城市公园自生植物多样性及其在异质生境中的分布特征*

赵聪聪[1] 徐小钰[1] 胡远东[1,2]

1 东北林业大学园林学院 哈尔滨 150001

2 黑龙江寒地园林植物种质资源开发与景观生态修复重点实验室 哈尔滨 150001

摘要：自生植物作为城市植被的重要组成部分，不仅具有重要的生态功能和美学价值，也是研究城市化过程与生物多样性互馈机制的绝佳对象。文章以哈尔滨市主城区 14 个公园作为研究区域，调查和分析自生植物多样性组成及其在异质性生境中的分布特征。结果表明：1）共记录自生植物 147 种，隶属于 43 科 118 属，菊科、蔷薇科和禾本科为优势科，一、二年生草本植物占主导地位；自生植物分布区类型与哈尔滨的气候特征相符，以世界广布性为主，且温带性植物占比高。2）水体边缘绿色空间（G+WE）生境自生植物的物种多样性水平最高，人工草坪（G-AL）生境的物种多样性水平最低。3）综合公园自生植物多样性水平显著高于其他 3 类公园，社区公园物种丰富度最低。4）自生植物物种数量与公园面积以及公园水体面积均呈显著正相关关系。因此，未来的城市公园设计与提升应构建丰富的生境类型，适当增加水体面积，以最大限度发挥城市公园的各项生态服务功能。

关键词：城市公园；自生植物；生境异质性；微生境

DOI：10.12169/zgcsly.2024.04.19.0001

Diversity of Spontaneous Vegetation and Its Distribution Pattern in Heterogeneous Habitat of Urban Park

Zhao Congcong[1] Xu Xiaoyu[1] Hu Yuandong[1,2]

(1. School of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Plant Resources Development and Landscape Ecological Restoration in Heilongjiang Cold Region, Harbin 150001, China)

Abstract: Spontaneous vegetation, as an important component of urban vegetation, has important ecological functions and aesthetic values, and an excellent object for studying the mutual feedback mechanism between urbanization process and biodiversity. Fourteen parks are selected in the city core of Harbin as the research area to investigate and analyze the composition of spontaneous vegetation and their distribution patterns in heterogeneous habitats. The results show that: 1) A total of 147 species of spontaneous vegetation are recorded, belonging to 118 genera of 43 families. Asteraceae, Rosaceae, and Poaceae are the dominant families, while annual and biennial herbaceous plants dominate. The distribution area of spontaneous vegetation is in correspondence with the climatic condition in Harbin, featured with widespread species and a high proportion of temperate plants; 2) The green space at the edge of water (G+WE) has the highest species diversity of spontaneous vegetation, while the artificial lawn (G-AL) has the

收稿日期：2024-04-19

* 基金项目：黑龙江省自然科学基金（LH2023E007）

第一作者：赵聪聪（1989-），女，博士生，研究方向为风景园林规划与设计、城市生物多样性。Email：zhao_ congcong@ nefu. edu. cn

通信作者：胡远东（1977-），男，博士，副教授，风景园林规划与设计、城市生态与生态设计、城市生物多样性。Email：huyuandong@ nefu. edu. cn

lowest species diversity; 3) The diversity of spontaneous vegetation in comprehensive parks is significantly higher than that in other 3 types of parks, while community parks have the lowest species richness; and 4) There is a significantly positive correlation between the number of spontaneous vegetation species and the park area as well as with the water area in park. Therefore, the design and improvement of future urban parks should put the focus on building rich types of habitat, appropriately increasing the water area, and maximizing the ecological service functions of urban parks.

Keywords: urban park; spontaneous vegetation; habitat heterogeneity; microhabitat

快速城市化造成自然斑块破碎化甚至大量消失，导致动植物生存空间不断萎缩或丧失，从而引发生物多样性降低、外来物种入侵、生物均质化等一系列生态环境问题[1-3]。自生植物作为城市植被的重要组成部分，不仅能调节城市气候、改善生态环境[4]，还能在复杂城市生境中作为先锋植物起到环境变化的指示作用[5-6]。与城市中高维护的人工栽培植物相比，自生植物具有抗干扰能力强、低维护、适应强和自播繁殖等特质[7-8]，有助于维持城市绿地植物景观的可持续性和城市生态系统的稳定性。

城市公园作为城市绿地系统中的重要组成部分，是自生植物的重要栖息地之一[9]。对城市公园中的自生植物适度留存和开发利用，将其与人工栽培植物进行合理搭配，有助于营造近自然景观、降低养护成本，对保护和维持城市生物多样性具有积极的作用[10]。近 30 年以来，哈尔滨经历了高速的城市化过程，城市建成区面积持续增加，城市生境与自生植物的多样性分布格局发生了显著变化。因此，选择哈尔滨市典型的快速城市化区域——主城区内 14 个城市公园作为研究区域，以自生植物为研究对象，结合生境类型划分，探究哈尔滨城市公园自生植物多样性分布格局及其成因，对补充和完善哈尔滨城市植被研究、进一步研究城市化过程与生物多样性的互馈机制、指导城市生物多样性保育和管理具有重要的科学价值和实践意义，同时也为哈尔滨城市公园低成本、低养护和低碳植物景观营造材料的选择提供参考。

1　研究区域概况

哈尔滨市（44° 04′—46° 40′ N、125° 42′—130°10′E）位于中国黑龙江省西南部，地处松嫩平原东南缘、松花江中上游，是我国纬度最高的省会城市。该地区气候类型属于中温带大陆性季风气候，冬季漫长（11 月至翌年 3 月），年平均气温为 5.2 ℃，全年降水量 582.9 mm，主要集中在 6—9 月。随着城市化的加剧，哈尔滨市原有植被分布格局发生明显变化，大量自然植被逐渐被城市建设用地和人工植被取代。哈尔滨市主城区位于松花江两岸的河漫滩和河流阶地上，城市景观格局呈中心点向外环状辐射。选择主城区 10 hm^2 以上不同类型的城市公园作为研究区域，通过实地踏查，去掉因开放区域受限或处于施工改造导致实际调查面积不足 10 hm^2 的公园，最终确定 14 个城市公园，包括综合公园 4 个、专类公园 4 个、滨河带状公园 4 个和社区公园 2 个。

2　研究方法

2.1　样方设置

采用网格系统取样法，沿每个公园正南正北方向以 100 m×100 m 的间距布置网格，将网格交叉点设置为调查样点。以每个样点为中心，设置 1 个 10 m×10 m 的样方，将落在建筑、水体处的样点进行微调。采用均匀布样法，在每个样方中心及四角设置 1 个 1 m×1 m 的小样方，记录每个样点的生境类型以及每个小样方中出现的自生维管束植物物种名称、高度、多度及盖度，本次共设置小样方1 457 个。本次调查的自生植物包括非人工栽培的草本植物、栽培物种逸生个体以及栽培树种更新的幼苗[11-12]。

2.2　城市公园生境类型划分

首先，根据前人的研究和 14 个城市公园的土地利用现状，将其划分为绿色空间（G）、硬质边缘绿色空间（G+HE）、硬质空间（H）、水体边缘绿色空间（G+WE）4 大类生境类型[12-15]；然后，结合公园景观要素组合特征，将上述 4 大生境类型进一步细分为 17 种微生境类型（表 1）；最后，结合实地调查和高清遥感影像目视解译，运用 Arcmap10.8 绘制 14 个公园的生境图谱（图 1）。

表 1 生境类型划分

大类生境类型/生境类型代码	微生境类型	微生境类型代码
绿地空间/G	乔木-灌木-草本	G-T-B-L
	灌木-草本	G-B-L
	乔木-草本	G-T-L
	自然化草坪/退化的人工草坪	G- NL
	人工草坪	G-AL
	绿篱-草本	G-H-L
	花草种植带	G-FB
硬质边缘绿地空间/G+HE	设施边缘	G+HE-FE
	广场铺装边缘	G+HE-SE
	园路边缘	G+HE-RE
	建筑边缘	G+HE-BE
	嵌草汀步	G+HE-SSOL
硬质空间/H	种植池	H-PB
	砖缝	H-BG
	停车场铺装	H-PP
水体边缘绿色空间/G+WE	水边种植地	G+WE-PL
	水边未种植地	G+WE-UPL

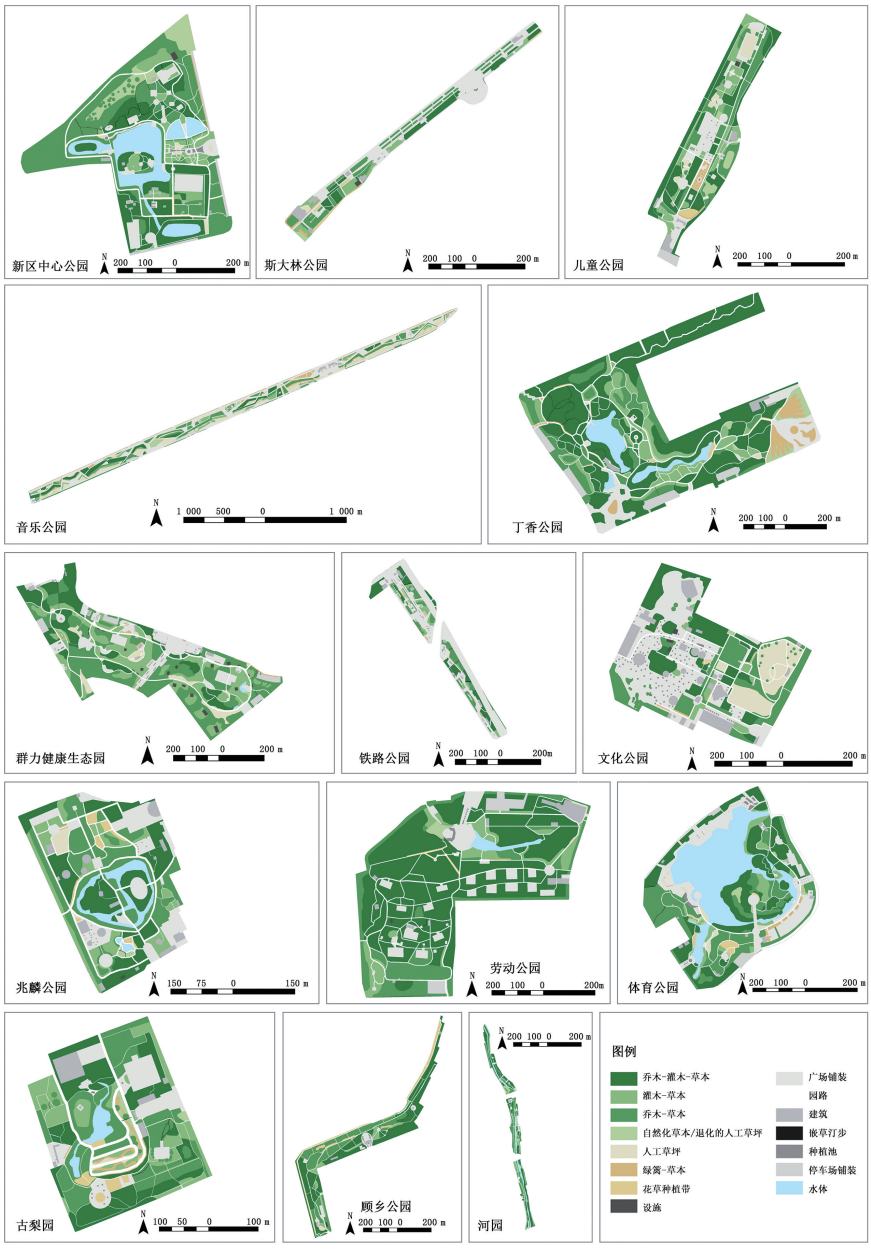


图 1 哈尔滨 14 个城市公园生境图谱

2.3　物种多样性指数计算

物种多样性指数选择 Patrick 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数进行测度，计算公式如下：

Patrick 多样性指数

$$P_0 = S_i \tag{1}$$

式（1）中：S_i为样方中出现的自生植物物种数。

Shannon-Wiener 多样性指数

$$H = -\sum_{i=1}^{S}(P_i \ln P_i) \tag{2}$$

式（2）中：S 表示调查样方中的自生植物物种数量；P_i为物种 i 的简化优势度比例。

Pielou 均匀度指数

$$J = H/H'_{\max} \tag{3}$$

式（3）中：H 为某个样方的自生植物物种多样性指数，即 Shannon-Wiener 多样性指数；$H'_{\max}$为该公园的自生植物物种多样性指数。

2.4　数据处理

各生境类型及各公园特征变量与自生植物多样性的关系通过单因素方差进行分析；不同公园类型条件下，各生境类型的自生植物多样性差异关系采用双因素方差进行分析；物种多样性与公园特征因子之间的相关性检验采用 Spearman 相关性检验。运用 SPSS25.0 和 GraphPad Prism9.0 软件统计和分析样方数据，统计图绘制在 Origin2021 和 Graphpad Prism9.0 软件中完成。

3　结果与分析

3.1　自生植物组成特征

本次调查共记录到自生植物 147 种，隶属于 43 科 118 属（表 2）。在 43 科中，寡种科数量占比最高，为 53.49%（23 科），包括 64 属 76 种；多种科数量最少，仅有 3 科（6.98%），分别为菊科（Compositae）、蔷薇科（Rosaceae）和禾本科（Gramineae），包括 37 属 54 种。在 118 属中，单种属的数量最多，为 101 属（85.59%）；多种属数量最少，仅有 1 属（0.85%），含 8 种植物，为蒿属（*Artemisia*）。

表 2　哈尔滨城市公园自生植物科属组成

科、属	科数/占比(%)	属数/占比(%)	种数/占比(%)
多种科（种数≥10）	3/6.98	37/31.36	54/36.73
寡种科（2≤种数≤9）	23/53.49	64/54.24	76/51.70
单种科（种数=1）	17/39.53	17/14.41	17/11.56
小计	43/100	118/100	147/100
多种属（种数≥5）		1/0.85	8/5.44
寡种属（2≤种数≤9）		16/13.56	38/25.85
单种属（种数=1）		101/85.59	101/68.71
小计		118/100	147/100

从生活型组成特征（表 3）可知：一、二年生草本植物占比最高（44.22%），其次是多年生草本植物（33.33%）；乔木和灌木的物种数量较为接近，分别为 6.80%和 6.12%；蕨类植物最少，物种数量的占比不足 1%。由表 4 可知：科水平上有超过 50%的自生植物为世界广布型，其次是热带性植物和温带性植物；属水平上的温带性植物种类数量最高，其次是世界广布型植物和泛热带性植物。从物种来源来看，哈尔滨城市公园自生植物的主要来源为乡土物种（70.07%）（表 5）。

表 3　自生植物生活型特征

生活型	物种数/占比(%)	代表物种
一、二年生草本	65/44.22	益母草(*Leonurus japonicus*)、铁苋菜(*Acalypha australis*)、斑地锦草(*Euphorbia maculata*)、狗尾草(*Setaria viridis*)
多年生草本	49/33.33	蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、酸模(*Rumex acetosa*)、老鹳草(*Geranium wilfordii*)、白屈菜(*Chelidonium majus*)
草质藤本	7/4.76	葎草(*Humulus scandens*、野大豆(*Glycine soja*)、茜草(*Rubia cordifolia*)
木质藤本	4/2.72	葡萄(*Vitis vinifera*)、野蔷薇(*Rosa multiflora*)
半灌木	2/1.36	苘麻(*Abutilon theophrasti*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)
灌木	9/6.12	紫丁香(*Syringa oblata*)、金银忍冬(*Lonicera maackii*)、榆叶梅(*Prunus triloba*)
乔木	10/6.80	榆(*Ulmus pumila*)、旱柳(*Salix matsudana*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)
蕨类植物	1/0.68	问荆(*Equisetum arvense*)
合计	147/100	

表 4 自生植物科、属的分布区类型

性质	分布区类型	科数/占比(%)	属数/占比(%)	种数/占比(%)
世界性	1 广布（世界广布）	28/65.12	28/23.73	40/27.21
	小计	28/65.12	28/23.73	40/27.21
热带性	2 泛热带（热带广布）	9/20.93	15/12.71	15/10.20
	2-1 热带亚洲、大洋洲和南美洲（墨西哥）间断分布	—	1/0.85	1/0.68
	3 热带亚洲和热带美洲间隔分布	—	2/1.69	2/1.36
	5 热带亚洲至热带大洋洲分布	—	1/0.85	1/0.68
	6 热带亚洲至热带非洲分布	—	2/1.69	2/1.36
	7 热带亚洲（印度—马来西亚）分布	—	2/1.69	2/1.36
	小计	9/20.93	23/19.49	23/15.65
温带性	8 北温带分布	2/4.65	29/24.58	43/29.25
	8-4 北温带和南温带（全温带）间断分布	4/9.30	8/6.78	10/6.80
	9 东亚和北美洲间断分布	—	6/5.08	6/4.08
	10 旧世界温带分布	—	10/8.47	10/6.80
	10-1 地中海区、西亚和东亚间断分布	—	3/2.54	3/2.04
	10-3 欧亚和南美洲（有时也在大洋洲）间断分布	—	3/2.54	3/2.04
	11 温带亚洲分布	—	3/2.54	3/2.04
	13 中亚分布	—	1/0.85	1/0.68
	14 东亚（东喜马拉雅-日本）	—	1/0.85	1/0.68
	14-2 中国-日本	—	3/2.54	4/2.72
	小计	6/13.95	67/56.78	84/57.14
	合计 —	43/100	118/100	147/100

表 5 自生植物物种来源

物种来源	物种数	占比/%
乡土物种	103	70.07
外来物种	44	29.93
合计	147	100

3.2 不同生境类型中自生植物的分布特征

从 4 大类生境中的自生植物多样性分布特征（图 2）可知：水体边缘绿色空间（G+WE）的 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均为最高，是自生植物最主要的生存空间；其次是绿色空间（G）和硬质边缘绿色空间（G+HE），这两种生境类型中也分布着大量自生植物，但与水体边缘绿色空间（G+WE）的物种丰富度差异不显著（$P>0.05$）；硬质空间（H）的 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均为最低，且与水体边缘绿色空间（G+WE）存在显著差异（$P<0.05$），是自生植物分布最少的生境类型。4 种生境大类之间的 Pielou 均匀度指数相近，没有显著差异（$P>0.05$）。

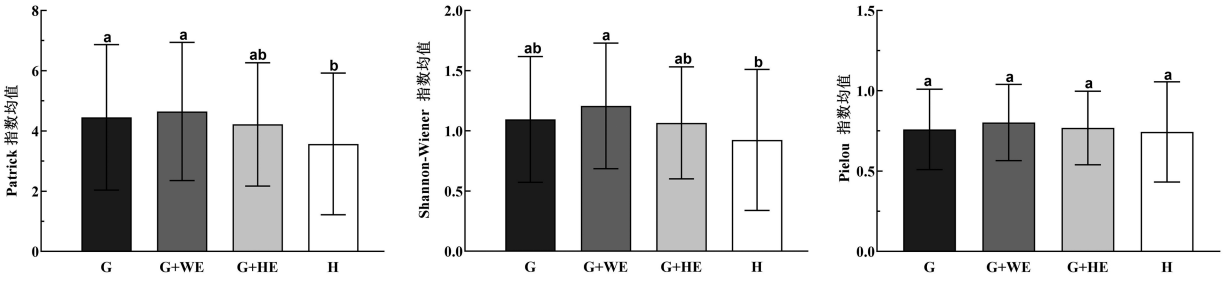


图 2 4 种生境类型自生植物的多样性

17 种微生境类型的自生植物多样性指数如图 3 所示：水边种植地（G+WE-PL）、自然化草坪/退化的人工草坪（G-NL）、乔木-灌木-草本（G-T-B-L）和灌木-草本（G-B-L）的 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数较高，但它们之间的差异性不显著（$P>0.05$），是自生植物最主要的 4 种生存空间；人工草坪（G-AL）的 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均为最低，且与另外 16 种微生境类型的 Shannon-Wiener 多样性指数均存在显著性差异（$P<0.05$），与除绿篱-草本（G-H-L）、砖缝（H-BG）、停车场铺装（H-PP）以外的 13 种微生境类型的 Patrick 丰富度指数均存在显著性差异（$P<0.05$），是自生植物分布最少的生境类型；17 种微生境类型之间的 Pielou 均匀度指数相近，没有显著性差异（$P>0.05$）。

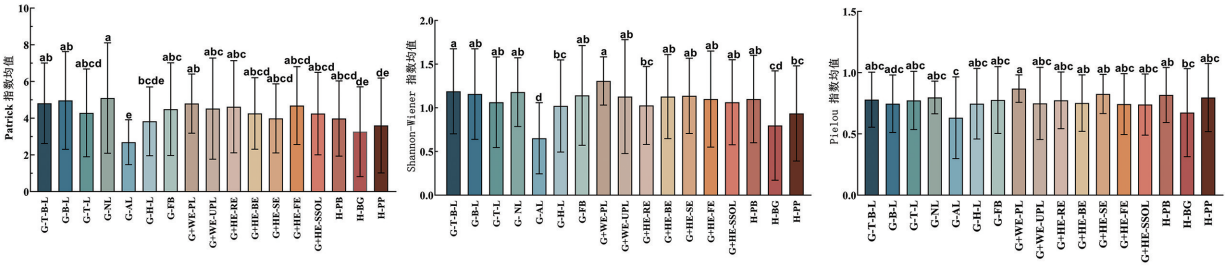


图 3　17 类微生境类型自生植物的多样性

3.3　不同公园类型中自生植物的分布特征

从不同城市公园类型的自生植物多样性指数（图 4）可知：综合公园的 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数的均值最高且与社区公园存在极显著差异（$P<0.001$）；社区公园的 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数的均值最低，并且与其他 3 个公园类型之间均呈极显著差异（$P<0.001$）；专类公园和滨河公园的 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均值接近，两者之间无显著性差异（$P>0.05$）；4 个不同类型公园的 Pielou 均匀度指数彼此之间无显著差异（$P>0.05$）。由图 5~6 可知，在相同生境大类和微生境类型中，综合公园的 Patrick 丰富度指数分别在 2 种生境和 3 种微生境类型中与社区公园呈显著性差异（$P<0.05$），其他生境大类和微生境类型之间未表现出显著差异（$P>0.05$）。

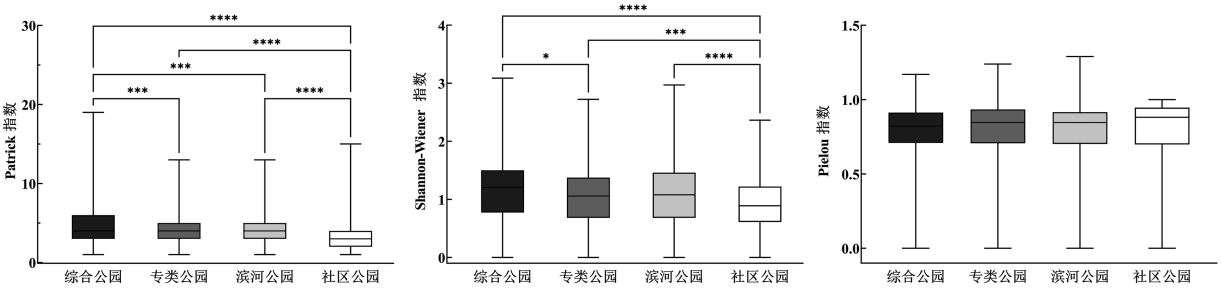


图 4　4 个不同类型城市公园自生植物的物种多样性

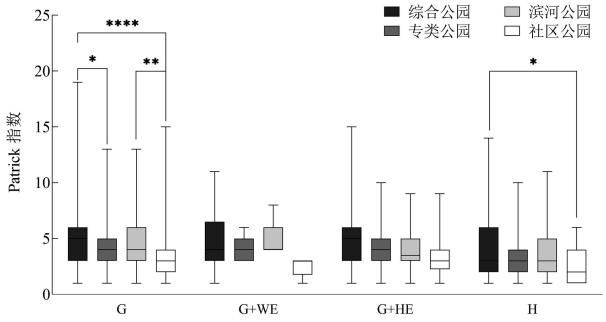


图 5　各生境大类中 4 类城市公园自生植物的 Patrick 丰富度

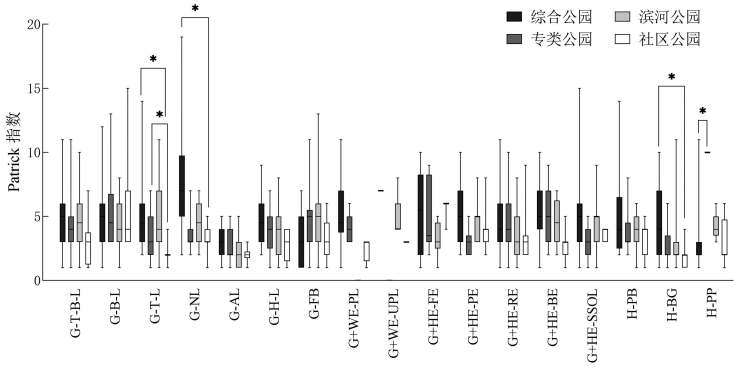


图 6　各微生境类型中 4 类城市公园自生植物的 Patrick 丰富度

城市公园特征因子与自生植物物种多样性相关性检验结果（图 7）表明：自生植物的物种数量与公园面积和水体面积呈显著正相关性（$P<0.05$），相关系数 r 分别为 0.603 5 和 0.597 2；自生植物的物种数量与城市公园的周长、周长面积比、绿地面积、建成年份 4 个特征因子之间的相关性不显著（$P>0.05$）。

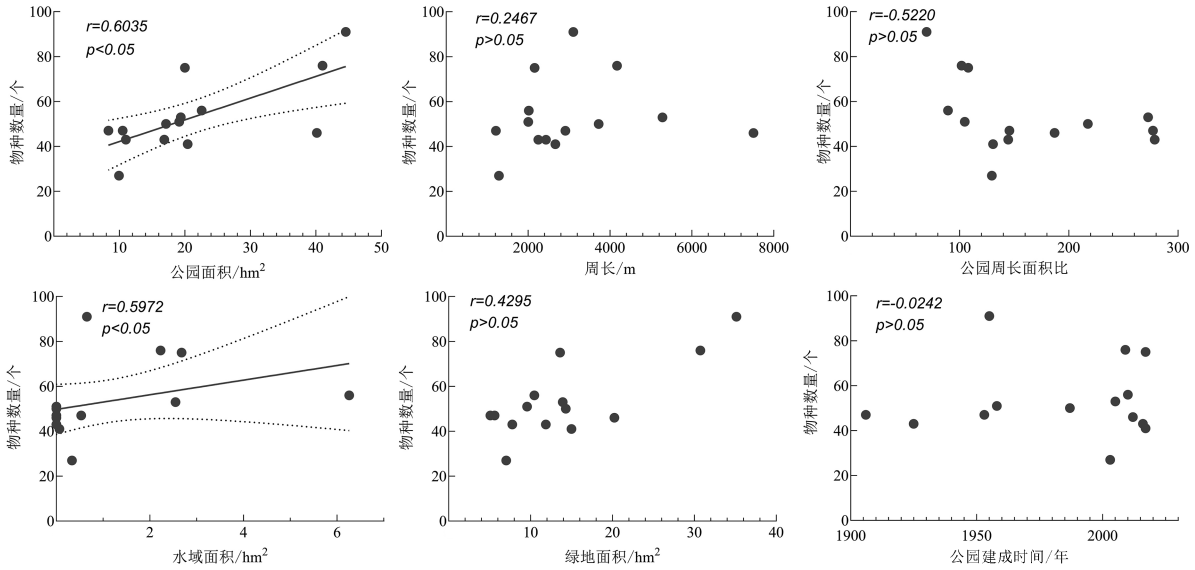


图 7 自生植物物种数量与公园特征因子之间的相关性

4 讨论

4.1 哈尔滨城市公园自生植物的适应性

城市公园虽为城市中植被层次较为丰富的绿地类型，但由于定期的割刈、喷洒除草剂等人为管理活动，使需要稳定生境的多年生自生植物较难在此存活。因此，研究区自生植物生活型以一、二年生为主，这类植物一般生长周期短，能够在短时间内建立群落，以更好地适应受到较大程度人为干扰的城市生境；而蕨类植物对温度、湿度等环境因素较为敏感，哈尔滨干燥、寒冷的气候条件使其难以在城市公园中稳定生长，其占比最低，这一结果也与国内相关的自生植物调查研究结果相近[16-18]。与其他气候带城市相比，菊科、蔷薇科和禾本科是研究区域中所含自生植物物种数量最多的 3 个科，且多以乡土树种为主，这与国内大多数城市公园自生植物的研究结论基本一致[13,19-20]，这也与菊科和禾本科多为草本植物且对城市生境具有很强的适应性有关；同时，高比例的单种属（85.59%）也反映了自生植物对复杂的城市生境表现出较广泛的适应性。

哈尔滨城市公园自生植物分布区类型在科的水平上，世界广布性占比最高，这与多个城市的调查结果基本相似[16,17,21]，说明这些植物具有较强的适应性和可塑性，能够应对高度异质化的城市生境。属的区系组成特征显示，温带性植物占比远高于热带性植物占比，这与上海热带性植物与温带性植物比例接近的研究结果[17]不同，主要原因是哈尔滨地处中温带，而上海地处北亚热带北部边缘，具有热带向温带过渡的性质，这与冯建孟和徐成东[22]提出的“纬度与热带区系成分和温带区系成分所占比重之比呈明显的负相关关系”结果一致，因此，哈尔滨自生植物属的区系组成中温带性植物比例最高。世界性和热带性地理成分科的自生植物数量也相对较多，这可能与人为干扰活动强度和程度有关，如城市公园中引入栽培的外来物种发生逸生现象，或是人类在不同城市间的频繁往来带动了种子传播；同时，城市热岛效应以及全球气候变暖也使得这两种地理成分的自生植物在城市中拥有了适宜的生存环境。

4.2 生境异质性和公园特征差异性对自生植物分布格局的影响

城市公园生境类型及其功能多样，各生境类型的管护强度及人为活动干扰活动也不尽相同，

导致不同生境的水、热、土壤等条件差异较大，进而影响自生植物的多样性分布格局。绿色空间（G）是城市公园的主导生境类型，其微生境中乔木-灌木-草本（G-T-B-L）拥有最高的 Shannon-Wiener 多样性指数和较高的 Patrick 多样性指数，这是因为相较于绿色空间（G）中的其他微生境，乔灌草复合结构在植物种类上更为丰富、空间更为闭合，进而为除草措施和游人进入制造了阻碍，极大地减少了人为干扰，为更多的自生植物定居生长创造了条件，这一结果也与许维强[23]得出的“自生植物丰富度与人为干扰程度成反比、与原有植物种类丰富度成正比”结果相符合；绿色空间的人工草坪（G-AL）微生境类型的这两个多样性指数均为最低，并远低于绝大多数其他微生境类型，主要原因是管理人员为了保证人工草坪的景观效果，往往采取高强度修剪、除草、高频率喷洒杀虫剂等手段进行维护，加之游人的频繁践踏，导致自生植物在人工草坪生境中难以生存，仅有相对低矮、耐践踏、生活史短的自生植物得以留存，如车前（*Plantago asiatica*）、蒲公英等。与之相反，水体边缘绿色空间（G+WE）是哈尔滨城市公园中面积比重最小的生境类型，但其 Patrick 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均为最高，尤其是水边种植地（G+WE-PL）微生境类型的 Shannon-Wiener 多样性指数达到最高值，这主要是由于滨水区是水陆交错带，水位变化带来水中动植物、微生物与陆地发生交替，使其拥有更为复杂和丰富的生境类型，为自生植物多样性的生存提供了更多的微生境类型，这与 Costanza 等[24]得出的“生境异质性与植物丰富度呈正相关”和常铭阳等[25]得出的“在小尺度空间中，物种多样性与土地利用类型多样性的正相关关系更为显著”的结果相符。

不同类型城市公园的服务半径、主导功能和设计方案等方面的差异，也是影响自生植物分布格局的重要原因。一般来说，综合公园的面积相对较大、景观元素和空间类型较多、植物群落类型多样，从而能够形成丰富多样的生境类型，尤其是在一些管理相对粗放的空间成为了自生植物重要的栖居地。综合公园的 Patrick 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均达到最高，且极显著高于社区公园。社区公园主要服务对象为周边居民，其规模较小、景观元素较少、植物种类和群落类型较为单一、管理相对精细，不利于自生植物的留存，其生境大类和微生境类型中的多样性指数也最低。4 个不同类型城市公园的 Pielou 均匀度指数无显著差异，表明自生植物在所有公园中分布特征基本类似。除此之外，公园面积和公园水体面积与自生植物的物种多样性呈显著正相关，但与部分学者[13]的研究结论略有不同，这可能与城市地理特征的差异有关。在微生境中，综合公园与社区公园在乔木-草本（G-T-L）和自然化草坪/退化的人工草坪（G-NL）生境中物种丰富度呈显著差异，这可能是因为综合公园的乔木-草本结构、自然草坪较多，且多为粗放式管理，给了自生植物足够的生长时间与环境条件。同时，综合公园的砖缝（H-BG）生境的物种丰富度也显著高于社区公园，这是因为综合公园面积大，路网复杂，园路的平均踩踏频次与社区公园相比较低。

5　结论

1）哈尔滨城市公园自生植物资源较为丰富，共记录到 147 种，隶属于 43 科 118 属，其中乡土植物占比较高，且以生长周期短、建群能力快的一、二年生植物为主，菊科、蔷薇科和禾本科是优势科。

2）自生植物的分布区类型与哈尔滨的气候特征相符，以世界广布性为主，且温带性植物占比高。

3）自生植物的生境异质性和公园特征差异性显著影响自生植物的分布格局。绿色空间中的乔木-灌木-草本（G-T-B-L）微生境具有最高的物种多样性，而人工草坪（G-AL）微生境的多样性指数最低；综合公园因生境类型多样和管理相对粗放，成为自生植物多样性的热点区域，而社区公园则因管理精细和生境单一，不利于自生植物的留存；公园面积和水体面积均为影响自生植物多样性的正向因素。

4）城市公园的设计与提升应着重营造多样化的生境类型，适当扩大水体区域，以提高城市公园在维持生物多样性的作用。

参考文献

[1] MCKINNEY M L. Urbanization, biodiversity, andconservation: The impacts of urbanization on native species are poorly studied, but educating a highly urbanized human population about these impacts can greatly improve species conservation in all ecosystems[J]. BioScience, 2002, 52(10): 883-890.

[2] 张淑菁, 王成. 近 20 年来欧洲城市生物多样性研究进展[J]. 中国城市林业, 2022, 20(6): 15-24.

[3] 靳程, 胡四维, 胡远东, 等. 不同地理尺度下中国城市绿化树种多样性的均质化特征[J]. 风景园林, 2022, 29(1): 53-58.

[4] ROBINSON S L, LUNDHOLM J T. Ecosystem services provided by urban spontaneous vegetation [J]. Urban Ecosystems, 2012, 15(3): 545-557.

[5] GAO Z W, SONG K, PAN Y J, et al. Drivers of spontaneous plant richness patterns in urban green space within a biodiversity hotspot[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 61: 127098.

[6] GAO Z W, PAN Y J, VAN BODEGOM P M, et al. Beta diversity of urban spontaneous plants and its drivers in 9 major cities of Yunnan Province, China [J]. Landscape and Urban Planning, 2023, 234: 104741.

[7] COHEN M, BAUDOIN R, PALIBRK M, et al. Urban biodiversity and social inequalities in built-up cities: New evidences, next questions. The example of Paris, France[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 106(3): 277-287.

[8] 李仓拴, 刘晖, 程爱云, 等. 让自然参与设计: 一种基于自然演替的城市自生群落改良设计途径[J]. 中国园林, 2019, 35(7): 118-123.

[9] BARUCH Z, LIDDICOAT C, CANDO-DUMANCELA C, et al. Increased plant species richness associates with greater soil bacterial diversity in urban green spaces [J]. Environmental Research, 2021, 196: 110425.

[10] BENEDICT M A, MCMAHON E T. Green infrastructure: smart conservation for the 21st century [J]. Renewable Resources Journal, 2002, 20(3): 12-17.

[11] 高志文. 云南省 9 个城市的自生植物多样性格局及其影响因子[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.

[12] CERVELLI E W, LUNDHOLM J T, DU X. Spontaneous urban vegetation and habitat heterogeneity in Xi'an, China [J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 120: 25-33.

[13] 李晓鹏. 城市化环境下公园自生植物的多样性与公众感知研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.

[14] 朱佳颖. 相如湖国家湿地公园自生植物多样性及其影响因素的调查[D]. 南充: 西华师范大学, 2020.

[15] 李晓鹏, 张思凝, 冯黎, 等. 成都城区河流廊道自生植物的生境及物种多样性[J]. 风景园林, 2022, 29(1): 64-70.

[16] 陈晓双, 梁红, 宋坤, 等. 哈尔滨城区杂草群落多样性及其分类体系[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2221-2228.

[17] 田志慧. 上海城乡陆生生态系统杂草群落多样性格局及其成因论研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.

[18] 尤其. 郑州市主城区自生草本植物组成与群落特征研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.

[19] 范秋云, 云英英, 梁伟红, 等. 海口市城市公园自生植物多样性研究[J]. 热带作物学报, 2024, 45(4): 734-741.

[20] 王云霄, 闫淑君, 马雯雯, 等. 福州国家森林公园草坪自生植物调查分析[J]. 中国城市林业, 2021, 19(6): 94-98.

[21] 曹丽娜. 南京市主城区道路绿地自生植物组成特征研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.

[22] 冯建孟, 徐成东. 植物区系过渡性及其生物地理意义[J]. 生态学杂志, 2009, 28(1): 108-112.

[23] 许维强. 城市建成区自生植物调查研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.

[24] COSTANZA J K, MOODY A, PEET R K. Multi-scale environmental heterogeneity as a predictor of plant species richness [J]. Landscape Ecology, 2011, 26(6): 851-864.

[25] CHANG M Y, LUO X Y, ZHANG Y R, et al. Land-use diversity can better predict urban spontaneous plant richness than impervious surface coverage at finer spatial scales[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 323: 116205.