

DOI: 10.20103/j.stxb.202502180343

陈春谛, 叶天昊, 王柳阳, 王若冰, 冯伟, 胡远东, 赵娟娟. 快速城镇化背景下我国城市植物多样性研究进展. 生态学报, 2025, 45(24): 12527-12541.  
Chen C D, Ye T H, Wang L Y, Wang R B, Feng W, Hu Y D, Zhao J J. Research progress of China's urban plant diversity in the context of rapid urbanization. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12527-12541.

## 快速城镇化背景下我国城市植物多样性研究进展

陈春谛<sup>1,\*</sup>, 叶天昊<sup>1</sup>, 王柳阳<sup>1</sup>, 王若冰<sup>1</sup>, 冯伟<sup>1</sup>, 胡远东<sup>2</sup>, 赵娟娟<sup>3</sup>

1 西南交通大学建筑学院, 成都 610000

2 东北林业大学园林学院, 哈尔滨 150040

3 西南大学园艺园林学院, 重庆 400715

**摘要:** 城市植物多样性作为城市生态系统基础, 为系统内其他生物以及城市居民提供诸多支持与服务, 对维持城市可持续发展具有重要意义, 近些年已成为城市生态学、城乡规划等领域的研究热点。基于 CNKI 和 Web of Science 两大数据库, 检索自进入快速城镇化以来(2000—2023 年间)我国城市植物多样性相关研究期刊论文, 采用文献计量法, 从现有研究地域分布、尺度选择、调查对象选取、调查方法、研究热点等方面系统分析研究进展与发展趋势, 归纳城市植物多样性关键影响因素, 并进一步提取文献调查的城市植物多样性数据, 探讨现有研究与我国城市发展需要之间的关系。在对筛选所得 925 篇中文文献和 107 篇英文文献的分析中发现, 中国城市植物多样性研究呈显著增长态势, 研究深度和广度不断扩展。所选生境类型愈加丰富, 调查植物从宽泛的城市植被转向区分本土与外来、栽培与自生, 并从数量描述、评估向多样性形成机制探讨转变, 研究视角向城市植物多样性的功能和服务聚焦。但在研究区域选择上地域分布不均衡, 西南生物多样性热点地区和西藏、内蒙古等生态脆弱区研究关注度不足; 在与城市发展需要的关系上, 存在“高城镇化速率-低研究量”的不匹配问题; 在多样性评估方法选择上, 更多沿用传统自然群落的生态学方法, 面对复杂城市环境可能存在局限。针对现有研究不足, 建议未来加强对我国西北、西南及青藏高原区域城市和各中小型城市的研究; 创新调查方法及多样性评估体系, 构建反映植物与城市环境互动关系、衡量城市人为干扰的多维度、多因素指标; 此外, 集成公民科学、众包数据与机器学习等新技术、新方法, 构建城市生物多样性动态监测体系, 形成多维监测网络, 以同步实现科学数据采集与公众环境教育目标, 为城市生态系统植物多样性评估实践及可持续生态规划、政策制定与管理提供理论依据及现实指导。

**关键词:** 城市植被; 自生植物; 生物多样性; 人为干扰

## Research progress of China's urban plant diversity in the context of rapid urbanization

CHEN Chundi<sup>1,\*</sup>, YE Tianhao<sup>1</sup>, WANG Liuyang<sup>1</sup>, WANG Ruobing<sup>1</sup>, FENG Wei<sup>1</sup>, HU Yuandong<sup>2</sup>, ZHAO Juanjuan<sup>3</sup>

1 School of Architecture, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China

2 College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

3 College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** Urban plant biodiversity, serving as a cornerstone of urban ecosystems, offers critical support and services to both resident species and human populations, playing an essential role in promoting urban sustainability. It has increasingly become a focal point in urban ecology, landscape planning, and related disciplines. This study systematically examined research progress and trends in urban plant diversity in China by analyzing 925 Chinese and 107 English journal articles published during the rapid urbanization period (2000—2023), retrieved from the CNKI and Web of Science databases.

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(52078346); 四川省科学技术厅重点研发计划区域创新(2024YFHZ0100); GEF7 中国绿色与碳中和城市项目成都项目(CD-CS3)

收稿日期: 2025-02-18; 网络出版日期: 2025-09-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chundichen@swjtu.edu.cn

Using bibliometric methods, the analysis focused on geographical distribution, spatial scale selection, target habitats, and species, investigation methodologies, and research hotspots. The key factors influencing urban plant diversity were further summarized. In addition, data on urban plant diversity extracted from the reviewed literature were compiled to explore the relationship between existing research and the needs of China's urban development. The analysis revealed a marked growth in both the depth and breadth of urban plant diversity research in China. The investigated habitats demonstrated increasing typological diversity, while plant surveys have evolved from general horticultural inventories to systematic distinctions between native/alien and cultivated/spontaneous species. The research paradigm has shifted from quantitative description and evaluation toward mechanistic exploration of diversity formation, with an emerging emphasis on functional attributes and ecosystem services of urban flora. However, in terms of the selection of research areas, existing studies showed an uneven geographic distribution, with insufficient attention given to biodiversity hotspots in southwestern China and ecologically vulnerable zones such as Tibet and Inner Mongolia. Regarding the relationship with urban development needs, there was a mismatch between research intensity and urbanization demands, characterized by "high urbanization rates-low research coverage". As for biodiversity assessment methods, conventional ecological approaches designed for natural communities have been largely inherited, which may have certain limitations in urban environments. To address these gaps, future research should prioritize expanding investigations to understudied regions including the northwestern and southwestern sectors, the Qinghai-Tibet Plateau, and small-to-medium-sized cities. Methodological innovations should focus on developing urban-specific assessment frameworks incorporating multi-dimensional indicators that quantify plant-environment interactions and human disturbance impacts. Integrative approaches combining citizen science, crowdsourced data, and machine learning technologies are recommended to establish dynamic biodiversity monitoring networks. Such systems would simultaneously advance scientific data collection and public environmental literacy, ultimately providing a robust theoretical foundation and practical guidance for sustainable urban ecological planning, policy formulation, and management practices.

**Key Words:** urban vegetation; spontaneous plants; biodiversity; anthropogenic disturbance

植物作为初级生产者,为众多生物提供食物来源、栖息地、繁殖和避护场所,以支持更广泛的动物、微生物等全系统多样性。城市植物多样性(Urban Plant Diversity)是指城市区域内所有植物种类的总和,涵盖自然分布的野生、自生植物和人工栽培植物,包含基因(或遗传)、物种、景观、生态系统等多个层次<sup>[1-2]</sup>。城市植物多样性作为全球生物多样性的组成部分,虽占比较低,却对城市生态系统的结构、功能及可持续发展起决定性作用<sup>[3]</sup>。在高密度、集约化的城市区域,植物及其所形成的植物多样性是生态系统服务供给的基础,可调节城市水循环、优化微生物环境以抑制慢性疾病<sup>[4]</sup>、提高景观美学价值,进而满足居民对公共环境卫生、休憩娱乐、情绪疏解等的需求,提升城市宜居性和人类福祉<sup>[5-6]</sup>。当前我国正处于快速城镇化中后期阶段,城市土地资源紧张,新增城市绿地面积代价高,植物作为城市建设中可调控、易实施的要素,提升其多样性对城市生态空间提质增效具有现实意义。

由于大规模以审美为导向的绿化美化等建设活动,城市常被视为生物多样性匮乏区域。但近年来国内外一些研究发现,因分布大量高度异质的景观斑块,城市区域生物多样性比周边地区更高<sup>[7]</sup>。例如,在城市化过程中未曾清除或未受干扰的自然/半自然生态地(即城市自然遗留地, Urban Remnant),通常是城市生物多样性的热点区域<sup>[8]</sup>。城市部分严重受干扰地区植物多样性虽同样很高,但其背后外来物种占比大<sup>[9]</sup>,与自然遗留地生物多样性的内涵和实质有很大区别。此外,城市作为人类主导的人工生态系统,其植物多样性受人为干扰强度大、范围广、影响持久。因此,亟需考虑城市环境特征,针对城市生境类型、空间尺度、调查方法、植被来源等方面,系统回顾现有研究进展。

近年来,城市植被研究已成为城市生态、城乡规划设计等领域的核心议题和研究难点,呈现多学科交叉特征<sup>[10]</sup>。本文聚焦城市植物物种多样性相关研究,围绕以下问题展开:(1)自进入快速城镇化以来,我国城市植

物多样性现有研究的发展趋势,及其在研究尺度、研究对象、调查方法和影响因素等方面存在哪些特征?(2)基于文献实测数据,全国研究空间分布与城市化水平存在何种关系?最后,展望未来研究重点,为城市植物多样性理论研究、评估实践及可持续管理提供启示。

## 1 研究数据来源及分析方法

### 1.1 数据来源

本文以CNKI和Web of Science两大数据库为检索源,中文以(“城市”或“城镇”或“城区”或“建成区”)和(“植物”或“植被”)和(“多样性”或“丰富度”)为主题词进行“精确”检索,英文以“TS=((City OR Town OR Urban OR Build-up OR Urban habitat) AND (Plant OR Vegetation) AND (Diversity OR Biodiversity OR Richness))”为检索主题词,国家或地区设置为中国,检索时间范围为2000—2023年。根据主题检索条件,初步检索得到中文文献41067篇、英文文献2302篇。进一步基于以下剔除标准全面筛选并去除无关文献:(1)研究对象为城市区域外的自然生态系统或乡村生态系统;(2)调查植物属于苔藓类等非维管束植物或藻类、地衣类等低等植物;(3)缺失植物基础信息调查步骤和方法说明;(4)缺少植物多样性指标数据。最终纳入研究的中文文献925篇,英文文献107篇。提取并统计最终文献的发表年份、研究对象等数据,构建数据库(表1)。

表1 文献主要统计信息

Table 1 General statistical information of literature

| 统计信息类别<br>Category of the information | 具体内容<br>Detail contents  | 描述<br>Description   |
|---------------------------------------|--|---|
| 基本信息<br>General information           | 发表年份<br>Publication year   | 发表时间<br>Time of publication   |
| 研究区<br>Study area                     | 发表期刊<br>Journal<br>研究尺度<br>Scale of study<br>研究区所属省级行政区<br>Administrative regions at the provincial level belonging to the study area<br>研究区所属地级行政区<br>Administrative regions at the prefectural level belonging to the study area | 文献所刊载的期刊<br>Journals published<br>区域级尺度、省域尺度、市域尺度、区(县)域尺度、场地(地块)尺度<br>Regional scale, provincial scale, municipal scale, district (county) scale, site (block) scale<br>研究区所属省、自治区、直辖市或特别行政区<br>Provinces, autonomous regions, municipalities or special administrative regions belonging to the study area<br>研究区所属地级市、地区、自治州或盟<br>Prefectural-level cities, districts, autonomous prefectures or leagues belonging to the study area  |
| 研究对象<br>Subjects of the study         | 研究对象类别<br>Category of research objects<br>生境类型<br>Habitat type   | 根据植物生活型分类:全部维管植物(不具体分类)、乔木、灌木、竹类、藤本、草本;根据植物状况分类:栽培植物、自生植物、未区分<br>According to plant life forms: all vascular plants (not specifically categorized), trees, shrubs, bamboo, vines, grasses; according to plant status: cultivated plants, natural plants, unclassified<br>城市绿地(正式生境空间):绿地类型按照《城市绿地规划标准》GB/T 51346—2019分为5类:公园绿地、防护绿地、广场绿地、附属绿地、区域绿地;非正式生境空间:城市绿地规划以外生境,如墙体、屋顶、闲置地、棕地、边缘间隙空间等<br>Urban green space (formal habitat space): green space types are categorized according to GB/T 51346—2019 into five categories: park green space, protective green space, square green space, adjacent green space, and regional green space; non-formal habitat space: green spaces outside urban green space planning, such as walls, roofs, idle lands, brown fields, and edge gaps. |
| 研究方法<br>Research methods              | 数据收集、调查方法<br>Data collection and survey methods  | 实地调研、遥感反演等<br>Field surveys, remote sensing interpretation, etc.  |
| 研究结论<br>Research conclusion           | 多样性评估指标<br>Indicators of diversity<br>城市植物多样性<br>Urban plant biodiversity<br>其他,如影响因素<br>Other factors, such as influencing factors  | 为指示植物群落种类和个体数量的统计指标<br>Statistical indicators for indicating the number of species and individuals of plant communities<br>研究调查所得植物物种数量<br>Number of plant species surveyed<br>影响城市植物多样性赋存状态、维持机制、空间格局等的各类因素<br>Factors affecting the presence state, maintenance mechanism, and spatial pattern of urban plant biodiversity  |

本研究以各城市的城镇化率、2000年至2023年城镇化率增幅(2023年城镇化率较2000年增值与2000年城镇化率之比)分别表征快速城镇化进程中我国各城市的城市化发展水平和发展速度。城市2000年、2023年城镇化率数据分别来源于《2000年人口普查分县资料》和各城市统计年鉴,同时鉴于现有文献城市植物多样性调查情况、城市行政等级调整等因素,最终筛选确定其中193个地级市城镇化率数据用以进一步定量分析。

### 1.2 数据分析方法

本文基于筛选所得文献数据,利用科学知识图谱工具CiteSpace构建研究关键词时间线并进行聚类分析,以可视化研究热点与发展趋势。基于所建文献数据库,对研究区域与尺度、研究对象、生境类型和调查技术等方面进行统计分析。同时,以我国地级行政区为统计单元,提取并统计文献调查所得各城市植物多样性数据,绘制并分析全国城市植物多样性空间分布格局,并采用Pearson相关系数进一步测算城市植物种数与城市化

水平之间的相关性。以我国各城市植物多样性被研究频次表征城市受关注程度,同样采用 Pearson 相关系数测算其与城市化水平的相关性,进而探讨现有城市植物多样性研究与我国城市发展需求的契合度。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究趋势

从历年文献发表数量趋势来看(图 1),我国城市植物多样性研究可分为 3 个阶段:2000—2005 年为萌芽阶段,整体发文量少,增长缓慢;2006—2014 年为初步发展阶段,发文量增长幅度显著;自 2015 年起进入快速发展阶段,并在 2015 年和 2019 年出现两次增长小高峰,该阶段年发文量均稳定在 50 篇以上,外文文献数量增长显著。

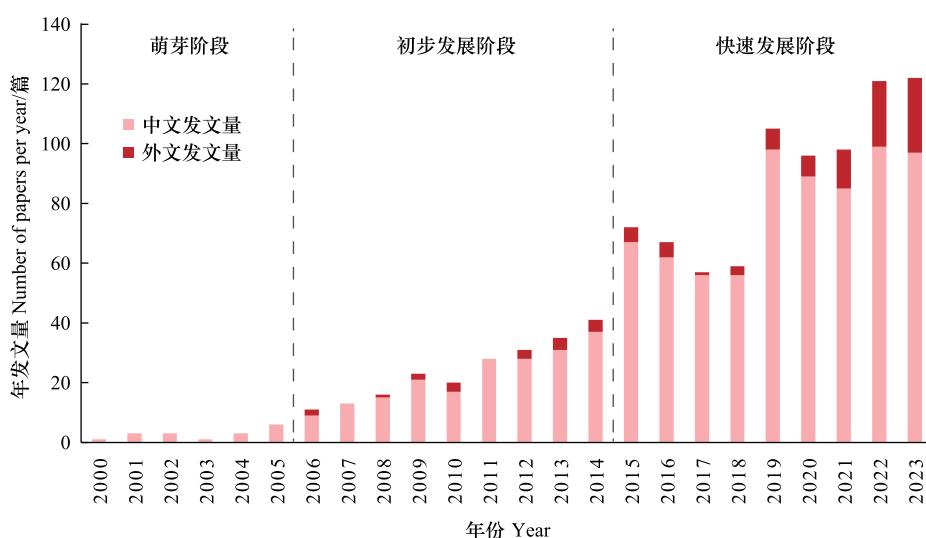


图 1 2000—2023 年中国城市植物多样性研究文献年度分布

Fig.1 Annual distribution of research literature on urban plant diversity in China, 2000—2023

在 2000—2005 年的研究萌芽阶段,随着 2000 年我国城镇化水平首次突破 30% 进入快速城镇化阶段,我国学者开始关注城市地区生物多样性,城市植物群落的多样性分析、城市植物多样性保护等方面的相关研究逐渐起步,出现“城市化”、“城市绿化”等关键词(图 2)。该阶段研究主要关注城市植物种类组成,多为城市绿化植物资源种类调查,鲜少涉及以植物生活型或来源为区分的专项调查,研究对象以园林植物<sup>[11]</sup>和道路交通绿化植物为主。

在 2006—2014 年的初步发展阶段,我国城市植物多样性研究以专项化探索为特征,其主要表现为对城市生境类型以及城市植物类型的细分。多样性调查的植物群落选择除城市园林、公园植物或道路绿化植物外,还拓展到城市人工林、城市森林<sup>[12]</sup>、居住区绿化<sup>[13]</sup>等类型。除城市绿地外,伴随着“spontaneous vegetation(自生植物)”关键词的出现(图 2),部分研究开始关注城市非正式生境空间(如城市墙体<sup>[14]</sup>)植物多样性,并进一步区分栽培植物和自生植物的多样性特征,突显与传统自然生态区研究的差异。同时,近自然性和地域特色性景观设计理念的产生,使乡土植物(native plants)和外来植物(alien plants)<sup>[15—16]</sup>受到关注,且部分研究就地域性城市植物资源可持续提出相应策略,为后续研究起到铺垫作用。此外,针对用地性质转变、人为干扰等因素对城市植物多样性影响机制的研究已有初步探索<sup>[17]</sup>。

自 2015 年进入快速发展阶段起,城市植物多样性研究呈逐步递增趋势。该阶段研究涉及城市用地类型多样,针对正式生境空间(城市绿地规划以内)的研究迅速积累,“城市公园”“公园绿地”“城市绿道”“居住区”等关键词大量涌现,且研究视角向城市植物多样性的价值、功能、服务等方面转变。“城市森林”生境成为

焦点,并同与之对应的“木本植物”“forests”关键词出现频率最高。相比草本植物,木本植物因体型大、性状特征明显、易辨识等个体优势,调查过程相对便捷,且生态系统服务价值高,成为普遍选择的研究对象,如城市森林公园<sup>[18]</sup>、行道树(street trees)<sup>[19]</sup>、古树名木(heritage trees)<sup>[20]</sup>。此外,城市植物多样性影响因素研究在外文文献中大量出现,影响因素类型进一步拓展,涵盖城市地理、社会经济、管理条件等多个维度。近年来,部分植物多样性调查则开始与固碳效益<sup>[21]</sup>、大气调节<sup>[22]</sup>等城市生态系统功能研究相结合。

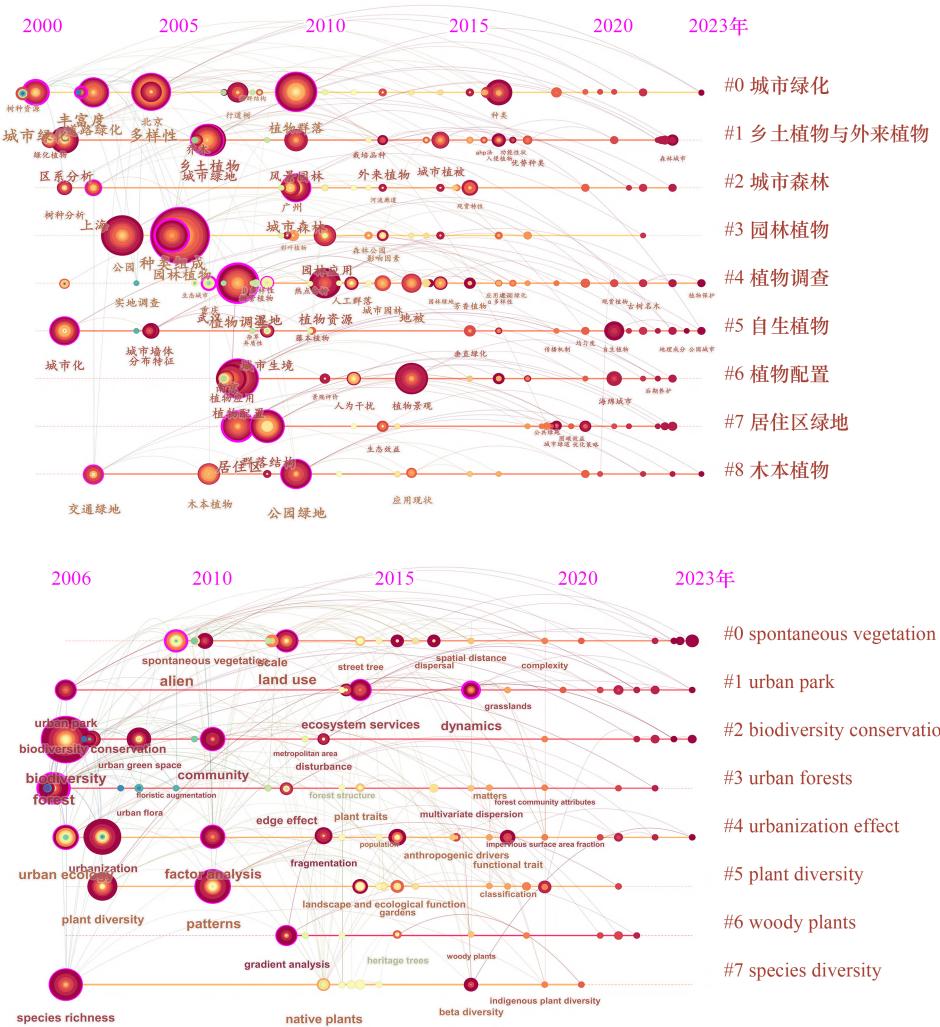


图2 中国城市植物多样性研究文献关键词网络时间线演变图

Fig.2 Timeline evolution of keywords in research on plant diversity in Chinese cities

节点代表关键词,颜色对应各关键词出现时间,节点大小与关键词出现次数成正比,时间线右侧为聚类标签

## 2.2 研究区域与尺度

研究目标区域主要分布于我国东部沿海地区,相关文献共557篇,占比达50.36%,主要集中于广东(101篇)、北京(74篇)、江苏(63篇)、福建(58篇)、浙江(49篇)和上海(48篇);中部地区267篇,占比24.14%,主要集中在河南(45篇)、湖北(41篇)、山西(39篇)等省。针对西部研究较少(23.60%),主要集中在重庆(51篇)、四川(44篇)、云南(40篇)。此外,内蒙古(17篇)、新疆(14篇)、西藏(13篇)、宁夏(7篇)、青海(4篇)等生态脆弱区研究较为匮乏(如图3)。各地区间教育科研投入水平、城市分布密度等差异,在一定程度上可能导致我国城市植物多样性研究在地域分布上的不均衡格局。

城市植物多样性研究的尺度跨度较大,从全国、珠三角城市群等大尺度到城市公园、家庭花园等小尺度均

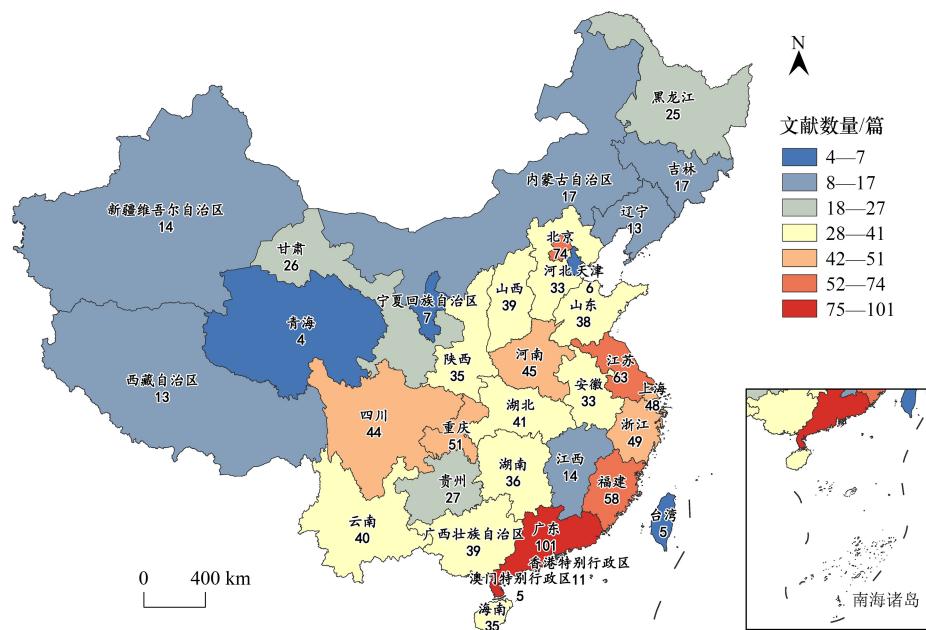


图3 中国城市植物多样性研究区省级行政区层面数量分布

Fig.3 Quantitative distribution at the provincial administrative district level in the study area of urban plant diversity in China

有所涉及;但主要以市域(568篇)和场地(地块)尺度(274篇)为主,分别占研究文献总量的55.04%和26.55%。而对省域(17篇)和区域(39篇)尺度的研究较少,共占研究总量5.43%。区域尺度的选择类型既有社会经济区域,如珠三角地区<sup>[23]</sup>,也有诸如长江流域<sup>[24]</sup>、晋中盆地<sup>[25]</sup>等的自然地理区域。场地(地块)尺度多以典型城市公园、滨水绿地为对象开展研究。

### 2.3 研究对象

(1)以植物生活型为分类依据:包括乔木、灌木、竹类、藤本、草本等,其中以综合调查城市“乔木、灌木、藤本、草本”多样性的研究最多,共419篇文献,占43.69%;其次为“乔木、灌木、草本”,共有文献257篇(见表2)。绝大多数研究涉及乔木类植物,占研究总数的92.60%;仅涉及草本植物多样性的研究则只占3.96%(38篇)。

(2)以生长方式为分类依据:依据生长方式受人为干扰的程度大小,将城市植物分为栽培植物和自生植物两类,其中自生植物包括未经有意栽种的栽培物种(栽培植物溢出种)和尚未在城市建设中使用的野生物种<sup>[26]</sup>。大多数研究并未对两类植物进行区分(约占62.60%)。在余下做区分的386篇专类研究中,聚焦栽培植物的研究数量占绝对优势,占专类研究总数72.54%(280篇),而对自生植物关注较少。城市建设以绿化美化活动为主,引种、人工种植植物更频繁、多样,因此栽培植物的多样性、空间分布一直是研究关注点。

### 2.4 城市生境类型

将城市规划管理中的各类城市绿地视为城市植物正式生境空间。依据《城市绿地分类标准》CJJT85—2017,城市绿地分为5大类,分别为公园绿地、防护绿地、广场用地、附属绿地、区域绿地。目前对城市整体绿地系统的研究最为集中,该类文献共389篇,占总量38.55%。其次是公园绿地,该类研究多选择各城市公园的典型园林植物群落进行调查,共计文献287篇,占总量28.44%。对附属绿地研究190篇,防护绿地的研究14篇,这两类绿地的研究主要集中在道路防护绿地、道路与交通设施用地附属绿地和居住用地附属绿地。区域绿地研究85篇,多为城市森林公园、湿地和滨河绿地。广场用地研究最少,仅12篇。总体而言,研究者对城市植物多样性研究绿地类型选择多倾向于城市公园绿地、湿地公园绿地等这类绿化面积大、用地布局集中的绿地,而对广场、防护绿地研究较少(见表3)。

表2 中国城市植物多样性文献所涉及植物类型统计

Table 2 Statistics of plant types involved in the literature on urban plant diversity in China

| 分类依据<br>Criteria of plant classification | 所涉及植物类型<br>Plant types | 文献篇数<br>Number of articles |
|--|------------------------|----------------------------|
| 植物生活型<br>Plant life forms                | 全部维管植物(不具体分类)          | 7                          |
|  | 乔木                     | 26                         |
|  | 乔木、灌木                  | 119                        |
|  | 乔木、灌木、草本               | 257                        |
|  | 乔木、灌木、藤本               | 19                         |
|  | 乔木、灌木、藤本、草本            | 419                        |
|  | 乔木、灌木、竹类               | 1                          |
|  | 乔木、灌木、竹类、草本            | 6                          |
|  | 乔木、灌木、竹类、藤本            | 6                          |
|  | 乔木、灌木、竹类、藤本、草本         | 26                         |
|  | 乔木、藤本、草本               | 2                          |
|  | 灌木                     | 3                          |
|  | 灌木、草本                  | 12                         |
|  | 灌木、藤本                  | 1                          |
|  | 灌木、藤本、草本               | 6                          |
|  | 灌木、竹类、藤本、草本            | 2                          |
|  | 竹类                     | 1                          |
|  | 藤本                     | 6                          |
|  | 藤本、草本                  | 2                          |
|  | 草本                     | 38                         |
| 生长方式<br>Growth status                    | 栽培植物                   | 280                        |
|  | 自生植物                   | 83                         |
|  | 栽培植物、自生植物              | 23                         |
|  | 未区分                    | 646                        |

城市区域非正式生境空间包括城市各类立体空间(屋顶、墙体、桥体或桥柱等)和荒野空间(城市闲置地、夹缝用地、城市棕地等),具有人为干预低、分布零散、面积小等特征<sup>[27]</sup>。针对此类生境空间的研究数量远不及城市正式绿地系统。这类城市生境因其植物群落多以自发演替主导,相应调查研究更关注野生、自生植物状况。其中,墙体生境研究较多,占40.63%,涉及香港<sup>[14]</sup>、南京<sup>[28-29]</sup>、重庆<sup>[30-31]</sup>、西安<sup>[32]</sup>等城市。与地面生境相比,立体空间生境在物种组成上存在较大差异,对此部分研究在植物多样性调查的基础上,进一步探索差异形成的影响因素<sup>[30-31]</sup>。

## 2.5 文献城市及植物多样性空间分布

现有研究共涵盖222个城市,占地级市总数的59.70%,主要集中于直辖市和省会城市(如北京、上海、广州、南京等),而其中64个城市仅涉及一次研究,大中小城市间研究关注度差距较大(见图4)。目前尚存在较多研究空白地区,如西南地区、西北地区和东北地区城市,这与省级行政区层面结果一致。值得注意的是,本研究分析结果显示(图6),城市研究频次与该城市城镇化率呈显著正相关,而与城镇化率增幅显著负相关。这表明城市化发展水平越高的城市,其植物多样性研究关注度更高,然而一些城镇化速度(增幅)高的城市反

表3 中国城市植物多样性文献研究所属绿地类型

Table 3 Types of green spaces in research on plant diversity in Chinese cities

| 生境类型<br>Habitat categories      | 绿地分类<br>Types of green space | 文献篇数<br>Number of articles |
|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 城市绿地<br>Urban green space       | 整体绿地系统                       | 389                        |
|                                 | 公园绿地                         | 287                        |
|                                 | 附属绿地                         | 190                        |
|                                 | 区域绿地                         | 85                         |
|                                 | 防护绿地                         | 14                         |
|                                 | 广场用地                         | 12                         |
| 非正式生境空间<br>Informal green space | —                            | 32                         |

而缺少调查研究,如商丘、上饶、丽江2023年末城镇化率相比2000年末增幅均在200%以上,但相应研究仅一项。

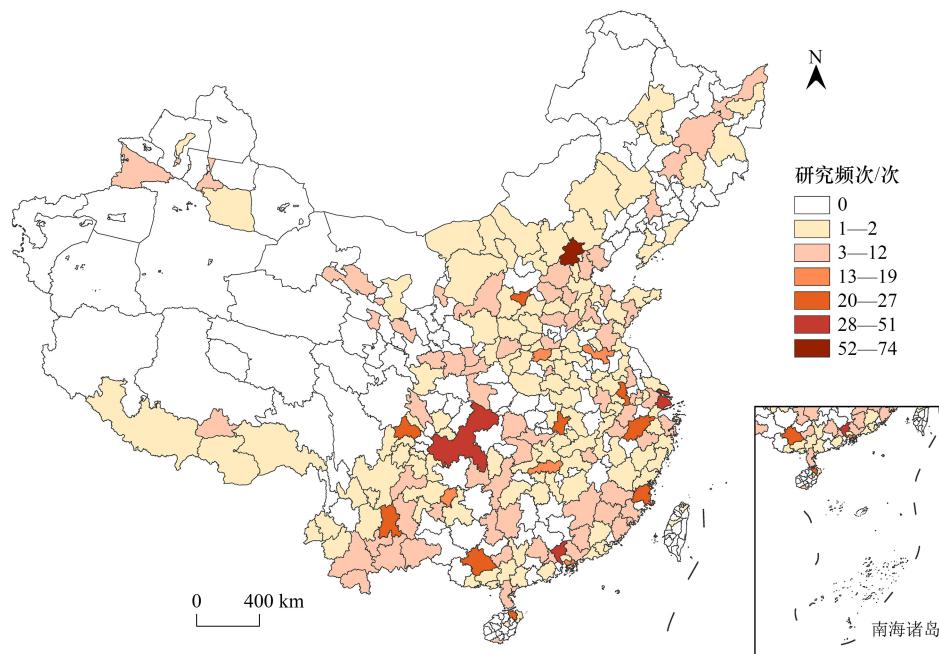


图4 中国各城市研究频次(2000—2023年)

Fig.4 Research frequency of various cities in China (2000—2023)

现有城市植物多样性研究记录物种数最高为台北市(2133种),最低为张家口市(11种)(见图5)。除了因气候、地理等因素而客观存在物种分布差异外,调查方式、目标植物类型等调查因素引起的偏差亦可能造成各城市植物种数调查结果的差异。相关性分析结果显示(图6),城市植物种数与该城市研究频次显著正相关。研究频次可反映出城市的受关注程度,研究频次越高说明对该城市各区域及各群落层次的调查更为充分,植物种类记录更完整。城市植物种数与城市城镇化率同样呈显著正相关性,表明快速城市化可在一定程度上提高区域植物多样性。城市化水平越高,城市的园林绿化资金投入越多,基础设施越丰富,表现出更高的绿地景观异质性和植物物种丰富度<sup>[33—34]</sup>,这在我国部分研究中同样得到验证<sup>[15,35]</sup>。

## 2.6 城市植物多样性调查技术

### 2.6.1 采样调查法

采样调查即通过现场观察和鉴定的方式获取研究区植物个体或群落的种类、分布、密度等数据<sup>[36]</sup>,其直观性强、设备需求低,但高度依赖调查者经验,且工作量大。表4对不同的城市植物多样性采样调查方法进行总结比较,主要包括普查法、专项调查法和抽样调查法。普查法调查对象为研究区内全部植物个体,由于城市范围较大,一般难以实现。专项调查法是指针对特定植物类型、用地性质或生境类别等进行的非全面调查,如城市行道树种类调查<sup>[37]</sup>、居住区植物调查<sup>[38]</sup>。抽样调查为目前最主要调查方法,分为概率抽样(简单随机、分层随机、系统抽样)和典型抽样(方便抽样、判断抽样、定额抽样等)<sup>[36,39]</sup>。不同抽样方法所得多样性调查结果准确性和稳定性存在差异,如对比各抽样方法对城市森林植物物种丰富度测度的影响,分层随机和广义随机细分分层表现最优<sup>[40]</sup>。结合城市功能单元(Urban Functional Units, UFUs)开展分层随机抽样的方式,因充分覆盖城市各土地利用类型下的植物生境而常被采用<sup>[41—43]</sup>。

采样调查需合理设计样地和取样方法。样地设置与采样充分性以及样本代表性直接相关,进而影响植物多样性调查结果准确度。常用样地设置方法有全查法、样带取样法和样方取样法,取样方法选择主要考虑调

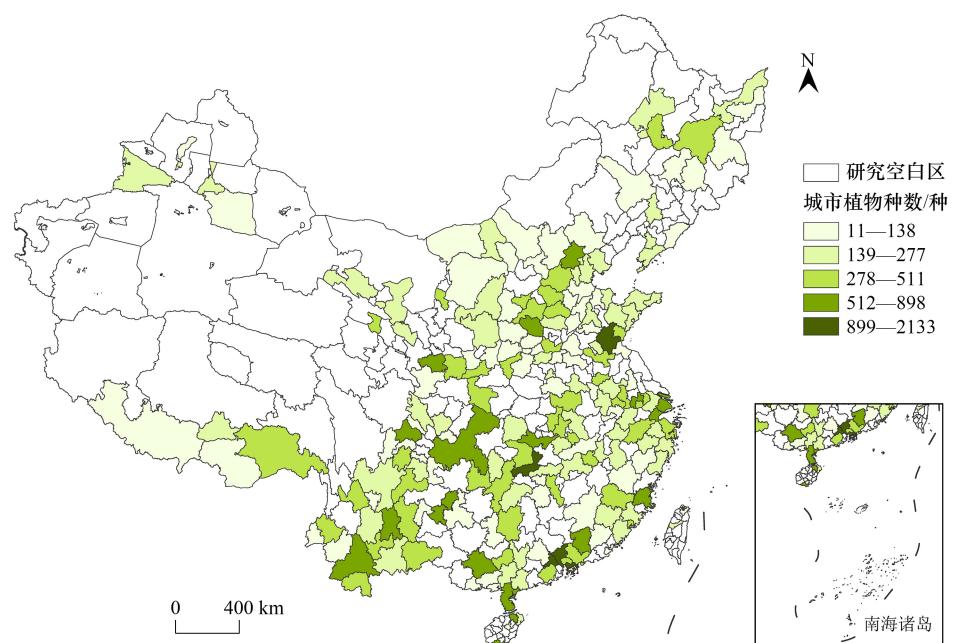


图 5 中国现有研究城市植物多样性调查结果空间分布

Fig.5 Spatial distribution of urban plant diversity survey results from existing research in Chinese Cities

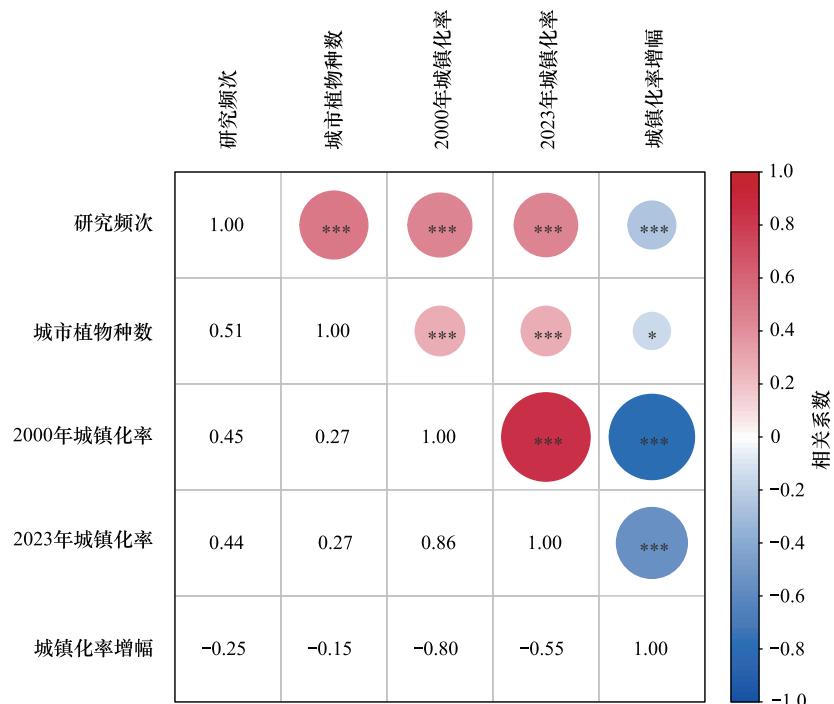


图 6 地级城市研究频次、植物种数与城镇化率相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of research frequency, plant species count, and urbanization rate in prefecture-level cities

各圆形大小表示对应相关系数绝对值大小,颜色表示强度和方向(红色=正,蓝色=负), \*\*\*.  $P < 0.001$ , \*\*.  $P < 0.01$ , \*.  $P < 0.05$

查区面积、调查区植物物种分布状况以及调查侧重点等因素,并与各抽样策略组合使用。除了考虑取样方式,部分学者还运用“种-面积曲线”<sup>[46–47]</sup>、“物种累积曲线”(或称“稀疏曲线”)<sup>[48]</sup>等方法探讨不同城市环境下取样量和样地最小取样面积选择。然而,各类曲线模型在被用于城市环境下植被物种调查采样充分性评估时,

其表现可能不及在自然植物群落中理想。“种-面积曲线”法在城市环境中易受到地块大小、生境破碎化、人为干扰等因素的限制<sup>[49—50]</sup>。有学者在针对北京城市植被的研究中还发现稀疏曲线不接近渐近线而无法确定足够的采样量，并推测其与城市植物组成的极端性以及人为干预有关<sup>[48]</sup>。此外，由于物种入侵程度和优势种状况对城市生态系统功能与服务存在显著影响<sup>[3]</sup>，因而在采样充分性评估中，除物种丰富度之外，外来种多样性等指标理应纳入考虑<sup>[48]</sup>。

表4 常用城市植物多样性数据采样调查方法比较

Table 4 Comparison of commonly used sampling survey methods for urban plant diversity data

| 采样调查方法<br>Specific sampling<br>survey methods             | 方法原理<br>Method<br>principle                           | 优势<br>Advantages                     | 劣势<br>Disadvantages                       | 调查对象<br>Study<br>subjects            | 研究实例<br>Examples of<br>research  | 文献篇数<br>Number<br>of articles |
|---|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|--|-------------------------------|
| 普查法<br>Direct observation<br>and identification<br>method | 对所有植物个体<br>或群落进行现场<br>观察，获取植物种<br>类、分布、密度等<br>信息      | 结果较为全面准<br>确，便于细致统计                  | 成本较高，耗费大<br>量人力、时间和资<br>金，难以在大范围<br>内实施   | 城市绿地面积较<br>小、目标植物数量<br>相对有限的场合       | 对香港老城区核<br>心地段所有共计<br>289面石挡土墙<br>植物分布进行野<br>外调查 <sup>[44]</sup>             | 135                           |
| 专项调查法<br>Transect<br>sampling method                      | 针对特定植物类<br>型、用地性质或生<br>境类别等，对调查<br>区域植物进行系<br>统性记录和测量 | 可根据需要调整<br>调查范围和内容，<br>节省资源，针对性<br>强 | 不能全面反映区<br>域内整体植物多<br>样性，适用性有限            | 特定植物群落、某<br>些重要本地植物<br>种类或外来入侵<br>物种 | 以太原市为研究<br>对象，对其绕城高<br>速以内地区行道<br>树结构特征进行<br>调查 <sup>[19]</sup>              | 769                           |
| 抽样调查法<br>Plot-based<br>survey method                      | 在调查区域内抽<br>选部分样地单元，<br>基于其中植物记<br>录数据进行估测             | 资源消耗较少，适<br>合大范围应用；调<br>查范围广、效率高     | 准确性依赖于样<br>本的代表性，可能<br>存在误差，且不适<br>合小范围调查 | 大面积城市区域<br>植物多样性调查                   | 使用样线法和采<br>样圈法调查武汉<br>特大城市 28 个次<br>生林幼苗和幼树<br>阶段木本物种多<br>样性 <sup>[45]</sup> | 867                           |

## 2.6.2 城市生态遥感技术

城市生态遥感技术一般通过遥感影像直接识别或结合其衍生数据构建预测模型，实现对城市植物多样性的监测。依据遥感反演方式可分为间接估测和直接关联两类<sup>[51]</sup>（表5），其中间接估测法基于生产力假说，以植物生产力连接起物种丰富度水平，如植被指数法；直接关联法则基于光谱变异性假说，认为高植物多样性将表现出高光谱异质性，其常用光谱反射率变异系数法构建关系模型。光谱反射率变异系数法更多用于森林、草原等自然保护区，在城市地区的研究应用尚显不足，现有成果仅局限于北京<sup>[52]</sup>、香港<sup>[53]</sup>等城市乔木树种多

表5 城市生态遥感技术方法比较

Table 5 Comparison of urban ecological remote sensing technology methods

| 遥感反演方法<br>Remote sensing<br>inversion methods                                | 方法原理<br>Method principle | 优势<br>Advantages          | 劣势<br>Disadvantages                                  | 调查对象<br>Study subjects     | 研究实例<br>Examples of<br>research  | 文献篇数<br>Number of<br>articles |
|--|--------------------------|---------------------------|--|----------------------------|--|-------------------------------|
| 植被指数法<br>NDVI/EVI/SAVI   | 间接估测；<br>生产力假说           | 计算简单；时空覆<br>盖广；数据资源<br>丰富 | 可能会趋于饱和；<br>环境敏感性高；实<br>时性差                          | 适合于大尺度、高<br>覆盖率的植被监<br>测   | 以海口市主城区<br>为例，利用遥感植<br>被指数与样方实<br>测数据，构建并比<br>较植物多样性遥<br>感监测模型 <sup>[54]</sup>           | 3                             |
| 光谱反射率变异<br>系数法<br>Spectral reflectance<br>coefficient of<br>variation method | 直接关联；<br>光谱变异性假说         | 评估的准确性高；<br>细微变化捕捉能<br>力强 | 计算复杂；数据获<br>取成本高；敏感性<br>强；缺失下层植物<br>数据；生态学意义<br>有待阐释 | 适合局部中小尺<br>度的精细物种多<br>样性分析 | 基于神经网络刻<br>画乔木斑块多样<br>性与光谱异质性<br>之间的关系，较准<br>确地反演城市乔<br>木的香农指数和<br>辛普森指数 <sup>[52]</sup> | 2                             |

样性估测。生态遥感技术具有效率高、成本低、适合大尺度估测和生态制图等优势。但常规遥感仅可获取冠层上部光谱反射信息,下层植被信息的缺失大幅降低了估测准确性。此外,卫星遥感较长的重访周期使得高光谱数据获取频率较低,难以实现实时获取数据和动态监测。

## 2.7 城市植物多样性影响因素

区别于自然植物群落,城市地区植物多样性不仅受自然因素影响,还与城市化进程中各种人类社会经济活动密切相关,两者共同塑造着城市植物多样性分布格局<sup>[55]</sup>。分析导致其长期维持或变化背后的机制,可为制定城市生态系统服务提升措施提供重要指导。在现有1032篇文献中,涉及城市植物多样性影响因素分析研究文章整体较少,仅92篇,占比为8.91%。所选研究城市主要集中在北京(12篇)、香港(8篇)、贵阳(8篇)和海口(7篇)。

当前研究涉及影响因素大致可分为自然地理、植被结构特征、景观格局、社会经济文化和维护管理五个类别(表6),已基本涵盖城市复杂系统下各主体要素。围绕以上因素,学界曾提出奢侈效应、遗产效应等假说。奢侈效应假说强调社会经济条件对城市植物多样性水平的促进作用,而遗产效应假说则认为历史生态遗产是城市植物多样性格局的基础,这类假说在我国许多研究中均得到验证<sup>[35,41,56]</sup>。但同时值得注意的是,城市植物多样性对于各类影响因素的响应情况在不同地理环境、政策背景城市之间有所分异。例如三亚城市植物多样性受城市管理因素的影响比社会经济因素更大,而在气候环境相同的海口管理措施变量则更为关键<sup>[57-58]</sup>。同一城市地区不同土地利用单元之间也存在差异,如有研究发现,交通流量因素对工商业功能单元、交通功能单元和居住功能单元的植物多样性有显著影响,但对休闲娱乐功能区则无显著影响<sup>[57]</sup>。此外,栽培植物和野生植物多样性对各要素的响应也不相同,例如一项在湛江城市植物多样性与景观格局关系的研究结果显示,景观分离度指数对栽培植物丰富度有显著正向影响,而对自身植物丰富度有显著负向影响<sup>[59]</sup>。此类对比研究虽总量较少,但足以表明城市巨系统下植物多样性响应机制的复杂性。

表6 研究所涉及城市植物多样性影响因素

Table 6 Factors influencing urban plant diversity in research

| 因素分类<br>Classification of factors              |        | 具体影响因素<br>Specific influencing factors  |
|--|--------|---|
| 自然地理<br>Physical geography                     | 气候因子   | 年平均降水量、月最大降水量、年平均太阳辐射持续时间、年平均气温、最热月气温、最冷月气温和最大风速  |
|  | 生态因子   | 土壤温度、土壤湿度、土壤pH、土壤有机质含量、水体pH、光照度(Lux)  |
|  | 地理位置因子 | 经纬度   |
|  | 地形因子   | 坡度和坡向   |
|  | 自然环境因子 | 绿地面积、公园类型、公园面积、公园周长、水能见度(湿地)、水形状指数(湿地)  |
| 植被结构特征<br>Vegetation structure characteristics | -      | 地上生物量(AGB)、乔木盖度、植物丰富度(乔木、灌木、草本)   |
| 景观格局<br>Landscape pattern                      | -      | Shannon均匀度指数(SHEI)、斑块数(NP)、斑块密度(DP)、景观形状指数(LSI)、分离度指数(SPLIT)、连接度(CONNECT)、斑块内聚力指数(COHESION)、斑块丰富度(PR)、景观地表起伏度的粗糙度变异性、物种与最近主干道的距离、物种与最近水源的距离 |
| 社会经济文化<br>Socioeconomics and culture           | 用地开发因子 | 建造年代(房龄)、建设历史进程、土地利用历史信息、绿地率、容积率(FAR)、建筑密度、空间拥挤度(SCD)、POI分布(反映用地功能和人类活动强度)、用地类型、距市中心距离、建成区面积、不透水面百分比、路网密度                                   |
|  | 人口因子   | 人口密度、人口规模   |
|  | 经济因子   | 房价、城市GDP  |
|  | 文化因子   | 地方文化、审美偏好   |
| 维护管理 Urban management                          | -      | 年施肥频率、年维护频率(年平均清理率,拔除杂草、修剪)、年浇水频率、游客活动干扰  |

### 3 讨论与展望

城市植物多样性作为维持城市生态系统稳定的重要支撑,在城市环境可持续发展和保障居民福祉方面作用显著,受到城市生态、城乡规划等领域研究的持续关注。本文回溯中国自进入快速城镇化阶段以来城市植物多样性(主要为物种多样性层次)研究文献,发现城市植物多样性研究深度和广度不断拓展:(1)研究对象逐步扩大,以城市生境类型和城市植物类型不断细分为主要特征,研究的生境类型从单一的城市公园、道路绿化等城市正式绿地空间延伸至城市立体空间、荒野空间等非正式生境;所调查植物则从宽泛的园林植物向细分本土与外来、栽培与自生植物转变;(2)研究方向从数量描述、评估深入至多样性形成机制探讨,不仅关注城市植物丰富度、多样性等基本特征,也逐渐重视其背后的影响因素及对城市复杂环境的适应机制;(3)研究视角向功能性和服务性聚焦,更关注植物多样性对城市生态系统功能的贡献,如分析其与城市绿地碳汇能力、雨洪调节、生态韧性的关系,并在影响因素中融入社会文化视角,社会公平性、文化偏好等议题也开始出现。

整体而言,目前我国城市植物多样性研究正处于快速发展阶段,现有研究已面向我国主要城市进行广泛探索,涵盖多样城市生境、植物群落类型以及各类调查技术,为系统性开展城市植物多样性研究奠定基础。本文结合我国城市发展研究状况,总结我国现阶段研究存在如下关键问题,并就此提出未来潜在研究方向。

目前我国城市植物多样性研究在地理区域上分布不均衡,50.36%的研究集中于东部区域,而较多城市地区尚未覆盖。同时,研究关注度与城市发展需求之间契合度较低,“高城镇化速率-低研究量”的现象突出,这与全球有关城市扩张对生物多样性直接影响研究的分布特征相一致<sup>[60]</sup>,现有学术研究滞后于现实城市发展过程中生态管理与规划决策的实践需求。未来需缩小研究投入在地理区域分布上的差异,重点关注西南生物热点区和西藏、内蒙古等生态脆弱区城市,并将目前数量更多、用地扩张可能性更大的中小城市优先纳入研究,以覆盖具有更高城镇化发展潜力区域,形成全方位、多层次的全国城市生物多样性研究网络。这也有助于拓宽全球城市生物多样性研究的区域焦点,而非局限于发达经济体的核心城市地区<sup>[61]</sup>。

在城市植物多样性调查技术方面,更多沿用传统自然群落的生态学方法,面对复杂城市环境可能存在局限。本文提议从以下方面创新:首先,在植物基础数据数据源拓展上,可尝试引入城市大数据、生物众包数据(例如,GBIF 网站 <https://www.gbif.org/>)等新数据,搭建公民科学平台<sup>[62]</sup>调动公众参与(如“Utrees” <https://www.utrees.cn/>),发挥其在数据获取成本和便利性上的优势,并推动实现公众环境教育;其次,在城市植物多样性评估体系构建上,基于城市生态系统特殊性,可将植物物种社会属性(如栽植的筛选标准)、对城市生态系统的适应性、外来植物入侵性等,这类有别于自然生态系统且能反映植物与城市环境互动关系、衡量城市人为干扰的多维度、多因素指标纳入其中。同时,在生物多样性保护、规划实践中,需要与之匹配的大尺度植物多样性空间评估。现阶段无论是地面采样调查方法还是遥感技术均难以满足规划与管理要求,需要创新空间表征方法,为生态规划设计提供更规范、标准的植物多样性空间基础数据支持。最后,在动态监测系统上,可引入机器学习等人工智能模型推演手段,集成公民科学、众包数据,尝试构建多要素动态驱动的城市植物多样性预测模型,形成时空连续的多维监测网络,助力城市可持续生态常态化管理。

此外,有关城市植物多样性在城市复杂建成环境下的维持机制及其影响因素的研究尚处于起步阶段。不同生长型、分类群或建群方式的植物在多样性分布存在差异,并对城市化过程存在不同响应阈值<sup>[63]</sup>,因此除以往受到更多关注的乔木植物、城市栽培植物外,城市草本植物、自生(野生)植物多样性研究应给予更多关注。同时,非正式生境植物群落作为对正式城市绿地植物多样性的重要补充,在管理方式、分布环境等方面具有特殊性,需探索其对“自然-人工”二元干扰的响应机制<sup>[55]</sup>。其次,近年来国际上围绕城市植物多样性与多种生态系统服务协同机制,以及两者间的传导路径,出现如城市植物多样性与微生物环境<sup>[64]</sup>、居民对植物多样性的感知差异<sup>[65]</sup>等议题。对此,我国应积极将城市居民、鸟类、微生物等生态系统要素纳入研究中,发挥我国城市类型高度多元化、各类型间地域差异显著的优势,围绕不同背景条件开展横向对比研究,以深入理解多要素作用下植物多样性的影响机制。同时,关注各影响因素的尺度效应,除关注城市地块尺度和单个城市尺

度外,还需向省域、气候区等更大地理尺度扩展,以推进对城市内部、城市群之间植物多样性与外部自然环境背景之间互动机制的探讨,为跨尺度研究提供数据支持。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 马克平. 试论生物多样性的概念. 生物多样性, 1993, 1(1): 20-22.
- [ 2 ] Uchida K, Blakey R V, Burger J R, Cooper D S, Niesner C A, Blumstein D T. Urban biodiversity and the importance of scale. Trends in Ecology & Evolution, 2021, 36(2): 123-131.
- [ 3 ] Weiskopf S R, Lerman S B, Isbell F, Lyn Morelli T. Biodiversity promotes urban ecosystem functioning. Ecography, 2024, 2024(9): e07366.
- [ 4 ] Mills J G, Brookes J D, Gellie N J C, Liddicoat C, Lowe A J, Sydnor H R, Thomas T, Weinstein P, Weyrich L S, Breed M F. Relating urban biodiversity to human health with the ‘holobiont’ concept. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 550.
- [ 5 ] Martens D, Öztürk Ö, Rindt L, Twarok J, Steinhardt U, Molitor H. Supporting biodiversity: Structures of participatory actions in urban green spaces. Frontiers in Sustainable Cities, 2022, 4: 952790.
- [ 6 ] Pereira P, Baró F. Greening the city: thriving for biodiversity and sustainability. Science of The Total Environment, 2022, 817: 153032.
- [ 7 ] Heikkinen M K, Iwachido Y, Sun X, Maehara K, Kawata M, Yamamoto S, Tsuchihashi Y, Sasaki T. Overlooked plant diversity in urban streetscapes in Oulu and Yokohama. Global Ecology and Conservation, 2023, 46: e02621.
- [ 8 ] Labadessa R, Ancillotto L. Small but irreplaceable: The conservation value of landscape remnants for urban plant diversity. Journal of Environmental Management, 2023, 339: 117907.
- [ 9 ] Chen C D, Wu S J, Meurk C D, Ma M H, Zhao J J, Lv M Q, Tong X X. Effects of local and landscape factors on exotic vegetation in the riparian zone of a regulated river: Implications for reservoir conservation. Landscape and Urban Planning, 2017, 157: 45-55.
- [ 10 ] Fang X N, Li J W, Ma Q. Integrating green infrastructure, ecosystem services and nature-based solutions for urban sustainability: a comprehensive literature review. Sustainable Cities and Society, 2023, 98: 104843.
- [ 11 ] 马剑英, 孙学刚. 绿洲型城市绿化植物种类调查与分析. 甘肃农业大学学报, 2001, 36(1): 108-111.
- [ 12 ] 陆庆轩, 何兴元. 沈阳城市森林植被结构和植物多样性研究. 中国城市林业, 2005, 3(4): 15-17.
- [ 13 ] 李芳, 黄俊华, 朱军. 乌鲁木齐市居住区木本植物物种多样性调查研究. 中国园林, 2012, 28(6): 90-94.
- [ 14 ] Jim C Y, Chen W Y. Habitat effect on vegetation ecology and occurrence on urban masonry walls. Urban Forestry & Urban Greening, 2010, 9(3): 169-178.
- [ 15 ] Gong C F, Chen J Q, Yu S X. Biotic homogenization and differentiation of the flora in artificial and near-natural habitats across urban green spaces. Landscape and Urban Planning, 2013, 120: 158-169.
- [ 16 ] 成夏岚, 陈红锋, 欧阳婵娟. 海口市城市绿地常见植物多样性调查及特征研究. 中国园林, 2012, 28(3): 105-108.
- [ 17 ] Zhang H, Jim C Y. Species diversity and performance assessment of trees in domestic gardens. Landscape and Urban Planning, 2014, 128: 23-34.
- [ 18 ] Yang J M, Li X L, Li S M, Liang H, Lu H C. The woody plant diversity and landscape pattern of fine-resolution urban forest along a distance gradient from points of interest in Qingdao. Ecological Indicators, 2021, 122: 107326.
- [ 19 ] 裴婷婷, 贺金钰, 武小钢, 陈小平. 太原市行道树结构特征及其与社会经济因素相关性研究. 中国园林, 2023, 39(8): 115-120.
- [ 20 ] Li K D, Zhang G F. Species diversity and distribution pattern of heritage trees in the rapidly-urbanizing province of Jiangsu, China. Forests, 2021, 12(11): 1543.
- [ 21 ] Wang Y C, Liu W Y, Ko S H, Lin J C. Tree species diversity and carbon storage in air quality enhancement zones in Taiwan. Aerosol and Air Quality Research, 2015, 15(4): 1291-1299.
- [ 22 ] 闫俊文, 刘庭风. 城市风景园林植物多样性及空气净化效应研究. 北方园艺, 2018(17): 110-114.
- [ 23 ] 李楚均, 陈小梅, 温小浩, 林敏丹, 许展颖. 城市化背景下珠江三角洲常绿阔叶林群落结构及植物多样性. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3298-3305.
- [ 24 ] Qian S H, Qi M, Huang L, Zhao L, Lin D M, Yang Y C. Biotic homogenization of China’s urban greening: a meta-analysis on woody species. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 18: 25-33.
- [ 25 ] Wang Y G, Meng D P, Zhu Y E, Zhang F. Impacts of regional urbanization development on plant diversity within boundary of built-up areas of different settlement categories in Jinzhong Basin, China. Landscape and Urban Planning, 2009, 91(4): 212-218.
- [ 26 ] Chen C D, Wang R B, Chen M K, Zhao J J, Li H, Ignatieve M, Zhou W Q. The post-effects of landscape practices on spontaneous plants in urban parks. Urban Forestry & Urban Greening, 2025, 107: 128744.
- [ 27 ] Stanford H R, Garrard G E, Kirk H, Hurley J. A social-ecological framework for identifying and governing informal greenspaces in cities. Landscape and Urban Planning, 2022, 221: 104378.

- [28] Li X H, Yin X M, Wang Y. Diversity and ecology of vascular plants established on the extant world-longest ancient city wall of Nanjing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 18: 41-52.
- [29] Miao X Y, Pan Y H, Chen H X, Zhang M J, Hu W S, Li Y X, Wu R Y, Wang P Y, Fang S B, Niu K C, Xu C, Teng S N. Understanding spontaneous biodiversity in informal urban green spaces: a local-landscape filtering framework with a test on wall plants. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023, 86: 127996.
- [30] Huang L, Qian S H, Li T, Jim C Y, Jin C, Zhao L, Lin D M, Shang K K, Yang Y C. Masonry walls as sieve of urban plant assemblages and refugia of native species in Chongqing, China. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 191: 103620.
- [31] Chen C D, Mao L F, Qiu Y G, Cui J, Wang Y C. Walls offer potential to improve urban biodiversity. *Scientific Reports*, 2020, 10: 9905.
- [32] Cervelli E W, Lundholm J T, Du X. Spontaneous urban vegetation and habitat heterogeneity in Xi'an, China. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 120: 25-33.
- [33] Davis M A, Grime J P, Thompson K. Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. *Journal of Ecology*, 2000, 88 (3): 528-534.
- [34] Savard J L, Clergeau P, Mennechez G. Biodiversity concepts and urban ecosystems. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 48(3/4): 131-142.
- [35] Li L Q, Du Z B, Liang J A, Mo X Q, Xu G Y, Zhu J Y, Li H Y. Homogenization characteristics and regional effects in the diversity pattern of woody plants in 101 cities in China. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118665.
- [36] 江南, 徐卫华, 赵娟娟, 李明娟. 城市植物地面抽样调查方法综述. 云南大学学报: 自然科学版, 2021, 43(3): 587-597.
- [37] Yang J, Zhou J X, Ke Y Z, Xiao J M. Assessing the structure and stability of street trees in Lhasa, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2012, 11(4): 432-438.
- [38] Chau N L, Jim C Y, Zhang H. Species-specific holistic assessment of tree structure and defects in urban Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 55: 126813.
- [39] 冯士雍. 关于样本对总体代表性问题的认识与讨论——兼论抽样调查中辅助变量的作用. *统计研究*, 2001, 18(9): 30-33, 37-34.
- [40] Jin J, Yang J. Effects of sampling approaches on quantifying urban forest structure. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 195: 103722.
- [41] Wang H F, Qureshi S, Qureshi B A, Qiu J X, Friedman C R, Breuste J, Wang X K. A multivariate analysis integrating ecological, socioeconomic and physical characteristics to investigate urban forest cover and plant diversity in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 921-929.
- [42] Zhu Z X, Pei H Q, Schamp B S, Qiu J X, Cai G Y, Cheng X L, Wang H F. Land cover and plant diversity in tropical coastal urban Haikou, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 44: 126395.
- [43] Cheng X L, Padullés Cubino J, Balfour K, Zhu Z X, Wang H F. Drivers of spontaneous and cultivated species diversity in the tropical city of Zhanjiang, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 67: 127428.
- [44] Jim C Y. Drivers for colonization and sustainable management of tree-dominated stonewall ecosystems. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 324-335.
- [45] Niu H Y, Rehling F, Chen Z W, Yue X C, Zhao H Y, Wang X R, Zhang H M, Schabo D G, Farwig N. Regeneration of urban forests as influenced by fragmentation, seed dispersal mode and the legacy effect of reforestation interventions. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 233: 104712.
- [46] 陈静, 刘时彦, 宋晨晨, 赵娟娟. 城市植被调查的取样面积推算与遗漏植物曲线. *生态科学*, 2019, 38(2): 25-30.
- [47] Zhao J J, Chen J, Chen C D, Lu S J, Song C C, Liu S Y, Li J, Zhuang C X. Is it sufficient? Assessment of two sampling methods for urban plant species richness investigations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023, 79: 127824.
- [48] Zhao J J, Ouyang Z Y, Xu W H, Zheng H, Meng X S. Sampling adequacy estimation for plant species composition by accumulation curves—a case study of urban vegetation in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(3): 113-121.
- [49] 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. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 208: 104023.
- [50] Su Y B, Gong C, Cui B W, Guo P P, Ouyang Z Y, Wang X K. Spatial heterogeneity of plant diversity within and between neighborhoods and its implications for a plant diversity survey in urban areas. *Forests*, 2021, 12(4): 416.
- [51] 张艺伟, 郭焱培, 唐荣, 唐志尧, 北京大学. 高光谱遥感在植物多样性研究中的应用进展与趋势. *遥感学报*, 2023, 27(11): 2467-2483.
- [52] 靖传宝, 周伟奇, 钱雨果. 城市乔木树种多样性遥感反演方法研究. *生态学报*, 2019, 39(22): 8383-8391.
- [53] Abbas S, Peng Q, Wong M S, Li Z L, Wang J C, Ng K T K, Kwok C Y T, Hui K K W. Characterizing and classifying urban tree species using bi-monthly terrestrial hyperspectral images in Hong Kong. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 177: 204-216.
- [54] 何荣晓, 雷金睿, 杨帆. 遥感植被指数与植物多样性的相关性及空间分布特征研究——以海口市主城区为例. *广西植物*, 2021, 41(3): 351-361.
- [55] Zhao J J, Bai Z P, Jiang B, Yu H D, Chen C D, Dai X C, Li Q, Song C C, Jiang N. Human activities affecting the species richness of urban spontaneous herbs under a three-scale factor framework. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2025, 104: 128654.

- [56] Ma Z J, Zhang P, Hu N L, Wang G D, Dong Y L, Guo Y J, Wang C C, Fu Y, Ren Z B. Understanding the drivers of woody plant diversity in urban parks in a snow climate city of China. *Journal of Forestry Research*, 2023, 34(4) : 1021-1032.
- [57] Nizamani M M, Padullés Cubino J, Harris A, Guo L Y, Wang H F. Spatial patterns and drivers of plant diversity in the tropical city of Sanya, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023, 79: 127818.
- [58] Zhang H L, Muhammad Nizamani M, Padullés Cubino J, Harris A, Guo L Y, Zhou J J, Wang H F. Habitat heterogeneity explains cultivated and spontaneous plant richness in Haikou City, China. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110713.
- [59] Cheng X-L, Nizamani M M, Jim C Y, Balfour K, Da L-J, Qureshi S, Zhu Z-X, Wang H-F. Using SPOT data and FRAGSTAS to analyze the relationship between plant diversity and green space landscape patterns in the tropical coastal city of Zhanjiang, China. *Remote Sensing*, 2020, 12(21) : 3477.
- [60] McDonald R I, Mansur A V, Ascensão F, Colbert M, Crossman K, Elmquist T, Gonzalez A, Güneralp B, Haase D, Hamann M, Hillel O, Huang K N, Kahnt B, Maddox D, Pacheco A, Pereira H M, Seto K C, Simkin R, Walsh B, Werner A S, Ziter C. Research gaps in knowledge of the impact of urban growth on biodiversity. *Nature Sustainability*, 2019, 3(1) : 16-24.
- [61] Knapp S, Aronson M F J, Carpenter E, Herrera-Montes A, Jung K, Kotze D J, La Sorte F A, Lepczyk C A, MacGregor-Fors I, MacIvor J S, Moretti M, Nilon C H, Piana M R, Rega-Brodsky C C, Salisbury A, Threlfall C G, Trisos C, Williams N S G, Hahs A K. A research agenda for urban biodiversity in the global extinction crisis. *BioScience*, 2021, 71(3) : 268-279.
- [62] Yang J, Xing D Q, Luo X Y. Assessing the performance of a citizen science project for monitoring urban woody plant species diversity in China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 59: 127001.
- [63] Wang H Y, Huang Y, Wang D R, Chen H. Effects of urban built-up patches on native plants in subtropical landscapes with ecological thresholds-A case study of Chongqing city. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105751.
- [64] Barrico L, Castro H, Coutinho A P, Gonçalves M T, Freitas H, Castro P. Plant and microbial biodiversity in urban forests and public gardens: Insights for cities' sustainable development. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 29: 19-27.
- [65] Southon G E, Jorgensen A, Dunnett N, Hoyle H, Evans K L. Perceived species-richness in urban green spaces: Cues, accuracy and well-being impacts. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 172: 1-10.