

氣候變遷對高屏溪流域崩塌潛勢之影響評估

范正成 楊智翔 張世駿* 黃效禹 郭嘉峻

摘要 為探討氣候變遷對高屏溪流域崩塌潛勢之影響，本研究透過地文因子蒐集與篩選檢定、降雨參數選定，以邏輯斯回歸建置崩塌潛勢評估模式，並結合 3 種 GCMs 模式及 3 種未來情境進行分析。結果顯示，與崩塌發生最為相關之 5 項地文因子及降雨參數分別為岩性、坡度、坡向、水系比、道路比及連續二日雨量。所建置之崩塌潛勢模式，其準確率可達 80% 以上。經綜合評估，INCM3 模式之結果對未來之衝擊最大，其中又以 INCM3 模式 B1 情境短期 (2010~2039 年) 之結果最符合現況；利用此模式及情境推估短期之結果與基期 (1961~1990 年) 相比，「極高」崩塌發生潛勢之增加面積達 98%。

關鍵詞：氣候變遷、崩塌、發生潛勢、地文因子、邏輯斯回歸。

Effects of Climate Change on the Potential of the Landslides in the Basin of Kaoping Stream

Jen-Chen Fan Chih-Hsiang Yang Shih-Chun Chang* Hsiao-Yu Huang Jia-Jun Guo

ABSTRACT To investigate the effects of climate change on the potential of the landslides in the basin of Kaoping stream, in this study, physiographic factors are collected and tested; rainfall parameters are selected; logistic regression method is used to establish the model for evaluating the potential of landslides; and 3 GCMs models and 3 future scenarios are used for analysis. Results show that 5 physiographic factors and 1 rainfall parameters are most highly correlated with the potential of landslides. They are the slope steepness, the area ratio of dip slope, the distance to fault, the road ratio and the rainfall amount of consecutive 2 days. The accuracy of the model established in this study reaches 80%. The impact for the future of the simulated results for the short term period (2010~2039) using the INCM3 model is found the greatest and the B1 scenario is found most in accordance with the real conditions. Using the developed model in this study to evaluate the potential of the landslide for the short term period, it is found the area of the highest potential of landslides increase 98%, compared with the potential of landslide in the baseline period (1961~1990).

Key Words : Climate change, landslide, potential of occurrence, physiographic factor, logistic regression.

一、前言

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2007) 報告顯示，全球暖化導致氣候變遷，將造成海平面上升及氣候變異等兩項主要問題。其中，後者包

括乾旱及暴雨事件頻率、範圍及強度等，皆可能大幅增加。而暴雨事件之頻率、強度增加之結果，將使台灣地區之坡地災害防治面臨更大挑戰。在台灣地區常見坡地災害中，崩塌係為現今社會大眾極為關切之議題，每當颱風、豪雨侵襲之際，常使台灣山區發生崩

塌災害，使公共設施或人民生命財產等，產生極大損失。崩塌發生之原因眾多，諸如地形、地質條件、土地利用狀況及降雨等。然而，在其他地文因子變動較小之情況下，降雨實為崩塌災害發生之重要誘發因素之一。根據台灣地區統計資料顯示，極端強降雨颱風（排名前 10 % 之颱風降雨），往往造成台灣地區重大崩塌災害，如莫拉克（編號 0908）、賀伯（編號 9608）及納莉（編號 0116）颱風等。此種極端強降雨颱風之發生頻率在 2000 年前，平均 3~4 年發生一次，惟於 2000 年後則平均每年發生一次。前述結果顯示，台灣地區目前之極端降雨事件發生頻率確有逐漸上升趨勢，隨颱風、豪雨所觸發之崩塌災害發生潛勢亦隨之提高。

在氣候變遷對崩塌發生潛勢之相關研究中，Jakob and Lambert (2009) 之研究指出，加拿大地區的 Howe Sound 在未來 2071 年到 2100 年間引發崩塌之暴雨事件將提升 28.0 % 之多。值得注意的是，該研究於時間降尺度部分係直接以統計之方式將長時間尺度之氣象資料（月）轉化為短時間尺度資料（24 小時）使用，惟其所建立月雨量與 24 小時雨量迴歸式之決定係數僅約 0.56。顯然，此種時間降尺度的偏差將使氣候變遷的不確定性大幅提升。Chiang and Chang (2009) 則是評估台灣白石溪集水區內，崩塌不穩定區域受氣候變遷的影響，該研究結果指出，2010~2099 年較 1960~2008 年而言，區內崩塌不穩定區域增加約 12.8 %。而在此研究中，亦採用與 Jakob and Lambert (2009) 相同方式進行氣候資料之時間降尺度，其月雨量與 24 小時雨量迴歸式之決定係數約 0.71。與前述相同，此種時間降尺度之方式有增加氣候變遷評估結果不確定性的可能。

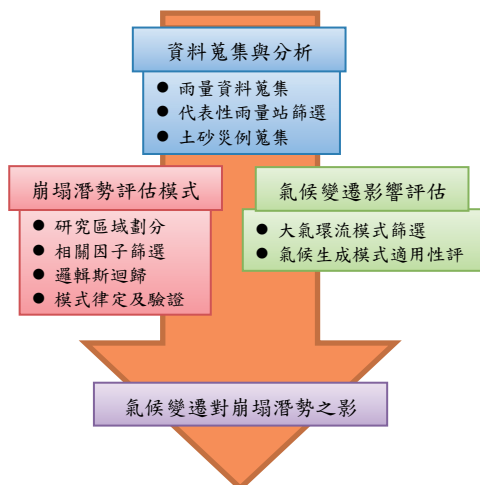


圖 1 研究流程

Fig.1 Flow chart of this Study

鑑於上述，本研究主要之目的即在於評估由於氣候變遷所導致之暴雨事件變化對崩塌發生潛勢的影響，特別是在氣候變遷之時間降尺度方面，採用氣候生成模式方式，期能改善以往相關研究之不足，以增加氣候變遷評估結果之可信度，使評估結果能作為未來因應防災策略研擬之參考。

二、研究方法

本研究旨在評估氣候變遷對高屏流域未來崩塌災害發生潛勢之影響，為達成此一目的，擬定之研究方法包括三大項：(1) 地文因子等資料蒐集及量化、(2) 崩塌災害發生影響評估模式之建置及 (3) 氣候變遷之影響評估。其整體研究流程如圖 1。

1. 研究範圍

高屏溪原名下淡水溪，流域面積 3,257 平方公里，乃台灣第一大河川，其全長 171 公里，流經屏東縣及高雄市。本研究範圍包括高雄市境內之內門區、六龜區、甲仙區、杉林區、那瑪夏區、美濃區、茂林區、桃源區、旗山區、林園區，以及屏東縣境內之三地門鄉、泰武鄉、高樹鄉、瑪家鄉、霧台鄉等，共計 15 個鄉鎮，如下圖 2 所示。

2. 崩塌災例資料蒐集

為瞭解高屏流域內歷年發生崩塌災害之暴雨事件變化情形及提供建置坡地災害發生潛勢影響評估模式之基礎資料，本研究蒐集研究區域內歷年發生之崩塌災例，內容包括災害發生之點位、時間、災害規模及雨量等。2007 年後之災例，主要以水土保持局每年彙整之重大土石災情報告為主，而 2007 年以前之災害記錄則由水土保持局台南分局歷年於高屏流域內所作之各式調查治理規劃報告中彙整取得。本研究共完成蒐集 57 件崩塌災害事件，介於 2005 至 2010 年間，其分布如圖 3 所示。

3. 地文因子蒐集及量化

建立崩塌潛勢評估模式前，須先篩選影響崩塌之代表性地文因子。前人研究中（如張石角，1987；Keefer, 1987；李錫堤，2009；Pradhan and Lee, 2010 等）探討與崩塌發生相關之地文因子共有 27 項。而其中最常用之地文因子有岩性、坡度、坡向、高程及土地利用等 5 項，其中，由於道路及水系密度為常造成崩塌之主因，故研究中另將土地利用因子分為道路密度及水系密度

等 2 項因子。本研究針對前述 6 項地文因子以無母數統計方法之 Mann-Whitney U test 進行顯著性檢定。檢定之結果如表 1 所示。由表 1 得知，高程因子之未發生樣本等級平均數大於發生樣本等級平均數，即表示平均高程較低之坡單元卻較容易發生崩塌災害，此點於理論上實屬牽強，惟分析結果何以如此，則未盡明瞭，有待未來進一步研究分析。由上之故，本研究中暫將高程因子予以捨棄。其餘 5 項地文因子之顯著性皆小於 0.01，顯示其與崩塌發生之相關性甚高。因此，本研究所選定與崩塌發生最為相關之 5 項地文因子為岩性、坡度、坡向、水系比及道路比。

上述 5 項因子可分為類別及數值因子 2 類，其中類別因子直接以 27 個發生過崩塌災害之坡單元為分析對象，統計其發生過災害之次數，依發生次數多寡給予其相對應之分數；數值因子則參考曾奕超 (2004) 之研究，應用模糊理論 (fuzzy theory) 中隸屬度 (degree of membership) 之概念，建立因子之隸屬函數 (membership function) 關係式，各項地文因子之定義及計算方式如下所示：

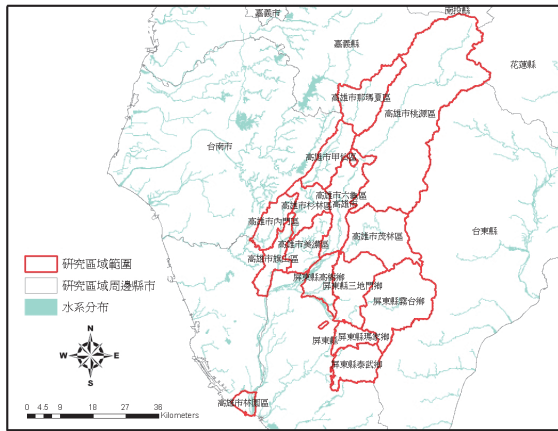


圖 2 研究範疇位置圖
Fig.2 Location of study area

- (1) 坡向：
依照八分坡向法及坡度平緩處 (坡度 < 5 %) 等，共分為 9 個等級。經統計本研究區內各坡向發生災害之次數及所占總次數比例如表 2 所示：
- (2) 坡度：
坡度之分級方式係直接參照水土保持技術手冊 (如表 3 所示)。依據表 3，坡度共分為七級。本研究依據表 3 及各坡單元平均坡度將其分級，並給予權重。

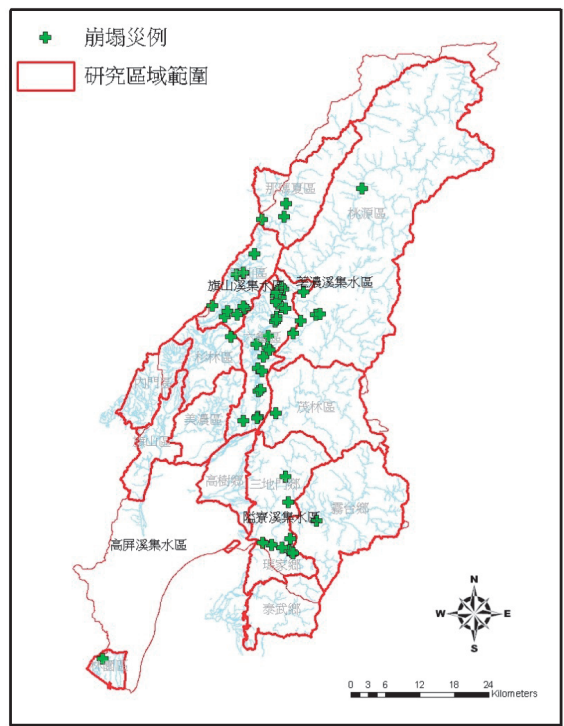


圖 3 研究範疇內歷年崩塌災害事件分布
Fig.3 Distribution of historical landslide disasters in study area (2005~2010)

表 1 崩塌因子顯著性檢定結果

Table 1 Significance test of landslide factors.

| | 坡向 | | 坡度 | | 高程 | | 水系比 | | 道路比 | | 岩性量化值 | |
|--------------------|-----------|-------|----------|------|----------|-------|-----------|------|-----------|-------|-----------|------|
| | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 發生與否 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 樣本數 | 27 | 180 | 27 | 180 | 27 | 180 | 27 | 180 | 27 | 180 | 27 | 180 |
| 等級平均數 | 132.8 | 100.1 | 109.3 | 73.6 | 66.6 | 110.4 | 137.2 | 99.4 | 131.9 | 100.2 | 146.4 | 97.9 |
| Mann Whitney U 統計量 | 1726.500 | | 1654.500 | | 1459.000 | | 1603.000 | | 1754.000 | | 1346.000 | |
| Wilcoxon W 統計量 | 18016.500 | | 2060.500 | | 1865.000 | | 17893.000 | | 18044.000 | | 17636.000 | |
| Z 檢定 | -2.737 | | -3.402 | | -3.581 | | -3.095 | | -2.701 | | -4.103 | |
| 顯著性 | .006 | | .001 | | .000 | | .002 | | .007 | | .000 | |

(3) 岩性：

根據中央地質調查所提供之五十萬分之一地質圖，本研究範圍內之地質種類包括廬山層、沖積層、南莊層、桂竹林層、階地堆積層、畢祿山層、大南澳片岩、頭崙山層、古亭坑層、卓蘭層、錦水頁岩、南港層、石底層、西村層、佳陽層等。其中，前 5 種地層中均曾發生過崩塌災害；其發生次數統計如表 4 所示。其後則依據坡單元中含有何種地質給予其相對應之權重分數。

表 2 各地區發生崩塌災害次數統計表

Table 2 The occurring frequency of landslide disasters in each aspect

| 方位 | 代碼 | 發生災害次數 | 所佔比例 (權重分數) |
|----|----|--------|-------------|
| 平地 | 0 | 0 | 0.00 |
| 北 | 1 | 0 | 0.00 |
| 東北 | 2 | 2 | 0.04 |
| 東 | 3 | 0 | 0.00 |
| 東南 | 4 | 14 | 0.25 |
| 南 | 5 | 6 | 0.11 |
| 西南 | 6 | 10 | 0.18 |
| 西 | 7 | 19 | 0.33 |
| 西北 | 8 | 6 | 0.11 |

表 3 坡度因子分級標準

Table 3 The weighting standard for slope factor

| 坡度分級 | 分級範圍 | 權重分數 |
|------|-----------------------|------|
| 一級坡 | $S \leq 5\%$ | 1 |
| 二級坡 | $5\% < S \leq 15\%$ | 2 |
| 三級坡 | $15\% < S \leq 30\%$ | 3 |
| 四級坡 | $30\% < S \leq 40\%$ | 4 |
| 五級坡 | $40\% < S \leq 55\%$ | 5 |
| 六級坡 | $55\% < S \leq 100\%$ | 6 |
| 七級坡 | $S > 100\%$ | 7 |

表 4 各地質發生崩塌災害次數統計表

Table 4 The occurring frequency of landslide disasters in each geology

| 地質 | 發生災害次數 | 所佔比例 (權重分數) |
|------|--------|-------------|
| 沖積層 | 11 | 0.2 |
| 南莊層 | 11 | 0.2 |
| 桂竹林層 | 8 | 0.1 |
| 階地堆積 | 4 | 0.1 |
| 廬山層 | 24 | 0.4 |

(4) 水系比：

本研究定義水系比為水系面積與坡單元面積之比值，而為量化水系比對崩塌之影響，針對發生過崩塌災害之坡單元進行水系比分析，並建立其隸屬函數，如式 1 及圖 4，其中 River 為水系比 (%)、 $River_N$ 為水系比之隸屬度：

$$\begin{cases} River < 0.33\%, & River_N = 0 \\ River_N = 0.327 \ln(River) + 0.361 \\ River > 7.06\%, & River_N = 1 \end{cases} \quad (1)$$

(5) 道路比：

本研究定義道路比為單位面積 (ha) 內之道路長度 (m)。研究中所統計之道路長度包含國道、省道、縣道及鄉道等。而為量化道路比對崩塌之影響，針對發生過崩塌災害之坡單元進行道路比分析，並建立其隸屬函數，如式 2 及圖 5，其中 Road 為道路比 (m/ha)、 $Road_N$ 為道路比之隸屬度：

$$\begin{cases} Road < 4.6, & Road_N = 0 \\ Road_N = 0.542 \ln(Road) - 0.827 \\ Road > 29.1, & Road_N = 1 \end{cases} \quad (2)$$

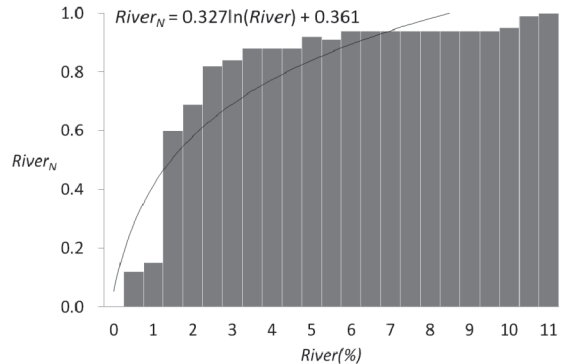


圖 4 水系比隸屬函數圖

Fig.4 Membership function of drainage density

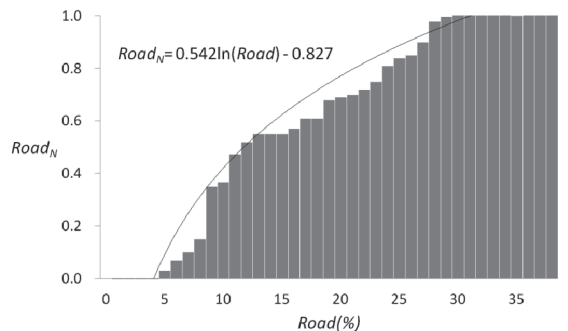


圖 5 道路比系數函數圖

Fig.5 Membership function of road density

4. 崩塌潛勢影響評估模式

國內外已有許多學者針對崩塌災害之潛勢評估進行研究，而崩塌現象乃綜合自然環境、氣象條件及人為開發等因素所造成，故於其潛勢評估部分，亦應考量所有可能影響之因素進行評估。綜觀現今崩塌潛勢評估或預測之相關模式，大致可分為定性分析、物理機制分析及定量統計分析等三大類。就定性分析方面而言，主要係由專家學者依其經驗針對崩塌地之成因進行判斷評估，並就崩塌因子作成相對排序及評分，將因子組合而得山崩潛感分析或環境敏感度分析，如張石角 (1987) 提出簡確法、陳振華 (1985) 以坡度等 7 項因子評估山崩潛感性等，惟此等分析方法需大量之人力進行現地調查，且權重及評分方式較為主觀；就物理機制方面而言，係以估算安全係數之方式評估該邊坡穩定性，如朱聖心 (2001)、陳憶璇 (2002) 以無限邊坡安全係數概念進行崩塌潛勢分析等，然而由於部分影響邊坡穩定之地文因子較難取得，如土壤性質、凝聚力、地下水位高度等，故需經由假設或特定點之取樣分析結果代表之，雖有物理機制為基礎，惟其輸入參數之不確定性易使模式準確性受到影響；定量統計分析則係由過往發生崩塌之實際案例，以前人經驗及數理模式之方式篩選影響崩塌發生之因子，再以定量方式針對目前尚未發生崩塌但具有相同特性之因子組合區域進行崩塌潛勢之預測或潛勢評估。如 Aldridge (1999) 則選取煤礦區 (coal seam)、高程 (elevation)、斷層 (faults)、斷層破碎帶 (fault zone)、坡度 (slope zone)、地陷區 (subsidence) 及岩性 (lithology) 等因子進行崩塌潛勢評估，並以粗糙集 (rough set) 來建立整體評估模式。

綜上，考量本研究欲建立高屏溪流域之崩塌發生潛勢評估模式，由於高屏溪流域範圍廣大，採用定性及物理機制分析皆有其困難存在。本研究即以定量統計方式為基礎，配合易取得之地文參數，以邏輯斯迴歸 (logistic regression) 進行評估模式之分析。

邏輯斯迴歸模式係利用統計為基礎，雖較缺乏力學基礎及序率之概念，惟此一模式可大量結合水文、地文因子，處理事件發生與未發生之二元資料，將輸入於模式中之大量參數量化並轉換為事件發生機率；目前此一模式於台灣地區之應用，已有 Chang et al. (2007)、Chang and Chiang (2009) 分別使用於陳有蘭溪流及石門水庫之白石集水區進行崩塌地發生之預測，研究結果顯示崩塌地研判準確度分別達 78% 與 84

%。惟其所建置之模式係依據「時」雨量資料作為降雨參數，而本研究旨在評估氣候變遷對崩塌發生潛勢之影響，而目前未來降雨資料方面，仍以「日」雨量資料的模擬較為可靠。因此，本研究即參考前人相關研究之模式建置方法，重新以邏輯斯回歸為基礎配合「日」雨量資料，重新建立高屏溪流域之崩塌發生潛勢影響評估模式，供後續氣候變遷分析之用。亦即本研究所建立之模式可用來評估地文條件已知之坡單元發生崩塌的降雨參數門檻；若在地文條件相同之下，用此模式即可推估未來短、中、長期氣候變遷所導致不同降雨參數之情況下，坡單元之崩塌發生潛勢。一般線性迴歸之分析方法，係找出一組推估值與觀測值具有最小平方和之參數，而二元迴歸則是找出一組具有最大可能性的參數，即預測值最符合觀測值，且能同時處理量化變數與類別參數。二元迴歸模式是對數線性模型的一種特殊形式 (Agresti, 2002)，當應變數為二元變數時即屬之，其可表示為式 3。其中， p_i 為第 i 點在給定一系列自變數 x_{1i} 、 x_{2i} 、...、 x_{ki} 值時的事件發生機率， α 、 β_k 為係數。在本研究中， x_{ki} 是第 i 點的因子向量，該點若發生崩塌災害 (landslide hazard) 則 $p_i=1$ ，無發生災害則 $p_i=0$ 。最後以訓練資料迴歸分析後即得係數 α 、 β_k 。在本研究中，於模式係數率定完成後，設定 p_i 為 0.5 時即發生災害。而模式參數應包含地文及降雨因子等，其中，地文因子為已知。因此，將各項地文因子及 $p_i=0.5$ 代入模式中，即可推求此一情況下之降雨門檻值。

$$\begin{cases} Z = \ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_{ki} \\ p_i = \frac{\exp(Z)}{1 + \exp(Z)} \end{cases} \quad (3)$$

5. 氣候變遷影響評估

氣候變遷預設情境一般可分成大氣環流模式 (general circulation models, GCMs) 預測、時間類比、空間類比以及假設等四類，其中唯有大氣環流模式之預測，方能真正以物理性評估大氣溫室氣體加強導致全球暖化之特性。因此，現今氣候變遷衝擊研究多採用大氣環流模式之模擬結果為主。

然而，GCMs 模式仍存在著尺度之問題，就空間尺度而言，屬全球大範圍的尺度，其模擬值若應用於小區域仍有相當之不確定性。故需透過空間降尺度過程以取得區域之氣候特性資料；就時間尺度而言，GCMs 輸出值以未來「月平均」氣溫或雨量變化值較

為可靠，而許多影響評估模式所需輸入值之時間尺度為「日」，故仍需透過氣候生成模式進行時間降尺度之工作。如此才能得到所需之未來氣候變遷情境的氣象資料，最後再帶入建置完成之影響評估模式中，評估氣候變遷所帶來的影響。整體氣候變遷影響評估流程如圖 6 所示。

(1) 大氣環流模式

目前 IPCC 共提供有 24 個 GCMs 資料，而在未來情境部分，目前國際上常採用之氣候變遷情境共有 6 種，即 A1F1、A1T、A1B、A2、B1 及 B2 等。根據 Nakicenovic and Swart (2000) 之解釋，B1 情境屬一個理想情境，即表示在該情境下，未來 2100 年二氧化碳濃度將在 550 ppm。而 A2 情境則係考慮一較嚴重之未來狀態，即表示在該情境下，未來 2100 年二氧化碳濃度會達到 850 ppm。A1B 則為一居中狀態，在該情境下，未來 2100 年二氧化碳濃度為 720 ppm。雖然 IPCC(2007) 一再提及 6 種氣候變遷情境在推估未來情況具同等重要性。然而，目前 IPCC 網站上僅提供 A1B、A2 及 B1 等 3 種情境之月資料供下載，又目前國際上多數研究皆選用此 3 種情境進行分析，因此本研究即優先以此 3 種情境進行分析。又因 IPCC 所提供之 24 個 GCMs 中僅有 10 個模式具有完整之 A2、A1B 及 B1 情境資料，本研究經以一般 GCM 輸出值之氣溫及降雨改變值作為篩選依據，選取較適用於高屏流域之 3 個模式為 GFCM21、INCM3、MPEH5。

(2) 氣候生成模式

許多水文、農業或生態之衝擊評估模式皆需輸入長期且連續性之日氣象資料。然而，GCMs 輸出值之尺度，通常係以月為單位。以降雨參數而言，GCMs 之輸出值為未來每月降雨量改變之比值，無法由此獲得時距更短或更進一步之降雨

參數，如日降雨量、降雨延時等，此時即需要以氣候生成模式加以轉換，方可應用於一般影響評估模式中。

目前國際間已有許多發展成熟之氣候生成模式可供應用，惟氣候生成模式選定部分，係依據影響評估模式所需之輸入參數決定。如影響評估模式所需輸入之參數為日雨量及降雨延時，則在氣候生成模式即應選擇可根據長期氣候統計時等兩項參數之模式。同時，選擇之氣候生成模式需經過驗證分析，證明該模式能良好模擬研究區域之氣候特性。因此，氣候生成模式之選定，最主要有兩項考量，一為影響評估模式之輸入參數；二則為是否通過適用性檢定。Fan et al. (2013) 曾以美國農業部研發之 CLIGEN 氣候生成模式，驗證其於台灣北部地區之適用性。研究結果顯示，CLIGEN 能根據歷史長期氣候資料，準確重現該地區降雨參數，包括月平均雨量、濕天數、濕天雨量及日雨量標準偏差等。

本研究參照上述 Fan et al. (2013) 之方式，根據 CLIGEN 模式單日降雨量之輸出項進行基本降雨參數（包含月平均雨量、濕天天數、濕天雨量及日雨量標準偏差等）、降雨兩型參數（包含單日最大暴雨、連續二日至四日最大暴雨等）之驗證。以無母數統計方法之 Mann-Whitney 檢定及 Kolmogorov-Smirnov 檢定，分別檢驗 1961~1990 年之各月觀測值及模擬值在均值及分佈型態上之差異。結果顯示高屏流域 6 個代表性雨量站（即大津、新發、御油山、瑪家、甲仙及月眉等）30 年各月之基本降雨參數及兩型參數皆通過 Mann-Whitney 檢定及 Kolmogorov-Smirnov 檢定，意即無法推翻觀測值與模擬值來自於相同母體之假設。此一結果可說明各項基本降雨參數及兩型參數之觀測值與模擬值，在 30 年均值及分佈型態上，均並無顯著之差異。此外，為進一步分析各站 30 年基本降雨參數及兩型參數均值之模擬能力，將觀測值與模擬值點繪於 X、Y 散佈圖中。結果顯示，各項參數均值之點繪大多皆均勻散佈於 1:1 直線上，而各站基本降雨參數及兩型參數觀測值與模擬值間之決定係數 (R^2) 皆在 0.981 以上。綜合上述統計檢定及 X-Y 散佈圖之結果，證明 CLIGEN 氣候生成模式確能準確的重現高屏流域之基本降雨參數及兩型參數。

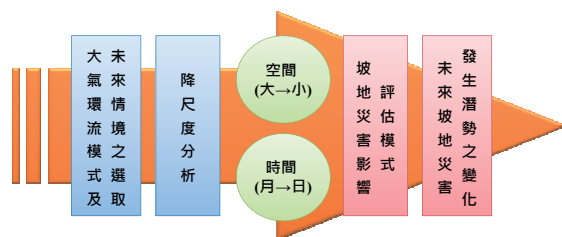


圖 6 氣候變遷影響評估流程

Fig.6 The flow chart of climate change effect evaluation

三、結果與討論

1. 崩塌潛勢影響評估模式之建置結果

根據所蒐集之歷年重大崩塌災例，研究區域內計有 57 件崩塌發生事件。發生事件樣本係由每個發生崩塌坡單元內之 5 項地文因子 (坡度、坡向、岩性、水系比及道路比) 及事件發生時之 4 項降雨參數 (當日雨量、連續二至四日累積雨量) 所組成。而在未發生崩塌樣本中，即以幾場主要之颱風事件 (包括海棠、聖帕、卡玫基、莫拉克及凡那比) 為其降雨參數標準，而地文因子則以在特定颱風事件中未發生崩塌之坡單元為樣本。經整理統計後，共有 57 件發生崩塌樣本及 1,194 件未發生崩塌樣本，其比例約為 1:21。然而對於邏輯斯回歸方法而言，如此懸殊之發生與未發生樣本比，將造成模式判斷未發生之準確率較高。而 Can et al. (2005) 之研究說明，以崩塌之邏輯斯模型而言，發生與未發生事件之樣本數以 1:1 之結果為最佳。本研究為討論發生與未發生樣本數比例對崩塌評估模式準確率之影響，分別採用 1:1、1:3 及 1:5 等三種樣本組合進行崩塌發生潛勢評估模式之建置。模式建置過程中，分為模式率定及驗證等兩階段。首先於模式率定之部分，使用 50 筆發生崩塌之樣本及三種比例 (50、150 及 250 筆) 之未發生崩塌樣本進行。同時，亦以未被選取至訓練階段的樣本，進行模式之驗證。其中，因未發生崩塌樣本之選取將直接影響模式率定之結果，為確認模式之穩定性，本研究以隨機取樣之方式且分別取樣 5 次進行模式之率定及驗證。模式率定及驗證階段之結果如表 5 及表 6 所示。

對於崩塌災害發生潛勢評估模式之預測而言，由於災害發生時常會造成大量之生命或財產之損失，故通常皆以較低之標準來發布災害之警戒通知，以期能提升災害防救之功能。因此，在評估指標中，應以「發生災害準確率」(即敏感度) 為最主要評估模式優劣之依據，其次才為「整體正確率」。故由表 5 可見，當取樣比例為 1:5 時，發生災害準確率約介於 48.0~52.0%，不同降雨參數率定之結果差異不大，以連續二日雨量之準確率最高；當取樣比例為 1:3 時，發生災害準確率微幅提升至 51.0~60.0%，同樣係以連續二日雨量之準確率最高；當取樣比例 1:1 時，發生災害準確率大幅提升至 78.8~83.2%，即已有 80% 機率可判斷崩塌災害之發生，同時連續二日雨量之準確率亦為最高。由前述結果可知，取樣比例 1:1 之模式準確率遠優於取樣比例 1:5 及 1:3，此一現象與 Can et al. (2005) 有相仿

之結果。同時，以各項降雨參數進行模式建置之結果而言，雖降雨參數對模式優劣的影響較不顯著，但仍是以使用連續二日雨量之模式準確率最佳。因此，本研究以取樣比例 1:1 及採用連續二日雨量之模式率定結果建置崩塌發生潛勢影響評估模式，如式 4 所示。

表 5 崩塌發生潛勢評估模式之評估結果

Table 5 The evaluation result of landslide potential model

| 取樣比例 | 降雨參數 | 發生災害準確率 (即敏感度, %) | 未發生災害準確率 (即指定度, %) | 整體準確率 (%) |
|------|----------------|-------------------|--------------------|-----------|
| 1:5 | 當日雨量 | 49.2 | 95.3 | 87.6 |
| | 連續二日雨量 | 52.0 | 96.4 | 89.0 |
| | 連續三日雨量 | 48.0 | 96.9 | 88.7 |
| | 連續四日雨量 | 48.0 | 96.6 | 88.5 |
| | 當日雨量 連續四日雨量 | 49.6 | 96.4 | 88.6 |
| 1:3 | 當日雨量 | 51.0 | 93.7 | 83.0 |
| | 連續二日雨量 | 60.0 | 94.0 | 85.3 |
| | 連續三日雨量 | 57.0 | 93.7 | 84.0 |
| | 連續四日雨量 | 55.0 | 93.3 | 83.8 |
| | 當日雨量 連續四日雨量 | 58.0 | 93.7 | 85.3 |
| 1:1 | 當日雨量 | 78.8 | 82.0 | 80.4 |
| | 連續二日雨量 | 83.2 | 84.4 | 83.8 |
| | 連續三日雨量 | 80.0 | 81.6 | 80.8 |
| | 連續四日雨量 | 81.6 | 80.4 | 81.0 |
| | 當日雨量 連續四日雨量 | 83.2 | 74.0 | 78.8 |

註：1. 取樣比例 1:5 即表示發生崩塌樣本 50 筆、未發生崩塌樣本 250 筆。
 2. 取樣比例 1:3 即表示發生崩塌樣本 50 筆、未發生崩塌樣本 150 筆。
 3. 取樣比例 1:1 即表示發生崩塌樣本 50 筆、未發生崩塌樣本 50 筆。
 4. 表中準確率之數值代表 5 次隨機取樣率定之平均值。

表 6 崩塌模式驗證之準確率交叉分析表

Table 6 The error matrix of cross validation for landslide potential model

| 崩塌發生潛勢評估模式 (崩塌樣本 7 筆、未崩塌樣本 1144 筆) | 模式判斷 | | 實際準確率 | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 有發生崩塌 | 有發生崩塌 | | |
| 歷史記錄 | 有發生崩塌 | 6 | 1 | 85.7% |
| | 無發生崩塌 | 241 | 903 | 78.9% |
| 整體準確率 | | 79.0% | | |

$$\begin{cases}
 Z = -13.121 + 17.516(\text{坡向}) + 0.181(\text{坡度}) \\
 + 0.320(\text{水系比}) + 0.022(\text{道路比}) \\
 + 0.5080(\text{岩性}) + 0.009(\text{連續二日雨量}) \quad (4) \\
 P = \frac{\exp(Z)}{1 + \exp(Z)}, P \geq 0.5 \rightarrow \text{崩塌發生}
 \end{cases}$$

模式驗證階段以式 4 針對未被率定階段使用之 7 筆發生崩塌樣本及 1,144 筆未發生崩塌樣本進行驗證。模式設定 p 在 0.5 以上即可能發生崩塌災害，故將地文及降雨因子輸入模式中計算 p ，發生與否即以 0.5 作為分界，整體結果如表 6 所示。模式驗證結果顯示，發生災害之準確率為 85.7%，與率定階段之 83.8% 相差甚小。而模式驗證之整體準確率為 79.0%，與率定階段之 83.8% 亦極為相近，說明此一模式確能以連續二日雨量配合 5 項地文因子，準確的評估崩塌災害發生之可能性。以研究結果而言，若以式 4 進行高屏溪流域內各坡單元崩塌發生與否判斷，有 80% 機率可成功判斷崩塌事件發生。

2. 氣候變遷對崩塌潛勢之影響評估

本研究為評估高屏溪流域未來崩塌災害發生潛勢之變化，以基期 (1961~1990 年) 與未來短 (2010~2039 年)、中 (2040~2069 年) 及長期 (2070~2099 年) 進行比較分析。雨量站之篩選部分，則考慮中央氣象各站之「地理位置」、「暴雨特性」及「歷年災害發生次數」等 3 項因素，進行研究區域內代表性雨量站點之篩選。透過各項分析，本研究選取大津、新發、御油山、瑪家、甲仙及月眉等 6 個站點作為代表站點。

在式 4 中，若依序給予各項地文及雨量參數，可計算得災害發生機率 p ，而於本研究中設定 $p \geq 0.5$ 時，為發生崩塌災害。因此，將 p 設定為 0.5 後，將各項地文因子帶入，即可反推求出研究區域內崩塌災害之致災門檻值，如表 7 所示。研究中結合降雨資料及致災門檻值進行研究範圍內崩塌災害潛勢高低之分析，基期 (1961~1990 年) 之潛勢高低數量及分布圖如表 8 及圖 7 所示，而 3 種 GCMs 模式於 3 種情境及短、中、長期之變化情形分述如下：

(1) GFCM21 模式

圖 8 係利用 GFCM21 模式於 3 種不同情境下，分析研究區域內未來短、中、長期之 5 種崩塌潛勢 (即極高、高、中、低、極低) 的面積對比於基期之 5 種崩塌潛勢面積的增減率。由圖 8 可見，災害潛勢屬「極高」所佔面積在 3 種情境下於未來短中長期之增減率皆為正值，約在

9.6~61.1% 之間；「低」所佔面積亦皆有增加；「極低」則皆為減少；「高」及「中」之未來變化則較不一致。

表 7 各地崩塌事件門檻值

Table 7 The precipitation thresholds for the occurrence potential of large-scale landslide disasters

| 參考雨量站 | 較大規模崩塌致災門檻值 (mm) |
|-------|------------------|
| 甲仙 | 687 |
| 月眉 | 724 |
| 大津 | 476 |
| 新發 | 345 |
| 御油山 | 582 |
| 瑪家 | 554 |

表 8 崩塌災害潛勢高低之定義及數量

Table 8 The domain and area for different occurrence potential of large-scale landslide disasters

| 潛勢 | 災害發生頻率年 | 較大規模崩塌 (面積 km^2) |
|----|------------------|----------------------------|
| 極高 | $T \leq 5$ | 118.9 |
| 高 | $5 < T \leq 10$ | 361.5 |
| 中 | $10 < T \leq 25$ | 273.1 |
| 低 | $25 < T \leq 50$ | 443.8 |
| 極低 | $T > 50$ | 1928.7 |

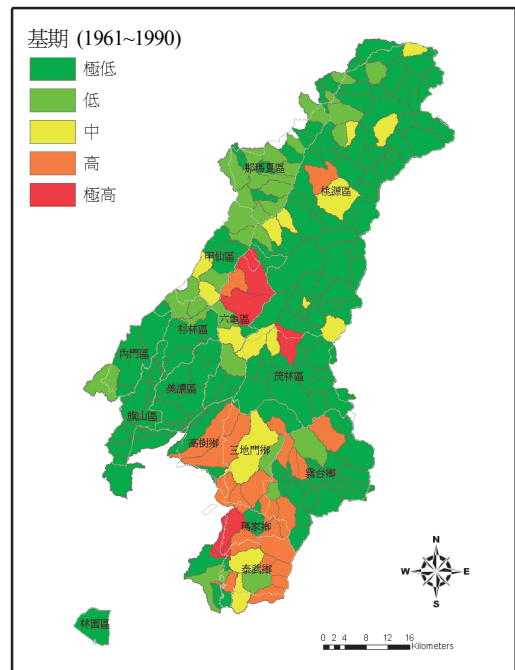


圖 7 較大規模崩塌災害發生潛勢分布圖 (基期)

Fig.7 The occurrence potential distribution of large-scale landslide disasters (1961~1990)

將研究區域內各坡單元在不同情境下, 未來短、中、長期之崩塌潛勢分別以不同顏色表示, 亦即為崩潛勢分布圖, 如圖 9 所示。若由基期之災害潛勢分布圖 (圖 7) 觀之, 區內崩塌災害潛勢屬「極高」的區塊大致分佈於六龜區、茂林區及瑪家鄉等地; 而由圖 9 可發現, 災害潛勢極高的區塊大致與基期相符, 惟在 A2 情境的短期變化中, 顯示三地門鄉及高樹鄉內有部分區域的潛勢提升至極高, 而 A1B 及 B1 的長期變化中亦顯示三地門鄉有部分區域的潛勢提升至極高。綜合災害潛勢增減率及分佈圖之結果可發現, GFCM21 模式模擬結果顯示區內潛勢較低之面積於各情境及各時期中皆有不同程度之增加率, 但可明顯看出區內潛勢極高之面積有顯著提升。

(2) INCM3 模式

圖 10 係利用 INCM3 模式於 3 種不同情境下, 分析研究區域內未來短、中、長期之 5 種崩塌潛勢 (即極高、高、中、低、極低) 的面積對比於基期之 5 種崩塌潛勢面積的增減率。由圖 10 可見, 災害潛勢屬「極高」所佔面積在 3 種情境下於未來短中長期之增減率除 A1B 情境的短期變化外皆為正值, 約在 11.2~121.4 % 之間 (A1B 情境的短期變化為 -20.5 %); 「低」所佔的面積全部皆有增加; 「極低」則是皆為減少; 「高」及「中」之未來變化則較不一致。此一增減率之變化情形與 GFCM21 模式之模擬結果相類似, 但相較於 GFCM21 模式, INCM3 模式在災害潛勢極高的增加情形更為顯著。

將研究區域內各坡單元在不同情境下, 未來短、中、長期之崩塌潛勢分別以不同顏色表示, 亦即為崩潛勢分布圖, 如圖 11 所示。若由基期之災害潛勢分布圖 (圖 7) 觀之, 區內基期崩塌災害潛勢屬「極高」的區塊大致分佈於六龜區、茂林區及瑪家鄉等地; 而由圖 11 可發現, 災害潛勢極高的區塊大致與基期相符。然而, 在甲仙區可發現原先區域內多屬潛勢「中」以下之層級, 而在各情境及短中長期之模擬結果確顯示區內潛勢大多皆提升至「高」之層級。此外, 在大多數情境-時期中皆可發現在部分區域內潛勢「極高」的區塊有增加的現象, 其中尤以高樹及三地門鄉之增加最為明顯。

綜合災害潛勢增減率及分佈圖之結果可發現, INCM3 模式的模擬結果與 GFCM21 模式之結果大致相符, 顯示區內潛勢較低的面積於各情境及各時期中皆有不同程度之增加率, 惟區內潛勢「極高」之面積較 GFCM21 模式的增加更為顯著。

(3) MPEH5 模式

圖 12 係利用 INCM3 模式於 3 種不同情境下, 分析研究區域內未來短、中、長期之 5 種崩塌潛勢 (即極高、高、中、低、極低) 的面積對比於基期之 5 種崩塌潛勢面積的增減率。由圖 12 可見, MPEH5 模式相較於前述兩種模式而言, 其模擬結果之變異性較大, 僅在潛勢「低」之變化較為一致, 除 A1B 情境的短期為減少外, 其餘皆為增加, 增加率約為 7.1~302.8 %。

將研究區域內各坡單元在不同情境下, 未來短、中、長期之崩塌潛勢分別以不同顏色表示, 亦即為崩潛勢分布圖, 如圖 13 所示。若由基期之災害潛勢分布圖 (圖 7) 觀之, 區內基期崩塌災害潛勢屬「極高」的區塊大致分佈於六龜區、茂林區及瑪家鄉等地; 而由圖 13 可發現, 在 3 種情境的長期變化中, 瑪家鄉僅餘極小部分的災害潛勢為極高, 其餘皆屬潛勢中以下之層級; 而原先屬較高潛勢之區塊, 在長期變化中亦多數降低至中以下的層級。

綜合災害潛勢增減率及分佈圖之結果可發現, MPEH5 模式的模擬結果相較於前兩種模式而言, 係為一較樂觀的未來狀況。區內長期的崩塌災害潛勢將大幅降低。

(4) 綜合分析

為探討研究區域內崩塌潛勢於各模式-情境-時期之變化情形, 將發生災害潛勢頻率年小於 25 年部分 (意即災害潛勢為中以上之區塊) 累加進行分析, 結果如圖 14 所示。於基期 (1961~1990) 內共有 753.4 km² 之災害潛勢在「中」以上 (即 25 年內至少發生一次崩塌災害), 而 3 種 GCMs 模式配合 3 種情境於未來短、中、長期變化皆不盡相同, 在短期變化中, 災害潛勢中以上的面積除 INCM3 模式 B1 情境外, 其餘皆呈現減少情況, 其增減率為 -46.1~-9.3 %; 中及長期之變異均較大, 增減率分別介於 -26.8~96.0 及 -60.2~72.7 %。

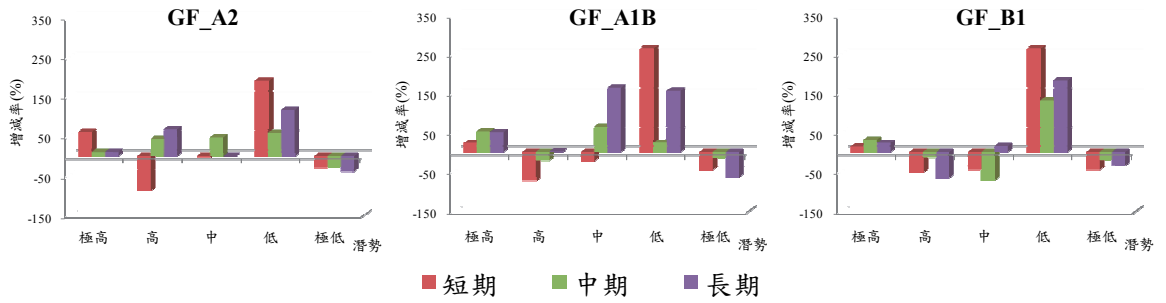


圖 8 未來短、中、長期崩塌災害潛勢面積之變化 (GFCM21 模式)

Fig.8 The variation of the potential areas of landslide disasters in short-term, medium-term and long-term (Mode GFCM21)

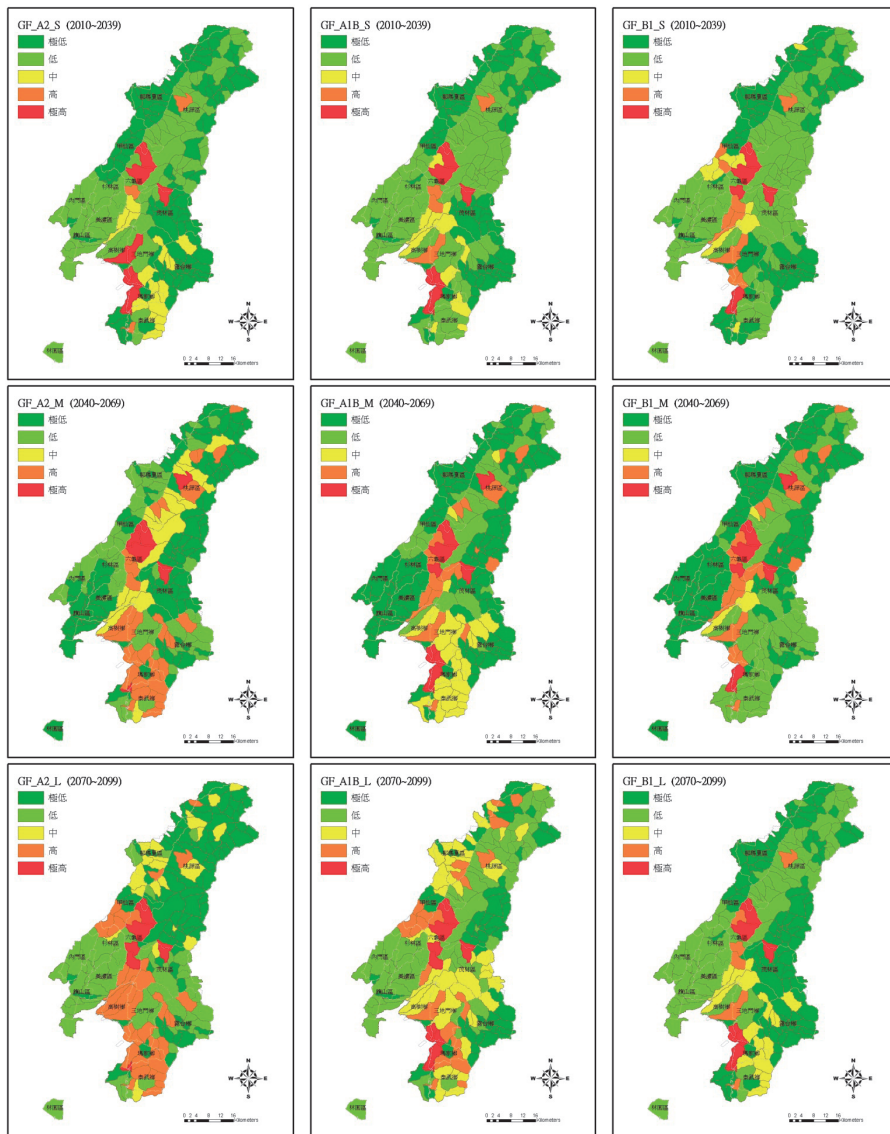


圖 9 未來短、中、長期崩塌災害潛勢分布圖 (GFCM21 模式)

Fig.9 The occurrence potential distribution of landslide disasters in short-term, medium-term and long-term (Mode GFCM21)

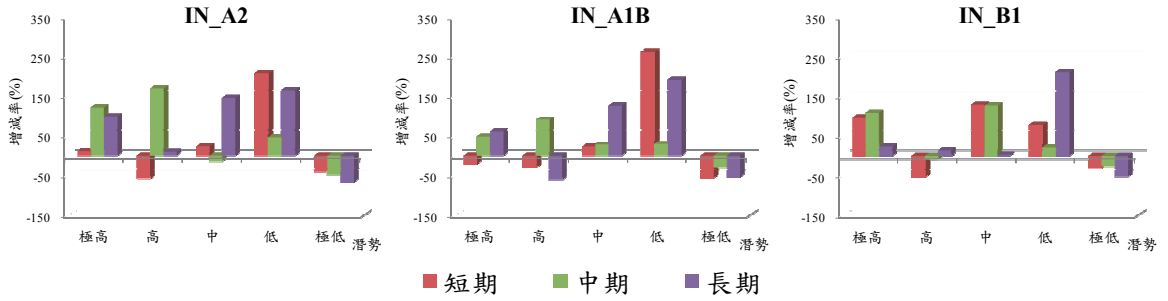


圖 10 未來短、中、長期崩塌災害潛勢面積之變化 (INCM3 模式)

Fig.10 The variation of the potential areas of landslide disasters in short-term, medium-term and long-term (Mode INCM3)

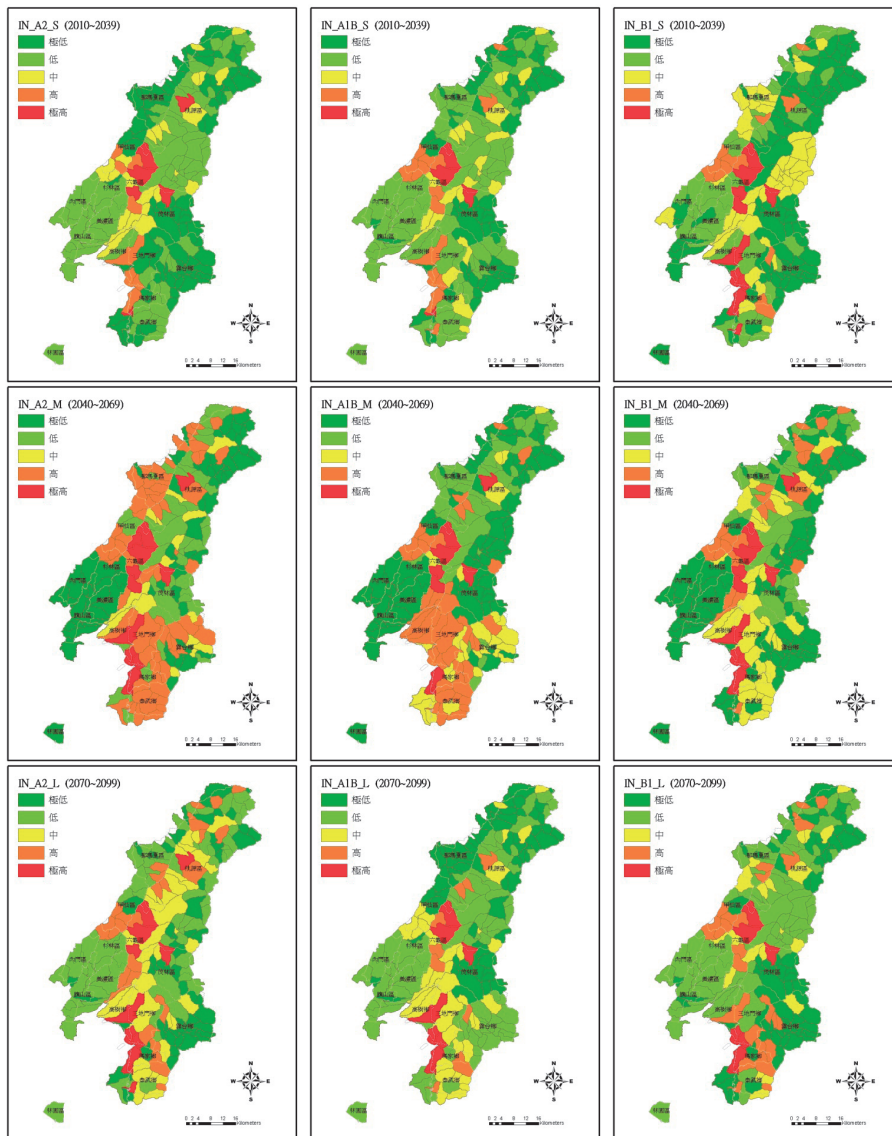


圖 11 未來短、中、長期崩塌災害潛勢分佈圖 (INCM3 模式)

Fig.11 The occurrence potential distribution of landslide disasters in short-term, medium-term and long-term (Mode INCM3)

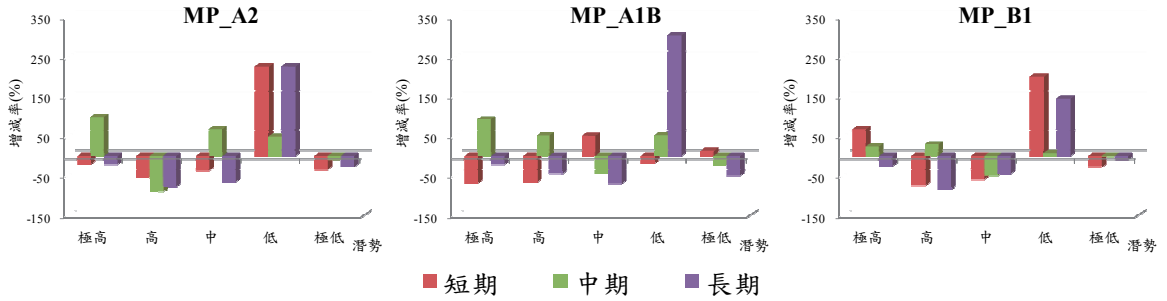


圖 12 未來短、中、長期崩塌災害潛勢面積之變化(MPEH5 模式)

Fig.12 The variation of the potential areas of landslide disasters in short-term, medium-term and long-term (Mode MPEH5)

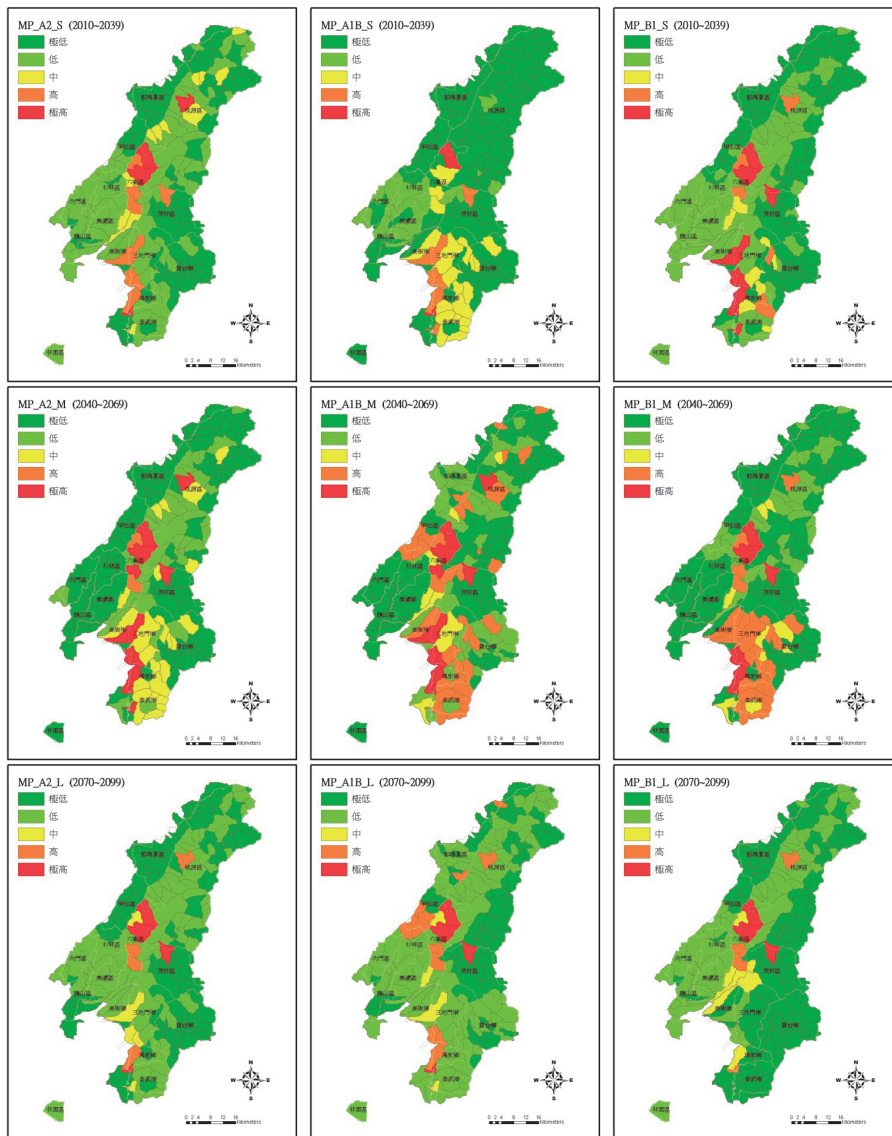


圖 13 未來短、中、長期崩塌災害潛勢分佈圖 (MPEH5 模式)

Fig.13 The occurrence potential distribution of landslide disasters in short-term, medium-term and long-term (Mode MPEH5)

整體而言, 以 INCM3 模式之結果最為悲觀, 其在 3 種情境於短中長期與基期比較之增減率除 A2 及 A1B 情境外皆為正值, 約在 11.4~96.0% 之間, 其中雖 A2 情境在短期變化為負值, 但以中、長期而言, 還是以 A2 之增值最為顯著, 反觀 B1 情境雖在短期變化亦為正值, 但在中、長期增值相對較緩; MPEH5 模式則最為樂觀, 3 種情境於短中長期與基期比較之增減率大多為負值, 約在 -64.0~-24.2%, 其中在 A2 及 B1 情境之變化較為一致, 短中長期皆為負值, 而 A1B 情境則是在中期變化為正值、短長期為負值。

本研究使用之基期為 1961~1990 年、短期為 2010~2039 年, 而現今已為 2013 年。根據研究範圍內歷年崩塌災害事件分布 (如圖 3) 及各模式短期崩塌災害潛勢分布圖 (如圖 9、11、13) 可見, 區內崩塌發生潛勢屬「極高」(發生頻率小於 5 年) 之區塊大致分布於高雄市甲仙區、六龜區及屏東縣三地門鄉、瑪家鄉等地。而其中又以 INCM3 模式 B1 情境所推估之崩塌發生潛勢結果與近年(2005~2010 年)最相符。利用 INCM3 模式 B1 情境推估短、中、長期之崩塌面積, 結果如

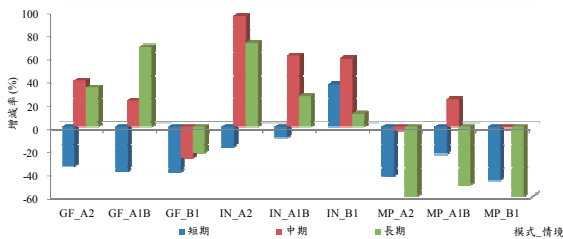


圖 14 未來發生災害頻率小於 25 年之崩塌災害潛勢面積增減率

Fig.14 The variation of the potential areas of landslide disasters (T<25 year) in short-term, medium-term and long-term

表 9 所示。與基期相比, 除「高」及「極低」崩塌發生潛勢部分於短期 (2010~2039 年) 有減少趨勢外, 其餘皆顯示為增加; 其中, 引人注意的是所推估的「極高」崩塌發生潛勢之增加面積達 98%, 而這些地方與本研究區域內 2005~2010 年實際發生崩塌最頻繁之地方非常相似。至於「高」崩塌發生潛勢面積為減少似與未來情境較不相符部分, 可能係因氣候變遷推估尚存有諸多不確定性因素, 或分析之樣本數目仍嫌不足, 此部分則有待未來進一步研究分析。

四、結論與建議

1. 結論

本研究透過地文因子蒐集與篩選檢定、降雨參數選定, 以邏輯斯回歸建置崩塌潛勢評估模式, 並結合 3 種 GCMs 及 3 種未來情境, 進行氣候變遷對高屏溪流域崩塌發生潛勢之影響評估, 得到結論如下:

- (1) 本研究針對前人研究中有關與崩塌發生相關之 27 項地文因子進行顯著性之檢定及分析, 結果顯示與崩塌發生最相關之 5 項地文因子為岩性、坡度、坡向、水系比及道路比。
- (2) 本研究針對與崩塌發生相關之 4 項降雨參數 (當日雨量、連續二日至四日累積雨量) 進行分析, 結果顯示連續二日雨量與崩塌發生最為相關。
- (3) 本研究利用上述 5 項地文因子、連續二日雨量及邏輯斯回歸建置崩塌潛勢評估模式。驗證結果顯示, 以連續二日累積雨量所建置之崩塌潛勢模式, 其判斷崩塌發生之準確率可達 80% 以上。
- (4) 經結合 3 種 GCMs 及 3 種未來情境之降雨資料及崩塌發生門檻值進行研究區域內崩塌發生潛勢高低之分析結果, 以 INCM3 模式之結果最為保

表 9 INCM3 模式 B1 情境短、中、長期崩塌面積與基期比較

Table 9 The difference of landslide potential area between INCM3 model - B1 scenario(short-term, mid-term and long-term) and base-line (1961~1990)

| 基期 (1961~1990年) | | INCM3-B1-S (2010~2039年) | | INCM3-B1-M (2040~2069年) | | INCM3-B1-L (2070~2099年) | |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| 崩塌 (km ²) | 崩塌 (km ²) | 與基期差異 | 崩塌 (km ²) | 與基期差異 | 崩塌 (km ²) | 與基期差異 | |
| 極高 | 118.9 | 235.3 | 116.4(+98%) | 249.0 | 130.1(+109.5%) | 146.3 | 27.4(+23.1%) |
| 高 | 361.5 | 168.5 | -193.0(-53.4%) | 328.8 | -32.7(-9.1%) | 411.7 | 50.2(+13.9%) |
| 中 | 273.1 | 627.6 | 354.5(+129.8%) | 621.6 | 348.5(+127.6%) | 281.4 | 8.3(+3.1%) |
| 低 | 443.8 | 790.6 | 346.8(+78.1%) | 536.8 | 93.0(+21%) | 1370.7 | 926.9(+208.9%) |
| 極低 | 1928.7 | 1303.9 | -624.8(-32.4%) | 1389.7 | -539.0(-27.9%) | 915.8 | -1012.9(-52.5%) |

守。其中，在 3 種情境裡以 A2 情境最為悲觀、A1B 情境次之、B1 情境最樂觀。區內發生崩塌災害頻率小於 25 年的面積於 A2 情境的中及長期與基期相比，分別增加了 96.0% 及 72.7 %。

- (5) 根據研究範圍內歷年崩塌災害事件分布及各模式短期崩塌災害潛勢分布圖可見，區內崩塌發生潛勢屬「極高」(發生頻率小於 5 年) 之區塊大致分布於高雄市甲仙區、六龜區及屏東縣三地門鄉、瑪家鄉等地，以 INCM3 模式 B1 情境所推估之崩塌發生潛勢結果與近年 (2005~2010) 最相符；利用此模式及情境推估短期之結果與基期相比，「極高」崩塌發生潛勢之增加面積達 98%。

2. 建議

- (1) 有關氣候變遷對未來高屏溪流域崩塌潛勢之影響，本研究假設模式中所使用之連續二日雨量會改變，而 5 個地文因子不變；因此，本研究建議未來使用此模式時應利用當時之地文因子進行崩塌潛勢評估。
- (2) 本研究所建置的崩塌潛勢評估模式係採用岩性、坡度、坡向、水系比及道路比等 5 項地文因子；建議未來可將地表覆蓋因子納入分析，而因地表覆蓋狀況亦會受到未來氣溫、雨量等因素影響而有所變化，故在評估坡地災害發生潛勢之變化前，應先行評估地表覆蓋的變化情形，才可使評估結果能更符合實際狀況。

誌 謝

本研究承蒙行政院農業委員會水土保持局及行政院國家科學委員會補助經費並提供資料，作者謹在此表示衷心感謝。

參考文獻

- [1] Aldridge, C.H. (1999). "Discerning Landslide Hazard Using a Rough Set Based Geographic Knowledge Discovery Methodology." *11th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre*, University of Otago, Dunedin, New Zealand.
- [2] Pradhan, B., and Lee, S. (2010). "Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis back-propagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling." *Environmental Modelling & Software*, 25, 747-759.
- [3] Caine, N. (1980). "The Rainfall Intensity Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows." *Geografiska Annaler*, 62, 23-27.
- [4] Can, T., Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H., and Duman, T.Y. (2005). "Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses." *Geomorphology*, 72 (1-4), 250-271.
- [5] Chang, K.T., and Chiang, S.H. (2009). "An Integrated Model for Predicting Rainfall-Induced Landslides." *Geomorphology*, 105, 366-373.
- [6] Chang, K.T., Chiang, S., and Hsu, M. (2007). "Modeling Typhoon- and Earthquake-Induced Landslides in a Mountainous Watershed using Logistic Regression." *Geomorphology*, 89, 335-347.
- [7] IPCC (2007). "Climate Change 2007: the Physical Basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change." Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press: 1-996.
- [8] Fan, J.C., Yang, C.H., Liu, C.H., and Huang, H.Y. (2013). "Assessment and validation of CLIGEN-simulated rainfall data for Northern Taiwan." *Paddy and Water Environment*, 11(1-4), 161-173.
- [9] Keefer, D.K., Wilson, R.C., Mark, R.K., Brabb, E.E., Brown, W.M., Ellen, S.D., Harp, E.L., Wiczorek, G.F., Alger, C.S., and Zarkin, R.S. (1987). "Real-Time Landslide Warning During Heavy Rainfall." *Science*, 238, 921-925.
- [10] Kiely, G. (1999). "Climate change in Ireland from precipitation and streamflow observation." *Advances in Water Resources*, 23, 141-151.
- [11] Kiely, G., Albertson, J.D., and Parlange, M.B. (1998). "Recent trends in diurnal variation of precipitation at Valentia on the west coast of Ireland." *Journal of Hydrology*, 207, 270-279.
- [12] Jakob, M. and Lambert, S. (2009). "Climate change effects on landslides along the southwest coast of British Columbia." *Geomorphology*, 107, 275-284.
- [13] Nakicenovic, N, Swart, R. et al. (2000). "Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, 570.

- [14] Nicks, A.D., Lane, L.J. and Gander, G.A. (1995). "Weather generator. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation," NSERL Report # 10, D.C. Flanagan and M.A. Nearing, Eds." NSERL West Lafayette, IN: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 2.1-2.22.
- [15] Sidle, R.C. (2006). "Landslides and surface erosion from roads – experiences in Asia. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia." *Regional Conference on Geomorphology*, 1, Abstracts: 302, Goiânia, Brazil.
- [16] Zhang, Y., Liu, B., Wang, Z., and Zhu, Q. (2008). "Evaluation of CLIGEN for storm generation on the semiarid Loess Plateau in China." *CATENA*, 73, 1-9.
- [17] 中央地質調查所 (2010), 「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置計畫」。(Central Geological Survey, MOEA. (2010). *Geological investigation and database construction in upstream river basin of inundation area*. (in Chinese))
- [18] 行政院國家科學委員會 (2011), 「台灣氣候變遷科學報告」。(National science council. (2011). *Climate change in Taiwan: scientific report 2011*. (in Chinese))
- [19] 行政院經濟部水利署 (2010), 「水文年報」。(Water resources agency, MOEA. (2010). *Hydrological year book of Taiwan 2010*. (in Chinese))
- [20] 朱聖心 (2001), 「應用地理資訊系統製作地震及降雨所引致之山崩危險圖」, 台灣大學土木工程研究所碩士論文。(Chu, S.S. (2001). *Seismic and Rainfall Landslide Hazard Maps with GIS*, National Taiwan University Department of Civil Engineering. (in Chinese))
- [21] 范正成、楊智翔、劉哲欣、廖雯雯、連琮勛 (2008), 「未來氣候變遷對台灣北部地區降雨沖蝕指數影響之研究」, 97 年度農業工程研討會, 台北市。(Fan, J.C., Yang, C.H., Liu, Z.X., Liao, W.W., Lian, C.X. (2008). *Effects of Climate Change in the Future on Rainfall Erosivity Factor Northern Taiwan*, Agriculture Engineering Conference 2008, Taipei. (in Chinese))
- [22] 范正成、童慶斌 (2011), 「氣候變遷對高屏流域坡地災害發生潛勢之影響評估」, 行政院農業委員會水土保持局。(Fan, J.C. and Tong, Q.B. (2011). *Effects of Climate Change on the Potential of the slopeland disaster in the Basin of Kaoping Stream*, Soil and water conservation bureau, Council of agriculture, Executive Yuan. (in Chinese))
- [23] 國家災害防救科技中心 (2012), 「台灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」。(National science and technology center for disaster reduction. (2012). *Taiwan climate change projection & information platform*. (in Chinese))
- [24] 張石角 (1987), 「山坡地潛在危險之預測及其在環境影響評估之應用」, 中華水土保持學報, 18(2), 41-62。(Chang, S.C. (1987). *The prediction of potential geological hazards of slopeland and its applications in environmental impact assessment*, Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 18(2), 41-62. (in Chinese))
- [25] 陳振華, 潘國樑 (1985), 「臺北市山坡地住宅區環境地質調查研究」, 工研院能源與礦業研究所報告, 第 229 號。(Chen, C.H. and Pan, K.L. (1985). *Geological investigation of residential area of slopeland in Taipei*, EMRO report, 229. (in Chinese))
- [26] 陳建忠、顧承宇、張怡文、許世孟、陳耐錦、溫惠鈺 (2010), 「氣候變遷下極端降雨引致廣域坡地災害評估技術之研究」, 中華水土保持學報, 43(1), 77-86。(Ku, C.Y., Gu, C.Y., Chang, Y.W., Xu, S.M., Chen, N.J., Wen, H.Y. (2010). *Study on the assessment of regional rainfall-induced landslide hazards under extreme climate conditions*, Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 43(1), 77-86. (in Chinese))
- [27] 陳熾璇 (2002), 「溪頭地區山崩潛感圖製作研究」, 國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文。(Chen, Y.H. (2002). *Landslide susceptibility mapping research in Xitou*, National Taiwan University Department of Civil Engineering. (in Chinese))
- [28] 楊智堯 (1999), 「類神經網路於邊坡破壞潛能分析之應用研究」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文。(Yang, Z.Y. (1999). *Evaluation of slope failures potential using Artificial Neural Networks*, National Cheng Kung University Department of Civil Engineering. (in Chinese))
- [29] 劉紹臣、符淙斌、許乾忠、陳正平、吳福婷 (2009), 「溫室效應影響下的全球極端降雨變化」, 中央研究院環境變遷研究中心。(Liu, S.C., Fu, C.B., Xu, C.Z., Chen, Z.P., Wu, F.T. (2009). *Temperature dependence of global precipitation extremes*, Geophysical research letters 36 L17702. (in Chinese))

- [30] 顏月珠 (1992), 「實用統計方法：圖解與實例」, 三民出版社。(Yan, Y.Z. (1992). *Applied statistics*, San Min PRESS. (in Chinese)).
-

2013 年 07 月 01 日 收稿

2013 年 08 月 06 日 修正

2013 年 08 月 23 日 接受

(本文開放討論至 2014 年 6 月 30 日)