

崩塌機率分析單元及機率模型之比較

吳俊毅⁽¹⁾ 葉彥駒⁽²⁾

摘要

在進行崩塌機率分析時，分析單元之選擇將影響機率分佈之結果，本研究針對不同網格及邊坡單元進行比較，歸納分析單元之選擇需考量崩塌地面積和機率分佈的不連續程度，其中邊坡單元之優點是能反映地形特徵，然而當需了解邊坡單元內崩塌較易發生在上下邊坡等不同位置時，則以 20 × 20 m 網格較能呈現同一個坡面之崩塌機率。本研究將 Poisson 及 Binomial 機率模型與分析單元結合，得出同時具空間、時間機率內涵之機率模型，並比較二者之差異。發現兩種模型得出之結果有著相同的分佈，唯 Binomial 模型得出之機率值較高，可視為較嚴重情形之分佈結果，可應用在一地區崩塌機率分佈之初步分析之用。

(**關鍵詞**：崩塌、分析單元、崩塌機率模型)

Comparison of Landslide Probability Analysis Results Based on Different Mapping Units and Probability Models

Chun-Yi Wu⁽¹⁾ *Yen-Chu Yeh*⁽²⁾

Assistant Professor⁽¹⁾, Master Student⁽²⁾, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

ABSTRACT

(1)國立中興大學水土保持學系 助理教授(通訊作者 e-mail: cywu@nchu.edu.tw)

(2)國立中興大學水土保持學系 碩士生

In landslide probability analysis, choice of mapping units will affect the result of probability distribution. In the present study we compared different grid cells and slope unit, and concluded that landslide area and non-continuous phenomenon of probability distribution should be considered when choosing mapping units. The advantage of slope units is the reflection of terrain characteristics. However, it is impossible to show different landslide prone areas in a slope unit. Oppositely, the 20×20 m grid cells are more appropriate than slope units to present landslide probability on a slope. In this study we combined Poisson and Binomial probability models with mapping units, and obtained probability models with spatial and temporal capabilities. Next, we compared these two models and got the same probability distribution. One difference is that Binomial model appeared higher probability value than that of the Poisson model. This can be considered as more serious situation of landslide probability distribution than the distribution of Poisson model. The Binomial probability model can be used in the initial analysis of landslide probability distribution in a region.

(**Keywords** : landslide, mapping unit, landslide probability model)

前言

近年來由於極端降雨事件有越趨頻繁之現象，再加上臺灣地質破碎，容易因暴雨而促發崩塌事件之發生，因此坡地之防災規劃相當重要，其常需考量當地之崩塌危害程度，以降低災害損失，崩塌危害根據 Varnes and IAEG (1984)的定義，具有特定空間及特定時間之內涵，即崩塌發生的空間機率以及時間機率。

崩塌的空間機率一般可視為崩塌潛勢分析 (Landslide Susceptibility Analysis)，分為定性法及定量法，定量法又分為統計分析及人工智慧兩類。統計分析係將全區劃分為不同的分析單元，再針對已發生崩塌區域之地形、地質、水文等潛勢因子進行分析，以建立潛勢模型並計算各分析單元的潛勢值。而在劃分分析單元時，不同之劃分方式會影響對於輸入資料不確定性之處理、模型的擬合度、以及劃分

之潛勢圖分佈之可靠程度(Guzzetti et al., 1999)。分析單元代表的是一個區域被劃分後的子區域，其包含了一組該區域的地面特徵，且特徵與以邊界隔開之鄰近區域不同(Hansen, 1984; Carrara et al., 1995; van Westen et al., 1997; Luckman et al., 1999; Van Den Eeckhaut et al., 2009)。在分析時，分析單元需能代表最大之單元內同質性及最大的單元間異質性(Guzzetti et al., 1999; Guzzetti, 2006)。因此本研究欲比較不同分析單元用於崩塌機率分析之差異，並找出適合的分析單元。

一般集水區之劃分方式可分為7種類型(Guzzetti, 2006; Van Den Eeckhaut et al., 2009)：網格、地勢單元、均一條件單元、邊坡單元、地形水文單元、地形單元、行政區單元。在各種前人所使用的分析單元裡，網格(Grid cells)是最多次被使用的，它依預先定義之分析單元大小將集水區切割為規律之網格，許多研究均以其作為分析單元(Carrara, 1983; Bernknopf et al., 1988; Pike, 1988; van Westen, 1993, 1994; Chung and Fabbri, 1999; Clerici et al., 2002; Lee, 2004)。雖然其不具地形地質特徵，但通過選擇適當之網格大小，並給定每個網格相對應的地面

參數，網格也能適當表現出地面特徵，加上電腦運算能力及遙測技術的進步，能以製作出越來越精細之網格圖資，一定程度彌補網格不具地形地質特徵之短缺。邊坡單元(Slope units)能將區域依排水渠道及分水嶺作為邊界劃分為不同的水文區(Carrara, 1988; Carrara et al., 1995; Guzzetti et al., 1999a; Xie et al., 2004)。由於邊坡單元具地形之特徵，能呈現邊坡特性，特別適合用來做崩塌潛勢分析(Guzzetti, 2006)。本研究選擇並比較不同大小網格與邊坡單元對於崩塌機率研究之適用性。

在崩塌時間機率(Temporal Probability)之部分，其推估方法可分為以超越機率為基礎之方法及物理模式兩種主要類型(Vasu et al., 2016)，其中，以超越機率為基礎之方法中，Poisson機率模型(Poisson Probability Model)及Binomial機率模型(Binomial Probability Model)常被用來分析自然隨機事件之重現機率(Crovelli, 2000; Onoz and Bayazit, 2001)。然而Poisson機率模型及Binomial機率模型需再結合適當之分析單元才能呈現出機率之空間分布，因此本研究之目的為分別結合不同分析單元及Poisson、Binomial機率模型，製作出具有空間及時間機率內涵之崩

塌機率模型，藉此分析選擇單元之因素，並決定出適合研究區之分析單元，同時也比較兩種機率模型之差異，找出較適用本研究區之機率模型，以為往後做集水區崩塌機率推估之參考。

研究方法

本研究先將研究區劃分為邊坡單元及不同大小網格，配合多年期颱風事件之崩塌目錄計算各分析單元歷年之崩塌次數，並以Poisson及Binomial機率模型計算一年內崩塌之超越機率。

1. 集水區不同分析單元劃分

在本研究以ArcGIS進行不同大小網格之劃分。先蒐集5 × 5 m的數值高程模型(DEM)，再使用「Resample工具」重新取樣成10 × 10 m、20 × 20 m、40 × 40 m、100 × 100 m之不同網格大小，接著將不同網格大小之網格圖層以「Raster to polygon工具」轉換成向量圖層(shapefile)。

邊坡單元因具有較完整之地形邊界，較網格式分析單元具地形、地質上之意義。參考Xie et al. (2004)之劃分方式，以ArcGIS之Hydrology模組來劃

分邊坡單元，其劃分步驟先針對研究區之原始地形劃分成小集水區，次將原始地形反轉，再針對反轉之地形劃分成小集水區，最後將反轉前後之小集水區疊合，即可得到左右兩側邊坡單元。邊坡單元之面積最小應大於崩塌地之平均面積(Van Den Eeckhaut et al., 2009)，以減少同一崩塌地被劃分到不同邊坡單元之情形，得到較佳之分析結果。

2. 崩塌地資料

衛星影像判釋數化的過程中，常因人為數化誤差而影響判釋品質，本研究依照「都會區周緣坡地山崩潛勢評估」(經濟部中央地質調查所，2013)中的「山崩遙測判釋作業手冊」建議流程，以判釋研究區之崩塌地並數化崩塌地圖層。崩塌地判釋之主要準則，則依「豪雨型崩塌地之遙測影像分析」(劉進金等，2001)所提出之準則進行崩塌地判釋。

本研究利用研究區內造成嚴重土砂流失之颱風事件，收集其前後期之衛星影像資料，進行常態化差異植生指標(NDVI)分析以找出崩塌裸露地之可能區位，再配合數值高程模型(DEM)之坡度分析、水系圖、土地利用圖，

以刪除並修正不合理之區位。

3. Poisson 機率模型

Poisson 機率模型可由事件過去發生之頻率來預測其未來再發生之機率，模型之基本假設為未來相同期間事件發生之頻率與過去相同。在時間間隔 t 內發生 n 個事件之 Poisson 機率模型如 (1) 式：

$$P[N(t) = n] = e^{-\lambda t} * \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (1)$$

(1) 式中 $P[N(t) = n]$ 代表在 t 年內發生 n 次事件之機率； λ 代表該事件過去發生之頻率，可由事件發生次數除以其跨越時間計算。而時間間隔 t 內發生 1 個以上事件之機率如 (2) 式：

$$P[N(t) \geq 1] = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

(2) 式中 $P[N(t) \geq 1]$ 代表在 t 年內發生 1 次以上事件之機率，此種機率即為超越機率。

4. Binomial 機率模型

Binomial 機率模型為離散式機率模型，其將研究之時間間隔切割為一段一段的區間，每一個區間即為一次試驗，而試驗之結果區分為「成功」或「失敗」兩種情況，並假設每一次

試驗的成功機率皆相等。本研究中以崩塌事件發生為「成功」，崩塌事件不發生為「失敗」，在時間間隔 t 內發生 n 個事件之 Binomial 機率模型如 (3) 式：

$$P[N(t) = n] = C_n^t p^n (1 - p)^{t-n} \quad (3)$$

(3) 式中 $P[N(t) = n]$ 代表在 t 年內發生 n 次事件之機率；其中 $C_n^t = t! / n! (t - n)!$ ； p 代表該事件過去之平均成功機率，可由事件發生之次數除以研究之時間間隔而得，相當於 Poisson 機率模型之 λ 。而時間間隔 t 內發生 1 個以上事件之機率如 (4) 式，即超越機率：

$$P[N(t) \geq 1] = 1 - (1 - p)^t \quad (4)$$

研究區域及研究結果

本研究之研究區域為臺北水源特定區，以網格 (5 × 5 m、10 × 10 m、20 × 20 m、40 × 40 m、100 × 100 m) 及邊坡單元之分割方法進行研究區之劃分，並選定 2000-2015 年之 8 次崩塌事件，進行 Poisson 及 Binomial 機率模型之計算，以比較本研究區根據不同分析單元及機率模型分析得出之機率分佈。

1. 臺北水源特定區概述

臺北水源特定區之範圍位於新北市東南方、新店溪青潭堰取水口以上之集水區，涵蓋新北市雙溪、坪林、

石碇、新店、烏來五區，其高程由西南方及東北方往西北方之集水區下游逐漸遞減，本研究區範圍如圖1所示。

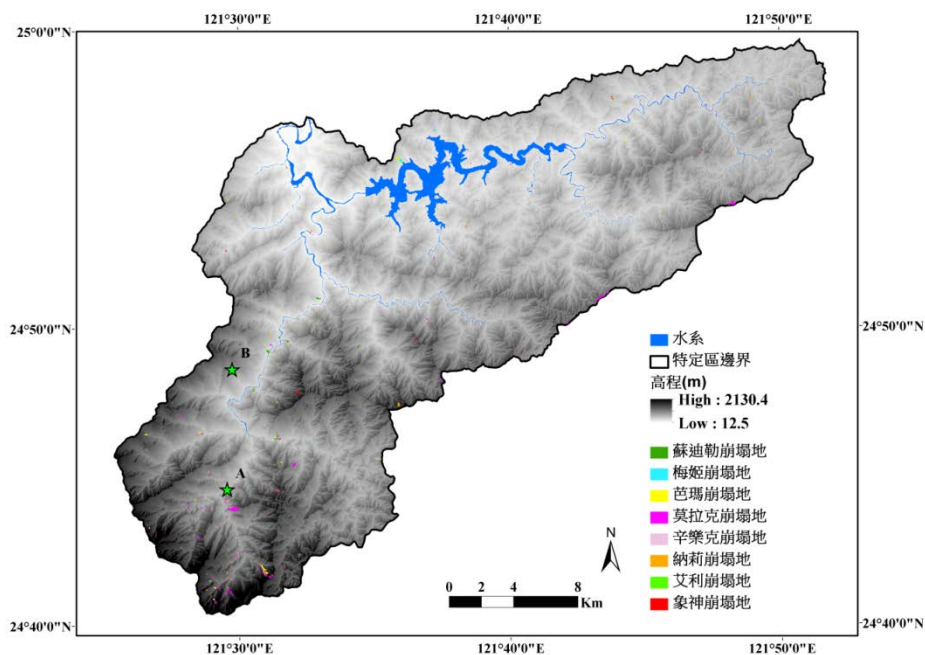


圖 1 臺北水源特定區範圍以及歷年崩塌地。點 A 代表圖 2 及圖 3 的位置，點 B 代表圖 4 的位置。

Figure 1 Geographic location of Taipei Water Source Domain and landslides over the years. Point A represents the location of Figure 2 and Figure 3, and point B represents the location of Figure 4.

2. 歷年颱風事件之崩塌目錄

本研究選定2000-2015年間在研究區造成嚴重土砂問題之颱風事件，包

括象神(2000年)、納莉(2001年)、艾利(2004年)、辛樂克(2008年)、莫拉克(2009年)、芭瑪(2009年)、梅姬(2010年)、蘇迪勒(2015年)共8次颱風事件，收集其事件前後之衛星影像資料，以崩塌地判釋流程完成崩塌地之判釋，表1列出8次崩塌事件之事件日期及崩塌地資料，其中崩塌地面積最小為16 m²，最大為118108 m²，平均面積2474 m²，判釋完成之8次颱風事件後崩塌地分佈如圖1 所示，由崩塌地分佈可以

看出崩塌地多分佈於本研究區西南區域，推估是因為該地區地勢較高、坡度較陡且地質條件較脆弱所致。

將各次颱風事件之崩塌目錄與不同尺寸之網格、邊坡單元進行套疊，可以計算各分析單元過去發生崩塌之次數，各分析單元歷年崩塌次數再依(2)式及(4)式可分別計算出未來一年內該分析單元發生崩塌之Poisson機率及Binomial機率。

表 1 8 次颱風事件之崩塌地資料。

Table 1 Landslide data of 8 typhoon events.

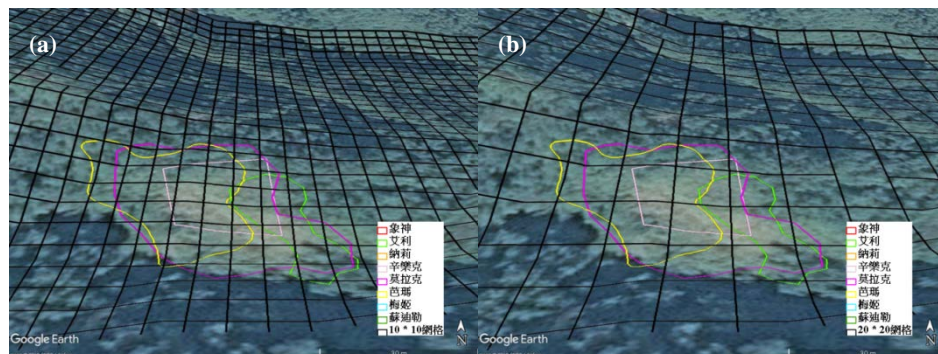
颱風事件	事件日期	新增崩塌地數量(個)	最小崩塌地面積(m ²)	最大崩塌地面積(m ²)	崩塌地總面積(m ²)	崩塌地平均面積(m ²)
象神	2000/11/01	42	326	19619	131148	3123
艾利	2001/09/16	92	107	68032	261650	2844
納莉	2004/08/24	97	140	27270	239856	2473
辛樂克	2008/09/13	32	475	21101	71111	2222
莫拉克	2009/08/07	173	16	118108	1016448	5875
芭瑪	2009/10/05	302	47	49369	484785	1605
梅姬	2010/10/21	47	407	27318	118874	2529
蘇迪勒	2015/08/08	589	257	48041	1075263	1826

3. 網格與邊坡單元之比較

邊坡單元因具有一定的地形代表性，且其平均面積約 25000 m^2 ，能較完整的涵蓋崩塌地，然而其面積較大，崩塌通常只發生在邊坡單元內的局部區域，因此對於崩塌地位置之描述較不精確。而網格其平均面積分別為 100 、 400 、 1600 、 10000 m^2 ，相對邊坡單元為小，則能更準確的呈現出崩塌地的位置。

本研究將各種分析單元之圖層檔案轉換成KML檔，以Google Earth開啟，

將分析單元與Google Earth上的衛星影像做比較，以了解分析單元與實際崩塌地之關係，並篩選適合本研究之分析單元。圖2是以不同分析單元套疊在Google Earth衛星影像上的結果，其地理位置位於圖1中的點A，由圖2(a)到圖2(e)分別是 $10 \times 10\text{ m}$ 、 $20 \times 20\text{ m}$ 、 $40 \times 40\text{ m}$ 、 $100 \times 100\text{ m}$ 網格以及邊坡單元，而影像之日期為蘇迪勒颱風後2015/10/27之影像圖，圖中之不同色環代表不同事件後新增之崩塌地，而黑色線是各個分析單元的邊界。



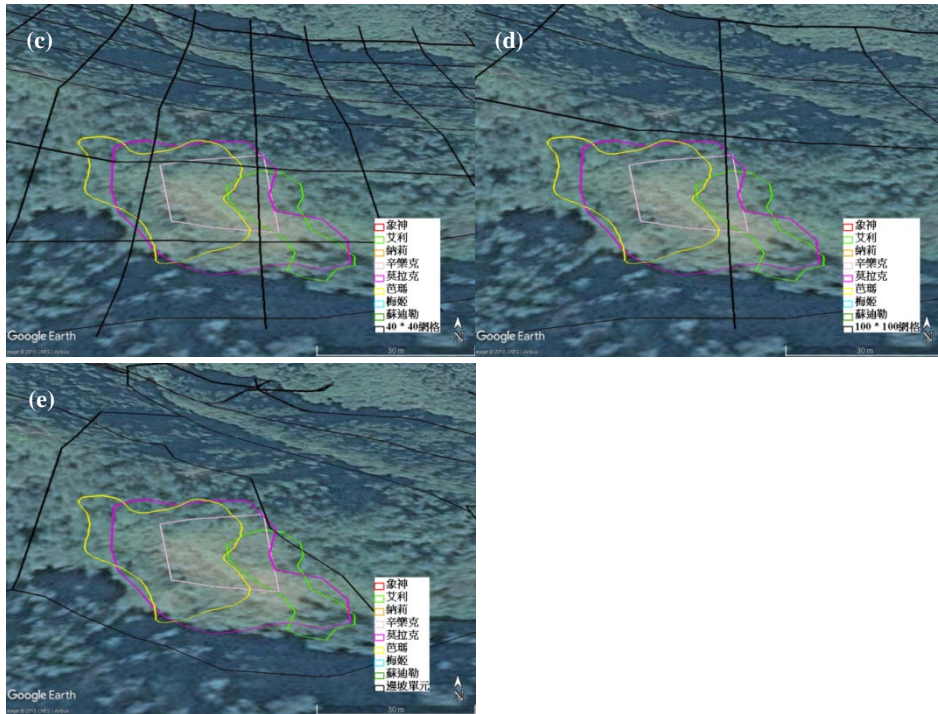


圖 2 以 Google Earth 之崩塌地衛星影像套疊分析單元圖層：(a) 10×10 m 網格 (b) 20×20 m 網格 (c) 40×40 m 網格 (d) 100×100 m 網格 (e) 邊坡單元。(影像日期：2015/10/27)

Figure 2 Use satellite imagery in Google Earth to combine with analysis units: (a) 10×10 m grid cells (b) 20×20 m grid cells (c) 40×40 m grid cells (d) 100×100 m grid cells (e) Slope units. (Imagery date: 2015/10/27)

由圖中可以看出崩塌地在衛星影像上對應位置有植生較稀疏之情形，且崩塌有重複發生之情形。然而以邊坡單元來看，崩塌地僅分布在邊坡單

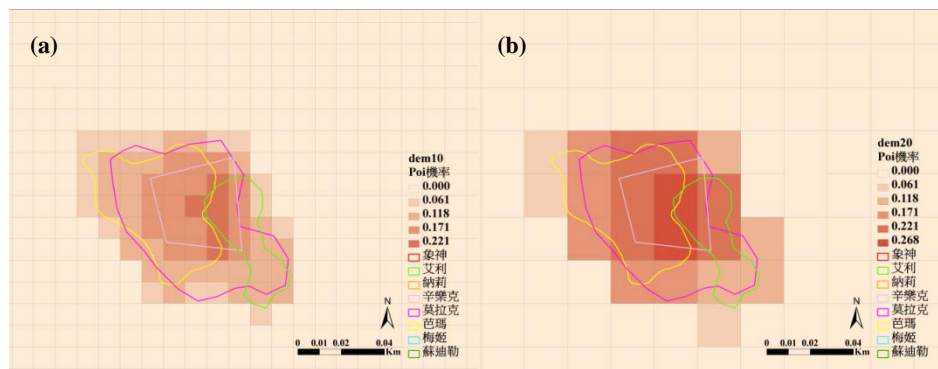
元內之局部區域，並非整個邊坡單元過去皆有崩塌之發生，因此若以邊坡單元為分析單元，因計算出的整個邊坡單元皆會是相同的機率值，無法呈現分析單元內的差異，而 40×40 m、

100 × 100 m之網格也有類似之情形，較無法精確呈現高崩塌機率之區位。而10 × 10 m、20 × 20 m網格則能較為精確地描繪出崩塌地的分佈位置。

另外，在本研究選定之8次歷年颱風事件中，發生的崩塌面積從最小的16 m²，到面積最大的崩塌地118108 m²，範圍落差相當大，因此要選擇一個能適合每種崩塌地尺寸的分析單元並不容易。由崩塌地面積之統計數值發現，本研究區發生之崩塌地有一半以上是面積小於1000 m²的小尺寸的崩塌地。因此本研究將崩塌地面積依大小作順序排列，選擇第十百分位的崩塌地面

積做為判定之標準，以決定適合本研究之分析單元。第十百分位的崩塌地面積是279 m²，因此以10 × 10 m之網格做分析單元時，其單元面積100 m²最能用以呈現崩塌地之分佈。

本研究再以同一地區之Poisson機率分佈進行不同分析單元之比較，以了解不同分析單元於崩塌機率呈現上之差異。圖3(a)到圖3(e)呈現的是不同大小網格以及邊坡單元的Poisson機率分佈圖，圖中以顏色的深淺呈現不同的Poisson機率，而不同崩塌事件則以不同的色環代表。



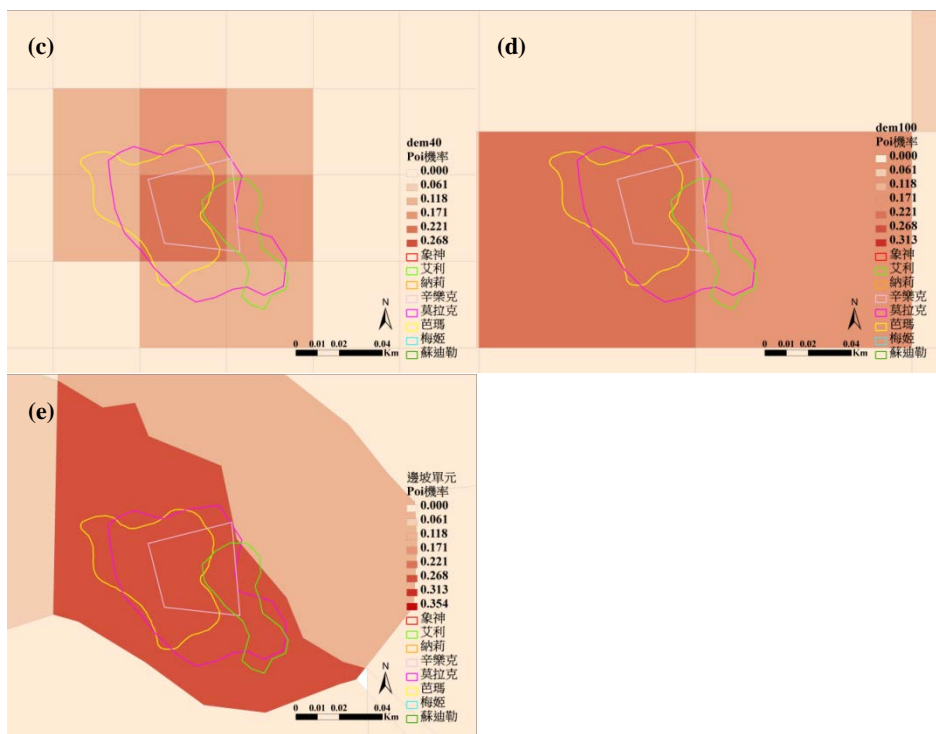


圖 3 不同分析單元之 Poisson 機率分佈：(a) 10×10 m 網格 (b) 20×20 m 網格 (c) 40×40 m 網格 (d) 100×100 m 網格 (e) 邊坡單元。

Figure 3 Poisson distribution for different mapping units: (a) 10×10 m grid cells (b) 20×20 m grid cells (c) 40×40 m grid cells (d) 100×100 m grid cells (e) Slope units.

由圖3中可以看出大的分析單元如圖3(e)的邊坡單元雖然能夠完整的涵蓋完整的崩塌位置，但也容易在一個邊坡單元內涵蓋多期的崩塌事件，造成在推估未來機率時整個邊坡單元

的機率皆提高，如圖中央呈深紅色的邊坡單元Poisson機率最高達0.268，然而事實上崩塌只發生在該邊坡單元的局部區域，其他位置過去則未發生崩塌，因此其他位置之崩塌機率是被高估的。若是使用尺寸較小的分析單元，

例如圖3(a)、圖3(b)之網格單元，則不會有大尺寸分析單元機率高估的問題。然而在本研究中發現小尺寸的分析單元會出現同一個坡面內崩塌機率反覆變化之情形，如圖4(位於圖1中的點B)為一個經常性發生崩塌之坡面，其未來崩塌之機率在此坡面上應為相同或

相近的值，然而圖4(a)的 10×10 m網格圖層在呈現崩塌機率分佈時，出現崩塌機率較低之網格夾在兩個崩塌機率較高的網格中間，較不連續，反之在 20×20 m網格圖層中之崩塌機率為連續分佈則合理，能夠呈現出同一個坡面有穩定之崩塌機率分布。

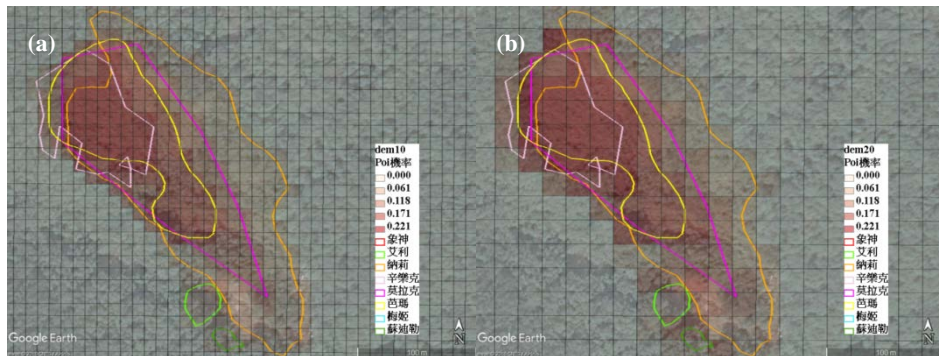


圖 4 10×10 m 與 20×20 m 網格之比較。(a) 10×10 m 網格 (b) 20×20 m 網格。

Figure 4 Comparison of 10×10 m and 20×20 m grid cells. (a) 10×10 m grid cells (b) 20×20 m grid cells.

綜上，以邊坡單元做分析時較能符合地形特徵，然而當需了解邊坡單元內崩塌較易發生在上下邊坡等不同位置時，邊坡單元則無法有效呈現。而使用網格作為分析單元時，雖不具地形特徵，但能呈現出更細部之崩塌機率差異。其中，考量本研究區崩塌

地面積，以 10×10 m網格作為分析單元較能呈現崩落地之分佈。而考量機率分佈時，使用 20×20 m網格則能呈現出同一坡面具有相同或相近的崩塌機率。

4. Poisson 機率模型與 Binomial 機率模型之比較

在機率模型的比較中，由分析單元選擇之結果，選擇以20 × 20 m網格作為比較之分析單元，圖5是全研究區兩種機率模型之分佈，可以看出兩種機率模型的分佈皆相同，僅數值不同，由公式可以知道兩者在同一分析單元裡皆是以相同的歷年崩塌次數代入公式去計算，因此會出現相同分佈的情況。兩種機率模型相比較可發現

Binomial算出之機率值較高，可視為危險性較高時之崩塌機率參考，其中機率值最高為0.313，代表若崩塌發生頻率和過去16年一樣，未來一年內發生崩塌之機率。且由圖5可發現本研究區之西南方有較多高機率值之網格分佈，能一定程度反映崩塌地之空間分佈機率。

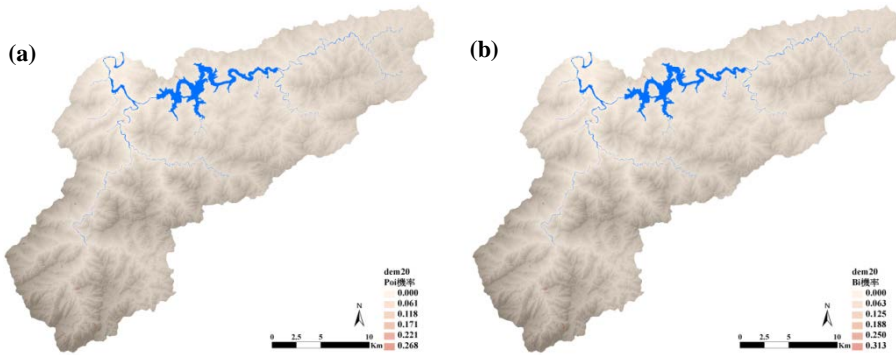


圖 5 (a) Poisson 機率模型及(b) Binomial 機率模型所計算出之機率分佈圖。
Figure 5 (a) Probability distribution of Poisson probability model and (b) Binomial probability model.

結論與建議

本研究探討了在進行崩塌機率分析時，考慮崩塌地面積、機率分佈時分析單元之選擇，建議參考之標準如下：

1. 分析單元之尺寸是否與崩塌地面積相匹配，並能適當呈現崩塌地範圍。
2. 分析單元應避免過小，以致呈現機率分佈時，在同一個坡面上出現機率值過於不連續的情形。

根據上述標準及本區崩塌地資料，可選擇邊坡單元或 10×10 m網格做為分析單元。邊坡單元具有地形之特徵，適合用做崩塌機率之分析，然而當需了解邊坡單元內崩塌較易發生在上下邊坡等不同位置時，則需要使用單元面積較小之網格。考慮到崩塌地面積時，以 10×10 m網格能適當的呈現崩塌地之分佈，而分析崩塌機率分佈時，使用 20×20 m網格則能呈現同一個坡面具有同樣或近似崩塌機率之特性。

另一方面，在Poisson及Binomial機率模型之比較上，雖然其機率分佈皆相同，然Binomial所計算之機率值較高，可視為較嚴重情形之機率分析結果，且機率模型能反映研究區西南方有較多高機率值網格分佈之空間特性，代表此機率模型同時具有崩塌空間及時間機率推估之能力，可作為未來在初步判定一區域崩塌機率分佈時之應用模型。

Binomial機率模型在本研究區計算出來的機率值最高為0.313，代表若崩塌發生頻率和過去16年一樣，未來一年內發生崩塌之機率。然而此處的假設包含地質與水文特性條件不變，

因此得出之崩塌機率尚無法細分為地質或水文因素，此為未來研究可再探討之方向。

參考文獻

1. 經濟部中央地質調查所(2013)，「都會區周緣坡地山崩潛勢評估」，財團法人中興工程顧問社。
2. 劉進金、翁勳政、黃金鴻、楊明宗(2001)，「豪雨型崩塌地之遙測影像分析」，21世紀土木工程技術與管理研討會論文集，新竹，第 C-21~C-31 頁。
3. Bernknopf, R. L., R. H. Campbell, D. S. Brookshire and C. D. Shapiro (1988), "A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation," *Bulletin American Association of Engineering Geologists*, 25(1): 39-56.
4. Carrara, A. (1983), "A multivariate model for landslide hazard evaluation," *Mathematical Geology*, 15: 403-426.
5. Carrara, A. (1988), "Drainage and

- divide networks derived from high-fidelity digital terrain models. In: Chung, C.-J. F., et al. (eds.), "Quantitative analysis of mineral and energy resources. NATO-ASI Series, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 581-597.
6. Carrara, A., M. Cardinali, F. Guzzetti and P. Reichenbach (1995), "GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.)," *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175.
 7. Chung C.-J. F. and A. G. Fabbri (1999), "Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(12): 1389-1399.
 8. Clerici, A., S. Perego, C. Tellini and P. Vescovi (2002), "A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method," *Geomorphology*, 48: 349-364.
 9. Crovelli, R. A. (2000), "Probability models for estimation of number and costs of landslides," United States Geological Survey Open File Report 00-249.
 10. Guzzetti, F. (2006), "Landslide Hazard and Risk Assessment," Ph.D. thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität University of Bonn, Bonn, 389 pp.
 11. Guzzetti, F., A. Carrara, M. Cardinali and P. Reichenbach (1999), "Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy," *Geomorphology*, 31: 181-216
 12. Guzzetti, F., A. Carrara, M. Cardinali and P. Reichenbach (1999a), "Landslide hazard evaluation: an aid to a sustainable development," *Geomorphology*, 31: 181-216.
 13. Hansen, M. J., (1984) "Strategies for classification of landslides," Brunsdon, D. and Prior, D.B. (eds.) *Slope Instability*. John Wiley and Sons, 1-25.
 14. Lee, S. (2004), "Application of

- Likelihood Ratio and Logistic Regression Models to Landslide Susceptibility Mapping Using GIS,” *Environmental Management*, 34(2): 223-232.
15. Luckman, P. G., R. D. Gibson and R. C. Derosé (1999) “Landslide erosion risk to New Zealand pastoral steeplands productivity,” *Land Degradation & Development*, 10(1): 49-65.
 16. Onoz, B. and M. Bayazit (2001), “Effect of the occurrence process of the peaks over threshold on the flood estimates,” *Journal of Hydrology*, 244: 86-96.
 17. Pike, R. J. (1988), “The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models,” *Mathematical Geology*, 20(5): 491-511.
 18. Van Den Eeckhaut, M., P. Reichenbach, F. Guzzetti, M. Rossi, and J. Poesen (2009), “Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 507-521.
 19. van Westen, C. J. (1993), “Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation,” ITC Publication n. 15, ITC, Enschede, 245 p.
 20. van Westen, C. J. (1994), “GIS in landslide hazard zonation: a review with examples from the Colombian Andes,” In: Price, M.F. and Heywood, D.I. (eds.) Taylor and Francis, London, 135-165.
 21. van Westen, C. J., N. Rengers, M. T. J. Terlien and R. Soeters (1997) “Prediction of the occurrence of slope instability phenomenal through GIS-based hazard zonation,” *Geologische Rundschau*, 86: 404-414.
 22. Varnes, D. J. and IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements (1984), “Landslide hazard zonation: a review of principles and practice,” UNESCO Press, Paris.
 23. Vasu, N. N., S. R. Lee, A. M. S. Pradhan, Y. T. Kim, S. H. Kanga, D. H. Lee (2016), “A new approach to temporal modelling for landslide hazard assessment using an extreme rainfall in-

- duced-landslide index,” *Engineering Geology*, 215: 36-49.
24. Xie, M., T. Esaki and G. Zhou (2004), “GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model,” *Natural Hazards*, 33: 265-282.
-

107 年 06 月 01 日收稿

107 年 06 月 06 日修改

107 年 06 月 08 日接受

水土保持學報 49 (4): 2249 - 2266 (2017)

Journal of Soil and Water Conservation, 49 (4): 2049 - 2066(2017)