

林分生长模型研究的进展*

唐守正 李希菲 孟昭和

摘要 本文叙述了林分生长模型的发展及目前研究方向;评价模型的分类方法和各种模型的关系及应用范围,强调模型系的相容性及完备性原则,指出近代模型往往是一个森林系统,大都含有多个被预测的变量和说明变量,必须注意因子间的关系,用高次、多项式方程决不是好方法。因子间的“相互预报”是模型中的大问题,方程组之间的“循环估计”往往产生有偏估计。

关键词 林分生长模型、收获预测、森林经理

1987年世界林分生长模型和模拟会议上提出林分生长模型和模拟的定义^[1]:林分生长模型是指一个或一组数学函数,它描述林木生长与林分状态和立地条件的关系;模拟是使用生长模型去估计林分在各种特定条件下的发展。这里明确地指出了林分生长模型不同于林区级的模型,例如林龄空间模型^[2],收获调整模型^[3],广林龄转移模型^[4],轮伐预估模型^[5]等。它也不同于单木级的模型,例如解析木生长分析等。该定义也说明了模型和模拟的关系,例如系统动力学方法^[6]是一种模拟技术,其使用的具体方程式及其参数值才是模型。这个定义还说明一个好的林分生长模型可以估计在各种特定条件下林分的发展,即它可以成为所谓经营模型的原型。本文以此观点叙述林分生长模型的分类及其历史发展,希望本文对我国生长模型研究方向的确立及生长模型合理利用有所裨益。

1 模型分类

林分生长收获模型分类方法很多,建议采用Davis等^[7~9]及我国自然科学基金重点项目“我国主要人工林生长模型、经营模型及优化控制”的分类方法(见表1)。

1.1 第一类模型(全林生长模型)

此类模型是应用最广泛的模型。特点是模型方程中自变量是林分的平均因子或总计因子。第一类模型又可分为二类,一类是与密度无关的模型。例如早期欧美的收获表^[10]及模式林分生长过程表^[11],都是与密度无关的正常收获表。近年来我国也有人编制经验收获表,但少用。此类模型已意义不大。另一类模型是与密度有关的模型。从30年代末开始把密度引入收获方程^[12,13]。这类模型现在应用较广,但形式各不相同,采用的密度指标也各有千秋。

1.1.1 密度指标 林分密度反应了林木间竞争的强度,是影响林分生长的重要因子。常用密度指标有单位面积株数、断面积、林分密度指数、树冠竞争因子、相对植距等。可参考文献[14,15]。

1.1.2 预估现在材积的可变密度模型 此类模型即表1的显式模型,例如:

1993-05-07收稿。

唐守正研究员,李希菲(中国林业科学研究院资源信息研究所 北京 100091);孟昭和(加拿大新布伦瑞克大学 林学院)。

*本文属自然科学基金项目“我国主要用材人工林生长模型、经营模型及优化控制”的部分内容。

表1 生长和收获模型分类

模拟林分	隐式模拟公式：主要关系和变量
I. 全林分模型	
A. 与密度无关的模型	
1. 正常收获表	$V_A = f(A, S)$
2. 平均现实林分的经验收获表	$V_A = f(A, S)$
B. 可变密度模型	
1. 预估现在材积 V_1	
a. 显式模型	$V_1 = f(A, S, D)$
b. 隐式模型 (直径分布)	$\begin{cases} f(d_i) = f(A, S, D) \\ v_i = f(d_i) \\ V_1 = \sum_i v_i(nd_i) \end{cases}$
2. 预估未来生长量 g_{12} 和材积 V_2	
a. 显式模型	
i. 直接预估生长量	$\begin{cases} g_{12} = f(S, A, D) \\ V_2 = V_1 + g_{12} \\ D_2 = f(S, A_1, A_2, D_1) \\ V_2 = f(S, A_2, D_2) \\ g_{12} = V_2 - V_1 \end{cases}$
ii. 预估林分密度	$\begin{cases} D_2 = f(S, A_1, A_2, D_1) \\ f(d_i)_2 = f(S, A_2, D_2) \\ V_2 = \sum_i v_i(nd_i)_2 \\ g_{12} = V_2 - V_1 \end{cases}$
b. 隐式模型 (直径分布)	$\begin{cases} f(d_i)_2 = f(S, A_2, D_2) \\ V_2 = \sum_i v_i(nd_i)_2 \\ g_{12} = V_2 - V_1 \end{cases}$
II. 径级模型	
A. 经验的林分表	
	$\begin{cases} (nd_i)_2 = f[(mdi), INCR] \\ V_2 = \sum_i v_i(nd_i)_2 \\ g_{12} = V_2 - V_1 \end{cases}$
B. 径级生长模型	
	$\begin{cases} (nd_i)_2 = f[(ndi), S, A, D] \\ V_1 = f(di) \\ V_2 = \sum_i V_1(ndi)_2 \\ g_{12} = V_2 - V_1 \end{cases}$
III. 单株树木模型	
A. 与距离有关	
	$\begin{cases} CCI_{AR} = f[DIST_A, D_1 S, (d_k, h_k, c_k)_1] \\ (d_k, h_k, c_k)_2 = f[CCI_A, D_1 S, (d_k, h_k, c_k)_1] \\ V_k = f(d_k \cdot h_k) \\ V_2 = \sum_k (V_k)_2 \\ g_{12} = V_2 - V_1 \end{cases}$
B. 与距离无关	
	$\begin{cases} CCI_k = f[D_1 S, (d_k, h_k, c_k)_1] \\ \text{所有其它操作和与距离有关模型相同} \end{cases}$

注: S = 地位指数; A = 林龄; D = 林分密度; i = 径级; g_{12} = 经过一个生长期的林分生长量;
 v_i = 径级 i 中每株树的平均材积; d_i = 径级 i 的大小; nd_i = 径级 i 中的树木株数; $(nd_i)_1$ } = 生长期开始和末了
时径级 i 中的株数; $INCR$ = 径级 i 立木的经验定期生长量; v_k = 树木 k 的材积; $f(d_i)$ = 直径分布函数;
 V_A = 年龄 A 时的林分蓄积; V_1 = 现在林分蓄积; V_2 = 生长期2末时的林分蓄积; h_k = 树木 k 的高度;
 Ck = 树木 k 的树冠大小; CCI_k = 树木 k 的树冠竞争指数; $DIST_k$ = 树木 k 与其相邻竞争木的距离;
 $(d_k, h_k, c_k)_1$ } = 生长期开始和末了时树木 k 的直径、树高和树冠大小; k = 树木 k ; d_k = 树木 k 的直径;
 $(d_k, h_k, c_k)_2$ }

(1) 弗吉尼亚火炬松天然林^[16]: $\ln V = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 A^{-1} + \beta_3 \ln B$, 其中 $\beta_0 \sim \beta_4$ 为参数, A, S, B 分别为林龄、立地指数和断面积。

(2) 佐治亚州湿地松人工林: $\ln V = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2/S + \beta_3 A^{-1} + \beta_4 \ln N$, 其中 N 为株数。这是早期可变密度模型的例子。可以估计不同密度林分的现实材积, 但不能预估今后该林分材积, 也不能估计林分其它测树因子。为了估计其它测树因子, 有必要引入其它关系。

(3) 印度黄檀可变密度表^[17]: $\ln B = b_0 + b_1 \ln A \cdot \ln S + b_2 A + b_3 S + b_4 \ln N$, 此式加上 $V = f(A, S, B)$ 可估计各种不同密度林分的主要测树因子。出现了多因子同时预估问题。

上述例子没有描述密度随林龄的变化, 仍然是静态模型, 于是引出下一种模型。

1.1.3 预估未来生长的可变密度模型 预估未来生长有两个重要问题, 一是林分是怎样生长的(自然生长, 人为控制, 自然灾害)。二是生长与收获的相容性。

为了描述自然生长, 出现了关于自然枯损的研究^[14, 18~21]。为了解决人为控制和自然灾害的问题, 出现了所谓经营模型^[22, 23]和灾害模型。

生长与收获的相容性概念最早由 Buckman^[24]和 Clutter^[25]提出并进行了研究, 其基本思想是林分生长量的积累应等于其收获量。Sullivan 等^[16]提出一组与例1相容的预估未来生长量的方程系:

$$\ln V_1 = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 A_1^{-1} + \beta_3 \ln B_1 \quad (1)$$

$$\ln B_2 = A_1/A_2 \ln B_1 + \alpha_0(1 - A_1/A_2) + \alpha_1 S(1 - A_1/A_2) \quad (2)$$

$$\ln V_2 = \ln V_1 + \beta_1(A_2^{-1} - A_1^{-1}) + \beta_3(\ln B_2 - \ln B_1) \quad (3)$$

其中下标1、2表示不同时间点。此方程系在下述两种意义下相容: ①固定 S , 由 A_1, B_1, A_2 推出 V_2 与(1)式中直接将下标1换成2得到的 V_2 相同。②由 A_1, B_1, A_2 推出 B_2 , 再由 A_2, B_2, A_3 推出 V_3 与 A_1, B_1, A_3 推出 V_3 (将下标1换成2, 下标2换成3)相同。近期的研究已把相容性概念推广到全部模型系之间的相容^[26, 27], 包括经营模型应与生长模型相容和林分生长模型系中各因子之间关系的相容。例如日本伊藤等^[28, 29], Laer^[30], 成子纯^[21], 张少昂^[31], 李希菲等^[32]都进行过林分生长多因子的生长模型研究。使用相容性概念来考查这些模型, 发现某些因子间关系不相容(尽管误差不大)。这样就产生了一个问题, 要建立一组相容的多因子模型系究竟需要多少独立的模型方程, 而其余关系可由这些独立方程作为派生方程而推导出来。把此概念称为模型系的完备性原则。

1.1.4 以平均直径为基础的直径分布模型 此类模型即表1中的隐式模型。Lenhart 等^[33]和 Bailey 等^[34, 35]是奠基性工作。这种方法可分为参数预估法和参数回收法。假定林分的直径分布 $f(d)$ 可由2到3个参数确定, 例如正态, 对数正态, Γ 分布, 综合 Γ 分布, β 分布, Weibull分布等直径分布函数。以三参数 Weibull 分布为例:

$$f(d) = c/b[(d-a)/b]^{c-1} \exp\{-[(d-a)/b]^c\}$$

其中 a, b, c 为参数。只要建立了 a, b, c 与林分状态及立地因子的关系, 例如 $a = f_1(A, S, D_s)$, $b = f_2(A, S, D_s)$, $c = f_3(A, S, D_s)$, 其中 D_s 为某种密度指标, 就可以得到可变密度的林分直径分布, 从而得到林分蓄积。这称为参数预估法。

参数回收法是利用显式模型所得平均直径结果及平均直径和参数关系反求参数 a, b, c 值。以 Weibull 分布为例, 其关系为

$$\begin{aligned}\bar{d} &= a + b\Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right) \quad (\text{算术平均直径}) \\ d_g &= a^2 + 2ab\Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right) + b^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) \quad (\text{断面积平均直径}) \\ d_{min} &= a + b\Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right) / n^{\left(1 + \frac{1}{c}\right)} \quad (\text{最小直径, 随机抽样})\end{aligned}$$

由平均直径生长方程得到各种林分状态下 \bar{d} , d_g , d_{min} 值后解上述方程即可得到林分直径分布。这种方法的优点是断面积预估与直径分布预估之间是相容的, 缺点是过分依赖直径分布型的假设。Hyink^[36]给出了工作大纲。Matney^[37]给出一个完整例, 我国的工作可见成子纯^[21]。

类似的方法也被用于混交林的模型, 例如^[38]给出树种间竞争的微分方程组, 由它可得林分生长模拟结果。

1.2 第二类模型 (径级模型)

此类模型以直径分布为自变量。表 1 中径级林分表法计算生长量就是一种径级模型, 一般教科书中均有阐述。早在 1966 年 Vsher^[39], Hool^[40]等将 Leslie^[41,42] 矩阵模型移植到林分直径分布的动态研究形成了矩阵模型 (将 Leslie 矩阵移置到林区级林龄结构的研究就是林龄空间理论^[2])。

1.2.1 矩阵模型 其基本形式为

$$\begin{bmatrix} x_1(t+1) \\ x_2(t+1) \\ \vdots \\ x_m(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_m(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $x_i(t)$ 为 t 年时第 i 直径级的株数 (或频率), a_{ij} 为第 t 年时由 j 径级转到 i 径级的概率。第一行一般表示进界生长。显然 a_{ij} 与林龄, 林分密度和立地条件有关。所以 $a_{ij} = a_{ij}(A, S, D_s)$, 这就是表 1 中的径级生长模型。

例如, 若不计枯损及进界生长。设径级宽度为 Δ , 第 i 径级的生长量为 Z_i 。当 $Z_i \leq \Delta$ 时, $a_{i+1,i} = Z_i/\Delta$, $a_{ii} = (\Delta - Z_i)/\Delta$, 其它 $a_{ij} = 0$ 。当 $\Delta < Z_i \leq 2\Delta$ 时, $a_{i+2,i} = (Z_i - \Delta)/\Delta$, $a_{i+1,i} = (2\Delta - Z_i)/\Delta$, 其它 $a_{ij} = 0$ 。这样构造出的公式 (4) 中的矩阵 $A = [a_{ij}]$ 就是林分表法估计生长量的方法。可见公式 (4) 是林分表法的矩阵表示。

如果转移矩阵 $A = [a_{ij}]$ 与时间和林分现实状态无关, 则称 A 为“时齐的”。绝大多数研究表明 A 是非时齐的, 因此这类模型建模的关键在于寻找函数 $a_{ij} = a_{ij}(A, S, D_s)$ 。例如 Solomon^[43] 提出二阶段估计法以解决时齐性问题。Adams 等^[44], EK^[45], Buongiorno 等^[46], Johnson 等^[47] 给出了一些函数 $a_{ij}(A, S, D_s)$ 的具体例子。这类模型讨论还可见文献 [48~50]。

我国有一些类似的工作^[51], 但很少有人讨论函数 $a_{ij}(A, S, D_s)$ 的形式及非时齐性问题。

由于矩阵模型和控制论中状态方程的自然联系, 这种方法多用于研究营林效果分析及优化控制。

矩阵模型的形式和性质非常接近马尔科夫过程的状态方程, 这种模型又称马尔科夫过程模型。

1.2.2 时间和 (或) 状态连续的径级模型 这种方法首先由铃木太七^[2]引入。设 $\varphi(t, y)$

为 t 年时林木直径 y 的分布密度函数, 并假定:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \sigma^2}{\Delta t} = \alpha(t, y); \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \beta(t, y)$$

其中 Δm 表示平均直径的增长, $\Delta \sigma^2$ 表示直径方差的增长及其他一些假设, 则 $\varphi(t, y)$ 满足下式:

$$\frac{\partial \varphi(t, y)}{\partial t} = \frac{1}{2} \alpha(t, y) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - \beta(t, y) \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \gamma(t, y) \varphi \quad (5)$$

其中 $\gamma(t, y)$ 是枯损函数。加上相应的边界条件及初始条件。根据对 α (平均直径生长率)、 β (直径方差的增长率) 可以得到不同的解 φ 。这个方法是希望给出理论方程的一个尝试, 现在除日本外, 很少有人使用, 理论上可能有价值, 但离实用较远。在方程(5)中令 $\beta(t, y) = 0$, 得到我国某些人用其他方法推出的林分直径分布方程式:

$$\frac{\partial \varphi(t, y)}{\partial t} = -\alpha(t, y) \frac{\partial \varphi(t, y)}{\partial y} - \gamma(t, y) \varphi(t, y) \quad (6)$$

它只是铃木太七方程的特殊形式。这种方程作为一种近似虽然可以应用(也有一定理论价值), 但最大问题是它不包含直径的分散项, 因此, 如果初始直径相同, 则以后全林直径永远相同, 这显然是不合理的。

1.3 单株木模型

单木模型是以模拟林分内每株树生长为基础的一类模型, 采用方法有经验公式法, 生长分析法及生长量修正法等, 本文介绍生长量修正法。目前, 国外出现的一些林分生长的模拟程序(生成器), 例如 PROGNOSIS, STEMS, PTAEDA 等都是以单株木模型为基础的。

1.3.1 竞争指标 描述林木由竞争对生长影响的数值指标。一株林木所受竞争压力取决于: ①林木本身的状态(如粗、细、高度、冠幅等); ②林木所处的局部环境(邻近树木的状态)。关玉秀等^[16]按此将竞争指标分为两大类。

1.3.1.1 非完备型指标 可分为只含对象木状态的, 例如相对直径。只含局部环境状态的, 如平均冠幅等。

1.3.1.2 完备性竞争指标 同时考虑上述两种状态, 如对象木与近邻木树冠重叠面积, 有效生长空间等。

1.3.2 生长量修正法 用生长量修正法进行单木模拟的基本思路是: ①估计疏开木(或没有竞争林分中林木)的潜在生长, ②计算每株林木所受的竞争压力, 即竞争指标, ③由竞争指标修正每株林木的潜在生长, 得到实际预估生长。

按考虑竞争指标的类型及估计方法又可分为: 与距离有关的单木模型及与距离无关的单木模型 2 类。

1.3.3 与距离有关的单木模型 例: 加州火炬松人工林^[53](PTAEDA)。由此例可见株模型的运算顺序及关系, 但各项单个公式在以后的发展中许多变化, 主要变化内容为: ①潜在生长的公式, ②修正函数的公式及竞争指标的选择, ③枯损木的判断, 用这种方法, 竞争指数的计算工作量非常大。为简化起见提出了与距离无关的单木模型。

1.3.4 与距离无关的单木模型 例: 宾州混交林^[53]分三个地位级。单株断面积潜在生长:

$$POT = (a_1 \cdot TBA \cdot a_2 - a_3 \cdot TBA) \cdot (a_4 + a_5 x_1 + a_6 x_2) \quad (7)$$

TBA 为单木断面积; x_1, x_2 为地位级的示性变量, 即对 1 地位级 $x_1 = 1, x_2 = 0$; 对二地位

级 $x_1=0$, $x_2=1$; 对三地位级 $x_1=0$, $x_2=0$ 。断面积修正函数:

$$MOD = b_1 [1.0 - \exp(-b_2/BAL + b_3 \cdot DBH^2 \sqrt{1 - BAA/250})] \quad (8)$$

其中 BAL 为大于目标树直径树木的断面积; DBH 为目标树胸径; BAA 为每英亩总断面积。每株树断面积生长量预测值为:

$$BAG = POT \cdot MOD \quad (9)$$

为求系数, 分别树种首先用观测的断面积生长量加1.65倍标准差作为 POT 的估计值, 当作回归因变量用(7)式回归估出各系数 $a_1 \sim a_6$, 第2步用观测的每株断面积生长量 BAG 为因变量。在(9)式 POT 用第一步得到的值及(8)式中的变量观测值为自变量, 回归得到各系数 $b_1 \sim b_3$ 。这里的方法与STEMS类似, 差别在于: ①用地位级代替立地指数, ②未用树冠度量。虽然如此, 其运行结果与STEMS相差不多。本例中断面积生长使用了Richards式, 我国这方面的工作可见孟宪宇等^[57]。

2 讨 论

现在世界上可能有几百个计算机的生长模型在运行^[54]。虽然各模型的一般方法非常近似, 但函数形式的细节却变化很大。前面介绍的模型主要是用于森林经营目的模型。单木模型中, 有些模型考虑光照、水分循环、养分循环等环境因子对林木生长的影响, 可用于种群动态的研究。因此, 在选用模型类型及其应用中有一些问题要注意:

(1) 上述介绍的“森林生长模型”, 主要用于森林经营的目的。其主要特点是“指定立地条件”, 这类模型要注意它隐含的条件。

(2) 由于近代模型多是模拟一个森林系统, 大都含有多个被预测的变量和说明变量, 必须注意因子间的关系。用高次、多项式方程决不是好方法。因子间的“相互预报”是模型中的大问题, 方程组之间的“循环估计”往往产生有偏估计。这些情况造成第三类模型的精度并不很高, 所以, 第三类模型主要用于森林经营活动的分析。例如STEMS预测宾洲混交林^[53]的结果与实测相比, 相关系数在0.7~0.8之间, 用PROGNOSIS于阿拉斯加东南部分的SEAPROG预报结果与实测结果之间的相关系数仅在0.7左右^[55]。而第一类模型精度较高, 多用于编制各种测树用表及营林分析。

参 考 文 献

- 1 Bruce D, Wensel L C. Modelling forest growth: approaches, definitions and problems. in proceeding of IUFRO conference, Forest growth modelling and prediction, 1987, (1): 1~8.
- 2 铃木太七(于政中译). 森林经理学. 北京: 北京林学院印刷厂, 1983.
- 3 Buongiorno J, Gilles J K. Forest management and economics. New york, Macmillan publishing company, 1987.
- 4 唐守正, 李希非, 温永昌. 全国用材林发展趋势的初步研究. 林业科学, 1986, 22(1): 21~29.
- 5 王冬梅. 大青山实验局森林轮伐预估模型及其应用. 林业科学研究, 1991, 4(增刊): 50~56.
- 6 福雷斯特. 系统原理. 北京: 清华大学出版社, 1986.
- 7 Davis L S, Johnson K N. Forest management (third edition). New york, McGraw-Hill book company, 1987.
- 8 Munno D D. Forest growth models—a prognosis, in growth models for tree and stand simulation, Royal College, stockholm, forest Research Notes, 1974. 30.

- 9 Clutter J C, Fortson L V, Pienaar G B, et al. Timber management—a quantitative approach. New York, Wiley, 1983.
- 10 胡希, 米勒, 比尔斯(测树学翻译组译). 测树学. 北京: 农业出版社, 1977.
- 11 Третьяков Н В. Справочник таксатора. Москва. 1952.
- 12 Mackinney A L, Schummacher F X, Chaiken L E. Construction of yield tables [for nonnormal loblolly Pine stands. Jour. Agr. Res. , 1937, 54, 531~545.
- 13 Schummack F X. A new growth curve and its application to timber—yield studies. J. For. , 1939, 37, 819~820.
- 14 克拉特 J L, 菲尔森 J C, 皮纳尔 L V, 等(范济洲, 董乃钧, 于政中, 等译). 用材林经理学. 北京: 中国林业出版社, 1991.
- 15 关玉秀, 张守攻. 竞争指标的分类及评价. 北京林业大学学报, 1992, 14(4): 1~8.
- 16 Sullivan A D, Clutter J L. A simultaneous growth and yield model for loblolly pine. For. Sci., 1972, 18: 76~86.
- 17 Sharma R P. Variable density yield tables of *Dalbergia sissoo*. The Indian Forester, 1973. 105, 421~434.
- 18 Bennett F A. Variable-density yield tables for management stand of natural slash pine. USDA. For. Serv. Res. Note SE-141, 1970.
- 19 张大勇, 赵松岭. 森林自疏过程中密度变化规律的研究. 林业科学, 1985, 21(4): 369~374.
- 20 Zeide B. Self-thinning and stand density. For. Sci. , 1991, 37(2): 517~525.
- 21 成子纯. 马尾松经营体系模拟系统的研究. 见: 中国林学会, 森林经理文集编辑委员会主编. 森林经理文集. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- 22 Pienaar L V, Shiver B D, Grider G E. Predicting basal area growth in thinned slash pine plantations. For. Sci., 1985, 31(3), 731~741.
- 23 Smith W D, Hafley W L. Evaluation of a loblolly pine plantation thinning model. SJAF. 1986, 10, 52~63.
- 24 Buckman R E. Growth and yield of red pine in minnesota, USDA. Tech. Bull. 1972, 1962.
- 25 Clutter J L. Compatible growth and yield model for loblolly pine. For. Sci, 1983, 9, 354~371.
- 26 李希菲. 大青山实验局主要树种(组)全林整体模型及精度验证. 林业科学研究, 1991, 4(增刊): 9~14.
- 27 唐守正. 广西大青山马尾松全林整体生长模型及其应用. 林业科学研究, 1991, 4(增刊): 8~13.
- 28 Ito T, Osumi S. Growth models for total and average basal area in even-aged pure stands based on the Richards growth function(I), derivation of the models. 日林志, 1985, 67(11): 434~441.
- 29 Ito T, Osumi S. Growth models for total and average basal area in even-aged pure stands based on the Richards growth function(I), application of the models to stands of sugi and hinoki. 日林志, 1986, 88(8): 303~313.
- 30 Laar A. The growth of unthinned pinus patula in relation to spacing. South African. For. J. , 1978, 107, 3~11.
- 31 张少昂. 兴安落叶松天然林分生长模型和可变密度收获表的研究. 东北林业大学学报, 1986, 14(3): 17~26.
- 32 李希菲, 唐守正. 大青山实验局杉木人工林可变密度收获表的编制. 林业科学研究, 1988, 1(4): 382~389.
- 33 Lenhart J D, Clutter J L. Cubic foot yield table for old field loblolly pine plantations in Georgia Piedmont. Ga. For. Res. Council, Report 22, series 3. 1971.
- 34 Bailey R L. Computer program for quantifying diameter distributions with Weibull function. For. Sci. , 1974, 20, 229.
- 35 Bailey R L, Dell T R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. For. Sci. , 1973, 19, 97~104.
- 36 Hyink D M, Moser J W. A generalized framework for projecting forest yield and stand structure using diameter distributions. For. Sci., 1983. 29, 85~95.
- 37 Matney T G, Ledbetter J R, Sullivan A D. Diameter distribution yield system for unthinned cut-over site prepared slash pine plantation in southern Mississippi. South J. Appl. For., 1987, 11(1): 32~36.
- 38 Lynch T B, Moser J W. A growth model for mixed species stands. For. Sci., 1986, 32: 697~706.
- 39 Usher M B. A matrix approach to the management of renewable resources, with special reference to selection forests. J. Appl. Ecol. , 1966, 3, 355~367.

- 40 Hool J N. A dynamic programming—markov chain approach to forest production control. Forest science—monograph, 12~1966.
- 41 Leslie P H. On the use of matrices in certain population mathematics. Biometrika, 1945, 33: 183~212.
- 42 Leslie P H. Some further notes on the use of matrices in population mathematics. Biometrika, 1948, 35: 213~45.
- 43 Solomon D L, Hosmer R A, Hayslett H T. A two-stage matrix model for predicting growth of forest stands in the northeast. Can. J. For. Res. , 1986, 16: 521~528.
- 44 Adams D M, EK A R. Optimizing the management of uneven-aged forest stands. Can. J. For. Res. , 1974, 4: 274~287.
- 45 EK A R. Nonlinear models for stand table projection in northern hardwood stands. Can. J. For. Res. , 1974, 4: 23~27.
- 46 Buongiorno J, Michie B R. A matrix model of uneven-aged forest management. For. Sci. , 1980, 26(4): 609~625.
- 47 Johnson S E, Ferguson I S, Li Rongwei. Evaluation of a stochastic diameter growth model for mountain ash. For. Sci. , 1991, 37(6): 1671~1681.
- 48 Binkley C S. Is succession in hardwood forest a stationary Markov process. For. Sci. , 1980, 26: 566~570.
- 49 Hulst R VAN. On the dynamics of vegetation; Markov chains as model of succession. Vegetation, 1979, 40: 3~14.
- 50 Roberts M R, Hruska A J. Predicting diameter distributions: a test of stationary Markov model. Can. J. For. Res. , 1987, 16: 130~135.
- 51 曾伟生, 于政中. 异龄林的生长动态研究. 林业科学, 1991, 27(3): 193~198.
- 52 Daniels A N, Durkhavt H E. Simulation of individual tree growth and development in managed loblolly plantations. Virginia polytechnic institute and state university Blacksburg. publication Fws-5-75, 1975.
- 53 Fairweather S E. Development of an individual tree growth model for Pennsylvania, in Forest growth modelling and prediction. IUFRO conference, ed. by Ek. 1987. 61~67.
- 54 Dale V H, Doyle T W, Shugart H H. A comparison of tree growth models. Ecological modelling, 1984, 29: 145~169.
- 55 Farr W A, Johnson R R. Comparison of some individual tree height increment models for western Hemlock and sitka spruce in southeast Alaska. In forest growth modelling and prediction proceedings of IUFRO conference, ed. by EK., 1987. 68~75.

The Development of Studies on Stand Growth Models

Tang Shouzheng Li Xifei Meng Zhaohe

Abstract In this paper, the classification and research of stand growth models are stated from the view of the history of stand growth models. The relationship and application range of various types of stand growth models are evaluated. The principles of compactness and completeness of a model system are emphasized. Some problems which we should pay attention to in the establishment of stand growth models are pointed out.

Key words Stand growth model, yield prediction, forest management

Tang Shouzheng, Professor, Li Xifei (The Research Institute of Forest Resource Information Techniques, CAF Beijing 100091); Meng Zhaohe (Department of Forest Engineering, UNB, Canada).