

文章编号: 1000-0615(2019)08-1781-09

DOI: 10.11964/jfc.20180711365

三峡水库生态调度对长江监利江段四大家鱼早期资源的影响

周雪, 王珂*, 陈大庆, 刘绍平, 段辛斌, 汪登强, 高雷

(中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北武汉 430233)

摘要: 为探究生态调度对长江中游四大家鱼繁殖的影响, 并了解影响家鱼产卵的关键生态水文指标的量化范围, 于2013—2017年5—7月三峡水库生态调度期间在长江中游监利江段进行了鱼类早期资源调查, 同时对采集到的四大家鱼卵苗与生态水文指标进行了相关性分析。结果显示, 家鱼卵苗量与流量增长率呈显著正相关。每年6月下旬的生态调度, 监利江段涨水持续时间为4 d及以上, 流量增长率为 $1\ 600\sim 2\ 833\ \text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ 时, 家鱼卵苗发生量较大, 可占年总规模的45%以上。三峡水库生态调度涨水过程能够在一定程度上满足监利江段四大家鱼繁殖的水文需求, 对减缓三峡水库运行引起的长江中游鱼类繁殖的不利影响和维持鱼类种群资源补充具有重要意义。

关键词: 四大家鱼; 早期资源; 水文指标; 生态调度; 三峡水库

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

随着长江干流水利水电工程的兴建, 水文情势和水流条件发生改变^[1-4], 产漂流性卵鱼类如四大家鱼的繁殖、发育活动不可避免地受到影响^[5-7]。根据历年早期资源调查结果, 长江中游四大家鱼产卵场地理分布的范围变化不大, 但是相比蓄水前, 产卵规模严重缩小^[8]。为了补充四大家鱼早期资源, 自2011年以来, 针对四大家鱼的自然繁殖, 三峡水库开展了数次实验性生态调度。

目前, 针对水文变化对家鱼产卵行为的影响, 国内学者利用IHA水文变化法^[9-11]、相关分析法^[12]等开展了研究, 指出家鱼成熟亲鱼排卵受精活动不仅需要适宜的水温条件, 还受到江水涨落、涨水过程等自然环境条件的刺激^[13-18]。已有学者指出, 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^[19], 但其仅有一年的监测数据, 不能系统分析三峡水库生态调度对四大家鱼早期资源的影响。为了更全面地评估生态调度对长江中游四大家鱼繁殖活动的影响, 本研究系统分析了2013—

2017年监利江段的早期资源监测数据, 利用家鱼产卵行为对生态水文指标的响应关系分析, 初步提出适合监利江段的生态调度水文指标范围。

1 材料与方 法

1.1 采样地点与时间

2013—2017年, 每年5—7月在长江中游监利江段(112°55'37"E, 29°31'58"N)进行鱼类早期资源调查, 该断面位于湖北省荆州市监利县内, 南临岳阳广兴洲, 北临监利三洲镇, 距洞庭湖出口城陵矶约50 km。在监利三洲断面的北岸、江中和南岸分别设置3个卵苗采集点, 每个采集点通过网具收集表层(水深0.5 m)和 中 层(水深3~5 m)的鱼卵和鱼苗, 每次采集时间为15 min。卵苗高峰期间进行昼夜采集, 间隔2 h采样1次, 采样点见图1。

1.2 样品采集和处理

采集网具为圆锥网, 网口面积 $0.19\ \text{m}^2$, 由网目为0.776 mm的尼龙筛绢制成。采样点坐标由

收稿日期: 2018-07-19 修回日期: 2018-10-29

资助项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2017HY-ZD0101); 国家自然科学基金(51579247); 国家重点研发计划(2018YFD0900901, 2018YFD0900902, 2018YFD0900903)

通信作者: 王珂, E-mail: wangke@yfi.ac.cn

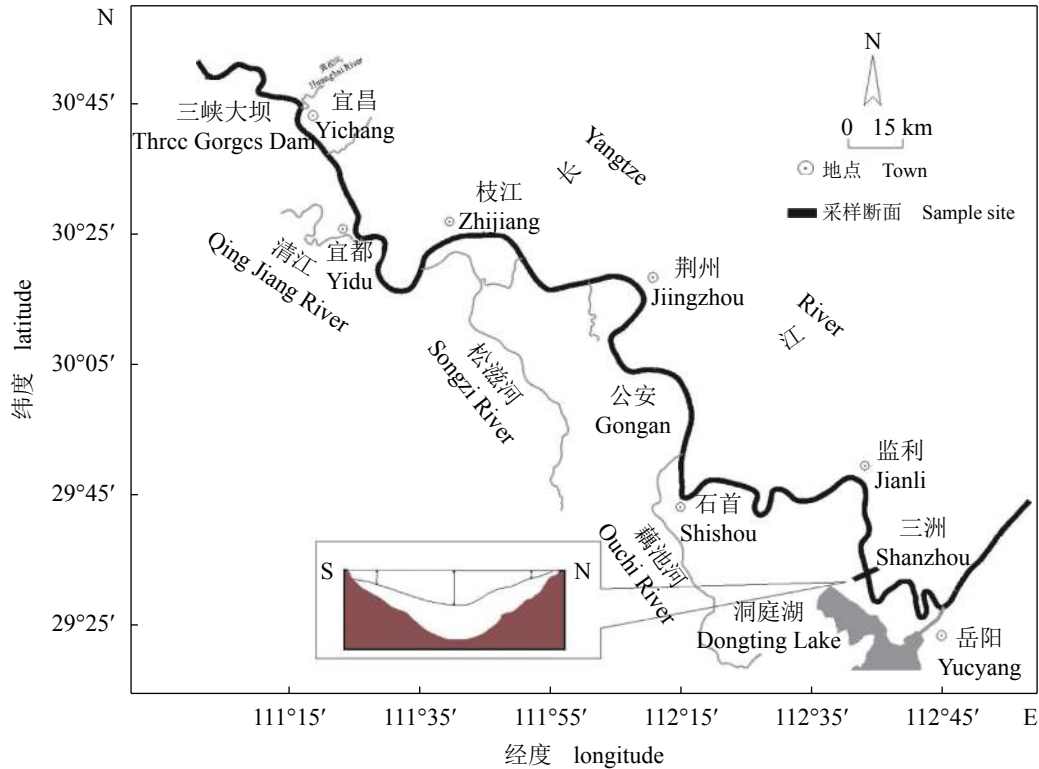


图 1 四大家鱼早期资源调查采样点

Fig. 1 Sampling site for larval resources of the four major Chinese carps

GPSI2XLC记录，网口流速使用LS45A型流速仪测定。采样同时记录采样点水温、溶解氧等环境数据。水位和流量数据参考监利水文站，数据来源自水利部全国水雨情信息网站(<http://xxfb.hydroinfo.gov.cn/ssIndex.html>)。

采集到的卵苗使用奥林巴斯解剖镜SZX16进行观察，记录鱼卵发育时期和形态特征，测定其卵径、膜径。鱼卵发育时期、仔鱼种类鉴定参考王昌燮^[20]、曹文宣等^[21]的方法。同时将未鉴定种类的卵苗用无水乙醇保存，返回实验室提取DNA，经PCR扩增细胞色素B进行测序，使用DNA STAR软件包中的Seqman对返回序列进行检查，然后在NCBI网站(<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.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

鱼卵、仔稚鱼的规模计算参照易伯鲁等^[13]的调查计算方法。

(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[(粒或尾)/ m^3]， S 为网口面积(m^2)， V 为网口流速(m/s)， n 为采集时段内进网卵苗数(粒或尾)， t 为采集时间(s)。

(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) 24 h内一次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径流量(粒或尾)， d_i 为第 i 次采集的卵苗密度[(粒或尾)/ m^3]， Q_i 为第 i 次采集时的断面流量(m^3/s)。

(4) 24 h内一次非采集期间卵苗径流量：

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

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(粒或尾)， $t_{i,i+1}$ 为第 $i, i+1$ 次采集时间间隔(s)。

(5) 采集江段的卵苗总径流量:

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

式中, $\sum M_i$ 为24 h内各次定时采集的鱼卵、仔鱼流量之和, $\sum M_{i,i+1}$ 为前后两次采集之间非采集时间内计算出的鱼卵、仔鱼流量之和。

用Office Excel软件进行数据处理,用SPSS 22软件进行数据分析,用Origin 75和AutoCAD 2013进行制图。

2 结果

2.1 三峡水库生态调度

2013—2017年三峡水库共进行了10次生态调度,其中2013年进行了3次,期间监利江段水温分别为18.00~20.70 °C, 21.90~23.70 °C, 24.00~25.20 °C; 2014年进行了1次,期间监利江段水温为21.10~21.25 °C; 2015—2017年分别进行了2次,其中2015年调度期间监利江段水温为21.95~22.15 °C, 23.35~23.75 °C, 2016年监利江段水温为21.90~22.10 °C, 23.40~23.90 °C, 2017年监利江段水温为19.40~19.76 °C, 21.10~22.00 °C。每年调度时间及持续时间不统一,主要在5月中下旬、6月上旬和6月下旬(表1)。

2.2 四大家鱼早期资源情况

经估算,2013年调查期间监利断面家鱼卵苗总径流量为4.48×10⁸粒或尾。四大家鱼卵苗高峰期出现2次,时间分别为6月26—29日和7月

4—12日;高峰期卵苗量分别为2.03×10⁸粒或尾和2.27×10⁸粒或尾,分别占总量的45%和51%(图2)。2013年三峡水库进行了3次生态调度(表1),其中6月23—30日持续8天的涨水,对应6月26—29日的第1次家鱼卵苗高峰。

2014年调查期间监利断面家鱼卵苗总径流量为3.46×10⁸粒或尾。四大家鱼卵苗高峰期出现2次,时间分别为6月22—29日和7月3—5日;高峰期卵苗量分别为1.80×10⁸粒或尾和1.02×10⁸粒或尾,分别占总量的52%和29%(图3)。2014年三峡水库进行了1次生态调度(表1),此次调度未出现对应的卵苗高峰。

2015年调查期间监利断面家鱼卵苗总径流量为3.06×10⁸粒或尾。四大家鱼卵苗高峰期出现2次,时间分别为6月22—25日和7月2—8日;高峰期卵苗量分别为0.99×10⁸粒或尾和2.00×10⁸粒或尾,分别占总量的32%和65%(图4)。2015年三峡水库进行了2次生态调度(表1),其中6月25日—7月2日持续8天的生态调度,对应7月2—8日的第2次家鱼卵苗高峰。

2016年调查期间监利断面家鱼卵苗总径流量为13.37×10⁸粒或尾。四大家鱼卵苗高峰期出现1次,时间为6月25—30日;高峰期卵苗量为12.17×10⁸粒或尾,占总量的91%(图5)。2016年进行了2次三峡水库生态调度(表1),其中6月20—23日持续4天的生态调度对应家鱼卵苗高峰。

2017年调查期间监利断面家鱼卵苗总径流量为2.7×10⁸粒或尾。四大家鱼卵苗高峰期出现

表1 三峡水库2013—2017年生态调度时间及调度期间监利江段水温情况

Tab. 1 Ecological operation schedule and water temperature of Jianli section during 2013—2017

| 年份 year | 次数 times | 生态调度时间 ecological operation time | 持续时间/d duration | 水温/°C water temperature |
|------------|-------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------------|
| 2013 | 第1次 | 05-10—05-25 | 16 | 18.00~20.70 |
| | 第2次 | 06-04—06-15 | 12 | 21.90~23.70 |
| | 第3次 | 06-23—06-30 | 8 | 24.00~25.20 |
| 2014 | 第1次 | 06-04—06-06 | 3 | 21.10~21.25 |
| 2015 | 第1次 | 06-07—06-10 | 4 | 21.95~22.15 |
| | 第2次 | 06-25—07-02 | 8 | 23.35~23.75 |
| 2016 | 第1次 | 06-08—06-12 | 5 | 21.90~22.10 |
| | 第2次 | 06-20—06-23 | 4 | 23.40~23.90 |
| 2017 | 第1次 | 05-20—05-25 | 6 | 19.40~19.76 |
| | 第2次 | 06-03—06-09 | 7 | 21.10~22.00 |

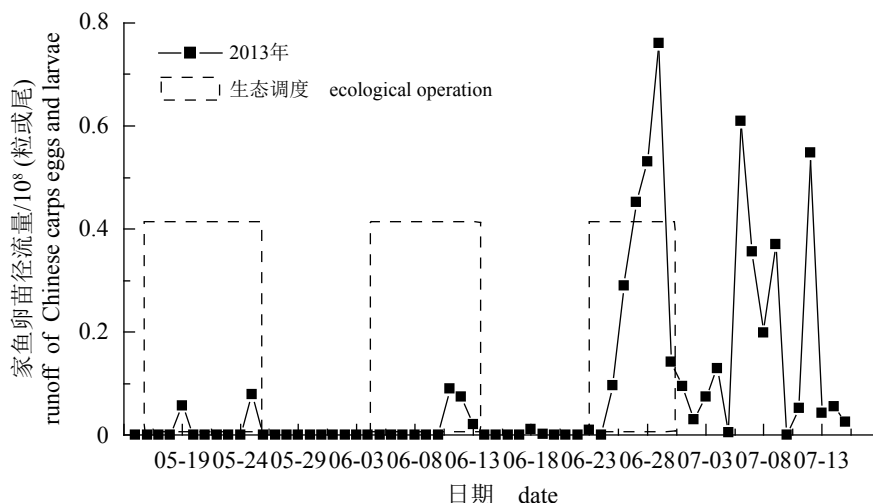


图2 2013年家鱼卵苗径流量与生态调度

Fig. 2 Spawning amount and ecological operation in 2013

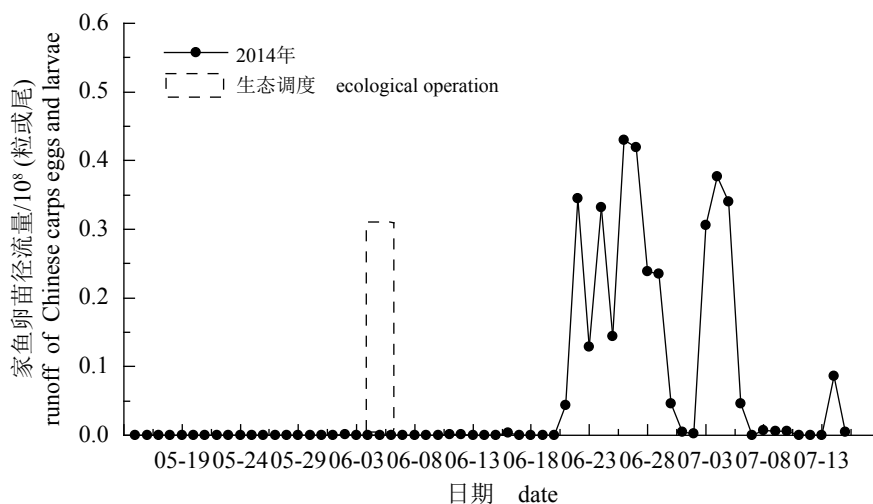


图3 2014年家鱼卵苗径流量与生态调度

Fig. 3 Spawning amount and ecological operation in 2014

1次, 时间为7月1—2日, 对应的卵苗量为 1.71×10^8 粒或尾, 占总量的64%(图6)。2017年进行了2次三峡水库生态调度(表1), 调度期间未在监利江段形成家鱼卵苗高峰。

2013年—2017年三峡水库进行的生态调度, 其中6月下旬的调度均对应一次家鱼卵苗高峰, 所以三峡水库6月下旬的生态调度对监利江段四大家鱼早期资源的补充效果最好。

2.3 家鱼早期资源对调度水文过程的响应

将四大家鱼卵苗高峰期的水文指标进行统计(表2): 涨水持续时间为3~8 d, 初始流量为 $10\ 900 \sim 17\ 800 \text{ m}^3/\text{s}$, 洪峰流量为 $16\ 000 \sim 26\ 300$

m^3/s , 流量涨幅为 $1\ 000 \sim 12\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$, 流量增长率为 $1\ 125.00 \sim 2\ 833.33 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{d})$ 。将水文指标与家鱼卵苗量进行相关性分析, 其中只有流量增长率与家鱼卵苗量呈显著的正相关($P < 0.05$), 其他指标与家鱼卵苗量未呈现出相关性, 说明流量增长率对家鱼早期资源量有影响(表3)。

2013年6月23—30日持续8 d的生态调度对应一次家鱼卵苗高峰, 此次生态调度, 监利江段在6月23—28日持续涨水6 d, 流量增长率为 $1\ 600.00 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{d})$, 家鱼卵苗发生量为 2.03×10^8 粒或尾, 占该年总家鱼卵量的45%。2015年6月25—7月2日持续8 d的生态调度对应一次家鱼卵苗高峰, 此次生态调度, 监利江段在7月2—5日持续4 d

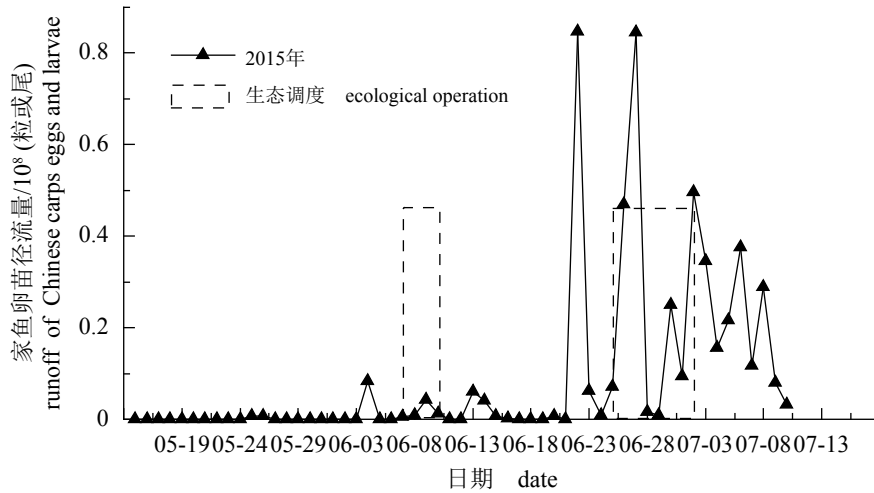


图 4 2015年家鱼卵苗径流量与生态调度

Fig. 4 Spawning amount and ecological operation in 2015

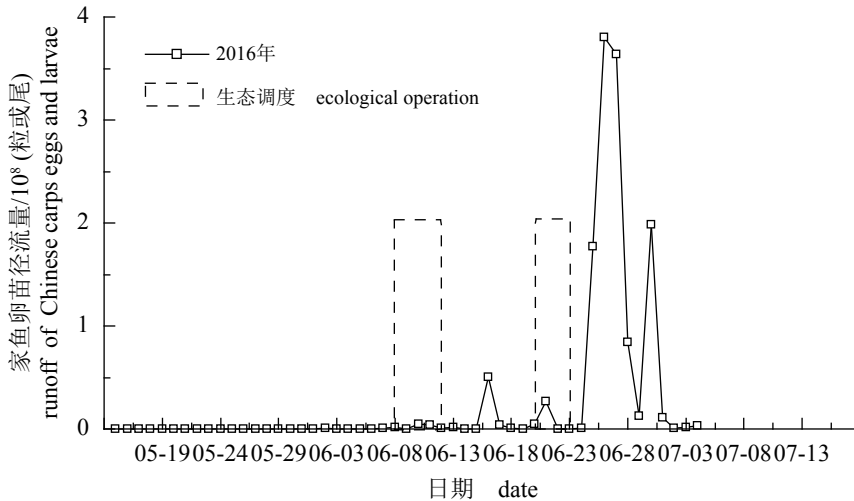


图 5 2016年家鱼卵苗径流量与生态调度

Fig. 5 Spawning amount and ecological operation in 2016

涨水, 流量增长率为 $2\ 233.00\ \text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$, 家鱼卵苗发生量为 2.00×10^8 粒或尾, 占该年总家鱼卵量的65%; 而监利江段在6月19—21日持续3天涨水, 流量增长率为 $1\ 550.00\ \text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$, 家鱼卵苗仅为 0.99×10^8 粒或尾。2016年6月20日—23日持续4天的生态调度对应家鱼卵苗高峰, 此次生态调度, 监利江段在6月25—28日持续涨水, 流量增长率为 $2\ 833.33\ \text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$, 家鱼卵苗发生量为 12.17×10^8 粒或尾, 占该年总家鱼卵量的91%。由此可以看出, 此3年6月下旬的生态调度有利于监利江段四大家鱼早期资源补充, 其中2016年效果最佳。根据此3年的生态调度特点, 可认为生态调度促使监利江段涨水持续时间为4 d及以上, 流量增

长率在 $1\ 600\sim 2\ 833.33\ \text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ 的涨水过程, 利于四大家鱼在监利江段形成早期资源高峰。

3 讨论

3.1 影响四大家鱼繁殖的水文因素

有研究认为^[22], 影响家鱼繁殖的关键水文指标为流量增长率和涨水持续时间。本研究分析四大家鱼早期资源对水文过程的响应关系, 也得出家鱼卵苗量与涨水过程的流量增长率呈显著正相关。其中涨水持续时间为3 d时, 家鱼卵苗量较低, 涨水持续时间为4 d及以上, 家鱼卵苗量相对较高。所以, 流量增长率在一定范

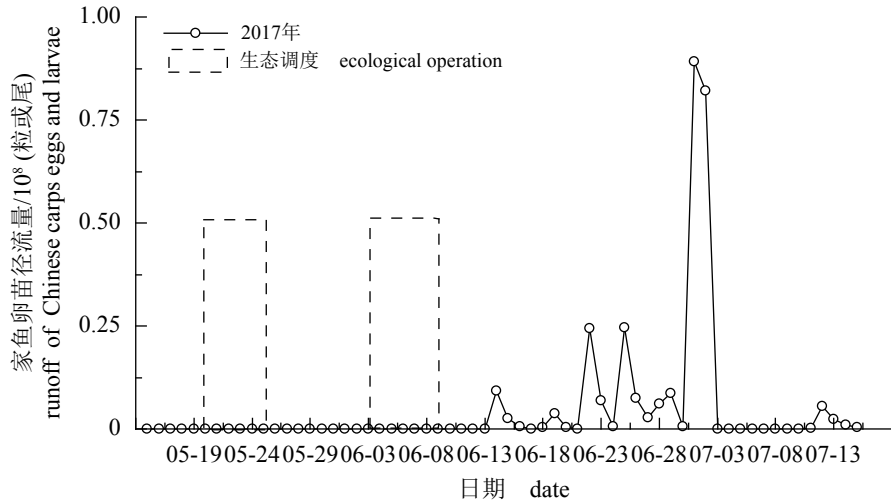


图 6 2017年家鱼卵苗径流量与生态调度

Fig. 6 Spawning amount and ecological operation in 2017

表 2 监利江段生态水文指标

Tab. 2 Ecological hydrology indexes at Jianli section

| 年份 year | 涨水时间 time of flow increase (T_{zs}) | 涨水持续时间/d duration of flow increase (T_{dur}) | 洪峰初始流量 /(m^3/s) initial flow (Q_{in}) | 洪峰流量 /(m^3/s) peak flow (Q_{max}) | 流量涨幅 /(m^3/s) flow increase (Q_{inc}) | 流量增长率 /[$m^3/(s \cdot d)$] the rate of flow increase(Q_{rinc}) | 家鱼卵苗高峰期卵苗量 /($\times 10^8$ 粒或尾) Chinese carps' eggs and larvae |
|------------|--|---|--|--|--|---|--|
| 2013 | 06-23—06-28 | 6 | 10 900 | 18 900 | 8 000 | 1 600.00 | 2.03 |
| | 07-02—07-09 | 8 | 12 600 | 25 100 | 12 500 | 1 785.71 | 2.27 |
| 2014 | 06-20—06-24 | 5 | 11 500 | 16 000 | 4 500 | 1 125.00 | 1.80 |
| | 07-02—07-07 | 6 | 15 700 | 23 200 | 7 500 | 1 500.00 | 1.02 |
| 2015 | 06-19—06-21 | 3 | 16 600 | 19 700 | 3 100 | 1 550.00 | 0.99 |
| | 07-02—07-05 | 4 | 17 900 | 24 600 | 6 700 | 2 233.00 | 2.00 |
| 2016 | 06-25—06-28 | 4 | 17 800 | 26 300 | 8 500 | 2 833.33 | 12.17 |
| 2017 | 06-26—06-29 | 4 | 16 900 | 21 400 | 4 500 | 1 500.00 | 1.70 |

表 3 监利江段生态水文指标与家鱼卵苗量的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient between ecological hydrology indexes and spawning amount at Jianli section

| 生态水文指标 ecological hydrology index | 涨水持续时间 T_{dur} | 初始流量 Q_{in} | 洪峰流量 Q_{max} | 流量涨幅 Q_{inc} | 流量增长率 Q_{rinc} |
|--------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| 相关系数R | -0.191 | 0.341 | 0.517 | 0.286 | 0.829* |

注: *相关性显著($P < 0.05$)

Notes: * the correlation is significant difference ($P < 0.05$)

围内, 流量增长率较大对四大家鱼繁殖有利, 涨水持续时间太低时, 无法达到刺激家鱼产卵的目的。

3.2 生态调度对监利江段家鱼繁殖的作用

四大家鱼在春季水温上升到18 °C以上才开始产卵^[13], 15~20 °C的过程对于四大家鱼性腺从

3期发育至4期有重要影响, 超过20 °C之后, 甚至更高水温21 °C以后, 家鱼的性腺发育将快速完成, 性成熟的四大家鱼亲鱼开始集中繁殖^[23]。2013—2017年生态调度期间, 监利江段水温均达到18 °C, 且逐次升温, 进而达到20 °C以上, 生态调度期间水温达到家鱼产卵的水温基本要求。

本研究分析得出, 针对监利江段四大家鱼

繁殖活动,当三峡水库生态调度时间在6月下旬,生态调度促使监利江段形成有效的涨水过程,其中涨水持续时间达到4 d及以上,流量增长率达到 $1\ 600\sim 2\ 833\ \text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$,会刺激家鱼集中繁殖。王俊娜^[24]对三峡运行前后长江中游的家鱼的生态环境流量需求进行综合分析,认为家鱼的正常繁殖在每年6月15日—7月20日,涨水率为 $900\sim 3\ 100\ \text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$,本研究结论在此范围内,并在此基础上进一步量化了涨水持续时间和涨水增长率。本研究结果可为针对监利江段四大家鱼繁殖活动的三峡水库生态调度方案提供科学依据。

感谢参与监利野外监测的工作人员,郭国忠、陈会娟等研究生。

参考文献:

- [1] 王俊,程海云.三峡水库蓄水期长江中下游水文情势变化及对策[J].*中国水利*,2010(19):15-17,14.
Wang J, Cheng H Y. Water regime variation of the middle and low reaches of Yangtze River during the water storage period of Three Gorges Reservoir and its countermeasures[J].*China Water Resources*,2010(19):15-17,14(in Chinese).
- [2] 李清清,覃晖,陈广才,等.长江中游水文情势变化及对鱼类的影响分析[J].*人民长江*,2012,43(11):86-89.
Li Q Q, Qin H, Chen G C, et al. Analysis on hydrologic alteration of middle Yangtze River and its impact on fish[J].*Yangtze River*,2012,43(11):86-89(in Chinese).
- [3] 熊明,许全喜,袁晶,等.三峡水库初期运用对长江中下游水文河道情势影响分析[J].*水力发电学报*,2010,29(1):120-125.
Xiong M, Xu Q X, Yuan J, et al. Study of the influences of Three Gorges project's initial operation on river regime of the middle and lower Yangtze River[J].*Journal of Hydroelectric Engineering*,2010,29(1):120-125(in Chinese).
- [4] 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[J].*水力发电学报*,2011,30(3):22-26,38.
Guo W X, Wang H X, Xu J X, et al. Effects of Three Gorges reservoir on the downstream eco-hydrological regimes during the spawning of important fishes[J].*Journal of Hydroelectric Engineering*,2011,30(3):22-26,38(in Chinese).
- [5] 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(增刊2):228-232.
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(supple 2):228-232(in Chinese).
- [6] 黄悦,范北林.三峡工程对中下游四大家鱼产卵环境的影响[J].*人民长江*,2008,39(19):38-41.
Huang Y, Fan B L. Impact of TGP on spawning environment of 4 major Chinese fishes in middle and downstream of the Yangtze River[J].*Yangtze River*,2008,39(19):38-41(in Chinese).
- [7] 李翀,廖文根,陈大庆,等.三峡水库不同运用情景对四大家鱼繁殖水动力学影响[J].*科技导报*,2008,26(17):55-61.
Li C, Liao W G, Chen D Q, et al. Hydrodynamic effect of different regulation scenarios for Three Gorges Reservoir on four major Chinese carps Spawning[J].*Science & Technology Review*,2008,26(17):55-61(in Chinese).
- [8] 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[J].*中国水产科学*,2008,15(4):523-532.
Duan X B, Chen D Q, Li Z H, 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[J].*Journal of Fishery Sciences of China*,2008,15(4):523-532(in Chinese).
- [9] Yin X A, Yang Z F, Petts G E. A new method to assess the flow regime alterations in riverine ecosystems[J].*River Research and Applications*,2015,31(4):497-504.
- [10] Mathews R, Richter B D. Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting[J].*Journal of the American Water Resources Association*,2007,43(6):1400-1413.
- [11] 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[J].*中国水利水电科学研究院学报*,2006,4(3):170-176.
Li C, Peng J, Liao W G. Study on the eco-hydrological

- factors and flow regime requirement on spawning of four major Chinese carps in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2006, 4(3): 170-176(in Chinese).
- [12] 王文君, 谢山, 张晓敏, 等. 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*, 2012, 33(6): 29-34.
- Wang W J, Xie S, Zhang X M, *et al.* Relationship between eco-hydrological factors and spawning activities of fishes with pelagic eggs in the lower reaches of the Minjiang River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(6): 29-34(in Chinese).
- [13] 易伯鲁, 余志堂, 梁秩燊. 长江干流草、青、鲢、鳙四大家鱼产卵场的分布、规模和自然条件[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1988: 1-46.
- Yi B L, Yu Z T, Liang Z S, *et al.* The distribution, natural conditions and breeding production of the spawning grounds of four famous freshwater fishes on the main stream on the Yangtze River[M]//Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1988: 1-46(in Chinese).
- [14] 李翀, 彭静, 廖文根. 河流管理的生态水文目标及其量化分析—以长江中游为例[J]. *中国水利*, 2006(23): 8-10.
- Li C, Peng J, Liao W G. Eco-hydrological target of river management and its quantitative analysis—take the middle reaches of Yangtze River as an example[J]. *China Water Resources*, 2006(23): 8-10(in Chinese).
- [15] 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[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(6): 892-897.
- Wang S Y, Liao W G, Chen D Q, *et al.* Analysis of eco-hydrological characteristics of the four Chinese farmed carps spawning grounds in the middle reach of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(6): 892-897(in Chinese).
- [16] 陈永柏, 廖文根, 彭期冬, 等. 四大家鱼产卵水文水力特性研究综述[J]. *水生态学杂志*, 2009, 2(2): 130-133.
- Chen Y B, Liao W G, Peng Q D, *et al.* A summary of hydrology and hydrodynamics conditions of four Chinese carps' spawning[J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2(2): 130-133(in Chinese).
- [17] 柏海霞, 彭期冬, 李翀, 等. 长江四大家鱼产卵场地形及其自然繁殖水动力条件研究综述[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2014, 12(3): 249-257.
- Bai H X, Peng Q D, Li C, *et al.* A summary of topographical characteristics of the four major Chinese carps' spawning grounds and hydrodynamic conditions for natural propagation in the Yangtze River[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2014, 12(3): 249-257(in Chinese).
- [18] 赵越, 周建中, 许可, 等. 保护四大家鱼产卵的三峡水库生态调度研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(4): 45-50.
- Zhao Y, Zhou J Z, Xu K, *et al.* Ecological operation of Three Gorges Reservoir for protection of four major Chinese carps spawning[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(4): 45-50(in Chinese).
- [19] 徐薇, 刘宏高, 唐会元, 等. 三峡水库生态调度对沙市江段鱼卵和仔鱼的影响[J]. *水生态学杂志*, 2014, 35(2): 1-8.
- Xu W, Liu H G, Tang H Y, *et al.* Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on fish eggs and larvae in Shashi Section of the Yangtze River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2014, 35(2): 1-8(in Chinese).
- [20] 王昌燮. 长江中游“野鱼苗”的种类鉴定[J]. *水生生物学集刊*, 1959(3): 324-341.
- Wang C L. The identification of the species in the "Wild Fry" of the middle waters of the Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1959(3): 324-341(in Chinese).
- [21] 曹文宣, 常剑波, 乔晔, 等. 长江鱼类早期资源[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- Cao W X, Chang J B, Qiao Y, *et al.* Fish resources of early life history stages in Yangtze River[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007(in Chinese).
- [22] 王俊娜, 李翀, 段辛斌, 等. 基于遗传规划法识别影响鱼类丰度的关键环境因子[J]. *水利学报*, 2012, 43(7): 860-868.
- Wang J N, Li C, Duan X B, *et al.* Identification of significant environmental factors affecting fish abundance by genetic programming[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(7): 860-868(in Chinese).
- [23] 沈忱. 长江上游鱼类保护区生态环境需水研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Shen C. Study on ecological and environmental flow for

- the fish reserve in the upper reaches of the Yangtze River[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015(in Chinese).
- [24] 王俊娜. 基于水文过程与生态过程耦合关系的三峡水库多目标优化调度研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011.
- Wang J N. Studies on multi-objective optimal operation of Three Gorges Reservoir based on the coupling relationships between hydrological processes and ecological processes[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011(in Chinese).

Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on larval resources of the four major Chinese carps in Jianli section of the Yangtze River

ZHOU Xue , WANG Ke * , CHEN Daqing , LIU Shaoping ,
DUAN Xinbin , WANG Dengqiang , GAO Lei

(Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430233, China)

Abstract: In order to explore the effect of ecological operation of Three Gorges Reservoir on breeding of the four major Chinese carps in Jianli section of the Yangtze River, and evaluate the quantitative range of ecological hydrology indexes that stimulate spawning behavior of four major Chinese carps, in this study, we investigated the early life resources of the Four Major Chinese Carps in Jianli section of the middle reaches of the Yangtze River, from May to July, 2013—2017. Correlation analysis was made between the Four Major Chinese carps' spawning and larvae collected and the ecological hydrology index. The results show that there is a significantly positive correlation between the daily flow increasing rate and the quantity of fish eggs. When the duration is 4 d and more, and the daily flow increasing rate is from 1 600 to 2 833 [$\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$], ecological operation is more effective to stimulate the reproduction of the Four Major Chinese Carps in late June. Preliminary results indicated, water rising of ecological operation of Three Gorges Reservoir has improved the hydrological conditions for the breeding of four major Chinese carps in Jianli section. The implement of ecological operation not only reduced the negative impact on fish breeding in the midstream of the Yangtze River, but also maintained fish population resources after the operation of the Three Gorges Reservoir.

Key words: the four major Chinese carps; larval resources; ecological hydrology index; ecological operation; Three Gorges Reservoir

Corresponding author: WANG Ke. E-mail: wangke@yfi.ac.cn

Funding projects: Fundamental Research Funds of Chinese Academy of Fishery Sciences (2017HY-ZD0101); National Natural Science Foundation of China (51579247); National Key R and D Program of China (2018YFD0900901, 2018YFD0900902, 2018YFD0900903)