

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*

张潇月¹ 鱼舜尧¹ 李婷婷¹ 金锁¹ 王宇¹ 齐锦秋^{1,2} 郝建锋^{1,3**}

¹四川农业大学林学院 成都 611130

²木材工业与家具工程重点实验室 成都 611130

³水土保持与荒漠化防治重点实验室 成都 611130

摘要 采用典型样地法,根据当地采沙运沙干扰及河岸带水位变化的影响,将河岸带生境划分河滩地、砾石地、芦苇地、斑茅地、沙坑地5个类型。运用除趋势对应分析(DCA)和冗余分析(RDA)研究不同生境间河岸带草本植物区系成分、群落和环境因子的关系。结果表明:(1)5个类型生境记录草本植物共35科91属109种,以禾本科(Gramineae)、菊科(Compositae)、蓼科(Polygonaceae)植物为主,沙坑地物种数最多,砾石地和河滩地物种数次之,斑茅地和芦苇地物种数最少。(2)属的区系成分较全面地表现了河岸带草本植物的地理分布,金马河温江段草本植物区系主要由世界分布型和泛热带分布型构成。(3)不同生境类型下Shannon-Wiener多样性指数(H')、Simpson指数(H')和Pielou均匀度指数(J_{sw})具有特定变化趋势,物种丰富度指数(D)对生境变化响应不显著。(4)河岸带土壤pH呈弱碱性,砾石地和芦苇地的全氮、全钾和有机质含量明显高于其他生境,河滩地和沙坑地土壤含水量、全磷含量较低。DCA和RDA结果表明,含水量、全氮和有机质是影响生境群落分布的主要限制因子,而土壤pH是影响植物区系组成分异的最主要条件。综上所述,经生态改造后的河滩地生境为河岸带最适生境类型。(图3 表4 参27)

关键词 生境;草本植物;植物区系;环境因子;物种多样性

CLC Q948.113

Relationship between species diversity, flora, and soil environmental factors of the herb community in different habitats in the Wenjiang Section of the Jinma River*

ZHANG Xiaoyue¹, YU Shunyao¹, LI Tingting¹, JIN Suo¹, WANG Yu¹, QI Jinqiu^{1,2} & HAO Jianfeng^{1,3**}

¹ College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

² Wood Industry and Furniture Engineering, Sichuan Provincial Colleges and Universities Key Laboratory, Chengdu 611130, China

³ Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Desertification Combating, Chengdu 611130, China

Abstract The riparian zone was divided into five habitat types (flood land, gravel land, *Phragmites australis* land, *Saccharum arundinaceum* land, and bunker land) according to the disturbance of local sand transportation and the change in the water level in the riparian zone. The relationship between the composition of the riparian herb flora and the community and environmental factors in the different habitats was investigated using Detrended Correspondence Analysis (DCA) and Redundancy Analysis (RDA). The results were as follows: (1) a total of 109 herbaceous plants belonging to 35 families of 91 genera were recorded in these five habitats (mainly, Gramineae, Compositae, and Polygonaceae). The bunker land had the largest number of species, followed by gravel land and flood land; *P. australis* land and *S. arundinaceum* land had the fewest species. (2) The floristic components of the genus represent the geographical distribution of the herbaceous plants. The floristic composition of herbaceous plants in the Wenjiang section of the Jinma River is mainly composed of the world distribution type and pantropical distribution type. (3) The Shannon-Wiener diversity index (H'), the Simpson index (H'), and the Pielou evenness index (J_{sw}) had specific trends in the different habitat types. The species richness index (D) did not significantly respond to changes in the different habitat types. (4) The pH of the riparian soil was weakly alkaline. The total nitrogen, total potassium, and organic matter content was significantly higher in the bunker land and *P. australis* land than in the other habitats. The soil water content and total phosphorus content of flood land and gravel land were low. The results of DCA and RDA indicate that water, total

收稿日期 Received: 2018-10-20 接受日期 Accepted: 2019-01-08

*国家自然科学基金项目(31370628)、四川省教育厅一般项目(自然科学, 15ZB0020)和四川农业大学双支计划项目(03571838)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31370628), the Project of Department of Education of Sichuan Province (15ZB0020), and the Project of Sichuan Agricultural University (03571838)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: haojf2005@aliyun.com)

nitrogen, and organic matter were the main limiting factors affecting community distribution, and soil pH was the main factor affecting the composition of flora. On the basis of comprehensive analysis, flood land is the best type of riparian zone after ecological improvement.

Keywords habitat; herbs; flora; environmental factor; species diversity

植物区系是植物界在特定时间、空间下对自然地理环境和气候条件长期适应的结果,代表了植物演化的古老共性联系^[1],是自然地理环境的反应及植物分类的重要依据^[2],运用植物区系指数可快速评估湿地植被恢复成效^[3].物种多样性是生态系统功能的重要基础,是表征群落学的重要指标,在反映植物群落的生境差异、群落结构组成和稳定性程度等方面具有重要的意义^[4].物种特征与生境之间的关系是理论生态学的热点^[5].植物群落所处生境类型不同,植物区系组成及物种多样性都会存在空间分异,其生态系统初级生产力及稳定性也会受到影响^[6].土壤作为河岸系统的重要组成部分,是物质转换的主要媒介,是河岸带的功能实现基础^[7].

河流河岸带作为重要的水生生态系统和陆生生态系统的生态交错带,具有时空异质性强、结构复杂和干扰因子多等特征^[8].在世界范围内河岸带生态系统正在发生巨大的改变,主要成因包括建造水坝、绿化河岸带和开采河流砾石等人为活动^[9].河岸带具有独特的生态结构特征和多种生态功能^[10],在维持生态稳定性、生物多样性、迟滞沉积物、富集和过滤各种营养元素方面起着十分重要的作用^[11-12].很多研究表明,河岸带植被的物种生活型以草本植物为主^[13],生境的复杂性以及不同程度、不同类型的干扰使河岸带草本植物的分布规律更加多变.近年来,我国河岸带植被的研究开展较少,仅在少数河流开展了河岸带草本植物功能群划分、物种组成和种间关系等研究^[14-15],有关河岸带草本植物区系和土壤理化性质关系的研究较少.

金马河属岷江干流局部河段,是长江上游以排洪为主要功能的重要险工段之一,也是成都平原的重要防洪屏障.本研究通过对金马河河岸带不同生境中草本植物群落的物种调查和土壤理化性质的测定,分析河岸带植物群落和植物区系成分与环境因子的相关关系,为金马河河岸带生态恢复和改造、最适生境类型的选取提供理论支持.

1 研究区概况

研究区位于四川盆地中部金马河流经温江区域(30°40'24"-30°40'32"N, 103°46'37"-103°46'40"E).区境为典型的平原地,地势平坦,无山无丘,海拔最低511.3 m,最高647.4 m.属亚热带湿润气候,四季分明,气候温和,雨量充沛,年平均气温17℃,年平均降雨量1 100 mm^[16].区域内成土母质为第四系灰色冲积物和紫灰色冲积物,土壤类型主要为灰色及紫灰色冲积物基础上发育而成的砂壤土^[17].金马河为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,气候宜人,水草丰茂,植被丰富.河岸带草本植物以斑茅(*Saccharum arundinaceum*)、芦苇(*Phragmites australis*)、红蓼(*Polygonum orientale*)、飞蓬(*Erigeron acer*)为主.

2 研究方法

2.1 样地设置

经实地踏查,参照杨文斌等的调查方法^[18],根据当地采沙运沙干扰及河岸带水位变化的影响,将河岸带生境划分为以下5个类型:河滩地、砾石地、芦苇地、斑茅地、沙坑地.每个类型分别设置3个20 m×20 m的样地(表1).采用“对角线法”在每个样地内设置12个1 m×1 m的草本样方,样方总数为180个.

2.2 野外调查内容

(1) 草本植物:统计包括草质藤本和蕨类植物,记录其种类、株数(丛数)、高度和盖度.

(2) 样地信息:使用GARMIN公司生产的etrex 209x手持GPS接收机测量经纬度和海拔信息,使用哈尔滨光学仪器厂生产的DQL-1B型森林罗盘仪测量坡向和坡度信息,同时进行拍照记录.

表1 样地基本情况

Table 1 Basic information of the sampling plots

样地 Plot	生境类型 Habitat type	海拔 Altitude (h/m)	坡度 Slope (α/°)	坡向 Aspect	生境特点 Habitat characteristics
n1-n3	I	511	5	SW251°	未受采沙行为干扰,但后期受人类其他活动影响较大. It was not affected by sand mining, but affected by other human activities.
n4-n6	II	508	4	NW333°	采沙后经河水水位变化形成. Sand is formed by changes in river water level after sand mining.
n7-n9	III	509	4	NE55°	经运沙的车辆碾压形成,后长满芦苇. It was formed by crushing of sand moving vehicles and then grown with <i>Phragmites australis</i> .
n10-n12	IV	515	6	NW339°	采沙后不再受水位影响的高地部分,后长满斑茅. The parts of the upland, no longer affected by the water level after sand mining, are covered with <i>Saccharum arundinaceum</i> .
n13-n15	V	507	5	SE153°	采沙后直接形成. Sand is formed directly after sand mining.

I: 河滩地; II: 砾石地; III: 芦苇地; IV: 斑茅地; V: 沙坑地.

I: Flood land; II: Gravel land; III: *Phragmites australis* land; IV: *Saccharum arundinaceum* land; V: Bunker land.

2.3 植物区系统计和物种多样性计算

根据吴征镒等^[19]和李锡文^[20]对植物科和属的区系划分原则,对河岸带5个不同生境类型共15个样地的草本植物科和属进行区系划分统计。

物种多样性的计算公式^[21]为:

物种丰富度指数(D):用绝对物种丰富度来表示, $D = S$
Simpson优势度指数(H'):

$$H' = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

Shannon-Wiener多样性指数(H):

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \log P_i$$

Pielou均匀度指数(J_{sw}):

$$J_{sw} = \frac{- \sum P_i \log P_i}{\log S}$$

上述各式中, S为样地中物种的总数; P_i 为第*i*种的个体数 n_i 占调查物种个体总数 n 的比例,即 $P_i = n_i/n$; $i = 1, 2, 3, \dots, S$ 。

2.4 土壤理化性质测定

土壤样品采集与处理:在研究区域各样方分别以对角线五点法^[22]布点,各点分别采集0-20 cm土层的混合土样带回实验室进行进一步分析。采用自然湿土样品进行土壤水分含量测定。将土样进行风干处理,取风干土样1份,挑去没有分解的有机物及石块研磨,使其全部通过2 mm孔径筛,供土壤表面物质测定(土壤pH、速效性养分等)使用;进行土壤全量测定(有机质、全氮、全磷、全钾等)时,多点分取20-30 g已通过2 mm孔径筛的土样进行进一步研磨,使其全部通过0.149 mm孔径筛备用。研磨过筛后将样品充分混匀,装入袋中进行标记并密封储存。

测定方法:土壤pH采用电位法测定;有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤全氮含量采用半微量凯氏法测定;全磷含量采用碱熔-钼锑抗比色法测定;全钾含量采用碱熔-火焰光度计法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定。

2.5 数据处理

采用Excel 2016和SPSS 20.0软件进行数据统计分析,使用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验各层次多样性指数的差异显著性($P = 0.05$);采用Canoco 5.0软件进行除趋势对应分析(DCA)和冗余分析(RDA);采用Origin 9.0软件进行绘图。

3 结果与分析

3.1 不同生境下河岸带草本植物区系成分

本研究在共计15个样地中完整调查草本植物样方合计180个,记录草本植物109种,隶属于35科91属。各生境中沙坑地物种数最多,隶属于22科47属58种,以禾本科(Gramineae)、桑科(Moraceae)、菊科(Compositae)、蓼科(Polygonaceae)植物为主;砾石地和河滩地物种数次之,以鸭跖草科(Commelinaceae)和豆科(Leguminosae)植物为主;斑茅地和芦苇地物种数最少,以凤尾蕨科(Pteridaceae)、蔷薇科(Rosaceae)和茜草科(Rubiaceae)植物为主。河岸带草本植物合计35科分布于世界分布、泛热带分布、北温带分布3种地理分布区,合计91属分布于12种地理分布区(表2)。

科水平上,砾石地生境中分布着最多的世界分布型科;各生境中泛热带分布型的数量均多于北温带分布型,河岸带属典型的亚热带湿润气候,常年温热潮湿,促使植物组成趋向于热带植物组成,以桑科、茜草科植物为代表。

属水平上,河滩地和斑茅地中泛热带分布型数量高于世界分布型,表现出更强烈的偏热带型特征;河滩地和砾石地地理分布较复杂,包含全部12个分布类型,芦苇地未包含热带亚洲至热带大洋洲分布及旧世界热带分布,沙坑地未包含热带亚洲至热带大洋洲分布及东亚和北美间断分布,斑茅地未包含中亚分布。调查发现在砾石地与沙坑地存在两种北温

表2 不同生境草本植物科和属的分布类型
Table 2 Distribution types of plant families and genera of herbaceous communities

分布区类型 Areal-type	I		II		III		IV		V		5种生境类型合计 Total of five habitat types			
	科 Family	属 Genus	科 Family	属 Genus	科 Family	属 Genus	科 Family	属 Genus	科 Family	属 Genus	科 Family	所占比例 Proportion	属 Genus	所占比例 Proportion
A-t1	8	7	12	12	10	9	7	7	11	13	17	48.57%	17	18.68%
A-t2	9	9	7	7	6	7	11	10	6	8	13	37.14%	17	18.68%
A-t3	4	6	4	8	4	5	5	9	5	8	5	14.29%	11	12.09%
A-t4		6		5		4		3		5			10	10.99%
A-t5		5		4		2		2		3			7	7.69%
A-t6		2		2		4		3		3			6	6.59%
A-t7		2		1		5		1		2			6	6.59%
A-t8		1		2				1					4	4.40%
A-t9		2		1		3		2					4	4.40%
A-t10		2		3		1		2		2			4	4.40%
A-t11		1		1				3		2			3	3.30%
A-t12		2		1		1				1			2	2.20%
总计 Total	21	45	23	47	20	41	23	43	22	47	35	100.00%	91	100.00%

A-t1: 世界分布; A-t2: 泛热带分布; A-t3: 北温带分布; A-t4: 热带亚洲和热带美洲间断分布; A-t5: 地中海区、西亚至中亚分布; A-t6: 热带亚洲至热带非洲分布; A-t7: 东亚分布; A-t8: 热带亚洲至热带大洋洲分布; A-t9: 东亚和北美间断分布; A-t10: 旧世界温带分布; A-t11: 旧世界热带分布; A-t12: 中亚分布。I: 河滩地; II: 砾石地; III: 芦苇地; IV: 斑茅地; V: 沙坑地。

A-t1: Cosmopolitan; A-t2: Pantropic; A-t3: North Temperate; A-t4: Trop. Asia & Trop. Amer. Disjuncted; A-t5: Mediterranean, W. Asia to C. Asia; A-t6: Trop. Asia to Trop. Africa; A-t7: E. Asia; A-t8: Trop. Asia to Trop. Australasia; A-t9: E. Asia & N. Am. Disjuncted; A-t10: Old World Temperate; A-t11: Old World Tropic; A-t12: C. Asia. I: Flood land; II: Gravel land; III: *Phragmites australis* land; IV: *Saccharum arundinaceum* land; V: Bunker land.

带分布型属的外来入侵物种, 莲子草属 (*Alternanthera*) 的喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 和鬼针草属 (*Bidens*) 的鬼针草 (*Bidens pilosa*), 但其数量很少, 分布范围较小, 未对环境造成恶劣影响, 若其大规模扩散, 会入侵湿地破坏景观, 排挤其他植物, 造成群落物种单一化。

总体上看, 科的分布类型中世界分布型占有最大比例 (17科, 占总科数的48.57%); 属的分布类型中世界分布型和泛热带分布型占有较大比例, 占总属数的比例同为18.68%, 两种分布类型充分反映了金马河温江段河岸带草本植被的地理分布特征, 并且形成了河岸带草本植被的主要组成部分。河岸带地处亚热带地区, 泛热带分布植物在群落中占优势地位, 相较于科一级的分布水平, 属一级的分布水平更好地体现了河岸带草本植物的地理分布特征, 因此应用属的分布特征表现植物区系组成更为合理。

3.2 不同生境下河岸带草本植物群落的物种多样性

由图1可见, 调查区草本植物群落的物种丰富度指数 (*D*) 对生境变化响应不显著, 指数变化为沙坑地>砾石地>河滩地>芦苇地>斑茅地。各生境类型下Shannon-Wiener多样性指数 (*H*)、Simpson指数 (*H'*) 和Pielou均匀度指数 (*J_{sw}*)

具有特定变化趋势, 表现为砾石地与沙坑地差异较小, 两者略高于河滩地和斑茅地, 芦苇地的*H*值和*H'*值和*J_{sw}*值最低, 与其余生境差异显著。芦苇地物种多样性指数处于较低水平, 物种组成单一, 群落分布不均匀, 不利于群落的稳定发展。

3.3 不同生境下河岸带土壤理化性质

由表3可见, 不同生境下各样地的土壤理化性质具有显著差异。土壤pH均呈弱碱性, 砾石地pH值最低, 河滩地pH值最高。全氮、全钾和有机质的变化规律一致, 均为砾石地>芦苇地>斑茅地>河滩地>沙坑地。速效钾含量表现为河滩地>砾石地>沙坑地>芦苇地>斑茅地, 与物种多样性变化趋势相似。砾石地和芦苇地的含水量较高; 河滩地和沙坑地由于土壤含沙量较高, 蓄水保肥能力差, 土壤含水量、全磷含量较低。

3.4 河岸带草本植物群落与环境因子的DCA分析

以样地为单位统计每种植物个体多度, 建立15 × 109 的样地-物种矩阵, 将坡度、坡向、海拔和7个土壤理化性质指标作为环境因子, 建立15 × 10 的样地-环境因子矩阵, 采用DCA分析对5个类型的15个样地进行排序 (图2)。DCA排序图

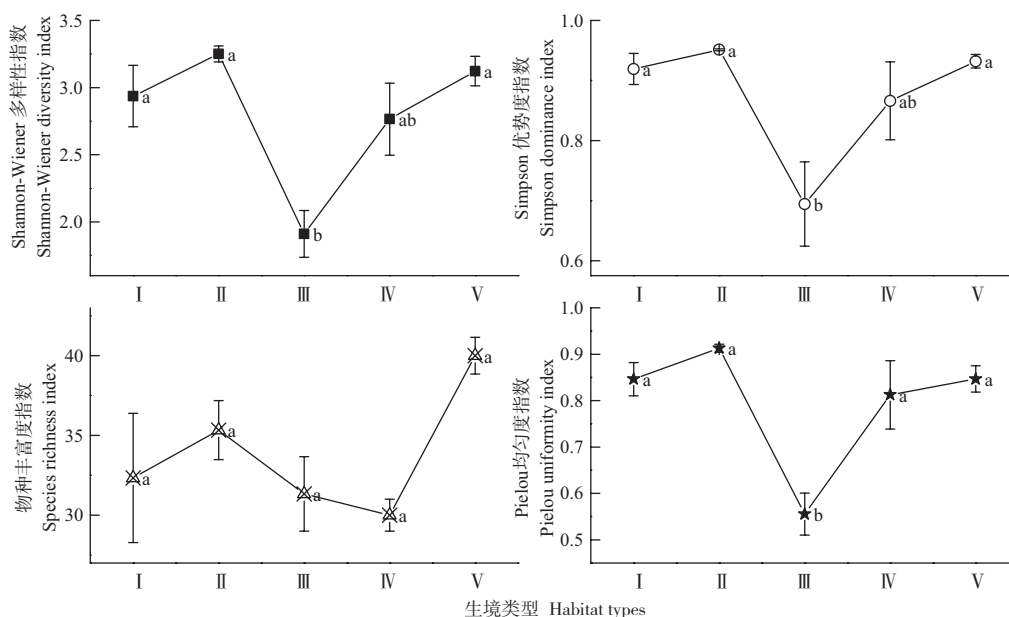


图1 不同生境下草本植物群落的物种多样性指数。I: 河滩地; II: 砾石地; III: 芦苇地; IV: 斑茅地; V: 沙坑地。不同小写字母表示不同生境间的数据差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 1 Species diversity index of herbaceous communities in different habitats. I: Flood land; II: Gravel land; III: *Phragmites australis* land; IV: *Saccharum arundinaceum* land; V: Bunker land. Different lowercase letters indicate significant difference in data between different habitats ($P < 0.05$).

表3 不同生境下河岸带土壤的理化性质

Table 3 Physical and chemical properties of riparian soil in different habitats

生境类型 Habitat types	pH	含水量 Soil water content (P/%)	全氮 Total nitrogen (w/g kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (w/mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (w/mg kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (w/g kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (w/g kg ⁻¹)
I	8.21 ± 0.04a	19.59 ± 0.70c	2.26 ± 0.53c	8.69 ± 0.87ab	11.79 ± 0.60a	0.25 ± 0.01ab	10.14 ± 0.67c
II	7.60 ± 0.01b	36.33 ± 2.52a	10.79 ± 1.03a	10.21 ± 0.23a	9.63 ± 0.95ab	0.33 ± 0.04a	49.84 ± 4.44a
III	7.76 ± 0.04c	32.09 ± 1.08ab	8.04 ± 0.33b	9.34 ± 0.20a	6.62 ± 0.64c	0.26 ± 0.01ab	41.32 ± 2.21a
IV	7.99 ± 0.01c	25.77 ± 1.70bc	3.42 ± 0.42c	8.38 ± 0.17ab	2.90 ± 0.08d	0.27 ± 0.01a	24.4 ± 0.31b
V	8.06 ± 0.09ab	22.5 ± 0.39c	1.29 ± 0.05c	5.94 ± 1.12b	7.21 ± 0.17bc	0.18 ± 0.02b	6.23 ± 0.66c

I: 河滩地; II: 砾石地; III: 芦苇地; IV: 斑茅地; V: 沙坑地。

I: Flood land; II: Gravel land; III: *Phragmites australis* land; IV: *Saccharum arundinaceum* land; V: Bunker land.

较好地反映了草本植物群落与环境因子之间的相互关系。

DCA 1、2轴的特征值分别为0.470 4和0.247 7, 前两轴累积解释方差为53.64%。沿DCA 1轴从左至右, 生境群落由斑茅地、河滩地、芦苇地向沙坑地和砾石地发展, 土壤养分逐渐增多, 海拔及地形因子相应变小; 沙坑地和砾石地与含水量、全氮、有机质呈正相关, 与海拔、坡度、土壤pH呈负相关, 斑茅地、河滩地和芦苇地恰恰相反。生境群落沿DCA 2轴的梯度变化趋势不明显。整体来看, 5种生境类型与样地在DCA排序图上揭示了重要的环境梯度, 其分布格局吻合较好。与DCA 1轴相关系数最高的环境因子, 即影响生境群落分布的主要限制因子为含水量、全氮和有机质。

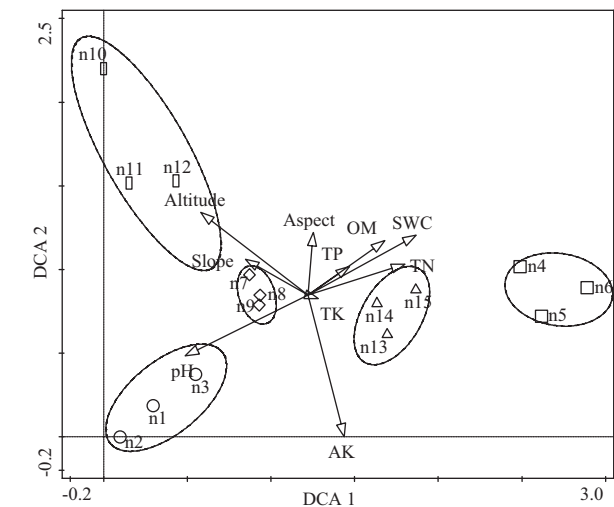


图2 草本植物群落与环境因子的DCA二维排序。Aspect: 坡向; Slope: 坡度; Altitude: 海拔; pH: 土壤酸碱度; SWC: 土壤含水量; TN: 全氮; TK: 全钾; AK: 速效钾; TP: 全磷; OM: 有机质。

Fig. 2 DCA two-dimensional ordering of herb community and environmental factors. SWC: Soil water content; TN: Total nitrogen; TK: Total potassium; AK: Available potassium; TP: Total phosphorus; OM: Organic matter.

3.5 河岸带草本植物属的区系组成与土壤理化性质的RDA分析

在科和属的区系成分分析中得到“应用属的分布特征表现植物区系组成更为合理”的结果, 因此选用属的区系组成类型作为响应变量, 土壤理化性质作为解释变量进行RDA排序。为更直观地表现解释变量对植物区系组成的影响, 采用空间和时间约束作为排列测试参数, 对土壤理化性质进行前瞻性变量选择预测, 结果(表4)显示, 土壤pH和有机质在RDA排序中贡献率达28.1%和24.5%, 均达到极显著水平($P < 0.01$)。其余土壤理化性质对植物属的区系组成影响较小, 未达到显著水平。

在解释变量对响应变量的解释方面, 前两轴能够解释植物区系组成变化的92.52%(图3)。RDA1轴与速效钾和土壤pH呈负相关, 与含水量呈正相关; RDA2轴与有机质呈极显著正相关, 与土壤pH和速效钾呈负相关。随着土壤pH的增大(RDA 2轴), 偏温带分布型增加趋势明显, 而偏热带分布型数量呈减少趋势; 随着有机质的增加(RDA2轴), 偏热带分

布型数量增加, 偏温带分布型数量减少。植物属的区系组成在RDA 1轴方向具有明显的分异现象。5种生境类型分布较为分散, 土壤pH对河滩地的影响最为显著, 是影响河滩地植物区系组成的主导因子; 有机质对芦苇地与斑茅地的影响最为显著, 是两种生境区系组成最重要的制约因子。

表4 土壤理化性质在RDA分析中的前瞻性选择特征

Table 4 Prospective selection characteristics of soil physical and chemical properties in RDA analysis

解释变量 Explanatory variable	解释变异量 Explain (P/%)	贡献率 Contribution (r/%)	伪F统计量 Pseudo-F	显著度 P
pH	15.4	28.1	2.3	0.002
有机质 Organic matter	13.4	24.5	2.2	0.002
速效钾 Available potassium	7.9	14.4	1.3	0.376
全钾 Total potassium	5.9	10.7	1.0	0.440
全氮 Total nitrogen	5.2	9.5	0.9	0.382
全磷 Total phosphorus	4.1	7.4	0.5	0.916
含水量 Soil water content	2.9	5.3	0.5	0.746

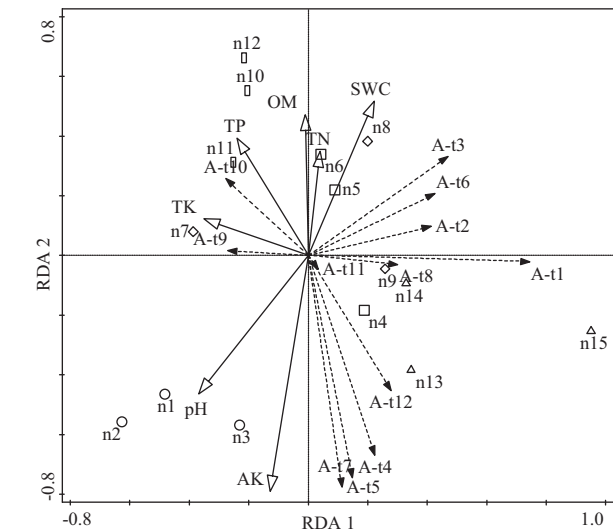


图3 草本植物属的区系组成和土壤理化性质的RDA二维排序。A-t1: 世界分布; A-t2: 泛热带分布; A-t3: 北温带分布; A-t4: 热带亚洲和热带美洲间断分布; A-t5: 地中海区、西亚至中亚分布; A-t6: 热带亚洲至热带非洲分布; A-t7: 东亚分布; A-t8: 热带亚洲至热带大洋洲分布; A-t9: 东亚和北美间断分布; A-t10: 旧世界温带分布; A-t11: 旧世界热带分布; A-t2: 中亚分布。

Fig. 3 RDA two-dimensional ordering of floristic composition and soil physical and chemical properties of herbaceous genus. A-t1: Cosmopolitan; A-t2: Pantropic; A-t3: North Temperate; A-t4: Trop. Asia & Trop. Amer. Disjuncted; A-t5: Mediterranean, W. Asia to C. Asia; A-t6: Trop. Asia to Trop. Africa; A-t7: E. Asia; A-t8: Trop. Asia to Trop. Australasia; A-t9: E. Asia & N. Am. Disjuncted; A-t10: Old World Temperate; A-t11: Old World Tropic; A-t2: C. Asia.

4 讨论与结论

本研究调查记录金马河温江段河岸带草本植物共35科91属109种, 以禾本科、菊科、蓼科、桑科植物为主。沙坑地物种种数最多, 砾石地和河滩地种数次之, 斑茅地和芦苇地种数最少。河岸带草本植物科可划分为3种地理分布型, 属可划分为12种地理分布型。世界分布型和泛热带分布型代表了大部分植被的地理分布特征。砾石地因风蚀水蚀作用强烈, 受水

流搬运作用,大量生境以外的植物繁殖体经河水运输至此,在水位变化中逐渐适应并定居于此生境,逐步演替为以蓼科等杂草类植物为优势种的群落,这与符饶等的研究结果^[23]一致。河滩地和斑茅地表现出了显著的偏热带型特征;河滩地和砾石地地理分布较复杂,包含全部12个分布类型。河岸带样地常年温热潮湿,植物区系趋向于热带植物组成发展。相较于科一级的分布水平,属一级的分布水平更好地体现了河岸带草本植物的地理分布特征,因此应用属的分布特征表现植物区系组成更为合理。

不同生境类型下 H 值、 H' 值和 J_{sw} 值具有特定变化趋势, D 值对生境变化响应不显著。芦苇地的 H 值、 H' 值和 J_{sw} 值最低,其原因是此类型中芦苇的优势度极高,且远高于其他物种,处于绝对优势地位,一定程度上抑制了其他物种的生长,物种多样性指数处于较低水平,物种组成单一,群落分布不均匀,群落趋于不稳定发展;而砾石地和沙坑地的 H 值、 H' 值和 J_{sw} 较高,则是由于频繁的采沙活动导致环境发生变化,各优势种差异不大,未出现绝对优势种,各物种的分布更加均匀,采沙干扰及水位变化使物种数量有所提升,增加了物种丰富度。河滩地与斑茅地各指数区间相似,但因其地理位置的原因受到频繁的重度人为干扰,物种多样性指数低于砾石地和沙坑地,此结果与卢训令等的研究结果^[24]相似。

河岸带土壤是河岸带生态系统功能实现的基础,在维持河岸带稳定性方面起着十分重要的作用。本研究不同生境下各样地的土壤理化性质具有显著差异。河岸带土壤pH均呈弱碱性,砾石地pH值最低,河滩地pH值最高,说明河滩地蒸发量偏高,周边矿物质含量较高,砾石地反之。砾石地和芦苇地的全氮、全钾和有机质含量明显高于其他生境,是因为两地沉积物较多,凋落物及浮游动物扮演了土壤主要的有机质供应者和养分归还者。芦苇地轻度盐渍化抑制了大部分草本植物的生长,却为芦苇提供了适宜生长的环境,这些芦苇群一方面保护了河岸带不受水土流失的影响,另一方面也带来了蒸散耗水量巨大的问题。河滩地的速效钾养分含量最高,与物种多样性变化相似,这与Helfield James M等的研究结果^[25]相符。砾石地和芦苇地的含水量较高,而河滩地和沙坑地土壤含水量、全磷含量较低,是由于后两种类型土壤含沙量较高,蓄水保肥能力差,造成含水量及养分含量低微,土壤肥力较差。

植被-土壤系统是一个密不可分的整体,其相互间协同变化的作用机理维持着生态系统的动态稳定。本研究显示群落与环境因子之间、属的植物区系成分与土壤理化性质之间均具有对应关系,这与孙千惠等的研究结果^[26]相似。群落与环境因子的DCA分析表明,含水量、全氮和有机质是影响生境群落分布的主要限制因子,这与吕倩等的研究结果^[27]相似。属的植物区系组成与土壤理化性质的RDA分析表明,土壤pH和有机质是RDA分析中影响极显著的两个变量($P < 0.01$)。土壤pH对河滩地的影响最为显著,是影响河滩地植物区系组成的主导因子;有机质对芦苇地与斑茅地的影响最为显著,是两种生境区系组成最重要的制约因子。5种生境类型间差异明显,分布较为分散。土壤pH与植物区系组成呈极显著负相关,是由于生境受各类干扰影响越严重,土壤越贫瘠,

土壤碱性越高,物种多样性水平越低,植物区系组成退化。为改善土壤结构,需平衡土壤酸碱性,增强土壤蓄水保肥的能力,提高河岸带生态稳定性。

综上所述,在植物区系组成与物种多样性方面,砾石地因水流搬运草种及较频繁的人、动物活动影响,物种多样性最为丰富,植物区系组成最为复杂,但其物种组成主要为杂草类植物,对养分争夺强烈,排挤其他植物,任其发展会破坏湿地景观,在实际应用中不建议选取;在土壤养分方面,芦苇地已形成以芦苇为绝对优势种的特征群落,各土壤养分含量较高,养分循环速度快,是典型的水生草本湿地类型,在调节气候、涵养水源及提供鸟类栖息地等方面具有重要贡献,但芦苇植株高大密集,物种组成单一,不利于物种多样性发展。在理想条件下,河滩地是最适宜河岸带草本植物生长发育的生境类型,但在实际情况中,河滩地受负面干扰程度较高,在自然选择下淘汰了大量同属异种植物,属内种间关系竞争强烈,群落稳定性差,需进行生态保护及改造。应严格控制金马河流域的耕作、割草、挖沙等人为活动干扰,逐步恢复已被破坏的河岸带生境,建立稳定的草本植物群落,提高河岸带水土保持能力,从而使河流生态系统发挥其稳定的循环及生态防护能力。

参考文献 [References]

- 1 刘晔,朱鑫鑫,沈泽昊,孙航.中国西南干旱河谷植被的区系地理成分与空间分异[J].生物多样性,2016,24(4):367-377 [Liu Y, Zhu XX, Shen ZH, Sun H. flora compositions and spatial differentiations of vegetation in dry valleys of Southwest China [J]. *Biodiv Sci*, 2016, 24(4): 367-377]
- 2 修晨,欧阳志云,郑华.北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析[J].生态学报,2014,34(6):1535-1547 [Xiu C, Ouyang ZY, Zhen H. Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(6): 1535-1547]
- 3 彭婉婷,罗鹏,刘长青,唐荣华,潘远智.运用植物区系质量指数快速评估湿地植被恢复成效[J].生物多样性,2014,22(5):564-573 [Peng WT, Luo P, Liu CQ, Tang RH, Pan YZ. A rapid and quantitative assessment of wetland vegetation restoration effects with Floristic Quality Assessment Index [J]. *Biodiv Sci*, 2014, 22(5): 564-573]
- 4 金慧,赵莹,赵伟,尹航,秦立武,崔凯峰,李晓杰,黄祥童.长白山牛皮杜鹃群落物种多样性的海拔梯度变化及相似性[J].生态学报,2015,35(1):125-133 [Jin H, Zhao Y, Zhao W, Yin H, Qin LW, Cui KF, Li XJ, Huang XT. Elevational changes in species diversity and similarity analysis of a *Rhododendron chrysanthum* community on Changbai Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(1): 125-133]
- 5 武晶,刘志民.生境破碎化对生物多样性的影响研究综述[J].生态学杂志,2014,33(7):1946-1952 [Wu J, Liu ZM. Effect of habitat fragmentation on biodiversity: a review [J]. *Chin J Ecol*, 2014, 33(7): 1946-1952]
- 6 周欣,左小安,赵学勇,王少昆,刘川,张婧,吕朋,张建鹏.科尔沁沙地植物群落分布与土壤特性关系的DCA、CCA及DCCA分析[J].生态学杂志,2015,34(4):947-954 [Zhou X, Zuo XA, Zhao XY, Wang SK, Liu C, Zhang J, Lv P, Zhang JP. Comparison analyses of DCA, CCA and DCCA on relationships between plant community distribution and soil properties of Horqin Sandy Land [J]. *Chin J Ecol*, 2015, 34(4): 947-954]

- 7 郦威, 卢振兰, 孔维静, 张远. 太子河河岸带土壤理化性质特征及其与环境因子的关系[J]. 生态科学, 2013, **32** (1): 90-97 [Li W, Lu ZL, Kong WJ, Zhang Y. Physical and chemical properties of riparian soils in the Taizi River Basin and their relationship with environmental factors [J]. *Ecol Sci*, 2013, **32** (1): 90-97]
- 8 赵清贺, 刘倩, 马丽娇, 丁圣彦, 卢训令, 汤茜, 徐珊珊. 黄河中下游典型河岸带土壤性质空间变异及其对环境的响应[J]. 应用生态学报, 2015, **26** (12): 3795-3802 [Zhao QH, Liu Q, Ma LJ, Ding SY, Lu XL, Tang Q, Xu SS. Spatial variation in riparian soil properties and its response to environmental factors in typical reach of the middle and lower reaches of the Yellow River [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26** (12): 3795-3802]
- 9 Sanjaya K, Asaeda T. application and assessment of a dynamic riparian vegetation model to predict the spatial distribution of vegetation in two Japanese river systems [J]. *J Hydro-environ Res*, 2017, **16** (5): 1-12
- 10 韩路, 王海珍, 于军. 河岸带生态学研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2013, **22** (5): 879-886 [Han L, Wang HZ, Yu J. Research progress and prospects on riparian zone ecology [J]. *Ecol Environ Sci*, 2013, **22** (5): 879-886]
- 11 夏晓平, 信忠保, 孔庆仙, 张栋. 北京怀九河河岸类型的植被与土壤理化性质差异[J]. 中国水土保持科学, 2017, **15** (4): 117-124 [Xia XP, Xin ZB, Kong QX, Zhang D. Vegetation and soil physicochemical properties in different types of the Huaijiu River riparian in Beijing [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2017, **15** (4): 117-124]
- 12 殷守敬, 吴传庆, 王晨, 马万栋, 何游云. 淮河干流岸边带生态健康遥感评估[J]. 中国环境科学, 2016, **36** (1): 299-306 [Yin SJ, Wu CQ, Wang C, Ma WD, He YY. Remote sensing assessment of ecological health of the riparian buffer along Huaihe River [J]. *Chin Environ Sci*, 2016, **36** (1): 299-306]
- 13 张文丽, 夏会娟, 张远, 孔维静, 贾晓波, 姚懿函. 东辽河河岸带草本植物物种多样性及群落数量分析[J]. 生态学杂志, 2014, **33** (5): 1142-1149 [Zhang WL, Xia HJ, Zhang Y, Kong WJ, Jia XB, Yao YH. Herbaceous species diversity and community quantitative analysis in the riparian zone of East Liaohe River [J]. *Chin J Ecol*, 2014, **33** (5): 1142-1149]
- 14 王烨, 金山, 秦晓娟, 秦浩, 张峰. 浊漳河干流湿地草本植物群落优势种间关系及功能群划分[J]. 生态学杂志, 2015, **34** (8): 2109-2114 [Wang Y, Jin S, Qin XJ, Qin H, Zhang F. Interspecific relationships of dominant species and plant functional groups of wetland herb communities in Zhuozhang River watershed, Shanxi [J]. *Chin J Ecol*, 2015, **34** (8): 2109-2114]
- 15 姚俊宇, 伍莅薇, 孙千惠, 吴霞, 姚小兰, 郝建锋, 齐锦秋. 林窗大小对川西马尾松人工林下物种多样性和生物量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24** (2): 214-220 [Yao JY, Wu XB, Sun QH, Wu X, Yao XL, Hao JF, Qi JQ. Effects of canopy gap size on understory species diversity and biomass in a *Pinus massoniana* plantation in western Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2018, **24** (2): 214-220]
- 16 唐香君, 郭亚琳, 樊敏, 王青, 赵丽. 岷江上游干旱河谷区林-农-草地土壤水分特征与数值模拟[J]. 中国农学通报, 2017, **33** (7): 128-133 [Tang XJ, Guo YL, Fan M, Wang Q, Zhao L. Moisture characteristics and numerical simulation of forest-farmland-grass and soil in arid valley Region in the Upper Reaches of Min River [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2017, **33** (7): 128-133]
- 17 方露, 李晓宁, 唐香君, 樊敏, 幸艳, 赵丽. 岷江上游杂谷脑河流域林树下土壤持水性及影响因素[J]. 水土保持研究, 2018, **25** (5): 95-102 [Fang L, Li XN, Tang XJ, Fan M, Xing Y, Zhao L. Research on water-holding capacity and related factors in Zagunao River Basin in the Upper Reaches of Min River [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2018, **25** (5): 95-102]
- 18 杨文斌, 刘坤, 周守标. 安徽新安江干流滩涂湿地草本植物区系及物种多样性[J]. 生态学报, 2013, **33** (5): 1433-1442 [Yang WB, Liu K, Zhou SB. The flora and species diversity of herbaceous seed plants in wetlands along the Xin'anjiang River from Anhui [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (5): 1433-1442]
- 19 吴征镒, 周浙昆, 李德铎, 彭华, 孙航. 世界种子植物科的分布区类型系统[J]. 云南植物研究, 2003, **25** (3): 245-257 [Wu ZY, Zhou ZK, Li DZ, Peng H, Sun H. The Areal-types of the World Families of Seed Plants [J]. *Acta Bot Yunnan*, 2003, **25** (3): 245-257]
- 20 李锡文. 中国种子植物区系统计分析[J]. 云南植物研究, 1996, **18** (4): 363-384 [Li XW. Floristic statistics and analyses of seed plants from China [J]. *Acta Bot Yunnan*, 1996, **18** (4): 363-384]
- 21 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004 [Zhang JT. Quantitative Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2004]
- 22 吕貽忠, 李保国. 土壤学实验[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010 [Lü YZ, Li BG. Soil Experiment [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010]
- 23 符饶, 郝建锋, 李艳, 姚小兰, 裴曾莉, 黄雨佳, 蒋倩. 青衣江中游河滨草本植物生态位和物种多样性[J]. 湿地科学, 2016, **14** (4): 546-552 [Fu R, Hao JF, Li Y, Yao XL, Pei ZL, Huang YJ, Jiang Q. Niche and species diversity of riparian herbaceous plants in the middle reaches of the Qingyijiang River [J]. *Wetl Sci*, 2016, **14** (4): 546-552]
- 24 卢训令, 汤茜, 梁国付, 丁圣彦. 黄河下游平原不同非农生境中植物多样性[J]. 生态学报, 2015, **35** (5): 1527-1536 [Lu XL, Tang Q, Liang GF, Ding SY. Plant species diversity of non-agricultural habitats in the lower reaches of the Yellow River plain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35** (5): 1527-1536]
- 25 Helfield JM, Engstrom J, Michel JT, Nilsson C, Jansson R. Effects of river restoration on riparian biodiversity in secondary channels of the Pite River, Sweden [J]. *Environ Manage*, 2012, **49** (1): 130-141
- 26 孙千惠, 吴霞, 王媚臻, 张柳桦, 姚小兰, 齐锦秋, 郝建锋. 林分密度对马尾松林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 应用生态学报, 2018, **29** (3): 732-738 [Sun QH, Wu X, Wang MZ, Zhang LH, Yao XL, Qi JQ, Hao JF. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of *Pinus massoniana* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29** (3): 732-738]
- 27 吕倩, 尹海峰, 何朋俊, 李贤伟, 范川, 冯茂松, 刘俊杰, 王艺峰. 马尾松人工林目标树经营初期对土壤理化性质与植物多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24** (3): 500-507 [Lü Q, Yin HF, He PJ, Li XW, Fan C, Feng MS, Liu JJ, Wang YF. Effects of early management of *Pinus massoniana* plantation target trees on soil physicochemical properties and plant diversity [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2018, **24** (3): 500-507]