

以降雨因子進行土石流警戒值訂定

A Study on the Rainfall-Based Warning Criteria of Debris-Flow Occurrence

主管單位：農業委員會水土保持局

詹錢登

李明熹

郭峰豪

JAN, CHYAN-DENG LEE, MING-HSI KUO, FENG-HAO

國立成功大學水利及海洋工程系

摘要

本文分析過去誘發土石流的降雨資料，計算土石流發生事件的降雨強度及有效累積雨量，並以降雨強度及有效累積雨量的乘積作為降雨驅動指標(RTI)，然後以統計方法，建立土石流發生各種不同可能性條件下所對應之降雨驅動指標警戒值(RTI_p)，進而建立土石流降雨警戒值。以 2004-2007 年 9 個土石流發生事件為應用對象，結果顯示本文所發展的模式能有效呈現降雨過程中不同時間之土石流發生可能性之時間警戒變化情形。

關鍵詞：土石流，降雨驅動指標，降雨警戒值

Abstract

The data of rainfall events that induced debris flows were analyzed to calculate the corresponding rainfall intensities, effective accumulated rainfall amounts, as well as the values of rainfall triggering index (RTI) defined as the product of the rainfall intensity multiplied by the effective accumulated rainfall amount, and then using the statistics method to evaluate the potential distribution of debris-flow occurrence, based on the corresponding RTI -values of debris flow events. The rainfall-based warning criteria were established by the above method. The proposed model was tested by 9 debris flow events during 2004 to 2007, and then applied to evaluate the temporal variations of debris-flow occurrence probabilities. The results show that the proposed model could effectively evaluate the temporal variations of debris-flow occurrence probability during a rainfall event.

KEY WORDS : debris flow, rainfall triggering index, rainfall-based warning criteria.

一、前言

台灣地區由於地形陡峭、地質破碎、豪雨集中、地狹人稠，隨著社會經濟快速發展，山坡地陸續開發使用。在天然因素及人為因素的共同影響之下，極易引發土石流災害，例如 1996 年 7 月 31 日至 8 月 1 日強烈颱風賀伯挾著強風豪雨侵襲台灣，造成南投縣陳有蘭溪及阿里山山區發生一系列嚴重土石流災害，死亡人數超過四十人。1999 年 9 月 21 日集集大地震後，大量鬆散的土方堆積在山坡地區，更是大大提高發生土石流的可能性。2001 年 7 月桃芝颱風在南投縣信義鄉造成土石流侵襲民舍事件。2004 年 7 月敏督利颱風及其夾帶的西南氣流，在台中縣和平鄉松鶴部落造成土石流災害之情形。

土石流是指大量鬆散土體與水混合後，在重力作用下沿斜坡或溪床由高處往低處流動的現象。豐富的鬆散土石、大量的水源及足夠大的坡度是形成土石流的三個基本條件。水源不僅是土石流的組成物質，更是土石流發生的激發條件。台灣地區雨量豐沛而且集中，土石流的發生也都是由降雨所激發的，尤其是颱風所帶來的豪雨。在土石流發生的三個基本條件中，對同一條土石流潛勢溪流而言，在一般情況下，地形條件的變化較為緩慢，可視為相對的穩定；土壤條件也是需要長時間的累積，也就是說土壤條件的變化是漸進的(除非是大地震或大規模土地開發)；但是降雨條件的變化卻是非常大的，有時毛毛細雨，有時傾盆大雨。因此在一定的時期內，在土壤條件和地形條件變化不大的情況下，土石流的發生及其規模大小，往往取決於流域內的降雨條件。也就是說，降雨條件是決定土石流形成與否的最活躍條件，因此如果能夠瞭解土石流潛勢溪流內，降雨條件、土石材料及溝床條件在土石流形成過程中的相互關係，就可以利用降雨條件在土石流潛勢溪流內的變化規律及發展趨勢，推估土石流發生可能性，以作為推動土石流防救災的參考(Keefer et al., 1987；詹錢登與李明熹, 2004)。

台灣地區早期的土石流發生臨界降雨線是參考日本做法，應用降雨強度 I 及有效累積雨量 R 之線性關係($R+aI=b$)，建立土石流降雨警戒線(謝正倫, 1995)。前述線性關係式雖然簡單，但是它包含有兩個待定之參數(a 及 b)，對於土石流發生樣本資料不多的地區或是缺乏土石流發生資料的地區而言，要同時準確推估兩個待定之參數是很困難的。因此詹錢登與李明熹(2004)提出以降雨強度 I 及有效累積雨量 R 的乘積作為降雨驅動指標(Rainfall Triggering Index, RTI)，依據以往土石流發生降雨事件的雨量資料，然後以統計方法，建立土石流發生各種不同可能性條件下所對應之降雨驅動指標警戒值(RTI_p)，本研究更進一步探討土石流發生降雨警戒值與地文條件的關係及土石流警戒發

布成效之評估。本文僅就降雨條件說明如何利用降雨因子進行土石流發生降雨警戒，以減少土石流災害。

二、土石流降雨警戒模式

在分析土石流發生降雨條件時，必須考量土石流發生當時的降雨量(直接激發雨量)及其之前的降雨量(間接激發雨量)。短歷時的暴雨(時雨量或十分鐘雨量)是目前常被使用的土石流直接激發雨量。不同的土石流潛勢溪流所需要的短歷時土石流直接激發雨量是不一樣的；即使是同一條土石流潛勢溪流，各次土石流發生所需要的短歷時直接激發雨量也可能是不一樣的，因為土石流發生所需要的短歷時直接激發雨量，取決於溪流溝床內當時土體及其含水狀況。由於土石流潛勢溪流都在山區，要量測土石流發生前溪流溝床內土體的含水狀況是很困難的，因此需要藉用土石流發生之前的降雨量來間接說明土體的含水狀況。一般來說土石流發生之前的降雨量越多，土體越接近飽和，因此所需要土石流短歷時直接激發雨量也就越小。除了土石流發生時刻的短歷時直接激發雨量外，本次降雨開始時刻至土石流發生時刻的降雨，是本次降雨事件中對土石流發生有直接貢獻之長歷時降雨，其降雨量稱為本次前段降雨量（如圖1所示）。本次降雨開始時刻之前的降雨(本次降雨的前期降雨)，也會影響土體的含水程度，因此對土石流的發生也有相當程度的影響，而且越接近本次降雨事件的前期降雨，對激發本次土石流所需的降雨強度影響越大；反之，越遠離本次降雨事件的前期降雨對激發本次土石流所需的降雨強度影響越小。本文定義降雨事件某時刻的降雨強度 I (mm/hr)和該時刻之前的有效累積雨量 R (mm)的乘積為降雨驅動指標 RTI (mm²/hr)，並用以評估土石流發生的可能性，即

$$RTI = I \times R \dots\dots\dots(1)$$

其中有效累積雨量的定義為本次前段降雨累積雨量及本次降雨開始時刻前七天的加權降雨量之和為影響土石流發生的有效累積雨量，即

$$R = R_0 + \sum_{i=1}^7 \alpha^i R_i = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i \dots\dots\dots(2)$$

其中 R_0 為本次前段降雨量， R_i 為本次降雨開始時刻前 i 天日雨量， α 為日雨量加權係數， $\alpha=0.8$ 。

三、土石流降雨警戒值

以降雨驅動指標(RTI) 建立某土石流潛勢溪流土石流發生降雨警戒值(RTI_p)之前，首先要在土石流潛勢溪流集水區內，選取具有代表性的參考雨量站，作為進行土石流降雨警戒預報的雨量資料來源，並收集歷年有土石流發生之降雨事件的雨量資料，將一降雨時間序列中以時雨量大於 4 mm 處為本次降雨開始時刻，以時雨量連續六小時均小於 4mm 處為該次降雨結束時刻（如圖 1），然後將降雨時間序列分割成許許多多的降雨場次，分析出每場降雨激發土石流時之小時降雨強度 I 及該時刻之前的有效累積雨量 R ；最後計算出該次降雨事件的 RTI 值；如果不知道該次降雨事件激發土石流的時刻，則以該次降雨事件的最大小時降雨強度 I 及其之前的有效累積雨量 R 的乘積，計算出該次降雨事件的 RTI 值。

詹錢登與李明熹(2004)曾以線性分布模式推估不同發生可能性 P 所對應之 RTI 值（記為 RTI_p ，如圖 2）：

$$RTI_p = RTI_{10} + \left(\frac{P-0.1}{0.8}\right)(RTI_{90} - RTI_{10}) \dots\dots\dots(3)$$

其中 RTI_{10} 及 RTI_{90} 兩個待定參數分別表示土石流發生的可能性是10%及90%所對應之降雨警戒值。當降雨事件的 RTI 值低於 RTI_{10} 時，表示該次降雨激發土石流的可能性小於10%；反之，當 RTI 值高於 RTI_{90} 時，表示該次降雨激發土石流的可能性大於90%。當 RTI 值落於過渡區時($RTI_{10} < RTI < RTI_{90}$)，則可由(3)式推求土石流發生可能性 P 所對應之 RTI 值。

因應不同的需求，土石流發生降雨警戒值不一定訂在土石流發生累積機率 $P=50\%$ 所對應之 RTI 值 (RTI_{50})，因此需要推估不同發生可能性 P 所對應之下的 RTI 值(記為 RTI_p)。為了便於說明一場降雨激發土石流的可能性，本文以 RTI_{10} 值當作下緣線，然後以 RTI_{90} 值當作上緣線，此下緣線 (RTI_{10}) 及上緣線 (RTI_{90}) 將土石流發生降雨警戒圖區分為三個區域，如圖3所示：當降雨事件的 RTI 值落於下緣線下方($RTI < RTI_{10}$)時，表示該次降雨激發土石流的可能性小於10%，本文稱為土石流低可能發生區；當 RTI 值落於上緣線上方($RTI > RTI_{90}$)時，表示該

次降雨激發土石流的可能性大於90%，本文稱為土石流高可能發生區；當 RTI 值落於過渡區($RTI_{10} \leq RTI \leq RTI_{90}$)時，隨著 RTI 值增加其激發土石流的可能性也就越高，本文稱為土石流中可能發生區。

四、土石流累積雨量警戒值

為了讓當地民眾及地方防救災單位易於瞭解土石流發生降雨警戒值，以利地方防災單位進行土石流發生警戒及避難措施之參考，本研究將土石流發生降雨警戒值簡化為土石流累積雨量警戒值，即在固定降雨強度 I ($=10 \text{ mm/hr}$) 條件下，選定一個土石流發生可能性 P 的降雨警戒值 RTI_c ，推求土石流累積雨量警戒值 R_c 。2005 年以土石流發生可能性 $P=50\%$ (即 RTI_{50}) 推求各鄉鎮土石流累積雨量警戒值，每個級距為 50mm，以 350mm 為上限，共分為 4 個級距，從 200mm ~350mm；2006 年第一次修訂以土石流發生可能性 $P=50\%$ (即 RTI_{50}) 推求各鄉鎮土石流累積雨量警戒值，每個級距為 50mm，以 450mm 為上限，增加至 6 個級距，從 200mm~450mm；2006 年第二次修定及 2007 年以土石流發生可能性 $P=70\%$ (即 RTI_{70}) 推求各鄉鎮土石流累積雨量警戒值，每個級距為 50mm，以 550mm 為上限，增加至 7 個級距，從 250mm ~550mm。2007 年更新後各鄉鎮區土石流累積雨量警戒值 250 mm 有 8 個鄉鎮、300 mm 有 3 個鄉鎮、350 mm 有 8 個鄉鎮、400 mm 有 6 個鄉鎮、450 mm 有 19 個鄉鎮、500 mm 有 43 個鄉鎮、550 mm 有 72 個鄉鎮，如圖 4 所示。

各鄉鎮土石流降雨警戒值每年會檢討更新，檢討原因主要有三項：1.新增降雨事件影響、2.新增土石流發生事件影響及 3.地震或其他重大事件影響。更新後的土石流降雨警戒值會於每年防汛期之前舉辦公開說明會，以提昇土石流降雨警戒之適用性。

五、土石流降雨警戒之應用

依據本研究發展的土石流降雨警戒方法，所建立的土石流降雨警戒值，從 2004 年就開始提供給土石流防災應變系統進行各鄉鎮區土石流降雨警戒實際試作。經資料蒐集結果顯示，2004 年~2007 年共有 9 場土石流發生事件，9 場土石流發生事件之發生地點及日期詳表 1 所示。由表 1 可看出，9 場土石流發生降雨事件中，高雄縣六龜鄉大津村於 2005-2007 年均有發生土石流，為近年來較常發生土石流之村落。本文僅以 2004 年敏督利颱風在台中縣和平鄉博愛村松鶴部落所造成的土石流發生案例，說明土石流降雨警戒的應用結果。

表 1 2004~2007 年土石流發生事件資料

年	致災原因	發生地點	發生日期
2004	豪雨	南投縣信義鄉神木村	5 月 21 日
	敏督利颱風	台中縣和平鄉博愛村	7 月 3 日
		台中縣東勢鎮	7 月 3 日
		南投縣仁愛鄉	7 月 3 日
		南投縣國姓鄉	7 月 3 日
2005	海棠颱風	高雄縣六龜鄉大津村與中興村	7 月 19 日
2006	豪雨	高雄縣六龜鄉大津村	6 月 10 日
2007	豪雨	高雄縣六龜鄉大津村	8 月 13 日
	聖帕颱風	高雄縣六龜鄉寶來村	8 月 19 日

敏督利颱風於 2004 年 6 月 23 日於關島西北方海面生成，以偏西方向移動，28 日移動速度減慢，30 日移動方向偏北朝台灣東部移動，其中心於 7 月 1 日 22 時 40 分左右在花蓮市南方約 20km 處登陸，次日上午由淡水附近進入台灣海峽，隨後以北北西的方向進入東海，4 日變為溫帶氣旋，其颱風路徑圖如圖 5 所示。受颱風外圍環流及 2~4 日颱風北上期間引進的強烈西南氣流影響，東部、中南部地區連日豪雨造成嚴重災情，多處道路坍方，並引發中部山區發生嚴重土石流災害。此次颱風及七二水災共計造成 33 人死亡、12 人失蹤，農林漁牧損失就高達 89 億元以上。圖 6 為 6 月 29 日~7 月 5 日台灣地區各地之累積雨量圖。由圖中可看出，高雄縣西南地區於此次颱風及七二水災期間之累積雨量資料超過 2,000mm，為台灣地區在該期間之最大累積雨量，台中、南投及嘉義等地山區也都有超過 1,200mm 的累積雨量，因此在台中縣和平鄉等地區均有土石流發生。

台中縣和平鄉博愛村松鶴部落在 2004 年 7 月 3 日早上 8:30 左右發生土石流，如圖 7 所示。大量土石從松鶴一溪及松鶴二溪直衝而下，松鶴一溪由原本 30m 的溪寬擴大到 450m，松鶴二溪由原本 8m 的溪寬擴大到 325m，雖然有 60 棟民宅遭土石流掩埋或沖毀，但沒有造成居民的傷亡，主要是因為土石流降雨警戒系統及地方單位有效率的即時疏散民眾，充分防災避難之功能。依據本研究所發展的土石流降雨警戒模式，台中縣和平鄉土石流發生降雨警戒值分別為 $RTI_{90}=3,175\text{mm}^2/\text{hr}$ 、 $RTI_{50}=1,727\text{mm}^2/\text{hr}$ 、 $RTI_{10}=279\text{mm}^2/\text{hr}$ ；累積雨量警戒值為 200mm。圖 8 為和平鄉（新伯公雨量站）在 2004 年 7 月 3 日小時降雨量、總有效累積雨量、降雨驅動指標值及土石流發生可能性隨時間

的變化情形。該場降雨從 7 月 2 日開始，7 月 2 日早上 10:50 土石流降雨驅動指標 RTI 值就已經超過 RTI_{50} ，到達土石流警戒發布的標準，若以土石流累積雨量警戒值來看，7 月 2 日下午 17:30 累積雨量指標 R 值也已經超過 R_{50} ，7 月 3 日凌晨 02:40 土石流降雨驅動指標 RTI 值在就已經高於 RTI_{90} ，此時的有效累積雨量已經超過 240mm。然後隨著降雨慢慢的增大在 3:50 時達到第一波的降雨高峰（小時降雨量為 81mm/hr，有效累積雨量為 315mm），隨後雖然降雨減少，但 RTI 值一直維持在土石流高可能發生區。另一波大雨在 8:10 驟降， RTI 值衝的更高，隨後在 8:30 至 9:00 之間土石流從松鶴一溪及松鶴二溪流下。上午 8:30 當時的小時降雨量為 81.5mm/hr，有效累積雨量高達 472mm，而當日的最大小時降雨量(=125.5mm/hr) 發生在上午 9:00，有效累積雨量為 526mm，且將近持續 8 小時土石流發生可能性均維持在高可能發生區。

由上述土石流發生降雨警戒值的應用結果得知，依據本研究所建立的土石流發生降雨警戒方法，除了能夠有效的展示出整個降雨事件過程中小時降雨量 I 、有效累積雨量 R_e 、降雨驅動指標 RTI 隨時間之變化趨勢外，亦可以說明土石流發生的可能性及土石流發生可能性持續的時間。此外，將第一次到達 RTI_{50} 的時間當作土石流警戒發布的時間點，由上述土石流發生案例來看，土石流警戒發布的時間為 7 月 2 日早上 10:50，土石流實際發生的時間為 7 月 3 日早上 8:30，可提供地方政府安全疏散民眾的時間足足有 21 小時；若以累積雨量警戒值來看，到達 R_{50} 的土石流警戒發布時間為 7 月 2 日下午 17:30，可提供地方政府安全疏散民眾的時間也有 15 小時。和平鄉公所在接獲土石流警戒後，在 7 月 2 日晚上 23:00 已將 1,080 位松鶴部落的民眾安全疏散至博愛國小，因此才降低土石流對民眾生命的危害。由此也可以說明水土保持局近年來在土石流降雨警戒資訊的研判與通報系統的建立，除了可以有效的提供各種降雨條件隨時間變化的趨勢及土石流發生可能性的訊息外，更可提供給相關單位作為不同程度土石流警戒訊息發佈之參考依據。

六、土石流降雨警戒成效分析

為評估近年土石流降雨警戒發布作業之整體執行成效，本研究依據 2005 年及 2006 年土石流年報中土石流紅色警戒發布資料及土石流發生資料，進行土石流降雨紅色警戒發布成效分析。本研究以有(無)土石流發生之鄉鎮中，有(無)發布為紅色警戒區之百分比，作為土石流紅色警戒成效之評估指標。其中可分為有或無土石流發生以及有或無發佈為紅色警戒區等 4 種不同組合，4 種不同組合之評估指標定義說明如下：

P_1 ：有土石流發生的鄉鎮中，有發布為紅色警戒區之百分比。

P_2 ：有土石流發生的鄉鎮中，無發布為紅色警戒區之百分比。

P_3 ：無土石流發生的鄉鎮中，有發布為紅色警戒區之百分比。

P_4 ：無土石流發生的鄉鎮中，無發布為紅色警戒區之百分比。

表 2 為 2005 年及 2006 年紅色警戒發佈成效分析結果。根據 2005 年各颱風豪雨事件紅色警戒發佈成效的平均值來看，有土石流發生的鄉鎮中，全部都有發布為紅色警戒區，所以 $P_1=100\%$ (i.e. $P_2=0\%$)；沒有土石流發生的鄉鎮中，也沒有發布紅色警戒之比例超過八成 ($P_4=81\%$)，換句話說，沒有土石流發生的鄉鎮中，卻發布紅色警戒的比例低於兩成 ($P_3=19\%$)。2006 年各颱風豪雨事件紅色警戒發佈成效的平均值來看，有土石流發生的鄉鎮中，全部都有發布為紅色警戒區，所以 $P_1=100\%$ (i.e. $P_2=0\%$)；沒有土石流發生的鄉鎮中，也沒有發布紅色警戒之比例超過九成 ($P_4=94\%$)，換句話說，沒有土石流發生的鄉鎮中，卻發布紅色警戒的比例低於一成 ($P_3=6\%$)。

依據 2005 年及 2006 年紅色警戒發佈成效的平均值來看，在有土石流發生的鄉鎮中，全部都有發布為紅色警戒區，因此此項成效分析均達到 100%；在沒有土石流發生的鄉鎮中，也沒有發布紅色警戒之比例，2006 年為 94%較 2005 年的 81%提昇許多。此結果充分顯示，農業委員會水土保持局土石流降雨警戒發佈系統可於土石流事件發生前提供有效的警戒資訊，並且其準確度有逐年改善之情況，對於土石流災害防治工作有相當大的幫助。

表 2 2005 年及 2006 年紅色警戒發佈成效分析

年度	P_1	P_2	P_3	P_4
2005	100%	0%	19%	81%
2006	100%	0%	6%	94%

七、結語

土石流的形成原因非常複雜，在土石流的防災方面，不能完全依賴土石流發生降雨警戒系統，也不能過度期望土石流防治工程來完全抑制土石流的發生或攔擋土石流的流動。人們必須要有風險的觀念，瞭解土石流的發生與流動具有很高的不確定。台灣地區以及世界其它地區，在暴雨土石流發生警戒方面，目前大多是以累積雨量及降雨強度為

基準。僅以雨量特性作為判定土石流發生與否之基準是不夠的，而且要有很高的準確度也是不可能的。縱然如此，雨量基準仍然是最為方便且可行的判定土石流發生與否之方法，因為雨量資料的取得仍是比較方便的，而且雨量資料所涵蓋的範圍較為廣泛。目前水土保持局是依據土石流發生降雨驅動指標及土石流累積雨量警戒值兩種警戒方法，進行暴雨土石流發生警戒工作，透過土石流降雨警戒資訊的研判與通報系統的建立，有效的提供各種降雨條件隨時間變化的趨勢及土石流發生可能性的訊息，提供相關單位作為不同程度土石流警戒訊息發佈之參考依據，並且其準確度有逐年改善之情況，對於土石流災害防治工作有相當大的幫助。

參考文獻

1. 吳積善(1990)，「雲南蔣家溝土石流之觀測研究」，中國大陸科學出版社。
2. 孟河清(1991)，「泥石流的發生和降雨」，第二屆全國泥石流學術會議論文集，第143-148頁。
3. 網干壽夫(1972)，「集中豪雨とっサ土斜面の崩壊」，施工技術，5(11):45。
4. 詹錢登 (2000)，「土石流概論」，科技圖書股份有限公司出版。
5. 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。
6. 詹錢登、李明熹、郭峰豪 (2006)，「土石流發生空間及時間降雨警戒模式」，地工技術，第110期，第55-64頁。
7. CAINE, N. (1980), “The Rainfall Intensity Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows,” *Geografiska Annaler*, 62:23-27.
8. JAN, C.D., LEE, M. H., HUANG T. H. (2003), “Effect of Rainfall on Debris Flows in Taiwan,” *Proceedings of the International Conference on Slope Engineering*, Hong Kong, 2:741-751.
9. JAN, C.D., LEE, M. H., WANG, J. S., WANG, C. L. (2004), “A Rainfall-Based Debris-Flow Warning Model and Its Application in Taiwan”, *International Conference on Slope Disaster Mitigation Strategy*, pp.111-119, Taipei.
10. KEEFER, D. K. ET AL. (1987), “Real-Time Landslides Warning During Heavy Rainfall,” *Science*, 238:921-925.

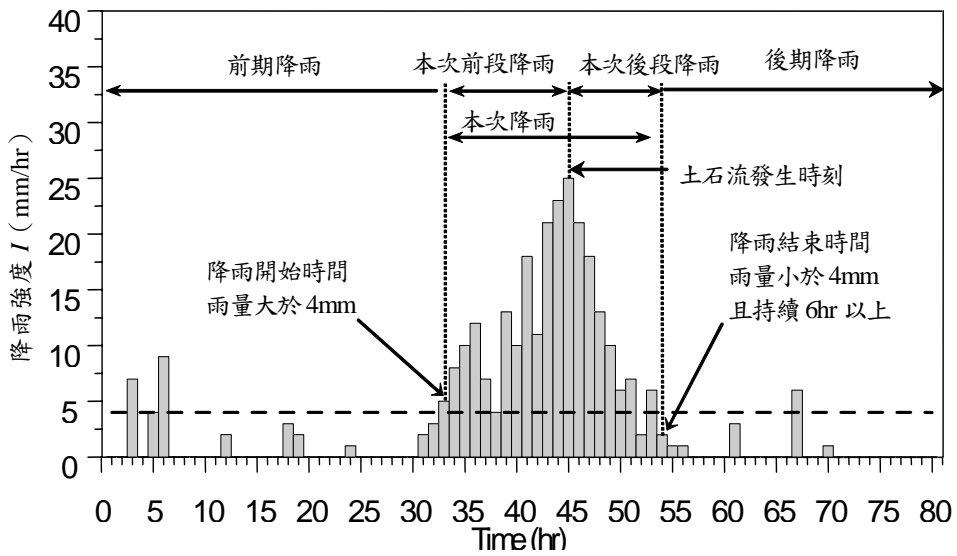


圖 1 本次降雨、前期降雨及後期降雨示意圖。

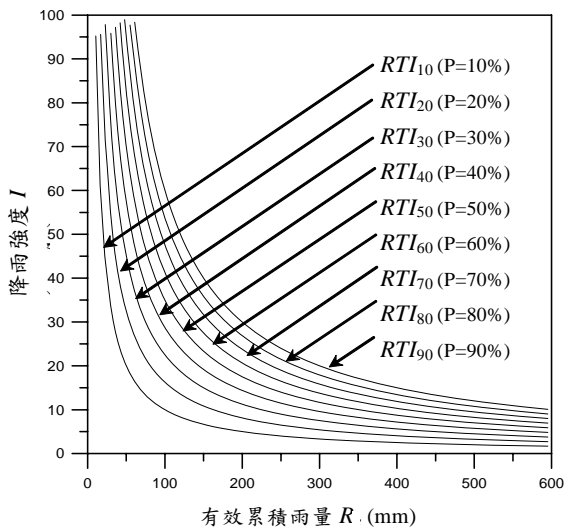


圖 2 不同土石流發生可能性之降雨警戒值示意圖

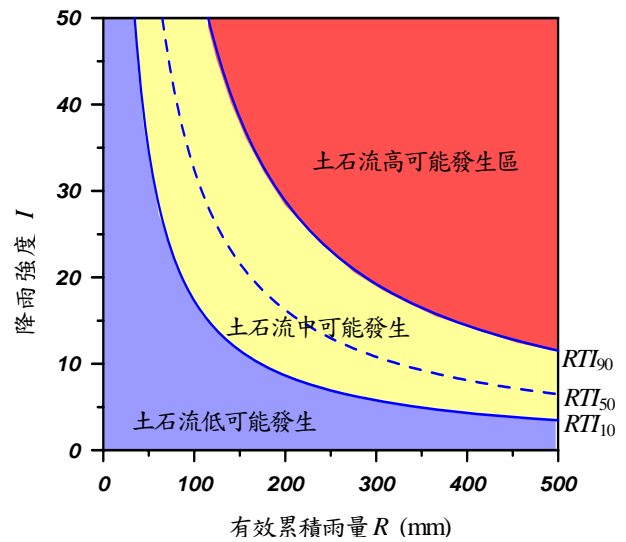
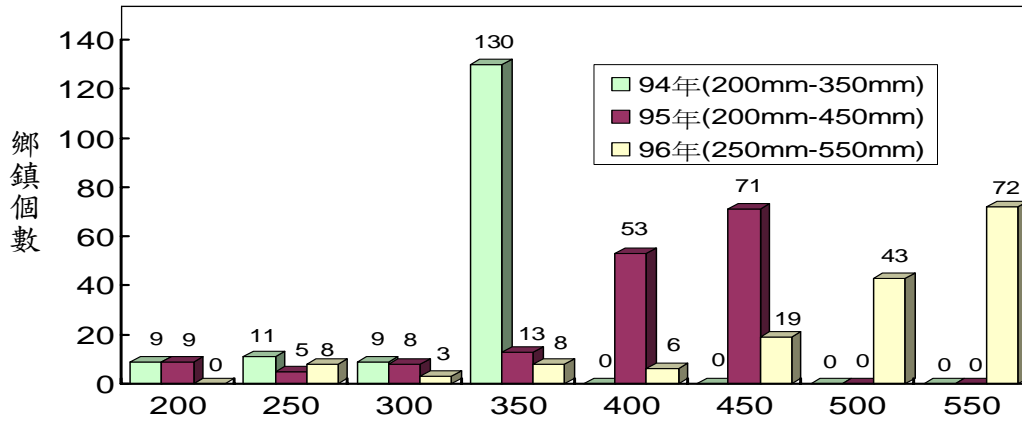


圖 3 以降雨條件區分土石流發生可能性示意圖



土石流累積雨量警戒值 (mm)

圖 4 2005-2007 年土石流累積雨量警戒值分佈圖

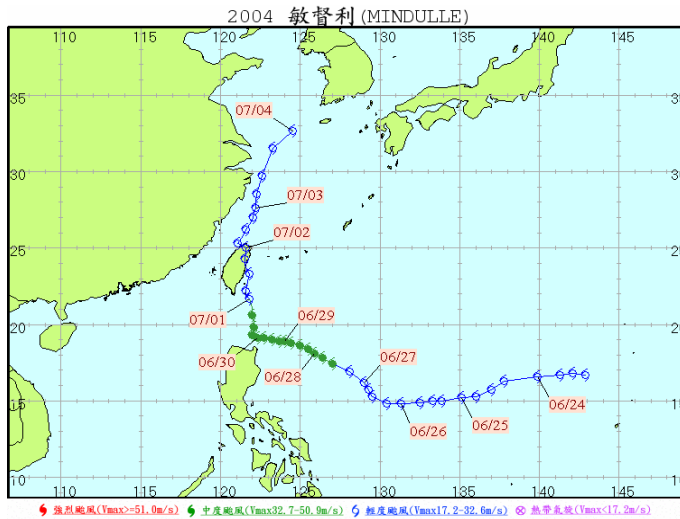


圖 5 敏督利颱風路徑圖 (2004 年 6 月 24 日~7 月 4 日) (中央氣象局)

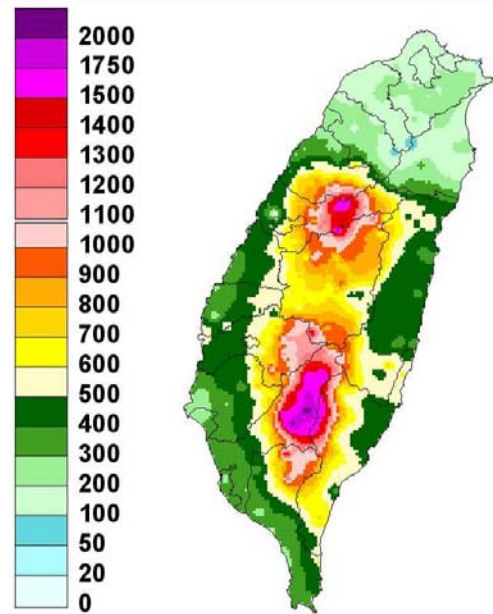


圖 6 敏督利颱風及七二水災期間台灣地區累積雨量圖 (2004 年 6 月 29 日~7 月 4 日)

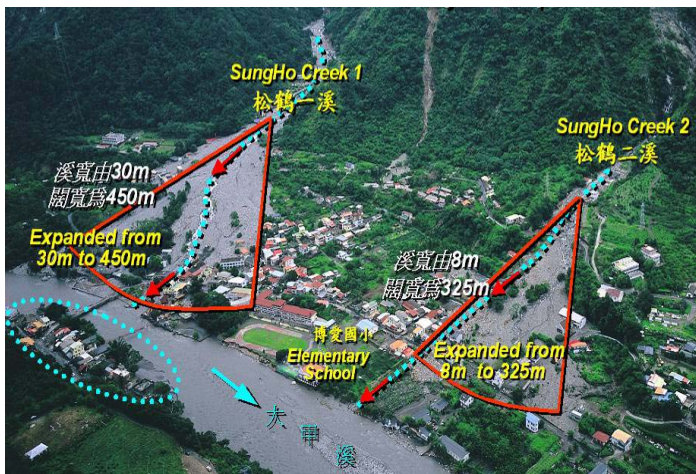


圖 7 台中縣和平鄉松鶴部落 2004 年敏督利颱風及七二水災土石流空照圖(水土保持局提供)

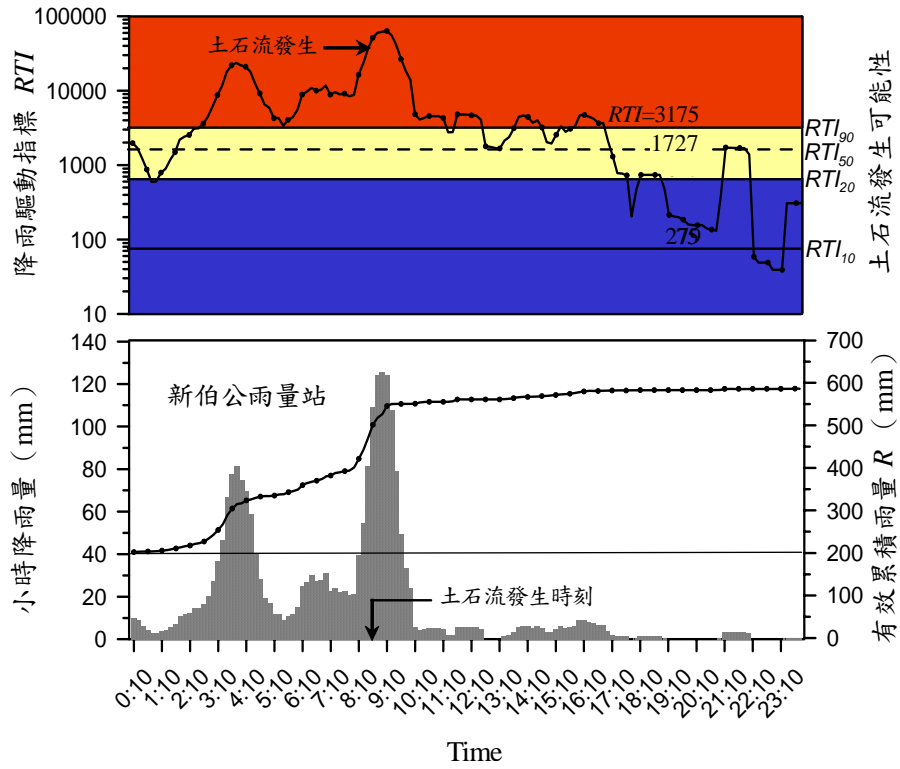


圖 8 和平鄉在 2004 年 7 月 3 日小時降雨量、有效累積雨量、降雨驅動指標值及土石流發生可能性隨時間的變化情形。