

臺灣近年 (2006-2020) 降雨誘發之土砂災害變遷趨勢分析

林詠喬^{[1][2]} 陳振宇^{[1]*} 莊承穎^{[1][2]} 陳均維^[1] 詹婉妤^[1]

摘要 本研究蒐集 2006 至 2020 年降雨引致的重大土砂災例共 494 件，並提出各年度全臺極端降雨分布之呈現方式，配合災例發生的時間與空間特徵來分析臺灣土砂災害變遷趨勢。整體而言，崩塌所占災害比例最高 (46%)，其次為土石流 (27%)，且 6 至 10 月為災例發生高峰期，並有 60% 發生於夜間。觀察有效累積雨量與災例之關聯性，結果顯示 90% 的重大土砂災例發生時有效累積雨量均大於 200 mm，且隨著降雨規模不同，災例類型比例亦有所變化。本研究綜整之土砂災害趨勢，可供研擬防災策略時參考。

關鍵詞：降雨致災、土砂災害、降雨特性、QPE

Trend of Sediment-related Disasters Triggered by Rainfall in Taiwan from 2006 to 2020

Yung-Chiau Lin^{[1][2]} Chen-Yu Chen^{[1]*} Cheng-Ying Chuang^{[1][2]} Jyun-Wei Chen^[1] Wan-Yu Chan^[1]

ABSTRACT Sediment-related disasters occur frequently in Taiwan because of special geography environments and torrential rainfall. This study collected 494 cases of severe sediment-related disasters triggered by rainfall from 2006 to 2020. Based on the cases and effective accumulated rainfall (EAR) data that were obtained using quantitative precipitation estimates, the spatial and temporal characteristics of sediment-related disasters in Taiwan were analyzed. Moreover, a visual representation of the peak distribution of the EAR in Taiwan was created. The results revealed that slope failure was the most common disaster (46%), followed by debris flows (27%). The results also indicated that the peak period of sediment-related disaster was June to October. Such disasters occurred more frequently at night than during the daytime. The relationship between accumulated rainfall and serious sediment-related disasters demonstrated that 90% of the major disasters occurred when the accumulated rainfall was greater than 200 mm. Additionally, the type of sediment-related disaster varied as the amount of rainfall increased or decreased. In all cases, the more rainfall that occurred, the higher that the proportion of debris flow was among the various types of disaster. Furthermore, some trends of sediment-related disasters were identified, which could be used in future disaster prevention measures.

Key Words: Rainfall, landslide, debris flow, quantitative precipitation estimates

一、前言

臺灣近年來極端氣候事件發生的次數與強度日漸增加，導致土砂災害頻仍。根據戴義欽、詹錢登 (2016) 的研究報告顯示：臺灣地區 20 年間 (1994~2013) 降雨事件中，大於 350 mm 的降雨事件平均每年增加 5 次；總雨量 350~600 mm 的降雨事件數平均每年增加 2.6 次；600~1,000 mm 的降雨事件數平均每年增加 1.7 次；而 1,000 mm 以上的降雨事件，每年增加 0.7 次。此外，日本政府統計 1976 年至 2017 年，一小時內降雨量超過 100 mm 的事件數，結果顯示 1976 年至 1985 年間，每年平均為 1.9 次，但在 2008 年至 2017 年間，已增加到每年平均 3.2 次 (国土交通省，2018)，顯示日本的極端降雨事件亦日趨頻繁。以全球尺度來看，國際災害資訊庫 (EM-DAT) 近 20 年來 (1998-2017) 平均每年的重大災害數量是 329 件，為 1978

年至 1997 年間平均每年重大災害數量的兩倍 (165 件)，此資料庫亦指出洪水與颱風為造成最多經濟損失之全球災害 (Wallemacq, 2018)。

劇烈降雨常伴隨崩塌、土石流、地滑等土砂災害及水患，也造成經濟與農業上的重大損失。例如，日本平成 30 年 7 月豪雨 (2018) 在西日本地區計有 122 個雨量站之 72 小時累積雨量打破歷史紀錄，且 7 月上旬全國雨量站的平均累積雨量 215.4 mm 亦為 1982 年以來最大紀錄 (日本氣象庁，2018)，豪雨與土砂災害造成 237 人死亡，建物全毀 6,767 棟、半毀 11,243 棟 (日本氣象庁，2019)。2018 年山竹颱風 (Typhoon Mangkhut) 造成香港 35 年來最嚴重的風暴潮 (storm surge)，超過 200 人受傷；同時也造成菲律賓多處嚴重的洪水與崩塌災情，並導致 114 人死亡，菲律賓全國總損失 339 億披索 (約 188 億新臺

[1] 行政院農業委員會水土保持局技術研究發展小組

Research and Technology Development Team, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, R.O.C

[2] 財團法人農業科技研究院

Agricultural Technology Research Institute, R.O.C

*Corresponding Author. E-mail: cychen59@gmail.com

幣)(國家災害防救科技中心, 2019)。2009 年侵襲臺灣的莫拉克颱風降下超大豪雨造成中南部山區嚴重的洪水與崩塌災害, 超過 700 人傷亡與失蹤, 公路橋梁損毀 115 座 (財團法人中興工程顧問社, 2010), 淹水面積超過 300 km², 估計高達 900 億元的經濟損失, 是臺灣自 1959 年以來最嚴重的水患 (行政院科技部, 2014)。

2005 年世界銀行指出臺灣有 90% 的面積、95% 的人口以及 96.5% 的 GDP, 可能遭受三種以上土砂災害的威脅與影響 (Dilley et al., 2005)。因為地形條件、地理環境及氣候影響, 土砂災害頻仍的臺灣, 對於降雨引致之土砂災害的防範與治理已推動長遠的政策與相關應變規劃 (陳振宇, 2013; 楊明德及徐瑞宏, 2013; 詹錢登及王志賢, 2017; 尹孝元等, 2019), 例如在 2000 年頒布的災害防救法, 已建立天然災害防救的規範及任務分工, 與災害發生前後的四大階段: 平時減災階段、災前整備階段、災中應變階段以及災後復原階段; 其中, 特別強調在災害未發生時, 掌握災害發生特性與評估各地區災害潛勢, 以及在災害發生時, 其應變措施及資訊決策, 為災害防救的重點工作。

儘管歷年來中央氣象局等單位已建立全臺各地面雨量站觀測及相關統計資料 (中央氣象局, 2019; 國家災害防救科技中心, 2015), 對降雨致災之事件進行全面性的雨量監測, 惟其統計方式係以不同降雨延時之累積雨量進行, 無法反應降雨期間影響邊坡穩定之土壤含水量等變化 (例如國內水土保持局採用的有效累積雨量及日本砂防單位使用的土壤雨量指數)(陳振宇, 2013)。本研究擬以有效累積雨量作為土壤含水量

表 1 本研究使用之空間分區及其 QPE 網格數與重大災例數

Table 1 Number of QPE and disaster cases in different regions of Taiwan

地區	縣市	QPE網格數	重大土砂災例數
北部	臺北市、新北市、基隆市、宜蘭縣、桃園市、新竹縣、新竹市	4,359	129
中部	苗栗縣、臺中市、南投縣、彰化縣、雲林縣	6,130	141
南部	嘉義縣、嘉義市、臺南市、高雄市、屏東縣	5,798	191
東部	花蓮縣、臺東縣	4,713	33
總計		21,000	494

2. 雨量資料

本研究採用自 2005 年 7 月正式啟用, 空間解析度 1.3 km x 1.3 km 的 QPESUMS 網格式雷達降雨估計資料 (Quantitative precipitation estimation, 以下簡稱 QPE) 取代地面自動雨量站, 並直接以 QPE 網格進行有效累積雨量計算; 其中臺灣本島部分共 21,000 個, 北中南東各區範圍內之 QPE 網格數如表 1。儘管許多研究指出, 由於雷達波在山區因地形遮蔽或與地面校正雨量站距離較遠等因素, QPE 於部分地區之準確度會受到影響 (中央氣象局, 2015; 唐玉霜等, 2016), 例如在高山邊緣常有雨量低估的情況發生 (黃碧慧, 2017); 但考量 QPE 空間解析度較高、具備對於過去 72 小時內高解析度定量降水估計及未來 0 至 1 小時定量降雨預報等優點 (張保亮, 2011), 近年來已廣泛應用於輔助風、水災及土石流警戒發佈等 (陳振宇等, 2019; 詹錢登、王志賢, 2016)。

變化之代表指標, 並提出各年度全臺極端降雨分布之視覺化呈現方式; 同時蒐集臺灣近年來降雨引致之重大土砂災例、有效累積雨量與新生崩塌面積等資料, 探討其時間及空間等相關性, 期掌握災害發生之特性與趨勢, 俾有助於未來防災政策的擬定。

二、材料及方法

1. 研究試區

本研究資料範圍涵蓋臺灣全島, 不含離島地區, 使用材料包含雨量資料、歷年重大土砂災例資料以及新生崩塌面積, 研究流程如圖 1; 為討論空間區位導致降雨與土砂災害之變異, 本研究將臺灣分成北、中、南、東四區 (表 1)。

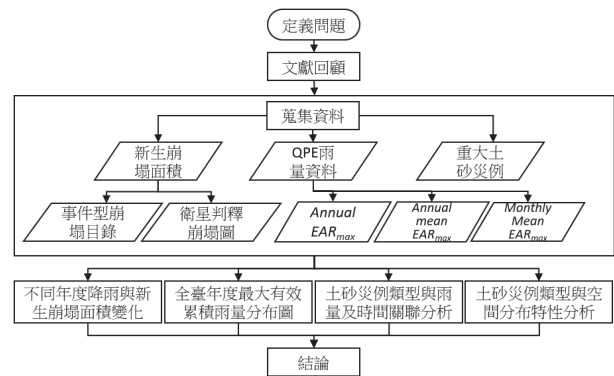


圖 1 研究流程圖

Fig.1 Flow chart of the study process

本研究使用 2006/1/1 至 2020/12/31 共計 180 個月的整點時雨量資料, 且為反應降雨期間土壤含水量等變化, 本研究採用逐時折減之有效累積雨量 (Effective Accumulated Rainfall, EAR) 計算公式 (陳振宇等, 2017)(式 1) 作為降雨期間土壤含水量變化指標。

$$EAR_t = I_t + EAR_{t-1} \times (0.7)^{\frac{1}{24}} \quad (\text{式 1})$$

其中 I_t 為目前的時雨量, EAR_{t-1} 為 1 小時前的有效累積雨量。

3. 全臺年度最大有效累積雨量分布圖

儘管許多研究指出, 降雨引致之土砂災害多與土壤含水量有直接關聯, 惟受限於現地觀測資料取得及實務操作之可行性, 現行土砂災害之警戒模式多以雨量作為警戒指標, 並透過前期雨量之折減方式, 來間接模擬降雨期間土壤含水量之變化

(陳振宇等, 2019)。此外, 由於目前氣象單位針對雨量之空間分布多以某場颱風豪雨事件期間繪製不同延時 (如 1 小時、24 小時等) 之累積雨量圖來表示, 無法反應全年度各地區土壤含水量峰值分布情形, 因此不易呈現與比較各年度間整體降雨致災的風險。為比較各年度降雨致災之風險程度, 本研究採用 (式 1) 所定義之有效累積雨量 (EAR) 作為降雨期間土壤含水量變化指標, 並找出每一個 QPE 網格各年度之年度最大有效累積雨量 (以下簡稱為 $Annual\ EAR_{max}$), 分別繪製出 2006 年至 2020 年全臺 $Annual\ EAR_{max}$ 分布圖; 其中, 為配合目前氣象局針對豪雨之定義, 採 200 mm (豪雨)、350 mm (大豪雨)、500 mm (超大豪雨)、1,000 mm、2,000 mm 等作為不同級距標準, 並分別給予綠 (0~200 mm)、黃 (200~350 mm)、橘 (350~500 mm)、紅 (500~1,000 mm)、紫 (1,000~2,000 mm)、黑 ($\geq 2,000$ mm) 等不同顏色, 便於視覺化呈現各年度全臺各地是否曾出現過極端降雨, 並反應出可能的降雨致災風險。

4. 災例資料

本重大土砂災例資料來源為水土保持局發布之重大土砂災例最速報 (土石流防災資訊網, 2021), 自 2006 年至 2020 年去除地震及發生時 EAR 為零之事件後, 計有 57 個颱風、豪雨及其他事件, 共計 494 個降雨引致的重大土砂災例 (表 2); 其中, 其他事件係指非颱風及非豪雨特報期間發生之降雨致災事件。資料內容包含災害類型 (概分為崩塌、土石流、地滑及洪水四類)、發生時間、地點、災情概況與災害發生時之 EAR 等, 其空間分布如圖 2。由於部分災例發生時混雜有多重災害類型, 為方便後續分類與討論, 本研究僅選擇重大土砂災例最速報中, 災害類型項目條列的第一項, 作為該重大土砂災例的主要災害類型。

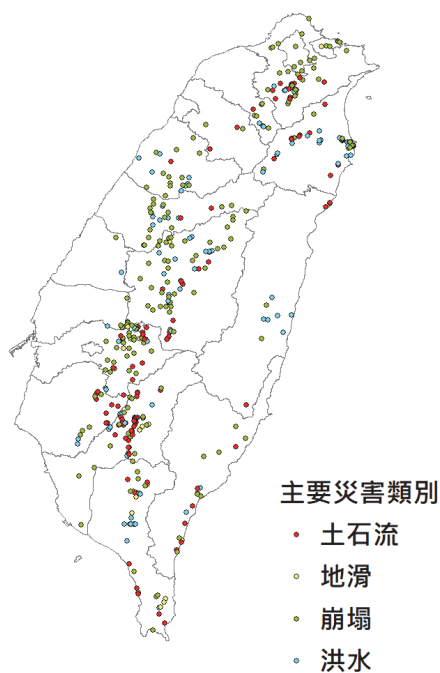


圖 2 2006-2020 年重大土砂災例分布

Fig.2 Distribution of severe sediment-related disasters

5. 歷年新生崩塌面積估算

本研究所稱之新生崩塌面積, 係指「舊有崩場地擴大」加上「新生崩場地」的部分 (陳俞旭, 2008), 並以水土保持局產製之 2010 年至 2020 年各年度事件型崩塌目錄圖資內容進行統計; 該圖資係以各年度颱風豪雨事件前後之 SPOT 等衛星影像判識成果, 標示出新生崩場地位置、面積及相應之颱風豪雨事件名稱。由於水保局事件型崩塌目錄目前尚無 2009 年以前之資料, 故本研究使用林務局 2005 年至 2010 年各年度衛星判釋全島崩塌圖層, 以相鄰二年之 GIS 圖層相減方式, 建立 2006 年至 2009 年之新生崩塌面積; 且因該圖層之最小判識面積為 0.1 公頃, 故若計算所得之新生崩塌地面積小於 0.1 公頃時, 則予以忽略。本研究整理 2006~2020 年之各年度新生崩塌面積如表 3。此外, 為探討北中南東不同地區之崩塌狀況, 新生崩塌的中心點落在任一地區, 便將該新生崩塌面積劃分為該地區。

表 2 2006-2020 年歷年災害事件與重大土砂災例件數

Table 2 Cases of severe sediment-related disasters in 2006 to 2020, Taiwan

西元年	災害事件	重大土砂災例 (件)	¹ 地區 (件)	² EAR_{max} (mm)
2006	0609豪雨	9	中部 (7)	865.8
2007	0604豪雨	17	中部 (13)	662.3
2007	0809豪雨	18	南部 (13)	1170.5
2007	其他	3	中部 (1) 南部 (1) 東部 (1)	848.1 (東部)
2007	柯羅莎颱風	8	北部 (4)	1002.4
2007	韋帕颱風	5	北部 (3)	673.5
2007	聖帕颱風	5	南部 (4)	1170.5
2008	卡玖基颱風	37	南部 (24)	1123.0
2008	辛樂克颱風	18	中部 (14)	1184.6
2008	其他	5	中部 (4)	842.5
2008	鳳凰颱風	3	東部 (2)	726.8
2008	薔蜜颱風	1	北部 (1)	1117.9
2009	芭瑪颱風	1	北部 (1)	1001.6
2009	莫拉克颱風	126	南部 (92)	1998.6
2010	0924豪雨	1	北部 (1)	650.7
2010	1016豪雨	4	東部 (4)	668.3
2010	凡那比颱風	8	南部 (8)	1086.8
2010	其他	1	北部 (1)	249.4
2010	梅姬颱風	34	北部 (34)	1256.3
2010	萊羅克颱風	1	東部 (1)	656.8
2011	0719豪雨	2	中部 (1) 南部 (1)	580.7 (南部)
2011	1001豪雨	13	北部 (12)	1308.4
2011	南瑪都颱風	7	南部 (7)	1031.5
2012	0504豪雨	1	中部 (1)	370.6
2012	0610豪雨	21	中部 (12)	922.5
2012	天秤颱風	1	南部 (1)	712.1
2012	蘇拉颱風	11	北部 (6)	1382.8
2013	0517豪雨	1	中部 (1)	356.7
2013	天兔颱風	1	東部 (1)	713.7
2013	其他	2	南部 (2)	935.3

西元 年	災害事件	重大土砂 災例 (件)	¹ 地區 (件)	² EAR_{max} (mm)
2013	康芮颱風	14	北部 (5) 南部 (5)	840.9 (南部)
2013	菲特颱風	2	北部 (2)	437.8
2013	蘇力颱風	4	中部 (3)	868.8
2014	哈吉貝颱風	1	東部 (1)	207.7
2014	麥德姆颱風	3	北部 (1) 南部 (1) 東部 (1)	589 (東部)
2014	鳳凰颱風	1	東部 (1)	636.5
2015	0902豪雨	1	北部 (1)	704.5
2015	杜鵑颱風	3	北部 (3)	704.5
2015	蘇迪勒颱風	30	北部 (30)	998.8
2016	0611豪雨	1	南部 (1)	616.0
2016	厄伯特颱風	1	東部 (1)	570.6
2016	其他	6	北部 (3) 南部 (3)	879.0 (南部)
2016	梅姬颱風	7	南部 (5)	879.0
2016	莫蘭蒂颱風	2	東部 (2)	902.2
2017	0601豪雨	10	中部 (8)	1008.1
2017	0613豪雨	3	中部 (3)	1008.1
2017	尼莎暨海棠颱風	3	北部 (1) 中部 (1) 南部 (1)	818.6 (南部)
2017	1011豪雨	9	東部 (6)	771.6
2018	0823熱帶低壓	4	南部 (4)	852.1
2018	其他	1	中部 (1)	163.0
2019	0520豪雨	1	中部 (1)	657.4
2019	0611豪雨	3	中部 (3)	521.9
2019	其他	5	中部 (3)	568.6
2019	利奇馬颱風	4	中部 (2) 南部 (2)	771.9 (南部)
2019	0815豪雨	7	南部 (4)	771.9
2020	0522豪雨	1	中部 (1)	424
2020	其他	2	北部 (1) 中部 (1)	460 (北部)
總計		57個颱風豪雨及其他事件; 494件重大土砂災例		

註：粗體為重大土砂災例數逾 10 件 (含) 之災害。¹ 地區 (件) 為該災害事件中重大土砂災例最多地區，括號內為該地區之災例件數。² EAR_{max} (mm) 為該災害事件重大土砂災例最多地區內所有 QPE 網格之當月最大有效累積雨量；若有災例件數相同的狀況，則顯示 EAR_{max} 較大的地區，並在括號中顯示地區名稱。

表 3 2006-2020 年各年度新生崩塌面積

Table 3 Yearly cumulative area of newborn landslide in 2006 to 2020

年度	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
新生崩塌面積 (km ²)	90.5	69.3	29.0	283.1	3.0	7.3	14.2	7.8
年度	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
新生崩塌面積 (km ²)	4.1	6.3	45.3	9.6	1.7	0.9	0.1	

註：2010-2020 年使用水土保持局事件型崩塌目錄圖層統計；2006-2009 年使用林務局 2005-2010 年衛星判釋全島崩塌圖層，以相鄰二年之圖層相減方式建立。

三、結 果

1. 歷年全臺 Annual EAR_{max} 分布情形

2006 年至 2020 年全臺各 QPE 網格於該年度之 Annual EAR_{max} ，繪製如圖 3。相較於各年度，2009 年全臺 Annual EAR_{max} 不論在峰值大小及分布範圍均為歷年之冠，其中在中南部地區有近半數面積之 Annual EAR_{max} 超過 1,000 mm 以上，且山坡

地範圍之 Annual EAR_{max} 均逾 500 mm，因此反應在當年度之重大土砂災例高達 127 件，占全部重大土砂災例之 25.7%。又如東部地區於圖 3 顯示，僅 2016 及 2017 年之 Annual EAR_{max} 其值較高且範圍較廣，故相較於其他地區該處之重大災例亦明顯較少 (如圖 2)。此外，圖 3 亦顯示 2013 年至 2020 年間各網格 Annual EAR_{max} 幾乎均未逾 1,000 mm 以上，逾 500 mm 雨量的面積也較 2006 年至 2012 年少；經比對重大土砂災例，2007 至 2012 年間每年至少有一個颱風豪雨災害事件造成之重大土砂災例達 10 件以上，且 2006 至 2012 年 7 年內重大土砂災例總數亦高達 361 件。而 2013 年至 2020 年 8 年內僅 3 個颱風豪雨事件造成之重大土砂災例逾 10 件 (含)，且重大土砂災例總數僅 133 件 (表 2)，此結果顯示，圖 3 之全臺 Annual EAR_{max} 呈現方式，確實可反應出該年度發生重大土砂災害之風險程度。值得注意的是，圖 3 亦顯示 2020 年全臺有 62% 的土地其 Annual EAR_{max} 不到 200 mm，這個結果除反映在 2020 年重大土砂災例只有 3 件外，亦造成 2021 年 5 月以前的中南部嚴重缺水事件。

2. 臺灣重大土砂災例類型與雨量及時間關聯分析

彙整 2006-2020 全臺 494 件重大土砂災例資料顯示，臺灣因降雨誘發的土砂災害類型以崩塌占 46.0% 最多 (227 件)，土石流占 27.1% 次之 (134 件)，而洪水占 23.1% (114 件)，地滑災害則最少，僅 3.8% (19 件)，如表 4。如排除洪水類型後，統計結果則為崩塌占 59.7%，土石流占 35.3%，地滑占 5.0%，此比例大致與日本土砂災害危險處所統計結果相近 (崩塌 62.9%、土石流 35.0%、地滑 2.1%) (國土交通省河川局砂防部，2002)。為比較各年度全臺有效累積雨量、新生崩塌面積及重大災例數之關聯性，本研究分別將全臺各年度 QPE 網格之 Annual EAR_{max} 取平均後定義為全臺年度平均最大有效累積雨量 (以下簡稱為 Annual mean EAR_{max})，並分別比較其與新生崩塌面積及重大災例數之關聯性，如圖 4 及圖 5。其中，2009 年新生崩塌面積、重大災例件數及 Annual mean EAR_{max} 均為最高，此為 2009 年 8 月侵襲臺灣的莫拉克颱風帶來廣域且巨量降雨所造成。自 2009 年以後，Annual mean EAR_{max} 即呈現下降之趨勢，且重大災例件數與新生崩塌面積亦呈現相同趨勢。

在月分方面，全臺歷年重大土砂災例多集中在 6 到 10 月間 (共 484 件，占整體 98.0%)，尤以 8 月最高，為 227 件 (占整體 46.0%)，其中主要是莫拉克颱風期間的 126 件 (占整體 25.5%)。如將 2006-2020 年同月分全臺 QPE 網格之 EAR_{max} 取平均值後，定義為月平均最大有效累積雨量 (以下簡稱為 Monthly Mean EAR_{max})，並與歷年重大土砂災例比較繪製為圖 6。其中 Monthly Mean EAR_{max} 以 5-10 月較高，最高為 8 月達 212.2 mm，且重大土砂災例數量也最多。

觀察不同重大土砂災例的發生時間，如將一天 24 小時劃分為早上 (06:01~12:00)、下午 (12:01~18:00)、晚上 (18:01~00:00) 及凌晨 (00:01~06:00) 四個時段，結果顯示，約有 60% 之重大土砂災例發生於夜間 (晚上 34% 與凌晨 25%)，此外，在夜間大幅增加的重大土砂災例類型為土石流災害 (圖 7)。此結果亦顯示，近年來政府強調之入夜前預防性疏散確實有其必要性。

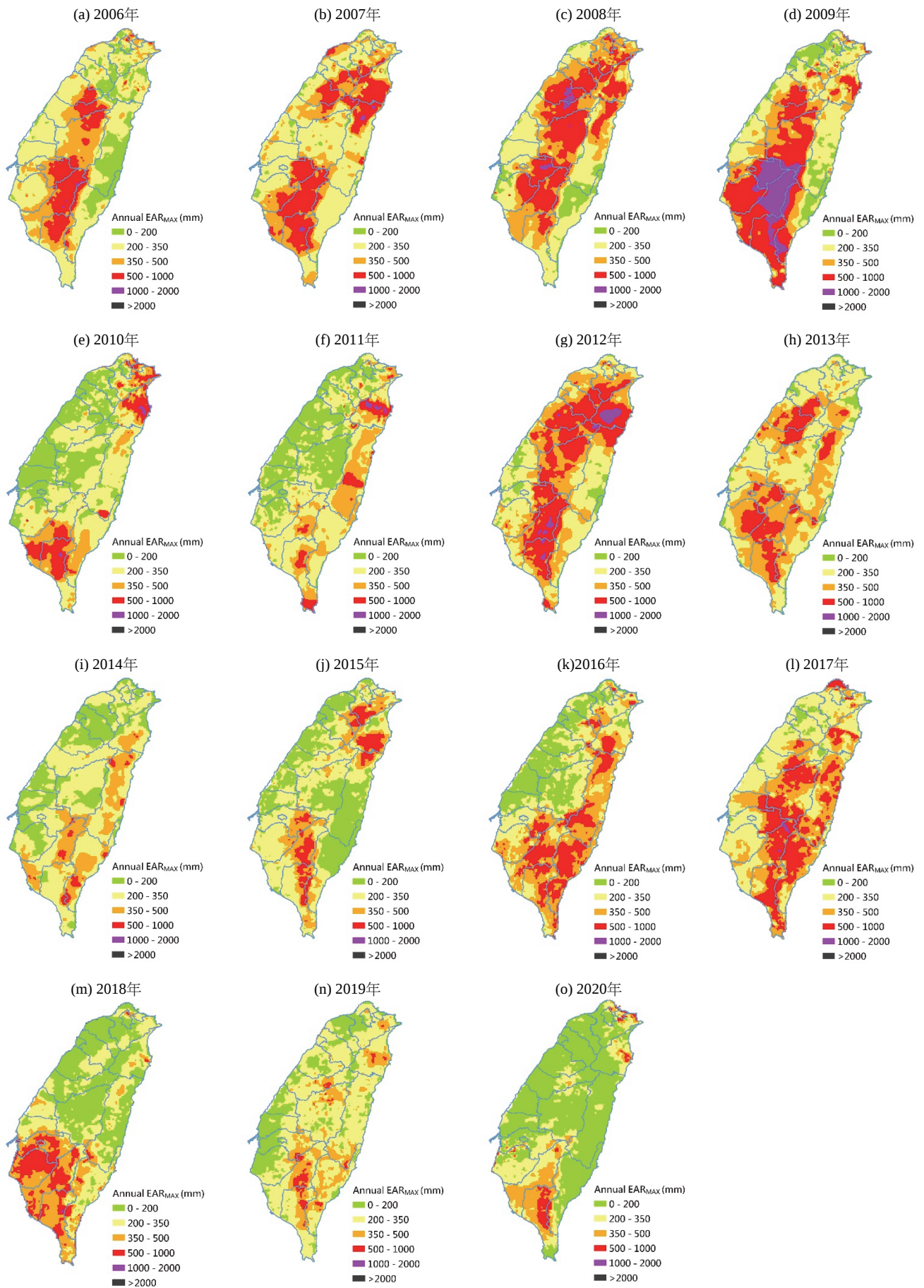


圖 3 2006-2020 年全臺年度最大有效累積雨量分布情形

Fig.3 Distribution of Annual EAR_{max} in 2006 to 2020

如進一步以各重大土砂災例發生時之 EAR 值, 分析其與降雨的關聯性, 並將重大土砂災例發生時之 EAR 繪製成累積機率分布圖, 結果顯示, 有 90% 的重大土砂災例發生於 EAR 大於 125 mm 時 (圖 8); 當 EAR 達超大豪雨 500 mm 時, 重大土砂災例之累積發生機率為 60.5%, 而當 EAR 達現行土石流警戒基準值最高範圍 650 mm 時, 則有 74.0% 重大土砂災例已發生。另一方面, 在不同 EAR 的累積機率區間內觀察不同災害類型的分布, 顯示當 EAR 增加時, 土石流災害有增加的趨勢, 而其他災害則較無顯著趨勢 (圖 9)。

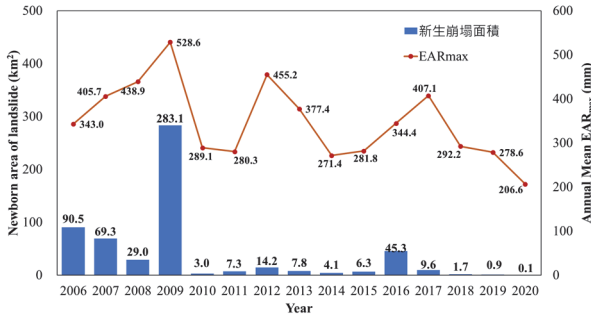


圖 4 2006-2020 年全臺年度平均最大有效累積雨量與新生崩塌面積

Fig.4 Annual mean EAR_{max} and newborn area of landslides in 2006 to 2020

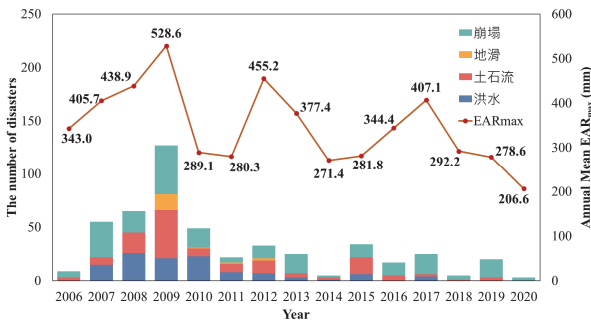


圖 5 2006-2020 年全臺年度平均最大有效累積雨量與重大土砂災例數

Fig.5 Annual mean EAR_{max} and the number of severe sediment-related disasters in 2006 to 2020

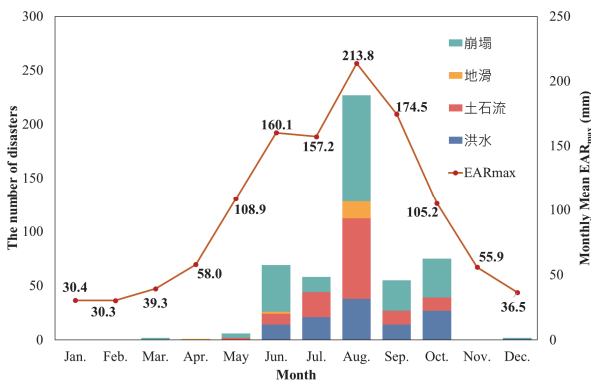


圖 6 2006-2020 年月平均最大有效累積雨量及重大土砂災例數

Fig.6 The number of severe sediment-related disasters and Monthly Mean EAR_{max} in 2006 to 2020

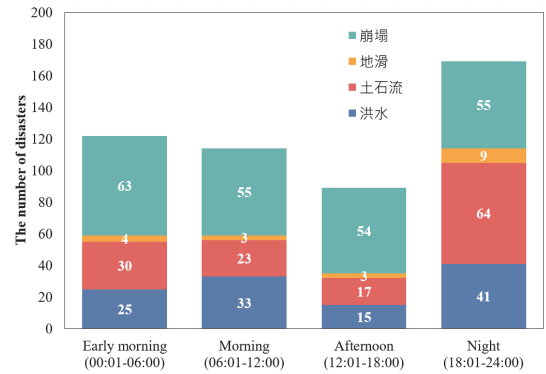


圖 7 一日 (24 小時) 中重大土砂災例發生時段

Fig.7 Occuring time interval of severe sediment-related disasters

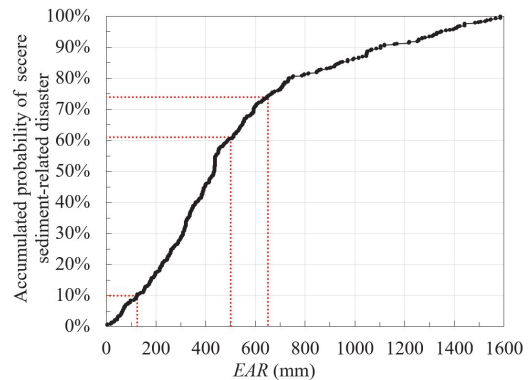


圖 8 2006-2020 年降雨誘發重大土砂災例發生機率

Fig.8 Accumulated probability of severe sediment-related disasters triggered by rainfall

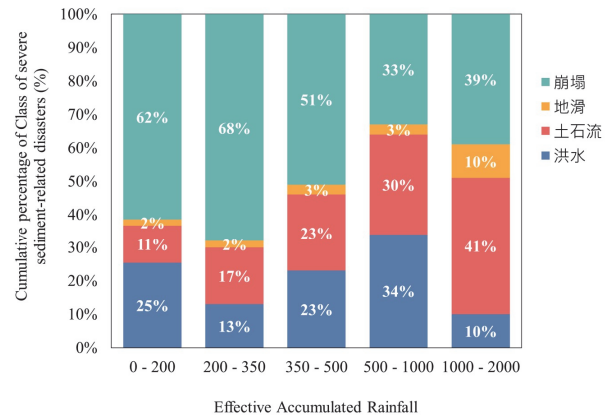


圖 9 不同降雨情境下之各類災害比例

Fig.9 Percentage of disaster types in different condition of effective accumulated rainfall

表 4 2006-2020 年臺灣重大土砂災例類型分析

Table 4 The number and percentage of severe sediment-related disasters in 2006 to 2020

類型	件數	比例 (%)	不計洪水後比例 (%)
崩塌	227	46.0	59.7
土石流	134	27.1	35.3
地滑	19	3.8	5.0
洪水	114	23.1	-

3. 臺灣重大土砂災例類型與空間分布特性分析

由於臺灣的降雨主要受到 5 月中旬至 6 月中旬的梅雨季、7 至 9 月的颱風季與西南風系統，以及 10 月開始的東北季風系統之影響，降雨集中之月分亦有區域性之不同 (國家災害防救科技中心，2015)。為進一步探討臺灣重大土砂災例類型與空間分布特性，本研究依表 1 之北中南東四個分區，繪製如圖 10、圖 11 及圖 12。由圖 10 顯示，如取 *Monthly Mean EAR_{max}* 以 100 mm 為界，北部及東部地區降雨集中於 6-10 月，中部及南部地區則為 5-9 月，且重大土砂災例集中之月分與 *Monthly Mean EAR_{max}* 之趨勢一致。如以重大土砂災例分布數量及類型來看，各區災例數量以南部最多 (191 件)，主要類型為土石流 (72 件) 及崩塌 (65 件)；中部災例數量為 141 件，以崩塌 (84 件) 及洪水 (34 件) 為最多；北部災例數量為 129 件，土砂災例類型主要為崩塌 (64 件) 及洪水 (33 件)；而東部災例數量最少 (33 件)，主要類型為崩塌 (14 件) 及土石流 (10 件)。圖 11 顯示在新生崩塌面積部分，北部新生崩塌面積最少，南部最多；其中南部與東部地區均在 2009 年莫拉克颱風時出現最大的新生崩塌面積，以及最多重大土砂災例 (圖 12)，之後則無明顯趨勢。

此外，由圖 10 知北部地區主要降雨及災害月分為 8-10 月，雖然 10 月分北部之 *Monthly Mean EAR_{max}* 無明顯增加，但 10 月分土砂災害數量最多，且多為洪水與崩塌災害，並多集中於宜蘭，推測可能為熱帶氣旋與東北季風共伴效應造成東北部尤其是宜蘭地區小範圍大量降雨所致 (范銑燦等，2008)，圖 3 也顯示宜蘭地區相較於其他北部縣市較容易有 *Annual EAR_{max}* 大於 500 mm 的情況出現。此外，圖 11 顯示北部地區於 2006 年至 2020 年之新生崩塌面積在四個地區裡為最少，僅在 2012 年有較大的雨量與崩塌面積，對照圖 3，其原因為 2012 年侵臺的蘇拉颱風造成北部地區 *EAR_{max}* 大範圍逾 500 mm，甚至於宜蘭大同及南澳山區超過 400 km² 的範圍其 *EAR_{max}* 已逾 1,000 mm，故在北部造成較多的災害事件 (表 2)。根據中央氣象局統計，蘇拉颱風在北部的宜蘭地區帶來超大豪雨，其中太平山地區總計累積降雨量達 1,815 mm，並造成災情 (蔡甫甸，2015)。

另一方面，由表 2 知，2010 年梅姬颱風及 2015 年蘇迪勒颱風，分別造成北部地區 34 及 30 件重大土砂災例，但圖 11 之新生崩塌面積卻未有明顯增加趨勢。其原因為 2010 年 10 月的梅姬颱風降雨僅集中於宜蘭，該月分北部地區的 *EAR_{max}* 為 1,256.3 mm，但其 *Monthly Mean EAR_{max}* 僅為 160.6 mm，且 34 件重大土砂災害地點皆發生於宜蘭縣，並有 27 件位於蘇澳鎮；圖 3 亦顯示 2010 年宜蘭附近之 *EAR_{max}* 大部分皆大於 500 mm，其中蘇澳及南澳亦有超過 90 km² 的範圍大於 1,000 mm，故梅

姬颱風主要影響範圍僅限於宜蘭地區，因此當年度北部地區之總新生崩塌面積不大。類似之情形亦見於 2015 年蘇迪勒颱風，該颱風雖造成新北市烏來區、新店區、三峽區與宜蘭縣大同鄉等北部地區大量重大土砂災例，也是 2015 年最嚴重的災害事件 (羅雅尹，2016)，但是 2015 年北部地區的新生崩塌面積並無大量增加 (圖 11)，根據 2015 年蘇迪勒颱風災害調查彙整報告指出，蘇迪勒颱風過後並未造成大量新崩塌地，且林相並未受明顯破壞 (張志新等，2015)。然而，部分研究亦指出，在林相未受破壞的情況下，新生崩塌地的面積可能因衛星影像無法判釋林相下的狀況而造成低估 (林松駿、梁偉立，2018)。另一方面，由於本研究的新生崩塌面積判定依據為新增的裸露地，若強降雨僅造成的原有崩塌地刷深，則無法計入。這些因素可能導致蘇迪勒颱風後未能於衛星影像發現大量新生崩塌面積。

對於中部地區而言，圖 10 顯示 6 月梅雨季節造成之重大土砂災例以中部比例最高，類型則以崩塌最多。於表 2 所列 2006-2020 年災害事件及其重大土砂災例件數顯示，歷年重大土砂災例數逾 10 件 (含) 的颱風豪雨事件計有 12 次，其中災例件數比例最高者，北中南區各占 4 次。檢視中部地區 4 次中，即有 3 次為梅雨事件 (分別為 2007 年 0604 豪雨、2012 年 0610 豪雨及 2017 年 0601 豪雨)。而四個分區中，南部地區的土砂災例數量最多 (184 件)，且 8 月發生的重大土砂災例相較於其他地區高出 2 倍至 3 倍，主要為崩塌及土石流類型，尤其是 8 月的雨量較其他地區高出許多 (圖 10)，主要是因為南部夏季除了颱風之外更有西南氣流的影響，造成大量降雨，使崩塌和土石流災害大幅增加 (圖 10)。其中，2009 年莫拉克颱風在南部占 126 件重大土砂災例，並且導致近年來最多的新生崩塌面積，其嚴重程度可見一斑。

相較於其他三區，東部重大土砂災例數量僅為其他三區之 17~25% 左右 (33 件)，東部地區的災害多發生於 6 至 10 月，8 月土石流類型最多，而 10 月則主要為崩塌及洪水 (圖 10)。雖然東部地區在 6 月至 10 月分的 *Monthly Mean EAR_{max}* 與北部及中部沒有明顯落差 (圖 10)，且歷年新生崩塌面積高於北區及中區 (圖 11)，但其重大災例件數比北部 (129 件) 及中部地區 (141 件) 少了許多 (表 1)。可能原因為東部地區占地雖廣，人口密度卻為全臺最低；根據內政部 2019 年 5 月統計，全臺平均人口密度為 651 人/km²，而花蓮縣為 76 人/km²，臺東縣為 62 人/km²，而水土保持局所建立的重大土砂災例主要為保全對象受土砂災害的紀錄及報告，因此重大土砂災例的數量便會相對較少。此外，相較於北部及中部，東部在 *Monthly Mean EAR_{max}* 與土地面積與前二區相差不大之情況下，新生崩塌面積卻高於北部及中部地區，是否係由於東部地區地震較為頻繁所致，值得後續進一步分析。

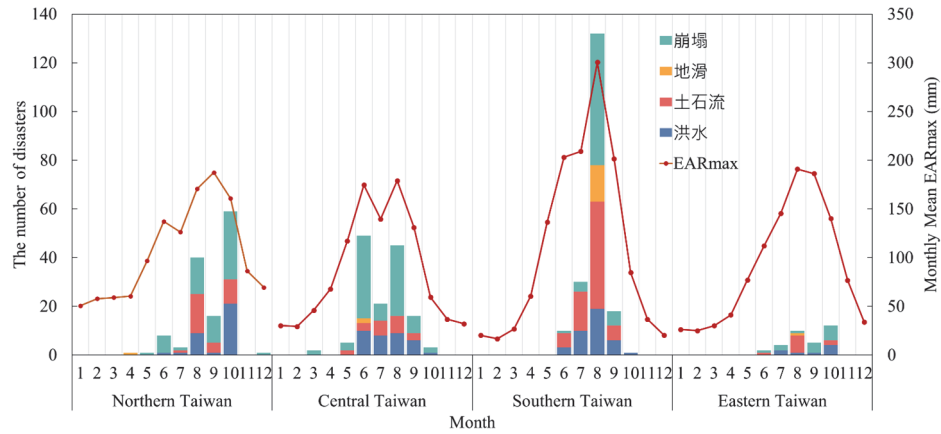


圖 10 各地區 2006-2020 年之月平均最大有效累積雨量及各月分災例數量

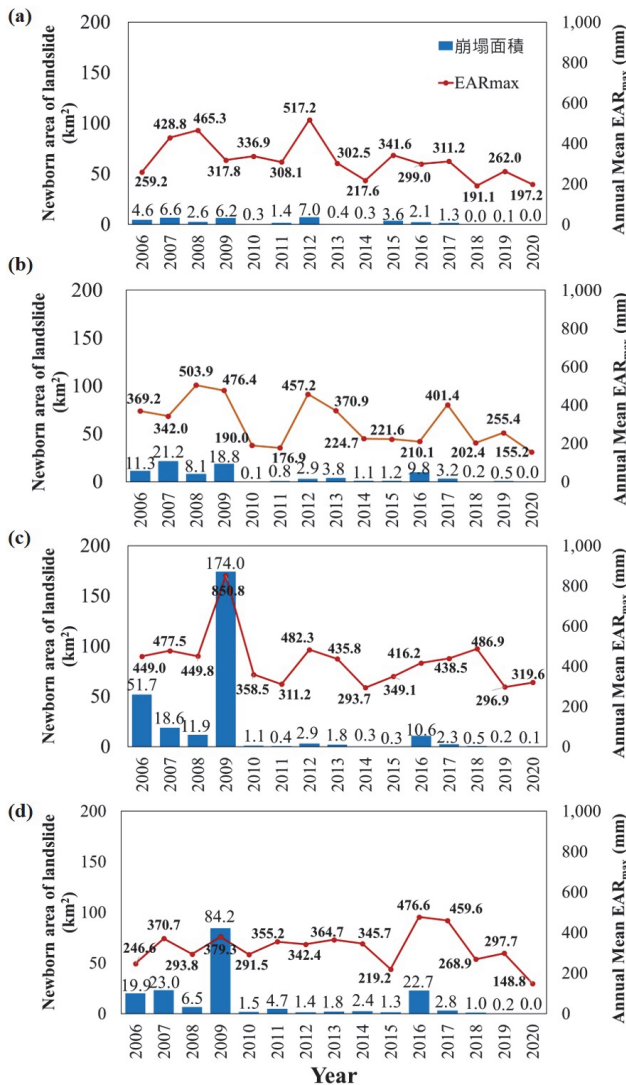
Fig.10 Each regions' Monthly Mean EAR_{max} and the number of severe sediment-related disasters in 2006 to 2020

圖 11 2006-2020 年各區新生崩塌面積及年度平均最大有效累積雨量 (a) 北部, (b) 中部, (c) 南部, (d) 東部

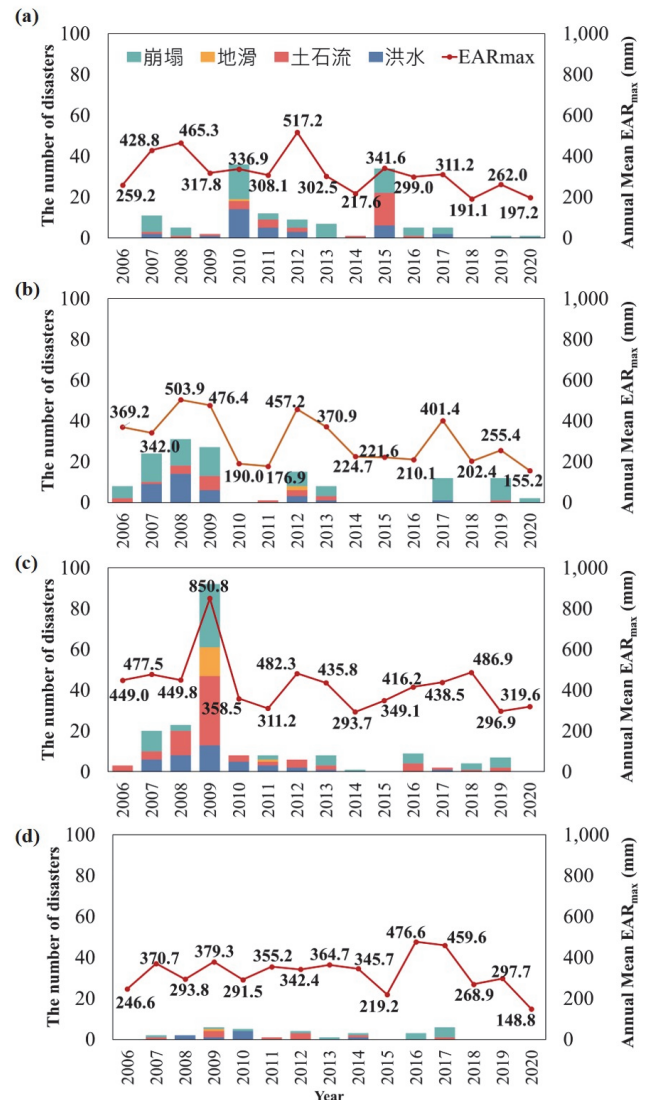
Fig.11 Each regions' newborn area of landslide and Annual mean EAR_{max} in 2020 to 2020

圖 12 2006-2020 年各區重大土砂災例與年度平均最大有效累積雨量 (a) 北部 (b) 中部 (c) 南部 (d) 東部

Fig.12 Each regions' cases of severe sediment-related disasters in 2006 to 2020 and Annual $EAR_{avg(max)}$ of year in 2006 to 2020

四、討 論

由於國內先前所能取得之較完整的歷年全臺崩塌地圖層，僅有林務局 2004-2017 年衛星判釋全島崩塌圖層，惟該圖層僅使用當年度 1 至 7 月之衛星影像進行崩塌地判識，由前述統計結果可知，72.7% 的土砂災害實際發生於 8 至 12 月，因此在計算各年度新生崩塌面積時，將造成某些崩塌無法確認是否真為當年度降雨所致。近期水土保持局產製並設為開放資料之事件型崩塌目錄 (2010-2020 年)，藉由多期衛星影像逐步確認新生崩塌可能發生的颱風豪雨事件，並標示於圖資內，有利於後續災例與災因分析應用。

為瞭解各年度全臺是否曾出現極端降雨，本研究已建立 2006-2020 年全臺 *Annual EAR_{max}* 分布圖 (圖 3)，儘管該圖只能呈現每個 QPE 網格於當年度是否曾出現極端降雨，無法呈現同一年度中同一地點是否多次出現極端降雨，但藉由比較圖 3 各年度結果以及圖 4 與圖 5 的 *Annual mean EAR_{max}* 之變化趨勢，似乎自 2009 年後，大範圍的極端降雨出現頻率明顯變少。對於臺灣的極端降雨事件是否有增加的趨勢，不同專家學者亦有不同的看法，許多研究認為，在近 30-50 年來，臺灣的強降雨事件有增加的趨勢。例如吳宜昭等 (2016) 分析 1993 年至 2015 年的短延時降雨事件，顯示 23 年來 3 小時延時強降雨事件的發生日數存在上升趨勢，平均每年增加 0.2 日。而涂建翊等 (2011) 分析 1960 年 2009 年 (共 50 年) 的時雨量資料，顯示臺灣地區時雨量小於 2 毫米的降雨時數與降雨量均明顯減少，2000 年後時雨量大於 30 毫米以及 50 毫米的強降雨則顯著增加。此外，盧孟明等 (2007) 分析 1951 年至 2005 年時雨量資料，結果顯示臺灣東北部 1979 年後短延時極端降雨事件有增加的現象，而中部和南部地區則無。另一方面，洪致文 (2012) 觀察臺灣 1885 年至 2010 年之降雨分布，顯示近 30 年至 50 年出現的強降雨災難事件，在 1920 年至 1960 年已有類似的雨量分布趨勢，因此近年在雨量紀錄的離群值有可能是時間尺度差異所造成。綜合以上前人研究結果，顯示不同時間尺度與地區劃分的研究成果有相當的差異，因此若要了解近年來強降雨或極端降雨是否有增加的趨勢，建議可拉長時間尺度至前一次相似雨量分布趨勢出現時，與納入不同降雨原因分析。

觀察重大土砂災例發生時間，顯示不管在年度、月分以及一日中不同時間區段皆有數量及類型的差異。其中，以日夜區分之重大土砂災例類型，土石流災害在晚間明顯增加，土石流亦是近年來防災對策中極為重視的議題，對於入夜前之預防性疏散及避難亦為防災應變之重點項目，此結果提供了加強入夜前避災之統計依據，未來可供後續防災策略研擬參考。

本研究結果顯示，當 *EAR* 增加，土石流災害類型亦呈現增加的趨勢 (圖 9)。推測可能原因為在累積雨量較高的事件中時崩塌與土石流都有發生，但崩塌事件發生於上游的部分，為土石流災害提供料源，使流動距離及影響範圍更廣的土石流災害危害下游保全對象而被紀錄為重大災例；另一方面，根據研究指出，隨著累積雨量增加，土石流影響範圍也會隨著擴大，並增加保全對象受到的損害 (劉格非等，2013)。由於本研究每

一件重大土砂災例僅選擇一種土砂災害類型作為代表，因此在雨量增加時，土石流的災害範圍若擴大，則土石流很可能被記錄為主要災害類型，同時間或較早發生的崩塌災害便未被納入，建議未來可針對複合型土砂災害，依其災害類型所占影響範圍比例，或是發生時間序列進行加權分析，以進一步了解不同有效累積雨量對土砂災害類型的影響。

五、結 論

本研究藉由 *EAR* 值之統計及全臺 *Annual EAR_{max}* 分布圖之繪製，顯示其與重大土砂災例的時間及空間分布相吻合；北中南東各地區亦因主要降雨系統不同而有相異的災害型態。本研究結果顯示，2013-2020 年重大土砂災例與全臺 *Annual EAR_{max}* 分布均較 2006-2012 年少，並未觀察到許多研究指出之極端降雨與土砂災害增加的現象，其原因可能為所採用之雨量資料時間區間較短導致。整體而言，歷年重大土砂災例中，崩塌所占災害比例最高 (46.0%)，其次為土石流 (27.1%)。在災害發生的時間方面，6 月至 10 月為臺灣重大土砂災害發生高峰期。觀察 *EAR* 與重大土砂災例的關聯性，結果顯示有 90% 的重大土砂災例發生於 *EAR* 大於 125 mm 時；當 *EAR* 達超大豪雨 500 mm 時，重大土砂災例之累積發生機率为 60.5%，而當 *EAR* 達現行土石流警戒基準值最高範圍 650 mm 時，則有 74.0% 重大土砂災例已發生。同時，約 6 成土砂災害發生在夜間，故入夜前之預防性疏散有其必要性。此外，隨著降雨規模不同，土砂災害類型之比例亦有所變化；其中土石流災害比例，隨雨量增加而增加。本研究嘗試探索近年土砂災害趨勢，惟受限於災害點位數量與資訊較少，建議可進一步蒐集其他政府相關部門或民間團體紀錄之災害事件。另外，本研究未考慮複合型災害，一筆災害事件僅選取一個主要災害類型，然而重大土砂災害常同時發生一個類型以上的災害，未來可進一步考慮複合災害事件的影響。本研究綜整全臺 2006 年至 2020 年重大災例，新生崩塌面積與雨量資料，並分析臺灣地區降雨致災的土砂災害趨勢，其結果將可供未來防災策略研擬時參考。

參考文獻

- [1] 土石流防災資訊網 (2021) <https://246.swcb.gov.tw> (Debris Flow Disaster Information Website, <https://246.swcb.gov.tw> (in Chinese))
- [2] 中央氣象局 (2015)，「氣象遙測觀測-氣象衛星與氣象雷達」。(Central Weather Bureau (2015). "Meteorological remote sensing- meteorological satellite and meteorological radar" (in Chinese)).
- [3] 中央氣象局 (2019)，「107 年氣候資料年報-地面資料」。(Central Weather Bureau (2019). "Climatological data annual report 2018 part I-Surface data". (in Chinese))
- [4] 尹孝元、王晉倫、簡以達、詹錢登、王志賢 (2019)，「臺灣坡地災害管理策略之演進與發展」，天氣分析與預報研討會，中央氣象局編印。(Yin, H.Y., Wang, C.L., Jian, Y.D.,

- Jan, C.D., and Wang, C.H. (2019). "The evolution and development of Taiwan's slopeland disaster management strategy." *Conference on Weather Analysis and Forecasting*, Central Weather Bureau. (in Chinese))
- [5] 行政院科技部 (2014), 「災害領域行動方案 102-106 年」。(Ministry of Science and Technology, ROC. (2014). "Action plan for disasters in 2013-2017, ROC." (in Chinese))
- [6] 吳宜昭、龔楚嫻、王安翔、于宜強 (2016), 「臺灣地區短延時強降雨事件氣候特性分析」, 國家災害防救科技中心災害防救電子報(第 132 期)。(Wu, Y.C., Kung, C.Y., Wang, A.X., and Yu, Y.C. (2016). "Analysis of climatic characteristics of duration heavy rainfall events in Taiwan." Online newspaper of National Science & Technology Center for Disaster Reduction (NCDR), 132. (in Chinese))
- [7] 林松駿、梁偉立 (2018), 「衛星影像判釋與現地探查天然林集水區新生崩塌地分布之比較: 以 2015 年蘇迪勒颱風誘發崩塌為例」, 中華水土保持學報, 49(1), 1-11。(Lin, S.J., and Liang, W.L. (2018). "Landslide distributions identified by satellite images and field investigations in a natural forested catchment: the case of landslides induced by typhoon Soudelor in 2015." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 49(1), 1-11 (2018). (in Chinese))
- [8] 洪致文 (2012), 「臺灣降雨指數(TRI)的建立與其分析應用」, 地理學報, (67), 73-96。(Hung, C.W. (2012). "The construction of TCCIP Taiwan Rainfall Index (TRI) and its applications." *Journal of Geographical Science*, (67), 73-96. (in Chinese))
- [9] 范鈞燦、趙家民、葛晉澤 (2008), 「秋颱侵襲臺灣之路徑與降雨特性研究」, 臺南科技大學通識教育學刊, 7, 233-258。(Fan, Y.S., Chao, C.M., and Ger, J.Z. (2008). "A Study on the tracks and rainfall of the autumn typhoons invading Taiwan." *Journal of General Education*, Tainan University of Technology, 7, 233-258. (in Chinese))
- [10] 唐玉霜、黃葳芃、張保亮、陳嘉榮 (2016), 「劇烈天氣監測系統 (QPESUMS) 之防災應用」, 中央氣象局氣象衛星中心。(Tang, Y.S., Huang, W.P., Chang, P.L., and Chen, J.R. (2016). "Disaster prevention and application of Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors (QPESUMS)." Central Weather Bureau. (in Chinese))
- [11] 涂建翊、陳俐盈、高瑞鞠、黃靖甯、朱熾儒、吳敏暉、林紋伊、張家華 (2011), 「從時雨量看臺灣降雨強度的頻率變化」, 2011 年地球科學系統學術論壇論文集, 中國文化大學理學院編印, 臺北, 臺灣, 113-117。(Tu, J.Y., Chen, L.Y., Gao, D.J., Huang, C.N., Zhu, Y.R., Wu, M.W., Lin, W.Y., and Chang, J.H. (2011). "Evaluating the frequency change of Taiwan's rainfall intensity from the hourly rainfall." *Proceedings of the Earth Science System Academic Forum*, College of Science, Chinese Culture University, Taipei, Taiwan, 113-117. (in Chinese))
- [12] 財團法人中興工程顧問社 (2010), 「八八水災災害調查成果與復健工程建議」, 財團法人中興工程顧問社/中興工程顧問股份有限公司編印, 臺北, 臺灣。(Sinotech Engineering Consultants, INC. (2010). *Investigation results and rehabilitation project suggestions of Typhoon-Morakot-caused flood*, Sinotech Engineering Consultants, INC and Sinotech Engineering Consultants, LTD, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- [13] 國家災害防救科技中心 (2015), 「臺灣極端降雨事件—1992-2013 年重要事件彙整」。(National Science & Technology Center for Disaster Reduction (NCDR) (2015). "The Rank of Extreme Rainfall Events over Taiwan, 2018." (in Chinese))
- [14] 國家災害防救科技中心 (2019), 「2018 天然災害紀實」。(National Science & Technology Center for Disaster Reduction (NCDR) (2019). "Natural Disaster Yearbook, 2018." (in Chinese))
- [15] 陳俞旭 (2008), 「地震對崩塌與土石流發生影響之研究」, 成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。(Chen, Y.S. (2008). *An Influence of Earthquake on the Occurrence of Landslide and Debris Flow*. Master's thesis of Department of Water Resources and Ocean Engineering, National Cheng Kung University. (in Chinese))
- [16] 陳振宇 (2013), 「以雨量為基礎之土砂災害警戒系統成效評估—以台灣及日本為例」, 中華水土保持學報, 44(1), 50-64。(Chen, C.Y. (2013). "Evaluation of Rainfall-Based Sediment Disaster Warning Systems: Case Studies in Taiwan and Japan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44 (1), 50-64. (in Chinese))
- [17] 陳振宇、劉維則、許家祥 (2017), 「使用 QPESUMS 雨量資料建立崩塌災害預警模式」, 中華水土保持學報, 48(1), 44-55。(Chen, C.Y., Liou, W.Z., and Hsu, C.H. (2017). "A Rainfall-based Warning Model for Predicting Landslides Using QPESUMS Rainfall Data." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 48(1), 44-55. (in Chinese))
- [18] 陳振宇、陳均維、陳國威、林詠喬 (2019), 「坡地降雨致災熱區警戒模式」, 中華水土保持學報, 50(1), 1-10。(Chen, C.Y., Chen, J.W., Chen, K.W., and Lin, Y.C. (2019). "Warning Model for Predicting the Risk Zones of Rainfall-Induced Slopeland Disasters." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 50(1), 1-10. (in Chinese))
- [19] 張志新、王俞婷、傅鍾璇、林又青、張駿暉、劉哲欣、呂喬茵、吳啟瑞、蘇元風 (2015), 「2015 年蘇迪勒颱風災害調查彙整報告」, 國家災害防救科技中心。(Chang, C.S., Wang, Y.T., Fu, H.S., Lin, Y.C., Chang, J.H., Liu, C.S., Lu, C.Y., Wu, C.R., and Su, Y.F. (2015). "The aggregate report of the disaster caused by typhoon SOUDELOR in 2015." *National science and technology center for disaster reduction*. (in Chinese))
- [20] 張保亮 (2011), 「QPESUMS 產品應用介紹」, 中央氣象局。(Chang, P.L. (2011). "Introduction of QPESUMS." *Central Weather Bureau*. (in Chinese))
- [21] 黃碧慧 (2017), 「QPE 於颱風事件的估計差異與空間之關聯性分析」, 行政院農業委員會水土保持局。(Huang, P.H. (2017). "An analysis of the correlation between the estimated difference of QPE and space in the typhoon events." *Soil and Water Conservation Bureau*. (in Chinese))

- [22] 詹錢登、王志賢 (2016), 「105 年土石流警戒基準值檢討與更新」, 行政院農業委員會水土保持局。(Jan, C.D., and Wang, C.H. (2016). "The modification and review of the debris-flow warning criteria." *Soil and Water Conservation Bureau*. (in Chinese))
- [23] 詹錢登、王志賢 (2017), 「降雨誘發土砂災害警戒機制之研究」, 水土保持局。(Jan, C.D., and Wang, C.H. (2017). "Study on warning system of rainfall-induced sediment disaster." results report, *Soil and Water Conservation Bureau*. (in Chinese))
- [24] 楊明德、徐瑞宏 (2013), 「應用雷達雨量於陳有蘭溪流域之疏散避難預警」, 環境工程會刊。(Yang, M.T., and Hsu, R.H. (2013). "Application of QPESUMS to warning and evacuation in Chen-yu-lan Creek Basin." *Environmental Engineering Journal*. (in Chinese))
- [25] 劉格非、魏士超、鄺寶成 (2013), 「累積雨量對土石流影響範圍評估之影響」, 中華水土保持學報, 44(3), 225-233。(Liu, K.F., Wei, S.C., and Li, P.C. (2013). "The influence of accumulated precipitation on debris flow hazard." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44(3), 225-233. (in Chinese))
- [26] 蔡甫甸 (2015), 「民國 101 年颱風調查報告」, 中央氣象局, 32-59。(Tsai, F.D. (2015). "Report Typhoons in 2012", *Central Weather Bureau*, 32-59. (in Chinese))
- [27] 盧孟明、陳佳正、林昀靜 (2007), 「1951-2005 年臺灣極端降雨事件發生頻率之變化」, 大氣科學, 35(2), 87-103。(Lu, M.M., Chen, C.J., and Lin, Y.C. (2007). "Long-term variations of the occurrence frequency of extreme rainfall events during the period of 1951-2005." *Atmospheric Sciences*, 35(2), 87-103. (in Chinese))
- [28] 羅雅尹 (2016), 「民國 104 年颱風調查報告—第 13 號蘇迪勒 (Soudelor) 颱風 (1513)」, 氣象學報, 53(1), 61-84。(Luo, Y.Y. (2016). "Report on Typhoon 1513 (Soudelor) of 2015." *Meteorological Bulletin*, 53(1), 61-84. (in Chinese))
- [29] 戴義欽、詹錢登 (2016), 「集水區大規模土砂災害風險辨識與耐受力盤查」, 水土保持局。(Tai, Y.C., and Jan, C.D. (2016). "Risk identification and tolerability investigation of large-scale sediment-related disasters in watershed." *Soil and Water Conservation Bureau*. (in Chinese))
- [30] 日本氣象庁 (2018), 「平成 30 年 7 月豪雨及び 7 月中旬以降の記録的な高温の特徴と要因について」。(Japan Meteorological Agency. (2018a). "The characteristics and factors of the record high temperature after 2018 July heavy rain and the middle of July, 2018." (in Japanese))
- [31] 日本氣象庁 (2019), 「平成 30 年 7 月豪雨による被害状況等について (第 32 報)」。(Japan Meteorological Agency. (2019). "About the damage situation by 2018 July heavy rain, No. 32." (in Japanese))
- [32] 国土交通省 (2018), 「平成 30 年 7 月豪雨について, 事業評価小委員会 (第 11 回)」。(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan. (2018). "Report about July, 2017 heavy rain." Project Evaluation Subcommittee, 11th." (in Japanese))
- [33] 国土交通省河川局砂防部 (2002), 「土砂災害危険箇所」。(https://www.mlit.go.jp/common/001286018.pdf)。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC) (2002). "Sediment-related disaster risk areas." (in Japanese))
- [34] Dilley, M., Chen, R. S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A. L., and Arnold, M. (2005). "Natural disaster hotspots: a global risk analysis." *The World Bank*.
- [35] Wallemacq, P. (2018). "Economic Losses, Poverty & Disasters 1998-2017." *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*, CRED.

2020 年 11 月 03 日 收稿

2021 年 01 月 11 日 修正

2022 年 08 月 15 日 接受