

莫拉克颱風災區土石流發生因子之特性 —以地形因子、降雨強度及崩塌率進行探討

Characteristics of Debris Flow-Inducing Factors in Typhoon Morakot Affected Area —An Examination of the Topographic Factors, Rainfall Intensity and Landslide Rate

國立臺灣大學土木工程學系
博士生
財團法人中興工程顧問社
防災科技研究中心
副研究員

沈 哲 緯*

Che-Wei Shen

行政院農委會水土保持局
土石流防災中心
正工程司

羅 文 俊

Wen-Chun Lo

財團法人中興工程顧問社
防災科技研究中心
助理研究員

蕭 震 洋

Cheng-Yang Hsiao

摘 要

莫拉克颱風在民國 98 年 8 月 7 日至 9 日侵襲臺灣，並在南臺灣降下了驚人的雨量，特別是屏東、嘉義、高雄等靠近中央山脈的區域。莫拉克颱風後，經由現地調查蒐集了相當多的災情資料，有鑑於此，本研究採用遙測影像、現地調查結果、農委會水保局 95~99 年土石流易致災因子調查資料及各項分析成果，萃取土石流發生三元素作為評估因子(地形、降雨及土砂來源，合計 101 個因子)，以主成分分析與相關性分析，綜合探討莫拉克颱風引發土石流之顯著地形發生因子，透過描述性統計進行莫拉克颱風災區 218 條溪流(皆屬溪床型)之土石流發生因子特性分析，除釐清莫拉克颱風引致溪床型土石流發生因子特性外，亦可回饋分析結果於易致災調查，提供土石流易致災調查發生因子研修參考。

關鍵詞：莫拉克颱風，土石流發生因子，特性分析。

*通訊作者，中興工程顧問社防災科技研究中心，11017 台北市信義區逸仙路 26 巷 7 號地下樓，cwshen@sinotech.org.tw

ABSTRACT

Typhoon Morakot lashed Taiwan during Aug. 7 to 9, 2009. It dumped heavy rainfall in southern Taiwan, especially around the Central Mountain Range in Pingtung, Chia-Yi, and Kaohsiung County. In view of this, Comprehensive field investigation was carried out by government and private organizations after Typhoon Morakot, useful information of debris flow was gathered. Besides, after Typhoon Morakot, the debris flow-inducing factors become more challenging in Taiwan, many aspects had to be considered.

The scope of this study was mainly discussed in debris flow-inducing factors in serious damaged areas which including Nantou, Chia-Yi, Tainan, Kaohsiung, Pingtung, Taitung County. Totally 218 channelized debris flow torrents were included. Field investigation data and disaster records of Typhoon Morakot were utilized to analyze debris flow-inducing factors in three aspects: terrain, rainfall and sediment source. First, by using Principle component analysis and Pearson Product Moment correlation analysis to select significant factors, 101 factors were reduced to the most important 18 factors. Then through descriptive statistics and characteristics Analysis were selected to discuss the relationship among “Average slope gradient of watershed”, “Landslide rate along the stream within fifty meter buffer zone” as well as the “rainfall intensity during Typhoon Morakot”. The above charts were used to summarize the range of factor value which tend to occur phenomenon of debris flow in Typhoon Morakot. The results can be utilized in improving debris flow hazard management in the future.

Keywords: Typhoon Morakot, Debris Flow-inducing Factors, Characteristics Analysis.

一、前言

由於臺灣位於板塊交界帶，構造活動快速，地震頻繁，地質構造複雜且廣佈，斷層、褶皺和節理發達，使得岩石破碎穩定性低，提供了土石流發生所需之大量料源。加上臺灣是屬於亞熱帶島嶼型氣候，夏季颱風常帶來災害性降雨，更提供了土石流發生所需之水量。因此當人類活動擴及災害敏感區時，將加速土石流災害發生與擴大災害規模。

土石流的發生與災害規模和集水區內崩塌物量體、地質背景、水文特性與地形特徵等因素有關。基本上，土石流的形成有三大基本要件，為豐富且鬆散的碎屑物、充足的水分和適當的坡度。豐富且鬆散的碎屑物提供土石流形成所需之固態物質；充足的水分可降低土石流內部固態物

質間的摩擦力與凝聚力，促使固態物質流動；適當的坡度供給土石流物質流動所需動力，克服其內部之摩擦力與凝聚力後向低處流動，於流動過程中促使碎屑物與水高度混合並增加其流動性。換言之，地文因子是土石流的誘發因素，如地質與地形等；水文氣象則是土石流的激發因素，尤以降雨為重。

土石流災害發生機制原因眾多，受限於各種環境和人為因素影響，使其發生具有高度不確定性，甚難以釐清災害誘發機制。有鑑於此，本研究採用遙測影像、現地調查結果、農委會水土保持局(以下簡稱水保局) 95~99 年土石流易致災因子調查資料及各項分析成果，萃取土石流發生三元素作為評估因子(地形、降雨及土砂來源，合計共 101 個發生因子)，輔以現地調查研判「有無發生土石流」屬性為因變數，透過主成分分析與

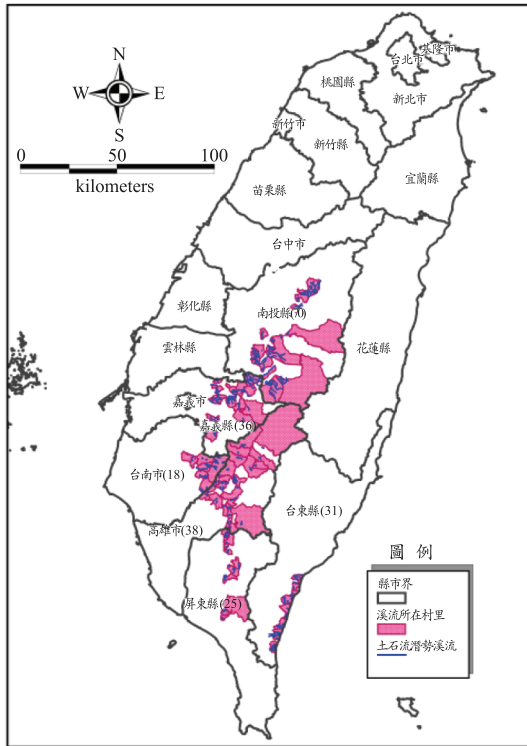


圖 1 本研究 218 條土石流潛勢溪流分布圖(摘自水保局，2011)

相關性分析篩選顯著地形發生因子，接著以描述性統計進行 218 條溪流(皆屬溪床型)之土石流顯著地形發生因子特性探討，歸納莫拉克颱風災區溪床型土石流潛勢溪流發生因子特性及因子值域，結果亦可回饋易致災調查表中，精進土石流易致災調查中發生因子項目。本研究 218 條土石流潛勢溪流分布如圖 1 所示。

二、土石流發生因子回顧與萃取

2.1 土砂來源(包含崩塌地及殘土率)

2.1.1 崩塌地面積

崩塌地崩落之土石較為鬆軟，常堆積於溪床及鄰近溪床坡面，而易成為土石流的材料來源(水保局，2010)。因此，集水區內崩塌地堆積料源，在豪雨時期易被誘發成土石流。

農委會水土保持局「98 年莫拉克颱風後土石流潛勢地區易致災因子調查」計畫中，曾就莫拉

克颱風土石流潛勢溪流兩側崩塌顯著影響範圍進行研究，係以成功率曲線(Success rate curve)及 Wald 統計值進行多個環域範圍比較。研究結果顯示，莫拉克颱風引致土石流潛勢溪流兩側 50 公尺環域範圍崩塌地與土石流流動與否相對關係較強，初步研判溪流線兩側 50 公尺為崩塌料源供應影響較顯著範圍。

基於上述結果可知，誘發土石流的土石料源以崩塌地供應為主，且考量莫拉克颱風溪床型土石流誘發應與「莫拉克颱風前期崩塌地」殘留之土石料源有直接關係，故後續內容談及潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之崩塌率，其定義係指莫拉克颱風前期各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內崩塌率。實際操作係以水保局提供之土石流潛勢溪流線圖層為基礎，向兩側產生 50 公尺環域範圍，而 50 公尺環域範圍以不超過山脊線為原則，故採人工修訂使其符合地形邊界，修訂完成後，再計算 50 公尺環域範圍內莫拉克颱風前期崩塌率(即 50 公尺環域範圍內崩塌地面積/集水面積)，以利進行後續土石流三元素特性比較分析使用。

2.1.2 面積高度積分(殘土率)

本因子是由百分率面積高度曲線(Percent-age Hypsometric Curve)求出的一項變數(如圖 2)。所謂的百分率面積高度曲線為地形學者做定量分析時的一項工具，目的在表示地表某區各高度以上面積佔全區總面積的比例，因此可利用此資料了解集水區地表發育概況，或用來研究集水區的地形發育情況。由面積高度積分可知地形的幼年、壯年、老年程度(Strahler, 1952)，如果此集水區為老年期，則表示下游面積較上游面積大，可視為侵蝕作用後之地表地形，侵蝕速率小於堆積速率。由此可知，此因子可表示地表的侵蝕與堆積的情況，即當作堆積物沈積多寡之指標。

2.2 降雨

土石流的水源供應，通常考慮降雨、融雪及地下水等來源，因臺灣所處地區及考量資料的完整性，故常以累積降雨量及降雨強度作為因子，本研究亦採用此兩種降雨因子進行後續特性探討。降雨量多且強度集中乃促成土石流發生之重

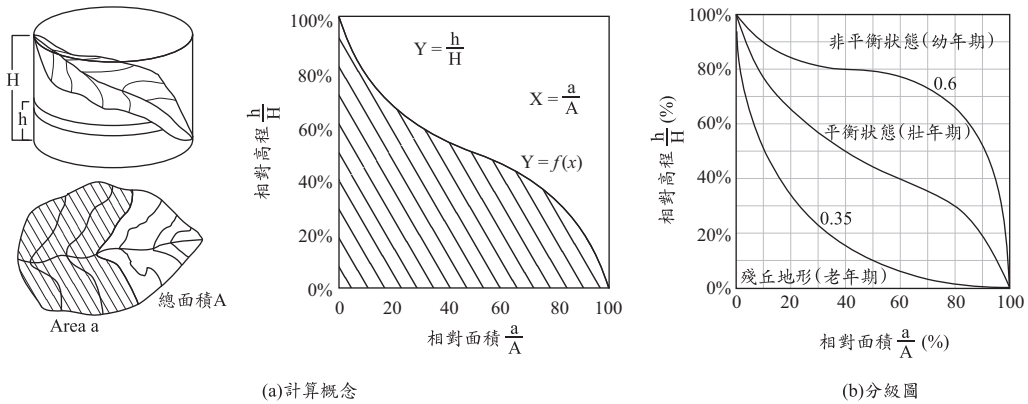


圖 2 面積高度積分示意圖(重繪自 Strahler, 1952)

要元素。依據山口伊佐夫(1985)之調查結果顯示，連續雨量達 60 mm，不論是長、短時間之降雨皆可能發生土石流。最大強度降雨尖峰發生時間與土石流發生時間同時發生者相當多，此外絕大部份之土石流發生在降雨尖峰後 2~3 小時內，可見降雨特性對土石流發生影響甚鉅。

2.3 地形

2.3.1 集水區面積

集水區面積愈大，則在暴雨時期所匯集的雨量愈大，會在集水區出口處產生較大流量。但因為集水面積越大，雨水匯集的時間愈長，所以與集流時間成反比，故可由集水區面積來評估河川尖峰流量與集流時間。Van Dine 調查加拿大 Howe Sound 地區發生土石流之溪流，發現集水區面積與土石流發生區之溪床坡度有反比例之關係存在，而發生土石流之集水區面積大小範圍一般在 0.4 到 0.7 平方公里之間(詹錢登，2000)。

2.3.2 主流

常見的主流因子有主流長度、主流相對高度、主流平均坡度及主流彎曲度，因子定義簡述如下：

- (1) 主流長度：主流長度愈長，河川尖峰流量愈大，集流時間也愈長。林信亨(2000)整理前人文獻得知主流長度會影響溪流之尖峰流量、集流時間與逕流分布等特性。

- (2) 主流高程差：主流高度差與坡度有絕對的相關性，故為河川動力機制的基礎，本研究也將其納入土石流發生評估因子。

- (3) 主流平均坡度：由於土石運動型態與坡度有密切關係，且主流溪床坡度隨縱断面由上游至下游皆會變化。故主流坡度決定土石運動類型，也易影響土石流的發生，故常見前人將此列為評估土石流發生之因子，根據詹錢登(2000)研究發現主流平均坡度過大，崩落土石易被水流帶走，坡度過低也不易驅動土石移動，故適當之坡度較易引發土石流。本研究以詹錢登(2000)所計算主流溪床之平均坡度(S)，其定義如公式(1)。

$$S = \tan^{-1} (\text{主流上下游端點之高程差} / \text{主流上下游端點水平投影長度})$$

..... (1)

- (4) 主流彎曲度：定義為主流長除以主流上下游端點水平投影長度。林昭遠、張力仁(2000)指出主流蜿蜒程度亦表示可攔阻砂石之程度，進而能影響土石流發生之機率。

2.3.3 坡度

理論上坡度愈陡，則驅動土石流發生之能量愈高，但根據詹錢登(2000)研究發現，溪床平均坡度(即集水區平均坡度，與主流平均坡度不同)若過大，崩落之土石易隨逕流持續向下遞移，不

易在上游形成土石之堆積，因此土石流發生機會並不高；而坡度過低之溪谷則通常不具有驅動土石流發生之能量，故適當的坡度條件亦為土石流致災的重要因子。

2.3.4 坡向

大多數的土石流皆發生於颱風或暴雨之後，若從臺灣地區颱風登陸之路徑統計中發現，登陸臺灣的颱風大多為東南—西北走向，此因素將造成迎風面所承受之雨水較背風面多，而且強風也會影響邊坡風化程度，因此集水區邊坡之坡向將影響集水區承受雨量與崩塌物質的多寡。Auer and Shakoor (1993)曾研究岩屑崩落(Debris Avalanche)，認為邊坡坡向將影響土壤受日照程度，此一因素將影響土壤於暴雨期前之含水量、覆蓋地表的植被種類與分布狀況、地表土壤的特性及暴雨期所接受之雨水量。因各地區受日照的坡向皆有所差異，其具有區域特性。

2.3.5 形狀因子

常見的形狀因子有集水區形狀係數、細長比及環性比，因子定義簡述如下：

- (1) 集水區形狀係數(Form factor, F)：係集水區面積與集水區長度平方之比值，為 1932 年由荷頓氏(Horton)所提出(李光敦，2002)。Strahler (1964)認為集水區形狀對於河川流量特性有顯著的影響，形狀係數小於 1 時，則表示集水區狹長，而一個狹長的集水區有較小的尖峰流量，且其流量歷線較為平緩。而形狀係數大於 1 時，則表示集水區寬宏，一個寬宏的集水區則有較大的尖峰流量，且其流量歷線較為尖聳(圖 3)。集水區形狀呈狹長形時，常見溪流邊坡之坡度較大，易有邊坡崩塌發生致使土石堆積於溪床上，因此形狀係數於土石流潛勢溪流危險度評估之相關研究中，一直扮演著相當重要的角色。尹承遠等(1993)曾探討臺灣地區土石流發生所得到的形狀係數在 0.13~0.34 之間；陳榮河、江英政(1999)調查新中橫公路沿線 25 處土石流潛勢溪流得其形狀係數集中於 0.1~0.5 之間。由此可知，較常見土石流發生於狹長形之集水區。

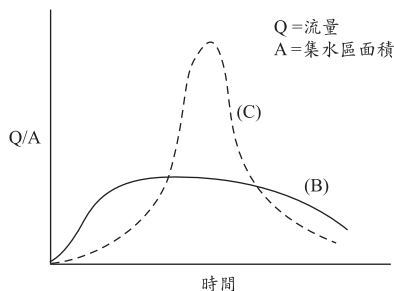
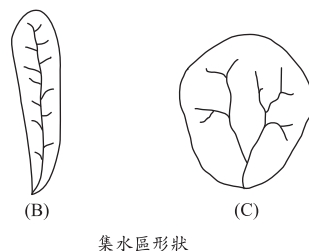


圖 3 集水區形狀係數與流量歷線關係圖(摘自李光敦，2002)

- (2) 細長比：定義為「面積相等之圓直徑」除以「集水區長度」。數值愈小，表示集水區愈狹長，同時也代表該流域起伏較大，流速也愈快，也容易發生土石流；但若本數值愈接近 1，則表示地形起伏較低(黃朝恩，1980)。
- (3) 環性比：定義為「集水區面積」除以「與集水區邊長相等圓周長之圓面積」。環性比介於 0~1 間，比值愈接近 1，流域形狀愈接近圓形，河流水系也易呈現向心狀，在豪雨影響下，易於相近時間匯流水於同一點，進而驅動土石移動。

2.3.6 高程

常見的集水區高程因子有集水區相對高度及集水區高度變異係數，因子定義簡述如下：

- (1) 集水區相對高度：此因子為集水區最高及最低的高程差。本因子落差愈大，表示集水區整體相對坡高愈大，降雨時的集流時間也就愈快。
- (2) 集水區高度變異係數：為集水區內高度標準差除以平均數。此項因子在值小的時候，表示高度變動不大，反之在值大的時候

表 1 研究使用資料列表

類型	屬性	時間	地點	來源名稱(計畫或基礎資料)
土石流發生與否	現地調查資料	98 年	218 條 土石流潛勢溪流	水保局「98 年莫拉克颱風後土石流潛勢地區易致災因子調查」
土砂來源	遙測判釋崩塌地	97 年底	全臺灣	97 年底福衛 2 號衛星影像判釋溪流崩塌地成果(莫拉克颱風前期崩塌)
地形	5m 高精度數值高程數值模型	91~93 年	全臺灣	93-95 年度之「高精度高解析數值地形模型建置計畫」
降雨	雨量	莫拉克颱風期間	218 條 土石流潛勢溪流	水保局土石流防災應變系統擷取的雨量資料

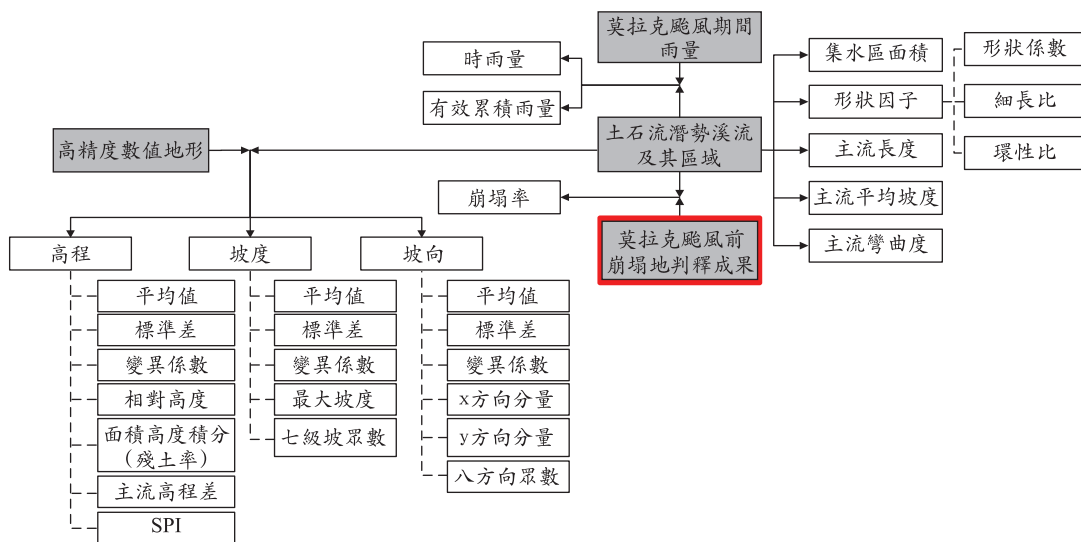


圖 4 基礎資料及因子萃取流程圖

候表示高度變動大，故可藉此因子得知集水區中高度的差異程度，即表示集水區的起伏程度。而起伏愈大，發生土石流機會愈大。蕭震洋(2003)提出此因子為陳有蘭流域影響土石流發生與否之關鍵影響因子。

2.3.7 其它地形指標

河道水力指數(Stream Power Index, 以下簡稱 SPI)常用於解釋有潛勢河道沖蝕及地貌變遷(Moore *et al.*, 1991)。Chen and Yu (2011)曾以此因子於臺灣陳有蘭溪進行土石流關聯性研究。其計算方式如公式(2)所示。

$$SPI = \ln(A_s \tan \beta) \dots\dots\dots (2)$$

式中 A_s 為指定坡度點以上之集水區面積； β 為該集水區範圍內之平均坡度百分比。

本研究依據 218 條土石流潛勢溪流、莫拉克颱風前期崩塌地判釋成果、5m 高精度數值高程模型、莫拉克颱風期間雨量等資料(資料來源如表 1 所示)，以①土石流潛勢溪流集水區、②溪床坡度 10 度以上及③溪床坡度 15 度以上有效集水區等三種不同集水區範圍進行因子萃取，成果計有土石流潛勢溪流之集水區面積、高程(變異係數、相對高度、面積高度積分)、坡度(平均值、標準差、變異係數、七級坡眾數、最大坡度)、坡向(平均值、八方向眾數、x 方向分量、y 方向分量)、形狀因子(形狀係數、細長比、環性比)、SPI、莫拉克颱風前期崩塌率、時雨量、有效累積雨量及主流長、主流高程差、主流平均坡度、主流彎曲度等，合計共 101 個因子，因子萃取組合與流程如圖 4 所示。

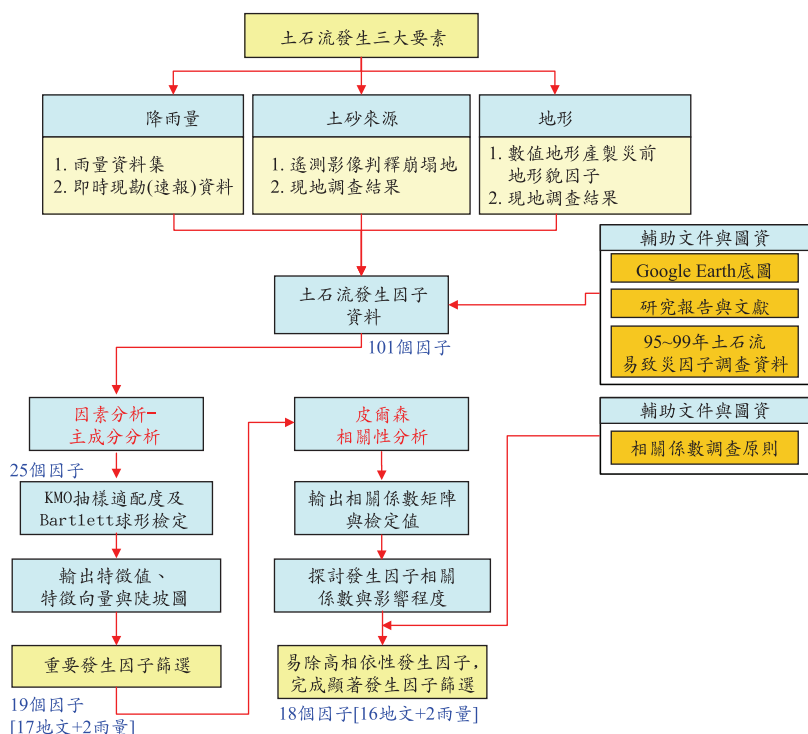


圖 5 土石流顯著地形發生因子篩選流程圖

三、研究方法

針對莫拉克颱風時有發生土石流現象之溪流為主，探討土石流顯著發生因子，分別就土砂來源(莫拉克颱風前期崩塌地目錄為基礎)、地形因子(集水區幾何形狀、集水區曲率、集水區坡度、集水區坡向、集水區高程及其它地形指標等因子)進行主成分分析(PCA)與相關性分析(CA)，綜合探討莫拉克颱風引發土石流之顯著地形發生因子，以利後續發生因子特性歸納及探討使用，至於降雨(時雨量、有效累積雨量)因子為土石流發生之必要條件，此階段不納入顯著發生因子篩選。分析流程如圖 5 所示。以下分別簡述本研究採用主成分分析、相關性分析及描述性統計等方法原理、流程與目的。

3.1 主成分分析

本研究參考前人研究方法(吳輝龍等人，2004；陳文福等人，2005；Li *et al.*, 2010)，採用

IBM SPSS V19.0 軟體的因素分析模組，以莫拉克颱風後現調評估「有無發生土石流屬性」為因變數，218 條溪流各項地形發生因子數值為自變數，採用主成分分析進行重要地形發生因子分析。

主成分分析是一種簡化數據集的技術，利用線性方程式將所有變項加以線性合併(linear combination)，計算所有土石流地形發生因子共同解釋的變異量，此線性組合稱為主成分。一般保留解釋量較大的幾個成分，來代表原來所有的變項，這些變項即為研究溪流的重要影響因子，其所對應之線性方程式係數即是該主成分中的影響係數。理論上主成分變數與原變數數目應是相同數量，本研究主成分個數決定分析方法說明如下：

1. 根據 Kaiser (1960)建議的 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin)抽樣適配度判定準則得知，KMO 至少應大於 0.6，表示資料的分析效果適合進行因素分析。此外，以 Bartlett 球形檢定進行顯著性檢定，代表母群體的相關

矩陣有共同因素存在，適合主成分分析。

2. 參考 Li *et al.* (2010)建議，獲選之主成分累積變異百分比(代表性)建議達 85%以上。
3. 根據 Kaiser's rule (Kaiser, 1960)建議，選取特徵值 $\lambda \geq 1$ 的數量，輔以 Cattell (1966)提出陡坡試驗法(screen test)，依據陡坡圖(screen plot)研判陡降後曲線走勢趨於平坦(反曲點)之主成分個數，平坦端之後主成分捨棄不用，選取前段較陡峭(即特徵值較大者)之個數即為獲選之主成分數量。
4. 將各別的主成分分析結果以主成分係數矩陣表示。參考吳輝龍等人(2004)及陳文福等人(2005)建議，挑選主成分係數大於 0.7 者為獲選的重要發生因子。
5. 將三要素各別的主成分分析結果以主成分係數矩陣表示。參考吳輝龍等人(2004)及陳文福等人(2005)建議，挑選主成分係數大於 0.7 者為正相關重要地形發生因子。

3.2 相關性分析

相關性分析主要目的係透過皮爾森積差相關性分析(Pearson Product Moment correlation analysis)反映土石流地形發生因子間相關程度，有助於了解土石流發生因子兩兩之間互制關係，其結果有助於高相關重要地形發生因子剔除參用，以減少因子間因相依造成之權重牽制影響。相關性係數分析結果，可採用相關係數表或相關圖表示，相關係數恆介於-1 與+1 之間，+1 表示 A 因子與 B 因子為完全正向線性相關(呈現遞增線性關係)；-1 表示 A 因子與 B 因子為完全負向線性相關(呈現遞減線性關係)；若相關係數的值非常接近零，則表示 A 因子與 B 因子無線性關係。一般可按三級劃分： $\gamma_{XY} < 0.4$ 為低度線性相關； $0.4 \leq \gamma_{XY} < 0.7$ 為顯著性相關； $0.7 \leq \gamma_{XY} < 1$ 為高度線性相關(參考自 Kendall, 1955)。相關性分析流程說明如下：

1. 採用 IBM SPSS V19.0 軟體的相關性分析模組，輸入研究溪流各項地形發生因子數值(連續數值)，採用皮爾森積差相關性分析探討各發生因子相關性，結果可輸出相關係數

矩陣評估兩兩因子間相關性程度。

2. 參考前人研究建議(Kendall, 1955; 吳輝龍等人, 2004; 陳文福等人, 2005; Li *et al.*, 2010)，以相關係數大於等於 0.7 或小於等於-0.7 者視為高度相關因子，表示兩兩因子在因子值域上具有相依性，剔除主成分係數較低者，最後所剩下的地形發生因子即為莫拉克颱風土石流顯著地形發生因子，此篩選剔除程序，可減少因子相依問題造成多變量因子間權重相互牽制影響。

3.3 土石流發生三元素特性歸納

依據水保局「98 年莫拉克颱風後土石流潛勢地區易致災因子調查」計畫現地調查獲致的「土石流發生與否」屬性，將 218 條土石流區分為「土石流發生組」及「土石流未發生組」探討土石流發生三元素特性，以「集水區平均坡度」及「各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率」為 Z 坐標，「有效累積雨量」為 X 坐標，「時雨量」為 Y 坐標，採泡泡圖(Bubble chart)及三維散布圖(3D scatter diagram)歸納「土石流發生與否兩群組」發生因子特性，期有助於解釋莫拉克颱風土石流發生三元素特性及影響值域。

四、研究結果與討論

以下就顯著發生因子篩選與特性歸納結果進行說明與討論。

4.1 土石流顯著發生因子結果與討論

4.1.1 主成分分析結果

- (1) 依據 Kaiser (1974)建議，分別就土砂來源、地形等類因子進行 KMO 檢定與 Bartlett 球形檢定，結果如表 3 所示。結果顯示，各類因子 KMO 檢定值皆大於 0.6 要求，且 Bartlett 球形檢定符合顯著性要求。
- (2) 根據 Li *et al.* (2010)建議，獲選之主成分累積變異百分比(代表性)達 85%以上，以及參考 Kaiser (1960)與 Cattell (1966)建議，選取特徵值 $\lambda \geq 1$ 的數量及陡坡試驗法篩選主成分數量，分析結果如表 4 所示。

表 3 主成分分析統計檢定結果

因子類別	Kaiser-Meyer-Olkin 統計檢定	Bartlett 球形顯著性檢定(p value)
土砂來源(前期崩塌地)	0.632	0.000<0.05
集水區幾何形狀	0.738	0.000<0.05
集水區曲率	0.613	3.368E-25<0.05
集水區坡度	0.607	0.000<0.05
集水區坡向	0.652	0.000<0.05
集水區高程	0.666	0.000<0.05
其它地形指標	0.640	0.000<0.05

表 4 主成分累積變異百分比、特徵值及陡坡圖成果彙整表

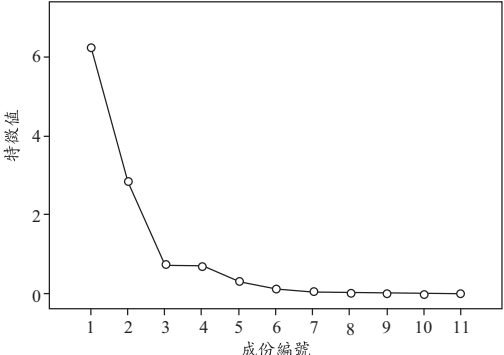
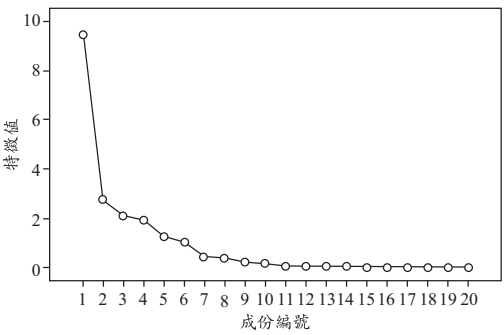
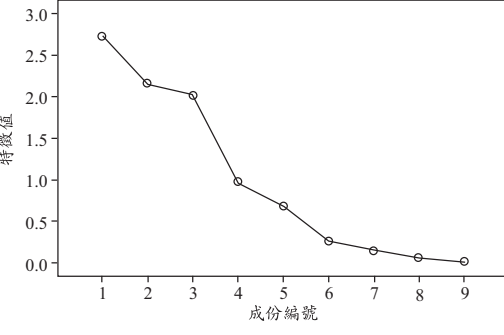
土砂來源 (崩塌地)	成份	初始特徵值			
		總和	變異數的%	累積%	
	1	6.235	56.680	56.680	
	2	2.832	25.749	82.429	
	3	0.726	6.601	89.030	
	4	0.698	6.348	95.378	
	5	0.318	2.890	98.269	
集水區 幾何形狀	成份	初始特徵值			
		總和	變異數的%	累積%	
	1	9.446	47.229	47.229	
	2	2.762	13.811	61.040	
	3	2.108	10.540	71.580	
	4	1.928	9.638	81.218	
	5	1.268	6.342	87.560	
集水區曲率	成份	初始特徵值			
		總和	變異數的%	累積%	
	1	2.734	30.383	30.383	
	2	2.159	23.994	54.376	
	3	2.018	22.418	76.795	
	4	0.972	10.795	87.590	
	5	0.673	7.479	95.069	

表 4 主成分累積變異百分比、特徵值及陡坡圖成果彙整表(續)

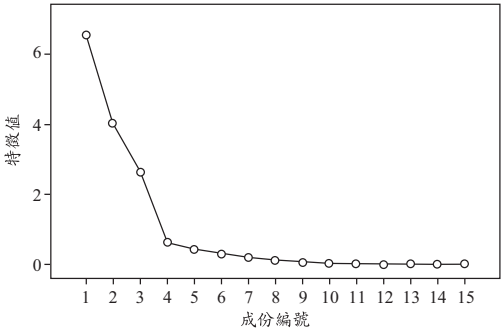
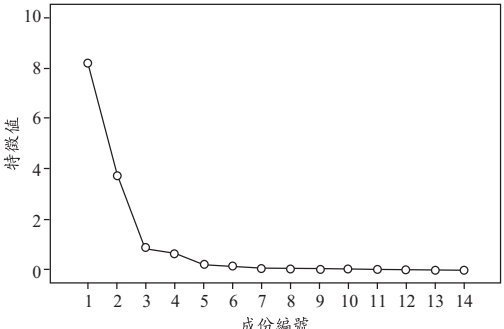
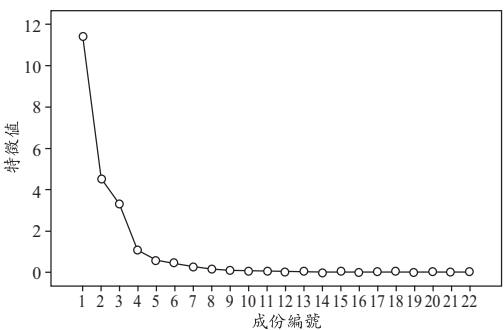
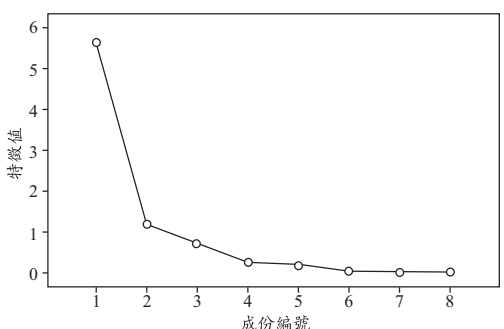
集水區坡度	成份	初始特徵值			
		總和	變異數的%	累積%	
	1	6.542	43.613	43.613	
	2	4.024	26.825	70.438	
	3	2.656	17.708	88.146	
	4	0.621	4.141	92.287	
	5	0.423	2.817	95.105	
集水區坡向	成份	初始特徵值			
		總和	變異數的%	累積%	
	1	8.247	58.906	58.906	
	2	3.787	27.051	85.956	
	3	0.854	6.102	92.059	
	4	0.644	4.599	96.658	
	5	0.188	1.341	97.999	
集水區高程	成份	初始特徵值			
		總和	變異數的%	累積%	
	1	11.437	51.985	51.985	
	2	4.523	20.559	72.544	
	3	3.312	15.056	87.599	
	4	1.050	4.774	92.373	
	5	0.571	2.593	94.967	
其他地形指標	成份	初始特徵值			
		總和	變異數的%	累積%	
	1	5.643	70.543	70.543	
	2	1.172	14.656	85.198	
	3	0.695	8.693	93.891	
	4	0.252	3.145	97.037	
	5	0.183	2.291	99.327	

表 5 地形、土砂來源發生因子主成分分析結果彙整表

因子類別(A→B) ^[註 1]	重要發生因子(主成分係數須大於等於 0.7)	單位	主成分順序	主成分係數
前期崩塌地(3→1)	各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率	%	1	0.9131
集水區形狀相關(5→2)	多邊形邊長與圓周長相等之圓面積	平方公尺	1	0.9853
	環性比	無因次	2	0.7845
集水區地形曲率因子(4→4)	10 度以上有效集水區全曲率標準差	1/公尺	1	0.9645
	集水區全曲率變異係數	無因次	2	0.9194
	10 度以上有效集水區全曲率平均值	1/公尺	3	0.9768
	15 度以上有效集水區全曲率平均值	1/公尺	4	0.9591
集水區坡度因子(3→3)	集水區坡度平均值	度	1	0.9056
	10 度以上有效集水區坡度變異係數	無因次	2	0.8857
	集水區坡度標準差	度	3	0.7472
集水區坡向因子(2→2)	10 度以上有效集水區坡向標準差	度	1	0.8472
	集水區坡向眾數(八方向)	無單位	2	0.8347
集水區高程因子(3→4)	(1)10 度以上有效集水區高度平均值	(1)公尺	1	0.9450
	(2)集水區高度平均值	(2)公尺		
	10 度以上有效面積高度積分(殘土率)	無因次	2	0.8718
其它地形指標(2→1)	10 度以上有效集水區高度變異係數	無因次	3	0.8596
	10 度以上有效集水區面積 SPI	平方公尺	1	0.9726

註 1：此欄位中以(A→B)表示(滿足條件的主成分數量→主成分係數大於等於 0.7 的數量)，合計有 16 個地形因子、1 個土砂來源因子獲選。

註 2：降雨(時雨量、有效累積雨量)因子為土石流發生之必要條件，此步驟不納入顯著發生因子篩選。

(3)參考吳輝龍等人(2004)及陳文福等人(2005)建議，挑選主成分係數大於 0.7 者為獲選的重要發生因子。挑選結果如表 5 所示。

4.1.2 相關性分析結果

由主成分分析獲選的重要發生因子相關性分析結果可知，「集水區坡度平均值」與「集水區高度平均值」相關係數達 0.728，「集水區高度平均值」與「10 度以上有效集水區高度平均值」相關係數高達 0.940，皆達到本研究建議之相依條件(相關係數大於等於 0.7 或小於等於-0.7)，依據上述表 5 可知，「10 度以上有效集水區高度平均值」主成分係數較高，故剔除「集水區高度平均值」因子，即可解決與「集水區坡度平均值」相依問題，亦獲致莫拉克颱風土石流顯著發生因子集合(表 6)。

4.2 土石流顯著發生因子特性歸納

4.2.1 以平均坡度及前期崩塌率探討顯著地形發生因子

根據「集水區平均坡度」及「各潛勢溪流線

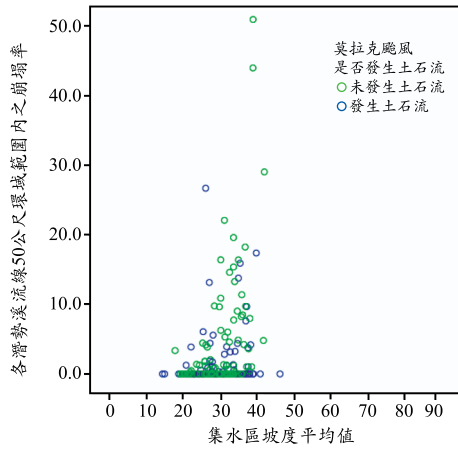
50 公尺環域範圍內之前期崩塌率」探討其餘顯著地形發生因子特性，初步以「土石流發生與否」歸納兩群組發生因子關聯性，散布圖結果如圖 6 及圖 7 所示。

- (1) 平均坡度及前期崩塌率：觀察圖 6(a)及圖 7(a)散布圖可知，土石流發生與否兩群組集水區坡度平均值分布範圍介於 20~40 度之間；土石流發生與否兩群組前期崩塌率分布範圍介於 0~5%之間。
- (2) 集水區形狀相關：觀察圖 6 (b~c)與圖 7 (b~c)散布圖可知，90%土石流發生組溪流「多邊形邊長與圓周長相等之圓面積」因子範圍分布於 100,000 平方公尺(1 平方公里)以內，而「環性比」因子分布範圍為 0.4~0.8 之間。
- (3) 集水區地形曲率因子：觀察圖 6 (d~g)及圖 7 (d~g)散布圖可知，90%土石流發生組溪流「集水區全曲率變異係數」因子範圍分布於-2,500~2,500 以內；「10 度以上有效集水區全曲率平均值」及「15 度以上有效集

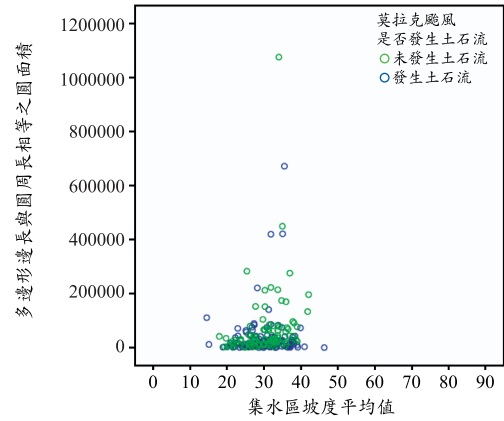
表 6 發生因子相關係數表

各潛勢溪流線50公尺環域範圍內之崩塌率	多邊形邊長與圓周長相等之圓面積	環性比	集水區全曲率變異係數	10度以上有效集水區全曲率標準差	10度以上有效集水區全曲率平均值	15度以上有效集水區全曲率平均值	集水區坡度平均值	集水區坡度標準差	10度以上有效集水區坡度變異係數	集水區坡度向眾數	10度以上有效集水區坡度標準差	10度以上有效集水區坡度平均值	10度以上有效集水區高度變異係數	10度以上有效集水區高度分(殘土率)	10度以上有效集水區面積SPI
1.000	0.246**	0.044	0.128	0.300**	0.379**	0.052	0.431**	0.311**	-0.162	-0.237*	0.049	0.374**	-0.229*	0.008	0.380**
0.246**	1.000	-0.031	0.009	0.099	0.255**	-0.045	0.244*	0.242*	-0.139	0.058	0.173	0.423**	-0.137	0.155	0.633**
0.044	-0.031	1.000	0.257**	0.010	0.074	-0.001	0.138	-0.325**	-0.217*	-0.167	0.136	0.079	-0.129	0.145	0.106
0.128	-0.009	0.257**	1.000	-0.006	-0.029	0.047	0.116	-0.094	-0.125	-0.065	-0.055	0.051	-0.021	0.116	0.054
0.300**	0.099	0.010	-0.006	1.000	0.040	0.115	0.194*	0.296**	0.054	-0.195*	0.171	0.213*	-0.171	0.012	0.064
0.379**	0.255**	0.074	-0.029	0.040	1.000	-0.005	0.347**	0.339**	0.115	0.034	0.170	0.313**	-0.141	0.061	0.391**
0.052	-0.045	-0.001	0.047	0.115	-0.005	1.000	-0.022	-0.162	0.012	-0.086	-0.002	-0.011	0.128	0.097	-0.048
0.431**	0.244*	0.138	0.116	0.194*	0.347**	-0.022	1.000	0.241*	-0.608**	-0.004	0.151	0.728**	-0.286**	0.241*	0.636**
0.311**	0.242*	-0.325**	-0.094	0.296**	0.339**	-0.162	0.241*	1.000	0.329**	0.168	-0.048	0.301**	-0.260**	-0.185	0.262**
-0.162	-0.139	-0.217*	-0.125	0.054	0.115	0.012	-0.608**	0.329**	1.000	0.071	-0.025	-0.380**	0.176	-0.424**	-0.383**
-0.237*	0.058	-0.167	-0.065	-0.021	0.034	-0.086	-0.004	0.168	0.071	1.000	-0.261**	0.118	-0.036	-0.116	0.141
0.049	0.173	0.136	-0.055	0.171	0.170	-0.002	0.151	-0.048	-0.025	-0.261**	1.000	0.234*	-0.203*	-0.007	0.253**
0.386**	0.419**	0.038	0.059	0.215*	0.313**	0.011	0.728**	0.301**	-0.380**	0.118	0.234*	1.000	-0.601**	0.289**	0.698**
0.374**	0.423**	0.079	0.051	0.221*	0.331**	-0.011	0.694**	0.221*	-0.258**	0.077	0.331**	1.000	-0.538**	0.243*	0.699**
-0.229*	-0.137	-0.129	-0.021	-0.171	-0.141	0.128	0.286**	-0.260**	0.176	-0.036	-0.203*	-0.538**	1.000	-0.139	-0.186
0.008	0.155	0.145	0.289**	0.243*	0.243*	0.097	0.241*	-0.185	-0.424**	-0.116	-0.007	0.243*	-0.139	1.000	0.246**
0.80**	0.633**	0.106	0.054	0.064	0.391**	-0.048	0.636**	0.262**	-0.383**	0.141	0.253**	0.699**	-0.186	0.246**	1.000

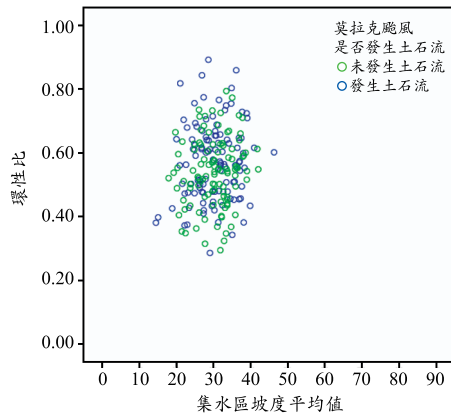
說明：(1) **在顯著水準為0.01時(雙尾)，相關顯著。(2) *在顯著水準為0.05時(雙尾)，相關顯著。



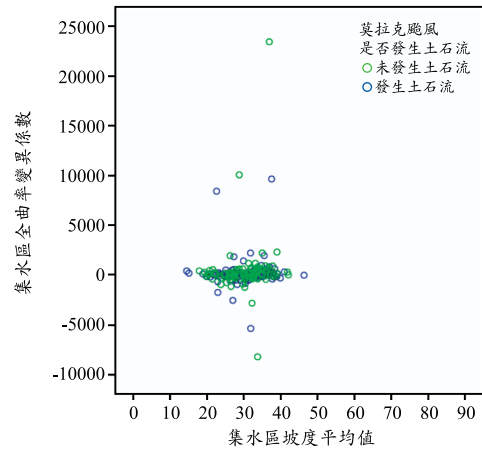
a)平均坡度 VS 各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率



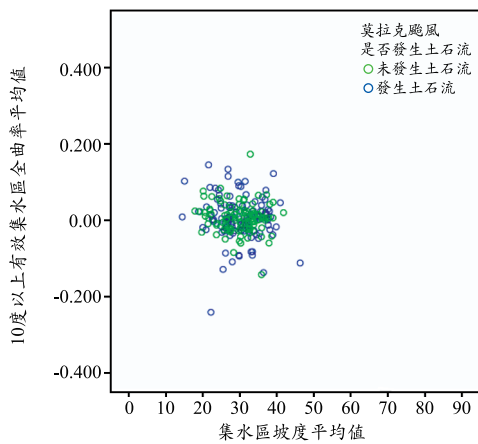
(b)平均坡度 VS 多邊形邊長與圓周長相等之圓面積



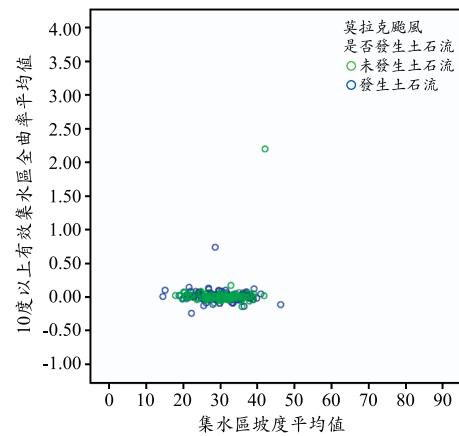
(c)平均坡度 VS 環性比



(d)平均坡度 VS 集水區全曲率變異係數

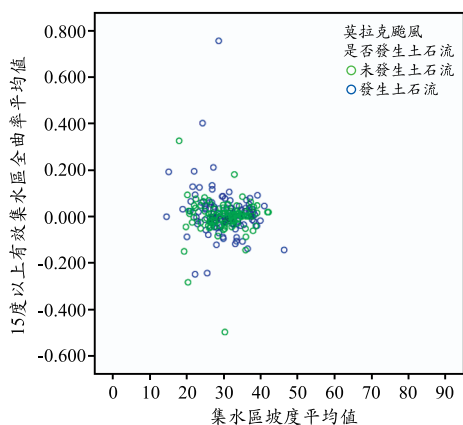


(e)平均坡度 VS 10 度以上有效集水區全曲率平均值

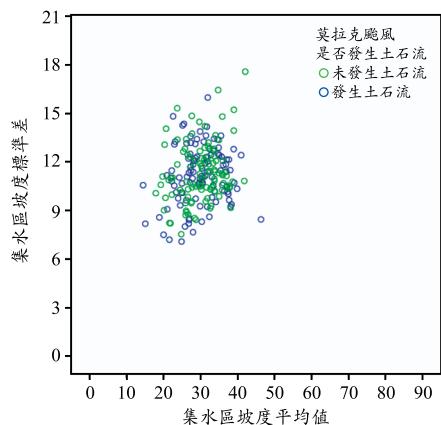


(f)平均坡度 VS 10 度以上有效集水區全曲率標準差

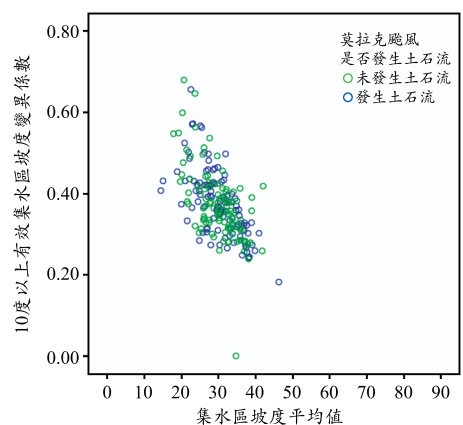
圖 6 集水區平均坡度及顯著地形發生因子關聯性散布圖成果



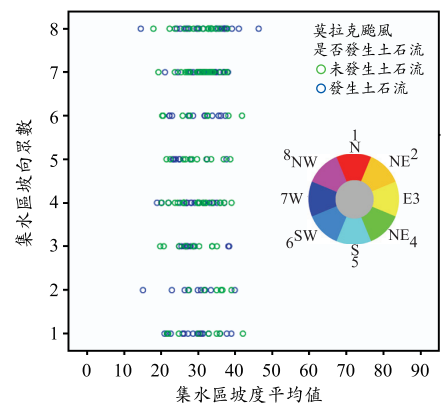
(g)平均坡度 VS 15 度以上有效集水區全曲率平均值



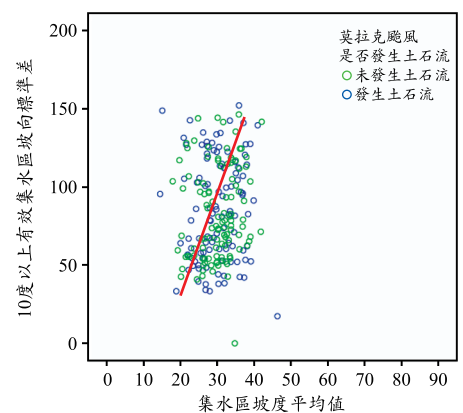
(h)平均坡度 VS 集水區坡度標準差



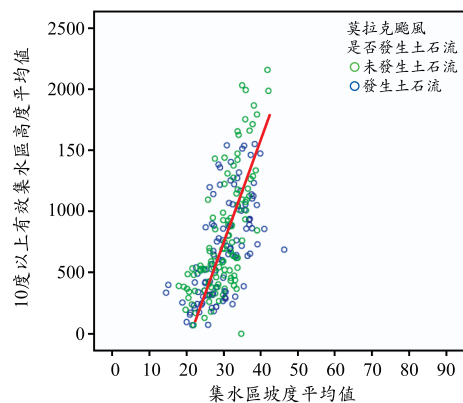
(i)平均坡度 VS 10 度以上有效集水區坡度變異係數



(j)平均坡度 VS 集水區坡向眾數

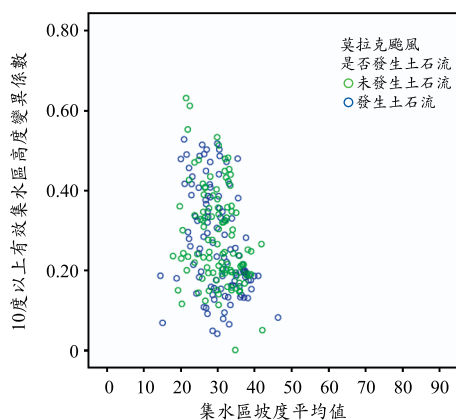


(k)平均坡度 VS 10 度以上有效集水區坡向標準差

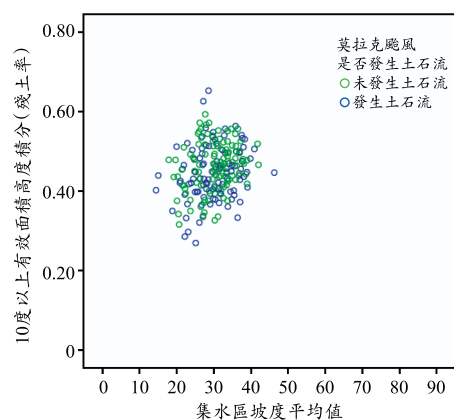


(l)平均坡度 VS 10 度以上有效集水區高度平均值

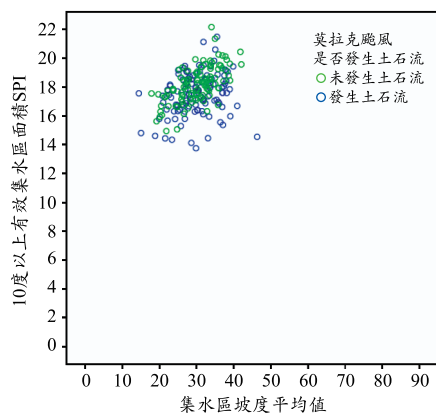
圖 6 集水區平均坡度及顯著地形發生因子關聯性散布圖成果(續)



(m) 平均坡度 VS 10 度以上有效集水區高度變異係數



(n) 平均坡度 VS 10 度以上有效面積高度積分(殘土率)



(o) 平均坡度 VS 10 度以上有效集水區面積 SPI

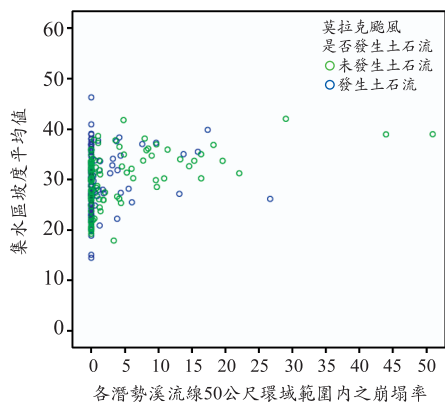
圖 6 集水區平均坡度及顯著地形發生因子關聯性散布圖成果(續)

水區全曲率平均值」因子範圍分布於 -0.1~0.1 之間；「10 度以上有效集水區全曲率標準差」因子範圍分布於 -0.25~0.25 之間。

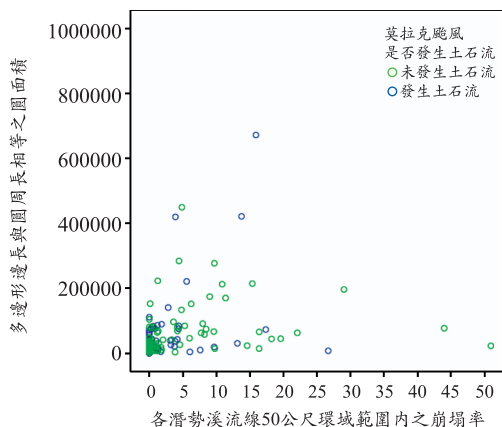
- (4) 集水區坡度因子：觀察圖 6 (h~i) 及圖 7 (h~i) 散布圖可知，90% 土石流發生組溪流「集水區坡度標準差」因子範圍分布於 6~15 之間；「10 度以上有效集水區坡度變異係數」因子範圍分布於 0.3~0.5 之間。
- (5) 集水區坡向因子：觀察圖 6(j) 及圖 7(j) 散布圖可知，土石流發生組與非土石流發生組於「坡向眾數」未有明顯特性或趨勢，而

90% 土石流發生組溪流「10 度以上有效集水區坡向標準差」範圍分布於 40~140 之間，且與集水區平均坡度成一正比關係，趨勢線詳如圖 6(k) 所示。

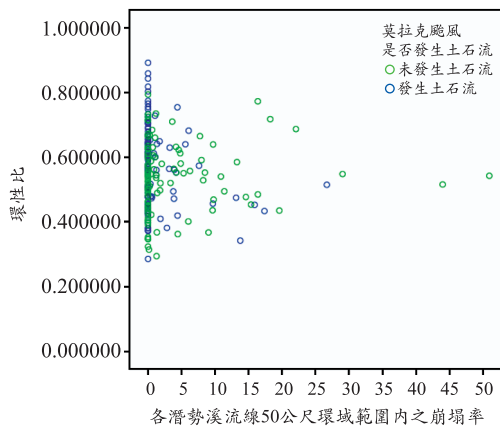
- (6) 集水區高程因子：觀察圖 6 (l~n) 及圖 7 (l~n) 散布圖可知，90% 土石流發生組溪流「10 度以上有效集水區高度平均值」範圍分布於 250~1,250 公尺之間，且與集水區平均坡度成正比關係，趨勢線詳如圖 6(l) 所示；「10 度以上有效集水區高度變異係數」值域範圍分布於 0.1~0.5 之間；「10 度以上有效面積高度積分(殘土率)」範圍分布於



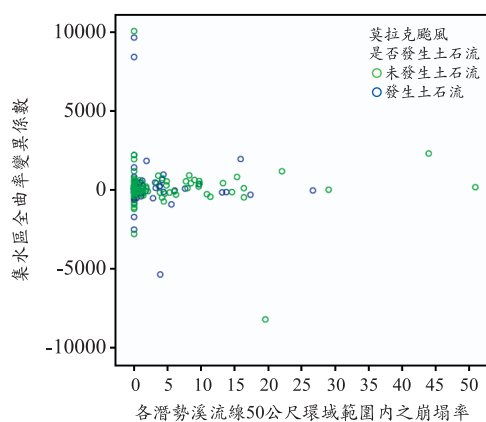
(a)各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 平均坡度



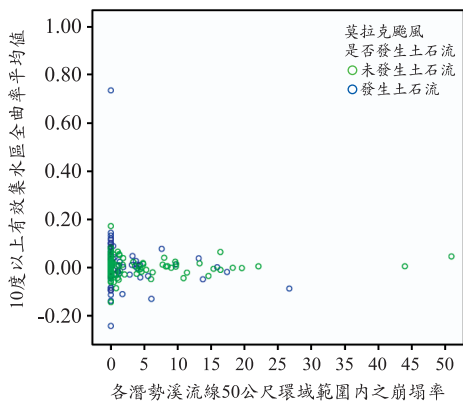
(b)各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 多邊形邊長與圓周長相等之圓面積



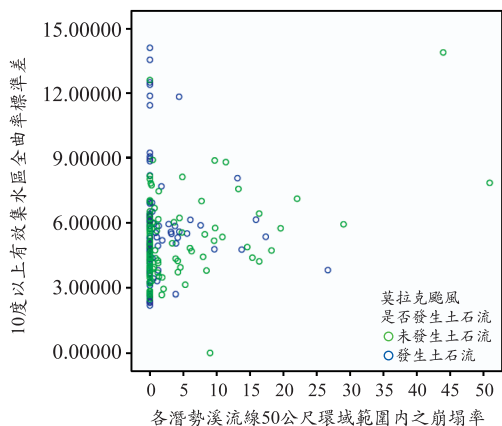
(c)各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 環性比



(d)各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 集水區全曲率變異係數

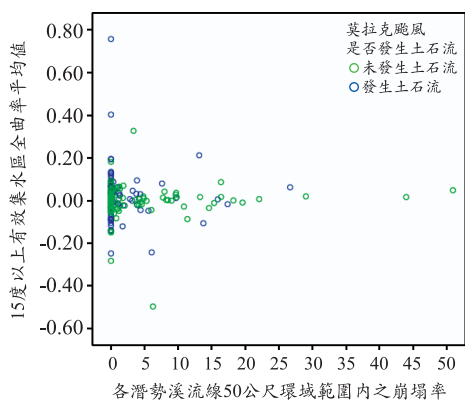


(e)各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 10 度以上有效集水區全曲率平均值

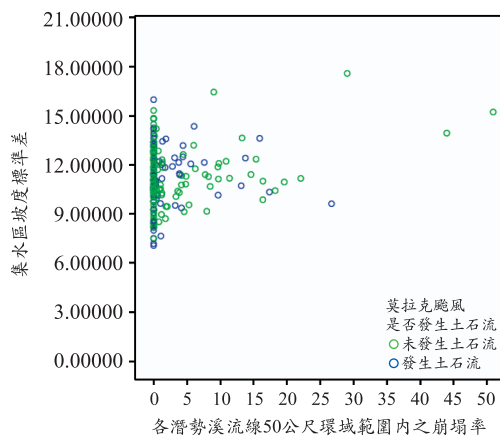


(f)各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 10 度以上有效集水區全曲率標準差

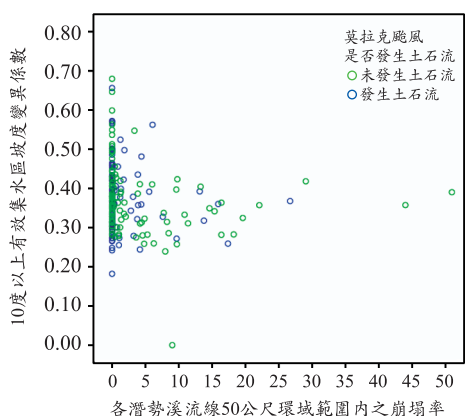
圖 7 各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率及顯著地形發生因子關聯性散布圖成果



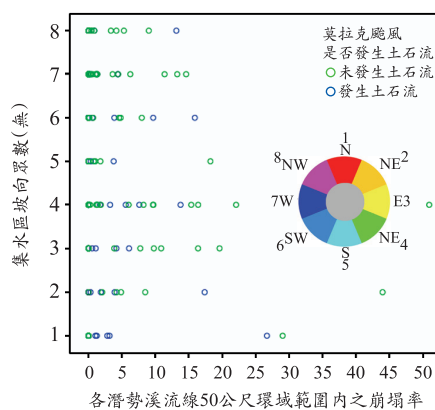
(g) 各潛勢溪流線 50m 環域範圍內之前期崩塌率 VS 15 度以上有效集水區全曲率平均值



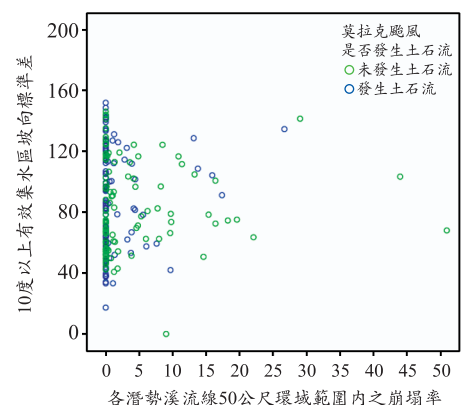
(h) 各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 集水區坡度標準差



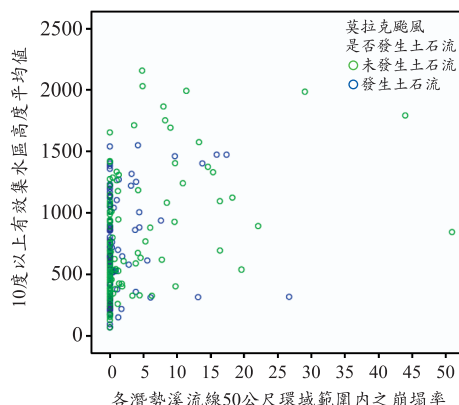
(i) 各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 10 度以上有效集水區坡度變異係數



(j) 各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 集水區坡向眾數

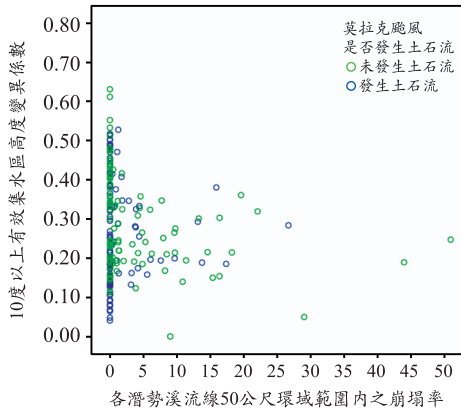


(k) 各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 10 度以上有效集水區坡度標準差

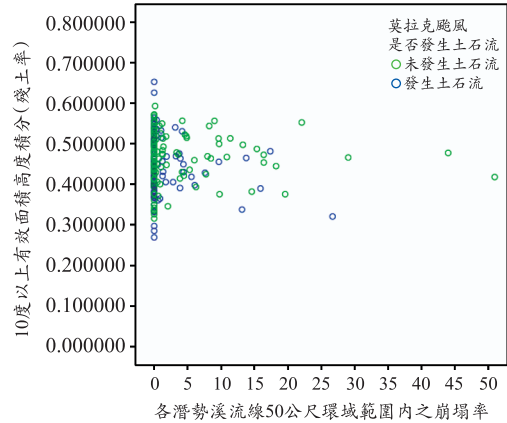


(l) 各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 10 度以上有效集水區高度平均值

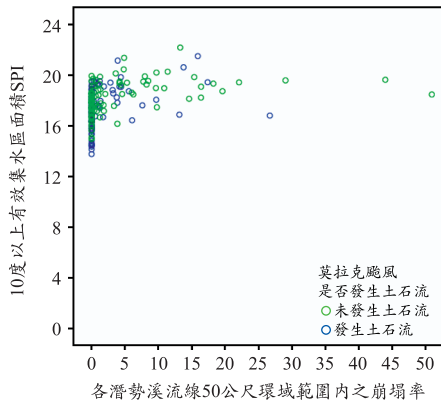
圖 7 各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率及顯著地形發生因子關聯性散布圖成果(續)



(m)各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 10 度以上有效集水區高度變異係數



(n)各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 10 度以上有效面積高度積分(殘土率)



(o)各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率 VS 10 度以上有效集水區面積 SPI

圖 7 各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率及顯著地形發生因子關聯性散布圖成果(續)

0.3~0.6 之間，依據 Strahler (1952)面積高度積分(殘土率)分級圖可知土石流發生組的集水區處於平衡時期(壯年期)。

- (7) 其它地形指標：觀察圖 6(o)及圖 7(o)散布圖可知，90%土石流發生組溪流「10 度以上有效集水區面積 SPI」值域範圍分布於 15~20 之間，且與集水區平均坡度成正比關係。

4.2.2 土石流發生三元素關聯性及特性歸納

圖 8 為土砂來源-坡度-降雨關聯性泡泡圖。觀察圖 8(a)可知，土石流發生組及土石流未發生組「有效累積雨量-時雨量-平均坡度關聯性」，

成果圖顯示土石流發生與否兩群組雨量及平均坡度分布關係。觀察分布可知，有效累積雨量介於 600~1,100 mm，時雨量介於 20~60 mm/hr，平均坡度大約介於四級坡至七級坡等條件下，有較多的土石流發生組樣本，表示莫拉克颱風在此雨量強度及地形條件下誘發較多土石流災害。

觀察圖 8(b)可知，土石流發生組及土石流未發生組「有效累積雨量-時雨量-崩塌率關聯性」，成果圖顯示土石流發生與否兩群組雨量及前期崩塌率分布關係。觀察分布可知，有效累積雨量介於 600~1,100 mm，時雨量介於 20~70 mm/hr，前期崩塌率大約介於 1~5%及 5%以上等條件

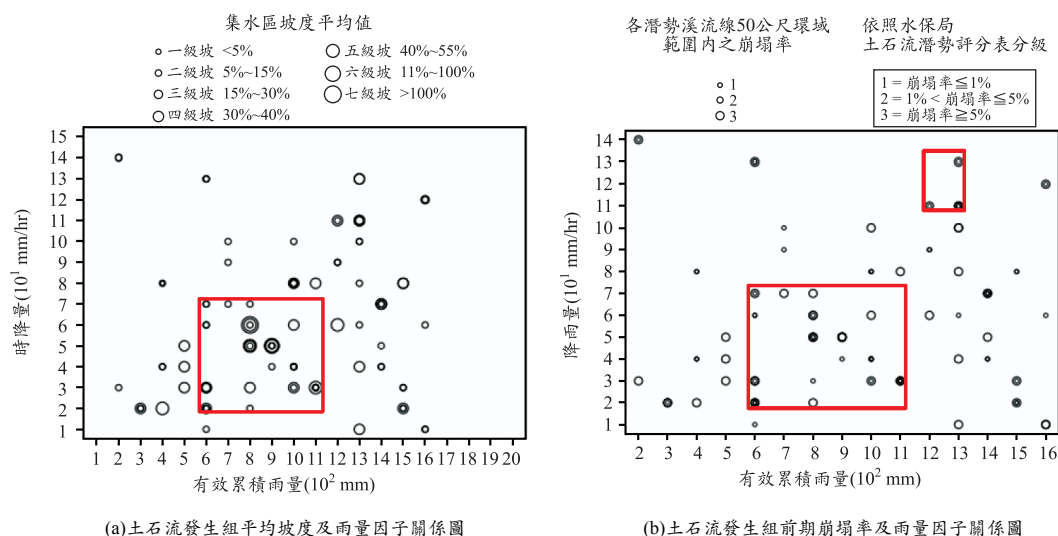


圖 8 土砂來源-坡度-降雨關聯圖

下，有較多的土石流發生組樣本，表示莫拉克颱風在此雨量強度及土砂料源供應下誘發較多土石流。

針對平均坡度及降雨因子進行土石流誘發門檻值探討，成果如圖 9 所示。分析方法以「未發生土石流組」樣本為主，以其資料點分布較密集的下限值為因子門檻值，如此可確保門檻值上方皆為發生土石流樣本，以較保守角度研擬土石流發生三元素誘發土石流臨界門檻值。

圖 9(a)為有效累積雨量-時雨量及平均坡度三維散布圖，由圖 9(b~d)分別就 X-Y、X-Z 及 Y-Z 平面探討未發生土石流組樣本分布下限，可獲得有效累積雨量門檻值為 115 mm，時雨量門檻值為 25 mm/hr，平均坡度門檻值為 20 度。表示莫拉克颱風於上揭門檻值以上有較多土石流災害產生。

五、研究結論與建議

5.1 研究結論

1. 本研究建議土石流顯著發生因子篩選流程，係透過主成分分析、相關性分析方法為之，可篩選出莫拉克颱風引致土石流的顯著發生因子，經文獻回顧萃取共 101 個因子，

經篩選獲致「各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率」、15 項地形因子及「累積降雨量與時雨量」2 項雨量因子，合計共 18 個顯著發生因子。

2. 本研究以「集水區平均坡度」及「各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率」為地形與土砂來源探討其餘顯著地形發生因子特性，經由散布圖歸納莫拉克颱風土石流發生重要影響值域，結果可供未來土石流發生因子易致災調查參用。
3. 由土石流發生三元素關聯性及特性歸納結果顯示，有效累積雨量介於 600~1,100 mm，時雨量介於 20~60 mm/hr，平均坡度大約介於四級坡至七級坡等條件下，前期崩塌率介於 1~5%及 5%以上等條件，於莫拉克颱風時有較多的土石流發生組樣本，表示莫拉克颱風在此雨量強度及地形條件下誘發較多土石流災害。
4. 根據有效累積雨量-時雨量及平均坡度三維散布圖結果可知，有效累積雨量門檻值 115 mm，時雨量門檻值 25 mm/hr，平均坡度門檻值 20 度時，莫拉克颱風於上揭門檻值以上開始誘發土石流。

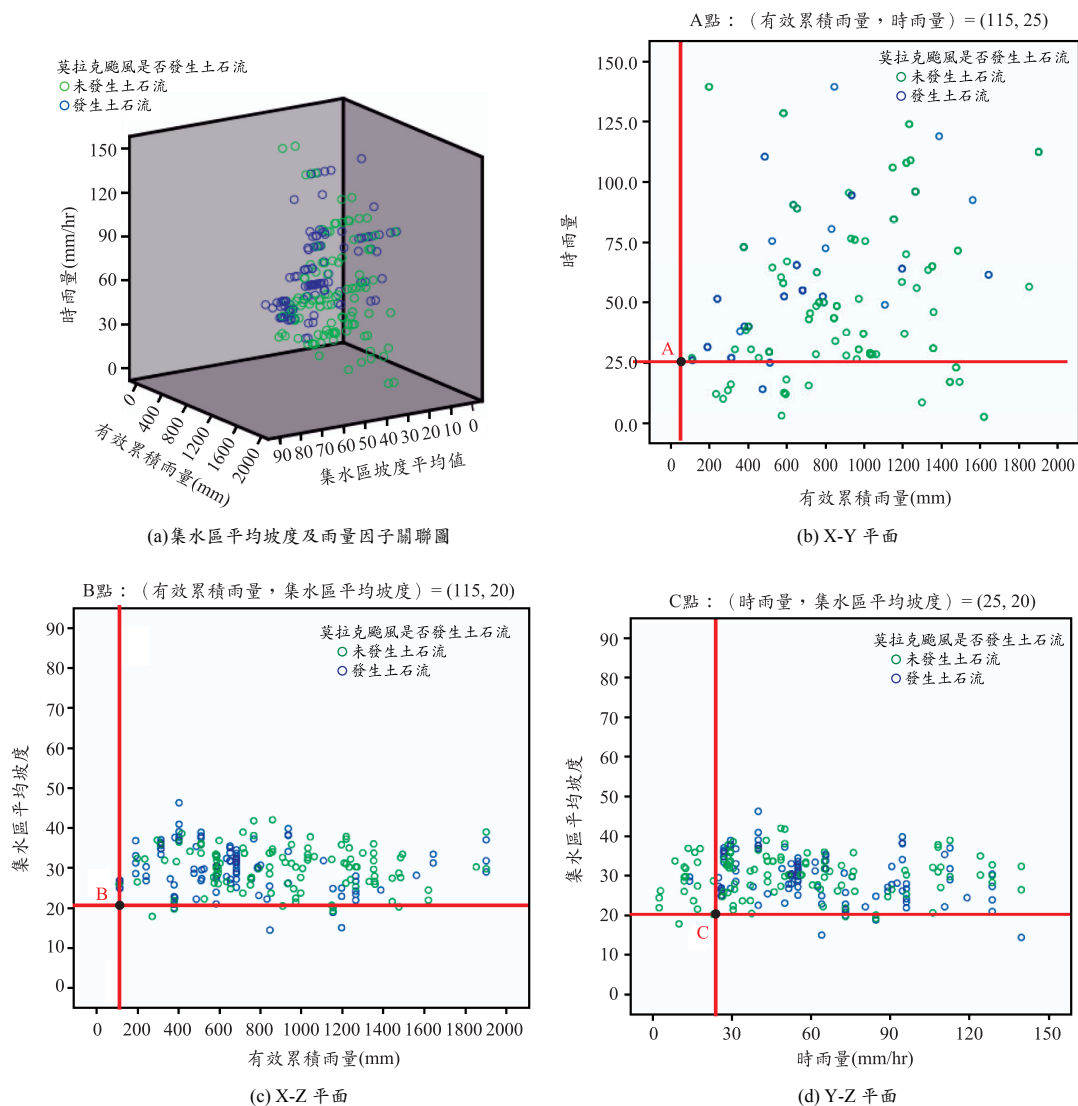


圖 9 有效累積雨量-時雨量及平均坡度散布圖

5.2 建議

1. 發生因子相互仍存有關係，並非獨立因子，故建議未來可以資料採礦方法針對篩選獲致顯著發生因子進行多重交叉關聯性，期能透過顯著發生因子多變量解釋能力，初步探討莫拉克颱風引發土石流之關聯性，並歸納各發生因子影響排序。
2. 經主成分分析可知，土砂來源以「各潛勢溪流線 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率」最重要，故建議未來應逐年紀錄各土石流潛勢

溪流 50 公尺環域範圍內之前期崩塌率，若有異常增加之趨勢，則可建議為潛勢溪流資料更新調查之溪流名單，針對該潛勢溪流進行易致災因子現地調查，或進行進一步之風險分析。

致 謝

感謝行政院農委會水土保持局經費支持(計畫名稱：莫拉克災區土石流發生因子關連性探討；計畫編號：SWCB-100-076)，以及財團法人

中興工程顧問社同事曹鼎志、辜炳寰、鄭錦桐博士等人提供意見與協助，於此一併申謝。

參考文獻

1. 山口伊佐夫：防砂工程學，國立臺灣大學森林學系譯，150-174 頁，1985。
2. 尹承遠、翁勳政、吳仁明、歐陽湘：「臺灣土石流之特性」，工程地質技術應用研討會(V)論文專集，第 70-90 頁，1993。
3. 尹承遠、吳仁明、翁勳政、歐陽湘：「土石流危險區地質、地形、水文特徵與預警模式建立」，工研院能源與資源研究所 1994。
4. 池古浩：土石流災害調查法，日本山海堂編印，國家科學委員會土石流研究群日文翻譯本，1980。
5. 吳輝龍、陳文福、張維訓：「集水區地文特性因子與土石流發生機率間相關性之研究—以陳有蘭溪為例」，中華水土保持學報，第 35 卷第 3 期，第 251-259 頁，2004。
6. 李光敦：水文學，五南出版社，共 385 頁，2002。
7. 林信亨：「地理資訊系統應用於土石流危險溪流危險度判定之研究」，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，2000。
8. 林昭遠、張力仁：「地文因子對土石流發生影響之研究-以陳有蘭溪為例」，中華水土保持學報，第 31 卷第 3 期，第 227-237 頁，2000。
9. 范正成、吳明峰、彭光宗：「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，1999。
10. 財團法人中興工程顧問社：「98 年莫拉克颱風後土石流潛勢地區易致災因子調查」，農委會水土保持局委託計畫成果報告，2009。
11. 財團法人中興工程顧問社：「99 年土石流潛勢地區易致災因子調查與危害頻率分析」，農委會水土保持局委託計畫成果報告，2010。
12. 財團法人中興工程顧問社：「莫拉克災區土石流發生因子關連性探討」，農委會水土保持局委託研究成果報告，2011。
13. 陳榮河、林美聆、陳宏宇：「銅門村土石流材料特性之初步研究」，中華水土保持學報，第 24 卷第 1 期，第 65-73 頁，1993。
14. 陳秋份：「土石流危險溪流危險度之區分」，國立成功大學水利暨海洋工程研究所碩士論文，1997。
15. 陳榮河：「土石流之發生機制」，地工技術，第 74 期，第 21-28 頁，1999。
16. 陳榮河、江英政：「新中橫公路邊坡破壞之調查」，第二屆土石流研討會論文集，第 180-189 頁，1999。
17. 陳榮河、歐泰林：「區域性土石流之發生機制」，地工技術，第 110 期，第 25-34 頁，2006。
18. 陳宏宇、蘇定義、陳琨銘：「土石流發生機制與地質環境之相關性」，地工技術，第 74 期，第 5-20 頁，1999。
19. 陳天健、林美聆等人：「桃芝颱風坡地及土石流災害特性分析」，中華水土保持學報，第三十二卷，第四期，第 279-288 頁，2001。
20. 陳文福、李毅宏、吳輝龍：「結合地文與降雨條件以判定土石流發生之研究—以陳有蘭溪集水區為例」，臺灣地理資訊學刊，第 2 期，第 27-44 頁，2005。
21. 黃朝恩：「臺灣島諸流域特徵及其相關性的地形學研究」，私立中國文化大學理學院地理學系研究報告，第 4 卷，第 1-93 頁，1980。
22. 詹錢登：土石流概論，科技圖書，2000。
23. 詹錢登、李明熹：「土石流發生降雨警戒模式」，中華水土保持學報，第 35 卷第 3 期，第 275-285 頁，2004。
24. 謝正倫、陳禮仁：「土石流潛在溪流之危險度的評估方法」，中華水土保持學報，第 24 卷第 1 期，第 13-19 頁，1993。
25. 謝正倫：「桃芝颱風後土石流災害發生基準研究」，土石流災害及其防制對策研討會論文集，第 83-102 頁，2001。
26. 蕭震洋：「以類神經網路及數值地型分析潛在危險性的土石流區：南投陳有蘭溪流域為實例」，國立臺灣海洋大學應用地球物理研究所碩士學位論文，2003。

27. Auer, K. and Shakoor A., "A Statistical Approach to Evaluate Debris Avalanche Activity in central Virginia", *Engineering Geology*, Vol. 33, pp. 305-321, 1993.
28. Arroyo, L. A., Johansen, K., Armston, J. and Phinn, S., "Integration of LiDAR and QuickBird imagery for mapping riparian biophysical parameters and land cover types in Australian tropical savannas", *Forest Ecology and Management*, Vol. 259, No. 3, pp. 598-606, 2010.
29. Breiman, Leo, "Random Forests", *Machine Learning*, Vol. 45, No. 1, pp. 5-32, 2001.
30. Cattell, R. B., "The scree test for the number of factors", *Multivariate Behavioral Research*, Vol. 1, pp. 629-637, 1966.
31. Chung, C.-J. F. and Fabbri, A. G., "Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 65, pp. 1389-1399, 1999.
32. Chung, C. J. and Fabbri, A. G., "Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping", *Natural Hazards*, Vol. 30, pp. 451-472, 2003.
33. Chen, Chien-Yuan and Yu, Fan-Chieh, "Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS", *Geomorphology*, Vol. 129, pp. 387-397, 2011.
34. David Theler, Emmanuel Reynard, Christophe Lambiel, Eric Bardou, "The contribution of geomorphological mapping to sediment transfer evaluation in small alpine catchments", *Geomorphology*, Vol. 124, pp. 113-213, 2010.
35. Davide Tiranti, Sabrina Bonetto, Giuseppe Mandrone, "Quantitative basin characterisation to refine debris-flow triggering criteria and processes: an example from the Italian Western Alps", *Landslides*, Vol. 5, pp. 45-57, 2008.
36. Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C. and Bergerud, W. A., "Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics", *Landslides*, Vol. 1, pp. 61-66, 2004.
37. Deng, H., Runger, G., and Tuv, Eugene, "Bias of importance measures for multi-valued attributes and solutions", *Proceedings of the 21st International Conference on Artificial Neural Networks*, 2011.
38. Fausto Guzzetti, Silvia Peruccacci, Mauro Rossi, Colin P. Stark, "The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update", *Landslides*, Vol. 5, pp. 3-17, 2008.
39. De Scally, F.A., Owens, I.F. and Louis, J., "Controls on fan depositional processes in the schist ranges of the Southern Alps, New Zealand, and implications for debris-flow hazard assessment", *Geomorphology*, Vol. 122, pp. 99-116, 2010.
40. Blahut, J., Horton, P., Sterlacchini, S. and Jaboyedoff, M., "Debris flow hazard modelling on medium scale: Valtellina di Tirano, Italy", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 2379-2390, 2010.
41. Kendall, M. G., Rank Correlation Methods, Charles Griffin and Company, 1955.
42. Kaiser, H. F., "The application of electronic computers to factor analysis", *Educational and Psychological Measurement*, Vol. 20, No. 1, pp. 141-151, 1960.
43. Li, Chen-Yeng, Lo, Wen-Chun, Chen, Chen-Yu, Shen, Che-Wei, and Tsao, Ting-Chi, "Using Logistic Regression to Predict the Susceptibility of Debris Flow Hazard in Hualien, Taiwan", 4th Japan-Taiwan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls, pp. 431-441, 2010.
44. Massimo Conforti, Pietro P. C. Aucelli, Gaetano Robustelli, Fabio Scarciglia, "Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy)", *Natural Hazards*, Vol. 56, pp. 881-898, 2011.

45. Moore, I. D., Grayson, R. B. and Ladson, A. R., "Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications", *Hydrological Processes*, Vol. 5, pp. 3-30, 1991.
46. Rickenmann, D. and Zimmermann, M., "The 1987 Debris Flows in Switzerland: Documentation and Analysis", *Geomorphology*, Vol. 8, pp. 175-189, 1993.
47. Strahler, A. N., "Hypsometric (area-altitude) Analysis of Erosional Topography", *Bull. Geol. Soc. Am.*, pp. 1117-1142, 1952.
48. Strahler, A. N., "Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks", In Chow, V. T., *Handbook of Applied Hydrology*, Section 4-11; McGraw-Hill, 1964.
49. Takahashi T., "Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft counter-measures for a disaster", *Journal of Natural Disaster Science*, Vol. 3, No. 1, pp. 57-89, 1981.
50. Thomas Glade, "Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology", *Geomorphology*, Vol. 66, pp. 189-213, 2005.
51. Wilson, J. P. and Gallant, J.C., Digital terrain analysis, In Wilson, J. P., Gallant, J. C. (Eds.), John Wiley & sons, New York, pp. 1-27, 2000.

收稿日期：民國 101 年 2 月 13 日

修正日期：民國 101 年 4 月 27 日

接受日期：民國 101 年 5 月 8 日