

天然红松阔叶林径级结构模拟

张连金¹, 惠刚盈², 孙长忠^{1*}

(1. 中国林业科学研究院 华北林业实验中心, 北京 102300;
2. 中国林业科学研究院 林业研究所, 国家林业局 林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘 要:以天然红松阔叶林为研究对象, 设置了 4 块 1 hm² 样地, 利用负指数模型、修正指数模型、限定混合 Weibull 分布模型及 q 值法进行径级结构模拟。结果表明, 4 块不同类型样地的径级分布均呈反“J”形, 森林更新良好; 指数模型整体上低估了林木株数, 限定混合 Weibull 分布模型则高估了林木株数, 而修正指数模型整个径阶范围内与实际情况较为接近, 模拟效果最好, 表明修正指数模型更适合天然红松阔叶林径级结构的模拟; 4 块不同林分的 q 值为 1.19~1.33, 说明 q 值法对于天然红松阔叶林的直径分布的表达效果较好。

关键词:天然红松阔叶林; 径级结构; 指数模型; 混合模型; Weibull 分布; q 值法则

中图分类号:S791.247 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2014)06-0157-07

Modeling Diameter Distribution of Natural Broadleaved-Korean Pine Mixed Forest

ZHANG Lian-jin¹, HUI Gang-ying², SUN Chang-zhong^{1*}

(1. Forestry Experiment Center of North China, CAF, Beijing 102300, China; 2. Research Institute of Forestry, CAF, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: Four 1 hm² plots were set up in a natural broadleaved-korean pine mixed forest, and the negative exponential model, modified exponential model, finite mixture Weibull distribution model and constant ratio q were used to model the diameter distribution. Results showed that in the 4 plots of different forest types, the diameter distribution of the trees all exhibited inverse J-shape, which meant that understory regeneration was relatively good. The overall number of trees were underestimated and overestimated by negative exponential model and finite mixture Weibull distribution model, respectively. The modified exponential model was more suitable for modeling the diameter distribution of natural broadleaved-korean pine mixed forest because it could predict the number of trees more exactly in the entire range of diameter classes. The diameter q value of the 4 plots of different forest types were between 1.19 and 1.33, which meant that it was better for expressing the diameter distribution of natural broadleaved-korean pine mixed forest.

Key words: natural broadleaved-korean pine mixed forest; diameter distribution; exponential model; a finite mixture model; Weibull distribution; constant ratio q

直径分布是描述林分结构最重要的因素之一^[1]。林木直径分布在森林调查、生长与收获模型和森林经营管理中发挥着重要的作用。从 de Liocourt 用几何级数来模拟异龄林直径分布开始, 林木

直径分布模型的研究已经有 100 多 a 的历史。其研究经历了从静态拟合到动态预测的过程, 前者主要是利用不同的理论函数来模拟直径分布, 如 de Liocourt 模型的指数形式^[2-4], Pearson 分布^[5], Pearl-

收稿日期: 2014-03-02 修回日期: 2014-05-14
基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题(2012BAD22B0304)。
作者简介: 张连金, 女, 博士, 工程师, 研究方向: 森林经营模拟。E-mail: zlianjin1102@126.com
* 通信作者: 孙长忠, 男, 研究员, 研究方向: 森林培育、森林生态。E-mail: sun61@163.com

Reed 生长曲线^[6], gamma 分布^[7], 对数正态分布^[8], beta 分布^[9-10], Weibull 分布^[11], logit-logistic 分布^[12], SB Johnson 分布^[13], 双正态分布^[14], Birnbaum-Saunders 分布^[15]及混合分布^[16-20]等。同时也有用不依赖于特定分布函数来描述林分直径分布的其它方法,如百分位法^[21]和非参数统计方法,如核密度估计法^[22]和 K 近邻回归法^[23-24]。后者主要是指利用参数预测、参数回收等技术建立林分直径结构动态预测模型,描述直径分布的动态变化规律。以往研究表明,不同的森林类型其直径分布规律差异较大,需要采用不同的分布函数或参数建立不同的模型^[25-26]。

红松(*Pinus koraiensis*)阔叶林是我国东北东部山区的地带性森林植被,也是第四纪冰川期后保存完好的原始裸子植物群落^[27],在温带针阔混交林中占有重要的地位。与全球同纬度地区的森林相比,以其建群种独特、物种多样性丰富及含有较多的亚热带成分而著称^[28]。目前,国内学者对东北红松阔叶林的径级结构开展了一些研究工作。描述性研究表明,东北阔叶红松林的径级分布遵循异龄林典型的反“J”形^[29-30],其主要树种径级呈现单峰、双峰、多峰、正态、反“J”形及“L”形等特征^[27-28,31-32]。模拟研究较少,其中动态模拟研究主要是采用转移矩阵模型^[33-34]和非参数核密度^[35]进行估计,静态模拟研究认为其径级分布呈现多种特征。如王顺忠^[36]等用指数分布、Weibull 分布和混合分布等 7 个方程模拟长白山阔叶红松林径级分布,其径级分布不是理想的反“J”形,而是 Goff 和 Weas 定义的“rotated-sigmoid”^[37]。谢小魁^[38]等利用 Weibull 分布函数、负指数函数以及 q 值理论对长白山原始阔叶红松林径级结构进行研究表明,林分径级分布呈反“J”形。

本研究以天然阔叶红松林为研究对象,设置了

4 块 1 hm² 样地,利用负指数模型、修正指数模型、限定混合 Weibull 分布模型及 q 值法进行其径级结构研究,以期为阔叶红松林的优化经营及次生林的恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验林分位于中国吉林省张广才岭支脉低海拔自然保护区(127°35′—127°51′E,43°51′—44°05′N)内,相对海拔 800 m 以下。气候类型属温带大陆性季风山地气候,春季雨少、干燥、多大风,夏季温热多雨,秋季凉爽多晴天、温差大,冬季漫长而寒冷;年均气温 3.5℃,最低气温-22.2℃,年均降水量 700~800 mm,多集中在 6—8 月,相对湿度 75%,总蒸发量 1 000 mm 以上,无霜期 120~150 d,平均积雪厚度 20~60 cm,土壤冻结深度为 1.5~2.0 m;土壤为潜育化暗棕壤。林分为天然红松针阔混交林,属长白山植物区系,主要有红松、杉松(*Abies holophylla*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)和鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma*)等 20 多个树种^[39]。

试验区域内共建立了 4 块各为 100 m×100 m 的固定标准地。这些固定标准地均是利用全站仪(TOPCON-GTS-602AF)对胸径>5 cm 的每株树木进行定位,并进行全林每木测径、树种挂牌。同时,调查记载林分郁闭度、坡度、坡向、平均树高、幼苗更新、枯立木等状况(表 1)。标准地编号依次为 A、B、C、D。它们各自代表研究区内不同类型林分,其中,样地 A 代表椴树红松针阔混交林,样地 B 代表水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)红松针阔混交林,样地 C 代表核桃楸(*Juglans mandshurica*)红松针阔混交林、样地 D 代表水核(水曲柳与核桃楸断面积相等)红松针阔混交林。

表 1 各样地林分基本特征

Table 1 Basic characteristics of each plot

样地	坡向	坡度/(°)	平均海拔/m	郁闭度	密度/(株·hm ⁻²)	平均树高/m	平均胸径/cm	树种数量
A	西北坡	17	600	0.85	1 186	12.87	14.67	20
B	西北坡	9	600	0.90	830	13.60	17.62	22
C	西北坡	9	600	0.80	824	13.87	16.43	19
D	西北坡	9	600	0.90	970	13.86	16.26	19

1.2 研究方法

1.2.1 模型简介 在众多天然异龄林林分直径结构研究中,负指数模型、修正指数模型、限定混合分布模型及 q 值法应用较多。本研究选择以上模型来模拟东北天然红松阔叶林的直径分布。具体模型如下:

1)负指数模型

负指数函数是模拟径级分布的经典模型^[3,39-40],表达式如下:

$$f(x,\theta)=\alpha e^{-\beta x} \tag{1}$$

式中, $\theta=(\alpha,\beta)'$ 。

2)修正指数模型

$$f(x,\theta)=e^{(\frac{\alpha x^3}{3}+\frac{\beta x^2}{2}+\gamma x+\eta)} \tag{2}$$

式中, $\theta=(\alpha,\beta,\gamma,\eta)'$ 。

3)2 组分混合分布模型

$$f(x,\varphi)=pf_1(x,\theta_1)+(1-p)f_2(x,\theta_2) \quad (3)$$

式中, $0\leq p\leq 1$, $f_i(x)$ 为某一分布的概率密度函数, 由于 Weibull 分布函数具有较大的灵活性与较强的实用性, 且参数具有较强的生物学意义而得到广泛应用, 因此这里限定 $f_i(x)$ 为三参数 Weibull, 则 $\varphi=(\rho,\alpha_1,\beta_1,\gamma_1,\alpha_2,\beta_2,\gamma_2)$ 。

方程(3)为概率密度函数, 株数估计值 $N_i=N*(F(X_i+\omega)-F(X_i-\omega))$, 其中 N 为总株数, $F(X)$ 为累计概率函数, X_i 为第径阶中值, ω 为组距除以 2。

4)q 值法

H. A. Meyer^[3]发现, 在未受到干扰的天然异龄林中, 连续 2 个径级间林木株数的比例趋向于一个常数 q 。 q 的系列和均值可以表达林分的径级株数分布状况, 在美国, 广泛地用保留径级分布符合常数 q 值来指导异龄林经营活动。 q 值越小, 径级分布曲线越平缓, 小径阶林木数量多; 反之, 曲线越陡峭, 大径阶林木数量多。 根据负指数模型, q 值计算式如下:

$$q=\frac{N_{j-1}}{N_j}=\frac{\alpha e^{-\beta x_{j-1}}}{\alpha e^{-\beta x_j}}=e^{\beta h} \quad (4)$$

式中, N_{j-1} 、 N_j 分别为某时刻第 $j-1$ 、 j 径阶的立木株数; x_{i-1} 、 x_i 分别为第 $j-1$ 、 j 径阶的径阶中值; h 为径级距; q 为常数。

1.2.2 模型参数求解与检验 应用 R 软件进行模型参数的拟合。 其中方程(1)和(2)用径级频数数据, 运用 R 软件(3.0.2 版)中 Rsolnp 软件包, 根据最小二乘法进行估算; 方程(3)中的 α 为初始位置(起测胸径), 即为 5 cm, 令 $X=x-\alpha$, 方程(3)中其

他的参数利用实测数据, 运用 R 软件(3.0.2 版)中 mixdist 软件包, 根据最大似然估计法并结合 Newton-type 算法和 EM 算法进行估算。

用图形与统计量——决定系数(R^2)、平均误差(Bias)及均方根误差(RMSE)对模型进行评价与检验。

$$R^2=1-\frac{\sum_{j=1}^m(N_j-\hat{N}_j)^2}{\sum_{j=1}^m(N_j-\bar{N})^2} \quad (5)$$

$$Bias=\frac{\sum_{j=1}^m(N_j-\hat{N}_j)}{m} \quad (6)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m(N_j-\hat{N}_j)^2}{m-k}} \quad (7)$$

式中, m 为径阶数; k 为模型参数个数; N_j 为第 j 径阶实测株数; \hat{N}_j 为第 j 径阶预估株数; \bar{N} 为观测株数的平均值。

2 结果与分析

2.1 红松阔叶林径级结构特征

径级株数密度分布是植物群落稳定性和生长发育现状的重要指标。 红松阔叶林各样地径级与株数密度分布(图 1)可以看出, 各样地径级结构相对简单, 基本规律都是小径级林木株数比较多, 随着径阶的增大, 各径阶的林木株数逐渐减少, 达到一定径阶后, 递减速度减缓至平稳, 符合异龄林的一般分布规律。 各样地中小径阶林木(6~24 cm)株数在林分所占比重最多, 基本累计百分比都在 75% 以上。 B 样地最低为 77%, A 样地最高达到 86%; 特大径阶林木(≥ 38 cm)仅占总株数的 7% 左右, 这种反“J”型的径级结构表明森林的天然更新良好^[41]。

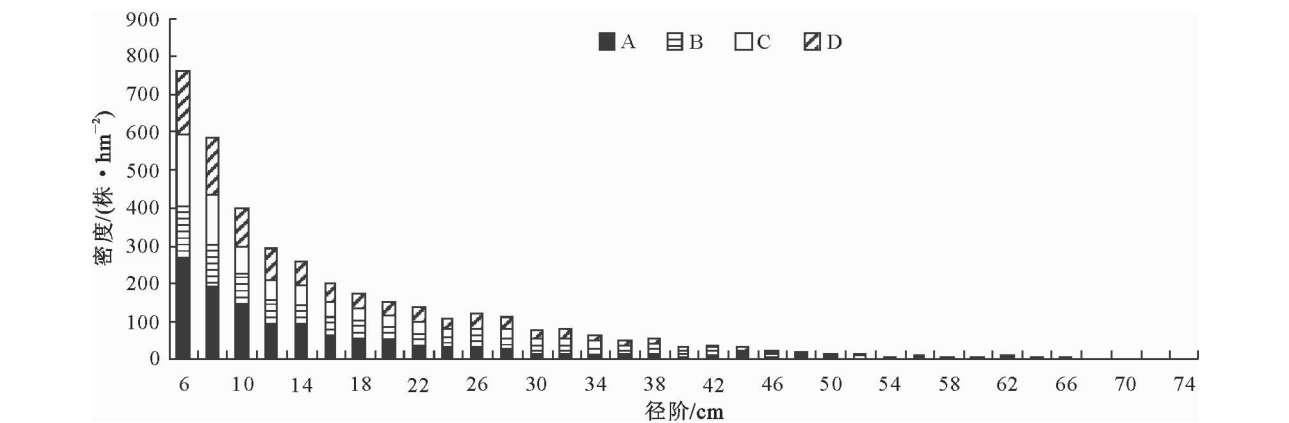


图 1 天然红松阔叶林各径阶与株数密度分布

Fig. 1 Stem number-diameter distribution of natural broadleaved-korean pine mixed forests

由红松阔叶林样地直径分布的特征数(表 2)可知, 4 块样地的最大胸径分别为 80.2、73.2、85.0、79.2 cm, 平均胸径分别为 14.67、17.62、16.43 cm 和 16.26 cm。 各样地的偏度系数均 >1 , 说明直径分布概率曲线均为左偏, 且左偏较为突出。 其中 D 样地左偏度幅度最小, A 样地左偏幅度最大。 各样

地的峰度系数都>0,说明径阶分布曲线为高峰,径阶分布离散程度小而集中。其中样地 C 的峰度系数最大,为 4. 20,说明核桃楸红松混交林分布曲线最陡峭;而样地 B 的峰度系数最小,为 2. 17,说明水曲柳红松混交林分布曲线相对平缓。

表 2 各样地直径分布特征数

Table 2 Descriptive statistics of tree DBH for each plot						
样地	最大值 /cm	平均值 /cm	标准差	变异系数 /%	偏度	峰度
A	80. 2	14. 67	10. 64	72. 49	1. 87	3. 96
B	73. 2	17. 62	12. 13	68. 84	1. 40	2. 17
C	85. 0	16. 43	12. 73	77. 47	1. 82	4. 20
D	79. 2	16. 26	10. 96	67. 41	1. 39	2. 34

2.2 直径分布拟合与检验

从表 3 可知,方程(1)中,各样地的 β 值均<1,其中,样地 C 的 β 值最大,样地 B 的 β 值最小,说明

表 3 直径分布模型参数估计值

Table 3 Parameter estimates of diameter distribution models for each plot														
样地	方程(1)		方程(2)				方程(3)							q
	α	β	α	β	γ	η	ρ	α_1	β_1	γ_1	α_2	β_2	γ_2	
A	547.735	0.129	-0.000 20	0.011	-0.236	6.812	0.400	5	2.194	0.612	5	12.972	1.086	1.30
B	210.839	0.086	-0.000 15	0.009	-0.190	5.917	0.426	5	2.903	0.671	5	19.476	1.496	1.19
C	399.381	0.141	-0.000 19	0.013	-0.274	6.657	0.568	5	2.906	0.656	5	21.254	1.500	1.33
D	295.445	0.098	-0.000 19	0.011	-0.214	6.281	0.680	5	4.993	0.770	5	23.007	2.183	1.22

从表 4 可以看出,无论是从决定系数、平均误差绝对值,还是均方根误差来看,方程(2)的拟合效果最好,方程(1)次之,方程(3)最差。其中,方程(2)的

表 4 直径分布模型拟合统计量

Table 4 Fitting statistics of diameter distribution models for each plot									
样地	方程(1)			方程(2)			方程(3)		
	R^2	Bias	RMSE	R^2	Bias	RMSE	R^2	Bias	RMSE
A	0. 988	2. 66	7. 05	0. 995	0. 88	4. 85	0. 969	3. 41	12. 09
B	0. 961	1. 12	6. 76	0. 987	-0. 16	4. 10	0. 709	-9. 07	19. 79
C	0. 947	3. 62	9. 11	0. 985	-0. 28	4. 97	0. 784	-7. 38	19. 58
D	0. 964	1. 65	8. 47	0. 983	-0. 70	6. 11	0. 792	-5. 66	21. 88

为了更好地反映模拟结果,分别作不同模型直径分布的观测值和预估值图(图 2)。可以看出,方程(1)总体上低估了林木株数,在中小径阶上拟合结果都比较接近,但对大径阶的估计效果较差,几乎接近 0,这与东北天然阔叶红松林中存在少量的大径阶林木的实际情况不符。而这些大径阶林木具有非常重要作用。方程(3)总体上高估了林木株数。虽然对小径阶模拟的误差较大,但能较好地预测大径阶林木株数。方程(2)拟合的结果与实际值在总体上较为接近,且能很好地模拟中小径阶林木,大径阶林木的模拟效果相对要差,整个径阶范围表现为一条平滑的曲线,与实际情况相符。因此,方程(2)可作为东北天然红松阔叶林林分直径分布模拟函数。

样地 C 的林木株数随径阶增加而下降的速度最快,样地 B 下降的速度最小。方程(2)中,各样地的 α 值、 β 值(保留 1 位有效数字)几乎相等,差异主要体现在参数 γ 与 η ,而 η 是常数项与径阶无关,说明各样地直径分布曲线的变化趋势相同,只是下降的速度有所差异。参数 γ 的绝对值与方程(1)中的参数 β 值在各样地中表现一致,即样地 C 最大,样地 B 最小,这符合林木株数随径阶增加而下降的速度样地 C 最快,样地 B 最小的事实。方程(3)中,各样地的尺度参数 β 值均>1,且尺度参数逐渐增大($\beta_2 > \beta_1$),说明后者覆盖的径阶范围比前者宽。各样地的形状参数 γ_1 都<1,而 γ_2 均>1,说明混合方程是由反“J”形和单峰左偏山状的 Weibull 方程按不同比例混合而来的。

决定系数超过 0. 98、平均误差绝对值<1. 0 cm、均方根误差不超过 6. 2。

2.3 林分 q 值

研究区不同森林类型红松阔叶林的 q 值为 1. 19~1. 33,表明这些样地的中小径级数量比较多,其中样地 C 的中小径级数量最多,样地 B 的最小。多数研究认为, q 值一般在 1. 2~1. 7 之间^[42]。本研究的 q 值在此范围内,属于正常情况。谢小魁^[38]等研究长白山原始阔叶红松林的 q 值为 1. 45 和 1. 74,因该研究径阶距为 4 cm,由于在数据相同情况下, q 随着径阶距的减小而减小,所以本研究的 q 值与其接近(表 3)。因此, q 值法对于阔叶红松林径阶株数密度的表达效果较好,能保持较好的异龄混交林径级分布状态,可用于描述红松阔叶林的径级分布和指导红松阔叶林的森林经营。

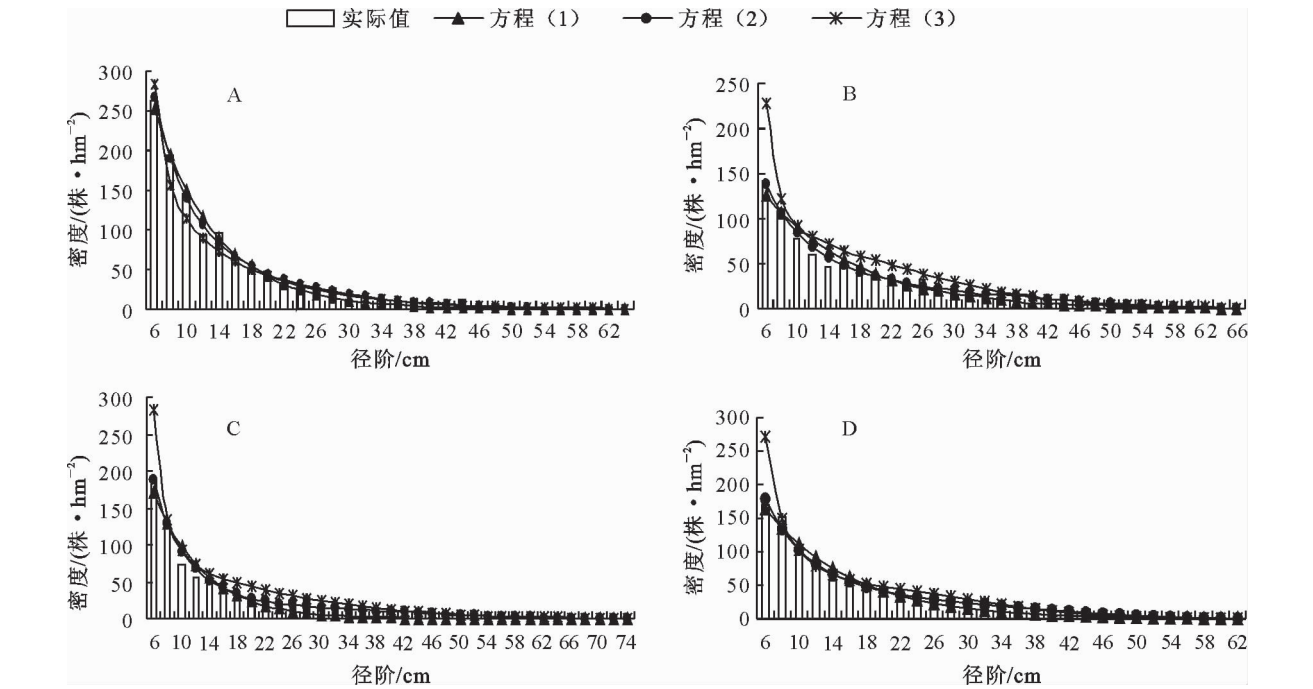


图 2 各样地不同模型直径分布的观测值与估计值

Fig. 2 Observed and predicted diameter distribution of different models for each plot

3 结论与讨论

红松阔叶林是我国东北东部地区的地带性植被,其直径分布多样。本研究中,4 种类型的天然红松阔叶林的径级结构均遵循异龄林典型的反“J”形,即小径级林木株数比较多,随着径阶的增大,各径阶的林木株数逐渐减少,达到一定径阶后,递减速度减缓至平稳,这与异龄混交林的规律相一致,能够维持天然更新,且大径阶株数有一定保证,表明该生态系统具有一定的稳定性。该研究与谢小魁^[38]等的研究结果相一致,也有研究认为其径级分布为 F. G. Goff^[37]定义的“rotated-sigmoid”。

各分布模型的拟合结果表明,无论是从统计量(决定系数、平均误差及均方根误差),还是从径级分布实际值与预估值图形来看,修正指数分布模型在整个径阶范围内与实际情况较为接近,模拟效果最好,能较好地模拟天然红松阔叶混交林的直径分布,能为阔叶红松林的优化经营及次生林的恢复提供科学依据。

q 值长期以来被用于描述异龄林林分的理想直径分布。多数研究表明, q 值一般在 1.2~1.7 之间^[42]。本研究 4 种类型的天然红松阔叶林的 q 值为 1.19~1.33,在该范围内。说明 q 值法对于天然红松阔叶林的直径分布的表达效果较好,可以用来指导天然红松阔叶林的经营。

径级分布是最基本的林分结构,天然异龄林的直径分布因受林分自身的立地条件、树种组成、演替及

更新过程等因素的影响而呈现多样性和复杂性。适合某一区域或某一森林类型的直径分布最优模型对于另一区域或另一森林类型并不一定最优,有时反而会表现出较大的劣势。因此,在模型选择时,应根据所研究林分的实际情况和研究目的选择不同的模型。

准确模拟林分的直径分布结构,是很重要的一项基础工作。但最重要的是,如何对直径分布的变化进行动态预估,采用简单易测的林分因子来预测直径分布模型的参数变化,这有待于作更进一步的研究。

参考文献:

[1] JANG W, PARK P S. Stand structure and maintenance of *Pinus jezoensis* in a northern temperate forest, South Korea[J]. Journal of Plant Biology, 2010, 53(3):180-189.

[2] MEYER H A, STEVENSON D D. The structure and growth of virgin beech-birch-maple-hemlock forests in northern Pennsylvania[J]. Journal of Agricultural Research, 1943, 67: 465-484.

[3] MEYER H A. Structure, growth, and drain in balanced uneven-aged forests[J]. Journal of Forestry, 1952, 50: 85-92.

[4] LEAK W B. An expression of diameter distribution for unbalanced, uneven-aged stands and forests[J]. Forest Science, 1964, 10(1): 39-50.

[5] SCHNUR G L. Diameter distributions for old-field loblolly pine stands in Maryland[J]. Journal of Agricultural Research, 1934, 49(8): 731-743.

[6] OSBORNE J G, SCHUMACHER F X. The construction of normal-yield and stand tables for even-aged timber stands[J]. Journal of Agricultural Research, 1935, 51: 547-564.

[7] NELSON T C. Diameter distribution and growth of loblolly

pine[J]. Forest Science, 1964, 10(1): 105-115.

[8] BLISS C I, REINKER K A. A log-normal approach to diameter distributions in even-aged stands [J]. Forest Science, 1964, 10(3): 350-360.

[9] CLUTTER J L, BENNETT F A. Diameter distributions in old-field slash pine plantations[R]. Georgia Forest Research Council Report, 1965, 13:1-9.

[10] LENHARD J D, CLUTTER J L. Cubic-foot yield tables for old-field loblolly pine plantations in the Georgia Piedmont [R]. Georgia Forest Research Council Report, 1971, 22: 1-13.

[11] BAILEY R L, DELL T R. Qualifying diameter distributions with the Weibull function[J]. Forest Science, 1973,19(2): 97-104.

[12] WANG M L, RENNOLS K. Tree diameter modelling: introducing the logit-logistic distribution[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35: 1305-1313.

[13] SIEKIERSKI K. Comparison and evaluation of three methods of estimation of the Johnson SB distribution[J]. Biometrical Journal, 1992, 34(7): 879-895.

[14] ZASADA M. Evaluation of the double normal distribution for tree diameter distribution modeling[J]. Silva Fennica, 2013, 47(2): 956-972.

[15] PODLASKI R. Characterization of diameter distribution data in near-natural forests using the Birnbaum - Saunders distribution[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2008, 38 (3): 518-527.

[16] ZHANG L J, GOVE J H, LIU C M, *et al.* A finite mixture of two Weibull distributions for modeling the diameter distributions of rotated-sigmoid, uneven-aged stands[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31: 1654-1659.

[17] LIU C M, ZHANG L J, DAVIS C J, *et al.* A finite mixture model for characterizing the diameter distribution on mixed-species forest stands[J]. Forest Science, 2002, 48: 653-661.

[18] ZASADA M, CIESZEWSKI C J. A finite mixture distribution approach for characterizing tree diameter distributions by natural social class in pure even-aged Scots pine stands in Poland[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 204: 145-158.

[19] PODLASKI R. Two-component mixture models for diameter distributions in mixed-species, two-age cohort stands [J]. Forest Science, 2010, 56(4): 379-390.

[20] JAWORSKI A, PODLASKI R. Modelling irregular and multimodal tree diameter distributions by finite mixture models: an approach to stand structure characterisation[J]. Journal of Forestry Research, 2012,17: 79-88.

[21] BAREBR, OPALACH D. Optimizing species composition in uneven-aged forest stands[J]. Forest Science, 1987, 33(4): 958-970.

[22] DROESSLER, T D, BURK T E. A test of nonparametric smoothing of diameter distributions[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 1989, 4: 407-415.

[23] HAARA A, MALTAMO M, TOKOLA T. The k-nearest-neighbor method for estimating basal area diameter distribution[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 1997, 12: 200-208.

[24] MALTAMO M, KANGAS A. Methods based on k-nearest neighbor regression in estimation of basal area diameter distribution[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28:1107-1115.

[25] 张雄清,雷源才. 北京山区天然栎林直径分布的研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(6): 1-5.

ZHANG X Q, LEI Y C. Studies on diameter distribution of Oak plants in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(6): 1-5. (in Chinese)

[26] 龚直文,亢新刚,杨华,等. 长白山杨桦次生林直径结构研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(3): 1-6.

GONG Z W, KANG X G, YANG H, *et al.* Diameter structure of polar-brich secondary forests in Changbai Mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24 (3): 1-6. (in Chinese)

[27] 孙伟中,代力民,章一平. 椴树阔叶红松林群落主要树种径级结构研究[J]. 生态学杂志,1997,16(1): 19-22.

SUN W Z, DAI L M, ZHANG Y P. Study of diameter breast-high structure of the main trees in *Tilia* broadleaved Korean pine forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 1997, 16 (1): 19-22. (in Chinese)

[28] 郝占庆,李步杭,张健,等. 长白山阔叶红松林样地(CBS):群落组成与结构[J]. 植物生态学报,2008,32(2): 238-250.

HAO Z Q, LI B H, ZHANG J, *et al.* Broad-leaved Korean pine mixed forest plot in Changbaishang (CBS) of China: community composition and structure[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(2): 238-250. (in Chinese)

[29] 徐海,惠刚盈,胡艳波,等. 天然红松阔叶林不同径阶林木的空间分布特征分析[J]. 林业科学研究,2006,19(6): 687-691.

XU H, HUI G Y, HU Y B, *et al.* Analysis of spatial distribution characteristics of trees with different diameter classes in natural Korean pine broad leaved forest[J]. Forest Research, 2006, 19(6): 687-691. (in Chinese)

[30] 张健,郝占庆,宋波,等. 长白山阔叶红松林中红松与紫椴的空间分布格局及其关联性[J]. 应用生态学报,2007,18(8): 1681-1687.

ZHANG J, HAO Z Q, SONG B, *et al.* Spatial distribution patterns and associations of *Pinus koraiensis* and *Tilia amurensis* in broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18 (8): 1681-1687. (in Chinese)

[31] 王蕾,张春雨,赵秀海. 长白山阔叶红松林的空间分布格局[J]. 林业科学,2009,45(5): 54-59.

WANG L, ZHANG C Y, ZHAO X H. Spatial pattern of Korean pine broadleaved forests in Changbai Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(5): 54-59. (in Chinese)

[32] 徐丽娜,金光泽. 小兴安岭凉水典型阔叶红松林动态监测样地:物种组成与群落结构[J]. 生物多样性,2012,20(4): 470-481.

XU L N, JING Z. Species composition and community structure of a typical mixed broad-leaved korean pine (*Pinus koraiensis*) forest plot in Liangshui Nature Reserve, northeast China[J]. Biodiversity Science, 2012, 20(4): 470-481. (in

Chinese)

[33] 王飞,代力民,邵国凡,等. 非线性状态方程模拟异龄林径阶动态—以长白山阔叶红松林为例[J]. 生态学杂志,2004,23(5): 101-105.

WANG F, DAI L M, SHAO G F, et al. Dynamic variation of diameter grade using non-liner programme—a case study on broadleaved and Korean pine mixed forest in Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 101-105. (in Chinese)

[34] 谢小魁,刘正纲,苏东凯,等. 长白山阔叶红松林径级结构动态模拟和优化经营[J]. 生态学杂志,2011,30(2): 384-388.

XIE X K, LIU Z G, SU D K, et al. Dynamic diameter distribution simulation and optimal management of broad-leaved korean pine mixed forest in Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(2): 384-388. (in Chinese)

[35] 郭芳,赵新振,殷鸣放,等. 非参数核密度估计在阔叶红松天然林直径分布研究中的应用[J]. 河南农业大学学报,2008,42(3): 303-306.

GUO F, ZHAO X Z, YIN M F, et al. Application of non-parametric kernel density estimation to research into diameter distribution of broadleaved *Pinus koraiensis* natural stand[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2008, 42(3): 303-306. (in Chinese)

[36] 王顺忠,王飞,张恒明,等. 长白山阔叶红松林径级模拟研究—林分模拟[J]. 北京林业大学学报,2006,28(5): 22-27.

WANG S Z, WANG F, ZHANG H M, et al. Modeling the diameter distribution of forest stands of broadleaved Korean pine mixed forests on the Changbaishan Mountain: forest stand modeling[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(5): 22-27. (in Chinese)

[37] GOFF F G, WEAS D. Canopy - understory interaction effects on forest population structure[J]. Forest Science, 1975, 21(2): 98-108.

[38] 谢小魁,苏东凯,刘正刚,等. 长白山原始阔叶红松林径级结构模拟[J]. 生态学杂志,2010,29(8): 1477-1481.

XIE X K, SU D K, LIU Z G, et al. Modeling diameter distribution of primary broadleaf Korean pine mixed forest in Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(8): 1477-1481. (in Chinese)

[39] LEAK W B. The J-shaped probability distribution[J]. Forest Science, 1965, 11(4): 405-409.

[40] 张青,赵俊卉,亢新刚,等. 基于长期历史数据的直径结构预测模型[J]. 林业科学,2010,46(9): 182-185.

ZHANG Q, ZHAO J H, KANG X G, et al. The prediction model of diameter distribution based on long-term investigation data[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(9): 182-185. (in Chinese)

[41] 兰国玉,胡跃华,曹敏,等. 西双版纳热带森林动态监测样地—树种组成与空间分布分局[J]. 植物生态学报,2008,32(2): 287-298.

LAN G Y, HU Y H, CAO M, et al. Establishment of Xishuangbanna tropical forest dynamics plot: species compositions and spatial distribution patterns [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2008, 32(2): 287-298. (in Chinese)

[42] HAO Q Y, ZHOU Y P, WANG L H, et al. Optimization models of stand structure and selective cutting cycle for large diameter trees of broadleaved forest in Changbai Mountain [J]. Journal of Forestry Research,2006,17(2): 135-140.

(上接第 148 页)

[8] DANSON F M, HETHERINGTON D, MORSDORF F, et al. Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning [J]. IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters, 2007(4):157-160.

[9] PFEIFER N, GORTE B, WINTERHALDER D. Automatic reconstruction of single trees from terrestriall asers canner data[J]. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004,35:114-119.

[10] CHENG Z L, ZHANG X P, CHEN B Q. Simple reconstruction of tree branches from a single range image[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2007,22(6):846-858.

[11] 王建利,刘晋浩,王典,等. 基于差分计算的林木测量二维点云数据滤波[J]. 西北林学院学报,2012, 27(3):193-196

WANG J L, LIU J H, WANG D, et al. Data filtering of two-dimensional point cloud in forest measurement based on difference calculation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(3):193-196. (in Chinese)

[12] 刘春,吴航彬. 基于真三维 TIN 的三维激光扫描数据压缩方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2006,31(10):908-911

[13] 刘立民. 刘明. 绿量—城市绿化评估的新概念[J]. 中国园林, 2000,16(5):32-34.

[14] 周坚华. 城市生存环境绿色量值群的研究(5):绿化三维量及其应用研究[J]. 中国园林,1998,14(5): 61-63.

[15] 陈芳,周志翔,王鹏程,等. 武汉钢铁公司厂区绿地绿量的定量研究[J]. 应用生态学报,2006, 17(4):592-596.

CHENG F, ZHOU Z X, WANG P C, et al. Green space vegetation quantity in workshop area of Wuhan Iron and Steed Company[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2006, 17(4):592-596. (in Chinese)

[16] 周坚华. 城市绿量测算模式及信息系统[J]. 地理学报,2001, 56(1):14-23.

ZHOU J H, Theory and practice on database of three-dimensional vegetation quantity [J]. Acta Geographica Sinica, 2001,56(1):14-23. (in Chinese)

[17] 刘常富,商瑜,赵桂玲. 基于类型与影响因子的城市森林三维绿量量化差异分析[J]. 西北林学院学报,2013,28(4):55-60.

LIU C F, SHANG Y, ZHAO G L. Quantitative difference a-nalysis of three-dimensional green biomass of urban forest based on the types and influencing factors [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013,28(4):55-60. (in Chinese)

[18] 马立广. 地面三维激光扫描仪的分类与应用[J]. 地理空间信息,2005,3(3):60-62.

MA L G. Classification and application of terrestrial laser scanners[J]. Geospatial Information, 2005,3(3):60-62. (in Chinese)