

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.006

三峡水库出库流量变化对洞庭湖定居性 鱼类产卵生境的影响

戴凌全^{1,2}, 张培培³, 常曼琪¹, 陈磊¹, 李 翀¹, 戴会超¹, 毛劲乔³

(1. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 北京 100038;
2. 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443100;
3. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为分析三峡水库消落期不同出库流量与洞庭湖定居性鱼类产卵生境加权可利用面积之间的关系, 选取水深和流速作为定居性鱼类产卵生境的关键影响因子, 建立生境适宜性曲线, 基于物理栖息地模型定量评估鱼类产卵生境适宜性的空间变化特征, 并量化鱼类产卵所需的适宜生态流量。结果表明: 三峡水库消落期增加出库流量对洞庭湖的水位及流速有一定的提升作用, 对东洞庭湖的影响明显, 对南洞庭湖和西洞庭湖的影响较小; 随着三峡水库出库流量的增加, 湖区定居性鱼类产卵生境的加权可利用面积呈现先增大再减小的趋势, 不同湖区的加权可利用面积变化趋势及对三峡水库出库流量的响应情况具有显著差异, 东洞庭湖定居性鱼类产卵生境的加权可利用面积呈现逐渐上升的趋势, 南洞庭湖加权可利用面积总体增长幅度不大, 呈现双峰曲线, 西洞庭湖加权可利用面积呈现先增大后减小的趋势; 定居性鱼类产卵生境的适宜生态流量范围为 18 500~24 500 m³/s, 最适宜生态流量为 22 500 m³/s。

关键词: 三峡水库; 洞庭湖; 定居性鱼类; 物理栖息地模型; 生态调度
中图分类号: TV697.1; TV213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)05-0038-08

Effect of outflow from Three Gorges Reservoir on spawning habitat of sedentary fish in Dongting Lake

DAI Lingquan^{1,2}, ZHANG Peipei³, CHANG Manqi¹, CHEN Lei¹, LI Chong¹, DAI Huichao¹, MAO Jinqiao³
(1. Yangtze Eco-environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;
2. Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Conservation of Fishes, Yichang 443100, China;
3. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To analyze the relationship between different outflows from Three Gorges Reservoir (TGR) during the drawdown period and the weighted usable area (WUA) of sedentary fish spawning habitat in Dongting Lake, the water depth and flow velocity were selected as the key influencing factors of sedentary fish spawning habitat, and the habitat suitable curves were established. This study quantitatively assessed the spatial variation characteristics of fish spawning habitat suitability based on the physical habitat simulation model (PHABSIM), and quantified the suitable ecological flow required for the fish spawning. The results show that the increase of outflow from TGR during the drawdown period has a certain effect on the water level and flow velocity of Dongting Lake. The effect on East Dongting Lake is obvious, but the effects on South Dongting Lake and West Dongting Lake are less. With the increase of outflow, the WUA of sedentary fishes spawning habitats in the lake area first increased and then decreased, whilst the difference is that the WUA of East Dongting Lake shows a gradual upward trend, the WUA of South Dongting Lake has a small overall increase with a double-peak curve, and the WUA of West Dongting Lake shows a trend of decreasing after increasing. The suitable ecological flow range of sedentary fishes spawning habitat was 18 500-24 500 m³/s, and the optimum ecological flow is 22 500 m³/s.

Key words: Three Gorges Reservoir; Dongting Lake; sedentary fish; physical habitat simulation model; ecological operation

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3204205, 2022YFC3201802); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52109013)
作者简介: 戴凌全(1986—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水库生态调度研究。E-mail: dai_lingquan@ctg.com.cn
引用本文: 戴凌全, 张培培, 常曼琪, 等. 三峡水库出库流量变化对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 38-45.
DAI Lingquan, ZHANG Peipei, CHANG Manqi, et al. Effect of outflow from Three Gorges Reservoir on spawning habitat of sedentary fish in Dongting Lake[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 38-45.

洞庭湖是我国第二大淡水湖,是长江流域重要的鱼类栖息地和资源库,在长江渔业中占有重要地位,其渔业资源备受关注^[1-2]。鱼类按生活习性可分为四类:海河洄游型、江湖洄游型、溪流定居型和湖泊定居型^[3-5]。在洞庭湖,海河洄游型、江湖洄游型鱼类占比逐渐减小,以鲤鱼、鲫鱼等为主的湖泊定居型鱼类的占比呈不断增加趋势。20 世纪末洞庭湖湖泊定居型鱼类所占比例已超过 86%,2001 年之后湖泊定居性鱼类占比达到 90% 以上,已成为洞庭湖鱼类资源最主要的组成成分,而四大家鱼等半洄游型鱼类的资源量则降至 8% 以下^[6-7]。定居性鱼类的产卵量将对湖区鱼类资源总量产生直接影响,因此促进洞庭湖定居性鱼类产卵是洞庭湖鱼类资源保护工作的重点。湖泊水动力条件改变会对湖区鱼类生境产生影响,也会对鱼类资源和生态系统造成严重影响^[8-10]。三峡水库作为长江干流控制性骨干水利工程,消落期(3—5 月)增加出库流量为洞庭湖生态补水提供了有利条件^[11-12],然而不同出库流量对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响有待进一步明确。

目前关于鱼类产卵生境的研究多集中在河道洄游型鱼类,包括四大家鱼、中华鲟、圆口铜鱼等。如戴凌全等^[13]采用物理栖息地模型明确了金沙江下游宜宾江段四大家鱼产卵繁殖所需要的适宜生态流量,为水库生态调度提供了具体目标;班璇等^[14]结合中华鲟产卵场水文情势在时间上的变化特征和空间上的分布特征,分析了不同水文情势下中华鲟产卵水深、流速和涡流等因子的响应特征,并进一步明确了中华鲟产卵所需的生态流量过程,为上游水库生态调度提供了理论基础;杨德国等^[15]通过对葛洲坝下游中华鲟产卵场的流量、流速、水温和含沙量等水文因素展开研究,得到影响中华鲟产卵的主要因子,认为流量过程对中华鲟产卵具有重要的促进作用;王煜等^[16]基于栖息地适合度评价模型计算了葛洲坝不同出库流量下中华鲟产卵生境面积大小及其空间分布特征,分析了葛洲坝运行对下游中华鲟产卵生境造成的影响;杨志等^[17]为实现金沙江下游圆口铜鱼的恢复,提出了圆口铜鱼不同生活史阶段关键生境因子的适宜度曲线;侯俊等^[18]采用栖息地模拟法计算了雅鲁藏布江中游拉萨裸裂尻鱼适宜的水深流速及流量;彭依云等^[19]以中国结鱼作为目标鱼类,基于 IFIM 和 EFDC 二维水动力模型建立了澜沧江最大支流罗梭江鱼类栖息地适宜性曲线,评价了不同水情下替代生境对目标鱼类的适宜度。

综上,三峡水库枯水期不同出库流量对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响方面的研究成果还较少,本文从定居性鱼类产卵所需的水动力需求出发,构建鱼类产卵生境的物理栖息地模型,模拟三峡水库不同出库流量下洞庭湖定居性鱼类产卵生境适宜度的空间分布格局,分析洞庭湖鱼类产卵生境的加权可利用面积(weighted usable area, WUA)对三峡水库不同出库流量的响应特征,以期通过水库生态调度改善湖区定居性鱼类产卵场水动力条件提供科学基础,为洞庭湖鱼类资源和湖泊生态系统保护工作提供新的思路。

1 研究区域概况

洞庭湖地处长江中游荆江南岸,长江干流通过三口(松滋、太平、藕池)流入洞庭湖,并与湖南四水(湘江、资水、沅江、澧水)汇合,经湖泊调蓄后在东洞庭湖流入长江^[20](图 1)。洞庭湖作为长江出三峡后的第一个大型通江湖泊,在防洪、维持生态平衡、保护湿地环境等方面具有重大意义,同时在鱼类洄游与产卵繁殖上发挥着重要作用^[21-22]。

2 研究方法

2.1 物理栖息地模拟法

物理栖息地模型(physical habitat simulation model, PHABSIM)能够定量反映不同水动力条件下洞庭湖

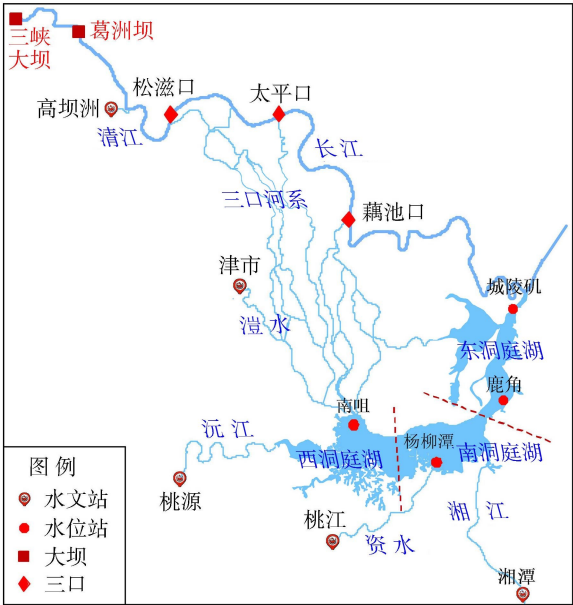


图 1 洞庭湖地理位置示意图
Fig.1 Geographic map of Dongting Lake

定居性鱼类产卵生境的变化特征^[23-26],由水动力模型(hydrodynamic model)和栖息地模型(habitat model)两部分组成。水动力模型计算三峡水库不同流量下洞庭湖的水动力分布特征,栖息地模型通过建立鱼类产卵生境关键影响因子的适宜度曲线,依据不同流量下的水动力分布特征找出对应的适宜度,赋予各自权重之后计算栖息地WUA^[25]。具体步骤:①收集定居性鱼类的产卵地点、时间、数量以及关键影响因子;②将栖息地适宜性指标与定居性鱼类产卵生境的关键影响因子(水深、流速)关联,绘制关键影响因子的适宜度曲线;③建立洞庭湖水动力模型,模拟不同流量下洞庭湖水动力分布特征;④将关键影响因子的适宜度曲线输入栖息地模型,结合水动力模型模拟的水深、流速计算不同流量下洞庭湖定居性鱼类产卵生境的WUA。模型构建流程如图2所示。

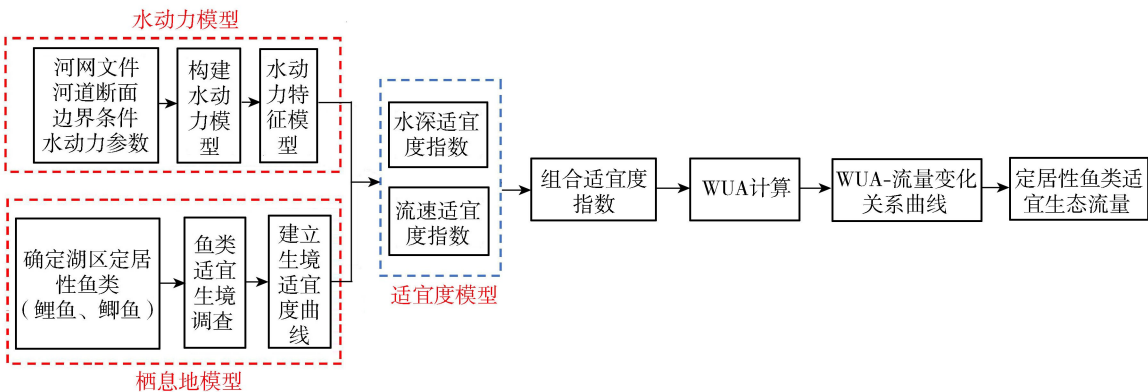


图2 基于物理栖息地模型的适宜生态流量求解流程

Fig.2 Flow chart for solving suitable ecological flow based on PHABSIM

2.2 生境适宜度曲线的构建

目前栖息地适宜度评价方法中使用最广泛、最经典的是适宜度曲线法^[27]。适宜度曲线的建立以栖息地适宜度指数(habitat suitability index, HSI)为基础,以生境影响因子为横坐标,以目标生物对生境影响因子的偏好为纵坐标,建立目标生物偏好与生境因子之间关系的连续曲线,从而定量描述目标物种对栖息地各个生境影响因子变化的响应程度。目标物种对生境影响因子的偏好介于0~1之间,0表示完全不适宜,1表示最适宜。

影响因子的选取是物理栖息地模型模拟效果准确与否的关键。流速、水深等因子常被作为鱼类产卵生境模拟的影响因子^[28-30]。每年3—5月,洞庭湖鲤、鲫开始产卵,主要的产卵场所是静水或缓流浅滩区的水草。为了保证卵的正常发育,水中流速不宜过大,因此选取流速、水深作为洞庭湖定居性鱼类产卵生境的关键影响因子。参考已有研究成果^[31-32],确定鲤、鲫鱼类产卵生境的适宜流速范围为0~0.6 m/s,最适宜流速范围为0.1~0.5 m/s,适宜水深范围为0.2~2.0 m,最适宜水深范围为0.5~1.5 m,定居性鱼类产卵生境影响因子的适宜度曲线如图3所示。

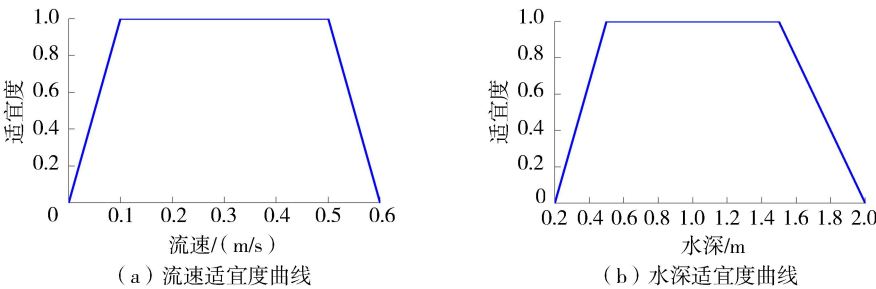


图3 洞庭湖定居性鱼类产卵生境影响因子适宜度曲线

Fig.3 Suitability curves of influencing factors for sedentary fish spawning habitat in Dongting Lake

2.3 水动力模型的建立和验证

水动力模型采用一二维耦合模型,涵盖范围包括长江干流三峡坝址至螺山段、三口河系、洞庭湖及其四水尾闾河段。河道采用一维模型,湖区及江湖交汇区采用二维模型,二维模型采用非结构不规则的三角形网

格,网格大小根据地形的空间分布等确定,地形采用长江干流、三口、四水尾间河道地形和洞庭湖实测水下地形。

流量边界包括三峡水库出库流量、清江流量、四水入湖控制站流量,采用 2019 年各水文站点 3—5 月的日平均流量过程(图 4(a)),下游水位边界条件采用 2010—2020 年螺山站水位-流量关系曲线(图 4(b))。

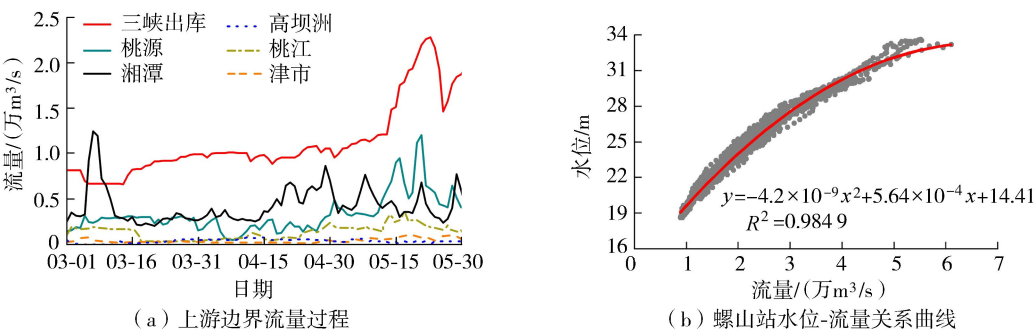


图 4 水动力模型的边界条件

Fig. 4 Boundary conditions of hydrodynamic model

为验证水动力模型的模拟效果,选取城陵矶、鹿角、杨柳潭和南咀站为洞庭湖代表性站点,各站点水位实测值与模拟值对比如图 5 所示。城陵矶、鹿角、杨柳潭、南咀站水位实测值和模拟值的均方根误差(root mean square error, RMSE)分别为 0.1898、0.2210、0.1468、0.1187 m,方差分别为 0.9875、0.9801、0.9697、0.9867 m²,平均绝对误差(mean absolute error, MAE)分别为 0.16、0.19、0.15、0.10 m。城陵矶站和鹿角站模拟效果较好,而杨柳潭站和南咀站模拟效果相对较差,因城陵矶站和鹿角站位于东洞庭湖,与长江干流联系紧密,受干流水位影响明显,而杨柳潭和南咀站距离干流较远,同时还受三口及四水的影响,水位变化情况更为复杂,因此模拟效果相对较差,但误差均在可接受范围内。总体来看,水动力模型的整体模拟精度较高,满足模型需求。

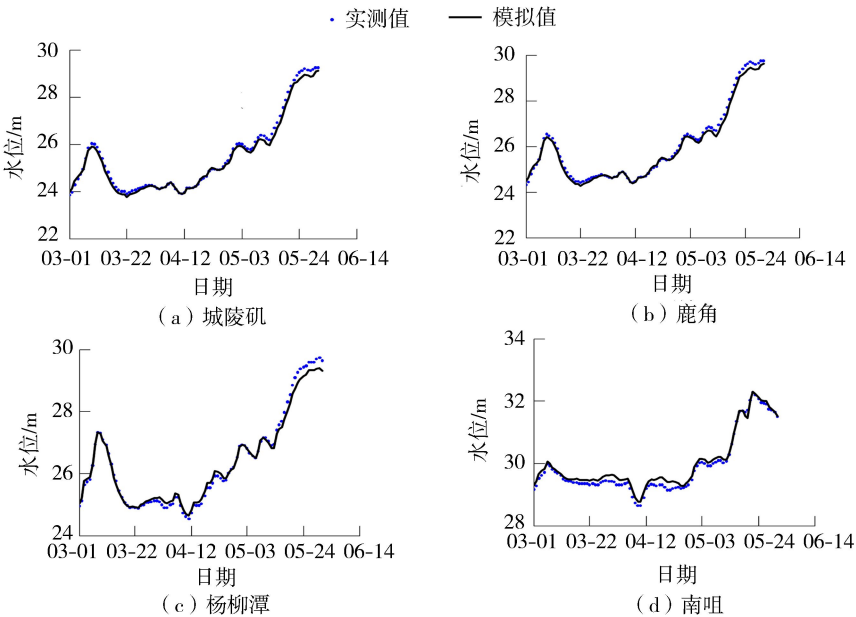


图 5 洞庭湖各站实测水位与模拟水位对比

Fig. 5 Comparison of observed and simulated water level in each station of Dongting Lake

3 结果与分析

3.1 工况设置

为量化三峡水库消落期不同出库流量对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响,根据 2017—2022 年三峡水库、清江及四水 3—5 月的实测流量数据进行流量划分。根据《三峡(正常运行期)—葛洲坝水利枢纽梯级调

度规程(2019年修订版)》的批复:1—5月三峡水库水位在综合考虑航运、发电、水资源、水生态需求的条件下逐步消落,因此水库出库流量划分如下:1—2月水库出库流量按不小于 $6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 控制,3—5月的最小出库流量应满足葛洲坝下游庙嘴水位不低于 39.0 m 。一般情况下,4月末库水位不低于枯水期消落低水位 155.0 m ,5月25日不高于 155.0 m 。同时调度规程也明确鱼类集中产卵期(5—6月)或有其他生态调度需求时,在防洪形势和水文条件许可的情况下,应针对性地实施有利于鱼类繁殖或改善水生态环境的生态调度试验。

本文的方案制定中考虑了调度规程,结合三峡水库运行后2017—2022年3—5月实际出库流量制定了工况。2017—2022年三峡水库实际出库流量如图6所示。由图6可知,3—5月三峡水库最小出库流量为 $6\,625\text{ m}^3/\text{s}$,最大出库流量为 $24\,375\text{ m}^3/\text{s}$,平均出库流量为 $10\,994\text{ m}^3/\text{s}$,因此可认为三峡水库3—5月出库流量范围为 $6\,500\sim 24\,500\text{ m}^3/\text{s}$,并以 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 为间隔进行工况划分。根据2017—2022年清江及四水3—5月实测流量数据,设置清江流量为 $530.23\text{ m}^3/\text{s}$,湘江湘潭站流量为 $2\,877.54\text{ m}^3/\text{s}$,资水桃江站流量为 $902.02\text{ m}^3/\text{s}$,沅江桃源站流量为 $2\,376.27\text{ m}^3/\text{s}$,澧水津市站流量为 $501.12\text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.2 不同出库流量下洞庭湖水动力空间变化特征

三峡水库不同出库流量下洞庭湖水位变化如图7(a)所示。三峡水库对洞庭湖水位的影响体现在2个方面:长江水流过枝城站后一方面通过三口分流量对洞庭湖直接补水,另一方面洞庭湖出口城陵矶水位增加对湖泊水位形成顶托。当出库流量为 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,通过松滋口分流量为 $135\text{ m}^3/\text{s}$,太平口、藕池口分流量均为0,城陵矶、鹿角、杨柳潭、南咀站的水位分别为 21.25 、 25.83 、 27.24 、 30.20 m ,此时4站水位最低。当出库流量为 $18\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,通过松滋口分流量为 $1\,398\text{ m}^3/\text{s}$,太平口分流量为 $210\text{ m}^3/\text{s}$,藕池口分流量为 $315\text{ m}^3/\text{s}$,城陵矶、鹿角、杨柳潭、南咀站的水位分别为 23.11 、 27.37 、 27.99 、 31.15 m ,与出库流量 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 相比,城陵矶站和鹿角站水位上升最大,分别上升了 1.86 、 1.54 m ,增幅分别为 8.75% 和 5.96% 。当出库流量为 $24\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,通过松滋口分流量为 $3\,667\text{ m}^3/\text{s}$,太平口分流量为 $874\text{ m}^3/\text{s}$,藕池口分流量均为 $1\,449.8\text{ m}^3/\text{s}$,城陵矶、鹿角、杨柳潭、南咀站水位达到最大值,分别为 24.07 、 28.24 、 28.60 、 31.98 m ,与出库流量 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 相比,水位分别上升了 2.81 、 2.41 、 1.36 、 1.78 m ,相应增幅分别为 13.27% 、 9.33% 、 4.99% 、 5.89% 。从水位变化和水位增幅的空间分布来看,受洞庭湖西高东低地形的影响,西洞庭湖南咀站水位最高,其次为南洞庭湖杨柳潭站,东洞庭湖城陵矶和鹿角站水位最低。随着三峡水库出库流量的增加,城陵矶、鹿角、杨柳潭、南咀站的水位皆有所上升,说明三峡水库增加出库流量对洞庭湖水位有一定的提升作用,但不同湖区水位的响应情况存在明显的空间差异。东洞庭湖城陵矶站水位上升明显,其次为东洞庭湖鹿角站,而南洞庭湖杨柳潭站和西洞庭湖南咀站则影响较小,因此可认为三峡水库消落期调度对于东洞庭湖水位提升作用明显,但对南洞庭湖和西洞庭湖影响较小。

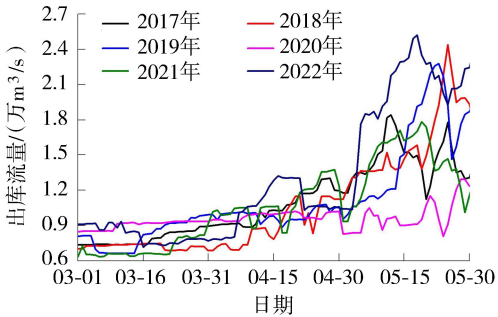


图6 三峡水库2017—2022年3—5月出库流量
Fig.6 Outflow from Three Gorges Reservoir from March to May in 2017-2022

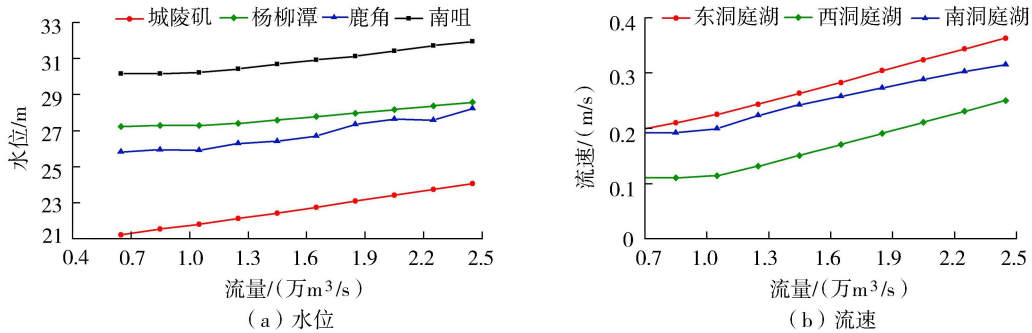


图7 三峡水库不同出库流量下洞庭湖水动力变化过程

Fig.7 Hydrodynamic variation process in Dongting Lake under different outflow from TGR

三峡水库不同出库流量下洞庭湖平均流速变化如图7(b)所示。当出库流量为 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,湖区平均流速为 0.18 m/s ,东、南、西洞庭湖平均流速分别为 0.20 、 0.19 、 0.11 m/s 。当出库流量为 $10\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,湖区平均流速为 0.20 m/s ,东、南、西洞庭湖平均流速分别为 0.23 、 0.20 、 0.12 m/s 。当出库流量为 $12\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,

湖区平均流速为 0.22 m/s,东、南、西洞庭湖平均流速分别为 0.24、0.22、0.13 m/s。当出库流量为 14 500 m³/s 时,湖区平均流速为 0.24 m/s,东、南、西洞庭湖平均流速分别为 0.26、0.24、0.15 m/s。

从流速变化情况来看,洞庭湖流速较低且变化范围不大,湖区流速位于 0.11 ~ 0.36 m/s 之间。三峡水库增加出库流量对洞庭湖流速有一定的提升作用,整体湖区平均流速提高 0.15 m/s,其中东、南、西洞庭湖平均流速分别提高 0.16、0.13、0.14 m/s,由此可知三峡水库增加出库流量对于东洞庭湖流速的影响相对明显,但对南洞庭湖和西洞庭湖则影响相对较小。

3.3 出库流量对洞庭湖定居性鱼类产卵适宜度的影响

三峡水库不同出库流量下洞庭湖定居性鱼类产卵生境组合适宜度空间分布如图 8 所示。当三峡水库出库流量为 6 500 m³/s,湖区的平均水深为 2.20 m,平均流速为 0.18 m/s,平均组合适宜度为 0.093,组合适宜度较大的区域主要分布在南洞庭湖和西洞庭湖;当三峡水库出库流量为 16 500 m³/s 时,湖区平均水深为 2.84 m,平均流速为 0.26 m/s,平均组合适宜度为 0.106,其中东洞庭湖组合适宜度分布区域大幅增加,主要集中于东洞庭湖西北部,说明随着出库流量的增加,东洞庭湖的定居性鱼类产卵适宜生境扩大,南洞庭湖组合适宜度下降至 0.250,随后逐渐减小,当流量超过 16 500 m³/s 时,南洞庭湖的定居性鱼类产卵适宜生境值分布面积缩小;当三峡水库出库流量为 22 500 m³/s,湖区水深为 3.40 m,平均流速为 0.32 m/s,平均组合适宜度最大为 0.120,东洞庭湖的适宜度分布区域进一步增加,覆盖东洞庭湖大部分,其中组合适宜度较大的区域主要集中于东洞庭湖东部,西洞庭湖组合适宜度降低至 0.146,且组合适宜度分布区域明显减少;当三峡水库出库流量为 24 500 m³/s 时,栖息地平均水深为 3.60 m,平均流速为 0.33 m/s,组合适宜度略有下降,平均组合适宜度为 0.110,各湖区组合适宜度均有减小。

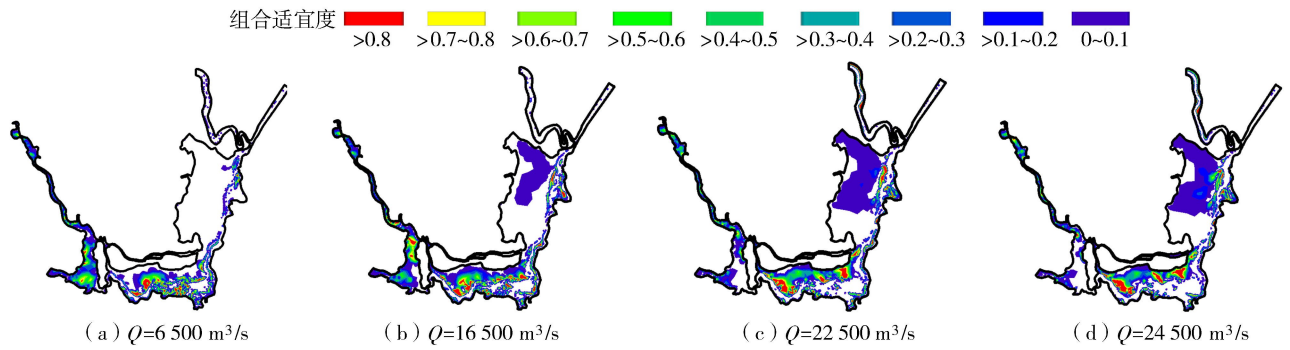


图 8 三峡水库不同出库流量下组合适宜度空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of combined suitability factor of TGR under different discharge flow

3.4 出库流量对鱼类产卵生境 WUA 的影响

三峡水库不同出库流量下洞庭湖定居性鱼类产卵生境的 WUA 如图 9 所示,在三峡水库出库流量逐渐增大的过程中,鱼类产卵生境的 WUA 呈现出先缓慢增大再逐渐减小的趋势。当出库流量为 6 500 m³/s 时,WUA 最小为 282.59 km²;当出库流量增加至 18 500 m³/s 时,WUA 呈现缓慢平稳的上升趋势;当出库流量为 20 500 m³/s 时,WUA 为 360.51 km²,此时相对于最小出库流量对应的 WUA 增加 77.92 km²,增幅为 27.58%;当出库流量为 22 500 m³/s 时,WUA 达到最大值为 376.16 km²;当出库流量为 24 500 m³/s 时,WUA 下降至 361.45 km²。由此可知,三峡水库增加出库流量能够增加洞庭湖定居性鱼类产卵生境的 WUA,最大可增加 93.57 km²,但当出库流量超过 22 500 m³/s,鱼类产卵生境的 WUA 反而减小,因此可认为洞庭湖定居性鱼类产卵生境的适宜生态流量范围为 18 500 ~ 24 500 m³/s,最适宜生态流量为 22 500 m³/s。

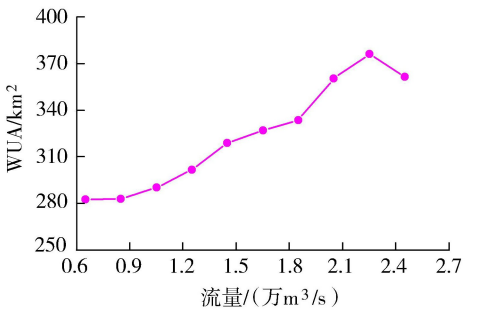


图 9 三峡水库出库流量与产卵生境 WUA 的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve of WUA and outflow from the TGR

三峡水库不同出库流量下洞庭湖不同湖区定居性鱼类产卵生境的 WUA 变化如图 10 所示,不同湖区的 WUA 变化趋势及对三峡水库出库流量的响应具有显著差异。东洞庭湖定居性鱼类产卵生境的 WUA 随着三峡水库出库

流量的增大呈现逐渐上升的趋势,当出库流量为 $20\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, WUA 为 154.96 km^2 ,此时 WUA 增加值为 32.56 km^2 ,相应的增幅为 26.60% ;当三峡水库出库流量为 $24\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, WUA 增加至最大值为 178.68 km^2 。南洞庭湖 WUA 在 $50.39\sim 52.75\text{ km}^2$ 之间,总体增长幅度不大,保持相对稳定,呈现先增加后减少的趋势且,其面积变化曲线存在 2 个峰值;当三峡水库出库流量为 $12\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, WUA 达到最大为 52.75 km^2 。南洞庭湖东部地形呈深槽形,长江干流对洞庭湖的顶托作用可影响到南洞庭湖,最初随着出库流量的增加,南洞庭湖的水深和组合适宜度逐渐增大;当出库流量大于 $12\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,组合适宜度和 WUA 逐渐减小;当出库流量为 $18\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, WUA 最小为 50.39 km^2 。南洞庭湖 WUA 最大值与最小值相差 1.58 km^2 ,总体保持稳定,说明三峡水库增加出库流量对南洞庭湖的影响较小。西洞庭湖 WUA 呈现先增大后减小的趋势,当出库流量为 $16\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, WUA 最大为 163.04 km^2 。西洞庭湖承接三口,三峡水库增泄的流量通过三口流入西洞庭湖,随着出库流量的增加,西洞庭湖的组合适宜度和 WUA 逐渐增大,当出库流量超过 $16\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 后, WUA 逐渐下降。

4 结 论

- a. 三峡水库增加出库流量对洞庭湖湖区的水位及流速有一定的提升作用,对于东洞庭湖的影响尤为明显,对南洞庭湖和西洞庭湖则影响较小。东洞庭湖(鹿角)、南洞庭湖(杨柳潭)、西洞庭湖(南咀)水位最大提升 2.41 、 1.36 、 1.78 m ,平均流速分别提高 0.16 、 0.13 、 0.14 m/s 。
- b. 随着三峡消落期出库流量的增加,洞庭湖定居性鱼类产卵生境的 WUA 呈现出先增大再减小的趋势,不同湖区的 WUA 变化特征各不相同,东洞庭湖 WUA 呈现逐渐上升的趋势,南洞庭湖 WUA 总体增长幅度不大,西洞庭湖 WUA 呈现先增大后减小的趋势。
- c. 洞庭湖定居性鱼类产卵生境的适宜生态流量范围为 $18\,500\sim 24\,500\text{ m}^3/\text{s}$,最适宜生态流量为 $22\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 。
- d. 研究成果明确了洞庭湖定居性鱼类产卵生境所需的适宜生态流量,可为通过三峡水库补水调度保护湖区鱼类资源提供参考依据,但由于鱼类的生命阶段包括产卵、胚胎发育、幼鱼、成鱼等,各阶段对栖息地生境的需求也会有所不同,因此在后续的研究中,可考虑鱼类其他关键生活史对环境适宜性的需求,包括水动力需求、索饵需求等,使得洞庭湖湖区渔业保护措施更系统和完善。

参考文献:

[1] 刘艳佳,高雷,郑永华,等.洞庭湖通江水道鱼类资源周年动态及其洄游特征研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):376-385. (LIU Yanjia,GAO Lei,ZHENG Yonghua,et al. Annual dynamics and migration characteristic of fish resources in the Chenglingji,in the channel connecting Dongting Lake and the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(2):376-385. (in Chinese))

[2] 蒋忠冠,曹亮,张鹗.洞庭湖鱼类的群落结构及其时空动态[J].水生生物学报,2019,43(增刊1):42-48. (JIANG Zhongguan,CAO Liang,ZHANG E. Spatio-temporal variations of fish assemblages in the Dongting Lake[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2019,43(Sup1):42-48. (in Chinese))

[3] QIN Xiangchao,GONG Zheng,LIU Huanzhang. Lateral migration of fish between China's second largest freshwater lake (Dongting Lake) and the mainstem of the Yangtze River[J]. Environmental Biology of Fishes,2019,102(4):527-539.

[4] 蒋祥龙,黎明政,杨少荣,等.鄱阳湖鱼类集合群落结构特征及其时间变化研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(3):588-601. (JIANG Xianglong,LI Mingzheng,YANG Shaorong,et al. Temporal variation of fish metacommunity structure in Poyang Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2022,31(3):588-601. (in Chinese))

[5] 王洪铸,刘学勤,王海军.长江河流-泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策[J].水生生物学报,2019,43(增刊1):157-182. (WANG Hongzhu,LIU Xueqin,WANG Haijun. The Yangtze River-floodplain ecosystem: multiple threats and holistic conservation[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2019,43(Sup1):157-182. (in Chinese))

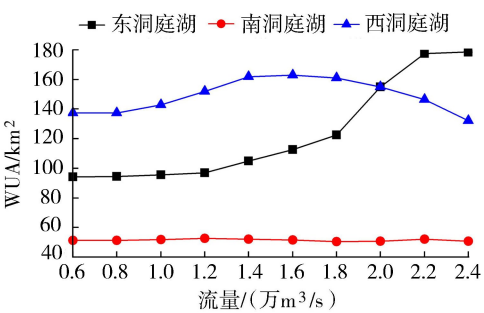


图 10 洞庭湖不同湖区定居性鱼类产卵生境 WUA 变化

Fig. 10 Variation of WUA in different lake areas of Dongting Lake

- [6] 朱轶,吕偲,胡慧建,等. 三峡大坝运行前后西洞庭湖鱼类群落结构特征变化[J]. 湖泊科学,2014,26(6):844-852. (ZHU Yi,LYU Cai,HU Huijian,et al. Changes in fish community structure in West Dongting Lake after the operation of the Three Gorges Dam[J]. Journal of Lake Sciences,2014,26(6):844-852. (in Chinese))
- [7] 贾春艳,王珂,李慧峰,等. 禁渔初期东洞庭湖鱼类资源的空间分布与密度变化[J]. 南方水产科学,2022,18(3):48-56. (JIA Chunyan,WANG Ke,LI Huifeng,et al. Spatial distribution and density changes of fish resources in East Dongting Lake during early fishing ban period[J]. South China Fisheries Science,2022,18(3):48-56. (in Chinese))
- [8] 王丽婧,田泽斌,李莹杰,等. 洞庭湖近30年水环境演变态势及影响因素研究[J]. 环境科学研究,2020,33(5):1140-1149. (WANG Lijing,TIAN Zebin,LI Yingjie,et al. Trend and driving factors of water environment change in Dongting Lake in the last 30 years[J]. Research of Environmental Sciences,2020,33(5):1140-1149. (in Chinese))
- [9] DAI Z,DU J,AO C,et al. Groundwater discharge to the Changjiang River, China, during the drought season of 2006: effects of the extreme drought and the impoundment of the Three Gorges Dam[J]. Hydrogeology Journal,2010,18(2):359-369.
- [10] XIE Y,TANG Y,XINSHENG C,et al. The impact of Three Gorges Dam on the downstream eco-hydrological environment and vegetation distribution of East Dongting Lake[J]. Ecohydrology,2015,8(4):738-746.
- [11] 任源鑫,曾思栋,夏军,等. 基于水文水动力耦合模拟的三峡水库调度对下泄流量影响研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2022,55(4):319-327. (REN Yuanxin,ZENG Sidong,XIA Jun,et al. Study on the influence of the Three Gorges Reservoir operation on water discharge based on hydrology and hydrodynamic coupling simulation[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2022,55(4):319-327. (in Chinese))
- [12] 林俊强,李游坤,刘毅,等. 刺激鱼类自然繁殖的生态调度和适应性管理研究进展[J]. 水利学报,2022,53(4):483-495. (LIN Junqiang,LI Youkun,LIU Yi,et al. Recent progress in ecological operation and adaptive management for stimulating fish natural spawning[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(4):483-495. (in Chinese))
- [13] 戴凌全,王煜,戴会超,等. 金沙江下游向家坝水库不同出库流量对四大家鱼生境面积影响的定量分析[J]. 环境科学研究,2021,34(7):1710-1718. (DAI Lingquan,WANG Yu,DAI Huichao,et al. Effect of different release from Xiangjiaba Reservoir in the lower reaches of Jinsha River on habitat area of four major Chinese carps[J]. Research of Environmental Sciences,2021,34(7):1710-1718. (in Chinese))
- [14] 班璇,高欣,DIPLAS P,等. 中华鲟产卵栖息地的三维水力因子适宜性分析[J]. 水科学进展,2018,29(1):80-88. (BAN Xuan,GAO Xin,DIPLAS P,et al. Suitability analysis of three dimensional hydraulic factors for spawning habitat of Chinese Sturgeon(*Acipenser sinensis*) [J]. Advances in Water Science,2018,29(1):80-88. (in Chinese))
- [15] 杨德国,危起伟,陈细华,等. 葛洲坝下游中华鲟产卵场的水文状况及其与繁殖活动的关系[J]. 生态学报,2007,27(3):862-869. (YANG Deguo,WEI Qiwei,CHEN Xihua,et al. Hydrology status on the spawning ground of *Acipenser sinensis* below the Gezhouba Dam and its relation to the spawning run[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(3):862-869. (in Chinese))
- [16] 王煜,戴会超,毛劲乔,等. 葛洲坝大江泄流对中华鲟产卵场空间分布特征的影响[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(6):487-493. (WANG Yu,DAI Huichao,MAO Jinqiao,et al. Effect of Gezhouba Dajiang discharge on space distribution features of Chinese sturgeon spawning grounds[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2014,32(6):487-493. (in Chinese))
- [17] 杨志,张鹏,唐会元,等. 金沙江下游圆口铜鱼生境适宜度曲线的构建[J]. 生态科学,2017,36(5):129-137. (YANG Zhi,ZHANG Peng,TANG Huiyuan,et al. The formation of habitat suitability curves for *Coreius guichenoti* (Sauvage & Dabry de Thiersant,1874) of the lower Jinsha River[J]. Ecological Science,2017,36(5):129-137. (in Chinese))
- [18] 侯俊,黄喻威,苗令占,等. 基于鱼类栖息地需求的雅鲁藏布江中游环境流量计算[J]. 水资源保护,2020,36(4):8-12. (HOU Jun,HUANG Yuwei,MIAO Lingzhan,et al. Calculating environmental flows in middle reach of Yarlung Tsangpo River based on fish habitat requirements[J]. Water Resources Protection,2020,36(4):8-12. (in Chinese))
- [19] 彭依云,洪迎新,刘东升,等. 罗梭江鱼类替代生境量化评价[J]. 水资源保护,2022,38(2):190-196. (PENG Yiyun,HONG Yingxin,LIU Dongsheng,et al. Quantitative evaluation of fish alternative habitats in the Luosuo River[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):190-196. (in Chinese))
- [20] WANG H,ZHU Y,ZHA H,et al. Quantitative assessment of water level regime alterations during 1959-2016 caused by Three Gorges Reservoir in the Dongting Lake, China[J]. Water Supply,2021,21(3):1188-1201.
- [21] WANG H,ZHANG Z,SONG D,et al. Water and sediment transport mechanisms in a large river-connected lake[J]. Water Environment Journal,2015,29(3):391-401.
- [22] WU S,XUE H,WEI X,et al. Lake area changes in the middle Yangtze region of China over the 20th century[J]. Journal of Environmental Management,2011,92(4):1248-1255.

144-153. (LIU Xiaobing,JIANG Huimin,ZHAO Yucheng,et al. A study on aerodynamic force characteristic of a special-shaped landscape bridge based on a rigid model pressure measurement test of an overall bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021,40(24):144-153. (in Chinese))

[15] TADEU A,DA SILVA F M,RAMEZANI B,et al. Experimental and numerical evaluation of the wind load on the 516 Arouca pedestrian suspension bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2022,220:104837.

[16] 廖绍凯,张研,陈达. 基于 S-A 模型的覆冰输电线绕流数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):1-8. (LIAO Shaokai,ZHANG Yan,CHEN Da. Numerical analysis of flow past iced conductor based on the S-A model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):1-8. (in Chinese))

[17] 蔡新,林世发,胡莉,等. 不同倾斜角叶尖小翼水平轴风力机气动性能[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):460-466. (CAI Xin,LIN Shifa,HU Li,et al. Aerodynamic performance of horizontal axis wind turbine with different inclination angles of tip winglet[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):460-466. (in Chinese))

[18] 葛耀君. 桥梁风洞试验指南[M]. 北京:人民交通出版社,2018.

[19] 李明,孙延国,李明水,等. 非对称 II 型梁和流线型箱梁气动性能风洞试验研究[J]. 振动与冲击,2019,38(8):54-60. (LI Ming,SUN Yanguo,LI Mingshui,et al. A study on the aerodynamic characteristics of an asymmetric II shaped girder and an asymmetric streamlined box girder via a wind tunnel test[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(8):54-60. (in Chinese))

[20] FUJINO Y,YOSHIDA Y. Wind-induced vibration and control of trans-tokyo bay crossing bridge[J]. Journal of Structural Engineering,2002,128(8):1012-1025.

[21] 李加武,宋特,林立华,等. 变截面连续钢箱梁桥静气动性能研究[J]. 公路交通科技,2020,37(4):88-95. (LI Jiawu,SONG Te,LIN Lihua,et al. Study on aerodynamic performance of a continuous steel box girder bridge with variable sections[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2020,37(4):88-95. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-22 编辑:刘晓艳)

(上接第 45 页)

[23] NAMAN S M,ROSENFELD J S,NEUSWANGER J R,et al. Comparing correlative and bioenergetics-based habitat suitability models for drift-feeding fishes[J]. Freshwater Biology,2019,64(8):1613-1626.

[24] NESTLER J M,MILHOUS R T,PAYNE T R,et al. History and review of the habitat suitability criteria curve in applied aquatic ecology:review of habitat suitability criteria in aquatic ecology[J]. River Research Applications,2019,35(5):1155-1180.

[25] 班璇,郭舟,熊兴基,等. 长江中游典型河段底栖动物的物理栖息地模型构建与应用[J]. 水利学报,2020,51(8):936-946. (BAN Xuan,GUO Zhou,XIONG Xingji,et al. Applying physical model of zoobenthos in typical reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(8):936-946. (in Chinese))

[26] ROSENFELD J S,NAMAN S M. Identifying and mitigating systematic biases in fish habitat simulation modeling:implications for estimating minimum instream flows[J]. River Research and Applications,2021,37(6):869-879.

[27] 易雨君,张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述[J]. 中国科学:技术科学,2019,49(4):363-377. (YI Yujun,ZHANG Shanghong. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019,49(4):363-377. (in Chinese))

[28] 毛劲乔,戴会超. 重大水利水电工程对重要水生生物的影响与调控[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(3):240-245. (MAO Jinqiao,DAI Huichao. Effects of large water conservancy and hydropower projects on major aquatic species and regulation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2016,44(3):240-245. (in Chinese))

[29] 张辉,曾晨军,李婷,等. 基于四大家鱼产卵需求的汉江中下游生态流量研究[J]. 水生态学杂志,2022,43(3):1-8. (ZHANG Hui,ZENG Chenjun,LI Ting,et al. Ecological flow in the mid-lower Hanjiang River based on spawning demands of the four major Chinese craps[J]. Journal of Hydroecology,2022,43(3):1-8. (in Chinese))

[30] 张先炳,胡亚萍,杨威,等. 水温对淡水温水性鱼类生命活动的影响[J]. 水生态学杂志,2021,42(4):117-122. (ZHANG Xianbing,HU Yaping,YANG Wei,et al. Effect of water temperature on the life activities of temperate freshwater fish[J]. Journal of Hydroecology,2021,42(4):117-122. (in Chinese))

[31] 胡莲,姚金忠,杨志,等. 三峡库区支流小江回水区鱼类早期资源状况[J]. 水生态学杂志,2022,43(4):78-84. (HU Lian,YAO Jinzhong,YANG Zhi,et al. Status of early stage fish resources in the backwater area of Xiaojiang River in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Hydroecology,2022,43(4):78-84. (in Chinese))

[32] 何文祥,胡丹心,许锐杰,等. 流溪河鱼类群落对环境因子的响应及关键标识种的筛查[J]. 生物资源,2022,44(3):223-235. (HE Wenxiang,HU Danxin,XU Ruijie,et al. Response of fish community to water environmental factors and screening of key biomarker species in Liusha River[J]. Biotic Resources,2022,44(3):223-235. (in Chinese))

(收稿日期:2022-09-09 编辑:刘晓艳)