# 长江安庆段草鱼仔稚鱼资源时空动态特征与水文因子的相关性

彭云鑫1,方弟安1,2,徐东坡1,2,丁隆强2,黎加胜3,任鹏2,何晓辉1,罗宇婷3

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,江苏 无锡 214081;
 3. 南京农业大学无锡渔业学院,江苏 无锡 214081

**摘要:** 为探究长江下游安庆段草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)仔稚鱼资源时空特征与水文因子之间的响应关系,本研究于 2018—2020 年每年的 4—8 月在长江安庆段对草鱼仔稚鱼进行连续监测,结合形态学与分子生物学方法共计鉴定出 272 尾草鱼仔稚鱼,连续 3 年捕获量占四大家鱼捕获量的比例分别为 12.30%、17.86%与 4.37%;通过仔稚鱼资源量估算,2018—2020 年通过安庆段的仔稚鱼径流量分别为 3.95×10<sup>8</sup>、5.79×10<sup>8</sup>、3.29×10<sup>8</sup>尾。时空特征分析结果显示,2018—2020 年安庆段草鱼仔稚鱼集中出现在 5—7 月,高峰期发生在 5 月和 7 月中上旬,其中 2020 年 因洪水暴发不利于繁殖,仔稚鱼丰度最低,其主汛期也存在推迟的现象;Kruskal-Wallis 检验表明左、右岸草鱼仔稚鱼丰度显著高于江心(P<0.05, n=70),2018—2020 年整体平均丰度呈现出左岸(8.99 ind/1000 m<sup>3</sup>)>右岸(5.34 ind/1000 m<sup>3</sup>)>江心(3.53 ind/1000 m<sup>3</sup>)的空间分布规律。通过 Pearson 相关性分析表明,草鱼仔稚鱼丰度与水温、水位日上涨率、径流量日上涨率呈显著正相关(P<0.05),与透明度呈极显著负相关的关系(P<0.01);GAM 模型分析结果显示,水文因子相对重要性由高到低依次为水温、透明度、水位日上涨率、径流量日上涨率。本研究中 GAM 模型总偏差解释率达到 90.8%,较为准确地揭示了草鱼仔稚鱼丰度与水文因子之间的响应关系,为揭示长江草鱼早期资源的发生机制积累了基础数据。

#### 

草鱼(Ctenopharyngodon idellus)、青鱼(Mylopharyngodon piceus)、鲢(Hypophthalmichthys molitrix)、鳙(Aristichthys nobilis)并称四大家鱼<sup>[1]</sup>, 长江干流为其重要的产卵场和洄游通道。从 20 世 纪 70 年代初起,由于大量捕捞与长江生境改变, 长江草鱼资源正逐渐衰减<sup>[2]</sup>;80 年代的长江草鱼 早期资源量仅占 60 年代的 25%<sup>[3]</sup>。葛洲坝等重大 水利工程对长江干流中草鱼产卵场的影响明显, 坝上水域的长期蓄水导致草鱼产卵场减少,坝下 水域的水文情势受到严重影响<sup>[4-5]</sup>。众所周知,长 江中上游是草鱼重要的繁殖与育幼场所,熊飞等<sup>[6]</sup> 对长江上游的调查结果显示,草鱼种群生长性能 呈现下降趋势。刘绍平等<sup>[7]</sup>在 2003—2006 年在长 江中游宜昌至城陵矶监测到的四大家鱼资源总量 仅为 1997—2002 年平均值的 42.8%。有学者研究 表明,长江中游至安庆段随距离的增加四大家鱼 仔稚鱼丰度有所增长<sup>[8]</sup>。任鹏<sup>[9]</sup>于 2012—2013 年 的研究也表明长江下游与鄱阳湖等大型湖泊及众 多支流相连构成复杂的江湖复合系统,使下游水 环境条件趋于原生态环境,因此长江草鱼资源量 有向安庆段增加的趋势。

长江安庆段分布有许多重要鱼类保护区,并 与七里湖这一通江湖泊相连,具有类似湖口江段 与鄱阳湖的生境特征,适合鱼类的索饵和育幼。仔

#### 收稿日期: 2021-04-23; 修订日期: 2021-06-12.

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0900903);中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2020TD61).

作者简介: 彭云鑫(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为鱼类早期资源. E-mail: 2370057783@qq.com

**通信作者:**方弟安,研究员,主要从事渔业资源方向研究, E-mail: fangdian@ffrc.cn; 徐东坡,研究员,主要从事渔业资源方向研究, E-mail: xudp@ffrc.cn

稚鱼的时空动态能够反映鱼类群落特征,开展相 关研究也是揭示鱼类群聚特征的重要手段之一<sup>[10]</sup>。丁 隆强等<sup>[11]</sup>在 2016—2018 年对安庆段四大家鱼仔 稚鱼资源调查时发现,四大家鱼仔稚鱼丰度明显 高于长江中游黄石江段,但是草鱼仔稚鱼资源呈 现逐年下降的趋势。为探究长江下游安庆段草鱼 仔稚鱼资源时空特征与水文因子之间的响应关系, 进一步揭示长江草鱼早期资源衰退和发生机制, 本研究以长江下游安庆段的草鱼仔稚鱼(初孵仔 鱼至鳞片形成期<sup>[10]</sup>)为研究对象,估算 2018— 2020 年安庆段草鱼仔稚鱼资源量现状,着重分析 草鱼仔稚鱼丰度的时间动态与空间分布格局,并 应用 GAM 模型解析仔稚鱼丰度与关键水文因子 之间的相关性,为揭示长江草鱼早期资源的发生 机制提供一定的理论依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 采样时间与地点

本研究于 2018—2019 年的 4 月下旬至 8 月上 旬、2020 年的 5 月上旬至 8 月上旬对长江下游安 庆段(117°0′18″E, 30°29′28″N)进行持续 327 d 的早 期资源调查;该江段的断面设置(图 1)参考曹文宣 等<sup>[10]</sup>的采样方法并结合现场勘查进行选择,设置 的断面包括左岸、右岸与江心 3 个采样点(左右两 岸采样点距岸边 5~10 m),每日样品的采集时间 为早上 5:00~7:00 am,对上层水体(≤1 m)进行 样品采集。

#### 1.2 调查方法与样品的保存及鉴定

1.2.1 样品采集 本研究在采样过程中所使用的 网具为直径 0.8 m, 网深 2.5 m, 网目 40 目, 孔径 0.25 mm 的锥形浮游生物网(拖网), 在拖网口处设 置流量计(Digital Flow Meter 23090; KC Denmark A/S, Silkeborg, Denmark)记录流量转数, 以此计 算单位时间内通过拖网的水流量, 并利用旋桨式 流速仪测定水流速度, 萨氏透明度盘测量透明度, 同时采用水质分析仪(Thremo Orion Star A329; Thermo Fisher Scientific Inc, Waltham, MA USA) 测定采样水域的温度、浊度、pH 等, 水位和江水 径流量的数据于安徽省水利信息网上的大通水文 站与安庆水文站获取; 样品采集过程中, 将网具 固定于渔船边的水体表面进行拖曳,渔船行驶方向与水流方向相反,为避免拖曳过程中网口浮出水面,且减少渔船行驶的波浪对采集产生的影响,使船速控制在2.5节左右,每次下网拽拖持续5 min。



1.2.2 样品鉴定与保存 现场采集的仔稚鱼样品 放入装有冰块的广口瓶保存,并置于 0~4 ℃恒温 箱隔热,在2h内用镊子将仔稚鱼挑出,随后对仔 稚鱼进行鉴定计数,再使用 75%乙醇保存。对于仔 稚鱼的种类鉴定,通常对照曹文宣等<sup>[10]</sup>的《长江鱼 类早期资源》,使用形态学方法在 Olympus SZX 16 解剖镜下进行分类鉴定。不能通过形态特征准确 判断种类或因鱼体残缺无法辨识的仔稚鱼,则采 用分子手段进行鉴定,方法是提取仔稚鱼样本的 基因组 DNA,基于 CO I (cytochorme C oxidase subunit I,线粒体细胞色素 C 氧化酶亚基 I)基因条 形码,用 PCR 扩增目的基因并测序,再将获得的 测序结果与长江鱼类条形码数据库进行对比从而 确定仔稚鱼的种类<sup>[12]</sup>。

#### 1.3 数据处理与分析

**1.3.1 草鱼仔稚鱼丰度计算** 草鱼仔稚鱼在拥有 主动游泳能力之前随江水漂流,因此仔稚鱼丰度 计算方法按照易伯鲁等<sup>[13]</sup>的计算方法,依据所采 集草鱼仔稚鱼的数量、单个采样点采集所用的时 间、采集期间流量计的差值和锥形 I 型浮游生物 网网口面积按下列公式处理:

$$Q_i = (0.3 \times S \times a_i) / t_i$$
$$D_i = \frac{N_i}{Q_i \times t_i}$$

式中,  $Q_i$ 为第 i 个采集点采集网具网口的过水流量 (m<sup>3</sup>/s), S 为主动网具网口面积(m<sup>2</sup>),  $a_i$ 为第 i 个采 集点采集流量计的流量差,  $t_i$ 为第 i 个采集点采集 所用的时间,  $D_i$ 为第 i 个采集点草鱼仔稚鱼的丰度 (ind/m<sup>3</sup>),  $N_i$ 为第 i 个采集点采集到的草鱼仔稚鱼 尾数(ind)。

**1.3.2 采样断面仔稚鱼平均丰度与定点仔稚鱼丰 度相比系数** 各采样点草鱼仔稚鱼的平均丰度与 第 *i* 个采样点草鱼仔稚鱼丰度相除,可计算出草 鱼仔稚鱼平均丰度相比系数,公式如下:

## $C = \sum \overline{D} / D_i$

式中, *C* 为仔稚鱼平均丰度相比系数,  $\overline{D}$ 为各采 样点仔稚鱼的平均丰度(ind/m<sup>3</sup>),  $D_i$ 为第 *i* 个采集 点草鱼仔稚鱼的丰度(ind/m<sup>3</sup>)。

**1.3.3 草鱼仔稚鱼径流量** 采样期间草鱼仔稚鱼 径流量:

#### $M_i = D_i \times Q_i \times C_i$

式中,  $M_i$  为第 *i* 次采集时间内通过该江段断面的 草鱼仔稚鱼尾数(ind),  $Q_i$  为第 *i* 次采集时的断面流 量(m<sup>3</sup>/s),  $D_i$  为第 *i* 个采集点草鱼仔稚鱼的丰度 (ind/m<sup>3</sup>)。

非采集期间草鱼仔稚鱼径流量:

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

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*<sub>*i*,*i*+1</sub> 为第 *i*, *i*+1 采集时间间隔内 的草鱼仔稚鱼径流量(ind), *t*<sub>*i*,*i*+1</sub> 为第 *i*, *i*+1 次采集 时间间隔(s)。

采集江段的草鱼仔稚鱼总径流量:

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

水位日上涨率与径流量日上涨率为当天采样

江段的水位、径流量减去前一天水位、径流量的 差值。

**1.3.4** 广义可加模型(generalized additive models, GAM) 该模型是一种非参数化或半参数化的回归分析方法<sup>[14]</sup>,当应变量和预测变量间关系不明确时,GAM 模型可以在较高程度上进行检测。本研究应用 GAM 模型揭示水文因子与草鱼仔稚鱼丰度之间的关系,表达式:

$$g(p) = \alpha + \sum_{j=1}^{n} f_i(x_j) + \varepsilon$$

式中, g(p) 为关联函数; p 为草鱼仔稚鱼密度 (ind/100 m<sup>3</sup>),  $\alpha$  为适合函数中的截距;  $x_j$  为解释 变量,包括水温、透明度、水位日上涨率和径流 量日上涨率;  $f_i(x_j)$  为解释变量关系的非参数函 数;  $\varepsilon$  为误差项,与解释变量  $x_j$  无关,  $E(\varepsilon)=0$ ,  $\varepsilon=6^2$ 模型采用样条平滑法,对数据图进行平滑处理。

在数据录入过程中使用 Excel 2016 软件对数 据进行处理,用 Origin 2018 软件制作分析图;数 据分析使用 SPSS19.0 分析软件,差异显著性使用 Kruskal-Wallis 分析,水文因子与丰度变化的关联 程度采用 Pearson 相关性分析;GAM 模型的构建 与验证在 R 3.5.3 软件的 mgcv 包内实现。

### 2 结果与分析

#### 2.1 草鱼仔稚鱼组成占比和径流量

本研究于 2018—2020 年 4—8 月在长江下游 安庆段开展早期资源调查共 327 d, 采集到仔稚 鱼 392186 尾, 其中四大家鱼 1912 尾, 草鱼有 272 尾。3 年内草鱼仔稚鱼的捕获量依次为 99 尾、165 尾与 8 尾, 分别占当年四大家鱼仔稚鱼总捕获量 的 12.30%、17.86%与 4.37%; 根据在安庆段 3 个 采样点所采集的草鱼仔稚鱼数量及江段流量计算, 2018—2020年通过安庆段的草鱼仔稚鱼径流量分 别为 3.95×10<sup>8</sup> 尾、5.79×10<sup>8</sup> 尾与 3.29×10<sup>8</sup> 尾。

#### 2.2 草鱼仔稚鱼丰度的时空分布特征

根据早期资源走航调查数据分析,安庆段 2018—2020年草鱼仔稚鱼丰度的变化范围为 1.12~ 141.54 ind/1000 m<sup>3</sup>,日平均丰度为 19.21 ind/ 1000 m<sup>3</sup>。2018 年安庆段草鱼仔稚鱼日平均丰度 为 17.36 ind/1000 m<sup>3</sup>, 在繁殖期内的草鱼仔稚鱼 丰度波动较明显, 高峰期集中发生于 5 月中上旬, 最高峰出现在 5 月 5 日, 丰度急剧下降后逐渐上 升, 至 5 月 14 日开始呈现波动性下降的趋势, 6 月与 7 月的草鱼仔稚鱼最高丰度依次出现在 6 月 7 日与 7 月 18 日, 对应峰值为 16.50 ind/1000 m<sup>3</sup> 与 36.56 ind/1000 m<sup>3</sup>。2019 年安庆段草鱼仔稚鱼 日平均丰度为 21.48 ind/1000 m<sup>3</sup>, 高峰期集中发 生于 5 月中上旬, 在 5 月 1 日与 5 月 15 日出现两 个最高峰, 对应仔稚鱼丰度为 14.15 ind/1000 m<sup>3</sup> 与 8.61 ind/1000 m<sup>3</sup>, 之后 7 月与 8 月出现两个小 高峰, 丰度分别为 3.66 ind/1000 m<sup>3</sup>与 3.60 ind/1000 m<sup>3</sup>; 2020 年仅于 7 月至 8 月上旬采集到草鱼仔稚 鱼,期间最高峰值出现在 7 月 1 日,对应丰度为 22.41 ind/1000 m<sup>3</sup> (图 2); 2018—2020 年草鱼仔稚 鱼丰度月变化分析显示, 5 月平均丰度显著高于 其他月份(图 3),为草鱼繁殖期内的苗汛高发期; 草鱼仔稚鱼丰度年变化分析表明, 2019 年平均丰 度高于 2018 年,显著高于 2020 年,呈波动性变 化(图 4)。





Fig. 2 Daily abundance of Ctenopharyngodon idellus larvae in Anqing section during 2018 to 2020



图 3 安庆段 2018—2020 年 4—8 月草鱼仔稚鱼丰度月变化 Fig. 3 Month abundance of *Ctenopharyngodon idellus* larvae in Anging section from April to August during 2018 to 2020

对 2018—2020 年长江下游安庆段的右岸、 江心与左岸草鱼仔稚鱼丰度数据进行差异显著 性分析,以此验证草鱼仔稚鱼在安庆段的断面 空间分布差异。Kruskal-Wallis 检验表明,采样断 面 3 个采样点在 3 年中均不存在显著性差异 (2018年: P>0.05, n=33; 2019年: P>0.05, n=59; 2020年: P>0.05, n=7), 但左、右岸的平均漂流丰





度均大于江心(P<0.05, n=70); 2018、2019年安庆 段草鱼仔稚鱼平均漂流丰度断面横向分布皆呈 现左岸(12.52、14.09 ind/1000 m<sup>3</sup>)>右岸(4.99、 10.84 ind/1000 m<sup>3</sup>)>江心(0.87、9.57 ind/1000 m<sup>3</sup>) 的分布规律, 2020 年呈现左岸(0.37 ind/1000 m<sup>3</sup>) >江心(0.19 ind/ 1000 m<sup>3</sup>)>右岸(0.14 ind/1000 m<sup>3</sup>) 的分布规律(图 5)。





#### 2.3 水文因子变化特征

2018-2020 年调查期间,安庆段环境因子变 化范围如表 1 所示, 所记录环境指标中的水温从 4-8月逐步上升,在5-6月波动较大,至7-8月 达到水温最大值(32.9 ℃, 29.8 ℃, 31.9 ℃);透明 度与浊度在调查期间呈波动性变化,在2018年7 月与2019年的5月波动较大,2020年的透明度于 5 月存在最小值(27 cm),可能与安庆段径流量骤 然增大相关,导致江水浑浊;2018—2020 年长江 安庆段的水位与径流量变化趋势相似, 其中 2020 年的峰值(17.96 m, 76500 m<sup>3</sup>/s)显著高于 2018 年 与 2019 年同期峰值(2018 年: 13.86 m, 49900 m3/s; 2019年: 16.56 m, 67900 m<sup>3</sup>/s), 峰值均在7月出现; 在调查期间, 左岸采样点的平均水温为25.17 ℃, 略 高于右岸采样点(24.98 ℃)与左岸采样点(24.93 ℃), 而透明度则呈现右岸采样点(43.83 cm)>江心采样 点(42.38 cm)>左岸采样点(39.00 cm)的空间分布 特征。

表 1 长江安庆段环境因子变化 Tab. 1 Changes of environmental factors in Anging section of the Yangtze River

	0		
环境因子 environmental factor	最小值 lowest	最大值 highest	平均值 average value
水温/℃ temperature	17.90	32.90	24.30±3.04
浊度 NTU	16.90	132.80	40.15±17.17
酸碱度 pH	7.36	8.51	7.85±0.24
溶氧量/(mg/L) DO	3.73	8.75	6.77±1.12
水流速度/(m/s) V	0.60	2.80	$0.89 \pm 0.2$
透明度/cm SD	5.00	70.00	41.07±11.36

#### 2.4 草鱼仔稚鱼丰度与水文因子的相关性

使用 Pearson 相关性分析草鱼仔稚鱼丰度与 水文因子之间的相关性的结果显示,草鱼仔稚 鱼丰度日变化与水温(P<0.05,图 6a)、水位日上 涨率(P<0.05,图 6b)与径流量日上涨率(P<0.05, 图 6c)呈显著正相关,与透明度呈极显著负相关 (P<0.01,图 6d)。如图 6 所示,水温在上升过程 中,仔稚鱼在 5 月密集出现,2018—2020 年每年 最高丰度所对应的水温依次为 23.8 ℃、26.6 ℃、 25.4 ℃,当水温上升至 27.9 ℃时,草鱼仔稚鱼 丰度明显下降,达到水温最大值 29.8 ℃时,仔 稚鱼丰度趋于零;当草鱼仔稚鱼丰度达到最大 时,透明度、水位与径流量分别为 51.5 cm、10.78 m 和 31100 m<sup>3</sup>/s;

在 Pearson 相关性分析的基础上构建 GAM 模型进一步验证,构建过程中分别加入关键水文因子(水温、透明度、水位日上涨率与径流量日上涨率),根据 AIC 准则选择最优模型,结果见表 2,总偏差解释率为 90.8%,预测模型的校正决定系数(*R*-sp)为 0.889>0.5,较准确地说明了水温、透明度、水位日上涨率与径流量日上涨率对草鱼仔稚鱼丰度的影响。

采用正态 Q-Q 图、Shapiro-wilk 检验来验证 GAM 模型与其残差的正态性。正态 Q-Q 图显示 GAM 模型符合正态分布(图 7), Shapiro-wilk 检验 表面 GAM 模型的残差符合正态分布(P>0.05)。

从 GAM 模型中的偏差解释率来看,加入模型的水文因子相对重要性表现为:水温>透明度>水位日上涨率>径流量日上涨率。从水文因子与草



图中 a、b、c 和 d 分别为草鱼仔稚鱼丰度与水温、水位日上涨率、径流量日上涨率和透明度之间的关系. Fig. 6 The relationship between the density of *Ctenopharyngodon idellus* larvae and hydrological factors in Anging section from 2018 to 2020

a, b, c and d are the relationship between the abundance of larval *Ctenopharyngodon idellus* and water temperature and daily rise of water level, daily rise of river runoff and transparency.

#### 表 2 安庆段草鱼仔稚鱼 GAM 模型方差分析

Tab. 2	Variance analysis of GAM	model for Ctenopharyngodon idellus	larvae in Anging section of th	e Yangtze River
	•			0

因变量 dependent variable	环境因子 environmental factors	偏差解释率/% deviation interpretation rate	R-sq	AIC	Р
草鱼仔稚鱼 Larval Ctenopharyngodon idellus	水温+透明度+水位日上涨率+径流量日上涨率 water temperature+transparency+daily rise of water level+ daily rise of runoff	90.8			
	水温 water temperature	59.6	0.559	597.67	$1.60 \times 10^{-2*}$
	透明度 transparency	25.8	0.834	487.56	$3.00 \times 10^{-3*}$
	水位日上涨率 daily rise of water level	4.7	0.885	328.68	$1.06 \times 10^{-4*}$
	径流量日上涨率 daily rise of runoff	0.7	0.889	258.16	$6.84 \times 10^{-8*}$

注: \*表示在 0.05 水平上呈显著性相关(P<0.05).

Note: \* indicates a significant correlation at the 0.05 level (P<0.05).

鱼仔稚鱼丰度的 GAM 分析(图 8)显示,草鱼仔稚 鱼丰度随水温、水位日上涨率与径流量日上涨率 的涨幅而呈现显著正相关关系(P<0.05),与透明 度呈现显著负相关性(P<0.05)。水位日上涨率范围 主要集中在 0.01~0.24 m/d,而水温、透明度与径 流量日上涨率都没有较集中的分布。

#### 3 讨论

#### 3.1 安庆段草鱼仔稚鱼资源的时空动态

近年来,对长江流域四大家鱼的调查结果表 明其早期资源量处于不断衰退的趋势<sup>[6,11]</sup>,其中 草鱼衰退趋势尤为明显,如长江上游江津段卵苗 种类组成中,草鱼所占的比例不断下降<sup>[15]</sup>。在三峡水库蓄水前后,长江中游以草鱼为主的四大家 鱼仔稚鱼组成发生明显变化,鲢的仔稚鱼资源量





快速增长, 而草鱼仔稚鱼资源量显著降低<sup>[16]</sup>. 2017—2018年通过宜都江段的四大家鱼仔稚鱼径 流量从 4.12×10<sup>8</sup> 尾降至 0.11×10<sup>8</sup> 尾<sup>[17]</sup>。本研究结 果中 2019 年草鱼仔稚鱼占四大家鱼仔稚鱼总量 的比例(17.86%)较 2018 年(12.30%)有所增长, 通 过长江安庆段的草鱼仔稚鱼径流量也从 3.95×10<sup>8</sup> 尾增长至 5.79×10<sup>8</sup> 尾; 一方面是因为草鱼作为典 型的产漂流性卵鱼类,其产卵活动多数发生在江 水上涨期间,规模大小受江水涨水过程的影响<sup>[18]</sup>. 2019年的水位与径流量普遍高于 2018年同期水 位与径流量, 涨水持续时间较长, 水文环境更适 宜草鱼亲鱼繁殖;另一方面,2019年长江禁捕工 作开始初步实施, 安庆段(实行全面退捕)未发生 大规模捕捞,有益于草鱼亲鱼繁殖,使得草鱼仔 稚鱼资源量明显高于 2018 年。本研究中 2020 年 通过安庆段的草鱼仔稚鱼径流量有所下降,其主 要原因是 2020 年 6 月长江流域接连发生强降雨, 加上长江的大坝开闸泄洪导致洪水暴发, 下游水



Fig. 8 GAM analysis on the relationship between larval fish abundance of Ctenopharyngodon idellus and hydrological factors

位与径流量大幅上涨,如安庆段 7 月水位与径流 量高达 18.42 m 与 81500 m<sup>3</sup>/s,过快的江水流速反 而不利于草鱼亲鱼繁殖<sup>[19]</sup>。

长江下游与沿江支流相连形成江湖连通系统, 且距离大坝越远的水域其水文情势趋向于自然状态,因此大坝对下游鱼类资源的影响较小<sup>[9]</sup>。2016 年通过长江下游安庆段的四大家鱼仔稚鱼径流量 为21.7×10<sup>8</sup>尾<sup>[11]</sup>,显著高于同期的长江中游黄石江 段<sup>[20]</sup>,本研究中2018年草鱼仔稚鱼径流量高于同 期长江中游宜昌江段的四大家鱼仔稚鱼径流量<sup>[21]</sup>, 呈现长江中游资源量向下游安庆段增多的趋势, 主要原因可能是由于长江安庆段至湖口江段生境良 好,且存在四大家鱼的产卵场<sup>[22]</sup>,由此产生的叠加 效应导致安庆江段的草鱼仔稚鱼径流量较高。

#### 3.2 草鱼仔稚鱼时空分布差异的影响因素

仔稚鱼发生的时空动态能直接反映亲鱼繁殖 的时空特征<sup>[23]</sup>。本研究结果显示,由于长江干流 的水位与径流量从 4 月开始逐渐增长,安庆段草 鱼仔稚鱼集中出现于 5—7 月,高峰期发生在 5 月和 7 月中上旬,与历史文献中该江段的四大家 鱼仔稚鱼出现的高峰期相似<sup>[11]</sup>,草鱼仔稚鱼出现 的高峰期峰值呈现逐年上升的趋势,但 2018— 2020 年主要汛期存在推迟的现象,主要原因是 2020 年因洪水暴发,水位与径流量涨幅过大,江 水流速过快不适宜草鱼亲鱼洄游产卵<sup>[24]</sup>,致使 5 月与 6 月未发现草鱼仔稚鱼,待 7 月径流量有所 下降后才出现草鱼苗汛。

徐薇等<sup>[25]</sup>的研究表明了鱼类早期资源在空间 上具有水平差异,其丰度与流速呈负相关性。本 研究对草鱼仔稚鱼丰度在断面空间分布差异上进 行分析时发现,3个采样点在2018—2020年均不 存在显著性差异,主要原因是江水流速较快,沿 岸不能形成缓流区,仔稚鱼较少聚集;另一方面 草鱼仔稚鱼密集出现的5月透明度较低,江水浑 浊,这在一定程度上降低了仔稚鱼主动游泳能力, 不能有效躲避捕捞和控制游泳方向,使得草鱼仔 稚鱼在左右沿岸分布没有显著差异,但整体上左 右两岸的草鱼仔稚鱼密度显著高于江心,与田佳 丽等<sup>[26]</sup>对安庆新洲江段的调查结果一致。此外草 鱼仔稚鱼群聚规模还受生境差异的影响,左岸的 草鱼仔稚鱼平均漂流丰度都略高于右岸,这是由 于左岸连接皖河口,水生植物覆盖率较高,有利 于草鱼摄食,使得仔稚鱼大量群聚。

#### 3.3 水文环境因子与草鱼仔稚鱼资源的相关性

鱼类早期资源的群聚动态可以反映出栖息地 生境的特征与水质状况<sup>[27]</sup>,水温通常被认为是影 响鱼类繁殖的重要因素,而作为四大家鱼之一的 草鱼,其产卵盛期的水温范围一般为18~24 ℃<sup>[28]</sup>。 本研究结果显示,水温是影响长江野生草鱼繁殖 的主要水文因子,安庆段草鱼仔稚鱼丰度日变化 整体随水温的升高呈上升趋势,苗汛高峰时期的 水温范围为 21.3~27.5 ℃,高于长江中游监利江段 的四大家鱼仔稚鱼高峰期的水温范围(20~24 ℃)<sup>[29]</sup>, 说明长江下游安庆段草鱼仔稚鱼适宜温度略高于 中游,而江水温度上升到 29.8 ℃后,草鱼仔稚鱼 丰度趋于零,研究结果表明,温度过高不利于草 鱼亲鱼产卵。

在鱼类繁殖期,长江草鱼产卵行为的发生离 不开水位与水径流量等自然条件的驱动<sup>[3]</sup>,有研 究表明,产漂流性卵鱼类在繁殖时理想的水位日 上涨率在 0.30~0.55 m/d, 径流量日上涨率一般高 于 2100 m³/(s·d)<sup>[30]</sup>。2018—2020 年安庆段的草鱼 仔稚鱼丰度与水位日上涨率和径流量日上涨率呈 显著正相关的关系, 当水温达到繁殖要求, 水位 日上涨率达到 0.22 m/d 或江水径流量上涨率达到 800 m<sup>3</sup>/(s·d)时,草鱼仔稚鱼丰度开始呈显著上升 趋势<sup>[31]</sup>,也有研究表明,径流量达到 30000 m³/s 时, 仔稚鱼与鱼卵的丰度明显降低<sup>[20-21]</sup>,而本研究中 径流量高于 30000 m³/s 时, 草鱼仔稚鱼仍有较高 丰度,这是由于长江下游河道较宽,加上有鄱阳 湖等通江湖泊的存在,水文环境也能满足草鱼亲 鱼繁殖的要求。本研究 GAM 模型分析的结果证 实了水位与径流量的涨幅是影响草鱼繁殖的重要 因素。

### 3.4 调查方法等对草鱼早期资源调查的影响

草鱼早期资源调查是评估草鱼丰度的重要研 究手段,其动态可以在一定程度上反映长江草鱼 资源状况,但此调查方法在本研究中略有不足之 处,如2020年长江下游因洪水泛滥而导致长江水 域面积大范围扩增且水流形态复杂,草鱼仔稚鱼 随机扩散,这对于采集草鱼仔稚鱼与探索仔稚鱼 资源分布规律增加了难度;同时采样工作大多是 在白天进行,草鱼一般是在夜间繁殖,不同距离 的产卵场随江水流速的不同而到达采样点的时间 也不同,基于固定采集而估算的草鱼仔稚鱼资源 量就可能与长江中的实际资源量有细微偏差。因 此,针对这些不足,建议增加采样断面中的采样 位点,同时对采样点进行持续性的全天监测,使 得草鱼仔稚鱼资源量分布与系统估算的结果更为 精确。本研究后续将重点关注草鱼仔稚鱼群聚水 域的生境特征,结合水文数据揭示草鱼仔稚鱼的 种群发生机制。

#### 4 小结与展望

本研究于 2018—2020 年在长江下游安庆段 以草鱼仔稚鱼为研究对象,针对长江下游干流草 鱼仔稚鱼时空动态开展相关研究,研究结果揭示 了草鱼仔稚鱼在安庆段的资源量现状、时空动态 特征,及其丰度与水温、透明度、水位日上涨率 和径流量日上涨率等水文因子的相关性,之后还 需要对长江安庆段及下游其他江段持续进行草鱼 早期资源监测,揭示长江下游野生草鱼资源的发 生和补充机制,同时为长江草鱼苗汛预测与种群 保护提供参考依据。

#### 参考文献:

- Newbold L R, Kemp P S. Influence of corrugated boundary hydrodynamics on the swimming performance and behaviour of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Ecological Engineering, 2015, 82: 112-120.
- [2] Chen D Q, Duan X B, Liu S P, et al. On the dynamics of fishery resources of the Yangtze River and its management[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2002, 26(6): 685-690.
  [陈大庆,段辛斌,刘绍平,等.长江渔业资源变动和管理 对策[J]. 水生生物学报, 2002, 26(6): 685-690.]
- [3] Yi B L, Yu Z T, Liang Z S. Gezhouba Hydro-Junction and the Four Famous Domestic Fishes of Yangtze River[M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 1988. [易伯鲁, 余志堂,梁秩燊,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.]
- [4] Yi Y J, Wang Z Y. Impact from dam construction on migration fishes in Yangtze River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(1): 29-33. [易雨君, 王

兆印. 大坝对长江流域洄游鱼类的影响[J]. 水利水电技术, 2009, 40(1): 29-33.]

- [5] Xie P, Chen Y Y. Evil quartet of inland waters in China: Impact of human activities on the loss of biodiversity[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1996, 20(Suppl): 41083.
- [6] Xiong F, Liu H Y, Duan X B, et al. Population structure and growth of *Ctenopharyngodon idellus* in the Upper Yangtze River[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2014, 37(4): 16-22. [熊飞,刘红艳,段辛斌,等. 长 江上游草鱼种群结构与生长特征[J]. 湖南师范大学自然 科学学报, 2014, 37(4): 16-22.]
- [7] Liu S P, Chen D Q, Duan X B, et al. Monitoring of the four famous Chinese carps resources in the middle and upper reaches of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, 13(2): 183-186. [刘绍平, 陈大 庆, 段辛斌,等. 长江中上游四大家鱼资源监测与渔业管 理[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(2): 183-186.]
- [8] Zhang G. Temporal and spatial patterns of early-life-history resource of the four major carps in the middle Yangtze River[D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences), 2012. [张国. 长江中游四大家鱼早期资源的时空 格局研究[D]. 武汉:中国科学院大学(中国科学院水生生 物研究所), 2012.]
- [9] Ren P. Distribution and annual dynamics of early life history resources of fish in the lower reach of the Yangtze River, China[D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences (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[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院水生 生物研究所), 2015.]
- [10] Cao W X, Chang J B, Qiao Y. 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. 长江鱼类早期 资源[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.]
- [11] Ding L Q, He X H, Li X F, et al. 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[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(4): 1116-1125.
  [丁隆强,何晓辉,李新丰,等. 2016—2018 年长江下游安 庆江段四大家鱼仔稚鱼资源调查分析[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4): 1116-1125.]
- [12] Gao L. Diversity and temporal and spatial patterns of larval fish assemblages in the south branch of Yangtze Estuary[D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Hydrobiology, the 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[D]. 武汉:中国科学院大学(中国科学院水生生物研究所), 2014.]

- [13] Yi B L, Yu Z T, Liang Z S, et al. The distribution, natural conditions and breeding production of the spawning grounds of four famous freshwater fishes on the main stream on the Yangtze River[M]//Gezhouba Water Control Project and the Four Famous Freshwater Fishes of the Yangtze River. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1988: 47-68. [易伯鲁, 余志堂, 梁秩燊,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[M]//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: 47-68.]
- [14] Hastie T, Tibshirani R. Generalized additive models[J]. Statistical Science, 1986, 1(3): 297-310.
- [15] Tang X L, Chen D Q, Wang K, et al. Spatial and temporal distribution of larval resources of fishes in the upper reaches of Yangtze River[J]. Freshwater Fisheries, 2010, 40(5): 27-31.
  [唐锡良,陈大庆,王珂,等.长江上游江津江段鱼类早期资源时空分布特征研究[J]. 淡水渔业, 2010, 40(5): 27-31.]
- [16] 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 Reservior[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.]
- [17] 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.]
- [18] Li M Z. Study on the life history strategies of fishes in the Yangtze River and its adaption to environment during early life history stage[D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences (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[D]. 武汉: 中国科学院 大学(中国科学院水生生物研究所), 2012.]
- [19] Wang S Y, Liao W G, Chen D Q, et al. Analysis of eco-hydrological characteristics of the four Chinese farmed carps' spawning grounds in the middle reach of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(6): 892-897. [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.]
- [20] 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, 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[J]. 水产学报,2019,43(6):1498-1506.]

- [21] 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.]
- [22] He X H, Tan L F, Peng Y X, et al. Four major Chinese carps eggs resources and spawning grounds distribution at Hukou section of the Yangtze River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(4): 420-430. [何晓辉, 谈龙飞, 彭云鑫, 等. 长江湖口段四大家鱼卵资源及其产卵场分布[J]. 中国 水产科学, 2021, 28(4): 420-430].
- [23] Doyle M J, Morse W W, Kendall A W. A comparison of larval fish assemblages in the temperate zone of the northeast Pacific and northwest Atlantic Oceans[J]. Bulletin of Marine Science, 1993, 53(2): 588-644.
- [24] Yang Q, Hu P, Yang Z F, et al. Suitable flow rate and adaptive threshold for grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) migration[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(4): 93-100.
  [杨庆, 胡鹏, 杨泽凡, 等. 草鱼洄游的适宜流速条件与适应阈值[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(4): 93-100.]
- [25] Xu W, Liu H G, Tang H Y, et al. Effects of ecological operation of Three Gorges reservoir on fish eggs and larvae in Shashi section of the Yangtze River[J]. 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[J]. 水 生态学杂志, 2014, 35(2): 1-8.]
- [26] Tian J L, Dai P, Ren P, et al. Assemblage of larvae and juvenile fish in Anqing Xinzhou section of the Yangtze River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(8): 916-926.
  [田佳丽,代培,任鹏,等.长江安庆新洲江段仔稚鱼的群 聚特征[J]. 中国水产科学, 2020, 27(8): 916-926.]
- [27] Franco A, Franzoi P, Torricelli P. Structure and functioning of Mediterranean lagoon fish assemblages: A key for the identification of water body types[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 79(3): 549-558.
- [28] Wu G X, Liu L H, Wang Z L, et al. Study on natural reproduction of grass carp in the Jinshajiang Reach of the upper reaches of the Yangtze River[J]. Freshwater Fisheries, 1988, 18(1): 3-6. [吴国犀, 刘乐和, 王志玲, 等. 长江上游金沙江 江段草鱼自然繁殖的研究[J]. 淡水渔业, 1988, 18(1): 3-6.]
- [29] Wang K, Zhou X, Chen D Q, et al. Response relationship analysis on hydrological processes and spawning behavior of four major Chinese carps[J]. 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[J]. 淡水渔业, 2019, 49(1): 66-70.]

- [30] 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.
- [31] Yi Y J, Le S H. Habitat suitability function of four major

Chinese carps spawning sites in the Yangtze River[J]. 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[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(S1): 117-122.]

# Correlation between the temporal and spatial characteristics of larval *Ctenopharyngodon idellus* resource and hydrological factors in the Anqing section of the Yangtze River

PENG Yunxin<sup>1</sup>, FANG Di'an<sup>1, 2</sup>, XU Dongpo<sup>1, 2</sup>, DING Longqiang<sup>2</sup>, LI Jiasheng<sup>3</sup>, REN Peng<sup>2</sup>, HE Xiaohui<sup>1</sup>, LUO Yuting<sup>3</sup>

- 1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
- 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, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China;
- 3. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China

Abstract: To explore the relationship between the temporal and spatial characteristics of larval *Ctenopharyngodon idellus* and hydrological factors in the Anging section of the lower Yangtze River, the larval C. *idellus* were systematically monitored from April 2018 to August 2020. A total of 272 larval C. idellus were identified using morphological and molecular biological methods, of which the three-year catch accounted for 12.30%, 34.52%, and 4.37% of the four major fish catches in China in 2018, 2019, and 2020, respectively. According to the estimation of larval fish resources, their runoffs were 3.95×10<sup>8</sup>, 5.79×10<sup>8</sup>, and 3.29×10<sup>8</sup>, for 2018, 2019, and 2020, respectively. The results of spatial and temporal characteristics analysis showed that the larvae and juveniles of C. *idellus* were present mainly from May to July, with peaks in May and the early part of mid-July. In 2020, the abundance of larvae and juveniles of C. idellus was the lowest because the flood was not suitable for breeding and because the main flood season was delayed. Kruskal-Wallis test showed that the abundance of larval C. idellus on the left and right banks was significantly higher than that in the middle of the river (P < 0.05, n = 70). From 2018 to 2020, the spatial distribution of the overall average abundance was distributed as follows: left bank (8.99 ind/1000 m<sup>3</sup>)>right bank (5.34 ind/1000 m<sup>3</sup>)>middle of the river (3.53 ind/1000 m<sup>3</sup>). Pearson correlation analysis showed that the abundance of larval C. *idellus* was significantly positively correlated with water temperature, the daily rising rate of water level, and runoff and negatively correlated with transparency. GAM model analysis showed that the relative importance of hydrological factors was as follows: water temperature>transparency>daily rising rate of water level>daily rising rate of runoff. In this study, the total deviation interpretation rate of the GAM model reached 90.8%, which accurately revealed the response relationship between the abundance of larval C. idellus and hydrological factors. This study accumulated basic data for understanding the occurrence mechanism of early C. idellus resources in the Yangtze River.

**Key words:** Anqing section of the Yangtze River; larval *Ctenopharyngodon idellus*; spatial and temporal dynamics; hydrological factors

Corresponding author: FANG Dian, E-mail: fangdian@ffrc.cn; XU Dongpo, E-mail: xudp@ffrc.cn