

DOI: 10.5846/stxb202104160993

张梦园¹, 李坤¹, 邢小艺¹, 范舒欣¹, 徐一丁², 郝培尧¹, 董丽^{1,*}. 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.

Zhang M Y, Li K, Xing X Y, Fan S X, Xu Y D, Hao P Y, Dong L. Responses of spontaneous plant diversity to urbanization in Wenyu River-North canal ecological corridor, Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2582-2592.

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

张梦园¹, 李坤¹, 邢小艺¹, 范舒欣¹, 徐一丁², 郝培尧¹, 董丽^{1,*}

¹ 北京林业大学园林学院, 北京 100083

² 中国城市规划设计研究院风景园林和景观研究分院, 北京 100044

摘要: 城市化进程带来的城市生境破碎化对城市野生动植物多样性产生了巨大的影响, 而生态廊道作为城市中的绿色线性空间, 对缓解城市化进程下的生物多样性丧失具有重要作用。自生植物不仅是城市植物多样性的重要组成部分, 也为乡土动物提供了赖以生存的资源, 在低维护植物景观营造中起到关键作用。聚焦北京温榆河-北运河生态廊道, 在对廊道自生植物总体物种组成进行分析的基础上, 探究城市化梯度上自生植物物种组成与多样性特征差异, 并分析不同自生植物种群对城市化水平的适应性。共调查到温榆河-北运河自生植物 195 种, 隶属于 73 科, 156 属, 以自生草本植物为主。各城市化水平下自生木本植物的 α 多样性无显著差异; 中低城市化水平下草本植物的 α 多样性显著高于其他水平 ($P < 0.05$)。随着城市化水平升高, 自生乔木和一年生、二年生的 β 多样性升高, 自生多年生草本、自生入侵植物和外来植物的 β 多样性值下降。在城市化梯度上的生态位宽度均值排序为入侵植物 > 乡土植物 > 国外外来植物 > 国内外来植物。将生态廊道自生植物按照生态位宽度划分为广适型、中适型和狭适型, 并依据生态位重叠筛选了与 15 种入侵植物在城市化梯度上适应性相近的自生乡土植物种类。本研究结果可以为营造稳定的低维护自生植物群落, 抵抗外来入侵植物的扩散, 实现城市河流生态廊道的生物多样性保护功能提供参考。

关键词: 生态廊道; 自生植物; 城市化; 城市生物多样性

Responses of spontaneous plant diversity to urbanization in Wenyu River-North canal ecological corridor, Beijing

ZHANG Mengyuan¹, LI Kun¹, XING Xiaoyi¹, FAN Shunxin¹, XU Yiding², HAO Peiyao¹, DONG Li^{1,*}

¹ School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Landscape Architecture and Landscape Research Branch, China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100044, China

Abstract: Urban habitat fragmentation caused by urbanization has had a negative impact on urban wildlife diversity. As the connected green space in the city, the ecological corridor plays an important role in the biodiversity conservation in the process of urbanization. As an important part of urban plant diversity, spontaneous plants provide resources for the survival of native animals and play a key role in the construction of low-maintenance plant landscape. In this study, we determined the overall composition of spontaneous species in the Wenyu River-North canal ecological corridor in Beijing, explored the changes of species composition and diversity characteristics of spontaneous plants with urbanization gradients, and analyzed the adaptability of different spontaneous species to urbanization. A total of 195 plant species were recorded which belonged to 156 genera and 73 families, and most of them were herbaceous plants. There was no significant difference in alpha-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32171860); 北京市科技计划项目 (D171100007217003)

收稿日期: 2021-04-16; **采用日期:** 2021-12-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dongli@bjfu.edu.cn

diversity of spontaneous woody plants at different urbanization levels. However, the alpha-diversity of spontaneous herbaceous plants at medium urbanization level was significantly higher than that at other levels ($P < 0.05$). With the increase of urbanization index, the beta-diversity of woody plants, annual herbs and biennial herbs increased, and the beta-diversity of perennial herbs, invasive plants and exotic plants decreased. The mean niche width with urbanization gradient was ranked as invasive plants > native plants > domestic exotic plants > foreign exotic plants. According to the niche width, the ecological corridor autophytes were divided into high adaptability type, moderate adaptable type and low adaptable type. We screened some native plant species with similar adaptability to the 15 invasive plants according to niche overlap. The results can provide references for constructing stable low-maintenance spontaneous plant communities, that can resist the spread of invasive plants, so as to bring the function of biodiversity conservation of urban river ecological corridors into full play.

Key Words: ecological corridor; spontaneous plants; urbanization; urban biodiversity

随着全球城市化进程的不断推进,城市环境恶化、资源紧张等“大城市病”逐渐凸显。城市带来的人为干扰不断加剧,以及残存生境的高度同质化和破碎化,使得城市生物多样性面临日益严峻的挑战。作为城市生物多样性的重要组成部分,城市植物可以为鸟类和昆虫提供食源,也是城市动物多样性的基础,因而受到学界的广泛关注。其中,除了直接受到城市建设和人为活动影响的人工栽培植物以外,还有一类未经人工栽培而在城市环境中自发定居生长的植物群体,即自生植物(spontaneous plants)也对城市绿地植物群落外貌和功能产生了不可忽视的影响^[1-2]。自城镇出现起,自生植物就在较低养护管理水平的绿地中广泛存在,为城市生物多样性保护提供了不可或缺的支持^[3-5]。然而,城市自生植物具有独特的环境适应性和敏感性,在城市生境中呈野生状态分布并可自然更新,其分布规律随城市的发展而复杂多变^[6]。城市绿地中的自生植物包括自生乡土植物和部分由于人类或动物携带外来植物种子、外来栽培植物的逸生等因素的影响,城市绿地中的自生植物必然会包含一部分入侵植物。自生植物的来源构成对城市自生植物群落的稳定性及其生态功能的发挥具有重要影响^[7]。虽然在不同地域与城市的研究中,城市野生植物/自生植物多样性随城市化水平的变化规律不一^[8-11];但其物种组成随城市化水平的变化而呈现差异已成共识^[12-15],主要体现在中心城区的建设导致乡土自生植物的丧失和外来栽培植物的逸生^[16-18],从而对乡土动物的多样性产生的威胁。因此,如何在城市建设过程中充分利用和保护自生植物,使其发挥应有的生态功能,成为行业实践中的难点。

在这一背景下,城市生态廊道作为一种应对城市生态问题的有效途径,已经成为城市规划的重要手段之一。生态廊道作为城市中的绿色线性空间,可以有效地提高绿地斑块连通性,在生物多样性保护方面具有重要作用^[19]。其中,河流生态廊道因其高度连续性和内部丰富的生境条件,其生态功能的发挥更为显著^[20]。已有研究证实城市河流生态廊道可以通过大量留存原有植被或营造栽培植物群落,对城市植物多样性保护和提升产生积极作用^[21-22]。然而,城市生态廊道对生物多样性的支持功能并不单体现在对原有植被的留存,其更重要的价值在于通过连续的绿色空间实现动植物的迁移扩散,从而减少城市化对野生动植物栖息地的割裂而带来的多样性缺失^[23];同时也存在生态廊道可能加剧外来植物入侵的争论^[24]。自生植物是生态廊道植物多样性支持功能的重要表征,同时也是城市生态廊道建设中低维护植物景观的有机组成部分。在城市化背景下,少量国际学者开始聚焦高连通性城市绿地中自生植物的多样性分布规律^[25-26];然而国内的相关研究几乎为空白,城市生态廊道对地域性自生植物多样性深层次影响缺乏实地研究支撑。因此,探究城市河流生态廊道中的自生植物对城市化水平的响应对论证城市生态廊道缓解城市化问题,保护生物多样性的功能具有重要的理论意义,同时对指导低维护、近自然的城市河流生态廊道植物景观营造具有重要的实践价值。

温榆河-北运河生态廊道是北京市东北部重要的河流生态廊道,穿过城市建成区至郊区,周边城市化梯度变化明显。本文在温榆河-北运河生态廊道自生植物总体物种组成进行分析的基础上,对其内部的城市化水平进行梯度划分,探究不同城市梯度上自生植物物种组成与多样性特征差异,并分析不同自生植物种群对城

市化水平的适应性,旨在为河流生态廊道规划及低维护植物景观营建提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地选择

北京(39°54'20"N, 116°25'29"E)地处中纬度地带,属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候。城市化的快速扩张导致北京建设用地的蔓延,形成了“摊大饼”式外延发展的局面,城市生境极度破碎化,景观格局复杂多样,城市生态环境极度脆弱。温榆河-北运河位于北京市东部平原,全长 88.27km。在城市建设过程中,河流沿岸建设或留存的城市公园、郊野公园、防护林地、苗圃果园和城市荒野地等构成了连续的绿色空间,承载了城市生态廊道的功能。温榆河-北运河生态廊道北接北部山区生态屏障,南与北京东南方向的开敞空间相连,是北京市绿地系统规划中的一级廊道,是北京市外环水系和第二道绿化隔离带的重要组成部分。其穿过城市建成区至郊区,周边城市化梯度变化明显;内部水系贯通,生境类型多样,是北京市东南部重要的绿色屏障和动植物迁移扩散的重要通道^[27-28]。

本文的研究范围包括温榆河-北运河周边承载生态廊道功能的绿色空间,结合 2017—2018 年夏季的高分二号遥感影像,根据城市用地性质和绿地连接程度,选定温榆河-北运河河道周边 1—3km 范围内共计 201km² 作为研究样地。

1.2 城市化水平提取方法

采用 2017—2018 年夏季的高分二号遥感影像,对影像数据进行了正射校正、辐射校正、融合镶嵌等预处理,根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)中的分类标准^[29],提取温榆河-北运河生态廊道内部建设用地(包含道路)斑块。随机抽取 80 个检验点对分类结果进行检验,Kappa 系数为 0.822,符合研究要求。采用 100m×100m 的网格均匀布采点,以采样点为圆心,以 500m 为半径提取建设用地占比作为城市化水平指数(Urbanization index, UI)。采用反距离权重法对生态廊道内城市化指数进行插值分析,得到的城市化水平指数在 0—0.8 之间,按照 0.1 的间隔将廊道范围内土地按城市化水平由低到高划分为 I—VIII 八个等级。

1.3 植物样方设置

于 2019—2020 年 7—9 月开展植物样方调查,垂直廊道方向设置样带,相邻样带间隔不大于 2km。在每个样带中,从河岸边缘起,每隔 100—200m 设置样点,部分在调研中不可进入的样点根据实际情况进行调整。以样点为中心,设置 10m×10m 的木本样方,记录自生乔灌木及木质藤本种类、数量、株高、冠幅、胸径和发生方式;在木本样方中心及四个角点处布置 1m×1m 的正方形草本小样方,记录自生草本的种类株数、高度和发生方式。若自生植株母株为自生植物,则发生方式记为野生;若其母株为栽培植物,则发生方式记为栽培植物种子繁殖或栽培植物根蘖繁殖。样点周边 20m 范围内无同种栽培植物的自生乡土植物的发生方式认定为野生;对非乡土植物或样点周边 20m 范围内同种栽培植物的自生植物,根据其生长状况、发生位置、繁殖特性等判断其为栽培植物种子繁殖、栽培植物根蘖繁殖或野生。共记录到木本样方 445 个,草本样方 2200 个,作为自生植物总体多样性分析数据。结合城市化水平等级划分结果,在保证样点在廊道内分布基本均匀的条件下,从每个城市化梯度范围内随机选取 5 个植物样点,作为城市化梯度上自生植物多样性分析数据,共选取木本样方 40 个,草本样方 200 个(图 1)。

1.4 数据处理方法

1.4.1 重要值

乔木层重要值^[30]: $IV_{\text{乔木}} = (\text{相对密度} + \text{相对优势度} + \text{相对频度})/3$

灌木及草本层重要值^[30]: $IV_{\text{灌木和草本植物}} = (\text{相对盖度} + \text{相对高度})/2$

1.4.2 α 多样性

Patrick 丰富度指数^[30]: $R = S = \text{所在样方的物种数}$

Simpson 多样性指数^[30]: $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$

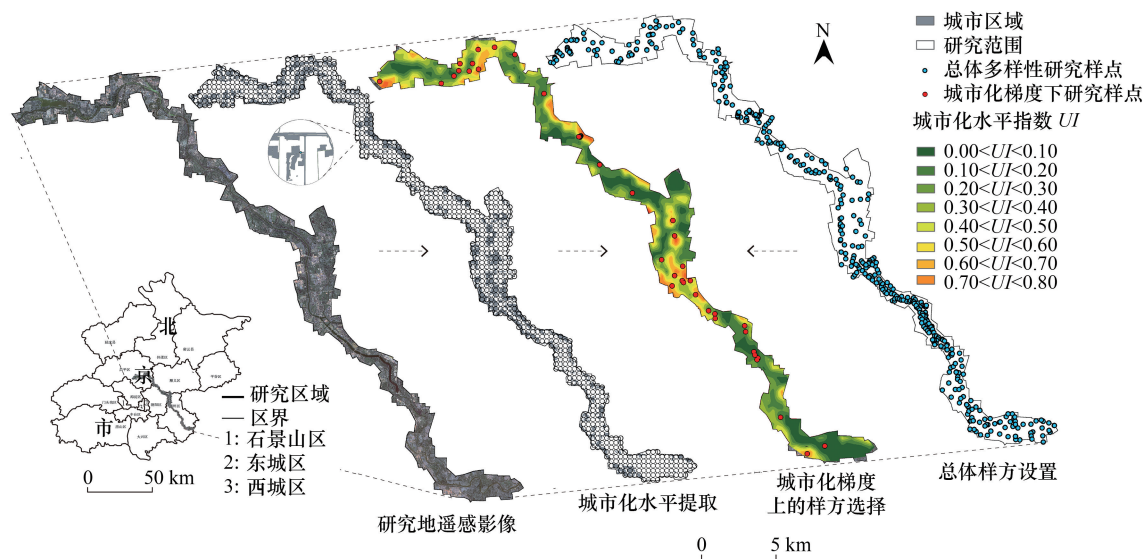


图 1 研究地及样点设置

Fig.1 Study area and sampling design

Shannon-Wiener 多样性指数^[30]:
$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i)$$

Pielou 均匀度指数^[30]:
$$J = H / \ln S$$

式中, P_i 为样方中物种 i 的重要值。

1.4.3 β 多样性

Whittaker β 多样性指数^[30]:
$$\beta_w = \frac{S}{A} - 1$$

式中, S 为研究中记录到的总物种数, A 为环境梯度上所发现的物种平均数。

1.4.4 生态位特征

Levins 生态位宽度指数^[30]:
$$B_i = 1 / \sum_{j=1}^r (P_{ij})^2$$

Levins 生态位重叠指数^[30]:
$$O_{ik} = \sum_{j=1}^r (P_{ij} P_{kj}) / \sum_{j=1}^r (P_{ij})^2$$

式中, B_i 为种 i 的生态位宽度; O_{ij} 为种 i 与种 k 的重叠指数; P_{ij} 代表种 i 在第 j 个资源状态下的重要值; P_{kj} 代表种 k 在第 j 个资源状态下的重要值。

采用单因素方差 (one-way ANOVA) 和 Duncan 检验 ($\alpha=0.05$) 比较不同城市化梯度样方自生草本 α 多样性指数差异, 采用 Kruskal-wallis 检验比较不同城市化梯度样方自生乔木和灌木 α 多样性指数差异。样方整理和数据计算采用 Excel 2016 和 R 4.0.3 进行, 多样性指数的计算采用 R 4.0.3 的 Vegan 包进行, 多样性指数的均值比较运用 agricolae 包, 生态位宽度和生态位重叠采用 spaa 包进行, 统计图绘制采用 Excel 2016 和 R 4.0.3 进行。对植物来源的信息参考《中国植物志》、《北京植物志》以及中国外来入侵物种数据库 (<http://chinaiaas.cn/wjPart/index.aspx>)。其中, 乡土植物 (native plants) 为自然分布于北京地区的物种, 外来植物 (alien plants) 指历史上自然分布范围为北京以外的物种, 参考植物志及相关文献确定^[31-32]。入侵植物 (invasive plants) 为外来植物中在北京地区存在大量个体及有大范围扩散潜力的有入侵认定的物种, 参考中国外来入侵物种数据库、植物志及相关文献确定^[33]。

2 结果与分析

2.1 温榆河-北运河生态廊道自生植物总体物种组成特征

调查共发现 195 种植物,隶属于 73 科,156 属。其中乔木 29 种,灌木及木质藤本 13 种,草本 153 种。乔木优势科为桑科 (Moraceae)、杨柳科 (Salicaceae)、榆科 (Ulmaceae);灌木及木质藤本优势科为茄科 (Solanaceae)、葡萄科 (Vitaceae)、木犀科 (Oleaceae);草本优势科为禾本科 (Poaceae)、菊科 (Asteraceae)、苋科 (Amaranthaceae)。物种频度大于 10% 的自生乔木有构树 (*Broussonetia papyrifera*) (21.97%)、榆树 (*Ulmus pumila*) (17.71%)、桑 (*Morus alba*) (12.56%) 和毛白杨 (*Populus tomentosa*) (12.11%);自生灌木及木质藤本物种频度均小于 5%;物种频度大于 15% 的自生草本有狗尾草 (*Setaria viridis*) (77.13%)、灰绿藜 (*Chenopodium glaucum*) (54.04%)、葎草 (*Humulus scandens*) (46.19%)、牛筋草 (*Eleusine indica*) (38.12%)、马唐 (*Digitaria sanguinalis*) (34.75%)、地肤 (*Kochia scoparia*) (26.23%)、马齿苋 (*Portulaca oleracea*) (21.08%)、稗 (*Echinochloa crusgalli*) (20.18%)、中华苦苣菜 (*Ixeris chinensis*) (15.70%) 和萝藦 (*Metaplexis japonica*) (15.47%)。浮水植物有荇菜 (*Nymphoides peltata*) 和水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 2 种;湿生植物 17 种,常见的有芦苇 (*Phragmites australis*)、稗、红蓼 (*Polygonum orientale*) 等;挺水植物有荷花 (*Nelumbo nucifera*)、慈菇 (*Sagittaria trifolia*)、三棱水葱 (*Schoenoplectus triqueter*) 3 种;沉水植物有金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*) 1 种。物种来源方面,乡土植物 139 种,国内外来植物 19 种,国外外来植物 37 种,入侵植物 29 种。入侵植物中乔木 2 种,藤本 1 种,草本 27 种,常见的种有刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、火炬树 (*Rhus typhina*)、牛筋草、小蓬草 (*Conyza canadensis*)、稗、圆叶牵牛 (*Pharbitis purpurea*)、凹头苋 (*Amaranthus lividus*) 等。发生方式方面,自生乔木中来自栽培植物种子繁殖的物种占总物种数的 71.88%,来自栽培植物根蘖繁殖的物种占比 15.63%,来自野生的物种占比 1.25%;自生灌木及木质藤本中来自栽培植物种子繁殖的物种占比 46.15%,来自栽培植物根蘖繁殖的物种占比 38.46%,来自野生的物种占比 15.39%;自生草本中来自栽培植物种子繁殖的物种占比 20.92%,来自野生的物种占比 79.09%。

2.2 城市化梯度上温榆河-北运河生态廊道自生植物多样性特征

2.2.1 城市化梯度上的自生植物 α 多样性

温榆河-北运河生态廊道自生乔木 Patrick 丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数最高均值出现在Ⅲ级城市化水平下,分别为 2.20、2.00、1.86,但不同城市化水平间无显著差异 ($P>0.05$)。自生灌木及木质藤本只在Ⅴ级和Ⅶ级城市化水平时出现,其丰富度指数和多样性指数在不同城市化水平间无显著差异 ($P>0.05$)。自生草本的 Patrick 丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数最高均值出现在Ⅲ级城市化水平下,分别为 11.60、8.35 和 6.48,在不同城市化水平间差异显著 ($P<0.05$)。自生乔木、灌木及木质藤本和草本的 Pielou 均匀度指数在不同城市化水平间差异均不显著 ($P>0.05$) (图 2)。

2.2.2 城市化梯度上的自生植物 β 多样性

在城市化梯度上,温榆河-北运河生态廊道自生植物整体物种数表现为单峰变化格局,峰值均出现在Ⅳ级城市化水平下;而自生植物的整体 β 多样性则基本稳定。自生乔木、灌木及木质藤本、草本、自生乡土植物、外来植物、入侵植物的种数变化趋势基本一致。自生乔木和一、二年生草本的 β 多样性值随城市化水平升高而升高,自生多年生草本的 β 多样性值随城市化水平升高而下降;自生乡土植物的 β 多样性值随城市化水平升高而升高,自生入侵植物和外来植物的 β 多样性值随城市化水平升高而下降。各城市化水平下来自栽培植物种子繁殖的物种数基本稳定。来自栽培植物根蘖繁殖的植物 β 多样性在Ⅳ级城市化水平下达到峰值 (图 3)。

2.3 温榆河-北运河生态廊道自生植物种群适应性

2.3.1 温榆河-北运河生态廊道自生植物种群生态位宽度

乔木层中,生态位宽度前十的物种依次是构树、榆树、桑、刺槐、臭椿 (*Ailanthus altissima*)、火炬树、毛白

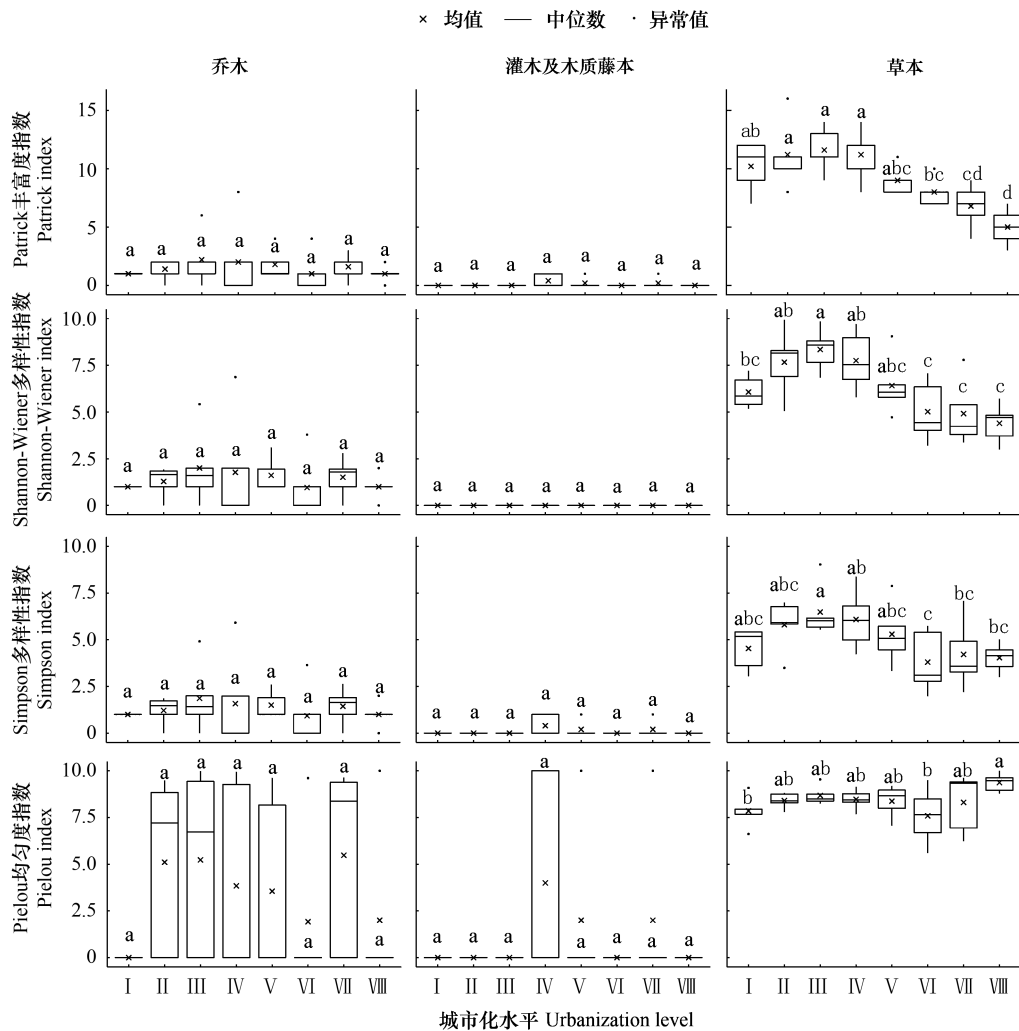
图2 城市化梯度上自生植物 α 多样性变化

Fig.2 Changes of the alpha-diversity of spontaneous plants with urbanization gradient

城市化水平 I: $0 < UI \leq 0.1$; 城市化水平 II: $0.1 < UI \leq 0.2$; 城市化水平 III: $0.2 < UI \leq 0.3$; 依此类推; 不同小写字母表示不同城市化梯度上差异显著 ($P < 0.05$)

杨、旱柳 (*Salix matsudana*)、栾树 (*Koelreuteria paniculata*)、美国红栎 (*Fraxinus pennsylvanica*)；草本层中, 生态位宽度前十的物种依次是狗尾草、菵草、灰绿藜、地肤、马齿苋、牛筋草、中华苦苣菜、猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、稗、马唐。各物种生态位宽度均值呈现为入侵植物 (2.70) > 乡土植物 (2.26) > 国外外来植物 (1.75) > 国内外来植物 (1.34)。根据各物种在城市化梯度上的生态位宽度, 将自生植物近等比划分为三类: 广适型如狗尾草、菵草、灰绿藜、地肤、马齿苋等; 中适型如紫花地丁 (*Viola philippica*)、毛白杨、蒺藜 (*Tribulus terrester*)、铁苋菜 (*Acalypha australis*)、马唐等; 狭适型如野牛草 (*Buchloe dactyloides*)、柳叶马鞭草 (*Verbena bonariensis*)、刺苋 (*Amaranthus spinosus*)、狗牙根 (*Cynodon dactylon*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*)、枣 (*Ziziphus jujuba*) 等 (表 1)。广适型植物种数在各城市化水平下基本一致; 中适型植物种数在低城市化区域 ($0 < UI \leq 0.4$) 高于高城市化区域 ($0.4 < UI \leq 0.8$); 而狭适型植物种数在低城市化区域 ($0 < UI \leq 0.3$) 和高城市化区域 ($0.4 < UI \leq 0.8$) 较低, 而在中城市化区域 ($0.3 < UI \leq 0.4$) 较高 (图 4)。

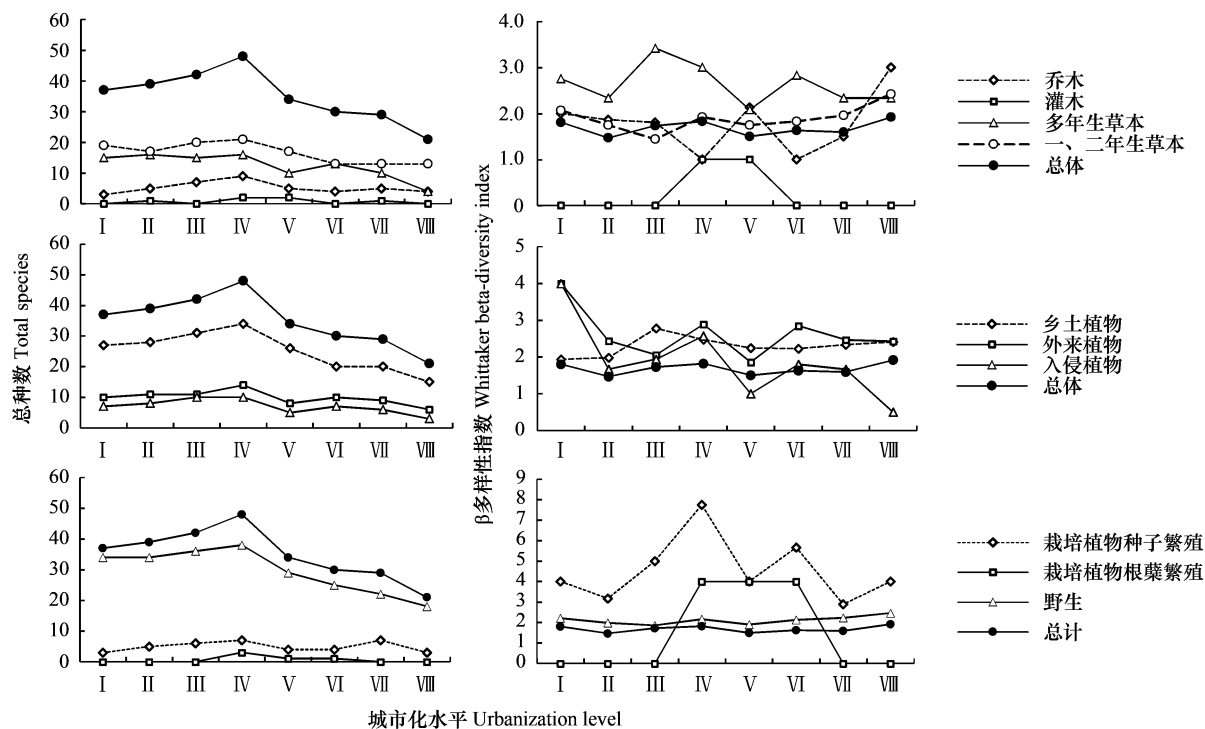


图3 城市化梯度上自生植物种数及β多样性变化

Fig.3 Changes of the species number and beta-diversity of spontaneous plants with urbanization gradient

表1 自生植物对城市化的适应类型划分

Table 1 Classification of adaptability types of spontaneous plants to urbanization		
类型 Type	分类依据 Classification standard	植物种类 Plant species
广适型 High adaptable type	生态位宽度>2.38	狗尾草、葎草、灰绿藜、地肤、马齿苋、牛筋草、构树、中华苦荬菜、猪毛蒿、稗、马唐、圆叶牵牛、小蓬草、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i>)、凹头苋、诸葛菜 (<i>Orychophragmus violaceus</i>)、地锦草 (<i>Euphorbia humifusa</i>)、芦苇、婆婆针 (<i>Bidens bipinnata</i>)、天名精 (<i>Carpesium abrotanoides</i>)、榆树、桑、牵牛 (<i>Pharbitis nil</i>)、萝藦、刺槐、臭椿、虎尾草 (<i>Chloris virgata</i>)、酸模叶蓼 (<i>Polygonum lapathifolium</i>)、酸模 (<i>Rumex acetosa</i>)、打碗花 (<i>Calystegia hederacea</i>)、苦苣菜 (<i>Sonchus oleraceus</i>)、车前 (<i>Plantago asiatica</i>)、绿穗苋 (<i>Amaranthus hybridus</i>)、火炬树
		紫花地丁、毛白杨、蒺藜、铁苋菜、马唐、知风草 (<i>Eragrostis ferruginea</i>)、天胡荽 (<i>Hydrocotyle sibthorpioides</i>)、紫苜蓿 (<i>Medicago sativa</i>)、地黄 (<i>Rehmannia glutinosa</i>)、益母草 (<i>Leonurus artemisia</i>)、翅果菊 (<i>Pterocypsela indica</i>)、朝天委陵菜 (<i>Potentilla chinensis</i>)、菰 (<i>Zizania latifolia</i>)、雀稗 (<i>Paspalum thunbergii</i>)、旋覆花 (<i>Inula japonica</i>)、活血丹 (<i>Glechoma longituba</i>)、萱草 (<i>Heimerocallis fulva</i>)、田旋花 (<i>Convolvulus arvensis</i>)、酢浆草 (<i>Oxalis corniculata</i>)、旱柳、栾树、鬼针草 (<i>Bidens pilosa</i>)、菖蒲 (<i>Acorus calamus</i>)、附地菜 (<i>Trigonotis peduncularis</i>)、蓟 (<i>Cirsium japonicum</i>)、鸭跖草 (<i>Commelina communis</i>)、水葫芦、美国红栌、香蒲 (<i>Typha orientalis</i>)
中适型 Moderate adaptable type	1.00<生态位宽度≤2.38	野牛草、柳叶马鞭草、刺苋、狗牙根、披碱草、慈姑、臭鸡矢藤 (<i>Paederia foetida</i>)、野豌豆 (<i>Vicia sepium</i>)、迎春花 (<i>Jasminum nudiflorum</i>)、五角枫 (<i>Acer mono</i>)、金光菊 (<i>Rudbeckia laciniata</i>)、加杨 (<i>Populus × canadensis</i>)、半夏 (<i>Pinellia ternata</i>)、天门冬 (<i>Asparagus cochinchinensis</i>)、杠板归 (<i>Polygonum perfoliatum</i>)、玉竹 (<i>Polygonatum odoratum</i>)、具芒碎米莎草 (<i>Cyperus microiria</i>)、凤花菜 (<i>Rorippa globosa</i>)、苘麻 (<i>Abutilon theophrasti</i>)、蒲公英 (<i>Taraxacum mongolicum</i>)、龙葵 (<i>Solanum nigrum</i>)、蛇莓 (<i>Duchesnea indica</i>)、千屈菜 (<i>Lythrum salicaria</i>)、野菊 (<i>Dendranthema indicum</i>)、尖裂假还阳参 (<i>Crepidiastrum sonchifolium</i>)、博落回 (<i>Macleaya cordata</i>)、青蒿 (<i>Artemisia carvifolia</i>)、草地早熟禾 (<i>Poa pratensis</i>)、苍耳 (<i>Xanthium sibiricum</i>)、巴天酸模 (<i>Rumex patientia</i>)、紫薇 (<i>Lagerstroemia indica</i>)、紫丁香 (<i>Syringa oblata</i>)、枸杞 (<i>Lycium chinense</i>)、西府海棠 (<i>Malus × micromalus</i>)、枣、香椿 (<i>Toona sinensis</i>)、山桃 (<i>Amygdalus davidiana</i>)、山杨 (<i>Populus davidiana</i>)
狭适型 Low adaptable type	生态位宽度≤1.00	

类型内物种按生态位宽度大小顺序列出,*为入侵植物

2.3.2 温榆河-北运河生态廊道自生植物种群生态位重叠

将城市化梯度研究中发现的 15 种自生入侵植物与其他自生植物组成 1290 个种对关系进行生态位重叠分析。生态位重叠值大于 0.9 的种对有 8 对,生态位重叠值位于 0.6—0.9 的种对有 14 对,生态位重叠值位于 0.4—0.6 的种对有 23 对,生态位重叠值位于 0.2—0.4 的种对有 47 对。由自生入侵植物与自生乡土植物组成的种对中,生态位重叠值较高的有:刺苋与野菊、尖裂假还阳参、博落回、臭鸡矢藤的生态位重叠值为 1;水葫芦与玉竹、具芒碎米莎草、风花菜的生态位重叠值为 0.61;野牛草与小画眉草的生态位重叠值为 0.48;鬼针草与青蒿、草地早熟禾、苍耳、酸模的生态位重叠值为 0.47;酢浆草与野菊、尖裂假还阳参、博落回的生态位重叠值为 0.44;绿穗苋与玉竹、具芒碎米莎草、风花菜的生态位重叠值为 0.25;火炬树与紫丁香的生态位重叠值为 0.24;苦苣菜与野菊、尖裂假还阳参、博落回的生态位重叠值为 0.20。

3 讨论

3.1 城市河流生态廊道自生植物物种组成的独特性

本研究发现北京温榆河-北运河生态廊道内自生植物共 195 种植物,大于前人对北京东北部二环至六环地区(181 种)^[10]和北京奥林匹克森林公园(128 种)^[34—36]的自生植物研究结果。其中,河流生态廊道自生木本植物种类(42 种)远高于北京东北部二环至六环地区(11 种)^[10]和城市公园(3 种)^[34—36],其主要原因可能是河流生态廊道中包括部分养护管理要求较低的滨河绿道和城市荒野地,一定程度上有利于自生木本植物的产生和留存。温榆河-北运河生态廊道自生草本植物种类 153 种,与前人对北京生态廊道草本植物的研究结果(141 种)接近^[37],高于城市公园研究结果(125 种)^[34—36]。菊科和禾本科是廊道内自生草本植物的优势科,狗尾草为优势种,这与前人在北京其他地区的研究结果一致^[37]。河流廊道内栽培草本种类构成相对单一,其逸生幼苗种类可能较城市区域少;但河流廊道内绿地管理粗放,且受河流水位等的影响,土壤水分条件变化多样,植物生境类型丰富,生境格局连通,均对自生植物多样性支持具有积极的作用。在温榆河-北运河生态廊道中,乡土植物 139 种,占比 71.28%,高于北京东北部二环至六环区域的研究结果^[37],低于北京城市公园的研究结果^[34—36],可见城市生态廊道对乡土植物多样性的保护有一定的积极作用。但研究中也发现入侵等级较高的刺苋、反枝苋、小蓬草、鬼针草等植物在廊道中出现频度较高,应加强监测管理。由于管理主体的差异,相较于城市绿地,城市河流河岸带景观的管理在不同城市化水平下都较为粗放。因此,虽然温榆河-北运河生态廊道内自生湿生和水生植物种类较少,但形成了以野生的稗、芦苇和红蓼为优势种,独具特色的朴野河岸景观。此外,较低的养护管理水平也为如天胡荽、水芹(*Oenanthe javanica*)、萎蒿(*Artemisia selengensis*)等城市绿地中偶见的湿生植物的留存提供了机会。

3.2 城市河流生态廊道自生植物多样性对城市化水平的响应

研究结果表明,温榆河-北运河生态廊道中自生木本植物的 α 多样性在城市化梯度上差异不显著,而自生草本植物的 α 多样性变化差异显著,这与前人对河流廊道植被多样性的研究结果一致^[26,38—39]。自生草本植物的 α 多样性在中低城市化水平($0.2 < UI \leq 0.3$)最高,而低城市化区域的自生草本植物 α 多样性高于高城市化区域,这与多数在城市区域内的研究结果一致^[9—11]。调研过程中发现,河流生态廊道内部整体养护频率基本与城市化水平正相关,但其养护水平通常比同等城市化水平下的城市绿地简单粗放。自生草本植物的发生方式以野生为主,受除草频率的影响,高城市化区域内自生草本植物留存较少,且大部分有潜力繁殖后代的自

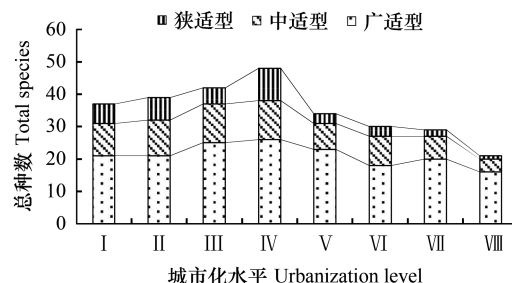


图4 城市化梯度上各适应类型自生植物的物种数变化

Fig.4 Changes of the species number of spontaneous plants in different adaptability types with urbanization gradient

生草本的花朵和种子未到达成熟阶段就被割除,种群难以繁衍,从而进一步抑制了高城市化区域的草本植物多样性,导致自生草本的 α 多样性在城市化梯度上变化明显。而木本植物多来自栽培植物种子或萌蘖,木本母株的生长和繁殖几乎不受养护强度的影响,且木本植物当年生的幼苗通常较为低矮,容易在除草过程中保留下来。然而,受到光照、养分等生长条件的限制,在没有特意培育的条件下,大部分当年生木本幼苗并不能顺利存活。只有在极粗放的管理下,一些速生的木本植物的幼苗可以在夏季长成大苗,从而在夏末刈草时得到保留。因此,虽然自生木本植物的 α 多样性在城市化梯度上变化不明显,但是高城市化区域的自生木本植株以当年生幼苗为主,低城市化区域的自生木本植株中存在较多的大龄苗和成株。

自生植物物种数在中等城市化水平下最高,主要是由于狭适型的乡土草本植物的集中出现产生的。可以从养护管理和人为活动两个角度理解自生植物多样性在城市化梯度上的变化。前人研究表明,高养护管理水平可以通过除草等方式降低自生植物多样性^[36];而人为活动及其带来的交通气流会促进动物扩散和风扩散自生植物种子的传播,同时城市绿化中栽培植物的大量使用会增加其逸生的可能性,有助于自生植物多样性的提升^[40-41]。在高城市化区域,人为活动较为密集,但养护管理水平较高,因此只有适应性较强的广适种可以适应这种高生存压力。在低城市化区域,养护管理水平较低,但人为活动也较少,因此植物种类较高城市化区域多,且主要体现在狭适型和中适型的生长上。在中城市化区域,养护管理水平和人为活动都处于中等水平,因此可能会允许一些由人为携带或栽培植物逸生的、适应性不强的自生植物在小范围内存在,从而体现为中城市化区域的狭适型自生植物较多,自生植物总 α 多样性和总种数较高。

温榆河-北运河生态廊道整体 β 多样性在城市化梯度上基本稳定,证实河流生态廊道作为连通的绿色空间,一定程度上缓解了高城市化区域的景观破碎和割裂,从而减弱了城市发展对植物多样性的冲击。然而,这种连通功能也有助于外来和入侵植物的传播,带来了一定程度的负面效应。本研究发现,外来和入侵植物的种数在城市化梯度上没有明显差异,其 β 多样性均随城市化水平升高而下降。这可以解释为,在河流生态廊道内,外来和入侵植物在高城市化区域的单个群落内部丰富度高,群落间同质化明显;而在远郊区的植物群落内部丰富度低,群落间异质性高,但城市和郊区间物种数量已趋于一致。对比研究普遍得出的高城市化区域城市绿地内的自生外来植物种数占大于低城市化区域的结果^[10, 42-43],可见城市河流生态廊道对外来和入侵植物从城市区域向郊区的扩散过程的促进作用。

3.3 自生植物对城市化水平的适应性差异及城市河流生态廊道入侵植物防控

从生态位宽度指数可以看出,乔木层中的构树、榆树、桑、刺槐、火炬树和草本层中的狗尾草、菵草、灰绿藜、地肤、马齿苋对城市化水平的适应力较强。通过研究自生植物对城市化梯度的适应性差异,在阐述河流生态廊道自生植物多样性对城市化梯度的响应外,也对河流生态廊道自生植物景观的维持与外来入侵植物的防治提供了重要的依据。入侵植物的生态位宽度均值高于乡土植物和外来植物,可见入侵植物在河流生态廊道中呈现出较强的适应性。分析自生入侵植物与自生乡土植物的生态位重叠,可以筛选一些在城市化梯度上适应性相近的种对,如刺苋与野菊、尖裂假还阳参、野牛草与小画眉草、鬼针草与青蒿等。这些乡土植物在自生植物景观营造中充当功能性植物,预先填补目标入侵物种的生态位,提升植物群落稳定性,以阻挡入侵植物抵抗在廊道中的扩散。然而,本研究得到的乡土植物与入侵植物的种对仅仅是基于城市化适应性的基础上提出来的,在运用过程中还需要依据物种的生态习性,综合植物在土壤、光照等生境资源上的生态位重叠进行选择。

4 结论

本研究共调查到温榆河-北运河自生植物 195 种,以自生草本植物为主。自生草本植物的 α 多样性变化随城市化变化差异显著,在中低城市化水平下最高,主要是由于狭适型植物在中等城市化区域的聚集导致的。自生植物 β 多样性分布特征表明,城市河流生态廊道在一定程度上缓解了城市化进程对自生植物整体多样性的影响,但同时也一定程度上促进了对外来和入侵植物从城市区域向郊区的扩散过程。因此,在未来的

城市生态廊道建设管理中,针对自生植物的适应性差异,科学地进行植物群落设计与种类选择,结合合理的养护措施,以及对外来入侵植物的密切监测,才能更好地发挥生态廊道对乡土动植物多样性的支持功能。

参考文献 (References):

- [1] Woodward S L. Spontaneous vegetation of the Murray springs area, San Pedro valley, Arizona. *Journal of the Arizona Academy of Science*, 1972, 7 (1): 12-16.
- [2] Jaritz G. Manurial experiments on fallows of long or several years' duration with spontaneous pasture vegetation in North-West-Tunisia and their importance for elaborating measures for pasture improvement. *Zeitschrift Fuer Acker und Pflanzenbau*, 1974, 139(4): 273-306.
- [3] Paker Y, Yom-Tov Y, Alon-Mozes T, Barnea A. The effect of plant richness and urban garden structure on bird species richness, diversity and community structure. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 186-195.
- [4] Hoyle H, Norton B, Dunnett N, Richards J P, Russell J M, Warren P. Plant species or flower colour diversity? Identifying the drivers of public and invertebrate response to designed annual meadows. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180: 103-113.
- [5] Norton B A, Bending G D, Clark R, Corstanje R, Dunnett N, Evans K L, Grafius D R, Gravestock E, Grice S M, Harris J A, Hilton S, Hoyle H, Lim E, Mercer T G, Pawlett M, Pescott O L, Richards J P, Southon G E, Warren P H. Urban meadows as an alternative to short mown grassland: effects of composition and height on biodiversity. *Ecological Applications*, 2019, 29(6): e01946.
- [6] Cilliers S S, Bredenkamp G J. Vegetation of road verges on an urbanisation gradient in Potchefstroom, South Africa. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 46(4): 217-239.
- [7] Thompson K, McCarthy M A. Traits of British alien and native urban plants. *Journal of Ecology*, 2008, 96(5): 853-859.
- [8] Godefroid S, Koedam N. Distribution pattern of the flora in a peri-urban forest: an effect of the city-forest ecotone. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 65(4): 169-185.
- [9] Zerbe S, Maure U, Schmitz S, Sukopp H. Biodiversity in Berlin and its potential for nature conservation. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 62 (3): 139-148.
- [10] 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[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [11] 陈国建. 城市化对植物物种多样性的影响: 方法、格局与机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [12] Lososová Z, Chytrý M, Tichý L, Danihelka J, Fajmon K, Hájek O, Kintrová K, Kühn I, Láníková D, Otýpková Z, Řehořek V. Native and alien floras in urban habitats: a comparison across 32 cities of central Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(5): 545-555.
- [13] 陈晓双, 梁红, 宋坤, 达良俊. 哈尔滨城区杂草群落多样性及其分类体系. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2221-2228.
- [14] 陈晓双, 梁红, 宋坤, 达良俊. 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.
- [15] 赵娟娟, 孙小梅, 陈珊珊, 江波, 陈春娣. 城市野生草本植物种类构成的特征——以宁波市为例. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 43-50.
- [16] 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.
- [17] Aronson M F J, Handel S N, La Puma I P, Clemants S E. Urbanization promotes non-native woody species and diverse plant assemblages in the New York metropolitan region. *Urban Ecosystems*, 2015, 18(1): 31-45.
- [18] Liang Y Q, Li J W, Li J, Valimaki S K. Impact of urbanization on plant diversity: A case study in built-up areas of Beijing. *Forestry Studies in China*, 2008, 10(3): 179-188.
- [19] Forman R T T. Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 1995, 10(3): 133-142.
- [20] 蔡好, 董丽. 绿道生态价值研究进展及展望. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2018, 49(1): 110-116.
- [21] 刘璐, 刘志成, 杨瑞莹, 张任菲, 李豪, 许晓明. 永定河干涸段(卢梁段)河流廊道植物群落数量分类及多样性特征. *生态学报*, 2020, 40 (24): 9129-9137.
- [22] 任斌斌, 李薇, 刘兴, 丛日晨. 北京城市绿道植物多样性特征研究. *中国园林*, 2015, 31(8): 10-14.
- [23] Bryant M M. Urban landscape conservation and the role of ecological greenways at local and metropolitan scales. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 76(1/4): 23-44.
- [24] Hansen M J, Cleverger A P. The influence of disturbance and habitat on the presence of non-native plant species along transport corridors. *Biological Conservation*, 2005, 125(2): 249-259.
- [25] White J R. Riparian corridor vegetation structure and soil function along urban, suburban, and rural streams in Louisville, KY, USA [D]. Louisville: University of Louisville, 2011.
- [26] Schwoertzig E, Ertlen D, Trémolières M. Are plant communities mainly determined by anthropogenic land cover along urban riparian corridors?. *Urban Ecosystems*, 2016, 19(4): 1767-1786.

- [27] 北京市城市规划设计研究院. 北京市绿地系统规划. (2010-10-28) [2021-01-18]. http://yllhj.beijing.gov.cn/zwgk/ghxx/gh/201911/t20191129_734967.shtml.
- [28] 北京市城市规划设计研究院. 北京城市总体规划(2016年-2035年). (2017-09-29) [2021-01-18]. http://www.beijing.gov.cn/gongkai/guohua/wngh/cqgh/201907/t20190701_100008.html.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21010—2017 土地利用现状分类. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [30] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004: 19-19, 123-125.
- [31] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 2002.
- [32] 贺士元, 邢其华, 尹祖棠, 江先甫. 北京植物志(第二版). 北京: 北京出版社, 1993.
- [33] 刘全儒, 于明, 周云龙. 北京地区外来入侵植物的初步研究. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2002, 38(3): 399-404.
- [34] 李晓鹏, 董丽, 关军洪, 赵凡, 吴思佳. 北京城市公园环境下自生植物物种组成及多样性时空特征. 生态学报, 2018, 38(2): 581-594.
- [35] Li X P, Fan S X, Hao P Y, Dong L. Temporal variations of spontaneous plants colonizing in different type of planted vegetation—a case of Beijing Olympic Forest Park. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 46: 126459.
- [36] Li X P, Fan S X, Guan J H, Zhao F, Dong L. Diversity and influencing factors on spontaneous plant distribution in Beijing Olympic Forest Park. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 181: 157-168.
- [37] 张楠, 董丽, 王璇, 王阔. 北京城市生态廊道草本植物组成及分布格局. 中国园林, 2018, 34(6): 94-99.
- [38] Burton M L, Samuelson L J. Influence of urbanization on riparian forest diversity and structure in the Georgia Piedmont, US. *Plant Ecology*, 2008, 195(1): 99-115.
- [39] Burton M L, Samuelson L J, Pan S F. Riparian woody plant diversity and forest structure along an urban-rural gradient. *Urban Ecosystems*, 2005, 8(1): 93-106.
- [40] Healy A J. Seed dispersal by human activity. *Nature*, 1943, 151(3822): 140-140.
- [41] Auffret A G. Can seed dispersal by human activity play a useful role for the conservation of European grasslands?. *Applied Vegetation Science*, 2011, 14(3): 291-303.
- [42] 杨景成, 王光美, 姜闯道, 赵洪涛, 张志东. 城市化影响下北京市外来入侵植物特征及其分布. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1857-1862.
- [43] Vakhlamova T, Rusterholz H P, Kanibolotskaya Y, Baur B. Effects of road type and urbanization on the diversity and abundance of alien species in roadside verges in Western Siberia. *Plant Ecology*, 2016, 217(3): 241-252.