北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

城市森林结构与木本植物物种多样性的耦合关系

郭嘉欣 马冰倩 郭璇 徐宇沛 李阳 谢仁天 徐程扬

Coupling relationship between urban forest structure and woody plant species diversity: a case study of Beijing

Guo Jiaxin, Ma Bingqian, Guo Xuan, Xu Yupei, Li Yang, Xie Rentian, Xu Chengyang

引用本文:
郭嘉欣, 马冰倩, 郭璇, 徐宇沛, 李阳, 谢仁天, 徐程扬. 城市森林结构与木本植物物种多样性的耦合关系[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(7):41–49. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240434
Guo Jiaxin, Ma Bingqian, Guo Xuan, Xu Yupei, Li Yang, Xie Rentian, Xu Chengyang. Coupling relationship between urban forest structure and woody plant species diversity: a case study of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7):41–49. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240434

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240434

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

青海省东北部森林林下物种多样性的驱动因素
Driving factors of understory species diversity in forest on the northeastern Qinghai Province of northwestern China
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 28–37. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220334

北京市城镇化地区植物多样性评价
Evaluation on plant diversity in urbanization area of Beijing City
北京林业大学学报, 2022, 44(8): 48–55. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210257

北京六环内校园林木树冠覆盖与森林结构分析
Analysis on tree canopy coverage and forest structure in schools within the Sixth Ring Road of Beijing
北京林业大学学报, 2020, 42(3): 110–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190259

北京市城市边缘区通风廊道型林地营建方法研究
Construction method of ventilation corridor woodland in urban fringe area of Beijing: taking the Heizhuanghu District as an example
北京林业大学学报, 2020, 42(2): 135–148. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190002

基于邻近木的林分结构多样性研究
Study on forest structure diversity based on the neighbourhood trees
北京林业大学学报, 2020, 42(6): 52–58. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190120

长白山典型天然林不同演替阶段物种多样性和结构多样性对生产力影响
Effects of species diversity and structural diversity on productivity in different succession stages of typical natural forest in Changbai Mountains of northeastern China
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 1–8. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210071

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240434

城市森林结构与木本植物物种多样性的耦合关系
——以北京市为例

郭嘉欣　马冰倩　郭　璇　徐宇沛　李　阳　谢仁天　徐程扬
（北京林业大学城市林业研究中心，森林培育和保护教育部重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】结构与生物多样性的耦合机制是生物多样性保护与提高人工林经营技术的重要基础，而城市森林结构与木本植物物种多样性之间关系研究较少，并成为科学经营城市森林的重要瓶颈。所以，本文以北京市六环以内的人工城市森林为对象，研究城市森林结构对木本植物多样性的影响，以期为科学构建和经营城市森林提供理论依据。**【方法】**选取 Shannon-Wiener 指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度、Berger-Parker 优势度表征树种组成多样性，选取林分平均胸径、平均树高、胸径组成多样性、树高组成多样性、林分断面积来表征林分物理结构特点，采用 Pearson 法进行相关性分析，利用主成分分析法构建能综合表征木本植物物种组成复杂度和林分物理结构复杂度的指数，并分析林分物理结构与物种组成结构间的耦合度。**【结果】**(1)木本植物物种多样性随着树高组成多样性和林分断面积的提高而提高，随着树木个体增大而降低，胸径组成多样性对木本植物多样性无显著影响。具有较复杂垂直结构的林分木本植物物种多样性较高。(2)垂直结构复杂度和空间占有度可显著影响林分树种组成复杂度，林分水平结构复杂度则与物种组成复杂度无显著关系。**【结论】**林分的物理结构可显著影响木本植物物种组成多样性，其中，树木大小、空间占有度及垂直结构复杂度是影响木本植物多样性的主要因子。在城市森林的构建与经营过程中，应通过提高林分垂直结构复杂度、种内和种间树木大小分化度、稳定生态种组的空间异质性来有效提高城市森林的木本植物多样性，进而提升城市森林的稳定性和综合生态系统服务功能。

关键词：城市森林；林分结构复杂度；木本植物组成；林分物理结构；耦合度
中图分类号：S731.2　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)07−0041−09
引文格式：郭嘉欣，马冰倩，郭璇，等. 城市森林结构与木本植物物种多样性的耦合关系——以北京市为例［J］. 北京林业大学学报，2025，47(7)：41−49. Guo Jiaxin, Ma Bingqian, Guo Xuan, et al. Coupling relationship between urban forest structure and woody plant species diversity: a case study of Beijing［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 41−49.

Coupling relationship between urban forest structure and woody plant species diversity: a case study of Beijing

Guo Jiaxin　Ma Bingqian　Guo Xuan　Xu Yupei　Li Yang　Xie Rentian　Xu Chengyang
(Research Center for Urban Forestry of Beijing Forestry University, Key Laboratory for Silviculture and Forest Conservation of Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］The coupling mechanism between stand structure and biodiversity is the important basis to innovate management techniques of plantations on basis of biodiversity conservation and improvement. However, the status of less research on the relationship between stand structure and woody plant diversity is the important bottleneck to managing urban forest scientifically. Therefore, taking the urban forest, which distributed within the sixth ring road in Beijing, as study objectives, and the aim of the

收稿日期: 2024−12−14　**修回日期:** 2025−03−24
基金项目: 北京市朝阳区科研项目 (CYSF-1904)，新进教师科研启动基金项目（BLX202101）。
第一作者: 郭嘉欣。主要研究方向：城市森林培育。Email: 592786830@qq.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 徐程扬，教授。主要研究方向：城市森林培育。Email: cyxv@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

study is to solve the affecting mechanisms of stand structure on woody plant diversity to provide theoretical supports for scientific establishing and managing urban forest. [**Method**] Shannon-Wiener index, Margalef richness, Pielou evenness and Berger-Parker dominance were chosen to characterize the diversity of tree species composition, and average DBH, average tree height, diameter composition diversity, tree height composition diversity and stand basal area were chosen to describe the complexity of urban forest structure. Meanwhile, Pearson method was used to analyze the correlation between stand physical structure and woody plant composition, and principal component analysis was used to construct complexity indices to integratedly describe the relationship between stand physical structure and woody plant composition. Furthermore, the coupling degree between indices of stand physical structure and indices of woody plant species composition was analyzed. [**Result**] (1) The species diversity of woody plants increased with the increase of tree height composition diversity and stand basal area, and decreased with enhancement of tree size while the influence of diameter composition diversity on woody plant species diversity was not significant. The higher woody plant species diversity was found in those urban forest stand with more complex vertical structure. (2) Woody plant diversity was significantly affected by complexity of vertical structure and complexity of space occupancy, while there was no remarkably relations between complexity of horizontal structure and complexity of woody plant composition. [**Conclusion**] Woody plant species diversity is significantly affected by stand physical structure, and the main factors influencing woody plant species diversity were tree size and space occupancy, complexity of vertical structure. Thus it is suggested that enhancing complexity of vertical structure, tree size differentiation of inter- and intro-species and spatial heterogeneity of stably ecological species groups should be adopted to increase woody plant species diversity efficiently in establishing and managing urban forest activities, and then to improve the urban forest stability and integrated ecosystem services.

Key words: urban forests; stand structural complexity; woody plant composition; stand physical structure; coupling degree

植物物种多样性是衡量物种丰富度和解析物种组成的关键指标，可反映群落结构的复杂性与稳定性，是评估城市森林健康状况和营林成效的核心要素，更是维持生态系统功能的重要标志[1]。物种多样性的形成机制一直是生态学领域的研究热点[2]。很多学者将树种组成多样性和林分结构作为评价森林自然度的重要指标[3]。森林自然度是林业决策中实施森林管理、保护、恢复的重要依据。通常来说，树种组成越丰富，林分结构异质性越强，森林就越接近自然状态，其自然度也就越高。近年来，林分结构特征与物种多样性之间的关系研究逐渐成为林学和生态学研究的热点问题，其研究结果对制定合理的森林经营措施、优化林分调控具有重要的指导意义[3]。

人工林是人工播种、栽植或扦插等人工措施培育形成的森林，具有明确的经营目的[4]。城市森林多起源于以木本植物为主的人工林，其群落结构简单，且多为单一树种种植[5-6]，易受到人为频繁清理林下植被、城市污染导致的生态退化、气候变化等因素的干扰[7]。随着人工林的集约化经营强度的提高，物种多样性受到一定负面影响，林分稳定性变差[8]，与自然生态系统相比，生物多样性显著降低[1]。因此，研究植物多样性及其影响因素对于高质量经营人工林至关重要。城市人工林的经营目标正从传统的木材生产向生态系统服务功能转变[6]，森林生产力[9]、城市森林的美学效果[10]、动物多样性[11]以及公众健康[12]等生态系统服务功能通常会随着生物多样性的提高而提升。目前，城市森林植被的再野化已经成为国际上的主流发展趋势[13]。我国城市森林多以人工林为主，树种组成简单、林下植被高度集约管理使得其结构稳定性下降，生物多样性普遍较低[8]。因此，采用基于自然的解决方案（NBS），协同或权衡城市森林美学质量，提高城市森林生物多样性和城市生态系统韧性[14]已成为城市森林质量提升的关键瓶颈问题。

森林结构是研究城市森林的重要基础，反映林分生长的变异性，一般来说，森林结构越复杂，越利于群落的健康和可持续发展[3]。林分结构不仅影响林分生长时空动态，还是驱动树木生长的主要因素。在一定范围内，结构越复杂，树种多样性越高[15]。胸径结构、树高结构、拥挤度等林分结构[16-17]主要通过生态位分化促进光和其他资源的空间分配，对群落物种多样性及其格局产生影响[18]。对森林结构的研

究目前多集中在林龄较大的天然林[19]、老龄林[17]，少有涉及到城市森林结构与木本植物多样性关系。城市森林的结构与生物多样性间的关系尚不明确。

城市森林结构与木本植物物种多样性间是否存在显著关系?针对这一科学问题，本文以北京市建成区六环以内的城市森林为对象，深入探讨城市森林的林分结构对木本植物物种组成多样性之间的影响机制，旨在为森林经营实践提供理论支持，指导林分结构的优化调控，从而充分发挥森林的多重效益，实现森林的可持续发展。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

北京市（115°20′ ~ 117°30′E，39°28′ ~ 41°05′N）地处华北平原北端，地势西北高、东南低，北部为中低山区，东南部为平原。全市平原区海拔 20 ~ 60 m。属于暖温带半湿润半干旱大陆季风气候，冬寒冷干燥，春秋短促。雨季集中在夏季，全年平均日照为 2 000 ~ 2 800 h。

北京市的城市森林植被以人工林为主，树种主要是温带落叶阔叶林树种，兼有温带针叶林树种。截至 2024 年底，林木覆盖率提升至 44.95%，绿化覆盖率达 49.3%，已成功打造成为“国家森林城市群”，极大拓展了绿色空间，并基本形成了“一屏三环五河九楔”森林和城市森林生态空间格局。其中，太行山和燕山构成了天然的森林生态屏障，城市公园、郊野公园、湿地公园共同构成了生态空间绿色框架，城市公园数量达 1 065 个。

本研究调查区域内总计乔木植物 86 种，隶属于 28 科 49 属，主要树种包括国槐（*Styphnolobium japonicum*）、毛白杨（*Populus tomentosa*）、油松、银杏（*Ginkgo biloba*）、臭椿（*Ailanthus altissima*）、旱柳（*Salix matsudana*）等（表 1）。

1.2　研究方法

1.2.1　样地设置与调查

2023 年 5—6 月，采用机械取样法在北京市六环以内城区设置城市森林调查样地。以北京市中心为起点，按照 2 km × 2 km 的地理网格划分样点，并沿东、南、西、北、西北、东北、西南、东南 8 个方向呈辐射状设置扇形样带。最终，选取落在这 8 条样带上的地理网格点作为样地，共设置了 154 块样地，每块样地面积为 900 m^2（30 m × 30 m）（图 1）。为了避免东西、南北样带落入两个中轴线的道路上，对样带方向进行了轻微旋转。

在调查过程中，记录不透水地面、裸地、空地等特殊样地。若遇到居民楼、道路等大面积障碍物覆盖的情况，则选择距离原样点最近且具有代表性的区域作为替代样地进行调查。调查样地内胸径 ⩾ 4 cm 的全部乔木树种个体，测量或记录树种名称、胸径（cm）、树高（m）、枝下高（m）、冠下高（m），树冠的东、西、南、北半径（m）。此外，在每个样地的四角及中心分别布设 5 个 1 m × 1 m 的草本样方，以

表 1　北京市城区样地中的主要乔木树种

Tab. 1　Major tree species in sampled urban forest in built-up area in Beijing

树种	科名	属名	株数占比/%	来源
国槐 *Styphnolobium japonicum*	豆科	槐属	12.80	乡土种
毛白杨 *Populus tomentosa*	杨柳科	杨属	10.38	乡土种
油松 *Pinus tabuliformis*	松科	松属	8.80	乡土种
银杏 *Ginkgo biloba*	银杏科	银杏属	7.46	乡土化种
臭椿 *Ailanthus altissima*	杨柳科	柳属	4.69	乡土种
旱柳 *Salix matsudana*	苦木科	臭椿属	4.50	乡土种
洋白蜡 *Fraxinus pennsylvanica*	木樨科	梣属	3.96	外来种
绒毛梣 *Fraxinus velutina*	木樨科	梣属	3.84	外来种
圆柏 *Juniperus chinensis*	柏科	刺柏属	3.73	乡土种
杜仲 *Eucommia ulmoides*	杜仲科	杜仲属	2.73	乡土化种
紫叶李 *Prunus cerasifera* ‘Atropurpurea’	蔷薇科	李属	2.54	外来种
刺槐 *Robinia pseudoacacia*	豆科	刺槐属	2.46	乡土化种
侧柏 *Platycladus orientalis*	柏科	侧柏属	2.31	乡土种
英桐 *Platanus acerifolia*	悬铃木科	悬铃木属	2.27	乡土化种
栾树 *Koelreuteria paniculata*	无患子科	栾树属	2.27	乡土种



图 1 北京市六环以内城区样点布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample point distribution in the urban area within the Sixth Ring Road in Beijing

及 5 个面积为 5 m × 5 m 的灌木样方，记录其种名、高度和冠幅。同时，详细记录样地的位置信息。

1.2.2 物种组成多样性指标选择及其复合指数构建

选取 Shannon-Wiener 指数(H)、Margalef 丰富度(M_R)、Pielou 均匀度(E)、Berger-Parker 优势度(D_{BP})4 个指标来表征树种组成多样性。其中，H 可体现林分的树种多样性，侧重于所有物种的丰富度；M_R 用来表述不同城市森林类型的植物物种丰富程度；E 可表征群落中不同物种的多度分布的均匀程度；而 D_{BP} 度量的是集中性，即多样性的反面，仅考虑数量优势，侧重于群落中优势种的作用。相关计算公式如下[20]。

$$H = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i \tag{1}$$

$$P_i = n_i / n \tag{2}$$

式中：P_i 是第 i 个物种比例，n_i 为第 i 个物种个体数，i=1，2，…，S，S 为样地的乔木物种数量，n 为所有物种个体总数。

$$E = H / \ln S \tag{3}$$

$$M_R = (S - 1) / \ln N \tag{4}$$

式中：N 为样地内乔木总株数。

$$D_{BP} = N_{max} / N \tag{5}$$

式中：N_{max} 表示样地内株数最多的树种株数。

为了将相关性比较密切的几个多样性指标归为同一个综合指标，以较少的复合因子来表征物种多样性，本研究采用主成分分析，利用上述 4 个多样性指标建立复合指数来综合表征物种多样性。

1.2.3 林分结构指标选择及其复合指数构建

选取林分平均胸径(DBH_A)、平均树高(H_A)、胸径组成多样性(D_D)、树高组成多样性(D_H)、林分断面积(CA_H)5 个林分物理结构指标，从林木生长情况、水平结构、垂直结构以及林分密度等方面来表征城市森林结构的复杂性。其中，胸径组成多样性和树高组成多样性分别根据调查胸径和树高的最大值和最小值，分别按照 2 cm、2 cm 等距离划分胸径、树高等级，再采用 Shannon-Wiener 指数进行计算[17,21]。与构建物种多样性指数方法一致，通过主成分分析，利用上述 5 个结构指标构建可综合表征林分物理结构的复合指数。

1.2.4 林分结构与物种多样性指标变异分析及其相关性分析

计算各指标的变异系数，来衡量各变量在不同样地之间的差异程度。利用 Pearson 法进行林分结构与物种多样性指标间的相关性分析，从单一指标间的直接相关分析、复合指数与单一指标之间的相关分析以及复合指数之间的相关分析 3 个维度来综合分析城市森林林分结构与物种多样性之间的关系。

1.2.5 林分结构与物种多样性指标间的耦合度分析

耦合度(C)是反映系统之间相互依赖、相互制约程度的指标，C 值越大，系统间关联程度越高，相互作用程度越大[22]。为进一步明确林分结构与物种多样性之间的关系，计算上述林分物理结构单一指标及复合指数与物种组成多样性单一指标及复合指数之间的耦合度。并根据刘娜娜等[23]方法将耦合度分为低水平耦合($0 < C \leqslant 0.3$)、拮抗阶段($0.3 < C \leqslant 0.5$)、磨合阶段($0.5 < C \leqslant 0.8$)、高水平耦合($0.8 < C < 1.0$)及良性共振($C = 1.0$)5 个等级。

1.3 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据的整理统计，使用 SPSS Statistics 26.0 软件对多样性指标和结构多样性指标进行主成分分析，使用 Origin 2024 绘制多样性指标和结构指标箱型图、相关性热图及主成分分析双标图。

2 结果与分析

2.1 城市森林结构和木本植物物种多样性指标的变化特征

木本植物组成多样性指标和物理结构指标在不同样地间的变异水平均较高，各指标变异系数的最小值为 45%，表明所研究的城市森林结构及木本植物物种多样性变化较大(表 2)。

表 2　城市森林树种多样性指标和林分物理结构指标统计

Tab. 2　Statistics of tree species diversity indicators and stand physical structural indicators of urban forests

指标名称	平均值	中位数	标准差	变异系数/%
Margalef丰富度(M_R)	0.81	0.69	0.78	96
Shannon多样性(H)	0.75	0.69	0.59	78
Pielou均匀度(E)	0.60	0.76	0.40	66
Berger-Parker优势度(D_{BP})	0.61	0.60	0.28	46
胸径组成多样性(D_D)	1.77	1.78	1.75	99
树高组成多样性(D_H)	1.02	1.10	0.52	51
平均树高(H_A)/m	8.10	7.76	3.67	45
平均胸径(DBH_A)/cm	21.71	20.01	11.92	55
林分断面积(CA_H)/($m^2 \cdot hm^{-2}$)	8.43	6.22	8.33	99

相对其他多样性指标而言，木本植物组成的 Berger-Parker 优势度(D_{BP})变异系数较低，只有 46%，表明优势种在不同样地之间相对稳定。Margalef 丰富度(M_R)、Shannon-Wiener 指数(H)中位数较小(均为 0.69)，表明物种组成简单、多样性较低；而 Pielou 均匀度(E)的中位数偏高，表明物种分布较均匀(表 2)。

林分物理结构中，胸径组成多样性(D_D)和林分断面积(CA_H)的变异系数比较大，表明不同样地间水平结构和林分密度存在显著差异。但是，D_D 和树高组成多样性(D_H)的中位数中等，表明其水平及垂直结构复杂度不高。平均树高(H_A)、平均胸径(DBH_A)和平均 CA_H 较小，表明所调查的城市森林树木个体总体上偏小(表 2)。

2.2　城市森林结构与木本植物物种多样性复合指数构建

2.2.1　木本植物物种多样性复合指数构建

采用林分树种组成多样性指标进行主成分分析，前 2 个成分轴的累计贡献率为 86.437%(表 1)。第 1 主成分在 Margalef 丰富度、Shannon-Wiener 多样性、Pielou 均匀度 3 个指标方面载荷较大，集中反映了树种种类的丰富程度和分布均匀性；所以，将其定义为物种组成复杂度(C_{sc})。第 2 主成分对 Berger-Parker 优势度的载荷较大，反映了优势种的数量优势；所以，将其定义为物种组成优势度(D_{SD})(表 3)。

2.2.2　林分结构复合指数构建

采用林分的物理结构指标进行主成分分析，前 3 个轴的累计贡献率为 85.444%(表 4)。其中，第 1 主成分在 D_A、H_A、CA_H 上载荷较大，集中反映了林木个体大小及密集性；所以，将其定义为林木的空间占有度(O_S)。第 2 主成分的 D_D 载荷较大，表征了树木胸径的分化程度，即 D_D 越大，林分水平结构越复杂；所以，将其定义为水平结构复杂度(C_{HS})。第 3 主成分的 D_H 载荷较大，即林分垂直层次多样性随 D_H 的提高而提高；所以，将其定义为垂直结构复杂度(C_{VS})。

表 3　物种多样性指标的主成分分析因子载荷矩阵

Tab. 3　Load matrix of tree species diversity indicators from principle component analysis

树种多样性指标	PC1	PC2
	物种组成复杂度(C_{SC})	物种组成优势度(D_{SC})
Margalef丰富度(M_R)	0.906	0.134
Shannon-Wiener多样性(H)	0.943	0.125
Pielou均匀度(E)	0.794	0.317
Berger-Parker优势度(D_{BP})	−0.407	0.695
贡献率/%	71.016	15.421

表 4　林分结构因子的主成分分析载荷矩阵

Tab. 4　Load matrix of forest structural indicators from principle component analysis

林分物理结构指标	PC1	PC2	PC3
	空间占有度(O_S)	水平结构复杂度(C_{HS})	垂直结构复杂度(C_{VS})
胸径组成多样性(D_D)	0.395	0.890	−0.219
树高组成多样性(D_H)	0.309	0.080	0.757
平均树高(H_A)	0.877	−0.147	−0.133
平均胸径(DBH_A)	0.787	−0.303	−0.388
林分断面积(CA_H)	0.807	−0.041	0.059
贡献率/%	41.489	23.429	20.526

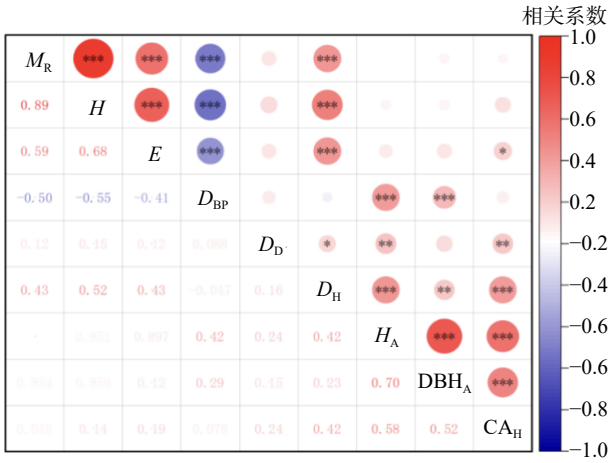
2.3　城市森林结构与木本植物物种多样性的相关性分析

2.3.1　林分结构指标之间的相互关系

Pearson 相关分析结果(图 2)显示：D_H 与 M_R、H、E 极显著正相关，树高多样性增加，物种丰富度、多样性、均匀度随之增加，表明树高多样性增加，物种多样性升高。DBH_A 和 H_A 与 D_{BP} 极显著正相关，即平均胸径、平均树高较大的林分物种优势度较高，表明具有较高的平均胸径和平均树高的森林多为树种组成简单或纯林。CA_H 与 E 显著正相关，物种均匀度随林分密度增加而提高。D_D 与 M_R、H、E、D_{BP} 均无显著关系，表明水平结构复杂度对物种多样性无显著影响(图 2)。

2.3.2　复合结构指数与物种多样性单一指标间的关系

O_S 与 D_{BP} 极显著正相关，表明林分中较多的大树将降低木本植物物种多样性(图 3)。C_{VS} 与 M_R、



*表示在 0.05 水平上差异显著，**表示在 0.01 水平上差异非常显著，***表示在 0.001 水平上差异极显著。下同。

图 2 林分结构指标间的 Pearson 相关热图

Fig. 2 Heat-map of Pearson correlations among stand structural indicators

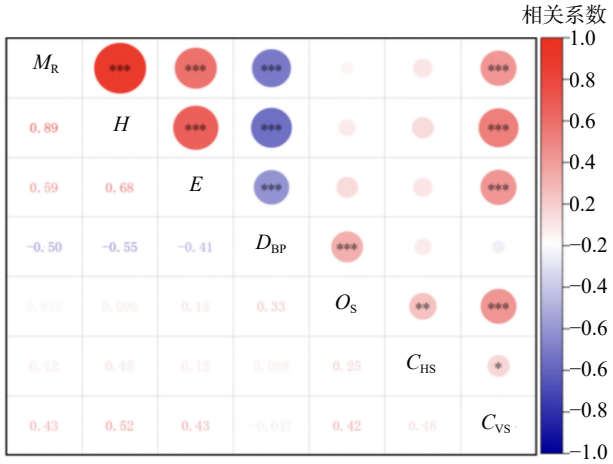


图 3 结构指数与多样性指标间的相关热图

Fig. 3 Heat-map of correlations between structural indices and tree species diversity indicators

H 以及 E 极显著正相关，即物种丰富度、多样性、均匀度均随垂直结构复杂度的提高而增加，木本植物垂直结构越复杂，物种多样性越高。C_{HS} 与 M_R、H 以及 E 无显著相关关系，表明水平结构复杂度对木本植物物种多样性无显著影响。

2.3.3 林分结构指数与多样性指数间的关系

从林分物理结构与物种组成间的综合影响角度出发，O_S 对 D_{SC} 有显著的正向影响，对 C_{SC} 影响不大；而 C_{VS} 对 C_{SC} 有显著的正向影响，对 D_{SC} 的影响不大；同样，C_{HS} 对 D_{SC} 和 C_{SC} 均无显著影响（图 4）。但是，3 个林分物理结构指数间均有显著的正相关关系。这表明在林分结构中，空间占有度的增加会使物种组成变简单，多样性降低，垂直结构复杂度不仅是影响物种多样性的最主要结构因素，而且其增加可以提升木本植物物种多样性。

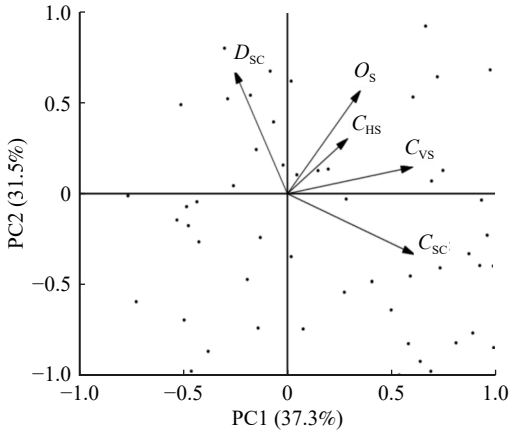


图 4 结构指数和多样性指数的 PCA 载荷图

Fig. 4 Loading diagram of stand structural indices and diversity indices from PCA

2.4 城市森林结构与木本植物物种多样性的耦合度

总体上，林分物理结构指标、物理结构指数与树种组成多样性指标、树种组成多样性指数间处于高水平耦合阶段（$1 > C > 0.80$）（表 5）。D_D 与 D_{BP}、D_D 与 D_{SC}、C_{HS} 与 D_{BP}、C_{HS} 与 D_{SC} 的耦合度值 $C \leqslant 0.80$，表明 D_D、C_{HS} 对城市森林物种组成多样性的影响相对偏弱，处于磨合阶段；H_A 与 H、O_S 与 H、C_{VS} 与 H、H_A 与 C_{SC}、O_S 与 C_{SC}、C_{VS} 与 C_{SC} 的耦合度值 $C = 1.00$，表明 H_A、O_S、C_{VS} 对城市森林物种组成多样性的影响是一致的，影响程度均较高；D_H 与 D_{BP}、D_H 与 C_{SC} 的耦合度值 $C = 1.00$，表明树木胸径的分化程度在很大程度上决定了城市森林的物种优势度和物种组成复杂度；DBH$_A$ 与 M_R、DBH$_A$ 与 E 的耦合度值 $C = 1.00$，表明树木大小不仅对物种丰富度有较高的影响，而且对物种分布均匀度也有较高的影响；CA$_H$ 与 M_R 的耦合度值 $C = 1.00$，表明林分密度对物种丰富度有强烈影响。

3 讨 论

研究林分结构特征与物种多样性之间复杂的互作关系，是当下林学和生态学领域热点问题，解决这一问题将为提高城市森林植物物种多样性，优化城市森林结构提供科学指导，并对增强森林群落结构复杂性及稳定性，提升森林自然度、维持生态系统功能等森林经营目标的实现具有重要意义。

本研究结果表明，树高组成多样性和木本植物物种的丰富度、多样性、均匀度呈极显著正相关关系，林分断面积与物种均匀度呈显著正相关关系，而平均胸径和平均树高则与物种优势度呈极显著正相关，胸径组成多样性反而对木本植物多样性无影响（图 2）。林分物理结构与木本植物多样性指标、指数之间高度耦合的结果（表 5），进一步证明了林分物

表 5　北京市城市森林物理结构指标和木本植物物种多样性指标间的耦合度

Tab. 5　Coupling degree between stand physical structure indicators and woody plant species diversity indicators in Beijing

指标类型	指标	物理结构指标					物理结构指数		
		D_D	D_H	H_A	DBH_A	CA_H	O_S	C_{HS}	C_{VS}
树种多样性指标	M_R	0.95	0.94	0.97	1.00	1.00	0.97	0.94	0.97
	H	0.88	0.99	1.00	0.99	0.97	1.00	0.87	1.00
	E	0.93	0.96	0.98	1.00	0.99	0.98	0.92	0.98
	D_{BP}	0.77	1.00	0.98	0.93	0.89	0.99	0.75	0.99
树种多样性指数	C_{SC}	0.84	1.00	1.00	0.98	0.94	1.00	0.83	1.00
	D_{SC}	0.80	0.99	0.99	0.95	0.91	0.99	0.78	0.99

理结构对木本植物多样性有显著影响，尤其以 D_H、H_A、DBH_A 的影响更大。较高的树高组成多样性，即植物垂直方向分化成层数量增多，可促进生境中生态位分化[24-25]，减少了同一层次原来林木对阳光、水分的争夺，物种分布更均匀，物种多样性增加[25]。所以，人工起源的城市森林木本植物多样性主要取决于树木个体大小和垂直结构复杂度，与树木水平空间结构关系不大，这也与前人的研究结果基本一致[24]。此外，平均胸径和平均树高（空间占有度）制约着木本植物物种多样性，即大树数量多或存在个别巨型木，作为林分最大有机体，其可拦截光、占据营养空间，并具备强扩种繁殖能力，这限制了周围树木生长，造成木本植物物种丰富度和多样性减少[26-27]。

从复合指数来看，垂直结构复杂度和物种丰富度、多样性、均匀度呈极显著正相关关系，而空间占有度和物种优势度极显著正相关，水平结构复杂度与物种丰富度、多样性、均匀度关系不大（图 3、图 4）。O_S、C_{VS} 与木本植物多样性指数以及指标间具有高度耦合的结果再次表明（表 5），人工起源的城市森林木本植物多样性主要取决于树木空间占有度和垂直结构复杂度[27]。所以，林分结构通常可以很好地预测生物多样性[27-28]。这是因为树冠结构复杂度通过提高植物的生境质量[29]而提高生物多样性[28]；同时，树木大小与冠层树木年龄、树冠层次复杂度以及树种组成变化可引起树冠覆盖度发生变化[30]，进一步通过影响光环境而影响生物多样性[24-25]。

本研究结果 Pielou 均匀度和 Berger-Parker 优势度处于中等水平，表明不同城市森林间的木本植物种类有较大的差异，混交林占比较高（表 2）。前人的研究表明：北京市的所有城市森林均起源于人工林，且这些人工林多为高度经营的森林，其木本植物平均仅有 6 种（1 ~ 11 种）[6]；即便在物种丰富度较高的公园绿色空间中，木本植物平均数量也只有 22 种（6 ~ 39 种），而乔木树种只有 14 种（6 ~ 25 种）[8]。因此，林分物理结构复杂度在很大程度上是由于木本植物丰富度引起的，与同种树木的胸径、树高生长分化程度关系较弱。

因此，为达到林分物理结构和木本植物多样性之间高度耦合、协调的目的，建议在优化城市森林结构经营中，重点通过增加天然植被中种间联结度较高的木本植物，以有效提高林分的垂直结构复杂度，创造具有一定规模的广义林隙，提高稳定生态种组的水平空间异质性。

4　结　　论

本研究针对城市森林结构与木本植物物种多样性间是否存在显著关系，利用 Pearson 法对林分结构和木本植物物种多样性单一指标间、复合指数与单一指标间以及复合指数间进行相关分析，并进一步进行耦合度分析，研究结论如下。

（1）北京市木本植物物种种类简单、多样性较低，但物种分布较均匀；水平及垂直结构复杂性不高，总体树木个体偏小（平均树高为 8.10 m），平均胸径为 21.71 cm），林分密度偏低，整体林分结构复杂度不高。

（2）较高的树高组成多样性 D_H 和林分断面积 CA_H 有利于提高木本植物多样性，而树木个体较大（平均胸径 DBH_A 和平均树高 H_A 较大），却在一定程度上降低木本植物物种多样性，胸径组成多样性 D_D 则对木本植物物种多样性无显著影响。同样，较高的垂直结构复杂度 Cvs 有利于提高木本植物物种多样性，而林木较高的空间占有度 O_S 则降低了木本植物物种多样性，水平结构复杂度 C_{HS} 对木本植物物种多样性无显著影响。

该研究可为北京市结构单一、稳定性差、多样性低的城市森林的再野化和近自然化经营提供理论支撑，并为其他北方城市的城市森林经营提高参考。但是，鉴于本文研究地区以及城市森林地块数量的局限性，未来的研究应进一步丰富城市森林结构及物种多样性指标，探索其他林分结构和木本植物多

样性指标间的影响机制，并在其他地区开展类似研究，在区域尺度上总结出更加具有普适性的城市森林结构与木本植物物种多样性间关系，为创新城市森林再野化、半自然化经营技术提供支撑。

参 考 文 献

[1] 王琬璐. 雄安新区不同营建模式城市森林植被特征及群落动态变化研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
Wang W L. Research on the characteristics and community dynamics of urban forest vegetation under different construction models in Xiong'an New Area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.

[2] 王蕾, 郭秋菊, 艾训儒, 等. 林分空间结构对天然林木本植物多样性的影响 [J]. 森林与环境学报, 2024, 44(1): 20−27.
Wang L, Guo Q J , Ai X R, et al. The influence of forest spatial structure on the diversity of woody plants in natural forest[J]. Journal of Forest and Environment, 2024, 44(1): 20−27.

[3] 欧阳田甜, 赵洋毅, 涂晓云, 等. 滇中磨盘山不同演替阶段林分结构及物种多样性研究 [J]. 西北林学院学报, 2024, 39(3): 67−76.
Ouyang T T, Zhao Y Y, Tu X Y, et al. Stand structure and species diversity at different succession stages in the Mopan Mountain in central Yunnan[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(3): 67−76.

[4] 温馨, 张妍妍, 张志杰, 等. 七老图山人工林林分结构与土壤因子对林下草本植物多样性的影响 [J]. 生态学报, 2025, 45(17): 1−9.
Wen X, Zhang Y Y, Zhang Z J, et al. Effects of stand structure and soil factors on understory herb diversity in Qilaotu Mountain plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): 1−9.

[5] 孟祥玉, 范舒欣, 董丽, 等. 北京城市森林林下植物多样性与土壤因子的相关性 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(7): 102−114.
Meng X Y, Fan S X, Dong L, et al. Correlation between understory plant diversity and soil factors in Beijing urban forests[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(7): 102−114.

[6] Guo P, Su Y, Wan W, et al. Urban plant diversity in relation to land use types in built-up areas of Beijing[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(1): 100−110.

[7] 郭玉洁, 任志彬, 何兴元. 城市森林景观多功能性及权衡协同关系 [J]. 应用生态学报, 2025, 36(3): 837−846.
Guo Y J, Ren Z B, He X Y. Multifunctionality of urban forest landscapes and the their trade-offs and synergies[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(3): 837−846.

[8] Li W, Ouyang Z, Meng X, et al. Plant species composition in relation to green cover configuration and function of urban parks in Beijing, China[J]. Ecological Research, 2006, 21(2): 221−237.

[9] Liang J, Crowther W T, Picard N, et al. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests[J]. Science, 2016, 354: aaf8957.

[10] Melton M, Sikorski P, Archiciński P, et al. Nature on our doorstep: how do residents perceive urban parks vs. biodiverse areas?[J]. Landscape and Urban Planing, 2024, 247: 105059.

[11] 田永莲, 孙秀锋, 吕鲜艳, 等. 我国城市鸟类多样性特征及其影响因素研究 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2022, 44(12): 39−49.
Tian Y L, Sun X F, Lü X Y, et al. Characteristics and influencing factors of urban bird diversity in China[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, 44(12): 39−49.

[12] Hansan L, Zhang X, Bi S, et al. Psychological benefits of green exercise in wild or urban greenspaces: a meta-analysis of controlled trials[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 68: 127458.

[13] Aronson M F J, Lepczyk C A, Evans K L, et al. Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2017, 15(4): 189−196.

[14] Lehmann S. Growing biodiverse urban futures: renaturalization and rewilding as strategies to strengthen urban resilience[J]. Sustainability, 2021, 13: 2932.

[15] 彭文成, 杨佳, 黄士绮, 等. 杉木人工林近自然化改造对林分结构及物种多样性的影响 [J]. 热带林业, 2023, 51(3): 23−27.
Peng W C, Yang J, Huang S Q, et al. Effect of close-to-nature management on the stand structure and species diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Tropical Forestry, 2023, 51(3): 23−27.

[16] 雷相东, 唐守正. 林分结构多样性指标研究综述 [J]. 林业科学, 2002, 38(3): 140−146.
Lei X D, Tang S Z. Indicators on structural diversity within-stand: a review[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(3): 140−146.

[17] 黄绍娴. 雅长保护区老龄林林木大小多样性及其与树种混交的关联性分析 [D]. 南宁: 广西大学, 2023.
Huang S X. Analysis of size diversity and its correlationwith species mingling in an old growth forestin Yachang Nature Reserve [D]. Nanning: Guangxi University, 2023.

[18] 李远发. 林分空间结构参数二元分布的研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
Li Y F. Research on the binary distribution of spatial structure parameters in forest stand [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.

[19] 史丽娟,吕海涛,张树梓,等. 冀北山地蒙古栎天然林林分结构特征 [J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(2): 25−32,42.
Shi L J，Lü H T，Zhang S Z，et al. Structural characteristics of Quercus mongolica natural forest stands in the northern Hebei Mountain Area[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(2): 25−32,42.

[20] Magurran A E, Phillip D A T. Implications of species loss in freshwater fish assemblages[J]. Ecography, 2001, 24(6): 645−650.

[21] Ali A, Yan E R, Chen H Y H, et al. Stand structural diversity

rather than species diversity enhances aboveground carbon storage in secondary subtropical forests in eastern China[J]. Biogeosciences, 2016, 13(16): 4627−4635.

[22] 宋亮, 赵冰琴, 申远洋, 等. 新银合欢林土壤理化性质–微生物生物量耦合协调关系研究 [J]. 土壤, 2023, 55(5): 1070−1079.
Song L, Zhao B Q, Shen Y Y, et al. Evaluation of coupling coordination relationship between soil physicochemical propertiesand microbial biomass of *Leucaena leucocephala* plantation[J]. Soils, 2023, 55(5): 1070−1079.

[23] 刘巧婧, 王莉红. 城市化与生态环境耦合协调关系研究——以杭州市为例 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(10): 4214−4222.
Liu Q J, Wang L H. Examination of a coupling coordination relationship between urbanization and the eco-environment: case study of Hangzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(10): 4214−4222.

[24] Ma Q, Su Y, Hu T, et al. The coordinated impact of forest internal structural complexity and tree species diversity on forest productivity across forest biomes[J]. Fundamental Research, 2024, 4(5): 1185−1195.

[25] 刘鲁霞, 胡波, 桑国庆, 等. 激光雷达森林结构指标在森林植物多样性评估中的研究进展 [J]. 林业科学, 2025, 61(1): 176−196.
Liu L X, Hu B, Sang G Q, et al. Assessing forest vegetation diversity using forest structure indicators based on LiDAR remote sensing: a review[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(1): 176−196.

[26] 王昕. 森林垂直结构和大树对植物多样性海拔梯度格局的影响 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
Wang X. The roles of forest vertical structure and large-diameter trees on plant diversity along elevational gradients[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.

[27] Gao T, Hedblom M, Emilsson T, et al. The role of forest stand structure as biodiversity indicator[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 330: 82−93.

[28] Walter J A, Stovall A E L, Atkins J W. Vegetation structural complexity and biodiversity in the Great Smoky Mountains[J]. Ecosphere, 2021, 12(3): e03390.

[29] Storch F, Boch S, Gossner M M, et al. Linking structure and species richness to support forest biodiversity monitoring at large scales[J]. Annals of Forest Science, 2023, 80(1): 3.

[30] Hämäläinen A, Runnel K, Ranius T, et al. Diversity of forest structures important for biodiversity is determined by the combined effects of productivity, stand age, and management[J]. Ambio, 2024, 53(5): 718−729.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　臧润国）