

土石流發生危險度及時分析及評估系統（一）

Real-Time Analysis and Evaluating System for
Hazardous Degree of Debris Flow (I)

范正成
Jen-Chen Fan
國立台灣大學
農業工程研究所教授

摘 要

本研究以南投縣境內土石流發生區為主要研究對象，提出土石流發生臨界降雨線之設定方法，且針對南投縣內三十個危險溪流樣本，進行土石流發生危險因子之檢定分析。研究結果顯示土地利用因子、溪床平均坡度及土壤粒徑大於四號篩百分比等三項因子與土石流發生關係較為密切。另由曾發生土石流的十三個溪流樣本，配合通過檢定的危險因子，進行三維費雪區別函數分析，建立土石流發生臨界降雨線之預測公式，亦藉以推測未發生土石流集水區之臨界降雨線。

ABSTRACT

The sites for this study were selected at the places where debris flows had ever occurred in the Prefecture of Nan-tou. In this study, a method for determining the critical rainfall line of debris flow occurrence was proposed. Thirty high potential streams of debris flow in the Prefecture of Nan-tou were used as samples. Then, dangerous factors affecting the occurrence of debris flow were examined and analyzed. The results showed that the land use factor, average slope

steepness of the stream and the percentage of soil particles greater than sieve No.4 were relatively highly related to the occurrence of debris flow. In addition to this, three dimensional Fisher's linear discriminant function was conducted using the dangerous factors (which passed the examination) of the 13 streams in which debris flows had ever occurred to establish the equations for evaluating the critical rainfall line of debris flow occurrence. Using the equations, the critical rainfall lines of the watersheds in which debris flow had never occurred could also be evaluated too.

前 言

台灣地區多山，地形陡峭，地質脆弱，每逢颱風豪雨，常有山崩、地滑、土石流等坡地災害發生，其中尤以土石流發生迅速，動能強大，影響區域廣闊，最值得注意。然而，土石流之發生原因至今尚未完全瞭解，亦無法有效加以控制，因此，如何建立準確的預警系統，適時提出警訊，以幫助民眾及早因應並防範於未然，遂成為土石流防災研究上的重點工作。

土石流發生臨界降雨線為土石流事前預警系統發佈之重要依據。瀨尾克美及

橫部幸裕(1978)以日本六甲山系,大戶流域及木津上游流域的土石流發生降雨進行分析,並指出土石流災害發生與未發生之分界線,為有效降雨強度與有效降雨量之函數關係。Keefer et al.(1987)利用Caine(1980)、Ellen(1985)及 Wieczorek et al.(1987)所收集之土石流發生資料,以平均降雨強度與降雨延時之關係,建立土石流發生臨界降雨條件。謝正倫(1991)以暴雨之有效累積雨量及有效降雨強度為指標,推求花蓮縣各土石流發生地區之臨界降雨條件。范正成及林森榮(1996)、范正成及姚正松(1997)、范正成及彭光宗(1998)及范正成及吳明峰(1999)分別針對花蓮、台東及南投地區之土石流發生紀錄,配合當地水文及地文因子進行研究,並建立一、二級河川之臨界降雨線推求公式。

因此本計畫即以降雨的特性為基礎,配合地文因子和現地被開發的程度來發展出一套能預測土石流發生的系統,運用此機制亦能評估出各個地方對於發生土石流的敏感性,藉以對於土石流的發生提供有效的預警。

研究方法

本預警系統的執行流程圖如圖 1.所示。大致可分成資料蒐集及臨界降雨線的推估兩部分。所需蒐集的資料有：(1)土石流發生記錄、(2)雨量資料、(3)土壤力學參數資料、(4)集水區地文因子資料、(5)植生狀況資料等分述如下。

資料蒐集與分析：

1.土石流發生記錄

引用范正成等(1998)有關南投地區土石流臨界降雨線研究中之記錄資料,該

資料係經由查閱過去文獻記錄及實際採訪當地居民及村里長而得,如表 1.所示。

2.雨量資料

本研究蒐集台灣省水利處於南投境內十七座雨量站,自民國 70 年 7 月至 87 年 10 月之時雨量紀錄,並以距離平方反比法(以距離遠近來決定權重,越近權重越大)推估南投境內共三十條樣本溪流之雨量。

例如點 X_0 之推估值： $\hat{Z}(X_0) = \sum_{i=1}^n I_i Z(X_i)$, 其中 $Z(X_i)$ 為觀測點 (X_i, Y_i) 之測量值, I_i 為觀測點 (X_i, Y_i) 之權重係數。 $I_i = \frac{f(d_{oi})}{\sum_{j=1}^n f(d_{oj})}$,

$$f(d_{oi}) = \frac{1}{d_{oi}^2},$$

$$d_{oi} = \sqrt{(X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2} \text{ (距離)}.$$

3.土壤力學參數資料：

針對所選定之三十條樣本溪流均進行現地密度試驗(砂錐法)及室內土壤力學試驗,試驗項目包括土壤粒徑(大於 4 號篩重量百分比、小於 200 號篩重量百分比)、土壤孔隙率、土壤孔隙比、土壤乾燥單位重、土壤飽和單位重、凝聚力、內摩擦角、塑性指數等,共八項參數。

3.1 土壤粒徑

在本計畫中採用土壤粒徑大於 4 號篩之重量百分比(粗顆粒)和土壤粒徑小於 200 號篩之重量百分比(細顆粒)兩個參數為考量因子。

3.2 土壤孔隙率及孔隙比

土壤孔隙率(porosity, n)指的是在土壤中,土壤顆粒以外之孔隙體積(volume of voids)與土壤總體積(total volume of voids & soil solids)之比,其值介於 0 與 1 之間,孔隙越大表示土壤越疏鬆。土壤孔隙比(void ratio, e)指的是在土壤中,土壤顆粒以外之孔隙體積與土壤顆粒所佔體積(volume of soil solids)之

比。孔隙比越大，亦表示土壤越疏鬆。因為孔隙率與孔隙比有下列之絕對相依的關係： $n=e/(1+e)$ ，因此只取一項分析即可。

3.3 土壤乾燥單位重

土壤乾燥單位重(dry unit weight, γ_d)指的是土壤在完全乾燥下，單位體積土壤所佔的重量。其使用單位通常為(gw/cm^3)。在乾燥單位重是土壤密實度的一般指標。因為在自然狀態中，乾燥單位重在現地並不隨含水量之改變而改變。

3.4 土壤飽和單位重

土壤飽和單位重(saturated unit weight, γ_{sat})指的是當土壤內的孔隙完全被水充滿的狀態下，其單位體積中，土壤連同充滿孔隙中之水所佔的重量。使用單位與乾燥單位重相同(gw/cm^3)。

3.5 凝聚力及內摩擦角

對大多數土壤力學問題而言，在一土體破壞面上，利用正應力的線性函數即可充份近似相對應的剪應力，並求得土壤之凝聚力與內摩擦角。其關係可寫成下式(亦即 Mohr-Coulomb 破壞準則)：

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

其中

τ_f ：剪應力(shear stress)

c ：凝聚力(cohesion)

σ ：正應力(normal stress)

ϕ ：內摩擦角(angle of internal friction)

3.6 塑性指數

塑性指數(plasticity index, PI)為一重要的阿太堡限度(Atterberg limits)指數，其為液性限度(LL)與塑性限度(PL)之差，即 $PI=LL-PL$ ，也就是土壤在塑性狀態含水量之範圍。所謂液性限度(LL)是指

土壤由半固態變為液態時之臨界含水量，測定方式通常使用 ASTM D423；塑性限度(PL)是指土壤之塑性狀態與半固體狀態之臨界含水量，測定方式通常使用 ASTM D424。通常土壤之塑性指數越大，其滲透性越小，而不排水剪力強度也越大。

4.集水區地文因子資料：

係以數值地形(DTM)資料，利用地理資訊系統軟體(ARCVIEW, ARC/INFO 等)加以分析整理而得。(如圖 2.所示)

4.1 集水區面積

集水區面積(Watershed, A)，係以土石流發生災害處向上溯源之集水面積為量測的範圍，若該點溪床平均坡度未超過 6 度則向上溯源到平均坡度為 6 度處為計算點，在未發生土石流的樣本中，通常以溪流與道路橋涵交匯處向上溯源之集水面積為量測依據，溪床平均坡度亦要考慮。單位為公頃，量測作業工具為利用 ARC/INFO 軟體的網格分析計算而得。

4.2 溪流長度

溪流長度(Length of main stream, L)，亦以土石流發生災害處向上溯源之集水面積為量測的範圍，在未發生土石流的樣本中，通常以溪流與道路橋涵交匯處向上溯源之量測之。單位為 km，量測作業工具為利用 ARC/INFO 軟體分析計算而得。

4.3 集水區平均寬度

集水區平均寬度(Mean width, W)，即為集水區面積(A)除以河川長度(L)之商，單位為 km。

$$W = \frac{A}{L} \quad (km) \quad (2)$$

4.4 集水區形狀因子

集水區形狀因子(Form factor, F)，為

1932 年荷頓氏所提出,其定義為單位主要河川長度之流域寬度。為一無因次參數。

$$F = \frac{W}{L} = \frac{\frac{A}{L}}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (3)$$

4.5 溪床平均坡度

溪床平均坡度(Mean slope, S), 其推求方法有很多種, 在本研究中乃依照王如意、易任(1979)「應用水文學」中平均坡度之求法, 以泰勒及施瓦茲氏法(Taylor and Schwarz method)求取。此法是將河川分成 n 段, 每段具平均坡度 S_i , 則溪床平均坡度可表示如:

$$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^n S_i^{1/2}}{n} \right)^2 \quad (4)$$

其中各段 S_i 的求法為:

$$S = SIN^{-1} \left(\frac{h_i}{l_i} \right) \quad (5)$$

當中 h_i 為第 i 段之上游高程與下游高程之差。 l_i 為第 i 段之河川長度。

5. 植生狀況資料:

植生狀況資料, 係以集水區內土地是否為原始林地或人造林地所被覆作為量化之基準。在量化的過程中, 採用內政部發行之台灣地區相片基本圖, 其中凡非為原始林地或人造林地者, 均視為開發面積, 並以如下公式計算土地利用因子:

$$\text{土地利用因子} = \frac{\text{開發面積}}{\text{集水區總面積}}$$

地文因子總表如表 2. 所示。

土石流發生之臨界降雨線設定:

1. 雨量資料分析方法:

為使設定之臨界降雨線所憑藉之分析資料與預警系統所監測得知降雨資料能具有一致性, 遂以如下方式對曾發生土石流之一級溪流降雨資料進行分析。

(1) 雨場分割: 以一場集中降雨在其前 24 小時內累積降雨量達 10mm 之時間點, 稱之降雨開始時間。其後 24 小時內累積降雨量未達 10mm 之時間點, 稱之降雨結束時間。(如圖 3. 所示)

(2) 有效累積雨量(ER): 以任意時間之時雨量(d_0), 加上其前各時雨量(d_i) 乘以一衰減係數(α)後加以累加而得。

$$ER = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i d_i \quad (6)$$

根據 Fedora and Beschta(1989)於有關臨前降水指數模擬暴雨逕流之研究中指出, 每二小時的洪水消退係數(K, recession coefficient) 與集水區面積(A, 單位: 公頃) 具有如下關係:

$$K = 0.881 + 0.00793 * \ln(A) \quad (7)$$

因此本研究以衰減係數 $\alpha = \sqrt{K}$ 進行有效累積雨量計算。

(3) 有效降雨時間: 降雨開始時間至任意時間稱為有效降雨時間。

(4) 雨場數化: 造成土石流之降雨以土石流發生時之前六小時內最大及次大之有效累積雨量及其有效降雨時間代表該場降雨; 至於未發生者, 則以該場降雨內最大有效累積雨量時及降雨結束時間時之有效累積雨量及其有效降雨強度代表該場降

雨。(如圖 4.所示)

(5)雨場資料取舍:根據青木佑久(1980)研究日本 23 場降雨事件所造成的 46 場土石流災害,指出當累積降雨量在 150~200mm 以上,即可能發生土石流。因此為了消除低有效累積雨量雨場對以費雪線性區別函數分析時之影響,本研究中將各延時均勻降雨情況下累積降雨量未達 150mm 之降雨在分析時予以捨棄,亦即臨界降雨線設定所使用之降雨資料需滿足如下關係式:

$$ER \geq \frac{1-a}{1-a} \left(\frac{150}{T} \right) \quad (8)$$

其中 T :有效降雨時間(hr)

ER 及 a 上述同

(結果如圖 5.所示)

2.土石流危險因子檢定與分析:

所選定之影響因子,包括土地利用因子及地文因子類之集水區面積、溪流長度、集水區平均寬度、集水區形狀因子、溪床平均坡度,以及力學參數類之土壤孔隙比、土壤粒徑大於 4 號篩百分比、土壤粒徑小於 200 號篩百分比、土壤內摩擦角、土壤塑性指數等,統計檢定時分別針對上述各因子進行分析。

影響因子之檢定方法係無母數統計(Nonparametric Statistics)中的 Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定法,其具有檢定兩獨立樣本所來自母體的平均數是否相等的功能。本檢定法之應用需滿足兩母體皆為連續分配,變異程度相同,且皆為隨機樣本之基本假設。有關檢定的步驟如下。

a.設立虛無假設

H_0 : 兩母體的平均數 n_1 、 n_2 相等

b.將兩組獨立樣本混合,分別給予適當等級,得兩樣本個別的等級和為 W_1 、 W_2 。

c.計算:

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - W_1$$
$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - W_2$$

其中, n_1 及 n_2 分別代表樣本大小, U_1 代表第一組樣本觀測值小於第二組樣本觀測值的總個數, U_2 代表第二組樣本觀測值小於第一組樣本觀測值的總個數,並取二者中之小者作為檢定統計量 U 。

d.當 n_1 、 n_2 皆小於或等於 8 時,經由 Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定表,可查得在該 n_1 、 n_2 及 U 情況下,所對應之機率值 p ,若 $p < \mu/2$ 則拒絕雙尾檢定之虛無假設 H_0 ,若 $p < \mu$ 則拒絕單尾檢定之虛無假設 H_0 。

此檢定的理論基礎為,若兩獨立樣本來自同一母體或平均數相等的母體,則兩組樣本的觀測值會交錯排列,即 U_1 與 U_2 應極為接近,否則檢定統計量 U 必小,應該拒絕 H_0 ,表示母體可能不一致或平均數可能不同。

本研究檢定分析中,虛無假設 H_0 定義為:土石流發生與土石流未發生之影響因子是來自於相同之母群體。檢定後取分析之後最有相關之影響因子進行分析。分析時採用統計軟體為 SPSS for Windows Version 7.52(Statistical Package for the Social Science)。

3.臨界降雨線設定:

臨界降雨線之設定(發生與未發生資料之劃分)採用變異數分析中的費雪線性區別函數加以劃分,此方法係由謝正倫等(1995)首先以二維方式應用於土石流臨界降雨線之設定。本研究以有效降雨時間為 X 軸座標,有效累積降雨量為 Y 軸座標,再加入通過 Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定

之地文因子與力學參數之合成函數為 Z 軸座標，進行三維費雪區別函數分析，計算方法如下：

(a) 混合樣本變異數—共變數矩陣

$$\tilde{S}_{pooled} = \frac{(n_1 - 1)\tilde{S}_1 + (n_2 - 1)\tilde{S}_2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (9)$$

其中 n_1 、 n_2 為群體 R_1 、 R_2 的樣本數

$\tilde{S}_1$ 、 $\tilde{S}_2$ 為 R_1 、 R_2 的樣本變異數—共變數矩陣

(b) 費雪區別函數

$$Y_{fisher} = (\tilde{m}_1 - \tilde{m}_2)' \tilde{S}_{pooled}^{-1} \tilde{x} \quad (10)$$

其中 $\tilde{m}_1$ 、 $\tilde{m}_2$ 為兩群體之樣本平均數向量

得費雪區別函數

$$Y_{fisher} = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 \quad (11)$$

其中 x_1 ：有效降雨強度(mm/hr)

x_2 ：有效累積雨量(mm)

x_3 ：通過檢定因子之合成項

(c) 求出群體分界點

$$\bar{Y} = \frac{1}{2}(\tilde{m}_1 - \tilde{m}_2)' \tilde{S}_{pooled}^{-1} (\tilde{m}_1 + \tilde{m}_2) \quad (12)$$

將(式 12)套入(式 11)中，即得

$$x_1 = -\frac{k_2}{k_1} x_2 - \frac{k_3}{k_1} x_3 + \frac{\bar{Y}}{k_1} \quad (13)$$

(即為 $y = ax + bz + c$ 之形式)

結果與討論

1. 所選定的三十個溪流之集水區樣本，經考量其 10 個可能與土石流發生與否具有相關性的影響因子，分析結果得到下列三種因子對土石流之影響較大，因子檢定之分析結果如表 3 所示。

- (1) 土地利用因子。
- (2) 土壤粒徑大於四號篩百分比。
- (3) 溪床平均坡度。

2. 綜合各橋涵集水區之資料，以有效降雨時間為 X 軸座標，有效累積降雨量為 Y 軸座標，再加入通過 Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定之地文因子與力學參數之合成函數為 Z 軸座標，進行三維費雪區別函數分析。Z 軸座標之合成函數型式，如下：

$$Z = aM + b(\#4) + cS \quad (14)$$

其中 M ：土地利用因子

$\#4$ ：土壤粒徑大於四號篩百分比(%)

S ：溪床平均坡度(%)

a, b, c ：待定係數

分析時，採用 EXCEL 電子試算表及 EXCEL VBA 巨集程式輔助運算，調整各待定係數值，以使所得區別平面所造成之誤判點數最少，並使發生土石流群體中心值與不發生土石流群體中心值之 Z 軸距離最遠為目標。分析結果得最佳之土石流發生臨界降雨線方程式為：

$$Y = -1.669X + 27.821Z + 2750 \quad (15)$$

其中 Y ：有效累積降雨量(mm)

X ：有效降雨時間(hr)

$$Z = -0.1M - 0.1(\#4) - S \quad (16)$$

其中 M ：土地利用因子

$\#4$ ：土壤粒徑大於四號篩百分比(%)

S ：溪床平均坡度(%)

使用資料點數 718 點，誤判點數 61 點。以(15)式對研究區域內曾發生土石流各集水區所對應之 Z 軸平面上投影，可清楚看出該臨界降雨線方程式對各集水區之預測情形，如圖 6.至圖 7.所示。發生與未發生土石流預測正確率之情形列於表 4 與表 5。至於未發生土石流之集水區，亦可經由(15)式配合地文因子及力學參數計算求得土石流發生臨界降雨線。

結論與建議

一、結論：

- 1.本研究以南投縣為主要研究區域，選定三十個集水區為樣本，進行影響土石流發生之因子檢定。挑選之因子包括—土地利用因子及地文因子類之集水區面積、溪流長度、集水區平均寬度、集水區形狀因子、溪床平均坡度，以及力學參數類之土壤孔隙比、土壤粒徑大於 4 號篩百分比、土壤粒徑小於 200 號篩百分比、土壤內摩擦角、土壤塑性指數等。經過 Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定之後發現下列三種因子—土地利用因子、土壤粒徑大於四號篩百分比及溪床平均坡度對土石流之影響較大。
- 2.本計畫亦針對研究區域內提出通用的土石流臨界降雨線預測公式如下：
$$Y = -1.669X + 27.821Z + 2750$$
其中 $Z = -0.1M - 0.1(\#4) - S$
Y: 有效累積降雨量(mm)
X: 有效降雨時間(hr)
M: 土地利用因子
#4: 土壤粒徑大於四號篩百分比(%)
S: 溪床平均坡度(%)
對於未發生土石流之集水區，亦上式配合地文因子及力學參數計算求得土石流發生臨界降雨線。
- 3.各因子經統計分析與檢定之結果，發現研究區域內發生土石流之樣本溪流有以下之趨勢：土地利用較高、土壤粒徑大於四號篩百分比之含量較多和溪床平均坡度較陡時容易發生土石流。
- 4.本計畫所提出之臨界降雨線公式，能將研究區域內曾發生土石流集水區之土石流

發生與未發生時的降雨情況分隔開來，如此之結果具有下列意義：

- (1)土石流預警功效：以往臨界降雨線之推求是以一個大地區為範圍，而在此範圍內，所有溪流之土石流發生條件則被視為相同。然而，此種作法將忽略了小地區之特性，使結果產生失真的現象。而利用本研究所發展出來之推估公式，則可做小地區臨界降雨線之推求，以因應土石流預警之需求。
對於土地利用之改變(經開發或保育後植生情況之改變)，或未曾發生土石流災害之集水區，也可經由本研究的推估公式以及該集水區各危險因子之情況，求得其土石流發生之臨界降雨線。不必受到土石流發生資料蒐集困難之限制及地區環境現況改變仍使用老舊資料的困擾。
- (2).土石流危險溪流之判定：本研究提出之臨界降雨線公式，藉由地區之相關參數資料可直接設定該地之臨界降雨線，該臨界降雨線也具有該地區土石流災害發生勢能的代表意義。這樣的結果除了可直接做為土石流預警外，也可以用來做為南投地區土石流危險溪流之判定依據。
- (3).土石流災害之防治：利用本研究提出之土石流臨界降雨線推估公式，藉著對植生狀況之控制，將有助於研究區域內的工程決策及土地利用規劃，以達到土石流災害發生防治的目的。

二、建議：

- 1.在判定土地利用時，所採用的是台灣省林務局農林航空測量所發行之台灣地區相片基本圖第三版，其攝影之時間為民國 69 年 12 月，距今將近二十年，相信在判識植生覆蓋等土地利用等資料時，必定

有其誤差存在。因此在往後兩年的研究中，希望能以衛星影像的遙測資料來加以判識地表覆蓋物，讓土地利用分析的結果更有可信度。

2. 本研究中納入了集水區地文因子、土壤力學參數等 10 項因子接受相關性檢定，而土石流發生之機制極為複雜，故研究中所納入之 10 項因子可能尚不夠充份，如能加入集水區的地質條件、地形特徵、崩坍情況等，則對於本研究之結果會有相當的助益。
3. 土石流發生記錄稀少，是本研究亟待克服的問題，因此在未來的研究中，若能蒐集更多台灣地區其它曾發生土石流記錄集水區之相關資料一起分析，將有助於提高本研究成果之適用性及可信度。
4. 在土壤力學特性的試驗方面，由於現地之地質特性多屬礫石土，且土石流發生區內直徑大於一公尺以上的石塊隨處可見，傳統土壤力學試驗尺度是否能確實反應出現地之特性，仍值得懷疑，因此，建議將來可嘗試採用更大尺度的力學試驗，以獲致更具代表性的資料。

參考文獻

1. 范正成、林森榮(1997)，「土石流發生之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，中華民國八十六年三月十三、十四日，台灣省南投縣溪頭。pp.125-139.
2. 范正成、姚政松(1997)，「台灣東部地區土石流發生的水文及地文條件之初步研究」，中國農業工程學會八十六年度學術研討會，台南市。中華民國八十六年十二月十七日。pp.525-532.
3. 范正成、彭光宗、張國良(1998)，「土石流危險因子與臨界降雨線關係之研究」，中國農業工程學會八十七年度學術研討會，台北市。中華民國八十七年十二月二十二日。pp.221-228.
4. 范正成、吳明峰、彭光宗(1999)，『台灣地區道路橋涵系統土石流危險區觀測與預警之研究』，交通部研究報告。
5. 謝正倫(1991)，「土石流預警系統之研究」，成大水工試驗所，研究試驗報告第 130 號。
6. 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 卷第三期，pp.167-172。
7. 青木佑久(1980)，「過去土石流災害降雨特徵之研究」，土木技術資料，22-2，pp.71-76。
8. 瀨尾克美、橫部幸裕(1978)，「土砂害降雨量之研究」，新砂防，Vol.108，pp.14-18。
9. Caine, N. (1980) "The Rainfall Intensity Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows"，Geografiska Annaler Vol.62, pp.23-27.
10. 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..
11. Fedora, M.A. and R.L.Beschta. (1989) "Storm Runoff Simulation Using an Antecedent Precipitation Index(API) Model"，Journal of Hydrology, Vol 112, pp. 121-133.
12. Keefer, D.K., R.C.Wilson, R.K. Mark, E.E. Brabb, W.M.Brown, S.D. Ellen, E.L. Harp, G.F.Wieczorek, C.S. Alger, and R.S. Zarkin. (1987) "Real-Time Landslide Warning During Heavy Rainfall"，Science, Vol.238, pp.921-925.
13. Wieczorek, G.F. (1987)，"Effect of Rainfall Intensity and Duration on Debris Flows in Central Santa Cruz Mountains"，California,

Flows/Avalanches : Process,
Recognition and Mitigation,
Geological Society of America,
Reviews in Engineering Geology,
Vol.7, pp.93-104.

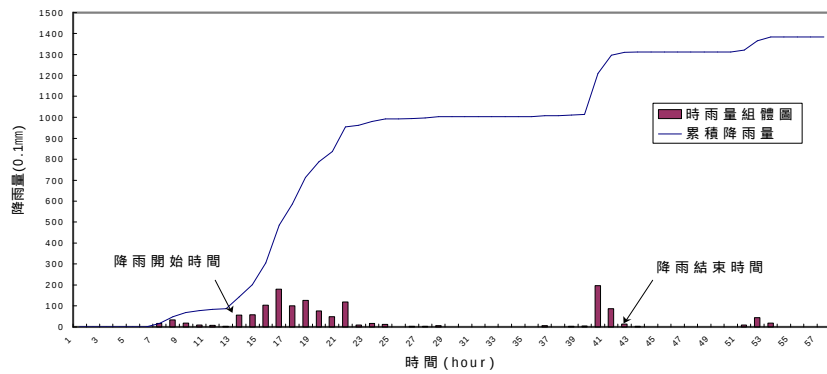


圖 3. 雨場劃分時間示意圖

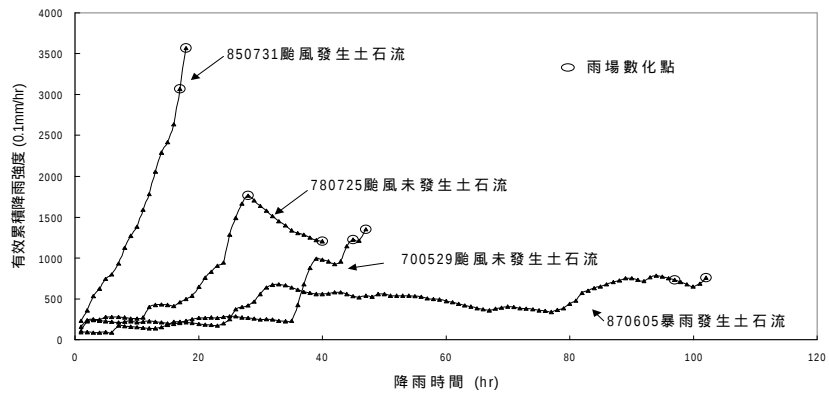


圖 4. 雨場數化案例說明

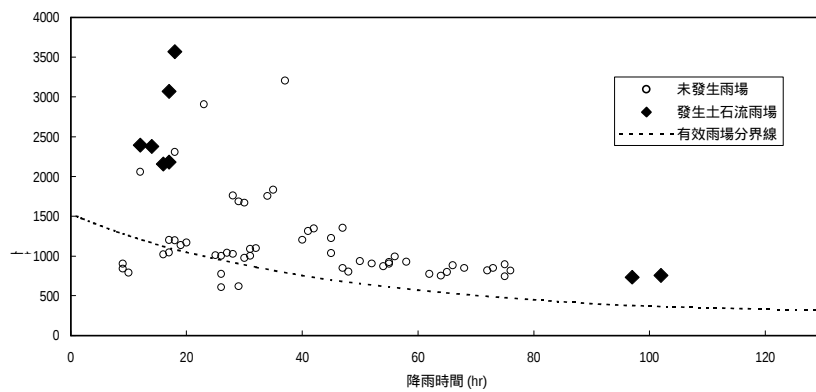


圖 5. 集水區雨場數化點

表 3. Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定結果

因子檢定結果					
力學參數	e	>#4	<#200	Tan(Φ)	
檢定機率值	0.346	0.063	0.660	0.630	
地文因子	A	L	W	shape	Slope
檢定機率值	0.691	0.917	0.544	0.770	0.149
土地利用因子	M				
檢定機率值	0.004				

表 4. 發生土石流雨場判斷情形

溪流名稱	實際量	推測量		正確率
	選用未發生土石流資料點	正確判斷點數	錯誤判斷點數	
新安橋	2	2	0	100%
新山橋	2	2	0	100%
郡平橋	2	2	0	100%
郡坑橋	2	2	0	100%
上安橋	2	2	0	100%
95.5K	2	2	0	100%
豐丘	8	6	2	75%
香蕉橋	2	2	0	100%
新興橋	2	2	0	100%
溪坪橋	2	2	0	100%
崩坎二橋	2	2	0	100%
苗圃	2	0	2	0%
哈比蘭	2	0	2	0%
合計	32	26	6	81%

表 5. 未發生土石流雨場判斷情形

溪流名稱	實際量	推測量		正確率
	選用未發生土石流資料點	正確判斷點數	錯誤判斷點數	
新安橋	52	46	6	88%
新山橋	51	45	6	88%
郡平橋	50	44	6	88%
郡坑橋	58	56	2	97%
上安橋	47	41	6	87%
95.5K	54	52	2	96%
豐丘	50	44	6	88%
香蕉橋	50	47	3	94%
新興橋	52	47	5	90%
溪坪橋	54	51	3	94%
崩坎二橋	55	53	2	96%
苗圃	58	55	3	94%
哈比蘭	50	45	5	90%
合計	681	626	55	92%

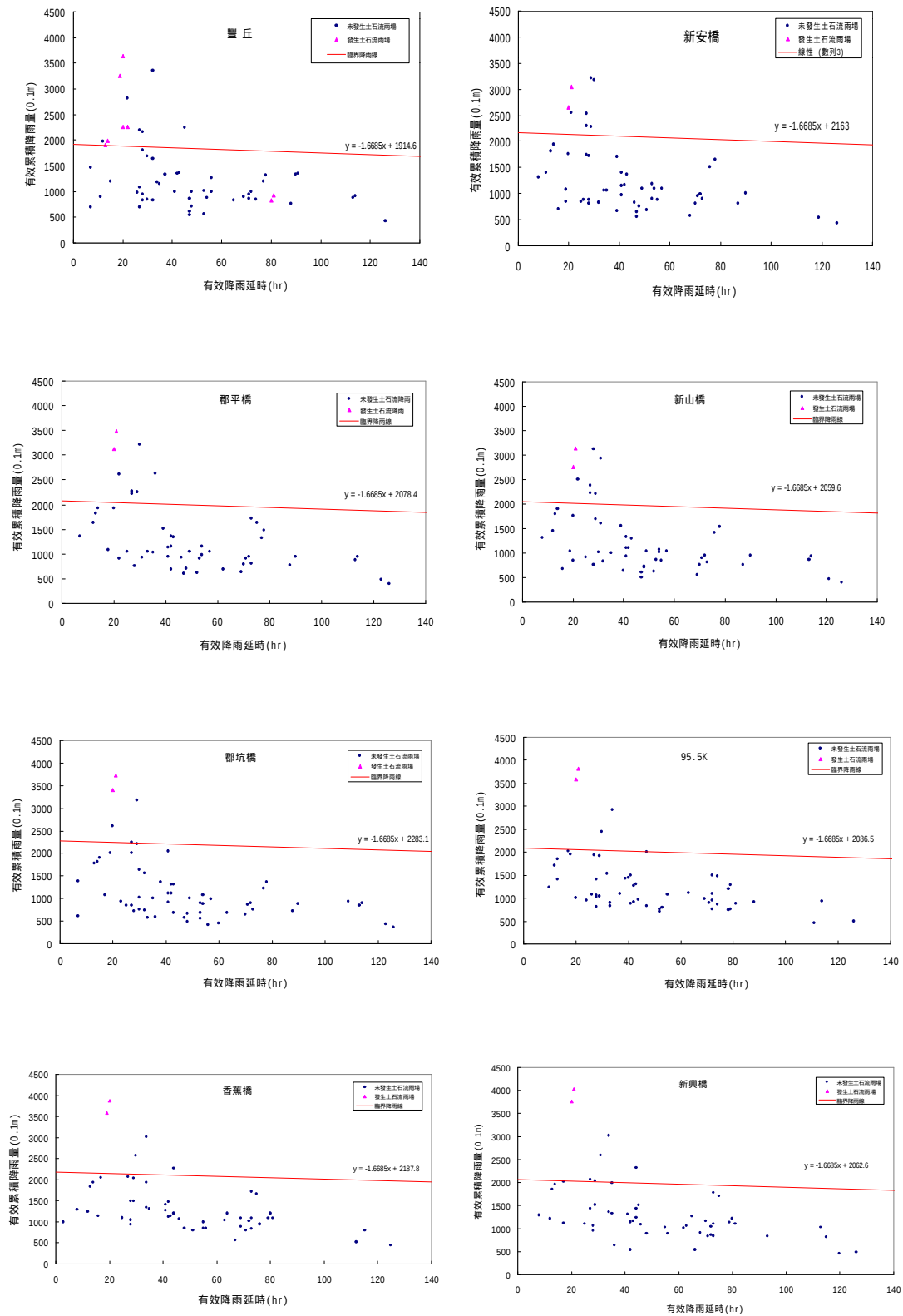


圖 6. 各集水區土石流發生臨界降雨線(三維方式分析)

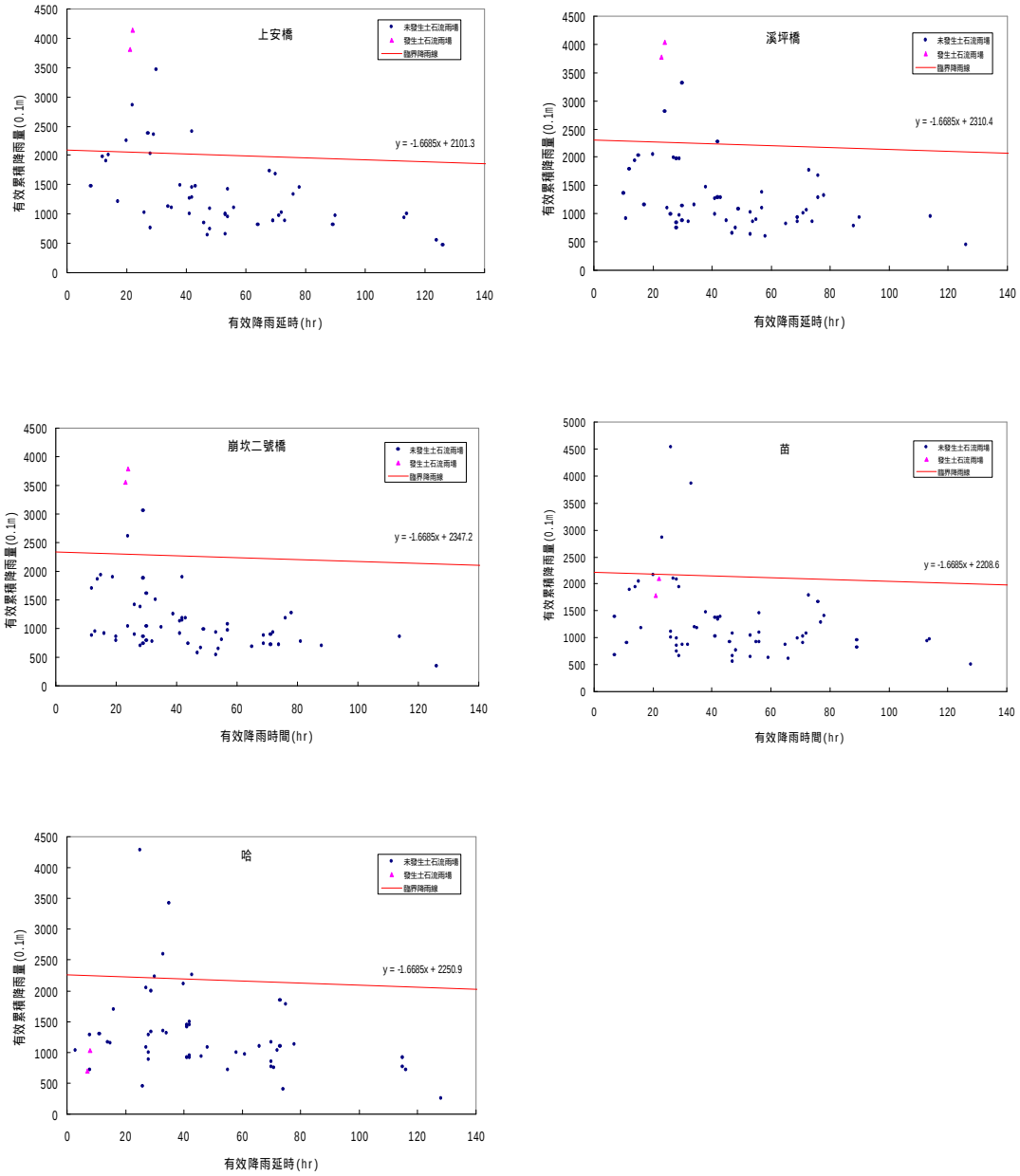


圖 7. 各集水區土石流發生臨界降雨線(三維方式分析)