

# 北亚热带典型针叶混交林空间结构参数分布特征分析

郑许光<sup>1</sup>, 钱鹏宏<sup>2</sup>, 翁振明<sup>3</sup>, 叶姝儿<sup>2</sup>, 王中旭<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>遂昌县生态林业发展中心, 浙江 丽水

<sup>2</sup>浙江农林大学暨阳学院园林学院, 浙江 绍兴

<sup>3</sup>遂昌县湖山林场, 浙江 丽水

收稿日期: 2025年6月9日; 录用日期: 2025年7月30日; 发布日期: 2025年8月25日

## 摘要

以北亚热带遂昌国家森林公园典型杉木-黄山松针叶混交林为研究对象, 对其结构特征进行研究, 为林分结构的优化提供参考为森林经营调控和重建提供指导。对样地内的林木进行每木定位和调查, 计算每株林木的角尺度( $W$ )、混交度( $M$ )和大小比数( $U$ ), 及核心区林木分布(一元、二元分布)相对频率。从一元空间分布格局分析可知, 研究区林木总体呈随机分布状态, 林分混交程度处于中等水平, 不同树种在生长势和生态位上的表现存在较大差异, 群落整体趋于均衡但结构尚未稳定。在二元分布分析中, 角尺度-混交度与大小比-角尺度两组指标组合下, 林木以随机分布为主, 混交程度主要表现为中等至偏强; 而在大小比-混交度的组合关系中, 则以强混交林木为主导类型, 表明林分在空间结构上呈现出一定的复杂性和异质性。从主要树种的混交特征来看, 优势种杉木与黄山松之间混交程度较高, 二者在群落中分布较为随机, 体现出良好的生态适应性和竞争力; 相对而言, 其余伴生树种生长势较弱, 且不同树种间在径级、树高等结构因子上差异显著, 群落内部存在一定程度的个体分化与层级分布。全面分析杉木-黄山松混交林的空间结构, 为杉木和黄山松混交林结构优化提供重要参考信息。

## 关键词

空间结构, 角尺度, 林木分布, 针叶混交林

# Analysis of Spatial Structure Parameter Distribution Characteristics of Typical Coniferous Mixed Forests in Northern Subtropical Regions

Xuguang Zheng<sup>1</sup>, Penghong Qian<sup>2</sup>, Zhenming Weng<sup>3</sup>, Shu'er Ye<sup>1</sup>, Zhongxu Wang<sup>2\*</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 郑许光, 钱鹏宏, 翁振明, 叶姝儿, 王中旭. 北亚热带典型针叶混交林空间结构参数分布特征分析[J]. 世界生态学, 2025, 14(3): 276-284. DOI: 10.12677/ije.2025.143033

<sup>1</sup>Ecological Forestry Development Center of Suichang County, Lishui Zhejiang

<sup>2</sup>College of Landscape Architecture, Jiyang College of Zhejiang A&F University, Shaoxing Zhejiang

<sup>3</sup>Hushan Forest Farm of Suichang County, Lishui Zhejiang

Received: Jun. 9<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 30<sup>th</sup>, 2025; published: Aug. 25<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Taking the typical coniferous mixed forest in the northern subtropical Suichang National Forest Park as the research object, this study aims to investigate its structural characteristics, provide reference for optimizing forest stand structure, and provide guidance for forest management, regulation, and reconstruction. Conduct positioning and investigation of each tree in the standard plot, calculate the angular scale ( $W$ ), mixed degree ( $M$ ), and size ratio ( $U$ ) of each tree, as well as the relative frequency of forest distribution in the core area (univariate and binary distribution). From the perspective of univariate distribution, the overall distribution of trees belongs to random distribution, with moderate mixed forest stands and uneven quality of tree species, in a moderate state; In the binary distribution, the combination of angular scale mixed degree and size ratio angular scale is dominated by randomly distributed and strongly mixed trees, while in the size ratio mixed degree distribution, strongly mixed trees are predominant. The mixed degree of the main tree species is relatively high, showing a mixed state of intensity or above; Among them, Chinese fir and Huangshan pine are the dominant tree species in this community, which belong to random distribution, while other tree species have growth disadvantages and significant differences in size between tree species. The spatial structure of Chinese fir Mount Huangshan pine mixed forest was comprehensively analyzed to provide important reference information for the structural optimization of Chinese fir and Mount Huangshan pine mixed forest.

## Keywords

Spatial Structure, Angular Scale, Forest Distribution, Coniferous Mixed Forest

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

对森林结构的分析有助于人类了解森林的形成过程和森林生态系统未来发展的趋势, 良好的森林结构既是森林生态系统构成的基础也是发挥森林生态功能的必要条件[1]。森林被要求向社会提供越来越多的商品和服务, 所以无论是天然林还是人工林的经营都应主抓结构, 创建并维护最佳的森林空间结构[2]。林分空间结构在森林生长过程中起到了决定性作用, 林分中各林木个体之间也是各林木与环境之间相互关系的体现, 反映了林木间的空间位置和相互竞争水平, 也决定了森林功能和森林经营技术[3][4]。当今的森林结构研究仍是基于最近相邻木空间关系的结构参数, 以空间结构单元为基础, 简洁并完整地描述林木的微环境结构多样性, 即林木个体之间的大小差异、水平分布状况、树种混交状况[5]。以上三种空间结构参数分别反映林分结构的不同属性, 均采用统一的五级分类标准。基于此, 可开展它们的联合分布分析, 以探讨结构特征之间的关联性。既有研究通常通过结构参数的均值与一元分布, 分别描述林分的整体特征与单一维度的结构特性, 该方法能直观地看出林分的整体特征, 但无法与林木的角尺度、混

交度和大小比数相联系,引起森林结构优化的局限性。结构参数二元分布的提出弥补了该缺陷[6],该方法通过频率分布优势,从两个维度刻画不同层级林木的空间结构特征,实现角尺度、混交度与大小比之间的成对组合分析[7],空间结构的二元分布相比于空间结构的一元分布有了更为丰富的信息,研究的方法广泛应用于不同林分类型。通过结合一元分布的直观表达与二元分布中结构参数的成对联立分析,可实现对研究区林分在水平空间上的科学合理配置,从而为构建结构稳定、功能健全的健康森林经营和发展提供科学依据。

当前关于北亚热带高海拔针叶林的结构参数研究,仍较少涉及多元分布层面的深入分析,相关研究尚处于起步阶段。杉木和黄山松作为北亚热带高海拔典型针叶植物,为保护和利用这些宝贵的资源,对其种群空间结构的研究迫在眉睫。本研究选取遂昌国家森林公园内保存状况良好、结构相对稳定的典型杉木-黄山松混交林样地作为研究对象,运用角尺度、混交度及大小比等结构参数对林分空间格局进行系统分析。同时,引入树种空间结构参数的多元分布方法,全面揭示混交林的结构特征。研究结果可为北亚热带地区杉木-黄山松混交林的健康经营与可持续利用提供科学参考。

## 2. 研究区域和方法

### 2.1. 研究区概况

研究区位于浙江省遂昌国家森林公园内,地处距遂昌县城约 50 km 处,地理坐标为东经 119°5'30"~119°8'30",北纬 28°20'00"~28°22'30"。区域海拔范围为 830~1516.3 m,地势总体较为陡峻,坡度普遍大于 26°,其中山体上部至顶部地形相对平缓。属中亚热带季风气候,年降水量 1850~2400 mm,平均气温 10℃~14℃,无霜期 180~230 d。以乔木树种为主体,针叶林的主要类型有杉木林、黄山松林和杉木-黄山松混交林,其中杉木和黄山松分布广泛,蓄积占绝对的优势。

### 2.2. 样地设置与调查

在遂昌国家森林公园内设置了 3 个典型的杉木-黄山松混交林样地,样地面积均为 40 m × 40 m。样地选取基于前期遥感解译与实地踏勘结果,综合考虑林分结构、立地条件、空间代表性和可操作性,遵循以下原则:(1) 代表性强:选择具有典型杉木-黄山松混交结构、林龄均匀、天然更新良好、未受明显人为干扰的林分,能够真实反映研究区该类型森林的生态特征与结构状态;(2) 立地条件一致:3 个样地地形、坡度、坡向及海拔差异较小,减少因环境因子变化带来的干扰,提高样地间数据的可比性;(3) 空间分布合理:样地均位于混交林主要分布区内的中下坡位,通过空间布局的合理性提高样地对研究区混交林群落结构的代表力。三个样地的平均海拔为 1200 m,平均坡度 14.4°,坡向为南偏西(192°),地势位于下坡位,林分郁闭度为 0.69,平均胸径为 14.0 cm,平均林高为 10.7 m,具备良好的生长条件和代表性林分结构特征。为提高研究结果的普适性和结论的科学性,样地采用典型样地调查法,结合系统抽样和分布均衡原则进行布设,确保数据能够较好代表区域内主要的杉木-黄山松混交林群体特征。林分郁闭度为 0.69,平均胸径为 14.0 cm,林层平均高度为 10.7 m。同时,以研究区样地西南角为坐标原点,采用 RTK 高精度测量仪确定坐标基轴,并对样地内所有胸径 ≥ 5 cm 的乔木进行详细调查,记录其树种名称、空间坐标、胸径、树高等信息,并进行挂牌编号。

### 2.3. 林分空间结构参数

基于 4 株相邻木的角尺度等空间结构参数角尺度( $W_i$ )、大小比数( $U_i$ )和树种混交度( $M_i$ ),可有效描述森林群落中林木个体在大小分化程度、空间隔离状况及分布格局等方面的结构特征,并实现对其空间异质性的精确描述与定量分析[8]。

$W_i$ 用来描述相邻树木围绕参照树  $i$  的均匀性角尺度[9], 被定义为  $\alpha$  角小于标准角  $\alpha^\circ (=72^\circ)$  的个数所占空间结构单元中 4 个  $\alpha$  角的比值。

$W_i$ 用下式来表示:

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{ij}$$

其中:  $Z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角小于标准角 } \alpha_0 \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

林分空间分布格局可通过计算样地内所有乔木树种角尺度的平均值( $\bar{W}$ )进行判断。具体而言, 当 $\bar{W}$ 位于[0.475, 0.517]区间时, 表示林木呈随机分布; 当 $\bar{W}$ 小于 0.475 时, 表明林木分布趋于均匀; 当 $\bar{W}$ 大于 0.517 则说明林木呈团状或聚集分布。

均值( $\bar{W}$ )的计算公式为:

$$\bar{w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i = \frac{1}{4n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 z_{ij}$$

$U_i$ 用来形容林木大小的差异程度[9], 其数值分布可划分为五个等级: 当 $U_i = 0$ 时表示具有明显优势; 当 $U_i = 0.25$ 表示亚优势;  $U_i = 0.50$ 为中等或相近状态;  $U_i = 0.75$ 表示劣势;  $U_i = 1.00$ 则反映目标木处于绝对劣势地位。该参数的计算公式如下所示:

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

其中:  $Z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角小于标准角 } \alpha_0 \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

混交度指数  $M_i$ 反映目标树与其相邻木在种属上的空间隔离程度[9], 该指标通常取值为 0、0.25、0.5、0.75 和 1.00, 分别对应零度混交、弱度混交、中度混交、强度混交及极强度混交五个等级。其计算公式如下:

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

其中:  $v_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当参照树 } i \text{ 与第 } j \text{ 株相邻木非同种时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

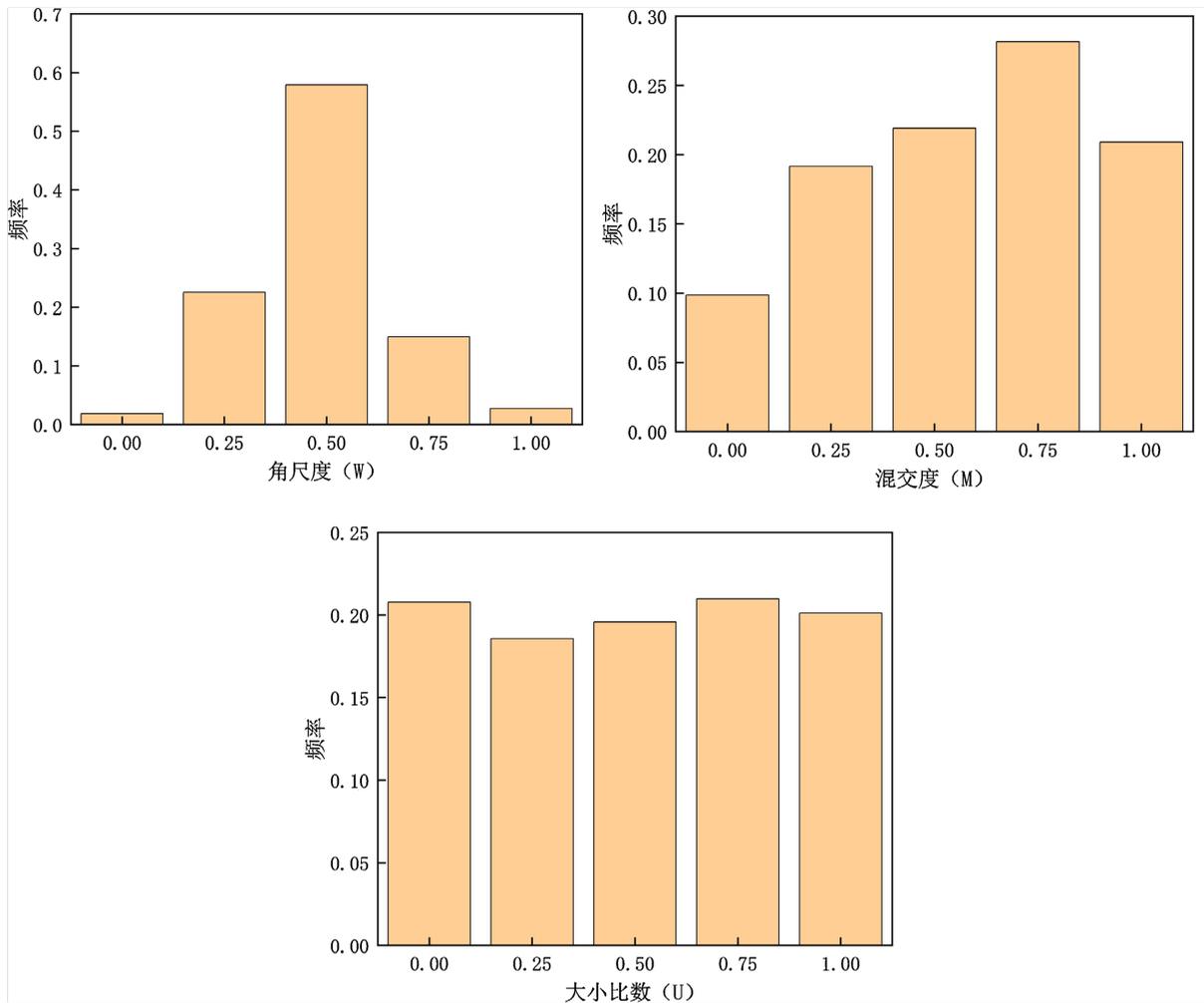
### 2.3. 数据处理

利用林分空间结构分析软件(Winkelmass1.0)计算林木空间结构参数( $W$ 、 $M$ 和  $U$ ), 利用 Excel 的数据透视表计算林木分布(一元、二元)相对频率。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 杉木 - 黄山松混交林空间结构参数的一元分布

结构参数的一元分布是指通过各参数的五个等级取值及其对应的林木相对频率, 来定量描述林分在某一结构维度上的特征表现。从图 1 可以看出, 样地中角尺度的分布整体呈现近似正态分布, 林分平均角尺度为 0.4854, 处于随机分布区间。随机分布等级的林木占比达 57.90%, 说明大部分林木空间排列趋于随机; 而“很均匀”与“很不均匀”等级的比例较低, 分别为 1.87%和 2.74%。在混交度的一元分布中, 不同混交等级的林木分布差异明显: 其中 9.85%的林木处于零度混交状态, 表明邻近木均为同种;



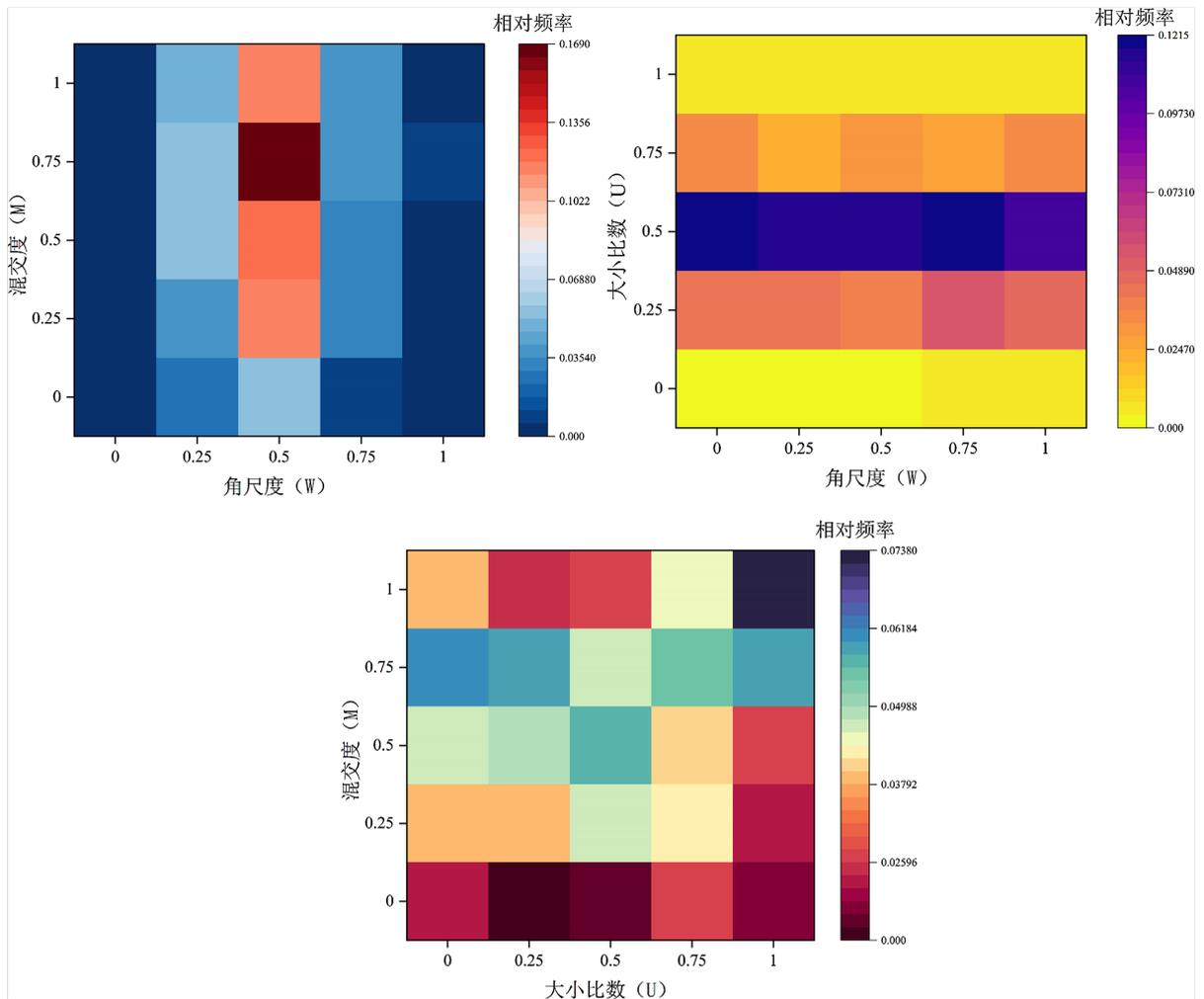
**Figure 1.** The unitary distribution of angular scale ( $W$ ), mixing degree ( $M$ ), and size ratio ( $U$ ) of Chinese fir Mount Huangshan pine mixed forest

**图 1.** 杉木 - 黄山松混交林角尺度( $W$ )、混交度( $M$ )、和大小比数( $U$ )的一元分布

而 28.15% 的林木则属于强度混交，显示出较高的异种混合程度。弱度混交、中度混交和极强度混交所占林木比例类似在 19.17%~21.92% 之间，样地的平均混交度为 0.5777，说明树木混交度强弱不明显，树种的空间隔离程度处于普通水平。该样地的平均大小比数为 0.5027，表明林木在生长竞争方面总体处于中等水平，未呈现明显的优势或劣势分化；从频率分布看，各大小比等级的相对频率均稳定在 0.20 附近，反映出林分内部树木大小关系分布较为均衡，未出现极端偏态现象。

### 3.2. 杉木 - 黄山松混交林空间结构参数的二元分布

将任一结构参数 XXX (取值为 0.00、0.25、0.50、0.75、1.00) 与另一结构参数 YYY 的五个等级取值 (同样为 0.00 至 1.00) 进行交叉组合，可构建出 25 种不同的结构参数联合类型，从而形成 XXX-YYY 二元分布。该分布通过相对频率反映两种结构属性的联合特征。由图 2 可见，杉木 - 黄山松混交林样地中，各混交等级下林木的相对频率随角尺度的变化趋势近似正态分布，呈现“先升后降”的规律，且在角尺度为随机分布等级(0.50)时相对频率达到峰值，依次为 0.054、0.117、0.124、0.169 和 0.115，对应不同混交水平。这表明处于随机空间格局的林分所占比例最大，约为 57.9%。



**Figure 2.** Binary distribution of angular scale ( $W$ ), mixing degree ( $M$ ), and size ratio ( $U$ ) of Chinese fir- Huangshan pine mixed forest

**图 2.** 杉木 - 黄山松混交林角尺度( $W$ )、混交度( $M$ )、和大小比数( $U$ )的二维热力图

此外, 极端分布类型(如非常均匀或极度不均匀)的林分所占比例较低。当角尺度为 0 (即高度均匀分布)时, 不同混交度等级对应的相对频率均接近于零。在强度混交水平(混交度为 0.75)下, 角尺度为 0.50 (随机分布)对应的结构组合相对频率最大(0.169), 说明样地中以“强度混交 + 随机分布”组合的林木最为常见, 是该混交林的主要空间结构特征。

在大小比与角尺度的二元分布中, 固定角尺度等级后, 各大小比等级对应的相对频率呈现先下降后上升的趋势, 表现出一定的“U 型”分布特征, 并在优势分布轴上取得最高的相对频率值(0.121)略微高于其他结构组合。这一结果表明, 在杉木 - 黄山松混交林中, 生长处于优势地位且空间分布趋于随机的林木所占比例最高, 占总样本树木的 12.1%。说明此类结构组合在该林分中较为典型, 是其空间生长格局的重要组成部分。

在大小比与混交度的二元分布中, 不同生长优势等级下林木在各混交状态中的分布特征存在明显差异。结果显示, 处于绝对劣势状态的林木中, 有 7.4% 分布于极强度混交等级, 为该类别中占比最高的结构组合。而在生长优势等级中, 与强度混交组合的林木比例达 6.1%, 也相对较高。总体来看, 混交度为零度混交的林分在所有大小比等级中均占比最低, 表明单一树种成分分布较少。同时, 各混交等级下,

不同生长态势(大小比)所对应的林分频率普遍分布于 0.20 左右, 反映出林分在生长优势与种间混交之间具有一定的均衡状态。

### 3.3. 杉木 - 黄山松混交林主要树种的空间结构特征

7 个主要树种的角尺度分布在 0.475~0.521 区间, 其中杉木作为优势种的角尺度=0.475 属于随机分布状态。黄山松、枹栎、马银花、木荷、山胡椒角尺度的分布范围在 0.475~0.517 区间, 属于随机分布, 而马银花角尺度远 > 0.517, 属于团状分布; 在大小比数指标上, 不同树种表现出显著差异。其中, 枹栎、冬青和山胡椒的平均大小比均接近或超过 0.75, 表明这些树种在混交林中处于明显的劣势地位; 马银花次之为 0.708; 木荷为 0.655; 杉木为 0.459; 黄山松最低为 0.340; 7 个树种中, 枹栎、冬青、马银花、木荷和山胡椒的平均混交度均在 0.75 以上, 黄山松略低于 0.75 (强度混交), 杉木的混交度接近于 0.25 (弱度混交)。冬青的大小比值处于所有树种中的最高水平, 反映其在林分中处于较为劣势的生长地位。然而, 冬青的混交度较高, 表明该树种与其他树种具有较强的空间混合特征, 从而在整体林分中承受的竞争压力相对较小。木荷虽然为大乔木, 但在高海拔地区种间竞争处于劣势。结果表明, 黄山松与杉木通常分布于群落的林冠上层, 具备较为粗壮的干形特征, 体现出其在群落结构中的明显优势地位。相较之下, 位于下层的小乔木多处于被压制的生长状态, 竞争能力相对较弱。

**Table 1.** Spatial structure parameters of main tree species in Chinese fir-Huangshan pine mixed forest

**表 1.** 杉木 - 黄山松混交林主要树种的空间结构参数

树种名	<i>W</i>	<i>U</i>	<i>M</i>
杉木	0.475	0.459	0.410
黄山松	0.496	0.340	0.663
枹栎	0.496	0.780	0.863
冬青	0.500	0.864	0.977
马银花	0.521	0.708	0.792
木荷	0.494	0.655	0.800
山胡椒	0.500	0.771	0.896
其他	0.493	0.711	0.799

## 4. 讨论

### 4.1. 杉木 - 黄山松混交林的空间结构参数分布与生态驱动机制

林分结构在林木个体在生长发育的过程中占据着主导地位, 林分结构直接影响林分的功能, 合理的林分结构有助于林木个体的生长发育和森林生态系统的稳定[3] [10]。本实验运用结构参数的二元分布全面地概述了遂昌杉木 - 黄山松混交林的空间结构特征, 它至少以 5 倍的详细程度超越了一元分布所提供的全部结构信息, 具有更强的空间解析能力。从不同的角度全面且系统地说明了杉木黄山松混交林的结构多样性, 有助于优化森林结构和森林的更新[11]。从一元分布结果来看, 样地中林木的空间分布整体趋于随机格局。通常而言, 结构较为稳定的森林群落在经历长期自然演替后, 其林木分布模式往往趋向于随机分布, 代表群落已达到相对成熟或顶极演替阶段的空间结构特征[12], 说明杉木 - 黄山松混交林的整体结构是趋于稳定的。这种格局反映了林木种群之间经过长期竞争后的动态均衡状态, 是不同树种对资源(光、水、养分等)竞争一权衡过程的综合结果[12]。本研究杉木 - 黄山松混交林主要位于海拔 1000 m 以

上的南坡中下部, 受益于充足的光照和中等水分供应条件。这一立地优势促使优势种杉木和黄山松能够有效占据林冠层, 实现光资源的最大化利用, 形成随机分布的优势格局。同时, 由于坡度大、土壤瘠薄(黄壤性山地土为主, 腐殖质层厚度在 5~10 cm 之间), 水分和养分成为限制性因子。此外, 群落内其他伴生树种(如木荷、冬青、短柄枹栎等)多分布于中下层, 且以团状或聚集分布为主, 表明其个体更新依赖于局部微环境(如林窗、湿洼)及种子传播限制, 这种格局受限于其在光资源竞争中的劣势地位。因此, 在种间的功能性状分化的情况下, 如黄山松较耐瘠薄、杉木生长较快, 使得两者在竞争中实现了一定程度的资源分层和生态位错位, 造成其他树种资源利用率低以至于群落多样性下降, 这可能就是杉木-黄山松混交林混交度保持在中庸水平的重要生态机制。

一元分布以文字或表格显示较明显但在表达结果的形式上较为单一, 二元分布同时从两方面描述林分结构特征, 相比一元分布信息更加清晰[7] [13]。本文中很好地展示了杉木-黄山松混交林群落的空间结构特征。在杉木-黄山松混交林的角尺度与混交度的二元分布中, 随机分布与强度混交组合的林木占比最高, 与结构参数在一元分布中的变化趋势相吻合, 进一步印证该林分中多数林木个体呈随机分布特征。而在大小比与角尺度的联合分布中, 各等级的频率围绕随机分布轴(角尺度)和中庸等级(大小比)基本对称分布, 表明林分内部多数树木在空间上呈现随机排列, 生长状态则处于中庸水平。而同一分布格局的林木, 处于各优劣等级的比例相近。这是由于受到不同光照强度的上层优势木和中下层劣势木在长期演替的过程中达到共生[12]。

#### 4.2. 杉木-黄山松林的主要树种结构特征

已有研究指出, 植物在较低林层中通常表现出较强的聚集分布特征; 而随着林层高度的增加, 其聚集性逐渐减弱, 空间格局趋于随机或呈团状分布[14] [15]。本研究对乔木层中 7 个主要树种的角尺度、混交度与大小比数进行了分析, 结果显示其空间结构特征与已有关于林层分布规律的研究相一致, 即随林层高度增加, 林木的空间分布由聚集趋于随机或团状格局, 验证了该结构变化规律在杉木-黄山松混交林中的适用性。杉木和黄山松为样地内主林层, 均属于随机分布, 而其他的低林层属于团状分布的状态。通过对 7 个树种空间结构参数的分析可知, 群落中树种间的空间隔离程度较高, 且在生长优势上差异显著。其中, 杉木与黄山松的大小比数较低, 能够占据乔木层上部并有效获取充足的光照资源。这说明二者在长期的竞争中维持了稳定的主导地位, 但由于二者对资源利用策略不同, 杉木更偏好水热资源丰富的生长环境, 而黄山松则在贫瘠土壤条件下仍能维持生长, 这种生理生态差异使其在混交林中实现了功能性互补, 有利于林分稳定; 而木荷个体由于高海拔生长受限, 分布于乔木下层, 优势程度较低, 冬青、山胡椒和短柄枹栎在群落中处于劣势地位, 混交度较高。

现代森林经营是在森林可持续经营的原则指导下, 以培育健康稳定优质高效的森林为目标。目前, 由于保护区内长期存在人为采伐干扰, 林场管护范围内的杉木与黄山松林分在结构稳定性及生态服务功能方面仍表现出一定的不确定性与波动性[16]。浙江遂昌在 2002 年设置了遂昌国家森林公园, 对杉木和黄山松林进行了保护。通过对保护区内杉木与黄山松空间结构特征的系统研究, 可为调控林分结构参数提供依据, 从而实现对林分结构的优化与调适, 为保护区内受大量人为干扰的黄山松杉木混交林的结构调整提供理论依据。保护区内杉木和黄山松的混交程度较高, 需要调整而降低顶级树种的竞争大小比数[17]。择伐作为混交林经营管理中的核心环节, 是调控林分空间结构的重要手段之一, 对于优化群落结构与提升森林质量具有关键作用[18] [19]。对黄山松和杉木林进行择伐和卫生伐使杉木和黄山松处于优势地位不受到挤压威胁, 在择伐过程中, 应优先清除林分中处于零度或弱度混交状态且受病虫害影响的个体, 尽可能保留空间格局呈随机分布的健康单株, 以维持林分结构的稳定性与生态功能的完整性[17]。通过补植珍贵树种及优良乡土树种, 提升林分密度和混交度, 增强树种之间的空间隔离, 有助于维持生态系统

的生物多样性, 从而促进杉木-黄山松混交林中物种的自然更新与可持续发展[20]。同时, 继续保持使林分的分布格局始终为随机分布状态, 通过维持空间结构的优化状态, 为后续深入探究群落格局及促进其健康持续发展奠定坚实基础。

## 参考文献

- [1] Pommerening, A. (2006) Evaluating Structural Indices by Reversing Forest Structural Analysis. *Forest Ecology and Management*, **224**, 266-277. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.039>
- [2] 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.
- [3] 汤孟平. 森林空间结构研究现状与发展趋势[J]. 林业科学, 2010, 46(1): 117-122.
- [4] Ishii, H.T., Tanabe, S. and Hiura, T. (2004) Exploring the Relationships among Canopy Structure, Stand Productivity, and Biodiversity of Temperate Forest Ecosystems. *Forest Science*, **50**, 342-355. <https://doi.org/10.1093/forestscience/50.3.342>
- [5] 胡艳波, 惠刚盈. 基于相邻木关系的林木密集程度表达方式研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(9): 1-8.
- [6] Li, Y., Hui, G., Zhao, Z. and Hu, Y. (2012) The Bivariate Distribution Characteristics of Spatial Structure in Natural Korean Pine Broad-Leaved Forest. *Journal of Vegetation Science*, **23**, 1180-1190. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01431.x>
- [7] Li, Y., Hui, G., Zhao, Z., Hu, Y. and Ye, S. (2014) Spatial Structural Characteristics of Three Hardwood Species in Korean Pine Broad-Leaved Forest—Validating the Bivariate Distribution of Structural Parameters from the Point of Tree Population. *Forest Ecology and Management*, **314**, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.11.012>
- [8] 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, 2019, 41(4): 21-31.
- [9] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究[J]. 林业科学研究, 2001, 14(1): 23-27.
- [10] Staudhammer, C.L. and LeMay, V.M. (2001) Introduction and Evaluation of Possible Indices of Stand Structural Diversity. *Canadian Journal of Forest Research*, **31**, 1105-1115. <https://doi.org/10.1139/x01-033>
- [11] 吴明晶. 毛竹和杉木混交林林分结构分析[J]. 福建林业科技, 2022, 49(03): 35-40.
- [12] 龚直文, 顾丽, 亢新刚, 等. 长白山森林次生演替过程中林木空间格局研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 92-99.
- [13] Chai, Z., Sun, C., Wang, D., Liu, W. and Zhang, C. (2016) Spatial Structure and Dynamics of Predominant Populations in a Virgin Old-Growth Oak Forest in the Qinling Mountains, China. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **32**, 19-29. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1183703>
- [14] 张健, 郝占庆, 宋波, 等. 长白山阔叶红松林中红松与紫椴的空间分布格局及其关联性[J]. 应用生态学报, 2007(8): 1681-1687.
- [15] 张莉, 张小平, 陆畅, 等. 安徽琅琊山青檀种群空间格局[J]. 林业科学, 2012, 48(2): 9-15.
- [16] 任正标, 郭传阳, 郑鸣鸣, 等. 间伐对杉木凋落物分解中生态化学计量的影响[J]. 西部林业科学, 2021, 50(2): 109-115.
- [17] 惠刚盈, 赵中华. 基于林分状态的森林经营策略[J]. 温带林业研究, 2018, 1(2): 10-14.
- [18] Kint, V. (2005) Structural Development in Ageing Temperate Scots Pine Stands. *Forest Ecology and Management*, **214**, 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.04.014>
- [19] Courbaud, B., Goreaud, F., Dreyfus, P. and Bonnet, F.R. (2001) Evaluating Thinning Strategies Using a Tree Distance Dependent Growth Model: Some Examples Based on the CAPSIS Software “Uneven-Aged Spruce Forests” Module. *Forest Ecology and Management*, **145**, 15-28. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(00\)00571-5](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(00)00571-5)
- [20] 陈明辉, 惠刚盈, 胡艳波, 等. 结构化森林经营对东北阔叶红松林森林质量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 19-30.