

# 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

李博 郜星晨 黄涛 姜伟<sup>1</sup>

(1. 中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所, 湖北 宜昌 443100;

2. 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443100)

**【摘要】:** 于2014~2020年5~7月在长江中游宜昌江段开展鱼类早期资源监测, 并对监测期间的四大家鱼自然繁殖状况与生态水文指标进行了相关性分析, 评估生态调度实施效果, 识别影响四大家鱼自然繁殖的关键生态水文指标。结果显示: (1)2014~2020年各年间宜昌江段四大家鱼鱼卵径流量为1.76~86.11亿粒, 总体呈上升变化, 共出现16次四大家鱼繁殖高峰, 主要集中在5月下旬至6月下旬出现; 四大家鱼鱼卵组成以鲢(61.12%)和草鱼(30.77%)为主, 鳙和青鱼比例分别为3.45%和4.64%; 鲢和草鱼繁殖盛期持续较长, 青鱼和鳙相对较晚。(2)2014~2020年三峡水库共开展的11次生态调度中, 有9次出现对应的四大家鱼繁殖高峰, 除2020年外, 生态调度期间鱼卵径流量占监测期间总卵量的比例变化范围为20.15%~78.35%, 生态调度期间家鱼单日鱼卵径流量均高于非生态调度期间, 证实生态调度的实施可促进四大家鱼自然繁殖。(3)各年四大家鱼繁殖期间鱼卵逐日密度和流量呈显著正相关( $R=0.72\sim0.97, p<0.05$ ), 各繁殖高峰期鱼卵径流量占总卵量比例与流量增长率呈显著正相关( $R=0.802, p<0.01$ ), 表明宜昌江段涨水过程可有效地刺激四大家鱼的自然繁殖活动。(4)宜昌江段适宜四大家鱼繁殖的流量范围为 $10000\sim25000\text{m}^3/\text{s}$ , 适宜四大家鱼繁殖的水温范围为 $21.0^{\circ}\text{C}\sim23.8^{\circ}\text{C}$ 。在此流量温度范围内实施生态调度, 保持出库流量日增长率维持在 $2000\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{d}$ 以上, 涨水时间维持在4d时, 有利于宜昌江段四大家鱼繁殖活动。

**【关键词】:** 四大家鱼 早期资源 产卵量 生态调度 生态水文指标

**【中图分类号】:** S931 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)12-2873-10

青鱼、草鱼、鲢、鳙合称“四大家鱼”, 属典型的产漂流性卵鱼类, 其繁殖活动受水温条件、涨水过程、初始流量、涨水时间、产卵时序等条件影响, 且不同的研究认为影响程度不同<sup>[1,2,3,4,5,6]</sup>。长江中游是四大家鱼的重要繁殖区域, 在长江中游城陵矶以上江段分布有11处产卵场, 其中以宜昌产卵场规模最大<sup>[3]</sup>。随着长江干流水利水电工程的兴建, 原江段水文情势、泥沙情势以及水温情势发生改变, 四大家鱼等产漂流性卵鱼类的繁殖、发育活动不可避免地受到影响<sup>[7,8]</sup>。根据相关文献资料, 1981年葛洲坝枢纽截流后, 仅影响到宜昌这一个产卵场, 基本不影响整个长江干流四大家鱼产卵规模<sup>[9]</sup>。三峡工程建设后, 根据Duan等<sup>[10]</sup>2003年调查结果, 宜昌江段四大家鱼产卵场范围略有下移, 产卵场江段长度变化不大, 长江中游的四大家鱼产卵规模减少, 为10.8亿粒。长江中游监利江段2003~2006年监测结果也表明, 四大家鱼产卵规模出现逐年下降趋势, 产卵活动时间也发生

<sup>1</sup>**作者简介:** 李博(1992~), 男, 工程师, 主要研究方向为渔业资源保护和鱼类生态学。E-mail:li\_boll@ctgpc.com.cn; 姜伟 E-mail:jiang\_weil6@ctgpc.com.cn

**基金项目:** 中国长江三峡集团有限公司科研项目(JG/18001B); 国家自然科学基金项目(51779016); 长江水利委员会长江科学院项目(CKSA2017690/SL)

推迟现象<sup>[11]</sup>。

生态调度即在实现防洪、发电、供水、灌溉、航运等社会经济目标的前提下，兼顾河流生态系统需求的调度方式<sup>[12]</sup>。为缓解水利工程引起的负面生态影响，美国自 20 世纪 70 年代就开始通过改进水库调度方式，恢复下游河流的自然水文情势来缓解大坝对下游河流生态功能的影响，其开展的生态调度试验研究不仅在数量上远超过其他国家，而且在类型上涵盖了不同生态目标和不同水库规模<sup>[13,14]</sup>。我国生态调度目前仍停留在理论探讨和初步尝试阶段<sup>[15]</sup>，但早在三峡工程论证阶段就提出通过水库生态调度减少工程运行对长江中游“四大家鱼”等关键物种的不利影响，营造有利于鱼类产卵的人造洪峰，促进其大规模繁殖。自 2011 年开始，三峡水库在保证防洪、发电和航运调度的基础上，针对四大家鱼繁殖的生物学特性，制定并开展了合理的生态调度试验。目前国内关于长江中游江段生态调度期间四大家鱼早期资源变化的研究报导仅针对沙市江段<sup>[16]</sup>和监利江段<sup>[17]</sup>，本研究于 2014~2020 年 5~7 月在长江中游宜昌市宜都市江段开展鱼类早期资源监测，对监测期间的四大家鱼自然繁殖状况与生态水文指标进行了相关性分析，识别影响四大家鱼自然繁殖的关键生态水文指标，为制定三峡工程综合调度方案提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查时间与区域

2014~2020 年 5~7 月在长江中游宜昌市宜都市三江断面(N30. 410216° ,E111. 441786° ) (图 1)开展鱼类早期资源监测，该断面位于宜都弯道河段上游，下距离清江汇口 1km, 距葛洲坝 43km, 汛期江面宽度约 1. 5km, 江段底质以卵砾石为主。

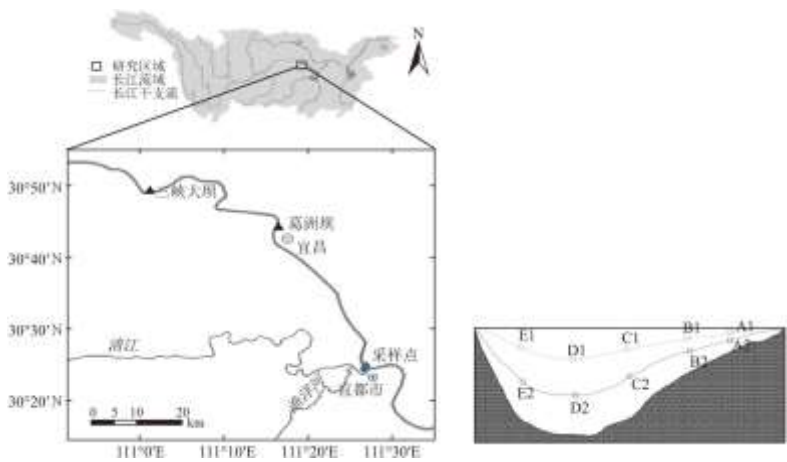


图 1 长江中游采样点及断面设置图

### 1.2 三峡水库生态调度实施过程

2014~2020 年三峡水库共开展 11 次生态调度(表 1), 其中 2014、2019 和 2020 年每年开展一次生态调度，其余各年每年均开展两次。生态调度主要在 5 月下旬至 6 月下旬开展，三峡出库起始流量介于 6400~15700m<sup>3</sup>/s, 持续涨水天数在 3~6d 之间，调度起始水温在 19. 2℃~23. 4℃之间，除 2017 和 2020 年第 1 次生态调度外，其余调度起始水温均在 20℃以上。

### 1.3 采样方法

鱼卵、仔鱼采集按照《内陆水域渔业资源调查手册》<sup>[18]</sup>进行。在断面左、中、右位置 3 个鱼卵采集点，在每个采集点表层和

网口面积 0.39m<sup>2</sup>), 后接集苗网箱 (50 目网通过矩形塑料框支撑为长方体网箱, 网箱尺寸为长 0.5m×高 0.4m×宽 0.3m, 上部不封口), 中层采样网具为圆锥网 (50 目, 网长 2m, 网口面积 0.50m<sup>2</sup>), 后接集苗桶 (长 25cm, 直径 12cm)。同时记录水位、流速、水温等参数, 使用 LS1206 型流速仪记录网口流速, 以哈希 hqd-ido 型溶氧仪记录调查江段溶解氧和水温, 流量数据来源于中国长江三峡集团有限公司水情信息网 (<https://www.ctg.com.cn/sxjt/sqkq/index.html>)。

表 1 三峡水库 2014~2020 年生态调度开展时间及调度期间宜昌江段水温变化

| 年份   | 次数    | 调度时间           | 持续涨水时间(d) | 流量变化范围(m <sup>3</sup> /s) | 水温范围(℃)   |
|------|-------|----------------|-----------|---------------------------|-----------|
| 2014 | 第 1 次 | 6 月 4~7 日      | 3         | 12300~18500               | 21.1~21.3 |
| 2015 | 第 1 次 | 6 月 7~10 日     | 4         | 6400~19000                | 22.0~22.2 |
|      | 第 2 次 | 6 月 25~28 日    | 4         | 13200~25400               | 23.4~23.8 |
| 2016 | 第 1 次 | 6 月 8~12 日     | 3         | 14425~20700               | 21.0~21.4 |
|      | 第 2 次 | 6 月 19~23 日    | 4         | 15700~23000               | 23.2~23.6 |
| 2017 | 第 1 次 | 5 月 20~25 日    | 5         | 11225~17800               | 19.2~19.5 |
|      | 第 2 次 | 6 月 3~9 日      | 6         | 11218~19450               | 21.6~21.7 |
| 2018 | 第 1 次 | 5 月 17~20 日    | 5         | 15050~25075               | 20.4~21.0 |
|      | 第 2 次 | 6 月 17~20 日    | 3         | 10725~16425               | 22.5~23.8 |
| 2019 | 第 1 次 | 5 月 26~6 月 1 日 | 5         | 15700~20300               | 20.0~20.7 |
| 2020 | 第 1 次 | 5 月 24~28 日    | 4         | 8300~12900                | 19.4~20.0 |

对采集的鱼卵进行分类, 使用奥林巴斯解剖镜 SZX16 进行观察记录, 根据卵色泽、膜径、胚体径、发育期等特征进行种类鉴定, 鉴定方法根据易伯鲁等<sup>[1]</sup>及曹文宣等<sup>[19]</sup>文献资料进行, 当场不能鉴定的种类在室内培养至能鉴定种类为止。对于形态学鉴定有疑问种类, 用无水乙醇保存, 带回实验室进行分子鉴定。采用线粒体细胞色素 b 基因对形态鉴定结果进行校准, 分子实验方法参照高雷<sup>[20]</sup>的方法进行。

1.4 数据处理与分析

鱼卵、仔稚鱼的规模计算参照易伯鲁等<sup>[1]</sup>的调查计算方法。

(1) 24h 通过调查断面的鱼卵总径流量(N<sub>m</sub>)

$$N_m = \sum M + \sum M' \tag{1}$$

式中：ΣM 为 24h 内各次定时采集的鱼卵径流量之和；ΣM' 为与前后两次采集之间非采集时间内计算出的鱼卵径流量之和

(2) 24h 内一次采集期间鱼卵径流量 (M)

$$M = (Q/q) \times m \cdot C \quad (2)$$

式中：Q 为调查断面流量 (m<sup>3</sup>/s)；q 为流经采集网具网口的江水流量 (m<sup>3</sup>/s)；m 为断面定定时采集一次采到的鱼卵数量 (粒或尾)；C 为断面鱼卵流量系数。

(3) 断面鱼卵流量系数 C

$$C = \frac{\sum \bar{d}}{d_i} \quad (3)$$

式中：d<sub>i</sub> 为固定采样点的鱼卵密度； $\sum \bar{d}$  为某断面各采样点鱼卵的平均密度。

(4) 前后两次采集之间非采集时间内计算出的鱼卵径流量 M'

$$M' = t' / 2 \times (M_1/t_1 + M_2/t_2) \quad (4)$$

式中：t' 为前后两次采样之间的时间间隔；t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub> 为前后两次采集的持续时间；M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> 表示前后两次采样的鱼卵数量。

不同年份水温、流量的差异采用单因素方差分析。各年间四大家鱼繁殖期逐日鱼卵密度变化与流量的相关性采用 Pearson Correlation 进行分析。四大家鱼繁殖高峰产卵规模与水文过程各指标的关系采用逐步回归分析，因各年监测期间产卵总量差异较大，在与水文过程各指标进行相关性分析时以高峰期卵量占当年总卵量比例替代高峰期卵量。图片处理用 Photoshop 软件，数据分析采用 Excel 和 R 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 四大家鱼早期资源量情况

#### 2.1.1 各年鱼卵径流量情况

根据监测结果估算，2014~2020 年各年间宜昌江段四大家鱼鱼卵径流总量为 1.76~86.11 亿粒，总体呈上升变化，2019 年达到最高，为 86.11 亿粒 (表 2)。各年间共出现 16 次四大家鱼繁殖高峰，主要集中在 5 月下旬至 6 月下旬出现。2014 年出现 1 次四大家鱼繁殖高峰，发生在生态调度期间，产卵规模为 0.47 亿粒；2015 年出现 2 次家鱼繁殖高峰，均发生在生态调度期间，产卵规模分别为 3.65 和 1.20 亿粒；2016 年出现 3 次四大家鱼繁殖高峰，产卵规模分别为 5.21、0.76 和 1.12 亿粒，其中后 2 次繁殖高峰均发生在生态调度期间；2017 年出现 2 次四大家鱼繁殖高峰，产卵规模分别为 9.79 和 10.97 亿粒，其中第 1 次发生在生态调度期间；2018 年出现 2 次四大家鱼繁殖高峰，均发生在生态调度期间，产卵高峰规模分别为 12.59 和 9.17 亿粒；2019 年出现 3 次四大家鱼繁殖高峰，产卵规模分别为 15.80、36.3 和 21.93 亿粒，其中第 1 次发生在生态调度期间；2020 年出现 3 次繁殖高峰，产卵高峰规模分别为 8.17、10.51 和 15.99 亿粒，生态调度期间未出现四大家鱼繁殖高峰。

表 2 2014~2020 年长江中游宜昌江段四大家鱼繁殖情况

| 年份   | 繁殖总规模(亿粒) | 出现繁殖高峰次数 | 出现繁殖高峰时间  | 繁殖高峰产卵规模(亿粒) |
|------|-----------|----------|-----------|--------------|
| 2014 | 1.76      | 1        | 6月5~7日★   | 0.47         |
| 2015 | 6.19      | 2        | 6月8~10日★  | 3.65         |
|      |           |          | 6月26~27日★ | 1.20         |
| 2016 | 7.69      | 3        | 5月31~6月5日 | 5.21         |
|      |           |          | 6月10~12日★ | 0.76         |
|      |           |          | 6月20~22日★ | 1.12         |
| 2017 | 29.92     | 2        | 6月9~11日★  | 9.79         |
|      |           |          | 6月18~19日  | 10.97        |
| 2018 | 33.16     | 2        | 5月19~20日★ | 12.59        |
|      |           |          | 6月19~20日★ | 9.17         |
| 2019 | 86.11     | 3        | 6月1~2日★   | 15.80        |
|      |           |          | 6月11~13日  | 36.39        |
|      |           |          | 6月23~24日  | 21.93        |
| 2020 | 36.43     | 3        | 6月4~7日    | 8.17         |
|      |           |          | 6月13~14日  | 10.51        |
|      |           |          | 6月22~25日  | 15.99        |

注：★表示生态调度期间。

### 2.1.2 不同种类家鱼繁殖情况

本研究自 2016 年开始采取形态鉴定和分子鉴定相结合方式，对四大家鱼鱼卵种类进行鉴定，因此仅对 2016~2020 年 5 年监测期间不同种类四大家鱼鱼卵径流量及所占比例进行统计分析，结果表明：各年鲢、鳙、草鱼和青鱼鱼卵径流量占比分别为 50.10%~73.07%、2.05%~4.66%、17.99%~44.06%、3.20%~6.86%(表 3)。各年间四大家鱼种类整体上以鲢和草鱼为主，年均占比分别为 61.12%和 30.77%，鳙和青鱼各年年均产卵量占总产卵量比例较小，分别为 3.45%和 4.64%。对 5 年间出现的 13 次四大家鱼繁殖高峰中不同种类家鱼产卵情况进行分析发现，鲢和草鱼产卵期持续较长，5 月中旬至 6 月下旬为盛产时期，在水温达到 20℃以上就开始出现大规模产卵；鳙和青鱼繁殖高峰较鲢和草鱼出现较晚，多在 6 月上旬之后，其中鳙产卵水温略高，繁殖高峰多在水温接近或达到 22℃以上出现。

表 3 宜昌江段不同种类家鱼鱼卵径流量及所占比例

| 年份   | 繁殖高峰时间   | 水温(℃)     | 鲢(%)  | 鳙(%) | 草鱼(%) | 青鱼(%) |
|------|----------|-----------|-------|------|-------|-------|
| 2016 | 6月5~6日   | 21.6~21.8 | 83.51 | 1.20 | 14.60 | 0.69  |
|      | 6月11~12日 | 22.3~22.4 | 60.34 | 8.62 | 24.14 | 6.90  |
|      | 6月21日    | 23.3~23.4 | 46.00 | 5.00 | 43.00 | 6.00  |
|      | 监测期间     |           | 73.07 | 4.53 | 17.99 | 4.41  |
| 2017 | 6月10~11日 | 21.9~22.0 | 70.72 | 4.18 | 21.29 | 3.80  |
|      | 6月18~19日 | 22.4~22.5 | 50.60 | 2.41 | 42.77 | 4.22  |
|      | 监测期间     |           | 55.80 | 3.39 | 35.46 | 5.35  |
| 2018 | 5月19日    | 20.2      | 58.76 | 3.73 | 32.46 | 5.05  |
|      | 6月20日    | 22.7      | 61.13 | 6.40 | 28.17 | 4.30  |
|      | 监测期间     |           | 60.32 | 4.66 | 28.16 | 6.86  |
| 2019 | 5月31日    | 20.8      | 65.08 | 0.53 | 33.33 | 1.06  |
|      | 6月11~12日 | 21.6~21.7 | 79.55 | 2.27 | 15.63 | 2.56  |
|      | 6月23~24日 | 22.8~23.1 | 69.11 | 3.79 | 20.87 | 6.23  |
|      | 监测期间     |           | 66.35 | 2.05 | 28.20 | 3.40  |
| 2020 | 6月7日     | 22.2      | 70.67 | 2.00 | 22.67 | 4.67  |
|      | 6月13~14日 | 22.6~22.7 | 45.85 | 3.01 | 47.13 | 4.01  |
|      | 6月22~23日 | 22.9      | 47.64 | 7.85 | 38.22 | 6.28  |
|      | 监测期间     |           | 50.10 | 2.64 | 44.06 | 3.20  |

## 2.2 家鱼繁殖与生态调度的响应

三峡水库在 2014~2020 年 7 年间共开展 11 次生态调度,出现对应的家鱼繁殖高峰 9 次,生态调度有效率达 81.82%。7 年间共出现 16 次四大家鱼繁殖高峰,其中与生态调度相对应的繁殖高峰次数占总繁殖高峰次数的 56.25%。从生态调度开展的时间以及相对应的四大家鱼繁殖高峰出现时间来看,生态调度开展 1~2d 后,宜昌江段四大家鱼开始出现集中产卵。对各年监测期间四大家鱼鱼卵径流量统计发现,各年生态调度期间家鱼鱼卵径流量为 0.47~24.35 亿粒,占当年总卵量比例为 2.46~78.35%(图 2a),其中 2014~2019 年均超过 20%,2015 年和 2018 年分别达到了 78.35%和 73.43%;各年间生态调度期间单日鱼卵径流量范围为 0.11~3.47 亿粒/d,非生态调度期间单日鱼卵径流量范围为 0.04~1.76 亿粒/天(图 2b),除 2020 年外,各年生态调度期间家鱼单日鱼卵径流量均高于非生态调度期间,生态调度效果明显。2020 年生态调度期间未形成家鱼繁殖高峰,单日鱼卵径流量低于非生态调度期间,生态调度期间家鱼鱼卵径流量占总卵量比例仅 2.46%。

## 2.3 家鱼繁殖的生态水文指标需求分析

### 2.3.1 水温

2014~2020 年在宜昌江段监测到四大家鱼产卵时的水温分布范围为 18.2℃~25.7℃, 各年间水温平均值范围为 21℃~21.77℃, 单因素方差分析表明, 各年采集到四大家鱼鱼卵时的水温在统计学上差异不显著 ( $F=1.436, p=0.222$ )。各年间出现的 16 次家鱼繁殖高峰期的起始水温均在 20℃ 以上, 其中有 14 次水温是在 21℃~23.8℃ 之间 (表 4); 与生态调度相对应的 9 次家鱼繁殖高峰, 均是在水温达到 20℃ 以上出现的, 2017 和 2020 年第一次生态调度开展时水温尚未达到 20℃, 结果均未形成家鱼鱼卵量高峰。因此, 本研究认为: 长江宜昌江段四大家鱼在水温达到 20℃ 以上后开始进入繁殖盛期, 繁殖最适宜的水温范围在 21.0℃~23.8℃ 之间。

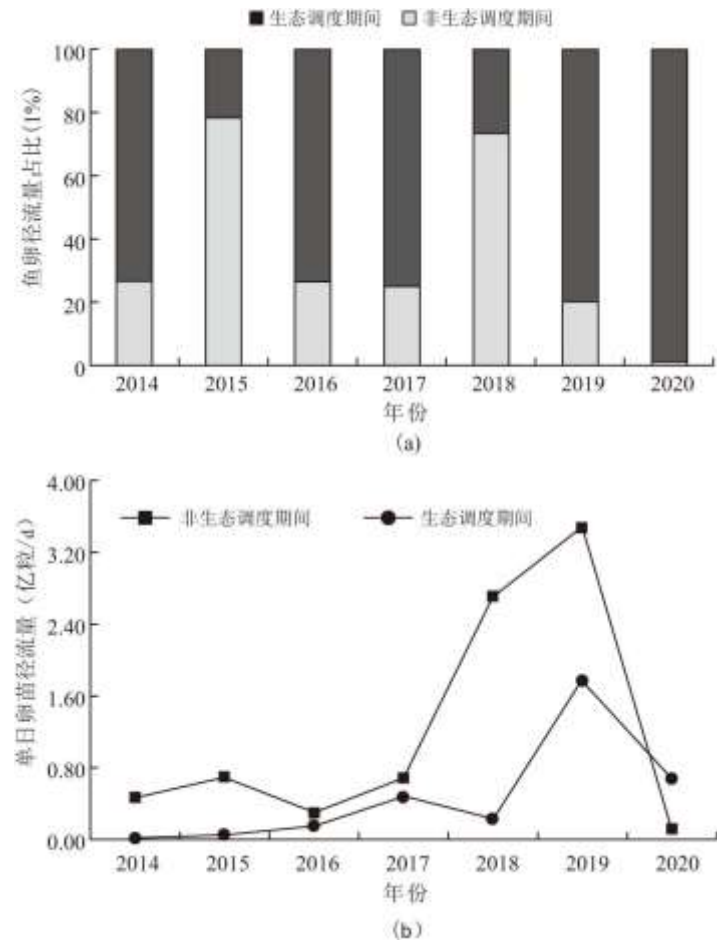


图 2 2014~2020 年生态调度期间四大家鱼鱼卵径流量占比及单日鱼卵径流量

### 2.3.2 水文过程

2014~2020 年在宜昌江段监测到四大家鱼产卵时的流量分布范围为 9400~38575m<sup>3</sup>/s, 各年平均值范围为 14663~20211m<sup>3</sup>/s, 单因素方差分析表明, 各年采集到四大家鱼鱼卵时的流量在统计学上差异显著 ( $F=5.996, p<0.01$ )。各年监测期间日平均流量首次超过 25000m<sup>3</sup>/s 的时间主要集中在 6 月底 (6 月 23~28 日), 以此为界大致可分为两个时期: 第一个时期为 5 月下旬至 6 月下旬, 各年间日均流量平均值范围为 13454~17948m<sup>3</sup>/s; 第二个时期为 6 月下旬之后, 随着流域汛期的到来, 三峡水库为保障长江中下游防洪需要, 加大下泄流量, 各年间日均流量平均值范围为 25596~29232m<sup>3</sup>/s。

2014~2020 年监测期间每一次鱼类繁殖高峰均伴随着一次较大的涨水过程, 对每年四大家鱼集中繁殖期间逐日鱼卵密度与流量进行相关性分析结果显示, 四大家鱼繁殖期逐日鱼卵密度和流量变化呈显著正相关( $R=0.72\sim0.97$ ,  $p<0.05$ )。进一步地对 7 年间出现的 16 次繁殖高峰期间水文过程进行统计(表 4): 起始流量范围为  $6400\sim18900\text{m}^3/\text{s}$ , 除 2015 年第一次繁殖高峰期起始流量低于  $10000\text{m}^3/\text{s}$  外(2015 年 6 月 3~7 日, 受“东方之星”沉船事件影响, 为了创造适于救援的水文条件, 三峡限制出库流量), 其余各次均在  $10000\text{m}^3/\text{s}$  以上; 涨水持续时间为 2~4d, 洪峰流量范围为  $16425\sim32300\text{m}^3/\text{s}$ , 其中有 13 次在  $25000\text{m}^3/\text{s}$  以下; 涨幅变化范围为  $5700\sim13600\text{m}^3/\text{s}$ ; 增长率范围为  $1925\sim4533\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{d}$ , 有 14 次在  $2000\text{m}^3/\text{s}$  以上; 对各高峰期鱼卵径流量占总卵量比例与水文过程进行逐步回归分析结果显示: 高峰期鱼卵径流量占总卵量比例只与流量增长率呈显著正相关( $R=0.802$ ,  $p<0.01$ ), 这表明三峡水库调度引起的流量增加有效地刺激四大家鱼的自然繁殖活动。

综合以上分析, 本研究认为, 宜昌江段适宜四大家鱼繁殖的流量范围为  $10000\sim25000\text{m}^3/\text{s}$ , 适宜四大家鱼繁殖的水温范围为  $21.0^\circ\text{C}\sim23.8^\circ\text{C}$ 。生态调度宜在此流量及温度范围内开展, 保持三峡出库流量日增长率维持在  $2000\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{d}$  以上, 涨水时间维持在 4d 左右, 有利于宜昌江段四大家鱼繁殖活动。

表 4 宜昌江段四大家鱼繁殖高峰期生态水文指标因子

| 年份   | 涨水时间      | 持续时间(d) | 水温范围( $^\circ\text{C}$ ) | 初始流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 涨幅( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 流量增长率( $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{d}$ ) | 高峰期卵量(亿粒) | 高峰期卵量占比(%) |
|------|-----------|---------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|-----------|------------|
| 2014 | 6月3~6日★   | 3       | 21.1~21.3                | 12300                         | 18500                         | 6200                        | 2067                                        | 1.39      | 26.11      |
| 2015 | 6月7~9日★   | 3       | 22.0~22.2                | 6400                          | 19600                         | 13200                       | 4400                                        | 3.65      | 54.11      |
|      | 6月25~28日★ | 4       | 23.4~23.8                | 13200                         | 20900                         | 7700                        | 1925                                        | 1.20      | 19.40      |
| 2016 | 5月30~6月4日 | 4       | 21.2~21.8                | 18900                         | 27600                         | 8700                        | 2175                                        | 5.21      | 27.05      |
|      | 6月8~11日★  | 3       | 21.0~21.4                | 13600                         | 21500                         | 7900                        | 2633                                        | 0.91      | 11.83      |
|      | 6月19~22日★ | 4       | 23.2~23.6                | 15700                         | 24800                         | 9100                        | 2275                                        | 1.13      | 14.70      |
| 2017 | 6月5~9日★   | 4       | 21.0~21.9                | 11300                         | 20300                         | 9000                        | 2250                                        | 9.79      | 32.72      |
|      | 6月15~19日  | 3       | 21.8~22.4                | 13200                         | 24700                         | 11500                       | 3833                                        | 10.97     | 36.66      |
| 2018 | 5月18~20日★ | 2       | 20.2~20.3                | 12300                         | 18300                         | 6000                        | 3000                                        | 14.99     | 45.20      |
|      | 6月17~20日★ | 2       | 22.9~23.5                | 10725                         | 16425                         | 5700                        | 2850                                        | 6.86      | 20.69      |

|      |            |   |           |       |       |       |      |       |       |
|------|------------|---|-----------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 2019 | 5月26~6月1日★ | 4 | 20.4~20.7 | 14300 | 22000 | 7700  | 1925 | 15.80 | 18.35 |
|      | 6月10~13日   | 2 | 21.5~21.9 | 11600 | 23300 | 11700 | 3200 | 36.39 | 42.26 |
|      | 6月22~25日   | 3 | 22.7~23.2 | 16200 | 26200 | 10000 | 3333 | 21.93 | 25.47 |
| 2020 | 6月2~7日     | 4 | 21.5~22.2 | 12800 | 19600 | 6800  | 2267 | 8.17  | 19.93 |
|      | 6月12~13日   | 2 | 22.3~22.6 | 10700 | 17900 | 7200  | 3600 | 10.51 | 25.64 |
|      | 6月21~24日   | 3 | 22.7~22.9 | 18700 | 32300 | 13600 | 4533 | 15.99 | 39.00 |

注：★表示生态调度期间。

表 5 宜昌江段四大家鱼鱼卵量与水文因子相关性

| 水文因子 | 持续涨水时间(d) | 初始流量(m <sup>3</sup> /s) | 洪峰流量(m <sup>3</sup> /s) | 涨幅(m <sup>3</sup> /s) | 流量增长率(m <sup>3</sup> /s·d) |
|------|-----------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 相关系数 | -0.466    | -0.381                  | 0.081                   | 0.471                 | 0.775**                    |

注：\*\*相关性极显著(p<0.01)。

### 3 讨论

#### 3.1 长江中游四大家鱼自然繁殖动态

根据 2014~2020 年监测结果估算, 长江宜昌江段四大家鱼早期资源量总体呈增加趋势, 2019 年最高为 86.11 亿粒, 其规模恢复到葛洲坝截流前水平(80 亿粒)<sup>[1]</sup>, 这主要与三峡水库生态调度实验开展、四大家鱼亲本放流以及近些年来加强禁捕力度等综合性保护措施有关, 但因缺乏宜昌江段四大家鱼繁殖亲鱼数量、捕捞情况等数据, 无法对各项具体保护措施的效果及贡献率进行深入分析。

根据 1964~1965 年长江中游江段早期资源调查结果<sup>[1]</sup>, 四大家鱼中鲢、鳙、草鱼和青鱼所占比例分别为 25.28%、5.85%、45.65%和 23.25%, 即草鱼最多, 鳙最少, 鲢和青鱼比例接近。Duan 等<sup>[10]</sup>, 刘明典等<sup>[21]</sup>分别于 2005~2006、2015~2016 年对宜昌江段四大家鱼早期资源进行监测结果显示: 2003 年后长江中游四大家鱼种类组成上出现鲢比例增加(超过 60%), 草鱼比例下降(不足 30%)趋势, 并由此得出三峡水库调蓄对草鱼的影响较为严重的结论。本研究中, 宜昌江段 2016~2020 年四大家鱼早期资源量中鲢、鳙、草鱼和青鱼比例分别为 61.12%、3.45%、30.77%和 4.64%, 和近年来调查结果相似, 但本研究认为仅考虑水利工程运行影响这一单一因素得出“三峡水库调蓄对草鱼的影响较为严重”的结论有待商榷, 应结合不同种类家鱼繁殖生物学差异、增殖

放流数量以及捕捞数量等因素进行综合分析。

本研究基于 2016~2020 年宜昌江段四大家鱼繁殖高峰不同种类产卵时序分析,认为鲢和草鱼产卵期持续较长,5 月中旬至 6 月下旬为盛产时期,鳙和青鱼繁殖高峰期出现相对较晚,多在 6 月中旬之后,其中鳙产卵水温略高,多在水温接近或达到 22℃ 以上出现集中产卵,该结论和曹文宣等<sup>[19]</sup>等结论一致,并在此基础上初步探讨了宜昌江段四大家鱼产卵时序,为今后针对目标物种保护提供参考。

### 3.2 影响四大家鱼繁殖的环境因子

黎明政等<sup>[22]</sup>研究认为,河流水温与涨水过程是影响四大家鱼繁殖活动的关键因子。四大家鱼在春季水温上升到 18℃ 以上才开始产卵<sup>[1]</sup>,宜昌江段 5 月中旬水温即达到 18℃,但早期繁殖规模较小,繁殖较为分散;5 月下旬,随三峡库区水位消落及上游来水增加,宜昌江段开始出现较大的涨水过程,此时水温在 20℃~21℃ 之间,较大概率会出现一次较大规模的四大家鱼自然繁殖,2018 和 2019 年均出现。随着水温升高至 21℃ 以上,家鱼的性腺发育将快速完成,性成熟的四大家鱼亲鱼开始大规模集中繁殖<sup>[23]</sup>。本研究基于 2014~2020 年宜昌江段四大家鱼早期资源监测情况,提出长江宜昌江段四大家鱼在水温达到 20℃ 以上后开始进入繁殖盛期,繁殖最适宜的水温范围在 21.0℃~23.8℃ 之间。和余志堂等<sup>[24]</sup>提出的四大家鱼繁殖盛期水温为 20℃~24℃ 范围相似,但稍低于刘明典等<sup>[21]</sup>提出的四大家鱼最适宜繁殖水温为 21.35℃~25.4℃ 的结论。

在水温条件适宜的情况下,河流涨水过程将成为诱发四大家鱼繁殖活动发生的重要因子<sup>[21]</sup>,水流的上涨既是促使性腺发育的重要条件,也是诱发产卵行为的重要因子<sup>[1,3]</sup>。黎明政<sup>[22]</sup>、周雪等<sup>[17]</sup>研究认为水位日增量是诱发四大家鱼产卵的最关键因子,王俊娜等<sup>[25]</sup>研究认为除流量增长率外,涨水持续时间也是影响家鱼繁殖的关键水文指标,徐薇等<sup>[6]</sup>认为持续涨水天数、初始水位和产卵时序是影响四大家鱼产卵量的重要生态水文参数。本研究中 2014~2020 年监测期间每一次鱼类繁殖高峰均伴随着一次较大的涨水过程,各年四大家鱼繁殖期间逐日鱼卵密度和流量变化呈显著正相关( $R=0.72\sim0.97, p<0.05$ ),各繁殖高峰期产卵规模与流量增长率呈显著正相关( $R=0.775, p<0.05$ ),这表明在水温等条件适宜的前提下,宜昌江段涨水过程有效地刺激了四大家鱼的自然繁殖活动。进一步地分析发现,宜昌江段适宜四大家鱼繁殖的流量范围为 10000~25000m<sup>3</sup>/s,适宜四大家鱼繁殖的水温范围为 21.0℃~23.8℃,由此提出三峡水库针对宜昌江段四大家鱼自然繁殖调度方案,即上述适宜流量、水温范围内,保持三峡出库流量日增长率维持在 2000m<sup>3</sup>/s·d 以上,涨水时间维持在 4d 左右,有利于宜昌江段四大家鱼繁殖活动。相比于王俊娜等<sup>[25]</sup>对三峡运行前后长江中游的家鱼的生态环境流量需求分析结论(时间为每年 6 月 15 日至 7 月 20 日,涨水率为 900~3100m<sup>3</sup>/s·d),本研究更进一步量化了水温及涨水过程,为三峡工程制定综合调度方案提供科学依据。

### 3.3 生态调度效果评价

已有研究表明,三峡水库生态调度涨水过程能够在一定程度上满足不同鱼类繁殖的水文需求,对减缓三峡水库运行引起的长江中游鱼类繁殖的不利影响和维持鱼类种群资源补充具有重要意义<sup>[16,17]</sup>。本研究基于 2014~2020 年宜昌江段四大家鱼早期资源监测结果表明,7 年间共开展的 11 次生态调度中出现对应的 9 次家鱼繁殖高峰,生态调度有效率达 81.82%;因各年生态调度开展次数及各次调度持续时间不同,以四大家鱼单日鱼卵径流量情况分析生态调度效果发现,除 2020 年外,各年生态调度期间家鱼单日鱼卵径流量均高于非生态调度期间,生态调度期间家鱼鱼卵径流量占当年总卵量比例均超过 20%,2015 和 2018 年分别达到了 78.35%和 73.43%,生态调度对于四大家鱼资源恢复效果显著。2020 年生态调度期间未形成家鱼繁殖高峰,推测原因为可能与调度开展时水温偏低(19.4℃),流量范围(8300~12900m<sup>3</sup>/s)以及流量增长率(1150m<sup>3</sup>/s·d)偏小有关。

在水温等条件适宜的前提下,生态调度造成的涨水过程可有效地刺激了四大家鱼的自然繁殖活动,但目前有关涨水过程是如何刺激四大家鱼繁殖活动的机制报导较少,有研究提出水流的上涨既是促使性腺发育的重要条件,也是诱发产卵行为的重要因子<sup>[1,3]</sup>。本项目基于对 2016~2017 年四大家鱼繁殖高峰期前后宜昌江段四大家鱼主要产卵场(胭脂坝-公路大桥江段)流速变化分析发现,在 5 月下旬至 6 月中旬(汛期来临前),三峡水库开展生态调度使得下泄流量持续增加,产卵场江段流速小于 1.5m/s 的

区域不断缩小(未发表数据),长江干流四大家鱼产卵时的平均流速范围在  $0.95\sim 1.5\text{m/s}$ <sup>[1,26]</sup>,由此本研究认为生态调度刺激家鱼产卵行为的途径之一可能为:在四大家鱼繁殖季节,生态调度造成的涨水过程,改变了产卵场的流速分布,导致四大家鱼适宜产卵的区域面积减小,促进了四大家鱼待产亲鱼的向流速适宜的区域集群,从而增加了产卵亲鱼的繁殖机会,出现相应繁殖高峰。

#### 参考文献:

- [1]易伯鲁,余志堂,梁秩燊.长江干流草鱼、青鱼、鲢、鳙四大家鱼产卵场的分布、规模和自然条件[M].武汉:湖北科学技术出版社,1988:1-46.
- [2]李翀,彭静,廖文根.长江中游四大家鱼发江生态水文因子分析及生态水文目标确定[J].中国水利水电科学研究院学报,2006,4(3):170-176.
- [3]王尚玉,廖文根,陈大庆,等.长江中游四大家鱼产卵场的生态水文特性分析[J].长江流域资源与环境,2008,17(6):892-897.
- [4]陈永柏,廖文根,彭期冬,等.四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述[J].水生态学杂志,2009,2(2):130-133.
- [5]赵越,周建中,许可,等.保护四大家鱼产卵的三峡水库生态调度研究[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(4):45-50.
- [6]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,2020,33,268(5):69-79.
- [7]彭期冬,廖文根,李翀,等.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),2012,44(S2):228-232.
- [8]熊明,许全喜,袁晶,等.三峡水库初期运用对长江中下游水文河道情势影响分析[J].水力发电学报,2010,29(1):120-125.
- [9]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,1982,6(4):287-305.
- [10]DUAN X B,LIU S P,HUANG M G,et al.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,2009,86:13-22.
- [11]李世健,陈大庆,刘绍平,等.长江中游监利江段鱼卵及仔稚鱼时空分布[J].淡水渔业,2011,41(2):18-24.
- [12]董哲仁,孙东亚,赵进勇.水库多目标生态调度[J].水利水电技术,2007,38(1):28-32.
- [13]王俊娜,董哲仁,廖文根,等.美国的水库生态调度实践[J].水利水电技术,2011(1):15-20.
- [14]黄云燕.水库生态调度方法研究[D].硕士学位论文.武汉:华中科技大学,2008.
- [15]谭红武,廖文根,李国强,等.国内外生态调度实践现状及我国生态调度发展策略浅议[C].中国水利学会 2008 学术年会

---

论文集(上册), 2008.

[16]徐薇, 刘宏高, 唐会元, 等. 三峡水库生态调度对沙市江段鱼卵和仔鱼的影响[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(2):1-8.

[17]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):1781-1788.

[18]张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社, 1973.

[19]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, 2-5.

[20]高雷. 长江口南支鱼类早期资源多样性与时空格局研究[D]. 博士学位论文. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2014.

[21]刘明典, 高雷, 田辉伍, 等. 长江中游宜昌江段鱼类早期资源现状[J]. 中国水产科学, 2018, 25(1):147-1580.

[22]黎明政. 长江鱼类生活史对策及其早期生活史阶段对环境的适应[D]. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2012:75-86.

[23]沈忱. 长江上游鱼类保护区生态环境需水研究[D]. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2015.

[24]余志堂, 周春生, 邓中彝, 等. 葛洲坝水利枢纽截流后的长江家鱼产卵场[C]. 中国鱼类学会鱼类学论文集(第四辑). 北京: 科学出版社, 1985:1-11.

[25]王俊娜, 李翀, 段辛斌, 等. 基于遗传规划法识别影响鱼类丰度的关键环境因子[J]. 水利学报, 2012, 43(7):860-868.

[26]刘建康, 何碧梧. 中国淡水鱼类养殖学[M]. 科学出版社, 1992.