

基于鱼类生物完整性的金沙江黑水河 健康评估及修复模式探讨

郜星辰^{1,2} 张琪^{1,2} 苏巍^{1,2} 李博^{1,2} 姜伟^{1,2} 杨少荣³ 唐锡良³¹

(1. 中国长江三峡集团公司中华鲟研究所, 湖北 宜昌 443100;

2. 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443100;

3. 中国三峡建设管理有限公司, 四川 成都 610041)

【摘要】: 为评估金沙江下游重要替代生境黑水河受人为干扰的实际情况, 以 2016~2018 年金沙江下游黑水河鱼类资源连续调查数据, 分析了渔获物种群结构及多样性特征, 构建了基于鱼类生物完整性指数的评价体系。研究表明: 群落中存在红尾副鳅 (IRI=6370)、横纹南鳅 (IRI=2418)、短须裂腹鱼 (IRI=1285)、前鳍高原鳅 (IRI=788) 和贝氏高原鳅 (IRI=715) 等 9 种优势种, 特有物种占比较高, 华西区和华南区鱼类区系存在度较高。确定了鱼类总种类数、鲤科鱼类物种数百分比、植食性鱼类个体百分比、杂食性鱼类个体百分比等 4 个主评指标; 黑水河生物完整性保存较差, 河流中下游及河口江段生态健康状况优于其他江段, 在河流内部源头和中上游完整性指数处于差等级。评价结论与人工采砂、过度捕捞、引水式水电开发等实际人为干扰相吻合, 以鱼类为指示物种实施了人工增殖放流、流域禁渔、拆除老木闸坝、河道内栖息地改善、下泄流量监控等一系列水生态系统恢复和保护实践, 长期开展监测与评估可验证黑水河鱼类栖息地生态修复工程的适应性效果。

【关键词】: 黑水河 生物完整性 鱼类 生态修复

【中图分类号】: Q143 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)01-0104-09

Karr (1981) 以鱼类为研究对象^[1], 建立了采用生物完整性指数 (Index of Biological Integrity, IBI) 评价河流健康状况的方法^[2]。IBI 评价是通过对生态系统中某一类群落的物种组成、多样性及功能结构方面进行分析, 将其与相应的标准体系比较, 然后根据分类指标评出选定区域的优劣^[3]。由于评价指标的全面、指标筛选科学以及赋值评分合理等优势, 该方法评价对象从冷水性溪流扩展到暖水性溪流、湖泊、河流、河口、湿地等不同类型的水体, 指示物种也扩展到底栖动物、藻类和浮游生物等生物类群^[4]。黑水河是金沙江下游干流重要替代生境和优先保护支流, 黑水河鱼类栖息地生态修复工程是国务院批复的《长江经济带生态环境保护规划》中明确的生态修复示范项目, 也是金沙江下游水电站梯级开发生态保护的重要举措^[5]。构建科学系统的河流健康评估体系, 对于制定科学合理的生态修复策略至关重要, 也可为判断修复实践效果提供参考依据。作为保护目标物种, 鱼类处于

作者简介: 郜星辰 (1989~), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为渔业资源及保护生物学. E-mail: 13039829682@126.com; 姜伟 E-mail: 106635291@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划“典型脆弱生态修复与保护研究”重点专项 (2016YFC0502210); 农业农村部长江流域渔政监督管理办公室“长江生物完整性指数指标创建及运行评估”专项 (17200307); 中国长江三峡集团有限公司“乌东德水库人工鱼巢设计与建设”项目 (JG/18001B); 国家自然科学基金 (51779016)

水生态系统食物链的最顶端，在水体生态系统中分布范围广、营养等级高、对水质变化反应灵敏，被认为最适用于评估河流健康状况^[4]。由于各个地区鱼类区系和河流自然状况不同，评价体系也存在较大差异，因此应用不同评价区域时需要因地制宜。但目前黑水河仅开展了鱼类群落结构、资源现状和河貌模拟等工作^[5,6,7]，仍未开展完善且有参考价值的河流健康评价研究。本文旨在分析黑水河渔获物结构、区系特点及珍稀特有鱼类分布，积累区域鱼类资源保护生物学资料。构建符合区域性特征的生物完整性评价体系并应用，评估金沙江下游重要替代生境黑水河受人为干扰的实际情况，以此开展科学的生态修复和长期河流生态监测。

1 研究区概况

黑水河属金沙江左岸正源性一级支流，位于四川省凉山彝族自治州境内，发源于昭觉县玛果梁子，自北向南流经昭觉、普格、宁南，于宁南县葫芦口注入金沙江；流域面积为 3591km²，全长 173.0km，天然落差 1931m，平均比降 11.05%，河口处多年平均流量为 80m³/s、径流量 25.25 亿 m³^[6]。黑水河干流已建有 4 座引水式电站，从上至下为苏家湾、公德房、松新和老木河。

2 研究方法

2.1 评价河段的选定与数据采集

根据受人为影响类型和强度的不同^[8]，并结合可操作性和安全性原则，确定调查断面分别为黑水河河口、葫芦口、谢家坝、765 回水点、宁南水文站、大花地村、幸福乡、磨槽湾、罗家河、水塘子、冷家湾、功德房坝上和苏家湾坝上等 13 个观测点作为本研究的评价对象(图 1)。本研究把采样点按从源头到金沙江汇口的顺序，分别归为上游(苏家湾坝上、公德房坝上)、中上游(冷家湾、水塘子、罗家河坝、磨槽湾)、中游(老木河电厂尾水、大花地村)、中下游(水文站、765 回水点、谢家坝)和下游(葫芦口，黑水河河口)等 5 个河段。2016 年 5 月 13 日至 5 月 28 日、2017 年 5 月 17 日至 6 月 2 日、10 月 29 日至 11 月 8 日、2018 年 4 月 20 日至 5 月 12 日、10 月 20 日至 11 月 9 日在调查河流的上、中、下游雇佣当地渔民，选取适合各河段的最高效捕捞工具采集鱼类，黑水河均为非涉水而过河流，在调查河段中鱼群经常出没区域设置地笼采样，同时根据渔民经验判断设置网目为 15 和 50mm 两类粘网。记录各观测点位置、鱼类物种数、个体数及鱼类体长体重，并通过市场购买和访问调查的方式作为种类调查的补充。调查中难以及时准确鉴定的样本用 95% 的酒精固定后带回，参考四川鱼类志、中国动物志：硬骨鱼纲鲤形目鉴定^[9,10]。

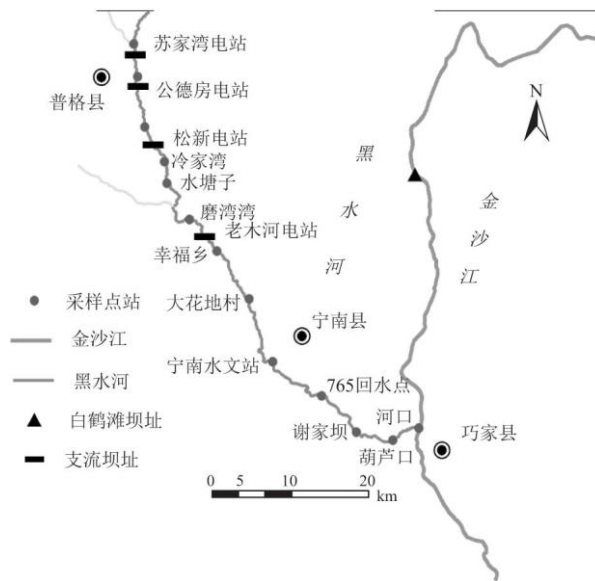


图 1 采样点分布示意图

2.2 水体理化测定与生境质量评估

采用便携式多参数水质测量仪(YSI-ProPlus)对水温(WT)、电导率(EC)、pH、溶解氧(DO)进行现场测定,水质快速分析仪(JY-TDS-1)现场测定溶解性固体总量(TDS)。同时现场采集2L水样,在实验室内测定总氮(TN)、总磷(TP)、5日生化需氧量(BOD₅)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮(NH₃-N)等指标。水样采集、保存和室内测定依据我国《水和废水监测分析方法》(第四版)^[11]。栖息地质量状况参照定性栖息地评估指数(QHEI)的评价标准,根据底质、生境复杂性、速度和深度结合性、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度和河岸土地利用类型等10项指标对采样点进行评分,每个指标20分,满分200分。各指标分为好(16~20分)、较好(11~15分)、一般(6~10分)、差(0~5分)^[12],分值通过现场调查,目测打分的方法获取分值。累计求和的方式计算栖息地综合指数(QHEI),参照Park等^[12]对栖息地质量的分级方法。

2.3 数据分析

2.3.1 相对重要性指数

综合分析渔获资源数量百分比、重量百分比和出现频率,判断其在种群中的重要程度,以IRI>100的作为优势种。计算公式如下:种类相对重要性指数^[13]: $IRI=(N+W) \cdot F$,式中,IRI为种类相对重要性指数,N为某种鱼占总尾数的百分比,W为某种鱼重量占总重量的百分比,F为出现频率。

2.3.2 鱼类生物完整性评价

2.3.2.1 候选指标的设置及设置原则

初选指标设置遵循全面性和适用性的原则,基于鱼类的群落组成、耐污类型、营养结构及生境质量等生物特征,归类为种类组成和丰度、耐受性、营养结构、繁殖共位群、鱼类数量和健康状况等5个项目层指标,在其下设置了对环境变化较为敏感的22个初选指标。本研究敏感型鱼类的确定参照邵星晨等^[4]和Yue等^[14]等资料;单位努力捕捞量所指的是在所调查河段使用最高效捕捞工具捕捞时,由单个捕捞工具在单位时间内(1h)的渔获物个体数量。

2.3.2.2 参照点的确定

在目前人为活动影响下,不受干扰的河流几乎不存在。目前黑水河所记载的鱼类资源历史数据,缺乏不同江段的相关信息。因此尽可能以有历史数据的为参照点,如不能使用历史数据的指标,将选择受干扰较小的河段作为参照点。基于其余河流参照点标准化筛选方法^[14],选择满足条件的采样点(大花地村、水文站、765回水点)作为参照点。

表1 参照点的选择标准

指标	参照点选择依据
土地利用	500m内无农业用地、公路及堤坝,河岸两侧无耕作土壤
水质状况	pH6~9;溶解氧≥6mg/L;氨氮≤0.5mg/L
栖息地环境质量	QHEI≥150

2.3.2.3 评价指标筛选

所有指标按照以下 3 个步骤进行筛选：(1)分布范围检验，即超过 95%的采样点为零值或分布范围很窄，则该候选指标不适用于构建 IBI 并予以删除；(2)判别能力分析，比较参照点位和观测点在 25%~75%分位数范围即箱体 IQ (Interquartile ranges) 的重叠情况，只有 $IQ \geq 2$ 的参数才能进一步分析；(3)Pearson 相关性分析，检验指标间的独立性， $|R| < 0.9$ 候选指标才能通过筛选^[15]。

2.3.2.4 赋值与评分

将河段中最好的历史数据作为期望值，用以制定赋值标准。无法获取历史数据，以参照点数据作为期望值。指标赋值参照 Karr 等^[2]将期望值与实际测得的最低值范围分为 3 等份，划分为 3 个评分区域，按照各观测点落在不同区域从好到差依次记为 5 分、3 分和 1 分；采用 Moyle 等^[16]的 IBI 总分计算方法，即：IBI 总分=各指标总分/指标个数 $\times 12$ 。基于鱼类完整性划分河流的 6 个等级：无鱼(0)，极差(12~22)，差(28~34)，一般(40~44)，好(48~52)，极好(58~60)。若 IBI 总分介于两个评价等级的分值之间，则该河流的鱼类完整性评价为处于两个评价等级之间的水平。

3 研究结果

3.1 鱼类生物多样性

3.1.1 渔获物组成及优势种

调查共采集鱼类 29729 尾，共计 115572.7g，隶属于 3 目 8 科 21 属 39 种。其中鲤形目 29 种(总类数的 74.4%)，鲇形目鱼类 9 种(总种数的 23.1%)，鲈形目共 1 种(总种数的 2.5%)。在科水平上，鲤科鱼类 16 种(总种数的 41.0%)，鳅科鱼类 9 种(总种数的 23.1%)，平鳍鳅科 4 种，鲿科 5 种，鮡科 2 种，鲇科 1 种，钝头鮠科 1 种，鰕虎鱼科 1 种。长江上游特有鱼类 11 种(总种数的 28.2%)，即戴氏南鳅、前鳍高原鳅、短体副鳅、长薄鳅、钝吻棒花鱼、短须裂腹鱼、昆明裂腹鱼、短身金沙鳅、中华金沙鳅、长鳍吻鮡和圆口铜鱼。渔获物尾数最多的是红尾副鳅，共捕获 10311 尾，占渔获物总尾数的 34.2%。其次是贝氏高原鳅、横纹南鳅和前鳍高原鳅，分别占渔获物总尾数的 26.8%、13.0%、9.9%和 5.4%。红尾副鳅、贝氏高原鳅和横纹南鳅尾数、重量都排在前 3 位。

3.1.2 相对重要指数

以相对重要指数 $IRI > 100$ 为优势种的划分标准(王雪辉等，2012)，黑水河共有 9 种鱼类为优势种(表 3)。排前 3 位的分别是红尾副鳅、横纹南鳅和短须裂腹鱼 IRI 均都大于 1000，其中红尾副鳅的 IRI 值最高(6370)，是占主导性地位的优势种。

表 3 黑水河前 10 种相对重要性指数

序号	物种	尾数	尾数百分比(%)	重量(g)	重量百分比(%)	出现频率(%)	相对重要性指数 IRI
1	红尾副鳅	10311	34.22	53353.3	44.31	81	6370
2	横纹南鳅	3913	12.98	14397.6	11.96	97	2418
3	短须裂腹鱼	1292	4.28	12675.4	10.53	87	1284
4	前鳍高原鳅	2990	9.92	6860.8	5.70	50	788

5	贝氏高原鳅	8082	26.82	15130.0	12.57	18	715
6	福建纹胸鮡	423	1.39	2792.8	2.32	60	221
7	中华金沙鳅	621	2.06	1806.8	1.50	37	131
8	戴氏南鳅	1633	5.41	2405.0	2.00	17	128
9	白缘鳅	222	0.73	2753.8	2.29	42	126
10	鲫	50	0.17	3397.2	2.82	33	99

3.2 鱼类生物完整性评价

3.2.1 初选指标的应用

结合本次鱼类资源调查的实际情况，参考目前 IBI 指标体系研究状况，选择 5 个项目层下的对环境变化较为敏感的 22 个初选指标(表 4)。

3.2.2 指数的筛选

M7、M9、M15、M19 等指标在各评价河流(河段)之间的差异均小于 10%，应当删除。外表病变或畸变个体的数量(M22)这一指标在各评价河流(河段)的调查结果均小于 5，应当删除。鉴别能力筛选删除的指标是 M2、M4-6、M8、M10-14、M18 和 M20(图 2)。M1 和 M21 间具有相关性，其余|R|值均小于 0.9(表 5)。考虑到渔获物鱼类总类数(M1)在 IBI 研究中的应用更易于量化且应用广泛，最终确定了 M1、M3、M16、M17 等 4 个指标以建立 IBI 指标体系。

3.2.3 综合评价结果

4 个评价指标的调查结果、评分标准和河段的鱼类完整性分值见表 6。结果表明：黑水河鱼类完整性整体表现为较差，多数指标均与期望值存在较大差距，从上游至河口呈现逐渐变好的趋势。其中中下游江段环境质量表现为好，中游、下游为一般。上游、中上游为差，其中苏家湾生物完整性为极差。

表 4 鱼类完整性初选指标及调查结果

项目层	参数	指标层	调查结果				
			上游	中上游	中游	中下游	下游
种类组成和丰度	M1	渔获物鱼类总种类数	10	11	17	21	16
	M2	总的种类数占期望值的百分比(%)	47.6	52.4	81.0	100	76.2
	M3	鲤科鱼类物种数百分比(%)	40	45.5	40	66.7	50.6
	M4	鳅科鱼类物种数百分比(%)	50	45.5	35.3	23.9	43.3

	M5	平鳍鳅科鱼类物种数百分比 (%)	10	0	11.8	9.5	12.5
	M6	鲮科鱼类物种数百分比 (%)	10	0	0	19	12.5
	M7	裂腹鱼亚科鱼类物种数百分比 (%)	20	18.2	17.6	14.3	12.5
	M8	条鳅亚科鱼类物种数百分比 (%)	50	45.5	29.4	28.6	25
	M9	上层鱼类物种数百分比 (%)	10	9	0	4.8	0
	M10	中上层鱼类物种数百分比 (%)	0	18.2	5.9	14.3	0
	M11	中下层鱼类物种数百分比 (%)	30	36.4	23.5	38.1	37.5
	M12	底层鱼类物种数百分比 (%)	60	36.4	70.6	42.8	62.5
耐受性	M13	耐受性强鱼类个体百分比 (%)	86.9	45.1	91.8	72.8	31.2
	M14	敏感型鱼类个体百分比 (%)	13.1	54.9	8.2	27.2	68.8
营养结构	M15	鱼食性鱼类个体百分比 (%)	0	0	0	0.4	0
	M16	植食性鱼类个体百分比 (%)	40	35	35.1	20.9	31.3
	M17	杂食性鱼类个体百分比 (%)	50	33	32.3	7.4	50
	M18	底栖动物食性鱼类个体百分比 (%)	10	32	32.6	71.3	18.7
繁殖共位群	M19	产粘性卵鱼类物种数百分比 (%)	90	90.9	94.1	85.7	93.8
	M20	产漂流性卵鱼类物种数百分比 (%)	0	0	5.9	14.3	6.2
健康状况	M21	单位捕捞量	60	71	137	178	143
	M22	外表病变或畸变个体的数量	1	4	0	0	3

4 讨论

4.1 黑水河鱼类多样性现状

4.1.1 区系组成

黑水河地理位置处于金沙江下游区域，华西区和华南区鱼类区系存在度较高，代表了典型的金沙江中下游区系特征。其中华西区代表性的有裂腹鱼亚科、条鳅亚科等鱼类，华南区代表种类为鲇、鮡、鳅和平鳍鳅科等鱼类^[17]，区系特点与牛栏江鱼类区系研究结论一致。张春霖^[18]认为中国的淡水鱼类主要由应分为黑龙江、西北高原、江河平原、东洋区和怒澜区等5个区系复合体组成，其中黑水河属于怒澜区，东洋区和西北高原区鱼类的混杂是本区鱼类区系的特点。其中野鲮亚科、平鳍鳅科、鲮科、鲇科等种类与东洋区相同；而裂腹鱼亚科、条鳅亚科等种类与西北高原区相同。

4.1.2 鱼类优势种和生态类型

渔获物中鲤形目鱼类最多(总种数的 74.4%), 鲇形目鱼类次之(总种数的 23.1%)。在科水平上, 其中鲤科鱼类种类最多(总种数的 41.0%), 鳅科鱼类次之(总种数的 23.1%)。相对重要性该指数结合个体数、体重组成和出现频率等信息, 已广泛应用于鱼类摄食生态和群落优势种成分的研究中。特定区域鱼类的优势物种与不同生态类群鱼类对当地的生境条件适应有关。黑水河水深较浅, “V”型沟谷较多, 适宜分布海拔较高、适应流水环境的小型鱼类栖息。IRI 排名前 3 位的红尾副鳅、横纹南鳅和短须裂腹鱼均为喜流水生境的定居性种类, 与该水域鱼类水流偏好功能群的研究结果相一致^[5]。渔获物中红尾副鳅、横纹南鳅、短须裂腹鱼、前鳍高原鳅、福建纹胸鮡、中华金沙鳅、戴氏南鳅、白缘鳅和贝氏高原鳅等 9 种鱼类 IRI>100, 优势种主要以杂食偏兼植食性种类为主。推测黑水河河道水流湍急, 着生藻类较为丰富而浮游动植物缺乏, 可保证典型的山地溪流鱼类完整的食物链需求, 从而可正常生活并逐渐演变为优势种群。水体生境的剧烈变化会敏感鱼类的影响较大, 特别是对食性较窄且不能及时改变食物种类的鱼类受影响最大。这与黑水河调查结果相似, 部分肉食性鱼类在个别清洁河段才可采集到。此外, 渔获物多为产黏沉性卵鱼类, 产漂流性种类中较为少见, 此结论与杨志等^[5]相同。其中黑水河上游及中上游区域无产漂流性卵鱼类, 表明黑水河现有小水电开发已对该区域的鱼类繁殖共位群产生明显影响。研究表明引水式小水电对鱼类群落的影响主要是改变河流生境, 浅滩-深潭交替的生境结构被破坏, 水坝上天然水面显著变宽, 流速明显降低。适应急流生境的产漂流性卵的鱼类无法完成生活史周期, 其中典型的产漂流性卵的鱼类仅在黑水河下游河段完成自然繁殖, 并维持一定的种群规模。

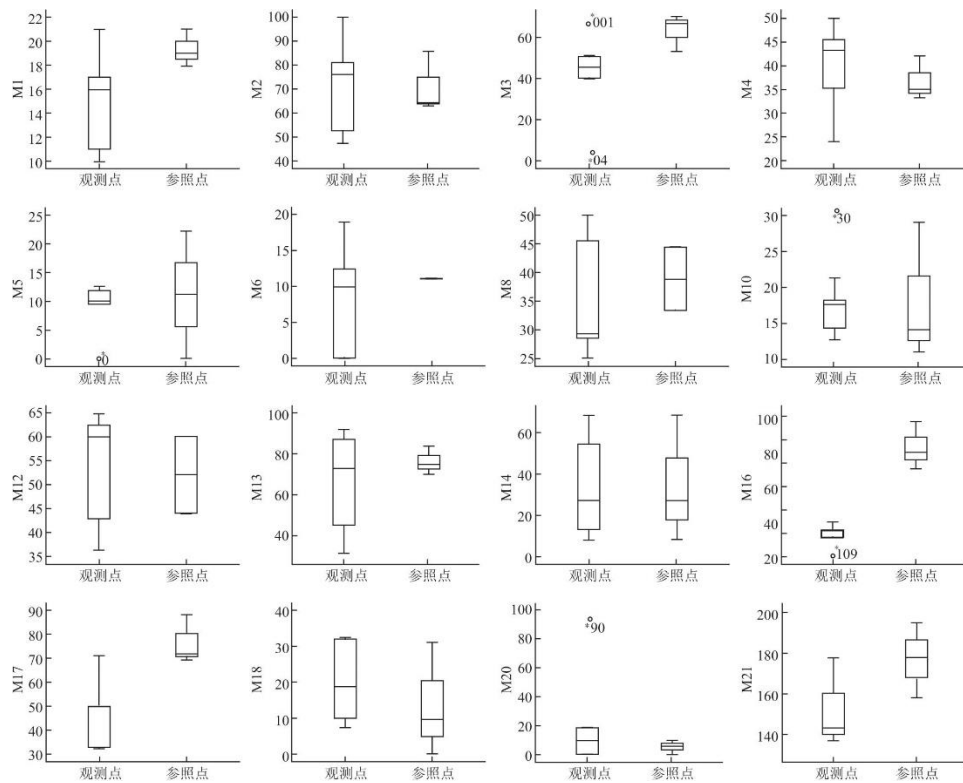


图 2 12 个候选参数在参照点和观测点的箱线图

表 5 5 个候选生物参数间的 Pearson 相关分析结果

参数	M1	M3	M16	M17	M21
M1	1				
M3	0.121 (P=0.68)	1			

M16	-0.872 (P=2.19)	-0.859 (P=0.12)	1		
M17	0.555 (P=1.23)	0.308 (P=3.2)	-0.735 (P=1.44)	1	
M21	0.983* (P=0.03)	0.782 (P=1.98)	-0.836 (P=0.22)	0.519 (P=2.68)	1

注：**表示 P<0.01, *表示 P<0.05.

表 6 鱼类生物完整性的评分

指标	期望值	对干扰响应	赋值标准				得分			
			1	3	5	上游	中上游	中游	中下游	下游
M1	28	下降	<16	16~20	≥20	1	1	3	5	3
M3	53.6	下降	<27	27~53.6	≥53.6	3	3	3	5	3
M16	45	下降	<33	33~45	≥45	3	3	3	3	5
M17	20.9	上升	>60	60~34	≤34	3	3	5	5	3
累计	-	-	-	-	-	10	10	14	18	14
总分	-	-	-	-	-	30	30	42	54	42
等级	-	-	-	-	-	差	差	一般	好	一般

4.1.3 特有物种占比较高

本研究共调查长江上游特有鱼类 11 种(总种数的 28.2%),未发现公开文献记录中的黄石爬鮠和张氏鲮。其中长鳍吻鮠和圆口铜鱼数量较少,仅分布在黑水河下游及河口附近江段,与结论一致^[5]。根据张雄等(2014)研究结论,黑水河特有鱼类数量仅次于牛栏江(14种),远高于鲮鱼河(6种)、龙川江(6种)、西溪河(5种)、普渡河(5种)、西宁河(4种)及其他代表性支流。黑水河是金沙江下游特有鱼类物种最丰富的区域之一,这也是黑水河作为潜在的替代生境,成为生态修复示范项目的基础。鉴于目前长江上游特有鱼类的种群规模逐年缩小的严峻形势^[9,10],该地区鱼类的保护对于金沙江乃至长江流域都有重要的意义。

4.2 黑水河鱼类生物完整性评价分析

4.2.1 参照点选择

为了评价结果更接近真实状态,目前参照点的的设定原则是选择历史记录,或者选择无人干扰的河流原始河段作为参照点位^[19]。此外历史数据还是指标设置、指标筛选及指标赋值的重要依据^[4]。目前黑水河历史资料是对渔业资源状况的笼统记录,各河段归纳及细分的鱼类生物信息较为匮乏^[19],因此本研究选用人类活动干扰最少的样板河段为参照点。由于各区域人类活动干扰程度的差异,应依据河流的自然状况及河道定位而设定适宜的参考状态或参照点。本文以水体理化指标、栖息地评分及土地利用等评价依据,制定了一套系统的定量标准。长期、稳定的水质监测数据将提供可靠的水环境背景,可能会降低参照点错选的概率。

率^[20]。栖息地及生境利用可反映外界干扰对河流生态系统的累积效应，以往大量研究也将其作为区分参照点与观测点的首要标准^[19]。但是栖息地特征及土地利用特征是依据专家经验作为判断的主要标准，不同观测人员存在不同程度的系统误差，在应用时存在一定的系统误差，因此在方法推广时存在一定的局限性^[20]。相对定量的参照点筛选标准可提供一个较为简单的选择方法，在以往的研究中在其他类群及河流中也得到了应用^[20,21]。但该方法的稳定性与可重复性还未得到验证，今后的研究中应补充并细化限制条件，搜集或通过遥感分析周围森林、村庄分布、人口密度等准确数据综合确定干扰程度，制定更加完备的参照点选择标准，从而提高参照点的准确性。本文中大花地村、水文站、765回水点作为河段的参照点，样点分布区域受小水电影响较小，保持着自然的流水生境，是鱼类维持一定数量的种群规模且保证种群的延续的关键栖息地。Ladson 强调河流健康是出于河流管理目的而产生的概念，其基准状态的设定在不同时间尺度上呈现阶段性的变化^[22]。随着金沙江下游干流梯级电站的陆续蓄水完工，白鹤滩水电站蓄水到 825m，部分研究区域将变为永久淹没区和回水变动区^[5]。未来产卵生境面积也可能比当今状态相对缩小，本研究中的参照点将会是通过合理有效的管理调控等可达到的最佳状况。

4.2.2 鱼类生物完整性指数评价状态

本研究运用一定数学手段对候选指标进行筛选，使初选参数由 22 个精简至 4 个。确保了反映的信息彼此相对独立，评价指标对外界干扰足够敏感，进而准确直观地反应生物完整性的变化。黑水河鱼类完整性整体表现为较差，多数指标与期望值存在较大差距。指标表现为非耐受性的种类丧失、数量下降，耐受力强的种类频度增加使营养结构偏斜，性成熟周期短的小型鱼类(如副鳅属和高原鳅属鱼类)逐步成为优势物种。从上游至河口呈现逐渐变好的趋势，其中中下游江段环境质量表现相对较好。上游、中上游大部分观测点鱼类完整性为差，中游、下游为一般。上游江段苏家湾为极差，鱼类资源量、种类下降明显，渔获物个体小型化，耐受性强的杂食性种类增多，推测主要受引水式电站运行影响，梯级开发已造成河流比较严重的破坏。黑水河下游老木河电站坝址至河口段保持自然流水生境，河流生态系统功能较为完善，决定着黑水河作为白鹤滩库区替代生境的作用。根据现场调查黑水河下游修建有多个采砂场^[18,23]，多数河段受采砂活动影响严重。由于河床底质对鱼类的摄食和繁殖有重要意义，因此黑水河下采砂活动对该区域健康状态影响较为严重^[5]。此外实地调查以及渔民走访也发现该区域电捕作业强度较大，被捕获的经济价值较高鱼类多为稚幼鱼，下游河段也面临受过度捕捞的压力。

4.3 黑水河河流生态修复实践

生态现状评价是河流生态修复的重要基础和前提条件，评价可为后续规划和修复提供技术和数据支撑^[12]。基于鱼类 IBI 的黑水河健康状况评价，可根据受损功能、受损程度及可修复性，有针对性对各河段地提出科学合理的修复策略。总结目前国内开展的生态修复技术，依据河流的自然或近自然的修复原则^[24]，从改善河流连通性、生物物种管理、水文调控及河道内栖息地改善等多维度提出了分阶段逐步恢复方案，具体修复工程主要包括(<http://www.sidri.com/index.html>): (1) 实施长江上游特有鱼类放流，补充河段土著鱼类 13500 尾(5800 尾短须裂腹鱼、4700 尾齐口裂腹鱼、3000 尾长薄鳅)。(2) 取拆除老木河闸坝，恢复干流连通河道长度约 61km，恢复河流连通性实现闸坝下游鱼类成功上溯。(3) 通过透水堰、疏浚河道、河床底质改善等河道内栖息地修复手段，改善松新电站减水河段水流条件，有利于鱼类索饵、产卵。(4) 对河道及电站闸坝下泄流量进行实时监控，保证下游减水河段生态流量满足需求，改善下游河道水生生态生境条件。(5) 2020 年 9 月底前实现水域全面禁渔，进一步加大了水生野生动物的保护力度。河流的健康评估作为河流生态系统管理的监测、评估手段和方法，可通过调查分析 IBI 变化识别河流管理策略实施效果，从而改善管理决策，逐步提高管理的适应性以及决策的有效性。修复工程的效果往往不能在短时间内体现，后期应结合长期跟踪监测^[24]，进一步完善河流生态修复理论，充分发挥黑水河生态修复在水电工程支流栖息地保护、河流水电开发与生态保护等方面的示范意义。

参考文献:

[1] XU F L, JRGENSEN S E, TAO S. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health[J]. Ecological Modelling, 1999, 116(1): 77-106.

-
- [2]KARR J R.Assessment of biotic integrity using fish communities[J].Fisheries,1981,6(6):21-27.
- [3]KERANS B,KARR J R.A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley[J].Ecological applications,1994,4(4):768-785.
- [4]郜星晨,章群,韩博平,等.基于鱼类生物完整性指数的广东鉴江流域环境质量评估[J].湖泊科学,2015,27(4):679-685.
- [5]杨志,龚云,董纯,等.黑水河下游鱼类资源现状及其保护措施[J].长江流域资源与环境,2017,26(6):847-855.
- [6]孙嘉宁.白鹤滩水库回水支流黑水河的鱼类生境模拟研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [7]杨志,唐会元,龚云,等.产卵迁徙对金沙江黑水河下游鱼类群聚结构变动的的影响[J].湖泊科学,2018,30(3):753-762.
- [8]黄亮亮,吴志强,蒋科,等.东苕溪鱼类生物完整性评价河流健康体系的构建与应用[J].中国环境科学,2013(7):1280-1289.
- [9]陈宜瑜.中国动物志,硬骨鱼纲,鲤形目(中)[M].北京:科学出版社,1998.
- [10]丁瑞华.四川鱼类志[M].四川:科学技术出版社,1994.
- [11]魏复盛.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [12]PARK H K,CHOI J K,Won K H,et al.Study on the evaluation of ecological health by using fish communities in the Wonju stream,Koreay[J].Korean Journal of Environmental Biolog,2017,35(4):684-693.
- [13]PINKAS L.Food habits study[J].Food habits of albacore bluefin tuna and bonito in California waters Fish Bull,1971,152:1-105.
- [14]YUE P.Osteichthyes:Cypriniformes III[M].Science Press,2000.
- [15]YANG Z,ZHU D,ZHU Q,et al.Development of new fish-based indices of biotic integrity for estimating the effects of cascade reservoirs on fish assemblages in the upper Yangtze River,China[J].Ecological Indicators,2020,119:106860.
- [16]MOYLE P B,RANDALL P J.Evaluating the biotic integrity of watersheds in the Sierra Nevada[J].California. Conservation Biology,1998,12(6):1318-1326.
- [17]王晓爱,陈小勇,杨君兴.中国金沙江一级支流牛栏江的鱼类区系分析[J].动物学研究,2009,30(5):585-592.
- [18]张春霖.中国淡水鱼类的分布[J].地理学报,1954,21(3):279-284.
- [19]余梵冬,顾党恩,佟延南,等.基于鱼类多样性与生物完整性的海南岛南渡江河流健康评价[J].生态学杂志,2018,37(9):171-180.

-
- [20]周莹, 渠晓东, 赵瑞. 河流健康评价中不同标准化方法的应用与比较[J]. 环境科学研究, 2013, 26(4):410-417.
- [21]RAWERJOST C, ZENKER A, BOHMER J. Reference conditions of German stream types analysed and revised with macroinvertebrate fauna[J]. *Limnologica*, 2004, 34(4):390-397.
- [22]HORN A L, RUEDA F J, HÖRMANN G, et al. Implementing river water quality modelling issues in mesoscale watershed models for water policy demands—an overview on current concepts, deficits, and future tasks[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2004.
- [23]RANKIN E T, OHIO E. The qualitative habitat evaluation index[QHEI]:Rationale, methods, and applications[R]. Columbus, OH:Ohio Environmental Protection Agency, 1989:1-4.
- [24]KRONENBERG J, BERGIER T, MALISZEWSKA K. The challenge of innovation diffusion:Nature-based solutions in Poland, Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas[M]. 2016.