airiti Library

本文章已註冊DOI數位物件識別碼

羅吉斯回歸與不安定指數應用於塊體崩壞敏感度評估比較—以台東縣海端鄉為例

Comparison of Mass Wasting Susceptibility Evaluation for Haiduan Township in Taitung County: Logistic Regression and Instability Index

doi:10.29972/BGSC.201212.0004

中國地理學會會刊, (49), 2012

Bulletin of the Geographical Society of China, (49), 2012

作者/Author： 洪政耀(Cheng-Yao Hung);林雪美(Hsueh-Mei Lin)

頁數/Page： 77-103

出版日期/Publication Date：2012/12

引用本篇文獻時，請提供DOI資訊，並透過DOI永久網址取得最正確的書目資訊。

To cite this Article, please include the DOI name in your reference data.

請使用本篇文獻DOI永久網址進行連結:

To link to this Article:

http://dx.doi.org/10.29972/BGSC.201212.0004

DOI Enhanced

DOI是數位物件識別碼（Digital Object Identifier, DOI）的簡稱，
是這篇文章在網路上的唯一識別碼，
用於永久連結及引用該篇文章。

若想得知更多DOI使用資訊，

請參考 http://doi.airiti.com

For more information,

Please see: http://doi.airiti.com

請往下捲動至下一頁，開始閱讀本篇文獻

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

最完整的學術整合查詢平台—華藝線上圖書館 ● http://www.airitilibrary.com ● Find more academic articles on Airiti Library

airiti

羅吉斯回歸與不安定指數應用於塊體崩壞敏感度評估比較-以台東縣海端鄉為例

Comparison of Mass Wasting Susceptibility Evaluation for Haiduan Township in Taitung County: Logistic Regression and Instability Index

洪政耀 Cheng-Yao Hung*　林雪美 Hsueh-Mei Lin**

Abstract

The occurrence of mass wasting is common in the mountains of Taiwan Island, due to the typical tectonic structure trigger earthquake and heavy precipitation from the seasonal plum-rains and typhoons. The rapid increase of population and demand of more usable land also result in development expanding into marginal land, therefore posts further negative impact on the hillside environment. The purpose of this study is to establish a current mass wasting susceptibility map of which Haiduan township, which will provide important baseline data for future studies in landslide risk reduction and land-use planning. The analysis of mass wasting susceptibility can be conducted through direct or indirect approach. The direct approach is considered more subjective and less reliable. Therefore, this study takes the indirect approach ofbivariate and multivariate statistical analyses to evaluate mass wastingsusceptibility, specifically,the analysis of Instability Index and logistic regression model.

Seven geographic factors are included in the analysis as covariates: lithology, slope angle, aspect, elevation, land use, distance to river, and distance to road.The results indicate an overall correctness rate of 61.09% for the instability index, and 75.72% for the logistic regression model. In the studies ofreceiver-operating characteristic (ROC) curve, theratio of area-under-curve (AUC) is 0.6673 for the instability index and 0.8836 for the logistic regression model. These results suggest thatthe logistic regression model is a preferred method than instability

* 國立臺灣師範大學地理學系博士候選人

Ph.D. candidate,Department of Geography, National Taiwan Normal University.

** 國立臺灣師範大學地理學系教授 (通訊作者)

Professor, Department of Geography, National Taiwan Normal University, Corresponding author.

airiti

index in the assessment of mass wasting susceptibility.

Keywords：Logistic regression, Instability Index, Mass wasting, classification error matrix, ROC

摘　要

台灣山區地形多樣複雜、地質脆弱，再加上雨量多集中在梅雨與夏季颱風所帶來的豪雨，使台灣山區常見塊體崩壞現象發生。另外，台灣人口快速的增加，土地利用的急切需求，促使邊緣環境地帶的快速發展，造成近年來坡地災害逐漸上升。為預防坡地災害的發生與國土規劃利用，繪製塊體崩壞敏感度地圖評估環境最敏感地區，以及調查敏感之因，著手進行防護措施，才能降低災害的發生。一般塊體崩壞敏感度的分析方法主要分為二大類群，即是直接與間接技術。由於直接式的方法過於主觀的，導致各專家所分析出來的敏感度有很大的差異。故使用二元分類統計方法、多變量統計等間接式方法，包含：不安定指數法與羅吉斯回歸等，並結合地理資訊系統完成屬性資料與基本環境圖層之建立。接著，利用不安定指數與羅吉斯回歸統計分析方法，完成海端鄉塊體崩壞敏感度評估，並比較二者方法之間的差異。

本研究選定坡度、坡向、高程、土地利用、地質、河流距離、道路距離等7項作為敏感度評估變數。研究結果顯示不安定指數法在全區塊體崩壞的整體正確率約為61.09%；羅吉斯回歸模式則是75.72%。另外，ROC 曲線下之 AUC 值，羅吉斯回歸模式的0.8836優於不安定指數的0.6673，以上顯示羅吉斯回歸模式在判釋正確率上優於不安定指數法。

關鍵字：羅吉斯回歸、不安定指數、塊體崩壞、分類誤差矩陣、ROC曲線

前　　言

根據世界銀行2005年刊行 Natural Disaster Hotspots - A Global Risk Analysis，台灣曝露於兩種或以上的自然災害下之人口與面積比例均為世界之冠，主要是因為台灣本身地處歐亞大陸與太平洋板塊交界帶，為島弧地質背景島嶼，山地面積佔約國土70%。地形多樣複雜、地質脆弱，山區的地勢陡峭，再加上又位在副熱帶季風氣候區，天氣型態複雜而多變，雨量多集中在梅雨與夏季颱風所帶來的豪雨，使具有高度敏感自然環境的台灣山區更常見塊體崩壞現象發生。人文環境方面，因為工業經濟的發展，台灣人口的增加、社會型態的轉變和邊緣環境地帶的快速發展，使台灣原本高山、陸地面積不大，地形陡峭

airiti

的自然環境，坡地災害近年來逐漸上升(林雪美，2004)，顯然台灣也是一個坡地災害好發的地區。

儘管台灣是一個坡地災害好發地區，但各地區敏感程度不一，尤其是山地偏遠地區，可能是環境最敏感地區。吳杰穎與江宜錦 (2008) 以防災工程與防災人力等自然災害脆弱度指標、災害頻率與淹水潛勢面積等災害損失指標、人員傷亡與農林漁牧經濟損失等災害管理指標，結果得出台東縣為五個脆弱度指數最高的縣市，又以偏遠鄉鎮為最，是環境最敏感、人文環境最脆弱的地區。

為預防坡地災害的發生與國土規劃利用，調查易塊體崩壞地區，建立塊體崩壞敏感度地圖顯然是一個相當重要的任務。繪製塊體崩壞敏感度地圖是為了評估環境最敏感地區，以及調查敏感之因，才能著手進行防護措施，以降低災害的發生。Süzen and Doyuran (2004) 提及在過去的20年之中，許多科學家試圖要評估塊體崩壞危害與產出敏感度圖，來描繪他們空間上的分布。然而，至今仍然沒有一般公認的方法，甚至應該調查的資料範圍也沒有一定。儘管在方法上與操作上不同，但所有方法的提出都是基於一個基礎概念模式。第一，需要確定且繪製一個與邊坡不穩定直接或間接相關的地質—地形因素圖。然後，需要包含這些因素對邊坡破壞相對貢獻的評估與地表不同敏感程度分級兩者 (Süzen and Doyuran, 2004)。塊體崩壞敏感度的分析方法主要分為二大類群，即是直接與間接技術 (Carrara *et al.*, 1995)。直接式的方法包含詮釋法途徑 (heuristic approaches)，例如：以地形的條件繪製易發生塊體崩壞地區的地圖，一般認為這些方法是主觀的，原因在於大多數都是依據專家的意見所製作而成的，判斷無法客觀呈現，導致各專家所分析出來的敏感度有很大的差異，且其他研究者也難以再製相同圖層。所以，在最近的幾十年期間，由於 GIS、RS 技術蓬勃發展，促進了敏感度與危害地圖的發展。學者們開始利用指標結合的地圖、二元分類統計方法、多變量統計方法，認知基礎的人工智慧技術發展製作塊體崩壞敏感度圖，稱之為間接式途徑。包含：不安定指數法 (Instability Index)、判別分析 (discriminant analysis)、羅吉斯回歸 (Logistic regression) 等統計方法，以及類神經網絡 (Neural network)、模糊層級分析法 (Fuzzy Analytic Hierarchy Process)、支持向量機 (Support Vector Machine) 等認知基礎的人工智慧技術方法。本研究將使用不安定指數法與羅吉斯回歸建立塊體崩壞敏感度圖，並比較驗證二種分析方法在評估塊體崩壞敏感的有效程度。

相關研究

(一) 塊體崩壞定義

塊體崩壞 (Mass Wasting) 抑或是塊體運動 (Mass Movement)，是指邊坡物質風化形成大量的碎屑，受到重力、水分、坡度以及誘發力影響之下而產生崩落滑動之現象 (何春蓀，1990；楊景春，1990；石再添，1998；Embleton and Thornes, 1979；Alexander, 1993；Cruden and Varnes, 1996；Thomas and Goudie, 2000；Crozier, 2005)，常見型態有崩塌、地滑、土石流等類型。

(二) 影響塊體崩壞的孕災因子

孕育塊體崩壞的環境有地質、高

airiti

程、塊體崩壞地面積、坡度、曲率、道路、河川、坡向、土壤、土地利用、植生度與活動性等，作為誘發塊體崩壞的孕災因子 (Alexander, 1992；Remondo *et al*., 2005；陳信雄等，2001；陳樹群等，2006)。

過去絕大多數文獻在塊體崩壞敏感度分析所需要使用的孕災因子上，並沒有一致的看法。有些學者認為與地形變數有關；有些則是考慮其他因素，如：地質或是環境特性是極為重要的因素。蘇苗彬等 (2009) 認為影響塊體崩壞的孕災因子大致可以區分為地形、地質、區位三大因子。區位因子包含：道路、河流與土地利用等。由於各地適合選用的因子各不相同，難以定義一套適用於全台各地的標準。再者，Remondo *et al*. (2003) 於西班牙 Deba 河谷的研究使用了17個變數來評估當地塊體崩壞敏感程度，結果只有五個變數被接受 (高程、坡向、坡度、地質與植被)，其它大於5個變數數量的模式並不能提供更好的結果。所以，最佳的模式並不需要使用這麼大量的變數，小心謹慎選擇變數是更重要的。所以本研究考慮地形、地質、區位三大因子，並使用最為廣泛且資料取得最容易之變數，即坡度、高程、坡向、地質、土地利用、河流距離、道路距離，作為分析敏感度之用。

1. 坡度

坡度係指邊坡的傾斜率，當邊坡愈傾斜，坡地物質向下的滑動力愈強，因此坡度陡峭與否，和塊體崩壞發生的機率有相當大的關係，從力學的觀點來看，坡度愈陡造成土層或是岩層往下移動的作用力更大，故需岩層強度愈強才能存在於陡峻的坡面，也因此產生塊體崩壞的機率才能相對較低 (陳怡睿等，2011；李嶸泰等，2012)。

2. 高程

高度差異會造成氣候之不同，進而影響植生分佈、風化種類與速率，高程愈高愈靠近山脊線處，遭受降雨沖蝕的影響則愈大 (楊明德等，2012；陳怡睿等，2011)。

3. 坡向

意即坡面的傾向，某些特定之坡向常遭受暴雨侵襲，或是向陽坡的風化程度也較背向坡強烈，所以易造成膠結不良或是高度風化的情況，容易引致塊體崩壞 (黃漢淨，2008)。

4. 土地利用

土地過度的開發與不適當的開發皆會造成邊坡的不穩定。Hufschmidt *et al*., (2005) 指出紐西蘭地區在過去因為都市化的影響快速開發土地，改變當地原始的土地覆蓋，開闢為農田、牧場、果園等用途之後，結果造成大規模的塊體崩壞發生。使得近年來因土地利用引起之邊坡環境地質災害問題逐漸受到重視。

5. 地質

本區岩層根據中央地調所調查之地質圖，大致可分為廬山層、畢祿山層、大南澳片岩為主。廬山層為新生代中新世岩層；畢祿山層為新生代始新世時期，以板岩及黝色石英質砂岩組成，並夾礫岩及砂質石灰岩與泥灰岩；大南澳片岩為古生代二疊紀時期岩層，主要以黑色片岩、綠色片岩、及結晶石灰岩等組成，並夾有矽質片岩及片麻岩，所以岩體強弱與膠結程度亦影響邊坡穩定與風化程度。另外，本區因為沒有斷層帶通過便不考慮此項變數所帶來的影響。

6. 河流距離

塊體崩壞多沿著河流而行或緊鄰河系，原因在於河流對邊坡具有掏刷坡趾的效應，以及也存在著解壓弱化兩岸邊坡岩體強度的影響，故離河流愈遠則發生塊體崩壞機率愈少，所以本研究選定河流距離為影響塊體崩壞發生的因子 (陳樹群、馮智偉，2005；楊明德等，2012)。

7. 道路距離

一般道路邊坡由於受到人為開發擾動，將邊坡坡腳去除之後，造成底部無法荷重頂部之重量，使邊坡不穩進而發生塊體崩壞 (楊明德等，2012)。

(三) 塊體崩壞敏感度評估方法

影響塊體崩壞的變數相當多，為有效評估一地環境發生塊體崩壞現象的敏感程度，逐漸發展出相當多元的評估方法，大體可分為二大類群，即是直接與間接技術 (Carrara *et al*., 1995)，在直接技術中，所有產出危害或是敏感度圖的判斷規則都是由研究者決定的，所以專家的認知是不可少的。採取這些方法一般都是應用易塊體崩壞地區的地形規則。但由於依賴製圖者的技能，所以其他研究者即便使用相同的資料要再製地圖，幾乎是不可行的，其中的原因是因為產出的地圖包含了主觀的意識。儘管他們地圖準確與製作熟練，這個方法在主觀性與專家依賴的影響程度之下，導致科學家紛紛前往統計領域挖掘有效的方法，讓統計方法的使用在近十年來有了助力。故本研究採取間接技術，評估各因素對邊坡不穩定的相對貢獻，以及依據這些因素產出一些能預測未來易塊體崩壞的地區。

不安定指數法是一種多元非線性回歸分析，為國內評估塊體崩壞敏感度常用模式之一。主要概念是以計量之觀點，於一相對關係下求出不安定指數值 (Dt) 做為整個研究區域內，不同區位環境致災之風險度高低評估指標值；主要進行各邊坡塊體崩壞影響變數之變異性，估算其影響變異值，並可依其變異值大小排列判定其影響權重比例，給予各變數不同權重之評分值，進而推導出可適性高之多元非線性數學模式。因此首先須得知模式中各變數之變異值，其變異值愈大，代表該變數影響邊坡崩塌之機率愈高 (簡李濱1992；蘇苗彬等，1998；林書毅，1998；趙振平、高玉錠，2006、2007；林雪美、洪政耀，2009；陳怡睿等，2011；洪政耀、林雪美，2012)。

判別分析屬於多變量分析方法的一種，用於解決多元回歸分析依變數需要等距尺度以上之變項困境，故判別分析依變數屬於名義或次序尺度，自變數通常為等距以上之變數。判別分析的基本原理與單因子多變量變數數分析 (MANOVA) 類似，但是 MANOVA 主要是了解各組樣本究竟在哪幾個依變數之平均數差異達到水準；至於判別分析則是透過得到觀察值在自變數之線性組合方程，以了解觀察值在依變數上分類之正確性，進而了解哪幾個自變數可以有效區分觀察值在依變數之分類 (王保進，2004；Chauhan *et al*., 2010)。

羅吉斯回歸為70年代發展出來的回歸模式，於90年代末期引進塊體崩壞敏感度研究，屬多變量對數線性回歸，早期處理依變數為類別資料的方式仍然使用線性回歸，然而，屬於類別變數的依變數只有0或1二種結果，在機率分配上屬於S型分布，與線性回歸的常態性分

airiti

配全然不同，造成分析上許多誤判與錯誤，故發展此模式是專門處理依變數為類別變數的分析。其次，王保進 (2004) 說明研究者利用判別分析時有一個很重要的基本假設，就是依變數的機率必須是常態分配，但判別分析的依變數也屬於名義變項，其常態性常是一個被質疑的問題。然而，羅吉斯回歸依變數無常態性、線性關係假設，可彌補多元回歸分析與判別分析所不足的地方。另外，羅吉斯回歸也不像認知基礎的人工智慧技術需要反覆的訓練與學習，故對於短時間評估一地塊體崩壞敏感度有其優勢，Chau and Chan (2005) 也指出目前最成熟且最普遍接受的方式為羅吉斯回歸分析。(陳樹群、彭智偉，2005；李錫堤、費立沅，2011；Nefeslioglu *et al*., 2008；Van Den Eeckhaut *et al*., 2006、2010)。

本研究將採取不安定指數法與羅吉斯回歸分析二種統計方法來評估塊體崩壞敏感程度，並驗證二種方法的有效程度，其原因有：

1. 不安定指數是一種相當簡單計算方法，利用各變數分級崩壞率的一些基本統計量，如：平均值與標準差，來建構模式，使用上相當簡便、快速；
2. 羅吉斯回歸較判別分析善於處理依變數屬於有無塊體崩壞這種二元類別的變數；
3. 不安定指數法與羅吉斯回歸兩種分析方法都屬於統計機率模式，利於比較。

研究區與研究方法

(一) 研究區概述

海端鄉位於台東縣西北端，是台東縣縣面積最大的鄉鎮，約880平方公里，同時也是山地鄉，主要為布農族原住民的活動範圍。海端鄉是一高山地區，地勢起伏大，海拔由239-3,662M，標高100公尺以下面積約占10%，介於100至1,000公尺間面積占51%，1,000公尺以上至2,000公尺之面積占27%，2,000公尺以上至3,000公尺之面積占11%，3,000公尺以上者占1%。岩層以中央地調所調查之地質圖來看，大致可分為廬山層、畢祿山層、大南澳片岩為主。廬山層為新生代中新世岩層，以黑色到深灰色的硬頁岩、板岩及千枚岩和深灰色的硬砂岩互層組成；畢祿山層為新生代始新世時期以板岩及黝色石英質砂岩組成，並夾礫岩及砂質石灰岩與泥灰岩；大南澳片岩為古生代二疊紀時期岩層，主要以黑色片岩、綠色片岩、及結晶石灰岩等組成，並夾有矽質片岩及片麻岩。雖然本區沒有活動斷層經過，但畢祿山層與大南澳片岩屬變質片岩，易受到降雨滲入飽和後而造成塊體崩壞發生。另外，本區有少許的沖積層、台地以及基性火成岩。受板塊構造擠壓的影響，坡向主要以東北、東、東南走向為主。本區坡度相當大，坡度由0°至77°，平均坡度32°為台東縣各鄉鎮之最，邊坡陡峭造成土層或是岩層往下移動的作用力更大。

在氣象上，根據中央氣象局1998-2007年的統計，每年都有一次以上達到大豪雨標準以上的颱風案例，而且根據聯合知識庫統計災害案例，顯示災害時間常常是颱風侵台時間，故此區塊體崩壞的發生與降雨因子有關。另外，洪政耀與林雪美 (2012) 利用自動降雨測站資料統計1998-2009年塊體崩壞與累積降雨量之間的關

係。大致來說，降雨量從12-950mm 都有案例的發生，不過絕大部分的案例集中在50-300mm 之間，表示本鄉極為敏感。

人文環境上，本區主要道路為台20線，是本鄉連接高雄市唯一一條公路。然而，根據聯合知識庫統計，近30年的案例逐漸增加之中 (圖1、2)，更於2009年莫拉克颱風侵襲後，沿線滿目瘡痍，梅山口至向陽一段至今還無法修復。過去農業以粟、芋頭、甘薯、豆類等主食為中心，食米的引入改變了他們的生產形態，因為他們所處的環境，無法從事水稻種植，所有食米都要向外界購入，於是改以經濟作物為主，政府的輔導也以經濟作物的栽培輔導為重心，從早期水果、紅豆，到現在的玉米、番茄、高冷蔬菜，以及茶葉的推廣。根據2010年統計，海端鄉人口戶數1,094戶，共4,512人，海端村的人口數最多1,282人，約佔所有海端鄉人口四分之一，利稻與霧鹿村人口最少，分別為351人與372人。圖2為本研究區範圍，包含災害案例的時空間分布與高程，災害案例主要集中在台20線利稻、霧鹿一段，以及摩天、向陽一帶，即便此處居住人口約700人左右，但此處的災害卻經常發生，顯然此處自然環境敏感，易受干擾。

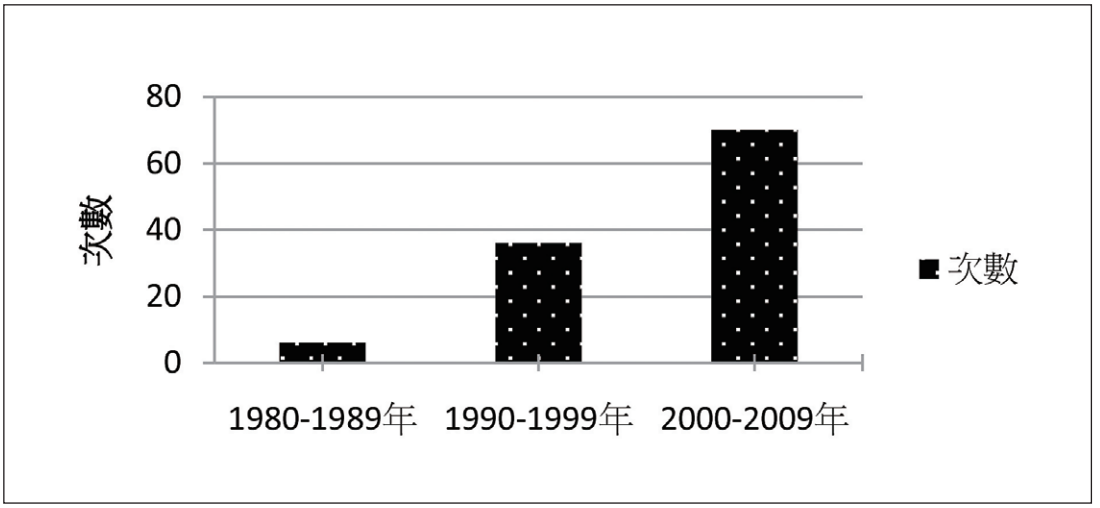

圖1　海端鄉近30年來塊體崩壞災害案例

(二) 研究方法

1. 資料的取得與建置

首先，透過任何敏感度評估現在的狀態，最好有過去危害狀態的資訊，本研究使用行政院農業委員會水土保持局於2002年更新的塊體崩壞案例，共有991個塊體崩壞繪製於本研究區內，共12.885平方公里。最小面積約1,600平方公尺；最大面積約67,000平方公尺 (圖2)。

第二個資料是地質圖與土地利用圖，二種為向量式資料，其資料屬於名義變數，變數內的屬性彼此之間沒有大小、順序差異。地質圖是根據中央地調所10萬分之一比例尺的資料所得。土地

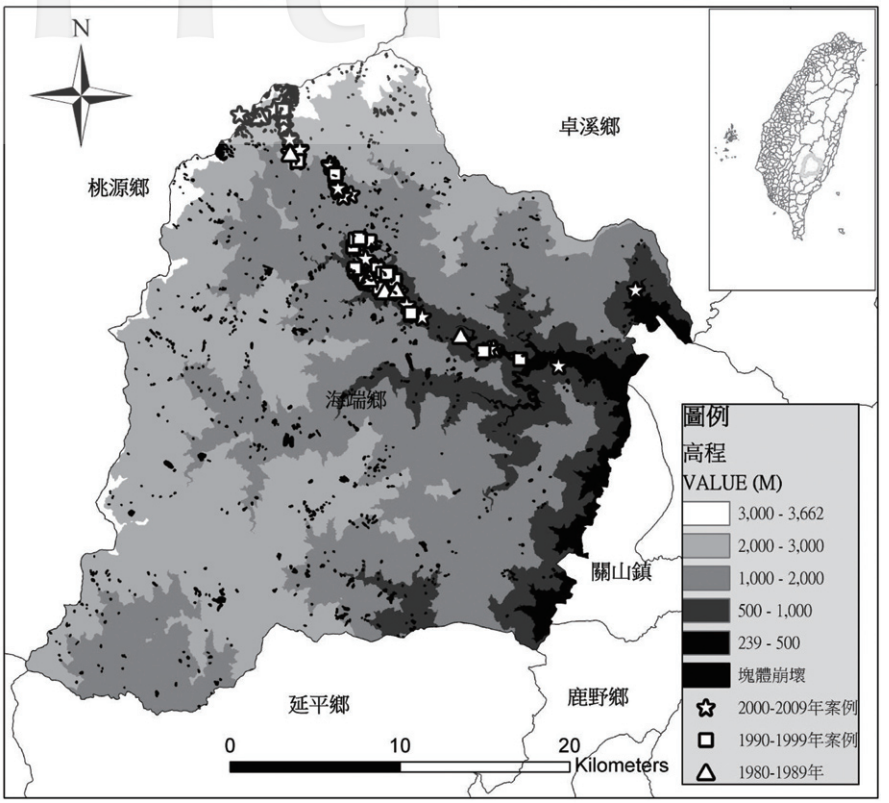

圖2　研究區地形圖

利用圖為內政部國土測繪中心根據航照、正射影像等，於2005年陸續以5千分之一比例尺繪製而成，土地利用大致上包含森林、農業、建物、道路、河流等性質 (圖3、4)。其中，將河流與道路二種土地利用分別另存 GIS 向量式圖層，再利用 GIS 計算塊體崩壞與道路、河流之間的距離，便能產出道路距離與河流距離二個圖層 (圖5、6)。

第三種資料，那就是數值地形高程圖，屬於網格式資料，網格大小為20×20公尺，其資料屬於連續變數，由此資料萃取3個變數：坡度、坡向、高程等地形變數 (圖7、8與圖2)。

選擇一個合適的地形繪製單元是塊體崩壞敏感度分析的初步階段。文獻中有許多學者討論不同的地形單元。透過他們的一致性 (consistency)、物理意義 (physical meaning) 與繪製技術三個面向來討論不同的地形單元 (Nefeslioglu *et al.*, 2008)。考量研究區的範圍以及塊體崩壞在本研究網格單元的分布，將選擇以網格作為塊體崩壞敏感度分析的地形單元。本研究區網格大小以20×20公尺為標準，共

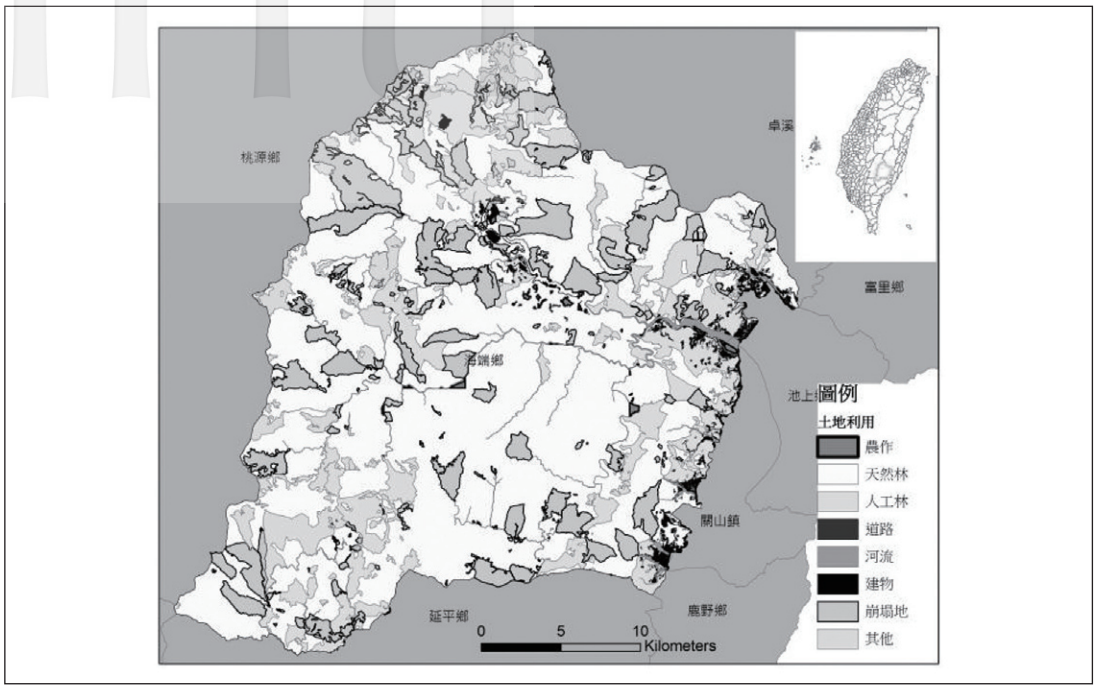

圖3　研究區土地利用圖

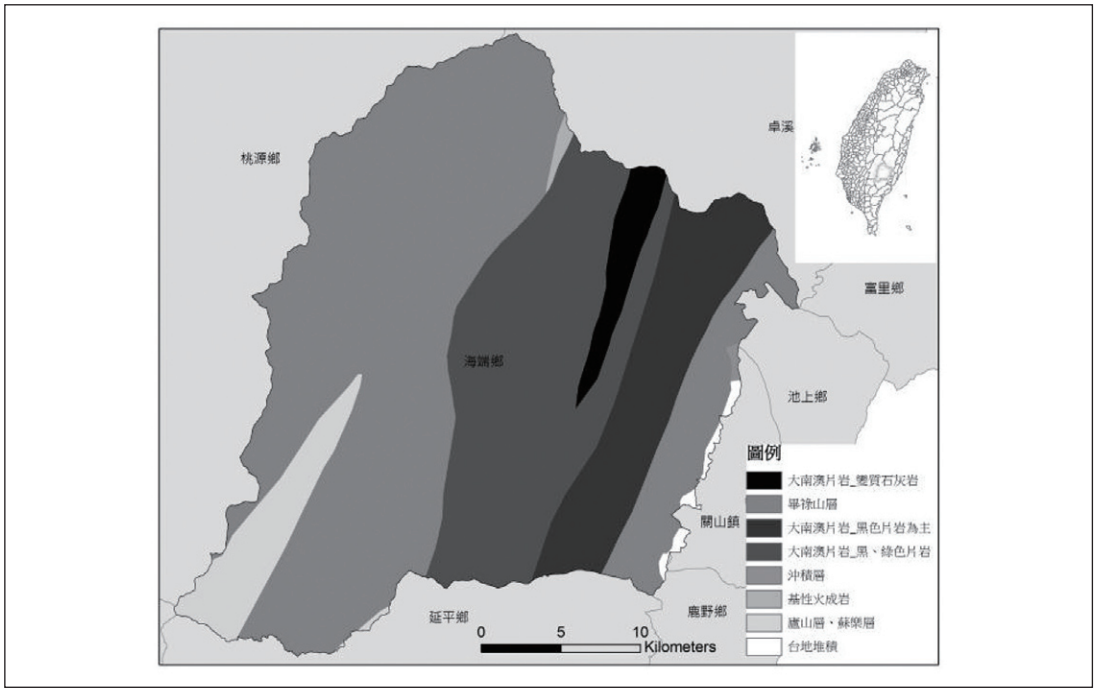

圖4　研究區地質圖

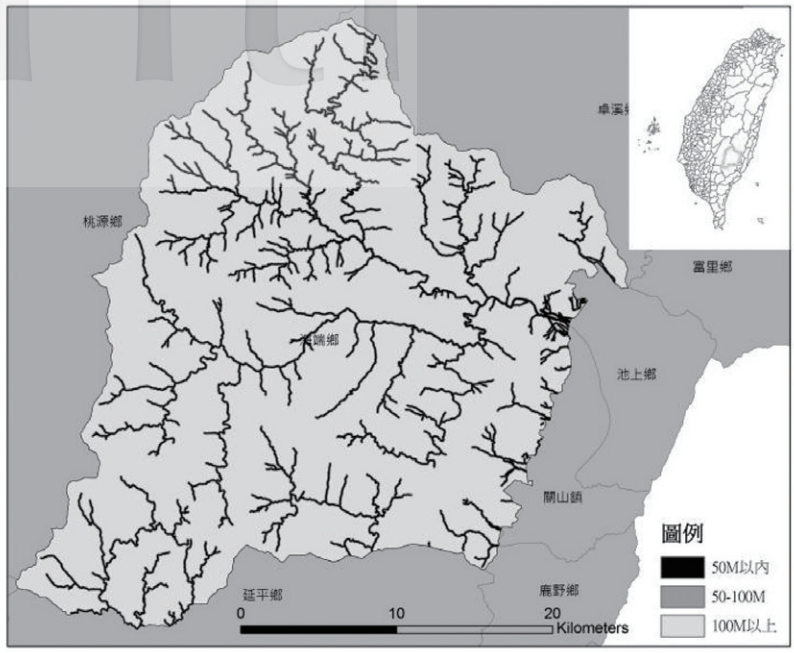

圖5　研究區河流距離圖

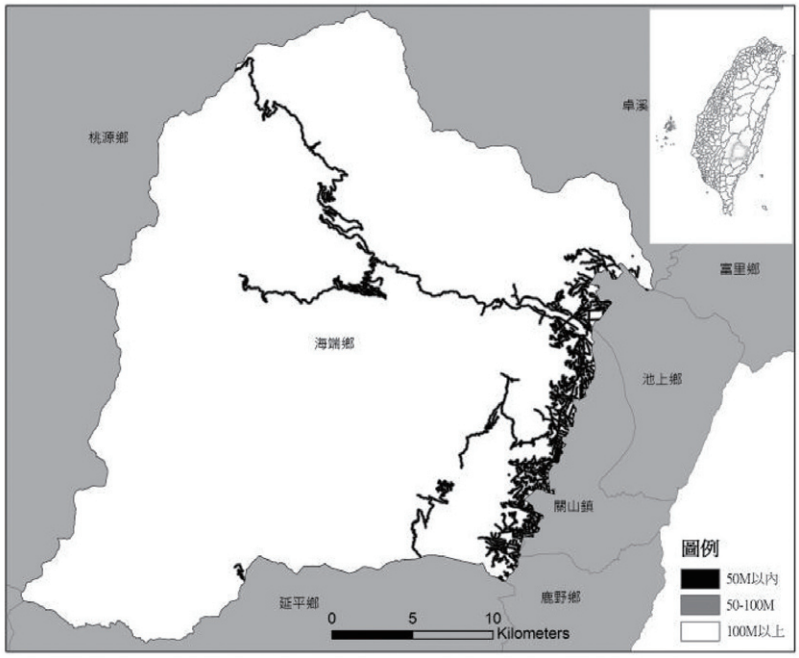

圖6　研究區道路距離圖

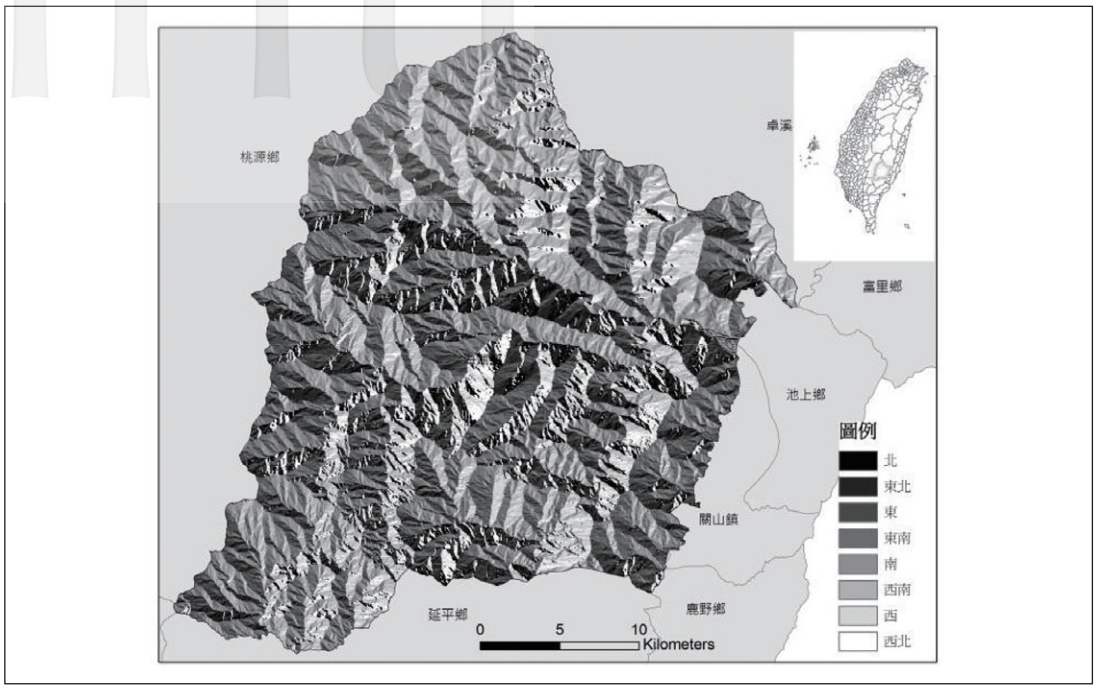

圖7　研究區坡向圖

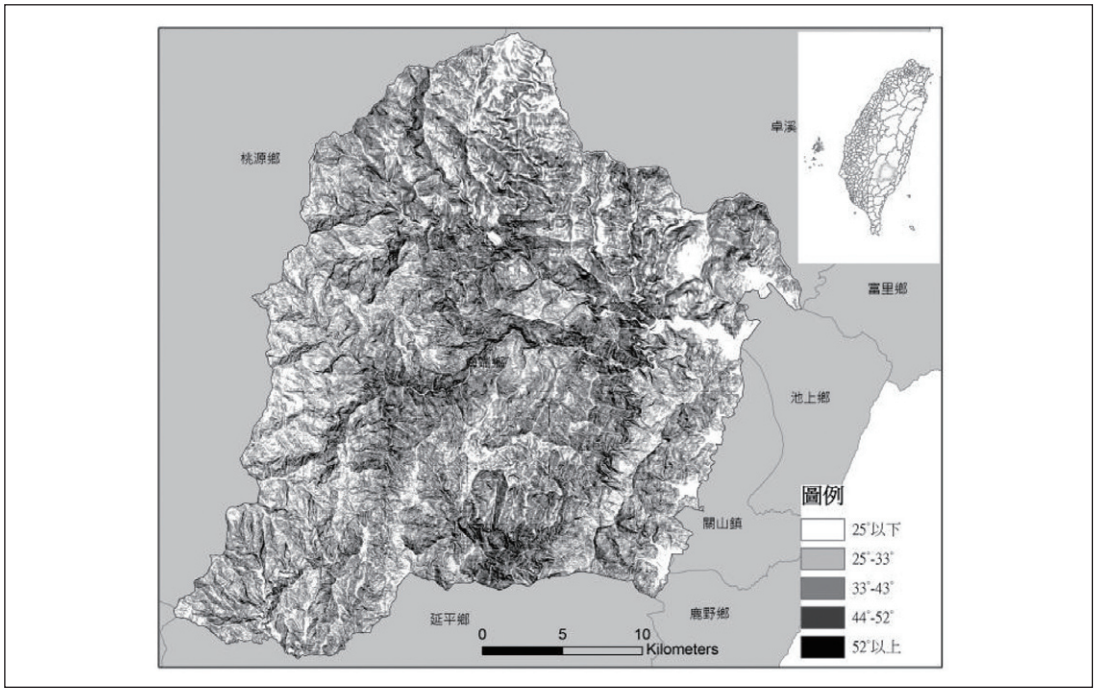

圖8　研究區坡度圖

由2,232,360網格單元組成。然而，原本屬於向量式資料的塊體崩壞圖、地質圖以及土地利用圖，若轉變以網格式方式表示，就需判斷邊界值屬於該變數何種屬性類別，本研究以該屬性邊界是否大於網格一半大小來判斷屬於何種屬性。舉例來說：農作與道路的邊界，其農作邊界與網格相疊，佔至網格一半以上面積，便會以農作作為此網格的屬性代表。研究區彙集991個塊體崩壞，共12.885平方公里，經網格方式轉變，共有32,194個網格單元。

2. 不安定指數法

此法的各變數評分都有經過標準化，提供一個較為客觀求取變數權重之統計方法，公式定義：

$$D_{total} = D_1^{W1} \times D_2^{W2} \times D_3^{W3} \ldots \times D_n^{Wn} \cdots(1)$$

(D_1、D_2、D_n 代表各評估變數之不安定指數值，如坡度、高程、斷層變數…等，W1、W2、W_n 代表變數之權重值，D_total 代表各項變數加總後，塊體崩壞發生的敏感度。)

首先，由聯合知識庫收集的塊體崩壞案例資料，接著將這些案例點位數化至 ArcGIS 中，將塊體崩壞資料轉換成20×20m 網格，計算研究區總網格面積、各變數分級後的網格面積，計算塊體崩壞網格密度，計算方式如：

塊體崩壞網格密度= (塊體崩壞網格數/區域總網格數) ……(2)

各變數的分級依據，如：土地利用與地質屬於名義變數，依據其類別分類。坡向、坡度、高程是由 DTM 產出的連續變數，坡向依據方位角分為八個方向，北、東北、東、東南、南、西南、西、西北；坡度、高程根據研究區平均值、標準差分級，採取 <-1.5sd、-1.5sd - -0.5sd、-0.5sd – 0.5sd、0.5sd – 1.5sd、>1.5sd，共5級。道路距離與河流距離是依據前人研究經驗分為0-50M、50-100M、100M 以上三個級別 (趙振平、高玉錠，2006、2007；Sarkar *et al*., 2008)。

利用 GIS 的“Zonal Statistics”統計塊體崩壞在各變數分級後的網格數，再依式(2) 求取塊體崩壞網格密度，將所有分級的密度加總。最後，將各分級塊體崩壞網格密度除以總網格塊體崩壞密度，便得佔總塊體崩壞發生率，之後再帶入不安定指數公式求取D值，D的範圍在1-10之間。

$$D= (9 (X_i-X_{min}) / (X_{max}-X_{min}))+1 \cdots\cdots(3)$$

(X_i 代表塊體崩壞網格密度，X_{min}、X_{max} 分別代表變數分級中佔總塊體崩壞發生率的最小與最大者。)

各變數權重計算，利用各變數佔總塊體崩壞發生率，計算各變數變異值 (Coefficient of Variation)，變異值的求取方式：

$$Vi= (\sigma i/X) \times 100\% \cdots\cdots(4)$$

(Vi 是第 i 個變數的變異值，也就是要作為變數之間權重的比較值。σ i 標準差 (Standard Deviation) ，X為平均數。)

利用各變數的變異值，除以總變異值值，即可得該變數之權重值。該式定義：

$$W_i=V_j/ (V_1+V_2+\ldots\ldots+V_n) \cdots\cdots(5)$$

最後將所有值求取後，帶入式 (1)，便可求得各種塊體崩壞敏感度地圖。塊體崩壞敏感度的分數因各變數 D_n 的範圍界於1-10之間，且其權重 W 也是透過各變數之間的變異值得出，故最後 D_{total} 的分數將介於1-10分之間。

3. 羅吉斯回歸

羅吉斯分析是勝算比 (Odds ratio) 指

airiti

得是塊體崩壞的可能性 (Y=1) 除於沒有塊體崩壞的可能性 (Y=0)，odds=P/(1-P)，P 是指塊體崩壞發生的可能性，值由0-1之間)，因此勝算比由 0-1(P由0-0.5)，是屬於塊體崩壞機會較少的 (P=0.5意味發生與不發生塊體崩壞的機會一樣)，所以塊體崩壞發生較高的機會，P 是由0.5-1之間，或 odds 由1-∞。因此 odds 不是對稱的，0<odds<1 表示不發生塊體崩壞機會是較高的；1<odds<∞ 表示發生塊體崩壞機會是較高 (Dai and Lee, 2003)。

$$\mathrm{Odds}(Y=1)=\frac{P(Y=1)}{1-P(Y=1)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

將 Odds 取自然對數的過程，稱為 logit 或是Z (Z=log (odds)，或是 odds=exp (Z)，Odds 的值由 0<odds<∞，轉變成對稱的 -∞<odds<∞，-∞<Z<0 代表不發生塊體崩壞機會是較高的，以及 0<Z<∞，代表發生塊體崩壞機會是較高。將 Odds (Y=1) 取自然對數後，我們不需要面對評估機率值時會超出機率的範圍，其自變數與依變數的等式可以寫成：

$$Y=\ln\left[\frac{p}{1-p}\right]=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\ldots+b_nx_n \quad \cdots(7)$$

(Y為二元分類變數，「1」表示塊體崩壞存在；「0」表示塊體崩壞不存在，b_0為截距，b_1 至 b_n 是部分回歸係數，x_1 至 x_n 為自變數。)

我們也可以將 logit (Y) 回歸為 Odds，將 Odds 轉變成 P(Y=1)，這個過程將會以變數 x_1、$x_2\cdots$, x_n 來表示塊體崩壞的發生機率：

$$P(Y=1)=\frac{1}{1+e^{-(b0+b1X1+b2X2+\cdots+bnXn)}} \cdots(8)$$

4. 評估模式優劣方法

一般評估模式優劣的方法有分類誤差矩陣 (classification error matrix) 與 ROC (Receiver Operating Characteristic, ROC) 曲線 (Chau and Chan, 2005；Gorsevski *et al*., 2006；Tunusluoglu *et al*.,2008；Chauhan *et al*., 2010；Das et al., 2010；Jaiswal *et al*., 2010；Buiet al.,2011)。李錫堤、費立沅 (2011) 指出誤差矩陣須借助清楚的塊體崩壞與非塊體崩壞歸類 (例如：以人為的方式界定某值以上屬於塊體崩壞組、某值以下屬於未塊體崩壞組)。Gorsevski *et al*. (2006) ROC 曲線是繪製表示預測機率準確性的圖形，利用 ROC 曲線下的面積 AUC (Area Under Curve) 就能方便度量整體模式的適配程度，且方便不同模式之間的比較。另外，ROC 曲線則係以連續的敏感值解釋塊體崩壞的能力繪製，不須有人為的塊體崩壞與非塊體崩壞分類界線，故更適合於塊體崩壞敏感模式優劣的評估。

李錫堤、費立沅 (2011) 提出在繪製 ROC 曲線時，先按敏感值做分級 (10-50 級)，接著計算每一等級所占面積與總面積的比例 (X 軸)，以及計算每一等級中塊體崩壞面積占總塊體崩壞面積的比例 (Y 軸)，最後繪製由高敏感值到低敏感值的累積曲線即得。橫軸及縱軸的值域均為0至1，故曲線下面積 AUC 值域亦為0至1，此值稱為 AUC，當 AUC 值為1時，該模式為完美模式；當 AUC 值接近為0.5時，該模式並不會比一般隨機猜測來得更好，一般而言 AUC≧0.8其模式都是良好的，0.7>AUC≧0.6其模式為差。

根據上述研究方法的討論，本研究透過災害案例的收集為基礎，確定選取的環境指標，再以不安定指數與羅吉斯回歸模式評估研究區塊體崩壞敏感度。模式的優劣以分類誤差矩陣、ROC 曲線評估，最後討論模式優劣的原因與該模型對於預測本區塊體崩壞敏感度的成效，其研究流程如圖9：

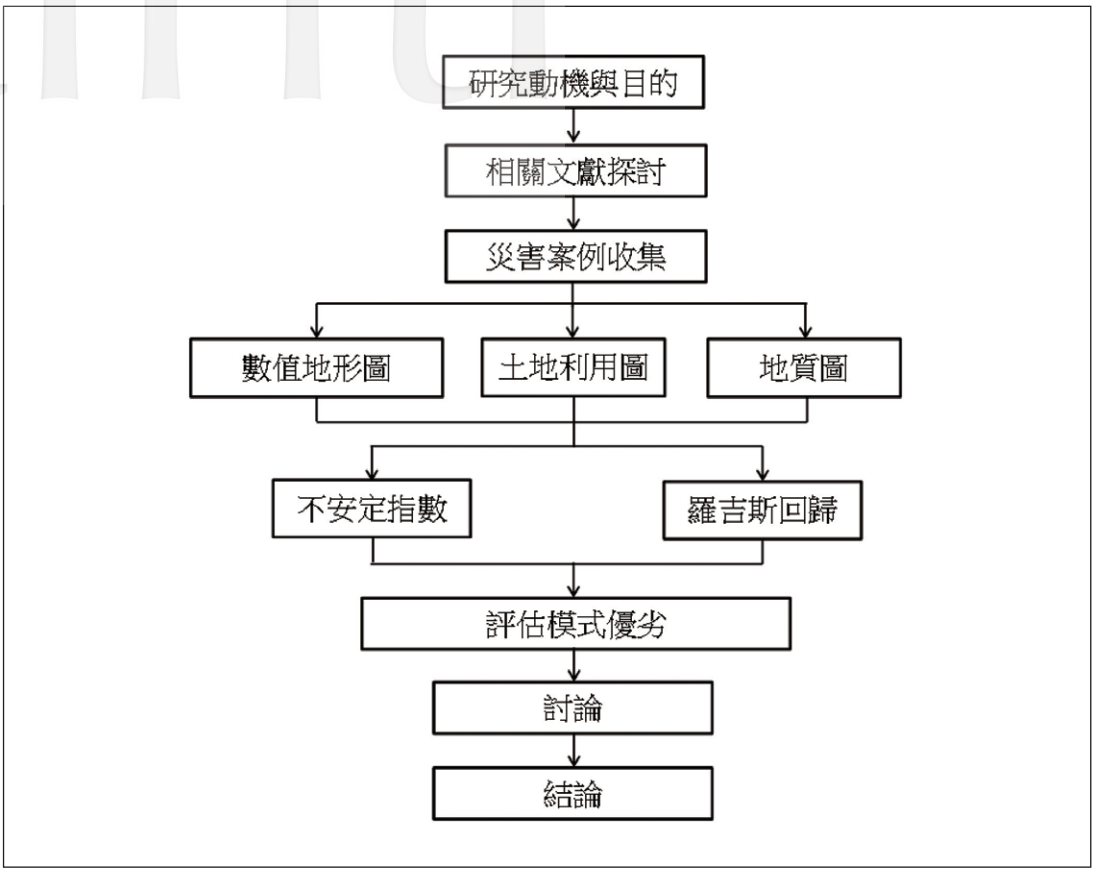

圖9　研究流程圖

研究結果

(一) 不安定指數模式

根據上述文獻探討後，本研究選取土地利用、高程、地質、道路距離、坡度、河岸距離與坡向7個塊體崩壞的孕災環境因子，計算各變數分級後的網格數，以及各分級所佔塊體崩壞的網格數，求取塊體崩壞網格密度後，再利用式3求取危險評分，如表1至表7。接著，再依佔總塊體崩壞發生率一欄的數值求取個變數變異值，最後再將各變數變異值加總，帶入式5得各變數權種值，最後帶入式1便能得出研究區塊體崩壞敏感度。

各變數最高評分分別為：道路距離100M以上、河流距離50-100M、土地利用以建物、坡向以南向、地質以畢祿山層、高程以3,068M 以上，與坡度以34°-43°為最高得分，表示環境中若有符合以上條件則為最敏感地區。影響塊體崩壞發生的原因以土地利用權重值最高，高程次之，地質次之；而坡向與道路距離權重值相對較低，顯示此二變數分級中，所佔塊體崩壞發生率差異不大，致使變異值差異小而影響權重值，也表示塊體崩壞並未集中在坡向與道路距離變數中的某一分級中，而是較均勻的分布

airiti

表1　塊體崩壞與道路距離變數的評分與權重

分級	分級網格數	塊體崩壞網格數	塊體崩壞密度	佔總塊體崩壞發生率	危險評分
0-50M	90,564	1,116	0.0123	30.70%	1.0
50-100M	55,378	735	0.0132	33.07%	4.84
100M以上	2,086,418	30,343	0.0145	36.23%	10.0
總和	2,232,360	32,194	0.0401	100.0%	
變異值	6.790				

*佔塊體崩壞發生率= (分級塊體崩壞網格密度/總塊體崩壞網格密度)×100%，再利用式 (3) 求取各分級之危險分數。

表2　塊體崩壞與河流距離變數的評分與權重

分級	分級網格數	塊體崩壞網格數	塊體崩壞密度	佔總塊體崩壞發生率	危險評分
0-50M	172,242	2,638	0.0153	27.66%	2.34
50-100M	159,203	4,259	0.0267	48.31%	10.0
100M以上	1,900,915	25,297	0.0133	24.03%	1.0
總和	2,232,360	32,194	0.0553	100.0%	
變異值	32.070				

表3　塊體崩壞與土地利用變數的評分與權重

分級	分級網格數	塊體崩壞網格數	塊體崩壞密度	佔總塊體崩壞發生率	危險評分
農作	420,614	6,089	0.0144	9.28%	3.10
天然林	973,631	11,669	0.0119	7.68%	2.74
人工林	325,669	2,618	0.0080	5.15%	2.17
道路	2,294	0	0	0%	1.0
河流	28,816	294	0.0102	6.54%	2.48
建物	3,755	232	0.0617	39.62%	10.0
塊體崩壞地	349,688	7,828	0.0223	14.35%	4.26
其它	127,893	3,464	0.0270	17.37%	4.94
總和	2,232,360	32,194	0.1559	100.0%	
變異值	91.280				

airiti

(表1至表7)。最後，各變數權重以指數表示之後，再將各變數相乘，便是塊體崩壞敏感度圖，如圖10。式9為本研究區塊體崩壞敏感度運算式：

$$D_{total} = 土地利用^{0.2564} \times 高程^{0.2509} \times 地質^{0.1801} \times 坡度^{0.1302} \times 河岸距離^{0.0901} \times 坡向^{0.0732} \times 道路距離^{0.0191} \quad (9)$$

表4　塊體崩壞與坡向變數的評分與權重

分級	分級網格數	塊體崩壞網格數	塊體崩壞密度	佔總塊體崩壞發生率	危險評分
北	204,124	2,471	0.0121	11.0%	3.89
東北	303,959	3,976	0.0130	11.88%	4.67
東	341,791	4,901	0.0143	13.03%	5.67
東南	373,962	6,598	0.0176	16.03%	8.30
南	314,525	6,217	0.0197	17.96%	10.0
西南	288,247	4,371	0.0151	13.78%	6.33
西	214,565	2,036	0.0094	8.62%	1.80
西北	188,436	1,597	0.0084	7.70%	1.0
總和	2,229,609	32,167	0.110	100.0%	
變異值	26.060				

表5　塊體崩壞與地質變數的評分與權重

分級	分級網格數	塊體崩壞網格數	塊體崩壞密度	佔總塊體崩壞發生率	危險評分
大南澳片岩	60,605	581	0.0095	13.51%	5.95
畢祿山層	1,201,759	20,932	0.0174	24.55%	10.0
大南澳片岩	271,252	1,759	0.0064	9.14%	4.35
大南澳片岩	556,501	7,749	0.0139	19.63%	8.19
沖積層	3,007	4	0.0013	1.87%	1.68
基性火成岩	6,455	85	0.0131	18.56%	7.80
廬山層蘇樂層	119,992	1,084	0.0090	12.73%	5.66
臺地堆積	12,789	0.0	0	0%	1.0
總和	2,232,360	32,194	0.0709	100.0%	
變異值	64.140				

airiti

(二) 羅吉斯回歸模式

陳樹群與馮智偉 (2005) 指出若是獨立自變數項目與類別較少時，建立模式時可將自變數以二元虛擬變數建立 (dummy variables)。然而，本研究採用之七個變數，除了道路距離及河流距離變數外，其餘均包含多個類別，為避免多項目在產出模式過程中有共線性之問題，本研究將不對多個類別的變數轉變為二元虛擬變數加以分析。

本研究共有32,194個塊體崩壞網格數，約取一半網格數15,375為1 (已塊體崩壞)，再以隨機抽樣方式抽取15,349個網格數為0 (未塊體崩壞)，利用 SAS 軟體將上述七個自變數進行羅吉斯回歸分析，採用最大概似估計法推估變數，得到的整體模式適配度檢驗如表8，由表8可知，在僅包含截距項之模式，AIC 值42,594.49，SC 值42,602.82，當投入七個自變數後，AIC 值降至24,417.148，SC 值

表6　塊體崩壞與高程變數的評分與權重

分級	分級網格數	塊體崩壞網格數	塊體崩壞密度	佔總塊體崩壞發生率	危險評分
702M以下	17,8423	2,134	0.0119	9.89%	1.15
703-1490M	616,671	9,619	0.0155	12.90%	1.73
1491-2279M	843,860	9,267	0.0109	9.08%	1.0
2280-3067M	550,453	8,323	0.0151	12.51%	1.66
3068M以上	41,295	2,776	0.0672	55.61%	10.0
總和	2,230,702	32,119	0.1209	100.0%	
變異值	89.320				

表7　塊體崩壞與坡度變數的評分與權重

分級	分級網格數	塊體崩壞網格數	塊體崩壞密度	佔總塊體崩壞發生率	危險評分
25° 以下	511,012	2,093	0.0040	5.63%	1.0
25° -33°	615,595	6,206	0.010	13.87%	3.81
34° -43°	735,152	17,085	0.0232	31.96%	10.0
44° -52°	288,432	5,469	0.0189	26.08%	7.98
53° 以上	80,466	1,314	0.0163	22.46%	6.75
總和	2,230,657	32,167	0.0727	100.0%	
變異值	46.370				

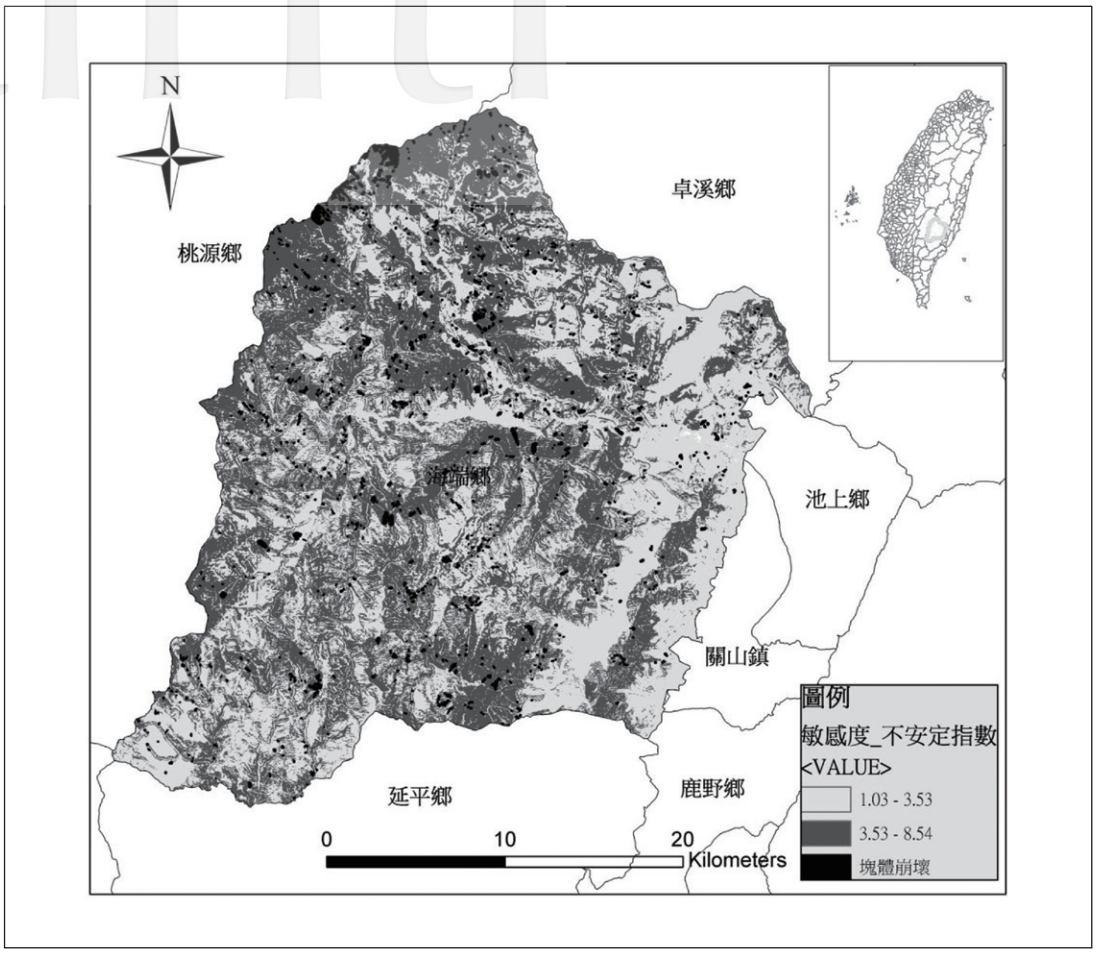

圖10　塊體崩壞敏感度圖_不安定指數模式

降至24,483.811，二者都有明顯的改善。另外，關於整體回歸模式是否有達到顯著，可參照概似比卡方檢定值、Score 檢定值與 Wald 檢定值等三項統計量，如表9，三個檢定值均已達到.001顯著水準，表示所投入的自變數中，至少有一個自變數可以有效地解釋與預測樣本在依變數的結果。至於是那些自變數可以有效解釋與預測依變數之結果，需進一步進行各別回歸係數之顯著性檢定。

各變數的回歸係數估計值如表10所示，本研究選入的7個變數均有達至顯著，表示變數均能影響依變數的結果。其中分別以河流距離2.162、道路距離1.257、地質0.751與坡向0.223為正向影響，以坡度-2.927負向影響最大。將 B 之估計值帶如式8，可得本研究區塊體崩壞敏感度運算式10，以 GIS 計算式10得本研究區塊體崩壞敏感度圖11。

$$\mathrm{Pr} = \frac{1}{1+e^{-(0.6692\ -\ 0.9985\ \text{高程} + 0.7505\ \text{地質} + 1.2567\ \text{道路距離} - 2.9272\ \text{坡度} + 2.1626\ \text{河流距離} + 0.2235\ \text{坡向} - 0.6624\ \text{土地利用})}} \quad (10)$$

airiti

表8　統計適配度表

檢定標準	只有截距	截距與共變量
AIC	42,594.49	24,417.148
SC	42,602.82	24,483.811
-2 Log L	42,592.49	24,401.148

表9　回歸模式檢定表

檢定	卡方值	自由度	顯著水準
概似比卡方	18,191.3375	7	<.0001
Score	12,171.7425	7	<.0001
Wald	6,078.3494	7	<.0001

表10　回歸模式的自變數估計值與顯著性檢定結果

	B之估計值(係數估計值)	S.E(係數估計標準誤)	Wald顯著性檢定值	Df(自由度)	顯著性	Exp (B)(自變數勝算比)
高程	-0.9985	0.0223	2,004.3169	1	.000	0.368
地質	0.7505	0.0152	2,431.5057	1	.000	2.118
道路距離	1.2567	0.0495	645.2495	1	.000	3.514
坡度	-2.9272	0.0384	5,809.2025	1	.000	0.054
河流距離	2.1616	0.0392	3,046.1804	1	.000	8.685
坡向	0.2235	0.0082	704.5994	1	.000	1.250
土地利用	-0.6624	0.0105	3,978.8843	1	.000	0.516
截距(常數)	0.6692	0.1587	17.7867	1	.000	1.953

討　　論

利用不安定指數法所建立的模式之中，以土地利用權重值最高，高程次之，地質再次之；而坡向與道路距離權重值相對較低，土地利用、高程與地質所佔權重值總和將近0.68。其結果與過去學者相似，例如：陳昆廷等 (2008) 利用坡度、坡向、植生、土壤沖蝕、地層與土地利用變數於屏東縣的研究成果顯示坡度、植生與地質最為重要，其權重值總和佔約0.65。趙振平與高玉錠 (2007) 南勢溪集水區的研究顯示土地利用、地質、高程為前三者重要變數，其結果與楊明德等 (2012) 研究相似。雷祖強等 (2009) 除了本研究的七項變數之外，再加入土壤厚度變數，其結果顯示坡度、高程與土壤厚度三項為最重要變數，權重值總和佔約0.5。

以羅吉斯回歸建立的模式之中，可知其權重順序依序為坡度、河流距離、道路距離、高程、地質，說明這些變數在本區可視為重要因子。當回歸係數為正值，代表該變數會增加該研究區塊體崩壞；而回歸係數為負值時，表示該因子會降低其塊體崩壞敏感度。本研究權重中會有負值的產生，主要是因為該變數與塊體崩壞呈現負相關，例如：坡度、高程。因為研究將坡度與高程視為連續變數處理，所以分析過程中，模式會認為坡度、高度愈高值

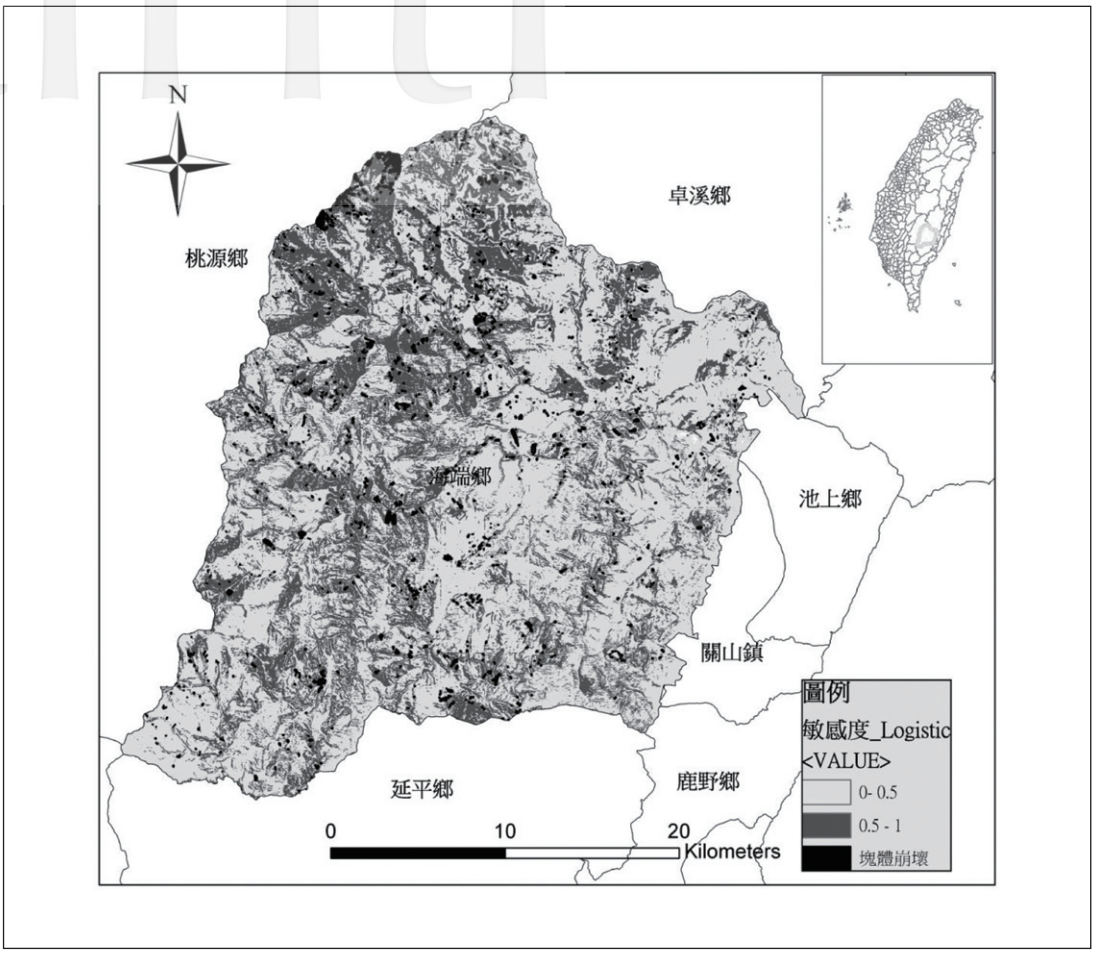

圖11　塊體崩壞敏感度圖_羅吉斯回歸模式

時，塊體崩壞就應有愈加增長的趨勢。然而，現實中並不是坡度愈陡、高程愈高就愈容易發生塊體崩壞，坡度陡峭也隱含岩性的強韌，不至於大規模崩壞。整體而言，模式也可以看出坡度與高程確實扮演著相當重要的角色。其他應用羅吉斯回歸研究如：李嶸泰等 (2012) 應用羅吉斯回歸在阿里山地區進行研究，其結果為岩性、坡度、坡向佔了大部分的權重。陳樹群與彭智偉 (2005) 以濁水溪為研究區，利用羅吉斯分析其研究區敏感度，結果為坡度、河流距離、地質影響最大。Nefeslioglu *et al*. (2008) 應用羅吉斯回歸分析土耳其 Kelkit 構造河谷地區的塊體崩壞敏感度，選用地質、海拔、坡度、坡向、曲率、沉積物傳遞、地形濕度指數 (topographic wetness index) 等變數，顯示地質是最重要的變數，遠大於其次的地形濕度指數。Chang *et al*. (2007) 在台灣南投縣和社部落一帶以羅吉斯回歸分析颱風與地震所誘發的塊體崩壞位置是否有不同，其結果發現無論是颱風抑或是地震誘發的

airiti

塊體崩壞，在本區地質、坡向都是佔相當重要的因素，但不同的是距離山脊與距離河流二著變數呈現相反的表現，也意味著不同自然現象誘發塊體崩壞的位置可能不盡相同。

從過去的研究不難發現彼此變數的重要性互有重疊，但儘管如此，在不同地區因為環境的特性不同，影響塊體崩壞潛在因子的重要程度將會有所不同，所以在眾多的研究之中，也很難找到幾乎一樣的結果，這也是為何 Chau and Chan (2005) 提出敏感度地圖應該以區域為單元劃分，因為塊體崩壞具有強烈的地域特性，若以過大的尺度為範圍其結果將無法精準掌握區域塊體崩壞的原因。

除了不同區域特性造成變數重要程度不一之外，我們必須了解何種模式是較適合用於本區塊體崩壞之研究。故為評估二種模式的優劣，本研究採取分類誤差矩陣 (classification error matrix) 與 ROC (Receiver Operating Characteristic, ROC) 曲線。在誤差矩陣中，不安定指數分析顯示其 D_total 值介於1.032-8.54之間，平均值為3.53，故取 D_total 值3.53作塊體崩壞分類值 (>3.53以上視為塊體崩壞、<3.53以下視為未塊體崩壞)；羅吉斯一般則以0.5作為界線區分有無塊體崩壞的依據，其結果見表11、12。不安定指數模式在預測未塊體崩壞與已塊體崩壞正確率分別為48.65%與74.1%，而羅吉斯模式在預測未塊體崩壞與已塊體崩壞正確率分別為76.64%與75.57%，顯然羅吉斯回歸模式較不會高估，意即將實際上未塊體崩壞視為塊體崩壞區，從圖10、11也可明顯看出，不安定指數高敏感地區的面積 (>3.53) 顯然大於羅吉斯 (>0.5) 所占的面積。然而，在已塊體崩壞的預測率上兩者相似74.1%對75.57%，也代表實際上有塊

表11　分類誤差矩陣表_不安定指數模式

不安定指數模式		預測推估		總和	預測正確率%
		0 (未塊體崩壞)	1 (已塊體崩壞)		
實際	0 (未塊體崩壞)	7,213	8,136	15,349	48.65% (未塊體崩壞)
	1 (已塊體崩壞)	3,817	11,558	15,375	74.1% (已塊體崩壞)
總和		11,030	19,694	30,724	61.09% (總體正確率)

表12　分類誤差矩陣表_羅吉斯回歸模式

羅吉斯回歸模式		預測推估		總和	預測正確率%
		0 (未塊體崩壞)	1 (已塊體崩壞)		
實際	0 (未塊體崩壞)	11,764	3,585	15,349	76.64% (未塊體崩壞)
	1 (已塊體崩壞)	3,733	11,642	15,375	75.57% (已塊體崩壞)
總和		15,497	15,227	30,724	75.72% (總體正確率)

airiti

體崩壞的地區也大多數都落在二種方法所分析出的高敏感地區。

以不安定指數與羅吉斯回歸分別所建立的兩種塊體崩壞敏感度模式，用來解釋其分布成功率曲線 AUC，詳見圖12、圖13。羅吉斯模式的 AUC 高達0.8836；而不安定指數模式只有0.6673，顯示羅吉斯回歸模式在解釋塊體崩壞敏感度之能力較不安定指數模式佳。

整體而言，無論是分類矩陣抑或是 ROC 曲線圖皆是羅吉斯回歸模式表現優於不安定指數法。主要原因有以下幾點：第一，因為不安定指數法各變數權重是根據標準差除於平均數而求出變異值所得來的(意謂單一變數若有極端值的出現其標準差將愈大，其變異值也將愈大)，主要是因為此法認為塊體崩壞會集中某一變數的特定範圍，而此特定範圍獲得的危險評分也將遠遠高過於其他範圍值，可見表1至7。再者，若塊體崩壞在某一變數是屬於有等間距的雙峰、三峰形，其變數對塊體崩壞亦有集中趨

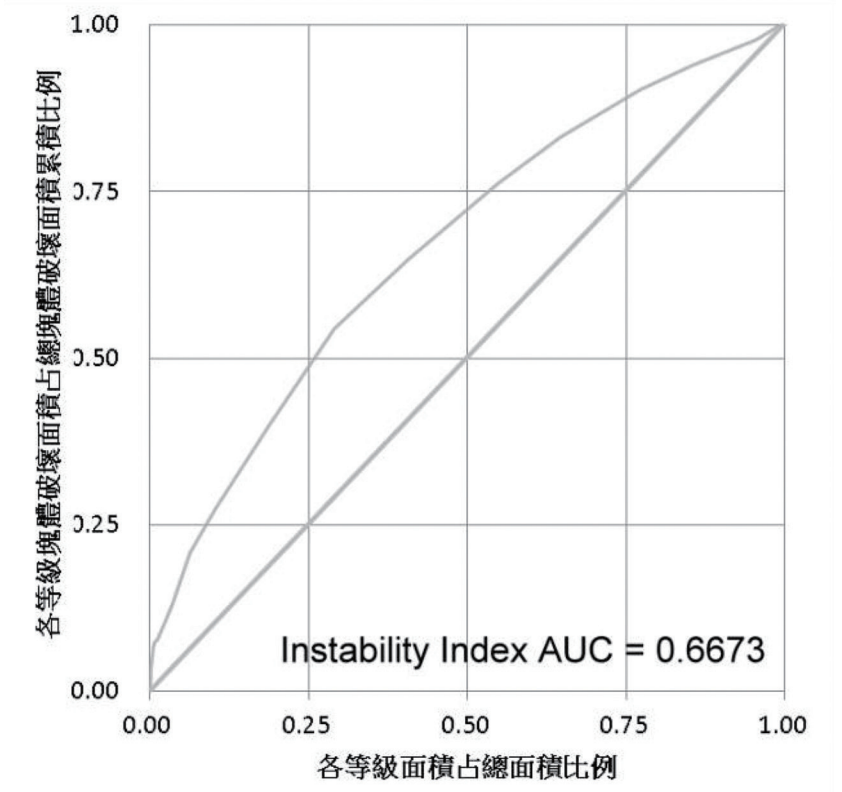

圖12　ROC 曲線圖_不安定指數模式

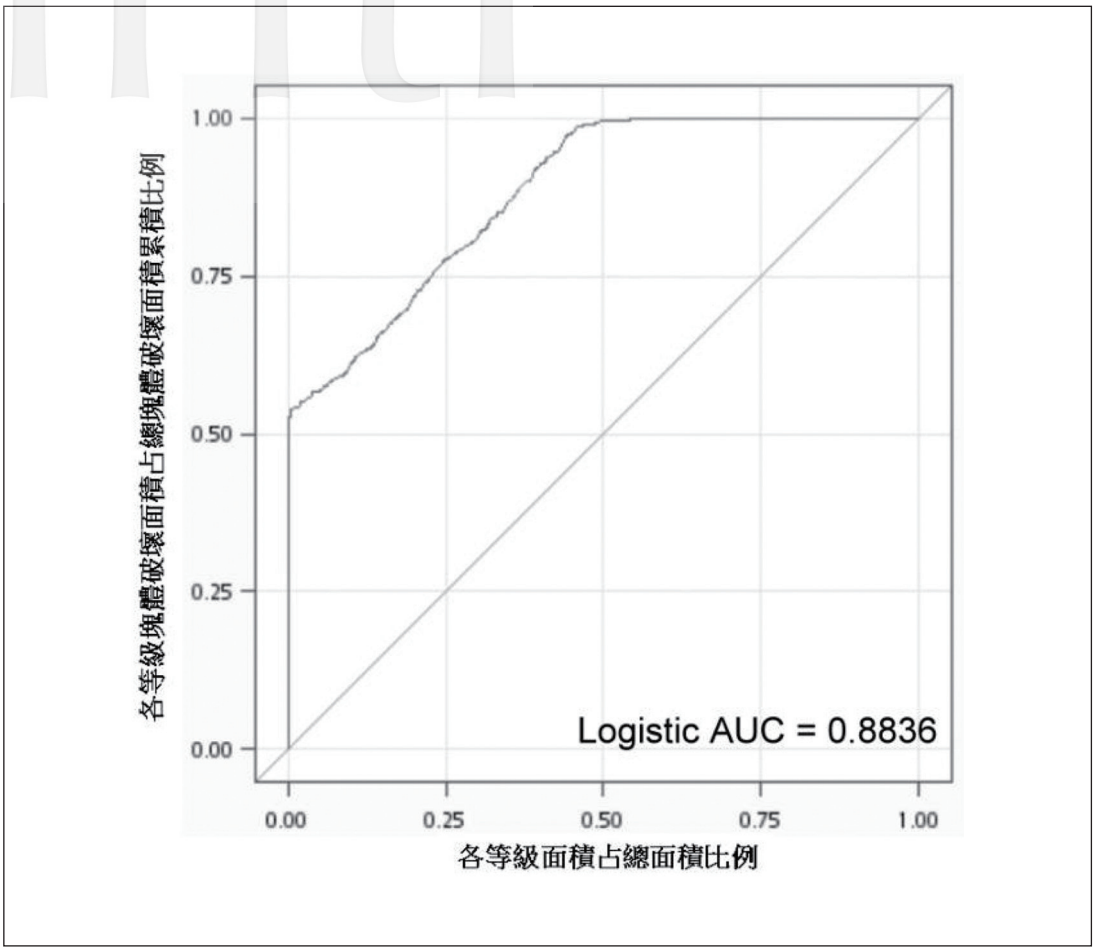

圖13　ROC 曲線圖_羅吉斯回歸模式

勢，然而其標準差卻會因為等距的影響而降低許多，導致變數的重要性降低。第二，D_total 值的計算方式是以線性組合中的乘冪方式進行，此計算方式會將權重高的變數放大影響能力，並縮小權種值低的變數之影響能力，這也是為何不安定指數模式中，多有將實際上未塊體崩壞視為塊體崩壞區的原因之一。

結　　論

為預防坡地災害的發生與國土規劃利用，調查易塊體崩壞地區以建立塊體崩壞敏感度地圖是一個相當重要的方法。然而，在過去常以專家依照地形條件來繪製易發生塊體崩壞地區的地圖。這些方法往往過於主觀，且無法再進行複製驗證。所以，在最近的幾十年期間，由於 GIS 與電腦計算技術蓬勃發展，促進學者們利用指標結合的地圖、二元分類統計方法、多變量統計方法等間接式途徑來發展敏感度評估方法。

本研究試圖以高程、坡度、地質、

airiti

土地利用、河岸距離、坡向、道路距離七個變數搭配不安定指數與羅吉斯回歸進行塊體崩壞敏感度分析。其結果與過去研究相互比較發現彼此變數的重要性互有重疊，但儘管如此，在不同地區因為環境的特性不同，影響塊體崩壞潛在因子的重要程度將會有所不同，因為塊體崩壞具有強烈的地域特性，若以過大的尺度為範圍其結果將無法精準掌握區域塊體崩壞的原因。而在模式優劣評估方面，利用不安定指數法在全區已塊體崩壞正確率約為74.1%，未塊體崩壞正確率約48.65%；羅吉斯回歸模式在全區已塊體崩壞正確率約為75.57%，未塊體崩壞正確率約76.64%，羅吉斯回歸模式在判釋塊體崩壞率的正確與否，顯然優於不安定指數方法。另外，在比較二種方法的預測準確性，ROC 曲線下的 AUC 值，也依然是羅吉斯回歸模式的0.8836優於不安定指數的0.6673，且羅吉斯回歸模式的 AUC 也已達到優良的模擬效果。以上顯示羅吉斯回歸模式在判釋正確率上優於不安定指數法。所以，本研究選用高程、坡度、地質、土地利用、河岸距離、坡向、道路距離等變數，再使用羅吉斯回歸模式評估本區塊體崩壞敏感度的成果是良好的。

致　　謝

本研究承行政院國家科學委員會專題研究計畫「氣候變遷下水文環境敏感區的動態變化及原住民社區的因應策略之研究－以台東太麻里溪流域為例 (I)」(NSC 100-2621-M-003-001) 之部分成果。最後，感謝兩位審查委員與會刊編輯們的寶貴意見，使本文更臻完善，特此感謝。

引用文獻

王保進 (2004) 多變量分析：套裝程式與資料分析，台北：高等教育文化事業有限公司。

石再添 (1998) 地學通論 (自然地理概論)，三版，台北：固地文化。

何春蓀 (1990) 普通地質學，國立編譯館主編：五南圖書出版有限公司。

李錫堤、費立沅 (2011) 蘭陽溪流域之山崩土石流潛在危害預測，前瞻科技與管理，1 (2)：67-83。

李嶸泰、張嘉琪、詹勳全、廖珮妤、洪雨柔 (2012) 應用羅吉斯迴歸法進行阿里山地區山崩潛勢評估，中華水土保持學報，43 (2)：167-176。

林書毅 (1998) 區域性山坡穩定評估方法探討—以林口台地為例，桃園：國立中央大學應用地質研究所碩士論文。

林雪美 (2004) 台灣地區近三十年自然災害的時空特性，師大地理研究報告，41：99-128。

林雪美、洪政耀 (2009) 新竹縣五峰鄉、尖石鄉坡地災害系統與災害識覺關聯之研究，華岡地理學報，24：1-18。

洪政耀、林雪美 (2012) 區域災害系統研究—以台東縣海端鄉為例，災害防救科技與管理學刊，2：17-41。

陳怡睿、林洧全、謝舜傑 (2011) 坡地利用影響山崩潛勢之評估模式建置—以寶來地區歷經莫拉克颱風為例，中華水土保持學報，42 (3)：251-262。

陳昆廷、蔡光榮、王宣惠、林欽川 (2008) 多變量不安定指數分析法應用於屏東山區道路邊坡崩塌潛感評估模式之建置研究，中興工程季刊，100：65-72。

陳信雄、邱祈榮、康恬慎 (2001) 地理資訊系統於石門水庫集水區崩塌地特性分析之研究，國立台灣大學農學院實驗

林研究報告，15 (3)：203-222。
陳樹群、馮智偉 (2005) 應用 Logistic 迴歸繪製崩塌潛感圖—以濁水溪流域為例，中華水土保持學報，36 (2)：191-201。
陳樹群、馮智偉、吳俊毅、黃柏璁、王价巨 (2006) 土石流潛勢區域之風險評估及災害管理，地工技術，110：45-54。
黃漢淨 (2008) 淺談森林之崩塌地，臺灣林業，34 (6)：54-64。
楊明德、黃奕達、黃凱翔、張益祥 (2012) 利用崩塌潛勢圖作風險評估之應用－以陳有蘭溪流域為例，中華水土保持學報，43 (1)：1-11。
楊景春 (1990) 地貌學教程，台北：明文書局。
雷祖強、周天穎、劉盈序 (2009) 以不安定指數法與模糊推論機制於雪霸國家公園內崩塌潛勢劃分之研究，水保技術，4 (3)：151-163。
趙振平、高玉錠 (2006) 利用地理資訊系統分析南勢溪集水區坡地災害危險度因子與評估準則之研究，華梵藝術與設計學報，2：240-256。
趙振平、高玉錠 (2007) 不安定指數法改進模式應用於南勢溪集水區山崩潛感分析之研究，中華水土保持學報，38 (2)：123-133。
簡李濱 (1992) 應用地理資訊系統建立坡地安定評估之計量方法，台中：國立中興大學土木工程研究所碩士論文。
蘇苗彬、陳毅輝、方俊傑 (2009) 應用不安定指數法於坡地崩塌之潛勢分析，水土保持技師公會，4 (1)：9-23。
蘇苗彬、蔡顯修、簡李濱 (1998) 集水區坡地安定評估之計量分析方法，中華水土保持學報，29 (2)：105-114。
Alexander, D. (1992) On the causes of landslides: human activities, perception, and natural process, *Environment Geology and Water Sciences*, 20 (3): 165-179.
Alexander, D. (1993) *Natural Disasters*, London: UCL Press.
Bui, D.T., Lofman, O., Revhaug , I. and Dick, O. (2011) Landslide susceptibility analysis in the HoaBinh province of Vietnam using statistical index and logistic regression, *Natural Hazard*, 59: 1413-1444.
Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. and Reichenbach, P. (1995) GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.) *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Dordrecht Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 135-175.
Chang, K.T., Chiang, S.H. and Hsu, M.L. (2007) Modeling typhoon- and earthquake-induced landslides in amountainous watershed using logistic regression, *Geomorphology*, 89: 335-347.
Chau, K.T. and Chan, J.E. (2005) Regional bias of landslide data in generating susceptibility maps using logistic regression: case of Hong Kong island, *Landslides*, 2: 280-290.
Chauhan, S., Sharma, M. and Arora, M.K. (2010) Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model, *Landslides*, 7: 411-4230.
Crozier, M.J. (2005) Management Frameworks for Landslide Hazard and Risk: Issues and Options, In: Glade, T. et al., (eds.) *Landslide hazard and risk*, Chichester: Wiley, 331-350.
Cruden, D.M. and Varnes, D.J. (1996) *Landslide types and processes, Landslides-Investigation and Mitigation, Special*

airiti

Report, Washington: National Academy Press: 36-75.

Dai, F.C. and Lee, C.F. (2003) A spatiotemporal probabilistic modelling of storm-induced shallow landsliding using aerial photographs and logistic regression, *Earth Surface Processes and Landforms,* 28: 527-545.

Das, I., Sahoo, S., van Westen, C., Stein, A. and Hack, R. (2010) Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India), *Geomorphology*, 114: 627-637.

Embleton, C. and Thornes, J. (1979) *Process in geomorphology*, London: Edward Arnold.

Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., Foltz, R. B. and Elliot, W.J. (2006) Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and ROC Analysis, *Transactions in GIS*, 10 (3): 395-415.

Hufschmidt, G., Crozier1, M. and Glade, T. (2005) Evolution of natural risk: research framework and perspectives, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 375–387.

Jaiswal, P., van Westen, C.J. and Jetten, V. (2010) Quantitative landslide hazard assessment along a transportation corridor in southern India, *Engineering Geology,* 116: 236-250.

Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y. and Durmaz, S. (2008) Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (eastern Black Sea region of Turkey), *Geomorphology*, 94: 401-418.

Remondo, J., González-Díez, A., Díaz de Terán J.R. and Cendrero, A. (2003) Landslide Susceptibility Models Utilising Spatial Data Analysis Techniques. A Case Study from the Lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain), *Natural Hazards*, 30: 267-279.

Remondo, J., Soto, J., González-Díez, A., Díaz de Terán J.R. and Cendrero, A. (2005) (2005) Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas in northern Spain, *Geomorphology*, 66: 69-84.

Sarkar, S., Kanungo, D.P., Patra, A.K. and Kumar, P. (2008) GiS based spatial data analysis for landslide susceptibility mapping, *Journal of Mountain Science*, 5: 52-62.

Süzen,M.L. and Doyuran, V. (2004) Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey, *Engineering Geology* ,71: 303-321.

Thomas, D.S.G. and Goudie, A. (2000) *The dictionary of physical geography (3th)*, Malden Ma: Blackwell press.

Tunusluoglu, M.C., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A. and Sonmez, H. (2008) Extraction of potential debris source areas by logistic regression technique: a case study from Barla, Besparmak and Kapi mountains (NW Taurids, Turkey), *Environmental Geology*, 54: 9-22.

Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Vandekerckhove, L., Van Gils, M. and Van Rompaey, A. (2010) Human–environment interactions in residential areas susceptible to landsliding: the Flemish Ardennes case study, *Area*, 42 (3): 339-358.

airiti

Van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G. and Vandekerckhove, L. (2006) Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium), *Geomorphology*, 76: 392-410.

101年08月27日收稿
101年10月06日修正
101年12月10日接受