三峡水库生态调度对沙市江段鱼卵和仔鱼的影响

徐 薇,刘宏高,唐会元,朱 迪,杨 志,乔 晔

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

摘要:2012年5-7月三峡水库试验性生态调度期间,在长江中游沙市江段设固定采样点,共采集到鱼卵和仔鱼35种,隶属于4目、8科、10亚科、28属。银鲴(*Squalidus argentatus*)、鳌(*Hemiculter leucisculus*)、细鳞鲴(*Plagiognathops microlepis*)、蒙古鲌(*Culter mongolicus mongolicus*)、花斑副沙鳅(*Parabotia fasciata*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus*)、鳊(*Parabramis pekinensis*)、赤眼鳟(*Squaliobarbus curriculus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)和鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)构成了该江段的主要繁殖种类。鱼类繁殖盛期在5-6月,进入7月后鱼卵减少而仔鱼数量显著增加。调查期间鱼卵和仔鱼总径流量约为6.89×10^{10}粒(尾),其中鱼卵径流量1.1×10^{10}粒,仔鱼径流量5.79×10^{10}尾。定点采集的鱼卵、仔鱼随采样时间和垂向空间分布均无显著性差异。不同采集点仔鱼的横向分布存在显著性差异,平均漂流密度为江北>江中>江南;鱼卵的横向分布无显著性差异,且与流速、流态等水力学指标存在负相关性。生态调度期间沙市江段鱼卵总径流量和家鱼卵径流量均出现高峰,繁殖种类明显增加。初步研究表明,三峡水库生态调度制造的涨水过程能够在一定程度上满足不同鱼类自然繁殖的水文需求,对于减缓三峡水库运行对长江中游鱼类自然繁殖的不利影响、维护鱼类种群资源补充具有重要的意义。

关键词:三峡水库;生态调度;鱼卵;仔鱼

中图分类号:Q145 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2014)02-0001-08

许多淡水鱼类在其个体早期生活史阶段(鱼卵和仔鱼)需要随江水漂流至下游合适的区域觅食生长,这一过程有利于种群补充(Brown & Armstrong, 1985)、扩散和基因交流(Pavlov, 1996)。当前,大规模的拦河筑坝显著改变了江河的自然水文节律,造成坝下游邻近江段鱼类繁殖时间推迟、鱼卵和仔鱼丰度减少、种类组成结构改变等一系列的负面生态效应(Humphries & Lake, 2000; 唐会元等,2012; 谭细畅等,2012; Wang et al, 2013)。为了缓解水利工程对河流鱼类及生态系统的影响,国外早在20世纪70年代提出在水库调度运行中考虑生态因素,即通过改进水库调度方式,重塑下游河流的自然水文情势,恢复河流的生态功能(王俊娜等,2011),进而在改善水质和水温(Lovich & Melis,2007)、维持生物栖息地(Wrona et al, 2007)、形成鱼类产卵的人造洪峰(Rood et al, 2005)以及提供洄游性鱼类种群的寻址需求(Dauble et al, 2003)等方面开展了诸多研究,推动了水库生态调度理论与技术的长足发展,这些经验对我国水库生态调度研究具有重要的借鉴作用。

三峡水利枢纽是治理开发与保护长江的关键性骨干工程。为减少工程运行对长江中游"四大家鱼"等关键物种的不利影响,早在工程论证阶段就提出通过水库生态调度,营造有利于鱼类产卵的人造洪峰,促进其大规模繁殖。在前期开展大量调查和研究的基础上,2011年6月,三峡水库首次实施针对"四大家鱼"自然繁殖的生态调度试验;2012年5-6月,三峡水库又相继实施了2次试验性生态调度,并同步开展了典型江段鱼类早期资源、水文及环境要素等监测工作。本文以湖北沙市断面早期资源调查数据为基础,研究调度期间葛洲坝下游江段重要鱼类繁殖、早期发育、漂流分布特征以及生境变化的响应,为进一步评估生态调度效果、优化调度方案提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样方法和数据采集

鱼类早期资源固定采集点选择在湖北省荆州市沙市区的荆江水文趸船,位于长江干流北岸主河道一侧(N30°18′52.58″;E112°13′45.03″),距岸边约100 m。选择该断面的依据,一方面历史上"四大家鱼"的主要产卵场分布在葛洲坝以下的长江中游江段,为了解三峡水库生态调度对"四大家鱼"自然繁

收稿日期:2013-11-14

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAC06B04);国家自然科学基金项目(51179109);水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室开放课题(2013004);水利部948计划项目(201210)。

通讯作者:乔晔。E-mail:qiaoye2006@gmail.com

作者简介:徐薇,1984年生,女,助理研究员,主要从事鱼类生态学研究。E-mail:betty3115@126.com

殖的影响,故将采样点设置在葛洲坝以下江段;另一方面,沙市江段距离葛洲坝约150 km,此处上游江段包括了顺直河道、弯曲河道以及沙洲等不同的生境类型,能够保证不同种类鱼卵和仔鱼样本的代表性。

采样时间为2012年5月18日至7月16日,共计60 d。采用弶网进行表层定性采集,网口呈半圆形,直径1.01 m,网长2 m,网口面积0.4 m^2,网眼40目。集苗网箱长40 cm,宽、高均为30 cm,通过矩形木框支撑成长方体形状,网箱的上部不封口,便于收集鱼卵和仔鱼,网箱的近底部开一个椭圆形口,用于与弶网连接。圆锥网进行表、中、底不同水层及断面定量采集,网口呈圆形,直径0.35 m。采样频次为每天的早(7:00-8:00)、中(12:00-13:00)、晚(18:00-19:00)3个时段,每个时段的下网时间为10~40 min;另在卵、苗汛时段进行断面采集3次,设置左岸、江心、右岸3个采样点,每个采样点均采集表、中、底3个水层的样品(图1)。采集过程中,通过前置的流速仪测定网口流速,以计算滤过的流量;同时测定当时的水温、溶氧、透明度等指标。采集江段的实时水文数据从水利部发布的"全国水雨情信息网"获取。

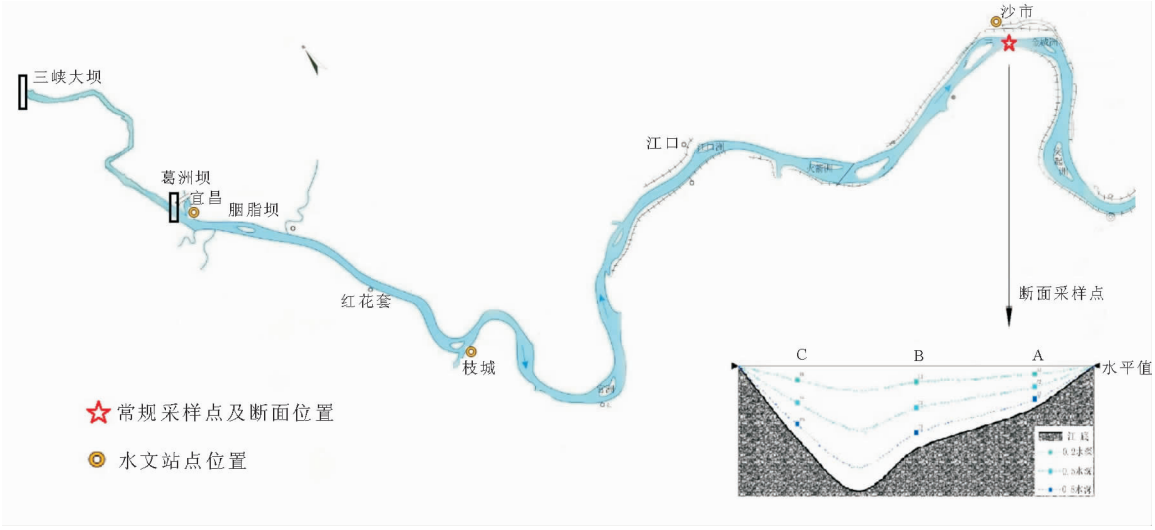

图1 采样点及研究江段示意

Fig. 1 Sampling station and studied area in midstream of the Yangtze River

1.2 样本处理和鉴定

采集到的鱼卵和仔鱼首先在双筒解剖镜下进行观察,依据卵径、外形和色素分布等典型特征初步鉴定,并记录发育期和主要性状。无法鉴定的鱼卵进行室内培养,一般培养至1周左右(发育至鳔充气期),然后用5%~7%福尔马林溶液保存;仔鱼直接固定保存。采样结束后,所有样品在实验室内做进一步鉴定和校核。鱼类鉴定参考《长江鱼类早期资源》、《葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼》以及未公开发表的内部资料。

1.3 数据处理和分析

(1)网口单位时间的卵苗密度:

$$d = \frac{n}{S \times V \times t}$$

式中:d 为卵苗单位时间进网密度,S 为网口面积,V 为网口流速,n 为采集时段内进网卵苗数(粒,尾),t 为采集时间。

(2)采样断面卵苗平均密度与定点卵苗密度相比系数:

$$C = \frac{\sum \bar{d}}{d_1}$$

式中:C 为卵苗平均密度相比系数,d_1 为固定采样点的卵苗密度,$\bar{d}$ 为某断面各采样点卵苗的平均密度。

(3)采集期间卵苗径流量:

$$M_i = d_i \times Q_i \times C$$

式中:M_i 为第 i 次采集时段内通过该江断面的卵苗数,d_i 为第 i 次采集的卵苗密度,Q_i 为第 i 次采集时的断面流量。

(4)非采集期间卵苗径流量:

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

用相邻2次采集的径流量及其间隔时间进行插补计算。式中:$M_{i,i+1}$ 为第 i,$i+1$ 次采集时间间隔内的卵苗径流量,$t_{i,i+1}$ 为第 i,$i+1$ 次采集时间间隔。

(5)采集江段的卵苗总径流量为:

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

上述产漂流性卵鱼类早期资源量估算方法及相关计算公式参考易伯鲁等(1988)对“四大家鱼”的研究。数据分析采用 SPSS13.0 软件,并通过 Kruskal-Wallis 非参数检验分析不同采样条件下(3 组数据)鱼卵和仔鱼的时空分布差异;一元和多元回归分析方法研究鱼卵和仔鱼空间分布与水文环境因子的关系,探讨鱼卵和仔鱼空间分布的主要影响因素。

2　结果与分析

2.1　三峡水库生态调度过程

2012 年 5 – 6 月,共进行了 2 次针对“四大家鱼”自然繁殖的试验性生态调度,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。由图 2 可知,首次生态调度时间为 5 月 25 – 31 日,调度期间出库流量比入库流量均值增加 2 560 m^3/s,通过本次生态调度,促使自然来水涨水 2 d,持续增加 4 d(5 月 28 – 31 日),最大出库流量达22 775 m^3/s。第二次生态调度在 6 月 25 – 30 日,6 月 26 – 27 日连续 2 d 入库流量小幅增加,入库流量与出库流量均值基本平衡,其中在 6 月 24 – 27 日形成 4 d 涨水过程,总体上涨时间增加 2 d。

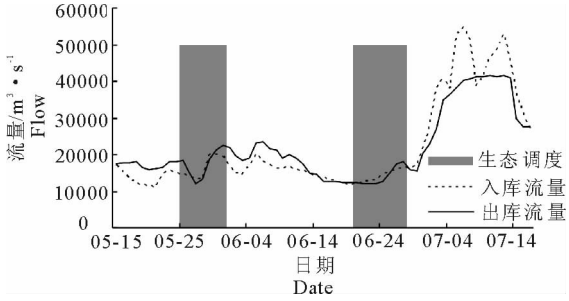

图 2　调查期间三峡水库入库与出库流量日变化

Fig. 2　Daily variations of inflow and outflow of TGR

2.2　采样渔获组成

长江干流沙市江段共采集到鱼卵 8 764 粒、仔鱼 146 786 尾。经室内培养和抽样鉴定(鱼卵 3 829 粒,仔鱼 39 125 尾),隶属于 4 目、8 科、10 亚科、28 属,共 35 种鱼类(表 1)。

表 1　长江沙市段的鱼卵和仔鱼组成

Tab. 1　Composition of fish eggs and larvae in Shashi section of the Yangtze River

种　类	鱼卵			仔鱼	
	5 月	6 月	7 月	6 月	7 月
鲤形目 Cypriniformes					
鲤科 Cyprinidae					
鲌亚科 Culterinae					
1. 蒙古鲌 *Culter mongolicus mongolicus*	+ +	+ + +	+ +	+	+ + +
2. 翘嘴鲌 *Culter alburnus*	+ +	+ +	+		+ + +
3. 䱗 *Hemiculter leucisculus*	+	+		+	+ + +
4. 银飘鱼 *Pseudolaubuca sinensis*	+			+	+ +
5. 寡鳞飘鱼 *Pseudolaubuca engraulis*				+ +	+ +
6. 鳊 *Parabramis pekinensis*		+ +	+		+ + +
鲴亚科 Xenocyprininae					
7. 细鳞鲴 *Plagiognathops microlepis*	+ + +	+ + +	+	+	+ + +
8. 银鲴 *Xenocypris argentea*		+	+		+
9. 黄尾鲴 *Xenocypris davidi*	+	+			
鮈亚科 Gobioninae					
10. 蛇鮈 *Saurogobio dabryi*	+ +	+ +	+		+
11. 银鮈 *Squalidus argentatus*	+ + +	+ + +	+		+ + +
12. 吻鮈 *Rhinogobio typus*	+	+	+		+
13. 铜鱼 *Coreius heterodon*	+	+			+
14. 麦穗鱼 *Pseudorasbora parva*				+	
雅罗鱼亚科 Leuciscinae					
15. 赤眼鳟 *Squaliobarbus curriculus*	+	+ +	+		+ + +
16. 草鱼 *Ctenopharyngodon idellus*	+ +	+			
17. 青鱼 *Mylopharyngodon piceus*	+	+			
18. 鳡 *Cchetobius elongatus*		+	+	+	
19. 鳢 *Elopichthys bambusa*	+	+			+
鲢亚科 Hypophthalmichthyinae					
20. 鲢 *Hypophthalmichthys molitrix*	+ +	+			
21. 鳙 *Aristichthys nobilis*	+	+			
鳅鮀亚科 Gobiobotinae					

续表1

种　类	鱼卵			仔鱼	
	5月	6月	7月	6月	7月
22. 鳅鮀 *Gobiobotia* sp.		+	+		
鲤亚科 Cyprininae					
23. 鲤 *Cyprinus carpio*				+	
鳑鲏亚科 *Acheilognathinae*					
24. 中华鳑鲏 *Rhodeus ocellatus*				+ +	
鲃亚科 Barbinae					
25. 中华倒刺鲃 *Spinibarbus sinensis*		+	+		+
鳅科 Cobitidae					
沙鳅亚科 Botiinae					
26. 花斑副沙鳅 *Parabotia fasciata*	+ +	+ +	+	+	+
27. 双斑副沙鳅 *Parabotia bimaculata*	+ +	+	+	+	+
平鳍鳅科 Taxonomy					
28. 犁头鳅 *Lepturichthys fimbriata*	+	+			
鲈形目 Perciformes					
鮨科 Serranidae					
29. 鳜 *Siniperca chuatsi*		+		+	+
30. 大眼鳜 *Siniperca kneri*					
鰕虎鱼科 Gobiidae					
31. 栉鰕虎鱼 *Ctenogobius* sp.				+	
鲇形目 Siluriformes					
鲇科 Siluridae					
32. 鲇 *Silurus asotus*		+			+
鲿科 Bagridae					
33. 长吻鮠 *Leiocassis longirostris*					+
34. 黄颡鱼 *Pelteobagrus* sp.					+
颌针鱼目 Beloniformes					
鱵科 Hemiramphidae					
35. 鱵 *Hemiirhamphus kurumeus*				+	

注:“+”表示少量出现;“++”表示较多出现;“+++”表示大量出现。

Note: “+” means a small number of the fishes; “++” means much more fishes; “+++” means a large number of the fishes.

采集的鱼卵中,以漂流性卵为主,包括青鱼、草鱼、鲢、鳙、鳡、鳤、赤眼鳟、银鮈、蛇鮈、吻鮈、铜鱼、犁头鳅、双斑副沙鳅、花斑副沙鳅、鳅鮀、寡鳞飘鱼共计16种;属于(弱)粘性卵的种类包括翘嘴鲌、蒙古鲌、鳊、细鳞鲴、黄尾鲴、银鲴、䱗、中华倒刺鲃、鲤、鲇共计10种;浮性卵种类有鳜和大眼鳜2种。鱼卵和仔鱼的种类组成和数量比例统计结果见表2。银鮈、细鳞鲴、蒙古鲌、花斑副沙鳅、翘嘴鲌、鳊以及“四大家鱼”中的草鱼和鲢构成了长江沙市江段主要的繁殖种类。

采集的仔鱼中,未获得鳅鮀、黄尾鲴、“四大家鱼”等种类,但出现中华鳑鲏、鰕虎鱼(属)、长吻鮠、黄颡鱼(属)、间下鱵、麦穗鱼共计7种(属)。仔鱼组成中,以䱗、细鳞鲴、蒙古鲌、翘嘴鲌、鳊、赤眼鳟、银鮈、飘鱼的数量占优。

2.3 鱼卵和仔鱼径流量

经估算,调查期间长江沙市断面鱼卵和仔鱼的总径流量为6.89×10^{10}粒(尾),其中鱼卵径流量为1.1×10^{10}粒,日径流量变动范围在$0\sim1.1\times10^{9}$粒;鱼苗径流量为5.79×10^{10}尾,日径流量变动范围在$0\sim1.0\times10^{10}$尾。鱼卵日径流量出现了3个明显的高峰期,其中5月21-22日的规模最大,5月29-30日次之,6月26-27日最小;仔鱼径流量在7月初显著增加,高峰期从7月5日至调查结束,呈现先上升后下降的变化过程(图3)。统计3次鱼卵高峰出现的种类数量分别为16种、19种和23种,以2次生态调度期间的繁殖种类较多。

“四大家鱼”鱼卵径流量为6.1×10^{8}粒,日径流量在$0\sim1.9\times10^{8}$粒,折算成每1 000 m^3流量日均漂流密度变幅在2~58粒。如图4所示,“四大家鱼”鱼卵高峰期出现4次,时间分别为5月19-24日、5月29日至6月1日、6月4-6日和9-10日以及6月25-30日;其中以首次生态调度期间的繁殖规模最大。

表 2　长江沙市段鱼卵和仔鱼种类组成及数量比例

Tab. 2　Species composition and proportion of fish eggs and larvae in Shashi section of the Yangtze River

种类	鱼卵数量/粒	比例/%	种类	仔鱼数量/尾	比例/%
银鮈	920	24.027	鲿	13 682	34.970
细鳞鲴	815	21.285	细鳞鲴	6801	17.383
蒙古鮈	537	14.024	蒙古鮈	4116	10.520
花斑副沙鳅	301	7.861	翘嘴鮈	4008	10.244
翘嘴鮈	211	5.510	鳊	2984	7.627
鳊	165	4.309	赤眼鳟	2356	6.022
蛇鮈	152	3.970	银鮈	2103	5.375
赤眼鳟	138	3.604	鲟虎鱼	991	2.533
双斑副沙鳅	115	3.003	飘鱼	751	1.919
鲿	85	2.220	寡鳞飘鱼	734	1.876
草鱼	80	2.089	鳡	147	0.376
鲢	51	1.332	鳜	115	0.294
飘鱼	43	1.123	花斑副沙鳅	84	0.215
犁头鳅	41	1.071	铜鱼	59	0.151
中华倒刺鲃	29	0.757	鳑鲏	55	0.140
鳜	28	0.731	中华倒刺鲃	22	0.056
银鲴	21	0.548	间下鱵	19	0.048
鳙	16	0.418	蛇鮈	18	0.046
鳑	16	0.418	银鲴	17	0.043
青鱼	15	0.392	黄颡鱼	16	0.041
鳡	14	0.366	麦穗鱼	12	0.031
吻鮈	11	0.287	吻鮈	11	0.028
鳅鮀	11	0.287	鲤	7	0.018
铜鱼	5	0.130	双斑副沙鳅	6	0.015
黄尾鲴	5	0.130	鳑	6	0.015
寡鳞飘鱼	2	0.052	鲇	3	0.007
鲤	1	0.026	犁头鳅	1	0.002
鲇	1	0.026	长吻鮠	1	0.002

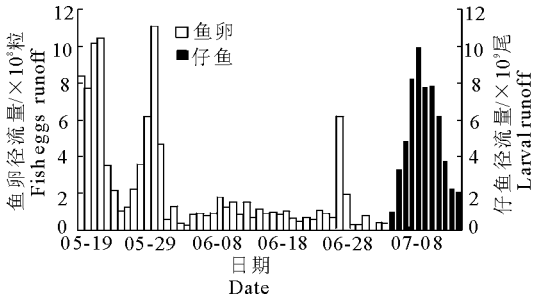

图 3　沙市断面鱼卵和仔鱼径流量的日变化

Fig. 3　Daily variations of fish eggs and larvae runoff in Shashi section

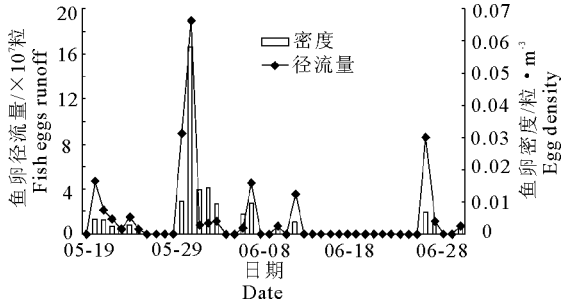

图 4　沙市断面"四大家鱼"卵密度和径流量的日变化

Fig. 4　Daily variations of eggs density and runoff of four major Chinese carps in Shashi section

2.4　鱼类繁殖时间与丰度

根据鱼卵出现时间及采集丰度可知,沙市江段鱼类的繁殖盛期为 5－6 月,进入 7 月,采集到的鱼卵已经很少,但鱼苗数量开始急增。不同种类繁殖的持续时间有所差异,银鮈、细鳞鲴、蒙古鮈、副沙鳅等持续时间最长,鱼卵丰度较高,覆盖整个调查时期;"四大家鱼"主要在 5 月中旬至 6 月下旬繁殖;犁头鳅、鳊等主要集中在 6 月繁殖,而鳜、银鲴、翘嘴鮈、中华倒刺鲃、鳑等鱼类的繁殖时间相对较晚,主要出现在 6 月下旬至 7 月中旬。繁殖时间的差异导致了不同种类鱼卵和仔鱼出现的时间及其相对丰度呈现出差异(表 1)。

2.5　鱼卵和仔鱼时空分布差异

2.5.1　时间分布　对固定采样点早、中、晚 3 个时间段采集的卵和仔鱼丰度数据进行差异显著性分析,验证采样时间对漂流密度是否有显著影响,即漂流密度随时间分布的差异性。Kruskal-Wallis 检验表明,不同时段采集的鱼卵($P = 0.196 > 0.05$, $n = 53$)和仔鱼($P = 0.50 > 0.05$, $n = 53$)的漂流密度均无显著差异。

2.5.2　垂向分布　对固定采样点表、中、底 3 个水层采集的卵和仔鱼丰度数据进行差异显著性分析,验证不同水层对漂流密度是否有显著影响,即漂流密度随纵向空间分布的差异性。Kruskal-Wallis 检验表明,不同水层采集的鱼卵($P = 0.341 > 0.05$, $n = 40$)和仔鱼($P = 0.952 > 0.05$, $n = 40$)的漂流密度均无显著差异。

2.5.3　横向分布　对断面采集的江北、江中、江南 3 个采样点的丰度数据进行差异显著性分析,验证漂流密度随横向空间分布的差异性。Kruskal-Wallis 检验表明,不同采样点的鱼卵漂流密度无显著差异($P = 0.071 > 0.05$, $n = 18$),但仔鱼的漂流密度在各采样点之间有显著性差异($P = 0.039 < 0.05$, $n = 9$),平均漂流密度为江北(2.541 尾/m^3)>江中(0.415 尾/m^3)>江南(0.179 尾/m^3)。

进一步将断面空间各点采集的鱼卵和仔鱼丰度数据与反映江河水动力指标的流速、水深、流态(弗汝德数)实测数据进行相关性分析,选出最优的拟合方程如表 3 所示。鱼卵密度与流速和流态因子之间均存在显著性负相关($R^2 > 0.7$),而与水深无相关性($R^2 < 0.2$;未列方程);仔鱼密度与水深和流态因子之间均无相关性($R^2 < 0.2$;未列方程),且与流速的负相关性不及鱼卵密度显著($R^2 < 0.5$)。

表3 鱼卵和仔鱼密度与水动力指标的拟合方程

Tab.3 Fitted equation between fish eggs/larvae density and hydraulic parameters

指标	鱼卵密度 D_1		仔鱼密度 D_m
	6月1日	6月28日	7月6日
流速 V	$D_1=0.01V^{-2.67}$	$D_1=0.380e^{-0.92V}$	$D_m=0.761V^{-3.14}$
	$R^2=0.847$	$R^2=0.745$	$R^2=0.363$
流态 F_r	$D_1=0.000F_r^{-1.98}$	$D_1=3.679F_r^2-1.931F_r+0.357$	$D_m=-13.13F_r^2+0.954F_r+1.307$
	$R^2=0.701$	$R^2=0.766$	$R^2=0.084$

3 讨论

3.1 宜昌至沙市江段鱼类早期资源现状

查询以往的资料,未见有关沙市江段鱼类早期资源调查的研究报道。本次调查发现沙市江段的鱼类早期资源共有35种,资源量及种类组成与近年来监利、武穴等邻近江段的研究结果基本一致(段辛斌等,2008;黎明政等,2010),表明近年来长江中游江段的鱼类早期资源状况趋于稳定,但与20世纪70年代相比(长江水产研究所,1981),产漂流性卵的鱼类种类减少,如铜鱼、鳡、鳡、吻鮈等已成为偶见种,且经济鱼类组成趋于单一,主要是鲌亚科鱼类;另外,受三峡工程阻隔和水文情势变化的双重影响,沙市江段"四大家鱼"的产卵规模明显减小,有资料记载的1965年枝城至沙市江段家鱼产卵规模约为105亿尾(易伯鲁等,1988),到2012年仅为6.1亿尾,其结果同样与整个长江中游"四大家鱼"繁殖亲体数量减少密切相关(吴清江,2013);此外,2012年推算"四大家鱼"的产卵场主要分布在葛洲坝、宜都、枝城、江口、沙市等几个江段①,与20世纪80年代的调查结果基本吻合,表明其产卵场位置相对稳定,三峡工程运行对其产卵场环境的影响有限(黄悦和范北林,2008)。

3.2 影响鱼类早期资源分布的主要因素

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(Elisabeth et al,2012)。

有研究表明,仔鱼漂流的时空分布特征往往存在一定的规律,如仔鱼的丰度在夜晚要高于白天(Michael et al,1999;Jason et al,2003),岸边要高于江心(常剑波等,1995;Martin et al,2004)。本次研究表明,沙市江段采集到的鱼卵和仔鱼在昼夜和垂直分布上均无显著性差异,与唐锡良等(2010)、李世健等(2011)的研究结果基本一致,尽管调查年份和江段有所差异,但采集时段均为5-7月鱼类的繁殖季节,长江干流江段不同鱼类的繁殖时间和繁殖地点较为分散,河道水文条件复杂多变,使得鱼卵和仔鱼的总体分布没有显著性差异。漂流性的鱼卵在未孵化出膜之前实质是一个被水流挟带被动扩散的过程,其在河道断面分布特征应与流经江段的河流形态及其断面水力学条件密切相关(Dudley 2004;曹文宣等,2007);本研究证实了这一观点,并得出流速较高、流态紊乱的区域,鱼卵密度较低,但其与水深无显著相关性,推测水深可能是通过改变流态来间接影响鱼卵的分布。仔鱼的断面分布有显著性差异,以江北的采集密度最高,江心最低。仔鱼具有一定的游泳和主动选择能力,在沿岸缓流回水区分布较多,其分布还受到生物因素的影响,故与水动力指标之间无显著相关性。了解鱼卵和仔鱼的时空分布规律,对于早期资源调查中采样位点的选取、采集时间与频次的设置具有一定的指导意义。

3.3 生态调度对沙市江段鱼类繁殖的作用

2012年三峡水库实施了2次持续增加下泄流量的生态调度过程,旨在促进葛洲坝下游江段的"四大家鱼"自然繁殖。2次调度均持续涨水4 d(5月28-31日、6月24-27日),较常规调度涨水多增加2 d。监测结果表明,2次调度期间均出现大规模卵汛,鱼卵总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。尽管5月20-22日非生态调度时期的鱼卵径流量最高,推测一方面与5月16-18日三峡出库流量、水位逐渐加大有关;另一方面可能是刚刚进入鱼类繁殖盛期,不同种类参与繁殖的亲鱼数量较多有关。随着后期水文、水温等条件的不断满足,使得其后2次生态调度期间参与繁殖的种类逐渐增加,至6月底达到峰值;此外,整个调查期

① 水利部中国科学院水工程生态研究所. 2012年度三峡水库针对四大家鱼自然繁殖的试验性生态调度效果监测-鱼类早期资源监测研究报告.

间“四大家鱼”的产卵量约为 6.1 亿粒,其中调度期间产卵量为4.13亿粒,占总量的72.73% 以上①,生态调度效果初显。

综合本文研究得出,目前长江干流产漂流性卵的种类居多,通过生态调度产生的洪峰能够在一定程度上满足不同水文需求尤其是涨水需求较高的鱼类繁殖(如鳙、鳡、犁头鳅等),使得在涨水期间鱼卵密度和种类均有增加,涨幅明显高于非调度涨水过程。为此,建议今后持续开展三峡水库生态调度及其相关生态响应监测工作,以保护长江日渐衰退的鱼类资源,维护健康长江,促进人水和谐。

参考文献

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.

常剑波, 邓中粦, 张国华,等. 1995. 洪湖灌江纳苗的可行性及效益评价[C]. 洪湖水生生物及资源开发[M]. 北京:科学出版社:220 – 229.

段辛斌, 陈大庆, 李志华,等. 2008. 三峡水库蓄水后长江中游产漂流性卵鱼类产卵场现状[J]. 中国水产科学,15(4): 523 – 532.

黄悦, 范北林. 2008. 三峡工程对中下游四大家鱼产卵环境的影响[J]. 人民长江,39(19): 38 – 41.

黎明政, 姜伟, 高欣,等. 2010. 长江武穴江段鱼类早期资源现状[J]. 水生生物学报, 34(6): 1211 – 1217.

李世健, 陈大庆, 刘绍平,等. 2011. 长江中游监利江段鱼卵及仔稚鱼时空分布[J]. 淡水渔业,41(2): 18 – 24.

谭细畅,李跃飞,李新辉,等. 2012. 梯级水坝胁迫下东江鱼类产卵场现状分析[J]. 湖泊科学,24(3):443 – 449.

唐会元,杨志,高少波,等. 2012. 金沙江中游圆口铜鱼早期资源现状[J]. 四川动物,31(3): 416 – 421.

唐锡良, 陈大庆, 王珂,等. 2010. 长江上游江津江段鱼类早期资源时空分布特征研究[J]. 淡水渔业,40(5): 27 – 31.

王俊娜,董哲仁,廖文根,等. 2011. 美国的水库生态调度实践[J]. 水利水电技术,42(1):15 – 20.

吴清江. 2013. 长江中下游水中生灵在呼救[J]. 中国三峡,(1):35 – 41.

易伯鲁, 余志堂, 梁秩燊, 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.

Brown A V, Armstrong M L. 1985. Propensity to drift downstream among various species of fish[J]. J Freshw Ecol,3: 3 – 17.

Dauble D D, Hanrahan T P, Geist D R. 2003. Impacts of the Columbia River hydroelectric system on Main-stem Habitats of Fall Chinook Salmon[J]. North American Journal of Fisheries Management, 23(3): 641 – 659.

Dudley R K. 2004. Ichthyofaunal Drift in Fragmented Rivers: Empirically Based Models and Conservation Implications [D]. Ph Dthesis. University of New Mexico, Albuquerque.

Elisabeth Schludermann, Michael Tritthart, Paul Humphries, et al. 2012. Dispersal and retention of larval fish in a potential nursery habitat of a large temperate river: an experimental study[J]. Can J Fish Aquat Sci,69: 1302 – 1315.

Humphries P,Lake P S. 2000. Fish larvae and the management of regulated rivers[J]. Reg Riv Res Manag,16:421 – 432.

Jason L,White Bret C. 2003. Harvey. Basin-scale patterns in the drift of embryonic and larval fishes and lamprey ammocoetes in two coastal rivers[J]. Environmental Biology of Fishes, 67: 369 – 378.

Lovich J, Melis T S. 2007. The state of Colorado River ecosystem in Grand Canyon: lessons from 10 year of adaptive ecosystem management[J]. Intl J River Basin Management, 5(3): 207 – 221.

Martin Reichard, Pavel Jurajda, Carl Smith. 2004. Spatial distribution of drifting cyprinid fishes in a shallow lowland river[J]. Arch Hydrobiol, 159(3): 395 – 407.

Michael P,Marchetti Peter B. 1999. Moyle Spatial and temporal ecology of native and introduced fish larvae in Lower Putah Creek, California[R]. Technical Completion Reports, University of California Water Resources Center, UC Berkeley.

Pavlov D S, Lupandin A I, Taradina D G,et al. 1996. Diurnal dynamics of buoyancy of juvenile cyprinid and percid fry as related to their downstream migration in the Volga Delta [J]. J Ichthy,36:808 – 811.

Rood S B, Samuelson G M, Braatne J H, et al. 2005. Managing river flows to restore floodplain forests[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 3(4): 193 – 201.

Wang J N, Li C, Duan X B,et al. 2013. The relationship between thermal regime alteration and spawning delay of the Four Major Chinese Carps in the Yangtze River below the Three Gorges Dam[C]. River Research and Applications, DOI: 10.1002/rra.

Wrona A, Wear D, Ward J, et al. 2007. Restoring ecological flows to the Lower Savannah River: collaborative scientific approach to adaptive management[R]. Proceedings of the 2007 Georgia Water Resources Conference.

(责任编辑　万月华)

Effects of Ecological Operation of Three Gorges Reservoir on Fish Eggs and Larvae in Shashi Section of the Yangtze River

XU Wei, LIU Hong-gao, TANG Hui-yuan, ZHU Di, YANG Zhi, QIAO Ye

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

Abstract: About 35 species of fish eggs and larvae belonging to 4 orders, 8 families, 10 subfamilies and 28 genera were collected in Shashi section, during the period of experimental ecological operation of Three Gorges Reservoir (TGR) from May to July 2012. More than ten species such as *Squalidus argentatus*, *Hemiculter leucisculus*, *Plagiognathops microlepis*, *Culter mongolicus mongolicus*, *Parabotia fasciata*, *Culter alburnus*, *Parabramis pekinensis*, *Squaliobarbus curriculus*, *Ctenopharyngodon idellus*, *Hypophthalmichthys molitrix* were the main breeding fishes in the surveyed river reach. The peak period of fish breeding was in May and June, and fish eggs decreased and larvae increased from July. During the sampling period, the total runoff of fish eggs and larvae was 6.89×10^{10} ind., including 1.1×10^{10} ind. of fish eggs and 5.79×10^{10} ind. of larvae. The temporal and vertical distribution in fixed sampling points had no significant differences both for the fish eggs and larvae. In respect to lateral distribution in different sampling point, significant difference existed for larvae with the highest drift density in the north of the river and the lowest in the south of the river, while no significant difference was observed for fish eggs with drift density negatively related to hydraulic parameters such as velocity and fluid state. The ecological operation of TGR boosted the quantity of both total fish eggs and the eggs of four major Chinese carps, as well as the variety of breeding species, which demonstrated the positive effect of water rising on improving hydrological conditions for the breeding of different fishes. The implement of ecological operation is of great significance not only for reducing the negative impact on fish breeding in the midstream of the Yangtze River , but also for maintaining fish population resource after the operation of the Three Gorges Reservoir.

Key words: Three Gorges Reservoir; ecological operation; fish eggs; larvae