

DOI: 10.20103/j.stxb.202408231998

尤其,张永才,木志强,代挽玉,闫倩如,商妞,尤俊,周佩,孙超,刘洋,栗燕.郑州不同城市生境自生草本植物群落功能多样性与谱系结构特征.生态学报,2025,45(18): - .

You Q, Zhang Y C, Mu Z Q, Dai W Y, Yan Q R, Shang N, You J, Zhou P, Sun C, Liu Y, Li Y. Functional diversity and phylogenetic structure characteristics of spontaneous herb communities in different urban habitats of Zhengzhou. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(18): - .

郑州不同城市生境自生草本植物群落功能多样性与谱系结构特征

尤 其¹, 张永才², 木志强³, 代挽玉¹, 闫倩如¹, 商 妞¹, 尤 俊⁴, 周 佩¹, 孙 超¹, 刘 洋¹, 栗 燕^{1,*}

1 河南农业大学风景园林与艺术学院, 郑州 450002

2 新乡市水系景观服务中心, 新乡 453000

3 喀什大学建筑学院, 喀什 844000

4 武汉市工业科技学校, 武汉 430080

摘要:城市中自发生长的草本植物是城市生物多样性的重要组成部分,而城市生境又是自生草本植物重要的载体。采用系统取样法共设置 65 个 1 km×1 km 采样网格,调查分析了郑州不同城市生境类型中自生草本植物群落功能多样性和谱系结构的差异,并探讨影响其变化的环境因素。结果表明:(1)共记录自生草本植物 291 种,隶属于 46 科 167 属,且菊科和禾本科的物种数在各类城市生境中均分布最多。(2)不同城市生境类型之间自生草本植物群落功能多样性(FRic、FEve、FDis 和 FD_Q)均存在显著差异,其中河流廊道、土壤废弃地和园林绿地的自生草本植物群落功能多样性整体均高于砾石废弃地和路边缝隙,并且拥有较高的物种丰富度与谱系多样性。(3)河流廊道的自生草本植物群落谱系结构整体呈发散状态,表明竞争排斥是群落构建的主要驱动力;土壤废弃地和园林绿地出现了发散与聚集两种群落谱系结构并存的现象,表明群落构建可能受到生境过滤和竞争排斥的综合作用;砾石废弃地和路边缝隙的群落谱系结构整体呈聚集状态,表明生境过滤对群落构建起主导作用;不同城市生境之间的自生草本植物群落均表现出一定的谱系结构,说明生态位过程是维持郑州主城区自生草本植物群落多样性的重要机制。(4)各功能多样性指数(FRic、FEve、FDis 和 FD_Q)与谱系多样性指数均呈极显著正相关关系,与谱系结构(NRI 和 NTI)均呈显著负相关关系;物种丰富度与功能多样性指数(FRic、FDis 和 FD_Q)均呈极显著正相关关系,但与功能均匀度指数 FEve 无显著相关性。(5)影响郑州主城区自生草本植物群落功能多样性与谱系结构的主要因素是土壤紧实度,其次是人为干扰、土壤含水量和土壤电导率。本结果有助于更好地理解不同城市生境类型中自生草本植物群落多样性的形成和维持机制,对指导和优化城市生物多样性管理与保育工作提供有益参考。

关键词:郑州市;自生草本植物;功能多样性;谱系结构;城市生境;环境因子

Functional diversity and phylogenetic structure characteristics of spontaneous herb communities in different urban habitats of Zhengzhou

YOU Qi¹, ZHANG Yongcai², MU Zhiqiang³, DAI Wanyu¹, YAN Qianru¹, SHANG Niu¹, YOU Jun⁴, ZHOU Pei¹, SUN Chao¹, LIU Yang¹, LI Yan^{1,*}

1 College of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2 Xinxiang City Water System Landscape Service Center, Xinxiang 453000, China

3 School of Architecture, Kashi University, Kashi 844000, China

基金项目:河南省科技攻关项目(232102110024);河南省高等学校重点科研项目(21A220002)

收稿日期:2024-08-23; **网络出版日期:**2024-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanli1978@163.com

4 Wuhan Industrial Science and Technology School, Wuhan 430080, China

Abstract: Urban spontaneous herbaceous plants are an important part of urban biodiversity, and urban habitats are important carriers of spontaneous herbaceous plants. A total of 65 sample plots, each measuring 1 km × 1 km, were established using a systematic sampling method to investigate and analyze the differences in functional diversity and phylogenetic structure of spontaneous herbaceous plant communities across various urban habitat types in Zhengzhou, and to identify important environmental factors these changes. The results indicated that: (1) A total of 291 species of spontaneous herbaceous plants were recorded, belonging to 167 genera and 46 families, with Asteraceae and Poaceae being the most species-rich families across all urban habitats. (2) There were significant differences in the functional diversity (FRic, FEve, FDis and FD_Q) of spontaneous herb communities among different urban habitat types. The functional diversity of spontaneous herb communities in river corridors, soil wastelands and landscaped green spaces was higher than that in gravel wastelands and roadside gaps, and had higher species richness and phylogenetic diversity. (3) The phylogenetic structure of spontaneous herbaceous plant communities in river corridors was generally overdispersed, indicating that competitive exclusion is the main driving force in community assembly. Overdispersed and clustered phylogenetic structures were observed in the soil wastelands and the landscaped green spaces, indicating that community assembly may be influenced by the combined effects of habitat filtering and competitive exclusion. The phylogenetic structure of communities in gravel wastelands and roadside gaps was generally clustered, indicating that habitat filtering plays a dominant role in community assembly. The spontaneous herbaceous plant communities in different urban habitats exhibited a certain phylogenetic structure, indicating that niche processes are key mechanisms for maintaining the diversity of spontaneous herbaceous plant communities in the main urban area of Zhengzhou. (4) The indices of functional diversity (FRic, FEve, FDis, and FD_Q) were found to be significantly positively correlated with phylogenetic diversity, while being significantly negatively correlated with phylogenetic structure (NRI and NTI). There was a significant positive connection between species richness and the functional diversity indices (FRic, FDis, and FD_Q), but it was not significantly correlated with the functional evenness index. (5) The main factors affecting the functional diversity and phylogenetic structure of spontaneous herbaceous plant communities in Zhengzhou urban areas were soil compaction, followed by human disturbance, soil moisture, and soil electrical conductivity. These results can help us to better understand the formation and maintenance mechanism of spontaneous herbaceous plant community diversity in different urban habitat types, and provide useful reference for guiding and optimizing urban biodiversity management and conservation.

Key Words: Zhengzhou; spontaneous herbaceous plants; functional diversity; phylogenetic structure; urban habitat; environmental factors

由于全球气候变化和剧烈的人类活动使得生物多样性丧失日益严峻,生物多样性保护成为全球关注的热点问题^[1]。理解群落构建过程即群落生物多样性维持机制,是生物多样性保护的重要理论基础,对维持生态系统稳定和功能发挥起着至关重要的作用^[2]。目前,关于群落生物多样性维持机制的解释主要基于确定性过程的生态位理论和基于随机过程的中性理论,前者强调生境过滤、竞争排斥等确定性过程在群落构建中的作用,而后者认为繁殖体扩散等随机过程是群落构建的主导因素^[3-4]。而关于生物多样性研究大多从物种多样性的角度开展,但物种多样性可能无法完全反映物种间进化、功能特征等差异,从而难以准确揭示植物群落构建的成因^[5]。近年来利用功能多样性与系统发育来探究群落生物多样性维持机制越来越受到关注^[4,6-7]。具体而言,功能多样性是指某一群落内物种或特定生态系统内所有物种功能特征数值和分布的变化范围,能够提供更多群落结构、功能及对资源利用状况的信息^[8],而谱系多样性是各物种间系统发育距离的累积,揭示了各物种间的亲缘关系及其进化历程^[9]。谱系结构作为谱系多样性的补充,是通过物种分化节点来反映群落形成的历史过程,通常与生境过滤、竞争作用以及生态位分化等群落组配规则存在紧密的联系^[10-11]。根

据生态位保守理论, 生境过滤筛选出适应能力相似、亲缘关系偏近的物种, 谱系结构表现为聚集状态; 相反, 竞争作用或者生态位分化会使生态位相似的物种无法共存于同一环境, 则群落内物种亲缘关系较远, 谱系结构表现为发散状态^[12]。因此, 将功能多样性与谱系研究相结合, 能够分别从生态过程和进化历史的角度来揭示群落维持生物多样性的生态学机制。

城市是人与自然联系的重要纽带, 也是生物多样性保护的热点区域^[13]。城市化进程改变了城市生态系统的原有结构和功能, 是引起城市生物多样性衰减的重要因素^[14]。城市环境会因各种因素的影响而发生改变, 如大量不透水地面增加、城市热岛效应、城市污染物以及频繁人为干扰等因素会引起城市区域内土壤、光照、温度以及水热条件等生态因子发生变化, 从而形成了特殊的城市生境, 对城市植被物种组成、群落类型及空间分布模式产生了重要的影响^[15-16]。植物的分布格局同城市环境异质性是相互影响的, 环境异质性可使植物在进化的过程中形成某种有效地获取必需资源的生态适应对策, 会对群落物种组成产生生境过滤效应^[16]。尽管城市通常被认为是“混凝土丛林”, 但城市内丰富的生境类型为许多物种提供栖息地, 特别是城市复杂环境中未经过人工栽植而能够自然生长的植物群体, 即自生植物^[17]。自生植物的生命力顽强且具有独特的环境适应性和敏感性, 又因其发挥的诸多生态效益以及展现的自然野趣效果得到了人们广泛认可^[18-19]。它们不仅在城市生境中呈野生状态分布并可自我繁殖, 而且能够通过改变自身的形态、生理、行为等快速响应城市生境的异质化, 其分布规律随城市的发展而复杂多变^[17,20]。作为城市植物多样性的重要组成部分, 不仅能够强化城市植物的地域特色, 更好地适应本地自然气候条件, 形成适应其所在环境的种群结构和生态系统, 还可为鸟类和昆虫提供栖息地以及重要的食物来源^[21-22], 对维持城市生态系统稳定、生物多样性保护以及地域性植物景观营建等方面具有重要意义。以往对城市生境自生植物研究不仅在城市建成区大尺度范围, 如杭州^[16]、哈尔滨^[23]等, 也有公园绿地^[18]、河流廊道^[24-25]、工业废弃地^[26]以及校园^[27]等中等尺度, 主要从物种的角度阐述了不同生境之间自生植物多样性的差异, 但对自生植物群落功能多样性和谱系结构研究却相对较少。在城市多尺度复杂因素的综合影响下, 自生植物的影响机制成为难题, 而对功能多样性和谱系结构的研究为理解不同城市生境中自生植物群落多样性的形成和维持机制提供了一种途径。

郑州市地处黄河中下游, 属于温带大陆性季风气候, 植物种类丰富多样, 主要以暖温带落叶阔叶林为主^[28]。作为河南省会及中原经济区的核心城市, 是近年来我国城市化最为剧烈的城市之一。高密度的城市建设及高强度的人为干扰使得市区内生境变得复杂而丰富, 成为了研究自生植物群落的理想地点。因此, 本文以郑州主城区自生草本植物为研究对象, 对不同城市生境类型中自生草本植物物种组成、功能多样性、物种多样性、谱系多样性以及谱系结构的差异进行分析, 并探讨影响其变化的环境因素, 有助于更好地理解城市中自生草本植物群落多样性的形成和维持机制, 以为城市生物多样性保护、低维护型城市荒野景观营建提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

郑州市位于东经 112°42′—114°14′, 北纬 34°16′—34°58′之间, 地处黄河中下游和伏牛山脉东北翼向黄淮平原过渡的交界地带, 属温带大陆性季风气候, 年平均气温 15.6℃, 年平均降雨量为 632.4 mm, 降雨多集中在每年 6—8 月。其地形比较复杂, 总趋势是西南高、东北低, 海拔高度大部分在 200—300 m 之间。截至 2022 年, 市中心城区城市建成区面积为 774.32 km², 常住人口达到 1282.8 万人。市域内植物资源丰富, 属于暖温带落叶阔叶林植被型, 以嵩山植物和黄河湿地植物最为典型, 有维管植物 181 科、941 属和 2302 种^[28], 常见的植物有毛白杨 (*Populus tomentosa*)、法国梧桐 (*Platanus orientalis*)、马唐 (*Digitaria sanguinalis*)、牛筋草 (*Eleusine indica*)、狗尾草 (*Setaria viridis*) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法

在全面调查的基础上, 于 2022 年 3—6 月和 7—11 月在郑州主城区采用系统取样法共设置 65 个 1 km×1

km 样地(图 1),并将样地内的生境划分为土壤废弃地(自然的、无人干扰的区域)、砾石废弃地(闲置的建筑工地或者是土壤存在建筑垃圾的区域)、园林绿地(人工建设的绿化用地,包括树池)、路边缝隙以及河流廊道五种类型。针对每个样地内不同城市生境类型采用“小样地+样方”的方法进行自生草本植物群落调查,每个样地设置 5—50 个 1 m×1 m 小样方不等,若遇到狭长地带或道路缝隙等特殊生境分别选取 1—5 m 的样段,共计 1667 个草本样方。记录样方内自生草本物种的名称、株数、平均株高、物种盖度、郁闭度、人为干扰强度以及生境类型等信息。

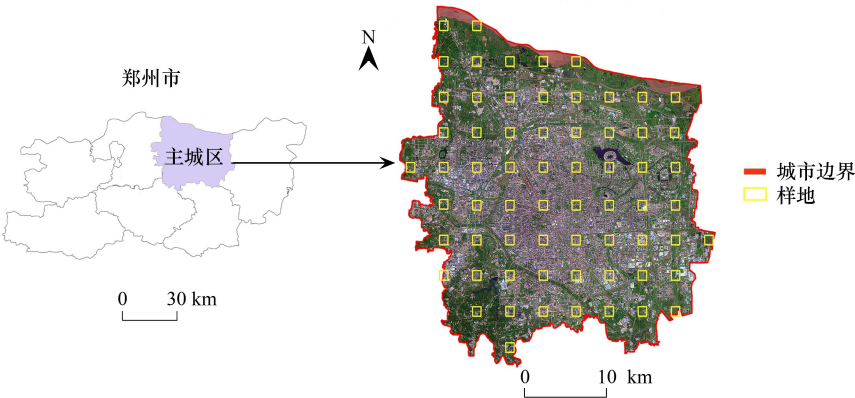


图 1 研究区域样地设置分布图
Fig.1 Distribution of sample plot settings in the study area

1.2.2 环境因子测定

采用梅花五点法取土样,在每个小样方中心及四角,选取 5 个采样点,去除地表枯落物后采集 0—20 cm 表层土壤,混合为 1 个土样,带回实验室进行土壤理化性质分析。土壤含水量测定采用烘干法;土壤 pH 值采用电位法(水土比为 2.5:1)测定;土壤电导率用 DDSJ-318 型雷磁电导率仪测定;土壤紧实度用 TJSD-750 型土壤紧实度仪测定。郁闭度采用样点法进行测定,以样方内人为践踏对草本群落环境的破坏程度作为人为干扰因素^[29],将郁闭度、人为干扰划分为 5 个等级(表 1)。

表 1 郁闭度和人为干扰等级划分

Table 1 Level classification of canopy density and human disturbance

等级 Level	郁闭度 Canopy density/%	人为干扰 Human disturbance	等级 Level	郁闭度 Canopy density/%	人为干扰 Human disturbance
1	< 20	罕见人为踩踏	4	40—49	较多人为踩踏
2	20—29	极少人为踩踏	5	> 50	经常人为踩踏
3	30—39	有人为踩踏			

1.3 数据处理

1.3.1 物种重要值

自生草本植物重要值计算:

$$IV_{\text{草本}} = (Hr + Cr + Fr) / 3 \tag{1}$$

$$IV_{\text{草质藤本}} = (Cr + Fr) / 2 \tag{2}$$

式中, Hr 为相对高度; Cr 为相对盖度; Fr 为相对频度。

1.3.2 功能性状数据获取与计算

如表 2 所示,本研究选取 10 种能反映植物形态特征、生殖特征以及物候特征等作为其功能性状指标,其中物种的花径大小为野外调查的实测数据,其它功能特征通过查阅《中国植物志》^[30]、《中国杂草原色图

鉴》^[31]、《郑州植物志》^[28]以及《中国外来入侵植物图鉴》^[32]获得。为评估自生草本植物群落功能多样性,选取功能丰富度指数(Functional richness index, FRic)、功能均匀度指数(Functional evenness index, FEve)、功能离散度指数(Functional dispersion index, FDis)以及 Rao 二次熵指数(Rao's quadratic entropy index, FD_Q)作为功能多样性指数^[33],其计算公式如下:

表 2 自生草本植物功能特征类型及其数据来源

Table 2 Types of functional characteristics of spontaneous herbs and their data sources

功能性状 Functional traits	数据类型 Data type	功能特征类型 Types of functional traits	数据来源 Data sources
生活型 Life form	名称数据	1.夏季一年生;2.冬季一年生;3.多年生	《中国杂草原色图鉴》
生长型 Growth form	名称数据	1.分枝型;2.丛生型;3.藤蔓型;4.匍匐型;5.莲座型;6.直立型;7.伪莲座型;8.短时间莲座型	《中国杂草原色图鉴》
繁殖型 Vegetation form	名称数据	1.根茎横向延伸最广范围形成联合体;2.根茎纵向延伸较广范围形成联合体;3.根茎分枝短狭小范围形成联合体;4.茎呈匍匐状扎根形成联合体;5.地上、地下均不形成联合体	《中国杂草原色图鉴》
散布型 Disseminule form	名称数据	1.风水媒介;2.动物媒介;3.果皮开裂型;4.重力传播型;5.营养繁殖	《中国杂草原色图鉴》
花型 Floral pattern	名称数据	1.唇型;2.蝶型;3.头状型;4.穗状型;5.五瓣型;6.辐射型;7.十字型;8.漏斗状型;9.其它花型	《中国植物志》;《郑州植物志》
花期 Flowering period	数值数据	1.短(0—3个月);2.中(4—6个月);3.(6个月以上)	《中国植物志》;《郑州植物志》
花径大小 Flower size	数值数据	1.小(< 1 cm);2.中(1—2 cm);3.大(> 2 cm)	实地调查记录
果型 Fruiting pattern	名称数据	1.颖果;2.荚果;3.短角果;4.长角果;5.胞果;6.聚合果;7.蓇葖果;8.坚果;9.双悬果;10.浆果;11.蒴果;12.瘦果;13.蒴果	《中国植物志》;《郑州植物志》
果期 Fruit period	数值数据	1.短(0—3个月);2.中(4—6个月);3.(6个月以上)	《中国植物志》;《郑州植物志》
物种来源 Species origin	名称数据	1.本地物种;2.外来物种	《郑州植物志》;《中国外来入侵植物图鉴》

(1) 功能丰富度指数 FRic:

$$FR_{ic} = \frac{SF_{ic}}{R_c} \quad (3)$$

式中, SF_{ic} 为群落 i 内物种所占据的生态位空间, R_c 为所有群落中性状 c 占据生态位空间。

(2) 功能均匀度指数 FEve:

$$EW_b = \frac{d_{ij}}{w_i + w_j} \quad (4)$$

$$PEW_b = \frac{EW_b}{\sum_{i=1}^{S-1} EW_b} \quad (5)$$

$$FEve = \frac{\sum_{i=1}^{S-1} \min\left(PEW_b \cdot \frac{1}{S-1}\right) - \frac{1}{S-1}}{1 - \frac{1}{S-1}} \quad (6)$$

式中, d_{ij} 为物种 i 与物种 j 间的欧氏距离, w_i 和 w_j 为物种 i 和物种 j 的相对丰富度, b 为分支长, S 为物种数目,

EW_b 为均匀度权重, PEW_b 为分支长权重。

(3) 功能离散度指数 $FDis$:

$$c = \frac{\sum a_j x_{ik}}{\sum a_j} \quad (7)$$

$$FDis = \frac{\sum a_j z_j}{\sum a_j} \quad (8)$$

式中, c 为加权重心, a_j 为物种 j 的相对多度, x_{ik} 为物种 i 性状 k 的值, z_j 为物种 j 到重心 c 的加权距离。

(4) Rao 二次熵指数 FD_Q :

$$d_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{ik} - X_{jk})^2 \quad (9)$$

$$Rao = \sum_{i=1}^{S-1} \sum_{j=i+1}^S d_{ij} w_i w_j \quad (10)$$

式中, n 为性状数, X_{ik} 、 X_{jk} 为物种 i 和物种 j 的 k 性状值, d_{ij} 为物种 i 与物种 j 间的差异度, S 为物种数目, w_i 和 w_j 分别为物种 i 和物种 j 的相对多度。

1.3.3 谱系多样性与谱系结构计算

将调查研究区内全部自生草本植物所隶属的科属信息分别通过 The Plant List 数据库 (<http://www.theplantlist.org/>) 进行规范校准, 采用 R 语言中 V.PhyloMaker2 软件包内的“phylo.maker”函数的“S3”方法, 以 GBOTB.extended.TPL 为骨架构建自生草本植物系统发育树, 通过 ggtree 软件包美化视图得到系统发育树 (图 2)。利用 Picante 软件包计算谱系多样性 (Phylogenetic diversity, PD)。谱系结构用净亲缘关系指数 (Net relatedness index, NRI) 和最近亲缘关系指数 (Nearest taxon index, NTI) 来表征, 计算公式如下:

$$NRI = -1 \times \left[\frac{MPD_{obs} - \text{mean}(MPD_{rand})}{sd(MPD_{rand})} \right] \quad (11)$$

$$NTI = -1 \times \left[\frac{MNTD_{obs} - \text{mean}(MNTD_{rand})}{sd(MNTD_{rand})} \right] \quad (12)$$

式中, MPD_{obs} 和 $MNTD_{obs}$ 分别表示平均谱系距离的观测值和最近相邻谱系距离的观测平均值, $\text{mean}(MPD_{rand})$ 和 $\text{mean}(MNTD_{rand})$ 为 999 个零模型模拟下随机群落的平均谱系距离和最近相邻谱系距离的平均值, $sd(MPD_{rand})$ 和 $sd(MNTD_{rand})$ 为零模型模拟下的标准差。若 $NRI, NTI > 0$, 说明样方中群落的物种在谱系结构上聚集, 生境过滤起主导作用; 若 $NRI, NTI < 0$, 说明样方中群落的物种在谱系结构上发散, 种间竞争排斥起主导作用; 若 $NRI, NTI = 0$, 则说明样方中群落的物种在谱系结构上是随机的, 中性理论起主导作用。

1.4 数据分析

使用 Excel 2020 对物种数据进行整理统计。自生草本植物群落功能多样性指数、物种丰富度指数和谱系多样性指数计算均在 R 软件中“vegan”、“FD”、“picante”和“ape”包进行计算。采用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene 检验各指数数据正态性和方差齐性。由于数据不符合正态分布和方差齐性, 采用 Kruskal-Wallis 检验和 Dunn 检验来比较不同城市生境类型之间自生草本植物群落的功能多样性指数、物种丰富度指数和谱系多样性指数差异, 显著水平设定为 $P < 0.05$; 利用 Pearson 相关性分析功能多样性指数、物种丰富度指数和谱系多样性指数之间的关系, 上述数据分析和制图均在 Origin 2021 软件中完成。利用冗余排序方法 (Redundancy analysis, RDA) 探究环境因子对功能多样性指数、物种丰富度指数和谱系多样性指数的影响, 在 Canoco 5.0 软件中进行分析并制图。

2 结果与分析

2.1 不同城市生境下自生草本植物物种组成

本次调查共记录自生草本植物 291 种, 隶属于 46 科 167 属, 以一年生草本植物种类最多 (173 种), 占总

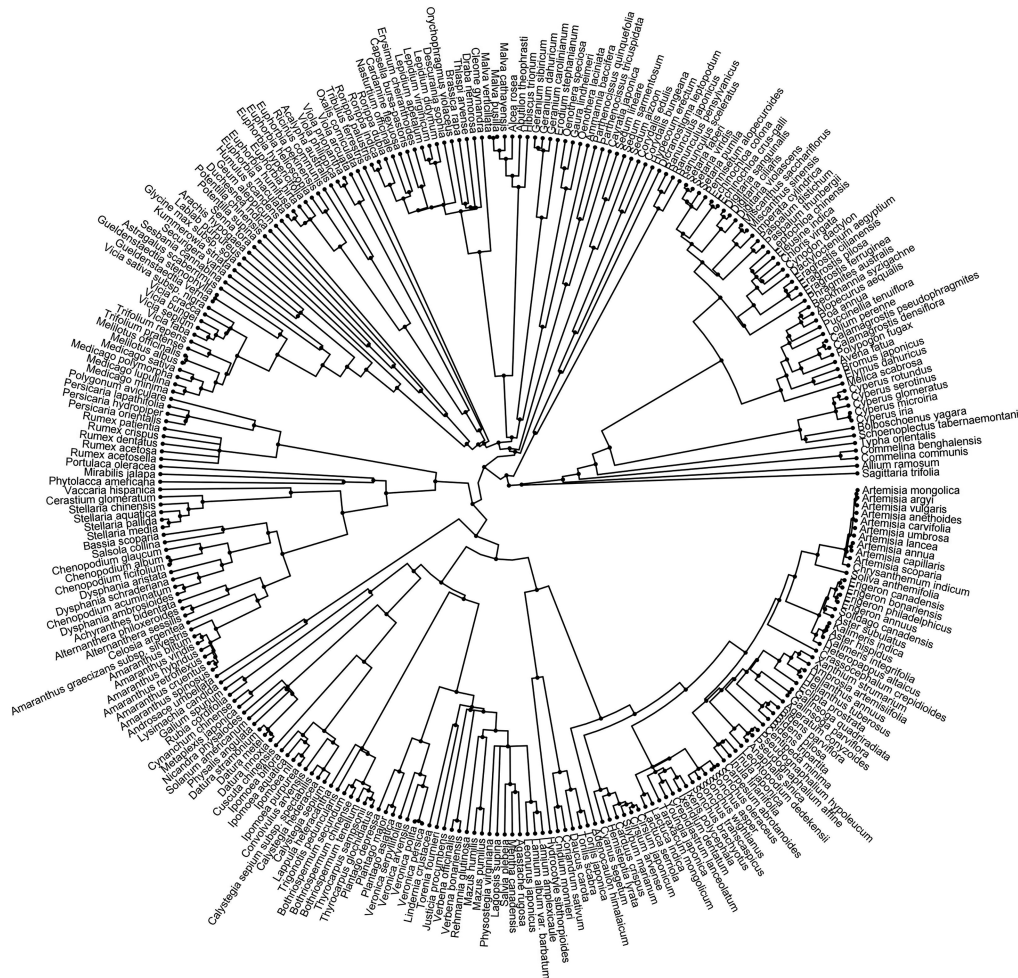


图 2 郑州主城区调查的 291 种自生草本植物谱系树

Fig.2 Phylogenetic tree of 291 spontaneous herbaceous plant species in the main urban area of Zhengzhou

种数 56.70%。属与种数排名前五的科依次为菊科(32 属 61 种)、禾本科(23 属 36 种)、豆科(13 属 21 种)、十字花科(11 属 15 种)和苋科(4 属 11 种),共涉及 83 属 144 种,分别占总属数 49.70%和总种数 49.48%;单种科和寡种科有 28 科,占总科数的 60.87%,涉及 53 种,仅占总种数的 18.21%。可见,郑州主城区的自生草本植物种类比较集中于少数几个大科。在不同城市生境类型中,土壤废弃地的自生草本植物种类最多,为 176 种;其次是园林绿地和河流廊道,分别为 158 种和 127 种,而路边缝隙的物种数最少,为 78 种,且菊科和禾本科的物种数在各个城市生境中均分布最多(图 3),表明河流廊道、土壤废弃地和园林绿地是郑州主城区自生草本植物主要的生存空间。

2.2 不同城市生境下自生草本植物群落功能多样性特征

Kruskal-Wallis 检验结果显示自生草本植物群落各功能多样性指数在不同城市生境中均具有显著差异性(图 4)。在功能丰富度指数中,园林绿地的功能丰富度指数最高,其次是河流廊道和土壤废弃地,而砾石废弃地的指数最低。其中,河流廊道和园林绿地显著高于砾石废弃地和路边缝隙;土壤废弃地与河流廊道、园林绿地和砾石废弃地差异显著。河流廊道、土壤废弃地和园林绿地的功能均匀度指数均显著高于砾石废弃地,其中河流廊道的最高,而砾石废弃地的最低。就功能离散度指数而言,河流廊道、土壤废弃地和园林绿地均极显著高于砾石废弃地,河流廊道和砾石废弃地与路边缝隙差异显著。各城市生境类型之间的 Rao 二次熵指数差异性与功能离散度指数保持一致。总体来看,河流廊道、土壤废弃地和园林绿地的自生草本植物群落功能多样

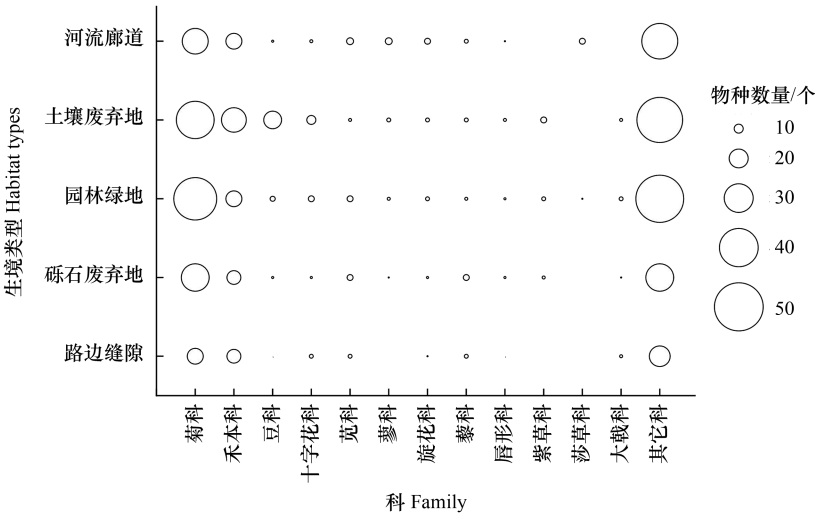


图 3 不同城市生境下自生草本植物物种组成

Fig.3 Species composition of spontaneous herbaceous plants in different urban habitats

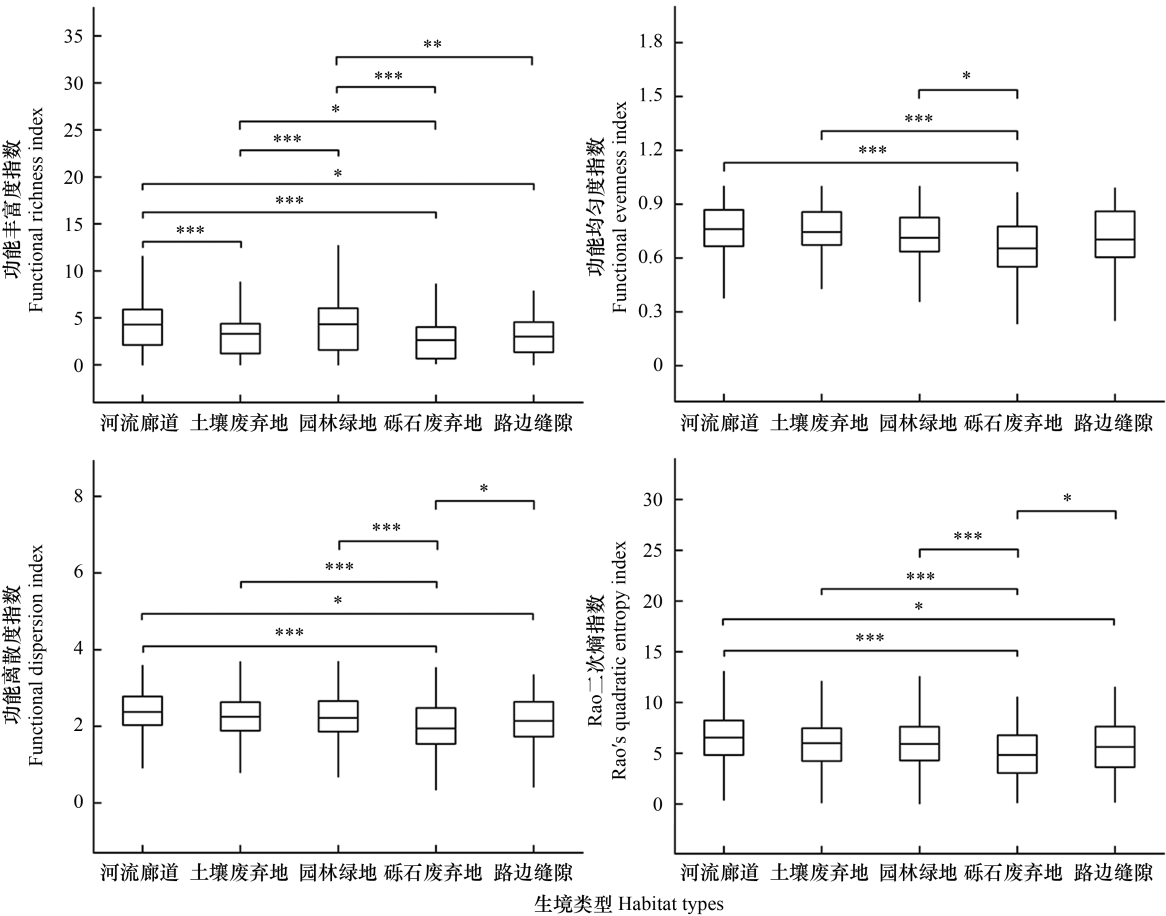


图 4 不同城市生境下自生草本植物群落功能多样性比较

Fig.4 Comparison of functional diversity of spontaneous herbaceous communities in different urban habitats

图中 * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$, *** 表示 $P<0.001$

性整体均高于砾石废弃地和路边缝隙,表明这三种城市生境的自生草本植物群落物种生态位分化程度更强,生态位重叠效应弱,资源利用效率更高,拥有较高的群落生产力及相对稳定的生态系统。

2.3 不同城市生境下自生草本植物群落物种丰富度与谱系特征

Kruskal-Wallis 检验结果显示自生草本植物群落物种丰富度和谱系多样性指数在不同城市生境之间均存在显著差异(图 5)。在物种丰富度指数方面,园林绿地的指数最高,其次是河流廊道和土壤废弃地,而砾石废弃地的指数最小。其中,河流廊道与砾石废弃地差异显著;土壤废弃地和园林绿地与砾石废弃地和路边缝隙均存在显著差异。对于谱系多样性指数而言,河流廊道、土壤废弃地、园林绿地和路边缝隙均显著高于砾石废弃地,且河流廊道的指数最大,砾石废弃地的指数最小。对不同城市生境的自生草本群落谱系结构的净亲缘关系指数(NRI)和最近亲缘关系指数(NTI)结果分析可知(图 5),河流廊道的 NRI 值和 NTI 值均极显著小于零(t 检验, $P < 0.01$),群落谱系结构整体呈发散状态,表明竞争排斥是河流廊道自生草本植物群落构建的主要驱动力;土壤废弃地的 NRI 值显著小于零(t 检验, $P < 0.05$),但 NTI 值整体大于零,而园林绿地的 NRI 值整体小于零,但 NTI 值却极显著大于零(t 检验, $P < 0.001$)。这两种城市生境的群落谱系结构两指数结果不一致,出现了发散与聚集两种群落谱系结构并存的现象,推测竞争排斥和生境过滤可能共同作用于土壤废弃地和园林绿地的自生草本植物群落构建。砾石废弃地和路边缝隙的 NRI 值和 NTI 值均极显著大于零(t 检验, $P < 0.001$),群落谱系结构整体呈聚集状态,表明生境过滤对砾石废弃地和路边缝隙的自生草本植物群落的构建起主导作用。

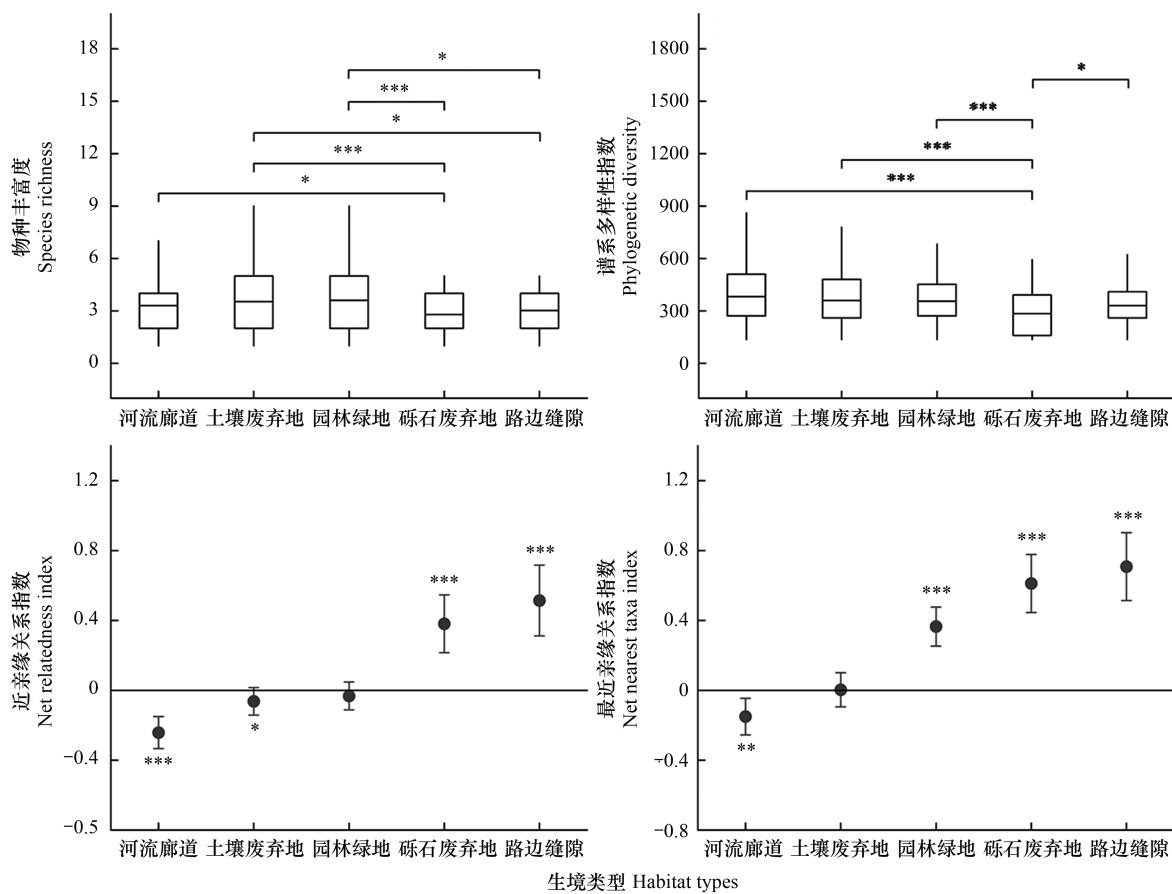


图 5 不同城市生境下的物种丰富度、谱系多样性、谱系结构及 t 检验结果

Fig.5 Species richness, phylogenetic diversity, phylogenetic structure and t -test results in different urban habitats

图中 * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

2.4 自生草本植物群落功能多样性与物种丰富度和谱系指数之间的关系

由表 3 可知,物种丰富度与功能多样性指数(FRic、FDis 和 FD_Q)均呈极显著正相关关系($P < 0.001$),但与

功能均匀度指数 FEve 无显著相关性 ($P > 0.05$)。各功能多样性指数 (FRic、FEve、FDis 和 FD_Q) 与谱系多样性指数均呈极显著正相关关系,与净亲缘关系指数 NRI 均呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。最近亲缘关系指数 NTI 与功能丰富度指数 FRic 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$),与功能均匀度指数 FEve、功能离散度指数 FDis 和 Rao 二次熵指数 FD_Q 均呈极显著负相关关系 ($P < 0.001$)。

表 3 群落功能多样性与物种丰富度和谱系指数的 Pearson 相关性分析

Table 3 Pearson correlation analysis of community functional diversity and species richness and phylogenetic index				
指数 Index	物种丰富度 Species richness	谱系多样性指数 Phylogenetic diversity	净亲缘关系指数 Net relatedness index	最近亲缘关系指数 Nearest taxon index
功能丰富度指数 FRic Functional richness index	0.555 ***	0.492 ***	-0.094 **	-0.069 *
功能均匀度指数 FEve Functional evenness index	0.031	0.165 ***	-0.195 ***	-0.290 ***
功能分散指数 FDis Functional dispersion index	0.681 ***	0.705 ***	-0.245 ***	-0.221 ***
Rao 二次熵指数 FD_Q Rao's quadratic entropy index	0.644 ***	0.672 ***	-0.216 ***	-0.196 ***

* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

2.5 不同指数与环境因子的关系

采用冗余分析 (RDA) 进行排序,选用不同指数作为响应变量,环境因子作为解释变量。如图 6 所示,第一主轴 (RDA1) 解释率达 72.41%,第二主轴 (RDA2) 解释率达 15.03%,两个排序轴共解释了 87.44% 的信息。如表 4 所示,对各指数影响最大是土壤紧实度,其次是人为干扰>土壤含水量>土壤电导率>郁闭度>土壤 pH 值。由图中箭头的夹角和方向可知,土壤含水量、土壤电导率与谱系多样性、物种丰富度和功能多样性指数 (FRic、FEve、FDis 和 FD_Q) 均呈正相关关系,与谱系结构 (NRI 和 NTI) 均呈负相关关系。人为干扰、土壤紧实度和土壤 pH 值与谱系结构 (NRI 和 NTI) 均呈正相关关系。人为干扰、土壤紧实度和郁闭度与谱系多样性、物种丰富度和功能多样性指数 (FRic、FEve、FDis 和 FD_Q) 均呈负相关关系。土壤含水量和土壤电导率呈正相关关系,与人为干扰、土壤紧实度、土壤 pH 值和郁闭度均呈负相关关系。

表 4 环境因子对不同指数的解释

Table 4 The explanation of environmental factors to different indexes			
环境因子 Environmental factors	贡献率 Contribution/%	F	P
土壤紧实度 Soil compaction	45.4	11.6	0.002
人为干扰 Human disturbance	21.5	5.5	0.006
土壤含水量 Soil moisture	13.2	3.4	0.030
土壤电导率 Soil electrical conductivity	8.1	2.1	0.048
郁闭度 Canopy density	6.0	1.5	0.184
土壤 pH 值 Soil pH	5.9	1.5	0.226

3 讨论

3.1 不同城市生境下自生草本植物物种组成、功能多样性和谱系特征

本次调查共记录自生草本植物 46 科 167 属 291 种,种类丰富多样,各类城市生境主要以菊科和禾本科的物种为主,与其它地区的研究结果相符^[19,23]。这是因为菊科、禾本科为世界广布科,又多为草本植物,多数植物生命周期短,种子量多而轻,便于传播扩散,繁殖方式多样使其对环境具有极强的适应能力,能迅速适应新环境并在当地建立种群^[34]。与前人研究结果一致^[17,19,23],河流廊道、土壤废弃地和园林绿地往往能够支持丰富多样的自生草本植物种类,可能是因为这三种城市生境异质性程度较高,可以提供多样化的生态位,能够满足不同物种生长所需的环境条件,而砾石废弃地和路边缝隙包含的物种数量较低,可能是由于土壤营养物质

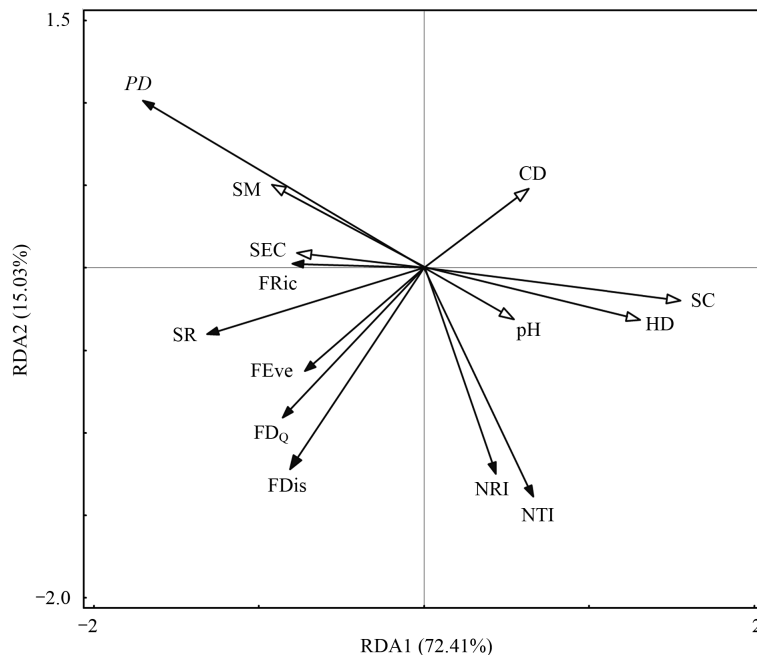


图 6 不同指数与环境因子的 RDA 排序

Fig.6 Redundancy analysis of different indexes and environmental factors

SEC: 土壤电导率 Soil electrical conductivity; SM: 土壤含水量 Soil moisture; SC: 土壤紧实度 Soil compaction; pH: 土壤 pH 值 Soil pH; CD: 郁闭度 Canopy density; HD: 人为干扰 Human disturbance; FRic: 功能丰富度指数 Functional richness index; FEve: 功能均匀度指数 Functional evenness index; FDis: 功能离散度指数 Functional dispersion index; FD_Q : Rao 二次熵指数 Rao's quadratic entropy index; NRI: 净亲缘关系指数 Net relatedness index; NTI: 最近亲缘关系指数 Nearest taxon index; PD: 谱系多样性指数 Phylogenetic diversity; SR: 物种丰富度 Species richness

相对贫瘠或人为干扰强度较大所致。植物群落功能多样性是指某一群落内物种间功能特征变化的范围,是环境筛选以及种间相互作用的产物,反映了物种对环境的适应能力,能够提供群落性状结构、功能及对资源的利用效率和群落稳定性等信息^[35-36]。本研究发现河流廊道、土壤废弃地和园林绿地的功能多样性指数(FRic、FEve、FDis 和 FD_Q)整体均高于砾石废弃地和路边缝隙,原因可能是河流廊道、土壤废弃地和园林绿地的环境条件复杂多样,微生境类型丰富,能够满足多种生态属性的群落物种共存,以致各物种性状叠加后整体群落的功能性状更加丰富,这也意味着植物群落能够充分利用环境资源(生态位被充分占据),抗干扰能力变强且不易被入侵种占据生态位,并且具有一定程度缓冲外界环境的波动的能力^[37];而砾石废弃地和路边缝隙常处在高温、土壤贫瘠以及人为活动频繁的环境,在这种低效率高竞争的环境压力下,环境过滤作用愈发显著,导致物种丰富度低且功能性状出现趋同化现象,进一步限制了物种功能性状的数值与范围,逐渐演变出相似的形态结构和功能特征,使得物种间生态位互补性降低^[8],如常分布此类生境的有狗尾草(*Setaria viridis*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、葎草(*Humulus scandens*)、斑地锦草(*Euphorbia maculata*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*)等以生活周期短、丛生型或匍匐型的单优势种群落为主,物种数量较为单一,导致群落物种功能多样性降低。

群落谱系结构是生态环境相互作用,环境过滤和历史进化相结合的结果^[38]。本研究发现不同城市生境之间的自生草本植物群落均表现出一定的谱系结构,与中性理论所预测的物种分布趋向于随机并不一致,这进一步表明生态位过程(生境过滤与竞争排斥)是维持郑州主城区自生草本植物群落多样性的重要机制。本研究发现河流廊道的自生草本植物群落谱系结构整体呈发散状态,主要原因可能是此类生境水热环境条件相对适宜,人为干扰程度较弱,占据相似生态位的物种之间会对环境资源进行激烈争夺,种间竞争排斥作用增强,从而驱动群落共存物种的生态位进一步分化来减弱种间竞争,导致近缘种在不同资源位中的离散分布,在

谱系结构整体上呈现发散格局,竞争排斥是群落构建的主要驱动力^[39]。土壤废弃地和园林绿地的 NRI 和 NTI 谱系结构指数不一致,出现发散与聚集两种群落谱系结构并存的现象,推测这两种城市生境自生草本植物群落构建可能受到生境过滤和竞争排斥的综合作用。一方面可能是由于这二者生境异质性程度较高,形成了更多的微生境及小气候条件,促使群落物种间会更倾向于采取不同的环境资源利用策略,物种间的竞争作用会加剧,同时存在生境过滤和竞争排斥两种生态过程的相互作用,从而表现出了更多的谱系结构^[40];另一方面可能与植被稳定程度有关^[39],由于部分自生草本植物群落常受到频繁的人为活动的影响,干扰改变群落物种组成与演替过程,使其结构和功能受到损害或发生变化,群落稳定程度会下降,致使谱系结构没有明显的聚集和发散趋势^[41]。另外,由于两种谱系结构指数的侧重点不同,NRI 亲缘关系是基于群落整体水平的,反映的是整个系统发育树的发育模式,而 NTI 亲缘关系是基于系统进化树末端的最近的系统发育关系^[42]。砾石废弃地和路边缝隙的自生草本植物群落谱系结构整体呈聚集状态,这是因为此类生境的环境条件较为恶劣,营养物质相对贫瘠,物种可利用的资源有限,导致植物生长和分布受到限制,同时受到较为强烈的人为干扰影响,环境胁迫压力较大,生境过滤作用会选择具有相同生物学特性即亲缘关系较近的物种共存,形成谱系聚集的结构,表明生境过滤对该类生境的群落构建起主导作用^[43]。

3.2 群落功能多样性指数与物种丰富度和谱系指数相关性分析

阐明物种多样性、功能多样性和谱系多样性之间的相互关系对于揭示它们对生态系统功能的影响具有重要的生态学意义^[44]。本研究结果表明物种丰富度与功能多样性指数(FRic、FDis 和 FD_Q)均呈极显著正相关关系,与功能均匀度指数 FEve 无显著相关性。这主要是因为功能丰富度指数 FRic、功能离散度指数 FDis 和 Rao 二次熵指数 FD_Q 是用来评估群落中的物种占据生态位空间的情况,随着群落中的物种数量增加,功能性状的数值分布的范围就越广,导致群落中的物种占据的功能生态位也相应增加,这与多数学者的研究结果相一致^[6,45-46],而功能均匀度指数 FEve 具有相对独立性,更多地反映群落中的物种某个性状所占据的空间分布均匀程度,所以与物种丰富度之间没有显著关系^[46]。各功能多样性指数(FRic、FEve、FDis 和 FD_Q)与谱系多样性指数均呈极显著正相关关系,可能是因为功能多样性高的群落环境条件更加多样和复杂,这促进了物种之间的进化分化,使得群落拥有更多的生态位,从而增加了谱系多样性,说明功能多样性与谱系多样性之间存在一定程度的协同变化^[4]。同时研究结果也发现各功能多样性指数(FRic、FEve、FDis 和 FD_Q)与谱系结构(NRI 和 NTI)均呈显著负相关关系,原因可能是随着群落物种数量越多,引起群落功能多样性升高,同时也增加了种间系统发育的距离,导致群落谱系结构呈发散的趋势;相反,生境过滤后导致只有可适应严苛生境条件的自生草本植物存活下来,导致群落中物种功能相似性增加,群落的功能多样性降低,群落谱系结构呈聚集趋势^[47]。

3.3 群落功能多样性与系统发育指数的影响因素

在城市生态系统中,不同城市生境中环境条件的异质性导致自生草本植物群落建群机制差异。本研究发现土壤紧实度、人为干扰、土壤含水量和土壤电导率对自生草本植物群落的功能多样性、谱系多样性、物种丰富度和谱系结构均有不同程度的影响,其中土壤紧实度与人为干扰的影响极为显著($P < 0.01$)。RDA 结果表明人为干扰和土壤紧实度与谱系结构均呈正相关关系,与谱系多样性、物种丰富度和功能多样性指数(FRic、FEve、FDis 和 FD_Q)均呈负相关关系。可能是因为伴随着人为干扰强度(践踏次数)和土壤紧实度增加,会导致土壤颗粒孔隙空间减少,土壤容重增加,土壤的通气透水性变差,土壤水分和肥力下降,严重影响土壤的营养分配过程,导致土壤性质和土地生产力发生改变,从而进一步影响植物地上部分的发育和根系的生长同时引起植物群落物种生态位分化程度降低,物种多样性减少,对自生草本植物群落的功能多样性和谱系多样性产生负面影响^[8,48]。另外,将土壤紧实度看作一个“环境筛”,生境过滤作用会促使适应高土壤紧实度的物种被保留,使得种间亲缘相近物种增加,降低了种间亲缘关系距离^[49],这也是引起砾石废弃地和路边缝隙的自生草本植物群落谱系结构聚集的重要原因。土壤含水量和土壤电导率与谱系多样性、物种丰富度和功能多样性指数(FRic、FEve、FDis 和 FD_Q)均呈正相关关系,与谱系结构均呈负相关关系,表明这两个环境因子在自生

草本植物群落多样性的形成和维持具有积极的影响。有研究表明,土壤电导率可直接反映土壤混合盐分的含量,而土壤中盐分的运动必然伴随着水分的运动^[49-50]。土壤的水分可以影响土壤通气,刺激了土壤微生物功能群使其代谢旺盛,增加土壤酶活性促进土壤养分分解,同时土壤中的盐分能提供植物生长发育所必需的营养元素,从而促进植物生长和多样性的增加,进而影响植物群落功能多样性和谱系多样性变化,同时也增加了种间系统发育的距离,导致植物群落谱系结构呈发散状态^[47,51-52]。

4 结论

郑州主城区自生草本植物种类丰富多样(46科167属291种),主要以一年生植物种为主,且菊科和禾本科是各类生境的优势科。河流廊道、土壤废弃地和园林绿地的自生草本植物群落的功能多样性、物种丰富度和谱系多样性较高。不同城市生境之间的自生草本植物群落均表现出一定的谱系结构,说明生态位过程是维持郑州主城区自生草本植物群落多样性的重要机制。各功能多样性指数(FRic、FEve、FDis 和 FD_Q)与谱系多样性指数均呈极显著正相关关系,与谱系结构均呈显著负相关关系;物种丰富度与功能多样性指数(FRic、FDis 和 FD_Q)均呈极显著正相关关系,但与功能均匀度指数 FEve 无显著相关性。土壤紧实度、人为干扰、土壤含水量和土壤电导率是影响郑州主城区自生草本植物群落功能多样性与谱系结构的主要因素。本结果有助于更好地理解不同城市生境之间自生草本植物群落多样性的形成和维持机制,可以有效地保护和提升城市生态系统的生物多样性,对指导和优化郑州市生物多样性管理与保育工作提供有益参考。

参考文献(References):

- [1] Cardinale B J, Emmett Duffy J, Gonzalez A, Hooper D U, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace G M, Tilman D, Wardle D A, Kinzig A P, Daily G C, Loreau M, Grace J B, Larigauderie A, Srivastava D S, Naeem S. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, 486(7401): 59-67.
- [2] 刘瑞雪, 林小龙, 陈龙清. 水淹干扰下水库水滨带植物群落谱系结构与物种多样性格局. *生态学报*, 2023, 43(11): 4700-4711.
- [3] 许金石, 柴永福, 刘晓, 岳明, 郭垚鑫, 康慕谊, 刘全儒, 郑成洋, 吉成均, 闫明, 张峰, 高贤明, 王仁卿, 石福臣, 张钦弟, 王茂. 华北区域环境梯度上阔叶林构建模式及分布成因. *植物生态学报*, 2019, 43(9): 732-741.
- [4] 姜晓燕, 高圣杰, 蒋燕, 田赞, 贾昕, 查天山. 毛乌素沙地植被不同恢复阶段植物群落物种多样性、功能多样性和系统发育多样性. *生物多样性*, 2022, 30(5): 18-28.
- [5] Purschke O, Schmid B C, Sykes M T, Poschlod P, Michalski S G, Durka W, Kühn I, Winter M, Prentice H C. Contrasting changes in taxonomic, phylogenetic and functional diversity during a long-term succession: insights into assembly processes. *Journal of Ecology*, 2013, 101(4): 857-866.
- [6] 李非凡, 陈森, 刘顺, 许格希, 陈健, 邢红爽, 史作民. 青藏高原东缘亚高山森林群落的多维度生物多样性. *应用生态学报*, 2024, 35(6): 1447-1454.
- [7] 王诗韵, 吕光辉, 蒋腊梅, 王恒方, 李岩, 王金龙. 不同尺度下艾比湖典型植物群落功能多样性和系统发育多样性研究. *生态环境学报*, 2020, 29(5): 889-900.
- [8] 向琳, 陈芳清, 官守鹏, 王玉兵, 吕坤. 井冈山鹿角杜鹃群落灌木层功能多样性及其随海拔梯度的变化. *生态学报*, 2019, 39(21): 8144-8155.
- [9] Pio D V, Broennimann O, Barraclough T G, Reeves G, Rebelo A G, Thuiller W, Guisan A, Salamin N. Spatial predictions of phylogenetic diversity in conservation decision making. *Conservation Biology*, 2011, 25(6): 1229-1239.
- [10] 赵连春, 段凯祥, 赵成章, 王继伟, 文军. 嘉峪关草湖湿地植物谱系结构及其对不同生境的响应. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2123-2130.
- [11] 廉敏, 铁军. 山西陵川南方红豆杉自然保护区鹅耳枥植物群落谱系结构特征. *生态学报*, 2020, 40(7): 2267-2276.
- [12] 牛红玉, 王峰峰, 练琚愉, 叶万辉, 沈浩. 群落构建研究的新进展: 进化和生态相结合的群落谱系结构研究. *生物多样性*, 2011, 19(3): 275-283.
- [13] Alberti M, Wang T Z. Detecting patterns of vertebrate biodiversity across the multidimensional urban landscape. *Ecology Letters*, 2022, 25(4): 1027-1045.
- [14] 吕永龙, 王尘辰, 曹祥会. 城市化的生态风险及其管理. *生态学报*, 2018, 38(2): 359-370.
- [15] Chen X S, Wang W B, Liang H, Liu X L, Da L J. Dynamics of ruderal species diversity under the rapid urbanization over the past half century in Harbin, NorthEast China. *Urban Ecosystems*, 2014, 17(2): 455-472.
- [16] 张明丽, 崔易翀, 达良俊. 杭州不同城市生境杂草群落分布格局及其成因. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2021, (2): 120-131.
- [17] 张梦园, 李坤, 邢小艺, 范舒欣, 徐一丁, 郝培尧, 董丽. 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.

- [18] 李晓璐, 张梦园, 范舒欣, 骆沁宇, 李一彤, 董丽. 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.
- [19] 李晓鹏, 董丽. 北京不同公园自生植物物种组成特征及群落类型. 风景园林, 2020, 27(4): 42-49.
- [20] 田志慧, 蔡北溟, 达良俊. 城市化进程中上海植被的多样性、空间格局和动态响应(VIII): 上海乡土陆生草本植物分布特征及其在城市绿化中的应用前景. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2011, (4): 24-34.
- [21] 尤其, 商妞, 代挽玉, 姜文倩. 城市闲置地自生植物种间联结及土壤因子分析——以郑州北龙湖公园为例. 西北林学院学报, 2023, 38(5): 270-278.
- [22] 陈炳榕, 王颀凤, 黄培璐, 李仓拴. 城市自生草本植物群落物种组成及其生物多样性特征研究——以陕西杨凌城区为例. 园林, 2024, 41(6): 106-114.
- [23] 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.
- [24] 申沛鑫, 任术, 梁新悦, 胡远东. 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.
- [25] 李晓鹏, 冯黎, 黄瑞, 刘百川, 徐思慧. 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. 中国园林, 2023, 39(8): 108-114.
- [26] 包钰婷, 李晓鹏, 黄瑞. 成都四环路内工业废弃地自生植物生境及物种多样性. 风景园林, 2024, 31(1): 103-111.
- [27] 梁新悦, 游桂璇, 祝珊, 胡远东. 哈尔滨市高校校园绿地自生植物多样性及其在异质生境中的分布特征. 中国园林, 2023, 39(12): 138-144.
- [28] 崔波, 李服, 马杰. 郑州植物志. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.
- [29] 李雨晗, 丁彦芬, 张畅为, 张强. 南京外秦淮河河岸带草本花卉群落分类与排序. 生态学杂志, 2023, 42(5): 1065-1073.
- [30] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志-第一卷-总论. 北京: 科学出版社, 2004.
- [31] 中华人民共和国农业部农药检定所. 中国杂草原色图鉴. 2000.
- [32] 万方浩, 刘全儒, 谢明. 生物入侵: 中国外来入侵植物图鉴. 北京: 科学出版社, 2012.
- [33] 宋彦涛, 王平, 周道玮. 植物群落功能多样性计算方法. 生态学杂志, 2011, 30(9): 2053-2059.
- [34] 马雯雯, 闫淑君, 王云霄, 王喆, 陈莹, 黄柳菁. 城市行道树种植池自生植物区系研究——以福州市为例. 河南科技学院学报: 自然科学版, 2021, 49(3): 39-47.
- [35] 黄林娟, 于燕妹, 安小菲, 余林兰, 薛跃规. 天坑森林植物群落叶功能性状、物种多样性和功能多样性特征. 生态学报, 2022, 42(24): 10264-10275.
- [36] Tolonen K E, Leinonen K, Marttila H, Erkinaro J, Heino J. Environmental predictability of taxonomic and functional community composition in high-latitude streams. *Freshwater Biology*, 2017, 62(1): 1-16.
- [37] 董世魁, 汤琳, 张相锋, 刘世梁, 刘全儒, 苏旭坤, 张勇, 武晓宇, 赵珍珍, 李钰, 沙威. 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.
- [38] Yan Y J, Yang X, Tang Z Y. Patterns of species diversity and phylogenetic structure of vascular plants on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecology and Evolution*, 2013, 3(13): 4584-4595.
- [39] 李梦佳, 何中声, 江蓝, 谷新光, 晋梦然, 陈博, 刘金福. 戴云山物种多样性与系统发育多样性海拔梯度分布格局及驱动因子. 生态学报, 2021, 41(3): 1148-1157.
- [40] 卢孟孟, 黄小翠, 慈秀芹, 杨国平, 李捷. 沿海拔梯度变化的哀牢山亚热带森林群落系统发育结构. 生物多样性, 2014, 22(4): 438-448.
- [41] 王俊伟, 明升平, 许敏, 拉琼. 高山生态关键带植物群落多样性格局与系统发育结构. 草地学报, 2023, 31(9): 2777-2786.
- [42] Kraft N J B, Cornwell W K, Webb C O, Ackerly D D. Trait evolution, community assembly, and the phylogenetic structure of ecological communities. *The American Naturalist*, 2007, 170(2): 271-283.
- [43] 徐璐, 刘旻霞, 穆若兰, 张国娟, 于瑞新, 李亮. 高寒草甸植物群落谱系结构与多样性格局. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1387-1397.
- [44] Stegen J C, Hurlbert A H. Inferring ecological processes from taxonomic, phylogenetic and functional trait β -diversity. *PLoS One*, 2011, 6(6): e20906.
- [45] 刘旻霞, 南笑宁, 张国娟, 李博文, 徐璐, 穆若兰, 李亮, 于瑞新. 高寒草甸不同坡向植物群落物种多样性与功能多样性的关系. 生态学报, 2021, 41(13): 5398-5407.
- [46] 薛倩妮, 闫明, 毕润成. 山西五鹿山森林群落木本植物功能多样性. 生态学报, 2015, 35(21): 7023-7032.
- [47] 吕自立, 刘彬, 常凤, 马紫荆, 曹秋梅. 巴音布鲁克高寒草甸物种多样性与系统发育多样性沿海拔梯度分布格局及驱动因子. 草业学报, 2023, 32(7): 12-22.
- [48] 尹凤玲, 刘旻霞, 刘成, 王明星, 席可. 单户与联户经营对高寒草甸土壤理化性质与植物多样性的影响. 植物研究, 2023, 43(2): 261-271.
- [49] Bennett S J, Barrett-Lennard E G, Colmer T D. Salinity and waterlogging as constraints to saltland pasture production: a review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(4): 349-360.
- [50] 谭海燕, 周文星, 童江云, 杨丛林, 包涛, 马芳. 昆明地区耕地土壤电导率和水溶性盐的关系及土壤盐化情况分析. 云南农业科技, 2018, (1): 4-6.
- [51] 孙亚菲, 柴永青. 祁连山西端不同生境子遗植物裸木群落物种多样性及其与土壤水分、盐分的关系. 草地学报, 2023, 31(7): 2059-2067.
- [52] 安小菲, 余林兰, 陈铭, 刘昕宇, 黄贵, 黄林娟, 薛跃规. 广西天坑森林物种多样性与土壤酶活性和养分的关系. 广西植物, 2023, 43(3): 504-514.