

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230471

杉木萌芽林结构多样性研究

萨日娜¹, 廉琪¹, 胡艳波¹, 张弓乔¹, 卢彦磊¹,
孙洪刚², 姚甲宝³, 赵中华^{1*}

(1. 林木资源高效生产全国重点实验室国家林业和草原局林木培育重点实验室, 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 中国林科院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 3. 中国林业科学研究院亚热带林业实验中心, 江西 新余 336600)

摘要: [目的] 多角度分析杉木萌芽林的结构特征, 为优化调整林分结构, 精准提升杉木萌芽林林分质量提供依据。[方法] 以亚热带林业实验中心的山下林场杉木萌芽林为对象, 采用 3 参数 Weibull 分布拟合直径分布, 用林分空间结构量化分析方法分析林分空间结构参数一元和二元分布特征、树种优势度及林分结构多样性, 并用遗传绝对距离法进行差异显著性检验。[结果] 3 个林分的树种组成均为以杉木萌生株为主, 混有少量阔叶树, 其 Shannon-Winner 指数在 0.933~1.039 之间, Simpson 多样性指数都小于 0.5, 说明树种多样性较低; 林分直径分布呈现左偏单峰山状曲线, 有向倒“J”型发展的趋势; 三板桥、七里坑上坡和下坡林分的平均角尺度分别为 0.503、0.486 和 0.500, 均属于随机分布的范畴, 林分平均混交度分别为 0.345、0.404 和 0.409, 林分整体上处于弱度混交向中度混交过渡的状态; 3 个林分的结构多样性指数值较低, 分别为 1.423、1.349 和 1.649, 角尺度-混交度、大小比数-角尺度二元分布表现出一定的规律性, 但混交度-大小比数二元分布变化相对复杂, 规律不明显。[结论] 杉木萌芽林树种组成相对简单, 树种多样性和林分结构多样性低, 胸高直径分布和林木分布格局初步具有天然林的特征, 需要通过林分结构优化调整提升林分质量。

关键词: 杉木萌芽林; 树种多样性; 空间结构; 结构多样性; 结构调整

中图分类号: S750

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)05-0148-12

杉木 (*Cunninghamialanceolata*(Lamb.)Hook.) 是我国南方低山丘陵区重要的优质乡土用材树种之一, 在南方 16 个省(区)均有种植。第九次全国森林资源清查结果表明, 杉木人工林无论是面积还是蓄积量均居第一, 在我国森林蓄积量和木材生产中占有重要地位。杉木是具有极强萌芽能力的树种, 杉木萌芽更新投入少、技术简单, 因此, 萌芽更新是杉木人工林的主要更新方式之一, 也是杉木产区传统的育杉方式^[1-2]。森林结构是各种自然生态过程在时间和空间上长期综合作用的结果, 是森林生长及生态过程的驱动因子^[3-4], 在很大程度上决定了森林稳定性、森林质量及碳储量等^[5-6]。林分结构是研究森林结构的基本单元, 即

是森林经营与分析的最小单位, 也是实施森林经营活动的具体对象, 一直是森林经营研究的重点问题。众多研究表明, 林分结构调控是提升森林质量的有效手段, 比如林分密度调控, 已有大量的文献研究表明, 密度调控能够影响各生长时期林分的树高、胸径、林分木材产量等因子, 在很大程度上决定了林分的内部结构, 从而决定了林分的产量结构^[7-12]。林分结构包括非空间结构和空间结构, 非空间结构包括树种组成、树高结构、直径结构、林分密度和年龄结构等; 林分空间结构从我国学者惠刚盈等提出了基于相邻木关系的林分空间结构参数体系以来, 由于该体系能够量化和多层次分析林分空间结构, 且能够指导经营实践而得到广泛应

收稿日期: 2023-12-06 修回日期: 2024-04-18

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2020ZB002-1); 国家自然科学基金面上项目(32171780)

* 通讯作者: 赵中华, 研究员。主要从事森林经营理论与技术研究。Email:zzhwl@caf.ac.cn

用^[13-22]。同时近年来, 学者们对于林分结构多样性的研究也越来越多^[23-25]。但林分结构及结构多样性评价调控应用于萌芽林的研究十分缺乏。

从上世纪 80 年代以来, 我国学者针对杉木萌芽林开展了大量的研究, 主要集中在采伐年龄、采伐季节、采伐工具等对杉木萌芽能力的影响, 杉木萌芽林的经营技术措施^[26]、二代实生林与萌芽林的生长特性^[27-28]、萌芽幼龄林群落特征及杉木萌芽林改造针阔叶混交林等方面^[29]、杉木萌芽更新研究^[30]及杉木萌芽更新经营技术研究^[31]; 关于杉木萌芽林的空间结构特征及经营对空间结构的影响研究极少。周红敏等对浙江龙泉萌生杉木林的空间结构进行分析, 根据萌生杉木林的结构特征提出经营对策^[1]。张煜林等以不同密度杉木萌生林自然恢复初期林分为研究对象, 分析了林分碳密度与树种多样性、结构多样性及林分空间结构参数之间的关系^[32]。本研究以位于江西省新余市分宜县的杉木萌芽林为研究对象, 从林分直径分布、树种多样性、林分空间结构参数一元分布、二元分布及林分结构多样性等方面精细分析杉木萌芽林的结构特征, 并在此基础上, 针对杉木萌芽林林分结构存在的主要问题提出经营建议, 以期对杉木萌芽林结构优化调控, 精准提升杉木萌芽林质量提供依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

江西省新余市分宜县位于江西中部偏西, 位于珠三角、长三角和闽东南三角交汇点, 袁河中游 (114°29'~114°51' E, 27°33'~28°08' N 之间), 县境南北长约 65 000 m, 东西宽约 36 000 m, 兼具我国南北方气候特征, 属亚热带湿润性气候, 年平均气温 17.2 °C, 年平均降雨量 1 600 mm, 全年无霜期 270 d。植被系江南山地丘陵常绿栲楠林, 油茶林、松杉林区, 常绿栲楠、松杉亚区。全县森林覆盖率 65.76%, 有林地面积 57 135.2 ha。

研究样地位于中国林业科学研究院亚热带林业实验中心的山下林场七里坑 72-4 和三板桥 22-7 林班, 林分年龄为 20 年, 均为一代杉木林皆伐后萌芽形成的林分, 其中, 七里坑 72-4 林班在林缘和山脊部人工栽植了少量的乐昌含笑 (*Michelia chapensis* Dandy)、檫木 (*Sassafras tzumu* (Hemsl.) Hemsl.), 桉树 (*Eucalyptus robusta* Smith) 等, 三板桥 22-7 林班, 在林缘和山脊部人

工栽植了木荷 (*Schima superba* Gardn & Champ.), 在林中还有少量的马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、枫香 (*Liquidambar formosana* Hance)、樟树 (*Cinnamomum camphora* (L.) Presl)、梓树 (*Catalpa ovata* G. Don)、苦槠 (*Castanopsis sclerophylla* (Lindl.) Schot)、刨花楠 (*Machilus pauhoi* Kaneh) 等; 补植树种与杉木在伐桩上萌发的林木及天然更新的树种形成了混交林。

1.2 样地设置与调查

2021 年 4 月和 2022 年 7 月, 在山下林场三板桥 22-7 和七里坑 72-4 林班内, 运用 TOPCON 全站仪 (GTS-601) 建立了面积分别为 60 m × 40 m 和两个 40 m × 60 m 定位监测样地, 对样地内胸高 ($h=1.3$ m) 直径大于 5 cm 的林木进行定位挂牌, 记录树种、胸径、树高、冠幅、更新状况、林木健康等基本信息。

1.3 内业分析

1.3.1 胸高直径分布 林分直径分布特征是林分结构中最重要指标之一, 是测定、研究林分直径、断面积、材积等生长因子的依据, 是许多森林经营技术的基础。本研究起测胸径为 5 cm, 径阶宽度为 2 cm, 采用 3 参数 Weibull 分布拟合杉木萌芽的胸高直径分布, 其概率密度函数为:

$$f_x = \begin{cases} 0, & x \leq d \\ \frac{c}{b} \left(\frac{x-c}{b} \right)^{c-1} \exp \left[- \left(\frac{x-a}{b} \right)^c \right], & x > d \end{cases} \quad (1)$$

式中, a 、 b 、 c 分别为位置参数、尺度参数和形状参数, d 为对应径阶直径。参数 a 为林分直径最小径阶的下限值; 当 $c \leq 1$ 时, $f(x)$ 随 x 的增大而减小; $1 < c < 3.6$ 时分布形状偏于左边; $c = 3.6$ 时, 近似正态分布; $c > 3.6$ 时, 偏于右边。

1.3.2 树种多样性 树种多样性选择 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数计算。

Shannon-Wiener 指数:

$$H = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (2)$$

式中: p_i 为第 i 个树种株数在林分树木总株数中所占百分比, S 为林分中树种的数目;

Simpson 多样性指数:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (p_i)^2 \quad (3)$$

式中: 参数与上同。

1.3.3 林分空间结构 运用森林空间结构分析软件 Winkelmass 分析林分空间结构参数一元分布，主要计算的参数有角尺度^[33]、混交度^[34]和主要树种优势度^[4]；同时，将角尺度（ W_i ）、混交度（ M_i ）和大小比数（ U_i ）两两结合，分析林分空间结构参数二元分布^[35]，再利用遗传绝对距离法对 3 个林分二元分布进行差异性检验^[4]。在计算 3 个空间结构参数时为避免边缘效应对林分结构的影响，本研究设置缓冲区域为各边长两侧的 5%。

树种优势度利用树种空间优势度来表达，其计算公式为：

$$D_{sp} = \sqrt{D_g \cdot (1 - \bar{U}_{sp})} \tag{4}$$

式中： D_g 表示树种相对显著度， $\bar{U}$ 表示树种大小比数均值，树种优势度在 [0, 1] 之间，越大越好。

1.3.4 林分结构多样性 林分结构多样性能表达不同林分和林型的结构异质性，包括树种多样性、分布和大小分化。采用 Zhao 等提出的林分结构多样性表达方法分析^[36]。其计算公式如下：

$$S_D = CV \cdot (H + D_u) \tag{5}$$

$$S_D = -CV \cdot \left(\sum_{j=1}^S P_j \log P_j + \sum_{i=1}^N u_i \log u_i \right) \tag{6}$$

式中， S_D 是结构多样性指数， S 是林分中的树种数量， P_j 是林分中第 j 个树种的比例； N 是结构单元类型的数量， u_i 是第 i 个结构单元类型所占的比例。 H 是香农指数； D_u 是结构单元类型的多样性； CV 是树木大小的变异系数。 S_D 的值由林分中树种的多样性、结构单元类型的多样性和单株大小的变化决定。

$$CV = \sigma / \mu \tag{7}$$

式（7）为林木大小的变异系数，式中 σ 为林分中林木胸径大小的标准偏差， μ 是林分中林木胸径平均值。

$$D_u = - \sum_{i=1}^N u_i \log u_i \tag{8}$$

式（8）为结构单元多样性，式中 D_u 是结构单元类型的多样性， u_i 是第 i 个结构单元类型在所有组合情况下的比例， N 是结构单元类型的数量；结构单元类型是根据结构单元中混交度、大小比数、角尺度和树种数量取值进行联合，把取值不同的结构单元看作是不同的类型；混交度、大小比数、

角尺度 3 个结构参数 5 种不同取值可能会出现组合有 $C_5^1 \times C_5^1 \times C_5^1 = 125$ 种情况；当考虑结构单元中的树种时，可能出现的结构单元类型种类为 $(C_1^1 + C_1^1 + C_2^1 + C_3^1 + C_4^1) \times C_5^1 \times C_5^1 = 275$ 种，因此，结构单元类型最多不超过 275。当森林中只有 1 种结构单元类型（ $N=1$ ）时， D_u 的最小值为零。结构单元类型越多，比例越均匀， D_u 的值就越大；当 $N=275$ 时， D_u 的最大值为 5.617。

1.3.5 数据处理 运用 Winkelmass 分析林分的水平结构，并在 Excel 表格中进行林分空间结构参数二元分布特征分析，运用遗传绝对距离法进行显著性检验。并用 R 语言对林分胸高直径进行 3 参数 Weibull 函数分布拟合。本研究内所有图均使用 origin2021 作图。

2 结果分析

2.1 杉木萌芽林树种组成及多样性

由表 1 可以看出，三板桥、七里坑上坡和七里坑下坡样地中树种数分别为 11 种、9 种和 11 种，Shannon-Winner 指数在 0.933~1.039 之间，Simpson 多样性指数都小于 0.5，说明 3 个林分树种多样性均较低。3 个林分中杉木的相对多度均达到了 70% 以上；其中，三板桥样地中，木荷和马尾松相对多度分别为 13.2% 和 7.7%，其余 8 个树种相对多度不到 10%；七里坑上坡样地中含笑的相对多度较高，达到了 14%，下坡样地含笑的相对多度则不到 10%，其余树种总占比不足 10%。整体而言，3 个林分中杉木萌芽林木在数量上占绝对优势，其它混生的树种主要集中在小班林缘和山脊部，因而导致树种组成多但树种多样性较低。

2.2 杉木萌芽林胸高直径分布

一般而言，没有干扰的人工林胸高直径结构呈正态分布，即中等林木占大多数，而小径级及大径级林木较少，而天然林呈倒“J”型分布，小径级木占大多数，随着径阶的增加，林木个体逐渐减少。三板桥 22-7 林班杉木萌芽林林木胸高直径分布呈单峰分布，胸径为 8~14 cm 的林木个体较多；七里坑 72-4 林班上坡林分呈多峰分布，林分中胸径为 10 cm 和 14 cm 径阶的林木较多；七里坑 72-4 林班下坡林分整体上呈单峰分布，胸径为 10~14 cm 的林木较多（图 1）。从 3 个林分的胸高直径利用 3 参数 Weibull 分布函数拟合结果的形

表 1 杉木萌芽林树种组成及多样性

Table 1 Species composition and diversity of Cunninghamia lanceolata coppice forest

样地 Plot	树种数 Tree species number	林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average height/m	断面积 Basal area /m ²	树种组成 Tree species composition	主要树种 Main tree species	相对多度/% Relative plurality	Simpson 指数 Simpson's Index	Shannon- Wiener指数 Shannon Wiener's Index
三板桥22-7 Sanbanqiao 22-7	11	3 308	12.8 ± 4.4	11.0 ± 3.2	10.236	6杉2木1马 + 梓- 其它	杉木 Cunninghamia lanceolata 木荷 Schima superba Gardn et Champ.1Pinus massoniana Lamb. + Catalpa ovata G. Don-Other	73.3	0.439	0.959
						6Cunninghamia lanceolata 2				
						Schima superba				
						Gardn et		13.2		
						Champ.1Pinus massoniana				
七里坑72-4上坡 Qilikeng 72-4 uphill	9	2 450	12.5 ± 3.8	11.3 ± 4.6	7.230	7杉1含 + 桉 + 木- 其它	杉木 Cunninghamia lanceolata 含笑 Michelia chapensis Dandy + Eucalyptus robusta Smith + Schima superba Gardn et Champ.-Other	72.1	0.450	0.933
						1Michelia				
						chapensis Dandy +		14.1		
						Eucalyptus				
						robusta Smith +				
七里坑72-4下坡 Qilikeng 72-4 downhill	11	1 929	13.8 ± 4.5	11.5 ± 3.4	6.305	7杉 + 含 + 桉 + 檫 + 木-其它	杉木 Cunninghamia lanceolata + Michelia chapensis Dandy + Eucalyptus robusta Smith + Sassafras tzumu(Hemsl.) Hemsl + Schima superba Gardn et Champ.-Other	74.0	0.437	1.039
						7Cunninghamia lanceolata +				
						Michelia				
						chapensis Dandy +		9.1		
						Eucalyptus robusta Smith +				

状参数值（c）可以看出，三板桥 22-7 林班和七里坑 72-4 林班下坡林分的林木胸高直径呈明显的左偏单峰山状分布（表 1），72-4 林班上坡林分的胸径分布的柱状图显示为多峰形状山状分布，但从拟合参数可以看出（表 2），胸高直径分布也趋于左偏单峰山状（1<c=1.902<3.6）。以上分析表明，3 块杉木萌芽林胸高直径集中分布在 8~14 cm 之间，呈现出明显左偏单峰分布的特征，随着径阶的增加，林木株数减少，已经具有了一些天然林径级结构分布的特征。这一方面可能是因为伐桩上萌生的杉木由于萌发时间不同而产生分化，另一方面可能是由于在林缘和山脊部人工栽植了阔叶树种，林

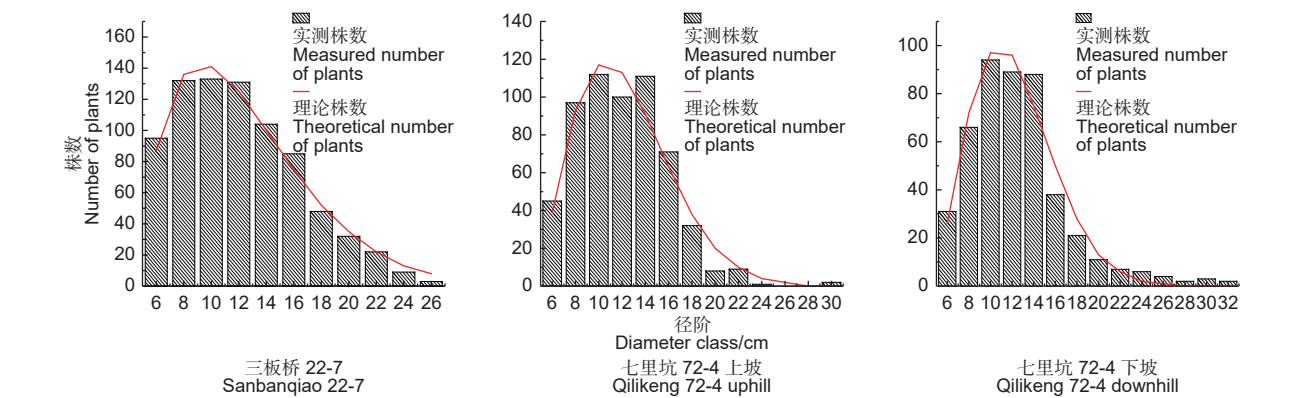


图 1 3 参数 Weibull 分布函数拟合直径分布图

Fig. 1 Fitting the diameter distribution of three-parameter Weibull distribution function

标准地Plot	参数Parameter		
	a	b	c
三板桥22-7 Sanbanqiao 22-7	5	7.944	1.618
七里坑72-4上坡 Qilikeng 72-4 uphill	5	7.912	1.902
七里坑72-4下坡 Qilikeng 72-4 downhill	5	8.422	1.733

下部分阔叶树种天然更新，从而对林分胸高直径分布产生了影响。

2.3 杉木萌芽林空间结构特征

2.3.1 林木分布格局及树种隔离程度 由图 2a 可知，七里坑 2 块样地中角尺度值为 0.5 的林木比例大致相同，约占 55%，三板桥样地角尺度为

0.5 的比例略高，达到了 60%；3 块样地中，角尺度小于 0.5 和大于 0.5 的分布频率大致相同，但 3 块样地中处于十分均匀 ($W=0$) 的比例极少，低于 2%，而处于聚集分布 ($W=1$) 的比例较低，约为 5% 左右。三板桥、七里坑上坡以及下坡林分平均角尺度值分别为 0.503、0.486 和 0.500，表明样地中的林木的分布格局整体上为随机分布的状态。从图 2b 可知，三板桥样地中零度混交 ($M=0$) 和弱度混交 ($M=0.25$) 的林木比例较高，均达到了 30% 以上，而处于中度混交、强度混交和极强度混交林木的比例均小于 15%，表明林分中的林木大多数为同种树聚集；七里坑 2 块样地的混交度为零的林木比例较三板桥样地的比例低，而处于中度混交、强度混交和极强度混交较三板桥样地有所上升，表明七里坑 2 块样地的树种隔离程度较三板桥样地高。三板桥、七里坑上坡和下坡 3 块样地林分平均混交度值分别为 0.345、

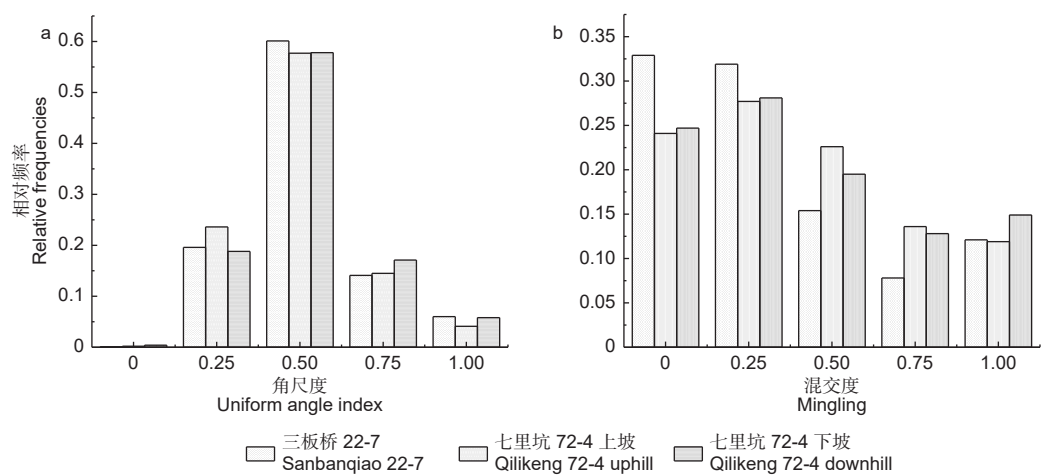


图 2 3 个林分角尺度和混交度分布图

Fig. 2 Distribution of uniform angle index and mingling in the three standard plots

0.404 和 0.409, 林分整体上处于弱度混交向中度混交过渡的状态。

2.3.2 树种优势度 将树种的大小比数均值与相对显著度相结合, 可以表达出树种在林分中的优势。对 3 个林分中主要树种的优势度进行了分析, 结果见表 3 和图 3。3 个林分的主要树种中均为杉木的树种优势度最高, 这主要是由于杉木萌生株数量较多, 相对显著度较高而造成的(表 3)。结合图 3a~c 可以看出, 三板桥林分中杉木株数为 582 株而木荷株数仅有 105 株, 但树种优势度仅相差 0.134, 说明该样地中杉木大多为劣势木到中庸木的比例较高, 而木荷及马尾松在林分中大多数为优势木、亚优势木, 也就是说, 以杉木为参照树及其 4 株相邻构成的结构单元中, 大小比数为 1、

0.75 和 0.5 所占的比例较高, 而以木荷及马尾松为参照树及其 4 株相邻木构成的结构单元中, 大小比数为 0、0.25 所占的比例较高。与三板桥林分不同, 七里坑上坡和下坡林分虽然杉木优势度也是最高的, 但杉木在结构单元中, 大小比数取值较为相对平均, 各个等级的比例相差不大, 而其它 2 个主要树种的大小比数取值则变化较大, 而且大多数处于劣势 ($U_i=1$ 或 $U_i=0.75$) 和中庸状态 ($U_i=0.5$), 因此, 它们的优势度较杉木相差较大(图 3e~j)。以上分析表明, 3 个林分中杉木萌生株由于数量和相对显著度占绝对优势, 导致其优势度总体较高, 但其它主要树种的竞争状态并不相同, 三板桥林分中的木荷与其相邻木相比处于优势状态, 而七里坑林发分中的含笑和桉树大多处于劣势状态。

表 3 主要树种树种优势度
Table 3 Degree of tree dominance of major tree species

标准地 Plot	树种 Tree species	株数 Number of plants	平均大小比数 Average neighborhood comparison	相对显著度 Relative prominence	树种优势度 Degree of tree species dominance
三板桥22-7 Sanbanqiao 22-7	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	582	0.549	0.579	0.511
	木荷 <i>Schima superba</i>	105	0.362	0.223	0.377
	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	61	0.291	0.105	0.273
七里坑72-4上坡 Qilikeng 72-4 uphill	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	424	0.479	0.727	0.615
	含笑 <i>Michelia chapensis</i>	83	0.524	0.124	0.243
	桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	57	0.618	0.085	0.180
七里坑72-4下坡 Qilikeng 72-4 downhill	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	342	0.505	0.699	0.588
	含笑 <i>Michelia chapensis</i>	42	0.554	0.082	0.191
	桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	35	0.464	0.089	0.218

2.3.3 角尺度-大小比数二元分布 由图 4 可以看出, 3 个林分中结构单元角尺度值为 0.5 时比例最高, 其次为角尺度值为 0.25 和 0.75 的结构单元, 且不同大小比数等级均有分布; 其中三板桥林分同一大小比数等级 56.7% 以上林木处于随机分布的结构单元中; 林木处于随机分布且绝对优势 ($W_i=0.5$, $U_i=0$) 的林木比例最大, 达到 14.1%, 其它大小等级且随机分布的林木也在 10% 以上, 该林分中没有结构单元角尺度值为 0 的林木。在七

里坑上坡林分中, 同一大小比数等级 45.9% 以上林木处于随机分布的结构单元中, 林木处于随机分布且绝对劣势 ($W_i=0.5$, $U_i=1$) 的林木比例最大, 达到 12.2%。在七里坑下坡林分中, 同一大小比数等级 50% 以上林木处于随机分布的结构单元中, 林木处于绝对优势且为随机分布 ($U_i=0$, $W_i=0.5$) 的林木比例最大, 达到 12.7%。综上所述 3 个林分处于同一大小比数时随机分布的林木占绝大数, 同时绝对优势林木处于随机分布的最多, 说明林木

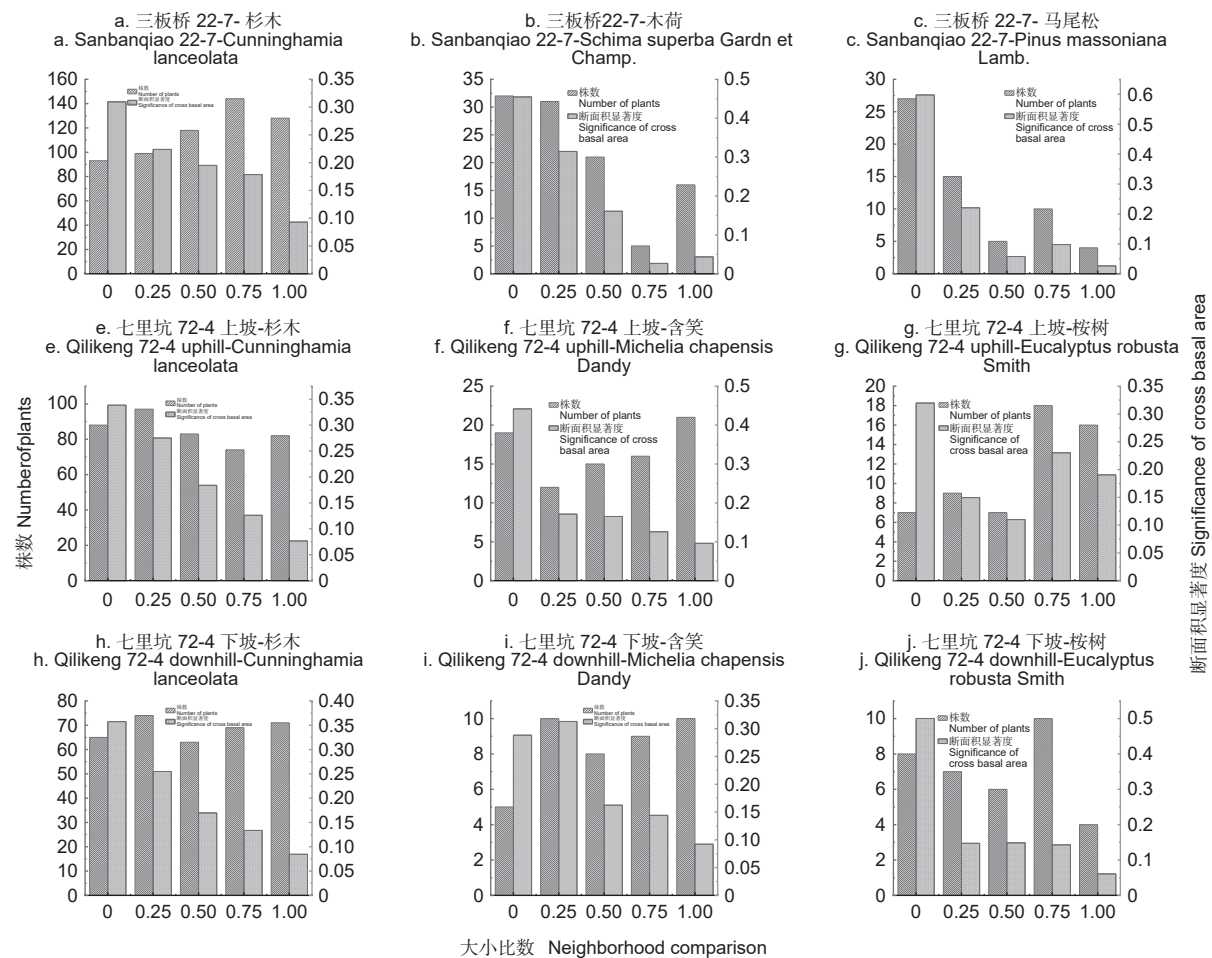


图 3 3 个林分主要树种优势度

Fig. 3 Degree of dominance of major tree species in three stands

在随机分布时长势较好。3 个林分的角尺度-大小比数二元分布遗传绝对距离检验差异不显著 ($d_{ab}=0.121<d_a=1.027$ 、 $d_{bc}=0.091<d_a=0.976$ 、 $d_{ac}=0.113<d_a=1.027$)。

2.3.4 角尺度-混交度二元分布 从图 5 可以看出, 3 个林分中林木处于零度和弱度混交的比例较高, 合计均超过了 50%, 且在這些林木中, 处于随机分布的林木比例较高, 其次为均匀分布的林木。其中, 三板桥林分中, 随机分布且零度和弱度混交的林木占比为 39.4%, 均匀分布的林木为 13.4%; 七里坑上坡林分随机分布且零度和弱度混交的林木占比为 25.8%, 均匀分布的林木为

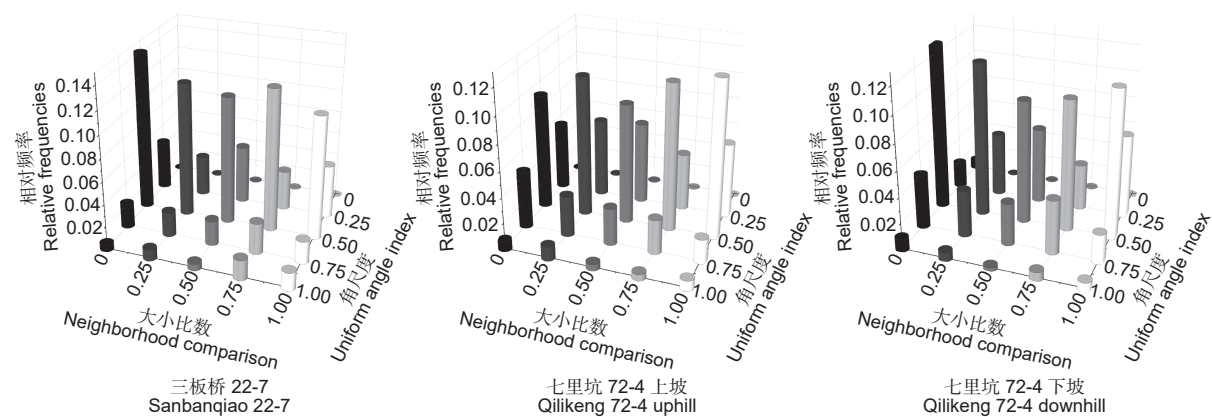


图 4 角尺度-大小比数二元分布

Fig. 4 Uniform angle index-neighborhood comparison binary distribution

14.6%; 七里坑下坡林分随机分布且零度和弱度混交的林木占比为 30.4%, 均匀分布的林木为 12.1%。3 个林分中处于极强度和强度混交的林木较少, 所占比例均没有超过 28%。3 个林分的角尺

度-混交度二元分布遗传绝对距离检验差异不显著 ($d_{ab}=0.201<d_a=1.130$ 、 $d_{bc}=0.116<d_c=1.010$ 、 $d_{ac}=0.157<d_a=1.130$)。

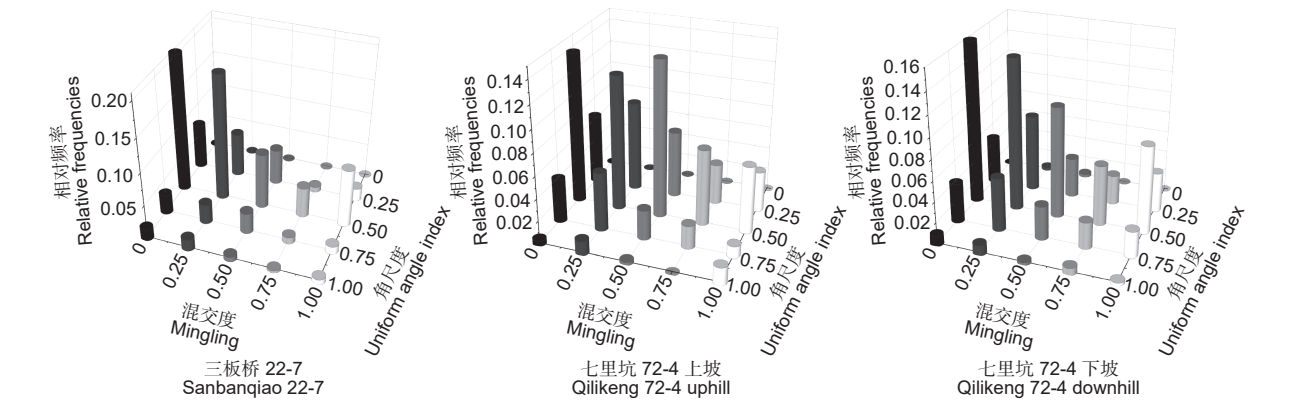


图 5 角尺度-混交度二元分布
Fig. 5 Uniform angle index-mingling binary distribution

2.3.5 混交度-大小比数二元分布 由图 6 可以看出, 3 个林分混交度-大小比数二元分布比较复杂, 尽管可以明显反映出林分中林木大多数处于中度混交以下, 但对于同一大小比数等级林木的混交程度或同一混交程度不同大小比数等级林木的比例变化相对复杂, 规律不明显, 例如在三板桥林分中, 对于零度混交等级 ($M_i=0$) 而言, 大小比数从优势到劣势的林木比例呈现先减少后增加的趋势; 而对于弱度混交等级 ($M_i=0.25$) 而言, 大小比数从优势到劣势的林木比例呈现双峰状。对于同一大小比数等级而言, 虽然 3 个林分总体上为随着混交程度的增加, 林木比例减少的规律, 但也出现了一些例外, 例如三板桥林分中的大小比数为优势等级 ($U_i=0$) 的林木, 呈现出随着混交度的增加, 林木比例先减少后增加, 而且零度混交且绝对优势 ($M_i=0, U_i=0$) 和强度混交且处于绝对优势 ($M_i=1, U_i=0$) 的林木比例分别达 7.4% 和 5.6%。这可能主要是由于萌生杉木和人工补植及天然更新的阔叶树种的年龄、生长特性不同而导致, 此外, 3 个林分的混交度-大小比数二元分布遗传绝对距离检验差异也不显著 ($d_{ab}=0.193<d_a=0.597$ 、 $d_{bc}=0.116<d_c=0.367$ 、 $d_{ac}=0.150<d_a=0.597$)。

2.3.6 林分结构多样性 Zhao 等^[36] 提出的基于相邻木关系的林分结构多样性指数同时考虑了树种多样性、林木大小、分布格局、混交等因素, 可表达出树种越丰富、混交程度越高, 林木大小分化、

分布格局变异越大, 林分结构多样性越高的普遍规律。林分结构多样性结果表明 (表 4), 3 个林分的结构单元类型数均在 90 个左右, 远低于 3 个结构参数组合类型的最大值 275; 3 个林分的林分结构多样性都较低, 分别为 1.423、1.349 和 1.649。结合林分的树种组成和多样性, 造成林分结构多样性低的主要原因是林分中杉木萌芽株占优势, 大多数林木与同种相邻, 由此造成结构单元的类型多样性较低, 此外, 树种多样性和胸高直径大小变异是造成 3 个林分林分结构多样性存在一定差异的主要原因。

3 讨论

林分结构规律研究是林分结构调控与优化的基础, 制定结构调控措施需遵循林分结构规律^[37]。杉木萌芽林是在杉木纯林皆伐后自然萌发的基础上, 在林缘与山脊上人工补植阔叶树后形成的林分。经过 20 多年的生长, 3 个林分直径结构、分布格局已经初步具有天然林的特征、林分的树种多样性也有所提高, 说明补植乡土阔叶树种确实可以人工促进树种多样性甚至在很大程度上可以改变林分直径分布的规律^[38-40]。但整体上树种组成仍然是以杉木萌生株占绝对优势, 树种分配的均匀性低。这与其发展阶段有密不可分的关系。皆伐自然萌生后同根的较多, 补植树种集中在林缘部, 林分内阔叶树种极少导致杉木仍占比例最高其它树种比例极少且分

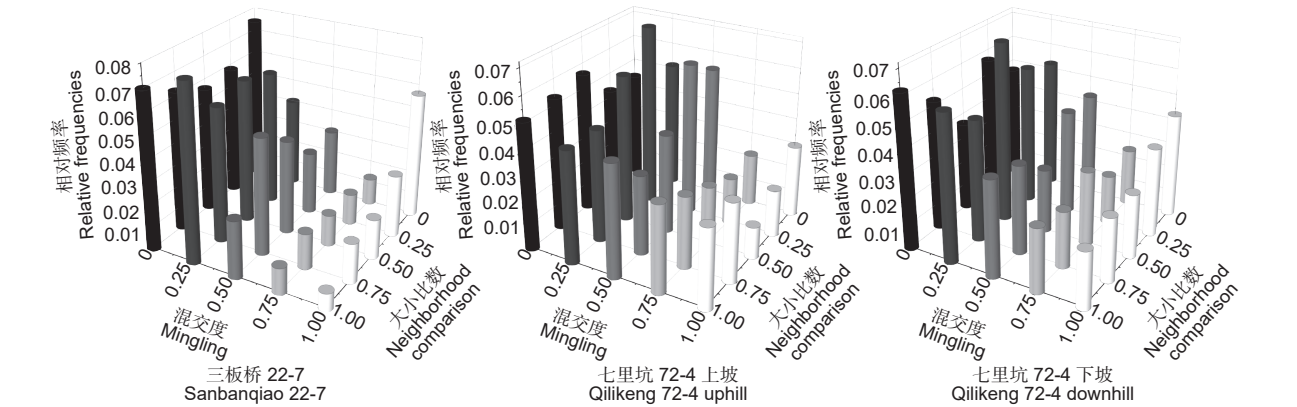


图 6 混交度-大小比数二元分布

Fig. 6 Mingling-neighborhood comparison binary distribution

表 4 林分结构多样性

Table 4 Diversity of stand structure

样地 Plot	核心区树种数 Number of tree species in core area	变异系数 Coefficient of variation	结构单元类型数量 Number of structural unit types	结构单元多样性 Structural unit diversity	林分结构多样性 Stand structure diversity
三板桥22-7 Sanbanqiao 22-7	11	0.358	90	3.010	1.423
七里坑72-4上坡 Qilikeng 72-4 uphill	9	0.313	90	3.378	1.349
七里坑72-4下坡 Qilikeng 72-4 downhill	11	0.375	91	3.361	1.649

配不均匀。

利用空间结构参数能够准确描述林木空间结构的结构状态^[41]。本研究通过分析林分空间结构一元二元分布^[42-43]发现 3 个林分存在的问题基本相同，整体林分呈弱度混交向中度混交过度的状态，林分分布格局为随机分布；同一混交度及大小比数对应的角尺度先增加再减小，在角尺度处于随机分布时取得最大值。而同一分布格局的周围大多是零度混交或弱度混交。上述结构特征反映杉木萌芽林的分空间异质性较差，林内杉木乔木层同龄同种之间资源竞争激烈并且多株同根需要的资源更多，林下养分、水分、土壤肥力及生存空间不足，限制了林下植被繁殖、更新发育，不利于林下其它树种的群落构建，这可能是导致 3 个林分混交度低的主要原因。这与王奕茹等对于杉木-闽楠混交林二元分布结构的研究结论^[44]和张岗岗对华北落叶松人工林空间结构的研究结论^[45]相似。

本研究采用了 Zhao 等^[36]提出的基于相邻木关系的林分结构多样性指数，其同时考虑了树种多样性、林木大小、分布格局、混交等因素。研究结果表明 3 个林分结构多样性低。4 个参数任一种变化都能影响结构多样性。从上述林分结构得出树种多样性、树种分配的均匀度和混交度较低，因此这也是导致结构多样性低的主要原因。同时树种分配的均匀性、树种多样性和混交度低是 3 个林分中共同存在并且主要解决的问题，建议调整和优化方向是在保持林木整体分布格局随机分布的前提下，采取去劣留优、见缝插针等方法，补植优良乡土阔叶树种，通过伐除周围影响其生长的杉木萌生株，增加阔叶树种的竞争优势从而降低杉木萌生株的比例，增加林分的混交度，提高林分中阔叶树种的优势程度和林分结构多样性。

4 结论

本研究探讨杉木萌芽林林分结构多样性特征情况，主要结论如下：3 个杉木萌芽林均呈现树种组成相对简单，树种多样性和林分结构多样性低，胸高直径分布和林木分布格局初步具有天然林的特征，需要通过林分结构优化调整提升林分质量。因

此本研究以期分析杉木萌芽林的林分结构和结构多样性, 发现其存在的问题, 并针对性的提出优化建议, 为杉木萌芽林结构优化调整提供依据。

参考文献:

- [1] 周红敏, 何必庭, 彭 辉, 等. 萌生杉木林空间结构特征研究 [J]. 林业科学研究, 2015, 28(5): 686-690.
- [2] 田 甜, 余树全, 张旭东, 等. 萌芽杉木幼龄林植物群落特征 [J]. 浙江农林大学学报 (自然科学版), 2020, 37(1): 36-42.
- [3] MATHYS A S, BRANG P, STILLHARD J, *et al.* Long-term tree species population dynamics in swiss forest reserves influenced by forest structure and climate [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 481: 118666.
- [4] 惠刚盈, 胡艳波, 徐海. 结构化森林经营 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [5] RAPHAEL A, BERGERON Y, GRAVEL D, *et al.* Interactions among trees: a key element in the stabilising effect of species diversity on forest growth [J]. *Functional Ecology*, 2019, 33(2): 360-367.
- [6] DAVID I F, BAUHUS J. A review of processes behind diversity —productivity relationships in forests [J]. *Current Forestry Reports*, 2016, 2(1): 45-61.
- [7] 梁 燕, 葛忠强, 李宗泰, 等. 鲁中石灰岩山地不同密度侧柏人工林林分生长特征研究 [J]. 湖南林业科技, 2019, 46(5): 37-43.
- [8] 刘建中, 曾素平, 王书初, 等. 密度调控对杉木人工林及套种阔叶树生长的影响 [J]. 安徽农学通报, 2023, 29(13): 71-77.
- [9] 汪星星, 廖文海, 左晓东, 等. 密度调控对杉木人工林土壤理化性质的影响 [J]. 东北林业大学学报 (自然科学版), 2023, 51(1): 82-87.
- [10] 曹怡立. 樟子松人工林不同密度调控对林木生长的影响 [J]. 辽宁林业科技, 2020(5): 16-19.
- [11] ORMAN O, PIOTR W, DOROTA D, *et al.* Regeneration growth and crown architecture of European beech and silver fir depend on gap characteristics and light gradient in the mixed montane old-growth stands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: 118866.
- [12] KURT A S, BERRILL J P, DAGLEY C M, *et al.* Residual stand structure and topography predict initial survival and animal browsing of redwood and douglas-fir seedlings planted in coastal forests of northern california [J]. *Sustainability*, 2023, 15(23): 16409.
- [13] 张明辉, 尹昀洲, 王 珂, 等. 水曲柳人工林空间结构特征对土壤养分含量的影响 [J]. 北京林业大学学报 (自然科学版), 2023, 45(9): 73-82.
- [14] LI T, WU X C, WU Y, *et al.* Forest carbon density estimation using tree species diversity and stand spatial structure indices [J]. *Forests*, 2023, 14(6): 1105.
- [15] 张向龙, 王 冰, 张秋良. 内蒙古大兴安岭白桦次生林空间结构特征 [J]. 林业资源管理, 2021(5): 80-86.
- [16] 赖敏华, 赖日文, 胡仁杰, 等. 人工杉木林林分空间结构参数分析及相关性研究 [J]. 生态科学, 2021, 40(3): 58-63.
- [17] 和敬渊, 王新杰, 王 开, 等. 杨桦次生林林分空间结构参数多元分布研究 [J]. 北京林业大学学报 (自然科学版), 2021, 43(3): 22-33.
- [18] 张岗岗, 刘瑞红, 惠刚盈, 等. 林分空间结构参数 N 元分布及其诠释: 以小陇山锐齿栎天然混交林为例 [J]. 北京林业大学学报 (自然科学版), 2019, 41(4): 21-31.
- [19] 梁文俊, 魏 曦, 赵伟文, 等. 基于二元分布空间结构参数的林分结构研究 [J]. 河南农业大学学报 (自然科学版), 2018, 52(4): 540-544.
- [20] 张熙琳, 陈国齐, 刘春晓, 等. 基于林分空间结构调整的思茅松天然林碳增汇经营技术优化 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学版), 2024, 44(4): 148-156.
- [21] LIU N, WANG D W, GUO Q X. Exploring the influence of large trees on temperate forest spatial structure from the angle of mingling [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 492: 119220.
- [22] SAFWAN A M, SAHADEV S, MUIZZ S M A, *et al.* Stand structure biomass and dynamics of naturally regenerated and restored mangroves in Malaysia [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482(1): 1-11.
- [23] 莫永俊, 曹小玉, 赵文菲, 等. 基于结构方程模型的杉木林林分结构多样性评价 [J]. 生态学报, 2024, 44(2): 1-12.
- [24] WANG G Z, LIU Y G, WU X Q, *et al.* Stand structural diversity and species with leaf nitrogen conservation drive aboveground carbon storage in tropical old-growth forests [J]. *Forests*, 2020, 11(9): 994.
- [25] 鲁君悦, 吴兆飞, 张春雨, 等. 吉林蛟河针阔混交林林层结构对生产力的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(5): 2024-2032.
- [26] 赵本虎, 张 锡. 杉木萌芽林经营技术 [J]. 四川林业科技, 1985, 6(4): 53-56.
- [27] 何宗明, 杨玉盛, 俞新妥. 二代实生与萌芽杉木生长特点分析 [J]. 福建林学院学报 (自然科学版), 2000, 20(4): 298-301.
- [28] 蓝柳鹏. 桉树萌芽林生长特性及密度调控研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [29] 沈启昌. 杉木萌芽林与木荷混交效应试验 [J]. 中南林业调查规划, 2006, 25(3): 57-59.
- [30] 汪传佳. 杉木萌芽更新研究 [J]. 林业科技开发, 2000, 14(2): 23-25.
- [31] 季冬林. 杉木林萌芽更新经营技术 [J]. 林业科技通讯, 2000(6): 43.
- [32] 张煜林, 刘玲娟, 刘胜龙, 等. 不同密度杉木萌生林自然恢复初期群落结构对林分碳密度的影响 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(2): 1-12.
- [33] 惠刚盈, GADOW K V, 等. 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
- [34] GADOW K V. Zur best und esbeschreibung in der forsteinrich-

tung[J]. *Forest and Holz*, 1993, 48(21): 602-606

[35] 李远发. 林分空间结构参数二元分布的研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.

[36] ZHAO Z H, HUI G Y, LIU W Z, *et al.* A novel method for calculating stand structural diversity based on the relationship of adjacent trees[J]. *Forests*, 2022, 13(2): 343.

[37] 王艳辉. 大岗山栎类次生林林分结构及生长规律研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2008.

[38] 谢阳生, 孟京辉, 曾 冀, 等. 马尾松人工纯林近自然化改造效果分析 [J]. *林业科学研究*, 2023, 36(2): 31-38.

[39] 彭文成, 杨 佳, 黄士绮, 等. 杉木人工林近自然化改造对林分结构及物种多样性的影响 [J]. *热带林业*, 2023, 51(3): 23-27.

[40] 钟昌龙, 施维华, 李国秀, 等. 红椿近成熟天然次生林直径分布 [J]. *生态科学*, 2022, 41(6): 114-122.

[41] 林富成, 王维芳, 门秀莉, 等. 兴安落叶松人工林空间结构优化 [J]. *北京林业大学学报 (自然科学版)*, 2021, 43(4): 68-76.

[42] HUI G Y, POMMERENING A. Analysing tree species and size diversity patterns in multi-species uneven-aged forests of northern China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 316: 125-138.

[43] 万 盼, 刘文桢, 刘瑞红, 等. 结构化经营对栎松混交林林分空间结构及稳定性的影响 [J]. *林业科学*, 2020, 56(4): 35-45.

[44] 王奕茹, 李际平, 曹小玉, 等. 运用空间结构参数二元分布对杉木-闽楠混交林林分结构分析 [J]. *东北林业大学学报 (自然科学版)*, 2020, 48(7): 55-59.

[45] 张岗岗, 王得祥, 柴宗政, 等. 秦岭中段华北落叶松人工林空间结构的二元分布特征 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2014, 42(9): 33-40.

Stand Structure Diversity of *Cunninghamia lanceolata* Coppice Forest

Sarina¹, LIAN Qi¹, HU Yan-bo¹, ZHANG Gong-qiao¹, LU Yan-lei¹,
SUN Hong-gang², YAO Jia-bao³, ZHAO Zhong-hua¹

(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry CAF, Beijing 100091, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 3. Experimental center of subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Xinyu 336600, Jiangxi, China)

Abstract: [Objective] To analyze the structural characteristics of *Cunninghamia lanceolata* Coppice Forest and provide a basis for optimizing and adjusting the stand structure and accurately improving the forest quality. [Methods] Based on the *Cunninghamia lanceolata* Coppice Forest in the Shanxia Forestry of the Subtropical Forestry Experiment Center, the diameter distribution was fitted by the Weibull distribution, and the univariate and bivariate distribution characteristics of the stand spatial structure parameters, the degree of dominance of the tree species, and the structural diversity of the stand were analyzed by the quantitative analysis of the stand spatial structure, and the significance test of differences was carried out by the method of the genetic absolute distance. [Results] The species composition of the three stands was dominated by coppice sprouts mixed with a small number of broad-leaved trees, with the Shannon-Winner index ranging from 0.933 to 1.039, and the Simpson's diversity index was less than 0.5, resulting in low species diversity; The diameter distribution of the stand showed a left-skewed monoclinal curve, with a tendency towards an inverted "J" shape; The mean angular scales of the uphill and downhill stands at Sanban-qiao and Qilikeng uphill and downhill were 0.503, 0.486, and 0.500, respectively, all of which belonged to the category of random distribution. The stand level mixing was 0.345, 0.404, and 0.409, respectively, and the stand as a whole was in a state of transition from weak to moderate mixing; Structural diversity index values were low in three stands with 1.423, 1.349 and 1.649 respectively. The uniform angle index-mingling and neighborhood comparison binary distributions showed some regularity, but the mingling-neighborhood comparison binary distribution varied in a relatively complex manner, and the regularity was not obvious. [Conclusion] The species composition of *Cunninghamia lanceolata* coppice forests is relatively simple, the tree species diversity and stand structure diversity are low, and the DBH distribution and tree distribution pattern initially have the characteristics of natural forests. It is necessary to improve the stand quality through optimization and adjustment of the stand structure.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata* coppice forest; tree species diversity; spatial structure; structure diversity; structural adjustment

(责任编辑: 崔 贝)