

DOI: 10.5846/stxb202002050203

何术锋,唐磊,王骏,朱晨曦,李婷,莫康乐,陈求稳.水坝拆除对黑水河鱼类群落结构和空间分布的影响.生态学报,2021,41(9):3525-3534.

He S F, Tang L, Wang J, Zhu C X, Li T, Mo K L, Chen Q W. Effects of dam removal on fish community structure and spatial distribution in Heishui River. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3525-3534.

水坝拆除对黑水河鱼类群落结构和空间分布的影响

何术锋, 唐磊, 王骏, 朱晨曦, 李婷, 莫康乐*, 陈求稳

南京水利科学研究院, 南京 210029

摘要:水坝拆除引起河流连通性、水动力、河流地貌等一系列变化,直接影响了鱼类群落结构和空间分布。黑水河为金沙江左岸一级支流,其上共建四级电站,出于支流生境恢复需求,第四级水坝老木河水坝于 2018 年 12 月实行拆除。为探明低水头坝拆除对鱼类群落的影响,结合 2018 年 6 月和 2019 年 6 月黑水河下游 60.4km 河段 10 个点位的渔获物调查,对拆坝前后鱼类群落结构和生态类型变化、优势物种与单位捕捞努力量以及不同河段间的群落相似性进行了分析。结果表明,水坝拆除半年后优势物种仍以鲤科和鲃科为主,但物种数和丰度整体上增加;生态类型上以杂食、喜急流和产微粘性卵鱼为主;拆坝后鱼类群落空间分布变化明显,靠近河口的自然河段鱼类上溯洄游到原坝址的上下游,部分长江上游特有鱼类在原坝址附近发生定殖行为,且拆坝后各河段的鱼类组成结构有同质化趋势。总体上,老木河水坝的拆除对黑水河下游的鱼类群落结构和空间分布产生了积极的影响。

关键词:黑水河;拆坝;鱼类群落;空间分布

Effects of dam removal on fish community structure and spatial distribution in Heishui River

HE Shufeng, TANG Lei, WANG Jun, ZHU Chenxi, LI Ting, MO Kangle*, CHEN Qiuwen

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

Abstract: Dam removal causes a series of changes in river connectivity, hydrodynamics and river landforms, which directly affects the structure and spatial distribution of fish community. The Heishui River is a first-level tributary on the left bank of the Jinsha River with four power stations built on it totally. Due to the necessity of tributary habitat restoration, the fourth-level dam Laomuhe Dam was demolished in December 2019. In order to ascertain the effects of the low-head dam removal on the fish community, the changes in fish community structure and ecological type, dominant species and catch per unit effort and community similarity between different river sections were analyzed in combining with the fish survey at 10 points in the lower reaches of the 60.4 km Heishui River in June 2018 and June 2019. The results showed that the dominant species were still mainly *Cyprinidae* and *Cobitidae* after the dam was demolished six months ago, but the species and abundance increased overall. The ecological type was dominated by omnivorous, preferring to running water and spawning slightly viscous fish. The spatial distribution of fish community changes obviously after dam removal. Fish in natural river sections near the estuary migrated to the upstream and downstream of the original dam site. Some native fish in the upper reaches of the Yangtze River colonized near the original dam site, and the fish community structures in each section after dam removal tended to be homogeneous. In general, removing the Laomu River Dam has positive effect on the fish community structure and spatial distribution in the lower Heishui River.

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0404501);国家自然科学基金(51809175);中国博士后科学基金资助项目(2019M651889)

收稿日期:2020-02-05; **网络出版日期:**2021-03-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: summer_mkl@foxmail.com

Key Words: Heishui River; dam demolition; fish assemblage; spatial distribution

大坝建设所造成的物理屏障将河流流水生境转化为静水生境,改变了水流温度和水文情势,导致水生生物群落变化^[1-4],影响了全球一半以上的河流生态系统。截至2013年,我国已建成9.8万座水库,其中小型水库占总数的95.2%^[5]。虽然高坝大库建设产生的生态环境问题引起了各方关注,但数量庞大、分布面广的小型水坝对流域整体生态环境造成的影响更为广泛。随着小型水坝服役时间的增长,病险老化、功能丧失以及经济效益衰退等问题日益突出^[6]。此外,支流上的水坝拆除被认为是对大型水电开发带来的负面环境影响的一种补偿措施。欧美国家已经实施了水坝拆除和研究,在生态学方面,且主要针对拆坝对产卵时期的江海洄游和溯河洄游鱼类影响展开了一系列的探索和讨论。但是,亚洲鱼类群落以鲤形目为主^[7-10],且主要为半洄游性鱼类,鱼类群落和洄游特点的差异会导致不同鱼类对水坝拆除的不同响应。因此,欧美国家常见拆坝策略在亚洲河流中应用的适用性,有待进行更深入的讨论^[11]。

黑水河为金沙江左岸一级支流,自葫芦口镇汇入金沙江干流,其上建有四级电站,从上游到下游依次为苏家湾电站、公德房电站、松新电站及老木河电站。老木河水坝是黑水河干流上的第四级水坝,为典型的小型溢流坝^[12],它截断了黑水河下游河流的连通性,对鱼类迁徙洄游造成了影响,导致鱼类种群的分离和遗传多样性的下降^[13-15]。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^[16],2018年12月,三峡公司对老木河水坝进行了报废拆除。本文基于老木河水电站拆除前后的鱼类资源调查,探明了小型水坝拆除对鱼类群落结构组成及空间分布的影响,为我国西南山区河流小型水坝拆除后的鱼类恢复提供了宝贵的参考意见。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

黑水河发源于凉山彝族自治州昭觉县玛果梁子,自北向南流经昭觉、普格、宁南3县,于宁南县东南部葫芦口镇注入金沙江干流,属金沙江下游白鹤滩水电站库区左岸一级支流(图1)。黑水河全长173.3 km,流域面积3591 km²,上下游河道天然落差1931 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,其次少量融雪,化冰补给。黑水河多年平均流量为68.31 m³/s,年平均输沙率为142.01 kg/s,多年平均年输沙量为448.56万t。黑水河水能资源充沛,其干流目前共有4座主要电站正在运行使用,从上游至下游依次为苏家湾电站、公德房电站、松新电站及老木河电站,4座小型电站均为引水式电站,因此,在电站运行期间极易造成减水河段和河道断流现象,松新电站及老木河电站减水河段分别长7.2 km和3.2 km^[17]。老木河水电站建于1988年,采用“克-奥I型”实用堰坝型设计,坝高7.8 m,坝顶中心线长度56 m,坝址处多年平均流量67 m³/s,多年平均悬移质含沙量2.12 kg/m³,电站厂房位于河道右岸,采用引水式发电,电站装机容量5.2 MW。

本文采用控制前后影响设计(BACI)^[18]研究比较了小型水坝拆除受影响河段和自然河段的鱼类群落组成和分布变化。根据黑水河上下游地理地貌、生态水文特征,并充分考虑河口、坝址、减水河段等不同生境类型,调查了从松新坝下至黑水河河口60.4 km河段共计10个点位(S1—S10)的渔获物,以分析老木河水坝拆除后

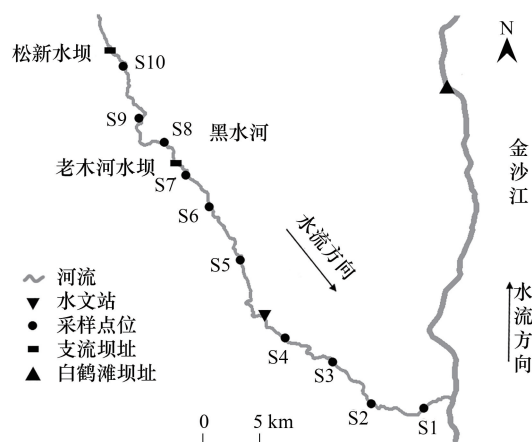


图1 采样点位分布图

Fig.1 Schematic Diagram of the Sampling sites Distribution

S1—S10表示渔获物采样点

鱼类群落结构的变化和空间分布情况。S1—S4 位于黑水河河口至上游 21.4 km 的自由河段,作为下游对照点位;S5—S7 位于老木河水坝下游 21.6 km 的受干扰河段,以研究拆坝后下游受干扰河段的鱼类变化;S8 和 S9 是位于坝址上游受干扰河段的两个点位,用来研究拆坝后上游受干扰河段的鱼类变化;最后一个点位 S10 位于松新电站下游 2.8 km 的减水河段,既可以作为老木河坝址上游鱼类变化的对照点,又可以作为老木河坝址下游减水段鱼类变化的对照点(图 1)。

1.2 鱼类调查

在取得有关渔政部门批准后,分别于 2018 年 6 月和 2019 年 6 月在松新坝下至黑水河河口 60.4 km 区域内进行鱼类资源调查。采样方法参照《内陆渔业自然资源调查手册》^[19],聘请当地经验丰富的渔民采用电捕法采集鱼类样本,为了降低单次采样带来的随机性和不确定性,每个点位重复采样 3 次,取样长度在 300—400 m,每次采样的时间控制在 60—80 min 之间。采样完成后,对采集到的渔获物逐尾进行体长与体重等生物学信息的测量,并依据《四川鱼类志》和《云南鱼类志》^[20-21]等书籍鉴定种类;所有鱼类在取样后都置于水盆中,并在识别和测量后放回河中。

1.3 数据分析

本文采用 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数、优势种及单位捕捞努力量的渔获量等方法分析黑水河下游鱼类群落结构特征,并采用相似性分析鱼类群落结构变化。

(1) 生物多样性与优势种

Shannon-Wiener 多样性指数(H'): $H' = - \sum p_i \ln p_i$;

Pielou 均匀度指数(J): $J = H' / \ln S$;

Margalef 丰富度指数(D): $D = (S - 1) / \ln N$;

优势种:相对重要性指数(Index of Relative Importance, IRI)综合了个体数、生物量和出现频率 3 个因素,避免了因鱼类个体大小的差异性造成的单纯依据个体数或者生物量判别优势种的误差,因此本文选择相对重要性指数(IRI)对群落优势种进行区分

$$IRI = (A + B) \times F$$

$$IRI\% = (IRI / \sum IRI) \times 100\%$$

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; A 为渔获物中各种类数量分数; B 为渔获物中各种类生物量分数; F 为各种类在所有采样次数中出现的频率。本研究设定采样时间段鱼类群落中 IRI% 大于 5% 的鱼类作为优势种。

(2) 单位捕捞努力量渔获量(Catch and Mass per unit effort)

采用下列公式分别计算 2018 年 6 月和 2019 年 6 月各采样点位的 CPUE 和 MPUE:

$$CPUE_i = N_i / h_i$$

$$MPUE_i = W_i / L_i$$

式中,CPUE _{i} 和 MPUE _{i} 分别为第 i 个样点每小时采集到的鱼类尾数(个/h)和鱼类重量(g/m); N_i 和 W_i 分别表示样点所采集到的鱼类尾数和鱼类重量; h_i 和 L_i 分别表示采样点采样时间(h)和采样距离(m)。

(3) 相似性分析

运用 PRIMER 6.0 软件,分析鱼类群落结构的时空变化动态。为提高数据的正态性和方差齐性,将鱼类的相对重要性指数占比数据进行($\log X + 1$)转化^[22]。首先,根据 Bray-Curtis 相似性系数,构建鱼类群落的相似性矩阵;其次,运用单因素交叉的相似性分析,检验空间因素(即样点类型)对鱼类群落结构的影响(以 R 值表示)^[23];最后,运用非参数多变量排序(NMDS)方法,构建鱼类群落结构的二维双标图,NMDS 分析结果的优劣采用胁强系数衡量^[23]。

(4) 生态类型划分

参考《四川鱼类志》、《云南鱼类志》^[20-21]以及现场调查结果基于不同种类食性、水流偏好和产卵类型的差

异,对所有采集到的鱼类种类的生态类型进行划分。

2 结果与分析

2.1 鱼类群落结构组成及生态类型变化

2018年6月(拆坝前)在调查区域内共采集到渔获物 6.78 kg, 1111 尾, 共鉴定出 17 种鱼, 隶属于 2 目 7 科 13 属; 2019 年 6 月(拆坝后)在调查区域中共采集到渔获物 12.13 kg, 1409 尾, 共鉴定出 21 种鱼, 隶属于 2 目 7 科 16 属。虽然拆坝后捕获的鱼类数只比拆坝前多了 292 尾, 但种类数新增了 5 种, 并且渔获量是拆坝前的两倍。拆坝后鲤科鱼类比例仍为最高, 但增加了两种共有 6 属 8 种, 占总种类数的 38.10%; 鳅科次之, 共有 3 属 6 种, 占比 28.57%; 其次是鮡科, 共 3 属 3 种, 占比 14.29%; 最少的是平鳍鳅科、鲇科、鲿科以及钝头鮠科, 均仅有 1 属 1 种, 各占 4.76%。渔获物中, 长江上游特有物种从拆坝前的 7 种增加到拆坝后的 9 种, 占比从 41.18% 上升到 42.86%。从拆坝前后两次的渔获物对比中可以看出, 拆坝后的鱼类平均体重在上升(表 1)。

拆坝后杂食性鱼类增加到 18 种, 肉食性鱼类增加到 3 种; 喜急流性鱼增加到 11 种, 喜缓流性鱼类增加到 5 种; 产微粘沉性卵的鱼增加到 13 种, 产粘性卵增加到 6 种, 产漂流性卵鱼减少到 2 种(表 2)。

老木河水坝拆除后, 黑水河下游鱼类的结构组成在部分河段发生了明显的变化。从指标变化来看, Shannon-Wiener 多样性指数除了在 S1 和 S10 点位下降外其余各点位均呈上升趋势, 变化范围为 -16%—129%, 其中变化最明显的是 S2、S5、S6 和 S8; Margalef 丰富度指数在所有点位均呈上升趋势, 变化范围为 10%—325%, 其中 S5—S9 变化最为明显; Pielou 均匀度指数在 S2—S4 和 S8 点位有所上升, 在其他点位明显下降, 变化范围为 -64%—38%(图 2)。从整体来看, 老木河坝址下游点位 S5—S7 和坝址上游蓄水段 S8—S9 鱼类群落均发生了明显的变化, 生物多样性和生物量在增加, 而鱼类分布的均匀度在减小。

2.2 鱼类群落生物量以及局部优势种变化

根据拆坝前后每个点位捕捞的渔获量计算得到单位捕捞努力量渔获量 CPUE 和 MPUE, 分析拆坝前后渔获量的空间分布特征。从空间分布来看, 拆坝后靠近河口的自然河段(S1—S4)的单位捕捞努力量渔获量均下降, 而老木河坝址下游受干扰河段(S5—S7)、原蓄水河段(S8—S9)以及松新坝下减水河段(S10)均上升(图 3)。

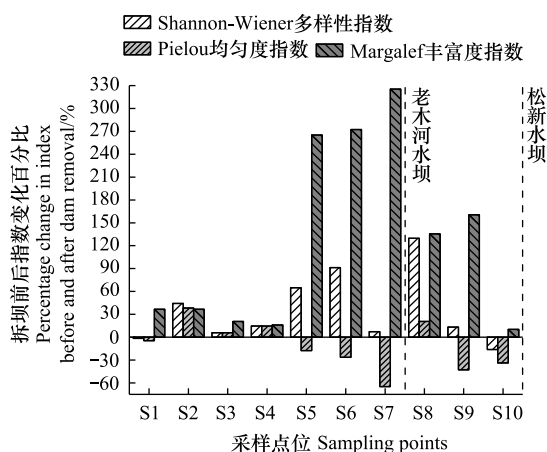


图 2 拆坝前后采样点位生物多样性变化

Fig.2 Changes in biodiversity at sampling sites before and after dam removal

负值表示拆坝后下降, 正值表示拆坝后上升, 水流方向从右到左

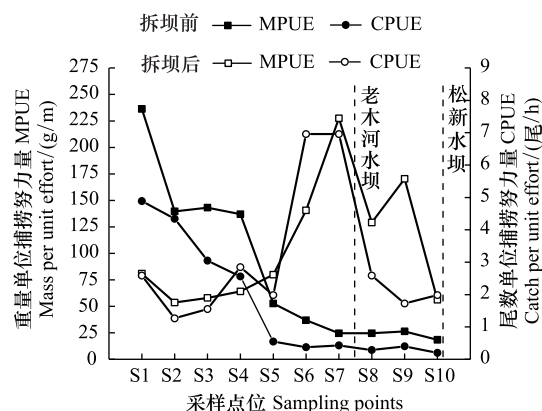


图 3 拆坝前后采样点位单位捕捞努力量的渔获量

Fig.3 Catch per unit effort at sampling points before and after dam removal

表 1 老木河水坝拆除前后黑水河下游渔获物
Table 1 Fish caught in the Heishui River lower reaches before and after the removal of the Laomuhe Dam

种类 Species name	拆坝前 (2018-06) Before dam removal				拆坝后 (2019-06) After dam removal				变化量 Changes	
	尾数百分比/% Individual percentage		重量百分比/% Weight percentage		尾数百分比/% Individual percentage		重量百分比/% Weight percentage		尾数百分比/% Individual percentage	重量百分比/% Weight percentage
	尾数百分比/% Individual percentage	重量百分比/% Weight percentage	平均体重/g Mean body weight	尾数百分比/% Individual percentage	重量百分比/% Weight percentage	平均体重/g Mean body weight	尾数百分比/% Individual percentage	重量百分比/% Weight percentage		
铜鱼 <i>Brass gudgeon</i>	0.2	0.1	4	0.1	0.7	86	-0.1	0.6		82
* 齐口裂腹鱼 <i>Schizothorax prenanti</i>	7.9	11.7	10	4.5	20.6	42	-3.4	8.9		32
* 短须裂腹鱼 <i>Schizothorax wangchiachii</i>	6.0	8.6	11	3.1	17.6	38	-2.9	9.0		27
* 昆明裂腹鱼 <i>Schizothorax grahami</i>	0.1	2.1	15	1.3	4.6	50	1.2	2.5		35
墨头鱼 <i>Garra pingi</i>	0.3	0.2	4	0.6	0.6	8	0.4	0.4		4
宽鳍鱲 <i>Zacco platypus</i>	0.6	1.3	13	1.6	2.0	11	0.9	0.6		-2
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	-	-	-	0.7	0.2	3	0.7	0.2		3
* 钝吻棒花鱼 <i>Abbotina obtusirostris</i>	-	-	-	0.4	0.1	3	0.4	0.1		3
* 前鳍高原鳅 <i>Triplophysa anterodorsalis</i>	11.7	11.8	6	4.5	3.4	6	-7.2	-8.5		0
贝氏高原鳅 <i>Trilophysa bleekeri</i>	8.8	7.0	5	0.2	0.2	7	-8.6	-6.8		2
红尾副鳅 <i>Paracobitis variegatus</i>	27.4	23.2	5	44.9	31.4	6	17.6	8.2		1
* 短体副鳅 <i>Paracobitis potanini</i>	21.6	20.6	6	6.4	3.8	5	-15	-17		-1
* 戴氏南鳅 <i>Schistura dabryi</i>	5.8	3.4	4	21.9	7.5	3	16.2	4.0		-1
横纹南鳅 <i>Schistura fasciolata</i>	-	-	-	0.1	0.1	4	0.1	0.1		4
* 中华金沙鳅 <i>Jinshaia sinensis</i>	1.2	0.7	4	1.5	0.5	3	0.3	-0.2		-1
犁头鳅 <i>Lepturichthys fimbriata</i>	0.1	0.1	5	-	-	-	-0.1	-0.1		-5
南方大口鲶 <i>Silurus meridionalis</i>	0.2	0.1	5	0.2	0.8	32	0.0	0.7		27
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	0.5	0.8	11	0.3	0.3	10	-0.2	-0.4		0
中华纹胸鮡 <i>Glyptothorax sinense</i>	4.6	3.6	5	5.0	2.9	5	0.4	-0.7		0
福建纹胸鮡 <i>Glyptothorax fukiensis</i>	-	-	-	0.6	0.2	2	0.6	0.2		2
* 黄石爬鮡 <i>Euchiloglanis kishinouyei</i>	-	-	-	0.1	0.1	10	0.1	0.1		10
白缘鲴 <i>Liobagrus marginatus</i>	3.3	4.6	8	2.1	2.5	10	-1.3	-2.1		2

* 长江上游特有鱼种, -未捕到

表 2 黑水河下游鱼类的种类组成及其生态类型

Table 2 Species composition and ecological types of fishes in the lower reaches of the Heishui River

科 Family	中文种类名 Chinese species name	缩写 Abbreviation	水流偏好 Preference for running water	产卵类型 Spawning type	摄食类型 Feeding type
鲤科 Cyprinidae	铜鱼	BG	R	PL	ZS
	* 齐口裂腹鱼	SP	EU	W/C	ZS
	* 短须裂腹鱼	SW	EU	W/C	ZS
	* 昆明裂腹鱼	SG	EU	W/C	ZS
	墨头鱼	GP	R	W/C	ZS
	宽鳍鱲	ZP	R	W/C	ZS
	麦穗鱼	PPA	L	NX	ZS
	* 钝吻棒花鱼	AO	L	W/C	ZS
鳅科 Cobitidae	* 前鳍高原鳅	TA	EU	W/C	ZS
	贝氏高原鳅	TB	EU	W/C	ZS
	红尾副鳅	PV	R	W/C	ZS
	* 短体副鳅	PPO	R	W/C	ZS
	* 戴氏南鳅	SD	R	W/C	ZS
	横纹南鳅	SF	R	W/C	ZS
平鳍鳅科 Homalopteridae	* 中华金沙鳅	JS	R	PL	ZS
	犁头鳅	LF	R	PL	ZS
鲇科 Siluridae	南方大口鲶	SM	L	NX	RS
鲢科 Bagridae	黄颡鱼	PF	L	NX	ZS
鲴科 Sisoridae	中华纹胸鲴	GS	R	NX	RS
	福建纹胸鲴	GF	R	NX	RS
	* 黄石爬鲴	EK	R	W/C	ZS
钝头鮠科 Amblycipitidae	白缘鲴	LM	L	NX	ZS

R: 喜急流性; EU: 广适性; L: 喜缓流性; W/C: 微粘沉性卵; PL: 漂流性卵; NX: 粘性卵; ZS: 杂食; RS: 肉食; * 长江上游特有鱼种

选取拆坝前后相对重要性指数百分比大于 5% 的鱼类,分析拆坝前后采样点位的主要优势物种的转变。拆坝后, S1—S4 主要的优势物种还是裂腹鱼、短体副鳅和红尾副鳅,但裂腹鱼的比重总体在上升, S5—S7 主要的优势物种由原来的戴氏南鳅与红尾副鳅转变为裂腹鱼与红尾副鳅, S8—S9 主要的优势物种是戴氏南鳅和红尾副鳅, S10 主要的优势物种是裂腹鱼与戴氏南鳅(图 4)。

2.3 鱼类群落相似性及移殖分析

利用采样点位的相对重要性指数百分比数据进行了相似性分析,不同采样点位的排序结果如图 5 所示,其协强系数为 0.09,表明结果可信^[22]。从图 4 可知,在相似性水平 63.82% 时可以将采样点位的渔获物分为 2 组,其中 BS1—BS4 和 AS1—AS5 为一组, BS5—BS10 和 AS6—AS10 为另一组,同一组的点位聚集在一起,表明这几个采样点位渔获物的相似度彼此较高,组与组之间的点位越靠近相似度越高,因此可以看出拆坝后 S5—S10 点位和 S1—S4 点位间的相似度增大了(图 5)。

单因素交叉检验显示两组渔获物在统计学上存在差异显著 ($R = 0.894, P = 0.1\% < 0.05$)。Pearson 相关性分析结果显示,不同种类的相对丰度与不同聚类之间的相关性存在差异,其中裂腹鱼 (SP、SW 和 SG)、中华纹胸鲴 (GS)、中华金沙鳅 (JS) 和白缘鲴 (LM) 等指向组 1,表明这些种类在组 1 中的相对丰度大于在组 2 中的相对丰度;与此类似,红尾副鳅 (PV)、戴氏南鳅 (SD) 和墨头鱼 (GP) 等指向组 2,表明这些种类在组 2 中的相对丰度大于在组 1 中的相对丰度(图 5)。

老木河水电站拆除后,黑水河下游鱼类空间分布发生了明显的变化。由表 3 可以看出, S1—S4 和 S10 采样点位拆坝后的鱼获物种类差异不大,但 S5—S9 采样点位的渔获物种类改变很大,并且物种数都已成倍增加。其中,中华金沙鳅出现在 S5—S9 的所有点位中,中华纹胸鲴和宽鳍鱲在其中的 4 个点位中被捕获到,前

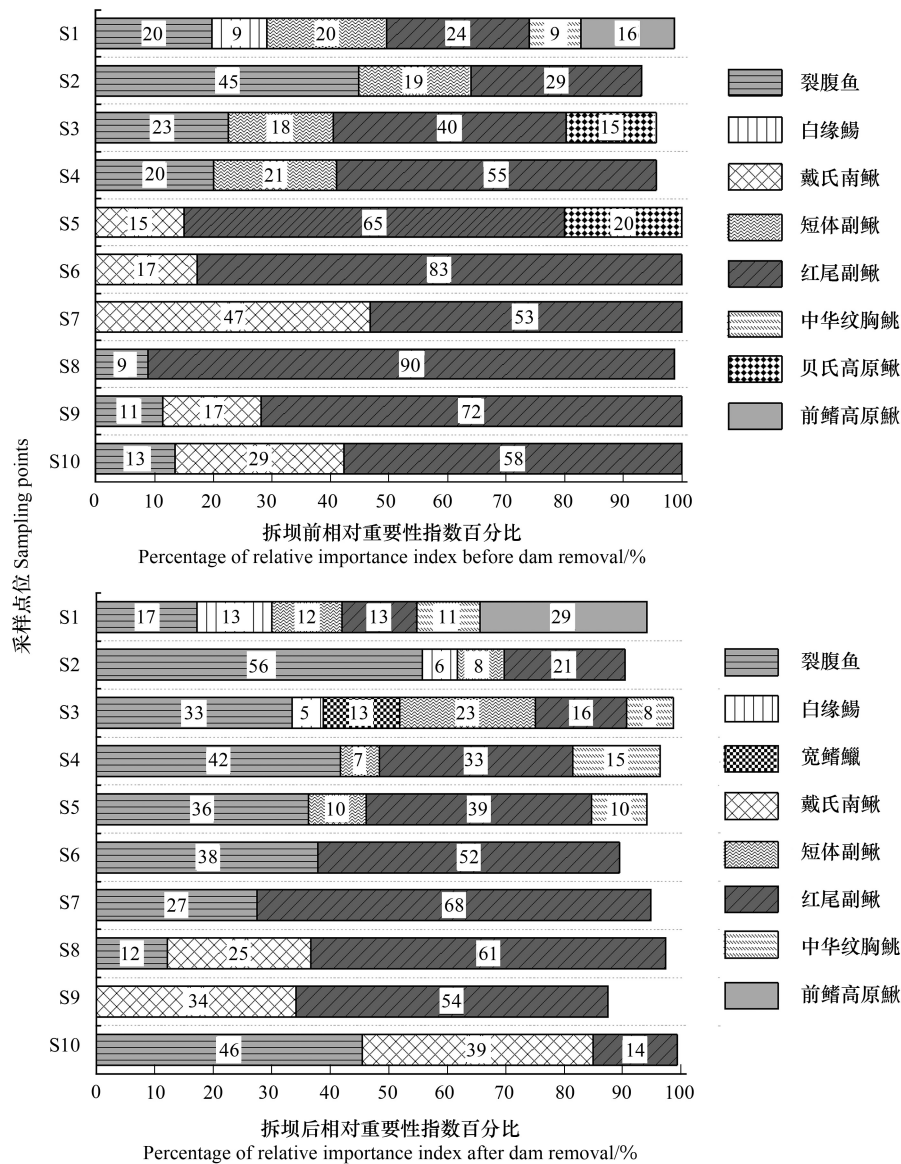


图 4 拆坝前后采样点位优势物种生物量占比

Fig.4 Percentage of dominant species biomass before and after dam removal

鳍高原鳅和钝吻棒花鱼在其中的 2 个点位中出现,黄石爬鮡、白缘鲴、短体副鳅、贝氏高原鳅和麦穗鱼均被捕获到 1 次,而拆坝前上述 10 种鱼均未出现在 S5—S10 点位的渔获物中。结果表明,下游 S1—S4 点位的鱼已经在拆坝后移殖到原坝址附近,且部分鱼类物种丰度较高,表明发生了定殖。

表 3 拆坝前后采样点位的渔获物种数

Table 3 Catch number of sampling points before and after dam removal

采样点位 Sampling points	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
拆坝前物种数 Species before dam removal	12	11	10	7	3	2	2	3	3	3
拆坝后物种数 Species after dam removal	13	12	10	7	11	8	9	8	9	5
共同物种 Common species	10	7	9	6	2	2	2	3	3	3

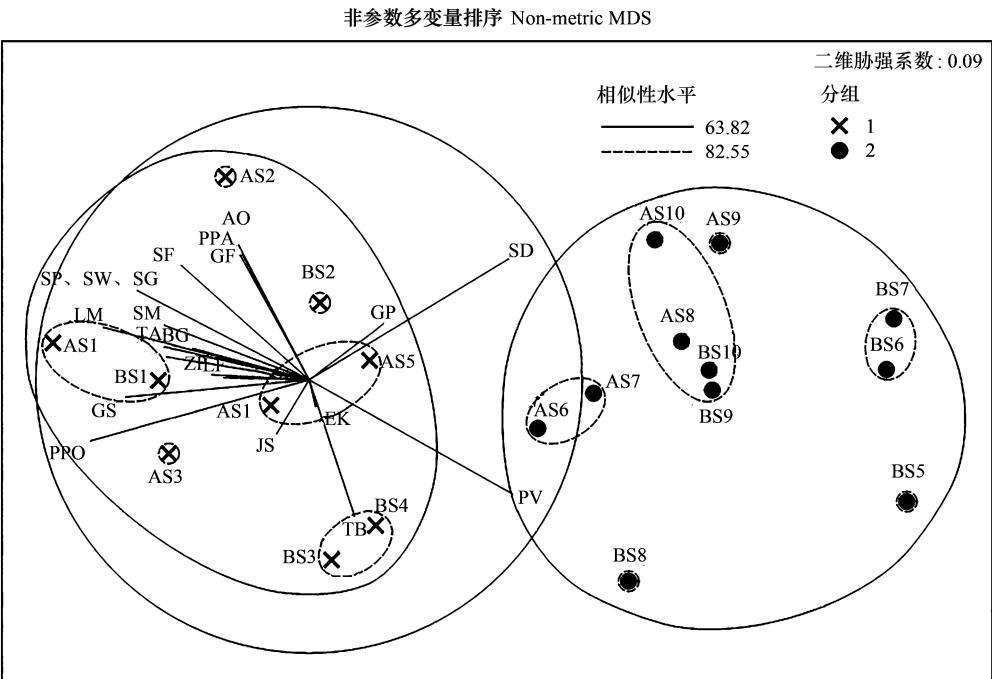


图5 拆坝前后黑水河下游鱼类的 MDS 图

Fig.5 NMDS of fish in the the Heishui River lower reaches before and after dam removal

BC: 铜鱼;SP: 齐口裂腹鱼;SW: 短须裂腹鱼;SG: 昆明裂腹鱼;GP: 墨头鱼;ZP: 宽鳍鱲;PPA: 麦穗鱼;AO: 顿吻棒花鱼;TA: 前鳍高原鳅;TB: 贝氏高原鳅;PV: 红尾副鳅;PPO: 短体副鳅;SD: 戴氏南鳅;SF: 横纹南鳅;JS: 中华金沙鳅;LF: 犁头鳅;SM: 南方大口鲶;PF: 黄颡鱼;GS: 中华纹胸鮡;GF: 福建纹胸鮡;EK: 黄石爬鮡;LM: 白缘鲴

3 讨论

3.1 拆坝对鱼类群落组成和结构的影响

老木河水电站拆除半年后,黑水河下游鱼类丰度发生了明显的增加,并且点位之间的鱼类群落结构变化有着同质化的趋势。拆坝后采集到的渔获物相比于拆坝前尾数增加 292 尾,种类数增加 4 种,并且总重量是拆坝前的 2 倍,根据渔获物重量百分比(表 1)可以看出拆坝前主要的优势物种是红尾副鳅、短体副鳅、齐口裂腹鱼和前鳍高原鳅,而拆坝后主要的优势物种变成了红尾副鳅、齐口裂腹鱼和短须裂腹鱼,这不仅体现了河流连通带来的变化,更说明水坝拆除后,在半年内发生了快速的地貌变化和栖息地变化,因为鱼类组合的恢复速度取决于栖息地的恢复速度^[11],在本研究中,老木河水电站拆除前,库区存在大量泥沙淤积,最大淤积厚度达 2.85 m,整体淤积呈现“三角洲形态”分布,且受大坝阻隔影响,坝址下游出现 3.2 km 的减水河段,拆坝后短期内,库区大量蓄水及泥沙下泄,水位逐渐下降、水面面积大幅缩减,并恢复河流自然径流状态,库区泥沙侵蚀主要分为上游水力侵蚀及坝址处溯源侵蚀两个方向,最大侵蚀厚度达 2.1 m,坝下河段出现明显的泥沙淤积现象,坝址附近如此显著的泥沙输移势必会影响鱼类的组成结构。尽管黑水河的鱼类种类较少,但是长江上游特有鱼类在其中占有较大的比例,拆坝前长江上游特有物种有齐口裂腹鱼、短须裂腹鱼、昆明裂腹鱼、前鳍高原鳅、戴氏南鳅、短体副鳅和中华金沙鳅 7 种,拆坝后增加了钝吻棒花鱼和黄石爬鮡两种鱼(表 1),根据杨志等^[24]调查,黑水河下游分布的长江上游特有鱼类共有 13 种,其中长薄鳅、张氏鲃、短身金沙鳅和西昌华吸鳅在本次调查中没有发现,但随着拆坝后河流泥沙脉冲不断的冲击地貌,会创造出更多适宜的鱼类生境^[25],扩大特有鱼类的栖息地范围。从生态类型上来看,黑水河下游的鱼类主要以摄食着生藻类和底栖动物、喜急流和产微粘性卵的鱼类为主,因为黑水河下游为典型的山地河流,绝大多数河道水流湍急、水深较浅、砾石和卵石密布、着生藻类较为丰富而浮游动植物缺乏,有利于喜流水生境、摄食着生藻类鱼类的栖息觅食以及在砾石

间产沉性卵鱼类的产卵活动,拆坝后,这三种生态类型的鱼类均有所增加,表明河流连通后,恢复了河流能量和营养物质的传输,食物和底栖动物的变化推动了鱼类群落组成的变化^[26]。另外,大坝拆除后会导致各点位鱼类群落组成相似性的增加,表现出同质化的趋势^[27-28],在本研究中坝址上下游点位的同质化是朝着靠近河口河段鱼类组成结构方向变化的,这是由于拆坝后河流连通性恢复河口段鱼类上溯导致的(图5)。拆坝后鱼类响应机制不明确的原因在于水坝拆除后鱼类的组成结构受河道形态、水文特征、泥沙淤积侵蚀和源种群等多方面因素影响^[13],所以尽管欧洲和北美已经进行了许多有关拆除大坝的生态研究^[29],却不适用于以鲤科为主的亚洲河流,而本研究表明以鲤科为主的鱼类在水坝拆除后可以在极短的时间内开始恢复。

3.2 拆坝对鱼类群落空间分布的影响

老木河水坝拆除半年后,鱼类发生了明显的移殖现象,特别是坝址上游蓄水区(S8—S9)和下游河段(S5—S7)最为明显。黑水河下游鱼类群落在老木河水电站拆除后空间分布发生了快速而巨大的变化,坝址上游蓄水区 and 下游河段的 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数都发生了大幅度的增加,而靠近河口的自然河段(S1—S4)和松新坝下的减水河段(S10)变化并不明显,这是因为老木河水坝拆除后,蓄水区 and 减水段消失,河流恢复连通性,水温、水深、流速和底质得到改善,鱼类食物来源丰富,这些栖息地特征的变化推动了鱼类群落空间分布的变化。分析拆坝前后每个点位的 MPUE 和 CPUE 可以看出(图3),拆坝前,黑水河下游的单位捕捞努力量在靠近河口处很大,S1—S4 的 MPUE 和 CPUE 分别在 125 g/m 和 3 个/h 左右,而其他点位的 MPUE 和 CPUE 分别在 30 g/m 和 0.3 个/h 左右,拆坝后,分布情况发生了相反的变化,S1—S4 点位的 MPUE 和 CPUE 下降,S5—S9 点位上升明显,说明拆坝前黑水河下游的鱼类大多分布在靠近河口的 S1—S4 点位,对于与水坝相邻的河段和远离水坝的河段之间的鱼类经常观察到很大的群落差异^[29-32],而拆坝后,鱼类发生了上溯洄游重新定殖到坝址附近,这意味着在水坝拆除后生境发生变化,鱼类不再受到水坝引起的扩散限制,并且筑坝引起的局部物种消失也得到了恢复^[4]。通过对比发现(表3),从靠近河口点位移殖到原坝址附近的鱼类有中华金沙鳅、中华纹胸鮡、宽鳍鱲、前鳍高原鳅、钝吻棒花鱼、黄石爬鮡、白缘鲴、短体副鳅、贝氏高原鳅和麦穗鱼,其中中华金沙鳅和宽鳍鱲丰度较高,进一步说明这四种鱼已经在此处定殖,这证明了拆除水坝对恢复河流连通性和促进基因流动的重要性^[33]。

3.3 拆坝对黑水河发挥支流生境替代作用的意义

白鹤滩水电站建成后,正常蓄水位达到 825 m 时,黑水河河口至上游约 35 km 的河段均受白鹤滩库区的回水顶托作用影响,水面面积加大,流速减缓,使得鱼类生存的急流生境大幅减少,老木河水电站的拆除会大大增加黑水河下游自然河段的长度,为鱼类提供更多觅食产卵的栖息地。另外,因为黑水河鱼类群落为金沙江干流鱼类群落的嵌套子集^[24],所以黑水河下游江段鱼类基本与附近金沙江干流江段一致。干流中的鱼类在白鹤滩水电站蓄水后会进入黑水河,此时,就需要大量的适宜干流鱼类群落生存的栖息地。老木河水电站的拆除不仅使得黑水河下游河流恢复连通,而且增加了鱼类的饵料、创造出更多适合产卵的栖息地^[34]。由于黑水河的鱼类群落里大多是喜急流的鱼,白鹤滩蓄水后,预计水文站以下被淹没的黑水河河段将不再有大量喜急流鱼类生存,干流喜急流鱼类和原来生存在靠近河口的喜急流鱼类将大量上溯到原坝址附近,形成新的空间分布。综上所述,拆坝对黑水河的支流生境替代作用有着重大的意义。

4 结论

本文对老木河水电站拆除前后对黑水河下游 10 个点位的鱼类群落开展了实地调查,通过对群落组成、生态类型、生物量以及相似性的分析,探究了拆坝引起的鱼类群落结构和空间分布的变化,得出如下结论:

(1) 老木河水电站拆除半年后,黑水河下游的鱼类群落的物种数和丰度均增加,结构上以鲤科和鳅科为主,其中长江上游特有鱼类从 7 种增加到 9 种;

(2) 老木河原坝址上下游附近鱼类群落组成结构朝着靠近河口附近河段的鱼类群落结构方向变化,恢复到近自然状况下的河流中鱼类群落结构出现同质化趋势;

(3)拆坝后,鱼类的空间分布发生了巨大的变化,靠近河口河段的鱼类上溯洄游并且定殖在原坝址附近,这为黑水河作为金沙江支流生境替代的合理性分析提供了有力参考。

参考文献(References):

- [1] Watters G T. Small dams as barriers to freshwater mussels (Bivalvia, Unionoida) and their hosts. *Biological Conservation*, 1996, 75(1): 79-85.
- [2] Martinez P J, Chart T E, Trammel M A, Wullschlegel J G, Bergersen E P. Fish species composition before and after construction of a main stem reservoir on the White River, Colorado. *Environmental Biology of Fishes*, 1994, 40(3): 227-239.
- [3] Magilligan F J, Nislow K H. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 2005, 71(1/2): 61-78.
- [4] Olden J D, Naiman R J. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*, 2010, 55(1): 86-107.
- [5] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报. *中国水利*, 2013, (7): 1-3.
- [6] 王正旭. 美国水电站退役与大坝拆除. *水利水电科技进展*, 2002, 22(6): 61-63.
- [7] Hart D D, Johnson T E, Bushaw-Newton K L, Horwitz R J, Bednarek A T, Charles D F, Kreeger D A, Velinsky D J. Dam removal: challenges and opportunities for ecological research and river restoration: we develop a risk assessment framework for understanding how potential responses to dam removal vary with dam and watershed characteristics, which can lead to more effective use of this restoration method. *BioScience*, 2002, 52(8): 669-682.
- [8] 陈宜瑜. 中国动物志,硬骨鱼纲:鲤形目. 北京:科学出版社, 1998.
- [9] 褚新洛. 中国动物志,硬骨鱼纲:鲇形目. 北京:科学出版社, 1999.
- [10] Nelson J S. *Fishes of the World*. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- [11] Doyle M W, Stanley E H, Orr C H, Selle A R, Sethi S A, Harbor J M. Stream ecosystem response to small dam removal: lessons from the heartland. *Geomorphology*, 2005, 71(1/2): 227-244.
- [12] Kim S, Toda Y, Tsujimoto T. Geomorphological and riparian vegetation responses following a low-head dam removal: a study based on literature review. *International Journal of River Basin Management*, 2015, 13(3): 315-324.
- [13] Catalano M J, Bozek M A, Pellett T D. Effects of dam removal on fish assemblage structure and spatial distributions in the Baraboo River, Wisconsin. *North American Journal of Fisheries Management*, 2007, 27(2): 519-530.
- [14] Bulow F J, Webb M A, Crumby W D, Quisenberry S S. Management Briefs: effectiveness of a fish barrier dam in limiting movement of rough fishes from a reservoir into a tributary stream. *North American Journal of Fisheries Management*, 1988, 8(2): 273-275.
- [15] 张雄, 刘飞, 林鹏程, 王剑伟, 曹文宣. 金沙江下游鱼类栖息地评估和保护优先级研究. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(4): 496-503.
- [16] Porto L M, McLaughlin R L, Noakes D L G. Low-head barrier dams restrict the movements of fishes in two Lake Ontario streams. *North American Journal of Fisheries Management*, 1999, 19(4): 1028-1036.
- [17] 傅菁菁, 黄滨, 芮建良, 谭升魁, 赵爽. 生境模拟法在黑水河鱼类栖息地保护中的应用. *水生生态学杂志*, 2016, 37(3): 70-75.
- [18] Stewart-Oaten A, Murdoch W W, Parker K R. Environmental impact assessment: "Pseudoreplication" in time? *Ecology*, 1986, 67(4): 929-940.
- [19] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册. 北京:农业出版社, 1991.
- [20] 丁瑞华. 四川鱼类志. 成都:四川科学技术出版社, 1994.
- [21] 陈银瑞, 褚新洛. 云南鱼类志. 科学出版社, 1989.
- [22] Clarke K R, Warwick R M. *Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation*. 2nd ed. Plymouth: Plymouth Marine Laboratory, 2001.
- [23] Majewski A R, Lynn B R, Lowdon M K, Williams W J, Reist J D. Community composition of demersal marine fishes on the Canadian Beaufort Shelf and at Herschel Island, Yukon Territory. *Journal of Marine Systems*, 2013, 127: 55-64.
- [24] 杨志, 龚云, 董纯, 唐会元, 乔晔. 黑水河下游鱼类资源现状及其保护措施. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(6): 847-855.
- [25] Cheng F, Granata T. Sediment transport and channel adjustments associated with dam removal: Field observations. *Water Resources Research*, 2007, 43(3): W03444.
- [26] Chao Z, Ding L Y, Ding C Z, Chen L Q, Sun J, Jiang X M. Responses of species and phylogenetic diversity of fish communities in the Lancang River to hydropower development and exotic invasions. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 261-279.
- [27] Rahel F J, Hubert W A. Fish assemblages and habitat gradients in a Rocky Mountain-Great Plains stream: biotic zonation and additive patterns of community change. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1991, 120(3): 319-332.
- [28] Kornis M S, Weidel B C, Powers S M, Diebel M W, Cline T J, Fox J M, Kitchell J F. Fish community dynamics following dam removal in a fragmented agricultural stream. *Aquatic Sciences*, 2015, 77(3): 465-480.
- [29] Dorobek A, Sullivan S M P, Kautza A. Short-term consequences of lowhead dam removal for fish assemblages in an urban river system. *River Systems*, 2015, 21(2/3): 125-139.
- [30] Katano O, Nakamura T, Abe S, Yamamoto S, Baba Y. Comparison of fish communities between above- and below-dam sections of small streams: barrier effect to diadromous fishes. *Journal of Fish Biology*, 2006, 68(3): 767-782.
- [31] McLaughlin R L, Porto L, Noakes D L G, Baylis J R, Carl L M, Dodd H R, Goldstein J D, Hayes D B, Randall R G. Effects of low-head barriers on stream fishes: taxonomic affiliations and morphological correlates of sensitive species. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2006, 63(4): 766-779.
- [32] Perkin J S, Gido K B. Fragmentation alters stream fish community structure in dendritic ecological networks. *Ecological Applications*, 2012, 22(8): 2176-2187.
- [33] Fagan W F. Connectivity, fragmentation, and extinction risk in dendritic metapopulations. *Ecology*, 2002, 83(12): 3243-3249.
- [34] Kanehl P D, Lyons J, Nelson J E. Changes in the habitat and fish community of the Milwaukee river, Wisconsin, following removal of the woolen mills dam. *North American Journal of Fisheries Management*, 1997, 17(2): 387-400.