

金沙江上游巴塘坝下干流和支流巴楚河鱼类群落结构研究¹

熊美华¹ 邵科¹ 董微微¹ 陈浩² 曾昌¹ 阙延福¹ 陈锋¹ 朱滨^{1*}

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北省水生态保护与修复工程技术研究中心, 湖北 武汉 430079;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

【摘要】:为研究金沙江上游干流巴塘水电站建设后, 支流巴楚河鱼类栖息地保护区功能的发挥情况, 在 2021 年开展了巴塘坝下干流及支流巴楚河鱼类资源监测, 采用多样性指数和多元统计方法分析了该区域鱼类群落结构特征。在金沙江干流及支流巴楚河共收集鱼类 11 种, 包括长江上游特有鱼类 5 种, 外来物种 3 种。干支流优势种差异显著, 干流优势种为裂腹鱼属 (*Schizothorax*) 鱼类, 支流优势种为软刺裸裂尻鱼 (*Schizopygopsis malacanthus*) 和细尾高原鳅 (*Triplophysa stenura*) 两种小型鱼类。在 43.53% 的 Bray-Curtis 相似性水平上可以将干支流 9 个采样点的鱼类群落结构分成 2 组, 对分组进行 SIMPER 分析的结果表明造成差异的主要原因与干支流优势种差异有关。生物多样性指数的分析结果显示, 位于巴楚河汇口附近的两个采样点生物多样性指数最高, 可能与汇口处生境较为复杂有关。建议加强对汇口处生境的保护, 同时恢复汇口往上河段的连通性, 将延长裂腹鱼属鱼类的洄游河段, 利于扩大其种群规模。

【关键词】:金沙江上游、巴塘水电站、巴楚河、鱼类群落结构

【中图分类号】: Q958.15、S931.5 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)11-2481-08

【DOI】: 10.11870/cjlyzyyhj202211013

水电站建设可以有效利用河流的水能资源, 水电在能源开发中占有重要比例, 2020 年水电占我国发电量总量的 16.82%^[1]。但同时梯级电站建设阻断了河流连通性, 改变了河流的自然形态和水文情势, 对河流生境也产生了极大改变, 从而对水生生物尤其是鱼类产生了重要影响^[2,3,4,5]。大坝造成的阻隔影响了鱼类的生殖、索饵和越冬洄游; 生境破碎化可能影响不同地区鱼类群体间的交流; 大坝建设形成库区, 会缩减生活于流水中鱼类的栖息地; 坝下尾水等容易造成气体过饱和、水温降低等现象, 从而干扰鱼类的繁殖和降低仔幼鱼存活率^[3,6,7]。

¹ 收稿日期: 2021-12-07; 修回日期: 2022-02-23

基金项目: 金沙江巴塘水电站鱼类行为生态学及栖息地保护修复调查研究 (2021KF1CS3675742); 农业财政专项 (CJDC-2017-03); 三峡工程影响水域重要水生生物遗传资源保护 (12620200600020J005)

作者简介: 熊美华 (1982 ~), 女, 副研究员, 主要研究方向为鱼类生态学和分子生态学. E-mail: dreamer@mail.ihe.ac.cn

* 通讯作者 E-mail: gezhub@163.com

金沙江干流全长 3 479 km, 总落差 5 100 m, 流域面积 47.32 万 km²。金沙江从玉树直门达至石鼓为上游河段, 石鼓至攀枝花(渡口)为中游河段, 攀枝花至宜宾为下游河段。金沙江上游水电规划共 13 个梯级电站, 其中巴塘水电站为第 9 级, 上游为拉哇水电站, 下游为苏洼龙水电站^[8]。为了缓解梯级电站建设所导致生境变化对鱼类产生的影响, 巴塘坝址以下 12 km 干流河段和巴楚河汇口上游 11 km 支流河段被作为鱼类栖息地进行保护。

目前, 对于巴塘坝下及巴楚河支流鱼类栖息地保护区中鱼类资源状况, 仅刘睿和孙莹^[9]对巴塘水电站所在河段鱼类进行了调查, 主要为高原鳅、裂腹鱼及石爬鮡类, 但未见对支流巴楚河鱼类的系统调查及相关报道。为了发挥支流巴楚河鱼类栖息地保护区功能, 本文对巴楚河及巴塘坝下栖息地保护区的鱼类开展调查和研究, 并探讨其作为金沙江上游鱼类保护的支流替代生境的可能性, 为后续金沙江上游鱼类种群及其栖息地保护措施提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

巴塘水电站坝址位于巴楚河口上游约 660 m 的金沙江干流上, 坝址控制流域面积 17.64 万 km², 多年平均流量 859 m³/s, 具有日调节性能, 巴塘水电站开发任务以发电为主^[8]。

巴楚河为金沙江左岸一级支流, 发源于理塘县, 于茶树山汇入金沙江, 流域面积 3 250 km², 河长 147 km, 天然落差 3 090 m, 巴楚河上规划有“1 库 5 级开发”方案, 目前已建的有拉拉山电站, 减水河段长 23.5 km, 发电尾水汇入巴楚河处距离巴楚河汇口 53.9 km, 其他未建的 4 级电站因为《四川省人民政府关于进一步加强和规范水电建设管理的意见》(川府发[2016]47 号)均不得开发建设。除了拉拉山电站, 还有规划外的 2 座电站已建成并运行, 即雅哇电站和纳扎西电站。雅哇电站和纳扎西电站均为引水式电站, 减水河段分别长 2 和 1 km, 发电尾水汇入巴楚河处分别距离巴楚河汇口 43 和 25 km, 最大坝高分别为 4.3 和 8 m^[9]。

1.2 样品采集

本研究调查时间为 2021 年 4 月, 调查范围为金沙江上流干支流, 共设置 9 个采样断面(图 1), 具体为巴塘坝下干流 3 个, 支流巴楚河 6 个, 设置的断面简称和位置如表 1 所示。采用地笼网(经渔业主管部门批准)以自主捕捞方式在 9 个断面进行鱼类资源调查, 地笼长度见表 1 所示, 每个采样点调查时长依据渔业主管部门批准调查总时长进行平均分配。鱼类种类依据形态特征参考相关文献和书籍^[10, 11, 12, 13, 14, 15]进行鉴定, 鱼名参照 Fishbase、郭延蜀等^[10]来进行命名, 逐尾测量鱼类全长(精确至 1 mm)、体长(精确至 1 mm)和体重(精确至 0.1 g)等生物学指标, 记录采集时间和采集地点等相关信息。

1.3 数据处理与分析

采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 种类丰富度指数(R)、Pielou 均匀度指数(J)分析不同江段鱼类群落结构特征^[16, 17, 18]; 基于原始渔获物个体数矩阵, 采用 Bray-Curits 相似性分析各采样点鱼类群落结构相似性。

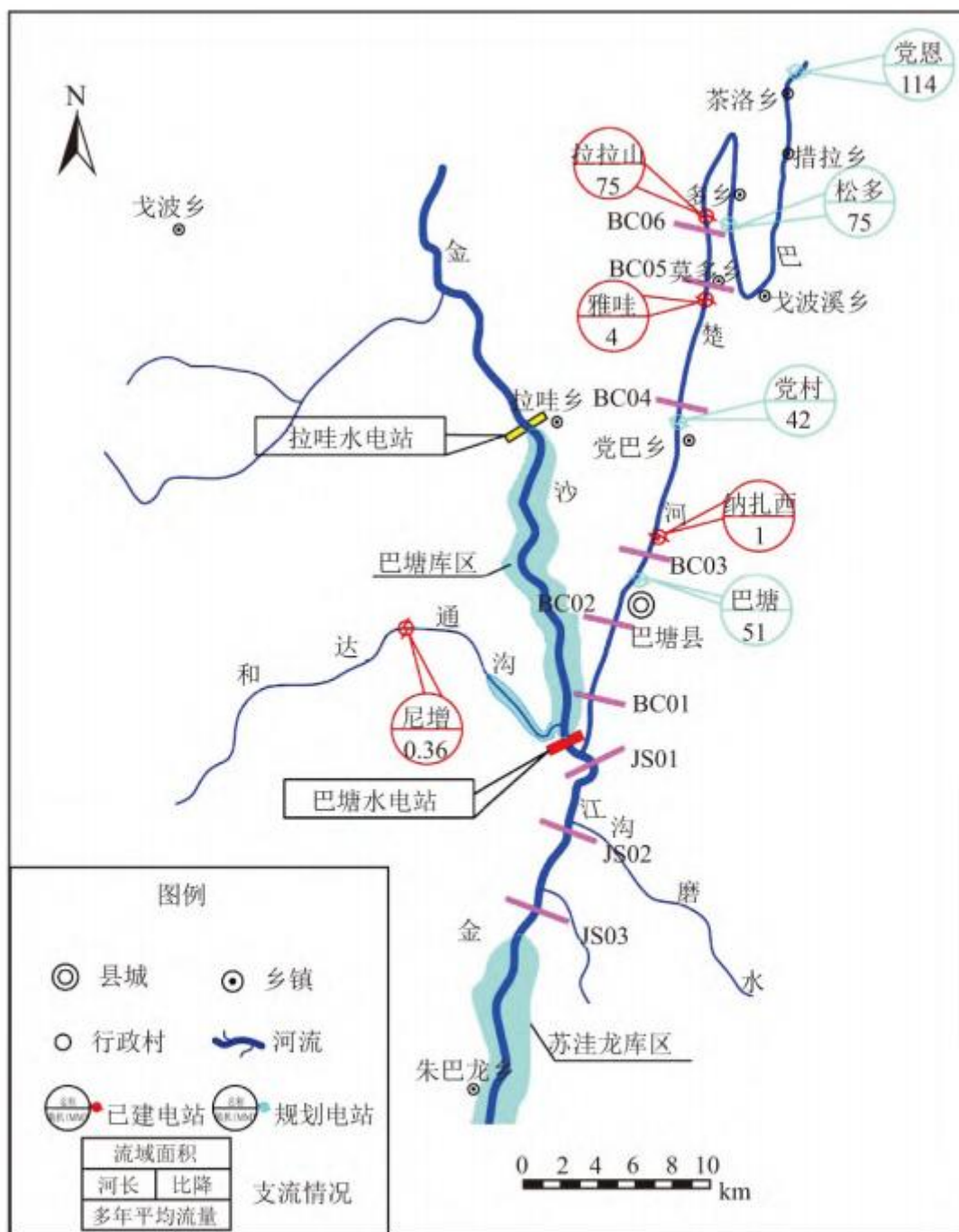


图 1 鱼类资源调查断面设置

Fig. 1 Sections of fish resources survey

表 1 断面简称和具体位置

断面简称	断面位置	经纬度	河宽 (m)	地笼长度 (m)
------	------	-----	--------	----------

金沙江干流	JS01	金沙江干流巴楚河汇口下游 200 m	N99° 3' 53" ;E29° 56' 2"	175	7.5
	JS02	金沙江干流巴楚河汇口下游约 5 km	N99° 3' 11" ;E29° 54' 5"	154	13
	JS03	金沙江干流巴楚河汇口下游约 10 km	N99° 2' 15" ;E29° 51' 58"	125	13
支流巴楚河	BC01	巴楚河汇口上游约 2 km	N99° 3' 47" ;E29° 56' 60"	40	15
	BC02	巴楚河汇口上游约 7.8 km	N99° 5' 27" ;E29° 58' 59"	82	11
	BC03	巴楚河纳扎西坝下	N99° 8' 15" ;E30° 1' 45"	27	11
	BC04	纳扎西库区黄草坪 2 号隧道桥下	N99° 9' 34" ;E30° 4' 1"	44	11
	BC05	雅哇坝前	N99° 11' 45" ;E30° 9' 45"	71	13
	BC06	拉拉山电厂尾水下游	N99° 13' 2" ;E30° 12' 26"	23	7.5

具体计算方法如下：

Shannon-Wiener 指数(H') 计算式为： $H' = -\sum P_i \cdot \ln P_i$, P_i 为群落中第 i 个种的个体数占有物种个体数的比例。基于物种数量反应群落种类多样性。

Margalef 丰富度指数(R) 计算式为： $R = (S-1)/\ln N$, S 为样品中的种类总数, N 为样品中的物种个体总数。反映群落物种丰富度。

Pielou' s 均匀性指数(J) 计算式为： $J = H' / \ln S$, H' 表示多样性; S 为样品中的种类总数。反映群落均匀度。

相似性分析：基于鱼类种类和相对丰度数据，经平方根转换后以 Bray-Curtis 相似性系数为基础构建不同采样点的相似性矩阵，采用层次聚类 Cluster 方法和非度量多维尺度分析 NMDS (Nonmetric Multidimensional Scaling, NMDS) 对各采样点鱼类群落进行分组，了解各采样点鱼类群落结构变化^[19]。采用单因素的相似性分析 (One-way Analysis of Similarity Statistics, one-way ANOSIM) 对分组数据进行差异检验，判断该分组结果的正确性^[20]。采用相似性百分比分析 (Similarity Percentage procedure, SIMPER) 来确定造成分组间差异的物种^[21]。Cluster、NMDS、ANOSIM 检验和 SIMPER 分析通过生态统计软件 Primer 6.0 进行。

2 结果

2.1 鱼类种类组成

在 9 个采样点共收集到鱼类 1 020 尾，重量达 19 532.6 g，隶属于 2 目，鲤形目和鲇形目，其中鲤形目鱼类共 3 科 10 种，具体为鲤科 5 种，条鳅科 3 种，鳅科 2 种，鲇形目鲇科 1 种，鱼类名录见表 2 所示。采集到四川省重点保护野生动物 1 种，即长丝裂腹鱼；长江上游特有鱼 5 种，即短须裂腹鱼、长丝裂腹鱼、四川裂腹鱼、软刺裸裂尻鱼和戴氏山鳅；外来物种 3 种，泥鳅、大鳞副泥鳅和鲇。金沙江上游干流 3 个采样点共收集到鱼类 9 种，隶属于 2 目，其中鲤形目 7 种，鲤科 5 种，条鳅科 3 种；鲇形目鲇科 1 种。支流巴楚河 6 个采样点共收集到鱼类 9 种，隶属于鲤形目，其中鲤科鱼类 4 种，条鳅科 3 种，鳅科 2 种。

表 2 鱼类名录表

鱼类种类		采样断面								
		JS01	JS02	JS03	BC01	BC02	BC03	BC04	BC05	BC06
鲤形目	Cypriniformes									
鲤超科	Cyprinoidea									
鲤科	Cyprinidae									
1. 短须裂腹鱼*	Schizothorax wangchiachii	√	√	√	√					
2. 长丝裂腹鱼**	Schizothorax dolichonema		√	√						
3. 四川裂腹鱼*	Schizothorax kozlovi	√	√			√				
4. 硬刺裸鲤	Gymnocypris firmispinatus	√	√	√	√			√	√	
5. 软刺裸裂尻鱼*	Schizopygopsis malacanthus	√			√	√	√	√	√	√
鳅超科	Cobitoidea									
条鳅科	Nemacheilidae									
6. 戴氏山	Claea dabryi			√	√	√	√	√		√

鳅*										
7. 斯氏高原鳅	Triplophysa stoliczkai			√	√					
8. 细尾高原鳅	Triplophysa stenura			√	√	√	√	√	√	√
鳅科	Cobitidae									
9. 泥鳅△	Misgurnus anguillicaudatus				√					
10. 大鳞副泥鳅△	Paramisgurnus dabryanus				√	√	√			
鲇形目	Siluriformes									
鲇科	Siluridae									
11. 鲇△	Silurus asotus	√								

注：※为四川省重点保护野生动物；*为长江上游特有鱼类；△为外来物种。

2.2 优势种

对比分析金沙江干流(JS)和支流巴楚河(BC)渔获物,选取个体数占比和生物量占比排名前2的鱼类,分析干支流渔获物优势物种,结果如图2所示。在金沙江干流上,裂腹鱼属为优势种,其中个体数占比最大的是长丝裂腹鱼和短须裂腹鱼,占比和为63.13%,生物量占比最大的是长丝裂腹鱼和四川裂腹鱼,占比和超过80%;支流巴楚河上软刺裸裂尻鱼和细尾高原鳅个体数和生物量占比均最大,占比数值和均超过70%。干支流优势种差异显著。

从图2中可看出,金沙江干流个体数占比和生物量占比最大的均为长丝裂腹鱼,个体数占比为42.62%,生物量占比达到63.77%,说明在渔获物中长丝裂腹鱼个体相对较大,其平均体重为80.8g;而个体数占比第二的短须裂腹鱼,其生物量占比却较小,仅为13.05%,小于四川裂腹鱼的生物量占比数(17.86%),说明短须裂腹鱼在渔获物中个体偏小,这与其平均体重38.7g相符。支流巴楚河上软刺裸裂尻鱼和细尾高原鳅占优势,个体数占比和生物量占比最大的均为软刺裸裂尻鱼,其次是细尾高原鳅,两种鱼个体均偏小,平均体重分别为17.5g和10.9g。

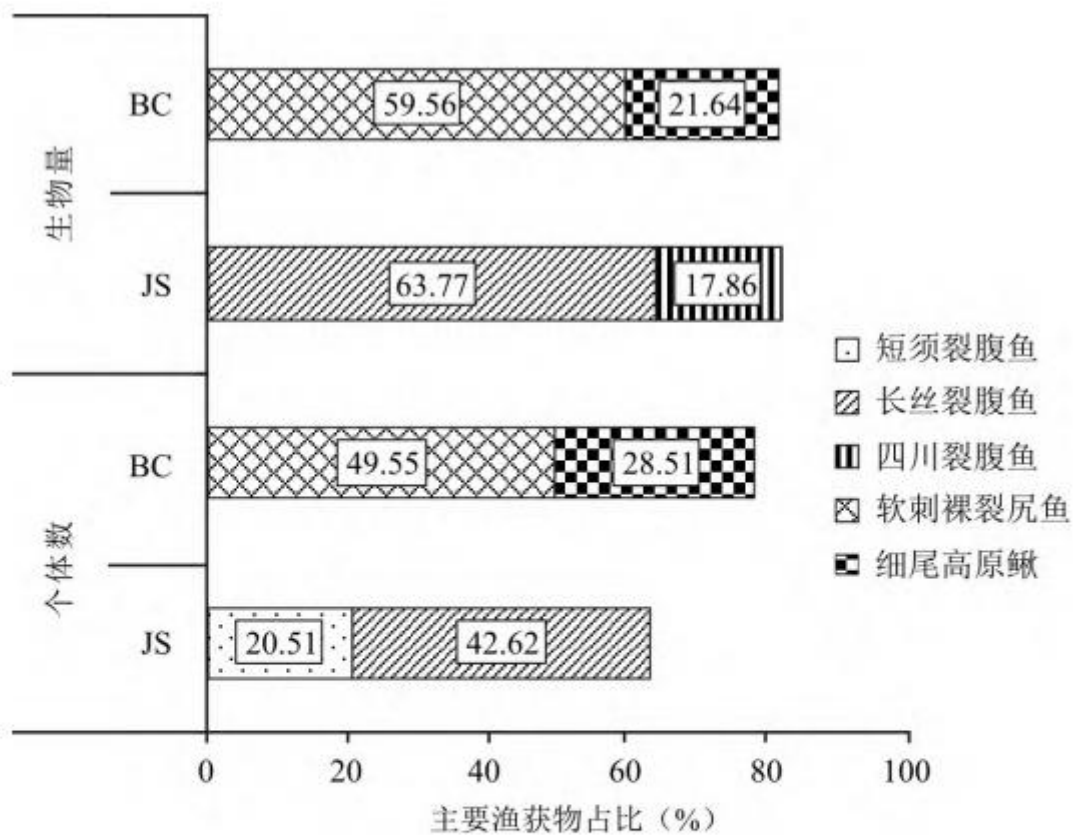
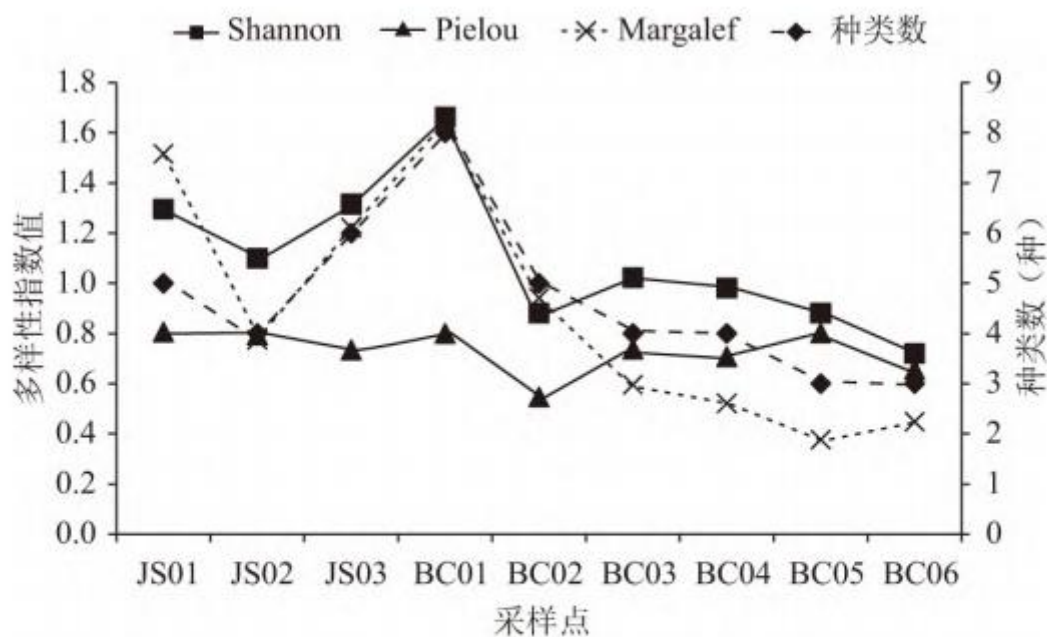


图2 金沙江干流和支流巴楚河
主要渔获物个体数占比和生物量占比
Fig. 2 Ratio of individual number and ratio
of biomass of dominant fish species

2.3 多样性指数

分析各采样点鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数，结果如图 3 所示。从图中可看出，除支流巴楚河 BC01 采样点外，金沙江干流各采样点指数值均大于支流其他采样点数值，这与各采样点鱼类种类数大体趋势一致。所有采样点中，JS01 和 BC01 的数值相对最高，而这两个均位于巴楚河汇口附近，可能与汇口处生境复杂，更适宜多种鱼类生存有关。



注：右侧 Y 轴为种类数，其他显示在左侧 Y 轴。

图 3 各采样点鱼类生物多样性指数

Fig. 3 Fish community biodiversity index at sampling sections

2.4 群落结构

Cluster 聚类分析表明：在 43.53% 的 Bray-Curtis 相似性水平上，可将 9 个采样点的鱼类群落分为 2 组，组 I 为 JS01、JS02、JS03 和 BC01，组 II 为支流巴楚河上 5 个采样点，即 BC02、BC03、BC04、BC05 和 BC06 (图 4)。One-way ANOSIM 检验结果表明这 2 组间的群聚结构在统计学上的差异显著 (全局 $R=0.775$, $P=0.008$, 置换检验 126 次)。NMDS 分析的胁强系数为 0.02, 表明该聚类结果很好 (图 5)。从 NMDS 图中可以看出，在相似性水平为 40% 时，鱼类群落可以分成 2 组，这与 Cluster 聚类结果一致；当相似性水平为 60% 时，鱼类群落可以分成 4 组，组 I 为 BC01 和 JS03, 组 II 为 JS01 和 JS02, 组 III 为支流巴楚河上 4 个采样点，即 BC03、BC04、BC05 和 BC06, 另一个采样点鱼类 BC02 单独聚为一支；当相似性水平为 80% 时，鱼类群落可以分成 6 组，JS01 与 JS02 聚在一起，BC03 与 BC06 聚在一起，BC04 与 BC05 聚在一起，其他采样点 JS03、BC01、BC02 不与其他点鱼类聚在一起，分别单独为一组。

对差异显著的聚焦结果进行 SIMPER 分析，结果表明：造成组 I 和组 II 间差异的主要物种有 5 种 (贡献率 > 10%)，在组 II (支流巴楚河上 5 个采样断面) 中丰度增加的有软刺裸裂尻鱼、细尾高原鳅、戴氏山鳅等 3 种小型鱼类，丰度减少的有短须裂腹鱼、四川裂腹鱼等中型鱼类。

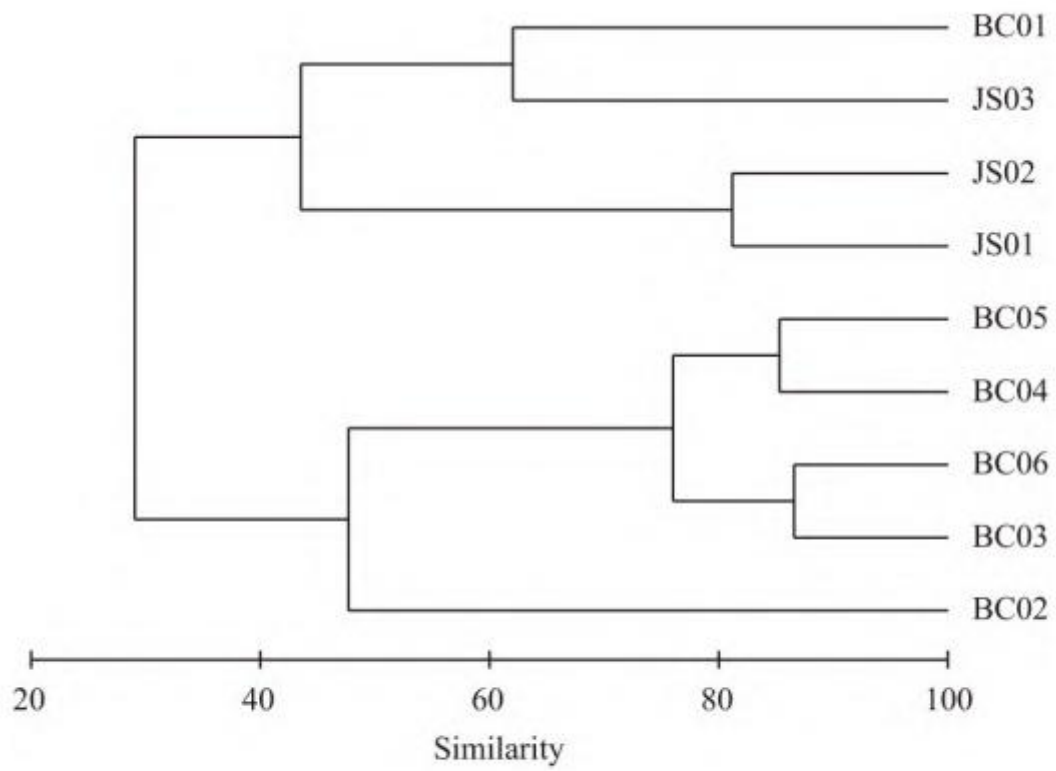


图4 9个采样点鱼类 Cluster 聚类图

Fig. 4 Cluster analysis of fishes at 9 sampling sections

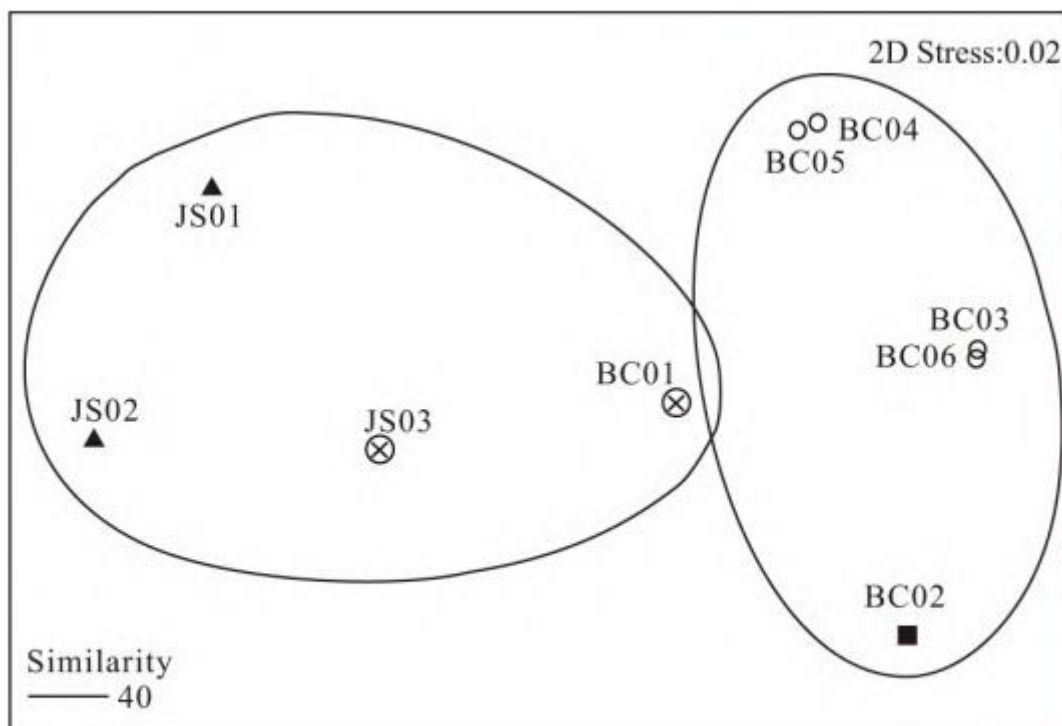


图 5 9 个采样点鱼类非度量多维尺度分析(NMDS) 图

Fig. 5 NMDS analysis of fishes at 9 sampling sections

表 3 造成巴塘水电站坝下干流和支流巴楚河区域鱼类群落组 I 和组 II 差异的主要种类组成及其平均差异度

物种	组 I 丰度	组 II 丰度	丰度变化	平均差异度	贡献率 (%)	累计贡献率 (%)
短须裂腹鱼	6.27	0.00	减少	17.08	24.06	24.06
软刺裸裂尻鱼	1.70	6.41	增加	13.97	19.69	43.75
细尾高原鳅	2.25	5.37	增加	9.76	13.75	57.50
四川裂腹鱼	3.31	0.34	减少	9.32	13.13	70.63
戴氏山鳅	1.08	2.81	增加	6.96	10.80	81.43

3 讨论

3.1 各采样点鱼类种类组成对比分析

本次调查中共监测到鱼类 11 种, 其中外来种 3 种, 土著种 8 种, 与历史上该调查区域分布的 10 种鱼类稍有差异^[8,9]。本次调查中, 未发现青石爬鮡(*Chimarrichthys davidi*)和黄石爬鮡(*Chimarrichthys kishinouyei*), 可能原因之一是这两种鱼类数量原本就极少, 在 2016 年对干流区域进行的调查中黄石爬鮡占渔获物比例不足 1%, 而青石爬鮡未采集到, 且该江段渔民已多年未捕到青石爬鮡^[9]; 另外, 可能与巴塘水电站的建设运行使坝下流速减缓, 导致适应急流生活的鮡类生存空间萎缩, 资源量显著下降有关。裂腹鱼属与刘睿等^[9]的报道一致, 三种鱼类均有一定渔获量, 但本次调查中在支流巴楚河未调查到四川省重点保护物种长丝裂腹鱼, 可能与本文调查时长丝裂腹鱼已完成产卵有关, 无须再上溯之流速湍急的支流有关; 而长丝裂腹鱼在干流离汇口最近的一个采样点 JS01 也未发现, 可能与此处由于采砂等人类活动影响导致生境破坏较严重有关^[8]。

相较于本区域历史种类, 本次调查中多了 3 种外来种, 这可能属于“水坝入侵者”^[22], 即大型水坝通过蓄水改变了局域水文条件, 能够促进外来水生生物对蓄水区的成功入侵, 增加蓄水区上游河段的被入侵风险。国内其他水库运行长时间后也出现外来鱼类种类、数量等增加的现象^[23]。本研究中, 巴塘水电站下游为正在建设中的苏洼龙水电站, 其库尾距巴塘坝址仅 12 km, 因此本次调查到的 3 种外来物种可能与苏洼龙水电站蓄水导致巴塘坝下河段及支流巴楚河汇口处外来物种的出现有关。

3.2 鱼类群落结构分析

关于群落构建机制, 目前存在着中性构建理论和生态位理论(包括竞争排斥学说和环境过滤学说)等, 影响鱼类群落结构变化的因素较多, 如可利用资源的数量、环境异质性、外界干扰作用等都会直接影响群落动态^[24]。在资源稀缺的环境中, 竞争排斥作用对群落的影响超过环境过滤; 相反, 在环境异质性高的生境中, 一般环境过滤机制对群落物种的分布作用占主导^[25, 26]。本研究中对鱼类群落结构分析显示, 在 80% 的相似性水平上, BC04 和 BC05 聚为一支, BC03 和 BC06 聚为一支, 其中, BC04 和 BC05 均分布于支流库区, 即纳扎西库区和雅哇库区, 这两个采样点生境、水文条件等比较类似, BC03 和 BC06, 分别位于纳扎西坝下和拉拉山坝下, 水文条件也比较相似, 也许也是这两个点鱼类群落结构相似度高的原因。库区和坝下生境差异较大, 环境异质性高, 因此, 库区和坝下群落相似性低, 说明在本次调查区域, 环境过滤作用对鱼类群落结构的影响更大。且有研究表明, 河道治理^[27]、水利建设^[28, 29]等人类活动^[30], 改变了局域栖息地条件和水流流态, 从而改变河流中鱼类等水生生物类群的纵向梯度格局, 如 Ward 和 Stanford 在河流连续统概念的基础上, 基于河流生态系统中普遍存在的人为干扰(如水利建设)进一步提出了河流“序列不连续体概念(Serial Discontinuity Concept)”, 该概念较为详尽地描述了人类活动对河流中的环境因素与生物成分及其生态过程的影响^[31]。此外, 水利建设也引起了栖息地同质化现象, 即降低了环境异质性, 正如牛红玉等^[32]提出的外界干扰(本研究中的大坝修建)等也作为一种环境过滤器, 对群落结构产生着影响, 由此造成河流区域鱼类区系的同质化^[33, 34], 这也解释了支流巴楚河 2 个坝下群体(纳扎西坝下和拉拉山坝下)聚成一类, 2 个库区群体(纳扎西库区和拉拉山库区)聚成一类的现象。

在 40% 相似性水平上, 支流巴楚河除汇口采样点 BC01 外, 其他 5 个采样点聚成一类, 巴楚河汇口采样点 BC01 与干流鱼类聚在一起, 在此采样点采集到了大量短须裂腹鱼, 结合裂腹鱼属溯流产卵习性^[10], 推测巴楚河汇口往上一段距离可能是裂腹鱼属鱼类溯流繁殖产卵场所, 在 BC02 也发现了四川裂腹鱼。干支流鱼类群落结构的差异, 与干支流优势种类差异较大相一致, 干流主要以裂腹鱼属为主, 支流的优势种为软刺裸裂尻鱼和细尾高原鳅, 为小型鱼类, 这也与表 3 所示结果一致, 造成干支流差别的主要原因是裂腹鱼属鱼类在支流的减少及软刺裸裂尻鱼、细尾高原鳅和戴氏山鳅等在支流的增加, 此种情况可能是由干支流生境差异较大所致, 如表 1 显示的干支流各断面河流宽度差异较大, 干流 3 个断面河段均为 100 m 以上, 而支流巴楚河断面河宽为 23~82 m^[10]。河流规模、流量、流速、底质类型及饵料生物种类和生物量差异等也是影响河流优势种的一个原因^[35, 36, 37, 38]。

3.3 巴塘水电站鱼类保护建议

本次调查在纳扎西电站往上未发现裂腹鱼属鱼类, 但并不能说明历史上没有裂腹鱼属存在, 可能是电站阻隔了裂腹鱼属鱼类的生殖和越冬洄游, 若能恢复拉拉山电站以下的连通性, 也许会延长裂腹鱼属鱼类的洄游河段, 扩大裂腹鱼属鱼类的种群规

模,更利于裂腹鱼属鱼类的保护。

在调查过程中发现的汇口处及干流部分区域存在采砂及砂石堆放等人类活动导致生境破坏行为,建议采取如下措施进行修复:通过移除堆放的弃渣,铺设砂砾石对受到破坏的底质环境进行修复,并在修复区域表层铺设天然河沙供鱼类筑巢,同时运用防冲刷工程手段保障该区域的稳定性;规范和控制栖息地保护河段的砂石开采活动,在重要鱼类产卵场河段设置禁采区。

对于本次调查中未发现的鮡类,为急流型鱼类,而巴塘水电站的建设运行导致坝下流速减小,可能此处生境已不再适宜于急流型鱼类生存,因此建议采取人工繁殖等保护措施,通过在适宜区域进行放流以维持种群延续。

参考文献

[1] 中电传媒能源情报研究中心.中国能源大数据报告(2021)[R].2021.CEC media Energy Information Research Center.China energy big data report (2021)[R].2021.

[2] LIERMANN C R,NILSSON C,ROBERTSON J,et al.Implications of dam obstruction for global freshwater fish diversity[J].BioScience,2012,62(6):539-548.

[3] 常剑波,陈永柏,高勇,等.水利水电工程对鱼类的影响及减缓对策.水利水电开发项目生态环境保护研究与实践[M].北京:中国环境科学出版社,2006.CHANG J Q,CHEN Y B,GAO Y,et al.Impacts of water resources and hydropower projects on fishes and mitigating strategies.Research and practice of ecological protection for water resource & hydropower development projects[M].Beijing:China Environmental Science Press,2006.

[4] 李婷,唐磊,王丽,等.水电开发对鱼类种群分布及生态类型变化的影响——以溪洛渡至向家坝河段为例[J].生态学报,2020,40(4):1473-1485.LI T,TANG L,WANG L,et al.Distribution characteristics and ecological types changes in fish communities under hydropower development from Xiluodu to Xiangjiaba reach[J].Acta Ecologica Sinica,2020,40(4):1473-1485.

[5] 熊美华,邵科,史方,等.蓄水运行时长对鱼类群落结构及生态类型的影响——以乌江下游银盘电站为例[J/OL].水生态学杂志,2021,<https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202106220196>.XIONG M H,SHAO K,SHI F,et al.Impact of impounding operation duration of Yinpan Hydropower Station on the Wujiang River on the fish community structure and ecological types[J/OL].Journal of Hydroecology,2021,<https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202106220196>.

[6] 邵科,杨志,唐会元,等.观音岩水电站蓄水前后金沙江攀枝花江段鱼类群落结构及变化特征[J].长江流域资源与环境,2020,29(11):2417-2426.SHAO K,YANG Z,TANG H Y,et al.Changes of fish community structures in Panzhihua section of the Jinsha river before and after impoundment of the Guanyinyan Hydropower Station[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(11):2417-2426.

[7] 骆辉煌,李倩,李翀.金沙江下游梯级开发对长江上游保护区鱼类繁殖的水温影响[J].中国水利水电科学研究院学报,2012,10(4):256-259,266.LUO H H,LI Q,LI C.The impact of water temperature during the fish reproduction in the upper Yangtze River due to the cascade development in the lower Jinsha River[J].Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2012,10(4):256-259,266.

[8] 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司.金沙江上游巴塘水电站环境影响报告书[R].2016.Power China

Northwest Engineering Corporation Limited. Environmental impact report of Batang hydropower station in the upper reaches of Jinsha River[R]. 2016.

[9] 刘睿, 孙莹. 水利水电开发中支流鱼类栖息地保护模式研究[J]. 环境与发展, 2017, 211-213. LIU R, SUN Y. Study on the habitat protection model of tributary fish in hydropower development[J]. Environment and development, 2017, 211-213.

[10] 郭延蜀, 孙治宇, 何兴恒, 等. 四川鱼类原色图志(上下册)[M]. 北京: 科学出版社, 2021. GUO Y S, SUN Z Y, HE X H, et al. Colored atlas of fishes in Sichuan (Volume I, II) [M]. Beijing: Science Press, 2021.

[11] 张春光, 杨君兴, 赵亚辉. 金沙江流域鱼类[M]. 北京: 科学出版社, 2019. ZHANG C G, YANG J X, ZHAO Y H. Fishes in the Jinsha Jiang river basin, the upper reaches of the Yangtze River, China[M]. Beijing: Science Press, 2019.

[12] 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等. 中国脊椎动物红色名录[J]. 生物多样性, 2016, 24(5):500-551. JIANG Z G, JIANG J P, WANG Y Z, et al. Red list of China's vertebrates[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(5):500-551.

[13] 乐佩琪, 等. 中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(下卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2000. YUE P Q, et al. Fauna sinica (Osteichthyes: Cypriniformes III) [M]. Beijing: Science Press, 2000.

[14] 陈宜瑜, 等. 中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(中卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1998. CHEN Y Y, et al. Fauna sinica (Osteichthyes: Cypriniformes II) [M]. Beijing: Science Press, 1998.

[15] 丁瑞华. 四川鱼类志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994. DING R H. The fishes of Sichuan, China[M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology, 1994.

[16] SHANNON C E. A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, 1948, 27(4):623-656.

[17] MARGALEF R. Information theory in ecology[J]. International Journal of General System, 1958, 3(1):36-71.

[18] PIELOU E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 10:370-383.

[19] LOZUPONE C, KNIGHT R. UniFrac: A new phylogenetic method for comparing microbial communities[J]. Applied and environmental microbiology, 2005, 71(12):8228-35.

[20] CLARKE K R, WARWICK R M. Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation (2nd Edition) [M]. UK: PRIMER-E Ltd, Plymouth Marine Laboratory, 2001.

[21] KRUSE M, TAYLOR M, MUHANDO C A, et al. Lunar, diel, and tidal changes in fish assemblages in an East African marine reserve[J]. Regional Studies in Marine Science, 2016, 3:49-57.

[22] JOHNSON P T J, OLDEN J D, ZANDEN M J V. Dam invaders: impoundments facilitate biological invasions into freshwaters[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2008, 6(7):357-363.

-
- [23] 王晓臣, 杨兴中, 邢娟娟, 等. 汉江喜河库区形成对鱼类群落结构的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4):932-937. WANG X C, YANG X Z, XING J J, et al. Effects of Xihe reservoir construction on fish assemblages in Hanjiang River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(4):932-937.
- [24] 史赞荣, 晁敏, 沈新强. 主导长江口鱼类群落物种时间共存格局的环境过滤机制研究[J]. 应用海洋学学报, 2018, 37(4):525-533. SHI Y R, CHAO M, SHEN X Q. Environmental filtering mechanism controlling the species temporal coexistence pattern for fish communities in Changjiang Estuary[J]. Journal of Applied Oceanography, 2018, 37(4):525-533.
- [25] 牛克昌, 刘恽宁, 沈泽昊, 等. 群落构建的中性理论和生态位理论[J]. 生物多样性, 2009, 17(6):579-293. NIU K C, LIU Y N, SHEN Z H, et al. Community assembly: the relative importance of neutral theory and niche theory[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6):579-593.
- [26] PIANKA E. Niche overlap and diffuse competition[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1974, 71:2141-2145.
- [27] GEHRKE P C, BROWN P, SCHILLER C B, et al. River regulation and fish communities in the Murray-Darling river system, Australia[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1995, 11(3-4):363-375.
- [28] MARCH J G, BENSTEAD J P, PRINGLE C M, et al. Damming tropical island streams: problems, solutions, and alternatives[J]. BioScience, 2003, 53(11):1069-1078.
- [29] ROSENBERG A, BIGFORD T E, LEATHERY S, et al. Ecosystem approaches to fishery management through essential fish habitat[J]. Bulletin of Marine Science, 2000, 66(3):535-542.
- [30] 储玲, 王文剑, 闫莉莉, 等. 黄山陈村水库上游河源溪流的鱼类群落及其纵向梯度格局[J]. 生态学报, 2015, 35(3):900-910. CHU L, WANG W J, YAN L L, et al. Fish assemblages and longitudinal patterns in the headwater streams of the Chencun Reservoir in the Huangshan Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3):900-910.
- [31] WARD J V, STANFORD J A. The serial discontinuity concept of lotic ecosystems // Fontaine T D, Bartell S M (Eds). Dynamics of Lotic Ecosystems. Ann Arbor: Ann Arbor Science, 1983:29-42.
- [32] 牛红玉, 王铮峰, 练璐愉, 等. 群落构建研究的新进展: 进化和生态相结合的群落谱系结构研究[J]. 生物多样性, 2011, 19(3):275-283. NIU H Y, WANG Z F, LIAN J Y, et al. New progress in community assembly: community phylogenetic structure combining evolution and ecology[J]. Biodiversity Science, 2011, 19(3):275-283.
- [33] RAHEL F J. Homogenization of freshwater faunas[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33:291-315.
- [34] SCOTT M C, HELFMAN G S. Native Invasions, homogenization, and the mismeasure of integrity of fish assemblages[J]. Fisheries, 2001, 26(11):6-15.
- [35] ALLAN J D, CASTILLO M M. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters (2nd

Edition) [M]. Dordrecht: Springer Press, 2007.

[36] OBERDORFF T, GUILBERT E, LUCCHETTA J C. Patterns of fish species richness in the Seine River basin, France [J]. *Hydrobiologia*, 1993, 259(3): 157-167.

[37] SCHLOSSER I J. Fish community structure and function along two habitat gradients in a headwater stream [J]. *Ecological Monographs*, 1982, 52(4): 395-414.

[38] VANNOTE R L, MINSHALL G W, CUMMINS K W, et al. The river continuum concept [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37(1): 130-137.