

DOI: 10.12264/JFSC2023-0270

长江中游洪湖江段四大家鱼早期资源及生态调度影响

高雷¹, 郭国忠^{1,2,3}, 杨浩¹, 陈大庆¹, 王珂¹, 段辛斌¹

1. 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, 湖北 武汉 430223;

2. 西南大学动物科技学院, 重庆 400715;

3. 华测检测认证集团股份有限公司, 广东 深圳 518000

摘要: 为了解长江洪湖江段四大家鱼早期资源状况及生态调度对其繁殖活动的影响, 本研究于 2014—2016 年每年的 5—7 月, 对该江段四大家鱼早期资源组成比例、资源量及水文指标等状况开展了调查, 共采集四大家鱼卵 56 粒, 鱼苗 74815 尾, 其中鲢卵、苗分别占四大家鱼总捕捞数量的 69.6% 和 75.7%。2014—2016 年, 估算通过洪湖江段的四大家鱼卵径流量分别为 1.11×10^8 粒、 0.95×10^8 粒和 0.94×10^8 粒, 鱼苗径流量分别为 7.63×10^8 尾、 15.36×10^8 尾和 27.64×10^8 尾。Pearson 相关性分析显示, 四大家鱼苗密度与流量、水温和水位呈极显著正相关($P < 0.01$)。GAM 模型显示, 四大家鱼苗密度在水温 18.1~26.6 °C 范围内, 呈现先上升后略微下降的趋势, 并与流量呈显著正线性关系。相比 20 世纪 90 年代, 洪湖江段四大家鱼资源量有所下降, 但产卵场分布位置没有发生明显的变动。生态调度对洪湖江段四大家鱼繁殖活动有一定的促进效果, 但效果弱于离坝较近的宜都、沙市等江段。建议对重要产卵场江段进行勘界定标, 加强宣传和保护。

关键词: 四大家鱼; 产卵场; 早期资源; 生态调度; 长江中游

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)12-1556-10

鱼类早期阶段个体存活率的细微变化是引起种群数量变动和年龄结构变化的主要原因, 直接关系到鱼类资源的补充^[1-2]。对鱼类早期资源的研究可以推测鱼类繁殖季节、产卵场分布范围和产卵规模, 了解鱼类繁殖群体数量和种群数量变动趋势, 解析鱼类繁殖和生长的环境需求和资源补充过程, 对鱼类资源的保护和修复具有重要的意义^[2-3]。研究鱼类早期资源也是了解水生生态系统结构和功能、评价水生生态环境现状的重要依据^[4-5]。

长江中游干支流及附属湖泊构成的江湖复合生态系统, 孕育了丰富的鱼类资源, 以鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)和鳙

(*Aristichthys nobilis*)(合称四大家鱼)为代表的江湖洄游型鱼类是该水域传统重要渔业捕捞对象^[6-7]。研究表明, 大型水坝、航道整治等涉水工程会阻断鱼类洄游通道、破坏鱼类产卵场和索饵场, 威胁鱼类的生存, 导致其资源衰退^[7-8]。如三峡水库蓄水后宜昌、监利等江段四大家鱼的资源量明显下降, 卵苗组成比例也发生了明显的变化^[9-10]。监利江段四大家鱼苗量由蓄水前年均 25 (1997—2002)亿尾下降至不足 1 亿尾(2009), 种类组成也由以草鱼为主变成以鲢为主^[10]。

为缓解三峡工程对坝下江段四大家鱼繁殖的影响, 三峡水库自 2011 年起实施了针对四大家鱼自然繁殖的实验性生态调度, 初步研究表明, 生

收稿日期: 2023-10-10; 修订日期: 2023-12-20.

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中华人民共和国水利部-中国长江三峡集团有限公司长江水科学研究联合基金项目(U2240214); 国家重点研发计划项目(2022YFC3202001); 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(2023TD09).

作者简介: 高雷(1985—), 男, 副研究员, 研究方向为水生生物资源监测与保护. E-mail: gaolei@yfi.ac.cn

通信作者: 段辛斌, 研究员, 研究方向为水生生物资源监测与保护. E-mail: duan@yfi.ac.cn

态调度对长江中游宜昌、荆州与监利江段四大家鱼繁殖有显著的促进效果^[11-14]。洪湖江段位于洞庭湖通江水道下游, 距离三峡大坝较远, 水文情势受大坝影响相对较小, 四大家鱼繁殖活动受到的影响可能较小。同时洪湖江段也历史上是四大家鱼重要的产卵场分布区, 螺山、嘉鱼和牌洲等产卵场的产卵总规模约占长江干流总量的 6%^[15]。本研究于 2014 至 2016 年对长江中游洪湖江段四大家鱼早期资源开展调查, 以期了解该江段四大家鱼早期资源现状及生态调度对其繁殖的影响, 为保护和修复长江中游鱼类资源、分析三峡水库生态调度实验影响、评估长江十年禁渔效果提供基础数据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 调查时间和地点

2014 年 5 月 5 日—7 月 14 日、2015 年 5 月 1 日—7 月 11 日和 2016 年 5 月 13 日—7 月 4 日, 在长江中游洪湖江段燕窝镇(114°19'18"E, 30°4'54"N)设置断面开展鱼类早期资源调查。该断面位于三峡大坝下游约 530 km、洞庭湖通江水道下游约 110 km (图 1)。

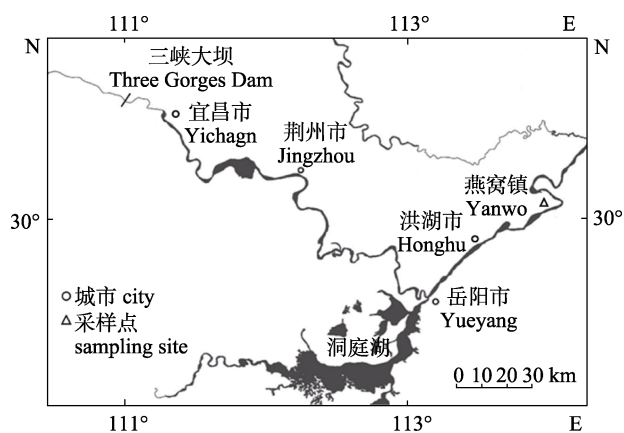


图 1 长江中游洪湖江段调查断面示意图

Fig. 1 Map of sampling site at Honghu section in the middle reaches of the Yangtze River

1.2 样品采集及处理

租用商业船使用强网(网目 0.5 mm, 网口面积 0.53 m²) 在长江两岸捕捞四大家鱼鱼苗(24 h 连续捕捞); 使用圆锥网(网目 0.5 mm, 网口面积

0.19 m²) 在长江两岸和江心捕捞四大家鱼鱼卵(每次捕捞 15 min)。同步测量水温、江水流速(LS45A 型流速仪)、溶解氧(溶解氧测量仪 YSI ProODO)、透明度(萨氏透明度盘)和 pH。水位和流量数据来自水利部全国水雨情信息网螺山水文站(<http://xxfb.hydroinfo.gov.cn/>)。

现场使用光学显微镜观察、记录鱼卵的发育期, 根据肌节数、色素等形态学特征鉴定鱼苗种类^[2]。所有捕捞到的样品均保存于 95% 的乙醇溶液中, 对卵径 > 4.0 mm 的鱼卵及难以通过形态学特征鉴定出种类的鱼苗带回实验室, 通过线粒体 DNA 细胞色素 b 基因鉴定^[8]。

1.3 数据分析

四大家卵苗径流量的计算方法参照易伯鲁等^[15], 计算公式:

$$M = D \times Q \times T$$

$$D = \frac{\sum d_i}{n}$$

$$d_i = m_i / (s \times v_i \times t_i)$$

式中, M 为一日中采集时间段内的卵苗径流量(ind), D 为采集断面卵苗平均密度(ind/m³), Q 为单位时间内长江径流(m³/s), T 为一日中采集时间段内的时间(s), d_i 为第 i 点卵苗密度, m_i 为第 i 点采集的卵苗数量(ind), s 为网口面积(m²), v_i 为第 i 点网口江水流速(m/s), t_i 为第 i 点采集时间(s), n 为采集断面所设采集点的数量。

每日非采集时间内, 流经断面的卵苗径流量 M' (ind) 采用插补法来计算:

$$M' = (M_1/t_1 + M_2/t_2)t'/2$$

式中, t' 为前后两次采集之间的间隔时间; t_1 , t_2 为前后两次采集的持续时间; M_1 , M_2 为前后两次采集的卵苗径流量。

每日通过调查断面的卵苗径流量 N (ind) 为: $N = M + M'$

产卵场位置根据采集鱼卵的发育时间和江水的平均流速推算, 计算公式:

$$L = V \times T'$$

式中, L 为鱼卵的漂流距离(m); V 为调查断面江水的平均流速(m/s); T' 为鱼卵胚胎发育所经历的时间(s)。

使用 Excel、SPSS 等软件分析数据和制图, 使

用 Pearson Correlation 分析四大家鱼卵苗日均密度和环境之间的相关性, 并运用 GAM (generalized additive model)模型对四大家鱼卵苗密度与环境因子的关系进行拟合。

2 结果与分析

2.1 种类组成

调查期间共采集四大家鱼卵 56 粒, 以鲢数量最多, 占四大家鱼卵总数量的 69.64%, 其次是草鱼, 占 17.86%, 青鱼和鳙较少, 分别占 7.14%、5.36%。

共采集四大家鱼苗 74815 尾, 以鲢数量最多, 占总捕捞量的 75.73%, 其次是草鱼, 占 21.42%, 青鱼占 2.71%, 鳙数量最少, 仅为 0.14% (表 1)。

表 1 长江中游洪湖江段四大家鱼卵苗种类组成
Tab. 1 Species composition of eggs and larvae of the four Chinese major carp at Honghu section in the middle reaches of the Yangtze River

种类 species	鱼卵 eggs		鱼苗 larvae	
	数量/粒 number	比例/% ratio	数量/尾 number	比例/% ratio
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	39	69.64	56654	75.73
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	10	17.86	16028	21.42
青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	4	7.14	2027	2.71
鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	3	5.36	106	0.14
合计 total	56	100	74815	100

2.2 径流量及密度

2014 年—2016 年调查期间, 估算通过洪湖江

段四大家鱼卵径流量分别为 1.11×10^8 粒、 0.95×10^8 粒、 0.94×10^8 粒, 平均密度分别为 0.67 ind/1000 m³、0.65 ind/1000 m³、0.62 ind/1000 m³。2014 年四大家鱼卵高峰期分别出现在 5 月 25—26 日、6 月 23—24 日, 平均密度分别为 10.91 ind/1000 m³ 和 6.89 ind/1000 m³。2015 年高峰期分别出现在 5 月 12 日、5 月 16 日、5 月 28 日和 6 月 9 日, 平均密度分别为 7.62 ind/1000 m³、13.83 ind/1000 m³、6.44 ind/1000 m³、6.01 ind/1000 m³。2016 年高峰期分别出现在 5 月 21—23 日、6 月 12—13 日、6 月 28—29 日, 平均密度分别为 3.02 ind/1000 m³、2.45 ind/1000 m³、2.45 ind/1000 m³(图 2)。

估算通过洪湖江段四大家鱼苗径流量分别为 7.63×10^8 尾、 15.36×10^8 尾、 27.64×10^8 尾, 平均密度分别为 3.99 ind/1000 m³、7.57 ind/1000 m³、18.00 ind/1000 m³。2014 年四大家鱼苗汛分别出现在 5 月 29 日—6 月 1 日、6 月 8—9 日、6 月 23 日—7 月 1 日、7 月 8—13 日, 平均密度分别为 5.43 ind/1000 m³、15.28 ind/1000 m³、12.84 ind/1000 m³、10.93 ind/1000 m³。2015 年苗汛分别出现在 6 月 8—9 日、6 月 14—15 日、6 月 21—24 日、7 月 6 日, 平均密度分别为 41.42 ind/1000 m³、26.60 ind/1000 m³、37.46 ind/1000 m³ 和 24.49 ind/1000 m³。2016 年苗汛分别出现在 6 月 11 日、6 月 21—22 日、6 月 26—28 日和 7 月 2 日, 平均密度分别为 65.6 ind/1000 m³、88.90 ind/1000 m³、114.20 ind/1000 m³ 和 111.90 ind/1000 m³(图 3)。

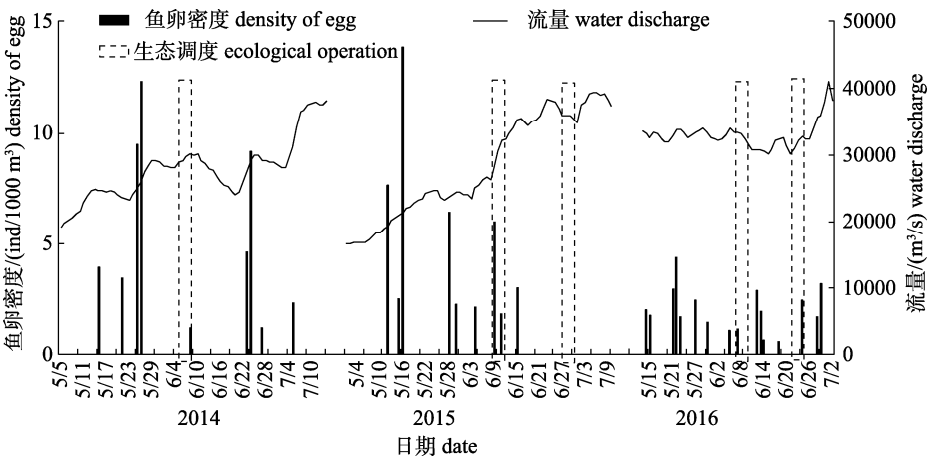


图 2 2014—2016 年长江洪湖段四大家鱼卵密度日变化
Fig. 2 Daily variation in density of the four major Chinese carp eggs at Honghu section in the Yangtze River from 2014 to 2016

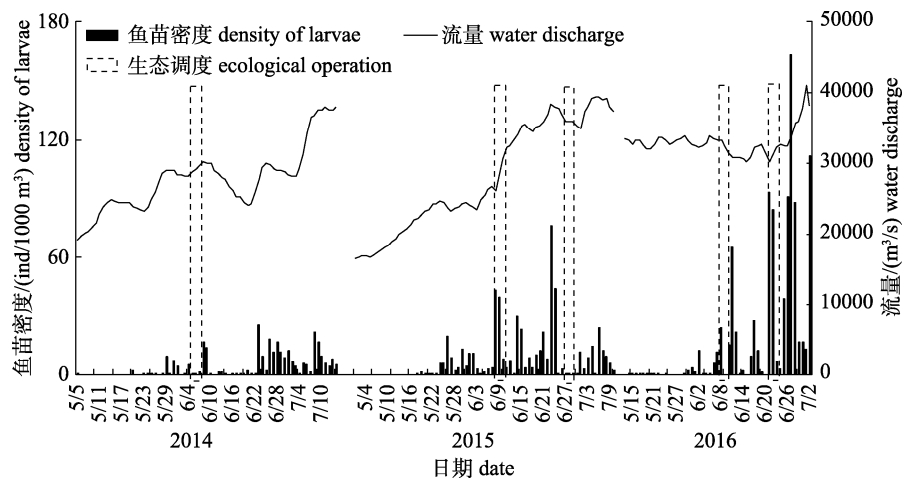


图 3 2014–2016 年长江洪湖段四大家鱼鱼苗密度日变化

Fig. 3 Daily variation in density of the four major Chinese carp larvae at Honghu section in the Yangtze River from 2014 to 2016

2.3 四大家鱼产卵场

调查期间采集到的四大家鱼卵发育期范围为囊胚中期至出膜前期。结合采集到四大家鱼卵时江水流速度推算, 2014 年采集的四大家鱼卵来自调查断面上游 12~135 km 江段, 2015 年来自调查断面上游 83~161 km 江段, 2016 年来自调查断面

上游 60~156 km 江段。洪湖江段四大家鱼产卵水域主要集中在洪湖、陆城、城陵矶和白螺 4 个江段, 其中洪湖江段在 3 年的调查中均监测到产卵活动, 产卵规模所占比例较大, 是四大家鱼产卵场的主要分布江段(表 2)。

表 2 2014–2016 年长江洪湖江段四大家鱼产卵场位置及产卵规模

Tab. 2 The locations and amount of the spawning grounds of the major four Chinese carps at Honghu section in the Yangtze River from 2014 to 2016

年份 years	产卵场名称 name of spawning grounds	产卵场位置 sites of spawning grounds	规模($\times 10^8$ ind) number	比例/% ratio
2014	燕窝 Yanwo	燕窝-龙口 Yanwo-Longkou	0.2	6.25
	洪湖 Honghu	赤壁-南门洲 Chibi-Nanmenzhou	0.7	21.88
	陆城 Lucheng	陆城-永济 Lucheng-Yongji	0.3	9.38
	城陵矶 Chenglingji	城陵矶-大湾 Chenglingji-Dawan	0.1	3.13
2015	洪湖 Honghu	南门洲-洪湖 Nanmenzhou-Honghu	0.5	15.63
	陆城 Lucheng	陆城 Lucheng	0.1	3.13
	城陵矶 Chenglingji	城陵矶-大湾 Chenglingji-Dawan	0.3	9.38
2016	白螺 Bailuo	白螺 Bailuo	0.2	6.25
	洪湖 Honghu	南门洲-陆溪 Nanmenzhou-Luxi	0.8	25.00
合计 total			3.2	100

2.4 生态调度与四大家鱼繁殖水文需求

2014 年 6 月 4—6 日, 三峡水库针对四大家鱼繁殖开展的一次生态调度期间, 洪湖江段出现一次较弱的洪峰, 持续涨水 4 d, 起始流量和水温分别为 28200 m³/s、23.55 ℃, 水位日上涨率和流量日上涨率分别为 0.05 m/d、420 m³/(s·d); 生态调

度期间四大家鱼卵苗资源量占调查期间总量的 6.06%。2015 年 6 月 7—10 日和 6 月 25 日—28 日开展两次生态调度, 洪湖江段仅在第一次生态调度期间出现一次洪峰, 持续涨水 8 d, 起始流量和水温分别为 26200 m³/s、23.05 ℃, 水位日上涨率和流量日上涨率分别为 0.21 m/d、1044 m³/(s·d);

生态调度期间四大家鱼卵苗资源量占调查期间总量的 21.15%。2016 年 6 月 8—12 日和 6 月 20—23 日开展两次生态调度, 洪湖江段仅在第二次生态调度期间出现一次较弱的洪峰, 持续涨水 3 d, 起始流量和水温分别为 30200 m³/s、28.60 ℃, 水位日上涨率和流量日上涨率分别为 0.08 m/d、650 m³/(s·d); 生态调度期间四大家鱼卵苗资源量占调查期间总量的 9.06%。

调查期间洪湖江段长江流量与水位变化一致, 随时间呈逐渐增加趋势; 透明度随时间呈波动下降趋势; 水温随时间呈上升趋势, 调查初期水温

就达到 18 ℃ 以上, 产卵高峰期水温范围为 20.5~25.5 ℃ (图 4)。

2.5 四大家鱼卵苗密度与环境因子的关系

对四大家鱼卵苗密度与环境因子的相关性分析表明, 四大家鱼苗密度与流量、水温和水位呈极显著正相关($P<0.01$), 与透明度无显著相关性($P>0.05$)。四大家鱼卵密度与流量、水温、水位和透明度相关性不显著($P>0.05$)(表 3)。

采用 GAM 模型分析四大家鱼苗密度与显著相关环境因子之间的关系。在构建 GAM 模型之前, 使用相关性分析筛选影响因子, 具有显著相

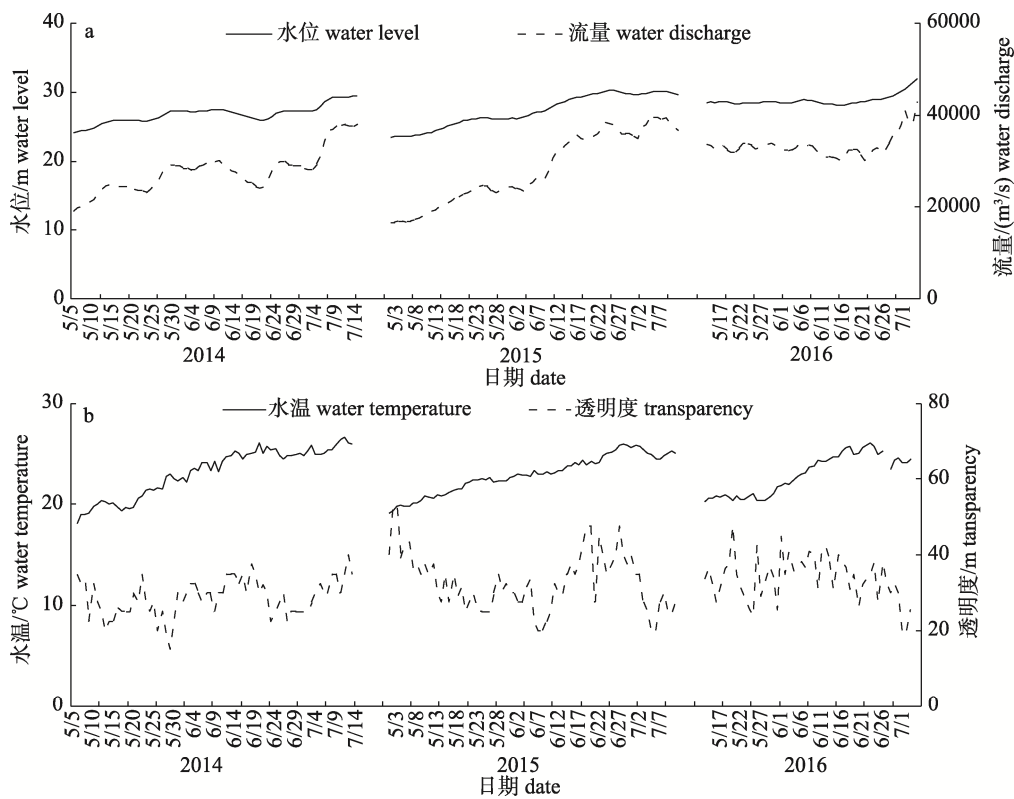


图 4 2014—2016 年洪湖江段环境因子的日变化

Fig. 4 The daily variation of environmental factors at Honghu section in 2014 to 2016

表 3 四大家鱼卵苗密度与环境因子间的相关关系

Tab. 3 Correlation analysis of the densities of the major four Chinese carps egg and larvae with environmental factors									
项目 items		流量/(m ³ /s) discharge		水温/℃ water temperature		水位/m water level		透明度/cm transparency	
		R	P	R	P	R	P	R	P
鱼卵密度	density of eggs	-0.113	0.116	-0.107	0.141	-0.120	0.094	-0.115	0.113
鱼苗密度	density of larvae	0.260**	<0.01	0.322**	<0.01	0.313**	<0.01	-0.026	0.720

注: **表示密度与环境因子极显著相关($P<0.01$)

Note: ** indicates significant correlation between density and environmental factors ($P<0.01$)

关性的两个因子保留一个^[16]。本研究最终选择流量和水温作为解释变量, 四大家鱼苗密度最为响应变量进行 GAM 模型构建。GAM 模型的表达式为:

GAM: $Y = \alpha + \sum_{j=1}^{\infty} f_i(x_j) + \varepsilon$

式中, Y 为四大家鱼苗密度; α 为适合函数的截距; ε 为随机误差项; x_j 为解释变量; $f_i(x_j)$ 为各环境变量 x_j 的任意单变量函数, 通过样条平滑函数来估计。将筛选出的环境因子代入 GAM 模型, 进一步筛选出影响四大家鱼苗密度的主要环境因子。

根据 AIC 最小原则得到最优 GAM 模型, 模型最终表达式为:

$\text{Log}(Y+1) = \alpha + s(\text{WT}) + s(\text{WD}) + \varepsilon$

式中, Y 为四大家鱼苗密度, α 为截距, $s(\text{WT})$ 为水温效应, $s(\text{WD})$ 为流量效应, ε 是服从正态分布的随机误差项。

GAM 模型偏差分析显示, 所选建模因子的累计偏差解释率为 21.0%, 流量和水温对四大家鱼苗密度均具有显著影响 ($P < 0.05$), 其中水温对四大家鱼苗密度影响更为显著 (表 4)。

流量、水温对四大家鱼苗密度分布的影响如图 5 显示。水温范围为 18.1~24 ℃ 时, 四大家鱼苗密度随着水温的增加而增加, 当水温大于 25 ℃ 时, 四大家鱼苗密度随着水温的增加而呈现略微下降趋势 (图 5a); 流量与四大家鱼苗密度呈现显著的正线性关系, 即随着流量的增加, 四大家鱼苗密度呈现增加的趋势 (图 5b)。

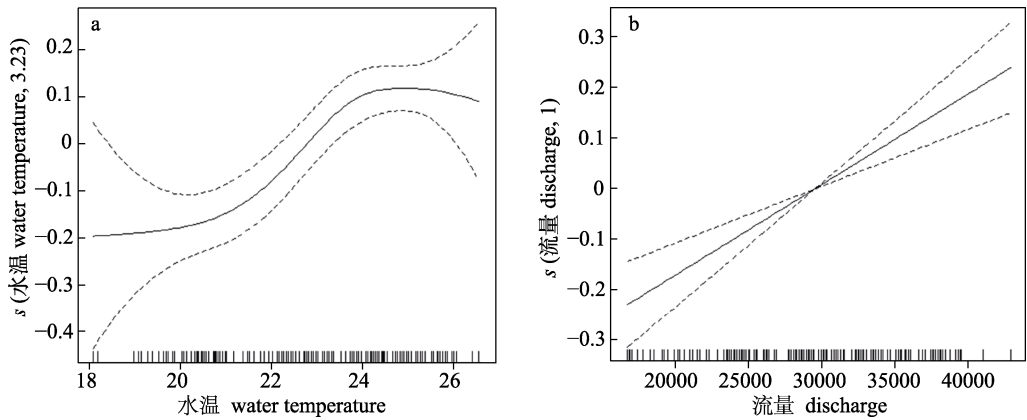


图 5 环境因子对四大家鱼苗密度的影响
Fig. 5 Effects of environmental factors on densities of the major four Chinese carps larvae from the GAM analysis

表 4 GAM 模型拟合结果分析
Tab. 4 Analysis of deviance for GAM

环境因子 factor	累计偏差 解释率/% cumulative of deviance explained	偏差解释 率/% deviance explanation	AIC	P 值 P-value
水温 water temperature	18.3	18.3	51.62	0.0041**
流量 discharge	20.5	2.2	48.36	0.0460*

注: *表示 0.05 水平上显著相关 ($P < 0.05$).
Note: * indicates significant correlation at 0.05 level ($P < 0.05$).

洪湖江段四大家鱼卵一般出现在水位上涨、流量增加期间, 四大家鱼鱼卵出现时水位日上涨率、流量日上涨率和水温分别为 0.14~0.24 m/d、138~1417 m³/(s·d) 和 20.55~25.55 ℃ (表 5)。

3 讨论

3.1 大坝对繁殖时间和规模的影响

大坝建设和运行改变了坝下江段的水文流态、水温节律, 影响鱼类的繁殖、摄食、生长和存活, 是造成坝下江段鱼类资源下降的重要因素^[7,17]; 随着离坝的增加, 大坝对鱼类资源的影响逐渐减弱^[7,18-19]。三峡水库低温水下泄降低了坝下江段水温, 导致长江中游宜昌、监利江段四大家鱼首次产卵时间从 4 月下旬推迟至 5 月中下旬^[5,15,20]。但距离大坝较远的黄石江段四大家鱼产卵时间没有受到明显影响^[8]。本研究中, 洪湖江段的四大家鱼卵最早出现在 5 月 12 日 (2015 年), 说明三峡大坝对洪湖江段四大家鱼的繁殖日期有一定影响, 但影响程度相对宜昌、监利江段较小。

表 5 2014–2016 年洪湖江段四大家鱼卵量与水温、径流量的关系
Tab. 5 Relation of the amount of the major four Chinese carp eggs and temperature and water discharge at Honghu section from 2014 to 2016

年份 year	涨水日期 dates of water level rising	水位日上涨率/(m/d) daily increasing rate of water level	流量日上涨率/[m ³ /(s·d)] daily increasing rate of discharge	产卵日期 spawning dates	水温/℃ temperature	卵密度/ (ind/1000 m ³) density of eggs
2014	5 月 5 日–14 日	0.17	580	—	—	—
	5 月 23 日–29 日	0.20	843	5 月 25 日–26 日	21.4–21.65	10.91
	6 月 20 日–26 日	0.19	829	6 月 23 日–24 日	25.4–25.55	6.89
	7 月 4 日–11 日	0.22	1088	7 月 5 日	24.95	2.35
2015	5 月 6 日–24 日	0.14	411	5 月 12 日	20.55	7.62
				5 月 15 日–16 日	20.95–21.2	8.18
	6 月 3 日–16 日	0.20	138	6 月 4 日	22.85	2.20
				6 月 9 日	23.25	6.01
				6 月 11 日	23.15	1.89
				6 月 15 日	23.85	3.01
2016	6 月 26 日–7 月 1 日	0.24	1417	6 月 28 日–29 日	23.4–24.35	2.45

综上可知，三峡水库低温水下泄对四大家鱼繁殖时间的影响范围应为坝下至武汉以上江段，随着离坝距离的增加、洞庭湖水系和汉江的汇入，对武汉以下江段繁殖时间的影响不明显。

洪湖江段四大家鱼苗在 1991—1992 年的年均径流量为 20.43 亿尾^[21]。三峡水库蓄水后，坝下江段水文环境发生了较大变化，宜昌^[11,22-23]、沙市^[12-13]和监利断面^[24]四大家鱼的资源量均出现不同程度的下降。本次调查表明，洪湖江段四大家鱼年均产卵规模为 1.00 亿粒，鱼苗年均径流量为 16.88 亿尾。相比 20 世纪 90 年代，资源量有一定下降。20 世纪 80 年代对产卵场的调查显示，四大家鱼产卵场在该水域主要分布在南门洲江段、洪湖江段和陆溪江段^[15,25]，与本研究相比，产卵场的位置及范围未发生明显变化，表明三峡大坝运行对洪湖江段四大家鱼的资源量有一定影响，但对该水域产卵场的分布范围没有明显影响。

3.2 繁殖活动与环境因子的关系

水温是决定水生动物繁殖活动能否发生，繁殖季节长短、繁殖是否成功的重要的环境因子^[17,26]。长江流域四大家鱼产卵的适宜水温范围为 18~24 ℃^[15]，本研究中四大家鱼卵主要出现在水温为 20~25 ℃之间。GAM 模拟结果也显示，当水温大于 25 ℃时，四大家鱼苗密度呈现缓慢下降的趋势。表明水温在 20~25 ℃时更适宜四大家鱼产

卵，这与黎明政等^[27]的研究结论相似。水温条件达到四大家鱼的繁殖需求之后，流量及水位日变化率等是鱼类产卵的关键影响因素^[6,17]。本研究中，洪湖江段四大家鱼卵主要出现在 6 月初至 7 月初，对应的水位日上涨率和流量日上涨率范围分别为 0.14~0.24 m/d、138~1417 m³/(s·d)，这与黄石江段四大家鱼产卵条件基本一致^[8]，但水位日上涨率和流量日上涨率数值低于宜昌^[11]和沙市^[12]江段的研究结果，这也是洪湖和黄石江段四大家鱼产卵规模低于宜昌和沙市江段的重要原因之一。

3.3 生态调度对四大家鱼繁殖的作用

大型水电工程的运行会减弱坝下江段的洪峰，影响四大家鱼等鱼类的自然繁殖活动^[28-29]。已有研究表明在鱼类繁殖季节，模拟自然河流水文条件，营造人工洪峰可以促进鱼类的自然繁殖活动^[12,14]。为降低三峡水库运行对鱼类繁殖造成的影响，2011 年以来，每年鱼类的繁殖季节，三峡水库都进行了针对四大家鱼自然繁殖的实验性生态调度^[12,30]。本研究表明，2014—2016 年的 5 次生态调度期间，有 3 次在洪湖江段形成了洪峰过程，出现了一定规模的四大家鱼产卵活动，然而有 2 次未在洪湖江段形成洪峰，且生态调度期间卵苗规模占总规模比例范围仅在 6.06%~21.15%之间，说明生态调度对洪湖江段四大家鱼繁殖活动有一定的促进效果，但生态调度的促进效果明

显弱于距大坝较近的宜都^[11]、沙市等江段^[12]。生态调度期间, 洪湖江段水温处于四大家鱼繁殖适宜温度范围内, 温度并不是影响期繁殖的限制因子。已有研究表明, 宜昌江段流量日上涨率达到 $2000 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ 以上, 沙市江段水位和流量日上涨率分别达到 0.54 m 、 $2200 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ 以上, 更适宜四大家鱼的繁殖活动^[11-12]。洪湖江段水位和流量日上涨率最大的一次生态调度效果最好, 说明较低的水位和流量日上涨率限制了洪湖江段四大家鱼的繁殖活动。

3.4 建议

长江洪湖江段四大家鱼卵苗资源丰富, 加之毗邻传统的鱼类索饵场洞庭湖水域, 是四大家鱼关键的洄游通道、重要的育幼和产卵场所, 为保护其卵苗资源和栖息生境, 建议: (1) 对产卵场江段进行勘界定标, 加强宣传, 规划涉水工程时, 尽量避开产卵场江段, 无法避开时需采取必要措施以降低工程建设的影响; (2) 严格执行长江十年禁渔政策, 保护幼鱼及亲本不被捕捞, 以期鱼类资源能实现修复性增长。

参考文献:

- [1] Chambers R C, Trippel E A. Early life history and recruitment in fish populations[M]. London: Chapman & Hall, 2012: 63-102.
- [2] 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.]
- [3] Corrêa R N, Hermes-Silva S, Reynalte-Tataje D, et al. Distribution and abundance of fish eggs and larvae in three tributaries of the Upper Uruguay River (Brazil)[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2011, 91(1): 51-61.
- [4] Wang K, Liu K, Xu D P, et al. Advances in research on early life resources of fish[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2013, 35(5): 1098-1107. [汪珂, 刘凯, 徐东坡, 等. 鱼类早期资源研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(5): 1098-1107.]
- [5] Meng Q, Gao L, Wang D Q, et al. The early-stage fish resources and effects of ecological regulation on fish reproduction at the Jianli section of the Yangtze River[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(7): 824-833. [孟秋, 高雷, 汪登强, 等. 长江中游监利江段鱼类早期资源及生态调度对鱼类繁殖的影响[J]. 中国水产科学, 2020, 27(7): 824-833.]
- [6] Duan X B, Chen D Q, Li Z H, et al. Current status of spawning grounds of fishes with pelagic eggs in the middle reaches of the Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, 15(4): 523-532. [段辛斌, 陈大庆, 李志华, 等. 三峡水库蓄水后长江中游产漂流性卵鱼类产卵场现状[J]. 中国水产科学, 2008, 15(4): 523-532.]
- [7] 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.
- [8] Gao L, Hu X K, Yang H, et al. Resources of the four major Chinese carps of early life history stages at Huangshi section in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 6(43): 1498-1506. [高雷, 胡兴坤, 杨浩, 等. 长江中游黄石江段四大家鱼早期资源现状[J]. 水产学报, 2019, 6(43): 1498-1506.]
- [9] Liu M D, Gao L, Tian H W, et al. Status of fishes at the early life history stage in the Yichang section in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(1): 147-158. [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): 147-158.]
- [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(1): 13-22.
- [11] 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.]
- [12] 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.]
- [13] Xu W, Jin Y, Chen G Y, et al. Changes of natural reproduction of fish producing drifting eggs in downstream Shashi section, middle reaches of Yangtze River during the ten-year (2011-2020) ecological operation of Three Gorges

- Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(5): 1729-1740. [徐薇, 金瑶, 陈桂亚, 等. 三峡水库十年生态调度(2011—2020 年)期间下游沙市江段产漂流性卵鱼类自然繁殖变化[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(5): 1729-1740.]
- [14] 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.]
- [15] Yi B L, Yu Z T, Liang Z Y, et al. Gezhouba water control project and four famous fishes in Yangtze River[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1988. [易伯鲁, 余志堂, 梁秩桑, 等. 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.]
- [16] Pu Y, Yang H, Tian H W, et al. Spatial distribution characteristics and identification of key environmental factors for juvenile Silver Carp in the upper reaches of Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(6): 1220-1228. [蒲艳, 杨浩, 田辉伍, 等. 长江上游鲢幼鱼空间分布特征及其关键环境因子判别[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(6): 1220-1228.]
- [17] Li M Z, Gao X, Yang S R, et al. Effects of environmental factors on natural reproduction of the four major Chinese carps in the Yangtze River, China[J]. *Zoological Science*, 2013, 30(4): 296-303.
- [18] Wolf A E, Willis D W, Power G J. Larval fish community in the Missouri River below Garrison Dam, North Dakota[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 1996, 11(1): 11-19.
- [19] Helfman G S. Fish conservation: A guide to understanding and restoring global aquatic biodiversity and fishery resources[M]. Washington: Island Press, 2007.
- [20] Peng Q D, Liao W G, Li C, et al. Impacts of four major Chinese carps' natural reproduction in the middle reaches of Changjiang River by Three Gorges Project since the impoundment[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(S2): 228-232. [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.]
- [21] Chang J B, Deng Z L, Zhang G H, et al. "Filling water and accommodating fry" in Honghu Lake: Possibility and ecological benefits[A]//Chen Y X, Xu Y W. Aquatic organisms and resource exploitation in Honghu Lake[M]. Beijing: Science Press, 1995: 220-231. [常剑波, 邓中舜, 张国华, 等. 洪湖灌江纳苗的可行性及效益评价[A]//陈宜瑜, 许蕴珩. 洪湖的水生生物及其资源开发[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 220-231.]
- [22] Chen C, Li M Z, Gao X, et al. The status of the early-stage fish resources and hydrologic influencing conditions in the Yichang section in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(5): 1055-1063. [陈诚, 黎明政, 高欣, 等. 长江中游宜昌江段鱼类早期资源现状及水文影响条件[J]. *水生生物学报*, 2020, 44(5): 1055-1063.]
- [23] Chang T, Duan Z H, Li M Z. Dynamic of fish eggs assemblage in the middle Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(1): 137-146. [常涛, 段中华, 黎明政. 三峡水库蓄水后长江中游宜昌江段鱼类早期资源群聚动态[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(1): 137-146.]
- [24] Li S J, Chen D Q, Liu S P, et al. Spatial and temporal distribution patterns of eggs, fish larvae and juveniles at Jianli cross-section in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Freshwater Fisheries*, 2011, 41(2): 18-24, 9. [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, 9.]
- [25] Yu Z T, Zhou C S, Deng Z L, et al. The spawning grounds of the "Four Famous Chinese Carps" in the Changjiang River after dammed by the key water control project at Gezhouba[A]//Chinese Ichthyological Society. Transactions of the Chinese ichthyological society (NO.4)[M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-11. [余志堂, 周春生, 邓中舜, 等. 葛洲坝水利枢纽截流后的长江家鱼产卵场[A]//中国鱼类学会. 鱼类学论文集(第四辑)[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1-11.]
- [26] Orton J H. Sea-temperature, breeding and distribution in marine animals[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1920, 12(2): 339-366.
- [27] Li M Z, Jiang W, Gao X, et al. Status quo of early life history stages at Wuxue cross-section of the Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(6): 1211-1217. [黎明政, 姜伟, 高欣, 等. 长江武穴江段鱼类早期资源现状[J]. *水生生物学报*, 2010, 34(6): 1211-1217.]
- [28] Wang J N. Studies on multi-objective optimal operation of Three Gorges Reservoir based on the coupling relationships between hydrological processes and ecological processes[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011. [王俊娜. 基于水文过程与生态过程耦合关系的三峡水库多目标优化调度研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011.]
- [29] 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.]

- [30] Chen J, Li Q Q. Assessment of eco-operation effect of Three Gorges Reservoir during trial run period[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(4): 1-6. [陈进, 李清清. 三峡水库实验性运行期生态调度效果评价[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(4): 1-6.]

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

GAO Lei¹, GUO Guozhong^{1,2,3}, YANG Hao¹, CHEN Daqing¹, WANG Ke¹, DUAN Xinbin¹

1. National Agricultural Science Observing and Experimental Station of Chongqing; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;
2. College of Animal Sciences, Technology Southwest University, Chongqing 400715, China;
3. Centre Testing International Group Co., LTD, Shenzhen 518000, China

Abstract: To estimate the early stage fish resources of four major Chinese carp species and the effects of ecological regulation on fish reproduction, we collected samples of fish eggs and larvae from the Honghu section of the Yangtze River from May 2014 to July 2016. A total of 56 fish eggs and 74815 larvae were collected. *Hypophthalmichthys molitrix* accounted for 69.64% and 75.73% of the total numbers, respectively. From 2014 to 2016, we estimated there were 1.11×10^8 , 0.95×10^8 , and 0.94×10^8 ind eggs of the four major Chinese carps drifted through the Honghu section, respectively; meanwhile, there were 7.63×10^8 , 15.36×10^8 , and 27.64×10^8 ind larvae, respectively. Larval density was significantly and positively correlated with water flow, water temperature, and water level ($P < 0.01$). The GAM model indicated that the density of the larvae showed an upward trend, which was followed by a slight decrease within the water temperature range of 18.1–26.6 °C; overall, it was significantly positively linearly correlated with flow. Compared to the previous century, the resource quantity of the four major Chinese carp in the Honghu reaches of the Yangtze River decreased; however, the location of their spawning grounds did not change significantly. Ecological regulation promoted the reproductive activities of the four major carp species in the Honghu reaches; however, the effect was weaker than that in the Yidu and Jingzhou reaches, which are closer to the dam. It is recommended that important spawning grounds be demarcated and labeled and that publicity and protection be strengthened.

Key words: four major Chinese carp; spawning grounds; early stage fish resources; ecological regulation; middle reaches of the Yangtze River

Corresponding author: DUAN Xinbin. E-mail: duan@yfi.ac.cn