地理學報　第三十三期：1-18(2003)
JOURNAL OF GEOGRAPHICAL SCIENCE (33) 1-18(2003)

森林集水區邊坡穩定性之評估
以蒙地卡羅模擬無限邊坡模式之參數

Slope Stability Evaluation in Steep Forested Watershed
Monte Carlo Simulation of Parameters in the Infinite Slope Model

黃誌川*　　徐美玲**

Jr-Chuan Huang　　Mei-Ling Hsu

Abstract

Landslides have been the major concern of forest management in Taiwan since most part of the island consists of precipitous slopelands, which are composed of highly fractured geological formations. Mapping or delineating areas susceptible to landslides is essential for effective watershed management. Thus, this study aims to develop an effective method for allocating unstable slopelands. The process-based model uses GIS as an integration platform, and uses DEM to calculate slope gradient and specific catchment area for each grid, deriving NDVI value from SPOT imagery. The model then uses Monte Carlo simulation to derive parameter values for cohesion and friction angle needed in the infinite slope model. Two simulation strategies are adopted. One treats the entire watershed as uniformity. The other uses NDVI to

* 中央研究院計算中心 GIS 工程師
GIS engineer, Computing Centre, Academia Sinica, Taiwan.

** 國立臺灣大學地理環境資源學系副教授
Associate Professor, Department of Geography, National Taiwan University.
Corresponding author, e-mail address: hsu@ccms.ntu.edu.tw

differentiate spatial variation of cohesion, and the friction angles of individual geological formation are simulated separately.

The result shows that the accuracy rates of the two strategies in differentiating instable slopes are 64.0% and 76.4%, respectively. And the average rates for individual landslides being correctly evaluated are 67.0% and 76.8% for the two respective strategies. In view of spatial distribution, most of the landslides in the Chi-Jia-Wan watershed are located in the EO formation (composed of quartzite, sandstone, slate, graphitic shale), while topographically, they are located in converging steep slopes. Landslides in the Yo-Sheng-Chi watershed mostly occurred along the river valley, and they were very likely to be triggered by human activities. Thus, the model performance was not as successful as in Chi-Jia-Wan watershed.

Keywords: geographic information system, digital elevation models, Monte Carlo simulation, infinite slope model.

摘　要

臺灣地區山地遍佈、地質脆弱且地形陡峭，政府對於森林集水區的治山防洪工作一直不遺餘力，如何能有效地找出可能的山崩潛在危險區以利治山防洪工作的進行是本研究的主要目的。本研究以 GIS 爲操作平臺，利用 DEM 計算各網點坡度及比集水面積，並利用 SPOT 衛星影像獲得常態化差異植生指標。以蒙地卡羅模擬無限邊坡模式所需的參數進行邊坡穩定性的評估；崩塌地的評估分兩種模擬方案進行分析，方案一將全區的植生和地質條件視爲均質，方案二利用 NDVI 進行土體與植生內聚力的加權，並根據地層分區進行內摩擦角的模擬。

結果顯示，方案一與方案二對不穩定邊坡的評估正確率約爲 64.0%與 76.4%，推估成功率分別爲 67.0%與 76.8%，相當有效。就崩塌地位置而言，七家灣溪集水區的崩塌地大多在 EO (四稜砂岩、眉溪砂岩、白冷層) 的區域高，區位上通常位於地形上有明顯匯流效應的陡坡上，而有勝溪的崩塌地則多位於河谷地區，可能與該地區頻繁的人爲活動有關。

關鍵詞：地理資訊系統、數值地形高程模型、蒙地卡羅模擬、無限邊坡模式

前　言

臺灣地區位於歐亞板塊交接處，造山運動頻繁，100 至 1,000 公尺高程的坡地佔全島面積約 3　3%，1,000 公尺以上的山地又佔 31.5%且地質特性脆弱，地形陡峭；加上 4～10 月間雨量豐沛往往造成許多坡地災害。在人口持續膨脹的壓力之下，山坡地經營管理的重要性也不斷提升。在顧及經濟發展與避免坡地災害的前提下，對於山坡地潛在危險區的劃設就顯得非常重要。許多研究顯示，在森林集水區中降水事件是觸發塊體運動的主要因素之一 (Sidle *et al.*, 1985)。導致山崩的因素有許多，包含　地形 (坡度、坡型)、土壤 (厚度、密度、內聚力、導水度)、水文 (降雨強度、延時、地表下逕流、孔隙水壓)、植生 (覆蓋度、根系強度)、地質 (岩層組成、排列、岩體內摩擦角) 等。由於這些因素往往具有

時空變異性，也因此常常造成評估時的複雜度與困難度。

在山崩敏感的地區劃設潛在危險區用以限制人爲土地利用活動是非常必要的 (Duan *et al.*, 2000)。理想上，各種人爲土地利用的活動，如：森林的砍伐、道路的開闢與坡地社區開發等，都應該盡量避免經過這些敏感的地區以免發生或觸發災害。劃設潛在危險區的方法，大體上可以區分爲五類：地面實際觀測 (on-ground monitoring)、遙感探測 (remote sensing)、因子重疊分析 (factor overlay)、統計模式 (statistical models) 和大地作用模式 (geotechnical process models) (Schuster *et al.*, 1978)，各類方法都有其適用範圍與相關限制，因此很難直接比較其優劣 (Ward *et al.*, 1982; Montgomery *et al.*, 1994)。

其中大地作用模式 (geotechnical process models) 是結合地形、植生及土壤資訊等環境資料庫的一套評估潛在危險區的有效方法 (Ward, 1976; Okimura *et al.*, 1985; Wu *et al.*, 1995; Dietrich *et al.*, 1992, 1993; Montgomery *et al.*, 1998)。大量新近研究使用這些環境資訊的原因，除了考量各因素空間變異性的必要性漸被重視外，地理資訊系統的長足發展已經使得此等資訊可以在單一個平臺上整合，也是促成此種發展的重要因素。遙測影像能有效提供植生資訊、地表特性與土壤含水量等資訊；數值地形模型則能快速掌握坡型與坡度及空間相關位置，極有助於此等環境因子空間變異性的掌握和邊坡穩定性的分析。

有些研究利用地形的特性並結合作用模式來進行區域的邊坡穩定性分析 (Dietrich *et al.*, 1986, 1993, 1995; Montgomery *et al.*, 1993, 1994; Zhang *et al.*, 1994)。也有利用控制因素的發生機率分析來劃定可能發生崩塌的地區 (Ward, 1976, 1985; Ward *et al.*, 1978)，不過此等作法卻忽視了降雨與地形的交互作用，尤其是在集流程度高與明顯的凹坡處，使得評估結果不盡理想。Wu and Sidle (1995) 發展了一個以降雨事件爲基礎的邊坡穩定模式，雖適用於森林集水區，但在當時卻因爲硬體運算能力的限制，而未能大幅推廣。Montgomery and Dietrich (1994) 在假設穩定狀態的降雨事件下，將土壤、植生特性和近地表水流與邊坡穩定模式作結合，後來又放寬原先固定土壤深度與植生影響的假設，以進行邊坡穩定性的評估 (Dietrich *et al.*, 1995)，結果顯示地質特性、土壤強度和水力傳導度對於此類模式具有決定性的影響，因此必須被更有效地整合到模式中 (Duan *et al.*, 2000)。

臺灣中央山脈地區大多爲板岩所組成，但是卻有許多不同的地層結構與特性，雖然森林覆蓋尚稱完整，但是覆蓋比例卻因地而異，因此有必要在模式中將地質與植生條件加以外顯。目前許多模式對於植生覆蓋與地質特性的考慮大多是在系統內以一個單一常數值作考量 (Dietrich *et al.*, 1995; 徐美玲，1995b)，這樣的處理對於臺灣的空間變異實有不足之處。因此本研究目的是比較兩種參數化的作法。方案一：不考慮植生覆蓋與地質特性的空間變異性，方案二：爲利用 SPOT 衛星影像之常態化差異植生指標 (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) 作爲土壤與植生內聚力的權重來描述空間變異特質，並以地質特性作爲內摩擦角分類的標準；兩項方案皆透過無限邊坡破壞模式與蒙地卡羅模擬來比較及探討彼此的優劣與適用性。

模式理論與研究架構

(一)無限邊坡模式

一般而言，臺灣的上游集水區因爲坡度陡峻、土壤淺薄，淺層崩塌是最普遍的崩塌型態（李民等，2000），因此針對大型集水區邊坡相對穩定的研究，應該可以利用無限邊坡理論去進行評估。本研究利用修正後的無限邊坡理論 (Pack *et al.*, 1998, 2001) 配合數值地形、衛星影像資料與地質資料進行邊坡穩定性的評估。無限邊坡模式已被廣泛地使用在崩塌地的評估上，其形式各類不一，可簡化爲安全係數（factor of safety, *FS*）的形式；分母爲剪應力 (shear stress)、分子爲剪應強度 (shear strength)，若剪應強度低於剪應力，安全係數小於 1，則邊坡會產生塊體運動向下崩移，如下式表示 (Hammond *et al.*, 1992) ：

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta \left[\rho_s g(D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g)D_w\right]\tan\varphi}{D\rho_s g \sin\theta \cdot \cos\theta} \qquad (1)$$

於上式中，C_r：爲植物根系的內聚力[N/m^2]，C_s：爲土壤本身的內聚力[N/m^2]，θ：爲坡度，s：爲土壤濕密度[kg/m^3]，w：水密度[kg/m^3]，g：重力加速度 (9.81 m/s^2)，D：土壤厚度[m]，D_w：地下水面高度[m]，φ：爲岩體的內摩擦角 (friction angle)。

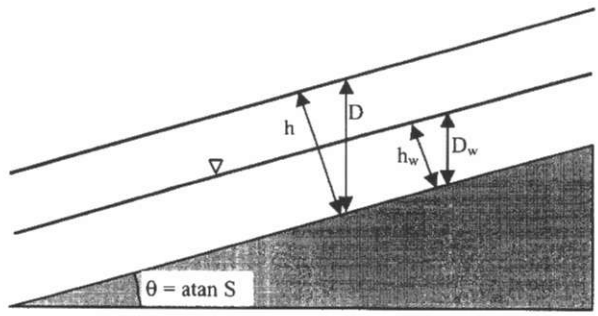


圖 1 邊坡概況示意圖

爲求簡化計算起見，使用垂直邊坡的土壤厚度 *h* 會比使用土壤的垂直厚度 *D* 來的簡便 (見圖 1)，兩者轉換式爲：

$$h = D \cdot \cos\theta \qquad (2)$$

令 *r* 爲水與土體的相對密度 ，一般而言約在 0.35～0.7 左右，如式 (3)：

$$r = \rho_w / \rho_s \qquad (3)$$

w 爲水位高度與土壤厚度之比值，該值可代表土體的飽和程度或孔隙水壓。如式 (4) 所示：

$$w = D_w / D = h_w / h \qquad (4)$$

C 爲土體內聚力及植物根系內聚力的總和，以無因次的方式表示，如下式：

$$C = (C_r + C_s)/(h\rho_s g) \qquad (5)$$

經過式 (2) ～ (5) 的適當轉換後，FS 以式 (6) 來表示：

$$FS = \frac{C \cos\theta + [1 - wr]\tan\varphi}{\sin\theta} \qquad (6)$$

式 (6) 爲使用無因次形式所表達的無限邊坡模式。這樣的形式在使用上較爲簡便，尤其是在內聚力 C 的表示部分，由於臺灣山區土壤淺薄植物根系所產生的內聚力可視爲均勻，因此將土壤內聚力與植物根系內聚力合併並結合土壤厚度形成無因次參數 (Pack *et al.*, 1998, 2001)，見式 (5)。此參數可視爲單位重量上的土體強度，或是土體與植物根系作用對邊坡穩定的貢獻程度，這部分的資料常無法測量，因此多採用模式來推估 (Sidle, 1991, 1992)。式 (6) 分子的第二項代表著岩體的內摩擦角對邊坡穩定的貢獻，並會隨著孔隙水壓的抬升而大幅減低岩體的強度 (徐美玲，1995a)。

(二)地形濕度指數

比集水面積 "a"定義爲空間上任一點的上坡集流面積除以該點的等高線長度[m^2/m] (圖 2)。此參數在近來的水文或地形研究中尤其在地表下逕流、變源面積 (variable source area) 與崩塌地的機制研究上，廣泛地被探討與使用 (Beven and Kirkby, 1979; O'Loughlin, 1986; Moore *et al.*, 1988, 1991; Grayson *et al.*, 1992a, 1992b)。此參數的發展是基於許多野外調查發現飽和漫地流往往最容易發生在一級河源頭的凹陷處。同時許多研究也顯示山崩也往往發生在地形上有明顯的匯流之處 (Montgomery *et al.*, 1994)。

本研究採用 TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979) 或類似以地形爲考量的濕度指數的假設以推估土體的飽和程度：

1.淺層的地表下側流 (lateral flow) 流動的勢能與地表坡度相同，見圖 (2)。

2.空間中任一點在穩定狀態下本身所提供往下坡的側流量爲 R [m/hr]。

3.側流量的最大容許量爲 T×sinθ，T：土體輸水性 (transmissivity) [m^2/hr]，爲水力傳導度[m/hr] 和土壤厚度 h[m]的乘積。

假設 (1) 和 (2) 意指：空間中任一點側流量 q，在不考慮未飽和層的水流行爲時，可視爲穩定側流量乘上比集水面積[m^2/hr]，如：式 (7)

$$q = R \cdot a \qquad (7)$$

假設 (3) 與一般形式的 TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979) 不同。一般在土壤厚度較厚，風化較爲完整且坡度較緩的邊坡上，水力傳導度會與土壤深度成指數遞減的關係。然而，臺灣山區的坡地狀況土壤較爲淺薄且爲計算方便起見。本模式假設水力傳導度並不會隨土壤深度而變，除了符合臺灣的情況外，亦可簡化土壤深度的影響 (Pack *et al.*, 1998)。另外，假設 (3) 中的 sinè 值相當於達西定律中

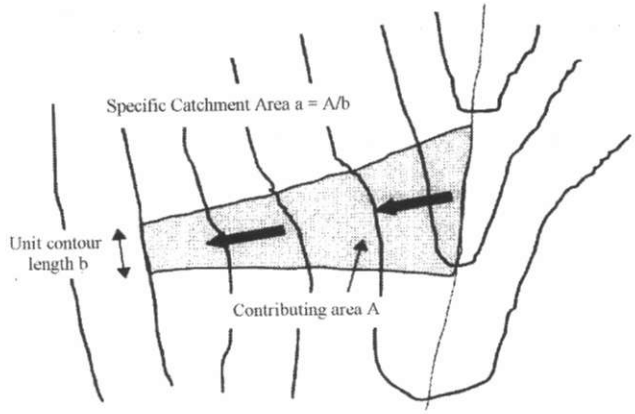


圖 2　比集水面積定義的示意圖

的水力坡降。因此，假設 (3) 可視爲空間中任一點的相對飽和度，可以式 (8) 表示：

$$\min\left(\frac{R}{T}\cdot\frac{a}{\sin\theta},1\right) \qquad (8)$$

此相對飽和度爲穩定狀態時的側流量與側流容許量的比值。因此，相對濕度的參數的上限爲　，若側流量大於側流容許量則表示：土壤完全達到飽和，並開始產生漫地流。本模式所指的穩定狀態乃長時間有效降雨所能形成的穩定狀態。比值 *R/T* 可視爲與降雨強度及土壤輸水性有關的複合性參數 (Pack *et al.*, 2001)。

經由上述的說明與轉化，可將式 (6) 改以下列的方式表達：

$$FS=\frac{C\ \cos\theta\left[1-\min\left(\frac{R}{T}\cdot\frac{a}{\sin\theta},1\right)r\right]\tan\varphi}{\sin\theta} \qquad (9)$$

式 (9) 中，變數 a 與 θ 爲物理參數並不隨作用而變，可直接從數值地形模型中析取。由於土的乾密度與水的密度的比值變動的範圍並不大 (一般約在 0.35～0.7 之間)，故本研究將其視爲常數 0.5 (Pack *et al.*, 2001)。因此評估式 (9) 中需要推估的主要參數爲 *C*、*R/T*、tanφ。

(三)蒙地卡羅模擬

參數的決定是模式運作所必須謹慎考慮的部分。在實際狀況中，代表性參數的選取、校正或驗證工作非常困難，主要牽涉到兩種不確定性因素：一爲模式不確定性 (model uncertainty)，一爲參數不確定性 (parameter uncertainty)。模式不確定性來自於模式歷程本身具有高度複雜性，目前的知識尚無法完全掌握在較開放的系統環境下各種作用的交互影響。由於系統無法完全掌握，因此參數的選取也產生不確定性，加上野外觀察時間通常不夠長或準確度仍嫌不足，或在傳統率定過程中，參數之此之間相互作用的干擾使得情況更加複雜。更嚴重的是由模式與參數所造成的不確定性時常相依且不容易分

離 (Beven, 1992; Salas, 1993)。

爲解決這部分的問題，利用序率模擬 (stochastic simulation) 的方式，不斷重複以不同的參數組合進行模擬，將結果與實測值做比對，藉此析取出較爲可信的參數值域，是個值得採用的研究取向 (Binley *et al*., 1991; Beven, 1992)。本研究利用隨機變數生產器隨機生成均等分配之 10,000 組參數組合 (Beven, 1992; Duan *et al*.,2000)，以每個參數組合進行邊坡穩定性模擬，並將模擬之安全係數小於 1 的空間單元與實際崩塌地進行比較比對評估。然而，在進行正確率評估時卻會遭遇兩項困難：第一、潛在危險區是指可能會發生崩塌的地區，不一定僅限於已經崩塌的地區。換句話說，模式所評估之危險區本身或許是潛在危險區但卻無法透過與實際崩塌地資料的比對加以證實；第二、崩塌地往往佔全研究區的極少部分；若模擬結果將全區皆視爲潛在危險區，雖與實際資料比對結果理想（每個崩塌地皆落於潛在危險區內）卻是個無效的結論。因此，本研究所採取的評估策略爲：限制潛在危險區的推估面積，以實際崩塌地佔全集水區面積的比例爲依據，以避免模擬結果高估潛在危險區。再以個別崩塌地爲檢測對象，崩塌地在鄰近一個網點範圍內出現安全係數小於 1 之網點時，即視模式正確評估該崩塌地；最後計算所有崩塌地中有多少比例的崩塌地被正確評估，將此值視爲正確率。

(四)研究區概述

本研究以臺灣七家灣溪集水區作爲個案研究的試驗區，該集水區位於臺灣中部大甲溪流域內，包含七家灣溪與有勝溪兩條支流的集水區 (圖 3)。集水區面積 106.15 平方公里，崩塌地個數 124 個，總面積 2.32 平方公里，約佔集水區總面積 2.19%。西北側爲雪山山脈，東南側爲中央山脈，東北方與蘭陽溪的最上游相鄰，整體地勢係由西北及東南的高山向中間陡降，自東北向西南傾斜，平均坡度約 67%。氣候方面，年平均溫約 14 C (環山)，日夜溫差大；年平均雨量約 2300mm（梨山），每年 5 月至 9 月爲濕季，佔全年總降雨量的 63%。地表覆蓋以森林爲主約佔 87%（1980 年資料），並有相當面積的溫帶果園與高冷蔬菜等農業活動。本研究區乃以中部橫貫公路之宜蘭支線與武陵農場爲對外的主要道路，區內的聚落則大多分佈在公路沿線 (詹仕堅等，2000)。

本區地質主要爲第三紀早期始新世與漸新世之沈積岩層，包含四種地層，EO (四稜砂岩、眉溪砂岩、白冷層)；EH (西村層、佳陽層)；OM (水長流層、大桶山層、乾溝層)；MI (鷹山層、蘇樂層)；岩性以黏板岩佔大多數 (圖 4)。土壤以黏板岩風化而成的黏土與黏壤土爲主，但風化並不完全，且存有灰壤化及紅壤化之現象，由於地勢陡峻且雨量多、強度大，致使土壤沖蝕現象旺盛，故區內土壤層大多淺薄，並多含板岩碎屑 (詹仕堅等，2000)。整體而言，研究區內植生狀況與地質狀況的空間變異不大，植生方面以森林爲主，若將果樹併入計算則佔總面積九成以上。

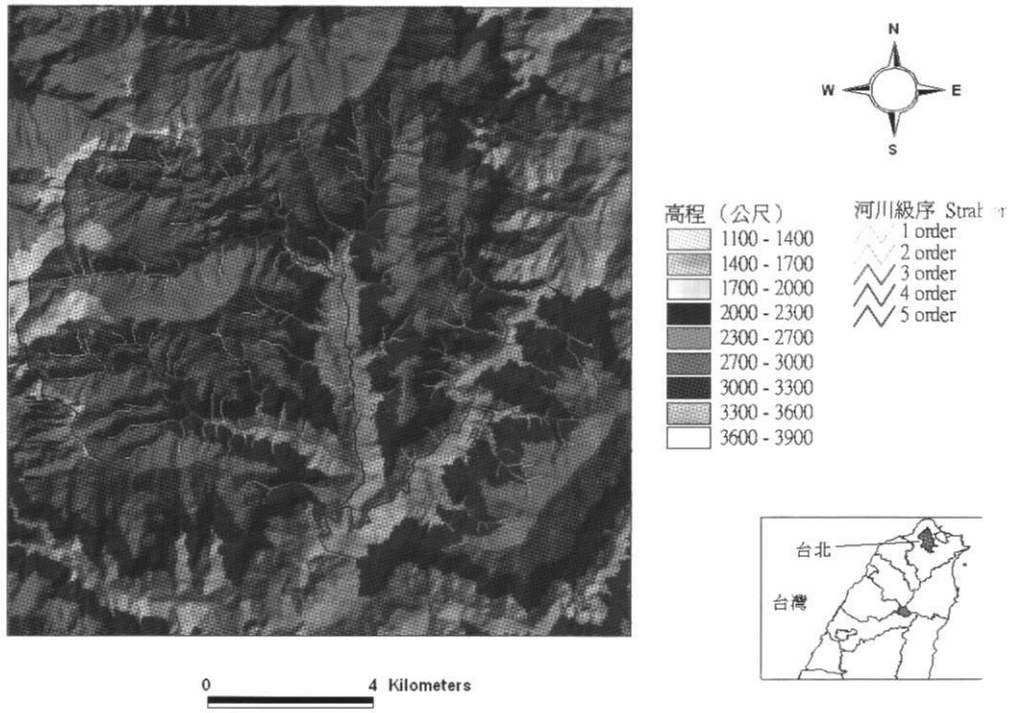


圖 3　七家灣溪集水區地形圖

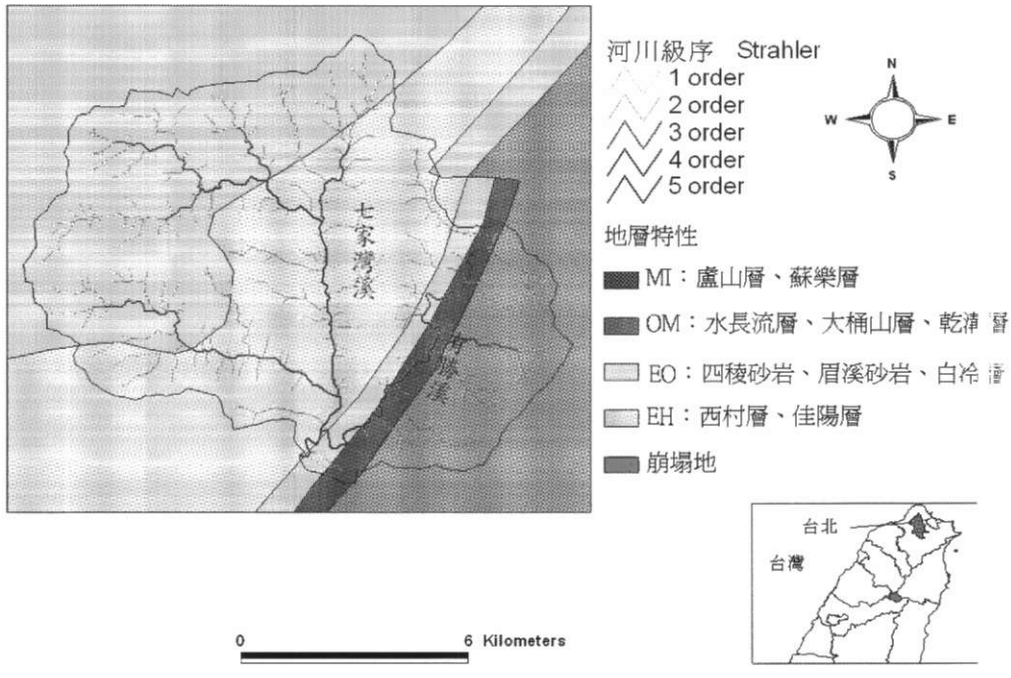


圖 4　七家灣溪地層組成與崩塌地分佈圖

(五)研究架構

具體的研究架構以圖 5 表示，在地形分析方面，利用數值地形模型可有效析取出比集水面積，並利用三次加權法的坡度計算方法析取各網點的坡度值 (黃誌川等，2001)，崩塌地資料是由航空照片判釋後在數化成 GIS 圖層 (德基水庫集水區管理委員會，1994)。至於植生與地質資料則分別以下列兩個方案處理，再比較模擬結果。

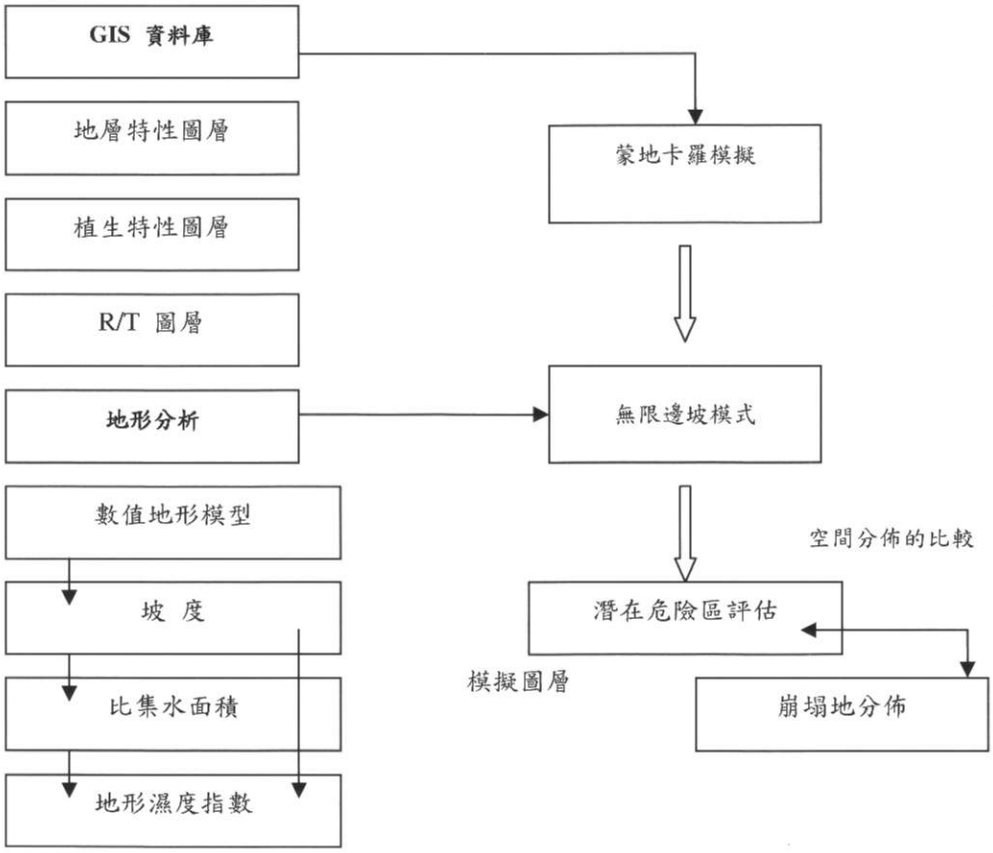


圖 5　研究架構圖

方案一：

不考慮植生覆蓋與地質特性的空間變異性，僅探討參數 C、R/T、φ 的整體變化，三個參數的特性如下表所示：

表 1　方案一之參數特性與值域分佈

參數名稱	參數意義	值　域	統計分
C	土壤與植生內聚力強度的總和，[無因次]。	0～0.6	均等分
R/T	受降雨強度與土壤輸水性影響，主要在估計孔隙水壓的作用強度，[L/L^2]。	0.54/5440～0.54/40	均等分
φ	岩體的內摩擦角，爲岩體抵抗下滑的抗剪強度，[度]。	20～50	均等分

由於地層內摩擦角隨著岩石的特性、不連續面的密度及風化的程度而會有很大的變異，因此參考本土實驗數據，根據 Pack *et al.* (1998) 的建議，以較大的值域 (20～50) 爲模擬的起始基準，進行校準的工作。而 C 值則採 Pack *et al.* (1998) 的建議值 0～0.6。$\frac{R}{T}\cdot\frac{a}{\sin\theta}$ 值爲估計孔隙水壓之參數，其上限爲 1 (此時會產生漫地流)；其值域因地而易。以本區而言，在 DEM 爲 40 公尺的解析度下，分水嶺部分之格點的集流面積即爲本身網格的面積，換算爲比集水面積爲 40 m^2/m。而一級河源頭之集水面積 (飽和狀態) 約爲 136 格點 (詹仕堅等，2000)，換算爲比集水面積約爲 5440 m^2/m，本研究區本研究區之平均坡度爲 67%轉化爲正弦值爲 0.54。因此，*R/T* 值的值域取 0.54/5440～0.54/40 之間。

方案二：

將地質與植生的條件加入考慮，考量每個地層岩體的內摩擦角，並利用法國 SPOT 衛星影像值估得常態化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 作爲土壤與植生內聚力的加權。NDVI 值之計算方法如下所示：

$$NDVI=(IR-R)/(IR+R) \qquad (10)$$

IR 爲近紅外光；*R* 爲紅光。NDVI 的值域落於-1.0～1.0 之間，所求得 NDVI 值愈大顯示地表植物生長愈旺盛、植被覆蓋越佳 (黃國禎等，1996)，此指數也經常使用在植物族群、土地覆蓋或植物覆蓋密度的分類 (Franklin *et al.*, 2000; Wheatley *et al.*, 2000)。因此本研究利用 NDVI 指數計算土壤與植生內聚力的權重值，將 NDVI 值轉爲-0.1～0.1 之間再與模擬的 *C* 值相加，以代表各格點植生作用強度的空間分佈，各參數值之特性與值域如表 2 所示。

表 2　方案二之參數特性與值域分佈

參數名稱	參數意義	值　域	統計分
C	土壤與植生內聚力強度的總和，NDVI 指數提供正負 0.1 的變化，[無因次]。	0.1～0.5	均等分
R/T	受降雨強度與土壤輸水性影響，主要在估計孔隙水壓的作用強度，[L/L^2]。	0.54/5440～0.54/40	均等分
MI-φ	廬山層的內摩擦角，抵抗下滑的抗剪強度，[度]。	20～50	均等分
OM-φ	水長流層的內摩擦角，抵抗下滑的抗剪強度，[度]。	20～50	均等分
EO-φ	四稜砂岩的內摩擦角，抵抗下滑的抗剪強度，[度]。	20～50	均等分
EH-φ	西村層的內摩擦角，抵抗下滑的抗剪強度，[度]。	20～50	均等分

分別將方案一與方案二中的各參數利用隨機變數生產器產生 10,000 組的參數組合，分別帶入無限邊坡模式，計算各格點的安全係數，將每次模擬結果與實際崩塌地資料作比對，分別計算每次結果之正確率。

結果與討論

圖 6 爲方案一模擬一萬次後的結果，顯示出單獨考慮任一參數無法看出該參數對整體正確率的影響程度，以 *C* 值爲例，趨勢上是 *C* 值越小正確率高，但仍有許多很小的 *C* 值但正確率偏低的情況。由 *C*、φ 與正確率的關係，可以發現此兩參數間可能具有相關性，而 *T/R* 值則否。這點表示：一地區是否爲潛在危險區，絕大半部分由植生與土體與植生的內聚力 (*C*)，其次爲岩壤內摩擦角 (φ) 與地形決定。而降雨強度與土壤輸水性 (*R/T* 值) 扮演著觸發者的角色，對於本身穩定度不高的邊坡往往是觸發其崩塌的重要機制 (徐美玲，1995a、1995b)。在一萬次的模擬中，正確率最高可達 100.00% (參數組合爲：*C*=0.06、*T/R*=204.01、φ=23.07、危險區面積=90.78 平方公里)，顯示此組參數可將實際崩塌的位置確實評估出來，然而此組參數的 *C* 值與 φ 值偏低，幾乎將全區評爲潛在危險區，有過度高估之現象。經營管理單位對於治山防洪與坡地災害防治，一方面希望有效避免災害的發生，另一方面卻希望運用最少的資源去進行相關防制措施；易言之，邊坡穩定的正確度與效益必須同時考量。因此，爲取得比較客觀的正確率，本研究參照實際崩塌地面積佔研究區的面積比例 (2.19%)，僅挑選評估不穩定邊坡面積佔研究區比例不超過 5%的模擬結果進行正確率的評估。在此條件下，選取 100 組較佳的參數組合來作爲值域析取的標準 (圖 7)；其中最理想的參數組合爲：*C*=0.105、*T/R*=1839.8、φ=47.78、正確率=64.0%，模擬結果見圖 9 左，參數析取之值域，見表 3。

表 3　方案一、二之參數特性比較表

參 數		最佳值	中位數	標準差	值域下限	值域上限
方案一	*C*	0.105	0.133	0.10	0.03	0.51
	T/R	1839.8	2611.95	2540.83	573.94	9778.39
	φ	47.78	44.38	5.07	20.02	48.37
方案二	*C*	0.241	0.202	0.07	0.03	0.39
	T/R	970.02	2203.74	1523.44	625.53	5798.37
	MI-φ	24.75	29.65	6.99	21.58	48.00
	OM-φ	28.82	33.75	9.01	22.89	47.47
	EO-φ	36.97	41.83	5.21	28.44	48.09
	EH-φ	39.19	42.27	5.66	28.09	48.73

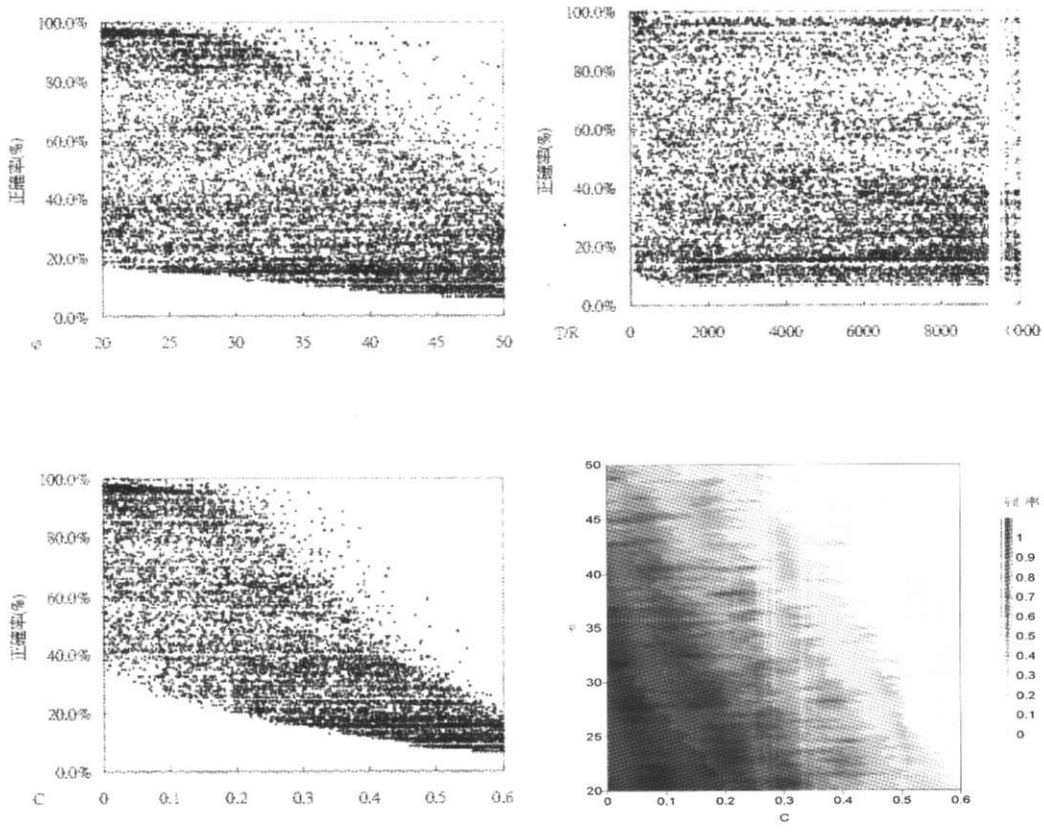


圖 6　方案一正確率之參數分佈結果

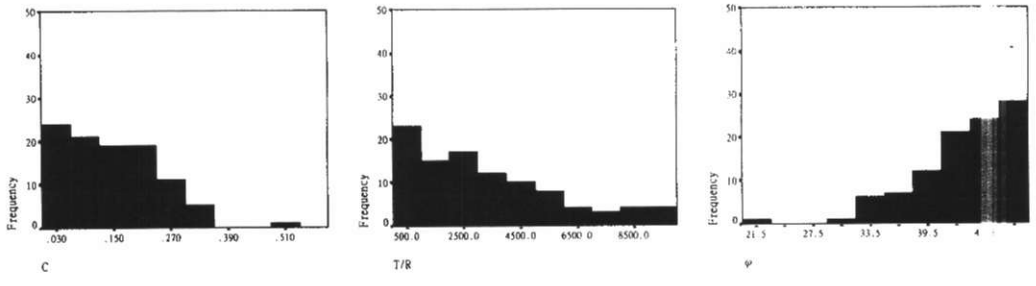


圖 7　方案一中最佳參數組合之次數分配圖

另外，使用方案二的評估方式，獲得最佳的參數組合爲：*C*=0.241、*T/R*=970.02、MI-φ=2 75、OM-φ=28.82、EO-φ=36.97、EH-φ=39.19、正確率=76.40%，模擬結果見圖 10 左，最佳 100 組參數的

次數分佈見圖 8，圖中清楚地說明了兩件事：1.利用 NDVI 指數可以有效地凸顯植生與土體內聚力 (*C*) 空間變異所產生的效應，提高模式評估的正確率；2.某些地質分區的內摩擦角 (φ) 有明顯的值域分佈，尤以 EO (四稜砂岩、眉溪砂岩、白冷層) 與 EH (西村層、佳陽層) 最爲顯著。

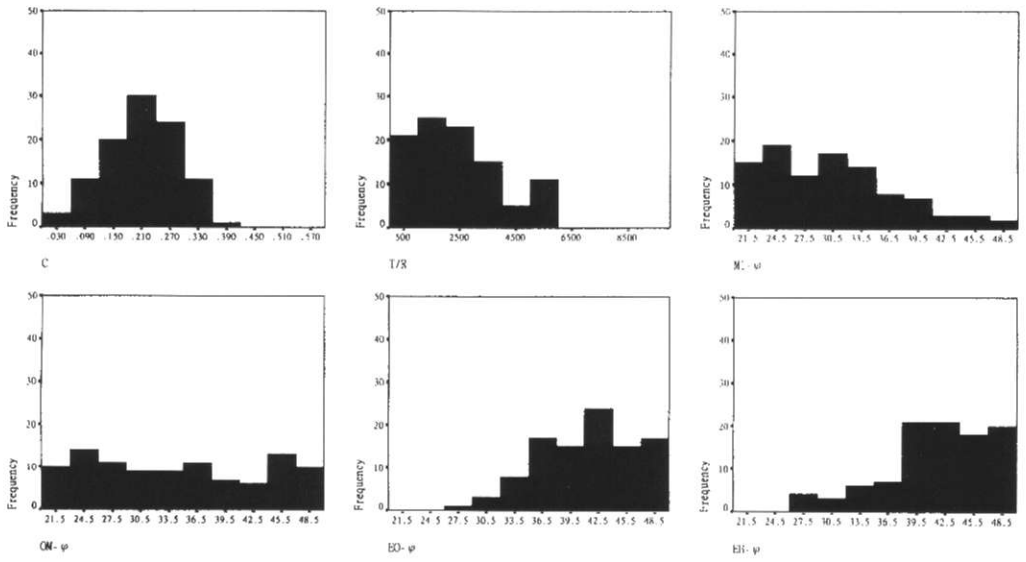


圖 8 方案二中最佳參數組合之次數分配圖

表 3 爲方案一與方案二最佳參數之特性比較。由此表中可以看出方案二中的 *C*、EH-φ、EO-φ 所析取出來的值域比方案一來得集中，顯示出此三個參數的重要性，也表示利用 NDVI 指數作爲土體與植生內聚力 (*C*) 的加權與分別評估各地層內摩擦角 (φ) 的考量，不但有助於參數的合理析取，更能提升模式評估的正確性。

若從個別崩塌地的角度來看，將每個崩塌地在方案一與方案二的最佳 100 組參數組合的模擬結果是否推估成功的比例作爲推估成功率，依每個崩塌地的推估成功率分三級（低：<35%、中：35～70%、高：>70%），然後統計各地層崩塌地的評估結果 (表 4)。發現方案二對各地層崩塌地皆有改善，以 EO、EH 與 MI 的地層不穩定邊坡的推估有較爲明顯的改善，顯示不穩定邊坡的推估有必要將個別地層特性納入考慮。

表 4　方案一、二之參數特性與推估成功率比較表

地層與方案	MI (27)		OM (11)		EO (72)		EH (14)	
推估成功率	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二
低 (0~35%)	77.78%	37.04%	100%	90.90%	27.78%	23.61%	85.7%	71.43%
中 (35~70%)	22.22%	33.33%	0 %	9.09%	13.89%	6.94%	7.14%	14.29%
高 (70~100%)	0 %	29.63%	0 %	0 %	58.33	69.44%	7.14%	14.29%

*( ) ：表示該地層的崩塌地個數

由圖 9 左與圖 10 左的空間位置與表 4 綜合比較可發現將地質條件加入評估後，可大幅提高 MI (廬山層、蘇樂層) 潛在危險區的正確率，並降低對 EH (西村層、佳陽層) 不穩定邊坡的過度高估，並提高 EO (四稜砂岩、眉溪砂岩、白冷層) 不穩定邊坡的推估成功率。

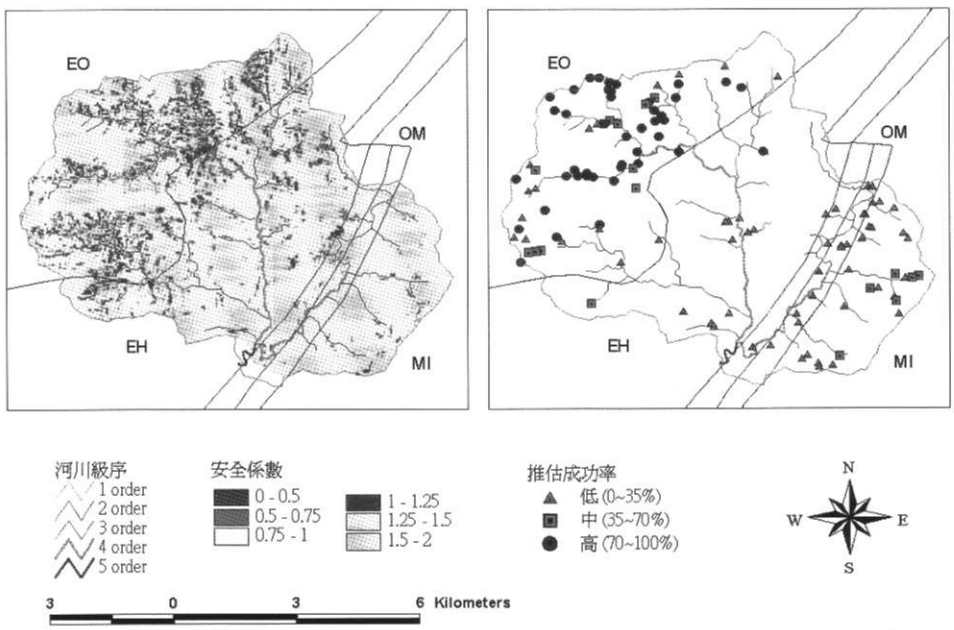


圖 9　根據方案一參數組合 (C=0.105、T/R=1839.7、φ=47.78) 之崩塌地評估結果

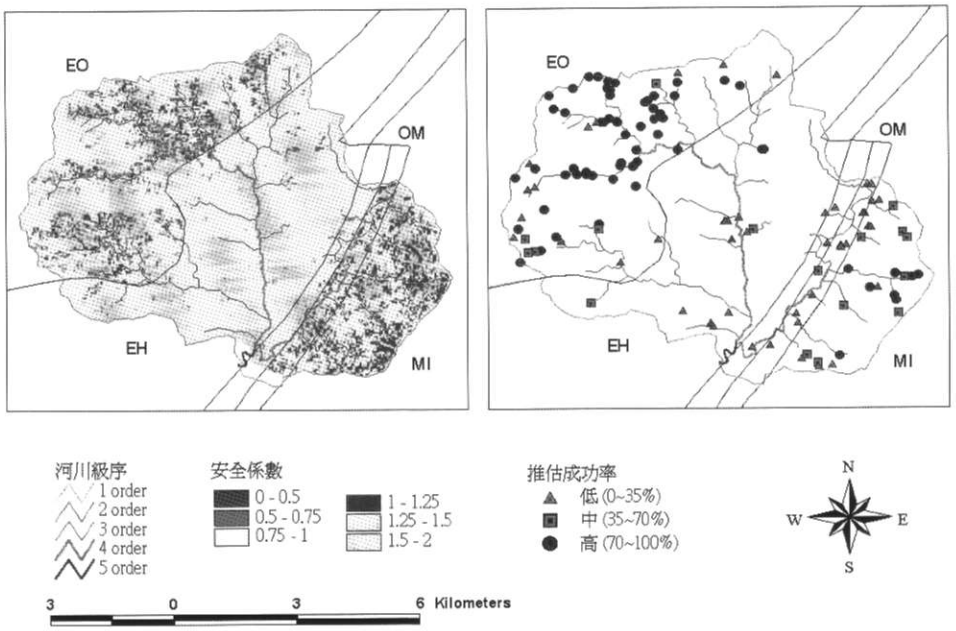


圖 10　根據方案二參數組合（C=0.241、T/R=970.02、MI-φ=24.75、OM-φ=28.82、EO-φ=36.97、EH-φ=39.19）之崩塌地評估結果

若空間位置而言，MI 大多屬於有勝溪流域，該流域也是溫帶果樹與高冷蔬菜高密度種植的地方，人爲干擾強烈，崩塌地多屬於零星、散佈的狀況且多位於河谷附近，因此這些崩塌地可能是道路修築、人爲整地以及河道側蝕的結果，因此預測結果較不理想，這部分必須進行較爲詳盡的地面觀測，並提高數值地形資料精度才能有效掌握崩塌地的分佈。

若單純就崩塌地的位置而言，本研究區的河谷大多低於 2,300 公尺左右，因此選取 2,300 公尺以上的崩塌地共 72 個，則方案一中有 67.0%的崩塌地可以成功推估，見圖 9 右；方案二則有 76.8%的崩塌地可以推估成功，見圖 10 右。

結　論

本研究以地理資訊系統、衛星影像與數值地形模型爲基礎，利用蒙地卡羅模擬各種參數組合，以無限邊坡模式推估出邊坡穩定性，以劃設森林集水區的潛在危險區。初步評估方案一與方案二，結果顯示其正確率分別爲 64%與 76%，且加入 NDVI 指數與各地層特性的考量後有助於參數值域的析取；若將最佳 100 組的參數組合的模擬結果與各崩塌地是否推估成功做比較，則方案二對於分佈在 MI 及 EO 地層不穩定邊坡的預測有顯著的改善。若剔除複雜的河道作用影響，僅選取高度在 2,300 公尺以上的區域，共計 72 個崩塌地，則方案一的崩塌地推估成功率達 67.0%，方案二高達 76.8%，顯示本模式對於崩塌地的推估有不錯的表現。具體結論歸納如下：

(一)本模式成本低廉，並能提供相當正確的資訊以利未來相關治山防洪設施之規劃與設計。

(二)臺灣地區地層脆弱、複雜，加上山區土壤淺薄，地層特性對邊坡穩定性的影響甚鉅，須加以考慮。

(三)臺灣山區森林覆蓋尚稱完整，土壤、植生內聚力與 NDVI 指數確實具有明顯的相關。

(四)對於人為活動頻仍的地區，如區內存在許多溫帶果樹與高冷蔬菜的有勝溪集水區，崩塌地的形成原因更加複雜，如欲改善推估結果則應輔以詳實的地面觀測。

(五)潛在危險區的正確性評估法值得進一步研究，未來的評估準則必須將非崩塌地面積過小的問題納入考量，同時必須能夠有效評量錯估樣本的原因。

謝　辭

感謝國科會的經費支持，計畫編號：NSC 90-2621-Z-002-018。對於 David Tarboton 提供的 SIMAP 原始碼和德委會所提供的七家灣溪相關資料，筆者於此一併致謝。

引用文獻

李民、張徽正、劉憲德、陳宏仁、高銘健（2000）陳有蘭溪流域山崩地質特性，臺灣山崩災害專輯（一），經濟部中央地質調查所，47-68。

徐美玲 (1995a) 坡地土壤孔隙水壓動態空間分佈預測模式，國立臺灣大學地理學系地理學報 18: 1-22。

徐美玲 (1995b) 預測潛在岩屑滑崩的網格式數值地形模式，國立臺灣大學地理學系地理學報 19: 1-16。

黃國楨、王韻皓、焦國模 (1996) 植生指標於 SPOT 衛星影像之研究，臺灣林業 22 (1): 45-52。

黃誌川、徐美玲 (2001) 網格數值地形 (DTM) 的解析度以不同坡度計算方法之比較，中華水土保持學報，32 (3): 199-205。

詹仕堅、孫志鴻 (2000) 網格式數值高程模型擷取河系集流閾值之探討，國立臺灣大學地理學系地理學報 28: 27-45。

德基水庫集水區管理委員會 (1994) 德基水庫集水區土地利用變遷分析及資訊系統之建立（總報告），經濟部。

Binley, A. M., and Beven, K. J. (1991) Physically-based modeling of catchment hydrology: a likelihood approach to reducing predictive uncertainty. In Farmer, D. G., and Rycroft, M. J. (eds.) *Computer Modelling in the Environmental Sciences,* IMA Conference Series, Clarendon Press, Oxford, 75-88.

Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979) A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin,* 24: 43-69.

Beven, K. J., and Binley, A. M. (1992) The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes,* 6: 279-298.

Dietrich, W. E., Wilson, C. J., and Reneau, S. L. (1986) Hollows, colluvium and landslides in soil-mantled landscapes. In Abrahams, A. D. (eds.) , *Hillslope Processes.* London: Allen & Unwin, 361-388.

Dietrich, W. E., Wilson, C. J., Montgomery, D. R., McKean, J., and Bauer, R. (1992) Channelization thresholds and land surface morphology. *Geology,* 20: 675-679.

Dietrich, W. E., Wilson, C. J., Montgomery, D. R., and McKean, J. (1993) Analysis of erosion thresholds and land surface morphology. *Geology* 101: 259-278.

Dietrich, W. E., Reiss, R., Hsu, M. L., Montgomery, D. R. (1995) A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes* 9: 383-400.

Duan, J. and Grant, G. E. (2000) Shallow Landslide Delineation for Steep Forest Watersheds Based on Topographic Attributes and Probability Analysis. In Wilson, J. P., and Gallant, J. C. (eds.) *Terrain Analysis – Principles and Applications*. John Wiley & Sons, New York, 311-329.

Franklin, J., McCullough, P., and Gray, C. (2000) Terrain Variables Used for Predictive Mapping of Vegetation Communities in Southern California. In Wilson, J. P., and Gallant, J. C. (eds.) *Terrain Analysis – Principles and Applications*. John Wiley & Sons, New York, 311-329.

Grayson, R. B., Moore, I. D., and McMahon, T. A. (1992a) Physically based hydrologic modeling, 1: A terrain-based model for investigative purposes. *Water Resources Research,* 28: 2639-2658.

Grayson, R. B, Moore, I. D., and McMahon, T. A. (1992b) Physically based hydrologic modeling, 2: Is the concept realistic ? *Water Resources Research,* 28: 2659-2666.

Hammond, C. D., Hall, D., Miller, S., and Swetik, P. (1992) *Level I Stability Analysis (LISA): Documentation for version 2.0.* Ogden, UT: United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station General Technical Report No. 285.

Montgomery, D. R., and Foufoula-Georgiou, E. (1993) Channel networks source representation using digital elevation models. *Water Resources Research,* 29: 3925-3934.

Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1994) A physically based model for the topographic control on the shallow landsliding. *Water Resources Research* 30: 1153-1171.

Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., and Sullivan, K. (1998) The Role of GIS in Watershed Analysis, In Lane, S. N., Richards, K. S., and Chandler, J. H. (eds.) *Landform Monitoring, Modeling and Analysis,* John Wiley & Sons, New York, 241-261.

Moore, I. D., Burch, G. J., and MacKenzie, D. H. (1988) Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,* 31: 1098-1107.

Okimura, T., and Ichikawa, R. (1985) A prediction method for surface failure by movements of infiltrated water in a surface soil layer. *Natural Disaster Science,* 7: 41-51.

O'Loughlin. E. M. (1986) Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research,* 22: 794-804.

Pack, R. T., Tarboton, D. G. and Goodwin, C. N. (1998) The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping. *Congress of the International Association of Engineering Geology*, Vancouver, British Columbia, Canada, 21-25 September 1998.

Pack, R. T., Tarboton, D. G., and Goodwin, C. N., (2001) Assessing Terrain Stability in a GIS using SI MAP, *15th annual GIS conference, GIS 2001*, Vancouver, British Columbia, February 19-22.

Salas, J. D., (1993) Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series, In David R. Maidmen (eds.) *Handbook of Hydrology,* McGraw-Hill, New York, 19.60-19.62.

Schuster, R. L., and Krizek, R. J. (1978) Landslide: analysis and control. *Transportation Researcl Board Special Report* 176: 1-10.

Sidle, R. C., Pearce, A. J., and O'Loughlin, C. L. (1985) *Hillslope Stability and Landuse*, Washingt n. DC: American Geophysical Union, Water Resource Monograph No. 11.

Sidle, R. C. (1991) A conceptual model of changes in root cohesion in response to vegetation mana ment. *Journal of Environmental Quality,* 20: 43-52.

Sidle, R. C. (1992) A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. *Water Re ources Research,* 28: 1897-1910.

Ward, T. J. (1976) *Factor of safety approach to landslide potential delineation.* Ph. D. Thesis, Colora o State University.

Ward, T. J., Li, R., and Simons, D. B. (1978) Landslide potential and probability considering randon ess of controlling factors. In *Proceedings of the International Symposium on Risk and Reliability i Water Resource,* Waterloo, Canada, 26-28 June 1978. Waterloo: University of Waterloo, 592-608.

Ward, T. J., Li, R., and Simons, D. B. (1982) Mapping landslide hazards in forest watersheds. *Transac ons of the American Society of Civil Engineers,* 108: 319-324.

Ward, T. J. (1985) Computer-based landslide delineation and risk assessment procedures for mana ement planning. In *Proceedings of a Workshop on Slope Stability: Problems and Solutions in Forest Management,* 51-57.

Wheatley, J. M., Wilson, J. P., Redmond, R. L., Ma, Z., and DiBenedette, J. (2000) Automated Lanc Cover Mapping Using Landsat Thematic Mapper Images and Topographic Attributes. In Wilson, J. P., and Gallant, J. C. (eds.) *Terrain Analysis – Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Nev York, 311-329.

Wu, W. and Sidle, R. C. (1995) A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Re ources Research,* 31: 2097-2110.

Zhang, W. H., and Montgomery, D. R. (1994) Digital elevation model grid size, landscape representati n, and hydrological simulation, *Water Resources Research,* 30: 1019-1028.

91 年 6 月 14 日　收稿
92 年 3 月 19 日　修正
92 年 4 月 10 日　接受