

# 黑水河下游岸边带植物群落空间格局与相对水位响应关系

何术锋, 张 辉, 杨培思, 李 婷, 王 骏, 莫康乐, 陈求稳

(南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 探明河流相对水位与岸边带植物群落分布关系, 为河流岸边带生态系统管理和修复提供理论依据。于2019年12月和2020年7月分别对金沙江一级支流黑水河下游进行植物调查, 共设置6个点位108个植物样方, 统计分析其植物群落组成、结构以及优势种, 结合水文情势分析植物分布和相对水位关系。结果表明, 黑水河下游岸边带共有21科45属50种植物, 种类组成上以菊科为主, 生活型上以多年生草本植物为主, 乔木和灌木相对较少。在相对水位0.55~1.25 m分布的岸边带植物主要为一年生草本鬼针草(*Bidens pilosa*)和水蓼(*Polygonum hydropiper*), 多年生草本芦苇(*Phragmites australis*)、白茅(*Imperata cylindrica*)和灌木蓖麻(*Ricinus communis*)多分布在相对水位1.25~1.80 m的位置, 多年生乔木银合欢(*Leucaena leucocephala*)则占据相对水位1.80 m以上的生存空间。新生裸露岸边带在水位变化作用下, 先锋入侵物种鬼针草被禾本科白茅和芦苇取代, 灌木类杭子梢属成为灌木优势物种, 合欢属成为乔木类优势物种, 分布呈阶梯式, 沿河床至高地依次为裸露滩地、草本和灌木优势种以及乔木优势种。

**关键词:** 黑水河; 岸边带; 植物群落; 相对水位

**中图分类号:** Q145 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2021)05-0127-10

岸边带主要指从河流基本径流的边缘至洪水所能淹没的高地(Nilsson et al, 2000), 岸边带植物指受到水流或受河流附近地下水影响的各种湿地和陆生植物。在自然状态下, 河流及其岸边带系统都会存在环境条件动态变化和梯度明显的特征(Nilsson et al, 2000; Naiman et al, 2010), 这些特征表现在河流的横向、纵向和垂向上(Naiman et al, 2005), 在横向上, 水流的干扰构成了最明显的梯度, 从河床到岸边高地, 水流的影响效果逐渐减小, 导致生物群落在该方向上呈现明显的变化趋势。

三峡消落带的研究显示岸边带植物的种类和盖度与淹没梯度密切相关(Chen et al, 2020)。在三江平原湿地的研究发现不同植物对水位的敏感程度以及耐受性存在明显差异, 因此导致岸边带形成异质性的植被分布格局(Shan et al, 2019)。对瑞典北部10条不同管制河流研究表明, 流量和水位的调节会导致木本、草本植物的相对丰度发生变化, 并导致物种的群落组成受到影响, 最终影响河岸地区的生态

系统服务(Bejarano et al, 2020)。研究结果表明较高的水位波动频率对水生植物的生长有抑制作用(Luo et al, 2018), 较低或中等水位波动频率对其没有显著影响(Casanova et al, 2000; Luo et al, 2016)。以往研究大多集中于水位变化对湿地和湖泊植物、藻类的影响(姚鑫等, 2014; Wang et al, 2016; 丁明明等, 2021), 而河流水位变化对岸边带植物生长分布的影响研究较少, 尤其是水位对陆生植物分布的研究更少。本文以金沙江左岸一级支流黑水河为研究区域, 通过野外调查, 统计分析其植物群落组成、结构以及优势种, 结合水文情势得到植物分布和相对水位关系, 可为黑水河作为支流生境替代河流的后期管理提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

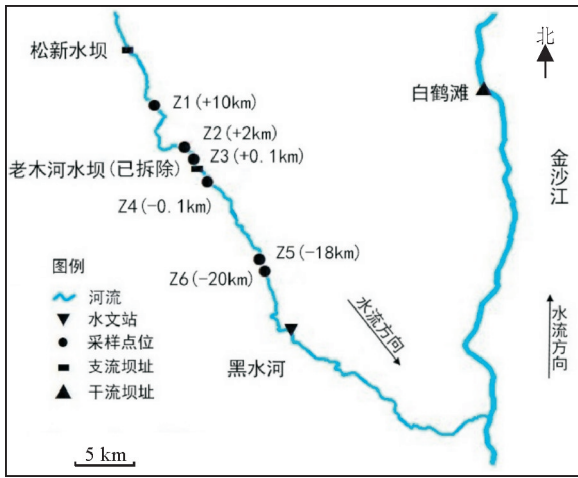
黑水河位于四川省凉山彝族自治州昭觉县玛果梁子境内, 从北向南流经昭觉、普格和宁南3个县城, 是金沙江左岸一级支流, 在宁南县葫芦口镇注入金沙江干流, 汇入口位于白鹤滩库区内(图1)。黑水河全长173.3 km, 流域面积3 591 km<sup>2</sup>, 上下游河道天然落差1 931 m, 平均比降1.12%, 属典型山区型河流, 河道狭窄, 河谷深切, 大部分河段断面呈“V”字型, 河床底质以大颗粒的卵石、砾石为主, 局部河段存在巨石。流域径流主要由降雨形成, 其次

收稿日期: 2021-06-30

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0408901); 国家自然科学基金青年基金(51809175)。

作者简介: 何术锋, 1995年生, 男, 硕士, 研究方向为环境与生态水力学应用。E-mail: 748592882@qq.com

通信作者: 莫康乐, 女, 博士, 研究方向为生态水力学。E-mail: summer\_mkl@foxmail.com



+表示老木河水坝上游,-表示老木河水坝下游

图1 研究区域与采样点位

+ denotes upstream of Laomu River dam,

- denotes downstream of Laomu River dam

Fig.1 Map of the study area and location of the sampling sites

少量融雪,化冰补给。黑水河多年平均流量为  $68.31 \text{ m}^3/\text{s}$ ,年平均输沙率为  $142.01 \text{ kg}/\text{s}$ ,多年平均年输沙量为 448.56 万 t。老木河是黑水河上第四级电站,下游是汇入金沙江的葫芦口,该电站修建于 1988 年,采用“克-奥 I 型”实用堰坝型设计,最大坝高为 7.8 m,坝顶中心线长度为 56 m,坝址处多年平均流量为  $67 \text{ m}^3/\text{s}$ ,多年平均悬移质含沙量为  $2.12 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,该电站发电厂房位于河道右岸,采用引水式发电,电站装机容量 5.2 MW。为修复黑水河下游生态环境,并发挥其作为金沙江下游白鹤滩库区干流鱼类的重要替代生境的作用(Porto et al,

1999),2018 年 12 月,三峡公司对黑水河最后一级电站老木河水坝进行了报废拆除。

结合黑水河的地貌和现场勘测,选定老木河水坝上下游 30 km 的岸边带设置了 6 个采样点位 Z1~Z6。其中 Z1、Z2、Z3 分别位于老木河水坝上游 10、2、0.1 km;Z4、Z5、Z6 分别位于老木河水坝下游 0.1、18、20 km。

## 1.2 调查方法

采用随机样方法于 2019 年 12 月和 2020 年 7 月对黑水河下游岸边带植物群落进行调查,根据现场实际勘测情况在每个点位设置 18 个采样样方,黑水河下游 6 个点位(表 1)共计 108 个植物样方。其中每个采样点位将乔木样方大小设置为  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  共计 2 个,分别记录样方内植物的种类、数量、高度、盖度以及样方中心海拔;每个采样点位将灌木样方大小设置为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  共计 4 个,记录植物的种类、数量、高度、盖度以及样方中心海拔;每个采样点位将草本样方大小设置为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ,共计 12 个,记录植物的种类、数量、高度、盖度以及样方中心海拔(牛翠娟,2007)。通过《中国植物志》和《四川植物志》对植物科、属、种以及生活型进行鉴定,对于无法现场鉴定的植物,拍摄植物群体和单一局部照片带回实验室,以便到实验室进行疑难种鉴定。

## 1.3 数据分析

采用 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数计算每个采样点位的植物多样性指数;采用重要值(IV)计算每个样点的优势物种,并结合相似性分析样点间的群落差异。

表 1 各样点情况

Tab.1 Information on each sampling site

采样点位	点位经纬度	点位海拔/m	调查时间	调查内容
Z1	$102^{\circ}36'21.08''\text{E}, 27^{\circ}13'44.26''\text{N}$	949.61~955.96	2019 年 12 月 和 2020 年 7 月	植物种类、 数量、高度、 盖度,样方 海拔
Z2	$102^{\circ}38'25.03''\text{E}, 27^{\circ}11'13.08''\text{N}$	900.52~903.43		
Z3	$102^{\circ}38'50.21''\text{E}, 27^{\circ}10'24.33''\text{N}$	889.86~893.84		
Z4	$102^{\circ}39'9.68''\text{E}, 27^{\circ}10'4.43''\text{N}$	883.72~887.28		
Z5	$102^{\circ}40'51.66''\text{E}, 27^{\circ}7'36.66''\text{N}$	830.04~832.99		
Z6	$102^{\circ}41'4.93''\text{E}, 27^{\circ}7'16.61''\text{N}$	824.10~827.69		

### 1.3.1 生物多样性与优势种

Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ ):

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (1)$$

Margalef 丰富度指数( $D$ ):

$$D = (S-1)/\ln N \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数( $J$ ):

$$J = H'/\ln S \quad (3)$$

式中: $P_i$  为群落中第  $i$  种的个体数占有物种总个体数的比例; $S$  为所有采集点的种类总数; $N$  为采集点的生物个体总数。

### 1.3.2 植物重要值(Important Value, IV)

$$IV = (D_r + P_r + F_r)/3 \quad (4)$$

物种的相对密度  $D_r$  = 目标物种的密度/样点中全部物种的总密度  $\times 100\%$

物种相对优势度  $P_r = \text{目标物种的盖度} / \text{样点中全部物种的总盖度} \times 100\%$

物种的相对频度  $F_r = \text{目标物种的频度} / \text{样方中全部物种的总频度} \times 100\%$

### 1.3.3 不相似度

$$\text{不相似度: BC} = 1 - \frac{2a}{(2a + b + c)} \quad \text{⑤}$$

式中:  $a$  代表两个样点间相同物种数,  $b$  和  $c$  分别是两个样点特有物种数, BC 值为 0 说明采样点完全相似, 为 1 说明完全不相似。

1.3.4 相似性分析 运用 PRIMER 6.0 软件, 分析植物群落结构的时空变化动态。为提高数据的正态性, 将植物重要值占比数据首先进行  $(\log X + 1)$  转化 (Clarke et al, 1994)。其次, 根据 Bray-Curtis 相似性系数, 构建植物群落的相似性矩阵; 然后, 运用单因素交叉的相似性分析, 检验空间因素 (即样点类型) 对植物群落结构的影响 (以  $R$  值表示); 最后, 运用非度量多维尺度分析 (NMDS) 方法, 构建植物群落结构的二维双标图。NMDS 分析结果的优劣采用胁强系数 (Stress) 衡量 (Majewski et al, 2013), 当

Stress < 0.2 时, 说明其图形具有一定的解释意义; 当 Stress < 0.1 时, 表示是一个好的排序; 当 Stress < 0.05 时, 说明图形具有很好的意义。

## 2 结果与分析

### 2.1 黑水河下游岸边带植物群落结构

黑水河下游岸边带共有 21 科 45 属 50 种植物 (表 2)。其中菊科最多, 共 14 种, 占总数的 28%; 其次为豆科 6 种, 占总数的 12%; 然后为禾本科 5 种、苋科 4 种、蓼科以及茄科各 3 种, 各占总数的 10%、8%、6% 和 6%; 其余 15 科均为 1 种, 各占总数的 2%。

从植物生活型来看, 多年生植物共 28 种, 占总数的 56%; 其次一年生植物有 17 种, 占总数的 34%; 1~2 年生植物仅有 5 种, 占总种类数的 10%。从植物类型上面来看, 草本植物有 40 种, 占总种类数的 80%; 灌木植物有 7 种, 占总种类数的 14%; 乔木植物有 3 种, 占总种类数的 6%。以上结果说明黑水河下游岸边带以多年生植物为主, 多年生植物中草本植物占主要部分, 灌木和乔木植物种类较少。

表 2 黑水河下游岸边带植物种类

Tab.1 Species list of riparian vegetation on the lower reaches of Heishui River

编号	科	属	种	拉丁名	生活型	类型
1	豆科	合欢属	银合欢	<i>Leucaena leucocephala</i>	PE	T
2		相思树属	金合欢	<i>Acacia farnesiana</i>	PE	T
3		杭子梢属	阔叶杭子梢	<i>Campylotropis latifolia</i>	PE	S
4		白花杭子梢	<i>Campylotropis macrocarpa</i>	PE	S	
5		山蚂蝗属	滇南山蚂蝗	<i>Desmodium megaphyllum</i>	PE	H
6		猪屎豆属	猪屎豆	<i>Crotalaria pallida</i>	PE	H
7	菊科	艾		<i>Artemisia argyi</i>	PE	H
8		蒿属	青蒿	<i>Artemisia caruifolia</i>	AN	H
9		白莲蒿	<i>Artemisia stechmanniana</i>	PE	H	
10		白酒草属	白酒草	<i>Eschenbachia japonica</i>	MI	H
11		六棱菊属	翼齿六棱菊	<i>Laggera crispata</i>	PE	H
12		鬼针草属	鬼针草	<i>Bidens pilosa</i>	AN	H
13		藿香蓟属	藿香蓟	<i>Ageratum conyzoides</i>	AN	H
14		豨莶属	豨莶	<i>Sigesbeckia orientalis</i>	AN	H
15		紫茎泽兰属	破坏草	<i>Ageratina adenophora</i>	PE	H
16		莴苣属	莴笋	<i>Lactuca sativa var. angustata</i>	MI	H
17	苦苣菜属	苦苣菜	<i>Sonchus oleraceus</i>	MI	H	
18	野苘蒿属	野苘蒿	<i>Crassocephalum crepidioides</i>	AN	H	
19	泥胡菜属	泥胡菜	<i>Hemisteptia lyrata</i>	AN	H	
20	拟鼠鞠草属	拟鼠鞠草	<i>Pseudognaphalium affine</i>	AN	H	
21	禾本科	芦苇属	芦苇	<i>Phragmites australis</i>	PE	H
22		白茅属	白茅	<i>Imperata cylindrica</i>	PE	H
23		画眉草属	垂穗画眉草	<i>Eragrostis fractus</i>	PE	H
24		狗尾草属	狗尾草	<i>Setaria viridis</i>	AN	H
25		黑麦草属	黑麦草	<i>Lolium perenne</i>	PE	H

续表 2

编号	科	属	种	拉丁名	生活型	类型
26	苋科	腺毛藜属	土荆芥	<i>Dysphania ambrosioides</i>	MI	H
27		藜属	藜	<i>Chenopodium album</i>	AN	H
28		莲子草属	喜旱莲子草	<i>Alternanthera philoxeroides</i>	PE	H
29		苋属	绿穗苋	<i>Amaranthus hybridus</i>	AN	H
30	蓼科	酸模属	戟叶酸模	<i>Rumex hastatus</i>	PE	S
31			酸模	<i>Rumex acetosa</i>	PE	H
32		蓼属	水蓼	<i>Polygonum hydropiper</i>	AN	H
33	茄科	茄属	龙葵	<i>Solanum nigrum</i>	AN	H
34			刺天茄	<i>Solanum violaceum</i>	PE	S
35			曼陀罗	<i>Datura stramonium</i>	PE	H
36	马桑科	马桑属	马桑	<i>Coriaria nepalensis</i>	PE	S
37	荨麻科	水麻属	水麻	<i>Debregeasia orientalis</i>	PE	S
38	大戟科	蓖麻属	蓖麻	<i>Ricinus communis</i>	AN	S
39	玄参科	醉鱼草属	白背枫	<i>Buddleja asiatica</i>	PE	T
40	木贼科	木贼属	木贼	<i>Equisetum hyemale</i>	PE	H
41	旋花科	马蹄金属	马蹄金	<i>Dichondra micrantha</i>	PE	H
42	铁角蕨科	铁角蕨属	铁角蕨	<i>Asplenium trichomanes</i>	MI	H
43	马鞭草科	马鞭草属	马鞭草	<i>Verbena officinalis</i>	PE	H
44	葫芦科	南瓜属	南瓜	<i>Cucurbita moschata</i>	AN	H
45	莎草科	莎草属	红翅莎草	<i>Cyperus pangorei</i>	PE	H
46	毛茛科	毛茛属	石龙芮	<i>Ranunculus sceleratus</i>	AN	H
47	桑科	榕属	地果	<i>Ficus tikoua</i>	PE	H
48	十字花科	独行菜属	独行菜	<i>Lepidium apetalum</i>	AN	H
49	紫草科	琉璃草属	琉璃草	<i>Cynoglossum furcatum</i>	PE	H
50	唇形科	香薷属	香薷	<i>Elsholtzia ciliata</i>	AN	H

注: AN: 一年生, MI: 1~2 年生, PE: 多年生, H: 草本, S: 灌木, T: 乔木。

Note: AN: annual, MI: 1-2-year, PE: perennials, H: herbs, S: shrubs, T: trees.

黑水河下游岸边带植物群落分布具有一定的空间特异性, 计算 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数以及 Pielou 均匀度指数可以看出 (图 2), Z2、Z3 和 Z4 点位的物种多样性和丰度均较高, 而 Z1、Z5 和 Z6 多样性和丰度相对较低, 其中 Z3 的物种多样性和丰度是最高的。6 个点位的 Pielou 均匀度基本无太大差别, 仅有 Z1 点位均匀度相对较低。

植物优势种 (表 3), 结果表明, 黑水河下游不同河段间的优势科是相同的, 均为禾本科、豆科以及菊科, 差异仅体现在占比上。位于老木河坝址上游较远处的 Z1 和 Z2 两个点位优势物种分别为禾本科、豆科和菊科, 其中禾本科占比较其他点位大。2 个点位禾本科和豆科中的优势种均为芦苇 (*Phragmites australis*)、白茅 (*Imperata cylindrica*)、银合欢 (*Leucaena leucocephala*) 和白花杭子梢 (*Campylotropis macrocarpa*), 仅在菊科优势种上面有所差别, Z1 菊科优势种为艾 (*Artemisia argyi*) 和豨薟 (*Sigesbeckia orientalis*), Z2 菊科优势种为破坏草 (*Ageratina adenophora*) 和鬼针草 (*Bidens pilosa*)。Z3 点位的优势物种是一年生草本植物鬼针草, 根据等级划分, 该植物为 1 级入侵物种, Z4 点位优势种为芦苇和白茅, 鬼针草和藿香蓟 (*Ageratum conyzoides*) 也占较大比重, 尽管 Z3 和 Z4 点位的优势科有明显差异, 但优势物种间的相对优势并不明显。Z5 和 Z6 点位优势科的重要值范围在 0.17~0.26, 尽管优势科的占比相对平衡, 但优势种的重要值在 0.03~0.17, 差异较大。从上游至下游, 禾本科在各点位的占比逐渐变小。

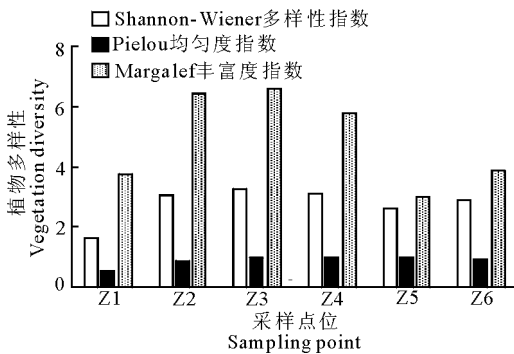


图 2 黑水河下游岸边带植物多样性

Fig.2 Diversity of the riparian vegetation community in the lower reaches of Heishui River

2.2 黑水河下游岸边带植物群落分布和相对水位  
 通过计算 6 个点位各个物种的重要值可以得到



表3 各点位优势物种

Tab.3 Dominant species at each sampling site

点位	优势科	重要值	优势种	重要值	生活型
Z1	禾本科	0.57	芦苇	0.32	多年生草本
			白茅	0.21	多年生草本
	豆科	0.18	银合欢	0.13	多年生乔木
			白花杭子梢	0.03	多年生灌木
	菊科	0.12	艾	0.05	多年生草本
			豨莶	0.02	一年生草本
Z2	禾本科	0.35	芦苇	0.14	多年生草本
			白茅	0.13	多年生草本
	豆科	0.16	白花杭子梢	0.08	多年生灌木
			银合欢	0.04	多年生乔木
	菊科	0.16	鬼针草	0.04	一年生草本
破坏草			0.04	多年生草本	
Z3	菊科	0.26	鬼针草	0.04	一年生草本
			翼齿六棱菊	0.04	多年生草本
	禾本科	0.18	芦苇	0.07	多年生草本
			白茅	0.06	多年生草本
	豆科	0.10	白花杭子梢	0.07	多年生灌木
银合欢			0.03	多年生乔木	
Z4	禾本科	0.27	白茅	0.10	多年生草本
			芦苇	0.07	多年生草本
	菊科	0.20	鬼针草	0.05	一年生草本
			藿香蓟	0.05	一年生草本
	豆科	0.11	白花杭子梢	0.07	多年生灌木
银合欢			0.03	多年生乔木	
Z5	豆科	0.26	银合欢	0.17	多年生乔木
			白花杭子梢	0.09	多年生灌木
	菊科	0.24	艾	0.09	多年生草本
			鬼针草	0.06	一年生草本
	禾本科	0.20	白茅	0.17	多年生草本
Z6	菊科	0.26	芦苇	0.03	多年生草本
			鬼针草	0.06	一年生草本
	豆科	0.22	破坏草	0.05	多年生草本
			银合欢	0.12	多年生乔木
	禾本科	0.17	金合欢	0.05	多年生乔木
			白茅	0.10	多年生草本
			芦苇	0.07	多年生草本

注:优势科取占比前3位,优势种取科类中占比前2位。

Note: Dominant families take the first three, and the dominant species take the first two.

岸边带植物分布和水位波动存在密不可分的关系,水位波动过程中承载了泥沙冲刷输运沉积、植物繁殖体水力传播以及营养物质的再分配等对植物生长发育至关重要的过程。通过2019年和2020年水文站(宁南站)数据和实测坡降得到每个点位的水位变化过程,再结合植物分布可知,草本、灌木以及乔木中的优势物种和相对水位存在一定的相关性(图3)。结果表明,一年生草本鬼针草和水蓼(*Polygonum hydropiper*)在草本中占主要地位,在相对水位的0.55~1.25 m区间分布,多年生草本和灌木像芦苇、白茅和白花杭子梢多分布在相对水位1.25~

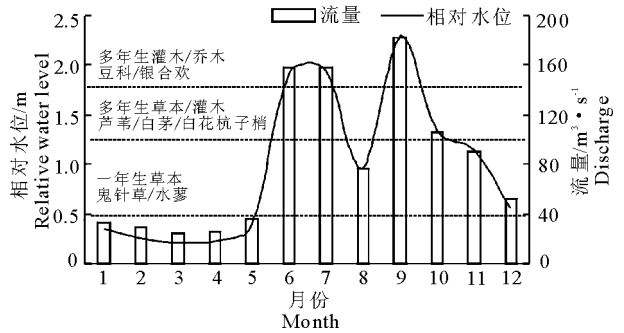


图3 黑水河下游植物和相对水位关系

The relative water level refers to the difference between the lowest water level and the riparian vegetation position

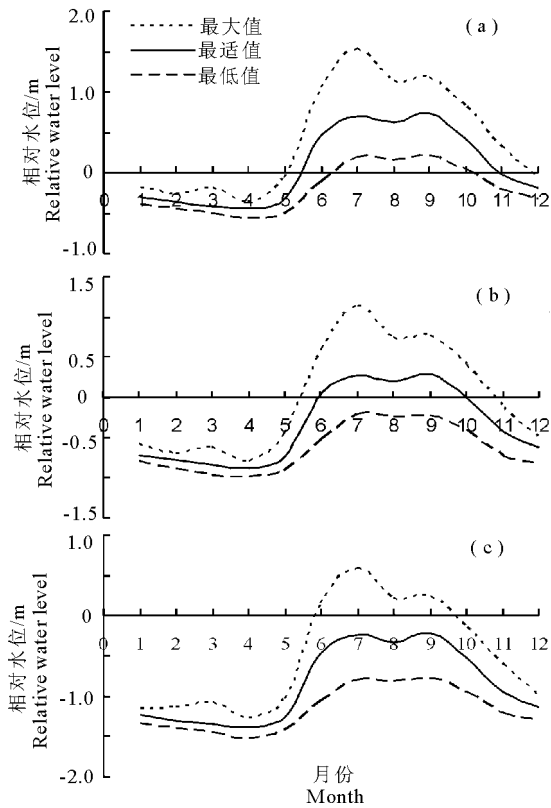
Fig.3 Relationship between riparian vegetation and relative water level in the lower reaches of Heishui River

1.80 m 的位置,而主要的乔木优势物种银合欢则占据了1.80 m 以上的生存空间。

不同的优势种对应不同的最大、最适和最低的相对水位值,其中,草本中优势种禾本科的最大、最适和最低的相对水位范围分别为-0.40~1.60 m、-0.45~0.75 m 和-0.55~0.20 m,最适相对水位1-5月基本处于非淹没状态,而5-11月基本处于淹没状态,最大淹没的相对水位在7月可达1.60 m;灌木中优势种杭子梢属的最大、最适和最低的相对水位范围分别为-0.85~1.10 m、-0.90~0.25 m 和-1.10~-0.25 m,最适相对水位非淹没时段集中于1-6月份,淹没时段集中于6-10月,最大淹没的相对水位在7月可达1.10 m;乔木中优势种合欢属的最大、最适和最低的相对水位范围分别为-1.25~0.60 m、-1.40~-0.25 m 和-1.60~0.75 m,其中仅有最大相对水位在6-10月会有淹没期,最适和最小相对水位在1-12月均为非淹没期,最大淹没的相对水位在7月仅为0.60 m(图4)。

为使本文提出的黑水河下游植物分布和相对水位的关系更具有说服力,采用2020年7月重复点位的野外调查数据对2019年12月的植物分布进行验证,验证主要包括时间和空间上的验证。

(1)时间尺度验证。采用2019年12月和2020年7月野外采样数据进行非度量多维度分析,分析结果如图5所示,胁强系数为0.11,表明结果可信。分析结果表明Z1、Z3、Z5和Z6 4个点位在不同的2个时段内的植物群落相似度高达85%,而Z2和Z4两个时间段的植物群落相似度仅有56.5%,这可能是由于Z2位于河流较大的弯道出口处,水流对该点位的植物冲击破坏较大,使得前后调查的数据有

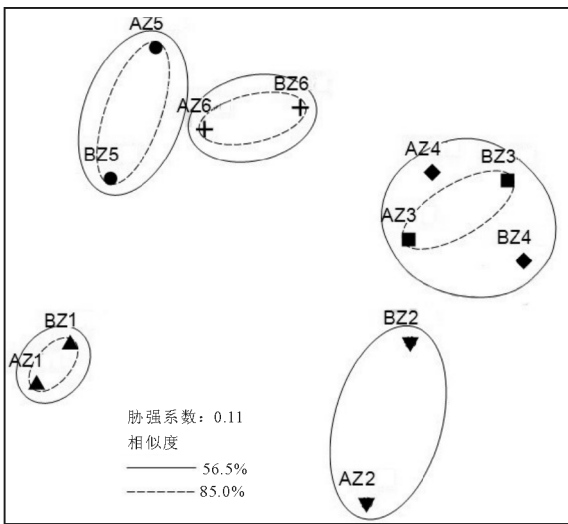


(a) 草本禾本科生长相对水位, (b) 灌木槭子梢属生长相对水位, (c) 乔木合欢属生长相对水位

图4 不同优势种的最大、最适和最低相对水位

(a) Relative water level of herb growth, (b) Relative water level of shrub growth, (c) Relative water level of arbor growth

Fig.4 Maximum, optimal and lowest relative water levels for different dominant species



B代表2019年12月采样, A代表2020年7月采样

图5 时间尺度验证

B represents sampling in December 2019, A represents sampling in July 2020

Fig.5 Time-scale verification

误差, 而 Z4 则是由于位于坝址下游, 受拆坝后的泥

沙运输影响较大, 并且在该点位的调查范围较其他点位也较大, 由于数据分析中不仅包含了植物种类还有植物的生长发育程度(植物生长高度), 所以尽管点位间的物种相差不大, 但受到植物生长发育程度的影响, 相似度也会较低。总体而言, 2次调查点位之间的植物群落相似度较高, 表明每个采样点位植物的优势种处在一个短暂的稳定阶段, 间接可以说明植物群落受水位波动的影响处于一个短暂的平衡状态。

(2)空间尺度验证。植物分布和水位波动关系是建立在植物采样点位中样方海拔的基础上, 空间验证主要分析每个采样点位中样方的植物分布相似性。每个采样点位分别设置了草本样方12个、灌木样方4个和乔木样方2个, 计算每个点位草本样方、灌木样方以及乔木样方的相似度来验证植物分布和水位波动的关系(表4), 根据计算结果可知草本样方和灌木样方相似占比范围均为50%~75%, 乔木样方相似占比达到100%, 6个点位3种样方的相似占比分别为78%、56%、62%、56%、62%和67%。总体来看, 不同点位和不同样方间的相似性均大于50%, 说明2次采样的样方点植物差别不大, 也可以间接证明黑水河下游植物分布和水位波动具有一定相关性。

表4 各点位样方相似度

Tab.4 Similarity of the sampling plot at each point

项 目	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	相似占 比/%
相似草本样方	9	6	7	6	6	7	50~75
相似灌木样方	3	2	2	2	3	3	50~75
相似乔木样方	2	2	2	2	2	2	100
相似占比/%	78	56	62	56	62	67	

### 2.3 黑水河下游新生岸边带植物群落演变趋势

黑水河下游第4级电站老木河水坝拆除后, 坝址上游裸露的沉积物为植物群落的建立提供了良好的生存生长环境, 通过对黑水河下游老木河水坝拆除后原蓄水区裸露的沉积物(Z3)进行调查可知, 水坝拆除后, 植物迅速占领了裸露的沉积物, 形成了初期的植物群落, 共调查到14科27属29种植物(表5), 其中最多的为菊科9种, 占该点位总种类数的31%, 其次为禾本科4种, 占该点位总种类数的14%, 豆科、茄科、苋科和蓼科各有2种, 各占该点位总种类数的7%, 其余分别为大戟科、玄参科、荨麻科、十字花科、紫草科、莎草科、马鞭草科和唇形科, 各有1种, 各占该点位总种类数的3%。根据生活型划分, 共有1种乔木、6种灌木和15种草本植物,

其中草本植物中共有 10 种为一年生植物,占草本植物的 2/3。该点位的银合欢、蓖麻和鬼针草属于外来入侵物种,并且根据等级划分,鬼针草属于 1 级恶性入侵类,而蓖麻和银合欢属于 2 级严重入侵类,不同的是,银合欢是上世纪当地人为防风固土引进的乔木类植物,具有一定的价值,但鬼针草属于一年生草本,繁殖方式多且快,大量侵占其他植物生长所需的水分、养分和光能等要素,使得拆坝后裸露沉积物上植物群落向成熟植物群落发展变得缓慢。

表 5 拆坝后库区裸露沉积物上植物种类

Tab.5 Vegetation species on bare sediments in the reservoir area after dam removal

编号	科	属	种	生活型	植物类型
1	菊科	紫茎泽兰属	破坏草	多年生	草本
2	菊科	白酒草属	白酒草	多年生	草本
3	菊科	泥胡菜属	泥胡菜	一年生	草本
4	菊科	六棱菊属	翼齿六棱菊	多年生	草本
5	菊科	鬼针草属	鬼针草	一年生	草本
6	菊科	豨薟属	豨薟	一年生	草本
7	菊科	拟鼠麴草属	拟鼠麴草	一年生	草本
8	菊科	蒿属	艾	多年生	草本
9	菊科	蒿属	青蒿	一年生	草本
10	禾本科	白茅属	白茅	多年生	草本
11	禾本科	芦苇属	芦苇	多年生	草本
12	禾本科	画眉草属	垂穗画眉草	多年生	草本
13	禾本科	狗尾草属	狗尾草	一年生	草本
14	豆科	合欢属	银合欢	多年生	乔木
15	豆科	杭子梢属	白花杭子梢	多年生	灌木
16	茄科	茄属	龙葵	一年生	草本
17	茄科	茄属	刺天茄	多年生	灌木
18	蓼科	蓼属	水蓼	一年生	草本
19	廖科	酸模属	戟叶酸模	多年生	灌木
20	苋科	腺毛藜属	土荆芥	多年生	草本
21	苋科	藜属	藜	一年生	草本
22	十字花科	独行菜属	独行菜	多年生	草本
23	紫草科	琉璃草属	琉璃草	多年生	草本
24	莎草科	莎草属	红翅莎草	多年生	草本
25	马鞭草科	马鞭草属	马鞭草	多年生	草本
26	唇形科	香薷属	香薷	一年生	草本
27	大戟科	蓖麻属	蓖麻	多年生	灌木
28	玄参科	醉鱼草属	白背枫	多年生	灌木
29	荨麻科	水麻属	水麻	多年生	灌木

结合黑水河相对水位-植物分布关系,新生裸露沉积物上的植物群落演替方向将趋于现有稳定的群落结构。先锋入侵物种鬼针草将被禾本科白茅和芦苇取代,灌木类杭子梢属将成为灌木优势物种,合欢属将成为乔木类优势物种,并且形成稳定植物群落结构的新生裸露沉积物上的植物种类数会小于植物群落刚建立时,植物分布沿河流横向呈阶梯式,从河床至高地依次为裸露滩地、草本和灌木优势种以及乔木优势种。

### 3 讨论

黑水河下游岸边带植物群落种类上主要以菊科为主,生活型上以多年生草本植物为主,乔木和灌木相对较少,这与余昱(2018)调查的金沙江干暖河谷灌草丛群落得出的结论有较高的相似度,在一定程度上也表明了黑水河作为金沙江梯级开发的支流生境替代的可行性。黑水河流速和泥沙含量均较大,水力侵蚀及泥沙冲淤使得岸边带处于动态的变化过程中(Wu et al, 2005),导致岸边带乔木和灌木类植物种类较少且单一,繁殖能力强且生长周期短的草本植物成为优势种。Z3 和 Z4 位于水坝拆除后河貌变化较大区域,点位草本植物的增加使得多样性和丰度高于其他点位,Z5 和 Z6 位于发育成熟的洲滩,群落结构稳定,其物种多样性和丰度均比其他点位要小(图 2)。

水位变化引起黑水河下游岸边带植物群落在河道横断面上分层分布,草本植物靠近河道径流边缘,由于受水位波动影响较大,大多为一年生和 1~2 年生草本植物,繁殖能力强且生长周期短,灌木和乔木分布于较高的滩地上,相对于草本植物,其生长繁殖周期较长,需要相对较稳定的岸边带环境(Deegan et al, 2012)。水位变化对河流纵向植物群落的分布影响并不明显,6 个点位的优势科均为禾本科、豆科和菊科(表 3)。受水流的季节性波动、年际波动或者极端洪水事件的影响,岸边带始终处于动态的变化中,岸边带环境(如淹没时间、淹没频率、淹没水深、水流冲刷、土壤性质等)的时空异质性有利于不同生活习性和不同环境适应性的植物物种占据各自的生态位(Ludwig, 1991; Auble et al, 1994; Pollock et al, 1998; Vervuren et al, 2003; Dwire et al, 2004)。黑水河属于丰枯水量明显的典型山区河流,再加上引水式电站的开发,频繁且幅度大的水位波动影响水压、水体 CO<sub>2</sub> 浓度、O<sub>2</sub> 浓度和光照强度(Coops et al, 2003; Luo et al, 2016; Pedersen et al, 2010; Voesenek et al, 2013; Visser et al, 2016),致使下游岸边带草本、灌木和乔木生长繁殖的最适宜相对水位不同(图 4),因此改变年际水位波动可以改变岸边带植物的优势种(Valk et al, 2015),为河流管理部门防止物种入侵提供参考依据。

黑水河上第 4 级老木河水坝拆除后,水沙变化导致的地貌演变决定了植物栖息地破坏和重建,泥沙沉积直接影响植物发芽和存活率的(Strahan, 1984; Bridge, 1993),因此在具有潮湿、营养丰富以

及种子匮乏等特点的黑水河下游新生裸露沉积物上,繁殖生长能力强的外来入侵物种鬼针草成为优势种(Bednarek,2001),发生岸边带植物群落的早期演替,短时间内物种多样性和丰富度上升(图2)。河流连通使得上游种子库和营养物质可以输运至下游,再通过水位波动作用于岸边带(Christer et al,1991;Nilsson et al,2002;Merritt et al,2002;Coops et al,2010),因此从重要值上看,黑水河下游岸边带优势科相同,且均以禾本科、豆科以及菊科为主,差异仅体现在占比上(表3),根据图5可知,Z3点位与其他点位相似性随时间推移在增加,表明长期的群落演替是朝着成熟稳定的植物群落方向变化的。

### 参考文献

- 丁明明,黎磊,金斌松,等,2021.水位波动的幅度与频率对刺苦草(*Vallisneria spinulosa*)生物量和形态特征的影响[J].湖泊科学,33(1):192-203.
- 牛翠娟,2007.基础生态学[M].北京:高等教育出版社.
- 姚鑫,桂杨山,万荣荣,等,2014.水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响[J].湖泊科学,26(6):813-821.
- 余昱,2018.金沙江、澜沧江干暖河谷灌草丛群落特征研究[D].昆明:云南大学.
- Auble G T, Friedman J M, Scott M L,1994. Relating riparian vegetation to present and future streamflows [J]. Ecological Applications, 4(3):544-554.
- Bednarek A T,2001. Undamming rivers; a review of the ecological impacts of dam removal[J]. Environmental Management, 27(6):803-814.
- Bejarano M D, Sarneel J, Su X L, 2020. Sordo-Ward A. Shifts in riparian plant life forms following flow regulation[J]. Forests, 11(518):1-19.
- Bridge J S,1993. The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers[J]. Geological Society of London Special Publications, 75(1):13-71.
- Casanova M T, Brock M A,2000. How do depth,duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities? [J]. Plant Ecology, 147(2):237-250.
- Christer N, Maria G, Gunnel G,1991. Importance of hydrochory in structuring plant communities along rivers[J]. Canadian Journal of Botany, 69:2631-2633.
- Chen Z, Yuan X, Ro-Nickoll M, et al,2020. Moderate inundation stimulates plant community assembly in the drawdown zone of China's Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Sciences Europe, 32:1-11.
- Clarke K R, Warwick R M,1994.Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation[M]. Plymouth marine laboratory, Natural environment research council.
- Coops H, Velde G,2010. Seed dispersal, germination and seedling growth of six helophyte species in relation to water-level zonation[J]. Freshwater Biology, 34(1):13-20.
- Coops H, Beklioglu M, Crisman T L,2003. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems-workshop conclusions[J]. Hydrobiologia, 506-509(1/3):23-27.
- Deegan B M, White S, Ganf G G,2012. Nutrients and water level fluctuations: a study of three aquatic plants[J]. River Research & Applications, 28(3):359-368.
- Dwire K A, Kauffman J B, Brookshire E, et al,2004. Plant biomass and species composition along an environmental gradient in montane riparian meadows [J]. Oecologia, 139(2):309-317.
- Luo F L, Matsubara S, Chen Y, et al,2018. Consecutive submergence and de-submergence both impede growth of a riparian plant during water level fluctuations with different frequencies[J]. Environmental and Experimental Botany,155:641-649.
- Luo F L, Jiang X X, Li H L, et al,2016. Does hydrological fluctuation alter impacts of species richness on biomass in wetland plant communities? [J]. Journal of Plant Ecology,9(4):434-441.
- Ludwig R,1991. Riparian vegetation along current-exposure gradients in floodplain wetlands of the river murray, australia[J]. Journal of Ecology, 79(1):117-127.
- Majewski A R, Lynn B R, Lowdon M K, et al,2013. Community composition of demersal marine fishes on the Canadian Beaufort Shelf and at Herschel Island, Yukon Territory[J]. Journal of Marine Systems, 127:55-64.
- Merritt D M, Wohl E E,2002. Processes governing hydrochory along rivers: hydraulics, hydrology, and dispersal phenology[J]. Ecological Applications, 12(4):1071-1087.
- Naiman R J, Bechtold J S, Beechie T J, et al,2010. A process-based view of floodplain forest patterns in coastal river valleys of the pacific northwest [J]. Ecosystems, 13(1):1-31.
- Naiman R J, Decamps H, McClain M E,2005. Riparia: ecology, conservation, and management of streamside communities [M]. Academic Press.
- Nilsson C, Andersson E, Merritt D M, et al,2002. Differences in riparian flora between riverbanks and river lakeshores explained by dispersal traits[J]. ecology,83



- (10): 2878 - 2887.
- Nilsson C, Berggren K, 2000. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation [J]. *Bioscience*, 50(9): 783 - 792.
- Pedersen O, Malik A I, Colmer T D, 2010. Submergence tolerance in *Hordeum marinum*: Dissolved CO<sub>2</sub> determines underwater photosynthesis and growth [J]. *Functional Plant Biology*, 37(6): 524 - 531.
- Porto L M, McLaughlin R L, Noakes D, 1999. Low-head barrier dams restrict the movements of fishes in two lake Ontario Streams [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 19(4): 1028 - 1036.
- Pollock M M, Hanley N T A, 1998. Plant species richness in riparian wetlands—a test of biodiversity theory [J]. *Ecology*, 79(1): 94 - 105.
- Shan L, Song C, Zhang X, et al, 2019. Plant defence allocation patterns following an increasing water level gradient in a freshwater wetland [J]. *Ecological Indicators*, 107: 105542.
- Strahan M B, 1984. Establishment and survival of woody riparian species on gravel bars of an intermittent stream [J]. *American Midland Naturalist*, 112(2): 235 - 245.
- Valk A, Volin J C, Wetzel P R, 2015. Predicted changes in interannual water-level fluctuations due to climate change and its implications for the vegetation of the Florida Everglades [J]. *Environmental Management*, 55(4): 799 - 806.
- Vervuren P, de Kroon C W P M, 2003. Extreme flooding events on the Rhine and the survival and distribution of riparian plant species [J]. *Journal of Ecology*, 91(1): 135 - 146.
- Visser E, Sasidharan R, Voesenek L, et al, 2016. Flooding stress signaling through perturbations in oxygen, ethylene, nitric oxide and light [J]. *New Phytologist*, 209(1): 39 - 43.
- Voesenek L, Sasidharan R, Weber A, 2013. Ethylene- and oxygen signalling-drive plant survival during flooding [J]. *Plant Biology*, 15(3): 426 - 435.
- Wang P, Zhang Q, Xu Y S et al, 2016. Effects of water level fluctuation on the growth of submerged macrophyte communities [J]. *Flora*, 223: 83 - 89.
- Wu W, Jr F, Bennett S J, et al, 2005. A depth-averaged two-dimensional model for flow, sediment transport, and bed topography in curved channels with riparian vegetation [J]. *Water Resources Research*, 41(3): <http://doi.org/10.1019/204WR003730>.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

## Relationship Between Spatial Pattern of Riparian Vegetation and Relative Water Level in Lower Heishui River

HE Shu-feng, ZHANG Hui, YANG Pei-si, Li Ting, WANG Jun, MO Kang-le, CHEN Qiu-wen

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R.China)

**Abstract:** Water level fluctuation affects species composition, dominance and evolution of the riparian vegetation community, and therefore, the entire riparian ecosystem. In this study, we explored the relationship between relative water level and the spatial distribution of riparian vegetation in the lower reaches of Heishui River, based on vegetation surveys conducted at six sites in December 2019 and July 2020. The six sampling sites were set along 30 km of the riparian zone, upstream and downstream of the Laomu River Dam. A total of 18 plots were set at each site: 2 arbor plots (10 m×10 m), 4 shrub plots (5 m×5 m) and 12 herb plots (1 m×1 m). Measurements recorded in each plot included altitude, species, number, coverage and height. Composition, structure and dominant species of the vegetation community were statistically analyzed and the relationship between riparian vegetation distribution and relative water level was analyzed in combination with the hydrological situation. A total of 50 plant species from 45 genera and 21 families were found in the lower reaches of Heishui River. Compositae was the dominant taxa, and the primary life form was perennial herbaceous plants, with relatively few trees and shrubs. In the riparian zone with relative water level of 0.55 m – 1.25 m, the vegetation community was dominated by annual herbaceous vegetation such as *Bidens pilosa* and *Polygonum hydropiper*. The perennial herb *Phragmites australis*, *Imperata cylindrica* and the shrub *Ricinus communis* were mostly distributed in the riparian zone 1.25 m – 1.80 m above water level. The small tree *Leucaena leucocephala* occupies the zone 1.8 m above water level. In newly formed riparian areas produced by the changing water level, the pioneer invasive species *Bidens pilosa* was replaced by the grasses *Imperata cylindrica* and *Phragmites australis*, *Campylotropis* became the dominant shrub species, and the dominant tree species was *Albizia*. To summarize, in newly formed bottomlands, herbaceous species, shrubs and then trees were successively distributed along the gradient from wetland to upland. This study provides a theoretical basis for riverbank ecosystem management and restoration.

**Key words:** Heishui River; riparian zone; vegetation community; relative water level