

宁波四明山黄山松人工林结构特征

白超¹, 余敏芬², 娄明华³, 毛建方², 徐婧², 翁学珪², 张琦¹, 杨沁雨¹

(1. 宁波市测绘和遥感技术研究院, 浙江 宁波 315042; 2. 宁波市林场, 浙江 宁波 315440;
3. 宁波市农业科学研究院, 浙江 宁波 315040)

摘要: 通过对四明山黄山松 *Pinus taiwanensis* 人工林的结构特征进行分析, 更好地为该区域林分经营提供理论参考。2021 年 11 月, 以在宁波市林场商量岗林区 3 林班建立的 100 m×100 m 黄山松人工林固定样地为研究对象, 利用角尺度 (W)、聚集指数 (R)、大小比数 (U)、混交度 (M)、大小分化度 (T)、竞争指数 (CH) 等空间结构参数, 分析黄山松人工林及其主要树种黄山松、柳杉 *Cryptomeria fortunei* 和山樱花 *Cerasus serrulata* 的结构特征。结果表明: 林分整体呈聚集分布 ($W=0.513$, $R=0.846$), 林木大小处于中庸状态 ($U=0.486$, $T=0.420$), 树种混交程度高 ($M=0.746$), 但竞争压力大 ($CH=68.006$), 林下更新良好 (径级结构呈倒 J 形分布); 黄山松种群呈随机分布 ($W=0.507$, $R=1.060$), 林木处于优势状态, 大小差异程度大 ($U=0.080$, $T=0.627$), 混交度高 ($M=0.882$) 且竞争压力小 ($CH=5.104$), 但幼树少更新差 (径级结构呈正态分布); 柳杉种群呈均匀分布 ($W=0.419$, $R=1.506$), 混交度极低 ($M=0.009$), 林木大小呈中庸态势 ($U=0.423$, $T=0.376$), 而竞争压力很小 ($CH=1.791$), 林下更新也一般 (径级结构类似正态多峰分布); 山樱花种群呈聚集分布 ($W=0.529$, $R=0.846$), 林木大小呈中庸态势, 混交程度高 ($M=0.780$), 竞争压力较大 ($CH=28.868$), 但林下更新好 (径级结构呈倒 J 形分布)。由于林分整体密度过大, 林分聚集分布不利于林分健康稳定发展, 建议将有培育潜力的黄山松和柳杉按大径材培育, 伐除病劣和影响大径材目标树生长的干扰木, 采取间伐降低林分密度, 趋向随机分布优化林木格局, 补植乡土珍贵阔叶树种, 促进林分正向演替形成多树种复层异龄混交林。

关键词: 黄山松人工林; 空间结构特征; 径级结构; 四明山

中图分类号: S718.55 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776 (2023) 04-0010-09

Structural Characteristics of *Pinus taiwanensis* Plantation in Siming Mountain of Ningbo

BAI Chao¹, YU Minfen², LOU Minghua³, MAO Jianfang², XU Jing², WENG Xueyao², ZHANG Qi¹, YANG Qinyu¹

(1. Ningbo Institute of Surveying and Mapping & Remote Sensing of Zhejiang, Ningbo 315042, China; 2. Ningbo Forest Farm of Zhejiang, Ningbo 315440, China; 3. Ningbo Academy of Agricultural Sciences of Zhejiang, Ningbo 315040, China)

Abstract: In November 2021, a 100×100 m permanent sample plot was established for tally in *Pinus taiwanensis* plantation planted in 1969 in Ningbo Forest Farm, Siming Mountain, Zhejiang province. Structure characteristics of plantation and dominant tree species were analyzed by spatial structure index and diameter distribution. The spatial structure index included uniform angle index (W), aggregation index (R), dominance index (U), differentiation index (T), mingling index (M) and competition index (CH). The result demonstrated that distribution pattern of the stand ($W=0.513$, $R=0.846$) was aggregated, so as that of *Cerasus. serrulata* ($W=0.529$, $R=0.846$), that of *P. taiwanensis* ($W=0.507$, $R=1.060$) random distribution, that

收稿日期: 2022-12-04; 修回日期: 2023-04-09

基金项目: 宁波市科学技术局公益性科技计划项目 (2021S019); 宁波市林场 2021 年度科技推广项目 (LK202105)

作者简介: 白超, 工程师, 从事森林培育和森林规划设计调查工作; E-mail:506064788@qq.com。通信作者: 余敏芬, 工程师, 从事林木育种和森林资源保护研究; E-mail:491856944@qq.com。

of *Cryptomeria fortunei* ($W=0.419$, $R=1.506$) uniform distribution. The dominance index of the stand ($U=0.486$, $T=0.420$), of *C. serrulata* ($U=0.419$, $T=0.408$) and of *C. fortunei* ($U=0.423$, $T=0.376$) showed medium tree size, while that of *P. taiwanensis* ($U=0.080$, $T=0.627$) showed tree size advantage. Mingling of the stand ($M=0.746$), of *P. taiwanensis* ($M=0.882$) and of *C. serrulata* ($M=0.780$) showed strong mingling, but that of *C. fortunei* ($M=0.009$) weak mingling. The competition index was ordered by the stand ($CH=68.006$) > *C. serrulata* ($CH=28.868$) > *P. taiwanensis* ($CH=5.104$) > *C. fortunei* ($CH=1.791$). It concluded that the stand with aggregated distribution, medium tree size, high species mingling, indicating stable community structure.

Key words: *Pinus taiwanensis* plantation; spatial structure characteristics; diameter class distribution; Siming Mountain

森林结构泛指不同植物种类和大小的空间配置与分布, 可用不同变量从不同方面进行测度, 但地上部分林分水平分布格局和树种配置以及林木大小分布等指标尤为重要, 在整个森林生态系统结构和功能以及物质循环过程中发挥着关键作用。随着生态环境保护意识的日益提升, 提出森林多功能发展, 构建结构稳定、功能多样、固碳高效的森林越来越受到重视^[1-2]。科学合理的森林经营, 通过辅以人工措施, 调整森林结构达到一个合理的状态, 加速森林的恢复和正向演替, 进而培育出稳定健康的森林生态系统。多功能经营的目标是培育异龄、混交、复层结构的多功能森林, 已被广泛应用于森林质量精准提升中^[3-4]。结构化森林经营属于多功能森林经营的代表性技术模式, 其根据结构决定功能的原理, 采用优化空间结构的手段, 利用空间结构参数分析林分空间特征指导林分结构调整, 对建群种竞争、林木格局和树种混交进行有的放矢的调整^[5], 进而达到培育健康稳定森林的目的。结构化森林经营技术方法具有完整的体系和指标, 常被应用于森林空间结构分析及经营评价。刘振华等^[6]利用结构化森林经营技术评价柏木 *Cupressus funebris*、鹅掌楸 *Liriodendron chinense* 和杉木 *Cunninghamia lanceolata* 针阔混交林林分的稳定性。魏红洋^[7]以帽儿山天然次生林为研究对象, 提出不同林分类型的结构化经营模式。张岩^[8]在塞罕坝机械林场北漫甸林场, 基于结构化森林经营理论的森林经营方案优化了林分结构。

四明山是浙东地区的生态屏障, 号称“浙东绿肺”, 宁波市林场是四明山森林资源精华所在, 是宁波和绍兴地区甬江、奉化江、姚江、鄞江的发源地, 是宁波市人工林分质量最好、森林资源最丰富、生态环境最优美的区域。但该区域目前存在森林植被单一, 林分结构不合理等问题, 以松、杉、柏为主的针叶林 (含针叶混交林) 面积占乔木林分面积的 82.32%, 其中黄山松 *Pinus taiwanensis* 面积占比高达 52.62%。如何通过科学经营森林促进四明山区域黄山松林健康稳定发展, 是该区域森林可持续发展的关键。目前, 国内关于黄山松林分结构方面的研究较多, 如余丽慧等^[9]基于浙江景宁草鱼塘亚热带针阔混交林, 分析了优势种黄山松的空间格局; 侯梅等^[10]分析了湖北麻城黄山松天然次生林的直径分布特征; 常陈豪等^[11]以河南信阳黄柏山林场黄山松人工林为研究对象, 比较分析了不同间伐强度对黄山松人工林林分空间结构及稳定性的影响; 吕康婷等^[12]分析了河南大别山区黄柏山林场黄山松人工林林分空间结构对林下植物多样性的影响等。然而, 关于宁波四明山区域黄山松人工林空间结构特征的研究暂未见报道。因此, 本研究对四明山黄山松人工林林分结构特征进行分析, 尤其是剖析空间结构特征, 为黄山松人工林科学经营管理和森林质量提升提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁波市林场位于宁波市区西部的四明山腹地, 地理坐标为 $121^{\circ}00' \sim 121^{\circ}14' \text{ E}$, $29^{\circ}38' \sim 29^{\circ}47' \text{ N}$, 主要坐落于余姚市境内, 总经营面积 $6\,566 \text{ hm}^2$, 下设商量岗、灵溪、仰天湖、甘竹岭、黄海田和周公宅六个林区。地处中亚热带和北亚热带边界, 为典型的中亚热带低、中山气候, 偏冷而湿润, 四季分明, 光照充足, 雨量充沛, 冬夏季风交替明显, 夏季凉爽, 7 月平均温度为 $22.9 \sim 24.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 最高气温不超过 $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 冬季寒冷, 1 月平均温度为 $-2.0 \sim 1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 极端最低温度达 $-14 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 年平均气温在 $11.6 \sim 12.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 无霜期为 203 d, 年降水量为 $1\,900 \text{ mm}$ 左右, 年平均相对湿度为 83.0%。土壤以黄壤为主, 有山地黄泥土、山地砂石土和红壤等。

1.2 样地设置与数据收集

2021 年 11 月, 在宁波市林场商量岗林区 3 林班 (海拔 802 ~ 961 m) 选取典型地段设置 1 个 100 m × 100 m 的黄山松人工林固定样地。为便于样地调查, 将样地分为 20 m × 20 m 的样方, 共 25 个样方。该林分造林始于 1969 年, 在立地条件较好的坡下种植柳杉 *Cryptomeria fortunei*, 种植株行距为 1.67 m × 1.67 m; 在立地条件较差的坡上种植黄山松, 种植株行距为 1.33 m × 1.33 m; 自 2000 年后未进行森林经营等措施; 共 46 种树种, 主要树种为黄山松、柳杉和山樱花 *Cerasus serrulata* (表 1)。利用 RTK 放样法 (G970) 进行每木定位, 测量每木坐标, 采用胸径围尺测定胸径 (为便于统计进阶林木, 起测林木胸径为 4 cm), 利用 Vertex IV 超声波树木测高测距仪测量树高与枝下高, 用皮尺测定东西南北 4 个方向冠幅, 并记录树种。同时记录经纬度、海拔、坡度、坡位、坡向等因子。

表 1 黄山松人工林树种基本情况
Tab. 1 Basic information and species composition of *P. taiwanensis* stand

林分及其树种	拉丁名	平均胸径/cm	平均树高/m	平均冠幅/m	平均断面积/(m ² ·hm ⁻²)	密度/(株·hm ⁻²)	树种平均断面积比例/%
林分		11.9	8.0	1.8	28.420	1 695	100.000
黄山松	<i>Pinus taiwanensis</i>	24.7	12.8	2.0	14.236	285	50.085
柳杉	<i>Cryptomeria fortunei</i>	24.7	15.4	2.0	4.751	88	16.716
山樱花	<i>Cerasus serrulata</i>	12.7	8.6	2.3	3.080	209	10.836
山胡椒	<i>Lindera glauca</i>	7.4	5.7	1.6	0.880	180	3.094
杉木	<i>Cunninghamia lanceolata</i>	17.7	10.7	1.4	0.864	31	3.040
八角枫	<i>Alangium chinense</i>	7.8	6.6	1.8	0.626	105	2.204
灯台树	<i>Bothrocaryum controversum</i>	10.3	7.3	2.0	0.581	60	2.044
白檀	<i>Symplocos paniculata</i>	5.6	5.0	1.5	0.572	224	2.014
黄檀	<i>Dalbergia hupeana</i>	9.0	8.2	1.7	0.543	73	1.910
琉璃白檀	<i>Symplocos sawafutagi</i>	7.1	6.0	1.6	0.287	66	1.009
格药柃	<i>Eurya muricata</i>	5.6	4.2	1.4	0.277	107	0.976
樟木	<i>Sassafras tzumu</i>	28.7	14.7	3.6	0.267	4	0.941
山槐	<i>Albizia kalkora</i>	10.0	8.2	2.0	0.194	23	0.682
金钱松	<i>Pseudolarix amabilis</i>	45.2	16.2	5.4	0.160	1	0.565
山榿	<i>Lindera reflexa</i>	5.3	5.4	1.5	0.159	69	0.563
白栎	<i>Quercus fabri</i>	7.7	5.6	1.4	0.105	21	0.371
鸡爪槭	<i>Acer palmatum</i>	9.0	7.7	1.9	0.072	9	0.252
山柿	<i>Diospyros montana</i>	8.4	8.0	1.8	0.071	8	0.251
青钱柳	<i>Cyclocarya paliurus</i>	10.1	7.4	2.2	0.066	7	0.233
赛山梅	<i>Styrax confusus</i>	6.4	6.1	1.7	0.064	17	0.224
麻栎	<i>Quercus acutissima</i>	10.2	6.2	1.5	0.055	6	0.195
赤杨叶	<i>Alniphyllum fortunei</i>	13.4	8.8	2.0	0.054	3	0.189
野漆	<i>Toxicodendron succedaneum</i>	7.6	5.9	1.3	0.050	10	0.175
云锦杜鹃	<i>Rhododendron fortunei</i>	7.0	8.0	1.4	0.049	12	0.171
玉兰	<i>Magnolia denudata</i>	10.8	8.9	2.2	0.048	5	0.168
蓝果树	<i>Nyssa sinensis</i>	16.0	10.2	2.7	0.042	2	0.146
豹皮樟	<i>Litsea coreana</i> var. <i>sinensis</i>	6.3	4.7	1.4	0.040	10	0.140
木荷	<i>Schima superba</i>	7.8	5.3	1.6	0.036	7	0.125
海棠花	<i>Malus spectabilis</i>	5.9	6.3	1.8	0.035	12	0.122
白背叶	<i>Mallotus apelta</i>	7.4	6.3	1.5	0.029	6	0.101
青冈	<i>Cyclobalanopsis glauca</i>	6.7	5.1	1.5	0.024	6	0.086
椿叶花椒	<i>Zanthoxylum ailanthoides</i>	16.2	14.2	4.6	0.021	1	0.073
栗	<i>Castanea mollissima</i>	9.9	6.5	2.5	0.015	2	0.054
垂丝石楠	<i>Photinia komarovii</i>	7.9	6.0	2.1	0.010	2	0.036
紫珠	<i>Callicarpa bodinieri</i>	5.1	4.3	1.5	0.010	5	0.036
肉花卫矛	<i>Euonymus carnosus</i>	6.1	5.6	1.1	0.009	3	0.031
野鸦椿	<i>Euscaphis japonica</i>	6.5	5.9	1.4	0.007	2	0.024
鹅耳枥	<i>Carpinus turczaninowii</i>	5.1	5.4	1.3	0.006	3	0.022

表 1 (续)							
林分及其树种	拉丁名	平均胸径/cm	平均树高/m	平均冠幅/m	平均断面积 /(m ² ·hm ⁻²)	密度 /(株·hm ⁻²)	树种平均断 面积比例/%
化香树	<i>Platycarya strobilacea</i>	6.2	6.2	1.2	0.006	2	0.021
厚皮香	<i>Ternstroemia gymnanthera</i>	5.0	4.6	1.3	0.004	2	0.014
苦槠木	<i>Fraxinus insularis</i>	7.0	4.7	1.0	0.004	1	0.014
下江忍冬	<i>Lonicera modesta</i>	6.7	7.2	1.0	0.004	1	0.012
杜鹃	<i>Rhododendron simsii</i>	4.6	3.2	1.2	0.003	2	0.012
红脉钓樟	<i>Lindera rubronervia</i>	6.4	3.8	1.9	0.003	1	0.011
香桂	<i>Cinnamomum subavenium</i>	6.0	6.1	1.3	0.003	1	0.010
胡颓子	<i>Elaeagnus pungens</i>	4.2	6.0	1.3	0.001	1	0.005

1.3 空间结构参数及评价

(1) 角尺度计算。本文采用对象木取 4 株最近邻木的角尺度^[13-15]:

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{ij}$$
$$W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i$$

式中, W_i 为对象木 i 的角尺度; Z_{ij} 为对象木 i 的第 j 个相邻木角度取值, 当第 j 个相邻木 α 角小于标准角时取值为 1, 否则为 0; W 为林分或种群角尺度均值; N 为林分株数。 W 在[0, 1]之间, 其值越小表明林木分布格局越趋向均匀, 反之, 值越大分布格局越趋向聚集。

(2) 混交度计算。本文采用以 4 株相邻木表达的混交度^[13-15]:

$$M_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_{ij}$$

式中, M_i 为对象木 i 的混交度; v_{ij} 为对象木 i 的第 j 个相邻木的树种取值, 当第 j 个相邻木与对象木 i 为不同树种时取值为 1, 否则为 0; M 为林分或种群混交度均值; N 为林分株数。 M 在[0, 1]之间, 其值越小表明林木树种混交程度越低, 反之, 值越大树种混交程度越高。

(3) 大小比数计算。本文采用对象木取 4 株最近邻木的大小比数^[13-15]:

$$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij}$$
$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$$

式中, U_i 为对象木 i 的大小比数; k_{ij} 为对象木 i 的第 j 个相邻木的大小取值, 当第 j 个相邻木比对象木 i 胸径小时取值为 1, 否则为 0; U 为林分或种群大小比数均值; N 为林分株数。 U 在[0, 1]之间, 值越小表明林木比相邻木大越处于优势, 反之, 值越大越处于劣势。

(4) 分布格局分析。分析分布格局的方法较多, 同一林分采用不同方法分析分布格局可能会出现不同结果。因此, 本文同时采用 Clark and Evans 提出的聚集指数^[16]进行分布格局分析:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i 2\sqrt{\rho}$$

式中, r_i 表示对象木 i 到它的最近相邻木的距离; ρ 表示单位面积林木株数; n 表示样方中的树木株数; R 为林分聚集指数。当 $R=1$ 时为随机分布, $R>1$ 时为均匀分布, $R<1$ 时为聚集分布。

(5) 林木竞争压力分析。本文采用 Hegyi 竞争指数^[17]分析林木竞争压力:

$$CH_i = \sum_{j=1}^n \frac{D_j}{D_i \cdot L_{ij}}$$

$$CH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CH_i$$

式中, n 为空间结构单元中竞争木的株数; N 为样地内对象木的株数; L_{ij} 为对象木与竞争木的距离; D_i 为对象木 i 的胸径; D_j 为竞争木 j 的胸径; CH_i 为对象木 i 的竞争指数; CH 为林分或种群竞争指数均值。 CH 在 $[0, 1]$ 之间, 值越大表明林木竞争压力越大, 反之, 值越小竞争压力越小。

(6) 林木优劣分析。林木大小比数无法定量分析出林木之间的优劣差距, 但大小分化度可以定量分析出对象木与其最近一株邻木的差异程度, 因此, 本文采用大小分化度^[18]进行分析:

$$T_i = 1 - \frac{\min(d_i, d_1)}{\max(d_i, d_1)}$$

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$$

式中, T_i 表示第 i 株林木的大小分化度; d_i 为第 i 株林木的胸径; d_1 表示最近一株邻木胸径; T 为林分或种群大小分化度均值; N 为林木株数。 T 在 $[0, 1]$ 之间, 其值越小表明林木与相邻木之间的大小差异程度越小, 反之, 值越大则大小差异程度越大。

1.4 数据分析与处理

本研究仅对林分整体和平均断面积占比大于 10% 的主要树种(黄山松、柳杉和山樱花)进行结构特征分析。利用 R 语言进行数据处理。为避免边缘效应的影响, 样地四周设置 5 m 缓冲区。

2 结果与分析

2.1 径级结构分析

以 2 cm 整化径阶, 按相对频率统计得到林分及其主要树种黄山松、柳杉和山樱花的径级结构分布特征, 见图 1。从图 1 可知, 林分的径级结构呈现倒 J 形, 6 cm 径阶的林木分布最多, 占 30.67%, 然后随着径阶增加株数分布频率逐渐降低, 最大林木胸径达到 52 cm。黄山松的径级结构呈现正态型分布, 其中 26 cm、28 cm 和 30 cm 径阶分布最多, 其相对频率分别为 13.70%、13.70% 和 13.24%, 林木胸径在 10.7 ~ 37.3 cm 之间。柳杉的径级结构特征呈多峰分布, 在 30 cm 径阶达到峰值, 分别在 12 cm、22 cm、26 cm 和 30 cm 径阶处形成小高峰, 其相对频率分别为 5.88%、10.29%、10.29% 和 11.76%, 林木胸径在 4.6 ~ 52.0 cm 之间。山樱花的径级结构呈现双峰形分布, 林木胸径在 4.4 ~ 32.0 cm 之间, 在 8 cm 径阶分布最多, 在 10 cm 径阶略微降

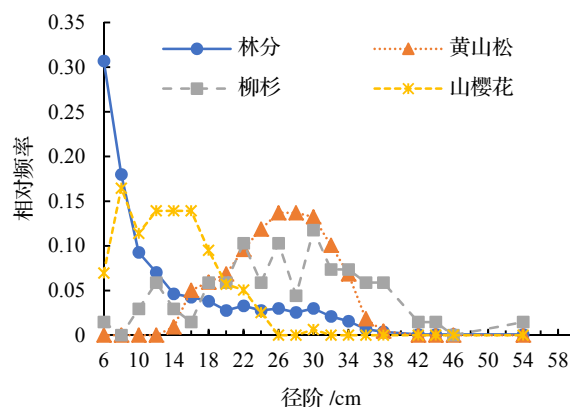


图 1 黄山松人工林径级结构分布

Fig. 1 Diameter class distribution in *P. taiwanensis* plantation

低, 在 12 cm、14 cm 和 16 cm 径阶保持平稳, 其相对频率均为 13.92%, 然后随着径阶增加株数频率逐渐降低。

2.2 空间结构参数一元分布分析

本文采用角尺度、混交度和大小比数的一元分布进行分析(图 2), 选用的每个空间结构参数均包含 5 种结构特征值, 每个小图中的相对频率为处于该种特征下的林木占有所有林木的比例。

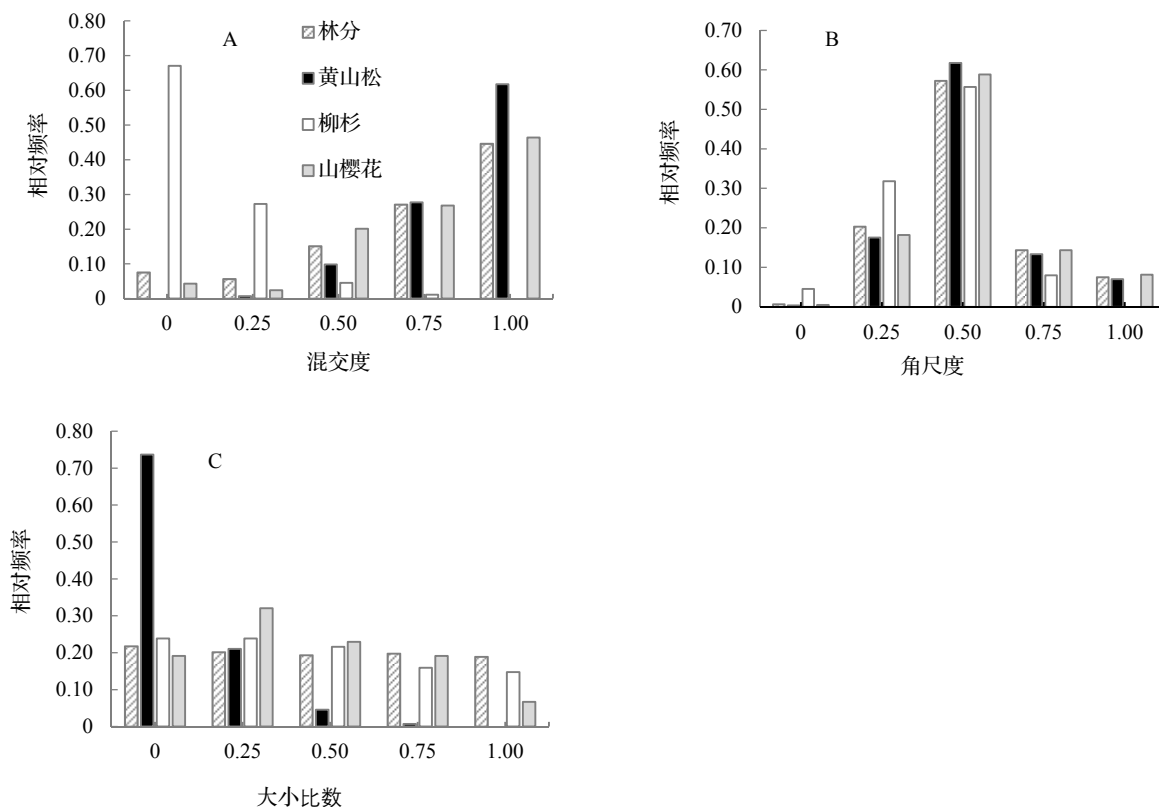


图 2 黄山松人工林空间结构参数一元分布图

Fig. 2 Univariate distribution of spatial structure parameters in *P. taiwanensis* plantation

混交度的 5 种情形分别是, $M=0$ 为零混交, $M=0.25$ 为弱度混交, $M=0.50$ 为中度混交, $M=0.75$ 为强混交, $M=1.00$ 为极强混交(图 2A)。林分整体混交度表现为随着混交等级的增加相对频率逐级增加。对于黄山松, 随着混交度等级的增加相对频率也逐级增加, 但在零混交等级上的相对频率为 0, 在极强混交等级上的相对频率最多, 为 0.62。柳杉则相反, 表现为随着混交等级的增加相对频率逐级减少, 在零混交等级上的相对频率最多, 为 0.67, 在极强混交等级上, 相对频率为 0。对于山樱花, 在零混交等级上的相对频率略高于弱度混交, 然后随着混交等级的增加相对频率逐级增加。

角尺度的 5 种情形分别是, $W=0$ 为很均匀, $W=0.25$ 为均匀, $W=0.50$ 为随机, $W=0.75$ 为不均匀, $W=1.00$ 为很不均匀(图 2B)。林分整体及其主要树种的角尺度均在随机等级上相对频率最多(林分整体 0.57、黄山松 0.62、山樱花 0.59、柳杉 0.56), 其次为均匀等级, 再分别向两端逐级减少。

大小比数的 5 种情形分别是, $U=0$ 为优势, $U=0.25$ 为亚优势, $U=0.50$ 为中庸, $U=0.75$ 为劣势, $U=1.00$ 为绝对劣势(图 2C)。林分整体的大小比数在各等级上的相对频率较均匀, 接近 0.2。黄山松的大小比数在各等级上的相对频率波动较大, 在优势等级上相对频率最多, 为 0.74, 随着大小比数等级的增加相对频率逐级减少, 呈倒 J 形分布。柳杉的大小比数在各等级上的相对频率也较均匀, 在优势和亚优势等级上相对频率略多, 为 0.24, 随着大小比数等级的增加相对频率略微减少。山樱花的大小比数在各等级上的相对频率也较均匀, 在亚优势上相对频率最多, 为 0.32, 再向两端逐级减少。

2.3 空间结构参数均值分析

空间结构参数均值反映出林分整体或种群的平均状态特征。本文亦采用角尺度均值 (W)、聚集指数均值 (R) 分析林木分布格局; 大小比数均值 (U)、大小分化度均值 (T) 分析林木大小优劣态势; 混交度均值(Mg) 分析树种隔离程度; 竞争指数均值 (CH) 分析林木竞争压力, 结果见表 2。

从林木格局分布看, 林分整体的角尺度均值为 0.513 (偏聚集的随机分布), 聚集指数均值为 0.846 (聚集分布), 归为聚集分布; 黄山松的角尺度均值为 0.507 (随机分布), 聚集指数均值为 1.060 (偏随机的均匀分布), 归为随机分布; 柳杉的聚集指数均值为 0.419, 聚集指数均值为 1.506, 两个指标都呈均匀分布; 山樱花的聚集指数均值为 0.529, 聚集指数均值为 0.846, 两个指标均呈现聚集分布。

从林木大小优劣态势看, 林分整体大小比数均值为 0.486, 大小分化度均值为 0.420, 表明林分内大多数林木处于中庸状态, 与最近一株林木之间的大小差异程度一般; 黄山松的大小比数均值为 0.081, 大小分化度均值为 0.627, 表明黄山松林木处于优势状态, 且大小差异程度很大; 山樱花 ($U=0.419, T=0.408$) 和柳杉 ($U=0.423, T=0.376$) 林木大小处于偏优势的中庸状态, 大小差异程度较低。

从树种隔离程度看, 林分整体及其主要树种的混交度均值从大到小分别是黄山松 (0.882) > 山樱花 (0.780) > 林分 (0.746) > 柳杉 (0.099), 可见, 黄山松的树种混交程度最高。

从林木竞争压力看, 林分整体 (68.006) 中大多数林木的竞争压力非常大; 山樱花种群 (28.869) 的竞争压力相对也较大; 而黄山松种群 (5.104) 和柳杉种群 (1.791) 的竞争压力远远低于林分整体。

表 2 黄山松人工林样地空间结构参数均值
Tab. 2 Mean spatial structure parameters of *P. taiwanensis* plantation

林分及其主要树种	W	R	U	T	M	CH
林分	0.513	0.846	0.486	0.420	0.746	68.006
黄山松	0.507	1.060	0.080	0.627	0.882	5.104
柳杉	0.419	1.506	0.423	0.376	0.099	1.791
山樱花	0.529	0.846	0.419	0.408	0.780	28.868

3 结论与讨论

3.1 结论

本文利用角尺度 (W)、聚集指数 (R)、大小比数 (U)、大小分化度 (T)、混交度 (M)、竞争指数 (CH) 等空间结构参数和径级结构分析了宁波四明山黄山松人工林的结构特征。结果表明, 从非空间结构——径级结构看, 林分整体呈现倒 J 形分布, 其主要树种黄山松呈正态分布, 柳杉呈多峰的类似正态分布, 山樱花呈双峰形分布。从空间结构参数一元分布看, 林分及其主要树种的角尺度一元分布都呈现以中庸轴 (W 为 0.50) 为中心向两端减少的分布趋势。在大小比数一元分布上, 林分整体及其主要树种山樱花和柳杉在各等级上分布较为均匀, 但黄山松呈倒 J 形分布。在混交度一元分布上, 林分整体及其主要树种山樱花和黄山松为正 J 形分布, 但柳杉却呈倒 J 形分布。从空间结构参数均值看, 在林木分布格局上, 林分整体 ($W=0.513, R=0.846$) 及其主要树种山樱花 ($W=0.529, R=0.846$) 呈聚集分布, 黄山松 ($W=0.507, R=1.060$) 呈随机分布, 柳杉 ($W=0.419, R=1.506$) 呈均匀分布。在林木大小优劣态势上, 林分整体 ($U=0.486, T=0.420$) 及其主要树种山樱花 ($U=0.419, T=0.408$) 和柳杉 ($U=0.423, T=0.376$) 与最近邻木相比大小呈中庸态势, 而黄山松 ($U=0.080, T=0.627$) 具有明显大小优势; 在树种隔离程度上, 树种混交程度从高到低依次为黄山松 ($M=0.882$) > 山樱花 ($M=0.780$) > 林分整体 ($M=0.746$) > 柳杉 ($M=0.009$)。从林木竞争看, 林分及其主要树种的竞争压力从大到小分别是林分整体 ($CH=68.006$) > 山樱花 ($CH=28.868$) > 黄山松 ($CH=5.104$) > 柳杉 ($CH=1.791$)。可见, 林分整体径级结构呈倒 J 形分布, 林下更新良好, 呈聚集分布, 林木大小处于中庸状态, 树种混交程度高, 林木间竞争压力大。黄山松种群径级结构呈正态分布, 幼树少更新差, 呈随机分布, 林木处于优势状态, 大小差异程度大, 混交度高且竞争压力小。柳杉种群径级结构类似正态的多峰分布, 林下更新一般, 呈均匀分布, 混交度极低, 林木大小呈中庸态势, 但竞争压力很小。山樱花种群径级结构呈倒 J 形分布, 因幼树居多, 呈聚集分布,

而幼树因个体较小与最近邻木相比大小差异程度小且呈中庸态势,混交程度高的同时却面临较大的竞争压力。

3.2 讨论

该样地内胸径大于 4 cm 的木本植物共有 46 种,其中黄山松个体数量最多,占林木总数的 16.80%。黄山松种群在数量、大小上占据明显优势,表明黄山松从群落中获得了较多的生存空间以及环境资源,目前在群落中仍处于显著的优势地位。柳杉种群由于生长环境的立地条件更好,数量虽少,但生长更快,大树相对更多。山樱花种群在数量上有优势,林木大小态势优于林分平均,表明该种群的环境适应能力强,在群落中也占有比较明显的优势地位。本研究样地内木本植物种类比太子山中亚热带监测的人工林样地更多^[19],与东灵山暖温带次生林的物种种类数量接近^[20]。林分整体径级结构呈倒 J 形分布趋势,小径级林木个体较多,大径级林木个体数量少,为典型异龄林的分布特征,说明群落更新演替状况良好,处于次生演替发展阶段^[21],意味着未来一段时间内群落仍然会以黄山松为优势种。黄山松种群径级结构呈正态分布,小径级、大径级个体少,中径级个体较多,但林下更新差,有随演替进行逐渐消失的趋势;山樱花种群径级结构呈双峰形,中小径级个体数多,种群更新良好,处于增长阶段,这种情况说明山樱花等更新较好的种群逐渐入侵生长替代黄山松种群成为优势种。

角尺度在置信区间[0.475, 0.517]范围内为随机分布^[22],小于 0.475 为均匀分布,大于 0.517 为聚集分布。本研究林分整体角尺度为 0.513,偏聚集的随机分布状态,而聚集指数为 0.846,为聚集分布,因此归为聚集分布;黄山松的角尺度为 0.507,为随机分布,聚集指数为 1.060,为偏随机的均匀分布状态,因此归为随机分布;山樱花的角尺度为 0.529,聚集指数为 0.846,均呈聚集分布;柳杉角尺度为 0.419,聚集指数为 1.506,均呈均匀分布。植物的空间分布格局与其生长习性、更新、扩散特征和生境异质性等有关^[23-24]。由于林分整体以幼树居多,以山樱花为代表的聚集分布型种群使林分整体呈现聚集分布态势。黄山松种植年份较久,加之种群更新差,随着生长部分林木死亡消失,由均匀分布逐渐向随机分布转变。柳杉与黄山松同期种植,因种植于坡下,林木生长条件好,仍呈均匀分布。周红敏等^[25]采用空间结构参数分析得出浙江省凤阳山针阔混交林林分整体格局为聚集分布,林木的混交度高,林分整体属中庸状态,与本研究林分整体的研究结果相似。有学者通过对角尺度、混交度和大小比数的二维和三维研究,认为分布格局、混交度、大小分化(有学者直接采用林木大小分化反映林木的竞争压力强度)具有相互制约或促进的作用。付翠林等^[19]对柏木人工林空间结构参数二元分布特征分析,周红敏等^[26]对针阔混交林空间结构参数二元分布特征分析,均认为处于低度混交状态的林木大小分化不明显,意味着更为激烈的竞争压力;而强度混交状态下的林木大小分化显著,意味着较小的竞争压力。本研究虽然首次分析了宁波四明山地区黄山松人工林的空间结构,但本文仅从空间结构参数均值和一元分布特征的角度进行分析,有待通过空间结构参数二元分布特征进一步揭示更为全面细微的林分空间结构特征。

培育出以地带性植被为主的异龄复层多树种混交林是该区域黄山松人工林的经营管理目标,以“伐劣留优,优化结构,促进天然更新”作为指南^[27]开展森林抚育经营。由于林分密度过高,导致林木之间营养竞争过大,在保持林分郁闭度不低于 0.6 的前提下,采取适当强度的间伐让林分具备更好的光热条件促进林木生长及林下幼苗更新;开展黄山松和柳杉大径材培育,伐除影响目标树生长的干扰树,并伐除林分中生长缓慢,干形、材质差、腐朽的松杉林木;优化调整山樱花分布格局趋向更为理想的随机状态;在林中空地补植乡土阔叶珍贵树种,人工促进林下更新,最终达到提高生物多样性,林分呈随机分布格局,保留木具有更强竞争优势,最终形成多树种复层异龄混交林。

参考文献:

- [1] 田惠玲,周平,贾朋,等. 粤北不同经营措施对人工林年均固碳量的影响[J]. 生态科学, 2018, 37(4): 211-217.
- [2] DUAN A G, FU L H, ZHANG J G. Self-thinning rules at Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations based on a permanent density trial in southern China[J]. J Resour Ecol, 2019, 10(3): 315-323.
- [3] 郭诗宇, FORSTER H, 陈幸良. 目标树经营: 德国经验与湖北实践[J]. 世界林业研究, 2021, 34(2): 14-20.
- [4] 曹小玉, 李际平, 封尧, 等. 杉木生态公益林林分空间结构分析及评价[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 37-48.
- [5] 胡雪凡, 张会儒, 张晓红. 中国代表性森林经营技术模式对比研究[J]. 森林工程, 2019, 35(04): 32-38.

- [6] 刘振华, 童方平, 刘帅, 等. 柏木、马褂木和杉木等针阔混交林结构化森林经营研究[J]. 湖南林业科技, 2019, 46 (03) : 25 - 32.
- [7] 魏红洋. 帽儿山天然次生林主要林分类型结构化经营模式[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021: 1 - 2.
- [8] 张岩. 基于结构化森林经营理论的华北落叶松混交林经营分析[J]. 现代园艺, 2022, 45 (10) : 180 - 182.
- [9] 余丽慧, 姚良锦, 徐端妙, 等. 亚热带针阔混交林优势种黄山松和马褂木的空间格局——以浙江景宁草鱼塘为例[J]. 江苏林业科技, 2021, 48 (05) : 20 - 27.
- [10] 侯梅, 胡剑民, 张琴琴, 等. 麻城黄山松天然林直径分布[J]. 生态科学, 2022, 41 (01) : 179 - 185.
- [11] 常陈豪, 吕康婷, 周梦丽, 等. 间伐对黄山松人工林林分空间结构及稳定性的影响[J]. 西北林学院学报: 1 - 8.
- [12] 吕康婷, 张二山, 李思颖, 等. 黄山松人工林林分空间结构对林下植物多样性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39 (6) : 1257 - 1266.
- [13] 惠刚盈, 克劳斯·冯佳多. 森林空间结构量化分析方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 45 - 47.
- [14] 惠刚盈, GADOW K V, 胡艳波, 等. 结构化森林经营[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 28 - 34.
- [15] 惠刚盈. 基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35 (4) : 1 - 8.
- [16] CLARK P J, EVANS F C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations[J]. Ecology, 1954, 35: 445 - 453.
- [17] HEGYI F. A simulation model for managing jack-pine stands, growth models for tree and stand simulation[J]. For Res, 1974, (30) : 74 - 90.
- [18] 娄明华, 白超, 惠刚盈, 等. 7 个林木大小多样性指数表达能力比较[J]. 生物多样性, 2019, 27 (04) : 449 - 456.
- [19] 付翠林, 汪洋, 孙林山, 等. 柏木人工林空间结构特征及其评价[J]. 湖南生态科学学报, 2022, 9 (01) : 17 - 26.
- [20] 刘海丰, 李亮, 桑卫国. 东灵山暖温带落叶阔叶次生林动态监测样地: 物种组成与群落结构[J]. 生物多样性, 2011, 19 (02) : 232 - 242.
- [21] 范娟, 赵秀海, 汪金松, 等. 江西九连山亚热带常绿阔叶林优势种空间分布格局[J]. 生态学报, 2012, 32 (9) : 2729 - 2737.
- [22] 惠刚盈, GADOW K V, 赵中华, 等. 结构化森林经营原理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 48.
- [23] CONDIT R, ASHTON P S, BAKER P, et al. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species[J]. Science, 2000, 288 (5470) : 1414 - 1418.
- [24] LI L, HUANG Z, YE W, et al. Spatial distributions of tree species in a subtropical forest of China[J]. Oikos, 2000, 118 (4) : 495 - 502.
- [25] 周红敏, 瞿虹, 彭辉, 等. 凤阳山针阔混交林主要优势树种的空间结构特征[J]. 浙江林业科技, 2019, 39 (04) : 48 - 53.
- [26] 周红敏, 彭辉, 蒋敏, 等. 凤阳山自然保护区针阔混交林空间结构研究[J]. 福建林业科技, 2019, 46 (03) : 51 - 67.
- [27] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波. 结构化森林经营技术指南[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010: 65 - 66.