



百花山油松人工林动态监测样地物种组成与群落结构

程瑞明 许格希 贾磊 丁易 房子怡 谢博 赵震 刘璐静 李黛青

Species composition and community structure for a dynamic monitoring plot of *Pinus tabuliformis* plantation in Baihua Mountain of Beijing

Cheng Ruiming, Xu Gexi, Jia Lei, Ding Yi, Fang Ziyi, Xie Bo, Zhao Zhen, Liu Lujing, Li Daiqing

引用本文:

程瑞明, 许格希, 贾磊, 丁易, 房子怡, 谢博, 赵震, 刘璐静, 李黛青. 百花山油松人工林动态监测样地物种组成与群落结构[J]. *北京林业大学学报*, 2025, 47(8):101–110. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250024

Cheng Ruiming, Xu Gexi, Jia Lei, Ding Yi, Fang Ziyi, Xie Bo, Zhao Zhen, Liu Lujing, Li Daiqing. Species composition and community structure for a dynamic monitoring plot of *Pinus tabuliformis* plantation in Baihua Mountain of Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2025, 47(8):101–110. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250024

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京百花山落叶阔叶林群落内木本植物的叶片功能性状变异特征

Variation characteristics in leaf functional traits of woody plants in deciduous broadleaved forest community in Baihua Mountain of Beijing

北京林业大学学报, 2024, 46(4): 40–51. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220462>

北京油松人工林遗传结构变异及与山西山系种群差异分析

Genetic structure variation of *Pinus tabuliformis* plantations in Beijing and the differences with Shanxi mountain populations

北京林业大学学报, 2020, 42(6): 33–42. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190399>

降雨减少对油松人工林凋落叶分解的影响

Effects of rainfall reduction on litter leaf decomposition of *Pinus tabuliformis* plantation

北京林业大学学报, 2020, 42(7): 68–76. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190211>

不同经营方式对油松成熟人工林生长和植物多样性的影响

Effects of different management methods on growth and plant diversity in mature *Pinus tabuliformis* plantations

北京林业大学学报, 2023, 45(12): 1–10. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220302>

气候变化对我国油松人工林适生区分布的影响

Effects of climate change on distribution of suitable area of *Pinus tabuliformis* plantation in China

北京林业大学学报, 2024, 46(6): 82–92. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230072>

晋西黄土区油松人工林密度和立地对细根特征的影响

Influence of density and site on fine root characteristics of *Pinus tabuliformis* plantations in loess area of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2024, 46(10): 22–32. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230282>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20250024

百花山油松人工林动态监测样地物种组成与群落结构

程瑞明¹ 许格希¹ 贾磊¹ 丁易¹ 房子怡¹ 谢博²
赵震² 刘璐静² 李黛青³

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;
2. 北京市百花山国家级自然保护区管理处, 北京 102311; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要:【目的】通过监测油松种群和群落动态, 为华北地区人工林质量提升和生物多样性研究提供基础数据支持。【方法】以北京百花山自然保护区油松林为研究对象, 选择 50 年生人工林建立 5.2 hm² 动态监测样地, 参考中国森林生物多样性监测网络的统一标准, 对样地内胸径 ≥ 1 cm 的所有木本植物进行了挂牌、调查和统计, 分析样地内木本植物的物种区系、径级组成及空间分布格局。【结果】样地内胸径 ≥ 1 cm 的木本植物共计 9 242 株, 其中活立木 7 145 株, 隶属 15 科 22 属 23 种。其中, 66.66% 的科和 63.64% 的属具有温带植物区系的特点。有 5 个物种的重要值 $> 5%$, 分别为油松、槲栎、黑桦、土庄绣线菊和华北落叶松, 其重要值总和 95.44%, 稀有种和偶见种分别有 8 种和 10 种。优势种的种群空间分布格局以聚集分布为主。【结论】百花山油松人工林动态监测样地物种多样性较高, 油松自疏过程为其他先锋树种提供生态位, 导致群落优势种群空间分布呈聚集模式。本研究为后续开展油松人工林质量精准提升和多样性维持机制研究提供本底数据支撑。

关键词: 油松人工林; 森林动态样地; 径级分布; 空间格局; 北京百花山

中图分类号: S791.254 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)08-0101-10

引文格式: 程瑞明, 许格希, 贾磊, 等. 百花山油松人工林动态监测样地物种组成与群落结构 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(8): 101-110. Cheng Ruiming, Xu Gexi, Jia Lei, et al. Species composition and community structure for a dynamic monitoring plot of *Pinus tabulaeformis* plantation in Baihua Mountain of Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(8): 101-110.

Species composition and community structure for a dynamic monitoring plot of *Pinus tabulaeformis* plantation in Baihua Mountain of Beijing

Cheng Ruiming¹ Xu Gexi¹ Jia Lei¹ Ding Yi¹ Fang Ziyi¹ Xie Bo²
Zhao Zhen² Liu Lujing² Li Daiqing³

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Management Bureau of Beijing Baihuashan National Nature Reserve, Beijing 102311, China;
3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: [Objective] By monitoring the dynamics of *Pinus tabulaeformis* populations and their associated communities, we aim to provide foundational data that will support improvements in plantation quality and advance biodiversity research across North China. [Method] This paper focuses on *P. tabulaeformis* forest in the Beijing Baihua Mountain Nature Reserve, where a 5.2 ha dynamic monitoring plot was established in a 50-year-old plantation. All woody plants with DBH ≥ 1 cm in the plot were tagged, surveyed, and

收稿日期: 2025-01-21 修回日期: 2025-07-09

基金项目: 北京市自然科学基金项目(5212019)。

第一作者: 程瑞明。主要研究方向: 森林动态监测。Email: ruiming_cheng@163.com 地址: 100091 北京市海淀区东小府 2 号。

责任作者: 刘璐静, 工程师。主要研究方向: 森林资源管理。Email: pamela0724@126.com 地址: 102311 北京市门头沟区清水镇百花山路张家铺段 102 号院。李黛青, 副研究员。主要研究方向: 生态环境监测。Email: ldq@rcees.ac.cn 地址: 100085 北京市海淀区双清路 18 号。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

inventoried following the standards of China Forest Biodiversity Monitoring Network. The study analyzed the floristic compositions, diameter class structures, and spatial distribution patterns of woody plant species in the plot. [Result] A total of 9 242 individuals with DBH \geq 1 cm were recorded in the plot, including 7 145 living trees which belong to 15 families, 22 genera and 23 species. The floristic composition of these species exhibited typical characteristics of temperate flora, with 66.66% of the families and 63.64% of the genera possessing temperate components. Five species had importance values $>$ 5%, namely *P. tabuliformis*, *Quercus dentata*, *Betula davurica*, *Spiraea ouensanensis*, and *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*, which took account for 95.44% of the overall importance values. The number of rare and accidental species was 8 and 10, respectively. The spatial distribution patterns of dominant species were primarily aggregated. [Conclusion] Species diversity is relatively high for *P. tabuliformis* plantation dynamic plot in the Baihua Mountain. The self-thinning process of *P. tabuliformis* provides niches for other pioneer tree species, which resulting in spatial aggregated patterns of dominant populations in the community. This study provides baseline data for future research on precision improvement in quality and the mechanisms that sustain biodiversity in *P. tabuliformis* plantations.

Key words: *Pinus tabuliformis* plantation; forest dynamic plot; diameter class distribution; spatial pattern; Baihua Mountain of Beijing

森林生态系统是陆地生态系统最大的碳库,根据最新研究,森林维持着全球约70%的植被碳库^[1]和约40%的土壤碳库^[2]。人工林是森林资源重要的组成部分,在生态环境恢复和社会经济发展中发挥着巨大作用。第九次森林资源清查^[3]显示我国人工林面积为 6.93×10^7 hm²,位居世界人工林面积之首;蓄积量为 24.83×10^8 m³,占全国森林蓄积量的17%。然而,随着人工林面积扩张和林分持续生长,一系列问题逐渐显现。例如,木材质量下降、病虫害加剧、地力衰退、生物多样性下降以及生态功能单一等^[4-5]。

森林群落的物种组成和结构是森林群落动态演替^[6]、生物多样性^[7]及生态服务功能^[8-9]等研究的基础。空间尺度是群落生态学研究中的重要内容之一,群落物种组成和结构会随着空间尺度的变化而改变。小尺度研究难以准确揭示物种分布规律^[10]、生态关系^[11]及森林碳储量^[12]等问题。大规模森林样地为探索多尺度上的物种组成、群落结构与分布格局提供了可能。2000年以来,国内外建立起的森林长期监测样地,为了解森林生态系统结构与功能及其演变提供了理想平台^[13-14]。例如,我国在海南热带雨林建立了60 hm²长期动态监测样地、浙江百山祖建立了25 hm²亚热带常绿阔叶林动态监测样地以及秦岭地区建立25 hm²落叶阔叶林森林动态监测样地等,在研究生态系统物种共存及其生态学驱动机制等方面取得了系列成果^[15-17]。

然而,当前大多数森林动态监测样地更多地关注天然林,而对人工林动态监测研究较少。随着气候变化和人类干扰,了解人工林内的群落组成变化和树种相关关系,对于进一步分析环境变化背景下

的人工林动态及其韧性具有重要的意义。油松(*Pinus tabuliformis*)是中国特有物种,因其耐寒、抗旱、耐瘠薄等特性,已成为我国北方地区主要的造林和用材树种。同时,油松在维持生物多样性、水源涵养以及固碳增汇等生态系统功能等方面发挥着重要作用^[18]。然而,至今少有较大面积油松的动态监测研究^[13]。

北京百花山国家级自然保护区分布大面积的油松人工林^[19]。本研究团队于2024年8月开始在该保护区按照中国森林生物多样性监测网络的统一标准,建设5.2 hm²油松人工林动态监测样地。研究物种组成、区系成分、径级分布和空间格局分布,以期了解华北油松人工林的物种组成、群落结构、更新和演替规律提供科学依据,也为未来华北地区实现碳达峰-碳中和提供研究平台。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

百花山自然保护区(39°48'~40°05'N, 115°25'~115°42'E)位于北京市门头沟境内,保护区大部分区域海拔在750~2 200 m之间。该地区属于温带大陆性季风气候区,春季干旱,风沙盛行,夏季温热多雨,秋季晴朗少风,寒暖适中但雨量偏少,冬季寒冷多风且干燥。研究区年降水量在450~720 mm,多集中于夏季,夏季降水量约占全年的74%;年平均温度6~7℃,最热月是7月份,最冷月是1月份;全年无霜期110 d左右;土壤类型以草甸土、棕壤、褐土为主^[19-20]。

研究区是典型的暖温带落叶阔叶林,由于长期

人为破坏, 目前多为人工林或采伐后天然恢复的次生林。天然次生林优势种主要为白桦(*Betula platyphylla*)、黑桦(*Betula davurica*)、槲树(*Quercus dentata*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)等, 人工林以华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)和油松为主^[21]。

1.2 样地树种调查方法

在北京百花山马栏林场选择 50 年生(1975 年造林, 初植密度为 1 500 株/hm²)的油松人工林, 参照全球森林地球观测体系(<https://forestgeo.si.edu/>)和中国森林生物多样性监测网络的统一标准进行样地建设。林相特征为单层针叶纯林。森林动态样地以坐标(39°54'02"N, 115°41'12"E)为起点, 设置 1 个东西长 260 m、南北宽 200 m 的油松人工林长期固定监测样地。利用千寻 RTK 系统将整个动态监测样地划分为 130 个 20 m × 20 m 的样方, 每个样方的 4 个角均用标志桩固定, 并在每个标志桩的西面和南面挂铝牌, 标示样方编号。将每个 20 m × 20 m 的样方细分成 16 个 5 m × 5 m 的小样方, 对小样方内 DBH ≥ 1 cm 的木本植物在树高 1.3 m 处涂油漆标记, 再使用铝牌对每个油漆标记的木本植物个体进行编号。调查记录所有挂牌树种(乔木、灌木、木质藤本植物、枯立木、倒木)的物种种类、胸径、树高、冠幅、分枝和萌生状况以及生长状态, 同时测量并记录每个个体在样方内的相对坐标。对未达到起测胸径的木本植物幼苗及草本植物进行物种调查。

1.3 数据分析方法

根据调查数据分析物种组成, 参考国家植物标本资源库在线共享平台《中国植物物种名录》(<https://www.cvh.ac.cn>), 对动态监测样地内所有 DBH ≥ 1 cm 的木本植物物种及其组成进行统计分析。同时计算样地中物种的相对频度、相对多度和相对胸高断面面积, 进而计算出物种的重要值^[22]。参照 Hubbell 等^[23]对稀有种和偶见种的定义, 对样地内的物种进行划分, 将每公顷平均个体数(I) ≤ 1 的物种定义为稀有种, 将每公顷平均个体数 $1 < I \leq 10$ 的物种定义为偶见种。参考世界种子植物科分布区类型^[24]和中国种子植物属的分布区类型^[25], 开展样地群落的植物区系分析。

样地内优势物种空间分布格局采用点格局分析方法^[26]。选取单变量双关联函数 $g(r)$ (r 表示空间尺度), 以完全空间随机(complete spatial randomness, CSR)模型为零模型, 研究样地内优势种群的空间分布格局。该方法假设每个个体在空间中任一位置出现的概率相同, 并且其分布不受任何生物或非生物

过程影响。通过使用 199 次蒙特卡洛随机模拟计算得到 95% 的置信区间。如果种群的空间分布显著偏离零模型, 则可以根据 $g(r)$ 的值判断其分布类型: 当 $g(r) > 1$ 时, 则认为该种群为聚集分布; 当 $g(r) < 1$ 时, 该种群为均匀分布; 当 $g(r) = 1$ 时, 该种群为完全随机分布^[27]。

采用软件 R 4.3.3 完成数据分析^[28], Origin 2019 进行图形绘制, 点格局分析基于 R 语言程序包“spatstat”完成。

2 结果与分析

2.1 物种组成特征

北京百花山油松人工林动态监测样地中, DBH ≥ 1 cm 的木本植物共记录 9 242 株, 包括活立木 7 145 株(主干树 6 424 株, 萌生树 721 株)及枯损木 2 097 株(枯立木 1 464 株, 枯倒木 633 株)。按 20 m × 20 m 的样方统计, 活立木平均 55 株/样方, 变幅 37 ~ 97 株。

样地中记录到的木本植物隶属于 15 科 22 属 23 种。其中, 常绿树种油松为优势树种, 同时也是样地中的常见种, 活立木 5 210 株, 平均胸径为 22.32 cm (表 1)。样地中其他常见种还包括落叶乔木树种槲树(545 株)、华北落叶松(375 株), 黑桦(352 株)以及落叶灌木树种土庄绣线菊(*Spiraea ouensanensis*, 483 株)。样地中稀有物种有刺榆(*Hemiptelea davidii*)、宽叶槲(*Tilia platyphyllos*)各 3 株, 刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、黑弹树(*Celtis bungeana*)、蒙桑(*Morus mongolica*)、黄栌(*Cotinus coggygria* var. *cinereus*)、毛樱桃(*Prunus tomentosa*)和叶底珠(*Flueggea suffruticosa*)等分别仅记录到了 1 株。

样地中裸子植物包含 1 科 2 属 2 种, 分别为油松和华北落叶松, 共计 5 585 株, 两种裸子植物活立木占样地活立木总数 78.17%。被子植物有 14 科 20 属 21 种。其中, 木樨科和桦木科植物种类最多, 木樨科包含流苏树(*Chionanthus retusus*)、暴马丁香(*Syringa reticulata* subsp. *amurensis*)、小叶栎(*Fraxinus bungeana*)。桦木科包含榛(*Corylus heterophylla*)、黑桦和白桦。

针对林下木本植物幼苗调查发现, 人工林林下幼苗以油松为主, 达 200 ~ 500 株/hm², 这些幼苗多为一二年生, 多年生幼苗或幼树相对较少。草本调查发现, 该群落草本层以东亚唐松草(*Thalictrum minus* var. *hypoleucum*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、穿龙薯蓣(*Dioscorea nipponica*)、蛇莓(*Duchesnea indica*)、华北耧斗菜(*Aquilegia yabeana*)、升麻(*Actaea cimicifuga*)为主, 这些草本植物在样地中分

表1 百花山油松人工林动态监测样地物种组成

Tab. 1 Species composition in the dynamic monitoring plot of *P. tabuliformis* plantation in Baihua Mountain

种名	科	属	生活型	生长型	多度	平均胸径/cm	胸高断面积/(m ² ·hm ⁻²)
油松 <i>P. tabuliformis</i>	松科 Pinaceae	松属 <i>Pinus</i>	常绿	乔木	5 210	22.32	216.90
槲树 <i>Q. dentata</i>	壳斗科 Fagaceae	栎属 <i>Quercus</i>	落叶	乔木	545	10.88	7.08
土庄绣线菊 <i>S. ouensanensis</i>	蔷薇科 Rosaceae	绣线菊属 <i>Spiraea</i>	落叶	灌木	483	1.90	0.22
华北落叶松 <i>L. gmelinii</i> var. <i>principis-rupprechtii</i>	松科 Pinaceae	落叶松属 <i>Larix</i>	落叶	乔木	375	21.47	14.67
黑桦 <i>B. davurica</i>	桦木科 Betulaceae	桦木属 <i>Betula</i>	落叶	乔木	352	17.48	9.56
金银忍冬 <i>Lonicera maackii</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	忍冬属 <i>Lonicera</i>	落叶	灌木	36	2.38	0.02
小叶栲 <i>F. bungeana</i>	木樨科 Oleaceae	栲属 <i>Fraxinus</i>	落叶	小乔木	24	3.37	0.03
溲疏 <i>Deutzia scabra</i>	绣球科 Hydrangeaceae	溲疏属 <i>Deutzia</i>	落叶	灌木	21	1.79	0.005 5
山梅花 <i>Philadelphus incanus</i>	绣球科 Hydrangeaceae	山梅花属 <i>Philadelphus</i>	落叶	灌木	19	2.13	0.01
流苏树 <i>C. retusus</i>	木樨科 Oleaceae	流苏树属 <i>Chionanthus</i>	落叶	乔木	16	2.09	0.005 9
白桦 <i>B. platyphylla</i>	桦木科 Betulaceae	桦木属 <i>Betula</i>	落叶	乔木	15	16.10	0.34
六道木 <i>Zabelia biflora</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	六道木属 <i>Zabelia</i>	落叶	灌木	14	2.41	0.007 5
榛 <i>C. heterophylla</i>	桦木科 Betulaceae	榛属 <i>Corylus</i>	落叶	灌木	10	2.07	0.003 6
黄花柳 <i>S. caprea</i>	杨柳科 Salicaceae	柳属 <i>Salix</i>	落叶	小乔木	7	4.23	0.01
暴马丁香 <i>S. reticulata</i> subsp. <i>amurensis</i>	木樨科 Oleaceae	丁香属 <i>Syringa</i>	落叶	乔木	6	3.95	0.009 2
刺榆 <i>H. davidii</i>	榆科 Ulmaceae	刺榆属 <i>Hemiptelea</i>	落叶	乔木	3	6.47	0.02
宽叶槲 <i>T. platyphyllos</i>	锦葵科 Malvaceae	槲属 <i>Tilia</i>	落叶	乔木	3	11.70	0.04
蒙桑 <i>M. mongolica</i>	桑科 Moraceae	桑属 <i>Morus</i>	落叶	灌木	1	13.40	0.01
黄栌 <i>C. coggygia</i> var. <i>cinereus</i>	漆树科 Anacardiaceae	黄栌属 <i>Cotinus</i>	落叶	灌木	1	2.00	0.000 3
黑弹树 <i>C. bungeana</i>	大麻科 Cannabaceae	朴属 <i>Celtis</i>	落叶	乔木	1	13.20	0.01
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	豆科 Fabaceae	刺槐属 <i>Robinia</i>	落叶	乔木	1	43.10	0.14
毛樱桃 <i>P. tomentosa</i>	蔷薇科 Rosaceae	李属 <i>Prunus</i>	落叶	灌木	1	3.25	0.000 8
叶底珠 <i>F. suffruticosa</i>	叶下珠科 Phyllanthaceae	白饭树属 <i>Flueggea</i>	落叶	小乔木	1	20.30	0.03

布极不均匀,多集中在光线较好的林窗以及土壤含水率相对较高的局域洼地。

2.2 物种优势度

表2显示:样地中重要值前10的物种重要值总和为98.36%。重要值>10%的物种包括油松和槲树,重要值分别为62.40%和10.50%。重要值在1%到10%之间的物种有黑桦、土庄绣线菊和华北落叶松,值分别为9.07%、7.80%和5.67%。后5种物种重要值最大值为0.80%,最小值为0.28%,这5种物种重要值总和为2.93%(表2)。

2.3 区系构成

从科、属地理分布区系成分划分结果可以看出(表3),百花山样地23种种子植物科级区系以北温带分布(66.66%)为主,代表科有壳斗科、榆科、松科等。其次是泛热带分布(26.67%)。同样地,属的分布区类型以北温带为主(63.64%),代表属如桦木属、栎属等;另外东亚和北美洲间断分布的属占13.64%,代表属有丁香属和刺槐属。

2.4 物种数与样方数、多度对数的关系

当动态样地样方数在50个(取样面积2 hm²)以下时,物种数目随动态样方数量的增加急剧增加;当样方数到110个(取样面积4.4 hm²)时,共发现21个物种,物种个体数达到5 878株;当样方数进一步提高到125个(取样面积5 hm²)时,23个物种全部出现(图1a)。随着物种数增加,物种多度对数呈下降趋势(图1b)。

2.5 径级结构

百花山油松人工林动态样地内存活的木本植物(DBH ≥ 1 cm)平均胸径为19.33 cm(范围1~46 cm)。径级分布呈先下降后急剧升高的趋势,主要集中在10~30 cm区间(占总数79.20%)(图2),各径级对应的物种科、属、种组成见表4。

根据重要值发现,油松、槲树、黑桦和土庄绣线菊4个物种重要值总计89.77%,株数6 590株,占总活立木的92.23%,是样地中优势种或建群种。油松活立木5 210株,占总活立木的72.92%,其径级分布

表 2 百花山油松人工林动态监测样地物种重要值排名

Tab. 2 Ranking of species importance values in the dynamic monitoring plot of *P. tabuliformis* plantation in Baihua Mountain

种名	相对多度/%	相对优势度/%	相对胸高断面面积/%	重要值/%
油松 <i>P. tabuliformis</i>	72.90	27.30	87.10	62.40
槲树 <i>Q. dentata</i>	7.63	21.00	2.84	10.50
黑桦 <i>B. davurica</i>	4.93	18.40	3.84	9.07
土庄绣线菊 <i>S. ouensanensis</i>	6.76	16.60	0.09	7.80
华北落叶松 <i>L. gmelinii</i> var. <i>principis-rupprechtii</i>	5.25	5.87	5.89	5.67
金银忍冬 <i>L. maackii</i>	0.50	1.89	0.01	0.80
白桦 <i>B. platyphylla</i>	0.21	1.89	0.14	0.75
小叶栎 <i>F. bungeana</i>	0.34	1.89	0.01	0.74
流苏树 <i>C. retusus</i>	0.22	0.84	0.00	0.36
六道木 <i>Z. biflora</i>	0.20	0.63	0.00	0.28
其他 Others	1.06	3.69	0.08	1.63
合计	100	100	100	100

表 3 百花山油松人工林动态监测样地科、属的区系类型统计

Tab. 3 Statistics of flora types of families and genera in the dynamic monitoring plot of *P. tabuliformis* plantation in Baihua Mountain

区系类型	科的数量	科占比/%	属的数量	属占比/%
1. 世界分布	1	6.67	1	4.54
2. 泛热带分布	4	26.67	2	9.09
8. 北温带分布	7	46.66	14	63.64
8-4. 北温带和南温带间断分布	3	20.00	0	0.00
9. 东亚和北美洲间断分布	0	0.00	3	13.64
14. 东亚分布	0	0.00	2	9.09
合计	15	100	22	100

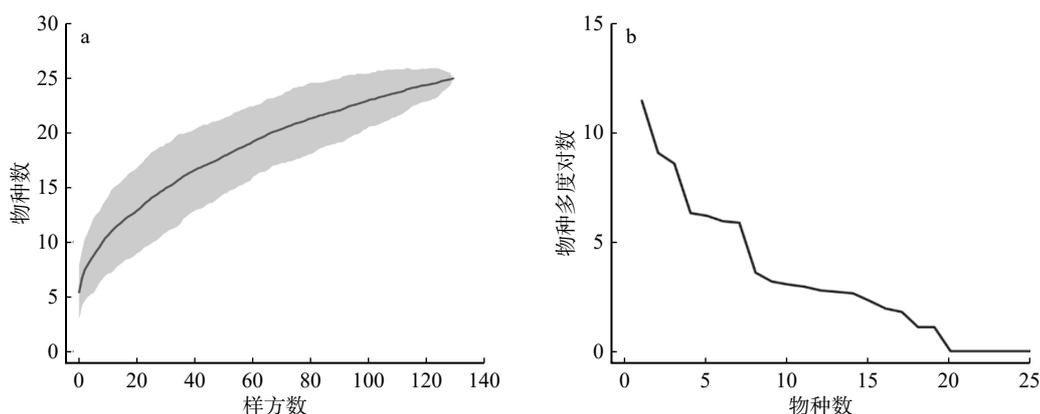


图 1 油松人工林动态监测样地物种数量与样方和物种多度的关系

Fig. 1 Relationship between species quantity, quadrat and species abundance in the dynamic monitoring plot of *P. tabuliformis* plantation

呈单峰分布, 10~30 cm 胸径的植株最多, 占油松活立木总数 90.67%(图 3a)。槲树活立木株数为 545 株, 占活立木总数的 7.63%, 径级分布呈现缓升急降的趋势, 胸径 10~20 cm 的植株最多(214 株), 占槲树活立木总数的 39.45%(图 3b)。黑桦活立木 352 株, 占样地活立木的 4.93%, 径级集中分布在 10~

30 cm(311 株, 图 3c)。土庄绣线菊为落叶灌木(483 株), 径级分布呈明显的倒“J”型, 胸径在 1~2.5 cm 的个体占 91.10%(图 3d)。

2.6 优势种的空间分布

根据优势种在动态样地中的相对坐标, 绘制优势种的空间分布格局。进而得到油松密度为 1 002 株/

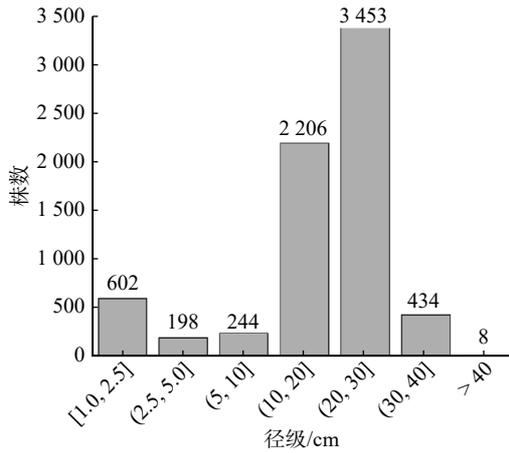


图2 百花山油松人工林动态监测样地木本植物存活个体的径级分布

Fig. 2 Diameter class distribution of woody plant surviving individuals in the dynamic monitoring plot of *P. tabuliformis* plantation in Baihua Mountain

hm², 在样地中分布较为均匀(图4a), 但也出现了一些林窗。槲树密度为105株/hm², 主要分布在油松形成的林窗内(图4b)。黑桦和土庄绣线菊零散分布在油松林中, 两者密度分别为68株/hm²和93株/hm²(图4c、d)。

不同物种在不同空间尺度上表现出不同的空间分布格局(图5)。槲树、黑桦和土庄绣线菊在几乎所

表4 百花山油松人工林动态监测样地不同起测胸径木本植物存活个体及其科属种的数量

Tab. 4 Number of surviving individuals and their families, genera, and species of woody plants with different start measuring DBH in the dynamic monitoring plot of *P. tabuliformis* plantation in Baihua Mountain

胸径/cm	个体数量	种数	属数	科数
≥ 1.0	7 145	23	22	15
> 2.5	6 543	21	20	14
> 5	6 345	16	15	13
> 10	6 101	14	13	12
> 20	3 895	8	7	6
> 30	442	5	5	4
> 40	8	4	4	3

有的尺度上都表现为显著的聚集分布格局(图5a、b、c)。油松在小尺度上表现为均匀分布, 而在4 m以上尺度表现为聚集分布(图5d)。

3 讨论

3.1 群落物种组成与结构特征

北京百花山国家级自然保护区5.2 hm²油松动态样地属于典型的温带常绿针叶人工林, 其密度为

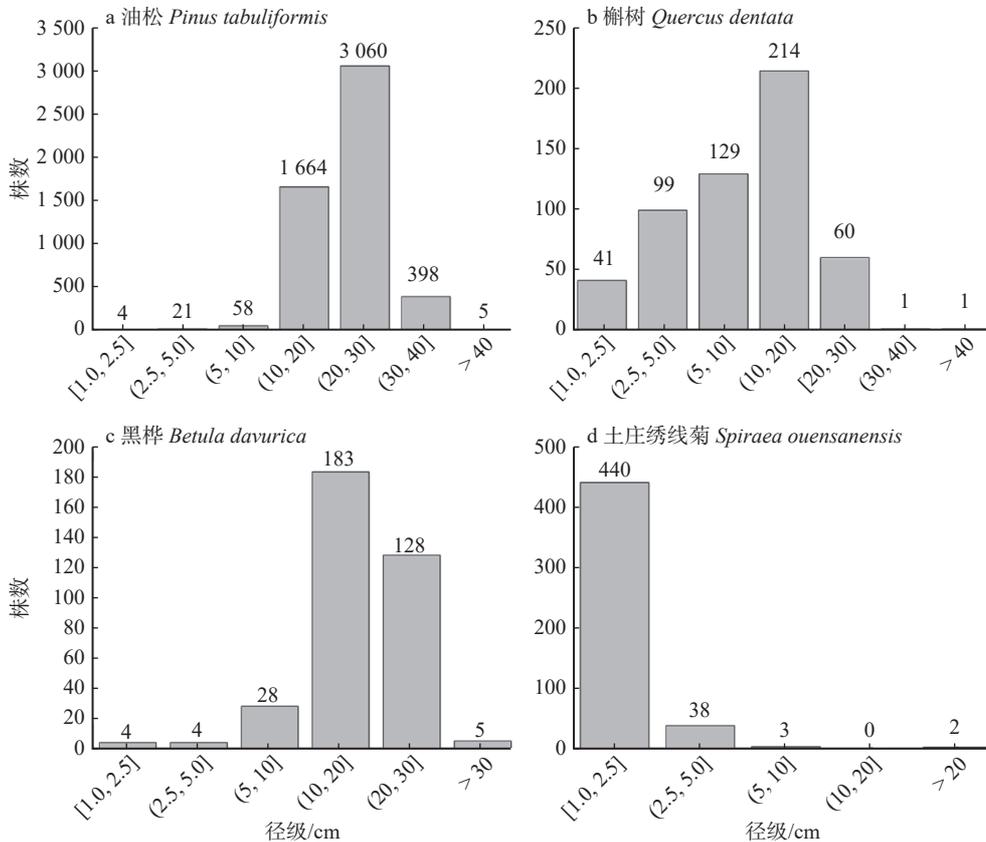


图3 百花山油松人工林动态监测样地4个优势种的径级分布

Fig. 3 Diameter class distribution of four dominant species for the dynamic plot of *P. tabuliformis* plantation in Baihua Mountain

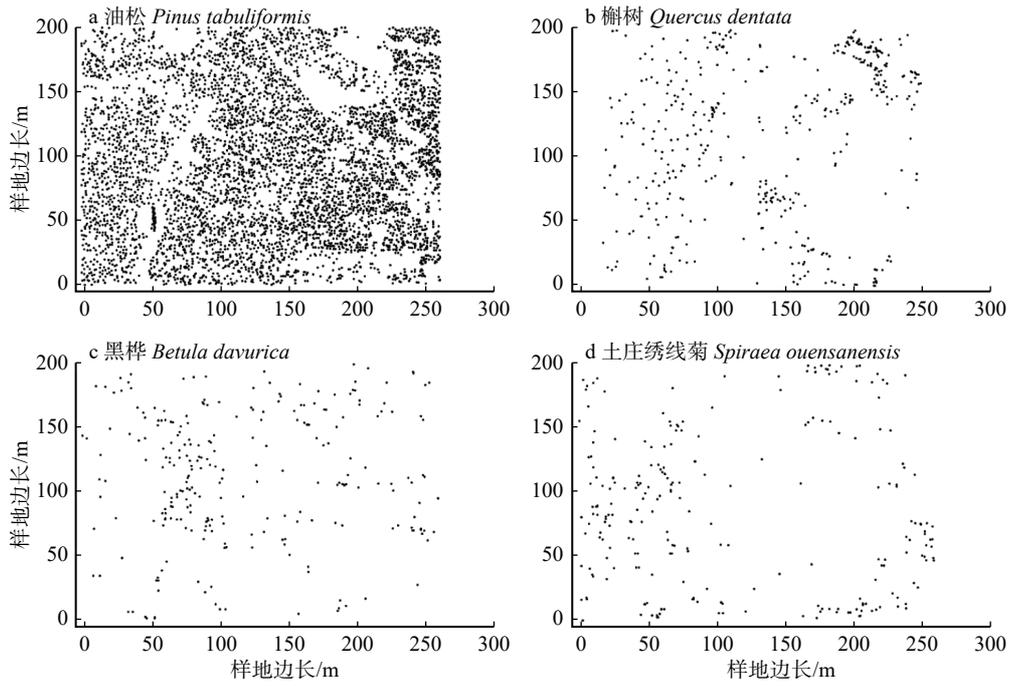
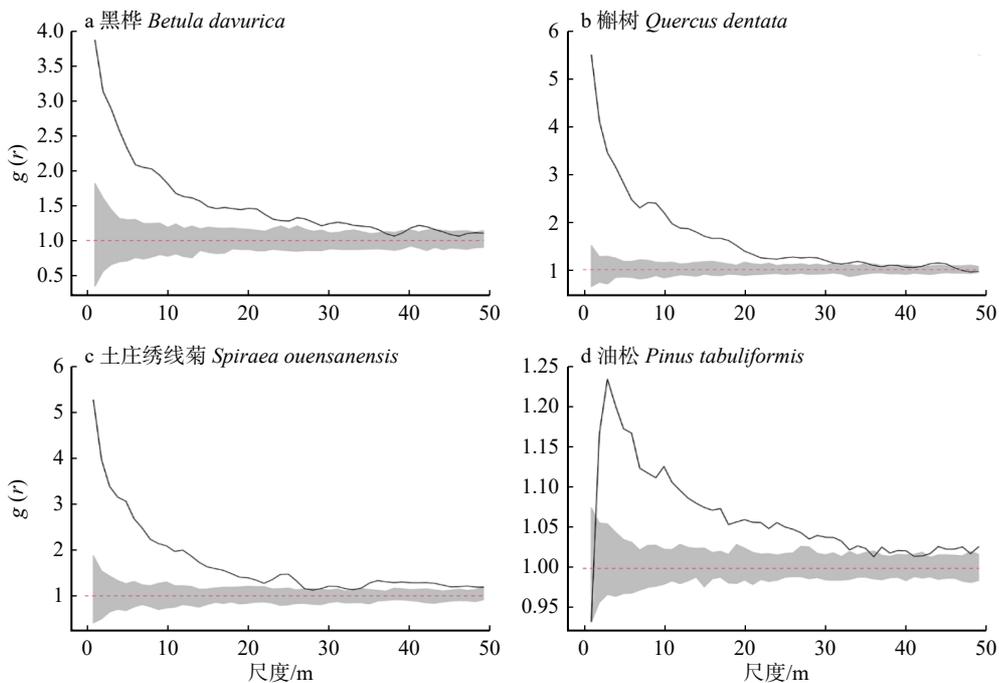


图 4 百花山油松人工林动态监测样地 4 个优势种的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of four dominant species for the dynamic plot of *P. tabulaeformis* plantation in Baihua Mountain

1 002 株/hm², 平均胸径 22.32 cm, 林分断面积为 216.90 m²/hm²。本次调查共记录了木本植物 15 科 22 属 23 种, 与同地区类似研究结果一致^[29]。相比较于海南霸王岭热带山地雨林 6 hm² 样地(包含木本植物 79 科 215 属 407 种)^[10]、四川米亚罗亚高山暗针

叶林 9.6 hm² 样地(14 科 20 属 32 种)^[30]和吉林张广才岭温带次生针阔混交林 21.84 hm² 样地(18 科 27 属 45 种)^[31], 百花山油松人工林样地物种多样性属于中等水平。从物种多度和重要值来看, 油松树种占有绝对的优势, 符合油松人工林的分布特性。槲



$g(r)$ 为单变量双关联函数。黑色实线表示 $g(r)$ 在相应尺度上的观测值, 红色虚线表示 $g(r)$ 在 CSR 零模型下的期望值, 灰色阴影区域为 95% 置信区间。

图 5 百花山油松人工林动态监测样地 4 个优势种在完全随机模型下的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of four dominant species for the dynamic plot of *P. tabulaeformis* plantation in Baihua Mountain under completely random models

树、黑桦、土庄绣线菊和华北落叶松是当地的乡土植物,同时也是样地中的常见种,重要值总和为33.04%,表明油松自然死亡形成的林窗为先锋树种以及林下灌丛提供了生态位。

3.2 区系组成特征

植物区系组成是植物在特定的自然历史条件下,经过长期演变形成的结果,反映植物群落的稳定性和对当地气候的适应能力^[25]。百花山油松人工林地处于暖温带,样地中66.66%科和63.64%属具温带区系特征(表3),表明温带成分为主要优势。这与吉林张广才岭温带次生针阔混交林(木本植物温带属占88.89%)以及四川米亚罗亚高山暗针叶林样地(木本植物温带属占85.00%)相似^[30-31]。另外,在百花山国家级自然保护区范围内的东灵山暖温带落叶阔叶次生林动态监测样地中发现,木本植物科和属均以温带成分为主(8科30属,分别占科属总数的44.44%和93.75%)^[32]。以上均表明百花山油松人工林样地温带特征明显,是典型的温带森林。

3.3 群落径级结构与物种空间分布格局

研究样地内木本植物的径级分布呈先下降后上升再下降趋势。DBH在1.0~2.5 cm范围内时,植株数量最多,这可能是由于自然稀疏等因素导致出现了一些较大的林窗,促进林下以土庄绣线菊为优势种的灌木快速生长。油松、槲树和黑桦3种乔木树种的径级均呈单峰分布,但灌木物种土庄绣线菊径级分布呈倒“J”型。这可能是由于本研究未对该种径级作进一步细分,如细分则可能出现单峰模式^[17]。当前群落未来较长阶段仍以油松为优势种,但槲树和黑桦也将逐渐演变成群落建群种。最终,以油松为优势种的针叶纯林将逐渐过渡为以油松、槲树和黑桦为建群种的针阔混交林^[19]。

物种个体空间分布格局分析有助于理解植物群落构建机制^[10-11]。本研究对样地内4个优势种进行空间分布格局分析,发现除油松在4 m小尺度表现为均匀分布外,其他所有的尺度物种均表现为聚集格局,但随尺度增加,聚集程度下降。槲树、黑桦和土庄绣线菊在小尺度上均表现为显著的聚集分布,这是植物群落最常见的分布格局^[33]。这种聚集分布可能与种子的扩散方式有关,种子通常优先落在母株附近,且种子数量随着与母株距离的增大而减少^[34]。另外,生境过滤也是聚集分布的重要驱动因子。成年个体的分布格局较为稳定,其周边的环境适合该种群生存,从而导致了物种在小尺度上的聚集^[17]。与主要靠种子繁殖的油松不同,槲树、黑桦和土庄绣线菊还具有萌蘖繁殖方式,即个体可以拥有多个萌生枝,这也是小尺度形成聚集分布的一个原因^[33]。

4 结 论

本研究基于北京百花山国家级自然保护区5.2 hm²油松人工林动样地(DBH ≥ 1 cm 木本植物)数据,分析了样地的物种组成、区系特征、径级分布和优势物种的空间分布格局。(1)油松人工林物种组成相对简单,但油松自然死亡形成的林窗为槲树、黑桦与土庄绣线菊等先锋树种和灌木物种提供生态位,形成较丰富的物种多样性。(2)样地植物区系具有典型的温带植物区系特点,温带成分科和属分别占总科属数量的66.66%和63.64%。(3)样地中优势种径级分布多呈单峰状,优势种的种群空间分布多呈聚集分布格局。研究表明该样地为长期研究华北温带典型人工林恢复过程中生物多样性的变化格局与未来的生态系统功能演化提供重要的研究平台。

参 考 文 献

- [1] Xu L, Saatchi S S, Yang Y, et al. Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century[J]. *Science Advances*, 2021, 7(27): eabe9829.
- [2] Georgiou K, Jackson R B, Vindušková O, et al. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 3797.
- [3] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014—2018)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
National Forestry and Grassland Administration. China forest resources report (2014—2018)[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019.
- [4] 臧颢, 黄锦程, 刘洪生, 等. 杉木人工林碳汇木材多功能经营的最优轮伐期[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(10): 120-128.
Zang H, Huang J C, Liu H S, et al. Optimal rotation period of carbon sequestration wood multifunctional management in Chinese fir plantation[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(10): 120-128.
- [5] Kremer K, Jonsson B G, Dutta T, et al. Single-vs mixed-species plantations: a systematic review on the effects on biodiversity[J]. *Biological Conservation*, 2025, 307: 111182.
- [6] Szefer P, Molem K, Sau A, et al. Impact of pathogenic fungi, herbivores and predators on secondary succession of tropical rainforest vegetation[J]. *Journal of Ecology*, 2020, 108(5): 1978-1988.
- [7] 孙越, 王清玉, 刘志宇, 等. 长白山区3种类型天然次生林乔木层物种组成和群落结构特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(4): 743-749.
Sun Y, Wang Q Y, Liu Z Y, et al. Tree species composition and community structure of the arbor layer of three types of natural secondary forests in Changbai Mountain area[J]. *Chinese Journal*

- of Applied and Environmental Biology, 2024, 30(4): 743–749.
- [8] Liu Y, Hu J, Gore J. Ecosystem stability relies on diversity difference between trophic levels[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121(50): e2416740121.
- [9] Govaert L, Hendry A P, Fattahi F, et al. Quantifying interspecific and intraspecific diversity effects on ecosystem functioning[J]. *Ecology*, 2024, 105(1): e4199.
- [10] 姚杰, 丁易, 黄继红, 等. 海南霸王岭热带山地雨林 6 hm² 森林动态监测样地物种组成与群落特征 [J]. 陆地生态系统与保护学报, 2023, 3(3): 1–12.
- Yao J, Ding Y, Huang J H, et al. Species composition and community characteristics of a 6 ha forest dynamics plot in tropical mountain rainforest, Bawangling, Hainan Island, South China[J]. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2023, 3(3): 1–12.
- [11] Mori A S, Isbell F, Cadotte M W. Assessing the importance of species and their assemblages for the biodiversity-ecosystem multifunctionality relationship[J]. *Ecology*, 2023, 104(8): e4104.
- [12] Bar-On Y M, Li X, O’Sullivan M, et al. Recent gains in global terrestrial carbon stocks are mostly stored in nonliving pools[J]. *Science*, 2025, 387(6740): 1291–1295.
- [13] 马克平. 大型固定样地: 森林生物多样性定位研究的平台 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 237.
- Ma K P. Large scale permanent plots: important platform for long term research on biodiversity in forest ecosystem[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(2): 237.
- [14] 马克平. 监测是评估生物多样性保护进展的有效途径 [J]. 生物多样性, 2011, 19(2): 125–126.
- Ma K P. Assessing progress of biodiversity conservation with monitoring approach[J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(2): 125–126.
- [15] 石佳竹, 许涵, 李艳朋, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林 60 hm² 大样地幼苗物种组成及数量特征 [J]. 林业科学, 2024, 60(9): 33–40.
- Shi J Z, Xu H, Li Y P, et al. Species composition and quantitative characteristics of seedlings in a 60 ha plot in the tropical mountain rainforest in Jianfengling, Hainan Island[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, 60(9): 33–40.
- [16] 刘啸林, 吴友贵, 张敏华, 等. 浙江百山祖 25 ha 亚热带森林动态监测样地群落组成与结构特征 [J]. 生物多样性, 2024, 32(2): 25–35.
- Liu X L, Wu Y G, Zhang M H, et al. Community composition and structure of a 25-ha forest dynamics plot of subtropical forest in Baishanzu, Zhejiang Province[J]. *Biodiversity Science*, 2024, 32(2): 25–35.
- [17] 谢峰淋, 周全, 史航, 等. 秦岭落叶阔叶林 25 ha 森林动态监测样地物种组成与群落特征 [J]. 生物多样性, 2019, 27(4): 439–448.
- Xie F L, Zhou Q, Shi H, et al. Species composition and community characteristics of a 25 ha forest dynamics plot in deciduous broadleaved forest, Qinling Mountains, north-central China[J]. *Biodiversity Science*, 2019, 27(4): 439–448.
- [18] 毛军, 王立平, 高永龙, 等. 北京八达岭林场人工林生态服务功能评估 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2024, 60(2): 224–232.
- Mao J, Wang L P, Gao Y L, et al. Evaluating plantation ecosystem services at Beijing Badaling National Forest Farm[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2024, 60(2): 224–232.
- [19] 郑景明, 赵秀海, 张春雨. 北京百花山森林群落的结构多样性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 7–11.
- Zheng J M, Zhao X H, Zhang C Y. Structural diversity of forest community in Baihuashan Mountain, Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(1): 7–11.
- [20] 邢韶华, 赵勃, 崔国发, 等. 北京百花山草甸优势种的种间关联性分析 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 46–51.
- Xing S H, Zhao B, Cui G F, et al. Inter-specific association of dominant species in Baihua Mountain Meadow of Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(3): 46–51.
- [21] 张丽谦, 韩海荣, 刘利, 等. 山地森林生态脆弱性评价指标体系构建与应用: 以北京百花山自然保护区为例 [J]. 林草资源研究, 2011(1): 67–71.
- Zhang L Q, Han H R, Liu L, et al. Construction and application of the ecological vulnerability assessment indicator system of montane forest: a case study in Baihua Mountains[J]. *Forest and Grassland Resources Research*, 2011(1): 67–71.
- [22] Linares-Palomino R, Alvarez S I P. Tree community patterns in seasonally dry tropical forests in the Cerros de Amotape Cordillera, Tumbes, Peru[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 209(3): 261–272.
- [23] Hubbell S P, Foster R B. Short-term dynamics of a neotropical forest: why ecological research matters to tropical conservation and management[J]. *Oikos*, 1992, 63(1): 48–61.
- [24] 吴征镒, 周浙昆, 李德铎, 等. 世界种子植物科的分布区类型系统 [J]. 云南植物研究, 2003, 25(3): 245–257.
- Wu Z Y, Zhou Z K, Li D Z, et al. The areal-types of the world families of seed plants[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2003, 25(3): 245–257.
- [25] 吴征镒. 中国种子植物属的分布区类型 [J]. 云南植物研究, 1991, 13(S4): 1–139.
- Wu Z Y. The areal-types of Chinese genera of seed plants[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1991, 13(S4): 1–139.
- [26] Illian J, Penttinen A, Stoyan H, et al. Statistical analysis and modelling of spatial point patterns[M]. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [27] Wiegand T, Moloney K J O A. Rings, circles, and null - models for point pattern analysis in ecology[J]. *Oikos*, 2004, 104(2): 209–229.

- [28] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing[EB/OL]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2023. <https://www.R-project.org/>.
- [29] 李利平, 邢韶华, 赵勃, 等. 北京山区不同区域油松林植物多样性比较研究 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(4): 12–16.
Li L P, Xing S H, Zhao B, et al. Comparative analysis of plant diversity of *Pinus tabulaeformis* forests in ten regions of Beijing mountainous areas[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(4): 12–16.
- [30] 赵广东, 陈健, 许格希, 等. 川西米亚罗亚高山暗针叶林动态样地物种组成与群落结构 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3501–3511.
Zhao G D, Chen J, Xu G X, et al. Species composition and community structure of Miyaluo subalpine dark coniferous forest dynamic plot in western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11): 3501–3511.
- [31] 孙越, 夏富才, 赵秀海, 等. 张广才岭温带次生针阔混交林物种组成和群落结构特征 [J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3425–3436.
Sun Y, Xia F C, Zhao X H, et al. The composition and community structure of coniferous and broadleaved mixed forest species in the Zhangguangcai Mountains, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): 3425–3436.
- [32] 刘海丰, 李亮, 桑卫国. 东灵山暖温带落叶阔叶次生林动态监测样地: 物种组成与群落结构 [J]. 生物多样性, 2011, 19(2): 232–242.
Liu H F, Li L, Sang W G. Species composition and community structure of the Donglingshan forest dynamic plot in a warm temperate deciduous broad-leaved secondary forest, China[J]. Biodiversity Science, 2011, 19(2): 232–242.
- [33] 祝燕, 白帆, 刘海丰, 等. 北京暖温带次生林种群分布格局与种间空间关联性 [J]. 生物多样性, 2011, 19(2): 252–259.
Zhu Y, Bai F, Liu H F, et al. Population distribution patterns and interspecific spatial associations in warm temperate secondary forests, Beijing[J]. Biodiversity Science, 2011, 19(2): 252–259.
- [34] 戴冬, 邢华, 杨佳绒, 等. 植物群落稀有种维持机制与土壤反馈的研究进展 [J]. 生物多样性, 2021, 29(12): 1687–1699.
Dai D, Xing H, Yang J R, et al. Advances in mechanisms of rare species maintenance and plant-soil feedback in plant communities[J]. Biodiversity Science, 2021, 29(12): 1687–1699.

(责任编辑 孟瑶 李 契
责任编辑委 臧润国)