

过鱼对象多维量化体系在南渡江流域的应用

刘媛媛¹, 金志军², 林晨宇³, 谭均军¹, 魏浪², 单成康², 石小涛¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002;

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州贵阳 550081;

3. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098)

摘要:过鱼对象的确定对于过鱼设施建设至关重要。量化评定过鱼对象优先保护次序,为南渡江过鱼设施建设、鱼类保护提供决策依据。基于过鱼设施建设目的及过坝鱼类的生境适宜能力,从过坝需求度、生境适应度、资源丰富度、物种效用度、物种濒危度和遗传损失度等6个维度,建立多指标量化的过鱼对象选择体系。采用主客观结合的组合权重,构建基于逼近理想排序法的过坝鱼类优先等级评定模型。以南渡江流域为实例进行初步分析,结合南渡江流域梯级建设,运用过鱼对象评定体系确定花鳗鲡、鲢、鳙等洄游性鱼类为首要过鱼对象,鳊、月鳢、鲈、海南长臀鲃为主要过鱼对象;乌塘鳢、红鳍原鲃、赤眼鲱、蒙古鲃为次要过鱼对象;鮠、倒刺鲃、马口鱼、纹唇鱼、唇鲮、翘嘴鲃、东方墨头鱼等鱼类为兼顾过鱼对象。本研究通过构建科学合理的多指标体系对南渡江流域过鱼设施过鱼对象优先保护次序进行量化,有助于指导过鱼设施效果评价,对过鱼设施建设具有一定参考价值。

关键词:过鱼设施;优先保护次序;多指标量化;南渡江流域

中图分类号:X321 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2023)05-0009-09

水利水电工程在获得防洪、发电等效益同时,对生态环境的影响也日益凸显。大坝建设破坏了河流连通性,影响鱼类繁衍、生存、洄游等生命行为(Li et al, 2013; Tao et al, 2012)。因此恢复河流连通性应作为流域开发的前置条件,而修建过鱼设施成为河流鱼类种群恢复的主要措施之一。但根据目前已有研究成果,过鱼设施建设在技术与管理方面存在不足(Chen et al, 2019),如缺乏对过鱼对象的适宜性研究(Shi et al, 2015)。过鱼设施结构设计以主要过鱼对象的生态习性、行为学指标为基础设计参数(侯轶群等, 2020),但在过鱼设施建设中,通常仅考虑洄游习性或物种保护等级(Brum et al, 2017)等单一指标以及专家的经验判断来确定过鱼对象(董哲仁等, 2020),尚未形成标准统一的量化选择体系(蔡露等, 2020a)。而单一指标及专家经验法忽略了遗传多样性受损的鱼类物种(Neraas & Spruell, 2001)及鱼类过

坝后对所处河段的适应情况(刘思伟, 2020; 吴丹, 2019),具有较大的局限性和主观性。

因此,构建科学合理的多指标量化评价体系确定过鱼对象是河流连通性恢复过程中亟待解决的关键问题(蔡露等, 2020b)。本研究参考物种优先保护相关研究成果,从物种濒危、物种价值、遗传价值角度对漳卫新河口及邻近海域鱼类(彭涛等, 2011)、长江上游干流江段鱼类(刘军, 2004)、闽江口及附近海域主要拖网鱼类(王家樵等, 2017)的优先保护量化研究,考虑鱼类洄游需求及生境适宜情况,以正在推进水利水电工程建设的南渡江流域为例,建立涵盖过坝需求度、生境适应度、资源丰富度、物种效用度、物种濒危度、遗传损失度等6个维度的多指标过鱼对象量化评定体系。对南渡江鱼类进行鱼类过坝优先等级划分,量化评定过鱼对象优先保护次序,为南渡江过鱼设施建设、鱼类保护提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

南渡江流域为我国境内唯一一条大型热带河流,发源于白沙县南峰山,干流长334 km,总落差703 m,流域鱼类资源丰富(余梵冬等, 2018a)。本研究使用的鱼类数据来自2016年5月的南渡江干流各江段水生生态调查及《中国濒危动物红皮书:鱼类》、《中国物种红色名录》等资料。基于以上数据,南渡

收稿日期:2021-12-28 修回日期:2023-08-21

基金项目:国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51922065);国家自然科学基金项目(51679126)。

作者简介:刘媛媛,1997年生,女,硕士研究生,主要研究方向为生态工程管理。E-mail: liuyy80123@163.com

通信作者:石小涛,1981年生,男,教授,主要从事生态水文学研究。E-mail: fishlab@163.com

江干流共调查到鱼类 60 种,隶属于 7 目 18 科。由于目前海南岛仍属于我国鱼类资源研究的薄弱地区(李高俊等,2020),大部分鱼类的生态习性缺乏相应的历史资料记载,栖息习性、产卵方式等习性尚未明确(余梵冬等,2018a),同时由于资料限制,部分鱼类的经济价值等指标较难判定。因此本文选取有代表性、资料齐全的 18 种鱼类进行过鱼对象比选(表 1)。根据采集鱼类的洄游习性、产卵方式、食性、濒危程度等指标,对 18 种鱼类进行过鱼对象评定。

表 1 南渡江流域过鱼对象比选鱼类习性

Tab.1 Ecological habits of the selected target fish species in Nandu River basin

种	洄游习性	产卵方式	食性	濒危程度
鲤形目				
CYPRINIFORMES				
鳙 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	RS	DE	P	LC
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	RS	DE	P	LC
唇鲮 <i>Hemibarbus labeo</i>	SE	VE	C	LC
鳊 <i>Hemiculter leucisculus</i>	SE	VE	O	LC
赤眼鳟 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	SE	VE	O	LC
蒙古鲌 <i>Culter mongolicus</i>	SE	VE	C	LC
翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	SE	VE	H	LC
红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	SE	VE	C	LC
纹唇鱼 <i>Osteochilus salsburyi</i>	SE	VE	H	LC
鲮 <i>Cirrhinus molitorella</i>	SE	VE	H	LC
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	SE	VE	C	LC
倒刺鲃	SE	DE	H	LC
<i>Spinibarbus denticulatus denticulatus</i>	SE	DE	H	LC
东方墨头鱼 <i>Garra orientalis</i>	SE	VE	H	LC
鲈形目				
PERCIFORMES				
月鳢 <i>Channa asiatica</i>	SE	VE	C	LC
乌塘鳢 <i>Bostrychus sinensis</i>	SE	VE	O	LC
鲇形目				
SILURIFORMES				
鲇 <i>Silurus asotus</i>	SE	VE	C	LC
海南长臀鲇	SE	VE	H	VU
<i>Cranoglanis boudierius multiradiatus</i>	SE	VE	H	VU
鳗鲡目				
ANGUILLIFORMES				
花鳗鲡 <i>Anguilla marmorata</i>	RS	DE	C	EN

注: RS: 江海洄游性; RL: 江湖洄游性; SE: 定居性; DE: 漂流性卵; VE: 沉粘性卵; C: 肉食性; O: 杂食性; H: 植食性; P: 浮游生物食性; LC: 无危; VU: 易危; EN: 濒危。

Note: RS: river-sea migratory species; RL: river-lake migratory species; SF: sedentary fish species; PL: drifting eggs; VE: viscid eggs; C: carnivore; O: omnivore; H: herbivore; P: planktotrophic; LC: least concern; VU: vulnerable species; EN: endangered species.

1.2 过鱼对象多维量化评价方法

参考刘军(2004)和彭涛等(2011)的对鱼类优先保护次序评价体系。针对过鱼设施建设目的,综合

考虑鱼类洄游需求以及鱼类过坝后对生境的适应能力,结合南渡江流域鱼类资源量情况、物种价值、物种濒危情况及遗传多样性价值,构建由过坝需求、生境适应度、资源丰富度、物种效用度、物种濒危度和遗传损失度这 6 个维度组成的评价指标体系,如图 1。

1.2.1 过坝需求度 在过鱼设施的设计建设工作中,鱼类实际过坝需求需要优先考虑。南渡江流域鱼类洄游习性可分为江湖洄游、江海洄游、定居性鱼类 3 种类型。

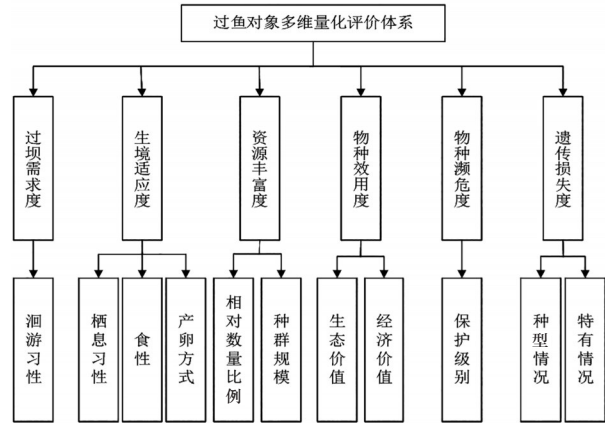


图 1 过鱼对象选择量化评价体系

Fig.1 Quantitative analysis and evaluation system for selecting target fish species

1.2.2 生境适应度 生境适应度是指根据鱼类的各项生态习性,反映工程影响水域内鱼类的生态环境适应性。过鱼对象过坝后是否适应水域生境,完成其生活史,直接影响过鱼设施运行效果。因此应优先选择对工程影响水域适应能力强的鱼类作为过鱼设施过鱼对象。本文选取鱼类栖息习性、食性、产卵方式 3 项指标作为生境适应度评价的基础指标。

(1) 栖息习性:根据鱼类的栖息特点及其完成生活史对生境条件的需求,分为 3 类。第一类是非流水依赖型,此类群种对流水生境无依赖度,整个生命史都可在静缓流生境中完成,也可在流水生境中完成;第二类是半流水依赖型,此类群既能适应流水生境,又能适应于静缓流生境中,但生命史的部分阶段需要在流水生境中完成;第三类是流水依赖性,此类群只能生活在流水生境中。

(2) 食性:根据鱼类食性划分原则,将鱼类划分为杂食性、植食性、浮游生物食性和肉食性(Tang et al, 2013)。由于食物链、食物网的能量传递效率限制,单一食性物种的生境适应性相对而言较差(刘思伟,2020)。

(3) 产卵方式:鱼的产卵方式有产浮性卵、沉性卵、黏沉性卵、漂流性卵以及其他产卵类型。依据所

选鱼类的不同繁殖方式分为2类进行评分(宋一清等,2018)。一类是产沉黏性卵,此类鱼对产卵场要求不严格,受精卵一般黏附于水草和砾石或沉于砾石缝中孵化;一类是产漂流性卵,流水生境面积要求相对较大,对产卵场要求较高。

1.2.3 资源丰富度 资源丰富度表示某种鱼类占该流域资源量的大小,由相对数量比例和种群规模2项定量评价指标表示。

(1)相对数量比例:根据渔获物中某种鱼类数量占总数量的比例划分为5个等级,进行评分。相对数量比例 $a \geq 10\%$ 记5分; $5\% \leq a < 10\%$ 记4分; $1\% \leq a < 5\%$ 记3分; $0.5\% \leq a < 1\%$ 记2分; $a \leq 0.5\%$ 记1分。

(2)种群规模:利用相对重要性指数(index of relative importance, IRI),对研究鱼类的种群资源进行定量评价,公式如下。

$$IRI = (N + W) \times F \times 10^4 \quad \text{①}$$

式中:IRI为相对重要性指数; N 为某种鱼的尾数百分比; W 为某种鱼的重量百分比; F 为发现某种鱼的站点数占总调查站点数的百分数。参考鱼类优势种划分原则(张改等,2021),将 $IRI \geq 500$ 的物种定为优势种, $100 \leq IRI < 500$ 为常见种, $10 \leq IRI < 100$ 为一般种, $IRI < 10$ 为劣势种。

1.2.4 物种效用度 物种效用是指某种鱼所具有的生态及经济价值量。该项指标通过生态价值、经济价值(蔡露等,2020a)2个基本指标进行定量评价。

(1)生态价值:参考李雷等(2019)对裂腹鱼类生态价值的评定,选择鱼类生态学特性和鱼类所属功能群的

营养级高低进行评价。若某种鱼的营养级较高,则其生态价值较高;某种鱼营养级较低,则生态价值较低。

(2)经济价值:参考蔡露等(2020a)的评定方法,根据鱼的市场经济价值,将鱼分为3个等级。若某鱼类的性成熟个体体重 $\geq 1 \text{ kg}$ 且价格 $\geq 50 \text{ 元/kg}$,则其经济价值判定为高;若某鱼类的性成熟个体体重 $\leq 1 \text{ kg}$ 且价格 $\geq 50 \text{ 元/kg}$,或鱼类的性成熟个体体重 $\geq 1 \text{ kg}$ 且价格 $\leq 50 \text{ 元/kg}$,则其经济价值判定为中;若某鱼类的性成熟个体体重 $< 1 \text{ kg}$ 且价格 $< 50 \text{ 元/kg}$,则其经济价值判定为低。

1.2.5 物种濒危度 根据《中国濒危动物红皮书:鱼类》将物种保护等级分为5个等级,分别是极危(CN)、濒危(EN)、易危(VU)、近危(NE)、无危(LC)。

1.2.6 遗传损失度 遗传损失是指鱼类灭绝对鱼类资源多样性遗传基因库可能产生损失的程度,是对其潜在遗传价值的定量评价(毛夏等,1994)。该项指标由种型情况、特有情况2个基本指标组成。

(1)种型情况:指该鱼类所在的科、属所含种的数量情况,体现其潜在的遗传值,可分为3类。单型属或特有属,即所在科仅1属1种;少型属种即所在属含2~3种;多型属种,即所在属含3种以上。

(2)特有情况:指鱼类的流域分布情况。分为流域特有种、2~3个水域分布、分布广泛3类。

根据构建的评价体系,结合鱼类生态习性和资源调查,对南渡江流域代表性鱼类进行赋分评价,形成过鱼设施过鱼对象评价标准(表2)。

1.3 评价指标权重确定

为提高过鱼设施过鱼对象评价指标权重评定的

表2 过鱼设施过鱼对象指标体系和评价标准

Tab. 2 Evaluation criteria for target fish species in fish passage facilities

一级指标	二级指标	评分标准/分				
		5	4	3	2	1
过坝需求度(A_1)	洄游习性(A_{11})	河海洄游	-	河湖洄游	-	定居
	栖息习性(A_{21})	非流水依赖型	-	半流水依赖型	-	流水依赖型
生境适应度(A_2)	食性(A_{22})	-	杂食性	植食性	浮游生物	肉食性
	产卵方式(A_{23})	-	-	-	产沉粘性卵	产漂流性卵
资源丰富度(A_3)	相对数量比例(A_{31})	$a \geq 10\%$	$5\% \leq a < 10\%$	$1\% \leq a < 5\%$	$0.5\% \leq a \leq 1\%$	$a \leq 0.5\%$
	种群规模(A_{32})		优势种	常见种	一般种	劣势种
物种效用度(A_4)	生态价值(A_{41})	高	-	中	-	低
	经济价值(A_{42})	高	-	中	-	低
物种濒危度(A_5)	保护级别(A_{51})	极危	濒危	易危	近危	无危
遗传损失度(A_6)	种型情况(A_{61})	单型属或特有属	-	少型属	-	多型属
	特有情况(A_{62})	本流域特有种	-	2~3个水域分布	-	分布广泛

准确性,本文采取基于博弈论的组合赋权法得出过鱼设施过鱼效果评价各指标的综合权重,从而避免单一赋权法的缺陷,赋权步骤如下:

1.3.1 层次分析法确定主观权重 主要有以下 4 个步骤。

(1)参照刘军(2004)、宋一清等(2018)鱼类物种保护优先等级评定的权重分配,确定指标相对重要性从大到小依次为过坝需求度、生境适应度、物种濒危度、遗传损失度、物种效用度、资源丰富度。根据相对重要性排序,采用层次分析法,构建判断矩阵 \mathbf{A} 。

(2)根据相对重要性矩阵,计算出其判断矩阵最大特征值 λ_{\max} ,特征向量 \mathbf{w} 。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\mathbf{A}\mathbf{w})_i}{\mathbf{w}_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: \mathbf{A} 为判断矩阵; n 为判断矩阵阶数; \mathbf{w}_i 是进行矩阵运算时的列向量; λ_{\max} 为判断矩阵最大特征值。

(3)一致性检验。一致性检验计算公式为:

$$\text{CR} = \frac{\text{CI}}{\text{RI}} \quad (3)$$

式中: CR 为随机一致性比率, CI 为判断矩阵一致性指标, RI 为同阶平均随机一致性指标,当 $\text{CR} < 0.10$ 时,认为判断矩阵具有满意的一致性。

(4)确定各项指标的主观权重

1.3.2 熵权法确定客观权重 主要有以下 3 个步骤。

(1)数据矩阵标准化,标准化公式为:

$$S_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (4)$$

式中: S_{ij} 为标准化指标值, x_{ij} 为初始标准值, $\min\{x_{ij}\}$ 为该指标最大值, $\min\{x_{ij}\}$ 为该项指标最小值。

(2)指标熵值计算

$$E_i = -k \sum_{j=1}^n h_{ij} \ln h_{ij} \quad (5)$$

$$h_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sum_{i=1}^m S_{ij}} \quad (6)$$

式中: $k = \frac{1}{\ln n}$, k 为玻尔兹曼常量, n 为评估对象个数。 E_i 为第 i 个指标的熵值, h_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个样本值占该指标的比重。

(3)指标权重计算

根据指标熵值,各项指标客观权重计算公式如下:

$$N_i = \frac{1 - E_i}{m - \sum_{i=1}^m E_i} \quad (7)$$

(3)组合权重

应用博弈论的组合赋权思想,利用主观赋权法层次分析法(AHP)和客观赋权法熵权法(EWM),计算综合权重,公式为:

$$\mathbf{W}_i = \frac{\mathbf{M}_i \mathbf{N}_i}{\sum_i^n \mathbf{M}_i \mathbf{N}_i} \quad (8)$$

式中: \mathbf{M}_i , \mathbf{N}_i 分别为层次分析法和熵权法求得权重向量, \mathbf{W}_i 为组合赋权法得出的综合权重向量。

1.4 TOPSIS 综合评价模型

TOPSIS 法又称逼近理想排序法(Hajduk & Jelonek,2021),其基本原理为根据构建的评价体系从所有评价对象中评选出最优方案与最劣方案,通过计算各评价对象与最优、劣方案的距离,从而获得各评价对象的优劣排序。

(1)根据已求得的综合权重向量确定加权决策矩阵

$$\mathbf{C}_{ij} = \mathbf{W}_i \times \mathbf{S}_{ij} \quad (9)$$

式中: \mathbf{W}_i 为指标权重, \mathbf{S}_{ij} 为标准化矩阵

(2)确定正理想值 \mathbf{C}^* 和负理想值 \mathbf{C}^0

$$\mathbf{C}^* = [c_1^*, \dots, c_n^*] \quad (10)$$

$$\mathbf{C}^0 = [c_1^0, \dots, c_n^0] \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_j^* = \max_i c_{ij} = (\max\{c_{11}, c_{21}, L, c_{n1}\}, \\ \max\{c_{12}, c_{22}, L, c_{n2}\}, L, \max\{c_{1m}, c_{2m}, L, c_{nm}\}) \\ c_j^0 = \min_i c_{ij} = (\min\{c_{11}, c_{21}, L, c_{n1}\}, \\ \min\{c_{12}, c_{22}, L, c_{n2}\}, L, \min\{c_{1m}, c_{2m}, L, c_{nm}\}) \end{array} \right. \quad (12)$$

(3)计算每个待评价对象到正理想值和负理想值的距离

$$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (c_{ij} - c_j^*)^2}, i = 1, \dots, m \quad (13)$$

$$d_i^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^m (c_{ij} - c_j^0)^2}, i = 1, \dots, m \quad (14)$$

(4)计算每个待评价对象的评价参考值

$$f_i = \frac{d_i^0}{d_i^0 + d_i^*} \quad (15)$$

运用量化评价模型,对过鱼对象进行定序分析,划分过鱼对象评定的优先等级。 $0.4 \leq f < 1$, 为首要过鱼对象; $0.15 \leq f < 0.4$, 为主要过鱼对象; $0.1 \leq f < 0.15$, 为次要过鱼对象; $f < 0.1$, 为兼顾过鱼对象。

2 结果与分析

2.1 过鱼对象评价指标权重

分别运用层次分析法与熵权法确定过鱼对象评定体系权重,对6个一级指标和11个二级指标进行指标权重计算。结果见表3。

根据博弈论的利弊权衡,以参考鱼类优先保护评价系统的权重设定的主观赋权 M_i 为主,依靠过鱼对象评价标准赋分的客观权重 N_i 对主观权重 M_i 进行修正,得出过鱼对象评定的综合权重 W_i 。过鱼对象评定准则层指标的相对重要性由大到小排序为:过坝需求度(A_1)、生境适应度(A_2)、资源丰富度(A_3)、物种效用度(A_4)、物种濒危度(A_5)、遗传损失度(A_6)。指标层的相对重要性由大到小排序为:洄游习性(A_{11})、栖息习性(A_{21})、保护级别(A_{51})、种型情况(A_{61})、食性(A_{22})、经济价值(A_{42})、生态价值(A_{41})、相对数量比例(A_{31})、特有情况(A_{62})、繁殖方式(A_{23})、种群规模(A_{32})。

表3 过鱼设施过鱼对象评价指标综合权重

Tab.3 Comprehensive weights of evaluation indicators for fish passage facilities

准则层 (A_i)	指标层 (A_j)	AHP 法权重 (M_i)	EWM 法权重 (N_i)	综合权重 (W_i)
过坝需求度(A_1)	洄游习性(A_{11})	0.4005	0.1209	0.4740
	栖息习性(A_{21})	0.1301	0.1227	0.1564
	产卵方式(A_{23})	0.0716	0.0193	0.0135
生境适应度(A_2)	食性(A_{22})	0.0394	0.1056	0.0407
	相对数量比例(A_{31})	0.0199	0.0945	0.0184
资源丰富度(A_3)	种群规模(A_{32})	0.0198	0.0236	0.0046
	物种效用度(A_4)	0.0177	0.1285	0.0223
物种濒危度(A_5)	生态价值(A_{41})	0.0355	0.1060	0.0368
	经济价值(A_{42})	0.01723	0.0862	0.1454
遗传损失度(A_6)	保护级别(A_{51})	0.0466	0.1560	0.0712
	种型情况(A_{61})	0.0466	0.0368	0.0168
	特有情况(A_{62})			

2.2 过鱼对象评定

2.2.1 准则层评价指标分析 南渡江流域18种鱼类6项单项评价指标结果如表4,可以看出不同鱼类准则层指标的差距较大。

2.2.1.1 过坝需求度 在选取的18种鱼类中,花鳗鲡为河海洄游性鱼类,性成熟时洄游至海洋产卵繁殖。其洄游距离较远,过坝需求度最高;其次是鳙、鲢河湖洄游性鱼类,性成熟时由湖泊洄游至江河产卵,具有一定的过坝需求;蒙古鲌、鲮、翘嘴鲌、唇鲮、月鳢、鳊等淡水定居性鱼类,无洄游需求,过坝需求度不高。

表4 准则层评价结果

Tab.4 Evaluation results of criterion level

鱼名	过坝需求度	生境适应度	资源丰富度	物种效用度	物种濒危度	遗传损失度
鳙	0.1154	0.1492	0.0902	0.1033	0.0435	0.1333
鲢	0.1154	0.1492	0.0685	0.1033	0.0435	0.1333
唇鲮	0.0385	0.1096	0.1402	0.1278	0.0435	0.0778
鳊	0.0385	0.2978	0.2120	0.0878	0.0435	0.0778
赤眼鳟	0.0385	0.2026	0.0685	0.0878	0.0435	0.1889
蒙古鲌	0.0385	0.1572	0.1402	0.1833	0.0435	0.0778
翘嘴鲌	0.0385	0.1561	0.0685	0.0478	0.0435	0.0778
纹唇鱼	0.0385	0.1561	0.1402	0.0478	0.0435	0.0778
鲮	0.0385	0.1561	0.1402	0.1033	0.0435	0.0778
马口鱼	0.0385	0.1096	0.1652	0.1278	0.0435	0.0778
倒刺鲃	0.0385	0.1248	0.0685	0.1033	0.0435	0.0778
红鳍原鲌	0.0385	0.1572	0.1402	0.1278	0.0435	0.1889
东方墨头鱼	0.0385	0.1561	0.0467	0.0478	0.0435	0.0778
月鳢	0.0385	0.2048	0.0935	0.1278	0.0435	0.0778
乌塘鳢	0.0385	0.2502	0.1402	0.1433	0.0435	0.1889
鲇	0.0385	0.2048	0.0685	0.0878	0.0435	0.0778
海南长臀鲃	0.0385	0.1328	0.1402	0.1589	0.1304	0.2333
花鳗鲡	0.1923	0.1259	0.0685	0.1833	0.1739	0.0778

2.2.1.2 生境适宜度 在选取的18种鱼类中,月鳢、鳊、乌塘鳢、蒙古鲌等鱼类生境适应度最高。

(1) 栖息习性

鳊、月鳢、鲇等为非流水依赖性鱼类,整个生命史既可在静水生境中完成,也可在流水生境中完成,因此该类型鱼类的生境适应性较高。而鳙、鲢、草鱼等为半流水依赖性鱼类,既生命史的部分阶段必须依赖于流水生境,比如产卵繁殖时需要水流刺激。倒刺鲃、东方墨头鱼、赤眼鳟、鲮、纹唇鱼等鱼类为流水依赖性鱼类,即该类群鱼类依赖于流水生境,主要或完全生活在流水生境中。但由于梯级水电开发,河流破碎化,流水生境萎缩,流水依赖性鱼类的生存空间被压缩。

(2) 食性

鳊、赤眼鳟、乌塘鳢等为杂食性鱼类;翘嘴鲌、纹唇鱼、鲮、倒刺鲃、东方墨头鱼等为植食性鱼类;鳙、鲢、海南长臀鲃为浮游生物食性;唇鲮、蒙古鲌、红鳍原鲌、月鳢等为肉食性鱼类。由于单一食性鱼类在生态系统中更脆弱,因此杂食性鱼类的生境适应能力强于植食性鱼类、肉食性鱼类等单一食性鱼类。

(3) 产卵方式

鳙、鲢、倒刺鲃、花鳗鲡等为产漂流性卵鱼类,产卵时需要湍急水流刺激,并需要较大范围的流水生境,保证受精卵的漂流孵化,因此该类型鱼类对产

卵生境的要求较高。鳃、蒙古鲃、翘嘴鲃、月鳢、红鳍原鲃等鱼类产粘性卵,对产卵生境的要求不高,卵多粘附于水草或其他水生植物上发育孵化。

2.2.1.3 资源丰富度 从相对数量比例和种群规模综合考虑,本次选取的南渡江流域18种鱼类中,鳃资源丰富度最高,其次是蒙古鲃、红鳍原鲃、唇鲮等鱼类;倒刺鲃、花鳗鲡、东方墨头鱼等鱼类的资源丰富度较低。

(1)相对数量比例

根据某种鱼类占总渔获物数量的比例可得,鳃的相对数量比例最大,为26.55%;其次是马口鱼,为5.23%;蒙古鲃、红鳍原鲃、唇鲮、海南长臀鲃、纹唇鱼、鲮、乌塘鳢的相对数量比例为1%~5%;月鳢、翘嘴鲃、鲃、赤眼鲢、东方墨头鱼、鳊、倒刺鲃、鲢、花鳗鲡等鱼类的相对数量比例均小于1%。

(2)种群规模

根据本次南渡江流域渔获物调查结果得出18种鱼类的相对重要性指数IRI(表5)。

表5 南渡江流域部分鱼类的相对重要性指数(IRI)
Tab.5 Relative importance index of fish species in the Nandu River basin

物种	N/%	W/%	F/%	IRI	物种划分
鳃	26.55	5.35	57.14	1823.09	优势种
鲮	1.98	13.92	57.14	908.55	
蒙古鲃	4.52	7.01	42.86	494.31	常见种
红鳍原鲃	4.24	2.36	57.14	377.17	
纹唇鱼	2.12	5.69	42.86	334.79	
唇鲮	3.25	3.79	42.86	301.84	
马口鱼	5.23	0.65	42.86	251.95	
乌塘鳢	1.27	2.89	57.14	237.54	
海南长臀鲃	2.82	5.46	28.57	236.66	
鳊	0.14	9.59	14.29	138.95	
翘嘴鲃	0.28	1.86	28.57	61.11	
鲃	0.28	1.82	28.57	59.95	
倒刺鲃	0.14	2.21	14.29	33.59	
赤眼鲢	0.28	0.88	28.57	33.33	
鲢	0.14	1.53	14.29	23.82	一般种
月鳢	0.71	0.60	14.29	18.63	
花鳗鲡	0.14	0.59	14.29	10.48	
东方墨头鱼	0.28	0.23	14.29	7.32	劣势种

相对重要性指数从高到低依次为鳃、鲮、蒙古鲃、红鳍原鲃、纹唇鱼、唇鲮、马口鱼、乌塘鳢、海南长臀鲃、鳊、翘嘴鲃、鲃、倒刺鲃、赤眼鲢、鲢、月鳢、花鳗鲡、东方墨头鱼。其中,鳃、鲮的IRI分别为1823.09、908.55,为优势种;蒙古鲃、红鳍原鲃、纹唇鱼、唇鲮、马口鱼、乌塘鳢、海南长臀鲃、鳊的IRI为100~500,为

常见种;倒刺鲃、赤眼鲢、鲢、月鳢、花鳗鲡为一般种;东方墨头鱼的IRI指数最低,为劣势种。

2.2.1.4 物种效用度 (1)生态价值

参考李雷等(2019)的鱼类生态价值评判原则,对选取的18种南渡江流域鱼类进行生态价值判定。其中唇鲮、蒙古鲃、马口鱼、红鳍原鲃、鲃的营养级位置较高,具有较高的生态价值;鳊、鲢、翘嘴鲃、倒刺鲃等鱼类的营养级位置偏低,生态价值偏低。

(2)经济价值

鲢、鳊、蒙古鲃、鲮、倒刺鲃等为主要经济鱼类;马口鱼、鳃、东方墨头鱼等为中小型经济鱼类。

2.2.1.5 物种濒危度 花鳗鲡、海南长臀鲃的得分较高,其中花鳗鲡为国家II级保护鱼类,列入《中国濒危动物红皮书:鱼类》濒危物种;海南长臀鲃列入《中国濒危动物红皮书:鱼类》易危物种。

2.2.1.6 遗传损失度 (1)种型情况

选取的18种鱼类隶属于4目6科19属,以鲤形目鲤科鱼类为主。其中赤眼鲢、红鳍原鲃、乌塘鳢其均为特有属物种,即所在科仅1属1种。鳊、鲢、海南长臀鲃为少型属种,其中鳊、鲢为鲤形目鲤科鲢属,所在属包含3种物种;海南长臀鲃为鲃形目长臀鲃科长臀鲃属,所在属包含2种物种。其余鱼类均为多型属,即所在属包含的物种数大于3种。

(2)特有情况:从鱼类的流域分布情况考虑,选取的18种鱼类中,海南长臀鲃为海南岛特有种,分布于南渡江及昌化江流域。鳊、鲢、唇鲮、鳃等其余鱼类均分布广泛。

2.2.2 过鱼对象优先等级评定 考虑南渡江建设实际情况,根据过鱼对象优先等级评价结果(表6)可知,花鳗鲡得分最高,其次是鳊、鲢。花鳗鲡、鲢、鳊为首要过鱼对象,均具有洄游需求,其中花鳗鲡为河海洄游鱼类,鲢、鳊为河湖洄游鱼类。主要过鱼对象有4种,占22%,分别为鳃、月鳢、鲃、海南长臀鲃。这4种过鱼对象均不完全依赖于流水生境,能良好适应筑坝后的鱼类生境变化。将其作为过鱼对象,能促进上下游鱼类基因交流,丰富鱼类资源,改善河流水生生态系统。其中鳃、月鳢、鲃均为非流水依赖性鱼类,在流水、静水环境下均能完成生活史,且产沉粘性卵,生境适宜度高,且均为重要经济鱼类,具有较高的物种价值;海南长臀鲃为《中国濒危动物红皮书:鱼类》易危物种,且为海南岛特有种,为少型属种,遗传多样性贫乏,具有较高的遗传价值,同时其肉质鲜美,为名贵的经济鱼类,具有较高经济价值。次要过鱼对象有4种,分别为乌塘鳢、红鳍原鲃、赤眼

鳊、蒙古鲃。其中乌塘鳢、红鳍原鲃、赤眼鳟均为特有属物种,遗传价值高。这4种鱼类具有良好生境适应能力,且均为经济鱼类,有一定经济价值。鲮、倒刺鲃、马口鱼、纹唇鱼、唇鲮、翘嘴鲃、东方墨头鱼等8种鱼类为兼顾过鱼对象,占本研究鱼类的44%。该类型鱼均依赖于流水生境,需在流水环境下完成生活史。由于工程建设,导致河流破碎化,流水生境萎缩,该类型鱼可能较难适应建坝后的水生生境,较难完成其生活史。因此若将其作为过鱼对象,并不能改善其生存困境。对此应从根本考虑,恢复鱼类适宜生境,方能帮助流水依赖型鱼类完成生活史。次要及兼顾过鱼对象,虽没有特殊的洄游需求,但作为过鱼对象可根据需要自由通过过鱼设施,以促进鱼类种群交流。

表6 过鱼对象等级评价结果

Tab.6 Evaluation result of potential target fish species

鱼名	评分	次序	等级
花鳊	0.8637	1	首要过鱼对象
鲢	0.4704	2	
鳙	0.4704	3	
鳊	0.1697	4	主要过鱼对象
月鳊	0.1649	5	
鲃	0.1641	6	
海南长臀鳊	0.1579	7	
乌塘鳢	0.1344	8	次要过鱼对象
红鳍原鲃	0.1271	9	
赤眼鳟	0.1119	10	
蒙古鲃	0.1048	11	
鲮	0.0370	12	兼顾过鱼对象
倒刺鲃	0.0348	13	
马口鱼	0.0289	14	
纹唇鱼	0.0271	15	
唇鲮	0.0259	16	
翘嘴鲃	0.0245	17	
东方墨头鱼	0.0245	18	

3 讨论

过鱼设施建设需要根据流域鱼类资源调查结果以及鱼类生态习性,合理确定过鱼对象。目前过鱼设施建设目的仅考虑栖息地连通性,并未考虑过坝鱼类的栖息地适应性,从而导致过鱼设施性能效果较低。如南渡江龙塘坝下过鱼设施以日本鳊、花鳊、七丝鲢及四大家鱼(鲢、鳙、草鱼、青鱼)为过鱼对象(菅宇翔等,2021)。其过鱼对象的选取主要考

虑鱼类洄游需求、濒危程度及经济价值,忽略了水利工程建设对鱼类生境的影响和鱼类对于受损生境的适应能力。本研究重点考虑鱼类洄游需求以及鱼类对所在河段的适应情况,通过组合赋权法确定指标权重,一定程度上避免主观随意性。

本研究将花鳊、鳊、鲢等洄游鱼类列入过鱼设施首要过鱼对象符合工程实际情况。水库蓄水后,淹没的植被降解释放的营养物质,为非流水依赖型的鱼类提供良好的栖息地。像鳊、月鳊、鲃等非流水依赖型鱼类,鳊、鲮、鳊、乌塘鳢、红鳍原鲃半流水依赖型鱼类具有良好的生境适应性,应选择此鱼类作为主要过鱼对象。且该类型鱼类生境适应性高,过坝后的存活率较高,护鱼效果较显著。将倒刺鲃、翘嘴鲃、东方墨头鱼等鱼类评定为兼顾过鱼对象,是因为该类型鱼类主要或完全生活在流水生境中。水利枢纽工程建成运行后,流水生境萎缩,对该类型鱼类的生存空间产生较大影响(余梵冬,2018b),若将其作为过鱼设施的过鱼对象,将由于缺乏适宜生境,不能有效完成生活史,导致过鱼效果不显著或者过坝后存活率较低。因此对该类型鱼类的保护措施,不应局限于过鱼设施建设,应从全流域角度考虑(董哲仁等,2020),采取针对性措施进行鱼类生境恢复,满足鱼类生长及繁殖需求。

多指标量化评定体系是科学合理确定过鱼设施过鱼对象的依据。但由于南渡江流域鱼类众多,区系构成复杂,大部分鱼类缺乏详细生态信息,较难进行过鱼对象评定,部分反映种类生活特性的指标如相对怀卵量、繁殖成功率等未纳入评价指标具体分析。由于缺乏鱼类生态价值评定相关研究,本研究参考李雷等(2019)的生态价值评定方法,通过鱼类的营养级判定生态价值。但该方法存在片面性和局限性,对部分鱼类生态价值评估略显不当。因此建议加强鱼类生物习性调查研究,为过鱼设施的过鱼对象评定提供更为准确和全面的参考依据。

参考文献

- 蔡露,段川,侯铁群,等,2020a-10-30.一种确定过鱼设备主要过鱼对象的方法:CN202010743815.4 [P].
- 蔡露,张鹏,侯铁群,等,2020b.我国过鱼设施建设需求、成果及存在的问题[J].生态学杂志,39(1):292-299.
- 董哲仁,张晶,赵进勇,2020.论恢复鱼类洄游通道规划方法[J].水生态学杂志,41(6):1-8.
- 侯铁群,蔡露,陈小娟,等,2020.过鱼设施设计要点及有效性评价[J].环境影响评价,42(3):19-23.
- 菅宇翔,王伟,王艳芳,等,2021.南渡江龙塘大坝枢纽改造工程

- 生态环境保护措施设计[J]. 水利水电工程设计, 40(3): 15-18.
- 李高俊, 顾党恩, 蔡杏伟, 等, 2020. 海南岛“两江一河”淡水土著鱼类的种类组成与分布现状[J]. 淡水渔业, 50(6): 15-22.
- 李雷, 马波, 金星, 等, 2019. 西藏雅鲁藏布江中游裂腹鱼类优先保护等级定量评价[J]. 中国水产科学, 26(5):914-924.
- 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): 12-16.
- 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.
- 毛夏, 蒋明康, 郑龙翔, 1994. 珍稀濒危植物评价分级专家系统研究[J]. 农村生态环境, (3): 18-21, 43.
- 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.
- 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.
- 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):481-489.
- 余梵冬, 顾党恩, 佟延南, 等, 2018a. 基于鱼类多样性与生物完整性的海南岛南渡江河流健康评价[J]. 生态学杂志, 37(9):2717-2726.
- 余梵冬, 王德强, 顾党恩, 等, 2018b. 海南岛南渡江鱼类种类组成和分布现状[J]. 淡水渔业, 48(2):58-67.
- 张改, 武智, 朱书礼, 等, 2021. 清远水利枢纽建设对库区鱼类群落结构影响[J]. 生态科学, 40(2):175-185.
- Brum F T, Graham C H, Costa G C, et al, 2017. Global priorities for conservation across multiple dimensions of mammalian diversity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114(29): 7641-7646.
- Chen A, Wen J, Wu M, et al, 2019. Review of global and China's policies on fish passages[J]. Water Policy, 21(4):708-721.
- Hajduk S, Jelonek D, 2021. A decision-making approach based on TOPSIS Method for Ranking Smart Cities in the context of urban energy[J]. Energies, 14(9):64-83
- Li J P, Dong S K, Peng M C, et al, 2013. Effects of damming on the biological integrity of fish assemblages in the middle Lancang-Mekong River basin[J]. Ecological Indicators, 34: 94-102.
- Neraas L P, Spruell P, 2001. Fragmentation of riverine systems: the genetic effects of dams on bull trout (*Salvelinus confluentus*) in the Clark Fork River system[J]. Molecular Ecology, 10(5):1153-1166
- Tang J F, Ye S W, Li W, et al, 2013. Status and historical changes in the fish community in Erhai Lake[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 31(4): 712-723.
- Tao J P, Gong Y T, Tan X C, et al, 2012. Spatiotemporal patterns of the fish assemblages downstream of the Gezhouba Dam on the Yangtze River[J]. Science China Life Sciences, 55(7): 626-636.
- Shi X T, Boyd Kynard, Defu Liu, et al, 2015. Development of fish passage in China[J]. Fisheries, 40(4):161-169.

(责任编辑 郑金秀)

Application of a Multi-Dimensional Quantization System for Targeting Fish Species in Nandu River Basin

LIU Yuan-yuan¹, JIN Zhi-jun², LIN Chen-yu³, TAN Jun-jun¹, WEI Lang², SHAN Cheng-kang², SHI Xiao-tao¹

- (1. College of hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R. China;
2. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guizhou 550081, P.R. China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China)

Abstract: The design and technical features of fish passage facilities are determined by biological indicators of target fish species, so determining the target species is the first task in constructing a fish passage. At present, there is not a comprehensive evaluation system for setting species priority for conservation. In this study, Nandu River was selected for a case study, and a multi-index quantitative selection system for targeting fish species was developed to determine species priority for fish passage facilities. The multi-index quantitative selection system consisted of 11 evaluation indices from 6 dimensions: fish migration pattern, habitat suitability, fishery resource richness, species value, degree of endangerment, and genetic loss. The dimensions were selected based on fish passage design requirements and habitat suitability for fish passing the dam. The weight of each evaluation index for the selection system was obtained using a combined subjective-objective weighting method that avoids the subjective limitation of single weighting method. In this research, 18 representative fish species of Nandu River were quantitatively analyzed for conservation priority using the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Results show that the fish in Nandu River fall into four levels of priority: (1) Target fish species of absolute priority include *Anguilla marmorata*, *Hypophthalmichthys molitrix* and *Hypophthalmichthys nobilis*; (2) primary target fish species include *Hemiculter leucisculus*, *Channa asiatica*, *Silurus asotus* and *Cranoglanis boudierius multiradiatus*; (3) Species of secondary importance include *Bostrychus sinensis*, *Cultrichthys erythropterus*, *Squaliobarbus curriculus*, and *Culter mongolicus Basilewsky*; (4) species of least importance include *Cirrhinus molitorella*, *Spinibarbus denticulatus denticulatus*, *Opsariichthys bidens* and *Osteochilus salsburyi*. In conclusion, we developed a rational, science based multi-index system to quantify the conservation priority of potential target fish species for fish passage facilities on Nandu River that will support fish passage construction and fish resource conservation in Nandu River.

Key words: fish passage facilities; conservation priority for fish species; multi-index quantitative selection system; Nandu River basin