



## 森林及地景 模擬方法的發展

◎Development of Forest and Landscape Modeling Approaches

◎David J. Mladenoff and William L. Baker (原著)

◎薛怡珍 (譯) / 國立台灣大學森林學研究所博士生

本篇文章譯自 Mladenoff 和 William (1999) 所出版《森林地景變遷的空間模擬：方法與應用》一書有關〈森林及地景模擬方法的發展〉內容。有關地景生態學的研究已於台灣地區蔓延開來，然在台灣地區真正開始發展地景生態學的研究大約十年的光景，許多理論及模式的發展仍處於探討摸索階段，譯者期許這篇譯文能夠為林業界在結合地景生態學應用時，也能夠對國外目前有關森林地景變遷模擬的模式有所瞭解。

本文內容包括森林模式在生態學上的基礎，演替、干擾、死亡的理論與概念，森林變化的概念模式，森林變化的電腦計算模式，地景模擬方法的發展...等之說明。

### 森林模式的生態基礎

森林地景模式 (forest landscape models) 的模式基礎分別源自好幾個不同來源，大部分源自已研究超過近 30 年的生態模式 (ecological models)。這些模式概念的理論基礎又多源自生態演替 (ecological succession)、干擾 (disturbance)、平衡及非平衡生態系統

(equilibrium and non-equilibrium ecological systems) 概念及理論的研究發展，包括族群、社會 (或稱群落)、生態系以及地景。比起 30 年電腦模擬發展而言，這些概念的根源更遠源自生態學。這些模式也多從地理資訊系統，以及森林規劃、經營管理及決策軟體的領域發展而來的。

此書所論及的模擬方法多為實證性的 (empirical) 和機制性的 (mechanistic) 方法，且很多在真實的地景 (real land-scapes) 上已有實際的案例在分析地景變化及經營管理。這些森林地景模式的研發及使用多著重於基礎的及實用的研究上。這些模擬方法的產生顯然是因應資源管理的需要，同時應用這些方法去管理大尺度的地景也有增加的趨勢。為了滿足經營管理的需求，我們需要能夠用來評估假設情境 (scenarios) 模擬不同經營管理結果的影響的工具。這些模擬常需要時間和空間尺度的決策模擬。而模擬模式 (simulation models) 往往是評估替選方案的唯一方法，但我們可能將每一個替選方案在真實世界中實際操作測試一遍。

同時模擬也考慮生態學本身的一環，即是所謂的地景生態學 (landscape ecology)。地景生態學本身的理論發展多源自於近四十年來的生態系及群落生態學，而實用方面的理論源自於環境管理，特別是在北美 (Golley, 1993)。空間過程及互動、大範圍面積的土地區域以及異質性的課題很明確地被加入地景生態學的研究重點之一 (Pickett and Cadenasso, 1995; Turner, 1989)。追

溯生態學及環境管理或生態系管理的研究在六〇年代的社會及環境風氣的成長僅是隨著研究經費以及對環境關懷及管理的成長的一般性學科 (McIntosh, 1985)。

特別是在此書所論及的方法論，這些方法的好幾個概念都是引自生態學的基礎。植被轉變 (或稱植被改變、植被變化、植被變遷) 的概念以干擾及演替為基礎，植被及生態系的非平衡性質可見於 Pickett and White (1985)。另一個重要的概念就是尺度，特別是在植被轉變中空間動態重要性的觀點，而這個動態在不同的空間及時間尺度 (spatial and temporal scale) 下發生 (Levin and Paine, 1974; Grubb, 1977; Loucks et al., 1985)。這些藉由技術工具而演進的概念，如電腦容量及新電腦的低成本、GIS 軟體以及遙測...等提供此書所論及的空間模擬方法依據。

### 演替、干擾、死亡的理論與概念

許多演替理論及概念發展的評論此書將不再針對其細節多論述之 (Connell and Slatyer, 1977; Drury and Nisbet, 1973; West et al., 1981; McIntosh, 1985; Glenn-Lewin et al., 1992)。

演替有系統性的研究於 1890 年代至 1900 年代初期發展，特別是 Cowles

(1899, 1911) 及 Cooper (1926) 的研究成果。詳細的理論和機制論的描述由 Clements (1916) 所研發出來。從植被組成的起始點到由氣候因素所決定的極盛相，對演替的概念及機制視為有條理的決定性進展而言，Clements 理論是一種工具 (Clements, 1916)。更重要的是植物社會透過時間以及曾經達到且呈現長期穩定的極盛相被視為回應個單一有機體是一樣的。這樣的一個理論有用之處在於它的次序性以及可預測性——在發展生態學的預測科學以及最後在預測模式上有著很大實用性的特質 (McIntosh, 1985)。

替選方案模式早期主要由美國的 Gleason (1926)、蘇聯的 Ramensky (1924) (引述 McIntosh, 1985) 以及英國的 Tansley (1935) 等人發展之。Gleason 特別評論 Clements 的論點，並指出演替有一個很大的部分是屬於推測的成分，且物種個別地回應到環境中。物種組成是由於一部份的偶發事件導致類似環境反應的物種集合體，卻不是由於整體的社會（群落）的決定性改變 (Gleason, 1927)。不過，在 Gleason 看來，比起 Clements 學派方法而言，量化方法應用在 Great Smoky Mountains 陡峭的環境梯度上 (steep environmental

gradients) (Whittaker, 1956) 以及在 Wisconsin 地區適度的梯度上 (moderate gradients) 更為有效 (Curtis and McIntosh, 1951; Curtis, 1959)。

甚至五〇年代以後，Clements 學派特別在系統生態學發展的領域中仍佔有一席之地 (Odum, 1969, 1971; Margalef, 1963)。過去幾十年來，生態學上重要的分野源自於系統生態學的 Clements 學派以及以群落、族群為基礎的 Gleason 學派的發展方法 (McIntosh, 1980; Peet and Christensen, 1980)。更多最新的方法已經認可更多演替的整合觀點，也包括植物資料統計 (Huston and Smith, 1987; Glenn-Lewin et al., 1992)。

某些發展的比演替理論慢的許多的理論，本身源自植被轉變的概念——干擾的重要性。理論發展需要演替與極盛相的概念和穩定平衡狀況的極盛相，對於可感受到少數干擾事件僅佔很小部分的角色。植被非平衡的想法確實是很早就相當清楚的，比起 Clements 學派的演替典範而言，「觀察尺度」的重要的觀念甚至是很慢才被學界所接受 (Watt, 1947; Whittaker, 1993)。更多新的干擾概念認可在干擾、空間與時間尺度，以及生態系過程變遷的整合中，推論及變化性的重要，正如以個體物種對環境有所反

應的資源可獲得性(Pickett and White, 1985)。對於在生態系統下演替及干擾可能在不同空間及時間尺度之過程運作而發生以及交互作用對影響植被轉變不同的方式有其重要性的認定，在實際的方法中設定模擬森林地景的進展階段。

### 森林變化的概念模式

雖然好幾個非空間方法在七〇年代研發應用於演替概念的變遷到預測模式。這些模式大多與馬可夫轉置模式(Markov transition models)以及生命-屬性模式(vital-attribute models)的方法有關。這些方法舉例更多演替理論的數學公式及以法則為基礎的公式，是很啓發式的，也開始應用演替理論在生態改變及經營管理的研究上。

靜態馬可夫模式(stationary Markov models)(Feller, 1968)已經被用在森林中，以被觀測轉置來描述演替改變的特質已有一段時間(Stephens and Waggoner, 1970; Waggoner and Stephens, 1970)。馬可夫模式是一個利用實證決定轉置機率之矩陣的數學方法，用以預測一段時間後的林木-物種替代位置以及組成。這方法已被描述很多次了，但有三個缺點：

1. 演替變化可能不是靜止不動的，例如機率經過一段時間可能不是一直不變的（換言

之，這裡所指的機率是動態的或然率）；

2. 馬可夫模式是典型的一次方模式，意思就是說在決定下一次的機率轉置，僅有目前現在狀況應該被考慮；
3. 馬可夫模式是非空間的（換言之，馬可夫模式沒有考慮空間的問題），在轉置機率中的毗鄰關係不被考慮(van Hulst, 1979; Binkley, 1980)。這方法的修正版已存在，即是半馬可夫模式(semi-Markov models)，它可以處理上述的一些問題(Ginsberg, 1971)。

### 森林變化的電腦計算模式

在七〇年代，轉變森林分動態的演替理論的一些方法已被研發出來，在單木、森林孔隙以及林分的尺度下，這些模式被公式化。

與馬可夫模式有關的轉置模式，是由澳大利亞(Noble and Slatyer, 1980)以及美國西部(Cattalino et al., 1979)所研發出來的。這些轉置模式比簡單馬可夫模式更具彈性，也由干擾及立地特性而開始整合不同的方法，而不是集中於一個單一穩定不變的狀態。狀態改變以物種生活史特徵或對干擾有反應之生命屬性結合的基礎(Cattalino et al., 1979)。這個模式證明對於生態學上的研究是很有用的，同時也應用於美國林業署FORPLAN森林規劃系統(Potter et

al., 1979)。某些以電腦展現的模式，也廣泛地被用在大區域面積的森林經營管理，如國有林，儘管它們沒有明確的空間。

早期的森林模式最有趣及詳盡之一是Ek and Monserud(1974)的FOREST模式，這個模式發展於美國北Wisconsin。FOREST模式在一個森林林分的所有林木中，模擬更新、生長以及枯死。每一棵林木都佔據一個空間，而模擬樹冠鬱閉度、種子散播的毗鄰(adjacent)的影響，也包括座落區位的空間。同時，這個模式挑戰電腦處理資料的容量，也有廣泛地輸入參數的需要。在許多方法中，FOREST模式是一個較好的概念及機制的方法，特別在七〇年代。但電腦設備以及輸入需求卻限制了FOREST模式的使用。

更早的如Botkin et al.(1972)研發的JABOWA模式，對北美的森林而言，這是最早的森林孔隙模擬。JABOWA模式和它許多的衍生物整合在森林孔隙層級，模擬詳盡的生態實境。Botkin et al.的JABOWA模式產生很多修正版，特別是由Shugart及其同僚(Shugart, 1984, 1998)所發展出來的。孔隙模式已為全球所採用，孔隙模式對在相類似的森林生態系統每一類型中，幫助瞭解森林林

分動態有很重要的貢獻。(Shugart, 1984; Urban and Shugart, 1992)。

孔隙模式的應用常被假設為單木孔隙尺度的改變，以及結果的解釋。然而，這不是在大部分模式可以操作的典型尺度。原來的JABOWA模式模擬一個0.01公頃(10 m × 10 m林木大小)樣區。FOREST模式以及後來所衍生的模式模擬比FOREST模式更大的一個樣區，典型的面積是0.08 ~ 1公頃之間(Shugart, 1984)。一個完整的森林林分模擬可能是相近似的，假設是同質性的話，藉由平均多單一樣點的執行。孔隙模式後來的版本藉由一個單木尺度的再生，以及空間執行，模擬在4~9公頃林分大小網格(a stand-sized grid)的樣區網路多加了一些細節(Smith and Urban, 1988; Sarkar et al., 1996)。因為最初的孔隙模式是單一樣區(single-plot)，且是非空間的，它們不包括像火災這樣的干擾因子(見Kercher and Axelrod, 1984)。孔隙模式已經有用地應用在許多問題上，自從早期這個模式的研發上，包括經營管理(Aber et al., 1982)以及氣候變遷(Solomon, 1986; Pastor and Post, 1988; Shugart, 1998)。

在這個時期，大部分的模式僅處理

林分內的改變，很少有方法企圖直接處理大尺度、地景或區域的森林改變，且在早期的研究都將它們摒棄在外，如FOREST模式也只針對林分的層級進行模擬。模式也由於美國IBP計畫而發展(Loicks et al., 1981)。另一個模式模擬北美中部Lake



States 區域森林改變由 Shugart et al. (1973) 所研發出來，這個模式是非空間的，也不包括干擾的部份(Johnson and Sharpe, 1976)。在這個案例中，轉變類似上述的馬可夫林木模式(Markov tree models)，轉置介於主要的森林覆蓋層層級。第三個模式是應用在喬治亞山麓地區，特別著重在包括土地使用覆蓋層級以及自然森林改變(Johnson and Sharpe, 1976)。這個模式不僅是決定性的演替模式(deterministic successional models)也包括藉由在地景上的伐木、火災以及放牧的可能改變。模式輸出描述在不同改變速率的干擾參數下一地區(regions)的土地覆蓋層級改變的百分比(Johnson and Sharpe, 1976)。

近年來，Pacala et al.(1993)以

發展一套空間、林分-層級外顯模式(SORTIE)，以更多新的、詳盡的田野資料和種子擴散、再生、生長以及枯死亡的等級分類。在這個方法中，單木在每一個林分中都有一個區位。在次模式(submodel)的機制和陳列中，SORTIE的結構源自JABOWA-FORET孔隙模式(Pacala et al., 1993)。SORTIE的優點在於它比先前的孔隙模式有更強的整合能力在它的次模式中，田野資料來源的關係上；而缺點是像過去的FOREST模式，在模擬大區域面積的外顯單木空間模式時，需要耗費大量的電腦成本。因此，面積小於10公頃的林分能夠在合理的時間進程被模擬之(Pacala et al., 1993)。模式也有它的力量，建立以輸入參數分類等級廣泛的新資料蒐集的需上，對南新英格蘭最初發展地區以外

的大多數區位而言，資料無法被取得。

## 生長收穫模式

生長收穫模式的發展已被評論好幾次 (Munro, 1974; Loucks et al., 1981; Dale et al., 1985; Parks and Alig, 1988)。這些模式源自於森林生長和收穫資料，以及為潛在收穫量預測其林分生長增加量的預測方程式，如STEMS (Belcher et al., 1982)。FOREST 模式也有部份重疊的理論，且也適合上述的描述。

## 森林經營管理及規劃模式

在一般的地區模式真正開始從更多生物基礎的演替以及森林生長模式分離出來，且與更多經營管理規劃、土地使用規劃以及決策支援軟體系統的部份重疊。在生長和收穫模式，以及這些規劃模式間通常有一個緊密的連結 (Iverson and Alston, 1986)。某些尺度的區別能夠被達成，區別更大的尺度、重要的規劃獲區域林木支援模式，以及比較小尺度的生長和收穫策略決策模式。最著名的是美國林業署的FORPLAN 模式 (Iverson and Alston, 1986)。這類型的模式通常是複雜的，過去的版本也被批評是缺乏生態的動態以及變化性，或在解決規劃或計畫中沒有空間的考量 (Johnson, 1992)。這是一個複雜且漸增

的問題，儘管存在缺點，但對大尺度規劃而言，擴大電腦模式的發展及使用且在大量的森林所有權上評估經營管理的結果，已經是重要的。

在七〇年代後，用在森林經營管理領域發展的這些模式也傾向從其它森林模式分離出來，類似森林及生態模式的分離。使用經營管理以及規劃領域，GIS 應用軟體發展更多的決策軟體模式，但它們是不具生態性的。這些應用軟體不考慮自然的干擾率或變化性，或在它們的規劃演算法則中的空間互動關係 (Jonson and Scheurman, 1977; Hoganson and Burke, 1997)。

## 干擾模式

此書所論及的最後一組模式是干擾模式。在干擾模式的許多資訊以及最初模擬的影響以火災擴散模式為基礎，發展用以瞭解火災行為 (van Wagner, 1969; Rothermel, 1972)。這個資訊稍後被應用到森林經營管理模式 (Kessell, 1976)。後來在森林干擾的生態研究上，包括火災 (Heinselman, 1973, 1981; van Wagner, 1978; Johnson, 1992) 以及稍後的焚風 (Canham and Loucks, 1984; Runkle, 1982; Frelich and Lorimer, 1991)，也整合至生態模式。

## 地景模擬方法的發展

此書中有關的地景模式是源自於森林生態及模擬的一些基礎理論，但八〇年代的科技研發將研究的領域轉變成空間現象 (spatial phenomena) 及大區域面積土地的研究。「地景生態」，即是大區域土地範圍 (以公里為單位的尺度) 的生態現象研究，在 12 世紀就已開始，但於八〇年代才日漸成熟。在衛星影像、GIS 等技術開始被使用後，30 m × 30 m 解析度的 LandSat Thematic Mapper (TM) 資料及小平台 GIS 軟體的使用在八〇年代促使大區域範圍的土地空間分析能夠更為合理。

八〇年代末有關地景變化的模式愈來愈多 (Baker, 1989)，少許相關於空間模式的案例也可見，部份因為科技革命的影響開始展現。八〇年代中葉，地景變化常見的模式以分佈的方法佔優勢。分佈地景模式著重於「...地景現象層級間的土地分佈面積...」(Baker, 1989 p.113)；如 Shugart et al. (1973) 的案例，Shugart et al. 的演替模式是以北美西部五大湖的 15 種林型的森林地覆資料為基礎。當 Shugart et al. 模式利用微分方程式時，微分方程式 (矩陣) 模式也應用在馬可夫、半馬可夫，以及推測方法；例如 Rejmanek et al. (1987)

在密西西比三角洲地區的植被動態模式。

然而，八〇年代中葉，好幾個研究趨勢導向存在於外顯空間地景模式。在空間外顯模式中 (spatially explicit models, 簡稱 SEM)，個別細胞 (cell) 或像元 (pixel) 的變化不能被預測之，這是由於缺乏細胞或像元已知的區位及其相關於其它細胞或像元的區位。最早的 SEM 可能是 Kessell (1979) 的火災模式梯度，這個模式是用來預估存在於空間的植被以及燃料資料，以模擬火災的空間格局以及火災後的演替。Kessell 模式 (the Kessell model) 的基礎源自森林生態學以及傳統的經營管理學，以梯度分析以及整合既存的干擾模式。

除了 Kessell 模式，八〇年代後期改變栽培 (cultivation) 以及次森林演替的空間外顯模式 (Wilkie and Finn, 1988)，以及海岸濕地改變 (Browder et al., 1985; Sklar et al., 1985) 也紛紛出現。這些模式的理論很少源自森林生態學以及模擬的文獻當中，但開始於應用在一個空間模擬架構下的地景生態想法反而出現。

另一支的發展是從數學及物理學理論中發展有關細胞陣列 (arrays of cells) 的特質，細胞自動化 (cellular



automata)就是其中一個，它源自於六〇年代的資訊理論。細胞自動化最簡單的形式是從簡單的鄰近互動法則引起複雜動態的網格 - 細胞模式 (Wolfram, 1984)。一個以鄰近為基礎的轉置地景變化模式於八〇年代後期在Georgia所研發出來 (Turner, 1988)。次其的方面是滲透模擬 (percolation modeling)，源自於碎形理論 (fractal theory) 以及陣列的空間特質 (spatial properties of arrays)。八〇年代後期，滲透模式被用在分析一地景的干擾散佈情況 (Turner et al., 1989)。

近十年來，這些由森林生態學、干擾生態學、地景生態學所新發展出來的支派，以及細胞自動化和滲透陣列的數學運算相互引導我們發展到今日如此書所論及的空間模擬。模式強調森林生態學以及小地區面積的模擬，如孔隙模式，大區域土地的空間外觀形式正在研發中，如ZELIG版本 - FACET所研發出的模式。源自於細胞自動化架構的模式如META FOR 以及對模擬擴散式過程 (contagious processes) 持續有用的，如干擾擴散，但包括更多的複雜毗鄰動態已經被擴大，如FORMOSAIC。更確切地說，網格細胞模式，如DISPATCH 以及HARVEST可能源自於細胞自動化，但以起

緊接的毗鄰而言，包括在尺度上運作的進程。

導向多尺度模式 (multi-scale models) 的支派和多進程空間模式 (multi-process spatial models) 幾乎同時發展，以LANDIS、LANDSIM、FORMOSAIC以及DELTA為例，但在其它許多模式展現是應用領域比較狹隘的。例如FARSITE火災擴散模式，利用網格 - 細胞輸入資料，但以向量格式模擬火災擴散面，且外部氣候因子控制火的散佈，以及跳蛙式的火災擴散動態的路徑散佈。Sessions et al.的SAFE FORESTS模式著重於火災動態以及林木收穫。這些多尺度、多進程模式採用細胞多孔式或向量毗鄰模式，我們稱之為自動化方法，且與演替模式、擴散模式、移動模式以及干擾模式結合，這些模式不單是以簡單的毗鄰基礎的空間外觀格式互相影響、互相作用，下至上模式 (bottom-up models) 如細胞自動化，證明複雜的動態適於簡單的毗鄰交互作用所引起的，但這些新的模式包括重要的非毗鄰過程，就是修正以及控制鄰近動態的過程。在這個傾向多尺度、多進程模式的轉變是遠離從上至下或下至上方法之間作一個簡單選擇的一個轉變的世界觀。此書最後會對森林地景模式作一般性的

描述，但有關不同的歷史著作描述於本章節。對一些層級而言，大部分不是以生態學以及森林學的生態干擾、演替原則，就是以早期非空間的地景轉置模式。

在空間外觀方法有多少多尺度、多進程的細節，在模擬森林地景時需要？此書最後一章企圖綜合回答這個問題。然而，首先僅有這個查詢某些關鍵部份說明。在森林林分的單木以及族群過程有多少細節是必須的？且什麼是必須的過程？是獨自在林分內的過程中，透過地景複製之，足夠佔領地景的必須過程？在不同的環境中，林分層級過程如何變化？在一個林分中，什麼過程導引至自然（如火災）以及人為的（如伐木）干擾，且這些如何被模擬之？森林片斷化（或稱為森林破碎化，forest fragmentation）是一個日益增加的全球性現象。我們的模式包括伴隨片斷化的必要改變嗎？一些地景模式包括空間擴

散以及干擾擴散，但這是其它空間過程所需要的嗎？區域性以及全球性進程的重要性日益增加，正如地方性以及全球性社會經濟的力量，且它可能被問到我們的模式如何將這些過程很好的表現出來。在模式的動態中，人類扮演一個角色嗎？模式研發者更深入回答這些問題藉由包括研發者所認定在過程中細節的豐富度是重要的以及藉由研發者所認定強調或除了過程之外是不重要的。然而，在每一個模式中將什麼因子包括進來也是模式目的的一個功能。

從二十年前的觀點來看，這些研發的結果幾乎都不便利；十年前有一點點指引方向的出現。希望可以看到這些模式能夠在某些發展上是領先的，這些領域對我們是很重要的，它們也不會是一個單一、全部、最後的模式。可能一個地景的空間模式多樣性能夠延展我們的視野在不同的方法中，對不同的目的以及尺度而言。

【註 1】bottom-up：係指從細節到總體的，從個別到全貌。top-down：係指從總體到細節的；綜合的。

【註 2】本文譯自Mladenoff, D. J. & W. L. Baker 1999. Development of Forest and Landscape Modeling Approaches. In: D. J. Mladenoff and W. L. Baker (eds). Spatial Modeling of Forest Landscapes Changes: Approaches and Applications. Cambridge University Press. pp.1-13.