

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*

雷欢, 陈锋, 谢文星, 陈金生, 金瑶, 黄道明**

(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, 湖北省水生态保护与修复工程技术研究中心, 武汉 430079)

摘要: 为促进汉江中下游鱼类繁殖, 2018年6月汉江中下游首次实施梯级联合生态调度试验. 该研究在汉江中下游钟祥、沙洋、泽口、仙桃江段设置监测断面, 采集鱼类早期资源, 并在兴隆枢纽泄洪闸上、下开展鱼类溯流集群情况监测, 以分析生态调度对促进汉江中下游鱼类繁殖的效果. 监测结果表明汉江中下游鱼卵种类共有26种(属), 其中产漂流性卵鱼类22种. 监测期间漂流性卵径流量为143411万粒, 其中四大家鱼卵径流量为4887万粒, 占3.41%, 推测汉江中下游有6处成规模的产漂流性卵鱼类产卵场. 生态调度期间, 坝下鱼类溯流集群随兴隆枢纽调度过程发生变化, 钟祥和仙桃江段均出现两次鱼类产卵高峰, 鱼卵径流量占总径流量的61.66%, 并监测到四大家鱼卵, 表明梯级联合生态调度结合区间来水, 对汉江下游鱼类, 特别是四大家鱼的繁殖具有积极的作用.

关键词: 汉江中下游; 生态调度; 产漂流性卵鱼类; 自然繁殖

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*

Lei Huan, Chen Feng, Xie Wenxing, Chen Jinsheng, Jin Yao & Huang Daoming**

(*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, Hubei Engineering Research Center of Hydroecology Protection and Restoration; Wuhan Imagination Science and Technology Development Company, Wuhan 430079, P.R. China*)

Abstract: In order to promote fish breeding, an ecological dispatching experiment was conducted for the first time in the middle and lower reaches of Hanjiang River in June 2018. The study set up monitoring sections in Zhongxiang, Shayang, Zekou and Xiantao to collect early fish resources, and monitoring sections of the fish assemblage in sluice gate of Xinglong hub, in order to analyze the effect of ecological regulation on fish reproduction in the middle and lower reaches of the Hanjiang River. The results showed that there were 26 species (genera) of fish eggs, of which 22 species were pelagic. The total fish eggs runoff during the monitoring period was 1434.11 million, of which 48.87 million were collected from the four major domestic fishes, accounting for 3.41%. It is estimated that there are six spawning grounds for pelagic fish in the middle and lower reaches of Hanjiang River. During the ecological regulation period, the fish assemblage under the dam of Xinglong project varied with the scheduling process, there were two spawning peaks in the sections of Zhongxiang and Xiantao, and the fish eggs account for 61.66% of the total, and detected eggs from the four major Chinese carps. The results showed that the combination of ecological regulation and regional water supply had positive effects on the reproduction of fish in the lower reaches of the Hanjiang River, especially the four major Chinese carps.

Keywords: The middle and lower reaches of the Hanjiang River; ecological regulation; fish with pelagic eggs; natural reproduction

汉江是长江的最长支流, 发源于秦岭南麓, 于武汉市龙王庙汇入长江干流, 干流全长 1577 km. 通常以丹

* 2021-08-05 收稿; 2021-11-30 收修改稿.

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

江口以上为上游,丹江口至钟祥碾盘山之间为中游,碾盘山以下为下游. 汉江作为长江中下游最大支流,与长江中下游鱼类资源具有高度相似性,迁移交流频繁. 一般而言,长江中下游及其湖泊肥育后的鱼类众多上溯至支流汉江索饵繁殖,汉江繁殖的仔幼鱼顺水漂流至长江中下游及其湖泊中索饵肥育. 汉江中下游鱼类约 79 种,许多主要经济鱼类是产漂流性卵鱼类^[1-2],其中以“四大家鱼”为典型的产漂流性卵鱼类代表以及其他的中小型经济鱼类,如拟尖头鲌、吻鲌、翘嘴鲌、蛇鲌、双斑副沙鳅和赤眼鳟等.

1970s 末周春生等^[1]调查,汉江中下游主要分布有王甫洲、茨河、襄樊、宜城、钟祥、马良、泽口等处产漂流性卵鱼类产卵场,但随着“南水北调”中线工程的兴建和汉江中下游的梯级开发,改变了汉江的生态环境,汉江中游洪峰过程弱化甚至消失,产漂流性卵鱼类产卵繁殖所需水文水力学条件难以满足,对其生长产生了较大的影响,以“四大家鱼”为代表的典型产漂流性卵鱼类资源量急剧下降,中小型产漂流性卵鱼类种类与资源量也发生较大改变^[3-8],产卵场数量明显减少,其位置也发生一定变化:王甫洲枢纽建设后的 2007 年监测结果表明^[3],中游王甫洲产卵场消失,襄樊“四大家鱼”产卵场消失;崔家营、兴隆等库区形成后,2014 年水利部中国科学院水工程生态研究所调查结果表明^[4],汉江中游干流仅有关家山、邓家台两处产漂流性卵鱼类产卵场,集中于宜城至钟祥江段,且规模不大,汉江下游因兴隆库区对洪峰过程的坦化,基本上无洪峰过程,未监测到产漂流性卵鱼类产卵.

鉴于汉江中下游鱼类繁殖生态环境的严峻形势,湖北省人民政府于 2015 年 11 月以鄂政函(2015)235 号《关于湖北省汉江干流丹江口以下梯级联合生态调度方案(试行)的批复》,同意开展汉江中下游联合生态实验性调度,缓解汉江干流梯级枢纽对产漂流性卵鱼类繁殖的影响. 2018 年 6 月 13 日,汉江中下游丹江口、王甫洲、崔家营、兴隆水利枢纽首次实行联合梯级生态调度,以促进中下游鱼类的产卵. 本研究于 2018 年生态调度期间在汉江下游钟祥和仙桃江段开展鱼类早期资源监测和兴隆枢纽鱼类上溯情况监测,目的在于查明:(1)汉江中下游鱼类早期资源的种类、产卵场分布及规模;(2)首次汉江梯级联合生态调度对促进中下游产漂流性卵鱼类繁殖的效果,为优化生态调度方案提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 2018 年汉江中下游生态调度方案

2018 年 6 月 12 日汉江中下游首次实施了梯级联合生态调度. 丹江口枢纽于 6 月 12 日至 15 日逐步加大下泄流量,6 月 16 日丹江口枢纽结束造峰,并根据实时水雨情及丹江口水库水位消落情况,择机逐步关闭表孔,使其 20 日库水位降至 160 m 左右;兴隆枢纽于 6 月 12 日开始预泄,6 月 15 日达到敞泄条件,18 日开始回蓄,20 日恢复通航. 根据上述时间节点控制,此次汉江中下游生态调度协同丹江口水库“造峰”调度、王甫洲枢纽维持进出库水量平衡调度、崔家营枢纽视情况加大下泄流量实现“叠峰”调度、兴隆枢纽“敞泄”调度及其它工程调度等.

生态调度工作接近尾声时,受湖北省梅雨期强降雨影响,汉江上游及中游区间来水加大,湖北省水利厅下达指令并及时协调调度王甫洲、崔家营枢纽按当时库水位控制,维持进出库平衡,保持原有自然洪水过程形态基本不变,为崔家营枢纽至兴隆枢纽河段鱼类营造了二次产卵繁殖的环境和条件.

此次生态调度时间为 6 月 12 日至 6 月 25 日,共 14 天.

1.2 早期资源采集

1.2.1 断面设置 本次早期资源监测范围为汉江中下游河段,共计 4 个采样断面,分别是钟祥市皇庄水文站下游约 100 m 处(31°11'05.18"N, 112°33'46.62"E)、沙洋汉江大桥附近(30°42'15.84"N, 112°36'10.34"E)、泽口江段(30°29'31.69"N, 112°52'30.48"E)和仙桃水文站上游约 20 m 趸船边(30°22'52.36"N, 113°26'36.43"E).

1.2.2 早期资源采集 监测方法按照《内陆水域渔业自然资源手册》^[9],同时参照易伯鲁等^[10]、长江“四大家鱼”产卵场调查队^[11]、刘乐和等^[12]的方法进行,产漂流性卵鱼类胚胎发育时序参照相关文献^[13-16]. 对采集的鱼卵立刻进行分类,记录发育期,通过观察及测量卵径、胚体长、卵色泽、发育期及其他特征进行鉴定. 每个断面设置左、中、右 3 个采样点,每个采样点采集上、中、下水层样品. 表层样品采集用筛网,网口半圆形,半径 0.5 m,面积 0.3927 m²,中层和底层样品采集用圆锥网,网口半径 0.35 m,面积 0.3848 m². 网口流速使用 LGY-II 型智能流速仪测定. 监测 2018 年 6 月 11 日—6 月 24 日整个生态调度过程,其中针对生态调度期间

在6月15日8时至6月18日17时35分进行连续81小时35分不间断监测。

1.2.3 卵苗鉴定 形态学鉴定方法:采集到的四大家鱼鱼卵统一就地培育到尾芽形成期至出膜前期进行鉴定,对四大家鱼鱼苗直接鉴定。无法鉴定的鱼卵和鱼苗,就地培育直到能鉴定种类为止。

分子生物学鉴定方法:现场挑取鱼卵,用无水酒精固定,带回实验室。取单个鱼卵或仔鱼,使用TSINGKE动物DNA提取试剂盒(TSP201),提取基因组DNA。所用cytb基因片段的通用引物由北京擎科生物科技有限公司合成,其序列分别为L14724(5'-GACTTGAAAAACCACCGTTG-3')和H15915(5'-CTCCGATCTCCG-GATTACAAGAC-3')。PCR反应体系为50 μL,包括模板金牌 Mix(green) 45 μL、10 μmol/L Primer F 2 μL、10 μmol/L Primer R 2 μL、Template(gDNA) 1 μL。在郎基A300型PCR仪上,进行如下反应程序:98℃预变性2 min;98℃变性10 s,58℃退火10 s,72℃延伸30 s,35个循环;最后,72℃延伸5 min。反应结束后,取PCR产物经8%聚丙烯酰胺凝胶电泳检测合格后,由北京擎科生物科技有限公司进行纯化和测序。将测序结果用CEExpress软件进行测序结果拼接,拼接后将序列黏贴到NCBI网站进行物种鉴定比对。

1.3 鱼类溯流集群情况观测

1.3.1 断面设置 本次鱼类溯流集群监测断面设置在兴隆枢纽右岸泄洪闸1号闸口位置,上下各布置一台回声探测系统。

1.3.2 观测时间和方法 利用水声学定点探测方法,开展昼夜24小时不间断观测,观测记录成鱼溯流集群过程。观测时间从6月14日10时至20日13时,其中1号闸门下断面共观测7天,上断面从6月15日闸门开启至17日关闭共持续3天。观测设备为挪威产Simrad鱼探仪,型号为EK80、EK60,换能器频率为70、120 kHz,波束角7°。探测时将换能器固定在水下1.5 m处,角度水平朝向左岸,监测断面探测距离30 m,覆盖1号闸口区域。

1.3.3 数据分析 利用声学处理软件Ecoview 8.0,在软件中对转换后的数据设置水面、水底边界、信号目标强度(target strength, TS)背景噪声阈值<-50 dB及交叉过滤参数。人工复核,统计每小时通过断面的鱼类数量、信号强度等信息。

1.4 水文测定与资料

使用旋桨式流速仪测定采集断面左、中、右站位及采集网口江水的流速。水文数据取自汉江皇庄和仙桃水文站,沙洋和泽口水位站。

1.5 产卵江段推算方法

1.5.1 产卵江段推算方法 产卵场的位置依据采集鱼卵的发育期和当时水流速度进行推算,公式为:

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

式中, S 为鱼卵的漂流距离, V 为江水平均流速, T 为当时水温条件下胚胎发育经历的时间。

1.5.2 断面系数的计算 根据断面上每个采集点表、中、底3个水层样品的鱼卵和鱼苗的密度,计算断面上所有样品的平均密度,以之除以定点采集点的鱼卵和鱼苗的密度,即可得出断面系数。

断面上所有采集点的平均密度为:

$$d_p = \left(\sum_{j=1}^n d_j \right) / n \quad (2)$$

则断面系数为:

$$c_i = d_p / d_j \quad (3)$$

式中, d_p 为断面上所有采集点鱼卵和鱼苗的平均密度(粒/ m^3 或尾/ m^3), d_j 为定点采集点的鱼卵和鱼苗的密度(粒/ m^3 或尾/ m^3), n 为采集点数, c_i 为断面系数。

1.5.3 鱼苗径流量的计算 每次采集时的卵苗径流量为:

$$m_i = q_i \cdot d_i \cdot c_i \cdot t_i \quad (4)$$

非采集期间的卵苗径流量为:

$$m_{i,i+1} = (m_i/t_i + m_{i+1}/t_{i+1})t_{i,i+1}/2 \quad (5)$$

总卵苗径流量为:

$$y = \sum m_i + \sum m_{i,i+1} \quad (6)$$

式中, m_i 为第 i 次采集期间的鱼卵、鱼苗流量(粒或尾), q_i 为第 i 次采集期间的水流量(m^3/s), d_i 为第 i 次采集的鱼卵、鱼苗密度(粒/ m^3 或尾/ m^3), c_i 为第 i 次采集的断面系数, t_i 为第 i 次采集的时间(min), $m_{i,i+1}$ 为第 i 和 $i+1$ 次采集时间间隔内鱼卵、鱼苗流量(粒或尾), $t_{i,i+1}$ 为第 i 和 $i+1$ 次采集时间间隔(min).

2 结果

2.1 汉江中下游生态调度过程

2018年6月生态调度期间,汉江中下游经历了2次洪峰过程(图1),均包括由于水库蓄水导致的落水过程以及满足生态需求的涨水过程.丹江口水库6月13日日均出库流量 $2300 \text{ m}^3/\text{s}$,6月14日日均出库流量增至 $3200 \text{ m}^3/\text{s}$,6月15—16日维持日均出库流量 $3200 \text{ m}^3/\text{s}$ 不变,6月17日后逐步减小出库流量,汉江中下游涨水时间为6月15—18日.6月19日唐白河涨水,最大流量 $700 \text{ m}^3/\text{s}$,丹江口水库保持下泄流量大于 $2700 \text{ m}^3/\text{s}$,汉江中下游降雨区间来水增大,汉江中下游又迎来一次洪水过程,时间为6月19—22日.监测期间,钟祥江段和仙桃江段水温在 $19.5\sim 24.8^\circ\text{C}$ 之间,基本上满足汉江产漂流性卵鱼类繁殖水温 $16\sim 32^\circ\text{C}$ 的水文条件^[1].

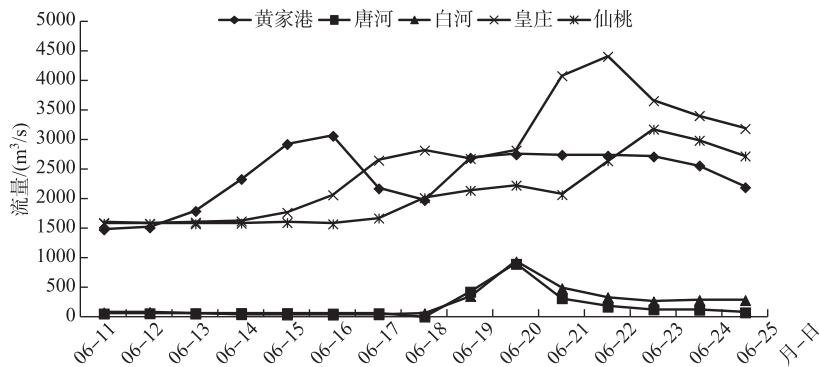


图1 汉江中下游各断面日均流量变化

Fig.1 Daily runoff of each section of the middle and lower reaches of Hanjiang River

2.2 早期资源种类组成

2018年生态调度期间共采获漂流性鱼卵49256粒(表1),经鉴定,隶属于26种(属).可以看出,汉江中下游产漂流性卵鱼类组成以银鮡、蛇鮡、鳊、鳙、花斑副沙鳅为主,四大家鱼有草鱼、鲢、青鱼.

汉江中下游产漂流性卵代表性鱼类鱼卵性状及类型见表2,“四大家鱼”中的青鱼、草鱼、鲢以及鳊、犁头鳅的卵径较大,吸水后可达到 $4.8\sim 6.5 \text{ mm}$;赤眼鳟、花斑副沙鳅、蛇鮡等鱼类的卵径稍小,达到 $3.2\sim 4.5 \text{ mm}$,卵黄色彩为箴黄,是典型的漂流性卵.银鮡、蒙古鲌、翘嘴鲌等鱼类产弱粘性卵,卵膜径有大有小($2.5\sim 5.1 \text{ mm}$),受精卵在浑浊的河水中易脱落,随流水漂流发育.

2.3 产卵场规模和分布

根据鱼卵发育期和江水流速,推测汉江襄阳至仙桃江段分布有6处成规模产漂流性卵鱼类产卵场:小何、流水、磷矿、兴隆、泽口、彭市(图2);另有3处零星产漂流性卵鱼类产卵场:文集、石碑、旧口,产卵规模均低于4000万粒.监测到的产卵场总长度113.5 km(表3).

推算漂流性鱼卵径流量为143411万粒,主要经济鱼类银鮡、鳊、蛇鮡和花斑副沙鳅为优势类群,鱼卵径流量为89854万粒,占62.65%;其他鱼类银鲌、吻鮡、鳊、似鳊和鳊等鱼卵径流量为29119万粒,占20.30%;四大家鱼鱼卵径流量为4887万粒,占3.41%.规模最大的为泽口产卵场,规模为38071万粒,其次是流水产卵场,规模为25333万粒(表4).

2.4 鱼探仪监测结果

从观测过程看,坝下鱼类溯流集群随兴隆枢纽调度出库流量变化而变化(图3).兴隆枢纽开始预泄调度后,随着下泄流量加大,鱼类溯流集群坝下,由于闸口上下水位落差大,鱼类不能过坝,坝下集群规模不断

表1 汉江中下游产漂流性卵鱼类种类组成*

Tab.1 The composition of the fish with pelagic eggs in the middle and lower reaches of Hanjiang River

种类	钟祥		沙洋		泽口		仙桃	
	卵粒	比例/%	卵粒	比例/%	卵粒	比例/%	卵粒	比例/%
银鮡 <i>Squalidus argentatus</i>	2599	12.51	4119	67.92	23	4.58	5300	24.18
鳊 <i>Hemiculter leucisclis</i>	5952	28.65	207	3.41	109	22.14	2608	11.90
蛇鮡 <i>Saurogobio dabryi</i>	1234	5.94	21	0.34	/	/	4326	19.73
银鲴 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	3120	15.02	62	1.02	45	9.16	/	/
圆筒吻鮡 <i>Rhinogobio cylindricus</i>	1161	5.59	/	/	/	/	383	1.75
吻鮡 <i>Rhinogobio typus</i>	326	1.57	41	0.68	/	/	1006	4.59
鳢 <i>Elopichthys bambusa</i>	989	4.76	/	/	/	/	202	0.92
蒙古鲃 <i>Culter mongolicus mongolicus</i>	949	4.57	/	/	/	/	440	2.01
翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i>	266	1.28	/	/	23	4.58	249	1.14
细鳞鲴 <i>Xenocypris microlepis</i>	245	1.18	/	/	/	/	146	0.67
花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i>	2541	12.23	393	6.48	26	5.34	1525	6.96
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	71	0.34	186	3.07	56	11.45	1768	8.06
宜昌鳅鮡 <i>Gobiobotia filifer</i>	25	0.12	62	1.02	8	1.53	64	0.29
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	652	3.14	662	10.92	23	4.58	/	/
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	326	1.57	/	/	11	2.29	119	0.54
青鱼 <i>Mylopharungodon piceus</i>	71	0.34	/	/	/	/	/	/
湖北圆吻鲴 <i>Xenocypris davidi</i>	/	/	62	1.02	11	2.29	81	0.37
赤眼鲱 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	71	0.34	/	/	4	0.76	830	3.78
寡鳞鲴 <i>Pseudolaubuca engraulis</i>	/	/	/	/	11	2.29	777	3.54
中华沙鳅 <i>Cobitis sinensis</i>	/	/	/	/	/	/	704	3.21
犁头鳅 <i>Lepturichthys fimbriata</i>	35	0.17	/	/	/	/	64	0.29
铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>	/	/	21	0.34	/	/	/	/
三角鲂 <i>Megalobrama terminalis</i>	/	/	186	3.07	53	10.69	/	/
似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	141	0.68	41	0.68	79	16.03	1395	6.36
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	/	/	/	/	8	1.53	/	/
长鳍吻鮡 <i>Rhinogobio ventralis</i>	/	/	/	/	4	0.76	/	/
合计	20775	100.0	6065	100.00	493	100.00	21923	100.00

*/表示无产漂流性卵鱼类。

表2 汉江中下游产漂流性卵代表性鱼类鱼卵性状及类型*

Tab.2 Characteristics and types of the fish with pelagic eggs in the middle and lower reaches of Hanjiang River

种类	早期鱼卵性状		漂流性卵类型		
	吸水膨胀膜径/mm	卵径/mm	卵黄色彩	典型类	微粘类
青鱼	5.0~6.0	1.7~1.8	酪黄	+	-
草鱼	5.0~5.8	1.7~1.9	篾黄	+	-
鲢	4.8~5.9	1.6~1.8	浅枇杷黄	+	-
鳢	5.0~6.5	1.8~2.0	酪黄	+	-
犁头鳅	5.0~5.8	1.7~1.8	肉红	+	-
赤眼鲱	3.8~4.5	1.3~1.5	篾黄	+	-
花斑副沙鳅	3.9~4.5	1.4~1.5	枇杷黄	+	-
蛇鮡	3.2~4.4	1.0~1.1	篾黄	+	-
银鮡	2.5~3.8	1.0~1.2	杏仁黄	-	+
蒙古鲃	4.5~5.0	1.5~1.6	篾黄	-	+
翘嘴鲃	4.5~5.1	1.4~1.5	酪黄	-	+

* +表示“是”，-表示“否”。

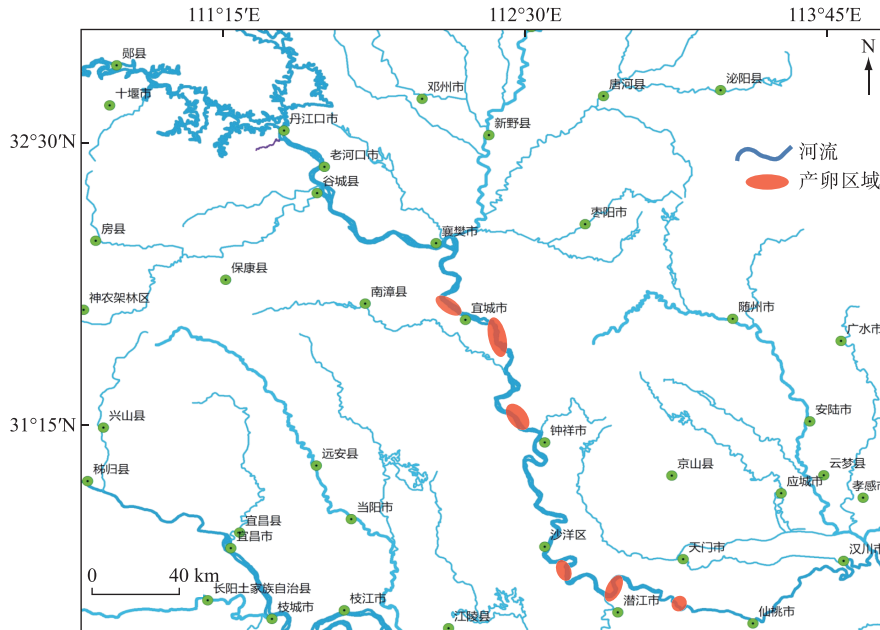


图 2 汉江中下游产漂流性卵鱼类产卵场示意

Fig.2 Distribution of the fish with pelagic eggs in the middle and lower reaches of Hanjiang River

表 3 汉江中下游产漂流性卵鱼类产卵场分布

Tab.3 Distribution of the fish with pelagic eggs in the the middle and lower reaches of Hanjiang River

序号	江段	名称	发育期	距受精时间/h	漂流距离/km	范围	长度/km	备注
1	襄阳至钟祥	小何	心脏原基期—耳石出现期	28~32	82~94	宜城—小何	12	钟祥监测点推算
2		流水	眼基出现期—尾鳍出现期	14~23	41~67	转斗—雅口	26	
3		磷矿	桑椹期—原肠中期	4~10	11~29	沿山头—腰湖港	18	
4	钟祥至沙洋	文集	尾芽期—尾泡出现期	20~21.5	60~64.5	陈集—文集	4.5	沙洋监测点推算
5		石碑	肌节出现期—眼囊期	13~16	39~48	张家港—张家湾	9	
6		旧口	囊胚早期—囊胚晚期	4.5~7.5	14~25	潘家湾—旧口	11	
7	沙洋至泽口	旧口	尾芽期—尾鳍出现期	20~22	70~81	潘家湾—旧口	11	泽口监测点推算
8		兴隆	囊胚中期—原肠中期	6~9.5	21~34	兴隆坝下—横堤	13	
9	沙洋至仙桃	兴隆	肌肉效应期—心脏搏动期	30~33.5	108~121	兴隆坝下—横堤	13	仙桃监测点推算
10		泽口	尾芽期—尾鳍出现期	20~23	72~83	泽口—王拐泵站	11	
11		彭市	原肠早期—胚孔封闭期	10~12.5	36~45	彭市闸上下	9	

扩大;兴隆枢纽敞泄期间,河道逐步恢复自然状态,鱼类上溯通道连通,坝下鱼类集群急剧减少;兴隆枢纽开始下闸控泄回蓄后,出库流量开始减少,库区水位上升,鱼类上溯受阻,鱼类在坝下不断聚集,特别是后期区域性洪水来临,下泄流量达到峰值,相应鱼类集群规模也达到极值,监测鱼类出现频率高达 243 ind./h(表 5)。兴隆枢纽敞泄期间,闸口观测到鱼类活动频率较为平稳,为 30~87 ind./h。

2.5 生态调度与卵(苗)汛

生态调度期间钟祥和仙桃江段鱼卵量与江水水位过程见图 4。钟祥监测江段鱼卵出现两次高峰期,时间分别为 6 月 16 日和 6 月 22 日,水位日涨幅分别为 0.503 和 0.312 m。仙桃监测江段鱼卵出现两次高峰期,时间分别为 6 月 18 日和 6 月 23 日,水位日涨幅分别为 0.701 和 0.654 m。结果表明产漂流性卵鱼类产卵量大

表4 汉江中下游产漂流性卵鱼类种类与规模(万粒)*
 Tab.4 Species and scale of the fish with pelagic eggs in middle and lower reaches
 of Hanjiang River($\times 10^4$ ind.)

种类	小何	流水	磷矿	文集	石碑	旧口	兴隆	泽口	彭市
银鮡	2189.94	4134.46	1921.54	1789.04	2258.33	2072.50	5396.57	7478	5211
鮠	3753.08	7156.76	4844.25	86.90	95.38	202.57	205.52	5236	5951
蛇鮡	817.39	1112.15	646.96	/	11.80	18.39	4504	6792	3984
银飘	2312.74	3840.59	2546.62	63.22	27.35	51.13	/	/	/
圆筒吻鮡	825.06	1094.41	532.17	/	/	/	481	733	68
吻鮡	272.46	0	788.78	/	33.03	27.35	351	3045	185
鳢	0	1046.28	1666.42	/	/	/	33	1658	0
蒙古鲃	480.97	955.08	1219.9	/	/	/	271	225	228
翘嘴鲃	173.97	509.21	128.37	/	/	11.04	228.52	166	53
细鳞鲃	0	306.54	278	/	/	/	0	551	0
花斑副沙鳅	1949.45	3356.71	1992.02	150.18	193.33	252.24	389.45	1457	2331
鳊	0	114	124.35	/	151.84	142.24	3634.44	2149	154
宜昌鳊鲃	0	30.4	32.03	/	40.67	54.63	51.82	66	80
草鱼	0	1043.75	851.74	/	501.30	493.90	/	/	/
鲢	0	319.2	673.94	/	/	12.78	0	792	0
青鱼	0	81.07	117.56	/	/	/	/	/	/
湖北圆吻鲂	/	/	/	/	/	103.35	0	682	0
赤眼鲱	0	172.27	145.54	/	/	/	772.24	2509	66
寡鳞鲱鱼	/	/	/	/	/	/	1403.78	1463	0
中华沙鳅	/	/	/	/	/	/	906	649	364
犁头鳅	16.63	0	45.8	/	/	/	/	/	/
三角鲂	/	/	/	103.86	83.62	147.45	/	/	/
长鳍吻鮡	/	/	/	/	/	4.24	/	/	/
马口鱼	/	/	/	/	/	8.54	/	/	/
似鳊	0	60.8	69.73	20.41	17.87	56.91	1908.67	2420	147
铜鱼	/	/	/	/	12.29	17.90	/	/	/
合计	12791.69	25333.68	18625.72	2126.70	3426.80	3677.15	20537.02	38071	18822

*/表示无产漂流性卵鱼类.

表5 鱼类活动观测结果*
 Tab.5 Observation result of fish behavior

时间 (月-日)	观测时长/ h	闸门下游断面		闸门上游断面		出库流量/ (m^3/s)
		观测总数/ (ind.)	活动频率/ (ind./h)	观测总数/ (ind.)	活动频率/ (ind./h)	
06-14	14	2740	196	/	/	1986
06-15	24	2458	102	613	26	1979
06-16	24	2047	85	861	44	1916
06-17	24	2097	87	715	30	2369
06-18	24	4574	191	/	/	2860
06-19	24	3141	131	/	/	2817
06-20	13	3158	243	/	/	2546

*/表示未监测.

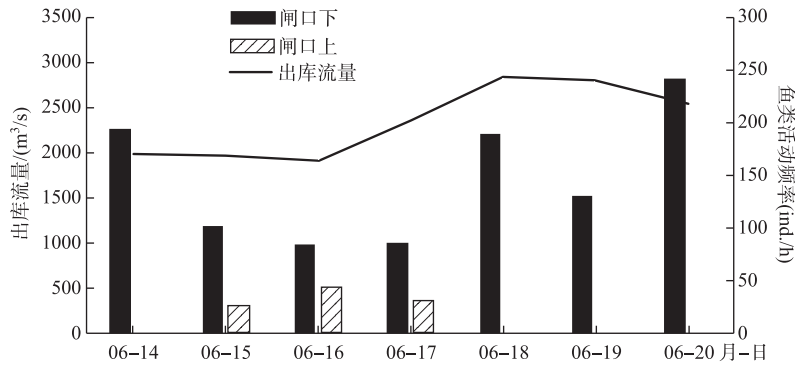


图 3 鱼类活动观测结果

Fig.3 Observation results of fish behavior

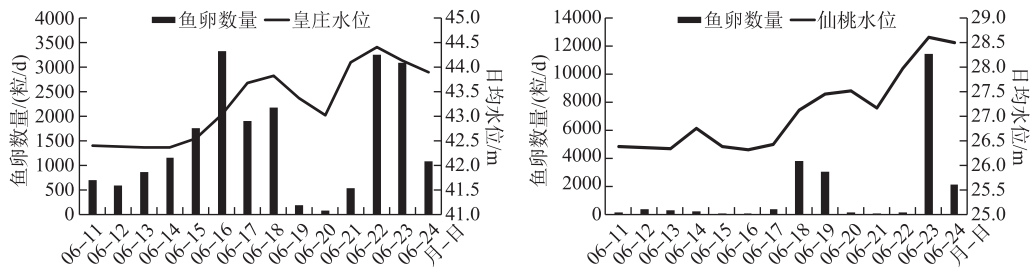


图 4 调查江段水位涨幅与产漂流性卵鱼类产卵量的关系

Fig.4 Relationship between rising size in water level and egg production of the fish with pelagic eggs in surveyed section

幅度增加均出现在水位上升阶段. 高峰期鱼卵量及水位涨幅见表 6.

表 6 调查江段水位涨幅与产漂流性卵鱼类产卵量的关系

Tab.6 Relationship between rising size in water level and egg production of the fish with pelagic eggs in surveyed section

时间 (月-日)	皇庄			仙桃		
	日均水位/m	水位比前日涨幅/m	鱼卵数量/(粒/d)	日均水位/m	水位比前日涨幅/m	鱼卵数量/(粒/d)
06-11	42.41	/	705	26.375	/	122
06-12	42.395	-0.015	590	26.355	-0.02	325
06-13	42.379	-0.016	875	26.33	-0.025	241
06-14	42.369	-0.01	1151	26.76	0.43	166
06-15	42.55	0.181	1768	26.375	-0.385	14
06-16	43.053	0.503	3334	26.308	-0.067	61
06-17	43.687	0.634	1901	26.423	0.115	349
06-18	43.826	0.139	2191	27.124	0.701	3800
06-19	43.383	-0.443	189	27.448	0.324	3000
06-20	43.026	-0.357	83	27.517	0.069	111
06-21	44.116	1.09	542	27.155	-0.362	43
06-22	44.428	0.312	3260	27.963	0.808	116
06-23	44.154	-0.274	3103	28.617	0.654	11459
06-24	43.912	-0.242	1083	28.505	-0.112	2116

生态调度期间钟祥和仙桃江段鱼卵(苗)日径流量和日均密度与江水流量过程见图 5、6。钟祥监测江段鱼卵日径流量变动范围为 596.02 万~14509.57 万粒,折算成每 1000 m³ 流量日均密度变动范围为 13.50~526.57 粒,分别于 6 月 15-16 日和 6 月 22-23 日出现高峰期。仙桃监测江段鱼卵日径流量变动范围为 40.28 万~43241.03 万粒,折算成每 1000 m³ 流量日均密度变动范围为 7.07~3925.21 粒,分别于 6 月 16-18 日和 6 月 23 日出现高峰。结果表明江水流量涨幅与产漂流性卵鱼类的产卵量有较大的相关性。

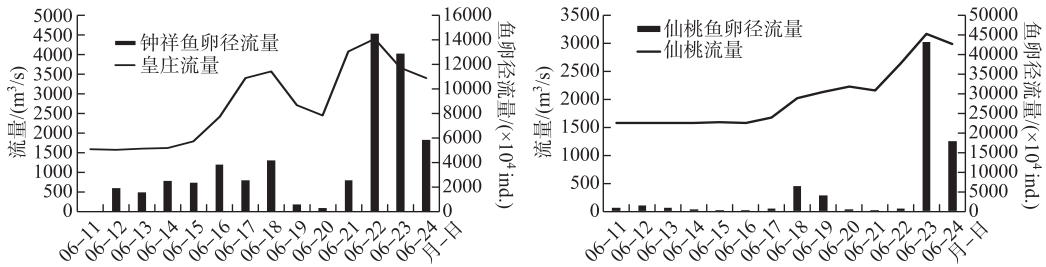


图 5 调查江段鱼卵日径流量与流量的关系

Fig.5 Relationship between daily runoff of fish eggs and discharge of surveyed section

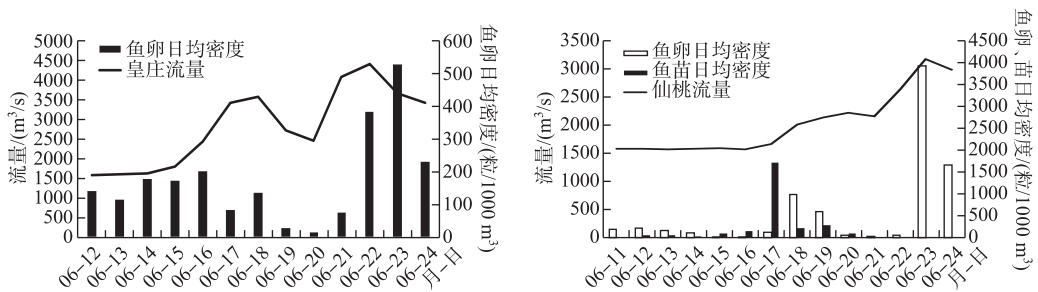


图 6 调查江段鱼卵苗日均密度与流量的关系

Fig.6 Relationship between the daily average density of fish eggs and larvae and discharge of surveyed section

3 分析与讨论

3.1 生态调度对产漂流性卵鱼类自然繁殖的生态效应

影响河流鱼类早期发育阶段漂流的因素包括非生物和生物两个方面。非生物因子包括洪水等流量变化及其引起的浑浊度变化、河段内的流速可变性、光照强度、溶解氧以及水温条件等,生物因子包括鱼体发育的不同阶段及其伴随的克流能力变化、栖息地偏好、饵料生物利用季节变化及其被捕食等^[17]。本文重点探讨生态调度期间非生物因子水文过程变化对鱼类早期资源的影响。

3.1.1 对繁殖种类的生态效应 根据监测结果,鲢、银飘、银鮡、蛇鮡、花斑副沙鲈、蒙古鲌、蒙古鲌等鱼类在生态调度前、生态调度时和生态调度后均可监测到鱼卵,这些鱼类是汉江中下游主要繁殖群体,而鳊、草鱼、鲢、青鱼和鳊繁殖鱼卵主要在生态调度期间 6 月 16-17 日和 6 月 22-23 日监测到,数量相对较少。

这与繁殖鱼类数量以及鱼类个体对水文感应有关。鲢、银飘、银鮡、蛇鮡、吻鮡等鱼类个体小,水文稍有变化可刺激它们产卵繁殖,而鳊、草鱼、鲢、青鱼等个体较大,其繁殖对洪峰过程要求比较高,需要有一定流量、流速变化的洪峰过程,中国水产科学院长江水产研究所^[18]1999-2002 年监利江段产卵场监测结果,初步建立了以监利江段数据为基础的四大家鱼繁殖生态学条件,即水位日上涨率为 0.27~0.36 m/d,流量日增长率为 930~1933 m³/(s·d),水位上升幅度为 1.4~1.8 m,涨水持续时间 4~6 d。谢文星等 2004 年^[3]调查结果显示,沙洋断面单次洪峰满足四大家鱼繁殖的基本水文过程需求为洪峰初始水位达到 33.82~36.71 m,洪峰最高水位 36.86~39.80 m,上涨时间持续 3~8 d,水位日上涨率达到 0.26~1.00 m/d,水位上涨

幅度 1.55~3.14 m. 对比此次调度期间水位数据(表 6), 第一次洪峰皇庄初始水位为 42.4 m, 最高水位为 43.9 m, 上涨时间持续 3 d, 水位日上涨率为 0.39~0.55 m/d, 水位共上涨 1.50 m; 第二次洪峰皇庄初始水位为 42.91 m, 最高水位为 44.47 m, 上涨时间持续 2 d, 水位日上涨率为 0.45~0.97 m/d, 水位共上涨 1.56 m; 仙桃两次洪峰水位日上涨率分别为 0.23~0.60 和 0.18~1.06 m/d, 水位分别上涨 0.91 和 1.31 m, 与上述数据基本吻合.

3.1.2 生态调度对产漂流性卵繁殖量的效应 研究表明^[1-2], 产漂流性卵鱼类的繁殖活动是在江中涨水期间进行的, 在河流涨水的诸水文要素中, 流速的增大对促使产卵起着主要作用. 流速的变化可以简易地用江河流量涨幅来反映. 监测结果表明生态调度期间鱼卵密度随着涨水过程逐渐增大, 至涨水末期达到峰值, 退水或平水过程中鱼卵密度减小或保持稳定, 表明调度期间鱼卵密度与涨水过程有积极的响应关系(图 6).

值得注意的是, 生态调度期间仙桃江段鱼卵和鱼苗密度呈现相反的变化(图 6). 结合鱼探仪观测结果(表 5), 兴隆枢纽预泄期间下泄流量逐步增大, 鱼类感应涨水, 溯流集群坝下, 但由于此期间闸口上下水位落差大, 坝下江段鱼类无法过坝, 主要集群于坝下产卵, 鱼卵密度较高; 兴隆枢纽敞泄期间, 闸口上下水位基本持平, 河流逐步恢复到自然状态, 鱼类上溯, 坝下鱼类集群锐减, 产卵量明显降低, 主要表现为仙桃江段鱼卵密度迅速降低, 鱼苗密度升高; 兴隆枢纽控泄蓄水期间, 水库水位逐步上升, 鱼类上溯通道受阻, 此时唐白河发水, 汉江中下游迎来第二次洪水过程, 兴隆枢纽下泄流量反而增大, 鱼类集群坝下规模亦增, 但由于此时闸口上下水位落差增大, 鱼类无法上溯, 坝下仙桃江段鱼卵密度急速升高, 鱼苗密度急剧降低. 据此推测兴隆枢纽敞泄有利于坝下亲鱼上溯产卵, 同时敞泄和控泄期间库区维持较大流速, 能够很大程度保证鱼苗降河过坝, 但随着库区蓄水结束, 库区流速变缓, 严重影响了早期资源降河下坝.

张晓敏等^[7]结合 2004 和 2007 年黄家港与沙洋断面水文数据, 分析发现汉江中下游“四大家鱼”自然繁殖对不同洪水来源有不同的响应, 其产卵主要依赖区间洪水, 丹江口水库现状调度形成的洪水过程对其作用有限. 此次生态调度期第一次洪水期间, 中游以下来水主要由丹江口下泄, 而第二次洪水则由唐白河发水、丹江口下泄, 并伴有区间来水组成, 此期间的鱼卵日径流量明显高于前一次, 这表明汉江中下游产漂流性卵鱼类的产卵在统筹考虑区域内水文情势情况下, 优化丹江人造洪峰, 可使中下游产漂流性卵鱼类繁殖达到最优状态, 与上述等分析基本符合.

3.2 产漂流性卵鱼类早期资源演变

3.2.1 产卵场数量减少, 位置发生变化 从历史调查结果来看, 汉江中下游产漂流性卵鱼类产卵场多分布在中游, 主要位于襄阳至沙洋江段(表 8). 据周春生等调查结果^[1], 1976 年汉江中游主要分布有王甫洲、茨河、襄樊、宜城、钟祥、马良 6 处集中产卵区域; 2007 年监测结果表明^[3], 中游王甫洲产卵场消失, 襄樊四大家鱼产卵场消失; 2014 年^[4], 汉江中游仅有监测到关家山、邓家台两处产漂流性卵鱼类产卵场, 下游未监测到产卵场.

此次调查表明, 汉江中游河段分布 3 处产漂流性卵鱼类产卵场, 数量较 1976 年和 2004 年有所减少, 但较 2014 年有增加, 产卵场位置均有所改变, 仅集中在宜城至钟祥河段. 汉江下游兴隆枢纽至仙桃江段分布有 3 处产卵场, 对比 1976 年^[1]和 2004 年^[3]结果, 除泽口产卵场外, 还监测到 2 处产卵场, 产卵场数量虽有增加, 但分布较零散且规模不大. 由于未见潜江以下江段相关研究, 无法判断这些产卵场是新形成的还是已存在的, 但证明汉江中下游生态调度期间, 兴隆枢纽以下汉江干流恢复自然河道, 满足了鱼类产卵繁殖所需水文水力学条件, 有利于产漂流性卵鱼类产卵场功能发挥. 汪登强等^[19]2018 年生态调度期间监测到兴隆枢纽至汉川江段分布有 4 处四大家鱼产卵场, 亦证明汉江下游目前存在满足产漂流性卵鱼类产卵的条件.

3.2.2 产卵规模萎缩, 经济鱼类比例下降 汉江中下游产漂流性卵鱼类产卵规模萎缩亦明显, 2014 年的鱼类产卵总量仅为 1976 年的 2.99%, 其中四大家鱼产卵量下降幅度最为显著, 仅为 1976 年四大家鱼产卵量的 0.02%, 繁殖的鱼类种类也明显减少, 2014 年四大家鱼中仅采集到青鱼早期资源; 其他经济鱼类如赤眼鳟、鳊、翘嘴鲌等鱼类产卵量占鱼类产卵总量的 8.00%, 为 1976 年其他经济鱼类产卵量的 0.51%; 1976 年小型鱼类产卵量占总产卵量的 33.13%, 2014 年上升至 91.88%; 而其他经济鱼类如赤眼鳟、鳊、翘嘴鲌产卵量比例有所下降, 从 1976 年的 47.1% 下降到 2014 年的 7.99%; 四大家鱼等大型个体产卵量的急剧下降, 从 1976 年的 11.77% 下降到 2014 年的 0.13%, 表明汉江中下游鱼类小型化趋势越来越明显(表 9).

生态调度期间产漂流性卵鱼类产卵场的规模为 143411 万粒,为 1979 年的 30.50%,产卵规模萎缩较明显,但对比 2014 年调查结果,其资源量有较好的恢复. 四大家鱼早期资源仅在流水、磷矿和泽口产卵场采到草鱼、鲢和青鱼受精卵(表 3),占漂流性卵产卵总量的 3.41%,较 2014 年四大家鱼早期资源仅占漂流性卵产卵总量的 0.13%,且只采集到青鱼受精卵,有明显的提高,但仍低于 1976 年四大家鱼 11.77% 比例. 经济鱼类资源量也有较明显的恢复,从 2014 年的 7.99% 升至 20.71%,但相比 1976 年结果,整体上还是呈下降趋势.

表 8 1976、2004、2014 和 2018 年汉江中下游产漂流性卵鱼类产卵场分布
Tab.8 The distribution of the fish with pelagic eggs in middle and lower reaches of Hanjiang River in 1976, 2004, 2014 and 2018

名称	1976 年调查结果			2004 年调查结果			
	范围	长度/km	相隔距离/km	名称	范围	长度/km	相隔距离/km
王甫州	光化—谷城	18	距丹江口 31.5	茨河	洄流湾—茨河	22.2	—
茨河	洄流湾—茨河	22.5	9.5	襄樊	牛首—襄樊	22.5	14.5
襄樊	牛首—襄樊	22.5	14.5	宜城	小河—宜城	21	—
宜城	宜城—关家山	41.5	63	关家山	流水—关家山	12	—
钟祥	碾盘山—塘港	43	32.5	钟祥	碾盘山—塘港	43	—
马良	马良—姚集	21.5	26.5	马良	马良—姚集	21.5	—
泽口	月亮台—泽口	22	51.0	泽口	月亮台—泽口	—	—
调查江段(丹江口—泽口)				调查江段(襄阳—沙洋)			
名称	2014 年调查结果			2018 年调查结果			
	范围	长度/km	相隔距离/km	名称	范围	长度/km	相隔距离/km
关家山	关家山—李家台	15	距宜城 35	小何	宜城—小何	12	距皇庄 82
邓家台	邓家台—皇庄	6	70	流水	转斗—雅口	26	41
				磷矿	沿山头—腰湖港	18	11
				兴隆	兴隆坝—横堤	13	距仙桃 108
				泽口	泽口—王拐泵站	11	72
				彭市	彭市闸上下	9	36
调查江段(襄阳—钟祥)				调查江段(襄阳—仙桃)			

表 9 汉江中下游鱼类卵苗径流量的演变
Tab.9 The evolution of eggs and fry in middle and lower reaches of Hanjiang River

项目	1976 年		2004 年		2014 年		2018 年	
	数量/万粒	比例/%	数量/万粒	比例/%	数量/万粒	比例/%	数量/万粒	比例/%
产卵总量	470149		1632651		14046		143411	
四大家鱼	92976	11.77	9330	0.57	18	0.13	4887	3.41
其他经济鱼类	221430	47.10	36416	2.23	1123	7.99	29705	20.71
小型鱼类	155743	33.13	1585905	97.20	12905	91.88	108819	75.88

3.3 影响鱼类早期资源变化的原因分析

3.3.1 水利航电枢纽 据相关报道^[20-25],在河流上建坝修闸,改变河流水文情势,改变现有生态环境,会对水文条件要求较高的四大家鱼繁殖群体产生更大负面影响. 目前,随着汉江中下游丹江口、王甫洲、崔家营、兴隆等梯级电站的建设运行,阻隔了汉江中下游乃至长江干流成熟亲鱼上溯至汉江中游、支流唐白河产卵场,同时导致汉江中下游水文情势发生较大变化^[26-29],径流年内分配趋于均匀化,径流过程线峰谷差变小,鱼类产卵孵化的水文水力学条件难以满足需求,产漂流性卵鱼类繁殖群体显著下降,其产卵场规模锐减^[3-7].

兴隆水利枢纽阻隔了泽口以下汉江下游及长江干流鱼类上溯至汉江中下游洄游通道, 崔家营航电枢纽阻隔了坝下鱼类上溯坝上庙滩及支流唐白河产卵场. 各枢纽为缓解阻隔影响建设了鱼道, 但影响依然存在. 同时水库运行淹没了原有产卵场, 致使原有产卵场消失或萎缩, 如兴隆水利枢纽蓄水, 淹没了马良产卵场, 崔家营航电枢纽运行使得中游钟祥产卵场面积萎缩.

近年来, 汉江流域连续干旱, 丹江口水库长期处于低水位运行, 2014 年以来为保证南水北调工程正常运行, 水库拦蓄了洪峰流量, 基本上没有泄洪, 汉江中下游洪峰过程主要靠区间来水和支流唐白河发洪, 洪峰流量有限, 经崔家营库区和兴隆库区坦化后, 基本上无洪峰过程. 随着南水北调工程正式运行及后续雅口枢纽、碾盘山枢纽建成, 此现象将成为常态. 同时库区形成后, 流速变缓, 漂流性卵由于漂流流速不够, 难以漂流下坝, 也导致了监测江段早期资源减少.

3.3.2 过渡捕捞 汉江中下游由于河势较为平缓, 沿岸人口多, 捕捞强度一直很高, 特别是 1970s 末以来, 捕捞强度不断加大. 汉江中游不到 300 km 的江段上有专业、兼业渔船 1663 艘, 渔船动力 28333 kW, 使用的网具除传统的刺网、三层刺网、百袋网、濠网和滚钩、卡子等外, 1990s 开始使用电拖网, 进行大规模的“电拖”、电打. 根据调查, 电拖网目前网目多为 1~2 cm, 有的电拖网电压高达 1000 余伏, 并开始采用多船联合作业, 致使鱼类资源遭到严重破坏^[34]. 2020 年以来, 汉江实行十年全面禁渔, 鱼类资源可能会有一定程度的恢复.

3.3.3 水质 汉江中下游沿岸社会经济较为发达, 人类活动强烈, 农业面源污染和城市污染是影响汉江中下游干支流水质的主要污染形式^[30-33], 污染严重的支流是干流典型污染物的重要来源, 如唐白河、汉北河携带大量农业面源污染物进入汉江, 影响汉江水质^[31-34]. 干流从中游至下游污染浓度普遍上升, 水环境质量明显下降, 襄阳至汉口段的有机耗氧污染物在一定程度上有继续恶化的趋势, 超标因子为高锰酸盐指数、氨氮、总磷等. 此外, 随着“南水北调”中线工程、鄂北水资源配置等调水工程的实施, 汉江中下游水量逐年减少、水环境容量下降, 水体自净能力降低, 水质环境更加严峻^[35-36], 对鱼类资源产生了一定影响.

3.4 建议

监测结果表明, 2018 年汉江中下游首次联合生态调度试验对产漂流性卵鱼类自然繁殖具有较好的促进作用. 兴隆枢纽敞泄, 不仅有利于坝下亲鱼上溯产卵场, 使库区江段原有产卵场满足了鱼类产卵繁殖所需水文水力学条件, 也有利于受精卵顺利漂流下坝, 产生了良好的生态效应. 建议将汉江中下游梯级联合生态调度纳入常规调度, 与防洪调度相结合, 将更有利于汉江中下游水生态系统的健康发展.

在鱼类繁殖季节, 江河的涨水过程包含着水位升高、流量增大、流速加快、流态紊乱和透明度减小等多种水文因素的变化, 这些水文因素的出现是相互关联的, 对鱼类繁殖所起的作用是综合的, 开展生态调度的同时, 建议加强汉江鱼类繁殖水文动力学研究工作, 为生态调度提供基础技术参数.

建议根据 2018 年生态调度效果优化生态调度方案, 尝试不同方案下不同规模的调度试验, 比如枯水年的调度, 小洪峰试调度等, 明确调度具体时间、时长, 合理增加兴隆敞泄时间、回蓄时间等, 改善坝下水文水力学条件, 促进更多亲鱼上溯, 后期生态调度方案还要充分考虑雅口和碾盘山两个枢纽运行情况. 同时加强相关监测和评估研究, 根据研究结果改进生态调度的时机、强度等, 以提高生态调度的效果.

汉江中下游梯级联合生态调度需要根据四大家鱼繁殖等产漂流性卵鱼类生物学特性, 运用先进的调度技术和手段, 创造其繁殖所需水文水力学条件的人造洪峰过程, 才会对四大家鱼等产漂流性卵鱼类产卵场的保护与恢复产生良好的效果. 但由于汉江中下游梯级枢纽较多, 参与联合梯级调度协调力度较大, 该河段同时具有航运、供水等功能, 生态调度期间暂停通航, 对供水也产生一定影响, 而目前洪水确定性预报的局限性^[37-39]对生态调度前期准备工作的开展造成一定困难, 因此建议开展汉江中下游干支流洪水早期预警研究, 特别是支流洪水预警研究, 做好支流和干流洪峰预测工作, 为生态调度顺利开展做好前期准备工作.

4 参考文献

- [1] Zhou CS, Liang ZS, Huang HN. Ecological features of the spawning of certain fishes in the Hanjiang River after the construction of dams. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1980, 7(2): 175-187. [周春生, 梁秩桑, 黄鹤年. 兴修水利枢纽后汉江产漂性卵鱼类的繁殖生态. 水生生物学集刊, 1980, 7(2): 175-187.]
- [2] Yu ZT. Investigation on fish resources in the middle and lower reaches of Hanjiang River and the impact of Danjiangkou project on fish resources. *Journal of Hydroecology*, 1982, 3(1): 19-22, 26. [余志堂. 汉江中下游鱼类资源调查以及

- 丹江口水利枢纽对汉江鱼类资源影响的评价. 水库渔业, 1982, 3(1): 19-22, 26.]
- [3] Xie WX, Huang DM, 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. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2(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. 水生生态学杂志, 2009, 2(2): 44-49.]
- [4] Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited ed. Environmental Impact Report for the Yakou shipping hub, Hanjiang River. 2015. [中国电建中南勘测设计研究院有限公司. 汉江雅口航运枢纽工程环境影响报告书. 2015.]
- [5] Li XF, Huang DM, Xie WX *et al.* Current status of spawning grounds of fish with pelagic eggs in the middle reaches of Hanjiang River. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2006, 21(2): 105-111. [李修峰, 黄道明, 谢文星等. 汉江中游产漂流性卵鱼类产卵场的现状. 大连水产学院学报, 2006, 21(2): 105-111.]
- [6] Li XF, Huang DM, Xie WX *et al.* Status of fisher resources in the middle reaches of the Hanjiang River. *J Lake Sci*, 2005, 17(4): 366-372. DOI: 10.18307/2005.0415. [李修峰, 黄道明, 谢文星等. 汉江中游鱼类资源现状. 湖泊科学, 2005, 17(4): 366-372.]
- [7] 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. 水生生态学杂志, 2009, 30(2): 126-129.]
- [8] Qin X, Chen J, Xiang F. Impact of cascaded hydroelectric on reproduction of fish with pelagic eggs in middle and lower reaches of Hanjiang River. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(S2): 501-506. [秦烜, 陈君, 向芳. 汉江中下游梯级开发对产漂流性卵鱼类繁殖的影响. 环境科学与技术, 2014, 37(S2): 501-506.]
- [9] Zhang JM, He ZH eds. A manual for investigation of natural resources in inland waters. Beijing: Agricultural Press, 1991. [张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册. 北京: 农业出版社, 1991.]
- [10] Borutsky EB, Yu ZT, Liang ZX *et al* eds. Gezhouba and four famous Chinese carps in the Yangtze River. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 1988. [易伯鲁, 余志堂, 梁秩桑等. 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.]
- [11] Survey Team of Spawning Grounds of Domestic Fishes in Changjiang River ed. 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. *Journal of Fisheries of China*, 1982, 6(4): 287-305. [长江四大家鱼产卵场调查. 葛洲坝水利枢纽工程截流后长江四大家鱼产卵场调查. 水产学报, 1982, 6(4): 287-305.]
- [12] Liu LH, Wu GX, Cao WX *et al.* Studies on the ecological effect on spawning of the black carp, the grass carp, the silver carp and the bighead carp in the Changjiang River after the constructions of the Gezhouba hydroelectric project. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1986, 10(2): 353-364. [刘乐和, 吴国犀, 曹维孝等. 葛洲坝水利枢纽兴建后副青、草、鲢、鳙繁殖生态的研究. 水生生物学报, 1986, 10(2): 353-364.]
- [13] Liang ZS, Yi BL, Yu ZT. The reproductive habit and embryonic development of *Elopichthys bambusa* in Changjiang (Yangtze River). *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1984, 8(4): 389-403. [梁秩桑, 易伯鲁, 余志堂. 长江干流和汉江的鳊鱼繁殖习性及其胚胎发育. 水生生物学集刊, 1984, 8(4): 389-403.]
- [14] Meng QW. On the morphological characteristics of the larvae of seven species of freshwater fishes. *Journal of Fisheries of China*, 1982, 6(1): 65-76. [孟庆闻. 7种鱼类仔鱼的形态观察. 水产学报, 1982, 6(1): 65-76.]
- [15] He XF, Song ZB, Xie EY. The breeding habits and embryonic development of long nose gudgeon (*Saurogobio dabryi* Bleeker). *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science*, 1996, 21(3): 276-281. [柯学福, 宋昭彬, 谢恩义. 蛇鮈的产卵习性和胚胎发育. 西南师范大学学报: 自然科学版, 1996, 21(3): 276-281.]
- [16] Wang CX. The identification of the species in the “wild fry” of the middle waters of the Yangtze River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1959, (3): 315-343. [王昌燮. 长江中游“野鱼苗”的种类鉴定. 水生生物学集刊, 1959, (3): 315-343.]
- [17] Schludermann E, Tritthart M, Humphries P *et al.* Dispersal and retention of larval fish in a potential nursery habitat of a large temperate river; An experimental study. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2012, 69(8): 1302-1315. DOI: 10.1139/f2012-061.
- [18] Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Three Gorges Bureau of Hydrol-

- ogy and Water Resources, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. Report on the preliminary study of the ecological operation of Three Gorges Reservoir for the natural reproduction needs of the four major Chinese carps. 2008. [水利部中国科学院水工程生态研究所, 中国水产科学研究院长江水产研究所, 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 中国科学院水生生物研究所, 长江水利委员会水文局长江三峡水文水资源勘测局. 针对四大家鱼自然繁殖需求的三峡工程生态调度方案前期研究报告. 2008.]
- [19] Wang DQ, Gao L, Duan XB *et al.* Preliminary analysis of the fish larvae and eggs and the effects of the eco-operation of cascade reservoirs on fish propagation in the lower Hanjiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(8): 1909-1917. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201908014. [汪登强, 高雷, 段辛斌等. 汉江下游鱼类早期资源及梯级联合生态调度对鱼类繁殖影响的初步分析. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(8): 1909-1917.]
- [20] Li C, Peng J, Liao WG. Study on the eco-hydrological factors and flow regime requirement on spawning of four major Chinese carps in the middle reaches of Yangtze River. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2006, **4**(3): 170-176. [李翀, 彭静, 廖文根. 长江中游四大家鱼发江生态水文因子分析及生态水文目标确定. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, **4**(3): 170-176.]
- [21] Duan XB, Chen DQ, Li ZH *et al.* Current status of spawning grounds of fishes with pelagic eggs in the middle reaches of the Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, **15**(4): 523-532. [段辛斌, 陈大庆, 李志华等. 三峡水库蓄水后长江中游产漂流性卵鱼类产卵场现状. 中国水产科学, 2008, **15**(4): 523-532.]
- [22] Wang SY, Liao WG, Chen DQ *et al.* Analysis of eco-hydrological characteristics of the four Chinese farmed carps' spawning grounds in the middle reach of the Yangtze River. *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. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(6): 892-897.]
- [23] Guo WX, Wang HX, Xu JX *et al.* Effects of Three Gorges reservoir on the downstream eco-hydrological regimes during the spawning of important fishes. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, **30**(3): 22-26, 38. [郭文献, 王鸿翔, 徐建新等. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究. 水力发电学报, 2011, **30**(3): 22-26, 38.]
- [24] Peng QD, Liao WG, 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. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2012, **44**(S2): 228-232. DOI: 10.15961/j.jsuese.2012.s2.041. [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. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, **44**(S2): 228-232.]
- [25] Xu CS, Ai ZQ, Xiao M. A review of influencing factors on natural reproduction of four major Chinese carps in Yangtze River. *Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences*, 2017, **39**(4): 27-30, 59. [许承双, 艾志强, 肖鸣. 影响长江四大家鱼自然繁殖的因素研究现状. 三峡大学学报: 自然科学版, 2017, **39**(4): 27-30, 59.]
- [26] Guo WX, Xia ZQ, Wang Q. Effects of Danjiangkou Reservoir on hydrological regimes in the middle and lower reaches of Hanjiang River. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2008, **36**(6): 733-737. [郭文献, 夏自强, 王乾. 丹江口水库对汉江中下游水文情势的影响. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, **36**(6): 733-737.]
- [27] Xiao C, Xie P, Tang T *et al.* Influence of middle route of south-to-north water diversion project on hydrological regime in middle and lower reaches of Hanjiang River. *Journal of China Hydrology*, 2009, **29**(1): 26-29. [肖婵, 谢平, 唐涛等. 南水北调中线工程对汉江中下游的水文情势影响分析. 水文, 2009, **29**(1): 26-29.]
- [28] Zheng JL. Study on the evolution of water ecological environment in the middle and lower reaches of Hanjiang River [Dissertation]. Jinzhou: Yangtze University, 2019. [郑继利. 汉江中下游水生态环境演变情况研究[学位论文]. 荆州: 长江大学, 2019.]
- [29] Yan H. Study of the hydrological regime evolution and ecological water demand in the middle and lower reaches of the Hanjiang River [Dissertation]. Yichang: China Three Gorges University, 2016. [严浩. 汉江中下游水文情势演变及生态需水研究[学位论文]. 宜昌: 三峡大学, 2016.]
- [30] Zhang Q, Liu W, Yang X *et al.* Research on pollution load and water environmental capacity in middle and lower reaches of Hanjiang River. *Yangtze River*, 2019, **50**(2): 79-82. [张强, 刘巍, 杨霞等. 汉江中下游流域污染负荷及水环境容量研究. 人民长江, 2019, **50**(2): 79-82.]
- [31] Liu WW. The spatial-temporal variation of water quality in Hanjiang River under the operation of the middle route of South-To-North water transfer project [Dissertation]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019. [刘文文. 中线工程运行

- 下汉江中下游水质时空变异性研究[学位论文]. 武汉:中国地质大学, 2019.]
- [32] Shi Y, Gu P, Cao J *et al.* Present condition and pollution source survey for water pollution of Hanjiang River Basin. *Environmental Science Survey*, 2011, **30**(5): 42-44. [石应, 古佩, 曹俊等. 汉江流域水污染现状及污染源调查. 环境科学导刊, 2011, **30**(5): 42-44.]
- [33] Chen YF, Zhang X. Long-term trends and sustainability trends of water quality in the middle and lower reaches of Hanjiang main stream. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(7): 1163-1167. DOI: 10.11870/cjlyzyy-hj201507012. [陈燕飞, 张翔. 汉江中下游干流水质变化趋势及持续性分析. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(7): 1163-1167.]
- [34] Peng D, Li SS, Wu LW *et al.* Trends of water quality in the middle and lower reaches of Hanjiang River. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(S1): 428-432. [彭聃, 李双双, 吴李文等. 汉江中下游水质变化趋势研究. 环境科学与技术, 2016, **39**(S1): 428-432.]
- [35] Zhang ZW, Chen Y, Xu CG. Water environment pollution and its countermeasures in Hanjiang River ecologic economic belt. *Pearl River*, 2020, **41**(2): 50-55, 66. [张中旺, 陈尧, 徐存刚. 汉江生态经济带水环境保护问题及对策. 人民珠江, 2020, **41**(2): 50-55, 66.]
- [36] Lu JY, Lin L. Problems and countermeasures on water eco-environment in Hanjiang River ecological economic belt. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1179-1186. [卢金友, 林莉. 汉江生态经济带水生态环境问题及对策. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1179-1186.]
- [37] Liang ZM, Jiang XL, Qian MK *et al.* Probabilistic flood forecasting considering heterogeneity of error distributions. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, **36**(4): 18-25. DOI: 10.11660/slfdbx.20170403. [梁忠民, 蒋晓蕾, 钱名开等. 考虑误差分布的洪水概率预报方法研究. 水力发电学报, 2017, **36**(4): 18-25.]
- [38] Kavetski D, Kuczera G, Franks SW. Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 2. Application. *Water Resources Research*, 2006, **42**(3): W03407. DOI: 10.1029/2005wr004376.
- [39] Gu HQ, Liu KL, Liu YH *et al.* Experiments on flood probability forecasting accounting for multi-source uncertainty. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2021, **49**(2): 99-104. [谷洪钦, 刘开磊, 刘玉环等. 综合多源不确定性的洪水概率预报试验. 河海大学学报: 自然科学版, 2021, **49**(2): 99-104.]