

哈尔滨城市道路绿地草本层自生植物多样性分布特征及影响因素

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Spontaneous Vegetation Diversity in the Herbaceous Layer of Urban Road Green Spaces in Harbin

胡远东^{1,2*} 王永芳¹ 赵聪聪¹ 刘笛阳¹
HU Yuandong^{1,2*} WANG Yongfang¹ ZHAO Congcong¹ LIU Diyang¹

(1.东北林业大学园林学院, 哈尔滨 150040; 2.黑龙江省园林植物种质资源开发与景观生态修复重点实验, 哈尔滨 150040)
(1. School of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, China, 150040; 2. Key Laboratory of Plant Resources Development and Landscape Ecological Restoration in Heilongjiang Cold Region, Harbin, Heilongjiang, China, 150040)

文章编号: 1000-0283(2025)11-0004-10
DOI: 10.12193/j.laing.2025.11.0004.001
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-07-07
修回日期: 2025-09-16

摘要

城市道路绿地是城市生态系统的重要组成部分, 具有降低噪声、净化空气和维持生物多样性等多种生态功能。城市道路绿地自生植物凭借其独特的自然属性, 对维持城市生物多样性发挥着不可忽视的作用。以哈尔滨红博广场为城市中心, 划定6 km宽的“十”字样带为研究靶区, 采用均匀取样法和典型取样法, 共设置1 213个样方, 全面开展草本层自生植物多样性调查, 并解析不同城市化水平、道路等级和生境类型的自生植物物种多样性组成、分布特征及其关键影响因素。结果表明: (1) 共记录草本层自生植物60科203属296种, 其种子扩散方式以自体扩散为主, 水扩散种类数量最少; (2) 中、低城市化水平区域自生植物的 α 多样性显著高于高城市化水平区域, 城市主干道与次干道的 α 多样性水平相似且均显著高于支路, 路侧绿带与分车绿带的 α 多样性水平相似, 且均显著高于行道树绿带; (3) 种子扩散方式对自生植物多样性的分布格局具有显著影响, 不同城市化水平和道路等级上的风扩散植物 α 多样性差异显著, 不同生境类型的自体扩散植物 α 多样性差异显著。本研究旨在为城市道路绿地低成本维护、生物多样性维持以及城市生态建设提供参考依据, 以期通过合理留存和利用自生植物, 能最大限度地发挥城市道路绿地的生态服务功能。

关键词

城市道路绿地; 扩散限制; 生境过滤; 城市化水平; 道路等级; 自生植物多样性

Abstract

Urban road green spaces constitute a vital element of the urban ecosystem, offering numerous ecological services, including noise reduction, air purification, and the preservation of biodiversity. Spontaneous plants in urban road green spaces are of considerable importance to the urban ecosystem owing to their distinctive natural characteristics. This research centers on a 6 km-wide cross-shaped zone around Hongbo Square in Harbin as the designated study area. Employing systematic and representative sampling techniques, a total of 1 213 sample plots were established to examine the spontaneous vegetation within the herbaceous layer. The study analyzes the species diversity composition, distribution characteristics, and main influencing factors of spontaneous plants across different urbanization levels, road grades, and habitat types. The results indicate that: (1) A total of 296 species of spontaneous herbaceous plants, belonging to 203 genera and 60 families, have been documented. Autochory (self-dispersal) was the dominant seed dispersal mode, while hydrochory (water dispersal) was the least common. (2) The α -diversity in medium and low urbanization areas was significantly higher than in high urbanization areas. The α -diversity levels of urban arterial roads and secondary roads were similar and both significantly higher than that of branch roads. The α -diversity levels of roadside green belts and median green belts were identical and both significantly higher than that of street tree green belts. (3) Seed dispersal modes had a significant impact on the distribution patterns of spontaneous plant diversity: the α -diversity of anemochorous (wind-dispersed) plants varied significantly across different urbanization levels and road grades. In contrast, the α -diversity of autochorous plants differed significantly across different habitat types. The findings of this study aim to provide insights for the low-cost maintenance of urban road green spaces, biodiversity conservation, and urban ecological development. By reasonably preserving and utilizing spontaneous plants, the ecological service functions of urban road green spaces can be maximized.

Keywords

urban road green spaces; dispersal limitation; habitat filtering; urbanization level; road hierarchy; spontaneous vegetation diversity

基金项目:

黑龙江自然科学基金“黑龙江城市植被多样性格局及成因研究”(编号: LH2023E007); 人力资源和社会保障部外国专家重点支撑项目“可持续城市的生物多样性保护与实践项目”(编号: D202400093)

胡远东

1977年生/男/湖北宜昌人/博士/副教授、博士生导师/研究方向为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

王永芳

2000年生/女/河北平泉人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计、城市生物多样性

赵聪聪

1989年生/女/吉林桦甸人/在读博士研究生/研究方向为风景园林规划与设计、城市生物多样性

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: huyuandong@nefu.edu.cn

城市化进程的发展导致野生动植物栖息地不断丧失与破碎化,引发生物多样性持续降低、外来物种入侵、生物均质化等一系列生态环境问题,特别是在快速城市化区域,这一影响尤为明显^[1-3]。自生植物丰富了城市植被多样性组成,通过其物种和功能多样性,在城市生态系统中承担着“生物多样性载体—环境适应者—生态服务提供者”的多重角色^[4]。本研究中的自生植物(spontaneous vegetation)是指在城市环境中未经人工刻意引种、依靠自然繁殖和更新的植物,通常被称为“野生植物”或“杂草”^[5-6]。自生植物能够通过自然演替形成复杂的植被结构,其稳定坚韧的生长特性,有助于以较低成本塑造持续演替的自然景观。是构建低维护与高生物多样性生境的高性价比之选^[7]。

目前国内关于自生植物的研究已经比较成熟,普遍集中于公园绿地、河流廊道、建筑墙体、废弃地等生境类型,大多数研究聚焦于自生植物多样性分布格局及其成因、自生植物对环境的响应机制与适应策略、自生草本植物生态位和种间联结等方面^[3,7-9]。道路绿地作为城市绿地系统的重要组成部分,具有重要的生态价值与美学价值,凭借其线性特征,能够有效促进了生态连通性,对维持或增加区域生物多样性具有重要意义^[10]。有研究发现,道路绿带是所有城市用地类型中,物种丰富度最高的区域,聚集了大量常见耐胁迫物种,并承载和支撑着基础生态功能,在城市多尺度多样性网络中的作用具有研究价值^[11]。

哈尔滨的道路绿地规划受到历史因素影响,呈现出有别于常规道路的“非规整”特征,且城区普遍存在的粗放式管理,在客观上为自生植物提供了相对稳定的生长空间。据此,本研究将哈尔滨道路绿地作为研究对象,旨在系统分析其自生植物在不同城市化

梯度、道路等级以及生境类型的组成特征与空间分布模式,重点探究不同种子扩散方式的自生植物在道路绿地的分布规律。本研究不仅有助于揭示哈尔滨市道路绿地自生植物的分布格局及其驱动机制,还能为丰富城市植被生态学理论、指导低维护景观设计以及推动低成本绿地的科学管理提供重要的数据支持和指导依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

哈尔滨市(44° 04'—46° 40' N, 125° 42'—130° 10' E)地处中国黑龙江省西南部,是中国纬度最高的省会城市,同时也是中国冬季最寒冷的省会城市。该地区属于中温带大陆性季风气候,气候特征表现为冬季酷寒漫长、夏季温热短促、春秋短暂多变。哈尔滨夏季平均气温22.3℃,冬季平均气温-14.6℃;年降水量平均值在494~651 mm,主要集中在7~8月,夏季降水占全年降水的66%。哈尔滨市道路系统受19世纪末俄罗斯殖民时期城市规划的影响,形成了以“放射状+方格网”为主的欧式路网络格局,具有宽马路、大广场的典型特征^[12]。加之道路绿地养护管理粗放,这些特征共同为自生植物提供了理想的生长空间,而哈尔滨对于道路绿地的植物规划的重点,主要聚集在灌木层和乔木层,草本层主要是由车前、藜等自生植物组成。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置

本研究根据建设用地所占比例对城市边界进行划定。利用ArcGIS 10.7的重分类法将2020年哈尔滨的土地利用类型进行重分类,将其解译为城市建设用地、耕地、植被、水体以及裸地等5个土地覆盖类型。将解译后

的图像运用Fragstats软件中移动窗格法(窗格大小为1 km×1 km)将建设用地比例≥30%的窗格进行聚类,形成城市边界^[13]。再以哈尔滨红博广场作为城市中心,在哈尔滨市范围内画宽度为6 km的十字带,将十字带和城市边界重合的部分作为调研范围。

结合百度街景在Google Earth的地图上标注道路等级、绿地类型、种植形式和优势乔木,利用分层取样和随机取样,综合考虑道路等级、绿带类型、种植形式等因素,尽可能选择不同的调查样点,在实地踏勘的过程中,对调查样点根据实际情况进行微调,最终选择268个调查样点(图1)。

在每个样点选择一个面积为400 m²乔木样方或面积为25 m²的灌木样方。记录每个样方中生长的所有植物种类,并采用均匀布样法,在每个样点中心及四角各设置一个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物种名称、高度、盖度、是否自生等样方信息,本次共设置小样方1 213个^[14]。

1.2.2 生境类型划分

样方内自生植物生境按照不同的城市绿带类型划分为行道树绿带、路侧绿带和分车绿带三大类,参考《城市道路绿化规划与设计规范》(CJJ 75-1997),并在此基础上结合道路绿地植物的种植带的形式划分为10类微生境^[15](表1)。

1.2.3 城市化水平指数计算

运用ArcGIS 10.7软件中的最大似然法,将2020年分辨率30 m的Landsat系列卫星影像解译为城市建设用地、耕地、植被、水体以及裸地5个土地覆盖类型。以每个样点中点为中心、500 m为半径,计算样点周边不透水率(即建设用地面积占比)^[14]。因为在不同城市等级

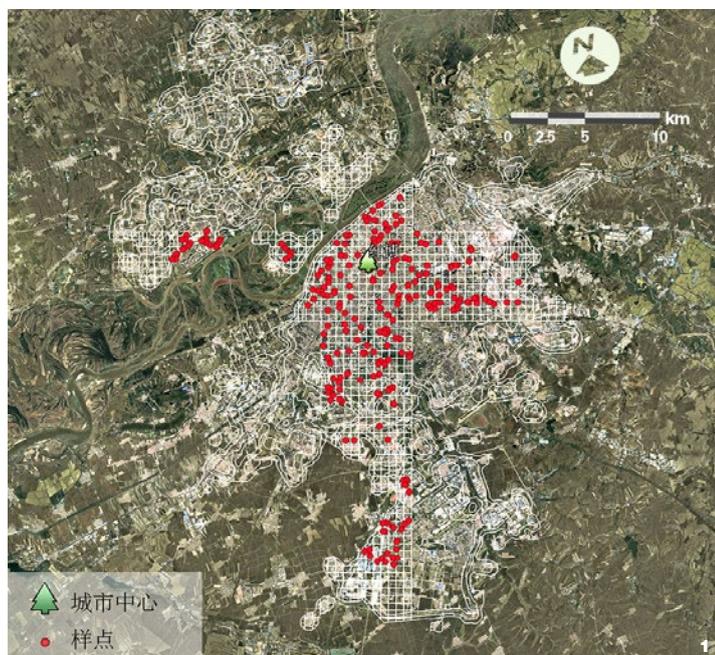


图1 样点布置
Fig. 1 Sampling sites

上的调研到的样点数量不均匀，所以结合样点的数量，将样点按周边不透水率0~59%、60%~69%、70%~79%、80%~89%、90%~100%的数值划分为I~V5个等级。

1.3 数据处理

(1) 频度计算见公式(1)。

$$F = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中， F 为物种的频度， n 为某一物种出现的样方数量和， N 为样

方数量总和。

(2) 重要值。采用重要值 (important value) 作为评价各物种优势程度的指标，物种重要值是样方群落中目标物种优势程度的综合体现，计算见公式(2)。

$$P_i = \frac{f_i + c_i + h_i}{3} \times 100\% \quad (2)$$

式中， P_i 为物种*i*的相对重要值， f_i 为物种*i*的相对频度； c_i 为物种*i*的相对盖度； h_i 为物种*i*的相对高度。

(3) α 多样性指数利用R4.4.3软件中的Vegan包进行计算，见公式(3)–(5)。

$$R = S \quad (3)$$

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

$$J = \frac{H}{\ln(S)} \quad (5)$$

式中， R 为物种丰富度指数， S 为所在样方的物种数量和，采用Patrick指数，直观表示目标样方中的植物种类数； H 为Shannon-Wiener多样性指数，该指数假设在群落中对个体进行随机取样，个体出现的不确定性。数值越大，则表示群落信息量越大； J 为Pielou均匀度指数，该指数反映群落中物种个体分布的均匀情况。

不同城市化水平下、不同道路等级中以及不同生境间 α 多样性的差异比较均采用Kruskal-Wallis差异性检验，检验过程利用R 4.4.3软件中的Rstax包计算，检验结果利用ggplot2包与ggpubr包进行可视化^[14]。自生植物的科属种组成、物种来源、生活型、发生方式、扩散方式等信息主要参考《中国植物志》《黑龙江省植物志》《中国入侵植物名录》《中国杂草原色图鉴》《黑龙江省主要乡土树种名录》《黑龙江省主要乡

表1 生境类型划分结果
Tab. 1 Classification of habitat types

生境大类 Habitat type	生境编码 Habitat code	微生境类型 Micro-habitat type	微生境编码 Micro-habitat code	生境特征描述 Description of habitat characteristics
行道树绿带	S	树带式	S-TSP	种植连续乔木的线性绿地
		绿带式	S-GBP	种植连续灌木或草本的线性绿地
		树池式	S-TPS	独立树池绿化单元
		花台式	S-RPS	抬升式种植池的绿地
路侧绿带	R	树带式	R-TSP	道路外侧种植连续乔木的绿地
		绿带式	R-GBP	道路外侧以灌木或地被为主的绿地
		花台式	R-RPS	道路外侧抬升式种植池的绿地
分车绿带	M	树带式	M-TSP	道路分隔带上种植连续乔木的绿地
		绿带式	M-GBP	道路分隔带以灌木或地被为主的绿地
		树池式	M-TPS	道路分隔带独立树池绿化单元

土草种名录》，及中国植物物种信息数据库、SID数据库进行确定^[14]。

2 结果与分析

2.1 城市道路绿地草本层自生植物的物种组成特征

本次共记录草本层自生植物296种，隶属于60科、203属，从科属构成上看，多种科植物有菊科(Asteraceae)、禾本科(Poaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、豆科(Fabaceae)、十字花科(Brassicaceae)，包括88属142种植物，其中菊科植物最多，包括35属、64种植物，是道路绿地草本自生植物中的优势科(表2)。从生活型来看，道路绿地自生植物以一年生草本为主，共90种，占比30.41%，其次为一、二年生草本，占比74.3%。从物种来源上看，乡土植物占据道路绿地自生植物的主导地位，共144种，占比48.65%，其次为国内外来植物，占比24.32%，入侵植物占比14.53%。从植物不同的授粉方式来看，道路绿地自生植物，主要以虫媒授粉为主，共205种，占比69.26%，其次为风媒授粉，占比24.32%；而在种子的扩散方式中，扩散型为自体扩散的植物占据优势地位，共172种，占比58.11%；其次为风扩散的植物，占比为23.99%，水扩散的植物占比最低，仅有9种，占比3.04%(表3)。

2.2 不同城市化水平道路绿地自生植物多样性的分布特征

哈尔滨市整体城市化范围呈现出典型的圈层式扩展格局，城市化程度总体上由核心区向城市边缘梯度递减。松花江横贯市区，将城市自然分割为江南、江北两大片区，其沿江区域城市化水平相对偏低。同时，受区域发展不均衡的影响，城市范围内形成了多个具有次级辐射能力的城市化中心。

不同城市化水平自生植物多样性分布特征如图2所示。道路绿地草本层自生植物的Patrick丰富指数和Shannon-Wiener指数中位数在不同的城市化水平中I>II>III>IV>V，且在不同城市化水平上的差异极显著($p < 0.0001$)，其中，城市化水平I和城市化水平V之间的差异最显著($p \leq 0.0001$)，城市化水平为I和III与城市化水平为II和IV的差异性较小($p \leq 0.05$)，相邻城市水平的差异性不显著($p > 0.05$)。Pielou均匀度指数在不同的城市水平中差异较小，但仍然表现出显著性差异($p < 0.05$)。Pielou均匀度指数的城市化水平I和城市化水平V差异不显著($p > 0.05$)，城市化水平I和II、城市化水平III和IV、城市化水平IV和V的差异不显著($p > 0.05$)。

2.3 不同等级道路绿地自生植物多样性的分布特征

道路绿地草本层自生植物的Shannon-Wiener

指数中位数呈现出MRD>SRD>BRD(主干路>次干路>支路)，其中Patrick丰富指数、Shannon-Wiener指数在不同道路等级的差异极显著($p < 0.0001$)，Pielou均匀度指数不同等级的城市道路中差异较小，但仍然显著($p = 0.014$)。Pielou均匀度指数在支路与主干道和支路与次干道之间差异不显著($p > 0.05$)，在主干道和次干道之间差异明显($p < 0.05$) (图2)。

2.4 不同生境类型自生植物多样性的分布特征

在不同的道路绿地生境类型中(图2)，草本层自生植物的Patrick丰富指数、Shannon-Wiener指数中位数呈现出M>R>S(分车绿带>路侧绿带>行道树绿带)，且在不同的绿地生境类型之间，差异性极为显著($p < 0.0001$)，R和M的Pielou均匀度指数相同($p > 0.05$)。

从不同微生境草本层自生植物的Patrick丰富指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数分析来看，微生境的差异性更为显著

表2 植物科属表
Tab. 2 Taxonomic list of plant families and genera

类别 Type	代表科 Representative families	属数/个 Number of genus	属占比/% Proportion of genus	物种数/个 Number of species	物种数占比/% Proportion of species
多种科 (种数≥14)	菊科、禾本科等	88	47.35	142	47.97
中等科 (种数5~13)	唇形科、苋科等	39	19.21	64	21.62
寡种科 (种数2~4)	锦葵科、木樨科等	55	27.09	69	23.31
单种科 (种数=1)	莎草科、松科等	21	10.35	21	7.10
总计	60个	203	100	296	100

表3 草本层自生植物的主要扩散方式
Tab. 3 Dominant dispersal syndromes of spontaneous herbaceous flora

种子扩散方式 Dispersal syndrome	物种数/个 Number of species	物种数占比/% Proportion of species	代表物种 Representative species
自体扩散	172	58.11	苘麻 (<i>Abutilon theophrasti</i>)
风扩散	71	23.99	芦苇 (<i>Phragmites australis</i>)
动物扩散	44	14.86	龙葵 (<i>Solanum nigrum</i>)
水扩散	9	3.04	天胡荽 (<i>Hydrocotyle sibthorpioides</i>)

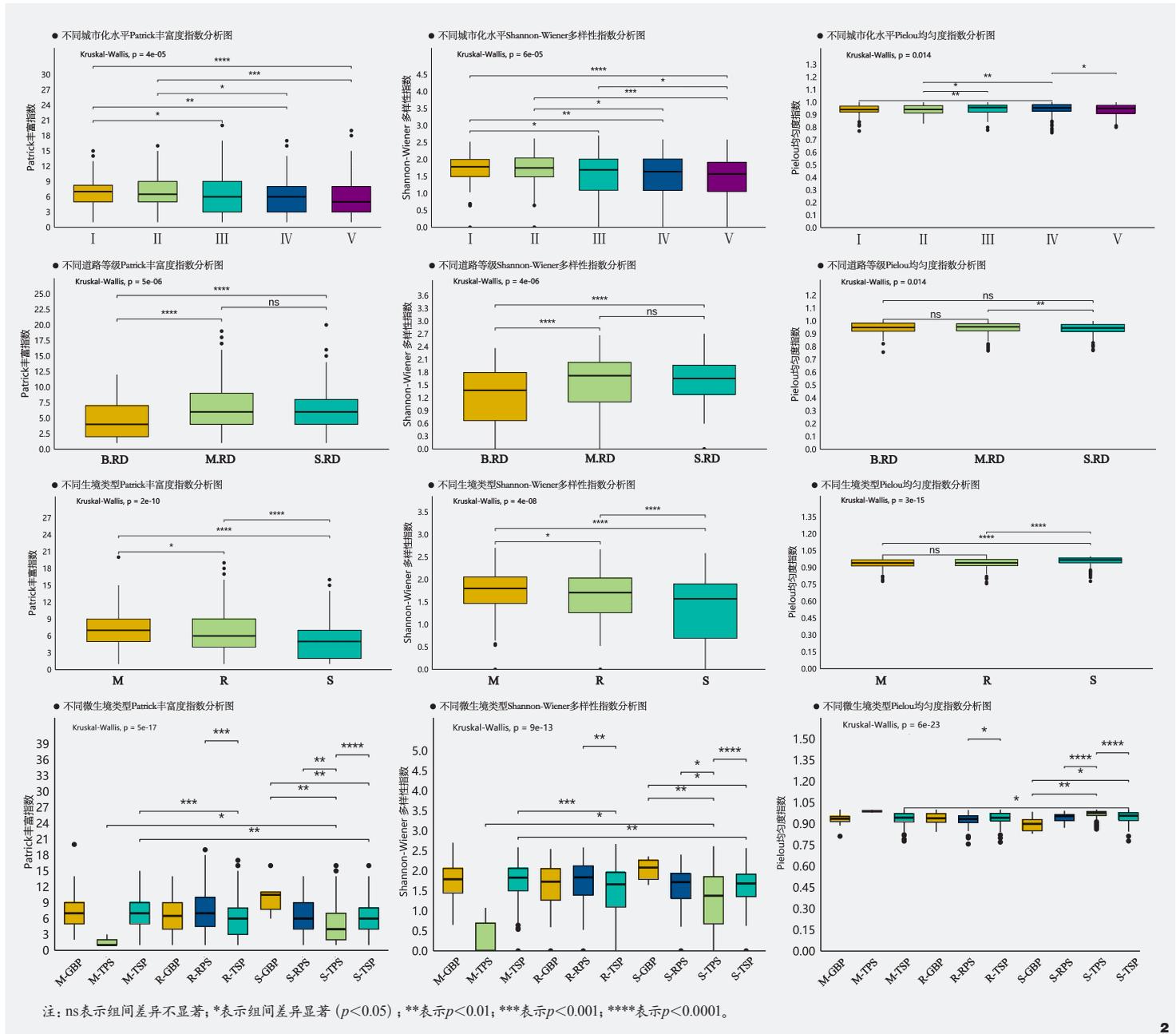


图2 不同分类条件下草本层自生植物 α 多样性
Fig. 2 α -Diversity of spontaneous herbs under varying classifications

($p < 0.05$), 表现出不同绿地类型之间的差异性小于不同种植形式之间的差异性的特征。各种微生境的Patrick丰富指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数的中位数, 在三类大生境中, GBP(绿带式)和RPS(花台式)比

较高, TSP(树带式)次之, TPS(树池式)最低。不同的种植类型中, Patrick丰富指数、Shannon-Wiener多样性指数的差异性中, TSP(树带式)差异性较高, GBP(绿带式)差异性较低, 不同绿地类型的RPS(花台式)没有差异。

2.5 不同种子扩散方式的自生植物 α 多样性

2.5.1 不同城市化水平不同种子扩散方式的自生植物 α 多样性

如图3所示, 种子扩散方式以风扩散为主的自生植物的Patrick丰富指数、Shannon-Wiener

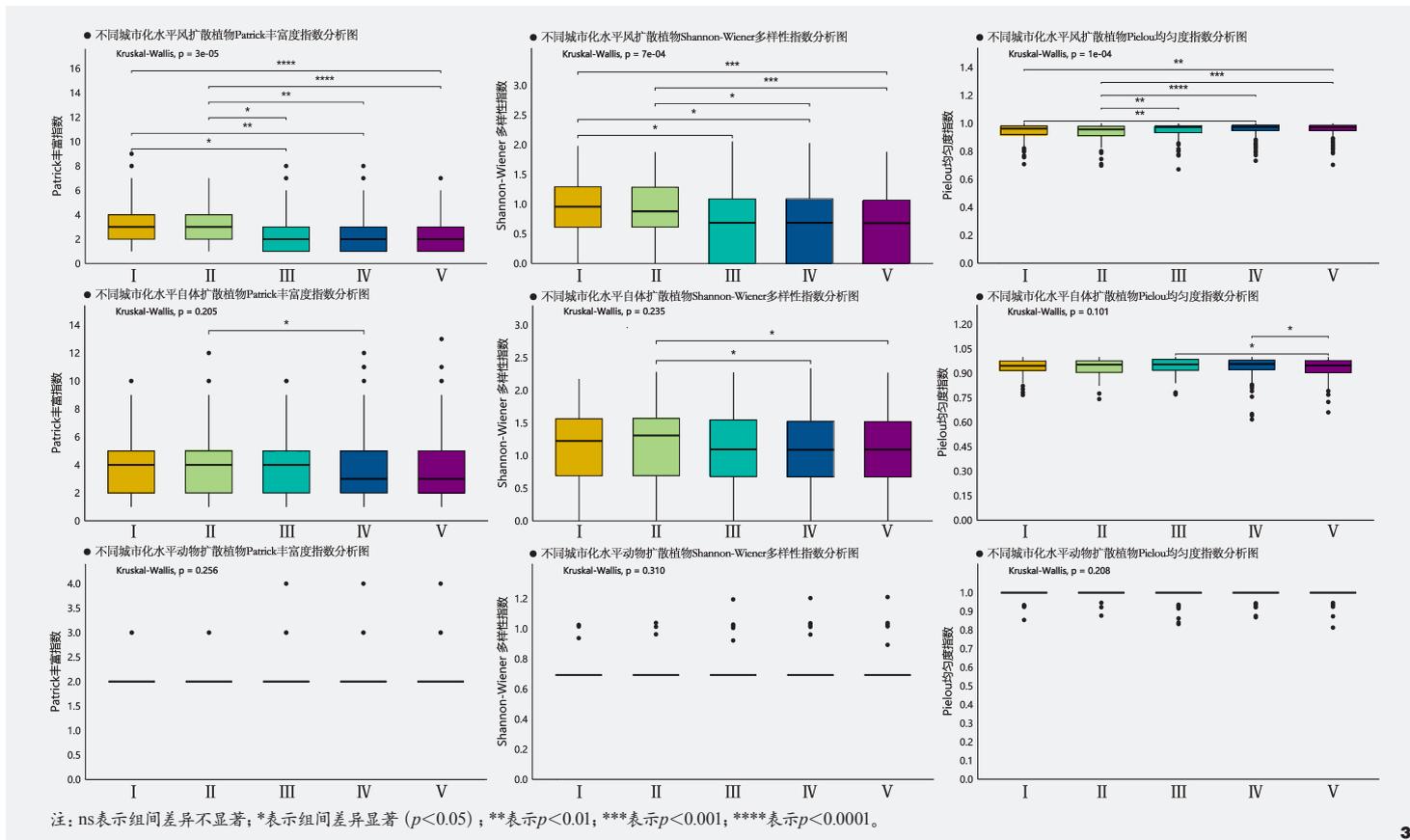


图3 不同城市化水平不同种子扩散方式的草本层自生植物 α 多样性
Fig. 3 Urbanization-dispersal interaction effects on α -diversity of spontaneous herbs

指数和Pielou均匀度指数, 在不同城市水平中呈现出 I > II > III > IV > V 的趋势, 差异性与总体植物的差异性相似, 都表现出了显著性差异 ($p < 0.001$)。而种子扩散型为自体扩散和动物扩散的植物, 在不同城市水平的Patrick丰富指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数差异性不显著 ($p > 0.05$)。

2.5.2 不同等级道路不同种子扩散方式的自生植物 α 多样性

种子扩散型以风扩散为主的植物在不同道路等级的Patrick丰富指数、Shannon-Wiener指数显示出极显著的差异 ($p < 0.0001$) (图4), 而Pielou均匀度指数差异性不显著 ($p > 0.05$)。此

外, 种子扩散型为自体扩散和动物扩散的自生植物的Patrick丰富指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数的差异性不显著 ($p > 0.05$)。

2.5.3 不同道路生境不同种子扩散方式的自生植物 α 多样性

种子扩散型以自体扩散为主的植物在不同道路绿地类型的Patrick丰富指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数的差异性显著 (图5), 自体扩散的Patrick丰富指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数的中位数呈现出 $M = R > S$ 。而种子扩散型以风扩散为主的植物仅在Pielou均匀度指数上存在差异 ($p < 0.001$), Patrick丰富指数、Shannon-Wiener指数的差异性

不显著 ($p < 0.05$)。以动物扩散为主的植物的Patrick丰富指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数的差异性不显著 ($p < 0.05$)。

3 讨论

3.1 城市化水平和道路等级的城市道路绿地自生植物多样性分布特征及其影响

草本自生植物多样性与城市化发展紧密相关, 道路绿地自生植物多样性呈现出显著的变化趋势, 从城市中心到城郊, 草本自生植物多样性指数呈现出随着城市不透水率的升高而降低的规律, 这与McKinney等的研究结果相似^[616], 道路绿地上出现这样的现象可能是由于随着城市化程度的加深, 城市道路

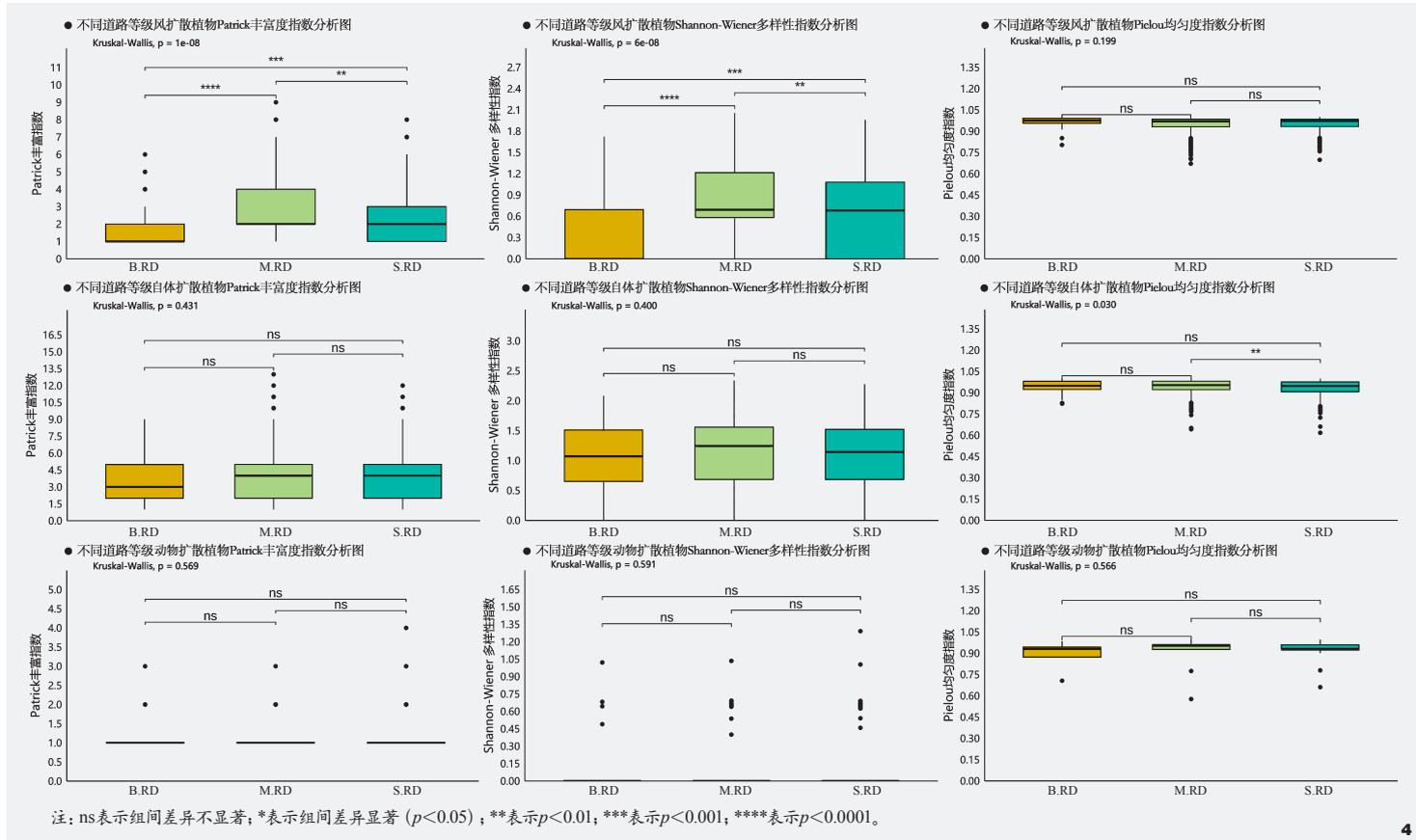


图4 不同等级道路不同种子扩散方式的草本层自生植物 α 多样性
Fig. 4 Road hierarchy-dispersal interaction effects on α -diversity of spontaneous herbs

绿地原本的生态系统遭到破坏，自然生境被以观赏为主的城市人工绿地所取代，进而导致城市道路绿地自生植物多样性的降低。除此之外，在快速的城市化进程之下，景观破碎化和一些其他因子的相互作用，影响了道路绿地上草本自生植物的分布空间。城市化进程对自生植物多样性的胁迫效应：从低到高城市化，多样性指标系统性衰减，且丰富度受损最严重。

植物的 α 多样性指数在不同的道路等级之间差异显著，不同道路等级对自生植物多样性的影响呈现出丰富度>多样性>均匀度的结果。Patrick丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数在不同的道路等

级中呈现出M.RD > S.RD > B.RD (主干路>次干路>支路)的关系，这个结果与前人研究略有不同^[17]，可能与不同城市对于道路绿地的建设情况不同，哈尔滨市支路上绿地的空间有限，多为树池形式，且管理粗放，生境面积有限且可能受周边环境挤压，导致物种数较少。而主干道和次干道因人工绿化投入引入更多物种，且主干路和次干路的道路结构相似，导致主干路和次干路之间的多样性差异性不显著。

3.2 生境过滤和扩散限制对城市道路绿地自生植物多样性分布格局的影响

生境过滤作为重要的生态过程，是指

环境条件(如地形、干扰类型等)对植物物种的筛选作用，只有具备特定适应性状的物种才能在特定生境中存活^[19]。本研究通过比较不同扩散方式(风传播、动物传播和自体传播)植物群落不同城市化水平和道路等级中的分布特征，揭示了环境对物种组成的过滤效应。研究发现，风传播植物的多样性指数在不同城市化水平和道路等级间差异最为显著，其Patrick指数和Pielou指数在各类别间均表现出显著差异，Shannon指数在不同道路等级间也存在显著差异。这种差异格局表明，风传播植物对环境变化具有高度敏感性，其传播过程被动依赖气流的特性使其容易受到环境障碍(如建筑物)的传播限制，

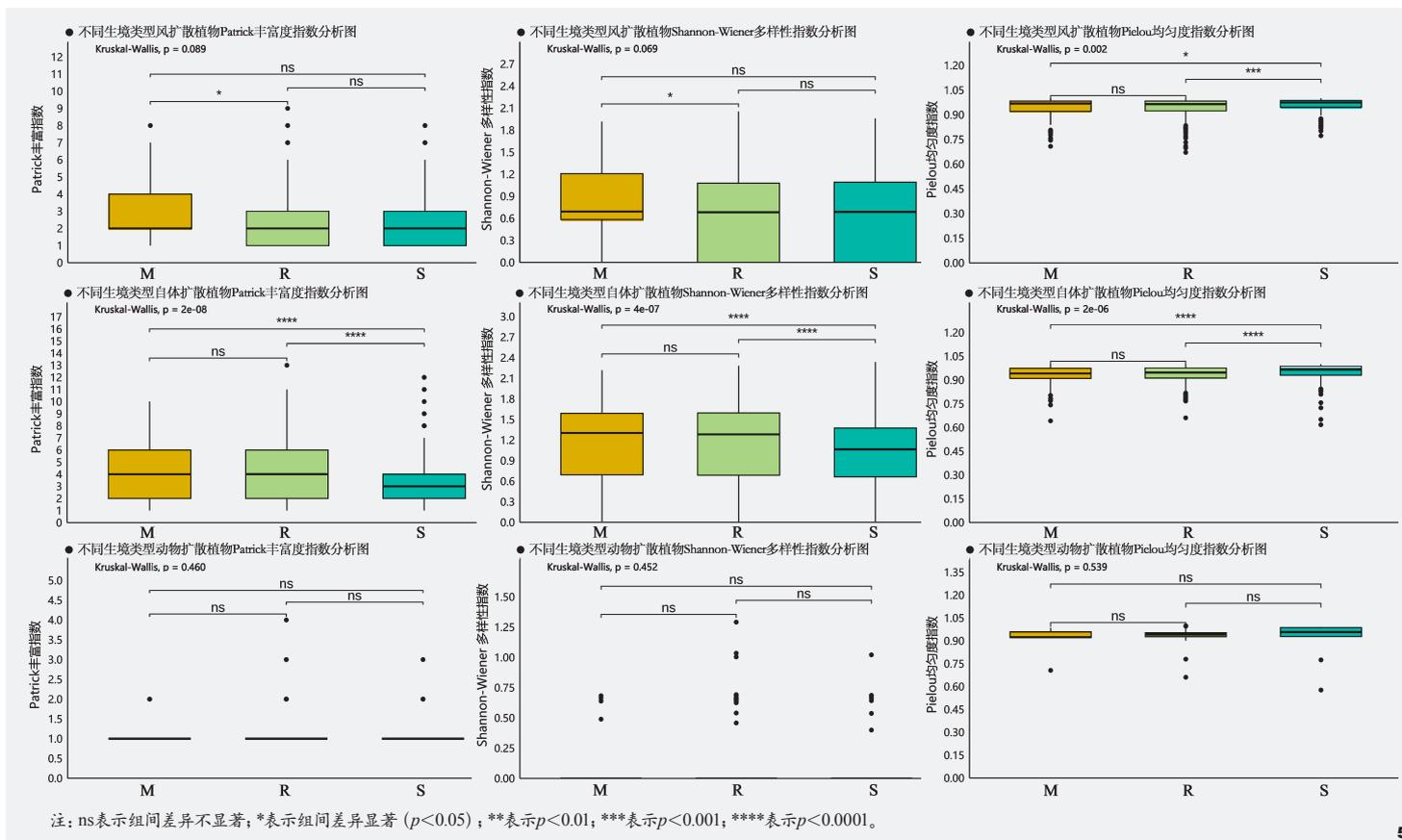


图5 不同生境下的不同种子扩散方式的草本层自生植物的 α 多样性
Fig. 5 Habitat-dispersal interaction effects on α -diversity of spontaneous herbs

形成明显的“环境筛”效应^[19]。环境梯度通过过滤风传播植物的特定功能性状(如种子重量)来塑造群落结构,而人类活动(如道路建设)则通过改变生境物理条件进一步强化了这种过滤效应。

扩散限制作为另一个关键机制,其本质是植物因传播方式与环境阻力的交互作用而无法有效到达或定居于适宜生境,从而导致多样性分布格局的空间异质性^[20]。研究发现,风传播植物在主干道的Patrick丰富度指数显著高于次干道,表明道路切割形成的物理屏障直接限制了风力传播效率。同时,Shannon多样性指数的降低反映了高干扰环境下物种的丢失和群落的简化。在不同城市

化水平中,风传播植物的所有多样性指数均呈现极显著差异,说明城市化梯度通过过滤风传播物种的适应性状进一步强化了扩散限制。扩散限制和生境过滤双重制约的形成,源于风传播植物依赖被动气流传播的特性,这使其易受道路物理阻隔和生境碎片化的影响。相比之下,自体传播和动物传播植物的多样性指数在不同城市化水平和道路等级中无显著差异。自体传播植物虽然在不同生境类型中的所有多样性指数均呈现极显著差异,但这种差异主要源于其短距离传播特性导致的初始传播范围限制。种子落地后,自体传播植物能够通过局域适应缓解环境压力,因此受干扰的影响相对较弱,这种多

样性格局主要受“母树效应—微生境适配—资源竞争”三级机制驱动的局域尺度空间限制所主导^[21]。动物传播植物在所有研究场景下均未表现出显著的多样性差异,其Pielou均匀度尤其稳定,这表明动物传播者(如鸟类)的定向投放行为能够有效优化种子分布,克服物理障碍。动物传播依赖高移动性传播者的特性,使其能够通过主动选择适宜微生境来抵消景观阻力,形成“生物介导的扩散补偿效应”^[22]。

综上,扩散限制通过“传播一定居”双阶段作用塑造植物多样性格局。在这一过程中,风传播系统对道路切割最为敏感,而动物传播则展现出最强的环境韧性。这些发现

为深入理解城市道路绿地植物群落的构建机制提供了重要依据，也为城市绿地设计和生物多样性保护提供了理论支撑。

3.3 哈尔滨城市道路绿地自生植物多样性提升与管理策略

3.3.1 城市空间规划策略

基于城市生态连通性与风媒植物传播特性，建议在哈尔滨市的整体规划中，将道路系统与沿线绿地统一考量并进行协同设计，着重构建连续贯通的通风廊道结构。在满足交通功能与工程条件的前提下，应科学优化道路红线宽度，并充分挖掘和利用中央分隔带、路侧绿地等道路绿带的生态潜力，系统性整合形成网络化的城市绿色廊道系统，使其成为风媒植物繁殖体（花粉、种子）远距离扩散的有效路径。

同时，需系统梳理城市建设的空间布局，尤其是在主导风向廊道区域及风媒植物栖息地与扩散路径上，严格控制建筑开发高度与密度，以显著降低其形成的阻风效应对扩散气流的物理阻碍。

3.3.2 道路生境营造策略

营造城市内生境斑块之间的连接通道，减少城市生境破碎化对生物多样性造成的影响^[23,24]。实现这一目标，关键在于最大化利用道路空间创造连续且受保护的土壤生境。在满足道路基本需求的前提下，优先设置足够面积和连续性的绿地空间。空间允许时，首选绿带式 and 树带式结合宽阔台式的种植形式，这能提供最大的土壤基质和乡土植被覆盖，为自生植物创造稳定生长的空间，并支撑更丰富的土壤微生物和小型动物群落，形成更具生态价值的微型生境斑块。当道路空间受限时，策略需转为优化有限空间的生

态质量：优先选择小型台式种植池，与独立树池相比，小型台式种植池能提供更多的土壤体积和植物配置可能性，进而形成有效的小型栖息地。当最终只能采用树池形式时，必须实施干扰隔离策略——通过在树池边缘设置护边盖板或透水格栅，将其与人行道通行区物理分割开来，此举核心目的在于最大限度地减少人为踩踏、杂物堆积等人类活动对树池内脆弱土壤环境、根系以及小型生物的干扰破坏。

将地面土壤、植被覆盖和树冠层视为生态廊道的载体，这些系统性的生境营造策略，包括优化种植形式、扩大土壤生境、引入乡土植被、实施隔离保护，其核心最终目标始终是强化道路绿地的生物多样性承载与连通功能，使之成为野生动植物（特别是传粉昆虫、鸟类）迁移的通道和暂栖的小型栖息地，有效串联城市内部的分散生境斑块，从而切实缓解生境破碎化带来的负面影响，提升城市整体生物多样性水平。

3.3.3 养护管理策略

城市化进程带来了高强度的人类活动、剧烈的土地利用变化以及环境污染等复合干扰，也间接改变了局部气候（如气温升高、降水模式改变），这些影响共同导致了城市生物多样性的显著下降^[25]。为有效应对这一挑战，对道路绿地的养护管理方式进行生态化转型至关重要，目标需从追求规整划一的景观形式，转向为主动创造和维持更高的生物多样性水平。具体策略包括：

(1) 调整修剪制度以支持植物自然繁殖周期，例如结合道路绿地中乡土自生植物的物候特点，在其种子成熟期进行修剪并且保留修剪后的残枝，通过适度的人为扰动（如模拟自然干扰）来促进种子的有效扩散和定

植，并且种植吸引动物传播者的植物，促进动物扩散植物在道路定植。

(2) 改革目前普遍存在的“一刀切”式贴地修剪方式。这种过低的修剪高度不仅严重抑制了自生植物（包括潜在更新的幼苗）的生存与生长，对栽培植物亦是伤害性操作，并极易导致地表大面积裸露，加剧水土流失和生境退化。因此，应严格控制修剪高度，保留一定的植被覆盖层，为植物提供必需的生长空间、时间，保障其完成关键生活史阶段（如开花结果），这对于维持草本植物多样性及依赖其生存的小型动物（如传粉昆虫）至关重要。

(3) 引入减少人为干扰的辅助管理策略，如设置温馨提示性指示牌，引导行人避免踩踏绿地，从而有效降低践踏对土壤结构、植被及其中小型生物造成的持续性破坏。通过这些针对性的养护管理策略转型，能够在常规的绿地维护框架内，显著提升道路绿地作为小型栖息地的生态价值，有效缓冲城市化负面影响，提升城市道路绿地区域生物多样性。

3.3.4 道路绿地裸露地表修复策略

针对城市道路绿地中因长期人为干扰（如过度踩踏等）形成的裸露地表，亟需采取主动生态修复措施以恢复其生态功能与景观价值。核心策略应打破土壤板结，引入乡土生命力，促进自然演替进程^[26]。建议首先对板结化区域进行适度松土并施加适量有机基质或缓释肥料，以改善土壤透气性、结构及基础肥力，为植物定植创造条件。在此基础上，优选并混播本地适应性强、耐旱耐磨且具有生态价值的自生乡土草本，通过“人工干预启动+自然力量主导”的模式，模拟并加速自然演替过程。所选自生乡土植

物凭借其对于城市生境的天然适应性，能更高效地定植、覆盖裸露地表，并形成结构相对稳定的微型植物群落^[14]。该修复措施不仅能迅速覆盖裸露土壤，有效减轻水土流失、扬尘问题，显著改善道路景观观感，更重要的是，通过引入多样化的本土植物资源，可为城市昆虫（尤其是传粉者）、土壤微生物及小型动物提供宝贵的食源、栖息地与繁殖空间，切实提升该区域生物多样性水平。这种低干预、低成本、高生态效益的修复方式，是恢复和增强道路绿地生态服务功能的优选路径。

4 结论

城市道路绿地是自生植物的重要栖息地，也是联通各生态系统的重要生态廊道。而自生植物是城市道路绿地生物多样性的的重要组成部分，本研究以哈尔滨城市道路绿地自生植物为研究对象，系统分析了生境过滤和扩散限制对植物群落多样性格局的影响机制，并探讨了提升城市道路绿地生物多样性的管理策略。研究结果显示，哈尔滨道路绿地自生植物的多样性指数在不同城市化梯度、道路等级及生境类型间均表现出显著差异。生境过滤通过环境条件对植物物种的适应性性状进行筛选，而扩散限制则源于物理屏障对种子传播效率的阻滞效应。风传播植物对环境变化最为敏感，其多样性指数在不同城市化水平和道路等级间的差异最为显著，表明其受生境过滤和扩散限制的双重制约最为强烈。相比之下，动物传播植物在所有研究场景下均未表现出显著差异，展现出较强的环境韧性；自体传播植物的多样性则主要受局域尺度空间限制的影响。

在低投入、低维护和可持续发展的背景下，道路绿地应重视自生植物的生态价值，

通过优化生境条件和实施科学的养护管理措施，有效提升生物多样性水平，增强生态系统稳定性。未来研究可对影响道路绿地生物多样性的因子进行研究，进一步量化空间限制强度，优化生境修复策略。本研究中只从物种层面对道路绿地上的种子扩散方式的不同植物多样性进行研究，并未进一步分析群落层面中植物的生态过程，在后续的研究中，可从群落角度出发，探究其更深层次的生态原理。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] SOANES K, TAYLOR L, RAMALHO C E, et al. Conserving Urban Biodiversity: Current Practice, Barriers, and Enablers[J]. *Conservation Letters*, 2023, 16(03): e12946.

[2] ZHU H Y, ZHAO C C, LI F N, et al. Distribution Patterns of Urban Spontaneous Vegetation Diversity and Their Response to Habitat Heterogeneity: A Case Study of Five Cities in Heilongjiang Province, China[J]. *Plants*, 2024, 13(21): 2982.

[3] 赵聪聪, 徐小钰, 胡远东. 城市公园自生植物多样性及其在异质生境中的分布特征[J]. *中国城市林业*, 2024, 22(05): 66-74.

[4] 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[J]. *生态学报*, 2024, 44(11): 4744-4757.

[5] GAO Z W, PAN Y J, SONG K, et al. Response and Sensitivity of Urban Plants with Different Seed Dispersal Modes[J]. *Nature Cities*, 2024, 2(01): 28-37.

[6] 刘昌, 邢昭华, 姚扬, 等. 北京城区自生植物分布格局及其影响因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(02): 544-558.

[7] YANG Y F, XU B, YU Q Q, et al. Distribution Pattern and Factors Influencing Spontaneous Plant Diversity in Different Wetland Habitats[J]. *Forests*, 2022, 13(10): 1678.

[8] 李晓鹏, 冯黎, 黄瑞, 等. 成都城区河流廊道自生植物的物种组成及其响应不同生境的多度格局[J]. *中国园林*, 2023, 39(08): 108-114.

[9] 李东宁, 李文, 董荣荣, 等. 哈尔滨城市工业废弃地自生植物多样性与分布特征[J]. *风景园林*, 2024(01): 112-120.

[10] CAO S X, SONG C, JIANG S W, et al. Effects

of Urban Greenway Environmental Types and Landscape Characteristics on Physical and Mental Health Restoration[J]. *Forests*, 2024, 15(04): 679.

[11] DEPARIS M, LEGAY N, CASTELLANOS A, et al. Linking Plant Diversity and Urban Uses at the City-block Scale to Inform Urban Planning[J]. *Land*, 2025, 14(01): 3.

[12] 徐璐思, 刘捷, 罗奇. 铁路影响下的近代哈尔滨城市建设初探(1896-1931)[J]. *华中建筑*, 2012, 30(08): 91-95.

[13] 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.

[14] 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[J]. *风景园林*, 2024, 31(06): 28-36.

[15] 陈天一, 赵聪聪, 文素洁, 等. 城市生境单元制图研究进展及其在生物多样性保护中的应用[J]. *风景园林*, 2022, 29(01): 12-17.

[16] MCKINNEY M L. Effects of Urbanization on Species Richness: A Review of Plants and Animals[J]. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(02): 161-176.

[17] 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.

[18] 刘延坤, 张鹤东, 汪洪明, 等. 森林群落生物多样性维持机制研究[J]. *中国林副特产*, 2024(03): 73-75.

[19] GERMAIN R M, MAYFIELD M M, GILBERT B. The “Filtering” Metaphor Revisited: Competition and Environment Jointly Structure Invasibility and Coexistence[J]. *Biology Letters*, 2018, 14(08): 20180460.

[20] 王明慧, 陈昭铨, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林不同种子扩散方式的优势种空间点格局分析[J]. *生物多样性*, 2023, 31(09): 86-95.

[21] MARQUARD E, WEIGELT A, ROSCHER C, et al. Positive Biodiversity-Productivity Relationship Due to Increased Plant Density[J]. *Journal of Ecology*, 2009, 97(04): 696-704.

[22] MUÑOZ M C, SCHAEFER H M, BÖHNING-GAESE K, et al. Importance of Animal and Plant Traits for Fruit Removal and Seedling Recruitment in a Tropical Forest[J]. *Oikos*, 2017, 126(06): 823-832.

[23] 沈存, 赵鸣. 不同尺度下植物多样性原则在城市道路绿地中的应用策略[J]. *中国城市林业*, 2023, 21(05): 131-137.

[24] 李如辰. 北京市道路生态廊道植物多样性及景观特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.

[25] 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[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2025, 45(04): 132-141.

[26] PAVAO-ZUCKERMAN M A. The Nature of Urban Soils and Their Role in Ecological Restoration in Cities[J]. *Restoration Ecology*, 2008, 16(04): 642-649.