

文章编号: 1674-5566(2025)04-0771-15

DOI: 10. 12024/jsou. 20240604571

基于鱼类生物完整性评价梯级水电站对金沙江中游水生态系统健康的影响

魏琨宇¹, 崔磊², 陈浩³, 马思颖¹, 刘玲¹, 万帆³, 何佳¹

(1. 北京师范大学 水科学研究院城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 水电水利规划设计总院, 北京 100120; 3. 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: 为评价梯级水电站对金沙江中游水生态系统健康状况的影响、探索并建立相关评价体系, 分别于2021年12月、2022年4月及7月对金沙江中游干流各梯级水电站库区与库尾段和主要支流进行鱼类资源和水环境因子调查。选择2007年4—5月、2008年3—4月、6—7月的历史调查数据作为参照状态, 对候选指标依次进行分布范围分析、判别能力分析和冗余度分析, 采用比值法建立评价标准, 分别构建了适用于金沙江中游干、支流的鱼类生物完整性指数(F-IBI)评价体系, 并探究了其与水环境因子间的相关性。结果表明: 干流评价指标包括均匀度指数(M3)、鲤科物种数百分比(M4)、中下层鱼类物种数百分比(M11)、漂流性卵鱼类个体数百分比(M18)和鱼类总个体数(M22); 支流评价指标包括鳅科物种百分比(M5)、M11、肉食性鱼类个体数百分比(M13)、M18、特殊产卵方式鱼类个体数百分比(M21)和M22。在金沙江中游共设置32个监测点, 水生态系统F-IBI分值范围为6.54至63.11分, 评价等级为“亚健康”、“一般”、“中风险”、“高风险”、“无鱼”的监测点占比分别为3.70%、29.63%、48.15%、11.11%、7.41%。F-IBI值与水温(WT, $r=-0.404\ 9$, $P=0.044\ 7$)呈显著负相关, 与水体透明度(SD, $r=0.569\ 1$, $P=0.003\ 0$)、流速(v , $r=0.450\ 9$, $P=0.046$)呈显著正相关。综上所述, 金沙江中游梯级水电站对其水生态系统健康状况产生了较大的影响, 且支流受影响情况高于干流。

关键词: 金沙江中游; 鱼类生物完整性指数; 梯级水电站; 水生态系统健康

中图分类号: S 931.1; X 826

文献标志码: A

金沙江中游为长江上游河段, 自石鼓至雅砻江口段, 地跨云南、四川两省, 地势西北高东南低, 全长564 km, 落差838 m, 全梯级总装机容量 2.058×10^7 kW, 多年平均开发电量 8.833×10^{10} (kW·h)^[1]。目前, 金沙江中游干流段按照从上游到下游的顺序已建梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、观音岩、金沙共7个梯级水电站, 银江梯级电站在建中, 这些大型水利工程在发电、航运、防洪方面发挥巨大效益的同时也对水生态系统造成潜在的影响^[2]。

水生态系统作为生物圈的重要组成部分, 在保证水环境与水生生物之间物质与能量流动循环的同时, 维持整个系统的相对平衡^[3]。金沙江作为长江重要的干流部分, 是我国重要的生态安

全屏障, 蕴含丰富的淡水渔业资源, 是重要的鱼类基因宝库。但近年来, 由于金沙江中游梯级水电站的不断开发建设, 直接导致了金沙江中游鱼类群落结构不断退化、区域环境不断恶化、生态完整性遭到破坏等问题, 水生态系统的健康状况受到严重威胁^[4], 因此选择合适的方法评价梯级水电站对金沙江中游水生态系统健康造成的影响十分重要^[5]。

在评价水生态系统健康时, KARR^[6]首次提出生物完整性的概念。相较于采用单一理化因子评价水生态系统健康状况的传统方法, 生物完整性指数(Index of biotic integrity, IBI)评价体系可选择具有代表性的某一生物类群作为指示生物, 通过计算多种类型的生物指标并建立评价体

收稿日期: 2024-06-06

修回日期: 2024-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200104); 国家自然科学基金(42271023, 42477456)

作者简介: 魏琨宇(2001—), 男, 硕士研究生; 研究方向为流域水生态安全。E-mail: 202321470021@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 何佳, E-mail: hejia@bnu.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

系,更准确地反映出系统受人类活动、环境干扰所造成的生物特性变化,已在河流水生态系统健康评价中广泛应用。根据不同河流水生态系统的生物群落特征,生物完整性指数评价研究中指示生物的选择不尽相同,包括鱼类^[7]、大型底栖动物^[8-9]、着生藻类^[10]和浮游生物^[11]等。其中鱼类在食物链中处于相对较高的位置,对于水生态系统中多种污染和变化较为敏感,可间接反映出水体污染程度和水生态系统健康状况。目前,我国河流水生态系统健康评价研究中,鱼类生物完整性指数(Fish-index of biotic integrity, F-IBI)作为最常用的指标之一,已广泛应用于湖泊、人工河和内流河等各类水域^[12],例如通过对洪湖^[13]、北运河^[14]、苏州河^[15]、漓江等^[16]进行F-IBI评价来判断水生态系统受损程度或水体治理恢复情况。但由于不同流域的水文水势、水生生物群落组成、系统受干扰程度和流域尺度等各方面存在较大差异,所以每个区域的F-IBI评价体系具有很强的特异性^[17]。

目前关于金沙江流域梯级水电站对水生态的影响研究主要集中于渔业资源的调查与保护^[18-19]、生物群落结构特征与多样性分析^[20],而应用F-IBI评价梯级水电站对金沙江中游水生态系统健康影响的研究较少。本研究以金沙江中游为研究区域,梯级水电站规划环评阶段的历史数据作为参照状态,分别对干流梯级水电站段及主要支流段构建F-IBI评价体系,评估梯级水电站投产运营后水生态系统健康受损情况,结合水环境因子相关性分析探究梯级水电站对金沙江中游水生态系统健康的影响因素,为金沙江乃至长江流域的生态保护和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与鉴定方法

以金沙江中游梨园库尾至雅砻江汇口间河段干流及其主要支流为调查区域,分别于2021年12月(枯水期)、2022年4月(平水期)、2022年7月(丰水期)对金沙江中游干流及其主要支流的水生生境及鱼类资源进行调查。结合金沙江中游水电站的分布、河流形态及水势特征,在干支流共布设32个监测断面(图1)。其中,干流调查

断面设置在梨园库尾至雅砻江河口段各梯级电站库尾和库区段,共设置14个监测点(S1~S14);支流调查断面设置在主要一级支流与干流的汇口上游,共设置18个监测点(S15~S32)。

结合金沙江鱼类种类、季节分布规律和生活习性,以及调查水域存在水生生境差异较大的情况,参照《内陆水域渔业自然资源调查手册》使用的渔具包括三层定置刺网(内层网目7.5 cm,外层网目18 cm)及地笼网(网目2 cm,长5 m,网高0.4 m)。于当日16:00~18:00放网、次日8:00~10:00收网,单次放网时间约为16 h。鱼类数量统计与种类鉴定工作在渔获物鲜活状态下完成,对于一时难以鉴定的鱼(主要指小型鱼类),经10%甲醛溶液固定后带回实验室进行物种鉴定,鱼类物种鉴定主要依据《中国动物志鲤形目中卷》《中国动物志鲤形目下卷》《中国动物志鲇形目》《中国鱼类系统检索》^[21]《长江水系渔业资源》^[22]《四川鱼类志》^[23]。

部分监测点因未采集到或无法采集渔获物而记作“无鱼”。监测点S19翠依河和S20金棉河因受到上游采矿、洗矿影响,河道内多年未见鱼类,未捕捞到渔获物。监测点S16白水河河流湍急,泥沙含量大而导致地笼被泥沙掩埋,无法采集渔获物;监测点S17格基河、S24河川河及S25后山河因水电站蓄水、降雨量减少等导致下泄流量较小,河道水深较浅,鱼类生存空间受限而无法设置刺网、地笼而无法采集;监测点S27平川河由于丰水期厂房下游山体滑坡落石较多,交通受阻而无法采样。

本次调查对32个监测点的水环境要素进行了同步监测,参照《地表水环境质量监测技术规范》(HJ 91.2—2002)的分析方法,对各监测点的水温(WT)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、电导率(EC)、溶解性总固体(TDS)、盐度(SAL)等水化学指标采用便携式水质分析仪进行现场测量,流速(v)使用旋桨式流速仪测定,透明度(SD)用直径20 cm的萨氏透明度盘测定。由于白水河、格基河等7个监测点未获得鱼类数据,因此对剩余25个监测点的F-IBI分值和水环境因子进行相关性分析。

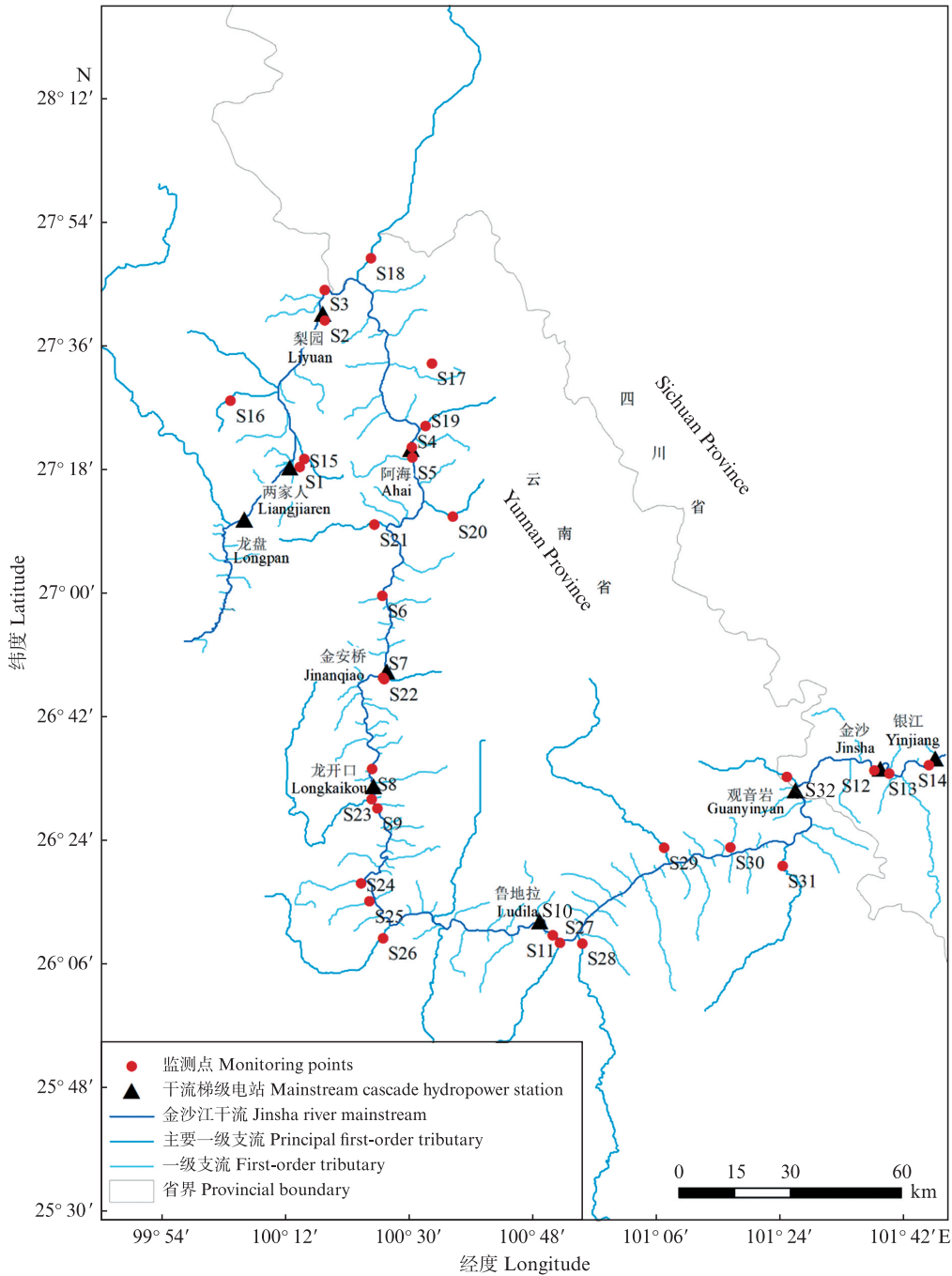


图1 金沙江中游监测点分布

Fig. 1 Distribution of monitoring points in the middle reaches of Jinsha River

1.2 参照点选择

参照点通常选取未受到人类干扰或者受干扰较小的河段,参照点的各项监测数据则为所研究区域评价体系的参照状态,若河流研究区在现阶段不存在合适的参照点则可选择其历史数据作为理想的参照状态^[24]。由于金沙江中游目前已经有多级水电站投入使用或在建,人类活动干扰较大,无法从现阶段的监测点中选择合适的参

照点,因此本研究应选择合适的金沙江中游历史调查数据作为参照状态。

为对《金沙江中游河段水电规划报告》(1992年编制)提出的金沙江中游河段“一库八级”水电开发方案提供足够的技术支撑,以及对水生态采取必要的保护措施,水利部中国科学院水工程生态研究所于2007年4—5月,2008年3—4月、6—7月对金沙中游水电站建设进行规划环评。规划

环评阶段使用流刺网、钓钩和电捕鱼等方式进行野外现场采集,干流设置梨园库尾至梨园坝址、梨园坝址至阿海坝址、阿海坝址至金安桥坝址、金安桥坝址至龙开口坝址、龙开口坝址至鲁地拉坝址、鲁地拉坝址至观音岩坝址和观音岩坝址以下共7个监测区域,支流设置格基河、翠依河、金棉河、水洛河、五郎河、漾弓江、渔泡江、平川河、马过河、万马河和塘坝河共11个支流监测区域。

在规划环评开始阶段,干流段梨园水电站正在进行可行性研究设计,金安桥水电站已开工建设,剩余的龙盘、两家人、阿海、龙开口、鲁地拉、观音岩、金沙、银江水电站仍处于前期研究阶段,水利开发程度相对较低,水体连通性相对较好。其次,水库区河谷人烟稀少,交通不便,人类干扰程度较小;工矿企业极不发达,无直接排入库区的工业污染源,例如梨园水电站库周仅有少量农业生活污水排入金沙江水,该河段水质状况可达国家地表水环境质量标准Ⅱ类标准。综上,本研究选择规划环评阶段的历史数据作为参照状态。

1.3 候选指标的选择与筛选

结合金沙江中游水生态环境特征及鱼类的群落组成等特点,兼顾适用性和全面性的基本原则,本研究提出5大类共23项候选指标(表1)^[25],能够综合反映出金沙江中游鱼类物种种类组成与丰富度、营养结构、敏感性和耐受度、繁殖共位群、鱼类数量及健康状况,从而有效地对金沙江中游水生态系统健康状况进行评价。

对上述候选指标需依次进行分布范围分析、判别能力分析和冗余度分析。(1)分布范围分析:候选指标筛选规则为剔除各监测点小于5种、90%以上监测点数值为0以及各监测点间差异小于10%的指标。(2)判别能力分析:基于箱线图比较各候选指标在参照点与监测点25%至75%分位数范围,即IQ(Interquartile ranges)的箱体重叠情况,不同重叠的情况赋值不同^[26]。IQ=0,中位数值均位于对方箱体范围内;IQ=1,箱体有重叠且仅一方中位数值位于对方箱体范围内;IQ=2,箱体部分重叠,但各自中位数值均位于对方箱体之外;IQ=3,箱体之间无重叠。筛选IQ≥2的候选指标进行下一轮分析。(3)冗余度分析:对余下指标进行正态分布检验,符合正态分布的指标进行Pearson相关性分析,不符合正态分布的指标间进行Spearman相关性分析,结果保留 $|r|<0.9$ 的指标,对于 $|r|≥0.9$ 的

指标综合考虑后进行取舍^[27]。

1.4 指标赋值与评价标准

指标分值计算最常用的方法有1、3、5赋值法^[28],连续赋值法和比值法^[29]。本研究的参照点相对较少,选择比值法对核心指标进行标准化计算^[30]。对于干扰越强、值越低的指标,以参照点95%分位数为最佳期望值,指标分值计算方法见式(1);对于干扰越强、值越高的指标,则以参照点5%分位数为最佳期望值,计算方法见式(2):

$$V_{ij} = V_{ija} / V_{jexp} \quad (1)$$

$$V_{ij} = (V_{jmax} - V_{ija}) / (V_{jmax} - V_{jexp}) \quad (2)$$

式中: V_{ij} 为*i*监测点第*j*指标的分值; V_{ija} 为*i*监测点第*j*指标的实际值; V_{jexp} 为第*j*指标的最佳期望值; V_{jmax} 为第*j*指标在所有监测点中的最大值。

F-IBI值的分布范围为0~1,若大于1,则均记作1。F-IBI总分为核心指标的分值累加。将计算得出的F-IBI总分进行百分制转化并划分为5个等级:高风险(0~20分)、中风险(21~40分)、一般(41~60分)、亚健康(61~80分)、健康(81~100分)^[29]。

2 结果

2.1 金沙江中游鱼类区系组成

根据资料记载,在20世纪80年代,金沙江中游干支流共分布鱼类149种,其中干流分布146种,长江上游特有鱼类52种^[21-23]。2007年4—5月,2008年3—4月、6—7月的调查数据表明^[31],金沙江中游的鱼类组成主要包括青藏高原类群、山地急流类群以及平原类群。其中虎跳峡至金安桥段为四川裂腹鱼(*Schizothorax kozlovi* Nikolsky)、短须裂腹鱼(*Schizothorax wangchiachii*)、长须裂腹鱼(*Schizothorax longibarbus*)、细尾高原鳅(*Triplophysa stenura*)和硬刺松潘裸鲤(*Gymnocypris potanini firmispinatus*)为主的青藏高原鱼类类群;龙开口以下至观音岩段为犁头鳅(*Lepturichthys fimbriata*)、中华金沙鳅(*Jinshaia sinensis*)等为主的山地急流和平原鱼类类群。自2004年来历次关于金沙江中游鱼类的调查^[32]共采集到鱼类99种,隶属于5目14科62属。其中鲤形目鱼类占比较大,共3科47属75种,占总种类数的75.76%;鲇形目次之,共4科8属15种,占15.15%;鲟形目2科2属2种,占2.02%;合鳃鱼目1科1属1种,占1.01%;鲈形目4科4属6种,占6.06%。

表1 金沙江中游F-IBI评价候选指标体系及其对干扰的响应

Tab. 1 Candidate metrics of F-IBI in the middle reaches of Jinsha River and their response to human disturbance

属性归类 Attribute	序号 Number	指标 Metrics	对干扰响应 Response to disturbance
物种种类组成与丰富度 Composition and richness	M1	鱼类物种数	下降
	M2	Shannon-Wiener多样性指数	下降
	M3	均匀度指数	下降
	M4	鲤科物种数百分比	上升
	M5	鳅科物种数百分比	下降
	M6	鲢科物种数百分比	下降
	M7	鲇科物种数百分比	上升
	M8	鲈形目物种数百分比	下降
	M9	鲇形目物种数百分比	上升
	M10	中上层鱼类物种数百分比	下降
	M11	中下层鱼类物种数百分比	下降
	M12	底层鱼类物种数百分比	下降
营养结构 Trophic structure	M13	肉食性鱼类个体数百分比	下降
	M14	植食性鱼类个体数百分比	下降
	M15	杂食性鱼类个体数百分比	上升
敏感性和耐受性 Tolerance	M16	耐受性鱼类个体数百分比	上升
	M17	敏感性鱼类个体数百分比	下降
繁殖共位群 Reproductive guilds	M18	漂流性卵鱼类个体数百分比	下降
	M19	沉性卵鱼类个体数百分比	下降
	M20	黏性卵鱼类个体数百分比	上升
	M21	特殊产卵方式鱼类个体数百分比	下降
鱼类数量 Quantity	M22	鱼类总个体数	下降
	M23	外来物种数量所占比例	上升

本次调查在干流段采集到鱼类共1 532尾,总质量198.28 kg,支流段共1 938尾,总质量72.51 kg。采集鱼类共63种,隶属于4目12科46属。小型鱼类优势种主要为棒花鱼(*Abbotina rivularis*)、高体鳊鲂(*Rhodeus ocellatus*)、麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)等,中大型鱼类优势种主要为短须裂腹鱼、细鳞裂腹鱼(*Schizothorax chongi*)等裂腹鱼类为主。鲤形目鱼类占比较大,共3科36属48种,占总种类数的75.19%,其中以鲤科鱼类为主,共26属34种,占总种数的53.97%;鲇形目次之,共4科5属9种,占14.29%;鲈形目4科4属5种,占7.94%;鲟形目1科1属1种,占1.59%。

2.2 F-IBI核心指标的筛选

金沙江中游干流的水文水势、水生态分区、鱼类群落组成及生境情况与支流有显著性差异,因此,对金沙江中游分别建立干流和支流的F-IBI评价体系。

对干流23个候选指标进行分布范围检验,因

在90%以上监测点数值为0而剔除指标M21和M23。剩余21个指标进行判别能力筛选,其中M3、M4、M5、M11、M12、M14、M18、M19和M22共9个指标的 $IQ \geq 2$,进行下一轮分析(图2)。其中M12、M14、M19理论上应随着干扰程度的增大而下降,但本研究中参照点的数值反而低于监测点,故将其剔除,M4与M5均为反映物种种类组成与丰富的指标,为避免重复剔除M5。对剩余的6个指标进行正态检验和相关性分析(表2),结果表明所有指标间的 $|R|$ 值均小于0.9,故不再进行剔除。综上,最终筛选出5个评价指标(M3、M4、M11、M18和M22)作为构建金沙江中游干流F-IBI体系的核心指标。

同上,对支流23个候选指标进行分布范围检验,因在90%以上监测点数值为0而剔除M7和M23。剩余21个指标进行判别能力分析,其中M3、M5、M10、M11、M13、M18、M21和M22共8个指标的 $IQ \geq 2$,进入下一轮分析(图3)。其中均匀度指数(M3)和中上层鱼类物种数百分比

(M10)理论上应随着干扰程度的增大而分别下降和上升,但参照点与监测点的数值变化趋势异常,故将其剔除。对剩余的6个指标进行正态检验和相关性分析(表3),结果表明所有指标间的

$|r|$ 值均小于0.9,均保留。综上,最终确定6个评价指标(M5、M11、M13、M18、M21和M22)作为构建金沙江中游支流F-IBI体系的核心指标。

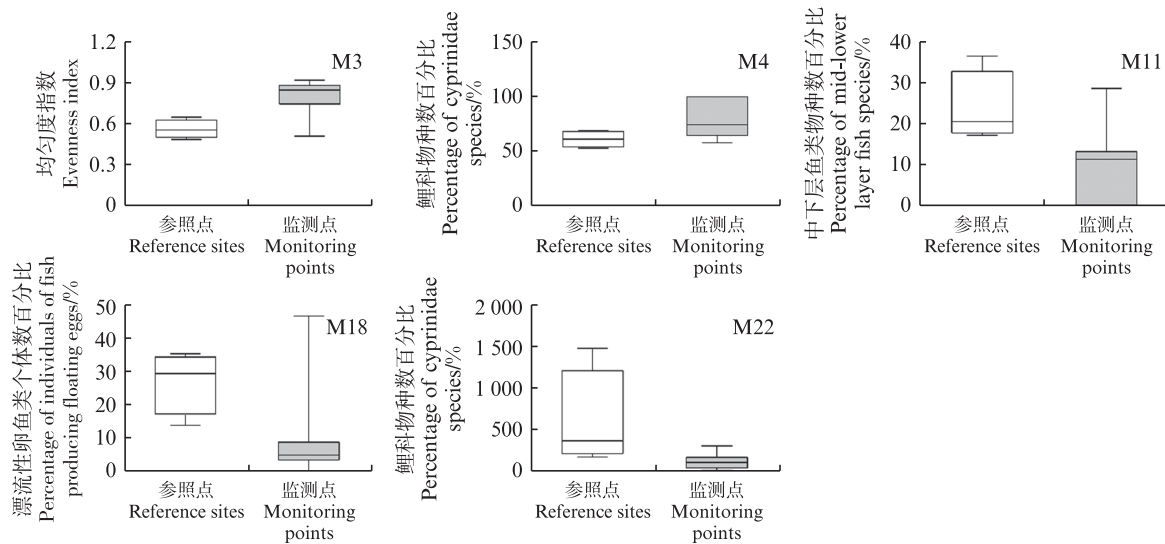


图2 金沙江中游干流的候选指标在参照点和监测点的箱线图

Fig. 2 Boxplots of candidate indicators between reference sites and observed sites for main stream of the middle reaches of Jinsha River

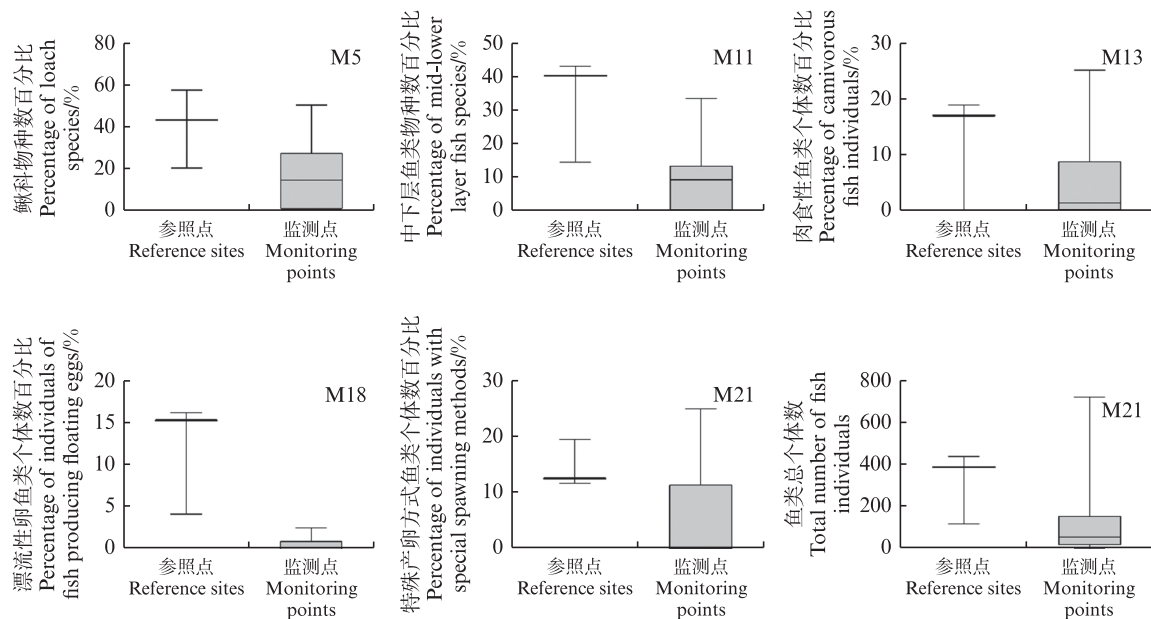


图3 金沙江中游支流的候选指标在参照点和监测点的箱线图

Fig. 3 Boxplots of candidate indicators between reference sites and observed sites for tributaries of the middle reaches of Jinsha River

表2 金沙江中游干流候选指标间的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients among candidate indicators of main stream of the middle reaches of Jinsha River

	M3	M4	M5	M11	M18	M22
M3	1					
M4	-0.106	1				
M5	0.062	-0.585*	1			
M11	-0.645*	-0.062	-0.281	1		
M18	-0.131	0.178	-0.226	0.214	1	
M22	-0.542	-0.353	0.073	0.293	0.043	1

注:**表示在 0.01 水平上显著相关,*表示在 0.05 水平上显著相关。
Notes: ** indicates significant correlation at the 0.01 level, * indicates significant correlation at the 0.05 level.

表3 金沙江中游支流候选指标间的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients among candidate indicators of tributaries of the middle reaches of Jinsha River

	M5	M11	M13	M18	M21	M22
M5	1					
M11	-0.545	1				
M13	-0.394	-0.227	1			
M18	-0.008	0.038	0.026	1		
M21	0.071	0.492	-0.317	-0.298	1	
M22	-0.430	0.330	-0.115	0.266	-0.070	1

注:**表示在 0.01 水平上显著相关,*表示在 0.05 水平上显著相关。
Notes: ** indicates significant correlation at the 0.01 level, * indicates significant correlation at the 0.05 level.

2.3 金沙江中游水生态健康评价

采用比值法分别得出金沙江中游干、支流 F-IBI 评价体系中各指标的计算公式(表 4 和 5),依次计算得出各监测点的 F-IBI 分值后进行百分制换算得到总分,分值越高代表水生态系统越健康。

根据评价标准,依次对金沙江中游干、支流共计 32 个监测点各月份进行 F-IBI 评价,结果如表 6 所示。基于整体研究表明金沙江中游水生态系统健康状况不容乐观,得分范围仅为 6.54 至 63.11 分。仅有干流的龙开口库尾段评价等级为“亚健康”;评价等级为“一般”的监测点共 8 个,占比 29.63%;评价等级为“中风险”的监测点共 13 个,占比 48.15%;健康状况为“高风险”的监测点共 3 个,占比 11.11%;“无鱼”的监测点共 2 个,占比 7.41%。

基于库区和库尾比较研究表明,库尾的水生生态健康状况优于库区。库区中水生态系统得分范围为 22.42 至 49.09 分,低于库尾的 30.78 至 63.11 分;干流段库区和库尾均无监测点评价等级为“高风险”,库区中评价等级为“中风险”的监测点共计 4 个,共占 66.67%,高于库尾的 28.57%。

基于干流和支流比较研究表明,干流的水生生态健康状况优于支流。干流和支流的水生态系统得分范围分别为 22.42 至 63.11 分和 6.54 至

41.39 分,且评价等级为“亚健康”的监测点仅存在于干流中。此外,干流中评价等级为“一般”的监测点共 7 个,占比 50.00%,高于支流的 7.69%;支流中存在 3 个评价等级为“高风险”的监测点,而干流中不存在。

表4 金沙江中游干流 F-IBI 核心指标计算公式

Tab. 4 Formula for calculating of the core attributes in the main stream of the middle reaches of Jinsha River

指标 Metrics	计算公式 Formula
均匀度指数(M3)	M3/0.64
鲤科物种数百分比(M4)	(100-M4)/(100-53.09)
中下层鱼类物种数百分比(M11)	M11/34.24
漂流性卵鱼类个体数百分比(M18)	M18/34.81
鱼类总个体数(M22)	M22/1 316.05

表5 金沙江中游支流 F-IBI 核心指标计算公式

Tab. 5 Formula for calculating of the core attributes of tributaries in the middle reaches of Jinsha River

指标 Metrics	计算公式 Formula
鳅科物种数百分比(M5)	M5/55.71
中下层鱼类物种数百分比(M11)	M11/42.57
肉食性鱼类个体数百分比(M13)	M13/18.58
漂流性卵鱼类个体数百分比(M18)	M18/16.10
特殊产卵方式鱼类个体数百分比(M21)	M21/18.84
鱼类总个体数(M22)	M22/434

表6 金沙江中游干、支流各监测点F-IBI评价结果

Tab. 6 F-IBI evaluation results of monitoring points main and tributaries in the middle reaches of Jinsha River

编号 Number	干流监测点 Mainstream monitoring point	健康等级 River health status	编号 Number	支流监测点 Tributary monitoring point	健康等级 River health status
S1	梨园库区	中风险	S15	大具河	中风险
S2	梨园库尾	中风险	S16	白水河	无鱼
S3	阿海库区	中风险	S17	格基河	无鱼
S4	阿海库尾	一般	S18	水洛河	中风险
S5	金安桥库区	中风险	S19	翠依河	无鱼
S6	金安桥库尾	中风险	S20	金棉河	无鱼
S7	龙开口库区	一般	S21	黑白水河	中风险
S8	龙开口库尾	亚健康	S22	五郎河	中风险
S9	鲁地拉库区	中风险	S23	漾弓河	中风险
S10	鲁地拉库尾	一般	S24	河川河	无鱼
S11	观音岩库尾	一般	S25	后川河	无鱼
S12	金沙库区	一般	S26	落漏河	高风险
S13	金沙库尾	一般	S27	平川河	无鱼
S14	银江段	一般	S28	渔泡江	高风险
			S29	马过河	高风险
			S30	温泉河	中风险
			S31	万马河	中风险
			S32	塘坝河	一般

2.4 F-IBI 分值与水环境因子相关性分析

对金沙江中游各监测点的F-IBI值与8个水环境因子进行相关性分析(图4)。结果表明,F-IBI值与电导率($r=0.172\ 9$, $P=0.408\ 5$)、溶解性总固体($r=0.267\ 8$, $P=0.195\ 6$)、盐度($r=0.238\ 4$, $P=0.251\ 1$)、pH($r=-0.268\ 8$, $P=0.193\ 9$)、溶解氧($r=-0.146\ 7$, $P=0.484\ 1$)6项水环境因子均无显著相关性,仅与水温($r=-0.404\ 9$, $P=0.044\ 7$)呈显著负相关,与水体透明度($r=0.569\ 1$, $P=0.003\ 0$)、流速($r=0.450\ 9$, $P=0.046$)呈显著正相关。

3 讨论

3.1 金沙江中游鱼类群落变化

本研究调查结果与自2004年以来至本次调查之前的历史鱼类数据^[32-33]相比,优势种未发生改变,未发现青鲮科,属数减少25.81%,种数减少36.36%。新增种类共8种,分别为团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus*)、黑鳍鲈(*Sarcocheilichthys nigripinnis*)、镜鲤(*Cyprinus carpio* var. *specularis*)、短尾高原鳅(*Trilophysa breviuscula*)、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)、乌鳢(*Channa argus*)和似刺鲃(*Paracanthobrama guichenoti*),其中尼

罗罗非鱼和镜鲤为外来种,团头鲂、翘嘴鲌、乌鳢和似刺鲃为养殖逃逸种类^[32-33]。这些外来或逃逸鱼类由于缺乏天敌而迅速生长,抢占土著鱼类的生态位,从而对土著鱼类的生存造成了威胁,群落由种群分化强烈转变为种级物种分化单调^[34],这一现象在澜沧江^[35]等水体中也普遍存在。

根据金沙江中游干支流F-IBI评价结果表明,现阶段金沙江中游水生态系统健康状况受损,梯级水电站的建设已造成了鱼类群落结构的较大改变。金沙中游原有的少数广布性种类,如鲤、鲫、泥鳅类等部分鱼类在静水中即可完成其生活史的全部阶段,在干流的河湾、浅水区以及支流等缓流区域中均能繁殖。F-IBI评价结果显示除龙开口库区和金沙库区评价等级为“一般”外,其余库区监测点评价等级均为“中风险”,其中鲁地拉库区鱼类种群变化最为显著,喜静缓流型鱼类棒花鱼尾数跃居第三,占比13.18%。由于梯级水库建成将使喜静缓流型鱼类产卵水域极大扩展,影响其受精卵发育主要因素为产于库尾频繁消落区的受精卵会受到一定损耗,但总体而言,梯级水库建成将使这类鱼繁殖及生长空间获得极大扩展,成为水库的主要鱼类群落^[36]。此外,圆口铜鱼

(*Coreius guichenoti*)、长薄鳅(*Leptobotia elongata*)等产漂流性卵的喜流水性鱼类因梯级水电站的建设使河流的连通性发生改变,导致产漂流性卵鱼类的洄游路线受到阻隔、鱼类种群基因

破碎化、产卵场及关键栖息地减少甚至丧失^[37]。研究表明,梯级水库造成圆口铜鱼的天然洄游通道被阻断,产卵场已被或正被淹没,种群出现裂化趋势,在库区段资源量显著减少^[38]。

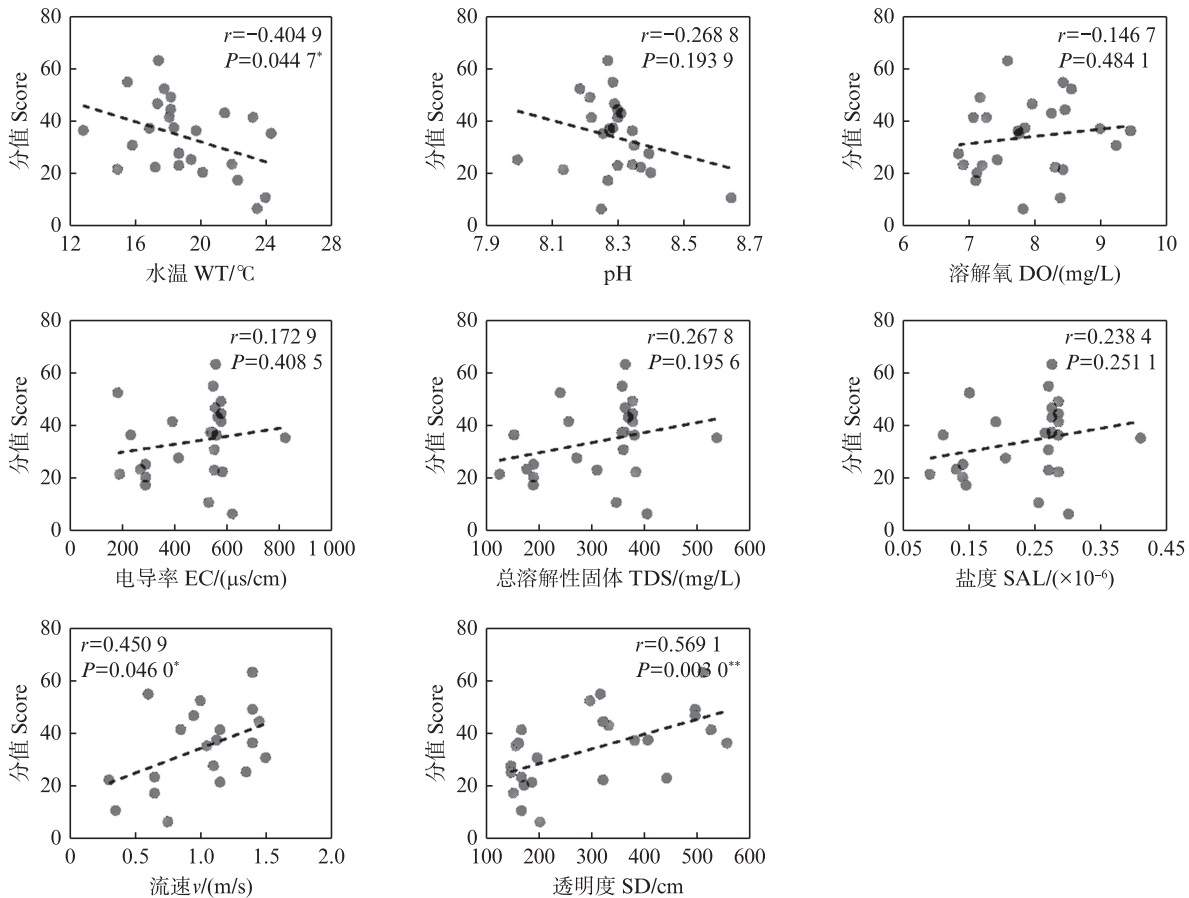


图4 金沙江中游F-IBI值与水环境因子间的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of F-IBI values and water environmental factors in the middle reaches of Jinsha River

支流段中被列为重要鱼类栖息地的马过河和渔泡江评价等级为“高风险”。在规划环评阶段,主要采用电捕技术,马过河主要渔获物以小型鱼类为主,其中斯氏高原鳅(*Triplophysa stoliczkae*)、红尾副鳅(*Paracobitis variegatus variegatus*)和宽鳍鱮(*Zacco platypus*)3种鱼类总质量和总数量占比分别为98.2%和98.0%^[31];本次调查采用地笼网和流刺网的方式进行捕捞,渔获物虽仍以光泽黄颡鱼(*Pelteobagrus nitidus*)、宽鳍鱮、棒花鱼等小型鱼类为主,但由于渔获物数量差异较大,极大地影响了F-IBI的评价结果。规划环评阶段渔泡江共捕获鱼类14种439尾,其中短须裂腹鱼、中华花鳅(*Cobitis sinensis*)、红尾副鳅、短体副鳅(*Paracobitis potanini*)、墨头鱼(*Garra pingi pingi*)这5种鱼类占渔获物质量百分

比的75.5%,数量也以中华花鳅、前鳍高原鳅(*Triplophysa anterodorsalis*)、宽鳍鱮、短体副鳅、短须裂腹鱼、红尾副鳅这6种鱼类为主,数量百分比占85.1%,渔获物以流水性的种类为主^[31]。现阶段由于上游电站无生态流量泄放要求,且下游观音岩回水较长,从而导致河段减脱水、河道干涸、连通性破坏、河口段适宜流水性鱼类生境退化,鱼类种群演变为以麦穗鱼、鳅类等小型鱼类为主,鱼类种群变化巨大。

支流段仅塘坝河评价等级为“一般”。规划环评阶段塘坝河水电站还未建成,塘坝河最下一级电站新庄河四级至干支流交汇口约16.7 km的河段无其他水利设施,水体流速较快且连通性较好,是重要的鱼类栖息地和洄游通道。而在2010年塘坝河水电站投入使用后,坝下至干支流交汇

口形成了约 2.5 km 的脱水河段,河流生态的驱动力消失,鱼类洄游通道遭到破坏,在短期内导致鲤、鲫、麦穗鱼、棒花鱼等喜缓流或静水型鱼类增多,产漂流性卵的洄游鱼类资源量显著减少,但在本次调查中发现岩原鲤等喜流水性鱼类,鱼类多样性有所恢复^[31]。

3.2 金沙江中游水生态系统健康状况受损成因分析

梯级水电站的叠加会长期、缓慢且潜在地影响生态环境系统,且会对河流的水文情势产生重大的影响^[39]。作为一种普遍性、典型性的人类活动干扰形式,金沙江中游梯级水电站通过改变水文水势、水环境因子等对鱼类资源产生影响,导致水生态系统健康受损。

已有研究表明,水温是影响鱼类生命活动的重要生态学因子,直接影响鱼类的代谢强度,从而对其繁殖发育、摄食生长、行为活动等造成直接影响^[40]。鱼类的产卵活动与繁殖规模对水温的变化十分敏感,例如金沙江干流的乌东德江段在 2022 年水温较 2021 年同期偏低,因此导致长鳍吻鲈(*Rhinogobio ventralis*)的繁殖期同期延后 11 d^[41]。受下泄低温水的影响,干流段库尾水生态系统状况不容乐观,评价等级为“中风险”和“一般”的监测点分别占比 28.57% 和 57.14%,仅有龙开口库尾评价等级为“亚健康”。由于金沙江中游段梯级水电站的蓄水发电,库区水温分层逐渐形成且随季节变动,在春夏季节沿库区垂直方向上从上层至下层水温逐渐降低,冬季呈现相反的现象。同时由于库区排水口在坝体下侧,所以下泄水的温度与自然水温度刚好相反,呈现春夏水温低,冬季水温高的现象,这会导致库尾段出现显著的水温滞后效应,从而影响库尾段鱼类的生存与繁殖,导致繁殖期的改变、幼鱼发育周期缩短、发育不良等^[36]。因此,要根据梯级水电站库尾鱼类的产卵特性及繁殖条件科学合理地开展分层取水生态调度,减小下泄水对库尾鱼类的影响。但在野外采样中,受天气、气温变化等自然条件的影响,瞬时水温变化很大,因而我们无法根据数次采样测得的瞬时水温来准确判断其与水生态健康之间的相关性,需进一步对金沙江中游各点进行不同时段、空间的水温监测才能更准确地探究其对鱼类及水生态健康的影响。

适宜的流速对于不同水流耐受性鱼类的分

布以及鱼类产卵活动至关重要。根据 F-IBI 评价结果显示,库区中水生态系统相较于库尾更差,其中梨园、金安桥、阿海、金沙 4 个梯级电站库区评价等级为“中风险”,这与调查中发现的该库区段裂腹鱼、圆口铜鱼、泉水鱼(*Semilabeo prochilus*)、墨头鱼、部分平鳍鳅科和鮡科等喜流水性鱼类呈现种群被迫迁移至库尾或支流、资源量不断减少、体态小型化的情况相一致。结合历史鱼类数据进行比较分析,金沙江中游鱼类栖息特点主要分为急流底栖类群、流水底栖类群、洞隙类群以及静缓流类群,其中大多都具有适应所在水域急流型水生生境的形态和构造特点。而各梯级水库建成后使原本复杂多样的自然水流环境遭到破坏,库区出现大面积缓流乃至静水区域,水域生态系变为静缓流水生态系统,造成喜流水性鱼类趋于流速较大的库尾段、喜缓流性鱼类成为库区静水段的主要鱼类群落的分裂式分布状况^[42]。

较长的洄游通道和较快的流速有利于圆口铜鱼、长薄鳅、长鳍吻鲈等产漂流性卵鱼类的精卵混合,因此这种鱼类的产卵场主要集中于水流湍急的河段。在 2007 至 2008 年规划环评阶段,金沙江中游水电开发程度相对较低,属于急缓流交替开放性水生生态系统,以圆口铜鱼为代表的产漂流性卵鱼类产卵场广泛分布在距离攀枝花庄上村以上 26.6~235.2 km 的上游江段,而现在金沙水电站已经建成,银江水电站正在建设中,金沙江下游 4 个梯级也相继建成,金沙江中下游干流段产漂流性卵鱼类产卵场范围锐减至乌东德水电站库尾约 17.2~52.5 km 的河段^[32]。此外,底栖动物主要栖息于流水环境下的块石和砾石底质,而库区的静水环境会造成底栖动物多样性减少^[43],进而导致以肉食性为主的鱼类在库区段种群密度下降。综上,金沙江中游的梯级水电站导致的流速变化,是导致其水生态系统健康状况受到影响的一个重要原因。

支流的水生态健康状况相较于干流更差,这与支流段向河流排放富含氮、磷的农业生产污水以及含有重金属的工业污水有关^[32]。漾弓江与渔泡江存在部分企业污水排入,BOD₅浓度较高,S²⁻检测值超过地表水Ⅲ类水质标准限值的情况,对鱼类生存造成一定的影响;塘坝河总氮、粪大肠杆菌超标,主要原因是由于河道周边的面源污

染所致,塘坝河上游石龙坝乡农村人口较多且污水处理水平落后,农村生活污水及农业生产废水以面源形式直接入河,导致水质较差,从而水生态系统健康状况堪忧。此外支流中翠依河和金棉河存在“无鱼”的情况,其原因主要是干流水电站在枯水期为维持发电而调蓄水量,导致部分支流在每年的部分时段内所接收到的下泄流量较小、河道干涸使鱼类生存空间受限。

金沙江干流段地势总体起伏明显,地势走向由西北向东南逐渐降低,且存在数量众多的梯级水电站,其上下游及支流已形成适应性的生境条件,这种不同生境之间的差异也显著影响了水生态系统。以龙开口为界,金沙江中游干流段上下游F-IBI评价结果存在显著差异,其中上游监测点F-IBI评价结果中仅有阿海库尾评价等级为“一般”,其余均为“中风险”,而下游段除鲁地拉库区外评价等级均为“亚健康”或“一般”。梨园至龙开口的山岭褶皱紧密且为南北走向的山谷,河谷谷坡由于受到崩塌重力地貌特征影响,呈现出陡直且呈现深“V”字型,仅在干、支流交汇处的少量谷坡发育形成阶地,河道整体形态差异较大且水流湍急;鲁地拉以下河段海拔落差相对较小,河道顺直,流速较缓^[2,33]。较大的海拔差异导致的水温等的变化,造成了干流上下游F-IBI评价结果和鱼类群落的显著差异。此外,干流段中评价等级为“亚健康”或“一般”监测点占比57.14%,显著优于支流段的5.56%,这是由于干流段谷底在不同断面深切速度和幅度不尽相同,并受到局部河道水力学作用,形成了浅滩开阔地、侵蚀区以及急流峡谷等多样的河谷地貌特征,为鱼类提供了更加丰富的栖息环境^[2]。

3.3 F-IBI生物完整性评价的不确定性分析

水生态系统健康状况及水生生物群落往往受多重胁迫因素的交互影响,而受制于调查能力、经济条件等原因,仅对部分水质参数与流速进行监测和线性分析,而未能获得其他水污染化学指标、水文参数、气候与土地利用等数据。在未来研究中应考虑到营养胁迫、水文胁迫、形态胁迫、热胁迫和其他化学胁迫等胁迫因子,采用更多元、新型的统计分析方法,分析这些胁迫因子间的相互作用形式及对水生生物群落的影响。

鱼类作为一种对水生态系统变化较为敏感的生物,在间接反映水生态系统健康状况的同

时,也存在移动能力较强、时空差异较大的问题。在鱼类生物群落构建及评价体系建立的过程中主要探究了环境因素对于鱼类生物群落及水生态系统健康状况的影响,而忽略了鱼类扩散作用的分析和数据调查,在未来的研究中应结合鱼类生物学特性、水体连通性、水流动态和生境联通性等因素,综合分析扩散作用对于鱼类生物群落及水生态系统健康状况的影响。

3.4 金沙江中游水生态健康保护与修复建议

金沙江中游已投入运行6个鱼类增殖放流站,截至2022年1月放流总数已超过2 000万尾。各梯级放流回捕统计与渔获物调查成果相关性分析表明,部分河段(梨园、阿海、观音岩库区及坝下河段)增殖放流种类在渔获物中的比例有所提高,但尚无相关增殖放流种类在放流河段形成自繁种群的依据,建议在后续工作中建立工程河段自然群体与人工群体遗传背景数据库,再通过后续持续的遗传动态监测对比分析,分析鱼类增殖放流的有效性。

水洛河水量丰沛,河谷宽窄相间,河流形态多样,对维持阿海坝下至金安桥坝址段流水生境至关重要,是全流域保护价值最高的支流。水洛河已建最末梯级撒多水电站坝址以下至河口有约21 km的天然河段和阿海库尾流水河段连通,是目前金沙江中游最理想的鱼类栖息地。因此建议减少该段水电站的开发,维护水洛河现有水生生态系统稳定。

金沙江中游重点保护支流大部分都存在水电开发程度高,已建梯级下泄生态流量不足等问题。建议各重点保护支流开展水电开发环境影响回顾性评价,系统开展各支流生态流量泄放效果评估,进一步核定各支流已建梯级需泄放生态流量值。

4 结论

应用F-IBI体系,分别筛选出金沙江中游干流和支流的核心指标,干流6个核心指标分别为均匀度指数、鲤科物种数百分比、鳅科物种数百分比、中下层鱼类物种数百分比、漂流性卵鱼类个体数百分比、鱼类总个体数;支流的6个核心指标包括鳅科物种数百分比、中下层鱼类物种数百分比、肉食性鱼类个体数百分比、漂流性卵鱼类个体数百分比、特殊产卵方式鱼类个体数百分

比、鱼类总个体数。

金沙江中游梯级水电站的投产运行使水文水势、鱼类栖息环境、洄游通道发生了巨大改变,导致了水生态系统健康状况整体较差,其中干流库区静水段较库尾流水段健康状况更差,支流整体较干流健康状况更差。

金沙江中游 F-IBI 值与流速、水体透明度呈显著正相关,揭示了金沙江梯级水电站已显著改变了自然流水环境并对鱼类的生存、孵化造成影响,建议增设鱼类增殖放流站,保护现存鱼类产卵场与栖息地并减少水电站的开发。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 唐鸿琴,丁文翔,王进.金沙江中游梯级水库泥沙对氮磷营养盐的影响[J].三峡生态环境监测,2023,8(1):43-49.
TANG H Q, DING W X, WANG J. Effects of sediment on nitrogen and phosphorus nutrients in cascade reservoirs in the middle reach of Jinsha River [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2023, 8(1): 43-49.
- [2] 张汶海.基于坝群影响与水文生态响应关系的河流生态流量研究[D].北京:清华大学,2019.
ZHANG W H. Research on river environmental flow based on the influence of dams construction and ecological response to hydrology [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [3] HE K J, TANG H, HE Y Y D, et al. Applicability of macrobenthos indexes in health assessment upstream of a large river: a case study in the Babian River of the Red River Basin, China [J]. Ecological Informatics, 2023, 74: 101958.
- [4] 李红清,雷明军,李德旺,等.长江上游水电开发生态制约及其适应性分析[J].人民长江,2014,45(15):1-6,13.
LI H Q, LEI M J, LI D W, et al. Analysis on ecological constraints and adaptability in hydropower development in Upper Yangtze River [J]. Yangtze River, 2014, 45(15): 1-6, 13.
- [5] 孙福红,郭一丁,王雨春,等.我国水生态系统完整性研究的重大意义、现状、挑战与主要任务[J].环境科学研究,2022,35(12):2748-2757.
SUN F H, GUO Y D, WANG Y C, et al. Significance, current situation, challenges and future direction and development of research on freshwater ecological integrity in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(12): 2748-2757.
- [6] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [7] 侯晓丽,王云彪.湿地生态风险评价中生物完整性指数研究进展[J].生态毒理学报,2018,13(4):3-8.
HOU X L, WANG Y B. Research progress of index of biotic integrity for ecological assessment in wetlands [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(4): 3-8.
- [8] 马卓萃,胡和平,王赛.基于B-IBI的东江下游河流生态健康评价[J].长江科学院院报,2023,40(9):32-38.
MA Z L, HU H P, WANG S. Evaluation of aquatic ecological health of rivers in the lower reaches of Dongjiang River based on Benthic-Index of Biotic Integrity [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(9): 32-38.
- [9] 熊伟唯,李卫明,陈圣盛,等.玛瑙河干流大型底栖动物群落结构特征分析及水生生态评价[J].环境科学研究,2022,35(5):1257-1267.
XIONG W W, LI W M, CHEN S S, et al. Community structure and aquatic ecological evaluation of macrobenthos in Manao River [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(5): 1257-1267.
- [10] 徐宗学,刘麟菲.基于着生藻类的渭河流域水生态系统健康评价[J].人民黄河,2020,42(9):123-129.
XU Z X, LIU L F. Assessment on the aquatic ecosystem health of the Weihe River Basin based on periphyton [J]. Yellow River, 2020, 42(9): 123-129.
- [11] 陈庆,柴一涵,王天鹅,等.基于浮游动物完整性的扎龙湿地水生生态状况评价[J].中国环境监测,2022,38(5):87-95.
CHEN Q, CHAI Y H, WANG T E, et al. Evaluation of water ecological status of Zhalong wetland based on zooplankton integrity [J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(5): 87-95.
- [12] 潘丽波,黄雪妍,刘晶晶,等.基于鱼类生物完整性的赤水河健康评估研究[J].环境科学研究,2023,36(8):1532-1542.
PAN L B, HUANG X Y, LIU J J, et al. Chishui River health assessment based on fish biotic integrity index [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(8): 1532-1542.
- [13] 朱迪,常剑波.长江中游浅水湖泊生物完整性时空变化[J].生态学报,2004,24(12):2761-2767.
ZHU D, CHANG J B. Evaluation on temporal and spatial changes of biological integrity for shallow lakes in the middle reach of the Yangtze River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2761-2767.
- [14] 李慧清,罗遵兰,孙光,等.应用鱼类生物完整性指数评价北运河河流健康状况[J].水生生态学杂志,2023,44(1):34-40.
LI H Q, LUO Z L, SUN G, et al. Health assessment of north canal river based on the fish-index of biotic integrity

- [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(1): 34-40.
- [15] 张亚,余宏昌,毕宝帅,等. 基于鱼类生物完整性指数的上海苏州河水生态系统健康评价[J]. *中国环境监测*, 2021, 37(6): 164-177.
- ZHANG Y, YU H C, BI B S, et al. Ecological health assessment of Suzhou River in Shanghai based on fish index of biotic integrity[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, 37(6): 164-177.
- [16] 朱召军,吴志强,黄亮亮,等. 漓江上游基于鱼类生物完整性指数的河流健康评价体系构建与应用[J]. *桂林理工大学学报*, 2016, 36(3): 533-538.
- ZHU Z J, WU Z Q, HUANG L L, et al. Development and application of IBI based on fish to assess river health in the upper reaches of Lijiang River [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2016, 36(3): 533-538.
- [17] ZHU D, CHANG J B. Annual variations of biotic integrity in the Upper Yangtze River using an adapted index of biotic integrity (IBI)[J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(5): 564-572.
- [18] 杨青瑞,陈冬红,骆辉煌,等. 金沙江中游鲁地拉以上河段水电开发中鱼类保护措施[J]. *水力发电*, 2022, 48(2): 8-12.
- YANG Q R, CHEN D H, LUO H H, et al. Fish protection measures during hydropower development in the upstream reaches of Ludila in Jinsha River[J]. *Water Power*, 2022, 48(2): 8-12.
- [19] 郑金秀,高少波,池仕运,等. 金沙江下游水生态状况评价及保护战略[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(9): 174-179, 204.
- ZHENG J X, GAO S B, CHI S Y, et al. Hydro-ecological assessment and protection strategies of Jinsha River downstream [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(9): 174-179, 204.
- [20] 池仕运,王瑞,魏秘,等. 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物群落结构特征和多样性分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(21): 8723-8738.
- CHI S Y, WANG R, WEI M, et al. Community structure and diversity of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River based on the monitoring data from 2010—2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21): 8723-8738.
- [21] 成庆泰,郑葆珊. *中国鱼类系统检索*[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- CHENG Q T, ZHENG B S. *Systematic synopsis of Chinese fishes*[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [22] 长江水系渔业资源调查协作组. *长江水系渔业资源*[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- Yangtze River Basin Fishery Resources Survey Cooperative Group. *Fishery resources of the Yangtze River Basin*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1990.
- [23] 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 & Technology, 1994.
- [24] 边坤,张建禄,苟妮娜,等. 应用鱼类生物完整性指数评价秦岭黑河流域健康状况[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(3): 23-29.
- BIAN K, ZHANG J L, GOU N N, et al. Ecological health assessment of Heihe River, Qinling, using the fish-based index of biotic integrity [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(3): 23-29.
- [25] LI T H, HUANG X L, JIANG X H, et al. Assessment of ecosystem health of the Yellow River with fish index of biotic integrity [J]. *Hydrobiologia*, 2018, 814(1): 31-43.
- [26] 邓明星,黄亮亮,莫苑敏,等. 应用鱼类生物完整性指数评价荔浦河河流健康[J]. *生态毒理学报*, 2018, 13(4): 111-119.
- DENG M X, HUANG L L, MO Y M, et al. River health assessment using biotic integrity index based on fish for Lipu River[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(4): 111-119.
- [27] 张翔,周国栋,王雷. 太湖鱼类生物完整性指数构建与健康评价[J]. *水产学杂志*, 2020, 33(1): 25-32.
- ZHANG X, ZHOU G D, WANG L. Construction of index of biotic integrity and health evaluation of fish in Taihu Lake [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2020, 33(1): 25-32.
- [28] 黄凯,姚焱,王晓宁,等. 基于鱼类完整性指数的滦河流域生态系统健康评价[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(5): 901-910.
- HUANG K, YAO Y, WANG X N, et al. The ecosystem health assessment based on the fish index of biological integrity in the Luanhe River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(5): 901-910.
- [29] 刘杨,陈凯,蔡永久,等. 应用鱼类完整性指数F-IBI评价巢湖流域的主要河流健康[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(6): 73-83.
- LIU Y, CHEN K, CAI Y J, et al. The health assessment of the main rivers in the Chaohu Basin using fish-index of biotic integrity [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(6): 73-83.
- [30] 王备新,杨莲芳,胡本进,等. 应用底栖动物完整性指数B-IBI评价溪流健康[J]. *生态学报*, 2005, 25(6): 1481-1490.
- WANG B X, YANG L F, HU B J, et al. A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1481-1490.
- [31] 梁媛,崔磊,文典,等. 水电开发前后金沙江中游鱼类

- 资源演变研究[J]. 水力发电, 2023, 49(9): 6-11.
- LIANG Y, CUI L, WEN D, et al. Research on the evolution of fish resources in the middle reaches of Jinsha River before and after hydropower development [J]. Water Power, 2023, 49(9): 6-11.
- [32] 王斌. 金沙江中游河段水电梯级开发规划环境影响评价及对策研究[R]. 北京市, 中国水电工程顾问集团公司, 2009-05-08.
- WANG B. Study on environmental impact assessment and countermeasures for the cascade hydropower development planning of the middle Reaches of the Jinsha River [R]. Beijing: HydroChina Corporation, 2009, May 8.
- [33] 王渝栋, 崔磊, 李茜, 等. 金沙江中游干流鱼类资源现状及梯级开发对其产生的影响分析[J]. 水生生物学报, 2024, 48(8): 1425-1432.
- WANG Y D, CUI L, LI Q, et al. The current status of fishery resources in the middle reaches of Jinsha River and the impact of cascade development [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(8): 1425-1432.
- [34] 严天明, 何佳洋, 罗杰, 等. 基于鱼类多样性及完整性指数评价南河上中游流域健康状况[J]. 淡水渔业, 2021, 51(5): 3-12.
- YAN T M, HE J Y, LUO J, et al. Assessment of ecosystem health on the upper and middle reaches of Nanhe River with the fish-based biotic integrity index [J]. Freshwater Fisheries, 2021, 51(5): 3-12.
- [35] 苏婉. 基于鱼类生物完整性指数的澜沧江中上游河流健康评价[D]. 昆明: 云南大学, 2021.
- SU W. River health assessment based on a fish-based index of biotic integrity in the upper and middle reaches of the Lancang River [D]. Kunming: Yunnan University, 2021.
- [36] 陈美玲. 澜沧江梯级库区环境梯度对鱼类分布的影响及其机制[D]. 昆明: 云南大学, 2021.
- CHEN M L. The effect and mechanism of environmental gradients on the distribution of fish assemblage in cascade reservoirs of the Lancang River [D]. Kunming: Yunnan University, 2021.
- [37] HELMS B S, WERNEKE D C, GANGLOFF M M, et al. The influence of low-head dams on fish assemblages in streams across Alabama [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2011, 30(4): 1095-1106.
- [38] 张春光, 杨君兴, 赵亚辉, 等. 金沙江流域鱼类[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 1-607.
- ZHANG C G, YANG J X, ZHAO Y H, et al. Fishes in the Jinsha Jiang River Basin, the upper reaches of the Yangtze River, China [M]. Beijing: Science Press, 2019: 1-607.
- [39] 王学雷, 宋辛辛. 梯级水库叠加影响下汉江中下游流域水文情势变化研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2019, 53(5): 685-691.
- WANG X L, SONG X X. Study on the change of hydrological regime in the middle and lower reaches of Hanjiang River under the influence of cascade water conservancy projects [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2019, 53(5): 685-691.
- [40] 张先炳, 胡亚萍, 杨威, 等. 水温对淡水温水性鱼类生命活动的影响[J]. 水生态学杂志, 2021, 42(4): 117-122.
- ZHANG X B, HU Y P, YANG W, et al. Effect of water temperature on the life activities of temperate freshwater fish [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(4): 117-122.
- [41] 曹俊, 陈小娟, 卢晶莹, 等. 乌东德水电站日调峰对下游裂腹鱼类栖息地的影响[J]. 水生态学杂志, 2024, 45(1): 87-95.
- CAO J, CHEN X J, LU J Y, et al. Effects of daily peak-shaving on schizothoracine fish habitat downstream of Wudongde hydropower station [J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(1): 87-95.
- [42] 杨志. 长江上游干流梯级水电开发对鱼类群落的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- YANG Z. Effects of cascade hydropower development in the main stream of the upper reaches of the Yangtze river on fish communities [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [43] 简东, 黄道明, 常秀岭, 等. 红水河干流梯级运行后底栖动物的演替[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(6): 12-18.
- JIAN D, HUANG D M, CHANG X L, et al. The succession of Zoobenthos in the mainstream of Hongshui River after the formation of the cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroecology, 2010, 3(6): 12-18.

Assessing the impact of cascade hydropower stations on the aquatic ecosystem health in the middle reaches of Jinsha River based on fish-index of biotic integrity

WEI Kunyu¹, CUI Lei², CHEN Hao³, MA Siying¹, LIU Ling¹, WAN Fan³, HE Jia¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China; 3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: To assess the impact of cascade hydropower stations on the health of aquatic ecosystem in the middle reaches of Jinsha River and to explore and establish relevant evaluation systems, surveys of fish resources and water environmental elements were conducted in December 2021, April 2022, and July 2022 in both the reservoir and tailwater parts of each station and its primary tributaries. Historical survey data from April to May 2007, March to April 2008, and June to July 2008 were utilized as reference conditions. The distribution range, discriminant capacity, and redundancy of the selected indicators were sequentially performed. Evaluation criteria were established through the implementation of the ratio method. Consequently, specific fish-index of biotic integrity (F-IBI) assessment frameworks tailored to both the main stem and tributaries of the Jinsha River were formulated. Additionally, an investigation into the correlation between F-IBI scores and various water environmental factors was undertaken. The results suggested that: Evenness index (M3), percentage of cyprinid species (M4), percentage of mid-lower layer fish species (M11), percentage of individuals of fish producing floating eggs (M18), and total number of fish individuals (M22) were screened out and analyzed as main stem core indicators. While percentage of loach species (M5), M11, percentage of carnivorous fish individuals (M13), M18, percentage of individuals with special spawning methods (M21) and M22 were filtered as tributaries core indicators. 32 monitoring points have been set up in the middle reaches of the Jinsha River. F-IBI scores range from 6.54 to 63.11 points, with evaluation grades of “sub-healthy”, “normal”, “medium risk”, “high risk” and “fishless” accounting for 3.70%, 29.6%, 48.1%, 11.1%, and 7.4% of monitoring points, respectively. In terms of correlations, the F-IBI values demonstrated a significant negative association with water temperature (WT, $r=-0.404\ 9$, $P=0.044\ 7$) and a significant positive correlation with secchidepth (SD, $r=0.569\ 1$, $P=0.003\ 0$) and flow velocity (v , $r=0.450\ 9$, $P=0.046$). In conclusion, the research results indicated that the cascade hydropower stations in the middle reaches of the Jinsha River exerted a significant impact on the overall health of its aquatic ecosystem, with a notably higher level of impact observed in the tributaries compared to the main stem.

Key words: the middle reaches of Jinsha River; fish-index of biotic integrity(F-IBI); cascade hydropower station; aquatic ecosystem health