DOI:10.15928/j.1674-3075.202311190342

2023年三峡水库生态调度对四大家鱼生境面积的影响

白凤朋[1,2,3],任玉峰[4],梅 杰[5],梁志明[4],马一鸣[4],杨中华[5]

(1.长江水资源保护科学研究所,湖北 武汉 430051;
2.长江水利委员会湖库水源地面源污染生态调控重点实验室,湖北 武汉 430051;
3.水利部江湖治理与防洪重点实验室,湖北 武汉 430051;
4.中国长江电力股份有限公司,湖北 宜昌 443000;
5.武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要:为量化生态调度对四大家鱼生境面积的影响,2023年在三峡水库开展了针对葛洲坝下游四大家鱼自然繁殖的生态调度试验,以葛洲坝至枝江江段为研究区域,选择水位变幅、水深、流速、水温4个主要生境因子,建立了耦合平面二维水动力学模型和产卵栖息地适宜度曲线的四大家鱼产卵生境质量评估模型,实现了产卵综合适宜度指数时空分布的精细化模拟。结果显示,2023年三峡水库生态调度期间,约60%研究区域四大家鱼产卵综合适宜度指数呈现增加趋势,其产卵加权可利用面积占研究区域总面积比例由30.45%增加至约55%;适宜四大家鱼产卵区域(综合适宜度指数0.6~1.0)明显增加,占研究区域总面积比例由4.67%增加至约60%。研究表明,三峡水库生态调度显著改善了葛洲坝至枝江江段四大家鱼产卵的生境质量。

关键词:生态调度;四大家鱼;适宜度指数;生境面积;三峡水库

中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2024)01-0112-08

水利工程的建成在带来巨大经济效益与社会效益的同时,也不可避免地对河流生态环境造成一定程度的影响。水库运行后,大坝下游河道的径流过程发生了较大变化,特别是水库蓄水后下游水文指标相较于蓄水前发生了改变,从不同的时空尺度上对下游鱼类的群落结构和自然繁殖造成了一定的影响(徐薇等,2019;屈霄等,2020)。生态调度通过改变大坝下泄流量,形成有利于鱼类产卵的人造洪峰,从而促进鱼类繁殖,被认为是减缓大坝运行对鱼类繁殖不利影响的有效途径(赵越等,2012;徐薇等,2014)。目前,国内尤其是在长江流域通过水库调度促进重要鱼类自然繁殖已成为生态调度的主要目标,对于保护水生生物资源具有十分重要的意义(徐薇等,2020;戴凌全等,2022)。2011年以来,三峡水库在保证防洪、发电和航运调度的基础上,针对四大家鱼繁殖的生物学特性制定并开展了合理的生态调度试验。截至2023年,三峡水库已连续13年开展了20次水文过程生态调度,一定程度上减缓了大坝运行对鱼类自然繁殖的不利影响(李博等,2021;徐薇等,2023)。

生境面积是反映鱼类生存空间的直接指标,水库的建设和运行导致鱼类生境面积缩小、破碎化程度增加、连续性及完整性下降(周湖海等,2019;Li et al,2016)。相关研究表明,生境面积的大小变化与鱼类产卵数量的变化趋势较为一致(Zhang et al,2018;Baumgartner et al,2020),说明生境面积在很大程度上影响了鱼类产卵分布和数量。因此,通过生态调度试验改善鱼类适宜的产卵生境面积是保证鱼类产卵数量的前提条件,而生态调度试验的效果也可以根据产卵生境面积的大小进行合理评估。目前,国内外在这一研究领域已经做了大量工作,并取得了一些进展,其中通过建立物理生境模拟模型来分析流量变化与生境面积的关系是当前的研究热点。物理生境模拟模型耦合了水动力模型和物种适宜生境偏好模型,基于物种对不同因子的适宜性曲线计算生境适宜性指数,进而模拟不同流量下物种对生境的适宜程度及适宜生境面积大小;该模型在长江流域及黄河流域的鱼类生境模拟中得到了广泛运用(郭文献等,2011;孙嘉宁等,2013;王煜等,2016;王瑞玲等,2020;戴凌全等,2021)。

收稿日期:2023-11-19

基金项目:国家重点研发项目(2021YFC3200304);长江科学院开放研究基金(CKWV2019732/KY);湖北省自然科学基金联合基金(2022CFD169);武汉市知识创新专项(2023020201010110)。

作者简介:白凤朋,1989年生,男,博士,高级工程师,主要从事流域水生态环境研究。E-mail:bfp@whu.edu.cn

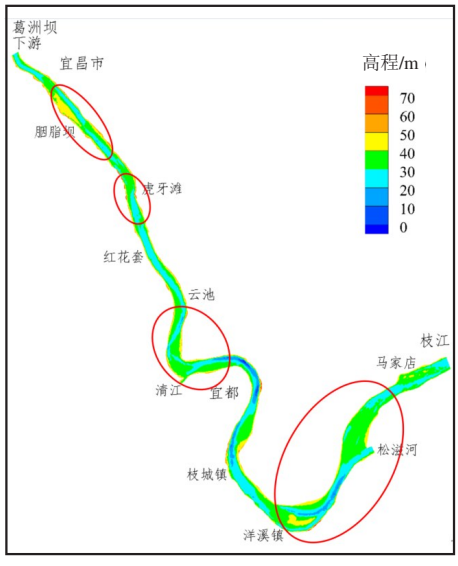
通信作者:杨中华,1977年生,男,博士,教授,主要从事环境水力学研究。E-mail:yzh@whu.edu.cn

本文以葛洲坝至枝江江段为研究区域,建立了耦合平面二维水动力学模型和产卵栖息地适宜度曲线的四大家鱼产卵生境质量评估模型,模拟三峡水库生态调度期间研究区域内四大家鱼产卵综合适宜度指数的时空分布及适宜产卵生境面积变化情况,以期为三峡水库下游四大家鱼产卵繁殖生态调度提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　研究区域

葛洲坝坝址至枝江江段长约90 km,区域内分布有胭脂坝、虎牙滩、宜都、枝城等四大家鱼产卵场(图1)。其中,宜昌–宜都产卵场(胭脂坝、虎牙滩、宜都)是长江中游典型的四大家鱼产卵场,同时也是距离三峡–葛洲坝梯级水库最近的四大家鱼产卵场。



红圈区为四大家鱼主要产卵场

图1　研究区域

The areas indicated by the red lines are the primary spawning areas of the four major Chinese carps

Fig.1　Map of the study area

1.2　研究方法

基于有限体积Godunov格式建立研究范围内的平面二维水动力学模型,选择水位变幅、水深、流速、水温4个主要生境因子,确定四大家鱼产卵栖息地适宜度曲线。耦合平面二维水动力学模型和产卵栖息地适宜度曲线,构建面向四大家鱼产卵生境质量评估模型,运用编写的Fortran程序计算评估区域内产卵综合适宜度指数(HSI)的时空分布及适宜生境面积情况。

1.2.1　平面二维水动力数学模型　(1)模型控制方程。由于本研究江段水平方向尺度远远大于垂直方向,所以适宜采用深度平均的平面二维浅水方程来描述区间水流特性:

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial x}+\frac{\partial G}{\partial y}=S \qquad ①$$

$$S=S_b+S_f+S_t$$

$$S_b=\begin{bmatrix}0\\ g\eta S_{b,x}\\ g\eta S_{b,y}\end{bmatrix},\ S_f=\begin{bmatrix}0\\ -g\eta S_{f,x}\\ -g\eta S_{f,y}\end{bmatrix}, \qquad ②$$

$$S_t=\begin{bmatrix}0\\ \partial(hT_{x,x})/\partial x+\partial(hT_{x,y})/\partial y\\ \partial(hT_{y,x})/\partial x+\partial(hT_{y,y})/\partial y\end{bmatrix}$$

式中:x、y分别表示二维笛卡尔坐标系的水平轴和垂直轴,U表示守恒向量,F、G分别表示x、y方向的对流通量向量,g为地球重力加速度,h为水深,z_b为河床地形高程,$\eta=h+z_b$表示水位,u、v分别为x、y方向上的流速分量,$q_x=hu$表示x方向上的单宽流量,$q_y=hv$表示y方向上的单宽流量;S_b表示地形源项向量,S_f表示摩阻源项向量,S_t表示紊流涡粘项向量。

水温模型控制方程:

$$\frac{\partial hT}{\partial t}+\frac{\partial(huT)}{\partial x}+\frac{\partial(hvT)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[D_x\frac{\partial(hT)}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[D_y\frac{\partial(hT)}{\partial y}\right]-K_shT \qquad ③$$

式中:T为水温,D_x和D_y为扩散系数,K_s散热系数。

(2)数值算法。数值模型采用作者团队研发的“基于Godunov型有限体积方法的平面二维水动力水温数学模型”,模型详细数值求解过程参考Zhu等(2018)。模型采用非结构三角形网格剖分计算区域,共剖分10 230个三角形单元;采用宜昌水文站水位对模型进行参数率定和模型验证,最大绝对误差为0.20 m(表1)。

表1　模型验证

Tab.1　Model validation

时间	实测水位/m	模拟水位/m	绝对误差/m
2023-05-27	40.88	40.73	0.15
2023-05-28	41.43	41.23	0.20
2023-05-29	41.93	41.76	0.17
2023-05-30	41.32	41.52	-0.20
2023-05-31	43.13	42.93	0.20
2023-06-01	44.05	43.95	0.10
2023-06-02	44.45	44.31	0.14
2023-06-03	44.47	44.40	0.07

1.2.2 四大家鱼栖息地适宜度曲线 四大家鱼繁殖期产卵场的生境质量将直接影响鱼类资源，适宜性曲线的建立以栖息地适宜度指数为基础，将四大家鱼对栖息地的偏好性和生境因子之间的关系进行量化，用数值 0~1 定义四大家鱼对生境因子的偏好，0 表示完全不适宜，1 表示完全适宜；取值越趋近于 1，则表示四大家鱼对此生境因子的偏好性越大。

一般情况下，影响四大家鱼产卵繁殖的主要水文条件为水位涨落和水温，河流水动力条件主要表现在流速、流态和水深方面，而回水、涡流等流态又与流速有关（柏海霞等,2014；林俊强等,2015）。本文主要研究水库生态调度方案下水文水动力条件对于四大家鱼产卵生境面积的影响，因此主要从水位变幅、水深、流速和水温 4 个生境因子构建四大家鱼产卵繁殖的适宜度曲线。目前，国内学者对长江中游河段四大家鱼产卵的水位变幅、水深、流速和水温等适宜度曲线已进行了相关研究（李建和夏自强,2011；易雨君和乐世华,2011；李建等,2013），综合比较选定的各适宜度曲线如图 2 所示。四大家鱼产卵的最适水位日涨幅≥0.25 m，最适水深为 3~12 m，最适流速为 0.6~1.3 m/s，产卵盛期水温为 21~24℃。

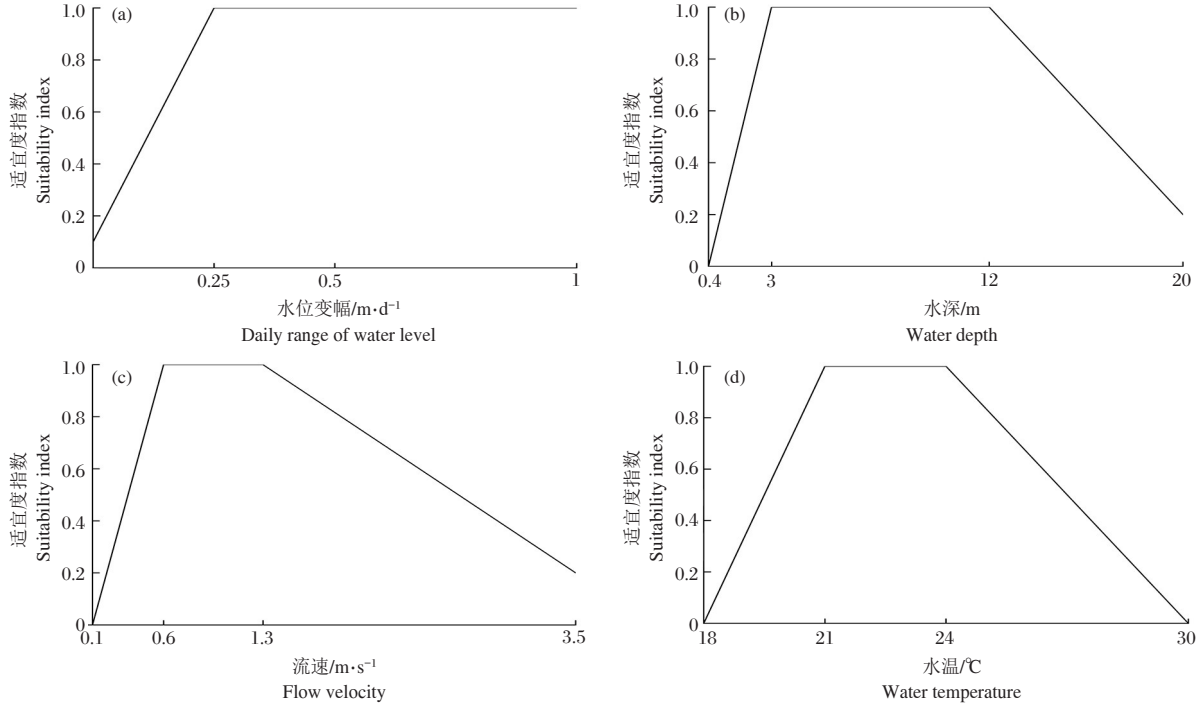


图 2 四大家鱼产卵栖息地适宜度曲线

Fig.2 Spawning habitat suitability curve of the four major Chinese carps

1.2.3 评估指标 （1）产卵综合适宜度。根据所建立的产卵适宜度曲线，采用几何平均方法计算四大家鱼的产卵综合适宜度（Habitat Suitability Index, HSI），具体表达式如下：

$$HSI = (SI_s \times SI_d \times SI_v \times SI_t)^{1/4} \quad ④$$

式中：SI_s 为四大家鱼产卵的水位变幅适宜度指数，SI_d 为四大家鱼产卵的水深适宜度指数，SI_v 为四大家鱼产卵的流速适宜度指数，SI_t 为四大家鱼产卵的水温适宜度指数。

（2）加权可利用面积。结合水动力模型模拟计算结果，计算产卵加权可利用面积（Weighted Usable Area,WUA），评价不同生态调度方案下的产卵栖息地生境质量，计算公式如下：

$$WUA = \sum_{i=1}^{n} HSI_i \cdot A_i \quad ⑤$$

式中：HSI_i 为第 i 个网格的 HSI 值，A_i 为第 i 个单元格的面积。

（3）产卵适宜等级面积占比。根据产卵综合适宜度指数大小，将产卵生境划分为 3 个等级，产卵综合适宜度指数分别在[0,0.2)、[0.2,0.6)、[0.6,1.0]范围内，产卵生境质量依次处于崩溃、不适宜、适宜等级（夏继红等,2022），产卵综合适宜度指数≥0.6 的河段网格被认为是四大家鱼产卵生境较为适宜的区域。

1.3　生态调度过程

2023 年 5 月 27 日至 6 月 3 日,三峡水库开展了年度首次针对葛洲坝下游四大家鱼自然繁殖的生态调度试验。5 月 27 日三峡出库流量按 8 160 m^3/s 控制,从 5 月 28 日至 6 月 3 日持续 7 d 加大出库流量,日均涨幅约 1 400 m^3/s;6 月 3 日出库流量加大至 17 900 m^3/s,本次生态调度试验结束。生态调度过程如图 3 所示。调度期间研究范围内的流量、水位和水温模型输入条件见表 2。

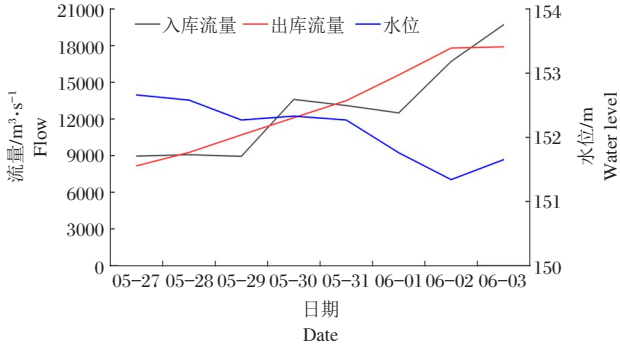


图 3　三峡水库生态调度过程

Fig.3　Yangtze River flow and water level under ecological operation of Three Gorges Reservoir

表 2　模型输入条件

Tab.2　Model input conditions

日期	三峡出库流量/$m^3·s^{-1}$	清江/$m^3·s^{-1}$	松滋河/$m^3·s^{-1}$	马家店水位/m	宜昌站水温/℃
2023-05-27	8 160	350	319	34.22	20.95
2023-05-28	9 260	361	300	34.16	21.03
2023-05-29	10 700	355	388	34.60	21.15
2023-05-30	12 100	405	504	35.15	21.25
2023-05-31	13 500	474	673	35.74	21.36
2023-06-01	15 600	560	873	36.30	21.55
2023-06-02	17 800	684	1214	37.08	21.69
2023-06-03	17 900	757	1473	37.44	21.75

2　结果与分析

2.1　产卵综合适宜度指数时空分布

生态调度期间(5 月 27 日至 6 月 3 日),产卵综合适宜度指数时空变化情况如图 4 所示。生态调度第 1 天(5 月 27 日),评估区域内平均流速为 0.66 m/s,平均水深为 6.37 m,产卵综合适宜度指数均值为 0.4,说明此时未充分达到四大家鱼产卵所需要的水动力条件;生态调度第 3 天(5 月 29 日),随着出库流量增大,

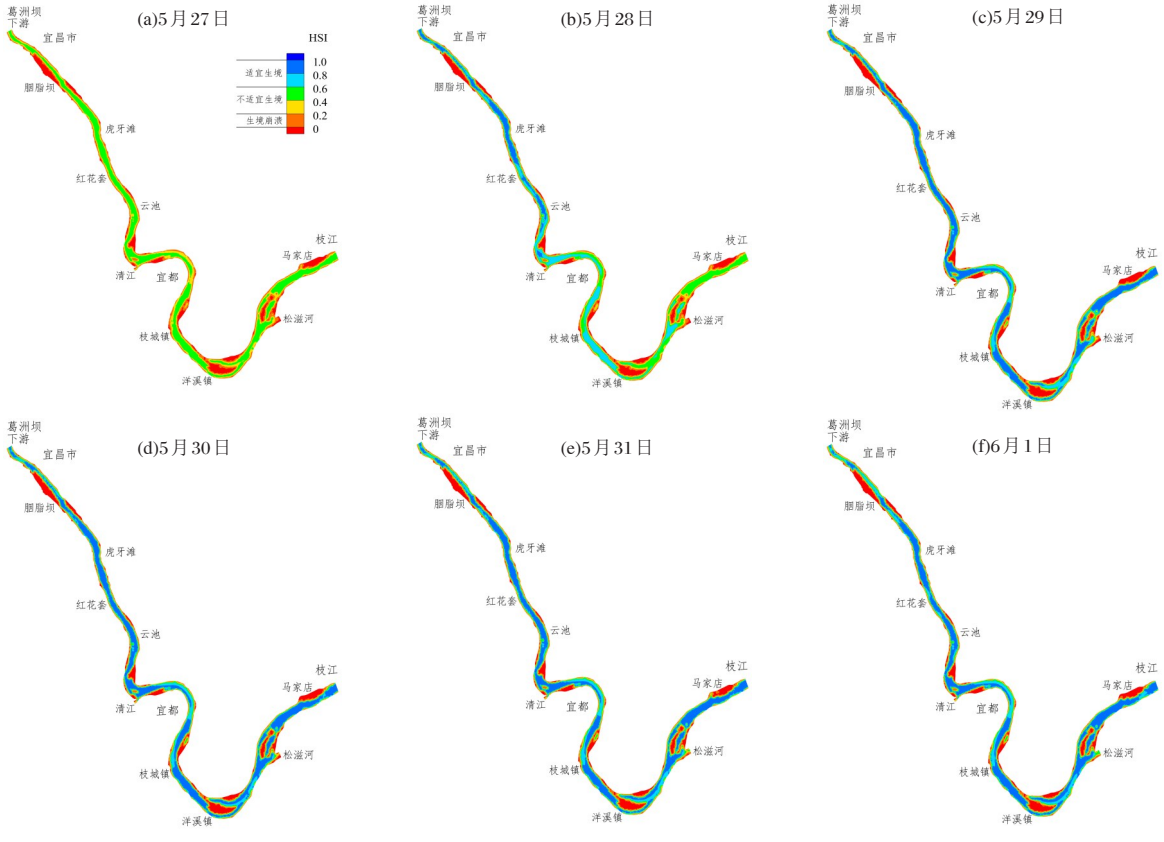


图 4　生态调度期间研究范围内四大家鱼产卵综合适宜度指数的时空分布

Fig.4　Spatial and temporal distribution of the comprehensive spawning habitat suitability index during the ecological operation period

胭脂坝、虎牙滩、宜都、枝城和枝江等江段流速和水深增加，出现了适宜四大家鱼产卵的水动力条件，评估区域内产卵综合适宜度指数增加较快，均值达到0.75，适宜四大家鱼产卵位置逐步向下游移动。生态调度后期，评估区域内产卵综合适宜度指数均值在0.8左右，维持在较高水平。

2.2　加权可利用面积变化

生态调度期间，葛洲坝至枝江江段产卵加权可利用面积总体呈现稳定增加的趋势（图5-a）。生态调度第4天（5月30日）达到峰值，约71.00 km²，调度后期维持在64.55~70.71 km²；产卵加权可利用面积占研究河段总面积的比例由调度第1天的30.45%增加至调度后期约55%。调度最后一天（6月3日）产卵加权可利用面积减少约5.3 km²，主要原因是三峡出库流量较于前一天（6月2日）仅增加100 m³/s，水位增幅减少，未能满足四大家鱼产卵最适宜的涨水条件。

研究表明，葛洲坝至枝江江段适宜产卵生境（综合适宜度指数0.6~1.0）的区域占评估范围总面积占比增加较为明显（图5-b），由4.67%增加至约60%；不适宜产卵生境（综合适宜度指数0.2~0.6）的区域占比明显减少，由54.45%下降至约4%；产卵生境崩溃（综合适宜度指数0~0.2）的区域面积变化较小，下降了约2%，主要分布在河道滩槽没有过水的区域。通过生态调度，主要将研究范围内不适宜四大家鱼的产卵生境转换为适宜产卵的区域。

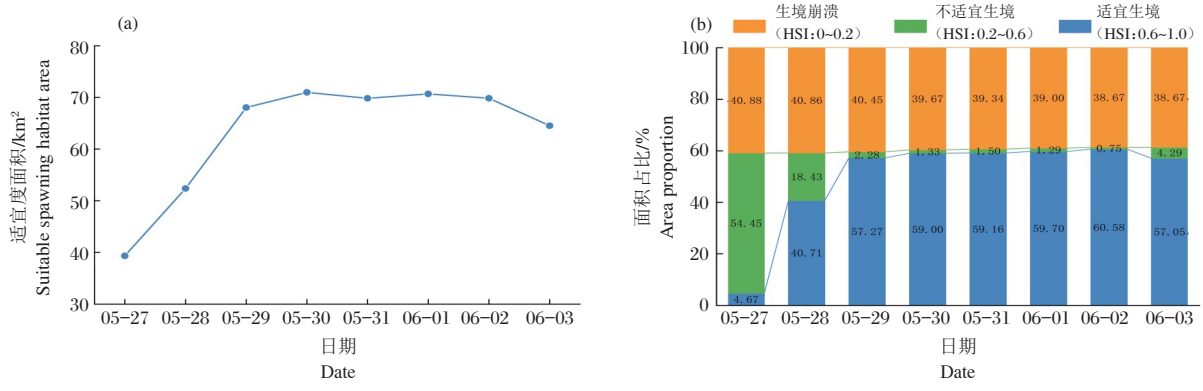


图5　产卵综合适宜度面积变化(a)及指数等级面积占比(b)

Fig.5　Proportion of area at each level of the comprehensive spawning habitat suitability index

3　讨论

3.1　生态调度能显著改善四大家鱼的产卵生境

2023年三峡水库生态调度期间，葛洲坝至枝江江段约60%区域产卵综合适宜度指数呈现增加趋势，产卵综合适宜度指数均值由0.4增加至0.8；产卵加权可利用面积最大值达到71.00 km²，占该江段总面积比例由30.45%增加至约55%；适宜产卵生境的区域明显增加，占评估范围总面积比例由4.67%增加至约60%。表明2023年三峡水库生态调度显著改善了葛洲坝至枝江江段四大家鱼产卵生境质量。

3.2　生态调度水温对四大家鱼产卵效果的影响

水温是影响四大家鱼生命活动的主要因素，为了更好地理解水温变化对四大家鱼产卵栖息地适宜性的影响，本研究运用所建立的生境质量评估模型对2种水温情景下的四大家鱼产卵生境进行模拟评估。

5月27日至6月3日生态调度期间，假设三峡水库生态调度方案不变、起调水温采用宜昌江段5月平均水温20℃，与实际生态调度（起调水温为20.95℃）情景下的产卵加权可利用面积对比如图6所示。在生态调度期间，2种情景下产卵加权可利用面积均有明显的增加，占研究区域总面积的比例分别增加了25%和20%。相较于实际起调水温情景，起调水温下降至20℃情景下，适宜家鱼产卵栖息的区域大幅度减小，产卵加权可利用面积最大值由71.00 km²减少至59.69 km²，适宜生境等级区域的最高面积占比由60.58%降至53.88%（图7）。

选择2个情景下产卵综合适宜面积最大的一天，即第4天（5月30日）进行起调水温改变与实际生态调度下的空间差值分析，结果如图8所示。相较于实际生态调度起调水温20.95℃情景，起调水温20℃情景下，几乎所有区域的产卵综合适宜度指数均呈现不同程度的下降，下降幅度为0.1~0.2。

综上，四大家鱼产卵受水温影响较大，因此在进行水库生态调度时必须考虑水库下泄水温度，建议三峡水库在满足四大家鱼产卵最佳水温条件下开展生态调度，以最大程度地提高四大家鱼的产卵生境适宜度。

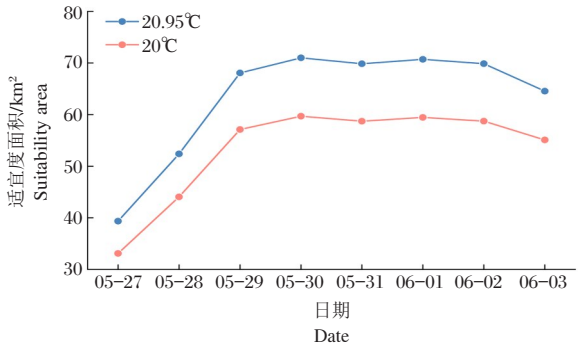


图6　不同起调水温的产卵适宜度面积变化

Fig.6　Comparison of the suitable spawning habitat areas under two scenarios

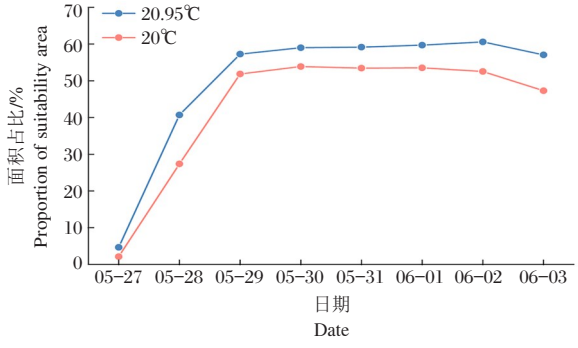


图7　不同起调水温的适宜生境等级面积占比

Fig.7　Comparison of the proportion for suitable spawning habitat areas under two scenarios

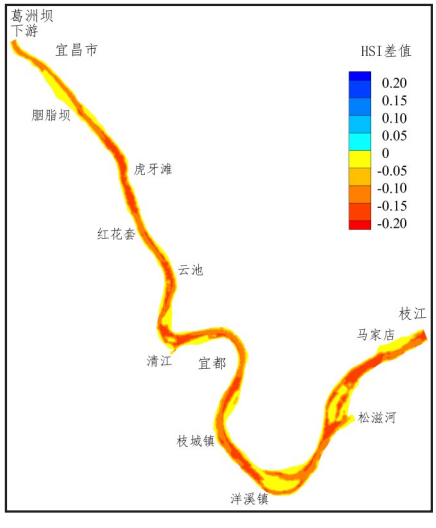


图8　2种情景下研究区域综合适宜度差值的空间变化

Fig.8　Spatial variation of HSI differences under two scenarios

4　结论

（1）选择水位变幅、水深、流速、水温4个主要生境因子，建立了耦合二维水动力学模型和产卵栖息地适宜度曲线的四大家鱼产卵生境质量评估模型，实现了产卵综合适宜度指数时空分布规律的精细化模拟。

（2）2023年三峡水库生态调度显著改善了葛洲坝至枝江江段四大家鱼产卵生境质量，适宜四大家鱼产卵的区域面积明显增加。

（3）四大家鱼产卵受水温影响较大，建议三峡水库在满足四大家鱼产卵最佳水温条件下开展生态调度。

参考文献

柏海霞,彭期冬,李翀,等,2014. 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, 12(3):249-257.

戴凌全,戴会超,李玮,等,2022. 兼顾四大家鱼产卵需求的梯级水电站生态调度[J]. 水力发电学报, 41(5):21-30.

戴凌全,王煜,戴会超,等,2021. 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, 34(7):1710-1718.

郭文献,谷红梅,王鸿翔,等,2011. 长江中游四大家鱼产卵场物理生境模拟研究[J]. 水力发电学报, 30(5):68-72.

李博,郜星晨,黄涛,等,2021. 三峡水库生态调度对长江中游宜昌江段四大家鱼自然繁殖影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 30(12):2873-2882.

李建,夏自强,2011. 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, 42(6):678-684.

李建,夏自强,戴会超,等,2013. 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, 44(8):892-900.

林俊强,彭期冬,黄真理,2015. 河流鱼类鱼卵运动的水力学研究进展[J]. 水利学报, 46(7):869-876.

屈霄,郭传波,熊芳园,等,2020. 梯级开发下金沙江下游鱼类群落结构特征及环境驱动因子[J]. 水生态学杂志, 41(6):46-56.

孙嘉宁,张土乔,Zhu D,等,2013. 白鹤滩水库回水支流的鱼类栖息地模拟评估[J]. 水利水电技术, 44(10):17-22.

王瑞玲,黄锦辉,葛雷,等,2020. 基于黄河鲤栖息地水文-生态响应关系的黄河下游生态流量研究[J]. 水利学报, 51(9):1175-1187.

王煜,唐梦君,戴会超,2016. 四大家鱼产卵栖息地适宜度与大坝泄流相关性分析[J]. 水利水电技术, 47(1):107-112.

夏继红,秦如照,窦传彬,等,2022. 中小河流鱼类生境适宜性评估模型与等级分区[J]. 水利水电科技进展, 42(3):9-13,31.

徐薇,刘宏高,唐会元,等,2014. 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, 35(2):1-8.

徐薇,杨志,万力,等,2019. 银盘电站蓄水前后乌江下游产漂流性卵鱼类自然繁殖变化[J]. 水生态学杂志, 40(6):8-15.

徐薇,杨志,陈小娟,等,2020. 三峡水库生态调度试验对四大家鱼产卵的影响分析[J]. 环境科学研究, 33(5):1129-1139.

徐薇,金瑶,陈桂亚,等,2023. 三峡水库十年生态调度(2011−2020年)期间下游沙市江段产漂流性卵鱼类自然繁殖变化[J]. 湖泊科学, 35(5):1729−1741.

易雨君,乐世华,2011. 长江四大家鱼产卵场的栖息地适宜度模型方程[J]. 应用基础与工程科学学报, 19(S1):117−122.

赵越,周建中,许可,等,2012. 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), 44(4):45−50.

周湖海,田辉伍,何春,等,2019. 金沙江下游巧家江段产漂流性卵鱼类早期资源研究[J]. 长江流域资源与环境, 28(12):2910−2920.

Baumgartner M T, Pitágoras A P, Baumgartner G, et al, 2020. Storage or Run−of−river Reservoirs: Exploring the Ecological Effects of Dam Operation on Stability and Species Interactions of Fish Assemblages[J]. Environmental Management, 65(2):220−231.

Li M, Duan Z, Gao X, et al, 2016. Impact of the Three Gorges Dam on reproduction of four major Chinese carps species in the middle reaches of the Changjiang River[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 34(5):885−893.

Zhang P, Qiao Y, Schineider M, et al, 2018. Using a hierarchical model framework to assess climate change and hydropower operation impacts on the habitat of an imperiled fish in the Jinsha River, China[J]. Science of The Total Environment, 646:1624−1638.

Zhu Z, Yang Z, Bai F, et al, 2018, A New Well−Balanced Reconstruction Technique for the Numerical Simulation of Shallow Water Flows with Wet/Dry Fronts and Complex Topography[J]. Water, 10(11):1661.

（责任编辑 万月华）

Effect of Ecological Operation of Three Gorges Reservoir on Spawning Habitat Area of the Four Major Chinese Carps

BAI Feng-peng[1,2,3], REN Yu-feng[4], MEI Jie[5], LIANG Zhi-ming[4],
MA Yi-ming[4],YANG Zhong-hua[5]

(1. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, P. R. China;
2. Key Laboratory of Ecological Regulation of Non-point Source Pollution in Lake and Reservoir Water Sources, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430051, P. R. China;
3. Key Laboratory of River and Lake Governance and Flood Control of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430051, P. R. China;
4. China Yangtze Power Co., Ltd, Yichang 443000, P. R. China;
5. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: Ecological operation of hydropower facilities is necessary to protect fishery resources and the effect of the ecological operation can be evaluated by monitoring the scale of spawning habitat for target fish species. From May 27 to June 3, 2023, an ecological operation experiment at Three Gorges Reservoir (TGR) was carried out, aiming to increase natural reproduction of the four major Chinese carps downstream of Gezhouba Dam, a run-of-the river dam below TGR at Yichang. In this study, a section of the Yangtze River from Gezhouba Dam to Zhijiang was investigated. The impact of ecological regulation on the spawning habitat area of the four major Chinese carps was estimated based on model simulations. The quality assessment model for spawning habitat was established by coupling a two-dimensional hydrodynamic model to the spawning habitat suitability index (HSI) curve. Four major habitat factors (water level amplitude, water depth, flow rate, and water temperature) were selected as model parameters. The spatial and temporal distribution of the comprehensive spawning HSI was simulated and the change in suitable spawning habitat area was analyzed. Results show that during ecological operation in 2023, the comprehensive spawning habitat suitability index increased by 60% in the study section, and the proportion of suitable spawning habitat area (weighted available area) increased from 30.45% to 55%. The areas suitable for spawning for the four major Chinese carps, with a comprehensive spawning habitat suitability index ranging from 0.6 to 1.0, have significantly increased from 4.67% to 60% of the total study area. In conclusion, the ecological regulation of Three Gorges Reservoir in 2023 significantly improved the quality of spawning habitat for the four major Chinese carps from Gezhouba dam to Zhijiang.

Key words: ecological operation; four major Chinese carps; suitability index; habitat area; Three Gorges Reservoir