

# 森林生長模式之發展及應用

文：馮豐隆 / 國立中興大學森林系教授  
吳純清 / 國立中興大學森林所研究生

## 一、前言

森林經營中，模式應用在森林生長收穫上是一必要之工具，而經營上所用的模式從以前至今，一直都是採用實證(empirical)模式或偽過程模式做為林地林木生長收穫之預測，但此種模式往往須在林地經營狀況及環境狀態不變時，才可適用，故只適用於小範圍林木生長量之推估，且林地常常隨時間改變，其環境因子也會改變，而且地球環境由於人類的干擾也逐漸在改變，若還僅用實證模式或偽過程模式推估時，可能會有不適用之現象產生；故近年來，許多林業學者發展能夠應用於較廣泛區域的過程模式及混合模式，因為此二模式是以林木生長之機制做為其架構，考慮同一樹種在不同環境因子下，如：陽光、溫度、土壤及水等因子，生長速度會不同，所以利用此模式對森林動態能有較準確的模擬。

以往，過程模式在林業經營上很少被應用，可能是推廣不夠，使得林業從業人員對過程模式的認知不夠、計算複雜，且對許多機制仍然不夠瞭解，而不被使用。但近年來，由於人們對森林經營漸漸朝向以生態系為基礎之經營方式，而使得過程模式漸漸地被大家所重視。

## 二、森林模式之功能及目的

我們建立模式因為它們可以幫助我們

(1) 定義我們的問題

- (2) 組織我們的思緒
- (3) 瞭解我們的資料
- (4) 與已知相連及測試
- (5) 作預測

模式對於演替機制若有合理的描述推論，則可以進行長期生態系動態之預測(Starfield *et al.*, 1987)。

過去，森林模擬主要著重在經濟上的預測及材積生產的預測。近年來，人們以更廣闊的角度去思考森林生長模式之運用，包括：短伐期增加收益、高資本投入造林以獲得最大的生產及最小的風險。

地位指數觀念在森林經營的收穫模式中是十分重要的，然而地位指數僅以立地品位與樹高、直徑、樹幹材積之間特殊的關係來決定其生產量，但這些相關在更小區域測驗生長時可能會招致失敗，因為生長與當地環境間的關係是相當複雜的，不能單以地位指數輕易的決定。因為，如果造林施業或環境狀況的改變，則地位指數就會有所失誤，而不再適用於所建立的生長關係(Battaglia, 1998)；此外，實證模式是運用統計之概念，應用回歸統計，配適最佳之曲線，故只能提供因子之相關性及可能的因果關係，而中間的過程機制則無法瞭解，且由統計學理論可知，以實證模式做預測推估時，只能適用於資料範圍內做內推。其所要預測的資料是在建檔資料範圍外時，做外推是不被允許的，因所得結果的誤差可能會相當的大。

1986年時Landsberg提出：早期森林生長模式主要著重於實證的及現實的地位分類模式，此種觀點造成誤解，以為機制(mechanistic)模式或解釋(explanatory)模式僅能應用在研究用途，而實證(empirical)模式則是應用於經營。因此，過程模式不被森林經營者接受與應用。

以過程模式為基礎的森林生產力模式，到目前為止幾乎沒有與森林經營系統相結合，普遍的認知認為過程模式只適合於研究運用，而經營的問題都是使用描述性的實證模式來解決，這就忽略了實證模式不能滿意地應付環境變遷及經營狀況的改變，也不能回答經營者現存的疑問的事實(Battaglia, 1998)。

最近，由於森林生態系經營時對空間異質性資訊的需求，才使過程模式的重要性再浮現出來，這些需求細分如下：

1. 評價大範圍空間尺度之經營活動(從小立地的林分尺度到地景尺度)。
2. 預測經營活動對較長期(多次輪伐期)森林的影響。
3. 瞭解經營對生物多樣性的影響。
4. 預測特殊成分(例如：生物的排遺、屍體等殘留物)對生態系統之影響。
5. 預測大範圍物種的族群動態。
6. 比較森林地景上自然與人為干擾的型態。
7. 評估全球氣候對特定森林的影響，反之亦然。

其實，以上所有需求是非常的複雜、可獲得的機制與假設有限，而且資料缺乏(Korzukhin *et al.*, 1996)。

在過去數十年，實證模式在森林生長及

收穫預測已有相當成功的表現，這項成功大多只是限定於預測木材纖維收穫的林木經營問題。實證模式在解決未來還是會繼續有其重要性。在處理過程發展的知識時，則需要瞭解變數之間的關係，而實證模式就會因其固有描述自然的能力而大受限制。然而，在面對森林生態系經營，則過程模式將會增加我們對森林生態系瞭解的能力。

雖然，林業的過程模擬開始於20-25年前，但其成就受限於研究及推廣的不力，且早期發展一直受限於需要大量明確母數值及缺少精確的測驗程序。然而，儘管受到這些限制，過程模式可以提供我們瞭解單株、林分、地景等森林層級的狀態與機制的資訊。此外，過程模式也提供預測環境改變下森林之生長潛能。所以，若要獲得森林生態系經營決策上所需要之資訊，過程模式就能扮演非常重要的角色(Korzukhin *et al.*, 1996)。

### 三、森林生長模式分類

#### (一)實證模式(統計模式)：

實證模式係建立依變數與獨立變數之統計關係而不用考慮基本的機制。實證模式也使用變數，但它假設這些變數的狀態在未來也會是以平均狀況值呈現。實證模式可說是一接近於未知的機制模式，典型的實證模式是具有合適次方的多項式。

#### (二)偽過程模式：

描述某時間的某一性態值與其生長率或相對生長率關係，但只限於描述生物之生長行為，如考慮生長率為同化作用與異化作用差的函數。

#### (三)過程模式(機制模式)：

過程模式模擬生物藉光合作用將CO<sub>2</sub>、

養分及水分轉換成為生物量的過程，過程模式可能使用生長季節降雨、光照時間和其他直接量測所得之量來推估生長量的變化與物種組成的動態變化(引自馮豐隆，1997)。

#### (四) 混合模式(hybrid model)：

過程模式將機制性的交感作用與環境相結合，因此，這種模式可以容易地反映出在環境狀況改變時過程模式參數的改變；但在另一方面，實證的生長模式亦有其功能，它可利用過去生長的統計資料，將決定生長的特殊因子納入，但這些因子在過程模式中卻不易模擬(Battaglia, 1998)；所以，混合模式結合過程模式與實證模式二者之優點，實現理論與實際結合之模擬。

### 四、四種模式介紹及比較分析

#### (一) 模式介紹

##### 1、實證模式：

在林學上，Spath在十七世紀、Hossfeld及Smallan在十八世紀時就已將數學模式應用在測計學及林木生長研究上，供做推定或預測之用，以表示各因子間量的關係。生長模式雖不能將現時情況詳盡地表達出來，但能扼要地表示出近似現實狀況的有用資訊，如生長極限值，連年生長量達最大時的總生長量、平均生長量(mean annual increment, mai)與連年生長量(current annual increment, cai)兩曲線交會點為平均生長量曲線之最高點，亦即 $mai=cai$ 時，為生物輪伐期。將生長模式分為三類，此一分類乃依據模式之主要關係與變數來加以分類(馮豐隆，1997)。

(1) 全林分模式(Whole Stand Model)：利用林分性態值樹種、林型的生長收穫為林齡、密度、地位、保育型式處理等因子的函

數，來描繪整個林分的斷面積、蓄積、結構組成、生長。

(2) 直徑級模式(Diameter Class Model)：描繪每一直徑級之平均木的樹高、胸高直徑、斷面積、材積，再將各級收穫量(總生長量)或各株收穫量加，即可得全林分材積。

(3) 單木模式(Individual Tree Model)：對林分的每株樹皆加以生長的描繪。考量樹木間的競爭與否，對該林木的生長及隙大小對物種更新及枯死對孔隙環境的影響。

#### 2、偽過程模式：

偽過程模式是直接導源於變數間關係的邏輯，一般由生物性的邏輯關係導源出來，且可以很有邏輯地解說生長現象。

1920年Putter曾經提出動物的生長為組成(synthesis)和破壞(destruction)之交互作用，即為同化作用和異化作用的交互作用。當同化作用大於異化作用時才有生長，當兩種作用相等時，有機體才會達到穩定狀態。Von Bertalanffy根據這種觀點提出表示生長率的公式如下：

$$dW/dt = \eta W^m - kW^n \dots\dots\dots(1)$$

式中的  $m$ ：植物內在增殖率

$W$ ：植物的體積或重量

$\eta$ ：同化作用率

$k$ ：異化作用率

大部分的功能式數學模式，係描述某時間、某一性態值與其絕對生長率(absolute growth rate, AGR)或相對生長率(relative growth rate, RGR)的關係。生長率若是為同化作用(anabolism)與異化作用(catabolism)差的函數，則總生長模式為Von Bertalanffy生長模式。如RGR為一定常數，則其總生長模式為

直線式；若RGR為一定常數時，則其總生長模式為指數式(exponential growth model)；若RGR為AGR的函數，則總生長模式為Logistic生長模式；若AGR為AGR的函數，則總生長模式為Monomolecular生長模式，其方程式、絕對生長率(AGR)及曲線性質如表1所示。

表1 - Richards(1959)指出三個常用的生長模式

	Monomolecular (Mitscherlich)	Autocatalytic (Logistic)	Gompertz
方程式	$W = W_0(1 - be^{-kt})$	$W = AW_0(1 - e^{-k(W_0 - W)})$	$W = Ae^{b(1 - e^{-ct})}$
生長率	$k(A - W)$	$kW(A - W)/A$	$kW \ln(A/W)$
曲線特性	逐漸遞減 漸近於反曲點	逐漸遞增 反曲點為 A/2	逐漸遞增 反曲點為 A/2

註：W表示時間t的性態值大小；A表示最大極限的值；k表示速率常數； $b = (W_0/A)(1 - m)$ ； $W_0$ 為時間為零時生物之重量；e：exponential

上述的三種模式僅能表示單一類型的曲線，沒有一種函數可以有彈性地將各種生長情況完全描述。Richards更進一步地發現上述三個模式可以以相同類型的一種曲線表示，型狀的不同只不過是其中一個母數的數值不同所導致，Richards (1959) 在檢討各個模式後，將Von Bertalanffy式一般化，導出Richards生長收穫模式，使多變性的生長曲線得以有效地描述，成為具有生物意義與數學邏輯的模式。將連年生長率式(1)式積分之後，求得其式為：

$$W = \left[ \eta / K - \left[ \eta / K - W_0^{(1-m)} \right] e^{-(1-m)kt} \right]^{(1-m)^{-1}} \quad (2)$$

$$W = A \{ 1 - B e^{-kt} \}^{(1-m)^{-1}} \quad (3)$$

$$\text{式中：} A^{(1-m)} = \eta / k \quad (4)$$

$$B = \eta K - W_0^{(1-m)} \quad (5)$$

$$K = (1-m)k \quad (6)$$

式中的 m：植物內在增殖率

W：植物的體積或重量

$\eta$ ：同化作用率

k：異化作用率

Richards式中代表曲線形狀的母數m，為

一連續的值，其所涵蓋值的範圍為 $m \geq 0$ ，而此母數正是生長函數的形狀指標。當 $m=0$ 時此模式則成為Mitscherlich (Monomolecular)式；當 $m=2$ 時則成為Logistic (Autocatalytic)式；當 $m$ 趨近於1時則成為Gompertz式。

Schnute應用加速生長(growth acceleration)的生物原則導出一個多功能的(versatile)生長模式，而加速生長為相對生長率的相對生長率 $[(1/z)(dz/dt)]$ 成線性關係： $(1/z)(dz/dt) = -(a+bz)$ ；配合年齡(T)和其性態值大小(y)，導出此Schnute模式，此生長模式包括了具有漸近、反曲的S型曲線、二次生長式(quadratic growth equation)、幕次生長式(power growth equation)、指數生長(exponential growth equation)和直線生長(linear growth)，而母數如y可直接由觀察資料得到，母數相當穩定皆是其優點。Schnute一般化模式如下：

$$W = \left[ \gamma_1^t + (\gamma_2^t - \gamma_1^t) \times \frac{1 - e^{-\alpha(T-t_1)}}{1 - e^{-\alpha(T-t_2)}} \right]^{1/y} \quad (7)$$

式中  $t_1, t_2$ ：兩個不同林齡；

$\gamma_1, \gamma_2$ ：在 $t_1, t_2$ 時的性態值；

$\gamma_2 > \gamma_1 > 0, t_2 > t_1 > 0$ 。

此生長模式的曲線形狀會隨a、b值不同而變化。Von Bertalanffy式、Gompertz式、Richards式、直線式等皆是其特例。Bredenkamp及Gregorie (1988)將Richards生長模式應用於不同林分密度的玫瑰桉直徑生長時，發現當林木有再生長現象時Richards無法適用。但是若使用Schnute式時，則能表現出再生長的現象(馮豐隆1997)。

上述各種不同形式的模式演變，可以發現到模式的發展越來越能表現各種林木生長狀況，使模式不再只是實驗模式，而成為偽過程模式。由於這樣的模式是由生物性的邏

輯關係推導而來，且由資料可推算出其母數統計值，因此可以適當地解釋生長現象。

### 3、過程模式：

過程模式可以結合環境影響作用之機制，因此它對環境的改變較敏感；過程模式發展至今，應用於森林生長模式至少有14種以上，CAB調查1990年至1996年應用模式解決環境變遷、污染影響及生態演替問題之文章中，引用最多的過程模式就是JABOWA模式(Battaglia, 1998)，即早期的孔隙模式(Gap model)。

孔隙模式考慮環境的獨立變數，再將它們的影響加乘，模式更假設每一棵樹在理想狀態下其生長為拉長S型(sigmoid)的函數，而若資源有限與鄰近之林木產生競爭時，此函數就會被修正；最初的孔隙模式是由Botkin, Janak and Wallis (1972)所發展的，模式假設(1)林木之直徑生長在最適狀態下是以最大的速率生長，並由其生長特性可知，生長是有限制的有最大年齡、最大直徑及最大樹高；(2)林木之生長由其立地特性之生物及非生物環境因子修正，因此，直徑生長即為潛能的生長函數及許多修正因子所產生之結果，而修正因子包含光強度影響因子、氣溫及土壤溼度及養分，修正值之範圍為0(停止生長)至1(以最大速率生長)(Liu J. and Ashton, Peter S., 1995)。模式如下：

$$D_t = \frac{GD(1 - \frac{DH}{D_{max}H_{max}})}{(274 + 3b_1D - 4b_2D^2)} \times r(AL) \times T(DEGD) \times S(BAR) \dots \dots (8)$$

式中的D<sub>t</sub>為直徑生長量；G為生長係數；D為胸高直徑；H為樹高。

D<sub>max</sub>及H<sub>max</sub>為所探討樹種之最大胸高直徑及樹高。

r (AL)為光入射量；T (DEGD)為溫度效應函數；S (BAR)為土地承载力(Botkin *et. al.*,

1972；Shugart, 1984)。

在林木生長的光照修正因子(r (AL))公式中，光照量和陰葉面積為主要影響因子，每一棵樹所能獲得的日照量是受到較高的樹之遮陰所影響；林木生長有其適當的溫度範圍，因此各種樹種的生存範圍及生長速度會隨著生長積溫(Growing Degree-day, DEGD)的改變而不同。所謂生長積溫，乃指氣溫大於植物開始生長所需要之溫度時，生長季節溫度的累加值；土壤因子以土地所生產的最大斷面積代替，用在單位面積上林木的斷面積，去評估林木受養分及水分競爭的影響，當林木斷面積等於最大斷面積時，土地承载力修正因子為0，即林木不再生長(Liu and Ashton, 1995；李宜德, 2000)。

### 4、混合模式(hybrid model)：

過程模式與實證模式在生長模擬上皆有其優點，混合模式則是希望將此二種模式的優點予以結合，而能得到較精確的推估結果，例如：林木在不同年齡時，其生長速度皆有差異，此現象在過程模式中難以表達出來，而實證模式或偽過程模式則可以輕易地模擬出整個時間過程(林齡)林木之生長曲線。所以過程模式可加入實證模式或偽過程模式成為混合模式，以便可以將推估範圍擴大(尺度擴大，scaling up)；此外，混合模式亦可由不同的過程模式加以混合，將其中較好的機制結合，以得到另一功能更強之模式。(Liu and Ashton, 1995)

### (二)各種模式的差別：

模式提供簡單的方法以呈現物體或群體之交感作用，模擬在特定情況下物體的行為或群體的行為，將可幫助我們解決問題。過程模式與實證模式解決不同的問題，主要是

