



黄河上游白河干流全段植物群落特征及生物多样性

李红霖 贺丽 吴科君 鄢武先 邓东周 陈德朝 刘思泽 文智猷

Research on plant community characteristics and biodiversity in the whole section of the main stream of Baihe River in the upper reaches of the Yellow River

LI Honglin, HE Li, WU Kejun, YAN Wuxian, DENG Dongzhou, CHEN Dechao, LIU Size, WEN Zhiyou

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0303>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河源区不同建植年限黑土滩栽培草地植物群落变化特征

Variation characteristics of plant communities in black soil shoals with different establishment years in the source area of the Yellow River

草业科学. 2020, 37(12): 2422 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0291>

永定河上游流域浮游植物变化及水质状况分析

Analysis of changes in phytoplankton and water quality in the upper reaches of the Yongding River

草业科学. 2020, 37(7): 1345 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0104>

空心莲子草入侵对豫南草本植物群落多样性及稳定性的影响

Influence of *Alternanthera philoxeroides* invasion on species diversity and stability in the herbaceous community in southern Henan Province

草业科学. 2019, 36(2): 382 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0304>

青藏高原高山草甸群落生物量及多样性对氮素添加的响应

Response of biomass and species diversity to nitrogen addition in alpine meadows

草业科学. 2017, 11(5): 1082 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0429>

皖北石灰岩山地不同植被恢复模式对植物群落物种组成及多样性的影响

Effects of vegetation restoration on the species composition and diversity of plant communities in the limestone mountains in northern Anhui Province

草业科学. 2020, 37(5): 845 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0475>

水氮耦合对荒漠草原植物物种多样性及生物量的影响

Effect of water and nitrogen interaction on plant species diversity and biomass in a desert grassland

草业科学. 2018, 12(1): 36 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0167>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0303

李红霖, 贺丽, 吴科君, 鄢武先, 邓东周, 陈德朝, 刘思泽, 文智猷. 黄河上游白河干流全段植物群落特征及生物多样性. 草业科学, 2023, 40(4): 848-863.

LI H L, HE L, WU K J, YAN W X, DENG D Z, CHEN D C, LIU S Z, WEN Z Y. Research on plant community characteristics and biodiversity in the whole section of the main stream of Baihe River in the upper reaches of the Yellow River. Pratacultural Science, 2023, 40(4): 848-863.

黄河上游白河干流全段植物群落 特征及生物多样性

李红霖, 贺 丽, 吴科君, 鄢武先, 邓东周, 陈德朝, 刘思泽, 文智猷

(四川省林业科学研究院, 四川 成都 610081)

摘要: 近年来, 若尔盖高原地区弯曲河流横向迁移现象越来越突出, 河道两岸带状成型淤积体(点边滩)越来越多, 侵蚀农牧民草地资源越来越严重, 区域水源涵养功能受到显著影响, 一定程度上, 威胁到黄河上游地区的生态安全、生物多样性保护和畜牧业经济的发展, 探索点边滩治理方案迫在眉睫。本研究以黄河上游白河干流全段岸线植被群落为研究对象, 采用典型样地法, 在白河干流沿程凹凸岸设置典型样地, 开展白河干流全段植物群落特征及生物多样性分析研究, 以期揭示白河干流全段植物群落特征变化及植被因子在点边滩形成过程中的关键作用。结果表明: 1) 干流空间尺度: 白河干流全段岸线植被群落共记录灌草藤植物 26 科 70 属 88 种, 其中, 灌木 6 科 8 属 10 种, 草本 21 科 62 属 77 种, 藤本 1 科 1 属 1 种; 草本层是白河干流岸线高寒灌丛群落物种构成的主体, 群落以中生、湿中生植物为建群种或优势种, 随着白河干流沿程往下走, 群落总体上呈现物种数、平均高度和平均盖度、草本层地上生物量逐渐增加, 物种多样性逐渐下降的变化规律。2) 凹凸岸空间特征: 河岸带植被群落凹凸岸异质性表现较为明显, 灌木层植被种类、物种多样性指数凸岸高于凹岸, 草本层种类、草本层地上生物量、物种多样性均表现为凹岸高于凸岸, 且凹凸岸在中下游的异质性表现高于上游。因此, 在黄河上游地区的河岸滩治理中, 应针对不同的河段采取不同的治理措施, 尤其是放牧、采砂、城镇建设等人为活动的合理控制及河岸带植被在弯曲河流演变过程中的相互作用, 同时对凹凸岸两个关键区域给予更多关注。

关键词: 黄河上游; 弯曲河流; 河岸带; 点边滩; 植被群落; 物种多样性; 生物量

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2023)04-0848-16

Research on plant community characteristics and biodiversity in the whole section of the main stream of Baihe River in the upper reaches of the Yellow River

LI Honglin, HE Li, WU Kejun, YAN Wuxian, DENG Dongzhou, CHEN Dechao, LIU Size, WEN Zhiyou

(Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: Recently, the lateral migration of curved rivers in the Zoige Plateau has become more and more prominent, with the formation of more and more band-shaped formed silt bodies (point-side beaches) on both banks of the river. As a result, the erosion of farmers and herdsmen's grassland resources has become increasingly severe. Regional water conservation function has been significantly affected, threatening the ecological security, biodiversity protection, and economic development of animal husbandry in the upper reaches of the Yellow River. Thus, there is an urgent need to develop a

收稿日期: 2022-04-11 接受日期: 2022-06-27

基金项目: 四川省科技厅基本科研课题 (2022JBKY05)

第一作者: 李红霖 (1991-), 女, 四川成都人, 工程师, 硕士, 主要从事林业 3S 技术应用、恢复生态学研究。E-mail: ganlin1220@126.com

通信作者: 陈德朝 (1986-), 男, 河北邯郸人, 副研究员, 硕士, 主要从事林学、恢复生态学相关研究。E-mail: 570820170@qq.com

treatment scheme for point-side beaches. This study takes the vegetation community along the whole section of the main stream of Baihe River in the upper reaches of the Yellow River as the research object. Using the typical sample plot method, typical sample plots were set along the concave and convex banks of the main stream of Baihe River to evaluate the characteristics and biodiversity of the plant community in the whole section of the main stream of Baihe River. Changes were identified in plant community characteristics along the section of the main stream of Baihe River, as well as the key role of vegetation factors in the formation of point-side beaches. The results showed that 1) spatial scale of trunk line: the vegetation community of the entire coastline of the main stream of the Baihe River has a total of 88 species of shrubs, grasses and vines, 70 genera, and 26 families, including 6 families, 8 genera, and 10 species of shrubs; 21 families, 62 genera, and 77 species of herbs; 1 family, 1 genus, and 1 species of Lianas. The herbaceous layer was the main body of species composition of the alpine shrub community on the shoreline of the main stream of the Baihe River. The plant population comprises mesophytes and wet mesophytes as the constructive species or dominant species. The community species, average height and coverage, and aboveground biomass of the herbaceous layer generally showed a gradual increase, and the species diversity showed a gradual decline; 2) spatial characteristics of concave and convex banks: the heterogeneity of the vegetation community in the riparian zone was marked. The vegetation types and species diversity index of the shrub layer were higher than those of the concave bank. Aboveground biomass and species diversity were higher in concave banks than in convex banks, and the heterogeneity of concave and convex banks in the middle and lower reaches was higher than that in the upstream. Therefore, different management measures should be employed for different river sections in the regulation of riparian beaches in the upper reaches of the Yellow River. In particular, the reasonable control of human activities, such as grazing, sand mining, and urban construction, and the interaction of riparian vegetation in the evolution of curved rivers should be reasonably managed. Lastly, attention should be paid to the two key areas of concave and convex banks.

Keywords: upper Yellow River; curved river; riparian zone; point bar; vegetation community; species diversity; biomass

Corresponding author: CHEN Dechao E-mail: 570820170@qq.com

河岸带是水生、陆地两大生态系统之间相互影响的狭窄生态交错带,在河岸稳定、水污染治理、径流调节、生物多样性保护等方面具有不可替代的价值^[1-3],并为各种生物提供绝佳的生境,拥有丰富的生物多样性^[4]。河岸带植被群落作为该交错带的核心要素,其变化对流域生态环境具有至关重要的风向标意义^[5-6]。

黄河上游地区是我国重要的生态屏障和水源涵养区,该地区的冲积河流以弯曲河型为主,弯曲河流横向迁移过程是凹岸冲刷和凸岸淤积共同作用的结果,受地质、水沙、河床条件、土壤和水流流速及比降、河岸植被等多因素共同作用,且各因素影响权重不尽相同^[7-9]。随着近几十年来气候的逐渐干旱化,草地载畜量的迅速增加^[10],使该区林草植被破坏严重、鼠害频发^[11]。若尔盖高原地区弯曲河流横向迁移现象越来越突出,过程越来越明显,河道两岸带状成型淤积体(点边滩)越来越多,侵蚀农牧民草场资源越来越严重,区域水源涵养功能受到显著影响,一定程度上,威胁到黄河上游地区的生

态安全、生物多样性保护和畜牧业经济的发展。探索点边滩治理方案迫在眉睫。

目前国内外学者关于河岸带点边滩的研究主要集中于点边滩的形成原因、特征、影响因素等,且研究区域聚焦河流下游河段。如 Kawai 和 Julien^[12]认为点边滩的形成受到弯道形态、水沙条件、床沙粒径和植被覆盖的综合影响。杨玥等^[13]以白河和黑河下游弯曲河段为研究对象,基于遥感影像和水沙数据,进行凸岸点边滩的形态描述、分类,建立点边滩的形态与水文条件的联系,分析点边滩演变规律。这些研究要素单一,且未能与河岸相位、生态安全、植被群落等相关关系结合,尤其是滨河植被与弯曲河流的相关关系是目前河流地貌学家关注度较为缺乏的板块。河岸带植被群落所构成的河流缓冲带,构成了营养物质和能量流动的关键过渡区,对弯曲河流河湾的迁移和几何形态的稳定性具有重要作用,在河湾凹岸加固河岸,在凸岸降低近岸流速,拦截部分泥沙,是河流地貌形成的参与者和调控者,是河岸带生态功能的发挥者和维持者,

其作用强弱取决于植被的种类、密度和分布等因素^[14-17]。杨树青等^[18]从植被密度角度,基于自然模型试验,发现河岸植被密集度与水流对河床的局部扰动力呈负相关关系,且凹凸岸均有植被覆盖的弯曲河道,其稳定曲率随植被覆盖率增大而减小;朱海丽等^[19]基于群落植被调查,发现弯曲河流凸岸形成了 4 个明显不同的植被演替分带;刘桢^[20]研究结果表明弯曲河流迁移速率与凹岸植被生物量呈指数关系,且河湾横向迁移对滨河草地生态系统形成牧草先增多后减少再增多的调节作用;以上研究均从不同角度做了分析,均为单点研究,但河岸带植物群落特征及生物多样性情况、沿程变化情况、凹凸岸变化,尚不明确。本研究选取黄河上游一级支流白河作为研究对象,基于野外植被群落调查,探讨以下两个问题:1) 不同河流沿程河岸带点边滩植被群落特征变化。2) 干流凹凸岸生境植被群落异质性特征。以期为黄河上游河曲湿地资源的保护利用与恢复以及区域生态环境的可持续发展提供理论支撑和决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白河流域位于黄河上游的若尔盖盆地(图 1),发源于红原县查勒肯,自南而北,流经红原县,至若尔盖县的唐克镇附近汇入黄河,河道全长 270 km,

流域面积 5 488 km²^[21-22]。白河作为黄河上游重要的一级支流,是黄河上游地区重要的水源涵养区和补给区。

以白河干流全段为研究区,分干流上、中、下游 3 段为重点试验区。白河干流均为土质河床。上游,河道长 38 km,流经丘陵山区,落差大,平均比降为 24‰,谷底宽 0.5~1.5 km;中游,河道长 155 km,流经浅山丘陵区,河道弯曲,比降降至 0.6‰,谷底宽 2~3 km,两岸多滩地,部分区域已沼泽化;下游,河道长 77 km,流经平原区,河道蜿蜒曲折,比降平缓,平均为 0.3‰,谷底宽增至 3~5 km。研究区属大陆性高原寒温带季风气候,四季不明显,长冬无夏,没有绝对无霜期;植被类型较为简单,以山地草甸、高寒草甸和高山草原化草甸为主;土壤以亚高山草甸土、高山草甸土、沼泽化草甸土和高原草甸土为主。

1.2 研究方法

1.2.1 研究样地调查

样地设置:依据方精云等^[23]的样地设置方法,于 2021 年 6 月—8 月对研究区的植被群落进行调查。依据若尔盖高原地区典型弯曲河流特征,将调查样地类型分为上游凹岸、上游凸岸、中游凹岸、中游凸岸、下游凹岸、下游凸岸。在上、中、下游各河段分别选取 3 个发育典型的河湾,距离上基本呈均匀分布状态,上游平均间距 12 km,中游平均

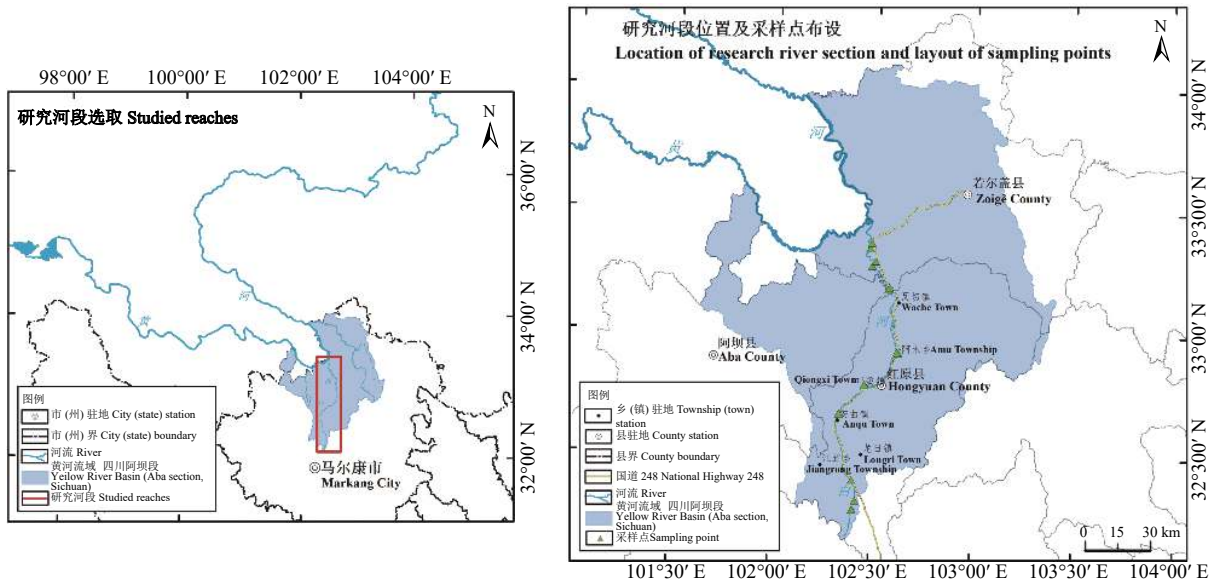


图 1 研究区地理位置图及采样点

Figure 1 Map of the study area and location of sampling points

间距 33 km, 下游平均间距 20 km, 为保证河流水文特征、河岸岩土体特性、海拔及受干扰程度的一致性, 本研究在同一河湾附近设置凹凸岸两种生境样地。每个生境类型分别设置 3 个 20 m × 20 m 的样地, 共计 18 个样地, 采用“对角线法”在每个样地内设置 3 个 5 m × 5 m 的灌木样方, 3 个 1 m × 1 m 的草本样方。3 个 50 cm × 50 cm 的生物量测定区。共计 54 个灌木样方, 54 个草本样方, 54 个生物量测定区。

野外调查: 对样地详细踏查时, 记录每个样方内灌草植物的种类、株数(丛数)、高度、冠幅(盖度)。同时使用 GPS 记录调查点的经纬度、海拔信息, 使用罗盘仪记录坡度、坡向信息, 并拍照记录(表 1)。

生物量测定: 在每个样地内选取 3 个生物量测定区样方, 采用“样方收获法”测定草本层地上生物量及地表枯落物生物量, 齐地刈割样方内所有草本植株及地上枯落物装袋编号带回实验室, 放入 65 ℃

烘箱烘干至恒重, 取出称重并做好记录。

1.2.2 资料收集

分析所用气象资料来自红原县气象年鉴; 所用牲畜存栏量数据来自红原县科学技术和农业畜牧局; 湿宽(河流水面宽度)基于高分二号卫星遥感影像(2021 年 8 月数据, 空间分辨率 1.8 m), 通过 Arcgis 进行图像处理获取。

1.2.3 重要值及物种多样性计算

对灌草两层植物分别进行统计分析, 本研究选取 Margalef 丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数测度河岸带群落多样性水平, 计算公式如下:

相对密度 = 某个种的株数/所有种的总株数;

相对频度 = 某个种在统计样方中出现的次数/所有种出现的总次数;

相对盖度 = 某个种的盖度/所有种的盖度之和;

物种重要值 (important value, IV): $IV = (\text{相对密}$

表 1 样地概况
Table 1 Details of the sample plots

生境类型 Habitat type		样地 Sample plot	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Altitude/m
河段 Studied reaches	凹凸岸 Slip-off/undercut bank			
上游 Upper reaches	凹岸 Slip-off bank	1	32°16'59.964" N, 102°24'47.639" E	3 800
		2	32°19'17.561" N, 102°25'39.714" E	3 710
		3	32°24'17.755" N, 102°24'29.689" E	3 599
	凸岸 Undercut bank	4	32°17'3.758" N, 102°24'48.518" E	3 798
		5	32°19'12.308" N, 102°25'40.332" E	3 711
		6	32°24'14.298" N, 102°24'30.065" E	3 601
中游 Middle reaches	凹岸 Slip-off bank	7	32°40'24.576" N, 102°20'25.219" E	3 510
		8	32°47'36.082" N, 102°27'51.556" E	3 493
		9	32°55'48.497" N, 102°37'10.249" E	3 475
	凸岸 Undercut bank	10	32°40'35.507" N, 102°20'15.911" E	3 510
		11	32°47'46.973" N, 102°27'43.831" E	3 494
		12	32°55'37.160" N, 102°37'39.990" E	3 477
下游 Lower reaches	凹岸 Slip-off bank	13	33°11'37.039" N, 102°34'39.868" E	3 447
		14	33°17'59.492" N, 102°30'16.453" E	3 444
		15	33°22'25.224" N, 102°29'7.220" E	3 436
	凸岸 Undercut bank	16	33°11'9.694" N, 102°34'16.693" E	3 447
		17	33°16'47.729" N, 102°29'18.209" E	3 439
		18	33°21'4.500" N, 102°28'36.224" E	3 437

度 + 相对盖度 + 相对频度)/3;

Margalef 丰富度指数: $R = (S - 1)/\ln N$;

Simpson 多样性指数 (优势度): $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$;

Shannon-Wiener 多样性指数: $H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$;

Pielou 均匀度指数: $J = H/\ln S$ 。

式中: $P_i = N_i/N$, $i = 1, 2, 3, \dots, S$; N_i 为第 i 种的个体数量 (物种重要值); N 为所有种的个体总数 (物种重要值总和); S 为物种总数。

1.2.4 数据处理

采用 Excel 软件记录、整理基础数据并绘制相关表格。采用 SPSS 22.0 单因素方差分析 (ANOVA) 的 LSD 法进行不同生境间群落特征、多样性指数、生物量及其分配的差异性比较和显著性检验。采用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析法 (redundancy analysis, RDA) 揭示植被因子 (生物量和物种多样性) 和关键因子 [海拔、降水量、湿宽 (河流水面宽度)、物种

数、植被平均高度、植被平均盖度] 的相互关系。

2 结果与分析

2.1 岸线植物群落特征

2.1.1 岸线植物群落物种组成变化

经群落调查统计分析发现, 白河干流全段岸线植被群落共记录灌草藤植物 26 科 70 属 88 种 (表 2、图 2), 其中, 灌木 6 科 8 属 10 种, 草本 21 科 62 属 77 种, 藤本 1 科 1 属 1 种; 单科单属植物共有 10 种; 菊科、毛茛科、蔷薇科、禾本科、莎草科、玄参科、豆科、伞形科植物是该区域的主要物种成分, 植物总量占调查总物种数的 64.8%; 草本植物总数量占调查总物种数的 87.5%, 可见, 白河干流岸线植被群落中, 灌木层物种组成较为单一, 草本层是白河干流岸线高寒灌丛群落物种构成的主体, 对群落物种多样性贡献最大。同时, 研究区植物种群以中生、湿中生植物为建群种或优势种, 主要有矮生嵩草

表 2 白河干流全段岸线植被群落科属种统计
Table 2 Data of families, genera, and species of communities in riparian zones along the channel of the Baihe River

层次 Layer	生境类型 Habitat type		科数 Family	属数 Genera	物种数 Species
	河段 Studied reaches	凹凸岸 Slip-off/undercut bank			
灌木层 Shrub layer	上游 Upper reaches	凹岸 Slip-off bank	3	5	7
		凸岸 Undercut bank	6	8	10
	中游 Middle reaches	凹岸 Slip-off bank	4	4	5
		凸岸 Undercut bank	5	6	7
	下游 Lower reaches	凹岸 Slip-off bank	3	3	3
		凸岸 Undercut bank	5	5	6
草本层 Herbaceous layer	上游 Upper reaches	凹岸 Slip-off bank	15	34	40
		凸岸 Undercut bank	15	35	40
	中游 Middle reaches	凹岸 Slip-off bank	16	32	37
		凸岸 Undercut bank	16	23	26
	下游 Lower reaches	凹岸 Slip-off bank	16	35	41
		凸岸 Undercut bank	15	31	40
藤本层 Lianaceous layer	上游 Upper reaches	凹岸 Slip-off bank			
		凸岸 Undercut bank			
	中游 Middle reaches	凹岸 Slip-off bank			
		凸岸 Undercut bank	1	1	1
	下游 Lower reaches	凹岸 Slip-off bank			
		凸岸 Undercut bank			

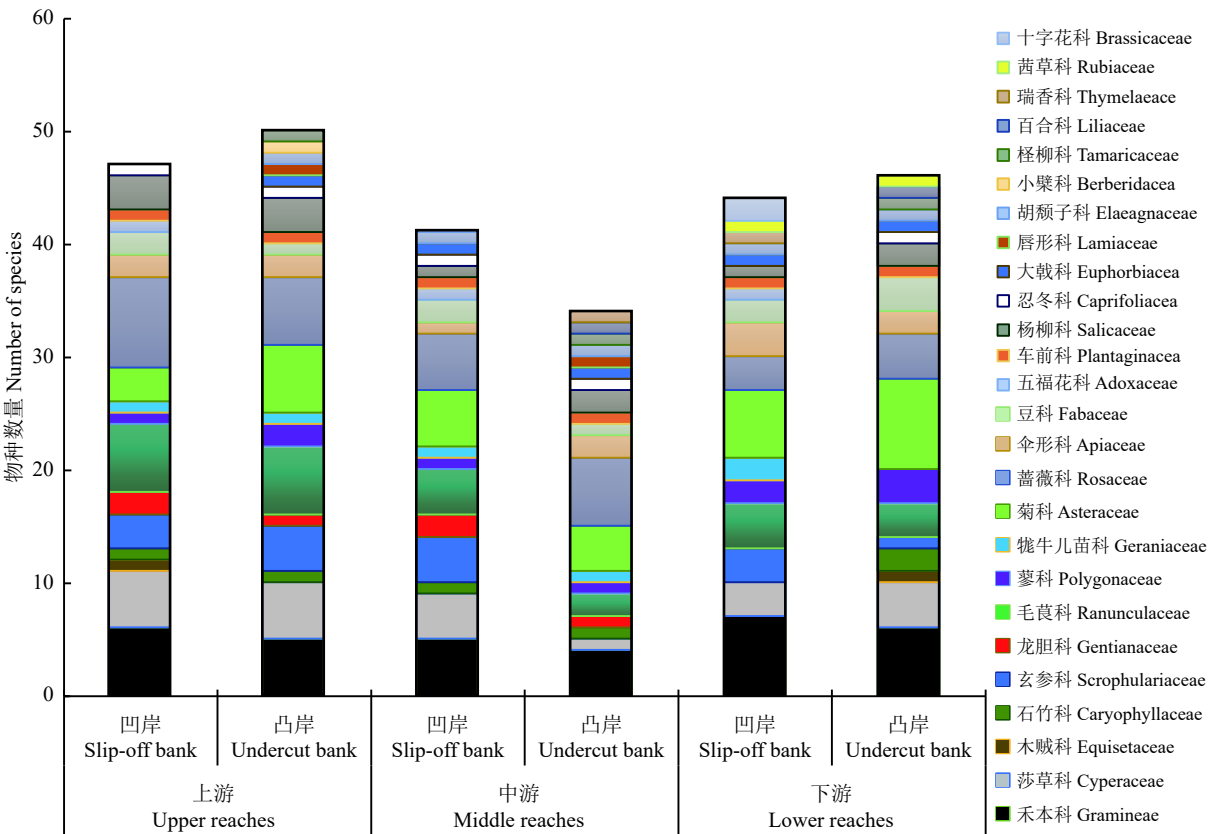


图 2 白河干流全段岸线植被群落物种科数占比

Figure 2 Proportion of all families of the communities in riparian zones along the channel of the Baihe River

(*Kobresia humilis*)、蕨麻 (*Argentina anserina*)、珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*); 伴生种有黄帚橐吾 (*Ligularia virgaurea*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 等。

就河段生境来看, 白河干流全段至上游到下游植物科、属、种数量呈先减少后增加趋势 (表 2、图 2), 均在中游形成波谷, 说明物种丰富度在上游和下游较高。上游物种以毛茛科、禾本科、菊科、蔷薇科、莎草科为主, 下游物种以菊科、禾本科、莎草科为主, 中游物种以菊科、禾本科、蔷薇科、毛茛科为主, 以狗舌草 (*Tephrosia kirilowii*)、沙蒿 (*Artemisia desertorum*)、细杆沙蒿 (*A. macilenta*) 为代表的菊科植物丰富度从上游至下游呈越来越高的趋势。就河流凹凸岸生境来看, 凸岸的物种丰富度高于凹岸, 主要表现在百合科、唇形科、怪柳科、小檗科的贡献, 灌木层上游到下游呈下降趋势; 草本层在中游凸岸形成明显的波谷, 在上游和下游两个河段凹凸岸物种丰富度差异性表现不明显, 草本层在白河全河段凹岸变化不明显, 在凸岸呈先减少后增加的趋势。

2.1.2 岸线植物群落盖度与高度

白河干流全段沿程岸线植被群落外貌变化极为

明显 (图 3)。从上游至下游, 灌木层与草本层呈现出截然相反的表现形态。就灌木层而言, 植物群落平均盖度呈下降趋势, 物种平均高度表现出先增加后降低的趋势; 而对于草本层, 植物群落平均高度和平均盖度均显著上升 ($P < 0.05$), 中游和下游河段植物群落平均盖度相比上游河段分别增加了 40.89% 和 65.68%; 平均高度在下游河段在 30 cm 以上, 显著高于上游河段。河流凹凸岸灌木层与草本层表现出一致性, 植物群落平均盖度和平均高度凸岸均显著高于凹岸。

2.1.3 岸线植物群落草本层地上生物量

草本层凹岸生物量和总生物量在白河干流全段沿程表现出自上游到下游逐渐增加 (图 4), 凸岸生物量在中游呈现小幅下降, 总体依旧表现出增加的趋势。就各河段而言, 上游凸岸大于凹岸, 中下游表现截然相反, 下游凹凸岸之间变化较小, 各生境之间情况变化复杂而细微。

2.2 优势种及其重要值变化

通过对白河干流全段岸线植被群落调查结果分

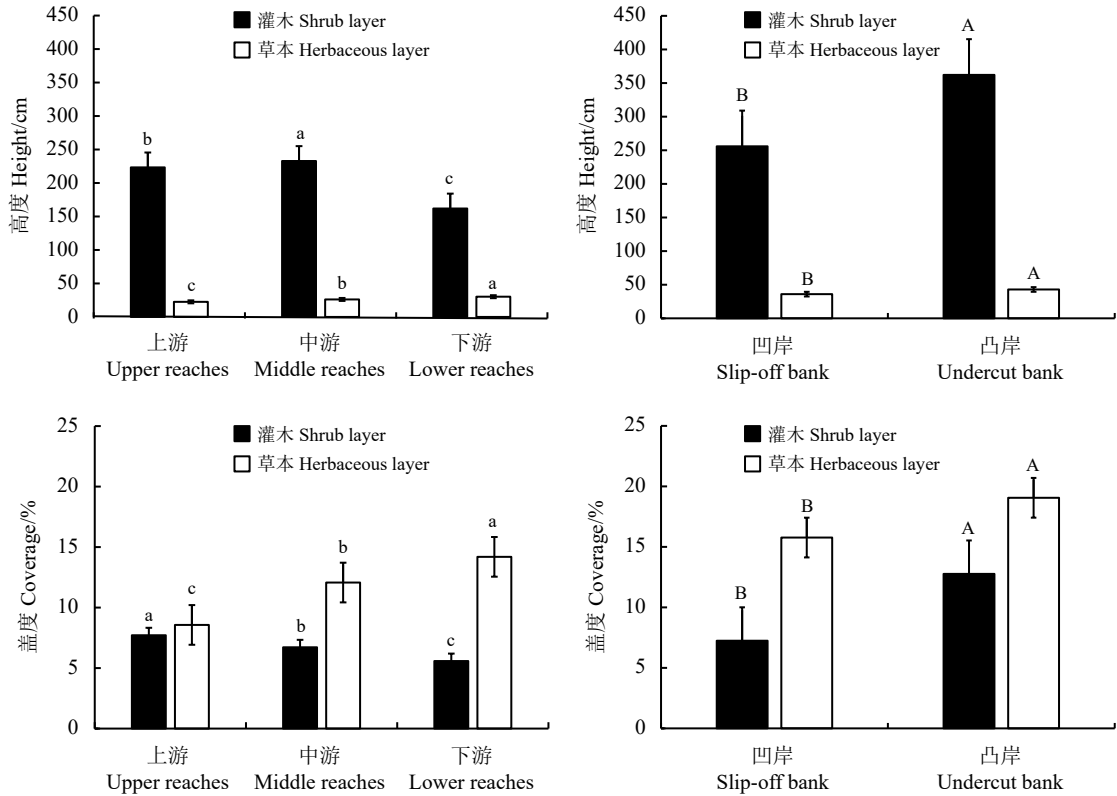


图 3 白河干流全段/凹凸岸植被群落的高度、盖度

Figure 3 Height and coverage of communities on the slip-off banks and in riparian zones along the channel of the Baihe River

不同小写字母表示同一植被不同河段生境间的差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一植被凹凸岸生境间的差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among habitats in different reaches at the 0.05 level; different capital letters indicate significant differences among habitats on slip-off/undercut bank at the 0.05 level.

别计算各物种重要值,对6种不同生境条件下植物群落重要值前3种(属)数据进行统计整理(表3)。就灌木层而言,凹岸优势种金露梅(*Potentilla fruticosa*)不变,其重要值变化由22.3538到8.4322再到29.9612,凸岸优势种奇花柳(*Salix atopantha*)未变,其重要值变化由15.0971到35.5141再到41.3116,沙棘(*Hippophae rhamnoides*)从中游开始成为优势种,其重要值变化凹凸岸呈现出相反的变化趋势。杨柳科植物几乎在各种生境类型中占据绝对优势。杨柳科、蔷薇科、胡颓子科这三大科植物重要值均位于前列,对白河干流岸线资源的竞争非常激烈。

就草本层而言,上游河段,矮生嵩草、甘肃嵩草(*Kobresia kansuensis*)均为优势种,其重要值凹凸岸变化分别为从12.0520到6.3424,从7.4017到12.2632;中游河段,优势种蕨麻未变,其重要值凹凸岸变化较大,从12.2146到7.0431;下游河段,优势种甘肃嵩草未变,重要值凹凸岸变化较大,从12.1502到6.3666;在干流全程河段,凸岸,优势种甘肃嵩草、

委陵菜类未变;凹岸,优势种出现较大变化,莎草科、蔷薇科一直高频分布于各种生境类型,从中游

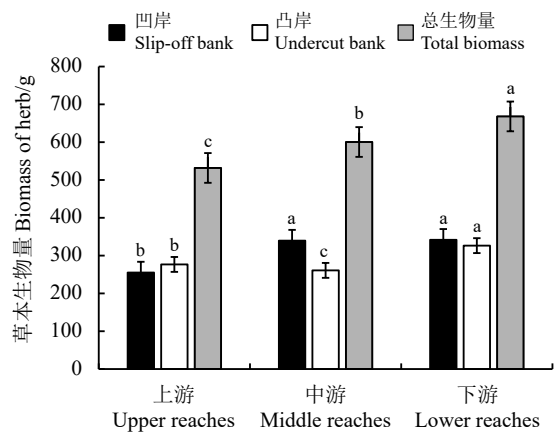


图 4 白河干流全段岸线草本植物地上生物量变化

Figure 4 Variation in herbaceous biomass in riparian zones along the channel of the Baihe River

不同小写字母表示不同河段生境间的差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among habitats in different reaches at the 0.05 level.

表 3 白河干流全段岸线植被群落优势种变化
Table 3 Variation in dominant species in riparian zones along the channel of the Baihe River

层次 Layer	生境类型 Habitat type		优势种及其重要值 Variation in dominant species and their important value
	河段 Studied reaches	凹凸岸 Slip-off/undercut bank	
灌木层 Shrub layer	上游 Upper reaches	凹岸 Slip-off bank	金露梅(22.353 8) + 奇花柳(21.362 7) + 山生柳(13.433 4) <i>Potentilla fruticose</i> (22.353 8) + <i>Salix atopantha</i> (21.362 7) + <i>Salix oritrepha</i> (13.433 4)
		凸岸 Undercut bank	杯腺柳(28.809 7) + 金露梅(15.527 1) + 奇花柳(15.097 1) <i>Salix cupularis</i> (28.809 7) + <i>Potentilla fruticose</i> (15.527 1) + <i>Salix atopantha</i> (15.097 1)
	中游 Middle reaches	凹岸 Slip-off bank	沙棘(41.639 2) + 奇花柳(39.930 9) + 金露梅(8.432 2) <i>Hippophae rhamnoides</i> (41.639 2) + <i>Salix atopantha</i> (39.930 9) + <i>Potentilla fruticose</i> (8.432 2)
		凸岸 Undercut bank	奇花柳(35.514 1) + 杯腺柳(15.502 5) + 沙棘(12.937 0) <i>Salix atopantha</i> (35.514 1) + <i>Salix cupularis</i> (15.502 5) + <i>Hippophae rhamnoides</i> (12.937 0)
	下游 Lower reaches	凹岸 Slip-off bank	杯腺柳(42.394 4) + 金露梅(29.961 2) + 沙棘(27.644 4) <i>Salix cupularis</i> (42.394 4) + <i>Potentilla fruticose</i> (29.961 2) + <i>Hippophae rhamnoides</i> (27.644 4)
		凸岸 Undercut bank	奇花柳(41.311 6) + 杯腺柳(15.529 5) + 沙棘(15.487 1) <i>Salix atopantha</i> (41.311 6) + <i>Salix cupularis</i> (15.529 5) + <i>Hippophae rhamnoides</i> (15.487 1)
草本层 Herbaceous layer	上游 Upper reaches	凹岸 Slip-off bank	矮生嵩草(12.052 0) + 甘肃嵩草(7.401 7) + 线叶嵩草(6.264 2) <i>Kobresia humilis</i> (12.052 0) + <i>Kobresia kansuensis</i> (7.401 7) + <i>Kobresia capillifolia</i> (6.264 2)
		凸岸 Undercut bank	甘肃嵩草(12.263 2) + 银叶蕨麻(11.704 8) + 矮生嵩草(6.342 4) <i>Kobresia kansuensis</i> (12.263 2) + <i>Argentina leuconota</i> (11.704 8) + <i>Kobresia humilis</i> (6.342 4)
	中游 Middle reaches	凹岸 Slip-off bank	蕨麻(12.214 6) + 高山蔗草(11.758 2) + 矮生嵩草(6.316 2) <i>Argentina anserina</i> (12.214 6) + <i>Scirpus paniculatocorymbosus</i> (11.758 2) + <i>Kobresia humilis</i> (6.316 2)
		凸岸 Undercut bank	甘肃嵩草(24.021 2) + 珠芽蓼(7.894 3) + 蕨麻(7.043 1) <i>Kobresia kansuensis</i> (24.021 2) + <i>Polygonum viviparum</i> (7.894 3) + <i>Argentina anserina</i> (7.043 1)
	下游 Lower reaches	凹岸 Slip-off bank	甘肃嵩草(12.150 2) + 垂穗披碱草(9.105 0) + 宽叶蒿(7.804 6) <i>Kobresia kansuensis</i> (12.150 2) + <i>Elymus nutans</i> (9.105 0) + <i>Artemisia latifolia</i> (7.804 6)
		凸岸 Undercut bank	垂穗披碱草(22.707 3) + 蕨麻(7.385 7) + 甘肃嵩草(6.366 6) <i>Elymus nutans</i> (22.707 3) + <i>Argentina anserina</i> (7.385 7) + <i>Kobresia kansuensis</i> (6.366 6)

开始, 出现蓼科、禾本科、菊科植物, 表明莎草科植物长势下降。

2.3 物种多样性指数变化

白河干流凹、凸岸草本层植被群落多样性指数在上、中、下游全段的变化趋势一致(图 5、图 6、图 7),

丰富度指数、Simpson 和 Shannon-Wiener多样性指数以及 Pielou 均匀度指数在凹岸表现出上游至下游逐渐下降的趋势, 在上游达到最大值, 下游降到最小值, 下游各指数显著小于上游 ($P < 0.05$); 凸岸表现出至上游至下游先下降后增加的趋势, 各指数数值

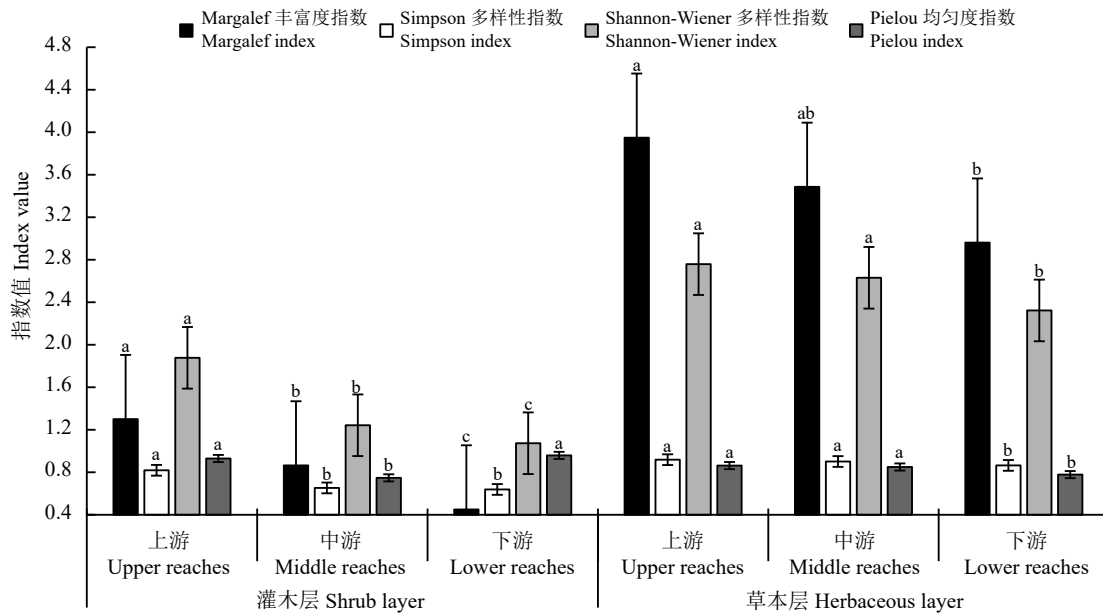


图 5 白河干流全段凹岸植被群落物种多样性

Figure 5 Species diversity on the slip-off banks in riparian zones along the channel of the Baihe River

不同小写字母表示同一植被不同河段生境间的差异显著 ($P < 0.05$); 图 6 同。

Different lowercase letters indicate significant differences among habitats in different reaches at the 0.05 level. This is applicable for Figure 6 as well.

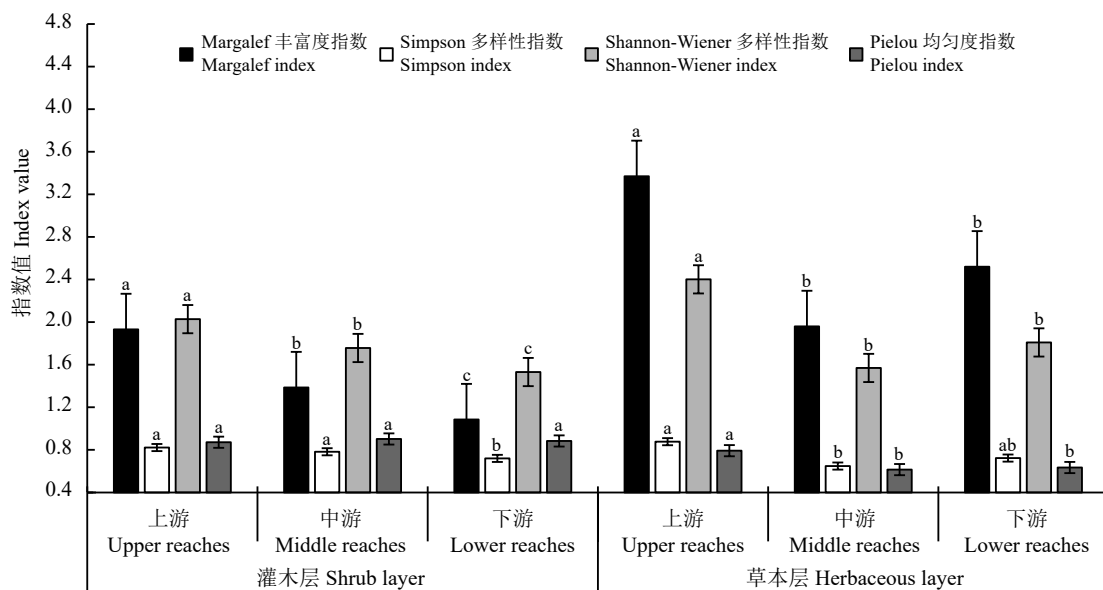


图 6 白河干流全段凸岸植被群落物种多样性

Figure 6 Species diversity on the undercut banks in riparian zones along the channel of the Baihe River

均在上游达到最大值, 中游形成波谷。整体而言, 凹、凸岸草本层植被群落多样性指数存在显著差异, 各指数凹岸显著高于凸岸。

就灌木层而言, 丰富度指数、Simpson 和 Shannon-Wiener 多样性指数在白河上、中、下游全段表现出较为一致的趋势特征 (图 5、图 6、图 7), 凹凸岸均显示至上游至下游逐渐下降的趋势, 凸岸明

显高于凹岸。且丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数在各河段表现出显著差异, 均匀度指数在凹凸岸差异不显著。

2.4 群落植被要素与关键因子的关系

基于 Canoco 5.0 软件对植被因子 (生物量和物种多样性) 和关键因子 [海拔、降水量、湿宽 (河流

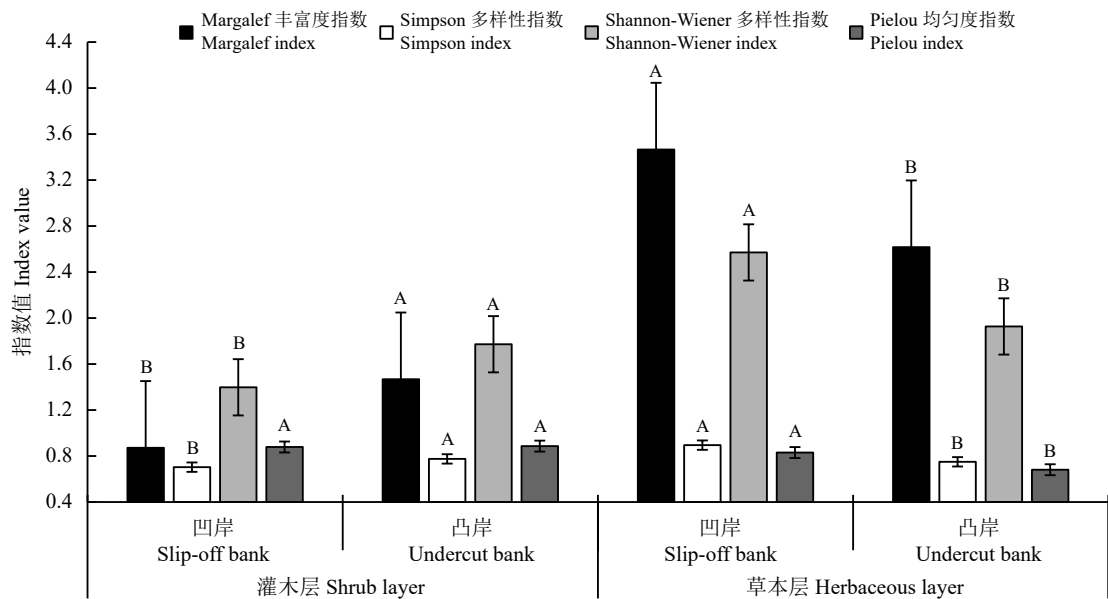


图 7 白河干流全段凹凸岸植被群落物种多样性

Figure 7 Species diversity on the slip-off and undercut banks in riparian zones along the channel of the Baihe River

不同大写字母表示同一指标凹凸岸生境间的差异显著 ($P < 0.05$)。
Different uppercase letters indicate significant differences among habitats on slip-off / undercut bank at the 0.05 level.

水面宽度)、物种数、植被平均高度、植被平均盖度 J) 的相互关系分析 (图 8), 结果表明, 第一、二排序轴累计解释率分别为 60.100 0% 和 0.000 3%, 说明第一、二排序轴能够较好地反映草本层植被要素与关键因子之间的关系, 并且第一排序轴起了决定性作用。草本层地上生物量和群落植被平均盖度、平均高度、物种数、湿宽呈正相关关系; 多样性指数与植被平均高度、平均盖度、湿宽呈负相关关系; 海拔与降水量呈正相关关系。关键因子对驱动群落植被要素变化的贡献由大到小分别是: 海拔、物种数、湿宽 (表 4)。其中, 海拔 ($P = 0.004$) 和物种数 ($P = 0.098$) 对植被要素变化影响显著。

3 讨论

3.1 植物群落对干流沿程的响应

白河流域拥有独特的生物群区, 生境极其脆弱且敏感, 高寒草地退化的一个主要表现就是植被的退化, 如群落生产力降低, 群落结构恶化^[24]。研究表明, 白河干流全段沿程岸线植被群落外貌变化极为明显, 随着河道游程往下走, 植物群落灌木层、草本层科属种数量表现出先减少后增加的趋势; 就植物群落平均高度和平均盖度而言, 灌木层表现出整体下降趋势, 草本层显著上升; 草本层地上生物

量总体上表现逐渐增加趋势; 这与张帆等^[25] 和李成阳等^[26] 关于退化草地的研究结果类似。

本研究中, 采样点与红原县的交通大动脉国道 248 的距离至上游到下游呈断崖式下降, 最近距

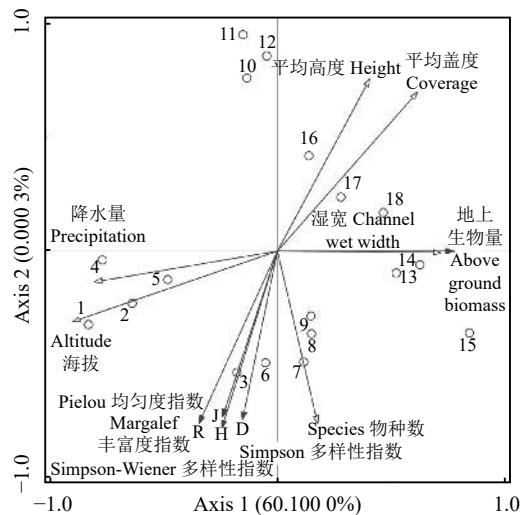


图 8 白河干流全段草本层物种多样性与相关因子的 RDA 分析

Figure 8 RDA analysis of species diversity and related factors of herbaceous layer in riparian zones along the channel of the Baihe River

○和数字代表采样点, 编号与表 1 对应。
○ and numbers in the figure represent sampling points, and the numbers correspond to Table 1.

表 4 白河干流全段草本层物种多样性解释力度
Table 4 Explanatory power of species diversity of herbaceous layer in riparian zones along the channel of the Baihe River

因子 Factor	解释力度排序 Rank order of explanatory variables	因子所占解释量	<i>F</i>	<i>P</i>
		Variance explains of factors/%		
海拔 Altitude	I	81.5	15.4	0.004**
物种数 Species	II	10.2	2.1	0.098*
湿宽 Channel wet width	III	2.8	0.5	0.484
平均高度 Height	IV	2.8	0.5	0.484
平均盖度 Coverage	V	2.3	0.4	0.540
降水量 Precipitation	VI	0.4	< 0.1	0.814

*, $P < 0.1$; **, $P < 0.05$.

表 5 红原县 2019—2021 年各乡镇牲畜存栏量
Table 5 Livestock stock in each township of Hongyuan County from 2019 to 2021

乡(镇) Township (Town)	2019				2020				2021				头 Head
	总 Total	牛 Cattle	马 Horse	羊 Sheep	总 Total	牛 Cattle	马 Horse	羊 Sheep	总 Total	牛 Cattle	马 Horse	羊 Sheep	
瓦切乡 Wache Township	95 491	93 630	1 861	0	85 939	84 118	1 821	0	74 277	72 642	1 635	0	
色地镇 Sedi Town	87 496	84 126	3 370	0	76 293	73 614	2 679	0	66 081	63 413	2 668	0	
安曲镇 Anqu Town	85 153	77 942	2 509	4 702	75 541	68 400	2 579	4 562	65 870	59 411	2 682	3 777	
麦洼乡 Maiwa Township	76 727	74 448	2 279	0	67 204	65 047	2 157	0	58 019	55 974	2 045	0	
邛溪镇 Qiongxi Town	72 485	70 318	1 227	940	63 272	61 306	996	970	54 566	52 702	868	996	
查尔玛乡 Chalma Township	60 679	58 612	2 087	0	52 664	50 964	1 700	0	45 651	43 958	1 693	0	
阿木乡 Amu Township	51 568	48 322	1 952	1 294	45 036	42 169	1 573	1 294	39 553	36 518	1 728	1 307	
龙日乡 Longri Township	50 883	48 658	1 783	442	45 698	43 647	1 508	543	39 550	37 263	1 629	658	
江茸乡 Jiangrong Township	38 757	33 142	1 966	3 649	33 336	28 155	1 532	3 649	28 235	24 378	1 080	2 777	
刷经寺镇 Shujingsi Town	35 822	32 443	3 228	151	31 140	28 297	2 712	131	26 546	24 152	2 291	103	

离在中游河段,平均距离仅 3.4 km,而且,越往下游,城镇分布越发密集,比如若尔盖大草原旅游名镇邛溪镇、阿木乡、瓦切镇、唐克镇皆位于白河中下游,且紧邻白河,城镇发展所产生的面源污染对河岸带植被功能结构特征的影响较为明显,人为扰动较大(图 1、表 5、图 9)。草本层科属种数量呈“U”型曲线变化,在中游形成波谷,也证实了这一

点。纵观近 3 年红原县各乡镇牲畜存栏量,白河沿岸排在前三的乡镇是瓦切乡、安曲镇、邛溪镇,位于白河中下游河段;反观上游,地处黄河长江分水岭查针梁子区域,白河源头多为永久或半永久冰川积雪,高原湖泊,远牧点地区,人为干扰较少,且红原县天然林保护工程多集中于白河源头区域刷经寺镇和查尔玛乡开展,生境植被群落保护在自

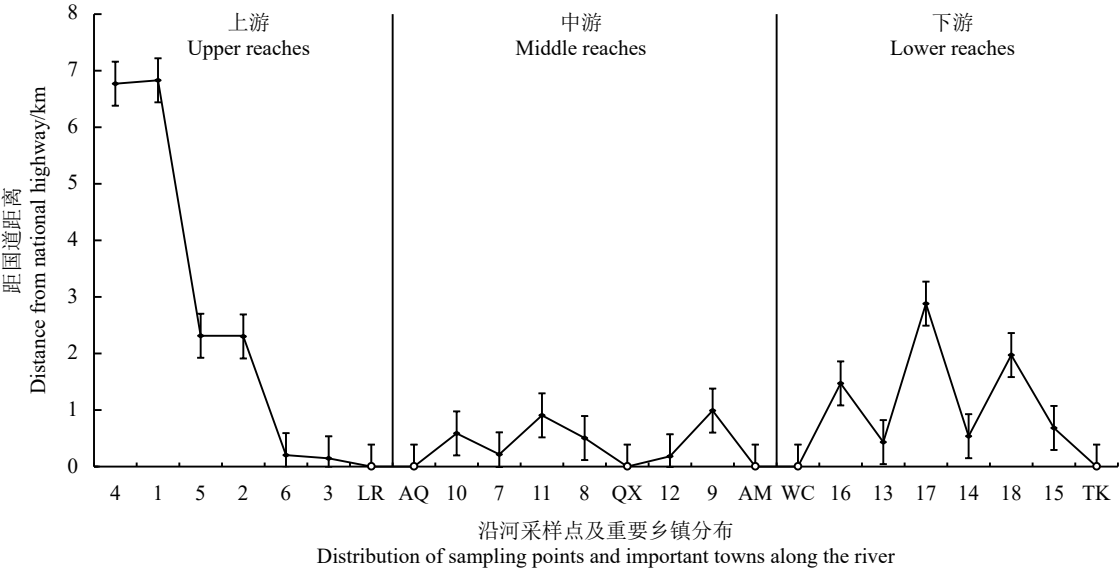


图 9 采样点与国道 248 的距离

Figure 9 Distance between the sampling point and National Highway 248

LR: 龙日乡; AQ: 安曲镇; QX: 邛溪镇; AM: 阿木乡; WC: 瓦切镇; TK: 唐克镇。横坐标数字与本研究表 1 样地编号一致。
LR: Longri Township; AQ: Anqu town; QX: Qiongxi town; AM: Amu Township; WC: Wache Township; TK: Tangke Town. The abscissa number is consistent with the sample plot number in Table 1.

然修复进程中几乎未受到破坏,故群落物种丰富,均匀度和覆盖度较高。可见,人类活动扰动、国土空间概况与白河干流河岸带植被群落状态密切相关,这与陈影等^[27]观点类似。物种多样性作为群落功能结构的基本特征,能表征群落结构和指示生境状况^[28-31]。白河干流岸线植被群落多样性指标在上、中、下游全段的变化趋势均整体表现出逐渐下降的趋势,和高寒草甸在退化过程中的演替规律相一致^[32-33]。

随着河道游程往下走,河岸带植被处于一种退化的趋势,莎草科、蔷薇科一直高频分布于各种生境类型,从中游开始,出现蓼科、禾本科、菊科植物,表明莎草科植物长势下降,其盖度和盖度均逐步下降,禾草类高生物种对光资源的遮挡力下降后,随之而来的是以狗舌草、沙蒿、细杆沙蒿等为代表的菊科植物丰富度表现出越来越高的趋势。即退化后,杂类草种所占比重越来越大,杂类草种一般具有较高的地上和地下生物量^[33],弥补了退化后莎草科植被盖度和生物量的降低。这与白河流域的游牧格局不无关系,表 5 显示自上游往下游,牲畜存栏量呈线性增长趋势,瓦切镇的 3 年平均牲畜存栏量是刷经寺镇的 2.73 倍,放牧压力越来越大,牲畜一般喜食莎草科和禾本科等适口性良好的植物,间

接增加了杂类草种的竞争能力^[34],同时杂类草根系较深,在环境变恶劣时,可以更好地利用深层的土壤水分和养分^[33],故在退化过程中,杂类草能更好的适应环境的变化,群落优势种由莎草科和禾本科植物向杂类草种植物转变。

3.2 植物群落对干流凹凸岸的响应

研究区干流凹凸岸生境植被群落异质性特征整体表现较为明显。灌木层与草本层在凹凸岸表现整体相异。研究表明,灌木层植被种类、物种多样性指数凸岸高于凹岸;草本层种类、草本层地上生物量、物种多样性均表现为凹岸高于凸岸,且凹凸岸在中下游的异质性表现高于上游。这与关于黄河源区弯曲河流的研究结论是保持一致^[20, 35-36]。

弯曲河流凹岸植被淘刷发生在密集根系层下部,导致植被根系层坍塌形成护岸,经过一定时间护岸草皮逐渐腐烂被水流冲刷带走,再发生密集根系层下部的淘刷,所以凹岸淘刷层之上的草本层着生环境是相对比较稳定的,植被生长时间长、植被群落相对稳定;与之对应的冲刷弯道顶部区域(即凸岸边滩),植被层洪水期易被水流、泥沙淹没,大部分植被死亡或生长缓慢,尤其是一年生植被,因此其植被发育情况较差,稳定性不高。同时,也正是因为凸岸植被的初步发育促进了洪水期细颗粒

泥沙在凸岸落淤,如此循环往复过程,随着先锋物种的定居,新的淤积构成新的河岸,已经成型的淤积体随即向后推移,凸岸植被带以弯道顶部区域为轴呈带状梯度变化^[37]。由此,本研究草本层种类、草本层地上生物量、物种多样性均表现为凹岸高于凸岸的结论得以解释,而凹凸岸在中下游的异质性表现高于上游,这可能与中下游河段群落外界扰动力较大有关,也可能与中下游河段弱约束性增强,冲刷力度降低,河道展宽和曲率增加,淤积力度增大,点边滩面积增加,截留颗粒态有机碳 (particulate organic carbon, POC) 相应增多有关^[13, 38]。

凸岸灌木层一般都生长于凸岸淤积体较为成熟的阶地,且每到汛期都有上游河沙和河湾顶部新淤积体向后推移过程中输送的营养物质不断累积,故灌木生长所需肥力得到保证,环境相对稳定;反观凹岸灌木层生长于河岸边,根部处于河沙淘刷与腐蚀的状态中,扰动较大,故凹凸岸整体表现反差较大,植被种类、被群落平均高度与盖度、物种多样性指数凸岸高于凹岸。

3.3 群落植被要素与关键因子的关系

驱动群落植被要素变化贡献率最大的关键因子是海拔,这是因为海拔是影响河岸带植被分布的主导因素,降水量、洪水周期、河道宽度、湿宽、水位、土壤因子和植物生长季长短等生境因子均与海拔因子密切相关^[39],河岸带物种多样性和生物量变化即是这些因素综合影响的结果。因此,位居贡献率第二、三位的物种数、湿宽得以解释。白河干流从上游到下游纵向梯度上,随着海拔降低,河道从约束性河段进入弱约束性河段,河道展宽和曲率增加^[13, 38],河岸带越来越宽,草本层植物群落着生环境趋于扩大化和复杂化,故草本层地上生物量和群落植被平均盖度、平均高度、物种数、湿宽呈正相关关系。本研究中,多样性指数与植被平均高度、平

均盖度、湿宽呈负相关关系,这与陈吉泉^[40]的研究结果不一致,这可能与中下游河段人为干扰较上游河段严重有关。表 5 和图 9 表明,中下游河段放牧活动和城镇建设活动较为集中,牛羊牲畜等粪便及城镇发展所产生的面源污染加强了河岸营养富集作用^[41],对河岸带植被功能结构特征的影响较为明显,引起植被平均高度、平均盖度增加,通过群落功能群分析,中下游群落优势种由莎草科和禾本科植物向杂类草种植物转变,多为优势物种形成的优势群落,故整体物种多样性降低。

4 结论

随着白河干流沿程往下走,河岸带植被群落总体上呈现物种数、平均高度和平均盖度、草本层地上生物量逐渐增加,物种多样性逐渐下降的变化规律,且优良牧草优势地位下降,毒杂草优势地位突出,草地质量指数明显下降,生物多样性降低,研究区白河干流沿岸植被带至上游往下游表现出逐步退化的趋势。就凹凸岸而言,河岸带植被群落异质性表现较为明显,灌木层植被种类、物种多样性指数凸岸高于凹岸;草本层种类、草本层地上生物量、物种多样性均表现为凹岸高于凸岸,且凹凸岸在中下游的异质性表现高于上游。河岸带植被群落在干流沿程和凹凸岸的变化与弯曲河流横向迁移过程规律保持一致,是凸岸淤积和凹岸冲刷共同作用的结果。从植物群落结构和多样性考虑,在黄河上游地区的河岸滩治理中,应针对不同的河段采取不同的治理措施,严格控制放牧、采砂、城镇拓展等人为活动干扰,运用河岸带植被在弯曲河流演变过程中的相互作用规律,同时对凹凸岸两个关键区域给予更多关注。本研究未将生态学与河流水利学结合起来,更精确地讨论河岸带植被生态系统与凹岸冲刷、凸岸淤积之间的相生相关演化规律,这将在下一个课题着重讨论研究。

参考文献 References:

- [1] 韩路,王海珍,于军. 河岸带生态学研究进展与展望. *生态环境学报*, 2013, 22(5): 879-886.
HAN L, WANG H Z, YU J. Research progress and prospects on riparian zone ecology. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5): 879-886.
- [2] 周铭浩,邱静,洪昌红,杜欢欢,汤海平. 河岸带功能及其保护修复措施. *黄河水利职业技术学院学报*, 2019, 31(4): 6-11.

- ZHOU M H, QIU J, HONG C H, DU H H, TANG H P. Riparian zone function and its protection and remediation measures. *Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute*, 2019, 31(4): 6-11.
- [3] 余飞燕, 王坤悦, 叶鑫, 董洪君, 黄凯, 罗志力, 郝建峰. 金马河温江段河岸带不同生境草本群落物种多样性和生物量变化研究. *草地学报*, 2020, 28(3): 793-800.
- YU F Y, WANG K Y, YE X, DONG H J, HUANG K, LUO Z L, HAO J F. Research on species diversity and biomass variation of herbaceous community in difference habitats in Wenjiang Section of Jinma River. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(3): 793-800.
- [4] 曾艳. 不同土地利用类型下河岸带草本植物群落结构及其影响因素. 南京: 南京大学硕士学位论文, 2015.
- ZENG Y. The effects of land use on herbaceous community structure in the riparian zone. Master Thesis. Nanjing: Nanjing University, 2015
- [5] 张建春, 彭补拙. 河岸带及其生态重建研究. *地理研究*, 2002(3): 373-383.
- ZHANG J C, PENG B Z. Research on riparian zone and its ecological reconstruction. *Geographical Studies*, 2002(3): 373-383.
- [6] 邓红兵, 王青春, 王庆礼, 吴文春, 邵国凡. 河岸植被缓冲带与河岸带管理. *应用生态学报*, 2001(6): 951-954.
- DENG H B, WANG Q C, WANG Q L, WU W C, SHAO G F. Riparian vegetation buffer zone and riparian zone management. *Journal of Applied Ecology*, 2001(6): 951-954.
- [7] CHANG T P, TOEBES G H. A statistical comparison of meander planforms in the Wabash Basin. *Water Resources Research*, 1970, 6(2): 557-578.
- [8] SWAMEE P K, PARKASH B, THOMAS J V, SINGH S. Changes in channel pattern of river ganga between mustafabad and rajmahal, gangetic plains since 18th century. *International Journal of Sediment Research*, 2003, 13(3): 219-231.
- [9] 刘成, 刘桢, 徐梦珍. 白河湾迁移速率及影响因素分析. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16(5): 495-502, 509.
- LIU C, LIU A, XU M Z. Analysis on migration rate and influencing factors of Baihe Bay. *Journal of China Academy of Water Resources and Hydropower Sciences*, 2018, 16(5): 495-502, 509.
- [10] 杜际增, 王根绪, 李元寿. 近45年长江黄河源区高寒草地退化特征及成因分析. *草业学报*, 2015, 24(6): 5-15.
- DU J Z, WANG G X, LI Y S. Degradation characteristics and causes of alpine grasslands in the source region of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 45 years. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(6): 5-15.
- [11] 薛娴, 郭坚, 张芳, 宗莉, 韩邦帅, 黄翠华. 高寒草甸地区沙漠化发展过程及成因分析: 以黄河源区玛多县为例. *中国沙漠*, 2007(5): 725-732.
- XUE X, GUO J, ZHANG F, ZONG L, HAN B S, HUANG C H. Development and cause of aeolian desertification in Alpine Region: In case of Maduo County in Yellow River Source Area. *Journal of Desert Research*, 2007(5): 725-732.
- [12] KAWAI S, JULIEN P Y. Point bar deposits in narrow sharp bends. *Journal of Hydraulic Research*, 1996, 34(2): 205-218.
- [13] 杨玥, 李志威, 胡旭跃, 吴新宇. 黄河源白河与黑河下游凸岸点边滩形态与变化规律. *泥沙研究*, 2021, 46(1): 50-56, 17.
- YANG Y, LI Z W, HU X Y, WU X Y. Morphological characteristics and processes of point bars in the lower White and Black Rivers of the Yellow River Source region. *Journal of Sediment Research*, 2021, 46(1): 50-56, 17.
- [14] CZORTEK P, DYDESKI M K, JAGODZINSKI A M. River regulation drives shifts in urban riparian vegetation over three decades. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 47: 126542.
- [15] 曲晓涵, 王雪岩. 大连市河岸带生态恢复与植被重建研究. *科技经济导刊*, 2019, 27(20): 113.
- QU X H, WANG X Y. Research on ecological restoration and vegetation reconstruction of Riparian Zone in Dalian City. *Technology and Economic Guide*, 2019, 27(20): 113.
- [16] 胡彬, 翟文静, 赵警卫. 河岸带植被对河流生态功能影响研究进展. *福建林业科技*, 2015, 42(3): 233-239.
- HU B, ZHAI W J, ZHAO J W. Progresses in researches on the influence of riparian vegetation on river ecological functions. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2015, 42(3): 233-239.
- [17] 武晓倩, 范保硕, 滕叶文, 李荣琦, 渠开跃, 钱金平, 田冰. 白洋淀流域河岸带草本植物群落分布特征与土壤环境因子的关系. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(6): 1608-1614.
- WU X Q, FAN B S, TENG Y W, LI R Q, QU K Y, QIAN J P, TIAN B. Relationship between herbaceous community distribution and soil environmental factors in riparian zone of Baiyangdian River Basin. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(6): 1608-1614.

- [18] 杨树青, 白玉川, 徐海珏, 黄哲. 河岸植被覆盖影响下的河流演化动力特性分析. 水利学报, 2018, 49(8): 995-1006.
YANG S Q, BAI Y C, XU H Y, HUANG Z. Dynamic characteristics of river evolution under the influence of riparian vegetation cover. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(8): 995-1006.
- [19] 朱海丽, 胡夏嵩, 李志威, 刘亚斌. 黄河源区弯曲河道草甸型植被分布特征. 泥沙研究, 2018, 43(1): 58-65.
ZHU H L, HU X S, LI Z W, LIU Y B. Zoning characteristics and processes in convex bank of meander reaches with riparian meadow in source region of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2018, 43(1): 58-65.
- [20] 刘桢. 黄河源区典型弯曲河流演变与滨河植被的作用研究. 北京: 中国水利水电科学研究院硕士学位论文, 2018.
LIU A. Relation between riparian vegetation and meander migration for typical meaning rivers in the Yellow River source region. Master Thesis. Beijing: China Academy of Water Resources and Hydropower Sciences, 2018.
- [21] 赵资乐. 黄河上游黑河、白河流域水沙规律. 甘肃水利水电技术, 2005(4): 336-338, 350.
ZHAO Z L. The regularity of water and sediment in the Heihe and Baihe river basins in the upper reaches of the Yellow River. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2005(4): 336-338, 350.
- [22] 李志威, 王兆印, 李艳富, 刘乐. 黄河源区典型弯曲河流的几何形态特征. 泥沙研究, 2012(4): 11-17.
LI Z W, WANG Z Y, LI Y F, LIU L. Geometric characteristics of typical curved rivers in the source region of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2012(4): 11-17.
- [23] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.
FANG J Y, WANG X P, SHEN Z H, TANG Z Y, HE J S, YU D, JIANG Y, WANG Z H, ZHENG C Y, ZHU J L, GUO Z D. Main contents, methods and technical specifications of plant community inventory. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 533-548.
- [24] LIN T, DONG S, SHERMAN R, LIU S, WU X. Changes in vegetation composition and plant diversity with rangeland degradation in the alpine region of Qinghai-Tibet Plateau. *The Rangeland Journal*, 2015, 37(1): 107-115.
- [25] 张帆, 李元淳, 王新, 朱剑霄. 青藏高原高寒草甸退化对草地群落生物量及其分配的影响. 草业科学, 2021, 38(8): 1451-1458.
ZHANG F, LI Y C, WANG X, ZHU J X. Effect of rangeland degradation on biomass allocation in alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Pratacultural Science*, 2021, 38(8): 1451-1458.
- [26] 李成阳, 张文娟, 赖焱敏, 彭飞, 陈小杰, 薛娴, 王涛, 尤全刚, 杜鹤强. 黄河源区不同退化程度高寒草原群落生产力、物种多样性和土壤特性及其关系研究. 生态学报, 2021, 41(11): 4541-4551.
LI C Y, ZHANG W J, LAI C M, PENG F, CHEN X J, XUE X, WANG T, YOU Q G, DU H Q. Plant productivity, species diversity, soil properties, and their relationships in an alpine steppe under different degradation degrees at the source of the Yellow River. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11): 4541-4551.
- [27] 陈影, 陈苏, 马鸿岳, 单岳, 冯天朕, 张鸿龄. 辽河干流河岸带植物及微生物多样性研究. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2048-2057.
CHEN Y, CHEN S, MA H Y, SHAN Y, FENG T Z, ZHANG H L. Plant and microbial diversity in the riparian zone of the Liao River mainstream, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 2048-2057.
- [28] 富金赤, 李晓莎, 许中旗, 郭延朋, 赵娱, 李校. 冀北山地阳坡草本植物物种多样性的空间异质性研究. 草地学报, 2018, 26(6): 1298-1304.
FU J C, LI X S, XU Z Q, GUO Y P, ZHAO Y, LI X. Spatial heterogeneity of herbaceous plant species diversity in dry south-slope of North Mountain of Hebei. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(6): 1298-1304.
- [29] 何松. 嘉陵江中下游河岸植被及植物多样性研究. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2019.
HE S. Research on riparian vegetation and plant diversity in the middle and lower reaches of Jialing River. Master Thesis. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [30] 孔庆仙, 信忠保, 夏晓平. 北京怀九河河岸带植物多样性及影响因子分析. 科技导报, 2017, 35(24): 57-65.
KONG Q X, XIN Z B, XIA X P. Analysis of plant diversity and influencing factors in the riparian zone of Huaijiu River in Beijing. *Science & Technology Review*, 2017, 35(24): 57-65.
- [31] 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述. 生态学杂志, 2001, 20(4): 55-60.
WANG D B, JI S Y, CHEN F P. A review of studies on plant community species diversity. *Chinese Journal of Ecology*, 2001,

- 20(4): 55-60.
- [32] WANG C T, LONG R J, WANG Q L, JING Z C, SHI J J. Changes in plant diversity, biomass and soil C, in alpine meadows at different degradation stages in the headwater region of three rivers, China. *Land Degradation & Development*, 2009, 20(2): 187-198.
- [33] LI C Y, PENG F, XUE X, YOU Q G, LAI C M, ZHANG W J, CHENG Y X. Productivity and quality of alpine grassland vary with soil water availability under experimental warming. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1790.
- [34] 李成阳, 赖炽敏, 彭飞, 薛娟, 尤全刚, 张文娟, 刘斐耀. 青藏高原北麓河流域不同退化程度高寒草甸生产力和群落结构特征. *草业科学*, 2019, 36(4): 1044-1052.
- LI C Y, LAI C M, PENG F, XUE X, YOU Q G, ZHANG W J, LIU F Y. Alpine meadows at different stages of degradation in the Beiluhe Basin of the Qinghai-Tibet Plateau: Productivity and community structure characteristics. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 1044-1052.
- [35] 朱海丽, 王兆印, 李志威. 黄河源区滨河草甸对弯曲河流河道演变的影响. *人民黄河*, 2013, 35(4): 41-44.
- ZHU H L, WANG Z Y, LI Z W. Influence of riparian meadow to the Meandering Rivers evolution in the Yellow River Source Region. *Yellow River*, 2013, 35(4): 41-44.
- [36] 谢彬山, 朱海丽, 李本峰, 胡夏嵩. 黄河源区曲流滨河植被空间分布与土壤特性关系研究. *泥沙研究*, 2019, 44(6): 66-73.
- XIE B S, ZHU H L, LI B F, HU X S. Study on relationship between vegetation spatial distribution and soil properties in the meander riverside in source region of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(6): 66-73.
- [37] 朱海丽. 黄河源区弯曲河流滨河植被增强河岸稳定作用机理研究. 西宁: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所)博士学位论文, 2018.
- ZHU H L. Study on the mechanism of riverbank stabilization reinforcement by the riparian vegetation of meandering river in the Yellow River source region. PhD Thesis. Xining: Chinese Academy of Sciences (Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences), 2018
- [38] 王丹阳. 青藏高原弯曲河流地貌单元对有机碳迁移的影响规律和机制. 长沙: 湖南大学博士学位论文, 2020.
- WANG D Y. Pattern and mechanism of influence of geomorphic units within meandering river of the Tibetan Plateau on organic carbon transport. PhD Thesis. Changsha: Hunan University, 2020.
- [39] 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. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1142-1149.
- ZHANG W L, XIA H J, ZHANG Y, KONG W J, JIA X B, YAO Y H. Herbaceous species diversity and community quantitative analysis in the riparian zone of East Liaohe River. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5): 1142-1149.
- [40] 陈吉泉. 河岸植被特征及其在生态系统和景观中的作用. *应用生态学报*, 1996, 7(4): 439-448.
- CHEN J Q. Riparian vegetation characteristics and their functions in ecosystems and landscapes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(4): 439-448.
- [41] 李良涛. 农田边界和居民庭院植物多样性分布格局及植被营建. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2014.
- LI L T. Distribution pattern of plant diversity and vegetation construction in field margins and home garden. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2014.

(责任编辑 张瑾)