

DOI: 10.5846/stxb202202160368

张丽苗, 谭雪, 董智, 郑杰, 袁中勋, 李昌晓. 重庆主城河岸带植物群落功能性状与土壤理化性质的关系. 生态学报, 2023, 43(5): 1892-1901.

Zhang L M, Tan X, Dong Z, Zheng J, Yuan Z X, Li C X. The relationship between plant functional traits and soil physicochemical properties in the riparian zones of downtown Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1892-1901.

重庆主城河岸带植物群落功能性状与土壤理化性质的关系

张丽苗, 谭雪, 董智, 郑杰, 袁中勋, 李昌晓*

西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715

摘要: 基于功能性状视角开展植物群落与环境关系的研究有助于揭示植物的适应策略。然而, 目前关于城市河岸带植物群落功能性状的研究较少。为此选取 10 项植物功能性状指标和 14 项土壤理化性质指标, 探究重庆主城 3 种生境类型河岸带(自然型河岸带(NRZ)、农耕主导型河岸带(FRZ)和开发建设主导型河岸带(BRZ))植物群落功能性状与土壤因子特征及互作机制。结果表明: (1) 与 NRZ 生境相比, FRZ 生境中的土壤速效磷、速效钾和氧化还原电位和 BRZ 生境中的土壤含水量显著偏高 ($P < 0.05$); FRZ 和 BRZ 生境中的土壤 pH 值和全磷含量显著偏高, 而土壤有机质、全钾和全氮含量显著偏低 ($P < 0.05$)。 (2) 与 NRZ 生境相比, FRZ 生境中的比根长和比根表面积显著较高, 茎干物质含量和叶干物质含量显著较低; BRZ 生境中仅茎干物质含量显著较低 ($P < 0.05$)。 (3) 冗余分析结果表明, 影响各生境类型河岸带植物群落功能性状的土壤因子不同, NRZ 生境为土壤容重、含水量和硝态氮, FRZ 生境为土壤铵态氮、全磷和有机质, BRZ 生境则是土壤含水量、温度和速效磷。研究发现与自然状态相比, 农业和建筑类型的人为干扰导致重庆主城河岸带生境发生改变, 植物群落通过权衡功能性状组合的策略提高对生境变化的适应性。

关键词: 城市河岸带; 生境类型; 植物功能性状; 土壤理化性质; 生态策略

The relationship between plant functional traits and soil physicochemical properties in the riparian zones of downtown Chongqing

ZHANG Limiao, TAN Xue, DONG Zhi, ZHENG Jie, YUAN Zhongxun, LI Changxiao*

Key Laboratory of Eco-environments in the Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in the Three Gorges Reservoir Region, College of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Studying the relationship between plants and the environment through plant functional traits is of help to reveal plants' adaptation strategies. At present, most researches on the relationship between plant functional traits and environmental factors have mainly focused on the terrestrial ecosystems. Very few similar studies have been carried out in the riparian ecosystems. Riparian vegetation is a prerequisite for riparian ecosystems to function properly, while maintaining healthy watercourse and landscape connectivity. Therefore, our study selected 10 plant functional trait indices and 14 soil physicochemical property indices to explore plant community functional traits, soil factor characteristics and interaction mechanisms of three habitat types (natural riparian zone (NRZ), farming riparian zone (FRZ) and building riparian zone (BRZ)) within the riparian zones of downtown Chongqing. The results showed that: (1) compared with the NRZ habitat, the soil available phosphorus, available potassium and redox potential in the FRZ habitat and the soil moisture in the BRZ

基金项目: 重庆市科技兴林项目(2021-9); 西南大学生命科学学院科学基金项目(20212005406201); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2020BFG03006); 中央林业改革发展资金科技推广示范项目(渝林科推 2020-2)

收稿日期: 2022-02-16; **网络出版日期:** 2022-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lichangx@swu.edu.cn

habitat were significantly higher ($P < 0.05$). The soil pH value and total phosphorus content were significantly higher in FRZ and BRZ habitats, while soil organic matter, total potassium and total nitrogen content were significantly lower ($P < 0.05$). (2) In comparison to the NRZ habitats, the specific root length and specific root surface area in the FRZ habitats were significantly higher, and the stem dry matter content and leaf dry matter content were significantly lower. Only the stem dry matter content was significantly lower in the BRZ habitats ($P < 0.05$). (3) The results of redundancy analysis showed that the soil factors which affected the functional traits of riparian plant communities in different habitat types were different. For the NRZ habitats, the influencing factors were soil bulk density, soil moisture and nitrate nitrogen. For the FRZ habitats, the influencing factors were soil ammonium nitrogen, total phosphorus and organic matter. For the BRZ habitats, the influencing factors were soil moisture, soil temperature, and available phosphorus. This study found that in comparison to the natural riparian state, the anthropogenic disturbance of agriculture and structural engineering related projects led to changes in the riparian habitats of downtown Chongqing, and that the plant community improved its adaptability to various habitats through trade-off combinations of functional traits.

Key Words: urban riparian zone; habitat type; plant functional traits; soil physicochemical properties; ecological strategy

植物功能性状是指植物适应环境变化形成的形态、生理和物候特征^[1-2],决定着植物的生长、存活和繁殖,影响着物种沿环境梯度的分布格局^[3]。植物功能性状与环境的关系是气候、干扰和生物条件共同筛选的结果,是近 30 年来植物功能生态学研究的重点领域之一^[4]。Garnier 等^[5]根据质量比假说,将个体水平植物功能性状予以加权赋值,计算得到群落加权平均性状指数(CWM),代表群落水平的植物功能性状,极大地推动了植物群落与环境因子的关系研究^[6-8]。学者们研究发现,在不同的地理空间尺度上,影响植物功能性状的环境因子不同。例如,在大尺度上,气候因子是决定植物功能性状的关键因素,而在小尺度上,地形因子和土壤因子影响更大^[3,9-10]。基于植物功能性状的群落研究有助于更全面地解释物种的适应性、物种集群和群落构建机制以及生态系统功能^[11-12]。然而,目前国内植物功能性状与环境因子之间关系的研究主要集中在陆地生态系统^[13-15],在河岸带生态系统中类似的研究较少。

河岸带是陆地和水体之间的生态交错区,在改善水质、控制洪水、减缓水土流失及保护生物多样性等方面具有重要作用^[16-17]。河岸植被是河岸带生态系统功能正常发挥及维持健康的水道和景观连通性的先决条件^[18]。重庆主城区位于三峡库区末端,受到三峡大坝蓄水的影响,极大地简化了该区域河岸带植被的组成和结构^[17]。与此同时,重庆主城河岸带遭到不同程度的人为干扰^[19],如航运、农业活动以及建筑扩建,加剧了河岸生态系统脆弱性^[20-21]。在大坝蓄水的驱动下,加之频繁的人为活动干扰^[22],重庆主城区河岸带生境变得具有高度异质性,主要表现在不同河流间水文、土壤和人为干扰的多样性和复杂性^[23]。然而,目前关于城市河岸带植物群落与土壤特性的研究较少,尤其是从植物群落功能性状视角切入的研究鲜有报道。因此,本研究以重庆主城河岸带为研究区域,探讨不同生境类型(自然、农业、建筑)植物群落功能性状与土壤理化性质的关系,以期回答以下科学问题:(1)不同生境类型河岸带植物群落功能性状及土壤理化特征是否存在差异?(2)不同生境类型河岸带植物群落功能性状与土壤理化性质之间存在怎样的互作机制?本研究从植物群落功能视角揭示城市河岸带植物群落与土壤理化特性之间的关系,研究结果可以为城市河岸带的植被修复、重建、管理和保护提供直接指导。

1 研究区概况

重庆市主城区(29°26'—29°37'N, 106°22'—106°37'E)位于三峡库区库尾(图 1),海拔高度在 168—400 m 之间,地貌以丘陵和低山为主,属亚热带湿润季风性气候,全年日照总数 1000—1400 h,年平均气温 18—20℃,年平均降水量 1000—1350 mm^[24-25]。该区土壤类型以水稻土、冲积土、紫色土、石灰土和黄壤为主。重庆市主城区段长江干流自西向东横贯全境,在平面上呈现出连续弯曲的河道形态。该河段支流水系发达,含

有嘉陵江、花溪河和五布河等 15 条一级支流。然而,随着人类对河流及河岸生态系统的过度开发利用,如大规模地开挖土地、建设道路、农业耕种等,加之三峡库区“冬蓄夏排”的水位管理模式,导致重庆市主城区河岸带植被受到水文胁迫和人为活动的双重影响。在这一背景下,重庆主城区河岸带形成了 3 种主要的生境类型:(1)自然型河岸带(NRZ):无人为破坏和扰动,基本上处于自然状态;(2)农耕主导型河岸带(FRZ):受农耕地干扰;(3)开发建设主导型河岸带(BRZ):受工程措施硬化如码头建设与河堤修护干扰。这些生境中的优势种主要以狗牙根(*Cynodon dactylon*)、牛鞭草(*Hemarthria altissima*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、葎草(*Humulus scandens*)、稗(*Echinochloa crusgalli*)、鸭跖草(*Commelina communis*)等一年生或多年生草本植物为主。

2 材料与方法

2.1 样地设置

为了明确重庆主城河岸带植物群落功能性状与土壤理化性质在 NRZ、FRZ 和 BRZ 生境之间的差异,根据全面性、典型性和代表性原则,于 2020 年 8 月,针对这 3 种生境分别设置了 8、16、16 条平行于河道的调查样带(长 100 m,宽 20 m)(图 1、表 1)。在每条样带内以 50 m 的间隔设置 3 个 2 m×2 m 的草本群落样方^[17],记录每个样方中的所有物种组成、盖度和高度。同时使用便携式全球定位系统(GPS)设备(Unistrong Odin 系列,中国北京)记录每个样方的地理位置(纬度和经度),并记录环境信息(海拔、坡度、坡向)、人为活动及干扰情况描述。

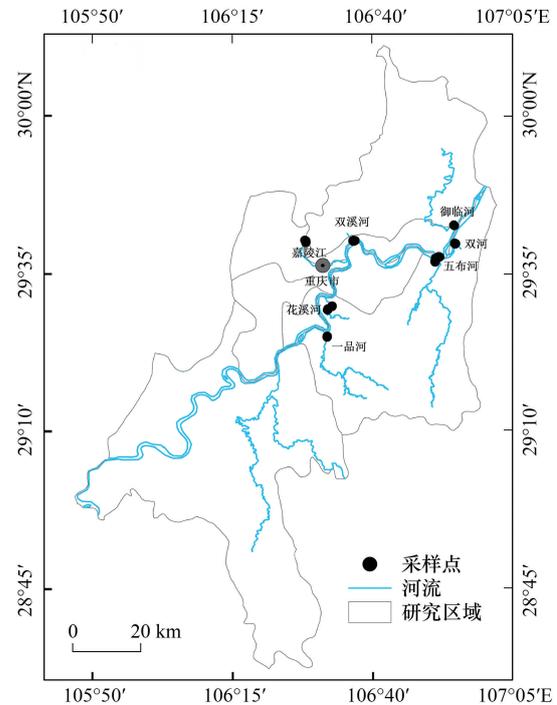


图 1 研究区位置及样方分布示意图

Fig.1 Location of the study area and the investigated plots

表 1 不同生境类型河岸带地形因子和群落特征

Table 1 Topographic factor and community characteristics in different habitat types

生境类型 Habitat type	河流 River	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/(°)	物种丰富度 Species richness	优势种 Dominant species
自然型河岸带 NRZ	双河	175.20±0.37	46.40±25.97	4.8±0.3	狗牙根 <i>C. dactylon</i>
	御临河	175.50±0.87	25.00±2.89	7.6±0.7	葎草 <i>H. scandens</i> 牛鞭草 <i>H. altissima</i>
农耕主导型河岸带 FRZ	一品河	176.40±1.83	16.40±3.44	5.4±0.5	喜旱莲子草 <i>A. philoxeroides</i>
	五布河	175.09±1.09	18.36±2.50	5.3±0.5	稗 <i>E. crusgalli</i>
	花溪河	180.33±2.09	32.83±4.59	6.4±0.6	鸭跖草 <i>C. communis</i>
开发建设主导型河岸带 BRZ	嘉陵江	175.60±0.24	21.60±6.55	7.1±0.6	牛鞭草 <i>H. altissima</i>
	双溪河	174.25±0.99	28.00±2.47	4.7±0.5	喜旱莲子草 <i>A. philoxeroides</i>
	干流段	171.67±0.41	21.67±3.63	4.7±0.3	葎草 <i>H. scandens</i>

NRZ:自然型河岸带 Natural riparian zone;FRZ:农耕主导型河岸带 Farming riparian zone;BRZ:开发建设主导型河岸带 Building riparian zone

2.2 植物功能性状取样与测定

在每个样方中选取盖度≥5%物种进行挑选,选取生长成熟、长势良好、大小相近的 3—5 株完整植株。在每株植物上采集 10 片完全展开、未遭受病虫害的叶片(从植株上端第 4 片叶子开始选取),用湿润滤纸覆盖,置于自封袋中并用泡沫箱保存。同时挖取采集过叶片的整株植物,并保证根系不被破损,带回实验室进行

根系的清洗和测定。为了全面反映植物功能性状特征及权衡策略,本研究参考功能性状手册测定了植物根、茎、叶 3 个组织的 10 项功能性状指标^[26],包括株高(H)、叶厚(LT)、比叶面积(SLA)、叶干物质含量(LDMC)、茎干物质含量(SDMC)、根长密度(RLD)、比根长(SRL)、比根表面积(SRA)、细根组织密度(FRTD)及根表面积密度(SAD)。

2.3 土壤因子取样与测定

为了确定土壤理化因子对植物功能性状的影响,测定了 14 项土壤理化指标。其中,使用氧化还原电位仪测定土壤温度(T)和氧化还原电位(ORP)。采用五点取样法对各样方中表层土壤(0—20 cm)进行采集,带回实验室测定其他土壤理化特性。参考《土壤分析技术规范(第二版)》^[27],采用环刀法测定土壤容重(BD);采用烘干法测定土壤含水量(SM);采用水浸提液电位测定法测定 pH 值;采用铬酸钾容量法-稀释热法测定有机质(SOM);采用元素分析仪测定全碳(TC)和全氮(TN);采用电感耦合等离子体发射光谱法测定全钾(TK)和全磷(TP);采用间断化学分析仪测定铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、速效钾(AK)和速效磷(AP)。

2.4 数据处理与分析

群落功能性状采用物种性状的群落加权平均值(CWM)表示。由每一物种的重要值对其相应的功能性状予以加权赋值,以消除物种均值对性状与环境因子关系的过滤效应^[5]。CWM 值广泛用于描述地块的功能组成,并评估群落或生态系统的属性。计算公式如下^[28]:

$$CWM = \sum_{i=1}^S P_i t_i$$

式中:S 为样地内所有植物的物种数, P_i 为种 i 的重要值, t_i 为第 i 个物种的性状值。

采用 SPSS 25.0 和 Canoco 5.0 软件进行数据统计分析。采用单因素方差分析评估不同干扰生境类型河岸带植物功能性状和土壤理化性质的差异。采用 Pearson 相关系数分析群落功能性状和土壤理化性质的相关性。采用主成分分析(PCA)分析影响植物群落功能性状的主要指标。采用冗余分析(RDA)分析土壤理化因子对群落功能性状的影响。分析前通过方差膨胀因子(VIF)剔除共线性强的土壤因子。

3 结果与分析

3.1 不同生境类型河岸带土壤理化性质

单因素方差分析结果表明(表 2),与 NRZ 生境相比,FRZ 和 BRZ 生境中的土壤有机质、全钾和全氮含量显著偏低,而土壤 pH 值和全磷含量显著偏高($P < 0.05$)。FRZ 生境中的土壤速效磷、速效钾和氧化还原电位比 BRZ 和 NRZ 生境中的显著偏高,土壤温度显著偏低,而 BRZ 生境与 NRZ 生境中无显著差异($P < 0.05$)。BRZ 生境中的土壤含水量比 FRZ 和 NRZ 生境中的显著偏高,而 FRZ 生境与 NRZ 生境中无显著差异($P < 0.05$)。此外,土壤铵态氮、硝态氮、全碳及容重在 3 种生境中的差异均不显著($P > 0.05$)。

对重庆主城河岸带土壤理化性质进行 Pearson 相关性分析(表 3),结果表明:土壤 pH 值和全磷、全碳、速效钾显著正相关,和铵态氮、全氮、全钾及有机质极显著负相关。土壤容重和氧化还原电位极显著正相关,和速效钾、速效磷、铵态氮、全碳、全磷、含水量极显著负相关。土壤全氮和全磷、铵态氮、速效磷、全钾、有机质含量显著正相关。土壤有机质和铵态氮、速效磷、速效钾及全钾极显著正相关。土壤速效钾和全磷、全碳、铵态氮、速效磷极显著正相关。土壤速效磷和速效钾、有机质、全氮极显著正相关。

3.2 不同生境类型河岸带植物群落功能性状特征

单因素方差分析结果表明,河岸带不同生境类型植物群落功能性状存在显著差异(表 4)。与 NRZ 生境相比,FRZ 和 BRZ 生境中茎干物质含量显著较低;FRZ 生境中的比根长和比根表面积显著较高,叶干物质含量显著较低($P < 0.05$)。而与 BRZ 生境相比,FRZ 生境中的比根长、根长密度、根表面积密度、比根表面积、比叶面积和叶厚显著较高,而茎干物质含量显著较低($P < 0.05$)。此外,株高和细根组织密度在 3 种生境中均无显著差异($P > 0.05$)。

表 2 不同生境类型河岸带土壤理化性质特征

Table 2 Soil physicochemical properties in the riparian zones of different habitat types

土壤因子 Soil factors	自然型河岸带 NRZ	农耕主导型河岸带 FRZ	开发建设主导型河岸带 BRZ
pH	7.41±0.05c	7.62±0.05b	7.76±0.02a
SM/%	21.50±1.9b	22.70±2.3b	30.10±1.5a
BD/(g/cm ³)	1.29±0.05a	1.27±0.05a	1.15±0.03a
ORP/mV	219.96±8.16b	245.48±6.58a	210.78±4.56b
T/°C	32.49±0.19a	30.00±0.27b	32.63±0.39a
TC/(g/kg)	15.78±1.09a	15.37±1.11a	16.83±0.30a
TN/(g/kg)	1.66±0.08a	1.11±0.06b	0.80±0.05c
TP/(g/kg)	0.51±0.02b	0.63±0.03a	0.60±0.01a
TK/(g/kg)	13.82±0.32a	12.23±0.22b	10.83±0.20c
SOM/%	2.60±0.2a	1.60±0.1b	1.00±0.1c
NH ₄ ⁺ -N/(mg/kg)	2.99±0.21a	2.83±0.24a	2.56±0.17a
NO ₃ ⁻ -N/(mg/kg)	0.92±0.23a	1.87±0.25a	1.47±0.14a
AP/(mg/kg)	8.71±1.23b	21.96±2.78a	9.81±0.55b
AK/(mg/kg)	27.87±2.44b	54.72±6.21a	29.43±1.51b

SM:土壤含水量 Soil moisture; BD:容重 Bulk density; ORP:氧化还原电位 Oxidation-reduction potential; T:土壤温度 Temperature; TC:全碳 Total carbon; TN:全氮 Total nitrogen; TP:全磷 Total phosphorus; TK:全钾 Total potassium; SOM:有机质 Soil organic matter; NH₄⁺-N:铵态氮 Ammonium nitrogen; NO₃⁻-N:硝态氮 Nitrate nitrogen; AP:速效磷 Available phosphorus; AK:速效钾 Available potassium;同行不同字母表示差异显著(P<0.05)

表 3 重庆主城河岸带土壤理化性质的相关性分析

Table 3 Correlation coefficients among soil physical and chemical properties in the riparian zone of Downtown Chongqing

土壤因子 Soil factors	pH	含水量 SM	容重 BD	氧化还 原电位 ORP	土壤温度 T	全碳 TC	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	有机质 SOM	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	速效磷 AP
SM	0.017												
BD	-0.122	-0.651 **											
ORP	0.033	-0.270 **	0.282 **										
T	-0.098	-0.088	0.001	-0.129									
TC	0.278 **	0.212 *	-0.502 **	-0.307 **	0.064								
TN	-0.331 **	0.098	-0.072	0.025	0.101	0.168							
TP	0.266 **	0.119	-0.414 **	-0.140	0.063	0.463 **	0.192 *						
TK	-0.338 **	-0.149	0.252 **	0.027	0.164	-0.245 **	0.587 **	-0.014					
SOM	-0.257 **	0.027	-0.091	0.059	0.153	0.182	0.860 **	0.174	0.598 **				
NH ₄ ⁺ -N	-0.248 **	0.256 **	-0.327 **	-0.039	0.189 *	0.249 **	0.612 **	0.261 **	0.138	0.453 **			
NO ₃ ⁻ -N	0.293 **	-0.121	-0.043	0.118	-0.036	-0.051	-0.157	0.117	-0.156	-0.135	-0.147		
AP	0.016	0.217 *	-0.397 **	0.146	-0.235 *	0.232 *	0.414 **	0.539 **	0.013	0.385 **	0.528 **	0.031	
AK	0.188 *	0.120	-0.353 **	0.045	0	0.357 **	0.140	0.471 **	0.007	0.298 **	0.261 **	0.179	0.552 **

* P<0.05; ** P<0.01

表 4 不同生境类型河岸带植物群落功能性状特征

Table 4 Functional traits of plant communities in the riparian zones of different habitat types

功能性状 Functional traits	自然型河岸带 NRZ	农耕主导型河岸带 FRZ	开发建设主导型河岸带 BRZ
H/cm	66.41±3.82a	63.92±3.92a	74.12±5.20a
SRL/(cm/g)	814.50±135.96b	1415.78±237.53a	642.45±87.25b
RLD/(cm/cm ³)	413.01±39.02ab	486.72±48.96a	326.22±32.28b
SAD/(cm ² /cm ³)	58.91±3.37ab	61.65±3.81a	47.99±3.50b
SRA/(cm ² /g)	295.91±50.89b	419.01±53.28a	286.18±34.45b
FRTD/(g/cm ³)	0.57±0.03a	0.52±0.09a	0.44±0.03a
SDMC/(mg/g)	243.38±14.52a	134.75±12.84c	176.62±11.72b
SLA/(mm ² /mg)	160.09±19.91ab	195.74±11.54a	150.10±15.57b
LDMC/(mg/g)	185.77±11.02a	140.83±11.46b	166.35±11.95ab
LT/mm	0.11±0.01ab	0.13±0.01a	0.09±0.01b

H:株高 Height; SRL:比根长 Specific root length; RLD:根长密度 Root length density; SAD:根表面积密度 Surface area density; SRA:比根表面积 Specific root area; FRTD:细根组织密度 Fine root tissue density; SDMC:茎干物质含量 Stem dry matter content; SLA:比叶面积 Specific leaf area; LDMC:叶干物质含量 Leaf dry matter content; LT:叶厚 Leaf thickness

对重庆主城河岸带植物群落功能性状进行 Pearson 相关性分析(表 5),结果表明:根性状间的相关性极强,根长密度、根表面积密度、比根长、比根表面积显著正相关。细根组织密度和根长密度、根表面积密度显著正相关,和比根表面积显著负相关。叶性状间的关系也十分紧密,叶厚和比叶面积显著正相关。不同器官间的性状也呈现一定的显著关系。叶厚和株高、比叶面积、根表面积密度及比根长显著正相关。比叶面积和株高、比根长、根表面积密度显著正相关。株高和叶干物质含量、茎干物质含量、叶厚、细根组织密度及比叶面积显著正相关。叶干物质含量和根长密度、根表面积密度、比根长、比根表面积、细根组织密度、茎干物质含量显著正相关。

表 5 重庆主城河岸带植物群落功能性状的相关性分析

Table 5 Correlation coefficients among functional traits of plant community in the riparian zone of downtown Chongqing

群落功能性状 Community functional trait	根长密度 RLD	根表面积密度 SAD	比根长 SRL	比根表面积 SRA	比叶面积 SLA	株高 H	叶厚 LT	细根组织密度 FRTD	茎干物质含量 SDMC
SAD	0.961 **								
SRL	0.903 **	0.860 **							
SRA	0.682 **	0.632 **	0.852 **						
SLA	0.163	0.230 **	0.226 *	0.094					
H	0.111	0.199 *	0.085	-0.032	0.389 **				
LT	0.162	0.284 **	0.196 *	0.041	0.444 **	0.405 **			
FRTD	0.238 *	0.379 **	-0.060	-0.238 *	-0.013	0.271 **	0.200		
SDMC	0.371 **	0.448 **	0.226 *	0.132	-0.044	0.429 **	-0.1017	0.46 * **	
LDMC	0.418 **	0.520 **	0.320 **	0.215 *	0.188 *	0.458 **	0.215 *	0.452 **	0.836 **

主成分分析表明(表 6),前 3 个 PCA 轴的累积贡献率达 69.72%且特征值均大于 1,说明性状指标在前 3 个轴的载荷值较高。3 个主成分的特征值分别为 3.336, 2.055, 1.551, 贡献率分别为 33.66%, 20.55%, 15.51%。其中,第一主成分与根长密度、根表面积密度、比根长和比根表面积等指标高度相关,代表了根性状(PC1);第二主成分与茎干物质含量和叶干物质含量等指标紧密相关,代表了干物质含量(PC2);第三主成分与株高、叶厚、细根组织密度和比叶面积等性状指标紧密相关,代表了全株性状(PC3)。

表 6 初始因子旋转成份矩阵与主成分贡献率

Table 6 Initial factor rotation component matrix and principal component contribution rate

性状指标 Trait index	主成分 Principal component			性状指标 Trait index	主成分 Principal component		
	PC1	PC2	PC3		PC1	PC2	PC3
RLD	0.919	0.061	-0.075	LT	0.318	-0.458	0.622
SAD	0.907	0.209	0.023	FRTD	-0.065	0.380	0.549
SRL	0.872	-0.303	-0.171	SLA	0.329	-0.276	0.460
SRA	0.750	-0.210	-0.326	特征值 Eigenvalue	3.366	2.055	1.551
SDMC	0.195	0.888	-0.004	贡献率 Contribution rate	33.66%	20.55%	15.51%
LDMC	0.300	0.797	-0.014	累积贡献率	33.66%	54.21%	69.72%
H	0.186	0.136	0.713	Cumulative contribution rate			

3.3 不同生境类型河岸带植物群落功能性状与土壤因子的关系

冗余分析结果表明(图 2),在 NRZ 生境,前两个轴的累积解释率为 61.05%,土壤容重、含水量、硝态氮是影响植物群落功能性状的主要土壤因子。株高、比叶面积及茎干物质含量与土壤含水量呈正相关关系,与土壤容重和硝态氮呈负相关关系,其余性状指标与主要土壤因子的关系正相反。在 FRZ 生境,前两个轴的累积解释率为 67.79%,土壤铵态氮、全磷、有机质是影响植物群落功能性状的主要土壤因子。茎干物质含量、叶干物质含量及根组织密度与土壤铵态氮、全磷及有机质呈负相关关系,其余性状指标与主要土壤因子呈正相关

关系。在 BRZ 生境,前两个轴的累积解释率为 53.10%。土壤含水量、温度、速效磷是影响植物群落功能性状的主要土壤因子。根性状、干物质含量与土壤含水量呈正相关关系,与土壤温度呈负相关关系。叶厚与土壤温度呈正相关关系,与土壤速效磷和温度呈负相关关系。

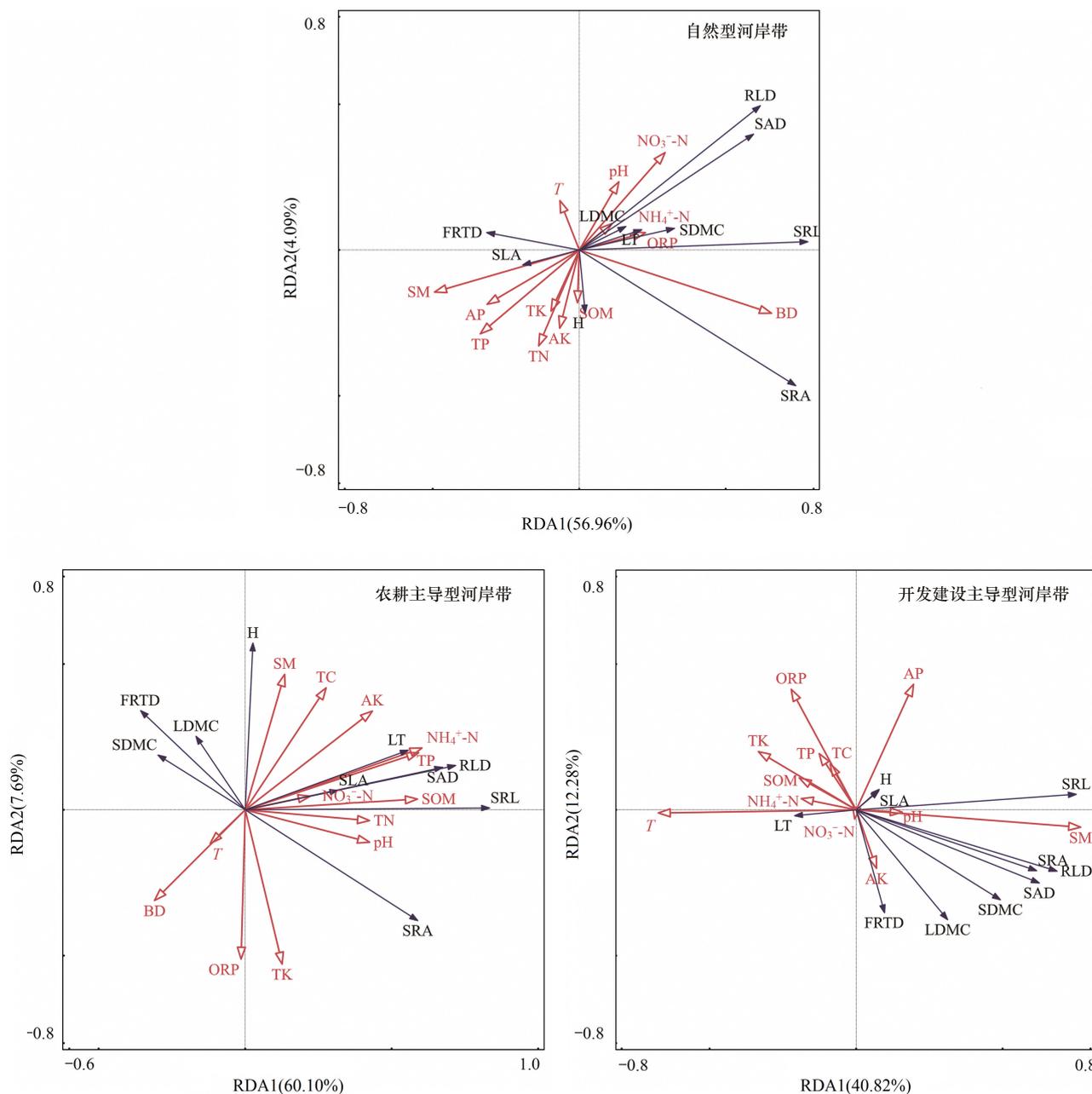


图 2 不同生境类型河岸带植物群落功能性状与土壤因子的冗余分析(RDA)排序

Fig.2 Redundancy analysis ordination of plant community functional traits and soil factors in the urban riparian zone with different habitat types

红色箭头代表土壤因子;SM:土壤含水量 Soil moisture;BD:容重 Bulk density;ORP:氧化还原电位 Oxidation-reduction potential;T:土壤温度 Temperature;TC:全碳 Total carbon;TN:全氮 Total nitrogen;TP:全磷 Total phosphorus;TK:全钾 Total potassium;SOM:有机质 Soil organic matter;NH₄⁺-N:铵态氮 Ammonium nitrogen;NO₃⁻-N:硝态氮 Nitrate nitrogen;AP:速效磷 Available phosphorus;AK:速效钾 Available potassium;蓝色箭头代表植物群落功能性状;H:株高 Height;SRL:比根长 Specific root length;RLD:根长密度 Root length density;SAD:根表面积密度 Surface area density;SRA:比根表面积 Specific root area;FRTD:细根组织密度 Fine root tissue density;SDMC:茎干物质含量 Stem dry matter content;SLA:比叶面积 Specific leaf area;LDMC:叶干物质含量 Leaf dry matter content;LT:叶厚 Leaf thickness

4 讨论

4.1 河岸带不同干扰生境类型土壤理化性质和群落功能性状特征

随着城市化进程的推进以及周边的土地利用,河岸生境逐渐恶化^[18]。本研究对重庆主城不同生境类型河岸带进行研究,结果表明,由于所受干扰类型的不同,河岸带发生了相对一致的变化。土壤有机质、全钾、全氮含量及 pH 值在不同干扰梯度下的生境类型中均呈显著性差异。其中土壤有机质、全钾和全氮含量表现为自然型河岸带(NRZ)>农耕主导型河岸带(FRZ)>开发建设主导型河岸带(BRZ),而 pH 值变化趋势与之正相反,即开发建设主导型河岸带(BRZ)>农耕主导型河岸带(FRZ)>自然型河岸带(NRZ)。可能是因为自然型河岸带(NRZ)植被覆盖度高,地表有丰富的凋落物残体,分解后产生多种腐殖质,从而提高了土壤有机质含量^[29]。研究表明土壤氮元素主要来源于土壤有机质,所以土壤中有机质含量丰富的区域氮含量也较高^[30],这一结论在本研究中也得到了很好的佐证,即不同生境类型中土壤氮含量与有机质的分布格局一致。而在开发建设主导型河岸带(BRZ),由于凋落物在土壤表面的积累和滞留率降低,并随之与土壤基质结合较少^[18],因此土壤有机质、全钾及全氮含量均较低;但是土壤 pH 值较高,可能是因为河岸护堤的存在,矿化物含量高,导致土壤碱性增强^[31],这往往也预示着群落受干扰程度加剧^[13],物种组成也会随着土壤酸碱度值的变化而相应变化,这与 Pickett 等^[32]的研究结果一致。土壤速效磷、速效钾含量表现为农耕主导性河岸带(FRZ)显著高于其他两种类型河岸带,这与人为耕作施肥等农业活动密切相关^[29]。葛晓改等^[33]研究也表明土壤速效磷的含量主要受植被类型和干扰活动的影响。

功能性状往往是相互协调的,不应该被孤立地看待和分析^[6]。植物功能性状的权衡决定了植物的生活史策略和群落中不同物种所占据的生态位^[34]。本研究结果表明,除株高和细根组织密度外,其余植物群落功能性状在重庆主城 3 种生境类型河岸带上均存在显著差异,这反映了植物对于不同环境的适应策略。株高表征了植物抢占资源的能力,细根组织密度反映了植物抵御外界环境变化的能力^[13]。此次调查是在洪水过后的平水期进行,由于水文状况的干扰,各生境群落植物株高和细根组织密度表现出较为相似的变化来适应河岸环境。自然型河岸带(NRZ)的比叶面积较低,叶干物质含量和茎干物质含量较高,而农耕主导型河岸带(FRZ)正相反。前人的研究也报道了类似的结果^[35-36]。比叶面积越大,叶片养分含量越高,资源吸收率就越高;叶干物质含量越高,碳氮比越高,养分利用率就越高^[37-38]。细根是稳定土壤团聚体的重要因素,根系性状影响土壤孔隙度和水分入渗,从而减少径流和土壤侵蚀^[39]。通过对植物群落功能性状进行主成分分析,得到 3 个主成分,主要包括根性状,干物质含量和全株性状,其共同表征了在不同生境类型中,植物为了适应环境变化而表现出不同的表型性状^[40]。

4.2 群落植物功能性状对土壤因子的响应

植物对土壤因子的响应部分是由功能性状介导的^[41]。植物根据环境差异化进行不同功能性状间的调控以形成最佳的性状组合,实现最大程度的资源利用,尽可能避免逆境带来的不利影响,以提高对不同生境条件的适合度,进而拓宽其生态幅。本研究表明,在不同生境类型河岸带,影响植物群落功能性状的因子不同。在自然型河岸带(NRZ),土壤容重、含水量及硝态氮是影响植物群落功能性状的主要因子。土壤容重是土壤紧实度的敏感指标,表征土壤的疏松程度^[30],与土壤含水量极显著负相关。由于自然河岸带坡度较陡峭,且土壤大多未经干扰,是原地土壤的积累,因而其容重对植物群落功能性状影响较大。除硝态氮外其余土壤养分对植物群落功能性状的解释量较低。可能是因为自然型河岸带主要以狗牙根、葎草和牛鞭草为主,这些植物生态位宽、生境适应性强,能够有效利用土壤养分,对土壤养分含量要求较低^[42]。前人研究发现,在高养分土壤,植物比叶面积增大,呈现出获取策略^[37,43]。而本研究结果与之相反,自然型河岸带(NRZ)土壤有机质、全钾、全氮含量较高,植物表现为较高茎干物质含量和叶干物质含量,采取缓慢投资-收益型策略,这与 Song 等^[44]的研究结果一致。在农耕主导型河岸带(FRZ),土壤全磷、铵态氮及有机质是影响植物群落功能性状的主要因子,植物群落根性状和比叶面积与土壤全磷和铵态氮呈正相关关系。土壤磷元素是一种沉积性矿物,

是土壤肥力的启动因素^[29],且土壤全磷与速效磷、速效钾及铵态氮极显著正相关。由于人为施肥的干扰,农耕主导型河岸带(FRZ)土壤速效磷和速效钾含量较高,入侵物种喜旱莲子草作为群落的优势物种,能较好地适应这一资源丰富的环境,显示出较大的根性状,以提高根系周转速率和延伸率,增强吸收水分和养分的能力^[38];同时,倾向于有较高的比叶面积提高叶片碳的同化效率,采取快速投资-收益型策略达到生存、繁殖目的,迅速占据生态位。而在开发建设主导型河岸带(BRZ),土壤含水量、温度及速效磷是影响植物群落功能性状的主要因子,植物群落根性状和干物质含量与含水量呈正相关关系,与土壤温度呈负相关关系,与土壤速效磷相关性较弱。有研究表明,地上性状可以通过地下性状调控植物对土壤水分的影响。土壤水分充足时,植物分配相对较小比例的光合产物给根系^[45];水分不足时则需要植物增加根系投入^[13]。而本研究结果与之不一致,是因为该生境中,优势物种为禾本科植物牛鞭草,其具有很强的分蘖能力,可以通过增加对根性状和干物质含量的投入,吸收水分和养分。本研究中其他土壤因子与植物群落功能性状关系较弱,是因为忽略了一些对土壤理化性质有较好响应的重要性状,如植物各器官的碳、氮、磷、钾等元素含量^[46],之后还需要测量更多与植物新陈代谢相关的生理性状进行进一步的研究和分析。

5 结论

本研究基于功能性状视角探讨了重庆主城自然型、农耕主导型和开发建设主导型河岸带植物群落功能性状与土壤因子特征及互作机制。结果表明,3种类型河岸带的土壤理化特征存在差异,与自然状态河岸带相比,受农业和建筑干扰的河岸带的土壤pH值和全磷含量显著增加,而土壤有机质、全钾和全氮含量显著减少。不同类型河岸带土壤理化因子的差异影响着植物群落的比根长、比根表面积、茎干物质含量和叶干物质含量,使其通过不同的权衡策略应对生境变化。本研究揭示了城市河岸带不同生境植物功能性状和土壤理化性质的差异,对于进一步认识河岸带植物群落的驱动机制及物种的适应策略具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E, Díaz S, Buchmann N, Gurvich D E, Reich P B, Steege H T, Morgan H D, Heijden M G A V, Pausas J G, Poorter H. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(4): 335.
- [2] Reich P B, Wright I J, Cavender-Bares J, Craine J M, Oleksyn J, Westoby M, Walters M B. The evolution of plant functional variation: traits, spectra, and strategies. *International Journal of Plant Sciences*, 2003, 164(S3): S143-S164.
- [3] 刘晓娟, 马克平. 植物功能性状研究进展. *中国科学: 生命科学*, 2015, 45(4): 325-339.
- [4] Diaz S, Cabido M, Casanoves F. Plant functional traits and environmental filters at a regional scale. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9(1): 113-122.
- [5] Garnier E, Cortez J, Billès G, Navas M L, Roumet C, Debussche M, Laurent G, Blanchard A, Aubry D, Bellmann A, Neill C, Toussaint J P. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. *Ecology*, 2004, 85(9): 2630-2637.
- [6] Cheng X Q, Ping T, Li Z Z, Wang T, Han H R, Epstein H E. Effects of environmental factors on plant functional traits across different plant life forms in a temperate forest ecosystem. *New Forests*, 2022, 53(1): 125-142.
- [7] 何雅琴, 史晓洁, 陈国杰, 赖敏英, 曾纪毅, 魏凯, 邓传远. 滨柃叶功能性状对环境因子的响应. *生态学报*, 2022, 42(6): 2418-2429.
- [8] Gong H D, Cui Q J, Gao J. Latitudinal, soil and climate effects on key leaf traits in northeastern China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e00904.
- [9] Xi N X, Adler P B, Chen D X, Wu H Y, Catford J A, van Bodegom P M, Bahn M, Crawford K M, Chu C J. Relationships between plant-soil feedbacks and functional traits. *Journal of Ecology*, 2021, 109(9): 3411-3423.
- [10] Joswig J S, Wirth C, Schuman M C, Kattge J, Reu B, Wright I J, Sippel S D, Rüger N, Richter R, Schaeppman M E, van Bodegom P M, Cornelissen J H C, Diaz S, Hattinck W N, Kramer K, Lens F, Niinemets Ü, Reich P B, Reichstein M, Römermann C, Schrodt F, Anand M, Bahn M, Byun C, Campetella G, Cerabolini B E L, Craine J M, Gonzalez-Melo A, Gutiérrez A G, He T H, Higuchi P, Jactel H, Kraft N J B, Minden V, Onipchenko V, Peñuelas J, Pillar V D, Sosinski Ê, Soudzilovskaia N A, Weiher E, Mahecha M D. Climatic and soil factors explain the two-dimensional spectrum of global plant trait variation. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6(1): 36-50.
- [11] 宋光满, 韩涛涛, 洪岚, 张玲玲, 李晓波, 任海. 演替过程中植物功能性状研究进展. *生态科学*, 2018, 37(2): 207-213.
- [12] 许驭丹, 董世魁, 李帅, 沈豪. 植物群落构建的生态过滤机制研究进展. *生态学报*, 2019, 39(7): 2267-2281.
- [13] 王琇瑜, 黄晓霞, 和克俭, 孙晓能, 吕曾哲舟, 张勇, 朱涓, 曾睿钦. 滇西北高寒草甸植物群落功能性状与土壤理化性质的关系. *草业学报*, 2020, 29(8): 6-17.
- [14] 霍佳璇, 任梁, 潘莹莹, 赵瑾, 向响, 余程, 孟德惠, 王源源, 鲁瑞洁, 黄永梅. 柴达木盆地荒漠植物功能性状及其对环境因子的响应. *生态学报*, 2022, 42(11): 1-10.
- [15] 王鑫, 杨磊, 赵倩, 张钦弟. 黄土高原典型小流域草地群落功能性状对土壤水分的响应. *生态学报*, 2020, 40(8): 2691-2697.

- [16] Yi X M, Huang Y Y, Ma M H, Wen Z F, Chen J L, Chen C D, Wu S J. Plant trait-based analysis reveals greater focus needed for mid-channel bar downstream from the Three Gorges Dam of the Yangtze River. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 105950.
- [17] Zheng J, Arif M, Zhang S L, Yuan Z X, Zhang L M, Li J J, Ding D D, Li C X. Dam inundation simplifies the plant community composition. *Science of the Total Environment*, 2021, 801: 149827.
- [18] Kuglerová L, Kielstra B W, Moore R D, Richardson J S. Importance of scale, land-use, and stream network properties for riparian plant communities along an urban gradient. *Freshwater Biology*, 2019, 64(3): 587-600.
- [19] Kaushal S S, Belt K T. The urban watershed continuum: evolving spatial and temporal dimensions. *Urban Ecosystems*, 2012, 15(2): 409-435.
- [20] Díaz-Pascacio E, Ortega-Argueta A, Castillo-Uzcanga M M, Ramírez-Marcial N. Influence of land use on the condition of the riparian zone along an urban-rural gradient in the Sabinal River, Mexico. *Botanical Sciences*, 2018, 96(2): 180-199.
- [21] Kyle G, Leishman M R. Plant functional trait variation in relation to riparian geomorphology: the importance of disturbance. *Austral Ecology*, 2009, 34(7): 793-804.
- [22] Zheng J, Arif M, Zhang S L, Yuan Z X, Zhang L M, Dong Z, Tan X, Charles W, Li C X. The convergence of species composition along the drawdown zone of the Three Gorges Dam Reservoir, China: implications for restoration. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(31): 42609-42621.
- [23] Arif M, Tahir M, Zheng J, Li C X. Impacts of riparian width and stream channel width on ecological networks in main waterways and tributaries. *Science of the Total Environment*, 2021, 792: 148457.
- [24] 吴雪, 黄力, 靳程, 钱深华, 杨永川. 重庆主城区杂草物种组成特征及多样性格局. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2020(2): 98-109.
- [25] 李婷婷. 城市绿色空间时空演变及其对生态环境效应的关联性研究——以重庆主城区为例. 重庆: 西南大学, 2018.
- [26] Díaz S, Kattge J, Cornelissen J H C, Wright I J, Lavorel S, Dray S, Reu B, Kleyer M, Wirth C, Colin Prentice I, Garnier E, Bönsch G, Westoby M, Poorter H, Reich P B, Moles A T, Dickie J, Gillison A N, Zanne A E, Chave J, Joseph Wright S, Sheremet'ev S N, Jactel H, Baraloto C, Cerabolini B, Pierce S, Shipley B, Kirkup D, Casanoves F, Joswig J S, Günther A, Falczuk V, Rüger N, Mahecha M D, Gorné L D. The global spectrum of plant form and function. *Nature*, 2016, 529(7585): 167-171.
- [27] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [28] Ackerly D D, Cornwell W K. A trait-based approach to community assembly: partitioning of species trait values into within- and among-community components. *Ecology Letters*, 2007, 10(2): 135-145.
- [29] 杨佳, 于志军, 王参, 王敏, 沈若雯, 刘敬泽. 雄安新区不同土地利用方式土壤性状的空间分布特征——以容城县为例. *生态学报*, 2021, 41(17): 6764-6772.
- [30] 梁士楚, 苑晓霞, 卢晓明, 许桂芬, 覃艳, 姜勇. 漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征. *生态学报*, 2019, 39(8): 2752-2761.
- [31] 张潇月, 齐锦秋, 张柳桦, 王媚臻, 李婷婷, 鱼舜尧, 郝建锋. 人为干扰对金马河温江段护岸林物种多样性和土壤理化性质的影响. *植物研究*, 2019, 39(1): 78-86.
- [32] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, Groffman P M, Band L E, Boone C G, Burch W R, Grimmond C S B, Hom J, Jenkins J C, Law N L, Nilon C H, Pouyat R V, Szlavecz K, Warren P S, Wilson M A. Beyond urban legends: an emerging framework of urban ecology, as illustrated by the Baltimore ecosystem study. *BioScience*, 2008, 58(2): 139-150.
- [33] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 付甜, 封晓辉. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系. *生态学报*, 2012, 32(3): 852-862.
- [34] Silvertown J. Plant coexistence and the niche. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, 19(11): 605-611.
- [35] Knapp S, Kühn I, Bakker J P, Kleyer M, Klotz S, Ozinga W A, Poschod P, Thompson K, Thuiller W, Römermann C. How species traits and affinity to urban land use control large-scale species frequency. *Diversity and Distributions*, 2009, 15(3): 533-546.
- [36] Thompson K, McCarthy M A. Traits of British alien and native urban plants. *Journal of Ecology*, 2008, 96(5): 853-859.
- [37] Wright I J, Reich P B, Westoby M, Ackerly D D, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen J H C, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom P K, Gulias J, Hikosaka K, Lamont B B, Lee T L, Lee W, Lusk C, Midgley J J, Navas M L, Niinemets Ü, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov V I, Roumet C, Thomas S C, Tjoelker M G, Veneklaas E J, Villar R. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 2004, 428(6985): 821-827.
- [38] Reich P B. The world-wide 'fast-slow' plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of Ecology*, 2014, 102(2): 275-301.
- [39] Gysels G, Poesen J, Bochet E, Li Y. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2005, 29(2): 189-217.
- [40] 王敬哲, 陈志强, 陈志彪, 潘宗涛. 南方红壤侵蚀区不同植被恢复年限下芒萁叶功能性状对土壤因子的响应. *生态学报*, 2020, 40(3): 900-909.
- [41] Dwyer J M, Hobbs R J, Mayfield M M. Specific leaf area responses to environmental gradients through space and time. *Ecology*, 2014, 95(2): 399-410.
- [42] 童笑笑, 陈春娣, 吴胜军, 贾振毅, 易雪梅, 马茂华. 三峡库区澎溪河消落带植物群落分布格局及生境影响. *生态学报*, 2018, 38(2): 571-580.
- [43] Ordoñez J C, van Bodegom P M, Witte J P M, Wright I J, Reich P B, Aerts R. A global study of relationships between leaf traits, climate and soil measures of nutrient fertility. *Global Ecology and Biogeography*, 2009, 18(2): 137-149.
- [44] Song G M, Wang J, Han T T, Wang Q, Ren H, Zhu H X, Wen X Y, Hui D F. Changes in plant functional traits and their relationships with environmental factors along an urban-rural gradient in Guangzhou, China. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105558.
- [45] McCarthy M C, Enquist B J. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation. *Functional Ecology*, 2007, 21(4): 713-720.
- [46] Jiang Z H, Ma K M. Environmental filtering drives herb community composition and functional trait changes across an elevational gradient. *Plant Ecology and Evolution*, 2015, 148(3): 301-310.