



## 專題

# 數學規劃法於 森林經營上之應用

◎馮豐隆 / 國立中興大學森林系教授

◎林玟嬪 / 夏威夷大學  
地理學博士候選人

## —— 從林木經營到生態系經營

### 一、前言

近年來，森林經營之世界潮流產生了明顯的變化。隨著人口增加，許多森林之開發已達到或超出其永續利用程度，人們也開始體認保護森林生態系之必要性。於是森林之經營管理策略，由原來的「生產財貨與勞務(即農業模式)」轉移到「維護森林健康、維護生物多樣性及提升森林生產力」之生態系模式(Weintraub and Bare, 1996)。除此之外，決策過程日益公開且複雜，以及資訊科技之突飛猛進，也是影響潮流改變之重要因子。

數學規劃法(Mathematical programming)應用於美國森林經營規劃已有40餘年之歷史。早期之應用主要在於林木採伐作業及林分管理之規劃。近年來，為因應生態系經營所衍生的問題，數學規劃法的研究與發展，面臨了新的

議題及挑戰，如空間問題(spatial issues)、層級系統(hierarchical systems)、多目標(multiple objectives)以及不確定性(uncertainty)等議題。茲將早期及近年數學規劃方法在森林經營上之應用，作一廣泛性的回顧與探討。

### 二、數學規劃早期之應用

Bare et al. (1984)曾針對1960到1980年代，系統分析—作業研究(System analysis—Operative research, SA-OR)模式在森林經營之應用詳加整理回顧。當時森林經營規劃問題之核心為林木生產，其數學規劃法之應用可歸維為以下四類：

#### (一) 苗圃作業

當時數學規劃法並未被廣泛應用於苗圃作業，僅少數作者曾利用此技術於苗床上種子及苗木的分派，以提供資訊

製作育苗計劃及種子苗木貯藏計劃，其中亦包括苗木運輸成本和苗木供需問題的解決。

## (二) 林分經營

林分經營問題可分為同齡林及異齡林二方面。在同齡林方面之問題包括：每單位面積各樹種應栽植多少株數？如何控制競爭的植生？何時以疏伐來調整森林空間分佈？施肥要施多少量？何時做經濟疏伐？要保留多少株林木？何時再更新？等。異齡林森林的生長與經營中，最重要的決策為：各樹種於各直徑級中應保有幾株？永續的直徑分佈為何？各樹種、各直徑級有多少林木需移除？利用何種策略來改善目前存在之林分結構至永續的直徑分佈？等。

雖然有些因子使上述問題更為複雜，其中包括：多目標及不確定性、生產的成本與效益不易測得及量化等。然而森林經營者仍應用許多種數學規劃工具去進行林分經營決策。例如：動態規劃法(Dynamic programming, DP)為決定最適疏伐之主要工具。此法應用於決定同齡林中蓄積量及輪伐期之聯合最適解，並可進而將育苗成本、最初栽植之林木株數、生育地品質、伐木成本等之影響，納入規劃模式。林地施肥之決策問題也可以結合疏伐規劃加以解決。此

外，為解決林分經營之不確定性問題，曾有研究者發展一套結合 DP 及 Markov chain 之模式，以決定最佳生產之控制策略。

## (三) 森林之經營問題

典型的森林規劃問題包括何時、在那裡收穫和收穫多少，以達到某森林目標函數的最適化。模擬和最適化方法皆廣泛被用來幫助經營者做決策。大部分的最適化方法皆以線性規劃(Linear Programming, LP)為模式架構，如美國森林署於 1971 年發展之林木資源分派模式(Timber Resource Allocation Model, Timber RAM)。雖然 LP 被大量應用於森林經營規劃上，但其應用亦招致不少批評。首先，LP 是一種確定性(deterministic)技術而卻使用在一個隨機性(stochastic)之森林經營系統。由於森林經營期間長，如何考量未來之不確定性為規劃上之重要課題。而降低不確定性影響之方法包括：LP 目標函數與限制式的係數之母數化(parameterizing)以及使用最大淨現值(Maximum present net worth, Max. PNW)為目標式。其他之批評尚有 LP 無法適當地處理林木產量對價格影響之問題，以及可能有零星細劃的林分產生等問題。

目標規劃(Goal programming, GP)

為解決多目標規劃問題之重要工具，然而GP亦有上述LP之問題。除此之外，GP將不同目標付與優先順序或給予權重而有主觀性之批評。Steuer and Schuler (1978)發展一套所謂互動式多目標規劃法，他們藉由在求解過程中與決策者互動以尋求最適解，進而避免權重問題。

森林經營規劃尚有所謂總體最適化(globally optimum)問題。為求得總體最適化，林分及森林之決策須同時產生。例如De Kluver et al. (1980)提出二階段最適化(two-stage optimization)法，在第一階段先使用DP來求得最佳疏伐及輪伐期決定的策略，然後於第二階段再採用多目標LP模式。

#### (四) 森林保護

森林經營之另一主要活動為保護森林資源免於受火災及病蟲害之破壞。其中SA-OR技術之應用以火災管理最多、最廣。目前模擬技術已廣泛應用於氣候、地形、燃料及救火活動對森林火災之影響。其中較重要之三個模式為FOCUS (US FS)、FIREScope (Sandenlia & VanGelar, 1977; 標註於Bare et al., 1984)及FORPLAN (Kessell, 1979; 標註於Bare et al., 1984)。FOCUS主要是提供一套方法來評估不同打火資源組合對森林火災初步滅火的影響，FIREScope

則提供消防人員救火資源之分派以及進行火災遏阻之預測。FORPLAN並非用來模擬滅火行動，而是用來模擬火災及其他干擾對森林之影響。模擬亦大量用於森林病蟲害控制。

此外，線性規劃、整數及混合整數規劃皆可有效率地應用於滅火裝備分派、人員及其他資源。非線性(non linear)、二次式(quadratic)及動態規劃亦大量應用於火災科學。例如，利用動態規劃來偵測火災與使直升機出動之延誤降至最低。

### 三、森林經營之新議題

近年來，為因應生態系經營，數學規劃法在森林經營之應用增加了許多新的議題，其中又以大尺度(如森林)之規劃問題較受重視。Weintraub & Bare (1996)曾針對森林層次之規劃模式與問題加以回顧探討，他們認為數學規劃模式為因應生態系經營之主要對策包括：(1)發展能反應森林層級(forest level)或次森林層級(sub-forest level)——林分、林木層級——空間問題之模式；(2)發展能反應多目標規劃環境之資源模式；(3)探討長時間經營活動所造成之累積影響，這些活動包括：築路、塊狀伐採、生育地分類區劃、河岸及濕地保護；(4)將不確定性納入模式中；(5)採用層級規

劃(hierarchical planning)方法來連結作業、戰術及策略三層次之規劃決策；(6)促進經營管理效率並同時考慮環境上的限制等。

茲將各類問題、模式及對策簡單探討如下：

#### (一) 多目標利用規劃

##### (Multiple use programming)

多目標利用規劃乃國有林或公有林經營最主要之問題之一。早期美國森林署發展之森林規劃模式(如Timber RAM)，著重在林木生產，視其他方面(如遊憩、水質、野生動物棲息地保育等)為限制條件。美國森林署於1980年發展FORPLAN規劃模式，基本上為Timber RAM之延伸。FORPLAN Version 2於1986年推出，其模式架構已能明確地將林木以外之資源視為規劃目標，其後並納入林道鋪設及規劃之功能。在1990年代後期，由於生態系經營理念的崛起，人們對資源永續性、生物多樣性、野生動物棲息地保護等議題日益重視，森林經營政策轉而尋求未來生態系之理想狀態(Desirable future condition, DFC)。針對此新的需求所發展之模式較著名者為美國森林署發展之Spectrum模式，其主要特點為結合數學規劃、生態模擬及GIS界面來處理森林經營規劃，以增進空

間關係的分析。其主要之應用包括：安排林木經營活動計畫以達生態系經營之目標，模擬在不同經營方案下資源間之影響或相互關係，以及分析各經營方案之取捨關係，以供決策之參考(USFS, 2000)。Spectrum將用以取代沿用多年之FORPLAN系統。

此外，鄰近社區之社會經濟需求、世代間的公平性等問題，亦是近年來森林經營之重要議題。隨著公眾參與程度的增加，這些議題的重要性亦隨之增加。故如何將其明確地納入多目標規劃過程中，為目前之重要研究課題。

目前最常用之多目標規劃模式為目標規劃法(Goal programming, GP)以及多目標線性規劃法(multiple objective linear programming, MOLP)。過去GP有「目標訂定不易」及「可能產生非最適解」之缺點，但其演算法經多年研究改良後，上述缺點已獲得克服。GP和MOLP之應用基本上很相似，因二者皆可歸類於距離函式模式(distance function model)(註1)之特殊例子(Romero, 1991)。雖然目前將多種目標納入數學模式中已無困難，但其仍未能被廣泛應用在實際規劃決策過程中。其中主要原因可能是許多政治性或社會性目標無法被納入數學模式中，而使其結果之可用性大為降

低。

(註1) 距離函式模式：

$$\begin{aligned} \text{Minimize } d_p &= [\sum w_i p(x_i^* - x_i)]^{1/p} \\ \text{s.t. } X &\in F \end{aligned}$$

式中的  $w_i$  = 賦予屬性  $i$  的權重；

$x_i^*$  = 屬性  $i$  的理想值；

$x_i$  = 屬性  $i$  的算出值  $t$ ；

$i = 1 - n$  (屬性數)；

$p$  = 距離函式的參數。

## (二) 空間問題 (Spatial issues)

此所指之空間問題包括：毗連限制 (adjacency constraints)、林道設置、河岸或風景廊道管理、野生動物遷移廊道管理等。將毗連限制 (即避免鄰近的林區同時採伐) 納入森林規劃模式乃近 20 年來之新發展。美國太平洋西北幾州之森林作業法規已正式規定公私有林經營管理單位均需遵守此限制，以避免嚴重之景觀衝擊。然而這項規定亦可能引起森林分割破碎 (forest fragmentation) 之問題。如何在此二者取得平衡點，將是值得進一步研究之議題。

解決空間問題最常用的工具有整數規劃 (Integer programming) 及混合整數規劃 (Mixed-integer programming)。早期，因電腦計算能力之限制，這些技術未能廣泛應用。近年來，除了電腦計算能力大幅提升外，為改進整數規劃法求解不易之缺點，相關演算法之研究與應用亦不斷出現，如所謂“啟發式演算法

(heuristic algorithms)”及“隨機搜索技術 (random search techniques)”等。

## (三) 不確定性 (Uncertainty)

如何處理不確定因子乃近年來相當獲得重視的議題。傳統之不確定性問題包括：林木市場、林木生長與收穫量預測、森林火災、暴風雨、病蟲害等。而較新之議題則有物種滅絕之可能性、全球生物圈之災難性變遷、氣候變遷等。森林經營規劃專家目前所採用之模式大致可分為機率模式 (probabilistic models) 以及模糊模式 (fuzzy models) 兩類。機率模式假設一個系統之不確定性，可經由相關隨機變數之機率分佈加以了解，而模糊模式則假設來自於言語文字描述之不確定性，可經由相關模式參數轉換成“模糊數字 (fuzzy numbers)”加以處理。

將不確定性納入森林規劃模式中，目前乃在發展階段。近年來有不少學者提出以機率模式為主之研究報告，常出現之數學規劃技術包括：隨機規劃 (stochastic programming)、機率動態規劃 (probabilistic dynamic programming)、機會限制線性規劃 (chance-constrained linear programming)、馬可夫決策模式 (Markov decision models)、假設情況分析

(scenario analysis)等。而機率模式目前主要之應用障礙為不易求得可信之機

率函式(probability functions)以及複雜之演算法。相反地，模糊模式因不具上述困難而被看好日後實際應用在森林規劃中。近年來，多位學者曾提出利用MAXMIN規劃法來使一些重要資源

受到保障，在Spectrum模式中即明列此為規劃目標選項之一。

#### (四)層級式之森林規劃

(Hierarchical approaches to forest planning)

森林經營之考量層面，從單一林分到整個集水區，從數個月之短期計畫到一兩百年之長程規劃，其所牽涉之問題範圍博大而複雜。數學規劃法之應用也

因此而有兩種不同的模式趨勢。其一為發展巨大型單一模式，如FORPLAN。這類



模式藉由大型複雜之模式結構來解決大尺度之森林經營決策問題。但是這類模式需大量資料、人力、物力，而其結果往往難懂、不易分析，更無法適當地處理多層級之規劃問題。第二種趨勢為發展層級式之森林規劃模式，也就是將規劃問題依空間尺度或者經營決策層級拆成數個次問題，再分別求解。例如Weintraub及Cholaky (1991)所採用之方法

係將規劃問題拆成策略性及戰略性二層級。首先，他劃區域，利用數學模式求得各區域之土地經營方案、林木產量、經營預算等策略性規劃方案。然後再將各規劃區域分成數個小區，建立戰略層級模式以解決各小區之規劃問題，並以上一層級所得之結果為目標或限制條件。這種將問題分層解決，並以上一層所得結果做為次一層規劃依據之方法，

即為層級式森林規劃法之主要特色。

#### 四、結語

森林經營之潮流已由單一目標經營、多目標資源經營轉變為生態系經營。生態系經營係森林保育與利用兩股力量衝突下之產物，其主旨乃倡導研擬二者兼顧之森林經營策略：一方面維護大尺度森林之健康與生態完整性；一方面允許有限度之資源利用。在這個潮流下，數學規劃法在森林經營上之應用亦產生新的研究趨勢，以迎合生態系經營之需要。如美國森林署研發之 Spectrum 系統，即明白宣示生態系經營為其主要應用目標。目標規劃法在生態系經營上之應用研究，以目標規劃、空間問題、不確定性及層級式規劃法為主。

雖然多目標規劃模式之實際應用性，常因政治性及社會性因素而大受影響，但至少它可幫助研擬初步方案架構，以供規劃決策之討論依據。而機率模式應用之障礙則有待進一步研究探討。此外，層級式規劃法之有效利用，則需要一套明確之回饋系統，以連結各規劃層級之決策。

#### 五、引用文獻

Bare, B. B., Briggs, D. G., Roise, J. P. and Schreuder, G. F. 1984. A survey of systems analysis models in

forestry and the forest products industries. *European Journal of Operational Research*, 18: 1-18.

De Kluyver, C. A., Daellenback, H. G. and Whyte, A. G. 1980. A two-stage-multiple objective mathematical programming approach to optimal thinning and harvesting. *Forest Science*, 26: 674-686.

Romero, C. 1991. *Handbook of Critical Issues in Goal Programming*. NY: Pergamon Press.

Steuer, R. E. and Schuler, A. L. 1978. An interactive multiple-objective linear programming approach to a problem in forest management. *Operations Research*, 26: 254-269.

USDA Forest Service. 2000. *The Spectrum User Guide*.

Weinraub, A. and Bare, V. B. 1996. New issues in forest land management from an operations research perspective. *Interface*, 26(5): 9-25.

Weinraub, A. and Cholak, A. 1991. A hierarchical approach to forest planning. *Forest Science*, 37 (2): 439-460. 