

使用 QPESUMS 雨量資料建立崩塌災害預警模式

陳振宇^{[1]*} 劉維則^{[1][2]} 許家祥^[3]

摘 要 台灣自 2005 年起採用 RTI 模式設定各鄉鎮雨量警戒值，並建立土石流紅黃警戒發布機制，已有效降低民眾傷亡。惟 RTI 模式之有效累積雨量係以逐日折減方式納入前七日之降雨，在某些特殊型態雨場常導致警戒誤報率偏高。為此，本研究提出以逐時折減之有效累積雨量修正公式，並建立以 QPESUMS 網格為警戒發布單元之坡地災害預警模式；以 2015 年蘇迪勒颱風重創之烏來山區為例，本模式可有效預測災害發生之時間及區域，並以視覺化方式呈現降雨致災熱區，有助於各級政府應變中心之災情預判與決策分析。

關鍵詞：崩塌、土石流、預警系統、QPESUMS、有效累積雨量。

A Rainfall-based Warning Model for Predicting Landslides Using QPESUMS Rainfall Data

Chen-Yu Chen^{[1]*} Wei-Ze Liou^{[1][2]} Chia-Hsiang Hsu^[3]

ABSTRACT The Rainfall Triggering Index (RTI) model is adopted to set up the critical rainfall for each township since 2005 in Taiwan, and the debris-flow warning system based on the RTI model is successful in reducing casualties. However, the antecedent rainfall calculation using the deduction coefficient of "t" days in the RTI model leads to a false alert rate higher under some rainfall patterns (e.g., long-term duration and lower rainfall intensity). This study suggests a modified method to calculate the antecedent rainfall and effective accumulated rainfall to solve the above-mentioned problems. We also establish a new warning model, which uses the QPESUM data for the past decade, the identified results of remote-sensing image, and the disaster records, to predict landslides. In the case study of the Wulai District during Typhon Soudelor in 2015, the new warning model offers good prediction of the times and locations of landslides. This study also proposes a new platform which displays the rainfall-induced disaster hot zones. These findings can help government officials to make appropriate decisions during emergency response.

Key Words: Landslide, debris flow, warning system, QPESUMS, effective accumulated rainfall.

一、前 言

儘管造成坡地災害的主要誘因包含降雨、地震、風化、火山爆發、融雪、人為擾動等，限於監測預警後的反應時間及實務操作的可行性，目前國內外多僅針對降雨驅動的坡地災害進行相關預警，並使用雨量作為主要警戒指標（陳振宇，2013；Osanai et al, 2010；Wieczorek and Glade, 2005）。事實上，建立以雨量為基礎之警戒模式，其關鍵在於如何選用適當的雨量指標，以及如何建立警戒臨界值（CL, Critical line）（國土交通省河川局砂防部等，2005；國土交通省國土技術政策綜合研究所，2001；Caine, N., 1980）。例如，日本自 2005 年起採用的徑向基底函數網路（Radial Basis Function Network, RBFN）模式，係使用 60 分鐘累積雨量及土壤雨量指數等二項雨量指標建立警戒模式（Osanai et al, 2010）；相對而言，歐美地區的警戒模

式，則較常使用降雨強度及降雨延時作為雨量指標（Baum and Godt, 2010；Aleotti, 2004；Keefer et al., 1987）。

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（陳振宇，2008；詹錢登、李明熹，2004）。其計算及警戒值設定方式簡述如下：

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

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

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 原先採用 0.8，經

[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, Taiwan, R.O.C.

[2] 財團法人農業科技研究院

Agricultural Technology Research Institute, Taiwan, R.O.C.

[3] 逢甲大學地理資訊系統研究中心

GIS Research Center, Feng Chia University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

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

多年實務應用檢討後,於 2014 年起已調整為 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採用該雨場最大雨量強度發生時刻之值。

早期 RTI 模式在設定警戒值時,需仰賴明確的災例資料,以設定合適之警戒值。惟因多數地區之災例蒐集不易,近年來 RTI 模式已改為「以雨場發生機率為主,災例資料為輔」之警戒值設定方式。其具體作法為: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 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,例如南投縣信義鄉為 250 mm、苗栗縣泰安鄉為 400 mm、花蓮縣玉里鎮為 600 mm(土石流防災資訊網, 2016)。台灣歷年土石流警戒基準值使用範圍之沿革如表 1。

依據聯合國國際減災策略組織 (UNISDR) 之定義:「預警系統係能及時發布及傳遞有意義的警戒資訊,使民眾、社區及組織能感受災害之威脅,俾能在時間充份的情況下採取適當的準備與行動,以降低受災的可能性」(UNISDR, 2009)。同時, Thiebes(2012) 亦指出一個好的預警系統必須能辨識及估計出災害風險,並提供明確易懂的警戒訊息,以促使民眾作出主動避難的反應。因此,一個完整的預警系統必須同時包含精確的警戒模式及明確易懂的發布機制 (陳振宇, 2013)。以日本為例,其自 2005 年起警戒模式統一採用 RBFN 模式,而在警戒發布機制方面,各都道府縣除使用傳統之表單方式通知所屬市町村外,亦於網站上以 1~5 km 之網格並採 4 個警戒等級方式呈現各地區之淺層崩塌及土石流等坡地災害風險,如圖 1(Osanai et al, 2010);此外,日本氣象廳亦自 2013 年起,開始於其官網上即時提供空間尺度為 5 km,分為 5 個警戒等級,每 10 分鐘更

新一次的全日本「土砂災害警戒等級網格資訊 (土砂災害警戒判定メッシュ情報)」(日本氣象廳, 2016),疊合各地平時已調查完成包含崩塌、地滑、土石流等的坡地災害潛勢資料(稱為土砂災害警戒區域),即可完整呈現各災害潛勢地區之致災風險等級,並配合其建議之因應作為進行相關防災工作,如圖 2 (日本內閣府, 2015)。相對而言,台灣目前採用之警戒發布方式僅針對個別之土石流潛勢溪流發布黃色及紅色警戒,尚未納入淺層崩塌之警戒資訊,亦未提供可即時呈現全台各地區坡地災害風險等級之圖形化或網格化之整體資訊。

綜上,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。儘管近年來中央氣象局及水土保持局等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,且雨量站設置時常遷就於電力及施工與維護之便利性,多位於土石流潛勢溪流下游臨近聚落處,單純使用地面雨量站資料未必能真實反應上游致災之降雨情形。
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。因此,對於間歇性之降雨(例如雲林古坑華山雨量站, 2016/6/18~ 6/21 每日下午固定之短延時降雨),其有效累積雨量便會產生較突兀之階梯式下降的情形,如圖 3。此外,由於逐日折減之折減速度較慢,對於長延時連續降雨,則常易發生動輒即逾警戒值之情形。如圖 4。同理,逐日折減也易造成颱風豪雨結束逾 24 小時以上,但有效累積雨量仍居高不下之情況,對於土石流警戒解除時機之判讀上,也常造成困擾。
3. 目前 RTI 模式在設定各地區警戒基準值時,必須先將該地區之參考雨量站的歷年雨量資料作適當的雨場分割;惟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),進而影響 RTI 模式之統計結果及土石流警戒基準值。
4. 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警戒系統所面臨的問題,提出相應之改進方案,並嘗試建立一可適合用於崩塌及土石流預警,且具視覺化之網格式警戒模式。同時,本研究將以 2015 年蘇迪勒颱風期間受災嚴重之烏來山區為例,進行本警戒模式於空間域及時間域預測精度之驗證。

表 1 台灣歷年土石流警戒基準值 (R_c) 使用範圍

Table 1 The critical accumulated rainfall (R_c) for debris flow in Taiwan

年度	2005	2006	2007~2008	2009	2010~2012	2013~2016
土石流警戒基準值 (mm)	200~350	200~450	250~550	250~600	200~600	250~600

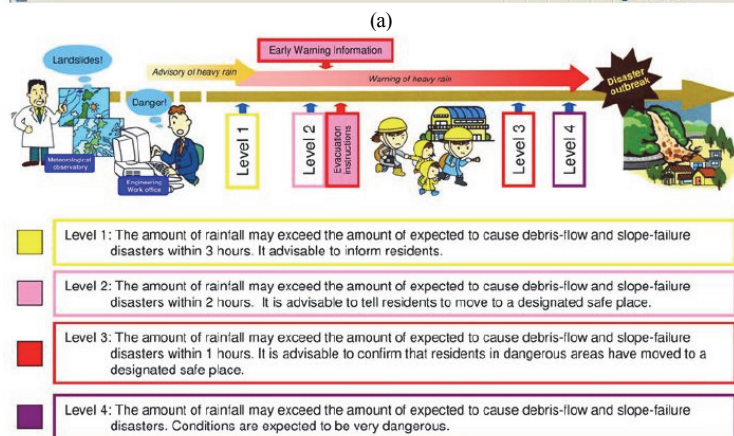
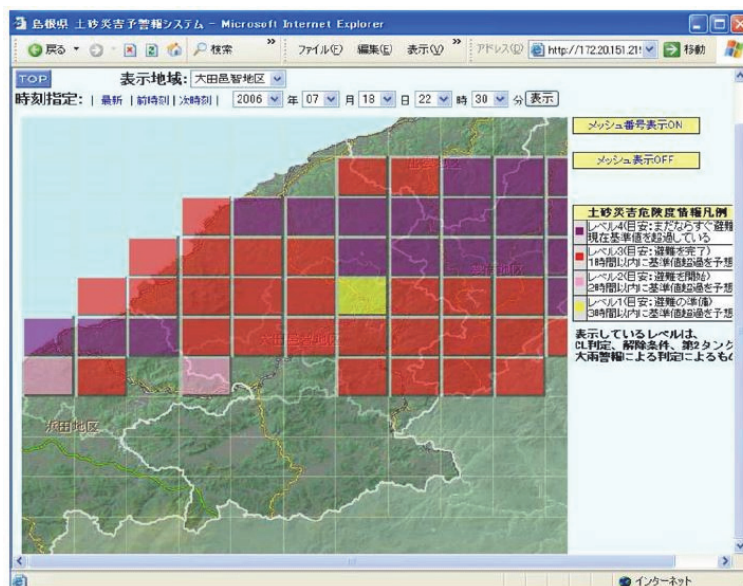


圖 1 (a) 日本土砂災害警戒發布及呈現方式 (b) 不同顏色之警戒等級及其建議之應變作為 (Osanai et al, 2010)

Fig.1 (a) The format in which early-warning information is disseminated from local government. (b)The colors are coded to show the condition indicated by the danger level, and the action that is recommended be taken. (Osanai et al, 2010)

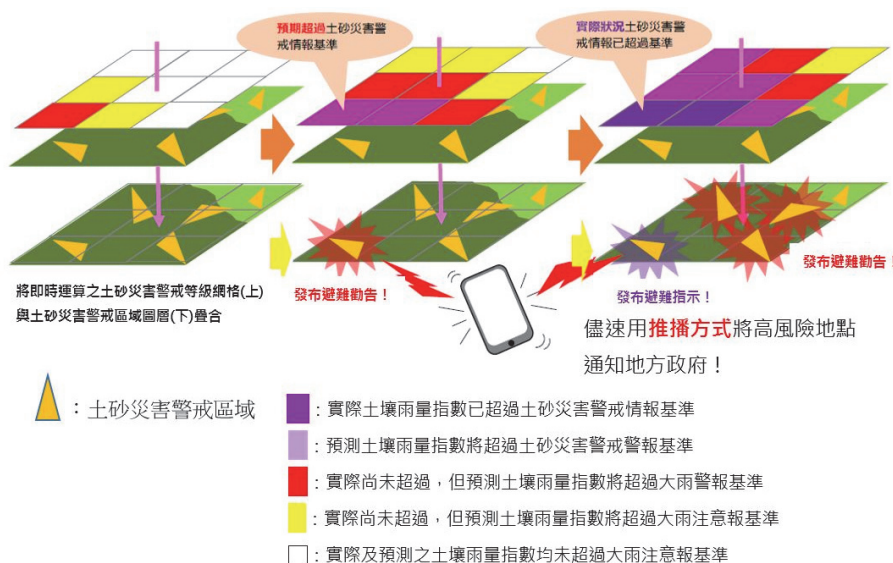


圖 2 將土砂災害警戒等級網格與土砂災害警戒區域疊合結果，以推播方式即時通知地方政府示意圖 (日本內閣府，2015)

Fig.2 The concept of Pushing the warning information which superimposed the sediment disaster potential area and risk level meshes to the local government (Cabinet Office, Government of Japan, 2015)

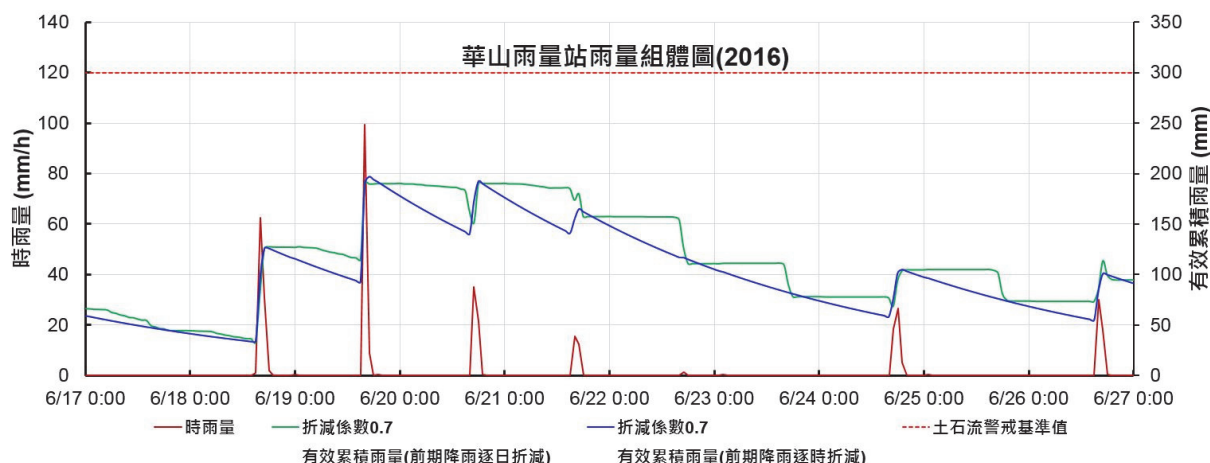


圖 3 間歇性短延時強降雨於不同有效累積雨量計算方式下之差異

Fig.3 The difference of different formula for effective accumulated rainfall during intermittent short-duration heavy rainfall

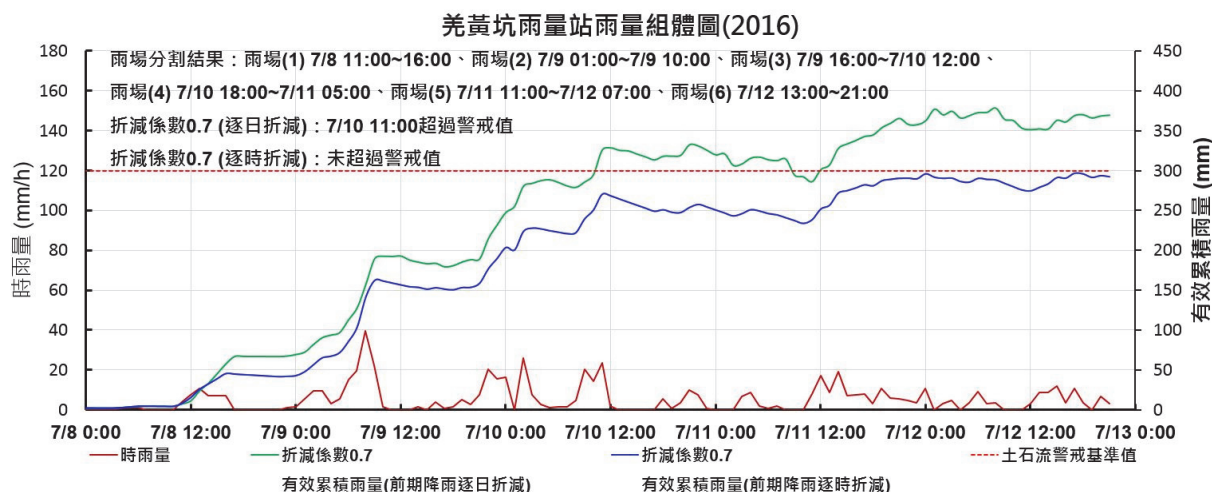


圖 4 長延時連續降雨於不同有效累積雨量計算方式下之差異

Fig.4 The difference of different formula for effective accumulated rainfall during intermittent long-duration heavy rainfall

二、材料及方法

為提昇雨量資料之空間解析度，本研究將採用建立已逾 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；同時，為解決現行 RTI 模式對於前期雨量處理方式之疑義，本研究將提出全新且計算快速的逐時折減之有效累積雨量計算公式。此外，不同於現行 RTI 模式在設定各地區警戒基準值時必須先進行雨場分割，本研究提出之警戒雨量設定及調整機制毋需此一步驟。同時，藉由林務局每年發布之航遙測影像崩塌地判識成果，與本研究建立之崩塌預警模式預測結果進行比較，以驗證本崩塌預警模式之可行性。研究流程如圖 5，以下分別說明：

1. 逐時折減之有效累積雨量計算方式

現行 RTI 模式所使用之有效累積雨量係考量前七日之前期降雨，且以 24 小時為折減周期，折減係數採 0.7 之方式，

以幕級數方式逐日折減，例如前一日之雨量折減 0.7，前二日之雨量折減 $(0.7)^2$ ，餘類推，如式 (2)。惟此種折減方式在間歇性的短延時降雨、長延時降雨以及颱風豪雨過後之警戒解除時機判斷上，均有其不足之處。為此，在折減周期與折減係數維持不變之前提下，本研究提出以「逐時折減」為概念之有效累積雨量修正公式，如式 (4)。

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

其中 I_t 為目前的時雨量， R_{t-1} 為 1 小時前的有效累積雨量。以式 (4) 之修正公式重新計算間歇性的短延時降雨以及長延時降雨之效果，如圖 3、圖 4。另對於颱風豪雨過後之警戒解除時機判斷之效果，如圖 6。綜上，本研究所提出之有效累積雨量修正公式已能初步解決前述問題，且相較於式 (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。

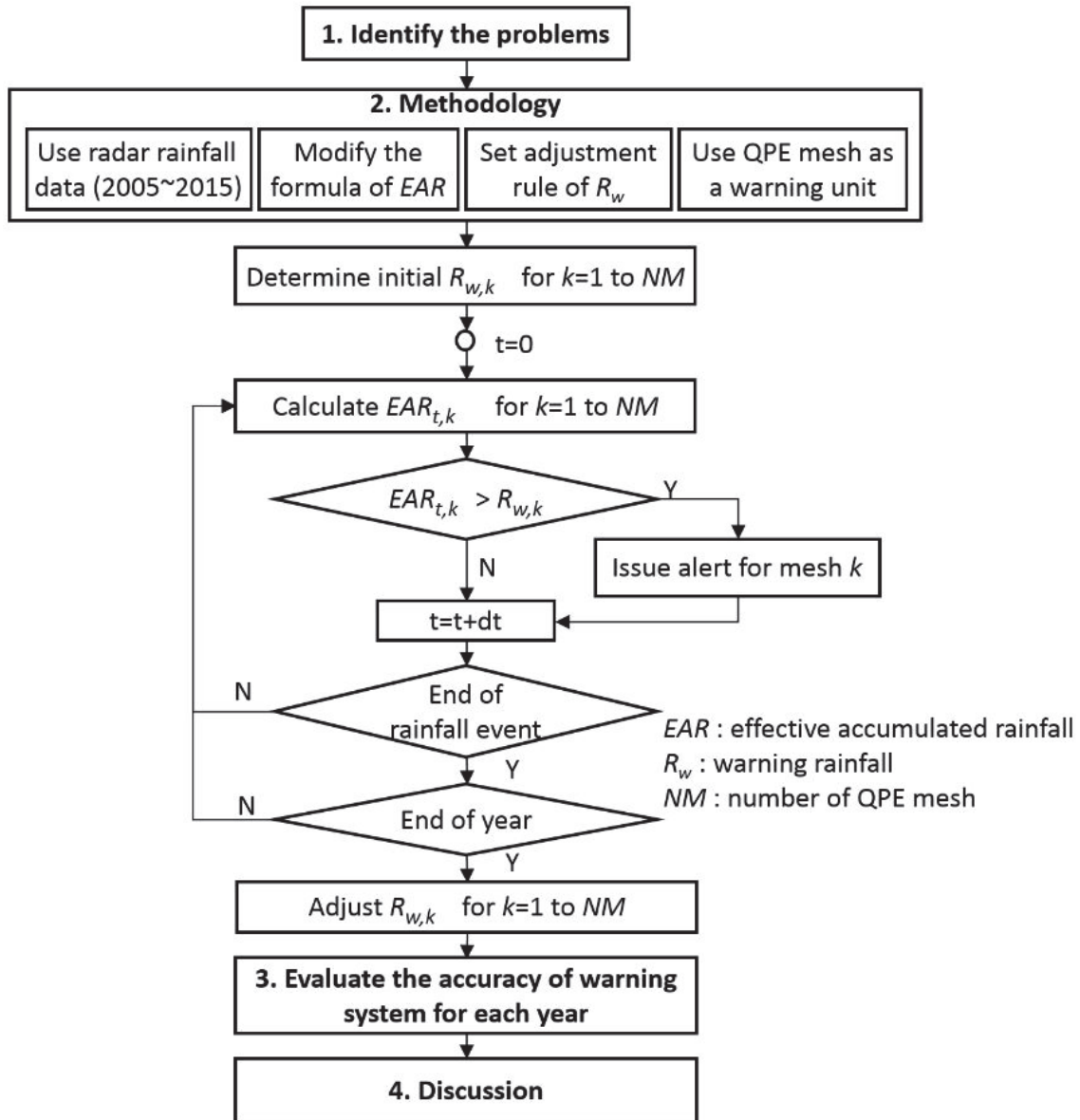


圖 5 研究流程圖

Fig.5 Flow chart of the study process.

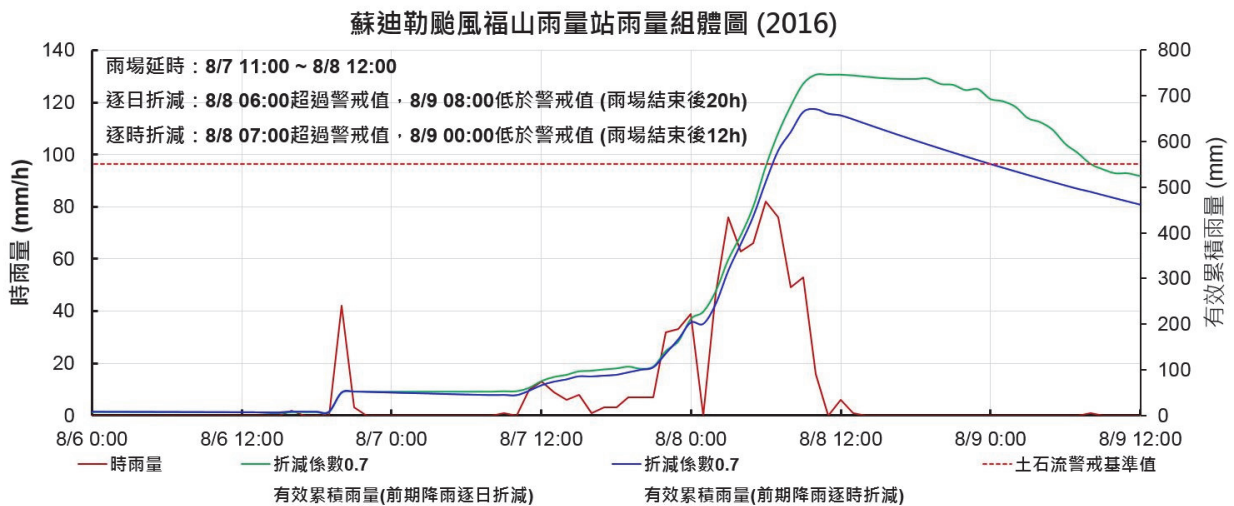


圖 6 不同有效累積雨量計算方式下警戒解除時機之差異

Fig.6 The difference of the time of lifting warning under different formula for effective accumulated rainfall

2. QPESUMS 網格雨量資料

劇烈天氣監測系統 (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors, QPESUMS) 係中央氣象局為加強對於颱風、梅雨、雷暴等災害性天氣的監測與極短期預報能力，與農委會水土保持局、經濟部水利署及美國劇烈風暴實驗室自 2002 年起共同合作整合雷達、衛星、雨量與閃電觀測資料，並結合地理資訊所發展的系統。其可提供每 10 分鐘更新一次之即時性劇烈天氣監測資訊、過去 72 小時內高解析度之定量降水估計、閃電分析及未來 0~1 小時定量降雨預報等產品，亦提供圖表化的雨量站與氣象站觀測資訊顯示(張保亮, 2011)。本研究採用 QPESUMS 自 2005 年 7 月開始對外提供之 QPE(Quantitative Precipitation Estimation) 定量降雨估計資料，其資料網格之空間解析度約為 1.3 km x 1.3 km；同時本研究使用 2005/07/01~2015/12/31 雨量資料，並採用式(4) 逐時折減方式計算出各網格自 2005/07/01 起每小時之有效累積雨量。為便於區隔與說明，以下將用 EAR(Effective Accumulated Rainfall)來表示以逐時折減修正公式計算之有效累積雨量。

3. 研究區基本資料

本研究選用新北市烏來區作為研究區，面積約為 321 km²，涵蓋 237 個 QPE 網格，居民 6,177 人，轄內目前計有 6 條水土保持局公布之土石流潛勢溪流。為標定研究區內每年坡面崩塌變化情形，本研究使用 2005~2015 林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層，同時，個別崩塌及土石流災害事件之發生時間則參考 2006~2015 年水土保持局發布之重大土砂災例報告(土石流防災資訊網, 2016)。依據前揭資料顯示，研究區內於 2015 年蘇迪勒颱風造成之坡地災害最為顯著，如圖 7。

4. 警戒發布單元及崩塌事件判定原則

本研究採用 QPE 網格作為警戒發布單元，且所建立之警戒模式僅針對颱風豪雨期間造成之群發型崩塌及土石流等坡地災害發布警戒，不考慮地震造成之坡地災害事件，亦不考慮局部地區於非降雨期間發生之零星崩塌事件。一般而言，同一區域內淺層崩塌事件之發生時間，大多早於土石流(李鎮洋等, 2011)，因此本研究建立之警戒發布時機仍以淺層崩塌為優先考慮對象；其中對於各年度各 QPE 網格內是否發生崩塌事件之判定原則，係使用林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層，並以某網格內有新生(擴大)崩塌時，則定義該網格發生崩塌事件。另，對於崩塌事件發生時間之判定原則，則採如有明確災害紀錄者，從之；如無，則假設崩塌發生在該年度之最大 EAR 的發生時刻。

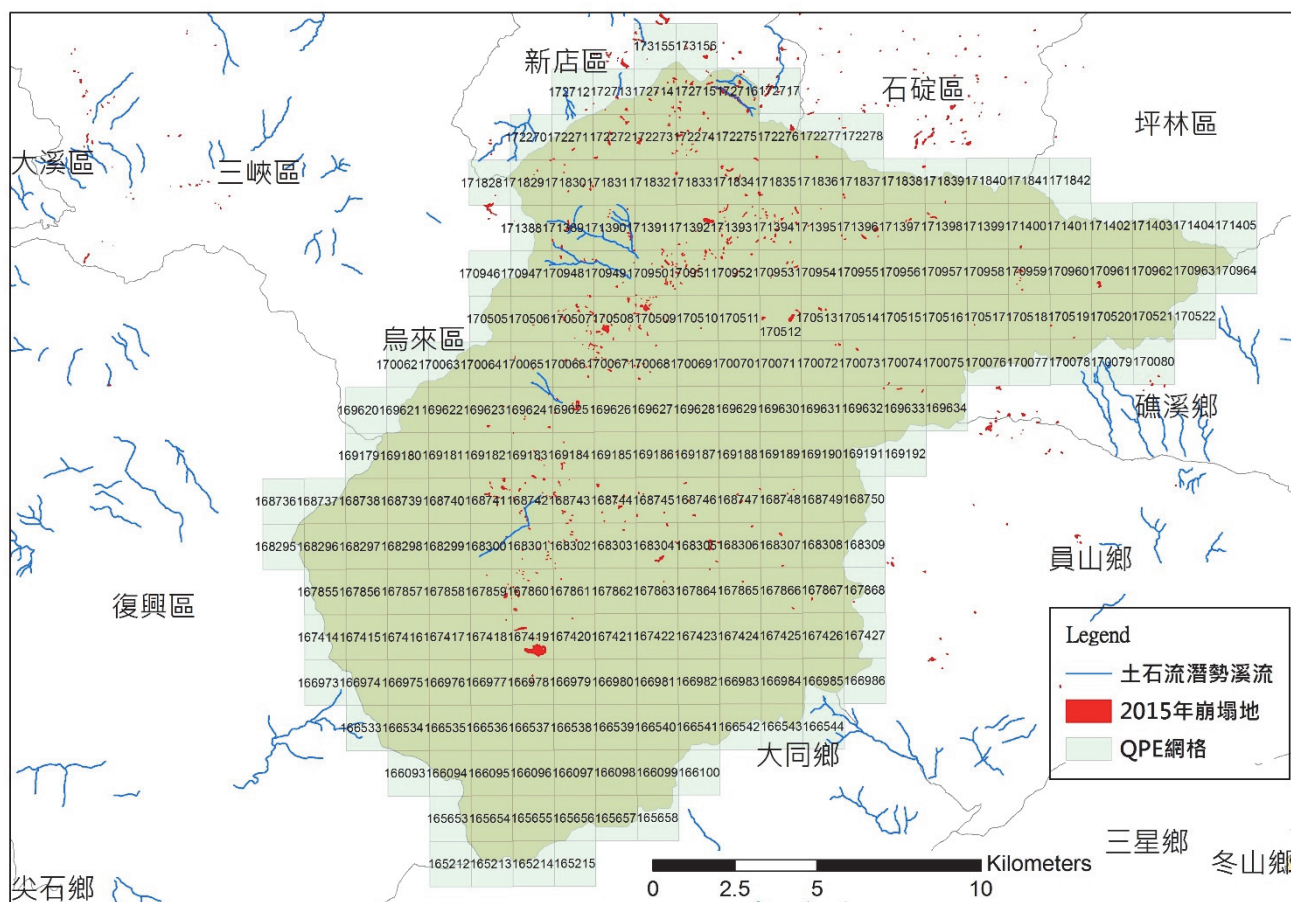


圖 7 新北市烏來區範圍內之 QPE 網格與 2015 年崩塌地分布情形

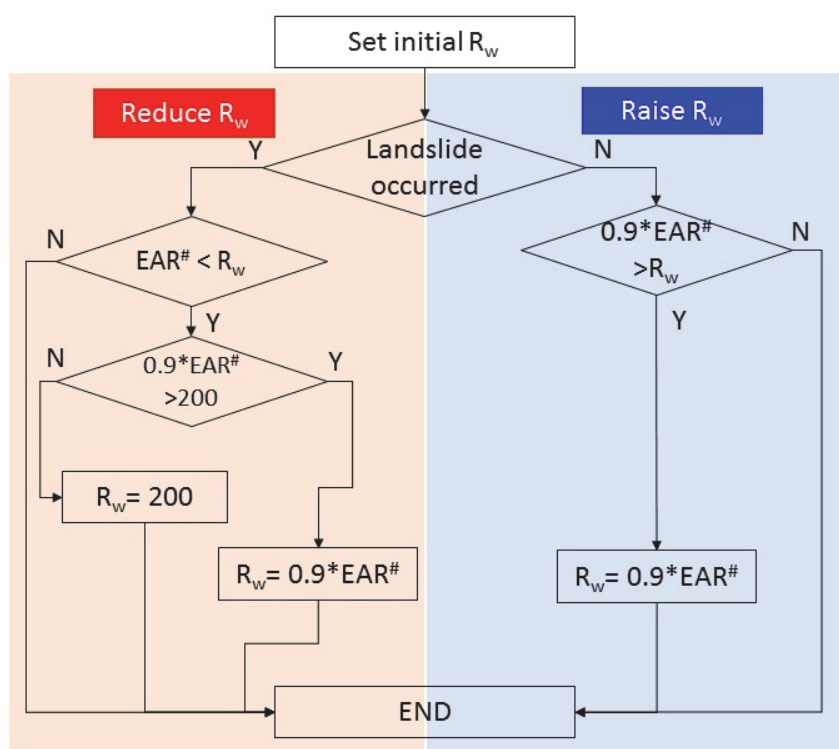
Fig.7 Distribution of QPE meshes and the landslides in 2015 in the Wulai District of Xinbei Municipality

5. 警戒雨量(R_w)之設定與調整機制

由於每一個 QPE 網格均為獨立的警戒單元，亦即每一個網格都有其獨立之警戒雨量 (R_w , warning rainfall)，在設定每一網格之初始警戒雨量 R_w 時，本研究係以 QPE 資料開始對外供應的第一年 (2005 年) 作初始設定之用。其中依 2005 年崩塌圖層判定其範圍內無崩塌事件之網格，即表在該年度最大降雨情況下該網格範圍內未發生崩塌，故以 2005 年該網格最大 EAR 為 R_w 之初始值；有崩塌網格，依前揭假設 (崩塌發生在最大 EAR 發生時刻) 並考慮警戒發布及疏散所需作業時間，以 2005 年該網格之最大 EAR 的 90% 作為 R_w 初始值。同時，由於林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層無法區別各崩塌地係為地震或降雨所觸發，為避免部份非降雨導致之崩塌可能過度

拉低該網格之警戒雨量，因此本研究設有最低警戒雨量，並參考現行土石流警戒基準值之下限，設定各網格之最小警戒雨量不得低於 200 mm。實際操作時，系統將即時運算各網格之 EAR，若某網格 $EAR > R_w$ 則發布該網格為警戒區。

此外，本研究設定每年年初時，即參考前一年度之林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層及全年度 EAR 之計算結果，自動調整每個網格之警戒雨量，其基本原則為：如前一年度某網格之最大 EAR 的 90% 已逾其警戒雨量 R_w ，但未發生崩塌，即表該網格可承受較大的雨場而不致發生崩塌，則調昇該網格之警戒雨量 R_w ；反之，如某網格在前一年度有發生崩塌，且發生時之 EAR 小於警戒雨量 R_w ，則必須調降其警戒雨量值。詳細之警戒雨量調整規則，詳如圖 8。



R_w : warning rainfall for each mesh

EAR : effective accumulated rainfall (R_t)

EAR[#] : if the occurring time of landslide is known, EAR[#] is the EAR at the occurring time, else EAR[#] is the max EAR during the rainfall event

$$R_t = I_t + R_{t-1} \times (0.7)^{\frac{1}{24}}$$

圖 8 各 QPE 網格之坡地災害警戒雨量調整規則

Fig.8 Adjustment rules of slope disaster warning rainfall for each QPE mesh

三、結果與討論

依據前揭修正後之有效累積雨量計算公式與警戒值設定與調整規則，本研究將 2006-2015 年烏來區內各 QPE 網格資料進行警戒發布預報，並分別以空間域及時間域檢驗警戒預報成果：

1. 結果

(1) 空間域精度檢驗

為驗證本研究提出之警戒模式對於坡地災害發

生地點之預測能力，亦即空間域之精度檢驗，本研究以 QPE 之網格為單元，對照林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層，逐一檢視各年度各網格是否已達警戒發布標準 ($EAR > R_w$)，以及各網格內實際崩塌情形。為客觀評估本研究之預測結果，此處分別定義「正判率、誤判率及漏判率」等三項評估指標，詳如表 2。本研究以 2005 年之資料為初始值，並依圖 8 之警戒雨量調整規則，逐年檢視 2006~2015 年計 10 年之警戒發布成效詳如表 3。經統計，本警戒模式應用於新北市烏來區近 10 年之平均正

判率為 69.5%、誤判率為 24.1%、漏判率為 6.4%。

表 2 坡地災害預警模式成果評估指標－正判率、誤判率及漏判率之定義

Table 2 The definition of positive rate, false positive rate and missing rate for warning system of sediment disaster

	警戒Y	警戒N
崩塌Y	A	B
崩塌N	C	D
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
$(A+D)/(A+B+C+D)$	$C/(A+B+C+D)$	$B/(A+B+C+D)$

表 3 2006~2015 年警戒發布結果之正判率、誤判率及漏判率

Table 3 The results of positive rate, false positive rate and missing rate for warning system during 2006~2015

2006	警戒Y	警戒N	2007	警戒Y	警戒N
崩塌Y	0	35	崩塌Y	27	9
崩塌N	1	201	崩塌N	127	74
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)	正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
84.8	0.4	14.8	42.6	53.6	3.8
2008	警戒Y	警戒N	2009	警戒Y	警戒N
崩塌Y	35	5	崩塌Y	12	18
崩塌N	162	35	崩塌N	8	199
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)	正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
29.5	68.4	2.1	89.0	3.4	7.6
2010	警戒Y	警戒N	2011	警戒Y	警戒N
崩塌Y	15	7	崩塌Y	11	24
崩塌N	25	190	崩塌N	6	196
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)	正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
86.5	10.5	3.0	87.3	2.5	10.1
2012	警戒Y	警戒N	2013	警戒Y	警戒N
崩塌Y	21	3	崩塌Y	4	8
崩塌N	151	62	崩塌N	9	216
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)	正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
35.0	63.7	1.3	92.8	3.8	3.4
2014	警戒Y	警戒N	2015	警戒Y	警戒N
崩塌Y	2	20	崩塌Y	71	23
崩塌N	0	215	崩塌N	81	62
正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)	正判率 (%)	誤判率 (%)	漏判率 (%)
91.6	0.0	8.4	56.1	34.2	9.7

(2) 時間域精度檢驗

良好的預警系統不僅要能預測災害發生地點，尚須於災害發生前提出預警。由於歷年烏來地區之坡地災害有明確發生時間紀錄者，僅 2015 年蘇迪勒颱風時水土保持局建立之重大土砂災害資料（土石流防災資訊網，2016），本研究即以此資料進行時間域精度之驗證。以 8 月 8 日 6 時發生於烏來瀑布公園旁之崩塌災害為例（TWD97 X:305643 Y:2749295，崩塌面積約 33,000 平方公尺，造成民宅建物 2 棟，道路 110 公尺毀損），本研究建立之警戒模式於災害前 6 小時即針對此處所在之網格發布警戒，且同年度之杜鵑颱風時此網格範圍內並未新增災情，而本警戒模式亦未發布警戒，如圖 9。另一案例為 8 月 8 日 6 時發生於信賢里編號新北 DF103 之

土石流潛勢溪流災情，該處災害造成烏砂溪橋上游之大納度假農場多間木屋及餐廳等計 14 間房舍遭土石流毀損；本研究建立之警戒模式亦於災害前 6 小時即針對此地區之網格發布警戒，且同年度之杜鵑颱風此網格範圍內並未新增災情，而本警戒模式亦未發布警戒，如圖 10。

2. 討論

(1) 現行 RTI 模式雨場分割及有效累積雨量計算方式之合理性

現行國內使用之 RTI 模式在建立警戒基準值時，必須先分割雨場，且僅考量前七日之前期雨量。然而，雨場究竟應如何分割才合理，實難有一致性的共識，例如台灣與日本使用之雨場分割方式就差異甚大（水土保持局，2016；国土交通省国土技術政策総合研究所，2001）。此外，前期雨量只考量前七日是否足夠？如八日前，某雨場之日雨量曾達 200 mm，依現行 RTI 模式之計算方式，該筆日雨量對於目前的有效累積雨量之貢獻仍達 11.5 mm，如逕予忽略，似乎仍有討論空間。相較之下，本研究所提出之逐時折減的有效累積雨量修正公式，已將歷年所有前期雨量全部納入計算，毋需再考量取用幾天的前期雨量。同時，本研究建立之警戒雨量 R_w 設定方式（如圖 8），係直接使用每一個時刻的 EAR 與崩塌發生與否之關係，亦即在設定與調整各 QPE 網格之警戒雨量 R_w 時完全毋需涉及雨場分割的問題，因此更為簡便與客觀。

(2) 成效評估指標合宜性之探討

儘管表 2 之正判率計算方式為許多研究所採用（Chen and Fujita, 2014），但其結果之良窳實受當年度降雨多寡影響甚大。以本研究區烏來區為例，正判率逾 84% 之年度均為降雨明顯較小之年度。例如，2006、2009、2010、2011、2013、2014 年，這幾個年度於烏來區所有 QPE 網格之年度最大 EAR 平均值僅約 190~310 mm，遠小於該年全部網格之警戒雨量 R_w 平均值約 440~550 mm（如表 4），亦即大多數網格在降雨量很小的情況下不會發布警戒，而實際上也較少發生崩塌，使得這幾個年度之正判率相對較高。因此正判率似較適合用來評估預警系統是否有過度預測（亦即雨量不大且未致災，警戒卻一直發布）之情形，而本研究所建立之警戒模式依實證結果，10 年平均近 7 成之正判率，似已達成一定成效。

然而，本預警模式更重要的目標，應為在颱風豪雨期間能成功預測何處將發生坡地災害，並儘早提出預警；為此，本研究另訂一參考指標「捕捉率= $A/(A+B)$ 」，其中 A、B 之定義同表 2，各年度之捕捉率成果如表 4。明顯地，於烏來區降雨量比較大的 2007、2008、2012 及 2015 年，其捕捉率明顯較高，亦即表示該年度因降雨導致之崩塌，逾 75% 均能被本警戒模式準確預測到。反之，其餘降雨甚少之年度，由於其崩塌成因可能為地震或人為作用所致，故本警戒模式之捕捉率相對較低。

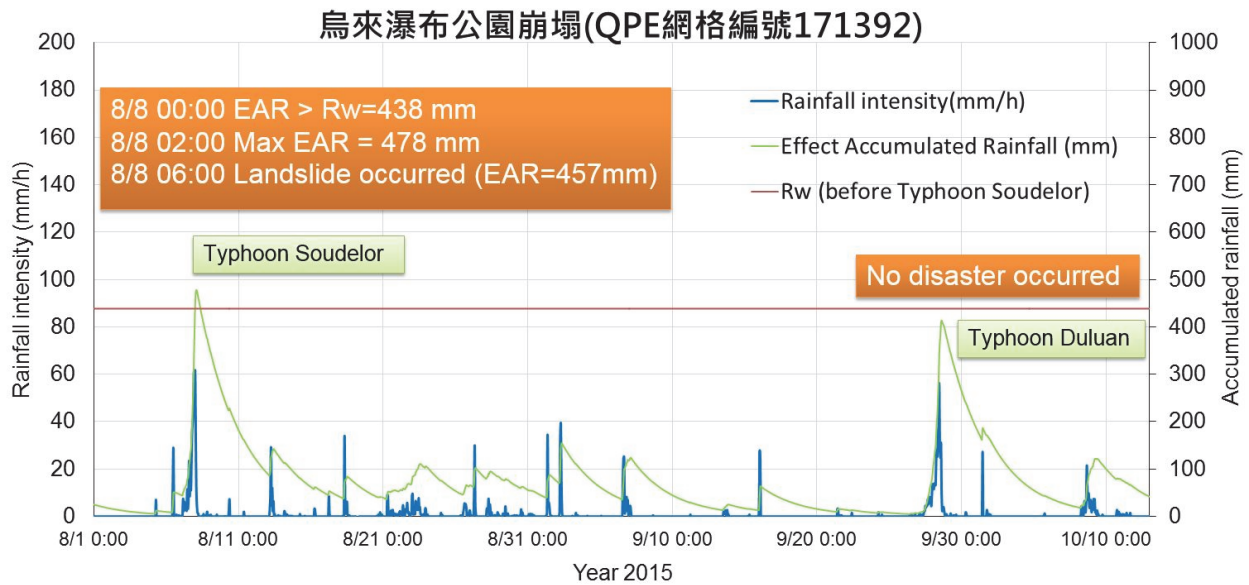


圖 9 烏來瀑布公園之崩塌發生時間與逐時有效累積雨量值變化情形

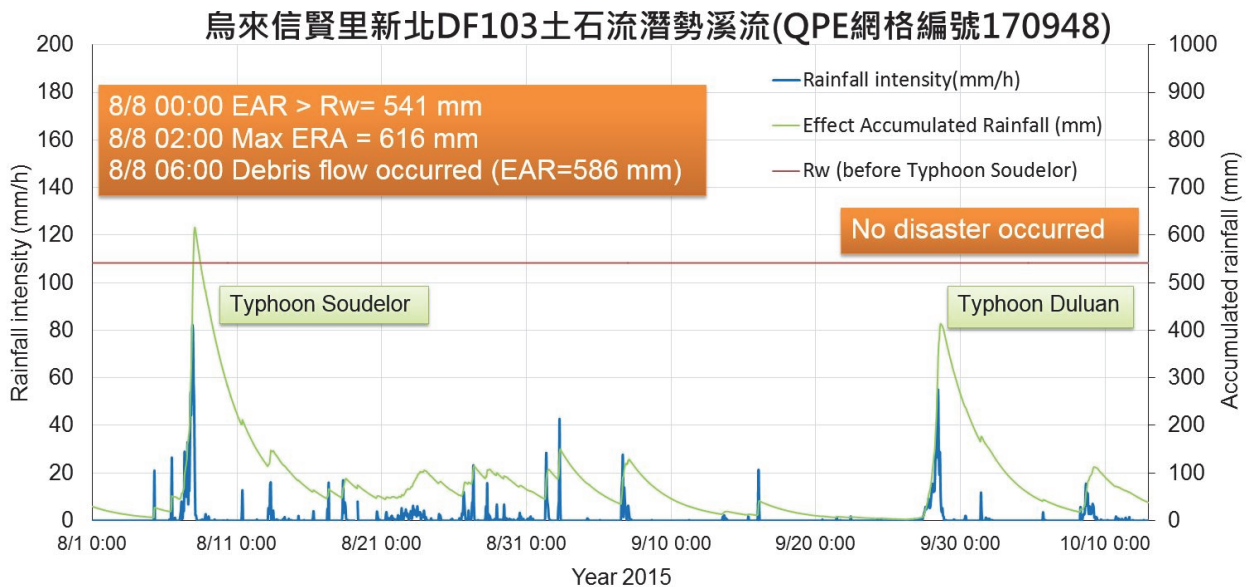
Fig.9 The occurring time of the landslide in Wulai Waterfall Park and the change of effective accumulated rainfall(EAR)

圖 10 烏來區信賢里土石流發生時間與逐時有效累積雨量值變化情形

Fig.10 The occurring time of the debris flow in Wulai District Xinxian Lane and the change of effective accumulated rainfall(EAR)表 4 2006~2015 年各年度全部網格之平均警戒雨量 R_w 、最大 EAR 平均值及捕捉率**Table 4 The results of average warning rainfall, max EAR and warning hit rate**

年度	崩塌網格數	全部網格之平均 R_w (mm)	全部網格之年度最大EAR平均值 (mm)	正判率(%)	捕捉率(%)
2006	35	441.8	195.8	84.8	0
2007	36	401.8	497.1	42.6	75.0
2008	40	463.8	577.7	29.5	87.5
2009	30	512.2	282.0	89.0	40
2010	22	492.7	303.9	86.5	68.2
2011	35	497.0	241.5	87.3	31.4
2012	24	477.3	569.4	35	87.5
2013	12	549.2	309.8	92.8	33.3
2014	22	544.1	192.0	91.6	9.1
2015	94	520.7	531.2	56.1	75.5
平均	37	490.1	377.8	69.5	50.8

註：2006 年之警戒雨量 R_w 係依據 2005 年資料所設之初始值；2007 年起之 R_w 係檢討前一年度警戒發布情形，依圖 8 之警戒雨量調整規則調整後之結果。

(3) 崩塌成因未分類造成之影響

由於本研究採用之林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層，無法區分該崩塌為降雨、地震或人為因素所造成，因此依圖 8 之警戒雨量調整規則，常會造成非降雨導致崩塌所在網格之次年度警戒雨量大幅下降。以 2006 年為例，當年度全部網格之年度最大 EAR 平均值僅 195.8 mm，但經判識有崩塌之網格卻達 35 格，其中警戒雨量 R_w 被強制調降到 200 mm 者高達 23 格，此結果亦造成 2007 年之誤判率暴增至 53.6%(即系統預測有崩塌，但實際未崩)。未來如能將崩塌圖層區分其致災原因，並事先排除非因降雨促崩部份，當能避免前揭問題，並進一步提昇預測精度。同時，由於本研究提出之警戒雨量調整規則簡單且易程式化，未來如能於每次颱風豪雨後儘速完成新增崩塌地之判識，即可快速反應及調整各網格之警戒值 R_w ，以大幅提昇防災預警之效能。此外，由表 4 之「全部網格之平均 R_w 」統計結果，2015 年烏來地區之全部網格之警戒雨量平均值約為 520 mm；此結果與當年度水土保持局所訂定之烏來區土石流警戒基準值 550 mm 相近，亦可證實本研究建立之警戒雨量調整規則之實用性。

(4) 降雨致災熱區之概念

日本近來對於各地區之土砂災害警戒指標，已由早期單純使用累積雨量逐步改用土壤雨量指數 (SWI, Soil Water Index)；例如日本氣象廳自 2013 年開始於官網提供之「土砂災害警戒等級網格資訊」，即是針對全日本每一個 5km 網格均設定不同的土壤雨量指數作為警戒值。但近期一些研究顯示，使用各網格目前之土壤雨量指數與其歷史最大土壤雨量指數之相對值作為預警指

標，效果更佳。例如，Saito and Matsuyama (2012) 使用此概念，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之預測結果。此概念係基於，如果某地區這次的降雨已逾過去 10 年的最大值，即表此地區將有較高的致災風險。沿用相同的概念，本研究嘗試將各網格之 EAR 正規化 (normalization)，並定義 N-EAR 為：

$$N-EAR = EAR / R_w \quad (5)$$

則 N-EAR 可視為該網格地區之致災風險，同時可定義不同顏色代表不同的風險等級，配合網路地圖平台之呈現，有利於地區整體災害風險之視覺化管理。圖 11 為 2016 年 9 月 15 日莫蘭蒂颱風期間台東地區 QPE 網格之 N-EAR 與坡地災害分布情形；其中地圖上呈現紫色之極高風險地區，即為莫蘭蒂颱風期間之降雨致災熱區。未來，如能將此以網格方式呈現之降雨致災熱區圖，疊合現有水土保持局已公開之土石流潛勢溪流，以及中央地質調查所已公告之山崩與地滑地質敏感區，將有助於地方政府於應變期間執行疏散避難等相關防災作為及決策研判。

(5) QPE 雨量估計值於山區之適用性

雖然近年來許多研究指出，由於山區地形遮蔽效應，QPESUMS 於山區降雨量之估計值有低估之趨勢 (周仲島等, 2015)，但由於目前 QPESUMS 已有累積 10 年以上之歷史雨量資料，且本研究所提出之方法係各 QPE 網格自行與其歷史資料比較，即便其降雨估計值低於地面雨量站實測資料，並不至於影響警戒預測之結果。

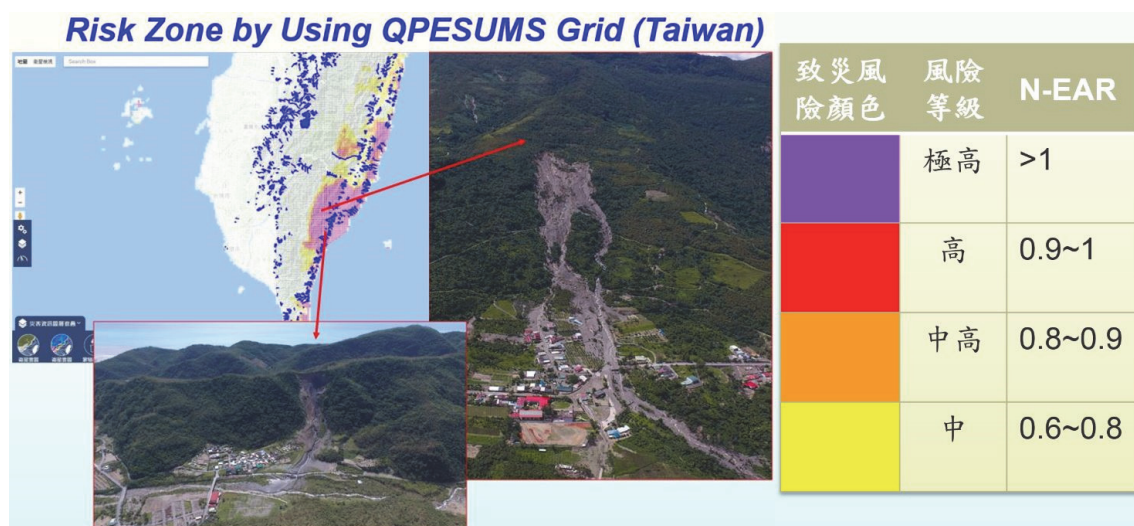


圖 11 2016 年莫蘭蒂颱風期間台東地區 QPE 網格之 N-EAR 與坡地災害分布情形

Fig.11 Distribution of N-EAR and slope land disaster on QPE meshes in Taitung Area During Typhoon Moranti in 2016

四、結 論

針對國內現行 RTI 模式使用之有效累積雨量計算方式所面臨的問題，本研究已提出有效累積雨量計算之改進方案 (逐

時折減法)，此修正公式不必考慮雨場之起、終點，且計算快速，非常適合大量之網格運算。同時，配合此有效累積雨量計算之修正公式，本研究提出一適合以網格為警戒單元的警戒值設定與調整規則，且由於此法在設定時毋須針對歷史雨量作雨

場分割，因此可避免因雨場定義不同導致警戒雨量設定值不一致之情形。

中央氣象局發展的 QPESUMS 系統正式上線已逾 10 年，藉由使用網格尺寸為 1.3km 之雷達降雨資料，可大幅提昇降雨資料之空間解析度。即便 QPESUMS 系統之降水估計值可能略少於地面雨量站之實測值，但經由同一地區長達 10 年實際的案例驗證，本研究提出之使用 QPESUMS 雷達降水資料建立崩塌災害預警模式，不論在預測崩塌事件發生地點之空間域精度上，以及在預測崩塌發生時間的時間域精度上，均有良好之表現。

國內目前僅針對颱風豪雨所導致的土石流災害建立預警機制，但坡地災害除土石流外，尚包括崩塌及地滑，且一般所謂的淺層崩塌發生之機率及範圍更高於土石流，因此如何比照土石流災害建立淺層崩塌之預警機制，係為未來國內坡地防災工作上必須加強之重點。本研究建立之警戒模式，可適用於因颱風豪雨所導致的群發型崩塌及土石流災害，其警戒值訂定方式簡單、客觀、可靠，且具一致性；同時，在警戒發布機制方面，本研究提出以網格為警戒發布單元，並以不同顏色呈現致災風險等級之視覺化管理方式，配合水土保持局已公開之土石流潛勢溪流，以及中央地質調查所已公告之山崩與地滑地質敏感區，將對於颱風豪雨期間各級政府之災害應變中心於災情研判與決策分析上有直接助益。

參考文獻

- [1] 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))
- [2] 水土保持局土石流防災資訊網 (2016)，<http://246.swcb.gov.tw> (Debris Flow Disaster Information Website, <http://246.swcb.gov.tw> (in Chinese))
- [3] 李鎮洋、賴文基、陳振宇、黃效禹、郭力行 (2011)，「莫拉克颱風複合型災害發生歷程的時空重建—以小林村深層崩塌為例」，42(4)，313-324。(Lee, C.Y., Lai, W.C., Chen, C.Y., Huang, H.Y., and Kuo, L.H. (2011). "The Reconstruction of the Processes of Catastrophic Disasters Caused by the 2009 Typhoon Morakot." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(4), 313-324. (in Chinese))
- [4] 周仲島、鍾吉俊、修榮光 (2015)，「S 波段雙偏極化雷達在梅雨季豪大雨天氣系統定量降雨估計之應用」，大氣科學，43(2)，91-113。(Jou, J.D., Jung, C.J., and Hsiu, R.G. (2015). "Quantitative Precipitation Estimation Using S-Band Polarimetric Radars in Taiwan Meiyu Season." *Journal of Meteorological Society*, 43(2), 91-113. (in Chinese))
- [5] 陳振宇 (2008)，「國內土石流警戒發布機制沿革」，台灣水土保持季刊，63，1-7。(Chen, C.Y. (2008). "The evolution of debris flow warning system in Taiwan." *Soil and Water Conservation Quarterly*, 63, 1-7. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 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))
- [8] 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))
- [9] 張保亮 (2011)，「QPESUMS 產品應用介紹」，中央氣象局氣象衛星中心。(Chang, P.L. (2011). *Introduction of QPESUMS*, Central Weather Bureau (CWB). (in Chinese))
- [10] 日本氣象庁 (2016)，土砂災害警戒判定メッシュ情報。(Japan Meteorological Agency (2016). *Sediment disaster warning judgment mesh information*. (in Japanese)) (<http://www.jma.go.jp/jp/doshamesh>)
- [11] 日本內閣府 (2015)，「総合的な土砂災害対策の推進について」。(Cabinet Office, Government of Japan (2015). *Promotion of comprehensive sediment-related disaster counter-measures*. (in Japanese))
- [12] 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2001)，「土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法」。(National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), (2001). *Manual of setting sediment disasters warning criterion based on rainfall indices*. (in Japanese))
- [13] 国土交通省河川局砂防部、氣象庁予報部、国土交通省国土技術政策総合研究所 (2005)，「国土交通省河川局砂防部と氣象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案)」。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC), Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) and Japan Meteorological Agency (JMA) and National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2005). *Manual for the method of setting mass-movement disasters warning criterion based on rainfall indices (Draft)*. (in Japanese))
- [14] Aleotti, P. (2004). "A warning system for rainfall-induced shallow failures." *Eng Geo*, 173(3-4), 247-265.
- [15] Baum, Rex L., and Godt, Jonathan W. (2010). "Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA." *Landslides*, 7(3), 259-272.
- [16] Caine, N. (1980). "The Rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows." *Geografiska Annaler*, 62A, 23-27.
- [17] Chen, C.Y., and Fujita, M. (2014). "A method for predicting landslides on a basin scale using water content indicator." *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 70(4), I_13-I_18.
- [18] Keefer, David K., Wilson, Raymond C., Mark, Robert K., Brabb, Earl E., Brown III, William M., Ellen, Stephen D.,

- Harp, Edwin L., Wieczorek, Gerald F., Alger, Christopher S., and Zarkin, Robert S. (1987). "Real-time landslide warning during heavy rainfall." *Science*, 238(4829), 921-925.
- [19] 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
- [20] 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.
- [21] Thiebes, B. (2012). *Landslide Analysis and Early Warning Systems: Local and Regional Case Study in the Swabian Alb, Germany*. Springer Berlin Heidelberg.
- [22] UNISDR (2009): Terminology on Disaster Risk Reduction. UN/ISDR. (http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf).
- [23] 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.
-

2017 年 02 月 05 日 收稿

2017 年 03 月 08 日 修正

2017 年 03 月 23 日 接受

(本文開放討論至 2016 年 9 月 30 日)