

引用格式: 陶涛, 光太俊, 黄庆丰, 等. 天马国家级自然保护区落叶阔叶林主要树种空间分布格局及其关联性[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 544–553. TAO Tao, GUANG Taijun, HUANG Qingfeng, *et al.* Spatial distribution pattern and correlation of main tree species in deciduous broad-leaved forest in Tianma National Nature Reserve[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(3): 544–553.

天马国家级自然保护区落叶阔叶林主要树种 空间分布格局及其关联性

陶涛¹, 光太俊^{2,3}, 黄庆丰^{2,3}, 唐雪海^{2,3}, 欧强新^{2,3}, 刘华^{2,3}

(1. 安徽林业职业技术学院, 安徽 合肥 230031; 2. 安徽农业大学 林学与园林学院, 安徽 合肥 230036; 3. 安徽大别山森林生态系统国家定位观测研究站, 安徽 金寨 237300)

摘要: 【目的】探讨中国亚热带北缘向暖温带过渡地带落叶阔叶林主要树种的空间分布格局及其关联性。【方法】以天马国家级自然保护区落叶阔叶林为对象, 采用相邻格子法划分 9 个 24 m×24 m 的样方, 记载样地内胸径 (DBH) ≥ 2.5 cm 的树种名称和空间坐标; 用重要值确定主要树种。运用空间点格局 O-ring 函数、完全空间随机零模型和异质泊松零模型分析主要树种的空间分布格局及其关联性。【结果】天马国家级自然保护区马鬃岭区共有 17 科 20 属 27 种, 优势树种为短柄枹栎 *Quercus serrata*、茅栗 *Castanea seguinii*, 亚优势树种为化香 *Platycarya strobilacea*。林木直径结构呈现倒“J”型分布。空间分布格局结果表明: 优势树种在 0~30 m 尺度起初呈现聚集分布, 随着尺度的增大, 其空间分布格局逐渐趋向于不规则随机分布。种间空间关联性分析发现: 枹栎、茅栗和化香 3 种优势树种之间关联性不显著, 但 3 种优势树种与伴生树种在一定尺度上存在关联性。【结论】该群落类型为典型异龄林栎类与化香落叶阔叶林, 短柄枹栎林内更新较好, 具有增长趋势, 而茅栗、化香林内更新较差, 增长趋势不明显。随着群落演替, 喜光稍耐阴树种将会逐步替代喜光树种。图 4 表 2 参 35

关键词: 落叶阔叶林; 空间分布格局; 种间关联; 北亚热带

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)03-0544-10

Spatial distribution pattern and correlation of main tree species in deciduous broad-leaved forest in Tianma National Nature Reserve

TAO Tao¹, GUANG Taijun^{2,3}, HUANG Qingfeng^{2,3}, TANG Xuehai^{2,3}, OU Qiangxin^{2,3}, LIU Hua^{2,3}

(1. Anhui Vocational & Technical College of Forestry, Hefei 230031, Anhui, China; 2. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China; 3. Anhui Dabie Mountain Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Jinzhai 237300, Anhui, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the spatial distribution pattern and correlation of the major tree species in deciduous broad-leaved forests in the transition zone from northern margin of subtropical zone to warm temperate zone in China. [Method] Taking the deciduous broad-leaved forest of Tianma National Nature Reserve as research object, the adjacent grid method was used to divide the forest into nine 24 m × 24 m sample plots. The names and spatial coordinates of tree species with diameter at breast height (DBH) ≥ 2.5 cm in the sample plots were recorded. The major tree species were determined based on their important values. The spatial distribution pattern and correlation of major tree species were analyzed by using spatial point pattern O-

收稿日期: 2024-08-11; 修回日期: 2024-11-20

基金项目: 安徽省教育厅重点自然科学基金项目 (KJ2020A1127); 安徽大别山森林生态系统国家定位监测研究站运行项目 (2022132235)

作者简介: 陶涛 (ORCID: 0009-0003-3383-3914), 副教授, 从事森林植物、森林培育研究。E-mail: 2269635691@qq.com。通信作者: 唐雪海 (ORCID: 0000-0002-9901-4087), 副教授, 博士, 从事森林可持续经营、植被定量遥感研究。E-mail: tangxuehai@ahau.edu.cn

ring function, complete spatial stochastic zero model, and heterogeneous Poisson zero model. [Result] There were 27 species belonging to 20 genera and 17 families in Mazongling area of Tianma National Nature Reserve, with *Quercus serrata* and *Castanea seguinii* as dominant species, and *Platycarya strobilacea* as subdominant species. The diameter structure of trees showed an inverted “J”-type distribution. The spatial pattern results showed that the dominant tree species were initially clustered in 0–30 m scale, and gradually tended to be irregular and random with the increase of the scale. The spatial correlation analysis revealed that there was no significant correlation among the three dominant tree species (i.e., *Q. glandulifera* var. *brevipetiolata*, *C. seguinii*, and *P. strobilacea*). However, there was some correlation among the three dominant species and their companion tree species at a certain scale. [Conclusion] The community type is typical heterogeneous forests of *Quercus* spp. and *P. strobilacea* deciduous broad-leaved forests. *Q. serrata* forest regeneration was better and had an increasing trend, while the regeneration of *C. seguinii* and *P. strobilacea* forests was poor and the growth trend was not obvious. With the succession of the community, the light-loving and slightly shade-tolerant species will gradually replace the light-loving species. [Ch, 4 fig. 2 tab. 35 ref.]

Key words: deciduous broad-leaved forest; spatial distribution pattern; interspecific association; northern subtropical zone

群落结构特征与种群空间分布格局是森林空间结构的重要研究内容，对开展森林可持续经营及揭示群落演变规律具有重要意义，一直受到林学家和生态学家的广泛关注^[1-2]。作为温带地区标志性的地带植被类型，落叶阔叶林广泛分布于中纬度地区。在亚热带高海拔地区，落叶阔叶林是垂直植被体系不可或缺的一部分，其季节性的变换尤为显著^[3-4]。针对不同研究范围展开的分析表明：影响落叶阔叶林群落的因素存在差异。如在大范围内，其地理位置与气候条件存在关联；而在小尺度的研究中，则和落叶阔叶林群落的环境异质性以及群落演替有关。落叶树种对于整个群落结构、物种组成、更新状况、养分以及物质循环等方面均具有关键意义。人们逐渐意识到生态转换带的复杂性以及资源丰富性，尤其是植被、动物和微生物组成的复杂森林生态系统对物种变化起到重要作用。近年来，国内学者对暖温带-北亚热带过渡区的群落结构、空间分布格局等开展了诸多研究^[5-8]。安徽天马国家级自然保护区位于亚热带向暖温带的典型转折点上，具有独特、罕见且天然的自然资源，也是各类动植物的重要栖息地^[9]。已有研究探究了天马国家级自然保护区马鬃岭片区的天然落叶阔叶林结构特征、物种多样性以及种间关系^[10-11]，而对于种群分布格局和种间空间关联性的研究还较少。本研究使用点格局分析法深入探讨该片区落叶阔叶林的演替动态和物种共存机制，为天马国家级自然保护区森林质量提升及群落结构调整策略制定提供参考。

1 研究区概况

天马国家级自然保护区马鬃岭片区位于安徽省金寨县西南部 (31°10′~31°20′N, 115°30′~115°50′E)，地势呈西北至东南走向，南高北低，平均海拔为 900 m。植被类型为落叶常绿阔叶林和落叶阔叶林，乔木树种主要有杉木 *Cunninghamia lanceolata*、黄山松 *Pinus taiwanensis*、马尾松 *P. massoniana* 及短柄枹栎 *Quercus serrata*、麻栎 *Q. acutissima*、栓皮栎 *Q. variabilis*、茅栗 *Castanea seguinii*、化香 *Platycarya strobilacea*、大别山山核桃 *Carya dabieshanensis* 等，灌木有 榲桲 *Loropetalum chinense*、杜鹃 *Rhododendron simsii*、荚蒾 *Viburnum dilatatum*、山胡椒 *Lindera glauca* 等。列入国家级重点保护的珍贵植物有银缕梅 *Parrotia subaequalis*、大别山五针松 *P. dabieshanensis*、香果木 *Emmenopterys henryi*、连香树 *Cercidiphyllum japonicum* 等。该地区属于北亚热带湿润季风气候，全年平均气温为 13.3 ℃，夏季平均气温为 20.0 ℃，年平均降水量为 1 480.0 mm，无霜期为 200.0~220.0 d。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

2018 年 9 月在主要区域设置 72 m×72 m 的样地，样地中心坐标为 31°15′30.2″N, 115°41′45.7″E，海

拔为 1 069~1 113 m, 东南坡, 坡度为 18°~20°, 优势树种为短柄枹栎、茅栗、化香, 密度为 1 537 株·hm⁻², 胸高断面积为 37.77 m²·hm⁻²。使用全站仪定位四至边界, 再利用相邻格子法, 将该样地分割成 9 个 24 m×24 m 的样方, 收集每个样方中胸径 (DBH)≥2.5 cm 林木的信息, 包括胸径、树高、空间坐标、海拔、坡度、坡向等。根据样地起测胸径和最大胸径, 将林木胸径划分为 13 个径级组 (下限排除法), 起始树木胸径为 2.5 cm, 组距为 5.0 cm, 从 II (>7.5~12.5 cm) 开始记录, 统计各胸径组单位面积株数。

2.2 主要树种确定

树种重要值 (V_i) 表示样地树种的优势程度^[12], 用来确定空间格局分析的树种。重要值=(相对密度+相对显著度+相对频度)/3。其中: 相对密度 (%) 为样地内某个树种株数与所有树种株数总和之比; 相对显著度 (%) 为某树种胸高断面积与所有树种的胸高断面积总和之比; 相对频度 (%) 为某个树种出现的样方数与所有树种出现的样方数总和之比。

2.3 空间格局分析法

为有效研究多变量模式的空间架构, 抑制 Ripley K 函数的累积影响, 本研究采用圆环替换原有的圆形, 增强 $g(r)$ 函数的精度^[13-14]。通过单变量 $g_{11}(r)$ 函数和完全空间随机 (complete spatial randomness, CSR) 零模式的检验, 深入探究样地主要树种的空间变化规律, 了解其生态系统特征。采用异质泊松 (heterogeneous Poisson, HP) 零模型来估计强度函数 λ 值, 由于遵循泊松分布, 实际的局部领域密度会大大高于理论预测, 因此需要考虑一阶效果, 而且还需要使用 Epanechnikov 核来估算。通过使用双变量 $g_{12}(r)$, 研究样本中物种 1 和物种 2 之间的关系, 并使用异质泊松零模型来确定它们之间的真正交互。这一方法能够消除栖息地的干扰。在异质泊松零模型的运算中, 物种 1 的位置保持固定, 而物种 2 的位置则进行随机分配, 故而, 两两树种之间的相互作用并非对称关系^[15-16]。

设定 1 m×1 m 的栅格, 圆环宽度 3 m, 检验尺度为 0~3 m, 使用蒙特卡罗模拟 (Monte Carlo Simulations) 中汇总统计数据 199 次的第 5 位低值和第 5 位高值, 生成了 95% 的模拟包络, 结合拟合优度 (GOF) 测试评估距离间隔内的显著性水平^[17], 如果数据拟合次数大于 199, 且 $P<0.05$, 则零假设在 5% 的水平拒绝。 $g_{11}(r)$ 值置于置信区间的上方、内部、下方时, 则分别表示物种在该尺度上为聚集、随机、均匀分布; 当 $g_{12}(r)$ 值置于置信区间的上方、内部、下方时, 则分别表示物种在该尺度上为正相关性、无相关性、负相关性。

$$g_{11}(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{dK(r)}{dr}; \quad (1)$$

$$g_{12}(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{dK_{12}(r)}{dr}。 \quad (2)$$

式 (1)~(2) 中: r 代表空间尺度的距离; $K(r)$ 表示同一树种在 r 尺度下的点对数目; $K_{12}(r)$ 表示 2 个不同树种在 r 尺度上的点对数目; $dK(r)$ 表示同一树种在设定圆环宽度下的点对数目; $dK_{12}(r)$ 表示 2 个不同树种在设定圆环宽度下的点对数目; dr 代表圆环的宽度 ($dr=0.2/0.5\lambda$); $g_{11}(r)$ 表示圆环中实际观测到的树木数量与预期树木数量的比例; $g_{12}(r)$ 表示物种 1 周围的圆环中实际观测到的物种 2 的数量与预期数量的比例。

3 结果与分析

3.1 树种组成

样地树种调查统计结果见表 1。样地林木 DBH≥2.5 cm 的树种组成共有 17 科 20 属 27 种, 其中壳斗科 Fagaceae 和蔷薇科 Rosaceae 树木种类最丰富。壳斗科有栎属 *Quercus* 的短柄枹栎、槲栎 *Q. aliena*、锐齿槲栎 *Q. aliena* var. *acutiserrata*; 栗属 *Castanea* 的茅栗; 蔷薇科含李属 *Cerasus* 的尾叶樱 (*C. dielsiana*、稠李 *Prunus padus*、山樱花 *P. serrulata*; 石楠属 *Photinia* 的中华石楠 *P. beauverdiana*。樟科 Lauraceae、山茱萸科 Cornaceae、清风藤科 Sabiaceae、豆科 Fabaceae 各有 2 种, 其余科只有 1 个树种。按照偶见种 1~10 株·hm⁻² 的标准^[18], 样地内偶见种有红果山胡椒 *Lindera erythrocarpa*、暖木 *Meliosma veitchiorum*、秀丽槭 *Acer elegantulum*、山樱花、山合欢 *Albizia kalkora* 等 10 种。

表 1 样地树种组成

Table 1 1 Composition of tree species in sample plot						
序号	树种	密度/ (株·hm ⁻²)	胸高断面积/ (m ² ·hm ⁻²)	重要值/%	科	属
1	短柄枹栎 <i>Quercus serrata</i>	183	13.53	19.77	壳斗科Fagaceae	枹属 <i>Quercus</i>
2	茅栗 <i>Castanea seguinii</i>	201	11.91	19.12	壳斗科Fagaceae	栗属 <i>Castanea</i>
3	化香 <i>Platycaryas trobilacea</i>	123	5.25	10.24	胡桃科Juglandaceae	化香属 <i>Platycaryas</i>
4	灯台树 <i>Cornus controversa</i>	152	0.64	6.42	山茱萸科Cornaceae	灯台树属 <i>Cornus</i>
5	君迁子 <i>Diospyros lotus</i>	122	0.59	6.12	柿科Ebenaceae	柿属 <i>Diospyros</i>
6	山胡椒 <i>Lindera glauca</i>	114	0.25	4.86	樟科Lauraceae	山胡椒属 <i>Lindera</i>
7	野鸦椿 <i>Euscaphis japonica</i>	106	0.20	4.77	省沽油科Staphyleaceae	野鸦椿属 <i>Euscaphis</i>
8	野茉莉 <i>Styrax japonicus</i>	102	0.29	4.76	安息香科Styracaceae	安息香属 <i>Styrax</i>
9	鹅耳枥 <i>Carpinus turczaninowii</i>	106	0.58	4.26	桦木科Betulaceae	鹅耳枥属 <i>Carpinus</i>
10	中华石楠 <i>Photinia beauverdiana</i>	66	0.26	3.17	蔷薇科Rosaceae	石楠属 <i>Photinia</i>
11	槲栎 <i>Quercus aliena</i>	29	1.62	2.91	壳斗科Fagaceae	枹属 <i>Quercus</i>
12	锐齿槲栎 <i>Quercus aliena</i> var. <i>acutiserrata</i>	27	1.36	2.50	壳斗科Fagaceae	枹属 <i>Quercus</i>
13	四照花 <i>Dendrobenthamia japonica</i>	41	0.22	2.13	山茱萸科Cornaceae	山茱萸属 <i>Dendrobenthamia</i>
14	尾叶樱 <i>Cerasus dielsiana</i>	33	0.28	1.88	蔷薇科Rosaceae	李属 <i>Prunus</i>
15	黄檀 <i>Dalbergia hupeana</i>	33	0.19	1.67	豆科Fabaceae	黄檀属 <i>Dalbergia</i>
16	刺楸 <i>Kalopanax septemlobus</i>	25	0.14	1.19	五加科Araliaceae	刺楸属 <i>Kalopanax</i>
17	金缕梅 <i>Hamamelis mollis</i>	14	0.02	0.71	金缕梅科Hamamelidaceae	金缕梅属 <i>Hamamelis</i>
18	山合欢 <i>Albizia kalkora</i>	8	0.14	0.56	豆科Fabaceae	合欢属 <i>Albizia</i>
19	山樱花 <i>Cerasus serrulata</i>	8	0.08	0.50	蔷薇科Rosaceae	李属 <i>Prunus</i>
20	秀丽槭 <i>Acer elegantulum</i>	8	0.03	0.46	无患子科Sapindaceae	槭属 <i>Acer</i>
21	红果山胡椒 <i>Lindera erythrocarpa</i>	8	0.01	0.45	樟科Lauraceae	山胡椒属 <i>Lindera</i>
22	华东椴 <i>Tilia japonica</i>	6	0.11	0.42	椴树科Tiliaceae	椴树属 <i>Tilia</i>
23	暖木 <i>Meliosma veitchiorum</i>	8	0.02	0.38	清风藤科Sabiaceae	泡花树属 <i>Meliosma</i>
24	红枝柴 <i>Meliosma oldhamii</i>	4	0.03	0.24	清风藤科Sabiaceae	泡花树属 <i>Meliosma</i>
25	肉花卫矛 <i>Euonymus carnosus</i>	4	0	0.22	卫矛科Celastraceae	卫矛属 <i>Euonymus</i>
26	青榨槭 <i>Acer davidii</i>	4	0.03	0.18	槭树科Aceraceae	槭属 <i>Acer</i>
27	稠李 <i>Prunus padus</i>	2	0	0.11	蔷薇科Rosaceae	李属 <i>Prunus</i>
合计		1 537	37.78	100		

样地内短柄枹栎、茅栗、化香的重要值均大于 10.00%，分别是 19.77%、19.12% 和 10.24%，3 个树种重要值占总重要值的 49.13%。3 个树种胸高断面积分别为 13.53、11.91、5.25 m²·hm⁻²，占样地总断面积的比例分别为 35.81%、31.52% 和 13.90%，总占比为 81.23%，因此，该样地群落类型为枹类与化香落叶阔叶林，优势树种为短柄枹栎、茅栗，亚优势树种为化香。

3.2 胸径结构

根据样地调查结果统计各胸径组单位面积株数，并绘制样地林木胸径结构图(图 1)。由图 1 可知：样地林木胸径结构呈现倒“J”型分布，其中 2.5~7.5、7.5~12.5 cm 直径组的林木株数最多，且随着胸径的不断增大，林木株数不断减少。这表明样地林分具备异龄林林分胸径结构的特点。图 2 显示：优势树种短柄枹栎的胸径结构大致呈倒“J”型分布，然而茅栗、化香的胸径结构与林地胸径结构不同，呈正态分布；短柄枹栎小径级的林木株数较多，意味着其林内更新情况良好，具有增长的态势；茅栗、化香小径级的林木株数较少，林内更新不

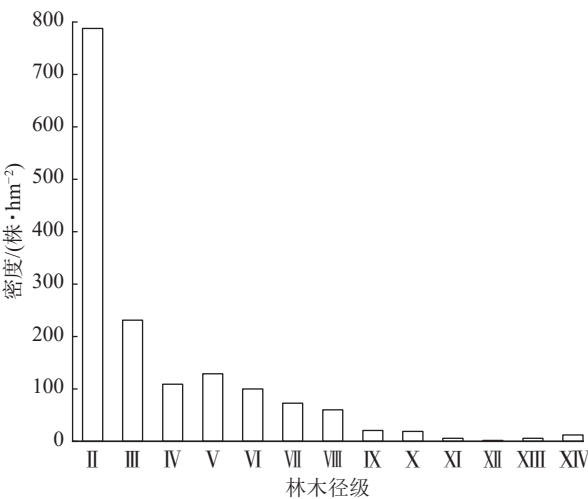


图 1 样地林分胸径结构
Figure 1 DBH structure of forest stands in the sample plot

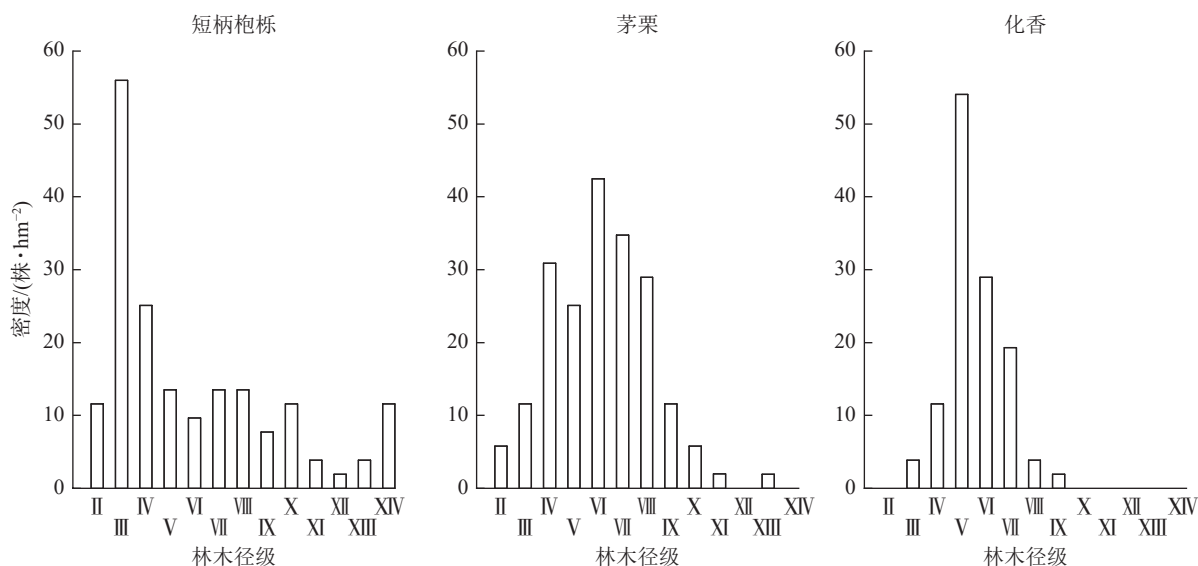


图 2 优势树种胸径结构

Figure 2 DBH structure of dominant tree species

佳, 增长的趋势并不明显。

3.3 林分的空间格局

样地所有树种林木 2 种空间分布函数模型结果如图 3。运用单变量 O-ring 函数展开的分析结果表明: 在完全随机零模型 (CSR) 的情况下, 样地内所有林木在小尺度 0~5 m 范围呈现出聚集分布态势, 而当尺度为 5~30 m 时, 则呈随机分布。在异质泊松零模型 (HP) 情况下, 所有林木同样在小尺度上表现出聚集分布的特征。随着空间尺度的不断增加, 其聚集程度逐渐减弱, 最终呈现出不规则随机分布的状态。

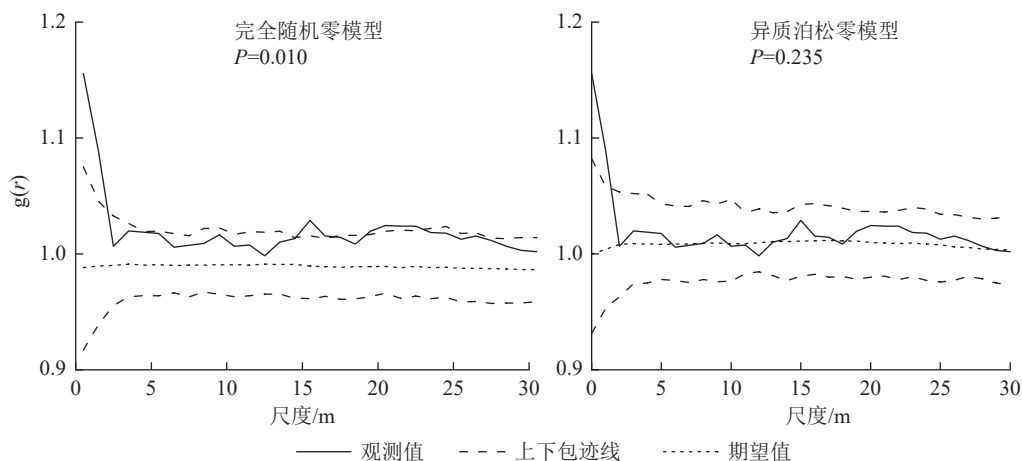


图 3 所有树种的完全随机零模型、异质泊松零模型的空间分布图

Figure 3 Spatial distribution pattern of all tree species under CSR and HP

3.4 优势树种的空间格局

根据完全随机零假设模型、异质泊松零模型, 短柄枹栎、茅栗和化香 3 种优势树种空间分布格局如图 4。在完全随机零假设模型情况下, 这 3 种优势树种在 0~30 m 尺度范围内, 起初均表现为聚集分布, 伴随尺度的扩大, 逐渐转变为随机分布态势。其中, 茅栗在 1~15、18~30 m 尺度上呈现不规则随机分布, 在其他尺度上则为聚集分布; 化香在 2~7、7~21、23~30 m 的尺度上呈现不规则随机分布, 在其余尺度上为聚集分布; 短柄枹栎在 5~30 m 的大尺度上呈不规则随机分布, 在小尺度上主要为聚集分布。在异质泊松零假设模型下进行分析可见: 这 3 种优势树种在 0~30 m 尺度上起初呈现聚集分布, 随尺度的增大, 其空间分布格局逐渐趋向于不规则随机分布。

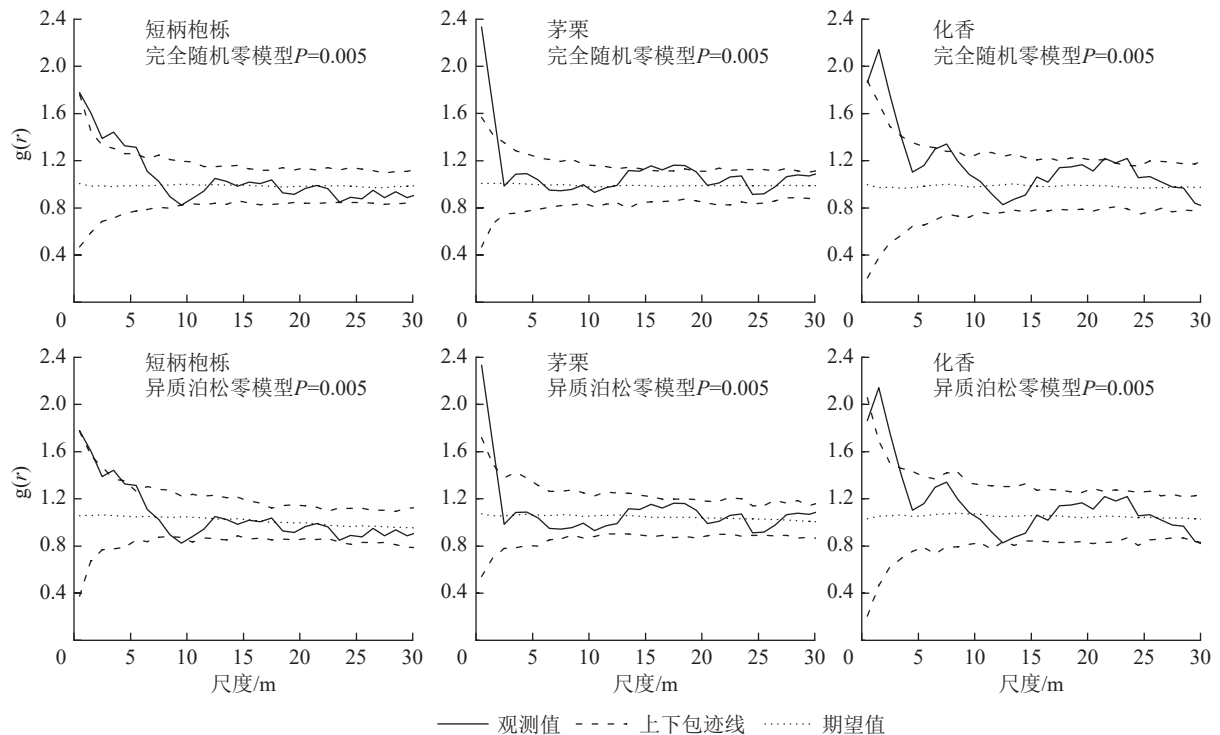


图 4 优势树种在完全随机零模型 (CSR) 和异质泊松零模型 (HP) 下的空间分布图

Figure 4 Spatial distribution map of dominant tree species under CSR and HP

3.5 种间空间关联性

由表 2 可见：在异质泊松零模型、GOF 检测偏离零模型 ($P < 0.05$) 检验中，样地内有 13 个树种对存在显著关联。短柄枹栎、茅栗和化香 3 种优势树种之间关联性不显著，但 3 种优势树种与伴生树种在一定尺度上存在关联性。如短柄枹栎与灯台树在 0、2 m 尺度上呈负相关，在 18~20 m 尺度上呈正相关，而短柄枹栎与君迁子在 2、4 m 尺度上呈负相关，26~28 m 尺度上呈正相关。同一种优势树种与不同伴生树种在不同尺度上相关性不同。茅栗与野茉莉在 0~2、24 m 尺度上呈正相关。化香与灯台树在 0、0~2、14~16 m 尺度上呈正相关，而化香与山胡椒在 4、4~6、6 m 尺度上呈正相关，在 10、10~12 m 尺度上呈

表 2 样地主要树种的种间关联表

Table 2 Interspecific associations of major tree species in the sample plot

树种1	树种2	P	不同尺度的关联性															
			0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30 m
短柄枹栎	灯台树	0.020	-	r/-	r	r	r	r	r	r	r	r/+	+/r	r	r	r	r	r
短柄枹栎	君迁子	0.010	r	r/-	r/-	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r/+	+	+/r
茅栗	野茉莉	0.050	r	+/r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r/+	r	r	r
化香	灯台树	0.005	+	+	r	r	r	r	r	r	+/r	r	r	r	r	r	r	r
化香	山胡椒	0.020	r	r	+	+	r	-	-/r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
灯台树	化香	0.045	+	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
灯台树	山胡椒	0.030	-	-	r	r	r	r	r	r	r	r	r	+	+/r	r	r	r
君迁子	野鸦椿	0.020	r	r	r/+	+	r	r	+	+	+/r	r	r	r	r	r	r	r
山胡椒	化香	0.050	r	r	r/+	+	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
山胡椒	灯台树	0.005	r	-	r	r	r	+	r	r	r	r/+	r	+	+/r	r	r	r
山胡椒	君迁子	0.030	r	r	r	r	r	+	+/r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
野鸦椿	君迁子	0.035	r	r	r/+	+	r	r	+	+	+/r	r	r	r	r	r	r	r
野茉莉	君迁子	0.050	r	r	r	r	r	+/r	r	r/+	+	+	+/r	r	r	r	r	r

说明：+，正相关；-，负相关；r，无关联。如果关联性有 1 个符号（如“+”），则表示对应尺度与上一个尺度和该尺度本身都具有正相关；如果关联性有 2 个符号（如“-/r”），则表示对应尺度与上一个尺度具有负相关，与该尺度本身无关联。

负相关。伴生树种之间在一定尺度上也存在关联性,如灯台树与山胡椒在0、0~2、2 m尺度上呈负相关,在22、22~24 m尺度上呈正相关。君迁子与野鸦椿在4、4~6、6、12、12~16 m尺度上呈正相关,其他尺度无关联。山胡椒与君迁子在10、10~12 m尺度上呈正相关,野茉莉与君迁子在8~10、14、14~20 m尺度上也呈正相关。

4 讨论

通常认为:在小尺寸上形成的林木空间分布格局首先是受群体本身生态学特征的直接影响,而在较大尺寸上的空间分布格局则更多是由于栖息地差异性的相互作用^[19]。本研究结果与阔叶落叶林主要树种径级结构呈倒“J”型的研究结果一致^[20-22],但与吴茜等^[23]对紫金山针阔混交林主要树种径级结构的研究结果略有差异。有研究表明:空间结构在小尺度上呈集群分布,聚集程度随着尺度的增大而降低^[24-27]。本研究样地林木在小尺度上呈聚集分布,伴随空间尺度的增大逐步趋向随机分布。这是由于在样地选择时就考虑到生境的一致性,所有林木均在同一坡面,坡度为18°~20°,样地生境异质性小;另一方面,种子质量较大的树种,种子成熟后依靠外部风力及动物的迁移所能传递的时间受限,大多散落在母树附近,体现在更小空间尺度的集中散布。样地优势树种短柄枹栎和茅栗,果仁质量较大,而化香果实为小坚果,背腹呈压扁状,两端具狭翅,较轻,所以,短柄枹栎、茅栗与化香比较偏向于更小空间尺度上集中散布。在群落演替进程中,天然次生林基本物种空间结构由聚集分布过渡为随意散布,因而,随意散布常呈现在生长发育完善、比较稳定的群落内^[28-30]。本研究样地内林木总体上呈现随意散布,也验证了研究区群落结构的稳定性。

种间关联性主要与生长环境、自身特性等相关,正关联表示种群间生长环境具有相似性,负关联则表示与生长环境具有差异性。本研究也发现:样地优势种的种间关系多呈无关联特点,说明群落中的优势种并没有表现出种内竞争关系,不同龄级的个体在较大的空间尺度上相互独立。随着观察尺度的变化,优势种内部可能呈现正关联或无关联,这反映了同一物种在利用环境资源相似性上呈现出种群内部积极的生态关系。这种关系增强了种间竞争力,使得这些种群能够在群落中占据优势地位,从而维持其生存和发展^[31-32]。群落中不同空间层次的树种对生长环境因子的需求不同,树种间的生存策略存在差异,竞争关系主要发生在中、下层^[33]。本研究优势树种与伴生树种之间存在一定的关联性。具体表现为:种间存在负关联的分别是短柄枹栎与灯台树、短柄枹栎与君迁子、化香与山胡椒、灯台树与山胡椒,位居群落上层的短柄枹栎、化香,可能对下层的灯台树、君迁子、山胡椒个体存在调控作用,因此,种间关系表现为明显的竞争排斥^[34]。茅栗与野茉莉、化香与灯台树、君迁子与野鸦椿、山胡椒与化香、山胡椒与君迁子、野茉莉与君迁子各种间存在正关联或无关联,说明它们之间具有一定的依赖性。研究区落叶阔叶林主要树种总体上呈正相关或无关联,且树种数量均多于负相关的树种,表明这些树种的分布格局具有相互独立的特征,反映出群落整体处于相对稳定阶段,物种之间能够共存,竞争排斥现象较弱,从而促进了群落的稳定性,有利于群落的演替过程。这与姜冬冬等^[35]的研究结论一致。

5 结论

本研究样地森林群落类型为落叶阔叶混交林,优势树种为短柄枹栎、茅栗和化香,具有北亚热带落叶阔叶林树种组成特征。林木直径结构具有典型的异龄林分直径结构特点。短柄枹栎林下更新能力较强,为发展种群,茅栗、化香林下更新较差,为衰退种群。在完全空间随机零模型和异质泊松零模型下林木空间分布格局:在0~5 m小尺度上均呈现聚集分布,在其他尺度上呈现随机分布,随着空间尺度的增加逐渐趋于随机分布,群落发育比较成熟,具有地带性稳定群落特征。短柄枹栎、茅栗和化香3种优势树种之间关联性不显著,但与灯台树、君迁子等伴生树种之间存在一定的关联性。

6 参考文献

- [1] 张晓红, 张会儒, 卢军, 等. 长白山蒙古栎次生林群落结构特征及优势树种空间分布格局[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1571-1579.
ZHANG Xiaohong, ZHANG Huiru, LU Jun, *et al.* Community structure characteristics and spatial distribution of dominant

- species of secondary *Quercus mongolica* forest in Changbai Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(5): 1571–1579.
- [2] 王晓荣, 曾立雄, 雷蕾, 等. 抚育择伐对马尾松林主要树种空间分布格局及其关联性的短期影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(12): 4421–4431.
- WANG Xiaorong, ZENG Lixiong, LEI Lei, *et al.* Short-term effects of selective cutting on the spatial distribution and association of dominant tree species in *Pinus massoniana* stands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(12): 4421–4431.
- [3] 袁志良, 陈云, 韦博良, 等. 暖温带-北亚热带生态过渡区物种生境相关性分析[J]. *生态学报*, 2013, **33**(24): 7819–7826.
- YUAN Zhiliang, CHEN Yun, WEI Boliang, *et al.* Species habitat correlation analysis in temperate-subtropical ecological transition zone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(24): 7819–7826.
- [4] 陈云, 郭凌, 姚成亮, 等. 暖温带-北亚热带过渡区落叶阔叶林群落特征[J]. *生态学报*, 2017, **37**(17): 5602–5611.
- CHEN Yun, GUO Ling, YAO Chengliang, *et al.* Community characteristics of a deciduous broad-leaved forest in a temperate subtropical ecological transition zone: analyses of a 5-hm² forest dynamics plot in Baiyunshan Nature Reserve, Henan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(17): 5602–5611.
- [5] 王丽, 常锦利, 周守标, 等. 鹞落坪国家级自然保护区乔木物种多样性与种间联结[J]. *生态学报*, 2019, **39**(1): 309–319.
- WANG Li, CHANG Jinli, ZHOU Shoubiao, *et al.* Species diversity and interspecific association of trees in the Yaoluoping Nation Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(1): 309–319.
- [6] 郭凌, 姚成亮, 曹若凡, 等. 白云山次生落叶阔叶林群落种类组成及其径级结构与空间分布格局[J]. *河南农业大学学报*, 2017, **51**(5): 647–652.
- GUO Ling, YAO Chengliang, CAO Ruofan, *et al.* Species composition, diameter-class structure and spatial distribution pattern of the secondary deciduous broad-leaved forest communities in Baiyun Mountain [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2017, **51**(5): 647–652.
- [7] 杨海裕, 张宋智, 刘小林, 等. 秦岭西段天然落叶阔叶林乔木种间关联性[J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(10): 2513–2520.
- YANG Haiyu, ZHANG Songzhi, LIU Xiaolin, *et al.* Interspecific associations among tree species in natural deciduous broadleaved forests in western Qinling, northwest China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(10): 2513–2520.
- [8] 赵昕, 常锦利, 周守标, 等. 鹞落坪自然保护区落叶阔叶林群落特征[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2020, **43**(3): 258–263.
- ZHAO Xin, CHANG Jinli, ZHOU Shoubiao, *et al.* Community characteristics of deciduous broad-leaved forest in Yaoluoping National Nature Reserve [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2020, **43**(3): 258–263.
- [9] 安徽省林业调查规划院编著. 安徽天马国家级自然保护区综合科学考察报告[M]. 合肥: 安徽科学出版社, 2014.
- Anhui Forestry Survey and Planning Institute. *Anhui Tianma National Nature Reserve Comprehensive Scientific Investigation Report* [M]. Hefei: Anhui Science Press, 2014.
- [10] 张抗. 天马自然保护区天然落叶阔叶林林分结构研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- ZHANG Kang. *Study on the Stand Structure of Natural Deciduous Broad-leaved Forest of Tianma Nature Reserve* [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.
- [11] 赵贵宝. 天马保护区森林群落空间结构和物种多样性分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.
- ZHAO Guibao. *Analysis of Spatial Structure and Species Diversity in Forest Community in Tianma Nature Reserve* [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015.
- [12] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- ZHANG Jintun. *Quantitative Ecology* [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [13] WANG Xugao, WIEGAND T, HAO Zhanqing, *et al.* Species associations in an old-growth temperate forest in north-eastern China [J]. *Journal of Ecology*, 2010, **98**(3): 674–686.
- [14] WIEGAND T, MOLONEY K A. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology [J]. *Oikos*, 2004, **104**(2): 209–229.
- [15] ZHOU Quan, SHI Hang, SHU Xiao, *et al.* Spatial distribution and interspecific associations in a deciduous broad-leaved forest in north-central China [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2019, **30**(6): 1153–1163.
- [16] 吴初平, 袁位高, 盛卫星, 等. 浙江省典型天然次生林主要树种空间分布格局及其关联性[J]. *生态学报*, 2018, **38**(2): 537–549.
- WU Chuping, YUAN Weigao, SHENG Weixing, *et al.* Spatial distribution patterns and associations of tree species in typical natural secondary forest communities in Zhejiang Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(2): 537–549.

- [17] WIEGAND T, GRABARNIK P, STOYAN D. Envelope tests for spatial point patterns with and without simulation [J/OL]. *Ecosphere*, 2016, 7(6): e01365 [2024-07-03]. doi: [10.1002/ecs2.1365](https://doi.org/10.1002/ecs2.1365).
- [18] 尉文, 闫琰, 刘晓云, 等. 太白山锐齿栎林群落结构特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1923–1932.
YU Wen, YAN Yan, LIU Xiaoyun, *et al.* Community structure of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest in the Taibai Mountain, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 1923–1932.
- [19] 姚良锦, 姚兰, 易咏梅, 等. 亚热带常绿落叶阔叶混交林优势种川陕鹅耳枥和多脉青冈的空间格局[J]. 林业科学, 2018, 54(12): 1–11.
YAO Liangjin, YAO Lan, YI Yongmei, *et al.* Spatial patterns of dominant species *Carpinus fargesiana* and *Cyclobalanopsis multinervis* in a subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(12): 1–11.
- [20] 陈霞, 袁在翔, 金雪梅, 等. 紫金山针阔混交林主要树种空间分布格局及种间关联性[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 84–90.
CHEN Xia, YUAN Zaixiang, JIN Xuemei, *et al.* Spatial distribution pattern and interspecific association of dominant tree species in a broad-leaved mixed forest on Zijin Mountain [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 42(6): 84–90.
- [21] 鲁梦珍, 曾馥平, 宋同清, 等. 喀斯特常绿落叶阔叶林死亡个体空间分布格局及生境关联[J]. 生物多样性, 2022, 30(4): 36–44.
LU Mengzhen, ZENG Fuping, SONG Tongqing, *et al.* Spatial distribution pattern and habitat-association of snags in karst evergreen deciduous broad-leaved mixed forests [J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30(4): 36–44.
- [22] 何春梅, 刘润清, 杨治春, 等. 秦岭皇冠暖温性落叶阔叶林物种组成与群落结构[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2737–2744.
HE Chunmei, LIU Runqing, YANG Zhichun, *et al.* Species composition and community structure of warm temperate deciduous broadleaved forests in Huangguan of Qinling Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2737–2744.
- [23] 吴茜, 袁在翔, 关庆伟, 等. 紫金山落叶阔叶林主要树种空间分布格局及种间关联性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(10): 71–79.
WU Qian, YUAN Zaixiang, GUAN Qingwei, *et al.* Spatial distribution and interspecific association of main tree species in a deciduous and broad-leaved forest in the Purple Mountain [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2023, 51(10): 71–79.
- [24] 金亚宁, 管增艳, 石松林, 等. 川西云杉人工林与天然林群落空间分布格局及种间关联性[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(3): 495–504.
JIN Yaning, GUAN Zengyan, SHI Songlin, *et al.* Spatial distribution pattern and interspecific correlation between plantation and natural forest of *Picea likiangensis* var. *rubescens* in western Sichuan, China [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(3): 495–504.
- [25] GU Li, GONG Zhiwen, LI Weizhong. Niches and interspecific associations of dominant populations in three changed stages of natural secondary forests on Loess Plateau, P. R. China [J/OL]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6604 [2024-07-03]. doi: [10.1038/s41598-017-06689-9](https://doi.org/10.1038/s41598-017-06689-9).
- [26] 宋佳佳, 麻云霞, 郭靖捷, 等. 内蒙古黄土丘陵区天然侧柏种群空间格局及种内关联性研究[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(9): 203–212.
SONG Jiajia, MA Yunxia, GUO Jingjie, *et al.* Spatial pattern and interspecific association of natural *Platycladus orientalis* population in Loess Hilly Region of Inner Mongolia [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(9): 203–212.
- [27] 李越千, 贾炜玮, 朱万才, 等. 穆棱东北红豆杉林空间结构特征与更新计数模型[J]. 植物研究, 2024-10-28 [2024-11-18]. <https://link.cnki.net/urlid/23.1480.S.20241028.0922.002>.
LI Yueqian, JIA Weiwei, ZHU Wancai, *et al.* Spatial structure and regeneration count model of *Taxus cuspidata* forests in Muling National Nature Reserve of Heilongjiang Province [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2024-10-28 [2024-11-18]. <https://link.cnki.net/urlid/23.1480.S.20241028.0922.002>.
- [28] 袁志良, 王婷, 朱学灵, 等. 宝天曼落叶阔叶林样地栓皮栎种群空间格局[J]. 生物多样性, 2011, 19(2): 224–231.
YUAN Zhiliang, WANG Ting, ZHU Xueling, *et al.* Patterns of spatial distribution of *Quercus variabilis* in deciduous broad leaf

- forests in Baotianman Nature Reserve [J]. *Biodiversity Science*, 2011, **19**(2): 224–231.
- [29] 兰航宇, 段文标, 陈立新, 等. 小兴安岭天然针阔混交林主要树种空间格局及其关联性[J]. 生态学报, 2019, **39**(18): 6660–6669.
- LAN Hangyu, DUAN Wenbiao, CHEN Lixin, *et al.* Spatial point patterns and associations of populations in the coniferous and deciduous broadleaved mixed forest in Xiaoxing'an Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(18): 6660–6669.
- [30] 王志高, 张中信, 汪文革, 等. 安徽岳西县鹞落坪国家级自然保护区森林群落结构的初步分析[J]. 植物生态学报, 2016, **40**(6): 615–619.
- WANG Zhigao, ZHANG Zhongxin, WANG Wenge, *et al.* Preliminary analysis of forest community structure of Yaoluoping National Nature Reserve in Yuexi County, Anhui Province, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, **40**(6): 615–619.
- [31] 黄小, 朱江, 姚兰, 等. 水杉原生种群结构及空间分布格局[J]. 生物多样性, 2020, **28**(4): 463–473.
- HUANG Xiao, ZHU Jiang, YAO Lan, *et al.* Structure and spatial distribution pattern of a native *Metasequoia glyptostroboides* population in Hubei [J]. *Biodiversity Science*, 2020, **28**(4): 463–473.
- [32] 王进, 朱江, 艾训儒, 等. 湖北木林子保护区山矾属植物空间分布格局及其关联性[J]. 生态学报, 2020, **40**(21): 7709–7720.
- WANG Jin, ZHU Jiang, AI Xunru, *et al.* Spatial distribution pattern and intraspecific and interspecific relationships of genus *Symplocos* in Mulinzi Nature Reserve, Hubei Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(21): 7709–7720.
- [33] 张昊楠, 薛建辉. 贵州赤水常绿阔叶林不同层次树木空间分布格局和竞争的关系[J]. 生态学报, 2018, **38**(20): 7381–7390.
- ZHANG Haonan, XUE Jianhui. Spatial patterns and competition among trees of different height classes in Guizhou, Chishui evergreen broadleaved forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(20): 7381–7390.
- [34] 黄林娟, 于燕妹, 安小菲, 等. 广西大石围天坑群天坑森林主要木本植物种间关联性研究[J]. 广西植物, 2021, **41**(5): 695–706.
- HUANG Linjuan, YU Yanmei, AN Xiaofei, *et al.* Interspecific association of main woody plants in tiankeng forests of Dashiwei Tiankeng Group, Guangxi [J]. *Guihaia*, 2021, **41**(5): 695–706.
- [35] 姜冬冬, 罗应华, 林建勇, 等. 广西十万大山山地常绿阔叶林优势种空间分布格局与关联性[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, **44**(1): 151–161.
- JIANG Dongdong, LUO Yinghua, LIN Jianyong, *et al.* Spatial distribution pattern and correlation of dominant species of evergreen broad-leaved forest in Shiwandashan mountain [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2024, **44**(1): 151–161.