

以降雨重現期分析陳有蘭溪流域之崩塌

—以莫拉克颱風為例

曾煒哲⁽¹⁾ 張光宗⁽²⁾

摘 要

本研究以陳有蘭溪流域為例，結合 NDVI 與最大1、3、6小時降雨量所推估的重現期進行空間套疊分析，以探討降雨重現期與崩塌間的關聯性。透過5公尺網格劃分全區，再由 NDVI 變異判釋莫拉克颱風期間的實際崩塌區，進行重現期套疊與崩塌比統計。結果顯示，當降雨重現期超過10年時，崩塌比皆高於莫拉克颱風事件之平均值(5.8%)。

綜合結果指出，最大1、3、6小時降雨高重現期為高風險因子。此外，本研究認為結合 NDVI 與降雨重現期資料能快速有效進行災後判釋與災前預警，未來若應用於即時監測系統，將有助於提升山區災害風險管理效能。

(**關鍵詞：**崩塌、重現期、NDVI、莫拉克颱風、災害潛勢分析)

Analysis of Landslides in the Chenyulan River Watershed Based on Rainfall Return Periods: A Case Study of Typhoon Morakot

Wei-Zhe Tseng⁽¹⁾ Kuang-Tsung Chang⁽²⁾

Master Student⁽¹⁾ Professor⁽²⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

ABSTRACT

This study used the Chenyulan River watershed as a case study to analyze the correlation between rainfall return periods and landslide distribution caused by Typhoon Morakot. Satellite images were used to extract NDVI before and after the disaster, and a 5-meter grid unit was applied to calculate NDVI changes to interpret actual landslide areas. Rainfall data from 21 stations were collected to calculate the return periods of maximum 1-hour, 3-hour, and 6-hour rainfall events. The rainfall return period layers were generated through Kriging interpolation and overlaid with the NDVI-derived landslide layer to analyze spatial relationships.

⁽¹⁾國立中興大學水土保持學系 碩士生(通訊作者 e-mail：a09755166@gmail.com)

⁽²⁾國立中興大學水土保持學系 教授

The results show that when the rainfall return period exceeds 10 years, the landslide ratio is significantly higher than the average value of 5.8% during Typhoon Morakot. Among them, the return period for maximum 1-hour rainfall shows the highest correlation with landslide distribution. The spatial overlay of high return period zones and landslide hotspots also shows strong consistency. The method combining NDVI change detection and rainfall return period analysis can be applied to rapid post-disaster interpretation and pre-disaster risk assessment.

(**Keywords**：Landslide, Return Period, NDVI, Typhoon Morakot, Hazard Susceptibility Analysis)

一、前言

台灣位處熱帶與副熱帶交界，受到東北季風、南方水氣及西太平洋颱風影響，年平均降雨量高達2,500毫米以上，為世界平均的近三倍。然而，降雨時序極不均勻，約有七成集中在每年五月至十月間，時常發生崩塌災害。

過去的崩塌潛勢評估研究多著重於地形、地質與降雨等因子的分析，並利用統計模型或地理資訊系統（GIS）進行空間分析。例如，陳盈靜（2014）應用不同延時降雨得出降雨量與崩塌有正相關性；劉盈劭(2013)利用地質及 DTM 探討崩塌與土石流作用發生與影響控因。

另外林政侑等人(2016)亦針對極端降雨對陳有蘭溪發生崩塌之情況進行研究發現崩塌規模非由降雨量決定，而是跟降雨量之重現期有關連。

且大部分的崩塌潛勢評估皆需長久的資料累積，有鑑於此，本研究提出一項創新方法，嘗試將最大1、3、6小時降雨資料轉換為重現期空間圖，並與 NDVI 判釋之崩塌區進行格網層級的統計比對，藉以量化降雨重現期與崩塌發生機率之關聯性，

補足現有研究對極端降雨觸發崩塌的空間對應分析不足之處，以提供未來豪雨事件，可快速評估是否造成崩塌的可能性。

二、研究區域與方法

2.1 研究區域地理及水文

陳有蘭溪位於台灣中部南投縣境內，為濁水溪上游最重要的支流之一，發源於中央山脈東側的郡大山區，流經信義鄉東埔、同富、地利等原住民部落，最終於水里鄉注入濁水溪。該溪全長約42公里，集水面積約455平方公里，其流域多屬高山深谷地形，海拔高低差達2,500公尺，地勢陡峭，河道蜿蜒曲折。

地質方面，陳有蘭溪流域屬於中央山脈變質岩帶，主要岩性為板岩、千枚岩與頁岩，岩層破碎且多構造破裂面，構造線如大南澳斷層與郡大斷層穿越流域，導致坡地穩定性普遍偏低。此外，區內地震頻繁，加上長年受颱風豪雨與地表逕流沖蝕作用，極易誘發崩塌與土石流等地質災害。

氣候上，陳有蘭溪位於副熱帶山區，年平均降雨量超過3,000毫米，主要集中在夏季颱風與梅雨季節，極端降雨事件頻繁，

因河川上游多為原始林與果園混合的土地利用型態，近年來亦有林道開發、觀光道路與部落聚落擴展等人為活動，進一步增加坡地破壞與崩塌潛勢。是中台灣土石災害風險最高的山區流域之一。

2.2 選取事件

本流域過去曾多次發生重大崩塌與土石災害，複雜的地形條件與脆弱的地質環境，使得陳有蘭溪成為研究山區崩塌地分布與潛勢預測的理想試驗區，歷來造成之豪雨災害尤以1996年賀伯颱風、2001年桃芝颱風、2009莫拉克颱風、2015蘇迪勒颱風造成的災情較為嚴重。

4個颱風對陳有蘭流域造成之崩塌災害皆無法輕視，惟本研究考量災害規模、發生年份及可利用數據，選擇莫拉克颱風，且其造成之災害重大，遙測技術亦已成熟，雨量站建立充足，適合作為研究對象。

莫拉克颱風於2009年8月侵襲台灣期間，其造成的豪雨強度與累積雨量均創下歷史新高，對台灣中南部山區構成毀滅性衝擊。陳有蘭流域地處中央山脈西側，因地勢陡峭、地質脆弱，加上颱風期間的連續性強降雨，在短時間內觸發大量坡地崩塌與土石流事件，災害具高度集中性與破壞性。

根據水土保持署與地調所的災後調查，莫拉克期間陳有蘭流域內新生成的崩塌面積約3,000公頃，等同於整體集水面積的6%以上，且多數集中於坡度大於30度之地形。多起大規模崩塌集中於東埔溫泉區、郡大林道沿線與地利部落周邊地區，不僅造成坡地裸露、地貌重塑，更因土石瞬間

大量入溪，導致主河道多處斷流或改道。

在交通方面，信義鄉通往各部落的產業道路與林道嚴重受創，超過10座橋梁損毀或掩埋，包括東埔吊橋、郡大林道多處橋梁基礎掏空；其中，同富至望鄉段幾乎全線中斷，導致數個原住民部落長時間孤立，災後重建亦面臨重大挑戰。

2.3 雨量資料

本研究參考葉柏村、張光宗(2019)選用21個雨量站，包含中央氣象署15站、水利署6站（如圖1），雨量資料從中央氣象署Codis氣候觀測資料查詢服務及水利署水文資訊網取得2009年8月5日21時至2009年8月10日6時之降雨量數據。

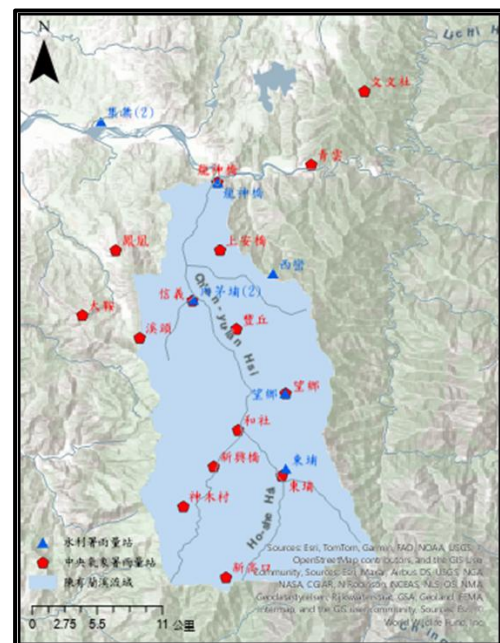


圖1 雨量站分布圖

Figure 1 Rainfall Station Distribution Map

透過蒐集的雨量資料(如圖2)整理各雨

量站之最大1小時降雨量、最大3小時降雨量、最大6小時降雨量，並透過水利署水利防災組（歷年各延時降雨及頻率分析）輸入雨量資料，求得其重現期區間，各雨量站資料求得重現期區間後亦會取得該雨量之統計檢定總覽表。

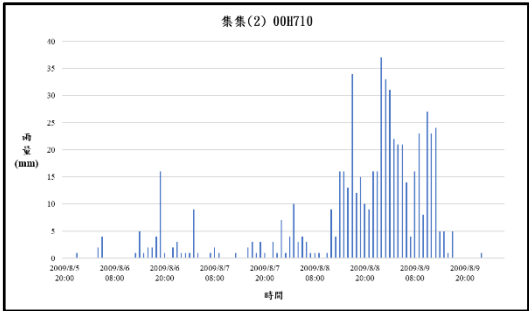


圖2 降雨組體圖（以00H710站為例）
Figure 2 Rainfall Hyetograph at Station 00H710 (Example)

因水利署水利防災組並未說明須選擇哪種機率分布較為適合各雨量站，且降雨重現期亦可能因「樣本數與降雨歷程長度」、「分布模型選擇差異」、「事件強度與特例影響」，為減少上述不確定性影響，本研究雨量站選用之機率分布以農業部農村發展與水土保持署(2023)公告「建立臺灣中部地區區域無因次降雨強度暨山坡地沉砂設施量體初步探討之成果報告書」所推薦最佳及次佳之機率分布，且符合水利署水利防災組已有5種之機率分布者，另農業部農村發展與水土保持署「建立臺灣中部地區區域無因次降雨強度暨山坡地沉砂設施量體初步探討之成果報告書」未包含之雨量站依據水利署水文分析注意事項，在暴雨分析中之暴雨量頻率分析之機率分布選用，

要考量卡方檢定與KS檢定，並原則以卡方檢定為主，再參酌SE值誤差分析的結果，選取合適的機率分布，本研究各雨量站在不同延時選用之機率分布如表1、表2、表3。

表1 最大1小時降雨機率分布選用統計表
Table 1 Statistical Table for Probability Distribution of Maximum 1-Hour Rainfall

雨量站	選用之機率分布	重現期
集集(2) 00H710	對數皮爾森第三類	1.11~2年
龍神橋 01H54	皮爾森第三類	2~5年
西巒 01H470	皮爾森第三類	2~5年
內茅埔(2) 01H780	極端值第一類	2~5年
望鄉 01H390	對數皮爾森第三類	2~5年
東埔 01H400	對數皮爾森第三類	5~10年
文文社 C1I040	對數皮爾森第三類	2~5年
青雲 C1I150	極端值第一類	1.11~2年
龍神橋 C1I160	皮爾森第三類	1.11~2年
鳳凰 C0I090	對數皮爾森第三類	1.11~2年
上安橋 C1I300	對數皮爾森第三類	1.11~2年
大鞍 C1I120	皮爾森第三類	<1.11年
信義 C1I080	對數皮爾森第三類	2~5年
豐丘 C1I290	極端值第一類	5~10年
溪頭 C1I100	皮爾森第三類	<1.11年
望鄉 C1I060	對數皮爾森第三類	2~5年

以降雨重現期分析陳有蘭流域之崩塌—以莫拉克颱風為例
曾煒哲、張光宗

和社 C1I070	皮爾森第三類	5~10年
新興橋 C1I340	對數皮爾森第三類	50~100年
神木村 C0H9A0	常態	25~50年
東埔 C1I350	對數皮爾森第三類	5~10年
新高口 C1I440	對數皮爾森第三類	5~10年

表2 最大3小時降雨機率分布選用統計表

Table 2 Statistical Table for Probability
Distribution of Maximum 3-Hour Rainfall

雨量站	選用之機率分布	重現期
集集(2) 00H710	對數皮爾森第三類	2~5年
龍神橋 01H54	皮爾森第三類	2~5年
西巒 01H470	皮爾森第三類	2~5年
內茅埔(2) 01H780	極端值第一類	2~5年
望鄉 01H390	對數皮爾森第三類	2~5年
東埔 01H400	對數皮爾森第三類	10~20年
文文社 C1I040	對數皮爾森第三類	5~10年
青雲 C1I150	極端值第一類	2~5年
龍神橋 C1I160	皮爾森第三類	2~5年
鳳凰 C0I090	對數皮爾森第三類	5~10年
上安橋 C1I300	對數皮爾森第三類	1.11~2年
大鞍 C1I120	皮爾森第三類	<1.11年
信義 C1I080	對數皮爾森第三類	2~5年
豐丘 C1I290	極端值第一類	10~20年

溪頭 C1I100	皮爾森第三類	<1.11年
望鄉 C1I060	對數皮爾森第三類	2~5年
和社 C1I070	皮爾森第三類	10~20年
新興橋 C1I340	對數皮爾森第三類	25~50年
神木村 C0H9A0	皮爾森第三類	25~50年
東埔 C1I350	對數皮爾森第三類	5~10年
新高口 C1I440	對數皮爾森第三類	20~25年

表3 最大6小時降雨機率分布選用統計表

Table 3 Statistical Table for Probability
Distribution of Maximum 6-Hour Rainfall

雨量站	選用之機率分布	重現期
集集(2) 00H710	對數皮爾森第三類	2~5年
龍神橋 01H54	對數皮爾森第三類	2~5年
西巒 01H470	皮爾森第三類	2~5年
內茅埔(2) 01H780	皮爾森第三類	2~5年
望鄉 01H390	皮爾森第三類	2~5年
東埔 01H400	對數皮爾森第三類	5~10年
文文社 C1I040	對數皮爾森第三類	10~20年
青雲 C1I150	皮爾森第三類	2~5年
龍神橋 C1I160	對數皮爾森第三類	2~5年
鳳凰 C0I090	對數皮爾森第三類	10~20年
上安橋 C1I300	極端值第一類	2~5年
大鞍 C1I120	對數皮爾森第三類	1.11~2年

信義 C1I080	對數皮爾森第三類	2~5年
豐丘 C1I290	皮爾森第三類	5~10年
溪頭 C1I100	對數皮爾森第三類	1.11~2年
望鄉 C1I060	皮爾森第三類	2~5年
和社 C1I070	皮爾森第三類	5~10年
新興橋 C1I340	皮爾森第三類	25~50年
神木村 C0H9A0	皮爾森第三類	20~25年
東埔 C1I350	對數皮爾森第三類	5~10年
新高口 C1I440	對數皮爾森第三類	25~50年

2.4 圖層套匯

利用內插法計算最大1小時降雨量、最大3小時降雨量、最大6小時降雨量之重現期，整理資料如圖3、圖4、圖5。

雨量站	X 座標	Y 座標	高程(m)	雨量(mm)	重現期(年)
集集(Z00H710)	227066.5	2635803	215	37	1.3
龍神橋 O1H54	236922.2	2630662	322	53	3
西帶 01H470	241603.5	2622974	1666	46	1.8
內茅埔(Z01H780)	234887.9	2620767	485	55	3.2
望鄉 01H390	242634.6	2612861	2200	47	2.8
東埔 01H400	242685.3	2606501	1135	54	7.6
文文社 C1I040	249336	2638343	1693	63.5	2.8
青雲 C1I150	244841.4	2632140	393	39	1.1
龍神橋 C1I160	236908.8	2630652	339	47	1.4
鳳凰 C0I090	228319.1	2624926	910	60.5	1.4
上安橋 C1I300	237137.1	2624934	781	38.5	1.5
大鞍 C1I120	225501.3	2619441	1515	20	0.6
信義 C1I080	234808	2620666	536	57	3.4
豐丘 C1I290	238516.4	2618280	1151	63.5	4.9
溪頭 C1I100	230343.3	2617527	1810	35	1.3
望鄉 C1I060	242671.4	2612841	2403	49	2.4
和社 C1I070	238657.1	2609748	825	63.5	8
新興橋 C1I340	236599.5	2606671	897	96	99.3
神木村 C0H9A0	234037.5	2603286	1595	95	19.6
東埔 C1I350	242354.5	2605888	887	53.5	6.5
新高口 C1I440	237634	2597303	2540	72	7.5

圖3 最大1小時降雨重現期重現期統計數據
Figure 3 Statistical Data of Maximum 1-Hour Rainfall Return Period

雨量站	X 座標	Y 座標	高程(m)	雨量(mm)	重現期(年)
集集(Z00H710)	227066.5	2635803	215	101	2.2
龍神橋 O1H54	236922.2	2630662	322	133	4.5
西帶 01H470	241603.5	2622974	1666	115	2.6
內茅埔(Z01H780)	234887.9	2620767	485	130	4.2
望鄉 01H390	242634.6	2612861	2200	121	3.8
東埔 01H400	242685.3	2606501	1135	144	13
文文社 C1I040	249336	2638343	1693	161.5	7.6
青雲 C1I150	244841.4	2632140	393	109.5	3.1
龍神橋 C1I160	236908.8	2630652	339	129	4
鳳凰 C0I090	228319.1	2624926	910	176.5	7.5
上安橋 C1I300	237137.1	2624934	781	100.5	1.8
大鞍 C1I120	225501.3	2619441	1515	53.5	0.9
信義 C1I080	234808	2620666	536	137	4
豐丘 C1I290	238516.4	2618280	1151	152.5	11.8
溪頭 C1I100	230343.3	2617527	1810	53.5	1.1
望鄉 C1I060	242671.4	2612841	2403	129	3.3
和社 C1I070	238657.1	2609748	825	169	12.3
新興橋 C1I340	236599.5	2606671	897	239.5	37
神木村 C0H9A0	234037.5	2603286	1595	255.5	26.6
東埔 C1I350	242354.5	2605888	887	142.5	8.7
新高口 C1I440	237634	2597303	2540	202	20.4

圖4 最大3小時降雨重現期重現期統計數據
Figure 4 Statistical Data of Maximum 3-Hour Rainfall Return Period

雨量站	X 座標	Y 座標	高程(m)	雨量(mm)	重現期(年)
集集(Z00H710)	227066.5	2635803	215	165	3.6
龍神橋 O1H54	236922.2	2630662	322	205	4.9
西帶 01H470	241603.5	2622974	1666	175	2.3
內茅埔(Z01H780)	234887.9	2620767	485	200	4.3
望鄉 01H390	242634.6	2612861	2200	194	3.7
東埔 01H400	242685.3	2606501	1135	219	9.7
文文社 C1I040	249336	2638343	1693	291	12.4
青雲 C1I150	244841.4	2632140	393	155	3.5
龍神橋 C1I160	236908.8	2630652	339	194.5	4.8
鳳凰 C0I090	228319.1	2624926	910	293	12.3
上安橋 C1I300	237137.1	2624934	781	155.5	2
大鞍 C1I120	225501.3	2619441	1515	87	1.3
信義 C1I080	234808	2620666	536	208.5	3.8
豐丘 C1I290	238516.4	2618280	1151	217	7
溪頭 C1I100	230343.3	2617527	1810	95	1.4
望鄉 C1I060	242671.4	2612841	2403	208.5	3.1
和社 C1I070	238657.1	2609748	825	256.5	9.4
新興橋 C1I340	236599.5	2606671	897	362.5	17.8
神木村 C0H9A0	234037.5	2603286	1595	392	16.3
東埔 C1I350	242354.5	2605888	887	216	6.6
新高口 C1I440	237634	2597303	2540	363.5	31.9

圖5 最大6小時降雨重現期重現期統計數據
Figure 5 Statistical Data of Maximum 6-Hour Rainfall Return Period

參考賴銘峰(2010)在陳有蘭溪應用 GIS 進行降雨空間特性之研究，本研究使用 ArcGIS Pro 之 Empirical Bayesian Kriging

(EBK) 工具進行最大1、3、6小時降雨重現期之空間內插。此法相較傳統 Kriging 具備統計穩健性與自動化建模能力，能有效應對降雨點資料樣本數較少與空間異質性高之問題。

在內插模型部分，本研究選擇球面函數 (Spherical Function) 作為半變異數模型，主要依據為其適用於變化平滑、距離一定範圍後趨於穩定之地理現象，較符合山區降雨空間分布特性。此外，Kriging 預測方法採用「正常分布」，並設定每格搜尋鄰點數為 12，變數搜尋半徑以適應 EBK 自動調整結果。

誤差評估方面，EBK 方法會於內插過程中自動生成 100 次模擬樣本，並根據模擬結果進行誤差建模與估算，最終輸出每一像元之預測值與誤差方差 (Prediction Standard Error)，並可計算整體內插的平均根均方誤差 (RMS)。若 RMS 偏高，將重新調整搜尋半徑與變異數模型進行最佳化。

獲得之降雨重現期成果圖如圖6、圖7、圖8，最後選用2009年7月25日之衛星影像(如圖9)及2009年8月15日之衛星影像(如圖10)分別做為陳有蘭流域歷經莫拉克颱風的崩塌網格進行前後比對。

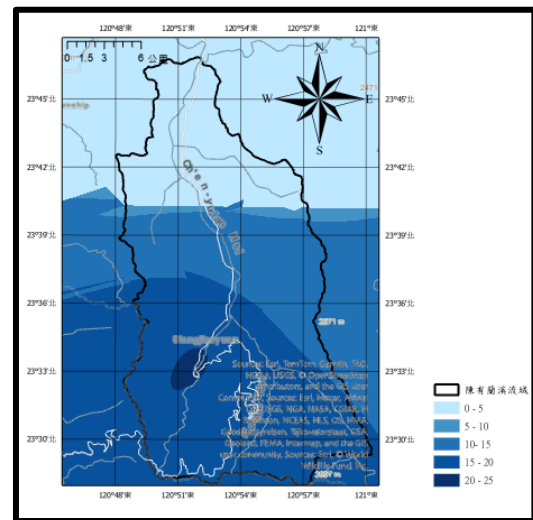


圖6 最大1小時降雨重現期 Kriging 成果圖
Figure 6 Kriging Result Map of Maximum 1-Hour Rainfall Return Period

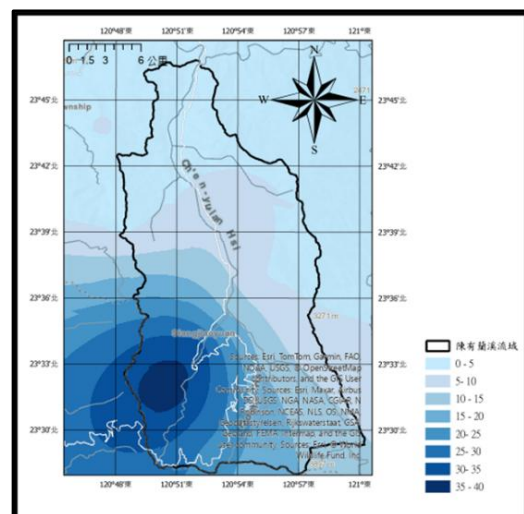


圖7 最大3小時降雨重現期 Kriging 成果圖
Figure 7 Kriging Result Map of Maximum 3-Hour Rainfall Return Period

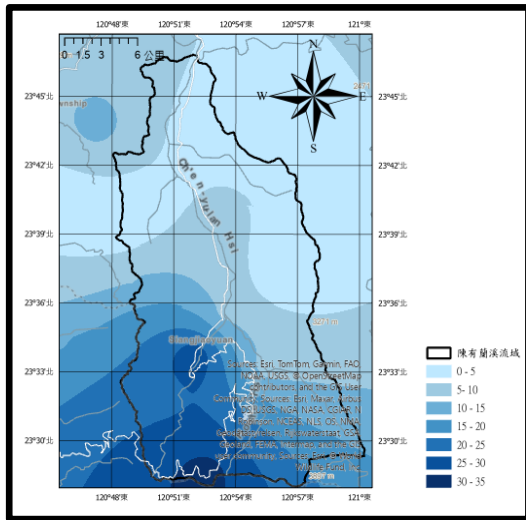


圖8 最大6小時降雨重現期 Kriging 成果圖
Figure 8 Kriging Result Map of Maximum 6-Hour Rainfall Return Period

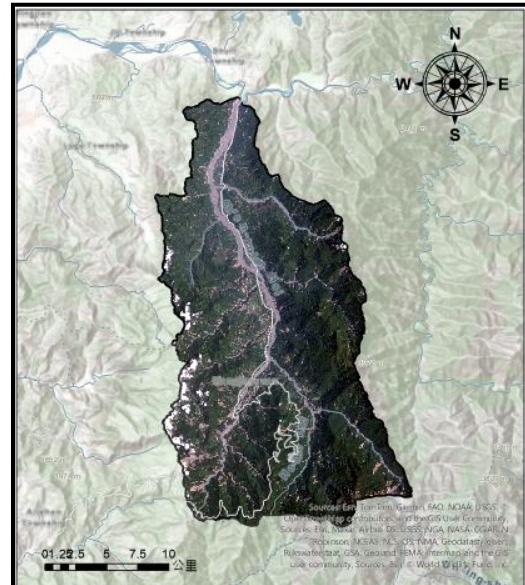


圖10 陳有蘭溪流域空拍圖 (2009.8.15)
Figure 10 Aerial Photograph of the Chen-Yu-Lan River Basin(2009.8.15)



圖9 陳有蘭溪流域空拍圖 (2009.7.25)
Figure 9 Aerial Photograph of the Chen-Yu-Lan River Basin(2009.7.25)

2.5 崩塌判釋

本研究參考 Nguyen et al.(2020)利用 NDVI 辨識山崩發生，又因本研究選用莫拉克颱風，故參考 Tsai et al.(2010)利用遙測技術研究莫拉克颱風對台灣南部造成崩塌的，其公式利用 NDVI 在莫拉克颱風事件發生的前後變化值去定義該網格是否崩塌，採用之公式如式1、式2：

$$\Delta NDVI = NDVI_{before} - NDVI_{after} \quad (1)$$

$$\Delta NDVI \geq 0.3 \text{ 且 } NDVI_{after} \leq 0.1 \quad (2)$$

為提升區域適用性，亦參考陳宜徽 (2005) 針對陳有蘭溪流域進行之多年崩塌事件研究，指出該區崩塌後 NDVI 均值約下降 0.04~0.09，且災後 NDVI 常落於 0.2 以下。從陳宜徽 (2005) 之研究成果可發現雖 Tsai et al.(2010)之崩塌定義公式之區

間的確符合實際崩塌情形，惟該公式之篩選條件較為嚴格，但考量莫拉克颱風具極端降雨強度，且較保守條件可排除因雲影、土地利用變動或非災害性因素所造成之誤判依據式2計算並套疊雨量資料後，每個網格可獲得一個降雨重現期及是否崩塌之資料。

為進一步分析崩塌事件之空間聚集趨勢，本研究以 NDVI 判釋結果（5×5 公尺格網）為基礎，將判釋為崩塌之網格轉換為點圖層後，套用 ArcGIS Pro 中「Kernel Density」工具進行熱區密度分析。該工具以核函數（Kernel Function）加權分布於鄰近像元中，計算出每單位面積內之點事件密度，設定參數如圖11：



圖11 Kernel Density 參數設定圖
Figure 11 Kernel Density Analysis Parameters

三、結果與討論

3.1 結果

本研究以5米*5米之網格劃分，共17,926,397格，其中1,040,901格依式2定義為崩塌，統計最大1、3、6小時降雨重現期之崩塌數據，計算其崩塌比如式3，為進行

降雨重現期與崩塌比例關係之分析，本研究將所有格網依據其最大降雨重現期估算值所落入之區間進行分類。例如，重現期介於0至10年者歸為「0-10年」組，依此類推。此分組方式乃依據內插資料之數值落點進行分類，並非表示平均值或年代表述，而是便於進行區段統計與空間風險分布觀察，成果如表4、表5、表6，關係如圖12、圖13、圖14。

崩塌比=〔(崩塌格數/總格數)*100%〕 (3)

表4 最大1小時降雨崩塌數據統計表
Table 4 Statistical Table of Landslide Data under Maximum 1-Hour Rainfall

重現期 (年)	崩塌 (格)	總格數 (格)	崩塌比 (%)
0~10	134780	4468720	3.02
10~20	873230	13177769	6.63
20~25	32891	279908	11.75

表5 最大3小時降雨崩塌數據統計表
Table 5 Statistical Table of Landslide Data under Maximum 3-Hour Rainfall

重現期 (年)	崩塌 (格)	總格數 (格)	崩塌比 (%)
0~10	311076	8737119	3.56
10~20	331817	4614236	7.19
20~30	163563	2646290	6.18
30~40	234445	1928752	12.16

表6 最大6小時降雨崩塌數據統計表
Table 6 Statistical Table of Landslide Data under Maximum 6-Hour Rainfall

重現期 (年)	崩塌 (格)	總格數 (格)	崩塌比 (%)
------------	-----------	------------	------------

0~10	387116	9883684	3.92
10~20	218958	3627059	6.04
20~30	423146	4179490	10.12
30~35	11681	236164	4.95

表 4 至表 6 中所列各重現期區段之總格數略有差異，主因為不同延時（1小時、3小時、6小時）之降雨重現期內插圖層，其空間分布結果並不完全一致。由於各雨量站在不同延時的最大降雨量差異性高，進而造成 Kriging 內插後之重現期空間範圍有所不同，使得各重現期區間在網格分類時產生交集差異。

為維持統計一致性，本研究以各區段內之「崩塌比」進行分析，「崩塌比」係為各重現期區段內的崩塌網格數除以該區段總網格數所得之百分比，避免因總格數不同造成誤差，且能有效反映不同重現期下崩塌發生的相對密度與風險趨勢，並不會因格數差異而影響比較結果的合理性。

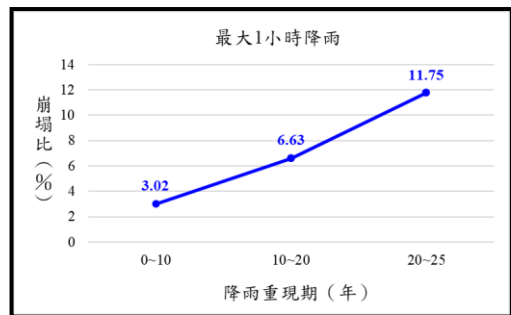


圖12 崩塌比隨降雨重現期變化趨勢圖（最大1小時降雨）

Figure 12 Trend of Landslide Ratio in Relation to Rainfall Return Period under Maximum 1-Hour Rainfall

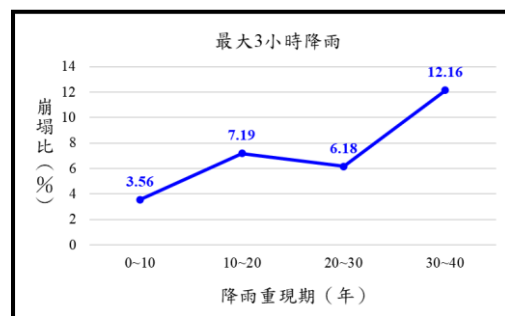


圖13 崩塌比隨降雨重現期變化趨勢圖（最大3小時降雨）

Figure 13 Trend of Landslide Ratio in Relation to Rainfall Return Period under Maximum 3-Hour Rainfall

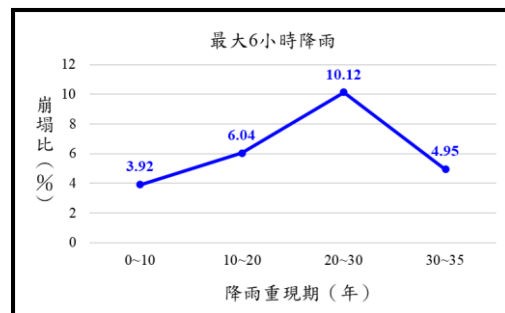


圖14 崩塌比隨降雨重現期變化趨勢圖（最大6小時降雨）

Figure 14 Trend of Landslide Ratio in Relation to Rainfall Return Period under Maximum 6-Hour Rainfall

本研究進一步以崩塌判釋點圖層進行 Kernel Density 分析，產製崩塌熱區圖(如圖 15)，以呈現崩塌事件於空間上的分布密集程度，並整理高重現期(大於10年重現期)之崩塌區分布圖如圖16、圖17、圖18，結果顯示，高重現期下之崩塌區域分布與 Kernel Density 分析所得之崩塌熱區具有高度一致性，顯示重現期可合理反映崩塌發

以降雨重現期分析陳有蘭流域之崩塌—以莫拉克颱風為例
曾煒哲、張光宗

生之空間集中趨勢，具潛在應用價值。

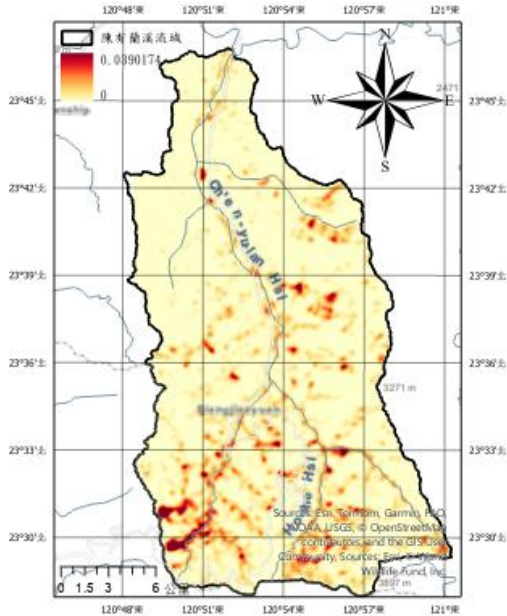


圖15 崩塌熱區圖

Figure 15 Landslide Hotspot Map

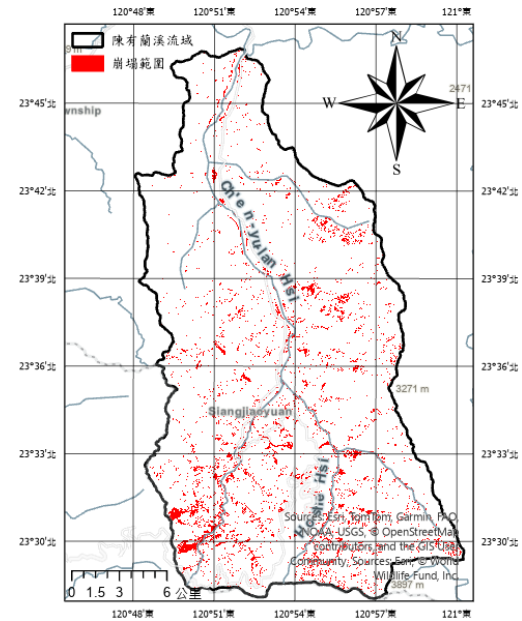


圖17 高重現期崩塌區分布圖(3小時)

Figure 17 Landslide Distribution under 3-Hour High Rainfall Return Period

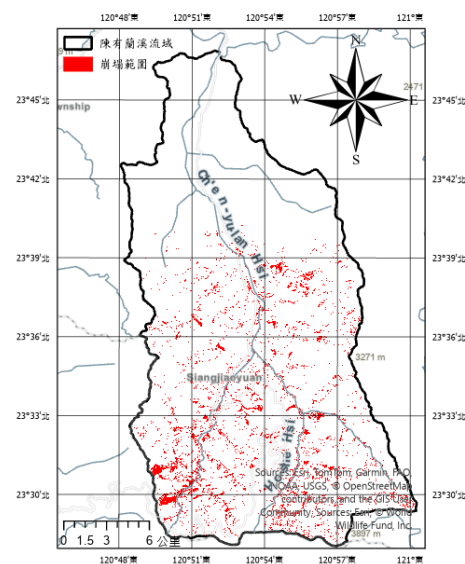


圖16 高重現期崩塌區分布圖(1小時)

Figure 16 Landslide Distribution under 1-Hour High Rainfall Return Period

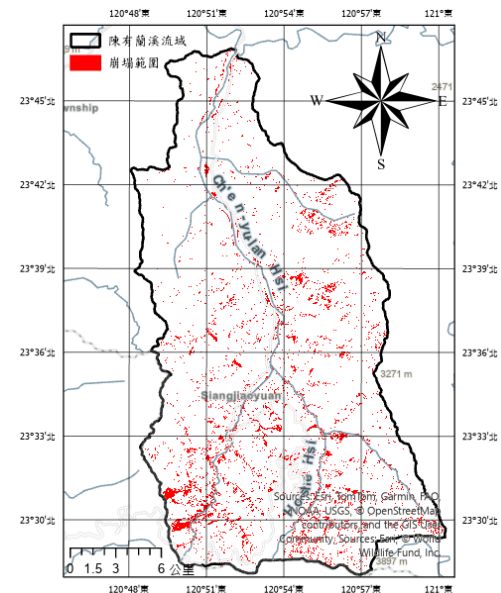


圖18 高重現期崩塌區分布圖(1小時)

Figure 18 Landslide Distribution under 6-Hour High Rainfall Return Periods

3.2 討論

本研究以莫拉克颱風造成之崩塌為基礎，透過不同延時（1小時、3小時、6小時）最大降雨量推估重現期，進行套疊分析，探討降雨重現期與崩塌對應之關係。套疊分析結果顯示，本次莫拉克颱風在陳有蘭溪流域造成之崩塌比約為5.8%。

首先，在最大1小時降雨重現期情境下，透過圖12可發現在此次颱風事件除0~10年重現期低於全流域之崩塌比，其餘重現期之崩塌比皆高於全流域之崩塌比，並在20~25年重現期達到11.75%，崩塌比與降雨重現期亦呈正相關性，由此可以得出當最大1小時降雨重現期大於10年時，陳有蘭溪流域崩塌之機率將顯著提升，可作為誘發崩塌初判之依據。

其次，在最大3小時降雨重現期情境下，透過圖13可發現雖崩塌比與降雨重現期未完全呈正相關性，在20~30年重現期時崩塌比略低於10~20年重現期，但此次颱風事件除0~10年重現期低於全流域之崩塌比，其餘重現期之崩塌比皆高於全流域之崩塌比，由此可以得出當最大3小時降雨重現期大於10年時，陳有蘭溪流域崩塌之機率將顯著提升，可作為誘發崩塌初判之依據。

最後，在最大降雨6小時重現期情境下透過圖14可發現雖崩塌比與降雨重現期在0~30年重現期區間呈正相關性，惟在30~35年重現期時崩塌比大幅下降，透過整理崩塌前 NDVI 之數據發現在未崩塌的224,483格裡有184,831格的 $NDVI \leq 0.2$ ， $NDVI \leq 0.2$ 代表該網格在莫拉克颱風事件以前就是植

被稀疏、裸露地及水，此種類型地質條件較難判定為崩塌，故可先排除考量30~35年重現期，剩餘之重現期，可以得出當最大6小時降雨重現期大於10年時，陳有蘭溪流域崩塌之機率將顯著提升，可作為誘發崩塌初判之依據。

從崩塌比與降雨重現期之關係可以發現不論是最大1小時降雨、最大3小時降雨、最大6小時降雨，其大致都是呈現正相關性，且在10年重現期發生崩塌有顯著提升，同時，熱區分布與高重現期崩塌區亦呈現顯著空間重疊，驗證了以 NDVI 配合重現期可有效推估潛在高風險區位。

四、結論

本研究結合莫拉克颱風事件之固定崩塌分布資料與三種不同延時（1小時、3小時、6小時）最大降雨轉換之重現期，進行套疊與空間統計分析，探討降雨重現期與崩塌之間的潛在關聯，整體研究發現如下：

(1) 重現期與崩塌比呈正相關性：不論最大1、3、6小時降雨，除因地質條件因素，越高的重現期其崩塌比也越大，故重現期可作為初判崩塌發生的條件。

(2) 10年重現期可視為崩塌風險之臨界門檻：在三種降雨延時條件下，當重現期大於10年時，崩塌比皆明顯高於全區平均值，並根據崩塌熱區圖與高重現期崩塌區分布圖之比較，此觀察結果可作為災前預警與風險管控之初判依據。

(3) NDVI 結合重現期為有效之空間風險評估方式：本研究結合 NDVI 變異量作

為崩塌指標，並以重現期表徵降雨異常程度，證實此一方法可應用於大範圍山區之災害潛勢快速評估，對災後判釋與災前預警皆具實用性與效率。

(4) 應用潛力與延伸建議：若能將本研究方法整合於降雨事件期間之自動化監測與重現期即時估算系統，將可協助判定高風險區域並及早啟動防災應變作業，進一步降低人員傷亡與基礎設施損害風險。

參考文獻

1. 陳盈靜(2014)，「台灣山區降雨量雨誘發山崩之關係及集集大地震後山坡復育情形」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
2. 劉盈劭(2013)，「陳有蘭溪源流區之崩塌與土石流發生特性與空間差異：以和社溪流域為例」，國立臺灣師範大學地理學系博士論文。
3. 林政侑、陳垣榮、林昭遠(2016)，「降雨重現期距與集水區崩塌區位關係之研究」，水土保持學報，第四十八卷，第四期，第1863-1876頁。
4. 葉柏村、張光宗(2019)，「山崩潛感模型的逐步建構雨決策分析」，中華水土保持學報，第五十卷，第二期，第49-62頁。
5. 中央氣象署 Codis 氣候觀測資料查詢服務，<https://codis.cwa.gov.tw/StationData>。
6. 經濟部水利署水文資訊網，<https://gweb.wra.gov.tw/HydroInfoCore/>。
7. 經濟部水利署水利署水利防災組-歷年各延時降雨及頻率分析，<https://fsv.manysplendid.com.tw/powerwra/rainIntensity/>。
8. 農業部農村發展及水土保持署(2023)，「建立臺灣中部地區區域無因次降雨強度暨山坡地沉砂設施量體初步探討成果報告書」，第4-10~4-12頁。
9. 賴銘峰(2010)，「應用 GIS 於集水區降雨空間特性之研究—以陳有蘭溪為例」，朝陽科技大學營建工程系碩士論文。
10. 陳宜徽(2005)，「陳有蘭溪流域山崩與植生狀態在颱風與地震事件中之對應關係」，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文。
11. Nguyen,T.D.,Chu,V.T. ,& Chiang, S. H. (2020)，「Generating multi-temporal landslide inventory using the NDVI temporal trajectory in Nantou County, Taiwan.」，Paper presented at the 41st Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2020),Online conference, Deqing, China. Asian Association on Remote Sensing

12. Tsai, F., Hwang, J.-H., Chen, L.-C., & Lin, T.-H. (2010) , 「 Post-disaster assessment of landslides in southern Taiwan after 2009 Typhoon Morakot using remote sensing and spatial analysis 」 , Natural Hazards and Earth System Sciences , 10(10): 2179–2190 。

114 年 05 月 21 日收稿

114 年 06 月 17 日修改

114 年 06 月 25 日接受