



雷州半岛风水林中无患子的空间分布格局与空间关联性

谢锭淇, 黄锐洲, 许涵, 蔡继醇, 唐光大

引用本文:

谢锭淇, 黄锐洲, 许涵, 等. 雷州半岛风水林中无患子的空间分布格局与空间关联性[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(1): 31–40.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4396>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

极小种群博罗红豆的群落物种组成和空间分布格局

Species Composition and Spatial Distribution Pattern of *Ormosia boluoensis* with Extremely Small Population
热带亚热带植物学报. 2020, 28(3): 301–309 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4151>

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

Spatial Pattern and Association of Main Species in Endangered Plant *Sinojackia rehderiana* Community
热带亚热带植物学报. 2019, 27(4): 349–358 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3992>

5种常见水土保持树种的气体交换特性研究

Characteristics of Gas Exchange of Five Common Water and Soil Conservation Tree Species
热带亚热带植物学报. 2017, 25(6): 531–538 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3747>

茂兰喀斯特常绿落叶阔叶混交林群落组成和优势种更新类型

Community Composition and Regeneration Types of Dominant Species in Evergreen and Deciduous Broad-leaved Mixed Karst Forest in Maolan National Nature Reserve, Guizhou Province
热带亚热带植物学报. 2018, 26(6): 651–660 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3893>

不同样方尺度下鄱阳湖湿地典型草洲植物种间关联性

Species Relationship among Typical Marshland Plants in Poyang Lake Region on Different Sample Scale
热带亚热带植物学报. 2018, 26(5): 449–456 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3862>

向下翻页, 浏览PDF全文

雷州半岛风水林中无患子的空间分布格局与空间关联性

谢锭淇¹, 黄锐洲¹, 许涵², 蔡继醇³, 唐光大^{1,3*}

(1. 华南农业大学南方石灰岩植物研究中心, 林学与风景园林学院, 广州 510640; 2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520; 3. 韶关学院英东生物与农业学院, 广东 韶关 512005)

摘要: 为探讨无患子(*Sapindus saponaria*)在生态修复和城市园林中的应用, 在广东湛江雷州市龙门镇足荣村无患子风水林设置 1 hm² 样地, 调查群落的物种组成, 并采用点格局分析法, 结合完全随机零模型和异质泊松零模型, 分析无患子的空间分布格局与关联性。结果表明, 样地中胸径 ≥ 1 cm 的乔木共计 28 科 60 属 73 种 3 585 株, 其中单属科、单种科、单种属的比例最高, 其次为寡属科、寡种科、寡种属。无患子总体在 0~25 m 研究尺度上呈聚集分布、随机分布和均匀分布交替出现的现象; 在小尺度上, 幼树呈聚集分布, 成年树呈均匀分布, 但随着尺度增大, 3 个龄级个体主要呈随机分布; 幼树与中龄树呈微弱的空间正关联, 而幼树与成年树呈空间无显著关联; 中龄树与成年树呈周期性变化, 由空间无显著关联(0~4.5 m)到空间正关联(4.5~10.0 m)再到空间无关联(10.0~25.0 m)。无患子在空间分布格局上从小尺度上的聚集分布过渡为大尺度上的随机分布, 可能存在一定程度的邻体竞争和密度制约; 幼树和中龄树共存比例高; 幼树和成年树则相对独立; 中龄树和成年树在局部尺度共存比例也较高。因此, 在雷州半岛生态修复和城市园林建设过程中, 无患子可小范围聚集栽培, 大面积分散栽培。

关键词: 无患子; 空间格局; 风水林; 种内联结

doi: 10.11926/jtsb.4396

Spatial Distribution Pattern and Association of *Sapindus saponaria* in Fengshui Forest, Leizhou Peninsula

XIE Dingqi¹, HUANG Ruizhou¹, XU Han², CAI Jichun³, TANG Guangda^{1,3*}

(1. South China Limestone Plants Research Center, College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 3. Henry Fok College of Biology and Agriculture, Shaoguan University, Shaoguan 512005, Guangdong, China)

Abstract: To explore the application of *Sapindus saponaria* in ecological restoration and urban garden, a 1 hm² plot was set up in *S. saponaria* Fengshui Forest in Zorong Village, Longmen Town, Leizhou City, Guangdong Province, the species composition of community was analyzed, and its spatial distribution pattern and intraspecific correlation were also analyzed using a point pattern analysis with complete spatial randomness and heterogeneous poisson. The results showed that there were 3 585 individuals of 73 species, belonging to 60 genera and 28 families with diameter at the breast height (DBH) ≥ 1 cm. The proportion of the monogeneric family, single-species family and monotypic genus were obviously higher than other types, followed by the oligogenera families, oligospecies families and oligotypic genera. The spatial distribution patterns of *S. saponaria* showed an

收稿日期: 2021-03-01 接受日期: 2021-05-24

基金项目: 广东省林业局项目(粤财农[2019]51号); 广东省林业科技创新项目(2018KJJCX010, 粤财资环[2020]130号)资助

This work was supported by the Project of Forestry Administration of Guangdong Province (Grant No. [2019]51), and the Project for Forestry Innovation in Guangdong (Grant No. 2018KJJCX010, [2020]130).

作者简介: 谢锭淇(1999~), 女, 在读本科生。E-mail: xiedingqi@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: gdtang@scau.edu.cn

alternating phenomenon of aggregation, random distribution and uniform distribution at 0–25 m scales. At a small scale, the distribution of saplings was aggregated, and that of adults was uniform. With the increment of spatial scale, trees in three age classes were mainly randomly distributed. The saplings and middle-aged trees had a weak positive association at 0–25 m scales, while it was negatively associated between saplings and adult trees. The association between middle-aged and adult trees showed periodic changes, from no significant association (0–4.5 m scale) to positive association (4.5–10.0 m scale) to no association (10.0–25.0 m scale). As a consequence of neighbor competition and density dependence, the spatial distribution pattern of *S. saponaria* changed from aggregated distribution at small scale to random distribution at large scale. The coexisting proportion of saplings and middle aged trees was high, and that of middle-aged and adult trees at small scales also high, while saplings and adult trees are relatively independent. Therefore, *S. saponaria* could be cultivated in small aggregations and scattered in large scales for the ecological restoration and urban garden construction in Leizhou Peninsula.

Key words: *Sapindus saponaria*; Spatial pattern; Fengshui forest; Intraspecies association

种群的空间分布格局是指种群内所有个体在一定水平空间的分布状况,是种群生物学特性、种间关系及环境条件综合作用的结果,也反映了种群结构的合理性^[1],空间分布类型及关联性常随生境异质性程度、种群繁殖方式和群落演替阶段而发生改变,相关指标可揭示物种种群生物学和生态学特性、群落演替及生存策略或适应机制的一般规律^[2–7]。乡村风水林是中国南方部分乡村周围存留的天然林与物种储备库,是人类与自然和谐共处的见证。然而,随着经济的发展,如今风水林面临着城市化、基础设施建设和其他经济发展形式的威胁,亟需保护^[8]。深入研究乡村风水林内优势种的空间分布格局,对区域森林生态恢复、乡村振兴和区域城镇园林建设等均有重要的理论指导意义。

无患子(*Sapindus saponaria*)为无患子科(Sapindaceae)落叶乔木,高可超 20 m,广泛分布于亚洲和美洲的热带、亚热带低山丘陵及石灰岩地区,在绿化、能源、医药等方面具有极高的价值。无患子喜光、稍耐阴、耐寒、根系发达、抗风及抗旱能力强、对土壤养分要求低,木材坚硬致密,因此可在生态环境脆弱地区实现短时间内造林成林,快速形成郁闭的森林^[9],在城市园林和绿化建设中,无患子对二氧化碳抗性较强^[10],是优秀的园林乔木。同时它是重要的林业生物质能源之一^[11],我国林业局公布的七大木本油料树种之一^[12],其果可入药^[13],具抗菌消炎、杀虫、润肤等功能^[11,14]。

雷州半岛地处广东大陆最南端,地势平坦,近年来地带性植被已经被大面积砍伐,原生植被稀少。足荣村风水林是现保存面积最大的村旁小斑块森林之一,作为村庄的庇佑林,村民心存敬畏,1990

年后便禁止采伐树木,故植被得以较好保存,是研究雷州半岛原生植被的理想样地。本研究在风水林内设置 1 hm²样地,并运用点格局分析方法,探讨风水林中无患子种群生长各阶段的空间分布规律,以及风水林中的生境异质性对空间分布格局的影响,旨在充分认识无患子种内的竞争关系和空间分布格局,为雷州半岛生态修复与城镇绿化提供师法自然的参考。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

研究样地(109°56'42.90" E, 20°36'59.66" N)位于湛江市雷州龙门镇足荣村附近,森林总面积约 56.79 hm²,海拔 97 m,地形平缓,属北热带海洋季风气候,年均温 22 °C~24 °C,最热月(7月)和最冷月(1月)平均气温分别为 28.5 °C和 15.0 °C,年均降水量 1 300~2 300 mm,5—10月多雷阵雨和暴雨,全年光照充足,雨热同期,干湿明显^[15–18]。

1.2 调查方法

依据远离林缘,不跨越小河及道路的原则,在林内挑选能够代表整片森林总体特征的地方,用哈光经纬激光罗盘仪(DQL-16ZJ型)定点,皮尺测距,建立长宽为 100 m×100 m的大样方,再将整个样方划分为 400 个 5 m×5 m小样方进行调查,对所有胸径(DBH)≥1 cm的乔灌木种进行每木检尺,记录种名、树高、胸径及生长状况,并以小样方西南角为原点,测量所有个体的空间相对坐标,坐标值以距离(m)表示。

1.3 样地群落统计分析

对样地群落中乔木进行调查, 统计科属组成^[19], 计算物种的重要值、多度、平均胸径(cm)、平均胸高断面面积(m²)等^[20], 重要值=(相对多度+相对频度+相对显著度)/3, 相对多度=(某物种数量/样地物种总数)×100%, 相对频度=(某物种频度/样地植物的频度总和)×100%, 相对显著度=(某物种胸高断面面积之和/样地所有物种的总胸高断面面积)×100%。

1.4 龄级结构划分

多数热带亚热带和树种的胸径和年龄呈正相关^[21], 故本文采用立木胸径代替年龄的方法划分无患子种群的龄级。根据无患子种群生活史特点^[22]及其胸径生长和年龄关系的拟合方程^[23], 划分为 3 个龄级: DBH ≤ 5 cm 为幼树, 5 cm < DBH ≤ 15 cm 为中龄树, DBH > 15 cm 为成年树。

1.5 点格局分析方法

单变量 Ripley's K(r)函数是以植物个体的空间坐标为基础, 分析不同尺度上种群的空间分布格局及关联性。该函数是以样方内任意点为圆心, 半径(r)的圆内期望点数与样方内点密度的比值, $K(r) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{I_r(d_{ij})}{W_{ij}} (i \neq j)$, 式中, A 为样地面积; n 为

样地内个体总数; r 为空间尺度; d_{ij} 为第 i 株与第 j 株之间的距离, 当 $d_{ij} \leq r$ 时, $I_r(d_{ij}) = 1$, 当 $d_{ij} > r$ 时, $I_r(d_{ij}) = 0$; W_{ij} 为边界效应修正的权重, 可校正边界效应引起的误差^[24]。

双变量 Ripley's K(r)函数分析不同尺度上植物种群的不同龄级之间的空间关联, $K_{12}(r) = \frac{A}{n_1 n_2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{I_r(d_{ij})}{W_{ij}} (i \neq j)$, 式中, n_1 和 n_2 为不同龄级的个体数量。

本研究采用 Ripley's g(r)函数来分析不同尺度上无患子种群的分布格局及空间关联, 与传统方法相比, 克服了种群空间格局单一尺度的缺陷^[6,25-26]。该函数由 Ripley's K(r)函数演化而来, 用圆环代替圆, 能更敏感地判别某一尺度上点的实际分布偏离期望值的程度, 有效消除大尺度格局分析时易受小尺度累积效应影响的缺点, 表示某一尺度上点的实际空间分布关系^[1,27-30], $g(r) = dK(r)/2\pi r dr$, 式中, r 为空间尺度; $dK(r)$ 与 dr 是对 $K(r)$ 与 r 分

别求导。当 $g(r)$ 值高于置信区间上限时, 树种呈聚集分布; 当 $g(r)$ 值在置信区间之间时, 树种呈随机分布; 当 $g(r)$ 值低于置信区间下限时, 树种呈均匀分布。

与 $K(r)$ 函数相同, $g(r)$ 函数也有相应的双变量公式, $g_{12}(r) = dK_{12}(r)/2\pi r dr$, 当 $g_{12}(r)$ 值高于置信区间上限时, 不同龄级呈正关联; 当 $g_{12}(r)$ 值在置信区间之间时, 不同龄级无关联; 当 $g_{12}(r)$ 值低于置信区间下限时, 不同龄级呈负关联。

本研究采用 2 种模型: (1) 完全空间随机模型 (complete space randomness, CSR): 作为零假设来检验生境异质性是否显著影响种群个体的空间分布, 即存在生境异质性效应, 种群个体的聚集程度增加, 不存在生境异质性效应, 研究尺度范围内各点出现的概率相同^[31]; (2) 异质泊松模型 (heterogeneous poisson process, HP): 排除生境异质性效应, 研究种群个体的空间分布规律^[32-33]。本研究选取标准差 $\sigma = 8$ m 以消除大尺度上的生境异质性对空间格局的影响, 经 99 次 Monte Carlo 模拟得到 95% 的置信区间。空间分布格局主要采用 R 3.6.1 的 spatstat 1.60-1 进行统计分析。

2 结果和分析

2.1 群落物种组成

胸径 ≥ 1 cm 的乔木共有 28 科 60 属 73 种 3 585 株, 其中主要以单属科(53.57%)、单种科(42.86%)、单种属(85%)的比例最高, 其次为寡属(2~4 属)科(39.29%)、寡种(2~4 种)科(39.29%)、寡种(2~4 种)属(15%); 属数与种数前 5 的科相同, 为茜草科(Rubiaceae, 8 属/9 种, 下同)、大戟科(Euphorbiaceae, 6/8)、樟科(Lauraceae, 4/6)、芸香科(Rutaceae, 4/5)、桑科(Moraceae, 4/5), 无中等属(5~9 种)、大科(10~19 属)、超大科(≥20 属)、大属(10~19 种)、超大属(≥20 种)(表 1)。无患子是无患子属唯一的种, 无患子科仅有 3 种, 另 2 种为龙眼(*Dimocarpus longan*)和赤才(*Erioglossum rubiginosum*)。

重要值 > 1% 的乔木共计 20 种(表 2), 多度为 3 232。重要值前 5 位的分别为樟(*Cinnamomum camphora*)、阴香(*Cinnamomum burmannii*)、银柴(*Aporosa dioica*)、假苹婆(*Sterculia lanceolata*)和无患子, 重要值之和为 54.55%; 以银柴的多度最高, 达 728 株, 其次为阴香、假苹婆、粗糠柴(*Mallotus phili-*

ppensis)、无患子。海红豆(*Adenanthera microsperma*) 的平均胸径最高,为 32.13 cm,无患子为 10.38 cm, 仅次于海红豆、樟和见血封喉(*Antiaris toxicaria*), 但无患子的个体数高于这 3 种植物,海红豆仅有 7 株;胸高断面积总和前 3 位的分别为樟(8.41 m²)、

阴香(3.37 m²)和无患子(2.92 m²)。

无患子有 190 棵,幼树有 77 棵(40.53%)和中龄树 64 棵(33.68%),成年树 49 棵(25.79%),径阶分布呈倒“J”型,表明幼苗具备良好的生存环境,种群正处于增长状态,种群持续更新。

表 1 乔木的科属组成

Table 1 Families and genera composition of trees

类型 Type	数量 Number	%	类型 Type	数量 Number	%	类型 Type	数量 Number	%
单属科 Monogeneric family	15	53.57	单种科 Single-species family	12	42.86	单种属 Monotypic genus	51	85.00
寡属科 Oligogenera family	11	39.29	寡种科 Oligospecies family	11	39.29	寡种属 Oligotypic genus	9	15.00
中等科 Medium family	2	7.14	中等科 Medium family	5	17.86	中等属 Medium genus	0	0
大科 Large family	0	0	大科 Large family	0	0	大属 Large genus	0	0
超大科 Multiple family	0	0	超大科 Multiple family	0	0	超大属 Multiple genus	0	0
合计 Total	28	100.00	合计 Total	28	100.00	合计 Total	60	100.00

表 2 重要值>1%物种的数量特征

Table 2 Quantitative characteristics of species with importance value more than 1%

植物 Species	重要值 /% Importance value	多度 Abundance	平均胸径 (cm) Mean diameter at breast height	胸高断面积 (m ²) Area at breast height
樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	12.96	94	32.13 ±10.39	8.41
阴香 <i>Cinnamomum burmannii</i>	12.60	485	6.69 ±6.62	3.37
银柴 <i>Aporosa dioica</i>	12.05	728	2.87 ±2.24	0.76
假苹婆 <i>Sterculia lanceolata</i>	9.28	419	4.68 ±5.16	1.60
无患子 <i>Sapindus saponaria</i>	7.66	190	10.38 ±9.41	2.92
粗糠柴 <i>Mallotus philippensis</i>	5.55	204	6.20 ±6.08	1.20
布渣叶 <i>Microcos paniculata</i>	4.13	111	8.26 ±9.18	1.32
见血封喉 <i>Antiaris toxicaria</i>	3.27	38	12.39 ±22.45	1.92
皂帽花 <i>Dasymaschalon trichophorum</i>	2.94	146	1.61 ±0.51	0.03
山楝 <i>Aphanamixis polystachya</i>	2.88	104	4.87 ±7.95	0.70
九节 <i>Psychotria asiatica</i>	2.66	143	1.99 ±0.90	0.05
毛柿 <i>Diospyros strigosa</i>	2.55	111	3.63 ±2.34	0.16
鸡爪箭 <i>Oxyceros sinensis</i>	2.39	119	1.89 ±0.92	0.04
膜叶脚骨脆 <i>Casearia membranacea</i>	1.55	46	7.03 ±8.10	0.41
土坛树 <i>Alangium salviifolium</i>	1.48	52	6.14 ±4.31	0.23
大青 <i>Clerodendrum cyrtophyllum</i>	1.46	78	1.46 ±0.97	0.02
毛黄肉楠 <i>Actinodaphne pilosa</i>	1.37	57	2.94 ±1.72	0.05
山小桔 <i>Glycosmis parviflora</i>	1.03	53	1.90 ±0.93	0.02
海红豆 <i>Adenanthera microsperma</i>	1.03	7	32.43 ±13.99	0.67
紫玉盘 <i>Uvaria macrophylla</i>	1.03	47	1.92 ±1.37	0.02

2.2 空间分布格局

从散点分布图(图 1)可见,植株多分布在左侧样地。幼树在小尺度上常呈聚集分布,但在右侧样地上分布较零星、疏散。成年树在左侧及右上侧样地中基本呈均匀分布。在右下侧样地上,成年树数量稀少,幼树及中龄树偏向于表现出独立于成年树的

分散分布。

从图 2 可见,CSR 的分析结果表明,在未排除生境异质性的条件下,无患子总体在 0~25 m 研究尺度上呈聚集分布和随机分布交替出现,其中在 2.0~3.0、6.5、9.0~10.5、14.0~15.5、17.5~18.0、19.5~22.0 和 24.5 m 尺度上呈聚集分布。HP 的分析结果

表明, 在剔除生境异质性的条件下, 无患子总体在 0~25 m 研究尺度上呈随机分布。

在未排除生境异质性的条件下, 0~25 m 研究尺度上, 幼树在小尺度(0.5~4.5 m)上呈显著聚集分布, 中尺度(8.5~10.5 m)和大尺度(20.5~22.0 m)上局部区域表现出微弱的聚集分布; 中龄树总体呈随机分布, 在较大尺度(14.5、19.0、22.0~23.0 和 25.0 m)上间断的且极微弱的呈聚集分布; 成年树均呈随机分布。在剔除生境异质性的条件下, 0~25 m 尺度上, 幼树交替呈随机分布、聚集分布及均匀分布, 其中在 0.5 和 2.0 m 尺度呈聚集分布, 6.0~7.5 m 尺度呈均匀分布; 中龄树均呈随机分布; 成年树在 2.5~5.5 m 尺度呈均匀分布, 其余尺度呈随机分布。表明无患子种子在小尺度上聚集发育成幼苗, 并随着幼树生长和尺度扩大, 中龄树和成年树逐步呈随机分布。

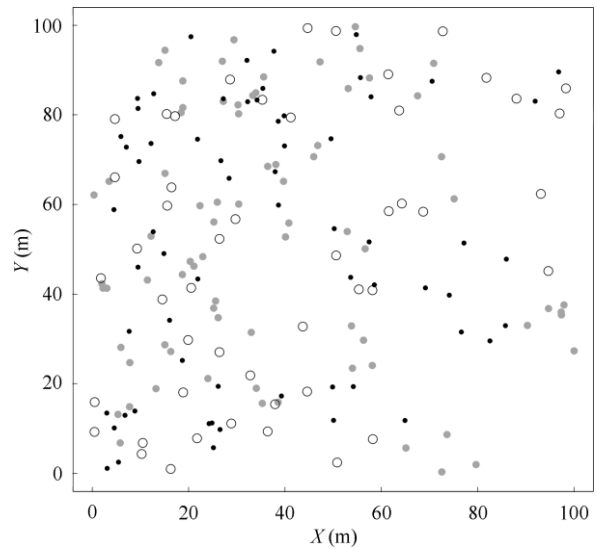


图 1 无患子的散点分布图。●: 幼树; ●: 中龄树; ○: 成年树。

Fig. 1 Scatter distribution map of *Sapindus saponaria*. ●: Sapling; ●: Middle-aged tree; ○: Adult tree.

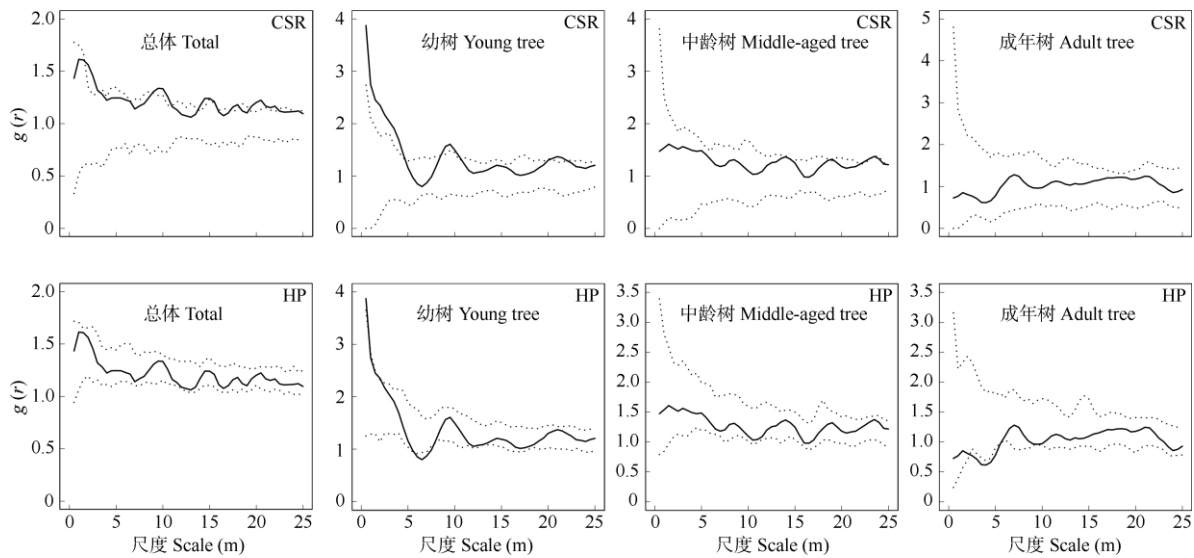


图 2 无患子的点格局分析。实线表示成对相关函数, 虚线表示 99% 包络线, 零模型为完全空间随机模型(CSR)和 $\sigma=8$ m 的异质泊松模型(HP)。

Fig. 2 Point pattern analysis of *Sapindus saponaria*. Solid lines are pair-correlation functions, and dotted lines are 99% confidence envelopes. Null models: complete spatial randomness (CSR) model and Heterogeneous Poisson (HP) model with $\sigma=8$ m.

2.3 不同龄级无患子间的关联性

CSR 分析结果表明(图 3), 无患子幼树与中龄树在小尺度(0.5~2.0 m)和较大尺度(17.0~20.5 m)上表现为显著的空间正相关, 此外, 在呈空间无关联的 2.5~16.5 和 21.0~25.0 m 尺度内又有个别点(9.5、11.0 m 尺度)突变为极其微弱的空间正相关; 幼树与成年树均呈空间无显著关联; 中龄树与成年树先呈空间无显著关联, 随着尺度增大至 6.0~10.0 m, 其关联程度升高, 过渡为空间正关联, 后又呈空间无

关联。表明幼树和中龄树、成年树各自占有生活空间, 竞争并不激烈, 3 个龄级的无患子共同发挥群体效应, 增加种间竞争力, 抵御其他物种。

3 结论和讨论

3.1 无患子的空间分布格局

密度制约是指种群之间存在的资源竞争和化感作用等造成的相互损害行为, 对成年树趋于规则

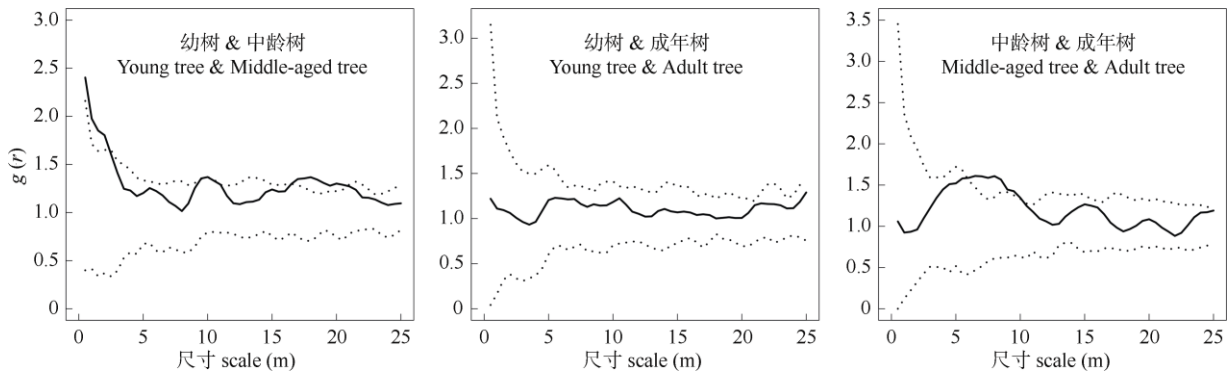


图3 无患子各龄级的种内空间关联(CSR模型)。实线表示成对相关函数,虚线表示99%包迹线。

Fig. 3 Intraspecific spatial association of *Sapindus saponaria* at different ages by CSR model. Solid lines are pair-correlation functions, and dotted lines are 99% confidence envelopes.

分布的作用结果尤为显著^[34-36]。本研究中无患子中龄树与成年树的CSR与HP的分析结果都支持了该结论。植物因固着生活,同种个体具有相同的生长习性,所以具有相近的生长需求,在资源(矿质营养、空间、水分、光照等)有限的情况下,恶性竞争会导致个体生长量下降、死亡率上升^[37]。此外,单株乔木可改变冠层下的环境条件而影响底层邻体,通常包括大幅度降低光照的可利用性、改变土壤的养分和湿度条件^[38],对其底层邻体影响的广度和强度因树种而异。无患子为阳性乔木,喜阳树种存活率与同种邻体密度呈负相关^[39],更新个体常因高邻体密度而导致欠缺所需的光照条件,最后致死^[40],宝天曼国家级自然保护区内落叶阔叶林的密度制约效应研究^[41]和巴拿马BCI样地对邻体制约幼树生长的研究结果^[42]都证实如此,与此同时植物还要承受其他生物的危害,且在高密度同种植物中幼小个体更容易成为被捕食者而受到损伤^[43],Hammond等分析了46个案例后,所得结论也证明大部分昆虫能降低紧邻母树更新个体的成活率^[34]。Janzen-Connell假说认为,由于捕食或寄主特异性害虫接近母树,更新个体的生存概率会随着与母树的距离增加而增加^[44]。幼树虽生长旺盛,但脆弱,故死亡率高,死亡后成年树难以得到补充,因此同种树木个体间的距离随时间推移增大,最终导致成年树相对分散的分布格局^[34,45]。

3.2 无患子不同龄级间的关联性

虽然密度制约对成年树趋于规则分布的作用结果尤为显著,但值得注意的是,生境异质性可以掩盖潜在的密度制约造成的现象。在本研究中,中

龄树与成年树在小尺度上呈空间正相关,虽然与自然界中多数种群内空间分布规律不同^[28,31,46-47],但是在适宜种群生长的生境中,密度制约所导致的个体死亡率上升或生长量减少,被生境适宜导致的个体成活率提高或生长量的增加所抵消,在适宜种群生长的生境中不仅难以检验出密度制约效应,反而会得到相反的假象^[34]。对热带常绿阔叶林的研究表明主要树种和不同龄间植株呈正向空间联结,表明该林分对种内竞争机制的支持很少,而群体保护或种群促进机制似乎更明显^[48]。

物种的适应能力和环境的选择作用共同决定不同物种各自的生态位^[49],生态位理论的生境关联过程强个体会沿着一定的环境梯度聚集^[50],而母树一般处于该树种适宜生长的生境,种子及幼苗在这种生境下能够提高成活率^[51],无患子种子大且重,不易受风力影响,幼树应聚集在母树周围分布。但本研究结果表明,无患子幼树与成年树在0~25 m尺度上皆呈空间无显著关联,这可能是由于生境异质性与扩散限制的共同作用放大了种内的密度制约效应,同时食草动物、病原体等也间接影响了幼苗阶段至成年阶段种群的分布格局^[26,52];风水林中常存在二次传播的干扰^[33],即母树的种子落到地面,其可食的肉质核果^[13]吸引动物搬运、储藏、取食并以粪便的形式扩散到它处,并在远离母树且生境适宜的地方生长发育^[53-54]。

综上,雷州半岛风水林样地中植物组成揭示了该风水林斑块的脆弱性,虽物种数量多,但单属科、单种科、单种属的比例最高,某种树死亡可能会导致该科、属在林内绝迹,由此可见该风水林的稳定性和抗干扰性较差。而无患子作为该风水林的关键

种之一,对风水林的群落稳定和演替有重要作用,其种子萌发的幼苗增加了草本层的多样性,中龄树与成年树为群落中上层乔木群落结构的重要组成部分。

风水林内无患子总体在0~25 m研究尺度上呈聚集分布、随机分布和均匀分布交替出现的现象,并从小尺度上幼树的聚集分布过渡为大尺度上中龄树及成年树的随机分布,可能存在一定程度的种子扩散限制、邻体竞争和密度制约;在个别尺度上,幼树与中龄树协调生长,共存比例高,与成年树则一直保持相对独立,中龄树与成年树可能由于某区域的小环境较适宜,在局部尺度上呈促进生长的关系。

无患子在雷州半岛风水林内的分布格局现状,为区域生态修复和城市园林建设提供了“师法自然”的参考。在人工营建生态林过程中,小范围可适当聚集栽培,大面积分散栽培,降低种内密度制约的效应,提高植株的长期生存比例;城市园林建设过程中,无患子秋季叶片变黄,是良好的秋色叶乔木树种,可在公园内小面积成簇种植,形成季节性彩色景观。

参考文献

- [1] LIU Y Y, LI F R, JIN G Z. Spatial patterns and associations of four species in an old-growth temperate forest [J]. *J Plant Interact*, 2014, 9(1): 745–753. doi: 10.1080/17429145.2014.925146.
- [2] ZHANG Z H, HU G, ZHU J D, et al. Spatial patterns and interspecific associations of dominant tree species in two old-growth karst forests, SW China [J]. *Ecol Res*, 2010, 25(6): 1151–1160. doi: 10.1007/s11284-010-0740-0.
- [3] LIU Y Y, JIN G Z. Spatial point pattern analysis for coarse woody debris in a mixed broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30(22): 6072–6081. doi: 10.3969/j.issn.1674-6805.2013.27.039.
刘妍妍, 金光泽. 小兴安岭阔叶红松林粗木质残体空间分布的点格局分析 [J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6072–6081. doi: 10.3969/j.issn.1674-6805.2013.27.039.
- [4] JIA G D, YU X X, DENG W P, et al. Spatial pattern analysis on individuals of *Tilia tuan* Szyszyl. at different altitudes in typical watershed of Beijing mountainous area [J]. *Ecol Environ Sci*, 2011, 20(S1): 996–1002. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2011.z1.001.
贾国栋, 余新晓, 邓文平, 等. 北京山区典型流域不同海拔椴树种群的空间点格局分析 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(S1): 996–1002. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2011.z1.001.
- [5] ZHANG M T, KANG X G, MENG J H, et al. Distribution patterns and associations of dominant tree species in a mixed coniferous-broadleaf forest in the Changbai Mountains [J]. *J Mt Sci*, 2015, 12(3): 659–670. doi: 10.1007/s11629-013-2795-1.
- [6] XIA S J, LIU M X, ZHU G, et al. Spatial distribution pattern and association between desert plant of *Reaumuria songarica* and *Stipa sareptana* var. *krylovii* population [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2018, 38(11): 2129–2137. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2018.11.2129.
夏素娟, 刘旻霞, 朱恭, 等. 荒漠植物红砂与西北针茅种群的空间格局及其关联性 [J]. *西北植物学报*, 2018, 38(11): 2129–2137. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2018.11.2129.
- [7] LI D L, JIANG H, WANG H, et al. Population structure and spatial distribution pattern of *Liquidambar formosana* in maple tree bay of Lianyungang [J]. *Ecol Environ Sci*, 2020, 29(1): 49–58. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.01.006.
李冬林, 江浩, 王火, 等. 连云港市枫树湾景区枫香种群结构与分布格局 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29(1): 49–58. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.01.006.
- [8] CHEN B X, COGGINS C, MINOR J, et al. *Fengshui* forests and village landscapes in China: Geographic extent, socioecological significance, and conservation prospects [J]. *Urban For Urban Gree*, 2018, 31: 79–92. doi: 10.1016/j.ufug.2017.12.011.
- [9] FAN Z Y. Preliminary analysis on promotion and application of energy plantations of *Sapindus mukorossi* in areas to the south of the Huaihe River [J]. *Anhui For Sci Technol*, 2017, 43(2): 51–53. doi: 10.3969/j.issn.2095-0152.2017.02.014.
范子燕. 浅析无患子能源林及其产业化在淮河以南区域的推广与应用 [J]. *安徽林业科技*, 2017, 43(2): 51–53. doi: 10.3969/j.issn.2095-0152.2017.02.014.
- [10] HUANG S, PAN W M. Excellent landscaping trees *Sapindus mukorossi* [J]. *Garden*, 2004(9): 42. doi: 10.3969/j.issn.1000-0283.2004.09.026.
黄顺, 潘文明. 优良造景树——无患子 [J]. *园林*, 2004(9): 42. doi: 10.3969/j.issn.1000-0283.2004.09.026.
- [11] FAN H H, TANG X H, SHU T, et al. Feasibility analysis of developing raw material forest of *Sapindus mukorossi* in Shunchang [J]. *Prot For Sci Technol*, 2014(6): 93–95. doi: 10.13601/j.issn.1005-5215.2014.06.039.
范辉华, 汤行昊, 舒婷, 等. 顺昌发展无患子原料林可行性分析 [J]. *防护林科技*, 2014(6): 93–95. doi: 10.13601/j.issn.1005-5215.2014.06.039.
- [12] YAN R, QIAN C. Physiological response of *Sapindus* seedlings to water stress [J]. *J SW Univ (Nat Sci)*, 2014, 36(4): 29–33. doi: 10.

- 13718/j.cnki.xdzk.2014.04.005.
- 闫瑞, 钱春. 无患子幼苗对水分胁迫的生理响应 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 29–33. doi: 10.13718/j.cnki.xdzk.2014.04.005.
- [13] ZENG Q Q, ZHENG L B, HUANG Y C, et al. Herbal textual and research progress of *Sapindus mukorossi* [J]. For Environ Sci, 2018, 34(4): 168–175. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2018.04.028.
- 曾庆钱, 郑良豹, 黄意成, 等. 无患子的本草考证及研究进展 [J]. 林业与环境科学, 2018, 34(4): 168–175. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2018.04.028.
- [14] YANG Y, LIU X L, ZHANG M, et al. Preparation and performance evaluation of soapberry handmade soap [J]. Guangzhou Chem Ind, 2019, 47(15): 92–95. doi: 10.3969/j.issn.1001-9677.2019.15.036.
- 杨莹, 柳小兰, 张明, 等. 无患子手工皂的研制与性能评价 [J]. 广州化工, 2019, 47(15): 92–95. doi: 10.3969/j.issn.1001-9677.2019.15.036.
- [15] LI F S, ZHANG Z, LI B. Variation characteristics of rainstorm climate in Zhanjiang from 1951 to 2011 [J]. Guangdong Meteor, 2012, 34(6): 35–37. doi: 10.3969/j.issn.1007-6190.2012.06.010.
- 李福胜, 张仲, 李斌. 湛江市 1951—2011 年暴雨气候的变化特征 [J]. 广东气象, 2012, 34(6): 35–37. doi: 10.3969/j.issn.1007-6190.2012.06.010.
- [16] TAN M Z. Study on restoration methods of tropical monsoon forest in Leizhou Peninsula [J]. Xiangcun Keji, 2017(12): 35–36. doi: 10.19345/j.cnki.1674-7909.2017.12.013.
- 谭铭智. 雷州半岛热带季雨林修复方法研究 [J]. 乡村科技, 2017(12): 35–36. doi: 10.19345/j.cnki.1674-7909.2017.12.013.
- [17] TANG W K, WANG Y, DONG J, et al. Early-middle Holocene paleo-environmental evolution revealed by a lacustrine sediment sequence in Leizhou Peninsula [J]. Geol Bull China, 2017, 36(9): 1625–1634. doi: 10.3969/j.issn.1671-2552.2017.09.014.
- 汤文坤, 王永, 董进, 等. 雷州半岛南部湖相沉积揭示的全新世早中期气候环境演变 [J]. 地质通报, 2017, 36(9): 1625–1634. doi: 10.3969/j.issn.1671-2552.2017.09.014.
- [18] LI N, CHEN J, LI R T. Screening study of native gardening plant based on new naturalism: Taking Leizhou Peninsula as an example [J]. Nanfang For Sci, 2019, 47(2): 30–34. doi: 10.16259/j.cnki.36-1342/s.2019.02.007.
- 李楠, 陈杰, 李润唐. 基于新自然主义条件下乡土园林植物的筛选研究——以雷州半岛为例 [J]. 南方林业科学, 2019, 47(2): 30–34. doi: 10.16259/j.cnki.36-1342/s.2019.02.007.
- [19] LAN J J, FEI W Q, LUO J, et al. Medicinal seed plants flora in Shergyla Mountains, Tibet [J]. Guihaia, 2018, 38(4): 411–419. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201703030.
- 拦继涛, 费文群, 罗建, 等. 西藏色季拉山药用种子植物区系研究 [J]. 广西植物, 2018, 38(4): 411–419. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201703030.
- [20] GUO Y, KANG N, DONG H, et al. Species composition and spatial distribution pattern of *Ormosia boluoensis* with extremely small population [J]. J Trop Subtrop Bot, 2020, 28(3): 301–309. doi: 10.11926/jtsb.4151.
- 郭韵, 康宁, 董辉, 等. 极小种群博罗红豆的群落物种组成和空间分布格局 [J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(3): 301–309. doi: 10.11926/jtsb.4151.
- [21] WU J X, ZHANG X M, LI L, et al. Characteristic and dynamics analysis of *Populus euphratica* populations at the middle reaches of the Tarim River [J]. Arid Zone Res, 2010, 27(2): 242–248. doi: 10.13866/j.azr.2010.02.004.
- 吴俊侠, 张希明, 李利, 等. 塔里木河干流中游胡杨种群特征与动态分析 [J]. 干旱区研究, 2010, 27(2): 242–248. doi: 10.13866/j.azr.2010.02.004.
- [22] YANG L. The characteristics and afforestation technology of *Sapindus saponaria* [J]. Modern Agric Sci Technol, 2019(9): 148. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2019.09.091.
- 杨丽. 无患子的特征特性与造林技术 [J]. 现代农业科技, 2019(9): 148. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2019.09.091.
- [23] WANG X. Study on growth models of four deciduous broad-leaved trees in Hefei [D]. Anhui: Anhui Agricultural University, 2010: 24–29. doi: 10.7666/d.y1735305.
- 王曦. 合肥市四种落叶阔叶树种生长模型的研究 [D]. 安徽: 安徽农业大学, 2010: 24–29. doi: 10.7666/d.y1735305.
- [24] ZHANG J T. Quantitative Ecology [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011: 359–360.
- 张金屯. 数量生态学 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2011: 359–360.
- [25] ZHANG J T. Analysis of spatial point pattern for plant species [J]. Acta Phytocool Sin, 1998, 22(4): 344–349.
- 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 344–349.
- [26] TU H R, LI J F, LIU R H, et al. Spatial distribution patterns and association of *Loropetalum chinense* population in karst hills of Guilin, southwest China [J]. Chin J Appl Ecol, 2019, 30(8): 2621–2630. doi: 10.13287/j.1001-9332.201908.016.
- 涂洪润, 李娇凤, 刘润红, 等. 桂林岩溶石山檵木种群空间格局及其关联性 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2621–2630. doi: 10.13287/j.1001-9332.201908.016.
- [27] YANG H, LI Y L, SHEN L, et al. Spatial distribution patterns of

- seedling and sapling in a spruce-fir forest in the Changbai Mountains area in northeastern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(24): 7311–7319. doi: 10.5846/stxb201303150432.
- 杨华, 李艳丽, 沈林, 等. 长白山云冷杉林幼苗幼树空间分布格局及其更新特征 [J]. *生态学报*, 2014, 34(24): 7311–7319. doi: 10.5846/stxb201303150432.
- [28] HE Z L, XU H, QIN X S, et al. Spatial distribution patterns and association of two apocynaceae plants in the tropical mountain rainforests of Jianfengling, Hainan Island, China [J]. *Biodiv Sci*, 2017, 25(10): 1065–1074. doi: 10.17520/biods.2017095.
- 何增丽, 许涵, 秦新生, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林 2 种夹竹桃科植物的空间分布格局与关联性 [J]. *生物多样性*, 2017, 25(10): 1065–1074. doi: 10.17520/biods.2017095.
- [29] YANG J, ZHONG Q J, WANG C Y, et al. Spatial pattern analysis of *Quercus pannosa* population at different altitudes in Yunnan Yaoshan [J]. *Ecol Sci*, 2019, 38(5): 111–118. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2019.05.015.
- 杨靖, 钟乾娟, 王崇云, 等. 云南药山黄背栎种群不同海拔空间格局分析 [J]. *生态科学*, 2019, 38(5): 111–118. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2019.05.015.
- [30] YAN D F, HE W, MA R T, et al. Effects of forest thinning on the spatial distribution patterns of *Quercus variabilis* population [J]. *Ecol Environ Sci*, 2020, 29(3): 429–437. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.03.001.
- 闫东锋, 贺文, 马瑞婷, 等. 抚育间伐对栓皮栎种群空间分布格局的影响 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29(3): 429–437. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.03.001.
- [31] LIANG S, XU H, LIN J Y, et al. Spatial distribution pattern of the dominant species *Gironniera subaequalis* in tropical montane rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China [J]. *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.
- [32] HUANG Y F, DING Y, ZANG R G, et al. Spatial pattern of trees in tropical lowland rain forest in Bawangling of Hainan Island, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2012, 36(4): 269–280. doi: 10.3724/SP.J.1258.2012.00269.
- 黄运峰, 丁易, 臧润国, 等. 海南岛霸王岭热带低地雨林树木的空间格局 [J]. *植物生态学报*, 2012, 36(4): 269–280. doi: 10.3724/SP.J.1258.2012.00269.
- [33] GUO Y L, WANG B, XIANG W S, et al. Spatial distribution of tree species in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China [J]. *Biodiv Sci*, 2015, 23(2): 183–191. doi: 10.17520/biods.2014126.
- 郭屹立, 王斌, 向悟生, 等. 广西弄岗北热带喀斯特季节性雨林监测样地种群空间点格局分析 [J]. *生物多样性*, 2015, 23(2): 183–191. doi: 10.17520/biods.2014126.
- [34] ZHU Y, MI X C, MA K P. A mechanism of plant species coexistence: the negative density-dependent hypothesis [J]. *Biodiv Sci*, 2009, 17(6): 594–604. doi: 10.3724/SP.J.1003.2009.09183.
- 祝燕, 米湘成, 马克平. 植物群落物种共存机制: 负密度制约假说 [J]. *生物多样性*, 2009, 17(6): 594–604. doi: 10.3724/SP.J.1003.2009.09183.
- [35] PU X C, UMAÑAB M N, JIN G Z. Trait-mediated neighbor effects on plant survival depend on life stages and stage-specific traits in a temperate forest [J]. *For Ecol Manage*, 2020, 472: 118250. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118250.
- [36] ZANG L P, XU H, LI Y D, et al. Conspecific negative density dependence of trees varies with plant functional traits and environmental conditions across scales in a 60-ha tropical rainforest dynamics plot [J]. *Biotropica*, 2021, 53(2): 693–702. doi: 10.1111/btp.12910.
- [37] COMITA L S, HUBBELL S P. Local neighborhood and species' shade tolerance influence survival in a diverse seedling bank [J]. *Ecology*, 2009, 90(2): 328–334. doi: 10.1890/08-0451.1.
- [38] KEMBEL S W, DALE M R T. Within-stand spatial structure and relation of boreal canopy and understorey vegetation [J]. *J Veg Sci*, 2006, 17(6): 783–790. doi: 10.1111/j.1654-1103.2006.tb02501.x.
- [39] HUBBELL S P, AHUMADA J A, CONDIT R, et al. Local neighborhood effects on long-term survival of individual trees in a Neotropical forest [J]. *Ecol Res*, 2001, 16(5): 859–875. doi: 10.1046/j.1440-1703.2001.00445.x.
- [40] ZHANG Z, LIU P, DING Y, et al. Distribution patterns of *Picea schrenkiana* var. *tianshanica* populations at different developmental stages in the western Tianshan Mountain, northwestern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2010, 32(3): 75–79. doi: 10.13332/j.1000-1522.2010.03.020.
- 张震, 刘萍, 丁易, 等. 天山云杉林不同发育阶段种群分布格局研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(3): 75–79. doi: 10.13332/j.1000-1522.2010.03.020.
- [41] LIU X J, REN S Y, LI L X, et al. Detecting density dependence on tree survival in a deciduous broad-leaved forest in Baotianman national nature reserve [J]. *Biodiv Sci*, 2016, 24(6): 639–648. doi: 10.17520/biods.2015134.
- 刘晓静, 任思远, 李鹿鑫, 等. 宝天曼国家级自然保护区落叶阔叶林密度制约效应对树木存活的影响 [J]. *生物多样性*, 2016, 24(6): 639–648. doi: 10.17520/biods.2015134.

- [42] URIARTE M, CONDIT R, CANHAM C D, et al. A spatially explicit model of sapling growth in a tropical forest: Does the identity of neighbours matter? [J]. *J Ecol*, 2004, 92(2): 348–360. doi: 10.1111/j.0022-0477.2004.00867.x.
- [43] WRIGHT J S. Plant diversity in tropical forests: A review of mechanisms of species coexistence [J]. *Oecologia*, 2002, 130(1): 1–14. doi: 10.1007/s004420100809.
- [44] JANZEN D H. Herbivores and the number of tree species in tropical forests [J]. *Amer Nat*, 1970, 104(940): 501–528. doi: 10.1086/282687.
- [45] MURRELL D J. On the emergent spatial structure of size-structured populations: When does self-thinning lead to a reduction in clustering? [J]. *J Ecol*, 2009, 97(2): 256–266. doi: 10.1111/j.1365-2745.2008.01475.x.
- [46] LI L, CHEN J H, REN H B, et al. Spatial patterns of *Castanopsis eyrei* and *Schima superba* in mid-subtropical broad-leaved evergreen forest in Gutianshan National Reserve, China [J]. *J Plant Ecol*, 2010, 34(3): 241–252. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.03.001.
李立, 陈建华, 任海保, 等. 古田山常绿阔叶林优势树种甜槠和木荷的空间格局分析 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(3): 241–252. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.03.001.
- [47] JIN S F, XU L D, LIAO X L, et al. An analysis on the spatial distribution pattern and interspecies correlation of natural secondary forest of *Cinnomomum camphor* [J]. *J Wuyi Univ*, 2019, 38(3): 40–46. doi: 10.14155/j.cnki.35-1293/g4.2019.03.008.
靳少非, 许鲁东, 廖晓丽, 等. 香樟天然次生林种群空间分布格局及其关联性分析 [J]. *武夷学院学报*, 2019, 38(3): 40–46. doi: 10.14155/j.cnki.35-1293/g4.2019.03.008.
- [48] NGUYEN H H, URUA-DIEZ J, WIEGAND K. Spatial distribution and association patterns in a tropical evergreen broad-leaved forest of north-central Vietnam [J]. *J Veg Sci*, 2016, 27(2): 318–327. doi: 10.1111/jvs.12361.
- [49] CHEN Y, WANG T, LI P K, et al. Community characteristics and spatial distribution of dominant tree species in a deciduous broad-leaved forest of Muzhaling, Henan, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2016, 40(11): 1179–1188. doi: 10.17521/cjpe.2016.0192.
陈云, 王婷, 李培坤, 等. 河南木札岭温带落叶阔叶林群落特征及主要乔木空间分布格局 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(11): 1179–1188. doi: 10.17521/cjpe.2016.0192.
- [50] JOHN R, DALLING J W, HARMS K E, et al. Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104(3): 864–869. doi: 10.1073/pnas.0604666104.
- [51] HAMILL D N, WRIGHT S J. Testing the dispersion of juveniles relative to adults: A new analytic method [J]. *Ecology*, 1986, 67(4): 952–957. doi: 10.2307/1939817.
- [52] HUANG Y F. Study on dynamics of tree species composition and spatial pattern in the tropical lowland rainforest on Hainan Island, China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013: 4–6. doi: 10.7666/d.Y2405265.
黄运峰. 海南岛热带低地雨林树种组成与格局动态 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013: 4–6. doi: 10.7666/d.Y2405265.
- [53] BAN Y, XU H C. Experimental studies on fate of *Larix gmelini* seeds in the soil in old-growth larch stands [J]. *Acta Ecol Sin*, 1996, 16(5): 541–547.
班勇, 徐化成. 原始老龄林内兴安落叶松种子命运的试验研究 [J]. *生态学报*, 1996, 16(5): 541–547.
- [54] RAZAFINDRATSIMA O H, DUNHAM A E. Frugivores bias seed-adult tree associations through nonrandom seed dispersal: A phylogenetic approach [J]. *Ecology*, 2016, 97(8): 2094–2102. doi: 10.1002/ecy.1434.