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

北方典型城市居住区植物群落物种组成差异及其驱动力

李硕涵 范俊涛 孙然好 张文龙 张帆 石婧仪 高瑞阳 张守红

Species composition differences and its driving forces of plant communities in residential area of typical northern cities

Li Shuohan, Fan Juntao, Sun Ranhao, Zhang Wenlong, Zhang Fan, Shi Jingyi, Gao Ruiyang, Zhang Shouhong

引用本文:
李硕涵, 范俊涛, 孙然好, 张文龙, 张帆, 石婧仪, 高瑞阳, 张守红. 北方典型城市居住区植物群落物种组成差异及其驱动力[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(8):111–123. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240425
Li Shuohan, Fan Juntao, Sun Ranhao, Zhang Wenlong, Zhang Fan, Shi Jingyi, Gao Ruiyang, Zhang Shouhong. Species composition differences and its driving forces of plant communities in residential area of typical northern cities[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(8):111–123. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240425

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240425

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

北京居住区鸟类群落特征及其影响因素
Characteristics and influencing factors of bird communities in residential areas of Beijing
北京林业大学学报, 2025, 47(6): 80–89. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240062

大兴安岭双河保护区植物多样性和群落结构特征分析
Characteristics of plant diversity and community structure in Shuanghe Nature Reserve in Daxing’anling area of northeastern China
北京林业大学学报, 2021, 43(7): 79–87. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200029

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

晋西黄土区沟谷不同部位植物多样性
Plant diversity in different positions of gullies and valleys in the loess region of western Shanxi Province, northern China
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 20–27. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230329

类型与结构对北京市居住区宅旁绿色空间质量的影响
Influence of type and structure on the quality of green space next to houses in residential areas of Beijing
北京林业大学学报, 2022, 44(5): 55–68. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200382

科尔沁沙地植物群落物种多样性及其主要影响因素
Species diversity of plant communities and its main influencing factors in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia of northern China
北京林业大学学报, 2020, 42(5): 106–114. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190284

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240425

北方典型城市居住区植物群落物种组成差异及其驱动力

李硕涵[1] 范俊涛[1] 孙然好[2] 张文龙[3,4] 张 帆[1] 石婧仪[1]
高瑞阳[1] 张守红[1,5,6]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室，北京 100085；3. 湖北省水利水电科学研究院，湖北 武汉 430070；4. 湖北省水土保持工程技术研究中心，湖北 武汉 430070；5. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083；6. 北京市水土保持工程技术研究中心，北京 100083）

摘要:【目的】探讨不同城市居住区绿地植物群落结构与多样性的差异特征，以期为城市绿地生态功能的优化提供科学依据。**【方法】**选取我国北方不同气候区 6 个典型城市（北京、西安、青岛、沈阳、迁安、西宁）39 个不同类型居住区 783 块绿地开展样地调查，通过计算物种重要值、植物多样性指数，定量解析城市各类型居住区绿地植物的物种组成、结构与植物多样性特征。**【结果】**（1）所调查城市居住区绿地植物共 756 种，隶属于 108 科 378 属，其中沿海城市青岛植物种类数最多（327 种），内陆城市北京、西宁植物种类数相对较少（分别为 182、226 种），北京乡土树种占比最高（95.24%），沈阳入侵物种占比最高（3.61%）。（2）草本植物是东西部城市居住区绿地的主导植物，中部城市则以乔木和灌木为主。植物群落结构以“乔”“灌”“草”单一生活型为主（占比 68.9%）。（3）北方城市绿地植物多样性呈现乔木层 > 草本层 > 灌木层的规律。西宁与其他城市植物群落 Jaccard 距离最大（均值 0.886 1），北京最小（均值 0.837 9），草本层对空间与环境异质性的响应最为敏感。与自然因素相比，社会经济因素（居住区面积、城市人均 GDP 和居住区建成时间）对居住区植物多样性影响更大。**【结论】**我国北方调查城市居住区绿地植物群落结构配置丰富，但优势种类群以“乔”“灌”“草”单一生活型配置为主。植物多样性从西向东逐渐增大，主要受社会经济因素影响。

关键词：北方城市；居住区；植物群落结构；植物多样性

中图分类号：S731 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)08−0111−13

引文格式：李硕涵，范俊涛，孙然好，等. 北方典型城市居住区植物群落物种组成差异及其驱动力 [J]. 北京林业大学学报，2025，47(8)：111−123. Li Shuohan, Fan Juntao, Sun Ranhao, et al. Species composition differences and its driving forces of plant communities in residential area of typical northern cities[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(8): 111−123.

Species composition differences and its driving forces of plant communities in residential area of typical northern cities

Li Shuohan[1] Fan Juntao[1] Sun Ranhao[2] Zhang Wenlong[3,4] Zhang Fan[1] Shi Jingyi[1]
Gao Ruiyang[1] Zhang Shouhong[1,5,6]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;
3. Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, Hubei, China;
4. Hubei Engineering and Technology Research Center of Soil and Water Conservation, Wuhan 430070, Hubei, China;
5. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, Beijing 100083, China;
6. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2024−12−11 **修回日期:** 2025−07−10

基金项目: 国家重点研发计划（2022YFF1303101）。

第一作者: 李硕涵。主要研究方向：城市社区绿地生态服务。Email: ShH_Li@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 张守红，教授。主要研究方向：水土保持与生态修复。Email: Zhangs@bjfu.edu.cn 地址：同上。

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

Abstract: [**Objective**] This paper investigates the characterization of plant community structure and diversity in urban communities from different climatic zones in northern China, aiming to provide a scientific basis for the configuration and management of green space vegetation in these areas. [**Method**] Sample surveys were conducted in 765 green spaces of 39 residential areas from six typical cities (Beijing, Xi'an, Qingdao, Shenyang, Qian'an, Xining) in northern China. The species importance value and plant diversity index were calculated to quantitatively analyze the species composition, structural characteristics, and plant diversity of community green spaces from different zones. [**Result**] (1) there were 756 plant species, belonging to 108 families and 378 genera in the investigated residential areas. Qingdao, a coastal city, had the most plant species of 327, while the plant species of inland cities, such as Beijing and Xining with 182 and 226 plants, respectively, were relatively small. (2) The importance value of herbaceous plants in the community green space of eastern and western cities was higher than central cities, while trees and shrubs had higher importance value in the central cities. The most common dominant species of the surveyed areas were single type of 'tree', 'shrub' and 'grass', accounting for 68.9% of total community green space. (3) In terms of life-form stratification, plant diversity followed the pattern of tree layer > herbaceous layer > shrub layer. The Jaccard distance indicated that Xining's plant communities were the most distinct from those of other cities (0.886 1), while Beijing showed the highest similarity (0.837 9), the herb layer was the most sensitive to spatial and environmental heterogeneity. Compared with natural factors, socioeconomic variables (including residential area size, per capita GDP, and construction year of residential areas) exerted a stronger influence on plant diversity. [**Conclusion**] The investigated urban residential areas in northern China exhibit rich configurations in plant community structure within green spaces, yet the dominant species groups are primarily characterized by a single life form arrangement of "trees", "shrubs", and "grasses". Additionally, plant diversity gradually increases from west to east, primarily influenced by socio-economic factors.

Key words: northern cities; residential areas; plant community structure; plant diversity

城市绿地是城市生态系统的重要组成部分，居住区绿地因其高可达性和频繁使用率而成为受人为扰动最强的绿地类型[1]。居住区绿地不仅为多种生物提供栖息地，丰富城市生物多样性[2]，还通过改善空气质量、缓解城市热岛效应，为居民提供优美的生活环境[3]。绿地植物群落结构与生物多样性是支撑其发挥生态和景观功能的核心要素[4]。因此，明晰居住区绿地的物种组成、结构与多样性特征，对提升城市绿地生态功能有重要意义[5]。

近年来，随着城市化进程加快，城市居住区植物种类和配置随之变化[6−7]。国内外学者通过样地调查、物种鉴定和多样性指数计算等方法，评估和比较了不同城市居住区的植物多样性[3,8−9]。研究表明，城市居住区植物群落结构和多样性受到多种因素影响，包括土地利用强度、绿化覆盖率、居民环保意识、管理维护水平等人为因素[10−11]，以及气候、土壤类型等自然因素[12−13]。尽管如此，科学开展城市居住区绿地规划、设计与建设，仍需明晰不同城市居住区植物群落结构与多样性特征[14]。不同气候区城市居住区植物群落特征和多样性差异显著[15]，居住区绿地植物配置需遵循不同标准分类施策。因此，必须在明确城市居住区绿地植物群落特征基础上，进一步厘清环境、社会经济和管理模式下植物配置对不同气候区城市绿地生态系统的影响，以制定相应对策提升其多样性与生态功能。然而，当前研究大多聚焦单一城市居住区，对于区域尺度城市植被研究，多基于文献整合和遥感数据，存在不同研究文献植被调查标准不统一、遥感图像难以精确反映居住区绿地植被特征等问题。城市居住区植物群落结构和多样性实测研究相对较少，城市居住区绿地植物规律性研究大多集中于单一维度（如本土植物、自生植物等）[16]，难以全面反映居住区绿地植物群落分布规律。

因此，本研究以我国北方典型城市居住区绿地植物为研究对象，选取 6 个城市 39 个居住区 783 块绿地开展样地调查，定量解析不同城市居住区植物群落组成异同及其形成原因，揭示我国北方居住区植物群落结构特征及多样性分异规律，为北方居住区绿地植物配置和建设优化提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域概况

本研究基于地理位置和气候条件，选取了 6 个

北方典型城市（北京、西安、青岛、沈阳、迁安、西宁）开展调查。在选取城市时，不仅考虑了地理位置和气候类型[17]，还结合了各地所处的植被区划和典型植被类型，确保样本具有区域代表性[18]。北京与迁安虽同处暖温带半湿润地区，均属于华北落叶阔叶林植被亚区，但北京位于太行山东麓，受山地丘陵影响，天然植被类型以栓皮栎、元宝枫等暖温型落叶阔叶林为主；而迁安位于燕山南麓与渤海湾之间，受海陆气候交替影响，其天然植物组成呈现出自华北向东北过渡的分布特征。沈阳处于中温带湿润区，属于东北针阔混交林区，天然植被以红松、白桦为代表。青岛则处于暖温带湿润区，沿海地带的常绿灌丛和草本植物种类丰富。西安地处秦岭北麓，具有暖温带与亚热带过渡地带特征，植物群落类型多样。西宁则处于青藏高原东缘，属高原温带半干旱区，植被以高寒草甸和灌丛为主，生态环境条件与东部城市差异显著。以上城市涵盖了从东部沿海到西部高原、从暖温带到中温带不同自然区划，能够基本代表我国北方不同气候区的植物群落结构和多样性特征。所选城市基本情况见表 1。

结合所选城市高分影像和城市总体规划等资料，同时考虑各居住区的可达性与可测性，在每个城市内选择高档、普通、新建和老旧等不同位置和类型的居住区（表 2），共计 39 个城市居住区作为研究对象。其中，新建与老旧居住区根据国务院办公厅印发《关于全面推进城镇老旧小区改造工作的指导意见》，以 2000 年为节点划分，高档与普通居住区则根据房价水平与当地平均房价水平进行比较划分。

1.2　样地布设与调查方法

研究团队于 2023 年 6—8 月采用全面调查法对选取样地（共计 783 个样地）开展实地调查。本研究将空间上独立的社区绿地斑块（如宅旁绿地、道路绿地、组团绿地、中心绿地）定义为样地，作为植被调查与统计分析的基本单元。样方布设遵循典型取样法原则，并根据样地特征进行差异化设置[19−20]。布设木本样方用于乔木层与灌木层植被调查，对于宅旁绿地和组团绿地，以样地中心点为基准设置 1 个 5 m × 10 m 木本样方；对于道路绿地等狭长形区域，按照 50 m^2 样方面积设置条形木本样方。对于中心绿地等面积较大样地，设置 2 个 5 m × 10 m 木本样方作为生物学重复，以确保取样代表性和数据可靠性。在每个木本样方中心设置 1 个 1 m × 1 m 草本样方，用于草本层植被调查。调查过程中，在木本样方内记录所有乔灌木物种名称、个体数量，并采用专业测量工具测定乔木树高、胸径、盖度。在草本样方内记录草本物种名称、个体数量，用目测法估测其盖度。本研究共完成乔木样方调查 839 个，灌木样方调查 839 个，草本样方调查 839 个。在所有样方内（包括木本样方和草本样方）记录藤本植物的物种名称，参照《中国外来入侵物种名单》和区域乡土植物数据库判定其乡土/入侵属性。所有调查数据均采用双人独立记录并进行交叉验证，以确保数据准确性和可靠性。

1.3　数据计算与统计分析

1.3.1　重要值计算

重要值是反映物种在群落中地位和作用的综合指标。重要值越高，表明该物种在群落中数量越多、分布越广、所占的生物量或覆盖度越大，因此其在群落中的重要性也越大。一般将重要值大于 10 的物种视为优势种。分层计算群落物种重要值[21−24]。

$$I_a = (R_D + R_{D0} + R_F)/3 \tag{1}$$

$$I_s = (R_D + R_C + R_F)/3 \tag{2}$$

$$I_h = (R_D + R_F)/2 \tag{3}$$

式中：I_a 为乔木重要值，I_s 为灌木重要值，I_h 为草本重要值。R_D 为相对多度（单个物种株数/所有物种总株数），R_{D0} 为相对显著度（单个物种胸高断面积/所有物种断面积），R_F 为相对频度（单个物种出现的样方数/所有样方数），R_C 为相对盖度（单个物种盖度值之和/所有物种盖度值总和）。

1.3.2　物种多样性计算

对原始数据进行物种丰度的稀疏化处理，计算

表 1　所选城市基本情况

Tab. 1　Basic information of selected cities

城市	经纬度	植被亚区	气候区
西宁	36°37′01″E，101°46′41″N	高寒草甸和灌丛	高原温带半干旱区
西安	34°20′29″E，108°56′23″N	暖温带落叶阔叶林、灌丛	暖温带半湿润区
北京	39°57′33″E，116°17′53″N	华北落叶阔叶林	暖温带半湿润区
迁安	39°59′57″E，118°42′06″N	华北落叶阔叶林	暖温带半湿润区
青岛	36°03′58″E，120°22′57″N	沿海常绿阔叶林和灌丛	暖温带湿润区
沈阳	41°48′20″E，123°25′53″N	东北针阔混交林区	中温带湿润区

表 2 各城市样地基本信息及样点数统计

Tab. 2 Basic information of sample plots in each city and statistics of sample points

城市	居住区类型	居住区名称	居住区面积/hm^2	建成时间	容积率	绿化率/%	样地数量
西宁	普通老旧	邮政局家属	0.291 0	1998	1.20	20	3
	普通新建	泰和园	5.264 2	2004	1.20	30	20
		海北小区	3.618 7	2005	1.20	30	13
		城南花苑	12.616 0	2009	1.20	30	27
	高档新建	省邮运局家属院	1.264 4	2008	1.20	30	4
		广汇九锦园	4.678 0	2019	2.26	37	20
西安	普通老旧	西五路109号家属院	1.382 6	1995	2.50	35	8
		和谐军休家园	2.511 1	2000	1.20	30	16
	高档老旧	电信十所家属院	5.075 9	2000	1.20	30	18
	普通新建	钟楼小区	1.947 0	2006	2.00	30	7
		明园小区	6.058 0	2009	3.50	20	27
	高档新建	雅荷春天(南区)	8.255 3	2011	2.12	38	30
		山水香堤别墅	4.312 2	2017	2.12	30	16
北京	普通老旧	科育社区	4.210 2	1985	2.83	30	17
		东王庄小区	12.221 0	1998	2.00	35	40
	高档老旧	农科院小区	7.028 4	1972	1.80	35	26
		柏儒苑小区	5.074 2	1998	1.52	30	14
	普通新建	逸成东苑	10.848 0	2006	2.38	30	54
		八家嘉园	12.527 0	2014	2.00	28	20
	高档新建	竹溪园	11.000 0	2010	1.09	50	19
迁安	普通老旧	燕春小区	6.587 7	2000	2.00	30	8
		常青小区	7.079 1	1992	2.00	20	11
	普通新建	兴安小区	6.785 5	2002	1.00	30	13
		苏新社区	7.626 3	2012	2.50	33	21
		河畔人家	1.821 1	2006	2.00	31	6
	高档新建	广场君府	2.539 9	2013	2.00	37	7
		上东水郡	8.403 0	2013	1.94	30	41
青岛	普通老旧	园林局职工宿舍	5.974 5	1985	1.20	30	17
		双玉新苑(南区)	5.524 5	2000	2.17	20	34
	高档老旧	金海湾	1.396 1	1998	1.00	30	9
	普通新建	福临万家(一期)	10.283 0	2011	1.50	47	29
		船院小区	4.343 2	2014	1.20	35	16
	高档新建	翠海宜居	8.559 6	2006	1.00	40	53
		龙湖春江天境	3.480 4	2022	4.00	30	9
沈阳	普通老旧	红星小区	3.478 2	1992	2.00	25	15
		合厚社区	3.134 2	2000	2.60	25	18
	高档老旧	宝环社区	1.910 1	1995	2.00	39	13
	普通新建	美好愿景	18.926 0	2016	2.50	40	25
	高档新建	方大胜景	10.648 0	2017	1.80	50	39

Shannon-Wiener 多样性指数（H'）、Simpson 多样性指数（D）、Pielou 均匀度指数（J）、Jaccard 距离（$J_{Distance}$）[25]。在计算 Jaccard 距离时，将每个城市作为计算单元，分别计算了乔木层、灌木层和草本层以及所有植物的 Jaccard 距离矩阵。所有计算均在 R v.4.2.2 中的 vegan 包进行。

$$H' = -\sum_{i=1}^{S}(P_i \ln P_i) \tag{4}$$

$$D = 1 - \sum_{i-1}^{S} P_i^2 \tag{5}$$

$$J = H / \ln S \tag{6}$$

$$J_{Distance} = 1 - \frac{c}{a+b-c} \tag{7}$$

式中：S 为样方中记录物种数，P_i 为第 i 个物种相对多度，a 是第 1 个样本的物种数，b 是第 2 个样本的物种数，c 是两个样本之间共有的物种数。

1.3.3　样方聚类分析

聚类分析旨在揭示不同城市绿地样方的植物群落结构特征，为绿地植物的配置与管理提供科学依据。基于植物重要值对 6 个城市调查样方进行聚类分析，采用轮廓系数评价聚类结果，并进行类群划分。在每个类群中，将重要值与最大值相差在 10% 以内的植物视为主要成分[26−27]，进一步统计这些主要成分的生活型，整合分析各类群优势种生活型特征。

1.3.4　驱动因素分析

基于植物群落构建的气候限制、社会经济水平、居住区开发强度及绿化条件，结合前人研究[28−30]，选取年均降水量、年均温度、年均风速、人均 GDP、容积率、绿化率 6 个影响因子，采用随机森林回归模型分析 6 个影响因子对 7 类优势种植物配置模式（“乔”“灌”“草”“乔灌”“乔草”“灌草”“乔灌草”）占比的驱动作用。所有环境因子均进行标准化处理以消除量纲差异影响。模型训练后，使用随机森林 feature_importances 方法评估各环境因子在模型中的相对重要性。重要性得分越高，表示该因子对植物配置占比预测的贡献越大。通过分析重要性得分，识别不同植物配置类型的主要驱动因子。

2　结果和分析

2.1　植物群落的物种组成

本研究共记录 6 个调查城市居住区绿地植物 756 种（表 3），隶属于 108 科，378 属。其中，乔木 211 种，隶属于 49 科 92 属；灌木 156 种，隶属于 47 科 84 属；草本 344 种，隶属于 68 科 235 属；藤本 54 种，隶属于 18 科 32 属。有 15 科包含 10 种及以上植物，其中物种最多的 3 科为蔷薇科（Rosaceae，72 种）、菊科（Asteraceae，70 种）和禾本科（Poaceae，55 种）。在 6 个调查城市中，青岛调查植物种数最多，共发现 327 种；北京、迁安、西宁植物种类数相对较少，分别为 182、216、226 种；西安乔木、灌木、草本种类数量最为接近，分别为 100、71、113 种；迁安各生活型植物种类中草本最多（101 种）接近乔灌木数量之和（103 种）。在 39 个居住区中，平均每个小区有 41 种植物。沈阳各小区平均植物种类数量最高，平均每小区达到 54 种。总体来看，乡土树种在各城市绿地植物群落中占据较高比例，入侵物种的比例相对较低，未对生态系统造成显著威胁（图 1）。北京乡土树种比例最高，达到 95.24%，其次是西安（87.96%）和迁安（87.05%）。沈阳入侵物种比例最高，为 3.61%，而西安入侵物种比例最低，仅为 0.70%。

根据不同城市不同生活型绿地的植物重要值可发现（表 4），在 6 个调查城市中，主要优势种包括榆树（*Ulmus pumila*）、紫叶李（*Prunus cerasifera* ‘Atropurpurea’）、一球悬铃木（*Platanus occidentalis*）、大叶黄杨（*Buxus megistophylla*）、冬青卫矛（*Euonymus japonicus*）、狗尾草（*Setaria viridis*）和麦冬（*Ophiopogon japonicus*）。榆树和一球悬铃木等乔木类优势种提高了绿化覆盖率和景观层次；大叶黄杨和麦冬等灌草

表 3　北方不同城市居住区植物种类数量特征

Tab. 3　Quantitative characteristics of plant species in residential areas of different cities in northern China

城市	调查居住区数	乔木/种	灌木/种	草本/种	藤本/种	植物/种	每个居住区平均植物种类/种
西宁	6	67	34	117	8	226	38
西安	7	100	71	113	25	309	44
北京	7	84	46	44	8	182	26
迁安	6	59	44	101	12	216	36
青岛	7	97	77	125	28	327	47
沈阳	5	84	58	112	15	269	54
合计	39	211	156	344	54	765	41

注：乔木、灌木、草本、藤本的合计种类数量为剔除各城市重复物种后统计的结果。

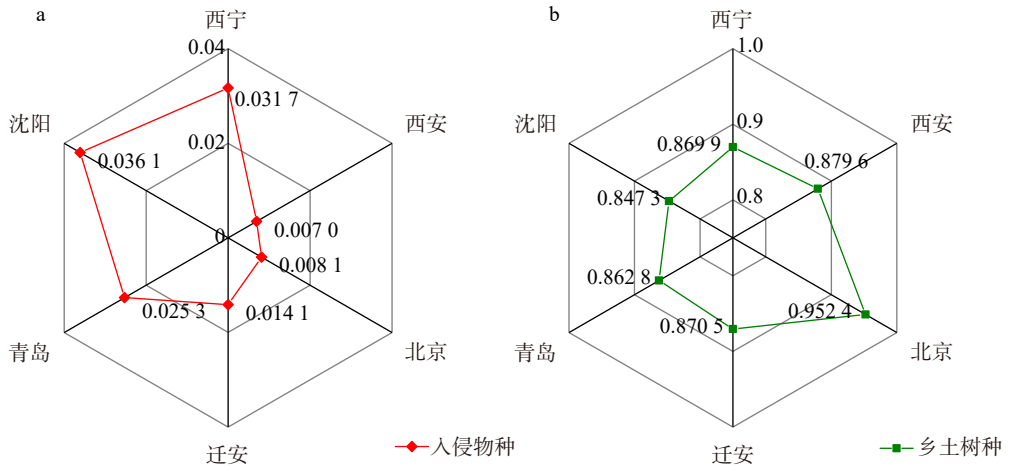


图 1 调查城市居住区入侵物种占比(a)和乡土树种占比(b)

Fig. 1 Proportions of invasive species (a) and native tree species (b) in residential areas of the surveyed cities

表 4 北方城市居住区乔木、灌木、草本重要值前 3 位的优势种

Tab. 4 Dominant species with top 3 important values of trees, shrubs, and herbs in residential areas of northern cities

城市	乔木		灌木		草本	
	种名	重要值/%	种名	重要值/%	种名	重要值/%
西宁	云杉 *Picea asperata*	10.53	榆叶梅 *Prunus triloba*	15.58	早熟禾 *Poa annua*	17.88
	榆 *Ulmus pumila*	10.38	紫丁香 *Syringa oblata*	14.44	麦冬 *Ophiopogon japonicus*	10.63
	花椒 *Zanthoxylum bungeanum*	6.87	连翘 *Forsythia suspensa*	6.01	黑麦草 *Lolium perenne*	6.50
西安	女贞 *Ligustrum lucidum*	24.17	石楠 *Photinia serratifolia*	11.71	麦冬 *Ophiopogon japonicus*	46.51
	棕榈 *Trachycarpus fortunei*	6.78	小蜡 *Ligustrum sinense*	8.32	酢浆草 *Oxalis corniculata*	6.38
	山樱 *Prunus serrulata*	6.05	南天竹 *Nandina domestica*	6.22	早熟禾 *Poa annua*	5.85
北京	栾 *Koelreuteria paniculata*	14.47	大叶黄杨 *Buxus megistophylla*	82.60	麦冬 *Ophiopogon japonicus*	33.12
	圆柏 *Juniperus chinensis*	10.67	月季 *Rosa chinensis*	6.19	鸢尾 *Iris tectorum*	13.37
	一球悬铃木 *Platanus occidentalis*	8.13	小叶黄杨 *Buxus sinica* var. parvifolia	5.86	玉簪 *Hosta plantaginea*	11.75
迁安	龙爪槐 *Styphnolobium japonicum* ‘Pendula’	10.64	冬青卫矛 *Euonymus japonicus*	28.85	狗尾草 *Setaria viridis*	32.32
	紫叶李 *Prunus cerasifera* ‘Atropurpurea’	9.69	大叶黄杨 *Buxus megistophylla*	12.04	藜 *Chenopodium album*	6.83
	一球悬铃木 *Platanus occidentalis*	4.95	锦带花 *Weigela florida*	8.49	千屈菜 *Lythrum salicaria*	4.34
青岛	国槐 *Styphnolobium japonicum*	14.05	无花果 *Ficus carica*	17.17	狗尾草 *Setaria viridis*	59.06
	紫叶李 *Prunus cerasifera* ‘Atropurpurea’	14.69	小叶黄杨 *Buxus sinica* var. *parvifolia*	15.90	麦冬 *Ophiopogon japonicus*	9.26
	雪松 *Cedrus deodara*	6.46	石楠 *Photinia serratifolia*	12.79	藜 *Chenopodium album*	7.33
沈阳	榆 *Ulmus pumila*	8.39	紫丁香 *Syringa oblata*	13.01	狗尾草 *Setaria viridis*	37.37
	花红 *Malus asiatica*、五角枫 *Acer truncatum*	5.05	锦带花 *Weigela florida*	9.20	藜 *Chenopodium album*	12.12
	美国红梣 *Fraxinus pennsylvanica*	4.97	榆叶梅 *Prunus triloba*	6.50	玉簪 *Hosta plantaginea*	10.56

类优势种适应性较强且维护成本较低，广泛应用于提高各类居住区植被覆盖率。在乔木层面，西安树种数量最多(100 种)，其主要优势种女贞重要值最高(24.17%)，表明西安乔木建设质量相对较好。沈阳乔木优势种重要值最低，榆树为 8.39%、花红(*Malus asiatica*)和五角枫(*Acer truncatum*)合计 5.05%、美国红梣(*Fraxinus pennsylvanica*)为 4.97%。这与沈阳乔木种类较少(84 种)和物种丰富度(269 种植物)较低有关。灌木层面，大叶黄杨作为北京和迁安优势种，重要值分别为 82.60%、12.04%，表明其耐寒和常绿特点在暖温带半湿润区具有显著优势。优势种石楠(*Photinia serratifolia*)适应温暖湿润气候，广泛分布在青岛和西安(12.79%、11.71%)，其维护成本低，且具备较强耐受性、适应性和较为突出的美学功能，是北方居住区常用高质量植被建设植物。草本层面，麦冬(人工植被)和狗尾草(广谱性田间杂草)作为优势种同时出现在多个城市，且重要值占比大，它们在绿化设计中因其较强适应性、低维护成本

以及较好的视觉效果而被建设者普遍采用。同时，鸢尾(*Iris tectorum*)(13.37%，北京)、藜(*Chenopodium album*)(12.12%，沈阳)、玉簪(*Hosta plantaginea*)(11.75%，北京)等优势种在一定程度上增加了绿地景观效果，但过度使用优势种可能会减少自生植物，降低植物多样性。因此，在优化城市绿地配置时，还需考虑自生植被状况，以进一步提高植被建设质量。

2.2　生活型构成差异

聚类分析表明，调查城市各居住区绿地植物群落结构中，以“乔”“灌”“草”单一生活型配置类群为主，达到 68.9%(图 2)，表明这 6 个城市居住区绿地营造与维护有利于单一生活型的形成。其中，以“乔”为优势种的生活型配置类群占比最大(28.5%)；以“乔灌”为优势种的生活型配置类群占比最小(3.7%)；以“乔灌”“乔草”“灌草”“乔灌草”为优势种的复合配置类群共占 31.1%，其中“乔灌草”为优势种的复合植物配置类群仅占 4.2%。

具体来看，西安、沈阳、迁安以“乔”“灌”“草”单一生活型配置最为显著。北京、青岛、西宁复合配置类群较多，3 市的“乔灌”“乔草”“灌草”“乔灌草”4 种优势植物配置的类群合计占比约 40%。“乔”作为优势植物生活型的类群，在沈阳(38.5%)、迁安(38.5%)、北京(36.4%)、西安(33.8%)4 个城市占比超 30%。“灌”作为优势植物生活型类群，在西宁(36.0%)占比最大。“草”作为优势植物生活型类群在迁安、沈阳、青岛、西安居多，占比均为 25% 左右。青岛优势植物生活型配置类群占比相对均衡，“乔”“草”占比最多，均为 22.6%，“乔灌”占比最少，为 6.1%。西宁优势植物生活型复合配置类群中“乔草”最多，占比 28.1%。其余 5 个城市复合配置类群中“灌草”最多，占比为 11.3%～18.2%。

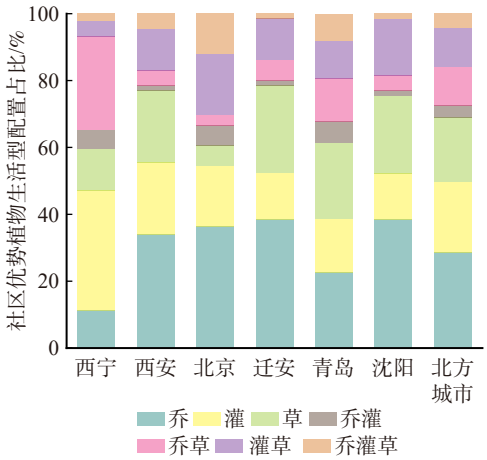


图 2　北方城市居住区各个类群优势植物生活型配置

Fig. 2　Dominant plant life form configuration of various groups in residential areas of northern cities

2.3　植物群落多样性特征

从 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数结果可以看出，在各个城市中，乔木层植物多样性最高，草本层次之，灌木层最低(图 3)。具体来看，乔木层通常具有较高物种丰富度和均匀度，而灌木层物种组成相对贫乏，草本层在部分城市中均匀度较高，但物种丰富度最低，表明同一城市居住区绿地营造时对草本植物种类选择较为单一且具有相近偏好。

在 6 个城市中，北京和青岛乔木层 Simpson 多样性指数最高(0.89～0.95)，大部分城市草本层 Simpson 多样性指数在 0.78～0.88 范围内，而灌木层最低(0.39～0.71)。这表明乔木层和草本层物种相对均衡，优势种群占比相对稳定，灌木层物种组成更单一。Pielou 均匀度指数反映了物种在群落中的均匀分布情况。草本层 Pielou 均匀度指数普遍较高，部分城市接近 1.00，西宁和青岛草本层 Pielou 均匀度指数达到 0.98±0.02，物种分布较均匀。相比之下，乔木层 Pielou 均匀度指数最低，其中迁安乔木层 Pielou 均匀度指数最低(0.77±0.03)，表明乔木绿化偏好“标准化”树种，导致物种同质化。各多样性指标显示，所调查城市居住区绿地多样性特征在不同城市间存在差异，因此使用 Jaccard 相似性指数进一步比较不同城市植物多样性差异。

基于 Jaccard 距离计算各城市植物多样性的不相似性(表 5)，结果显示西宁与其他城市植物群落差异最大，北京与其他城市植物群落差异相对较小。西宁位于高原温带半干旱区，植被以高寒草甸和灌丛为主，气候条件和植被类型导致其植物群落的组成与其他城市差异较大。北京与迁安、青岛之间的 Jaccard 距离值分别为 0.764 1、0.818 2，表明城市间的植被类型和物种组成不相似性相对较低，这与其相似的气候密切相关。北京和迁安均位于暖温带半湿润区，青岛位于温带湿润区，三者气候特点为冬季寒冷干燥，夏季高温湿润。沈阳与西宁(0.793 5)植物群落间的不相似性相对较低。沈阳位于中温带湿润区，植被以东北针阔混交林为主，与西宁气候类型存在差异，但降水量分布相似且均属于温带气候，导致其植物群落具有一定的相似性。

居住区绿地植物群落的不相似性呈现出显著的生活型分化规律(表 6～8)。草本群落的城市间差异最大(平均 Jaccard 距离 0.823 4)，灌木群落次之(平均 Jaccard 距离 0.780 9)，乔木群落最小(平均 Jaccard 距离 0.693 4)，草本层对空间与环境异质性的响应最为敏感。

乔木群落的不相似性整体较低，并呈现邻近城

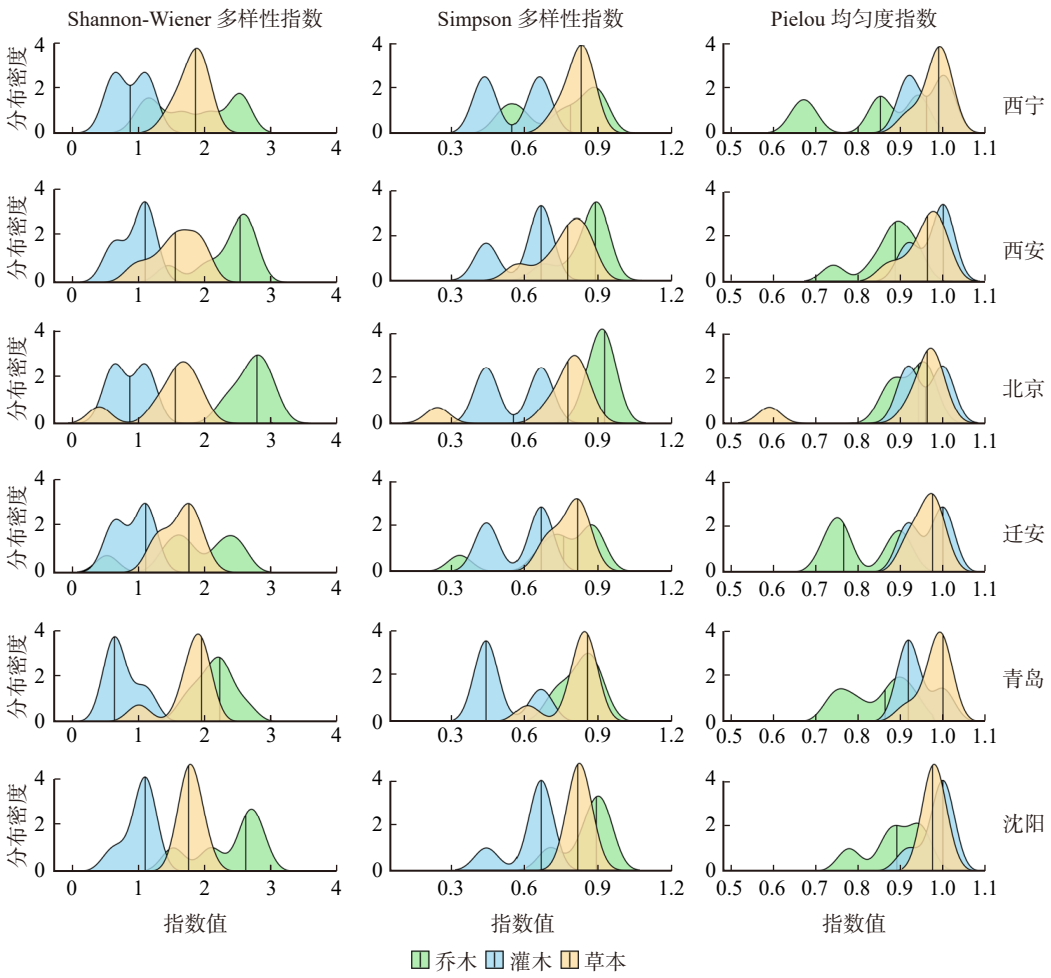


图 3 北方城市居住区植物群落多样性特征

Fig. 3 Diversity characteristics of plant communities in residential areas of northern cities

表 5 不同城市居住区绿地植物群落 Jaccard 距离

Tab. 5 Jaccard distance of plant communities in residential green space of different cities

城市	迁安	北京	沈阳	青岛	西安	西宁
迁安	0.000 0					
北京	0.764 1	0.000 0				
沈阳	0.817 4	0.850 8	0.000 0			
青岛	0.857 0	0.818 2	0.845 6	0.000 0		
西安	0.887 1	0.864 4	0.883 8	0.838 8	0.000 0	
西宁	0.881 2	0.892 3	0.793 5	0.928 2	0.935 3	0.000 0

表 6 不同城市居住区乔木群落 Jaccard 距离

Tab. 6 Jaccard distance of arbor communities in residential area of different cities

城市	迁安	北京	沈阳	青岛	西安	西宁
迁安	0.000 0					
北京	0.578 4	0.000 0				
沈阳	0.650 9	0.716 4	0.000 0			
青岛	0.672 7	0.643 4	0.718 5	0.000 0		
西安	0.706 3	0.702 7	0.741 7	0.678 1	0.000 0	
西宁	0.687 5	0.697 5	0.692 3	0.741 9	0.773 0	0.000 0

表 7　不同城市居住区灌木群落 Jaccard 距离

Tab. 7　Jaccard distance of shrub communities in residential area of different cities

城市	迁安	北京	沈阳	青岛	西安	西宁
迁安	0.000 0					
北京	0.674 7	0.000 0				
沈阳	0.760 0	0.772 7	0.000 0			
青岛	0.761 1	0.747 5	0.800 0	0.000 0		
西安	0.817 4	0.787 9	0.854 7	0.672 6	0.000 0	
西宁	0.802 5	0.753 8	0.827 2	0.819 1	0.861 7	0.000 0

表 8　不同城市居住区草本群落 Jaccard 距离

Tab. 8　Jaccard distance of herb communities in residential area of different cities

城市	迁安	北京	沈阳	青岛	西安	西宁
迁安	0.000 0					
北京	0.816 8	0.000 0				
沈阳	0.733 0	0.873 2	0.000 0			
青岛	0.772 0	0.840 0	0.719 6	0.000 0		
西安	0.822 0	0.890 4	0.814 4	0.767 7	0.000 0	
西宁	0.818 2	0.903 8	0.851 0	0.839 4	0.889 4	0.000 0

市趋同现象。北京与迁安同属华北落叶阔叶林亚区，其乔木组成高度相似(Jaccard 距离为 0.578 4)。西安与西宁的乔木不相似性最高，Jaccard 距离达 0.773 0。各城市灌木群落的不相似性存在差异。西安(暖温带–亚热带过渡带)与青岛(暖温带滨海)虽地理距离较远，但其不相似性却最低(Jaccard 距离为 0.672 6)，这主要归因于观赏灌木(如月季、冬青)的跨区域趋同配置。西安与西宁的灌木不相似性最高(Jaccard 距离为 0.861 7)。西宁灌木层与其他城市的的平均 Jaccard 距离最高(0.812 9)，而迁安的最低(0.763 1)。草本群落的城市间分异最显著。北京与其他城市的 Jaccard 距离普遍较高，平均值达到 0.864 8，其中北京与西宁的 Jaccard 距离最大(0.903 8)，体现了平原与高原生境的根本差异。地理梯度效应在草本层尤为突出，迁安与西宁的 Jaccard 距离从乔木层的 0.687 5 显著跃升至 0.818 2(增幅达 19.1%)，表明草本植物组成对地理隔离的敏感性高于木本植物。

2.4　植物组成变化的影响因素分析

基于随机森林回归模型分析植物配置的驱动因子。结果表明，年均降水量和容积率是影响单一植物配置模式的主要因素(图 4)。年均降水量对以“草”为优势种的生活型配置类群影响最大，其重要性得分为 0.473 8，表明水分是草本配置模式的主导因子。对于以“乔”为优势种的生活型配置类群，容积率的影响最为显著，重要性得分为 0.428 4，表明建筑密度对乔木配置模式的影响较大。在以“乔灌”为优势种的生活型配置类群中，年均降水量(0.231 6)和容积率(0.288 3)均为重要因子，表明水分条件和建筑密度共同影响复层植物群落配置。优势植物复合型配置模式“乔灌草”对多个环境因子的响应较均衡，年均风速(0.234 7)、绿化率(0.225 2)和年均温度(0.192 1)对其影响较大，而容积率(0.064 0)和年均降水量(0.123 9)的影响相对较小。

植物多样性指数与自然、社会经济因素相关关系显示(图 5)，社会经济因素是影响北方居住区绿地植物多样性的主要因素。其中，居住区面积与 Pielou 均匀度指数呈显著正相关(r = 0.207 4，p < 0.05)，是影响北方居住区绿地植物多样性的关键因素之一。这表明面积较大的居住区可提供更大的绿地空间，从而促进物种的均匀分布。人均 GDP 和居住区建成时间与 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数及 Pielou 均匀度指数之间存在一定的正相关趋势(r = 0.102 4 ~ 0.116 2)。这意味着经济发展水平较高、建成时间较长的居住区在植物类型选择上更加多样化。相比之下，年均降水量、年均温度、年均风速等自然因素对植物多样性指数的影响不显著，反映出城市居住区绿地在初期营建与后期维护中受到较强的人为干扰。总体来看，社会经济发展水平，尤其居住区面积是植物多样性的关键因素。未来城市居住区绿地规划与营建应注重物种多样性与均匀度的平衡，以提升生态系统的稳定性与可持续性。

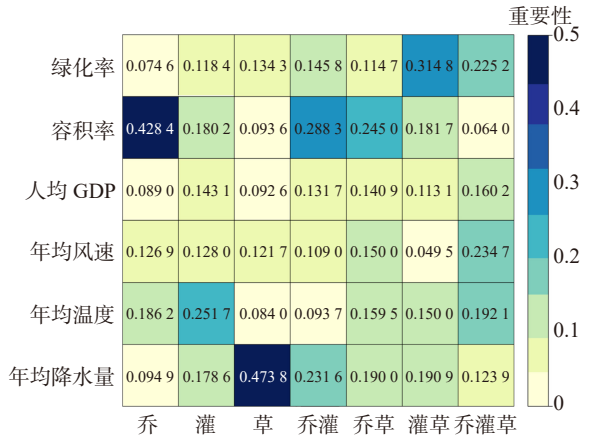
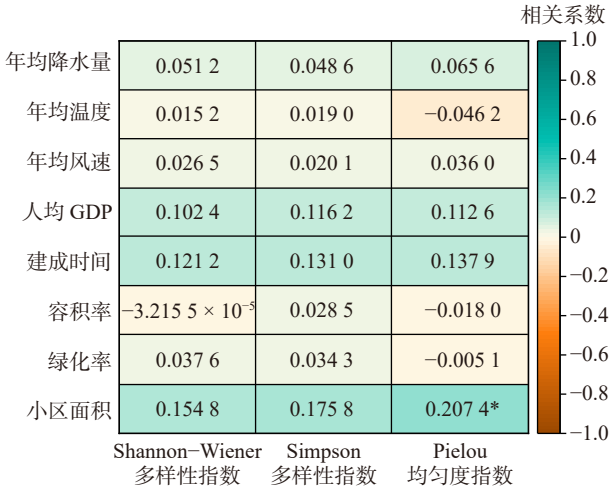


图 4 影响因子对优势种植物配置模式的驱动重要性

Fig. 4 Driving importance of influencing factors on configuration patterns of dominant species



*表示 $p < 0.05$。

图 5 植物多样性指数与自然、社会经济因素的相关性

Fig. 5 Correlations between plant diversity index and natural, socio-economic factors

3 讨 论

3.1 城市居住区植物组成

本研究调查了北方 6 个典型城市中的 39 个居住区，共发现植物 108 科 378 属 756 种，种类丰富且具有明显的地域性特征。气候条件、土壤类型和现有植被分布是影响植物组成的重要因素[29]。蔷薇科植物因其符合《园林绿化工程施工及验收规范》(CJJ 82—2012)中“优先选用适生性强、观赏价值高的乡土植物”的要求，在 39 个居住区绿地中的使用频率最高(25 属 72 种)。植物种类构成中，乡土种、归化种和外来种的比例分布反映了不同城市绿地植物配置特点。总体来看，乡土树种在各城市绿地植物群落中占据较高比例，入侵物种比例相对较低，未对生态系统造成显著威胁(图 1)。例如，北京的乡土树种比例最高，达到 95.24%，其次是西安(87.96%)和西宁(86.99%)。这些城市为提升绿地生态功能和适应性，在植物配置中倾向于使用本地植物。这与近年来出台的政策，如《北京市园林绿化专项规划(2018—2035 年)》和《西安市城市绿化条例》有关。相比之下，沈阳入侵物种比例较高，达到 3.61%，而西安最低，仅为 0.69%。根据《沈阳市城市绿地保护规定》，沈阳仅提出新建项目配套绿化工程同步设计施工并对古树名木实行分级保护，未对外来物种进行明确规定，这导致了政策对外来物种引入的限制有所放松。与此不同，西安严格执行《陕西省林业有害生物防治检疫条例》，要求外来苗木必须经过检疫备案，并通过“外来植物准入清单”制度限制高风险物种的引入。这表明，不同城市在外来物种引入和管理策略上的差异影响了城市居住区绿地植物的物种组成。

3.2 城市居住区植物多样性差异

近年来，居住区绿地设计偏好逐渐从具有庞大树冠的遮荫树种转向冠层较小或个体较小的观花树种[30−31]，如西府海棠(*Malus micromalus*)、日本晚樱(*Prunus serrulata* var. *lannesiana*)和紫叶李等。不同城市居住区在植物种类选择上存在差异，这不仅受自然条件影响，还受到设计偏好、苗木市场价格以及供应链等因素的综合影响[32]。北京和西宁侧重生态功能，优先使用本土树种，如栾树(*Koelreuteria paniculata*)和榆树；青岛和迁安则多引入观赏性强的外来植物，如紫叶李和一球悬铃木，以增强景观效果；沈阳和西安较多使用耐寒树种，如榆树和美国红栌，这些树种在市场上易得且价格较低；青岛和迁安引入易获取且成本适中的外来物种，如紫叶李和石楠。城市绿地树种组成受到生态功能优先、植物多样性保护、景观美学追求、实际功能需求和文化风格建设等综合因素的影响[33]。此外，不同建成时间的居住区植物组成、生活型特征、地理来源特征及观赏树种特征存在差异[34]，早期建成的居住区多以耐寒、耐旱的乡土树种为主，新建居住区则倾向于使用耐污染的外来树种[35]。

城市发展水平较高、绿地投入较大的城市(如北京)，其植物群落组成相对稳定[36]；高档居住区倾向于使用更多类型的植物营造景观[37]，且有更加规范和完善的管理维护制度。为提升城市居住区绿地植物多样性，可从提升居住区绿地经营、维护水平与资金投入方面入手。例如，可建立多元化资金支持机制，政府设立专项基金支持老旧居住区改造，同时通过“认养绿地”和“社区众筹”引入社会资本参与[38−40]；为居住区制定长期管护计划，引入专业团队或培训志愿者，鼓励居民参与维护[41−42]；借鉴首都花园式居住区管理维护经验，通过制定统一的规划与管理维护标准，提升居住区绿地的生态功能和景观价值[43]。

本研究发现，社会经济发展等人为因素是导致城市居住区植物多样性变化的主要因素[44−45]。城市居住区绿地植物多样性空间分布规律与气候条件的关系并不完全一致，这表明城市绿地植物群落受到显著的人类干扰[46]。人均 GDP、建成时间、容积率和绿化率对北方城市居住区植物多样性的影响更为显著。但前人研究也证实，气候要素是植物多样性长期变化的最主要驱动因素[47−48]。未来研究可进一步结合更精细的数据，探讨气候因素和人类活动强度对城市绿地生物多样性差异的潜在影响。

3.3　研究不足与展望

本研究综合考虑了居住区类型、建成时间、地理位置等要素，在 6 个北方典型城市选择了 39 个居住区，布设了 2 517 个调查样方。然而，由于调查期间城市居住区管控严格，进入居住区的难度增加，导致调查样地数量和代表性存在一定的限制。为适应城市社区绿地碎片化特征，木本调查样方面积进行了差异化设置，虽增强了实地操作性，但可能会影响跨类型群落参数（如密度、盖度）的直接可比性。尽管如此，研究团队通过增加样本量、设计重复和优化统计方法，减少了这些限制的影响。

本研究探明了北方典型城市居住区的植被群落结构与多样性特征，验证了样地调查方法对小型公园植物多样性特征提取的有效性[49]。未来，随着城市居住区开放性增强和新调查技术的涌现，可达性与可测性限制有望解除，从而提升样地选取和布设的科学性与代表性。融合地面调查与遥感技术[50]，可精准识别城市居住区植被多样性特征，为绿地提质增效提供支撑。

4　结　　论

本研究对北方不同城市居住区绿地植物开展了实地调查，分析了绿地植物物种组成、群落结构与植物多样性特征。

（1）调查城市居住区绿地植物共 756 种，隶属于 108 科 378 属。沿海城市青岛植物种类最多，为 327 种；内陆城市北京、西宁植物种类相对较少，分别为 182、226 种。调查城市每个居住区平均植物种类为 41 种，主要优势种有榆树、紫叶李、一球悬铃木、大叶黄杨、冬青卫矛、狗尾草和麦冬等。北京乡土树种占比最高（95.24%），沈阳入侵物种占比最高（3.61%），西安最低（0.69%）。

（2）调查城市居住区植物种类较为丰富，但优势种生活型配置单一。单一生活型配置（68.9%）为主导，复合植物配置类群（“乔灌”“乔草”“灌草”“乔灌草”）占 31.1%，以“乔灌草”为优势种的配置仅占 4.2%。

（3）植物多样性呈乔木层最高、草本层次之、灌木层最低的规律。乔木层物种丰富度和均匀度较高，而灌木层物种组成单一。西宁与其他城市的植物群落差异最大，北京的与迁安、青岛的 Jaccard 距离值相对较低（0.764 1、0.818 2），植物群落结构较为相似。城市间草本群落的差异最大（平均 Jaccard 距离 0.823 4），灌木群落次之（0.780 9），乔木群落最小（0.693 4），草本层对空间与环境异质性的响应最为敏感。

（4）社会经济因素对植物多样性的影响大于自然因素。年均降水量和容积率是优势植物单一植物配置模式的主要驱动因素。居住区面积、城市人均 GDP 和建成时间等社会经济因素是影响植物多样性的主要驱动因素。未来城市居住区绿地规划中应进一步优化物种多样性与均匀度，提升生态稳定性。

参　考　文　献

[1] 毛齐正, 王鲁豫, 柳敏, 等. 城市居住区多功能绿地景观的景感生态学效应 [J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7509−7520.
Mao Q Z, Wang L Y, Liu M, et al. Landsenses ecology effects of multi-functional green space landscape in urban residential area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7509−7520.

[2] 孙然好, 陈爱莲, 李芬, 等. 城市生态景观建设的指导原则和评价指标 [J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2322−2329.
Sun R H, Chen A L, Li F, et al. Guidelines and evaluation indicators of urban ecological landscape construction[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2322−2329.

[3] Carrus G, Scopelliti M, Lafortezza R, et al. Go greener, feel better? The positive effects of biodiversity on the well-being of individuals visiting urban and peri-urban green areas[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 134: 221−228.

[4] 文志, 郑华, 欧阳志云. 生物多样性与生态系统服务关系研究进展 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 340−348.
Wen Z, Zheng H, Ouyang Z Y. Research progress on the relationship between biodiversity and ecosystem services[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 340−348.

[5] 傅伯杰, 田汉勤, 陶福禄, 等. 全球变化对生态系统服务的影响研究进展 [J]. 中国基础科学, 2020, 22(3): 25−30.
Fu B J, Tian H Q, Tao F L, et al. Progress of the impact of global change on ecosystem services[J]. China Basic Science, 2020, 22(3): 25−30.

[6] 约日古丽卡斯木, 孜比布拉·司马义, 王蕾, 等. 新疆博乐市生态环境变化对城市建设用地扩张的响应 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 252−259.
Yoeriguli K, Zibibula S, Wang L, et al. Response of ecological environment change to urban construction land expansion in Bole City of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(1): 252−259.

[7] Zhao D, Yang Q, Sun M, et al. Urbanization and greenspace effect on plant biodiversity variations in Beijing, China[J]. Urban

Forestry & Urban Greening, 2023, 89: 128119.

[8] 严珅, 孙然好. 京津冀县域城镇化与景观格局变化的协调性研究 [J]. 生态环境学报, 2018, 27(1): 62−70.
Yan S, Sun R H. Assessment of the county-level coordination between urbanization intensity and landscape patterns in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(1): 62−70.

[9] 刘珍环, 魏莱, 周义. 面向城市生物多样性提升的可持续景观格局构建机理与途径 [J]. 生态学报, 2024, 44(14): 5905−5913.
Liu Z H, Wei L, Zhou Y. Constructing sustainable landscape patterns for enhancing urban biodiversity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 5905−5913.

[10] Riley C B, Herms D A, Gardiner M M. Exotic trees contribute to urban forest diversity and ecosystem services in inner-city Cleveland, OH[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 29: 367−376.

[11] Yu B. Ecological effects of new-type urbanization in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110239.

[12] 周志翔, 邵天一, 唐万鹏, 等. 城市绿地空间格局及其环境效应: 以宜昌市中心城区为例 [J]. 生态学报, 2004, 24(2): 186−192.
Zhou Z X, Shao T Y, Tang W P, et al. The different urban green-land spatial patterns and their environmental effects: a case of the central district of Yichang City, Hubei Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(2): 186−192.

[13] Chang C R, Chen M C, Su M H. Natural versus human drivers of plant diversity in urban parks and the anthropogenic species-area hypotheses[J]. Landscape and Urban Planning, 2021, 208: 104023.

[14] Wu W, Chen W Y, Yun Y, et al. Urban greenness, mixed land-use, and life satisfaction: Evidence from residential locations and workplace settings in Beijing[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 224: 104428.

[15] Chen Y, Ge Y, Wu Z, et al. Homogenization of tree species diversity in urban green spaces along a temperature gradient in eastern China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 66: 127388.

[16] 潘妮, 闵钰婷, 赵娟娟, 等. 城市建成区自生草本植物群落的物种多样性与功能多样性: 以深圳市为例 [J]. 生态学报, 2024, 44(9): 3759−3774.
Pan N, Min Y T, Zhao J J, et al. Species and functional diversity of spontaneous herb communities in urban built-up areas: a case study of Shenzhen City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3759−3774.

[17] 王芳, 李炳元, 田思雨, 等. 中国生态地理区划更新和优化 [J]. 地理学报, 2024, 79(1): 3−16.
Wang F, Li B Y, Tian S Y, et al. Updated scheme for eco-geographical regionalization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(1): 3−16.

[18] 中国植被编辑委员会. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.
Editorial Committee for Vegetation of China. Chinese vegetation[M]. Beijing: Science Press, 1980.

[19] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533−548.
Fang J Y, Wang X P, Shen Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 533−548.

[20] 党辉, 李晶, 张渝萌, 等. 基于公平性评价的西安市城市绿地生态系统服务空间格局 [J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6970−6980.
Dang H, Li J, Zhang Y M, et al. Spatial pattern of urban green space ecosystem service in Xi'an City based on fairness evaluation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6970−6980.

[21] Curtis J T, Mcintosh R P. An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin[J]. Ecology, 1951, 32(3): 476−496.

[22] Whittaker R H. Dominance and diversity in land plant communities: numerical relations of species express the importance of competition in community function and evolution[J]. Science, 1965, 147(3655): 250−260.

[23] Whittaker R H. Communities and ecosystems[M]. New York: Macmillan, 1970.

[24] Daubenmire R F. Canopy-coverage method of vegetational analysis[J]. Northwest Science, 1959, 33: 43−64.

[25] 张金屯. 数量生态学 [M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2018.
Zhang J T. Quantitative ecology [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2018.

[26] 谭稳稳. 三江平原典型湿地植物群落特征与种间关系研究 [D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2022.
Tan W W. The research of wetlands communities structure and interspecific relation in Sanjiang Plain[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences), 2022.

[27] 李坤. 刺槐人工林转换模式对群落结构和土壤性质的影响机制 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
Li K. The influence mechanism of *Robinia pseudoacacia* plantation conversion model on its community structure and soil properties[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019.

[28] 任国平, 刘黎明, 卓东. 都市郊区景观生态质量空间差异及影响因素分析 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 252−263.
Ren G P, Liu L M, Zhuo D. Analysis of spatial differentiation of landscape ecological quality and its affecting factors in metropolitan suburbs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(21): 252−263.

[29] 吴佳怿. 居住区树种综合评价及植物配置模式研究: 以莱州市居住区为例 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2021.
Wu J Y. Comprehensive evaluation of residential tree species and study on plant configuration patterns: a case study of Laizhou City[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2021.

[30] 代佳灵. 重庆市中心城区居住区绿化树木的演变及影响因素 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
Dai J L. Changes and influencing factors of greening woody plants of residences in Chongqing metropolitan area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.

[31] Jim C Y, Liu H T. Species diversity of three major urban forest types in Guangzhou City, China[J]. Forest Ecology and Management, 2001, 146(1−3): 99−114.

[32] 路红玉. 居民对不同类型园艺设计的偏好及其对生物多样性的

影响 [J]. 分子植物育种, 2024, 22(24): 8306−8311.
Lu H Y. Resident preferences for different types of horticultural design and their impact on biodiversity[J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(24): 8306−8311.

[33] 韩宝龙, 束承继, 蔡文博, 等. 植被群落特征对城市生态系统服务的影响研究进展 [J]. 生态学报, 2021, 41(24): 9978−9989.
Han B L, Shu C J, Cai W B, et al. Research advances in the impact of vegetation community characteristics on urban ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9978−9989.

[34] 胡迅, 杨永川, 靳程, 等. 不同乡土植物概念下的居住区乡土植物应用概况: 以重庆主城区为例 [J]. 中国园林, 2022, 38(10): 26−31.
Hu X, Yang Y C, Jin C, et al. Application of native plants in residences under different concepts of native plants: a case study of Chongqing main urban area[J]. Chinese Landscape Architecture, 2022, 38(10): 26−31.

[35] Nagendra H, Gopal D. Street trees in Bangalore: density, diversity, composition and distribution[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2010, 9(2): 129−137.

[36] 刘浩, 崔岳铭, 王磊, 等. 北京市城镇化地区植物多样性评价 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(8): 48−55.
Liu H, Cui Y M, Wang L, et al. Evaluation on plant diversity in urbanization area of Beijing City[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(8): 48−55.

[37] 黄玥, 陈玉, 何宇娟, 等. 社会经济因素对上海市居住区植物多样性的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3403−3410.
Huang Y, Chen Y, He Y J, et al. Effects of socioeconomic factors on urban plant diversity of residential areas in Shanghai, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(10): 3403−3410.

[38] 吴志强, 伍江, 张佳丽, 等. “城镇老旧小区更新改造的实施机制”学术笔谈 [J]. 城市规划学刊, 2021(3): 1−10.
Wu Z Q, Wu J, Zhang J L, et al. Academic discussion on “implementation mechanism of urban old residential area renewal and renovation”[J]. Urban Planning Forum, 2021(3): 1−10.

[39] 杨君, 张煜, 蒋佳妮. 构建“共享感”空间: 城市社区环境治理的理论基础与实现路径 [J]. 中共福建省委党校 (福建行政学院) 学报, 2022(4): 134−142.
Yang J, Zhang Y, Jiang J N. Constructing a “sense of sharing” space: the theoretical foundation and implementation path of urban community environmental governance[J]. Journal of Fujian Provincial Committee Party School of CPC (Fujian Academy of Governance), 2022(4): 134−142.

[40] 宋润辰, 奚雪松, 吕宁. 加拿大国家公园与社区协同保护与发展的经验及启示——以班夫国家公园及其社区为例 [J]. 中国园林, 2024, 40(10): 41−47.
Song R C, Xi X S, Lü N. Experiences and inspirations of the collaborative conservation and development efforts between national parks and park communities in Canada: a case study of Banff National Park and park community[J]. Chinese Landscape Architecture, 2024, 40(10): 41−47.

[41] 顾方哲. 公众参与、社区组织与建筑遗产保护: 波士顿贝肯山历史街区的社区营造 [J]. 山东大学学报 (哲学社会科学版), 2018(3): 60−69.
Gu F Z. Public participation, community organization, and the protection of architectural heritage: the community-building of historic beacon hill district, Boston[J]. [J]. Journal of Shandong University(Philosophy and Social Sciences), 2018(3): 60−69.

[42] 钟莉, 李姣, 莫馨彦. 城市公园绿地开放共享治理策略——以邵阳市城市公园为例 [J]. 现代园艺, 2025, 48(2): 160−161, 165, 168.
Zhong L, Li J, Mo X Y. Governance strategy for open sharing of urban park green space: a case study of Shaoyang City’s urban parks[J]. Contemporary Horticulture, 2025, 48(2): 160−161, 165, 168.

[43] 曾海聪, 李晨亮, 张君瑶, 等. 城市绿地生物多样性影响因素研究概述 [J]. 中国城市林业, 2023, 21(5): 171−178.
Zeng H C, Li C L, Zhang J Y, et al. Research on influencing factors to biodiversity in urban green spaces[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2023, 21(5): 171−178.

[44] Mooney H A, Duraiappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(Suppl. 1): 3665−3672.

[45] Li L, Du Z, Liang J, et al. Homogenization characteristics and regional effects in the diversity pattern of woody plants in 101 cities in China[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118665.

[46] 张式雷, 张良振, 李春林, 等. 青岛不同城市公园木本植物对群落 β 多样性的贡献 [J]. 园林, 2024, 41(7): 97−107.
Zhang S L, Zhang L Z, Li C L, et al. Contribution of woody plants to β diversity in different urban parks of Qingdao[J]. Landscape Architecture Academic Journal, 2024, 41(7): 97−107.

[47] 吴建国, 吕佳佳. 土地利用变化对生物多样性的影响 [J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1276−1281.
Wu J G, Lü J J. Effects of land use change on the biodiversity[J]. Ecology and Environmental, 2008, 17(3): 1276−1281.

[48] Yang G, Ouyang Y, Hou X, et al. Homogenization of urban forests across the subtropical zones of China[J]. Land, 2023, 12(8): 1559.

[49] 杨博, 郭陶然, 郑思俊, 等. 基于公众参与和人工智能技术的上海草本植物多样性监测实践探索 [J]. 园林, 2021, 38(12): 112−118.
Yang B, Guo T R, Zheng S J, et al. A practical exploration on plant diversity monitoring in urban areas based on the public participation & artificial intelligent technology: a case study on native herbaceous plants diversity monitoring in Shanghai[J]. Landscape Architecture Academic, 2021, 38(12): 112−118.

[50] 叶俊, 康思奇, 傅根深, 等. 基于卫星遥感的城市绿地景观格局变化研究进展 [J]. 测绘通报, 2022(3): 23−27.
Ye J, Kang S Q, Fu G S, et al. Research progress of urban green space landscape pattern change based on satellite remote sensing[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(3): 23−27.

（责任编辑　孟　瑶　李　契
责任编委　徐程扬）