

阿里山溪集水區源頭崩塌機制之探討

林昭遠⁽¹⁾ 張鑫歲⁽²⁾ 傅桂霖⁽³⁾

摘要

本研究目的係以 Strahler's 河川級序之概念劃定源頭集水區並探討其崩塌發生機制。利用數位地形模型及遙測影像處理技術，萃取樣區之地文水文資訊，藉由河道輸砂量與坡面泥砂產量之比值，建立源頭崩塌潛勢指標。結果顯示源頭崩塌潛勢指標可有效反映集水區源頭土砂堆積能量狀況，若逢極端事件來臨時，源頭崩塌潛勢較高之區位可能發生大規模土砂災害，可做為源頭集水區監測及管理之參考。

(**關鍵詞**：極端事件、向源侵蝕、源頭集水區、源頭崩塌潛勢指標)

Mechanism of headwater landslides in Alisan creek watershed

Lin Chao-Yuan⁽¹⁾ *Jhang Sin-Wei*⁽²⁾ *Fu Gui-Lin*⁽³⁾

Professor⁽¹⁾ Graduate Student⁽²⁾, Ph. D. Student⁽³⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, 402, R.O.C.

ABSTRACT

This study focused on the mechanisms of landslides which occurred in the headwater watershed to establish the index of potential headwater landslides. The index of potential headwater landslide is defined as a ratio of the amount of channel sediment output to the slopeland sediment yield for a given storm event in the headwater watershed. The spatial distribution of headwater watershed was delineated in the interested watershed according to the rule of Strahler's stream order and a conceptual model (index of potential headwater landslide) is introduced to quantitatively measure the potential headwater landslide for the references of policy and decision making.

(**Keywords** : Extreme event, Headward erosion, Headwater watershed, Index of potential headwater landslide.)

(1)國立中興大學水土保持學系教授(通訊作者 e-mail : cylin@water.nchu.edu.tw)

(2)國立中興大學水土保持學系研究生

(2)國立中興大學水土保持學系博士生

前言

近年來氣候變遷與極端氣候廣受探討，其寒流、熱浪、豪雨、乾旱與熱帶氣旋等氣候現象災害遽增，各國皆有不少災害事件發生(表 1)，2009 年莫拉克風災重創全台，阿里山溪集水區發生多處崩塌，崩塌區位之地覆類別多以森林為主，過去普遍認為森林之保水固土能力能有效減少土壤流失與崩塌發生，當發生極端降雨事件時，上游河道易因坡面泥砂補充不足而形成向源侵蝕，造成源頭河道邊坡破壞，形成大規模的崩塌，使森林平時涵養的土砂一次釋出，堆積於野溪河道。蔡真珍(2012)認為森林在長時間保水固土下，積蓄著豐富的土壤並持續進行土壤化育作用，當坡度陡峭區受外力影響下，易產生自然崩塌現象，可視為森林系統的能量代謝作用。

由於源頭集水區具有地勢陡峭、國土保安以及交通不便等條件；易為人為干擾性低之天然林區位，莫拉克風災在此區位所造成之土砂災害，為天然林經營管理上極為重要之課題。因源頭集水區地理條件嚴苛，現勘調查有其難度，Parachini et al. (2000)與陳樹群等(2009)使用數值高程模型，分別以 Strahler 定義之河川級序與地形形態指標來劃分源頭集水區，克服無法現地調查之問題。有關源頭集水區之合理定義以及其崩塌機制之探討有待深入研究，本研究延伸 Strahler (1964)河川級序之概念，將集水區分為漫地流、野溪、以及長流水等主要組成區位，另由野溪門檻值及 Strahler 河川級序概念劃分源頭集水區，藉由泥砂產量與河道輸砂量之比值提出源頭崩塌潛勢指標，探討源頭集水區崩塌發生機制，提供源頭集水區監測及管理之參考。

表 1 全球歷年災害事件

Table 1 Global disaster events over the years

時間	地點	事件	成因
2005/06	台灣	六一二水災	暴雨
2005/08	美國	卡崔娜颶風	颶風
2006/06	台灣	六九水災	暴雨
2006/08	北韓	北韓水災	暴雨
2007/12	馬來西亞	馬來西亞水災	暴雨
2008/05	中國大陸	中國南方水災	暴雨
2008/06	美國	美國中西部洪水	暴雨
2009/07	中國大陸	四川洪災	暴雨
2009/08	台灣	八八風災	颱風
2009/11	大不列顛愛爾蘭	大不列顛及愛爾蘭洪災	暴雨
2010/05	中國大陸	中國水災	暴雨
2010/07	中國大陸	長江流域大洪水	暴雨

時間	地點	事件	成因
2010/07	巴基斯坦	巴基斯坦洪災	暴雨
2010/09	台灣	高雄水災	暴雨
2011/06	中國大陸	中國華南水災	暴雨
2011/07	泰國	曼谷水災	暴雨
2012/02~03	澳洲	澳洲水災	暴雨
2012/08	大陸	江西水災	颱風
2012/08	菲律賓馬尼拉	菲律賓水患	暴雨

材料與方法

1. 研究流程

為能建立源頭崩塌潛勢指標作為源頭集水區監測之使用，利用數值高程模型(DEM)劃分源頭集水區，以 SPOT 4 衛星影像萃取莫拉克風災之崩塌區位，使用雨量資料計算莫拉克風災降雨量之頻率年，藉由泥砂產量與河道輸砂量之比值，提出源頭崩塌潛勢指標，將此指標與莫拉克風災源頭集水區崩塌區位進行驗證，供未來源頭集水區監測管理之參考(圖 1)。

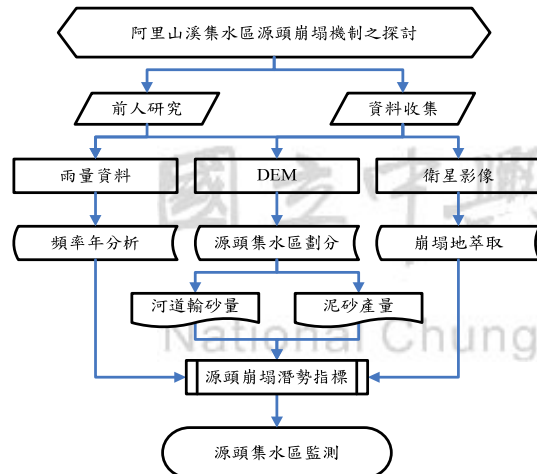


圖 1 研究流程

Figure 1 Flowchart of this study

2. 研究樣區

莫拉克風災於阿里山溪集水區引發多處崩塌及土砂災害，由國科會莫拉克颱風災情勘查與綜整分析(2010)結果，顯示部分土砂流入民宅造成 4 人死亡、多條聯外道路損壞以及 29 戶房舍毀損，嚴重影響對外通訊以及物資補充，為莫拉克風災重點災區之一，故選擇阿里山溪集水區探討源頭崩塌之機制。阿里山溪集水區為濁水溪流域中清水溪之支流，橫跨嘉義縣梅山鄉與阿里山鄉，南與竹崎鄉相連，東接信義鄉。地勢為東高而西北低，集水區面積約為 6,653.84 ha，高程主要分布在 760~2,280 m 之間，約占 90.05%；坡度以六級坡為主，約占 42.05%，其次為五級坡，約占 18.41%；坡向分布主要以西北(17.98%)及北向(16.17%)較多。土地利用現況，以天然林及人工林為主，面積約為 5,381.85 ha，占 80.89%(表 2)。

表 2 阿里山溪集水區土地利用統計

Table 2 Statistics of land use in Alisan creek watershed

土地利用類別	面積(ha)	比例(%)
天然林	3,148.33	47.32
人工林	2,233.52	33.57
水利用地	163.79	2.46
墾地	323.99	4.87
裸露地	625.33	9.39
其他	158.88	2.39
合計	6,653.84	100.00

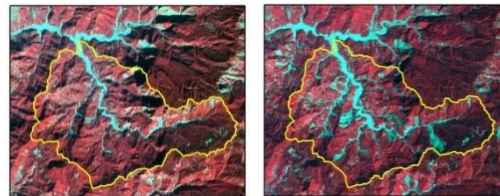
3. 研究材料

利用 DEM 資料配合 Strahler 所提出之河川級序原理，將野溪級序 1 之出口集水區定義為源頭集水區，並以源頭集水區泥砂產量與河道輸砂量之比值萃取源頭崩塌潛勢指標，可量化分析源頭集水區之崩塌潛勢，其中河道輸砂量以水利署 1978 年至 2008 年之雨量資料進行頻率分析，推估莫拉克風災降雨量之重現期距。另以中央太空遙測中心購得之 SPOT 4 衛星影像萃取集水區之常態化差異植生指標 NDVI (圖 2)，了解集水區植物生長良窳之空間分布，可做為深層崩塌潛在區位判釋之用。此外；另以 2008 年國土測繪中心繪製之土地利用圖資萃取天然林及人工林區位，探討不同林地管理區位之崩塌發生情形(表 3)。

表 3 研究材料相關資訊

Table 3 Related information of the study materials

資料名稱	時間	空間解析度	來源	用途
DEM	2003	5m × 5m	內政部	地文水文分析
衛星影像 SPOT4	09/01/05 09/09/26	20m × 20m	中央太空遙測中心	環境指標
雨量資料	1978 ~2009	—	中央氣象局	重現期距分析
土地利用圖資	2008	—	國土測繪中心	天然林區位萃取



2009/01/05(風災前) 2009/09/26(風災後)

圖 2 阿里山溪集水區 SPOT4 衛星影像

Figure 2 SPOT satellite images of Alisan creek watershed

4. 研究方法

本研究旨在定義源頭集水區之劃分及源頭崩塌發生機制之探討，利用坡面泥砂產量與河道輸砂量之關係建立源頭崩塌潛勢指標，其方法詳述如下：

(1) 源頭集水區劃分

源頭集水區係指野溪上游之集水區，此區為以溪流發源地為主。Janisch et al. (2011) 曾定義渠道級序 0 與級序 1 的出口皆可視為渠道源頭，為能準確判讀河川級序，Deshmukh et al. (2010)利用 Strahler(1964)河川級序原理判釋印度謝爾河(Sher River)之級序。本研究採用野溪級序 1 之集水區作為源頭集水區。為能找出野溪區位，其先萃取常流水，使用測繪者依據一年四季皆有水體流動所測繪之地形圖視為常流水，並配合多重門檻值與流向之關係，點擊河道源頭處進行常流水萃取；野溪則依據選定累積流量門檻值與流向萃取該門檻值之水系，將萃取之常流水與野溪套疊，則常流水以外之水系即為野溪(圖 3)，最後依據 Strahler 河川級序原理，找出野溪級序 1 之河段，並以野溪級序 1 之出口劃分集水區，將此集水區定義為源頭集水區。

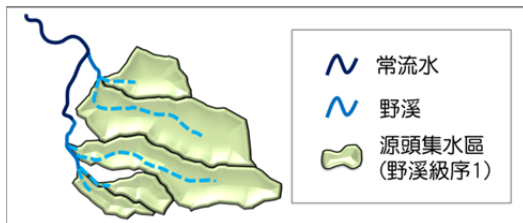


圖 3 源頭集水區劃分示意圖
Figure 3 Delineation of headwater watersheds

為選定適當之累積流量門檻值劃分野溪區位以萃取源頭集水區，以門檻值 500(累積流量為 500 個網格)為間距，萃取各門檻值之源頭集水區個數，並以此對莫拉克新增崩塌地編碼，可求得各門檻值劃分下之崩塌數目。門檻值越小；雖可得到較為精確之劃分成果，

惟因所劃定之集水區個數較多，在處理分析上就顯得繁雜；門檻值越大所劃定之集水區較無法精確反映崩塌區位之一致性。由崩塌個數斜率變化與源頭集水區個數之關係(圖 4)，斜率變化最大處表示在此門檻下崩塌個數變化最大，當門檻值大於於此點時，崩塌個數逐趨收斂而不再變化；小於此點時崩塌個數則呈現不穩定之波動，藉由崩塌個數與源頭集水區數目之關係，以斜率變化最大之門檻值(門檻值 1,000)做為劃分源頭集水區之依據(表 4)。

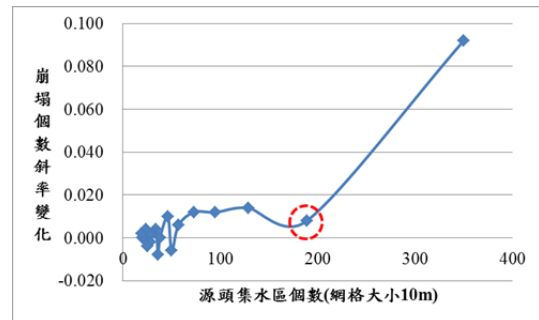


圖 4 以門檻值劃分最佳化源頭集水區數目
Figure 4 Optimal numbers of headwater watershed classified by threshold method.

表 4 最佳門檻值之推定

Table 4 Optimal threshold value estimated

門檻值 (網格個 數)	源頭 集水 區個 數	源頭 崩塌 個數	斜率	斜率 變化
500	350	198	0.148	
1,000	189	124	0.056	0.092
1,500	129	96	0.048	0.008
2,000	95	72	0.014	0.014

			0.034	
2,500	73	55	0.012	
			0.022	
3,000	57	44	0.012	
			0.010	
3,500	50	39	0.006	
			0.004	
4,000	46	37	-0.006	
			0.010	
4,500	38	32	0.010	
			0.000	
5,000	36	32	0.000	
			0.000	
5,500	34	32	-0.008	
			0.008	
6,000	30	28	0.004	
			0.004	
6,500	28	26	0.002	
			0.002	
7,000	27	25	-0.002	
			0.004	
7,500	25	23	0.002	
			0.002	
8,000	24	22	-0.004	
			0.006	
8,500	21	19	0.004	
			0.002	
9,000	20	18	0.000	
			0.002	
9,500	19	17	0.000	
			0.002	
10,000	18	16		

(2) 源頭崩塌潛勢指標

由於植生的保水固土能力使土砂不易受小規模之雨量而流失，當極端降雨時，河道因地形改變形成侵蝕現象，使河道坡度更加

陡峭且流速加快。河道的侵蝕漸漸往上游移動之情形謂之向源侵蝕。源頭集水區人為干擾少、植生保護佳，其崩塌原因主要是暴雨時野溪河道因泥砂補充少而產生向源侵蝕所引起。黃景川等(2011)指出源頭邊坡因豪雨發生大量崩塌常成為土石流之主要土石來源。廖志中等(2011)指出崩積地層常因向源侵蝕坡腳，造成崩體大、小規模的滑動。由坡面補充至河道之泥砂量不足時，易造成河床淘刷，造成兩岸坡面土體抗剪強度下降而發生崩塌。因此藉由集水區坡面泥砂產量與河道輸砂量之計算，可建置集水區源頭崩塌潛勢指標如下：

$$\text{源頭崩塌潛勢指標} = 1 - \frac{\text{坡面泥砂產量}}{\text{河道輸砂量}} \quad (1)$$

(3) 坡面泥砂產量

集水區坡面泥砂產量是由集水區坡面土壤流失量(USLE 推估)與坡面泥砂遞移率(SDR)相乘而得，但並非每一單場事件降雨會導致相同之坡面泥砂產量，因此本研究在同一集水區探討土砂災害時，單場暴雨(single event)的雨量將會影響每次泥砂的運移量，將此雨量影響關係納入計算式中，其公式如下：

$$\text{坡面泥砂產量} = \text{USLE} \times \text{SDR} \times \frac{\text{該事件降雨量}}{\text{年平均降雨量}} \quad (2)$$

a. 土壤流失量：

通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)為 1954 年由美國開始發展，由 Wischmeier 與 Smith(1965,1978)所分析建置。台灣在水土保持技術規範第三十五條提

出山坡地土壤流失量之估算，得採用通用土壤流失公式，估算時應使用台灣地區之區域性參數值，公式如下：

$$A_m = R_m \times K_m \times L \times S \times C \times P \quad (3)$$

- A_m =土壤流失量(ton/ha/year)
- R_m =降雨沖蝕指數(Mj.mm/ha.hr.y)
- K_m =土壤沖蝕指數(t.ha.y/ha.Mj.mm)
- L=坡長因子
- S=坡度因子
- C=覆蓋與管理因子
- P=水土保持處理因子

b. 坡面泥砂遞移率：

假設坡面泥砂主要以坡面地表水運移至常流水，則泥砂遞移率為某個網格點對最接近之常流水網格點的泥砂貢獻量。依據集水區自動劃分原理將泥砂貢獻量之網格點上游流入面積做為表示，若網格點上游之流入面積越大，則逕流量越大，將泥砂運移至常流水也越多。因此集水區坡面上每個網格點之泥砂遞移率，可判釋為此網格點上游流入面積與此網格點流至最接近之常流水上游面積的比值如圖 6，由此可知越靠近常流水之網格點，泥砂遞移率越高。



圖 6 泥砂遞移率示意圖

Figure 6 Concepts of sediment delivery ratio

(4) 河道輸砂量

集水區土壤流出量依照特性可分成一般含砂水流與土石流，一般挾砂水流是河床載運移量，另一個為水中懸浮物的懸浮載；在民國 1996 年 8 月之水土保持技術規範第七十一條有說明河床載運移量估算方法，可利用 Schoklitsch(1950)進行估算，又以 2012 年 10 月之水土保持技術規範第十七條指出山坡地集水區洪峰流量估算，當無實測資料時採用合理化公式計算，其適用面積不可超過一千公頃，以下為河床載運移量之公式：

a. Schoklitsch(1950)：

$$q_s = \frac{2500}{\gamma_s} S^{1.5} (q - q_c) \quad (4)$$

$$q_c = 0.26 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{5/3} \frac{D_0^{3/2}}{S^{7/6}} \quad (5)$$

q_s ：單位河寬河床載運移量(kg/sec/m)

q_c ：單位河寬之河床載起動流量(cms/m)

式中單位河寬以一個網格 10 m 之長度作為單位河寬，計算合理化公式時，降雨強度(I)需要使用頻率年分析加以運算，為了模擬莫拉克風災之流量，故分析莫拉克風災之頻率年，本研究使用甘保氏於 1941 年提出之極端值第一型分佈法，此方法常被用來描述暴雨事件頻率與量體之間的關係，又稱為甘保氏分佈(Gumbel's distribution)，為一種重覆指數型機率函數。

表 5 Schoklitsch 參數選定

Table 5 Values of Parameters for Schoklitsch model

參數項目	參數選定
S：河床坡度(%)	源頭集水區內野溪之平均坡度。
q：單位河寬流量(cms/m) $q = \frac{CIA}{360 \times \text{河道寬度}}$	河道寬度此以一個網格 10m 作為河道寬度。
γ_s ：泥砂單位重(kg/m ³)	參考水土保持手冊-工程篇，泥砂單位重一般為 2.3~2.6t/m ³ ，此採用最大值 2.6，經單位換算求得 2,600 kg/m ³ 。
γ ：水單位重(kg/m ³)	經單位換算求得水單位重為 $\frac{1}{9.8}$ kg/m ³
D ₀ ：河床材料粒徑(m)，原模式採 D ₅₀ 為代表粒徑	採用蔡明波 (2011) 現地調查之資料做為參考。

b. 頻率年分析(極端值第一型分佈法)：

從經濟部水利署取得 1978 年至 2009 年之雨量資料，並統計莫拉克風災之三日最大暴雨，由於 2009 年莫拉克風災於 7、8、9 日影響台灣地區，因而使用三日最大暴雨之雨量進行頻率年分析。顯示頻率年達 450 年之三日最大暴雨量為 1,659.08 mm，而莫拉克風災之三日最大暴雨量為 1,658.70 mm，已趨近於 450 年之頻率年，因此以 450 年重現期距作為莫拉克風災之探討，如圖 7。

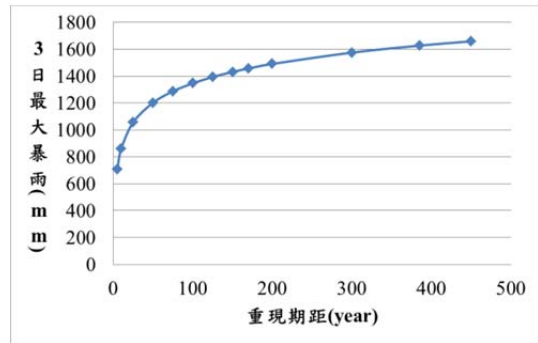


圖 7 莫拉克風災三日最大暴雨頻率年分析
Figure 7 Return period of three-day maximum storm occurred during the strikes of Typhoon Morakot

結果與討論

1. 源頭集水區崩塌資訊

崩塌區位之植生會因崩塌事件的發生導致植生遭受破壞，因此以 2009/01/05 及 2009/09/26 莫拉克風災前後衛星影像進行 NDVI 分析，並利用莫拉克風災前後植生生長差異之特性，使用影像相減法取得阿里山溪集水區之新增崩塌區位(圖 8)，其 Kappa 係數約 0.73 屬良好等級，新增崩塌面積為 557.29 ha，崩塌率約 8.38%，天然林面積約為 3,148.33 ha，崩塌面積約 350.06 ha，崩塌率約為 11.12%，人工林面積約為 2,233.52 ha，崩塌面積約 114.82 ha，崩塌率約為 5.14%，顯示阿里山溪集水區內天然林之崩塌率較人工林高(表 6)。

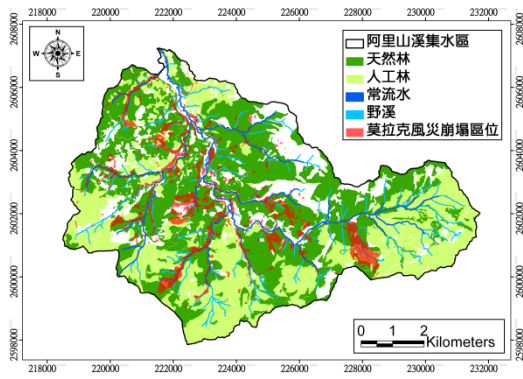


圖 8 莫拉克風災崩塌區位

Figure 8 Spatial distribution of landslides caused by Typhoon Morakot

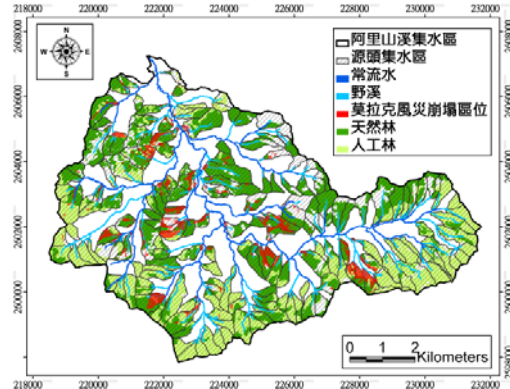


圖 9 源頭集水區崩塌區位

Figure 9 Spatial distribution of landslides in the headwater watersheds

表 6 集水區崩塌資訊

Table 6 Watershed landslide information

項目	面積 (ha)	崩塌面積 (ha)	崩塌率 (%)
阿里山溪 集水區	6,653.84	557.29	8.38
天然林	3,148.33	350.06	11.12
人工林	2,233.52	114.82	5.14

以累積流量 1,000 個網格之門檻值所劃分之水系，據此劃分野溪級序 1 之源頭集水區(圖 9)，並得知阿里山溪集水區有 189 個源頭集水區，如表 7 顯示源頭集水區內之天然林有較高的崩塌率。

表 7 源頭集水區崩塌資訊

Table 7 Landslide information of headwater watersheds

項目	面積 (ha)	崩塌面積 (ha)	崩塌率 (%)
源頭集 水區	4,067.87	263.28	6.47
天然林	1,892.29	171.87	9.08
人工林	1,510.91	57.15	3.78

2. 源頭崩塌機制

由上述崩塌資訊發現天然林之崩塌率皆高於人工林，其原因在於天然林因地勢陡峭交通不易抵達，且開發較少，因此保水固土能力佳，坡面平時補充河道泥砂較少，當極端降雨事件發生時，逕流所匯集之高流量因河道平時累積泥砂少，使其向下、向側邊沖刷，一旦兩岸坡腳失去穩定便產生崩塌，而天然林由於固土能力佳，因此崩塌時所產生之土方量往往較多。相較於人工林因有定時疏伐與農作採收情形，保水固土能力差，於較低之降雨頻率事件發生時即易產生土壤流失，但因平時將部分土砂排入河道，極端事件來臨時，河道有足夠泥砂供水流帶走，而不至於坡腳刷深嚴重，另因坡面不易累積土砂，使人工林發生崩塌時產生之土砂量亦較少。

3. 源頭崩塌潛勢指標建置

為找出源頭崩塌之潛在區位，因此利用源頭崩塌機制中坡面補充河道泥砂不足而易

產生崩塌之特性，提出估算源頭崩塌潛勢之量化指標，源頭崩塌潛勢指標是由泥砂產量與河道輸砂量之比值經反線性配置而得。藉由災前源頭崩塌潛勢指標與災後崩塌率之關係(圖 10)，可發現源頭崩塌發生之區位其源頭崩塌潛勢指標大多高於 0.6。顯示指標越高發生崩塌之潛勢越高，然而源頭崩塌潛勢指標大於 0.6 者雖有幾處未發生崩塌，惟其仍屬高崩塌潛勢區位，為下次極端事件土砂災害之重點防治區位。

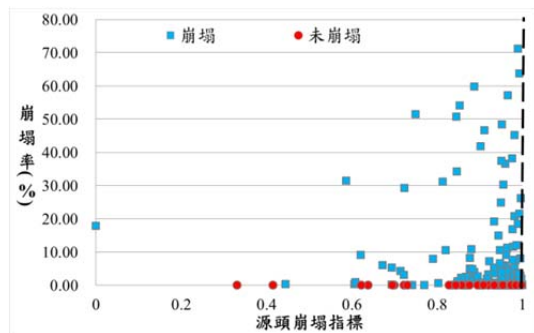


圖 10 源頭崩塌指標與崩塌率點繪圖
Figure 10 Scatter map of landslide rate vs headwater landslide index

結論

本研究利用累積流量門檻值萃取野溪，使用 Strahler 定義之河川級序劃分源頭集水區，得知阿里山溪集水區有 189 個源頭集水區，面積約為 4,067.87 ha。輔以天然林與人工林判釋集水區林地崩塌情形，其崩塌率分別為 9.08%與 3.78%，顯示源頭集水區林地崩塌以天然林為主。由於源頭集水區之天然林區位保水固土能力佳，坡面平時補充河道泥砂不足，致使極端事件時匯集之逕流易刷深河道產生崩塌。據此本研究提出源頭崩塌潛

勢指標量化源頭崩塌潛勢，結果顯示源頭崩塌潛勢指標越大源頭集水區發生崩塌之之比率就越高。源頭崩塌潛勢指標值大而尚未崩塌的區位，未來仍是極端事件之高潛勢崩塌區位，宜小心防範大規模集水區土砂災害之發生。源頭崩塌潛勢指標可供集水區崩塌監測之參考。

謝誌

本研究承行政院農業委員會林務局科技計畫(100 農科-8.5.1-務-e1)補助經費，謹此致謝。

參考文獻

1. 行政院國家科學委員會(2010)莫拉克颱風災情勘查與綜整分析之結果。
2. 陳樹群、馮智偉(2009)以數值高程模型為基礎之河源位置的地形特徵—以塔克金溪上游集水區為例。中華水土保持學報 40(2)：123-134。
3. 黃景川、駱建利、朱奕璋、胡立康、李金龍、張家薰、雲世傑(2011)降雨引發潛層邊坡破壞機制。中華水土保持學報。42(3)：184-195。
4. 蔡明波、陳樹群(2011)阿里山溪集水區之土砂災害調查及枝幹式防治工法探討。技師月刊。58：19-29。
5. 蔡真珍、林煥鈞(2012)由森林集水區天然崩塌事件淺談自然界的脈衝現象。林業研究專訊。19(2)：50-53。
6. 廖志中、潘以文、林志平、堂禎國、黃

- 玉麟、羅文驤（2011）梨山崩塌大規模崩基地層之形成機制。中華水土保持學報。42(4)：303-312。
7. Deshmukh, D. S., U. C. Chaube, S. Tignath and S. K. Tripathi.(2010), "Morphological analysis of Sher River basin using GIS for identification of erosion-prone areas." *Ecohydrology & Hydrobiology*, 10(2-4):307-314.
 8. Janisch, J. E., A. D. Foster and W. J. Ehinger.(2011), "Characteristics of small headwater wetlands in second-growth forests of Washington, USA." , *Forest Ecology and Management*, 261(7):1265-1274.
 9. Paracchini, M.L., S. Folving and F. Bertolo, (2000), "Identification and Classification of European Headwaters." M.J. Haigh and J. Krecek (Eds.), *Environmental Reconstruction in Headwater Areas*, pp.67-79.
 10. Strahler, A. N.,(1964), "Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. " , *Hand book of Applied Hydrology, Sec4-II*, edited by V.T. Chow, McGraw-Hill Book Company, N.Y.
 11. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. (1965), "Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains." , *Agricultural Handbook 282*, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture.
 12. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. (1978), "Predicting rainfall erosion losses." , *agricultural handbook No. 537*.Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture.
-

102 年 04 月 16 日收稿

102 年 04 月 30 日修改

102 年 05 月 02 日接受