

李朝达, 林俊强, 夏继红, 等. 三峡水库运行以来四大家鱼产卵的生态水文响应变化 [J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(5): 158-166.

LI Chaoda, LIN Junqiang, XIA Jihong, et al. Ecohydrological response changes in the spawning behaviors of the four major Chinese carps since the operation of the Three Gorges Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(5): 158-166.

三峡水库运行以来四大家鱼产卵的生态水文响应变化

李朝达¹, 林俊强², 夏继红¹, 俞立雄³, 彭期冬², 段辛斌³

(1. 河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 3. 中国水产科学研究院 长江水产研究所, 湖北 武汉 430223)

摘要: 水库对径流的调蓄作用, 改变了天然河流的水文情势, 从而破坏了鱼类原有的生长繁殖条件和对环境的正常行为响应。2011 年以来, 三峡水库在四大家鱼繁殖期采取了积极的生态调度运行方式以减缓这一不利生态影响。为分析三峡水库运行以来四大家鱼产卵的生态水文响应变化, 本研究应用 Weber-Fechner 生物感知定律, 新提出了鱼类感觉日流量涨幅和鱼类感觉累积流量涨幅两个生态水文指标, 并借鉴前人提出的有效反映四大家鱼产卵响应的指标, 利用 2013—2019 年多年水文、生物监测成果分析了鱼类产卵与当前水文过程的响应特性。结果表明: (1) 当前刺激家鱼产卵的涨水关键生态水文指标为鱼类感觉日流量涨幅、鱼类感觉累积流量涨幅、流量日增长和流量总增长; (2) 涨水过程中有效刺激家鱼产卵达全年产卵规模 25% 以上的生态水文指标阈值为鱼类感觉日流量涨幅 8.37%~36.05%、鱼类感觉累积流量涨幅 58.58%~180.23%、流量日增长 1 295~2 825 m³/s、流量总增长 7 500~12 670 m³/s; (3) 总体上三峡水库生态调度对四大家鱼产卵具有较好的促进作用。

关键词: 三峡水库; 四大家鱼; 生态调度; 生态水文响应

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.05.017

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV 211.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)05-0158-09



听语音
聊科研
与作者互动

Ecohydrological response changes in the spawning behaviors of the four major Chinese carps species since the operation of the Three Gorges Reservoir

LI Chaoda¹, LIN Junqiang², XIA Jihong¹, YU Lixiong³, PENG Qidong², DUAN Xinbin³

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Yangtze River Fisheries Research Institute, China Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, Hubei, China)

Abstract: Reservoir operations change the hydrological natural rivers regime, thereby destroying the original reproduction

收稿日期: 2020-08-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE01960000, 2018YFD0900805, 2018YFE0128500); 流域水循环模拟与调节国家重点实验室的自主研究项目(SKL2020ZY10)

作者简介: 李朝达(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态水力学方面研究。E-mail: lichao1995@hhu.edu.cn. <http://www.cnki.net>

通信作者: 林俊强(1984—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水生态与水环境研究。E-mail: junqiang-lin@hotmail.com

conditions and the normal behavioral response to the environment of fish. The Three Gorges Reservoir (TGR) has taken an active ecological operation to reduce the adverse ecological impact during the breeding season of the four major Chinese carps (FMCC) . To analyze the changes of ecohydrological response of the FMCC spawning since the operation of the TGR, this paper proposed two new ecohydrological indicators by applying the Weber-Fechner biological perception law ,the daily increasing discharge in fish perception and the cumulative increasing discharge in fish perception. Coupled with the indicators proposed by previous studies , this paper quantitatively analyzed the response of fish spawning and the hydrologic characteristics of the increasing discharge process using hydrological and biological surveying data from 2013 to 2019. Results show: (1) the key ecohydrological indicators of the FMCC spawning during the increasing discharge process are the daily increasing discharge in fish perception ,the cumulative increasing discharge in fish perception ,the average daily increasing discharge and the total increasing discharge; (2) when the FMCC spawning amounts exceed 25% of the spawning scale in the whole year ,the ecohydrological indicator thresholds are obtained ,the daily increasing discharge in fish perception is 8. 37% ~ 36. 05% ,the cumulative increasing discharge in fish perception is 58. 58% ~ 180. 23% ,the average daily increasing discharge is 1 295 ~ 2 825 m³ /s and the total increasing discharge is 7 500 ~ 12 670 m³ /s. (3) the ecological operation of the TGR has a good effect on the spawning of the FMCC.

Keywords: The Three Gorges Reservoir; the four major Chinese carps; ecological operation; ecohydrological response

0 引言

青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)、鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙 (*Aristichthys nobilis*) 合称四大家鱼,是中国重要的淡水经济鱼类^[1]。长江宜昌至城陵矶江段是四大家鱼最主要的繁殖栖息地,历史上繁殖规模占长江干流家鱼繁殖规模的 42.7%^[2]。2003 年三峡水库蓄水以来,受水库调度影响,宜昌及其下游水文情势与天然情况相比,发生了较为显著变化^[3-4]。例如,长江进入主汛期(7月中旬)前,三峡水库对中小洪水的调度削弱了天然洪峰过程,四大家鱼产卵繁殖所需的水文刺激减弱^[5-7],导致三峡水库运行初期长江四大家鱼资源量持续下降,2009 年监利卵苗发生量达到谷值,仅为 0.42 亿尾^[8],相比 20 世纪 60 年代监利卵苗量的 403 亿尾^[9],产卵规模萎缩严重,长江四大家鱼种质安全受到严重威胁。

为了降低四大家鱼繁殖期洪峰过程减弱的影响,三峡水库将生态因子纳入传统水库调度中,自 2011 年起,每年实施生态调度试验,为促进长江中游四大家鱼资源恢复迈出了重要一步^[10]。天然条件下四大家鱼产卵的生态水文特性研究是水库制定生态调度方案的理论基础,国内外学者在 20 世纪 90 年代至本世纪初期开展了诸多相关研究。ZHANG 等^[11]采用系统重构分析方法对影响四大家鱼产卵的生态水文指标进行了分析,认为适度的初始水位、初始流量、较大的流量日增长率、较高的水位日增长率及较长的时间水位上涨同四大家鱼的产卵行为密切相关。王俊娜等^[12]通过采用遗传规划法识别出涨水持续时间和日均涨水率为影响家鱼产卵和鱼苗丰度的关键环境因

子。李建等^[13]将水力学模型和栖息地模型结合,通过物理栖息地模拟计算得到了四大家鱼产卵期的适宜生态流量。赵越等^[14]将生态流组法应用于四大家鱼产卵期的生态水文事件分析中,推求得到了满足四大家鱼产卵需求的流量过程。

近年来,三峡水库运行方式日趋完善,每年针对四大家鱼开展的促进其繁殖的生态调度试验也成为常态。然而,三峡水库调控下,家鱼行为与水文情势之间如何响应,响应特性与天然情况相比有何变化,刺激产卵的关键水文指标是否不同,这是当前三峡水库生态调度实践中面临的一连串新问题,也是未来生态调度适应性管理与优化调整的前提基础。基于上述问题,本文以长江中游规模最大、对三峡生态调度响应最为强烈的宜昌—宜都产卵场为研究区域,对 2013—2019 年多年水文、生物监测成果进行系统分析,深入探讨鱼类产卵与当前水文过程的响应特性,以期揭示三峡水库正常运行以来四大家鱼产卵的生态水文响应变化。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

四大家鱼产卵场主要分布于长江中游江段,据历史调查显示,长江中游产卵场的产卵规模占长江总产卵量的 70.4% 以上^[2]。目前长江中游分布有宜昌—宜都产卵场、枝城产卵场、沙市产卵场、监利产卵场等,其中宜昌—宜都产卵场为当前长江中游规模最大的产卵场,位于葛洲坝下游约 20 公里,在三峡水库下游约 60 公里,是葛洲坝—三峡梯级电站下游最近的产卵场,受生态调度影响最为直接(见图 1)。历史上对四大家鱼产卵场的空间位置进行了多次调查,结

果表明, 宜昌一宜都江段一直都是较为稳定且规模较大的产卵场^[15-16], 其地形包括弯道、沙洲、顺直河道等家鱼喜好地形, 该江段的水文特性, 以及与地形相互作用形成的水动力特性均具有一定的代表性。

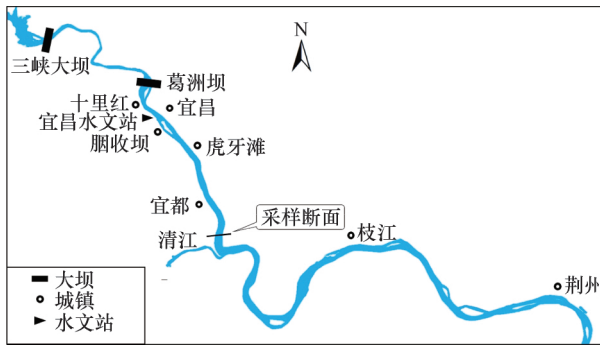


图 1 研究区域及采样断面位置

Fig. 1 Location of the study area and sampling section

1.2 采样方法

为了监测该江段四大家鱼早期资源、评估三峡生态调度效果, 中国水利水电科学研究院与中国水产科学院长江水产研究所自 2013 年以来, 每年在四大家鱼繁殖期, 尤其是三峡生态调度期间, 在宜昌一宜都产卵场进行生态水文、水动力要素与早期资源的联合监测。监测断面设置于长江中游宜昌市宜都县 (30°17'48.06"N、111°36'40.04E, 见图 1), 在断面的两岸和江中分别设置 3 个鱼卵采集点, 每个采集点在江水表层、中层和底层通过圆锥网收集鱼卵, 每次采集时间为 10 min, 同时记录透明度、溶氧、水温等参数。卵苗高峰期进行昼夜采集, 间隔 2 h 采样 1 次。鱼卵采集后, 对其进行发育时期鉴定, 随后用 95% 的乙醇进行固定和保存, 送回实验室对其种类进行鉴定^[17]。

本研究进行的生态水文分析是基于宜昌水文站的日流量序列数据, 数据来源于湖北省水文水资源局 (<http://sw.hubeiwater.gov.cn/>)。生态调度时期根据长江三峡集团有限公司发布的生态调度公告和长江防总发布的生态调度调度令确定。产卵规模的计算参照易伯鲁等^[2]的调查计算方法。

1.3 生态水文指标的选择

天然河流的水文情势, 带有周期性的流量、水位、脉冲频率、发生时机、持续时间和变化率等要素信息, 对河流生态系统与鱼类自然繁衍具有重要意义^[18]。国内外诸多学者从这些富有生态学意义的水文要素出发, 研究了天然条件下四大家鱼产卵的生态水文特性。研究表明, 洪水脉冲初始流量、流量日增长量、涨水持续时间、洪峰流量、流量总增长量这几

个生态水文指标与四大家鱼产卵行为密切相关^[5, 12, 14, 19]。因此, 本文也选择这几个指标进行三峡水库正常运行以来四大家鱼产卵的生态水文响应分析。其中, 洪水脉冲初始流量 (Q_{min}) 为某次洪水脉冲过程中开始涨水的流量; 洪峰流量 (Q_{max}) 为某次洪水脉冲过程中洪峰水位对应的流量; 涨水持续时间 (T_{dur}) 为某次洪水脉冲过程中从开始涨水到洪峰流量的天数; 流量日增长量 (Q_{av}) 为某次洪水脉冲过程中 (洪峰流量-洪水脉冲初始流量) / 涨水持续时间; 流量总增长量 (Q_t) 为某次洪水脉冲过程中洪峰流量与洪水脉冲初始流量之差。在三峡水库每年生态调度的实际方案中, 是以洪水脉冲初始流量来选择开展生态调度的时机, 以流量日增长量、涨水持续时间来控制人造洪水脉冲过程的泄放。

此外, 从生物生理学角度, 很多生物行为对外界环境变量的感知遵循 Weber-Fechner 定律^[21]。该定律认为, 在中等强度的物理刺激下 (不超过生物正常生理范围), 生物能够感觉到物理量的变化与原物理量的大小有关, 且呈一定规律性, 可表示为

$$\frac{\Delta I}{I} = W_c \quad (1)$$

式中, ΔI 为当前物理量增量; I 为原物理量; W_c 为 Weber 率, 表示感觉到的刺激量。

在生物响应判别上, 只有在当前物理刺激强度与生物之前的背景物理强度之差 ΔI 超过了最小可觉差时, 生物才能够感觉到刺激, 当感觉刺激量超过某个阈值, 生物才能作出行为响应^[22-23]。

GOODWIN 等^[24]将 Weber-Fechner 定律应用于研究鱼类对水力特征量的感受方式, 提出在当前特征量强度与鱼类已适应的刺激强度存在差别是鱼类感受到刺激的前提, 但只有当这个差别超过了一定阈值, 鱼类才能察觉到特征量的变化, 进而对环境变化做出响应, 例如根据流速大小选择游泳路径等。产卵行为同属于鱼类的生理响应行为, 为了探究鱼类产卵行为与洪水脉冲刺激的关联性, 本文根据 Weber-Fechner 定律, 定义了 2 个描述鱼类感觉刺激与累积感觉刺激的水文指标, 分别为鱼类感觉日流量涨幅 P_{da} 和鱼类感觉累积流量涨幅 P_{cu} , 指标具体计算公式如下

$$P_{da} = \frac{Q_{av}}{Q_{min}} \quad (2)$$

$$P_{cu} = \frac{Q_t}{Q_{min}} \quad (3)$$

式中, Q_{av} 为流量日增长量 (m^3/s); Q_{min} 为洪水脉冲初始流量 (m^3/s); Q_t 为涨水过程中流量总增长量

表 1 四大家鱼产卵与三峡水库生态调度下水文响应分析的生态水文指标

Table 1 Ecohydrological indicators that potentially affect FMCC spawning

水文指标	洪水脉冲初始流量	洪峰流量	涨水持续时间	流量日增长	流量总增长	鱼类感觉日流量涨幅	鱼类感觉累积流量涨幅
变量名	Q_{\min}	Q_{\max}	T_{dur}	Q_{av}	Q_t	P_{da}	P_{cu}
单位	m^3/s	m^3/s	d	m^3/s	m^3/s	%	%

(m^3/s)。

本文进行四大家鱼产卵行为与三峡水库调度环境下水文响应分析的生态水文指标如表 1 所列。

1.4 相关性分析方法

本文采用 Pearson 相关性分析来探究鱼类产卵对涨水过程生态水文指标的响应。Pearson 相关系数取值范围为(-1, 1), 系数为正值表明两个变量为正相关关系, 系数为负值表明两个变量为负相关关系, 绝对值越大表明相关性越强。通常情况下根据 Pearson 相关系数绝对值的取值范围判断变量的相关强度: 相关系数绝对值为 0.8~1.0 可认为两变量极显著相关; 相关系数绝对值为 0.6~0.8 可认为两变量显著相关; 相关系数绝对值为 0.4~0.6 可认为两变量中等程度相关; 相关系数绝对值为 0.2~0.4 可认为两变量弱相关; 相关系数绝对值为 0.0~0.2 可认为两变量极弱相关或无相关。

2 结果与讨论

2.1 近年来四大家鱼产卵规模年际变化

根据长江水产研究所的早期资源调查数据, 2013—2019 年(除 2016 年)监测期间, 三峡水库下游的宜昌—宜都产卵场四大家鱼的产卵规模呈逐年上升趋势(见图 2), 年增长率为 4.98%~322.28%。其中, 2019 年产卵量为 43.436 亿粒, 较 2018 年增长了 322.28%, 创下近年新高。这表明经过多年三峡水库生态调度实践, 四大家鱼家鱼资源量出现大幅

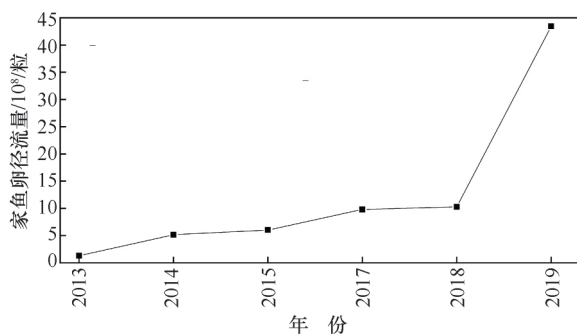


图 2 2013—2019 年(除 2016 年)监测期间宜昌—宜都四大家鱼产卵规模

Fig. 2 Spawning amount of the FMCC in the Yichang-Yidu spawning ground during 2013-2019 (except 2016)

度的恢复, 同时也与近年来实施了延长禁渔期、四大家鱼亲本增殖放流等综合性保护措施有关。

2.2 四大家鱼产卵对涨水生态水文指标的响应分析

三峡水库正常运行后, 四大家鱼在涨水过程中发生产卵响应的频次最为密集、响应的规模也最大^[11]。为了进一步分析三峡水库运行, 尤其是近年来在家鱼繁殖期采取的生态调度泄放方式下, 家鱼产卵行为对涨水生态水文指标的响应特性是否变化, 本文将具有有效产卵规模的涨水过程(该涨水过程累积刺激了家鱼产卵占全年产卵规模 20% 以上)逐日流量数据与标准化后的产卵响应数据摘取出来, 应用上文选择的生态水文指标, 计算和量化这些涨水过程的特征指标, 并分析涨水特征指标与涨水过程中家鱼累积产卵量的响应关系。

表 2 列出了 2013—2019 年(除 2016 年)监测期间, 有效刺激家鱼产卵的涨水过程相应的生态水文指标与逐次涨水过程对应的家鱼累积产卵规模数据。2013—2019 年(除 2016 年), 宜都断面共监测到 12 次家鱼有效产卵的高峰过程, 每次产卵高峰的家鱼产卵规模占全年该产卵场产卵规模的 20.61%~50.00%。依据建立的生态水文指标体系, 统计 2013—2019 年(除 2016 年)这 12 次涨水过程促成四大家鱼繁殖的生态水文指标(见表 2)。结果表明, 涨水持续时间为 4~8 d, 初始流量为 7 030~18 500 m^3/s , 洪峰流量为 18 370~27 100 m^3/s , 流量日增长为 703~2 825 m^3/s , 流量总增长为 2 810~12 670 m^3/s , 鱼类感觉日流量涨幅为 4.51%~36.05%, 鱼类感觉累积流量涨幅为 18.80%~181.22%。其中, 单次产卵高峰规模超过全年规模 25% 对应的涨水过程, 涨水持续时间为 4~7 d, 初始流量为 7 030~16 200 m^3/s , 洪峰流量为 18 900~26 850 m^3/s , 流量日增长为 1 295~2 825 m^3/s , 流量总增长为 7 500~12 670 m^3/s , 鱼类感觉日流量涨幅为 8.37%~36.05%, 鱼类感觉累积流量涨幅为 58.58%~180.23%。

计算分析历次涨水的各生态水文指标与涨水引起的鱼卵高峰期产卵规模(标准化后)的相关性(见表 3)。结果表明, 流量日增长、流量总增长、鱼类感觉日流量涨幅和鱼类感觉累积流量涨幅这 4 个指标

表2 生态水文指标与家鱼产卵响应数据

Table 2 Ecohydrological data and FMCC spawning scale during the effective spawning period

年份	时间	T_{dur}/d	$Q_{min}/m^3 \cdot s^{-1}$	$Q_{max}/m^3 \cdot s^{-1}$	$Q_{av}/m^3 \cdot s^{-1}$	$Q_t/m^3 \cdot s^{-1}$	$P_{da}/\%$	$P_{cu}/\%$	产卵量/ $\times 10^8$ 粒	卵量年内占比/ $\%$
2013	6.22~6.25	4	10 400	21 700	2 825	11 300	27.16	108.65	0.655	50.00
2014	6.30~6.70	5	11 400	18 900	1 500	7 500	13.16	65.79	1.304	25.27
	7.10~7.40	4	18 500	27 100	2 150	8 600	11.62	46.49	1.237	23.97
2015	6.70~6.11	5	7 030	19 700	2 534	12 670	36.05	180.23	2.408	39.98
	6.22~6.27	6	16 200	26 850	1 775	10 650	10.96	65.74	1.540	25.56
2017	6.50~6.10	6	12 080	19 850	1 295	7 770	10.72	64.32	3.340	34.09
	6.16~6.19	4	16 810	23 920	1 778	7 110	10.57	42.30	2.337	23.85
	6.25~6.29	5	19 740	27 020	1 456	7 280	7.38	36.88	2.142	21.86
2018	5.19~5.25	7	15 960	25 310	1 336	9 350	8.37	58.58	3.574	34.75
	6.18~6.25	8	11 780	19 650	984	7 870	8.35	66.81	2.120	20.61
2019	5.28~6.10	5	16 550	20 280	746	3 730	4.51	22.54	10.074	23.19
	6.10~6.13	4	14 950	17 760	703	2 810	4.70	18.80	9.397	21.63

表3 宜昌江段生态水文指标与涨水期产卵规模的相关性

Table 3 Correlation between ecohydrological indicators and spawning scale of Yichang spawning ground

生态水文指标	涨水持续时间	洪水脉冲初始流量	洪峰流量	流量日增长	流量总增长	鱼类感觉日流量涨幅	鱼类感觉累积流量涨幅
Pearson 相关系数	-0.114	-0.614*	-0.109	0.705*	0.673*	0.778**	0.718**

注: *表示在0.05水平上显著相关,**表示在0.01水平上显著相关

与四大家鱼产卵规模显著呈正相关关系, Pearson 相关系数分别为 0.705、0.673、0.77 和 0.718; 洪水脉冲初始流量与四大家鱼产卵规模呈显著负相关关系, Pearson 相关系数为-0.614; 涨水持续时间和洪峰流量这 2 个指标与四大家鱼产卵规模没有显著相关性关系, Pearson 相关系数分别为-0.114 和-0.109。其中, 洪水脉冲初始流量、流量日增长和流量总增长这 3 个指标与四大家鱼产卵规模在 0.05 水平上显著相关, 鱼类感觉日流量涨幅和鱼类感觉累积流量涨幅这 2 个指标与四大家鱼产卵规模在 0.01 水平上显著相关。

上述结果表明, 当前三峡水库正常运行以来, 刺激家鱼产卵的关键生态水文指标为鱼类感觉日流量涨幅、鱼类感觉累积流量涨幅、流量日增长、流量总增长和洪水脉冲初始流量。值得注意的是, 流量日增长和流量总增长指标反映的是涨水过程中流量的物理量变化, 而鱼类感觉日流量涨幅和鱼类感觉累积流量涨幅反映的是鱼类对流量的感知变化。根据 Weber-Fechner 定律, 只有当涨水过程中流量变化量与鱼类已经适应了的刺激强度之间的差别越大, 鱼类对其刺激的感知越强, 从而触发产卵行为。从上述结果可以看出, 鱼类产卵行为对流量日变化的感知最为敏感、其次是对流量累积变化的感知。

历史文献表明, 三峡水库蓄水前, 较长的涨水持续时间^[12]、洪峰流量^[2], 与四大家鱼产卵行为密切

相关。而三峡水库正常运行以来, 根据本文 Pearson 相关性分析结果显示, 涨水持续时间和洪峰流量这 2 个指标与四大家鱼产卵规模已失去了显著相关性(见表 3)。这反映了两个方面的潜在变化。一是家鱼产卵繁殖所需的水文条件已成为受控条件, 三峡水库具有较大的水文调节能力, 在家鱼繁殖季节的 5—6 月, 长江主汛期来临之前, 洪峰流量等指标受中小洪水调度影响, 已经失去天然特性, 更多地可能受电网调峰影响。另一方面, 随着三峡水库运行调度方式的日益成熟, 尤其是在家鱼繁殖季节采取的持续多日的人造洪峰生态调度, 涨水持续时间等指标已不成为家鱼产卵繁殖的限制因素。当前三峡水库运行方式下, 四大家鱼产卵对水文刺激的响应, 更多地表现为对流量日变化和流量累积变化的感知上。

根据本节分析的四大家鱼产卵与生态水文指标的响应关系, 结合历年来涨水过程对应的家鱼产卵量占比数据(见表 2), 认为家鱼产卵规模占全年产卵规模 25% 以上的涨水过程是有效刺激家鱼产卵的水文过程, 并以此统计这些涨水过程的关键生态水文指标范围, 作为刺激家鱼产卵的关键水文指标阈值的参考。经统计, 这些关键水文指标的参考阈值分别为: 鱼类感觉日流量涨幅 8.37%~36.05%, 鱼类感觉累积流量涨幅 58.58%~180.23%, 流量日增长 1 295~2 825 m^3/s , 流量总增长 7 500~12 670 m^3/s , 洪水脉冲初始流量 7 030~16 200 m^3/s 。

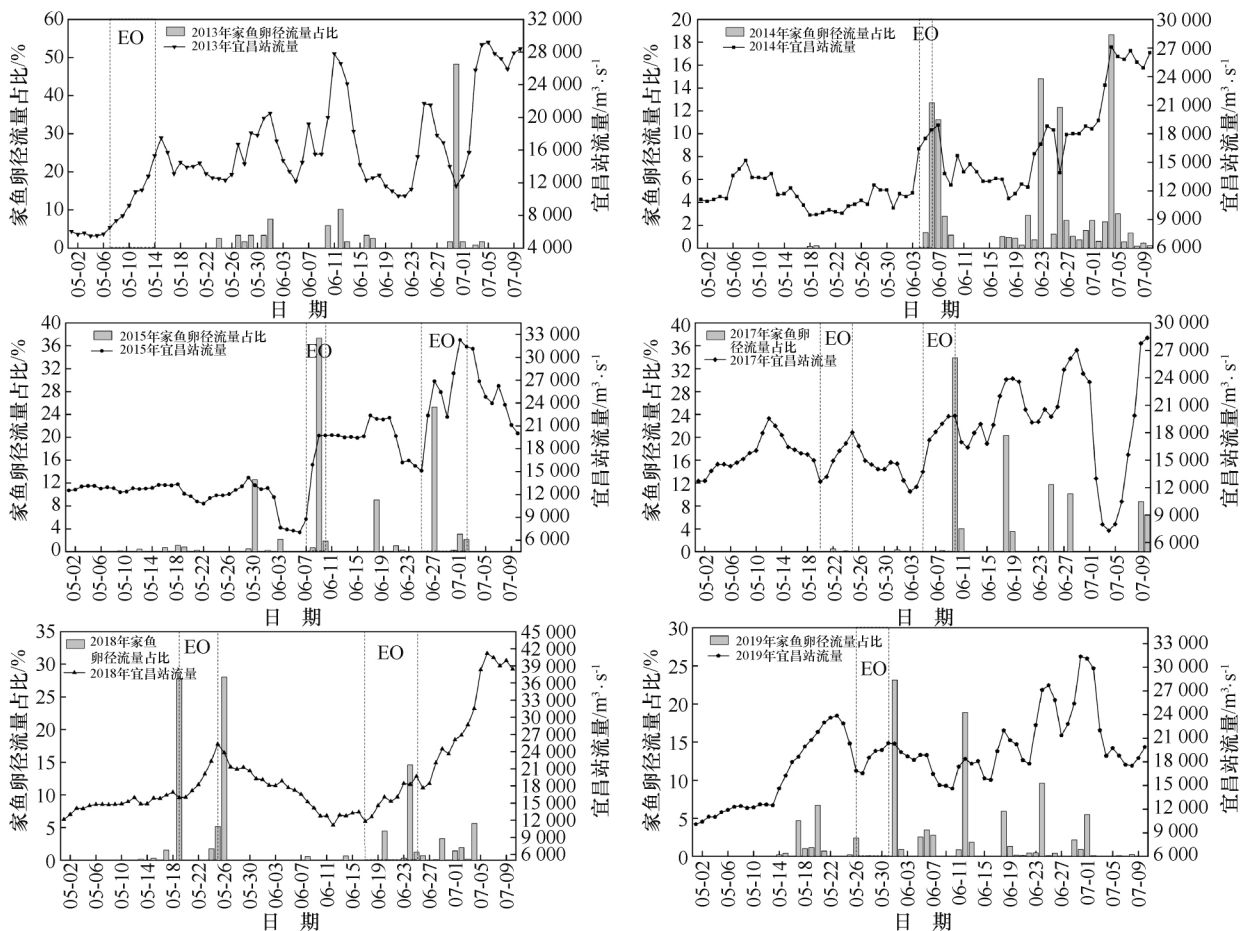
2.3 三峡生态调度对四大家鱼产卵的刺激作用

2011年以来, 三峡水库于每年5—6月份开展刺激四大家鱼产卵的生态调度试验, 2013—2019年共进行了9次生态调度, 持续时间为3~9 d(见表4)。为了进一步分析三峡水库生态调度所营造的人造洪水过程对四大家鱼产卵的刺激作用, 本文在监测时期宜昌流量与家鱼产卵响应关系图中, 将生态调度时期单独标识出来, 如图3所示。从图3中相应的数据可以看出, 三峡水库生态调度的效果有好有坏, 并非每次都能达到较好刺激家鱼产卵的效果。例如, 三峡水库2013年、2017年第1次的生态调度没有引起家鱼产卵高峰; 2014年的生态调度, 引起了当年第1次产卵高峰, 产卵规模占全年产卵量的比例为25.27%; 2015年的两次生态调度, 分别引起了当年第2次和第3次产卵高峰, 两次产卵规模占全年产卵量的比例分别为39.98%、25.56%; 2017年第2次的生态调

度, 引起当年第1次产卵高峰, 产卵规模占全年产卵量的比例为34.09%; 2018年的两次生态调度, 引起了当年第2次和第3次产卵高峰, 产卵规模占全年产卵量的比例分别为34.75%、20.61%; 2019年的生态调度, 引起了当年第1次产卵高峰, 产卵规模占全年产卵量的比例为23.19%。

表4 三峡水库2013—2019年生态调度时间

年份	次数	时间	持续时间/d
2013	第1次	5月7日—5月14日	8
2014	第1次	6月4日—6月6日	3
2015	第1次	6月7日—6月10日	4
	第2次	6月25日—7月2日	8
2016	第1次	6月8日—6月12日	5
2017	第1次	5月20日—5月25日	6
	第2次	6月5日—6月10日	6
2018	第1次	5月19日—5月25日	7
	第2次	6月17日—6月25日	9
2019	第1次	5月25日—5月31日	7



注: EO代表生态调度期间, 其余为非生态调度期间

Note: EO refers to the ecological operation period; the rest of the time is the nonecological operation period.

图3 2013—2019年(除2016年)监测时段宜昌流量与家鱼产卵量响应关系

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
Fig. 3 Spawning scale of the FMCC and flow at the Yichang gauge station during 2013—2019 (except 2016)

可见,除2013年和2017年第1次的生态调度未有家鱼产卵高峰出现外,其余的生态调度均引起了家鱼产卵的积极响应,生态调度期间产卵规模占全年产卵规模的比例高达23.19%~65.3%,这表明生态调度所营造的人造洪水过程对四大家鱼的产卵繁殖具有很好的促进作用。

根据2.2节总结得出的关键生态水文指标阈值区间,分析2013和2017年未能出现产卵高峰的两次生态调度。结果表明,2017年第一次生态调度期间,宜昌江段的鱼类感觉日流量涨幅为7.09%,鱼类感觉累积流量涨幅为42.53%,流量日增长为897 m³/s,流量总增长为5380 m³/s,洪水脉冲初始流量12650 m³/s,5个关键指标中有4个不在上述有效刺激家鱼产卵的指标阈值区间内。2013年生态调度期间,宜昌江段的鱼类感觉日流量涨幅为16.79%,鱼类感觉累积流量涨幅为134.30%,流量日增长为1096 m³/s,流量总增长为8770 m³/s,洪水脉冲初始流量6530 m³/s,5个关键指标中有2个不在上述指标阈值区间内。因此,未来制定三峡生态调度方案时,可积极参考文本分析得出的关键水文指标及其阈值区间。

3 结论与展望

生态调度是减缓水库不利生态影响的重要手段。2011年以来,三峡水库每年开展促进四大家鱼自然繁殖的生态调度试验,至今已进行了16场次。观测结果显示,生态调度有的场次效果好,有的场次甚至未出现家鱼产卵响应。可见,人工干预的生态调度措施,难以一步到位达到预期生态修复效果,需要通过适应性管理,在实践中不断优化调整,才能持续改善河流生态系统。而适应性管理的关键,在于解析当前三峡水库正常运行以来四大家鱼产卵的生态水文响应特性。本文紧密围绕这一科学问题,通过近6年来(2013—2019年,除2016年)对三峡水库下游四大家鱼产卵场的多年水文、生物数据的跟踪监测与系统分析,借鉴前人提出的较好反映四大家鱼产卵响应的生态水文指标,并应用Weber-Fechner生物感知定律,新提出了鱼类感觉日流量涨幅和鱼类感觉累积流量涨幅这两个指标,应用这些指标分析了鱼类产卵与当前水文过程的响应特性。

结果表明:(1)三峡正常运行以来,鱼类感觉日流量涨幅、鱼类感觉累积流量涨幅、流量日增长、流量总增长这4个指标与四大家鱼产卵规模呈显著正相关关系,洪水脉冲初始流量与四大家鱼产卵规模呈显著负相关关系,涨水持续时间和洪峰流量这2个指标

与四大家鱼产卵规模已失去相关性;(2)当前刺激家鱼产卵的关键生态水文指标为鱼类感觉日流量涨幅、流量日增长、鱼类感觉累积流量涨幅、流量总增长,有效刺激家鱼产卵(家鱼产卵规模占全年产卵规模25%以上)的指标阈值范围分别为鱼类感觉日流量涨幅8.37%~36.05%、鱼类感觉累积流量涨幅58.58%~180.23%、流量日增长1295~2825 m³/s、流量总增长7500~12670 m³/s;(3)总体上三峡水库生态调度对四大家鱼产卵具有较好的促进作用,除2013第1次和2017年第1次三峡水库生态调度未有家鱼产卵高峰出现外,其余各年份各场次生态调度均有家鱼产卵高峰与之响应,没有刺激效果的几个场次,多个涨水生态水文指标不落在上述阈值范围内。

本文从家鱼产卵繁殖期的各涨水过程入手,应用多个生态水文指标量化涨水过程,并分析各指标与产卵规模的相关关系,揭示了更为细节的家鱼产卵的涨水生态水文响应特性和指标阈值。在此基础上,将焦点进一步聚焦到由三峡水库调度引起的人造涨水过程,分析了三峡水库生态调度的效果,并提出了未来制定生态调度方案时可供参考的指标阈值建议。论文层层深入,为三峡水库生态调度的适应性管理提供了理论支撑。然而在我们多年研究过程中,发现水文过程仅仅是刺激家鱼产卵的一个驱动条件,在同一水文过程中,家鱼并非在所有江段都能感受到刺激而触发产卵。换言之,涨水过程中产卵场形成的局部水动力环境必然存在特殊性。而水库调控下的水文情势、产卵场水动力环境与鱼类行为三者的驱动响应机制还未真正明晰。本文研究仅仅是这三者关系中的其中一环。未来研究中,希望进一步开展水库调控下的水文情势、产卵场水动力环境与鱼类行为三者之间的驱动响应与互馈关系研究,并建立具有机理意义的刺激鱼类产卵响应的水库水量调节机制,服务于三峡水库、乃至世界其他大型水库生态调度的优化调整。

参考文献(References):

- [1] 长江水系渔业资源调查协作组. 长江水系渔业资源[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
Yangtze River Fishery Resources Investigation Cooperation Group. Fishery resources in the Yangtze River System[M]. Beijing: China Ocean Press, 1990.
- [2] 易伯鲁, 余志堂, 梁秩燊, 等. 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.
Yi Bolu, Yu Zhizhang, Liang Zhishen et al. The distribution scale and natural conditions of the spawning grounds of the four major

- Chinese carps in the mainstream of the Yangtze River[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1988.
- [3] 长江水利委员会. 三峡工程生态环境影响研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.
Changjiang Water Resources Commission. Research on the Ecological Environment Impact of the Three Gorges Project[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997.
- [4] 熊明, 许全喜, 袁晶, 等. 三峡水库初期运用对长江中下游水道情势影响分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 120-125.
XIONG Ming, XU Quanxi, YUAN Jing, 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.
- [5] 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 Wenxian, WANG Hongxiang, XU Jianxin, 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.
- [6] 李建, 夏自强, 戴会超, 等. 三峡初期蓄水对典型鱼类栖息地适宜性的影响[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 892-900.
LI Jian, XIA Ziqiang, DAI Huichao, et al. Effect of the Three Gorges Reservoir initial filling on downstream habitat suitability of the typical fishes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 892-900.
- [7] XIN G, YU Z, WANG J W, et al. Immediate impacts of the second impoundment on fish communities in the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Biology of Fishes, 2010, 87(2): 163-173.
- [8] 长江渔业资源管理委员会办公室. 长江三峡工程生态与环境监测系统渔业资源与环境监测重点站技术报告(2007—2009) [R]. 2009.
Yangtze River Fishery Resources Management Committee. Technical report on key stations of fishery resources and environment monitoring system of the Three Gorges Project (2007-2009) [R]. 2009.
- [9] 长江四大家鱼产卵场调查队. 葛洲坝水利枢纽工程截流后的长江四大家鱼产卵场调查[J]. 水产学报, 1982(4): 287-305.
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(4): 287-305.
- [10] LI Q F, YU M X, ZHAO J H, et al. Impact of the Three Gorges reservoir operation on downstream ecological water requirements [J]. Hydrology Research, 2012, 43(1-2): 173-80.
- [11] ZHANG C H, CHANG J B, SHU C F. Application of factor-criteria system reconstruction analysis in the reproduction research on grass carp, silver carp and bighead in the Yangtze River [J]. International Journal of General Systems, 2000, 29(3): 419-428.
- [12] 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 Junna, LI Chong, DUAN Xinbin, et al. Identification of significant environmental factors affecting fish abundance by genetic programming [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(7): 860-868.
- [13] 李建, 夏自强. 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 678-684.
LI Jian, XIA Ziqiang. Study on instream ecological flow of the middle Yangtze River based on physical habitat simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 678-684.
- [14] 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 Yue, ZHOU Jianzhong, XU Ke, 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.
- [15] 国家水产总局长江水产研究所. 长江家鱼产卵场调查技术参考资料[R]. 武汉: 国家水产总局长江水产研究所, 1981.
Reference materials for investigation of spawning grounds of domestic fishes in the Yangtze River [R]. Wuhan: Yangtze River Fisheries Research Institute, 1981.
- [16] 谭红武. 长江中游四大家鱼产卵场物理栖息地分析研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2010.
TAN Hongwu. Study on the physical habitat of the spawning grounds of four major Chinese carps in the middle Yangtze River [D]. Beijing: Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010.
- [17] 王昌燮. 长江中游“野鱼苗”的种类鉴定[J]. 水生生物学报, 1959(3): 315-343.
WANG Changxie. The identification of the species in the "wild fry" of the middle waters of the Yangtze River [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1959(3): 315-343.
- [18] 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 Wenxuan, CHANG Jianbo, QIAO Ye, et al. Early fish resources in the Yangtze River [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2007.
- [19] POFF L R, ALLAN J D, BAIN M B, et al. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration [J]. Bioence, 1997, 47(11): .
- [20] YANG Y C, CAI X M, HERRICKS E E. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance: A data mining approach for fish community analysis [J]. Water Resources Research, 2008, 44(4): 472-479.

- [21] DRÖSLER J. An n-dimensional Weber Law and the Corresponding Fechner Law [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2000, 44(2) : 330-335.
- [22] BEE M A , VÉLEZ A , FORESTER J D. Sound level discrimination by gray treefrogs in the presence and absence of chorus-shaped noise [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(5) : 4188.
- [23] SEBASTIAN S , ABRAMS J , GEISLER W S. Measuring the Laws of Natural Vision by Constrained Natural Scene Sampling [J]. *Journal of Vision*, 2014, 14(10) : 647-647.
- [24] ANDREW G R , NESTLER J M , ANDERSON J J. Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM) [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 192 (1-2) : 197-223.
- [25] ANDREW G R , ANDERSON J J , NESTLER J M. Decoding 3-D movement patterns of fish in response to hydrodynamics and water quality for forecast simulation [J]. *Hydroinformatics*, 2004(78) : 255-268.

(责任编辑 郭利娜)