

文章编号:1001-1498(2004)06-0787-09

# 林分直径结构模拟与预测研究概述

张建国<sup>1,2</sup>, 段爱国<sup>1,2</sup>, 童书振<sup>1,2</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所,北京 100091; 2. 国家林业局林木培育实验室,北京 100091)

**摘要:**从林分直径结构模拟预测模型的选择以及模型参数的求解方法 2 个方面,对林分直径结构模拟与预测模型的国内外研究现状进行了较为详细的论述,总结指出林分直径结构模型的研究正围绕参数法和非参数法 2 种方法展开,重点归纳总结了理论方程法、最相似回归法等几种主要模拟预测方法以及百分位法、回归法等常用的模型参数求解和预测方法,分别指出了各种模型及参数求解方法的优劣,并对当前研究工作存在的问题及今后研究的重点进行了讨论。本项研究着眼于实际应用的层面,旨在为今后的研究提供阶梯,以有助于该项研究工作的展开。

**关键词:**直径结构;模拟与预测;研究方法

**中图分类号:**S757      **文献标识码:**A

随着森林经营集约化程度的提高,生产中迫切需要更加详尽的林木大小的信息<sup>[1]</sup>。林木直径分布与林分的蓄积结构及功能有着密切的关系,合理的林分结构是充分发挥森林效能的基础。了解了林分的直径结构,也就对林分的整体生长态势有了比较详尽的掌握,对单木生长以及林分竞争所产生的结果有了清楚的认识,探讨林分直径结构动态变化规律更是有利于揭示林分发展规律的实质。林分直径结构模拟与预测模型属二类模型<sup>[2]</sup>,具有林分生长模型(一类)以及单木生长模型(三类)所不具备的功能及优特点,是研究林分直径结构的重要手段。自 20 世纪 90 年代以来,随着相关学科日新月异的变化及统计分析科学的发展,林分直径结构模型朝着复杂化、多样化方向发展,从而从整体上提升了林分直径结构模拟与预测系统的性能及准确度,更能为科学营林和准确预估材积提供翔实的数字依据。

## 1 林分直径结构模型研究进展

林分直径结构模型历来是国内外林学家关注和研究的重点。从研究的对象来说,现实林分可划分为两大类,即同龄纯林和异龄混交林,两种林分总体特征上有着明显不同,因此,所适用的林分直径结构模型亦存在较大变化。一般来讲,在研究异龄混交林分的直径结构规律时,可将复杂林分划分成若干森林分子进行调查研究<sup>[3]</sup>。从所采用的研究方法来看,对于林分直径结构模型的研究,大体上可分为参数法(parametric approach)<sup>[3~5]</sup>和非参数法(nonparametric approach)<sup>[6]</sup>两种,具体而言包括相对直径法<sup>[7]</sup>、概率密度函数法<sup>[3]</sup>、理论方程法<sup>[4]</sup>、联立方程组

收稿日期:2004-03-04

基金项目:国家“十五”攻关项目“南方主要针叶用材林树种新品种选育及培育技术”

作者简介:张建国(1963—),男,甘肃陇西人,造林学博士,研究员。电话:010-62889603。Email:zhangjg@rif.forestry.ac.cn

法 (percentile prediction method)<sup>[5]</sup>、最相似回归法 (k-nearest neighbor estimation method)<sup>[6]</sup> 以及其它拟合方法等。从目前研究现状看,以参数法为主导。

### 1.1 相对直径法

相对直径法能使不同平均直径、不同株数的林分在同一尺度上进行比较,并能在一定程度上反映各单株在林分中的相对竞争力的大小<sup>[3]</sup>。根据该法所绘制的曲线,只要已知林分中任一林木的直径,即可求出小于这一直径的林木占林分总株数的百分数。有资料表明,不论树种、年龄、密度和立地条件如何,林分平均直径 ( $D_g$ ) 在株数累积分布曲线上的位置大致在 55% ~ 64%,一般近于 60% 处<sup>[3]</sup>。相对直径法对于现实林分直径分布状况能给出合理有效的描述,但对未知林分的直径分布就不能给予准确的评估,对林分直径的动态分布也不能给出科学的预测。

### 1.2 概率密度函数法

从 20 世纪 60 年代至今,所采用的概率密度函数主要有正态分布、对数正态分布、分布、分布、Weibull 分布、 $S_8$  分布及综合分布<sup>[4,8]</sup>。其中正态分布、分布以及 Weibull 分布应用较多。

Bailey<sup>[9]</sup>、寇文正<sup>[10]</sup>等均用正态分布拟合不同树种的直径分布,效果较好,但正态分布只有两个参数,分布曲线变化小,只能拟合林分发育过程中某一阶段的直径分布,具有一定的局限性。虽然如此,该分布作为经典的、一种理想状态下的林分直径分布在林分直径结构模型研究领域具有重要的意义,分布函数表达式如下:

$$f(x) = 1/(2 \cdot \sigma) \exp(- (x - \bar{x})^2 / (2 \sigma^2)) \quad (1)$$

(1) 式中,  $x$  和  $\bar{x}$  为直径实测值与平均值。  $\sigma$  为直径  $x$  的标准差。

分布具有很大的灵活性,可拟合同龄林和异龄林的直径分布<sup>[10]</sup>,但分布存在一个主要的缺点,就是在闭区间内,其累积分布函数不存在,因此,各径阶的株数比例就不得不采用数值积分技术来获得,并且该分布参数的生物学意义不甚明显。Bailey 等<sup>[11]</sup>提出用 Weibull 分布拟合直径分布,该分布函数因其具有足够的灵活性、参数容易求解和预估、参数的生物学意义明显以及在闭区间内存在累积分布函数且形式简洁明了等优点,吸引了众多研究者的重视并得到了广泛的应用,尤其是进入 20 世纪 90 年代以来,更是占据重要地位<sup>[12~24]</sup>。与其它理论方程相比,该函数亦表现出较高的精确度和适合度<sup>[25,26]</sup>。Weibull 分布函数形式为:

$$F(x) = 1 - \exp\left[- \left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right] \quad (a \geq 0; b, c > 0) \quad (2)$$

### 1.3 理论方程法

在林分生长模型研究领域,理论方程主要用于构建全林分及单木生长模型<sup>[27]</sup>,直到 20 世纪 90 年代中期以后,其在研建林分径阶分布模型上的优越性才日渐显露,且以国内的应用研究为主。目前应用的理论方程主要包括种群动态模型及一般理论生长方程两种<sup>[28,29]</sup>。

Gompertz 和 Logistic 方程最初均用于描述种群增长及分布问题。Gompertz 方程是由 Benjamin Gompertz 于 1825 年首先提出,用来描述人口衰亡及年龄分布状况。吴承祯<sup>[30]</sup>将其应用到杉木人工林直径分布结构的研究上,结果表明适合性良好。Logistic 方程是由比利时数学家 Verhulst 所首创,用于描述人口的增长规律,惠刚盈<sup>[28]</sup>在国内首次将该方程应用于林分结构的研究。Ishikawa<sup>[31]</sup>鉴于 Richards 方程的灵活性曾采用该方程来描述林木直径分布,并给出了该

方程的概率密度函数形式,但未能提出该方程应用在直径分布领域的理论基础。段爱国<sup>[29]</sup>在分析理论方程的发展来源及数学解析性时,发现包括 Gompertz、Logistic 两方程在内的诸如 Richards、Korf 等“S”型或近似“S”型的方程在一定假设条件下均可用于林分直径分布的模拟。理论方程应用于林分直径结构的模拟主要源于以下2点:(1)各方程渐近线的存在及良好的单调性使其具备了对林分直径累积分布进行模拟的数学基础<sup>[29]</sup>;(2)理论方程的微分式可通过自然界种群生长变化量与环境营养空间的辩证关系予以一定的解释<sup>[32]</sup>,其微分式均可表达为:

$$dy/dx = rf(y) \cdot g(y) \quad (3)$$

(3)式中, $r$ 为各方程参数的数学组合,可理解为各方程的内禀增长率, $f(y)$ 与 $y$ 成正相关, $g(y)$ 受 $y$ 上渐近值的约束,并与 $y$ 成负相关。值得提出的是,理论方程描述的是一种累积分布形式,将理论方程表达式对自变量求导即可得到相应的概率密度函数。对理论方程模拟的精度差异及产生差异的实质原因,张建国等<sup>[33]</sup>指出方程拐点浮动与否、浮动范围及固定拐点所在位置对方程模拟精度具有实质性的影响。

#### 1.4 联立方程组法

Borders<sup>[6]</sup>提出了一种不依赖于任何预先确定函数的预测方法(Distribution-free methods),该方法假定相邻百分位间的株数分布为均匀分布,采用12个不同累积株数百分数处直径的预测方程所组成的方程系统(即联立方程)来描述直径的分布规律。该方法被认为对多相性林分,特别是受自然灾害(如病虫害)、人为干扰(如抚育间伐)以及一些表现为双峰的纯林或混交林林分,具有较好的模拟效果<sup>[34]</sup>。孟宪宇<sup>[35]</sup>列出了该方法的基本求算过程,并采用相邻百分位处的直径、林分平均直径、地位指数、每公顷林木株数、林分年龄等林分特征因子建立了落叶松(*Larix Mill*)人工林林分13个不同百分位处直径的预估方程组,进而求算出87块林分的直径分布序列,<sup>2</sup>检验结果表明:接受率为76%,略高于3参数Weibull分布函数的72.4%。Maltamo<sup>[36]</sup>采用一个方栓函数(spline function)来描述相邻百分位点间的林木分布状况,林分特征值选用直径中位数、断面积直径中值以及一个哑变量,其中哑变量用来描述林分是否疏伐。Kangas<sup>[37]</sup>曾将一种标准化的方法应用于联立方程组法,并取得了较单独采用联立方程组法好的效果。该方法可从2个方面加以完善:(1)选用能精确预估各百分位处直径的模拟方程(如非线性方程)及准确反映林分直径结构的特征因子;(2)相邻百分位点间选择合适的分布函数。虽然联立方程组法具有许多优点,但其不足之处在于需要较多的林分直径结构特征的信息以及联立方程求解过程较为繁琐且彼此间的误差项存在累加性。

#### 1.5 最相似回归法

最相似回归法是一种不依赖于任何分布函数、基于 $k$ 个最相似实测林分分布的权重平均的非参数预测法<sup>[7]</sup>。利用该方法对未知林分直径分布进行预测主要需要解决3方面的问题:(1)选用适当距离函数,确定最相邻林分及林分个数;(2)确定所筛选出最相邻林分的直径分布;(3)确定权重函数,对各参照(最相邻)林分给出合适的权重值。

Maltamo<sup>[38]</sup>经过对几种距离函数的比较分析后,发现如下绝对差异函数为最佳:

$$d_{ij} = \sum_{l=1}^p c_l |x_{il} - x_{jl}| \quad (4)$$

(4)式中 $d_{ij}$ 表示参照林分 $i$ 与目标林分 $j$ 之间的距离; $l=1, \dots, p$ ;  $p$ 表示林分变量的个数; $c_l$ 为林分变量 $x_l$ 的系数;其值可采用函数比较法予以确定<sup>[39]</sup>。 $x_{il}$ 、 $x_{jl}$ 为所测林分特征变量,如

林分年龄、断面积、断面积直径中值、林分平均高等,这些特征变量在应用到距离函数之前需作标准化处理,以使其单位不致影响所求算的距离结果。

虽然绝对差异函数所描述的距离较平方偏差法更稳定,但其它形式的距离函数亦在可选范围内<sup>[40]</sup>。

Maltamo 为参照林分所选用的权重函数以距离的倒数为基础,表达式为:

$$w_{ij} = \left( \frac{1}{1 + d_{ij}} \right)^{pm} / \sum_{i=1}^k \left( \frac{1}{1 + d_{ij}} \right)^{pm} \quad (5)$$

(5)式中权重值  $w_{ij}$  表示第  $i$  个林分相对第  $j$  个目标林分的权重,  $w_{ij}$  的总和等于 1,当针对某一个目标林分时,  $j$  值不变,仅  $i$  值变动,且  $i \neq j$ ;权重参数  $pm$  决定最相邻林分权重随距离  $d_{ij}$  下降的快慢,在寻求参数  $pm$  的最优值时,  $pm$  被允许的变动范围为  $1 \leq pm \leq 5$ ;参照林分的数目  $i$  的取值范围为  $1 \leq i \leq 15$ 。距离函数以及权重参数  $pm$  的效果可通过交叉检验法比较获得,所谓交叉检验法即指每一个林分都由不包括其本身在内的其它林分估计得到的一种检验方法。

Maltamo 所描述的直径分布为断面积直径分布,其给出的目标林分每单位面积的断面积直径分布计算式为:

$$\hat{z}_j = G_j \sum_{i=1}^k w_{ij} z_i \quad (6)$$

(6)式中,  $\hat{z}_j$  指每单位面积的断面积直径分布,  $z_i$  为各参照林分断面积直径分布相对自身断面积的比值,  $w_{ij}$  如前权重函数式所示,  $k$  指所采用的参照林分数目,  $G_j$  表示目标林分  $j$  的断面积。

从统计学的角度来讲,最相似回归法具有很强的灵活性,对双峰或多峰分布有着更强的适应性,不失为一条解决复杂分布问题的新思路,但该方法需要合适的参照材料,且当研究大范围的林分时,最相邻参照林分的选用过程耗时较多,并且对相关软件的依赖性较大。Haara 等<sup>[7]</sup>发现,在大多数研究例子中,Weibull 的分布方法较最相似回归法具有更高的精度。鉴于概率分布函数等参数法及非参数法(如最相似回归法)优点的互补性, Maltamo<sup>[38]</sup>将最相似回归法与 Weibull 方程结合起来研究直径分布问题,取得了较单一方法更理想的效果。

## 1.6 其它拟合方法

随着相关学科的发展以及对模型适应性需求的提高,林木直径分布模拟预测模型正呈多样化发展趋势。邓聚龙<sup>[41]</sup>提出了灰色系统模型的概念,该系统可分为 GM(1,1)、GM(1,n)和 GM(2,1)等 3 种,其中 GM(1,1)应用最为广泛。马胜利<sup>[42]</sup>应用 GM(1,1)模型研究了纯林及天然异龄林的直径分布情况,认为该模型较  $\chi^2$  分布及抛物线分布效果好。对于混交林分, Maltamo<sup>[43]</sup>曾利用 Weibull 分布进行过描述,发现 Weibull 函数对林分内单一树种以及多树种整体直径分布均具有较好的模拟性能。有研究表明<sup>[44]</sup>,当混交林分表现为双峰或多峰状态时,无论是  $S_b$  分布还是 Weibull 分布都不能给予精确的描述。Titterton<sup>[45]</sup>介绍了一种被称为有限混合分布的研究方法, Liu<sup>[46]</sup>采用 2 参数 Weibull 分布建立的有限混合分布模型研究了混合树种所组成林分的直径分布。对于林分直径结构模拟预测模型的研究,本文仅列出当前具有代表性的典型研究。

## 2 模型参数求解及预测方法

采用参数法对林分直径分布进行模拟与预测时,其内容可以分为对已知林分分布参数的求解和对未知林分分布参数的预估两部分。模型参数的求解及预估方法至关重要,对模拟精度与预测效果有较大的影响。如分布参数的求解和预估是分步进行的,则参数求解精度的高低将直接影响预估的效果。参数的预估方法包括参数预测法(PPM)和参数回收法(PRM)<sup>[47]</sup>。参数的求解方法包括最大似然法、矩法、百分位法、回归法、遗传算法、BP模型等等,最常用的为前面4种,且最大似然法、回归法、遗传算法和BP模型主要解决已知林分分布参数的求解问题,如要实现预估还需采用PPM或PRM,而矩法以及百分位法在求解已知林分分布参数的同时,可以达到预估的目的。

Bailey<sup>[11]</sup>认为最大似然法是一种非常精确的参数求解方法,但需用迭代法进行求算。对于几乎所有的概率密度函数来说,矩法不失为一种普适性的求解方法<sup>[3,41]</sup>。百分位法是一种简洁实用的近似求算方法,该方法正日益受到研究者的重视;而随着数理统计软件的发展,回归法,尤其是非线性回归法正体现出其本身的优越性。本文以Weibull分布函数为例,对矩法、百分位法及回归法的应用作简要概述。

### 2.1 基于矩法的参数预测体系

矩法是利用矩估计技术求出分布参数的方法。分布函数之表达式见(1)式,其一阶原点矩即数学期望 $E(x)$ 可由林分的算术平均直径 $\bar{x}$ 加以估计,而二阶原点矩可由林分的平方平均直径 $\bar{x}^2$ 加以估计。

$$\bar{x} = \int_0^{\infty} xf(x, a, b, c) dx = a + b(1 + 1/c) \quad (7)$$

$$\bar{x}^2 = \int_0^{\infty} x^2 f(x, a, b, c) dx = b^2(1 + 2/c) + 2ab(1 + 1/c) + a^2 \quad (8)$$

(7)、(8)式中, $f$ 表示伽玛函数。通常,当采用矩估计方法时,位置参数 $a$ 被设定为林分最小径阶的下限值或最小直径的某个指定倍数,将已知林分 $\bar{x}$ 和 $\bar{x}^2$ 的值代入以上2式,联立方程(7)、(8)求解,就可得到相应的参数值;假定未知林分直径符合Weibull分布,则只要已知或通过一类模型得出 $\bar{x}$ 、 $\bar{x}^2$ 的值,应用(7)、(8)式即可实现对未知林分直径分布的预测。矩法的优点为不依赖于现实林分即可直接对未知林分直径分布作出预测,但其缺点也在于此,因为往往事先无法预知某一树种、某一林分直径符合何种分布,即假设的前提条件很难确定,因此,应用该方法会导致未知林分直径分布的趋同化。

### 2.2 基于百分位法的参数预测体系

百分位法可以应用于概率密度函数以及理论方程参数的求解。Weibull参数回收方法最早由Da Silva<sup>[48]</sup>提出,随后,一些学者<sup>[13,14,49]</sup>发展性地应用了这一方法,该回收方法正是基于百分位法。百分位法主要由2部分组成:(1)建立分布函数参数与各百分位点直径的关联方程;(2)建立各百分位点直径与林分因子的联立方程。Bailey<sup>[49]</sup>选用的百分位点为0、25%、50%、95%,给出的各参数估计方程为:

$$a = (n^{1/3}/D_0 - D_{50}) / (n^{1/3} - 1) \quad (9)$$

$$c = \ln \left[ \frac{\ln(1 - 0.95)}{\ln(1 - 0.25)} \right] / \ln \left[ \frac{D_{95} - a}{D_{25} - a} \right] \quad (10)$$

$$b = \frac{a-1}{2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 \left(\frac{2}{1} - \frac{2}{3}\right) + \frac{D_g^2}{2}} \quad (11)$$

(11)式中,  $\frac{2}{1} = [1 + 1/c]$ ,  $\frac{2}{3} = [1 + 2/c]$ ;以上3式中,  $D_0$  指林分最小胸高直径,  $n$  为林分株数,  $D_g$  为林分平方平均直径,  $D_{25}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{95}$  分别指百分位点 25%、50%、95%处所对应的直径。

(9)式是假定  $D_0$  符合一个近似的 Weibull 分布,并指定参数  $c = 3$  的情形下,结合百分位点  $D_{50}$  的求解方程而得到;联立百分位点 25%和 95%的 Weibull 方程可得出(10)式;利用矩法所得到的(8)式对参数  $b$  进行求解,即可推导出(11)式。各百分位点直径的求解方程可由如下(12)式作出估计。

$$D_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (12)$$

上式中,  $D_i$  表示各百分位点处的直径,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  代表参与预估的林分因子。Brooks<sup>[13]</sup> 为提高估计精度,对百分位点  $D_0$  和  $D_{50}$  的估计采用上式,而采用如下(13)式估计  $D_{25}$ 、 $D_{95}$ 。

$$D_i = f(D_{50}, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (13)$$

采用3参数 Weibull 分布函数预估林分直径分布时,位置参数  $a$  的估计精度直接影响着估计效果,百分位法的一大优点就是采用2个百分位点直径的估计方程对  $a$  进行求解,较好地解决了这一问题。

### 2.3 基于回归法的参数预测体系

回归分析法是处理一个变量与其它变量的函数关系的方法。回归法是求解理论方程等分布函数的参数的理想方法。基于该方法的参数预测体系主要由3部分组成<sup>[4,28,30,50]</sup>:(1)利用线性或非线形回归法作数据拟合,得到参数值;(2)借助分布曲线上的关键点建立模型参数的回收方程;(3)建立分布曲线上关键点处的直径与林分因子间的关联方程。回收方程一般可表达为如下形式:

$$F_i = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, D_i) \quad (14)$$

(14)式中,  $F_i$  为关键点的累积频率,  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  指代模型的参数,  $n$  为参数个数,  $D_i$  指第  $i$  关键点对应的直径。对包含3个参数以内的“S”型分布曲线,一般关键点  $F_i$  取值为 0.333、0.9 以及方程拐点的纵坐标。

对于3参数 Weibull 方程而言,参数回收方程形式如下:

$$0.333 = 1 - \exp(-((D_{0.333} - a)/b)^c) \quad (15)$$

$$0.9 = 1 - \exp(-((D_{0.9} - a)/b)^c) \quad (16)$$

$$D_i = b(1 - 1/c)^{1/c} + a \quad (17)$$

(17)式中,  $D_i$  表示分布曲线拐点处所对应的直径。经过曲线拟合得到已知林分分布参数值,根据以上3式即可求出各关键点所对应的直径。反之,如已知  $D_{0.333}$ 、 $D_i$  和  $D_{0.9}$  的值,联立方程(15)、(16)、(17)就可求出参数  $a, b, c$ 。分布曲线各关键点处的直径与林分因子的关联方程可采用(18)式表示:

$$D_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (18)$$

上式中,  $D_i$  表示各关键点处的直径,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  代表参与预估的林分因子。通常采用的方程为幂函数形式, 见(19)式:

$$D_i = mD_g^n \quad (19)$$

(19)式中,  $m, n$  为待估参数,  $D_g$  为林分平方平均直径。这样, 利用(15)、(16)、(17)式求出各关键点所对应的直径, 建立其与林分因子间如同(18)式的回归关系, 即可形成一个完整的预测体系。

从上面对矩法、百分位法、回归法的介绍可以看到, 这些方法彼此间存在一定的联系, 如百分位法参数的求解过程应用了矩法, 而回归法中采用的关键点与百分位法的百分位点有着异曲同工之处。当然, 这些方法还可以彼此联合, 形成新的模拟预估体系。

### 3 林分直径结构模拟与预测研究存在的问题及建议

林分直径结构模拟与预测的研究工作已经取得了很大的进展, 但鉴于该研究在材种测算、经营措施、森林更新以及林木枯损等方面的巨大价值和应用前景, 本项研究尚需得到林学家们的进一步重视。总的看来, 林分直径结构模拟与预测领域的研究还存在许多重要的问题尚未解决, 建议今后一个时期的研究工作从以下几个方面展开。

(1) 同时开展参数法、非参数法以及依赖于分布函数和不依赖于分布函数的模拟预测方法的研究工作, 寻求描述林分直径分布的最佳方法; (2) 寻找最能反映直径分布规律的林分特征因子, 并建立特征因子与分布参数的最佳函数关系; (3) 解决当前研究中存在的模拟与预测脱节的问题, 在对已知林分进行模拟时, 要考虑所建立起来的模拟预测体系的适用范畴, 因为, 采用所建立的模型进行预估时, 往往对部分未知林分预测效果较好, 而对另外一部分未知林分预测精度较低, 这样还是未能解决好预估的问题, 除探讨最相似回归法与分布函数相结合进行预估的方法外, 亦可考虑对林分进行分段(如不同龄级组合)、分类(如不同密度)建模的思路; (4) 构建直径分布与材积分布、断面积分布间的关系, 使直径分布模型服务于收获预估的需要; (5) 充分重视相关学科的发展及其在本领域的应用, 譬如可采用模糊数学的相关理论描述林分直径分布; (6) 对于人为干扰后的林分直径分布的模拟与预测有待加强。

#### 参考文献:

- [1] 盛炜彤. 杉木建筑材优化栽培模式研究总报告[J]. 世界林业研究, 1996, 9(专集): 32~53
- [2] Davis L S, Johnson K N. Forest Management (3rd Edition) [M]. McGraw-hill, New York, 1987
- [3] 李凤日. 林木直径分布的研究(综述)[J]. 林业译丛, 1986(4): 12~18
- [4] 段爱国, 张建国, 童书振. 6种生长方程在杉木人工林分直径结构上的应用[J]. 林业科学研究, 2003, 16(4): 423~429
- [5] Borders B E, Surter R A, Bailey R L, et al. Percentile-based distributions characterize forest stand tables[J]. For Sci, 1987(33): 570~576
- [6] Haara A, Maltamo M, Tokola T. The k-nearest-neighbour method for estimating basal-area diameter distribution[J]. Scand J For Res, 1997(12): 200~208
- [7] 孟宪宇. 测树学(第2版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996
- [8] 邱水文. 林木直径分布收获模型综述[J]. 华东森林经理, 1991, 5(2): 28~32
- [9] Bailey R L. Individual tree growth derived from diameter distribution models[J]. For Sci, 1980(26): 626~632
- [10] 寇文正. 林木直径分布的研究[J]. 南京林产工业学院学报, 1982(1): 51~65
- [11] Bailey R L, Dell T R. Quantifying diameter distribution with the Weibull function[J]. For Sci, 1973(19): 97~104

- [12] Smalley G W, Bailey R L. Yield tables and stand structure for loblolly pine plantations in Tennessee, Alabama, and Georgia highlands [J]. USDA For Serv Res Pap, 1974. 57
- [13] Brooks J R, Borders B E. Predicting diameter distributions for site-prepared loblolly and slash pine plantations [J]. South J Appl For, 1992, 16(3): 130 ~ 133
- [14] Lee Y J, Hong S H. Weibull diameter distribution yield prediction system for loblolly pine plantations [J]. Jour Korean For Soc, 2001, 90(2): 176 ~ 183
- [15] Campos J C C. Diameter distribution yield tables and their application to compare levels of thinning practices [J]. Proceedings. XVII IU-FRO world congress, Kyoto Japan, 1981. 13 ~ 24
- [16] 木梨谦吉, 西泽正久. 对林分模拟的生长模型的研究 [J]. 李炳铁译. 林业资源管理译丛, 1985(1): 83 ~ 110
- [17] 孟宪宇. 使用 Weibull 函数对树高分布和直径分布的研究 [J]. 北京林学院学报, 1988(1): 40 ~ 48
- [18] 王振亮, 毕君. 太行山刺槐人工林直径分布规律的研究 [J]. 河北林业科技, 1994(3): 15 ~ 18
- [19] 李久先. 三种生长模式在红松人工林生长适用性之探讨 [J]. 中华林业季刊, 1996, 29(2): 3 ~ 14
- [20] 周国模, 王瑞铨, 俞双群, 等. 庆元县人工杉木林直径分布的研究 [J]. 华东森林经理, 1996, 10(1): 18 ~ 21
- [21] James R N. Evaluation of diameter distribution as a criterion for selecting crop trees in pulpwood regime [J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 1998, 28(2): 195 ~ 201
- [22] 杨凯, 高燕平, 李国春, 等. 红皮云杉人工林直径结构分布模型的研究 [J]. 吉林林学院学报, 1999, 15(1): 14 ~ 19
- [23] 李荣伟, 唐志刚, 杜仲人工林林分直径分布研究 [J]. 四川林业科技, 2000, 21(2): 1 ~ 6
- [24] 王艳洁, 腾启和. 河北省承德地区天然次生栎林直径分布的研究 [J]. 林业资源管理, 2001(1): 45 ~ 50
- [25] Dolph K L. Polymorphic site index curves for red fir in California and southern Oregon [J]. USDA For Serv Res Pap, 1991 (PSW-206): 18
- [26] Mark O K. Site index curves for pinus nigra grown in the south island high country [J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 1998, 28(3): 389 ~ 399
- [27] Zeide B. Accuracy of equations describing diameter growth [J]. Can J For Res, 1989(19): 1283 ~ 1286
- [28] 惠刚盈, 盛炜彤. 林分直径结构模型的研究 [J]. 林业科学研究, 1995, 8(2): 127 ~ 131
- [29] 段爱国. 杉木人工林林分直径结构模拟及其动态变化规律的研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2002
- [30] 吴承祯, 洪伟. 杉木人工林直径结构模型的研究 [J]. 福建林学院学报, 1998(2): 110 ~ 113
- [31] Ishikawa, Yoshio. Analysis of the diameter distribution using the RICHARDS distribution function ( ). Relationship between mean diameter or diameter variance and parameter  $m$  or  $k$  of uniform and even-aged stands [J]. J Plann, 1998(31): 15 ~ 18
- [32] 李文灿. 对 Logistic 方程的再认识 [J]. 北京林业大学学报, 1990(2): 121 ~ 127
- [33] 张建国, 段爱国. 理论生长方程对杉木人工林林分直径结构的模拟研究 [J]. 林业科学, 2003, 39(6): 55 ~ 61
- [34] Borders B E, Patterson W D. Projecting stand tables: A comparison of the Weibull diameter distribution method, a percentile-based projection method, and a basal area growth projection method [J]. For Sci, 1990, 36: 413 ~ 424
- [35] 孟宪宇, 岳德鹏. 利用联立方程测算林分直径分布的初步研究 [J]. 林业资源管理, 1995(6): 39 ~ 43
- [36] Maltamo M, Kangas A, Uuttera J, et al. Comparison of percentile based prediction methods and the Weibull distribution in describing the diameter distribution of heterogeneous Scots pine stands [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 133(3): 263 ~ 274
- [37] Kangas A, Maltamo M. Calibrating predicted diameter distribution with additional information [J]. For Sci, 2000, 46(3): 390 ~ 396
- [38] Maltamo M, Kangas A. Methods based on  $k$ -nearest neighbor regression in the prediction of basal area diameter distribution [J]. Can J For Res, 1998(28): 1107 ~ 1115
- [39] Gill P E, Murray W, Wright M H. Practical optimization [M]. London: Academic Press Limited, 1981
- [40] Tokola T. Point accuracy of a non-parametric method in estimation of forest characteristics with different satellite materials [J]. Int J Remote Sens, 1996(17): 2333 ~ 2351
- [41] 邓聚龙. 灰色预测与决策 [M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1987
- [42] 马胜利. 灰色模型在林木直径分布规律研究中的应用 [J]. 林业资源管理, 1999(3): 75 ~ 78
- [43] Maltamo M. Comparing basal-area diameter distributions estimated by tree species and for the entire growing stock in a mixed stand [J]. Silva Fenn, 1997(31): 53 ~ 65



- [44] Tham A. Structure of mixed *Picea abies* (L.) Karst. and *Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh. stands in south and middle Sweden[J]. Scand J For Res, 1988(3):355~370
- [45] Titterton D M. Mixture distributions(update) [M]. Encyclopedia of statistical sciences, 1997. 399~407
- [46] Liu C M, Zhang L J, Davis C J. A finite mixture model for characterizing the diameter distributions of mixed-species forest stands[J]. For Sci, 2002, 48(4):653~661
- [47] Hyink D M, Moser J W. A generalized framework for projecting forest yield and stand structure using diameter distributions[J]. For Sci, 1983, 29:85~95
- [48] Da Silva J A. Dynamics of stand structure in fertilized slash pine plantations[D]. Univ of GA, 1986
- [49] Bailey R L, Burgan T M, Jokela E J. Fertilized midrotation-aged slash pine plantations-stand structure and yield prediction models[J]. Southern Journal of Applied Forestry, 1989(13):76~80
- [50] 段爱国,何彩云,张建国,等.杉木人工林林分直径结构动态预测的研究[J].林业科学,2004,40(5):32~38

## Review on the Modeling and Prediction of Stand Diameter Structure

ZHANG Jian guo, DUAN Ai guo, TONG Shu zhen

(Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091, China)

**Abstract:** This paper, from two aspects, discussed the internal and external study situation about the model of modeling and prediction of stand diameter structure, summarily indicated that the study of stand diameter structure model was unfolded around two methods of parametric approach and nonparametric approach, mainly introduced a few main modeling and prediction methods like theoretical equation method, k-nearest neighbor estimation method, and a few common evaluation and prediction methods like percentile method and regression method, indicated respectively the advantages and shortages of models and calculation methods of parameters, and discussed present problems and following emphases in studies. This paper, in the view of practical application, aimed to provide a study platform for following studies.

**Key words:** diameter structure; modeling and prediction; methods