

2016—2018年长江下游安庆江段四大家鱼仔稚鱼资源调查分析*

丁隆强¹, 何晓辉¹, 李新丰², 方弟安^{1,2}, 徐东坡^{1,2**}

(1: 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306)

(2: 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业农村部长江下游渔业资源环境科学观测实验站, 无锡 214081)

摘要: 为探究长江安庆江段四大家鱼仔稚鱼资源现状及其丰度变化与水文因子之间的关系, 于2016—2018年4—8月对该江段进行早期资源调查。调查期间共采集到四大家鱼仔稚鱼3178尾, 其中以鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)为主, 分别占家鱼捕捞总数的67.97%和23.03%。估算2016—2018年通过安庆江段的四大家鱼仔稚鱼径流量分别为 21.70×10^8 、 14.62×10^8 、 12.05×10^8 尾, 呈现出逐年减少的趋势。家鱼仔稚鱼丰度自4月中旬呈波动性上升趋势, 在7月中上旬达到高峰期。Kruskal-Wallis检验表明采样断面空间分布存在显著性差异, 平均漂流密度为北岸($16.09 \text{ ind./}100 \text{ m}^3$) > 南岸($5.40 \text{ ind./}100 \text{ m}^3$) > 江心($3.43 \text{ ind./}100 \text{ m}^3$)。GAM模型结果显示, 对四大家鱼仔稚鱼丰度影响显著的水文因子为水温、透明度、水位日上涨率和径流量日上涨率, 各因子相对重要性依次为水位日上涨率 > 透明度 > 水温 > 径流量日上涨率。其丰度与透明度呈负相关, 与水温(24.0~27.3℃)、水位日上涨率和径流量日上涨率均呈正相关关系。本研究中GAM模型累积偏差解释率达到69.8%, 较高程度上揭示了水文条件对家鱼仔稚鱼资源丰度的影响, 为长江下游四大家鱼的苗汛预测及资源保护策略的制定提供科学依据。

关键词: 长江安庆江段; 四大家鱼; 仔稚鱼资源; 影响因子

The larvae and juvenile fish resources of the four major Chinese carps at Anqing section in the lower reaches of the Yangtze River from 2016 to 2018 *

DING Longqiang¹, HE Xiaohui¹, LI Xinfeng², FANG Di'an^{1,2} & XU Dongpo^{1,2**}

(1: National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P.R.China)

(2: Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in the Lower Reaches of the Changjiang River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Freshwater Fisheries Research Center, CAFS, Wuxi 214081, P.R.China)

Abstract: In order to explore the current situation of the larvae and juvenile fish resources of the four major Chinese carps in Anqing section of the Yangtze River and the relationship between abundance and hydrological factors, a total of 3178 larvae and juveniles were collected during the investigation from April to August of 2016–2018. Among which, *Hypophthalmichthys molitrix* and *Ctenopharyngodon idellus* formed the majority, accounting for 67.97% and 23.03% of the total larvae catches respectively. We estimated there were 21.70×10^8 , 14.62×10^8 and 12.05×10^8 individual larvae of the four major Chinese carps drifted through the Anqing section in three years, the results indicated a decreasing trend annually. The abundance of Chinese carps has been increased intermittently since mid-April, and peaked in mid-July. The Kruskal-Wallis test showed that, there were significant differences for larvae with the highest drift density in the north of river and the lowest in the middle of the river. According to the results of generalized additive model, the hydrological factors that have significant influence on the abundance of larvae are water temperature, transparency, daily increasing rate of water level and discharge. The orders of the contribution to abundance of larvae were in sequence of the daily increasing rate of water level, transparency, water temperature and the daily increasing rate of discharge. Among them, the abundance of larvae was negatively correlated with the transparency, and positively correlated with the water tem-

* 2019-09-09 收稿; 2019-12-30 收修改稿。

国家重点研发计划(2018YFD0900903)和长江下游鱼类早期资源种群补充机制研究项目(2017JBF04)联合资助。

** 通信作者; E-mail: xudp@ffrc.cn.

perature (24.0–27.3°C), daily increasing rate of water level and discharge. The accumulation of deviance explained by the optimized GAM to the abundance of larvae was 69.8%, which revealed the influence of hydrological conditions on the abundance of Chinese carps resources in early stage at a high degree. The results will provide a scientific basis for the prediction of seedling flood and protection strategy of the four major Chinese carps fisheries resource in the lower reaches of Yangtze River.

Keywords: Anqing section of the Yangtze River; four major Chinese carps; larvae and juvenile fish resources; impact factors

青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和鳙 (*Aristichthys nobilis*) 统称为四大家鱼, 是我国特有的经济鱼类, 其产量曾占我国淡水鱼总产量的 60%^[1]. 长江干流是四大家鱼主要的繁殖场所, 作为典型的产漂流性卵鱼类, 其繁殖行为及早期生长与长江生态水文条件相适应. 水利工程的建设改变了长江原有的生态环境, 使得现有的满足四大家鱼繁殖需求的江段减少, 同时受过度捕捞等因素干扰, 家鱼亲鱼群体破坏较为严重, 致使长江流域家鱼数量逐渐减少^[2]. 近年来长江中游监利江段和汉江丹江口水库上游早期资源调查结果均显示四大家鱼资源量显著下降, 2007 年监利江段四大家鱼卵苗径流量仅为 1981 年的 1.34%, 2014 年丹江口水库上游家鱼卵苗径流量下降到 1977 年的 0.25%^[3-4]. 长江干流四大家鱼产卵场多集中在中上游江段, 历史调查资料表明下游仅在湖口和彭泽江段发现四大家鱼产卵场^[5]. 任鹏的研究表明长江下游由于江湖连通效应及支流的汇入, 距离大坝越远的江段其水文形势越趋于自然状态, 使得四大家鱼仔鱼资源量自中游向下游安庆江段有增多的趋势^[6].

安庆江段沿岸有众多附属湖泊, 分布有长江江豚自然生态保护区、长江刀鲚国家级水产种质资源保护区等重要生态功能区, 是重要的渔业资源水域^[7]. 位于上游的湖口江段与鄱阳湖形成特殊的江湖复合型生态系统, 对四大家鱼的繁殖及育幼提供良好的生境, 使得距离鄱阳湖较近的安庆江段家鱼仔鱼丰度高于南京和靖江江段^[8]. 安庆市是作为长江三角洲重要的水运枢纽和化工城市, 频繁的航运、化工污染和过度捕捞等因素导致安庆江段渔业资源日益衰退. 2015 年春季安庆江段成鱼调查中四大家鱼仅有鲢和草鱼为常见种, 且鲢个体呈现小型化现象, 四大家鱼资源明显衰退^[9]. 本研究以长江下游安庆段的家鱼仔稚鱼 (初孵仔鱼至鳞片形成期^[10]) 为研究对象, 在繁殖高峰期对安庆江段进行持续监测, 了解安庆江段四大家鱼仔稚鱼资源量现状, 运用 GAM 模型解析该江段家鱼仔稚鱼丰度变化与水文环境因子之间的关系, 为评估长江下游四大家鱼资源补充量、苗汛预测和保护提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 采样时间和地点

通过查阅长江鱼类早期资源的历史文献^[10]及现场勘察, 2016—2018 年 4—8 月 (2016 年: 4 月 17 日—8 月 15 日; 2017 年: 4—8 月逐月采样一周; 2018 年: 4 月 22 日—8 月 10 日, 共计 239 天) 于长江下游安庆段开展早期资源调查. 采样断面设置于长江干流与皖河口交汇处上游 50 m 处 (图 1), 断面设置北岸 (30°29'5"N, 116°59'24"E)、南岸 (30°28'48"N, 116°59'59"E) 和江心 (30°28'56"N, 116°59'40"E) 3 个采样点, 南北两岸采样点距离岸边 10 m 左右.

1.2 调查方法和样品的保存鉴定

四大家鱼早期资源采集使用大型圆锥状浮游生物网进行主动采集. 网具为直径 0.8 m、网深 2.5 m、网目 40 目、孔径 0.25 mm 的圆锥浮游生物网, 网后连接圆柱形鱼苗收集装置, 网口固定流量计用于测量网口过水量, 采样时使用机动船对江水上层进行拖拽. 调查期间, 每日 8:00—11:00 之间对各采样点进行定量采集一次, 根据采集到的鱼类早期资源总捕捞数确定每次采集时间 (3~10 min), 采样同时记录每次拖网持续时间. 使用 Dretec 电子水温计测量水温, 采用萨氏透明度盘测量透明度, 使用德国 HYDRO-BIOS 公司数字网口流量计记录流量计转数来换算网口过水流量. 采样断面的水位和江水径流量数据来分别自安徽省水文信息网的安庆水文站和大通水文站 (由于采样断面和铜陵市大通镇之间无大型支流汇入长江干流, 故可以反映该断面的江水径流量情况).

主动网具采集的家鱼仔稚鱼样品由冰水保存, 样品鉴定完成后使用 75% 中性酒精保存. 仔稚鱼种类鉴定按照曹文宣等^[10]编写的《长江鱼类早期资源》, 通过形态学方法在奥林巴斯解剖镜 SZX16 进行种类鉴定,

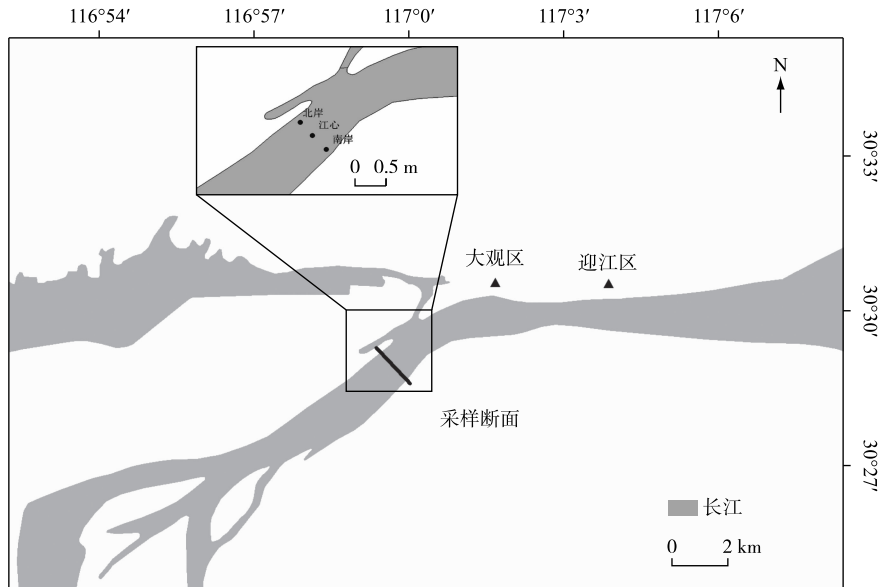


图 1 安庆江段鱼类早期资源采样点设置

Fig.1 The location of sampling sites in Anqing section on fisheries of early life history stages

并分类计数. 对于形态破损难以鉴定确认的物种使用分子方法鉴定, 具体步骤是: 提取样本的基因组 DNA, 基于 *CO I* (Cytochrome C oxidase Subunit I, 线粒体细胞色素 C 氧化酶亚基 I) 基因条形码, 采用 PCR 扩增目的条带并测序, 将所测结果与已经用成鱼建立的长江鱼类条形码数据库进行比对得到种类鉴定的结果^[11].

1.3 数据处理与分析

1) 仔稚鱼密度计算方法参考易伯鲁等^[12]的计算方法, 依据所采集四大家鱼仔稚鱼的数量、采集时间、流量计的始末差值和主动网口面积按下列公式处理:

$$q_i = 0.3C_i \cdot a \tag{1}$$

$$D_i = N_i / q_i t \tag{2}$$

式中, q_i 为第 i 次采集网具网口的过水流量 (m^3/s), C_i 为第 i 次采集流量计的流量差, a 为主动网具网口面积 (m^2), 0.3 为流量计的常数, t 为每次采集仔稚鱼时间 (s), D_i 为第 i 次采集仔稚鱼的密度 ($ind./m^3$), N_i 为第 i 次采集仔稚鱼数量 ($ind.$).

2) 采样断面鱼苗平均密度与定点鱼苗密度相比系数:

$$C = \sum \bar{D} / D_i \tag{3}$$

式中, C 为鱼苗平均密度相比系数, \bar{D} 为断面各采样点鱼苗的平均密度 ($ind./m^3$).

3) 采集期间卵苗径流量:

$$M_i = D_i \cdot Q_i \cdot C \tag{4}$$

式中, M_i 为第 i 次采集时段内通过该江段断面的鱼苗数 ($ind.$), Q_i 为第 i 次采集时的断面流量 (m^3/s).

非采集期间鱼苗径流量:

$$M_{i,j+1} = (M_i/t_i + M_{i+1}/t_{i+1})t_{i,j+1}/2 \tag{5}$$

用相邻两次采集的径流量及其间隔时间进行插补计算. 式中: $M_{i,i+1}$ 为第 $i, i+1$ 采集时间间隔内的鱼苗径流量 ($ind.$), $t_{i,i+1}$ 为第 $i, i+1$ 次采集时间间隔 (s).

采集江段的鱼苗总径流量为:

$$M = \sum M_i + \sum M_{i,j+1} \tag{6}$$

依据刘建康对长江下游四大家鱼鱼苗垂直分布的研究结果,江水上层家鱼苗平均捕获率占总捕获率的43.5%^[13],估算本研究中繁殖期内通过安庆江段的四大家鱼仔稚鱼总径流量。

4)广义可加模型(generalized additive models, GAM)是一种非参数化或半参数化的回归分析方法,能很好地模拟应变量和一个或多个预测变量之间的关系^[14]。本研究运用GAM模型分析水文因子对家鱼仔稚鱼丰度变化的因子进行分析,其表达式为:

$$g(\rho) = \alpha + \sum_{j=1}^n f_j(x_j) + \varepsilon \quad (7)$$

式中, $g(\rho)$ 为关联函数; ρ 为仔稚鱼丰度(ind./m³); α 为适合函数中的截距; x_j 为解释变量,包括水温、透明度、水位上涨率和径流量上涨率; $f_j(x_j)$ 为解释变量关系的非参数函数; ε 为误差项,与解释变量 x_j 无关, $E(\varepsilon) = 0, \varepsilon = \delta^2$ 模型采用样条平滑法,对数据图进行平滑处理。

数据处理使用Excel 2016软件,使用Origin 2018软件制作直方图等分析图。数据分析使用SPSS 19.0软件,差异性分析使用单因素方差分析,相关性分析使用Pearson相关性分析。GAM模型的构建及其检验在R软件(R 3.5.3)的mgcv包内完成。

2 结果与分析

2.1 安庆江段四大家鱼仔稚鱼种类组成及径流量

2016—2018年共调查239天,采集家鱼仔稚鱼3178尾,其中以鲢数量最多,共2160尾,占家鱼仔稚鱼总捕捞数量的67.97%;其次是草鱼,共计732尾占23.03%;鳊279尾占8.78%;青鱼数量最少,仅采集到7尾,所占比例为0.22%。2016—2018年四大家鱼仔稚鱼变化规律呈现出鲢所占比例逐年上升,草鱼比例不断下降,鳊所占比例较为稳定(表1)。根据采集到的四大家鱼仔稚鱼数量及断面流量估算,2016—2018年4—8月份通过安庆江段四大家鱼仔稚鱼径流量依次为21.70×10⁸、14.62×10⁸、12.05×10⁸尾,占各年份仔稚鱼总径流量的2.43%、0.99%和0.65%。

表1 安庆江段四大家鱼仔稚鱼种类组成

Tab.1 Species composition of larvae and juveniles of the four major Chinese carps in Anqing section

年份	青鱼占比/ %	草鱼占比/ %	鲢占比/ %	鳊占比/ %	家鱼仔稚鱼径流量/ (×10 ⁸ 尾)
2016	0.18	27.19	64.76	7.87	21.70
2017	0.51	20.51	67.18	11.79	14.62
2018	0.26	11.99	77.17	10.59	12.05

2.2 四大家鱼仔稚鱼丰度的时空分布特征

2016年安庆江段家鱼仔稚鱼日平均丰度为8.57±9.03 ind./100 m³。仔稚鱼自4月中旬呈波动性上升趋势至7月中旬达到峰值,集中出现在5月下旬至7月中旬,共出现3次苗汛,分别为5月21日、6月15日、7月4日,对应的仔稚鱼密度为26.50、37.83、43.23 ind./100 m³。2017年家鱼日平均丰度为6.76±4.29 ind./100 m³,采集时间内最高丰度为13.77 ind./100 m³。对应日期为7月8日。2018年日平均丰度为7.49±12.52 ind./100 m³,仔稚鱼丰度随江段径流量变化呈现先升后降再上升的趋势,在5月27日和7月18日达到峰值,对应的密度分别为13.74和55.86 ind./100 m³(图2)。

对断面北岸、南岸和江心3个采样点的家鱼密度数据进行显著性分析,验证家鱼密度随断面横向分布的差异性。Kruskal-Wallis检验表明,断面3个采样点的家鱼仔稚鱼漂流密度均存在显著性差异(2016年: $P = 0.026 < 0.05, n = 57$;2017年: $P = 0.041 < 0.05, n = 5$;2018年: $P = 0.046 < 0.05, n = 49$)。2016—2018年断面家鱼密度横向分布均呈现出北岸>南岸>江心,三年内北岸平均漂流密度依次为14.14、17.83、16.30 ind./100 m³;南岸平均漂流密度依次为7.63、4.79、3.66 ind./100 m³;江心平均漂流密度依次为3.97、3.81、2.53 ind./100 m³。

2.3 四大家鱼仔稚鱼丰度与水文环境因子之间的关系

调查期间内,安庆江段水温变化范围为18.0~29.8℃,平均值为25.30±2.44℃;透明度为16~70 cm,平均

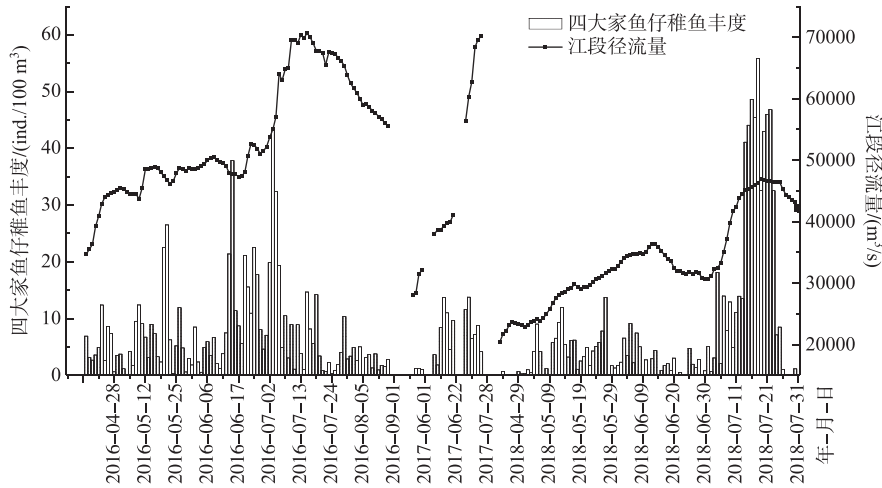


图2 安庆江段四大家鱼仔稚鱼丰度变化

Fig.2 Abundance change of larvae and juveniles of the four major Chinese carps in Anqing section

值为 46.78 ± 15.64 cm; 溶解氧浓度为 $6.17 \sim 8.07$ mg/L, 平均值为 7.24 ± 2.15 mg/L; pH $7.39 \sim 8.17$, 平均值为 7.80 ± 0.20 ; 江水径流量 $20400 \sim 70200$ m³/s, 日上涨率在 $100 \sim 7000$ m³/(s·d); 水位 $8.44 \sim 17.69$ m, 日上涨率在 $0.01 \sim 1.25$ m/d 之间. 通过对家鱼仔稚鱼丰度与水文环境因子进行的相关性分析发现, 家鱼日丰度变化与水温呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与透明度呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与江水径流量、水位均呈极显著正相关 ($P < 0.01$).

GAM 模型构建过程中逐步加入各个水文因子, 依据 AIC 准则来选择最优模型. 模型最终结果见表 2, 其总偏差解释率为 69.8%, 预测模型的校正决定系数 R -sq 为 $0.622 > 0.5$, 说明模型较高程度上揭示了水文因子对家鱼仔稚鱼丰度的影响.

应用正态 Q-Q 图和 Shapiro-wilk 检验验证模型残差的正态性, 诊断 GAM 模型. 正态 Q-Q 图表明 GAM 模型基本符合正态分布 (图 3). Shapiro-wilk 检验表明, 模型残差符合正态分布 ($w = 0.941, P = 0.070 > 0.05$).

表 2 安庆江段四大家鱼仔稚鱼 GAM 模型方差分析

Tab.2 Analysis of variance of GAM for the larvae and juveniles of the four major Chinese carps in Anqing section

因变量	环境因子	偏差解释率/%	R-sq	AIC	P
仔稚鱼	水温+透明度+水位日上涨率+径流量日上涨率	69.8			
	水温	7.82	0.059	1471.40	4.59×10^{-8} *
	透明度	13.78	0.191	1328.37	2.02×10^{-6} *
	水位日上涨率	47.5	0.620	676.88	0.00116*
	径流量日上涨率	0.07	0.622	539.28	0.043*

* 表示在 0.05 水平上显著相关.

GAM 模型结果显示, 根据偏差解释率, 各因子相对重要性依次为水位日上涨率 > 透明度 > 水温 > 径流量日上涨率. 水文因子与家鱼仔稚鱼丰度之间关系的分析结果图表明 (图 4), 当水温在 $19.0 \sim 27.3$ °C 时, 家鱼仔稚鱼大量出现, 其丰度随水温升高整体呈现上升趋势; 在超过 27.3 °C 后, 其丰度逐渐下降. 透明度范围主要集中在 $24 \sim 57$ cm 之间, 家鱼仔稚鱼密度与透明度呈现显著负相关性, 即江水透明度下降时家鱼仔稚鱼密度上升. 水位和径流量的日上涨率与家鱼仔稚鱼丰度均呈现极显著正相关性, 说明家鱼丰度随水位和径流量的日上涨率增大有所上升. 其中家鱼高峰期对应的水温、水位日上涨率和径流量日上涨率分别为 27.3 °C、

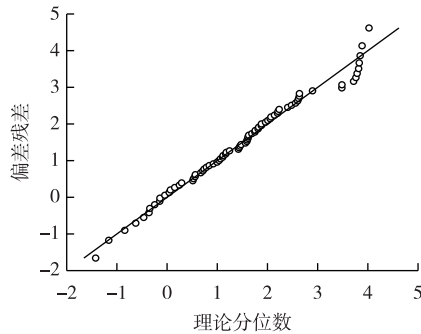


图3 四大家鱼仔稚鱼丰度的 GAM 模型 Q-Q 图

Fig.3 Normal Q-Q plot of GAM for abundance of larvae and juveniles of the four major Chinese carps

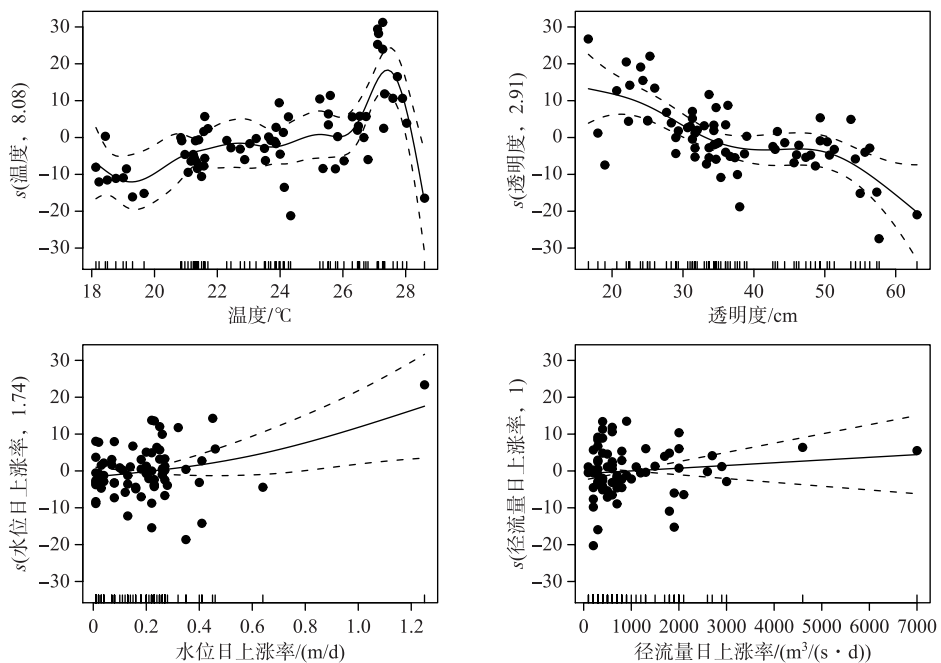


图4 四大家鱼仔稚鱼丰度与各因子之间关系的 GAM 分析

Fig.4 The relationship between abundance and factors of larval and juvenile of the four major Chinese carps and factors based on the generalized additive model

0.23 m/d 和 $900 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{d})$.

3 讨论

3.1 安庆江段四大家鱼仔稚鱼资源现状

三峡大坝运行以来,长江中上游四大家鱼卵苗种类组成出现以滤食浮游生物的鲢鱼苗数量迅速增加,草鱼所占比例不断下降,鳙和青鱼处于较低水平^[2,15],本研究结果与中上游相类似. 长江下游安庆江段2016—2018年四大家鱼组成中鲢以67.97%的比例占绝对优势,且所占比例有一定上升趋势;其次是草鱼,呈现出逐年下降的趋势;鳙和青鱼所占比例较低. 与2013年^[6]结果相比青鱼资源量占比大幅度下降,可能原因是由于长江下游悬浮质粒径较小,泥沙和有机质等营养物质在水流搬运过程中不易沉积,不利于大型底

栖动物的生存和建群^[16]。作为底栖生物食性的青鱼, 饵料的匮乏直接影响其生长及育幼过程中正常的摄食活动, 使得青鱼早期资源量得不到有效补充。长江干流中青鱼资源量的减少应引起重视。

由于沿江支流的汇入及水流作用, 距离大坝较远的江段其水文情势越接近自然状态, 大坝对鱼类资源的不利影响就会越小^[17]。2016年安庆江段四大家鱼仔稚鱼日平均密度为 $8.57 \text{ ind./}100 \text{ m}^3$, 显著高于同期中游黄石江段的卵苗日均密度^[18], 表明四大家鱼资源量自长江中游部分江段向下游安庆江段有增多的趋势。长江下游距离三峡大坝较远, 水文特征受影响较小, 同时鄱阳湖与长江的连通关系不仅有利于家鱼亲鱼出湖繁殖, 也有利于仔鱼入湖育幼, 鄱阳湖和长江形成的江湖复合生态系统可能是安庆江段家鱼资源量较大的原因。

近年来对长江流域早期资源的调查结果均呈现出四大家鱼资源量处于不断衰退的趋势。2014—2015年刘明典等对长江中游早期资源调查结果显示大坝下泄的不饱和水流改变了原有的水文环境, 使得宜昌江段四大家鱼产卵场规模呈减少趋势^[19]。受大量涉水工程和围湖造田的影响, 安庆江段和沿江湖泊的连通关系均发生变化, 导致江湖洄游性鱼类自然繁殖受到影响。本研究估算2016—2018年通过安庆江段的四大家鱼仔稚鱼径流量分别为 21.70×10^8 尾、 14.62×10^8 尾、 12.05×10^8 尾, 呈现出逐年下降的趋势。受江湖阻隔的影响, 安庆江段鱼类群落结构表现出洄游性鱼类减少的趋势^[20], 长江干流四大家鱼繁殖亲本数量的减少, 使得仔稚鱼径流量逐年下降。此外, 作为典型的产漂流性卵鱼类, 四大家鱼产卵规模同江水涨水过程密切相关^[21]。2018年江段径流量较往年相比上涨持续时间较短, 上涨幅度较低。涨水过程的缩减一定程度上影响四大家鱼的正常繁殖活动。

3.2 影响四大家鱼仔稚鱼时空分布差异的因素

鱼类早期资源的时间动态能直接反映鱼类繁殖时间的变化特征^[22]。安庆江段四大家鱼仔稚鱼集中出现在5—7月, 高峰期多发生在6月下旬和7月, 与长江中游四大家鱼繁殖时间大致相同。2016—2018年安庆江段四大家鱼苗高峰期丰度有所上升, 但其主汛期存在推迟且持续时间有缩短的迹象。2016和2017年主汛期均处于6月下旬至7月上旬, 2018年则推迟至7月中下旬。可能是由于2018年5月份江水涨幅较低, 不满足家鱼繁殖所需的水文条件, 使得四大家鱼集中在7月中下旬江水上涨过程时进行繁殖活动。

河流鱼类早期阶段受非生物和生物因素影响会存在一定的漂流规律。非生物因子包括洪水的水位涨幅变化、河床形态、光照强度、水温水文条件等, 生物因子有鱼类的发育阶段、栖息地偏好及其种间关系等^[23]。徐薇等研究发现长江鱼类在早期阶段存在水平分布上的显著性差异, 断面空间卵苗密度与流速存在负相关性关系^[24]。本文在分析采样断面四大家鱼仔稚鱼丰度空间分布时, 发现江心丰度显著低于南北两岸。江心水流量大, 流速较两岸快, 不利于仔稚鱼的栖息和生存, 使得具有一定游泳和主动选择能力的仔鱼聚集在沿岸缓流回水区。此外其分布还受生物等其他因素的影响, 采样断面3个点的年际变化呈现南岸丰度均值逐年接近江心, 北岸家鱼仔稚鱼丰度有一定的增长趋势。采样断面属于顺直型江段, 两岸江水流速无较大差异, 其南北两岸家鱼仔稚鱼丰度可能受生境差异等因素影响。北岸拥有较高的植被覆盖率, 相比南岸航运及农耕等人类活动所造成的污染可以提供更为丰富的生物饵料, 有利于仔稚鱼早期的摄食活动。

3.3 水文环境因子对四大家鱼仔稚鱼丰度的影响

四大家鱼繁殖特性相似, 其产卵所需的水文条件也相似, 不同种类在相同产卵场进行繁殖活动, 常被视作一个类群进行研究。作为典型的产漂流性卵鱼类, 亲鱼需要在特定的水温条件下, 同时有适宜水位涨幅才能促使排卵^[25]。水温被认为是影响鱼类产卵的重要因素, 适宜四大家鱼产卵的水温一般在 $18 \sim 24^\circ\text{C}$ 。长江中游监利断面家鱼卵苗高峰期在6月下旬至7月初, 水温范围在 $20 \sim 24^\circ\text{C}$ ^[26]。本研究中安庆江段同期水温在 $22.4 \sim 25.2^\circ\text{C}$, 略高于监利江段。推测水温的差异是导致家鱼资源量长江中游向下游有增多趋势的原因。GAM模型结果中安庆江段水温范围在 $19 \sim 27.3^\circ\text{C}$ 之间, 随着水温的上升, 家鱼仔稚鱼丰度整体呈上升趋势。

透明度随江水径流量的变化被认为是鱼类产卵起始的重要因素。张晓敏等研究2004—2007年汉江中下游洪峰过程中发现, 当水温和涨水条件均满足家鱼繁殖需求的情况下, 仅在透明度低于 14.5 cm 时监测到家鱼卵^[27]。因此洪水过程中透明度的高低和家鱼自然繁殖存在一定的相关性。本文结果表明家鱼仔稚鱼密度与透明度呈显著负相关关系, 随着透明度下降, 家鱼密度升高。即在繁殖季节, 透明度的降低提高了家鱼产卵的可能性, 同时有利于仔稚鱼躲避敌害的能力。

此外,水流刺激也是四大家鱼产卵的必备条件. 易雨君等探究长江中游家鱼栖息地适宜度曲线的结果表明水位的变幅是家鱼繁殖活动的必备条件,鱼苗径流量与洪峰呈正相关关系,长江中游家鱼产卵的理想水位日上涨率为 $0.3 \text{ m/d}^{[28]}$. 本研究发现安庆江段四大家鱼仔稚鱼丰度伴随着江水水位和径流量上涨有显著的上升趋势,证明水位和径流量的上涨是刺激四大家鱼繁殖的重要因子. GAM模型结果显示安庆江段水位日上涨率达到 0.23 m/d 或径流量日上涨率达到 $900 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ 时,仔稚鱼丰度开始显著上升.

3.4 对长江下游四大家鱼资源保护的建議

长江下游城市经济发展迅速,人类活动频繁,为保护和恢复四大家鱼资源,基于以往和本文研究结果建议:(1)坚持贯彻落实长江流域禁渔制度,保证家鱼亲本的正常繁殖.(2)动态监测鱼类资源,以便制定和调整增殖保护对策. 针对下游鳊和青鱼数量稀少的情况,应通过开展科学增殖放流,增加繁殖群体数量,促进渔业资源恢复.(3)应注意保护洲滩及岸线的自然属性,尤其是实施航道整治和护岸等工程时.(4)严控各类污染物的排放,保证鱼类栖息地环境质量.(5)确保通江湖泊与长江干流的连通性,并逐步恢复其他沿江湖泊及支流与长江干流的连通性,充分发挥江湖复合生态系统的作用,以此来保护和恢复长江下游家鱼资源.

4 小结与展望

本研究于2016—2018年对安庆江段四大家鱼仔稚鱼资源进行了连续监测,掌握了四大家鱼仔稚鱼资源分布情况和苗汛规律,并利用GAM模型初步揭示了水文水环境条件对家鱼早期资源丰度的影响,为安庆段四大家鱼资源的保护提供了数据支撑.

1)2016—2018年长江安庆江段四大家鱼仔稚鱼种类主要是鲢和草鱼;其次是鳊;青鱼数量极少仅占家鱼总数的0.22%. 估算3年内通过该江段的家鱼仔稚鱼径流量分别为 21.70×10^8 、 14.62×10^8 、 12.05×10^8 尾,呈逐年下降的趋势.

2)安庆江段四大家鱼仔稚鱼自4月中旬整体丰度呈波动性上升趋势,在7月中上旬达到高峰期,其主汛期有明显推迟的现象. 断面空间分布规律为北岸>南岸>江心,且北岸丰度有一定的增长.

3)在繁殖季节中,四大家鱼仔稚鱼丰度与水温、透明度、水位日上涨率和径流量日上涨率呈显著相关,其中水位日上涨率影响较为显著. 家鱼仔稚鱼丰度与透明度呈负相关,与水温($24.0\sim 27.3^\circ\text{C}$)、水位日上涨率和径流量日上涨率均呈正相关关系.

4)鉴于仔稚鱼资源的垂直空间分布对总径流量估算的影响,后续工作将开展仔稚鱼的垂直分布情况研究,提高径流量估算的准确度.

5)利用仔稚鱼耳石鉴定家鱼日龄,分析其早期生长特征,结合该江段水文数据推算安庆江段以上江段四大家鱼产卵场位置及规模,为四大家鱼保护提供更准确的资料.

5 参考文献

- [1] Duan XB, Liu SP, Huang MG *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. *Environmental Biology of Fishes*, 2009, **86**(1): 13-22.
- [2] Duan XB, Chen DQ, Li Z *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. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, **15**(4): 523-532. [段辛斌, 陈大庆, 李志等. 三峡水库蓄水后长江中游产漂流性卵鱼类产卵场现状. 中国水产科学, 2008, **15**(4): 523-532.]
- [3] Li SJ. Studies on resources of fish in early life history stages at Jianli section and characteristics of phykton community in the middle reach of Yangtze River [Dissertation]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. [李世建. 长江中游监利断面鱼类早期资源量及浮游生物群落结构特征初步研究 [学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2011.]
- [4] Lei H, Xie WX, Huang DM *et al.* The early evolution of the fish with pelagic eggs resources in the upstream of Danjiangkou Reservoir after the cascade development. *J Lake Sci*, 2018, **30**(5): 1319-1331. DOI: 10.18307/2018.0514. [雷欢, 谢文星, 黄道明等. 丹江口水库上游梯级开发后产漂流性卵鱼类早期资源及其演变. 湖泊科学, 2018, **30**(5):

- 1319-1331.]
- [5] Survey team of spawning grounds of domestic fishes in Changjiang River. A survey on the spawning grounds of the four famous China carps” in the Changjiang River after dammed by the key water control project at Gezhouba. *Journal of Fisheries of China*, 1982, **6**(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留后长江四大家鱼产卵场调查. 水产学报, 1982, **6**(4): 287-305.]
- [6] Ren P. Distribution and annual dynamics of early life history resources of fish in the lower reach of the Yangtze River, China[Dissertation]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2015.[任鹏. 长江下游鱼类早期资源的分布与周年动态研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2015.]
- [7] Zhang XK, Yu DP, Wang HL *et al.* Fish community structure in main habitat of the finless porpoise, the Anqing section of Yangtze River. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(7): 1832-1839.[张晓可, 于道平, 王慧丽等. 长江安庆段江豚主要栖息地鱼类群落结构. 生态学报, 2016, **36**(7): 1832-1839.]
- [8] Ren P, Hu H, Song YQ *et al.* The spatial pattern of larval fish assemblages in the lower reach of the Yangtze River: potential influences of river-lake connectivity and tidal intrusion. *Hydrobiologia*, 2016, **766**(1): 365-379.
- [9] Liu MD, Li PF, Huang C *et al.* Spring community structure and species diversity of fish in the Anqing section of Yangtze River. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(6): 64-71.[刘明典, 李鹏飞, 黄翠等. 长江安庆段春季鱼类群落结构特征及多样性研究. 水生态学杂志, 2017, **38**(6): 64-71.]
- [10] Cao WX, Chang JB, Qiao Y *et al* eds. Fish resources of early life history stages in Yangtze River. Beijing: China Water Power Press, 2007.[曹文宣, 常剑波, 乔焯等. 长江鱼类早期资源. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.]
- [11] Gao L. Diversity and temporal and spatial patterns of larval fish assemblages in the south branch of Yangtze Estuary[Dissertation]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2014.[高雷. 长江口南支鱼类早期资源多样性与时空格局研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2014.]
- [12] Yi BL, Yu ZT, Liang ZS *et al* eds. The distribution, natural conditions and breeding production of the spawning grounds of four famous freshwater fishes on the main stream on the Yangtze River. In: Yi BL, Yu ZT, Liang ZS *et al* eds. Gezhouba Water Control Project and Four Famous Fishes in Yangtze River. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1988: 1-46.[易伯鲁, 余志堂, 梁秩桑等. 长江干流草, 青, 鲢, 鳙四大家鱼产卵场的分布, 规模和自然条件. 见: 易伯鲁, 余志堂, 梁秩桑等编. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1988: 1-46.]
- [13] Liu JK, Wang ZX. Preliminary study on the vertical distribution of the commercial fish in lower Yangtze. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1955, (2): 71-79.[刘建康, 王祖熊. 江中家鱼苗垂直分布的初步观察. 水生生物学集刊, 1955, (2): 71-79.]
- [14] Hastie T, Tibshirani R. Generalized additive models. *Statistical Science*, 1986, **1**(3): 297-310.
- [15] Tang XL. Studies on early fish resources in Jiangjin cross-section in the upstream of Yangtze River [Dissertation]. Chongqing: Southwest University, 2010.[唐锡良. 长江上游江津江段鱼类早期资源研究[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2010.]
- [16] Ma YX, Yao WL, Yuan SB *et al.* Community structure and environmental analysis of macrozoobenthos in Yichang-Anqing reaches of the Yangtze mainstem. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(3): 634-642.[马雅雪, 姚维林, 袁赛波等. 长江干流宜昌-安庆段大型底栖动物群落结构及环境分析. 水生生物学报, 2019, **43**(3): 634-642.]
- [17] Helfman GS ed. Fish coservation: A guide to understanding and restoring global aquatic biodiversity and fishery resources. Washington, DC: Island Press, 2007.
- [18] Gao L, Hu XK, Yang H *et al.* The early-stage fish resources of the major Chinese carps at Huangshi section in the middle reaches of the Yangtze River. *Journal of Fisheries of China*, 2019, **43**(6): 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. 水产学报, 2019, **43**(6): 1498-1506.]
- [19] Liu MD, Gao L, Tian HW *et al.* Status of fishes at the early life history stage in the Yichang section in the middle reaches of the Yangtze River. *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. 中国水产科学, 2018, **25**(1): 147-158.]
- [20] Zhang MY, Xu DP, Liu K *et al.* Ichthyologic survey and primary studies on diversity of fishery species in Anqing section of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2006, **18**(6): 670-676. DOI: 10.18307/2006.0617.[张敏莹, 徐东坡, 刘凯等. 长江安庆江段鱼类调查及物种多样性初步研究. 湖泊科学, 2006, **18**(6): 670-676.]
- [21] Li MZ, Gao X, Yang SR *et al.* Effect of environmental factors on natural reproduction of the Four Major Chinese Carps in

- the Yangtze River, China. *Zoological Science*, 2013, **30**(4): 296-303.
- [22] Doyle MJ, Morse WW, Kendall Jr AW. A comparison of larval fish assemblages in the temperate zone of the northeast pacific and northwest atlantic oceans. *Bulletin of Marine Science*, 1993, **53**(2): 588-644.
- [23] Schludermann E, Trithart M, Humphries P *et al.* Dispersal and retention of larval fish in a potential nursery habitat of a large temperate river: an experimental study. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 2012, **69**(8): 1302-1315.
- [24] Xu W, Liu HG, Tang HY *et al.* Effects of ecological operation of three gorges reservoir on fish eggs and larvae in Shashi Section of the Yangtze River. *Journal of Hydroecology*, 2014, **35**(2): 1-8.[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. 水生态学杂志, 2014, **35**(2): 1-8.]
- [25] Li MZ. Study on the life strategies of fishes in the Yangtze River and its adaption to environment during early life history stage[Dissertation]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2012.[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[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2012.]
- [26] Wang K, Zhou X, Chen DQ *et al.* Response relationship analysis on hydrological processes and spawning behavior of four major Chinese carps. *Freshwater Fisheries*, 2019, **49**(1): 66-70.[王珂, 周雪, 陈大庆等. 四大家鱼自然繁殖对水文过程的响应关系研究. 淡水渔业, 2019, **49**(1): 66-70.]
- [27] Zhang XM, Huang DM, Xie WX *et al.* Eco-hydrological characteristics of four major chinese carps on nature spawning conditions in the mid-lower Hanjiang River. *Journal of Hydroecology*, 2009, **30**(2): 126-129.[张晓敏, 黄道明, 谢文星等. 汉江中下游“四大家鱼”自然繁殖的生态水文特征. 水生态学杂志, 2009, **30**(2): 126-129.]
- [28] Yi YJ, Le SH. Habitat suitability function of four major Chinese carps spawning sites in the Yangtze River. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, **19**(S1): 117-122.[易雨君, 乐世华. 长江四大家鱼产卵场的栖息地适宜度模型方程. 应用基础与工程科学学报, 2011, **19**(S1): 117-122.]