

金沙江旭龙水电站鱼类栖息地适宜性评价

李方平¹,张登成²,王 孟²,陈 锋³,翟红娟²,杨汉运³,张可可²

(1. 国电金沙江旭龙(奔子栏)水电开发有限公司,四川 成都 610041;

2. 长江水资源保护科学研究所,湖北 武汉 430051;

3. 水利部中国科学院水工程生态研究所,湖北 武汉 430079)

摘要:评估栖息地适宜性等级,提出针对性的栖息地保护与修复措施,为梯级水电开发影响下的鱼类栖息地保护范围筛选提供参考。为筛选金沙江上游旭龙江段鱼类栖息地保护支流,从替代适宜性和保护适宜性2个角度构建了鱼类栖息地适宜性评价指标体系,选取11个与栖息地质量密切相关的评价指标,应用层次分析法确定评价指标的权重值,计算3条主要支流的栖息地适宜性指数(HSI),并划分栖息地适宜性等级。结果表明:重点保护鱼类物种相似性、纵向连通性指数、特有鱼类物种相似性3项指标的权重值位列前3位,分别为0.234、0.234、0.127;定曲、麦曲河、丹达曲的HSI分别为82.1、67.4和65.1,定曲适宜性等级最高为“高度适宜”,麦曲河、丹达曲适宜性等级为“适宜”。针对当前定曲鱼类生境存在的问题,拟定了补建过鱼设施、开展受损河道生境修复、实施生态调度以及加强水污染监管等对策措施。

关键词:鱼类栖息地;适宜性指数;生境修复;旭龙水电站

中图分类号:Q178.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2023)06-0053-10

旭龙水电站位于云南省德钦县与四川省得荣县交界的金沙江干流河段,电站正常蓄水位2 302 m,装机容量2 400 MW,多年平均发电量103.19亿kW·h。电站建设在取得巨大综合利用效益的同时,也将对生态环境尤其是鱼类及其生境带来一定不利影响,表现在:大坝建设造成河流生境片段化影响鱼类洄游和遗传交流,库区水文情势变化压缩流水性鱼类栖息空间,低温水下泄推迟鱼类繁殖季节等。面对梯级水电开发的负面生态效应,现有的过鱼设施、人工增殖放流、生态调度等保护措施无法从根本上解决鱼类多样性衰退问题(曹文宣,2008),从保护生物学角度出发,栖息地保护是鱼类多样性保护最为有效的途径(张雄等,2014;黄光明等,2015;邱阳凌,2018)。

开展栖息地适宜性评估并选择适宜保护河段是开展鱼类栖息地保护的基础和前提(杨刚等,2014;姜跃良等,2015)。鱼类栖息地评估方法主要包括栖息地模拟法、微观河流地貌法和宏观空间分析法(张雄

等,2014),其中栖息地模拟法是基于河道内流量增加法的原理,用以量化分析特定鱼类对水深、流速、河床底质等的要求及其与河流流量关系的计算方法,当前研究侧重于具体某种鱼类的物理栖息地适宜度建模、二维水力学模型模拟研究及应用(Steffler & Blackburn, 2002;傅菁菁等,2016)。微观河流地貌法通过实地调查河流地貌生境因子,采取综合打分的方法分析其适宜性(Brown et al, 2000; Vinagre et al, 2006; 姜跃良等,2015; 马里等,2017)。上述2种方法往往针对某一具体河段,适用于小尺度范围鱼类栖息地质量评估,相对而言,宏观空间分析法更适宜于大尺度范围内的栖息地快速评估(张雄等,2014),尤其适用于干流水电开发影响下的支流栖息地筛选研究(黄滨等,2018)。

本研究采用宏观空间分析法,针对旭龙库区及坝下3条主要支流(麦曲河、丹达曲、定曲),在《河流水生生物栖息地保护技术规范》(国家能源局,2021)评价指标体系的基础上,综合分析各评价指标与鱼类栖息地保护功能之间的关系及影响程度,构建了适用于金沙江上游旭龙江段的栖息地适宜性评价指标体系,并应用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)确定各项评价指标的权重值,加权计算鱼类栖息地适宜性指数,评估栖息地适宜性等级,并提出针对性的保护与修复措施,以期对梯级水电开发影响下的鱼类栖息地保护范围筛选提供参考。

收稿日期:2022-03-10 修回日期:2023-08-21

基金项目:水利部重大科技项目(SK2022040)。

作者简介:李方平,男,高级工程师,研究方向为水电工程建设管理。E-mail:532562719@qq.com

通信作者:张登成,男,工程师,研究方向为水生态保护与修复、水利水电工程环境影响评价。E-mail:569095890@qq.com

1 区域概况

旭龙水电站库区及坝下河段分布有 10 条主要支流,这些支流普遍切割深、沟谷狭窄、沟床纵比降大。其中规模较大、具有保护价值的支流包括旭龙库尾的麦曲河、库区的丹达曲以及坝下游的定曲(图1)。

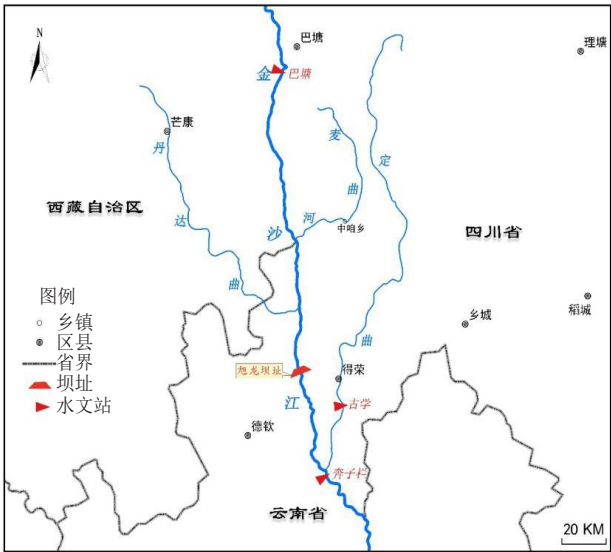


图1 研究区域水系
Fig.1 Schematic diagram of river system in the study area

麦曲河属金沙江左岸一级支流,发源于巴塘县拉拉拉,大致流向由北向南,全长约 100 km,流域面积 1 564 km²。麦曲河为典型的山区河流,中咱以上河段高山峻岭,河谷狭窄,水流湍急;中咱以下至河口约 30 km 河段,河流相对较为平缓,河谷较开阔,沙质边滩、心滩较发育,河床底质多卵石、砾石、沙砾。

丹达曲属金沙江右岸一级支流,发源于西藏芒康县尼德附近山脉,自北向南偏东流经芒康县、嘎托区及徐中区后在布虚村附近进入云南境内,经德钦县的羊拉乡地界转东注入金沙江。丹达曲全长约 144 km,河道平均比降 1.55%,流域面积约 2 608 km²。丹达曲上游段河谷较宽阔,水流平缓,中下游段河谷狭窄,水流湍急,属低沙河流,河床覆盖层多以沙卵石组成。

定曲属金沙江左岸一级支流,发源于理塘县沙鲁里山主峰格聂山西麓,自北向南流经理塘、巴塘、乡城、得荣 4 县,在得荣县奔都桥左纳玛依河,于古学大桥与最大支流许曲河汇合,在古学以下汇入金沙江。定曲全长约 226 km,流域面积约 12 213 km²。

2 数据与方法

2.1 研究数据获取

采用资料收集、现场调查和补充监测方式,获取研究区域的水文、水质、水生生物以及水资源开发利用等基础数据。其中,水文数据包括金沙江巴塘、奔子栏水文站 1953–2015 年以及定曲古学水文站 1987–2015 年径流系列统计资料;水质数据为 2019 年麦曲河、丹达曲、定曲共计 9 个断面水质评价结果;水生生物数据源于 2012 年 10–11 月、2013 年 5–6 月、2016 年 5 月、2019 年 4–5 月对麦曲河、丹达曲、定曲的鱼类资源及其生境状况调查结果。同时收集研究区域的社会经济、水污染源、水资源开发利用和防洪工程建设等资料。

2.2 评价指标体系建立

参考《河流水生生物栖息地保护技术规范》(国家能源局,2021),结合研究江段生态环境特点,根据完整性、独立性、可评价性和简明性原则,构建栖息地评价指标体系,如表 1。参考国内相关研究成果(张雄等,2014;杨青瑞等,2015;邹曦等,2021),得到各项评价指标的标准化和赋分情况,如表 2。

表 1 鱼类栖息地适宜性评价指标体系
Tab.1 Evaluation index system of fish habitat suitability

目标层	准则层	子目标层	评价指标
栖息地 适宜性 指数 (A)	替代适 宜性 (B ₁)	物种相似 性(C ₁)	土著鱼类物种相似性指数(D ₁)
			特有鱼类物种相似性指数(D ₂)
			重点保护鱼类物种相似性指数(D ₃)
		河流水质状况(D ₄)	
	生境相似 性(C ₂)	河口处多年平均流量(D ₅)	
		生境多样性状况(D ₆)	
		鱼类产卵场分布情况(D ₇)	
	保护适 宜性 (B ₂)	支流连通 性(C ₃)	纵向连通性指数(D ₈)
			横向连通性指数(D ₉)
		生态健康 性(C ₄)	自然流水江段保留率(D ₁₀)
河岸生态缓冲带状况(D ₁₁)			

2.2.1 物种相似性指标 参考《河流水生生物栖息地保护技术规范》(国家能源局,2021),选取土著鱼类物种相似性指数、特有鱼类物种相似性指数、重点保护鱼类物种相似性指数作为物种相似性指标。

(1)土著鱼类物种相似性指数(D₁)

土著鱼类物种相似性是指金沙江干流旭龙江段分布的土著鱼类在支流中也分布的种类数量所占比例,可用下式计算:

表2 评价指标的标准化和所赋分值
Tab.2 Standardization and scoring
of the evaluation indices

指标	指标标准化	适宜状况	赋分值
$D_1/\%$	≥ 85	非常适宜	100
	$65 \leq D_1 < 80$	适宜	75
	$40 \leq D_1 < 65$	基本适宜	50
	< 40	不适宜	25
$D_2/\%$	≥ 85	非常适宜	100
	$65 \leq D_2 < 80$	适宜	75
	$40 \leq D_2 < 65$	基本适宜	50
	< 40	不适宜	25
$D_3/\%$	≥ 85	非常适宜	100
	$65 \leq D_3 < 80$	适宜	75
	$40 \leq D_3 < 65$	基本适宜	50
	< 40	不适宜	25
D_4	I、II类水质	非常适宜	100
	III类水质	适宜	75
	IV类水质	基本适宜	50
	V类水质	不适宜	25
$D_5/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	> 100	非常适宜	100
	$60 < D_5 \leq 100$	适宜	75
	$20 < D_5 \leq 60$	基本适宜	50
	≤ 20	不适宜	25
D_6	4种生境类型	非常适宜	100
	3种生境类型	适宜	75
	2种生境类型	基本适宜	50
	仅有1种生境类型	不适宜	25
D_7	分布有裂腹鱼类、 鲃科鱼类、	非常适宜	100
	高原鳅类的产卵场	适宜	75
	分布有裂腹鱼类、 高原鳅类产卵场		
	仅分布有鲃科鱼类 产卵场	基本适宜	50
	仅分布有高原鳅类 产卵场	不适宜	25
$D_8/\%$	≤ 3	非常适宜	100
	$3 < D_8 \leq 6$	适宜	75
	$6 < D_8 \leq 9$	基本适宜	50
	> 9	不适宜	25
$D_9/\%$	≥ 80	非常适宜	100
	$60 \leq D_9 < 80$	适宜	75
	$40 \leq D_9 < 60$	基本适宜	50
	< 40	不适宜	25
$D_{10}/\%$	≥ 90	非常适宜	100
	$60 \leq D_{10} < 90$	适宜	75
	$30 \leq D_{10} < 60$	基本适宜	50
	$< 30\%$	不适宜	25
D_{11}	植被带宽度 $\geq 15\text{ m}$,河漫滩 植被优势类群为林地, 河岸稳定无侵蚀	非常适宜	100
	植被带宽度(10~15 m),河 漫滩植被优势类群为灌丛 或草地,河岸轻度侵蚀	适宜	75
	植被带宽度(5~10 m), 河漫滩占地类型为农田, 岸坡中度侵蚀	基本适宜	50
	植被带宽度 $< 5\text{ m}$,河漫滩占 地类型为工业区或矿厂, 岸坡重度侵蚀	不适宜	25

$$D_1 = \frac{E_{1\text{支流}}}{E_{1\text{干流}}}$$

①

式中: $E_{1\text{干流}}$ 为金沙江干流旭龙江段分布的土著鱼类种类数量; $E_{1\text{支流}}$ 为支流中分布的土著鱼类同样在干流中分布的种类数量。

(2)特有鱼类物种相似性指数(D_2)

特有鱼类物种相似性是指金沙江干流旭龙江段分布的特有鱼类同样在支流中分布的种类数量所占比例,可用下式计算:

$$D_2 = \frac{E_{2\text{支流}}}{E_{2\text{干流}}}$$

②

式中: $E_{2\text{干流}}$ 为金沙江干流旭龙江段分布的特有鱼类种类数量; $E_{2\text{支流}}$ 为干流中分布的特有鱼类同样在支流中分布的种类数量。

(3)重点保护鱼类相似性指数(D_3)

重点保护鱼类是指纳入国家级、省级重点保护鱼类,重点保护鱼类物种相似性是指干流中分布的重点保护鱼类同样在支流中分布的种类数量所占比例,可用下式计算:

$$D_3 = \frac{E_{3\text{支流}}}{E_{3\text{干流}}}$$

③

式中: $E_{3\text{干流}}$ 为金沙江干流旭龙江段中分布的重点保护鱼类物种数量; $E_{3\text{支流}}$ 为干流中分布的重点保护鱼类同样在支流中分布的物种数量。

2.2.2 生境相似性指标 河流水质状况、河口多年平均流量、生境多样性、产卵场分布作为生境相似性指标。

(1)河流水质状况(D_4)

河流污染物等可能影响鱼类的生存、繁殖及觅食等生命活动,河流水质状况能够直接反映污染状况,参考杨青瑞等(2015),以代表性断面水质评价结果反映河流的水质状况。

(2)河口处多年平均流量(D_5)

河口处多年平均流量反映河流满足鱼类及其他水生生物生态需水的能力和物种承载能力(蒋晓辉等,2009),定曲河口处多年平均流量采用古学水文站资料,麦曲河、丹达曲利用巴塘、奔子栏水文站水文资料推算。

(3)生境多样性指数(D_6)

按照鱼类栖息生境优劣,山区河流生境可主要划分为深潭-浅滩、平坦河床、水库库区、急流跌水4种类型(张雄等,2014),针对上游、中游、下游各选取3 km典型河段开展调查,以生境类型的多样性作为评价标准。

(4)鱼类产卵场分布情况(D_7)

特定鱼类产卵场往往具有该种鱼类繁殖所要求的环境条件,参考杨青瑞等(2015),根据河流中鱼类产卵场的产卵种类、分布面积以及生境现状等综合评价。

2.2.3 支流连通性指标 参考郭亚萍等(2016),采用纵向连通性指数、横向连通性指数作为支流连通性指标。

(1)纵向连通性指数(D_8)

纵向连通性采用河流的断点或节点等障碍物数量(已有过鱼设施的不纳入统计)与河流长度的比值,根据各支流已建及在建水电站数量进行计算。

$$D_8 = \frac{N}{RL}$$

④

式中: N 为评价河流中已建及在建水电站的个数; RL 为评价河流的公里数。

(2)横向连通性指数(D_9)

横向连通性用河流天然河岸或生态护岸的公里数与河岸总公里数的比值表示,具体计算公式如下:

$$D_9 = \frac{NL}{RBL}$$

⑤

式中: $0 \leq D_9 \leq 1$, D_9 越接近 1 表示河流的横向连通性越好; NL 为天然河岸或生态护岸的公里数; RBL 为河流河岸总公里数。

2.2.4 生态健康性指标 自然流水江段保留率和河岸生态缓冲带状况作为生态健康性指标。

(1)自然流水江段保留率(D_{10})

自然流水江段保留率指标参考《雅砻江流域综合规划环境影响报告书》(长江水资源保护科学研究所,2019),根据梯级开发后保留的自然流水江段与河流长度的比值进行计算,具体计算公式如下:

$$D_{10} = \frac{NFL}{RL}$$

⑥

式中: $0 \leq D_{10} \leq 1$, D_{10} 越接近 1 表示自然流水江段保留程度越好; NFL 为河流未开发江段的公里数; RL 为评价河流的公里数。

(2)河岸生态缓冲带状况(D_{11})

河岸生态缓冲带是决定鱼类多样性和群落结构的重要因素,参考邹曦等(2021),河岸生态缓冲带状况由植被带宽度、河漫滩优势类型及岸坡侵蚀度等作为评价依据。

2.3 栖息地适宜性指数计算及评价标准

2.3.1 栖息地适宜性指数计算 计算方法有乘法、几何平均法、最小值法及加权平均法(张文鸽等,

2008),不同的评价指标对鱼类栖息地的影响程度不同,加权平均法考虑了各评价指标的影响力(康鑫等,2011;杨刚等,2014),故选用加权平均法计算鱼类栖息地适宜性指数(HSI),计算公式如下:

$$HSI = \sum_{i=1}^n \alpha_i D_i$$

⑦

式中: HSI 代表鱼类栖息地适宜性指数, α_i 为各评价指标的权重, D_i 为各评价指标的实际得分, n 为评价指标的个数。

本研究采用层次分析法,通过决策打分确定评价指标的权重。为检验判别矩阵的一致性,计算一致性指标 CI ,在此基础上计算随机一致性比值 CR 。

$$CI = (\lambda_{\max} - n)(n - 1)$$

⑧

式中: CI 为一致性指标, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征值, n 是矩阵的维数。

$$CR = CI/RI$$

⑨

式中: CR 为一致性指标, RI 为随机一致性指标,可通过查表获取。当 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵满足一致性要求。

2.3.2 评价标准 鱼类栖息地适宜性指数的评价标准具有相对性,本研究结合区域实际情况,采用分级指标评分法,确定栖息地保护适宜性分为 5 级,详见表 3。

表 3 鱼类栖息地适宜性等级
Tab.3 Grading of fish habitat suitability

适宜性指数	适宜性等级	含义
[80,100)	高度适宜	与水电开发河流的物种种群结构和生境条件相似性高,连通性强,生态健康,生物栖息地质量优、数量多。
[60,80)	适宜	与水电开发河流的物种种群结构和生境条件基本相似,连通性较强,生态系统一定程度退化,但生物栖息地数量多。
[40,60)	一般适宜	与水电开发河流的物种种群结构和生境条件相似性一般,连通性一般,生态系统一定程度退化,生物栖息地数量适中。
[20,40)	勉强适宜	与水电开发河流的物种种群结构和生境条件大体相似,连通性较差,生态系统较大程度退化,生物栖息地数量较少。
[0,20)	不适宜	与水电开发河流的物种种群结构和生境条件基本不相似,连通性差,生态系统严重退化,生物栖息地数量极少或消失。

3 结果与分析

3.1 评价指标赋分

从物种相似性方面看,金沙江干流旭龙江段分布土著鱼类共计 17 种,隶属于 2 目 4 科 13 属。其中土著鱼类 11 种,包括国家二级重点保护鱼类 1 种,即

金沙鲈鲤(*Percocypris pingi*);四川省重点保护鱼类2种,即金沙鲈鲤、长丝裂腹鱼(*Schizothorax o;olichonema*);长江上游特有鱼类9种,即金沙鲈鲤、短须裂腹鱼(*S. wangchiachii*)、长丝裂腹鱼、四川裂腹鱼(*S. (Racoma) kozlovi*)、软刺裸裂尻鱼(*Schizopygopsis malacanthus*)、硬刺松潘裸鲤(*Gymnocypris potanini firmispinatus*)、中华金沙鳅(*Jinshaia. sinensis*)、黄石爬鮡(*Euchiloglanis kishinouyei*)、安氏高原鳅(*Triplophysa angeli*),详见表4。3条支流中,麦曲河分布土著鱼类10种,定曲河为9种,均包含长江上游特有鱼类8种,而丹达曲仅分布有土著鱼类7种,长江上游特有鱼类6种,因此丹达曲土著鱼类相似性指数、特有鱼类相似性指数均低于麦曲河和定曲。

从生境相似性方面看,丹达曲水质指标达Ⅱ类标准,麦曲河、定曲总体可达到Ⅲ类水质标准;定曲河口处多年平均流量达到151 m³/s,显著高于丹达曲(32 m³/s)和麦曲河(20 m³/s);在生境多样性方面,麦曲河中咱以上河段、丹达曲中下游河段基本为单一的急流跌水生境,仅麦曲河中咱以下30 km河段、丹达曲上游河段分布有深潭-浅滩、平坦河床等生境类型,而定曲上下游河段均分布有深潭-浅滩、平坦河床、急流跌水等生境类型;在鱼类产卵场分布方面,定曲在定波-正斗河段、麻通-来依河段等广泛分布有裂腹鱼类、鮡科鱼类以及高原鳅类的产卵场,而麦曲河、丹达曲仅在河口河段零星分布有裂腹鱼类、高原鳅类产卵场。

从支流连通性方面看,麦曲河纵向连通性指数为3%,高于丹达曲(1.4%)和定曲(0.9%),麦曲河已建水电站3座,分别为昌波二级水电站(坝后式)、纳交西水电站(引水式)、中咱水电站(引水式),丹达曲已建电站1座,为丹达曲电站(引水式),在建电站1座,为新丹达曲电站(引水式),定曲已建水电站2座,分别为鱼根(引水式)、古学水电站(引水式),麦曲河纵向连通性指数高,与其已建电站数量多和河道长度最短有关。从横向连通性来看,麦曲河岸线总体处于自然状态,丹达曲仅在上游流经芒康县城零星分布有混凝土护坡,而定曲流经得荣县城以及斯闸乡、奔都乡等乡镇,在这些河段修建了混凝土防护工,导致定曲横向连通性指数相对较低。

从生态健康性方面看,3条支流已建水电站库区回水长度+引水式电站减水河段长度介于18.5~22 km,自然流水江段保留率均高于80%。从河岸生态缓冲带来看,麦曲河中咱以上河段、丹达曲中下游河段沿岸山势陡峭、河谷狭窄,植被覆盖度较低,局部岸坡有较为强

表4 金沙江上游干流旭龙江段及支流鱼类调查结果
Tab.4 Fish survey results for the Xulong section of Jinsha River

种类	调查水域				关注物种
	干流	麦曲河	丹达曲	定曲	
I. 鲤形目					
CYPRINIFORMES					
1. 鲇科Cobitidae					
高原鲇属 <i>Triplophysa</i>					
安氏高原鲇 <i>T. angeli</i>	★	★	☆	★	E
勃氏高原鲇 <i>T. bleekeri</i>	★	☆			
细尾高原鲇 <i>T. stenura</i>	★	★	★	★	
泥鲇属 <i>Misgurnus</i>					
泥鲇					
<i>M. anguillicaudatus</i> [△]	★				
2. 鲤科Cyprinidae					
鲮鲃属 <i>Rhoaues</i>					
高体鲮鲃					
<i>R. ocellatus</i> [△]	★				
棒花鱼属 <i>Abbottina</i>					
棒花鱼 <i>A. rivularis</i> [△]	★				
麦穗鱼属					
<i>Pseudorasbora</i>					
麦穗鱼 <i>P. parva</i> [△]	★				
鲃亚科Barbinae					
鲃鲤属 <i>Percocypris</i>					
金沙鲃鲤					
<i>Percocypris pingi</i>	★				E、C、R
裂腹鱼属					
<i>Schizothorax</i>					
短须裂腹鱼					
<i>S. wangchiachii</i>	★	★	★	★	E
长丝裂腹鱼					
<i>S. dolichonema</i>	★	★	★	★	E、C、R
四川裂腹鱼					
<i>S. (Racoma) kozlovi</i>	★	★	☆	★	E
裸裂尻鱼属					
<i>Schizopygopsis</i>					
软刺裸裂尻鱼					
<i>S. malacanthus</i>	★	★	★	★	E
裸鲤属 <i>Gymnocypris</i>					
硬刺松潘裸鲤					
<i>G. potanini firmispinatus</i>	★	★		★	E
鲫属 <i>Carassius</i>					
鲫 <i>C. auratus</i> [△]	★				
鲤属 <i>Cyprinus</i>					
鲤 <i>C. carpio</i> [△]	★				
3. 平鳍鲃科					
Homalopteridae					
金沙鲃属 <i>Jinshaia</i>					
中华金沙鲃 <i>J. sinensis</i>	★	★		☆	E
II. 鲇形目SILURIFORMES					
4. 鲇科Sisoridae					
石爬鲇属 <i>Euchiloglanis</i>					
黄石爬鲇 <i>E. kishinouyei</i>	★	★	☆	★	E、R

注:“★”表示采集到的种类,“☆”表示调查访问存在种类,“△”表示外来物种;E、C、R 分别表示特有种、保护种和红色名录物种。
Note: “★” indicates the collected species, “☆” indicates the species existing in the investigation and visit, and “△” indicates the alien species; E, C and R represent endemic species, protected species and red list species, respectively.

烈的侵蚀现象,而定曲上中游河岸带具有较高的植被覆盖率,仅在乡镇河段有轻度侵蚀现象,故其河岸生态缓冲带状况赋分较高。

麦曲河、丹达曲、定曲各项评价指标的计算值、赋分值以及适宜状况详见表 5。定曲河除重点保护鱼类物种相似性以外,其他各项评价指标均为适宜及以上等级;麦曲河除重点保护鱼类物种相似性、河口处多年平均流量、河岸生态缓冲带状况外,其他评价指标均为适宜及以上等级;丹达曲除特有鱼类物种相似性、河流水质状况、纵向连通性指数、横向连通性指数、自然流水江段保留率外,其他评价指标均为基本适宜及以下等级。

3.2 评价指标权重

根据各评价指标对鱼类栖息地质量影响的相对程度,通过评价价值指标之间的两两比较确定每个评价指标的相对重要性:栖息地保护理应优先考虑列入国家级或省级重点保护鱼类,河流纵向连通是鱼类在产卵场、索饵场和越冬场顺利迁移的基础,对鱼类完成整个生活史过程至关重要(吕军等,2017),因此将重点保护鱼类物种相似指数、纵向连通性指数列为第 1 等级;研究江段分布的长江上游特有鱼类也

是重要的保护对象,维护鱼类产卵条件是保障鱼类种群维持的基础,因此将特有鱼类物种相似性、鱼类产卵场分布情况列为第 2 等级;深潭、浅滩等多样性生境类型能够更好满足不同鱼类索饵、繁殖和越冬的需求,河口处多年平均流量大的河流能提供更多物种的栖息空间(张雄等,2014),自然流水江段对于适宜流水生境的裂腹鱼类、鮡科鱼类繁殖至关重要,考虑到上述指标对鱼类栖息地质量的影响程度,故将土著鱼类物种相似性、生境多样性指数、河口处多年平均流量、自然流水江段保留率列为第 3 等级;河岸带土地利用类型及生态型护岸对鱼类的多样性和群落结构以间接影响为主(康鑫等,2011),故将横向连通性指数、河岸生态缓冲带状况列为第 4 等级;河流水质状况与鱼类的生长、繁殖等关系密切(杨刚等,2014),考虑到研究区域河流水质总体良好,对鱼类栖息地质量影响较小,故列为第 5 等级。由此构建如表 6 所示的评价指标判别矩阵。

通过实际计算,判别矩阵最大特征值 λ_{max} 为 11.56,随机一致性指标 $RI=1.52(n=11)$,据此计算一致性比率 $CR=0.037\leq 0.1$,表明判别矩阵具有良好的 consistency。各评价指标权重见表 7。

表 5 3 条支流各项评价指标赋分
Tab.5 Index scores for the three tributaries

评价指标	麦曲河			丹达曲			定曲		
	指标描述	赋分	适宜状况	指标描述	赋分	适宜状况	指标描述	赋分	适宜状况
土著鱼类物种相似性	90.9%	100	非常适宜	63.6%	50	基本适宜	81.8%	75	适宜
特有鱼类物种相似性	88.9%	100	非常适宜	66.7%	75	不适宜	88.9%	100	非常适宜
重点保护鱼类物种相似性	50.0%	50	基本适宜	50.0%	50	基本适宜	50.0%	50	基本适宜
河流水质状况	Ⅲ类	75	适宜	Ⅱ类	100	非常适宜	Ⅲ类	75	适宜
河口处多年平均流量	20 m³/s	50	基本适宜	32 m³/s	50	基本适宜	151 m³/s	100	非常适宜
生境多样性指数	急流跌水、深潭-浅滩、平坦河床生境	75	适宜	急流跌水、平坦河床生境	50	基本适宜	深潭-浅滩、水库库区、急流跌水、平坦河床生境	100	非常适宜
鱼类产卵场分布情况	分布有裂腹鱼类、高原鳅类产卵场	75	适宜	分布有裂腹鱼类、高原鳅类产卵场	50	基本适宜	中上游分布有裂腹鱼类、高原鳅类产卵场,下游分布有鮡科鱼类产卵场	100	非常适宜
纵向连通性指数	3.0%	75	适宜	1.4%	100	非常适宜	0.9%	100	非常适宜
横向连通性指数	95%	100	非常适宜	95%	100	非常适宜	85%	100	非常适宜
自然流水江段保留率	81.0%	75	适宜	87.2%	75	适宜	90.3%	100	非常适宜
河岸生态缓冲带状况	植被带宽度<5 m,局部岸坡有强烈侵蚀现象	25	不适宜	植被带宽度<5 m,局部岸坡有强烈侵蚀现象	25	不适宜	上中游河段植被带宽度 10~15 m,乡镇河段有轻度侵蚀现象	75	适宜

3.3 栖息地适宜性排序

HSI 计算结果表明(表 8),定曲的 HSI 数为 82.1,适宜性等级为“高度适宜”,麦曲河的 HSI 为 67.4,适宜性等级为“适宜”,丹达曲的 HSI 为 65.1,适宜性等级为“适宜”。因此,研究江段应优先保护旭龙坝下江段的定曲,其次是旭龙库尾的麦曲河,最后是库区支流丹达曲。

表 6 评价指标判断矩阵
Tab.6 Evaluation index judgment matrix

指标	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈	D ₉	D ₁₀	D ₁₁
D ₁	1	1/3	1/5	5	3	1	1/3	1/5	3	1	3
D ₂	3	1	1/3	7	5	3	1	1/3	5	3	5
D ₃	5	3	1	9	5	5	3	1	7	5	7
D ₄	1/5	1/7	1/9	1	1/5	1/5	1/7	1/9	1/3	1/5	1/3
D ₅	1/3	1/5	1/5	5	1	1	1/3	1/5	3	1	3
D ₆	1	1/3	1/5	5	1	1	1/3	1/5	3	1	3
D ₇	3	1	1/3	7	3	3	1	1/3	5	3	5
D ₈	5	3	1	9	5	5	3	1	7	5	7
D ₉	1/3	1/5	1/7	3	1/3	1/3	1/5	1/7	1	1/3	1
D ₁₀	1	1/3	1/5	5	1	1	1/3	1/5	3	1	3
D ₁₁	1/3	1/5	1/7	3	1/3	1/3	1/5	1/7	1	1/3	1

表 7 各评价指标权重值
Tab.7 Weight of each evaluation index

评价指标	权重值	评价指标	权重值
D ₁	0.062	D ₇	0.119
D ₂	0.127	D ₈	0.234
D ₃	0.234	D ₉	0.025
D ₄	0.014	D ₁₀	0.054
D ₅	0.050	D ₁₁	0.025
D ₆	0.054		

表 8 鱼类栖息地适宜性指数得分及保护顺序
Tab.8 Fish habitat suitability index scores, grades and protection order

支流名称	HSI	适宜性等级	栖息地保护顺序
麦曲河	67.4	适宜	2
丹达曲	65.1	一般适宜	3
定曲	82.1	高度适宜	1

4 讨论

4.1 评价指标体系优化

科学合理的评价指标体系是精准筛选栖息地保护范围的基础。本文构建的评价指标体系充分考虑了金沙江上游旭龙江段的生境特点以及基础数据的可获取性,在《河流水生生物栖息地保护技术规范》

(NB/T10485-2021)的基础上,从明确指标概念、规范计算方法等方面,优化了生境相似性、支流连通性、生态健康性等子目标层的评价指标,优化后的指标体系具有科学内涵,能够综合反映比选支流的栖息地保护价值。

在生境相似性子目标层中,选取了生境多样性指数、鱼类产卵场分布情况、河流水质状况和河口处多年平均流量 4 项指标。已有研究表明,河流的生境异质性对鱼类完成索饵、繁殖和越冬等全部生活史过程至关重要,尤其是具有深潭浅滩等复杂生境类型的河流往往鱼类多样性较高(张雄等,2014),本研究在各条支流上下游选取典型河段,开展生境类型及其分布情况的现场调查,有助于描述河流总体生境复杂程度。不同类群鱼类的繁殖习性及其对产卵场的需求有所不同,通常裂腹鱼类繁殖需要底质砾石相对粗大、水流缓急交错的河床,往往在水深 0.15~1.5 m、流速 0.2~1.5 m/s 的边滩、心滩等产卵繁殖(詹会祥等,2017;李洋,2019);黄石爬鮡等鮡科鱼类产卵场多分布于干支流的峡谷、窄谷及水流较为湍急单一河道江段(黄奇夔等,2003);高原鳅类主要在河流沿岸带石砾及支流适宜的小环境中产粘性卵(王树森等,2016)。作为鱼类栖息地保护支流,应该尽可能满足更多类群鱼类的产卵繁殖条件,因此将鱼类产卵场分布情况作为重要的评价指标。河流水质状况直接影响鱼类栖息和繁殖(马里等,2017),河口处多年平均流量可反映满足鱼类及其他水生生物生态需水的能力和物种承载能力(蒋晓辉等,2009),考虑到这 2 个指标概念明确,故将其作为评价指标。通过对上述评价指标的优化,计算所需的基础数据更易准确获取,计算过程也更为直观和简捷,具有较好的推广价值和应用前景。

研究表明,河岸带生境质量是决定鱼类多样性和群落结构的重要环境因子(高欣等,2015、李艳丽等,2016)。相对于技术规范,本研究在支流连通性子目标层中增加了横向连通性指数,在生态健康性子目标层中增加了河岸生态缓冲带状况指标,可从不同角度表征河岸带生境质量,以更全面评估河流栖息地的适宜状况。

本研究构建的评价指标体系虽涵盖了生境适宜性评估的各个方面,但受限于基础资料制约和快速评估的需要,仍存在以下不足之处:一是生物因素考虑较少,影响鱼类栖息地的因素不仅是水文、水质、河道底质等环境因素,还包括饵料生物水平、鱼类种群特性以及种间关系等生物因素,下阶段可将饵料丰富度

指数、鱼类物种多样性指数等纳入评价指标体系;二本息选取的评价指标较为宏观,如水质状况仅考虑了代表性断面的水质类别,水文状况仅考虑了河口处多年平均流量,下阶段可进一步考虑水温、溶解氧、酸碱度、含沙量等水质指标以及流量上涨率、涨落水次数、洪峰流量等水文变化类和频率类指标。

4.2 栖息地适宜性比选

根据栖息地适宜性评估结果,3条支流中定曲栖息地适宜性等级为“高度适宜”,而麦曲河、丹达曲的适宜性等级为“适宜”,表明定曲宜作为旭龙水电站替代生境的首选河段。

在栖息地适宜性评价所包含的11个评价指标中,定曲在特有鱼类物种相似性、河口处多年平均流量、生境多样性指数、鱼类产卵场分布情况、纵向连通性指数、横向连通性指数、自然流水江段保留率等7项评价指标达到了“非常适宜”状态。定曲的河流水质状况、土著鱼类物种相似性、河岸生态缓冲带状况等3项评价指标达到了“适宜”状态,但还有进一步提高的空间。从河流水质状况来看,2019年定曲古学水电站厂房尾水断面部分时段氨氮、总磷偶有出现Ⅲ类情况,其余指标均达到Ⅱ类水质标准,因此应采取污染源控制等措施维护定曲良好水环境质量。从河岸生态缓冲带状况来看,受河道采砂等人为活动影响,麦曲河、丹达曲局部岸坡有较为强烈的侵蚀现象,定曲流经的得荣县城以及古学等乡镇河段有轻度侵蚀现象,此外受河道地形影响定曲的河岸带植被带宽度优于麦曲河和丹达曲,因此定曲河岸生态缓冲带赋分更高,但应采取措施有效控制河道采砂现象。从特有鱼类种类来看,除金沙鲈鲤、中华金沙鲈外,金沙江干流旭龙江段分布的其他7种特有鱼类在定曲均有采集到,丹达曲仅采集到特有鱼类3种,麦曲河采集到特有鱼类8种,但中华金沙鲈在麦曲河种群数量较少,仅在2012年采集到1尾。据刘淑伟等(2013)调查,中华金沙鲈主要分布于金沙江中下游以及长江上游的干支流,为典型的产漂流性卵鱼类,虎跳峡以上的龙蟠镇、黎明乡和巨甸镇江段产卵场是海拔最高、位于金沙江最上游的中华金沙鲈产卵场,因此金沙江旭龙坝址以上江段不是中华金沙鲈的主要分布区域。受当前全球气候变化、梯级水电开发等影响,目前中华金沙鲈种群向旭龙以下江段迁移,定曲未捕获该物种可能与采样强度不够以及其种群规模较小等有关,后期在定曲鱼类调查中应予以重点关注。

定曲的重点保护鱼类物种相似性指标达到了

“基本适宜”状态,与麦曲河、丹达曲的适宜状况一致,这是由于研究江段分布省级以上重点保护鱼类2种(即金沙鲈鲤、长丝裂腹鱼),长丝裂腹鱼在3条支流均有发现,但金沙鲈鲤种群数量稀少仅分布在金沙江干流所致。

4.3 栖息地保护河流选取应考虑的其他因素

栖息地适宜性评估是栖息地保护河段筛选的基础,但在实际工作中,除了考虑河流生境适宜性外,还需综合考虑栖息地保护的技术经济可行性,如开展栖息地保护所需成本、地方经济社会发展对河流水资源和水能资源开发利用的诉求等(黄光明等,2015;姜跃良等,2015)。

据了解,对于定曲相关单位编制了《四川省定曲河干流乡城、得荣段水电规划报告》,推荐采用8级水电开发方案,梯级电站自上而下依次为松多、正斗、水若、门扎、扎杂、得荣、奔都、古学。但按当前四川省小水电建设限制性要求及长江经济带小水电清理整改政策,定曲规划水电站装机容量不超过5万kW,相应水电站建设难以实施。

目前定曲干流建有古学、鱼根2座水电站,已建水电站对鱼类的影响主要是限制坝上、坝下鱼类群体交流,对裂腹鱼类等短距离洄游性鱼类造成一定阻隔影响。考虑到古学水电站坝高仅7.5 m,鱼根水电站坝高仅2 m,且古学水电站敞泄期间鱼类仍可上溯洄游,若通过对已建古学、鱼根水电站进行连通性改造,可进一步促进鱼类完成生活史和维持种群结构稳定。此外,定曲沿岸居民基本上为藏族,没有捕鱼食用的习惯,特别是近年来河长制实施以及当地居民环保意识提高,鱼类资源得到有效保护。因此,定曲具有实施栖息地保护的有利条件。

4.4 定曲栖息地保护建议

通过开展栖息地适宜性评价,对于指导编制旭龙水电站栖息地保护规划具有重要意义。结合现场调查及栖息地适宜性评价结果,针对定曲栖息地存在的问题,提出以下保护建议:

(1)补建过鱼设施,改善定曲的纵向连通性,减缓古学、鱼根水电站对裂腹鱼类等短距离洄游性鱼类的阻隔影响。考虑到古学、鱼根水电站均为低坝,建议在古学水电站补建垂直竖缝式鱼道,鱼根水电站补建仿自然鱼道。

(2)开展受损河道生境修复。定曲中上游相对宽谷河段如定波、白松河段,由于筑路等需要建有多个挖沙场,挖沙会严重破坏裂腹鱼类等赖以栖息和

繁殖的砾石沙滩、心滩,建议关闭上述挖沙场,依据河道地形和河流冲淤特性,按照河道原有形态进行近自然恢复。

(3)实施古学梯级生态调度。利用古学水电站检修时机,在鱼类主要繁殖期3~7月实施1~2次敞泄生态调度,更好促进鱼类上下交流和繁殖洄游。

(4)加强水污染监管。定曲流经得荣县城,县城生活污水排放将直接干扰鱼类的栖息以及洄游,应确保定曲生活污水达标排放,维护鱼类良好栖息环境。

参考文献

- 曹文宣,2008.有关长江流域鱼类资源保护的几个问题[J].长江流域资源与环境,17(2):163-164.
- 长江水资源保护科学研究所,2019.雅砻江流域综合规划环境影响报告书[R].武汉:长江水资源保护科学研究所.
- 傅菁菁,黄滨,芮建良,等,2016.生境模拟法在黑水河鱼类栖息地保护中的应用[J].水生态学杂志,37(3):70-75.
- 高欣,丁森,张远,等,2015.鱼类生物群落对太子河流域土地利用、河岸带栖息地质量的响应[J].生态学报,35(21):7198-7206.
- 郭亚萍,李丹,曹滨,等,2016.水量优化调度对水系连通性的影响分析[J].中国农村水利水电,12:109-112,116.
- 国家能源局,2021.河流水生生物栖息地保护技术规范(NB/T 10485-2021)[S].北京:国家能源局.
- 黄滨,傅菁菁,芮建良,等,2018.水利水电工程鱼类栖息地保护模式及研究展望——基于文献综述的思考[J].环境与可持续发展,43(1):103-105.
- 黄光明,王海龙,王伟营,等,2015.澜沧江流域鱼类栖息地保护实践[J].水生态学杂志,36(6):86-92.
- 黄奇夔,杜军,王春,等,2003.黄石爬的繁殖生境、两性系统和繁殖行为研究[J].西南农业学报,20(4):119-121.
- 姜跃良,孙大东,喻卫奇,2015.雅砻江中下游鱼类栖息地评价与保护方案[J].水生态学杂志,36(6):80-85.
- 蒋晓辉,Angela Arthington,刘昌明,2009.基于流量恢复法的黄河下游鱼类生态需水研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),45(Z1):537-542.
- 康鑫,张远,张楠,等,2011.太子河洛氏鲮幼鱼栖息地适宜度评估[J].生态毒理学报,6(3):310-320.
- 李艳利,李艳粉,李科,2016.不同尺度下人类活动对浑太河

流域鱼类和大型底栖动物群落特征的影响[J].环境科学研究,29(8):1145-1153.

李洋,2019.筑坝河流鱼类产卵生态流量研究[D].北京:中国水利水电科学研究院.

刘淑伟,杨君兴,陈小勇,2013.金沙江中上游中华金沙鳅(*Jinshaia sinensis*)产卵场的发现及意义[J].动物学研究,34(6):626-630.

吕军,汪雪格,刘伟,等,2017.松花江流域主要干支流纵向连通性与鱼类生境[J].水资源保护,33(6):155-160,174.

马里,白音包力皋,许凤冉,等,2017.鱼类栖息地环境评价指标体系初探[J].水利水电技术,48(3):77-81,126.

邱阳凌,2018.黑水河生态河貌模拟及鱼类替代生境评价[D].重庆:重庆交通大学.

王树森,谢佳燕,任程,等,2016.短尾高原鳅繁殖力初步研究[J].四川动物,35(3):440-443.

杨刚,张涛,庄平,等,2014.长江口棘头梅童鱼幼鱼栖息地的初步评估[J].应用生态学报,25(8):2418-2424.

杨青瑞,陈声威,何建宽,等,2015.支流生境替代保护效果评价指标体系与评价方法研究[J].中国水利水电科学研究院学报,13(6):408-413,420.

詹会祥,郑永华,晏宏,等,2017.昆明裂腹鱼繁殖生物学研究[J].水生态学杂志,38(5):92-96.

张文鸽,黄强,蒋晓辉,2008.基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究[J].水科学进展,19(2):192-197.

张雄,刘飞,林鹏程,等,2014.金沙江下游鱼类栖息地评估和保护优先级研究[J].长江流域资源与环境,23(4):496-503.

邹曦,杨荣华,杨志,等,2021.长江流域典型支流生境健康评价[J].水生态学杂志,42(5):29-39.

Brown S K, Buja K R, Jury S H, et al, 2000. Habitat suitability index models for eight fish and invertebrate species in Casco and Sheepscot Bays, Maine[J]. North American Journal of Fisheries Management, 20(2):408-435.

Steffler P, Blackburn J, 2002. Two-dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat [M]. Canada: University of Alberta.

Vinagre C, Fonseca V, Cabral H, et al, 2006. Habitat suitability index models for the Juvenile soles, *Solea solea* and *Solea senegalensis*, in the Tagus estuary: Defining variables for species management[J]. Fisheries Research, 82(1/2/3):140-149.

(责任编辑 郑金秀)

**Suitability Assessment of Fish Habitat in the Riverine Section
at Xulong Hydropower Station on Jinsha River**

LI Fang-ping¹, ZHANG Deng-cheng², WANG Meng², CHEN Feng³,
ZHAI Hong-juan², YANG Han-yun³, ZHANG Ke-ke²

- (1. Guodian Jinsha River Xulong (benzilan) Hydropower Development Co., Ltd, Chengdu 610041, P.R. China;
- 2. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, P.R. China;
- 3. Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources & Chinese Academy of Sciences,
Wuhan 430079, P.R. China)

Abstract: In this study, we evaluated the suitability of fish habitat in the Xulong section of the upper Jinsha River, and recommended targeted conservation and restoration strategies. We aimed to support fish habitat screening in the river section influenced by cascaded hydropower development. First, an evaluation index system for fish habitat suitability in the Xulong section was developed, consisting of 11 indices from the aspects of species similarity, habitat similarity, tributary connectivity, and ecological health. The weight of each index was determined by analytic hierarchy process, the habitat suitability index (HSI) was calculated by weighted summation, and five grades of habitat suitability were designated (highly suitable, suitable, generally suitable, barely suitable, unsuitable). Then, based on the constructed evaluation index system, the habitat suitability index of the three primary tributaries (Dingqu, Maiqu and Dandaqu River) along Xulong river section were calculated and grades assigned. The weighted values for the similarity of key protected fish species, vertical connectivity index and endemic fish species similarity were the top three among the 11 indices, with respective values of 0.234, 0.234 and 0.127. The HSI of Dingqu, Maiqu and Dandaqu River were 82.1, 67.4 and 65.1, respectively, giving grades of "high suitability" for Dingqu River and "suitable" for Maiqu River and Dandaqu River. Thus, the Dingqu River below Xulong dam should receive priority protection. Habitat conservation and restoration are proposed in response to the current habitat problems in Dandaqu River, including rebuilding fish passing facilities, restoration of damaged river habitat, implementation of ecological regulation and strengthening of water pollution control.

Key words: fish habitat; suitability index; habitat restoration; Xulong hydropower station