

使用細胞自動化模擬烏石坑地區之地景動態

Modeling landscape dynamics using a cellular automata in Wu-Shyr-Keng area of Taiwan

呂明倫^{1,*} 何芄薇²

Ming-Lun Lu^{1,*} and Yuan-Wei Ho²

¹行政院農業委員會特有生物研究保育中心 55244 南投縣集集鎮民生東路 1 號

²國立屏東科技大學森林系 91201 屏東縣內埔鄉學府路 1 號

¹ Endemic Species Research Institute, Jiji, Nantou, Taiwan

² Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan

*通訊作者：alan@tesri.gov.tw

*Corresponding author: alan@tesri.gov.tw

摘 要

預測自然地景的動態發展有利於保育工作的推動。本研究以細胞自動化(cellular automata, CA)為基礎，結合馬可夫模式與邏輯斯迴歸，發展一模擬烏石坑地區地景動態之預測模式。*Satellite Pour L'observation de la Terre* 遙測影像所建立 2006 與 2012 年之地景分類圖資進行變遷監測發現，本區部份的森林覆蓋已呈現回復的情形，進而將馬可夫模式所預測的地景面積，以及邏輯斯迴歸推估之空間分布機率，整合至 CA 演化規則中，建構模擬森林回復之地景動態模式。模擬的結果對照遙測分類結果發現，兩者各地景類型的空間分布的概況相去不遠，有助於模擬地景動態。總體而言，本研究發展之 CA 模式可作為生態環境與資源經營管理之參考，另一方面，亦可作為其他自然地景之研究範本。

Abstract

Forecasting a reliable dynamic process in respect of natural landscape is central to drive conservation efforts. In this study, a Markov model and logistic regression imbedded cellular automaton (CA)-based model are developed to predict the landscape dynamics in Wu-Shyr-Keng area of Taiwan. We observed landscape change between 2006 and 2012 using remotely sensed data from *Satellite Pour L'observation de la Terre*. The result showed that a portion of forest covers has been restored, and the spatial distribution of forest resilience was ingested into a Markov and logistic model to build transition rules for CA simulation. We found a satisfactory comparison between the simulation result and remote-sensing estimate in the corresponding year. The developed protocol may not only provide insights for conservation and resource management, but also be extended for use in other ecosystems.

關鍵字：預測、馬可夫模式、邏輯斯迴歸、演化規則、低海拔試驗站

Key words: forecast, Markov model, logistic regression, transition rule, low altitude experimental station

收件日期：2014年03月24日

接受日期：2014年05月30日

Received: March 24, 2014

Accepted: May 30, 2014

緒言

現今促使全球環境變遷的主因，不外乎人類對自然資源過度的開發利用，長久下來，將導致生態環境及生物多樣性受到嚴重破壞 (Geist and Lambin 2002)。地景變遷(landscape change)研究是為觀察環境受到干擾後，從原型態轉移到另一種新特徵之過程，如火災、伐木與都市擴張等，瞭解其中的變遷機制，便能進一步預測地景未來的動態發展(Bürgi *et al.* 2004; Echeverria *et al.* 2008; Houet *et al.* 2010)。因此，預測地景動態為地景變遷研究的延伸，不僅有助於理解地景轉移的可能性，並可為環境維護與資源經營管理，提供更明確的

指導方針。

隨著資訊科技與科學研究之演進，目前已發展出許多成熟的動態預測模式，如常見的細胞自動化(cellular automata, CA)，概念源自 John von Neumann 所提出的自我複製(self-replicating)計算機理論，組成元素包含細胞(cells)、細胞狀態(states)、鄰近空間(neighborhoods)與演化規則(transition rules)等。細胞為CA的基本運算單位，在一特定時間序列的進行下(即遞迴；recursion)，會依照某一種特定規則，與周遭的鄰近細胞產生相互影響，演化成為新的狀態(Batty *et al.* 1997; Balzter *et al.* 1998; Sui and Zeng 2001)。然而，CA 著重於細胞空間分布的模擬，並沒有顧慮

到未來演化細胞的數量及空間分配的優先順序，因此，遂有混合模式(hybrid model)概念的提出，即將其他模式整合至 CA 的演化規則加以應用，如馬可夫模式(Markov model)可預測地景變遷的面積(陳及吳 2001；鄭等 2005)；邏輯斯迴歸(logistic regression)可推估空間分布機率(Mertens *et al.* 2008)，兩者的應用皆有效改善原 CA 的缺失(Soares-Filho *et al.* 2002; Jokar Arsanjani *et al.* 2013; Lu *et al.* 2013)。

特有生物研究保育中心(下簡稱特生中心)之低海拔試驗站位於中部烏石坑地區，該區的動、植物資源豐富，並為台灣典型的低海拔自然生態系(楊等 2011)。由於近代國內曾發生重大的天然災害，如地震、強颱與暴雨等，造成本區地景出現大面積的崩場地，惟至近期災害的擾動似有趨緩，歷經長期的地景變遷後，部分森林植被的覆蓋已逐漸復原(呂及何 2013)，亦使野生物族群的種類與數量開始回升(楊等 2013)。有鑑於此，本研究以 CA 為主體，結合馬可夫模式與邏輯斯迴歸，發展一預測模

式，模擬烏石坑地區之森林面積在持續回復下，所呈現出來之地景動態，期研究結果能提供生態環境維護與資源經營管理之參考。

材料與方法

一、研究區概述

本研究區位於台中市和平區自由村烏石坑，境內涵蓋特生中心低海拔試驗站管轄試驗地，此外，為比較周邊地景之差異，另劃設距離管轄範圍 0~1 km 及 1~2 km 之緩衝帶(圖 1)，總計面積約 3,400 ha。本區地形大多以陡峭高山為主，海拔介於 670~1,834 m，區內以東南方之山椒山為最高標，主要水系由大安溪流域的烏石坑溪支系，與另一支系乾溪構成大安溪集水區。氣候方面，年平均溫、相對濕度及降雨量，各別約 18°C、89% 及 2,600 mm 以上。土地覆蓋以森林為主，具優勢的原生植物社會由樟科、殼斗科與桑科榕屬組成，屬低海拔闊葉林相。

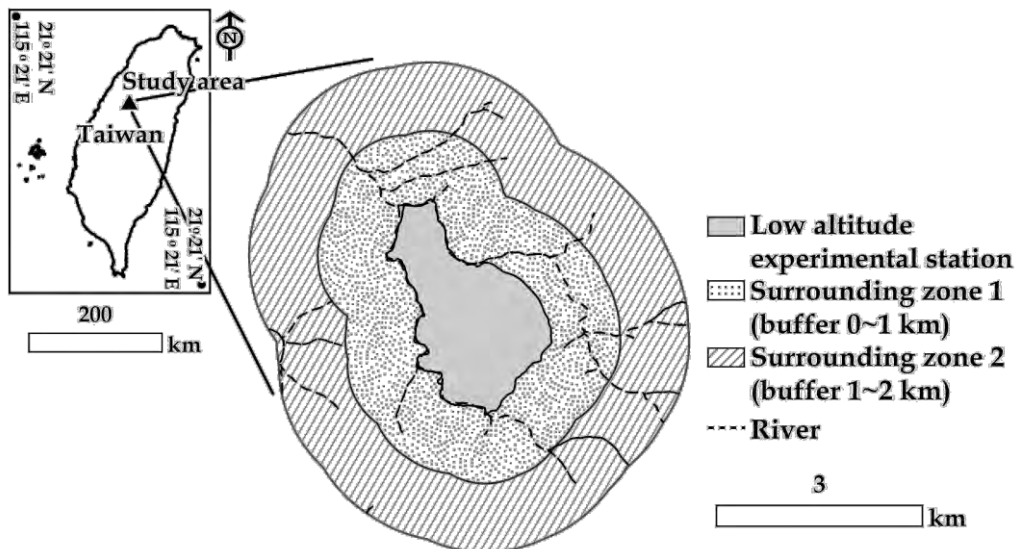


圖 1. 研究區地理位置圖。

Fig. 1. General geographical features of this study site.

二、研究方法

(一) 圖資建立

地景圖資的生產方法係從中央大學太空及遙測中心選購清晰、雲霧少及已完成幾何糾正(level 3)之 *Satellite Pour L'observation de la Terre* (SPOT) 衛星影像，年份分別為 2006 與 2012 年的冬季影像，並以 ERDAS IMAGINE 8.4 軟體執行 ISODATA 與最大概似分類法(maximum likelihood classification)構成的混合式分類法(hybrid classification)，將地景區分為森林、裸露區與其他土地使用等 3 種地景類型，兩時期分類後的總體準確度均高於 90% 以上，足夠進行後續的地景轉移偵測(Nagendra *et al.* 2008; Kuemmerle *et al.* 2009)，由於本研究著重於自然地景之演變，因此，將含有人為干擾介入的其他土地使用類型排除，即其他土地使用轉變為森林或裸露區；森林或裸露區轉變為其他土地使用的範圍全部遮罩(詳細的影像分類過程可參考呂及何 2013)。為觀察地景變遷，利用地理資訊系統(geographic information system, GIS)之套疊分析，產生各種地景類型間之轉移分布圖。

(二) 馬可夫模式之應用

馬可夫模式係假設某一時期(t)地景出現的機率，是隨前一時期($t-1$)的地景狀態而產生變化，因此，在應用馬可夫模式進行地景面積預測前，必須先評估轉移機率矩陣是否具有馬可夫特性，一般常用的方法為 Goodman (1968) 之卡方檢定(χ^2 -test)，當卡方統計值大於理論卡方值，表示轉移矩陣具有馬可夫特性，適用於預測地景面積的變化，反之則無(鄭等 2005)。馬可夫模式係利用兩種時期中，各地景類型間的轉移機率(transition probability)作為運算基礎，其計算式如下：

$$P_{ij} = n_{ij} / \sum_{j=1}^m n_{ij} \quad 1$$

式中 P_{ij} 為 $t-1$ 時期第 i 種地景類型轉變成 t 時期第 j 種地景類型的轉移機率， m 為地景類型數目， n_{ij} 為地景類型轉變後的量。各種地景類型的轉移機率，以矩陣形態表示，可表示如下：

$$P = (P_{ij}) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix} \quad 2$$

式中 P_{ij} 須符合式 3 與 4 兩種狀態：

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad 3$$

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} = 1 \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad 4$$

當矩陣重複自乘無限多次後，其內的各種轉移機率將達到穩定狀態，因此，可將 $n \times n$ 個轉移矩陣轉換為 $n \times 1$ 個轉移矩陣，此 n 則為該時期馬可夫模式所得之理論趨勢值，預測模式即表示如下：

$$X_{t+1} = X_t P_{ij} \quad 5$$

式中 X_{t+1} 與 X_t 分別為 t 與 $t+1$ 時期某一地景類型的量。

為瞭解未來的地景動態是否達到穩定的發展，本研究依馬可夫模式所預測之地景類型面積，計算地景穩定性指標(landscape stability index, LSI)，用以表現整體地景系統於不同時間階段之動態趨勢，其計算方式如下(鍾及呂 2006)：

$$LSI = \sum_{j=1}^m |X_{t+1} - X_t| \quad 6$$

當某一時間階段的 LSI 值愈大代表地景動態明顯，相對整體地景系統的發展趨勢較不穩定；愈小代表不明顯，地景系統則較穩定。

(三) 邏輯斯迴歸分析

邏輯斯迴歸為一種分立選擇 (discrete choices)的二元機率模式，目的是為了尋求依變項和一連串解釋變項(影響因子)之間的關係。為探討森林回復的機率分布，本研究針對 2006 與 2012 年「裸露區轉變為森林」之空間分布，利用分層逢機取樣方法，於研究區中選取 742 個樣點，作為統計上的依變項(出現紀錄為 1、未出現紀錄為 0)，解釋變項則整合航空照片、數值高程資料(digital elevation model)、SPOT 影像與其他相關 GIS 圖資，建立海拔高(m)、坡度(°)、2006 年植生覆蓋度(常態化差異植生指標；normalized difference vegetation index; NDVI; Tucker and Sellers 1986)，以及離 2006 年森林邊緣、道路、河流與裸露區之最短距離(m)等，共 7 個環境因子作為解釋變項，建構之數學式如下：

$$\text{Logit}(p) = \ln[p/(1-p)] = \beta_0 + \sum \beta_j X_j \text{ and } p = P(Y=1) \quad 7$$

式中 P 為森林回復之機率， Y 為依變項， X_j 為解釋變項(上述 7 個環境因子)， β_0 與 β_j 皆為估計參數。

各解釋變項對依變項的影響，必須檢定其來自於本質上的影響或純粹只是樣本之機率誤差，此可透過 Wald 統計值進行檢定，假設所建構的模式中，各環境因子與森林回復之關係達到顯著性，表示可有效推估森林回復之空間分布機率。

(四) 發展細胞自動化模式

一般的 CA 基本模式如下(Huang *et al.* 2008; Al-shalabi *et al.* 2013)：

$$S_{ij}^{t+1} = f(S_{ij}^t, Q_{ij}^t, E_{ij}^t) \quad 8$$

式中 S_{ij}^{t+1} 為 $t+1$ 時期第 i 行第 j 列所預測出來的

細胞狀態， S_{ij}^t 為 t 時期之原細胞狀態， Q_{ij}^t 為鄰近空間之細胞， E_{ij}^t 為演化規則。本研究利用 SPOT 影像所生產的網格資料，可作為 CA 中的細胞，森林及裸露區類型則為兩種細胞狀態，由於模擬情境設定森林持續回復之假設，因此，利用條件陳述式可建構裸露區轉變為森林的 CA 模式(式 9)：

$$\text{If}(Q_{ij}^t \times E_{ij}^t);$$

$$\text{Then } S_{ij}^{t+1} = \text{Forest}; \text{ Else } S_{ij}^{t+1} = \text{Bare area.} \quad 9$$

上述 CA 模式中， Q_{ij}^t 設定 Moore 型 3x3 個細胞之鄰近空間(由 8 個細胞圍繞住中心的細胞)進行全區運算， E_{ij}^t 包括：1. 由 t 前進至 $t+1$ 時期的細胞數量取決於馬可夫模式預測的結果；2. 由於森林自然回復時，先驅及入侵性植物會優先定殖，而這些物種的繁殖力強，因此，當任一裸露區的細胞進行運算時，其鄰近空間若出現 1 個或以上的森林細胞，該裸露區細胞即視為演化候選細胞，若不符合以上條件時，則無演化發生；3. 各演化候選細胞轉變為森林細胞的依據，乃參考邏輯斯迴歸產生的機率，由高至低進行空間分配，直至與馬可夫模式所預測的細胞數量相等，未被分配到的候選細胞則保持原有狀態。

為評估 CA 模擬與遙測分類結果的差異，以 2006 年之遙測分類結果為基礎，參考 2012 年各地景類型之細胞數量，進行 CA 模式之運算，並透過百分比同質性檢定 (test for homogeneity) 測驗 CA 模擬與 2012 年實際遙測分類結果之差異性，另一方面，藉由套裝軟體 Fragstats 3.3 計算之平均嵌塊體大小 (mean patch size, MPS)、嵌塊體密度 (patch density, PD) 與平均最近鄰近度 (mean nearest neighbor, MNN) 等 3 種地景指標 (McGarigal and Marks 1995)，用於比較兩者間的地景結構特徵。

結 果

2006 與 2012 年 SPOT 影像分類所獲得之森林及裸露區類型，經 GIS 套疊分析產生 4 種地景轉移類型(圖 2)，進而計算轉移矩陣，如表 1 所示，2006~2012 年間約有 174 ha (5%)的裸露區轉變為森林類型，僅有 36 ha (1%)左右的森林轉變為裸露區類型，由此可知，該期間森林確實有回復的情形。為利用馬可夫模式預

測各地景類型的面積變化，首先應評估本研究區的地景發展是否適合應用馬可夫模式進行預測，本研究逢機選取 1,000 個樣點，進行卡方檢定，結果顯示，在自由度等於 1 和顯著水準等於 1%時，其卡方統計值($\chi^2=33.89$)大於查表之理論卡方值 ($\chi^2=6.64$)，由此可知，2006~2012 年期間的地景變遷確實具馬可夫特性，適用於預測地景未來的變化。

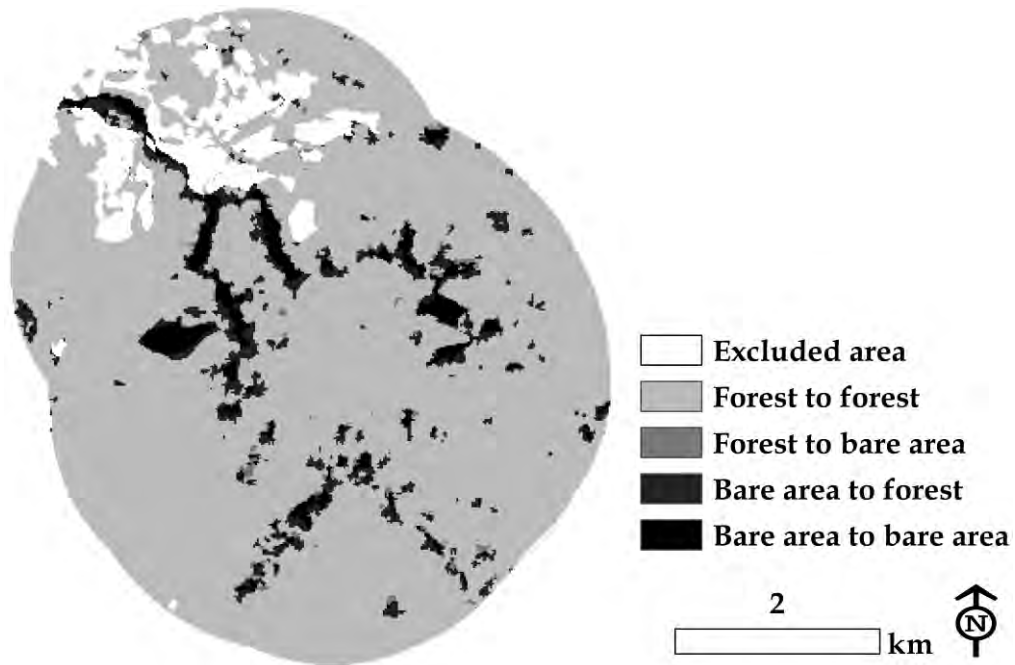


圖 2. 2006 至 2012 年之地景變遷圖。

Fig. 2. Landscape change map from 2006 to 2012.

表 1. 2006 至 2012 年地景變遷所構成之轉移矩陣(單位：ha、%)

Table 1. Transition matrix of landscape change from 2006 to 2012 (unit: ha; %)

	2012	
	Forest	Bare area
2006		
Forest	2,784.80 (98.69)	36.92 (1.31)
Bare area	174.04 (5.49)	2,995.76 (94.51)

應用表1轉移機率矩陣，以6年為間距，依序預測2018、2024、2030、2036與2042年之各地景類型面積，並計算2012~2042年間5個階段之LSI，評估各地景類型的動態發展是否達到穩定趨勢，如圖3所示，LSI隨著時間的增加而

逐漸下降，尤其2024~2030年階段起，曲線型態趨於平坦，並且2036~2042年階段，各地景類型間的轉換量已接近於0，顯示整體的地景動態已呈現穩定。

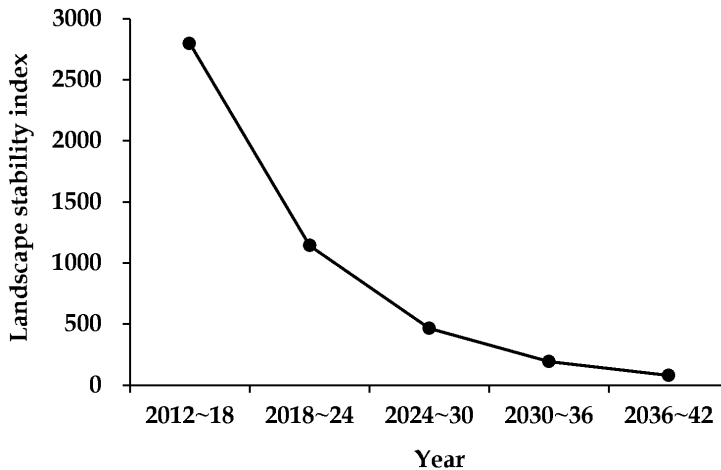


圖 3. 地景穩定性指標之預測趨勢。

Fig. 3. A predicted trend of landscape stability index.

森林回復的空間分布機率推估，乃以裸露區轉變為森林之地景類型(圖 1)，作為邏輯斯迴歸分析之統計依據。由分析結果發現，7 種環境因子經 Wald 檢定後，達顯著性者($p>0.01$)

為海拔高、離 2006 年森林邊緣與裸露區之最短距離等 3 個解釋變項(表 3)，表示該 3 種變項對森林回復具有顯著的影響力，故可納入邏輯斯迴歸的模式中(式 7)。

表 2. 邏輯斯迴歸評估 2006~2012 年森林回復之統計結果

Table 2. Statistics of logistic regression to evaluate the forest resilience from 2006 to 2012

Variable	β	Standard error	Wald statistic	Significance
Intercept	3.285	0.741	19.647	0.000
Elevation	-3.716	1.345	7.631	0.006
Slope	-0.938	0.863	1.181	0.277
NDVI	0.152	0.492	0.095	0.758
Forest edge	-22.559	7.308	9.529	0.002
Road	1.358	0.932	2.124	0.145
River	2.172	1.510	2.069	0.150
Bare area	-119.758	17.552	46.554	0.000

β =estimated parameter; NDVI=normalized difference vegetation index.

將海拔高、離 2006 年森林邊緣與裸露區之最短距離等 3 個解釋變項估計值代入邏輯斯迴歸模式，即可獲得全區之森林回復機率分布(圖 4)，圖中像元之機率愈接近 0 時(顏色愈趨近於

白色)，代表森林回復機率愈低，即不適宜植物的生長；當愈接近 1 時(顏色愈趨近於黑色)，代表該像元有高可能性被植被覆蓋，故適合作為 CA 模擬時，細胞空間分配之依據。

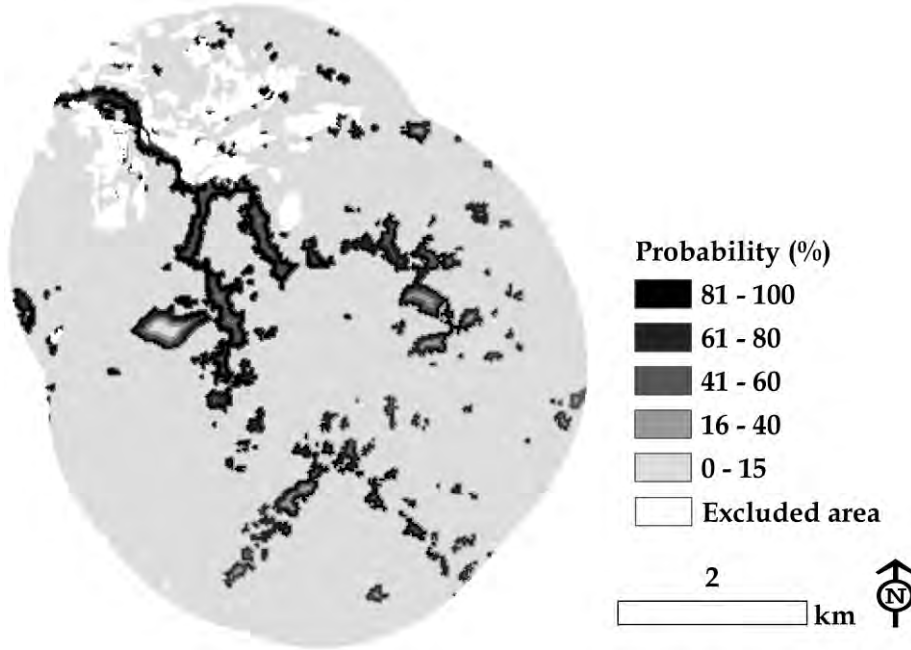


圖 4. 邏輯斯迴歸所預測之森林回復機率分布圖，圖中分級方法採用 Jenks 自然間斷法(natural breaks)。

Fig. 4. Probability prediction of forest resilience derived from logistic regression. A Jenks' natural breaks method was applied to group the classes.

利用 2006 年遙測分類結果為基礎，依據本研究發展之 CA 模式(式 9)，進行森林與裸露區兩種地景類型之空間分布模擬，模擬結果再與 2012 年遙測分類結果作比較，整體來看，兩種方法所得到的結果大致相仿，各地景類型顯現的分布位置並無巨大的偏移，利用逢機取樣選取 1,000 個樣點進行百分比同質性檢定可

知，卡方值為 3.39、 $p=0.07$ ，並未達差異顯著性標準，顯示兩種方法所得結果具同質性，由此可知，本 CA 模式具備模擬地景空間分布之能力，而從地景結構上的差異來觀之，可從裸露區類型的模擬結果發現，北半部有許多小嵌塊體明顯誤判為森林；南半邊則有部份嵌塊體的形狀與數量有所異(圖 5)。

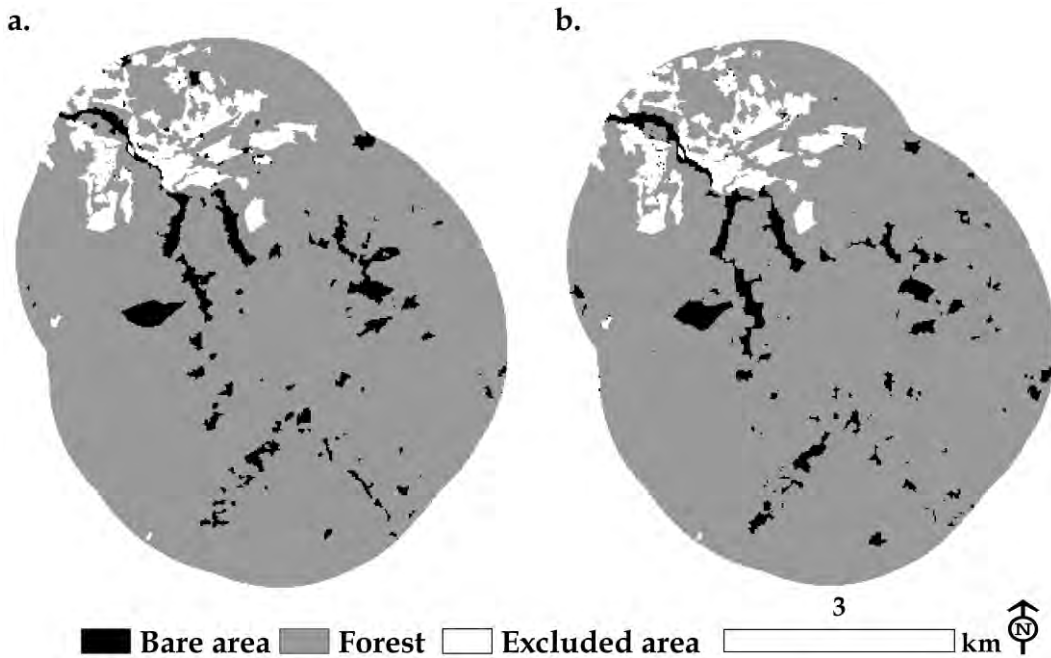


圖 5. 遙測分類與細胞自動化模擬之 2012 年地景空間分布。

Fig. 5. Contemporary (2012) distribution of landscape categories derived using (a) remote-sensing estimate and (b) cellular automata simulation.

為量化 2012 年遙測分類與 CA 模擬結果在地景結構上的特徵，本研究計算 MPS、PD 與 MNN 等 3 種地景指標，如表 3 所示，CA 模擬所得的森林除 PD 外，MPS 與 MNN 皆高

於遙測分類結果；裸露區各地景指標的計算結果洽與森林相反，相較於遙測分類結果，CA 模擬的森林嵌塊體較大而集中，反觀，裸露區嵌塊體呈現小而零散。

表 3. 遙測分類與細胞自動化模擬結果之地景平均嵌塊體大小(mean patch size, MPS)、嵌塊體密度(patch density, PD)與平均最近鄰近度(mean nearest neighbor, MNN)等指標

Table 3. Metrics of the mean patch size (MPS), patch density (PD) and mean nearest neighbor (MNN) for landscape categories using remote-sensing estimate and cellular automata simulation

	Estimate		Simulation	
	Forest	Bare area	Forest	Bare area
MPS (ha)	97.11	1.52	136.83	1.27
PD (N/100 ha)	0.98	3.43	0.69	4.09
MNN (m)	49.95	131.00	55.76	125.86

N=number of patches

由前文馬可夫模式所預測的結果可知，烏石坑地區的地景動態直至 2042 年達到穩定狀態(圖 3)。因此，本研究以 2006 年的遙測分類結果為基礎資料，藉由 6 年的間距，進行 6 次 CA 遞迴模擬，共可產生 6 個時期的地景空間分布圖，除 2012 年外，2018~2042 年的地景動態演變如圖 6 所示，在森林持續回復情境下，

低海拔試驗站管轄範圍的邊界及距離其 0~1 km 緩衝帶內，裸露區嵌塊體逐漸被森林所取代，但至 2042 年，緩衝帶內有少數的裸露區嵌塊體仍保持相當面積，其餘多數被森林取代後，呈現零散的分布(圖 6e)，而距離管轄範圍最外圍緩衝帶的動態情形較無太大的變化。

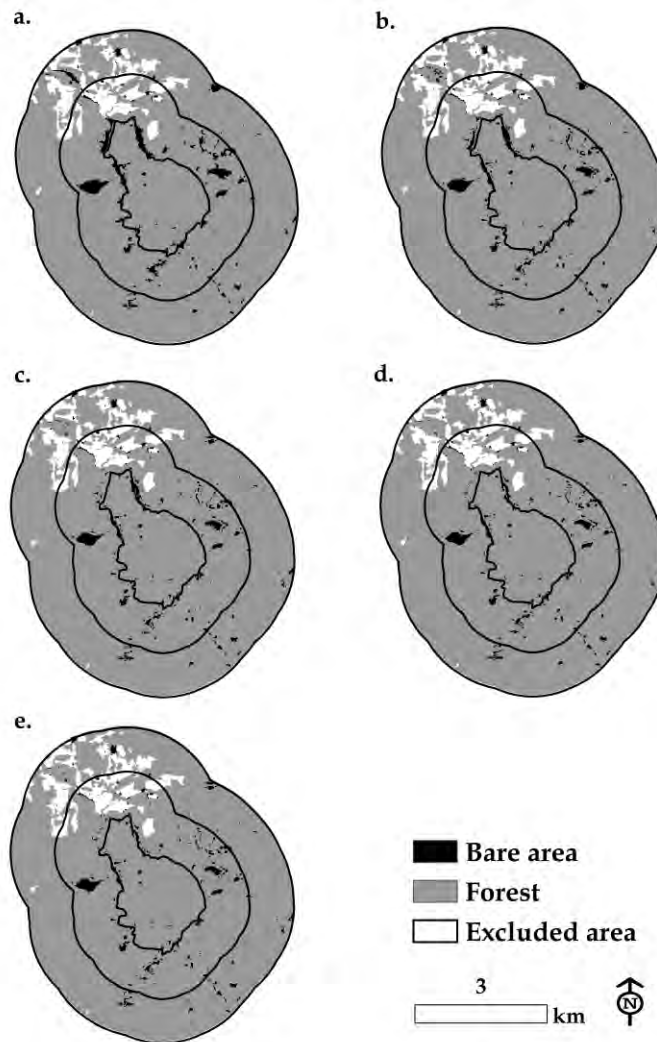


圖 6. 細胞自動化模擬地景動態，(a) 2018、(b) 2024、(c) 2030、(d) 2036 與 (e) 2042 年。

Fig. 6. Simulations of landscape dynamics based on cellular automata in (a) 2018, (b) 2024, (c) 2030, (d) 2036 and (e) 2042.

討 論

本研究所發展之烏石坑地區地景動態模式乃整合馬可夫、邏輯斯迴歸及CA等模式加以創建，其中經馬可夫模式與邏輯斯迴歸分析所獲得之結果，係啟動CA模擬之兩大參數。由地景變遷圖與馬可夫模式的轉移矩陣可知，烏石坑地區的地景變遷趨勢除了少部份森林有崩塌或退化之外，多以裸露區轉變森林為主要(表1與圖2)，此乃近幾年(2012年止)，台灣中部山區受颱風及暴雨的擾動已較往年緩和(呂及何 2013)，有利先驅性植物入侵裸露區，而後續所預測的森林與裸露區類型像元數量(或面積)，為設定CA模式的第一大參數；邏輯斯迴歸建構而成之空間分布機率高低，係決定往後森林回復在空間分布上的優先順序可能性(圖4)，則為第二大參數。

利用CA模擬與依據實際地物的遙測分類結果進行比對，發現兩者地景的概況相去不遠，並從百分比同質性檢定的結果亦發現地景類型的分布狀況具一致性水準，因此，本CA模擬尚屬合理範圍(圖5)，惟從地景結構分析模擬的結果可知，森林回復因多偏好於某些特定的環境因子，導致嵌塊體呈現群聚，裸露區嵌塊體也因而受到影響呈現零散分布(表3)，此乃模擬與遙測分類結果之主要差異，至於這些特定的環境因子，可從邏輯斯迴歸的分析結果窺知(表2)。邏輯斯迴歸採用的解釋變項，為地理資訊分析常用且易獲得的地形及地物特徵，然而，影響植物生長與分布的因子，尚有溫度、濕度、降雨、輻射能及風速等區域性的微氣候(Chen *et al.* 1999; Meyer *et al.* 2001; Rambo and North, 2009)。這些因子雖屬重要，但其空間資料的取得常受限並不易掌握，此外，野生動物作用，如取食與排泄物等亦會影響植物種子的

傳播(Holbrook and Smith, 2000; Wehncke *et al.* 2003)，為另一種不確定因素，由此可知，未來降低模擬誤差的方式，可從CA模式的第二大參數加以改進。

本研究之CA模式，除模擬各種地景類型未來可能存在的位置所在，其圖徵形成的背景亦綜合了各種環境屬性，因此，可作為熱點(hotspot)區位的參考。從模擬的結果發現，烏石坑地區歷經長期動態演變後，距離低海拔試驗站管轄範圍0~1 km緩衝帶內，部份的裸露區嵌塊體仍保有相當的面積(圖6)，因此，其未來的發展值得特別注意。

結 論

CA為模擬地景動態的利器，本研究結合不同類型預測模式之特性，建構一種改良過後的CA，應用於模擬烏石坑地區森林回復之情形，由研究成果發現，所發展之CA具備模擬該區地景空間分布與長期動態之能力。另一方面，台灣近代氣候變遷所導致的突發性極端天氣頻繁，環境受災害的影響也並非單一性，造成地景之變動甚鉅，本研究未來方向將強調實務上的應用，即配合不同的氣候因子條件，適當地調整模擬情境與演化規則，使CA的應用更為廣泛，俾經營管理之所需。

引用文獻

- 呂明倫、何健鎔。2013。烏石坑地區受天然災害引起之地景變遷分析。台灣生物多樣性研究15: 275- 285。
- 陳永寬、吳守從。2001。應用馬可夫鏈模式預測南仁山生態保護區地景變遷。台大實驗林研究報告15: 317-328。

- 楊育昌、何健鎔、何東輯、黃朝卿、張仕緯、
林斯正、劉敏慧、程忠智、胡景瀚。2011。
特有生物研究保育中心低海拔試驗站長
期生態監測之研究：野生動物普查與氣象
因子監測。臺大實驗林研究報告25: 1-23。
- 楊育昌、劉敏慧、林春富、程忠智、何東輯、
何健鎔、林雅玲。2013。烏石坑地區森林
與溪流環境兩棲類群聚受地震影響之研
究。台灣生物多樣性研究15: 83-97。
- 鄭祈全、吳治達、王素芬。2005。應用Markov
和Logit模式監測地景變遷之研究。台灣林
業科學20: 29-36。
- 鍾玉龍、呂明倫。2006。綠島地景動態之研究。
特有生物研究8: 87-96。
- Al-shalabi, M., L. Billa, B. Pradhan, S. Mansor
and A. A. A. Al-Sharif. 2013. Modelling
urban growth evolution and land-use
changes using GIS based cellular automata
and SLEUTH models: the case of Sana'a
metropolitan city, Yemen. *Environmental
Earth Sciences* 70:425-437.
- Balster, H., P. W. Braun and W. Köhler. 1998.
Cellular automata models for vegetation
dynamics. *Ecological Modelling* 107:
113-125.
- Batty, M., H. Couclelis and M. Eichen. 1997.
Urban systems as cellular automata.
*Environment and Planning B: Planning and
Design* 24: 159-305.
- Bürgi, M., A. M. Hersperger and N.
Schneeberger. 2004. Driving forces of
landscape change-current and new
directions. *Landscape Ecology* 19: 857-868.
- Chen, J. Q., S. C. Saunders, T. R. Crow, R. J.
Naiman, K. D. Brosofske, G. D. Mroz, B. L.
Brookshire and J. F. Franklin. 1999.
Microclimate in forest ecosystem and
landscape ecology – Variations in local
climate can be used to monitor and compare
the effects of different management regimes.
Bioscience 49: 288-297.
- Echeverria, C., D. A. Coomes, M. Hall and A. C.
Newton. 2008. Spatially explicit models to
analyze forest loss and fragmentation
between 1976 and 2020 in southern Chile.
Ecological Modelling 212: 439-449.
- Geist, H. J. and E. F. Lambin. 2002. Proximate
causes and underlying driving forces of
tropical deforestation. *BioScience* 52:
143-150.
- Goodman, L. A. 1968. The analysis of
cross-classified data: Independence,
quasi-independence, and interactions in
contingency tables with or without missing
entries. *Journal American Statistics
Association* 63: 1031-1091.
- Holbrook, K. M. and T. B. Smith. 2000. Seed
dispersal and movement patterns in two
species of *Ceratogymna* hornbills in a West
African tropical lowland forest. *Oecologia*
125: 249-257.
- Houet, T., P. H. Verburg and T. R. Loveland.
2010. Monitoring and modelling landscape
dynamics. *Landscape Ecology* 25: 163-167.
- Huang, H. M., L. Q. Zhang, Y. J. Guan and D. H.
Wang. 2008. A cellular automata model for
population expansion of *Spartina
alterniflora* at Jiuduansha Shoals, Shanghai,
China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*
77: 47-55.

- Jokar Arsanjani, J., M. Helbich, W. Kainz and A. Darvishi. 2013. Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21: 265-275.
- Kuemmerle, T., D. Müller, P. Griffiths and M. Rusu. 2009. Land use change in Southern Romania after the collapse of socialism. *Regional Environmental Change* 9: 1-12.
- Lu, M. L., J. Y. Huang, Y. L. Chung and C. Y. Huang. 2013. Modeling the invasion of a Central American Mimosoid tree species (*Leucaena leucocephala*) in a tropical coastal region of Taiwan. *Remote Sensing Letters* 4: 485-493.
- McGarigal, K. and B. J. Marks. 1995. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. General Technical Report PNW-GTR-351, Portland.
- Mertens, B., L. Hua, B. Belcher, M. Ruiz-Pérez, M. Fu and X. Yang. 2008. Spatial patterns and processes of bamboo expansion in Southern China. *Applied Geography* 28: 16-31.
- Meyer, C. L., T. D. Sisk and W. W. Covington. 2001. Microclimatic Changes Induced by Ecological Restoration of Ponderosa Pine Forests in Northern Arizona. *Restoration Ecology* 9: 443-452.
- Nagendra, H., S. Pareeth, B. Sharma, C. M. Schweik and K. R. Adhikari. 2008. Forest fragmentation and regrowth in an institutional mosaic of community, government and private ownership in Nepal. *Landscape Ecology* 23: 41-54.
- Rambo, T. R. and M. P. North. 2009. Canopy microclimate response to pattern and density of thinning in a Sierra Nevada forest. *Forest Ecology and Management* 257: 435-442.
- Soares-Filho, B. S., G. C. Cerqueira and C. L. Pennachin. 2002. DINAMICA-a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling* 154: 217-235.
- Sui, D. Z. and H. Zeng. 2001. Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: a case study in Shenzhen. *Landscape and Urban Planning* 53: 37-52.
- Tucker, C. J. and P. J. Sellers. 1986. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing* 7: 1395-1416.
- Wehncke, E. V., S. P. Hubbell, R. B. Foster and J. W. Dalling. 2003. Seed dispersal patterns produced by white-faced monkeys: implications for the dispersal limitation of neotropical tree species. *Journal of Ecology* 91: 677-685.