



金马河温江段河岸带不同生境植物物种多样性与土壤理化性质的动态变化

余飞燕, 叶鑫, 周润惠, 董洪君, 王敏, 陈聪琳, 郝建锋

引用本文:

余飞燕, 叶鑫, 周润惠, 等. 金马河温江段河岸带不同生境植物物种多样性与土壤理化性质的动态变化[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(1): 1–8.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4237>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

人为干扰对栲树次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响

Effect of Human Disturbance on Species Diversity and Soil Physiochemical Properties of *Castanopsis fargesii* Secondary Forest
热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 355–362 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3843>

地被植物对广东常绿阔叶林土壤养分的指示作用

Indicative Effect of Ground Vegetation on Soil Nutrient Status in Evergreen Broad-leaved Forest of Guangdong
热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 115–123 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4105>

草海国家级自然保护区华山松群落特征及物种多样性研究

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 44–52 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4063>

人为干扰对川西碧峰峡山矾次生林群落结构和物种多样性的影响

Effects of Human Disturbance on Species Diversity and Community Structure of *Symplocos sumuntia* Secondary Forest in Bifengxia in Western Sichuan
热带亚热带植物学报. 2016, 24(5): 559–567 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2016.05.012>

广西中部7种典型灌丛群落的物种多样性特征

Species Biodiversity of Seven Typical Shrub Communities in the Middle of Guangxi Zhuang Autonomous Region
热带亚热带植物学报. 2018, 26(2): 157–163 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3841>

金马河温江段河岸带不同生境植物物种多样性与土壤理化性质的动态变化

余飞燕¹, 叶鑫¹, 周润惠¹, 董洪君¹, 王敏¹, 陈聪琳¹, 郝建锋^{1,2}

(1. 四川农业大学林学院, 成都 611130; 2. 四川省水土保持与荒漠化防治重点实验室, 成都 611130)

摘要: 为评价植被恢复过程中生物多样性和土壤性质的变化, 对 2015 和 2018 年金马河温江段河岸带内河滩地、砾石地、芦苇地、斑茅地和沙坑地 5 种生境的植物多样性和土壤理化性质进行了比较分析。结果表明, 2015 年金马河温江段河岸带共有 32 科 80 属 113 种草本植物, 2018 年共有 57 科 118 属 161 种草本、灌木植物, 以河滩地和斑茅地的物种变化最显著, 均有灌木层加入, 而砾石地的变化最小。2018 年除河滩地、斑茅地外, 其余生境的物种多样性指数变化不大, 各生境的物种丰富度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(H')、Pielou 均匀度指数(J_{sw})的变化趋势一致, 均以砾石地最大, 芦苇地最小。2018 年河滩地、斑茅地的土壤含水量(SWC)显著低于其他生境, 斑茅地的土壤容重(BD)最低, 土壤全氮(TN)、有机质(OM)含量最大。冗余分析(RDA)表明, 结合物种矩阵和环境矩阵, BD、SWC、OM 与物种多样性的相关性最显著, 砾石地和沙坑地主要受到 SWC、土壤 pH 的影响, 而在河滩地和斑茅地中 OM 是主导因子。从整体上看, 禁止采砂后, 各生境呈现不同程度的恢复状态, 以斑茅地恢复效果最显著。这些为持续改善金马河河岸带土壤质量现状、促进河岸带生态系统恢复提供理论依据。

关键词: 河岸带; 生境; 物种多样性; 土壤; 冗余分析

doi: 10.11926/jtsb.4237

Dynamic Changes in Plant Diversity and Soil Physical and Chemical Properties in Different Habitats in Wenjiang Section of Jinma River

YU Fei-yan¹, YE Xin¹, ZHOU Run-hui¹, DONG Hong-jun¹, WANG Min¹, CHEN Cong-lin¹, HAO Jian-feng^{1,2*}

(1. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Key Laboratory for Soil and Water Conservation and Desertification Control of Sichuan, Chengdu 611130, China)

Abstract: To evaluate the changes in biodiversity and soil properties during vegetation restoration, the plant diversity and soil characters among five habitats, such as flood land, gravel land, reed land, *Saccharum arundinaceum* land and sand land, in riparian zone of Wenjiang section of Jinma River were comparative analyzed in 2015 and 2018. The results showed that there were 113 species of herbs in Wenjiang riparian zone, belonging to 80 genera and 32 families in 2015, and 161 species of herbs and shrubs, belonging to 118 genera and 57 families in 2018. With shrub layer added in 2018, the changes in community structure of flood land and *S. arundinaceum* land were the most significant, and that in gravel land was the smallest. In 2018, except for the flood land and *S. arundinaceum* land, the biodiversity indexes had little change. The richness index (D), Shannon-Wiener diversity index (H), Simpson dominance index (H') and Pielou evenness index (J_{sw}) showed the same

收稿日期: 2020-04-21 接受日期: 2020-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370628); 四川省教育厅项目(15ZB0020); 国家级大学生创新性实验计划项目(1510626064)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31370628), the General Project of Education Department of Sichuan (Grant No. 15ZB0020), and the Program for National Innovative Experiment of College Students (Grant No. 1510626064).

作者简介: 余飞燕, 女, 本科生, 主要从事森林生态学研究。E-mail: 2279100562@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 704060294@qq.com

variation trend among habitats, with the biggest in gravel land and the smallest in reed land. In 2018, the soil water contents (SWC) of flood land and *S. arundinaceum* land were significantly lower than that of other habitats, the soil bulk density (BD) of *S. arundinaceum* land was the lowest, but the contents of TN and OM were the biggest. Combining species matrix and environment matrix, redundancy analysis (RDA) showed that BD, SWC, OM had the most significant correlation with species diversity. SWC and soil pH were the main effect factors in the gravel land and sand land, while OM in the flood land and *S. arundinaceum* land. On the whole, after forbidding sand mining, each habitat showed different degrees of restoration, and the restoration effect of *S. arundinaceum* land was the most significant. These would be conducive to providing theoretical basis for continuously improving the current situation of soil quality and promoting the restoration of riparian ecosystem in the Wenjiang section of Jinma River.

Key words: Riparian zone; Habitat; Species diversity; Soil; Redundancy analysis

自然河岸带由充足的水分、独特的砂质土壤和适生的植被群落三大要素构成, 具有明显的边缘效应和独特的生态功能^[1-3], 对水分需求具有宽振幅的物种能够在短距离内出现^[4]。河岸带水文地貌过程和生态学过程创造了从靠近河道较低处的砾石滩^[5]到不受水位影响的高地部分。物种多样性是群落稳定程度和生境差异的综合体现^[6]。土壤理化性质作为决定土壤肥力、反映生境变化的重要指标^[7-8], 小生境环境(光、热和水分条件)的不同, 加上河岸带的地形地貌、土地利用及植被类型等景观特征势必会影响到土壤性质的空间异质性^[1,9-10]。关于土壤理化性质与物种多样性关系的话题一直是生态学领域的研究热点^[11-13], 了解植被和土壤的动态变化特征是理解植物群落物质循环和能量流动的基础, 因此还需深入研究探讨。

金马河河岸带在维持河流湿地生物多样性、阻滞泥沙向河道输送的水文效应和机械效应过程中发挥的生态效益受到诸多学者关注^[14-17]。随着建筑活动中用沙的需求大大增加, 非法挖掘河岸地区的无序采砂现象频频发生, 导致河床高程、稳定程度下降, 甚至河岸带的净化能力被削弱^[18]。2016年8月, 当地政府对此段河岸带实施了禁采砂石措施, 对河岸带植被进行恢复重建。本文以金马河温江段河岸带为研究对象, 通过对不同生境类型下植被特征、物种多样性和土壤主要养分进行调查分析, 并与张潇月等^[15]在2015年对同一区段的研究结果进行比较, 探讨3年后土壤中制约河岸带植被多样性的理化性质指标, 评估禁止采砂前后植被恢复程度和生境变化情况, 持续关注河岸带动态变化, 以期持续改善金马河河岸

带土壤质量现状、促进河岸带生态系统恢复和重建提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于四川省成都平原的金马河温江段(30°40'23.87"~30°40'47.41" N, 103°46'19.30"~103°46'44.90" E), 是岷江流域的重点自流灌溉区, 处于著名水利工程都江堰的调控范围^[15]。研究区地处亚热带湿润气候区, 年均气温 17℃, 年降水量 1 300 mm, 全年日照时数 1 033.8 h, 年均无霜期为 284 d^[19], 四季分明, 雨热同期。金马河的洪水主要来自岷江上游, 分为融雪洪水、雨雪混合洪水和暴雨洪水 3 种^[17]。金马河河道内分布沙石, 土壤类型为冲积土, 砂壤质。区内无乔木分布, 灌木植物有水麻(*Debregeasia orientalis*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*)等; 草本植物是该区植物群落的主要组成部分, 有水蓼(*Polygonum hydropiper*)、芦苇(*Phragmites australis*)等。

2 方法

2.1 试验设计和采样

于2018年9月在金马河温江段河岸带参照方精云等^[20]的方法分别设置 15 个河岸带样地。每个样地根据水淹时间、相对高程和植被类型划分为河滩地、砾石地、芦苇地、斑茅地、沙坑地(表 1)。在每种生境各设置 3 个 20 m×20 m 样方, 样方间距在 10 m 以上。采用“对角线法”在每个样方内设置 12 个 1 m×1 m 的草本样方, 仅在河滩地和斑茅地内设置 6 个 5 m×5 m 的灌木样方(除河

滩地和斑茅地外, 其他生境中未发现灌木存在), 共计灌木样方 36 个, 草本样方 180 个。记录样方内所有灌木(DBH ≤ 3 cm)和草本植物的种类、盖度和植株高度, 同时用 GPS 记录每个样方的地

理位置和海拔高度。采用对角线五点法, 在每个样地用环刀取土用于土壤物理性质测定, 同时取 0~10 cm 土层成混合土样, 去除根系和石头等, 室内风干, 过 2 mm 筛后用于土壤化学性质测定。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of plots

生境类型 Habitat type	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect	海拔 Altitude (m)	盖度 Coverage /%		优势种 Dominant species	
				2015	2018	2015	2018
A	4	SW88°	520	13.35	56.76	斑茅, 飞蓬 <i>Saccharum arundinaceum</i> , <i>Erigeron acer</i>	水麻, 白茅 <i>Debregeasia orientalis</i> , <i>Imperata cylindrica</i>
B	4	NW69°	519	4.66	2.94	红蓼, 酸模 <i>Polygonum orientale</i> , <i>Rumex acetosa</i>	水蓼, 木贼 <i>Polygonum hydropiper</i> , <i>Equisetum hyemale</i>
C	5	NW51°	509	87.3	33.87	芦苇, 芦竹 <i>Phragmites australis</i> , <i>Arundo donax</i>	芦苇, 茜草 <i>Phragmites australis</i> , <i>Rubia cordifolia</i>
D	5	SE60°	503	55.62	45.92	斑茅, 蜈蚣草 <i>Saccharum arundinaceum</i> , <i>Pteris vittata</i>	斑茅, 水麻 <i>Saccharum arundinaceum</i> , <i>Debregeasia orientalis</i>
E	12	SW46°	515	57.78	48.79	芦苇, 飞蓬 <i>Phragmites australis</i> , <i>Erigeron acer</i>	葎草, 芦苇 <i>Humulus scandens</i> , <i>Phragmites australis</i>

A: 河滩地; B: 砾石地; C: 芦苇地; D: 斑茅地; E: 沙坑地。以下图表同。

A: Flood land; B: Gravel land; C: Reed land; D: *Saccharum arundinaceum* land; E: Sand land. The same is following Figures and Tables.

2.2 数据的统计和分析

本文选取 4 个多样性指数来分析群落物种多样性水平, 相对密度 = 某种的株数 / 所有种的总株数; 相对频度 = 某种在样方中出现的次数 / 所有种出现的总次数; 相对盖度 = 某种的盖度 / 所有种盖度之和; 灌木层、草本层重要值(IV) = (相对密度 + 相对盖度 + 相对频度) / 3; 丰富度指数 $D=S$ 。Simpson 指数(优势度指数): $H' = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$, Shannon-Wiener 多样性指数: $H = -\sum_{i=1}^S P_i \log P_i$, Pielou 均匀度指数: $J_{sw} = -\sum P_i \log P_i / \log S$, 式中, P_i 为第 i 种的株数(n_i) 占所有种总株数(n) 的比例, 即 $P_i = n_i / n$ ($i=1, 2, 3, \dots, S$, S 为物种数)。

土壤养分含量的测定 土壤含水量(SWC, %) 采用烘干法(105℃)测定, 土壤容重(BD, g/cm³)采用环刀法测定, 土壤 pH 值采用电位法, 有机质含量(OM, g/kg)采用重铬酸钾氧化法, 全氮(TN, g/kg)采用凯氏定氮法, 全磷(TP, g/kg)采用钼锑抗比色法, 全钾(TK, g/kg)采用火焰亮度计法, 速效钾(AK, mg/kg)采用乙酸铵提取-火焰分光亮度法测定。每个土样测 3 次。

采用 Excel 2016 软件进行数据处理, 采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)对数据进行分析, 用

最小显著差异法(LSD)检验差异显著性($P=0.05$), 使用 Canoco 5.0 对物种多样性和土壤养分指标的关系进行冗余分析(RDA), 并作图。

3 结果和分析

3.1 物种组成

2015 年河岸带有草本植物 113 种, 隶属于 32 科 80 属, 以沙坑地的物种数最多, 砾石地和河滩地次之, 斑茅地和芦苇地最少^[15], 2018 年共记录到草灌植物 57 科 118 属 161 种。河滩地和斑茅地的物种变化最显著, 均有灌木物种加入, 使物种更丰富(表 2)。河滩地草本植物增加了 13 科, 但减少了 13 属和 8 种, 灌木层增加了 9 科 11 属 12 种植物, 植被盖度显著增加(表 1), 优势种由斑茅(*Saccharum arundinaceum*)、飞蓬(*Erigeron acer*)变为水麻、白茅(*Imperata cylindrica*); 斑茅地草本植物减少了 8 科 12 属 6 种, 灌木层增加了 14 科 17 属 17 种植物, 植被盖度下降, 优势种由斑茅、蜈蚣草(*Pteris vittat*)变为斑茅、水麻。芦苇地和沙坑地的物种变化次之, 沙坑地物种最丰富, 2015 和 2018 年均均为最多(分别为 59 和 73 种), 且以 1 科 1 属 1 种为主, 仅有菊科(Compositae)、禾本科(Gramineae)、蓼科(Polygonaceae)等有多种植物。砾石地的物种变化最小。

3.2 物种多样性指数

对 5 种生境 3 年来的物种多样性指数变化进行分析(表 3)。2015 年, 各生境类型下物种丰富度指数(D)以沙坑地最高, 斑茅地最低; Shannon 多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(H')、Pielou 均匀度指数(J_{sw})具有相同的变化趋势, 均为砾石地与沙坑地略高于河滩地和斑茅地, 芦苇地最低。2018 年, 草本层的 H 、 H' 、 D 和 J_{sw} 在各生境大都下降, 以砾石地的 H 、 H' 和 J_{sw} 最大, 芦苇地的最小。2018 年各生境草本层的 H 、 H' 、 J_{sw} 均没有显著差异; 沙坑地和芦苇地、斑茅地间的 D 存在显著差异。因河滩地、斑茅地在 2018 年有灌木层出现, 草本层各多样性指数均有下降。

表 3 不同生境下植物群落物种多样性指数变化

Table 3 Changes in species diversity indexes of plant communities in different habitats

层次 Layer	生境 Habitat	Shannon 多样性指数 (H) Shannon diversity index		Simpson 优势度指数 (H') Simpson dominance index		物种丰富度指数 (D) Richness index		Pielou 均匀度指数 (J_{sw}) Pielou evenness index	
		2015	2018	2015	2018	2015	2018	2015	2018
		草本 Herb	A	3.049±0.225a	2.020±0.27ab	0.945±0.011a	0.720±0.080a	36.000±4.163b	26.330±0.880ab
	B	3.359±0.053a	2.810±0.12ab	0.944±0.070ab	0.900±0.010a	40.000±2.309ab	32.670±5.840ab	0.975±0.012a	0.820±0.020a
	C	1.980±0.183b	1.820±0.26b	0.971±0.013ab	0.700±0.090a	33.667±2.404b	18.000±1.530b	0.574±0.052b	0.590±0.100a
	D	2.824±0.282b	2.560±0.17ab	1.021±0.009a	0.890±0.020a	32.667±1.333b	23.670±2.330b	0.835±0.072a	0.810±0.030a
	E	3.182±0.111a	2.580±0.17ab	0.733±0.082b	0.850±0.040a	44.667±1.764a	39.670±4.180a	0.900±0.056a	0.700±0.030a
灌木 Shrub	A		1.596±0.16b		0.685±0.066b		9.333±0.333b		0.713±0.061b
	D		2.174±0.09a		0.852±0.008a		13.000±1.527a		0.854±0.010a

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.05 level.

3.3 土壤物理化学性质特征

从表 4 可见, 不同生境土壤的 pH 值为 7.75~8.11, 呈微碱性。沙坑地的土壤含水量(SWC)显著高于其他生境, 而河滩地、斑茅地显著低于其他生境; 各生境的土壤容重(BD)为 1.53~1.96, 斑茅地的 BD 显著低于其他生境, 表明土质最疏松。总体来看, 斑茅地的各种养分含量最适中, 适于河岸带植被生长。与张潇月等^[17]的研究结果相比, 温江河岸带的土壤化学性质指标在 3 年间发生了很大变化。土壤中的全氮(TN)的最高值从 2015 年砾石地(10.79 g/kg)变为 2018 年斑茅地(3.46 g/kg), 沙坑地的全钾(TK)由 2015 年最低(5.94 g/kg)变为 2018 年最高(23.91 g/kg), 斑茅地的 TK 含量始终较低。有机质(OM)含量最高值由 2015 年砾石地(49.84 g/kg)变为 2018 年斑茅地(138.42 g/kg), 最低值由 2015 年沙坑地(6.23 g/kg)变为 2018 年芦苇地(15.78 g/kg)。沙

表 2 河岸带不同生境植物物种在 2015-2018 年的组成变化

Table 2 Changes in species composition in different habitats at riparian zones from 2015 to 2018

生境 Habitat	结构 Structure	科 Family	属 Genus	种 Species
A	草本层 Herb layer	13	-13	-8
	灌木层 Shrub layer	9	11	12
B	草本层 Herb layer	0	0	-2
	灌木层 Shrub layer	0	0	0
C	草本层 Herb layer	4	3	7
	灌木层 Shrub layer	0	0	0
D	草本层 Herb layer	-8	-12	-6
	灌木层 Shrub layer	14	17	17
E	草本层 Herb layer	1	5	14
	灌木层 Shrub layer	0	0	0

坑地速效钾(AK)含量上升为最大(12.27 mg/kg), 全磷(TP)含量变化不大。

3.4 物种多样性与土壤理化性质的冗余分析

以物种多样性作为响应变量, 土壤理化性质作为解释变量进行冗余分析(RDA)并排序(表 5、图 1)。就草本层而言, 两轴与 8 项环境因子的相关性均未达极显著水平, 但与 SWC、pH、TK 呈显著相关。就灌木层而言, 两轴与 OM、BD、SWC、TN、pH 的相关性达极显著水平。土壤理化性质可以分别解释灌木层和草本层物种多样性变异的 99.92% 和 96.31%, 同时灌木层多样性-环境因子相关系数大于草本层。RDA1 轴仅与 TN、OM 成正相关, 与其余土壤理化性质呈负相关, 且与 BD、OM 的相关性较大。RDA2 轴仅与 TK、TN 呈正相关, 且与 TK、TN 呈正相关, 且与 TK 的相关性最大。SWC 与草

表 4 2018 年河岸带不同生境的土壤理化性质

Table 4 Physico-chemical properties of riparian soil in different habitats in 2018

	生境 Habitat				
	A	B	C	D	E
pH	7.85±0.02ab	8.05±0.04a	7.90±0.02ab	7.75±0.15b	8.11±0.09a
土壤含水量 Soil water content (SWC, %)	9.26±0.99c	16.31±0.28b	13.17±0.56b	7.09±0.70c	23.49±1.85a
容重 Bulk density (BD, g/cm ³)	1.84±0.02a	1.96±0.04a	1.94±0.02a	1.53±0.04b	1.92±0.04a
全氮 Total nitrogen (TN, g/kg)	2.43±0.40a	1.20±0.32a	2.10±0.27a	3.46±0.99a	1.11±0.04a
全磷 Total phosphorus (TP, g/kg)	0.15±0.02a	0.15±0.01a	0.24±0.03a	0.20±0.03a	0.15±0.02a
全钾 Total potassium (TK, g/kg)	23.59±1.28a	20.46±0.94a	19.64±2.23a	18.68±1.85a	23.91±1.23a
速效钾 Available potassium (AK, mg/kg)	6.90±0.15b	4.54±0.24c	7.92±0.63b	4.37±0.32c	12.27±0.13a
有机质 Organic matter (OM, g/kg)	67.47±2.36b	25.13±3.57c	15.78±1.42c	138.42±9.50a	36.14±2.32c

同行数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Data followed different letters in the same line indicate significant differences at 0.05 level.

表 5 冗余分析排序及蒙特卡洛置换检验结果

Table 5 Prospective selection characteristics of soil physical and chemical properties in RDA analysis

环境因子 Explanatory variables	草本层 Herb layer				灌木层 Shrub layer			
	Axis 1	Axis 2	F	P	Axis 1	Axis 2	F	P
OM	-0.106 3	-0.350 4	0.4	0.634	0.871 2	-0.236 7	40.7	0.002**
BD	0.149 3	0.382 8	0.5	0.492	-0.802 8	0.111 0	23.5	0.002**
SWC	0.607 0	0.216 4	6.2	0.016*	-0.779 9	-0.007 6	20.1	0.004**
TN	-0.473 9	-0.262 1	3.3	0.068	0.640 7	-0.480 7	9	0.004**
pH	0.570 1	0.248 1	5.3	0.024*	-0.607 5	0.310 9	7.6	0.008**
TP	0.253 4	0.559 3	1.4	0.274			3.4	0.102
TK	-0.528 4	-0.279 8	4.3	0.036*	-0.039 2	-0.228 0	<0.1	0.884
AK	0.262 3	0.483 9	1.3	0.266	-0.053 9	0.271 3	<0.1	0.836
特征值 Eigenvalue	0.850 7	0.112 4			0.998 1	0.001 1		
累计解释变异 Explained variation	85.070 0	96.310 0			99.810 0	99.920 0		
相关系数 Correlation coefficient	0.995 7	0.896 7			0.999 7	0.932 4		

**: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$.

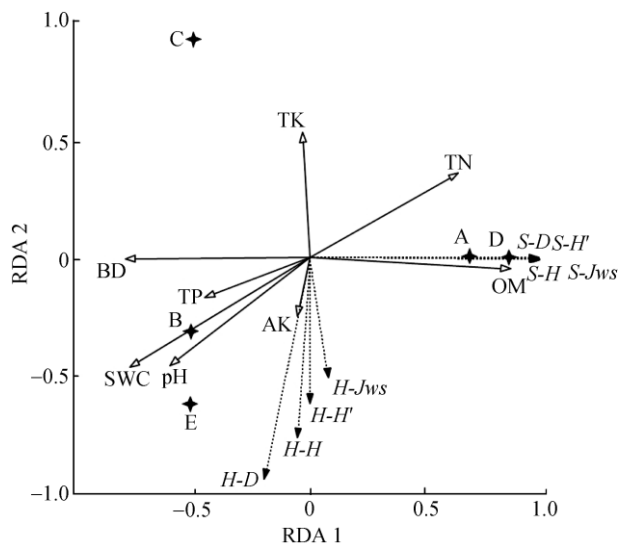


图 1 物种多样性与土壤养分间的冗余分析

Fig. 1 Redundancy analysis of species diversity and soil nutrients

本层 D 呈极显著正相关, BD 与灌木层 H、H'、D、 J_{sw} 呈极显著负相关, 灌木层 H、H'、 J_{sw} 与 AK 呈极显著负相关, 与 OM 呈极显著正相关。随土壤 SWC、AK、TP 的增加(RDA1 轴), 草本层各物种多样性指数有增大的趋势, 而灌木层的呈减小趋势。砾石地、沙坑地分布较集中, 主要受到 SWC、土壤 pH 的影响。河滩地、斑茅地分布较集中, OM 是主导因子。

4 结论和讨论

灌草层更新情况是生境恢复程度的重要参考因素^[21]。根据 2015 和 2018 年在金马河温江段河岸带开展的物种多样性调查, 菊科、禾本科、蓼科等世界广布科植物占据优势。仅河滩地和斑茅地经恢

复后出现灌木层,这说明生境植被结构趋于复杂,能充分利用资源,但生态位重叠明显,种内竞争将更激烈。沙坑地植物种类仍最丰富,芦苇地物种仍最少且植被盖度有所下降,但种类有所增加,如钮子瓜(*Zehneria maysorensis*)、通泉草(*Mazus japonicus*)、苦苣菜(*Sonchus oleraceus*)的出现,有利于生境物种多样性水平提高。刘浩栋等^[22]认为小密度且聚集程度较强的群落,具有复杂的种间竞争与不稳定的群落结构,所以芦苇地的 H 和 J_{sw} 较低。而砾石地植被盖度虽最小,长期受周期性洪水影响,但水蓼、狗牙根等耐水性较好的植被均匀分布于生境中,有利于增大砾石地的 H 和 J_{sw} 值。

土壤是生态系统中进行复杂的根际反应、微生物生命活动等多种生态过程的载体,土壤养分则能更全面、科学反映生境状况。金马河温江段河岸带各生境土壤呈微碱性,说明该区蒸发量偏高且淋溶程度不明显。沙坑地的 SWC 和养分含量经恢复后明显增大,说明其适宜的水分、养分是维持较高丰富度指数(D)的基础。斑茅地的 BD 显著最低,而 TN、OM 含量明显增多,这是因为生境内灌草层的丰富枯枝落叶层改善了土壤质地,明显改变了土壤化学性质。值得注意的是,在王森浩^[23]等对西沙群岛植被恢复的研究表明,在藤草-灌木-乔木演替过程中 SWC 持续上升,但本研究中河滩地、斑茅地的 SWC 显著低于其他生境,可能是因为这 2 个生境处于阳坡($SW88^\circ$ 和 $SE60^\circ$),植被恢复过程中灌草层复合结构比其他生境草本植被蒸腾作用更强,淹水时间较少,灌草层的根系使土质疏松,水分、光照等资源利用率更高。从整体上看,斑茅地各种养分含量最适中,植被结构合理,土壤质地最疏松,恢复效果最显著,适于河岸带植被生长。

土壤养分含量和空间分布特征等直接影响生境植被的更新过程^[24],而植物群落结构对土壤结构和转化养分元素有较大影响,因此植被与土壤是相互影响的系统。本研究的 RDA 分析表明,植物物种多样性与土壤理化性质间存在相关关系,而本研究中的 SWC、BD 与草灌层 H 、 H' 、 D 、 J_{sw} 的相关性,与刘道锟等^[25]对大兴安岭干旱阳坡的研究结果恰恰相反,这可能与两地生境的演替阶段、植物群落类型和气候类型等不同有关。不同于灌木层,草本层的物种多样性指数随 SWC、AK、TP 的增加呈增大的趋势,说明河岸带草本植物比灌木植物更需要生长在磷钾含量高、湿度大的土壤中。BD 与

灌木层的多样性指数呈极显著负相关,这与灌木植物根系对土壤的保墒放墒作用有关。在二维排序图中,砾石地、沙坑地集中分布在左下方,河滩地、斑茅地集中分布在右侧(图 1),说明在 SWC 较高的砾石地、沙坑地中,植被生长主要受土壤酸碱度的限制;而凋落物丰富是河滩地和斑茅地维持高竞争灌草共存格局的主要因素。

因此,金马河温江段河岸带生态系统在进行植被恢复过程中,应充分考虑植被群落的稳定性和生境土壤的养分情况,如芦苇地物种多样性水平虽有所提升,但土质较差,群落结构简单,砾石地受洪水影响大,土壤含有许多大粒径卵石,草本植物较为丰富,灌木物种贫乏,恢复效果最微弱,应适当补植千屈菜(*Lythrum salicaria*)和芦竹(*Arundo donax*)等耐水性植物以提高群落物种多样性水平。RDA 结果表明,BD、SWC、OM 与物种多样性的相关性最为显著,因此在生态恢复过程中应注意平衡生境土壤的三相比例,适时疏松土壤、引水排水、控制土壤酸碱度等,才能使植被结构及组成稳定。张潇月等^[15]认为,经生态改造的河滩地是最适宜河岸带草本植物生长发育的生境类型。但经 3 年人工恢复后植被-土壤结构发生较大变化,现今河滩地虽灌草植被丰富,但因距公路近而受人为干扰最大,而斑茅地内土壤养分指标更适宜于河岸带植被生长,壤质更疏松,故我们认为斑茅地恢复效果最显著。河岸带是一个动态变化的生态系统,同时还受其他复杂的环境因子的影响,因此,今后应重点研究生境植被更新生长过程与其他相关环境因子的作用关系。

参考文献

- [1] LIU Q, WEI J B, WU Z F, et al. Effects of multi-scale environmental factors on spatial heterogeneity of soil physical and chemical properties of riparian zone in Liuxi River of Guangzhou [J]. Chin J Ecol, 2016, 35(11): 3064–3071. doi: 10.13292/j.1000-4890.201611.015.
- [2] ZHAO Q H, XU S S, MA L J, et al. Analysis of plant species diversity under different vegetation types in riparian zone of the main stream of Beijiang River [J]. Res Soil Water Conserv, 2017, 24(5): 215–221. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.05.034.
- [3] 赵清贺, 徐珊珊, 马丽娇, 等. 北江干流河岸带不同植被类型植物物种多样性分析 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 215–221. doi: 10.

- 13869/j.cnki.rswc.2017.05.034.
- [3] O'TOOLE P, CHAMBERS J M, BELL R W. Understanding the characteristics of riparian zones in low relief, sandy catchments that affect their nutrient removal potential [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2018, 258: 182–196. doi: 10.1016/j.agee.2018.02.020.
- [4] WOLLNY J T, OTTE A, HARVOLK-SCHÖNING S. Riparian plant species composition alternates between species from standing and flowing water bodies—Results of field studies upstream and downstream of weirs along the German rivers Lahn and Fulda [J]. *Ecol Eng*, 2019, 139: 105576. doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.08.006.
- [5] WANG J, WANG D M, REN Y, et al. Coupling relationships between soil microbes and soil nutrients under different hydrologic conditions in the riparian zone of the Lijiang River [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39(8): 2687–2695. doi: 10.5846/stxb201803260595.
- 王静, 王冬梅, 任远, 等. 漓江河岸带不同水文环境土壤微生物与土壤养分的耦合关系 [J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2687–2695. doi: 10.5846/stxb201803260595.
- [6] GAO Y, DU F, WANG Y N. Relationship between aboveground biomass and species diversity of abandoned community in Loess Hilly Region [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2017, 24(3): 96–102. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.03.018.
- 高艳, 杜峰, 王雁南. 黄土丘陵区撂荒群落地上生物量和物种多样性关系 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 96–102. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.03.018.
- [7] WANG X N, ZHOU Z L, WANG L, et al. Analysis on soil physical and chemical properties of different habitats in the middle reaches of the Tarim River [J]. *For Resour Manag*, 2015(1): 95–100. doi: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2015.01.017.
- 王夏楠, 周正立, 王亮, 等. 塔里木河中游不同生境土壤理化性质分析 [J]. *林业资源管理*, 2015(1): 95–100. doi: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2015.01.017.
- [8] YANG C L, MA X P, HOU W, et al. Soil physical and chemical properties of riparian zone along Xi River [J]. *Sci Technol Rev*, 2012, 30(3): 61–66. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.03.010.
- 杨春璐, 马溪平, 侯伟, 等. 南芬细河河岸带土壤理化性质分析 [J]. *科技导报*, 2012, 30(3): 61–66. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.03.010.
- [9] WU Q S, LONG J, LI J, et al. Effects of different microhabitat types on soil microbial community composition in the Maolan Karst Forest in southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39(3): 1009–1018. doi: 10.5846/stxb201801110084.
- 吴求生, 龙健, 李娟, 等. 茂兰喀斯特森林小生境类型对土壤微生物群落组成的影响 [J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 1009–1018. doi: 10.5846/stxb201801110084.
- [10] HE B, LI Q, LIU Y. Community characteristics and species diversity of *Pinus armandii* in Caohai National Nature Reserve [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2020, 28(1): 44–52. doi: 10.11926/jtsb.4063.
- 何斌, 李青, 刘勇. 草海国家级自然保护区华山松群落特征及物种多样性研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2020, 28(1): 44–52. doi: 10.11926/jtsb.4063.
- [11] LI X N, ZHANG W W, ZHAO C Q, et al. Plant diversity and soil physicochemical properties in the Wasteland of Yanqing District [J]. *Acta Agrest Sin*, 2019, 27(3): 695–701. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2019.03.023.
- 李晓娜, 张微微, 赵春桥, 等. 延庆区荒滩地土壤理化性质及其对植物多样性的影响 [J]. *草地学报*, 2019, 27(3): 695–701. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2019.03.023.
- [12] LIU J, WANG N, CUI D Z, et al. Community structure and diversity of soil bacteria in different habitats of Da Liangzihe National Forest Park in the Lesser Khinggan Mountains [J]. *Biodiv Sci*, 2019, 27(8): 911–918. doi: 10.17520/biods.2019237.
- 刘君, 王宁, 崔岱宗, 等. 小兴安岭大亮子河国家森林公园不同生境下土壤细菌多样性和群落结构 [J]. *生物多样性*, 2019, 27(8): 911–918. doi: 10.17520/biods.2019237.
- [13] WANG M Z, QI J Q, WEI L P, et al. Effect of human disturbance on species diversity and soil physicochemical properties of *Castanopsis fargesii* secondary forest [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2018, 26(4): 355–362. doi: 10.11926/jtsb.3843.
- 王媚臻, 齐锦秋, 魏丽萍, 等. 人为干扰对栲树次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2018, 26(4): 355–362. doi: 10.11926/jtsb.3843.
- [14] YU G A, LI Z W, YANG H Y, et al. Effects of riparian plant roots on the unconsolidated bank stability of meandering channels in the Tarim River, China [J]. *Geomorphology*, 2020, 351: 106958. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.106958.
- [15] ZHANG X Y, YU S Y, LI T T, et al. Relationship between species diversity, flora, and soil environmental factors of the herb community in different habitats in the Wenjiang Section of the Jinma River [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2019, 25(4): 838–844. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2018.10017.
- 张满月, 鱼舜尧, 李婷婷, 等. 金马河温江段河岸带不同生境下草本植物多样性和植物区系与土壤环境因子的关系 [J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(4): 838–844. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2018.10017.
- [16] WANG X L, YANG S T, HAO F H, et al. Spatial analysis of river health to Jinma River in Dujiangyan irrigation regions [J]. *J Beijing*

- Norm Univ (Nat Sci), 2007, 43(4): 452–456. doi: 10.3321/j.issn:0476-0301.2007.04.019.
- 王雪蕾, 杨胜天, 郝芳华, 等. 都江堰灌区金马河河流健康空间形态分析 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(4): 452–456. doi: 10.3321/j.issn:0476-0301.2007.04.019.
- [17] HE L. Proposal of flood control and ecological embankment construction of Jinma River under Zipingpu Reservoir regulation [J]. China Water Resour, 2017(9): 35–36,52. doi: 10.3969/j.issn.1000-1123.2017.09.013. 何丽. 紫坪铺水库调度下的金马河防洪与生态堤防建设建议 [J]. 中国水利, 2017, (9): 35–36,52. doi: 10.3969/j.issn.1000-1123.2017.09.013.
- [18] QIN Y B, CHEN Z H, DING B J, et al. Impact of sand mining on the carbon sequestration and nitrogen removal ability of soil in the riparian area of Lijiang River, China [J]. Environ Pollut, 2020, 261: 114220. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114220.
- [19] LIANG X Z, YAN J J, BAI S Q, et al. Variations of important morphological features of *Erianthus arundinaceum* germplasms [J]. Pratacult Sci, 2011, 28(7): 1307–1314. 梁绪振, 鄢家俊, 白史且, 等. 斑茅种质资源形态性状的变异研究 [J]. 草业科学, 2011, 28(7): 1307–1314.
- [20] FANG J Y, WANG X P, SHEN Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory [J]. Biodiv Sci, 2009, 17(6): 533–548. doi: 10.3724/SPJ.1003.2009.09253. 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533–548. doi: 10.3724/SPJ.1003.2009.09253.
- [21] HAN J, YING L X, LI G X, et al. Spatial patterns of species diversity in the herb layer of early post-fire regeneration in mixed *Pinus yunnanensis* forests [J]. Chin J Plant Ecol, 2016, 40(3): 200–211. doi: 10.17521/cjpe.2015.0161. 韩杰, 应凌霄, 李贵祥, 等. 云南松混交林火烧迹地更新早期草本层物种多样性的空间格局 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(3): 200–211. doi: 10.17521/cjpe.2015.0161.
- [22] LIU H D, CHEN Q, XU Z Y, et al. Effects of topographical factors on species diversity across *Dacrydium pectinatum* natural community in Hainan Island [J]. Chin J Ecol, 2020, 39(2): 394–403. doi: 10.13292/j.1000-4890.202002.024. 刘浩栋, 陈巧, 徐志扬, 等. 海南岛霸王岭陆均松天然群落物种多样性及地形因子的解释 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 394–403. doi: 10.13292/j.1000-4890.202002.024.
- [23] WANG S H, ZHU Y J, WANG Y F, et al. Effect of vegetation types on soil physicochemical property in East Island and Yongxing Island of Xisha Islands [J]. J Trop Subtrop Bot, 2019, 27(4): 383–390. doi: 10.11926/jtsb.4013. 王森浩, 朱怡静, 王玉芳, 等. 西沙群岛主要岛屿不同植被类型对土壤理化性质的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(4): 383–390. doi: 10.11926/jtsb.4013.
- [24] ZENG S Q, GAN J J, XIAO H S, et al. Changes in soil properties in regenerating *Schima superba* secondary forests [J]. Acta Ecol Sin, 2014, 34(15): 4242–4250. doi: 10.5846/stxb201312253021. 曾思齐, 甘静静, 肖化顺, 等. 木荷次生林林木更新与土壤特征的相关性 [J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4242–4250. doi: 10.5846/stxb201312253021.
- [25] LIU D K, SUN H L, GAN Q M, et al. Soil physicochemical properties and plant species diversity of different vegetation degradation stages in arid sunny-slope of Great Xing'an Mountains [J]. For Eng, 2016, 32(2): 1–6. doi: 10.16270/j.cnki.slgc.2016.02.001. 刘道锟, 孙海龙, 甘秋妹, 等. 大兴安岭干旱阳坡不同植被退化阶段土壤理化性质与物种多样性研究 [J]. 森林工程, 2016, 32(2): 1–6. doi: 10.16270/j.cnki.slgc.2016.02.001.