長約 2,750 公尺，溪流平均坡度約在 33% 以上，曾於 1973 年發生土石流災害。由於該區遇颱風、豪雨來襲時，研判可能形成土石流災害，對下游之橋梁與鐵公路等公共設施以及部落民眾生命財產安全造成威脅，符合應劃定為特定水土保持區之條件，劃定位置詳如圖 1。

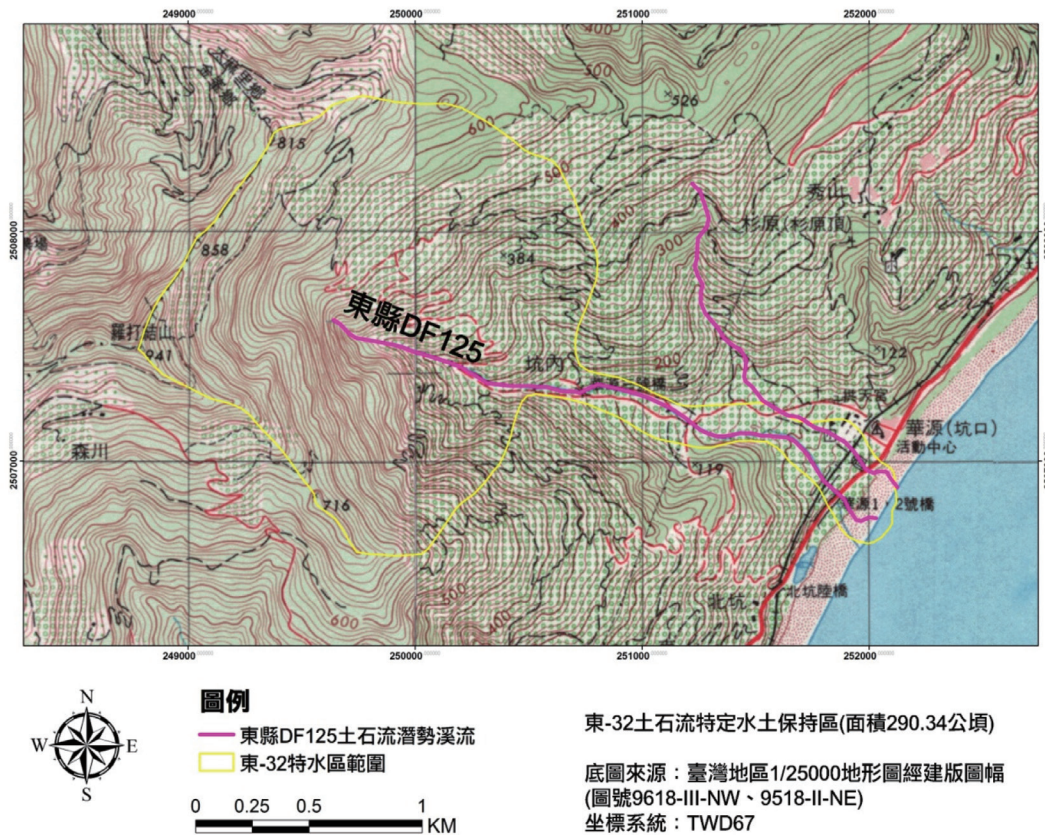


圖 1 臺東太麻里鄉東 -32 土石流特定水土保持區位置

Fig.1 Geographic location of No.32 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

### 2. 忠孝里東 -5 土石流特定水土保持區

隸屬於臺東縣成功鎮忠孝里，為臺東縣編號 NO.5 之土石流潛勢溪流之集水範圍（目前編號改為東縣 DF159），溪床坡度 30% 以上，土石流災害發生於 1985 年尼爾森颱風所造成，該次災害發生後並無詳細調查資料，依據劃定計劃面

積為 125.8 公頃，該區上游坡度甚陡，因地形因素每遇颱風、豪雨來襲，較容易造成洪水夾雜崩積物或河床堆積物而形成土石流災害，對下游之橋梁、臺 11 線公路設施以及部落民眾生命財產安全造成嚴重威脅，劃定位置詳如圖 2。

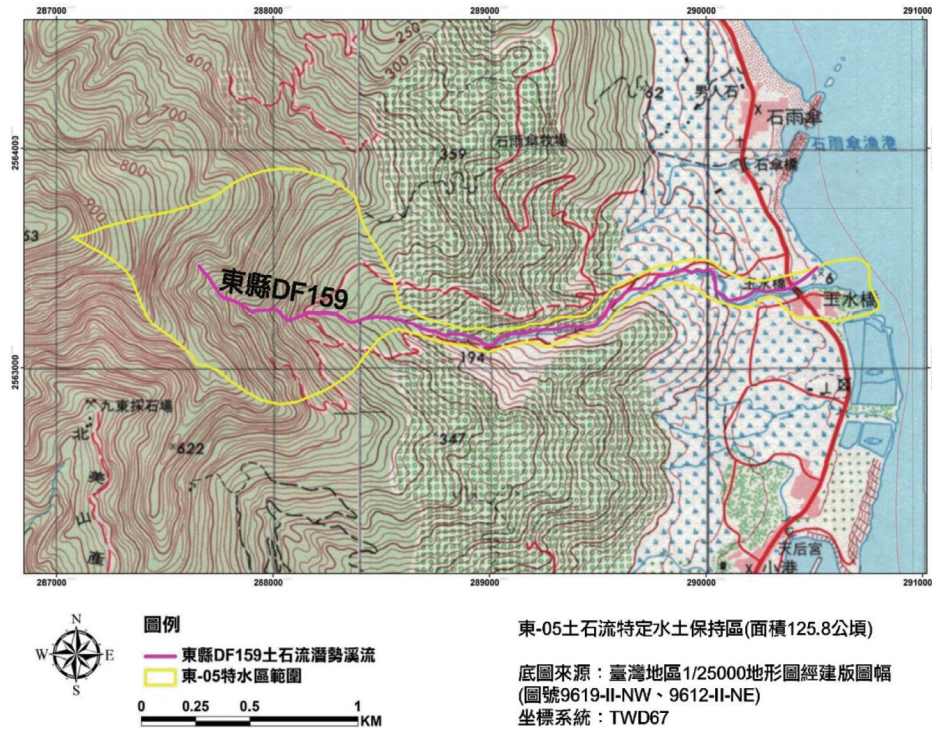


圖 2 臺東成功鎮忠孝里東 -05 土石流特定水土保持區位置

Fig.2 Geographic location of No.5 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

### 3. 桃源村東 -90 土石流特定水土保持區

隸屬於臺東縣延平鄉桃源村之鹿野溪上游的松風溪集水區，為臺東縣編號 NO.90 之土石流潛勢溪流之集水範圍（目前編號改為東縣 DF029），溪流全長 6700 公尺，高程介於 230~2100 公尺間，上游處 660 公尺之坡度較陡約 65%，中游河段坡度約 18%，下游處至出水口坡度約 10%，公告劃定面積約為 1254.72 公頃。區內多為闊葉林分佈，本區潛勢等級屬於低敏感度，劃定之目的在於減低發生土石流災害之危險，並對土地利用予以適當的限制，以落實土石流防災工作，劃定位置詳如圖 3。

依「水土保持法」第十八條及「水土保持法施行細則」第二十條規定而擬定長期水土保持計畫，針對土石流發生原因，分期、分區加以整治，加強必要之水土保持處理與維護，以減低發生土石流災害，有關劃定類別、歷史災害、劃定之目的及公告日期等整理如表 1，整治規劃分期分區處理計畫經費如表 2，長期水土保持計畫實施後，每五年應通盤檢討一次，並視實際需要變更，通盤檢討實施

之際除檢視致災因數之減少或增加外，並檢視施作工程之損毀狀況，以及防災制度的建立與否，施作發包之工程經費如表 3。

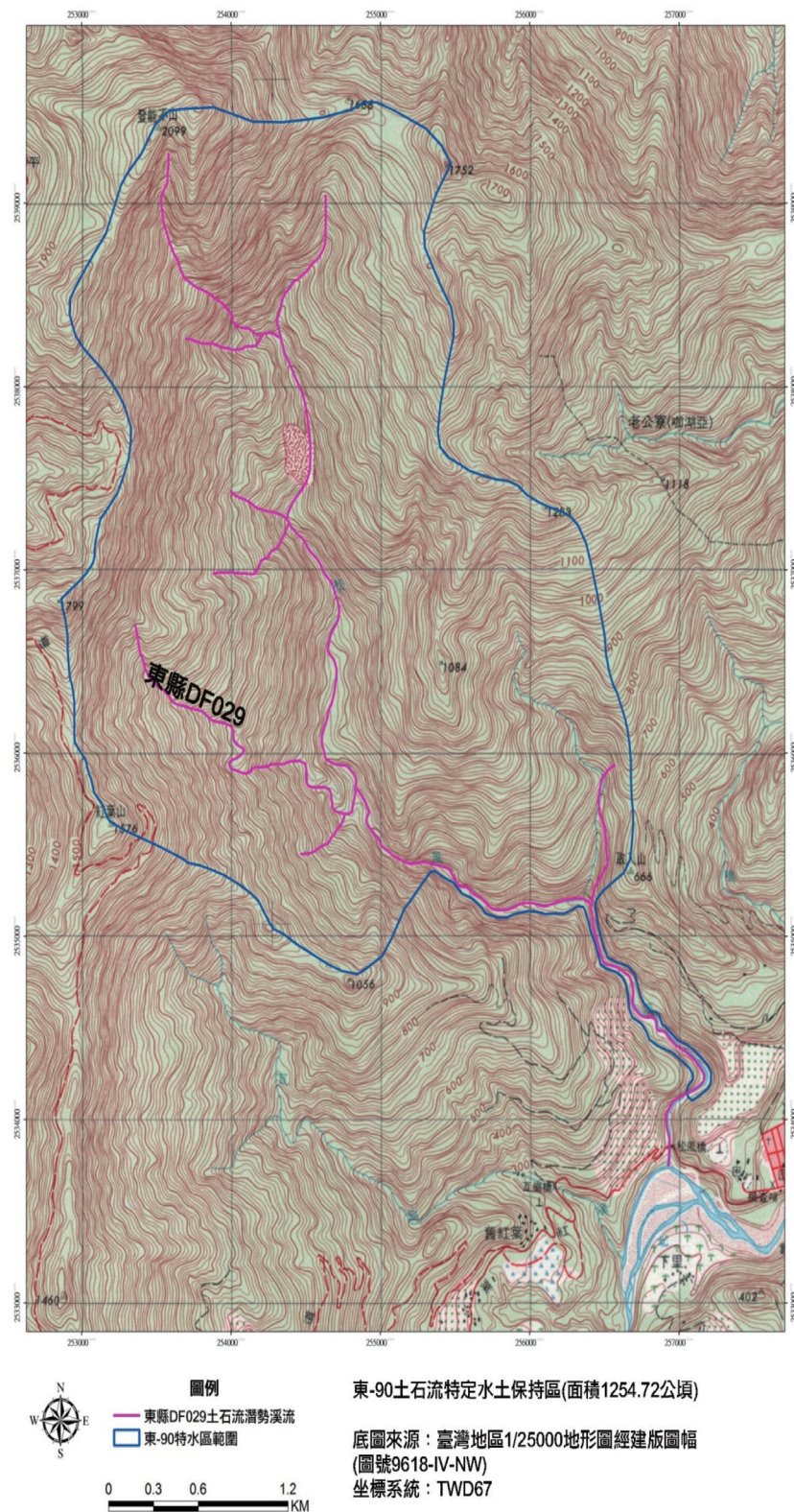


圖 3 台東延平鄉桃源村東 -90 土石流特定水土保持區位置

Fig.3 Geographic location of No.90 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

表 1 本研究劃定公告土石流特定水土保持區資料

Tab.1 Data of mapping and declaration on specific zone for soil and water conservation prevention in this research.

名稱	鄉鎮別 (鄉鎮/村裡)	類別/編號	面積 (公頃)	歷史災害/劃定之目的	保全對象	公告日期 (文號)
臺東縣太麻里鄉東-32土石流特定水土保持區	太麻里鄉華源村	土石流東縣 DF1250	290.34	1973年土石流災害，對下游之橋梁、鐵公路等公共設施、部落民眾生命安全造成威脅。	下游之橋梁、鐵公路等公共設施、部落民眾。	2001.10.16 (農水保字第901856305號)
臺東縣成功鎮東-05土石流特定水土保持區	成功鎮忠孝里	土石流東縣 DF159	124.04	1985年尼爾森台風土石流災害，對下游之橋梁、台11線公路等公共設施、部落民眾生命安全造成威脅。	下游臺11線公路與玉水橋等公共設施、部落民眾。	2001.10.16 (農水保字第901856305號)
臺東縣延平鄉東-90土石流特定水土保持區	延平鄉桃源村	土石流東縣 DF029	1,254.72	減低發生土石流災害之危險，對區內土地利用予以適當之限制。	松風溪匯入鹿野溪交匯口處東20鄉道、松風橋橋樑。	2001.10.16 (農水保字第901856305號)

表 2 本研究整治規劃分期分區處理計畫經費

Tab.2 The staging partition budget of control works planning in this research.

名稱	工程項目	工程內容	分期	概估經費 (千元)	合計經費 (千元)
臺東縣太麻里鄉東-32土石流特定水土保持區	1. 崩塌地處理	坡面植生處理	短期	1,000	13,805
	2. 野溪整治	橋梁、固床工、護岸工	短、中期	7,500	
	3. 農路水土保持	邊坡穩定、排水改善	短期	1,290	
	4. 農地水土保持	山邊溝排水、裸地植生	短、中期	1,000	
	5. 其他	告示牌及長期維護	短、中期	3,015	
成功鎮忠孝里東-5土石流特定水土保持區	1. 土石流防治	野溪上游土砂抑制、橋梁改善、下游整流	短、中期	55,650	69,047.7
	2. 崩塌地處理	坑溝崩塌整治	短、長期	8,397.7	
	3. 農地水土保持	農地排水安全系統	長期	5,000	
延平鄉桃源村東-90土石流特定水土保持區	1. 道路水土保持	道路排水改善維護	短期	5,474	11,654
	2. 農地水土保持	農地水土保持改善維護	短	6,180	

資料來源：依據長期水土保持計畫分期分區規劃設計內容。

表 3 本研究特定水土保持區水土保持處理措施經費

Tab.3 The control works planning budget of specific zone for soil and water conservation prevention in this research.

名稱	長期水土保持計畫實施	工程件數	經費 (千元)	合計經費 (千元)
臺東縣太麻里鄉東-32土石流特定水土保持區	長期水土保持計畫實施前(1979-2002年)	23	64,882	105,678
	長期水土保持計畫實施後(2003-2014年)	8	40,796	
成功鎮忠孝里東-5土石流特定水土保持區	長期水土保持計畫實施前(1995-1998年)	4	6,475	41,230
	長期水土保持計畫實施後(2003-2013年)	9	34,755	
延平鄉桃源村東-90土石流特定水土保持區	長期水土保持計畫實施前	0	0	0
	長期水土保持計畫實施後	0	0	

由表 2 長期水土保持計畫所規劃整治經費與表 3 實際施作整治工程相較之下，管理單位將視特定水土保持區內之工程需求編列工程預算，因此實際執行之工程經費將與長期水土保持計畫編列工程經費有落差，甚至有無須興辦工程情形。

## (II) 研究方法

在傳統經濟學的供需法則中，供給和需求兩者間之互動關係影響著價格（植）的變化，當供給減少（增加）或需求上升（下降）時，價格就會隨之改變，以反應實際狀況。但當我們討論環境資源課題時，由於其所有權不易界定，因此無法借著價格機能來運作，達到我們所期望的效果。因此當討論到有關山坡地災害引發的環境問題時，通常將其視為土地使用的外部性 (externalities)，又稱為外部效果 (external effects)。

所謂外部性，就是指當事人從事經濟行為後，不必自行負擔的成本或是創造出不歸當事人享受的利益。經濟的外部性是指某個經濟實體的行為使他人收益（正外部效應）或受損（負外部效應），卻不會得到補償或付出代價，如新產品的開發便具有很強的正外部效應。外部效果可分成兩類，第一類稱為外部效益，即當事人經濟行為所創造的利益，不歸當事人享受，那部分的利益稱為「外部效益 (external benefits)」，例如為了保護下游居民的飲水權益，在上游劃設水源保護區，並限制區內一切的開發行為，對於保護區內的居民而言，此即為外部效益。另一種即是當事人由經濟行為所獲得的利益，不必自行負擔的成本，稱為「外部成本 (external costs)」，如違規使用山坡地的問題即屬之。然而政府劃定土石流特定水土保持區的目的，是為了保護鄰近村里之安全，因此產生之外部效果，主要以外部效益為主，因此本文討論重點將著重於外部效益。

要解決外部性之問題，使社會成本反應為私人成本及社會效益反應為私人效益的話，就必須將外部成本及外部效益內部化，即所謂「外部效果內部化」。換言之，使當事人在從事經濟行為後，將其所創造的利益及成本回歸至當事人本身，使生產者自行負責或享受外部效果。

要使外部效果內部化的方式主要有下列三種：賦予財產權、直接管制、課稅或補償。第一種方法即政府對「公共財產」或「無主物」賦予財產權，主張只要使用或是污染就需付費，資源的使用不致流於浪費了。但是此種方式因為環境的財產權難以界定而不易執行。第二種方法為直接管制，此種最為常見，例如政府所訂定「特定水土保持區」的制度，限制一切開發行為，為政府過去所廣泛運用

之方法，但是就目前實際的劃定執行情況而言，其效果並非預期的理想。第三種方法就是政府以課稅的方式使外部成本內部化，而以補償的方式使外部效益內部化（張清溪等，2002）。然而，由前述討論得知，劃定土石流特定水土保持區所產生的多半是外部效益的問題，因此，本研究所討論的方向，著重於以補償的方式使特定區劃定所產生之外部效益內部化。故在估算分析時乃假設選擇不補償、選擇避難疏散與選擇土地儲備制度之成本效益分析（淨效益分析）。計算各別之淨效益，亦就是將效益減去成本所得值，就是淨效益的值。本文討論亦考慮土石流特定水土保持區風險問題，將風險分析加入，求出各別的預期成本及預期效益，再計算個別之淨效益。假定只有 T1、T2、T3 三種迴歸週期的降雨，且各別造成 A1=0%、A2=50%、A3=100% 的淹沒面積，為便於實際計算，假設 T3=10 年，則表示每年有 10% 的發生機率。T2=5 年，則表示每年有 20% 的發生機率，剩餘的 70% 發生機率都歸為迴歸週期更短的 T1。由假設可列出預期成本及效益期望值：

$$\text{預期成本} = 1/T1 \times A1 \times C + 1/T2 \times A2 \times C + 1/T3 \times A3 \times C$$

$$\text{預期效益} = 1/T1 \times A1 \times B + 1/T2 \times A2 \times B + 1/T3 \times A3 \times B$$

式中，C 是淹沒面積為 100% 時所需要付出之成本。B 是當淹沒面積為 100% 時各制度執行所能獲得之效益，為了簡化，在淹沒面積為 50% 的成本效益計算，就直接以淹沒面積為 100% 時之成本及效益按比例計算。根據以上公式，代入各計算之值，可以求得三種不同制度之預期成本、預期效益及淨效益值。

### III、結果與討論

#### (I) 太麻里鄉東 -32 土石流特定水土保持區

##### 1. 選擇不補償之成本效益分析

本區潛勢溪流周邊保全對象及有受災可能性住戶以 15 戶計，本區救助對象以 1 戶 4 人計算共有 60 人，依據曾經發生土石流災情特水區案例依其比例計算分別為：死亡 3 人、失蹤 4 人、重傷 16 人、安遷 37 人，假設最嚴重的狀況，視其災害損失淹沒面積為 100%，再以此估計政府的救助成本，依「土石流災害防救種類及標準」規定災害救助金核發標準計算結果如表 4，得知政府災後的救助成本共為 3,740,000 元，災後重建執行成本估算結果如表 5。

表 4 東 -32 土石流特定區災害救助成本計算

Tab.4 Cost accounting of disaster relief on No.32 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

救助對象	人數	救助金 (萬元 / 人)	救助成本 (萬元)
死亡	3	20	60
失蹤	4	20	80
重傷	16	10	160
安遷	37	2	74
救助總成本 (萬元)			374

表 5 東 -32 土石流特定區災後重建執行成本估算

Tab.5 Cost accounting of post-disaster reconstruction on No.32 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

名稱	經費 (萬元)	資料來源
整治工程	4,079.6	特水區廢止計畫報告彙整
劃定及長期水土保持規劃費用	80	
總執行經費	4,159.6	

將上述表 4 與表 5 所計算之救助成本與災後重建成本相加，即為政府共要付出的成本 C1，為 45,336,000 元。

## 2. 選擇避難疏散之成本效益分析

救助部分直接根據「土石流災害防救種類及標準」第六條規定計算。生命價值部分人數計算，直接將失蹤人數合併死亡人數相加計算，所獲得之總效益 B2 為 101,000,000 元（如表 6）。

表 6 東 -32 土石流特定區疏散避難制度效益

Tab.6 Effectiveness of disaster evacuation on No.32 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung

項目	對象	人數	金額 (萬元 / 人)	效益 (萬元)
救助部分	死亡	3	20	60
	失蹤	4	20	80
	重傷	16	10	160
生命價值		7	1,400	9,800
總效益				10,100

由表 7 計算得知，若政府選擇疏散避難的制度，需付出之總成本 C2 共為 42,936,000 元。

表 7 東 -32 土石流特定區疏散避難制度之成本計算

Tab.7 Cost accounting of disaster evacuation on No.32 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	對象	人數	金額 (萬元 / 人)	成本 (萬元)
災前	疏散避難	—	—	60
災後	安遷救助	37	2	74
	災後重建	—	—	4,159.6
總成本				4,293.6

### 3. 土地儲備制度之成本效益分析

假設政府預先利用被賦予的「徵收權」或「先買權」取得未來欲發展或進行保育之土地，取得方式以協定價購為主，並償付與徵收權或先買權，以提高協議架構之執行效果，由表計算得知，政府若選擇土地儲備的制度，所能獲得之總效益 B3 為 143,336,000 元（如表 8）。

表 8 東 -32 土石流特定區土地儲備制度之效益

Tab.8 Effectiveness of land reserve on No.32 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	對象	人數	金額 (萬元 / 人)	效益 (萬元)
救助 部分	死亡	3	20	60
	失蹤	4	20	80
	重傷	16	10	160
	安遷	37	2	74
災後重建		—	—	4159.6
生命價值		7	1,400	9,800
總效益				14,333.6

土地儲備制度主要的成本為徵收及補償保全戶所居之土地與地上物，又分成徵收土地及補償原有地上物。參考過去災害經驗依其比例計算，假定災害造成下游全毀 11 間及半毀 4 間的災情，作為徵收補償的戶數，再依此戶數之土地面積及地上的結構物，計算出要補償之土地價格及地上物之價值。據當地該區民房多為一層樓磚造房屋，平均約 60 坪（約為 198 平方公尺），為精化計算乃於 Google earth 圖面計算建築物面積，由於此區域大部分為老舊建築物，因此必須有折舊率計算，以臺北市政府地政局建物現值試算，磚造建築一年折舊率為 2.1%，區域內建築物計有 40 年以上屋齡計算之。

$$\text{建物現值} = \text{建物單價} \times [1 - (\text{年折舊率} \times \text{屋齡})]$$

而土地地價則依據臺東縣政府地政處公告土地現值及公告地價，土地面積則依據建築物座落地號土地面積計算，其統計結果如表 9 所示。

表 9 東 -32 土石流特定區土地價值計算

Tab.9 Cost evaluation of land on No.32 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	不同地價土地面積		資料來源
土地面積 (平方公尺)	13046	281	依據 15 戶保全住戶建物地號面積
公告地價 (元 / 平方公尺)	72	64	依據臺東縣政府地政處公告地價
公告現值 (元 / 平方公尺)	500	530	依據臺東縣政府地政處公告現值
總經費 (元)	7,175,300		

再則計算地上物之價值，例如一樓磚造房屋，每平方公尺的造價為 12,700 元，磚造一年折舊率為 2.1%，計算結果得知政府對地上物構造物補償之總經費為 9,871,928 元（如表 10）。

表 10 東 -32 土石流特定區地上物價值計算

Tab.10 Cost evaluation of buildings on land on No.32 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	磚造	鋼筋混凝土土造	輕鋼架	資料來源
房屋面積 (平方公尺)	2795.8	189	411	資料估算所得
地上構造物價格 (元 / 平方公尺)	12700	18850	9950	依據臺北市政府地政局研發計算軟體
折舊率	2.1%	1.5%	1.8%	
屋齡	40 年	30 年	20 年	
經費 (元)	5,681,066	1,573,614	2,617,248	
總經費 (元)	9,871,928			

經土地價值計算與地上物價值計算結果，政府執行土地儲備制度時，所需要付出之總成本為兩者之和，共為 17,047,228 元。

#### 4. 三種不同方式之淨效益分析

經過各別的成本及效益計算後，帶入預期成本及預期效益之計算公式，得之將效益扣除成本所得之值，即為淨效益的值。求得三種不同制度之預期成本、預期效益及淨效益值，列如表 11。

表 11 東 -32 土石流特定區不同制度之淨效益計算

Tab.11 Net benefits evaluation of different policy on No.32 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

執行制度	項目	金額 (元)	淨效益 (元)
不補償	預期成本	9,067,200	-9,067,200
	預期效益	0	
疏散避難	預期成本	8,587,200	11,612,800
	預期效益	20,200,000	
土地儲備	預期成本	3,409,446	25,257,754
	預期效益	28,667,200	

由上述華源土石流特定水土保持區經計算可看出，三種制度中預期成本最大的為不補償之制度，其次為疏散避難制度，最小的為土地儲備制度。再者，在預期效益的部分，最佳的制度為土地儲備制度，其次為疏散避難制度，最差為不補償之制度。

## (II) 成功鎮忠孝里東 -5 土石流特定水土保持區

### 1. 選擇不補償之成本效益分析

本區潛勢溪流周邊保全對象及有受災可能性住戶以 9 戶計，本區救助對象以 1 戶 4 人計算共有 36 人，依據曾經發生土石流災情特水區案例依其比例計算分別為：死亡 2 人、失蹤 2 人、重傷 9 人、安遷 22 人，假設最嚴重的狀況，視其災害損失淹沒面積為 100%，再以此估計政府的救助成本，依「土石流災害防救種類及標準」規定災害救助金核發標準計算結果如表 12，得知政府災後的救助成本共為 3,740,000 元，災後重建執行成本估算結果如表 13。

表 12 東 -05 土石流特定區災害救助成本計算

Tab.12 Cost accounting of disaster relief on No.5 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

救助對象	人數	救助金 (萬元 / 人)	救助成本 (萬元)
死亡	2	20	40
失蹤	2	20	40
重傷	9	10	90
安遷	22	2	44
救助總成本 (萬元)			214

表 13 東 -05 土石流特定區災後重建執行成本估算

Tab.13 Cost accounting of post-disaster reconstruction on No.5 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

名稱	經費（萬元）	資料來源
整治工程 劃定及長期水土保持規劃 費用	3,475.5 80	特水區廢止計畫報告彙整
總執行經費	3,555.5	

上述將所計算之救助成本與災後重建成本予以相加，得到政府共要付出的成本 C1 為 37,695,000 元。

## 2. 選擇避難疏散之成本效益分析

救助部分直接根據「土石流災害防救種類及標準」第六條規定計算。生命價值部份人數計算，直接將失蹤人數合併死亡人數相加計算，所獲得之總效益 B2 為 57,700,000 元（如表 14 與 15）。

表 14 東 -05 土石流特定區疏散避難制度效益

Tab.14 Effectiveness of disaster evacuation on No.5 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	對象	人數	金額（萬元/人）	效益（萬元）
救助 部分	死亡	2	20	40
	失蹤	2	20	40
	重傷	9	10	90
生命價值		4	1,400	5,600
總效益				5,770

表 15 東 -05 土石流特定區疏散避難制度成本計算

Tab.15 Cost accounting of disaster evacuation on No.32 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	對象	人數	金額（萬元/人）	成本（萬元）
災前	疏散避難	—	—	60
災後	安遷救助	22	2	44
	災後重建	—	—	3,555.5
總成本				3,659.5

由上表計算得知，若政府選擇疏散避難的制度，需付出之總成本 C2 共為 36,595,000 元。

### 3. 土地儲備制度之成本效益分析

假設政府預先取得未來欲發展或進行保育之土地，以協議價購為主，並償付與徵收權或先買權，以提高協議架構之執行效果，由表計算得知，政府若選擇土地儲備的制度，所能獲得之總效益 B3 為 93,695,000 元（如表 16）。

表 16 東 -05 土石流特定區土地儲備制度之效益

Tab.16 Effectiveness of land reserve on No.5 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	對象	人數	金額（萬元 / 人）	效益（萬元）
救助 部分	死亡	2	20	40
	失蹤	2	20	40
	重傷	9	10	90
	安遷	22	2	44
災後重建		—	—	3,555.5
生命價值		4	1,400	5,600
總效益				9,369.5

土地儲備制度主要的成本為徵收及補償保全戶所居之土地，又分成徵收土地及補償原有地上物。參考過去災害經驗依其比例計算，假定災害造成下游全毀 6 間及半毀 3 間的災情，作為徵收補償的戶數，再依此戶數之土地面積及地上的結構物，計算出要補償之土地價格及地上物之價值。據當地該區民房多為一層樓磚造房屋，建築面積不等大部份約 20-40 坪（約為 66-132 平方公尺），為精化計算乃於 Google earth 圖面計算建築物面積，由於此區域大部分為老舊建築物，因此必須有折舊率計算，以臺北市政府地政局建物現值試算，磚造建築一年折舊率為 2.1%，區域內建築物計有 40 年以上屋齡計算之。（公式同前）

而土地地價則依據臺東縣政府地政處公告土地現值及公告地價，土地面積則依據建築物座落地號土地面積計算，其統計結果如表 17 所示。

表 17 東 -05 土石流特定區土地價值計算

Tab.17 Cost evaluation of land on No.5 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	不同面積地價土地				資料來源
土地面積（平方公尺）	37,241	294	2,397	27,839	依據 9 戶保全住戶建物地號面積
公告地價（元 / 平方公尺）	46	34	28	13	依據臺東縣政府地政處公告地價
公告現值（元 / 平方公尺）	335	230	200	85	依據臺東縣政府地政處公告現值
總經費（元）	2,930,728				

再則計算地上物之價值，例如一樓磚造房屋，每平方公尺的造價為 12,700 元，磚造一年折舊率為 2.1%，計算結果得知政府對地上物構造物補償之總經費為 9,871,928 元（如表 18）。

表 18 東 -05 土石流特定區地上物價值計算

Tab.18 Cost evaluation of buildings on land on No.5 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	磚造	資料來源
房屋面積（平方公尺）	1065.19	資料估算所得
地上構造物價格（元 / 平方公尺）	12700	依據臺北市政府地政局研發計算軟體
折舊率	2.1%	
屋齡	40 年	
總經費（元）	2,164,466	

經土地價值計算與地上物價值計算結果，政府執行土地儲備制度時，所需要付出之總成本為兩者之和，共為 5,095,194 元。

#### 4. 三種不同方式之淨效益分析

根據以上公式，代入各計算之值，可以求得三種不同制度之風險管理預期成本、預期效益及淨效益值，列如表 19 所示。

表 19 東 -05 土石流特定區不同制度之淨效益計算

Tab.19 Net benefits evaluation of different policy on No.5 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

執行制度	項目	金額（元）	淨效益（元）
不補償	預期成本	7,539,000	-7,539,000
	預期效益	0	
疏散避難	預期成本	7,319,000	4,221,000
	預期效益	11,540,000	
土地儲備	預期成本	1,974,386	16,764,614
	預期效益	18,739,000	

由上述忠孝里東 -5 土石流特定水土保持區計算可看出，預期成本最大的為不補償之制度，最小的為土地儲備制度。倘若發生土石災害，土地儲備制度與其他兩制度之預期成本差值會更大，其主要原因在於此特水區內土地為宜農牧用地或是宜林地，土地成本相對是較低的。再者，在預期效益的部分，最佳的制度為土地儲備制度，最差為不補償之制度。

## (III) 延平鄉桃源村東 -90 土石流特定水土保持區

## 1. 選擇不補償之成本效益分析

依實際勘查評估後，本特定水土保持區若發生土石流災害時，由野溪運移而下的土砂會至鹿野溪，而位處高地之桃源村並不會受到土石流之影響，此與原先劃定之理由相違悖，因此本區救助對象為 0 人（上下游均無人居住或活動），沿用案例估計救助成本，依計算結果政府災後的救助成本，並參采該區整治規劃分期分區處理計畫之災後重建執行成本估算如表 20 及 21 所示。將所計算之救助成本與災後重建成本予以相加，得到政府共要付出的成本 C1 為 12,454,000 元。

表 20 東 -90 土石流特定區災害救助成本計算

Tab.20 Cost accounting of disaster relief on No.90 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

救助對象	人數	救助金（萬元/人）	救助成本（萬元）
死亡	0	0	0
失蹤	0	0	0
重傷	0	0	0
安遷	0	0	0
救助總成本（萬元）			0

表 21 東 -90 土石流特定區災後重建執行成本估算

Tab.21 Cost accounting of post-disaster reconstruction on No.90 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

名稱	經費（萬元）	資料來源
劃定及長期水土保持規劃費用	80	
長期水土保持治理費用	1,165.4	長期水土保持計畫工程規劃費
總執行經費	1,245.4	

## 2. 選擇避難疏散之成本效益分析

救助部分直接根據「土石流災害防救種類及標準」第六條規定計算。生命價值部份人數計算，直接將失蹤人數合併死亡人數相加計算，所獲得之總效益 B2 為 0 元（如表 22 與 23）。

表 22 東 -90 土石流特定區疏散避難制度效益

Tab.21 Effectiveness of disaster evacuation on No.90 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	對象	人數	金額 (萬元 / 人)	效益 (萬元)
救助 部分	死亡	0	0	0
	失蹤	0	0	0
	重傷	0	0	0
生命價值		0	0	0
總效益				0

表 23 東 -90 土石流特定區疏散避難制度成本計算

Tab.23 Cost accounting of disaster evacuation on No.90 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	對象	人數	金額 (萬元 / 人)	成本 (萬元)
災前	疏散避難	—	—	0
災後	安遷救助	0	0	0
	災後重建	—	—	1,245.4
總成本				1,245.4

由表 23 計算得知，若政府選擇疏散避難的制度，需付出之總成本 C2 共為 12,454,000 元。

### 3. 土地儲備制度之成本效益分析

假設政府預先取得未來欲發展或進行保育之土地，以協議價購為主，並償付與徵收權或先買權，以提高協議架構之執行效果，但由於本特定水土保持區內並無保全物件，也因此並保權物件生命遭受威脅之問題，由表計算得知，政府若選擇土地儲備的制度，所能獲得之總效益 B3 為 12,454,000 元（如表 24）。

表 24 東 -90 土石流特定區土地儲備制度之效益

Tab.24 Effectiveness of land reserve on No.90 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	對象	人數	金額 (萬元 / 人)	效益 (萬元)
救助 部分	死亡	0	0	0
	失蹤	0	0	0
	重傷	0	0	0
	安遷	0	0	0
災後重建		—	—	1,245.4
生命價值		0	0	0
總效益				1,245.4

土地儲備制度主要的成本為徵收及補償保全戶所居之土地，又分成徵收土地及補償原有地上物。若以徵收土地方式，則位於特定水土保持區範圍內之私人土地僅有兩筆，且範圍內面積不大，以臺東縣政府公告現值計算分析結果，即為 15,071.5 元（如表 25）。

表 25 東 -90 土石流特定區土地價值計算

Tab.25 Cost evaluation of land on No.90 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	土地面積	資料來源
土地面積	350.5	依據特水區範圍內私人土地面積
公告地價 (元 / 平方公尺)	8	依據臺東縣政府地政處公告地價
公告現值 (元 / 平方公尺)	43	依據臺東縣政府地政處公告現值
總經費 (元)	15,071.5	

再則計算地上物之價值，因本特定水土保持區內並無保全物件，故地上物構造物補償之總經費為 0 元（如表 26）。

表 26 東 -90 土石流特定區地上物價值計算

Tab.26 Cost evaluation of buildings on land on No.90 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

項目	磚造	資料來源
房屋面積 (平方公尺)	0	資料估算所得
地上構造物價格 (元 / 平方公尺)	0	
折舊率	0	
屋齡	0	
總經費 (元)	0	

經土地價值計算與地上物價值計算結果，政府執行土地儲備制度時，所需要付出之總成本為兩者之和，共為 15,071.5 元。

#### 4. 三種不同方式之淨效益分析

根據以上公式，代入各計算之值，可以求得三種不同制度之風險管理預期成本、預期效益及淨效益值，列如表 27 所示。

表 27 東 -90 土石流特定區不同制度之淨效益計算

Tab.27 Net benefits evaluation of different policy on No.90 specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

執行制度	項目	金額 (元)	淨效益 (元)
不補償	預期成本	2,490,800	-2,490,800
	預期效益	0	
疏散避難	預期成本	2,490,800	-2,490,800
	預期效益	0	
土地儲備	預期成本	3,014	2,487,786
	預期效益	2,490,800	

由上述桃源村東 -90 土石流特定水土保持區假設計算可看出，預期成本最大的為不補償及疏散避難制度，最小的為土地儲備制度。由於本特定水土保持區並沒有保全物件，但若發生土石流災害且影響下游地區，仍勢必重建。再者，在預期效益部分，土地儲備制度則較佳，係因區域內之私有土地僅占 0.02%。

(IV) 綜合討論

透過外部效應分析而計算之淨效益而予以整理繪圖得到圖 4 之結果，顯示不補償制度之對策中太麻里鄉華源村東 -32 土石流特定水土保持區的淨效益為負值最高，主要因為該地區保全對象較多，且自長期水土保持計畫實施至廢止計畫期間，工程整治經費也較其他為高。而採用疏散避難或土地儲備的制度時，其所得到的淨效益都較不補償制度高出甚多，且有土地儲備制度之淨效益略高於疏散避難制度之淨效益的趨勢。

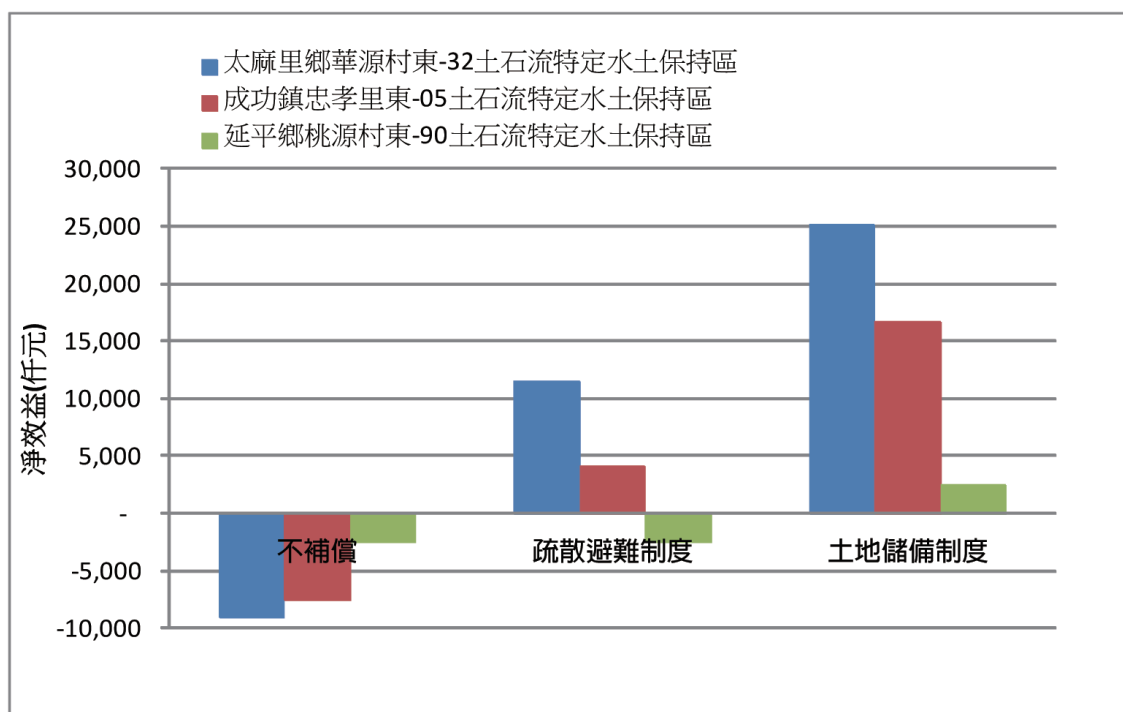


圖 4 臺東縣三處土石流特定水土保持區之管理制度對策比較

Fig.4 Compared three management policies on specific zone for soil and water conservation prevention in Taitung.

然而，上述三種制度以土地儲備制度淨效益最佳，為可一勞永逸之作法，但近年來民主聲浪高漲，一旦與土地有關策略即有社會運動產生，即便參與者多非在地住民。又近年來遭受極端氣候的影響，由以 2009 年莫拉克颱風所帶來重大災害，疏散機制的執行相較於過去確實容易許多。過去水土保持相關工作之執行較少討論到土地價值的轉移與土地儲備制度的建立問題，多數的水土保持工程都是在取得土地使用同意書的情況下進行，較少有補償購地的情況發生。當政府將土石流潛勢溪流區劃定為特定水土保持區公告成立之後，按規定執行並有成果的情況之下所產生之外部效益是非常明顯的。惟水土保持法第十九條第二項規定：特定區中之土地，除攸關水資源之重大建設，不涉及一定規模以上之地貌改變及經環境影響評估審查通過之自然游憩區，經主管機關同意可開發之外，其他地區均禁止任何開發行為。如此政府在劃定限制發展區（特定水土保持區為其中之一）時，是以公權力的方式，基於公共利益與自然防災的理由來對人民之財產加以限制，且無需補償。如此行為有違反憲法第十五條規定人民之生存權、工作權、財產權，應予保障之嫌。因此儘管政府除了為了公益防災的理由之外，也需要對人民的財產權加以重視，將劃定限制開發區時所產生之外部效益回饋到受限者身上。否則當有外部效益存在時，反而造成民眾權益的損失，所以導致土石流特定水土保持區的劃定不為該地區民眾所接受，甚至在土地所有權人發覺其可能被劃定為特定水土保持區時，帶有敵意及懷疑之反彈旋即而生。因此要解決外部效益的問題，由前述外部性理論所分析得知，必須給予受限者相關的補償措施，使其私人邊際效益增加，將外部效益內部化，才會創造出最大的社會福利。

目前的特定水土保持區劃定與廢止準則法規中，並未制定出有關於特定區之救助、補償、回饋制度與辦法，只有在水土保持法中第二十一條有規定：經劃定為特定水土保持區之水庫集水區保護帶內之私有土地所有人或地上物所有人所受之損失得請求補償金。以及第三十一條規定：有下列情形之一者，由主管機關酌予補助或救濟：一、實施水土保持之處理與維護，增進公共安全而蒙受損失者。二、實施水土保持之處理與維護交換土地或遷移而蒙受損失者。三、因實施第二十六條緊急水土保持之處理與維護而傷亡者。其中又以第三十一條第一項和土石流特定水土保持區的劃定較為有關。惟以上的問題正就是影響外部效益是否能夠或者如何內部化的問題，但長久以來不但使外部效益的問題無法有效解決，更可能造成民眾對制度之質疑或反對。每當執行上遇到問題，政府為了避免衝突，

通常以不繼續執行處理之，若一旦真的發生災害，其所造成的社會成本更是難以估計，因此本文所分析討論有關特定區之救助、補償、回饋制度與辦法，為現階段所面臨問題之解決方案對策，相關處理措施應即早制定為宜。

## IV、結論與建議

### (I) 結論

1. 特定水土保持區的劃定與其他的環境敏感區位劃定方式類似，惟過去政府在劃定特定水土保持區時，其外部效益問題癥結主要是因為在目前的劃定法規中並沒有明確規定相關的補償方式，而使得因劃定特定區產生之外部效益無法有效的內部化，自然使得政府在劃定特定區時，常遭當地居民的抗爭，以致於執行效率不彰。
2. 每當災害發生時，政府受到輿論的責難且付出更多之社會成本於災後搶救與復建工程上。因此若要減少外部效益問題，就必須有配套的補償措施，盡可能使外部效益能內部化。
3. 劃定為特定水土保持區後民眾並不知其受到哪些管制措施，反而是透過土地管理機關如財政部國有財產署函送各土地承租人令其解約之公文才得知，依據「國土保安計畫 - 解決土石流災害具體執行計畫」內容指出，對於土石流危險區內土地，不再辦理放租與放領；已出租土地，應加強辦理改定林地租約，改為造林使用。
4. 依據水土保持法第十九條第二項規定，”經劃定為特定水土保持區之各類地區，區內禁止任何開發行為”。此舉致使民眾大為恐慌，世居於此民眾皆以務農為生，頓時因被劃定為土石流特定水土保持區後，土地使用受到限制因此群起抗爭，由於土地管理機關對於水土保持法內文過度解讀，導致民眾亦誤解劃定為特定水土保持區之用意，真是所謂未蒙其利，先受其害。
5. 由於土石流或崩塌災害發生後其堆積區與洪泛區形成坡度較緩的地形，且土質鬆散而成為開發優勢區域，導致人類活動再進入之機會極高。相對必須提高成本選擇安全居住場所者而言，其所消耗的工程整治與防災費用系來自全民課征的稅款，政府毫無限制的予以這些原本即不適合居住地區救助或提供防災措施，實不符合公平原則。

6. 特定水土保持區的補償制度，應歸屬於公益性發展地區的補償方式，即以地役權或發展權移轉為主。但是特定水土保持區被劃定的原因，是經主管機關認定具有危害公共安全之虞，亟需加強水土保持處理及維護的較高危險因數地區，區內容易遭受洪水或土石流災害，不適宜居住、不適合興建永久性建築物和公共設施，不得列為開發區。因此特定水土保持區的補償方式，應依當地災害性決定適合採用土地儲備制或地役權的制度為宜。

## (II) 建議

1. 本文是以三個臺東縣案例方式討論土石流特定水土保持區劃定所遭遇的土地補償問題，有些部分與實際情況或許會有差距但卻也值得後續深入研究。
2. 當選擇執行補償措施後卻從未發生嚴重的土砂災害時，如此投入大筆經費作為購地補償成本的確毫無效益可言。但透過分析大致上可探討出不補償、疏散避難及土地儲備等制度的效益，這是風險機率的問題，本次研究則尚未討論。
3. 因限制特定區內開發使得該地區附近居民受到保障的外部效益，本次研究亦未提出比較具體可行的回饋機制。

## V、參考文獻

- 石塚忠範，2004，「土砂災害防止法與危險區劃定方法」，2004 特定水土保持區劃定國際研討會論文集，2:23-26。
- 行政院農委會水土保持局，2006，「水土保持手冊」。
- 行政院農業委員會水土保持局，2006，「坡地保育信息」，<http://www.swcb.gov.tw/form/index.asp?m1=12&m2=236>。
- 行政院農業委員會水土保持局，2017，「水土保持相關法規」，[http://www.swcb.gov.tw/class2/index.asp?ct=laws\\_main&m1=10&m2=55](http://www.swcb.gov.tw/class2/index.asp?ct=laws_main&m1=10&m2=55)。
- 周惠文，2007，「特定水土保持區劃定之外部效益分析」，國立屏東科技大學森林系碩士論文。
- 柯勇全、陳樹群，2009，「特定水土保持區劃定之過去現在與未來」，中華水土保持學報，35(2):165-175。
- 夏維良，2002，「土地使用限制回饋行為之研究—以制度授權觀點為基礎」，國立臺北大學不動產城鄉環境學系碩士論文。

- 張清溪、許嘉棟、劉鶯釧、吳聰敏，2002，「經濟學」，三民書局。
- 許中立、黃文仁、周惠文、林潤榮，2006，「土石流特定水土保持劃定補償效益之探討」，臺灣坡地防災學報，5(2):39-58。
- 許中立，2008，「臺東 032 土石流特定水土保持區之治理成效檢討」，水保技術，3(2):87-94。
- 傅祖壇、簡資修，1995，「臺灣山坡地管理之制度經濟層面探討」，臺灣銀行季刊，46(3):252-270。
- 詹錢登，1994，「土石流危險度之評估與預測」，中華水土保持學報，25(2):95-102。
- 臺灣坡地防災學會，2014，「台東縣成功鎮忠孝裡東 -05 土石流特定水土保持區劃出之檢討評估及廢止計畫」，台東縣政府委託計畫報告書。
- 臺灣坡地防災學會，2015，「台東縣太麻裡鄉華源村東 -32 土石流特定水土保持區劃出之檢討評估及廢止計畫」，台東縣政府委託計畫報告書。
- 臺灣坡地防災學會，2015，「台東縣延平鄉桃源村東 -90 土石流特定水土保持區劃出之檢討評估及廢止計畫」，台東縣政府委託計畫報告書。
- 劉格非、李欣輯，2004，「外部性理論于『土石流特定水土保持區』劃定之應用」，國立臺灣大學台大工程學刊，92:105-118。
- 顏秀峰、蘇正炎，1998，「特定水土保持區劃定之法規探討」，1998 中日奧土石流危險區劃定研習會論文集，6:1-16。

# 台灣南部地區降雨量與降雨沖蝕指數之時間與空間變化

李明熹<sup>1\*</sup> 廖怡雯<sup>2</sup>

**【摘要】**台灣地區目前所使用之降雨沖蝕指數（R）是由黃俊德（1979）所建立，距今久遠，加上近年來氣候變遷極端降雨事件發生頻繁，對於土壤沖蝕的影響甚鉅。本研究為了解降雨特性的改變對降雨沖蝕指數之影響，以台南、高雄及屏東地區為研究區域，分析月、季及年降雨量與降雨沖蝕指數之關係，並探討兩者之時間與空間變化，繪製台灣南部地區降雨沖蝕指數等值圖。根據研究地區 95 個中央氣象局雨量站 14 年（2002~2015）10 分鐘雨量資料，進行雨場分割，共計 36,045 場單場有效降雨事件，其中單場最大降雨量發生於 2009 年莫拉克颱風期間，約佔全部雨量站之 7 成（63 個雨量站）。時間變化分析結果顯示，月平均降雨量（ $P_m$ ）及月平均降雨沖蝕指數（ $R_m$ ）於 5、8、9 及 11 月份有逐年上升之趨勢，其餘月份為持平或逐年下降之趨勢；季平均降雨量（ $P_s$ ）及季平均降雨沖蝕指數（ $R_s$ ）於夏、秋季有逐年上升之趨勢；整體而言，研究地區之年平均降雨量（ $P_y$ ）及年平均降雨沖蝕指數（ $R_y$ ）均為逐年上升之趨勢。空間變化分析結果顯示，月、季及年降雨沖蝕指數大致上由西或西南部向東或東北部遞增，且最大  $R_y$  有逐年增加之趨勢，其最大值發生位置有往北移動之趨勢。

**【關鍵詞】**降雨沖蝕指數、通用土壤流失公式、時間變化、空間變化。

## TEMPORAL AND SPATIAL VARIATIONS OF RAINFALL AND RAINFALL EROSIVITY IN SOUTHERN TAIWAN

Ming-Hsi Lee<sup>1\*</sup> Yi-Wen Liao<sup>2</sup>

- 
- 1 國立屏東科技大學水土保持系副教授，通訊作者。電子郵件：mhlee@mail.npust.edu.tw  
Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology. Corresponding Author. E-mail: mhlee@mail.npust.edu.tw
- 2 國立屏東科技大學水土保持系碩士生。  
Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology.

**【 Abstract 】** The purpose of the present study are establishing relationship between rainfall intensity and rainfall erosivity based on monthly, seasonal and annual precipitation data. Temporal and spatial variations of rainfall and rainfall erosivity are investigated using a dataset monitored by using 10-min rainfall data of 95 precipitation stations of the period between 2002 and 2015 in southern Taiwan. Temporal variation of rainfall erosivity shows that the average monthly, seasonal, annual rainfall and rainfall erosivity increase yearly. The spatial analysis shows average annual rainfall erosivity increases from plain to mountain region, and from southwest to northeast. The results of this study can serve as a helpful reference for relevant institutes and departments.

**【 Key words 】** Rainfall erosivity, USLE, Temporal variation, Spatial variation.

## I、前言

近年來台灣極端降雨事件發生頻繁，有累積雨量變高、降雨延時更長及區域性降雨強度增強等情況發生（陳晉琪等，2008），且中央研究院分析過去台灣地區之降雨資料顯示，台灣地區因極端降雨事件之致災規模與範圍均大幅增加，且受極端降雨影響程度均遠超過全球之平均值，可見全球氣候變遷對台灣因極端降雨事件產生災害的規模與範圍影響甚鉅（柳中明，2005）。

台灣地區目前所使用的降雨沖蝕指數（R）主要依據黃俊德（1979）沿用 Wischmeier 及 Smith 的降雨動能公式，以基隆、新竹、台中、日月潭、高雄、恆春、花蓮與台東等八處測候所 20 年的自記式日雨量資料為基礎，並以全台灣 200 個雨量站的月雨量資料為輔，所訂定的降雨沖蝕指數，而盧光輝（1999）與盧昭堯等人（2005）也針對台灣年降雨沖蝕指數進行修訂，發現年降雨沖蝕指數有隨著極端降雨事件增加而變大。有鑒於此，重新建立符合現今氣候狀況之降雨沖蝕指數等值圖乃刻不容緩，因此本研究為了解降雨特性的改變對降雨沖蝕指數之影響，以台南、高雄及屏東地區為研究區域，分析各雨量站之有效降雨事件之降雨特性變化及降雨沖蝕指數（包括單場、月、季及年）之變化，及區域內各雨量站之年平均降雨沖蝕指數值，建立年降雨沖蝕指數與年降雨量之關係式，並探討降雨沖蝕指數之時空變化。研究成果可提供給相關單位作為氣候變遷下降雨沖蝕指數評估之參考依據。

## II、材料與方法

### (I) 研究區域

本研究蒐集台灣南部區域（台南市、高雄市及屏東縣）內共 95 個中央氣象局雨量站資料，雨量站分佈位置如圖 1 所示。利用 2002 年至 2015 年之 10 分鐘等間隔降雨資料，及各雨量站設站（1992~1993）後至 2015 年之 60 分鐘等間隔降雨資料，作為後續各項分析之參考依據。

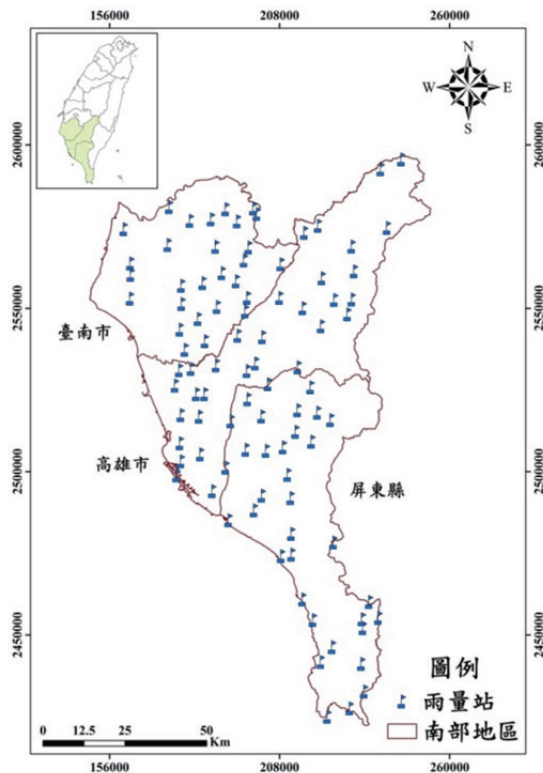


圖 1 台灣南部地區 95 個中央氣象局雨量站位置分布圖

Fig.1 Geographic locations of 95 rainfall stations in southern Taiwan

### (II) 研究方法

#### 1. 有效雨場判定

本研究利用 Wischmeier and Smith (1958) 所提出之定義為依據，進行單場有效降雨事件之分析，其定義如下所示：

- (1) 單場降雨之累積降雨量須超過 12.7 mm，且該場降雨與前場降雨需間隔超過 6 小時以上則視為一場有效降雨事件。

(2) 降雨若低於 12.7 mm，但於 15 分鐘內降下 6.35 mm 以上之雨量，仍具備有沖蝕之潛在能力，則該場降雨應視為有效降雨事件，其降雨總動能須列入降雨總動能之計算。

## 2. 降雨沖蝕指數之計算

經由上述有效降雨事件定義判定後所篩選出之單場有效降雨，計算出降雨強度，並利用 Wischmeier and Smith 依據 Laws 及 Parson 於 1943 年對自然降雨實測資料推導而成之每公頃單位降雨量之降雨動能公式，如公式 2-1 及 2-2 所示：

$$e_i = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I ; I < 76 \text{ mm/hr} \quad (2-1)$$

$$e_i = 0.283 ; I > 76 \text{ mm/hr} \quad (2-2)$$

其中， $e_i$  為每公頃單位降雨量之降雨動能 (MJ/ha-mm)； $I$  為降雨強度 (mm/hr)。

而單場降雨的降雨沖蝕指數為該場降雨的降雨總動能與該場降雨最大 30 分鐘降雨強度之乘積，且降雨沖蝕指數可以線性累加，如公式 2-3 所示：

$$R_j = \sum_{i=1}^{T_j} (E_{ji}) \times I_{j30} = \sum_{i=1}^{T_j} (e_i P_{ji}) \times I_{j30} \quad (2-3)$$

其中， $R_j$  為第  $j$  場降雨的降雨沖蝕指數； $E_{ji}$  ( $=e_i P_{ji}$ ) 為第  $j$  場降雨中第  $i$  時刻的降雨動能； $I_{j30}$  為第  $j$  場降雨的最大 30 分鐘降雨強度； $e_i$  為第  $j$  場降雨中的第  $i$  時刻的每公頃單位降雨量之降雨動能； $P_{ji}$  為第  $j$  場降雨中第  $i$  時刻的降雨量； $T_j$  為第  $j$  場降雨的降雨延時。

依據有效降雨場次分割資料，計算每一場有效降雨的降雨沖蝕指數，累加得月、季及年降雨沖蝕指數，分析研究區域內各雨量站之月、季及年降雨沖蝕指數隨時間之變化趨勢，如公式 2-4~2-6 所示。藉此瞭解近年來在氣候變遷下，研究區域之降雨沖蝕指數隨時間的變化情形。

$$R_m = \sum_{j=1}^M R_j \quad (2-4)$$

$$R_s = \sum_{j=1}^S R_j \quad (2-5)$$

$$R_y = \sum_{j=1}^Y R_j \quad (2-6)$$

$R_j$  為第  $j$  場降雨之單場降雨沖蝕指數； $R_m$  為整月的單場降雨沖蝕指數累加； $R_s$  為每季的單場降雨沖蝕指數累加； $R_y$  為整年的單場降雨沖蝕指數累加。

### 3. 降雨沖蝕指數之時空變化

將 1993~2015 年 60 分鐘雨量資料代入迴歸關係式，推估 1993~2015 年之月、季及年降雨沖蝕指數，並以 5 年移動平均分析台灣南部地區降雨沖蝕指數近 23 年之時間變化趨勢。而本研究為瞭解研究區域降雨沖蝕指數空間分布，使用地理資訊系統軟體 ArcMAP 10.2，利用其中的克利金法 (Kriging) 繪製不同時間單位之降雨量與降雨沖蝕指數等值圖，探討降雨量與降雨沖蝕指數之空間變化。

## III、結果與討論

### (I) 降雨特性分析

本研究分析 2002~2015 年有效降雨事件共計 36,045 場，其各雨量站有效降雨事件之極端值特性分析結果如下，單場有效降雨事件介於 110~649 場之間，平均約為 379 場，其中最大值發生於台南大棟山雨量站，最小值則在高雄新集雨量站。單場最大降雨量範圍介於 320~2,970 mm 之間，平均約為 1,236 mm (SD=577 mm)，最大值發生於 2009 年莫拉克颱風期間的高雄御油山雨量站，另發現單場最大降雨量皆發生於 2009 年莫拉克颱風期間，約佔全部雨量站 7 成 (63 個雨量站)。單場最大降雨動能與單場最大降雨沖蝕指數範圍分別介於 73~780 MJ/ha 及 7,721~107,675 MJ-mm/ha-hr，其平均各別為 306MJ/ha (SD=153MJ/ha) 及 35,580MJ-mm/ha-hr (SD=19,483 MJ-mm/ha-hr)，最大值出現在莫拉克颱風期間的高雄尾寮山雨量站，最小值出現在高雄旗津雨量站。最大年降雨沖蝕指數範圍約介於 24,822~168,715 MJ-mm/ha-hr-yr 之間，平均約為 61,895 MJ-mm/ha-hr-yr，最大值為台南七股寮雨量站，最小值為高雄旗津雨量站。綜觀上述有效降雨事件特性分析結果，以 2009 年莫拉克颱風影響台灣南部地區的降雨沖蝕指數最為明顯。

### (II) 月、季及年降雨量與降雨沖蝕指數時間變化趨勢

本研究蒐集台灣南部地區 95 個雨量站之降雨量資料，探討台灣南部地區近年各月、季及年降雨量與降雨沖蝕指數時間變化趨勢，結果說明如下：

#### 1. 月平均降雨量與降雨沖蝕指數之時間變化

為得知台灣南部地區近 23 年 (1993~2015 年) 各月平均降雨沖蝕指數 ( $R_m$ )

時間變化，本研究將 1993~2001 年台灣南部地區中 95 個雨量站各月降雨量加以平均，得到每月之月平均降雨量 ( $P_m$ )，代入 2002~2015 年各月降雨量與降雨沖蝕指數的迴歸關係式中如表 1 所示。推估 1993~2001 年之各  $R_m$ ，最後再將 1993~2015 年各  $R_m$  點繪於圖 2 及圖 3。Y 軸左側為每月之  $R_m$ ，Y 軸右側為每月之  $P_m$ ，X 軸為各年年份。圖中紅色實線及紅色虛線分別代表每月之  $R_m$  趨勢線及五年移動平均線；藍色實線及藍色虛線分別代表每月之  $P_m$  趨勢線及五年移動平均線。由圖中可看出在台灣南部地區近 23 年 (1993~2015 年)  $P_m$  及  $R_m$  時間變化趨勢，在 5、8、9 及 11 月份  $P_m$  與  $R_m$  之時間變化有逐年上升之趨勢；其餘月份  $P_m$  與  $R_m$  之時間變化為持平或逐年下降之趨勢，此現象亦說明了未來乾季的月降雨量與降雨沖蝕指數會越來越少，濕季的月降雨量與降雨沖蝕指數會越來越高。

表 1 台灣南部地區月平均降雨量與月平均降雨沖蝕指數之迴歸關係式分析結果  
Table1 Relationship between monthly average rainfall and rainfall erosivity

月份	迴歸關係式	判定係數 ( $r^2$ )	個數 (N)
1 月	$R_m=2.18P_m^{1.04}$	0.74**	95
2 月	$R_m=3.98P_m^{1.00}$	0.64**	95
3 月	$R_m=5.14P_m^{1.00}$	0.69**	95
4 月	$R_m=16.61P_m^{0.80}$	0.52**	95
5 月	$R_m=2.64P_m^{1.26}$	0.72**	95
6 月	$R_m=0.70P_m^{1.48}$	0.65**	95
7 月	$R_m=1.25P_m^{1.40}$	0.90**	95
8 月	$R_m=2.68P_m^{1.28}$	0.80**	95
9 月	$R_m=3.89P_m^{1.20}$	0.79**	95
10 月	$R_m=1.42P_m^{1.43}$	0.93**	95
11 月	$R_m=0.95P_m^{1.45}$	0.56**	95
12 月	$R_m=2.43P_m^{1.34}$	0.74**	95

註：\*\* 表示顯著水準  $\alpha < 0.01$ 。

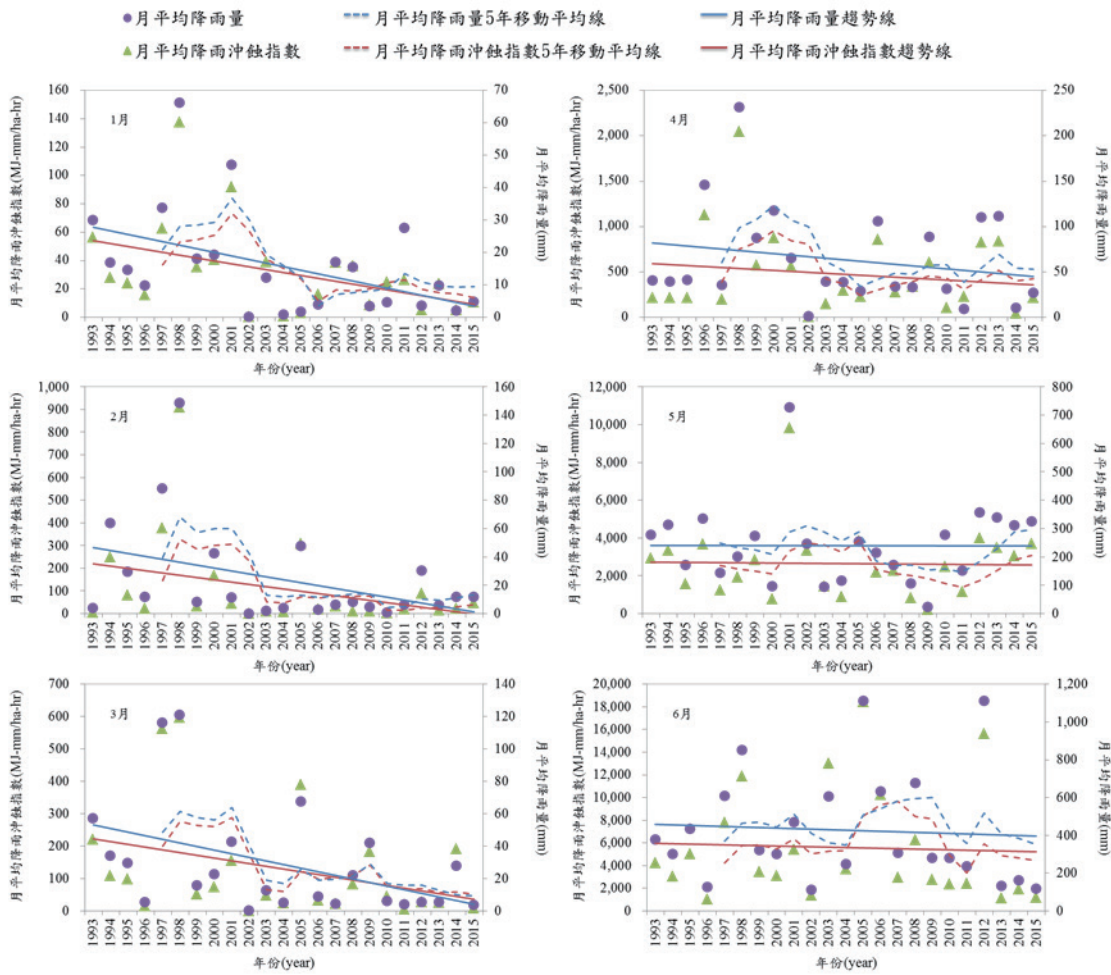


圖 2 台灣南部地區 23 年（1993~2015 年）1~6 月之月平均降雨量與月平均降雨沖蝕指數隨時間之變化趨勢

Fig.2 Variation trend of the monthly average rainfall and rainfall erosivity between 1993 and 2015 (Jan. to Jun.)

## 2. 季平均降雨量與降雨沖蝕指數之時間變化

四季定義如下，從 2 月至 4 月間為春季；從 5 月至 7 月間為夏季；從 7 月至 9 月間為秋季；從 10 月至隔年 1 月間為冬季，同樣以前述分析之方法，得出各季之季平均降雨量 ( $P_s$ ) 與季平均降雨沖蝕指數 ( $R_s$ ) 迴歸關係式如表 2 所示。 $P_s$  與  $R_s$  之時間變化趨勢圖如圖 4 所示，可看出台灣南部地區近 23 年（1993~2015 年） $P_s$  及  $R_s$  時間變化趨勢，而在夏、秋、冬季的  $P_s$  與  $R_s$  時間變化圖中，因 5~10 月份大多為梅雨季節、颱風、豪雨及西南氣流，且近年來受氣候變遷極端降雨事件影響，夏、秋季的  $P_s$  與  $R_s$  均有逐年上升之趨勢，反觀春季  $P_s$  與  $R_s$  的時間變化則是逐年下降之趨勢，顯示近年  $P_s$  與  $R_s$  在乾季時降雨量與降雨沖蝕指數會越來越少，濕季時降雨量與降雨沖蝕指數會越來越高。

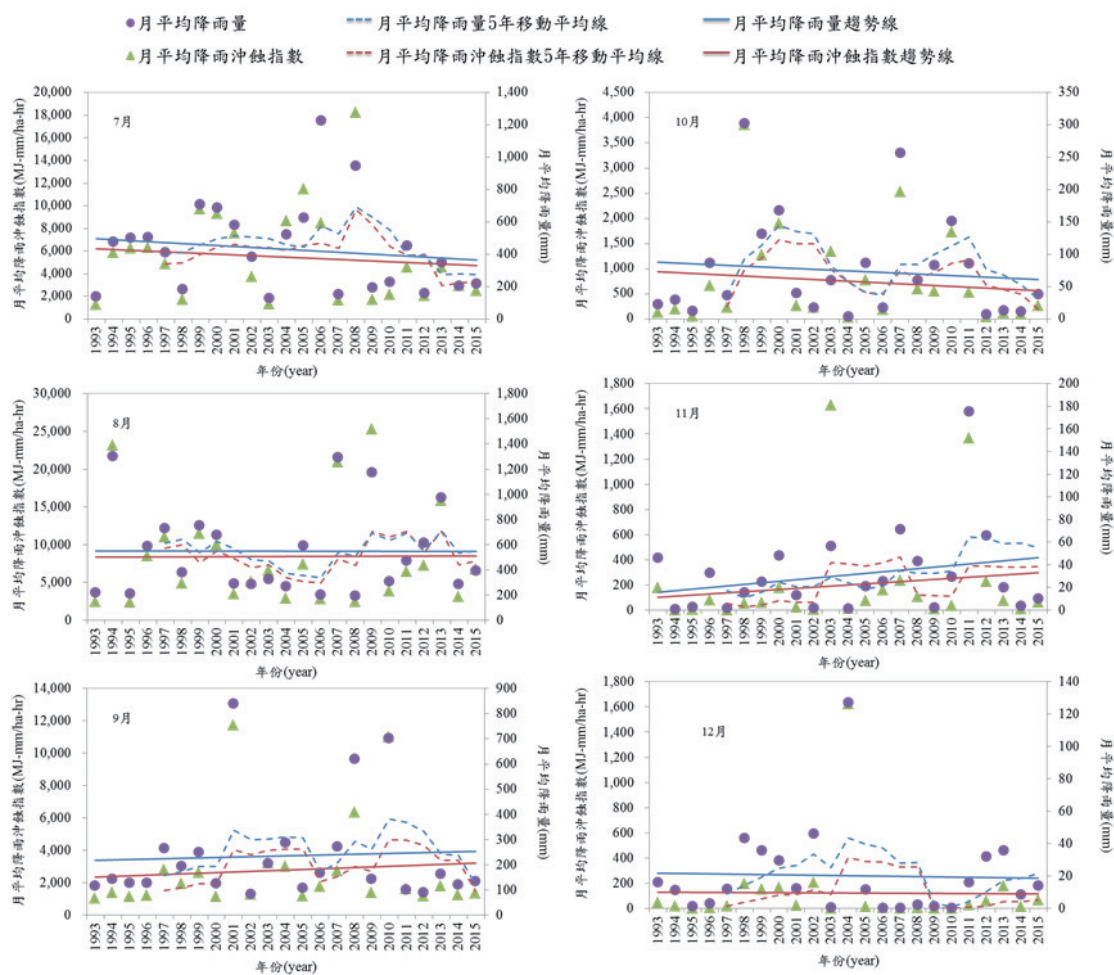


圖 3 台灣南部地區 23 年 (1993~2015 年) 7~12 月之月平均降雨量與月平均降雨沖蝕指數隨時間之變化趨勢

Fig.3 Variation trend of the monthly average rainfall and rainfall erosivity between 1993 and 2015 (Jul. to Dec.)

表 2 台灣南部地區季平均降雨量與季平均降雨沖蝕指數之迴歸關係式分析結果  
Table2 Relationship between seasonal average rainfall and rainfall erosivity

季節	迴歸關係式	相關係數 ( $r^2$ )	個數 (N)
春季	$R_s=11.89P_s^{0.88}$	0.70**	95
夏季	$R_s=1.93P_s^{1.36}$	0.93**	95
秋季	$R_s=9.76P_s^{1.05}$	0.70**	95
冬季	$R_s=1.82P_s^{1.28}$	0.75**	95

註：\*\* 表示顯著水準  $\alpha < 0.01$ 。

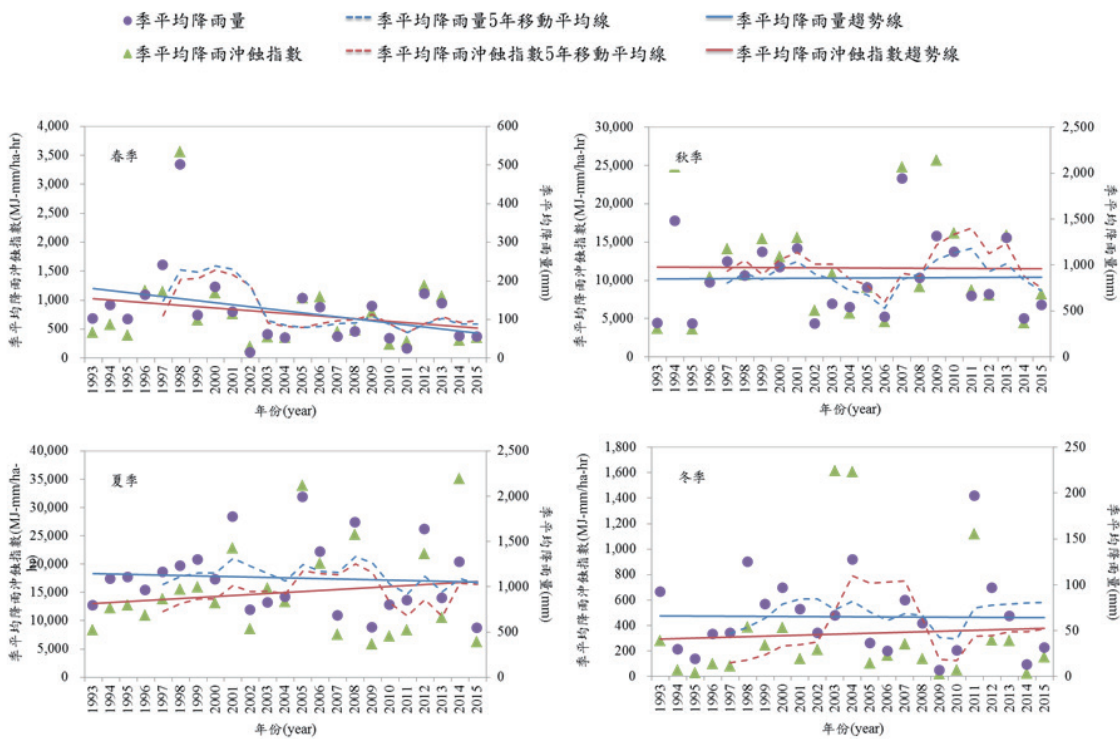


圖 4 台灣南部地區 23 年 (1993~2015 年) 之季平均降雨量與季平均降雨沖蝕指數隨時間之變化趨勢  
Fig.4 Variation trend of the Seasonal average rainfall and rainfall erosivity between 1993 and 2015

### 3. 年平均降雨量與降雨沖蝕指數之時間變化

同樣以前述分析之方法，得出年平均降雨量 ( $P_y$ ) 與年平均降雨沖蝕指數 ( $R_y$ ) 迴歸關係式如表 3 所示。 $P_y$  與  $R_y$  之時間變化趨勢圖如圖 5 所示，可看出  $P_y$  與  $R_y$  的上升或下降之趨勢一致，其  $P_y$  皆大於 1,000 mm， $R_y$  普遍高於 15,000MJ-mm/ha-hr-yr，而近年來受氣候變遷極端降雨事件影響，颱風侵襲的頻率與降雨的強度都有明顯增加，因此  $P_y$  與  $R_y$  均有逐年上升之趨勢。

表 3 台灣南部地區年平均降雨量與季平均降雨沖蝕指數之迴歸關係式分析結果  
Table3 Relationship between annual average rainfall and rainfall erosivity

迴歸關係式	相關係數 (r <sup>2</sup> )	個數 (N)
$R_y = 3.07P_y^{1.20}$	0.87 <sup>**</sup>	95

註：\*\* 表示顯著水準  $\alpha < 0.01$ 。

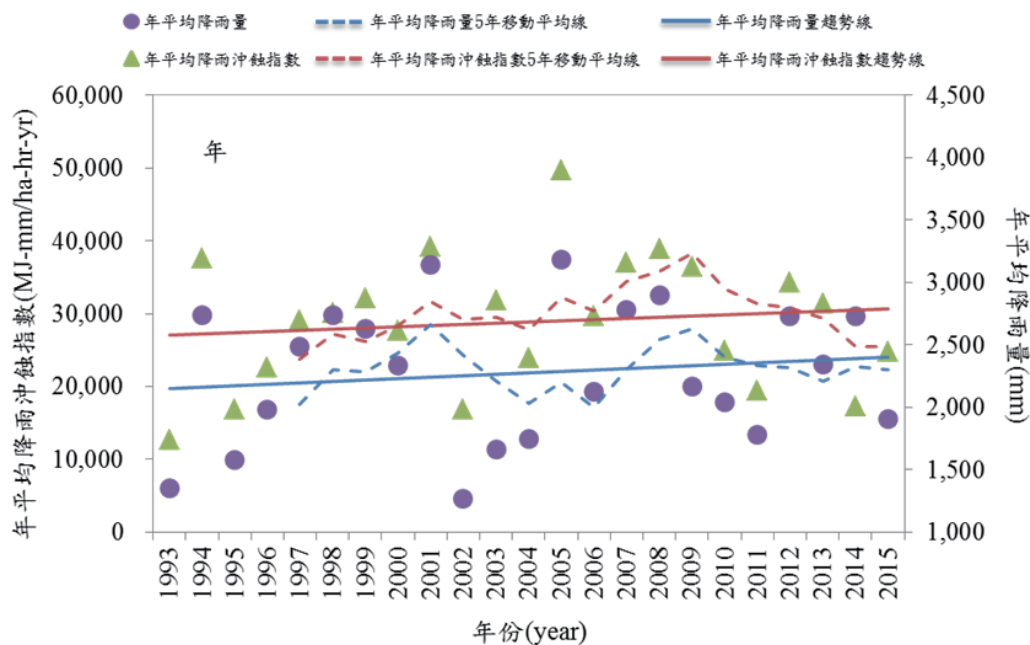


圖 5 台灣南部地區 23 年（1993~2015 年）之年平均降雨量與年平均降雨沖蝕指數隨時間之變化趨勢  
Fig.5 Variation trend of the annual average rainfall and rainfall erosivity between 1993 and 2015

### (III) 月、季及年降雨沖蝕指數空間變化趨勢

為了解台灣南部地區降雨沖蝕指數之空間分佈情形，本文依據所蒐集的 95 個雨量站之 10 分鐘降雨量資料（2002~2015 年），分別計算出 95 個雨量站之各月、季及年平均降雨沖蝕指數（ $R_m$ 、 $R_s$  及  $R_y$ ），再利用克利金法繪製各月、季及年平均降雨沖蝕指數之空間分佈等值圖，分析結果說明如下：

#### 1. 月平均降雨沖蝕指數之空間變化

台灣南部地區近年（2002~2015 年）月平均降雨沖蝕指數（ $R_m$ ）的空間變化，大致上均由西部或西南部向東部或東北部遞增，並由平原地區向山區逐漸增加。在 11 月至隔年 4 月的  $R_m$  值大多低於 2,500 MJ-mm/ha-hr，5 月至 10 月的  $R_m$  值均大於 2,500 MJ-mm/ha-hr，7~8 月份的  $R_m$  值則為最高，如圖 6 所示。

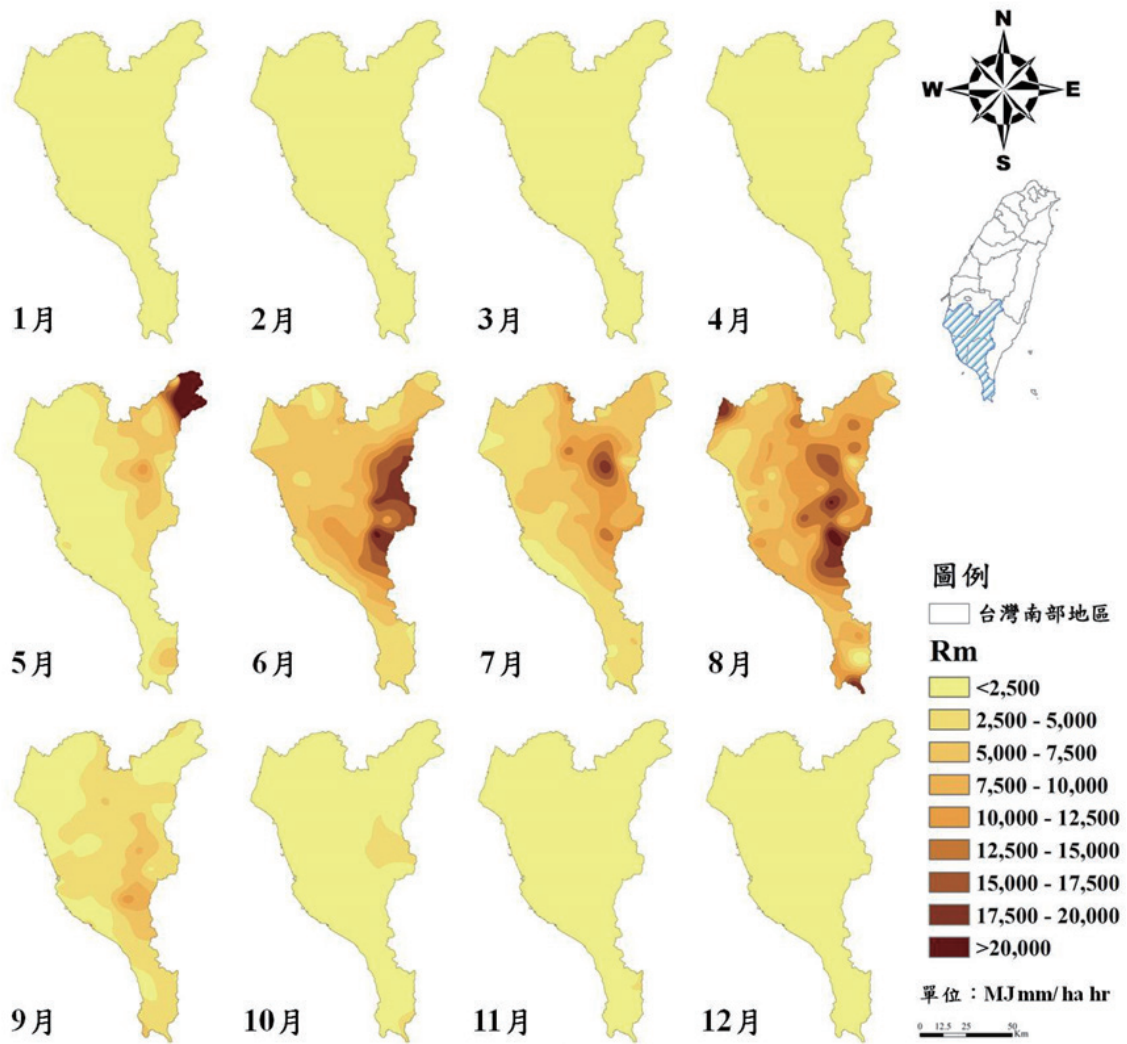


圖 6 台灣南部地區近 14 年（2002~2015 年）月平均降雨沖蝕指數空間變化  
 Fig.6 Spatial trend of the monthly average rainfall and rainfall erosivity between 2002 and 2015

## 2. 季平均降雨沖蝕指數之空間變化

台灣南部地區近年（2002~2015 年）季平均降雨沖蝕指數（ $R_s$ ）的空間變化，大致上由西往東逐漸遞增，顯示其與地形、雨量站分佈位置有很大的關係。 $R_s$  主要集中於夏、秋兩季為主，其中又以夏季為最高，其最大  $R_s$  為 46,715 MJ-mm/ha-hr。春、冬兩季則因中央山脈阻擋使得東北季風不易到達南部，故  $R_s$  最大約 3,793 MJ-mm/ha-hr，與夏、秋兩季相比相差約 10 倍，另外春、冬兩季  $R_s$  也有由西往東逐漸增加之趨勢產生，如圖 7 所示。

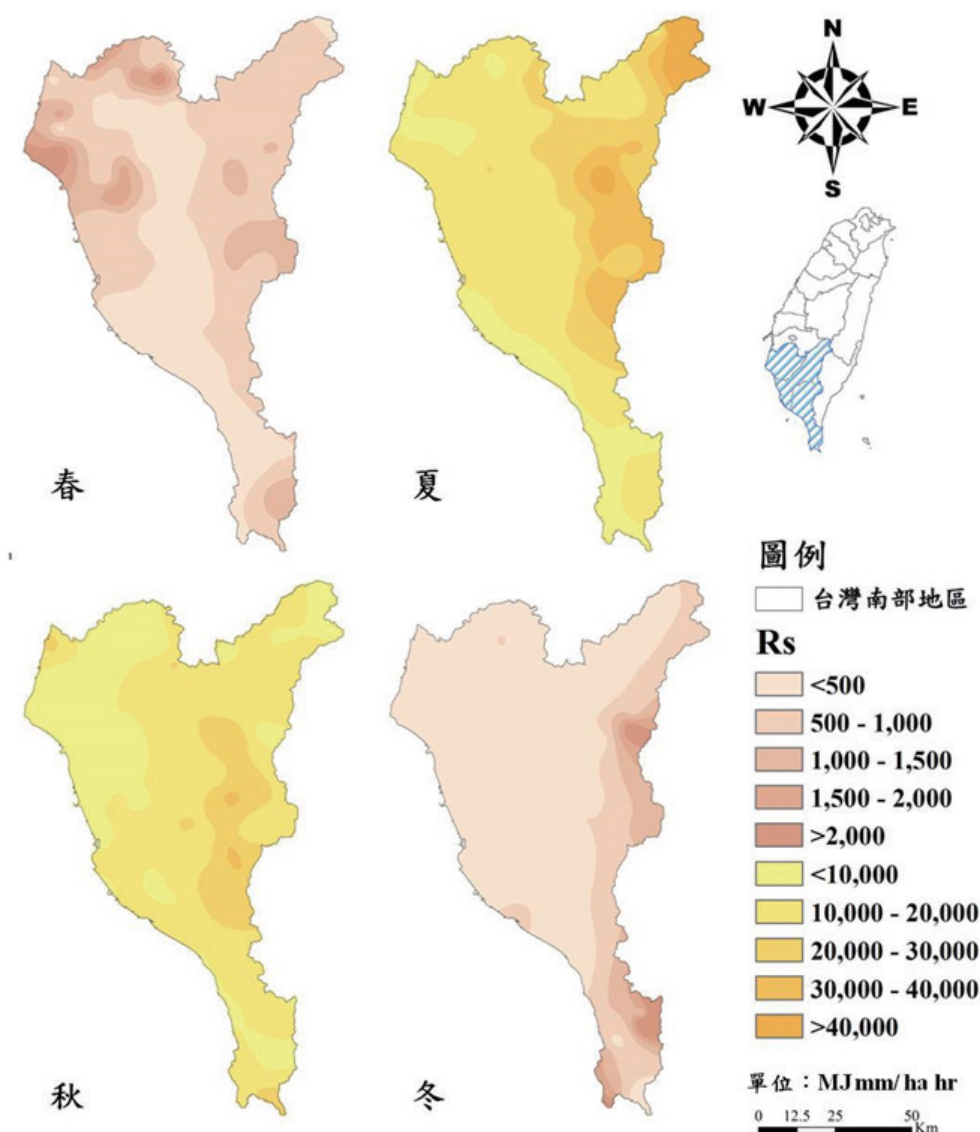


圖 7 台灣南部地區近 14 年（2002~2015 年）季平均降雨沖蝕指數空間變化  
 Fig.7 Spatial trend of the seasonal average rainfall and rainfall erosivity between 2002 and 2015

### 3. 年平均降雨沖蝕指數之空間變化

台灣南部地區近 14 年（2002~2015 年）年平均降雨沖蝕指數（ $R_y$ ）的空間變化，大致上均由西南部向東北部遞增，並由平原地區向山區逐漸增加，如圖 8 所示。其  $R_y$  值均大於 15,000 MJ-mm/ha-hr-yr，御油山雨量站附近  $R_y$  值更高達 72,927 MJ-mm/ha-hr-yr，且由黃俊德（1979）、盧光輝（1999）、盧昭堯（2005）及本研究（2016）之年平均降雨沖蝕指數（ $R_y$ ）空間分佈圖發現，最大年平均降雨沖蝕指數有逐漸增大之趨勢，且在最大值發生位置有逐漸往北移之趨勢，如圖 9 所示。

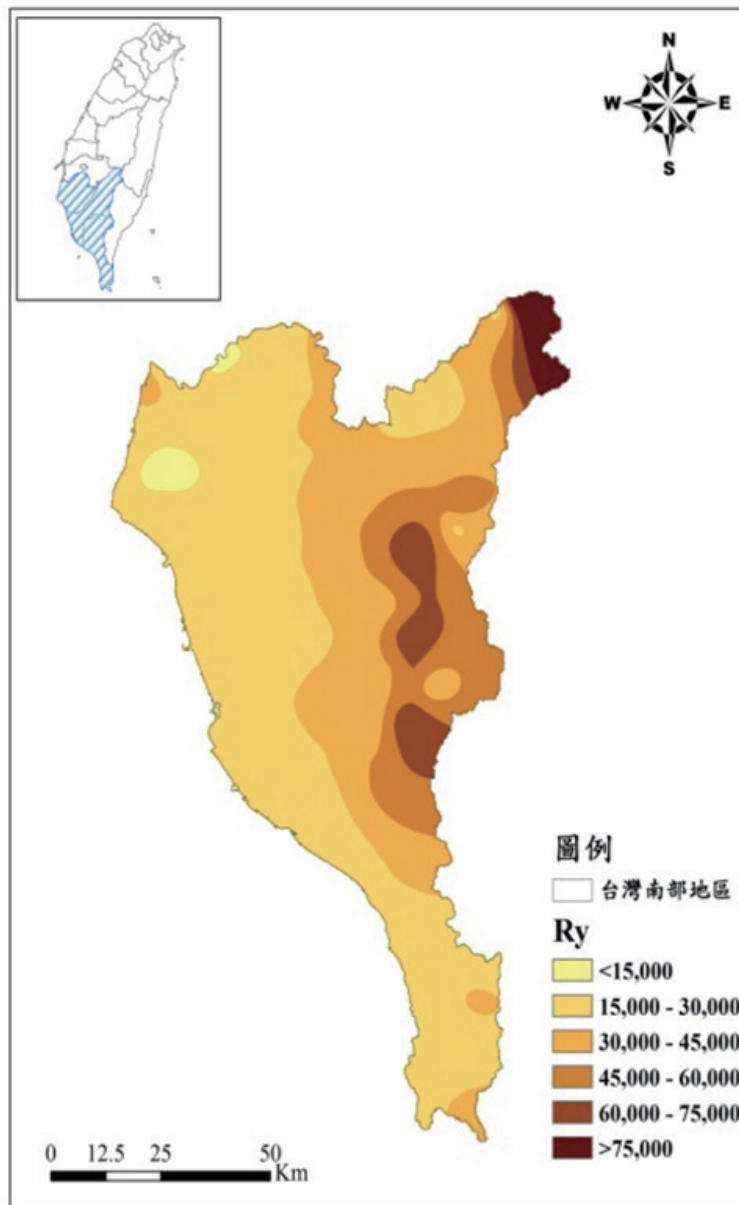


圖 8 台灣南部地區近 14 年（2002~2015 年）年平均降雨沖蝕指數空間變化

Fig.8 Spatial trend of the annual average rainfall and rainfall erosivity between 2002 and 2015

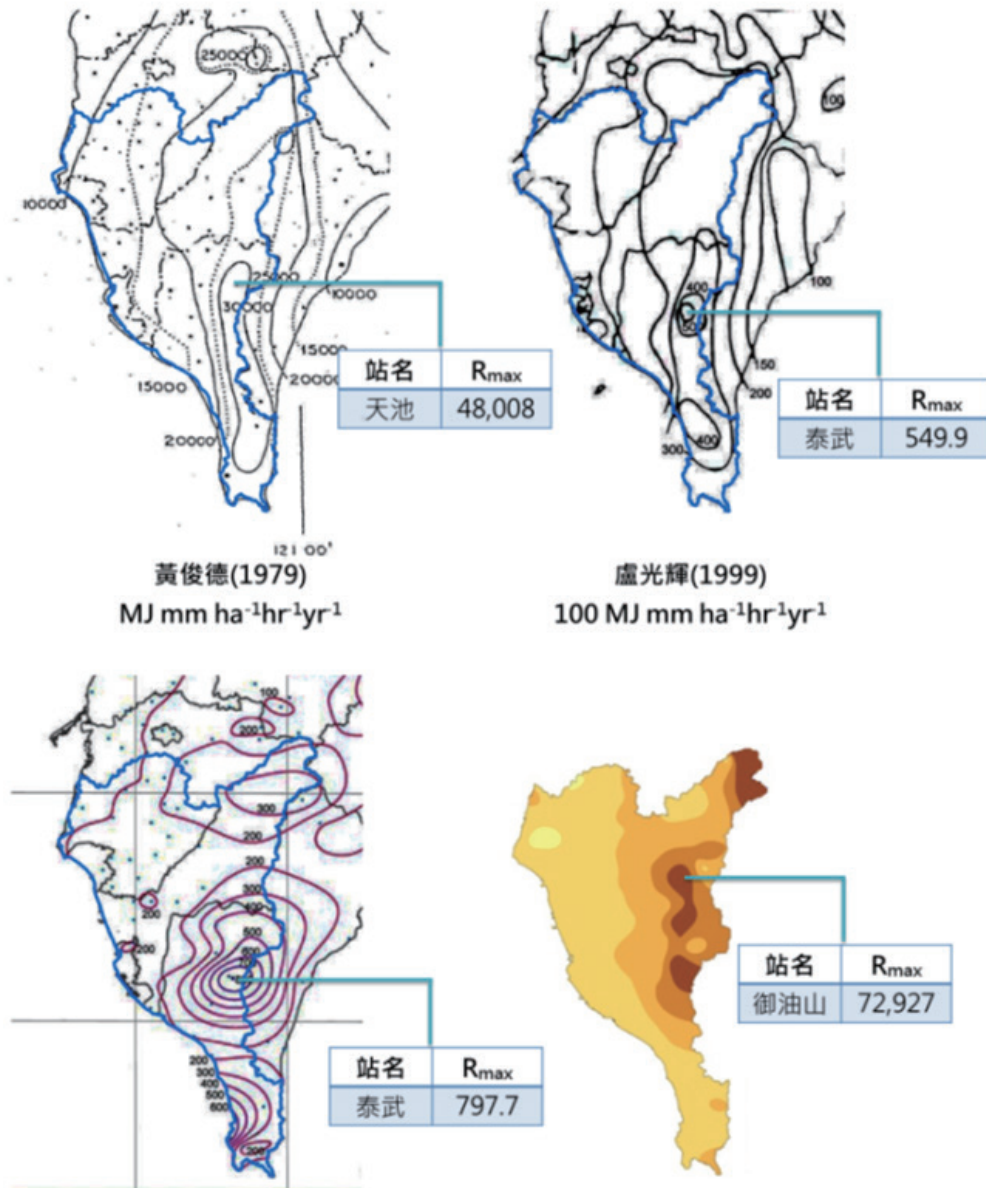


圖 9 台灣南部地區年平均降雨沖蝕指數空間變化圖之探討  
 Fig.9 Comparison between the annual average rainfall and rainfall erosivity

## IV、結論

本研究以台南、高雄及屏東地區為研究區域，蒐集研究區域內 95 個中央氣象局雨量站資料，利用 2002 年至 2015 年之 10 分鐘等間隔降雨資料，及各雨量站設站（1992~1993）後至 2015 年之 60 分鐘等間隔降雨資料，分析月、季及年降雨量與降雨沖蝕指數之關係，並探討時間與空間變化，最後繪製台灣南部地區降雨沖蝕指數等值圖，其結果說明如下：

1. 單場最大降雨量發生於 2009 年莫拉克颱風期間，約佔全部雨量站 7 成（63 個雨量站）。最大年降雨沖蝕指數範圍約介於 24,822~168,715 MJ-mm/ha-hr-yr 之間，平均約為 61,895 MJ-mm/ha-hr-yr，最大值為台南七股寮雨量站。
2. 降雨量與降雨沖蝕指數之時間變化分析結果顯示，月平均降雨量（ $P_m$ ）及降雨沖蝕指數（ $R_m$ ）主要集中在 6~9 月， $P_m$  及  $R_m$  於 5、8、9 及 11 月份有逐年上升之趨勢；其餘月份為持平或逐年下降的趨勢。季平均降雨量（ $P_s$ ）及季平均降雨沖蝕指數（ $R_s$ ）於夏、秋季有逐年上升之趨勢；春季  $P_s$  與  $R_s$  則為逐年下降之趨勢。整體而言，研究地區之年平均降雨量（ $P_y$ ）及年平均降雨沖蝕指數（ $R_y$ ）均為逐年上升之趨勢。
3. 降雨沖蝕指數之空間變化分析結果顯示，台灣南部地區近年（2002~2015 年）月平均降雨沖蝕指數（ $R_m$ ）之空間變化，大致上均由西部或西南部向東部或東北部遞增，並由平原地區向山區逐漸增加。季降雨沖蝕指數（ $R_s$ ）主要集中於夏、秋兩季，其中又以夏季為最高，其最大  $R_s$  為 46,715 MJ-mm/ha-hr，且有由西往東逐漸遞增的關係，顯示其與地形、雨量站分布位置有很大的關係。整體而言，年平均降雨沖蝕指數（ $R_y$ ）之空間變化，大致上均由西南部向東北部遞增，並由平原地區向山區逐漸增加，其  $R_y$  值均大於 15,000 MJ-mm/ha-hr-yr，最大為御油山雨量站， $R_y$  值高達 72,927 MJ-mm/ha-hr-yr，且由黃俊德（1979）、盧光輝（1999）、盧昭堯（2005）及本研究（2016）之年平均降雨沖蝕指數空間分布圖發現，最大年平均降雨沖蝕指數有逐漸增大之趨勢，且在最大值發生位置有逐漸往北移之趨勢。
4. 由於近年來受到極端降雨事件影響，部分地區以過去訂定之年降雨沖蝕指數可能會有低估之現象，建議參考本研究之全台灣降雨沖蝕指數，使其能更符合目前降雨特性所造成的土壤沖蝕量之估算。

## V、謝誌

本研究承蒙行政院農業委員會水土保持局提供研究經費（SWCB-105-054），及審查委員提供寶貴建議，以利本研究順利進行，謹此致謝。

## VI、參考文獻

- 柳中明（2005）氣候變遷、衝擊、因應與永續發展研究進展 2005（上）及（下）。  
國立臺灣大學全球變遷研究中心、國立中央大學環境研究中心、國科會永續發展研究推動委員會。
- 陳晉琪、楊育瑄、黃文舜、李亮廷、詹錢登（2008）土石流發生頻率與降雨特性關係之研究。第十七屆水利工程研討會，論文編號：L4，1-5。
- 黃俊德（1979）臺灣降雨沖蝕指數之研究。中華水土保持學報 10(1)：127-144。
- 盧光輝（1999）降雨沖蝕指數之修訂。中華水土保持學報 30(2)：87-94。
- 盧昭堯、蘇志強、吳藝昀（2005）臺灣地區年等降雨沖蝕指數圖之修訂。中華水土保持學報 36(2)：159-172。
- Laws, J. O., and Parsons, D.A. (1943) The relation of rain drop size to intensity. *American Geophysical, Union Transactions*. 24:452-460.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D., and Uhland, R. E. (1958) Evaluation of factors in the soil loss equation. *Agricultural Engineering* 39(1):458-462.
- Wischmeier, W. H., and Smith, D. D. (1978) Predicting rainfall erosion losses-Aguide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, *Agricultural Handbook*, No. 282.



## 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 2017 / 曾俊偉 主編.

-- 初版 -- 臺北市:農委會林試所, 民106.06

204面; 21×29.7公分

ISBN: 978-986-05-2727-8 (平裝)

1. 林業管理 2. 集水區 3. 文集

436.12407

106009376

## 2017森林集水區經營研討會論文集

發行人 黃裕星

策劃 游漢明

主編 曾俊偉

執行編輯 陳乃維

美術編輯 許明峰

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 台中市區中山路6號3樓 04-2226-0330

出版日期 中華民國一〇六年六月 初版

定價 新台幣200元整

ISBN ISBN 978-986-05-2727-8

GPN 1010600826

圖文有著作權 未經同意請勿使用