

濒危植物狭果秤锤树群落内主要树种的空间分布格局和关联性

周赛霞¹, 彭焱松¹, 高浦新¹, 詹选怀¹, 丁剑敏¹, 廖梅英², 严有光³

(1. 江西省中国科学院庐山植物园, 江西 庐山 332900; 2. 武汉市园林绿化建设管理站, 武汉 430014; 3. 武汉绿岛园林工程有限公司, 武汉 430056)

摘要: 为了解狭果秤锤树(*Sinojackia rehderiana*)群落的物种共存机制, 研究了群落 0.5 hm²样地内 5 主要树种的空间分布格局和种间关联性。结果表明, 香樟(*Cinnamomum camphora*)、紫弹树(*Celtis biondii*)处于群落上层, 尾叶冬青(*Ilex wilsonii*)在群落中层, 下层以狭果秤锤树、瓜木(*Alangium platanifolium*)为主。狭果秤锤树、香樟、尾叶冬青、瓜木在小尺度上均为聚集分布, 随着尺度的增大呈现出均匀分布或随机分布的趋势; 紫弹树在全部尺度上为随机分布。尾叶冬青、瓜木在较小尺度上与狭果秤锤树的空间分布呈负相关, 而香樟、紫弹树与狭果秤锤树则在较大尺度上呈负相关性, 香樟、紫弹树、尾叶冬青、瓜木两两之间均无明显空间相关性。因此, 推断密度制约和种子扩散限制对狭果秤锤树群落空间格局形成起作用, 生境异质性的影响没有明显表现出来, 群落尚未达到稳定状态。

关键词: 狭果秤锤树; 分布格局; 林层; 濒危植物; 空间关联性

doi: 10.11926/jtsb.3992

Spatial Pattern and Association of Main Species in Endangered Plant *Sinojackia rehderiana* Community

ZHOU Sai-xia¹, PENG Yan-song¹, GAO Pu-xin¹, ZHAN Xuan-huai¹, DING Jian-min¹, LIAO Mei-ying², YAN You-guang³

(1. Lushan Botanical Garden, Jiangxi Province and Chinese Academy of Sciences, Lushan 332900, Jiangxi, China; 2. Wuhan City Landscaping Construction Management Station, Wuhan 430014, China; 3. Wuhan Greenisland Landscape Co., Ltd, Wuhan 430056, China)

Abstract: In order to understand the species coexistence mechanism of *Sinojackia rehderiana* community in Yongxiu County of Jiangxi Province, the spatial distribution pattern and associations of 5 main species in 0.5 hm² plot of *S. rehderiana* community were studied. The results showed that the vertical structure of the community was evident, *Cinnamomum camphora* and *Celtis biondii* were in upper layer; *Ilex wilsonii* in middle layer, and the dominant species were *S. rehderiana* and *Alangium platanifolium* in lower layer. *Celtis biondii* was distributed randomly at all spatial scales, and other 4 species were clumped distribution at small scale, and showed an uniform distribution or random distribution with the increment of scale. *Ilex wilsonii* and *A. platanifolium* were negatively associated with *S. rehderiana* at small spatial scale. However, *Cinnamomum camphora* and *C. biondii* had negative association with *S. rehderiana* at large spatial scale. There was no obvious association among *C. camphora*, *C. biondii*, *I. wilsonii* and *A. platanifolium*. Therefore, it was deduced that density restriction and seed diffusion restriction play a role in the spatial pattern formation of *Sinojackia rehderiana* community, and the influence of habitat heterogeneity is not obvious, and the community has not reached a stable state.

收稿日期: 2018-09-12 接受日期: 2018-12-04

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KFJ-3W-N01-143); 国家科技基础性工作专项(2013FY111500-2-3); 江西省火炬计划项目(20132BBE51003)资助
This work was supported by the Key Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KFJ-3W-N01-143); the Basic Work Special Program of Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2013FY111500-2-3); and the Torch Plan Project in Jiangxi Province (Grant No. 20132BBE51003).

作者简介: 周赛霞(1976~), 女, 副研究员, 主要从事植物保护生态学和种群生态学方面的研究。E-mail: zhousaixia420@sohu.com

Key words: *Sinojackia rehderiana*; Spatial distribution pattern; Forest story; Endangered plant; Spatial association

植物群落包括物种组成、外貌、大小结构、空间分布格局和环境等方面,组成群落的物种间及物种与生境间彼此影响和相互作用^[1-2]。种群空间分布格局和种间空间关联性是空间分布格局的两个主要内容,种群不同的空间分布格局显著影响着物种的生长、死亡、更新及抗干扰能力,而种群间的空间关联性直接影响着群落物种组成和结构、更新和演替方向^[3-8]。研究表明,空间分布格局与研究的尺度相关,在较小的尺度上可能与种内种间竞争,种子扩散限制等相关,而在较大尺度上可能取决于群落生境异质性^[9-11]。对群落中优势物种组成及空间分布格局的研究可以为物种共存机制提供重要信息,是制定生物多样性保护和营林造林管理措施的重要依据和理论参考。

空间格局研究方法主要有样方法、分形理论法、无样地法和点格局分析法等^[12-13]。点格局分析法克服了传统方法只能分析单一距离或面积空间分布格局的缺陷,可以分析各种尺度下种群的分布格局及种群间的相互关系,较大程度上利用了坐标图的信息,因而倍受欢迎^[14]。点格局分析法经历了从 Ripley K 函数到 O-ring 统计方法的优化,避免了因累积效应造成对空间分布格局的误判^[14-15]。

狭果秤锤树(*Sinojackia rehderiana*)为我国特有的珍稀濒危植物,由于生境破碎化和栖息地丧失,目前该物种仅自然分布于江西省永修县和彭泽县、湖北省黄梅县和安徽省泾县,种群小且个体数量较少^[16-17]。本文在对狭果秤锤树群落 0.5 hm² 标准样地进行调查的基础上,运用 O-ring 点格局分析法对自然分布于江西省永修县的狭果秤锤树群落优势树种的种内和种间空间格局进行分析,旨在揭示狭果秤锤树这一珍稀濒危植物的群落物种共存机制。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

永修县位于江西省北部,修河、潦河两大水系贯穿东西,属亚热带湿润季风气候区,年平均气温 17.5℃。最低气温在 1 月,平均温度 5℃,历史最低温 -8.7℃,全年 0℃ 以下有 15.6 d;最高气温在 7 月,平均温度 29.1℃,历史最高气温 41.1℃,全年 35℃ 以上有 22.8 d。年均降水量 1 560.9 mm,年均

相对湿度 78%,年均风速 2.7 m s⁻¹。研究地位于永修县艾城镇青山村,北纬 29°7'55.8",东经 115°42'39.8",海拔约 23 m。土壤为沙质壤土,pH 为 6.0~6.5,地带性植被为亚热带常绿阔叶林。由于频繁的人类活动干扰,狭果秤锤树仅集中分布于村庄附近的风水林内,风水林靠近河沟,林内环境阴凉且湿度相对较高,狭果秤锤树长势良好。风水林的主要乔木树种为狭果秤锤树、香樟(*Cinnamomum camphora*)、紫弹树(*Celtis biondii*)等;灌木层优势种为狭果秤锤树、瓜木(*Alangium platanifolium*)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum*)等;草本层以紫金牛(*Ardisia japonica*)为主。

1.2 样地设置和调查

2014 年 5 月,采用相邻格子样方法,在狭果秤锤树集中分布地段,设置 1 个 50 m×100 m 的固定大样方,再细分成 50 个 10 m×10 m 的小样方,每个小样方角桩以罗盘仪定位,安放 PVC-U 管作标桩。以大样方西南角为坐标原点,东西向为坐标横轴,南北向为坐标纵轴,对样方内胸径(DBH)≥1 cm 的个体进行统计,记录每株植物的种名、胸径、树高、冠幅以及相对位置坐标、生长状况等信息。

1.3 数据分析

物种组成 计算物种重要值(IV),重要值=(相对密度+相对频度+相对优势度)/3。本文采用物种重要值排序法,选取重要值前 5 位的物种进行格局分析。

林层的划分 对狭果秤锤树林内优势树种进行树高-株数作图,树高级以 2 m 为一级。参考前人方法^[18]和实际调查情况,对林层进行划分,平均树高≥15 m 为林冠层树种,平均树高 5~15 m 的属于林分中层,平均树高≤5 m 的为林下层树种。

空间分布格局 种群分布格局和种间关联性采用点格局分析法中的成对相关函数,利用点间的距离,以某一点为圆心,r 为半径,在指定宽度的圆环区域内的点数量来进行点格局分析。对某一树种进行空间分布格局分析时,采用完全空间随机模型(CSR),利用移动窗口的方法使空间点的随机分布限定在半径小于 10 m 的范围内,以此来判断某一树种的分布类型。根据 Monte Carlo 模拟结果,

单变量 $O(r)$ 值在置信区间之上为物种在该尺度聚集分布, 置信区间之内为随机分布, 之下为均匀分布。同时观察半径大于 10 m 尺度上的空间格局, 若为聚集分布, 则可能是生境异质性效应在发生作用, 此时将采用异质性泊松分布对优势树种空间格局进行检验。对不同林层优势树种进行种间关联性分析时, 采用前提条件假设, 假设下层树种的空间分布受上层树种的影响, 而上层树种相对位置不变; 对同一林层树种进行判断时, 让两个树种位置都随机变化, 即采用完全随机零假设。根据 Monte Carlo 模拟结果, 如果双变量 $O(r)$ 值在置信区间上、中、下时, 分别表明两者在该尺度空间正相关、相互独立、负相关。

O-ring 格局分析采用生态学软件 Programita (2014) 进行, 研究尺度 0~25 m, 设定圆环宽度为 1 m。Monte

Carlo 循环 199 次, 将循环结果中第 5 个最大值和最小值之间的数值范围作为置信区间, 以 $\alpha=0.05$ 表示显著性水平^[19]。

2 结果和分析

2.1 物种组成

0.5 hm² 样地中胸径(DBH)≥1 cm 的植物有 40 种 1 637 株。重要值前 5 位的物种依次为狭果秤锤树、香樟、紫弹树、尾叶冬青(*Ilex wilsonii*)和瓜木, 共有 1 216 株(表 1), 占总株数的 74.3%, 其中, 狭果秤锤树 954 株, 重要值最大; 其次是香樟和紫弹树, 个体数量不多, 基本为成熟或过熟树, 在林分中优势地位较明显; 尾叶冬青、瓜木数量较多, 在林分中散生, 频度较大, 重要值也较高(图 1)。

表 1 5 种主要树种在狭果秤锤树群落中的数量指标

Table 1 Quantitative indices of the 5 species in the *Sinojackia rehderiana* community

物种 Species	多度 Abundance	频度 / % Frequency	胸高断面面积 Basal area (m ² hm ⁻²)	重要值 Importance value	生活型 Life form
狭果秤锤树 <i>Sinojackia rehderiana</i>	954	98	6.14	25.23	灌木或小乔木 Shrub or small tree
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	63	62	69.74	23.49	乔木 Tree
紫弹树 <i>Celtis biondii</i>	27	38	18.67	7.39	乔木 Tree
尾叶冬青 <i>Ilex wilsonii</i>	92	76	2.19	5.65	乔木或小乔木 Tree or small tree
瓜木 <i>Alangium platanifolium</i>	80	60	0.83	4.36	小乔木 Small tree
合计 Total	1 216	100	97.57	66.12	

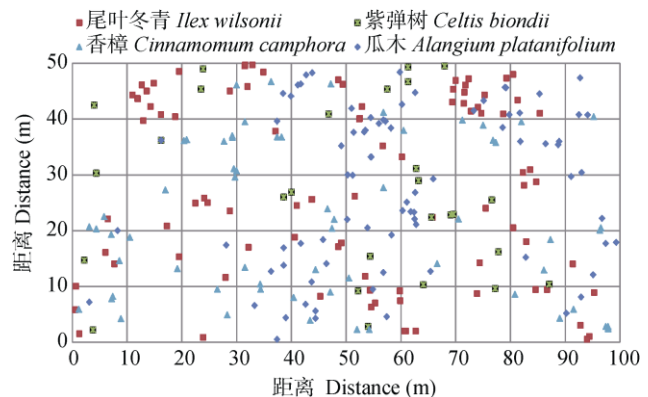
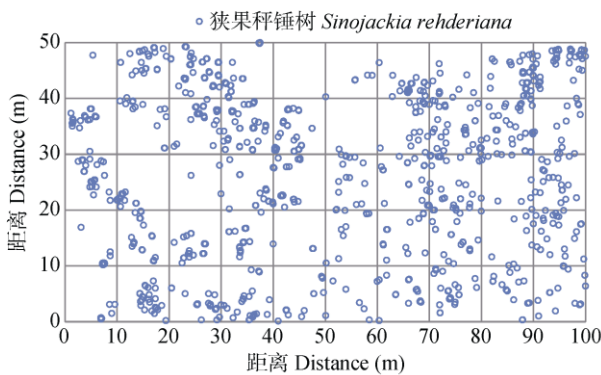


图 1 5 树种的分布图

Fig. 1 Distribution of 5 tree species in the *Sinojackia rehderiana* community

2.2 胸径结构和高度结构

狭果秤锤树小径级个体较多, 1 cm ≤ DBH < 2.5 cm 有 639 株, 大径级个体少, DBH ≥ 7.5 cm 仅有 32 株(图 2)。香樟、紫弹树个体数量相对较少, 集中分布于大径级, 缺乏幼苗和小树。瓜木径级较窄,

最大 DBH 为 11.0 cm, 77.5% 的个体集中在胸径 1~5 cm。尾叶冬青最大胸径 22.3 cm, 径级宽度较狭果秤锤树和瓜木大, 平均胸径 4.2 cm, 也较两者大(表 2)。

群落中香樟和紫弹树树体高大, 冠幅饱满, 平均高度均在 27 m 以上(表 2, 图 3), 处于群落上层。

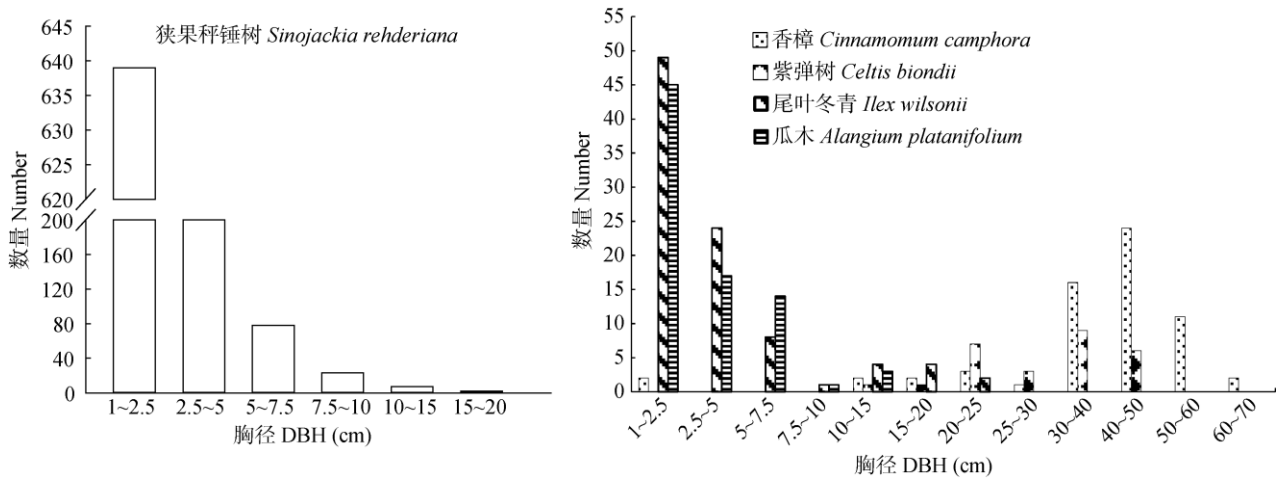


图 2 狭果秤锤树群落 5 种主要物种的径级结构

Fig. 2 DBH structure of 5 tree species in *Sinojackia rehderiana* community

表 2 5 种主要树种的胸径和树高

Table 2 DBH and height range of 5 tree species in the *Sinojackia rehderiana* community

物种 Species	胸径 DBH (cm)			树高 High (m)			林层 Forest layer
	最大 Max	最小 Min	平均 Mean	最高 Max	最低 Min	平均 Average	
狭果秤锤树 <i>Sinojackia rehderiana</i>	15.7	1.0	2.5	11.0	0.5	3.5	下层 Lower
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	63.0	1.8	39.8	33.8	1.7	30.6	上层 Upper
紫弹树 <i>Celtis biondii</i>	48.0	14.3	31.9	33.0	7.2	27.3	上层 Upper
尾叶冬青 <i>Ilex wilsonii</i>	22.3	1.0	4.2	21.0	1.5	5.2	中层 Middle
瓜木 <i>Alangium platanifolium</i>	11.0	1.0	3.2	11.2	1.6	4.3	下层 Lower

尾叶冬青茎干挺拔, 部分个体高度 10 m 以上, 20 m 以上仅 1 株, 平均高度 5.2 m, 处于群落中林层。狭果秤锤树和瓜木平均高度分别为 3.5 和 4.3 m, 处于林分下层。

2.3 主要树种的空间分布格局

从图 1 可较直观看出不同种群的个体数和分布位置。狭果秤锤树个体数量最多, 超出其余物种的个体总和, 且聚集程度较高; 其余 4 种植物散生在样地内, 也表现出一定程度的聚集分布; 狭果秤锤树集中分布的小样方内, 其他物种出现的机会较小, 反之亦然。

狭果秤锤树在 0~5.5、6.5~10.5 m 尺度上呈聚集分布(图 4), 聚集程度在 5 种优势树种中最大, 在 5.5~6.5 m 尺度上呈随机分布, 在 10.5~25 m 尺度上呈均匀分布; 香樟在 0~1.5 m 尺度上呈聚集分布, 其余尺度基本为随机分布; 紫弹树在 0~25 m 尺度上均为随机分布; 瓜木在 0~8.5 m 尺度上基本为聚集分布, 18.5~25 m 尺度上呈随机分布; 尾叶冬青

在 0~4.5 m 尺度上呈聚集分布, 11.5~15.5 m 尺度上呈均匀分布, 其余尺度上呈随机分布。综上所述, 狭果秤锤树、香樟、瓜木、尾叶冬青 4 种优势植物的聚集分布仅发生在较小尺度上, 表明群落中生境异质性作用不明显。

2.4 主要树种的空间关联性

O-ring 统计分析表明(图 5), 香樟与狭果秤锤树的空间分布在 6.5~9 m 尺度上呈正相关, 在 12~13 和 20~24 m 尺度上呈负相关, 大部分尺度的空间关联性不明显; 紫弹树与狭果秤锤树的空间分布在 1~2、7~8、15~18 和 24~25 m 尺度上表现为负关联, 其余尺度无明显相关性; 尾叶冬青与狭果秤锤树的空间分布在 0~2.5 和 24~25 m 尺度上呈负相关, 其余尺度为正相关或相关性不明显; 瓜木与狭果秤锤树的空间分布在大部分尺度上无明显相关性, 仅在 0~4.5 和 6~8 m 尺度上呈负关联。因此, 香樟、紫弹树、尾叶冬青、瓜木等 4 优势树种在群落中不同程度地与狭果秤锤树存在空间负相关性,

尤其是林层接近的尾叶冬青和瓜木, 但大部分尺度上表现为无明显空间关联性。

香樟与紫弹树的空间分布在 2~3 m 尺度上呈负相关, 其余尺度无明显相关性; 香樟与尾叶冬青的空间分布在 9.5~10.5 和 20~21 m 尺度上呈负相关, 其它尺度上无明显空间关系; 香樟与瓜木、紫弹树与尾叶冬青在所研究的 0~25 m 所有尺度上均未有明显相关性; 紫弹树与瓜木在 20~24 m、尾叶冬青与瓜木在 21~22.5 m 均表现出空间正相关性, 其余尺度无明显空间关联性。

3 讨论

对种群空间分布格局的讨论离不开种群自身生物学特性和环境因素。研究样地内物种丰富, 种群间密度差异很大, 5 个优势树种表现出不同的生存策略, 分别在林分的不同高度发挥优势作用。香樟和紫弹树虽然数量不多, 但立木胸径较大, 树高占有明显优势, 处于群落的林冠层。尾叶冬青中小径木较多, 同时又有一定数量的大径木和较高个体存在, 因而在群落中层发挥优势作用。狭果秤锤树

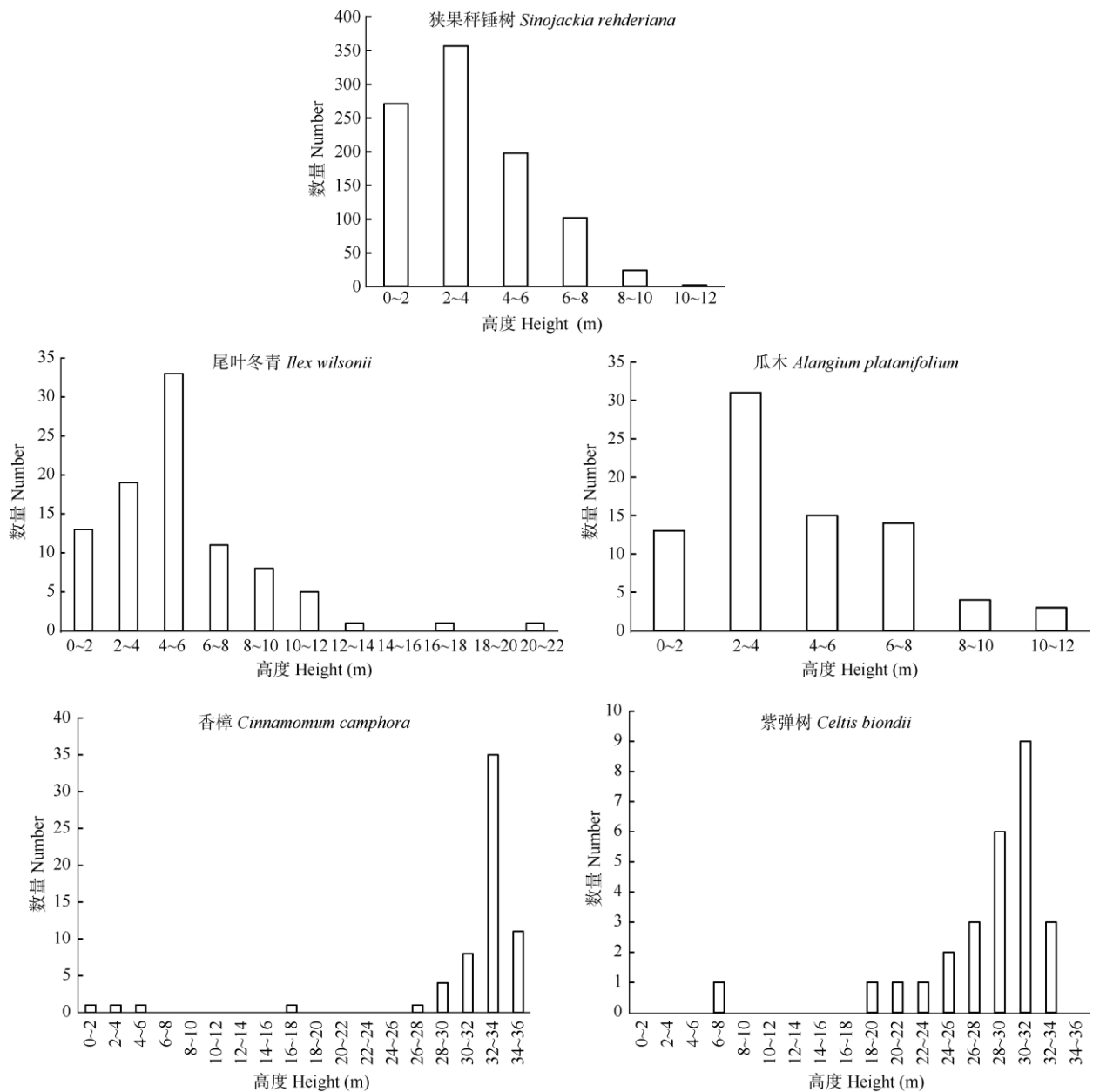


图 3 5 种主要树种高度结构

Fig. 3 Height structure of 5 tree species in the *Sinojackia rehderiana* community

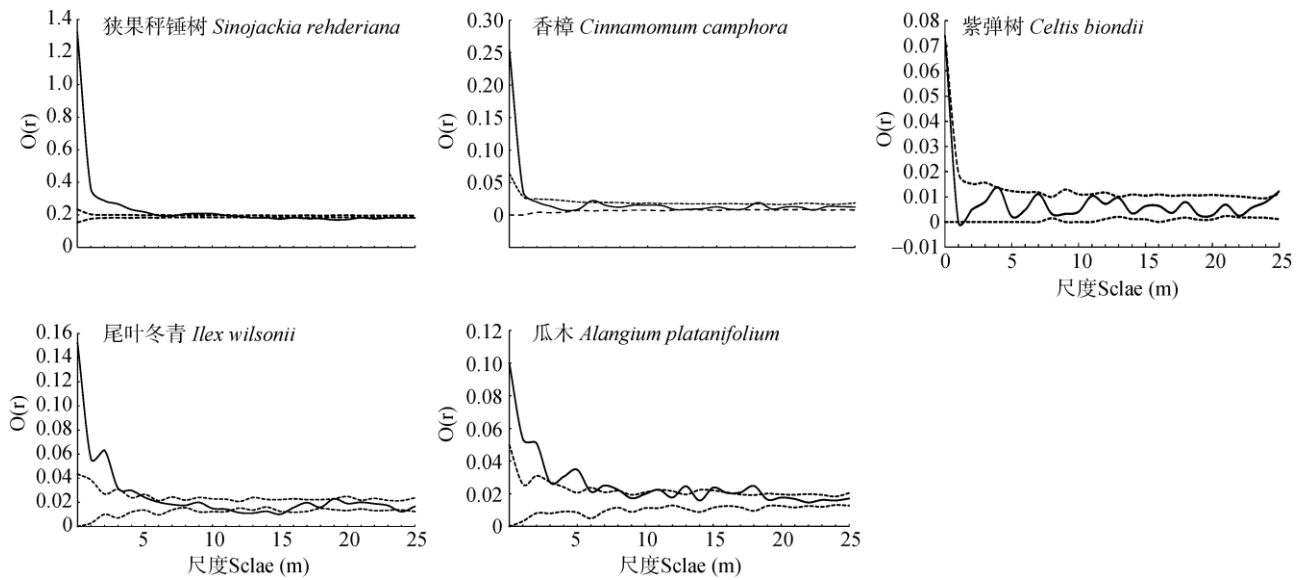


图 4 5 种优势种群的空间分布格局。实线为 $O(r)$ 值，虚线为包迹线，表示 95% 置信区间。下图同。

Fig. 4 Spatial distribution pattern of 5 species in *Sinojackia rehderiana* community. The solid line is $O(r)$ value, dashed lines are the envelope curve, showing 95% confidence interval. The same is following figure.

个体数量多，尤其是小径级个体数量大，且在样地中分布范围广，在林分下层占绝对优势。瓜木数量和频度在群落中均占有一定优势，是地带性植被中常见物种，在维持群落的稳定性方面有一定作用。种群占据不同的林层是物种的一种共存策略，可以有效地避免强烈的种间竞争^[12]。

大量研究证明，物种在较高的林层表现出均匀性分布或随机分布，较低的林层则聚集分布趋势较明显，林层越高，物种聚集程度越低^[20-21]，上层树种分布格局主要受光照、水份和对外界营养资源竞争影响^[22]。本研究中，处于上层的香樟只在很小的尺度上呈聚集分布，以随机分布占绝对优势。在长期的演化过程中，紫弹树已表现出全部尺度上的随机分布。显而易见，上层乔木种子散布能力更强，加之有树高和粗壮根系等优势更易获得阳光、雨露、水分等自然资源，相对而言，中下层乔木对其造成的影响已变成次要因素，因此在成熟的林分中冠层物种呈随机或均匀分布。种内和种间竞争及种子扩散限制等因素则影响着下层树种分布格局^[23-24]。中下层物种尾叶冬青、狭果秤锤树和瓜木均在更多尺度上呈聚集分布格局，这种现象可以解释为因其径级、树高较小，生长所需要的资源也较少，种内竞争相对较弱，加之种子扩散限制，从而形成了中、下林层物种聚集分布。许多研究表明，聚集分布主要发生在 ≤ 10 m 的局部范围内，更大尺

度上的聚集分布主要由环境异质性引起^[24]，我们的研究结果与此结论一致。本样地地势平坦，小气候及土壤等生境相对一致，生境异质性较小，优势物种聚集分布均发生在 ≤ 10 m 的尺度内，这也使得对分布格局及种间关联性的研究变得更简单。

物种的空间关联性与研究尺度密切相关，在较小的尺度上，空间关联性主要受种内、种间竞争及种子扩散限制等影响，在较大的尺度上可能是由于种群的分布格局及环境的异质性决定^[25-26]。香樟、紫弹树、尾叶冬青、瓜木 4 优势种与狭果秤锤树在一定尺度上均表现出负相关，尤其是尾叶冬青和瓜木与狭果秤锤树在小尺度上的负相关性更明显，说明 4 优势种与狭果秤锤树竞争较激烈。狭果秤锤树成熟植株结实量很大，在样地中有大量实生苗，而且自身萌孽性很强，在母体周围也会产生一些个体，大量个体的生长与其它物种争夺环境资源，主要由密度制约因素引发激烈的种内种间竞争^[25,27-29]，尤其是林层相近的尾叶冬青、瓜木等树种更明显，这种现象与张昊楠等^[20]的研究结论一致，张昊楠等研究认为群落中的竞争主要发生在中、下层个体的层次内或层次间，个体较大的林木受到的影响较小，从而解释了不同林层树种的竞争和共存策略；但也有学者认为受物种多度的影响，同一物种聚集分布会造成种间分隔或种间重叠，从而增加物种间不相关的机率^[30]，作者认为这

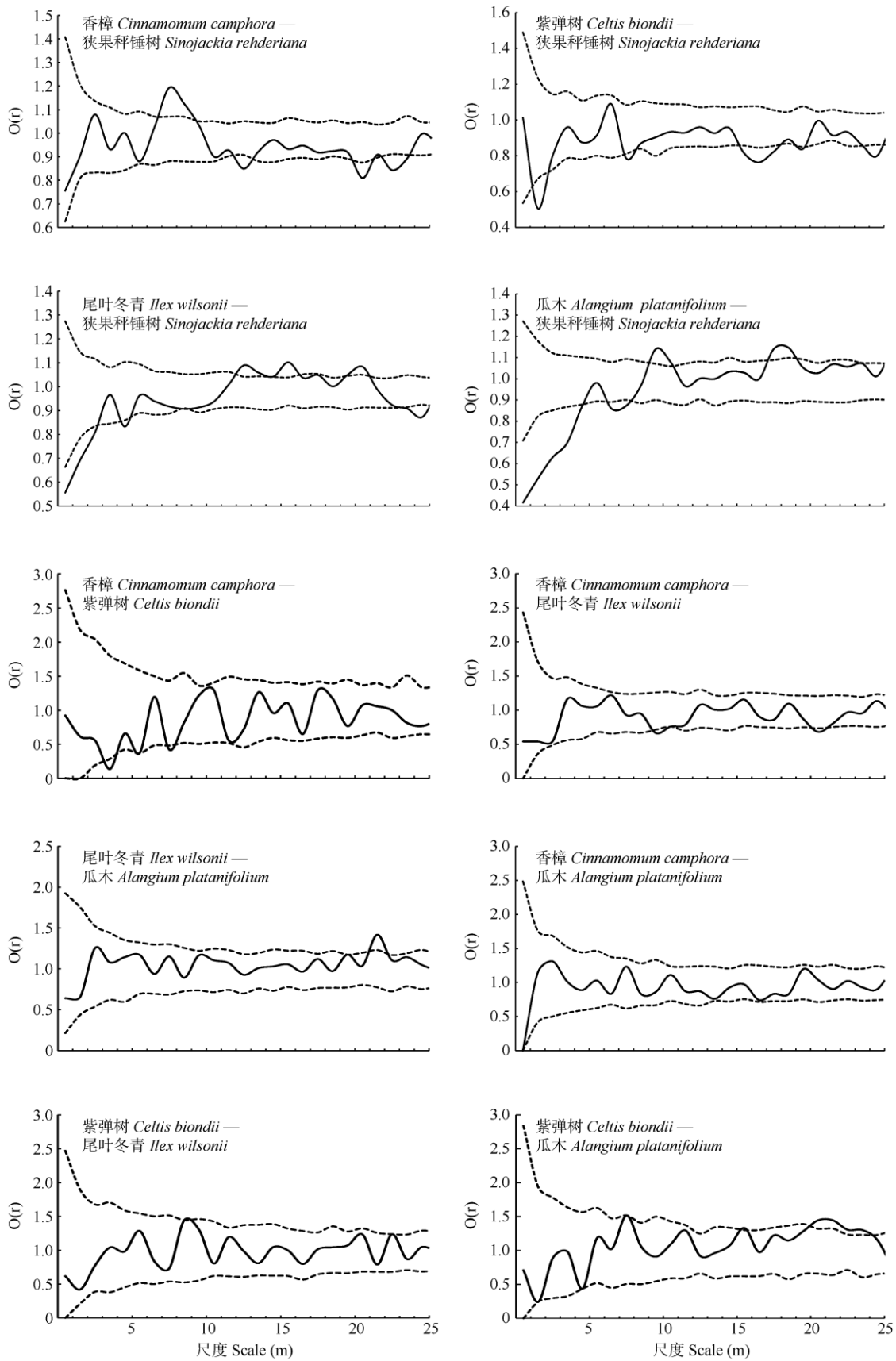


图 5 5 种植物的种间关系

Fig. 5 Interspecific relation of 5 species in *Sinojackia rehderiana* community

可能与他们的研究对象为灌木, 成丛分布有关。

香樟、紫弹树、尾叶冬青、瓜木均在大部分尺度上表现出相互独立的特性, 极少尺度表现出两两相关联。居于林冠层的香樟和紫弹树在 3~4 m 的尺度上呈负相关, 说明他们之间存在一定的竞争, 但更多尺度上相互独立, 体现了利用资源的相似性及生态位重叠。香樟与尾叶冬青可能由于同为常绿阔叶树种, 在争夺环境资源上存在一定的竞争, 在 9.5~10.5 和 20~21 m 中等尺度上呈空间负相关, 但大部分尺度相关性不明显, 说明两者之间生态位重叠较少, 具体原因还需进一步研究。紫弹树-尾叶冬青、紫弹树-瓜木、香樟-瓜木、尾叶冬青-瓜木相互独立, 说明两两之间竞争较弱, 生态位重叠较少。

不同林层优势树种聚集分布仅发生在小尺度, 大尺度上以随机分布为主; 冠层物种受到竞争较弱, 竞争主要发生在中下层物种间, 尤其是负关联性均与狭果秤锤树有关, 这说明林分还不稳定, 狭果秤锤树受到种间竞争较强, 尤其是来自于中下层的优势物种。综上所述, 针对分布格局和种间关联性的原因分析有助于理解优势物种竞争和共存策略, 这在评价森林现状及制定濒危植物保护策略时具有重要意义。建议在森林的管理和濒危植物的保护过程中, 可采取适当的择伐手段, 比如伐除一些低矮的尾叶冬青、瓜木等, 缓和物种间的竞争压力, 人为促进濒危植物狭果秤锤树的生长和更新。

参考文献

- [1] FAN F R, PAN B Z, MA X Q, et al. A study on structure and spatial distribution pattern of *Artocarpus hypargyreus* population [J]. *For Res*, 2008, 21(2): 176–181. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2008.02.011.
范繁荣, 潘标志, 马祥庆, 等. 白桂木的种群结构和空间分布格局研究 [J]. *林业科学研究*, 2008, 21(2): 176–181. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2008.02.011.
- [2] PAN X, ZHOU R F, GU S S, et al. Structure and distribution pattern of *Cyclobalanopsis multinervis* population in an evergreen broad-leaved forest in Baishanzu [J]. *Subtrop Plant Sci*, 2013, 42(3): 227–232. doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2013.03.009.
潘霞, 周荣飞, 顾莎莎, 等. 百山祖北坡常绿阔叶林多脉青冈种群结构和分布格局 [J]. *亚热带植物科学*, 2013, 42(3): 227–232. doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2013.03.009.
- [3] YANG H, LI Y L, SHEN L, et al. Spatial distributions and associations of main tree species in a spruce-fir forest in the Changbai Mountains area in northeastern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(16): 4698–4706. doi: 10.5846/stxb201306021270.
杨华, 李艳丽, 沈林, 等. 长白山云冷杉针阔混交林主要树种空间分布及其关联性 [J]. *生态学报*, 2014, 34(16): 4698–4706. doi: 10.5846/stxb201306021270.
- [4] HOU H Y, WANG L H. Species composition and main populations spatial distribution pattern in Korean pine broad-leaved forest in Xiaoxing'an Mountains of northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24(11): 3043–3049. doi: 10.13287/j.1001-9332.2013.0526.
侯红亚, 王立海. 小兴安岭阔叶红松林物种组成及主要种群的空间分布格局 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3043–3049. doi: 10.13287/j.1001-9332.2013.0526.
- [5] ZONG G, BAI X J, ZHANG S Y. Spatial pattern and interspecific spatial association of tree seedlings in a secondary forest in montane region of eastern Liaoning Province, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, 29(1): 18–24. doi: 10.13287/j.1001-9332.201801.002.
宗国, 白雪娇, 张淑媛, 等. 辽东山区次生林乔木幼苗分布格局与种间空间关联性 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 18–24. doi: 10.13287/j.1001-9332.201801.002.
- [6] JIAO W J, GUO D G, ZHANG J, et al. Spatial associations of constructive species in *Pinus tabulaeformis-Quercus wutaishanica* forest in Lingkong Mountain Nature Reserve, Shanxi Province of China [J]. *Chin J Ecol*, 2012, 31(12): 3050–3057. doi: 10.13292/j.1000-4890.2012.0403.
焦文婧, 郭东罡, 张婕, 等. 灵空山自然保护区油松-辽东栎建群种关联性 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31(12): 3050–3057. doi: 10.13292/j.1000-4890.2012.0403.
- [7] BAROT S, GIGNOUX J, MENAUT J C. Demography of a savanna palm tree: Predictions from comprehensive spatial pattern analyses [J]. *Ecology*, 1999, 80(6): 1987–2005. doi: 10.1890/0012-9658(1999)080[1987:DOASPT]2.0.CO;2.
- [8] LARSON A J, CHURCHILL D. Tree spatial patterns in fire-frequent forests of western North America, including mechanisms of pattern formation and implications for designing fuel reduction and restoration treatments [J]. *For Ecol Manage*, 2012, 267: 74–92. doi: 10.1016/j.foreco.2011.11.038.
- [9] MA Y D, LIU W Z, ZHAO Z H, et al. Change analysis of spatial pattern and correlation for *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest population in Xiaolong Mountains [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2014, 34(9): 1878–1886. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.09.1878.
马映栋, 刘文桢, 赵中华, 等. 小陇山锐齿栎林种群空间格局及关联性变化分析 [J]. *西北植物学报*, 2014, 34(9): 1878–1886. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.09.1878.
- [10] ZHAO L J, XIANG W H. Life history and spatial patterns of

- Lithocarpus glaber* and *Cyclobalanopsis glauca* populations in evergreen broad-leaved forest [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2014, 34(6): 1259–1268. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.06.1259.
- 赵丽娟, 项文化. 常绿阔叶林石栎和青冈种群生活史特征与空间分布格局 [J]. *西北植物学报*, 2014, 34(6): 1259–1268. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.06.1259.
- [11] STOLL P, BERGIUS E. Pattern and process: Competition causes regular spacing of individuals within plant populations [J]. *J Ecol*, 2005, 93(2): 395–403. doi: 10.1111/j.0022-0477.2005.00989.x.
- [12] WEI S G, LI L, XU R, et al. Spatial pattern and interspecific relationship of dominant species in plant community in Jinggang Mountain [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2015, 23(1): 74–80. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2015.01.011.
- 魏识广, 李林, 许睿, 等. 井冈山植物群落优势种空间分布格局与种间关联 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2015, 23(1): 74–80. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2015.01.011.
- [13] LU W L, ZHANG H J, CHEN Q B, et al. Size structure and spatial distribution of *Cunninghamia lanceolata* populations in Chongqing Simian Mountains [J]. *Res Environ Yangtze Basin*, 2016, 25(5): 777–785. doi: 10.11870/cjlyzyyhj201605011.
- 卢炜丽, 张洪江, 陈奇伯, 等. 重庆四面山杉木林优势种群径级结构与空间分布格局 [J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(5): 777–785. doi: 10.11870/cjlyzyyhj201605011.
- [14] BAI X J, DENG L P, LI L L, et al. Distribution patterns of woody plants in a secondary forest in the montane region of eastern Liaoning Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(1): 98–105. doi: 10.5846/stxb201405171012.
- 白雪娇, 邓莉萍, 李露露, 等. 辽东山区次生林木本植物空间分布 [J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 98–105. doi: 10.5846/stxb201405171012.
- [15] GUO Y X, HU Y N, LI G, et al. Spatial pattern and spatial association of *Betula albosinensis* at different developmental stages at Taibai Mountain [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, 50(1): 9–14. doi: 10.11707/j.1001-7488.20140102.
- 郭垚鑫, 胡有宁, 李刚, 等. 太白山红桦种群不同发育阶段的空间格局与关联性 [J]. *林业科学*, 2014, 50(1): 9–14. doi: 10.11707/j.1001-7488.20140102.
- [16] YAO X H, YE Q G, KANG M, et al. Geographic distribution and current status of the endangered genera *Sinojackia* and *Changiostyrax* [J]. *Biodiv Sci*, 2005, 13(4): 339–346. doi: 10.1360/biodiv.050059.
- 姚小洪, 叶其刚, 康明, 等. 秤锤树属与长果安息香属植物的地理分布及其濒危现状 [J]. *生物多样性*, 2005, 13(4): 339–346. doi: 10.1360/biodiv.050059.
- [17] ZHOU S X, PENG Y S, DING J M, et al. Analysis on community stability and inter-specific correlations among dominant woody populations of the endangered plant *Sinojackia rehderiana* communities [J]. *Guihaia*, 2017, 37(4): 442–448. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201507020.
- 周赛霞, 彭焱松, 丁剑敏, 等. 珍稀植物狭果秤锤树群落木本植物种间联结性及群落稳定性研究 [J]. *广西植物*, 2017, 37(4): 442–448. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201507020.
- [18] ZHANG M, MI X C, JIN G Z. Composition and spatial patterns of the Liangshui spruce-fir valley forest in the Xiao Hinggan Mountains [J]. *Chin Sci Bull*, 2014, 59(24): 2377–2387.
- 张冕, 米湘成, 金光泽. 小兴安岭凉水谷地云冷杉林群落组成与空间格局 [J]. *科学通报*, 2014, 59(24): 2377–2387.
- [19] MIAO N, LIU S R, SHI Z M, et al. Spatial pattern analysis of a *Rhododendron-Abies* virginial forest near timberline on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(1): 1–9.
- 缪宁, 刘世荣, 史作民, 等. 青藏高原东缘林线杜鹃-岷江冷杉原始林的空间格局 [J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 1–9.
- [20] ZHANG H N, XUE J G. Spatial patterns and competition among trees of different height classes in Guizhou, Chishui evergreen broad-leaved forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38(20): 7381–7390. doi: 10.5846/stxb201709121640.
- 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. doi: 10.5846/stxb201709121640.
- [21] SALAS C, LEMAY V, NÚÑEZ P, et al. Spatial patterns in an old-growth *Nothofagus obliqua* forest in south-central Chile [J]. *For Ecol Manage*, 2006, 231(1/2/3): 38–46. doi: 10.1016/j.foreco.2006.04.037.
- [22] DRUCKENBROD D L, SHUGART H H, DAVIES I. Spatial pattern and process in forest stands within the Virginia piedmont [J]. *J Veg Sci*, 2005, 16(1): 37–48. doi: 10.1111/J.1654-1103.2005.tb02336.x.
- [23] GETZIN S, WORBES M, WIEGAND T, et al. Size dominance regulates tree spacing more than competition within height classes in tropical Cameroon [J]. *J Trop Ecol*, 2011, 27(1): 93–102. doi: 10.1017/s0266467410000453.
- [24] LIANG S, XU H, LIN J Y, et al. Spatial distribution pattern of the dominant species *Gironmiera subaequalis* in tropical montane rain-forest of Jianfengling, Hainan Island, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2014, 38(12): 1273–1282. doi: 10.3724/SP.J.1258.2014.00122.
- 梁爽, 许涵, 林家怡, 等. 尖峰岭热带山地雨林优势树种白颜树空间分布格局 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(12): 1273–1282. doi: 10.3724/SP.J.1258.2014.00122.
- [25] NI R Q, TANG J Y, CHENG Y X, et al. Spatial distribution patterns and associations of main tree species in spruce-fir forest in Changbai Mountains, northeastern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2013, 35(6):

- 28–35. doi: 10.13332/j.1000-1522.2013.06.013.
- 倪瑞强, 唐景毅, 程艳霞, 等. 长白山云冷杉林主要树种空间分布及其关联性 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(6): 28–35. doi: 10.13332/j.1000-1522.2013.06.013.
- [26] CHANG W, DANG K L, WU P H, et al. Spatial pattern of secondary *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests in the Qinling Mountains [J]. Acta Ecol Sin, 2016, 36(4): 1021–1029. doi: 10.5846/stxb201406291343.
- 常伟, 党坤良, 武朋辉, 等. 秦岭林区锐齿栎次生林种群空间分布格局 [J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1021–1029. doi: 10.5846/stxb201406291343.
- [27] SU S J, LIU J F, MA R F, et al. Spatial distribution patterns and associations of *Pinus taiwanensis* population in Daiyun Mountain, southeast China [J]. Res Sci, 2015, 37(4): 0841–0848.
- 苏松锦, 刘金福, 马瑞丰, 等. 戴云山黄山松种群的空间分布格局与关联性 [J]. 资源科学, 2015, 37(4): 841–848.
- [28] CHEN K Y, ZHANG H R, LEI X D. Spatial pattern of *Quercus mongolica* in natural secondary forest [J]. Acta Ecol Sin, 2018, 38(10): 3462–3470. doi: 10.5846/stxb201707101243.
- 陈科屹, 张会儒, 雷相东. 天然次生林蒙古栎种群空间格局 [J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3462–3470. doi: 10.5846/stxb201707101243.
- [29] YU D P, ZHOU L, DONG B L, et al. Structure and dynamics of *Betula ermanii* population on the northern slope of Changbai Mountain [J]. Chin J Ecol, 2004, 23(5): 30–34. doi: 10.13292/j.1000-4890.2004.0149.
- 于大炮, 周莉, 董百丽, 等. 长白山北坡岳桦种群结构及动态分析 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 30–34. doi: 10.13292/j.1000-4890.2004.0149.
- [30] PERRY G L W, ENRIGHT N J, MILLER B P, et al. Nearest-neighbour interactions in species-rich shrublands: The roles of abundance, spatial patterns and resources [J]. Oikos, 2009, 118(2): 161–174. doi: 10.1111/j.1600-0706.2008.16947.x.