

DOI: 10.12264/JFSC2023-0166

水电站影响下太湖西苕溪鱼类产卵生境及其早期资源与环境因子的关系

周开毅¹, 郭爱环², 张易祥¹, 盛鹏程², 练青平², 盛强¹, 原居林²

1. 湖州师范学院生命科学学院, 浙江省水生生物资源养护与开发技术研究重点实验室, 浙江 湖州 313000;

2. 浙江省淡水水产研究所, 浙江 湖州 313001

摘要: 水利设施运行影响下的鱼类早期资源发生规律被逐渐关注, 坝下区域也成为鱼类产卵生境的关注热点。西苕溪作为太湖上游的重要补充支流, 是太湖流域鱼类完成生活史过程的重要载体。为解析电站影响下的坝下河流生境变量与鱼类早期资源的内在联系, 本研究于 2022 年 4—7 月在西苕溪江东电站坝下的东山段开展了持续 90 d 的鱼类早期资源调查以及时空格局研究。结果显示, 该区域鱼卵日平均密度为 (0.5 ± 0.7) ind/m³, 仔鱼日平均密度为 (0.5 ± 0.6) ind/m³。运用形态学结合分子生物学方法进行种类鉴定, 共鉴定鱼类 35 种, 隶属 4 目 14 科 22 属, 其中产沉性卵鱼类 9 种, 产浮性卵 5 种, 产黏性卵 9 种, 产漂流性卵 12 种。5 月下旬、6 月上旬和 6 月下旬为产卵高峰期。左右岸样线以沉性卵和以水生植物为黏附基质的产黏性卵鱼类为主, 河心样线则以产漂流性卵、产黏性卵和浮性卵鱼类为主。该区域鱼类卵苗数量受水温、流速、水位影响较大, 水位、流速是影响鱼类繁殖的主要因子, 电站调度对卵苗量有显著影响。基于卵苗收获量、卵苗发育时期等结果, 判定该采样区域——西苕溪江东电站坝下东山段为适宜多种鱼类繁殖的复合型产卵场, 对太湖流域鱼类多样性和渔业资源保护具有重要意义。

关键词: 鱼类早期资源; 产卵场; 环境因子; 太湖; 西苕溪

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)09-1127-15

河流上游是洄游繁殖鱼类的重要生态区, 是补充洄游鱼类早期资源的关键场所^[1]。掌握上游河流鱼类早期资源的发生规模和规律^[2], 明确鱼类产卵生境特征, 解析影响鱼类早期资源的关键环境因子, 对区域渔业资源管理与保护具有重要意义^[3]。

从 20 世纪 60 年代开始, 我国开展了大量鱼类早期资源研究工作, 长江、珠江等流域干流鱼类早期资源时空规律、产卵场空间位置等研究日益丰富^[4-5]。中下游湖泊及其连通河流鱼类群落结构变动、鱼类早期资源动态变化以及江湖洄游发生机制已有大量研究^[6-7]。随着各流域中各类电站、闸坝等水利设施的建设和运行, 原有河流环境被逐渐改变^[8], 鱼类早期资源发生规律和鱼类

产卵场空间格局可能发生较大变化^[9]。水利设施运行影响下的鱼类早期资源发生规律和产卵场特征被逐渐关注^[4-5, 10], 闸坝的坝下区域则成为洄游鱼类产卵生境的关注热点^[11-13]。

鱼类产卵生境中的水温、流速、底质环境等往往是影响鱼类早期资源规模和规律的关键因子^[14], 局部微生境也会改变鱼类产卵的时空格局^[15]。受坝下区域水文、地形等客观条件制约, 在坝下开展局域尺度的鱼类产卵和早期资源时空格局研究存在一定困难^[16], 而微生境下的时空格局研究是解析坝下区域鱼类产卵生境特征的重要途径, 亟待开展相关工作。

西苕溪位于浙江北部, 是太湖流域上游重要的

收稿日期: 2023-08-01; 修订日期: 2023-09-05.

基金项目: 浙江省基础公益研究项目(LGN20C190001); 浙江省尖兵领雁研发攻关计划项目(2022C02071).

作者简介: 周开毅(1999-), 男, 硕士, 研究方向为渔业资源调查与保护. E-mail: 784322205@qq.com

通信作者: 盛强, 湖州师范学院, E-mail: qsheng@zjhu.edu.cn; 原居林, 浙江省淡水水产研究所, E-mail: yuanjulin1982@163.com

支流,也是太湖西部丘陵水生态区组成部分^[17-19]。其河道历史上经多次开发,修筑了江东电站等水利设施^[20]。江东电站等水利设施阻挡了鱼类继续向上洄游,使得大量鱼类被迫停留在坝下,并对环境逐步适应形成产卵适宜区域。通过前期分析和预实验,初步判断西苕溪江东电站坝下东山段为区域鱼类繁殖的集中场所,且江东电站坝下鱼类可利用产卵面积较小,水文、地形等客观条件适宜,可开展长期局域尺度研究。

本研究通过对西苕溪江东电站坝下东山段鱼类集中产卵生境中鱼类早期资源的时空格局研究,阐释西苕溪江东电站段鱼类早期资源规模、繁殖鱼类种群构成、集中产卵生境的鱼类繁殖时空规律,解析电站影响下的坝下河流生境变量与鱼类早期资源的内在联系,为水利工程影响下的鱼类重要生境的保护和识别提供理论依据,同时为区域渔业资源保护提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 采样地点

于 2022 年 4 月 20 日—7 月 20 日在浙江省湖州市安吉县太湖上游西苕溪东山江段江东电站坝下 50 m (30°41'32"N, 119°41'38"E)至杭长高速大桥(30°41'31"N, 119°41'34"E)范围内进行鱼类早期资源调查。

该调查区域范围约 510 m,河宽最窄处 75 m,最宽处 161 m;平均水深旱季为 2.1 m,雨季为 3.6 m。受江东电站及其附属设施建设、运行等人为活动影响,河岸较平直,河道中部为砂石底质,河道两侧近岸浅滩多为淤泥底质;河段浅滩分布较多水生维管束植物,主要有苦草(*Vallisneria spiralis*)、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)等;河岸无高大树木,多为低矮草本植物(图 1)。

设置 3 个采样样线,在河左岸、河心及右岸各设置一个样线,分别为 1#、2#、3#。其中左岸样线、右岸样线离岸约 25 m,河心样线沿河流中泓线设置;左右岸样线水深约 1.5~3.0 m,河心样线水深约 2.5~5 m;各样线起于杭长高速桥下,止于江东电站出水口下 50 m 处。

1.2 采样方法

采样工具:在野外调查中,依据《中华人民共和国水产行业标准—河流漂流性鱼卵、仔鱼采样技术规范》^[21]使用浅 I 型浮游生物网进行样品采集。浮游生物网网长 145 cm,网口内径 50 cm,孔径 0.505 mm,网底设置长度为 23 cm 的集苗筒。网口安装 HYDRO-BIOS 流量计(型号: 438115,德国)记录流量。

采样频次:使用摩托艇以 3 km/h 的平均时速对 3 个采样样线分别进行拖网采样,各样线采样时间为 10 min,拖网由缆绳牵引,网具与船尾间距 3 m 以减小影响。每日进行 2 次采样,分别为上午 5:00~6:00 和下午 17:00~18:00。

环境数据采集:使用北斗卫星定位系统记录拖网轨迹;YSL-Pro plus 便携式水质检测仪测量样线采样终止点水温、pH、水体溶解氧;萨氏盘记录透明度;LS300A 便携式流速仪检测采样终止点流速;离岸 3 m 处设置水位尺记录水位变化。

1.3 样品处理及鉴定

使用 80 目筛网对样品进行筛选,将鱼卵及仔稚鱼进行分类保存与统计。使用 OLYMPUS SZX7 解剖镜观察采集的卵苗,记录其发育期与主要性状,并进行形态学鉴定^[22]。对形态学无法辨认的样品,通过 DNA 条形码技术利用线粒体 CO I 基因进行鉴定^[23]。使用 CO I 序列引物 *cox1*-5528f/*cox2*-7217r (GGTGCCTGAGCYGGRATAGT/GC-GTCTTGGAATCCTARTTG) PCR 扩增后测序,所测序列在 NCBI 数据库进行比对确认卵苗种类^[24]。

1.4 数据处理与分析方法

依据《中华人民共和国水产行业标准—河流漂流性鱼卵、仔鱼采样评估方法》^[25]、易伯鲁等^[4]的计算方法对鱼卵、仔稚鱼丰度进行计算。卵苗丰度计算公式为:

$$D_i = m / (C_i \times S \times 0.3)$$

式中, D_i 为采集卵苗丰度 (ind/m³); m 为一次采样卵苗量(ind); S 为采集网网口面积(m²); C_i 为流量计转速差(r); 0.3 为流量计转子螺距(m/r)。

鱼类产卵场的推算以根据其形体特征、肌节数、卵发育程度等早期发育特征进行发育时间的确定,以确定其产卵场范围。

使用 Adobe Illustrator CC 2018 绘制采样流域

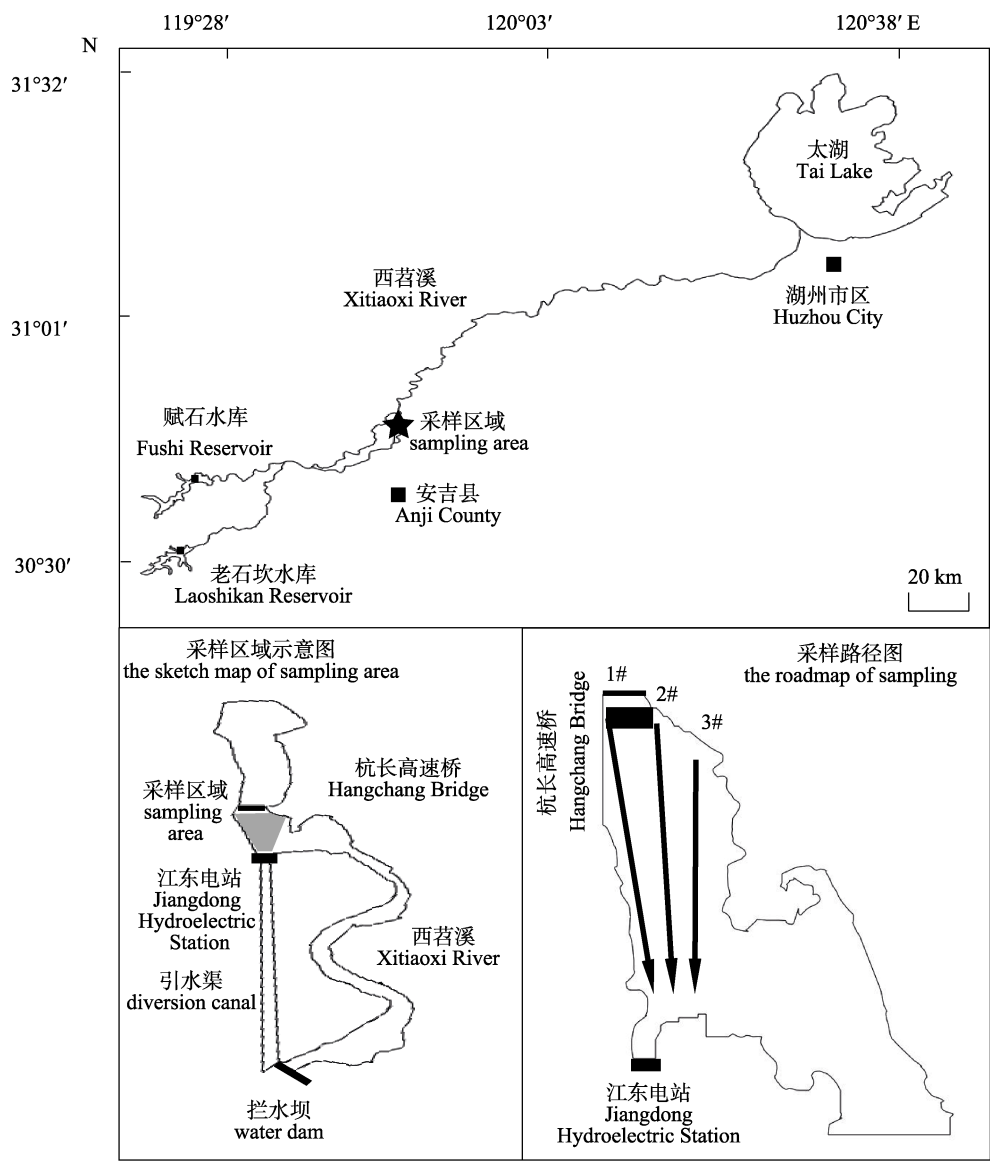


图 1 西苕溪早期资源采样区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of early resourcesampling area in the Xitiao River

示意图; 使用 Excel 进行基础数据统计并绘图; 使用 R 软件 ggdendro 包对鱼类各断面卵苗数据进行聚类分析, corrrplot 包对环境数据进行相关性分析(correlation analysis)并绘制热图, 筛选环境数据中的主导因子; vegan 和 ggplot2 包对鱼类群落数据和各环境数据进行除趋势分析(DCA), 再根据第一轴值(2.16)选择了冗余分析(RDA)并绘图, 以评估卵苗数量与环境因子变化关系。

2 结果及分析

2.1 鱼类组成

本研究共计获取 24455 粒鱼卵, 24325 尾仔稚

鱼。运用形态学结合分子生物学方法进行鉴定^[22,24], 共鉴定出鱼类 35 种, 隶属 4 目 14 科 22 属(表 1)。其中鲤形目鲤科鱼 23 种, 鲈形目真鲈科 2 种, 虾虎鱼科 3 种, 慈鲷科 1 种; 鲇形目鲶科 3 种; 鲱形目鲱科 3 种。

鲤形目卵苗数为 43071 尾(粒), 占卵苗总数的 88.30%; 鲈形目卵苗数为 5523 尾(粒), 占卵苗总数的 11.32%; 鲱形目卵苗数为 172 尾(粒), 占卵苗总数的 0.35%; 鲇形目卵苗数为 14 尾(粒), 占卵苗总数的 0.03%。

以产卵类型划分, 产漂流性卵鱼类 12 种, 产沉性卵鱼类 9 种, 产黏性卵 9 种, 产浮性卵 5 种。

表 1 2022 年 4—7 月西苕溪江东电站坝下卵苗组成
Tab. 1 Species composition of fish eggs and fries in the spawning grounds of Jiangdong Hydropower Station in the Xitiaoxi River

目 order	科 family	属 genus	种 species	产卵类型 type of egg	卵苗数 fish egg and fry number	占总数百分比/% percentage of total	卵数量 fish egg number	占总数百分比/% percentage of total	仔鱼数量 fry number	占总数百分比/% percentage of total
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	鲮属 <i>Acheilognathus</i>	兴凯鲮 <i>Acanthorhodeus chankaensis</i>	黏性 adhesive egg	74	0.15	0	0.00	74	0.30
		鲮属 <i>Acheilognathus</i>	大鳍鲮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	黏性 adhesive egg	56	0.11	0	0.00	56	0.23
		鲮属 <i>Rhodeinae</i>	中华鲮 <i>Rhodeus uyekii</i>	黏性 adhesive egg	64	0.13	0	0.00	64	0.26
		鲮属 <i>Carassius</i>	鲫 <i>Carassius auratus</i>	黏性 adhesive egg	2196	4.50	0	0.00	2196	9.33
		鲮属 <i>Cyprinus</i>	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	黏性 adhesive egg	3304	6.77	0	0.00	3304	13.58
		鲮属 <i>Hypophthalmichthys</i>	鳊 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	漂流性 drifting egg	11	0.02	11	0.04	0	0.00
		鲮属 <i>Gobio</i>	蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	漂流性 drifting egg	3454	7.08	2190	8.96	1264	5.20
		鲮属 <i>Gobio</i>	银鮈 <i>Squalidus argentatus</i>	漂流性 drifting egg	6521	13.37	3712	15.18	2809	11.55
		鲮属 <i>Sarcocheilichthys</i>	黑鳍鲈 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	漂流性 drifting egg	33	0.07	0	0.00	33	0.14
		鲮属 <i>Zacco</i>	棘颊鲈 <i>Zacco acanthogenys</i>	沉性 demersal egg	61	0.13	51	0.21	10	0.04
		马口鱼属 <i>Opsariichthys</i>	马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	沉性 demersal egg	6	0.01	0	0.00	6	0.02
		似鲮属 <i>Pseudobrama</i>	似鲮 <i>Pseudobrama simoni</i>	漂流性 drifting egg	2709	5.55	2009	8.22	700	2.88
		鲮属 <i>Xenocypris</i>	细鳞鲮 <i>Xenocypris microlepis</i>	漂流性 drifting egg	2510	5.15	1104	4.51	1406	5.78
			黄尾鲮 <i>Xenocypris davidi</i>	黏性 adhesive egg	1208	2.48	563	2.30	645	2.65
			银鲮 <i>Xenocypris argentea</i>	漂流性 drifting egg	16	0.03	16	0.07	0	0.00
		圆吻鲮属 <i>Distoechodon</i>	圆吻鲮 <i>Distoechodon tumirostris</i>	漂流性 drifting egg	1327	2.72	531	2.17	796	3.27
		鲮属 <i>Hemiculter</i>	贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	漂流性 drifting egg	15388	31.55	8915	36.45	6473	26.61
		鲮属 <i>Culter</i>	翘嘴鲮 <i>Culter alburnus</i>	黏性 adhesive egg	873	1.79	566	2.31	307	1.26
			蒙古鲮 <i>Chanodichthys mongolicus</i>	黏性 adhesive egg	3219	6.60	1931	7.90	1288	5.29
			达氏鲮 <i>Chanodichthys dabryi</i>	黏性 adhesive egg	7	0.01	7	0.03	0	0.00
		鲮属 <i>Pseudolaubuca</i>	鲮鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	漂流性 drifting egg	28	0.06	28	0.11	0	0.00
			寡鳞鲮 <i>Pseudolaubuca engraulis</i>	漂流性 drifting egg	4	0.01	4	0.02	0	0.00
		草鱼属 <i>Ctenopharyngodon</i>	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	漂流性 drifting egg	2	0.00	2	0.01	0	0.00

(持续 to be continued)

(续表 1 Tab. 1 continued)

目 order	科 family	属 genus	种 species	产卵类型 type of egg	卵苗数 fish egg and fry number	占总数百分比/% percentage of total	卵数量 fish egg number	占总数百分比/% percentage of total	仔鱼数量 fry number	占总数百分比/% percentage of total
鲇形目 Siluriformes	鲇科 Siluridae	鲇属 <i>Silurus</i>	鲇 <i>Silurus asotus</i>	沉性 demersal egg	5	0.01	5	0.02	0	0.00
			大口鲇 <i>Silurus meridionalis</i>	沉性 demersal egg	3	0.01	3	0.01	0	0.00
			黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	沉性 demersal egg	6	0.01	6	0.02	0	0.00
鲈形目 Perciformes	鮠科 Bagridae	黄颡鱼属 <i>Pelteobagrus</i>	鮠 <i>Siniperca chuatsi</i>	浮性 pelagic egg	245	0.50	166	0.68	79	0.32
			大口鲈 <i>Siniperca kneri</i>	浮性 pelagic egg	220	0.45	190	0.78	30	0.12
	鮠科 Percichthyidae	鮠属 <i>Siniperca</i>	波氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>	沉性 demersal egg	2659	5.45	1197	4.89	1462	6.01
			褐吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius brunneus</i>	沉性 demersal egg	179	0.37	17	0.07	162	0.67
	虾虎鱼科 Gobiidae	虾虎鱼属 <i>Rhinogobius</i>	子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	沉性 demersal egg	2218	4.55	1057	4.32	1161	4.77
			莫桑比克罗非鱼 <i>Oreochromis mossambicus</i>	沉性 demersal egg	2	0.00	2	0.01	0	0.00
鲱形目 Clupeiformes	慈鲷科 Cichlidae	罗非鱼属 <i>Oreochromis</i>	刀鲱 <i>Coilia ectenes</i>	浮性 pelagic egg	26	0.05	26	0.11	0	0.00
			凤鲱 <i>Coilia mystus</i>	浮性 pelagic egg	39	0.08	39	0.16	0	0.00
			短颌鲱 <i>Coilia brachygnathus</i>	浮性 pelagic egg	107	0.22	107	0.44	0	0.00

其中漂流性卵数量较多,为 18522 粒,占总体卵数量的 75.74%;其次为黏性卵,数量为 3067,占总体卵数量的 12.54%;然后是沉性卵,数量 2338,占总体卵数量的 9.55%;最后为浮性卵,数量为 528,占总体卵数量的 2.17%。

其中贝氏鲶(*Hemiculter bleekeri*)、银鮡(*Squalidus argentatus*)、蛇鮡(*Saurogobio dabryi*)、鲤(*Cyprinus carpio*)、蒙古鲃(*Chanodichthys mongolicus*)、似鳊(*Pseudobrama simoni*)、波氏吻虾虎鱼(*Rhinogobius cliffordpopei*)、细鳞鲃(*Plagiognathops microlepis*)、子陵吻虾虎鱼(*Rhinogobius giurinus*)、鲫(*Carassius auratus*)为西苕溪江东电站坝下鱼类早期资源的主要构成,占总卵苗数量的 90.57%。

2.2 卵苗密度时空变化

采样区域鱼卵日平均密度为 (0.5 ± 0.7) ind/m³,仔鱼日平均密度为 (0.5 ± 0.6) ind/m³。

鱼卵日平均密度最高值出现在 6 月 4 日,为 3.32 ind/m³;采样过程中鱼卵量有 10 次零值,均出现在 4 月下旬至 5 月上旬。5 月下旬、6 月上旬和 6 月下旬为产卵高峰期,鱼卵日平均密度均值分别为 0.75 ind/m³、1.11 ind/m³和 1.18 ind/m³。4 月下旬、5 月中旬和 5 月上旬鱼类产卵量较低,鱼卵日平均密度分别为 0.07 ind/m³、0.40 ind/m³和 0.40 ind/m³。

仔鱼最高密度值出现在 5 月 10 日,为 2.78 ind/m³;最低密度值出现在 6 月 30 日,为 0.02 ind/m³。仔鱼数量高峰多集中于 4 月上旬、5 月上旬和 6 月中旬,日平均密度分别为 0.76、1.30 和 1.17 ind/m³。而 6 月下旬至 7 月中旬仔鱼数量较低,日平均密度分别为 0.16 ind/m³和 0.16 ind/m³(图 2)。

聚类分析结果显示 4 月与 7 月鱼类卵苗数量较接近,7 月 1#样线与 2#样线相似性较高。6 月卵苗数远高于 5 月,但产卵物种相似,在 6 月中 2#和 3#样线产卵物种相似,在 5 月中 1#与 2#样线相似。总体来看采样样线中左岸、右岸样线采集到的物种构成较为相似,多为产漂流性卵的小型鱼类、以水草为黏附基质的产黏性卵鱼类。河心样线则是以产浮性、产黏沉性卵鱼类为主。

2.3 主要种类繁殖时空特征

根据 2.1 结果,选择鱼卵数量最多的贝氏鲶、银鮡、蛇鮡、似鳊、蒙古鲃进一步分析。

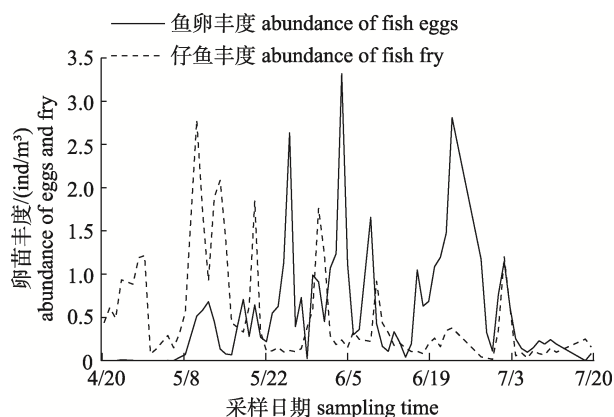


图 2 西苕溪江东电站坝下产卵场采样时段鱼卵、仔鱼密度日变化情况

Fig. 2 The daily variation of fish eggs and fries during sampling time in the Dongshan section of the Xitiaoxi River

贝氏鲶的卵在采样调查中出现频次最多,鱼卵日平均密度最大,达到 1.55 ind/m³,为西苕溪鱼类繁殖的主要优势种。银鮡、蛇鮡的主要产卵时间集中于 5 月中旬及 6 月中下旬,产卵量较多,分别为 0.48 ind/m³以及 0.28 ind/m³。似鳊产卵高峰期为 6 月中下旬,日平均密度为 0.26 ind/m³。在 5 月下旬采集到少量蒙古鲃鱼卵,6 月上旬出现频次增加,7 月上旬采集的鱼卵日平均密度达到最高峰,为 0.13 ind/m³(图 3)。

选择仔鱼数量最多的贝氏鲶、鲤、银鮡、鲫、波氏吻虾虎鱼进一步分析。

贝氏鲶仔鱼在采样期间均有发现,仔鱼平均日密度为 0.38 ind/m³。鲤、鲫仔鱼孵化高峰期在 4 月、5 月,仔鱼日平均密度分别为 0.14 ind/m³和 0.34 ind/m³。在 6 月采集到少量鲤仔鱼。采集到的银鮡、波氏吻虾虎鱼仔鱼较多,其中 5—6 月数量较多,分别为 0.17 ind/m³和 0.09 ind/m³,至 7 月上旬仍可采集到少量仔鱼。

依据采样样线划分,在各样线中鱼卵数量较多的为贝氏鲶、银鮡、蛇鮡、似鳊、蒙古鲃(图 4)。其中贝氏鲶、银鮡、蛇鮡、似鳊在 1#样线中的鱼卵数量大于其他样线。似鳊 3#样线鱼卵数量大于 2#样线。蒙古鲃在 3#样线的鱼卵数量高于 2#样线和 1#样线。

在各样线获取的仔鱼显示,数量较多的为贝氏鲶、鲤、银鮡、鲫、波氏吻虾虎鱼。1#样线中

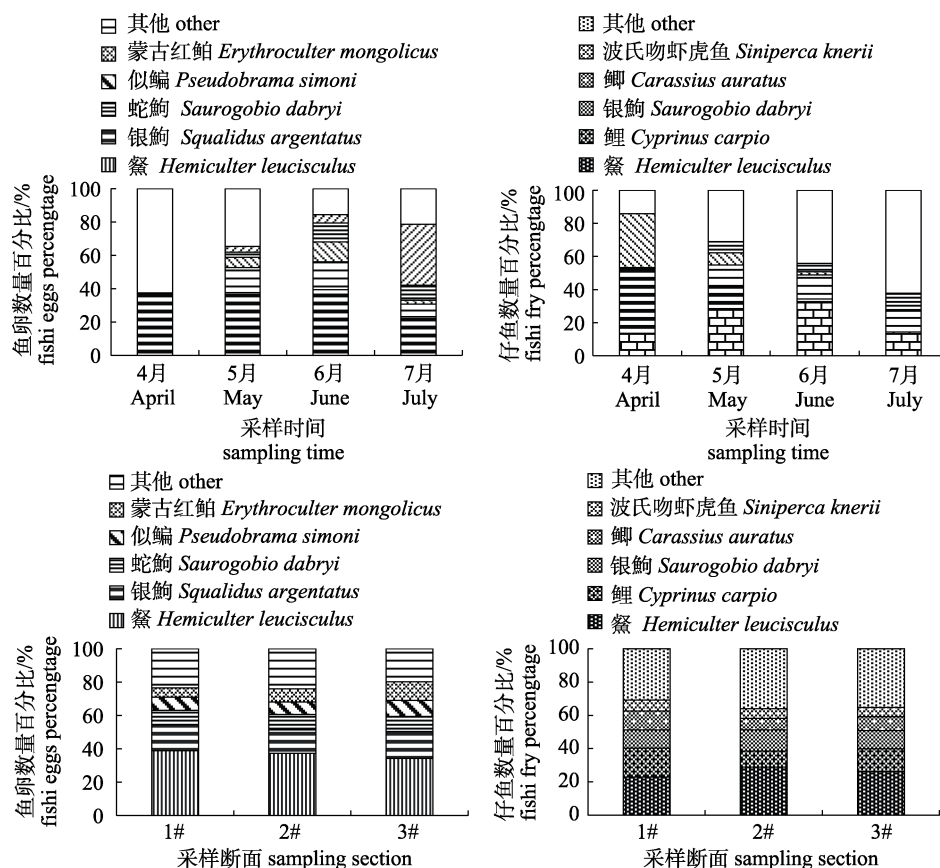


图3 调查断面各月 and 不同断面数量排名在前5的鱼类卵苗量占比

Fig. 3 The number percentage of fish eggs and fries in each month in the Dongshan section of the Xitaoxi River (Only the top of five in the number displayed)

鲤、鲫仔鱼数量高于其他样线。2#样线中贝氏鲮、银鮈仔鱼数量大于其他样线。3#样线中仔鱼数量相对其余样线数量较低。

2.4 产卵场位置推算

在采样期间所采集到的鱼卵发育期多集中于胚盘期至囊胚期之间, 发育时间较短^[22](表2)。依据采样时间内鱼卵发育期所需时间, 结合采样断面河流流速的平均值(0.82 m/s)进行推算^[5], 漂流性卵主要分布于拦水坝坝下 0.1~1.22 km 处以及江东电站坝下至杭长高速桥段, 该区域长约为 560 m。离开电站泄水区后, 整体水流速度降低(0.1~0.3 m/s), 依据张先柄等^[26]对漂流性、沉性鱼卵沉降速率的相关计算, 以及沉性鱼卵发育阶段的判别(图5), 推算沉性鱼卵多来源于江东电站坝下至杭长高速桥下。

由于江东电站上游地区海拔高度变化较小, 导致西苕溪上游流速较缓, 且分布多处拦河坝,

形成库区, 漂流性鱼卵无法漂流至下游^[13]。经过浮球验证漂流距离不足以到达江东电站下泄区域^[27], 因此不考虑上游鱼卵漂流至江东电站。

2.5 西苕溪断面卵苗量与环境因子的关系

逐日监测水温(WT)、酸碱度(pH)、水位(WL)、水流速(WV)、水流量(WD)、溶解氧(DO)、透明度(SD)等环境因子, 结果如表3所示。

受江东电站开合闸影响, 不同采样时间中各环境因子变动差异较大, 分别对上午、下午环境因子进行相关性分析。上午采样阶段溶解氧和 pH 与水温变化幅度呈正相关, 透明度、水位、流量与水温变化、pH 变化呈负相关, 透明度变化与水位变化呈负相关。下午采样阶段, 流速与水位呈正相关, 透明度与水温、pH、溶解氧呈负相关(图6)。

先将各物种数据、环境数据进行 $\lg(x+1)$ 转化, 依据相关性分析以及蒙特卡洛检验($P<0.05$)筛选环境因子, 并选择了水温、水位、流量、透明度、

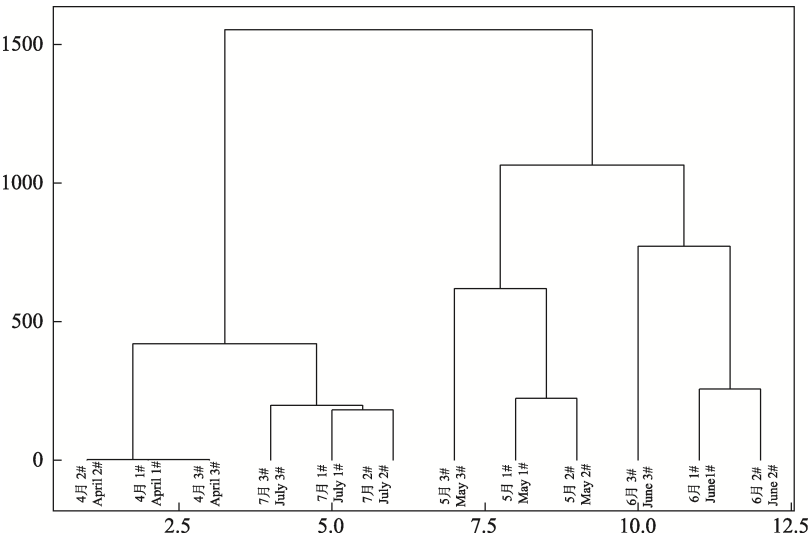


图 4 各样线不同月份聚类分析图

Fig. 4 The cluster analysis chart for different months of each sampling section

表 2 2022 年西苕溪东山江段各鱼种鱼卵发育期

Tab. 2 Developmental stages of fish eggs of different fish species at Dongshan section of the Xitiao River

发育期 Developmental stages	种类 species	卵类型 type of egg	种类 species	卵类型 type of egg
胚盘形成期 blastocyst stage	大口鲶 <i>Silurus meridionalis</i>	沉性 demersal egg	翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	黏性 adhesive egg
	鲢 <i>Silurus asotus</i>	沉性 demersal egg	蒙古鲌 <i>Chanodichthys mongolicus</i>	黏性 adhesive egg
	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	沉性 demersal egg	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	漂流性 drifting egg
	褐吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius Brunneus</i>	沉性 demersal egg	寡鳞鲈 <i>Pseudolaubuca engraulis</i>	漂流性 drifting egg
	棘颊鲷 <i>Zacco acanthogenys</i>	沉性 demersal egg	鳙 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	漂流性 drifting egg
	子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	沉性 demersal egg	银鲌 <i>Xenocypris argentea</i>	漂流性 drifting egg
	波氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>	沉性 demersal egg	鲈鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	漂流性 drifting egg
	刀鲚 <i>Coilia ectenes</i>	浮性 pelagic egg	圆吻鲴 <i>Distoechodon tumirostris</i>	漂流性 drifting egg
	凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	浮性 pelagic egg	细鳞鲴 <i>Xenocypris microlepis</i>	漂流性 drifting egg
	短颌鲚 <i>Coilia brachygnathus</i>	浮性 pelagic egg	似鲴 <i>Pseudobrama simoni</i>	漂流性 drifting egg
	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	浮性 pelagic egg	蛇鲻 <i>Saurogobio dabryi</i>	漂流性 drifting egg
	大眼鳊 <i>Siniperca knerii</i>	浮性 pelagic egg	银鲻 <i>Squalidus argentatus</i>	漂流性 drifting egg
	达氏鲌 <i>Chanodichthys dabryi</i>	黏性 Adhesive egg	贝氏鲌 <i>Hemiculter bleekeri</i>	漂流性 drifting egg
	黄尾鲴 <i>Xenocypris davidi</i>	黏性 Adhesive egg		
细胞分裂期 cell division stage	波氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>	沉性 demersal egg	银鲻 <i>Squalidus argentatus</i>	漂流性 drifting egg
	蛇鲻 <i>Saurogobio dabryi</i>	漂流性 drifting egg	似鲴 <i>Pseudobrama simoni</i>	漂流性 drifting egg
	子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	沉性 demersal egg	褐吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius Brunneus</i>	沉性 demersal egg
囊胚期 blastula stage	子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	沉性 demersal egg	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	浮性 pelagic egg
	波氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>	沉性 demersal egg	大眼鳊 <i>Siniperca knerii</i>	浮性 pelagic egg

流速构建环境数据矩阵, 通过夏皮罗-威尔克检验^[28] ($P<0.05$)选择 12 种鱼类的鱼卵数量作为物种数据矩阵, 构成物种与环境因子矩阵^[29]。通过对物种数据进行的除趋势分析得出第一轴轴长值为 2.16, 故应用 RDA 方法进行分析。RDA1 轴(95.57)与 RDA2 轴(2.3)能够解释 97.87 的鱼类群

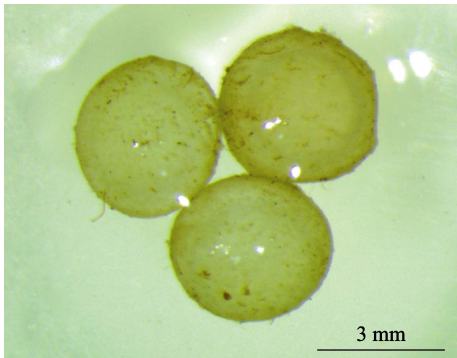


图 5 2022 年西苕溪东山江段采集到的蒙古鲃鱼卵
Fig. 5 *Culter mongolicus* eggs collected at Dongshan section of the Xitiaoxi River

表 3 2022 年西苕溪东山江段鱼类产卵期
(4–7 月)水环境因子指标

Tab. 3 Water environment indexes at Dongshan section of the Xitiaoxi River in spawning peak (April to July) in 2022			
$\bar{x}\pm\text{SE}$			
环境因子 environmental factor	范围 range	均值 mean	
水温/℃ water temperature	11.00–35.80	23.41±4.22	
流速/(m/s) velocity of flow	0.00–2.50	0.78±0.36	
流量/(m³/s) water discharge	1158–2734	1811.48±222.26	
溶解氧/(mg/L) dissolved oxygen	4.90–24.40	9.74±4.51	
水位/m water level	1.26–2.38	1.43±0.16	
透明度/mm transparency	145–322	125.05±16.45	
pH	7.00–9.56	8.32±0.41	

落与环境因子变化间的关系, 表明鱼类繁殖活动

与环境变化显著相关(图 7)。对鱼类产卵数量影响较大的环境因子为水位、水温、流速。细鳞鲃、银鲃、蛇鲃、翘嘴鲃(*Culter alburnus*)的繁殖活动受流速的影响较大, 黑鳍鲈(*Sarcocheilichthys nigripinnis*)、似鳊、波氏吻虾虎鱼、黄尾鲃(*Xenocypris davidi*)的产卵数量与水温、流量呈正相关, 与流速呈负相关, 蒙古鲃与水位、水温呈正相关。

3 讨论

3.1 西苕溪鱼类早期资源组成与太湖流域鱼类组成差异

唐晟凯等^[30]2008 年在太湖鱼类调查中共获得 47 种渔获物, 受过度捕捞、围湖造田等因素影响, 导致鱼类低龄化、小型鱼类占比提升趋势明显。本研究中, 西苕溪小型鱼类的产卵量远高于中、大型鱼类, 其中贝氏鲃、银鲃、蛇鲃、鲤、鲫为主要繁殖鱼类, 占总卵苗的 65.92%, 表明西苕溪鱼类以小型鱼类为主, 与太湖鱼类群落结构相似。

张翔等^[31]2018—2022 年在对太湖流域的渔业资源调查中累计发现鱼类 52 种, 其中翘嘴鲃、蒙古鲃、鳊(*Siniperca chuatsi*)等高营养级掠食性鱼类占比较低。西苕溪整体水流较为平缓, 江东电站下泄区制造的急流区域为其提供了适宜的集中产卵环境, 因此西苕溪东山江段掠食性鱼类卵

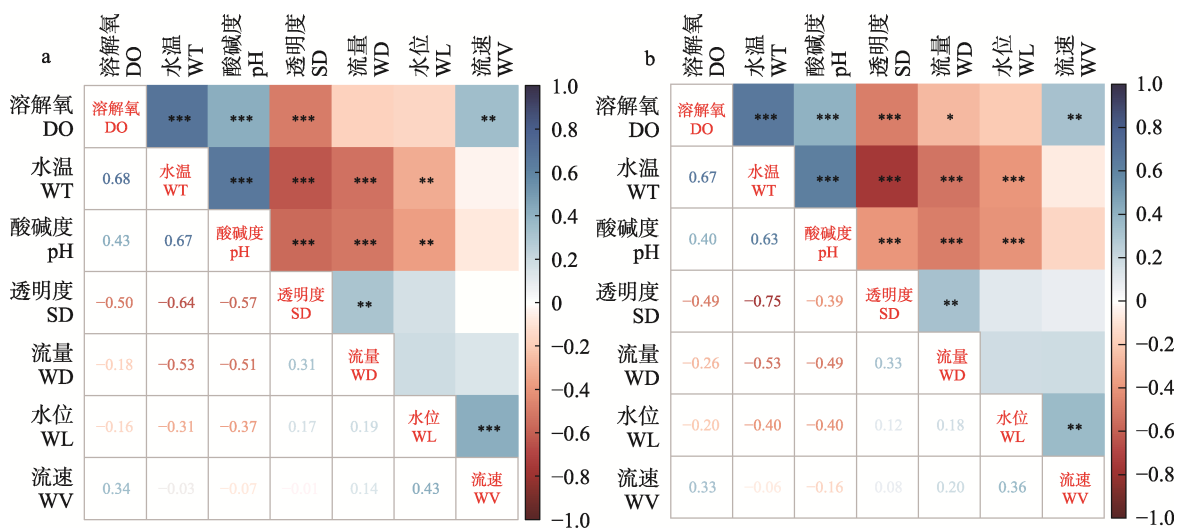


图 6 不同采样时间环境因子相关性矩阵热图
a. 上午; b. 下午.

Fig. 6 Environmental factor correlation matrix in different sampling time
a. In the morning; b. In the afternoon.

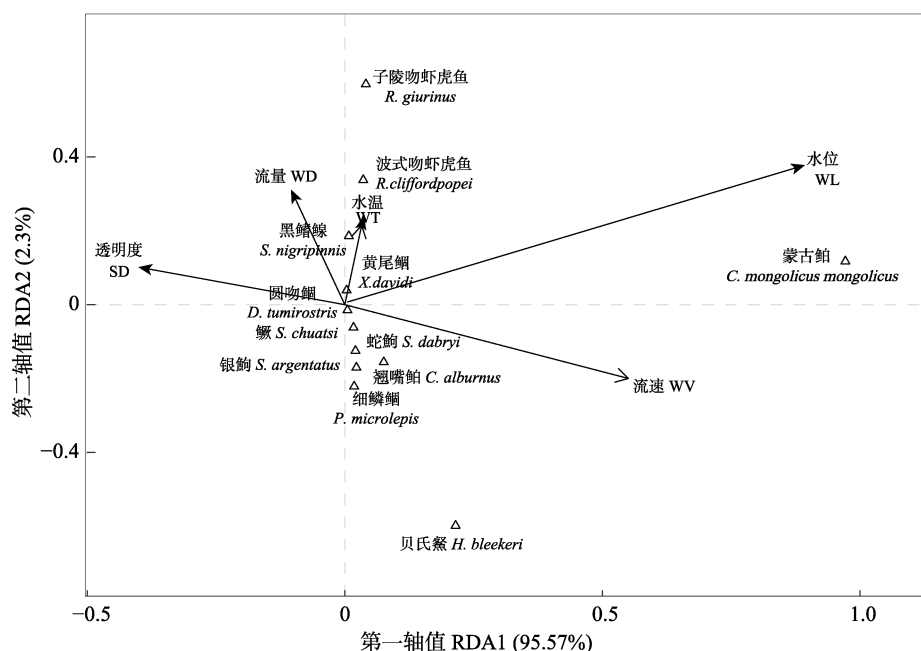


图 7 2022 年西苕溪采样断面水环境因子与物种数量的 RDA 排序图

Fig. 7 The relationship between water environment factors and species number at Xitaoxi sampling section in 2022

苗数量较为丰富。其中翘嘴鲌、蒙古鲌产卵量较大, 6—7 月鱼卵日密度均值可达 2.70 ind/m^3 , 或可补充太湖流域掠食性鱼类种群数量。

毛志刚等^[32]2010 年在对太湖流域的鱼类调查中, 发现多个外来物种, 包括鲢(*Cirrhinus molitorella*)、露斯塔野鲮(*Labeo rohita*)和胡子鲇(*Clarias batrachus*)等。本研究发现了莫桑比克罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)卵, 这表明莫桑比克罗非鱼可能经人为放生或是从养殖场逃逸后在西苕溪完成自然繁殖, 形成生物入侵态势。

此外, 西苕溪鱼类组成中存在典型的溪流物种, 如: 长鳍马口鳅(*Opsariichthys evolans*)、棘颊鲷(*Zacco acanthogenys*)、马口鱼(*Opsariichthys bidens*)、斑鲌(*Siniperca scherzeri*)等, 表明西苕溪江东电站段仍然是溪流鱼类生活与繁殖的主要生境之一。

总体来看, 西苕溪作为太湖上游的主要支流, 其鱼类组成与太湖鱼类组成相似, 可为维持太湖流域鱼类多样性和种群数量提供支持。

3.2 西苕溪江东电站段坝下鱼类产卵场的判定

现场观察结果表明, 江东电站坝下鱼类繁殖活动密集, 繁殖鱼种多样, 可初步判定江东电站

坝下至杭长高速桥下河段为多种鱼类的集中产卵场。结合走访调查、无人机观察、鱼类早期资源分析数据^[33], 本研究进一步确认该电站坝下河段为西苕溪多种鱼类的集中产卵场。

通过走访渔民、垂钓者获取到亲鱼样本, 解剖结果显示翘嘴鲌、蒙古鲌、鳊、大眼鳊(*Siniperca kneri*)等鱼类精巢、卵巢发育阶段多为 IV 期、V 期, 产卵所需生理条件已成熟^[34]; 另一方面, 西苕溪东山江段为鱼类繁殖提供了适宜的产卵环境条件。鱼类繁殖期时区域水温为 $24.8 \sim 28.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 区域流速为 $0.8 \sim 2.5 \text{ m/s}$, 与曹文宣^[35]、Yang 等^[36]描述的鱼类繁殖温度和流速要求相符。

江东电站闭闸期间, 断面流速降低至 0.01 m/s , 可观察到鲤、鲫等鱼类近岸产卵。开闸期间, 断面流速可达 $2.0 \sim 2.5 \text{ m/s}$, 可在河岸直接观测到群聚群游, 拍击水面, 互相追逐等鱼类繁殖行为, 种类以蒙古鲌、翘嘴鲌为主, 产卵时间多集中在每日 17~21 时。

本研究通过拖网方式获取到大量蒙古鲌和翘嘴鲌等产黏性卵鱼类的鱼卵, 说明鱼产卵位置与采样位置非常接近或可能重合^[37], 进一步佐证本研究中西苕溪调查区域为蒙古鲌、翘嘴鲌等鱼类

的产卵场。

3.3 环境变化和电站运行对鱼类早期资源的影响

已有研究表明,水温是鱼类繁殖的必要条件^[38]。受纬度、海拔等地理因素以及水库低温下泄影响,西苕溪鱼类产卵高峰期多集中于5月下旬以及6月,平均温度到达26.3~28.0℃时卵苗数量达到极值。RDA分析结果显示水温重要性在5个环境解释变量中排名次于水位、流速,子陵吻虾虎鱼、波氏吻虾虎鱼、黄尾鲴、黑鳍鲈等小型鱼类,温度越高采集到的相关卵苗数量越多(图7)。

水位、流速在鱼类产卵活动过程中起关键性作用^[13]。江东电站运行产生的特定流速、水位条件与产卵场的形成过程密不可分,在适宜条件下才能够形成有利于鱼类精卵混合,具有环流、涡流的特定产卵场^[39-40]。该区域内水流流速变化幅度(0.01~2.5 m/s)、水位涨落程度(1.26~2.38 m)较大。江东电站运行时间取决于上游库区水位高度。除洪汛期和枯水期外,电站持续运行时间多为8~20时,其余时间段闭闸蓄积水位。坝下水文变化严重依赖电站运行以及上游水库泄水量,受此影响上下午采样时间往往是闭闸时期,下午采样时间往往是开闸时期。闭闸期间采样区域流速降低,水位降低,更适宜低流速需求鱼类繁殖,但对近岸以水草或浅滩为基质产沉、黏性卵鱼类的影响较大^[41]。因此鲤、鲫、虾虎鱼等中小型鱼则多选择水位稳定后的近岸缓流区域产卵^[42];下午电站常处于开闸发电阶段,调查断面内流速较快,水位抬升,扩大的水面和涡流区使得翘嘴鲈、蒙古鲈等鱼类常选择河流中泓线急流区域繁殖^[43],银鲴、蛇鲴等小型鱼类则选择近岸环流区进行繁殖,水位上升覆盖陆生植物与挺水植物,使得以水草为黏附基质的产黏性卵鱼类大量繁殖。同时调查结果也显示下午获取的卵苗量显著高于上午采集的卵苗量。

江东电站运行改变了底质环境影响鱼类繁殖^[44]。鱼类对不同底质的需求会导致鱼类产卵选择的差异^[45]。出水口中心河道常年受电站水流冲刷多为砂石底质,出水口两岸常形成回水导致泥沙逐渐淤积,形成中心河道(砂质底质)与河岸底质(淤泥底质)的差异。河两岸淤泥底质多有苦草

和狐尾藻等水生植物群落,为贝氏鲃、鲤、鲫等中小型鱼类提供庇护空间和产卵区域^[46]。河心多分布砾石底质,为圆吻鲴(*Distoechodon tumirostris*)、细鳞鲴、银鲴(*Xenocypris argentea*)等鲴科鱼以及翘嘴鲈和蒙古鲈等鲈科鱼产卵提供条件^[47]。

3.4 西苕溪鱼类产卵场保护

适宜的水环境是鱼类繁殖场功能发挥作用的重要保障,可为鱼类产卵提供有利条件^[48]。本研究表明调查区域为多种鱼类集中产卵场。该产卵场受江东电站开合闸影响,水位变动大,在水位尺标定处于1.58 m以上,流速区间在0.8 m/s以上时,为该地区鱼类最适繁殖区间。需适度地进行生态流量的调度管理,延长开闸时间,或与上游水库协商进行持续的水位调度,以在鱼类繁殖期稳定形成适宜环境,为鱼类繁殖创造有利条件。

已有研究表明捕捞或垂钓等人干扰活动会严重影响鱼类繁殖^[49]。本研究结果显示蒙古鲈、翘嘴鲈、鳊亚科鱼类等多种鱼类产卵场且规模较大,但江东电站断面较窄,鱼类可利用繁殖空间较少,鱼类进行繁殖活动时较为集中易被捕获。因此,应将江东电站坝下至杭长高速桥下设为多种鱼类产卵场保护区并禁止一切捕捞行为。

本研究时间跨度较短,采样方式为主动采集,未能以被动采集的方式收集该产卵场卵苗径流量等数据。为进一步认识鱼类洄游和利用产卵场的规律,为渔业资源和水生生物多样性保护提供支持,还需建设渔业资源监测站,长期观察流域内的鱼类繁殖态势和繁殖动向。

4 结论

江东电站坝下至杭长高速桥约560 m范围为西苕溪多种鱼类集中产卵场,是补充太湖流域鱼类资源的重要生境。江东电站运行中的调度为坝下区域营造了适宜多种鱼类产卵繁殖的条件,坝下翘嘴鲈、蒙古鲈、鳊等掠食性鱼类卵苗规模较大,可补充太湖流域肉食性鱼类种群数量。在区域范围内对电站进行科学的生态调度对坝下产卵场的维持具有重要意义,后续可以进一步加强长期监测、区域渔业管理政策和产卵场保护对策的研究工作,为保护太湖流域鱼类生物多样性和渔

业资源提供支撑。

参考文献:

- [1] Kikko T, Ishizaki D, Ninomiya K, et al. Diel patterns of larval drift of honmoroko *Gnathopogon caeruleus* in an inlet of Ibanai Lagoon, Lake Biwa, Japan[J]. *Journal of Fish Biology*, 2015, 86(1): 409-415.
- [2] Wang D L, Yao L J, Yu J, et al. Response to environmental factors of spawning ground in the Pearl River Estuary, China[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(7): 763.
- [3] Duan X B. Studies on fish resources and the fishes of early life history stage in the Upper Yangtze River[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008. [段辛斌. 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, 2008.]
- [4] Yi B L, Yu Z T, Liang Z S, et al. Water conservancy project construction and Fishery Ecology Research Collection: Gezhouba water control project and four famous fishes in Yangtze River[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1988. [易伯鲁, 余志堂, 梁秩桑等. 水利枢纽建设与渔业生态研究专集: 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.]
- [5] Survey Team of Spawning Grounds of Domestic Fishes in Changjiang River. A survey on the spawning grounds of the “four famous Chinese carps” in the Changjiang River after dammed by the key water control project at gezhouba[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1982, 6(4): 287-305. [Survey Team of Spawning Grounds of Domestic Fishes in Changjiang River. 葛洲坝水利枢纽工程截流后长江四大家鱼产卵场调查[J]. *水产学报*, 1982, 6(4): 287-305.]
- [6] Liu Y J, Gao L, Zheng Y H, et al. Annual dynamics and migration characteristics of fish resources in the Chenglingji, in the channel connecting Dongting Lake and the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(2): 376-385. [6] [刘艳佳, 高雷, 郑永华, 等. 洞庭湖通江水道鱼类资源周年动态及其洄游特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(2): 376-385.]
- [7] Jiang X L, Li M Z, Yang S R, et al. Temporal variation of fish metacommunity structure in Poyang Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(3): 588-601. [蒋祥龙, 黎明政, 杨少荣, 等. 鄱阳湖鱼类集合群落结构特征及其时间变化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(3): 588-601.]
- [8] Tsuboi J I, Endou S, Morita K. Habitat fragmentation by damming threatens coexistence of stream-dwelling charr and salmon in the Fuji River, Japan[J]. *Hydrobiologia*, 2010, 650(1): 223-232.
- [9] Liu J K, Cao W X. Fish resources of the Yangtze River Basin and the tactics for their conservation[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1992, 1(1): 17-23. [刘建康, 曹文宣. 长江流域的鱼类资源及其保护对策[J]. *长江流域资源与环境*, 1992, 1(1): 17-23.]
- [10] Cheng F, Li W, Castello L, et al. Potential effects of dam cascade on fish: Lessons from the Yangtze River[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2015, 25(3): 569-585.
- [11] Xie W X, Huang D M, Xie S, et al. The early evolution of the four major Chinese carps resources in the middle and lower reaches of Hanjiang River after the construction and operation of Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 30(2): 44-49. [谢文星, 黄道明, 谢山, 等. 丹江口水利枢纽兴建后汉江中下游四大家鱼等早期资源及其演变[J]. *水生态学杂志*, 2009, 30(2): 44-49.]
- [12] Peng Q D, Liao W G, Li C, et al. Impacts of four major Chinese carps' natural reproduction in the middle reaches of Changjiang River by Three Gorges Project since the impoundment[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(S2): 228-232. [彭期冬, 廖文根, 李翀, 等. 三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(S2): 228-232.]
- [13] Zhou Q B, Cheng F, Wang Z, et al. Study on fish resources of the early life history stages and the effects of ecological regulation of the xiangjiaba reservoir at the Hejiang section in the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(1): 95-103. [周岐兵, 程飞, 王震, 等. 长江上游合江江段鱼类早期资源与向家坝水库生态调度效果初步研究[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(1): 95-103.]
- [14] 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.
- [15] Li M Z. Life history strategy of Yangtze River fish and its adaptation to the environment in its early life history stage[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. [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]. 北京: 中国科学院大学, 2013.]
- [16] Xu W, Yang Z, Chen X J, et al. Three gorges reservoir ecological operation effect on the spawning of the four major Chinese carps[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1129-1139. [徐薇, 杨志, 陈小娟, 等. 三峡水库生态调度试验对四大家鱼产卵的影响分析[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1129-1139.]

- [17] Gao Y N, Gao J F. Delineation of aquatic ecoregions in Taihu Lake basin[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(1): 111-117. [高永年, 高俊峰. 太湖流域水生生态功能分区[J]. 地理研究, 2010, 29(1): 111-117.]
- [18] Gao W, Wang X Q, Zeng Y. A trend analysis of observations of runoff in the xitaoxi river in the Taihu Lake between 1972 and 2008[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(6): 33-37. [高伟, 王西琴, 曾勇. 太湖流域西苕溪 1972—2008 年径流量变化趋势与原因分析[J]. 中国农村水利水电, 2010(6): 33-37.]
- [19] Dai X Y, Xu Y P, Lin Z X, et al. Attribution analysis for runoff change in xitaoxi basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(6): 1279-1286. [代晓颖, 许有鹏, 林芷欣, 等. 太湖西苕溪流域径流变化归因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1279-1286.]
- [20] Zhu Y M, Yao Q H. Development and utilization of hydropower resources in Dongshan section of Xitaoxi stream[J]. *China Water Power & Electrification*, 2012(10): 61-64. [朱永明, 姚庆华. 西苕溪干流东山段水电资源开发利用[J]. 中国水能及电气化, 2012(10): 61-64.]
- [21] Lu Z Y, Zhang Y Y, Cui P, et al. Effect of dietary lutein with different levels of lipid on growth performance and body color of Yamabaki ogon[J]. *Feed Research*, 2021, 44(20): 27-32. [卢正义, 张媛媛, 崔培, 等. 不同脂肪水平的叶黄素饲料对黄金锦鲤生长性能和体色的影响[J]. 饲料研究, 2021, 44(20): 27-32.]
- [22] 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.]
- [23] Hebert P D N, Cywinska A, Ball S L, et al. Biological identifications through DNA barcodes[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2003, 270(1512): 313-321.
- [24] Ko H L, Wang Y T, Chiu T S, et al. Evaluating the accuracy of morphological identification of larval fishes by applying DNA barcoding[J]. *PLoS One*, 2013, 8(1): e53451.
- [25] Pearl River Fisheries Research Institute, CAFS. Method for evaluating the resources of drifting fish eggs and larvae in rivers[S]. China: Industry Standard-Aquaculture, SC/T 9427-2016. [中国水产科学研究院珠江水产研究所. 河流漂流性鱼卵和仔鱼资源评估方法[S]. 中国: 行业标准-水产, 2016.]
- [26] Zhang X B, Zhang K R, Yang W, et al. Hydrostatic settling characteristics of drifting fish eggs in main stream of Yangtze River from Yibin to Fengdu[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(9): 1918-1925. [张先炳, 张堪瑞, 杨威, 等. 长江上游宜宾至丰都江段漂流性鱼卵的静水沉降特性[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1918-1925.]
- [27] Jiang W, Liu H Z, Duan Z H, et al. Studies on the drift pattern of drifting fish eggs with tracers in Upper Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(6): 1172-1178. [姜伟, 刘焕章, 段中华, 等. 以标志物对长江上游漂流性鱼卵漂流方式的研究[J]. 水生生物学报, 2010, 34(6): 1172-1178.]
- [28] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [29] McCune B, Grace J B, Urban D L. Analysis of ecological communities[M]. Gleneden Beach, OR: MjM Software Design, 2002.
- [30] Tang S K, Zhang T Q, Shen Z H, et al. Ichthyology investigation and catch analysis in Taihu Lake[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010, 38(2): 376-379. [30] [唐晟凯, 张彤晴, 沈振华, 等. 太湖鱼类学调查及渔获物分析[J]. 江苏农业科学, 2010, 38(2): 376-379.]
- [31] Zhang X, Shen W, Zhou G D. Status of the fish community and canonical correspondence analysis of environmental factors in Lake Taihu from 2018 to 2020[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(5): 674-680. [31] [张翔, 沈伟, 周国栋. 2018—2020 年太湖鱼类群落结构及其环境因子典范对应分析[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 674-680.]
- [32] Mao Z G, Gu X H, Zeng Q F, et al. Community structure and diversity of fish in Lake Taihu[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12): 2836-2842. [32] [毛志刚, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等. 太湖鱼类群落结构及多样性[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2836-2842.]
- [33] Gao M, Wang Z R, Zhou Q B, et al. Effects of dietary lipid levels on growth performance, fatty acid composition and liver histology of loach (*Misgurnus Anguillicaudatus*) [J]. *Feed Industry*, 2021, 42(10): 6-15. [高森, 王自蕊, 周秋白, 等. 饲料脂肪水平对泥鳅生长性能、脂肪酸组成和肝脏组织学的影响[J]. 饲料工业, 2021, 42(10): 6-15.]
- [34] Yin M C. Fish ecology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995. [殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.]
- [35] Cao W X. Water ecological restoration in the cascade development of hydropower in the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Technology and Economy of Changjiang*, 2019, 3(2): 5-10. [曹文宣. 长江上游水电梯级开发的水域生态修复问题[J]. 长江技术经济, 2019, 3(2): 5-10.]
- [36] Yang Z, Zhu Q G, Cao J, et al. 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*, 2021, 787: 147618.
- [37] Zhu Q G, Zhang Q, Yang Z, et al. Status of early stage resources of fish with sticky and demersal eggs in modaoxi river, a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(1): 101-107. [朱其广, 张琪, 杨志, 等. 三峡库区支流磨刀溪产粘沉性卵鱼类早期资源现状[J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(1): 101-107.]
- [38] Kamler E, Kecke H, Bauer-Nemeschkal E. Temperature-induced changes of survival, development and yolk partitioning in *Chondrostoma nasus*[J]. *Journal of Fish Biology*, 1998, 53(3): 658-682.
- [39] Boavida I, Jesus J B, Pereira V, et al. Fulfilling spawning flow requirements for potamodromous cyprinids in a restored river segment[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 635: 567-575.
- [40] Gendaszek A S, Burton K, Magirl C S, et al. Streambed scour of salmon spawning habitat in a regulated river influenced by management of peak discharge[J]. *Freshwater Biology*, 2018, 63(8): 917-927.
- [41] Lei H, Xie W X, Huang D M, et al. The early evolution of the fish with pelagic eggs resources in the upstream of Danjiangkou Reservoir after the cascade development[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(5): 1319-1331. [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[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(5): 1319-1331.]
- [42] Wu M Q, Zhong J S, Ge K K, et al. Seasonal fluctuation of fish larvae and juveniles distribution in the surf zone of the Yangtze River Estuary[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(1): 1-7. [吴美琴, 钟俊生, 葛珂珂, 等. 长江口沿岸碎波带仔稚鱼分布的季节性变动[J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(1): 1-7.]
- [43] Wang L F, Tian H W, Yan Z L, et al. Status of early-stage fish resources and hydrological condition response relationship in Luzhou section of Upper Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(4): 814-822. [王龙飞, 田辉伍, 严忠鑫, 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[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(4): 814-822.]
- [44] Fischer J, Paukert C, Daniels M. Fish community response to habitat alteration: Impacts of sand dredging in the Kansas River[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2012, 141(6): 1532-1544.
- [45] Reynalte-Tataje D A, Agostinho A A, Bialecki A. Temporal and spatial distributions of the fish larval assemblages of the Ivinheima River sub-basin (Brazil)[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2013, 96(7): 811-822.
- [46] Fu C Z, Wu J H, Chen J K, et al. Freshwater fish biodiversity in the Yangtze River Basin of China: Patterns, threats and conservation[J]. *Biodiversity & Conservation*, 2003, 12(8): 1649-1685.
- [47] Tian J J, Feng X W, Pu D Y, et al. Effects of channelizing Jialing River on the spawning grounds of major commercial fish species[J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(3): 9-17. [田佳佳, 冯兴无, 蒲德永, 等. 嘉陵江渠化对主要经济鱼类产卵场的影响[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(3): 9-17.]
- [48] Jobling M. Stream ecology: Structure and function of running waters[J]. *Aquaculture*, 1995, 134(3-4): 372-374.
- [49] Liu Y. The fish resources and angling fishery status in the middle reaches of Jialing River[D]. Chongqing: Southwest University, 2021. [刘玥. 嘉陵江中游鱼类资源与垂钓渔业现状研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.]

Early fish resources and their relationship with environmental factors in Dongshan Reach of the Xitiao River in the Tai Lake

ZHOU Kaiyi¹, GUO Aihuan², ZHANG Yixiang¹, SHENG Pengcheng², LIAN Qingping², SHENG Qiang¹, YUAN Julin²

1. School of Life Sciences, Huzhou University; Zhejiang Provincial Key Laboratory of Aquatic Biological Resource Conservation and Development Technology, Huzhou 313000, China;
2. Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, Huzhou 313001, China

Abstract: With the construction and operation of water infrastructure in river basins, significant alterations have occurred in the original habitats, leading to changes in the patterns of juvenile fish resources and the spatial

distribution of fish spawning grounds. As a result, considerable attention has been devoted to studying the patterns of juvenile fish resources and the characteristics of spawning grounds in various sections of the Yangtze River mainstream. The dam downstream area has emerged as a focal point for investigating fish spawning habitats. However, due to constraints such as hydrological conditions and topography, localized studies on the spatiotemporal patterns of fish spawning and early life stages in the dam downstream area have been challenging. Extensive research has been conducted on the dynamics of fish community structure in the middle and lower reaches of the river, as well as the interconnected lakes, encompassing changes in fish populations and the mechanisms driving river-lake migrations. However, limited research is available on the coupling relationship between concentrated spawning habitats, fish resources early in their life cycle, and river environments in the upstream tributaries of lakes. Exploring the patterns of early-stage fish resources and concentrated spawning in the upstream tributaries of large lakes is equally important for the conservation of aquatic fisheries resources. The upstream rivers of lakes serve as crucial ecological zones for migratory fish reproduction in river-lake systems and play a vital role in replenishing juvenile fish resources for such species. The Xitiao River, an important supplementary tributary of the Tai Lake, also serves as a crucial conduit for fish migration in the southern Tai Lake basin. It is home to a nationally protected gene pool and boasts abundant fish resources. The East Mountain section below the Jiangdong Power Station in the Xitiao River is a concentrated breeding site for regional fish populations. Moreover, the area downstream of the Jiangdong Power Station provides favorable hydrological and topographical conditions, making it an ideal location for conducting localized studies on the spatiotemporal patterns of juvenile fish resources. To investigate the intrinsic relationship between the variables of the downstream river habitat and fish resources under the influence of the power station, this study conducted a 90-day survey of fish resources and spatial-temporal patterns using a shallow type I plankton net in the Dongshanjiang section of the Xitiao River from April to July 2022. The survey obtained 24455 fish eggs and 24325 larval fish, with a daily average density of (0.5 ± 0.7) ind/m³ and (0.5 ± 0.6) ind/m³, respectively. Using morphological and molecular biology methods for identification, a total of 35 fish species were identified, belonging to four orders, 14 families, and 22 genera. *Hemiculter bleekeri*, *Squalidus argentatus*, *Cyprinus carpio*, *Carassius auratus*, *Saurogobio dabryi*, and *Culter mongolicus* had relatively high numbers of eggs and larvae. The fish resources included 9 species of benthic egg-laying fish, 5 species of pelagic egg-laying fish, 9 species of adhesive egg-laying fish, and 12 species of drifting egg-laying fish. Late May, early June, and late June were the peak spawning periods. The sampling results evidenced that benthic and adhesive egg-laying fish, which use aquatic plants as attachment substrates, were dominant on the left and right bank sample lines, whereas drifting, adhesive, and pelagic egg-laying fish dominated the river center sample line. The redundancy analysis results evidenced that water temperature, flow rate, and water level influenced the number of fish eggs and larvae in the area to varying degrees, with water level and flow rate being the main factors affecting fish reproduction, and egg production increasing significantly after rainfall. Based on the results of egg harvest and egg development stage, the sampled river section and the upstream river of Dongshanjiang in the Xitiao River were determined to be a composite fish spawning ground. The fish resources in this spawning ground were abundant, and the habitat was suitable for fish reproduction and nurturing. The discharge of the power station had a certain effect on fish reproduction, and moderate ecological scheduling could meet the needs of fish reproduction, which was of great significance for the protection of fish diversity and fishery resources in the Tai Lake.

Key words: early fish resources; spawning grounds; environmental factors; the Tai Lake; the Xitiao River

Corresponding author: SHENG Qiang, E-mail: qsheng@zjhu.edu.cn; YUAN Julin, E-mail: yuanjulin1982@163.com