

长白山杨桦次生林直径结构研究

龚直文, 亢新刚*, 杨 华, 顾 丽, 赵浩彦

(北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 林学院, 北京 100083)

摘 要:以长白山金沟岭林场杨桦次生林为研究对象, 分析了杨桦次生林直径分布特征, 通过 Weibull 分布函数和负指数分布函数 2 种直径分布模型的模拟和检验, 表明两者都适宜于异龄次生林的直径分布模拟; 计算了次生异龄林中连续 2 个径阶中的株数之比(常数 q 值), 分布范围为 1.26~1.49。

关键词:林分结构; 直径分布; q 值法则; Weibull 分布; 负指数分布; 杨桦林; 次生林

中图分类号:S711

文献标识码:A

文章编号:1001-7461(2009)03-0001-06

Diameter Structure of Polar-Birch Secondary Forests in Changbai Mountain

GONG Zhi-wen, KANG Xin-gang, YANG Hua, GU Li, ZHAO Hao-yan

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, College of Forestry,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Permanent plots in the polar-birch secondary forests in Changbai Mountain, northeastern China, were established, and Weibull function and Negative exponential diameter distribution function, based on observation data of these plots, were developed to model diameter frequency distributions. Results showed that Weibull function and negative exponential function were suitable models for modeling uneven-aged secondary forests. And the study calculates the diameter q value, which was between 1.26~1.49.

Key words: forest structure; diameter distribution; constant ratio q ; Weibull function; negative exponential function; polar-birch forest; secondary forest

次生林是由于人为破坏或异常自然干扰, 使原始林的林分结构、建群物种组成或基本功能发生了显著变化, 经过天然更新或人工诱导天然更新恢复形成的林分^[1]。它既保持着原始森林的物种成分与生境, 又与原始森林在结构组成、林木生长、生产力、林分环境和生态功能等诸多方面有着显著的不同。次生林可以理解为是原始森林生态系统的一种退化^[2], 具体表现为生态系统的基本结构和固有功能的破坏或丧失, 生物多样性下降, 稳定性和抗逆能力减弱, 系统生产力降低等^[3]。在中国, 次生林面积已占全国森林面积的近一半^[4], 成为中国森林资源的主体。因此, 开展次生林结构、功能与改造调整研究具有重要意义。

杨桦林是以山杨(*Populus davidiana*)、白桦

(*Betula platyphylla*)及硕桦(*B. costata*)为优势树种的林分^[5]。在小兴安岭林区, 杨桦林是在阔叶红松林被破坏后(火烧、皆伐、撂荒等)的次生裸地上首先发生的先锋群落。杨桦次生林是阔叶红松林的自然恢复演替规律的重要过渡阶段之一。目前, 国内针对杨桦次生林的研究主要集中于采伐林隙幼苗更新动态^[6]、次生杨桦混交林的土壤呼吸作用^[7]、白桦山杨混交林凋落物的分解率实验^[8]、杨桦林下生境条件有利于红松的更新生长研究^[5]、杨桦林经营密度效应研究^[9]以及利用改进的 ZELIG、CBA 模型模拟杨桦林的动态变化过程, 预测山杨、白桦退出林分时间的早晚^[10]。这些研究有助于了解杨桦次生林的群落结构、林下更新演替及与周围环境的关系。但迄今为止, 对于杨桦次生林林分直径结构的研究

收稿日期: 2008-10-31 修回日期: 2008-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(30671667); 国家“十一五”科技支撑课题(2006BAD03A08)

作者简介: 龚直文, 男, 博士研究生, 从事天然林可持续经营和森林植被恢复研究。

* 通讯作者: 亢新刚, 男, 教授, 博士生导师, 从事森林可持续经营研究。E-mail: xingangk@163.com。

较少。林分直径分布是林分结构的主要特征,同时林分的直径分布模型与森林群落的生产结构及机能特性有着密切关系^[11]。杨桦次生林为次生异龄林,群落结构复杂,深入了解杨桦次生林的直径结构,对于揭示其功能及内在机制具有重要意义。对长白山杨桦次生林进行调查研究,利用 Weibull 分布函数和负指数分布函数分析其直径结构规律,并试图用 q 值理论,即连续 2 个径阶中的株数之比(常数 q 值),指导杨桦次生林分采伐经营和结构调整,从而加快杨桦次生林恢复为地带性顶级群落的进程,为次生林经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地自然概况

试验研究区设在吉林省汪清县金沟岭林场,属长白山系老爷岭山脉雪岭支脉,面积 16 286 hm^2 。林场地貌为低山丘陵,海拔 300~1 200 m,坡度 5~25°,个别陡坡在 35°以上。本区属季风气候,全年平均气温为 3.9℃,≥10℃活动积温 2 144.0℃;1 月平均气温-32.0℃左右,7 月平均气温 22.0℃左右;年降水量 600~700 mm,且多集中在 7 月份;早霜始于 9 月中旬,晚霜延至翌年 5 月末,生长期约 120 d;积雪平均厚 50 cm。海拔 800~1 000 m 为针叶林灰棕壤土,沟谷是草甸土、泥炭土、沼泽土或冲积土,平均厚度 40 cm 左右。主要树种有白桦、山杨、色木槭(*Acer mono*)、硕桦、椴木(*Tiliamandshurica*)、胡桃

楸(*Juglans mandshurica*)、水曲柳(*Frazinus mandshurica*)、山槐(*Maackia amurensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)等,主要下木有金银忍冬(*Lonicera maackii*)、暴马丁香(*Syringa reticulata*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、榛子(*Corylus heterophylla*)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma*)、红皮云杉(*P. koraiensis*)和臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、红松(*Pinus koraiensis*)等。主要地被物为香附子(*Cyperus rotundus*)及禾本科草类。

1.2 方法

1.2.1 样地调查 分别选择 20 世纪 40~70 年代原始红松针阔混交林被过量采伐、火烧后恢复的天然杨桦次生林为研究对象。2007 年 8~9 月份,以空间代时间的方法,在样地选择时尽可能缩小各阶段间空间距离,并使地形因子(海拔、坡向、坡度)和土壤条件尽量保持一致。采用典型取样法设置样地,对杨桦次生林进行调查,共选取 8 块典型样地(表 1)。每个样地面积 40 m×50 m,所设样地林木株数为 274~474 株,密度 1 370~2 420 株· hm^{-2} 。于样地四角及中心分别设置 5 个 2 m×2 m 灌木样方和 1 m×1 m 草本样方。记录乔木层胸径≥5.0 cm 的所有树种名称、胸径、树高、第一枝下高、冠幅;灌木层植物名称、株数、高度;草本层(包括幼苗)植物种类、数量、盖度、高度。同时对地形因子、土壤因子、枯落物分解率等进行调查。

表 1 标准地的基本概况

Table 1 The basal statistics of each sample

标准地号	样地株数/株	密度/(株· hm^{-2})	最大胸径/cm	平均胸径/cm	每公顷断面积/ m^2	每公顷蓄积/ m^3	针阔比	直径标准差	偏度	峭度
A1	346	1 730	52.3	13.9	26.9	188.8	8 阔 2 针	7.42	2.14	5.60
A2	327	1 655	46.1	13.2	22.5	154.7	8 阔 2 针	6.89	1.94	4.16
B1	347	1 735	45.9	13.0	23.0	159.7	9 阔 1 针	6.44	2.20	5.92
B2	289	1 445	54.4	13.7	21.4	154.7	10 阔 1 针	7.69	2.23	6.07
C1	411	2 055	44.8	11.5	21.6	141.8	8 阔 2 针	5.21	2.35	7.84
C2	484	2 420	28.4	11.2	23.8	150.7	10 阔 1 针	4.57	1.34	1.67
D1	334	1 670	49.5	15.3	31.1	226.1	7 阔 3 针	8.38	1.77	3.29
D2	274	1 370	37.6	14.8	23.5	164.3	9 阔 1 针	6.41	0.87	0.41

1.2.2 研究方法 林分直径分布模型应用较多的有正态分布、对数正态分布^[12]、Jonson's SB^[13]和 Weibull 分布^[14]。近年来,Weibull 分布应用最为普遍^[15-20],它具有适应性强、灵活性大的特点,能清楚直观地解释其参数意义。根据在林业中已应用的直径分布模型的统计特征,可用负指数分布和 Weibull 分布来模拟异龄林分直径结构^[21],本文选择这 2 个模型来模拟杨桦次生林直径分布,拟合结

果用 χ^2 检验法进行检验,并预估其模拟精度。

(1)Weibull 分布函数。Weibull 分布函数可对林分直径分布和树高分布均能进行很好的拟合,既能拟合不同偏度、峰度的单峰曲线,又可以拟合倒“J”型曲线。Weibull 分布函数公式为^[14]:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{c}{b} (x-a)^{c-1} e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} & x \geq a, b > 0, c > 0 \\ 0 & x < a \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 为位置参数, 即每一组中最小径阶的下限值; b 为尺度参数; c 为形状参数; x 为组中值。当 c 为 1~3.6 时, 为单峰左偏山状分布; 当 $c < 1$ 时, 为倒“J”型分布; 当 $c = 1$ 时, 为指数分布; 当 $c = 2$ 时, 为 χ^2 分布; 当 $c = 3.6$ 时, 为近似正态分布; 当 $c \rightarrow \infty$ 时, 变为单点分布。

(2) 负指数分布函数。Meyer(1953)指出, 未受干扰的天然异龄林趋于一个可用指数方程表达的直径分布^[22]。典型的异龄林直径分布可用负指数分布模拟。负指数分布函数为^[23]:

$$Y = Ke^{-ax} \quad (2)$$

式中: Y 为每个径阶的株数; x 为胸径; e 为自然对数的底; a 、 K 表示直径分布特征的常数, 其中, a 表示林木株数在连续的径阶中减小的速率, K 为林分相对密度^[24]。

研究表明, a 和 K 有很好的相关关系, a 值大, 说明林木株数随直径增加而迅速下降; 当 a 值和 K 值都较大时, 表明小树的密度较大^[25]。负指数直径分布在经营异龄林中简单、实用, Van Laar 等推荐此函数作为天然异龄林的直径分布模型^[26-27]。

(3) 分布检验。将 Weibull 分布和负指数分布进行实际拟合, 并对他们各自的理论株数与实际株数在 $\alpha = 0.05$ 的显著水平下作 χ^2 检验, 即:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{[F(x_i) - S(x_i)]^2}{F(x_i)} \right\} \quad (3)$$

式中: $F(x_i)$ 表示第 i 径阶的理论株数, $S(x_i)$ 表示第 i 径阶的实际株数, m 表示径阶数。

(4) q 值法则。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)^[23]。Meyer(1953)定义了一个法正的异龄林为“目前的生长能被定期地伐去, 同时又能保持林分结构分布和原始的森林蓄积。”他指出, 描述这种“法正”异龄林可以用常数 (q) 来表示^[21]。其林分径级分布可由下列关系式表达^[28]:

$$X_d = \frac{X_{d-1}}{q} \quad (4)$$

根据(4)式, Husch(1982)把 q 值与负指数函数联系起来表示如下:

$$q = \frac{X_{d-1}}{X_d} = \frac{K \cdot e^{-aD_{d-1}}}{K \cdot e^{-aD_d}} = e^{-a(D_d - D_{d-1})} = e^{ah} \quad (5)$$

式中: X 为在 t 时刻中径级 d 的立木株数, D_{d-1} 、 D_d 为相邻的 2 个径级, h 为径级距, q 是一个递减系数或常数。 q 为某一径级的株数与相邻较大径级株数之比, q 的序列和均值可以表达林分的径级株数分布状况^[22]。 q 值越小, 直径分布曲线越平缓; q 值越大, 曲线越陡峭。 q 的取值在于经营者的目标, 一般情况下, q 值小, 生产大径材数量多; q 值大, 则小径

材数量多。

1.2.3 数据处理 采用统计软件 SPSS for Windows 13.0 和 ForStat 2.0 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 杨桦次生林直径结构特征和林分径级结构特点

2.1.1 林分直径结构特征 研究表明, 混交林中, 白桦和山杨分别占整个林分树种组成的 40% 左右, 此外, 林中还散生紫椴 (*Tilia amurensis*)、黄檗 (*Phellodendron amurense*)、色木槭等其他阔叶树种。从表 1 可以看出, 8 个标准地的最小直径为 5.0 cm, 最大直径为 54.4 cm, 样地的平均直径为 13.3 cm, 小径级林木较多使得林分平均胸径变小。它们的偏度均大于 0, 说明其直径分布为左偏, 形状上属单峰型, 较正态分布尖峭, 其林分的直径分布偏向小径阶; 所设的 8 个标准地的峭度都为正值, 说明其峰度比正态分布峰度高, 但 C1 标准地的峰度更突出一些。标准地中针阔叶比例失调, 阔叶树种占主要优势, 针叶树种大多处于受压状况, 林分密度不均。

2.1.2 林分径级结构特点 由图 1 可以看出, 杨桦次生林直径结构相对简单, 基本规律都是 6~12 径阶的林木株数比重多, 随着径阶的增加, 各径阶的林木株数逐渐减少, 达到一定径阶后, 递减速度减缓直至平稳, 呈现明显的倒“J”型分布。虽然树木大多集中于中、小径阶, 但较大径阶仍有树木分布。杨桦次生林在径阶 6 cm 时的株数最多, 其次为 8 cm, 再次为 10 cm。从总体上看, 杨桦次生林林分单位面积上的蓄积量小, 干形较差, 应及时进行近自然化改造, 逐步改善林分的遗传结构, 促进其形成结构合理、生产力较高的林分。

2.2 林分直径分布拟合与检验

2.2.1 参数估计 拟合模型参数估计(表 2)表明, 杨桦次生林各演替阶段径阶株数 Weibull 分布函数形状参数 (c) 的估计值为 1.0~3.6。拟合结果中, 实际株数与拟合理论株数的相关性, 即 x 对 $F(x)$ 的相关系数 (R) 均在 0.933 以上, 相关系数 (R) 的均值为 0.961; 而在拟合负指数分布函数时, 拟合的相关系数 (R) 均在 0.919 以上, 相关系数 (R) 均值为 0.954。可以看出, 各演替阶段径阶株数拟合的相关系数 (R) 总体差异不大, 在林分株数较多, 尤其是小径级林木株数较多时, 用 Weibull 分布拟合效果更好。Weibull 参数估计结果中, C 值均小于 1, 模型曲线呈倒“J”型, 与图 1 实际分布状况相似。负指数分布拟合中, C1 和 C2 样地的 a 、 K 值较大, 表明林分中小径级株数较多。

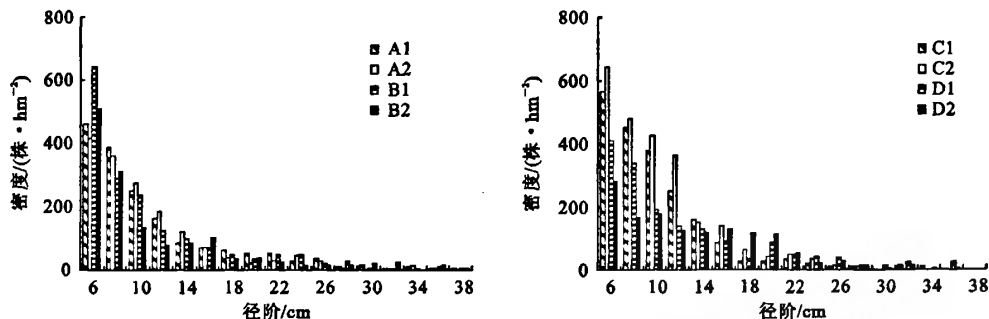


图1 杨桦次生林径阶一株数分布

Fig.1 Stem number-diameter distribution of the polar and birch secondary forests in 5 cm dbh classes

表2 各样地直径分布模型参数

Table 2 Parameters of diameter distribution functions in each plot

项目	参数	样地号							
		A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
Weibull 分布	a	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	b	6.561	6.174	5.755	5.869	5.471	5.815	7.813	8.928
	c	0.920	0.971	0.888	0.840	1.036	1.203	0.953	1.298
	R	0.955	0.933	0.974	0.972	0.980	0.987	0.945	0.943
负指数分布	a	0.149	0.173	0.134	0.158	0.201	0.190	0.128	0.117
	k	207.114	256.560	161.013	174.481	443.465	495.424	151.815	121.540
	R	0.966	0.936	0.940	0.964	0.981	0.986	0.942	0.919

2.2.2 分布拟合 从图2可以看出,Weibull分布与负指数模型模拟效果与实际值均较为接近,仅在小径级阶段其模拟株数与实际值均存在相差偏大或偏小的情况。但在随后的各径阶中差异逐渐缩小,整个径阶范围与观测值也比较吻合,均表现为一条平滑的曲线,其趋势是在大径级阶段均保存着几株大径级林木,与实际状况相符。

2.2.3 分布函数的检验与预测精度 χ^2 值是典型样地内每径阶理论株数和实际株数之差平方和后,再由样地径阶数求均方差得到。预估精度是检验模型预测效果的指标,考虑了样本单元数与自由度的影响,预测误差的计算公式如下:

$$\text{预估精度} = 1 - \frac{t_a \sqrt{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\hat{y} \sqrt{n(n-T)}} \quad (6)$$

式中: y_i 为实测值, \hat{y}_i 为模型预估值, n 为样本单元数, t_a 为置信水平 α 的 t 分布值, T 为模型的参数个数, \hat{y} 为每个样本单元估计值的平均数。

8个次生林样地 $\chi^2_{0.05}$ 为37.652,经 χ^2 检验,所有样地数据均服从Weibull分布和负指数分布,预

估平均误差均在5%以下,因此,所模拟的次生林直径结构是适用的,实际应用误差较小,精度较高(表3)。从 χ^2 检验和预测精度结果来看,Weibull分布的总体拟合效果优于负指数分布,用Weibull分布描述该区林分直径分布是比较适宜的。说明Weibull分布可以作为该区杨桦次生林林分直径结构株数分布预测函数。

2.3 林分 q 值

从表4可以看出,研究区杨桦次生林的 q 值为1.2636~1.4948,且C1和C2样地 q 值较大,表明这2个样地中小径级材数量多。Meyer(1952)利用 q 值法则研究美国宾夕法尼亚州高山橡树林分的 q 值为1.2~2.0,其他的森林类型 q 值也处于此区间之内^[23]。 q 值较小,表明胸径频数分布较为缓和,林分在较大径阶部分占相对高的比例。亢新刚(2003)研究表明,长白山金沟岭林场检查法经营的云冷杉针阔混交林 q 值分布范围为1.20~1.50,平均值为1.30^[22]。本研究的杨桦次生林各演替阶段的 q 均值在也在此范围内,属于正常情况。

表3 直径分布函数拟合结果检验

Table 3 Fit statistics of diameter distribution models in each plot

样地号	Weibull 分布函数		负指数分布函数		样地号	Weibull 分布函数		负指数分布函数	
	χ^2	预估精度/%	χ^2	预估精度/%		χ^2	预估精度/%	χ^2	预估精度/%
A1	19.72	97.21	35.94	91.46	C1	32.64	99.21	33.35	98.88
A2	21.99	99.09	22.15	99.16	C2	16.26	99.14	27.90	98.64
B1	31.76	99.06	32.54	97.47	D1	30.05	97.76	31.68	96.94
B2	30.48	98.99	31.64	97.94	D2	31.91	98.35	33.63	98.73

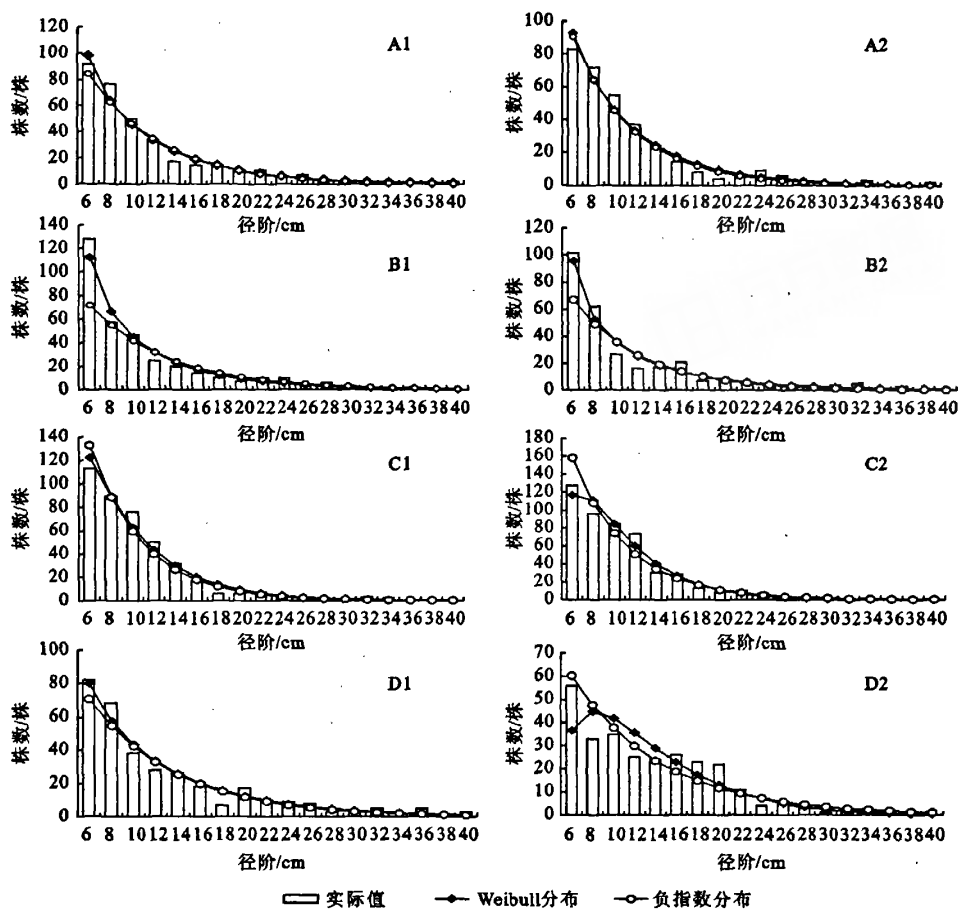


图2 各样地不同模型直径分布的观测值和估计值

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

表4 各样地株数径级分布的q值

Table 4 The q values of number-classes distributions for each plot

样地号	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
q 值	1.347 2	1.413 4	1.307 3	1.371 6	1.494 8	1.462 3	1.291 8	1.263 6

3 结论与讨论

8个标准地杨桦次生林直径结构均呈倒“J”型递减曲线分布,即小径阶的林木株数较多,随着直径的增大,林木株数急剧递减,但是到一定径阶后,其递减速率减慢,并逐渐趋于平稳。这与异龄混交林的一般规律相一致,其生态系统有一定的稳定性。用 Weibull 模型和负指数模型均能较好地模拟次生异龄林的直径分布,其中 Weibull 模型效果更好。负指数分布与林分 q 值统计结果表明,8个样地中,q 值法则对于杨桦异龄林径阶株数的变化表达效果较好,杨桦异龄林的 q 值为 1.26~1.49,保持了较好的异龄林直径分布状态,可以用来指导次生林分的改造。q 值长期以来被用于描述异龄林林分的理

想胸径分布。Goodburn^[29]研究表明,早期对于人工经营的异龄林和非经营老龄林林分在经营时都以接近于平衡状态的 q 值为目标。在美国,广泛地用保留直径分布符合常数 q 值来指导异龄林经营活动。多数研究表明,q 值为 1.2~1.7^[30-31]。因此,可以根据林分径阶 q 值法则来经营天然异龄林,能够使林分接近于天然林的理想结构。

参考文献:

[1] 朱教君,刘世荣. 次生林概念与生态干扰度[J]. 生态学杂志, 2007,26(7),1085-1093.
[2] GRAU H R, ARTURI M F, BROWN A D, et al. Floristic and structural patterns along a chronosequence of secondary forest succession in argentinean subtropical montane forests [J]. For. Ecol. Manag., 1997,95,161-171.

- [3] FINEGAN B. Pattern and process in Neotropical secondary rainforests: The first 100 years of succession[J]. Trends Ecol, 1996, 11: 119-124.
- [4] 李国猷. 北方次生林经营[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992: 1-5.
- [5] 刘传照, 李兆全. 杨桦林下的生境条件与红松天然更新的研究[J]. 东北林业大学学报, 1987, 15 (4): 22-28.
- [6] 宋新章, 张智婷, 肖文发, 等. 长白山杨桦次生林采伐林隙幼苗更新动态[J]. 林业科学, 2008, 44 (3): 13-20.
- [7] 王旭, 周广胜, 蒋延玲. 山杨白桦混交次生林与原始阔叶红松林土壤呼吸作用比较[J]. 植物生态学报, 2007, 31 (3): 348-354.
- [8] 李雪峰, 张岩, 牛丽君, 等. 长白山白桦(*Betula platyphlla*)纯林和白桦山杨(*Populus davidiana*)混交林凋落物的分解[J]. 生态学报, 2007, 27 (5): 1782-1790.
- [9] 兰士波. 天然杨桦林密度效应的研究[J]. 南京林业大学学报, 自然科学版, 2007, 31 (2): 83-87.
- [10] 于振良, 赵士洞, 王庆礼, 等. 长白山阔叶红松林带内杨桦林动态模拟[J]. 应用生态学报, 1997, 8(5): 455-458.
- [11] 刘金福, 洪伟, 林升学. 格氏栲天然林主要种群直径分布结构特征[J]. 福建林学院学报, 2001, 21(4): 325-328.
- [12] BLISS C I, REINKER K A. A lognormal approach to diameter distributions in even-aged stands [J]. Forest Science, 1964, 10(3): 350-360.
- [13] HAFLEY W L, SCHREUDER H T. Statistical distributions for fitting diameter and height data in even-aged stands [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1977, 7: 481-487.
- [14] BAILEY R L, DELL T R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function [J]. Forest Science, 1973, 19(2): 97-104.
- [15] 孟宪宇. 使用 Weibull 函数对树高分布和直径分布的研究[J]. 北京林业大学学报, 1988, 10(1): 40-48.
- [16] 惠刚盈, 盛伟彬. 林分直径结构模型的研究[J]. 林业科学研究, 1995, 8(2): 127-131.
- [17] 洪利兴, 杜国坚, 张庆荣, 等. 天然常绿阔叶异龄幼林胸径的 Weibull 分布及动态预测[J]. 植物生态学报, 1995, 19(01): 29-42.
- [18] 刘君然, 赵东方. 落叶松人工林威布尔分布参数与林分因子模型的研究[J]. 林业科学, 1997, 33(5): 412-417.
- [19] 周春国, 余光辉, 吴富桢, 等. 用变型 Weibull 分布对热带雨林结构规律的研究[J]. 南京林业大学学报, 1998, 22(4): 14-18.
- [20] 周国模, 刘恩斌, 刘安兴, 等. Weibull 分布参数辨识改进及对浙江毛竹林胸径年龄分布的测度[J]. 生态学报, 2006, 26 (9): 148-156.
- [21] MEYER H A. Forest mensuration[M]. Pennsylvania, Pennsylvania Vally Publishers, 1953.
- [22] 亢新刚, 胡文力, 董景林, 等. 过伐林区检查法经营针阔混交林林分结构动态[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(6): 1-5.
- [23] MEYER H A. Structure, growth and drain in balanced uneven-aged forests[J]. J. For., 1952, 50: 85-92.
- [24] GUL A U, MISIR M, MISIR N, et al. Calculation of uneven-aged stand structures with the negative exponential diameter distribution and Sterba's modified competition density rule[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 214: 212-220.
- [25] 张少昂, 王冬梅. Richards 方程的分析和一种新的树木理论生长方程[J]. 北京林业大学学报, 1992, 14(3): 99-105.
- [26] VAN LAAR A, AKCA A. Forest mensuration [M]. Göttingen: Cuvillier Verlag, 1997: 418.
- [27] 陆元昌, 雷相东, 国红, 等. 西双版纳热带雨林直径分布模型[J]. 福建林学院学报, 2005, 25(1): 1-4.
- [28] 于政中. 森林经理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993: 47-49.
- [29] GOODBURN J M, LORIMER C G. Population structure in old-growth and managed northern hardwoods, an examination of the balanced diameter distribution concept [J]. Forest Ecology and Management, 1999, 118: 11-29.
- [30] 丹尼尔 T W, 海勒姆斯 J A, 贝克 F S. 森林经营原理[M]. 赵克绳, 王业谨, 宫连城, 等译. 北京: 中国林业出版社, 1987: 374-375.
- [31] HAO Q, ZHOU Y, WANG L, 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.