网络出版时间:2015-08-05 08:56 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.09.010 网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150805.0856.020.html

# 长白山云冷杉混交林直径结构分布研究

张梦弢1, 亢新刚1, 郭韦韦1, 孟京辉1, 杨英军2

(1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,北京100083;

2 汪清林业局,吉林 汪清 133200)

[摘 要] 【目的】选择能够正确拟合经过采伐后的长白山云冷杉针阔混交林直径结构分布的模型。【方法】以 长白山 12 块经过 2~3 次采伐的云冷杉过伐林固定样地数据为依据,分别运用负指数、三参数 Weibull、限定混合 Weibull 模型拟合云冷杉混交林的直径分布。【结果】12 块样地密度为 535~1 035 株/hm<sup>2</sup>,平均胸径变化不大,在 20.1~23.9 cm;所有样地直径分布偏度为正。除 1 号、7 号样地的直径结构用负指数模型效果较好,2 号、4 号样地用 三参数 Weibull 模型拟合效果较好外,其余样地均适合用限定混合 Weibull 模型拟合。【结论】3 种分布模型中,负指 数模型拟合近似"反 J"型曲线时效果较好,而限定混合 Weibull 模型在拟合不规则直径分布时效果较好。

[关键词] 云冷杉混交林;直径分布;负指数模型;Weibull 模型;限定混合 Weibull 模型 [中图分类号] S711 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2015)09-0065-08

# Diameter structural distribution of spruce-fir mixed forest in Changbai Mountain

ZHANG Meng-tao<sup>1</sup>, KANG Xin-gang<sup>1</sup>, GUO Wei-wei<sup>1</sup>, MENG Jing-hui<sup>1</sup>, YANG Ying-jun<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 Wangqing Forestry Bureau, Wangqing, Jilin 133200, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to choose models for simulating diameter structure of harvested spruce-fir mixed forest in Changbai Mountain. [Method] Based on analysis of 12 spruce-fir permanent plots in over-cutting forest that had been cut two or three times, negative exponential model, three parameters Weibull model and finite mixed Weibull model were used for fitting diameter distributions of spruce-fir mixed forest. [Result] The density of tree number was 535 - 1~035 trees/hm<sup>2</sup>, and the mean DBH was 20.1-23.9 cm. The skewness was positive in all plots. The negative exponential model was suitable for diameter distribution of plots 1 and 7, three parameters Weibull model was suitable for plots 2 and 4, while finite mixed Weibull model was good for the rest. [Conclusion] The inverse J-shaped curves can be better fitted by negative exponential model, while the irregular distributions can be fitted better by finite mixed Weibull model.

Key words:spruce-fir mixed stand;diameter distribution;negative exponential model;three parameters Weibull model;finite mixed Weibull model

[收稿日期] 2014-01-27

[作者简介] 张梦弢(1984-),男,山西大同人,在读博士,主要从事森林可持续经营研究。E-mail:zmt0411@163.com

[通信作者] 亢新刚(1952-),男,北京人,教授,主要从事森林可持续经营研究。E-mail:kxg520512@163.com

<sup>[</sup>基金项目] 引进国际先进林业科学技术"948"项目(2013-4-66)

直径分布模型是模拟森林生长、收获的重要手 段,也是森林经营的主要工具之一[1-2]。同龄纯林直 径结构相对较为单一,主要表现为正态分布曲线;而 天然异龄混交林的结构则相对复杂,分布形式也极 其多样,除了经典的"反J"型曲线外,还经常呈现出 不对称的单峰或多峰曲线[3]。用于模拟天然林分直 径分布的模型不胜枚举,如 Pearson 模型、负指数模 型、γ模型、三参数 Weibull 模型等,这些分布模型 针对异龄林"反J"型、单峰曲线的拟合,均取得了很 好的效果[4-6]。然而,经历了过度采伐或者火烧的天 然林,直径分布并非上述"反J"型或者单峰曲线,更 多的表现为不规则的多峰曲线,对此,有些学者设想 运用混合模型来进行直径分布的拟合[7-8]。近年来, 有学者在混合模型的基础上,提出一种限定混合 Weibull 模型,与负指数模型和三参数 Weibull 模型 相比,其在拟合不规则的多峰曲线直径分布上具有 更好的效果,并取得广泛的应用<sup>[9-10]</sup>。例如:Liu 等<sup>[9]</sup>分别运用限定混合模型和三参数 Weibull 模型 拟合天然混交林直径分布,结果表明,限定混合模型 在拟合林分直径不规则曲线方面具有明显优势; Zhang 等<sup>[10]</sup>发现,限定混合模型在拟合具有"rotated-sigmoid"特征的直径分布时,较其他直径分布模 型效果好。

我国长白山地区的云冷杉针阔混交林,是该地 区的一种主要的森林类型,具有较高的物种丰富度 与物种组成<sup>[11]</sup>。然而建国初期,由于生产上的大量 需求,该地区森林资源经历了不同程度的采伐,进而 形成了具有不规则林分结构的森林群落<sup>[12-14]</sup>。研究 不规则的直径分布,既是对林分结构的一种补充,也 是促进森林群落健康稳定的必要手段<sup>[9]</sup>。因此,本 研究以长白山 12 块云冷杉混交林样地数据为基础, 运用负指数、三参数 Weibull、限定混合 Weibull 3 种直径拟合分布模型,对比分析了长白山云冷杉针 阔混交林的直径分布状态,以期为长白山云冷杉针 然混交林的可持续经营提供理论依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验地概况

研究地区位于吉林省汪清林业局金沟岭林场, 场部地理坐标为130°10′E,43°22′N。林场地貌为低 山丘陵,海拔300~1200m,坡度5°~25°。该区属 季风型气候,全年平均气温3.9℃左右,1月份平均 气温-32℃左右;7月份平均气温22℃左右;年降 水量600~700mm。本地区土壤多为灰棕壤土,积 雪平均厚达 50 cm。针叶树种主要包括鱼鳞云杉 (Picea jezoensis)、红松(Pinus koraiensis)、臭冷杉 (Abies nephrolepis)、长白落叶松(Larix olgensis) 等,阔叶树种包括白桦(Betula platyphylla)、枫桦 (Betula costata)、蒙古栎(Quercus mongolica)、色 木(Acer mono)、椴树(Tilia amurensis)等,主要灌 木有忍冬(Lonicera japonica)、暴马丁香(Syringa amurensis)、毛榛子(Corylus mandshurica)等。

## 1.2 数据来源

数据来源于 1986-1988 年设立的 12 块云冷杉 过伐林固定样地,面积均为 0.2 hm<sup>2</sup>。样地每隔 2 年进行 1 次复测,共进行过 2~3 次不同强度的采 伐<sup>[15]</sup>。每木检尺胸径 5 cm 以上的林木,记录调查 林木的胸径、树高、冠幅、第一枝下高,并调查林下植 被和更新状况等,最后一次调查时间为 2008 年或 2009 年。本研究选取 2008 年或 2009 年复测数据 进行分析,由于生产上普遍采用 4 cm 划分林木径 阶,复测时很多小径阶的林木没有及时记录,因此为 了减小误差,本研究以 8 cm 为起测径阶<sup>[16]</sup>。

#### 1.3 试验方法

本研究采用负指数、三参数 Weibull、限定混合 Weibull 3 种模型进行云冷杉林直径分布的拟合。

1)负指数分模型。模型计算公式为:

$$f(x) = a \mathrm{e}^{-bx} \,. \tag{1}$$

2) 三参数 Weibull 模型。模型计算公式为:

$$f(x) = \begin{cases} 0, x < a; \\ \frac{c}{b} \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^{c}\right]}, \quad (2) \\ x \ge a, b \ge 0, c \ge 0, \end{cases}$$

式(1)、(2)中:a、b、c分别为位置(直径分布最小径 阶下限值)、尺度(与林分平均直径的位置相关)、形 状(决定 Weibull 曲线类型及形状)参数,e为自然对 数的底,x为对应的径阶直径,f(x)为对应各径阶的 株数百分比。

3)限定混合 Weibull 模型。假设一个限定混合 Weibull 分布是由 k 个独立的概率密度函数(Probability density functions)组成的,因此限定混合 Weibull 模型可表示为:

 $f(x) = \sum_{i=1}^{k} \rho_i f_i(x) = \rho_1 f_1(x) + \dots + \rho_k f_k(x) \, (3)$ 式中:  $\rho_i$ 表示第 i个组分所占比例,并且满足 0  $\rho_i \leq 1$ 和 $\Sigma \rho_i = 1; f_i(x)$ 表示第 i个概率密度函数,并 且每个概率密度函数都有不同的平均值、方差。

本研究中, 假定每个组分都是由一个三参数 Weibull 模型组成的,并且本研究最多只考虑 3 个组

由式(2)和(4)可知,如果限定混合 Weibull 模型由 2 个组分构成,则位置、尺度、形状参数的个数为 6,如果由 3 个组分构成,则参数的个数为 9,本研究分别以  $a_i, b_i, c_i$  ( $i \leq 3$ )进行表示。

利用三参数 Weibull 分布密度函数拟合林分直 径分布时,一般位置参数 *a* 为林分直径最小径阶的 下限值(本研究 *a*=7),尺度和形状参数 *b*、*c* 以最大 似然估计法进行求解<sup>[3]</sup>。限定混合 Weibull 模型参 数的求解,利用最大似然估计法,结合 Newton-type 算法和 EM 算法进行<sup>[1,9,17]</sup>。

以均方根误差(*Rmse*)和偏差(*Bias*)作为不同 模型拟合效果的判别标准<sup>[10]</sup>,并以 χ<sup>2</sup> 进行拟合度 检验,计算公式如下:

$$Rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} (N_i - \hat{N}_i)^2}{m}} .$$
 (5)

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^{m} (N_i - \hat{N}_i)}{m}.$$
 (6)

$$\chi^2 = -2\sum_{i=1}^m N_i \times \lg \frac{\hat{N}_i}{N_i} \,. \tag{7}$$

式中: $N_i$  为第 i 径阶实测值; $\hat{N}_i$  为第 i 径阶模型拟 合值;m 为径阶数; $\chi^2$  的自由度为(m-k-1),其中 k 为参数个数。

上述参数的计算通过 R 语言(2.14 版)的 stats 和 mixdist 软件包完成。

# 2 结果与分析

#### 2.1 林分的径级结构特征

由表1可知,12块云冷杉混交林样地密度差异 很大,最大的1号样地密度达到1035株/hm<sup>2</sup>,密度 最小的样地为5号,为535株/hm<sup>2</sup>;各样地平均胸 径变化不大,最小的7号样地为20.1 cm,而最大的 4号样地也只有23.9 cm;各样地直径分布变动系数 大于0.45 的只有1、6、7和11号4块样地,说明除 此4块样地外,直径分布范围并不大;所有样地直径 分布偏度均为正值,即株数主要分布在小于平均直 径的范围内;1、2、11号样地峰度值均大于0,其余样 地峰度值则小于0,说明除上述3块样地外,径阶分 布较平缓。

表 1 长白山云冷杉混交林样地林分的基本概况 Table 1 Basic characteristics of sample plots in the spruce-fir mixed forest in Changbai Mountain.

样地 Sample plot	株数 Number of trees	密度/ (株・hm <sup>-2</sup> ) Density	平均胸径/cm Mean DBH	标准差 Standard deviation	变动系数 Coefficient of variation	断面积/ (m²•hm <sup>-2</sup> ) Basal area	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
1	207	1 035	20.5	9.747	0.475	41.71	0.870	0.325
2	162	810	21.8	8.509	0.390	34.79	0.618	0.546
3	136	680	22.1	8.568	0.388	30.02	0.190	-0.678
4	137	685	23.9	8.990	0.376	35.16	0.355	-0.287
5	107	535	22.3	9.851	0.442	24.94	0.147	-1.434
6	111	555	21.5	10.014	0.466	24.53	0.556	-0.668
7	146	730	20.1	9.197	0.458	27.92	0.481	-0.834
8	191	955	22.2	8.852	0.399	42.79	0.396	-0.475
9	153	765	23.2	9.191	0.396	37.32	0.257	-1.042
10	108	540	21.7	8.407	0.387	22.93	0.449	-0.699
11	119	595	22.3	10.568	0.474	28.36	0.911	1.150
12	118	590	22.0	8.736	0.397	25.93	0.441	-0.828

## 2.2 直径分布的拟合与检验

2.2.1 拟 合 表 2 为各样地直径分布模型的参数。表 2 中, 三参数 Weibull 模型与限定混合 Weibull 模型的位置参数 *a* 为 7, 三参数 Weibull 模型的形状参数值 *c* 均在 1~3.6, 该曲线符合正偏山 状分布; 限定混合 Weibull 模型中, 3、7、9、12 号样地 由 3 个组分组成, 其余样地直径分布均由 2 个组分 组成。其中, 在 2 个组分组成的限定混合 Weibull

模型中,9 号样地第 1 个组分的形状参数( $c_1$ )为 7.822,为左偏态分布,其余样地直径分布为正偏山 状分布;第 2 个组分中, $c_2$  值大于 3.6 的分布明显增 多,范围在 4.654~16.743。而在 3 个组分组成的 限定混合 Weibull 模型中,样地 3、7、9、12 号第 3 个 组分的形状参数值( $c_3$ )均大于3.6,因此,分布曲线 均有左移偏向。

各样地直径分布拟合曲线如图1和图2所示。

图 1 和图 2 显示,对于近似"反 J"型直径分布曲线, 如 1 号样地,3 种分布模型差别不大;而对于单峰直 径分布(2 号样地),三参数 Weibull 模型与限定混合 Weibull 模型拟合效果较好;对于双峰直径分布,以 5 号样地为例,峰值分别处于 12 和 32 cm,限定混合 Weibull 模型拟合效果优于其他 2 种模型;同样,对 于多峰分布,如 3 号样地,限定混合 Weibull 模型的 拟合效果较好。

# 表 2 长白山云冷杉混交林直径分布模型的参数

Table 2 Model parameters of diameter distribution models for spruce-fir mixed forest in Changbai Mountain.

模型	参数	样地 Sample plots											
Model	Parameters	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
负指数模型 Negative	а	32.821	18.631	13.297	12.266	10.359	14.359	21.246	19.978	11.866	10.962	15.052	11.888
exponential model	b	0.049	0.035	0.025	0.024	0.023	0.039	0.042	0.030	0.014	0.026	0.040	0.026
三参数 Weibull 模型	а	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Three	b	15.661	17.551	19.111	19.981	19.921	17.431	16.601	18.421	19.991	17.321	18.331	17.451
weibull model	С	1.277	1.731	1.634	1.829	1.231	1.279	1.180	1.633	1.629	1.631	1.329	1.577
	$a_1$	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	$b_1$	5.534	14.537	4.202	6.831	5.798	8.081	2.016	13.363	5.719	6.707	2.445	9.347
	$c_1$	1.301	1.513	1.378	2.114	1.426	1.371	1.039	1.483	7.822	2.112	2.474	1.864
四台泪人	$a_2$	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
限定低合 Weibull 模型	$b_2$	17.217	19.795	13.842	21.203	24.759	27.321	10.730	25.959	15.491	19.719	18.733	19.301
Finite mixture	C2	1.565	6.535	5.586	2.427	4.952	4.654	3.248	5.899	1.575	2.463	1.721	16.743
mixed Weibull	$a_3$	_	_	7	_	_	_	7	_	7	_	—	7
model	$b_3$	_	—	24.326	—	—	—	24.795	_	27.614	—	—	28.615
	С3	_	—	4.865	—	—	—	5.044	_	8.356	—	—	8.326
	$ ho_1$	0.286	0.854	0.289	0.219	0.480	0.645	0.238	0.817	0.089	0.317	0.154	0.619
	02	_	_	0.301	_	_	_	0.401	_	0.733	_	_	0.174



图 1 长白山云冷杉混交林 1~6 号样地 3 种直径分布模型的拟合效果

Fig. 1 Fitting results of three diameter distribution models for 1-6 sample plots in

spruce-fir mixed forest in Changbai Mountain



spruce-fir mixed forest in Changbai Mountain

2.2.2 检 验 模型检验结果(表 3)表明,对1号 样地,负指数模型的平均偏差(*Bias*)和  $\chi^2$  值最小, 限定混合 Weibull 模型的  $\chi^2$  值最大,而负指数模型 的 *P* 值最大,说明负指数模型拟合效果较好,结论 相同的还有 7 号样地,这与图 1 的直观描述结果一 致;2 号样地三参数 Weibull 模型与限定混合 Weibull 模型的拟合效果均优于负指数模型;同样, 8 号样地中,2 种 Weibull 模型 *P* 值分别为 0.844 3 和 0.857 8,然而限定混合 Weibull 模型的平均偏差 (Bias)和  $\chi^2$  均较小,模拟效果稍好,11 号样地与此 相似;4 号样地中,三参数 Weibull 模型的 Bias、 Rmse 和  $\chi^2$  均值最小,P 值最大,因此拟合效果最 好,其次为限定混合 Weibull 模型,负指数模型效果 最差;其余样地均以限定混合 Weibull 模型的拟合 效果优于另外 2 种直径分布模型。

表 3 长白山云冷杉混交林 12 块样地 3 种直径分布模型的检验结果

Table 3	Test results of	f three diameter	distribution	models for	12 p	olots in s	spruce-fir	mixed	forest in	n Changbai	Mountain.
---------	-----------------	------------------	--------------	------------	------	------------	------------	-------	-----------	------------	-----------

样地 Sample plots	负指数模型 Negative exponential model				Thre	三参数 W	Yeibull 模型 Yrs Weibull	model	限定混合 Weibull 模型 Finite mixed Weibull model			
	Bias	Rmse	$\chi^2$	P值 P-value	Bias	Rmse	$\chi^2$	P值 P-value	Bias	Rmse	$\chi^2$	P值 P-value
1	-0.330	3.431	11.086	0.9611	0.089	2.724	12.278	0.906 2	0.056	3.115	13.305	0.715 5
2	0.309	4.539	28.353	0.130 4	0.009	2.833	11.320	0.937 6	0.012	2.544	9.294	0.930 6
3	-0.047	3.423	15.392	0.496 1	0.316	2.708	14.665	0.475 8	-0.071	1.961	4.113	0.903 8
4	-0.319	3.669	22.998	0.288 9	-0.335	1.996	2.234	0.9897	-0.037	2.009	8.307	0.959 5
5	-0.051	3.019	13.496	0.564 1	0.729	3.096	26.857	0.020 0	-0.057	2.193	6.193	0.6911
6	-0.088	2.829	10.894	0.898 8	0.219	2.659	14.695	0.617 4	-0.280	2.817	6.629	0.948 1
7	-0.049	2.789	7.287	0.949 1	0.689	2.946	19.108	0.160 9	0.193	2.441	7.953	0.438 0
8	-0.109	4.339	20.053	0.329 8	0.174	2.643	11.232	0.844 3	0.016	3.010	8.024	0.8578
9	0.050	3.839	14.045	0.522 1	0.348	3.303	15.290	0.358 6	-0.198	2.762	4.275	0.831 5
10	-0.119	3.259	16.723	0.403 7	0.139	2.202	11.343	0.727 9	-0.005	2.168	8.309	0.760 5
11	-0.248	2.723	16.995	0.848 9	0.050	2.353	16.879	0.815 1	0.012	1.992	14.384	0.810 5
12	-0.084	3.548	18.637	0.287 9	0.184	2.629	14.635	0.478 0	-0.078	2.206	7.691	0.565 5

图 3 为各样地直径分布模型模拟结果的残差 值,反映了各直径分布模型的拟合结果。图 3 显示, 1号样地中,3个模型的残差分布大致相同,在径级的开始和中间部分残差波动比较剧烈,随着径级的

增大,残差波动性逐渐减缓;2号、4号样地的2种 Weibull 模型残差波动较小,其中2号样地负指数模 型除在10~14 cm 径级,4号样地在12~16 cm 径 级波动较小外,其余径级波动都相对剧烈;3号样地 中限定混合 Weibull 模型残差的波动程度较另外2 种模型平缓;5、6号样地分布符合限定混合 Weibull 模型,其残差除在初始径级处波动较大外,其余径级 波动程度都比较平缓;而7号样地的负指数模型残 差波动则相对平缓;8号样地在径级初始处,3种直 径分布模型的残差波动性都比较大,但随着径级的 增加,2种 Weibull 模型的残差波动性逐渐减缓;9 号样地中的限定性混合 Weibull 模型除 10和 20~ 24 cm 径级残差值较大外,其余径级残差值相对较 小;10~12 号样地中,除个别径级外,限定混和 Weibull 模型的残差值比另外 2 种模型的波动性平 缓。



图 3 长白山云冷杉混交林 12 块样地 3 种直径分布模型模型结果的残差值 □,负指数模型;□□,三参数 Weibull 模型;□□□,限定混合 Weibull 模型

Fig. 3 Residuals of three diameter distribution models for 12 plots in spruce-fir mixed forest in Changbai Mountain
INegative exponential model; Three parameters Weibull model; Finite mixed Weibull model

# 3 讨论与结论

云冷杉针阔混交林是长白山的主要森林群落之一<sup>[18]</sup>。该地区在不同时期曾遭受到不同程度的采 伐,采伐后林内充足的空间在促进了树木生长的同 时也加剧了树种的竞争,树木进界与枯损的相互作 用造成了天然林林分直径结构的不规律性<sup>[14-15,19]</sup>。 此外,由于长期以来人们对于天然异龄林的粗放式 经营,使得云冷杉针阔混交林疏于管理,林分结构单 一化、老龄化严重,林下更新不足,这也是造成林分 产生多样化直径结构的原因之一。本研究中,12 块 遭受过不同程度采伐的云冷杉混交林样地,除1 号 样地的直径分布呈现出近似"反 J"型曲线外,其余 样地均不同程度地表现为单、双峰甚至多峰状曲线 分布。

由于生产上普遍采用4 cm 划分林木径阶,造成 复测时很多小径阶的林木没有及时记录,导致模拟 云冷杉针阔混交林直径分布时6 cm 径阶株数明显 偏少,这对于模型的拟合与评价有影响。为了提高 分析精度,本研究设定8 cm 为起测径阶,这与赵俊 卉<sup>[20]</sup>以及胡云云等<sup>[16]</sup>分别以相同样地数据研究云 冷杉针阔混交林生长和结构动态时拟定的起测径阶 一致。6 cm 径阶株数偏少的原因,有可能是外业数 据收集过程中人为主观的忽视,或者是由于立地遭 受人为干扰频繁所致,如果是前者,应当在今后的调 查中,注意对小径阶林木的记录;如果是后者,则应 当在减少人为破坏的同时,加强林下天然更新及人 促天然更新等措施,或者适时地进行林下补植,以保 证天然林保持健康的更新机制。

本研究通过对 3 种直径分布模型的拟合发现, 不规则多峰山状分布林分样地的峰值除在靠近小径 阶出现外,其余峰值在 28~32 cm 径阶处也多有出 现(如 3~7 号样地),应采取不同的经营措施对林分 结构进行适度调整。如果林分是幼龄林或中龄林, 应该采取适度的封育措施,从而保证幼龄或中龄的 林木能够继续生长;如果是成熟林分,则应该进行适 度择伐,伐除一些生长状况不佳的"小老头树"以及 已经没有生长潜力的林木,使得林分能够疏开,为林 下更新提供充足的生长空间,这也与郑丽凤等<sup>[21]</sup>和 孔令红等<sup>[22]</sup>的研究观点相吻合。对于样地中大径 阶林木分布过多的情况(如 9、10 号样地),对比负指 数模型,也应当对该径阶的林木进行适当采伐,避免 木材质量出现下降的情况出现,以免对经济效益造 成影响。

利用直径模型分析林分结构,能够为林分的"近 自然状态"研究提供依据,从而有助于采取不同的经 营措施,提高林分结构的多样性[23]。本研究基于长 白山云冷杉针阔混交林样地数据,采用限定性混合 Weibull 模型对直径分布进行拟合,结果显示该地 区林分结构并不理想,急需根据拟合分布模型参数, 对林分进行适当改造,调整林分内部直径株数分布, 提高其经济和生态效益。此外,在异龄林生长过程 中,达到理想直径分布是一个漫长的过程,林分直径 结构还会表现出不规则性,因此利用限定混合 Weibull 模型, 不仅是对异龄林直径分布模拟的一 种补充,而且对于林分动态变化研究也是有效的[1]。 在今后的研究中,应注重结合多年连续复测的数据, 利用直径分布模型(负指数、三参数 Weibull、限定混 合 Weibull 模型等)推断林分结构的动态变化,而这 也是下一步研究的重点。

# [参考文献]

- [1] Jaworski A, Podlaski R. Modeling irregular and multimodal tree diameter distributions by finite mixture models: An approach to stand structure characterization [J]. Journal of Forest Research, 2012, 17(1): 79-88.
- [2] 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):62-66.
  Lu Y C,Lei X D,Guo H,et al. Diameter frequency distribution models in the tropical rain forest of Xishuangbanna,Southwest China [J]. Journal of Fujian College of Forestry,2005,25(1): 62-66. (in Chinese)
- [3] 孟宪宇. 测树学 [M]. 3 版. 北京:中国林业出版社,2006:82-86.
   Meng X Y. Dendrometria [M]. 3rd edition. Beijing: China For-

estry Publishing House, 2006;82-86. (in Chinese)

- [4] Engone Obiang N L,Ngomanda A,Hymas O,et al. Diagnosing the demographic balance of two light-demanding tree species populations in central Africa from their diameter distribution [J]. Forest Ecology and Management,2014,313:55-62.
- [5] 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)
- [6] 孟宪字.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(1):40-48.
  Meng X Y. Research of tree height and diameter distributions by Weibull function [J]. Journal of Beijing Forestry University,1988(1):40-48. (in Chinese)
- [7] Podur J J, Martell D L, Stanford D. A compound poisson model for the annual area burned by forest fires in the province of Ontario [J]. Environmetrics, 2010, 21(5):457-469.

- [8] Goff F G, West D. Canopy-understory interaction effects on forest population structure [J]. Forest Science, 1975, 21(2): 98-108.
- [9] Liu C, Zhang L, Davis C J, et al. A finite mixture model for characterizing the diameter distributions of mixed-species forest stands [J]. Forest Science, 2002, 48(4):653-661.
- [10] Zhang L, Gove J H, Liu C, 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(9):1654-1659.
- [11] Yang X, Xu M. Biodiversity conservation in Changbai Mountain Biosphere Reserve, northeastern China: Status, problem, and strategy [J]. Biodiversity & Conservation, 2003, 12(5): 883-903.
- Podlaski R, Zasada M. Comparison of selected statistical distributions for modelling the diameter distributions in nearnatural *Abie-Fagus* forests in the swietokrzyski National Park (Poland) [J]. European Journal of Forest Research, 2008, 127 (6), 455-463.
- [13] 张志华,韦新良,汤孟平,等. 天目山针阔混交林中枫香的结构 特征 [J]. 浙江农林大学学报,2012(6):867-874.
  Zhang Z H, Wei X L, Tang M P, et al. Structural characteristics of *Liquidambar formosana* for a mised coniferous-broadleaf forest in Mount Tianmu [J]. Journal of Zhejiang A&F University,2012(6):867-874. (in Chinese)
- [14] 张煜星.中国森林资源 1950-2003 年经营状况及问题 [J]. 北京林业大学学报,2008(5):91-96.

Zhang Y X. Forest management conditions and problems from 1950 to 2003 in China [J]. Journal of Beijing Forestry University,2008(5):91-96. (in Chinese)

[15] 于政中,亢新刚,李法胜,等.检查法第一经理期研究[J].林 业科学,1996(1):24-34.

Yu Z Z,Kang X G,Li F S,et al. Research of control method in the primary period [J]. Scientia Silvae Sinicae,1996(1):24-34. (in Chinese)

[16] 胡云云,闵志强,高 延,等.择伐对天然云冷杉林林分生长和 结构的影响[J].林业科学,2011(2):15-24. H Y Y, Min Z Q, Gao Y, et al. Effects of selective cutting on stand growth and structure for natural mixed spruce (*Picea koraiensis*)-fir (*Abies nephrolepis*) forests [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011(2):15-24. (in Chinese)

- [17] 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(2):145-158.
- [18] 龚直文, 元新刚, 顾 丽, 等. 长白山云冷杉针阔混交林演替过 程空间格局变化 [J]. 东北林业大学学报, 2010(1):44-46, 53.
   Gong Z W, Kang X G, Gu L, et al. Spatial pattern dynamics of forest succession in spruce-fir mixed stand in Changbai Mountain, Northeast China [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010(1):44-46, 53. (in Chinese)
- [19] Zhang L, Liu C. Fitting irregular diameter distributions of forest stands by Weibull, modified Weibull, and mixture Weibull models [J]. Journal of Forest Research, 2006, 11(5): 369-372.
- [20] 赵俊卉.长白山云冷杉混交林生长模型的研究 [D].北京:北 京林业大学,2010.
   Zhao J H. Growth modeling for spruce-fir forest in Changbai Mountains [D]. Beijing:Beijing Forestry University,2010. (in Chinese)
- [21] 郑丽凤,周新年,胡喜生,等.择伐作业体系下天然林直径分布
   [J].东北林业大学学报,2009(9):22-24.
   Zheng L F,Zhou X N,Hu X S, et al. Model of diameter distribution under selective cutting operation [J]. Journal of Northeast Forestry University,2009(9):22-24. (in Chinese)
- [22] 孔令红,郑小贤.金沟岭林场云冷杉林空间分布格局及更新研究[J].福建林业科技,2007(4):1-4.
  Kong L H, Zheng X X. Study on spatial layout and regeneration of spruce-fir forest in Jingouling Forest Farm [J]. Journal of Fujian College of Forestry,2007(4):1-4. (in Chinese)
- [23] Jaworski A, Podlaski R. Structure and dynamics of selected stands of primeval character in the Pieniny National Park [J]. Dendrobiology,2007,58:25-42.