

土石流發生危險度及時分析及評估系統(二)

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

范正成
Jen-Chen Fan
國立台灣大學
農業工程研究所教授

摘要

本研究以南投縣為主要研究區域，選定二十八個集水區為樣本，進行影響土石流發生之因子檢定。經過 Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定之後發現下列五種因子及組合——土地利用因子、土壤粒徑大於四號篩百分、集水區面積、主要河川長度比和溪床平均坡度對土石流之影響較大。並引用多變量分析中之費雪區別函數求出南投地區土石流預警的建議公式。進一步與當地雨量資料的頻率分析做比較，以瞭解各個樣本溪流發生土石流之危險度，以作為防災搶險之參考。

前言

土石流的發生與台灣特殊的地文與水文條件有著密不可分的關係。為了盡可能的降低發生土石流所造成之損失，如何有效的預知及防制即成為重要之課題。在目前未能全面進行防治與整治措施的狀況下，能適時的採用預報警報系統，於發生災害前通知危險區域內活動人員，儘早採取避難疏散措施，爭取逃生時間，必能確實減少土石流災害對生命財產的影響。

土石流的成因十分複雜，因此欲藉雨量資料進行精準的研究預測是尚嫌不足的，其餘因子如地質概況、溪床上游堆積物情形、地形因素等等考量，有待眾人之力建立一套完整之預警模式，實為國家社稷之福。

研究方法

本研究選定南投縣境內 28 條土石流危險溪流為例，分析多項與土石流發生有關之

潛在因子，提出土石流發生與否之判定方法，且針對各個分析流域，進行土石流危險區域的判定，給予適度的量化，以供防災搶險的依據。

研究之主要流程分成三個部分，首先為選定土石流分析樣本溪流，列出相關的地文及力學性質等，經過統計檢定決定其土石流發生之相關潛在因子，進一步與雨量分析之結果相結合，以費雪區別函數求得土石流發生之臨界降雨線推估之經驗公式，最後將土石流臨界降雨線與頻率分析得之暴雨復現期相比較，以判定其危險度。

一、土石流發生相關因子之選定

研究中選定之土石流發生相關因子大致尚可分成兩類，其一為地文因子包括有土地利用狀況、集水區的基本資料及土壤力學參數等，另一類為水文因子，其主要的分析資料為研究區域內歷年之降雨量。

1. 土地利用因子

研究中使用 1996 年之南投 SPOT 衛星影像資料，分類之方法採用 Imagine 影像處理軟體中之非監督性分類法，其利用群集演算的方法加以分類，先假設一組類別的平均值，或將所有的資料當成一類，計算平均值及標準差。經過一系列之區別與結合之疊代計算，直到最高次迴圈計算。當任一類的標準差大於最大標準差之值分開計算，若任兩類的平均值小於任兩類別平均值之距離時，進行結合，而每一類別個數小於類別最小個數限制之值時則捨棄。

2. 集水區地文因子

土石流發生的地區通常位於河川上游處，更有許多土石流是發生於野溪上。但在傳統地形圖上很難判斷野溪的位置和其狀況，利用 Arc/Info 以 DTM 模擬出渠道流和漫地流，可以得到所有的地表逕流的流動水系資料，故由 DTM 可以快速有效的推求出地文因子，如：河川長度、集水分區、溪床坡度……等，DTM 及 GIS 空間分析技術在大區域之研討上相當實用。以下再將各項地文因子作一完整之定義：

(1) 集水區面積(Watershed, A)

在主要河川長度上取平均坡度16度以上為起算點。

(2)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。

(3)集水區形狀因子(Form factor, F)

$$F = \frac{W}{L} = \frac{\frac{A}{L}}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

(4)溪床平均坡度(Mean slope, S)

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(2)式：

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

其中各段 S_i 的求法為(3)式：

$$S = \sin^{-1} \left(\frac{h_i}{l_i} \right) \quad (3)$$

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。

3. 土壤力學參數資料

針對所選定之二十八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。

4. 降雨資料收集及計算

本計畫目前已蒐集自民國69年~民國87年約十八年之雨量資料，資料來源為台灣省水利處，共十七座雨量站。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。

二、土石流發生之臨界降雨線設定

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)兩場分割：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。

(2)有效累積雨量(ER)：以任意時間之雨量(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。

$$ER = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i d_i \quad (4)$$

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：

$$K = 0.881 + 0.00793 \ln(A) \quad (5)$$

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。

(5)雨場資料取捨：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：

$$ER \geq \frac{1 - \alpha^T}{1 - \alpha} \left(\frac{150}{T} \right) \quad (6)$$

T：有效降雨時間(hr)

ER 及 α 上述同

三、土石流發生影藉因子檢定與分析

1. 土石流發生之影響因子

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。

2. 影響因子之檢定方法

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。

四、費雪區別函數分析

費雪線性區別函數的主要目的是在求取最能將各群體資料點區別清楚的函數，其考慮將兩個母體的多變量資料經由線性組合的方式，轉換成為單變量的資料，而且希望在這個單變量的資料所對應的兩個母體的中心點相距最遠，也就是在這個線性組合的方向能將兩個群體的資料點區別的最清楚。其要訣在於使組間變異對組內變異之比值為最大。

研究中以三維分析方式，亦即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。

五、危險區劃分

1. 雨量資料整理與降雨強度-延時-頻率分析

首先將研究區域內的降雨資料整理篩選，兩場篩選方式及數化方法如前所述，以連續暴雨資料進行年最大值選用法，將不同延時的降雨序列以對數皮爾遜第三類分佈(Log - Pearson type III distribution)為

降雨之機率分佈，推求 2、5、10、20、50、100 年各延時之頻率雨量，並換算其對應的降雨強度，再以三參數的 Horner 公式建立降雨強度與延時的關係式。

2. 降雨歷線的還原

由前一步驟得知 IDF 關係式後，可得知在某復現期下，各場暴雨的延時及降雨強度關係，再以三角形法模擬該場降雨的兩型分佈，如此便得知每場暴雨降雨歷線分佈。

3. 求出 RDF 曲線

將前述求得的降雨歷線，求出延時-有效累積雨量關係：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)，後累加而得有效累積雨量，如下：

$$ER = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i d_i \quad (17)$$

圖 1 為豐丘地區 RDF 曲線與土石流臨界降雨線關係。由此圖可概略得知，當地土石流臨界降雨線座落於復現期為 4 年的暴雨所造成的有效累積降雨深度。其中崩坎二號橋的臨界降雨線約等於當地 10 年暴雨復現期所產生的降雨量，因此單就工程統計的觀點來分析，豐丘地區發生土石流的機會是崩坎二號橋的 1 倍之多。

結論與建議

結論：

1. 本研究以南投縣為主要研究區域，選定二十八個集水區為樣本，進行影響土石流發生之因子檢定。挑選之因子包括一土地利用因子及地文因子類之集水區面積、主要河川長度、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、凝聚力、土壤塑性指數等。經過 Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定之後發現下列五種因子及組合—土地利用因子、土壤粒徑大於四號篩百分、集水區面積、主要河川長度比和溪床平均坡度對土石流之影響較大。

2. 本研究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：

$$Y = -4.873X - 0.261Z + 2240 \quad (18)$$

Y：有效累積降雨量(mm)

X：有效降雨時間(hr)

$$Z = 0.51A + 0.64B + 0.27C + 0.87D + 0.11E \quad (19)$$

A：土地利用因子(%)

B：土壤粒徑大於四號篩百分比(%)

C：主要河川長度(m)

D：有效集水區面積(ha)

E：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. 如前述，發生土石流之樣本溪流經過

預測公式計算之結果，正確率約有 81%，其在苗圃及哈比蘭(東埔二號橋)兩個樣本點，經訪查後之土石流發生時間可能不正確，導致正確率約有八成。

4. 由前述可知若土石流發生時間無法正確調查得之，對研究的結果將有很大的影響，完整的土石流發生記錄應包括發生土石流的地點、確定發生土石流的時間及確定未發生土石流的暴雨，若土石流發生於大降雨強度時，將對分析結果產生明顯的影響，以賀伯颱風所造成的土石流為例，每半個小時的時間誤差，都將高估或低估累積降雨強度達 20%，因此，如何有效掌握較為精確的土石流發生時間，為亟待克服的問題。

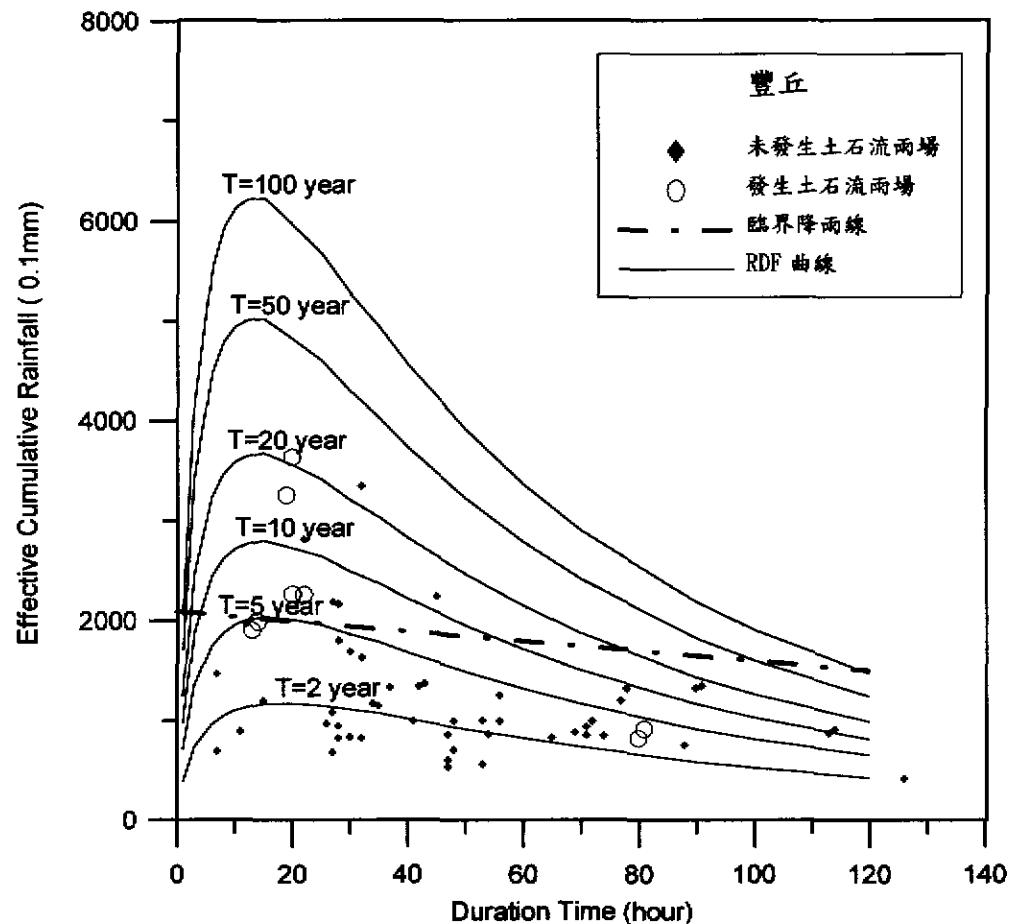


圖 1 豐丘地區臨界降雨線與暴雨復現期關係圖

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

土石流發生危險度及時分析及評估系統(二)

計畫編號：NSC89-2625-Z-002-022

執行期間：88年8月1日至89年7月31日

計畫主持人：范正成 教授

研究助理：張國良
劉哲欣

處理方式：☐ 可立即對外提供參考
☐ 一年後可對外提供參考
☐ 兩年後可對外提供參考
(必要時，本會得暫延發表時限)

執行單位：國立臺灣大學農業工程學研究所

中華民國 89 年 8 月 1 日

土石流發生危險度及時分析及評估系統（二）
Real-Time Analysis and Evaluating System for
Hazardous Degree of Debris Flow (II)

計畫主持人：范正成 臺灣大學農業工程學系教授

研究助理：張國良 臺灣大學農業工程學系博士班研究生

劉哲欣 臺灣大學農業工程學系碩士班研究生

委託單位：行政院國家科學委員會

執行單位：國立台灣大學

中華民國八十九年八月

中文摘要

本研究之主要目的，即分析各種與土石流發生有關之水文與地文相關因子，評估各個樣本溪流發生土石流的潛在勢能，以做為土石流預警之臨界降雨線建構的基準。

研究中南投縣為主要研究區域，選定二十八個集水區為樣本，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、主要河川長度、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、凝聚力、土壤塑性指數等。經過 Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定之後發現下列五種因子及組合—土地利用因子、土壤粒徑大於四號篩百分、集水區面積、主要河川長度比和溪床平均坡度對土石流之影響較大。並引用多變量分析中之費雪區別函數求出南投地區土石流預警的建議公式。進一步與當地雨量資料的頻率分析做比較，以瞭解各個樣本溪流發生土石流之危險度，以作為防災搶險之參考。

（關鍵字：土石流、水文因子、地文因子、臨界降雨線、費雪區別函數）

ABSTRACT

The main purpose of this study is to analyze the hydrologic and physiographic factors of a watershed, that are relevant to the occurrence of debris flow. Besides, the potential of debris flow for each sample creek is also evaluated. Accordingly, the criteria of the critical rainfall lines for warning systems of debris flows are established.

In this study, twenty-eight watersheds were selected in the prefecture of Nan-Tou as the test sites. The factors affecting the occurrence of debris flow were examined. The factors included : land use factor, physiographic factors such as watershed area, length of main stream, mean width, form factor, average slope steepness and mechanical properties of the soils. The properties consisted of porosity, percentage of soil particles greater than sieve No.4, percentage of soil particles finer than sieve No.200, internal friction angle, cohesion, plasticity index, etc. After examination by Mann-Whitney-Wilcoxon test, the following five factors were found to be more related to the occurrence of debris flow. They were: land use factor, percentage of soil particles greater than sieve No.4, watershed area, length of main stream and average slope steepness. A side from these. Fisher's discriminant function was used to derive the equations for debris flow warning. In addition, the equations was compared with the frequency analysis of local rainfall data so that the hazardous degree of debris flow occurrence for each sample stream could be evaluated. Thus, the equations maybe used to prevent debris flow disasters.

(Key word: debris flow, hydrological factor, physiologic factor, critical rainfall line, Fisher's discriminant function)

目 錄

第一章 前言	1
第二章 相關之前人研究	4
2-1 土石流發生與水文因子之關係	4
2-2 土石流發生與地文因子之關係	13
第三章 研究區域簡介	18
3-1 研究區域地質概述	18
3-2 研究區域簡介	25
3-3 研究區內土石流分析樣本溪流之選定	29
3-4 土石流發生記錄	29
第四章 研究方法	32
4-1 研究之流程	32
4-2 土石流發生相關因子之選定	32
4.2.1 土地利用因子	32
4.2.1(A) 遙測技術簡介	34
4.2.1(B) 波譜特性	35
4.2.1(C) 衛星資料特性	38
4.2.2 集水區地文因子	44
4.2.3 土壤力學參數	55
4.2.3(A) 土壤粒徑	55
4.2.3(B) 土壤孔隙率及孔隙比	55
4.2.3(C) 土壤乾燥單位重	55
4.2.3(D) 土壤飽和單位重	55
4.2.3(E) 凝聚力與內摩擦角	56
4.2.3(F) 塑性指數	56
4.2.4 降雨資料收集及計算	60
4.2.4(A) 雨量資料來源	60
4.2.4(B) 雨量資料推估	60
4-3 臨界降雨線設定	63
4.3.1 雨場劃分	63
4.3.2 有效降雨時間及有效累積雨量	62

4.3.3	雨場數化.....	65
4.3.4	雨場取捨.....	65
4-4	土石流發生影響因子之檢定與分析.....	67
4.4.1	土石流發生之影響因子.....	67
4.4.2	影響因子之檢定方法.....	67
4.4.3	各影響因子分析結果.....	68
4-5	費雪區別函數分析.....	70
4.5.1	各橋涵集水區土石流臨界降雨線.....	72
4-6	花蓮、台東土石流危險流分析.....	78
4-7	危險區劃分.....	84
4.7.1	雨量資料整理與降雨強度-延時-頻率分析.....	84
4.7.2	降雨歷線的還原.....	84
4.7.3	求出RDF曲線.....	84
第五章	結論與建議.....	89
5-1	結論.....	89
5-2	建議.....	91
參考文獻		93

圖 目 錄

圖1.1 南投陳有蘭溪流域921地震後航照圖.....	3
圖1.2 921地震後坡地崩坍及地表植生改變圖.....	3
圖2.1 六甲山系有效雨量與有效雨量強度關係圖.....	6
圖2.2 警戒、避難體制判定圖.....	6
圖2.3 形成土石流之臨界降雨線.....	9
圖2.4 中國大陸雲南蔣家溝土石流預報圖.....	9
圖2.5 發生降雨之各項分析雨量示意圖.....	12
圖2.6 未發生降雨之各項分析雨量示意圖.....	12
圖3.1 台灣地質分區圖.....	22
圖3.2 南投地區地質分佈圖.....	23
圖3.3 研究區內主要斷層圖.....	24
圖3.4 研究區域圖.....	26
圖3.5 新興橋土石流堆積區.....	27
圖3.6 台大實驗林溪頭營林區之土石流.....	27
圖3.7 台大實驗林溪頭營林區森林擋住土石流之情形.....	28
圖3.8 南投九份二山921地震後地貌改變.....	28
圖3.9 分析流域及樣本點分佈圖.....	30
圖4.1 研究之流程圖.....	33
圖4.2 電磁波譜圖.....	37
圖4.3 多譜掃描系統運作圖.....	37
圖4.4 地表覆蓋物的波譜反射特性曲線.....	38

圖4.5 研究區域之SPOT衛星影像圖.....	41
圖4.6 土地利用判識圖.....	42
圖4.7 以數值地形求取地文因子流程圖.....	45
圖4.8 流向之判定圖.....	46
圖4.9 兩種不同之級序定義方式.....	51
圖4.10 具完整屬性資料之向量圖層.....	51
圖4.11 北山坑數值地形圖、流域樣本點及坡度圖.....	52
圖4.12 北勢溪數值地形圖、流域樣本點及坡度圖.....	52
圖4.13 玉崙溪數值地形圖、流域樣本點及坡度圖.....	53
圖4.14 陳有蘭溪數值地形圖、流域樣本點及坡度圖.....	53
圖4.15 水利處雨量站分佈圖.....	61
圖4.16 雨場劃分時間示意圖.....	64
圖4.17 雨場數化案例說明.....	65
圖4.18 土石流樣本溪流雨場數化點範例.....	65
圖4.19 豐丘上游集水區土石流發生臨界降雨線.....	74
圖4.20 各集水區土石流臨界降雨線(三維分析方法).....	75
圖4.20 各集水區土石流臨界降雨線(三維分析方法).....	76
圖4.21 花東雨場數化結果.....	78
圖4.22 花蓮、台東雨量站及土石流樣本溪流圖.....	79
圖4.23 土石流危險區判定流程.....	83
圖4.24 豐丘地區臨界降雨線與暴雨復現期關係圖.....	86
圖4.25 各地區臨界降雨線與暴雨復現期關係圖.....	87
圖4.25 (續) 各地區臨界降雨線與暴雨復現期關係圖.....	88

表 目 錄

表2.1 不同地區激發土石流所需之降雨條件.....	8
表2.2 花蓮、台東臨界降雨線回歸公式表.....	16
表3.1 研究區土石流發生記錄.....	31
表4.1 SPOT衛星影像特性.....	39
表4.2 研究區域土地利用表.....	43
表4.3 地文因子數據.....	54
表4.4 土壤力學性質試驗資料.....	57
表4.4 (續)土壤力學性質試驗資料.....	58
表4.4 (續)土壤力學性質試驗資料.....	59
表4.7 雨量站名稱及位置一覽表.....	62
表4.8 MANN-WHITNEY-WILCOXON檢定結果.....	69
表4.9 發生土石流雨場判斷情形.....	77
表4.10 未發生土石流雨場判斷情形.....	77
表4.11 花東土石流發生時間.....	80
表4.12 花蓮、台東土石流樣本溪流數據.....	81
表4.12 (續) 花蓮、台東土石流樣本溪流數據.....	81

謝 誌

本研究承蒙行政院國家科學委員會經費補助，研究期間承蒙台大農工系主任張斐章教授及師生之支持與鼓勵。並感謝經濟部水利處、行政院農委會等單位提供研究所需相關的寶貴資料。感謝國立台灣大學土木研究所陳榮河教授、劉格非教授提供諸多寶貴意見，使本計畫得以順利完成，謹在此表達最深的謝意。

3. 如前述，發生土石流之樣本溪流經過預測公式計算之結果，正確率約有 81%，其在苗圃及哈比蘭（東埔二號橋）兩個樣本點，經訪查後之土石流發生時間可能不正確，導致正確率約有八成。
4. 研究中曾加入花蓮、台東之土石流危險溪流，與南投之危險溪流合併加以分析，嘗試推導大範圍區域之土石流發生臨界降雨線經驗公式，但推估出來之經驗公式與物理意義並不符合，研判其原因可能是花蓮、台東部分土石流發生時間訪查不正確，導致雨量計算結果誤差太大。另一方面由於土石流的發生臨界條件與地域性有很大的關連性，不同地區的降雨型態與地文水文條件差異性頗大，是否能推估出大範圍區域適用的經驗公式尚待進一步之研析，因此研究中僅提出南投地區適用之經驗公式。
5. 由前述兩點可知若土石流發生時間無法正確調查得之，對研究的結果將有很大的影響，完整的土石流發生記錄應包括發生土石流的地點、確定發生土石流的時間及確定未發生土石流的暴雨，其中，後二者對於分析結果都相當重要，因此，對於過去曾發生的大暴雨是否造成土石流之確認，仍待探究。如同大部分發生土石流的區域，研究區域中之土石流發生地區人煙稀少，更無觀測記錄儀器，對於土石流發生時間的資料取得，僅能由相關文獻及附近稀落的住戶詢得概略的資料，而若土石流發生於大降雨強度時，將對分析結果產生明顯的影響，以賀伯颱風所造成的土石流為例，每半個小時的時間誤差，都將高估或低估累積降雨強度達 20%，因此，如何有效掌握較為精確的土石流發生時間，為亟待克服的問題。

5.2 建議

1. 研究中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及危險區的劃定，可瞭解各個溪流之危險程度，將有助於研究區域內的工程決策及土地利用規劃，將有限的經費發揮到最大的效能，以達到土石流災害發生防治的目的。

2. 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。

3. 在發生 921 集集大地震之後，使得山區地表地貌改變甚鉅，因此前述推導出之臨界降雨線勢必要做些修正，如土地利用情形、土壤孔隙率等地文因子，這樣才能代表現階段土石流危險溪流之潛勢。

參考文獻

1. 瀨尾克美、船崎昌繼(1973), “土砂害降雨量之研究”, 新砂防, Vol.88, pp. 22-28。
2. 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。
3. 行政院農業委員會, 《陳有蘭溪治山防災整體治理規劃報告》, 中華民國八十六年九月。
4. 行政院國家科學委員會, 《1996 賀伯颱風侵台災害分析及檢討》, 專題研究計畫成果報告, 中華民國八十六年二月。
5. 江永哲、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 期, 第 21-37 頁。
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 期, 第 167-172 頁。
7. 李錫堤(1996), 《從地形學的觀點看陳有蘭溪的賀伯風災》, 地工技術, 第 57 期, 第 17-24 頁。
8. 林銘郎等(1996), 《新中橫沿線天然災害及成因分析》, 地工技術, 第 57 期, 第 31-44 頁。
9. 台灣省政府農林廳山地農牧局, 《山坡地土壤調查報告(南投縣、彰化縣)》, 中華民國七十三年十二月。
10. 范正成、林森榮 (1996), 《土石流防災與監測之研究—雨量分析、降雨預報應用於土石流預警(一)》, 國科會專題研究計畫報告, 計畫編號: NSC-85-2621-P-002-052
11. 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.
12. 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》, 國科會專題研究計畫報告, 計畫編號:

13. 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.
14. 范正成、彭光宗(1998)，《土石流危險因子與臨界降雨線關係之研究》，國科會專題研究計畫報告，計畫編號：NSC-87-2621-P-002-052
15. 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。
16. 范正成、吳明峰（1999），《陳有蘭溪流域一集溪流土石流臨界降雨線及其地文因子之關係》，第八屆大地工程學術研討會論文集，中華民國八十八年八月十八日。
17. 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。
18. 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。
19. 黃誌川、徐美玲、朱子豪《應用區別分析進行 SPOT 衛星影像之土地利用分類-以宜蘭沿海為例》。
20. 蘇明道、王元愷、劉哲欣、林俊宏(1999)，《空間分析在土石流發生潛勢研討之應用-以陳有蘭溪為例》，農業工程學報第 45 卷第二期，pp.52-62。
21. 何春蓀，〈台灣地質概論台灣地質說明書〉經濟部中央地質調查所。
22. 張建邦，〈多變量分析〉三民書局。
23. 許銘熙、黃宏斌、蕭長庚(1991)，〈台灣地區降雨強度-延時-頻率關係之初步研究〉，台灣大學水工試驗所研究報告第一百一十七號。
24. 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.
25. Caine, N. (1980) "The Rainfall Intensity Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows ", *Geografiska Annaler* Vol.62, pp.23-27.
 26. 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.
 27. 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.
 28. 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 Ameri.
 29. Auer, K. and A. Shakoor (1993) , "A Statistical Approach to Evaluate Debris Avalanche Activity in Central Virginia" *Engineering Geology*, 33, pp.305 – 321.
 30. Campbell, R.H. (1975), "Soil Slips, Debris Flows, and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California, " *U.S. Geological Survey Professional Paper* 851.
 31. Johnson, K.A. and N. Sitar (1990), "Hydrologic Conditions Leading to Debris-Flow Initiation. " , *Can. Geotech. J.* 27, p789-801
 32. Wieczorek, G.F., G. Mandrone, Lee DeCola(1996), "The Influence of Hillslope Shape on Debris-Flow Initiation ", *Debris-flow Hazard mitigation : Mechanics, Prediction, and assessment Proceedings of First International Conference*. p.21-31.

第一章、前言

台灣地區人口密集度高而土地資源有限，經過長期以來高密度與未規劃的開發，尤其是山坡地區域，其地形地貌皆與自然原始狀態有極大的差異，也因此原本水與土的平衡由於人類活動的不當介入遭到破壞，進而造成許多對人民身家財產安全損壞的災害，其中土石流便是具代表性的一個例子。

土石流的發生與台灣特殊的地文與水文條件有著密不可分的關係。山坡地地形佔了全島三分之二以上的面積，而山脈的地質又多屬於易於破碎斷裂的沈積岩與變質岩，加上位於歐亞板塊和菲律賓板塊之碰撞區，地震發生頻繁，山區傳出崩塌災害時有所聞。另外，全年 2500mm 的平均雨量，並常於夏季颱風侵襲時發生高強度降雨，河川坡短流急造成大量沖刷。先天條件已如此惡劣，後天又再加以人類不當之開發，破壞水土保持，使森林涵養能力下降，邊坡穩定性不足，導致坍塌、地滑、表土沖蝕、山洪爆發與土石流等天然災害一再地發生。

台灣近年來最大的土石流災害，發生於民國七十九年六月二十三日，花蓮縣秀林鄉銅門村，因歐菲莉颱風帶來的豪雨，當時，降雨強度達每小時 106 公釐，最大日雨量 386 公釐，土石流自山谷狂洩而出，短短 30 秒間，即將大片住家房舍埋沒，最高掩埋土砂高度六公尺，滾下直徑 1~4 公尺之巨石遍佈，造成房屋全毀 24 間，死亡人數 29 人，失蹤 6 人。而在民國八十五年七月三十一日賀伯颱風來襲時，土石流所造成人員的傷亡如郡坑死亡 4 人、郡坑橋死亡（失蹤）8 人，豐丘、同富及新興橋死亡共 9 人，神木村死亡 5 人，也令人記

憶猶新。

為了盡可能的降低發生土石流所造成之損失，如何有效的預知及防制即成為重要之課題。在後述內容中，第二章對於相關之前人研究加以說明，第三章對於研究區域之地質、地形及危險溪流的選定做一概述，第四章提到研究之流程及方法，並將研究中所引用的數據完整說明，第五章把研究之結果做整理，並提出相關之建議。而台灣本島目前具有土石流災害危險性的溪流已達五百多條，民國 88 年 9 月 21 日集集大地震之後，山坡地植生及地貌皆有明顯的改變（詳見圖 1-1, 1-2），具有發生土石流的高潛勢溪流持續增加，若遇夏季豪雨颱風帶來充沛的雨量，勢必造成嚴重的災害，在目前未能全面進行防治與整治措施的狀況下，能適時的採用預報警報系統，於發生災害前通知危險區域內活動人員，儘早採取避難疏散措施，爭取逃生時間，必能確實減少土石流災害對生命財產的影響。

土石流的成因十分複雜，因此欲藉雨量資料進行精準的研究預測是尚嫌不足的，其餘因子如地質概況、溪床上游堆積物情形、地形因素等等考量，有待眾人之力建立一套完整之預警模式，實為國家社稷之福。

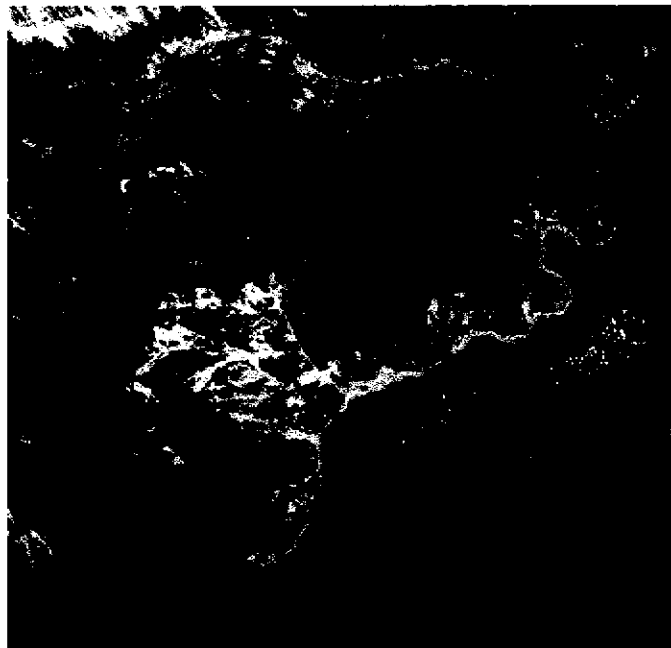


圖 1-1 南投陳有蘭溪流域 921 地震後航照圖



圖 1-2 921 地震後坡地崩塌及地表植生改變圖

第二章、相關之前人研究

土石流發生的機制極為複雜，與地域性有其正相關的關係，換言之與當地之降雨特性、水文因子及地文因子的特性有關。其中降雨量的多寡即直接提供誘發土石流的水量，對於土石流的發生有最直接的影響。因此以下就針對水文及地文與土石流發生之相關研究作一整理，需注意的是在下列各篇研究中的有效降雨強度及有效累積雨量等，其定義方式均與論文中之定義有所不同。

2.1 土石流發生與水文因子之關係

1. 瀨尾克美，船崎昌繼（1973）分析日本七個縣市中之178場土石流災害，以平均發生土石流降雨量及平均年雨量作為分析基準，整理得到(2.1)式：

$$y=0.35x-270 \quad (2.1)$$

y：各地區之平均發生雨量（mm）

x：各地區之平均年雨量（mm）

並以有效降雨強度與有效降雨量區分出警戒避難體基準為(2.2)(2.3)式：

$$\text{警戒基準：} y = \frac{2360}{9.5 + x} \quad (2.2)$$

$$\text{避難基準：} y = \frac{6000}{20 + x} \quad (2.3)$$

x：有效降雨強度（mm/hr）

y：有效累積雨量（單位:mm）

2. 瀨尾克美，橫部幸欲（1978），分析日本六甲山系，大戶川流域、木津上游流域的土石流發生降雨強度及有效降雨量定義出土石流危險區和安全區域之分界線（發生境界線）為(2.4)式：

$$y=a/(b+x) \quad (2.4)$$

其中，x：有效降雨強度(mm/hr)

y：有效降雨量(mm)

a、b：待定係數

圖 2.1 為上述地區有效雨量與有效降雨強度之關係圖。

圖 2.2 為上述地區警戒、避難體制分界圖。

3. 青木佑久（1980），分析日本共23場降雨事件所造成的46場土石流災害，得到以下的結論：

- a. 在不考慮前期降雨（antecedent rainfall）的情況下，強度大的降雨延時數小時或普通的降雨延時 12 小時以上，再加上持續 3~6 小時強度約 30~40 mm/hr 的降雨，即會發生土石流災害（此時累積降雨量將達到 100mm 以上）。
- b. 若累積降雨量在 150~200mm 以上，即使小於上述的降雨強度也會發生土石流的災害。
- c. 累積降雨量達 400mm 以上一定會發生土石流災害。
- d. 災害發生前之前期短時間雨量會隨著降雨延時之增大而減小。

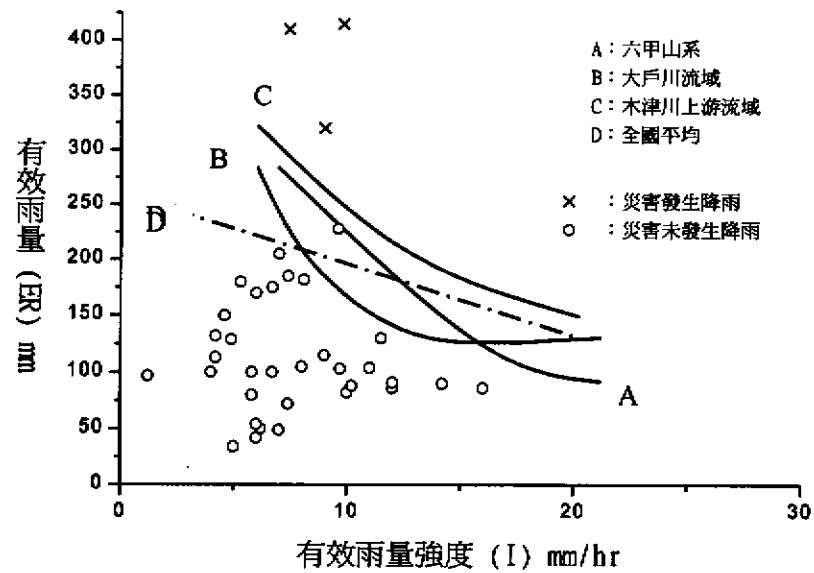


圖 2.1 六甲山系有效雨量與有效雨量強度關係圖
(摘自瀨尾克美、橫部幸裕，1978)

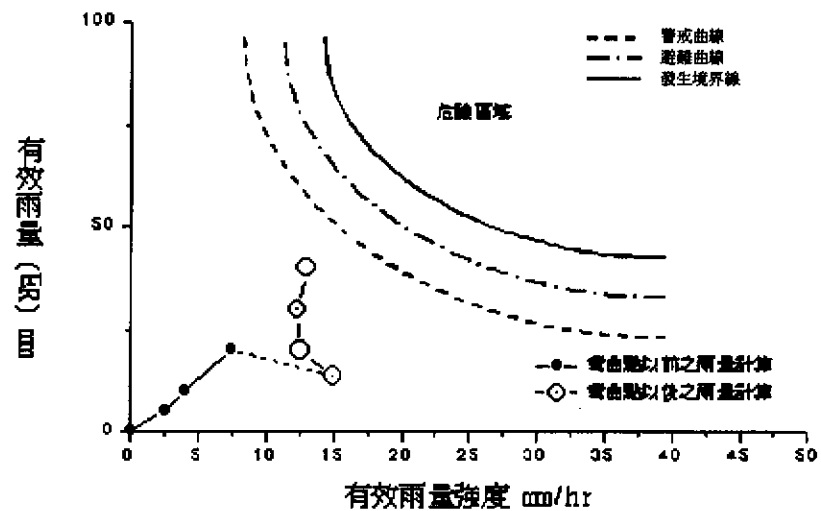


圖 2.2 警戒、避難基準分界圖
(摘自瀨尾克美、橫部幸裕，1978)

4. Keefer, D.K. et al. (1987), Caine(1980)、Ellen(1985)、Wieczorek et al. (1987)以土石流發生雨量資料，以延時和雨量資料作基準，以迴歸分析的方式，求出土石流發生之臨界降雨條件 (2.5) 式。如表 2.1 所示。

$$(I - I_0)T \geq Q_c \quad (2.5)$$

I : 平均降雨強度 (mm/hr)

I_0 : 流失雨量強度 (mm/hr)，降雨中對增加土壤孔隙水壓力沒有貢獻的部分。

$I - I_0$: 有效降雨強度 (mm/hr)

T : 降雨延時 (hr)

Q_c : 使土壤孔隙水壓達到造成土壤滑動之臨界水量 (mm)

其中流失強度 I_0 及臨界水量 Q_c 與當地地文與水文因子有關。圖 2.3 為不同地區形成土石流之臨界雨量線圖 (Keefer et al., 1987)

5. 吳積善等人 (1990)，以中國大陸雲南蔣家溝為研究區域，研究結果為較短延時（如10分鐘）的降雨是土石流發生之主要臨界雨量，並以連續十分鐘最大降雨量及前期累積降雨量為基準，建立雲南蔣家溝土石流之發生判別式：

$$R_{10} \geq 5.5 - 0.091P \geq 0.5 \quad (2.6)$$

R_{10} : 連續十分鐘最大降雨量 (mm)

P : 前期降雨量 (mm)

圖 2.4 為中國大陸雲南蔣家溝土石流發生分界圖。

表 2.1 不同地區激發土石流所需之降雨條件
(摘自 Keefer et al. , 1987)

資 料 來 源	I_o (mm/hr)	Q_c (mm)	備 註
Caine(1980)	4.49	13.65	不同地區多場土石流資料 (Worldwide data)
Cannon-Ellen(1985)	6.89	38.10	同地區多場土石流資料 (San Francisco , Cal. , U.S.A.)
Wieczorek et al. (1987)	1.52	9.00	同地區單場土石流資料 (La Honda , Cal. , U.S.A.)

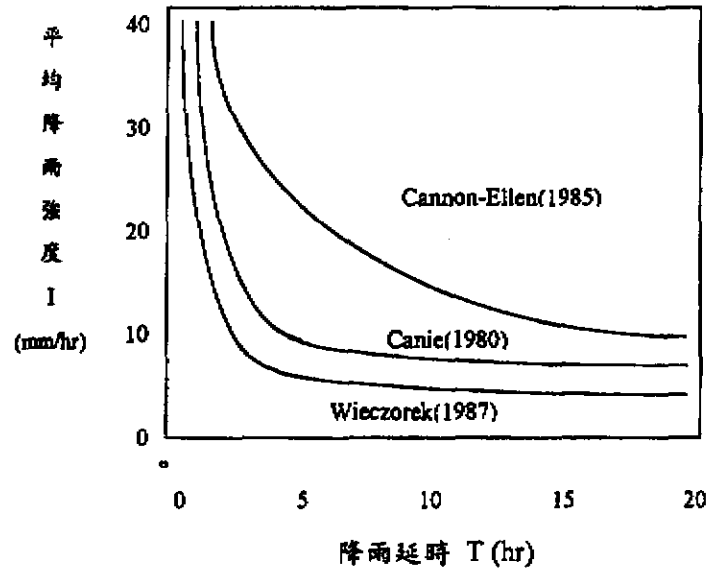


圖 2.3 發生土石流之臨界降雨線(摘自 Keefer et al., 1987)

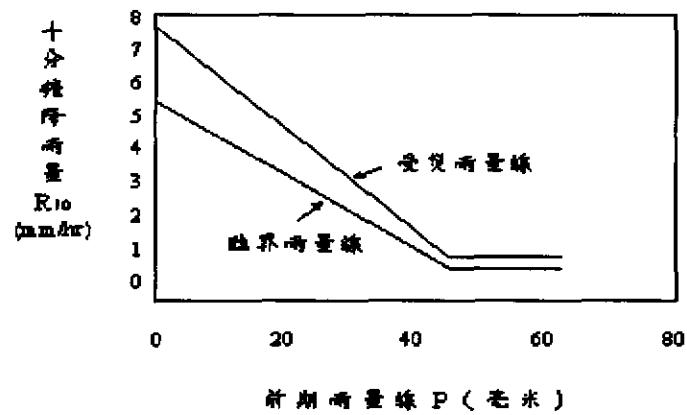


圖 2.4 中國大陸雲南蔣家溝土石流分界圖
(摘自吳積善, 1990)

6. 江永哲、林啟源 (1991)，分析曾發生於臺灣的七場土石流與降雨間的關係，發現在台灣造成土石流之累積發生雨量至少大於150mm，而最大一小時的降雨強度至少大於40mm/hr。其中有效累積雨量及有效降雨強度在發生土石流及未發生土石流的雨場之計算方式不同，皆從變曲點A開始計算（如圖2.5、2.6所示），有效累積雨量為從點A至任意時間的累積雨量，而有效雨量強度為從點A至任意時點的降雨強度。其中變曲點A為一場獨立雨場1小時雨量超過4mm的點，變曲點B為1小時雨量小於4mm且持續3個小時以上的點。

7. 江永哲，林啟源(1991)提出分離土石流安全區域和危險區域，其分離線為：

$$\text{新竹芎林：} y=519-16.3x$$

$$\text{台北林口：} y=\frac{6870}{15.8+x}$$

$$\text{南投豐丘：} y=3577-179.0x$$

$$\text{彰化二水：} y=\text{無法分離}$$

$$\text{南投溪頭：} y=526.7-16.7x$$

$$\text{花蓮銅門：} y=1419-60.3x$$

其中，

y：有效累積雨量（mm）

x：有效降雨強度（mm/hr）

依瀨尾克美(1974, 1978)等提出的方法，利用 $y=\frac{a}{b+x}$ 之分離方程式，

可得：

$$\text{鳳山：} \quad y = \frac{5000}{5+x}$$

$$\text{法華山：} \quad y = \frac{4600}{9+x}$$

$$\text{紅葉：} \quad y = \frac{4800}{3.5+x}$$

$$\text{銅門：} \quad y = \frac{5800}{8.8+x}$$

$$\text{壽豐：} \quad y = \frac{9000}{13+x}$$

$$\text{大興：} \quad y = \frac{7850}{10.7+x}$$

其中，

y：有效累積雨量（mm）

x：有效降雨強度（mm/hr）

8.謝正倫（1991），根據日本方面的文獻資料，說明土石流危險溪流之判定及土石流發生臨界降雨條件之設定方法，並以暴雨之有效累積雨量及有效降雨強度為基準，推求花蓮縣各土石流發生地區之臨界降雨條件。

9.謝正倫、江志浩、陳禮仁（1992），調查整理花東地區共295條土石流危險溪流得知：

- a. 當時雨量超過 27mm/hr、總累積雨量超過 360mm 時，則有誘發土石流之可能性。
- b. 花東地區於民國 78-80 年中土石流之誘發暴雨，其最大時雨量與總累積雨量分別介於 27mm/hr-113mm/hr 和 360mm-1200mm 間，發生率 50%之時雨量與總累積雨量分別為 65mm/hr 和 700mm。

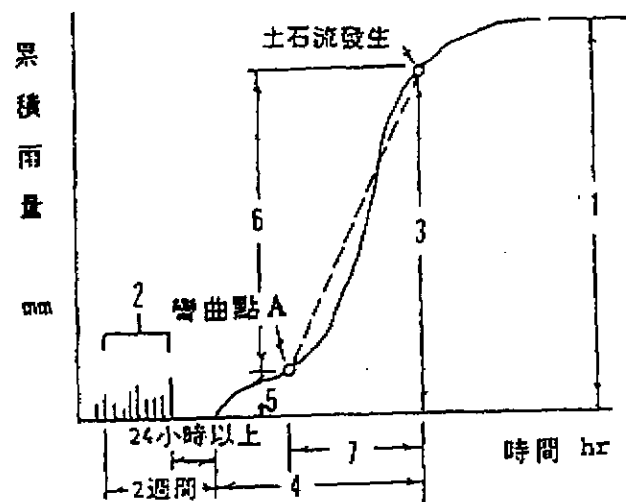


圖2.5 發生降雨之各項分析雨量示意圖
(摘自江永哲、林啟源)

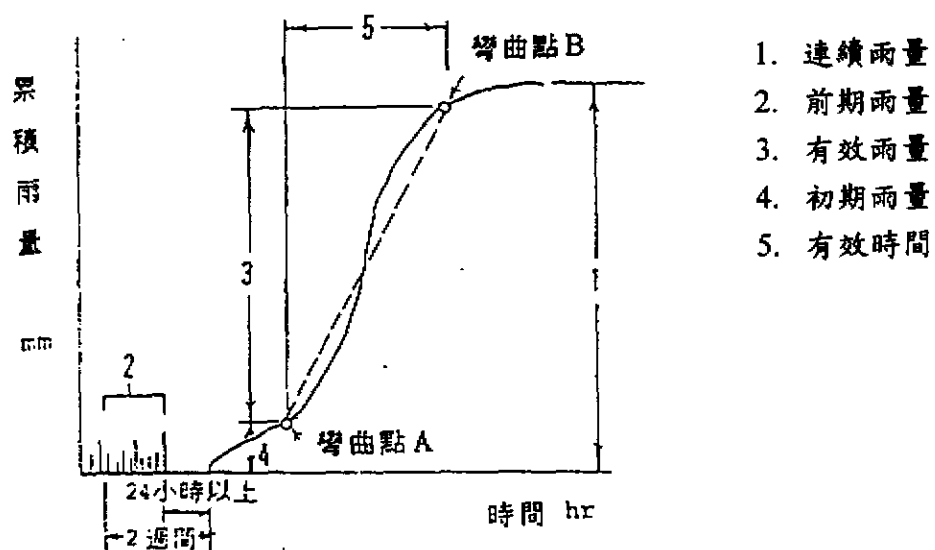


圖2.6 未發生降雨之各項分析雨量示意圖
(摘自江永哲、林啟源)

2.2 土石流發生與地文因子之關係

1. 鄭瑞昌，江永哲（1986），採取現地土石進行土壤力學試驗及水槽試驗，對於土石流發生機制之研究中，提出土壤特性，坡度，坡向，地表狀況對土石流發生將造成影響。其中發生土石流的臨界坡度，隨著礫石含量之遞增，而有遞減的趨勢，大致在15度以上便會發生土石流。
2. 錢寧、萬兆惠(1986)，對中國大陸各地土石流災害現場之調查，認為土石流的一個突出特點就是顆粒粒徑之分散度極大，粗細泥砂俱備。
3. 游繁結、陳重光（1987），研究南投縣信義鄉豐丘土石流，顯示該地區民國74年之土石流，發生在坡度23°的地方；而民國75年之土石流，發生在坡度17度的地方。
4. Auer and Shakoor（1989），對於具不同危險程度的土石流發生流域進行試驗，指出發生危險性高之流域一般擁有較粗之顆粒、和較高之土壤孔隙率與孔隙比、較低之土壤含水量與塑性指數。
5. 黃宏斌、何智武、楊德良(1991)，依據土壤力學之理論基礎，推導水位與堆積平面齊平、水位於堆積平面之下、堆積面有地表逕流等三種狀況之土石流發生模式。
6. 謝正倫，陳禮仁(1993)，提出有效集水面積（即溪床坡度大於15度以上之集水面積）作為危險溪流之判定指標，並以流出土砂量作為危險度之評估標準。

7. 陳宏宇 (1994)，對花蓮地區木瓜溪沿岸土石流災害的調查研究，以航照判釋地貌表徵及實驗室試驗特性等資料來說明薄層堆積的兩側谷壁地質材料、坡地地形與土石流災害之機制，並提出：
- a. 溝谷谷壁之不連續面非常發達，組成順向即楔型模式，提供主要土石來源之一。
 - b. 一般之溝谷谷壁在含水飽和的情況下，其邊坡破壞之安全係數將低於 1，形成平面破壞及楔型破壞，造成谷壁的崩塌。
 - c. 在高的降雨強度下，使溝谷堆積物產生崩塌，進而與水混合形成土石流。
8. 林美聆，詹士勝 (1995)，以地質、集水區面積、集水區形狀係數、溪谷邊坡坡度與坡向、溪床平均坡度等六項因子來作為土石流危險度判定指標。利用地理資訊系統加以處理分析，並引用危險因子之觀念，使不同單位及量測範圍之各影響因素能合併計算，進行危險度之綜合評估，發現土石流危險溪流之特性與地域之關係相當顯著。
9. 范正成、林森榮 (1996)，針對花蓮地區土石流發生資料分析。提出對於花蓮地區土石流發生影響較大之五個因子為土壤孔隙比、土壤粒徑（包括大於4號篩之重量百分比、土壤粒徑小於200號篩之重量百分比）、溪床平均坡度及植生狀況；並且成功發展土石流發生臨界降雨線之a, b值回歸方程式如(2.7)(2.8)式：

$$a = -10^{-4}(1933C + 7S - 10t - 0.57f - 0.96e + 1244.5)$$

$$(R^2 = 0.63379) \quad (2.7)$$

$$b = -4.395e^{\frac{c}{0.092}} - 3.26e^{\frac{s}{25.2}} - 0.735e^{\frac{e}{0.91}} - 2.094e^{\frac{f}{25}} - 7.309e^{\frac{t}{38.7}} + 41.393$$

$$(R^2 = 0.61874) \quad (2.8)$$

其中，c為植生因子，s為坡度，e為孔隙比、f為土壤粒徑大於4號篩所佔重量百分比、t為土壤粒徑小於200號篩所佔重量百分比。來定量推估土石流發生臨界降雨線。

10. 范正成、姚政松(1997)，針對台東地區土石流發生資料進行分析，得到台東地區對土石流發生影響較大的四項因子(土壤孔隙率、集水區面積、集水區形狀因子、溪床平均坡度)，並迴歸出台東及合併花、東兩地區之臨界降雨線公式，結果如表2.2所示。

11. 何敏龍、陳榮河(1997)，研究細料流失現象引發山谷型與邊坡型土石流之影響，提到細料的流失會造成土體孔隙率、凝聚力、內摩擦角的變化而造成土體剪力強度的改變，進而誘發土石流。

12. 范正成、彭光宗、張國良(1998)，針對南投地區進行土石流發生危險因子與臨界降雨線之研究，提出南投縣土石流發生之臨界降雨線a、b值迴歸公式如(2.9)(2.10)式：

臨界降雨線型式為：Y=aX+b

$$a = 10^{-3} \left[\begin{array}{l} -0.106(NO4) + 0.059(NO200) - 0.832(n) + 0.00112(A) \\ + 0.224(L) - 0.0293(S) + 4.24(C) - 122.597 \end{array} \right]$$

$$(R^2 = 0.85173) \quad (2.9)$$

$$b = -2.377(NO4) + 0.308(NO200) - 36.254(n) - 0.113(A) - 5.722(L) - 1.232(S) - 233.325(C) + 147.364$$

$$(R^2 = 0.61221) \quad (2.10)$$

N04	土壤大於#4 百分比
NO200	土壤小於#200 百分比
N	土壤孔隙率(無因次)
L	溪流長度(公尺)
S	溪床平均坡度(度)
C	植生覆蓋因子百分比

13. 范正成、吳明峰、彭光宗(1999)，針對南投縣陳有蘭溪流域之一級溪流進行三維之臨界降雨線研究。對研究區域內提出通用的土石流臨界降雨線預測公式如(2.11)(2.12)式：

$$Y = -11.42X - 55.97Z + 3652 \quad (2.11)$$

$$\text{其中 } Z = S + 0.05M - 0.05(\phi \times \#4) \quad (2.12)$$

Y: 有效累積降雨量(mm)

X: 有效降雨時間(hr)

S: 溪床平均坡度(%)

M: 土地利用因子

ϕ : 內摩擦角(degree)

#4: 土壤粒徑大於四號篩百分比(%)

表 2.2 花蓮、台東臨界降雨線迴歸公式表
(摘自范正成、姚政松，1997)

區域	台東	R ²	台東、花蓮合併	R ²
a	$10^3(0.691A_c-471.384C+85.912F_c-178.72n+0.2355S-155.049)$	0.634	$-10^3(0.795A_c+6.03C+0.0124f-2.4144n+0.0108S-0.5556)$	0.599
b	$-0.055A_c-3.531C+11.444F_c-4.712n-0.0734S+53.832$	0.638	$-0.0156A_c+23.698C-0.383f-0.8567n-0.1119S+58.179$	0.552
備註	A_c : 集水區面積(公頃) C : 植生覆蓋因子(百分比) F_c : 集水區形狀因子(無因次) n : 土壤孔隙率(無因次) S : 溪床平均坡度(度)		A_c : 集水區面積(公頃) C : 植生覆蓋因子(百分比) f : 土壤粒徑大於4號篩(%) n : 土壤孔隙率(無因次) S : 溪床平均坡度(度)	

第三章、研究區域簡介

本研究以南投縣境內土石流發生區為主要研究對象，針對南投縣內二十八個危險溪流樣本，考慮可能誘發土石流之潛在勢能，提出土石流發生臨界降雨線之設定方法，以供預警之主要依據。

3.1 研究區域地質概述

台灣本島主要的地層都呈長而狹的帶狀分布，大致和台灣島的長軸平行。台灣大致可以分為三個主要地質區(如圖 3.1 所示)：

1. 中央脈地質區，本區又可以分為兩個地質亞區：

中央山脈的西翼和脊樑山嶺，包括雪山和玉山兩個最高山嶺

中央山脈的東翼

2. 西部麓山地質區

3. 海岸山脈地質區

南投地區

南投地區屬於中央山脈的西翼和脊樑山嶺地質區，此區大部份是深灰或灰黑色劈理良好的硬頁岩(argillite)、板岩(slate)、以及千枚岩(phyllite)；也就是說，為經過變堅或變質的泥質岩石。這些岩石中常含有許多小石英脈。泥質岩在西部以硬頁岩為主，向東漸漸變為板岩或千枚岩。硬頁岩的定義是變堅的頁岩，只受過極輕微的擠壓；如變質度增高，較硬的頁岩就漸變為板岩。這些泥質岩石的變質度從本帶的西界向東邊的先第三紀基盤或中央山脈的核心地帶逐漸增強。

白色和灰色的砂岩在巨厚的頁岩層中構成另一個重要岩相，砂岩中通常夾有薄層或不規則凸鏡狀的石墨質煤或炭質頁岩。白色砂岩有時變為中粒至粗粒的石英岩，灰色砂岩則變為較細粒的硬砂岩。砂岩常成厚層塊狀，有時也夾有灰黑色使頁岩和板岩的互層。砂岩段和頁

岩段之間的地層界線是屬於漸變的，在一般大比例尺的地質圖上都呈現犬牙相錯之狀。石灰質或泥灰質的凸鏡體或結核多散布在中央山脈高處的板岩中，層厚及層位不同而且不連續的礫石層或凸鏡體則出現在硬頁岩和板岩帶的東部及南部，所含的礫石部分來自變質基岩，部分來自硬頁岩和板岩。玄武岩質的碎屑岩和凝灰岩是這個泥質地層中最多的火山岩，多成散佈的不規則岩體，一般延展不廣；此外尚有少許安山岩、輝綠岩。以及其他不同成份的火山碎屑岩(見圖 3.2)。

台灣地處地震帶，全島大大小小的活動斷層高達 51 條，共分為三類敘述如下：

(一) 第一類活動斷層 (全新世活動斷層)：符合下列任一項者

1. 全新世 (10000 年) 內以來曾經發生錯移之斷層。
2. 錯移 (或淺移) 現在結構物之斷層。
3. 與地震相伴生之斷層。
4. 錯移現代沖積層之斷層。
5. 地形監測證實具潛移活動性之斷層。

(二) 第二類活動斷層 (更新世晚期活動斷層)：未符合第一類活動斷層之分類準則，但符合下列任一項者

1. 過去十萬年以來曾經發生錯移之斷層。
2. 錯移階地堆積物或台地堆積層之斷層。

對於雖有部分學者提出其為活動斷層，但編圖時仍無法依文獻資料加以明確歸類為前述二類者，目前將其暫列為存疑性活動斷層。未來經進一步詳細調查後，可依新獲取之資料再將其歸類為第一、第二類活動斷層或非活動斷層。

(三) 存疑性活動斷層：包括

1. 將第四紀地層錯移之斷層。
2. 將紅土緩起伏面錯移之斷層。

3. 具活動斷層地形特徵，但缺乏地質資料佐證者。

而研究區域內主要通過的活動斷層如圖 3.3 所示，這些斷層亦為這次 921 集集大地震之主要活動的斷層，茲說明如下：

車籠埔斷層

【活動斷層分類及依據】：第二類活動斷層。

【斷層分佈範圍所屬行政區】：台中縣、台中市、南投縣。

【斷層性質與延伸範圍】：為台中盆地與豐原、南投兩丘陵的交界線，自豐原至名間；呈南北走向，全長超過 50 公里，草屯河階群西緣辨認出的草屯斷層，可能為本斷層之一段。何春蓀（1959,1975,1982；Ho,1976）指出本斷層為構造複雜的內麓山帶和摺皺平緩的外麓山帶間之界限。孟昭彝（Meng,1963）認為車籠埔斷層兩側地層接觸關係為錦水頁岩層逆衝覆蓋在較新的地層之上，且為三義逆掩斷層向南的延伸。

【地形與地質特徵】：林朝（1957）指出豐原東方新社河階群的公荖坪面（LT2），受此斷層的引曳而向西下撓（down-warping），因而推測本斷層及台中盆地均形成於更新世晚期。

本斷層上盤露出上新世錦水質岩和卓蘭層，下盤露出更新世頭嵙山層和現代沖積層，而被認定屬於活動斷層（Chang,1971;何春蓀,1959;1977）認為車籠埔斷層的斷層痕跡雖被沖積層覆蓋，但因其切斷更新世的頭嵙山層而推定為活動斷層。

張錫齡（Chang,1971）指出台中盆地南端，上新世的錦水頁岩與更新世的頭嵙山層以此斷層接觸。且認為此斷層呈向東凸出之弧形，弧的頂點位在頭汴坑與車籠埔之間，可能為河流沿車籠埔斷層崖侵蝕所形成，或是『車籠埔構造』的地形表徵。

吳大銘（Wu,1978）以 1917 年其附近曾發生大地震，且橫過斷層線的大地測量結果顯示斷層上盤隆起 15 公分，因而推測本斷層為活動

斷層。

大茅埔—雙冬斷層

【活動斷層分類及依據】：存疑性活動斷層。

【斷層分佈範圍所屬行政區】：台中縣、南投縣。

【斷層性質與延伸範圍】：為豐原、南投兩丘陵的東界，由東勢附近經雙冬至集集大山，呈南北走向，長約 55 公里 (Hsu and Chang,1979)。本斷層南段稱為哮貓斷層，北段稱為大茅埔斷層 (何春蓀,1959)。

【地形與地質特徵】：何春蓀 (1959) 認為本斷層為高角度逆斷層，中新世各不同地層沿雙冬斷層與更新世地層相接，其斷距因地而異，最大層位落差可達 5000 公尺。

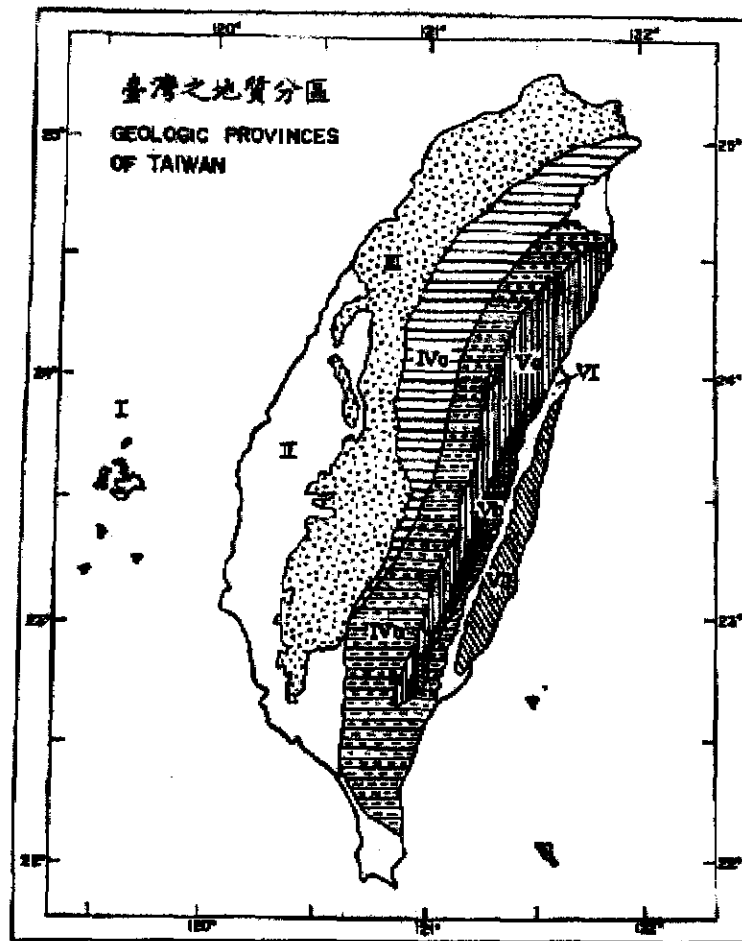
邱華燈 (Chiu,1972) 在雙冬東南方 2 公里之河谷發現本斷層之露頭，中新世的南港層向西掩覆於頭嵙山層礫岩之上，斷層面走向 N50。E，向東傾斜 55。。

楊貴三 (1986) 調查本斷層所經的雙冬附近階地，未見變位現象，其餘地區因缺乏平坦面，亦未找到地形變位的證據，但因中新統掩覆在更新統之上，而推測為活動斷層。

【地下地質】：黃金來 (1968) 由震測解釋此斷層為東傾約 50。之逆斷層，中新世的桂竹林層掩覆在更新世的頭嵙層之上。

【引用文獻】：何春蓀 (1959)；黃金來 (1968)；Chiu,1972；Hsu and Chang (1979)；楊貴三 (1986)。

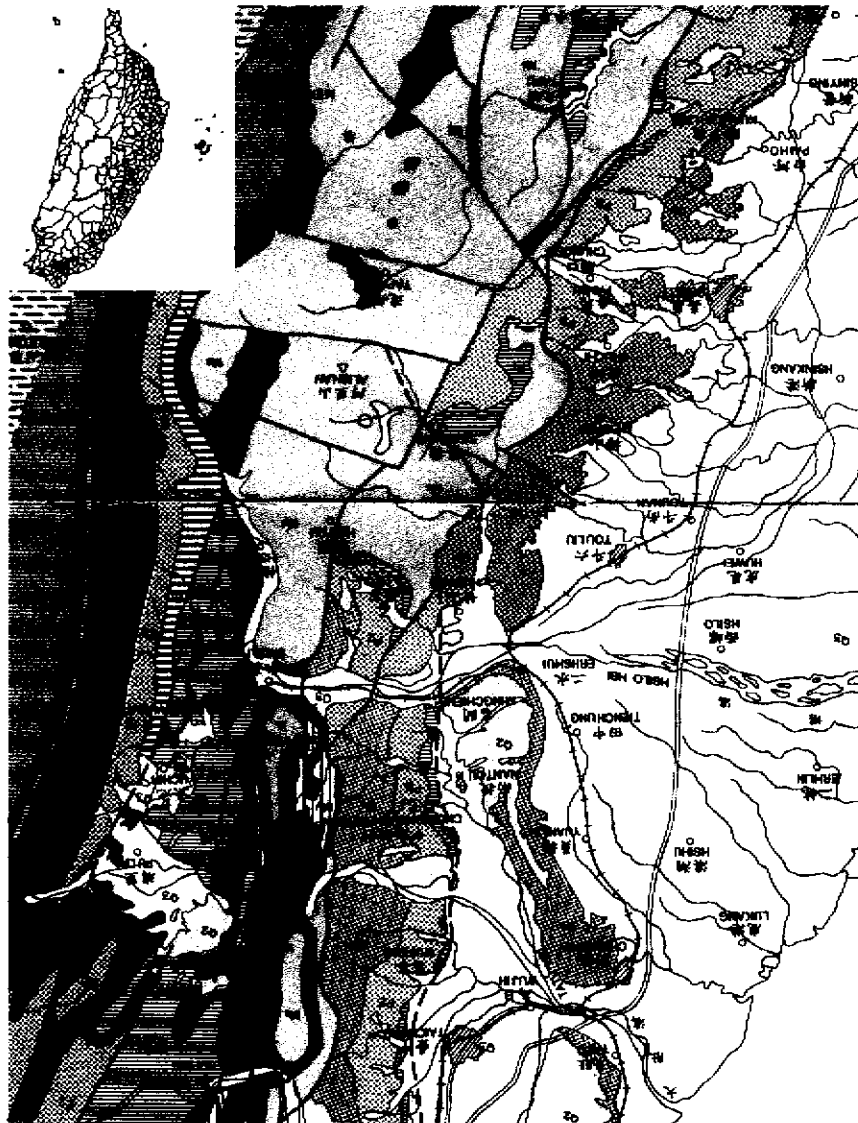
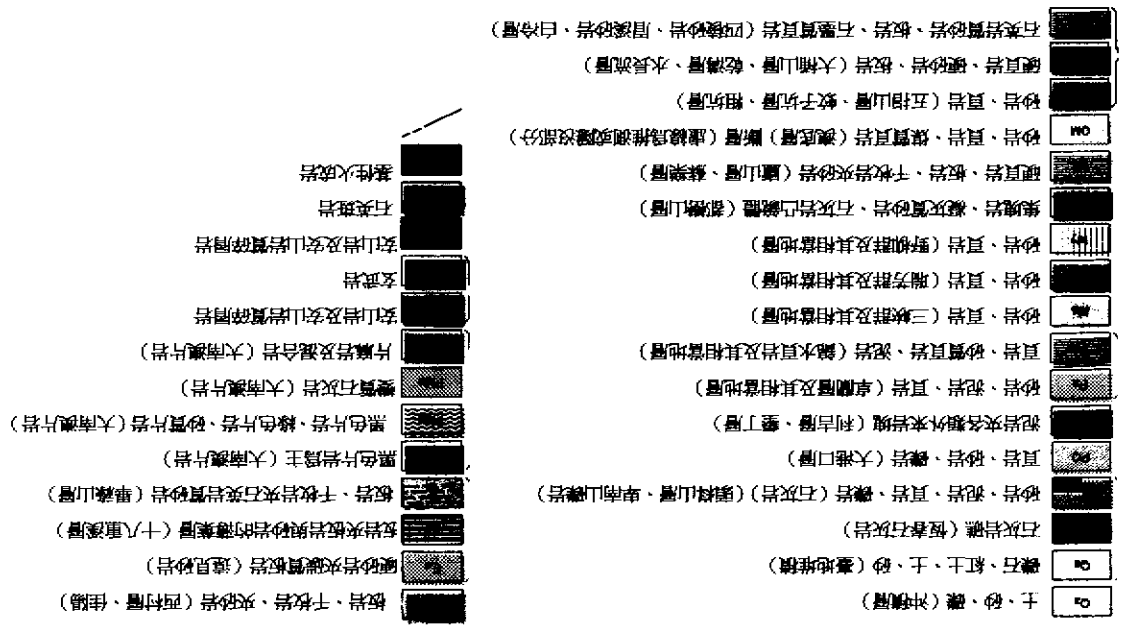
【備註】：本斷層的活動時代不明確，暫列存疑性活動斷層。



- | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| I 澎湖羣島（洪流式玄武岩） | V 中央山脈東翼地質區（先第三紀硬質雜岩） |
| II 濱海平原（沖積層） | Va 太魯閣帶 |
| III 西部麓山地質區（以新第三紀碎屑岩為主） | Vb 玉里帶 |
| IV 中央山脈西翼地質區（中新世至古第三紀硬頁岩及板岩系） | VI 東部縱谷（沖積帶） |
| IVa 雪山山脈帶 | VII 海岸山脈地質區（新第三紀火山質及洪流式碎屑岩覆蓋的火山灰） |
| IVb 脊梁山脈帶 | |

圖 3.1 台灣地質分區圖(中央地質調查所)

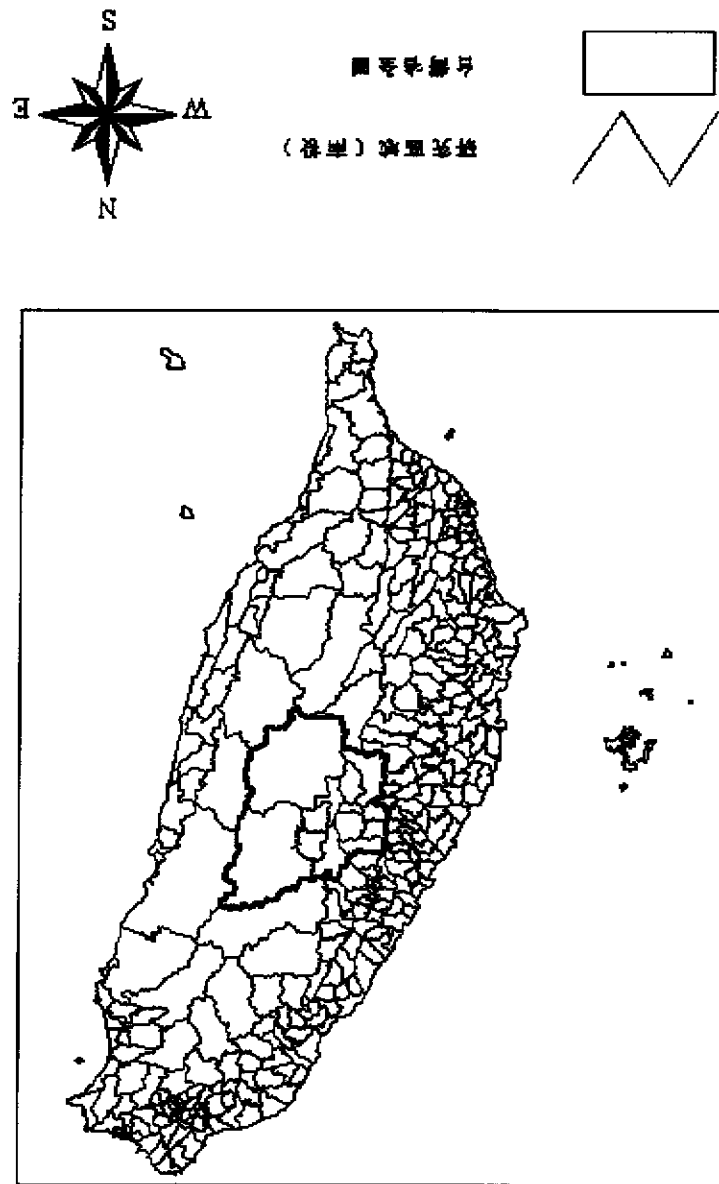
圖 3.2 南投地區地質分佈圖(中央地質調查所)



3.2 研究區域簡介

南投縣其位於台灣中央，是全省唯一不濱海之縣份（圖 3.4 所示），南北長約九十五公里，東西寬約七十二公里，東以中央山脈與花蓮縣相鄰，西以八卦丘陵及清水溪與彰化縣及雲林縣相接境，南以清水溪及玉山支脈與雲林嘉義、高雄三縣相接壤，北以北港溪與大甲溪之分水嶺（白狗大山、八仙山）及烏溪與台中縣為界，在全省五大山系中擁有中央山脈、阿里山脈、玉山山脈、五山山脈等三大山系，全省高度超過三千公尺之六十二座山峰中，位於本縣者有四一座，本縣山多平原少，山地佔約百分之八十三。全縣土地總面積 4,106.4360 平方公里。其境內於民國八十五年八月賀伯颱風時，引發陳有蘭溪沿線（新中橫台 21 線）南平坑、新山橋、郡坑口（4 人死亡）、郡坑橋（8 人死亡）、豐丘、同富社區（2 人死亡）、隆華國小、新興橋等地嚴重的土石流災害（圖 3.5 新興橋於賀伯風災後之景觀）。北勢溪流域的台大實驗林之降雨強度以最大 24 小時降雨 1099 公釐及最大二日降雨 1258 公釐居於阿里山之後，所引發之土石流所幸有茂密之人工林加以阻擋，未傳出有重大之傷亡（如圖 3.6 圖 3.7 所示）。民國 88 年 921 集集大地震，造成台灣生命財產重大的損失，其震央亦在研究區域範圍內，區域內兩條斷層（車籠埔及雙冬斷層）產生移動，使得附近的環境、生態及地質等發生很大的改變（圖 3.8），使得蘊含土石流發生潛勢的溪流大增，若是遇到颱風、豪雨帶來充沛的雨量，發生土石流得機率必定增加。

圖 3.4 研究區域圖



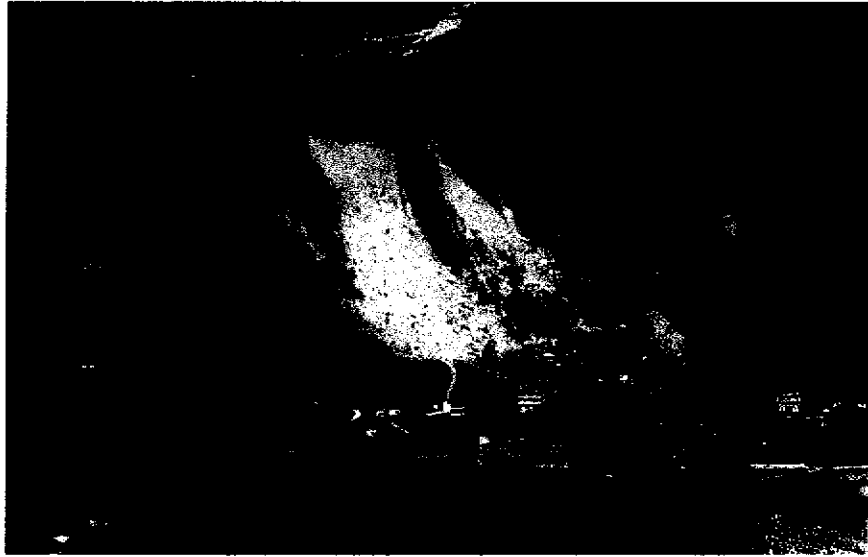


圖 3.5 新興橋土石流堆積區（李錫堤攝）

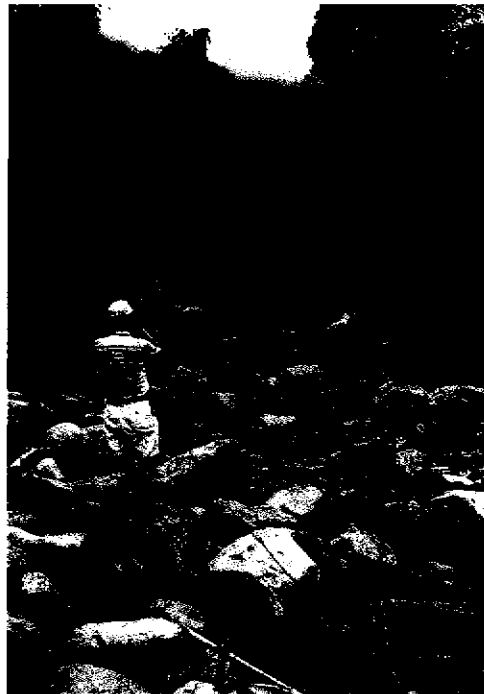


圖 3.6 台大實驗林溪頭營林區之土石流（洪如江攝）

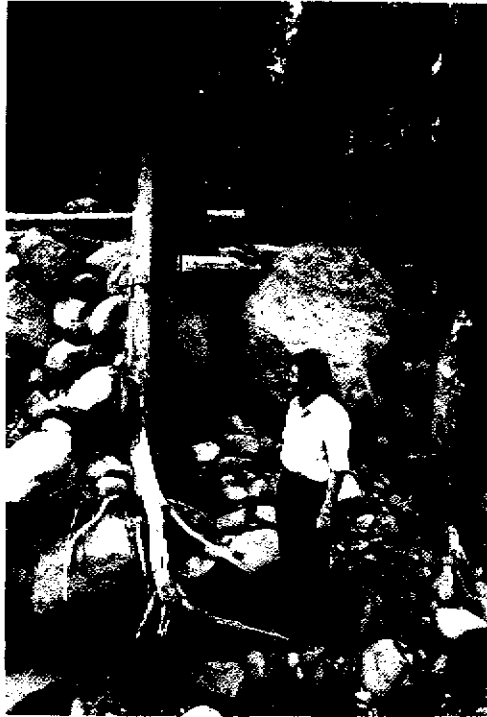


圖 3.7 台大溪頭營林區森林擋住土石流之情形（洪如江攝）



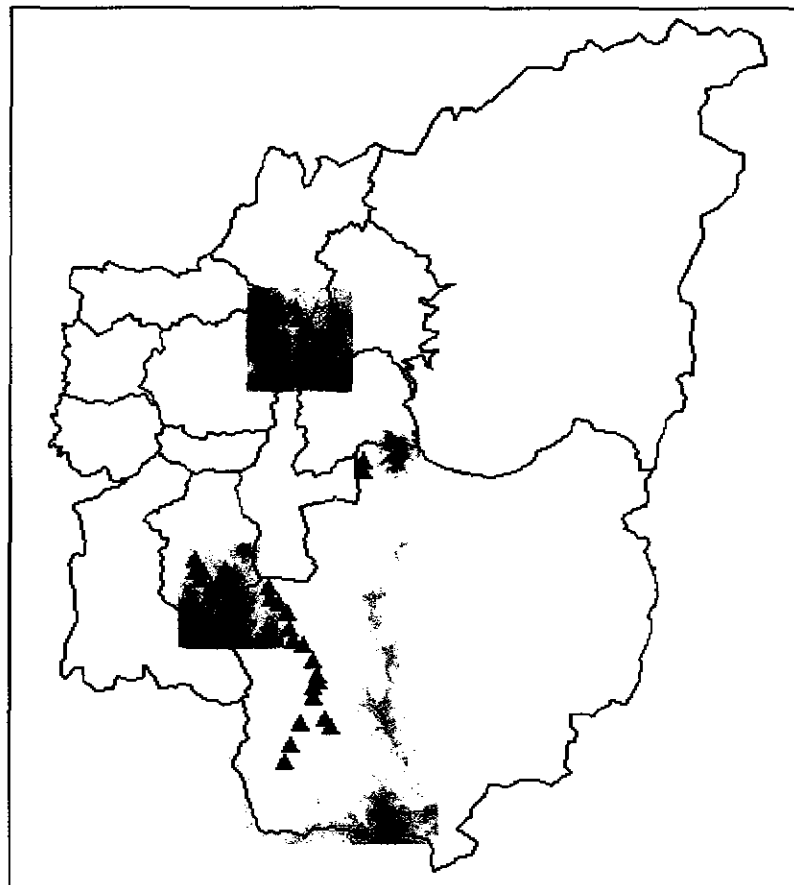
圖 3.8 南投九份二山 921 地震後地貌改變(航照圖)

3.3 研究區內土石流分析樣本溪流之選定

研究中分析之土石流危險溪流樣本，以行政院農委會於民國八十年委託國立成功大學水工試驗所畫定之南投縣 64 條危險溪流為基礎，查閱土石流相關之文獻及整合本研究室歷年相關研究之結果，並由南投地區二萬五千分之一地形圖挑選其中一、二級河川配合實際勘察結果，最後選定 28 條溪流為本研究分析樣本，其中曾有土石流發生者有 13 條，未發生土石流者有 15 條，發生與未發生者之比例約為 1:1。區域涵蓋的範圍分別為南投縣的北勢溪流域、玉崙溪流域、北山坑流域及陳有蘭溪流域等。(分析流域及樣本點如圖 3.9 所示)

3.4 土石流發生記錄

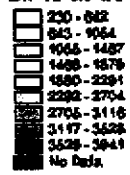
引用范正成等(1999)有關南投地區土石流臨界降雨線研究中之記錄資料，該資料係經由歷年的研究成果和查閱過去文獻記錄及實際採訪當地居民及村里長而得，如表 3.1 所示。



北勢溪流域



陳有蘭溪流域



▲ 土石流樣本溪流

□ 南投行政區域

北山坑流域



玉崙溪流域

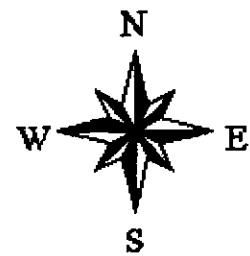
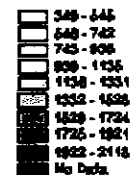


圖 3.9 分析流域及樣本點分佈圖

表 3.1 研究區土石流發生記錄

災害地	土石流發生時間	造成降雨的原因
新安橋	民國 85 年 8 月 1 日 2~3 時	賀伯颱風
新山橋	民國 85 年 8 月 1 日 2~3 時	賀伯颱風
郡平橋	民國 85 年 8 月 1 日 2~3 時	賀伯颱風
郡坑橋	民國 85 年 8 月 1 日 2~3 時	賀伯颱風
上安橋	民國 85 年 8 月 1 日 2~3 時	賀伯颱風
95.5k	民國 85 年 8 月 1 日 1~2 時	賀伯颱風
豐丘	1. 民國 74 年 8 月 23 日 19:00 2. 民國 75 年 8 月 22 日 18:50 3. 民國 85 年 7 月 31 日 11~12 時 4. 民國 87 年 6 月 9 日 18~19 時	尼爾森颱風 韋恩颱風 賀伯颱風
香蕉橋	民國 85 年 8 月 1 日 0~1 時	賀伯颱風
新興橋	民國 85 年 8 月 1 日 0~1 時	賀伯颱風
溪坪橋	民國 85 年 8 月 1 日 4~5 時	賀伯颱風
崩炭二號橋	民國 85 年 8 月 1 日 4~5 時	賀伯颱風
苗園	民國 78 年 9 月 12 日 14~15 時	暴雨
哈比蘭	民國 75 年 8 月 22 日 4~5 時	韋恩颱風

第四章、研究方法

本研究以前述選定南投縣境內 28 條土石流危險溪流為例，分析多項與土石流發生有關之潛在因子，提出土石流發生與否之判定方法，且針對各個分析流域，進行土石流危險區域的判定，給予適度的量化，以供防災搶險的依據。

4.1 研究之流程

研究之主要流程分成三個部分，首先為選定土石流分析樣本溪流，列出相關的地文及力學性質等，經過統計檢定決定其土石流發生之相關潛在因子，進一步與雨量分析之結果相結合，以費雪區別函數求得土石流發生之臨界降雨線推估之經驗公式，最後將土石流臨界降雨線與頻率分析得之暴雨復現期相比較，以判定其危險度。（流程圖如圖 4.1 所示）

4.2 土石流發生相關因子之選定

研究中選定之土石流發生相關因子大致尚可分成兩類，其一為地文因子包括有土地利用狀況、集水區的基本資料及土壤力學參數等，另一類為水文因子，其主要的分析資料為研究區域內歷年之降雨量。

4.2.1 土地利用因子

分析流域內是否具有發生土石流之潛在勢能，則集水區內開發的情況有著一定程度的影響。如何能將土地開發的情形給予正確的量化，就成為重要的分析步驟。研究中以衛星影像作為土地開發分類的依據，以下針對遙感探測做一簡介：

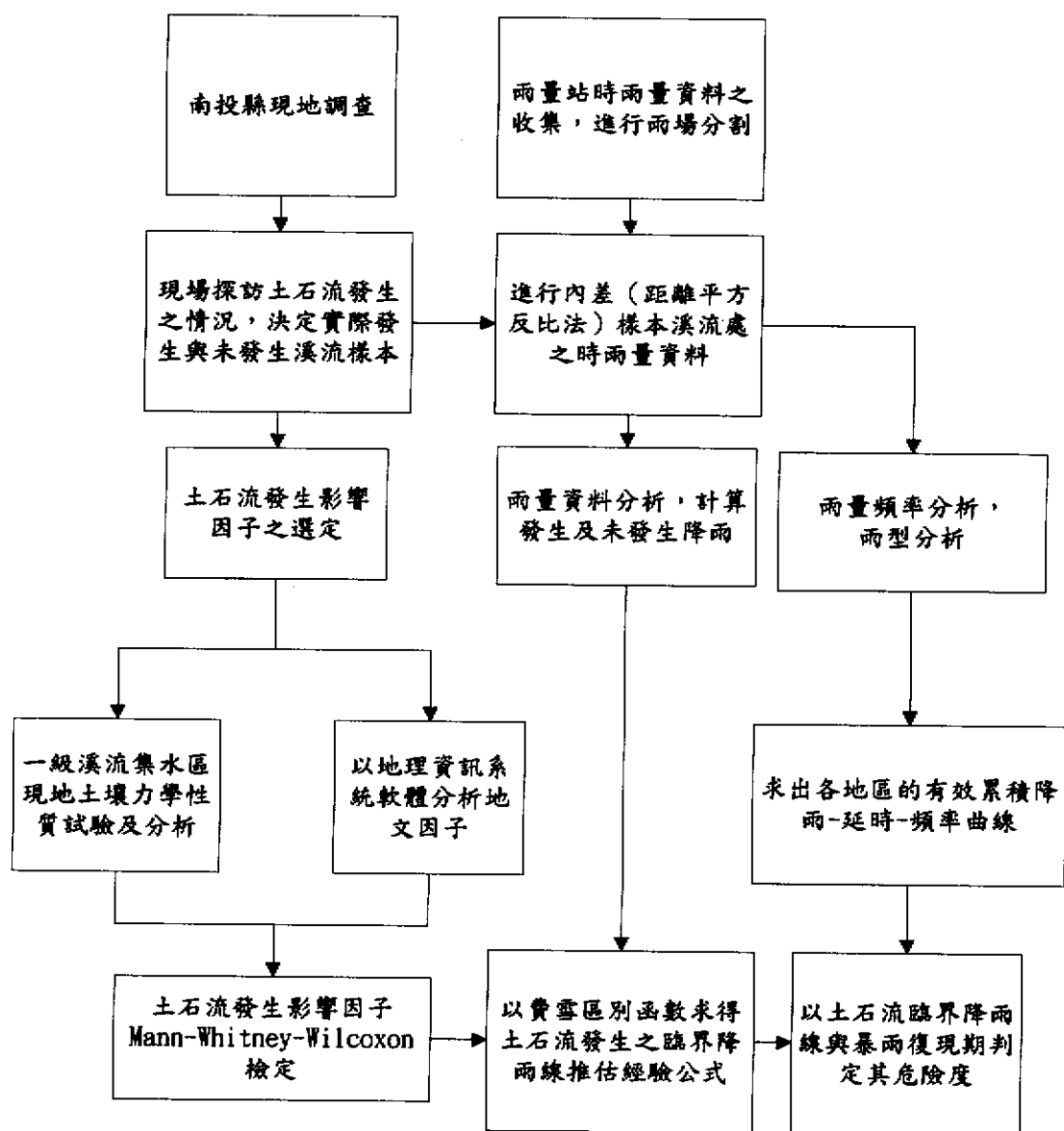


圖 4.1 研究之流程圖

4.2.1(a) 遙測技術簡介

所謂遙感探測，乃是利用感測器收集目標物所反射的能量，以獲取目標物資訊的一項科學與技術。過程中並不需直接和欲探測地區或目標物接觸。遙測系統最大的優點在於涵蓋面積廣泛和即時的特性，此特點也解決了傳統現地調查需耗費大量時間及人力的缺點。因此，不但在區域性問題的重覆監測上提供了很大的幫助；並可對資源調查、交通規劃、和環境污染防治等廣域性的問題提供方便的技術支援。

遙測影像是由感測器所收集的能量轉化而來。這些能量是太陽光、微波或是幅射電磁波等能源穿透大氣層到達地面，再經地面目標物的吸收、反射和折射等作用後，被感測器收集並記錄下來。感測器的形式也因收集的能量不同而有不同的設計。包括聲波、重力場或是電磁波...等，都有不同的感測器加以收集。其中尤以電磁波之應用最廣，因此以下僅就電磁波譜之遙測系統作介紹。

電磁波譜遙測系統的設計，主要是分別以感測器收集儲存不同波段的電磁波。一般表示上，常將這些不同的波段使用對數圖的型式來表示，如圖 4.2 所示。肉眼可以感應的波段範圍是 $0.4\mu\text{m}$ 至 $0.7\mu\text{m}$ ，也就是一般所熟知的藍、綠、紅三個波段範圍。至於其他較常使用的波段還有反射紅外光(近紅外光)和熱紅外光(遠紅外光)...等等。因為地物不同的物理、光學特性，在不同波段甚至可能會有全然不同的反應，而這些不同的反應便是影像判讀的基礎。

電磁波譜的收集主要有四種方式。包括：攝影式系統、熱紅外線掃描系統、雷達系統、和多光譜掃描系統(Multi-Spectral Scanning, MSS)。而研究中所使用的法國 SPOT 衛星影像則屬於多光譜掃描系統。多光譜掃描系統，如圖 4.3 所示，設計成可以感測許多

狹窄波段的能量，包含了記錄紫外線波長、可見光、反射紅外光到熱波譜部份。多光譜掃描系統將熱掃描器簡單地擴展成多個檢波器，也就是實際上以多個多段檢波器執行影像的資料收集，所以多譜掃描系統和熱紅外線掃描系統最大的不同就是多了分波裝置。在理論上，我們可以任意的擴充檢波器，然而此舉也使入射光變得更窄，有些檢波器設計上高達十八個，甚至二十四個，不過一般而言，檢波器裝置六至九個就足供研究使用。

4.2.1(b) 波譜特性

波長為 λ 的電磁能入射到地表時，會產生反射、穿透及吸收三種作用，如(4-1)式所示。而通常我們會以波譜反射率 R 來描述波譜的反射特性，波譜反射率的定義如式(4-2)所示。

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (4-1)$$

$$R(\lambda) = \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)} \quad (4-2)$$

其中： λ =波長；

$E_I(\lambda)$ =入射的能量；

$E_R(\lambda)$ =反射的能量；

$E_A(\lambda)$ =吸收的能量；

$E_T(\lambda)$ =穿透的能量。

根據波譜反射率的定義，可以將不同波長下的波譜反射率繪製成波譜反射率曲線(Spectral Reflectance Curve)。圖 4.4 是地表覆蓋物的波譜反射特性曲線，其中包含綠色植物(小麥)、乾裸土壤、濕土以及清水、濁水等典型的地表覆蓋物波譜反射率曲線。不同的地表覆蓋物在不同的電磁波段會有不同的反射特性。因此在光譜反射特性曲線圖

上其波譜反射特性曲線隨波長的不同而有明顯的變化。某些類別可能在某個波長範圍之下與其他類別的波譜反射率有很大的差異。例如雪地和成熟的麥田在波長 $1.0\mu\text{m}$ 時，其波譜反射率並無太大的差異，但在波長 $1.6\mu\text{m}$ 時即出現相當大的落差。此特性即可作為類別判釋的依據。

植物反射電磁波譜的機制大部份發生在「葉面」，而影響植物反射強度的因子，包括有葉之成熟度、葉綠素、葉面健康狀況、及含水量等。以 SPOT 衛星影像而言，特別是在近紅外光的部份，由於近紅外光對葉面的穿透性佳，故下層的葉面會對穿透的近紅外光再次反射，而增加整體的近紅外光反射強度。在經驗上也發現當近紅外光段與紅光段的反射強度相差很小時，往往顯示出該區域的綠色生物量較少。

最能反應出水體波譜反射特性的當屬近紅外光段。水體吸收近紅外光段能量的特性，使得近紅外光段的影像呈現出較低的灰階值。因此我們可以很容易使用近紅外光段偵測到地表的水體，不過水體的波譜反射值也受許多因子的影響，包括：水中的懸浮物質、水生綠藻、山脈的陰影、甚至水體表面的鏡面反射等，都會影響到光譜的反射值。遙測影像經常會因為時間和空間的因素影響，產生判釋上的誤差。在空間上，由於遙測影像所涵蓋的範圍相當廣大，因此即使是相同的覆蓋類別，也會因為土壤、氣候、或者耕作方式...等等條件的不同，而使得波譜反射率產生若干的差異。而在時間上，則由於季節不同，使得覆蓋類別本身產生變化，特別在植生的類別受時間季節影響尤其明顯。例如：落葉林之植物在秋天之際葉綠素轉淡，而春天時各種的花卉盛開，在光譜反射上也會有顯著的不同。

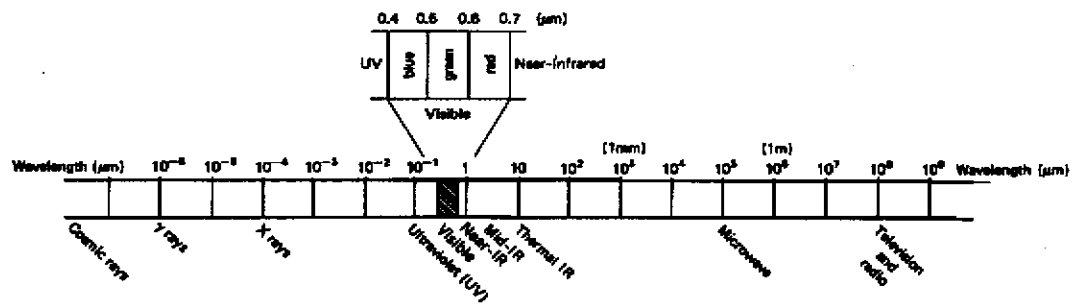


圖 4.2 電磁波譜
(資料來源：Lillesand and Kiefer, 1994)

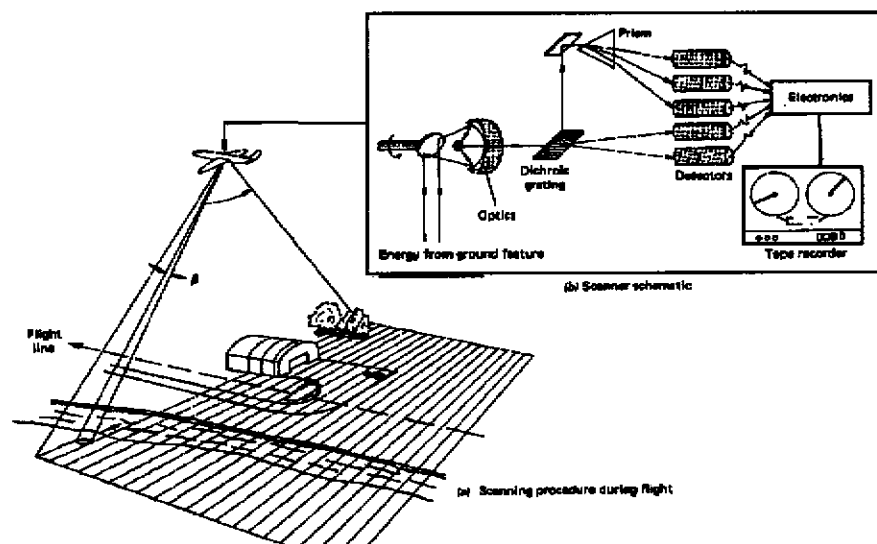


圖 4.3 多譜掃描系統的運作
(資料來源：Lillesand and Kiefer, 1994)

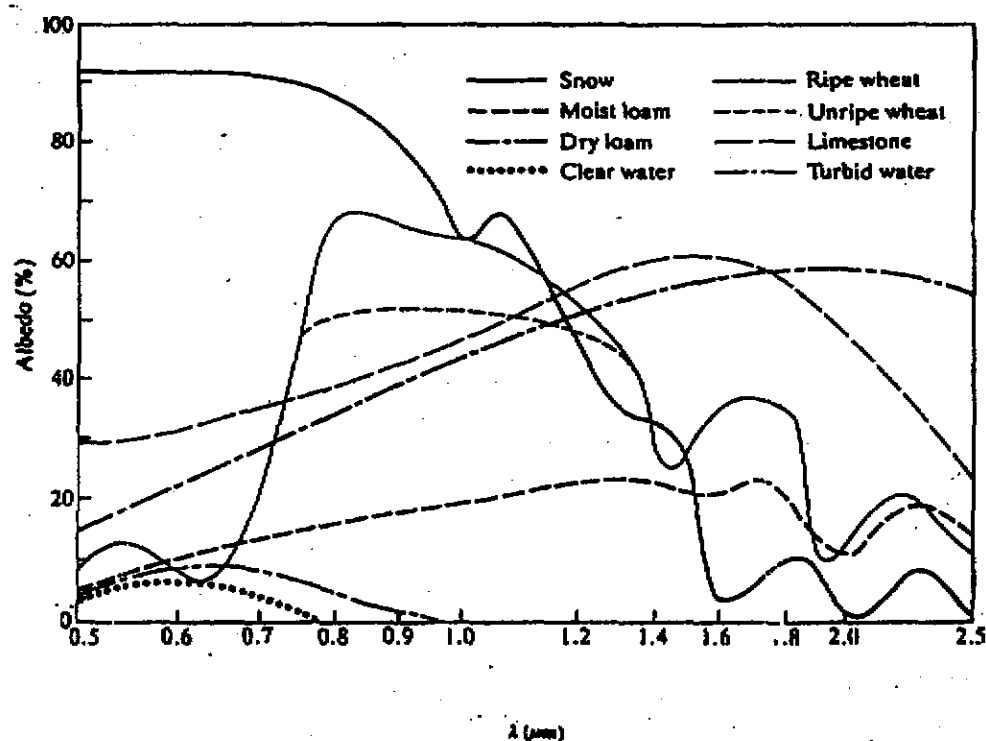


圖 4.4 地表覆蓋物的波譜反射特性曲線
(資料來源：Rees, 1990)

光譜反射值受此空間和時間效應的影響，往往會對遙測影像的判釋造成相當程度的誤差，因此應用上不可不慎。而紋理特徵則較不受時間和空間的影響。

4.2.1(c) 衛星資料特性

衛星影像是以網格式 (raster) 的儲存方式來記錄資料，也就是以陣列型態於空間中等間距記錄地表資訊，當取樣間距愈小則代表資料之解析度愈高，每個像元所代表的空間範圍就愈小。像元是整張衛星影像的組成單元，其灰階值即代表物質在光譜中不同的強度反應。若以 8bit 的資料型態作儲存，則灰階值的變化範圍即為 0~255，共 256 種不同的變化值。光譜中反射最強的，其灰階值即為 255，呈現的是白色的亮點；反射最弱的，其灰階值為 0，呈現的是黑色的暗

點，其他強度反射值其灰階範圍則介於 0 與 255 之間。

目前國內最常使用的衛星影像資料是由國立中央大學太空及遙測中心衛星接收站所接收的法國 SPOT 衛星資料及美國大地 (LANDSAT) 衛星資料。該中心自民國 82 年起便接收並處理 SPOT 衛星影像，提供各界使用。SPOT 衛星影像的空間解析度，就多光譜而言，可以達到 $12.5\text{m} \times 12.5\text{m}$ ；在可見光段(Panchromatic, PAN)更可達到 $6.25\text{m} \times 6.25\text{m}$ (如表 4.1 所示)。一般而言，SPOT 衛星影像，其空間解析度較 LANDSAT 衛星影像來得高，但其波段數目則比 LANDSAT 衛星來得少；所以雖然 LANDSAT 影像的解析度較 SPOT 影像來的差，但卻因擁有較多的波段，所以在分類應用上，皆為各單位所廣泛使用。

表 4.1 SPOT 衛星影像特性

光譜波段	波長範圍(μm)	解析度(m)
綠光段(Green)	0.5-0.59	12.5
紅光段(Red)	0.61-0.68	12.5
近紅外光段(Infrared)	0.79-0.89	12.5
可見光段 (Panchromatic)	0.51-0.73	6.25

研究中使用 1996 年之南投 SPOT 衛星影像資料 (如圖 4.5 示)，分類之方法採用 Imagine 影像處理軟體中之非監督性分類法，其利用群集演算的方法加以分類，先假設一組類別的平均值，或將所有的資

料當成一類，計算平均值及標準差。經過一系列之區別與結合之疊代計算，直到最高次迴圈計算。當任一類的標準差大於最大標準差之值分開計算，若任兩類的平均值小於任兩類別平均值之距離時，進行結合，而每一類別個數小於類別最小個數限制之值時則捨棄。

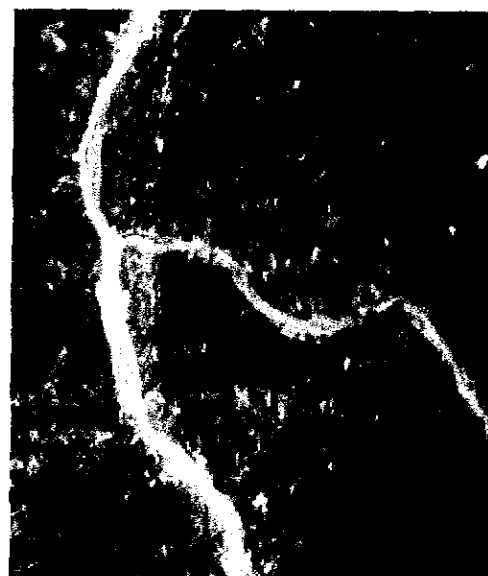
圖 4.6 說明了分類的結果，若選擇監督性分類則有一個缺點即是訓練樣區的樣本選取及數量不能代表母群體，而使結果不具代表性。那非監督性分類的主要缺點即是對於邊界分類的效果不佳。因此作法上就以非監督性分類為主，輔以航空照片作為判識類別的作法，表 4.2 列出了分類後的結果。



圖 4.5 研究區域之 SPOT 衛星影像圖(1996)



陳有蘭溪航照圖



SOPT 衛星影像圖(1996)



分類後之土地利用圖

圖 4.6 土地利用判識圖

表 4.2 研究區域土地利用表

集水區 名稱	分析地點	土地開發像素 數目	土地未開發像素 數目	土地利用 百分比 (%)
北勢溪流域	溪坪橋	33	3184	1.03
	崩坎二號橋	37	1473	2.45
	苗園	49	8553	0.57
	大智橋	8	4045	0.20
	奮鬥橋	44	2840	1.53
	深坑二號橋	37	1280	2.81
	深坑四號橋	43	1601	2.62
玉崙溪 流域	潭南一號橋	3	14632	0.02
	潭南二號橋	187	1464	11.33
北山坑 流域	林厝橋	17	1540	1.09
	港源三號橋	117	1802	6.10
陳有蘭溪流域	壽山橋	604	3582	14.43
	新安橋	774	5853	11.68
	新山橋	920	2240	29.11
	郡平橋	1734	3499	33.14
	郡安橋	348	3449	9.17
	郡坑橋	1632	974	62.62
	上安橋	515	3050	14.45
	95.5K	2034	10536	16.18
	豐丘	536	10184	5.00
	筆石橋	10	17439	0.06
	庫坑橋	59	1657	3.44
	望美橋	8	1701	0.47
	望鄉橋	416	5768	6.73
	香蕉橋	3111	7688	28.81
	新興橋	346	10767	3.11
	東埔一號橋	284	6887	3.96
	東埔二號橋	19	22458	0.08

註：土地開發之部分包括道路、房舍、茶園、檳榔園等非原始林地的部分。

4.2.2 集水區地文因子

土石流發生的地區通常位於河川上游處，更有許多土石流是發生於野溪上。但在傳統地形圖上很難判斷野溪的位置和其狀況，利用 Arc/Info 以 DTM 模擬出渠道流和漫地流，可以得到所有的地表逕流的流動水系資料，故由 DTM 可以快速有效的推求出地文因子，如：河川長度、集水分區、溪床坡度.....等，DTM 及 GIS 空間分析技術在大區域之研討上相當實用。

河系推導及地文因子之求取：流程圖如圖 4.7 所示

1. DTM 資料之初步處理：

由於台灣目前之 DTM 的解析度是 40mx40m，有可能發生局部區域地形資料不足之情況，使接下來之地形分析工作無法進行，因此取得 DTM 資料之後，首先須作初步之資料修正，對局部突出或窪陷進行區域整平，填平窪陷或是去除突起之相對極端值，在 Arc/Info 內可以 FILL 指令來進行：

`FILL<in_grid><out_grid>{SINK|PEAK}{z_limit}{out_dir_grid}`

其中：<in_grid>：需要處理之輸入檔案名稱。

<out_grid>：處理後之輸出檔案名稱。

{SINK|PEAK}：選擇欲填平窪陷或是去除突起（可以不設定）

{z_limit}：給定之高差範圍（可以不設定）

{out_dir_grid}：not necessary（可以不設定）

例：FILL elev_grid1 filled_grid2

如果在應用 DTM 資料前未經此步驟處理，則有可能產生局部區

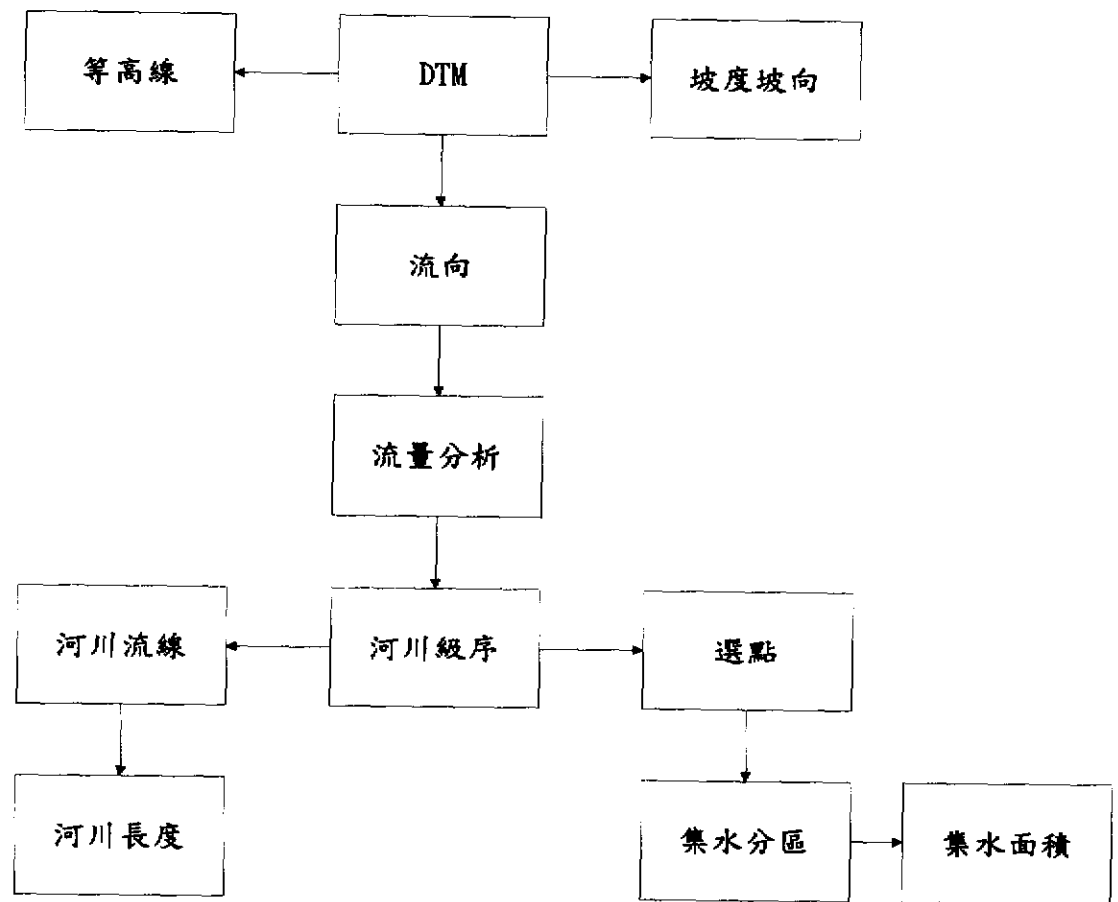


圖 4.7 以數值地形 (DTM) 求取地文因子流程圖

域之流線因不合理的高低起伏而間斷，在河川分析時，不但河流本身會有不連貫的不合理情形，在級序的求取上也會發現級序無法連接或無法劃定子集水分區之結果。

2. 流向判定：

區域整平後即可進行流向圖層之產生，即由原始之 DTM 資料產生另一個包含流向資料之網格圖層，流向資料圖層為河川網路空間分析所必需，需先分析出流向，才能繼續進行河系之建立。

FLOWDIRECTION (<surface_grid>, {o_drop_grid}, {NORMAL | FORCE})

其中： <surface_grid>：即經整平後之 DTM 資料圖層

{o_drop_grid}：設定是否產生各點落差值之圖層（可以不設定）

{NORMAL | FORCE}：圖層邊緣處流向之指定方式（可以不設定）

Normal：依高程差判定流向

Force：圖層邊緣之網格點的流向均設定為向外流動

例：dir_grid = flowdirection (filled_grid)

某網格點處流向之判斷是以該點高程與附近各點高程比較決定，流向之表示方式如圖 4.8 所示之，向右流即以 1 表示，向下流則以 4 表示之；若是有可能向一個以上的方向流動，則以算數和表示之，例如流動方向為右(1)、右下(2)、及下(4)三個方向，則表示為 1+2+4=7。

32	64	128
16		1
8	4	2

圖 4.8 流向之判定

3. 流量分析：

流向判定完成後即可進行流量分析以產生河川網路，此方法乃是假設一均勻降雨來模擬該區域所可能產生的逕流方向和流量：

`FLOWACCUMULATION (<dir_grid>, {weight_grid})`

其中：<dir_grid>：由流向分析函數(`flowdirection()`)所得之流向圖層。

{weight_grid}：用以模擬之假設降雨量（可以不設定）

例：`net_grid = flowaccumulation ( dir_grid )`

在做此函數的計算處理時，如果為了避免地形上局部窪蓄所造成河流的中斷，可以假設一較大之降雨，模擬出較大的流量，以減少地形對流量之影響。

4. 河川級序判定

得到了流向及流量二項基本圖層之後，Arc/Info 即可模擬出研究區域內河川級序之分佈情形：

`STREAMORDER(<net_grid>, <dir_grid>, {STRAHLER|SHREVE})`

其中 <net_grid>：由流量分析所得之圖層。

<dir_grid>：由流向分析函數(`flowdirection()`)所做出之流向圖層。

{STRAHLER|SHREVE}：求取級序之二種方法(參考圖 4.9, 可以不設定)

例：`order_grid = streamorder (net_grid, dir_grid, strahler)`

在此項計算中 Arc/Info 會自動的將所有可能之漫地流及渠道流皆列於結果之中，即除了集水分區稜線之外，整塊研究區域都會有河川覆蓋。

5. 河系導出：

由河川級序和流向圖層，可以產生河流流線之圖層。

STREAMLINE (<net_grid>, <dir_grid>, {out_item}, {weed})

其中 <net_grid>：由流量分析所得之圖層。

<dir_grid>：由流向分析函數(flowdirection())所做出之流向圖層。

{out_item}：輸出圖層屬性資料表中存放網格資料之名稱(可以不設定)

{weed}：圖層錯誤自動修正參考值(參考 Arc/Info 手冊)(可以不設定)

例：line = streamline (net_grid, dir_grid, #, 10000)

由此函數模擬所得之河川網絡乃是由河川級序圖層轉換而來，屬性資料表中包括了欲求取之基本地文因子：河川級序和河川長度。因為原先之圖層是由河川級序產生，故有些同級河川並未相連，而且十分散亂，故需要經手動過程將同級河川連接起來，每段河川連結之後，再利用資料庫軟體 FOXBASE 重新修正屬性資料後完成河系圖層之建立。

6. 子集水區劃定：

在模擬子集水區之前必須先將各待劃定子集水區的集水點先選取出來。

SELECTPOINT (<grid>, <point_file>, {INSIDE|OUTSIDE})

其中 <grid>：原先之 DTM 數值地形資料。

<point_file>：各選取點集合之文字檔名。

{INSIDE|OUTSIDE}：選擇網格點之方式(可以不設定)

Inside：除點選的點之外均不選取

Outside：除點選的點之外均選取

例：s_point = selectpoint (grid, point)

集水點圖層選取之後，便以下式之指令劃分出所選取之集水點上方的子集水區：

WATERSHED (<dir_grid> , <source_grid>)

其中 <dir_grid>: 由流向分析函數(flowdirection())所得之流向圖層。

<source_grid>: 此處即代入先前之選定點之圖層(selectpoint())。

例: w_shed1 = watershed (dir_grid, s_point)

此過程中是以河川流向及級序做為輸入，產生一集水分區之網格圖層，再經過一次 Arc/Info 內部函數 GRIDPOLY() 之轉換，可以將 grid 圖層轉成一包含完整屬性資料之向量圖層（如圖 4.10 所示）。

若依據上述之方式即可推求出集水區的各項地文因子，如集水區面積、主要河川長度、溪床平均坡度、形狀係數等。以下再將各項地文因子作一完整之定義

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，故以數值地形圖解析度為 40*40 公尺，在主要河川長度上取平均坡度 16 度以上為起算點。

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。

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如 (4.3) 式。為一無因次參數。

$$F = \frac{W}{L} = \frac{\frac{A}{L}}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (4.3)$$

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(4.4)式：

$$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^n S_i^{1/2}}{n} \right)^2 \quad (4.4)$$

其中各段 S_i 的求法為 (4.4) 式：

$$S = \sin^{-1} \left(\frac{h_i}{l_i} \right) \quad (4.5)$$

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。

依據上述方法推求各研究流域之數值地形圖及地文因子數據整理如圖 4.11、4.12、4.13、4.14 及表 4.3 所示。

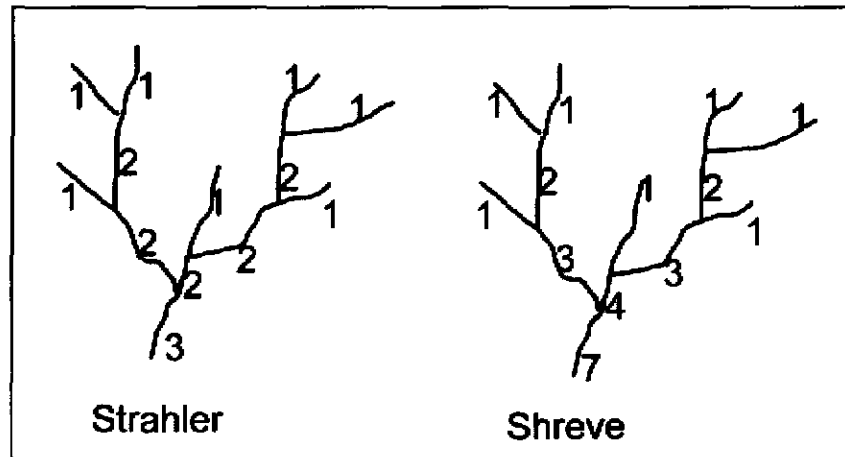


圖 4.9、兩種不同之級序定義方式

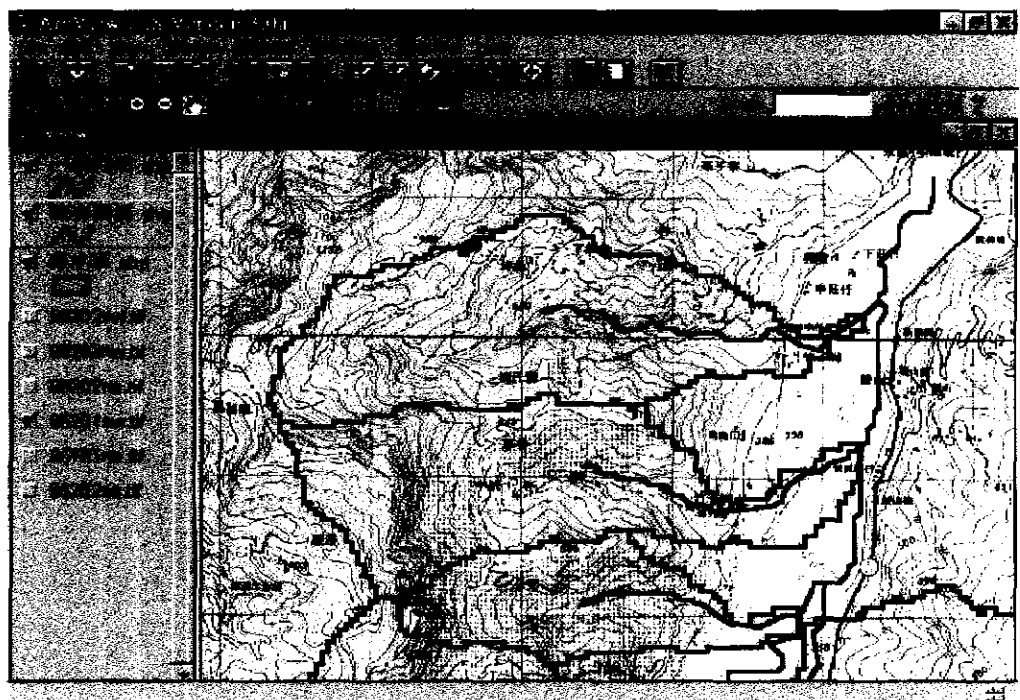


圖 4.10 具完整屬性資料之向量圖層

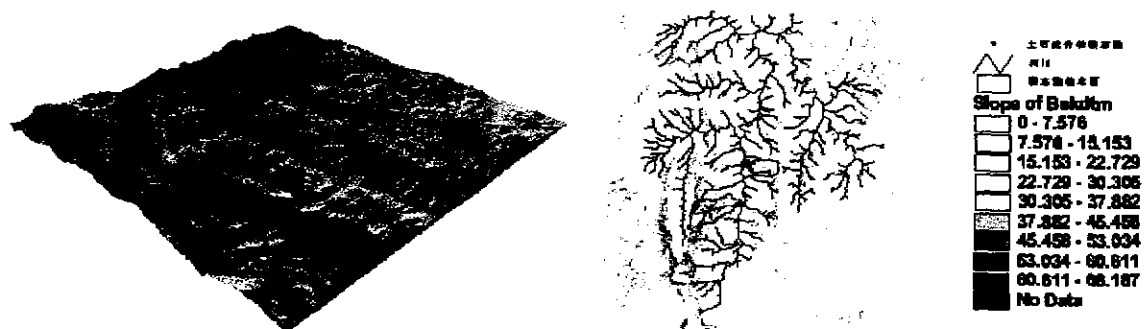


圖 4.11 北山坑數值地形圖、流域樣本點及坡度圖



圖 4.12 北勢溪數值地形圖、流域樣本點及坡度圖

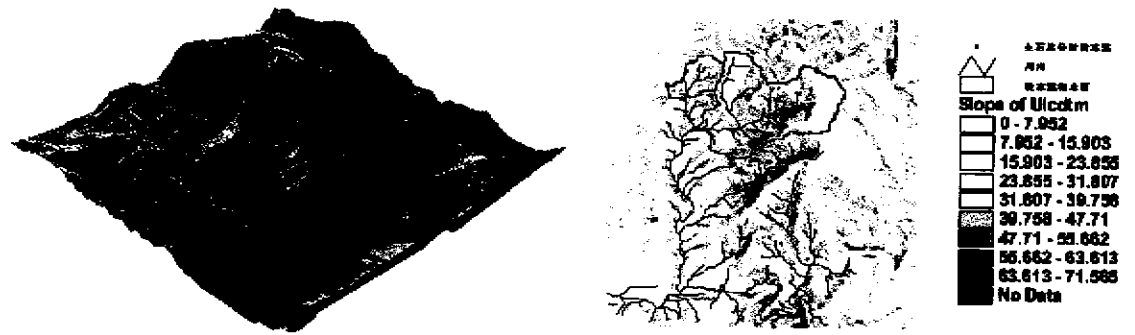


圖 4.13 玉崙溪數值地形圖、流域樣本點及坡度圖

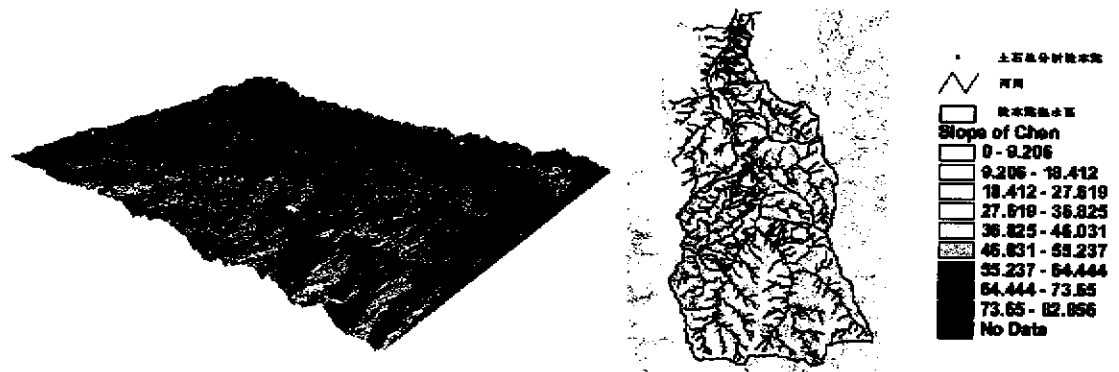


圖 4.14 陳有蘭數值地形圖、流域樣本點及坡度圖

表4.3 地文因子數據

集水區 名稱	分析地點	集水區面積 (ha)	溪流長度 (m)	集水區平均 寬度(km)	集水區形狀 因子	溪床平均坡 度(%)
北 勢 溪 流 域	溪坪橋	76.87	591.4	0.76	0.25	9.99
	崩坎二號橋	21.9	442	0.5	1.12	7.98
	苗圃	127.9	885.1	1.33	0.46	17.49
	大智橋	63.52	890.6	0.66	0.41	17.63
	奮鬥橋	42.08	734.6	0.72	0.3	15.80
	深坑二號橋	18.72	162	0.74	1.15	14.10
	深坑四號橋	28.48	544.4	0.84	1.02	19.90
玉崙溪 流域	潭南一號橋	224	1146.8	1.9	0.59	18.61
	潭南二號橋	25.12	391.2	0.79	0.64	9.53
北山坑 流域	林厝橋	22.72	267.6	0.48	0.46	12.32
	港源三號橋	27.84	574	0.58	0.29	12.55
陳有蘭溪 流域	壽山橋	54.74	828.7	0.57	0.39	17.12
	新安橋	100.48	607.9	1	0.75	14.36
	新山橋	45.92	540.3	0.68	0.88	18.99
	郡平橋	78.4	576	1.38	2.39	14.29
	郡安橋	48.64	795	1.17	0.51	10.54
	郡坑橋	36.32	377	1.01	2.68	11.53
	上安橋	52.8	1163.2	0.93	0.26	13.09
	95.5K	192	1116.1	1.36	0.92	15.57
	豐丘	161.28	1507.2	0.86	0.44	20.98
	筆石橋	266.4	1010.7	1.63	0.16	6.99
	庫坑橋	25.12	552.1	1.01	0.29	10.21
	望美橋	21.53	546	1.18	2.17	4.29
	望鄉橋	93.28	787.1	1.57	0.17	7.70
	香蕉橋	164.32	1343.6	1	0.6	14.86
	新興橋	169.28	1640.1	0.84	0.29	14.34
	東埔一號橋	68.64	1087	0.87	0.41	13.78
	東埔二號橋	345.66	3420.8	1.23	0.27	20.54

4.2.3 土壤力學參數

研究中土壤力學性質資料之取得方法，原則上是以現地試驗方式進行，亦即先針對研究區域內各危險溪流之集水區，進行現地密度試驗及採樣，並將採得土樣於試驗室中進行比重分析、粒徑分析、阿太堡試驗及直接剪力試驗，試驗結果列於表 4.4。

4.2.3(a) 土壤粒徑

若得知土壤之粒徑分佈，則可判斷土壤及配與否，並做為土壤分類，亦可進一步評估土壤之液化潛能。研究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。

4.2.3(b) 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。且孔隙率與孔隙比有下列之絕對相依的關係： $n=e/(1+e)$ 。

4.2.3(c) 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。

4.2.3(d) 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)。

4.2.3(e) 凝聚力與內摩擦角

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 (4.6) 式 (亦即 Mohr-Coulomb 破壞準則)：

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (4.6)$$

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)

4.2.3(f) 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。

表 4.4 土壤力學性質試驗資料

	溪坪橋	崩坎二號橋	苗圃	大智橋	奮鬥橋	深坑二號橋	深坑四號橋	潭南一號橋	潭南二號橋	林厝橋
採土點座標(E)	227.1	227.3	228.7	227.9	226.4	226.3	226.6	243.2	243.0	235.7
採土點座標(N)	2621.0	2622.2	2618.7	2620.4	2624.7	2621.6	2621.4	2636.1	2636.9	2648.8
乾燥單位重 (g/cm ³)	1.150	1.305	1.128	1.401	1.414	1.298	1.155	1.388	1.334	1.341
飽和單位重 (g/cm ³)	1.684	1.804	1.680	1.858	1.680	1.784	1.751	1.852	1.828	1.832
土壤孔隙比	1.150	0.998	1.234	0.843	1.172	0.949	1.480	0.869	0.980	0.968
土壤孔隙率	0.535	0.500	0.552	0.457	0.540	0.487	0.597	0.465	0.495	0.492
土壤大於#4(%)	27.98	23.78	11.51	46.25	32.96	22.25	48.86	61.00	74.01	37.45
土壤小於#200(%)	44.55	23.97	43.01	34.37	23.05	23.30	40.59	19.41	11.72	22.52

凝聚力 (kg/cm ²)	0.030	0.156	0.000	0.013	0.011	0.017	0.161	0.157	0.200	0.043
內摩擦角(°)	32.08	22.53	33.18	29.75	31.23	32.09	24.18	29.44	25.08	30.19
塑性指數	20.47	NP	NP	7.43	NP	NP	18.52	NP	NP	9.01
採土點描述	野溪左岸 10m, 無高差, 砍斷坡腳	野溪右岸 175m, 高差15m, 山坡頂, 雜草處	野溪左岸 30m, 高差2m, 雜草處	野溪左岸 5m, 橋上游20m, 高差50m	野溪左岸 5m, 高3m, 竹林處, 砍斷坡腳	野溪左岸 5m, 橋上游200m, 高差5m, 竹林處	野溪右岸 300m, 高差10m	野溪右岸 10m, 無高差, 砍斷坡腳	野溪右岸 5m, 無高差, 砍斷坡腳	野溪右岸 7m, 無高差, 砍斷坡腳

表 4.4(續) 土壤力學性質試驗資料

	港源三 號橋	壽山橋	新安橋	新山橋	郡平橋	郡安橋	郡坑橋	上安橋	新興橋	95.5k
採土點座 標(E)	235.6	235.6	235.5	235.5	235.2	234.7	234.8	234.4	235.3	235.9
採土點座 標(N)	2647.3	2629.6	2629.4	2628.8	2627.9	2626.6	2627.0	2625.7	2605.9	2619.8
乾燥單 位重 (g/cm ³)	1.175	1.524	1.645	1.827	1.661	1.512	1.463	1.581	1.612	1.603
飽和單 位重 (g/cm ³)	1.725	1.965	2.022	2.144	2.031	1.947	1.915	1.986	2.005	2.005
土壤孔 隙比	1.224	0.791	0.664	0.464	0.589	0.771	0.829	0.681	0.646	0.675
土壤孔 隙率	0.550	0.441	0.399	0.317	0.370	0.435	0.452	0.405	0.393	0.402
土壤大於 #4(%)	46.39	39.40	31.25	23.10	43.34	41.20	12.38	42.11	53.54	24.64
土壤小於 #200(%)	44.68	26.63	25.72	14.61	21.54	38.78	71.38	20.26	24.00	49.71
凝聚力 (kg/cm ²)	0.000	0.060	0.090	0.130	0.040	0.020	0.000	0.030	0.140	0.060
內摩擦 角(°)	36.56	36.20	39.80	27.37	24.86	37.35	37.33	39.13	26.32	37.81
塑性 指數	6.95	7.87	4.49	NP	6.12	6.7	3.85	3.43	7.07	5.09
採土點描 述	野溪右 岸 100m, 高 差 5m, 橋 砍斷坡 腳	野溪左 岸, 距溪 岸, 距 200m, 相 思樹林 旁	野溪右 岸, 崖邊 2-3m, 距 橋 30m, 高 差 10m, 喬 木林旁	野溪左 岸, 崖邊 1-2m, 距 橋 90m, 高 差 15m, 檳 榔樹林	野溪右 岸, 崖邊 1-3m, 距 橋 50m, 高 差 15m, 喬 木林旁	野溪左 岸, 距溪 岸, 距 10m, 距 路 30m, 兩 溪底高差 10m, 蕉 椰樹	野溪右 岸, 崖邊 1-2m, 距 橋 80m, 高 差 10m, 檳 椰樹	溪 左 岸, 崖邊 5m, 距橋 1600m, 路 與溪底 高差 3m, 桃 樹林旁	野溪左 岸, 距溪 岸, 距 20m, 距 路 50m, 高 差 10m, 雜 林旁	野溪右 岸, 距溪 岸, 距 400m, 距 路 60m, 高 差 30m, 灌 木叢旁

表 4.4(續) 土壤力學性質試驗資料

	豐丘	筆石橋	庫坑橋	望美橋	望鄉橋	車寮橋	香蕉橋	新開橋	東埔一號橋	東埔二號橋
採土點座標(E)	236.3	237.4	237.5	238.1	237.8	237.4	236.5	234.6	239.0	239.2
採土點座標(N)	2618.6	2615.9	2613.4	2613.3	2612.2	2609.3	2608.1	2623.9	2606.8	2608.1
乾燥單位重 (g/cm ³)	1.359	1.628	1.472	1.580	1.701	1.649	1.514	1.434	1.332	1.439
飽和單位重 (g/cm ³)	1.851	2.012	1.913	2.004	2.060	2.042	1.950	1.903	1.815	1.891
土壤孔隙比	0.971	0.652	0.807	0.751	0.605	0.654	0.775	0.893	0.937	0.826
土壤孔隙率	0.492	0.384	0.441	0.424	0.377	0.392	0.436	0.469	0.484	0.452
土壤大於#4(%)	49.32	64.18	32.71	52.62	34.22	46.14	33.34	26.32	31.38	43.66
土壤小於#200(%)	19.96	10.59	31.40	11.79	36.22	18.66	28.46	28.24	33.99	17.19
凝聚力 (kg/cm ²)	0.000	0.0000	0.040	0.160	0.000	0.030	0.070	0.040	0.139	0.026
內摩擦角(°)	26.89	42.15	37.39	29.86	40.12	44.14	38.27	40.96	25.44	32.53
塑性指數	7.58	7.87	0.79	1.08	3.76	8.00	10.09	8.46	7.65	5.48
採土點描述	野溪右岸, 崖邊, 距橋2~4m, 距橋100m, 高差30m, 雜林旁	筆石溪左岸, 距橋2000m, 與溪底高差20m, 雜林旁	野溪右岸, 距橋20m, 與溪底高差10m, 雜林旁	野溪左岸, 崖邊, 距橋15m, 與溪底高差10m, 雜林旁	野溪左岸, 崖邊, 距橋20m, 與溪底高差15m, 雜林旁	野溪右岸, 距路岸10m, 與溪底高差5m, 檳榔林旁	野溪左岸, 距路岸15m, 高差10m, 砍斷坡腳, 瓜樹林旁	野溪右岸, 崖邊, 距橋1m, 與溪底高差20m, 橋木林旁	野溪右岸, 無高差, 公路旁, 砍斷坡腳	野溪右岸, 無高差, 公路旁, 砍斷坡腳

4.2.4 降雨資料收集及計算

4.2.4(a) 雨量資料來源

本計畫目前已蒐集自民國 69 年~民國 87 年約十八年之雨量資料，資料來源為台灣省水利處。扣除廢站及沒有電腦記錄之雨量站，共取 17 個站，各站分佈如圖 4.15 所示，站名如表 4.7 所列。

4.2.4(b) 雨量資料推估

在進行土石流預警系統之降雨分析時，所需之雨量資料為時雨量資料。對於各個土石流發生溪流樣本處之雨量資料推估，資料量龐大，在研究中採距離平方反比法求得。

距離平方反比法一現象在空間上的變遷大部份不應該是突然的，而是漸變的，距離平方反比法的未知點就是以鄰近點距離遠近之平方值來決定權重，越近權重越大。

點 X_0 之推估值： $\hat{Z}(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i)$ ， $Z(X_i)$ 為觀測點 (X_i, Y_i) 之測量值，

λ_i 為觀測點 (X_i, Y_i) 之權重係數。 $\lambda_i = \frac{f(d_{oi})}{\sum_{j=1}^n f(d_{oj})}$ ， $f(d_{oi}) = \frac{1}{d_{oi}^2}$ ，

$d_{oi} = \sqrt{(X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2}$ (距離)。(參考蔡玉琴(1997)，淡水河流域降雨時空分析及推估—地理資訊系統的應用)

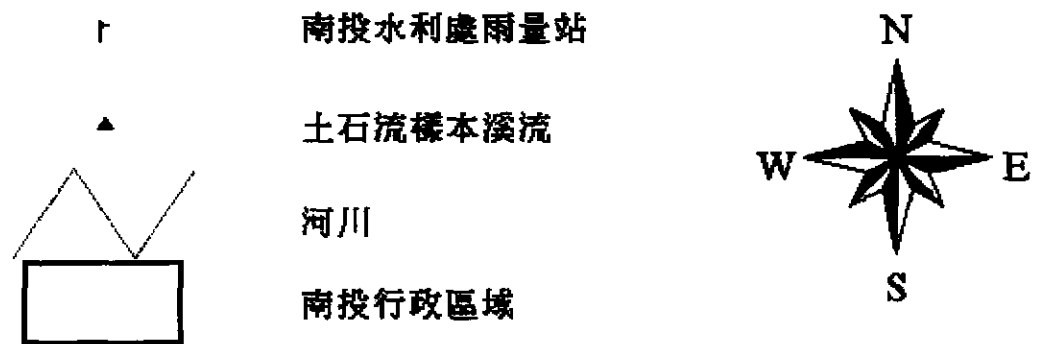
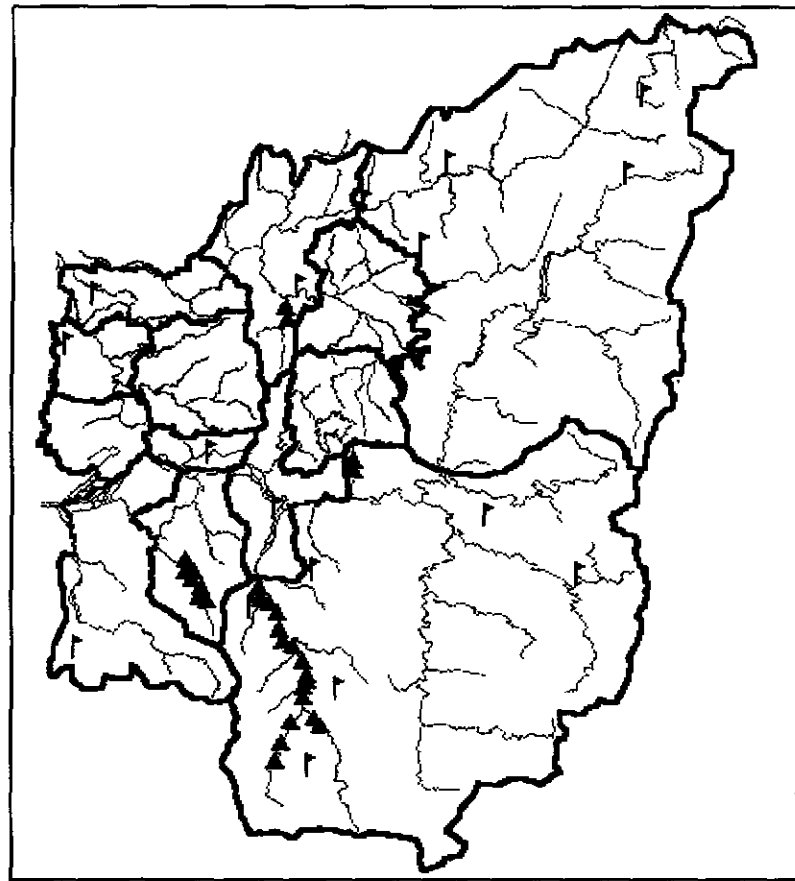


圖 4.15 水利處雨量站分佈圖

表4.7 雨量站名稱及位置一覽表(資料取自台灣省水利處)

流域名稱	流域編號	雨量站名	電腦編號	雨量站位置 (橫參卡脫二度分帶座標)	
				E	N
烏溪流域	270	翠巒	0020	270.320	2675.351
烏溪流域	270	凌霄	0045	250.396	2656.755
烏溪流域	270	清流	0050	244.435	2662.724
烏溪流域	270	惠蓀	0075	253.671	2665.892
烏溪流域	270	北山	0330	238.412	2653.653
烏溪流域	270	六分寮	0500	212.393	2647.852
烏溪流域	270	草屯	0570	216.645	2652.610
濁水溪流域	290	翠峰	0070	269.682	2667.074
濁水溪流域	290	關門	0330	268.154	2624.312
濁水溪流域	290	卡奈托灣	0370	258.551	2627.348
濁水溪流域	290	東埔	0490	241.748	2605.846
濁水溪流域	290	望鄉	0520	241.894	2612.828
濁水溪流域	290	內茅埔	0590	234.108	2620.987
濁水溪流域	290	西巒	0610	238.558	2624.705
濁水溪流域	290	龍神橋	0630	236.015	2630.736
濁水溪流域	290	集集	0790	226.229	2636.040
濁水溪流域	290	桶頭	1040	213.982	2616.162

4.3 臨界降雨線設定

土石流發生臨界降雨線為土石流事前警報系統發佈之重要依據。本研究有關土石流臨界降雨線之設定方法，首先將各發生土石流樣本溪流之雨量資料進行雨場劃分及雨場數化，繼將地文因子及力學參數資料經由無母數統計分析方法，判定出與土石流發生具有相關性之影響因子，最後再以費雪區別函數分析各個曾發生土石流樣本溪流之臨界降雨線及其與地文因子與力學參數之函數關係。

4.3.1 雨場劃分

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 4.16 所示。

4.3.2 有效降雨時間及有效累積雨量

a. 有效降雨時間(T):將降雨開始時間至任意時間稱為有效降雨時間(註:其中之有效降雨係指前述降雨開始時間起算之雨量,此不同於一般水文學中所稱產生直接逕流部份所對應的降雨量)。

b. 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_t)乘以一衰減係數(α)後累加而得有效累積雨量,如(4.7)式:

$$ER = \sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t d_t \quad (4.7)$$

其中衰減係數之決定,乃依據 Fedora and Beschta(1989)有關臨前降水指數模擬暴雨逕流之研究,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:

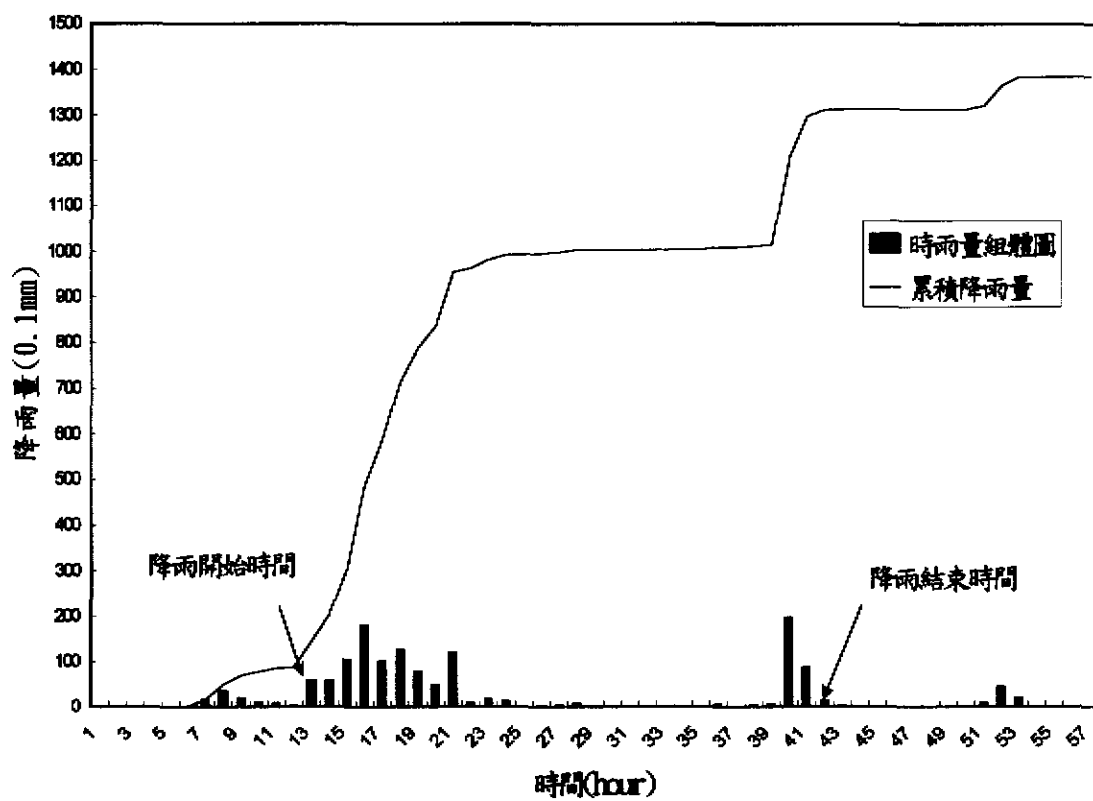


圖 4.16 雨場劃分時間示意圖

公頃)具有如下關係：

$$K=0.881+0.00793*\ln(A) \quad (4.8)$$

本研究即以上式所得之洪水消退係數，再經由 $\alpha = \sqrt{K}$ 計算其衰退係數值。

4.3.3 雨場數化

- a. 發生土石流之降雨：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。
- b. 未發生土石流之降雨：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時間代表該場降雨。

如圖 4.17，即舉數場颱風及暴雨為例，說明其降雨時間與有效累積雨量之歷線關係，以及各雨場之數化點。

4.3.4 雨場取捨

根據青木佑木(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。因此本研究將各延時均勻降雨情況下累積降雨量未達 150mm 之降雨(如圖 4.18 虛線左下部分)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 (4.9) 關係式：

$$ER \geq \frac{1-\alpha'}{1-\alpha} \left(\frac{150}{T} \right) \quad (4.9)$$

其中 T ：有效降雨時間(hr)

ER 及 α 定義如前所述

經由上式之處理，將可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。

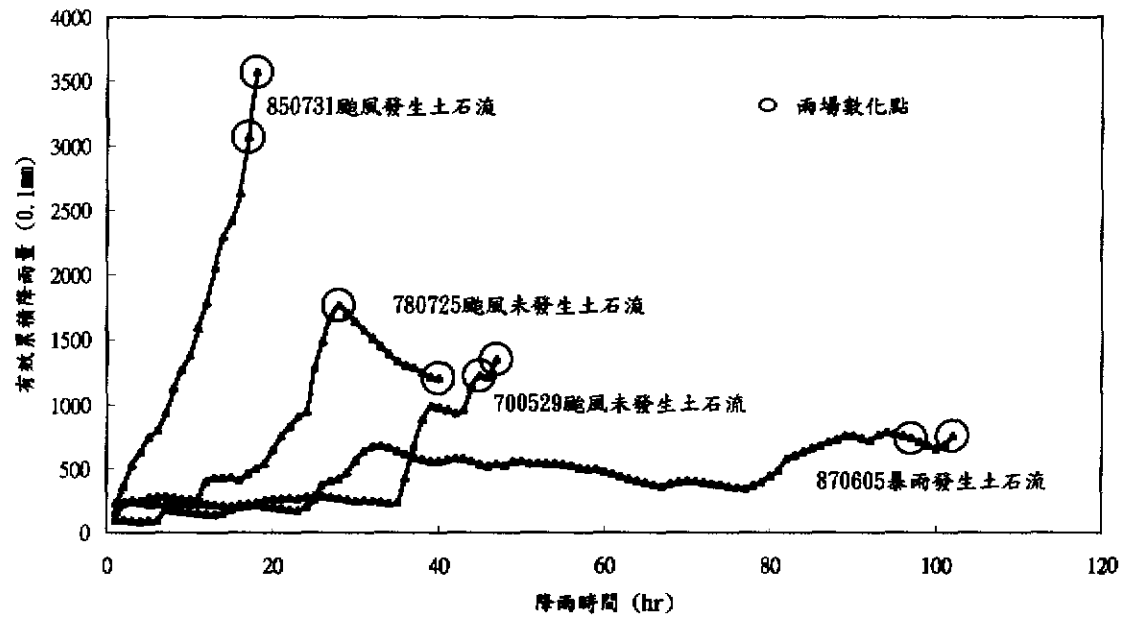


圖 4.17 雨場數化案例說明

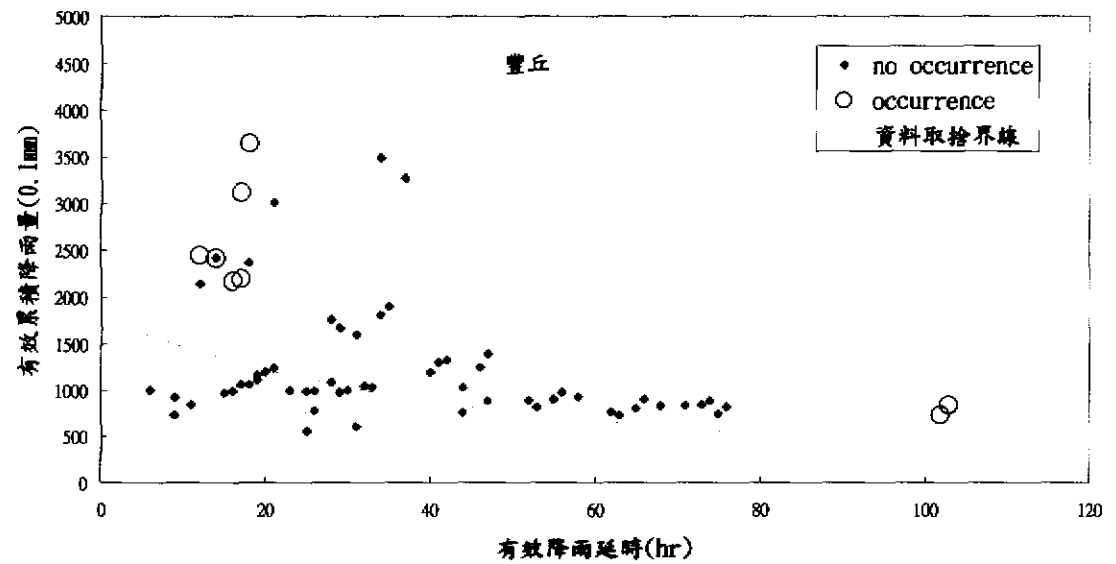


圖 4.18 土石流樣本溪流雨場數化點範例

4.4 土石流發生影響因子之檢定與分析

本研究檢定分析對象係以研究區域內具有實測力學參數資料之 13 個土石流樣本溪流，針對所選定之土石流發生影響因子，配合統計方法加以檢定，以決定與土石流發生與否具有相關性之危險因子。

4.4.1 土石流發生之影響因子

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。

4.4.2 影響因子之檢定方法

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 η_1 、 η_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：

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - W_1 \quad (4.10)$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - W_2 \quad (4.11)$$

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 。

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。分析時採用統計軟體為 SPSS for Windows Version 7.52 (Statistical Package for the Social Science)，在分析結果的部份，選擇檢定後最有相關的因子進行分析，研究中取用這些因子為土石流發生之危險因子。

4.4.3 各影響因子分析結果

所選定的 28 個危險溪流樣本，經考量其 11 個可能與土石流發生與否具有相關性的影響因子，並以 Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定檢定之，其檢定結果如表 4.8 所示。選擇最有相關的因子作分析亦即此因子在發生土石流與未發生土石流之溪流樣本中，具有顯著之差異。分析結果得到下列五種因子對土石流之影響較大。

1. 土地利用因子。
2. 集水區有效面積
3. 主要河川長度
4. 粒徑大於四號篩百分比。
5. 溪床平均坡度。

表 4.8 Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定結果

檢定因子	發生否	N	Mean Rank	Mann-Whitney U	Wilcoxon W	Z	Asymp.Sig. (2-tailed)
集水區平均寬度	1	13	15.62	83	203	-0.668	0.504
	2	15	13.53				
	Total	28					
集水區形狀因子	1	13	15.88	79.5	199.5	-0.829	0.407
	2	15	13.3				
	Total	28					
溪床平均坡度	1	13	16.77	68	188	-1.359	0.174
	2	15	12.53				
	Total	28					
土地利用因子	1	13	18.23	49	169	-2.234	0.25
	2	15	11.27				
	Total	28					
集水區有效面積	1	13	18	52	172	-2.096	0.036
	2	15	11.47				
	Total	28					
主要河川長度	1	13	16.92	66	186	-1.451	0.147
	2	15	12.4				
	Total	28					
土壤孔隙比	1	13	12.54	72	163	-1.175	0.24
	2	15	16.2				
	Total	28					
土壤內摩擦角	1	13	14.62	96	216	-0.069	0.945
	2	15	14.4				
	Total	28					
土壤凝聚力	1	13	14.27	94.5	185.5	-0.139	0.89
	2	15	14.7				
	Total	28					
土壤粒徑大於4號篩百分比	1	13	11.31	56	147	-1.912	0.056
	2	15	17.27				
	Total	28					
土壤粒徑小於200號篩百分比	1	13	15.08	90	210	-0.345	0.73
	2	15	14				
	Total	28					

註：發生否(1：發生、2：未發生)

4.5 費雪區別函數分析

多變量統計法其主要之原理為將兩種或以上之變量資料，應用多元空間之統計與線性代數等方法，將特定問題作一分析。區別分析是一種相依之多變量解析法，其函數之類型可用線性和非線性等來類比，各有其優劣點。非線性分析較線性分析的結果保守許多，且線性方式分析在兩軸之交點與實際的物理現象不符合。研究中以兩種方式分析接無法將兩群集之資料點完全分離，皆要做進一步的修正。雖然非線性分析有較保守的結果，針對防災的觀點來說應該採用，但限於實際資料點之分佈情況決定以多變量分析中的費雪線性區別函數來劃定土石流臨界降雨線，可得到較佳的結果。跟以往臨界降雨線相關研究所採用二維方式分析較不同，本研究採用三維方式分析，亦即以有效降雨時間為 X 軸座標，有效累積降雨量為 Y 軸座標，並加入地文因子與力學參數之合成函數， $z=f(\text{slope}\%...)$ ，為 Z 軸座標，再進行費雪線性區別函數分析。

費雪線性區別函數的主要目的是在求取最能將各群體資料點區別清楚的函數，其考慮將兩個母體的多變量資料經由線性組合的方式，轉換成為單變量的資料，而且希望在這個單變量的資料所對應的兩個母體的中心點相距最遠，也就是在這個線性組合的方向能將兩個群體的資料點區別的最清楚。其要訣在於使組間變異對組內變異之比值為最大。

做法上，採用 EXCEL 電子試算表計算即可，計算步驟如下：

1. 混合樣本變異數—共變數矩陣 S_{pooled}

$$\tilde{S}_{pooled} = \frac{(n_1 - 1)\tilde{S}_1 + (n_2 - 1)\tilde{S}_2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (4.12)$$

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

2. 費雪區別函數可由下式求得：

$$Y_{fisher} = (\tilde{\mu}_1 - \tilde{\mu}_2)' \tilde{S}_{pooled}^{-1} \tilde{x} \quad (4.13)$$

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

所得之費雪區別函數型式如下：

$$\text{二維情況： } Y_{fisher} = k_1 x_1 + k_2 x_2 \quad (4.14)$$

$$\text{三維情況： } Y_{fisher} = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 \quad (4.15)$$

其中 x_1 ：有效降雨時間(hr)

x_2 ：有效累積降雨量(mm)

x_3 ：地文因子與力學參數之合成函數

k_1, k_2, k_3 ：待定係數

3. 求出群體分界點

$$\bar{Y} = \frac{1}{2} (\tilde{\mu}_1 - \tilde{\mu}_2)' \tilde{S}_{pooled}^{-1} (\tilde{\mu}_1 + \tilde{\mu}_2) \quad (4.16)$$

將(4.16)式套入(4.14)式及(4.15)式中，即可得

$$\text{二維情況： } x_1 = -\frac{k_2}{k_1} x_2 + \frac{\bar{Y}}{k_1} \quad (4.17)$$

$$\text{三維情況： } x_1 = -\frac{k_2}{k_1} x_2 - \frac{k_3}{k_1} x_3 + \frac{\bar{Y}}{k_1} \quad (4.18)$$

(4.17) 式及 (4.18) 式即為臨界降雨線公式 $y = ax + c$ 及

$y = ax + bz + c$ 之形式

$$\text{其中 } a = -\frac{k_2}{k_1} \quad (4.19)$$

$$b = -\frac{k_3}{k_1} \quad (4.20)$$

$$c = \frac{\bar{Y}}{k_1} \quad (4.21)$$

4.5.1 各橋涵集水區土石流臨界降雨線

根據計畫區域內土石流發生記錄，除了豐丘地區之外，其餘橋涵集水區皆各僅有一次土石流發生記錄，研究中以三維分析方式，亦即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：

$$Z = aA + bB + cC + dD + eE \quad (4.22)$$

其中 A: 土地利用因子

B: 土壤粒徑大於四號篩百分比(%)

C: 主要河川長度

D: 有效集水區面積

E: 溪床平均坡度(%)

a, b, c, d, e: 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：

$$Y = -4.873X - 0.261Z + 2240 \quad (4.23)$$

其中 Y: 有效累積降雨量(mm)

X: 有效降雨時間(hr)

$$Z = 0.51A + 0.64B + 0.27C + 0.87D + 0.11E \quad (4.24)$$

Z、A、B、C、D 及 E 之定義同(4.22)式

使用資料點 718 點，誤判點數 83 點。

以(4.23)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 4.19 及圖 4.20 所示。至於未發生土石流之集水區，亦可經由(4.23)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。其對於實際發生土石流之雨場，判斷正確率約為 81%，至於入選未發生土石流之雨場，其判斷正確率則約為 89%，詳如表 4.9 及表 4.10 所示。

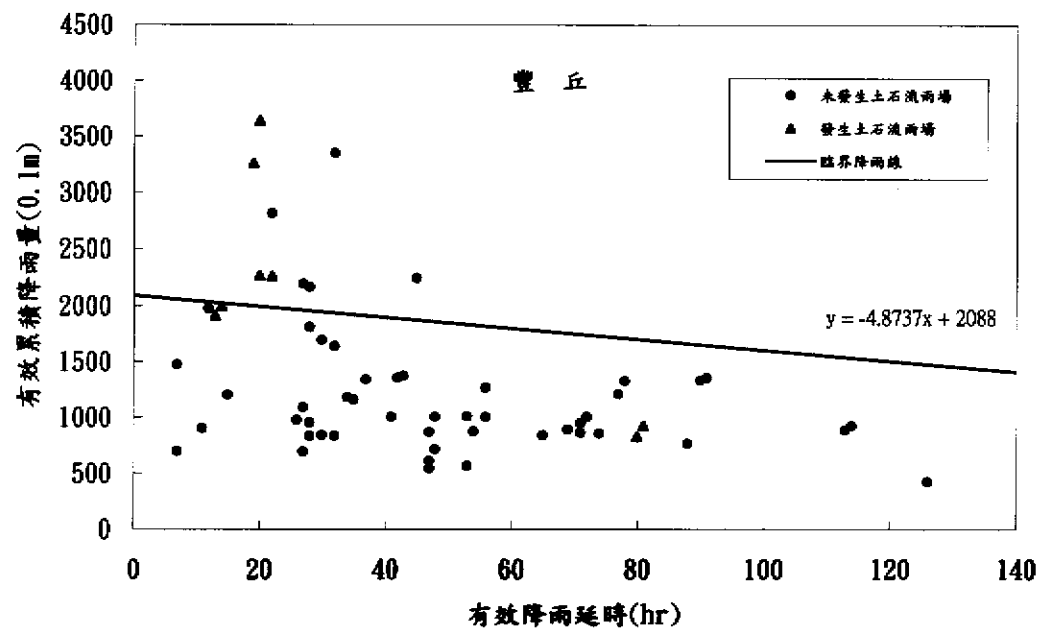


圖 4.19 豐丘上游集水區土石流發生臨界降雨線(三維方式分析)

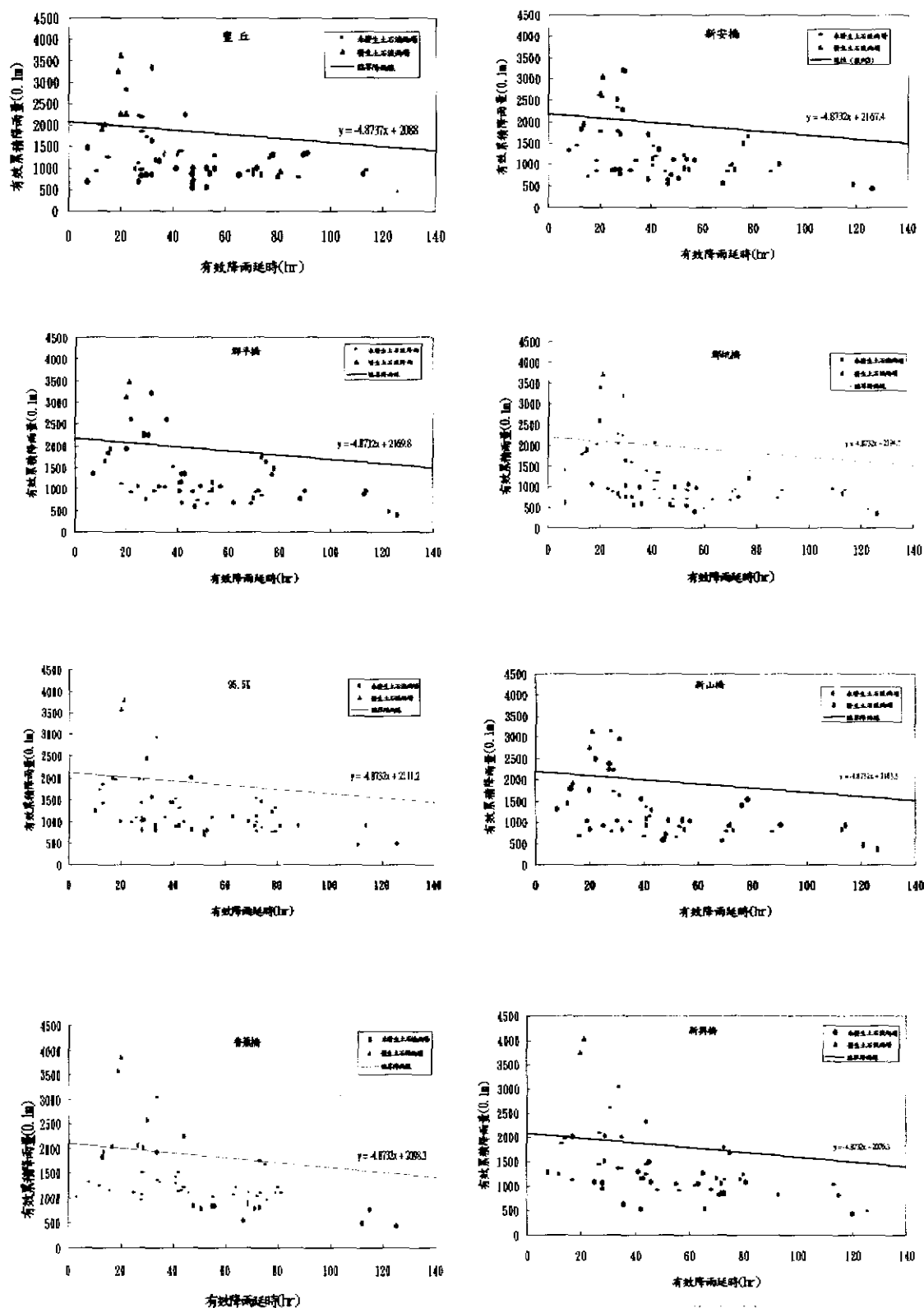


圖 4.20 各集水區土石流發生臨界降雨線(三維方式分析)

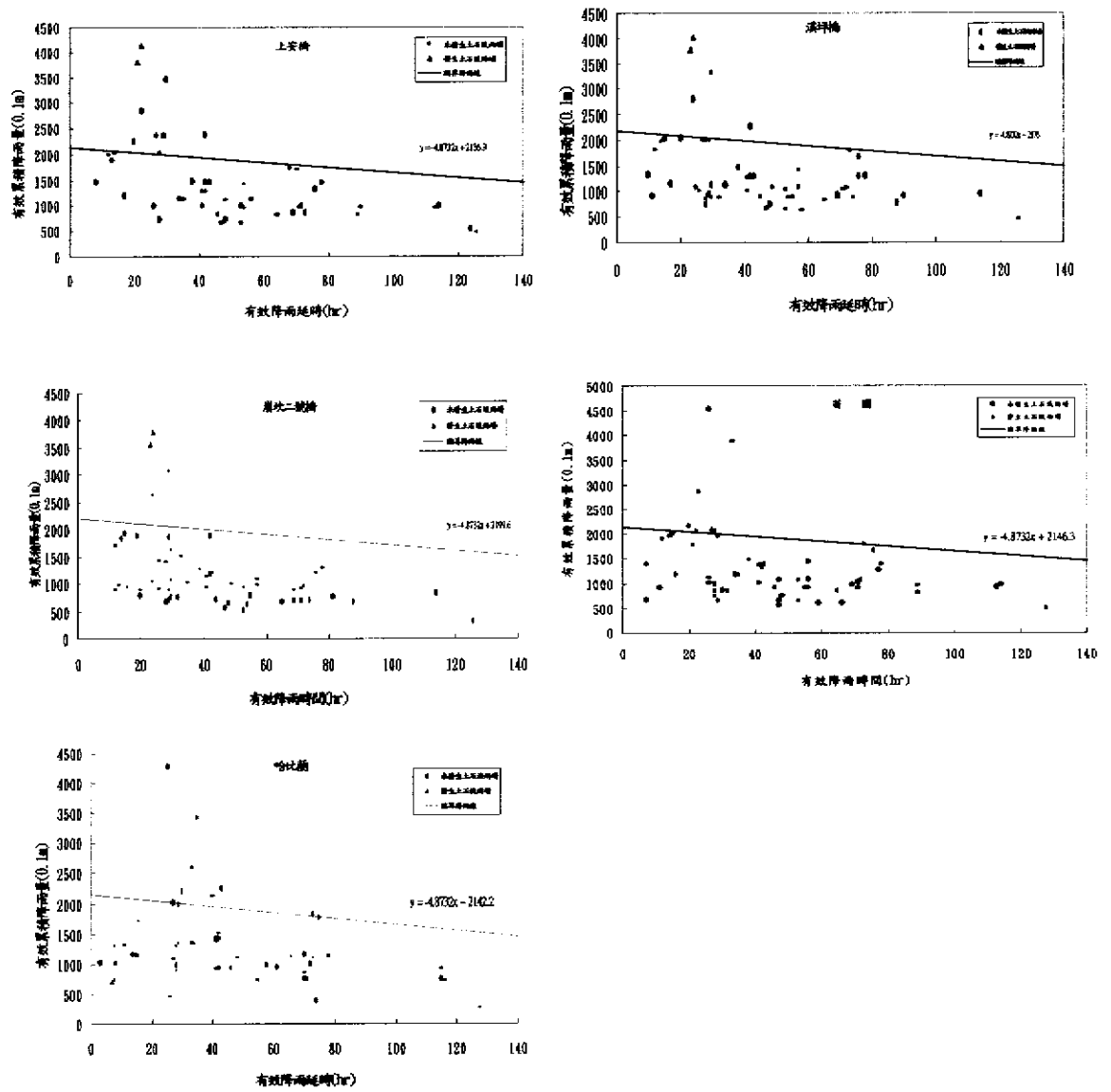


圖 4.20(續) 各集水區土石流發生臨界降雨線(三維方式分析)

表 4.9 發生土石流兩場判斷情形

溪流名稱	實際量	推測量		正確率
	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	5	3	63%
香蕉橋	2	2	0	100%
新興橋	2	2	0	100%
溪坪橋	2	2	0	100%
崩炭二橋	2	2	0	100%
苗圃	2	1	1	50%
哈比蘭	2	0	2	0%
合 計	32	26	6	81%

表 4.10 未發生土石流兩場判斷情形

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	53	5	91%
上安橋	46	39	7	85%
95.5K	54	51	3	94%
豐丘	50	45	5	90%
香蕉橋	50	42	8	84%
新興橋	52	44	8	85%
溪坪橋	52	49	3	94%
崩炭二橋	55	53	2	96%
苗圃	57	52	5	91%
哈比蘭	50	41	9	82%
合 計	677	604	73	89%

4.6 花蓮、台東土石流危險溪流分析

研究中嘗試加入南投以外地區之土石流發生之危險溪流，推導較大範圍判別土石流發生之經驗公式。分別加入花蓮、台東共 14 個分析點與先前南投地區之危險溪流一並分析。土石流危險溪流樣本及水利處雨量站的相關位置圖如圖 4.22 所示。其中雨量資料來源、地文因子及力學參數的求取，皆與前述相同。土石流發生時間如表 4.11 所示，各危險溪流之相關地文因子和力學參數值如表 4.11 及 4.12。

雨場數化結果如圖 4.21 所示，由土石流發生雨場與未發生土石流之雨場之分佈可看出，欲將其二群集分離所得到之結果並不令人滿意。進一步把南投的雨場納入分析，其得到之結果不如南投單一地區所得之臨界降雨線，且與實際之物理意義並不符合。因此推導大區域的土石流發生經驗公式並沒有成功。

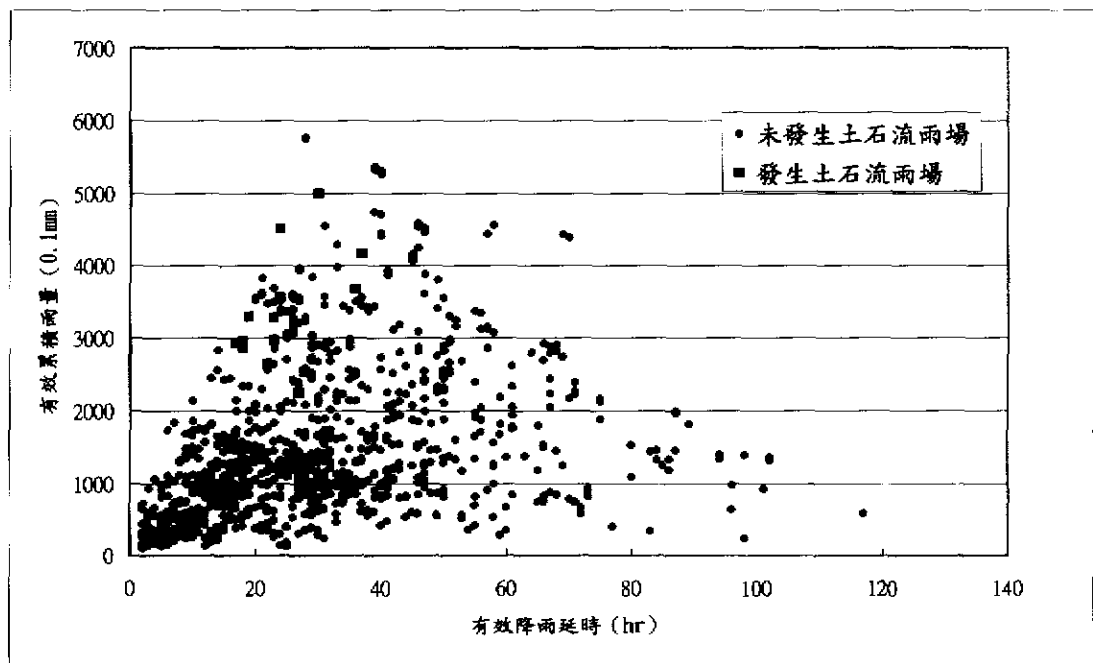


圖 4.21 花東雨場數化結果

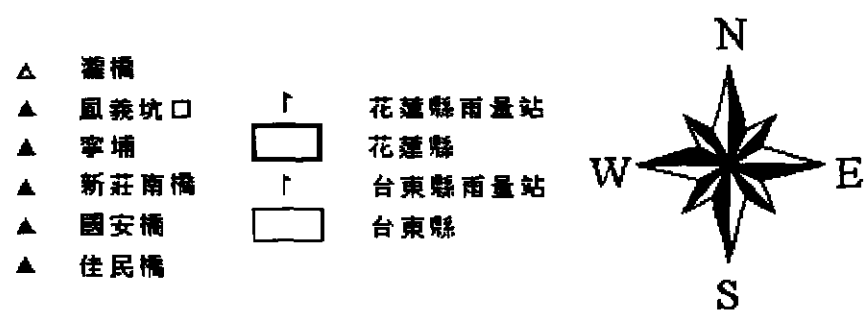
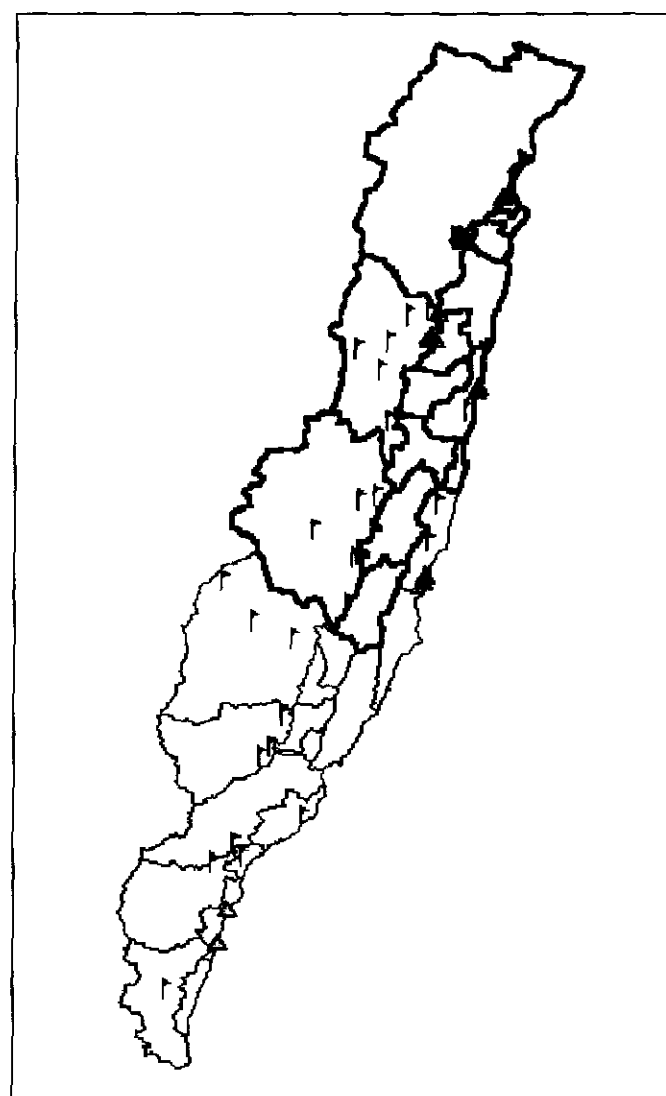


圖 4.22 花蓮、台東雨量站及土石流樣本溪流圖

表 4.11 花東土石流發生時間

地點	時間	造成降雨原因
花蓮豐濱鄉、東興部落	民國 83 年 7 月 10 晚上 11:30 左右有大規模土石流發生，晚上 8:00~9:00 有小規模發生。	提姆颱風
花蓮銅門鄉	民國 79 年 6 月 23 日約 14 點 40 分發生	歐菲莉颱風
花蓮榕樹鄉	79 年 9 月 7 日約 23 點 24 分 發生	歐菲莉颱風
花蓮鳳林鎮鳳義坑谷口	87 年 10 月 16 日約 2 點發生	瑞伯颱風
花蓮秀林鄉須美基溪	85 年 11 月 10 日約 11 點發生	暴雨
台東隴橋	80 年 9 月 23 日約 13 點 30 分 發生	耐特颱風
台東寧埔	87 年 10 月 15 日約 16 點發生	瑞伯颱風

表 4.12 花蓮、台東土石流樣本溪流數據

地 點		集水區面積 (ha)	溪流長度 (m)	平均寬度 (m)	形狀因子	平均坡度 (度)	土地利用 (%)
台 東	瀧橋	55.36	746	742.09	0.99	13.81	43.5
	松子澗	106.08	1430	741.82	0.52	17.69	21.93
	寧埔	61.76	1250	494.08	0.4	4.39	33.81
	彭仔存橋	35.52	852	416.9	0.49	4.31	15.27
花 蓮	新莊南橋	44.8	1089	411.39	0.38	10.05	12.85
	新社橋	22.8	821.3	277.61	0.34	15.21	20.64
	國安橋	16.8	302.9	554.64	1.83	18.36	11.51
	銅門二號橋	94.56	1677	563.86	0.34	22.15	22.22
	榕樹橋	169.44	1547	1095.28	0.71	8.11	47.45
	銅門橋	91.68	1781.3	514.68	0.29	18.38	37.49
	鳳義坑口	32.64	794.7	410.72	0.52	6.02	44.76
	西林橋	12.48	805.5	154.93	0.19	7.84	30.51
	佳民橋	210.4	1678.6	1253.43	0.75	16.42	51.59
	新興橋	44.32	1136.8	389.87	0.34	16.31	30.21

表 4.12(續) 花蓮、台東土石流樣本溪流數據

地 點		孔隙比	大於 4 號篩 %	小於 200 號篩 %	凝聚力 (kg/cm ²)	內摩擦角 (度)
台 東	瀧橋	0.73	49.1	11.49	0.04	34.27
	松子澗	0.83	60.67	9.11	0.01	34.71
	寧埔	1.03	34	28.91	0.04	29.59
花 蓮	彭仔存橋	0.97	38.38	45.22	0.01	23.73
	新莊南橋	0.66	26.41	3.41	0	33.97
	新社橋	1.13	64.21	20.84	0.09	26.24
	國安橋	0.49	40.04	20.83	0.03	32.62
	銅門二號橋	1.04	54.36	12.92	0.02	30.72
	榕樹橋	0.57	35.33	31.18	0	31.38
	銅門橋	1.2	51.49	17.52	0	33.46
	鳳義坑口	0.77	38.7	22.93	0.01	31.18
	西林橋	0.75	44.92	24	0.04	32.89
	佳民橋	0.45	60.65	7.35	0.07	37.16
	新興橋	0.53	59.55	2.05	0.07	31.1

4.7 危險區劃分

土石流危險區之判定在土石流防災措施中佔有重要的地位。經由準確的分析與判視，可將發生土石流的高危險區予以監控，並提早進行土石流災害防治措施，使土石流發生所造成的災害程度降低。一般而言，形成土石流之基本要件為豐富的鬆散土石、充份的水份及足夠大之坡度。豐富的鬆散土石提供形成土石流所需之固態物質。而充份的水份，潤滑土石流內固態物質並降低固態物質間的摩擦力與凝聚力，促使固態物質液化以助於流動。足夠大之坡度，供給土石流流動之動力，使土石流克服其內部之摩擦力與凝聚力後，能繼續向低處流動。

目前土石流危險區判定方法，多半是採取訂定危險因子，並經過現場調查及資料彙整來給予各個因子相對應的分數，經由總分來區別不同的危險程度，一般而言危險區判定流程可依下列步驟進行：

- (1) 選取不同的危險度評估指標。
- (2) 訂定各指標在不同危險度下的分數。
- (3) 根據所有評估指標的累計分數範圍，訂出土石流發生的高危險區、中度危險區及低危險區。
- (4) 依據前述評估標準對現地進行評判作業。
- (5) 將評估結果與實際土石流發生歷史做比對，並將評估因子做適當的修正。

其主要流程如圖 4.23 所示。

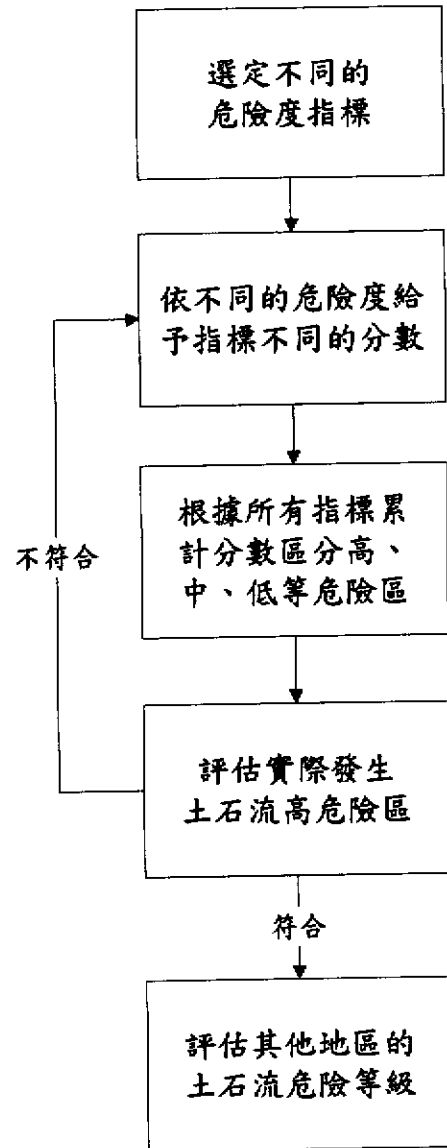


圖 4.23 土石流危險區判定流程

降雨量是直接影響土石流發生的主要誘因，又台灣各地區各地之降雨特性大不相同，因此若要針對各個流域進行土石流危險區的判釋，則不得不將水文型態與地文特性融合。本研究嘗試以降雨強度-延時-頻率曲線結合通用土石流臨界降雨線公式，將土石流危險溪流的研判以較合理的方式表達，並以復現期的觀點切入，去探討當地因降雨而誘發土石流的發生機率。

為了要將集水區暴雨復現期與土石流臨界降雨線相結合，首先要針對集水區進行降雨強度-延時-頻率(IDF)的分析工作，得知某復現期的降雨強度與延時關係後，再以適當的雨型分佈將雨場還原為歷線形式，帶入退水係數求得有效累積降雨量，如此便可得知在某復現期下的降雨延時與有效累積降雨量的關係(RDF)，進而可與土石流臨界降雨線結合予以分析比較。

4.7.1 雨量資料整理與降雨強度-延時-頻率分析

首先將研究區域內的降雨資料整理篩選，雨場篩選方式及數化方法如 4.3 節所述，以連續暴雨資料進行年最大值選用法，將不同延時的降雨序列以對數皮爾遜第三類分佈 (Log-Pearson type III distribution) 為降雨之機率分佈，推求 2、5、10、20、50、100 年各延時之頻率雨量，並換算其對應的降雨強度，再以三參數的 Horner 公式建立降雨強度與延時的關係式。

4.7.2 降雨歷線的還原

由前一步驟得知 IDF 關係式後，可得知在某復現期下，各場暴雨的延時及降雨強度關係，再以三角形法模擬該場降雨的雨型分佈，如此便得知每場暴雨降雨歷線分佈。

4.7.3 求出 RDF 曲線

將前述求得的降雨歷線，求出延時-有效累積雨量關係：以任意

時間之時雨量(d_0)，加上其前各時雨量(d_t)乘以一衰減係數(α)後累加而得有效累積雨量，如下：

$$ER = \sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t d_t \quad (4.25)$$

其中衰減係數之決定，乃依據 Fedora and Beschta(1989)有關臨前降水指數模擬暴雨逕流之研究，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：

$$K = 0.881 + 0.00793 \ln(A) \quad (4.26)$$

本研究即以上式所得之洪水消退係數，再經由 $\alpha = \sqrt{K}$ 計算其衰退係數值。如此便得知在某復現期下，延時-有效累積雨量關係，即可繪出 RDF 曲線圖。

圖 4.24 為豐丘地區 RDF 曲線與土石流臨界降雨線關係。由此圖可概略得知，當地土石流臨界降雨線座落於復現期為 4 年的暴雨所造成的有效累積降雨深度。圖 4.25 為其它地區土石流臨界降雨線與有效累積降雨量-延時-頻率關係。其中崩坎二號橋的臨界降雨線約等於當地 10 年暴雨復現期所產生的降雨量，因此單就工程統計的觀點來分析，豐丘地區發生土石流的機會是崩坎二號橋的 1 倍之多。

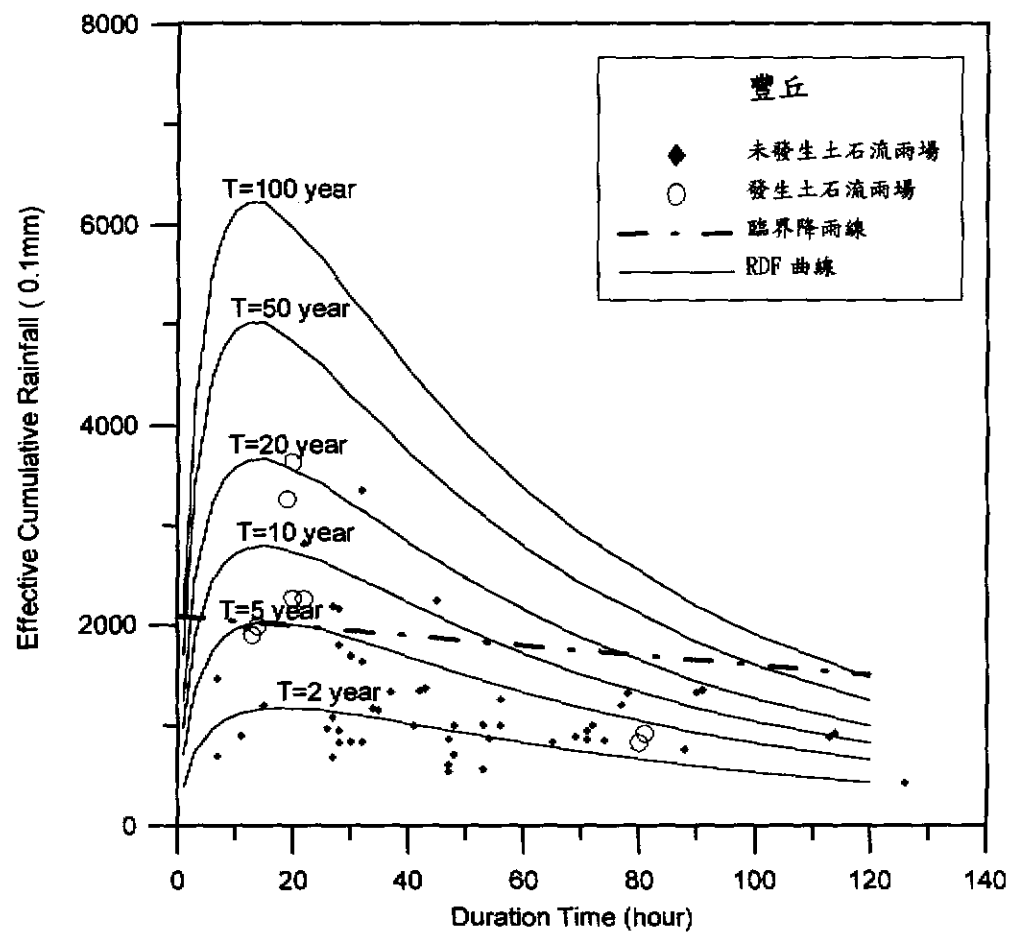


圖 4.24 豐丘地區臨界降雨線與暴雨復現期關係圖

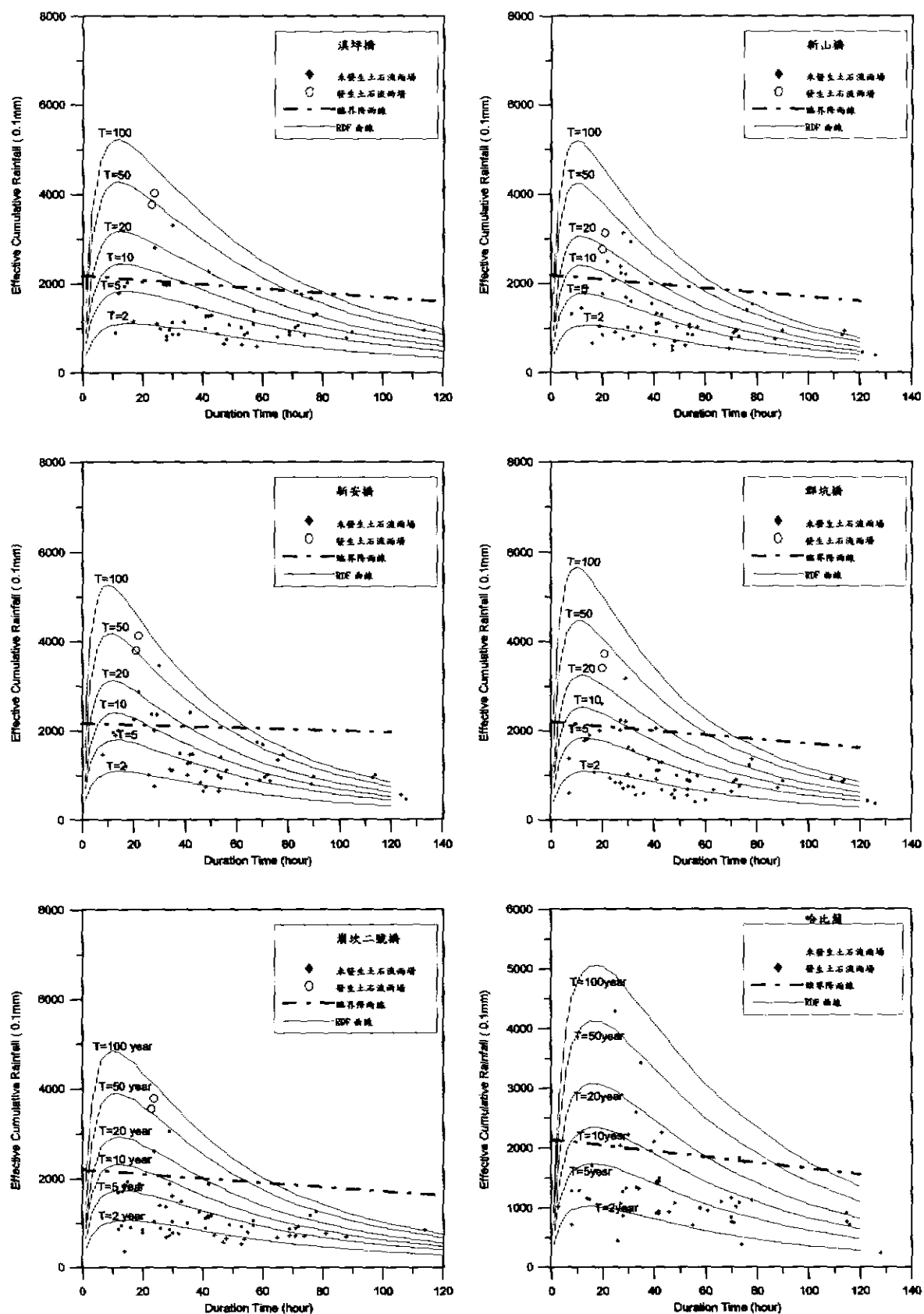


圖 4.25 各地區臨界降雨線與暴雨復現期關係圖

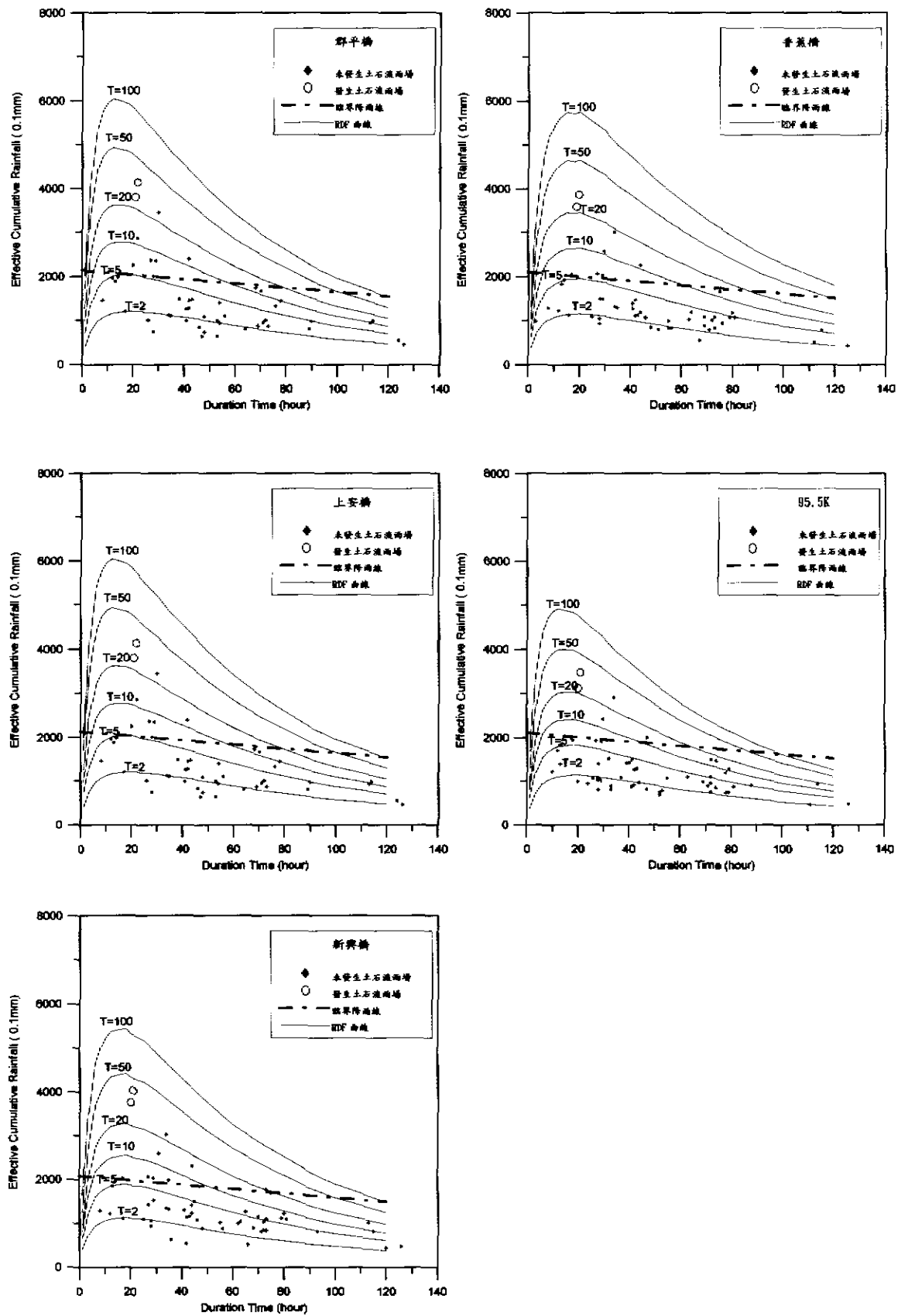


圖 4.25(續) 各地區臨界降雨線與暴雨復現期關係圖

第五章 結論與建議

5.1 結論

1. 本研究以南投縣為主要研究區域，選定二十八個集水區為樣本，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、主要河川長度、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、凝聚力、土壤塑性指數等。經過 Mann-Whitney-Wilcoxon 檢定之後發現下列五種因子及組合—土地利用因子、土壤粒徑大於四號篩百分、集水區面積、主要河川長度比和溪床平均坡度對土石流之影響較大。

2. 本研究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：

$$Y = -4.873X - 0.261Z + 2240 \quad (5.1)$$

其中 Y：有效累積降雨量(mm)

X：有效降雨時間(hr)

$$Z = 0.51A + 0.64B + 0.27C + 0.87D + 0.11E \quad (5.2)$$

A：土地利用因子(%)

B：土壤粒徑大於四號篩百分比(%)

C：主要河川長度(m)

D：有效集水區面積(ha)

E：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。