

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202004025

董鹏, 彭智奇, 朱弘, 等. 南京老山秤锤树空间分布格局及种间关联性 [J]. 广西植物, 2022, 42(2): 247–256.

DONG P, PENG ZQ, ZHU H, et al. Spatial distribution patterns and interspecific correlation of *Sinojackia xylocarpa* in Laoshan Mountain of Nanjing [J]. *Guihaia*, 2022, 42(2): 247–256.

南京老山秤锤树空间分布格局及种间关联性

董鹏¹, 彭智奇¹, 朱弘^{1,2}, 朱淑霞¹, 董京京¹, 翟飞飞³,
钟育谦³, 郑爱春⁴, 王贤荣¹, 伊贤贵^{1*}

(1. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心 生物与环境学院, 南京 210037; 2. 浙江省林业科学研究院, 杭州 310023; 3. 江苏省野生动植物保护站, 南京 210037; 4. 南京市浦口林业站 南京 210037)

摘要: 以南京老山 1 hm² 样地秤锤树 (*Sinojackia xylocarpa*) 天然种群为研究对象, 运用成对 $g(r)$ 函数, 选择完全随机模型、异质泊松模型与先决条件零模型, 分析秤锤树种群结构和空间分布格局及其空间关联性, 从空间格局角度来深入认识其种群结构和分布格局及形成该格局可能存在的机制并提出保护建议。结果表明: (1) 秤锤树天然种群中小径个体数量占优, 属于增长型种群。(2) 种内空间分布研究中, 基于完全随机模型分析, 秤锤树种群在尺度 0~26 m 时为聚集分布, 尺度 29~30 m 时为均匀分布; 基于异质泊松模型分析, 秤锤树种群在 0~23 m 时为聚集分布, 尺度 27~30 m 时为均匀分布。秤锤树空间分布表现为由聚集分布向均匀分布变化。(3) 主要种间关联性研究中, 秤锤树与朴树 (*Celtis sinensis*) 的种间关联性表现为小尺度下负关联, 随着空间尺度的增加变为正关联。秤锤树与黄连木 (*Pistacia chinensis*) 和秤锤树与三角槭 (*Acer buergerianum*) 的种间关联性大致相同, 基本为大尺度下正关联, 偶尔出现负关联和无关联。上述结果表明, 秤锤树种群更新状况良好, 种群空间分布以聚集分布为主, 其主要受种间竞争、扩散限制与密度制约的影响。基于种群现状开展就地保护与适当干扰其生存群落, 是濒危物种秤锤树的科学有效的保护措施。

关键词: 秤锤树, 点格局分析, 空间分布格局, 种间关联性, 南京老山

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2022)02-0247-10

Spatial distribution patterns and interspecific correlation of *Sinojackia xylocarpa* in Laoshan Mountain of Nanjing

DONG Peng¹, PENG Zhiqi¹, ZHU Hong^{1,2}, ZHU Shuxia¹, DONG Jingjing¹, ZHAI Feifei³,
ZHONG Yuqian³, ZHENG Aichun⁴, WANG Xianrong¹, YI Xiangui^{1*}

(1. Collaborative Innovation Center of the Southern Modern Forestry, College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China; 3. Jiangsu Wildlife Protection Station, Nanjing 210037, China; 4. Nanjing Pukou Forestry Station, Nanjing 210037, China)

Abstract: The species of *Sinojackia xylocarpa* in sample plot of 1 hm² in Laoshan Mountain of Nanjing was taken as the object of study. Using the pairing correlation function $g(r)$ and three null models: complete spatial randomness (CSR), heterogeneous Poisson (HP) and antecedent condition (AC) to analyze the relation between the structure and spatial

收稿日期: 2020-09-22

基金项目: 绿色江苏专项资金(021108043); 第二次全国重点保护野生植物资源调查专项资金(031010251) [Supported by Special Fund of Green Jiangsu (021108043); Special Fund of the Second National Key Protection of Wild Plant Resource Survey (031010251)].

第一作者: 董鹏(1995-), 硕士研究生, 研究方向植物学, (E-mail) 15996310353@163.com。

*通信作者: 伊贤贵, 硕士, 讲师, 研究方向植物分类学, (E-mail) yixiangui@njfu.edu.cn。

distribution of the population. The potential mechanism of this pattern formation could be deeply recognized from the view of spatial pattern. The results were as follows: (1) The number of individuals of small DBH class in natural *S. xylocarpa* population was dominant, and it was a growing population. (2) In the study of point pattern analysis, the *S. xylocarpa* population showed the aggregate distribution at scale 0–26 m, and uniformly distribution at scale 29–30 m based on the CSR; and the *S. xylocarpa* population showed the aggregate distribution at scale 0–23 m, and uniformly distribution at scale 27–30 m based on the HP. The spatial distribution pattern of *S. xylocarpa* showed a trend of changing from aggregate distribution to uniformly distribution. (3) In the study of interspecific correlation, the spatial relationship between *S. xylocarpa* and *Celtis sinensis* showed from the negative correlation to the positive correlation. The spatial relationship between *Sinojackia xylocarpa* and *Pistacia chinensis* and that between *Sinojackia xylocarpa* and *Acer buergerianum* were about the same. There were positive correlations between them on a large scale, and occasionally negative correlation and no correlation. The above results indicate that *Sinojackia xylocarpa* population is in a good regeneration state. The spatial distribution pattern of *S. xylocarpa* population is basically aggregate distribution, and is mainly affected by interspecific competition, diffusion restriction and density restriction. Based on population status, carrying out *in situ* protection and appropriately disturbing the community are a scientific and effective protection measure for the endangered species of *S. xylocarpa*.

Key words: *Sinojackia xylocarpa*, point pattern analysis, spatial distribution pattern, interspecific correlation, Laoshan Mountain of Nanjing

种群的空间分布格局是指种群内所有个体在一定空间范围内的分布情况 (Lan et al., 2012; Velázquez et al., 2016), 能够反映种间关系 (侯向阳和韩进轩, 1997)、种间的共存机制 (何增丽等, 2017)、推测种群演替格局形成的过程 (龚直文等, 2010) 等, 是生态学研究的热点之一 (McIntire & Fajardo, 2009; 陈倩等, 2018)。研究植物空间格局的方法很多, 目前采用点格局分析的手段成为主流, 点格局分析在一定空间范围内不受尺度限制, 能够将每个个体视为二维空间中的点, 从而最大限度地利用物种的空间位置信息分析种群分布格局或不同种群间的关联性, 具体应用于研究物种分布受环境差异的影响 (郭屹立等, 2015)、物种空间分布与种间关联性 (胡满等, 2019)、濒危植物空间分布格局 (周赛霞等, 2019)、群落中优势种群空间格局 (王亚飞等, 2020) 等。开展强调物种空间分布和种群结构的调查与研究是对野外极小种群的保护与拯救 (黄小等, 2020), 其研究结果对珍稀濒危植物保护与生物多样性维持方面至关重要。

秤锤树 (*Sinojackia xylocarpa*) 是我国特有的安息香科植物, 被列入国家 II 级重点保护野生植物名录。由我国著名植物学家胡先骕发表于 1928 年, 其模式标本采自南京。秤锤树种子具有深度休眠性 (贾书果和沈永宝, 2007), 并且木质化的厚种皮难以吸引动物传播, 导致秤锤树自然更新能力弱与种子扩散有限, 加之人类生产严重破坏其

片段化生境, 20 世纪 70 年代后在南京多次调查中均未发现野生秤锤树, 一度被部分学者认为秤锤树在南京野外已灭绝 (郝日明等, 2000; 陈瑞冰等, 2015)。全国第二次重点保护野生植物资源调查于南京老山国家森林公园内重新发现秤锤树天然种群 (杨国栋等, 2018)。

南京老山国家森林公园为秤锤树重要的原生分布区, 在人为活动干扰频繁的华东地区, 秤锤物种研究对于珍稀濒危物种与极小种群相关研究具有重要的借鉴意义。目前仅有对其生存环境的分析报道 (杨国栋等, 2018), 尚无对其空间分布与种群结构的研究。该文以老山 1 hm² 样地中的秤锤树为研究对象, 通过 $g(r)$ 成对函数和不同零模型对该种空间分布与空间关联性分析, 探讨种间竞争、环境因素、自身生物学特性等对其空间格局影响, 以期揭示秤锤树种群生存现状以及群落优势物种空间关系, 为原生分布区内秤锤树天然种群的保护提供理论依据。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

南京老山国家森林公园位于江苏省南京市西北郊, 118°30' E、30°40' N, 被誉为“南京绿肺”“江北明珠” (钟华瀚等, 2018), 目前是江苏省最大的国家森林公园。地貌属低山丘陵, 地处亚热带季

风气候区,冬冷夏热,四季分明,平均降雨量 1 106.5 mm,年平均温度 15.4 ℃,年极端气温最高 39.7 ℃,最低 -13.1 ℃,年平均降水量 1 106 mm,日照充足,雨量充沛。森林面积约 5 440.36 hm²,区域自然植被属次生发育的落叶阔叶与常绿阔叶混交林,以朴树(*Celtis sinensis*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、三角槭(*Acer buergerianum*)、榉树(*Zelkova serrata*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)与盐肤木(*Rhus chinensis*)等为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 在南京老山选取秤锤树天然种群主要分布区(图 1),设置 1 hm²的样地,以大样方西南角为坐标原点,南北方向为纵轴,东西方向为横轴,东西长 100 m,南北长 100 m,分成 400 个 5 m × 5 m 的小样方进行实地调研。调查森林群落信息:乔木层植物的物种名、主干编号、胸径、树高、冠幅、坐标;灌木层植物的物种名、高度、冠幅、盖度;草本层植物的物种名、盖度、高度。

1.2.2 重要值计算 分别计算乔木层和灌木层重要值(王世彤等,2018):

乔木重要值(%)=(相对多度+相对频度+相对显著度)/3;灌木重要值(%)=(相对多度+相对频度+相对盖度)/3;相对多度(%)=(某个种的株数/所有种的总株数)×100;相对频度(%)=(某个种的频度/所有种的频度)×100;相对显著度(%)=(某个种的胸高断面面积/所有种的胸高段面积之和)×100;相对盖度(%)=(某个种的盖度之和/所有种的盖度之和)×100。

1.2.3 种群径级划分 采用径级代替龄级的方法(金鑫等,2018;黄小等,2021),本研究结合样地内秤锤树径级特征,将秤锤树径级划分为 9 个径级:Ⅰ级 DBH<2 cm,Ⅱ级 2≤DBH<4 cm,Ⅲ级 4≤DBH<6 cm,Ⅳ级 6≤DBH<8 cm,Ⅴ级 8≤DBH<10 cm,Ⅵ级 10≤DBH<12 cm,Ⅶ级 12≤DBH<14 cm,Ⅷ级 14≤DBH<16 cm,Ⅸ级 DBH≥16 cm。

1.2.4 点格局分析 植物群落的分布格局与空间尺度关系紧密。本文点格局分析采用单变量 $g(r)$ 函数和双变量 $g_{12}(r)$ 函数进行分析。点格局分析通过 199 次 Monte Carlo 随机模拟,模拟 99% 的置信区间(Wiegand et al., 2006)并分别利用模拟的最大值和最小值生成上下两条包迹线,最大距离不超过样地较短边长的一半(张金屯,1998),本研究取 30 m。计算公式如下:

$$g(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{dk(r)}{dr}; g_{12}(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{dk_{12}(r)}{dr}。$$

式中: r 为空间尺度距离。单变量 $g(r)$ 函数中,当 $g(r)$ 值分别处于包迹线的上、内、下时,种群空间分布分别为聚集分布、随机分布、均匀分布;双变量 $g_{12}(r)$ 函数中,当 $g_{12}(r)$ 值分别处于包迹线的上、内、下时,种间关联性变现为正关联、无关联、负关联(张健等,2007;梁爽等,2014)。

1.2.5 零模型选择 空间格局由物种和环境共同作用形成,某一尺度下的空间格局由特定的原因形成,为了揭示生态学过程选择合适的零模型将有助于认识种群空间格局的内在特征(王鑫厅等,2012),本研究中单变量 $g(r)$ 函数采用完全随机模型(complete spatial randomness, CSR)和异质泊松模型(heterogeneous Poisson, HP);双变量 $g_{12}(r)$ 函数采用完全随机模型(CSR)和先决条件零模型(antecedent condition, AC)。CSR 是点格局中最常用最简单的模型,该模型中个体之间相互独立,且出现在研究范围内任何位置的几率相等。HP 和 AC 有排除环境异质性的优点,若在大于 10 m 尺度上呈聚集分布,可以解释为受环境异质性的影响(黄小等,2021);HP 和 AC 排除环境异质性后,若小尺度还是呈聚集分布,解释为受扩散限制影响。

本研究的数据处理是由 R 3.6.1 版本中的“spatstat”程序包(Baddeley & Turner, 2005)完成,使用 R 3.6.1 软件完成绘图。

2 结果与分析

2.1 秤锤树群落结构特征

由表 1 可知,乔木层中重要值(>1%)的物种共计 11 种,它们的相对密度和相对显著度之和所占的百分比分别为 89.46% 和 85.64%。重要值前五物种的相对密度和相对显著度之和所占的百分比分别为 61.77% 和 60.36%,表明这五个物种在整个样方中占主导地位。其中,朴树的数量、频度、显著度在整个样地中占绝对优势,说明朴树为该样地的优势种和建群种。虽然目标物种秤锤树在整个样地中数量较多,但频度和显著度较低,因此,呈聚集分布,其重要值在乔木层中靠前,是样地中的优势种。

取灌木层重要值前十的物种,朴树、八角枫与三角槭同样出现在乔木层重要值前十之中。灌木层中朴树数量、频度、盖度及重要值最大,在灌木

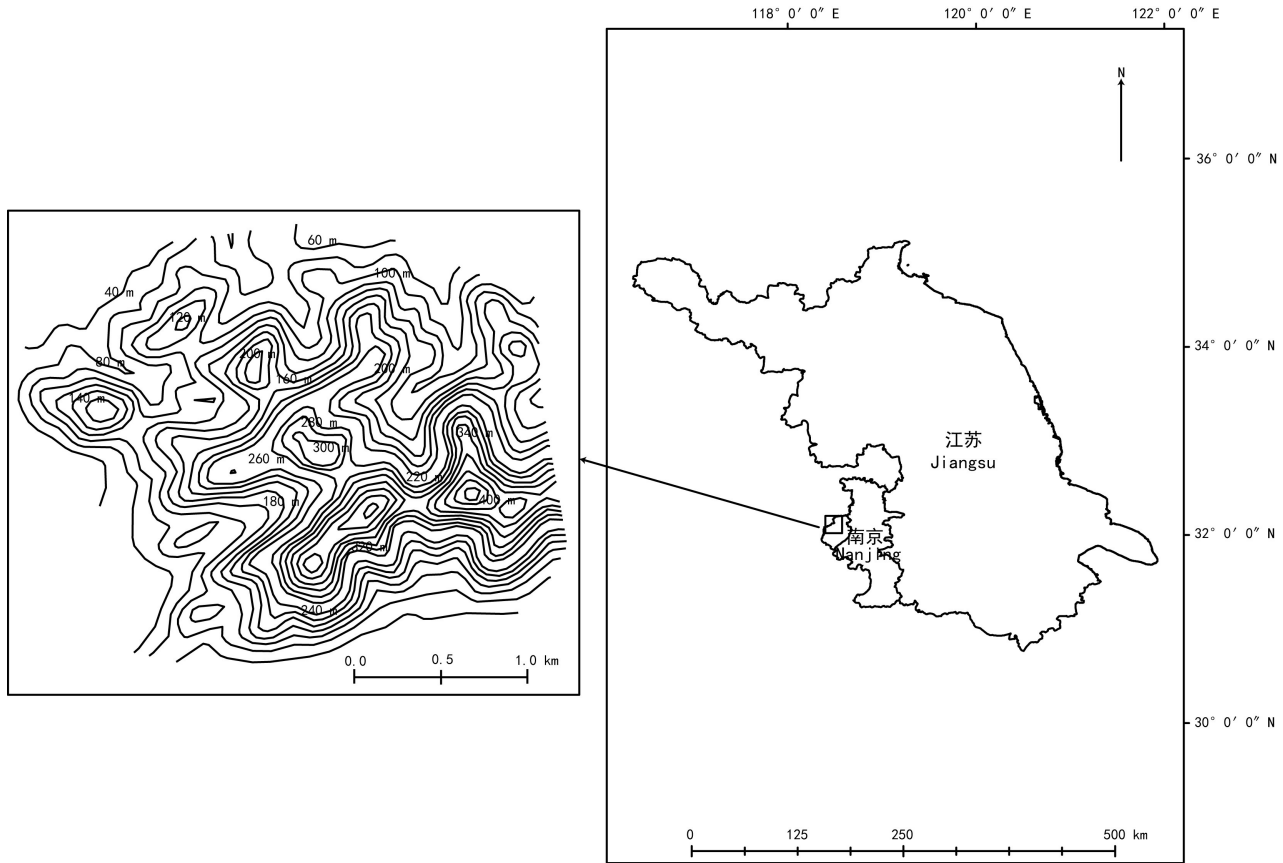


图 1 南京老山国家森林公园天然秤锤树种群分布位置

Fig. 1 Location of the natural population of *Sinojackia xylocarpa* in Laoshan Mountain National Forest Park of Nanjing

层中依旧占据绝对优势。相比之下乔木层的优势种黄连木和秤锤树在灌木层中的重要值表现很低,其中灌木层中的秤锤树相对数量和相对频度仅为 2.78% 和 1.81%,重要值为 1.53% (表 1)。秤锤树在乔木层与灌木层重要值的变化明显,表明灌木层中秤锤树的幼苗数量较少,种群的恢复与发展会受到其他物种竞争影响或环境变化影响。

2.2 径级分布

如图 2 的秤锤树胸径 (DBH) 统计所示,该秤锤树种群中乔木层秤锤树总量为 432 棵。其中:胸径在 $2 \leq \text{DBH} < 4$ cm 之间的个体数最多,为 199 棵,占比为 46.06%;胸径在 $4 \leq \text{DBH} < 6$ cm 之间的数量为 109 棵,占比为 25.23%。该样地中胸径大于 10 cm 的秤锤树仅有 7 棵,占比为 1.62%,其中最大的一棵胸径为 17.00 cm。样地中秤锤树多以小径木为主,径级分布呈现出“J”型,属于典型的成长型种群,还未达到种群稳定状态。

2.3 秤锤树空间分布

如图 3:A 所示,基于 CSR 模型,秤锤树在 0~26 m 尺度下为聚集分布,并且聚集程度逐渐下降,29~30 m 尺度下呈现均匀分布。如图 3:B 所示,基于 HP 模型,秤锤树在 0~23 m 尺度下为聚集分布,23~27 m 尺度下为随机分布,27~30 m 尺度下为均匀分布。通过 CSR 和 HP 模型对比,小尺度上都呈聚集分布,表明其空间分布受扩散限制影响。

图 2 表明秤锤树种群以小径木为主,因此,对胸径 $0 \text{ cm} < \text{DBH} < 6 \text{ cm}$ 的秤锤树进行空间分布分析,结果如图 4 所示。在 CSR 模型中,0~27 m 为聚集分布,27~29 m 为随机分布,29~30 m 为均匀分布。在 HP 模型中,0~23 m 为聚集分布,23~26 m 为随机分布,26~30 m 为均匀分布。小径秤锤树群体聚集分布为主要分布类型,由聚集分布向均匀分布变化。HP 模型下,随机分布与均匀分布尺度范围增加。

表 1 群落重要值

Table 1 Important values of communities

乔木层树种 Species in arborous layer	数量 Number	频度 Frequency	显著度 Significance	重要值 Important value (%)
朴树 <i>Celtis sinensis</i>	944	284	38 455.58	25.55
秤锤树 <i>Sinojackia xylocarpa</i>	432	60	6 823.29	9.00
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	148	104	18 130.30	6.30
三角槭 <i>Acer buergerianum</i>	83	42	2 441.80	2.90
梧桐 <i>Firmiana simplex</i>	59	45	6 449.59	2.65
楝木 <i>Cornus macrophylla</i>	59	44	4 473.39	2.61
八角枫 <i>Alangium chinense</i>	45	32	2 828.88	1.93
红柴枝 <i>Meliosma oldhamii</i>	49	28	2 843.46	1.84
杨树 <i>Populus simonii</i>	48	28	17 091.21	1.83
黄檀 <i>Dalbergia hupeana</i>	25	22	1 944.12	1.23
黄荆 <i>Vitex negundo</i>	35	16	1 097.09	1.16
灌木层树种 Species in shrub layer	数量 Number	频度 Frequency	盖度 Coverage	重要值 Important value (%)
朴树 <i>Celtis sinensis</i>	96	76	48.04	8.28
茶条槭 <i>Acer tataricum</i>	60	60	18.37	5.81
八角枫 <i>A. chinense</i>	64	52	45.50	5.59
老鸦柿 <i>Diospyros rhombifolia</i>	56	48	19.94	5.02
三角槭 <i>Acer buergerianum</i>	52	48	33.91	4.83
高粱泡 <i>Rubus lambertianus</i>	32	32	19.56	3.10
小蜡 <i>Ligustrum sinense</i>	32	32	5.78	3.10
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	28	28	9.20	2.71
毛茛 <i>Cornus walteri</i>	28	24	10.36	2.51
竹叶花椒 <i>Zanthoxylum armatum</i>	24	24	2.45	2.32
柘 <i>Maclura tricuspidata</i>	24	24	2.29	2.32
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	24	20	20.10	2.12
雀梅藤 <i>Sageretia thea</i>	16	16	3.05	1.55
秤锤树 <i>Sinojackia xylocarpa</i>	20	12	30.14	1.53

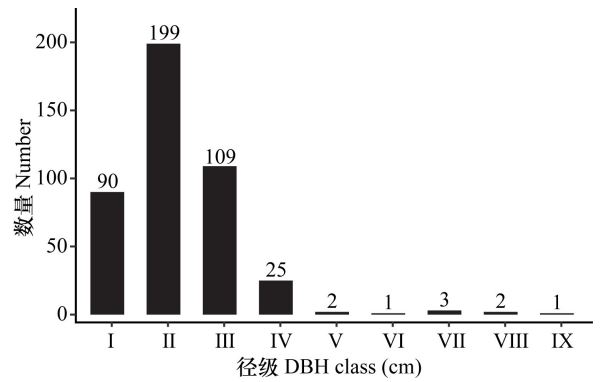


图 2 秤锤树径级结构

Fig. 2 DBH structure of *Sinojackia xylocarpa*

通过上述结果得到秤锤树小径木群体以及秤锤树种群分布趋势相似,均以聚集分布为主;HP模型下,小尺度上仍为聚集分布,随机分布与均匀分布尺度范围变大,空间分布受扩散限制影响。

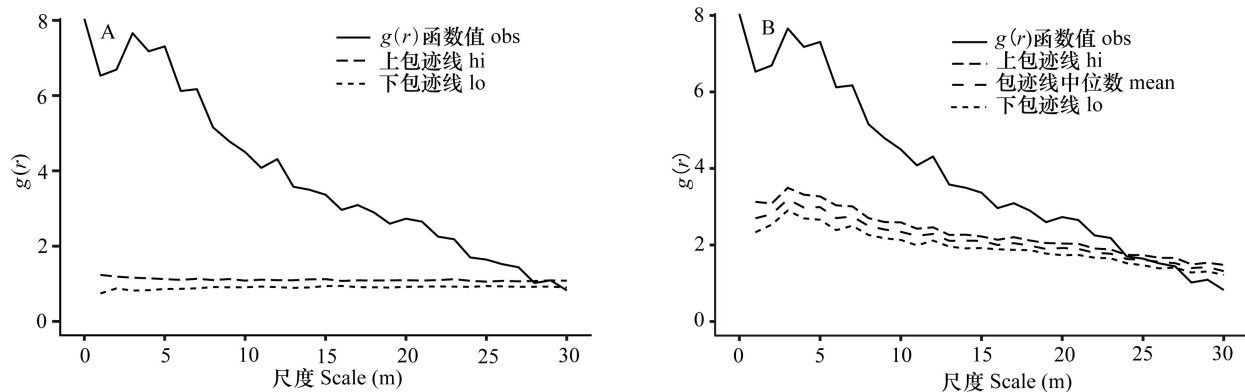
2.4 种间关联性

结果如图 5 所示,秤锤树种群主要分布于样方平缓地带,其中样地东部区域集中分布,西南区域零星分布,呈现出“条带”状;朴树、黄连木、三角槭在样地中均匀分布,其中朴树数量最多;梧桐数量最少,主要分布在样地的中部区域。

如图 6 所示,基于 CSR 模型,秤锤树与朴树在 1~12 m 尺度下呈负关联,在 15~30 m 尺度下正关联;秤锤树与黄连木在 6~7 m、11~30 m 尺度下呈正关联,其他尺度无关联;秤锤树与三角槭在 2~30 m 尺度下呈正关联;秤锤树与梧桐在 2~10 m 尺度下无关联,在 10~30 m 尺度下呈正关联。秤锤树与群落中优势物种关联性的共同点为在大尺度上表现出正关联。

如图 7 所示,基于 AC 模型消除环境异质性的情况下,秤锤树与朴树在 1~16 m 尺度下呈负关联,在 21~30 m 尺度下呈正关联;秤锤树与黄连木在 6~7 m、12~16 m、25~30 m 尺度下呈正关联,在其余尺度下无关联;秤锤树与三角槭在 15~16 m、26~30 m 尺度下正关联,在其余尺度下呈无关联;秤锤树与梧桐在 2~6 m 尺度下呈负关联,在 11~30 m 尺度下呈正关联。

AC 模型下,秤锤树分别与黄连木、三角槭以及梧桐的关联性显著变化,表现为正关联性减少,负关联性或无关联性增多;CSR 与 AC 两种模型下仅有秤锤树与朴树表现出强的负关联性。



A. 完全随机模型 (CSR); B. 异质泊松模型 (HP)。下同。

A. Complete spatial randomness (CSR); B. Heterogeneous Poisson (HP). The same below.

图3 秤锤树空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution pattern of *Sinojackia xylocarpa*

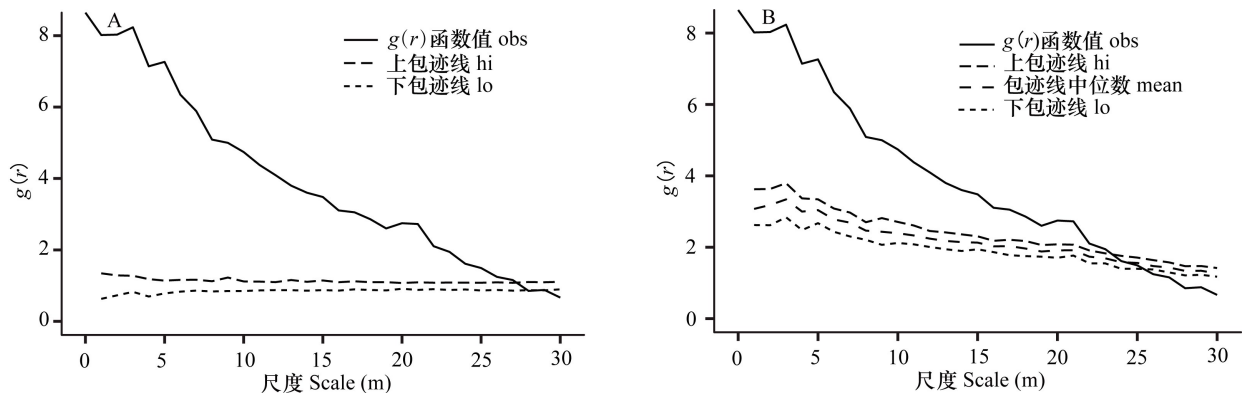


图4 胸径 0 cm < DBH < 6 cm 秤锤树空间分布格局

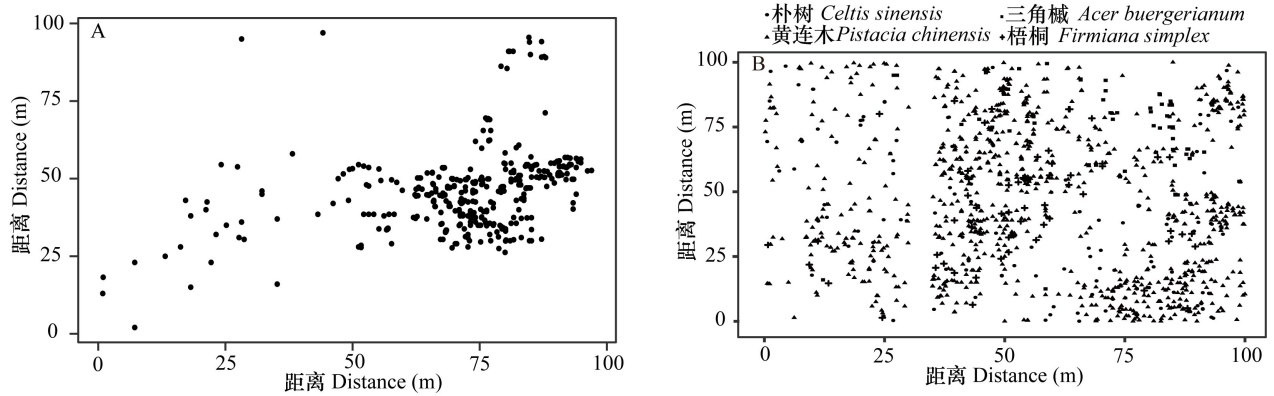
Fig. 4 Spatial distribution pattern of *Sinojackia xylocarpa* at 0 cm < DBH < 6 cm

3 讨论与结论

在自然环境下,种群的空间分布与自身生物学特性、种子扩散的限制 (Seidler & Plotkin, 2006)、密度制约 (王进等, 2019) 及环境因子 (黄小等, 2021) 等有关。基于 CSR 模型探究秤锤树空间分布格局, 结果表明秤锤树在 0~26 m 尺度下表现为聚集分布, 表明秤锤树分布受环境异质性影响。通过 HP 模型消除环境异质性后, 0~23 m 尺度下仍表现为聚集分布, 说明其空间分布受种子扩散传播限制。秤锤树种子具有数量多与重量大特点, 其在种子扩散时主要靠重力传播, 扩散限制使其种子会更多落在母株周围, 随着与母株的距离增加种子数量会减少, 因而在小尺度上表现出

聚集分布。聚集分布有利于发挥群体效应 (韩路等, 2007), 群体效应产生的庇护效果使秤锤树种群抵御其他物种的入侵, 使自身种群能够更好地发展, 向种群稳定阶段更好地过渡。随着种群的不断生长, 对资源和空间的需求不断增多, 密度制约使秤锤树种群内部竞争日益严重, 造成部分个体逐渐死亡, 因此, 秤锤树在 27~30 m 尺度上会表现出随机分布或均匀分布。由此可见, 老山地区的秤锤树空间分布主要受种子扩散限制和密度制约影响; 在就地与迁地保护中, 解除秤锤树种子扩散限制与人工疏苗有助于其种群分布区的扩张。

基于 CSR 与 AC 模型探究群落中优势物种的空间关联性, 正关联性是由于物种间相互依赖或者物种处于异质环境下, 对环境有相同的适应性 (金鑫等, 2018); 负关联则是由于物种间的竞争或

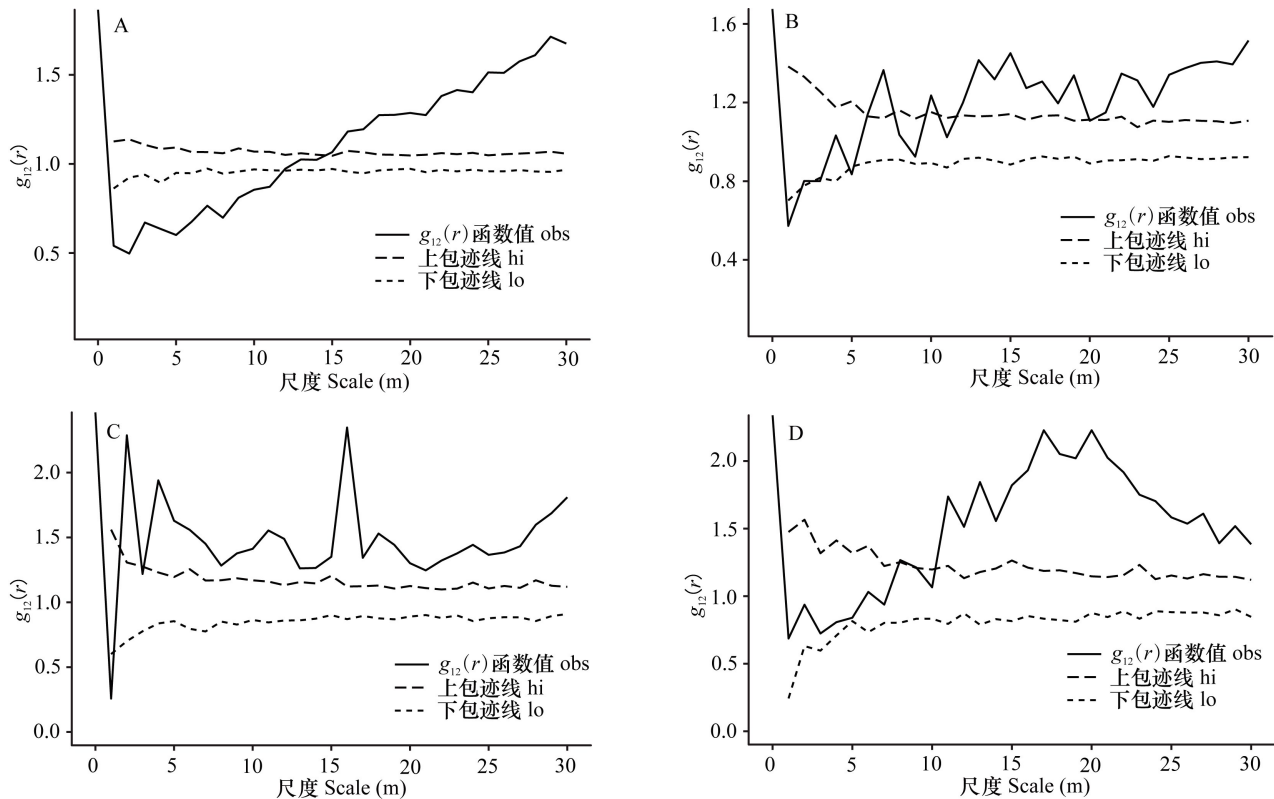


A. 秤锤树; B. 朴树-黄连木-三角槭-梧桐。

A. *Sinojackia xylocarpa*; B. *Celtis sinensis*-*Pistacia chinensis*-*Acer buergerianum*-*Firmiana simplex*.

图 5 群落中重要值前五物种分布图

Fig. 5 Scatter distribution patterns of top five species with importance value of community



A. 秤锤树-朴树; B. 秤锤树-黄连木; C. 秤锤树-三角槭; D. 秤锤树-梧桐。下同。

A. *Sinojackia xylocarpa*-*Celtis sinensis*; B. *Sinojackia xylocarpa*-*Pistacia chinensis*; C. *Sinojackia xylocarpa*-*Acer buergerianum*; D. *Sinojackia xylocarpa*-*Firmiana simplex*. The same below.

图 6 基于完全随机模型(CSR)的种间关联性

Fig. 6 Interspecific correlation based on complete spatial randomness (CSR)

者对于环境需求的差异造成的综合影响(Gray & He, 2009)。秤锤树与朴树的空间关联性, CSR 与

AC 模型在 1~12 m 尺度下都呈负关联, 解释为秤锤树受扩散限制影响在小尺度下的聚集分布产生

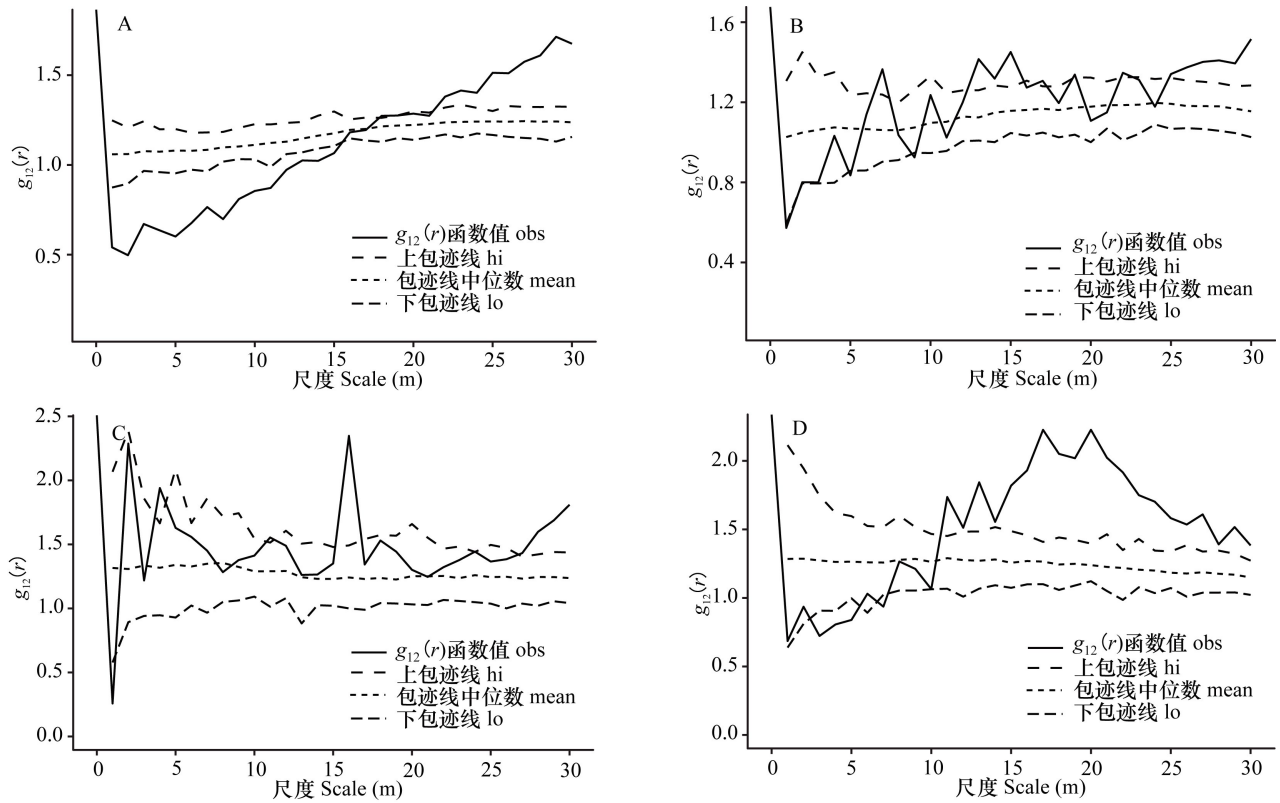


图7 基于先决条件零模型(AC)的种间关联性

Fig. 7 Interspecific correlation based on antecedent condition (AC)

“庇护效果”与朴树种群展开竞争；21~30 m 都表现为正关联性，可能因为两个种群发展到稳定阶段后两者对环境有相同的偏好；对0~30 m 整体尺度进行分析，结果揭示两者对环境资源需求存在相似性以及生态位的重叠，两者间的竞争会严重影响秤锤树种群演替。秤锤树与黄连木、秤锤树与三角槭的关联性在 CSR 与 AC 模型下变化明显，无关联急剧增加、正关联减少，说明两两之间竞争弱，生态位重叠很少。秤锤树与梧桐的关联性在两种模型中变化小，仍是在小尺度为无关联、大尺度为正关联，说明两者在小尺度上生态位重叠很少，大尺度上对环境需求的相似性。对群落优势物种的空间关联性研究中，仅有秤锤树与朴树在 CSR 和 AC 模型中负关联性明显，说明群落中优势度高的物种更加影响秤锤树种群的演替。

南京老山地区秤锤树天然种群分布样地中物种组成较丰富，种间分布密度差异大，群落中落叶树种优势明显，符合北亚热带地带性落叶阔叶林的特征。乔木层中朴树、黄连木、三角槭在整个样

方中均匀分布，朴树的种群数量远大于其他树种，朴树作为样地的优势种和建群种，一定程度上影响了秤锤树等种群的扩张。样地内秤锤树种群数量多但频度低，集中分布在样地的东部区域，由于处于人类干扰活动频繁区域，且秤锤树为生长速度较慢的灌木型树种，导致大径级植株数量少，而小径级种群比例极高。其种群结构表现为增长型种群结构，未达到稳定状态，在种间竞争与群落演替过程中容易受其他种群竞争和环境变化影响，对生存群落其他优势物种适当的干扰有助于秤锤树种群的演替与发展。

综上所述，南京老山国家森林公园秤锤树种群目前以低幼龄树为主，种群结构处于增长阶段，在整个群落中多为聚集分布，其主要受种间竞争、扩散限制与密度制约因素的影响。通过人工种子扩散以及人工疏苗等方法，解除秤锤树种子扩散与密度限制，维持与适当干扰其生存植物群落，开展就地保护与迁地保护等措施，可以有效地促进秤锤树天然种群的保护、恢复与扩张。

参考文献:

- BADDELEY A, TURNER R, 2005. Spatstat: an R package for analyzing spatial point patterns [J]. *J Statist Software*, 12(1): 1-42.
- CHEN Q, CHEN J, ZHONG JJ, et al., 2018. Interspecific association and functional group classification of the dominant populations in shrub layer in secondary forest of *Pinus tabuliformis* in Qinling Mountain, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 29(6): 1736-1744. [陈倩, 陈杰, 钟娇娇, 等, 2018. 秦岭山地油松天然次生林灌木层主要种群种间联结性与功能群划分 [J]. *应用生态学报*, 29(6): 1736-1744.]
- CHEN RB, ZHANG GF, LIU J, et al., 2015. Endangerment grade and protection priority of rare plant species in Baohuashan National Forest Park, Jiangsu Province [J]. *J Ecol Rural Environ*, 31(2): 174-179. [陈瑞冰, 张光富, 刘娟, 等, 2015. 江苏宝华山国家森林公园珍稀植物的濒危等级及优先保护 [J]. *生态与农村环境学报*, 31(2): 174-179.]
- CONDIT R, ASHTON PS, BAKER P, et al., 2000. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species [J]. *Science*, 288: 1414-1418.
- GONG ZW, GU L, KANG XG, et al., 2010. Spatial pattern of forests during secondary succession in Changbai Mountain, northeastern China [J]. *J Beijing For Univ*, 32(2): 92-99. [龚直文, 顾丽, 亢新刚, 等, 2010. 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*, 32(2): 92-99.]
- GRAY L, HE FL, 2009. Spatial point-pattern analysis for detecting density-dependent competition in a boreal chronosequence of Alberta [J]. *For Ecol Manag*, 259(1): 98-106.
- GUO YL, WANG B, XIANG WS, et al., 2015. Spatial distribution of tree species in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China [J]. *Biodivers Sci*, 23(2): 183-191. [郭屹立, 王斌, 向悟生, 等, 2015. 广西弄岗北热带喀斯特季节性雨林监测样地种群空间格局分析 [J]. *生物多样性*, 23(2): 183-191.]
- HAN L, WANG HZ, PENG J, et al., 2007. Spatial distribution patterns and dynamics of major population in *Populus euphratica* forest in upper reaches of Tarim River [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 27(8): 1668-1673. [韩路, 王海珍, 彭杰, 等, 2007. 塔里木河上游天然胡杨林种群空间分布格局与动态研究 [J]. *西北植物学报*, 27(8): 1668-1673.]
- HAO RM, HUANG ZY, LIU XJ, et al., 2000. The natural distribution and characteristics of the rare and endangered plants in Jiangsu, China [J]. *Biodivers Sci*, 8(2): 153-162. [郝日明, 黄致远, 刘兴剑, 等, 2000. 中国珍稀濒危保护植物在江苏省的自然分布及其特点 [J]. *生物多样性*, 8(2): 153-162.]
- HE ZL, XU H, QIN XS, et al., 2017. Spatial distribution patterns and association of two Apocynaceae plants in the tropical mountain rainforests of Jianfengling, Hainan Island, China [J]. *Biodivers Sci*, 25(10): 1065-1074. [何增丽, 许涵, 秦新生, 等, 2017. 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*, 25(10): 1065-1074.]
- HOU XY, HAN JX, 1997. Simulation analysis of spatial patterns of main species in the Korean-pine broadleaved forest in Changbai Mountain [J]. *Chin J Plant Ecol*, 21(3): 47-54. [侯向阳, 韩进轩, 1997. 长白山红松林主要树种空间格局的模拟分析 [J]. *植物生态学报*, 21(3): 47-54.]
- HU M, ZENG SQ, LONG SS, 2019. Spatial distribution patterns and associations of the main tree species in *Cyclobalanopsis glauca* secondary forest [J]. *J Cent S Univ Technol*, 39(6): 66-71. [胡满, 曾思齐, 龙时胜, 2019. 青冈栎次生林主要树种空间分布格局及其关联性研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 39(6): 66-71.]
- HUANG X, ZHU J, YAO L, et al., 2020. The structure and spatial distribution pattern of native *Metasequia glaytostroboides* population [J]. *Biodivers Sci*, 40(1): 1-12. [黄小, 朱江, 姚兰, 等, 2020. 水杉原生种群结构及空间分布格局 [J]. *生物多样性*, 40(1): 1-12.]
- HUANG X, YAO L, AI XR, et al., 2021. Spatial distribution pattern and association of two species of the *Litsea* in largeplot in Mulinzi Nature Reserve [J]. *Guihaia*, 41(8): 1333-1345. [黄小, 姚兰, 艾训儒, 等, 2021. 木林子大样地两个木姜子属物种空间分布格局及关联性 [J]. *广西植物*, 41(8): 1333-1345.]
- JIA SG, SHEN YB, 2007. Research progress on *Sinojackia xylocarpa* Hu [J]. *J Jiangsu For Sci Tcehnol*, 34(6): 41-45. [贾书果, 沈永宝, 2007. 秤锤树的研究进展 [J]. *江苏林业科技*, 34(6): 41-45.]
- JIN X, ZHANG QD, XU Q, et al., 2018. Population distribution patterns and interspecific spatial associations of *Acanthopanax senticosus* populations in Lingkong Mountain, Shanxi Province, China [J]. *Plant Sci J*, 36(3): 327-335. [金鑫, 张钦弟, 许强, 等, 2018. 山西灵空山刺五加种群空间分布格局及种间空间关联性 [J]. *植物科学学报*, 36(3): 327-335.]
- LAN GY, GETZIN S, WIEGAND T, et al., 2012. Spatial distribution and interspecific associations of tree species in a tropical seasonal rain forest of China [J]. *PLoS ONE*, 7(9): e46074.
- LIANG S, XU H, LIN JY, et al., 2014. Spatial distribution pattern of the dominant species *Gironniera subaequalis* in tropical montane rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 38(12): 1273-1282. [梁爽, 许涵, 林家怡, 等, 2014. 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*, 38(12):

- 1273-1282.]
- MCINTIRE EJB, FAJARDO A, 2009. Beyond description: the active and effective way to infer processes from spatial patterns [J]. *Ecology*, 90(1): 46-56.
- SEIDLER TG, PLOTKIN JB, 2006. Seed dispersal and spatial pattern in tropical trees [J]. *Plos Biol*, 4(11): 2132-2137.
- VELÁZQUEZ E, MARTÍNEZ I, GETZIN S, et al., 2016. An evaluation of the state of spatial point pattern analysis in ecology [J]. *Ecography*, 39(11): 1042-1055.
- WANG J, AI XR, ZHU J, et al., 2019. Population structure and spatial distribution pattern of dominant species *Eurya alata* in Mulinzi Nature Reserve, Hubei Province [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 39(11): 2053-2063. [王进, 艾训儒, 朱江, 等, 2019. 木林子保护区优势种翅柃种群结构与空间分布格局 [J]. *西北植物学报*, 39(11): 2053-2063.]
- WANG ST, WU H, LIU MT, et al., 2018. Community structure and dynamics of a remnant forest dominated by a plant species with extremely small population (*Sinojackia huangmeiensis*) in central China [J]. *Biodivers Sci*, 26(7): 749-759. [王世彤, 吴浩, 刘梦婷, 等, 2018. 极小种群野生植物黄梅秤锤树群落结构与动态 [J]. *生物多样性*, 26(7): 749-759.]
- WANG XT, HOU YL, LIANG CZ, et al., 2012. Point pattern analysis based on different null models for detecting spatial patterns [J]. *Biodivers Sci*, 20(2): 151-158. [王鑫厅, 侯亚丽, 梁存柱, 等, 2012. 基于不同零模型的点格局分析 [J]. *生物多样性*, 20(2): 151-158.]
- WANG YF, QU MX, LAN HY, et al., 2020. Spatial pattern and interspecific correlation of dominant population in Spruce-fir-Koren pine forest [J]. *J Centr S Univ For Tcehnol*, 40(1): 49-58. [王亚飞, 曲美学, 兰航宇, 等, 2020. 云冷杉红松林内优势种群的空间格局及种间关联性 [J]. *中南林业科技大学学报*, 40(1): 49-58.]
- WIEGAND T, KISSLING WD, CIPRIOTTI PA, et al., 2006. Extending point pattern analysis for objects of finite size and irregular shape [J]. *J Ecol*, 94(4): 825-837.
- YANG GD, JI XY, CHEN L, et al., 2018. Spatial distribution and environmental interpretation of wild *Sinojackia xylocarpa* communities based on self-organizing map (SOM) [J]. *Biodivers Sci*, 26(12): 1268-1276. [杨国栋, 季芯悦, 陈林, 等, 2018. 基于SOM的野生秤锤树群落的空间分布和环境解释 [J]. *生物多样性*, 26(12): 1268-1276.]
- ZHANG J, HAO ZQ, SONG B, et al., 2007. Spatial distribution patterns and associations of *Pinus koraiensis* and *Tilia amurensis* in broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains [J]. *Chin J Appl Ecol*, 18(8): 1681-1687. [张健, 郝占庆, 宋波, 等, 2007. 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*, 18(8): 1681-1687.]
- ZHANG JT, 1998. Analysis of spatial point patterns for plant species [J]. *Chin J Plant Ecol*, 22(4): 57-62. [张金屯, 1998. 植物种群空间分布的点格局分析 [J]. *植物生态学报*, 22(4): 57-62.]
- ZHONG HH, HU RT, YUAN LF, et al., 2018. Analysis on the alternation of butterfly diversity in Laoshan National Forest Park [J]. *J Jiangsu For Sci Technol*, 45(6): 34-38. [钟华瀚, 胡润涛, 袁李飞, 等, 2018. 老山国家森林公园蝴蝶物种调查及分析 [J]. *江苏林业科技*, 45(6): 34-38.]
- ZHOU SX, PENG YS, GAO PX, et al., 2019. Spatial pattern and association of main species in endangered plant *Sinojackia rehderiana* community [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 27(4): 349-358. [周赛霞, 彭焱松, 高浦新, 等, 2019. 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 [J]. *热带亚热带植物学报*, 27(4): 349-358.]

(责任编辑 周翠鸣)