

金沙江乌东德水电站生态调度目标鱼类筛选研究

张登成, 樊皓, 王孟, 李斐, 阮娅

(长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051)

摘要:对乌东德坝下江段鱼类生态调度需求次序进行定量研究,为生态调度目标物种的选择以及生态调度方案制定提供决策依据。采用2008年6月和11月、2009年4月、2011年6月、2012年4-5月、2013年4-5月的金沙江干支流渔获物调查结果,以及2016-2019年金沙江下游流域水生生态监测结果,考虑不同鱼类繁殖对生态水文过程的需求以及数据可得性,构建包含物种濒危系数、遗传价值系数和物种价值系数在内的评价体系,对金沙江乌东德坝址至白鹤滩坝址之间分布的53种土著鱼类进行生态调度需求次序的定量研究。结果表明,处于生态调度需求1级的鱼类有4种,为圆口铜鱼、长鳍吻鲈、中华金沙鲈和齐口裂腹鱼,这些鱼类均属长江上游特有鱼类,也是受水电开发影响较为显著的种类;处于生态调度需求2级的鱼类有14种,包括长江上游特有鱼类11种,这些鱼类产卵繁殖对流水生境均有一定需求;处于生态调度需求3级的鱼类有28种,这些鱼类以广适型种类为主,对水流条件的要求不高;处于生态调度需求4级的鱼类有7种,多为常见的小型鱼类,其产卵繁殖对生境要求不高。评价结果基本反映了乌东德坝下江段鱼类对生态调度的实际需求,考虑到产漂流性卵鱼类和产粘沉性卵鱼类繁殖需求的差异,综合确定圆口铜鱼和齐口裂腹鱼为乌东德水电站生态调度的主要目标鱼类,长鳍吻鲈、中华金沙鲈等作为兼顾目标鱼类。

关键词:乌东德水电站;生态调度;优先保护;目标鱼类

中图分类号:S932.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2022)05-0073-10

金沙江乌东德水电站是金沙江下游河段最上游梯级,于2015年12月16日正式开工,2020年8月23日水库蓄水至965 m。作为西电东送的骨干工程,乌东德水电站装机容量10 200 MW,年发电量389.1亿kW·h(钮新强等,2014)。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资源带来一定不利影响,主要表现在:大坝建设阻隔了坝下江段流水性鱼类的迁移;水库的调节作用造成洪峰过程的坦化,对需要涨水过程的产漂流性卵鱼类繁殖不利;水库运行将改变下游河道的自然水温分布规律,带来一定的滞温效应,推迟鱼类产卵繁殖期;水库营养盐滞留导致坝下江段饵料生物资源量下降,造成鱼类繁殖期能量积累减缓以及仔稚鱼食物来源减少;电站的日内调峰运行使得坝下水位变化频繁,可能导致部分产粘沉性卵鱼类受精卵和仔稚鱼的搁浅死亡;泄洪期间,下泄水气体过饱和导致

鱼类患气泡病并引起死亡等(王丹,2011;许秀贞等,2018)。

水库生态调度是缓解水电工程对鱼类不利影响的重要保护措施,通过在特定时期优化水库调度减缓水库调节对水文过程、水温等环境要素改变带来的生态影响,可有效维持河流生态系统的基本稳定(袁超和陈永柏,2011;Ma et al, 2019)。同时,水库生态调度是一个系统工程,涉及到保护物种识别、生态需求分析、调度方案制定、跟踪监测及效果评估等(Wang et al, 2021),其中识别关键保护物种是开展生态调度的基础和前提(郭文献等,2009)。国内关于关键保护物种评价主要以陆生植物为研究对象(万加武等,2019;刘哲荣等,2019),而对鱼类的关注和研究相对匮乏,主要是由于鱼类终身生活在水中不易被观察到,人类活动对鱼类造成的威胁常常被忽视,而一旦鱼类生存危机被公众所重视时,往往已接近最危险或者无法挽回的地步(朱挺兵等,2021),因此,加强对受威胁鱼类的优先保护等级研究,并有重点地采取保护措施是非常必要的(Joshua, 1999; Myers et al, 2000)。

在鱼类优先保护等级研究方面,刘军(2004)首次借鉴植物保护等级评价体系,运用濒危系数、遗传价值系数和物种价值系数,对长江上游干流16种特

收稿日期:2021-10-01 修回日期:2022-07-22

基金项目:中国三峡建设管理有限公司科研项目(JG/18011B)。

作者简介:张登成,1990年生,男,工程师,主要从事水利水电工程环境影响评价、水生态保护与修复研究。E-mail:569095890@qq.com

通信作者:樊皓,1985年生,男,高级工程师,主要从事水利水电工程环境影响评价、水资源保护研究。E-mail:fanhaohu@163.com

有鱼类的优先保护顺序进行了定量分析;蒋晓辉等(2005)采用种群关键性指数结合物种保护顺序的方法,对黄河干流兰州以上河段、兰州至花园口、花园口至利津河段的关键物种进行了研究;牛建功等(2012)对哈巴河 15 种土著特有鱼类进行了优先保护顺序的定量研究;徐薇等(2013)针对长江上游干流江段受梯级开发威胁的 25 种特有鱼类,采用模糊评价法分析了鱼类的优先保护等级;宋一清等(2018)对黑水河 35 种鱼类进行了优先保护次序的定量分析,并结合黑水河栖息地实际情况,确定保护目标鱼类。上述评价研究为各地鱼类的保护等级评价提供了重要的借鉴作用,但由于不同研究所涉及的区域、对象、环境等存在差异,此外筛选鱼类保护对象后所采取的保护措施也不尽相同,因此鱼类优先保护评价指标体系及评估方法也需要根据实际情况进行调整(朱挺兵等,2021)。本文综合考虑不同鱼类繁殖对生态水文过程的需求以及数据可得性,构建包含物种濒危系数、遗传价值系数和物种价值系数在内

的评价体系,对乌东德坝下江段鱼类生态调度需求次序进行定量研究,以期水电工程生态调度目标物种的筛选以及生态调度方案制定提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文研究区域为金沙江乌东德坝址至白鹤滩坝址之间的干支流河段,利用的鱼类数据来源于《金沙江乌东德水电站环境影响报告书》(长江水资源保护科学研究所,2015)中 2008 年 6 月和 11 月、2009 年 4 月、2011 年 6 月、2012 年 4-5 月、2013 年 4-5 月的金沙江干支流渔获物调查结果,以及 2016-2019 年金沙江下游流域水生生态监测结果,其中流域水生生态监测在金沙江乌东德至白鹤滩坝址区间布设了 5 个调查断面,每年于 5-7 月和 10-12 月开展 2 期监测。

综合梳理以上资料,研究区域分布有鱼类 55 种,隶属于 3 目 10 科 42 属,其中土著鱼类 53 种,外来鱼类 2 种,土著鱼类中包括长江上游特有鱼类 15 种(表 1)。

表 1 金沙江乌东德坝址至白鹤滩坝址江段鱼类名录

Tab.1 Species list for the section of Jinsha River from Wudongde dam to Baihetan dam

序号	物种名称	金坪子	东川渡口	普渡河河口区	小江河河口区	黑水河河口区
鲤形目 CYPRINIFORMES						
鳅科 Cobitidae						
条鳅亚科 Noemacheilinae						
副鳅属 <i>Paracobitis</i>						
1	红尾副鳅 <i>Paracobitis variegatus</i>		+			+
2	*短体副鳅 <i>Paracobitis potanini</i>					+
高原鳅属 <i>Triplophysa</i>						
3	前鳍高原鳅 <i>Triplophysa anterodorsalis</i>					+
沙鳅亚科 Botiinae						
薄鳅属 <i>Leptobotia</i>						
4	*长薄鳅 <i>Leptobotia elongata</i>					+
泥鳅属 <i>Misgurnus</i>						
5	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>				+	
鲤科 Cyprinidae						
鱮亚科 Danioninae						
鱮属 <i>Zacco</i>						
6	宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>		+	+	+	+
雅罗鱼亚科 Leuciscinae						
草鱼属 <i>Ctenopharyngodon</i>						
7	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>		+	+		
鲢亚科 Hypophthalmichthyinae						
鳊属 <i>Aristichthys</i>						
8	鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>		+		+	
鲢属 <i>Hypophthalmichthys</i>						
9	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>		+	+	+	
鲢亚科 Acheilognathinae						
鲢属 <i>Rhodeus</i>						

续表1

序号	物种名称	金坪子	东川渡口	普渡河河口区	小江河河口区	黑水河河口区
10	中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>		+		+	
	鲮亚科 <i>Acheilognathinae</i>					
	鲮属 <i>Acheilognathus</i>					
11	大鳍鲮 <i>Acheilognathus macropterus</i>			+		
	野鲮亚科 <i>Labeoninae</i>					
	泉水鱼属 <i>Pseudogyriinocheilus</i>					
12	泉水鱼 <i>Pseudogyriinocheilus prochilus</i>		+		+	
	鲃亚科 <i>Barbinae</i>					
	墨头鱼属 <i>Garra</i>					
13	墨头鱼 <i>Garra imberba</i>		+			+
	鲃亚科 <i>Culterinae</i>					
	飘鱼属 <i>Pseudolaubuca</i>					
14	银飘鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>			+	+	
15	寡鳞飘鱼 <i>Pseudolaubuca engraulis</i>		+		+	
	鲮属 <i>Hemiculter</i>					
16	鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>		+	+	+	
17	贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>				+	+
	鲃属 <i>Culter</i>					
18	翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i>		+	+	+	
	原鲃属 <i>Cultrichthys</i>					
19	红鳍原鲃 <i>Culter erythropterus</i>		+		+	
	鮡亚科 <i>Gobioninae</i>					
	麦穗鱼属 <i>Pseudorasbora</i>					
20	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>		+	+	+	+
	铜鱼属 <i>Coreius</i>					
21	*圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>	+	+			
	吻鮡属 <i>Rhinogobio</i>					
22	*长鳍吻鮡 <i>Rhinogobio ventralis</i>		+			
	棒花鱼属 <i>Abbottina</i>					
23	钝吻棒花鱼 <i>Abbottina obtusirostris</i>		+		+	+
	蛇鮡属 <i>Saurogobio</i>					
24	蛇鮡 <i>Saurogobio dabryi</i>	+	+	+	+	
	颌须鮡属 <i>Gnathopogon</i>					
25	短须颌须鮡 <i>Gnathopogon imberbis</i>		+			
	盘鮡属 <i>Discogobio</i>					
26	云南盘鮡 <i>Discogobio yunnanensis</i>		+	+	+	+
	鳅鮡亚科 <i>Gobiobotinae</i>					
	异鳃鳅属 <i>Xenophysogobio</i>					
27	*异鳃鳅 <i>Xenophysogobio boulengeri</i>		+	+	+	
28	*裸体异鳃鳅 <i>Xenophysogobio nudicorpa</i>		+			
	鲃亚科 <i>Barbinae</i>					
	倒刺鲃属 <i>Spinibarbus</i>					
29	中华倒刺鲃 <i>Spinibarbus sinensis</i>		+			
	鲈鲤属 <i>Percocypris</i>					
30	*金沙鲈鲤 <i>Percocypris pingi</i>		+		+	+
	白甲鱼属 <i>Onychostoma</i>					
31	白甲鱼 <i>Onychostoma sima</i>	+	+	+	+	+
	裂腹鱼亚科 <i>Schizothoracinae</i>					
	裂腹鱼属 <i>Schizothorax</i>					
32	*齐口裂腹鱼 <i>Schizothorax prenanti</i>		+		+	+

续表 2

序号	物种名称	金坪子	东川渡口	普渡河河口区	小江河河口区	黑水河口区
33	*短须裂腹鱼 <i>Schizothorax wangchiachii</i>					+
34	*昆明裂腹鱼 <i>Schizothorax grahami</i>				+	
35	*细鳞裂腹鱼 <i>Schizothorax chongi</i>		+	+		
36	*长丝裂腹鱼 <i>Schizothorax dolichonema</i>	+				
鲤亚科 Cyprininae						
原鲤属 <i>Procypris</i>						
37	*岩原鲤 <i>Procypris rabaudi</i>				+	
鲤属 <i>Cyprinus</i>						
38	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>		+	+	+	
鲫属 <i>Carassius</i>						
39	鲫 <i>Carassius auratus</i>		+	+	+	
平鳍鲃科 Homalopteridae						
金沙鲃属 <i>Jinshaia</i>						
40	*中华金沙鲃 <i>Jinshaia sinensis</i>	+	+	+		+
41	*短身金沙鲃 <i>Jinshaia abbreviata</i>	+				+
犁头鲃属 <i>Lepturichthys</i>						
42	犁头鲃 <i>Lepturichthys fimbriata</i>		+			
鲇形目 SILURIFORMES						
鲇科 Siluridae						
鲇属 <i>Silurus</i>						
43	鲇 <i>Silurus asotus</i>	+	+	+	+	+
鲮科 Bagridae						
黄颡鱼属 <i>Pelteobagrus</i>						
44	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	+	+	+	+	+
45	瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>		+		+	
46	光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>		+			
鮠属 <i>Leiocassis</i>						
47	粗唇鮠 <i>Leiocassis crassilabris</i>	+	+	+	+	+
拟鲮属 <i>Pseudobagrus</i>						
48	凹尾拟鲮 <i>Pseudobagrus emarginatus</i>	+	+	+	+	+
49	细体拟鲮 <i>Pseudobagrus pratti</i>	+	+	+	+	+
胡子鲇科 Clariidae						
胡子鲇属 <i>Clarias</i>						
50	**革胡子鲇 <i>Clarias leather</i>		+		+	
钝头鮠科 Amblycipitidae						
鮠属 <i>Liobagrus</i>						
51	白缘鮠 <i>Liobagrus marginatus</i>	+	+		+	+
鲃科 Sisoridae						
纹胸鲃属 <i>Glyptothorax</i>						
52	中华纹胸鲃 <i>Glyptothorax sinense</i>	+	+		+	+
鲈形目 PERCIFORMES						
虾虎鱼科 Gobiidae						
吻虾虎鱼属 <i>Rhinogobius</i>						
53	子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>		+		+	
54	波氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>			+	+	
丽鱼科 Cichlidae						
罗非鱼属 <i>Oreochromis</i>						
55	**罗非鱼 <i>Oreochromis mossambicus</i>		+		+	

注:*代表长江上游特有鱼类,**代表外来鱼类

Note:* fish species endemic to the upper Yangtze River,** invasive species

1.2 生态调度需求优先等级评价方法

1.2.1 指标体系构建 参考有关鱼类优先保护等级评价方法(刘军,2004;牛建功等,2012;宋一清等,2018),评价

体系由物种濒危系数、遗传价值系数和物种价值系数组成。研究鱼类生态调度需求顺序,由以上3个系数按照一定权重计算后累加得到的综合评价价值进行排序,见表2。

表2 评估指标体系及其赋分标准

Tab.2 Evaluation index system and scoring criteria

评价系数	评价指标	赋分标准		
		1	2	3
物种濒危系数 C_i	初次性成熟年龄 x_1	1~2	3~4	>4
	产卵类型 x_2	粘草产卵类型、产浮性卵及其他特殊产卵类型	流水产粘沉性卵鱼类	产漂流性卵鱼类
	分布单元出现率 x_3 /%	>50	20~50	<20
	濒危情况 x_4	其他	易危、近危	濒危及以上
	相对数量比例 x_5 /%	<0.05	0.05~1	>1
遗传价值系数 C_g	种型情况 x_6	所在属含6种以上	所在属含2~6种	单型属或特有属
	特有情况 x_7	3个以上水域广泛分布	2~3个水域分布	本流域特有种
物种价值系数 C_s	生态价值 x_8	罕见种	常见种	优势种
	经济价值 x_9	经济价值很低	具有一定经济价值	具有较高的经济价值

(1)物种濒危系数表示某种鱼类受威胁的程度,选择初次性成熟年龄、产卵类型、分布单元出现率、濒危情况、相对数量比例等5项指标进行综合评价。

初次性成熟年龄:根据雌性初次性成熟年龄高低来划分其分值的大小,通常初次性成熟年龄较大的鱼类,其个体繁殖力较弱,种群恢复较慢,其产卵需要更高的水文情势条件,最高分值定为3分,为初次性成熟年龄在4龄以上者,初次性成熟年龄为3~4龄的为2分,初次性成熟年龄为1~2龄的为1分。

产卵类型:根据产卵方式不同确定其分值大小,反映了鱼类产卵对栖息生境及水文情势的要求,依据鱼类受精卵的性质将其分为3类。一类为产漂流性卵鱼类,其产卵繁殖需要洪水过程刺激,对水文过程调度的需求最高,设为3分;流水产粘沉性卵鱼类,产卵期间需要一定的流速刺激,设为2分;粘草产卵类型、产浮性卵及其他特殊产卵类型,在静水环境下即可产卵繁殖,设为1分。

分布单元出现率:根据某种鱼类在研究江段渔获物调查中出现频率确定,通常相对出现率较低的物种,其分布范围更狭窄,所面临的灭绝风险更高,这些鱼类更需要采取生态调度措施恢复其繁殖生境。将出现率在20%以下的设为3分,出现率20%~50%的设为2分,出现率50%以上的设为1分。

濒危情况:基于某种鱼类的濒危程度确定等级,参考《中国濒危动物红皮书 鱼类》、《中国物种红色名录(第一卷)》等。濒危及以上等级鱼类具有较高的保护必要性,赋值为3分;易危和近危等级鱼类具有

中等的保护必要性,赋值为2分;其他鱼类具有较低的保护必要性,赋值为1分。

相对数量比例:将渔获物中数量百分比大于1%的鱼类赋值为3分,数量百分比处于0.05%~1%的鱼类赋值为2分,数量百分比小于0.05%的鱼类赋值为1分。

(2)遗传价值系数表示某种鱼类灭绝后,对生物多样性可能产生的遗传基因损失程度,是对其潜在遗传价值的定量评价,选择种型情况和特有情况2项指标。

种型情况:依据其所在属的情况和属所含种数量进行评分,将单型属种或特有属赋值为3分,所在属仅含2~6种的少型属种赋值为2分,所在属含6种以上的多型属种赋值为1分。

特有情况:特有鱼类是适应特定流域独特生境的鱼类,多为适应流水生境的种类,对于维持流域生物多样性具有重要意义,依据某种鱼类在不同水域中的分布情况而评分,分布水域频度越低,特有性越高。将本流域特有种赋值为3分,在2~3个水域分布的鱼类赋值为2分,在3个以上水域广泛分布的鱼类赋值为1分。

(3)物种价值系数是用来表示某种鱼类所具有生态价值和经济价值的大小,生态价值根据某种鱼类在鱼类群落中的相对重要性指数(IRI)评分,经济价值根据某种鱼类在当地的经济价值高低评分。

生态价值:根据在渔获物中是否为优势种进行确定,IRI≥500优势种为3分,100≤IRI<500常见种为2分,IRI<100非优势种为1分(王家樵等,2017)。

相对重要性指数(IRI)计算公式如下:

$$IRI = (N + W) \times F \quad (1)$$

式中:IRI为相对重要性指数, N 为某一种类的尾数占总尾数的百分比, W 为某一种类的重量占总重量的百分比, F 为发现某一种类的样点数占总调查样点数的百分比。

经济价值:根据某种鱼类的在当地经济价值高低而评分,经济价值越高,分值越高。将个体大、价格高的主要经济鱼类赋值为3分;个体较大、价格比较高的一般经济鱼类赋值为2分;个体小、价值低的鱼类赋值为1分。经济价值的数值主要来自于历史资料和当地市场统计(刘军,2004;宋一清等,2018)。

1.2.2 评价系数计算及指标权重 评价系数计算公式如下:

$$C = \sum_{i=1}^n x_i / \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

式中: C 分别代表物种濒危系数(C_t)、遗传价值系数(C_g)、物种价值系数(C_s)的实际得分; x_i 为各评价指标的实际得分; X_i 为各评价指标规定的最高分值; n 为各评价系数的指标个数。

物种濒危系数、遗传价值数、物种价值系数权重的确定是根据评价系数的相对重要程度而确定的,本研究的权重分配采用层次分析法进行确定,并借鉴刘军(2004)、宋一清等(2018)等有关研究成果,最终确定权重分配为:物种濒危系数权重为60%,遗传损失系数的权重为25%,物种价值系数的权重为15%。

1.2.3 综合评价价值及目标鱼类筛选 本研究中53种土著鱼类的评价指标赋分,主要依据金沙江下游鱼类研究的相关文献、调查报告、地方鱼类志等确定,对于部分缺失数据的鱼类采用其近缘种替代。在此基础上,计算物种濒危系数、遗传价值系数和物种价值系数,结合3个评价系数的权重,其乘积之和即为综合评价价值。

综合评价价值计算公式为:

$$V_s = \alpha \times C_t + \beta \times C_g + \gamma \times C_s \quad (3)$$

式中: V_s 为综合评价价值, α 为物种濒危系数的权重, β 为遗传价值系数的权重, γ 为物种价值系数的权重。

根据计算得到的 V_s ,参考相关文献资料(刘军,2004;蒋晓辉等,2005;宋一清等,2018;朱挺兵等,2021),将研究江段53种土著鱼类的生态调度需求优先保护顺序划分为4级: $V_s \geq 0.75$ 为1级保护; $0.6 \leq V_s < 0.75$ 为2级保护; $0.4 \leq V_s < 0.6$ 为3级保护; $V_s < 0.4$ 为4级保护。考虑到产漂流性卵鱼类和产粘沉性卵鱼类在繁殖习性上的差异,所选择的目标鱼类应代表这两大类群鱼类的繁殖需求,结合上述原则,主要从1级保护鱼类中筛选

代表性种类作为生态调度目标鱼类。

2 结果与分析

2.1 生态调度需求等级

根据综合评价价值对乌东德坝下江段鱼类生态调度需求等级进行分级,结果见表3。

按照分组结果,处于1级保护的鱼类有4种,分别为圆口铜鱼、长鳍吻鮡、中华金沙鳅和齐口裂腹鱼。这些鱼类均为长江上游特有鱼类,在乌东德水电站蓄水前后资源量和出现率较高,从繁殖习性来看,圆口铜鱼、长鳍吻鮡、中华金沙鳅为产漂流性卵的喜流性鱼类,齐口裂腹鱼为砾石底质上产沉性卵的喜流性鱼类,这些鱼类产卵活动的完成均需要适当的水流条件刺激,受水电开发导致的大坝阻隔以及径流过程变化影响较为显著。

处于2级保护的鱼类有14种,分别为短体副鳅、长薄鳅、草鱼、鳙、鲢、异鳔鳅鲃、裸体异鳔鳅鲃、金沙鲈鲤、短须裂腹鱼、昆明裂腹鱼、细鳞裂腹鱼、长丝裂腹鱼、岩原鲤、短身金沙鳅。除草鱼、鳙、鲢以外,其他种类均为长江上游特有鱼类,多数种类以着生藻类、底栖无脊椎动物为食,其栖息、生长和繁殖均需流水生境,这些鱼类在研究江段的出现率较高。

处于3级保护的鱼类有28种。这些鱼类中无长江上游特有鱼类,对水流条件的要求以广适型种类为主,如鲤、鲫、翘嘴鲃、蛇鮡等,上述鱼类在国内河流、湖泊和水库中广泛分布。

处于4级保护的鱼类有7种,这些鱼类多为小型鱼类,在河流、湖泊、水库以及沟渠等各类水体均可广泛分布,其栖息和产卵繁殖对生境要求不高。

2.2 生态调度目标鱼类筛选

生态调度作为缓解水电工程对鱼类不利影响的有效保护措施,其作用是在鱼类繁殖期通过实施基荷发电、制造洪峰过程等调度措施,满足刺激鱼类产卵以及保障受精卵孵化所需的水文条件(袁超和陈永柏,2011)。考虑到本江段产漂流性卵鱼类和产粘沉性卵鱼类在繁殖时间(前者为5-6月,后者为3-4月)和生态水文需求(前者需要洪水过程刺激产卵以及足够的漂流孵化流水河段,后者需要维持水位稳定以保障受精卵顺利孵化)上的显著差异,因此生态调度目标鱼类应同时兼顾这两大繁殖类群。

根据生态调度需求等级评价结果,处于生态调度需求1级的种类包括圆口铜鱼、长鳍吻鮡、中华金沙鳅和齐口裂腹鱼,除齐口裂腹鱼外,其他3种鱼类均为产漂流性卵鱼类。考虑到圆口铜鱼产卵繁殖对

表3 研究江段53种鱼类优先保护等级综合评估结果

Tab.3 Comprehensive evaluation results of priority protection levels of 53 fish species in the study area

序号	中文种名	物种濒危系数						遗传价值系数			物种价值系数			综合评价价值	生态调度需求等级
		初次性成熟年龄	产卵类型	分布单元出现率	濒危情况	相对数量比例	得分	特有情况	种型情况	得分	生态价值	经济价值	得分		
1	红尾副鳅	1	2	2	2	3	0.67	0	1	0.17	3	1	0.67	0.54	3
2	短体副鳅	1	2	2	2	2	0.60	3	1	0.67	2	1	0.50	0.60	2
3	前鳍高原鳅	1	2	2	2	1	0.53	0	1	0.17	1	1	0.33	0.41	3
4	长薄鳅	1	3	2	3	2	0.73	3	1	0.67	1	2	0.50	0.68	2
5	泥鳅	1	1	1	1	2	0.40	0	1	0.17	1	2	0.50	0.36	4
6	宽鳍鱻	1	2	1	1	3	0.53	0	1	0.17	2	1	0.50	0.44	3
7	草鱼	3	3	1	1	3	0.73	0	3	0.50	2	2	0.67	0.67	2
8	鲮	3	3	1	1	2	0.67	0	3	0.50	1	2	0.50	0.60	2
9	鲢	3	3	1	1	3	0.73	0	2	0.33	2	2	0.67	0.62	2
10	中华鲮	1	1	1	1	2	0.40	0	1	0.17	1	1	0.33	0.33	4
11	大鳍鱮	2	2	2	2	2	0.67	0	1	0.17	1	1	0.33	0.49	3
12	泉水鱼	2	2	2	2	2	0.67	0	2	0.33	1	1	0.33	0.53	3
13	墨头鱼	2	2	2	2	2	0.67	0	1	0.17	1	2	0.50	0.52	3
14	银飘鱼	2	2	2	2	1	0.60	0	2	0.33	1	2	0.50	0.52	3
15	寡鳞飘鱼	2	2	2	2	2	0.67	0	2	0.33	1	2	0.50	0.56	3
16	熬	1	1	1	1	3	0.47	0	1	0.17	3	2	0.83	0.45	3
17	贝氏熬	1	1	1	1	2	0.40	0	1	0.17	1	2	0.50	0.36	4
18	翘嘴鲌	2	2	2	1	2	0.60	0	1	0.17	1	3	0.67	0.50	3
19	红鳍原鲌	2	2	2	1	2	0.60	0	1	0.17	1	3	0.67	0.50	3
20	麦穗鱼	1	1	1	1	2	0.40	0	2	0.33	1	1	0.33	0.37	4
21	圆口铜鱼	2	3	2	3	3	0.87	3	2	0.83	3	3	1.00	0.88	1
22	长鳍吻鲈	2	3	3	3	2	0.87	3	1	0.67	1	2	0.50	0.76	1
23	钝吻棒花鱼	1	1	1	1	2	0.40	0	1	0.17	1	1	0.33	0.33	4
24	蛇鲈	1	3	2	2	3	0.73	0	1	0.17	3	1	0.67	0.58	3
25	短须颌须鲈	1	2	2	2	1	0.53	0	1	0.17	1	1	0.33	0.41	3
26	云南盘鲈	2	3	2	2	2	0.73	0	1	0.17	2	1	0.50	0.56	3
27	异鳔鳅鲈	1	3	3	2	2	0.67	3	2	0.83	1	1	0.33	0.66	2
28	裸体异鳔鳅鲈	1	3	3	2	1	0.60	3	2	0.83	1	1	0.33	0.62	2
29	中华倒刺鲃	2	2	2	2	2	0.67	0	1	0.17	1	2	0.50	0.52	3
30	金沙鲈鲤	2	2	2	2	2	0.67	3	2	0.83	1	2	0.50	0.68	2
31	白甲鱼	2	2	2	3	2	0.73	0	1	0.17	1	2	0.50	0.56	3
32	齐口裂腹鱼	2	2	2	3	3	0.80	3	1	0.67	3	3	1.00	0.80	1
33	短须裂腹鱼	2	2	2	3	2	0.73	3	1	0.67	1	2	0.50	0.68	2
34	昆明裂腹鱼	2	2	2	3	2	0.73	3	1	0.67	1	2	0.50	0.68	2
35	细鳞裂腹鱼	2	2	2	3	2	0.73	3	1	0.67	1	2	0.50	0.68	2
36	长丝裂腹鱼	2	2	2	3	2	0.73	3	1	0.67	1	2	0.50	0.68	2
37	岩原鲤	3	2	1	3	1	0.67	3	2	0.83	1	2	0.50	0.68	2
38	鲤	1	1	1	1	3	0.47	0	1	0.17	2	2	0.67	0.42	3
39	鲫	1	1	1	1	3	0.47	0	1	0.17	3	2	0.83	0.45	3
40	中华金沙鳅	2	3	2	3	2	0.80	3	2	0.83	2	1	0.50	0.76	1
41	短身金沙鳅	2	3	2	3	1	0.73	3	2	0.83	1	1	0.33	0.70	2
42	犁头鳅	2	3	2	3	1	0.73	0	2	0.33	1	1	0.33	0.57	3
43	鲃	2	2	1	1	3	0.60	0	1	0.17	3	2	0.83	0.53	3
44	黄颡鱼	1	2	1	1	2	0.47	0	1	0.17	2	2	0.67	0.42	3
45	瓦氏黄颡鱼	1	2	1	1	2	0.47	0	1	0.17	2	2	0.67	0.42	3
46	光泽黄颡鱼	1	2	1	1	2	0.47	0	1	0.17	2	2	0.67	0.42	3
47	粗唇鲃	2	2	2	2	2	0.67	0	1	0.17	2	2	0.67	0.54	3
48	凹尾拟鲢	2	2	2	2	3	0.73	0	1	0.17	3	1	0.67	0.58	3
49	细体拟鲢	2	2	2	2	3	0.73	0	1	0.17	3	1	0.67	0.58	3
50	白缘鲃	2	2	2	2	3	0.73	0	1	0.17	3	1	0.67	0.58	3
51	中华纹胸鲃	2	2	2	2	3	0.73	0	1	0.17	2	2	0.67	0.58	3
52	子陵吻虾虎鱼	1	1	1	1	2	0.40	0	1	0.17	1	1	0.33	0.33	4
53	波氏吻虾虎鱼	1	1	1	1	2	0.40	0	1	0.17	1	1	0.33	0.33	4

洪水过程的刺激相对长鳍吻鮡、中华金沙鳅要求更高,在满足圆口铜鱼产卵繁殖的情况下,也可满足长鳍吻鮡、中华金沙鳅的繁殖对水文情势的需求(张轶超,2009)。因此,本文将圆口铜鱼作为产漂流性卵鱼类的目标鱼类,齐口裂腹鱼作为产粘沉性卵鱼类的目标鱼类,长鳍吻鮡、中华金沙鳅作为生态调度的兼顾目标鱼类。

3 讨论

3.1 乌东德坝下江段鱼类群落现状

金沙江乌东德坝址处多年平均流量为 $3\ 850\ \text{m}^3/\text{s}$,坝下江段大部分江段水流湍急,但同时也存在一些水流较缓、砾石较多的边滩和心滩,这种缓急交替的生境条件可满足不同鱼类完成生活史的要求。根据2016–2019年金沙江下游流域水生生态调查结果,乌东德坝下江段调查到鱼类55种,渔获物主要包括圆口铜鱼、齐口裂腹鱼、长吻鮡、鲃、鲮、细体拟鲮、凹尾拟鲮、鲫、白缘鲮、鲤等15种,占渔获物总重的84.43%,占渔获物总数量的73.97%。从栖息特点上看,研究区域内分布的鱼类多具有适应急流生境的形态构造特点;从食性上看,研究区域的鱼类饵料组成以底栖动物或固着生物为主;从洄游习性上看,研究区域分布的鱼类可分为长距离洄游、短距离洄游和定居性种类,长距离洄游种类以圆口铜鱼、长鳍吻鮡等产漂流性卵鱼类为代表,短距离洄游种类以齐口裂腹鱼、四川裂腹鱼等产粘沉性卵鱼类为代表,定居性种类以鲤、鲫等为代表。

根据2019年3月25日至7月3日在东川渡口断面开展鱼类早期资源调查,共采集到鱼卵934粒、鱼苗14尾,共鉴定出鱼类13种,其中产漂流性卵鱼类包括长鳍吻鮡、中华金沙鳅、长薄鳅、中华沙鳅、圆口铜鱼、裸体异鳔鳅、犁头鳅等10种。通过东川渡口断面的鱼卵径流量为 104.27×10^6 粒,其中以中华金沙鳅的繁殖规模最大,为 27.51×10^6 粒;其次为长鳍吻鮡,为 25.66×10^6 粒;随后为犁头鳅、圆口铜鱼、长薄鳅和中华沙鳅,繁殖规模分别为 17.20×10^6 、 8.92×10^6 、 8.62×10^6 和 6.03×10^6 粒。

3.2 生态调度需求分析

本研究在前人研究的基础上,结合不同类型鱼类繁殖对生态调度的需求以及部分指标的数据可得性和准确性,对评价指标体系进行了适当的调整。如刘军(2004)、宋一清等(2018)确定的评价指标中,将分布范围、相对怀卵量等作为物种濒危系数的评价指标,考虑到本文研究范围为乌东德坝址至白鹤

滩坝址之间金沙江干流江段,不同鱼类在该江段的分布长度难以准确评估,因此未采用分布范围指标;相对怀卵量指标需要鱼类繁殖生物学研究数据作为支撑,受光照条件、水温、饵料生物丰度等的异质性,同种鱼类的不同地理种群相对怀卵量差异较大,故本文未采用相对怀卵量指标。因此,本研究最终采用9项评价指标,包括初次性成熟年龄、产卵类型、分布单元出现率、濒危情况、相对数量比例、种型情况、特有情况、生态价值、经济价值。

根据生态调度需求等级评价结果,本研究将圆口铜鱼的保护等级确定为1级,与徐薇等(2013)的研究结论一致,圆口铜鱼为金沙江下游和长江上游典型的产漂流性卵鱼类,雌性需4龄以上方可达到性成熟,其产卵水温需达到 18℃ 以上并伴有洪水过程刺激,《国家重点保护野生动物名录》(2021年)将其列入国家二级重点保护动物,乌东德水电站运行后洪水过程弱化以及低温水下泄等对其种群维持影响较大,因此其生态调度需求较高;本文将长鳍吻鮡的保护等级定为1级,相对徐薇等(2013)、宋一清等(2018)高一个等级,其原因是研究江段长鳍吻鮡在渔获物中出现率偏低所致;中华金沙鳅保护等级在本研究中为1级,而徐薇等(2013)将其列为4级优先保护鱼类,产生差异的原因是两者采用的评价指标体系不同,徐薇等(2013)构建了包括物种珍稀性、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,在人为干扰程度子系统中采用了工程阻隔、过度捕捞等人为干扰强度指标,对中华金沙鳅而言上述指标评分较低,故得出的优先保护等级低于本研究;本文将齐口裂腹鱼的保护等级定位1级,比刘军(2004)高出一个等级,比徐薇等(2013)高出2个等级,这与齐口裂腹鱼在本研究江段相对重要性指数较高有关。可见,本研究构建的评价指标体系具有客观性和针对性,评价结果基本反映了乌东德坝下江段鱼类的实际情况。

需要说明的是,本研究评价指标数据大部分来源于相关文献资料(乐佩琦和陈宜瑜,1998;汪松和解焱,2004),但由于部分鱼类基础生物学和生态学研究滞后,参考宋一清等(2018)的方法,对于这些鱼类采用其近缘种替代,为了保证评价结果的可靠性,建议下阶段结合鱼类基础生物学研究进展,对评价指标赋分进行复核更新。此外本研究未考虑到保护等级所具有的模糊性,忽视了从一个等级到另一个等级的中间过渡性质,系统模糊模式识别可充分利用综合评价带来的诸多信息,所得到的结果更具全

面性和真实性(刘军,2004),建议下阶段深入开展相关方面研究工作。

3.3 生态调度目标鱼类筛选

本研究在生态调度需求等级评价的基础上,将圆口铜鱼作为产漂流性卵鱼类的目标鱼类,齐口裂腹鱼作为产粘沉性卵鱼类的目标鱼类。对于齐口裂腹鱼等产粘沉性卵鱼类,只要达到一定的水温要求,具备必要的附着基质便可产卵繁殖,但在其繁殖季节应保障河流水位的稳定,以避免水位频繁涨落导致受精卵和仔幼鱼搁浅死亡(宋一清等,2018),对于乌东德水电站而言,在齐口裂腹鱼繁殖期3-4月通过实施基荷发电即可保障下游江段水位稳定。对于圆口铜鱼等产漂流性卵鱼类,其成熟亲鱼的排精活动一般伴随着涨水过程进行,卵苗数量与持续涨水时间、流量日上涨率等水文条件密切相关(张轶超,2009),为满足圆口铜鱼繁殖需求,建议结合乌东德水库汛期消落计划,在5月下旬至6月下旬制造洪峰过程刺激其产卵,并保障受精卵漂流孵化所需流速0.2 m/s以上的流水江段长度。此外,考虑到下游白鹤滩水电站蓄水后对乌东德坝下流水江段的影响,建议下阶段对研究江段圆口铜鱼的种群动态和早期资源变化情况持续进行监测,据此可对生态调度目标鱼类进行优化调整。

参考文献

钮新强,石伯勋,翁永红,2014.金沙江乌东德水电站设计重大技术问题研究[J].人民长江,45(20):1-7.

王丹,2011.水电工程建设对水生生物的影响评价——以金沙江乌东德水电站工程为例[D].北京:中国科学院研究生院.

许秀贞,闫峰陵,阮娅,2016.浅析乌东德水电站建设对鱼类资源的影响[J].人民长江,47(24):17-20.

袁超,陈永柏,2011.三峡水库生态调度的适应性管理研究[J].长江流域资源与环境,20(3):269-275.

郭文献,夏自强,王远坤,等,2009.三峡水库生态调度目标研究[J].水科学进展,20(4):554-559.

万加武,夏海林,周赛霞,等,2019.江西庐山国家级自然保护区珍稀濒危植物优先保护定量研究[J].热带亚热带植物学报,27(2):55-64.

刘哲荣,刘果厚,高润宏,2019.内蒙古珍稀濒危植物濒危现状及优先保护评估[J].应用生态学报,30(6):1974-1982.

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.

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.

蒋晓辉,刘晓燕,张曙光,等,2005.黄河干流水生态系统关键物种的识别[J].人民黄河,27(10):1-3.

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.

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.

宋一清,成必新,胡伟,2018.黑水河鱼类优先保护次序的定量分析[J].水生态学杂志,39(6):65-72.

长江水资源保护科学研究所,2015.金沙江乌东德水电站环境影响报告书[R].武汉:长江水资源保护科学研究所.

乐佩琦,陈宜瑜,1998.中国濒危动物红皮书[M].北京:科学出版社.

汪松,解焱,2004.中国物种红色名录(第一卷)[M].北京:高等教育出版社.

王家樵,黄良敏,李军,等,2017.闽江口及附近海域主要拖网鱼类的保护等级评价[J].海洋渔业,39(5):3-11.

张轶超,2009.大坝建设对长江上游圆口铜鱼和长鳍吻鮡自然繁殖的影响[D].武汉:中国科学院水生生物研究所.

Ma Q, Li R, Feng J, et al, 2019. Ecological regulation of cascade hydropower stations to reduce the risk of supersaturated total dissolved gas to fish[J]. Journal of Hydro-environment Research, 27:102-115.

Wang Y, Liu P, Wu C, et al, 2021. Reservoir ecological operation by quantifying outflow disturbance to aquatic community dynamics[J]. Environmental Research Letters, 16(7):074005.

Joshua G, 1999. Global Conservation Priorities[J]. Conservation Biology, 1999, 13(1):5-5.

Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, et al, 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities[J]. Nature, 403(6772):853-858.

(责任编辑 郑金秀)

Target Fish Screening for the Ecological Operation of Wudongde Hydropower Station on Jinsha River

ZHANG Deng-cheng, FAN Hao, WANG Meng, LI Fei, RUAN Ya

(Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, P.R. China)

Abstract: Ecological regulation is an effective measure for mitigating the adverse impacts of hydropower projects on fish. Determining the target fish to be managed is the basis for formulating an ecological regulation scheme. Based on field investigation and review of relevant literature, the conservation priority of 53 indigenous fish species distributed between Wudongde dam and Baihetan dam on the Jinsha River was quantitatively analyzed by developing an evaluation index system that included an endangerment coefficient, a genetic value coefficient and a species value coefficient. The aim was to provide a means for determining target fish species for ecological regulation to support development of an ecological regulation scheme. The data for this study was obtained from investigating results of fish catches on the mainstem of Jinsha River (June and November of 2008, April of 2009, June of 2011, and April and May of 2012 and 2013), as well as monitoring results from 5 transects (May to July and October to December, 2016–2019). A total of 55 fish species from 42 genera, 10 families and 3 orders were recorded in the study area, including 53 native species (15 endemic to the upper Yangtze River) and 2 invasive species. According to the evaluation index system, there are 4 species at the first level of ecological regulation demand, including *Coreius guichenoti*, *Rhinogobio ventralis*, *jinshaia sinensis* and *Schizothorax prenanti*. These species are all endemic to the upper Yangtze River, with rich resources and high occurrence rates in the study river section, and all were significantly affected by changes in the runoff process caused by hydropower development. There are 14 fish species in the second level of ecological regulation demand, including 11 species endemic to the upper Yangtze River and require a flowing water habitat during the spawning and reproduction season. In the third level there are 28 fish species that display wide habitat adaptability and tolerate different water flow conditions. In the fourth level there are 7 fish species, mostly common small-size fish with no special habitat requirements for spawning and reproduction. The evaluation results reflect the actual situation of fish species in the reach below Wudongde dam. After considering the differences in reproductive requirements of species with drifting and viscous eggs, our comprehensive determination of conservation priority indicates that *C. guichenoti* and *S. prenanti* are the primary target species for ecological regulation at Wudongde hydropower station, followed by *R. ventralis* and *j. sinensis*.

Key words: Wudongde hydropower station; ecological regulation; priority protection; target fish species