

天目山针阔混交林中枫香的结构特征

张志华¹, 韦新良¹, 汤孟平^{1,2}, 骆文建¹, 王 敬¹

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300)

摘要: 为全面掌握天目山国家级自然保护区针阔混交林中的枫香 *Liquidambar formosana* 结构特征, 在全面清查基础上设置 10 个标准地进行林分调查。分析枫香胸径、树高、冠幅结构规律, 并运用 Weibull 分布密度函数分别做拟合对比; 利用单株生物量模型测算枫香各径阶、各部分生物量, 分析生物量结构; 同时研究枫香密度及空间分布格局等结构特征。结果表明: 枫香的胸径、树高、冠幅结构符合森林经营的目标, Weibull 分布密度函数拟合结果基本符合枫香胸径、树高、冠幅结构规律; 树干、树根生物量占枫香总体生物量的 91.4%, 各径阶枫香生物量总体分布不均匀, 树干和树根生物量分布曲线起伏较为接近, 各径阶树冠生物量分布较为均匀; 各标准地枫香株数密度变动系数为 0.625, 枫香分布地域差异性较大; 各标准地角尺度均值大于 0.517, 种群内部呈聚集分布。图 8 表 7 参 20

关键词: 森林生态学; 枫香; 结构; 生物量; 株数密度; 分布格局; 天目山

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2012)06-0867-08

Structural characteristics of *Liquidambar formosana* for a mixed coniferous-broadleaf forest in Mount Tianmu

ZHANG Zhi-hua¹, WEI Xin-liang¹, TANG Meng-ping^{1,2}, LUO Wen-jian¹, WANG Jing¹

(1. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To provide a theoretical basis for *Liquidambar formosana* protection, management, and landscape construction in a mixed coniferous, broadleaf forest in National Nature Reserve of Mount Tianmu, ten sample plots were established for a stand survey. Diameter at breast height (DBH), tree height, and crown breadth were studied and fit to a Weibull distribution function. All tree parts and diameter classes of *L. formosana* biomass were measured using a single tree biomass model, and then analyzed. Density and spatial distribution patterns were also determined. Results showed that DBH, tree height, and crown breadth structure were in accordance to the forest management objectives, and fit the Weibull distribution function well. Trunk and root biomass accounted for 91.4% of the total biomass with biomass for all diameter classes being uneven. Distribution curves for trunk and root biomass were similar, and all crown breadth biomass was symmetrical. In all sample plots, variation of the density coefficient for *L. formosana* was 0.625, and all sample plot means for neighborhood patterns were greater than 0.517. Thus, the density coefficient showed large regional differences in distribution, and neighborhood patterns showed that tree distribution was clumped. [Ch, 8 fig. 7 tab. 20 ref.]

Key words: forest ecology; *Liquidambar formosana*; structure; biomass; tree density; distribution pattern; Mount Tianmu

收稿日期: 2011-12-06; 修回日期: 2012-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30871963)

作者简介: 张志华, 从事森林及环境评价与规划设计研究。E-mail: zzhcolin@163.com。通信作者: 韦新良, 教授, 博士, 从事森林及环境评价与规划设计研究。E-mail: weixl@zafu.edu.cn

枫香 *Liquidambar formosana* 为落叶乔木, 树干高大、通直、圆满。最高达 40 m, 胸径最大可达 1 m。深根性, 主根粗长, 抗风力强; 树皮灰褐色, 方块状剥落; 小枝干后灰色, 被柔毛, 略有皮孔; 叶薄革质, 阔卵形, 掌状 3 裂, 中央裂片较长, 先端尾状渐尖。主要分布于中国长江流域及其以南的广大地区, 垂直分布于海拔 1 500 m 以下平原、丘陵山谷、山麓。在浙江省各地广泛分布, 生于山地林中或村落附近, 喜湿润肥沃土壤, 是很好的行道绿化树种^[1]。枫香对二氧化硫、氯气等有较强的抗性, 具有生长快、用途广、适应性强、维护地力明显、生态效益好等特点, 是林种、树种结构调整的首选树种^[2]。作为天目山区重要乡土树种的枫香, 目前多处于野生状态。研究表明: 枫香是生态景观林中的重要构景树种^[3-4], 喜与壳斗科 Fagaceae, 樟科 Lauraceae, 山茶科 Theaceae 等树种混生, 是与马尾松 *Pinus massoniana*, 湿地松 *Pinus elliottii*, 杉木 *Cunninghamia lanceolata* 混交造林的理想伴生树种^[5], 因此, 研究混交林中枫香的林分结构具有重要的意义。以往国内对枫香的研究多集中在枫香同马尾松、杉木等其他树种混交的生长效应方面^[6-10], 黄勇来^[11]研究过枫香的林分结构和群落特征, 鲜有学者关注混交林中枫香的结构特征。本研究以天目山针阔混交林中的枫香树种为研究对象, 分别从枫香的胸径、树高、冠幅、生物量, 以及株数分布密度、空间分布格局等方面展开研究, 为天目山国家级自然保护区的管理提供科学的依据。

1 研究区自然概况

天目山国家级自然保护区, 地处浙江省临安市西北部, 距杭州 94 km, 面积为 4 284 hm², 地理位置为 30°18'30"~30°24'55"N, 119°24'11"~119°28'21"E, 海拔 300~1 556 m, 具有典型的中亚热带的森林生态系统和森林景观。四季分明, 气候温和, 年平均气温为 14.8~8.8 °C, 最冷月平均气温 3.4~2.6 °C, 平均最低气温 -13.1~-20.2 °C, 最热月平均气温 28.1~19.9 °C, 平均最高气温 38.2~29.1 °C。无霜期为 235~209 d, 雨水充沛, 年雨日为 159.2~183.1 d, 年降水量达 1 390~1 870 mm, 积雪期较长, 比区外多 10~30 d, 形成浙江西北部的多雨中心。天目山土壤随着海拔升高由亚热带红壤向湿润的温带型棕黄壤过渡, 海拔 600 m 以下为红壤, 海拔 600 m 至 1 200 m 为黄壤, 海拔 1 200 m 以上为棕黄壤。这些独特的环境条件构成了天目山植物区系的古老性, 复杂性和种类丰富性, 共计有苔类植物 70 种、藓类植物 240 种、蕨类植物 110 种、种子植物 1 570 种。其中, 国家重点保护植物 25 种, 以天目山命名的植物 24 种, 珍稀孑遗植物银杏的野生种也分布于此, 具有重要的科研价值。

2 研究材料与方法

2.1 研究材料

2011 年 7 月在天目山国家级自然保护区结合地势条件, 设立 10 块具有代表性的针阔混交林标准地进行林分结构调查(表 1), 标准地大小为 30 m × 30 m。采用全面调查法, 调查标准地内所有大于起测径

表 1 标准地概况

Table 1 Situation of sample plots

标准地号	海拔/m	坡度/(°)	坡向	坡位	枫香株数	郁闭度	林分起源
01	384	13	西	中	53	0.8	天然林
02	471	35	西南	上	13	0.6	天然林
03	369	11	西	下	44	0.7	天然林
04	332	39	西	中上	32	1.0	天然林
05	370	13	西	中上	15	0.7	天然林
06	378	15	西	上	18	0.8	天然林
07	338	31	西	下	15	0.7	天然林
08	351	16	西	中	13	0.8	天然林
09	401	35	东南	中上	17	0.6	天然林
10	365	30	东南	中上	13	0.6	天然林

阶(5 cm)的林木特征值,包括树种、胸径、树高、枝下高、冠幅等,同时用全站仪记录每株林木的具体坐标。标准地中主要树种有:枫香,马尾松,杉木,白栎 *Quercus fabric*, 麻栎 *Quercus acutissima*, 短柄枹 *Quercus glandulifera* var. *brevipetiolata*, 小叶栎 *Quercus chenii*, 石栎 *Lithocarpus glabra*, 山矾 *Symplocos caudata*, 木荷 *Schima superba*, 苦槠 *Castanopsis sclerophylla*, 化香 *Platycarya strobilacea*, 青冈 *Cyclobalanopsis glauca*, 锥栗 *Castanea henryi*, 欒木 *Loropetalum chinense*, 山合欢 *Albizia kalkora*, 天目槭 *Acer sinopurpurascens* 等。本研究将所有标准地中的枫香树单独列出作为本次研究的对象。

2.2 研究方法

2.2.1 胸径、树高、冠幅结构 胸径结构是林分内各种大小胸径林木按径阶的分配状态,是最重要、最基本的林分结构,它直接影响着林木的树高、干形、材积材种及树冠等因子的变化^[12],因此,胸径分布模拟对于预测未来的林分收获有着重要意义,能够准确模拟林分发展,对于制定森林经营计划显得十分重要^[13]。本研究采用适用性最为普遍的 Weibull 分布模型^[14]来模拟枫香的胸径结构规律。同时以 1 m 为 1 个树高级宽度,将枫香东西、南北冠幅取算术平均值得到平均冠幅后以 1 m 为 1 个冠幅级宽度,用 Weibull 分布密度函数分别对枫香树高、冠幅分布进行拟合。之后通过对比枫香胸径、树高、冠幅实际分布曲线与拟合曲线进行分析探讨,并对拟合结果进行残差分析,从而说明拟合精度。

三参数 Weibull 分布的概率密度函数^[15]为:

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

式(1)中: a , b , c 分别称为位置参数、尺度参数及形状参数, e 为自然对数的底, x 分别对应径阶、树高级、冠幅级的频数, $f(x)$ 分别对应各径阶、树高级、冠幅级数百分数。在利用三参数 Weibull 分布密度函数进行拟合时,一般将参数 a 分别定为枫香胸径、树高、冠幅的下限值,根据其分布函数形式(2)的性质,通过线性变换得式(3),采用线性求解法求解参数 b 和 c 。式(1)对应的分布函数形式如下:

$$f(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b} \right)^c} & x > a \\ 0 & x \geq a \end{cases} \quad (2)$$

变换可得:

$$\ln\{-\ln[1-F(x)]\} = -c \ln b + c \ln(x-a) \quad (3)$$

式(3)中: $F(x)$ 对应各数量级胸径、树高、冠幅 x 的累计株数百分数,其中 $F(x) = 1$ 不参与拟合。用式(3)求出枫香胸径、树高、冠幅的分布参数 a , b , c , 然后通过 matlab 编程进行枫香株数分布拟合。

2.2.2 枫香生物量分布规律 测定树种的生物量,对于评价该树种的生产力及提高营林水平和综合利用其产品都有重要意义^[16]。目前,测定生物量的方法有很多,本研究采用适合浙江省枫香树种的单株生物量模型: $S_1 = S_2 + S_3 + S_4$; $S_2 = 0.044 \ 4 H^{0.719} \ 7 D^{1.709 \ 5}$; $S_3 = 0.085 \ 6 D^{1.226 \ 57} L^{0.397 \ 0}$; $S_4 = 0.045 \ 9 H^{0.106 \ 7} D^{2.024 \ 7}$ 。其中: S_1 为单株生物量总量, S_2 为树干部分生物量, S_3 为树冠部分生物量, S_4 为树根部分生物量^[17]。通过计算枫香各径阶、各部分生物量及总和来分析天目山枫香的生物量分布规律。

2.2.3 枫香株数密度 株数密度是林业调查时常用的一个指标。本研究采用数理统计方法将各标准地中枫香单独列出进行统计,计算枫香株数密度的变动系数,从而分析枫香在各标准地中的密度分布特征。

2.2.4 枫香空间分布格局 分析林木空间分布格局的方法主要有样方法、距离法和角尺度法等 3 类^[18]。本研究采用角尺度法来分析枫香的空间分布格局。在林分中,任意 2 个最近相邻木的夹角有 2 个,令小角为 α ,角尺度 W_i 被定义为 α 角小于标准角 α_0 ($\alpha_0 = 72^\circ$) 的个数占所考察的最近 4 株相邻木的比例。通过 W_i 可以得到角尺度均值 $\bar{W}$,当取值范围在 $[0.475, 0.517]$ 内时林分为随机分布,小于 0.475 时为均匀分布,大于 0.517 时则为团状分布^[19]。角尺度均值计算公式为:

$$\bar{W} = \frac{1}{N} \sum_i W_i = \frac{1}{4N} \sum_i \sum_{j=1}^N Z_{ij} \quad (4)$$

式(4)中, $Z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角小于标准角 } \alpha_0 \\ 0, & \text{当第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角大于标准角 } \alpha_0 \end{cases}$; N 为林分内参照树的株数; i 为任一参照树^[20]; j 为参照树 i 的 4 株最近相邻木; W_i 为角尺度。通过计算机软件编程进行边缘矫正并计算出各标准地中枫香的平均角尺度。

3 结果分析

3.1 Weibull 分布密度函数拟合参数

结果见表 2。拟合相关指数 R^2 表明拟合效果良好, 表明可以采用 Weibull 分布密度函数拟合枫香的胸径、树高、冠幅分布规律。

3.2 胸径结构

通过统计各径阶的枫香株数, 可以得到表 3。根据表 3 和胸径分布拟合结果可以得到枫香各径阶实际株数分布同 Weibull 分布曲线对比图 1。从图中可以看出: 枫香胸径实际分布近似于倒“J”型曲线, 6~10 cm 径阶枫香株数占绝大多数, 12~64 cm 径阶枫香株数较少。Weibull 分布函数拟合呈倒“J”型曲线, 同样是 6~10 cm 径阶枫香株数占绝大多数, 12~64 cm 径阶枫香株数较少。为了较好地反映拟合结果, 以径阶为横坐标、各径阶株数残差为纵坐标作直径拟合残差图。从图 2 中可以看出: Weibull 分布模型在 6~14 cm 小径阶时拟合误差较大, 而大径阶中仅有 32 cm 径阶误差较大, 较好的拟合了大径阶林木株数。

表 2 Weibull 分布函数拟合的参数值

Table 2 Values of parametric fitting of Weibull distribution

参数	a	b	c	R^2
胸径	5.0	6.569 7	0.777 7	0.961 8
树高	5.5	2.783 8	0.961 3	0.966 1
冠幅	0.5	3.584 6	2.622 4	0.988 5

表 3 各径阶枫香株数分布

Table 3 Distribution of plant number in different diameter classes

径阶/cm	株数/株	径阶/cm	株数/株	径阶/cm	株数/株	径阶/cm	株数/株	径阶/cm	株数/株
6	45	14	12	22	4	30	3	38	4
8	59	16	5	24	4	32	8	40	2
10	41	18	5	26	3	34	3	46	1
12	18	20	7	28	5	36	3	64	1

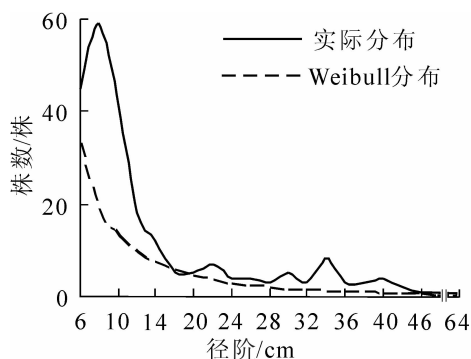


图 1 枫香胸径实际分布与 Weibull 分布

Figure 1 Actual distribution in contrast with Weibull distribution of *Liquidambar formosana* diameter

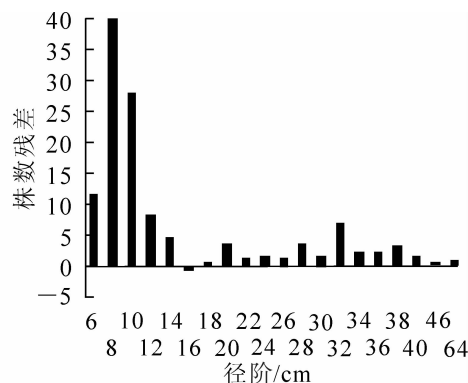


图 2 胸径拟合残差图

Figure 2 Residual plot of diameter fitting

3.3 树高结构

按各树高级统计枫香株数, 可以得到表 4。根据表 4 和树高分布拟合结果可以得到枫香各树高级实际株数分布同 Weibull 分布曲线对比图 3, 从中可以看出枫香直径实际分布近似于倒“J”型曲线, 树高主要集中在 6~9 m, 大于 9 m 的枫香株数较少, 较高的树主要集中在 15 m 高, 随着树高级的增大, 株数越来越少。Weibull 分布函数拟合呈倒“J”型曲线, 同样是 6~9 m 树高级的枫香株数占绝大多数, 大于 9 m 的越来越少。为了较好地反映拟合结果, 以树高级为横坐标、各树高级株数残差为纵坐标作树高拟合残差图。从图 4 中可以看出: Weibull 分布模型在 7, 8, 14~16 m 树高时低估株数, 在 6, 9~11 m 树高时高估株数, 除 6~8 m 树高级外, 其余拟合效果均较好。

表 4 各树高级枫香株数分布

Table 4 Distribution of plant number in different height classs

树高级/m	株数/株	树高级/m	株数/株	树高级/m	株数/株	树高级/m	株数/株	树高级/m	株数/株
6	41	9	18	12	8	15	11	18	1
7	64	10	11	13	6	16	8	19	0
8	46	11	9	14	8	17	1	20	1

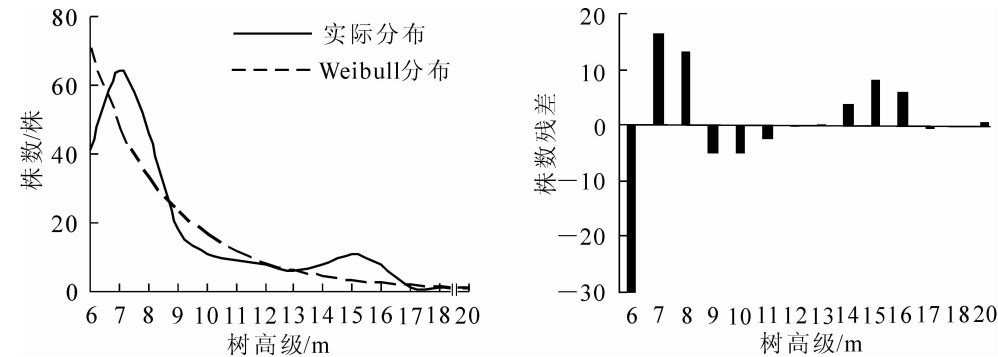


图 3 枫香树高实际分布与 Weibull 分布
Figure 3 Actual distribution in contrast with Weibull distribution of *Liquidambar formosana* height

图 4 树高拟合残差图
Figure 4 Residual plot of height fitting

3.4 冠幅结构

按各冠幅级统计枫香株数，可以得到表 5。根据表 5 和冠幅分布拟合结果可以得到枫香各冠幅级实际株数分布同 Weibull 分布曲线对比图 5，可以看出实际分布同 Weibull 分布拟合冠幅分布较为一致，都呈偏左的正态分布，株数多的集中在冠幅级为 3~5 m 的区间。为了较好的反映拟合结果，以冠幅级为横坐标、各冠幅级株数残差为纵坐标作冠幅拟合残差图。从图 6 中可以看出：Weibull 分布模型在 2, 4 m 冠幅时误差较大，较好的拟合了其余冠幅级枫香株数。

3.5 生物量结构

根据单株生物量模型，计算出枫树干、树冠、树根等各部分生物量。计算可得各标准地枫香生物量

表 5 各冠幅级枫香株数分布

Table 5 Distribution of plant number in different crown breadth classes

冠幅级/m	株数/株	冠幅级/m	株数/株	冠幅级/m	株数/株	冠幅级/m	株数/株	冠幅级/m	株数/株
1	1	3	71	5	36	7	5	9	0
2	24	4	72	6	17	8	6	10	1

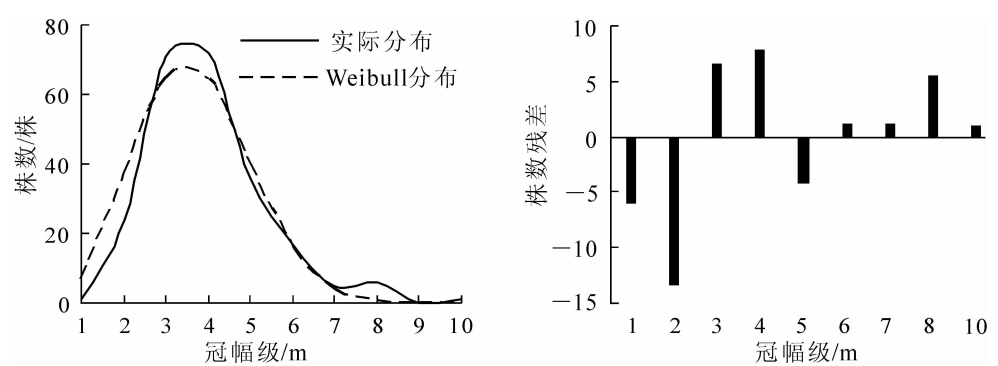


图 5 枫香冠幅实际分布与 Weibull 分布
Figure 5 Actual distribution in contrast with Weibull distribution of *Liquidambar formosana* crown

图 6 冠幅拟合残差图
Figure 6 Residual plot of crown fitting

总量为 12 044.134 kg，其中树干生物量为 6 907.224 kg，树冠生物量为 1 032.209 kg，树根生物量为 4 104.701 kg。统计各径阶各部分生物量可以得到折线图 7，计算各径阶枫香生物量总和得到图 8。

图 7 所示天目山枫香生物量构成中，树干>树根>树冠。树干和树根各径阶生物量呈多峰曲线状，且树干生物量分布曲线和树根生物量分布曲线起伏近似一致，树干和树根生物量分布较多的部分集中在相同径阶。树冠生物量曲线趋于平稳，各径阶变化幅度不大；图 8 为枫香在各径阶生物量分布的具体情况，生物量较多部分主要集中在 8，10，28，32，36，38，64 cm 径阶，综合各径阶株数分布，小径阶和大径阶中生物量分布较多的部分，株数分布也较其他径阶多，大径阶生物量含量高，但株数较小径阶株数少。

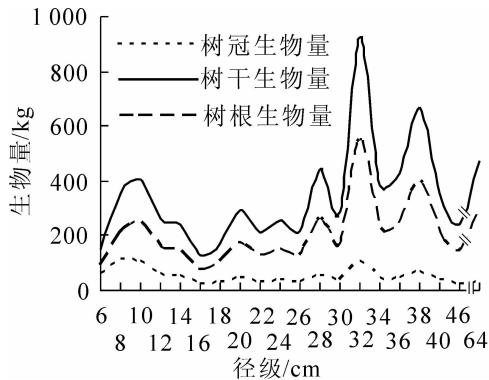


图 7 枫香各径阶树干、树冠、树根生物量分布

Figure 7 Distribution of trunk biomass, crown biomass, tree root biomass in all diameter classes

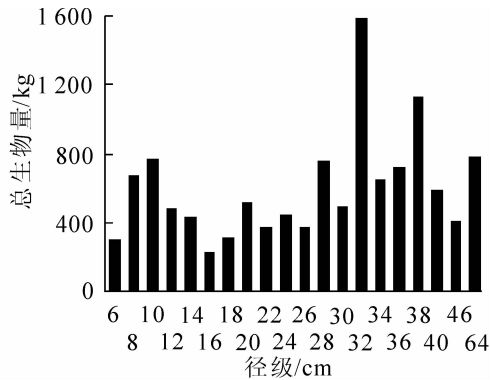


图 8 枫香各径阶生物量分布

Figure 8 Distribution of *Liquidambar formosana* biomass in all diameter classes

3.6 枫香密度分布

计算各标准地枫香密度得到表 6，所有标准地中枫香平均密度为 259 株·hm⁻²，根据变动系数公式 $C_v=\sigma/\mu$ ，计算出各标准地枫香密度的变动系数为 0.625。由此可知，各标准地枫香株数分布不均衡，密度相差较大，从而反映出天目山枫香分布地域差异性较大。

表 6 各标准地枫香株数及密度

Table 6 Total and density of *Liquidambar formosana* in different sample plots

样地号	株数/株	密度/(株·hm ⁻²)	样地号	株数/株	密度/(株·hm ⁻²)	样地号	株数/株	密度/(株·hm ⁻²)
1	53	589	5	15	167	9	17	189
2	13	144	6	18	200	10	13	144
3	44	489	7	15	167			
4	32	356	8	13	144			

3.7 枫香空间分布格局

用式(4)计算所有标准地枫香角尺度均值得到表 7，从中可以看出 10 块标准地枫香角尺度均值均大于 0.517，各标准地枫香均呈现为团状分布。由此也反映出天目山枫香整体分布格局为聚集分布。

表 7 各标准地枫香角尺度均值

Table 7 Mean value of neighbourhood pattern in different sample plots

样地号	$\overline{W}$	样地号	$\overline{W}$	样地号	$\overline{W}$	样地号	$\overline{W}$	样地号	$\overline{W}$
1	0.590	3	0.614	5	0.600	7	0.600	9	0.574
2	0.673	4	0.578	6	0.708	8	0.700	10	0.615

4 结论与讨论

Weibull 分布密度函数灵活性强、适用范围较广，常用来分析整体林分的直径生长规律。本研究将针阔混交林中枫香单独列出，用 Weibull 分布密度函数拟合，结果表明：Weibull 分布基本适用于模拟天目山枫香的胸径、树高、冠幅结构规律。在进行胸径拟合时，拟合株数较实际株数偏少，在小径阶时拟合误差较大，但较好地拟合了大径阶枫香株数；拟合树高结构时，除 6~8 m 树高级外，其余拟合效果均较好；拟合冠幅结构时，在 2 m 和 4 m 冠幅级误差较大，其余冠幅级拟合效果较好。综合拟合曲线图，Weibull 分布曲线近似符合枫香胸径、树高、冠幅实际分布的规律，仍能反映出天目山枫香树种的生长规律。

总体上看，标准地内的枫香直径呈不规则的倒“J”型曲线分布，小径阶的枫香株数最多，随着胸径的增大枫香株数开始急剧递减，到一定径阶后，其递减速度减慢，并趋于平稳，与天然林分的生长规律相符合。大径阶株数占有一定比例，同时能够维持物种的自我更新，在生态学意义上有较强稳定性，符合森林经营标准。

枫香树高分布也近似倒“J”型曲线分布，株数分布在 6~9 m 的占多数，树高较高的株数分布较少、近似均匀，这和枫香的胸径规律有着密切的关系。冠幅则呈偏左的正态分布，中小尺度冠幅的株数占比例最大。枫香的胸径、树高、冠幅结构规律基本一致，基本符合森林经营的目标结构。

枫香生物量较多的主要分布在 8~10 cm 径阶、28~38 cm 径阶、64 cm 径阶，峰值出现在 32 cm 径阶。结合各径阶实际株数分析，8~10 cm 径阶株数较多，28~38 cm 径阶的株数在大径阶林木中相比略多，因此生物量较高。64 cm 径阶株数仅 1 株，属异常情况，从中也可以看出胸径大的枫香单株生物量占绝对优势，大径阶枫香的生物量占枫香总生物量中的比例最大。树干、树根生物量占枫香总体生物量的 91.4%，在生物量构成中，树干>树根>树冠。各径阶枫香树干、树根生物量分布不均匀，分布曲线较为一致，各径阶树冠生物量较为均匀，起伏不大。

在不考虑其他树种的情况下，标准地内枫香平均密度为 259 株·hm⁻²，变动系数为 0.625，分布呈现不均衡性；各标准地枫香角尺度均值较大，均为团状分布。总体而言，天目山枫香分布在地域上差异明显，在种群内呈聚集状，应该同与其他物种的竞争和不同地域的立地质量有关。

通过对天目山针阔混交林中枫香胸径、树高、冠幅、生物量、株数密度、空间分布结构的综合分析，对今后天目山自然保护区的林分调整、生态维护及景观营建等方面有着重要的指导意义。为了更深入全面的分析混交林各方面结构，还需要进一步对标准地整体资料进行研究、分析。

参考文献：

- [1] 韦直, 何业祺. 浙江植物志[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1993: 120 - 121.
- [2] 余新松, 方乐金. 枫香树幼林生长节律的观察研究[J]. 江苏林业科技, 2001, 28 (2): 13 - 36.
SHE Xinsong, FANG Lejin. An investigation on growth rhythm of young trees of *Liquidambar* [J]. *J Jiangsu For Sci Technol*, 2001, 28 (2): 13 - 36.
- [3] 马俊, 韦新良, 尤建林, 等. 生态景观林树种选择定量研究[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25 (5): 578 - 583.
MA Jun, WEI Xinliang, YOU Jianlin, et al. Tree species selection for an ecological landscape forest at Qingshan Lake, Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, 25 (5): 578 - 583.
- [4] 韦新良, 马俊, 刘恩斌, 等. 生态景观林树种选择适宜性评价技术研究[J]. 西北林学院学报, 2008, 23 (6): 207 - 212.
WEI Xinliang, MA Jun, LIU Enbin, et al. Suitability evaluation of tree species for ecological and landscape purpose [J]. *J Northwest For Univ*, 2008, 23 (6): 207 - 212.
- [5] 金保东, 陈培森, 白新森. 枫香在针阔混交林中的作用及其开发前景[J]. 防护林科技, 2001 (3): 65 - 68.
JIN Baodong, CHEN Peisen, BAI Xinsen. Function and development prospect of *Liquidambar formosana* in mixed coniferous and broad-leaved forest [J]. *Pro For Sci & Technol*, 2001 (3): 65 - 68.
- [6] 徐小牛, 李宏开. 马尾松枫香混交林生长及其效应研究[J]. 林业科学, 1997, 33 (5): 385 - 393.
XU Xiaoni, LI Hongkai. Study on the growth of mixed stands of *Pinus massoniana* and *Liquidambar formosana* and its

- ecological benefits [J]. *Sci Silv Sin*, 1997, **33** (5), 385 – 393.
- [7] 张桦, 王建功, 徐连喜. 皖西地区马尾松枫香混交林效益研究[J]. 安徽农业大学学报, 1999, **26** (2): 225 – 228.
ZHANG Hua, WANG Jiangong, XU Lianxi. Study on ecological effects of mixture plantation of masson pine and sweetgum in western Anhui Province [J]. *J Anhui Agric Univ*, 1999, **26** (2): 225 – 228.
- [8] 钱国钦. 枫香杉木混交林生产力及生态特性[J]. 浙江林学院学报, 2000, **17** (3): 289 – 293.
QIAN Guoqin. Productivity and ecological characteristics of mixed forest of Chinese sweetgum and Chinese fir [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2000, **17** (3): 289 – 293.
- [9] 黄勇来. 枫香与不同树种混交林的生长及生物生产力研究[J]. 西南林学院学报, 2006, **26** (2): 15 – 18.
HUANG Yonglai. Comparison of growth and biomass productivity of mixed and pure forests of *Liquidambar formosana* [J]. *J Southwest For Coll*, 2006, **26** (2): 15 – 18.
- [10] 林书荣. 枫香与杉木、马尾松混交林生长效果研究[J]. 福建林业科技, 2007, **34** (3): 100 – 121.
LIN Shurong. A study on the growth affected by *Pinus massoniana* or *Cunninghamia lanceolata* mixed with *Liquidambar formosana* [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2007, **34** (3): 100 – 121.
- [11] 黄勇来. 枫香天然林及人工林群落特征和生长过程比较[J]. 福建林学院学报, 2004, **24** (4): 361 – 364
HUANG Yonglai. Comparison between community characteristics and growth of natural forest and plantation of *Liquidambar formosana* Hance [J]. *J Fujian Coll For*, 2004, **24** (4): 361 – 364.
- [12] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006: 71 – 80.
- [13] LAURI M. An algorithm for ensuring compatibility between estimated percentiles of diameter distribution and measured stand variables [J]. *For Sci*, 2004, **50** (1): 20 – 32.
- [14] 龚直文, 亢新刚, 顾丽, 等. 天然林林分结构研究方法综述[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26** (3): 434 – 443.
GONG Zhiwen, KANG Xingang, GU Li, *et al.* Research methods on natural forest stand structure: a review [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26** (3): 434 – 443.
- [15] 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: 自然科学报, 1998, **22** (4): 14 – 18.
ZHOU Chunguo, SHE Guanghui, WU Fuzhen, *et al.* A study on the tropical rain forest stand structure with improved Weibull function [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 1998, **22** (4): 14 – 18.
- [16] 薛立, 杨鹏. 森林生物量研究综述[J]. 福建林学院学报, 2004, **24** (3): 283 – 288.
XUE Li, YANG Peng. Summary of research on forest biomass [J]. *J Fujian Coll For*, 2004, **24** (3): 283 – 288.
- [17] 袁位高, 江波, 葛永金, 等. 浙江省重点公益林生物量模型研究[J]. 浙江林业科技, 2009, **29** (2): 1 – 5.
YUAN Weigao, JIANG Bo, GE Yongjin, *et al.* Study on biomass model of key ecological forest in Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2009, **29** (2): 1 – 5.
- [18] 惠刚盈, 李丽, 赵中华, 等. 林木空间分布格局分析方法[J]. 生态学报, 2007, **27** (11): 4717 – 4728.
HUI Gangying, LI Li, ZHAO Zhonghua, *et al.* The comparison of methods in analysis of the tree spatial distribution pattern [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27** (11): 4717 – 4728.
- [19] HUI Gangying, von GADOW K. Das winkelmaß herleitung des optimalen standardwinkels [J]. *Allg Forst-u J-Ztg*, 2002, **173** (10): 173 – 178.
- [20] 惠刚盈, von GADOW K, ALBERT M. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数[J]. 林业科学, 1999, **35** (1): 37 – 42.
HUI Gangying, von GADOW K, ALBERT M. The neighbourhood pattern: a new structure parameter for describing distribution of forest tree position [J]. *Sci Silv Sin*, 1999, **35** (1): 37 – 42.