

杉木人工林收获模型系统的研究*

惠刚盈 盛炜彤 Gadow K. V. 罗云伍 张校林 黄冬青

摘要 利用优势木高生长与密度关系相对较小,并且是立地和年龄的函数这一特性以及直径生长的多因子效应等生物学规律,将优势高作为独立变量引入其它相关模型构建了杉木人工林收获模型系统。解决了杉木人工林自然生长和伐后生长模拟,建立了标准树高曲线和直径与断面积相容性预估模型以及间伐模拟系统,推导出了由于间伐而引起的非生长性增长的计算公式。

关键词 杉木、收获模型系统、结构设计

科学地营造速生丰产林,已受到国内外的普遍关注。目前国际上对此方面研究的一个重要方向是利用模型描述复杂的林木群体生长规律,通过模拟探索多变条件下的林分生长动态。而森林收获模型的研究,近年来已进入多因子的统一描述,开始倾向于研制全林整体生长模型^[1],并通过建立灵活性大的、相容性收获模型系统来预估林分的收获量^[2]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)是我国重要用材树种。多年来,特别是“六五”以来,林业科学工作者对杉木人工林的速生丰产技术进行了较为深入的研究。骆期邦等^[3]将地位指数引入 Richards 方程建立了 8 参数多形地位指数曲线模型;刘景芳等进行了杉木速生丰产林优化密度控制技术的研究并编制了经营数表等等,这些研究使杉木人工林经营步入量化阶段,但是要建立一套能够评价不同造林措施的模型系统,还需要考虑模型结构和建立动态的相容性收获模型系统。

所以,本研究旨在筑建一个适合于我国杉木人工林生长的收获模型系统,以及及时提供生长与收获信息,为进一步研制经营模型及优化栽培模式提供必要的技术手段。

1 收获模型系统的结构

优势高与林分密度关系相对较小,主要受立地和年龄的影响。也就是说它是立地和年龄的函数即 $H_0 = f(SI, A)$ 。故常将其视为独立变量而引入其它模型,以此来体现立地效应和生长的年变化。

标准树高曲线和直径分布模型的研制是构建收获模型系统最重要的两条主线,林分的自然生长和疏伐模拟则是构成林分生长模拟系统的中心环节。此外,立木出材量预测及生物量估算模型也是收获模型系统中的重要组成部分。以上模型即组成收获模型系统。各个模型之间相互联系即为收获模型系统的结构。其相互关系如图 1 所示。

1993—12—13 收稿。

惠刚盈助理研究员,盛炜彤(中国林业科学研究院林业研究所 北京 100091);Gadow K. V. (德国哥廷根大学);罗云伍,张校林,黄冬青(中国林业科学研究院亚热带林业实验中心)。

* 本文系“七五”“杉木人工林集约栽培”和“八五”“杉木建筑材优化栽培模式研究”国家攻关专题的部分内容。华网坤研究员阅读全文并提出宝贵意见,在此表示感谢。

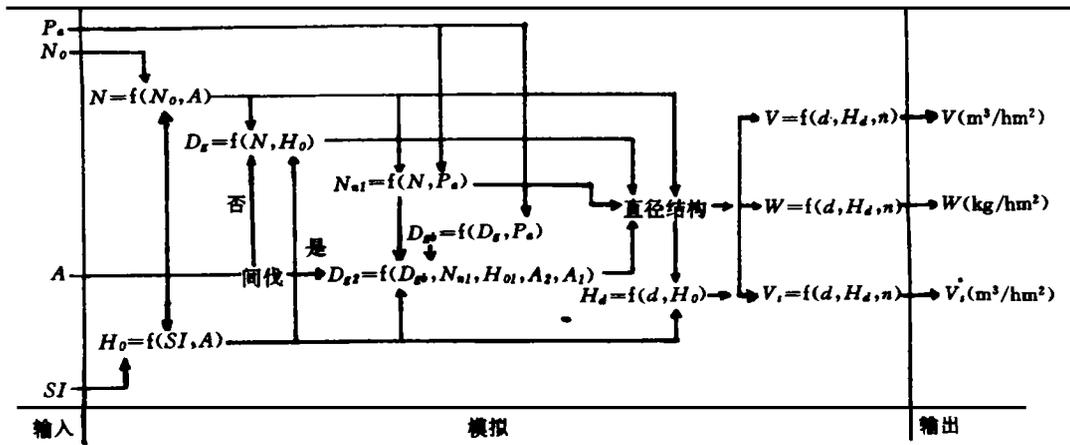


图1 收获模型系统的基本结构

P_a : A 年时的间伐强度; N_0 : 初植密度; SI : 地位指数; N : 现实密度; H_0 : 优势木高; D_g : 断面面积平均直径; N_{a1} : 间伐后的林分密度; D_{g1} : 间伐后的林分断面面积平均直径; D_{g2} : A_1 年时伐去的林分在 A_2 年时的断面面积平均直径; H_d : d 径阶所对应的树高; n : 径阶株数; V 、 W 、 V_i 分别代表林分的蓄积量、生物量和材种出材量。

2 方法与结果

2.1 优势高生长预估模型

优势高生长主要依赖于立地质量,所以常将其视为评定立地质量的综合指标。故优势高生长的预估是林分生长与收获模拟的基本内容。

林分优势高生长方程常选用 Chapman-Richards 模型^[2]

$$H_0 = \alpha_1 (1 - e^{-\alpha_2 A})^{\alpha_3} \quad (1)$$

由于立地质量愈高的生长速率越大。故令方程(1)中的参数 α_2 为立地指数的函数,设 $\alpha_2 = \alpha_{21} SI^{\alpha_{22}}$ 代入(1),从而就得到树高多形生长曲线模型: $A_{1_{\max}} = \ln(\alpha_3) / \alpha_{21} SI^{\alpha_{22}}$

$$H_0 = \alpha_1 (1 - e^{-\alpha_{21} SI^{\alpha_{22}} A})^{\alpha_3} \quad (2)$$

令方程(2)的一价导数为零,便得到树高连年生量最大时的林龄。

显然,树高速生期到来的迟早取决于地位指数的高低,并且反映了好的立地速生期来得早的生物学规律^[4]。可见,所构造的模型能客观地反映林木的生长。该模型与 Trousdell 等^[5]、骆期邦等^[3]用参数预估法所构建的 8 参数 Richards 方程是有区别的。即采用了共同的 α_1 和 α_3 ,从而确保了拐点参数所表示的生物意义。

利用模型(2)与中心产区丘陵区优势木树干解析材料进行拟合:

$$\alpha_1 = 47.784; \alpha_{21} = 0.00102; \alpha_{22} = 1.124; \alpha_3 = 1.077 (R^2 = 0.963, n = 20)$$

2.2 林分株数自然发展过程

实际林分株数的自然稀疏不是连续的、而是一个间断的推移式的过程^[6]。然而这种推移式的减少过程很难模拟,故多年来人们一直采用一种简化的做法即将其作为连续性的过程处理。

Clutter 和 Jones^[7]使用了如下微分方程来预估枯损:

$$\frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial A} = \alpha N^{\beta} A^{\gamma} \quad (3)$$

方程(3)式经过积分和一些数学变换后整理得

$$N = [N_1^a + b(A_1^c - A^c)]^{\frac{1}{a}} \quad (4)$$

式中: $a = -\beta$, $b = a\beta/(\gamma+1)$, $c = \gamma+1$

由此方程可以计算出林龄 A_1 时, 密度为 N_1 的林分, 在 A 年时的株数 N_0 , 由于不同立地的林木株数枯损不同, 故将方程(3)和(4)中的 A 用优势木高 H_0 替换, 从而得到依赖于优势高和前期密度的枯损方程即

$$\frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial H_0} = aN^\beta H_0^\gamma \quad (5)$$

$$N = [N_1^a + b(H_{01}^c - H_0^c)]^{\frac{1}{a}} \quad (6)$$

利用模型(6)与中心产区造林密度以及间伐试验中的对照试验地材料进行拟合: $a = -0.36785$; $b = -0.000000895$; $c = 3.56889$ ($F = 1.489 < F_{0.05} = 3.179$, $n = 53$)。

2.3 直径和断面积预估模型

在未进行间伐的具有相同优势高的林分中, 直径与株数之间存在幂函数关系(比较 Goulding^[8], Sterba^[9])即

$$D_g = aN^{-b} \quad (7)$$

而不同优势高的林分其参数大小不同, 设 $a = a_1 H_0^{b_1}$ 、 $b = a_2 H_0^{b_2}$ 代入(7)为

$$D_g = a_1 H_0^{b_1} N^{-a_2 H_0^{b_2}} \quad (8)$$

此为所建的直径预估模型。之所以将参数的变化设为幂函数($a x^b$)的形式, 是因为它基本上概括了差不多全部的单峰曲线形式即能增强模型的适应性。

$$G = \pi D_g^2 N / 40000 \quad (9)$$

将方程(8)代入(9)即得断面积预估模型

$$G = \frac{\pi}{40000} a_1^2 H_0^{2b_1} N^{1-2a_2 H_0^{b_2}} \quad (10)$$

方程(8)与(10)是相容性方程, 其方程参数可以互导。由方程(8)和(10)可导出直径和断面积差分预估方程即

$$D_{g2} = D_{g1} N_2^{-a_2 H_{02}^{b_2}} N_1^{a_2 H_{01}^{b_2}} \left[\frac{H_{02}}{H_{01}} \right]^{b_1} \quad (11)$$

$$G_2 = G_1 N_2^{1-2a_2 H_{02}^{b_2}} N_1^{2a_2 H_{01}^{b_2}-1} \left[\frac{H_{02}}{H_{01}} \right]^{2b_1} \quad (12)$$

方程(11)、(12)在森林经理调查中资源数据更新、收获预估等方面将发挥重要作用。

利用方程(8)、造林密度及未间伐的林分的调查资料拟合: $a_1 = 1.6601$; $b_1 = 1.6744$; $a_2 = 0.0862$; $b_2 = 0.4668$ ($R^2 = 0.967$, $F = 0.73 < F_{0.05} = 3.029$, $n = 227$)。

2.4 间伐模拟

过去对间伐试验的评价仅局限于描述性的单个试验的对比分析, 这难以满足使间伐试验结果的普遍化和制定优化间伐方案的要求。为此, 近年来人们试图用模型来评价间伐效果^[13]。

众所周知, 间伐后林分的发展依赖于林分中保留木的大小以及它在群落中的位置。具体到一个林分也就是除依赖于保留木本身的大小外, 还取决于保留林分密度和优势木高。对于生长

预估而言,除林分状态变量而外,间伐后的时间间隔起重要作用。

基于以上的分析,构建了模拟间伐效果的多因子乘积式

$$D_{g2} = \alpha_0 D_{gb}^{\alpha_1} N_{n1}^{\alpha_2} H_{o1}^{\alpha_3} (1 + A_2 - A_1)^{\alpha_4} \quad (13)$$

式中, D_{g2} = 伐后即年龄 A_2 时的待估断面积平均直径; D_{gb} = 伐后即疏伐年龄 A_1 时保留林分的断面积平均直径; N_{n1} = 伐后保留的每公顷株数; H_{o1} 疏伐时的优势木高; $\alpha_0 \cdots \alpha_4$ 为参数。

将下层间伐试验林分数据与方程(13)拟合,得 $\alpha_0 = 2.5287$; $\alpha_1 = 0.7424$; $\alpha_2 = -0.0636$; $\alpha_3 = 0.0626$; $\alpha_4 = 0.1292$ ($R^2 = 0.968$, $F = 0.081 < F_{0.05} = 3.045$, $n = 186$)。

要想利用(13)式对疏伐后的林分断面积平均直径进行预估,首先要解决伐后 D_{gb} 的估算问题。显然 D_{gb} 与伐前 D_g 及疏伐强度(P_s)有关。而疏伐强度的表示方法通常采用断面积比(B_i/B)或株数比(N_i/N)。为了解决疏伐引起的非生长性增长以及改善模型灵活性,有必要建立两者之间的转换关系。Pienaar^[11]用了 $N_i/N = (B_i/B)^a$ 或 $B_i/B = (N_i/N)^b$ 来表征两者之间的关系。研究拟合得 $N_i/N = (B_i/B)^{0.6574}$ 或 $B_i/B = (N_i/N)^{1.5182}$ ($R^2 = 0.98$, $n = 29$)。

Pienaar 所采用的两者之间的这种转换关系为进一步推导伐后的 D_{gb} 的计算公式打下了良好的基础,因为

$$\frac{B_i}{B} = \frac{B - B_b}{B} = (\frac{1}{4}\pi D_g^2 N - \frac{1}{4}\pi D_{gb}^2 N_b) / \frac{1}{4}\pi D_g^2 N = 1 - (1 - \frac{N_i}{N}) D_{gb}^2 / D_g^2$$

$$\text{所以} \quad D_{gb} = D_g \sqrt{(1 - \frac{B_i}{B}) / (1 - \frac{N_i}{N})} \quad (14)$$

以上模型构成了完整的疏伐模拟系统。

2.5 直径分布模型

众多的研究表明,Weibull 分布函数最适合表征同龄林的直径分布^[6,12]。

Weibull 分布的概率密度函数的表达式为

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ c/b \cdot \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} & x > a \end{cases} \quad (15)$$

式中,参数 a 是位置参数, b 是尺度参数, c 是形状参数。其累积分布函数为

$$F(X) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{X-a}{b}\right)^c\right] \quad (a \leq X \leq \infty) \quad (16)$$

各径阶的频率计算公式为

$$P(L < X < U) = \exp\left[-\left(\frac{L-a}{b}\right)^c\right] - \exp\left[-\left(\frac{U-a}{b}\right)^c\right] \quad (17)$$

式中 $P = i$ 径阶树木的比率; $L = i$ 径阶的下限; $U = i$ 径阶的上限; 各径阶的株数为 $n_i = N \cdot P_i$

在 Weibull 概率密度函数中随机变量 X 是没有上限的,关联到任意高尾部径阶的概率将是很少的且是有限的。因此在实践中必须采用某些舍位规则,本研究采用 Smalley 和 Bailey^[17]所采用的规则即当高尾部径阶的频率小于或等于 0.5/1 000 时则不计算,而将此径阶的频率加到前一个径阶,使该径阶的累积频数等于林木总株数。

参数回收模型由于其与林分模型数学上的一致性,而在直径分布动态预测中得以广泛应

用^[13]。

参数回收技术主要采用距法即根据数学原理,分布函数的 1 阶原点距即数学期望 $E(x)$ 为林分算术平均直径(D), 2 阶原点距 $E(x^2)$ 为林分平方平均直径(D_g)的平方, 这样有

$$E(x) = D = \int_0^{\infty} Xf(X; a, b, c)dx = a + b\Gamma(1 + \frac{1}{c}) \quad (18)$$

$$E(X^2) = D_g^2 = \int_0^{\infty} X^2f(X; a, b, c)dx = b^2\Gamma(1 + \frac{2}{c})2ab\Gamma(1 + \frac{1}{c}) + a^2 \quad (19)$$

显然利用公式(18)和(19)求解 b, c 时, 还需解决 D 和 a 预估问题。

关于 a 值的预估通常是采用最小径阶的下限。然而最小径阶(a')与密度、立地以及林龄的关系不是很紧密, 通常表现为间断式的推移过程。采用中央平均直径的 K 倍^[14]作为 a 值的近似估计即 a 等于 a' 所在径阶的下限值。杉木人工林 K 一般为 0.5。

关于 D 的预估: 由于断面积平均直径(D_g)与 D 间存在着很紧密的线性关系, 故采用 $D = a + bD_g$ 来解决 D 的预估问题。用密度试验材料拟合得 $a = -0.36756; b = 1.01301$ ($R = 0.999, n = 52$)。

以上方法即可实现直径分布的动态预测。

2.6 标准树高曲线模型

标准树高曲线体现了以直径、树高关系为基础的林分树高曲线的普遍规律^[15]。所以标准树高曲线的研制受到众多学者的重视。迄今为止描述树高曲线的方程不下于 30 种^[14], 然而真正不存在系统误差的为数不多。

选用了如下模拟途径, 即选用幂函数为基本的林分树高曲线

$$h_i = 1.3 + ad_i^b \quad (20)$$

由于林分树高曲线随年龄和立地指数的提高具有向右上方移位的性质^[16]。设 $a = a_1H_o^{b_1}$; $b = a_2H_o^{b_2}$, 得标准树高曲线模型

$$h_i = 1.3 + a_1H_o^{b_1}d_i^{a_2H_o^{b_2}} \quad (21)$$

通过调查的 226 条杉木林分树高曲线的拟合, 得到 $a_1 = 0.162; b_1 = 0.880; a_2 = 1.198; b_2 = -0.212$ ($R^2 = 0.962, F = 2.263 < F_{0.05} = 2.996, n = 1444$)。

3 结 语

构建收获模型系统是进一步研制经营模型的基础。建立的模型需要经过试验数据的检验。检验模型适用性的有效方法是残差分析^[17]。也就是说通过 F 值的大小来判断模型的回归效果。如果 F 值小于理论值 $F_{0.05(2, n-2)}$, 则所建立的模型是有效的。以上模型之后所标注的 F 值均小于理论值。这说明以上模型是适用的。

通过构筑杉木人工林收获模型系统可见, 长期的、重复测定的试验数据对于建模至关重要; 如何选用现有的试验数据及保护现有试验地显得越来越重要; 未来需要研究的问题在于如何利用此系统构筑除密度控制而外的包含其它营林措施在内的动态的森林经营模拟模型。

参 考 文 献

- 1 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): 8~14.
- 2 Gadow K V. Wachstums- und Ertragsmodelle fuer die Forsteinrichtung. Mittlungen aus der Waldwachs-

- tumsforschung in Muenchen, 1992, 3.
- 3 骆期邦, 吴志德, 蒋菊生, 等. Richards 函数拟合多形地位指数模型的研究. 林业科学研究, 1989, 2(6): 534~539.
 - 4 Kramer H. Waldwachstumslehre. Hamburg und Berlin: Paul parey, 1988. 55.
 - 5 Clutter J L., Fortson J C., Pienaar C V, et al. Timber management. John Wiley & Sons, 1983. 122~130.
 - 6 Gadow K V. Untersuchungen zur Konstruktion von Wachstumsmodellen fuer schnellwuechige Plantagenbaumarten, Forstliche Forschungsberichte Muenchen, 1987, 77: 1~123.
 - 7 Clutter J L., Jones E P. Prediction of growth after thinning in old-field slash pine plantations USDA. For. Serv. Res. Pape, 1980.
 - 8 Goulding C J. Simulation technique for a stochastic model of growth of douglas-fir. Ph. D. thesis Univ. of B. C. Vanconver, 1972.
 - 9 Sterba H. Natuerlicher Bestockungsgrad und Reinekes SDI. Centralblatt fuer das gesamte Forstwesen, 1981, 98(2): 101~116.
 - 10 Kao C, Brodie J D. Determination of optimal thinning entry interval using dynamic Programming. For. Sci, 1979, 25(4): 673~675.
 - 11 Pienaar L V. An approximation of basal area growth after thinning based on growth in unthinned plantations. For. Sci, 1979, 25(2): 223~236.
 - 12 Gerold D. Modellierung des Wachstums von Waldbestaenden auf der Basis der Durchmesser-Struktur. Dissertation, TU Dresden, 1990.
 - 13 Hyink D M, Moser J W. A Generalized framework for projecting forest yield and stand structure using diameter distributions. For. Sci., 1983, 29(1): 86~95.
 - 14 Wenk G, Antanaitis V, Smelko U. Waldtragslehre. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin, 1990. 221~227.
 - 15 Wiedemann E. Ueber die Vereinfachung der Hoehenermittlung bei der Vorratsaufnahme. Mitt. a. Forstw. u. Forstwiss, 1936.
 - 16 惠刚盈, 罗云伍, 张校林. 杉木人工林树高曲线的变化规律. 林业科技通讯, 1991, 254(7): 12.
 - 17 李希菲, 唐守正, 王松龄. 大岗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.

Study on the Yield Modelling System of Chinese Fir Plantation

Hui Gangying Sheng Weitong Gadow K. V.

Luo Yunwu Zhang Xiaolin Huang Dongqing

Abstract By using the biological law that height growth of dominant tree is independent of its plantation density and it's a function of the site an stand age and that diameter growth can indicate a multifactor effect, and by the use of taking the dominant height as an independent variant and introducing it into other related models, a yield modelling system for Chinese fir plantation has been constructed. It helps to provide a growth modelling for natural growth and post-thinning growth of Chinese fir plantation. It can help to build a standard tree height curve, a compatible predicting model for diameter and cross-sectional area and a thinning modelling system. In addition, a mathematical equation on the nongrowth increase caused by thinning can be deduced.

Key words Chinese fir, yield modelling system, model structure

Hui Gangying, Assistant Professor. Sheng Weitong (The Research Institute of Forestry, CAF Beijing 100091); Gadow K. V. (University of Goettingen, Germany); Luo Yunwu, Zhang Xiaolin, Huang Dongqing (The Subtropical Forest Experimental Centre, CAF).