

# 以降雨因子進行土石流警戒基準值訂定

## Rainfall-Based Warning Criteria of Debris-Flow Occurrence

主管單位：農業委員會水土保持局 計畫編號：swcb-92-052

詹錢登

Jan, C. D.

國立成功大學水利及海洋工程學系

### 摘要

本文以降雨強度及有效累積雨量的乘積作為評估土石流發生可能性的降雨指標( $C$ 值)，並以此建立土石流發生可能性降雨警戒模式。以降雨指標為縱座標，降雨時間為橫座標，建立土石流發生可能性降雨警戒圖。以歷年有發生土石流的降雨指標之 $C_{10}$ 為下緣線，以沒有發生土石流的降雨指標之 $C_{90}$ 為上緣線，將降雨警戒圖區分為三個區域。在下緣線以下及上緣線以上的區域分別代表土石流發生可能性低於10%及高於90%的區域，在下緣線與上緣線之間土石流發生的可能性介於10%至90%之間。應用本文所發展的模式於南投縣水里鄉，分析兩場降雨事件過程中降雨指標 $C$ 值隨時間之變化，結果顯示本文所發展的模式能有效呈現降雨過程中土石流發生的可能性及其隨時間的變化趨勢。

關鍵詞：土石流、警戒模式、警戒基準值

### Summary

A rainfall-based warning model of debris-flow occurrence probability is proposed in the present paper, basing on a rainfall index  $C$  that is defined as the multiplication of the rainfall intensity  $I$  and the effective accumulated rainfall  $R$ . A rainfall-based warning diagram is developed with the data of rainfall index on the ordinate while the time on the abscissa. A lower envelope line ( $IR = C_{10}$ ) was determined based on the data of rainfall index triggering debris flows, while the upper envelope line ( $IR = C_{90}$ ) was determined based on the data of rainfall index without triggering debris flows. The lower and upper envelope lines divide the diagram in

to three parts. It implies that the occurrence probability of debris flow is lower than 10% as the rainfall index is lower than the lower line, while the occurrence probability larger than 90% as the rainfall index higher than upper line. In the transition regime, between the lower and the upper lines, debris-flow occurrence probability is between 10% and 90%. The proposed model is applied in the Shueili, Nantou, Central Taiwan, to develop a rainfall-based debris-flow warning model for that town. Two rainfall events were analyzed. The results show that the proposed model could effectively show the instantaneously occurrence probability of debris flow and its changing tendency during the rainfall events.

Keywords: Debris Flow, Warning Model, Warning Criteria.

### 一、前言

土石流(或稱泥石流)是指大量鬆散土體與水混合後在重力作用下沿斜坡或溝渠由高處往低處流動的自然現象，它的運動特性介於流體與固體之間。雖然土石流的發生是土體由不穩定狀態轉換到穩定狀態的自然現象，但其運動的過程中常常給山區居民帶來災害，尤其是近年來山坡地開發及人民往山坡地遷居的結果，使得土石流的發生頻率及其災害規模越趨嚴重。因此若能理解土石流發生的機制，縱使人為的力量無法阻止土石流的發生，也期望能夠降低土石流發生的可能性、發生的規模或預知土石流可能發生的時間與地點，事先做好避難準備，以減少土石流所帶來之災害。

形成土石流的三個基本條件是豐富的鬆散土石、大量的水源及陡峭的坡度。豐富的

鬆散土石提供形成土石流所需之固體物質；大量的水源潤滑土石流內固體物質並降低固體物質間的摩擦力與凝聚力，促使固體物質液化而流動；陡峻的坡度提供給土石流體流動的動力，使土石流體克服其內部之摩擦力與凝聚力後繼續向低處流動(詹，1994)。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。降雨、冰川融雪和水體潰決等水動力條件都可以激發土石流，但是世界各地絕大多數的土石流是由降雨所激發的。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，對同一條土石流溝或同一個土石流區域而言，在正常情況下，地形條件可視為相對的穩定；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)；但是降雨條件在區域內的變化確是非常大的，有時晴天，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，它即使不是土石流發生與否的必然條件，卻是對土石流發生與否有著決定性的影響。因此如果能夠瞭解土石流潛勢溪流內降雨條件和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之可能性。本文先回顧前人所發展的土石流發生降雨警戒模式，然後提出新的土石流發生降雨警戒模式，並將此模式應用於鄉鎮區土石流發生降雨警戒基準值之訂定。

## 二、降雨警戒模式之回顧

由前人的研究得知，土石流發生降雨警戒模式中最常被使用的降雨參數包括降雨強度  $I$ 、降雨延時  $T$ 、累積雨量  $R$  及前期降雨量  $P_0$ 。值得注意的是，不同研究人員所採用的降雨參數之定義可能有所不同，例如，降雨強度方面有人採用的是時降雨強度，有人採用的是十分鐘降雨強度；累積雨量方面，有的是指本次降雨的累積雨量，有的是指包

含本次降雨量及前期有效累積雨量的有效累積雨量；甚至在本次降雨及前期降雨的計算方面也有很大之差異，如表1所示。

表 1 不同定義之降雨參數指標

降雨參數	相關定義
降雨強度 $I$	十分鐘降雨強度 $I_{10m}$ 一小時降雨強度 $I_{60m}$ 當日降雨強度 $I_d$ 有效降雨強度 $I_e$ 一場降雨之平均降雨強度 $I_a$
累積雨量 $R$	本次累積雨量 $R$ 本次有效累積雨量 $R_e$ 4小時累積雨量 $R_{4hr}$ 總有效累積雨量 $R_{te}$
降雨延時 $T$	有效降雨延時 $T_e$ 一場降雨之降雨延時 $T$
前期降雨量 $P_0$	發生當日前 7 天之有效累積雨量 $P_{7d}$ 發生當日前 14 天之累積雨量 $P_{14d}$ 發生當日前 14 天之有效累積雨量 $P_{e14d}$ 發生當日前 20 天之有效累積雨量 $P_{20d}$ 發生當日 10 分鐘激發雨量前至降雨開始的累積雨量 $P_{10m}$

依據前人在降雨參數上選定的不同，土石流發生降雨警戒模式大致上可區分為五種：第一種是以降雨強度及累積雨量為警戒指標 (I-R 模式)，例如孟河清(1991)、謝正倫(2001)及詹錢登(2002)都是利用降雨強度和累積雨量劃定土石流發生臨界降雨線。第二種是以降雨強度及降雨延時為警戒指標 (I-T 模式)，例如 Caine(1980)、Cannon & Ellen(1985)、Wieczorek et al. (1987)及 Keefer et al. (1987)都是利用激發土石流的那一場雨事件(簡稱本次降雨事件)的降雨強度及降雨延時，建立土石流發生之臨界降雨線，基本上此種方法所建立之土石流發生臨界降雨線是沒有考量前期降雨的影響。第三種是以累積雨量及降雨延時為警戒指標 (R-T 模式)，如范正成(1999)以台灣花蓮及台東地區為例，探討集水區之水文及地文特性對土石流發生臨界

降雨線的影響。第四種是以降雨強度及前期降雨量為警戒指標 (I-P<sub>0</sub>模式)，如網干(1972)利用土石流發生當日雨量及發生前 14天之前期降雨量，建立土石流發生臨界降雨線。吳積善等人(1990)在雲南蔣家溝土石流之觀測研究中，以十分鐘降雨量及前期降雨量為參數，建立雲南蔣家溝土石流發生判別式及受災判別式。第五種是以其他降雨參數為警戒指標來決定土石流發生臨界降雨線，如Wilson(1997)以土石流發生當日雨量及全年兩天平均降雨量來建立土石流發生臨界降雨線，如表2所示。在前述五種降雨警戒模式中，以 I-R 模式及 I-T 模式最常被使用。

表 2 土石流發生警戒模式類型相關文獻

模式類型	相關文獻
I-R	謝正倫(1995, 2001) 江永哲與林啟源(1991) 范正成與姚正松(1997) 瀨尾克美與橫部幸裕 (1978) 川上浩 (1981) 譚萬沛 (1991) 孟河清(1991) 詹錢登 (2002)
I-T	陳晉琪 (2000) 黃俊耀 (2000) 姚善文 (2001) Caine (1980) Cannon-Ellen (1985) Wieczorek (1987) Keefer(1987) Marchi(2000)
R-T	范正成 (1999) 及(2001) 青木佑久 (1980)
I-P <sub>0</sub>	網干 (1972) 吳積善(1990)
其他	瀨尾克美與船崎昌繼 (1973) Wilson(1997)

國內最早之土石流發生臨界降雨線是國立成功大學謝正倫教授參考日本學者所建立的(謝正倫, 1995)，如(1)式所列，它是屬於前段所分析的第一種模式，即 I-R 模式，它也是國內水土保持局現行使用的模式，如圖1所示。

$$R + aI = b \quad (1)$$

其中R是指有效累積雨量，它包含本次降雨量及前期有效累積雨量；係數a及常數b是因地而異之經驗參數，它們是利用過去多年土石流發生時及不發生時之雨量參數(降雨強度及有效累積雨量)推求而得的。當臨界降雨線 (C.L.) 設定後，可進一步推求警戒降雨線W.L.

前述土石流發生線性臨界降雨線它包含有兩個待定之參數(a及b)，對於土石流發生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參數(a及b)是很困難的。而且由於各地土石流潛勢溪流的地理條件(地質及地型條件)及潛在的穩定條件不一致，因此激發土石流所需之雨量也有很大的變化，即使是同一條土石流潛勢溪流，因為土體的穩定程度不一樣，各次土石流發生時的當次降雨量也有所不同。國內水土保持局在以往的應用經驗中也發現，現行使用的降雨警戒模式常有預測不準的情況。影響預測準確程度的原因，除了模式本身之外，也常是因為土石流發生與否本身所具有的不確定性。因此有需要持續研究以發展出更適當之土石流發生降雨警戒模式。本文嘗試提出一簡單而且能說明土石流發生的降雨警戒模式。

### 三、土石流發生降雨指標

許多的現場資料顯示，在一連續降雨過程中，降雨型土石流的爆發均出現在一次降雨過程中的某一時刻，這一時刻以前的降雨才對該次土石流發生起決定性的作用，土石流發生時刻起至土石流過程結束時刻為止的時段內的降雨只能影響土石流之規模，而土石流過程結束時刻以後的降雨對本次土石流的形成及規模就沒有影響了。因此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(激發雨量)及其之前的降雨量。短歷時的暴雨是土石流發生的激發雨量，雖然不同的短歷時暴雨均可當作土石流發生的激發雨量，目前最為常見的是時雨量及十分鐘雨量。不同的土石流潛勢溪流所需要的短歷時土石流激發雨量不一樣，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激發雨量也是不一樣，因為土

石流發生所需要的短歷時激發雨量，取決於溪流溝床內土體及其含水狀況。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有很大困難的，因此需要藉用土石流發生之前的降雨量來相對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激發雨量也就越小。

在說明土石流發生降雨指標之前，需先確定降雨時間序列中雨場的分割方法，因為相同的降雨時間序列由於不同的分割方法，所計算出降雨參數(如降雨延時、平均降雨強度、本次降雨量、降雨指標等等)會有所不同。本文所採用的雨場分割方法如圖2所示，其方法為：將一降雨時間序列中以時雨量小於 4 mm處為本次降雨開始時刻，而以時雨量連續六小時均小於 4 mm處為該次降雨結束時刻，降雨開始時刻至降雨結束時刻為本次降雨延時，其累積雨量為本次降雨累積雨量。如果土石流發生在本次降雨過程中(一般發生在本次降雨過程的峰值降雨時刻)，定義土石流發生時刻之短歷時降雨強度(一般取時降雨強度或十分鐘降雨強度)為土石流發生之激發降雨強度。本次降雨開始時刻至本次土石流發生時刻的降雨稱為本次前段降雨，本次降雨開始時刻之前的降雨稱為本次降雨事件的前期降雨；本次土石流發生時刻至本次降雨結束時刻的降雨稱為本次後段降雨，而本次降雨結束時刻之後的降雨則稱為本次降雨事件的後期降雨。如果本次降雨事件中沒有發生土石流，則以本次降雨過程的峰值降雨發生時刻做區分，本次降雨開始時刻至峰值降雨時刻之間的降雨稱為本次前段降雨，峰值降雨時刻之後至本次降雨結束時刻之間的降雨則稱為本次後段降雨。

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降雨，其降雨量稱為本次前段降雨累積雨量。本次降雨開始時刻之前的降雨(本次降雨的前期降雨)，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本次激發土石流的臨界短歷時降雨強度的影響越大；反之，越遠離本次降雨事件的前期降雨

對土石流短歷時激發降雨強度的影響越小。本文定義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  $R$ ，即

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

其中  $R_0$  為本次前段降雨累積雨量， $R_i$  ( $i=1, 2, \dots, 7$ ) 為本次降雨開始時刻前  $i$  天日雨量， $\alpha$  為日雨量加權係數(本文取  $\alpha = 0.8$ )。

本文以本次降雨事件的降雨強度  $I$  和有效累積雨量  $R$  之乘積作為評估土石流發生與否的“降雨指標”，即

$$I \times R = C \quad (3)$$

其中降雨指標  $C$  的單位為  $mm^2/hr$ ；降雨強度  $I$  的單位(無論是十分鐘降雨強度或時降雨強度)習慣上均表示為  $mm/hr$ ；有效累積雨量  $R$  的單位為  $mm$ 。

#### 四、土石流發生降雨警戒模式及基準值之建立

在建立某土石流潛勢溪流發生土石流降雨警戒模式之前，先要在土石流潛勢溪流集水區內，選取最具有代表性的雨量站，作為進行降雨土石流預報的雨量代表站(或稱參考雨量站)。確定有代表性的雨量站，才能準確說明土石流發生時的降雨條件，一般而言代表雨量站最好是位於土石流的形成區內。收集代表雨量站歷年降雨時間序列(無論是否有發生土石流)，依據前一章節雨場分割方式，將降雨時間序列分割成許許多多的降雨事件(降雨場次)，計算每次降雨事前段降雨的平均降雨強度  $I$  及有效累積雨量  $R$ ，進而計算出每次降雨事件的降雨指標  $C (= IR)$ 。以降雨事件發生時間排序  $N$  為橫軸，降雨事件的降雨指標  $C$  為縱軸，建立降雨指標與降雨事件發生時間排序關係圖，即  $C-N$  圖。將所有有發生土石流的降雨指標(以圈號表示)及沒有發生土石流的降雨指標(以叉號表示)點繪於  $C-N$  圖上，如圖3所示。

假設某代表雨量站多年降雨時間序列(無論是否有發生土石流),經過兩場分割後,共有M次降雨事件,其中有發生土石流的降雨事件有 $M_1$ 次,沒有發生土石流的降雨事件有 $M_2$ 次( $M_2=M-M_1$ )。用前述的方法分析後,可得到 $M_1$ 個有發生土石流的降雨指標(C值)及 $M_2$ 個沒有發生土石流的降雨指標(C值)。將有發生土石流的降雨指標及沒有發生土石流的降雨指標分別進行統計分析,然後以有發生土石流的降雨指標 $C_{10}$ (表示在有發生土石流的降雨指標當中有10%的降雨指標小於此值)為下緣線( $IR=C_{10}$ ),以沒有發生土石流的降雨指標 $C_{90}$ (表示在沒有發生土石流的降雨指標當中有90%的降雨指標小於此值)為上緣線( $IR=C_{90}$ ),將降雨指標與降雨事件發生時間排序關係圖(C-N 圖)區分為上、中、下三個區域,如圖4a所示,或轉換成降雨強度I與有效累積雨量R關係圖(I-R 圖)區分為上、中、下三個區域,如圖4b所示。在下緣線( $IR=C_{10}$ )以下的區域是土石流發生可能性很低的區域,而在上緣線( $IR=C_{90}$ )以上的區域是土石流極可能發生的區域。在下緣線與上緣線之間的區域則是一個過渡區域,降雨指標落於過渡區的降雨,可能會發生土石流也可能不會發生土石流,在過渡區中越接近上緣線則發生土石流可能越高。當下緣線與上緣線確定之後,也可以降雨強度 I 為縱座標以有效累積雨量 R 為橫座標建立土石流發生可能性分區圖。

此外,對某一個土石流潛勢溪流而言,其集水區內沒有發生土石流的降雨事件遠遠多於有發生土石流的降雨事件,因此以統計分析沒有發生土石流的降雨指標來推求 $C_{90}$ ,不會有資料數量不足的問題;但是有發生土石流的降雨事件往往不是很多,因此我們建議當有發生土石流的降雨事件數量大於10次時,直接用統計方法推求 $C_{10}$ ;當有發生土石流的降雨事件數量介於5至10次時,以有發生土石流的降雨事件的最小降雨指標值代表 $C_{10}$ 值;當有發生土石流的降雨事件數量小於5次時,則以該集水區或鄉鎮區目前水土保持局所採用的降雨警戒基準值( $I_n, R_n$ )的乘積視為 $C_{50}$ ( $= I_n R_n$ ),利用 $C_{90}$ 與 $C_{50}$ 間之機率

分布比例,並參考土石流發生資料點定出最小降雨指標 $C_{10}$ 。

為了便於說明一場降雨激發土石流的可能性,將下緣線( $IR=C_{10}$ )及上緣線( $IR=C_{90}$ )分別定為土石流發生的可能性是10%及90%。當降雨指標落於下緣線的下方時,表示該次降雨激發土石流的可能性小於10%;反之,當降雨指標落於上緣線的上方時,表示該次降雨激發土石流的可能性大於90%。當降雨指標C值落於過渡區時( $C_{10} < C < C_{90}$ ),則該次降雨激發土石流的可能性 $P(C)$ 以線性分布方式定義為

$$P(C) = 0.1 + 0.8 \left( \frac{C - C_{10}}{C_{90} - C_{10}} \right) \quad (4)$$

例如,若某次降雨事件的C值恰巧落於 $C_{10}$ 和 $C_{90}$ 的中間時,則由(4)式可以推算該次降雨激發土石流的可能性 $P(C) = 50\%$ 。另一方面,當 $C_{10}$ 、 $C_{90}$ 及土石流發生可能性 $P(C)$ 已知時,可由下式計算其所對應之降雨指標C值

$$C(P) = C_{10} + \left( \frac{P - 0.1}{0.8} \right) (C_{90} - C_{10}) \quad (5)$$

## 五、區域性土石流發生降雨警戒值

由於土石流潛勢溪流內並不是經常發生土石流,世界上除了極少數的溪流會經常發生土石流之外(例如中國大陸蔣家溝每年六月至九月期間大約發生十餘次土石流事件),絕大多數的土石流潛勢溪流偶爾才發生一次土石流,其發生土石流的時間間距由數年、數十年或更長的時間。因此絕大多數的土石流潛勢溪流都缺乏或只有少數的土石流發生紀錄資料。台灣地區土石流的問題在1980年代初期起才開始被重視,而且同一條土石流潛勢溪流其土石流發生的時間間距往往是數年、數十年或更長的時間。台灣地區已經被確認的土石流潛勢溪流有1,420條,但是每一條潛勢溪流內土石流發生的紀錄卻寥寥無幾,如果想以降雨資料及統計方法,分析單一條土石流潛勢溪流發生土石流可能性的臨界降雨警戒值時,會面臨土石流發生紀錄不

足的問題。因此我們不能單獨分析單一條土石流潛勢溪流發生土石流可能性的臨界降雨警戒值時，而只能分析比較大的區域或流域內土石流發生之可能性，這個較大的區域或流域內包含有許多條土石流潛勢溪流及有較多的土石流發生紀錄。也就是說，雖然目前無法以單一土石流潛勢溪流發生土石流的紀錄建立降雨警戒值，但是可以用區域性土石流潛勢溪流發生土石流的紀錄去發展區域性土石流發生降雨警戒值。除了土石流發生紀錄事件不足的問題之外，還有絕大數的土石流潛勢溪流的土石流形成區是缺乏雨量站的，因此只能將就選用土石流潛勢溪流下游或鄰近地區的雨量站作為代表雨量站。當分析區域性土石流發生降雨警戒值時，可選用接近土石流潛勢溪流的雨量站作為代表雨量站；對於比較大的地區可能會用兩個或更多的雨量站資料，分析降雨條件及計算其降雨指標。在進行區域性土石流分析時，可選擇大的集水區當作分析的對象(例如陳有蘭流域)，或選擇行政區當作分析的對象(例如南投縣水里鄉)；不同區域大小的選擇及區域劃分的方法，自有其優點與缺點。

如前節所述，台灣地區單一條土石流潛勢溪流的發生紀錄很有限，目前尚且無法建立適合單一條土石流潛勢溪流的降雨警戒值，因此本文發展區域性土石流潛勢溪流的降雨警戒值。在區域的選擇上，本文選用以鄉鎮區為單元的方式劃分區域，依據土石流發生紀錄的充足與否，將台灣本島具有山坡地之鄉鎮區分為三種類型：(1)多次土石流發生紀錄( $\geq 5$ 次)的鄉鎮區 16 個、(2)少次土石流發生紀錄(1至4次)的鄉鎮區 61 個及(3)缺乏土石流發生紀錄的鄉鎮區 148 個，如圖 5 所示。

以鄉鎮區為單元時，代表雨量站的選取原則如下：(1) 當該鄉鎮區內集水區有雨量站，則採用最接近土石流潛勢溪流之雨量站；(2) 當該鄉鎮區內集水區無雨量站，則採用鄉鎮外但同一集水區而且最接近土石流潛勢溪流之雨量站；若仍無雨量站，則採用最接近土石流潛勢溪流的集水區之雨量站；(3) 當鄉鎮區中若有多個子集水區時，在每一子集水區內各採用最接近土石流潛勢溪流之雨

量站；(4) 若同一個集水區內之土石流潛勢溪流眾多或過於分散時，則可視情況採用二個或二個以上的雨量站。

以南投縣水里鄉為例，依據前述雨量站的選取原則，選用龍神橋雨量站(C1I16)降雨資料計算水里鄉南部降雨指標，選用青雲雨量站(C1I15)降雨資料計算水里鄉東部及西部降雨指標，及選用魚池雨量站(C1H91)降雨資料計算水里鄉北部降雨指標，各雨量站之相關地理位置如圖 6 所示。

總共分析三年的降雨事件資料(2000年至2002年)，然後建立南投縣水里鄉921集集大地震後土石流發生降雨警戒基準值。在此三年當中有發生土石流事件的降雨事件共13次，沒有發生土石流事件的降雨事件共71次。將水里鄉此三年所有有發生土石流的降雨指標C值(以圈號表示)及沒有發生土石流的降雨指標C值(以叉號表示)點繪於降雨指標及降雨事件發生時間排序關係圖，即C-N圖，如圖3所示。以有發生土石流的降雨指標推求得 $C_{10} = 300$ ，以沒有發生土石流的降雨指標推求得 $C_{90} = 2,020$ 。當降雨指標 $C_{10}$ 及 $C_{90}$ 所對應之土石流發生可能性分別為10%及90%時，南投縣水里鄉土石流發生可能性為50%時所對應之降雨指標C則為1,160。當下緣線( $IR = C_{10}$ )與上緣線( $IR = C_{90}$ )確定之後，也可以降雨強度I為縱座標，以有效累積雨量R為橫座標，建立土石流發生可能性分區圖。

為讓土石流防治之相關工作人員及一般民眾都能清楚的了解當地土石流發生降雨警戒之相關資料(如地理位置、基本資料、土石流災害歷史紀錄、土石流潛勢溪流、採用氣象局雨量站、發生機率範圍、機率方程式及機率式警戒圖等)，本文以表3的方式來展現各鄉鎮區機率式土石流發生警戒基準之各項資料。

## 六、土石流發生降雨警戒模式應用

前節應用 921 集集大地震後三年的降雨資料(2000年至2002年)，已經建立南投縣水里鄉土石流發生降雨警戒模式下緣線( $IR = C_{10}$ )與上緣線( $IR = C_{90}$ )的基準值。當應用本文所發展土石流發生可能性降雨警戒模

式時，以降雨指標  $C$  值為縱座標，以時間  $t$  為橫座標，選取 90 年 7 月 30 日桃芝颱風及 92 年 5 月 15 日一場豪雨兩場降雨事件進行分析，其中前一場降雨事件有激發土石流而後一場降雨事件沒有激發土石流。圖 7 顯示桃芝颱風 90 年 7 月 30 日當日龍神橋雨量站 (C1116) 小時降雨強度  $I$ 、有效累積雨量  $R$  及降雨指標  $C$  值隨時間之變化。由圖中可知道該場降雨的降雨強度  $I$  及有效累積雨量  $R$  均非常大，最大降雨強度  $I$  約為 130 mm/hr，最大有效累積雨量  $R$  約為 510 mm；該場降雨的土石流發生降雨指標  $C$  值在當日凌晨 0:00 就已經高於警戒值的下緣線  $C_{10}(=300)$ ，然後降雨強度漸小，降雨指標  $C$  值略為減小，但於 2:00 以後雨量逐漸轉強，降雨指標  $C$  值急遽增加，在 5:00 時  $C$  值已經高於上緣線  $C_{90}(=2,020)$  了，而且後續的兩個小時仍繼續增加，然後雨量減小，但直到 15:00 以後， $C$  值才小於上緣線  $C_{90}$ 。水里鄉在當日降雨事件中，持續 10 個小時，處於土石流發生高可能性狀態(可能性高於 90%)。此外，水里鄉附近另外兩個雨量站，青雲雨量站(C1115)及魚池雨量站(C1H91)降雨資料計算結果也有類似之情形。這場特大降雨量結果造成水里鄉多處土石流發生。

圖 8 顯示 92 年 5 月 15 日一場豪雨事件在龍神橋雨量站(C1116)十分鐘降雨強度  $I$ 、有效累積雨量  $R$  及降雨指標  $C$  值隨時間之變化。由圖中可知道該場降雨的最大降雨強度  $I$  約為 24 mm/hr，前期雨量很小，最大有效累積雨量  $R$  只有 64 mm；該場降雨在 15:10 開始，剛下雨沒多久降雨強度就高於 10 mm，15:50 降雨指標  $C$  值就超過土石流發生警戒值的下緣線  $C_{10}$ ，也就是說土石流發生的可能性已經超過 10%，雖然降雨強度及降雨指標  $C$  值逐漸增加，但後來雨勢沒有再增加，最大之  $C$  值仍小於  $C_{50}$ ；此場降雨的  $C$  值雖然持續 2.5 小時是高於  $C_{10}$ ，但是都沒有超過  $C_{50}$ ，也就是說土石流發生的可能性低於 50%。水里鄉附近另外兩個雨量站，青雲雨量站(C1115)及魚池雨量站(C1H91)降雨資料計算結果也有類似之情形。這場降雨結果在水里鄉沒有發生土石流。

在前述水里鄉兩場降雨事件的應用上，可以看出本文所發展土石流發生可能性降雨警戒模式，在整個降雨事件的過程中，可藉由降雨指標  $C$  值隨時間的變化，判斷出土石流發生的可能性，而且也可以看出土石流發生可能性的持續時間及其隨時間的變化趨勢。此土石流發生的可能性及其隨時間的變化趨勢，可提供給相關單位作為發佈土石流發生不同程度警戒訊息之依據。

## 七、結論

- (1) 形成土石流的三個基本條件中以降雨條件最為活躍，如果能夠瞭解土石流潛勢溪流內降雨條件和土石流形成過程中的相互關係，就可以利用土石流潛勢溪流內降雨條件的變化規律及發展趨勢推估土石流發生之可能性。常被使用來分析土石流發生臨界降雨條件的降雨參數包括降雨強度  $I$ 、降雨延時  $T$ 、累積雨量  $R$  及前期降雨量  $P_0$ 。現有土石流發生臨界降雨關係式可區分  $I$ - $R$  模式、 $I$ - $T$  模式、 $R$ - $T$  模式、 $I$ - $P_0$  模式及其它模式，其中以  $I$ - $R$  模式及  $I$ - $T$  模式最為常見。但是不同研究人員對於本次降雨事件及降雨參數的定義並不一致，在應用時應加以注意。
- (2) 國內水土保持局目前使用的土石流發生降雨警戒模式屬於線性  $I$ - $R$  模式，模式中包含兩個經驗參數，它們需要依據許多有土石流發生的降雨事件來推求。由於同一地區土石流發生資料不多，要準確推估兩個待定經驗參數是很困難的。以往的應用經驗也發現目前的降雨警戒模式常發生預測不準的情況。預測不準的原因除了模式本身的因素之外，也常是因為土石流發生本身具有不確定性，但是目前降雨警戒模式缺乏說明土石流發生可能性的機制。
- (3) 本文以降雨強度  $I$  及有效累積雨量  $R$  的乘積作為降雨指標  $C$  值 ( $C = IR$ )，建立以降雨指標  $C$  值為判斷基準的土石流發生可能性降雨警戒模式。以降雨指標  $C$  為縱軸，降雨事件發生時間排序  $N$  為橫軸，建立降雨指標與降雨事件發生時間排序關係圖，即  $C$ - $N$  圖。以歷年有發生土石流

的降雨指標  $C_{10}$  為下緣線，以沒有發生土石流的降雨指標  $C_{90}$  為上緣線，將  $C-N$  圖區分為三個區域。在下緣線以下及上緣線以上的區域分別代表土石流發生可能性低於 10% 及高於 90% 的區域。在下緣線與上緣線之間的區域則是一個過渡區域，土石流發生的可能性介於 10% 至 90% 之間。

- (4) 台灣地區土石流潛勢溪流中土石流發生的時距往往是數年、數十年或更長的時間，因此同一條潛勢溪流有發生土石流的紀錄很少，目前無法以統計方法依據降雨資料建立個別潛勢溪流發生土石流降雨警戒值，只能用區域性土石流潛勢溪流發生土石流的紀錄去發展區域性土石流發生降雨警戒值。除了土石流發生紀錄事件不足的問題之外，還有絕大多數的土石流潛勢溪流的土石流形成區是缺乏雨量站的，目前將就選用土石流潛勢溪流下游或鄰近地區雨量站作為代表雨量站。為提升降雨警戒值的可靠性，建議相關單位於土石流形成區設置雨量站。
- (5) 本文以南投縣水里鄉為例，以龍神橋雨量站降雨資料計算水里鄉南部的降雨指標，青雲雨量站降雨資料計算水里鄉東部及西部的降雨指標及魚池雨量站降雨資料計算水里鄉北部的降雨指標，建立南投縣水里鄉 921 集集大地震後區域性土石流發生可能性降雨警戒模式。此降雨警戒模式的下緣線降雨指標  $C_{10}=300$  及上緣線降雨指標  $C_{90}=2,020$ ，分別代表土石流發生可

能性為 10% 及 90%。當南投縣水里鄉降雨指標  $C$  等於 1,160 時，其發生土石流的可能性為 50%。

- (6) 應用本文所發展區域性土石流發生可能性降雨警戒模式於南投縣水里鄉，分析 90 年 7 月 30 日桃芝颱風及 92 年 5 月 15 日豪雨等兩場降雨事件過程中，降雨指標  $C$  值隨時間之變化分析結果顯示，前一場降雨事件的  $C$  值持續 10 個小時高於  $C_{90}$ ，即持續 10 個小時處於土石流發生高可能性狀態(可能性高於 90%)；後一場降雨的  $C$  值雖然持續 2.5 小時是高於  $C_{10}$ ，也就是說該場降雨激發土石流的可能性低於 50%。兩場降雨事件的分析結果與實際情況(前一場降雨有激發土石流而後一場降雨沒有激發土石流)相符合。
- (7) 在水里鄉兩場降雨事件的應用結果顯示本文所發展土石流發生可能性降雨警戒模式，在整個降雨事件的過程中，可藉由降雨指標  $C$  值隨時間的變化，判斷出土石流發生的可能性及其隨時間的變化趨勢，因此可作為發佈土石流發生可能性警戒訊息之參考。然而，不同地區的降雨警戒基準值  $C_{10}$  及  $C_{90}$  可能會不一樣，它們可能會隨著地文條件之差異而有所不同，未來應加強分析降雨警戒基準值( $C_{10}$  及  $C_{90}$ ) 與地文特性之關係。

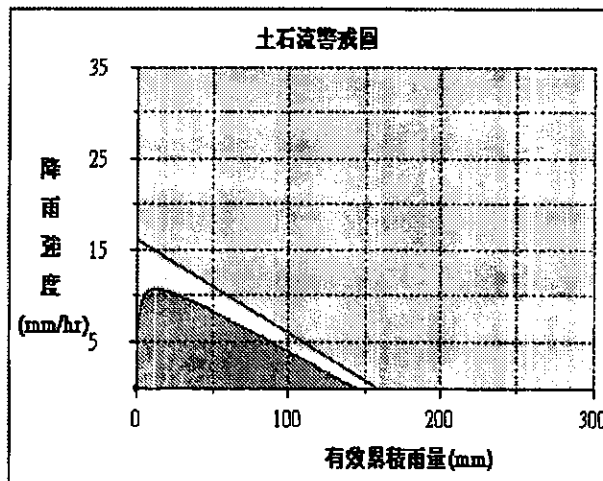


圖 1 國內目前採用之土石流發生降雨警戒模式示意圖



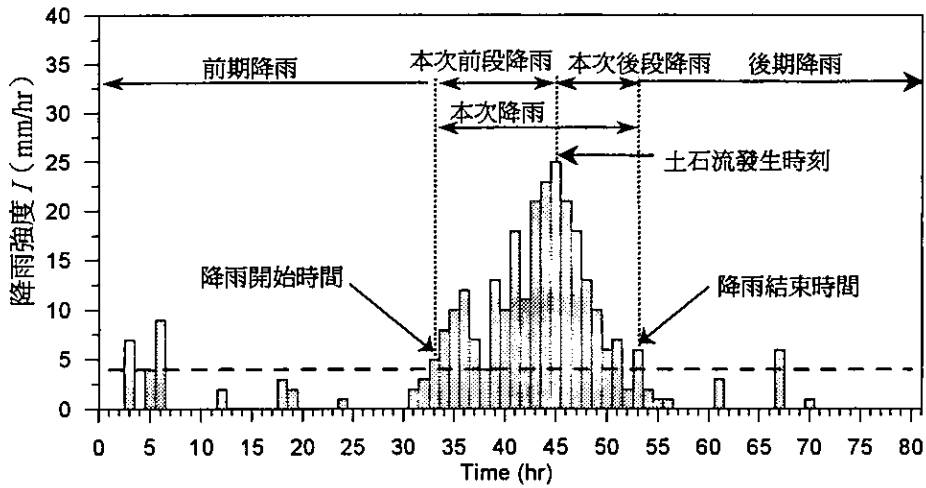


圖 2 本文所採用的雨場分割方法示意圖

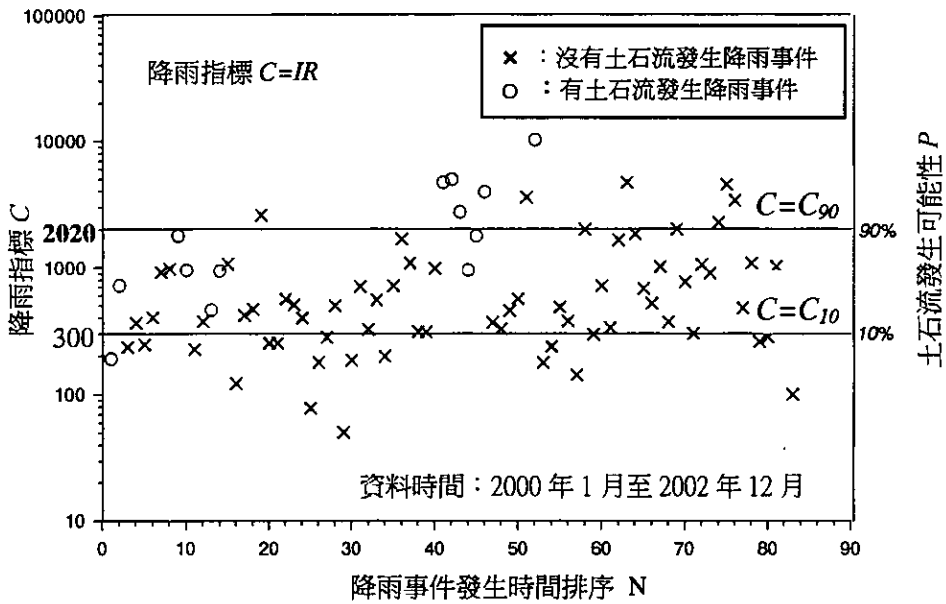


圖 3 水里鄉龍神橋雨量站各場降雨事件之降雨指標及警戒降雨指標  $C_{90}$  及  $C_{10}$  之劃定

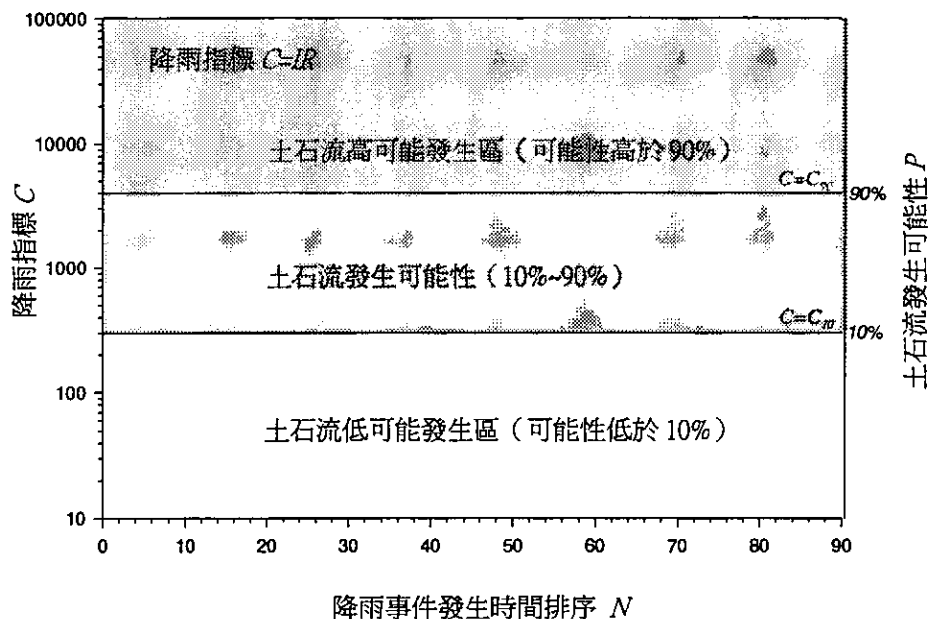


圖 4a 以降雨指標區分土石流發生可能性示意圖

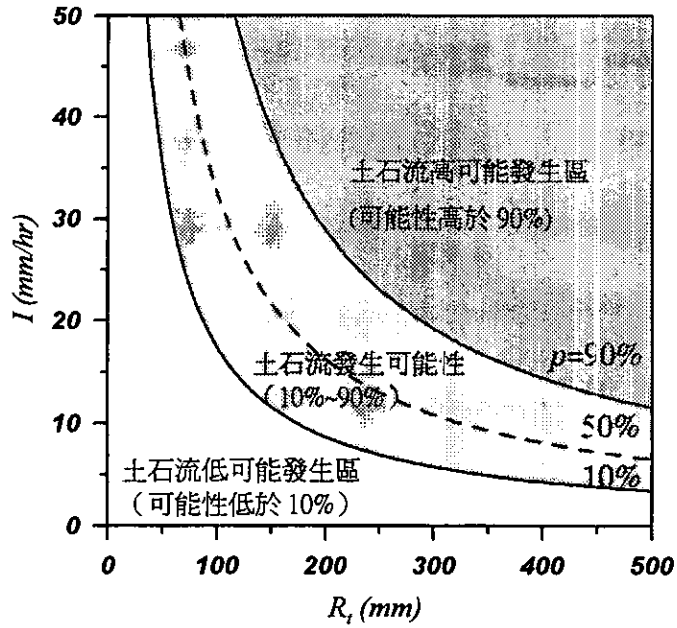


圖 4b 土石流發生可能性分區示意圖

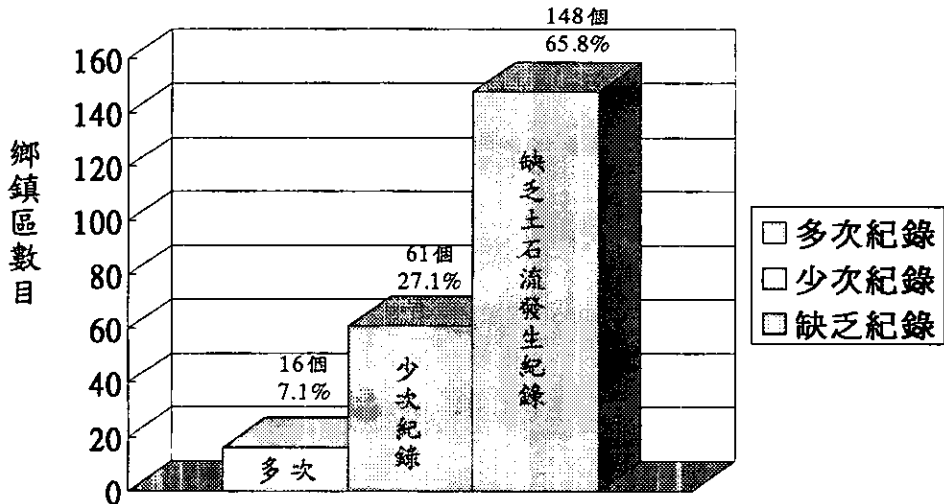


圖 5 台灣本島具有山坡地之鄉鎮區土石流發生紀錄統計

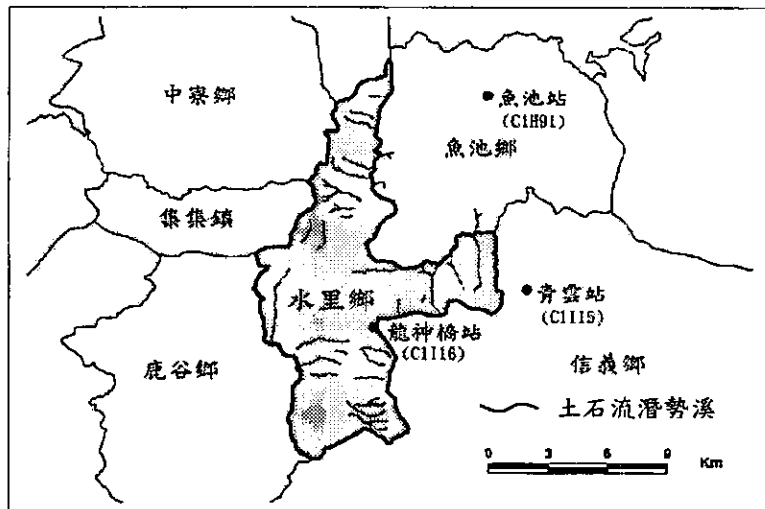


圖 6 南投縣水里鄉土石流潛勢溪流及參考雨量站之相關位置

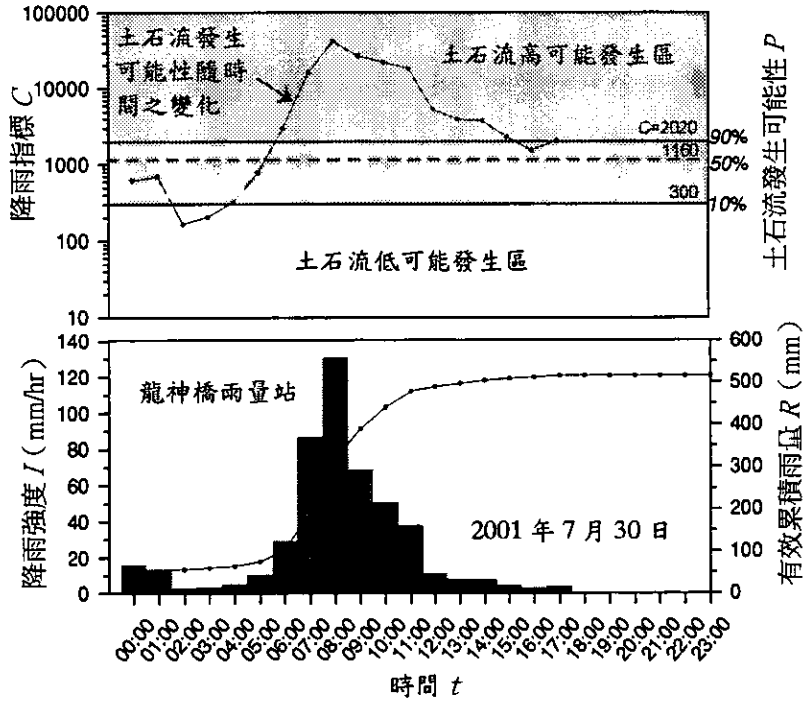


圖 7 水里鄉桃芝颱風期間降雨強度、有效累積雨量、降雨指標及土石流發生可能性隨時間之變化

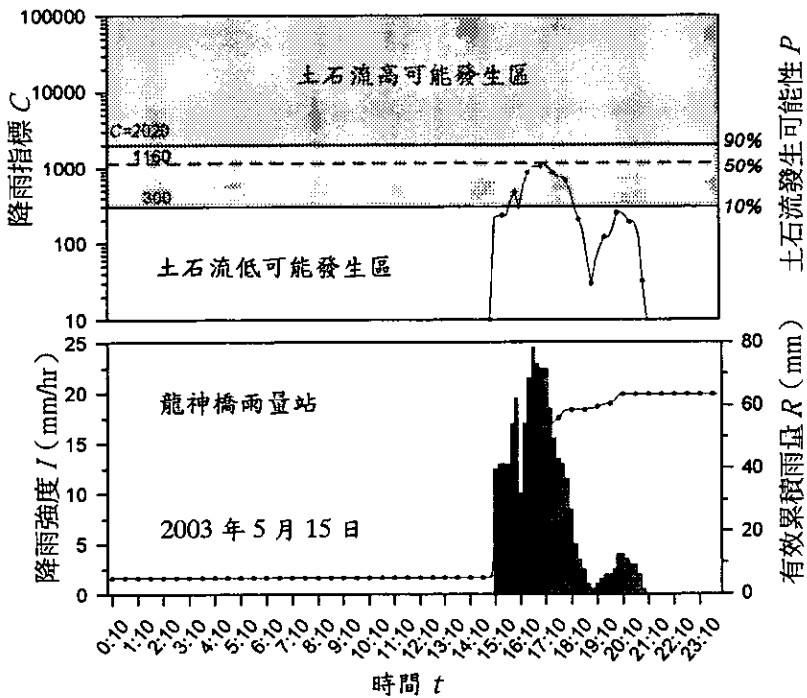
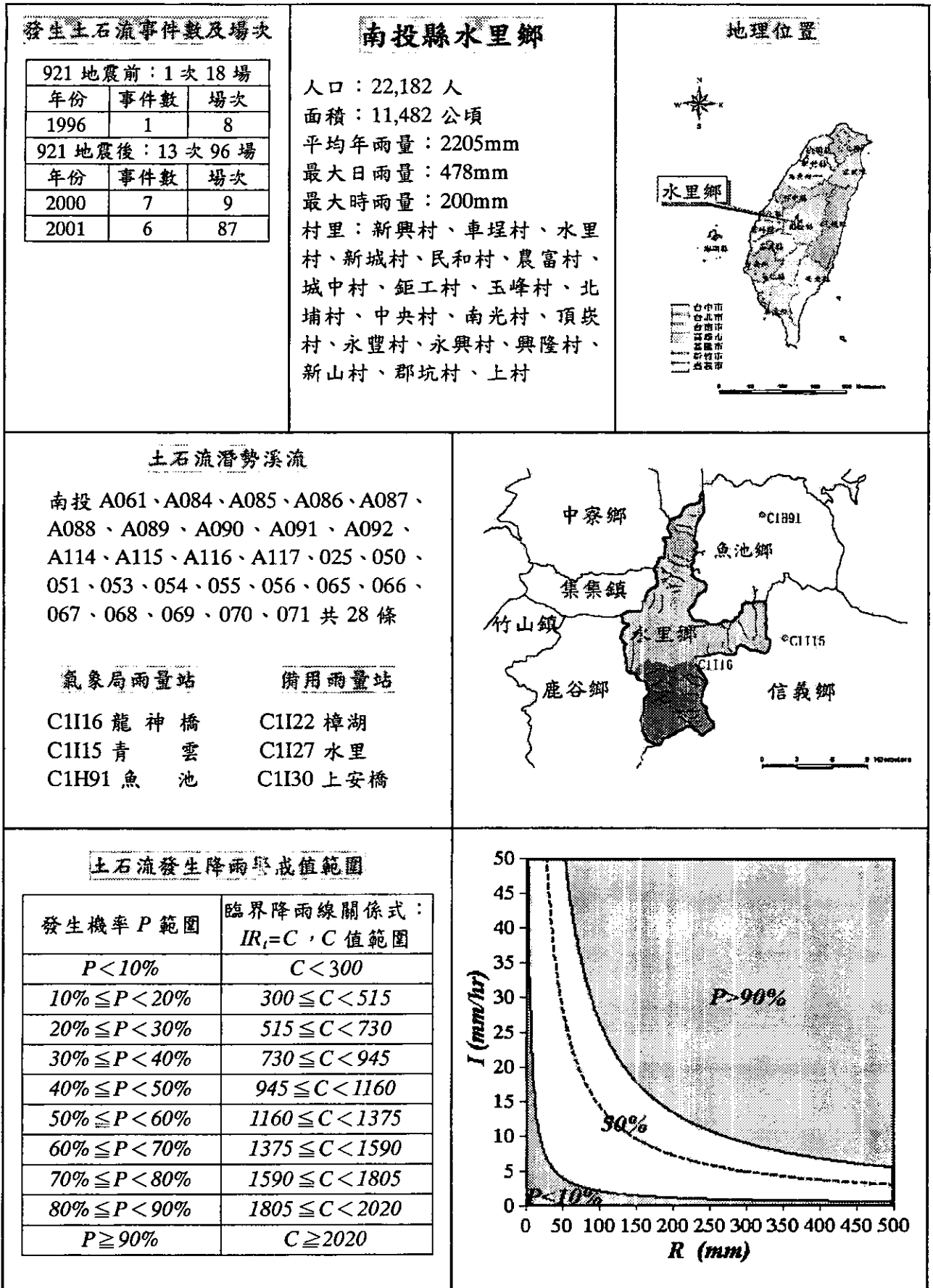


圖 8 水里鄉 2003 年 5 月 15 日豪雨期間降雨強度、有效累積雨量、降雨指標及土石流發生可能性隨時間之變化

表3 南投縣水里鄉機率式土石流發生警戒基本資料表



## 參考文獻

- [1] 江永哲與林啟源 (1991),『土石流之發生雨量特性分析』,中華水土保持學報,第22卷,第2期,第21-37頁。
- [2] 吳積善等人 (1990),『雲南蔣家溝土石流之觀測研究』,中國大陸科學出版社。
- [3] 孟河清 (1991),『泥石流之發生和降雨』,第二屆全國泥石流學術會議論文集,第143-148頁。
- [4] 范正成、姚正松 (1997),『台灣東部地區土石流發生的水文及地文條件應用於土石流預警之初步研究』,中華民國第一屆土石流研討會,第125-139頁。
- [5] 范正成、吳明峰、彭光宗 (1999),『豐丘土石流發生臨界降雨線之研究』,地工技術,第74期,第39-46頁。
- [6] 范正成、吳明峰 (2001),『一級溪流土石流危險因子及其與臨界降雨線之關係』,中華水土保持學報,第32卷,第3期,第227-234頁。
- [7] 姚善文 (2001),『土石流發生之水文特性探討』,中央大學土木系碩士論文。
- [8] 陳晉琪 (2000),『土石流發生條件及發生機率之研究』,成功大學水利及海洋工程系博士論文。
- [9] 黃俊耀 (2000),『台灣地區土石流發生臨界降雨特性之研究-以花蓮、台東及南投縣為例』,成功大學水利及海洋工程系碩士論文。
- [10] 詹錢登 (2002),『土石流發生降雨警戒值模式之研究』,農委會水土保持局。
- [11] 謝正倫、江志浩、陳禮仁 (1992),『花東兩縣土石流現場調查與分析』,中華水土保持學報,第22卷,第2期,第109-122頁。
- [12] 謝正倫、陸源忠、游保杉、陳禮仁 (1995),『土石流發生臨界降雨線設定方法之研究』,中華水土保持學報,第26卷,第3期,第167-172頁。
- [13] 謝正倫 (2001),『桃芝颱風土石流災害發生基準初步研究』,土石流災害及其防制對策研討會論文集,第83-102頁。
- [14] 譚萬沛 (1991),『降雨泥石流的臨界雨量研究』,第二屆全國泥石流學術會議論文集,第136-142頁。
- [15] 青木佑久 (1980),『過去に土石流災害等の災害なまらした降雨特徴』,土木技術資料,Vol22, No.2, pp.71-76。
- [16] 網千壽夫 (1972),『集中豪雨とつせ土斜面の崩壊』,施工技術,Vol5, No.11, pp.45。
- [17] 瀨尾克美、船崎昌繼 (1973),『土砂害(主に土石流的被害)と降雨量について』,新砂防,Vol89, pp.22-28。
- [18] 瀨尾克美、横部幸裕 (1978),『土砂害(主に土石流的被害)と降雨量について』,新砂防,Vol108, pp.14-18。
- [19] Caine, N. (1980), "The Rainfall Intensity Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows," Geografiska Annaler, Vol .62, pp.23-27.
- [20] Cannon, S.H. and S.D. Ellen (1985), "Rainfall Conditions for Abundant Debris Avalanches in San Francisco Bay Region California," California Geology, Vol .38, No.12, pp.267-272.
- [21] Jan, C.D., Lee, M. H., Huang T. H. (2003), 「Effect of Rainfall on Debris Flows in Taiwan」, International Conference on Slope Engineering, Vol. 2, pp.741-751, Hong Kong.
- [22] Keefer, D. K. et al. (1987), "Real-Time Landslides Warming During Heavy Rainfall", Science, Vol .238, pp.921-925.
- [23] Wiczorek, G. F. (1987), "Effect of Rainfall Intensity and Duration on Debris Flows in Central Santa Cruz Mountains," Reviews in Engineering Geology, Vol .7, pp.93-104.
- [24] Wilson, R. C. (1997), "Normalizing rainfall/debris-flow thresholds along U. S. pacific coast for long-term variation in precipitation climate", Proceedings of the First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, San Francisco, pp.32-43.