



# 從林分到地景的七個關鍵課題 —談森林生態系經營的多時空尺度

文、圖 ■ 謝漢欽 ■ 行政院農業委員會林業試驗所副研究員

**森**林生態系經營引入地景生態學的知識與方法，著重於大尺度地景範圍以上的森林保育與管理。過去的林學研究多侷限於林分尺度的研究與規劃經營，所需生態監測及經營作業的時間尺度也相對較小；多數的經營決策與活動都侷限於小範圍、短時期。因此從林分到地景的多尺度與跨尺度的研究與知識就顯得貧乏與不足。本文介紹北美應用地景生態學發展的知識於森林生態系經營與保育時所面臨的問題，內容聚焦在探討自然與人為干擾（disturbance）於林分到地景尺度所扮演的角色。

## 一、定義森林生態系的林分與地景

森林可以從微小尺度到地景層級以上尺度，看見其不同尺度下的時空格局（pattern）分佈（多重因素形成的空間異質性）及生態過程（process）。從具有林分分佈其中的森林生態系來看，林分視為相對均值的區塊（patch），林分的成因可歸於干擾的歷史及其體系（regimes）、樹種混合、地形、水文及土壤因素。若由生態系統的層級特性的角度，森林地景範圍包含了不同樹種或同一

樹種不同齡級的林分區塊分佈其中，再加上其他非森林覆蓋類型的區塊，構成了地景的空間異質性。林分的年齡從最後一次顯著干擾起算，可定義成時間的函數。因此以干擾體系為基礎可以定義林分與地景尺度的觀測單元。

至於林分的實際面積大小及所謂地景範圍的大小，一般不宜主觀認定，而應以生態過程涉及的尺度大小來劃分。當使用森林地景作為分析的單元時，是將過程（如水在水系網路的流動、動物移動、干擾蔓延等）與不同的地景要素連結一起看待。所以地景尺度並沒有最大的限制，研究時希望地景尺度所涵蓋的面積應足夠解釋地景所聯繫的生態過程。從森林為主體的地景鑲嵌體（mosaics）可晉級到區域（regional）尺度的植群類型，再藉由氣候與地文梯度（gradients）從區域尺度向上推展（bottom-up）到更大的尺度。

以往的森林經營或生態皆聚焦於林分尺度上，雖可以合理地瞭解各種林型的林分的結構與動態，但多數研究只從試驗的地景中，有目的地篩選具有生產力、附經濟價值的林型與林分，而忽略了其他

(Franklin and Spies 1991)。事實上地景要素之間是相互作用、相互影響的。這也是想從林分尺度所得的資料上推 (scaling up) 到地景尺度，往往造成失敗或偏誤的原因。與傳統比較，生態系經營們必須考慮森林大尺度的分析，此時應針對所經營或研究目的，同時綜合考慮更多的林型及林分周圍更多實質的相異地景元素。

## 二、森林干擾體系的內涵

所有的森林的生長與森林中的其他生物體，都多少受到干擾的影響，或因受嚴重干擾而消失。以北美北方林為例，常遭受規模較大、較強、能創造林分區塊的干擾。此等干擾主要經由人為伐木所造成大的區塊、形成具有粗粒度 (coarse-grained) 年齡較輕、同林齡林分的格局。相對北美溫帶雨林遭受

較小、較弱的干擾，造成少數林木的死亡的小區塊，形成細粒度的、較老、異齡林分的格局。森林所經歷的干擾的頻率與類型影響了森林的結構及其能提供動物棲地的種類。森林的干擾體系 (disturbance regimes) 可定義為：干擾的頻率、強度、空間範圍及內部異質性的長期樣態 (Pickett and White 1995)。也因干擾體系具有大時間及空間尺度的現象，一般難以從事研究，但時常直接從小尺度個別林分之干擾體系歷史推論而得；而這些不外乎是造成小尺度林分或是能維持林分格局的主要干擾類型，諸如輕度林火或其他造成森林孔隙的干擾類型。因此從林分層級上推，企圖解釋地景層級的干擾體系的確會造成問題。理由是，地景的不同部分可能遭受不同型態的干擾體系，只由局部地景的動態描述，事實上無法推估全部的地景範圍；如果使用大區域的平均值區來解釋，也會失去生態意義。

目前全球的大部分森林處於自然過程及人為活動干擾的交互作用影響下，其中有些受到人為干擾宰制產生土地利用的轉變，致使森林無法留存下來。尤其現代化工業型林業對森林的林分及地景的干擾，創造出的森林地景格局與只受到自然過程干擾的森林迥然不同。瞭解自然干擾體系如何塑造森林生態系已經變成一個新的森林經營方法的關鍵要素。1990年代美國及加拿大倡導的森林生態系經營政策，著重於採用自然干擾過程及其產生的結構的效應當作森林經營多目標的模式。然而要執行這種方法，面臨的困難

(圖片 / 高遠文化 攝影 / 葉品好)



在於我們對自然干擾體系不夠瞭解、目前的知識無法提供森林經營的建議，以及訴諸於社會層面之森林經營作業的限制。

### 三、七個重要課題

為了瞭解林分到地景尺度的森林干擾，以下說明研究人員及自然資源經營者必須面對的7個極具挑戰性之關鍵課題：

#### (一) 重視尺度的問題

生態學家早已體認到調查的尺度決定了所觀測生態格局；研究的粒度 (grain) 與幅度 (extent) 兩者限定了可以偵測、判釋、由生態過程促成的格局之空間與時間尺度。此外取樣與分析的方法進一步促成尺度觀測的過濾效應。當調查尺度與異質性系統尺度無法對應時，過於人為主觀簡化的觀測格局容易導出錯誤的結論。

傳統的林業與森林生態研究很少面對並處理尺度的問題，研究多受限於過去的方法或延續過去的研究傾向聚焦於單一不定的尺度上進行。由於尺度相異結論就互異，無法從某一尺度推論另一尺度，因而常受到科學的質疑，也降低其應用性。除了林分尺度與地景尺度有所差異外，長時期觀測對短時期的觀測所得結論也大不相同。最明顯的是，影響自然干擾的行為與效應的重要因子會隨分析尺度不同而改變。以林火為例，小尺度的林火，地形位置及燃料儲備是林火的引燃、強度及蔓延之決定因素；當空間與時間尺度擴大時，林火的發生頻率、強度及規模，就要由長期的氣候與天氣趨勢來詮釋。

同樣地，干擾體系也會隨著所選擇的尺度不同而相異。例如促成林分出現的干擾時間間隔很長的森林，干擾體系由維持林分的小型干擾所主導。也因森林地景的生態格局是由不同大小尺度的干擾在空間與時間上複雜地交互作用下呈現，大小尺度的過程都有其相當的影響份量，因此我們面對森林生態系干擾在多個尺度上所扮演的角色應進行瞭解與研究。

#### (二) 從多尺度瞭解干擾所扮演的角色

許多生態過程能在多尺度上運作，並於多尺度上產生不同層次的影響。局部過程可能造就大尺度的影響結果，例如水系的小崩塌促成溪流的土石沈積的順流效應 (downstream effects)。有些局部過程造成的影響後果只有在大尺度分析時才能觀測得到，林分層級的經營作業累積效應 (cumulative effects) 只在地景尺度分析時顯現；雖然小面積皆伐的個別區塊只會減除微量的後演替物種的棲息地，但經由累積之後，在人工林經營的集水區促成未砍伐森林的轉化及破碎化效應，足以威脅生物種群的生存。

生態學家早已習慣在小尺度上研究某些過程，在大尺度上研究其他過程，但卻很少去檢驗過程在跨尺度上如何運作。目前正在發展的地景生態學雖已經著重在大尺度上進行生態研究，但森林地景可以從多尺度來定義，而且包含了多尺度過程的運作在內；因此進行多尺度的研究將會比單只研究大尺度所得的結果有用。如果在單一尺度或多個狹窄尺度範圍下進行研究，將不易於認定

哪一尺度範圍所得結論是與尺度相關的。從局部地景或小尺度區域所得的結論一般無法適用於解釋較廣大的地景。我們可以從一系列與尺度相關的交互作用，由上到下（top-down）或從下到上方式來檢視森林地景格局形成原因。

在小尺度空間上容易使用傳統的試驗設計方法及資料處理技術進行現地調查研究，然而森林對時間尺度的反應一般很長，傳統方法只能顧及快速的過程，也導致大量運用「以空間取代時間」的研究方式（如使用遙測資料）。然而目前使用衛星影像資料的新技術於大空間尺度的研究時，有關資料不同空間解析度之內插及誤差分析方面問題仍有待解決。

然而，其中更具挑戰的在於生態學家必須去關注不同尺度下的森林組成、結構及生態功能的變異性。我們可以在不同尺度描述森林的組成，但是當面積逐漸擴大時，森林類型的分類數目往往逐漸減少。例如許多大面積的森林分類只分成森林地及非森林地兩種。有些研究已著重在小尺度與大尺度的森林結構，但是結構屬性的檢驗在個別尺度是不相同的。小尺度的結構描述主要聚焦於林木的大小和年齡、粗殘材（coarse woody debris）、森林孔隙及單木之間的空間分布；在大尺度上則聚焦於區塊形狀、大小及空間格局。然而很少的研究能整合分析結構的各個面向。

森林生態功能已經在不同尺度以不同的方式進行研究，某些功能如森林生產量及

生物量的動態已經在系列的不同尺度上進行分析，但並不是出現同一個研究上。許多其他的大尺度生態功能目前仍然處與理論階段，既使有理論架構，但整合性仍待加強。因此經營者期望藉助與地景功能及動物棲地相關連的研究知識時，個別研究之間不僅無法一致，也缺乏能夠整合地景動態的相關研究。

### （三）不同尺度的生態平衡能兼顧嗎？

干擾與演替都能作用於地景上，以隨時間而不同的演替階段來創造林分區塊。保育學家所提出的最小動態面積（minimum dynamic area；MDA）：是指面積夠大到每一演替階段都能保持包含有區塊的最小面積（Pickett and Thompson 1978）。由於MDA能指出某一自然干擾體系的尺度，因此是一個重要的理論概念。MDA的規劃理應與自然保護區的設計有關；然而尋求MDA並不是很有用，除非在某個尺度上能處於平衡態（equilibrium）。假如地景在所有尺度上表現出不穩定，那麼將不可能確認某單一尺度的「自然組合」，並由此衍生出能符合經營目標的條件。

在個別林分的尺度上，森林是處於動態的、很少是處於平衡態（Turner et al. 1993）；縱使林分發展與經歷干擾的時間尺度在不同生態系之間變異很大，幾乎所有林分都同時受到災害型干擾的影響。雖然有些生態學家建議在面積夠大的尺度範圍內，可能存在干擾速率與恢復能力之間的平衡，而此一平衡可維持區塊鑲嵌體處於一個平衡態的

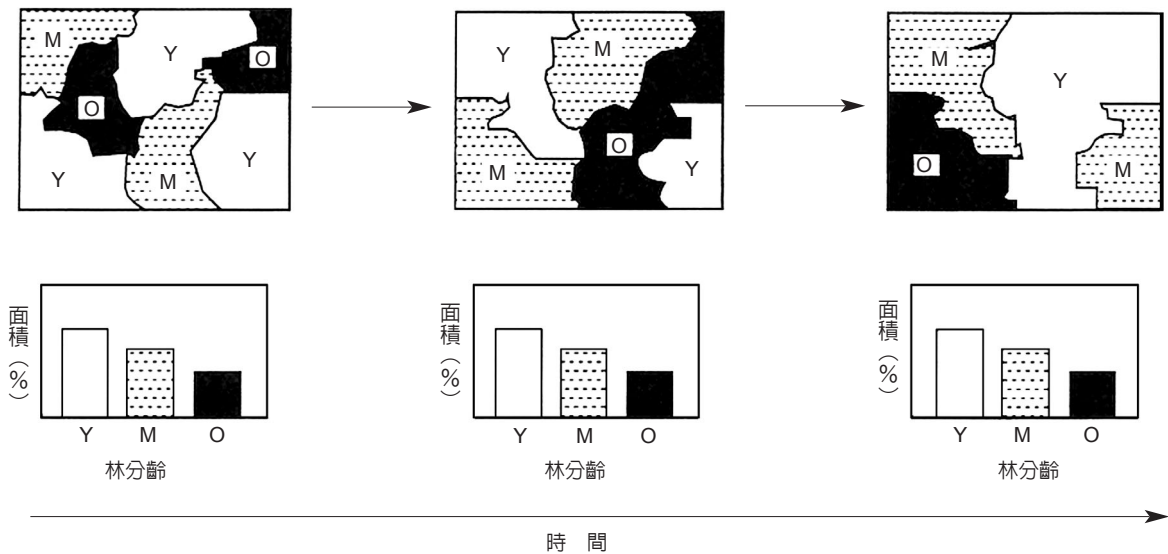


圖1 本圖說明森林地景「變動穩態鑲嵌體」，不同時期的林分區塊及齡級的變動，干擾及演替的綜合是區塊演變的趨動力。「變動穩態」是指不同時期能維持相同齡級的面積。

格局。由研究證據顯示某些地景可以呈現出這種穩定的鑲嵌體，但其餘則沒有。因此有了變動鑲嵌體穩定態 (shifting-mosaic steady-state) 假設 (Bormann and Likens 1994)。假說主要在說明由林分層級的動態擾動能夠產生穩定地景層級。然而達成變動鑲嵌體穩定態，森林必需具有以下兩個特性：

- (1) 經歷一個干擾之後，個別林分的重要變數（如生物量或物種組成）多少應依循一個確定的軌跡發展。
- (2) 干擾的頻率及尺度在時間上必須相對恆定，不應有突發事件，因此能夠在地景尺度上達成森林區塊穩定的年齡分佈（如圖1）。

事實上這兩個假是有問題的，在生態系中或許會有典型的生物量累積的格局，但這種依循一個確定性發展軌跡，一般不容易

適用於任何系統。即使演替的路徑在相似地區能夠確定，因為空間分佈的非隨機性及其受干擾後恢復時間的差異，森林地景呈現的變異在不同型態的地區明顯互異。事實上在異質性的地景，森林區塊不能自由地變動 (shift)，使得第 (1) 個假設無法達成。而第 (2) 個假設則需要恆定的環境條件及干擾媒介，因為干擾頻率隨時間而變動並且常有突發事件，經由檢驗是很難支持這樣的條件。

有些研究結合了經驗資料與模式模擬，企圖從實際的地景來決定MDA，但多數沒有成功。研究所得結論是：森林地景是一個「很多個不同非穩定態鑲嵌體組成的一個鑲嵌體」。雖說如此，變動鑲嵌體穩定態假說啟發了我們去探究「為何森林生態系呈現出非穩定態的動態？」(Turner et al. 1993)。從森林動態的多尺度觀點，事實上已讓我們轉移到

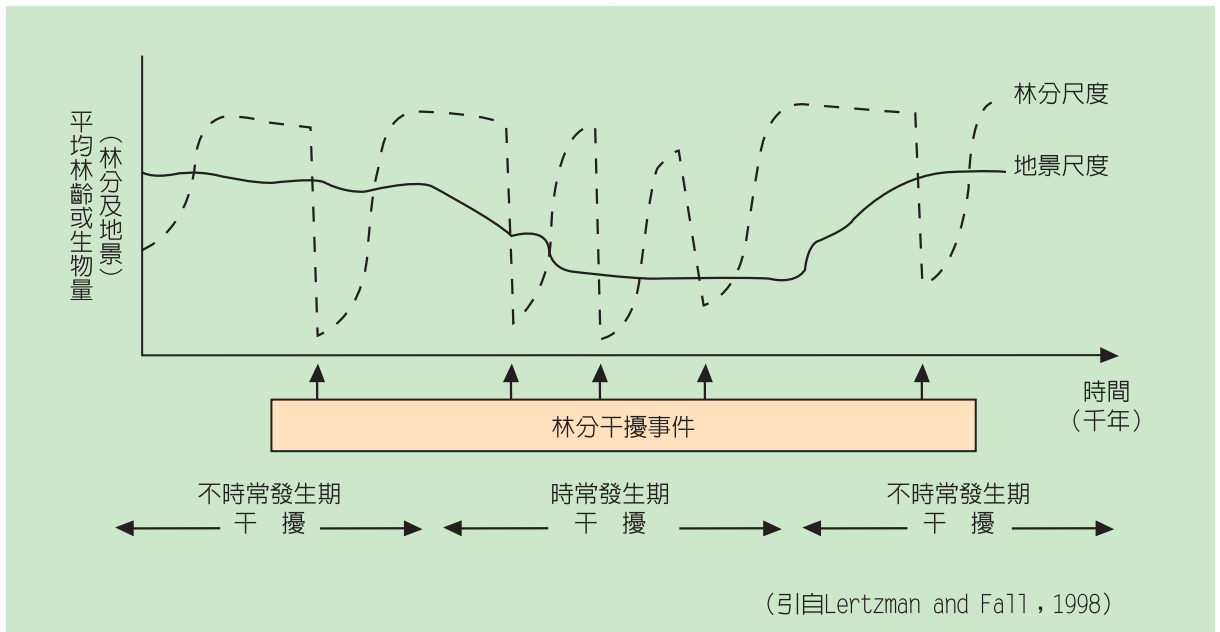


圖2 森林地景非穩態變動鑲嵌體發展軌跡示意圖。林分尺度（虛線）的生物量或齡級的波動是由干擾及演替造成。地景尺度（實線）的生物量的波動起因於林分層級動態的累積。區域性氣候變遷由上而下運行，影響個別林分所經歷的干擾體系、演替速率及演替路徑。

一個「看待森林生態系的變動為普遍現象，而捨棄尋求恆定（生態平衡）的新生態典範（paradigm）」。

#### （四）小尺度過程的交互作用，由下而上形成地景格局並影響大尺度過程

對於植被來說土壤及微氣候條件的小尺度效應是普遍存在，為植物生態學所研究。對於由小尺度局部的條件累積而影響大尺度格局機制瞭解仍然有限，少數研究評估了局部及大尺度過程如何影響地景格局或森林動態，發現了小尺度局部過程與大尺度區域過程之間的複雜交互作用（如圖2），其中局部土壤因子主要影響了林分類型的分佈及其所處地景基質（matrix）的成分。

大型與小型干擾在森林動態及不同階段

的林分發展及演替期間扮演重要的角色。大型干擾一般結合了生態格局與過程在跨尺度上同步發生，導致較大、均值、具演替初期種的森林區塊。隨著時間演進，小尺度干擾在上述格局裡扮演創造空間異質性的角色、時常將主要樹種推移成後演替期的樹種。例如北美北方林的南部，在一個災害性森林大火之後，造成具同齡級、樹冠一致、初期群落之空間格局；之後在大火次數減少的情況下，間歇性暴風在上面創造疏開林冠的小區塊，促成更新機制並補充後演替樹種，形成具有混合樹種、異齡級、及細質地的林分。相對的在大型罕見干擾（干擾頻率1,000年或更長）地區，主要由小尺度干擾後的恢復過程主導地景的格局成因。例如加拿大BC省的



海岸外緣的潮濕溫帶雨林，在未經開發的集水區分佈的森林，主要是由老齡、由小型干擾疏開孔隙的異齡林組成。1990年代美國西北的黃杉（Douglas-fir）林的研究，開始注意這些後演替森林的經營，著重在大火干擾後形成的林分的恢復上。大型與小型干擾共同作用下，相較之下小型干擾的貢獻容易被忽略。未來應針對此類起因於不同大小及強度干擾下的森林之動態歷史進行研究。

### （五）大尺度過程由上而下制約局部林分尺度的動態

從長時間尺度來看，與小尺度、強度小的干擾比較，極端干擾事件的出現足以主導了整個森林的動態。例如美國黃石公園的森林火災，從1700年代早期至1988年之間大多發生可以自行熄滅，火燒面積少於1公頃的小型林火。此類干擾足以在黃石公園地區形成穩態鑲嵌體，然而事實上這段期間地景經研究證實並不是處於穩定態。主要是因為1988年及發生於1700年前後、能燒毀黃石公園很大比例面積（1988年燒毀了32,000公頃）的森林大火，造成可以持續數百年，處於非平衡態的具混合樹種及林齡結構的格局。大火與小火不只在火燒面積的大小，在火災行為上也大不相同；大火一般不受於局部的燃料條件、地形阻隔及自然或人為滅火的限制，並具較大的空間異質性。

罕見、極端的事件在很長的時段裡扮演顯要的角色，能決定生態系統的動態。許多專家主張與區域和次大陸尺度有關連的氣候波動是決定此類極端事件可能發生的關鍵

變數；與大尺度氣體環流有關的大陸山脊走向，結合了從數十年到百年時間尺度的溫暖趨勢造成的天氣，形成起火的源（source），導致足以忽視局部條件影響的廣泛分佈之區域性大火。林火的發生頻率對氣候波動極為敏感，此類波動在長時期內明顯地驅動本區的森林動態。

此外地形在森林地景具有中尺度作用，在大尺度天氣驅動林火行為時，足以隔絕森林區塊避面受到干擾的影響，導致干擾體系的空間分支。例如大火時，水系支流與主要風向垂直的地區不會燃燒。目前我們對大尺度天氣、中尺度地形及局部森林的狀況之間的交互作用仍然瞭解有限。

### （六）人類活動方式改變了自然干擾體系

過去人類企圖壓制干擾媒介（如林火及蟲害的爆發），而以不同型式的干擾（如伐木、放牧等）取而代之，已經衝擊到森林的干擾體系。人類很有效率地以不同的方式、在不同的時空尺度上，使用與「自然」的干擾體系截然不同之人為干擾體系影響了森林生態系（如圖3）。

如同前述，不同的干擾類型可依據干擾的大小、強度、頻率、內部異質性，以及這些個別因子在時間及空間尺度的變異性來描述。伐木是全球普遍存在的人為森林干擾，工業干擾與自然干擾依其變異性兩者明顯不同。許多自然干擾創造系列大小不同的森林區塊分佈，例如林火與蟲害可以只危害單木或大到蔓延數千公頃，一個地景的區塊大小變異可能相當大。另一方面工業伐木的

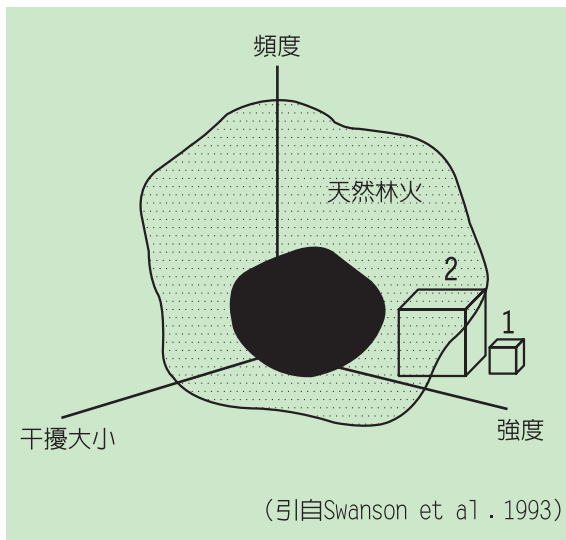


圖3 自然干擾體系、傳統森林經營體系及基於自然干擾體系的森林經營體系差異示意圖。不規則點雲區代表天然林火機率分佈（依據樹輪年代學判釋），1號盒子代表散佈式皆伐經營干擾體系（包含育林作業），2號盒子代表1號盒子繼續受到自然干擾過程及其他因素的影響。黑色區代表使用「生態系經營」情境所允許的條件範疇。

面積空間幅度大小受到政策及工程要求的限定，時常形成具均值、規整格局的人為地景。在主要由形成孔隙的小型干擾主導的森林進行大面積砍伐作業，地景質地會比未伐木前來得粗。在過去大火主宰的森林鑲嵌體上進行小區塊皆伐，導致地景格局的質地會比較細。當不同系列大小的經營單元出現地景上，超出自然干擾變異的範圍時，這種人為塑造的干擾將使森林生態系退化。

自然干擾傾向具有內部異質，個別的干擾強度經常是不同的，而且在不同干擾事件之間具有強度不同的內部變異性。例如野火在火燒區域經常漏失個別林木或樹叢，導致具有複雜形狀及結構多樣性的更新林分，

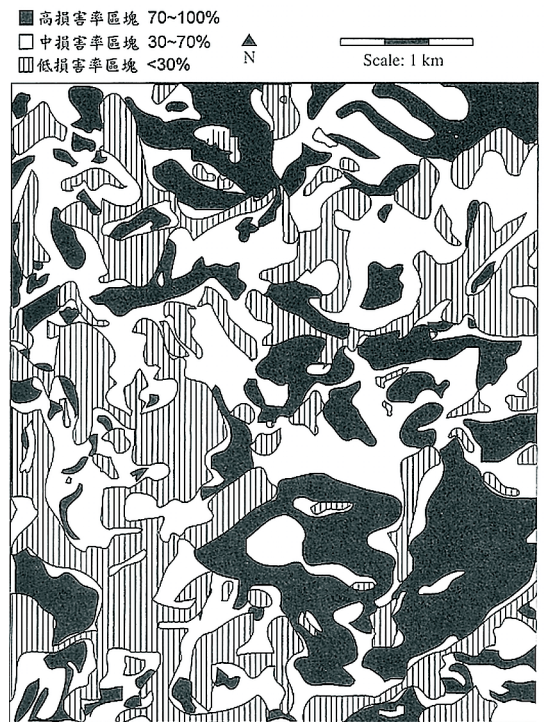


圖4 在美國奧瑞岡州Central Western Cascades 的一個Site，1800年至1900年間被火燒的森林區塊從受林火危害重建之分佈圖。分成3個損害率組類，本區31至42%的面積屬於中等損害組類，高損害區塊佔了21%的面積。

這種後干擾結構多樣性使得林分有利於提供不同生物的棲息地（圖4）。Franklin（1993）將那些森林經過干擾後留存下來能貢獻於林分發展的結構、功能及組成多樣性之要素稱為「襲產（legacies）」。地景層級歷經干擾後，逃過干擾的整個區塊可視為襲產，足以創造森林分佈的複雜格局（如圖4和圖5A）。相對的皆伐作業視為一種標準同齡森林經營系統，本身表現出高而一致的干擾強度：具簡單的形狀、有規定大小的面積、100%的伐除林冠及次冠層林木。在美國西北的許多



地區的皆伐作業，採取大尺度同齡林經營，產生跨越地景的均一性，導致林分與地景尺度都呈現低的異質性。標準林木生產導向的作業方法，在成熟林分尚未恢復到它干擾前狀態時就被採收；其所設定的輪伐期將無法從開創的林分或地景獲得襲產能帶來的效益（圖5）。

自然干擾隨時間及空間而變化，干擾事件的時間間隔可以是數十年到數百年的時段。相對工業式伐木企圖採取嚴苛、固定長度、能持續生產木材的輪伐期程。然而以這種模式經營的森林地景，長期下來育林干擾體系在達到老齡林階段之前，於較早期演替階段就被截斷林分發展，並在地景層級減少區塊類別數，因而導致林分區塊年齡集中在至平均區塊年齡，變異數也縮小，意圖趨近一個穩定態的變動相嵌體。

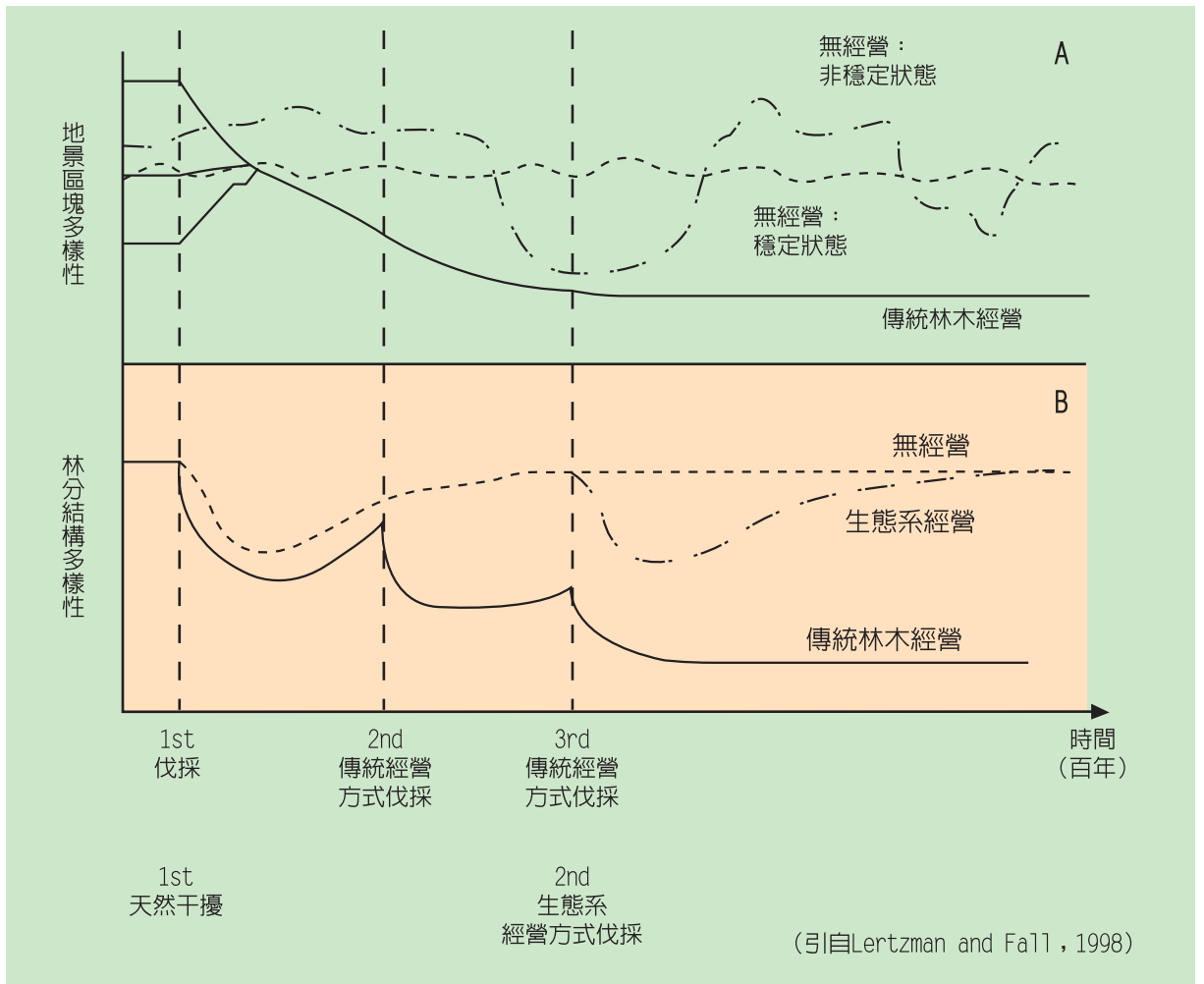
此外經營體系刻意「保護」森林地景，使之免於自然的干擾，同樣能造成森林鑲嵌體格局的重塑與改變。過去50多年的美國國家公園或其他區實施強度的林火撲滅方式，導致連接度比較高、缺乏年輕林分分佈的地景，此類地景反而容易遭受大型無法控制的災害性干擾，尤其當林齡越增加時越容易受干擾的影響。相似的效應也發生於加拿大BC省內陸及美西內地廣大的森林；大面積的柱松（lodgepole pine）森林因為年紀老化，反而容易遭受山松甲蟲（mountain pine beetle）的危害。這些森林過去也曾經歷過相對頻仍的林火，這些林火可以維持比較不容易傳播蟲害的鑲嵌體。

在美國國家公園及其他保護區，面臨的問題則在於與經營目標相抵觸有關，主要原因在於很難去定義或經營處於非穩定態的「自然」系統。若要發展以生態系為基礎的經營體系（ecosystem-based management regime）（圖5B），不管是為了木材收穫或是國家公園保育，都需要從地區（site）到次區域（subregional）尺度去研究及瞭解關於的森林結構、干擾歷史及地景層級動態的資訊（Lertzman et al.1997）。目前此類資訊經常是不夠詳細，仍無法當作特定地景經營的指南。

#### （七）整合多尺度空間分析的工具與方法

生態學家可以使用許多新工具從事多尺度的空間分析（如圖6）。全球衛星定位系統（GPS）及地理資訊系統（GIS）可擔任蒐集、儲存與處理空間資料的工具。遙測資料能提供各種解析度、可以補充傳統地面樣區調查不足的資料。空間統計（spatial statistics）及地景格局指標（indices）是空間資料分析及決定格局尺度的方法。高速電腦與大儲存媒體連結，使得空間模式分析與模擬容易達成。組合這些工具可應用於跨尺度的整合分析，然而目前使用這些工具的潛能仍待開發。

遙測資料包括衛星影像與航空照片，以往在森林領域的應用當作林分的分類工具，足以產生相當詳細具不同精確度的林相圖。目前亟需能善於表達誤差及誤差傳播的方法及模式，進而能使用有效資料作生態假設的檢驗。生態學家已使用衛星影像產生大尺度的成果，此外不同時間序列的遙測影像



(引自Lertzman and Fall, 1998)

圖5 不同干擾體系的結構多樣性示意圖。在地景尺度森林經營的瞬間衝擊於林分區塊並隨起始的狀態而不同。林木經營增加干擾頻率並截斷區塊林齡分佈，簡化了森林地景。A. 林木經營傾向於創造及維持變動穩態的森林，但是比起自然干擾體系具有低的區塊多樣性以及時間變異。B. 任何經營體系的伐木都迅速衝擊到林分層級，但規模的大小隨經營目的而不相同。林木經營採用生態系經營途徑，其所維持的條件與天然干擾體系相近許多，也因延長了輪伐期，伐採時破壞性相對減少。

能提供夠長時間資料進行地景變遷的分析。進一步發展遙測技術，整合地面調查的研究資料可達成跨尺度關係的分析。

以往地理資訊系統當作空間資料庫，儲存大量與空間相關的資料集，並輸出主題地圖。有些地理資訊系統具有複雜的模式分析工具，便利於生態分析使用。但有關資料

處理、轉換及誤差傳播評估方面仍待加強。只有少數系統結合了空間統計模組，提供地景格局分析。未來GIS應朝向整合空間模式分析方向發展。

全球衛星定位系統使用軌道衛星網路的訊號，允許手持式接收儀定位地球表面的座標位置。其定位精確度隨接收儀等級、

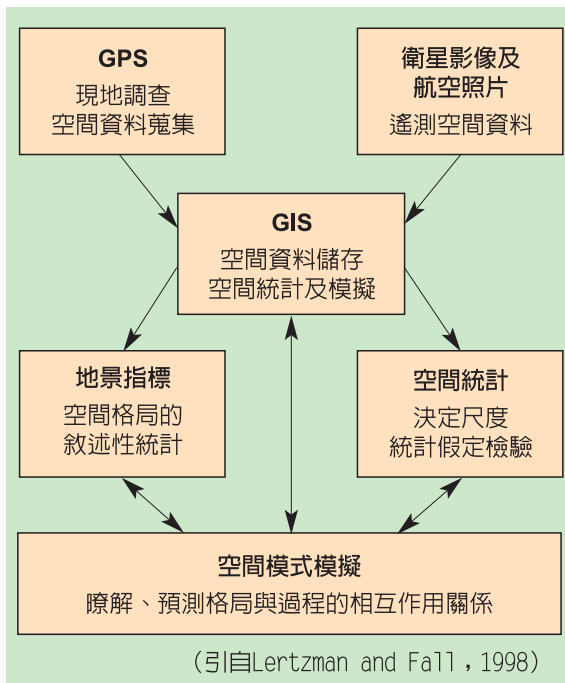


圖6 可供生態學家作多尺度空間模式分析的新工具關係示意圖。善於組合新工具有利於跨尺度關係的分析與解釋。

定位點的地區植被與地形遮蔽狀況而異。一般在森林環境中定位，合理的可接受精度約2到4公尺。GPS的重要性在於其所附與的系列工具上，允許與現地測量研究搭配，經由地理座標對位，很容易輸入GIS中，連結到相關的遙測影像上。

相當多可用於描述地景的結構與格局的指標已經被開發。這些地景指標量測個別區塊的幾何形狀、組成，以及整個地景區塊的空間分佈結構。雖然一些共通的指標已經被廣泛應用，但大部分並不具有生態解釋意義 (Ritter et al. 1995)。也許是這個原因，大多數的應用多聚焦在相對簡單的指標上，如核心區面積、周長與面積比及重要區塊類型

的面積百分比等。而且許多的指標與空間尺度有高度相關，在不同空間尺度會呈現不同的結果 (Rogers 1993)。為了讓指標分析方法成為有用的工具，一個經過層層檢核過的健全指標必須被確定；這些指標在不同尺度的表現行為必須已知，並且要能整合尺度與空間的關係。

空間統計及地質統計 (geostatistics) 已在其他領域發展成熟，這些技術仍可以有效應用到生態問題上，例如應用半變異圖、空間相關圖及變異階梯分析法，納入層級系統尺度的考量，這些方法包括了繪製某些不同觀測尺度的生態變異，用以說明變數的空間尺度關係；此外蒙地爾 (Mantel test) 及局部蒙地爾測驗是提供空間交叉相關或空間回歸的分析方法。其中某些方法除了應用於探索式資料分析外，還可正式應用於空間格局與空間交叉相關的統計推論。很多方法可以再結合碎形維度分析 (fractal analysis)，使之應用於確定空間格局或過程的尺度上，成為跨尺度分析的重要工具。

此外一些新的模擬工具結合了GIS資料庫與生態分析模式，這些工具允許生態學家執行複雜的地景動態空間與時間模式模擬。這類模擬有利於發展假設及描繪從不同干擾體系所呈現空間格局的特徵。目前我們應該有能力去組合這些技術、資料及跨分析尺度的模式。很遺憾的，許多工具本身並不容易整合使用，應用方法的假設仍然未解，估算的可靠度無法掌握，實際的多尺度資料與模式的整合仍面臨挑戰。

#### 四、地景結構與行為類型，哪一型能適用？

單一機制無法解釋所有尺度的格局 (Levin 1992)。生態文獻中森林地景被描述成數種鑲嵌體結構類型具有若干反應干擾體系的行為特徵。例如前述的變動鑲嵌體穩定態，觀念上涉及處於不同林齡級或演替組成鑲嵌體的地景行為 (如表1)。我們可將組合的地景型態及其行為指涉到一個原形 (archetype)。原形考慮了自然可能的狀態，用來定義一系列隱含或明顯的模式。原形影響我們對自然可能狀態的觀念，採用錯的原形會限制我們處理真實生態動態的能力。

地景的原形應該能充分代表鑲嵌體的結構本質及其結構所產生的行為的變異。表1顯示鑲嵌體結構及其相對應的地景行為分類矩陣，本矩陣不代表所有分類，只圖便利以下的說明。其中4個鑲嵌體的結構係依據各自組成要素的不同區分，地景行為則依據不同的時間及空間格局加以分類。4個類目 (catalog) 討論如下：

第一類目：只將簡單林齡級鑲嵌體套在研究的地景上，並使用林齡級代理演替的各個階段，這正是Turner等 (1994) 模式分析的森林地景類型，研究使用兩個比值：干擾間隔對恢復時間的比及干擾面積對地景面積的比，確定一系列可能的地景行為如圖7所示。圖中顯示6種地景行為類型，從穩定狀態到不穩定的混沌系統，發生於這兩個比值 (X軸與Y軸) 所構成的空間區隔中。鑲嵌體類型有助於生態學家思考及建立森林地景動態觀念模式。

此時穩定態及各種非穩定態行為都有可能發生 (鑲嵌體的所有要素均能存在於系統的所有可能狀態)，而這也是真正唯一能呈現變動穩定態的鑲嵌體的類目。然而這種穩態假設已由Barker在黃石國家公園的實證認為是不存在的。因為自然干擾體系的分支化結果，某些區塊明顯地不會變動，為期300年間隔的大火導致地景時常從其間的小型干擾中恢復。即使是直接由人類干預，地景層級的林齡結構及空間格局恢復時段仍需很長的時間。

表1 地景行為及鑲嵌結構原型分類矩陣

樹種名稱	鑲嵌結構			
	齡級鑲嵌體	地位鑲嵌體	齡級+地位鑲嵌體	齡級+地位+干擾體系鑲嵌體
穩定態地景	←—————		—————→	
變動穩定態動態	可能			
非穩定態動態	可能	可能	可能	
空間異質性動態			可能	可能

(引自Lertzman and Fall, 1998)



第二類目：屬於由地位（site）型所組成的鑲嵌體，主要是由土壤或微氣候差異決定的植被。儘管鑲嵌體底層運作的地位條件是森林格局主要的貢獻者，一般很難去想像森林地景沒有林齡級結構加諸其上，因此本類目不盡合理。

第三類目：本類目的鑲嵌體已將齡級及地位同時考慮，本類目與第一類目在實際生態經驗上較為相似。由年齡或地位級簡單構成的鑲嵌體，可以產生複雜的時間與空間動態。目前已經應用地景格局的中性模式（Neutral models）檢驗是否受干擾（是或否）二元值（binary）的地景；而這也可用於代表一個具有不容易火燒具低燃料區塊的地位鑲嵌體。模式應用滲透原理模擬地景接受干擾及由地景結構如何影響地景動態之通透性，已得到若干結論。事實上本方法已經應用在如圖1林齡級的模式分析上，僅依據如圖7的兩個比值，其呈現的動態行為不是屬於穩定態就是非穩定態兩種。

第四類目：乃是由主導不同局部地景的不同干擾體系的運作，地景受干擾後區分不同齡級的地位鑲嵌體。在這個被區分地景中的個別次鑲嵌體可能表現出表1中所示的任何地景行為。事實上Barker的結論說明了變動穩定態假設是不存在的，當考慮任何大小（大小尺度相對於最大的干擾事件）的森林干擾體系及相嵌體動態時，會發現此一「不同鑲嵌體的鑲嵌體」。受干擾體系區分的空間次區域的大多數案例應可歸屬於中尺度地形因子的運作。結合小尺度變數

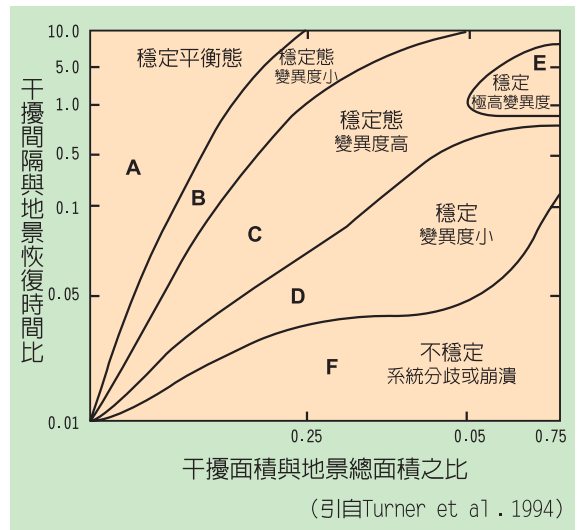


圖7 應用簡單森林地景空間模式模擬的狀態空間圖示，從空間可區隔出6種不同的地景行為。X軸、Y軸代表意義如圖所示。

（如燃料）、中尺度變數（如地形）及大尺度變數（如區域氣候型態），三者在地景空間交互作用的結構干擾目前仍尚待瞭解，因此第四類目是未來研究的主題。

## 五、地景穩定性的兩種意義

穩定性（stability）這個字詞用於解釋地景行為有兩種意義，第一個定義是指只有齡級或區塊組成隨時間的相對恆定而言。所有鑲嵌體型態的類目有可能在短時間內表現穩定，例如森林可於20年間在物種組成、林齡級及空間格局方面呈現恆定，但是實質上仍然處於非平衡態（disequilibrium）。長期的穩定不可能同時表現在大小地景上。原因是小地景比較有可能由單一罕見大的干擾所主宰，而大地景較可能由許多局部地景鑲嵌而成，擁有同等干擾參數及包含不同的動態。

第二個定義是指系統承受擾動後恢復到原來狀態的傾向或發展軌跡，分別稱之為自我平衡（homeostatic）或同位穩定（homeorhetic）Turner et al. 1993）。在干擾體系不隨時間變異的情況下，林齡級相嵌體由統計上摘要可呈現自我平衡的穩定，但平衡只存在於齡級分佈，而不存在於齡級區塊的空間結構上。假如干擾不去變動地位鑲嵌體的結構，地位鑲嵌體應表現包括空間關係的自我平衡穩定。在干擾體系不變下，由年齡、地位及干擾體系所區分的中尺度空間次區域會呈現出自我平衡穩定鑲嵌體。

綜合言之，我們無法從簡單結構鑲嵌體，確實說明所期望的動態。目前模式只檢驗矩陣的左上部分，然而大多數森林地景應該屬於右下矩陣？將地景類型列入氣候變遷下與保育及經營問題直接相關之地景模式分析上確實是項挑戰。因此在干擾體系時常變動下，從空間次區分到整個地景大多會屬於非穩定態相嵌體？

## 六、結語

人類的干擾體系與自然干擾體系在不同時空尺度上相異。傳統森林經營在有限尺度範圍內上進行規劃、實行及評估，最詳盡的規劃都集中在林分尺度。林分層級規劃的累積效應從下而上驅動經營地區的地景動態，產生地景尺度的經營問題。北美地區在制訂政策及法律去規範地景的規劃與經營之前，需要整合經營決策架構、各類空間資料、多尺度量化分析工具及空間分析模式，以便

在大範圍的空間尺度上以適應性途徑，進行長期性的經營作業評估。

以林分層級作為野生動物棲息地的作法或設置大尺度區域的保留系統，兩者皆不能符合保育的目標，除非能採用協調多尺度的保育策略。森林地景的格局表現出從下而上及從上而下相互作用的結果：森林生態系或生物的保育策略都必須瞭解相關的生態過程，並注意森林地景處於不穩定狀態的行為特徵。目前在不同尺度進行的保育投入，能獲得多少效益仍然不是很清楚。要評估的可替代方案仍處於假說發展階段，尚未進入檢測階段。

此外未來預期的氣候變遷將產生新的干擾體系，干擾本身對氣候變動也十分敏感，都會影響森林生態系。森林生態系普遍存在的動態是屬於非穩定態類型，研究或經營時要能確認系統的干擾動態時間框架，兩者都頗具挑戰性，是生態學家未來必須面對的課題。🌱



（圖）臺灣文化 攝影 / 葉品好