

# 面向产漂流性卵鱼类的三峡水库生态调度效果评价

张迪<sup>1</sup>, 徐薇<sup>2</sup>, 吴凡<sup>3</sup>, 林俊强<sup>1</sup>, 侯轶群<sup>2</sup>, 朱博然<sup>1</sup>, 彭期冬<sup>1</sup>, 靳甜甜<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

2. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 湖北武汉 430079;

3. 国家发展和改革委员会一带一路建设促进中心, 北京 100038)

**摘要:** 构建生态调度效果评估指标体系, 评估三峡水库历年生态调度的效果并提出生态调度方案的优化建议, 为三峡水库生态调度提供参考。从生态环境效益和社会经济效益2个维度出发, 构建的面向产漂流性卵鱼类繁殖的水库生态调度效果评价体系包含目标层、准则层和6个一级指标、10个二级指标, 提出了各指标的计算方法和赋分标准, 并采用层次分析法根据指标相对重要度, 计算了各指标的权重系数。2012-2022年三峡水库生态调度效果各年度存在明显差异, 涨水持续时间、初始流量、流量日上涨率和洪峰流量、水温等水文水环境指标满足鱼类最适繁殖需求的生态调度, 鱼类繁殖响应良好; 开展2次生态调度年份的效果好于开展1次调度的年份。三峡水库生态调度尽可能控制在水温20℃以上起调, 水库出流过程尽可能接近鱼类适宜的水文需求阈值区间, 同时在水库运行条件合适的前提下, 年内尽可能开展2次生态调度实践, 泄放较大脉冲的洪峰过程, 促进鱼类繁殖。

**关键词:** 产漂流性卵鱼类; 四大家鱼; 生态调度; 效果评价; 三峡水库

**中图分类号:** TV697.1, S961.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2024)01-0058-09

水利水电工程建设是人类开发利用河流水能资源的主体方式, 在防洪、发电、灌溉、航运、供水等方面发挥着诸多兴利功能, 但也不可避免地改变了河流的天然水文情势和水沙过程, 驱使河流地形、水动力、水质等环境状态发生变化, 进而破坏鱼类等水生生物原有的生长繁殖条件, 扰乱了生物对环境的正常行为响应, 对河流生态系统带来了一定的负面影响(陈求稳等, 2020; 李婷等, 2020; 陈秀秀等, 2022)。为解决水利工程建设带来的上述负面生态影响, 协调水库社会效益与生态环境之间的矛盾关系, 国内外学者和水工程的运行管理者开始探索把生态因子加入到日常调度中, 提出了生态调度的概念(林俊强等, 2022)。

三峡水库位于长江干流, 是长江上游干流控制性梯级水库的最末一级。作为现今世界上最大的水利枢纽工程, 三峡水库集防洪、发电、航运和水资源利用等综合效益为一体, 是治理、开发和保护长江的

关键性骨干工程。同时, 三峡工程的运行, 也不可避免地对长江河流生态系统产生了诸多影响。四大家鱼作为长江中下游生态系统的代表性物种, 也是受三峡水库运行影响较大的物种(李世健等, 2011; Duan et al, 2009)。研究表明, 三峡水库建成后坝下水文过程和水温变化对四大家鱼的繁殖活动产生了显著影响。四大家鱼自然繁殖时期为每年的5-6月份, 最低水温为18℃, 水温低于18℃则繁殖活动被迫终止, 受三峡水库春季低温水下泄影响, 四大家鱼的产卵繁殖期出现明显的滞后效应, 推迟时间约20 d(彭期冬等, 2012)。另一方面, 天然河流的洪水脉冲过程带有强烈的生命节律信号, 会引发鱼类的自然繁殖行为, 观测资料显示, 四大家鱼等产漂流性卵鱼类在水温合适的前提下, 如遇江水上涨就可能诱发繁殖行为(陈永柏等, 2009)。涨水率、涨水持续时间等水文节律指标是影响鱼类繁殖的关键指标, 三峡水库建成后水文过程坦化, 洪峰过程削减, 洪峰流量、涨水率等鱼类繁殖的刺激信号减弱, 同样可能对四大家鱼的繁殖活动产生不利影响。

为了减缓不利生态影响, 三峡水库2011-2022年连续12年开展了面向下游产漂流性卵鱼类自然繁殖的18次生态调度试验, 在每年的5-7月份, 结合上游来水条件, 在水温合适的条件下, 通过改变水库下泄流量过程, 人工创造适合四大家鱼产卵繁殖所需水文条件以及水力学条件的洪峰过程, 刺激四大家鱼

收稿日期: 2023-11-14

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200304); 国家自然科学基金联合基金(U2240214)。

作者简介: 张迪, 1991年生, 女, 高级工程师, 主要从事生态水力学研究。E-mail: zhangd\_91@163.com

通信作者: 林俊强, 1984年生, 男, 正高级工程师, 主要从事生态水力学研究。E-mail: junquang-lin@hotmail.com

等产漂流性卵鱼类繁殖。2017年开始,生态调度试验扩展到了金沙江下游,开展了溪洛渡、向家坝、三峡梯级水库联合生态调度试验,梯级水库同步开始加大出库流量,以满足生态调度试验要求。

陈进和李清清(2015)通过分析三峡生态调度期水文过程指标和鱼类产卵量,定性评估了三峡水库的生态调度效果。徐薇等(2023)在金沙江中游梨园水电站坝下江段设点观测鱼类早期资源和水文环境要素,通过分析鱼类自然繁殖对生态调度的响应情况,评估了生态调度效果。但目前相关研究尚未建立可系统反映水文、水环境要素特性及鱼类繁殖响应的生态调度效果定量化评价方法体系。本研究旨在通过综合考虑生态调度对下游水文环境要素和鱼类早期资源影响,构建生态调度效果评估指标体系,评估三峡水库历年生态调度的效果,并提出生态调度方案的优化建议,为三峡水库生态调度提供参考。

## 1 生态调度效果评估指标体系构建

本研究从生态环境效益和社会经济效益2个维度出发,通过查阅文献、专家咨询的方式,基于层次分析法,构建三峡水库产漂流性卵鱼类生态调度效果评估指标体系。

### 1.1 指标遴选

1.1.1 生态环境效益评价指标 生态环境效益评价主要从水文环境要素和鱼类早期资源2个层面考量。鱼类早期资源量是最直观反映生态调度效果的指标,考虑到监测可能存在较大的随机性误差,因此,本研究综合考量“水文环境要素”“鱼类早期资源量”2个层面,以期更为全面、客观地评估生态调度效果。

水文环境要素是影响水生生物繁殖的重要指标,对于水生生物尤其是产漂流性卵鱼类来说,水温和水文过程是影响其繁殖的关键要素。相关研究显示,对于产漂流性卵鱼类,水温是刺激其繁殖的重要启动信号,涨水持续时间、涨水断面初始流量、涨水断面洪峰流量和流量日增长率也被认为是影响鱼类繁殖的关键水文指标(徐薇等,2020;李朝达等,2021)。为量化水文指标对鱼类繁殖影响,本研究借用“栖息地适宜度”的概念,利用栖息地适宜度指数(Habitat Suitability Index, HSI)表征鱼类对水文指标的偏好程度。最终选取“涨水持续时间适宜度”“涨水断面初始流量适宜度”“涨水断面洪峰流量适宜度”“流量日增长率适宜度”作为评价指标。

水工程的建设改变了河流的原始特征,水库调

蓄引起的径流过程坦化,导致产漂流性卵鱼类等水生生物繁殖刺激的减弱,造成生物资源量的下降(廖文婷等,2018)。生态调度时间大多在鱼类繁殖期,通过“人造洪峰”的方式促进鱼类繁殖,加快鱼类种质资源恢复(朱文丽等,2023;熊明和郭卫,2023)。基于上述认知,选择“调度目标鱼类产卵量增加率”“生态调度期间鱼类繁殖规模占整个繁殖期比例”作为评价指标。

1.1.2 社会经济效益评价指标 水库生态调度在改善河流生态环境的同时应兼顾社会效益和工程的功能目标,通常应考虑的目标主要包括防洪、发电、航运、供水、泥沙等。具体到本研究的对象,主要考虑的功能目标包括防洪、发电和航运3个层面。

防洪是三峡水库的主要功能目标之一,生态调度的下泄流量也应以下游防洪安全为前提,流量不宜过大,故选取“下游防洪安全度”为评价指标。

生态调度与发电调度之间存在一定的制约因素,主要表现为生态调度会影响电站运行出力以及调峰总量,可能造成发电量的损失(任玉峰等,2020)。因此选取“发电损失量”作为生态调度对发电影响的关键指标。

水电站对下游河道航运的影响主要体现为对河道水位和流速的影响,生态调度导致的水库出流过程改变可能会引起下游河道的水位和流速波动。因此,选择“出库流量”作为评价生态调度对航运安全影响的指标。

### 1.2 指标量化

1.2.1 水文过程指标适宜度 水文过程指标适宜度是指生态调度涨水持续时间、初始流量、洪峰流量、流量日增长率对于鱼类繁殖的适宜度,表征目标鱼类繁殖对调度水文过程指标的偏好程度,均以适宜度指数表示。

(1)涨水持续时间适宜度 首先确定目标鱼类,然后建立目标鱼类繁殖行为与调度涨水持续时间的响应关系曲线即适宜度指数曲线,最后根据适宜度指数曲线计算待评价生态调度涨水持续时间的适宜度指数。

本研究目标鱼类主要是以四大家鱼为代表的产漂流性卵鱼类。针对涨水持续时间,易伯鲁等(1988)认为,四大家鱼在江水起涨后0.5~2 d开始产卵,产卵持续时间都在4 d以上,平均持续时间11 d,持续时间范围4~18 d;王俊娜等(2012)提出,有利于增加四大家鱼鱼苗丰度的水文过程的持续时间在5~8 d。因此本研究以0.5~18 d作为涨水持续时间的适宜范围,

2~4 d 作为最适范围,4~8 d 为次适宜范围。

(2) 涨水断面初始流量 李博等(2021)、李朝达等(2021)研究认为适宜四大家鱼繁殖的初始流量范围分别为 6 400~18 900、7 030~16 200  $\text{m}^3/\text{s}$ ,徐薇等(2020)认为初始流量达到 14 000  $\text{m}^3/\text{s}$  即为适宜。本文以 6 400~18 900  $\text{m}^3/\text{s}$  为涨水断面初始流量适宜范围,14 000~16 200  $\text{m}^3/\text{s}$  作为最适范围。

(3) 涨水断面洪峰流量 李博等(2021)认为产卵时的流量范围为 9 400~38 575  $\text{m}^3/\text{s}$ ,适宜四大家鱼繁殖的洪峰流量范围为 16 425~32 300  $\text{m}^3/\text{s}$ ;王悦和高千红(2017)认为洪峰流量大于 20 000  $\text{m}^3/\text{s}$  鱼类产卵量增加;刘瀚等(2023)认为最适洪峰流量为

19 610  $\text{m}^3/\text{s}$ 。本文以 9 400~38 575  $\text{m}^3/\text{s}$  作为涨水断面洪峰流量适宜范围,以 16 425~20 000  $\text{m}^3/\text{s}$  为较适范围,以 20 000~32 300  $\text{m}^3/\text{s}$  为最适范围。

(4) 流量日增长率 王俊娜等(2012)提出,有利于增加四大家鱼鱼苗丰度的日均涨水率高于 900  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ ;王悦和高千红(2017)认为,适宜的流量日增长范围为 1 295~2 825  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ ,增长率范围为 1 925~4 533  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ 。本文以 900~4 533  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$  为流量日增长率适宜范围,以 1 295~1 925  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$  为较适范围,以 1 925~2 825  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$  为最适范围。

(5) 水文过程指标赋分 水文过程指标适宜度见图 1。各指标得分=指标适宜度 $\times$ 100。

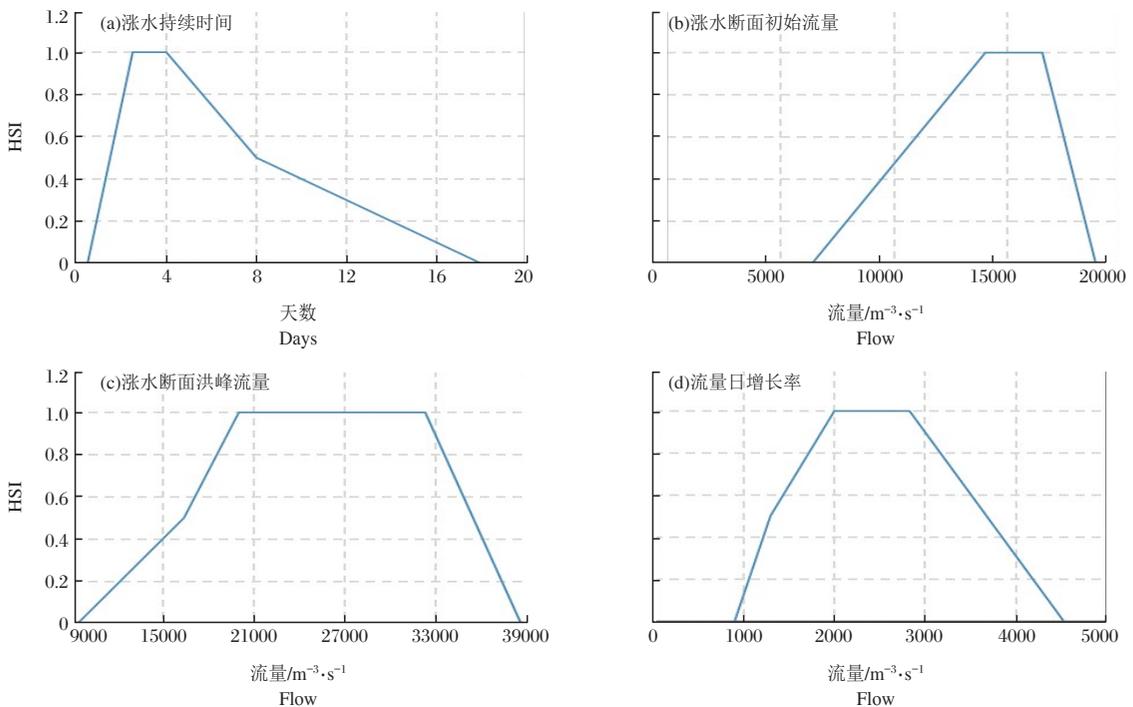


图 1 水文过程指标适宜度曲线

Fig.1 Suitability curve of hydrological process indices

1.2.2 水温适宜度 指水温对于藻类生长或鱼类繁殖等水生物活动的适宜度指数,表征藻类或鱼类等水生生物对水温的偏好程度,以水温适宜度指数表示。

首先确定调度目标鱼类,然后建立调度目标鱼类繁殖与水温之间的响应关系曲线即水温适宜度指数曲线,最后根据水温适宜度指数曲线计算待评价水温的适宜度指数。

对于长江流域的四大家鱼而言,水温是影响家鱼繁殖的关键水文指标。李博等(2021)提出适宜四大家鱼繁殖的水温范围为 21~23.8  $^{\circ}\text{C}$ 。王俊娜等(2012)认为适宜水温范围为 20~25  $^{\circ}\text{C}$ 。陈永柏等(2009)认为水温低于 18  $^{\circ}\text{C}$  或高于 30  $^{\circ}\text{C}$  会引起胚胎发育停止或产

生畸形。因此,本文以 18~30  $^{\circ}\text{C}$  作为四大家鱼繁殖水温的适宜范围,以 20~21  $^{\circ}\text{C}$  和 23.8~25  $^{\circ}\text{C}$  作为较好适宜范围,以 21~23.8  $^{\circ}\text{C}$  作为最适宜范围。

水温适宜度曲线见图 2。水温适宜度得分=水温适宜度 $\times$ 100。

1.2.3 鱼类产卵量增加比例 指本年度与前  $n$  年( $n$  为调度目标鱼类的平均性成熟时间)相比鱼类产卵量增加的比例,反映生态调度后鱼类产卵量的增长情况。

鱼类产卵量增加比例=(本年度鱼类产卵量-前  $n$  年鱼类年均产卵量)/前  $n$  年鱼类年均产卵量 $\times$ 100%

本研究的评价对象四大家鱼性成熟时间一般为 4~5 龄,选择 4 龄作为四大家鱼的平均性成熟时间,即  $n=4$ 。

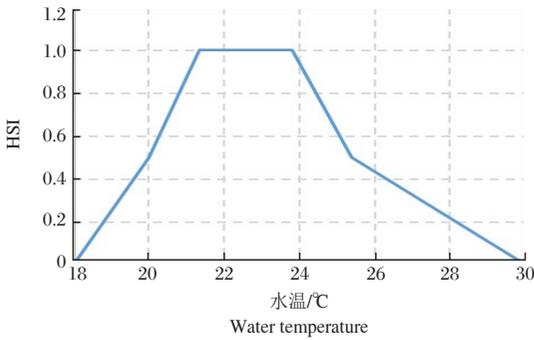


图2 水温适宜度曲线

Fig.2 Water temperature suitability curve

基于鱼类种群的环境容纳量具有一定的限值,当本年度鱼类产卵量大于水库建成前,或鱼类产卵量增加比例大于100%时,鱼类产卵量增加比例得分为100;当鱼类产卵量增加比例小于100%时,鱼类产卵量增加比例得分=鱼类产卵量增加比例×100;当鱼类产卵量不增反降时,得分为0。

调查显示,四大家鱼年产卵量在20世纪60年代约为80亿粒,此后繁殖规模持续下降,至80年代三峡水库建设前下游江段年产卵量已经下降至约15亿粒,2008~2011年平均产卵量约为3亿粒(Li et al, 2016)。本研究以80亿粒作为三峡水库建成前鱼类年产卵量目标值。

1.2.4 生态调度期间鱼类繁殖规模占整个繁殖期比例 该指标比例反映生态调度对鱼类繁殖行为的促进情况。

生态调度期间鱼类繁殖规模占整个繁殖期比例=生态调度期间鱼类产卵量/整个繁殖期鱼类产卵量×100%。

考虑到生态调度期占整个鱼类繁殖期的比例较小,因此当生态调度期间鱼类产卵量占整个繁殖期比例大于50%时得分即为满分;当占比小于等于

50%时,生态调度期间鱼类繁殖规模占整个繁殖期比例得分=生态调度期间鱼类繁殖规模占整个繁殖期比例×200。

1.2.5 下游防洪安全度 指生态调度期间水库下泄流量对下游设计防洪安全流量的满足程度,反映生态调度下泄流量变化过程是否满足下游防洪安全要求。

下游防洪安全度=调度期低于防洪安全流量的天数/调度总天数×100%。

根据三峡水库调度规程,下游防洪安全流量为43 000 m<sup>3</sup>/s。下游防洪安全度小于10%,得分为0;防洪安全度在10%~100%得分0~100。

1.2.6 发电损失量 指生态调度期与旬内非生态调度期相比的发电损失量,反映生态调度对发电的影响程度。

发电损失量=(生态调度期日均发电量-旬内非生态调度期日均发电量)/旬内非生态调度期发电量。

发电损失量超过50%,得分为0;发电损失量在50%~0,按0~100赋分;发电损失量小于0时,得分为100。

1.2.7 航运安全度 指生态调度期间水库下泄流量或水位变幅对航运安全要求的满足程度。

下游航运安全度=调度期下泄流量超过航运安全流量的天数/调度总天数×100%。

程晓东等(2022)考虑两坝间的航运需求,提出三峡水库出库流量不宜超过35000m<sup>3</sup>/s,因此本研究将35000 m<sup>3</sup>/s确定为航运安全流量。

赋分标准:根据下游航运安全度的计算结果,将下游航运安全度情况赋予0~100的分值,即下游航运安全度得分=下游航运安全度×100。

1.3 指标权重与综合评价

各指标权重值采用1~9分标度法,根据指标重要性,构造判断矩阵,通过一致性检验后,最终确定各指标的权重,结果见表1。

表1 面向四大家鱼繁殖的三峡水库生态调度效果评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system of the ecological operation effect of the Three Gorges Reservoir on the reproduction of the four major Chinese carps

目标层	准则层	指标层							
		权重	一级指标	权重	二级指标	权重	总权重		
水库生态调度效果 A1	生态环境效益 B1	0.8	水文 C1	0.2857	涨水持续时间适宜度 D1	0.25	0.0571		
					涨水断面初始流量适宜度 D2	0.25	0.0571		
					涨水断面洪峰流量适宜度 D3	0.25	0.0571		
					流量日增长率适宜度 D4	0.25	0.0571		
			水环境 C2	0.1429	水温适宜度 D5	1	0.1143		
			水生物 C3	0.5714	鱼类产卵量增加比例 D6	0.3333	0.1524		
	社会经济效益 B2	0.2	防洪 C4	0.4286	生态调度期间鱼类繁殖规模占整个繁殖期比例 D7	0.6667	0.3048		
					下游防洪安全度 D8	1	0.0857		
					发电 C5	0.4286	发电损失量 D9	1	0.0857
					航运 C6	0.1429	航运安全度 D10	1	0.0286

根据指标权重和评分标准,计算得到生态调度效果总评分,根据评分得到历年生态调度效果评语,评语={优良( $V_1$ ),中等( $V_2$ ),较差( $V_3$ )}={75,50,0}。

## 2 结果与分析

### 2.1 三峡水库生态调度相关指标统计

收集了2012–2022年三峡水库下泄水温、出库流量等调度过程数据,并根据调度规程和机组出力曲

线,估算了生态调度期间的发电量,详细的生态调度实施情况和统计指标见表2。

每次生态调度试验前后2个月,水利部中国科学院水工程生态研究所、中国水产科学研究院、中华鲟研究所等相关科研单位都会通过在下游宜都和沙市设点采集漂流性卵苗的方法跟踪监测四大家鱼的自然繁殖状况,以了解生态调度效果。本文根据在沙市的监测结果(图3)(水利部中国科学院水工程生态研究所提供)评估三峡历年生态调度效果。

表 2 2012–2022年三峡水库生态调度相关指标统计

Tab.2 Relevant indicators of ecological operation of Three Gorges Reservoir (2012–2022)

调度年份	调度日期	涨水持续时间/d	初始流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	洪峰流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	流量日涨幅/ $m^3 \cdot s^{-1}$	调度起始水温/ $^{\circ}C$	调度期日均发电量/ $亿kW \cdot h$	旬内其余时段日均发电量/ $亿kW \cdot h$
2012年	05.25-05.31	4	18300	23800	590	21.5	2.99	3.35
	06.20-06.27	4	12600	20400	750	23.0		
2013年	05.07-05.14	9	6230	16200	1130	17.5	2.21	2.34
2014年	06.04-06.07	3	14600	18500	1370	21.1	3.22	2.78
2015年	06.07-06.10	4	6530	19600	3140	22.0	3.54	2.21
	06.25-06.28	3	14800	28500	1930	23.3		
2016年	06.09-06.11	3	14600	21500	2020	22.5	3.32	3.45
2017年	05.20-05.25	5	11300	18600	1350	20.3	2.91	2.69
	06.04-06.09	6	11500	20300	1580	21.8		
2018年	05.19-05.25	5	11500	26200	2450	21.0	3.66	3.82
	06.17-06.20	3	11000	16425	1150	23.5		
2019年	05.25-05.29	5	14600	22000	1020	20	3.32	4.09
2020年	05.23-05.28	4	8160	14600	1210	19.4	3.09	3.55
2021年	05.29-06.03	4	11500	17900	1800	21.3	4.12	4.28
	06.16-06.22	4	12500	24900	1900			
2022年	06.03~06.08	5	12800	22400	1920	21.22	5.95	5.83
	06.23~06.28	5	20400	25500	1940			



图 3 沙市断面产漂流性卵鱼类早期资源量监测结果

Fig.3 Monitoring results of the early life stage resources of fish species with drifting eggs in the Shashi section of Yangtze River

2012年是开展生态调度的第2年,三峡水库下游江段的水温高于 $18^{\circ}C$ ,处于鱼类适宜繁殖水温区间。各项水文过程指标中,流量日增长率低于适宜阈值;生态调度期间总产卵量为4.13亿粒,占繁殖期总产卵量的67.7%,同时产卵量较前3年有所上升。生态调度效果总评分为83.9分,为“优良”等级。

### 2.2 三峡水库生态调度效果

三峡水库历年生态调度指标评分见图4,效果评价见图5。

2013年初始流量、流量日增长率和洪峰流量整体偏低,水温低于 $18^{\circ}C$ ,未达到鱼类繁殖的水温范围,生态调度效果不理想,总评分52.87分,为“中等”等级。

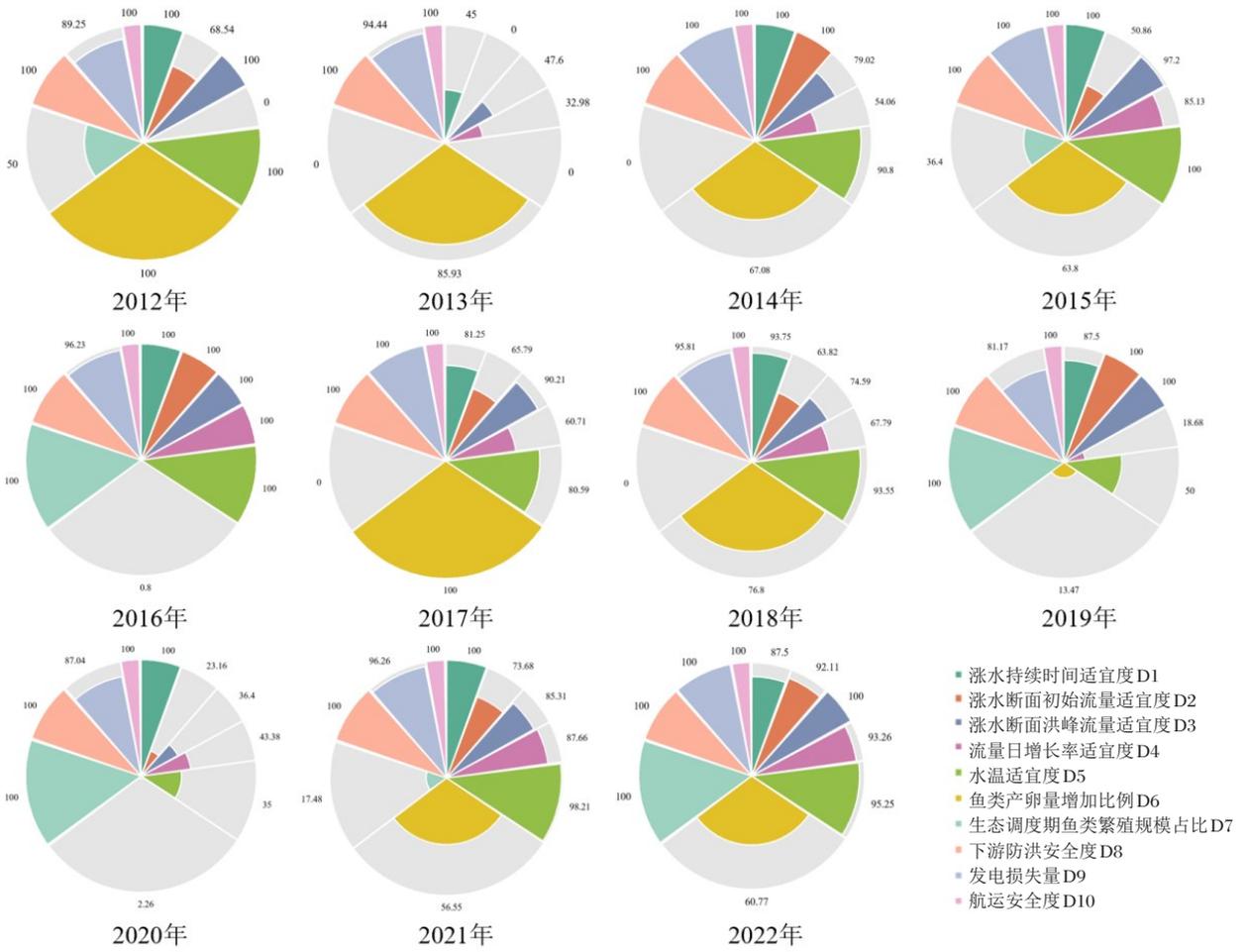


图4 三峡水库历年生态调度指标评分

Fig.4 Evaluation index scores for ecological operation of Three Gorges Reservoir (2012-2022)



图5 三峡水库历年生态调度效果评价

Fig.5 Evaluation of ecological operation of Three Gorges Reservoir (2012-2022)

2014年初始流量和涨水持续事件均达到四大家鱼适宜繁殖要求,但是洪峰流量和流量日增长率偏低;生态调度期间鱼类产卵量占比虽较高,但鱼类产卵量与前3年相比有所下降。生态调度效果总评分69.8分,为“中等”等级。

2015年6月份开展了2次生态调度试验,各项水

文水环境指标基本满足目标鱼类繁殖需求,调度效果整体评分75.4分,为“优良”等级。

2016年除洪峰流量略低于最适繁殖流量外,其余各项水文和水环境指标均满足鱼类繁殖最适条件,但从鱼类的繁殖响应来看,生态调度期间的鱼类产卵量为0.02亿粒,仅占整个繁殖期总产卵量5.02亿粒的0.4%。可能是由于四大家鱼属单批产卵型鱼类,各批次家鱼的性腺成熟和繁殖需要一定的时间间隔,本次生态调度的启动时机可能未处于大批次家鱼的性腺成熟时期,导致调度期间未捕捉到四大家鱼产卵高峰。

2017、2018年三峡水库均开展了2次生态调度试验,期间各项水文指标略低于鱼类繁殖最适条件需求,但仍然处于较适宜范围,因此有效刺激了鱼类的繁殖,生态调度期间捕捉到鱼类产卵高峰。调度效果整体评分分别为76.7、70.9分。

2019年、2020年三峡水库各开展1次生态调度试验,期间各项水文指标和水环境指标与鱼类繁殖

最适条件需求之间存在一定差距,生态调度期间仅监测到少量鱼类产卵。调度效果评分分别为 60.9、50.4 分,调度效果不理想。

2021、2022 年三峡水库各开展 2 次生态调度,各项水文指标与鱼类繁殖需求的匹配度明显提升,调度期间监测到鱼类产卵高峰,调度效益评分分别为 70.6、85.9 分。其中 2021 年生态调度效益评分较低主要是由于整个繁殖期在沙市断面监测到的产卵量偏低,约 9 亿粒,远少于同期在宜都站的监测数据(约 150 亿粒)。2021 年沙市断面产卵量较低的原因可能有 2 种,一是由于监测方法的随机性导致监测产卵量比实际产卵量偏低;二是由于水文过程的沿程坦化和引江济淮工程影响,生态调度刺激减弱。另一方面,2022 年沙市监测到的鱼类产卵量达到历史新高,较往年呈指数增长趋势,同时宜都江段的产卵量也显著升高,由此可见长江流域四大家鱼资源量呈逐年向好趋势,除生态调度影响外,可能还与“十年禁渔”等因素有关。

考虑到不同年份生态调度次数不同,因此本研究对比了不同调度次数的效果差异,见图 6。开展 2 次生态调度的年份,其生态调度效果评分好于仅开展 1 次调度的年份。开展 1 次生态调度或第 1 次生态调度多选择 5 月或 6 月初,此时水温和来水量普遍较低,水库调度可泄放的洪峰过程也相对较弱。第 2 次生态调度大多选择 6 月中下旬,此时水温较高,且来水量增多有助于泄放更大脉冲的洪峰过程,更有利于鱼类繁殖。

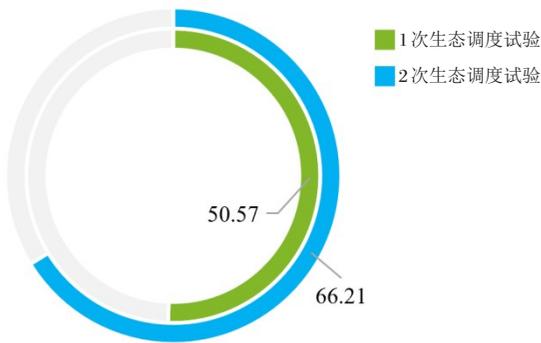


图 6 不同次数生态调度效益评分

Fig.6 Comparison of ecological operation once each year and twice each year

### 3 结论

本研究从生态环境效益和社会经济效益 2 个维度构建了面向产漂流性卵鱼类繁殖的水库生态调度效果评价体系,并以三峡水库为例,评估了历年生态调度效果,提出了三峡水库生态调度的优化建议。主要研究结果如下。

(1)构建的水库生态调度效果评价体系包含目标层、准则层和 6 个一级指标、10 个二级指标,提出了各指标的计算方法和赋分标准,并采用层次分析法根据指标相对重要度,计算了各指标的权重系数。

(2)评估了 2012–2022 年三峡水库产漂流性卵鱼类生态调度效果。各年度调度效果存在明显差异,涨水持续时间、初始流量、流量日上涨率和洪峰流量、水温等水文水环境指标满足鱼类最适繁殖需求的生态调度,鱼类繁殖响应良好,效果较为理想;开展 2 次生态调度的年份调度效果好于开展 1 次调度的年份。

(3)三峡水库生态调度尽可能控制在水温 20℃ 以上起调,水库出流过程尽可能接近鱼类适宜的水文需求阈值区间,同时在水库运行条件合适的前提下,年内尽可能开展 2 次生态调度,泄放较大脉冲的洪峰过程,以促进鱼类繁殖。

### 参考文献

- 陈进,李清清,2015. 三峡水库试验性运行期生态调度效果评价[J]. 长江科学院院报,32(4):1–6.
- 陈求稳,张建云,莫康乐,等,2020. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J]. 水科学进展,31(5):793–810.
- 陈秀秀,叶盛,潘海龙,等,2022. 水库运行对河流水文情势影响分析—以龙羊峡、小浪底水库为例[J]. 中国农村水利水电,(10):96–104.
- 陈永柏,廖文根,彭期冬,等,2009. 四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述[J]. 水生态学杂志,30(2):130–133.
- 程晓东,徐涛,冯志州,等,2022. 汛期三峡-葛洲坝两坝间船舶疏散应急调度研究[J]. 人民长江,53(7):8–12.
- 李博,郜星辰,黄涛,等,2021. 三峡水库生态调度对长江中游宜昌江段四大家鱼自然繁殖影响分析[J]. 长江流域资源与环境,30(12):2873–2882.
- 李朝达,林俊强,夏继红,等,2021. 三峡水库运行以来四大家鱼产卵的生态水文响应变化[J]. 水利水电技术(中英文),52(5):158–166.
- 李世健,陈大庆,刘绍平,等,2011. 长江中游监利江段鱼卵及仔稚鱼时空分布[J]. 淡水渔业,41(2):18–24,9.
- 李婷,唐磊,王丽,等,2020. 水电开发对鱼类种群分布及生态类型变化的影响——以溪洛渡至向家坝河段为例[J]. 生态学报,40(4):1473–1485.
- 廖文婷,邓红兵,李若男,等,2018. 水利工程对坝下径流的影响——以葛洲坝、三峡水利枢纽为例[J]. 生态学报,38(5):1750–1757.
- 林俊强,李游坤,刘毅,等,2022. 刺激鱼类自然繁殖的生态调度和适应性管理研究进展[J]. 水利学报,53(4):483–495.
- 刘瀚,林俊强,秦鑫,等,2023. 基于生物水文响应模型的刺激四大家鱼繁殖生态调度目标量化方法研究——以三峡水库为例[J]. 湖泊科学,35(5):1741–1751.

- 彭期冬,廖文根,李翀,等,2012.三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究[J].四川大学学报(工程科学版),44(S2):228-232.
- 任玉峰,赵良水,曹辉,等,2020.金沙江下游梯级水库生态调度影响研究[J].三峡生态环境监测,5(1):8-13.
- 王俊娜,冯顺新,骆辉煌,2012.近50年长江中游洪水脉冲与渔业产量的关系演变[J].四川大学学报(工程科学版),44(S2):198-205.
- 王悦,高千红,2017.长江水文过程与四大家鱼产卵行为关联性分析[J].人民长江,48(6):24-27.
- 熊明,郭卫,2023.面向产漂流性卵鱼类繁殖的水电站生态水文过程调控[J].长江科学院院报,40(10):1-5.
- 徐薇,杨志,陈小娟,等,2020.三峡水库生态调度试验对四大家鱼产卵的影响分析[J].环境科学研究,33(5):1129-1139.
- 徐薇,丁胜祥,陈音超,等,2023.金沙江中游梨园水电站生态调度试验及效果分析[J].人民长江,54(9):82-90.
- 易伯鲁,余志堂,梁志燊,1988.葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼[M].武汉:湖北科学技术出版社.
- 朱文丽,曹瑞,邢龙,等,2023.金沙江下游梯级水库人造洪峰生态调度综合效益影响分析[J].水文:DOI:10.19797/j.cnki.1000-0852.20220485.
- Duan X, Liu S, Huang M, et al, 2009. Changes in abundance of larvae of the four domestic Chinese carps in the middle reach of the Yangtze River, China, before and after closing of the Three Gorges Dam[J]. Environmental Biology of Fishes, 86(1):13-22.
- Li M Z, Duan Z, Gao X, et al, 2016. Impact of the Three Gorges Dam on reproduction of four major Chinese carps species in the middle reaches of the Changjiang River[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 34(5): 885-893.

(责任编辑 张俊友)

## Effects of Ecological Operation of Three Gorges Reservoir on Fish Species with Drifting Eggs

ZHANG Di<sup>1</sup>, XU Wei<sup>2</sup>, WU Fan<sup>3</sup>, LIN Jun-qiang<sup>1</sup>, HOU Yi-qun<sup>2</sup>,  
ZHU Bo-ran<sup>1</sup>, PENG Qi-dong<sup>1</sup>, JIN Tian-tian<sup>1</sup>

- (1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, P.R. China;  
2. Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences,  
Wuhan 430079, P.R. China;  
3. Belt and Road Initiative Center, National Development and Reform Commission,  
Beijing 100048, P.R. China)

**Abstract:** To mitigate adverse ecological effects, Three Gorges Reservoir has been run according to an ecological operation protocol for 12 years (2011–2022), targeting natural reproduction of fish species with drifting eggs in the river below the dam. In this study, we evaluated the effect of ecological operation of Three Gorges Reservoir over the years based on a constructed evaluation index system. Based on the results we make recommendations for optimizing the ecological operation scheme, aiming to provide a reference for the ecological operation of Three Gorges Reservoir. Based on the effect of discharge scheduling on spawning success of fish species with drifting eggs, the evaluation system developed for this study contains a target layer and criterion layer, consisting of 6 primary indices and 10 secondary indices. The weight coefficient of each index was calculated according to the relative importance of the index as determined by the analytic hierarchy process. From 2012 to 2022, the effect of ecological operation of Three Gorges Reservoir varied significantly from year to year. Fish reproduction was good when ecological operation resulted in optimal hydrological and environmental conditions, such as the duration of flow increase, initial flow, daily rate of increase in flow, peak flow, and water temperature. Ecological operation twice a year was more beneficial than once a year. We recommend that ecological operation of discharge from Three Gorges Reservoir should be controlled to maintain a water temperature above 20°C, and that the discharge process should provide, as close as possible, the hydrological conditions required for target fish species to reproduce. Further, ecological operation should be carried out twice a year, and the flood peak with large pulses should be released according to a schedule that promotes fish reproduction.

**Key words:** fish species with drifting eggs; four major Chinese carps; ecological operation; effect evaluation; Three Gorges Reservoir