

长江上游江津段产漂流性卵鱼类早期资源现状及繁殖需求

朱俊¹, 曹俊², 周涛¹, 杨志², 朱正强², 朱其广²

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010;

2. 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, 湖北 武汉 430079)

摘要: 研究长江上游江津段产漂流性卵鱼类早期资源现状及繁殖水文需求, 可为长江上游鱼类资源保护和管理提供数据基础。2019–2022年鱼类繁殖季节, 在长江上游保护区江津断面开展鱼类早期资源调查, 以了解该区域鱼类早期资源种类组成、鱼卵密度的时间动态以及与水文、水环境因子的关系。结果表明, 所采集到的67种鱼类卵苗中典型产漂流性种类26种; 从各种类繁殖规模比例来看, 吻鮠(*Rhinogobio typus*)、圆筒吻鮠(*R. cylindricus*)、铜鱼(*Coreius heterodon*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)等占比较高; 长鳍吻鮠(*R. ventralis*)繁殖高峰集中在4月, 圆筒吻鮠和铜鱼集中在5月中下旬至7月上旬, 四大家鱼集中在6月中旬至7月上旬, 吻鮠的繁殖时间较长, 高峰期集中在4月下旬至6月中下旬; 产漂流性卵鱼类的主要产卵场分布在泸州弥陀镇、重庆朱杨溪–石门和金刚沱–油溪镇江段; 相关分析结果表明, 日均鱼卵密度与透明度呈显著负相关, 与流量呈显著正相关; 分类回归树结果表明, 涨水过程中的水位涨幅、初始流量和透明度最小值是影响保护区产漂流性卵鱼类繁殖规模大小的重要因素, 对于不同种类而言, 所需的积温、流量条件不尽相同。长江上游保护区江段是多种产漂流性卵鱼类的产卵场, 金沙江下游梯级电站陆续运行后, 原产卵场位置和规模均发生了一定的变化, 建议在实施生态调度来减缓其影响时, 不仅需要考虑水文、积温条件对鱼类性腺的影响, 还需要考虑水文过程与产卵场形成之间的联系。

关键词: 产漂流性卵鱼类; 产卵场; 鱼类早期资源; 水文条件; 长江上游

中图分类号: Q958.8 **文献标志码:** S932.4 **文章编号:** 1674–3075(2024)01–0075–12

长江上游是我国淡水鱼类种质资源最为丰富的地区之一, 共有鱼类261种, 分布于上游水域的特有鱼类多达112种(曹文宣, 2000); 2017–2021年在长江上游共采集到鱼类130种(杨海乐等, 2023)。随着向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德4座电站的全部完建, 金沙江下游干流的河流生境发生了明显改变, 原有激流生境几乎全部转变为静缓流生境, 从而使得宜宾以下长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区江段(以下简称保护区)成为许多长江上游特有鱼类、重要种质鱼类[如四大家鱼、长吻鮠(*Leiocassis longirostri*)、鲃(*Silurus asotus*)、胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)等]栖息繁殖的重要或关键生境区域, 并对长江流域生物多样性的维持与保护起到举足轻重的作用。长江上游水电梯级开发显著改变了河流的自然

状态, 对区域水生生态环境和鱼类栖息地也不可避免地产生一定影响(曹文宣, 1983)。产漂流性卵鱼类作为长江上游鱼类主要的生态类群之一, 是鱼类生物多样性的的重要组成部分, 也是我国淡水养殖业的重要种质资源, 其早期资源动态能够有效反映水电工程开发的生态学影响(张东亚等, 2018)。金沙江一期工程蓄水前(向家坝、溪洛渡电站分别于2012年10月和2013年5月下闸蓄水), 在长江上游江津段, 陆续有学者对产漂流性卵鱼类产卵场和鱼类早期资源时空分布进行了监测与研究, 结果表明长江上游分布有30余种产漂流性卵鱼类和产卵场(段辛斌, 2008; 唐锡良, 2010; 段辛斌等, 2015)。金沙江一期工程蓄水后, 中国水产科学研究院长江水产研究所(2017; 2018; 2019)在江津段开展了早期资源监测, 并对保护区产漂流性卵鱼类的繁殖种类、繁殖规模和产卵场位置等进行了调查和推算。金沙江二期工程蓄水后(乌东德、白鹤滩电站已分别于2020年1月和2021年4月下闸蓄水), 保护区内产漂流性卵鱼类的早期资源状况是否会进一步发生变化, 至今未见报道。

为此, 本研究基于2019–2022年对长江江津段产漂流性卵鱼类早期资源的监测数据, 分析江津段鱼类早期资源补充规律、产卵场分布和水文需求, 为

收稿日期: 2023-11-08

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司“金沙江下游流域水生生态监测(2019-2024年)”项目(JG/19017B)。

作者简介: 朱俊, 1990年生, 男, 工程师, 主要从事水库环保、技术管理工作。E-mail: 396204987@qq.com

通信作者: 朱其广, 1985年生, 男, 工程师, 主要从事鱼类生态学研究。E-mail: zhuqiguang@mail.ihe.ac.cn

水利工程对产漂流性卵鱼类自然繁殖的生态学影响积累基础资料,为长江上游鱼类资源保护和管理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 断面设置与调查方法

2019年3月23日-6月30日,2020年4月25日-6月30日,2021年3月1日-7月10日,2022年3月15日-7月8日,在长江上游保护区实验区内江津几江社区通泰门码头(106°15'05'' E, 29°18'41'' N)进行鱼类早期资源监测,采样断面距离下游保护区末端江津地维大桥约 24 km(图 1)。调查方法依据《长江鱼类早期资源》(曹文宣等,2007)进行。采集网具为 40 目圆锥网,网长 2.0 m,网口面积 0.393 m³,网后接长方形集苗框(规格:30 cm×20 cm×25 cm)。

每天采样 2 次,分别在 08:00-10:00 和 17:00-09:00 进行,每次采集时间约 60 min,在水体浑浊度高,浮渣较多时,减少采样持续时间至 30~45 min,以免网具堵塞。同时记录流速、水温、透明度等参数,以 LS1206B 型流速仪记录网口流速,以 HOBO MX2203 型水下温度计自动记录调查江段逐时水温,用萨氏盘测量水体透明度。水文数据来源全国水雨情信息网(http://xxfb.mwr.cn/sq_djdh.html)朱沱水文站。

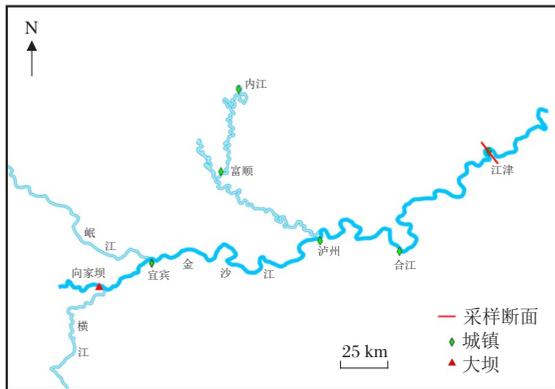


图 1 采样断面示意

Fig.1 Location of sampling sites in the upper Yangtze River

1.2 样品处理

采样结束后,对样本进行分拣,分别处理鱼卵和鱼苗(仔稚鱼)。根据鱼卵生态类型(黏沉性、漂流性、浮性)分类,观察及记录发育时期后保存于 95% 的乙醇溶液中。为保证结果的准确性,鱼卵全部采用分子测序。使用体式解剖镜观察采集的鱼苗,并通过形态特征鉴定种类(王昌燮,1959;易伯鲁等,1988),对于无法鉴定的种类,将其样本保存于 95%

乙醇溶液中,后期同鱼卵样品一起送至测序公司(武汉天一辉远)进行测序,采用线粒体细胞色素 b 基因和 COI 基因进行物种鉴定。使用 DNA STAR 软件包中的 Seq-Man 对序列进行检查,然后于 NCBI 网(<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/BlastAlign.cgi>)中进行比对,以序列相似度最高为鉴定标准。

1.3 数据处理

1.3.1 产卵规模和产卵场位置 根据逐日采集的卵苗数量、采集时间、网口面积和流速数据计算卵苗密度,根据逐日断面平均流量数据推算卵苗日径流量,用来反映卵苗资源量的日变化。计算方法参照相关文献(易伯鲁等,1988)。

产卵场位置的推算依据所采鱼卵的发育时期,结合调查断面以上江段江水流速来推算鱼卵的漂流距离,计算公式如下:

$$S=V \times T \quad (1)$$

式中: S 为鱼卵的漂流距离(m), V 为江水平均流速(m/s), T 为当时水温条件下鱼卵发育经历的时间(s)。

1.3.2 水文条件和水环境分析 为探讨产漂流性卵鱼类资源量和水文过程的关系,采用分类回归树(Classification and regression trees analysis, CART)(Breiman,1984)对繁殖活动与环境因子间的关系进行定量分析。本研究将鱼类繁殖规模(各次涨水过程中的繁殖规模在本年度繁殖规模中的占比)定义为响应变量,水文因子定义为预测变量,以此做分类树的分析。本研究考虑的水文因子包括水温、流量、水位、流量和水位的日变化量(反映涨水幅度)、涨水过程中的透明度、繁殖高峰时的积温(15℃以上的积温)等(Yang et al,2021),具体见表 1。在进行分类树分析时,将 4 年的调查数据看作一个整体,共包括 54 个样方的数据;以单次涨水过程为单位,将环境因子进行对数转换 $\lg(x+1)$ 后带入模型,选择复杂度参数(complexity parameter, CP)修剪模型分类结果。

为了检验鱼卵漂流规律与水环境因子的关系,使用 Pearson 相关性检验进行分析。相关性检验使用 SPSS 20.0 软件进行,CART 分析与树图输出使用 R-Studio 软件 rpart 包进行,其他数据的处理和图形制作使用 Excel 2010 软件进行。

2 结果与分析

2.1 种类组成

2019-2022 年,在长江上游江津江段累计采集鱼

续表 2

种类	拉丁文名	2019年		2020年		2021年		2022年		漂流性卵
		卵	苗	卵	苗	卵	苗	卵	苗	
34. 宜昌鳅鮡	<i>Gobiobotia filifer</i>	+	+	+		+		+		是
35. 异鳔鳅鮡☆	<i>Xenophysogobio boulengeri</i>	+		+		+		+		是
36. 中华鲮	<i>Rhodeus sinensis</i>		+		+	+			+	
37. 大鳍鱮	<i>Acheilognathus macropterus</i>		+							
38. 中华倒刺鲃	<i>Spinibarbus sinensis</i>		+				+		+	
39. 白甲鱼	<i>Onychostoma sima</i>									
40. 鲤	<i>Cyprinus carpio</i>	+	+			+	+	+	+	
41. 鲫	<i>Carassius auratus</i>		+				+		+	
鳅科	Cobitidae									
42. 红尾荷马条鳅	<i>Homaltula variegatus</i>		+							
43. 短体荷马条鳅☆	<i>Homaltula potanini</i>		+						+	
44. 中华沙鳅	<i>Botia supercilialis</i>	+		+		+	+	+		是
45. 花斑副沙鳅	<i>Parabotia fasciata</i>	+		+		+		+	+	是
46. 长薄鳅☆	<i>Leptobotia elongata</i>					+		+		是
47. 紫薄鳅	<i>Leptobotia taeniops</i>					+				是
48. 小眼薄鳅☆	<i>Leptobotia microphthalmia</i>			+		+		+		是
49. 红唇薄鳅☆	<i>Leptobotia rubrilabris</i>					+		+		是
平鳍鳅科	Balitoridae									
50. 犁头鳅	<i>Lepturichthys fimbriata</i>	+		+		+	+	+	+	是
51. 中华金沙鳅☆	<i>Jinshaia sinensis</i>	+		+		+		+		是
52. 西昌华吸鳅☆	<i>Sinogastromyzon sichangensis</i>								+	
53. 四川华吸鳅☆	<i>Sinogastromyzon szechuanensis</i>					+				
54. 峨眉后平鳅☆	<i>Metahomaloptera omeiensis</i>	+				+				
鲇形目	Siluriformes									
鲇科	Siluridae									
55. 鲇	<i>Silurus asotus</i>		+			+	+	+	+	
56. 黄颡鱼	<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>		+				+			
鲢科	Bagridae									
57. 瓦氏黄颡鱼	<i>Pelteobagrus vachelli</i>		+				+			
58. 光泽黄颡鱼	<i>Pelteobagrus nitidus</i>						+			
59. 粗唇鲃	<i>Leiocassis crassilabris</i>						+			
钝头鲃科	Amblycipitidae									
60. 黑尾鲃	<i>Liobagrus nigricauda</i>		+				+			
鮡科	Sisoridae									
61. 中华纹胸鮡	<i>Glyptothorax sinensis</i>	+	+	+		+	+	+	+	
鲑形目	Salmoniformes									
银鱼科	Salangidae									
62. 太湖新银鱼	<i>Neosalanx taihuensis</i>		+		+		+			
虾虎鱼目	Gobiiformes									
塘鳢科	Eleotridae									
63. 河川沙塘鳢	<i>Odontobutis potamophila</i>		+				+			
虾虎鱼科	Gobiidae									
64. 子陵吻虾虎鱼	<i>Rhinogobius giurinus</i>	+	+		+		+		+	
颌针鱼目	Beloniformes									
鱮科	Hemiramphidae									
65. 间下鱮	<i>Hyporamphus intermedius</i>						+			
鲈形目	Perciformes									
鲈科	Serranidae									
66. 鳊	<i>Siniperca chuatsi</i>	+	+	+		+	+		+	
慈鲷科	Cichlidae									
67. 尼罗罗非鱼△	<i>Oreochromis niloticus</i>							+		
合计		26	32	21	8	36	22	28	16	

注: ☆-长江特有种, △-外来种

Note: ☆-denotes endemic species to the Yangtze River, △-denotes the exotic species

2.2 繁殖规模

调查期间,估算流经江津断面产漂流性卵鱼类的卵苗径流量分别为2019年 9.32×10^8 粒(尾)、2020年 5.82×10^8 粒(尾)、2021年 12.24×10^8 粒(尾)、2022年 14.99×10^8 粒(尾)。从各种类繁殖规模比例来看,吻鮡(*Rhinogobio typus*)、圆筒吻鮡、铜鱼(*Coreius heterodon*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)等占比较高(图2)。

2.3 鱼卵密度逐日变化

2019年3月23日-6月30日,卵的平均密度为

18.56×10^{-3} 粒/ m^3 ,最大密度为 86.75×10^{-3} 粒/ m^3 ,出现在6月11日。2020年4月25日-6月30日,卵的平均密度为 15.64×10^{-3} 粒/ m^3 ,最大密度为 69.59×10^{-3} 粒/ m^3 ,出现在4月30日。2021年3月1日-7月10日,卵的平均密度为 14.16×10^{-3} 粒/ m^3 ,最大密度为 371.21×10^{-3} 粒/ m^3 ,出现在7月1日。2022年3月1日-7月10日,卵的平均密度为 12.40×10^{-3} 粒/ m^3 ,最大密度为 145.10×10^{-3} 粒/ m^3 ,出现在6月4日(图3)。调查期间,各年度出现卵高峰的时间见表3。

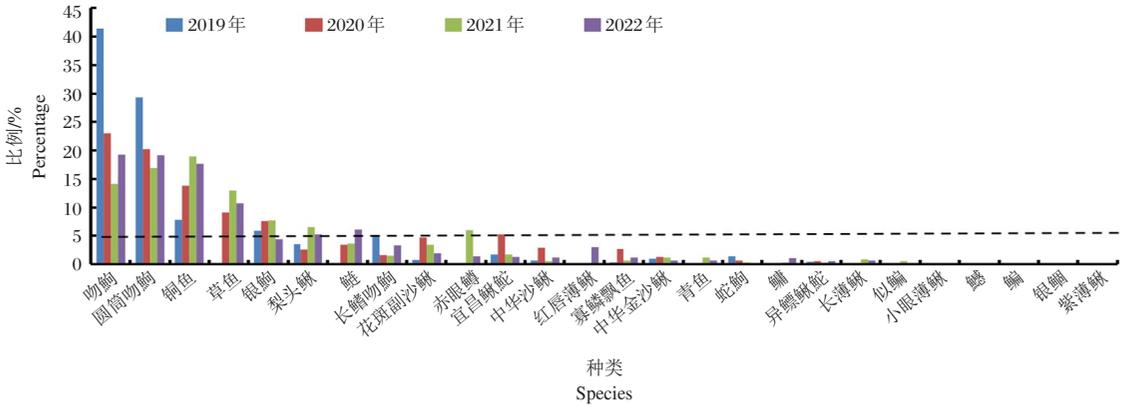


图2 产漂流性卵鱼类繁殖规模比例

Fig.2 Spawning quantity for each fish species with drifting eggs

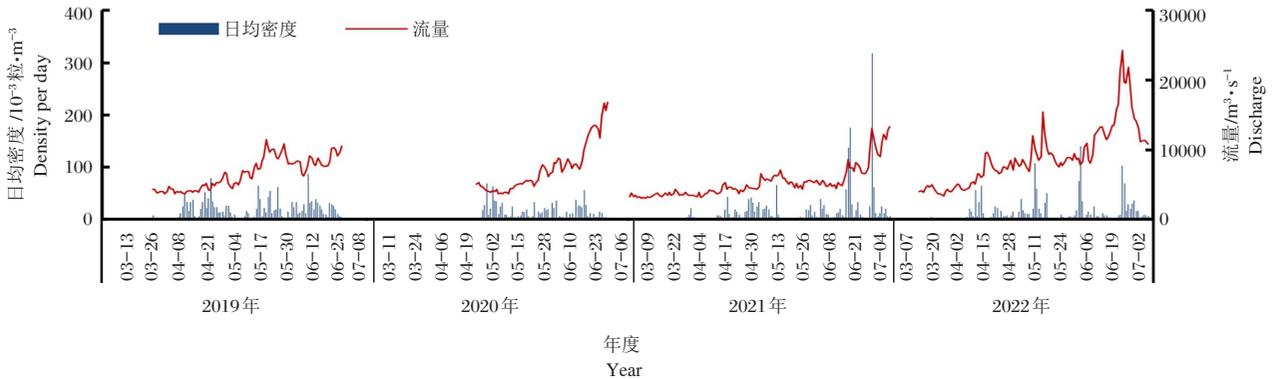


图3 2019-2022年江津断面鱼卵密度日变化

Fig.3 Daily variation of egg density in the Jiangjin section from 2019 to 2022

表3 2019-2022年调查期间卵密度高峰出现时间

Tab.3 Period of peak egg production from 2019 to 2022

编号	2019年		2020年		2021年		2022年	
	日期	日均密度/ 10^{-3} 粒· m^{-3}						
1	4月10日	48.83	4月30日	69.59	4月19日	43.94	4月15日	64.10
2	4月20日	51.64	5月3日	63.49	4月30日	39.05	5月5日	37.25
3	4月23日	78.76	5月13日	25.00	5月14日	65.61	5月12日	100.19
4	5月17日	63.98	5月24日	33.22	6月5日	39.49	5月18日	50.58
5	5月23日	54.59	6月4日	36.63	6月20日	175.45	6月4日	145.10
6	5月27日	61.54	6月14日	37.62	7月1日	317.21	6月25日	103.85
7	6月11日	86.75	6月18日	56.34			7月1日	36.47

2.4 代表性种类的繁殖时间

长江上游保护区段产漂流性卵鱼类种类繁多,本研究选择各年度繁殖规模比例相对较大、社会关注度较高的种类为代表,如国家二级保护动物(长鳍吻鮡、长薄鳅)、长江上游特有鱼类(圆筒吻鮡、中华金沙鳅和异鳔鳅鲇)及重要经济鱼类(铜鱼、四大家鱼和吻鮡),进行逐旬分析。这些种类的繁殖时间主要集中在4-7月,各种类间略有差异(图4)。长鳍吻鮡繁殖时间较早,繁殖高峰集中在4月至5月上旬,5月中旬后也有零星繁殖发生;圆筒吻鮡、铜鱼、中华金沙鳅和异鳔鳅鲇的繁殖高峰集中在5月中下旬至7月上旬;四大家鱼集中在6月中旬至7月上旬;吻鮡的繁殖时间较长,高峰期集中在4月下旬至6月中下旬;长薄鳅

的繁殖高峰出现在6月下旬至7月上旬。

2.5 产卵场位置

对产漂流性卵鱼类的产卵场进行了推算,结果显示,长江上游江津断面以上170 km广泛分布着产漂流性卵鱼类产卵场(图5),产卵量较大的有5处(弥陀镇、朱杨溪、石门镇、金刚沱和油溪镇),其中四大家鱼产卵场集中在泸州弥陀镇至重庆江津油溪镇江段,铜鱼产卵场集中在泸州弥陀镇和重庆朱杨溪至油溪镇江段,长鳍吻鮡产卵场集中在金刚沱至油溪镇江段,圆筒吻鮡产卵场集中在弥陀镇和金刚沱江段。不同鱼类产卵场间存在重叠,重叠最为明显的是泸州弥陀镇、重庆朱杨溪镇至石门镇、金刚沱至油溪镇约50 km江段,产卵量约占全江段的67.67%。

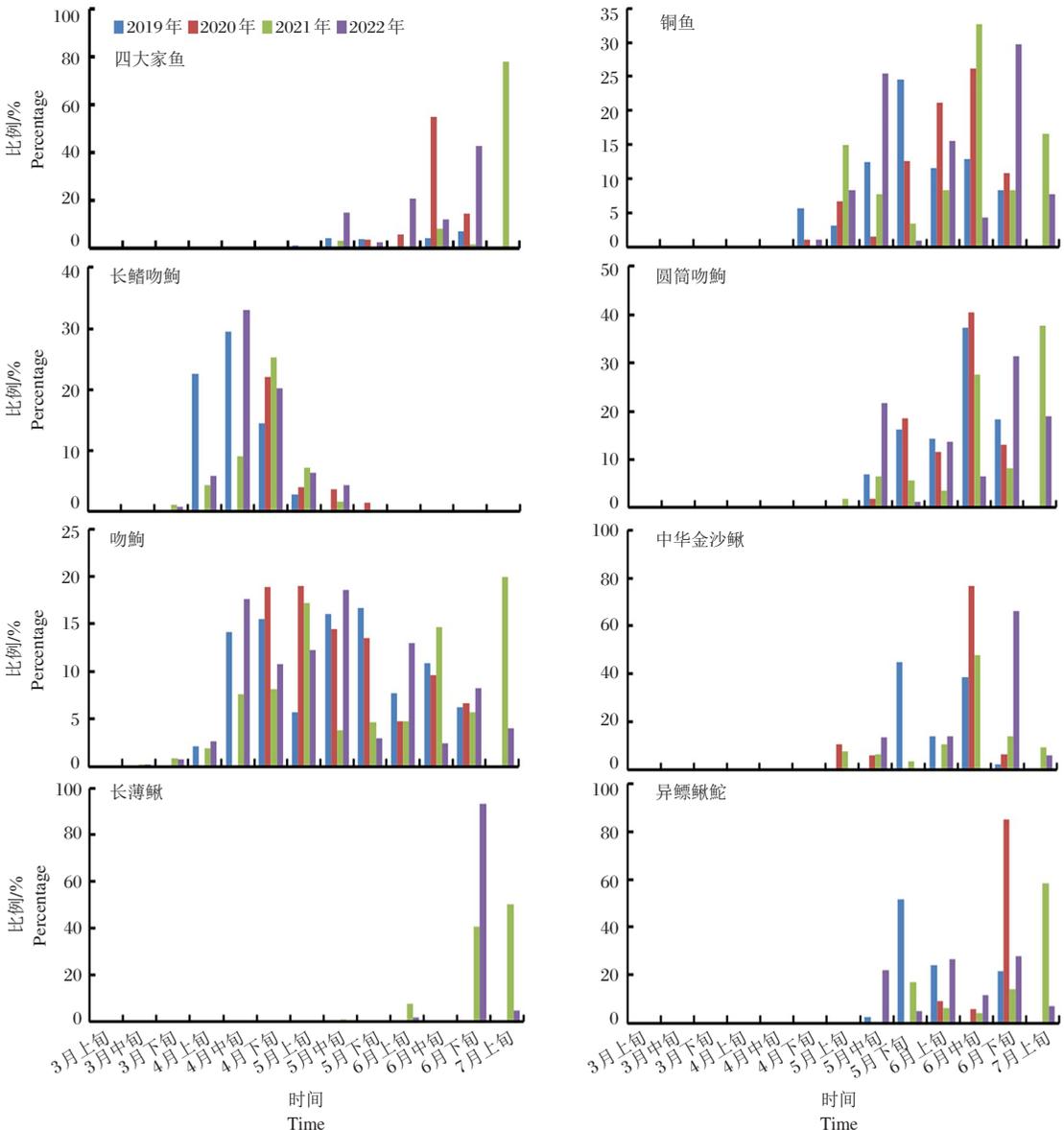


图4 2019-2022年主要种类繁殖时间及逐旬繁殖规模比例

Fig.4 Spawning period of primary fish species and proportion of eggs over ten days from 2019 to 2022

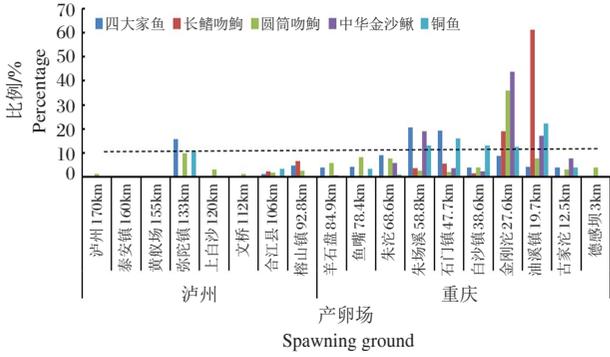


图5 长江上游产漂流性卵鱼类的产卵场分布情况及繁殖贡献比例

Distance from each spawning ground to the sampling section is given above name
Fig.5 Spawning ground distribution and proportion of eggs from species with drifting eggs in the upper Yangtze River

2.6 鱼类繁殖与环境因子的关系

2019–2022年,每年调查期间平均水温分别为19.6℃、21.8℃、19.7℃和19.7℃,其中鱼类繁殖高峰期(5–6月)的平均水温分别为21.1℃、22.1℃、21.8℃和20.3℃,2020–2022年繁殖高峰期水温略呈下降

趋势(图6)。调查期间,水温和江水流量总体呈上升趋势,透明度在进入5月份后总体呈下降趋势(图7)。经 Pearson 相关关系检验,日均卵密度与透明度显著负相关(2019年, $r=-0.274, P=0.008$; 2020年, $r=-0.377, P=0.001$; 2021年, $r=-0.143, P=0.183$; 2022年, $r=-0.172, P=0.033$),与流量呈显著正相关(2019年, $r=0.072, P=0.647$; 2020年, $r=0.497, P=0.024$; 2021年, $r=0.557, P=0.000$; 2022年, $r=0.538, P=0.033$)。

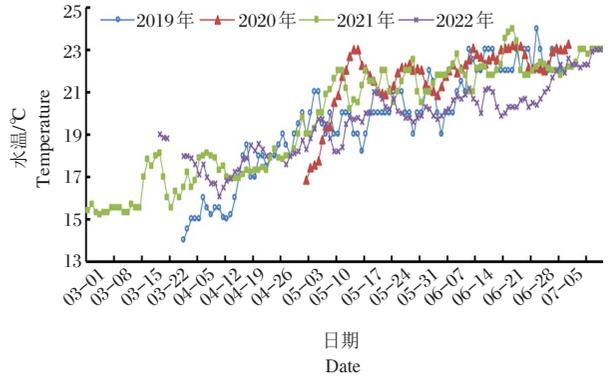


图6 水温日变化

Fig.6 Daily variation of water temperature during the sampling period (2019–2022)

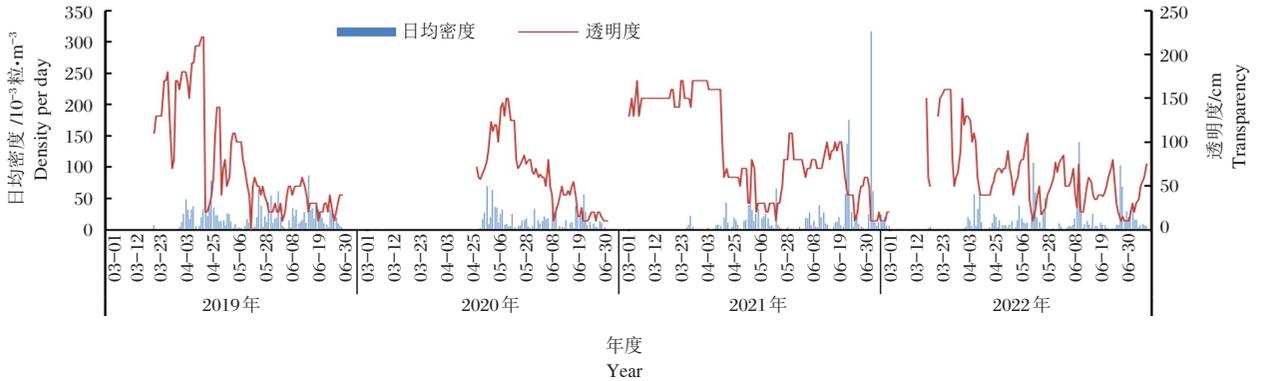


图7 2019–2022年采样期间日均卵密度和透明度变化

Fig.7 Daily variation of the egg density and water transparency during the sampling period (2019–2022)

根据 CART 分析结果,单次涨水过程中的水位上涨幅度、初始流量和透明度是影响产漂流性卵鱼类繁殖规模的主要原因,规模较大的繁殖活动发生在涨水过程的水位上涨幅度>1.53 m,初始流量>7 289 m³/s,透明度最小值<44.7 cm的时期(图8)。

对代表性种类的分析结果表明,鱼类的繁殖规模主要与涨水过程的水位、流量、水温相关(图9)。铜鱼的主要繁殖活动发生在涨水过程的水位涨幅>1.56 m,洪峰流量>6 540 m³/s的时期;圆筒吻鲈的主要繁殖活动发生在产卵峰值积温>266.0℃·d,水位上涨率>0.5 m/d的时期;长鳍吻鲈的主要繁殖活

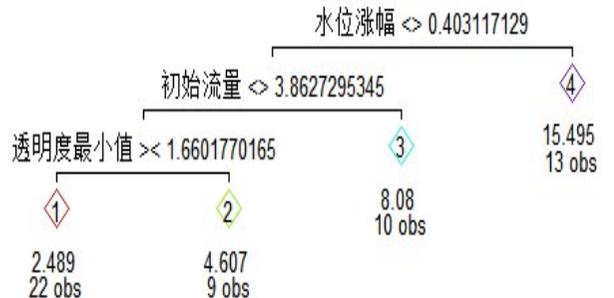


图8 鱼类繁殖规模与环境因子间关系的分类树分析
Fig.8 Classification tree showing the relationship of drifting egg production with environmental variables

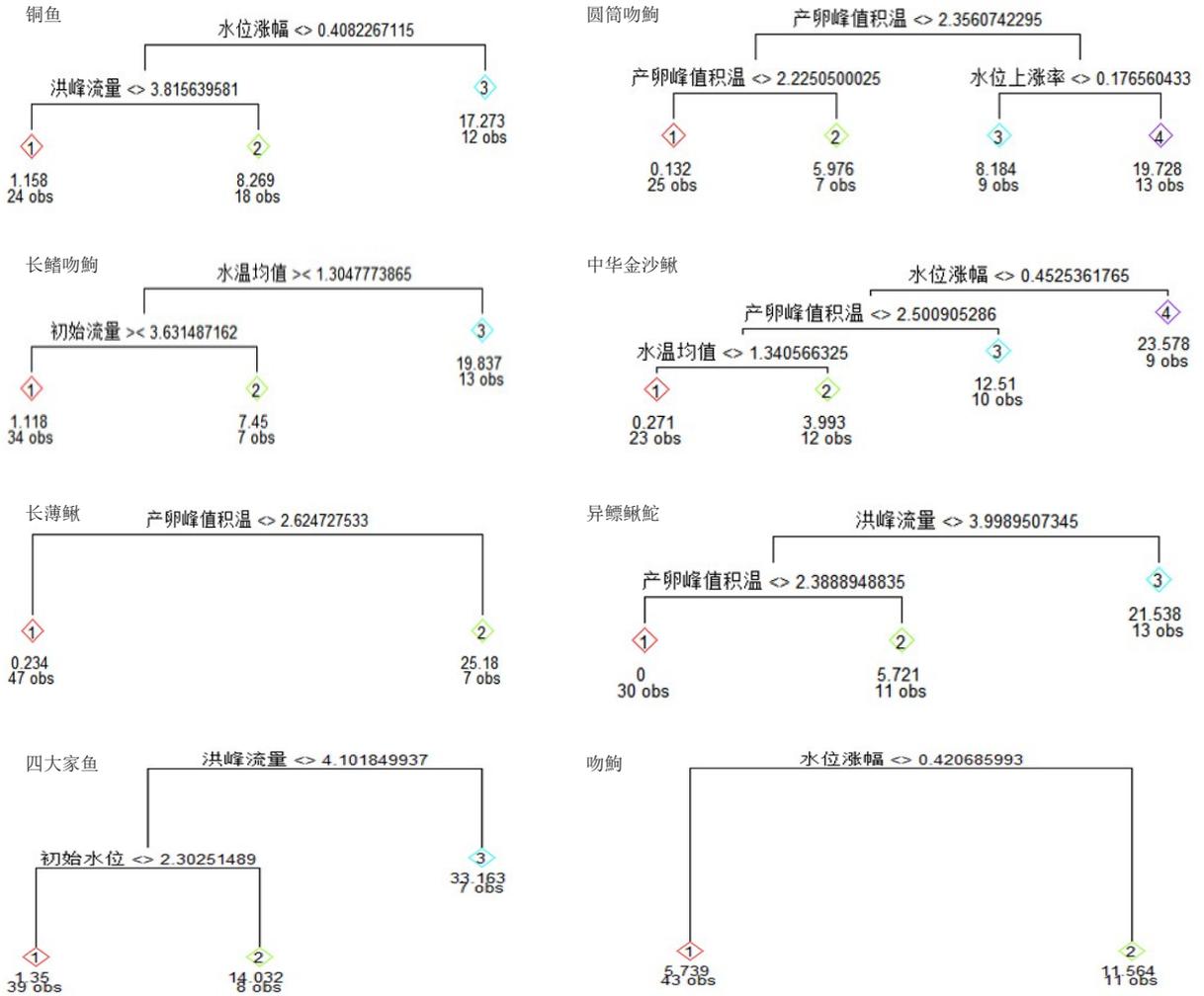


图 9 代表性物种的繁殖规模与环境因子间关系的分类树分析

Fig.9 Classification tree showing the relationship of drifting egg production for representative species with environmental variables

动发生在水温均值 $<19.2^{\circ}\text{C}$,初始流量 $<4\,279\text{ m}^3/\text{s}$ 的时期;中华金沙鳅的主要繁殖活动发生在水位涨幅 $>1.83\text{ m}$,产卵峰值积温 $>315.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,水温均值 $>20.9^{\circ}\text{C}$ 的时期;长薄鳅的主要繁殖活动发生在产卵峰值积温 $>420.4^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的时期;异鳔鳅鲈的主要繁殖活动发生在洪峰流量 $>9\,975\text{ m}^3/\text{s}$,产卵峰值积温 $>243.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的时期;吻鲈的主要繁殖活动发生在水位涨幅 $>1.63\text{ m}$ 的时期;四大家鱼的主要繁殖活动发生在洪峰流量 $>12\,642\text{ m}^3/\text{s}$,初始水位 $>199.69\text{ m}$ 的时期。

3 讨论

3.1 长江上游保护区江段是多种鱼类的产卵场

长江上游川江段河道峡谷段与宽谷段交错出现,峡谷段一般不长,江面狭窄,谷坡陡峭,宽谷段江面开阔,岸坡缓坦,水道弯曲,江心多有石岛,岸边多有砾坝,峡谷水急,宽谷多滩,是产漂流性卵鱼类的

理想产卵环境(沈玉昌,1963)。当前长江上游保护区江津断面采集到的鱼类早期资源物种组成丰富,2019–2022年调查到卵苗67种,达到了近年长江上游鱼类资源调查到种类数(130种)(杨海乐等,2023)的一半,其中产漂流性卵鱼类26种,包括国家二级保护动物长鳍吻鲈、红唇薄鳅、长薄鳅3种以及铜鱼、四大家鱼等重要经济鱼类。

与金沙江一期工程蓄水后的结果(中国水产科学研究院长江水产研究所,2017;2018;2019)相比,鉴定出的卵苗种类数较之前有一定增加(表4)。究其原因,可能是本研究采集到的鱼卵数量较多,且全部采用分子鉴定,以往研究往往采用抽取部分鱼卵送检,培养部分鱼卵做形态鉴定相结合的方式,孵化条件需求高的种类在培养过程中可能会因死亡而损失,从而导致一些少见种,如平鳍鳅科的峨眉后平鳅、四川华吸鳅等鱼类的遗漏。结合中国水

表4 江津断面近年早期资源监测情况

Tab.4 Monitoring results of the early stage fish resource at Jiangjin section in recent years

年度	种类	卵苗径流量 /10 ⁸ 粒(尾)	卵径流量 /10 ⁸ 粒	四大家鱼 /10 ⁸ 粒	铜鱼 /10 ⁸ 粒	四大家鱼产卵场 (主要)	铜鱼产卵场 (主要)	文献来源
2006年	20余种,部分 鉴定到属	7.68	/	1.67	0.69			
2007年	20种,部分鉴定到属	37	/	7.42	1.65	(弥陀-合江)	宜宾-合江	段辛斌,2008
2009年	35种,漂流性卵20种	26.8	10.9	3.76	2.52	宜宾江安-江津 龙门(弥陀-朱杨溪)	宜宾-龙门(泸州-弥陀,合江-朱杨溪,石门-龙门)	唐锡良等,2010
2010年		/	32.42	3.21	1.45			
2011年	41种,漂流性卵21种	/	46.72	4.52	3.33	宜宾南溪区-江津白沙镇(泸州市-榕山镇)	宜宾南溪区-江津白沙镇(弥陀镇-合江县)	段辛斌等,2015
2012年		/	39.71	2.69	3.87			
2016年	40余种	31.19	21.97	2.51	0.90	宜宾-石门(合江-石门)	黄舣场-文桥,合江县-鱼咀,朱沱-白沙	中国水产科学研究院长江水产研究所,2017
2017年	38种	22.47	20.63	2.87	0.86	黄舣场-文桥,榕山镇-石门	黄舣场-上白沙,合江-羊石盘,石门-龙门	中国水产科学研究院长江水产研究所,2018
2018年	34种	22.57	/	2.53	0.87	弥陀-鱼咀,朱沱-金刚	合江-鱼咀,朱沱-金刚	中国水产科学研究院长江水产研究所,2019
2019年		9.31	9.25	0.05	0.78			
2020年	67种,产漂流性卵26种	5.82	5.80	0.75	0.80	弥陀,朱杨溪-石门,金刚-油溪	弥陀,朱杨溪-油溪	本研究
2021年		12.24	12.22	2.23	2.32			
2022年		14.99	14.96	2.79	2.64			

注:“/”无数据。

Note: “/”denotes no data.

产科学研究院长江水产研究所(2017;2018;2019)及本研究结果,2017-2022年江津断面总计采集到产漂流性卵鱼类种类26种(图10)。调查到的种类以长鳍吻鲈、圆筒吻鲈、铜鱼、四大家鱼、吻鲈为主,而银鲌、鳊、赤眼鲮、长薄鳅等种类并非每年都能采集到。银鲌、鳊、赤眼鲮这类广适性鱼类对于保护区江段也没有强烈的依赖性,三峡水库库尾的流水江段也能满足其繁殖的需求(黎明政等,2019)。

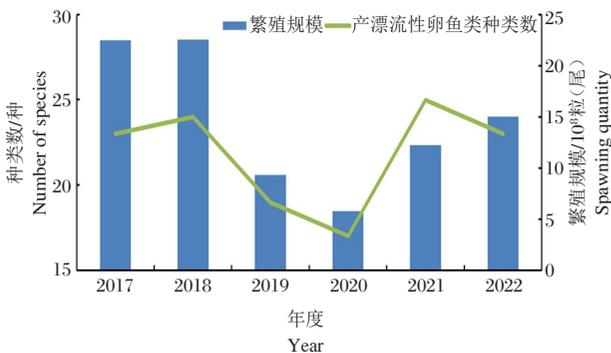


图10 2017-2022年江津断面采集到的产漂流性卵鱼类种类数及繁殖规模

Fig.10 Species number of collected fish species with drifting eggs and their spawning quantity in Jiangjin section during 2017-2022

综合中国水产科学研究院长江水产研究所(2017;2018;2019)及本研究结果,从繁殖规模来看,代表性种类均存在着明显的波动(图11),可能与当年繁殖季节的水文、水温条件有关。长薄鳅的繁殖规模自2016年以后下降显著,这可能是长薄鳅的性腺成熟所需积温较高,繁殖高峰较为靠后,野外调查未能覆盖至其繁殖盛期所致。由于金沙江二期工程蓄水后开展调查的年份较短,暂时无法评估其对于保护区内产漂流性卵鱼类的种类数和繁殖规模是否会造成影响。

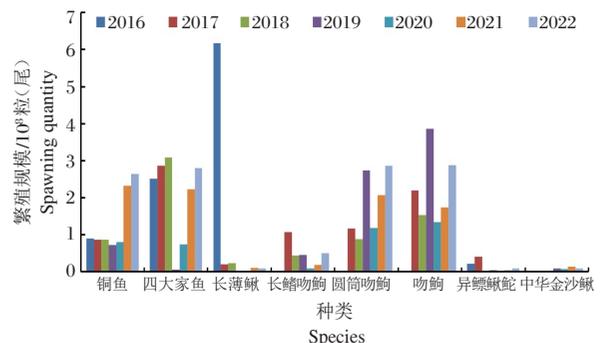


图11 2016-2022年主要种类的繁殖规模变化

Fig.11 Dynamic of the spawning quantity for the primary species from 2016 to 2022

从历年种类来看(段辛斌,2008;唐锡良等,2010;段辛斌,2015;中国水产科学院长江水产研究所,2017;2018;2019),2009年及以前能够采集到少量圆口铜鱼苗,2010年以后的调查均未能采集到圆口铜鱼卵苗,这可能与金沙江下游梯级电站截流后河流的连通性受阻有关。

此外,本研究在2022年4月25日采集到3粒尼罗罗非鱼鱼卵,表明该外来物种在保护区江段能够发生自然繁殖行为,往后是否能够形成稳定种群,有待进一步调查和综合评估。

3.2 主要产卵场位置变化

2006–2012年金沙江一期工程未蓄水,长江上游干流水文情势变化主要受到自然洪峰过程影响,自然洪峰过程年间变化较为规律,产卵场位置未出现明显变化,江津断面以上广泛分布有铜鱼、四大家鱼等鱼类产卵场。其中,四大家鱼的产卵场较为分散,范围较广,在泸州市至榕山镇,白沙镇至朱杨溪江段均有分布;铜鱼产卵场集中在弥陀镇至合江县江段;大部分鱼类产卵场主要位于弥陀镇至榕山镇之间49 km的江段,即泸州弥陀镇、合江县和榕山镇3个核心鱼类产卵场(段辛斌等,2015)。2016–2017年,上游泸州段的这3个核心产卵场依然存在,下游重庆段的朱沱、石门、白沙、龙门段上升为主要产卵场区域(表4)。2018–2022年,四大家鱼和铜鱼在下游重庆江津朱杨溪—油溪镇的产卵场逐渐替代泸州合江县和榕山镇成为核心产卵场。

水库调度通常会导致流量变异性降低,抑制流量峰值,增加短脉冲洪水的频率(Poff et al,1997),这对许多产漂流性卵鱼类的产卵活动造成了明显的影响(Santos et al,2018)。基于2012–2016年朱沱站流量资料(王海秀和尹正杰,2019),溪洛渡、向家坝蓄水运行后2013–2016年和蓄水前2009–2012年相比,蓄水后高流量脉冲(3 d以上)发生次数较蓄水前自然状况下增多,历时变短;峰值流量显著下降且发生时间提前,峰值流量对应历时变短,缩短了10 d,平均涨幅明显增大。保护区江段涨水过程的削弱,对坝下保护区鱼类的产卵活动会产生一定的影响,这可能是导致长江上游产漂流性卵鱼类核心产卵场位置和产卵规模发生一定程度变化的原因。

3.3 繁殖规模与环境因子的关系

保护区2019–2022年日均密度的变化,与流量显著正相关,而与透明度呈负相关。表明产漂流性卵鱼类繁殖高峰出现时,往往伴随着流量增大,水体泥沙含量上升,透明度下降。鱼类早期资源的补充不

仅与自身的繁殖活动有关,也与外部的水环境紧密相关,其中水温是影响鱼类繁殖至关重要的因素(Kai et al,2000),采样期间,各年的逐日平均水温在19.6–21.8℃之间,已处于铜鱼、吻鮠类等许多产漂流性卵鱼类的适宜产卵范围之内(段辛斌,2008),采样期水温已不是这些鱼类产卵繁殖的限制性因子。

在长江上游保护区繁殖的代表性物种中,除长鳍吻鮠的繁殖活动在流量小、水温稍低的条件下发生外,圆筒吻鮠、中华金沙鳅、长薄鳅和异鳔鳅鲇的繁殖规模与积温条件紧密相关,适宜积温越大的种类,其繁殖高峰时间往往也相对靠后(图4),繁殖高峰最晚的长薄鳅所需适宜积温条件更是达到了420.4℃·d。积温条件往往与鱼类性腺发育相关(关忠志等,2008),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(薛慧敏等,2019)。这也意味着,开展保护区生态调度的时机需要考虑不同的目标种类是否已经达到性成熟。在保护区全面禁渔的背景下,通过传统的渔获物调查来获取鱼类性腺发育程度的方式已不可取,通过开展室内养殖实验,建立积温—性成熟度关系来判断鱼类是否达到性成熟值得尝试。

本研究还发现,涨水过程中的水位涨幅(铜鱼和中华金沙鳅)、水位上涨率(圆筒吻鮠)、洪峰流量(异鳔鳅鲇)在鱼类产卵活动发生过程中起到重要的作用。水位上涨通常是流量增加的结果,流量过程会刺激产漂流性卵鱼类繁殖,是该年鱼卵总产量的主要决定因素(王文君等,2012)。此外,流量往往与产卵场的形成与分布密切相关(柏海霞等,2014),适宜的流量条件,才能形成更大面积的产卵场(Boavida et al,2018)。然而本研究暂未考虑水文过程—产卵场适宜性之间的联系。

在金沙江下游梯级水电站已全部建成的背景下,向家坝下川江河段的水文、水温条件都将不可避免地发生一定程度的改变,下泄水温滞后,可能会引起坝下河段内鱼类到达性腺发育成熟所需积温的时间延长,导致繁殖高峰的推迟;洪峰过程的平坦化,则可能达不到鱼类繁殖所需求的涨水条件;此外,梯级电站对于泥沙的拦截,可能会导致清水下泄,而保护区产漂流性卵鱼类的繁殖高峰往往是在透明度大幅下降的条件下出现。生态调度作为缓解水利工程带来不利影响的有效措施,已经在保护区实施数年,也取得了一定的成效。然而,保护区内自然繁殖的产漂流性卵鱼类种类繁多,水文需求也不尽相同。

建议基于鱼类的繁殖需求,分批开展针对性的调度试验,长鳍吻鲈在水温较低时即可繁殖,且对于流量的需求不高,可在其主要繁殖季节(4月中下旬),适当加大下泄流量;圆筒吻鲈、铜鱼和四大家鱼繁殖高峰多在5月中下旬以后,此时的水温已适宜这类鱼类繁殖,可结合支流(如岷江、赤水河)来水较多时,开展调度以满足鱼类对于涨水幅度的需求,同时支流泥沙的汇入可以降低干流水体的透明度,促进干流鱼类的繁殖;而长薄鳅、中华金沙鳅这类对于积温要求较高的鱼类,可以在6月下旬水温较高时开展调度。

此外,目前保护区段的水文调度,多是关注水文过程对产漂流性卵鱼类自然繁殖的促进作用,而缺乏对水文条件与物理栖息地相互作用形成适宜产卵生境的考量,建议下一步分析保护区江段产漂流性卵鱼类自然繁殖与环境条件的关系、评估生态调度效果时,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、水文过程条件,而且要充分考虑水流、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。

参考文献

柏海霞,彭期冬,李翀,等,2014. 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[J]. 中国水利水电科学研究院学报,12(3):249-257.

曹文宣,1983. 水利工程与鱼类资源的利用和保护[J]. 水库渔业,(1):10-21.

曹文宣,2000. 长江上游特有鱼类自然保护区的建设及相关问题的思考[J]. 长江流域资源与环境, 9(2):131-132.

曹文宣,常剑波,乔晔,等,2007. 长江鱼类早期资源[M]. 北京:中国水利水电出版社.

中国水产科学研究院长江水产研究所,2017. 金沙江下游流域水生生态监测(2016-2018年)2016年度报告[R]. 武汉:中国水产科学研究院长江水产研究所:45-58.

中国水产科学研究院长江水产研究所,2018. 金沙江下游流域水生生态监测(2016-2018年)2017年度报告[R]. 武汉:中国水产科学研究院长江水产研究所:62-70.

中国水产科学研究院长江水产研究所,2019. 金沙江下游流域水生生态监测(2016-2018年)2018年度报告[R]. 武汉:中国水产科学研究院长江水产研究所:77-90.

段辛斌,2008. 长江上游鱼类资源现状及早期资源调查研究[D]. 武汉:华中农业大学.

段辛斌,田辉伍,高天珩,等,2015. 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[J]. 长江流域资源与环

境,24(8):8.

关忠志,刘吉明,李东占,等,2008. 香鱼性腺发育与积温关系的初步研究[J]. 水产学杂志, 21(2):33-36.

黎明政,马琴,陈林,刘焕章,2019. 三峡水库产漂流性卵鱼类繁殖现状及水文需求研究[J]. 水生生物学报,43(S01):84-96.

沈玉昌,1963. 长江上游河谷地貌[M]. 北京:科学出版社:91-97.

唐锡良,2010. 长江上游江津江段鱼类早期资源研究[D]. 重庆:西南大学.

王昌燮,1959. 长江中游“野鱼苗”的种类鉴定[J]. 水生生物学集刊,(3):324-341.

王海秀,尹正杰,2019. 长江上游水文情势变化对保护区铜鱼产卵的影响[J]. 人民长江, 50(12):46-50.

王文君,谢山,张晓敏,等,2012. 岷江下游产漂流性卵鱼类的繁殖活动与生态水文因子的关系[J]. 水生态学杂志, 33(6):29-34.

薛慧敏,李跃飞,武智,等,2019. 水温对珠江中下游鳊属鱼类早期资源补充的影响[J]. 淡水渔业, 49(3):59-65.

杨海乐,沈丽,何勇凤,等,2023. 长江水生生物资源与环境本底状况调查(2017-2021)[J]. 水产学报, 47(2):1-28.

易伯鲁,梁秩燊,余志堂,等,1988. 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:32-35.

张东亚,葛德祥,步青云,等,2018. 水电工程对水生生态的影响特征及减缓对策措施研讨[J]. 水电站设计, 34(3):92-94.

Boavida I, Jesus J B, Pereira V, et al, 2018. Fulfilling spawning flow requirements for potamodromous cyprinids in a restored river segment[J]. Science of the Total Environment, 635:567-575.

Breiman L, 1984. Classification and Regression Trees[M]. London: Chapman & Hall/CRC: 18-41.

Poff L N, Allan D J, Bain B M, et al, 1997. The natural flow regime, a paradigm for river conservation and restoration [J]. Bioscience, 47:769-784.

Santos N C L, Berthou G E, Dias J D, et al, 2018. Cumulative ecological effects of a Neotropical reservoir cascade across multiple assemblages [J]. Hydrobiologia, 819(4):77-91.

Yang Z, Zhu Q, Cao J, et al, 2021. Using a hierarchical model framework to investigate the relationships between fish spawning and abiotic factors for environmental flow management[J]. Science of The Total Environment, 787: 147618.

Kai W, Astrid J T, Katarzyna H, 2000. Changes in the timing of spawning of Baltic cod: possible causes and implications for recruitment[J]. Ices Journal of Marine Science, (2): 452-464.

Early Stage Resource Status of Fish Species Spawning Drifting Eggs in the Jiangjin Section of the Upper Yangtze River and Their Hydrologic Requirements

ZHU Jun¹, CAO Jun², ZHOU Tao¹, YANG Zhi², ZHU Zheng-qiang², ZHU Qi-guang²

(1. China Three Gorges Group Co., Ltd., Wuhan 430010, P.R. China;

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

Abstract : In this study, we investigated the status of fish species that spawn drifting eggs in the Jiangjin section of the upper Yangtze River, focusing on species composition, temporal dynamics of egg density, spawning grounds and their relationship with hydrologic and environmental factors. Our aim was to accumulate basic data to support the fishery resource conservation and management in the upper Yangtze River and study the ecological effects of hydraulic projects on the natural spawning of species that produce drifting eggs. The study was based on early stage fish monitoring conducted in the Jiangjin section during the spawning periods from 2019 to 2022. Hydrologic and environmental parameters were measured simultaneously, including water velocity, discharge flow, water level, water temperature and transparency. A total of 67 fish species from 13 families and 7 orders were collected during the investigation, identified using morphological and molecular techniques. 26 of the species collected produce drifting eggs and 11 were endemic to the upper Yangtze River. Recruitment of drifting eggs in the Jiangjin section were estimated at 9.32×10^8 in 2019, 5.82×10^8 in 2020, 12.24×10^8 in 2021 and 14.99×10^8 in 2022. Egg production for *Rhinogobio typus*, *Rhinogobio cylindricus*, *Coreius heterodon* and *Ctenopharyngodon idellus* was much higher than for other species. The spawning of *Rhinogobio ventralis* peaked in April, while spawning of *Rhinogobio cylindricus* and *Coreius heterodon* occurred from mid-May to early July. The four major Chinese carps also spawned from mid-June to early July and, for *Rhinogobio typus*, it was from late April to late June. Five spawning grounds for fish species producing pelagic eggs were located 170 km above the Jiangjin transect, located near Mituo, Zhuyangxi, Shimen, Jingangtuo and Youxi. There was a significant positive correlation between average daily density of eggs and discharge flow and significant negative correlation with transparency. A classification regression tree was constructed and indicated that water level, initial discharge flow and minimum transparency during discharge flooding were the critical factors affecting spawning quantity. The spawning requirements for accumulated temperature and flow varied by species. In conclusion, there were spawning grounds for many species that produce drifting eggs in the upper reaches of Yangtze River, and the location and productivity of the original spawning grounds have changed due to construction and operation of the cascaded reservoirs. We recommend ecological reservoir operation to meet the hydrological requirements for fish spawning and early life stages of pelagic species, considering the effect of hydrology and accumulated temperature on fish gonad development and the relationship between hydrological conditions and spawning ground formation.

Key words: fish with drifting eggs; spawning grounds; early stage fish resources; hydrology; upper Yangtze River