Jiang W, Pu Y, Deng H T, *et al*. Ecological scheduling of Xiluodu-Xiangjiaba cascade reservoirs on the reproduction of the four major Chinese carps in the Jiangjin section of the upper Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(10): 102504. [姜伟, 蒲艳, 邓华堂, 等. 溪洛渡–向家坝梯级水库生态调度对长江上游江津江段四大家鱼繁殖的影响 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(10): 102504.]

溪洛渡–向家坝梯级水库生态调度对长江上游江津江段四大家鱼繁殖的影响

姜 伟[1, 2*] 蒲 艳[3*] 邓华堂[3] 俞立雄[3] 杨 浩[3] 戴凌全[1, 2] 李 莎[1, 2]
段辛斌[3] 刘 璇[1, 2] 田辉伍[3]

(1. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 武汉 430010; 2. 长江经济带生态环境国家工程研究中心, 武汉 430205; 3. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 国家农业科学重庆观测实验站, 武汉 430223)

摘要: 为减缓水电站运行对坝下河流鱼类繁殖的不利影响、充分发挥水库的生态效益, 自2017年起开展了溪洛渡–向家坝联合生态调度。研究基于2017—2022年长江上游江津江段早期资源调查数据, 评估梯级水库联合生态调度对坝下江段四大家鱼自然繁殖效果, 并识别影响四大家鱼自然繁殖的关键水文指标。结果表明, 2017—2022年江津江段四大家鱼鱼卵径流总量为0.42亿—4.01亿粒, 总体呈波动变化趋势, 其中2022年最高(约4.01亿粒); 6年间共观察到25次产卵高峰期, 主要集中在6月上旬至7月上旬。生态调度期间, 四大家鱼鱼卵径流量为0.001亿—1.088亿粒, 占当年总卵径流量的0.06%—34.47%, 其中2022年超过30%, 2018年超过10%。从生态调度效果来看, 与生态调度相吻合的繁殖高峰期占总繁殖高峰期的16%, 表明生态调度有效促进坝下江津江段四大家鱼自然繁殖活动。水文需求分析结果表明, 江津江段适宜四大家鱼产卵流量为6000—15000 m^3/s, 适宜水温为21—23℃。产卵量与水文指标相关性分析显示, 四大家鱼产卵量与洪峰流量、流量涨幅及流量增长率具有显著正相关($P<0.05$)。根据四大家鱼早期资源调查结果, 建议在5月中下旬及6月上旬开展2—3次生态调度, 并保持江津江段涨水持续时间维持3d以上且流量日增长率维持在900 m^3/s以上, 有利于促进江津江段四大家鱼大规模繁殖。研究成果可为金沙江梯级水库调度方案制定提供科学依据。

关键词: 梯级水库; 自然繁殖; 联合生态调度; 四大家鱼; 水文指标

中图分类号: S932.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)10-102504-10

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2024.0488 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2024.0488

长江上游共分布着258种鱼类, 其中长江上游特有鱼类124种[1], 是我国多种珍稀特有鱼类的栖息地, 也是保护鱼类遗传种质和生物多样性的重要区域[2, 3]。长江上游建有世界上最大的梯级水电工程群[4], 截至2021年底, 长江上游已建成117座大型水库[5], 其中乌东德–白鹤滩–溪洛渡–向家坝是金沙江下游规划开发的4个梯级电站, 均已投产发电, 是开发长江电资源的关键性工程, 在长江流域防洪、灌溉、水资源开发和利用等方面发挥着重要作用[6]。向家坝水电站下游紧邻长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区(以下简称“保护区”), 梯级电站的运行在一定程度上影响保护区鱼类自然繁殖和仔幼鱼存活率。

先前研究表明, 大坝建设和运行一定程度上改变了坝下河流水文情势[7, 8]及泥沙含量, 进而对坝

收稿日期: 2024-12-18; **修订日期:** 2025-04-11

基金项目: 中国长江三峡集团公司项目(202303297); 国家自然科学基金联合基金(U2240214); 中国水产科学研究院创新团队项目(2020TD09); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(YFI202402)资助 [Supported by the Project of China Three Gorges Corporation (202303297); National Natural Science Foundation of China Joint Foundation Program (U2240214); The Innovation Team Project of Chinese Academy of Fishery Sciences (2020TD09); Central Public Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (YFI202402)]

作者简介: 姜伟(1982—), 男, 正高级工程师; 研究方向为渔业资源及水生态修复。E-mail: jiang_wei6@ctg.com.cn 蒲艳(1993—), 女, 助理研究员; 研究方向为渔业资源保护与利用。E-mail: puy0819@163.com *共同第一作者

通信作者: 田辉伍(1984—), 男, 博士, 副研究员; 研究方向为渔业资源保护。E-mail: tianhw@yfi.ac.cn

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

下鱼类繁殖及生长产生不利影响。在金沙江梯级水库蓄水后, 向家坝坝下河段春季“滞冷”效应明显, 导致坝下重要鱼类适宜产卵水温时间延迟30—40d[9]; 峰值流量和大流量脉冲持续时间分别减少41.2%和62.6%[4], 影响鱼类种群的繁殖成功率。而大坝拦截作用, 使长江上游泥沙量减少约56.8%[4], 向家坝站总磷(Total Phosphorus, TP)浓度较蓄水前降低约75%[10], “清水下泄”导致坝下江段营养水平减低, 进而降低坝下江段初级生产力水平, 限制仔鱼摄食、生长和存活[11]。此外, Cheng等[12]研究发现, 长江上游梯级水电站运行后, 水流条件的显著改变对26种以产漂流卵为主的鱼类的繁殖均造成了不利影响。

青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Aristichthys nobilis*), 被合称为四大家鱼, 是我国重要经济鱼类, 广泛分布于我国流域[13]。四大家鱼属典型的产漂流性卵鱼类, 成熟亲鱼产卵后受精卵需流水维持漂流并在漂流过程中完成孵化和发育[14]。当鱼类性腺发育成熟时, 河流水温达到18℃以上, 且江水上涨0.5—2d, 四大家鱼开始集中产卵。在三峡大坝修建后, 长江宜昌以上江段分布的部分四大家鱼产卵场发生迁移。如Tang等[13]研究发现, 三峡水库蓄水后原本湍流河段鱼类繁殖适宜度下降, 大部分产卵场转移至忠县以上江段, 其中朱沱−江津江段及巴南−忠县江段是适宜四大家鱼繁殖的主要江段。为减少电站运行对产漂流卵鱼类的负面影响, 自2011年起中国长江三峡集团连续14年共开展了22次以“四大家鱼”为主的水库生态调度试验[15], 旨在鱼类繁殖季节通过调整水库调度方式改变大坝下泄流量, 形成有利于鱼类产卵的“人造洪峰”, 以促进坝下产漂流性卵鱼类繁殖[3]。周雪等[16]研究结果表明, 生态调度有利于监利江段形成四大家鱼产卵高峰期, 其产卵规模可占年总规模45%以上。徐薇等[17]调查结果显示, 在2011—2018年生态调度期间, 四大家鱼产卵量约占总产卵量的31.90%—66.58%。以上实践结果证明, 生态调度对长江中游四大家鱼繁殖活动具有显著的促进作用[18—20], 其中2024年是开展生态调度试验以来效果最为显著的一年。

通过实施生态调度人为控制水库出库流量, 营造满足鱼类产卵所需的水文条件, 是维护河流生态系统健康的有效方法。有学者表明, 大坝梯级运行对鱼类的影响具有累积性, 比单个大坝单独造成的影响要更为显著[12]。以往生态调度对鱼类自然繁殖的评估效果多集中于单个大坝, 梯级水电站联合生态调度对产漂流性卵鱼类的效果评估鲜见报道。自2017年起, 溪洛渡−向家坝梯级水库于每年5—6月开展针对下游河道鱼类自然繁殖联合生态调度试验。为评估溪洛渡−向家坝联合生态调度试验效果, 本研究基于2017—2022年长江上游江津江段鱼类早期资源、水文环境要素等监测数据, 分析四大家鱼自然繁殖状况与生态水文指标的关系, 评估其联合生态调度试验效果, 为制定溪洛渡−向家坝联合生态调度试验方案与优化提供数据支撑。

1　材料与方法

1.1　调查时间与区域

2017—2022年每年5—7月在长江上游江津江段(106°15′ E, 29°18′ N)开展鱼类早期资源调查, 该江段上游有岷江、沱江和赤水河等支流, 距向家坝水电站约350 km (图 1)。

1.2　溪洛渡、向家坝联合生态调度实施过程

2017—2022年溪洛渡−向家坝共实施了8次生态调度试验, 2018—2020年均为1次, 2017年为2次, 2022年3次, 其中2021年因来水量不足未开展生态调度试验。统计数据显示, 生态调度时间主要集中在5月中下旬, 2022年延续至6月下旬, 向家坝出库流量介于1830—11100 m^3/s, 出库流量日增幅介于320—1040 m^3/s, 持续涨水时间为2—5d。生态调度期间具体实施时间及水文状况见表 1。

1.3　采集方法

按照《长江鱼类监测手册》[21]和《长江鱼类早期资源》[22]进行采样, 在断面左、右设置采样点, 使用圆锥网(网长2.5 m; 网目0.5 mm; 网口面积0.196 m^2)进行表、中层采集, 网后连接圆柱形集苗筒(网长20 cm, 直径12 cm)收集卵苗。采样频次为每天(07: 00—11: 00)、(15: 00—18: 00) 2个时段, 每网采集时间为15—30min。在网口系上LS45A流速仪测定网口流速, 以计算滤过的流量。同步监测环境变量, 使用便携式水质分析仪YSI Pro ODO测量水温(WT,℃)和溶解氧(DO, mg/L), 用透明度盘测量透明度(SD, cm)。水位、流量数据来源于水利部全国水雨情信息网站(http://xxfb.mwr.cn/sq_djdh.html)的朱沱水文站。

采集的样本在Olympus SZX16体式显微镜下观察鱼卵的形态特征, 记录鱼卵发育时期, 测定卵膜、卵直径等生物学指标。为保证结果的准确性, 鱼卵采用分子测序, 测序数量不低于该年调查样本总数量的2/3。将鱼卵保存在含无水乙醇的2 mLEP管中, 带回实验室提取DNA, 经PCR扩增后进行测序, 采用线粒体细胞色素*b*基因进行物种鉴定。然

后使用DNASTAR软件对测序结果进行校对, 将校对过的序列与NCBI网站进行比对, 以序列相似度最高为鉴定物种(相似度>98%)。

1.4 数据处理

四大家鱼自然繁殖规模估算参照易伯鲁等[23]的计算方法。

(1)网口单位时间的卵苗密度:

$$d = \frac{n}{S \times V \times t} \tag{1}$$

式中, d为卵苗单位时间进网密度[(粒或尾)/m^3]; S尾网口面积, m^2; V为网口流速, m/s; n为采集时段内进网卵苗数, 粒或尾; t为采集时间, s。

(2)断面卵苗平均密度与定点卵苗密度相比系数:

$$C = \frac{\sum \bar{d}}{d_1} \tag{2}$$

式中, C为卵苗平均密度相比系数; d_1为固定采样点的卵苗密度; $\bar{d}$为某断面各采样点卵苗的平均密度。

(3)采集期间卵苗径流量:

$$M_i = d_i \times Q_i \times C \tag{3}$$

式中, M_i为第i次采集时段内通过该江断面的卵苗径流量, 粒或尾; d_i为第i次采集的卵苗密度(粒或尾)/m^3; Q_i为第i次采集时的断面流量(m^3/s)。

(4)非采集期间卵苗径流量, 用相邻2次采集的径流量及其间隔时间进行插补计算:

$$M_{i,\ i+1} = t_{i,\ i+1}/2 \times (M_i/t_i + M_{i,\ i+1}/t_{i,\ i+1}) \tag{4}$$

式中, $M_{i,\ i+1}$为第i, i+1次采集时间间隔内的卵苗径流量, 粒或尾; $t_{i,\ i+1}$为第i, i+1次采集时间间隔(s)。

(5)采集江段的卵苗总径流量:

$$M = \sum M_i + \sum M_{i,\ i+1} \tag{5}$$

式中, $\sum M_i$为24h内各次定时采集的卵苗之和, $\sum M_{i,i+1}$为前后两次采集之间非采集时间内计算出

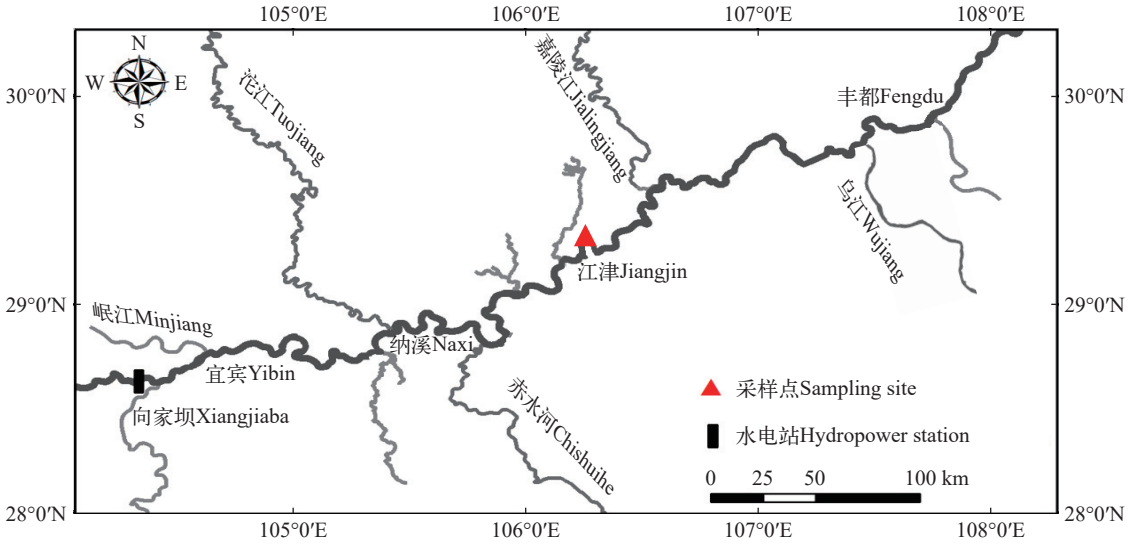


图 1 江津江段早期资源采样断面示意图

Fig. 1 Sampling sites of early-stage resources in the Jiangjin section

表 1 溪洛渡-向家坝联合生态调度时间及出库水文状况

Tab. 1 Timing of joint Xiluodu-Xiangjiaba ecological dispatching and hydrological conditions of outflow from reservoirs

年份 Year	调度时间 Scheduling time	出库流量 Outflow (m^3/s)	持续涨水时间 Duration of flooding (d)	流量日涨幅 Daily increase in flow [m^3/(s·d)]	水位日涨幅 Daily water level increase (m/d)
2017年	5月13—17日	1830—3760	4	480	0.28
	5月20—25日	2440—4540	5	420	0.43
2018年	5月15—18日	3350—4300	3	320	0.37
2019年	5月25—31日	3870—5920	4	510	0.37
2020年	5月23—28日	2720—4690	4	490	0.40
2022年	5月13—15日	3350—4120	2	390	1.55
	6月2—6日	1990—5440	4	860	0.49
	6月16—21日	5880—11100	5	1040	0.62

的鱼卵、仔稚鱼流量之和。

1.5 统计分析

不同年份水温、流量的差异采用单因素方差分析。四大家鱼繁殖高峰产卵规模与水文过程各指标的关系, 使用Spearman相关性检验进行分析, 数据处理使用Excel 2016软件进行, GraphPad Software 9.0进行统计分析和绘图。

2 结果

2.1 四大家鱼早期资源量分析

2017—2022年共监测到四大家鱼鱼卵510粒。根据监测结果估算, 2017—2022年各年间江津江段四大家鱼鱼卵径流总量为0.42亿—4.01亿粒, 总体呈波动变化趋势, 2022年达到最高, 为4.01亿粒。各年间共出现25次四大家鱼繁殖高峰期, 主要集中在6月上旬至7月上旬(表 2)。2017年共出现6次四大家鱼繁殖高峰, 产卵量占总产卵量的4.27%—36.47%; 2018年共出现3次家鱼繁殖高峰, 产卵量占该年总产卵量的10.26%—43.86%, 其中有1次发生在生态调度期间; 2019年出现3次四大家鱼繁殖高峰, 产卵量占该年总产卵量的9.90%—42.75%; 2020年出现4次四大家鱼繁殖高峰, 产卵量占该年总产卵量的7.57%—65.57%; 2021年出现4次四大家鱼繁殖高峰, 产卵量占该年总产卵量的14.37%—39.20%; 2022年出现5次四大家鱼繁殖高峰, 产卵量占该年总产卵量的6.26%—27.35%, 其中有3次发生在生态调度期间。进一步分析显示, 四大家鱼出现产卵高峰期时均伴随着洪峰涨水过程, 表明洪峰涨水过程有利于促进四大家鱼繁殖。

2.2 四大家鱼繁殖对生态调度的响应

2017—2022年间共开展了8次生态调度, 其中有4次产卵高峰期出现在生态调度期间或紧随在调度结束后1—3d, 生态调度有效率达50%。从生态调度效果来看, 6年间共观察到25次产卵高峰期, 其中与生态调度相吻合的繁殖高峰期占总繁殖高峰期的16%, 2017年与2018年首次监测到四大家鱼繁殖活动均是在生态调度开始后, 说明生态调度对四大家鱼繁殖活动产生了积极响应。进一步分析生态调度实施时间及监测断面涨水时间的关系, 发现生态调度“人造洪峰”所形成的涨水时间至监测断面存在1—2d的滞后效应。相应地, 产卵高峰期与涨水时间一致也存在滞后性, 即生态调度结束后四大家鱼开始集中产卵。从水文数据来看, 生态调度期间江津江段起始流量为4265—24200 m^3/s, 洪峰流量为5885—24200 m^3/s, 涨水持续时间为2—6d, 流量日增长量为324—3460 $m^3/(s·d)$。四大家鱼卵径流量统计显示, 生态调度期间四大家鱼卵径流量为0.001亿—1.088亿粒, 占当年总卵径流量的0.06%—34.47% (图 2), 其中2022年超过30%, 2018年超过10%, 进一步表明生态调度能够有效促进四大家鱼繁殖活动的发生。

2.3 四大家鱼繁殖生态水文指标需求

水温指标需求　2017—2022年监测结果显示, 6年间监测到四大家鱼产卵的水温为19.3—24.0℃, 各年平均水温为20.5—22.2℃, 其中2018年调查期间水温稍高于其他年份(图 3)。单因素方差分析显示, 各年间采集到四大家鱼鱼卵时水温在统计学上具有显著性(F=11.51, P<0.001)。监测数据显示，产卵高峰期水温为20.3—22.9℃, 平均水温为21.7℃。因此, 本研究认为长江上游江津江段四大家鱼繁殖适应水温为21—23℃。

表 2　江津江段四大家鱼产卵高峰期及产卵规模占比

Tab. 2　Percentage of the peak spawning period and spawning size of the four main carps in Jiangjin section

年份 Year	出现产卵高峰期时间 Time of peak spawning	繁殖高峰期产卵规模占比 Percentage of in breeding peak (%)	水温范围 Water temperature (℃)
2017年	6月5日	4.27	21.3
	6月10—12日	19.30	22.3—22.6
	6月15—18日	36.47	20.9—21.4
	6月24日	10.81	22.0
	6月26—27日	10.04	21.0—21.2
	7月8日	4.67	22.8
2018年	5月20日★	10.26	21.8
	5月24日	27.58	22.3
	6月22—23日	43.86	22.1—22.1
2019年	6月16日	16.92	22.5
	6月29日	42.75	22.3
	7月13日	9.90	22.9
2020年	6月18日	10.73	22.4
	6月29日	7.57	22.4
	7月1—2日	65.57	22.0—22.4
	7月8日	8.30	22.5
2021年	5月14日	21.80	21.1
	6月20日	39.20	21.3
	6月25日	14.54	21.7
	6月30日	14.37	22.0
2022年	5月17日★	6.26	20.3
	6月4日★	22.59	20.4
	6月11日	9.92	20.3
	6月23—24日★	27.35	20.4—20.6
	6月28日	6.30	21.9

注: ★表示算生态调度效果
Note: ★ indicates the effect of ecological scheduling

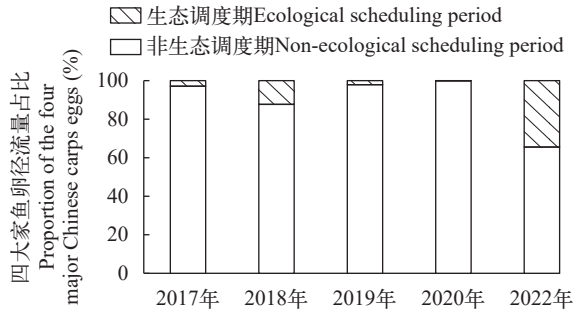


图 2 2017—2022年生态调度期间四大家鱼卵径流量占比

Fig. 2 Proportion of the four major Chinese carps eggs during the ecological operation from 2017 to 2022

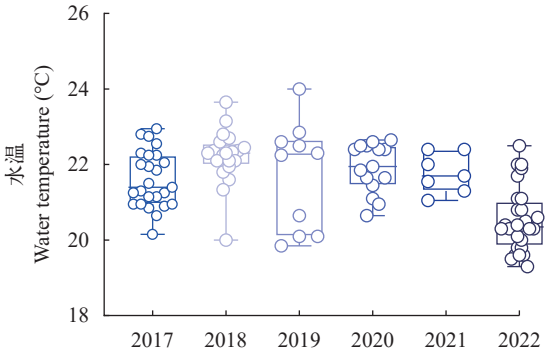


图 3 2017—2022年江津江段四大家鱼繁殖水温

Fig. 3 Proportion water temperatur of four major Chinese carps from 2017 to 2022 in Jiangjin section

水文指标需求 已有研究证明, 四大家鱼繁殖高峰期伴随着一次较大的涨水过程。2017—2022年监测结果显示, 6年间共统计到29次涨水过程并均监测到四大家鱼繁殖, 其中有14次为产卵高峰期。在29次涨水过程中有7次发生在5月中下旬, 16次发生在6月, 6次发生在7月。四大家鱼产卵量与水文指标统计结果显示(表 3): 起始流量为4570—15250 m^3/s; 涨水持续时间为2—8d; 洪峰流量为6950—25700 m^3/s, 其中洪峰流量为15000 m^3/s以下的有21次, 流量在15000 m^3/s以上有8次; 流量涨幅为840—12925 m^3/s; 流量增长率为236—3483 $m^3/(s·d)$, 其中日增长率维持在900 m^3/s有17次。李朝达等[24]认为, 家鱼产卵规模占全年产卵规模25%以上的涨水过程是有效刺激家鱼产卵的水文过程。本研究统计结果显示, 产卵规模占全年产卵规模25%以上的日增长率维持在900 m^3/s以上。2017—2022年江津江段首次调查到四大家鱼繁殖活动均从5月中旬开始, 在5月上旬均未监测到四大家鱼繁殖活动。将四大家鱼产卵量与水文指标进行相关性分析显示(表 4), 四大家鱼产卵量与洪峰流量、流量涨幅及流量增长率具有显著正相关($P<0.05$), 说明流量增长有助于四大家鱼自然繁殖。

综合上述分析, 本研究认为江津江段四大家鱼适宜产卵的流量为6000—15000 m^3/s, 适宜水温为21—23℃。生态调度试验可在5月中下旬及6月上旬开展2—3次, 其涨水持续时间在3d以上, 流量日增长率维持在900 m^3/s以上, 有利于促进四大家鱼大规模繁殖。

3 讨论

3.1 长江上游四大家鱼繁殖动态成因分析

20世纪80年代, 重庆至武穴的1520 km江段内四大家鱼总产卵规模约173亿, 其中重庆江段产卵场规模不足1亿[25]。据段辛斌[26, 27]、唐锡良等[28]调查结果, 长江上游江津江段四大家鱼产卵规模为1.67亿—7.42亿粒, 表明三峡水库蓄水后四大家鱼产卵场位置上移, 上游激流生境江段已成为四大家鱼新的产卵场并具有稳定的产卵规模。鱼类早期资源的补充不仅与自身的繁殖活动有关, 也与外部的水环境紧密相关, 其中水温是影响鱼类繁殖至关重要因素[29]。本研究调查结果显示, 2017—2022年江津江段产卵规模为0.42亿—4.01亿粒, 与金沙江梯级水库蓄水前相比[27], 江津江段四大家鱼年均产卵规模降低约50.63% (除2022年外), 这可能与该江段水文情势变化有关。水利工程的建设运行会改变坝下江段水文节律(水温、流量等), 进而对下游河道鱼类繁殖、生长等过程产生不利影响[30—32]。金沙江梯级水库运行后, 低温下泄水的排放导致下游河道水温出现“滞冷”现象[7], 使得坝下江段鱼类性腺发育成熟期推迟, 导致鱼类用于繁殖的能力投入减少[33], 进而影响其繁殖。

研究表明, 水文脉冲事件(如水位涨幅、流量增加)会明显刺激产漂流性卵鱼类的繁殖, 是鱼类总产卵量的主要决定因素[34]。本研究水文数据显示, 2022年江津江段平均流量(11317 m^3/s)高于其他年份, 且生态调度期间四大家鱼产卵规模占该年总产卵规模约34%。同时, 自2021年起, 长江全流域全面实施十年禁捕政策。渔获物调查结果显示, 禁捕后四大家鱼数量占比与重量占比均呈现上升趋势[35], 表明禁捕后四大家鱼平均个体规格得到恢复。这一变化间接表明, 鱼类种群性成熟个体比例增加, 繁殖种群规模量扩大[36]。此外, 禁渔后鱼类单位捕捞努力量渔获量(CPUE)和成鱼比例呈现逐年增加趋势(中国水产科学研究院长江水产研究所, 未公布数据), 进一步验证了禁渔对鱼类资源量恢复具有积极作用。综合来看, 本研究推测2022年四大家鱼资源量高于其他年份, 可能是生态调度、长江十年禁渔及水文情势变化等多维度生态保护措施协同作用的结果。

3.2 四大家鱼繁殖过程的关键水文因子分析

鱼类繁殖与产卵的发生受多重外界环境因子的共同影响, 包括水温、流量、流速、降雨量、溶氧、盐度[37, 38]、日长[39]等。这些因素中, 水温和流量是影响四大家鱼繁殖活动的关键因子, 水温升高能促进鱼类性腺发育, 而流量增加能够激发鱼类的产卵活动[18]。在本研究中, 江津江段监测到四大家鱼繁殖活动时的水温接近或超过20℃, 均达到四大家鱼繁殖的最低水温(18℃)[40]。当水温超过20℃或21℃以后, 四大家鱼的性腺发育将快速完成, 进而

表 3　江津江段涨水期间四大家鱼产卵量及水文指标

Tab. 3　Spawning abundance and hydrological indicators of four major Chinese carps during flood period in Jiangjin section

年份 Year	涨水时间 Rise date	涨水持续时间 Rise duration (d)	初始流量 Initial flow (m^3/s)	洪峰流量 Peak flow (m^3/s)	流量涨幅 Traffic increase (m^3/s)	流量增长率 Rise rate of flow [$m^3/(s·d)$]	水温范围Water temperature (℃)	四大家鱼产卵规模占比 Proportion of the four major Chinese carps eggs (%)
2017年	5月23—26日★	3	5015	7385	2370	790	20.2—20.7	2.79
	6月1—4日	3	4570	6950	2380	793	21.5—22.1	5.27
	6月10—18日	8	6270	13700	7430	929	20.9—22.6	57.33
	6月22—26日	4	9710	18750	9040	2260	21.2—22.3	18.67
	7月6—8日	2	10050	14500	4450	2225	22.0—22.8	5.06
	7月10—13日	3	13600	21600	8000	2667	22.6—23.0	3.28
2018年	5月15—19日★	4	5555	8250	2695	674	21.3—21.8	12.36
	5月21—24日	3	5835	13050	7215	2405	22.3—22.4	29.58
	6月8—13日	5	7365	8545	1180	236	22.3—22.8	2.99
	6月19—26日	7	5825	18750	12925	1846	21.9—22.9	46.01
	7月2—5日	3	15250	25700	10450	3483	22.8—24.0	2.64
2019年	5月17—21日	4	7140	11650	4510	1128	19.9—20.3	10.55
	6月14—16日	2	7930	8770	840	420	22.3—22.5	16.84
	6月19—23日	4	7570	10300	2730	683	21.9—24.0	7.48
	6月26—29日	3	8920	13950	5030	1677	22.0—22.3	42.70
2020年	5月24—28日★	4	4850	7820	2970	743	20.3—21.5	0.04
	5月31—6月3日	3	6285	8280	1995	665	21.3—21.7	1.91
	6月16—21日	5	7910	12450	4540	908	21.7—22.9	11.32
	6月26—7月1日	5	11750	21900	10150	2030	21.9—22.1	73.18
	7月6—8日	2	13400	15100	1700	850	22.1—22.5	8.39
	7月10—15日	5	11700	15600	3900	780	22.5—23.0	3.93
2021年	5月11—16日	5	5640	7160	1520	304	20.4—21.1	21.71
	6月15—19日	4	4955	8650	3695	924	21.4—23.3	39.18
	6月27—7月1日	4	6745	13100	6355	1589	21.3—22.4	16.05
	7月4—10日	6	9455	13400	3945	658	22.3—22.5	8.50
2022年	5月14—16日★	2	8480	15400	6920	3460	19.6—21.4	8.83
	6月4—7日★	3	7880	10900	3020	1007	20.3—20.9	25.97
	6月9—14日	5	8020	13300	5280	1056	19.5—20.9	15.59
	6月17—25日★	8	11500	24200	12700	1588	19.8—21.1	28.66

注: ★为生态调度期间

Note: ★ indicates during ecological scheduling

表 4　江津江段四大家鱼产卵量与水文指标相关性

Tab. 4　Correlation between spawning quantity of four major carps and hydrological indexes in Jiangjin section

水文指标 Hydrological indicators	涨水持续时间 Rise duration (d)	初始流量 Initial flow (m^3/s)	洪峰流量 Peak flow (m^3/s)	流量涨幅 Flow increase (m^3/s)	流量增长率 Rise rate of flow [$m^3/(s·d)$]
相关系数Correlation coefficient	0.205	0.139	0.422*	0.502**	0.445*

注: *P<0.05, **P<0.01

促进四大家鱼集中大规模产卵[16, 18]。基于本研究四大家鱼采集情况, 江津江段四大家鱼繁殖产卵的水温为19.3—24.0℃, 其中产卵高峰期水温为21—23℃。因此，本研究认为长江上游江津江段四大家鱼繁殖的适宜水温为21—23℃, 与长江中游宜昌江段[18]四大家鱼繁殖适宜水温结论相近, 稍窄于长江中游洪湖江段四大家鱼繁殖水温[19]。

单一的水温或流量变化不足以启动四大家鱼产卵, 需将这两个因素结合起来, 方能提高四大家鱼繁殖成功率[37]。诸多学者研究已证实, 流量增长率是影响三峡库区及长江中游江段四大家鱼繁殖的重要水文指标[16, 18, 41]。李超达等[24]研究表明, 在三峡水库运行后, 刺激家鱼产卵的涨水关键生态水文指标为鱼类感觉日流量涨幅、鱼类感觉累积流量涨幅、流量日增长和流量总增长。徐薇等[17]认为持续涨水天数、初始水位和产卵时序是影响长江宜昌至沙市江段四大家鱼繁殖的重要水文参数。在水温适宜的条件下, 河流涨水过程是触发四大家鱼繁殖活动发生的重要因子[24]。在本研究中, 2017—2022年四大家鱼产卵高峰期发生时均伴随着一次涨水过程。相关性分析表明, 四大家鱼产卵量与洪峰流量、流量涨幅及流量增长率具有显著正相关, 该结果与前人研究结论相一致, 进一步证实了河流涨水过程对江津江段四大家鱼繁殖活动具有显著促进作用[18, 24]。进一步分析表明, 江津江段适宜四大家鱼产卵流量为6000—15000 m^3/s, 其中当流量日增长率超过900 m^3/s时, 更有利于四大家鱼大规模繁殖产卵。

3.3 生态调度效果分析及优化建议

已有研究表明, 在鱼类繁殖季节, 通过“人造洪峰”的方式再现鱼类繁殖所需的水文条件, 可以提高鱼类的繁殖成功率[18, 42]。自2017年以来, 溪洛渡–向家坝在每年5—6月期间实施生态调度, 6年间共开展了8次生态调度。根据本研究监测结果, 除2017和2019—2020年外, 2018和2022年生态调度均形成了产卵高峰期, 且2017和2018年首次监测到四大家鱼繁殖活动均是在生态调度实施后, 表明生态调度对四大家鱼繁殖活动具有较好的促进作用。进一步分析各年间水文情势变化得知, 2018年5月中下旬平均水温为21.4℃, 2022年5月中下旬平均流量为9293 m^3/s, 高于其他年份同期水平。反之, 2017和2019—2020年生态调度效果不明显, 推测其原因可能与当年水文情势(水温、流量)偏低有关。此外, 2022年首次将生态调度时间延长至6月, 调度次数增加为3次, 这可能也是导致2022年生态调度效果较为明显的原因之一。

郝好鑫等[9]和陈金凤等[7]研究发现, 金沙江梯级水库的运行后, 坝下江段屏山站3—8月份水温降低幅度为0.08—3.66℃, 朱沱站4—7月水温降低幅度为0.55—1.38℃, 其中5月降温最为显著。本研究早期资源调查结果显示, 江津江段首次监测到四大家鱼产卵活动发生在5月10日以后, 与蓄水前相比[25], 蓄水后四大家鱼繁殖时间延迟到5月中旬—7月。除四大家鱼外, 向家坝坝下河段其他鱼类如长薄鳅、紫薄鳅、宽体沙鳅、鳘、黄尾鲴[33]等鱼类也出现了类似现状。在适宜水温条件下, 开展生态调度可促进四大家鱼等产漂流性卵鱼类的繁殖活动。周岐兵等[3]调查结果显示, 2020年生态调度有效促进了圆筒吻鮈、铜鱼、草鱼等6种产漂流性卵鱼类的繁殖。结合生态调度实施情况及本研究监测结果, 建议在5月中下旬和6月上旬分别开展至少1次生态调度试验, 并确保涨水持续时间不低于3d, 流量日增长率维持在900 m^3/s以上, 以促进长江上游江津江段四大家鱼等产漂流性卵鱼类的繁殖活动。基于流量日增长率(≥900 m^3/s)及产卵规模占比(≥25%)等关键指标, 评估溪洛渡–向家坝联合生态调度实施效果。结果表明, 2017—2022年开展的生态调度试验中, 2022年生态调度效果最为显著, 表现为产卵规模更大及产卵高峰响应更为集中。

4 结论

本文基于2017—2022年早期资源调查数据，系统分析了金沙江下游溪洛渡–向家坝联合生态调度对江津江段四大家鱼自然繁殖的影响效果, 并识别了影响其繁殖活动的关键水文指标, 主要结论: (1)金沙江下游梯级水库生态调度对坝下江段四大家鱼繁殖活动具有显著的促进作用。(2)四大家鱼繁殖与洪峰流量、流量涨幅及流量增长率等生态水文指标显著相关, 通过95%显著性检验。(3)为进一步促进四大家鱼繁殖活动, 建议在每年5月中下旬及6月上旬开展2—3次生态调度试验, 并保持江津江段涨水持续时间维持3d以上, 流量日增长率维持在900 m^3/s以上。本研究目前仅评估了生态调度对四大家鱼繁殖的响应效果, 后续应从多物种、多角度、多方法去分析生态调度对鱼类资源的恢复效果, 进而提出更全面的水库生态调度方案。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

[1] Zhao L, Zhao W G, Cheng J, *et al*. Habitat characteristics and optimization of proliferation and releasing points for rare and endemic fish resources in the upper reaches of

the Yangtze River [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2025, **42**(3): 68-75. [赵亮, 赵文贵, 成江, 等. 长江上游珍稀特有鱼类资源的栖息地生境特征及增殖放流点优化 [J]. 长江科学院院报, 2025, **42**(3): 68-75.]

[2] Cheng R, Luo Y, Li Q, *et al*. Application of eDNA metabarcoding for monitoring the fish diversity of the Jiangjin to Fuling section of the upper reaches of the Yangtze River [J]. *Hydrobiologia*, 2023, **850**(19): 4067-4088.

[3] Zhou Q B, Cheng F, Wang Z, *et al*. Study on fish resources of the early life history stages and the effects of ecological regulation of the Xiangjiaba Reservoir at the Hejiang section in the upper reaches of the Yangtze River [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, **38**(1): 95-103. [周岐兵, 程飞, 王震, 等. 长江上游合江江段鱼类早期资源与向家坝水库生态调度效果初步研究 [J]. 中国环境监测, 2022, **38**(1): 95-103.]

[4] Zhou Y, Wang G, Wu H, *et al*. Changes in flow and sediment transport caused by cascade hydropower in the upper reaches of Yangtze River and their influence on spawning of *Coreius heterodon* [J]. *CATENA*, 2024(235): 107622.

[5] Li S, Zeng L, Zhang C J, *et al*. Spatio-temporal variations and propagation from meteorological to hydrological drought in the upper Yangtze River basin over last 120 years [J]. *Climate Change Research*, 2023, **19**(3): 263-277. [李帅, 曾凌, 张存杰, 等. 长江上游近120年来气象干旱和水文干旱时空变化关系及其传递特征 [J]. 气候变化研究进展, 2023, **19**(3): 263-277.]

[6] Guan Y W, Li Y B, Chen L X, *et al*. Study on vertical physicochemical characteristics of water of cascade reservoirs in lower reaches of Jinsha River in summer and winter [J]. *Yangtze River*, 2024, **55**(12): 54-63. [管义伟, 李银波, 陈露欣, 等. 金沙江下游梯级水库夏冬季垂向水体理化特征研究 [J]. 人民长江, 2024, **55**(12): 54-63.]

[7] Chen J F, Zeng L, Li Y, *et al*. Water temperature variations in lower Jingsha River [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, **41**(6): 200-206. [陈金凤, 曾凌, 李雨, 等. 金沙江下游水温变化规律探讨 [J]. 长江科学院院报, 2024, **41**(6): 200-206.]

[8] Tao Y W, Wang Y K, Wang D, *et al*. Assessing water temperature variations and impacts on fish spawning downstream of Three Gorges Dam [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, **37**(10): 48-55. [陶雨薇, 王远坤, 王栋, 等. 三峡水库坝下水温变化及其对鱼类产卵影响 [J]. 水力发电学报, 2018, **37**(10): 48-55.]

[9] Hao H X, Yang X, Yang M F, *et al*. Impacts of the cascade reservoirs of Jinshajiang River on water temperature and fish spawning time [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(1): 247-257. [郝好鑫, 杨霞, 杨梦斐, 等. 金沙江下游梯级水库对水温及鱼类适宜产卵时间的影响 [J]. 湖泊科学, 2023, **35**(1): 247-257.]

[10] Liu S W, Zhang X F, Lv P Y, *et al*. Effects of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River on nitrogen and phosphorus retention [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(3): 656-666. [刘尚武, 张小峰, 吕平毓, 等. 金沙江下游梯级水库对氮、磷营养盐的滞留效应 [J]. 湖泊科学, 2019, **31**(3): 656-666.]

[11] Song Y Q, Cheng F, Murphy B R, *et al*. Downstream effects of the Three Gorges Dam on larval dispersal, spatial distribution, and growth of the four major Chinese carps call for reprioritizing conservation measures [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2018, **75**(1): 141-151.

[12] Cheng F, Li W, Castello L, *et al*. Potential effects of dam cascade on fish: lessons from the Yangtze River [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2015, **25**(3): 569-585.

[13] Tang C, Yan Q, Li W, *et al*. Impact of dam construction on the spawning grounds of the four major Chinese carps in the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydrology*, 2022(609): 127694.

[14] Dai L Q, Dai H C, Li W, *et al*. Optimal operation of cascade hydropower plants considering spawning of four major Chinese carps [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2022, **41**(5): 21-30. [戴凌全, 戴会超, 李玮, 等. 兼顾四大家鱼产卵需求的梯级水电站生态调度 [J]. 水力发电学报, 2022, **41**(5): 21-30.]

[15] Dai L Q, Gao X C, Huang T, *et al*. Ecological scheduling of Three Gorges Reservoir helps the population recovery of “four major Chinese carps” in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Life World*, 2024(2): 32-35. [戴凌全, 郜星晨, 黄涛, 等. 三峡水库生态调度助力长江中游“四大家鱼”种群恢复 [J]. 生命世界, 2024(2): 32-35.]

[16] Zhou X, Wang K, Chen D Q, *et al*. Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on larval resources of the four major Chinese carps in Jianli section of the Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, **43**(8): 1781-1789. [周雪, 王珂, 陈大庆, 等. 三峡水库生态调度对长江监利江段四大家鱼早期资源的影响 [J]. 水产学报, 2019, **43**(8): 1781-1789.]

[17] Xu W, Yang Z, Chen X J, *et al*. Three Gorges Reservoir ecological operation effect on the spawning of the four major Chinese carps [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1129-1139. [徐薇, 杨志, 陈小娟, 等. 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, 2020, **33**(5): 1129-1139.]

[18] Li B, Gao X C, Huang T, *et al*. Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on spawning of four major Chinese carps in Yichang section of Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(12): 2873-2882. [李博, 郜星晨, 黄涛, 等. 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, 2021, **30**(12): 2873-2882.]

[19] Gao L, Guo G Z, Yang H, *et al*. The early-stage fish resources of the four major Chinese carps and effects of the eco-operation at Honghu section in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, **30**(12): 1556-1565. [高雷, 郭国忠, 杨浩, 等. 长江中游洪湖江段四大家鱼早期资源及生态调度

影响 [J]. 中国水产科学, 2023, **30**(12): 1556-1565.]

[20] Cao R, Li S, Gong W T, *et al*. Joint operation practice of lower reaches of Jinsha River-Three Gorges cascade reservoirs in 2023 [J]. *Yangtze River*, 2024, **55**(6): 1-8. [曹瑞, 李帅, 龚文婷, 等. 金沙江下游-三峡梯级水库2023年联合调度实践 [J]. 人民长江, 2024, **55**(6): 1-8.]

[21] Chen D Q. The Monitoring Manual of Yangtze River Fish [M]. Beijing: Science Press, 2013: 42-49. [陈大庆. 长江鱼类监测手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 42-49.]

[22] Cao W X, Chang J B, Qiao Y, *et al*. Fish Resources of Early Life History Stages in Yangtze River [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. [曹文宣, 常剑波, 乔晔, 等. 长江鱼类早期资源 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 23-34.]

[23] Yi B L, Yu Z T, Liang D S, *et al*. Water Conservancy Project Construction and Fishery Ecology Research Collection: Gezhouba Water Control Project and Four Famous Fishes in Yangtze River [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1988: 32-34. [易伯鲁, 余志堂, 梁秩燊, 等. 水利枢纽建设与渔业生态研究专集: 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, 1988: 32-34.]

[24] Li C D, Lin J Q, Xia J H, *et al*. Ecohydrological response changes in the spawning behaviors of the four major Chinese carps species since the operation of the Three Gorges Reservoir [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, **52**(5): 158-166. [李朝达, 林俊强, 夏继红, 等. 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), 2021, **52**(5): 158-166.]

[25] Survey Team of Spawning Grounds of Domestic Fishes in Chanjiang River. A survey on the spawning grounds of the four famous Chinese carps in the Changjiang river after the dammed by the key water control project at Gezhouba [J]. *Journal of Fisheries of China*, 1982(4): 287-305. [长江四大家鱼产卵场调查队. 葛洲坝水利枢纽工程截流后长江四大家鱼产卵场调查 [J]. 水产学报, 1982(4): 287-305.]

[26] Duan X B. Studies on fish resoures and the fishes of early life history stage in the upper Yangtze River [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008: 40-42. [段辛斌. 长江上游鱼类资源现状及早期资源调查研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2008: 40-42.]

[27] Duan X B, Tian H W, Gao T H, *et al*. Resources status of ichthyoplankton in the upper Yangtze River before the storage of Jinsha river first stage project [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(8): 1358-1365. [段辛斌, 田辉伍, 高天珩, 等. 金沙江一期工程蓄水前长江上游产漂流性卵鱼类产卵场现状 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(8): 1358-1365.]

[28] Tang X L. Studies on early fish resources in Jiangjin cross-section in the upstream of Yangtze River [D]. Chongqing: Southwest University, 2010: 12-15. [唐锡良. 长江上游江津江段鱼类早期资源研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2010: 12-15.]

[29] Zhu J, Cao J, Zhou T, *et al*. Early stage resource status of fish species spawning drifting eggs in the Jiangjin section of the upper Yangtze River and their hydrologic requirements [J]. *Journal of Hydroecology*, 2024, **45**(1): 75-86. [朱俊, 曹俊, 周涛, 等. 长江上游江津段产漂流性卵鱼类早期资源现状及繁殖需求 [J]. 水生态学杂志, 2024, **45**(1): 75-86.]

[30] Luo H H, Li Q, Li C. The impact of water temperature during the fish reproduction in the upper Yangtze River due to the cascade development in the lower Jinsha River [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2012, **10**(4): 256-259, 266. [骆辉煌, 李倩, 李翀. 金沙江下游梯级开发对长江上游保护区鱼类繁殖的水温影响 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, **10**(4): 256-259, 266.]

[31] Wang D Q, Gao L, Duan X B, *et al*. Preliminary analysis of the fish larvae and eggs and the effects of the eco-operation of cascade reservoirs on fish propagation in the lower Hanjiang River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(8): 1909-1917. [汪登强, 高雷, 段辛斌, 等. 汉江下游鱼类早期资源及梯级联合生态调度对鱼类繁殖影响的初步分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(8): 1909-1917.]

[32] Chen Z G, Cheng L, Chen Y S. Current status and future perspectives of reservoirs ecological operation [J]. *Yangtze River*, 2020, **51**(1): 94-103,123. [陈志刚, 程琳, 陈宇顺. 水库生态调度现状与展望 [J]. 人民长江, 2020, **51**(1): 94-103,123.]

[33] Zhou Y, Wang N, Wen X X, *et al*. Cumulative influences and ecological effects of cascade hydropower development on water temperature in upper Yangtze River [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, **43**(11): 1-16. [周扬, 王宁, 温潇雄, 等. 长江上游梯级水电开发的水温累积影响及生态效应 [J]. 水力发电学报, 2024, **43**(11): 1-16.]

[34] Wang W J, Xie S, Zhang X M, *et al*. Relationship between eco-hydrological factors and spawning activities of fishes with pelagic eggs in the lower reaches of the Minjiang River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(6): 29-34. [王文君, 谢山, 张晓敏, 等. 岷江下游产漂流性卵鱼类的繁殖活动与生态水文因子的关系 [J]. 水生态学杂志, 2012, **33**(6): 29-34.]

[35] Li X Y. Spatial and temporal distribution characteristics of fish in the main stream of the upper Yangtze River reserve Jiangan-Chongqing section in the early period of closed fishing [D]. Chongqing: Southwest University, 2022: 33-36. [李祥艳. 禁渔初期长江上游保护区干流江安-重庆江段鱼类时空分布特征 [D]. 重庆: 西南大学, 2022: 33-36.]

[36] Varnes B K, Olsen E M. Fish community dynamics in a coastal no-take marine protected area compared to a harvested area before and after protection from fishing [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2023, **80**(5): 1462-1471.

[37] Griffen E M, Weber M J. Environmental factors associated with fish reproduction in regulated rivers [J]. *River Research and Applications*, 2025, **41**(2): 515-530.

[38] Kumar P, Babita M, Kailasam M, *et al*. Effect of Changing Environmental Factors on Reproductive Cycle and Endocrinology of Fishes [M]. Outlook of Climate Change and Fish Nutrition. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 377-396.

[39] Paumier A, Drouineau H, Boutry S, *et al*. Assessing the relative importance of temperature, discharge, and day length on the reproduction of an anadromous fish (*Alosa alosa*) [J]. *Freshwater Biology*, 2020, **65**(2): 253-263.

[40] Guo W X, Wang H X, Xu J X, *et al*. Effects of Three Gorges Reservoir on the downstream eco-hydrological regimes during the spawning of important fishes [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, **30**(3): 22-26, 38. [郭文献, 王鸿翔, 徐建新, 等. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究 [J]. 水力发电学报, 2011, **30**(3): 22-26, 38.]

[41] Li M Z, Ma Q, Chen L, *et al*. Natural reproduction and hydrologic requirements of pelagophil fish in the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 84-96. [黎明政, 马琴, 陈林, 等. 三峡水库产漂流性卵鱼类繁殖现状及水文需求研究 [J]. 水生生物学报, 2019, **43**(S1): 84-96.]

[42] Jiang D G, Ke Y, Mao J Q, *et al*. Multi-objective optimization of Three Gorges Reservoir based on ecological flow constraints [J]. *Water Resources and Power*, 2023, **41**(12): 53-57. [蒋定国, 柯云, 毛劲乔, 等. 基于生态流量约束的三峡水库多目标优化研究 [J]. 水电能源科学, 2023, **41**(12): 53-57.]

ECOLOGICAL SCHEDULING OF XILUODU-XIANGJIABA CASCADE RESERVOIRS ON THE REPRODUCTION OF THE FOUR MAJOR CHINESE CARPS IN THE JIANGJIN SECTION OF THE UPPER YANGTZE RIVER

JIANG Wei[1, 2], PU Yan[3], DENG Hua-Tang[3], YU Li-Xiong[3], YANG Hao[3], DAI Ling-Quan[1, 2], LI Sha[1, 2], DUAN Xin-Bin[3], LIU Xuan[1, 2] and TIAN Hui-Wu[3]

(1. *Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center*, *China Three Gorges Corporation*, *Wuhan* 430010, *China*; 2. *National Engineering Research Center of Eco-Environment Protection for Yangtze River Economic Belt*, *Wuhan* 430205, *China*; 3. *National Agricultural Science Observing and Experimental Station of Chongqing*; *Yangtze River Fisheries Research Institute*, *Chinese Academy of Fishery Sciences*, *Wuhan* 430223, *China*)

Abstract: To mitigate the negative effects of hydropower operation on fish reproduction in the downstream river and maximize reservoir ecological benefits, the Xiluodu-Xiangjiaba joint ecological scheduling has been implemented since 2017. Based on early resource survey data from the Jiangjin section of the upper Yangtze River from 2017 to 2022, this study evaluates the effects of cascade reservoir joint ecological scheduling on the natural spawning of the four major Chinese carps in the downstream river section and identifies key hydrological indicators that affect the natural spawning of the four major Chinese carps. The results showed that the total egg production of four major Chinese carps in the Jiangjin section ranged from 42 to 401 million from 2017 to 2022, exhibiting a general fluctuating trend with a peak of approximately 401 million in 2022. Over the six-year period, 25 spawning peaks were observed, mainly concentrated from early June to early July. During ecological scheduling periods, the egg runoff volumes ranged from 0.001 to 108.8 million, accounting for 0.06% to 34.47% of annual totals-exceeding 30% in 2022 and 10% in 2018. In terms of ecological scheduling effectiveness, the breeding peak period that coincided with ecological scheduling accounted for 16% of the total breeding peak period, indicating that ecological scheduling effectively promoted the natural breeding activities in the downstream Jiangjin section. Hydrological demand analysis showed that the suitable flow range for spawning of the four major Chinese carps in the Jiangjin section was 6000—15000 m^3/s, with a suitable water temperature of 21—23℃. Correlation analysis further demonstrated that spawning amount had a significant positive correlation with the peak flow, flow increment, and flow increase rate ($P<0.05$). Based on these results, the study recommends conducting 2—3 ecological scheduling events in mid-late May and early June, maintaining rising water conditions in the Jiangjin section for more than 3d, and ensuring a daily fiow increase rate of at least 900 m^3/s to facilitate the large-scale reproduction. The results provide a scientific basis for formulating scheduling strategies for the Jinsha River cascade reservoir system.

Key words: Cascade reservoirs; Natural propagation; Joint ecological scheduling; Four major Chinese carps; Hydrological index