

坡地降雨致災熱區警戒模式

陳振宇^{[1]*} 陳均維^[1] 陳國威^[1] 林詠喬^{[1][2]}

摘要 儘管降雨誘發的坡地災害與該地區之地質、地形、植生等條件有關，但多數警戒模式僅針對降雨指標進行量化。例如，現行國內的 RTI 土石流警戒雨量模式及日本的 RBFN 土砂災害雨量警戒模式，雖已藉由調整不同警戒雨量以表現各地區之地文地質等條件差異，但仍未有一套明確的量化評估方式可表達各地區之地文脆弱度。本研究採用 QPESUMS 雷達降雨網格資料之歷史相對雨量值，以及各網格範圍內歷年新增崩塌地之發生頻率及規模，提出降雨危害度指標 (H_R) 與地文脆弱度指標 (F_P)，並以此二指標建立颱風豪雨期間各 QPE 網格內之坡地降雨致災風險等級 (R_h)。以高雄市六龜區 2005-2017 年之降雨事件為例，本研究建立之警戒模式可有效預測新生崩塌發生之時間及區域，並以視覺化方式展示可能的坡地降雨致災熱區。

關鍵詞：災害、脆弱度、危害度、崩塌、預警系統

Warning Model for Predicting the Risk Zones of Rainfall-Induced Slopeland Disasters

Chen-Yu Chen^{[1]*} Jyun-Wei Chen^[1] Kuo-Wei Chen^[1] Yung-Chiau Lin^{[1][2]}

ABSTRACT Slopeland disasters triggered by rainfall are related to geology, topography, and vegetation conditions; however, most warning models are only quantified for rainfall indicators. For example, although the current debris flow warning model in Taiwan and the sediment-related disaster warning model in Japan employ different critical lines, indicating the differences in the geology and terrain of the two regions, these models do not comprise a defined set of quantitative assessment methods for expressing the physiographic fragility of each region. In this study, we used historical relative rainfall data from QPESUMS to define a rainfall hazard index (H_R) and adopted the frequency and scale of new collapses in each QPESUMS mesh to determine a physiographic fragility index (F_P). Then, we integrated these two indicators to obtain the risk level of rainfall-induced hazard (R_h) for each QPESUMS mesh during a typhoon or heavy rainfall. Finally, we considered rainfall events from 2005 through 2017 in Liougui District of Kaohsiung City as an example. The results indicate that the warning model can predict the occurrence and location of new collapses and also display the risk zones of rainfall-induced slopeland disasters through a visualization platform.

Key Words: Disaster, fragility, hazard, landslide, warning system

一、前言

建立警戒系統並適時疏散災害潛勢區內的民眾，為降低天然災害導致人命傷亡風險的有效方式。儘管多數研究結果顯示，降雨導致坡地崩塌或土石流發生的主因係與土壤含水量有直接關連，但限於現地觀測資料取得及實務操作之可行性，現行降雨導致坡地災害之警戒模式多僅使用雨量及其衍生之參數等作為監測指標 (Wieczorek and Glade, 2005; Baum RL and Godt JW, 2010; Osanai et al, 2010; 陳振宇, 2013)。此外，台灣現行土石流警戒機制，僅針對已公開之 1 千多條土石流潛勢溪流發布紅黃警戒，對於山坡地上更常見的崩塌災害，並未提供預警資訊，且目前採用逐條發布土石流警戒之發布機制，亦不利於地區整體坡地災害風險之評估 (陳振宇等, 2017)。

台灣自 2005 年起正式改以 60 分鐘累積雨量及考慮前七天降雨效應之有效累積雨量組合而成的降雨驅動指標 (Rainfall Triggering Index, RTI) 模式，據以設定各鄉鎮之土石流警

戒基準值，並建立土石流紅、黃警戒發布機制，歷經十多年來的實際應用，已有效降低土石流災害造成民眾之傷亡數目 (詹錢登、李明熹, 2004)。其計算及警戒值設定方式簡述如下：

$$RTI = 1 \times R_t \quad (1)$$

$$R_t = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i \quad (2)$$

其中 I 為 60 分鐘累積雨量； R_t 稱為有效累積雨量， R_i 為前 i 日的 24 小時累積雨量 (例如 R_0 即為目前時間之前的 24 小時累積雨量)， α^i 為前 i 日的折減係數； α 目前採用 0.7 (水土保持局, 2016)。而在訂定各鄉鎮警戒基準值時，須先蒐集該鄉鎮內參考雨量站之歷年降雨資料進行雨場分割，再將每一個雨場以一個雨量強度 I 及一個有效累積雨量值 R_t 代表之，並據以計算該雨場之 RTI 值。其中，如該雨場為已發生土石流災害之雨場事件，則其代表之雨量強度及有效累積雨量採用土石流發生時刻之值；反之，如該雨場期間未發生土石流災害或有發生但不知明確發生時間，則其代表之雨量強度及有效累積雨量

[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

採用該雨場最大雨量強度發生時刻之值。

完成該鄉鎮參考雨量站歷年降雨資料之雨場分割、設定代表值並計算各雨場之 RTI 值後，再將歷年雨場之 RTI 值依照大小排列，並以式 (3) 經驗機率公式之韋伯公式計算出歷年雨場 RTI 值較小的 10%，設為 RTI_{10} (記為下警戒值，表示僅有 10% 的 RTI 值小於此值)，以及 RTI_{90} (記為上警戒值，表示有 90% 的 RTI 值小於此值)。

$$P(X \geq X_r) = \frac{m}{n+1} \quad (3)$$

式(3)中， P =變量大於或等於某一變量值 X_r 的超越機率 (exceedance probability)； m =由大到小排列的序號，亦即在 n 次觀測資料中出現大於或等於某一值 X_r 的次數； n =樣本系列總量，此處即為雨場總數。

最後將上下警戒值(RTI_{10} 與 RTI_{90})以式(4)進行線性內插，即可求出其它的 RTI 特定值，例如： RTI_{50} 或 RTI_{70} 等。

$$RTI_M = RTI_{10} + \left(\frac{M-10}{80} \right) (RTI_{90} - RTI_{10}) \quad (4)$$

此外，為便於一般民眾理解及實務操作之便利性，水土保持局以鄉鎮為單元，將各地區之 RTI 值轉換為以有效累積雨量為單一指標之土石流警戒基準值 (R_c)，目前採用 RTI_{70} 除以降雨強度 10 mm/hr，並取 50 mm 為一個級距，訂出各鄉鎮之土石流警戒基準值。現行台灣 159 個轄區內有土石流潛勢溪流的鄉鎮，其土石流警戒基準值之範圍為 200 至 600 mm 共 9 個級距。

儘管台灣現行的土石流警戒系統對於颱風豪雨導致之土石流災害，在事前預警上已有顯著成效，但在警戒值設定過程及警戒發布之實務運作上，仍有一些問題待解決。包含：

1. 目前警戒值之設定及警戒發布，仍完全仰賴地面自動雨量站。儘管近年來相關單位已大幅提昇山區自動雨量站之設置密度，全台 85% 土石流潛勢溪流距離參考雨量站均在 3 km 以內 (水土保持局，2016)，已遠高於國際氣象組織 (World Meteorological Organization, WMO) 對於不同地形雨量站網最小密度之建議 (例如，具有高山且不規則降雨之島嶼，每 25 km² 設置一雨量站 (WMO, 1970))，但由於台灣山區地形複雜，區域雨量變化大，此密度恐仍顯不足。
2. 現行 RTI 模式對於前期降雨之處理，係採用「逐日折減」方式，即便是降雨延時僅 1 小時的降雨，在 24 小時內其對於土壤飽和度變化之影響均視為相同，此與現地土壤含水計觀測結果明顯不同。此外， RTI 模式在設定各地區土石流警戒基準值時，必須先將參考雨量站之歷年雨量資料進行雨場分割，但不同的雨場分割方式將造成後續統計時所使用的雨場數目及降雨指標代表值差異甚大，進而影響所設定之土石流警戒基準值 (陳振宇等，2017)。
3. 許多以雨量為基準之警戒模式在實務操作時，多著重於當下之雨量值多寡，常忽略該雨量與過去歷史紀錄之相對值為何？例如同樣是日雨量 300 mm 的降雨，如落在年平均雨量為 3000 mm 以上的地區未必致災；但若下在年平均雨量僅為 300 mm 的地區則可能造成重大災情。因此，近期一些研究已開始採用相對值的概念設定降雨致災風險，例如，Saito and Matsuyama (2012) 定義 NSWI (Normalized Soil Water Index) 為目前某網格之土壤雨量指數除以過去 10 年該網格的最大歷史土壤雨量指數，並應用於 2011 年 Talas 颱風造成重大災情的紀伊半島地區，獲得比單純使用土壤雨量指數更好的預測結果。

4. 儘管降雨引致之坡地災害與該地區之地質、地形、植生等條件有關，但多數警戒模式僅針對降雨指標進行量化。例如，現行國內的 RTI 土石流警戒雨量模式及日本的基底函數網路 (Radial Basis Function Network, RBFN) 模式，雖已藉由調整不同警戒雨量以表現各地區之地文地質等條件差異，但仍未有一套明確的量化評估方式可表達各地區之地文脆弱度 (Physiographic fragility)。
5. 現行之警戒模式僅針對土石流災害提供預警，但對於常見的淺層崩塌則尚未提供警戒資訊；且現行以土石流潛勢溪流為標的之紅黃警戒發布模式，無法提供各地區整體的坡地災害風險等級警示，不利於各級政府防災單位全面掌握狀況。

為此，本研究將針對前揭國內現行土石流災害雨量警戒模式所面臨的問題，提出相應之改進方案，期建立坡地降雨致災熱區警戒模式；此外，由於觸發坡地災害的誘因除降雨外，尚可能包含地震、風化、森林火災、人為擾動或複合型誘因，為避免個案式的零星災情案例可能導致警戒模式在操作上過於複雜或過度預測，故本研究提出之降雨致災熱區警戒模式僅針對颱風豪雨期間可能發生的群發型坡地災害進行預警。在研究架構上，本研究先藉由歷年新生崩塌地之發生頻率及規模，建立各劇烈天氣監測系統 (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor, QPESUMS) 網格範圍內之地文脆弱度，並由歷史雨量資料之相對值定義出降雨危害度指標，最後整合 QPESUMS 的雷達降雨估計網格資料與地文脆弱度，提出坡地降雨致災熱區風險等級指標，同時建立具視覺化之網格式警戒模式，相關流程詳如圖 1。本研究將以高雄市六龜區為例，進行本警戒模式於空間域及時間域預測結果之驗證及討論。

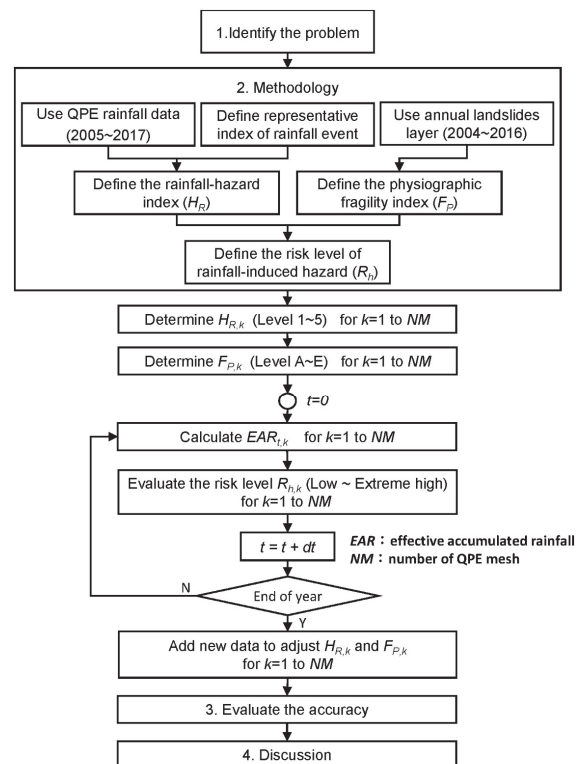


圖 1 研究流程圖

Fig.1 Flow chart of the study process

二、材料及方法

1. 研究試區及雨量資料

本研究係以高雄市六龜區為驗證案例，同時採用自 2005 年 7 月正式啟用，建立已逾 10 年，空間解析度較高 (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 網格式作為警戒發布單元；所使用之雨量資料為 2005 年 7 月 1 日至 2017 年 7 月 31 日，共計 145 個月的各 QPE 網格式雨量。本研究試區內計涵蓋 147 個 QPE 網格式，其空間分布及地形坡度如圖 2。

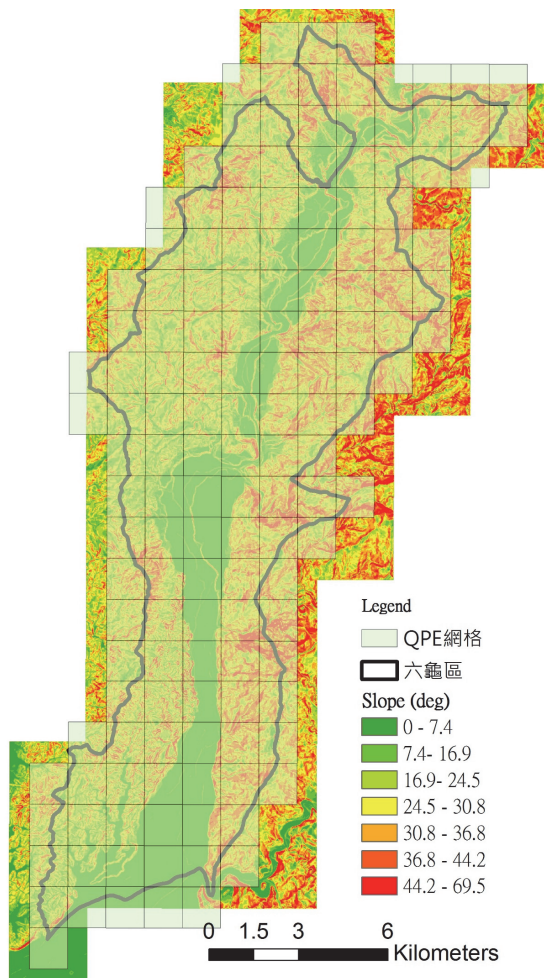


圖 2 高雄市六龜區範圍與 QPE 網格式分布及坡度

Fig.2 Distribution of QPE meshes and slope in Liougui District of Kaohsiung City

2. 降雨危害度指標

本研究係僅針對降雨引致之崩塌進行致災熱區評估。為評估不同規模之降雨造成之危害度差異，本研究參考並改良現行 RTI 模式之作法建立降雨危害度指標。首先，為解決現行 RTI 模式對於前期雨量處理方式之疑義，本研究使用陳振宇等 (2017) 所提出的逐時折減之有效累積雨量 (Effective Accumulated Rainfall, EAR) 計算公式，如式 (5)：

$$EAR_t = I_t + EAR_{t-1} \times (0.7)^{\frac{1}{24}} \quad (5)$$

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。相較於式 (2) 每次運算均需分別計算前七日之 24 小時累積雨量並乘上折減係數後再累加，式 (5) 之計算僅有一次折減及一次累加，其計算量大幅減少，有利於後續大量網格式運算時使用。

此外，由於不同的雨場分割方式，將造成統計時使用之雨場數目及降雨指標代表值差異甚大 (詹錢登等, 2003)，為簡化雨場分割問題，本研究採用各 QPE 網格式之每月最大 EAR 值作為該月份之雨場代表值；例如本研究取 2005 年 7 月至 2017 年 7 月每個月最大的 EAR 值作為該月雨場代表值，亦即每個 QPE 網格式均有 145 個雨場。此外，因台灣各地降雨量變化與季節有明顯關連性，以六龜地區的 QPE 編號 110025 網格式為例，2005/07~2017/07 間的 145 個雨場中，有效累積雨量 (EAR) 小於 50 mm 的雨場約佔 4 成 (如表 1)。

表 1 QPE 編號 110025 網格式每月最大 EAR 統計 (2005/07~2017/07)

Table 1 The statistics of monthly maximum EAR on No.110025 of QPE mesh (2005/07~2017/07)

每月最大 EAR (mm)	<50	50~100	100~150	150~200	>200
雨場數量	60	27	15	10	33

由於本研究係針對降雨引致之群發型崩塌進行致災熱區評估，故對於不致造成坡地災害的較小雨場，擬先予以剔除，僅將「致災性雨場」納入後續建立降雨危害度指標時之統計資料。為定義前揭「致災性雨場」，本研究整理水土保持局 2006~2017 年所建立之 464 件全重大土砂災例報告 (土石流防災資訊網, 2018)，扣除災害發生時其累積雨量為零的 5 件案例，將剩餘的 459 件災例依其發生時的累積雨量由小而大排列後，統計出不同累積雨量下，降雨誘發重大土砂災例累積發生機率如圖 3。其中，僅有 10% 的重大土砂災例發生時的累積雨量小於 150 mm，且多為非颱風豪雨期間的零星個案式邊坡崩塌 (例如 2010 年 4 月 5 日 14:33 發生之國道三號 3.1 公里處走山事件，發生時有效累積雨量為 17.5 mm)，亦即 90% 的重大土砂災例其發生時之累積雨量均大於 150 mm，故本研究定義大於 150 mm 之雨場方為「致災性雨場」，並據以定義降雨危害度指標，其程序如下：

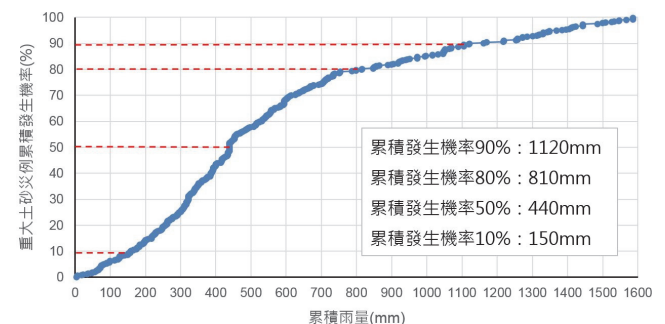


圖 3 降雨誘發重大土砂災例累積發生機率

Fig.3 Accumulated occurring probability of rainfall-induced sediment-related disaster

各 QPE 網格均先剔除小於 150 mm 之雨場資料後，再參照 RTI 模式以韋伯公式計算出 EAR_{10} 、 EAR_{90} 及 EAR_{95} 三個值，其中 EAR_{10} 代表該 QPE 網格歷年來僅有 10% 的具危害度之雨場小於此值。同時，本研究取 EAR_{10} 、 EAR_{90} 作線性內插（類同 (4) 式），分別計算出 EAR_{30} 及 EAR_{60} 後，定義降雨危害度指標 (Rainfall-hazard index, H_R)，如表 2。以位於六龜區寶來里之 QPE 編號 110025 網格為例，經刪除 EAR 小於 150 mm 之雨場後，餘 43 個雨場（亦即平均 1 年有 3.6 個致災性雨場），考量每年颱風侵襲南台灣次數與梅雨季，此值尚屬合理。將此 43 個致災性雨場以韋伯法計算後，此網格之降雨危害指標值對應值如表 3，其中 EAR_{max} 為該網格雨場資料之歷史最大 EAR ，發生於 2009 年 8 月之莫拉克颱風。

3. 地文脆弱度指標

由於地質、地形、地表植生及人為開發利用（如開闢道路等）均會直接、間接或交互影響該地區在降雨期間是否產生崩塌或沖蝕等現象，此部份較不易直接由前揭各項因子單獨進行評估。因此，本研究係採用各 QPE 網格內每年是否產生新生崩塌（亦即反映崩塌發生頻率），以及崩塌規模等二項指標來代表該網格範圍內之地文脆弱度 (Physiographic fragility)。本研究使用 2004~2016 林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層作為各網格歷年是否發生新生崩塌之評估基準，並以相鄰二年之 GIS 圖層相減方式，建立 2005~2016 年間，每一個 QPE 網格範圍內之每年新生崩塌面積。值得注意的是，由於林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層係使用當年度 1~7 月之衛星影像判識而得，故如 2009 年 8 月莫拉克颱風所導致之新生崩塌，係於 2010 年之圖層才會呈現。而此處之新生崩塌面積，係指「舊有崩塌地擴大」加上「新生崩塌地」的部分，即圖 4 中之(3)與

(4)。此外，由於林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層之最小判識面積為 0.1ha，本研究處理後所得之各每年度新生崩塌地面積如小於 0.1ha 者，均視為無新生崩塌。

為驗證本研究提出之地文脆弱度指標具有代表性，本研究僅取 2005~2014 年新生崩塌地面積作為基礎資料以建立每一個 QPE 網格的地文脆弱度指標，再以 2015 及 2016 年之資料進行驗證。其中，2005~2014 十年內均未有新生崩塌之網格計有 40 格，而每年均有新生崩塌者有 1 格，即位於六龜區寶來里之 QPE 編號 110025 網格。表 4 摘錄部份 QPE 網格範圍內之每年新生崩塌地面積及相關統計。

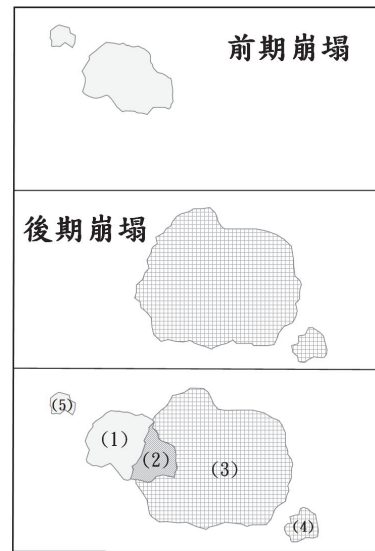


圖 4 崩塌地變遷及分類示意（修改自陳俞旭，2008）

Fig.4 The change of landslides and classification (Chen, 2008)

表 2 降雨危害度指標 H_R 之定義

Table 2 The definition of rainfall-hazard index (H_R)

危害度等級	1	2	3	4	5
意義	安全	注意	稍危險	危險	極危險
指標 H_R	$<EAR_{30}$	$EAR_{30} \sim EAR_{60}$	$EAR_{60} \sim EAR_{90}$	$EAR_{90} \sim EAR_{95}$	$>EAR_{95}$

表 3 QPE 編號 110025 網格降雨危害指標值 H_R 對應值

Table 3 The value of rainfall-hazard index (H_R) on No.110025 of QPE mesh

EAR_{10}	EAR_{30}	EAR_{60}	EAR_{90}	EAR_{95}	EAR_{max}
171 mm	313 mm	525 mm	738 mm	815 mm	1266 mm

表 4 各 QPE 網格範圍內之每年新生崩塌地面積 (m^2) 及相關統計 (摘錄)

Table 4 Annual new collapse area and related statistics in each QPE grid (excerpt)

QPE編號	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	N_n	A_a
101641	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
102962	0	1,685	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,685
106935	0	0	0	0	0	6,366	4,833	0	0	0	0	0	2	5,599
109585	2,209	18,898	0	0	0	144,656	18,866	1,609	9,446	0	0	0	6	32,614
110025	6,471	99,080	8,183	8,758	32,481	130,574	2,882	5,981	6,124	1,338	1,717	2,125	10	30,187
108261	24,127	16,881	0	3,454	5,029	274,572	60,048	0	4,893	0	0	0	7	55,572

N_n : 2005~2014 年新生崩塌頻率 (次數)

A_a : 2005~2014 年平均新生崩塌面積 (m^2)

為便於後續與降雨危害度指標整合,本研究將新生崩塌頻率 (N_n , 單位為次數) 與平均新生崩塌面積 (A_a , 單位為 m^2) 整併為單一指標, 並定義為地文脆弱度指標 (Physiographic fragility index, F_P) 如式 (6) :

$$F_P = \begin{cases} N_n \times \log A_a & \text{if } N_n > 0 \\ 0 & \text{if } N_n = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中 2005~2014 十年內均無新生崩塌之 40 個 QPE 網格其 F_P 均設為 0, 研究區內 147 個網格之 F_P 值範圍、特徵及分級標準如表 5。分級後各網格之地文脆弱度指標, 如圖 5。

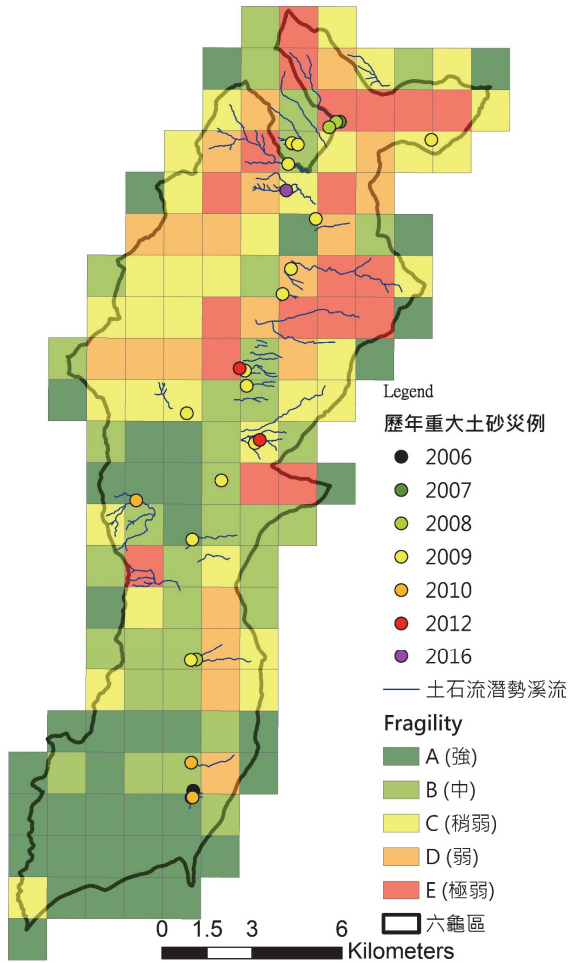


圖 5 各 QPE 網格之地文脆弱度指標

Fig.5 The physiographic fragility index (F_P) of each QPE mesh

表 5 研究區內地文脆弱度指標 F_P 分布特徵與分級

Table 5 Distribution characteristics and classification of physiographic fragility index (F_P) in the study area

F_P 值	網格數	特徵	脆弱度	意義
0	40	10年內無新生崩塌	A	強
0~10	35	崩塌1~2次, 面積0.1~4.0 ha	B	中
10~15	18	崩塌3~4次, 面積0.3~7.9 ha	C	稍弱
15~20	15	崩塌4~5次, 面積0.6~3.5 ha		
20~25	13	崩塌5~6次, 面積1.2~4.7 ha	D	弱
25~30	7	崩塌6次, 面積1.7~6.3 ha		
30~35	8	崩塌7~8次, 面積0.6~5.5 ha	E	極弱
>35	11	崩塌8~10次, 面積1.0~4.7 ha		

4. 降雨致災風險等級指標

坡地崩塌發生之條件, 可概分為誘因與基因, 以本研究之範疇為例, 誘因即為降雨, 基因即為地質與地形等條件。為有效整合前揭所提出之降雨危害度指標 (誘因) 及地文脆弱度指標 (基因), 本研究採用矩陣法定義「降雨致災風險等級」 (Risk level of rainfall-induced hazard, R_h), 詳如圖 6。其中, 由於前已考量在台灣引致坡地災害之雨量一般多在 150 mm 以上, 故圖 6 中 EAR 小於 150 mm 時, 均強制設為低致災風險; 同時, 為考量極端降雨仍可能帶來高風險之情境, 故圖 6 中若 EAR 大於 1000mm 時, 均自動調昇一個致災風險等級。

降雨危害度指標	高	極高	極高	極高	極高
5	中高	高	高	極高	極高
4	中	中高	高	高	極高
3	低	中	中高	高	高
2	低	中	中	中高	高
1	低	低	低	中	中高
地文脆弱度指標					
A B C D E					

圖 6 以矩陣法定義之降雨致災風險等級指標(R_h)

Fig.6 The definition of risk level of rainfall-induced hazard (R_h) by matrix

三、結果與討論

1. 地文脆弱度指標驗證

為評估式 (6) 及表 5 所設定之地文脆弱度指標是否合宜, 本研究以 2015 及 2016 年之新生崩塌網格所在位置作為驗證。以 2015 年為例, 該年度計有 14 個網格發生新生崩塌, 其中位於地文脆弱度指標等級為 E 與 D 之網格分別有 7 個及 4 個, 亦即近 8 成的新生崩塌確實位於地文脆弱度指標評估為極弱與弱的地區 (如表 6); 同時, 2016 年之驗證結果, 其預測正確率亦逾 8 成, 故可知本研究所提之地文脆弱度指標 F_P , 確實可在空間域上有效指出容易新生崩塌之區域。

表 6 地文脆弱度指標驗證結果

Table 6 The verification results of physiographic fragility index

年度	新生崩塌網格總數	位於不同地文脆弱度等級網格數				
		A (強)	B (中)	C (稍弱)	D (弱)	E (極弱)
2015	14	0	2	1	4	7
2016	6	0	0	1	1	4

2. 降雨致災風險等級驗證

為驗證不同地文脆弱度網格在歷年 (2005/7~2017/7)145

個雨場事件中，其降雨致災風險等級變化情形與實際新生崩塌之關連性，本研究分別就五種地文脆弱度等級各選一代表網格，將歷年雨場資料及新生崩塌事件及其規模進行事件時序分析。

五種地文脆弱度代表網格之分析結果詳如表 7，脆弱度 E 至 B 之代表網格於歷年降雨事件期間之降雨致災風險等級變化情形與新生崩塌事件之時間序列圖，詳如圖 7。

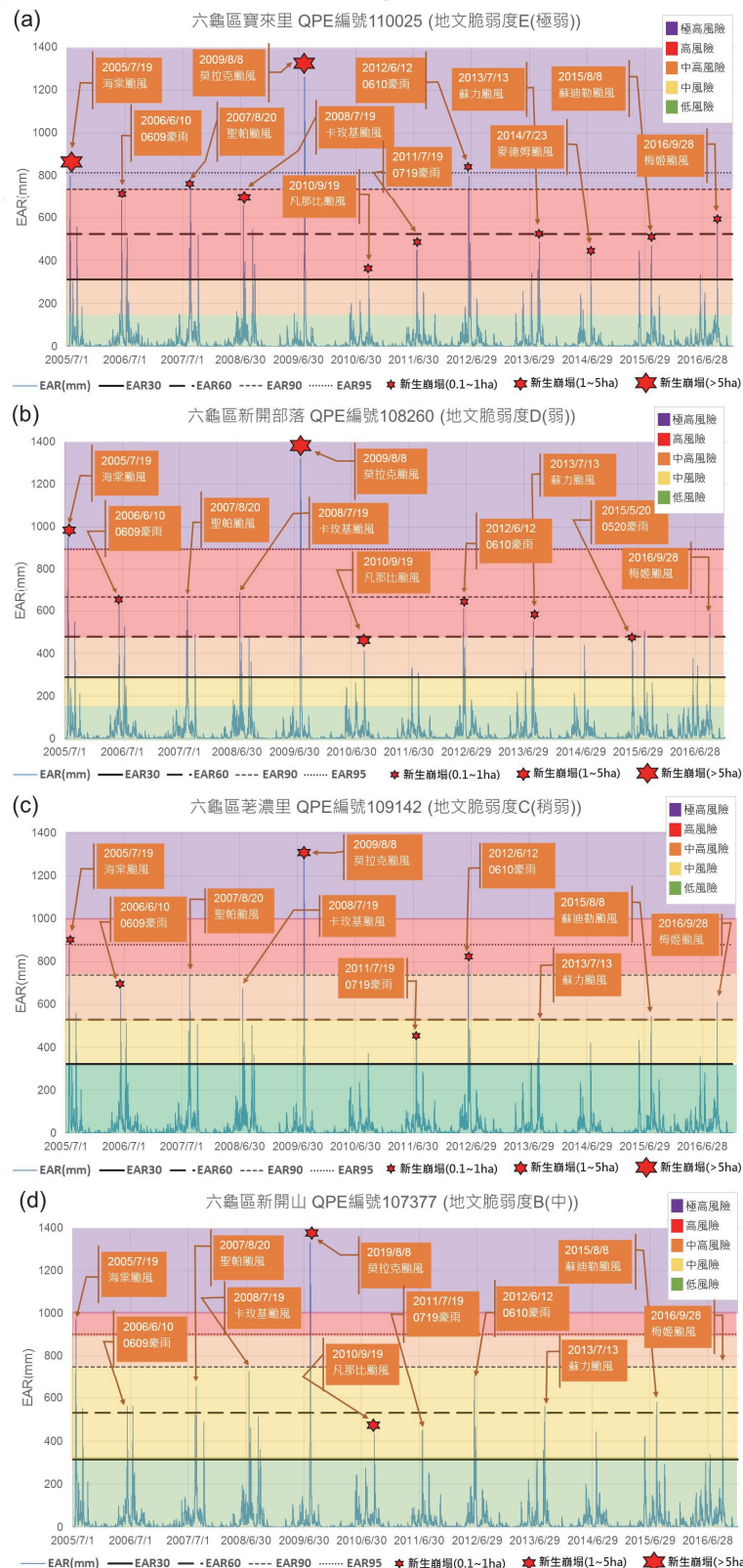


圖 7 歷年降雨事件期間之降雨致災風險等級變化情形與新生崩塌事件之時間序列圖 (a) 六龜區寶來里，(b) 六龜區新開部落，(c) 六龜區荖濃里，(d) 六龜區新開山

Fig.7 Timeline of changes in rainfall-induced hazard level and new collapses during rainfall events in previous years. (a) Baolai Vil., Liugui Dist. (b) Xinkai Tribe, Liugui Dist. (c)Launong Vil., Liugui Dist. (d)Xinkaishan, Liugui Dist.

由表 7 之結果呈現, 本研究提出之降雨致災風險等級對於新生崩塌預測具有一定之成效。例如, 表 7 之 5 個代表網格於歷次雨場期間其致災風險等級達到「極高」者, 均發生新生崩塌; 致災風險等級達到「高」者, 亦有約 40% 的機率發生新生崩塌, 且其發生機率亦隨風險等級降低而減少, 符合一般對於警戒模式之期待。此外, 透過圖 7 以時間軸序列方式呈現各

代表網格新生崩塌發生時間與規模, 大致也呈現規模較大之新生崩塌亦多發生於其致災風險等級達到「極高」時。亦即, 後續如能將此模式導入即時雨量計算, 並整合呈現於 WebGIS 平台, 即可作為具視覺化的廣域型土砂災害警戒模式, 有利於防災業務人員整體掌握災害趨勢, 並據以進行相關決策分析。

表 7 歷年降雨致災風險等級與新生崩塌發生率

Table 7 The risk level of rainfall-induced hazard and proportion of new collapse in previous years

QPE編號110025 (脆弱度等級E)		雨場數	新生崩塌雨場數	新生崩塌發生率(%)
降雨致災風險等級 (R_h)				
極高 ($EAR>EAR_{90}$)		4	4	100.0
高 ($EAR_{30}<EAR<EAR_{90}$)		19	8	42.1
中高 ($150\text{mm}<EAR<EAR_{30}$)		20	0	0.0
中 (Undefined)		-	-	-
低 ($EAR<150\text{mm}$)		102	0	0.0
$EAR_{30}=313\text{ mm}$ $EAR_{60}=525\text{ mm}$ $EAR_{90}=738\text{ mm}$ $EAR_{95}=815\text{ mm}$				
QPE編號108260 (脆弱度等級D)		雨場數	新生崩塌雨場數	新生崩塌發生率(%)
降雨致災風險等級 (R_h)				
極高 ($EAR>EAR_{95}$)		2	2	100.0
高 ($EAR_{60}<EAR<EAR_{95}$)		11	3	27.3
中高 ($EAR_{30}<EAR<EAR_{60}$)		8	2	25.0
中 ($150\text{mm}<EAR<EAR_{30}$)		20	0	0.0
低 ($EAR<150\text{mm}$)		104	0	0.0
$EAR_{30}=289\text{ mm}$ $EAR_{60}=477\text{ mm}$ $EAR_{90}=665\text{ mm}$ $EAR_{95}=894\text{ mm}$				
QPE編號109142 (脆弱度等級C)		雨場數	新生崩塌雨場數	新生崩塌發生率(%)
降雨致災風險等級 (R_h)				
極高 ($EAR>1000\text{mm}$)		1	1	100.0
高 ($EAR>EAR_{90}$)		2	2	100.0
中高 ($EAR_{60}<EAR<EAR_{90}$)		6	1	16.7
中 ($EAR_{30}<EAR<EAR_{60}$)		11	1	9.1
低 ($EAR<EAR_{30}$)		125	0	0.0
$EAR_{30}=321\text{ mm}$ $EAR_{60}=529\text{ mm}$ $EAR_{90}=738\text{ mm}$ $EAR_{95}=880\text{ mm}$				
QPE編號107377 (脆弱度等級B)		雨場數	新生崩塌雨場數	新生崩塌發生率(%)
降雨致災風險等級 (R_h)				
極高 ($EAR>1000\text{mm}$)		1	1	100.0
高 ($EAR>EAR_{95}$)		1	0	0.0
中高 ($EAR_{90}<EAR<EAR_{95}$)		1	1	6.3
中 ($EAR_{30}<EAR<EAR_{90}$)		16	0	0.0
低 ($EAR<EAR_{30}$)		126	0	0.0
$EAR_{30}=315\text{ mm}$ $EAR_{60}=532\text{ mm}$ $EAR_{90}=748\text{ mm}$ $EAR_{95}=904\text{ mm}$				
QPE編號102521 (脆弱度等級A)		雨場數	新生崩塌雨場數	新生崩塌發生率(%)
降雨致災風險等級 (R_h)				
極高 (Undefined)		-	-	-
高 ($EAR>1000\text{mm}$)		0	0	0.0
中高 ($EAR>EAR_{95}$)		2	0	0.0
中 ($EAR_{90}<EAR<EAR_{95}$)		3	0	0.0
低 ($EAR<EAR_{90}$)		140	0	0.0
$EAR_{30}=253\text{ mm}$ $EAR_{60}=392\text{ mm}$ $EAR_{90}=531\text{ mm}$ $EAR_{95}=844\text{ mm}$				

3. 重大土砂災例發生地點與時間驗證

依據水土保持局 2006~2017 年所建立之 464 件重大土砂災例報告，六龜區歷年計有 35 件重大土砂災例；其中扣除 7 件洪水災害後，餘 28 件崩塌及土石流災例之空間分布如圖 5。分析此 28 件崩塌及土石流災例所在之 QPE 網格地文脆弱度，發現位處地文脆弱度為 A(強) 及 B(中) 等級之災例竟佔 60.7%，似不合理。惟水保局所記錄之重大災例點位，係以保全對象(如家屋)受災處為主，多已在土石流潛勢溪流之堆積區或平坦地，並非建立地文脆弱度時所考量之坡地崩塌區或土石流潛勢溪流中上游區，故如改以災例點位中上游之 QPE 網格重新檢視其地文脆弱度，則地文脆弱度為 D(弱) 及 E(極弱) 等級之災例所佔比例即變為 57.1% (詳如表 8)。因此，後續如應用此模式進行警戒發布時，宜同時考量保全對象所在處及其中上游之 QPE 網格之降雨致災風險等級變化。

為驗證本模式於重大土砂災例發生前能有效提供預警資

訊，本研究進一步將前揭 28 件重大土砂災例逐一檢視於災害發生前，其所在 QPE 網格或其中上游所在 QPE 網格之降雨致災風險等級變化情形。其中，92.9%之重大土砂災例於發生前已達「中高」致災風險等級，82.1%之重大土砂災例於發生前已達「高」致災風險等級，另有 39.3%已達「極高」致災風險等級，詳如表 9。為進一步檢視各案例之狀況，表 10 摘錄位於不同地文脆弱度網格上之重大土砂災例發生前之致災風險等級變化情形，其中致災風險等級達「極高」之案例，均造成大規模之土砂災害，並導致重大傷亡。此外，2016 年梅姬颱風—荖濃里土石流潛勢溪流高市 DF097 之災例，如以災例處之 QPE 網格(編號 109142)檢視，其地文脆弱度為 C，故其致災風險等級之臨界雨量值較高，造成災例發生前 1 小時其致災風險等級僅達「中高」。但如取災點中上游 QPE 網格(編號 109141，地文脆弱度為 D)檢視時，則其致災風險等級達「中高」時間提前為 9/27 15:00，並於 9/27 20:00(災害前 2 小時)達「高」致災風險等級。

表 8 六龜區歷年重大土砂災例處之地文脆弱度指標統計

Table 8 The statistics of physiographic fragility index in historical major sediment-related disaster in Liougui District

地文脆弱度等級	災例所在點位地文脆弱度 (災例數)	比例 (%)	災例點位中上游地文脆弱度 (災例數)	比例 (%)
A(強)	6	21.4	1	3.6
B(中)	11	39.3	9	32.1
C(稍弱)	5	17.9	2	7.1
D(弱)	2	7.1	6	21.4
E(極弱)	4	14.3	10	35.7

表 9 六龜區歷年重大土砂災例發生前 QPE 網格降雨致災風險等級統計

Table 9 The statistics of risk level of rainfall-induced hazard before historical major sediment-related disasters in Liougui District

	重大災例件 數	達中高致災風險等級		達高致災風險等級		達極高致災風險等級	
		件數	比例 (%)	件數	比例 (%)	件數	比例 (%)
2006年0609豪雨	2	2	100.0	1	50.0	0	0.0
2007年聖帕颱風	1	1	100.0	1	100.0	0	0.0
2008年卡玫基颱風	4	4	100.0	4	100.0	0	0.0
2009年莫拉克颱風	15	15	100.0	14	93.3	11	73.3
2010年凡那比颱風	3	2	66.7	1	33.3	0	0.0
2012年0610豪雨	2	1	50.0	1	50.0	0	0.0
2016年梅姬颱風	1	1	100.0	1	100.0	0	0.0
小計	28	26	92.9	23	82.1	11	39.3

表 10 六龜區重大土砂災例發生前 QPE 網格降雨致災風險等級 (摘錄)

Table 10 The risk level of rainfall-induced hazard before historical major sediment-related disasters in Liougui District (excerpt)

災例點位 網格編號	地文脆弱度	災例事件	災情狀況	達中高致災 風險時間	達高致災 風險時間	達極高致災 風險時間
110025	E (極弱)	2008年卡玫基颱風-寶來里高市DF047	7/17 23:00 EAR=640 mm土石流沖毀農路250m，阻斷台20線	7/17 14:00	17/17 15:00	未達
108260	D (弱)	2009年莫拉克颱風-新發里高市DF078	8/8 21:00 EAR=1399 mm土石流堆積深度逾6m，面積逾20ha，造成38棟房屋受損，28死。	8/7 13:00	8/7 22:00	8/8 09:00
109142	C (稍弱)	2016年梅姬颱風-荖濃里高市DF097	9/27 22:00 EAR=598 mm 土石流堆積區面積約0.3 ha，1戶民宅遭土石入侵	9/27* 21:00	未達*	未達
107377	B (中)	2009年莫拉克颱風-新發里	8/9 06:00 EAR=1327 mm 新發里14鄰後方崩塌，6棟房屋遭埋，5死12傷。	8/8 06:00	8/8 09:00	8/8 10:00

註 1：EAR=災例所在 QPE 網格之有效累積雨量

註 2：2016 年梅姬颱風—荖濃里高市 DF097 災例，如取災點中上游 QPE 網格(編號 109141，地文脆弱度為 D)，則中高致災風險時間為 9/27 15:00，高致災風險時間為 9/27 20:00，未達極高致災風險等級。

4. 預警系統建立

藉由各 QPE 網格之降雨致災風險等級之建立，於颱風豪雨期間如能即時接收及計算各網格之 *EAR*，即可隨時更新各網格目前之降雨致災風險等級，同時藉由不同顏色之呈現，可協助防災人員以視覺化的方式掌握各地區整體災害風險，鑑視出可能的坡地降雨致災熱區（圖 8）。後續如能持續整合各式災害潛勢圖資（如土石流潛勢溪流、山崩地滑地質敏感區、歷史

災例點位、道路重點監控路段、封路封橋資訊等），將有助於強化地方政府於颱風豪雨應變期間之防災資源之調度及進行疏散避難決策等（陳振宇等，2017）。此外，由於本研究使用之 *EAR* 之計算方式簡單快速，故如能導入預測雨量資料，將可進一步推估未來各網格降雨致災風險等級之變化，如事前律定相應之防災作為，即可建立降雨致災熱區警戒模式；同時，若導入未來 12~24 小時的預測雨量，亦可進一步於入夜前發布預防性疏散地區。

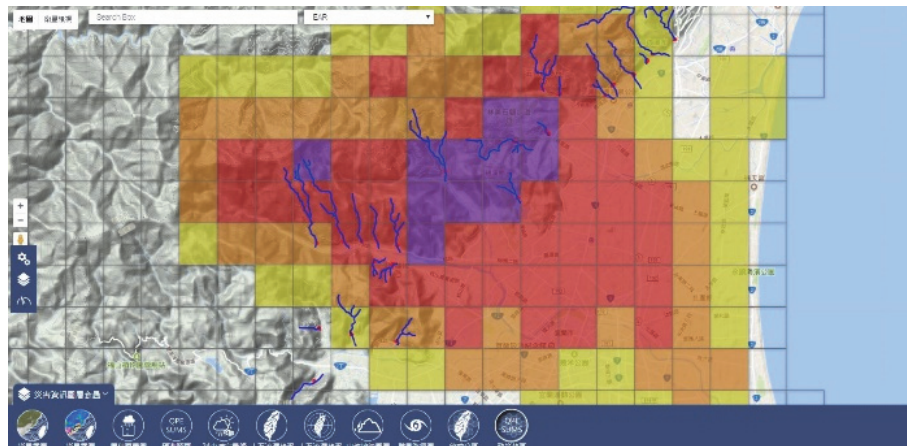


圖 8 降雨致災風險展示平台

Fig.8 The display platform of risk level of rainfall-induced hazard

一個完整的土砂災害預警系統，除精確的警戒模式外，尚需考量與設計完善的警戒訊息發布與傳遞機制；亦即一個好的預警系統除了必須能辨識出災害風險，並要能提供明確易懂的警戒資訊及建議作為，以適當的途徑即時傳送至相關單位及保全對象，促使其作出適當的反應（如疏散避難），以降低災害風險（Thiebes, 2012；陳振宇，2013）。本研究目前已初步建立坡地降雨致災熱區警戒模式，惟後續欲建立完整的坡地土砂災害預警系統，尚須考量警戒如何發布方能符合實際防災應變之運作。例如，為利於疏散避難之行政作業，警戒發布單元可能仍以村里為宜，但是否村里範圍內任一 QPE 網格達到「高」致災風險等級時，即應發布警戒？或是僅考慮有保全對象之 QPE 網格即可？此外，由前節之討論可知，集水區中上游之崩塌可能導致下游保全對象受災，故評估是否發布警戒，似乎宜以集水區範圍作整體評估？且警戒的等級是否比照現行土石流警戒，採紅、黃警戒二級制即可？此外，即便本研究已提供視覺化平台供使用者掌握整體狀況，但如何將警戒發布的結果轉化為明確易懂的訊息，快速傳播且讓受訊者有感，尚須進一步研究。

四、結論

國內外現行實際應用之土砂災害警戒模式，仍多以雨量為主要指標，未將地質、地形等地文條件同步納入警戒分析研判流程，致警戒之誤報率往往偏高。本研究提出降雨致災熱區警戒模式，已分別將地質、地形等條件（致災基因），以及地區歷史雨量納入評估的降雨頻率（致災誘因）整合考量，並採降雨

危害度及地文脆弱度雙指標之方式建立降雨期間各 QPE 網格範圍內之降雨致災風險等級。同時，透過不同顏色的呈現，可以視覺化方式完整提供各地區之致災風險，有利於防災業務人員掌握全盤狀況。此外，經由 2005~2017 年實際之降雨事件驗證結果，本研究提出之坡地降雨致災熱區警戒模式確實可在時間域及空間域上有效預測坡地災害可能發生之時間及空間分布，未來有潛力成為廣域型之複合型土砂災害警戒模式。

參考文獻

- [1] 土石流防災資訊網 (2018), <http://246.swcb.gov.tw> (Debris Flow Disaster Information Website, <http://246.swcb.gov.tw> (in Chinese))
- [2] 水土保持局 (2016), 「105 年土石流警戒基準值檢討與更新」。(Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) (2016). *The modification and review of the debris-flow warning criteria in 2016*. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 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))
- [5] 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))
- [6] 詹錢登、李明熹、黃婷卉 (2003), 「土石流發生降雨警戒值模式之研究」, 九十一年度防救災專案計畫成果研討會。 (Jan, C.D., Lee, M.H., and Huang, T.H. (2003). “Rainfall Threshold Criterion for Debris Flow Initiation.” *Proceeding of disaster prevention project conference*. (in Chinese))
- [7] 詹錢登、李明熹 (2004), 「土石流發生降雨警戒模式」, 中華水土保持學報, 35(3), 275-285。 (Jan, C.D. and Li, M.H. (2004). “A Debris-Flow Rainfall-Based Warning Model.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 35(3), 275-285. (in Chinese))
- [8] Baum RL and Godt JW (2010). “Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA.” *Landslides*, 7(3), 259-272.
- [9] Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S., and Noro, T. (2010). “Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network.” *Landslides*, 7(3), 325-338.
- [10] Saito, H. and Matsuyama, H. (2012). “Catastrophic landslide disasters triggered by record-breaking rainfall in Japan: Their accurate detection with Normalized Soil Water Index in the Kii Peninsula for the year 2011.” *SOLA*, 8, 81-84.
- [11] Thiebes, B. (2012). *Landslide Analysis and Early Warning Systems: Local and Regional Case Study in the Swabian Alb, Germany*. Springer Berlin Heidelberg.
- [12] Wieczorek, G.F., and Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob M, Hunger O (eds) *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Praxis, Springer Berlin Heidelberg, 325-362
- [13] WMO (1970). *Guide to Hydrometeorological Practices*. WMO Tech. Pap. 82. Geneva, Swiss.

2019 年 02 月 10 日 收稿

2019 年 03 月 27 日 修正

2019 年 04 月 01 日 接受

(本文開放討論至 2019 年 06 月 30 日)