

赤水河河源段栖息地现状评价及修复对策探讨

李 轩^{1,2}, 张 晶², 艾祖军³, 赵进勇², 于子钺^{2,4}, 韩会玲¹, 冯 硕²

(1. 河北农业大学, 河北 保定 071000;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

3. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区云南管护局, 云南 昭通 657000;

4. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038)

摘要:开展赤水河河源段重点鱼类优先保护排序及河道栖息地健康评价,为赤水河鱼类保护和栖息地修复提供参考。以赤水河河源段为研究区域,设置18个采样点,于2021年11月、2022年4月进行调查。综合考虑区域内小水电拆除对鱼类栖息地的影响,依据AHP-熵权法,筛选了金沙鲈鲤、青石爬鮡、圆口铜鱼、岩原鲤、昆明裂腹鱼、长薄鳅6种优先保护鱼类,构建基于河流地貌特征、水文、水质及鱼类等4方面的河道栖息地健康评价指标体系,建立多尺度赤水河河源段栖息地综合评价标准。评价结果显示该河段仅30%河道栖息地为较好状况,50%河道栖息地处于一般状况,20%河道栖息地处于较差状况。小水电拆除可以有效恢复鱼类栖息地,但其质量仍需进一步提升,结合研究区栖息地现状评估结果,可采取河道清理、卵砾石注入、河段平面形态修复、砾石群修复、构建生态丁字坝等5种修复措施。

关键词:小水电拆除;优先保护;栖息地评价;评价标准;赤水河

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2023)02-0034-10

栖息地是河流水生态系统的重要组成部分,探讨鱼类与栖息地的定量关系一直是河流生态恢复研究的热点(赵进勇等,2022)。国内关于生物优先保护定量评价最初是以植物为对象,从生态学的3个水平评定了受威胁的等级(许再富等,1987)。刘军等(2004)借鉴了定量评估植物威胁程度和优先保护顺序的层次指数法,从威胁程度、遗传多样性损失和物种价值3个方面定量评估了分布在长江上游的16种特有鱼类。彭涛等(2011)根据汛期河口水生生态系统的特点,建立了河口及邻近水域鱼类保护优先性的评估模型。牛建功等(2012)利用濒危系数、遗传价值系数和物种价值系数对哈巴河15种当地特有鱼类的优先保护顺序进行了定量研究,对哈巴河地区鱼类的受威胁状态进行系统分析。徐薇等(2013)以模糊评价法为例,构建了由物种珍稀性、物种价值和人为干扰程度3个子系统组成的鱼类优先保护等级评估体系,为制订特有鱼类保护措施提供了科学依

据。朱挺兵等(2021)在此基础上建立了鱼类评价系统和指标,对澜沧江西藏段鱼类进行了优先保护等级评价。Maire等人(2017)从研究区河流鱼类物种组合中得出了4个非相关的保护目标:分类多样性、功能多样性、自然遗产重要性和社会经济价值,提出了一种基于最优原则的多目标优先排序方法,根据规划单元在4个保护目标之间的内在权衡进行排序。Aker等(2018)选定3种印度主要的鲤科鱼类,根据目标鱼类的栖息地适宜性确定了适宜的生态流量。Choi等(2019)进行栖息地模拟确定大头刺鱼和细孔刺鱼等9种优势鱼类为保护物种。大量学者运用相关评价方法对不同研究区进行了评估,对各地的鱼类保护提供了至关重要的借鉴价值,但随着人类活动的加剧,仅考虑鱼类物种本身特性确定保护需求无法与栖息地保护建立对应的体系,不同区域的鱼类保护及栖息地评价需进行相应调整。早期USEPA(1999)确定了溪流和涉水河流中进行快速生物评估的基本方法,重点关注附生生物、底栖大型无脊椎动物和鱼类群落,以及评估物理栖息地结构的质量。姜跃良等(2015)运用这种评价指标体系,由多项指标构成雅砻江中下游鱼类栖息地评价指标体系并依此进行了评价,取得了与实际较为吻合的评价结果。国内外常见的修复鱼类栖息地的方式主要是河道中设置巨木(Roni et al, 2001)巨石、丁坝和堰等(Lester et al, 2008),英国Inchewan Burn河利用卵石

收稿日期:2022-07-30 修回日期:2022-12-29

基金项目:中国水科院创新团队专项(WE0145B042021, 城乡水系生态景观构建理论和技术研究)。

作者简介:李轩,1998年生,男,硕士研究生,主要从事河流生态保护与修复研究。E-mail: 11630153015379@qq.com

通信作者:韩会玲,1965年生,女,教授,博士生导师,主要从事水利水电工程、农业水土工程研究。E-mail: cjhlh@hebau.edu.cn

跌水-深潭结构改造衬砌河床修复鱼类产卵栖息地(Anonymous,2002)。Park等(2018)通过设置巨石的方式模拟了栖息地质量的变化,为鱼类庇护所设置提供依据。Lee等(2020)模拟了河道中放置巨石对生物栖息地的影响,结果显示不同型式的巨石布置关系生境质量的改善。近年来,国内栖息地修复研究已成为河流综合治理的一项重要内容,常用的河流栖息地修复措施有生态丁坝、深槽-浅滩、砾石群等(刘思伟,2020)。综上所述,栖息地现状评价研究大多针对单一指标进行分析,对栖息地受损区位影响分析及修复布控较少,受损栖息地的修复对策有待进一步研究。

赤水河河源段位于长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区云南段,近年保护区内小水电的清理在一定程度上消除了生境破碎化、片断化,但由于部分水电站拆除不完全,河道内障碍物、建筑垃圾增多等因素,局部生境仍破坏严重,鱼类栖息地未得到完全自然化恢复,产漂流性卵的金沙鲈鲤(詹会祥等,2016)、圆口铜鱼、长薄鳅(王导群等,2019)等和产黏性卵鱼类的青石爬鮡(李明德,2012)、岩原鲤(陈银瑞等,1989)、昆明裂腹鱼(陈小勇,2013)的栖息环境仍受到胁迫。此前赤水河河源段栖息地评价研究未见相关报道,因此开展赤水河河源段重点鱼类优先保护排序及河道栖息地健康评价对于保护区内受损河流生态系统恢复到较为自然的状态、改善生态完整性和可持续性具有着重要意义。本文在前人研究的基础上,从河流地貌特征、水质、水文和鱼类4个方面评价了鱼类栖息地的综合生境指标,并初步构建了栖息地评价指标体系。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

赤水河是长江上游右岸最大的一级支流,在云南境被称为赤水河河源段,河源段涉及昭通市的镇雄、威信两县,全长97.0 km。镇雄县境内流程79.7 km,面积1 505.8 km²,出境多年平均流量24.8 m³/s,主要支流有雨洒河、铜车河等;威信县境内流程17.3 km,均为威信县与镇雄县界河,区间面积477 km²,平均流量5.83 m³/s,主要支流有石坎河、扎西河、倒流河、苦猪河等。2020年赤水河河源段13座水电站进行了整改,退出电站建设时间、空间位置等具体信息见表1和图1。

1.2 数据来源

根据赤水河河源段流域地理位置、水电站拆除

情况、水生态情况和土地利用类型等因素,从上游到下游共设置了18个代表性采样点位,各点位的有关信息见表2和图1。2021年11月、2022年4月课题组利用LS1260B流速仪、水深测量尺、手持GPS等仪器对代表采样点位进行现场实地测量,完成水质、河宽、水深和流速等河道断面数据的收集。此外,在赤水河、铜车河、鱼洞河、倒流河等18个河段开展了鱼类资源调查。

表1 自然保护区赤水河河源段退出电站统计

Tab.1 Statistics on the power stations removed in the Chishui River headwaters of the nature reserve				
序号	名称	建设年份	所在河流	坝址(取水口)以上集水面积/km ²
1	果珠鱼洞电站	1998	鱼洞河	0.05
2	大湾玉田电站	1977	赤水河	139.30
3	母享一级电站	1982	铜车河	—
4	母享二级电站	1991	铜车河	—
5	坡头新场电站	1972	铜车河	1000.00
6	簸笠电站	1994	赤水河	200.00
7	鱼洞乡花渔洞电站	1994	铜车河	64.00
8	花朗乡法地电站	1988	赤水河	141.60
9	花朗乡双核桃电站	2004	赤水河	818.00
10	凉风洞电站	1972	苦猪河	89.00
11	两合岩电站	1963	石坎河	61.50
12	石坎电站	1978	石坎河	380.00
13	庙坝电站	1978	石坎河	72.50

表2 调研点位统计

Tab.2 Basic information on the investigated river section			
点位	点位名称	所在河流	地理坐标
C1	妥泥河典型断面	妥泥河	27°71'N,104°98'E
C2	雨洒河典型断面	雨洒河	27°69'N,104°98'E
C3	倒回龙岔河桥	洛甸河	27°69'N,104°99'E
C4	鱼洞河果珠鱼洞电站坝址	鱼洞河	27°38'N,105°01'E
C5	赤水河法地电站坝址	赤水河	27°38'N,105°02'E
C6	赤水河玉田电站坝址		27°42'N,105°06'E
C7	赤水河双核桃电站坝址		27°72'N,105°15'E
C8	赤水河二龙抢宝	石坎河	27°75'N,105°18'E
C9	石坎河典型断面		27°77'N,105°09'E
C10	石坎电站坝址		27°78'N,105°09'E
C11	庙坝电站坝址	扎西河	27°79'N,105°07'E
C12	两合岩电站坝址		27°81'N,105°05'E
C13	簸笠电站坝址		27°72'N,105°20'E
C14	新场电站坝址	铜车河	27°64'N,105°20'E
C15	母享一二级电站坝址	母享河	27°51'N,105°16'E
C16	花渔洞电站坝址		27°46'N,105°17'E
C17	巴茅坝鱼类产卵场		27°79'N,105°26'E
C18	凉风洞电站坝址	苦猪河	27°83'N,105°23'E

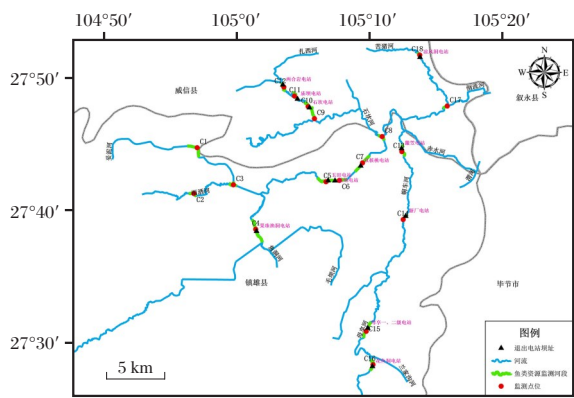


图 1 赤水河河源段退出电站及监测点位

Fig.1 Location of the removed power stations and monitoring points in the Chishui River headwaters

1.3 指标权重计算方法

1.3.1 层次分析法 层次分析法(AHP)通过定性分析确立各个指标之间的内在联系和层次(Saaty et al, 2005),明确每个影响因素及指标,将结构按目标层、准则层和指标层进行划分,构建结构模型体系。创建矩阵 A 作为判断矩阵,以验证其一致性,计算的指标权重矩阵为:

$$A_i=(A_{i1},A_{i2},A_{i3},\cdots,A_{in})^T \tag{1}$$

1.3.2 熵权法 熵权法根据数据提供的信息量,计算出指标变异幅度,从而确定权重(Wolff et al, 2013)。指标矩阵 X 中,指标的数据差较大,则指标的信息熵较小且权重较大。因此,可以根据指标信息熵的计算来确定每个指标的权重,权重的计算步骤可参考刘红雨等(2022)。

1.3.3 综合 AHP-熵权法 熵权法是客观的赋权方法,但这也是其不足之处,该方法过于依赖客观数据,容易随着数据和极值的变化影响评价结果的准确性。由于 AHP 受主观因素影响强,而熵权法则是绝对客观,将两者结合起来处理权重分布更具优势,这样得到的权重值更加科学合理(曾雯禹,2021)。

利用计算出的 AHP 权重与熵权法权重,综合权重 x 一般的计算公式为:

$$W_i = \frac{\varphi_i + A_i}{\sum_{i=1}^n \varphi_i + A_i} (i = 1, \cdots, n) \tag{2}$$

计算出所有指标的权重组合,将组合权重汇总得到组合权重向量 X :

$$X_i=(X_1,X_2,X_3,\cdots,X_n)^T \tag{3}$$

1.4 评价指标体系与评价标准

1.4.1 评价体系建立 根据赤水河河源段河流生境

特点,综合不同学者对鱼类栖息地进行评估的方法,建立由河流地貌特征、水质特征、鱼类情况、水文特征 4 个准则层共 10 个指标构成的评价体系(张晶等, 2010;Newcomb et al, 2006)。

在栖息地评价标准(Dolloff et al, 1993; Han-naford et al, 1997)基础上确定评分标准,赤水河河源段栖息地综合评价标准如表 3。

1.4.2 优先保护鱼类的确定方法 赤水河河源段鱼类物种资源丰富,据历史数据显示该河段分布有鱼类 59 种,分属 5 目 12 科,其中国家二级保护鱼类共 7 种,昭通特有鱼类 17 种。赤水河河源段鱼类种类数量占赤水河全境鱼类种类总数的 50.9%,多以定居性的冷水性激流底栖鱼类为主。考虑对鱼类的影响趋势及数据的完整度,这里仅对 18 种特有保护鱼类进行优先保护等级评估。基于鱼类优先保护评估结果,选取河段内优先保护鱼类的所占比例作为栖息地评价中鱼类情况的指标层。

以相关文献资料(刘军,2004)和实地调查数据为基础,综合考虑鱼类濒危程度(张兴磊等,2022)、鱼类价值(李明德,2012)、受干扰程度(仝路路等,2019)等因素,确定了 10 个评价指标。各评价指标的评分范围为 1~4 分,级别依次增大,依据研究区鱼类特征调查数据中的分类情况、影响程度分析采用专家打分进行分值评定。

(1)物种珍稀程度 物种珍稀程度用以表示自然分布状态下鱼类物种的珍稀程度,考虑了资源现状、栖息流速、产卵情况和洄游类型 4 种指标特性。

其中资源现状评分依据资源现状指数确定,参照如下公式进行计算:

$$H_{资源} = \frac{F_i}{F_m} \tag{4}$$

式中: F_i 表示第 i 种物种的数目; F_m 表示调研所有鱼类物种的数目之和。

栖息流速根据查阅文献(仇倩雯等,2020)及现场测量确定;产卵情况及洄游类型依据查阅相关文献确定研究区内参与评价的鱼类产卵类型及洄游情况。

(2)物种遗传特性 物种遗传特性对生物多样性可能产生的遗传基因损失程度,是对鱼类潜在遗传价值的定量评价,考虑了种型情况、分布范围和人为干扰 3 个指标特性。

根据查阅相关文献确定研究区内参与评价的鱼类种属情况;分布范围评分以调研鱼类的所在河段所处河流的水系划分;人为干扰为定性分析,根据实际调研河段鱼类受人类活动影响情况通过专家打分进行评价。

表 3 赤水河河源段栖息地综合评价标准

Tab.3 Comprehensive habitat evaluation criteria for the Chishui River headwaters

序号	准则层	指标层	评分标准			
			9~10	6~8	3~5	0~2
1	河流地貌	河床宽度	75% 以上河道河床宽度≥40 m	75% 以上河道河床宽度≥30 m	75% 以上河道河床宽度≥20 m	75% 以上河道河床宽度≥10 m
2		河床底质	赤水河自然条件下,未受到人为干扰河道 75% 以上是块石、漂石、砾石、卵石和砂,其他为细沙碎石等沉积物	50%~75% 以上是块石、漂石、砾石、卵石和砂,其他为细砂、碎石等沉积物	25%~50% 以上是块石、漂石、砾石、卵石和砂,其他为细沙碎石等沉积物	块石、漂石、砾石、卵石和砂少于 25%,其他全部为细沙碎石等沉积物
3		河道地形变化	河道深泓线未发生改变;未发生渠道化,河道维持正常模式	河道深泓线发生部分偏移;渠道化出现较少,通常在桥墩周围处出现渠道化,对水生生物影响较小。	河道深泓线发生大部分偏移;渠道化比较广泛,在两岸有筑堤或桥梁支柱出现,对水生生物的影响很严重	河道深泓线发生整体偏移;河岸由混凝土浆砌石等人工固定,对水生生物的影响很严重,生境完全改变
4	河流地貌	堤岸稳定性	基岩河岸,堤岸高度<1 m,近期内河岸不会发生变形破坏,无水土流失现象	岩土河岸,堤岸高度<2 m,河岸结构有松动发育迹象,有水土流失迹象,但近期不会发生变形和破坏	黏土河岸,堤岸高度<3 m,河岸松动裂痕发育趋势明显,一定条件下可导致河岸变形和破坏,中度水土流失	非黏土河岸,堤岸高度<5 m,河岸水土流失严重,随时可能发生大的变形和破坏,或已经发生破坏
5		河岸带植被覆盖率	河岸周围植被种类多,面积大。75% 以上的堤岸覆盖有植被	河岸周围植被种类比较多,面积一般。50%~75% 堤岸覆盖有植被	河岸周围植被种类比较少,面积较小。25%~50% 堤岸覆盖有植被	河岸周围几乎没有任何植被。少于 25% 的堤岸覆盖,部分堤岸无植被覆盖
6		人为干扰程度	无人类活动干扰或少有人类活动;河岸两侧无农业耕种、畜牧养殖等活动	人类干扰较小,有少部分通行者;河岸一侧为农业耕种	人类干扰较大,紧邻公路并有少部分车辆通过;河岸两侧农业耕种,需要施加化肥和农药	人类干扰很大,紧邻公路并经常有车辆通过;河岸两侧为农业耕种、畜牧养殖,且有垃圾堆放
7	水质特性	水质优劣程度	I~Ⅲ类水质比例≥90%	I~Ⅲ类水质比例<75%,且劣 V 类比例<20%	I~Ⅲ类水质比例<75%,且 30%≤劣 V 类比例<50%	劣 V 类比例≥50%
8	鱼类情况	优先保护鱼类比例	6 种重点保护鱼类占比>50%,且有产卵场分布	6 种重点保护鱼类占比>25%,且有产卵场分布	6 种重点保护鱼类占比<25%	河段内未出现 6 种重点保护鱼类
9	水文特性	河道水量状况	水量较大,河水淹没到河岸两侧,少量河道暴露	水量比较大,河水淹没 75% 左右的河道	水量一般,河水淹没 25%~75% 的河道	水量很小,河道干涸
10		水深流速综合特性	慢一深、慢一浅、快一深和快一浅 4 种类型均有出现,且几乎是平均分布。(0.5 m 深度将浅与深分开,0.3 m/s 将快与慢分开。)	只有 3 种类型出现(如果快一浅没有出现,分值比缺少其他情况分值低)	只有 2 种类型出现(如果快一浅和慢一浅没有出现,分值要低)	只有 1 种类型出现

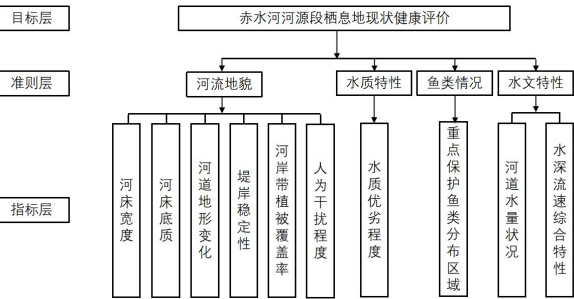


图 2 基于优先保护鱼类的赤水河河源段河道栖息地现状评价体系

Fig.2 River habitat evaluation system for the Chishui River headwaters based on the priority of fish protection

(3)物种价值

物种价值用以表示不同鱼类所具有的生态、经济及科研的价值,考虑了生态价值、经济价值和科研价值3个指标特性。

其中生态价值评分依据物种所属是否为优势种群划分,鱼类在生态系统中影响程度越大其生态价值越高;经济价值评分依据鱼类物种个体大小划分,个体越大经济价值越高,通过专家打分进行评价;科研价值评分依据该鱼类是否有人工增殖划分,其中1~2分为人工增殖鱼类,3~4分为无人工增殖鱼类。

2 结果与分析

2.1 权重计算结果

2.1.1 指标权重及筛选结果 本研究利用AHP-熵权法确定赤水河河源段重点保护鱼类各指标的权重,结果如表4。

表 4 鱼类优先保护评价指标体系权重计算结果
Tab.4 RWeighting of the evaluation index system for fish conservation priority

准则层	准则层权系数	指标层	指标层权系数	总排权系数
物种珍稀程度	0.393	资源现状	0.019	0.049
		栖息流速	0.034	0.086
		产卵情况	0.037	0.095
		洄游类型	0.064	0.162
		种型情况	0.026	0.111
物种遗传特性	0.231	分布范围	0.019	0.081
		人为干扰	0.009	0.038
		生态价值	0.038	0.102
物种价值	0.376	经济价值	0.080	0.212
		科研价值	0.023	0.062

通过对物种珍稀程度、物种遗传特性、物种价值3方面系统分析,根据鱼类优先保护等级评价结果

(表5),确定圆口铜鱼、青石爬鮡、金沙鲈鲤、岩原鲤、昆明裂腹鱼、长薄鳅共6种特有鱼类作为优先保护对象,并作为鱼类栖息地现状评价鱼类物种。

2.1.2 指标权重确定 确定赤水河河源段河道栖息地健康评价体系各参数的AHP权重及熵权法权重进而算出各指标层的综合权重,结果如表6。

表 5 赤水河河源段鱼类重点保护评价结果
Tab.5 Evaluation results for key fish species in the Chishui River headwaters

编号	鱼类名称	一级指标评分			优先保护评分
		物种珍稀程度	物种价值	物种珍稀程度	
1	短体副鳅	1.15	1.51	2.75	5.41
2	长薄鳅	1.62	3.39	4.32	9.32
3	贝氏高原鳅	0.69	2.26	2.75	5.70
4	圆口铜鱼	2.31	3.01	5.50	10.82
5	长鳍吻鮡	2.08	1.51	4.72	8.30
6	黑尾近红鮡	1.85	1.51	4.72	8.07
7	异鳔鳅鮀	2.08	1.51	3.93	7.51
8	金沙鲈鲤	2.31	3.01	4.32	9.64
9	短身白甲鱼	1.38	2.63	4.72	8.73
10	云南盘鮡	2.08	2.26	3.93	8.26
11	昆明裂腹鱼	1.38	3.01	5.11	9.50
12	四川裂腹鱼	1.38	2.26	5.11	8.75
13	岩原鲤	2.08	3.01	5.11	10.20
14	短身金沙鳅	1.85	2.26	3.93	8.03
15	西昌华吸鳅	1.15	1.88	5.11	8.14
16	峨眉后平鳅	1.62	1.88	4.32	7.82
17	青石爬鮡	2.31	2.26	5.89	10.46
18	四川白甲鱼	0.92	2.26	3.93	7.11

表 6 栖息地评价指标权重系数
Tab.6 Weight for each habitat evaluation indicator

准则层	准则层权系数	指标层	指标层权系数	总排权系数
河流地貌	0.525	河床宽度	0.054	0.104
		底质	0.060	0.114
		河道地形变化	0.018	0.035
		堤岸稳定性	0.061	0.117
		河岸带植被覆盖率	0.020	0.039
		人为干扰程度	0.061	0.117
水质特性	0.111	水质优劣程度	0.125	0.111
鱼类情况	0.171	重点保护鱼类分布区域	0.171	0.171
水文特性	0.193	河道水量状况	0.080	0.100
		水深流速综合特性	0.023	0.093

根据各项评价参数的实测数据和最终的得分情况将赤水河河源段的河道栖息地健康评价标准分为4个等级,分别为好(8~10)、较好(6~8)、一般(5~6)、

较差(0~5)。其中,等级为好的河道与自然河流相比其地貌特征相似度高,生境条件相似度高,水质及水文特性条件良好,生态健康,鱼类栖息地质量优;等级为较好的河道与自然河流相比其地貌特征和生境条件基本相似,水质及水文特性条件较好,鱼类栖息地质量较高;等级为一般的河道与自然河流相比其地貌特征和生境条件相似度一般,生态系统一定程度退化,水质及水文特性条件一般,鱼类栖息地质量一般;等级为较差的河道与自然河流相比其地貌特征和生境条件基本不相似,生态系统较大程度退化,水质及水文特性条件较差,鱼类栖息

地质量较差。

2.2 栖息地现状评价结果

通过赤水河河源段各监测点位准则层评价结果如图3所示,可以看出,研究区域内的河流地貌特征中堤岸稳定性及人为干扰程度评分普遍低于其他指标,说明该区域内的自然形态受人为扰动影响较大。水质特征评分除城区段普遍较高,说明水质并不是导致该区域自然河道栖息地环境脆弱的主要原因。

赤水河河源段河道栖息地现状评价结果如图4,研究区内没有评价为好的河段,仅有44.4%的河道栖息地状况较好,27.8%的河道栖息地状况为一般,

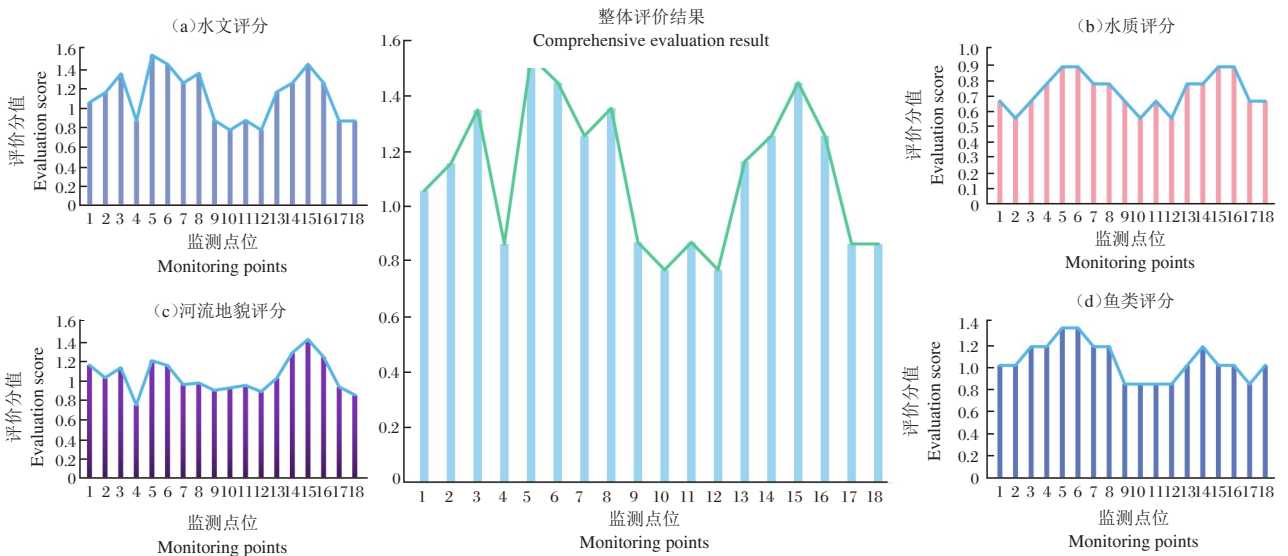


图3 赤水河河源段河道栖息地现状准则层评价结果

Fig. 3 Evaluation results for the guideline layers of current habitat in the Chishui River headwaters

27.8%的河道栖息地为较差。总体来讲河道栖息地情况在原小水电坝址河段从上游到下游逐渐变差,离开坝址河段后河道栖息地状况逐渐恢复。

2.3 小水电对河流栖息地的影响

随着小水电的快速发展,其建设及运行改变了河流的自然流态,破坏了河流连通性(Marx et al, 2014),改变了物理化学特性,阻碍了鱼类的迁移,并在社会层面也形成一定影响,如移民对生态、社会的负面影响(Dudgeon et al, 2000)。Harlan等(2021)认为小水电对河流生态系统存在一定的负面影响,其修建及运行需考虑社会、生态的需求。虽然研究区内涉及到的小水电均已拆除,但其对河流自然形态造成的影响使得河流无法在短时间内通过自然恢复到原来的状态。对比未修建小水电的C1(妥泥河典型断面)~C3(倒回龙岔河桥)河段及C2(雨洒河典型断面)~C3(倒回龙岔河桥)河段,其栖息地总体评

分虽不如某些存在坝址河段的分值高,但是其河流地貌特征评分较其他有电站坝址河段评分普遍较高,说明小水电的修建对河流地貌特性有一定不可逆的影响。

倒回龙岔河桥C3监测河段未建设小水电,但由于临近生活居民区受人类活动干扰较大;鱼洞河果珠鱼洞电站坝址C4监测河段位于果珠鱼洞电站坝址位置,该河段栖息地现状评价结果为较差。自然河流与小水电退出河流监测数值对比如图5所示,通过对比自然河流的C3监测河段与小水电拆除的C4监测河段,确定两者在河流地貌特征及水文上有很大差异。C3监测河段河道平均宽度为32.5 m,河床底质50%以上为块石、漂石、砾石、卵石和砂,细砂、碎石等沉积物较少,河道深泓线未发生较大偏移,河水水量较大且水深流速多样性较好。而C4监测河段受小水电影响河道宽度仅为21.5 m,河水水量较小,水

深流速较为单一,多样性场较少。由于库区拦截,上游洪水挟带大量泥沙,在坝体拆除后随雨季向下游释放,泥沙构成以碎石、细砂、砂等推移质为主,泥沙输移以泥沙波的扩散作用为主,造成坝体下游形成自然堆积堤坝,纵向上局部形成陡坡,河流开发地段在边滩、浅滩发生堆积,局部河道深泓线发生较大偏移。细沙进入到河床砾石中会降低水流速度,大量淤积会扼杀孵化卵和鱼苗,限制鱼卵的发育,进而对栖息地造成损伤。倒回龙岔河桥自然河段虽然受农业耕种等人类活动较大,但其河流地貌特征及水文水质特性基本处于自然状态,河道栖息地处于较好状态。而果珠鱼洞电站坝址河段的河道底质与自然河段相比已经发生明显改变,河道深泓线的改变对岸坡的稳定性造成了一定的破坏,泥沙的淤积也使得水深流速多样性降低,对鱼类栖息产卵均造成了不利影响,需对局部受损较严重区域进行修复。

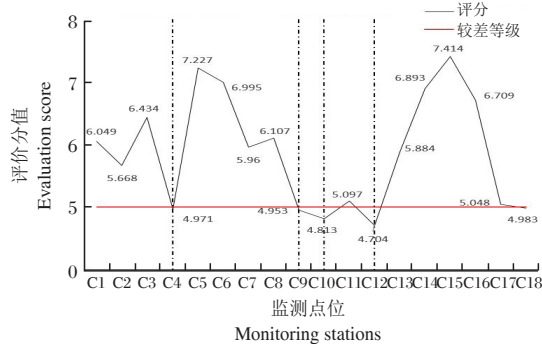


图4 赤水河河源段栖息地现状评价结果

Fig.4 Habitat status evaluation of the Chishui River headwaters

图4所示调研的12个小水电坝址中4个河道栖息地评价为较差,其中3个小水电坝址都流经城区段,位于城区段的C9~C12河段、C17~C18河段其总体评分均为较差,河道渠道化严重,失去了天然河流深潭、浅滩、河漫滩等多样性地貌形态,改变了河流流动形态,缺失差异化流速及水深分布格局,河流地貌多样性大幅减少,鱼类栖息地质量也随之下降。评价较好的坝址河段受到人类活动强干扰相对较少,其中C5(赤水河法地电站坝址)、C6(赤水河玉田电站坝址)、C15(母享二电站坝址)均位于人类活动较小区域,距离居民区有一定距离,小水电拆除后河流地貌特征及水文特征恢复比其他人为扰动较大的坝址区相对较好,也间接说明拆坝后河流自然恢复受人为扰动程度影响。

同时,由于本研究范围内坝址小水电的拆除时间不同,小水电对河流栖息地的影响时间也存在一

定差异。在下一步研究过程中,应增加研究的时间尺度,通过分析不同小水电的拆除对河流栖息地评估的影响,定量确定小水电拆除对河流栖息地评估的影响,为河流生态恢复和减少河流生境环境质量变化提供参考。

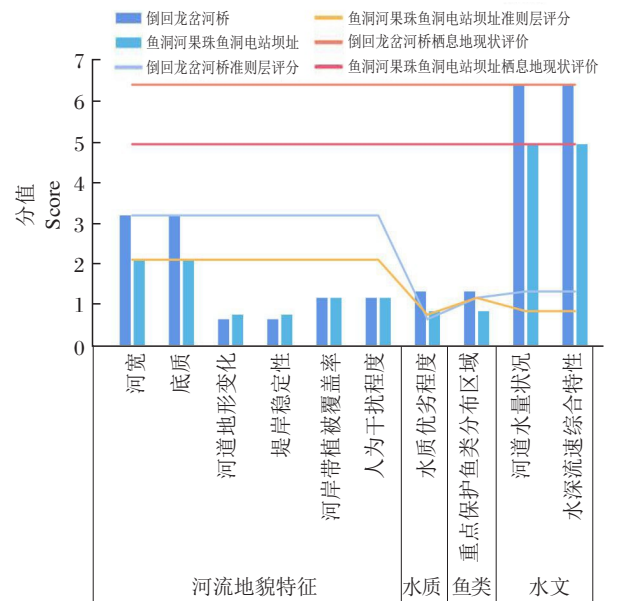


图5 自然河流与小水电退出河流监测数值对比

Fig.5 Comparison of monitored factors between natural rivers and rivers affected by small hydropower stations

3 修复对策探讨

通过分析赤水河河源段栖息地现状评价结果,针对河流地貌特征较差的C4、C7~C13、C18监测河段进行河道清理,清理小水电拆除不完全区域的废弃建筑物等河道侵占物,对残留建筑垃圾或河道内堆积体在非汛期采用控导工程进行机械挖除。

C4、C7~C9、C12~C13、C18监测河段的河床底质受小水电影响,库区长期淤积、底质粒径细化,河道形态受基岩控制,山谷受限,并且表现出人类建设活动造成的显著基质变化。通过人为卵砾石注入,缓解细颗粒沉积物向下游侵蚀沉积,粗化后的河道主槽可形成新的鱼类生境,为下游河段提供更合适的基质。

C4~C7、C13、C14、C18监测河段的水坝拆除后,岸坡出露,次要河槽过水时增加岸坡冲刷风险,需对分汊段进行局部河段平面形态修复。在河流中心加深主河槽开挖断面,减少次要河槽过流,并在冲刷段岸坡部位增加树根等栖息地加强措施,让泥沙重新堆积起来,形成缓坡河岸。

C4、C9~C13、C17、C18监测河段的水文特性及

鱼类情况与其他监测河段相比有一定差距,适宜鱼类栖息产卵的多样性水深流速较少,针对该特性缺乏的监测河段进行砾石群修复。通过布置砾石群,使水流通过砾石群时,受到扰动消耗能量,使河段局部流速下降,砾石周围形成具有多样性特征的水深、底质和流速等生境条件。

C4、C7、C9~C13、C17、C18监测河段原库区河水分汊后,出现次要河槽紧邻河岸,由于多年库区水体淹没,河道地形变化较大且植被覆盖率低。针对该现状,局部构建生态丁坝,在改变河流蜿蜒度的同时,利用丁坝实现横断面地貌形态多样化,局部增加淤积,强化河流主槽,形成差异化流速及水深分布格局,增加河流地貌多样性,提高鱼类栖息地质量。

4 结论

本研究根据赤水河河源段河道栖息地的实际情况,通过AHP-熵权法将赤水河河源段河道栖息地评价分为目标层、准则层和指标层3级评价标准,对研究区域的栖息地环境状况进行了评价。并根据研究区栖息地现状评估结果,针对不同受损河段采取河道清理、卵砾石注入、河段平面形态修复、砾石群及生态丁坝构建5种修复对策。主要结论如下:

(1)纵观赤水河河源段所调研河道栖息地现状评价情况,结果显示无评价为好的河段。河道栖息地生境状况在经过原小水电坝址河段从上游到下游逐渐变差,离开坝址河段后河道栖息地状况逐渐恢复。

(2)赤水河河源段河流地貌特征、水质特征较好,鱼类特征及水文特征相对较差,特别是受到人为干扰较大的原电站坝址下游区域,鱼类特征及水文特征评分相对较低。大部分区域处于强人为扰动状态,仍需进一步采取措施恢复河道栖息地生境状况,从而预防水生生态系统退化进一步加深。

(3)小水电拆除使河流连通性得到一定的恢复,但河流水文地貌特征仍需进一步的恢复,如原拦河坝对河流的拦截作用导致河流深泓线发生偏移、小水电拆除后河流受长期建坝影响导致下游河道淤积形成的自然坝等人为扰动影响自然恢复较为缓慢,需针对不同受损程度进行精准施策。

参考文献

陈小勇,2013.云南鱼类名录[J].动物学研究,34(4):281-337.
陈银瑞,褚新洛,1989.云南鱼类志·上册[M].北京:科学出版社.
仇倩雯,赵文博,王首鹏,等,2020.太子河本溪城区段河道栖息地健康评价[J].水利水电技术,51(S1):177-184.
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].水生生态学杂志,36(6):80-85.
李明德,2012.中国经济鱼类生态学[M].天津:天津科学技术出版社.
刘红雨,刘友存,孟丽红,等,2022.熵权法在水资源与水环境评价中的研究进展[J].冰川冻土,44(1):299-306.
刘军,2004.长江上游特有鱼类受威胁及优先保护顺序的定量分析[J].中国环境科学,24(4):395-399.
刘思伟,2020.基于优先保护鱼类的清溪河栖息地评估及恢复技术应用研究[D].郑州:郑州大学.
牛建功,蔡林钢,刘建,等,2012.哈巴河土著特有鱼类优先保护等级的定量研究[J].干旱区资源与环境,26(3):172-176.
彭涛,陈晓宏,王高旭,等,2011.河口及邻近海域鱼类优先保护次序的评价模型[J].长江流域资源与环境,20(4):404-409.
全路路,郭传波,王瑞,等,2019.多重人类活动干扰下赣江流域水环境和鱼类资源的研究现状分析[J].长江流域资源与环境,28(12):2879-2892.
王导群,田辉伍,唐锡良,等,2020.雅砻江河口区产漂流性卵鱼类早期资源现状[J].生态学报,39(3):893-899.
徐薇,杨志,乔晔,2013.长江上游河流开发受威胁鱼类优先保护等级评估[J].人民长江,44(10):109-112.
许再富,陶国达,1987.地区性的植物受威胁及优先保护综合评价方法探讨[J].云南植物研究,9(2):193-202.
曾雯禹,2021.基于AHP-熵权法和物元可拓模型的倭肯河干流健康评价研究[D].哈尔滨:黑龙江大学.
詹会祥,杨德国,李正友,等,2016.金沙鲈鲤人工繁殖技术研究[J].水生生态学杂志,37(4):84-88.
张晶,董哲仁,孙东亚,等,2010.基于主导生态功能分区的河流健康评价全指标体系[J].水利学报,41(8):883-892.
张兴磊,樊寒冰,薛敬阳,等,2022.圆口铜鱼水力生境适宜度评价及集群区域预测[J].水电能源科学,40(1):64-67.
赵进勇,于子钺,张晶,等,2022.国内外河湖生态保护与修复技术标准进展综述[J].中国水利,(6):32-37.
朱挺兵,胡飞飞,龚进玲,等,2021.澜沧江西藏段鱼类优先保护等级评价[J].淡水渔业,51(2):40-46.
Akter A, Tanim A H,2018. A modeling approach to establish environmental flow threshold in ungauged semidiurnal tidal river[J]. Journal of Hydrology, 558:442-459.
Anonymous A,2002. Manual of River Restoration Techniques [C].River Restoration Centre.http://resolver.tudelft.nl/uuid:6bf422c4-91fc-45bf-9258-e6f3e645f2dd.
Choi H S,Choi J, Choi B, 2019. Impact on Fish Community by Restoration of Ecological Waterway using Physical Habitat Simulation[J].Ecology and Resilient Infrastructure, 6(1):1-11.
Dolloff C A,1993. Basinwide estimation of habitat and fish populations in streams[M]. US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station.

- Dudgeon D, 2000. Large-scale hydrological changes in tropical Asia: prospects for riverine biodiversity: the construction of large dams will have an impact on the biodiversity of tropical Asian rivers and their associated wetlands[J]. *BioScience*, 50(9):793–806.
- Hannaford M J, 1997. JSTOR: Training reduces observer variability in visual-based assessments of stream habitat[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 16(4): 853–860.
- Harlan T, Xu R, He J, 2021. Is small hydropower beautiful? Social impacts of river fragmentation in China's Red River Basin[J]. *Ambio*, 50(2):436–447.
- Lester R E, Boulton A J, 2008. Rehabilitating agricultural streams in Australia with wood: a review.[J]. *Environmental Management*, 42(2):310–326.
- Maire A, Laffaille P, Maire J F, et al, 2017. Identification of Priority Areas for the Conservation of Stream Fish Assemblages: Implications for River Management in France[J]. *River Research and Applications*, 33(4):524–537.
- Marx S, Venter R, 2014. The Prognosis of influence of the oder river waters dammed by malczyce barrage on left bank areas [J]. *Journal of Water & Land Development*, 21(1):19–27.
- Newcomb T J, Orth D J, Stauffer D F, 2006. *Habitat Evaluation*[M]. Virginia: American Fisheries Society.
- Park K, Lee K, Kim Y, 2018. Use of Instream Structure Technique for Aquatic Habitat Formation in Ecological Stream Restoration[J]. *Sustainability*, 10(11):4032.
- Park S, Sur C, Lee J, et al, 2020. Ecological drought monitoring through fish habitat-based flow assessment in the Gam river basin of Korea[J]. *Ecological Indicators*, 109:105830.
- Roni P, Quinn T P, 2001. Density and size of juvenile salmonids in response to placement of large woody debris in western Oregon and Washington streams[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(2): 282–292.
- Saaty T L, Kearns K P, 2005. The Analytic Hierarchy Process [J]. *analytical planning*, 29(16): 24–39.
- US EPA, 1999. *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers, Benthic Macroinvertebrates and Fish*[M]. United States Environmental Protection Agency.
- Wolff S L, 2013. Rudolph Clausius: a pioneer of the modern theory of heat[J]. *Vacuum*, 90: 102–108.

(责任编辑 郑金秀)

Health Status Assessment and Restoration Strategies of Habitat in the Headwaters of Chishui River Based on Fish Protection Priority

LI Xuan^{1,2}, ZHANG Jing², AI Zu-jun³, ZHAO Jin-yong², YU Zi-cheng^{2,4}, HAN Hui-ling¹, FENG Shuo²

- (1. Hebei Agricultural University, Baoding 071000, P. R. China;
- 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P. R. China;
- 3. Yunnan Management and Conservation Bureau of the Upper Yangtze River Rare and Endemic Fish National Nature Reserve, Zhaotong 657000, P. R. China;
- 4. Hebei University of Engineering, Handan 056038, P. R. China)

Abstract : The headwaters of Chishui River are located in the Yunnan section of the National Nature Reserve for Rare and Endemic Fishes in the upper reaches of Yangtze River. In recent years, demolition of small hydropower stations in the reserve has reduced fish habitat fragmentation, but the habitat remains seriously damaged. In this paper, we ranked the protection priority of important fish species in the Chishui River headwaters and a comprehensive habitat health assessment index was then developed to evaluate fish habitat in the section investigated. We aimed to provide a reference for fish conservation and habitat restoration of Chishui River. In November 2021 and April 2022, a fishery resource investigation was carried out in 18 river sections from upstream to downstream and information was collected on water quality, hydrology, and the river landform of sampling sites. To assess the disturbance to fish habitat resulting from the removal of small hydropower stations, a habitat health assessment index was developed consisting of 10 parameters from four aspects: river landform, hydrology, water quality and fish protection priority. The weight of each component of the habitat health assessment system was calculated using the analytical hierarchy process (AHP). The habitat health evaluation system includes four status grades based on the AHP score: excellent, good, fair, poor, and the index system was used to assess the habitat status of the Chishui River headwaters. Six fish species with protection priority were screened according to the AHP-Entropy weight method, including *Percocypris pingi*, *Euchiloglanis davidi*, *Coreius guichenoti*, *Procypris rabaudi*, *Schizothorax grahami* and *Leptobotia elongata*. Habitat evaluation results show that 30% of the river habitat was in good condition, 50% of the river habitat was in fair condition, and 20% of the river habitat was in poor condition. Removal of small hydropower stations partially restored fish habitat, but the quality of the habitat needs further improvement. In addition to the habitat status assessment, five river restoration strategies were recommended: channel dredging, addition gravel, flat form restoration, and construction of gravel bars and ecological spur dikes.

Key words: small hydropower removal; conservation priority; habitat evaluation; evaluation standard; Chishui River