

杉木人工林断面积

生长规律及动态模拟

张建国 孙洪刚 著

Zhang Jianguo and Sun Honggang

Basal Area Growth and Modeling of
Chinese Fir Plantations



科学出版社

www.sciencep.com

杉木人工林断面积生长规律及动态模拟

Basal Area Growth and Modeling of Chinese
Fir Plantations

张建国 孙洪刚 著

Zhang Jianguo and Sun Honggang

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

林分断面积是林分生长和收获预估体系中的核心因子之一。探讨林分断面积变化规律,对于深入理解林分空间结构特性、揭示林木生长变化规律、提高杉木人工林的经营水平具有重要的理论和实践价值。本书共分7章,包括林分断面积生长模拟研究概述、杉木人工林林分断面积生长规律、间伐对林分断面积生长的影响、林分水平断面积生长模拟、单木断面积变化规律和单木断面积生长模拟等。

本书可供森林培育工作者和高校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

杉木人工林断面积生长规律及动态模拟/张建国,孙洪刚著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-029222-3

I. ①杉… II. ①张… ②孙… III. ①杉木-人工林-植物生长-研究
IV. ①S791.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 199358 号

责任编辑:莫结胜 刘 晶/责任校对:钟 洋
责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年11月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年11月第一次印刷 印张: 14

印数: 1—1 500 字数: 280 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

林分断面积是林分生长模型的重要组成部分,与林分蓄积和林分平均直径密切相关。林分断面积生长预估是林分生长和收获预估体系中的核心因子和重要基础之一。通过对林分断面积的模拟,可以实现林分、径阶和单木三个水平模型的兼容。因此,探讨林分断面积变化规律对深入理解林分空间结构特性和揭示林木生长变化规律具有重要的意义。

在过去的 10 年里,随着统计学和计算机技术的迅猛发展,林分断面积生长模拟技术取得了长足的进步。以数学为基础,模拟林分断面积变化动态的模型已经得到了广泛重视,许多研究者从不同的数学理论角度提出了不同的模拟技术和方法,如联立方程法、差分方法、人工神经网络法、线性/非线性回归法、矩阵法等。

在国内,人工林林分生长模拟的研究一直是森林测树和森林培育学关注的热点。但是在以往的研究中,主要是以林分直径、树高、枝下高、冠幅、株数及蓄积等指标为研究对象,在探讨林分立地、密度、间伐、整地、施肥、种源及无性系选择等的生长效应时,也是以这些指标作为基础,而对林分断面积的考虑相对比较少,缺乏对林分断面积生长规律的研究,特别是对人为密度调控下林分断面积的变化规律缺乏深入的了解,从而在一定程度上限制了森林经营技术的提升。

杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]是我国亚热带地区特有的优良速生针叶树种,素以分布广、生长快、繁殖易、病虫害少、材质好、产量高、栽培历史悠久而闻名中外。杉木在我国速生丰产用材林中的比重极大,据第 6 次全国森林资源普查统计,全国杉木人工林面积达 921.50 万 ha,占全国造林面积的 28.54%(雷加富,2005)。作为主要的速生丰产用材林种之一,如何实现杉木人工林速生、丰产、优质及高效这一目标,直接影响到我国木材供需矛盾的解决。要实现杉木高效培育,一个非常重要的方面是必须清楚了解和掌握杉木人工林林分的生长规律及其对经营措施的响应。目前,国际上对这方面研究的一个重要方向是利用数学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,预测林分因子及经营措施对林木生长的影响,优化经营方案,以实现林分的最优经营管理。

本研究在国家“十一五”科技支撑项目“杉木和马尾松大径材速生丰产林培育关键技术研究及示范”(编号:2006BAD24B03)的支持下,以江西大岗山杉木密度试验林和密度间伐试验林的长期定位观测数据为依据,从种群生物学角度出发,探讨了不同生长条件下(立地、密度、间伐等)杉木林分断面积生长规律、断面积分布及生长模拟,希望在杉木人工林林分生长理论及预估模型研究领域有新的发展。

全书共分7章,重点论述了林分断面积的模拟技术进展,从林分水平、径阶水平和单木水平3个层次上系统研究了杉木人工林断面积动态变化规律及其模拟技术,详细分析了立地、密度、间伐、自然整枝、林龄等因素对林分断面积的影响。

本研究的野外观测和数据统计分析得到了中国林业科学研究院林业研究所童书振先生、段爱国副研究员,中国林业科学研究院亚热带林业实验中心李江南研究员、夏良放研究员和邓宗富高级工程师的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!限于作者的水平,本书的研究观点和结论还是初步的,肯定有不少错误和不当之处,敬请读者和同行专家批评指正。

张建国 孙洪刚

2010年2月

目 录

前言

1 林分断面积生长模拟研究概述	1
1.1 林分水平断面积模拟	1
1.2 径阶断面积生长模拟	9
1.3 单木断面积生长模拟	11
参考文献	14
2 杉木人工林林分断面积生长规律	19
2.1 试验地概况	19
2.2 密度试验设计	19
2.3 研究方法	20
2.4 结果与分析	21
2.4.1 林分断面积的变化规律	21
2.4.2 林分断面积生长模拟	23
2.4.3 枯死木断面积变化规律	26
2.4.4 雪灾对林分断面积的影响	28
2.4.5 自然整枝与林龄	30
2.4.6 自然整枝与间伐	31
2.4.7 自然整枝与林分断面积	33
2.4.8 自然整枝与林分密度	33
2.4.9 自然整枝与立地	35
2.5 小结	36
参考文献	37
3 杉木人工林间伐对林分断面积生长的影响	39
3.1 试验地概况	39
3.2 试验设计	39
3.3 结果与分析	39
3.3.1 间伐前后林分断面积变化趋势比较	39
3.3.2 间伐次数与林分密度、立地之间的关系	41
3.3.3 间伐强度与林分密度、立地的关系	41
3.3.4 间伐前后断面积分布规律	42
3.3.5 间伐后与未间伐同密度林分断面积比较	50

3.3.6 相同立地和初植密度未间伐和间伐林分断面积比较	54
3.4 小结	57
参考文献	57
4 杉木林分断面积模拟	58
4.1 模型的分类	58
4.2 林分断面积生长模型应具备的条件	59
4.3 动态模型的推导过程	59
4.4 模拟过程中的自相关	64
4.5 模型拟合及检验	64
4.5.1 模型拟合原理	64
4.5.2 模型拟合与检验	65
4.6 结果与分析	66
4.6.1 林分断面积生长特性	66
4.6.2 模型自相关	66
4.6.3 模拟精度的提高	66
4.7 小结	74
参考文献	74
5 杉木林分径阶断面积动态分布模拟	76
5.1 研究方法	76
5.2 结果与分析	77
5.2.1 模型选择的标准	77
5.2.2 径阶大小与断面积模拟精度之间的关系	81
5.2.3 径阶数量与模拟精度之间的关系	82
5.2.4 理论上渐近值与模拟精度之间的关系	86
5.2.5 模拟渐近值与林分因子的关系	95
5.2.6 模型参数与林分因子之间的关系	113
5.3 小结	124
参考文献	125
6 杉木人工林单木断面积变化规律	126
6.1 研究方法	126
6.2 结果与分析	127
6.2.1 Chow 检验	127
6.2.2 林分因子与单木断面积之间的关系	128
6.2.3 间伐过程中单木断面积对比分析	132
6.2.4 间伐后小区单木断面积比较	134
6.3 小结	136

参考文献..... 137

7 杉木人工林单木断面积生长模拟 138

7.1 材料与方法 138

7.1.1 试验地概况 138

7.1.2 试验设计 139

7.1.3 模拟方法 139

7.2 结果与分析 140

7.2.1 年珠样地单木断面积影响因素的回归分析 140

7.2.2 立地条件与林龄对单木断面积的影响 144

7.2.3 青石湾样地单木断面积影响因素的回归分析 145

7.3 小结 150

参考文献..... 150

附表..... 151

1 林分断面积生长模拟研究概述

林分断面积是林分生长模型的重要组成部分,与林分平均直径和林分蓄积密切相关。林分断面积生长预估是林分生长和收获预估体系中的核心因子和重要基础之一。在以往林分生长的研究中,主要是以林分胸高直径、树高、枝下高、冠幅、株数和蓄积等为研究对象,在探讨林分立地、密度、间伐、整地、施肥、种源及无性系选择等的生长效应时,也多以这些指标作为基础,而对林分断面积的考虑甚少。在过去的 10 年里,随着统计学和计算机技术的迅猛发展,林分断面积生长模拟技术取得了长足的进步。以数学为基础,模拟林分断面积变化动态的模型已经得到了广泛重视,许多研究者从不同的数学理论角度提出了不同的模拟技术和方法,如联立方程法(Eerikäinen, 2002)、差分方法(Carson *et al.*, 1999; Corona *et al.*, 2002; García and Rui, 2003)、人工神经网络法(Liu *et al.*, 2003)、线性/非线性回归法(Nyland *et al.*, 2000; Fang and Bailey, 2001; Sharma *et al.*, 2002; Philip *et al.*, 2003)、矩阵法(Stanton, 2001; Hao *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2005)等。

由于植物种群的生长是两种相反作用(同化作用、异化作用)的结果(Zeide, 2003; 李凤日等, 2000),不同的植物种群其遗传结构、空间结构、年龄结构和大小结构也不尽相同(Silvertown and Charlesworth, 2003)。现有的模拟技术和方法尽管在模拟过程中也具有较高的模拟精度,但大都不能反映植物种群生长的基本特性,无法刻画植物种群的生理生态学机制。因此,依据生物学原理做出某种假设,选取有关变量,确定有关参数,建立数学模型,然后借助数学的理论和方法,揭示种群的变化规律,预测它的未来,再通过实践去检验和不断修正、深化原有的模型,以求得与现实更为一致的反映,已成为众多研究者的首选研究方式(马知恩, 1996)。下面我们将从林分、径阶和单木三个水平尺度上,对林分断面积模拟技术和方法的研究现状及进展进行概述,目的是为进一步研究杉木人工林断面积的模拟提供参考依据。

1.1 林分水平断面积模拟

林分水平断面积生长和收获模型根据其产生和发展经历,主要有以下 6 个阶段。

(1) 林分收获表。林分收获表是对同龄林在不同林龄时林分收获量的预期,也是最古老的一种产量估计方法。目前已知的最古老的收获表为中国明朝崇祯年间的“龙泉码价”。1787 年,德国出版了第一份具有现代意义的林分收获表。早期

的林分收获表很难表示林龄、立地条件和林分密度三个因子对林分生长和收获的交互影响。因此,这一时期的林分收获表都是针对某一特定条件下的收获表。

(2) 生长收获方程。理论上,生长收获方程可以通过模拟林分收获表的数据得到。利用生长收获方程可以量化林分生长与收获的函数关系。生长收获方程是通过对林分内大小不一的单木测量数据拟合得到的。材积(或断面积)的生长被界定为同一林分两次测量之间的差异,也就是在林分水平上考虑生长收获动态,这对于在两次测量时林分没有发生更新和死亡的林分具有很高的预测精度;同时,该方法也隐含这样一个假设:林分内单木的空间序列在生长过程中没有发生变化(例如,林分中直径最大的树木,在林分生长过程中其直径永远保持最大)。

(3) 经验收获方程。MacKinney 和 Chaiken(1939)应用线性回归方法建立了第一个经验收获方程。他们的经验收获方程建立在材积相对生长量与林龄为负相关($\partial V/V \propto t^{-2}$)的假设之上。通过对假设的数学表达式取对数,得到方程

$$\ln V = \beta_0 - \beta_1 t^{-1} \quad (1-1)$$

式(1-1)包含两个参数, β_0 —材积的最大生长量; β_1 —材积生长率。同时, β_0 和 β_1 被假定与立地条件和林分密度具有简单的线性关系。这一模型的构建原理在以后相当长的时间里被广大林业工作者所采用。究其原因,主要有以下优点:①模型的数学表达式所给出的林龄与材积的关系与同龄纯林生长的规律相一致;②因变量采用 $\ln V$ 而不是 V ,可以满足线性回归的统计假设(线性、正态、加性、同方差);③使用 $\ln V$ 形式作为因变量,更便于表达自变量与因变量之间的因果关系。

(4) 经验生长方程。经验收获方程的缺陷在于无法反映林分生长及对林分进行经营管理时林分的动态过程,而经验生长方程则可以弥补这一不足。例如,Nelson(1963)基于假设“同龄纯林的林分蓄积断面积(ΔG)随林龄(t)增加渐进减小,随立地指数的增加而增加”建立了包括林龄和立地指数的二次经验生长方程

$$\Delta G = \beta_0 + \beta_1 G t^{-1} + (\beta_2 + \beta_3 t^{-1} + \beta_4 S_{h,d}) G^2 \quad (1-2)$$

式(1-2)中, ΔG —林分蓄积断面积($m^2 \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$); G —林分断面积($m^2 \cdot ha^{-1}$); $S_{h,d}$ —基于树高-直径关系估计得到的立地指数; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ —方程待定参数。

利用式(1-2)可以预测下次收获时的断面积蓄积增量及理论断面积蓄积量的最大值。

(5) 生长收获兼容方程。从理论上讲,林分收获量是林分生长量积累的结果,因此,可以由林分生长模型导出相应的林分收获模型。早期林业科研人员受限于对林分生长过程的正确认识,无法建立合理的假设和选取正确方程拟合因子,由生长数据估计得到的收获结果往往与观测值相差甚远。这一问题直到 1963 年 Clutter 在研究美国南方火炬松(*Pinus teada*)的生长收获规律时才得到解决。Clutter 对 Schumacher 方程的对数式进行了修改,得到林分材积收获方程

$$\ln V = \beta_0 + \beta_1 S_{h,t} + \beta_2 \ln G + \beta_3 t^{-1} \quad (1-3)$$

式(1-3)中, V —林龄为 t 时的林分材积; G —林龄为 t 时的林分断面积; $S_{h,t}$ —立地指数; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ —方程待定参数。

若假设立地指数不变, 将式(1-3)中的林龄 t 求导, 从而得到有关林分材积生长方程

$$\frac{dV}{dt} = \beta_2 \frac{V}{G} \left(\frac{dG}{dt} \right) - \beta_3 V t^{-2} \quad (1-4)$$

在式(1-4)中, 断面积生长蓄积量 $\left(\frac{dG}{dt} \right)$ 通过等式变换也可得到。1972 年, Sullivan 和 Clutter 对式(1-4)进行了重新定义, 给出了生长、收获模型一致性的数学依据, 并以林分初始年龄、与初始林龄相对应的林分断面积、立地指数和待预测林龄为自变量, 成功预测了未来某年的林分断面积。

(6) 理论生长方程。Bertalanffy、Chapman-Richards、Korf、Logistic、Schumacher、Gompertz 等理论生长方程与生长收获方程一样, 都可以模拟和预测林分的生长收获动态。由于构建理论生长方程的假设是以生物学特性为基础, 因此在解释林分生长规律时优于生长收获方程。

Moser 和 Hall(1969)采用异速生长方程的形式描述了林分材积(V)和断面积(G)的关系

$$V = \beta_0 G^{\beta_1} \quad (1-5)$$

式(1-5)中, β_0, β_1 —待定参数。

将式(1-5)代入 Bertalanffy 方程 ($\Delta G = \beta_2 G^{\beta_3} - \beta_4 G$), 得到林分材积蓄积量估计方程

$$\Delta V = \beta_1 V (\beta_2 G^{\beta_3-1} - \beta_4) \quad (1-6)$$

对式(1-6)中的林分断面积蓄积进行积分, 然后用材积代替, 这样就可以得到某一时段内林分累积断面积的估计方程。因此, 类似式(1-6)的生长收获模型也可称为林分断面积和材积兼容方程。

由于理论生长方程具有兼容性及生物特性, 因此, 早在 19 世纪初就受到了广大林业科研人员的重视。

Gompertz 于 1825 年提出用于描述人口衰亡及年龄分布状况的 Gompertz 模型

$$y = k \exp[-\exp(a - bx)] \quad (1-7)$$

式(1-7)中, k, a, b —待定参数, $k > 0, b > 0$ 。一个世纪后, 该式被用作生长曲线模型, 广泛用于生物学和经济学领域。

Candy(1989)在研究辐射松(*Pinus radiate*)断面积生长模型中, 由 Gompertz 模型得出断面积生长模型

$$B_k = B_{k-1} \exp\{\exp[\alpha + \beta \ln(t_{k-1})] - \exp[1 + \beta \ln(t_k)]\} \quad (1-8)$$

式(1-8)中, B_k —林龄为 t_k 时的林分断面积; B_{k-1} —林龄为 t_{k-1} 时的林分断面积; α , β —与林分条件有关的参数; $\exp(\delta)$ — e 的 δ 次方; $\ln$ —自然对数。

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 S + \alpha_2 S_d + \alpha_3 S_d^2 + \alpha_4 S_t + \alpha_5 S_t T_k + \alpha_6 P_r \quad (1-9)$$

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 S_d + \beta_3 S_d^2 + \beta_4 P_r \quad (1-10)$$

式(1-9)和式(1-10)中, S —立地指数; S_d —林分密度指标; S_t —间伐指标; T_k —最近一次间伐后的时间; P_r —修枝高比率; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta$ —待定参数。

Bailey 和 Ware(1983)在 Clutter(1963)断面积生长指标的基础上,增加了表示间伐的指标,获得了如下间伐林分断面积预估模型

$$B = \theta^{-1} \exp(\beta_1 + \beta_2 X/A^2 A_t + \beta_3 S) \quad (1-11)$$

式(1-11)中, B —预估的林分断面积; A —预估时刻的林龄; S —立地指数; A_t —最近间伐时的年龄; X —间伐指标变量; $\exp(\delta)$ — e 的 δ 次方; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ —待定参数。

由式(1-11)同样可以得到间伐林分的断面积生长模型

$$B_2 = B_1^{(A_1/A_2)} \exp[\beta_1 (1 - A_1/A_2) + \beta_2 X(1/A_2 - 1/A_1)/A_1 A_2] \\ \times \exp[\beta_3 S(1 - A_1/A_2)] \quad (1-12)$$

式(1-12)中, B_2 — A_2 时的断面积; B_1 — A_1 时的断面积; $\exp(\delta)$ — e 的 δ 次方。

式(1-12)具有以下性质:

(1) 当 $A_1 \rightarrow A_2$ 时, $B_1 \rightarrow B_2$;

(2) 步长不变性。当 $A_1 < A_2 < A_3$ 时, 由 A_1 时的 B_1 经过 A_2 时的 B_2 预估 A_3 时的 B_3 , 与由 A_1 直接预估 A_3 时的 B_3 结果完全一致。

Pienaar 和 Turnbull (1973) 从 Von Bertalanffy 模型推导出 Chapman-Richards 模型[式(1-6)], 并对最大断面积($B_{\max}$)、断面积生长率(dB/dt)和最大断面积生长率($b_{\max}$)进行了证明

$$B_t = A \{1 - \exp[-k(t - t_0)]\}^{1/(1-m)} \quad (1-13)$$

$$B_{\max} = Am^{1/(1-m)} \quad (1-14)$$

$$dB/dt = \frac{kB[(A/B)^{(1-m)} - 1]}{1 - m} \quad (1-15)$$

$$b_{\max} = Akm^{m/(1-m)} \quad (1-16)$$

式(1-13)至式(1-16)中, $\exp(\delta)$ — e 的 δ 次方; B_t —林龄为 t 时的林分断面积; A —林分断面积上渐近值; k —与生长速度有关的参数; t —林龄; t_0 —树高达到 1.3m 时的平均年龄; m —与生长曲线相关的参数, 与林分初始密度呈负相关。

在对不同林龄、立地和林分密度下南非沼泽松(*Pinus elliottii*)进行模拟后认为: ①Chapman-Richards 模型适用于未间伐同龄林的胸高断面积生长过程的模拟; ②在一定林分密度范围内, 最终林分断面积值是否一致只与立地状况有关; ③在一定林分密度范围内, 初始林分密度越小, 林分断面积累积生长率越小; ④ t_0

与初始林分密度无关。

Pienaar 和 Shiver (1984) 应用 Chapman-Richards 模型

$$B_t = \alpha \{1 - \exp[-\beta(t - \gamma)]\}^\delta \quad (1-17)$$

式(1-17)中, $\exp(\delta) - e$ 的 δ 次方; B_t —林龄为 t 时的林分断面积; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ —待定参数。

对 45 年生未间伐和间伐的湿地松(*Pinus elliottii* Engelm.) 进行林分断面积生长分析时发现: 不同林分密度下 α, γ 保持不变; β 随林分密度增加而增加; δ 随林分密度增加而减小。因此, 以初始林分密度为自变量对 β, δ 再参数化

$$B_t = \alpha \{1 - \exp[-\beta'(t - \gamma)]\}^\delta \quad (1-18)$$

$$\beta' = \beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 N_p)] \quad (1-19)$$

$$\delta' = \delta_0 \exp(-\delta_1 N_p) \quad (1-20)$$

式(1-18)至式(1-20)中, $\exp(\delta) - e$ 的 δ 次方; N_p —树木栽植一年后每英亩*的存活株数; $\beta_0, \beta_1, \delta_0, \delta_1$ —待定参数。

从经验上说, 具有相同年龄、立地和单位面积株数的人工林不论是否间伐过, 其断面积收获量最终趋于一致。而趋于一致的速率可用被压指数(the index of suppression)描述

$$IS_2 = IS_1 \exp\{-(B_4 + B_5 IS_1)[(t_2 - t_1)/t_1]^{B_6}\} \quad (1-21)$$

式(1-21)中, $\exp(\delta) - e$ 的 δ 次方; IS_2 —年龄 t_2 时的被压指数; IS_1 —年龄 t_1 时的被压指数; B_4, B_5, B_6 —待定参数。

由此可得 t_2 时的间伐林分断面积

$$B_{t_2} = (1 - IS_2) B_{u_2} \quad (1-22)$$

式(1-22)中, B_{t_2} —年龄 t_2 时间伐过的林分所预估的每英亩断面积; B_{u_2} —年龄 t_2 时同等条件下的未间伐林分所预估的每英亩断面积; IS_2 —年龄 t_2 时的被压指数。

Pienaar 等(1985)采用经 Clutter 和 Jones(1980)改造的 Schumacher 一般式来模拟林分断面积的间伐效应

$$B_2 = B_1^{(A_1/A_2)^{c_1}} \exp\{c_2 [1 - (A_1/A_2)^{c_1}]\} \quad (1-23)$$

式(1-23)中, B_1 —林龄在 A_1 时的林分断面积; B_2 —林龄在 A_2 时的林分断面积 ($A_2 \geq A_1$); $\exp(\delta) - e$ 的 δ 次方; c_1, c_2 —待定参数。

模拟结果表明, 尽管立地条件相同, 但是对于未间伐林和间伐林采用同一模型进行模拟是不合适的, 必须考虑间伐因素。

$$B_2 = B_1^{(A_1/A_2)^{c_0+c_1X}} \exp\{c_2 [1 - (A_1/A_2)^{c_0+c_1X}]\} \quad (1-24)$$

式(1-24)中, $\exp(\delta) - e$ 的 δ 次方; $X = TPA_t / TPA_a$ —间伐指数; TPA_t —被伐除的

* 英亩, acre, 1acre $\approx$ 4046.856m²。

林木株数; TPA_u —间伐后样地剩余的林木株数; c_0, c_1, c_2 —待定参数。

当式(1-24)中 $X=0$, 即没有间伐发生时, 式(1-23)与式(1-24)相同; 当 $A_1 \rightarrow A_2$ 时, 式(1-23)与式(1-24)中的 $B_1 \rightarrow B_2$ 。因此, 该模型具有一定的兼容性, 但对于不同立地下的林分断面积动态缺乏讨论。

为验证如下理论: 间伐后的林分与具有相同年龄、地位指数和每公顷株数的未间伐林分的断面积生长趋同, Pienaar 等(1985)用 Chapman-Richards 扩展模型对间伐林分断面积进行了模拟

$$BA_u = a_0 \{1 - \exp[-a_1 (1 - \exp(-a_2 \cdot SPAP)) (A - a_3)]\}^{a_4} \quad (1-25)$$

式(1-25)中, BA_u —没有被间伐林分的断面积; $SPAP$ —栽植一年后存活林木的株数; A —林龄; $\exp(\delta)$ — e 的 δ 次方; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 —待定参数。

并重新构建了被压指数

$$IS = \frac{BA_u - BA_t}{BA_u} \quad (1-26)$$

式(1-26)中, IS —被压指数; BA_t —间伐后保留木林分断面积。

对于式(1-26), 当 $IS < 0$, 未间伐林分的断面积小于间伐林分的断面积; 当 IS 逐渐增加或者保持不变, 未间伐林分的断面积与间伐林分的断面积之间的断面积差值增大; 当 IS 逐渐减小, 未间伐林分的断面积与间伐林分的断面积之差值保持不变; 当 IS 趋近 0, 未间伐林分的断面积与间伐林分的断面积数值接近。

式(1-23)基于初始断面积之上, 式(1-24)由于考虑到间伐因素而基于未间伐林分和被压指数之上。经数据拟合发现, 当间伐林分断面积的预估基于未间伐林分和被压指数时, 具有更高的准确性(杜纪山, 1997), 这说明式(1-24)优于式(1-23)。

张少昂(1986)在对兴安落叶松 [*Larix gmelinii* (Rupr.)] 天然林分生长模型和可变密度收获表的研究中, 从 Von Bertalanffy 生长法则出发, 利用反映林分每公顷株数和林分平均直径之间关系的林分密度指数, 由平均直径生长模型推导出林分每公顷断面积的生长模型

$$G = A_1 \{1 - \exp[-bS^C(t_0 - 4)]\}^R \quad (1-27)$$

式(1-27)中, G —林分断面积; A_1 —断面积生长的渐近值; S —密度指标 ($S = 10\,000/SDI$, SDI 为林分密度指数); t_0 —林分平均高达到胸高 1.3m 时的平均年龄; $\exp(\delta)$ — e 的 δ 次方; C, R —待定参数。

李希菲等(1988)在大岗山实验局杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 人工林可变密度收获表的编制中, 对张少昂(1986)提出的断面积生长模型做了进一步的改进, 是 Richards 生长模型在地位质量和林分密度两个方向上的扩展, 其模型为

$$G = b_1 L^{b_2} \{1 - \exp[-b_4 S^{b_5}(t - t_0)]\}^{b_3} \quad (1-28)$$

式(1-28)中, G —林分断面积; L —林分地位指数; S —林分密度指数; t_0 —树高达胸

高时的年龄(大岗山杉木人工林的 $t_0=2$); $\exp(\delta)$ — e 的 δ 次方; b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 —待定参数。

杜纪山 (1997) 应用式 (1-27) 和式 (1-28) 两种形式关系描述长白落叶松 (*Larix olgensis*) 和杉木林分断面积变化规律, 得出 Richards 模型优于 Schumacher 模型。

针对以往未间伐林和间伐林的断面积进行兼容性模拟时间伐次数少、间伐间隔年龄一致、立地指数相同等缺陷, Hasenauer 等 (1997) 同样基于 Schumacher 一般式, 对未间伐林和间伐林的断面积进行兼容性模拟。具体形式如下

$$BA_{p_2} = BA_{p_1}^{H_1/H_2} \exp \left\{ \left[\frac{BA_{p_1}}{BA_{T_1}} \right]^{b_0} b_1 SI^{b_2} TR [1 - (H_1/H_2)] \right\} \quad (1-29)$$

式 (1-29) 中, BA_{p_2} — p_2 林龄时林分断面积; BA_{p_1} — p_1 林龄时林分断面积; BA_{T_1} —林龄 T_1 时总的林分断面积; H_1 —前次测得的优势木平均高; H_2 —本次测得的优势木平均高; SI —立地指数; TR —间伐效应变量; $\exp(\delta)$ — e 的 δ 次方; b_0, b_1, b_2 —待定参数。

式中, TR 具体公式如下

$$TR = \left(\frac{BA_{p_A}}{BA_{p_B}} \right)^{b_3 (H_1/H_2)} \quad (1-30)$$

当 $b_3=0$, 间伐林分与未间伐林分断面积生长相同; 当 $b_3>0$, 间伐林分断面积生长大于未间伐林分断面积生长; 当 $b_3<0$, 间伐林分断面积生长小于未间伐林分断面积生长。

McTague 和 Bailey (1987) 指出: 林龄、立地指数、林分断面积相同的林分, 最终林分断面积生长一致, 与间伐无关; 并将参数回收法应用于 Weibull 模型进行林分断面积模拟

$$f(x) = cb^{-1} [(x-a)/b]^{c-1} \exp \{ - [(x-a)/b]^c \} \quad (1-31)$$

式 (1-31) 中, $\exp(\delta)$ — e 的 δ 次方; a, b, c —待定参数, $0 \leq a \leq x \leq \infty, b > 0, c > 0$ 。

$$\begin{aligned} D_{10_2} = & \alpha_1 \ln \left(\frac{A_2 N_1}{A_1 N_2} \right) + \alpha_2 S(A_2 - A_1) \\ & - \alpha_3 X [A_2 \ln(N_2) - A_1 \ln(N_1)] \\ & + \alpha_4 X S \ln \left(\frac{N_2}{N_1} \right) + D_{10_1} \end{aligned} \quad (1-32)$$

$$D_{63_2} = \beta_1 \ln \left(\frac{A_2 N_1}{A_1 N_2} \right) + \beta_2 S(A_2 - A_1) - \beta_3 X \ln \left(\frac{N_2}{N_1} \right) + D_{63_1} \quad (1-33)$$

将式 (1-32)、式 (1-33) 代入式 (1-31) 并整理, 得

$$\ln(B_2) = -a \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) + b \ln(N_2/N_1)$$

$$+ c \ln(D_{63_2}/D_{63_1}) + d \ln(D_{10_2}/D_{10_1}) \\ + e \left(\frac{1}{D_{63_2} - D_{10_2}} - \frac{1}{D_{63_1} - D_{10_1}} \right) + \ln(B_1) \quad (1-34)$$

式(1-32)至式(1-34)中, D_{10_2} —林龄 A_2 时直径第 10 百分位数; D_{10_1} —林龄 A_1 时直径第 10 百分位数; D_{63_2} —林龄 A_2 时直径第 63 百分位数; D_{63_1} —林龄 A_1 时直径第 63 百分位数; B_2 —林龄 A_2 时的林分断面积; B_1 —林龄 A_1 时的林分断面积; N_2 —林龄 A_2 时单位面积林木的株数; N_1 —林龄 A_1 时单位面积林木的株数; S —立地指数; $X = \begin{cases} 1, & \text{林分未间伐} \\ 0, & \text{已间伐林分} \end{cases}$; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, a, b, c, d, e$ —待定参数。

式(1-34)具有以下性质:①当 $A_2 \rightarrow A_1$ 时, $\ln(B_2) \rightarrow \ln(B_1)$;②预测林分断面积由 A_1 经 A_2 预估 A_3 时的林分断面结果,与由 A_1 直接预估 A_3 所得的林分断面积结果相同。

克劳斯·冯佳多和惠刚盈(1998)以林木株数(N)和优势木树高(H)建立林分断面积预估模型

$$G_2 = G_1 N_2^{1-0.142} H_2^{0.601} N_1^{0.142} H_1^{0.601-1} \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{4.292} \quad (1-35)$$

式(1-35)中, G_1 —林龄 t_1 时的胸高断面积($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$); G_2 —林龄 t_2 时的胸高断面积($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$); N_1 —林龄 t_1 时的每公顷株数; N_2 —林龄 t_2 时的每公顷株数; H_1 —林龄 t_1 时的优势高; H_2 —林龄 t_2 时的优势高。

胡晓龙(2003)采用多型 Richards 生长模型对不同立地指数及不同疏密度的林分断面积生长过程进行模拟

$$G = f[B(S_i, p_i), t] = B_0(S_i, p_i) \{1 - \exp[-B_1(S_i, p_i)]t\}^{B_2(S_i, p_i)} \quad (1-36)$$

式(1-36)中, $B_0(S_i, p_i) = c_0 S_i^{c_1} p_i^{c_2}$; $B_1(S_i, p_i) = c_3 + c_4 \ln(S_i) + c_5 \ln(S_i \times p_i)$; $B_2(S_i, p_i) = c_6 + c_7 S_i + c_8 (S_i/p_i)$; $\exp(\delta)$ — e 的 δ 次方; G —林分断面积; B_0 —初始林分断面积; S_i —林分立地指数; p_i —林分疏密度; t —林龄; $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8$ —待定参数。

该模型以 Richards 生长模型为基础,对模型各项采用非线性回归,综合林龄、立地和林分密度对林分断面积的影响。

Anta 等(2006)应用 Korf、Hossfeld、Betalanffy-Richards 的广义差分形式对生长在不同气候区、不同经营方式的湿地松人工林进行了模拟。结果显示, Korf 模型中与立地相关的两个参数广义差分形式的模拟效果最佳,并且能充分反映林分生物学特性,同时还具有步长无关性和简易性。具体形式如下

$$Y = \exp(X_0) \exp \left[- \left(\frac{b_1 + b_2}{X_0} \right) t^{-b_3} \right] \quad (1-37)$$

$$X_0 = \frac{1}{2} t_0^{-b_3} \{ b_1 + t_0^{b_3} \ln(Y_0) + \sqrt{4b_2 t_0^{b_3} + [-b_1 - t_0^{b_3} \ln(Y_0)]^2} \} \quad (1-38)$$

式(1-37)、式(1-38)中, $\exp(\delta) - e$ 的 δ 次方; X_0 —林分初始状态时的林龄; Y_0 —林分初始状态时的林分断面积; t_0 —初始林龄; b_1 、 b_2 、 b_3 —待定参数。

综合上述林分断面积模拟的成果可以得出以下结论。

一是林分预估或生长模型中, 至少应包含立地质量、林分密度和林龄 3 个变量。这是因为, 在一定林分密度范围内, 最终林分断面积值是否一致只与立地状况有关; 在相同立地条件下, 不同的林分密度将导致林分断面积和单木断面积的不同; 林龄则可以说明林分的生长发育阶段。但由于上述各个模型的数据来自不同的气候区及不同经营目的的林分, 这使得已有模型的普适性很差。因此, 如何提高模型的普适性将是本文研究的重点之一。

二是林分断面积预估模型应当具有 6 个方面的性质。①渐近性。在一定立地条件下, 某一树种的林分最终可以达到的断面积值, 如以 B_m 表示最大量, 则有 $t \rightarrow \infty$, 断面积 $B \rightarrow B_m$; 该渐近性对未间伐林和间伐林都适用。②相容性。对未间伐林分, 断面积生长和收获相容; 对间伐林分, 不但断面积生长和收获相容, 而且与未间伐林分断面积相容, 亦即间伐林分断面积预估模型在用于未间伐林分时, 可衰减为未间伐林分断面积预估模型。③单调性。在一个林分正常的自然生长过程中, 随着年龄的增加, 断面积总量将逐渐增大并最终趋于渐近值。间伐林分在间伐的当时断面积总量减小, 但其后又是从间伐后的保留断面积单调上升直至与立地相一致的渐近值。④步长不变性。无论是未间伐林分还是间伐林分, 由年龄 t_1 经 t_2 预估 t_3 时的断面积和由 t_1 直接预估 t_3 时的断面积具有相同的结果。⑤机理性。为了使断面积模型具有广泛的适用性, 建立具有一定机理性的预估模型是十分必要的。对未间伐林分断面积预估模型来说, 模型的参数具有较为明显的生物学意义。对间伐林分断面积预估模型来说, 除参数需有生物学意义, 其中的间伐变量显式或隐式能够说明不同间伐体制对断面积生长过程的影响。⑥简易性。模型太复杂有可能导致自变量之间的交互作用而变得不稳定, 最终导致模拟精度很低, 甚至出现错误的结果。

1.2 径阶断面积生长模拟

在现代森林经营管理的决策中, 不仅需要全林分总蓄积量, 更需要掌握全林分各径阶材积(或断面积)的分布状态, 进而为经营管理的经济效益、分析决策提供依据。因此, 提供径阶材积(或断面积)分布(一般采用林分直径结构形式)的方法应反映在林分生长收获模型中。特别是对同龄林, 采用以径阶分布模型(亦称直径分布模型)为基础来研建林分生长收获模型的方法已得到普遍重视。

径阶模型以树木径阶作为林分生长模拟的基本单位。它实际上是对林分模型和单木模型的折中。当某一径阶包含了林分所有树木时, 林分模型也可以被认为是径阶模型; 类似的, 当林分中的每株单木都包含于同一个径阶时, 单木模型就成