

三峡库区涪陵江段产漂流性卵鱼类的早期资源及其对水文和水温特征的响应^{*}

杨志¹, 龚云¹, 胡挺², 朱其广¹, 金瑶¹, 曹俊¹, 唐会元¹, 徐薇¹, 陈小娟^{1**}

(1:水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079)

(2:中国长江三峡集团有限公司, 武汉 430010)

摘要:三峡水库调度运行改变了库区江段的水文情势,影响漂流性卵苗在库区江段内的时空分布特征。在水库低水位运行时,具有流水生境特征的库中和库尾江段是产漂流性卵鱼类在整个三峡库区内重要的产卵江段。了解三峡库中和库尾江段产漂流性卵鱼类的早期资源状况及其对水文和水温特征的响应关系,对于采取适宜的保护措施促进鱼类早期资源的恢复具有重要的意义。本文通过2017—2020年5—7月在库中涪陵断面进行的逐日早期资源监测,了解三峡库中和库尾江段产漂流性卵鱼类早期资源的种类组成、产卵规模、产卵场分布及其年际变动特征,并采用随机森林(RF)模型,分析鱼类逐日产卵规模变动与水文、水温格局及其过程的关系,辨识影响不同种类产卵规模变动的关键水文及水温要素。结果表明:2017—2020年共采集到漂流性鱼卵21种,包括长江上游特有鱼类鱼卵3种;以圆筒吻鮈 *Rhinogobio cylindricus*、蒙古鮈 *Chanodichthys mongolicus*、贝氏鱲 *Hemiculter bleekeri* 等6种鱼类的鱼卵为主,占总采集鱼卵数的88.76%;各年的鱼卵规模分别为 83.04×10^8 、 14.29×10^8 、 20.43×10^8 和 22.83×10^8 粒;涪陵以上干流江段分布有6个鱼类的集中产卵场,是圆筒吻鮈、长鳍吻鮈 *R. ventralis*、长薄鳅 *Leptobotia elongata* 等长江上游特有鱼类重要的产卵场所;逐日产卵规模主要受产卵时透明度及流量大小、产卵前流量或水位上涨过程以及产卵前积温大小的影响,且影响不同鱼类自然繁殖的关键水温、水文因素在不同种类间存在差异。研究结果可为三峡库区鱼类资源保护措施特别是生态调度措施的实施提供科学依据。

关键词:三峡库区;鱼类早期资源;产卵规模;产卵场;生物—非生物关系;随机森林模型

Fish resources of the early life history stages in the Fuling section of the Three Gorges Reservoir and their responses to hydrological and thermal characteristics^{*}

Yang Zhi¹, Gong Yun¹, Hu Ting², Zhu Qiguang¹, Jin Yao¹, Cao Jun¹, Tang Huiyuan¹, Xu Wei¹ & Chen Xiaojuan^{1**}

(1: Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R. China)

(2: China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, P.R. China)

Abstract: Reservoir operation resulting from river damming has altered the flow regimes of the river sections of reservoirs, inducing profound impacts on the spatiotemporal distribution of the early resources of fish species that spawn drifting eggs (FSDE) in the river sections of reservoirs. During the period of low water-level operation stage of the reservoir, the river section with flowing-water habitats is an important spawning river section compared those other sections of the reservoir. Fully understanding the status of early resource of FSDE and their response to hydrological and thermal characteristics in a reservoir's middle and tail reaches is of great significance for the restoration and promotion the scale of early resource. This paper intended to reveal the inter-annual variation in

* 2022-10-13 收稿; 2022-12-19 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2021YFC3200304)、国家自然科学基金项目(51879171)和中国三峡集团有限公司项目联合资助。

** 通信作者; E-mail: chenxiaojuan@mail.ihe.ac.cn。

the species composition of eggs and larvae collected, as well as the spawning scale and distribution of fish spawning grounds in the middle and tail reaches of the Three Gorges Reservoir (TGR), through the daily sampling for eggs and larvae being conducted at the Fuling section from May to July in 2017–2020. The random forest model was further performed to clarify the relationships between the variations in the daily spawning scales and the hydrological, thermal patterns and process conditions, aiming to identify the key hydrological and thermal factors affecting the variations of spawning scales of different species. The results showed that: 1) 21 species of eggs were collected, including 3 species of fish eggs that endemic to the upper reaches of the Yangtze River, and the amounts of eggs of 6 fish species, including *Rhinogobio cylindricus*, *Chanodichthys mongolicus*, and *Hemiculter bleekeri*, etc., were dominant, which accounted for 88.76% of total number of eggs collected. 2) The scale of fish eggs each year was 83.04×10^8 ind., 14.29×10^8 ind., 20.43×10^8 ind., and 22.83×10^8 ind., respectively. 3) There were 6 main spawning grounds distributed in the upstream of Fuling sampling site in the TGR, where is an important spawning place for endemic fish species (e.g. *R. cylindricus*, *R. ventralis*, and *Leptobotia elongata*) in the upper reaches of the Yangtze River. 4) The daily spawning scales were mainly affected by the amounts of transparency and flow discharge during spawning, as well as flow or water level rising rate and accumulated water temperature before spawning, and the key hydrological and thermal factors that affect the natural reproduction were different among different species. This research provides data support for the implementation of fish resource protection measures, especially ecological regulation measures, in the TGR.

Keywords: Three Gorges Reservoir; fish early resource; spawning scale; spawning ground; biotic-abiotic relationship; random forest model

三峡水库周期性的蓄水倒灌,不可避免地对库区产漂流性卵鱼类的早期资源造成一定程度的影响^[1-4]。调查发现,随着三峡水库的蓄水倒灌,原分布于库首及部分库中江段内的产卵场被淹没,鱼类被迫上溯至库区上游江段完成繁殖活动;涪陵以上的库区干流江段不仅是三峡水库蓄水后,四大家鱼等产漂流性卵鱼类在整个库区内的重要产卵江段,而且也是该江段及三峡库区以上江段出生卵苗顺水漂流的必经通道^[1-4]。了解该江段产漂流性卵鱼类的早期资源状况及其对水文和水温特征的响应关系,是准确辨识三峡水库蓄水运行对长江上游鱼类早期资源变动的影响,以及采取适宜的保护措施(如就地保护、生态调度等措施)恢复或保护受水库蓄水影响鱼类资源状况的基础前提^[4-7]。

目前,对三峡库区涪陵以上干流江段的鱼类早期资源状况的调查与研究,主要集中在卵苗种类组成及数量比例、卵苗发生时间及规模动态、四大家鱼和铜鱼的产卵场位置分布情况及其自然繁殖所需的适宜水文、水温条件确定等方面^[1-4,8],而对长江上游特有鱼类产卵场的分布位置状况及其自然繁殖的水文、水温需求条件的调查与研究缺乏。同时,已有的早期资源调查位点均位于大型支流与三峡水库汇口处的下游附近或较远的江段(如涪陵、丰都、忠县、万州、云阳等江段),其调查结果未充分考虑大型支流来源鱼卵汇入的影响,导致许多鱼卵的来源难以确定;当使用这些鱼卵进行产卵场推算时,无法确定这些鱼卵的出生地是在干流还是在支流^[1-4]。此外,在基于鱼类早期资源数据,确定三峡库区产漂流性卵鱼类自然繁殖的适宜水文、水温需求条件时,多考虑鱼类产卵时的水文、水温条件,而通常忽略产卵前水文过程及积温大小对鱼类自然繁殖的影响^[9-10]。

本文通过2017—2020年5—7月在涪陵采样断面(该断面位于乌江与三峡水库汇口处上游200 m;离上游嘉陵江河口有120 km;嘉陵江河口—乌江河口间无大型支流汇入)进行的早期资源逐日调查,获取三峡库区涪陵以上江段鱼类早期资源的种类组成、产卵规模、产卵场分布位置情况等信息,并比较分析其在年际间的差异;进而构建产漂流性卵鱼类种类,特别是重要种质资源鱼类种类和主要长江上游特有鱼类种类的逐日产卵规模变动与水文、水温格局与过程条件的关系模型,分析辨识鱼类早期资源丰度变动对水文、水温特征的响应规律,从而为三峡库尾江段鱼类早期资源保护措施的实施提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 采样点与采样方法

2017年5月22日—7月16日、2018年5月17日—7月15日、2019年5月15日—7月13日以及2020年5月20日—7月15日在涪陵区南岸固定采样点($29^{\circ}45'39.0''N, 107^{\circ}6'32.7''E$),用琼网进行逐日卵苗采

样。采集点靠近河道深泓线一侧,位于河段顺直、水面宽阔的江段区域内。在逐日采样期间,当卵苗密度出现高峰期时,采用圆锥网进行断面采集,获取采集点卵苗分布的断面系数^[11-13](附表 I)。断面采集时,沿采样断面横断面方向依次等距离均匀布设 3 个采样点,并对每个采样点进行表、中和底层采集(相应的采集深度分别为该点水深的 0.2、0.5、0.8 倍)^[11-13]。非断面采集时进行连续采样,每日在两个时间段(7:30—9:30, 16:30—18:30; 预实验显示调查断面的鱼卵密度在 1:00—12:00 和 13:00—24:00 间无显著性差异,且所选时间段内的鱼卵密度相对较高)内进行采集,每个时间段采样 2~4 次,每次采样持续 15 min。断面采集时,采样时间段及采样频次与非断面采集相同,但每次采集的时间为 5 min^[11-13]。

每次采样时,人工直接收、放采集网具,并记录采集起始及结束时间、采样网具网口的入水水深、倾角、网口前的水流流速及水温(各年调查期间的日平均水温范围为 19.7~25.9℃)。每次采样完成后,将网内的卵、苗、悬浮物等进行滤取,并分拣鱼卵、仔鱼和稚鱼。对每次采样收集到的鱼卵进行计数,然后转移至有水的容器中进行室内培养^[9,11-13]。当鱼卵在室内培养到鳔一室期(室内培养水温 20.1~25.2℃, 培养 5~10 d)时,将其从培养容器中取出,然后放入离心管或塑料瓶中用 5%~8% 浓度的福尔马林溶液进行固定,并在常温下或冷藏环境中保存;对于在培养中死亡的卵苗,则用 80% 浓度的酒精进行固定,然后编号冷藏保存鱼卵。仔稚鱼则在采样现场放入塑料圆口瓶中,用 80% 浓度的酒精或 5%~8% 浓度的福尔马林溶液进行固定后在常温下或冷藏环境中保存。

1.2 卵苗种类鉴定及水文数据获取

固定的卵苗样本采用以下 2 种方法进行种类鉴定:1)形态学方法。利用不同种类早期发育阶段在各种可数性状(仔鱼出膜后的肌节数目、油球的有无及数目、卵膜丝的有无、各鳍鳍条的数目、幽门盲囊的数目等)、可量性状(卵黄径、卵膜径、油球直径、非圆形卵的长径与短径、卵周隙的大小等)以及描述性状(卵的形状与构造、卵黄的颜色、油球的颜色、胚胎发育过程中器官出现的顺序、仔鱼的体型及色素分布等)上的差异进行不同种类的形态学区分^[7];2)分子学方法。提取卵或者鱼苗的 mtDNA, 利用通用引物(cyth 或 COI)对所提取 DNA 进行扩增,之后进行测序。对测序结果进行拼接、比对及遗传距离计算后,确定其种类^[12]。

本研究从长江水文网(<http://www.cjh.com.cn/>)收集 3—7 月涪陵采样点上游寸滩水文站的逐日不同时刻的流量和水位数据,并从长江水利委员会水文局收集采样点附近清溪场水文站 3—7 月的断面平均流速数据。同时,在产卵高峰期,在采样点至木洞江段间使用多普勒流速仪选择部分断面测量其平均流速,并结合清溪场断面流速结果校核预估产卵场位置至采样点之间的平均流速。此外,在涪陵断面放置 HOBO 水温自动测量计测量 3—7 月各日不同时刻的水温(每 1 小时读取 1 个数据)。

1.3 数据分析

1.3.1 早期资源种类组成及其年际变动 根据种类鉴定及卵苗计数结果,统计不同鱼类种类被采集到的鱼卵粒数占当年总采集到的鱼卵粒数的比例,并进行年际间的比较。同时,综合 4 年调查数据,采用饼图可视化鱼卵粒数百分比大于 1% 的鱼类的种类组成。

1.3.2 产卵规模及其年际变动 参考易伯鲁等^[13]提出的方法,计算各年调查期间不同鱼类的逐日产卵规模。统计比较不同年份采样期间的逐日产卵规模及总产卵规模(万 ind.),并计算不同年份采样期间主要产卵鱼类(产卵规模占比至少在 1 年中大于 1% 的种类)的产卵规模占当年所有鱼类产卵规模的比例(%). 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较各年逐日产卵规模的平均值是否在统计学上具有显著差异性,并采用多重比较方法分析显著性差异的来源。使用单因素方差分析前,采用 Levene's test 进行方差齐次性检验;当方差齐次时,采用 Turkey HSD 方法进行多重比较,反之,使用 Tamhane's T2 方法进行多重比较^[14]。

1.3.3 产卵场分布位置及其年际变动 基于产卵场位置估算公式,估算产卵场的大致分布位置: $S=VT/1000$, 其中 S 为不同种类鱼卵的漂流距离(km), V 为采集到不同鱼卵时采样点断面的平均流速(m/s), T 为采集到不同种类鱼卵时这些鱼卵胚胎已发育经历的时间(s)^[13]。分析比较不同年份采样期间,主要产卵场分布位置的年际变动情况。

1.3.4 主要产卵场的产卵规模及其年际变动 分年份统计分析产漂流性卵鱼类在不同产卵场内的产卵规模占各年所有产卵场总产卵规模的比例,确定不同年份鱼卵最主要的产卵场来源;以及主要产卵鱼类种类各年在最主要产卵场内的产卵规模占各年总产卵规模的比例,确定其年际变动情况。

1.3.5 产漂流性卵鱼类早期资源丰度变动对水文和水温特征的响应 采用随机森林模型(random forest, RF),分析2017—2020年5—7月间所有产漂流性卵鱼类种类以及典型鱼类种类或类群(铜鱼、圆筒吻鮈和四大家鱼)^[15-16]的逐日产卵规模与水文、水温格局与过程条件的关系,辨识产漂流性卵鱼类早期资源丰度变动对水文、水温特征的响应规律。RF模型是一种基于分类树(classification tree)的算法,是机器学习中一种广泛运用在生物—非生物关系研究之中的分类与回归方法。RF可以处理大量的多达几千个的自变量,并能够评估所有变量的重要性,而不需要顾虑一般回归问题所面临的多元共线性问题;RF的预测或回归结果对缺失数据和非平衡的数据比较稳健;RF中分类树的算法自然地包括了变量的交互作用,而交互作用在其他模型中(如线性模型、广义可加模型等)因其复杂性而经常被忽略^[17-18]。在构建随机森林模型时,以所有漂流性卵鱼类种类以及典型鱼类种类或类群的逐日产卵规模为因变量,以6个水文变量——产卵时的日平均流量(DAFD)、产卵前的流量上升量(RQD)、产卵前的水位上升量(RQWL)、产卵前的流量日均上升率(DRRFD)、产卵前的水位日均上升率(DRRWL)以及产卵前流量上升的有效持续天数(EDRFD),2个水温变量——产卵时的平均水温(DAWT)和从第1次达到15℃的日期到产卵日的累积温度(产卵前积温,AT)以及1个水质变量——产卵时的日平均透明度(DATR)作为自变量。各个自变量的参数计算方法请见文献[9]。AT通过对某一产卵日前第1次达到15℃到该产卵日之间所有天数内的日平均水温进行求和获得;日平均水温来源于3—7月涪陵断面实测数据。采用leave-one-out方法作为RF的验证程序;采用指标%IncMSE(mean decrease accuracy,平均精确度减少指数)和IncNodePurity(mean decrease gini,平均下降基尼指数)判别各自变量对因变量影响的相对重要性,并绘制重要影响变量对因变量的偏效应(Partial effect)图^[17-18]。

1.3.6 分析软件 采用WPS Office 11.1.0.1235、R语言R i386 4.0.3以及ArcGIS 10.2进行数据处理、统计分析及图形绘制;采用R语言软件包randomForest 4.6-14进行随机森林模型的构建与分析。本文的显著性水平设置为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 早期资源种类组成及其年际变动

2017—2020年5—7月,共采集到鱼卵28731粒、仔稚鱼26866尾。经鉴定,漂流性鱼卵有22种,隶属于1目3科19属(图1和附表Ⅱ),其中鲤科鱼卵种类数最多,共采集到19种,占鱼卵总种类数的比例为86.36%;仔稚鱼种类28种,隶属于6目11科25属(图1和附表Ⅱ),其中鲤科仔稚鱼种类数最多,13种,占仔稚鱼总种类数的比例为48.15%。所采集到的鱼卵中,有3种长江上游特有鱼类(圆筒吻鮈 *Rhinogobio cylindricus*、长鳍吻鮈 *R. ventralis*、长薄鳅 *Leptobotia elongata*)的鱼卵。鱼卵以圆筒吻鮈、蒙古鮈 *Chanodichthys mongolicus*、贝氏鱉 *Hemiculter bleekeri*、银鮈 *Squalidus argentatus*、铜鱼 *Coreius heterodon*、吻鮈 *R. typus* 和翘嘴鮈 *Culter alburnus* 6种鱼类的鱼卵为主,这6种鱼类的鱼卵数占总鱼卵数的比例为88.76%,其它16种鱼类的鱼卵数仅占11.24%(图1a)。

圆筒吻鮈的鱼卵数比例在各年间呈现波动变化趋势,2020年的数量比例相较之2017年略有下降;蒙古鮈的鱼卵数比例在各年间呈逐年上升趋势,而似鮈 *Pseudobrama simoni* 的鱼卵数比例则呈明显的波动上升趋势;贝氏鱉、银鮈和蛇鮈 *Saurogobio dabryi* 的鱼卵数比例在各年间呈波动下降趋势,其中2020年较2017年有较大幅度的下降;相较2017年,2020年铜鱼和翘嘴鮈的鱼卵数比例略有上升(图1b)。

2.2 产卵规模及其年际变动

2017—2020年采样期间,流经涪陵采样点的鱼卵规模分别为 83.04×10^8 ind.、 14.29×10^8 ind.、 20.43×10^8 ind.和 22.83×10^8 ind.,2017年后流经涪陵采样点的鱼卵规模明显下降(图2a)。单因素方差结果显示,逐日产卵规模的平均值在各年间差异显著(Levene's test: $P=0.419>0.05$;One-way ANOVA: $F=8.808$, $P<0.001$)(图2a);多重比较(Turkey HSD)显示逐日产卵规模的平均值在2017年与其它3个年份间差异显著(P 均小于0.001),但在2018—2020年间无显著差异(P 均大于0.05)。

12种主要产卵种类的产卵规模占各年总产卵规模的比例见图2b,结果显示:总体上,蒙古鮈(CM)、圆筒吻鮈(RC)、似鮈(PS)、鲢 *Hypophthalmichthys molitrix*(HM)以及吻鮈(RT)的产卵规模占比在各年间呈上升趋势,而贝氏鱉(HB)、银鮈(SA)以及蛇鮈(SD)的产卵规模占比在各年间则呈下降趋势。

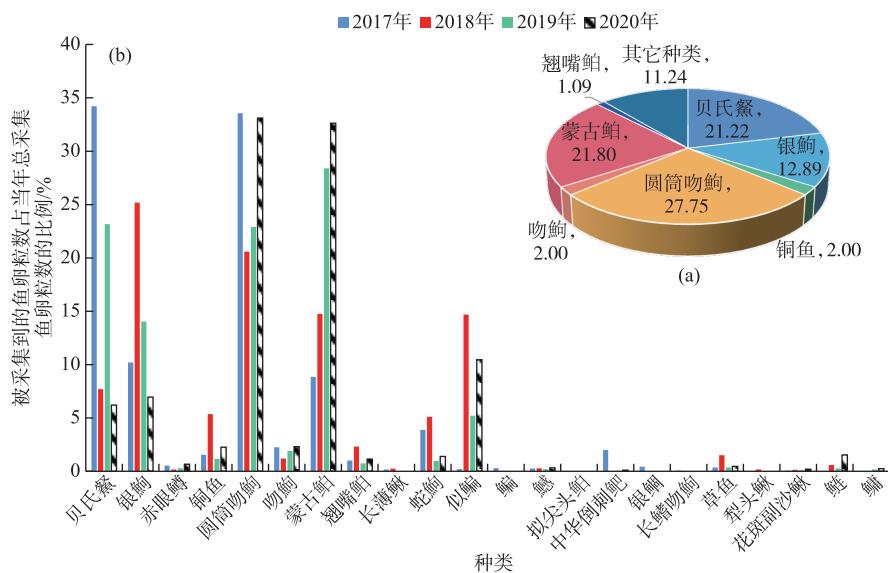


图 1 2017—2020 年 5—7 月在涪陵采样点被采集到的鱼卵主要种类组成及其鱼卵数占 4 年采样期间采集到的鱼卵总数的比例(a), 以及不同种类鱼卵的数量比例在年际间的变动情况(b)

Fig.1 The main species composition of fish eggs collected from the Fuling sampling site from May to July in 2017–2020 and the proportions of their numbers of eggs account for the total number of fish eggs collected during the 4-year sampling period (a), as well as the inter-annual changes in the number proportions of eggs of different species (b)

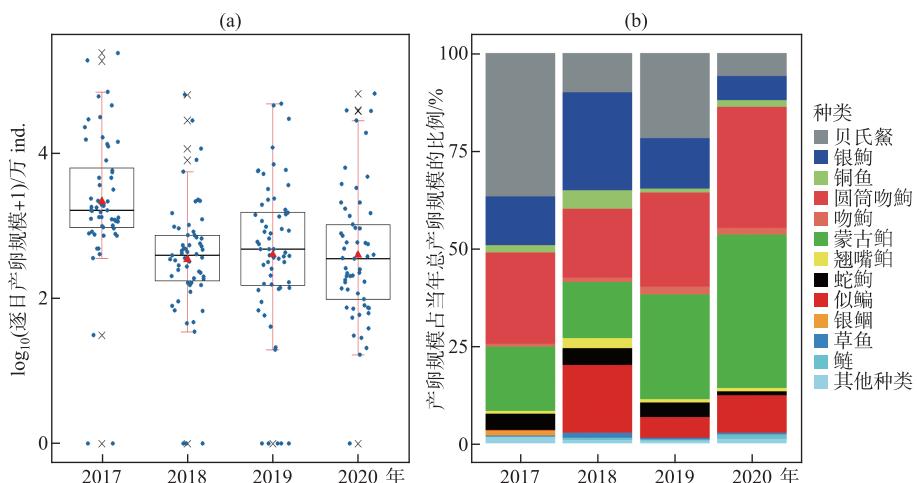


图 2 2017—2020 年 5—7 月涪陵采样点逐日产卵规模的分布情况(a)(黑色的叉形以及红色的三角形标志分别代表异常值和平均值, 箱体的 3 条横线从上到下分别代表 75% 分位数、中位数以及 25% 分位数); 主要产卵种类产卵规模占各年总产卵规模的比例(b)

Fig.2 Distribution of daily spawning scale at Fuling sampling site from May to July in 2017–2020 (the signs black fork and red triangle marks represent outlier and average values, respectively, and the three horizontal lines in the box from up to down represent 75% quantile, median and 25% quantile, respectively) (a); Proportions of spawning scales of main fish species account for total spawning scale in each year (b)

2.3 主要产卵场的分布位置及其年际变动

根据所采集鱼卵的发育期,结合该时段采样点上游的流速和水温条件,推算2017—2020年所采集的主要种类的鱼卵来自采样点上游的6个产卵场:1)涪陵产卵场,根据桑椹期鱼卵推算得出,位于采样点上游7~12 km;2)石沱镇产卵场,根据原肠期鱼卵推算得出,漂流距离23~37 km,位于石沱镇上游江段;3)江南镇产卵场,根据胚孔封闭期鱼卵推算得出,漂流距离39~50 km,位于江南镇—扇沱乡江段附近;4)麻柳嘴镇产卵场,根据尾芽期鱼卵推算得出,漂流距离59~66 km,位于白家冲上下游江段;5)木洞镇产卵场,根据尾鳍出现期鱼卵推算得出,漂流距离78~86 km,位于木洞镇下游江段;6)巴南区产卵场,根据心脏搏动期鱼卵推算得出,漂流距离118~148 km,位于大渡口区至巴南区附近江段(图3)。相同地理名称产卵场的具体位置在各年间略有差异。监测到的主要产卵场数量在各年间有所差异,其中2017—2018年监测到主要产卵场4个;2019年为5个;2020年为6个(图3)。

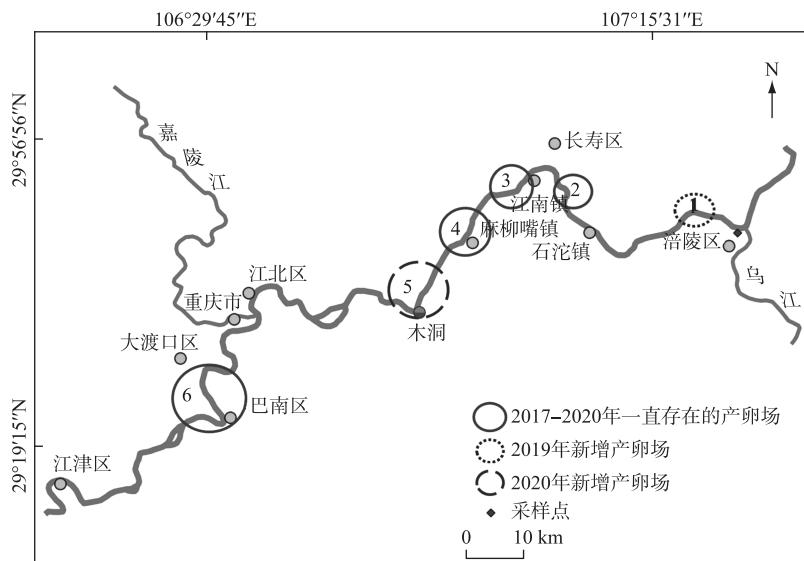


图3 2017—2020年间涪陵采样点上游主要产卵场分布位置的示意图
Fig.3 Schematic diagram of the distributed locations of the main spawning grounds in the river section upstream of the Fuling sampling site during 2017–2020

2.4 主要产卵场的产卵规模占比及其年际变动

2017—2020年间涪陵采样点采集到的鱼卵主要来自采样点上游4个产卵场(石沱镇、江南镇、麻柳嘴镇及巴南区产卵场),产漂流性卵鱼类在这4个产卵场的产卵规模占比在各年间的变动范围分别为6.99%~24.59%(石沱镇)、2.15%~38.76%(江南镇)、10.87%~58.89%(麻柳嘴镇)和12.17%~48.77%(巴南区);平均值分别为13.20%(石沱镇)、24.23%(江南镇)、26.44%(麻柳嘴镇)和32.54%(巴南区)(图4)。

主要或重要产卵种类2017—2020年在4个最主要产卵场内的产卵规模占各年总产卵规模的比例见图5,结果显示:主要产卵种类在不同主要产卵场内的产卵规模占比在年际间波动较大;2017年圆筒吻鮈产

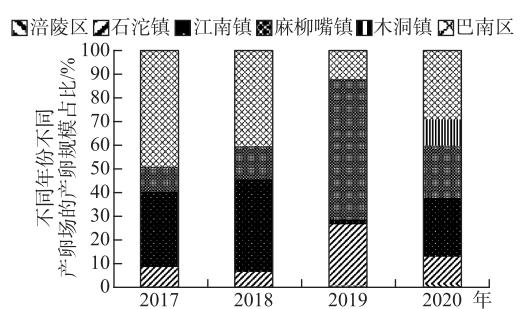


图4 2017—2020年间涪陵采样点上游主要产卵场的产卵规模占各年所有产卵场总产卵规模的比例
Fig.4 Proportion of spawning scale of major spawning grounds upstream of Fuling sampling site in each year accounts for the total spawning scale of all spawning grounds in each year during 2017–2020

卵规模占比最大值(12.09%)出现的产卵场为巴南区产卵场,2018年为江南镇产卵场(10.05%),2019年为石沱镇产卵场(16.17%),2020年又为巴南区产卵场(9.11%),且2020年其在各个主要产卵场间的产卵规模占比差异变小;蒙古鮈从在江南镇和麻柳嘴镇产卵场内的产卵规模占比较大,逐渐转变为在江南镇、麻柳嘴镇和巴南区产卵场内的产卵规模均较大;除2019年外,银鮈和贝氏鱥在麻柳嘴镇和巴南区产卵场内的各年产卵规模占比均较大。

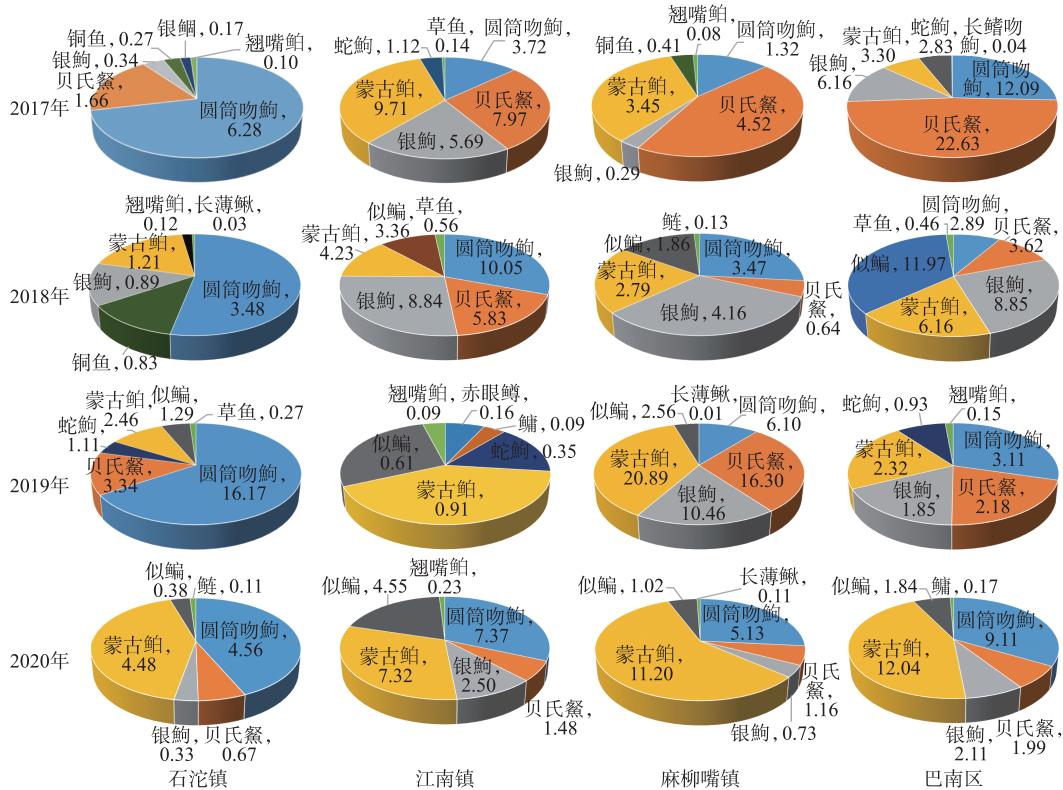


图 5 2017—2020 年间主要或重要产卵鱼类种类各年在 4 个
最主要产卵场内的产卵规模占各年总产卵规模的比例

Fig.5 Proportion of spawning scale of main or important spawning fish species in the four main spawning grounds in each year accounts for the total spawning scale in each year during 2017–2020

2.5 产漂流性卵鱼类早期资源丰度变动对水文和水温特征的响应

随机森林模型结果显示:所选择的10个解释变量能够解释87.81%的所有种类、84.64%的铜鱼、86.86%的圆筒吻鮈以及83.30%的四大家鱼的逐日产卵规模变异。变量 DATR(产卵时的日平均透明度)、RQD(产卵前的流量上升量)、AT(产卵前的积温)和 DAFD(产卵时的日平均流量)的%IncMSE 和 IncNodePurity 值排在所有种类逐日产卵规模预测变量的%IncMSE 和 IncNodePurity 值的前4位,且与其它变量的%IncMSE 和 IncNodePurity 值有明显的分离,表明上述4个变量是影响所有种类逐日产卵规模变动的最主要的影响变量(图6)。类似地,影响铜鱼、圆筒吻鮈和四大家鱼逐日产卵规模变动的关键变量分别是铜鱼——AT 和 RQWL(产卵前的水位上升量)、圆筒吻鮈——EDRFD(产卵前流量上升的有效持续天数)和 DATR 以及四大家鱼——AT、DRRFID(产卵前的流量日均上升率)、DAFD 和 RQD(图6)。

影响所有种类、铜鱼、圆筒吻鮈和四大家鱼逐日产卵规模变动的关键变量的偏效应图如图7所示,结果显示:

1)对于所有鱼类种类而言,其逐日产卵规模(TSS)随着产卵时的日平均透明度(DATR)的下降而上升,

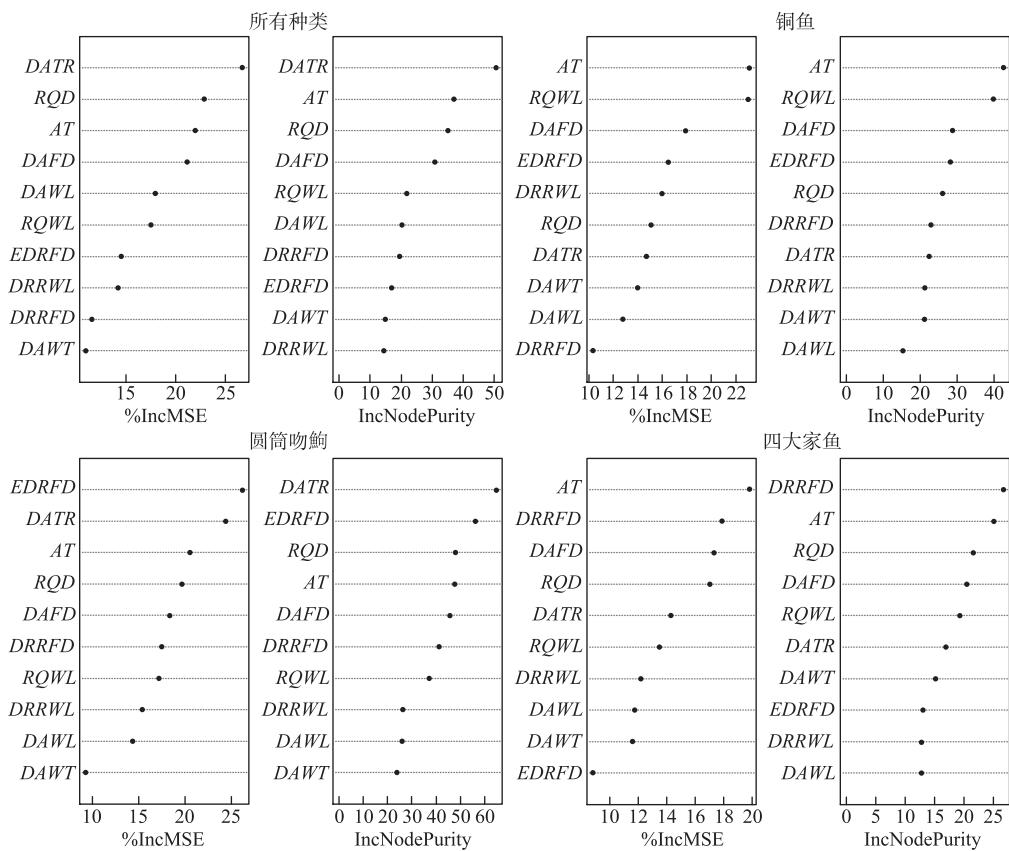


图 6 不同解释变量在预测所有种类、铜鱼、圆筒吻鮈和四大家鱼逐日产卵规模变动中的重要性排序
(随机森林模型结果)

Fig.6 Ranking of importance of different explanatory variables in predicting the changes of daily spawning scales of all species, *Coreius heterodon*, *Rhinogobio cylindricus*, and major four Chinese carps (results of random forest model)

当透明度的 log 转换值小于 1.56(即透明度小于 35 cm)时的逐日产卵规模较大;随着产卵前积温(AT)的增加呈现先增加,然后较为稳定,到最后再波动下降的趋势,当 AT 的 log 转换值在 2.80~3.25(630~1777°C)之间时的逐日产卵规模较大;随着产卵前的流量上升量(RQD)的上升呈现先小幅上升,然后再大幅上升到峰值,最后再波动下降的趋势,当 RQD 的 log 转换值在 3.60~4.20(3980~15847 m³/s)之间时的逐日产卵规模较大;随着产卵时的日平均流量(DAFD)的上升呈现先上升,然后再波动下降的趋势,当 DAFD 的 log 转换值在 3.94~4.28(8709~19054 m³/s)之间时的逐日产卵规模较大。

2)对于铜鱼而言,其逐日产卵规模(TYSS)随着 AT 的上升呈现先波动上升,然后再快速下降的趋势,当 AT 的 log 转换值在 3.21~3.35(1621~2238°C)之间时的逐日产卵规模较大;随着产卵前的水位上升量(RQWL)的上升呈现先快速上升,然后再波动下降直到保持相对稳定的趋势,当 RQWL 的 log 转换值在 0.19~0.40(0.55~1.57 m/d)之间时的逐日产卵规模较大。

3)对于圆筒吻鮈而言,其逐日产卵规模(YTWJSS)随着产卵前流量上升的有效持续天数(EDRFD)的上升呈现波动上升的趋势;随着 DATR 的上升呈现先保持相对稳定,然后再快速下降的趋势,当 DATR 的 log 转换值小于 1.32(20 cm)时的逐日产卵规模较大。

4)对于四大家鱼而言,其逐日产卵规模(SDJYSS)随着 AT 的上升,经历保持相对稳定、小幅上升、快速

下降、波动下降、再快速下降这一过程;随着产卵前的流量日均上升率($DRRFD$)的上升呈现先保持相对稳定,再下降然后再上升的趋势,当 $DRRFD$ 的log转换值大于2.46($287 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$)时的逐日产卵规模较大;随着 $DAFD$ 的上升呈现先波动上升,然后再波动下降,最后保持相对稳定的趋势,当 $DAFD$ 的log转换值在4.02~4.28($10470\sim19054 \text{ m}^3/\text{s}$)之间时的逐日产卵规模较大;随着 RQD 的上升经历相对稳定、快速上升、波动上升、波动下降、保持相对稳定这一过程,当 RQD 的log转换值在3.70~4.20($5011\sim15848 \text{ m}^3/\text{s}$)之间时的逐日产卵规模较大。

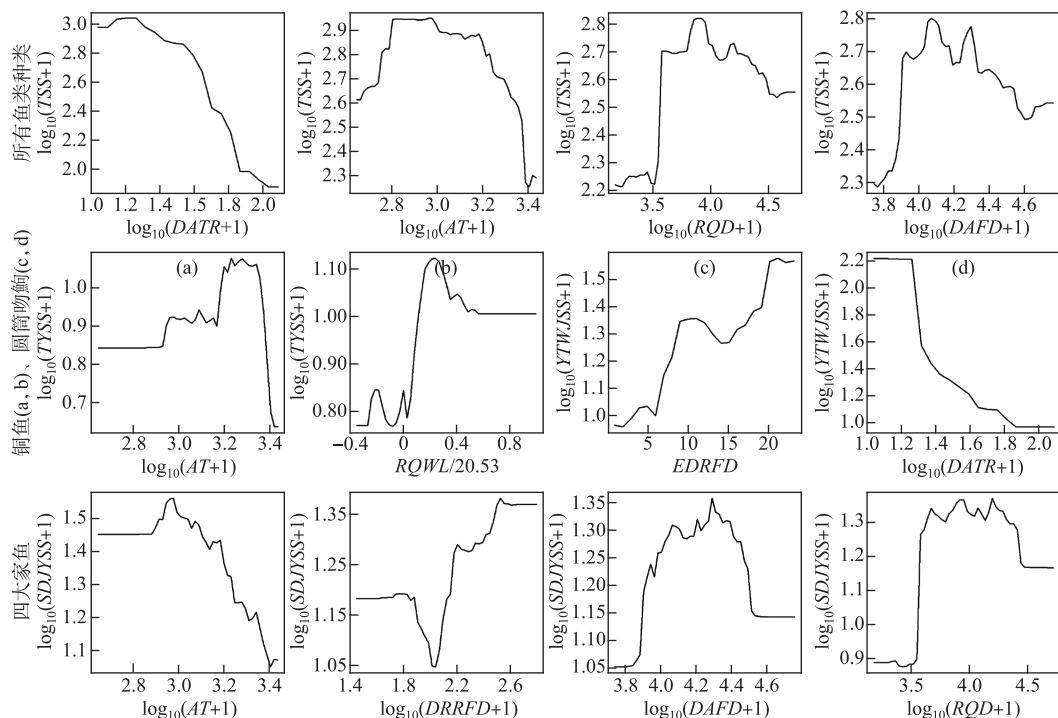


图 7 影响所有种类、铜鱼、圆筒吻𬶋和四大家鱼逐日产卵规模变动的关键变量的偏效应图

Fig. 7 Partial effect diagram of key variables affecting the daily spawning scale change of all species, *Coreius heterodon*, *Rhinogobio cylindricus*, and major four Chinese carps

3 讨论与结论

3.1 早期资源的种类组成、产卵规模及产卵场位置分布

综合在三峡库区干流不同江段的历史调查资料结果^[1-4,8,11],发现三峡水库成库后至少有20种以上的漂流性鱼卵流经三峡库中和库尾江段,本文获得的结果与上述结果相一致(图1和附表Ⅱ),表明三峡库中和库尾江段在长江上游产漂流性卵鱼类多样性维持方面具有重要的意义。本次调查获得的漂流性鱼卵的种类组成与三峡水库成库后的历史调查结果间略有差异^[1-4,8,11],如本次未采集到的宜昌鱥𬶍 *Gobiobotia filifer* 鱼卵,但采集到长鳍吻𬶋鱼卵。造成上述结果的原因很可能与不同采样点上游鱼类产卵场分布、采样点具体位置、采样时间以及采样网具等的差异有关^[1-4,19-20]。

调查发现4年间流经涪陵断面的鱼卵规模年平均值为 $35.15 \times 10^8 \text{ ind.}$,与向家坝、溪洛渡未蓄水前(2010—2012年5—7月)流经江津断面(该断面上游为长距离的流水生境江段)的平均鱼卵规模($39.62 \times 10^8 \text{ ind.}$)相近^[21],表明流经三峡涪陵以上干流江段的漂流性鱼卵规模较大,该江段流水生境的维持在长江上游漂流性鱼卵规模的维持方面也具有重要的意义。同时,本研究发现自2018年,流经涪陵采样点断面的鱼卵规模维持在 $14 \times 10^8\sim23 \times 10^8 \text{ ind.}$ 之间,较2017年同期有明显的下降,该现象的出现很可能是由于不同年份

间水文情势及产卵亲鱼数量差异的结果^[22-23],需要后续跟踪监测与研究。

有调查发现,三峡水库蓄水前,在三峡水库尾江段分布有四大家鱼和铜鱼的产卵场^[8,24];蓄水后,三峡库尾江段仍分布有四大家鱼的产卵场^[1-2]。本研究结果显示,在涪陵以上江段,在分布有四大家鱼和铜鱼产卵场的同时,也分布有长鳍吻鮈、圆筒吻鮈、长薄鳅等长江上游特有鱼类及翘嘴鮊、蒙古鮈等重要种质资源鱼类的产卵场(图5)。同时,与蓄水前相比^[8,24],铜鱼在涪陵以上江段内的主要产卵场的位置有所上移,而四大家鱼在涪陵以上江段内的主要产卵场数量增加(增加涪陵区、石沱镇、江南镇及麻柳嘴镇4个产卵场)。此外,以前的调查认为,在确定产卵场的具体分布位置时,使用较早发育期或刚受精的鱼卵,并结合采样点上游流速的校验,可以准确地确定产卵场的位置^[7,13]。在本研究中,木洞产卵场到采样点之间的平均流速通过实测数据进行了校验,且推算木洞及以下产卵场所使用鱼卵的发育期为尾鳍出现期及以下发育期,这些发育期的鱼卵漂流到采样点的漂流时间较短(2~26 h),表明推算获得的木洞及以下产卵场的分布位置是较为准确的。木洞及以下产卵场的分布位置,与刘乐和等1983—1984年基于早期资源及亲鱼解剖结果获得的铜鱼产卵场的分布位置也大致相同^[8]。尽管如此,本文推算获得的巴南产卵场的分布位置,很可能与实际结果存在一定程度的偏差,这是因为:1)该产卵场到木洞产卵场间的平均流速未进行实地测量校验;2)该产卵场下游有大型支流嘉陵江汇入,推算该产卵场的鱼卵可能来源于嘉陵江而不是长江干流。

3.2 产漂流性卵鱼类自然繁殖与水文和水温因子的关系

研究表明,产卵前适宜的持续涨水天数对于部分鱼类产卵规模的大小具有决定性的意义^[9,25-28]。同时,产漂流性卵鱼类自然繁殖的适宜水文需求条件在不同种类间存在差异,在研究鱼类产卵规模与水文条件关系时要充分考虑物种间而不是功能群组间的差异性^[1,9]。此外,许多研究也强调洪水过程中透明度的下降在产漂流性卵鱼类的自然繁殖活动中扮演着重要的角色^[9,29-31]。在本文中,尽管影响鱼类产卵规模的水文条件在不同种类间存在差异,但是决定这些鱼类产卵规模的关键水文要素均与产卵前的洪水平涨过程(涨水时透明度同时下降)有关(图6)。

产卵前的积温大小在影响三峡库尾江段鱼类产卵规模中扮演着关键或次要角色,其中在影响铜鱼和四大家鱼的产卵规模中起到关键的作用,而在影响圆筒吻鮈的产卵规模中起到次要作用(图6),表明积温条件在影响鱼类性腺成熟过程中具有种类差异性,且这种差异很可能与不同种类间性成熟个体的大小差异有关^[9,32]。同时,本文结果显示对于相同种类而言,其产卵规模较大时的适宜积温范围区间较大,这可能与不同个体在性腺成熟前所处环境的水温、光周期、水质、饵料资源丰度及环境胁迫程度等的差异有关^[33];这些生境因子的差异,会导致性腺成熟时间在不同鱼类个体间有所差异,从而通过改变水温累积的统计天数而最终影响该种鱼类自然繁殖的适宜积温范围。总之,在产漂流性卵鱼类自然繁殖过程中,性腺成熟以及产卵活动发生也易受积温效应的影响。

许多研究在强调产卵前水温、水文条件对鱼类自然繁殖意义的同时,也强调产卵时的水温和流量条件对鱼类产卵活动发生的意义^[9-10,25-28,34]。在本文中,变量一产卵日的平均水温(DAWT)的重要性排在10个解释变量的最后列(倒数1~3位)(图6),表明该变量在预测所有产漂流性卵鱼类产卵规模及典型鱼类产卵规模中的作用均较小,该变量不是影响三峡库尾产漂流性卵鱼类产卵规模的关键变量。这与各年调查期间研究区域的水温已处于这些鱼类的适宜产卵水温范围内有关。采样期间,各年的逐日平均水温处于19.7~25.9°C之间,已处于铜鱼、四大家鱼、鮈类等许多产漂流性卵鱼类的适宜产卵范围之内^[24,34-36],采样期水温已不是这些鱼类产卵繁殖的限制性因子。尽管如此,与产卵日的平均水温不同,产卵日的平均流量(DAFD)仍在预测各种产漂流性卵鱼类的逐日产卵规模中扮演着关键或次要作用(DAFD在重要性排序图中排在前4位或更前位)(图6),表明产卵日的平均流量在鱼类产卵活动发生过程中起到重要的作用。通常地,逐日平均流量与研究区域产卵场的形成分布有关。研究已发现,特定流量条件下水流的水力学过程与产卵场的形成与分布密切相关^[37];只有在适宜的流量条件下,才能形成更大面积的有利于鱼类精卵充分搅动混合、具有典型漩涡与环流特征的产卵场^[15,38-39]。在此背景下,在探讨产漂流性卵鱼类产卵繁殖的生境需求时,不仅要考虑鱼类自身性腺成熟及产卵活动发生的适宜水温、水文格局与过程条件,而且也要充分考虑水流、水温条件与河流现有地形和地貌特征的耦合效应在产卵场形成与分布中的作用。

本研究还发现产卵时的日平均水位(DAWL)不是影响三峡库区涪陵以上江段产漂流性卵鱼类产卵规模

大小的关键或重要因素(图6),表明各年采样期间三峡库区的水位高低对涪陵以上江段产漂流性卵鱼类的产卵影响较小,这与三峡水库的水位调度规程有关。通常地,三峡水库的水位在5月下旬快速下降,到6月初时其已处于低水位运行期(坝前水位控制线在145 m),此时涪陵以上江段已绝大部分或完全成为适宜产漂流性卵鱼类产卵的流水江段^[40]。尽管如此,在鱼类繁殖期间,当上游来水条件合适时,通过库区的水位调度还可以进一步优化涪陵以上江段的水文条件,如对于所有产漂流性卵鱼类种类而言,当寸滩水文站的日平均流量在8709~19054 m³/s之间时,且日均流量上涨量在3980~15847 m³/s之间时,此时为鱼类自然繁殖最适宜的水文条件区间;此时,尽量降低库区的蓄水水位,避免库区高水位倒灌对涪陵以上江段水文情势的影响,不仅有利于鱼类适宜产卵场面积的增加,而且也有利于鱼卵孵化漂程的增加。

3.3 结论

基于2017—2020年5—7月在三峡库尾涪陵断面的早期资源调查,获取了该断面上游三峡库区江段产漂流性卵鱼类的早期资源状况,包括卵苗的种类组成、产卵规模、主要产卵场分布位置等,并在此基础上,分析比较了各年早期资源表征特征的年际变动,探讨了三峡库中和库尾江段产漂流性卵鱼类早期资源对水文、水温特征的响应关系,发现:1)从产卵种类组成、产卵规模以及主要产卵场的分布情况来看,三峡库区涪陵以上干流江段仍是长江上游产漂流性卵鱼类特别是圆筒吻鮈、长鳍吻鮈、长薄鳅等长江上游特有鱼类重要的产卵场所;自然繁殖季节在涪陵以上江段形成有利于刺激产漂流性卵鱼类性腺成熟、产卵活动发生以及产卵场形成的适宜流水江段,对于该区域产漂流性卵鱼类关键生活史阶段的完成具有重要的意义。2)2017年后流经涪陵的漂流性卵规模明显减少,但蒙古鮈、圆筒吻鮈、似鱎、鲢以及吻鮈在各年间的产卵规模占比在年际间呈上升趋势。3)产漂流性卵鱼类的逐日产卵规模易受产卵时透明度、流量大小、产卵前流量或水位上涨过程以及产卵前积温大小的影响,突显了水温及水文条件在产漂流性卵自然繁殖不同过程阶段(性腺成熟、产卵活动发生及产卵场形成)的递进性影响过程。4)影响不同产漂流性卵鱼类自然繁殖的关键水温、水文因素在不同种类间存在差异,辨识该差异性对于在三峡库区江段实施促进漂流性卵鱼类自然繁殖的生态调度有重要的应用价值。

4 附录

附表Ⅰ和Ⅱ见电子版(DOI: 10.18307/2023.0233)。

5 参考文献

- [1] Li MZ, Ma Q, Chen L et al. Natural reproduction and hydrologic requirements of pelagophil fish in the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(S1): 84-96. [黎明政, 马琴, 陈林等. 三峡水库产漂流性卵鱼类繁殖现状及水文需求研究. 水生生物学报, 2019, 43(S1): 84-96.]
- [2] Wang HL, Li MZ, Gao X et al. The status of the early stage fish resources in the Fengdu section of the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(5): 954-964. [王红丽, 黎明政, 高欣等. 三峡库区丰都江段鱼类早期资源现状. 水生生物学报, 2015, 39(5): 954-964.]
- [3] Jiang W, Liu HZ, Duan ZH et al. Seasonal variation in drifting eggs and larvae in the Upper Yangtze, China. *Zoological Science*, 2010, 27(5): 402-409. DOI: 10.2108/zsj.27.402.
- [4] Mu HX, Li MZ, Liu HZ et al. Analysis of fish eggs and larvae flowing into the Three Gorges Reservoir on the Yangtze River, China. *Fisheries Science*, 2014, 80(3): 505-515. DOI: 10.1007/s12562-014-0729-7.
- [5] Tan XC, Li YF, Li XH et al. The status of fish spawning ground in the East River with cascade dams' duress. *J Lake Sci.*, 2012, 24(3): 443-449. DOI: 10.18307/2012.0317. [谭细畅, 李跃飞, 李新辉等. 梯级水坝胁迫下东江鱼类产卵场现状分析. 湖泊科学, 2012, 24(3): 443-449.]
- [6] Dudley RK, Platania SP. Flow regulation and fragmentation imperil pelagic-spawning riverine fishes. *Ecological Applications*, 2007, 17(7): 2074-2086. DOI: 10.1890/06-1252.1.
- [7] 曹文宣, 常剑波, 乔晔. 长江鱼类早期资源. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [8] Liu LH, Wu GX, Wang ZL. Reproduction ecology of *Coreius heterodon* (bleeker) and *Coreius guichenoti* (sauvage et dabry) in the main-stream of the Changjiang River after the construction of gezhouba dam. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1990, 14(3): 205-215. [刘乐和, 吴国犀, 王志玲. 葛洲坝水利枢纽兴建后长江干流铜鱼和圆口铜鱼的繁殖生态. 水生生物学报, 1990, 14(3): 205-215.]
- [9] Yang Z, Zhu QG, Cao J et al. Using a hierarchical model framework to investigate the relationships between fish spawning and abiotic fac-

- tors for environmental flow management. *Science of the Total Environment*, 2021, **787**: 147618. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147618.
- [10] Poff NL. Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flows challenges in a non-stationary world. *Freshwater Biology*, 2018, **63**(8): 1011-1021. DOI: 10.1111/fwb.13038.
- [11] Tang MY, Huang DL, Huang LZ et al. Preliminary study on incubation status and hydraulic characteristics of the eggs of the four major Chinese carps in the Three Gorges Reservoir. *Reservoir Fisheries*, 1989, **10**(4): 26-30. [唐明英, 黄德林, 黄立章等. 草、青、鲢、鳙鱼卵水力学特性试验及其在三峡库区孵化条件初步预测. 水利渔业, 1989, **10**(4): 26-30.]
- [12] Lei H, Chen F, Xie WX et al. Effects of the first ecological operation of cascade reservoirs in the middle and lower reaches of Hanjiang River on the natural reproduction of pelagic fish. *J Lake Sci*, 2022, **34**(4): 1219-1233. DOI: 10.18307/2022.0415. [雷欢, 陈锋, 谢文星等. 汉江中下游梯级枢纽联合生态调度对产漂流性卵鱼类自然繁殖的效应研究. 湖泊科学, 2022, **34**(4): 1219-1233.]
- [13] 易伯鲁, 余志堂, 梁秩燊等. 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: 1-117.
- [14] Kabacoff RI. In action: data analysis and graphics with R. New York: Manning Publications Co., 2011: 219-242.
- [15] 湖北省水生生物研究所鱼类研究室. 长江鱼类. 北京: 科学出版社, 1976.
- [16] Wang MR, Yang SR, Liu F et al. Age and growth of *Rhinogobio cylindricus* Günther in the upper reaches of the Yangtze River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(2): 262-269. [王美荣, 杨少荣, 刘飞等. 长江上游圆筒吻𬶋年龄与生长的研究. 水生生物学报, 2012, **36**(2): 262-269.]
- [17] Breiman L. Statistical modeling: The two cultures. *Statistical Science*, 2001, **16**(3): 199-215.
- [18] Li XH. Random forest is a specific algorithm, not omnipotent for all datasets. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2019, **56**(1): 170-179. [李欣海. 随机森林是特点鲜明的模型, 不是万能的模型. 应用昆虫学报, 2019, **56**(1): 170-179.]
- [19] Yu K, Chen YC, Lin JQ et al. Eulerian-Lagrangian modeling of riverine fish eggs drifting and improved estimation of spawning scale of fish with pelagic eggs. *Journal of Hydropower Engineering*, 2019, **38**(6): 56-68. [余康, 陈永灿, 林俊强等. 鱼卵漂流的欧拉-拉格朗日模型与产卵量估算. 水力发电学报, 2019, **38**(6): 56-68.]
- [20] Duan ZH, Sun JY, Tan XC et al. Collecting efficiency of different nets in field investigation on larval fish. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23**(6): 670-676. [段中华, 孙建贻, 谭细畅等. 鱼类早期资源调查中不同网具采集效率的研究. 水生生物学报, 1999, **23**(6): 670-676.]
- [21] Duan XB, Tian HW, Gao TH et al. Resources status of ichthyoplankton in the Upper Yangtze River before the storage of Jinsha River first stage project. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(8): 1358-1365. [段辛斌, 田辉伍, 高天珩等. 金沙江一期工程蓄水前长江上游产漂流性卵鱼类产卵场现状. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(8): 1358-1365.]
- [22] Liu F, Li L, Liu HZ et al. Diel drifting pattern of fish eggs in Chishui section of the Chishui River. *Freshwater Fisheries*, 2014, **44**(6): 87-92. [刘飞, 黎良, 刘焕章等. 赤水河赤水市江段鱼卵漂流密度的昼夜变化特征. 淡水渔业, 2014, **44**(6): 87-92.]
- [23] 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.
- [24] 段辛斌. 长江上游鱼类资源现状及早期资源调查研究[学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [25] Olden JD, Naiman RJ. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: Modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(1): 86-107. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02179.x.
- [26] Wang JN, Li C, Duan XB et al. Variation in the significant environmental factors affecting larval abundance of four major Chinese carp species: Fish spawning response to the Three Gorges Dam. *Freshwater Biology*, 2014, **59**(7): 1343-1360. DOI: 10.1111/fwb.12348.
- [27] King AJ, Gwinn DC, Tonkin Z et al. Using abiotic drivers of fish spawning to inform environmental flow management. *Journal of Applied Ecology*, 2016, **53**(1): 34-43. DOI: 10.1111/1365-2664.12542.
- [28] Li T, Mo KL, Wang J et al. Mismatch between critical and accumulated temperature following river damming impacts fish spawning. *Science of the Total Environment*, 2021, **756**: 144052. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144052.
- [29] 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.]
- [30] Xu W, Qiao Y, Chen XJ et al. Spawning activity of the four major Chinese carps in the middle mainstream of the Yangtze River, during the Three Gorges Reservoir operation period, China. *Journal of Applied Ichthyology*, 2015, **31**(5): 846-854. DOI: 10.1111/jai.12771.
- [31] Wang LF, Tian HW, Yan ZL et al. Status of early-stage fish resources and hydrological condition response relationship in Luzhou section of Upper Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(4): 814-822. [王龙飞, 田辉伍, 严忠銮等. 长江上游泸州江段鱼类早期资源现状及其与水文条件响应关系. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(4): 814-822.]
- [32] Xue HM, Li YF, Wu Z et al. Effects of water temperature on early recruitment of *Siniperca* in the middle and lower reaches of the Pearl River. *Freshwater Fisheries*, 2019, **49**(3): 59-65. [薛慧敏, 李跃飞, 武智等. 水温对珠江中下游鳜属鱼类早期资源补充的影响. 淡水渔业, 2019, **49**(3): 59-65.]
- [33] Wen HS, Lin HR. Effect of environmental factors on gonadal maturation as well as its ovulation and spawning in teleosts. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(1): 151-155. [温海深, 林浩然. 环境因子对硬骨鱼类性腺发育成熟及其排卵和产卵的调控. 应用生态学报, 2001, **12**(1): 151-155.]

- 报, 2001, 12(1): 151-155.]
- [34] Xu W, Yang Z, Chen XJ et al. Three gorges reservoir ecological operation effect on the spawning of the four major Chinese carps. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1129-1139. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.03.46. [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. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1129-1139.]
- [35] Li SH. Biological characteristics and culture techniques of *Chanodichthys mongolicus*. *China Fisheries*, 2006, (10): 22-23. [李世华. 蒙古红鲌生物学特性及其养殖技术. 中国水产, 2006, (10): 22-23.]
- [36] Qin L, Xiong BX, Lv CJ. Individual fecundity of *Culter alburens* in Xujiache Reservoir of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1952-1957. [覃亮, 熊邦喜, 吕光俊. 徐家河水库翘嘴鲌的个体生殖力. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1952-1957.]
- [37] Bai HX, Peng QD, Li C et al. A summary of topographical characteristics of the four major Chinese carps' spawning grounds and hydrodynamic conditions for natural propagation in the Yangtze River. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2014, 12(3): 249-257. [柏海霞, 彭期冬, 李翀等. 长江四大家鱼产卵场地形及其自然繁殖水动力条件研究综述. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(3): 249-257.]
- [38] Boavida I, Jesus JB, Pereira V et al. Fulfilling spawning flow requirements for potamodromous cyprinids in a restored river segment. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 567-575. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.167.
- [39] Gendaszek AS, Burton K, Magirl CS et al. Streambed scour of salmon spawning habitat in a regulated river influenced by management of peak discharge. *Freshwater Biology*, 2018, 63(8): 917-927. DOI: 10.1111/fwb.12987.
- [40] Li C, Liao WG, Chen DQ et al. Analysis on spawning site of Chinese carps in the reservoir of Three Gorges Project based on 1-D hydrodynamic model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(11): 1285-1289. [李翀, 廖文根, 陈大庆等. 基于水力学模型的三峡库区四大家鱼产卵场推求. 水利学报, 2007, 38(11): 1285-1289.]

附表 I 不同采样年份进行断面采集试验时所获得的断面系数

Attached Tab.I The cross-section adjustment coefficients obtained by the cross-section sampling experiments in different sampling years

年份	试验日期	断面系数	备注
2016	5月22日	0.78	预试验
2017	5月24日	0.81	
	6月10日	0.65	
	6月18日	0.88	
	5月25日	0.72	
2018	6月23日	0.78	
	5月19日	0.91	
2019	6月24日	0.71	
	6月20日	0.82	

附表II 2017-2020年5-7月在涪陵采样点被采集到的鱼卵和仔稚鱼的种类组成

Attached Tab.II Species composition of fish eggs and larvae collected from the Fuling sampling site from May to July in 2017-2020

目	科	中文种名	拉丁名	鱼卵	仔稚鱼	鱼卵类型
鲑形目	银鱼科	太湖新银鱼	<i>Neosalanx taihuensis</i>	+		
鲤形目	鳅科	中华沙鳅	<i>Botia superciliaris</i>	+		漂流性卵
		花斑副沙鳅	<i>Parabotia fasciata</i>	+	+	漂流性卵
		长薄鳅	<i>Leptobotia elongata</i>	+		漂流性卵
		泥鳅	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	+		
鲤科	鲤科	草鱼	<i>Ctenopharyngodon idellus</i>	+		漂流性卵
		赤眼鳟	<i>Squaliobarbus curriculus</i>	+		漂流性卵
		鳡	<i>Elopichthys bambusa</i>	+		漂流性卵
		银鲴	<i>Xenocypris argentea</i>	+		漂流性卵
		黄尾鲴	<i>Xenocypris davidi</i>		+	
		似鳊	<i>Pseudobrama simoni</i>	+		漂流性卵
		鳙	<i>Aristichthys nobilis</i>	+	+	漂流性卵
		鲢	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	+	+	漂流性卵
		高体鳑鲏	<i>Rhodeus ocellatus</i>	+		
		寡鳞瓢鱼	<i>Pseudolabuca engraulis</i>	+		
		鱊	<i>Hemiculter leucisculus</i>	+		
		贝氏鱊	<i>Hemiculter bleekeri</i>	+	+	漂流性卵
		翘嘴鮊	<i>Culter alburnus</i>	+		漂流性卵
		蒙古鮊	<i>Chanodichthys mongolicus</i>	+		漂流性卵
		拟尖头鮊	<i>Culter oxycephalooides</i>	+		漂流性卵
		鮈	<i>Parabramis pekinensis</i>	+		漂流性卵
		麦穗鱼	<i>Pseudorasbora parva</i>		+	

目	科	中文种名	拉丁名	鱼卵	仔稚鱼	鱼卵类型
鲇形目	鮀科	黑鳍鮀	<i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	+		
		银鮀	<i>Squalidus argentatus</i>	+		漂流性卵
		铜鱼	<i>Coreius heterodon</i>	+		漂流性卵
		吻鮀	<i>Rhinogobio typus</i>	+	+	漂流性卵
		圆筒吻鮀	<i>Rhinogobio cylindricus</i>	+		漂流性卵
		长鳍吻鮀	<i>Rhinogobio ventralis</i>	+		漂流性卵
		蛇鮀	<i>Saurogobio dabryi</i>	+		漂流性卵
		中华倒刺鲃	<i>Spinibarbus sinensis</i>	+	+	漂流性卵
		鲤	<i>Cyprinus carpio</i>		+	
	平鳍鳅科	鲫	<i>Carassius auratus</i>		+	
		犁头鳅	<i>Lepturichthys fimbriata</i>	+		漂流性卵
颌针鱼目	鮀科	鮀	<i>Silurus asotus</i>		+	
	鱲科	黄颡鱼	<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	+		
		瓦氏黄颡鱼	<i>Pelteobagrus vachelli</i>	+		
		光泽黄颡鱼	<i>Pelteobagrus nitidus</i>	+		
	𬶐科	粗唇𬶏	<i>Leiocassis crassilabris</i>	+		
		中华纹胸𬶐	<i>Glyptothorax sinense</i>	+		
		间下鱲	<i>Hyporhamphus intermedius</i>	+		
鲈形目	丽鱼科	莫桑比克罗非鱼	<i>Oreochromis mossambicus</i>	+		
	𫚥虎鱼科	子陵吻𫚥虎鱼	<i>Rhinogobius giurinus</i>	+		
		波氏吻𫚥虎鱼	<i>Ctenogobius clifordpopei</i>	+		
鲱形目	胎鳉科	食蚊鱼	<i>Gambusia affinis</i>	+		