

DOI: 10.11686/cyxb2025150

http://cyxb.magtech.com.cn

王慧腾, 刘文兰, 唐红, 等. 兰州滨河公园自生植物物种多样性与功能多样性对城市化的响应. 草业学报, 2026, 35(3): 96—113.

WANG Hui-teng, LIU Wen-lan, TANG Hong, *et al.* Responses of species and functional diversity of spontaneous vegetation to urbanization in Lanzhou riverside parks. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(3): 96—113.

兰州滨河公园自生植物物种多样性 与功能多样性对城市化的响应

王慧腾, 刘文兰*, 唐红, 刘晓娟, 韩蓉, 宋捷

(甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 自生植物是研究城市化与城市生态系统互馈机制的重要对象, 研究自生植物物种多样性和功能多样性之间的关系及其对城市化的响应, 有利于揭示其物种分布格局与生态系统功能的维持机制。本研究以兰州滨河公园自生植物群落为对象, 通过分析自生植物物种组成与功能特征、不同城市化水平与不同生境类型下自生植物群落物种多样性和功能多样性的差异性, 探究物种多样性与功能多样性之间的关系对城市化的响应, 阐明自生植物的分布格局及其对城市化的响应机制。结果显示: 兰州市滨河公园有 142 种自生植物, 隶属于 42 科 116 属, 以草本植物为主。生活型上, 多年生草本植物 (38%) 和一年生草本植物 (30%) 占优势。植物区系上乡土植物占比 54.2%, 入侵植物 (14.1%) 的扩散较明显。总体上, 草质叶片 (61.87%) 和纸质叶片 (26.06%)、小型叶 (24.65%) 和中等叶 (59.15%)、虫媒 (73.24%)、风力传播 (59.15%) 在各自功能性状中的占比较大。城市化对公园绿地自生植物产生了显著的影响, 高干扰环境下一年生植物扩张明显, 生境破碎化促进短生命周期、高扩散力物种的入侵。自生植物的物种多样性、功能多样性在不同城市化水平和不同生境类型中均多数存在显著性差异 ($P < 0.05$), 灌丛与硬质生境, 林地与灌丛功能丰富度 (FRic) 存在显著性差异 ($P < 0.05$); 林地与灌丛 Patrick 指数存在显著性差异 ($P < 0.05$)。在不同城市化水平上, 中等城市化水平下自生植物 Patrick 指数最高, 功能丰富度 (FRic) 最低, 环境过滤效应导致功能性状趋同。高城市化水平则引起群落均质化。Patrick 指数与功能丰富度、Rao 二次熵 (RaoQ) 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 符合生态位互补理论。物种多样性与功能多样性之间在不同城市化水平多数存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$), Shannon—Wiener 指数与 RaoQ 在高城市化水平线性关系拟合效果最好。揭示了兰州滨河公园自生植物对城市化的响应机制, 为城市滨河绿地生态保护与可持续发展提供科学依据。

关键词: 城市化; 自生植物; 物种多样性; 功能多样性; 滨河公园; 兰州市

Responses of species and functional diversity of spontaneous vegetation to urbanization in Lanzhou riverside parks

WANG Hui-teng, LIU Wen-lan*, TANG Hong, LIU Xiao-juan, HAN Rong, SONG Jie

College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Sites with spontaneous vegetation are important for studying the mutual feedback mechanisms between urbanization and urban ecosystems. The study of the relationship between species diversity and functional diversity of spontaneous vegetation and their response to urbanization can be predictive of the distribution patterns of species and can aid elucidation of mechanisms of ecosystem function. In this study, the spontaneous vegetation community in

收稿日期: 2025-04-24; 改回日期: 2025-06-05

基金项目: 2024 年甘肃省高校教师创新基金项目 (2024B-081), 甘肃农业大学科技创新基金—学科建设专项基金 (GAU-XKJS-2018-114), 国家自然科学基金项目 (32160409) 和甘肃林业和草原局林草科技创新与合作项目 (kjcx2021004) 资助。

作者简介: 王慧腾 (2001—), 女, 河南周口人, 在读硕士。E-mail: 1073323020238@st.gsau.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liuwl@gsau.edu.cn

Lanzhou riverside parks was chosen for study, and the distribution patterns of species were recorded to clarify vegetation response mechanisms to urbanization. This was achieved by analyzing spontaneous vegetation species composition and functional characteristics, and the differences between species diversity and functional diversity of the spontaneous vegetation community under different urbanization levels and for different habitat types, and by probing the relationship between species diversity and functional diversity and their responses to urbanization. It was found that there were 142 spontaneously occurring plant species among the vegetation in the Lanzhou riverside parks, belonging to 42 families and 116 genera, and dominated by herbaceous plants. On life-history type, perennial herbaceous plants (38%) and annual herbaceous plants (30%) were dominant. The flora was 54.2% native, with a noticeable spread of invasive plants (14.1%). Overall, species with herbaceous foliage (61.87%) and papery foliage (26.06%), species with small- (24.65%) and medium-sized leaves (59.15%), insect vectors (73.24%), and wind dispersal (59.15%) had the greatest contribution to functional traits. Urbanization had a significant impact on spontaneous vegetation in park green spaces, with significant expansion of annuals in high disturbance environments and habitat fragmentation promoting invasion of short-life-cycle, high dispersal species. Spontaneous vegetation's species and functional diversity differed significantly ($P < 0.05$) among urbanization levels and habitat types. Functional richness (FRic), differed significantly ($P < 0.05$) between scrub and hard-substrate habitat, and between woodland and scrub; and Patrick index, between woodlands and scrub ($P < 0.05$). Across different urbanization levels, spontaneous vegetation had the highest Patrick index and the lowest FRic at medium urbanization level, and the prevailing abiotic conditions filtered species possessing traits that can adapt to the local environment, thereby causing the functional traits of community members to converge. High urbanization level caused community homogenization. Patrick index showed a significant positive correlation ($P < 0.05$) with functional richness and Rao's quadratic entropy value (RaoQ), which is in line with theory of ecological niche complementarity. There was a highly significant positive correlation ($P < 0.01$) between species diversity and functional diversity in most of the different urbanization levels, and a linear relationship between Shannon—Wiener index and RaoQ was more evident at high urbanization levels. This study reveals the response patterns of spontaneous vegetation to urbanization in Lanzhou riverside parks, and provides scientific data for managing the ecological protection and sustainable development of urban riverside green space.

Key words: urbanization; spontaneous vegetation; species diversity; functional diversity; the riverside parks; Lanzhou City

自生植物(spontaneous vegetation)指未经人工栽培便可在城市环境中自发定居生长的植物群体^[1],作为自然生长的本土物种,具有抗干扰能力强、低维护和适应强等特点^[2],不仅是城市生物多样性的载体,更能作为环境变化的指示种^[3]。城市化进程显著改变了城市生物多样性格局^[4-5],尤其对自生植物群落分布产生深刻的影响^[6]。国外最早开始关注自生生物,聚焦于公众认知、景观设计方面^[7-8],新加坡一项实践证实,公众对自然化景观接受度较高^[9]。当前已深入研究到自生植物的生境分布格局^[10]、功能特性^[11]。国内学者在西安^[3]、杭州^[12]、郑州^[13]、哈尔滨^[14]等城市开展自生植物调查,包括河流廊道^[15]、城市绿地^[13]、公园^[16]、校园^[17]以及特殊生境,如墙体^[18]、荒地^[19]、道路^[20]、屋顶^[21]的自生植物物种分布。研究表明,城市公园作为城市生物多样性的核心载体,其自生植物群落在维持生态服务中具有不可替代的作用^[22]。然而,当前研究多局限于物种多样性层面,仅通过物种丰富度无法体现出群落内功能性状的变化,对功能多样性等深层维度的探索仍显不足。

物种多样性是生态系统稳定的重要指标,可以反映群落的丰富程度和均匀度^[23]。功能多样性通过功能性状差异来揭示植物对环境的响应机制^[24],能阐释植物群落中冗余种和种间互补作用。前者由资源可利用程度决定,后者则是由环境筛选和物种间相互作用,即生态位分化所决定^[25]。目前济南^[6]、北京^[26]、南京^[20]、哈尔滨^[15]等城市研究了城市化进程下自生植物的物种多样性。少数学者研究自生植物的功能多样性^[27-29],但是自生植物物种多

样性与功能多样性之间的关系对城市化的响应鲜有报道。研究功能多样性是从表象生态迈向机制生态的关键跨度。物种多样性和功能多样性对生态系统结构和功能起决定性作用,是生物多样性在不同层次上的表现形式^[27]。阐明物种多样性和功能多样性的关系有利于揭示城市化进程中自生植物的分布格局及环境筛选维持的物种与性状组合。

兰州城市规模的迅猛扩张,人口急剧增加,城市生境与植物的多样性分布格局发生了显著变化。滨河公园沿黄河而建,是滨河绿地的重要代表,其自生植物群落对城市化的响应具有典型性和代表性。兰州市已有研究自生植物物种多样性层面,如吕宁宁等^[22]揭示了滨河公园自生植物的物种组成特征;张瑜等^[30]、张起鹏等^[31]则对湿地典型植物群落的多样性进行研究,但尚未有功能多样性层面研究。因此,本研究对不同城市化水平下公园自生植物多样性,及其内部不同生境类型如何影响自生植物物种多样性与功能多样性进行分析,并探究物种多样性和功能多样性之间的关系在城市化水平下的变化,揭示城市化对自生植物群落的影响规律及内在机制,为兰州城市滨河绿地的生态保护以及城市生态可持续发展提供科学理论支撑和实践指导。

1 材料与方法

1.1 调查区域概况

兰州市(35°34′—37°00′ N, 102°36′—104°35′ E)位于中国西北部、甘肃省中部,气候类型为大陆性季风气候,年降水量 316 mm,年日照 2446 h,无霜期 180 d,年平均气温 9.3 °C,平均风速 0.8 m·s⁻¹,平均相对湿度 48%^[32]。土壤类型以黄绵土和灰钙土为主^[30]。兰州市地势西部和南部高,东北低,南北两山夹峙,形成了“两山夹一河”的地形,平均海拔 1500 m。该市建成区园林绿地面积达 8681.39 hm²,绿地率为 40.76%,绿化覆盖率达 42.09%,乔灌木占比 63.88%。黄河风情线周边已建成多个城市公园,流量丰沛的黄河水使黄河两岸生态极具天然优势,公园内自生植物种类丰富,满足自生植物调查。随着城市化进程的加快,兰州市自然植被遭到破坏,城市绿地面积减少,景观更破碎化,兰州市特殊的地理、自然条件决定了其特有的城市发展模式,城市化程度变化显著。故本研究选取滨河公园作为对象分析城市化对自生植物物种分布的影响。该区域分布有垂柳(*Salix babylonica*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis*)等湿地植物 208 种,其中自然植物 187 种、栽培植物 21 种^[31]。

1.2 研究方法

1.2.1 城市化水平划分 不透水率是衡量城市化程度的重要指标之一,被广泛应用于表征城市化强度^[6,33-34]。本研究利用 2023 年 30 m 分辨率地表覆盖(Globe Land 30)数据集(<https://zenodo.org/records/12779975>),该数据集包含 9 个主要的地表覆盖类型,分别是农田、森林、灌木地、草原、湿地、水体、裸地、冰雪和不透水面。运用 ArcGIS 10.8 软件对兰州市主城区土地利用遥感影像进行解译分类,以每个公园斑块边界为中心,建立 1000 m 为半径的缓冲区,计算公园周边的不透水面比例(impermeable surface area, ISA),即缓冲区内不透水面所占的面积百分比^[34],作为城市化指数。按照 0.04 间隔将城市化指数由低到高分 I~V 5 个等级,代表公园绿地所处位置的城市化水平(表 1)。

1.2.2 样地设置与群落调查 2024 年 5—9 月,在预调查的基础上,选取 12 个滨河公园(表 1)进行自生植物调查,共记录到草本样方 942 个,作为城市化梯度下自生植物多样性分析数据,本研究的滨河公园内沿河区域垂直距离兰州市黄河岸线 500 m 以内,其中雁滩公园地处黄河故道,属河滩地,故划分为滨河公园。首先利用 ArcGIS 软件,采用均匀网格布样法,沿着每个公园边界正南正北方向以 100 m×100 m 的方格设置均匀的网格点,去除落在水面的网格点。在每个样点的中心,设置 5 m×5 m 的木本样方,记录自生乔、灌木及木质藤本种类、数量、株高,在木本样方设置 3~5 个 1 m×1 m 的小样方进行自生植物调查,记录样方中出现的自生草本植物的物种名、株数、盖度、株高以及该样点的生境类型、人为干扰程度、海拔、经度、纬度等信息。本研究中自生植物包括城市杂草、栽培植物中的木本植物更新幼苗,以及废置地、硬质铺装和护岸缝隙等生境内生长的木本和草本植物^[35];样点周边 10 m 范围内无同种栽培植物认定为自生,若母株为建成前保留植物,则该植株也记录为自生^[22]。对于胸径超过 2 cm 的木本植物、有明显人工栽培管理痕迹的草本植物,均认定为栽培植物。生境类型的划分结合实地调

查情况与前人研究^[16,20,36],按照养护管理与人为干扰程度及样方所处位置,分为人工草坪(以人工草本植物为主的区域,且不与水体相邻)、硬质生境(包括铺装缝隙、砖石缝、硬质边缘)、灌丛(以灌木为优势植被的人工与自然群落)、林地(自然林与种植林下草地,郁闭度 20%~80%)、滨水生境(距离水体<2 m 的区域,包括河道护坡堤岸,湖边、河岸草地)5 种类型。人为干扰程度^[12,18]根据管理员修剪次数与样点内人为践踏程度划分 5 个等级(表 2)。部分样点依据自生植物实际分布情况进行微调,补充选择足以反映所有生境、群落种类组成和结构特征的样地,以确保能涵盖各公园的所有生境类型。

表 1 各公园样方数和城市化指数概况

Table 1 Overview of the number of plots and urbanization index in each park

城市化水平 Urbanization level	公园名称 Name of parks	所属区 District	面积 Area (hm ²)	样方数 Samples number (No.)	城市化指数 Urbanization index (%)
I	兰州龙源公园 Lanzhou Longyuan Park	城关区 Chengguan District	2.87	47	75.6
II	西沙公园 Xisha Park	西固区 Xigu District	12.00	64	82.6
	小西湖公园 Xiaoxihu Park	七里河区 Qilihe District	14.20	78	83.4
III	滩尖子湿地公园 Tanjianzi Wetland Park	城关区 Chengguan District	14.95	83	86.1
	银滩湿地公园 Silver Beach Wetland Park	安宁区 Anning District	53.80	74	86.2
	寓言故事公园 Fables Park	安宁区 Anning District	0.38	36	86.3
	马拉松文化主题公园 Marathon Culture Theme Park	城关区 Chengguan District	11.60	72	86.7
	水车博览园 Waterwheel Expo Park	城关区 Chengguan District	5.59	47	86.8
	廉政文化主题公园 Integrity Culture Theme Park	安宁区 Anning District	15.30	33	87.3
	百合公园 Lily Park	七里河区 Qilihe District	11.00	54	87.4
IV	马滩湿地公园 Matan Wetland Park	七里河区 Qilihe District	7.60	51	87.8
V	雁滩公园 Yantan Park	城关区 Chengguan District	14.55	53	92.0

注: I、II、III、IV、V 由低到高分别代表不同的城市化程度。下同。

Note: I, II, III, IV and V represent different degrees of urbanization from low to high. The same below.

表 2 生境类型与人为干扰等级划分

Table 2 Habitat types and human disturbance classifications

生境类型 Habitat type	干扰类型 Interference type	人为干扰程度 Degree of human interference
人工草坪 Artificial turf	践踏、刈割 Trample, mow	强 Strong
硬质生境 Hard habitat	践踏、拔除 Trample, uproot	中强 Medium-strong
灌丛 Scrub	拔除 Uproot	中 Middle
林地 Woodland	拔除、刈割 Uproot, mow	弱中 Weak-medium
滨水生境 Waterfront habitat	践踏 Trample	弱 Weak

依据《中国植物志》^[37]和《甘肃省植物志》^[38]对调查物种进行科、属、种的分类和生活型的划分。通过查阅《中国外来入侵植物名录》^[39]、《中国外来入侵植物图鉴》^[40],参照中国科学院植物研究所发布的中国外来入侵物种信息系统(www.iplant.cn/ias)界定入侵植物与非入侵植物等,确定物种来源。

1.3 数据处理

1.3.1 重要值与物种多样性指数 重要值^[41]可以反映物种在群落中的地位 and 作用,计算公式如下:

$$\text{重要值 (importance value, IV)} = (\text{相对多度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度}) / 3$$

植物物种多样性指数^[41]计算公式如下:

Patrick 丰富度指数: $R = S$

Simpson 优势度指数: $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$

Shannon-Wiener 多样性指数: $H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$

Pielou 均匀度指数: $J = H/\ln S$

式中: S 为总物种数, N 为所有物种重要值之和, N_i 为第 i 个物种的重要值, P_i 为第 i 个物种的相对重要值, 其中 $P_i = N_i/N$ 。

1.3.2 功能性状特征 本研究选择 13 个功能性状特征(表 3), 主要从形态特征、生殖特征和生理特征 3 种类型中选取指标。植物的高度数据通过野外调查测量获得, 其余功能特征主要通过查阅《中国植物志》^[37]、文献[27, 36, 42-44]等获得。

表 3 植物功能特征类型

Table 3 Types of plant functional traits

植物性状 Plant traits	性状特征 Traits characteristics	属性 Attributes	文献参考 Literature reference
叶片大小 Leaf size	1. 小 Small; 2. 中等 Medium; 3. 大 Large.	C	Chaudhary 等 ^[42]
叶片质地 Leaf texture	1. 膜质 Membranous; 2. 草质 Herbaceous; 3. 纸质 Papery; 4. 肉质 Fleshy; 5. 革质 Leathery.	C	宋晨晨等 ^[43]
叶片绒毛 Leaf fluff	1. 无毛或近无毛 Glabrous or subglabrous; 2. 中等密度 Medium density; 3. 密毛 Densely hairy.	C	宋晨晨等 ^[43]
叶片粗糙程度 Leaf froughness	1. 光滑 Soft; 2. 较光滑 Slightly soft; 3. 较粗糙 Slightly rough; 4. 粗糙 Rough.	C	宋晨晨等 ^[43]
花期 Flowering period	1. 短(0~3个月) Short (0-3 months); 2. 中(4~6个月) Medium (4-6 months); 3. 长(6个月以上) Long (more than 6 months).	Q	潘妮等 ^[27]
固氮类型 Nitrogen fixation type	1. 固氮 N-fixing; 2. 不固氮 Non-N-fixing.	C	宋晨晨等 ^[43]
植物来源 Species source	1. 本地 Native species; 2. 国内外来 Domestic alien species; 3. 国外外来 Foreign alien species.	C	潘妮等 ^[27]
根系深浅 Root depth	1. 深根 Deep root; 2. 中根 Medium root; 3. 浅根 Shallow root.	C	Dawson 等 ^[44]
根系类型 Root type	1. 直根系 Taproot system; 2. 须根系 Fibrous root system.	C	潘妮等 ^[27]
果期 Fruit period	1. 短(0~3个月) Short (0-3 months); 2. 中(4~6个月) Medium (4-6 months); 3. 长(6个月以上) Long (more than 6 months).	Q	潘妮等 ^[27]
植株高度 Plant height	株高 Plant height.	Q	骆沁宇等 ^[36]
传粉方式 Pollination mode	1. 风媒 Wind-borne; 2. 虫媒 Insect-borne.	C	骆沁宇等 ^[36]
种子扩散方式 Dispersal mode	1. 风力传播 Wind-borne; 2. 动物传播 Animal-borne; 3. 自动传播 Auto-borne.	C	骆沁宇等 ^[36]

C: 分类数据 Disaggregated data; Q: 量化数据 Quantitative data.

1.3.3 功能多样性指数 选取功能多样性指数评估不同城市化样地的自生植物群落^[45-46], 并选择功能丰富度(functional richness, FRic)、功能均匀度(functional evenness, FEve)、功能分歧度(functional disvergence, FDiv)和 Rao 二次熵(Rao's quadratic entropy, RaoQ)指数对功能多样性进行评估。FRic 用于描述群落中的整体功能多样性, 代表了物种群落所占据的功能空间的大小^[25]。FDiv 在某种程度上功能性状分布可以最大化整个群落的功能差异^[25]。RaoQ 是 Simpson 指数的广义形式, 表示群落中随机选择的两个个体在功能上不同的概率^[27]。而 FEve 指群落内物种功能特征在生态空间分布的均匀程度^[42], 可体现群落内物种对有效资源全方位的利用效率。计算公式如下:

$$FRic = \frac{SFci}{Rc}$$

式中: $SFci$ 表示物种在群落中所占有的生态位置, Rc 为性状 c 的绝对范围。

$$FEve = \frac{\sum_{i=1}^{s-1} \min\left(PEW_i, \frac{1}{S-1}\right) - \frac{1}{S-1}}{1 - \frac{1}{S}}$$

$$PEW_i = \frac{EW_i}{\sum_{i=1}^{s-1} EW_i}, EW_i = \frac{dist(i, j)}{W_i + W_j}$$

式中: PEW_i 为分支长权重, EW 为均匀度, I 为分支长, $dist(i, j)$ 表示物种 i 和物种 j 的欧氏距离, S 为物种数, EW_i 表示加权平均的均匀度, W_i 、 W_j 分别表示物种 i 、 j 的相对多度。

$$FDiv = \frac{\Delta d + \overline{dG}}{\Delta|d| + \overline{dG}}$$

$$\Delta|d| = \sum_{i=1}^s W_i \times |dG_i - \overline{dG}|$$

式中: \overline{dG} 为物种 i 的功能性状值距离重心的欧氏距离的均值, dG_i 为物种 i 的功能性状值, Δd 为以相对丰度为权重的离散度, W_i 为物种 i 的相对多度。

$$RaoQ = \sum_{i=1}^{s-1} \sum_{j=i+1}^s d_{ij} p_i p_j$$

式中: S 为群落物种丰富度, d_{ij} 为物种 i 和物种 j 的差异度, P_i 和 P_j 为物种 i 和 j 的相对丰度。

功能多样性和物种多样性值均由 R 4. 2. 2 中的“FD”包和“Vegan”包计算。统计检验采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 Kruskal-Wallis 检验, 对物种多样性指数、功能多样性指数进行差异分析, 并对自生草本植物群落的物种多样性和功能多样性进行 Spearman 秩相关分析与回归分析。数据的整理和统计图的绘制采用 Excel 2016、Origin 2022 和 SPSS 25. 0 进行。

2 结果与分析

2. 1 自生植物物种组成特征

2. 1. 1 不同城市化水平自生植物物种组成 兰州市自生植物总体物种组成见表 4。本次调查共记录到兰州市滨河公园自生植物 42 科 116 属 142 种。其中草本植物有 33 科 100 属 121 种, 灌木植物有 9 科 9 属 9 种, 乔木植物有 7 科 8 属 9 种, 藤本植物有 2 科 3 属 3 种。根据科属种的统计结果, 公园中种数最多的植物生活型为草本, 其次是乔木、灌木、藤本。植物来源统计发现, 乡土植物 77 种, 占物种总数 54. 2%, 如 蓼 蓄 (*Polygonum aviculare*)、田 旋 花 (*Convolvulus arvensis*)、地 锦 草 (*Euphorbia humifusa*)、早 开 堇 菜 (*Viola prionantha*)、甘 蒙 怪 柳 (*Tamarix austromongolica*)。外来植物 65 种, 占物种总数的 45. 8%。其中国内外来植物 36 种, 占物种总数的 25. 4%, 如 白 柳 (*Salix alba*)、滨 菊 (*Leucanthemum vulgare*)、鼠 尾 草 (*Salvia japonica*)、旋 覆 花 (*Inula japonica*); 国外外来植物 9 种, 占物种总数的 6. 3%, 如 刺 槐 (*Robinia pseudoacacia*)、粗 毛 牛 膝 菊 (*Galinsoga quadriradiata*)、灰 绿 藜

表 4 自生植物物种组成

Table 4 Composition of spontaneous plant species

生活型 Life form	种数 Species number	乡土种 Indigenous species		外来种 Exotic species					
		种数 Spe- cies number	比例 Pro- portion (%)	国内外来植物 Do- mestic alien plants	比例 Propor- tion (%)	国外外来植物 For- eign alien plants	比例 Propor- tion (%)	入侵植物 In- vasive plants	比例 Propor- tion (%)
乔木 Tree	9	6	66. 7	2	22. 2	1	11. 1	0	0
灌木 Shrub	9	7	77. 8	2	22. 2	0	0. 0	0	0
草本 Herb	121	63	52. 1	31	25. 6	7	5. 8	20	16. 5
藤本 Vine	3	1	33. 3	1	33. 3	1	33. 3	0	0
总计 Total	142	77	54. 2	36	25. 4	9	6. 3	20	14. 1

(*Oxybasis glauca*)、秋英(*Cosmos bipinnatus*)；入侵植物 20 种,占物种总数的 14.1%。如黄花草木樨(*Melilotus officinalis*)、红车轴草(*Trifolium pratense*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)等。

根据科属种统计结果,种数排名前 5 的科依次是菊科(*Asteraceae*) 36 种、禾本科(*Poaceae*) 19 种、豆科(*Leguminosae*) 10 种、苋科(*Amaranthaceae*) 7 种、十字花科(*Brassicaceae*) 6 种,占总种数的 55%;占种数排名前 2 的属分别是蒿属(*Artemisia*) 6 种、苦苣菜属(*Sonchus*) 3 种,占总种数的 6%。根据各科内所含物种数的多少,将自生植物所有的科划分为多种科(≥ 15 种)、中等科(5~14种)、寡种科(2~4种)和单科(仅含 1 种)4 类^[17]。其中,多种科有 2 科,中等科有 4 科。单种科和寡种科有 36 科,占总科数的 86%,涉及 59 种,占总种数的 42%。自生植物的科、属、种数量在不同城市化水平的变化总体趋势一致(图 1)。随城市化程度的增强,科、属、种数量先上升后下降,但城市化水平 V 的(22)科(41)属(43)种数量高于城市化水平 I (20)科(37)属(38)种数量,城市化水平 IV 的科、属、种数量均最低,分别是 15 科、31 属、34 种。在中等城市化水平(I、II、III)时,科、属、种的数量均呈增加的趋势,在城市化水平为 III 时,科、属、种数量均达到峰值,分别为 37 科、91 属、110 种。

生活型上,一年生植物有 42 种,占 30%,如苍耳(*Xanthium strumarium*)、粗毛牛膝菊、地锦草、狗尾草(*Setaria viridis*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)等;一或二年生植物有 14 种,占 9.86%,有朝天委陵菜(*Potentilla supina*)、独行菜(*Lepidium apetalum*)、附地菜(*Trigonotis peduncularis*)等;二年生植物有 7 种,占 4.92%,如黄花婆罗门参(*Tragopogon orientalis*)、芒颖大麦草(*Hordeum jubatum*)、牛蒡(*Arctium lappa*);多年生植物有 54 种,占 38%,如白车轴草(*Trifolium repens*)、绣球小冠花(*Coronilla varia*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等;乔木有 9 种,占 6.34%,如榆(*Ulmus pumila*)、旱柳(*Salix matsudana*)、垂柳、银白杨(*Populus alba*);灌木有 9 种,占 6.34%,如枸杞(*Lycium chinense*)、金银忍冬(*Lonicera maackii*);半灌木状草本 4 种,占 2.82%,如茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、青杞(*Solanum septemlobum*);草质藤本 2 种,如鹅绒藤(*Cynanchum chinense*),占 1.41%;木质藤本仅 1 种,如五叶地锦(*Parthenocissus quinquefoli*),占 0.07%。对不同城市化梯度自生植物群落的生活型进行分析后得出(图 2),在不同城市化水平(I~V)中自生植物生活型均以多

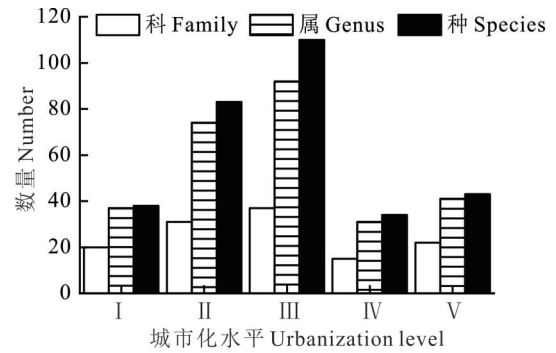


图 1 不同城市化梯度科属种
Fig. 1 Different urbanization gradients families, genera, and species

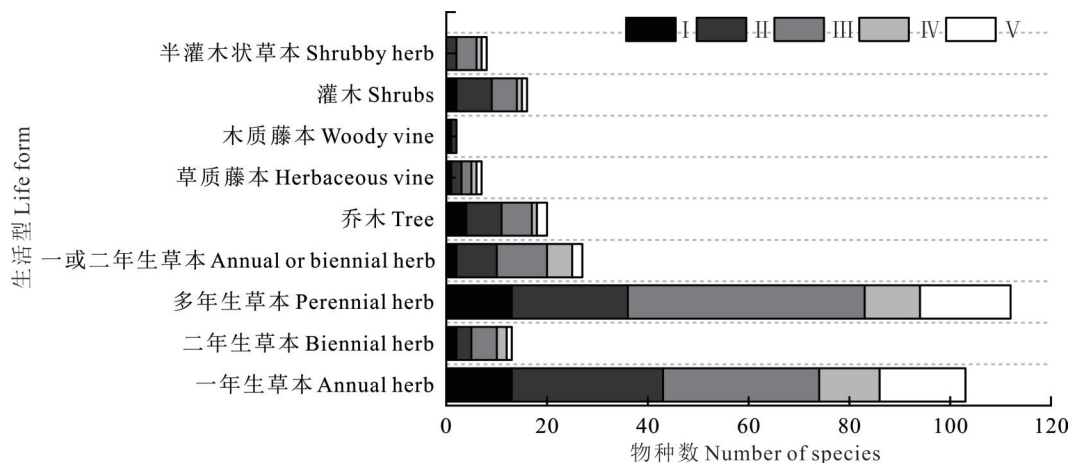


图 2 不同城市化梯度生活型
Fig. 2 Life forms with different urbanization gradients

年生草本和一年生草本植物为主,木质藤本植物最少,且相差不大。多年生草本植物在城市化水平Ⅲ中数量最多,高达47种,一年生草本次之,高达31种。较高城市化水平和低城市化水平多年生草本数量较少。城市化水平Ⅱ一年生草本数量高于多年生草本,分别是30和23种。自生植物按来源类型可分为乡土植物、国内外来植物与国外外来植物和入侵植物,从不同城市化梯度物种来源分布可以看出(图3),兰州市滨河公园自生植物以乡土植物为主,乡土植物、国内外来植物、国外外来植物、入侵植物数量随着城市化梯度升高均先升高再降低。中等城市化水平Ⅱ、Ⅲ的乡土植物数量最高。

2.1.2 自生植物重要值排序 物种重要值是分析群落物种组成的一个重要参数,基本能够反映出群落的优势物种组成。从不同城市化梯度的自生植物重要值排序来看(表5),乡土植物重要值较高,在城市化水平Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ中,优势种分别是蒲公英、朝天委陵菜、早开堇菜、芦苇,重要值分别是0.33、0.41、0.50、0.35,并均为乡土植物。城市化水平Ⅰ整体排序前5位的自生植物重要值为0.17~0.33,外来植物有旋覆花、宽叶独行菜(*Lepidium latifolium*)、小蓬草(*Erigeron canadensis*);城市化水平Ⅱ、Ⅳ优势种中乡土植物数量最多,其中城市化水平Ⅳ重要值最高的是乳苣(*Lactuca tatarica*),高达0.54。

表5 不同城市化梯度重要值

Table 5 Important values of different urbanization gradients

城市化水平Ⅰ		城市化水平Ⅱ		城市化水平Ⅲ		城市化水平Ⅳ		城市化水平Ⅴ	
Urbanization level I		Urbanization level II		Urbanization level III		Urbanization level IV		Urbanization level V	
种名	重要值	种名	重要值	种名	重要值	种名	重要值	种名	重要值
Species name	Important value	Species name	Important value	Species name	Important value	Species name	Important value	Species name	Important value
蒲公英 <i>T. mongolicum*</i>	0.33	朝天委陵菜 <i>P. supina*</i>	0.41	早开堇菜 <i>V. prionantha*</i>	0.50	乳苣 <i>L. tatarica</i>	0.54	芦苇 <i>P. australis*</i>	0.35
旋覆花 <i>I. japonica</i>	0.27	曼陀罗 <i>Datura stramonium</i>	0.23	芦苇 <i>P. australis*</i>	0.25	旋覆花 <i>I. japonica</i>	0.29	千屈菜 <i>L. salicaria*</i>	0.32
芦苇 <i>P. australis*</i>	0.24	早开堇菜 <i>V. prionantha*</i>	0.23	旋覆花 <i>I. japonica</i>	0.24	地肤 <i>Bassia scoparia*</i>	0.23	白车轴草 <i>T. repens</i>	0.16
宽叶独行菜 <i>L. latifolium</i>	0.22	青杞 <i>S. temlobum*</i>	0.22	诸葛菜 <i>Orychophragmus violaceus*</i>	0.23	藜 <i>Chenopodium album*</i>	0.19	平车前 <i>Plantago depressa*</i>	0.16
小蓬草 <i>E. canadensis</i>	0.17	芦苇 <i>P. australis*</i>	0.16	粗毛牛膝菊 <i>G. quadriradiata</i>	0.21	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	0.18	蒲公英 <i>T. mongolicum*</i>	0.15

标记*的为乡土植物 Plants marked with * are indigenous plants.

2.1.3 自生植物功能性状特征 兰州市滨河公园绿地自生植物功能性状结果如下(表6)。叶片性状方面,叶片质地以草质和纸质占比较大,共占总种数的87.93%;叶片大小以小型叶和中等叶为主,占总种数的83.80%;叶片绒毛多为无毛或近无毛,占总种数的57.04%;叶片粗糙程度以较光滑为主,占总种数的43.66%。因此,兰州市滨河公园自生植物的叶片大多为中小型叶、草质或纸质、不被绒毛或近无毛且叶面较光滑。此外,花果期均以0~3个月为主,占总种数的50%。自生植物的根系类型以须根系为主,占总种数的86.62%,大多数自生植物

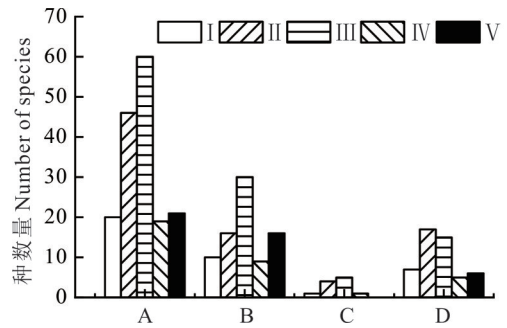


图3 不同城市化梯度物种来源

Fig. 3 Species sources of different urbanization gradients

A: 乡土植物 Native plant; B: 国内外来植物 Domestic alien plants; C: 国外外来植物 Foreign plants; D: 入侵植物 Invasive plant.

为草本植物,具有浅根性的特点,浅根性占85.92%。固氮类型方面,92.25%的自生植物不固氮;固氮植物仅有11种。此外,植物的传粉方式以虫媒为主,占总种数的73.24%;种子的扩散方式以风力扩散居多,占总种数的59.15%,动物传播和自动传播占比相差不大。

表6 各功能性状特征占植物物种数的比例

Table 6 Proportion of functional traits to the number of plant species (%)

植物性状 Plant traits	特征分类 Characteristic classification	占物种总数的比例 Proportion of total species	植物性状 Plant traits	特征分类 Characteristic classification	占物种总数的比例 Proportion of total species
叶片质地 Leaf texture	膜质 Membranous	4.92	固氮类型 Nitro- gen fixation type	固氮 N-fixing	7.75
	草质 Herbaceous	61.87		不固氮 Non-N-fixing	92.25
	纸质 Papery	26.06	植物来源 Spe- cies source	本地 Native species	54.23
	肉质 Fleshy	0.70		国内外来 Domestic alien species	26.06
	革质 Leathery	6.34		国外外来 Foreign alien species	5.63
叶片大小 Leaf size	小 Small	24.65	根系深浅 Root depth	浅 Shallow	85.92
	中等 Medium	59.15		中 Medium	0
	大 Large	16.20		深 Deep	14.08
叶片绒毛 Leaf fluff	无毛或近无毛 Glabrous or subglabrous	57.04	根系类型 Root type	直根系 Taproot system	13.38
	中等密度 Medium density	26.06		须根系 Fibrous root system	86.62
	密毛 Densely hairy	16.90	传粉方式 Polli- nation mode	风媒 Wind-borne	26.76
叶片粗糙程 度 Leaf froughness	光滑 Soft	7.04	种子扩散方式 Dispersal mode	虫媒 Insect-borne	73.24
	较光滑 Slightly soft	43.66		风力传播 Wind-borne	59.15
	较粗糙 Slightly rough	36.62		动物传播 Animal-borne	16.20
	粗糙 Rough	12.68		自动传播 Auto-borne	24.65
花期 Flower- ing period	短 Short	50.00	果期 Fruit period	短 Short	54.93
	中 Medium	45.07		中 Medium	42.25
	长 Long	4.93		长 Long	2.82

2.2 物种多样性与功能多样性对城市化的响应

2.2.1 不同城市化水平自生植物物种多样性与功能多样性 基于调查数据与城市化水平划分,对比分析不同城市化水平群落物种多样性的差异(图4)。Kruskal-Wallis 检验结果显示,群落水平自生草本植物的 Patrick 丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon—Wiener 多样性指数在不同城市化水平之间存在显著性差异($P < 0.05$)。Pielou 均匀度指数,排序为城市化水平 II > 城市化水平 I > 城市化水平 III > 城市化水平 IV > 城市化水平 V,在不同城市化水平之间不存在显著差异($P > 0.05$)。城市化水平 II 的 Patrick 丰富度指数、Shannon—Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数显著高于其他4个城市化水平($P < 0.05$),Patrick 丰富度指数、Shannon—Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数的最低均值均出现在城市化水平 I。可见不同城市化程度的物种多样性有显著差异,中等城市化水平的物种多样性指数相对最大。

不同城市化水平自生植物功能多样性的变化见图5,Kruskal-Wallis 检验结果显示,群落水平自生植物的功能丰富度(FR_{ic})、Rao 二次熵指数(RaoQ)和功能均匀度指数(FE_{ve})在不同城市化水平存在显著差异($P < 0.05$),在多重比较中,FR_{ic}、FE_{ve} 存在显著差异($P < 0.05$);RaoQ 无显著差异($P > 0.05$),且最高均值出现在城市化水平 II,最低均值出现在城市化水平 I。城市化水平 II 与城市化水平 I、III、IV、V 的 FR_{ic} 差异显著($P < 0.05$),城

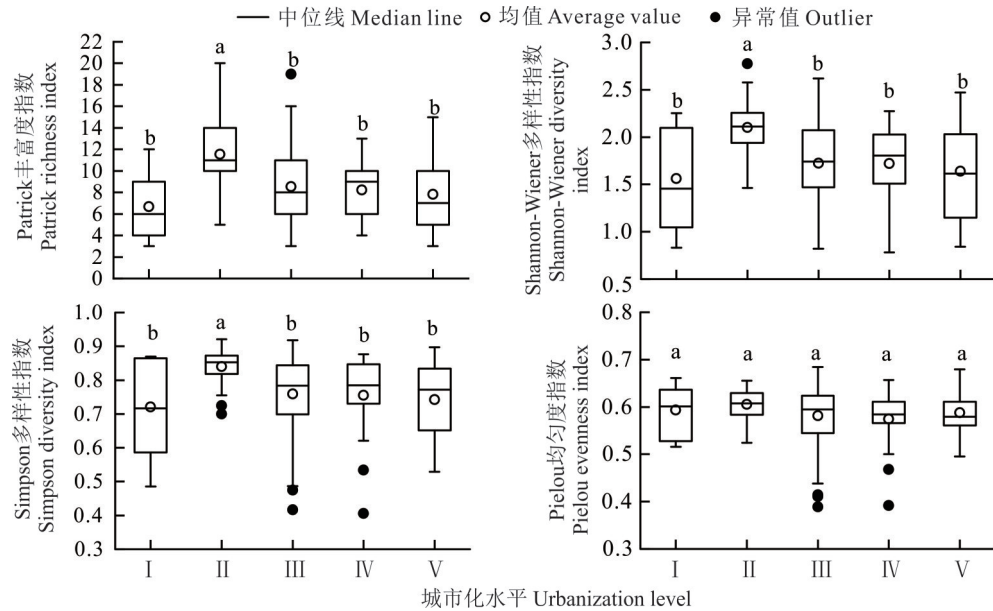


图 4 不同城市化梯度自生植物群落物种多样性

Fig. 4 Biodiversity of spontaneous plant species at different urbanization gradients

不同小写字母表示不同城市化梯度之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different gradients of urbanization ($P < 0.05$). The same below.

城市化水平 IV 和 V 的 FEve 存在显著差异 ($P < 0.05$)。城市化水平 II 的 FRic 最高, 城市化水平 I 的 FRic 最低。FEve 在城市化水平 I 均值最高, 在城市化水平 IV 均值最低。FDiv 没有显著差异 ($P > 0.05$), 最高均值出现在城市化水平 V, 最低均值出现在城市化水平 II。可见中等城市化水平下自生植物的功能丰富度较高。

2.2.2 不同生境类型自生植物物种多样性与功能多样性

自生植物群落物种多样性在不同生境类型之间多重比较结果见图 6, Patrick 指数、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数在不同生境之间多数存在显著性差异 ($P < 0.05$)。Patrick 指数中滨水生境与灌丛、硬质生境、林地、人工草坪之间不存在显著性差异 ($P > 0.05$)。Simpson 多样性指数中, 林地与人工草坪、硬质生境存在显著性差异 ($P < 0.05$)。Shannon-Wiener 多样性指数中, 无显著差异的是灌丛与滨水生境、灌丛与林地灌丛和硬质生境等。不同生境中, Pielou 均匀度指数无显著性差异 ($P > 0.05$)。

基于生境类型的划分, 对不同生境类型的自生植物群落功能多样性进行单因素方差分析 (图 7), 结果显示功能多样性指数在不同生境类型中具有显著性差异。其中 FDiv 与 FEve 在不同生境类型中无显著性差异 ($P > 0.05$), 人工草坪和灌丛生境功能均匀度指数、功能分歧度指数值较高; FRic 中, 硬质生境分别与人工草坪、灌丛、滨水生境之间差异显著 ($P < 0.05$), 灌丛与人工草坪和林地生境之间差异显著 ($P < 0.05$), 硬质生境与林地生境之间差异不显著 ($P > 0.05$), 硬质生境指数均值最高, 灌丛生境指数均值最低。Rao 二次熵指数中, 硬质生境与灌丛、滨水生境均存在显著性差异 ($P < 0.05$), 人工草坪与滨水生境、灌丛与林地之间无显著差异 ($P > 0.05$)。灌丛的 Rao 二次熵指数均值最低, 硬质生境的 Rao 二次熵指数均值最高。

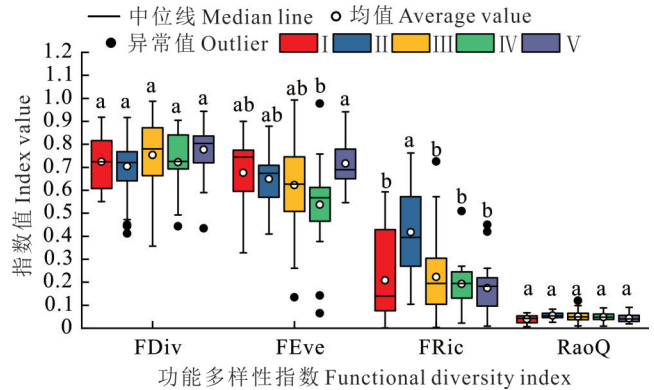


图 5 不同城市化梯度自生植物群落功能多样性

Fig. 5 Functional diversity of spontaneous plants with different urbanization gradients

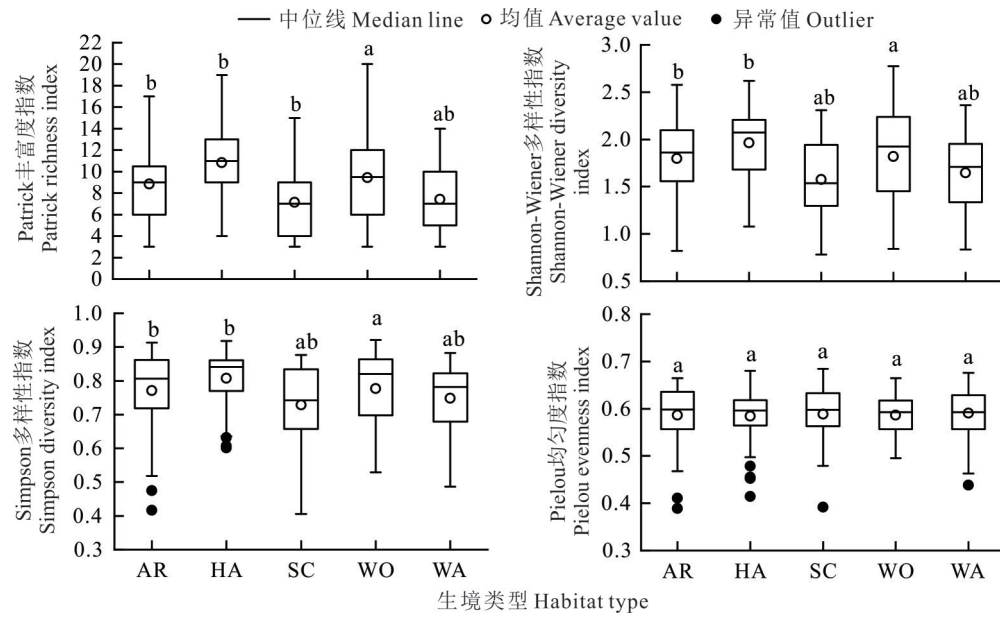


图6 不同生境类型自生植物群落物种多样性

Fig. 6 Species diversity of spontaneous plant communities in different habitat types

不同小写字母表示不同生境类型之间差异显著($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different habitat types ($P < 0.05$). AR: 人工草坪 Artificial turf; HA: 硬质生境 Hardscape; SC: 灌丛 Scrub; WO: 林地 Woodland; WA: 滨水生境 Waterfront habitat. 下同。The same below.

2.3 不同城市化水平下物种多样性与功能多样性之间的关系

2.3.1 功能多样性指数间的相关性 功能多样性指标间的相关性分析见表7,功能丰富度(FRic)与Rao二次熵指数(RaoQ)呈正相关关系,在城市化水平I、II、IV、V中存在显著正相关关系($P < 0.05$),在城市化水平V中呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。FRic与功能均匀度(FEve)不存在显著相关关系($P > 0.05$);功能分歧度(FDiv)与FRic在城市化水平I、II、IV、V中不存在显著相关关系($P > 0.05$),但是在城市化水平III中,FDiv与FRic呈极显著负相关关系($P < 0.01$)。RaoQ与FEve在城市化水平I中具有显著正相关关系($P < 0.05$),FEve、RaoQ与FDiv不存在显著相关关系($P > 0.05$)。

2.3.2 物种多样性指数和功能多样性指数之间的相关性 物种多样性和功能多样性存在相关关系。对不同城市化梯度下所有样地的物种多样性和功能多样性指数进行Spearman秩相关性检验(表8),可以看出物种丰富度Patrick、Shannon—Wiener多样性指数、Simpson多样性指数均与功能丰富度(FRic)、Rao二次熵指数(RaoQ)呈极显著正相关关系($P < 0.01$),表明物种数量的增加可能扩展功能性状范围并促进性状分化。Pielou指数与RaoQ、功能均匀度(FEve)呈极显著正相关关系($P < 0.01$),Pielou指数与FRic呈正相关关系($P > 0.05$),反映了物种多度是否分布均匀直接影响功能性状组成。功能分歧度(FDiv)与所有物种多样性指数均无显著相关关系($P > 0.05$),FDiv与Simpson多样性指数、Pielou指数呈负相关关系($P > 0.05$),与Patrick丰富度、Shannon—Wiener多样性指数呈正相关关系($P > 0.05$)。

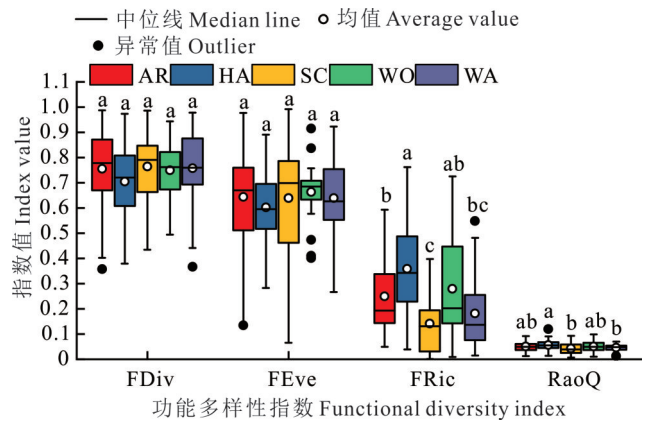


图7 不同生境类型自生植物群落功能多样性

Fig. 7 Functional diversity of spontaneous plant communities in different habitat types

2.3.3 不同城市化水平下物种多样性与功能多样性之间的线性回归 通过相关性分析发现,自生草本植物群落的物种多样性和功能多样性存在相关关系,为进一步研究两者之间的线性关系,利用回归模型拟合回归曲线。对不同城市化水平下自生植物群落物种多样性与功能多样性进行线性回归分析显示(表 9),Patrick 丰富度指数、Shannon—Wiener 多样性指数与功能丰富度(FRic)、Rao 二次熵指数(RaoQ)多数存在极显著正相关关系($P < 0.01$)。对自生植物群落物种多样性与功能多样性的回归分析结果中相关系数较高的进行线性拟合(图 8),其中 Patrick 指数与功能丰富度(FRic)拟合效果最好的是城市化水平 I ($R^2 = 0.768, P < 0.01$),其次是城市化水平 V ($R^2 = 0.696, P < 0.01$)。Patrick 指数与 RaoQ 拟合效果最好的是城市化水平 I、城市化水平 V。Shannon—Wiener 多样性指数与 FRic 之间线性拟合效果最好的是城市化水平 V ($R^2 = 0.772, P < 0.01$); Shannon—Wiener 多样性指数与 RaoQ 拟合效果最好的是城市化水平 I ($R^2 = 0.736, P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 自生植物物种组成特征

城市滨河公园绿地是自生植物重要的栖息地,自生植物不仅是城市生物多样性的重要组成部分,也是研究城市化与城市生态系统互馈机制的绝佳对象。本研究共调查到兰州 12 个滨河公园 42 科 116 属 142 种自生植物,其中自生草本植物占 85%,与前人对兰州市滨河公园自生植物调查结果(163 种)^[22]相近。与深圳、北京、成都城市研究结果一致^[27,34-35],菊科、禾本科也是兰州市滨河

表 7 功能多样性指数间的 Spearman 秩相关性

Table 7 Spearman rank correlation among functional diversity indices

城市化水平 Urbanization level	指数 Index	FRic	RaoQ	FEve
I	RaoQ	0.843*		
	FEve	0.007	0.308*	
	FDiv	0.104	0.164	-0.186
II	RaoQ	0.307*		
	FEve	0.064	0.149	
	FDiv	-0.230	-0.171	0.147
III	RaoQ	0.020		
	FEve	-0.115	-0.025	
	FDiv	-0.292**	0.050	-0.055
IV	RaoQ	0.532*		
	FEve	0.038	0.026	
	FDiv	0.104	0.102	0.154
V	RaoQ	0.760**		
	FEve	0.059	0.098	
	FDiv	0.000	0.390	0.118

**表示 $P < 0.01$, *表示 $0.01 < P < 0.05$ 。下同。 ** denotes $P < 0.01$, * denotes $0.01 < P < 0.05$. The same below.

表 8 物种多样性与功能多样性的 Spearman 秩相关性

Table 8 Spearman's rank correlation of species diversity with functional diversity

指数 Index	功能丰富度 Functional richness	Rao 二次熵 Rao quadratic entropy	功能均匀度 Functional evenness	功能分歧度 Functional divergence
Patrick 指数 Patrick index	0.212**	0.464**	-0.063	0.101
Shannon—Wiener 指数 Shannon—Wiener index	0.244**	0.535**	0.017	0.025
Simpson 指数 Simpson index	0.217**	0.544**	0.060	-0.017
Pielou 指数 Pielou index	0.118	0.295**	0.213**	-0.084

表 9 自生植物群落物种多样性与功能多样性的回归分析(相关系数 R^2)

Table 9 Regression analysis of species diversity and functional diversity of spontaneous plant communities (correlation coefficient R^2)

指数 Index	功能丰富度 Functional richness					Rao 二次熵 Rao quadratic entropy				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Patrick 指数 Patrick index	0.768**	0.290**	0.048**	0.014	0.696**	0.718**	0.014	0.150**	0.038**	0.277**
Shannon—Wiener 指数 Shannon—Wiener index	0.675**	0.221**	0.073**	0.014	0.772**	0.736**	0.018	0.240**	0.182**	0.408**

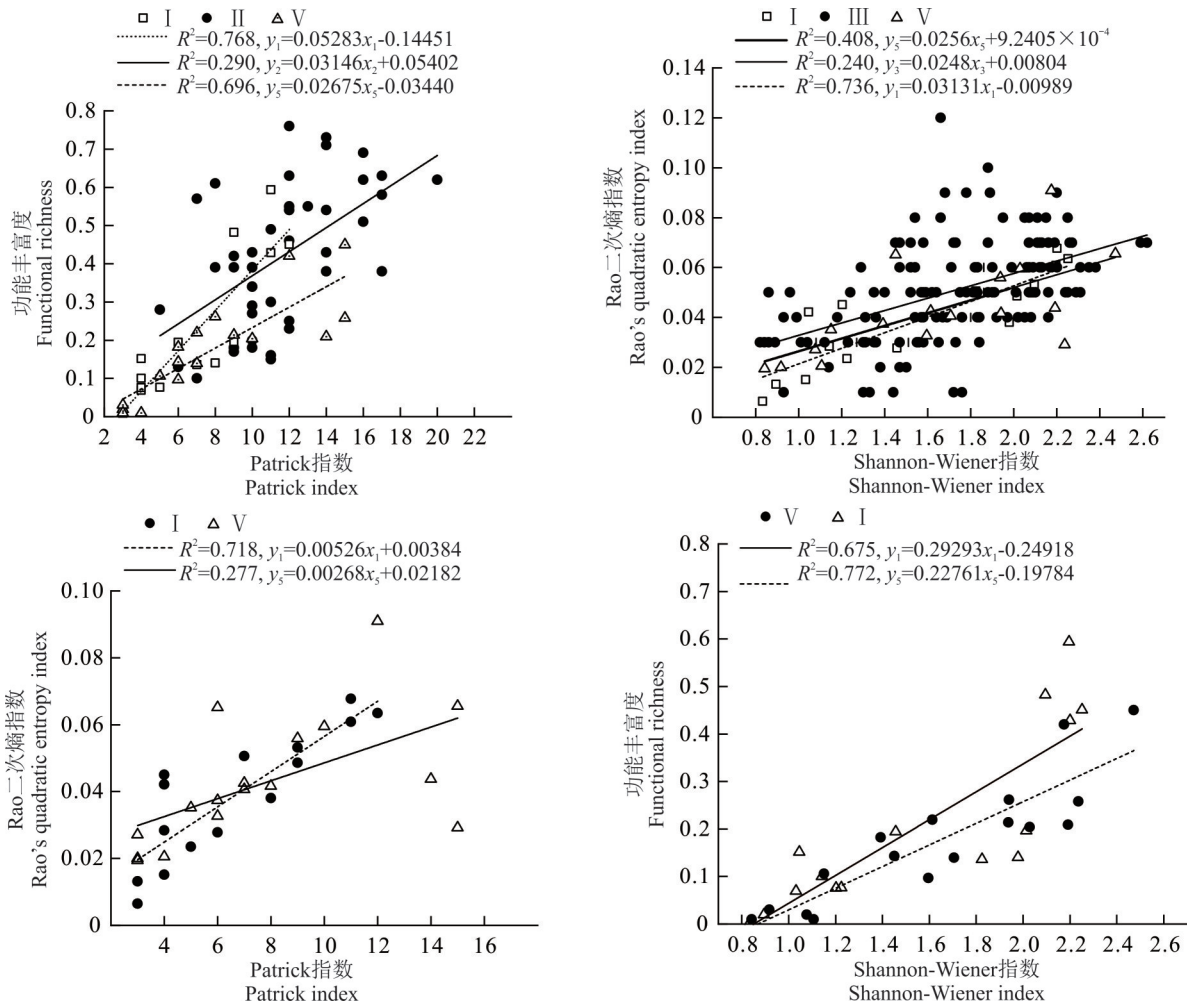


图8 不同城市化水平自生植物群落物种多样性与功能多样性回归分析

Fig. 8 Regression analysis of species diversity and functional diversity in spontaneous plants communities across different levels of urbanization

公园的优势科,反映这些科在自然条件下具有多样性和适应性。生活型上,与哈尔滨^[15]的研究结果相比,兰州市多年生草本占主导地位,多于一年生草本,这与前人在兰州不同区域的调查结果一致^[17],但哈尔滨表现出更高比例的一年生先锋物种,因为多年生草本生活周期长,地下根系“复杂”,竞争力强;而一年生草本生活周期短、可塑性强,对人为干扰有较强的耐受性^[12,14]。这种差异本质上反映了干旱地区植物所形成的特殊适应策略。本研究发现中等城市化水平Ⅲ中自生植物种类最多,高城市化水平自生植物种数量下降(图1)。与高志文^[2]、Mckinney^[5]的研究结果一致,一、二年生草本和二年生草本物种数量相较于多年生草本在高城市化水平增加,这可能与公园管理水平和人为干扰有关。城市化水平较高的区域人类活动频繁,促进了一、二年生植物的生长。物种来源分析上,乡土植物共77种,占54.2%,高于兰州市3所高校的调查结果(61种)^[47],印证了公园绿地、河流廊道等类型有着更高的自生植物多样性^[15-16,36]。入侵植物20种,占14.1%。例如粗毛牛膝菊、鬼针草(*Bidens pilosa*)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)、草木樨、反枝苋等,在滨河公园出现频度较高,深圳市入侵植物也均以菊科、苋科为主^[43],这类植物生命周期短、扩散力强。因此需要一定的人工干预。入侵性极强的外来植物可能形成具有危害的入侵景观,应慎重考虑引进外来植物。大多数自生植物为乡土植物,填补裸露的绿地、修复荒废的景观^[3,13,16]。乡土植物经过长期自然选择更适应当地气候变化。功能性状方面,与深圳市研究结果^[27]相似,草质(61.87%)、中等叶(59.15%)、无毛或近无毛(57.04%)、较光滑(43.66%)、花期0~3个月(50%)、果期0~3个月(54.93%)、乡土植物(54.23%)、不固氮(92.25%)、浅根性(85.92%)、须根系(86.62%)、虫媒(73.24%)、风力传

播(59.15%)在各自功能性状中的占比较高,重庆山地城市公园虫媒比例大于风力扩散,植物群落以人工植被为主,观赏植物依赖虫媒,因此虫媒较高^[48]。

3.2 城市化对自生植物多样性的影响

城市化显著降低自生植物群落多样性^[26]。中等城市化水平 II 的 Patrick 丰富度、Shannon—Wiener 指数、Simpson 指数均显著高于其他水平($P < 0.05$),城市化水平 I 的物种多样性指数最低。Pielou 指数无显著差异($P > 0.05$),中度干扰水平 II、III 指数较高。物种多样性呈单峰曲线,证明中度干扰促进生物多样,这与北京温榆河廊道结果一致^[34]。低干扰区水平均匀度高但是功能空间小,这可能因为稳定的群落被少数多年生种主导^[6]。多数研究表明随着城市化程度的增高,物种丰富度和多样性指数呈递减趋势^[26,49-50]。城市化造成外来物种入侵、污染、生境破碎化、人为干扰等问题,导致本土植物减少^[51],从而减少了物种总数。Shannon—Wiener 指数越高,表示物种分布越均匀,多样性越高^[12]。兰州滨河公园自生植物物种间分布相对均匀。极端和高强度的干扰通常导致原生生态系统的破坏,物种多样性急剧下降,而适度或轻微的干扰可能通过提供生态扰动,促进生物多样性的维持或增加^[52]。功能多样性指数方面,研究发现沿城市化梯度形成了明显的性状机制。高城市化程度表现出功能降低趋势,表征为虫媒、风力传播等广适性性状的优势占比;功能丰富度(FRic)在城市化水平 II 最高,低城市化水平 I 最低($P < 0.05$),功能均匀度(FEve)在低城市化水平 I 最高,高城市化水平 IV 最低($P < 0.05$),RaoQ、功能分歧度(FDiv)无显著性差异($P > 0.05$),均值较高的分别是城市化水平 II 与 V。可能因为过渡阶段生境破碎化导致环境过滤强化^[10],淘汰特殊功能性状物种同时尚未形成高城市化下的均质化群落,处于功能多样性低谷期。

3.3 生境类型在维持多样性中的作用

滨水生境(WA)的Patrick丰富度与多数生境之间无显著差异($P > 0.05$)。滨水生境(WA)与林地(WO)具有缓冲效应,林地(WO)的Simpson指数显著高于人工草坪(AR)与硬质生境(HA),使城市干扰相对弱化,但Patrick丰富度在滨水生境(WA)无差异,反映了Simpson指数对优势种更敏感^[53],而Patrick指数受稀有种影响较大。与尤其等^[54]、Zhang等^[10]结果一致,人工草坪(AR)多样性指数最低,人工管理减少生态位空间。硬质生境(HA)的Simpson指数显著低于林地($P < 0.05$)。功能丰富度(FRic)在林地(WO)与灌丛(SC)之间差异显著($P < 0.05$),自然生境的层次结构支持多维功能空间,抗干扰能力强可能因为其群落结构复杂,而不是物种数量^[55]。功能均匀度(FEve)在灌丛(SC)与林地(WO)间无显著差异,植物群落结构越复杂,越促进功能均匀^[56]。从FRic均值来看,各生境类型功能丰富度指数值排序为硬质生境>林地>人工草坪>滨水生境>灌丛。

3.4 物种多样性与功能多样性之间的关系对城市化的响应

功能丰富度(FRic)与RaoQ在低城市化与高城市化水平存在显著相关关系($P < 0.05$)。功能均匀度(FEve)与其他物种多样性指数具有孤立性,功能分歧度(FDiv)响应环境过滤与物种多样性机制不同^[25],为避免多重共线性干扰,选择代表性强且独立性高的功能丰富度(FRic)与RaoQ进行回归分析。多数研究表明,群落功能多样性随着物种多样性的增加而增加,即物种多样性和功能多样性之间多数存在正相关关系^[24-25,53],本研究结果(表7)与其一致,Patrick指数、Shannon—Wiener多样性指数、Simpson指数均与FRic、RaoQ呈极显著正相关关系($P < 0.01$),因为物种数量增加扩展了群落的功能性状范围,物种占据更广的生态位空间^[28];物种多样性增强功能性状的分化,进一步使群落内功能性状差异扩大;优势种减少与功能冗余降低相关,促进功能性状互补。Pielou指数与RaoQ、FEve呈极显著正相关关系($P < 0.01$),表明均匀的物种多度分布,通过减少优势种垄断促进功能性状离散化,使功能资源均匀分配。物种均匀度与功能均匀度无显著正相关关系($P > 0.05$),物种均匀度并不影响功能空间的大小,但影响其功能组成。功能分歧度(FDiv)反映极端性状的优势度,物种多样性指数与功能分歧度均无显著相关关系($P > 0.05$),体现了功能分歧度(FDiv)的独立性。

不同城市化水平的物种与功能多样性关系为城市生态管理提供依据。本研究结果表明不同城市化水平的自生植物群落物种多样性(Patrick指数、Shannon—Wiener多样性指数)与功能多样性(FRic、RaoQ)之间存在显著正相关关系($P < 0.05$),这一结论符合生态位分化理论的预测,低城市化与高城市化水平的物种—功能多样性耦

合更强。进一步回归分析表明物种多样性可在一定程度上较好地预测功能多样性。不同城市化水平物种多样性与功能多样性的回归分析表明物种多样性可以在一定范围内表征功能多样性的趋势,但不能完全替代功能多样性^[23]。总之,功能多样性是反映种间生态功能性状差异的指标,这些功能性状本身是受环境和竞争影响的体现,但反过来又会影响植物的行为,进而对植物群落的功能和过程发生影响^[23,27]。本研究印证了城市自生植物群落构建种生态位过程与环境过滤的协调作用,为城市化过程中生物多样性维持机制提供了定量依据。未来研究中,可通过多季节调查,进一步验证城市滨河公园自生植物群落的物种多样性与功能多样性之间的关系。

4 结论

本研究以兰州市滨河公园自生植物为对象,探讨了不同城市化水平下公园及不同生境类型自生植物群落的物种多样性与功能多样性特征,并进一步研究了物种多样性与功能多样性之间的关系对城市化的响应。兰州市滨河公园有42科116属142种自生植物,自生草本植物资源丰富。生活型以多年生草本(38%)和一年生草本(30%)为主,乡土植物占比54.2%,入侵植物(14.1%)的扩散较明显。一年生植物在高干扰环境下扩张,城市化通过生境破碎化促进短生命周期、高扩散力物种的入侵。自生植物对维持滨河公园多样性具有积极作用。虫媒(73.24%)、风力传播(59.15%)为广适性性状,浅根性(85.92%)、须根系(86.62%)占比较高,反映了植物干旱适应策略。自生植物群落的物种多样性与功能多样性在不同城市化水平和不同生境类型中差异显著($P < 0.05$),在不同城市化水平上,中度城市化水平下自生植物物种丰富度最高,功能丰富度(FRiC)最低,中度城市化提供多样生境,环境过滤效应导致功能性状趋同;高城市化水平引起均质化。不同城市化水平下物种多样性和功能多样性之间存在正相关关系($P < 0.05$)。物种丰富度与FRiC、RaoQ显著正相关($P < 0.05$),支持生态位互补理论。研究物种与功能多样性之间关系,可为生态修复与入侵种防控提供理论依据。建议未来在滨河绿地管理中,多维持复层群落结构,可同步提升FRiC与RaoQ;通过植被缓冲带阻断传播,限制高扩散力一年生植物。

参考文献 References:

- [1] Zhang J P, Liu C L, Liu X N, *et al.* Species diversity of spontaneous herbaceous plants in the green belt areas of Beijing. *Research of Environmental Sciences*, 2025, 38(1): 39–48.
张继平, 刘春兰, 刘晓娜, 等. 北京市绿化隔离地区自生草本植物物种多样性研究. *环境科学研究*, 2025, 38(1): 39–48.
- [2] Gao Z W. Pattern of spontaneous plants diversity and its factors in 9 cities of Yunnan Province, China. Shanghai: East China Normal University, 2021.
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. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [3] Shi X Y. Investigation of spontaneous vegetation resources and landscape application in Xi'an urban area. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2024.
史新园. 西安城区自生植物资源调查与园林应用研究. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
- [4] Uchida K, Fujimoto H, Ushimaru A. Urbanization promotes the loss of seasonal dynamics in the semi-natural grasslands of an East Asian megacity. *Basic and Applied Ecology*, 2018, 29: 1–11.
- [5] Mckinney M L. Urbanization, biodiversity, and conservation. *Bioscience*, 2002, 52: 883–890.
- [6] Chen J Y, Yun H F, Xu W B, *et al.* Responses of spontaneous plant diversity to urbanization in different habitats. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Science)*, 2025, 45(4): 1–10.
陈金艳, 员浩帆, 徐文斌, 等. 不同生境下城市自生植物多样性对城市化的响应. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2025, 45(4): 1–10.
- [7] Bonthoux S, Brun M, Di Pietro F, *et al.* How can wastelands promote biodiversity in cities? A review. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 79–88.
- [8] Madre F, Vergnes A, Machon N, *et al.* Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: first insights from a large-scale sampling. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 100–107.
- [9] Khew J Y T, Yokohari M, Tanaka T. Public perceptions of nature and landscape preference in Singapore. *Human Ecology*, 2014, 42: 979–988.
- [10] Zhang M Y, Li X L, Fan S X, *et al.* Response of spontaneous plant communities to microhabitats in a riparian corridor in

- Beijing, China. *Scientific Reports*, 2024, 14: 17642.
- [11] Yang Y F, Xu B, Yu Q, *et al.* Distribution pattern and factors influencing spontaneous plant diversity in different wetland habitats. *Forests*, 2022, 13: 1678.
- [12] Zhang M L. Diversity pattern of ruderal community and its responses to heterogeneous habitat in urban of Hangzhou. Hangzhou: East China Normal University, 2018.
张明丽. 杭州城市杂草群落多样性格局及对异质化生境的响应. 杭州: 华东师范大学, 2018.
- [13] You Q. Composition and community characteristics of spontaneous herbaceous plants in the main urban area of Zhengzhou. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.
尤其. 郑州市主城区自生草本植物组成与群落特征研究. 郑州: 河南农业大学, 2024.
- [14] Chen X S. Plant diversity and community types of urban green space on urban-rural gradient in Harbin. Shanghai: East China Normal University, 2014.
陈晓双. 哈尔滨城区杂草群落分布格局及其对生境异质化的响应. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [15] Shen P X, Ren S, Liang X Y, *et al.* Diversity and distribution characteristics of spontaneous vegetation in herbaceous layer of urban river corridors in Harbin. *Landscape Architecture*, 2024, 31(6): 28–36.
申沛鑫, 任术, 梁新悦, 等. 哈尔滨城市河流廊道草本层自生植物多样性及分布特征. *风景园林*, 2024, 31(6): 28–36.
- [16] Li X L, Zhang M Y, Fan S X, *et al.* Study on distribution characteristics of spontaneous plants in urban park green spaces in different habitats in Beijing. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(10): 2118–2125.
李晓璐, 张梦园, 范舒欣, 等. 基于不同生境的北京城市公园绿地自生植物分布特征研究. *环境科学研究*, 2024, 37(10): 2118–2125.
- [17] An Q, Liu W L. Investigation and analysis of the diversity of self-generated herbaceous plants in three universities in Lanzhou City. *Subtropical Plant Science*, 2024, 53(3): 257–270.
安琪, 刘文兰. 兰州市 3 所高校自生草本植物多样性调查与分析. *亚热带植物科学*, 2024, 53(3): 257–270.
- [18] Liu Q, Ding Y F, Song S S, *et al.* Quantitative classification and ordination analysis of spontaneous vegetation communities in herb layer along the green belt of Nanjing Ming City Wall. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(5): 1–15.
刘倩, 丁彦芬, 宋杉杉, 等. 南京明城墙绿带草本层自生植物群落数量分类与排序分析. *草业学报*, 2024, 33(5): 1–15.
- [19] Chu C H. Spatial distribution and plant diversity of idle land in the main city of Nanjing. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
褚晨晖. 南京市主城区闲置土地分布及植物多样性研究. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [20] Zhai Y W. Response of the spontaneous plant composition in road greenbelt to urbanization level in: implications for spontaneous plant landscape construction—a case study of Nanjing City. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
翟育雯. 道路绿地自生植物组成对城市化水平的响应及景观营造研究——以南京市为例. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [21] Hu R, Chen R Z. Research on summer climate adaptability of spontaneous vegetation for roof greening in Chengdu. *Landscape Architecture*, 2024, 31(4): 104–110.
胡锐, 陈睿智. 成都自生草本植物屋顶绿化夏季气候适应性研究. *风景园林*, 2024, 31(4): 104–110.
- [22] Lyu N N, Liu W L, Liu X J. Species composition and diversity analysis of autophytes in Lanzhou riverside parks. *Biotic Resources*, 2024, 46(3): 255–264.
吕宁宁, 刘文兰, 刘晓娟. 兰州滨河公园自生植物物种组成及多样性分析. *生物资源*, 2024, 46(3): 255–264.
- [23] Li J W, He B Y, Li C, *et al.* Analysis of grassland community-level plant functional traits and functional diversity at different times during restoration. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(1): 16–25.
李江文, 何邦印, 李彩, 等. 不同恢复年限草地群落水平植物功能性状及功能多样性分析. *草业学报*, 2023, 32(1): 16–25.
- [24] Dong S K, Tang L, Zhang X F, *et al.* Relationship between plant species diversity and functional diversity in alpine grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1472–1483.
董世魁, 汤琳, 张相锋, 等. 高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系. *生态学报*, 2017, 37(5): 1472–1483.
- [25] Jiang X L, Zhang W G. Functional diversity and its research method. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2766–2773.
江小雷, 张卫国. 功能多样性及其研究方法. *生态学报*, 2010, 30(10): 2766–2773.
- [26] Wang K. Research on the spontaneous herbaceous plants in Beijing urban area. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
王阔. 北京城市化环境下自生草本植物现状及园林应用研究. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [27] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9): 3759–3774.
- 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. *生态学报*, 2024, 44(9): 3759–3774.
- [28] Li X P, Li X L, Zhang M Y, *et al.* Urban park attributes as predictors for the diversity and composition of spontaneous plants—A case in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2024, 91: 128–185.
- [29] Qin D Y. Functional traits of spontaneous plants in Chongqing metropolis and their responses to urbanization. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- 秦丹亚. 重庆市主城区自生植物功能性状及其对城市化的响应. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [30] Zhang Y, Wu Y H, Zhao F. Study on species diversity of typical plant community in wetland along Yellow River in Lanzhou. *Grassland and Turf*, 2016, 36(1): 65–71.
- 张瑜, 吴永华, 赵峰. 黄河兰州段湿地典型植物群落物种多样性研究. *草原与草坪*, 2016, 36(1): 65–71.
- [31] Zhang Q P, Wang Q, Zhang L, *et al.* An analyses of plant diversities for Yellow River wetland in Lanzhou City. *Bullet in of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(3): 240–244.
- 张起鹏, 王倩, 张丽, 等. 黄河兰州段湿地植物多样性研究. *水土保持通报*, 2012, 32(3): 240–244.
- [32] Zhou P P, Zhang M J, Wang S J, *et al.* The characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes of greening plants in Lanzhou downtown. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(11): 2942–2951.
- 周盼盼, 张明军, 王圣杰, 等. 兰州城区绿化植物稳定氢氧同位素特征. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 2942–2951.
- [33] Zhong J L, Li X, Liu W, *et al.* Effects of urbanization intensity on forest vegetation characteristics and landscape pattern indices in Nanchang. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(8): 2285–2294.
- 钟嘉琳, 李心, 刘玮, 等. 南昌城市化强度对森林植被特征和景观格局指数的影响. *生态学杂志*, 2024, 43(8): 2285–2294.
- [34] Zhang M Y, Li K, Xing X Y, *et al.* Responses of spontaneous plant diversity to urbanization in Wenyu River-North canal ecological corridor, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7): 2582–2592.
- 张梦园, 李坤, 邢小艺, 等. 北京温榆河—北运河生态廊道自生植物多样性对城市化的响应. *生态学报*, 2022, 42(7): 2582–2592.
- [35] Li X P, Zhang S N, Feng L, *et al.* Habitat and species diversity of spontaneous plants on both sides of river corridor in Chengdu urban area. *Landscape Architecture*, 2022, 29(1): 64–70.
- 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. *风景园林*, 2022, 29(1): 64–70.
- [36] Luo Q Y, Zhang M Y, Li X L, *et al.* Diversity characteristics and functional trait composition of spontaneous plants in different habitats of urban green space, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4744–4757.
- 骆沁宇, 张梦园, 李晓璐, 等. 北京城市绿地不同生境自生植物多样性特征及其功能性状组成. *生态学报*, 2024, 44(11): 4744–4757.
- [37] Editorial Board of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. *Flora of China (Volum 1)*. Beijing: Science Press, 2006.
- 中国科学院中国植物志编委会. *中国植物志(第一卷)*. 北京: 科学出版社, 2006.
- [38] Editorial Board Member of Gansu Flora. *Flora of Gansu (Volum 2)*. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 2005.
- 甘肃植物志编委. *甘肃植物志(第二卷)*. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2005.
- [39] Ma J S, Li H R. The checklist of the alien invasive plants in China. Beijing: Higher Education Press, 2018.
- 马金双, 李惠茹. *中国外来入侵植物名录*. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [40] Wan F H, Liu Q R, Xie M, *et al.* Color illustrations of invasive alien plants in China. Beijing: Science Press, 2012.
- 万方浩, 刘全儒, 谢明, 等. *生物入侵: 中国外来入侵植物图鉴*. 北京: 科学出版社, 2012.
- [41] Zhang J T. *Quantitative ecology*. Beijing: Science Press, 2004.
- 张金屯. *数量生态学*. 北京: 科学出版社, 2004.
- [42] Chaudhary I J, Rathore D. Suspended particulate matter deposition and its impact on urban trees. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9: 1072–1082.
- [43] Song C C, Liu S Y, Zhao J J, *et al.* Evaluation of ecological function for urban plant communities based on functional traits. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2): 703–714.
- 宋晨晨, 刘时彦, 赵娟娟, 等. 基于功能特征的城市植物群落生态功能评价. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 703–714.
- [44] Dawson S K, Carmona C P, González-Suárez M, *et al.* The traits of “trait ecologists”: An analysis of the use of trait and functional trait terminology. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(23): 16434–16445.

- [45] Petchey O L, Gaston K J. Functional diversity (FD), species richness and community composition. *Ecology Letters*, 2002, 5(3): 402–411.
- [46] Han T T, Tang X, Ren H, *et al.* Community/ecosystem functional diversity: measurements and development. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(8): 3286–3295.
韩涛涛, 唐玄, 任海, 等. 群落/生态系统功能多样性研究方法及展望. *生态学报*, 2021, 41(8): 3286–3295.
- [47] Li J, Lu S J, Qiu L S, *et al.* Effects of invasive plants on species and functional diversity of herbs in the built-up area of Shenzhen, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(18): 7507–7522.
李建, 卢世君, 邱礼杉, 等. 深圳市建成区入侵植物对草本植物种类及功能多样性的影响. *生态学报*, 2023, 43(18): 7507–7522.
- [48] Li M J, Zhao J J, Liu S Y, *et al.* Study on the functional diversity and the species diversity of plant communities in Mountain City Parks—A case study of the main urban area of Chongqing. *Chinese Landscape Architecture*, 2021, 37(2): 124–129.
李明娟, 赵娟娟, 刘时彦, 等. 山地城市公园植物群落功能多样性与物种多样性研究——以重庆市主城区为例. *中国园林*, 2021, 37(2): 124–129.
- [49] Liu C, Xing S H, Yao Y, *et al.* Spatial distribution pattern and influencing factors of spontaneous plants within the built-up areas of Beijing, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(2): 544–558.
刘昌, 邢韶华, 姚扬, 等. 北京城区自生植物分布格局及其影响因素. *生态学报*, 2024, 44(2): 544–558.
- [50] Wang M, Li J, Kuang S, *et al.* Plant diversity along the urban-rural gradient and its relationship with urbanization degree in Shanghai, China. *Forests*, 2020, 11(2): 171.
- [51] Chen X S, Liang H, Song K, *et al.* Ruderal species diversity and distribution in heterogeneous habitats of the urban area of Harbin. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(4): 946–952.
陈晓双, 梁红, 宋坤, 等. 哈尔滨中心城区杂草物种多样性及其在异质生境中的分布特征. *生态学杂志*, 2014, 33(4): 946–952.
- [52] Tian Z H, Chen K X, Da L J, *et al.* Diversity, spatial pattern and dynamics vegetation under urbanization in shanghai (III): Flora of the ruderal in the urban area of Shanghai under the influence of rapid urbanization. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2008(4): 49–57.
田志慧, 陈克霞, 达良俊, 等. 城市化进程中上海植被的多样性、空间格局和动态响应(III): 高度城市化影响下上海中心城区杂草区系特征. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2008(4): 49–57.
- [53] Pan N. Species composition and functional diversity of spontaneous herbs communities in Shenzhen discipline: Landscape architecture. Chongqing: Southwest University, 2022.
潘妮. 深圳市建成区自生草本植物群落的种类构成与功能多样性研究. 重庆: 西南大学, 2022.
- [54] You Q, Jiang W Q, Yan Q R, *et al.* Diversity of spontaneous herbaceous plants and influencing factors in different habitats within the main urban area of Zhengzhou. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2024, 44(11): 109–119.
尤其, 姜文倩, 闫倩如, 等. 郑州主城区不同生境自生草本植物多样性及影响因素. *中南林业科技大学学报*, 2024, 44(11): 109–119.
- [55] Soulard C T, Valette E, Perrin C, *et al.* Peri-urban agro-ecosystems in the Mediterranean: diversity, dynamics, and drivers. *Regional Environmental Change*, 2018, 18: 651–662.
- [56] Mouillot D, Graham N, Villegger S, *et al.* A functional approach reveals community responses to disturbances. *Trends in Ecology Evolution*, 2013, 28(3): 167–177.