

坡地降雨致災熱區警戒模式初探

陳振宇^{1*} 陳均維¹ 陳國威¹ 劉維則^{1,2}

行政院農業委員會水土保持局技術研究發展小組¹ 財團法人農業科技研究院²

摘要

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。此外，台灣現行之土石流災害警戒機制，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。為此，本研究整合QPE雷達降雨網格資料與各網格範圍內歷年坡地裸露率變化，提出坡地降雨致災熱區評估指標，並以網格方式建立坡地降雨致災熱區之警戒發布機制。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。

關鍵字：致災熱區、脆弱度、有效累積雨量、崩塌、預警系統、QPESUMS

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)。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：

$$RTI = 1 \times R_t$$

$$R_t = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i \quad (1)$$

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

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。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，並以韋伯法計算出歷年雨場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)。最後將上下警戒值(RTI_{10} 與 RTI_{90})以式(3)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。

$$RTI_M = RTI_{10} + \left(\frac{M-10}{80} \right) (RTI_{90} - RTI_{10}) \quad (3)$$

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10mm/hr，並取50mm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600mm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：

- (一) 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(截至2106年止，依據水土保持局統計，全台85%土石流潛勢溪流距離參考雨量站均在3 km以內)，但由於台灣山區地形變化大，此密度似仍顯不足。
- (二) 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，與實際狀況不符。
- (三) 現行警戒雨量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，但未有一套明確的評估方式可表達各地區之地文脆弱度(Physiographic fragility)。
- (四) 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雨量警戒模式所面臨的問題，提出相應之改進方案。首先藉由歷年坡地裸露率變化，建立各網格範圍內之地文脆弱度，再整合QPE雷達降雨網格資料與地文脆弱度，提出坡地降雨致災熱區風險評估指標，並建立具視覺化之網格式警戒模式。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精度之驗證。

二、材料與方法

(一) 研究試區

本研究係以高雄市六龜區為驗證案例，同時採用建立已逾10年，空間解析度較高的QPESUMS網格式雷達降雨資料取代地面自動雨量站，並直接以QPESUMS網格作為警戒發布單元。本研究試區內計涵蓋147個QPE網格，其空間分布及地形坡度如圖1。

(二) 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，亦即視降雨為危害(Hazard)，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(4)：

$$EAR_t = I_t + EAR_{t-1} \times (0.7)^{\frac{1}{24}} \quad (4)$$

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(4)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網格均有145個雨場。惟考量在台灣引致坡地災害之雨量一般多在150mm以上(水土保持局，2017)，故本研究定義大於150mm之雨場方為具危害度之雨場，並據以定義降雨危害度指標，其程序如下：

各QPE網格均先剔除小於150mm之雨場資料後，再參照RTI模式以韋伯法計算出 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(3)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1。以位於六龜區寶來里之QPE編號110025網格為例，經刪除EAR小於150mm之雨場後，餘43個雨場(亦即平均1年3.6個致災性雨場)，考量每年颱風襲台次數與梅雨季，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2，其中 EAR_{max} 為該網格雨場資料之歷史最大EAR，發生2009年8月莫拉克颱風。

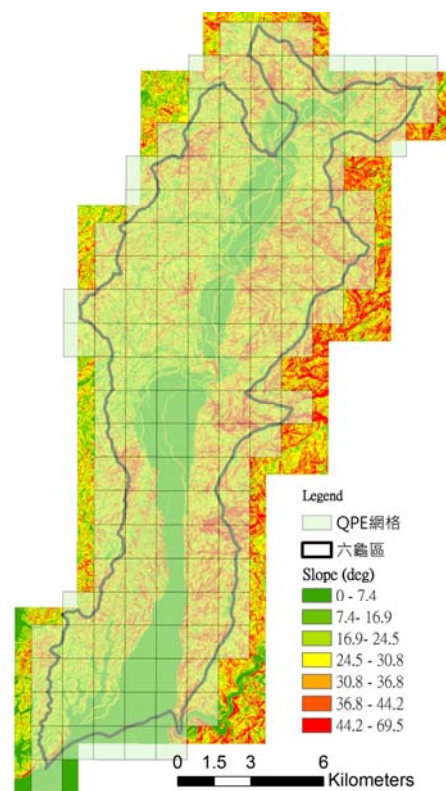


圖1 高雄市六龜區範圍及QPE網格分布

表1 降雨危害度指標 H_R 之定義

危害度等級	1	2	3	4	5
意義	低	中	中高	高	極高
指標 H_R	$<EAR_{30}$	$EAR_{30} \sim EAR_{60}$	$EAR_{60} \sim EAR_{90}$	$EAR_{90} \sim EAR_{95}$	$>EAR_{95}$

表2 QPE編號110025網格降雨危害指標值 H_R 對應值

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

(三) 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。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2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0.1公頃，本研究處理後所得之各每年度新生崩塌地面積如小於0.1公頃者，均視為無新生崩塌。

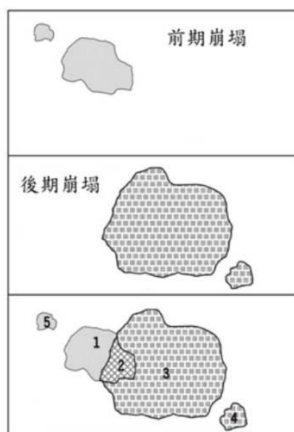


圖2 崩塌地變遷及分類示意(陳俞旭, 2008)

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3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。

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)與平均新生崩塌面積(A_a)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(5)：

$$F_P = \begin{cases} N_n \times \log A_a & \text{if } N_n > 0 \\ 0 & \text{if } N_n = 0 \end{cases} \quad (5)$$

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4。分級後各網格之地文脆弱度指標，如圖3。

表4 研究區內地文脆弱度指標 F_P 分布特徵與分級

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

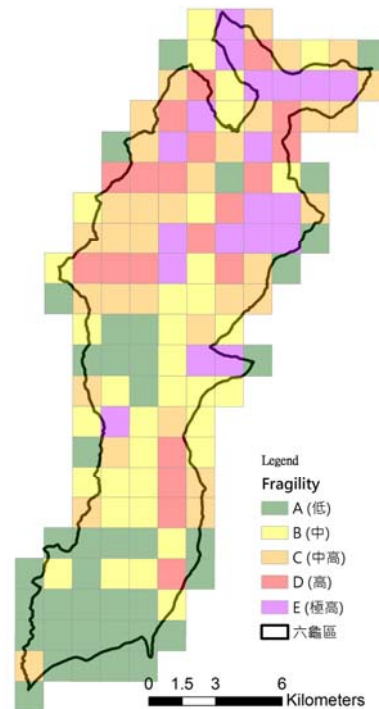


圖3 各網格之地文脆弱度指標

(四) 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地文條件。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「降雨致災風險等級指標」(Risk index)

of rainfall-induced hazard, R_h)，詳如圖4。其中，由於前已考量在台灣引致坡地災害之雨量一般多在150mm以上，故圖4中EAR小於150mm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4中若EAR大於1000mm時，均自動調昇一個致災風險等級。

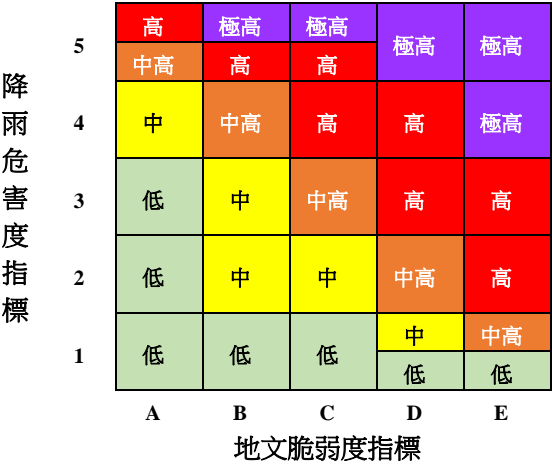


圖4 以矩陣法定義之降雨致災風險等級指標(R_h)

三、結果與討論

1. 地文脆弱度指標驗證

為評估式(5)及表4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「極高」與「高」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高度脆弱的地區(如表5)；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5 地文脆弱度指標驗證結果

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

2. 降雨致災風險等級指標驗證

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「極高脆弱度」、「高脆弱度」、「中高脆弱度」、「中脆弱度」及「低脆弱度」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5，極高脆弱度至中脆弱度代表

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5。

由表5之結果呈現，本研究所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5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45%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5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GIS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5 歷年降雨致災風險等級與新生崩塌發生率(1/5)

QPE編號110025 (極高脆弱度)	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 ($EAR_{30} < EAR < EAR_{90}$)	15	8	53.3
中高 ($150mm < EAR < EAR_{30}$)	20	0	0.0
中 (Undefined)	-	-	-
低 ($EAR < 150mm$)	106	0	0.0

$EAR_{30}=313mm$ $EAR_{60}=525mm$ $EAR_{90}=738mm$ $EAR_{95}=815mm$

表5 歷年降雨致災風險等級與新生崩塌發生率(2/5)

QPE編號108260 (高脆弱度)	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 ($150mm < EAR < EAR_{30}$)	20	0	0.0
低 ($EAR < 150mm$)	104	0	0.0

$EAR_{30}=289mm$ $EAR_{60}=477mm$ $EAR_{90}=665mm$ $EAR_{95}=894mm$

表5 歷年降雨致災風險等級與新生崩塌發生率(3/5)

QPE編號109142 (中高脆弱度)	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 ($EAR > 1000mm$)	1	1	100.0
高 ($EAR > EAR_{90}$)	2	2	100.0
中高 ($EAR_{60} < EAR < EAR_{90}$)	6	2	33.3
中 ($EAR_{30} < EAR < EAR_{60}$)	11	0	9.1
低 ($EAR < EAR_{30}$)	125	0	0.0

$EAR_{30}=321mm$ $EAR_{60}=529mm$ $EAR_{90}=738mm$ $EAR_{95}=880mm$

表5 歷年降雨致災風險等級與新生崩塌發生率(4/5)

QPE編號107377 (中脆弱度)	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 ($EAR > 1000mm$)	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

$EAR_{30}=315mm$ $EAR_{60}=532mm$ $EAR_{90}=748mm$ $EAR_{95}=904mm$

表5 歷年降雨致災風險等級與新生崩塌發生率(5/5)

QPE編號102521(低脆弱度)	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

EAR₃₀=253mm EAR₆₀=392mm EAR₉₀=531mm EAR₉₅=844mm

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，係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；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崩塌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. Wiczonek, 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, pp. 325-362
2. 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)，pp.44-55。
3. 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。
4. 水土保持局(2016)，「105年土石流警戒基準值檢討與更新」。
5. 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。
6. 水土保持局(2017)，歷年重大土砂災例。
7. 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。

表3 各QPE網格範圍內之每年新生崩塌地面積及相關統計(摘錄)

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(m²)

六龜區寶來里 QPE編號110025 (極高脆弱度)

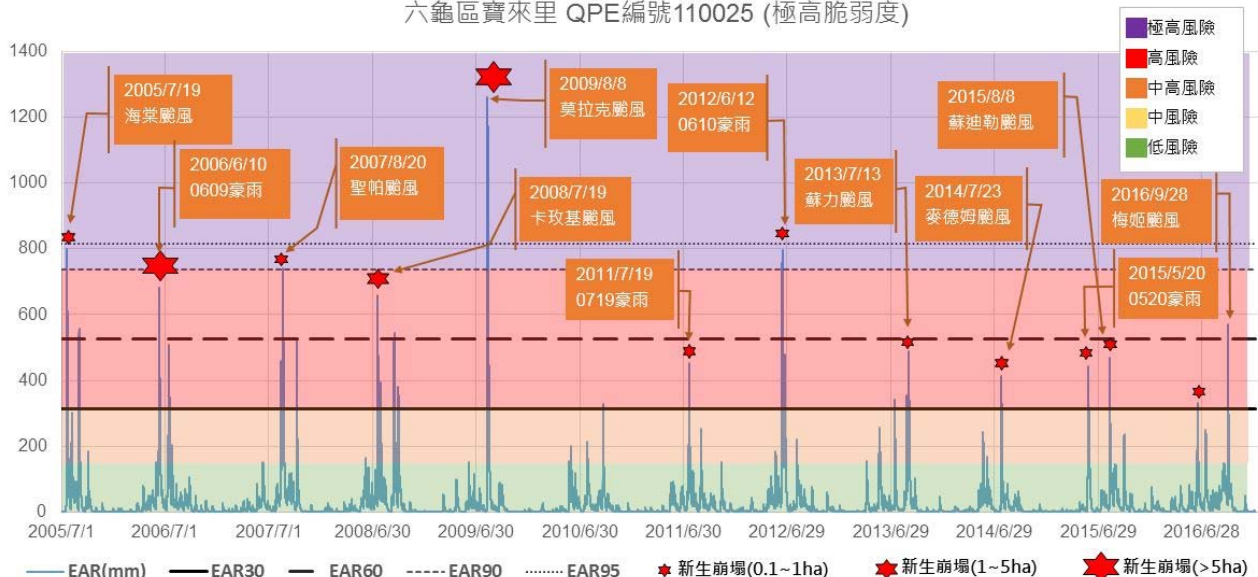


圖 5 歷年降雨事件期間之降雨致災風險等級變化情形與新生崩塌事件之時間序列圖(1/4)

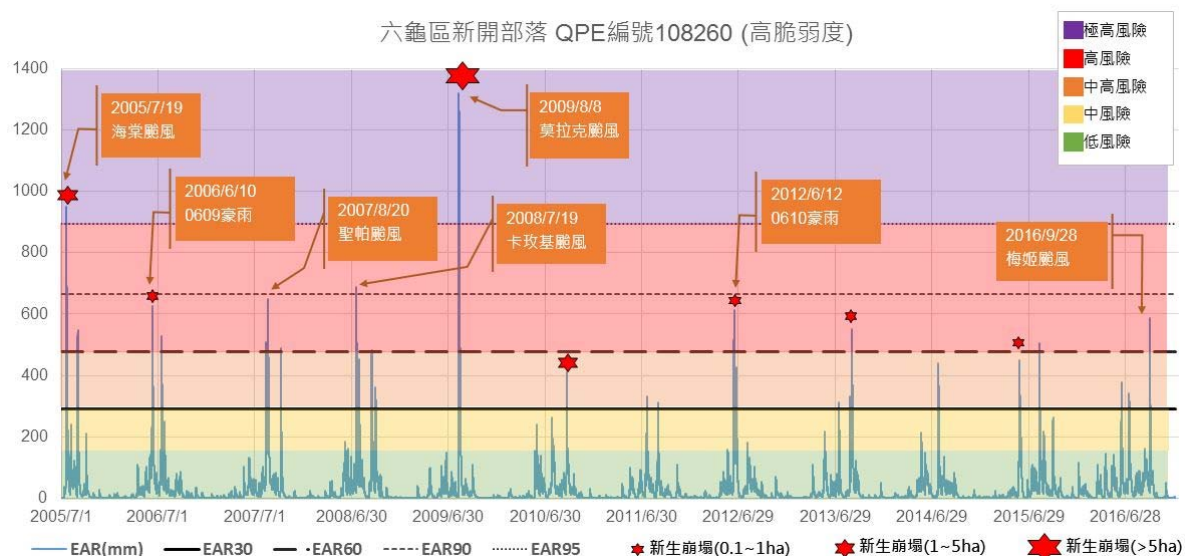


圖 5 歷年降雨事件期間之降雨致災風險等級變化情形與新生崩塌事件之時間序列圖(2/4)

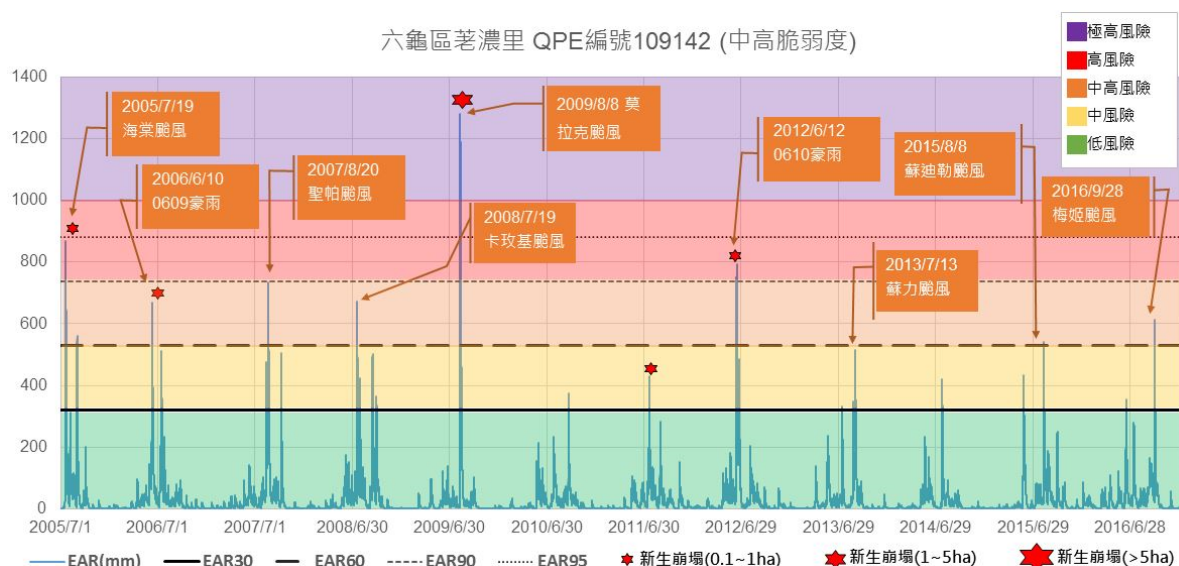


圖 5 歷年降雨事件期間之降雨致災風險等級變化情形與新生崩塌事件之時間序列圖(3/4)

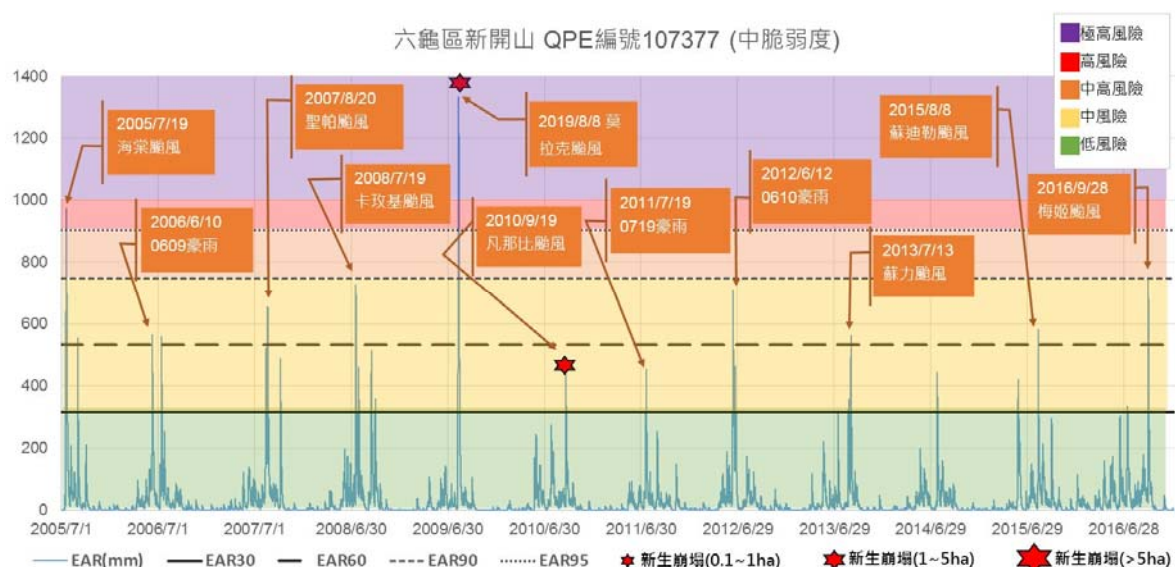


圖 5 歷年降雨事件期間之降雨致災風險等級變化情形與新生崩塌事件之時間序列圖(4/4)