DOI:10.14188/j.1671-8844.2025.0051 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-12

基于水文水动力需求的重要水生生物自然产卵试验场选择策略研究

刘璇[1,2],张启凡[1,2],姜伟[1,2,4],曹光荣[1,2],李秋平[3],戴凌全[1,2,4*]

(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,湖北 武汉 430014; 2. 长江经济带生态环境国家工程研究中心,湖北 武汉 430014; 3. 长江水利委员会水文局长江三峡水文水资源勘测局,湖北 宜昌 443002; 4. 中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所 湖北 宜昌 443100)

摘要:恢复重要水生生物自然产卵是维护长江流域生物多样性的关键举措,而自然产卵试验场的科学选择是试验能否成功的决定性因素之一。以重要水生生物中华鲟为例,基于历史实测资料解析中华鲟产卵适宜水文水动力条件,耦合三维水动力模型和产卵适宜度模型,量化不同流量下潜在试验场产卵适宜度的空间分布特征,分析宜昌胭脂坝右岸分汊河道作为中华鲟产卵试验场的适宜性。结果表明:11月水温降至20.0℃以后满足中华鲟自然产卵对水温的需求,主河道流量增加能够有效提升试验场水深和流速适宜度,主河道流量每增加1000 m^3/s,分汊河道流速增加0.01~0.04 m/s,水深增加0.4~0.7 m;在具体试验场地选择上优先推荐在分汊河道下游河段,采取拦网、围网等局部区域封闭措施;在试验年份上建议在丰水年宜昌站流量大于13000 m^3/s时开展试验,在平水处或枯水年可采用生态调度、明渠引流、造流泵造流等调控措施改善试验区的水文水动力条件,进而提高产卵的成功率。研究成果可为中华鲟自然产卵试验场科学选址提供理论依据,也为其他重要水生生物产卵试验场选择提供方法指导。

关键词:中华鲟;自然产卵;试验场选择;适宜度模型;水文水动力需求

中图分类号:TV1 **文献标志码:**A

Research on the selection strategy for natural spawning trial site of important aquatic species based on hydrological and hydrodynamic requirements

LIU Xuan[1,2], ZHANG Qifan[1,2], JIANG Wei[1,2,4], CAO Guangrong[1,2], LI Qiuping[3], DAI Lingquan[1,2,4*]

(1. Yangtze Eco-environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Wuhan, 430014, China;
2. National Engineering Research Center of Eco-environment Protection for Yangtze River Economic Belt, Wuhan, 430014, China;
3. Three Gorges Bureau of Hydrological and Water Resources Survey , Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources, Yichang 443002, China;
4. Chinese Sturgeon Research Institute, ChinaThree Gorges Corporation, Yichang 443100, China)

Abstract: Restoring the natural spawning of important aquatic species is a key measure to preserve biodiversity

收稿日期:XXXX-XX-XX

作者简介:刘璇(1994-),女,工程师,博士,主要从事水文水资源方面的研究,E-mail: liu_xuan4@ctg.com.cn

通信作者:戴凌全(1986-),男,高级工程师,博士,主要从事生态水利过程调控方面的研究,E-mail: dai_lingquan@ctg.com.cn

基金项目:中国长江三峡集团公司项目资助(编号:202303294);湖北省自然科学基金创新群体项目(编号:2024AFA036);中国长江三峡集团公司重大科研项目(WWKY-2021-0351)

本文引用格式:刘璇,张启凡,姜伟,等.基于水文水动力需求的重要水生生物自然产卵试验场选择策略研究[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-12.

Citation: LIU Xuan, ZHANG Qifan, JIANG Wei, et al. Research on the selection strategy for natural spawning trial site of important aquatic species based on hydrological and hydrodynamic requirements[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-12.

in the Yangtze River Basin. The scientific selection of natural spawning trial sites is one of the decisive factors for the success of such restoration efforts. This article takes the Chinese sturgeon as an example, and the right branched river channel near Yanzhiba has been identified as a potential trial site. Based on historical field data, this study analyzed the hydrological and hydrodynamic conditions suitable for Chinese sturgeon spawning. By coupling a three-dimensional hydrodynamic model with a Habitat Suitability model, the spatial distribution characteristics of spawning suitability under different flow conditions were quantified. The results show that after the water temperature drops below 20.0℃ in November, it meets the natural spawning needs of Chinese sturgeon for water temperature. Increasing the discharge in the main channel could effectively improve the water depth and flow velocity suitability at the trial site. For every 1000 m^3/s increase in the main channel discharge, the flow velocity in the branched channel increases by 0.01～0.04 m/s, and the water depth increases by 0.4～0.7 m. In terms of specific trial site selection, it is recommended to prioritize the downstream section of the branched river channel and adopt local area closure measures such as blocking and fencing. It is recommended to conduct trial when the flow rate at Yichang station is greater than 13000 m^3/s in wet years. Increasing outflow through reservoir ecological operation, drawing water from the main Yangtze through open channel, artificially creating velocities by the pumps could be adopted in normal or dry years to improve the hydrological and hydrodynamic conditions in the trial area, thereby increasing the spawning success rate. This study provides a theoretical basis for the scientific selection of natural spawning trial sites for Chinese sturgeon and provide methodological guidance for selecting spawning sites for other important aquatic species.

Key words: Chinese sturgeon; natural spawning; selection of trial site; suitability model; hydrologic and hydrodynamic requirements

1 引言

长江流域江河-湖泊水势相连,为水生生物提供了优越的生长栖息环境,是水生生物多样性最为丰富的河流之一,其中鱼类资源尤为丰富,历史上记录分布鱼类443种[1-2]。自20世纪80年代,在气候变化、过度捕捞、工程建设等多重因素的共同影响下,长江流域生物多样性呈下降趋势,特别是位于长江生物链顶层的旗舰物种:中华鲟野生种群数量持续减少[3-5]。水生生物的种类和数量是流域生态系统健康状况的标志,为恢复长江流域水生生物多样性,相关机构采取了生态调度、过鱼设施、生境修复、十年禁捕等多种措施,取得了积极效果[6-7]。如三峡水库自2011年首次开展针对长江中游四大家鱼自然产卵生态调度试验以来,宜昌江段四大家鱼产卵量从2011年不足2亿粒增加至2024年超过340亿粒,生态调度对鱼类自然产卵促进效果显著[8-10]。但整体而言,针对长江中游四大家鱼等产漂流性卵鱼类效果明显,对于中华鲟等体长较大、长距离洄游的产粘沉性卵鱼类的生态调度仍处在研究之中,尚未付诸实施[11]。

中华鲟是大型溯河生殖洄游型鱼类,是我国一级重点保护野生动物[12]。1981年葛洲坝水利枢纽截流前,中华鲟的产卵场分布于金沙江下游至重庆之间,葛洲坝水利枢纽工程修建后,在湖北宜昌葛洲坝下江段形成了新的产卵场,但产卵规模远小于原产卵场,自然种群状况堪忧[13-14]。增殖放流是目前中华鲟保护最主要的方式,近40年来全国累计放流中华鲟总量约800万尾,其中三峡集团中华鲟研究所放流总量超过650万尾,承担了全国放流总量的80%以上,基本解决了中华鲟人工保护问题,有效降低了中华鲟灭绝的风险[15],但其野生种群自然产卵自2017年中断后至今仍未恢复。

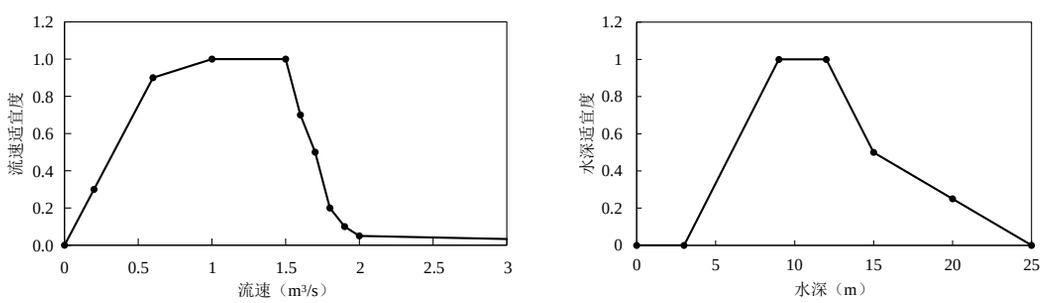
自然产卵是鱼类生活史的关键环节,为推动长江水生生物多样性保护,《中华人民共和国长江保护法》(2021)明确提出,应针对中华鲟等物种开展生境特征和种群动态的研究。开展自然条件下中华鲟产卵试验是恢复自然产卵必须的前置措施之一[16-18],其核心在于通过科学选择自然产卵试验场、人工调控流量等措施,营造满足中华鲟自然产卵的水文水动力条件。因此开展自然产卵试验场的选择策略研究有助于揭示中华鲟自然产卵的生态环境需求,是恢复中华鲟自然产卵的关键。

水文水动力条件是产卵试验场选择首要考虑的因素之一。宜昌胭脂坝右岸分汊河道位于葛洲坝中华鲟自然产卵场下游,该河段具备中华鲟栖息和繁殖的生态环境基础,且水动力环境对葛洲坝的

流量调控响应显著,具有潜在的试验场价值。本文深入研究该区域的水文水动力条件,通过理论分析、数值模拟等方法,明确不同流量下胭脂坝右岸分汊河道水动力适宜度指数的空间分布规律,提出中华鲟自然产卵试验场选择策略。研究结果可为中华鲟自然产卵试验场的科学选址提供理论支撑,为栖息地修复提供重要参考,对推动长江水生生物多样性保护具有重要意义。

2 中华鲟自然产卵水文水动力需求

根据中华鲟自然产卵场的历史监测数据,中华鲟产卵对环境条件的敏感性主要体现在水温、水文水动力、水质及河床底质等方面[19-20]。中华鲟倾向于选择水深较大、水流适中且底质为鹅卵石或者岩石的区域作为产卵场所,这些条件不仅为鲟卵提供了良好的附着基质和水流环境,也有利于受精和孵化。历史监测数据显示[21-22]:中华鲟产卵的最佳水温范围为16.0~20℃,当水温低于15.0℃或高于21.0℃时未观察到中华鲟产卵行为。每年秋季当产卵场水温降至一定阈值后,在水文水动力条件满足的条件下中华鲟可能开展繁殖活动。水文水动力条件包括流速和水深,流速对促进中华鲟产卵的作用主要体现在以下三方面:①适宜流速能够加速亲鱼性腺发育,并促进产卵和排精行为的发生;②适宜的水流可以清理产卵场卵石、岩石表面及缝隙中的泥沙和杂物,为受精卵黏附提供洁净基质,同时减小泥沙、杂物等对受精卵的损害,提高成活率;③产卵排精完成后,稳定的水流可确保水体中溶氧水平较高,为黏附于岩石或卵石上的受精卵提供适宜的孵化环境。根据1983—2002年中华鲟产卵日宜昌江段流速和水位监测资料[23-25],推算中华鲟发生自然产卵的流速范围为0.0~2.0 m/s,较适宜流速范围为0.6~1.0 m/s;水深范围为4.0~20.0 m,较适宜水深范围为9.0~12.0 m。结合中华鲟相关研究成果[29-32]和研究区域实地调查,提取中华鲟产卵流速和水深适宜度曲线如图1所示,并以此作为评价不同工况下潜在试验场水文水动力特性对中华鲟自然产卵适宜程度的重要依据。



(a)流速适宜度 (b)水深适宜度

图1 中华鲟产卵流速及水深适宜度曲线

Fig.1 Suitability curves of flow velocity and water depth for Chinese sturgeon spawning

3 胭脂坝潜在试验场适宜度模型构建

3.1 胭脂坝潜在试验场基本概况

中华鲟试验场的选择需尽可能满足水温、水文水动力、水质及河床底质等条件。水温主要受气温影响,与气候条件密切相关,其可控性较低。水质与河床底质受现有条件限制,在满足基本生态需求的前提下选择空间较为有限。综合上述因素,水文水动力条件是试验场选择优先考虑的指标。由于成年中华鲟体长通常在2.5~4.0 m,因此试验场水深需确保在4.0 m以上,同时应能保证适宜的流速。

长江中游宜昌江段胭脂坝右岸分汊河道全长5.0 km,面积1.0 km^2,距离葛洲坝下游中华鲟自然产卵场直线距离约10.0 km。区域位置及地形如图2所示,分汊河道河床底高程在29.7~40.5 m之间,当宜昌水文站流量为10000.0 m^3/s时(下同)平均水面宽度200.0 m,平均水深5.0 m,具备开展中华鲟自然产卵试验的基本条件。为了便于分析,根据分汊河道地形特征和水面宽度变化,将胭脂坝右岸分汊河道分为上游、中游和下游三个河段。其中上游段从分汊河道上边界至河面收窄处,此河段地形相对平坦,河床平均底高程36.7 m,河面宽阔且顺直,水面平均宽度220.0 m,水流流速较缓。中游段为河面束窄且弯曲的河段,此河段地形复杂,呈现左岸偏高、右岸偏低特征,河床平均底高程36.4 m,水面

平均宽度100.0 m,河道水深也相应由浅变深,水流流速较快。余下区域为下游河段,此河段宽阔顺直,地势总体较为平坦,包含有浅滩和深潭,河床平均底高程34.6 m,水面平均宽度190.0 m,具备较为稳定的水动力条件。

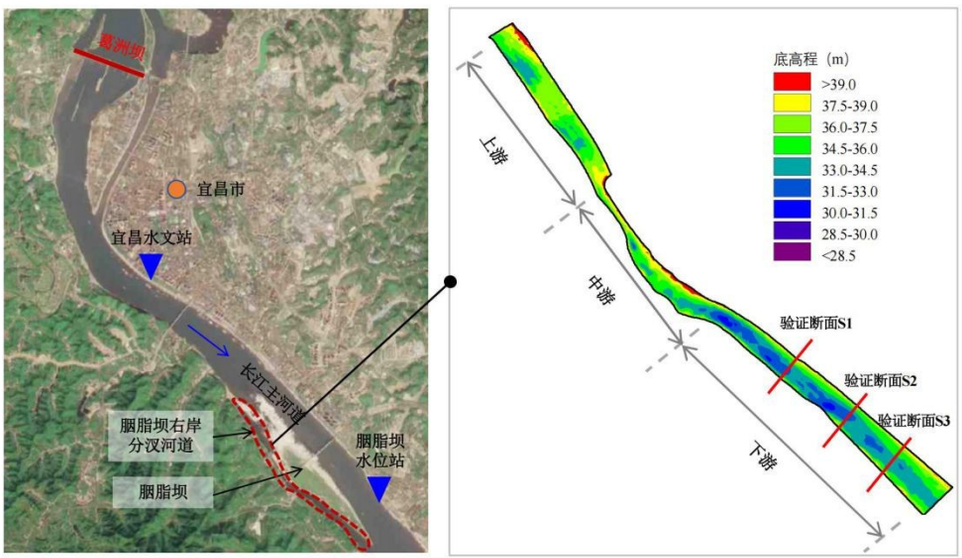


图 2 中华鲟潜在试验场位置示意图及地形

Fig.2 Location of potential trial site for Chinese sturgeon and topography

3.2 三维水动力模型构建及验证

(1)模型网格划分及边界条件

以胭脂坝右岸分汊河道为研究区域,采用三维水动力模型模拟不同来流条件下研究区域水动力分布特征,重点分析河流流量变化及随河床高程起伏而产生的流速、水深变化。地形数据采用1∶1000河床地形图,模型采用非结构的三角形网格(图3),能够较好地模拟试验场内复杂的地形特征,同时对复杂岸线的拟合精度较高。平面网格大小依据中华鲟短时游动范围和地形的空间分布确定,最终将区域划分为11422个三角形单元,网格最大面积为100.0 m^2,最小面积为30.0 m^2。模型在垂直方向等间距分为5层,时间步长设置为30 s。

基于实测数据设定模型边界条件,上边界采用实测胭脂坝分流流量作为流量边界条件,下边界则采用实测胭脂坝水文站水位作为边界条件,详见表1。

(2)水动力模型验证

根据三峡集团与长江三峡水文水资源勘测局2024年5月19日联合实测数据,宜昌水文站流量为10000 m^3/s,胭脂坝右岸分汊河道分流量为60 m^3/s,相应下游水位为40.0 m。选取S1、S2、S3三个断面(图2)的表层、底层流速模拟值与实测值进行对比分析,结果如图4所示。由图可知各断面流速模拟值与实测值接近,流速沿岸变化趋势一致,平均误差小于0.01 m/s。因此本文构建的胭脂坝水动力模型能够较准确地模拟潜在试验场的水动力特性,为分析中华鲟自然产卵试验场的水动力特性提供可靠工具。

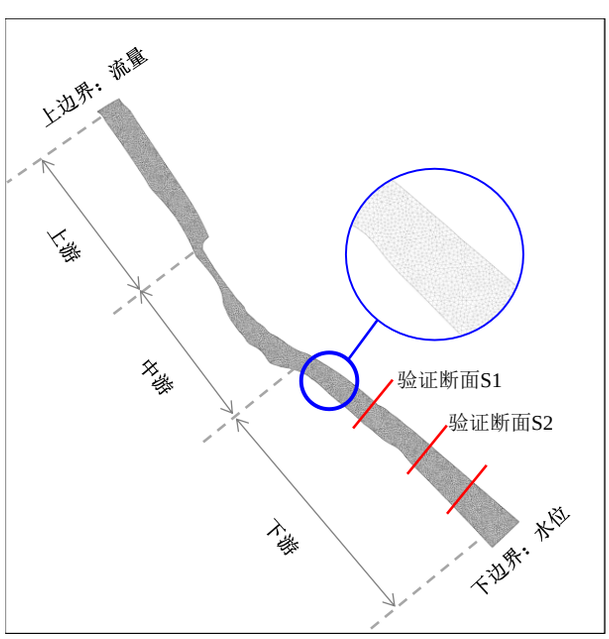
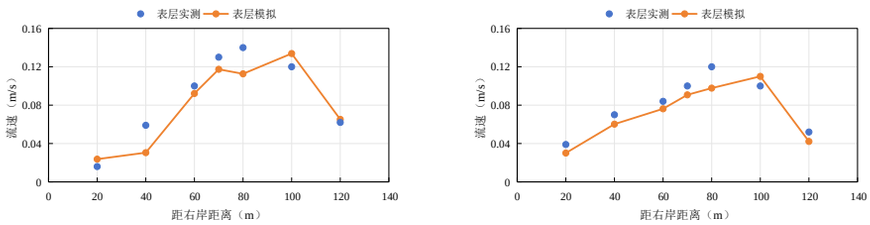


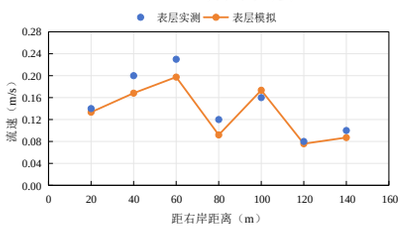
图 3 水动力模型网格划分示意图

Fig.3 Hydrodynamic model grid division

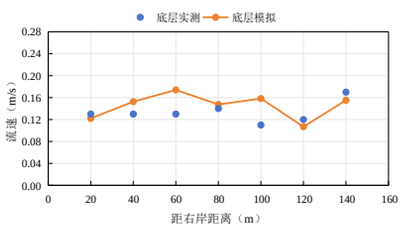


（*a*）S1断面表层

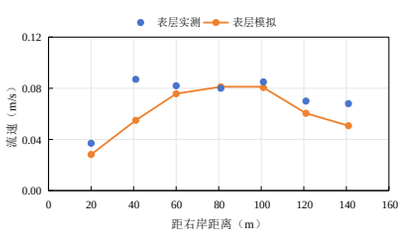
（*b*）S1断面底层



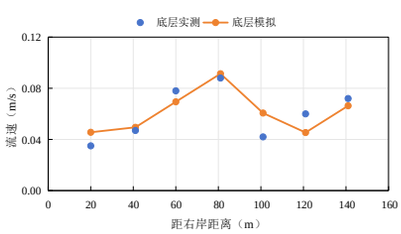
（*c*）S2断面表层



（*d*）S2断面底层



（*e*）S3断面表层



（*f*）S3断面底层

图 4　各断面模拟与实测流速对比图

Fig.4　Comparison of simulated and observed velocity

3.3　产卵场适宜度模型构建

产卵场适宜度指数(Habitat Suitability Index, HSI)是生态学中用于量化物种丰富度和生态变量之间关系的方法[26-28]。通过构建产卵场适宜度指数,综合评价其产卵所需关键生境因子,赋予各生境因子相应权重,并计算整体*HSI*值,进而确定产卵场适宜度的空间分布。产卵场适宜度模型的基本假定如下:①适宜度是流速、水深等水文要素的函数;②流速、水深和河床质等因素对物种数量和分布产生影响,这些因素相互作用,共同决定产卵场微生境条件;③在模拟过程中河床形态保持不变。产卵场适宜度指数计算方法有如下三种:

$$HSI_i = CSF(V_i) \times CSF(H_i) \times CSF(C_i) \quad (1)$$

$$HSI_i = (CSF(V_i) \times CSF(H_i) \times CSF(C_i))^{1/3} \quad (2)$$

$$HSI_i = \min(CSF(V_i), CSF(H_i), CSF(C_i)) \quad (3)$$

式中,HSI_i为每个网格单元的栖息地适宜度指数,i为网格序号;$CSF(V_i)$是流速适宜值;$CSF(H_i)$是水深适宜值;$CSF(C_i)$是河道指标适宜值,包括河床质和遮蔽物。其中乘积法(公式(1))通过将各指标适宜度指数相乘,反映其综合作用。立方根法(公式(2))将各指标适宜度指数相乘后取几何平均,既能够反映生境因子的综合效应,又能避免单一因子对适宜度指数过度放大或缩小。最小值法(公式(3))将生境因子中最不适宜的适宜度值作为产卵场适宜度指数,即栖息地适宜度由限制性最强的环境因子决定。

为平衡多环境因子综合影响,避免极端值,本研究采用立方根法(公式(2))评价产卵场适宜度。基于中华鲟对流速、水深和河道特征的适宜度指数曲线,确定不同流量下各单元对应的适宜度指数。试验场域底质主要为10~50 cm的卵圆或扁圆卵石叠加构成且分布均匀,由于河段内底质特性受流量变化影响较小,在计算中将C_i值默认为1,重点考虑流速和水深对产卵场适宜度的综合影响。

产卵场适宜度指数以0~1的数值表示影响因子(水深、流速、河道指标)对中华鲟产卵的影响,最适宜条件赋值为1,完全不适宜条件赋值为0。

4　不同工况下产卵适宜度及试验场选择策略

4.1　水文情势分析及模拟工况设置

根据三峡水库正式蓄水后(2010—2024年)宜昌站多年日均水温数据分析(图5),11月初宜昌站

水温可降至20.0℃以下,满足中华鲟产卵的水温条件。因此拟在11月开展中华鲟自然产卵试验,并进一步分析宜昌站11月流量情势。

2010—2024年宜昌站11月流量范围为6664~14396 m^3/s,采用皮尔逊III型曲线对11月平均流量进行频率分析,结果表明:枯水年11月平均流量低于7662 m^3/s,平水年11月平均流量介于7662~10141 m^3/s,丰水年11月流量超过10141 m^3/s。历史监测数据显示,当宜昌站流量小于9500 m^3/s时,胭脂坝右岸分汊河道无分流量,分汊河道中下游水体由主河道倒灌进入,无法形成中华鲟产卵适宜的流速条件。因此本研究选取宜昌站流量大于9500 m^3/s的情景进行模拟分析,以确保试验场能够形成适宜的流速和水深条件。

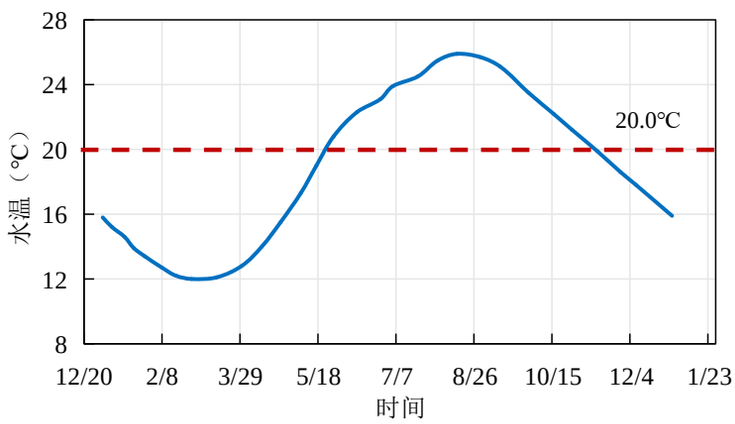


图5 2010—2024年宜昌站日平均水温过程

Fig.5 Daily average water temperature at Yichang station from 2015 to 2024

为全面评估不同流量下胭脂坝右岸分汊河道水文水动力特征,设置了以下六种流量递增工况:宜昌站流量分别为10000 m^3/s、11000 m^3/s、12000 m^3/s、13000 m^3/s、14000 m^3/s和15000 m^3/s,其中工况1对应平水年,工况2至工况6对应丰水年。根据长江三峡水文水资源勘测局近年监测结果,得出不同工况下分流量及下游水位,如表1所示。

表1 分汊河道水文水动力模拟工况

Table 1 Hydrodynamic simulation scenarios for the branched river channel

工况	长江主河道流量(宜昌水文站)(m^3/s)	胭脂坝右岸汊道流量(m^3/s)	下游水位(m)	典型年
1	10000	60	40.0	平水年
2	11000	75	40.5	丰水年
3	12000	100	41.2	丰水年
4	13000	120	41.6	丰水年
5	14000	150	42.0	丰水年
6	15000	200	42.4	丰水年

4.2 分汊河道水动力分布特征分析

虽然中华鲟属于底栖性鱼类,但试验场水深相对较浅且中华鲟体型较大,故本研究主要关注水体中层流速的变化特征。基于设定的6种模拟工况,分别模拟不同工况下分汊河道流速和水深的空间分布情况(图6和图7)。结果表明:不同工况下试验场上游、中游、下游流态基本一致,水流沿河道向下至河道中游处河面变窄,水深较浅,流速变大;河道下游处河面变宽,水深较大,流速趋稳。整体而言,试验场上游和下游流速略小于中游流速,下游水深明显高于上游和中游。

进一步分析不同工况下试验场的流速和水深变化规律(图8)。各工况平均流速变化幅度较小(图8(a)),工况1至工况6的平均流速分别为0.10 m/s、0.11 m/s、0.13 m/s、0.15 m/s、0.17 m/s和0.22 m/s。表明随着宜昌站流量增加,试验场流速略有提升,宜昌站流量每增加1000 m^3/s,试验场平均流速可增加0.01~0.04 m/s。工况1至工况6最大流

速范围是0.83~1.23 m/s,主要分布在中游河段束窄区域,属于局部区域极值,这种流速分布特征与河道形态密切相关。从工况1至工况6流速分布范围逐渐扩大,尤其是丰水年工况下(工况5、6),最大流速可达1.02 m/s、1.23 m/s,与最小流速差值明显增大,表明随着宜昌站流量增加,胭脂坝右岸分汊河道流速空间分布异质性增强,中游和下游河段的流速明显提升。

不同工况下水深随流量变化呈现较为规律的空间分布特征(图8(b))。工况1至工况6的平均水深依次为4.6 m、5.1 m、5.8 m、6.2 m、6.6 m和7.0 m,表明随着宜昌站流量增加,试验场平均水深逐渐升高,宜昌站流量每增加1000 m^3/s,试验场平均水深可增加0.4~0.7 m。各工况水深最小值范围在0.0~2.3 m之间,主要分布在岸边浅滩,水深最大值范围在9.8~12.2 m之间,主要分布在下游河段,表明下游河段易形成深水区,尤其是工况4至工况6中深水区的范围显著大,中华鲟产卵的水深条件更加适宜。

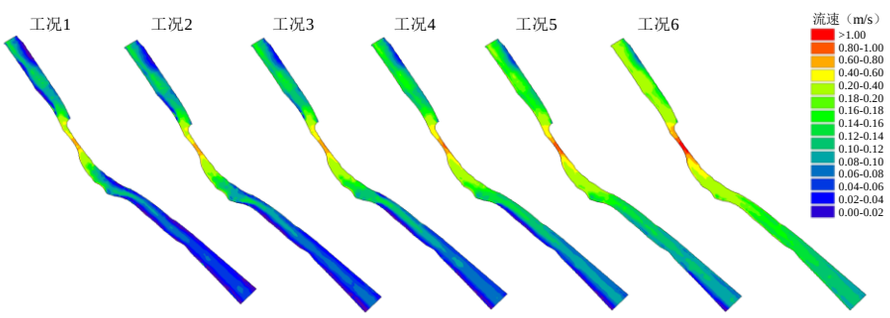


图6 不同工况胭脂坝右岸分汊河道流速分布

Fig.6 Velocity distribution in the right branched river of Yanzhiba under different scenarios

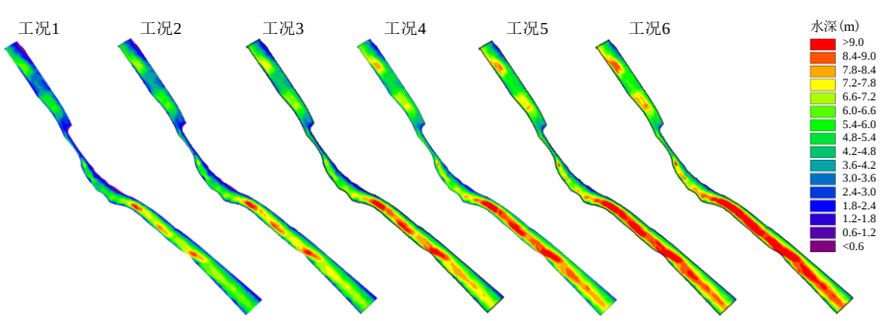


图7 不同工况下胭脂坝右岸分汊河道水深分布

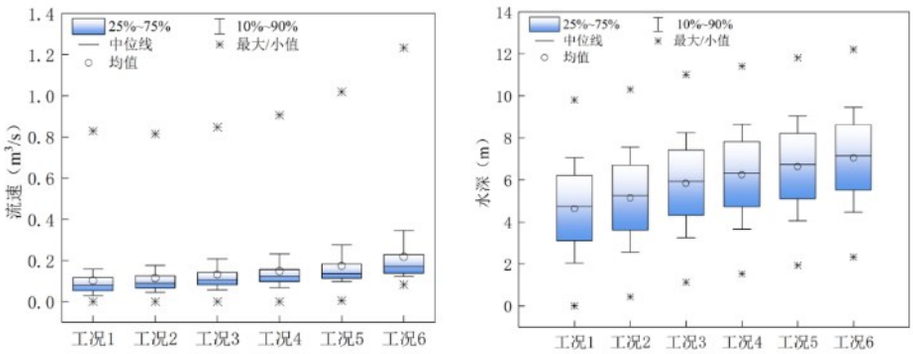
Fig.7 Water Depth Distribution in the right branched river of Yanzhiba under different scenarios

通过分析不同工况下流速和水深,发现胭脂坝右岸分汊河道初步具备中华鲟产卵适宜的水动力条件。从水文需求角度看,中华鲟产卵较适宜流速范围为0.6~1.0 m/s,较适宜水深范围为9.0~12.0 m,模拟结果表明,试验场下游区域更容易满足上述产卵条件,而上游河段水深较浅,中游束窄段则由于水深较浅,且局部区域存在流速过大的情况,可能不利于产卵。因此在试验场的选择过程中应重点关注下游河段的适宜度。

4.3 分汊河道产卵适宜度分析

(1)流速适宜度指数分析

随着长江主河道流量增加,胭脂坝右岸分汊河道流速及水深分布也随之变化。为了分析不同工况下适宜流速的空间分布情况,绘制了流速适宜度指数分布图,如图7所示。试验场整体呈现出中游河段流速适宜度最高,下游次之;河岸附近流速适宜度低于河道中心,各工况流速适宜度分布基本一致。各工况中游河段的流速适宜度指数值大多在0.6~1.0,流速适宜度较高,表明仅从流速适宜度指数上看中游区域更适宜中华鲟产卵。上游和下游区域的流速适宜度指数较低。工况1至6随着流量增加高适宜度区域的范围逐渐增大,表明主河道流量增加可以显著提升试验场的流速适宜度指数。在平水年工况下(工况1、2),上游和下游河段的流速适宜度指数值大多在0.1~0.4,适宜性较低,表明在平水年工况下上游和下游河段可能无法满足中



(a)流速 (b)水深

图 8 不同工况下胭脂坝右岸分汊河道流速和水深统计分析

Fig.8 Statistical analysis of velocity and water depth in the right branched river of Yanzhiba under different scenarios

华鲟自然产卵的流速需求。在丰水年工况下(工况5、6),中游河段和下游河段的上半部分区域适宜度指数较高,表明在丰水年工况下,该区域可以满足中华鲟自然产卵的流速需求。

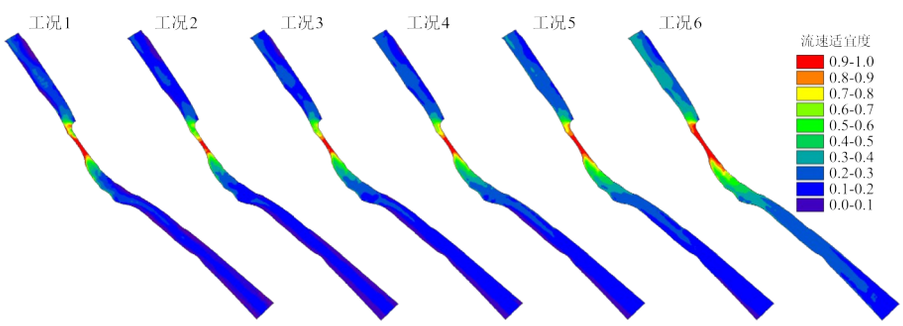


图 9 不同工况下胭脂坝右岸分汊河道流速适宜度指数分布

Fig.9 Velocity suitability index distribution in the right branched river of Yanzhiba under different scenarios

(2)水深适宜度指数分析

图8展示了不同工况下的水深适宜度指数分布情况。各工况水深适宜度分布基本一致,分汊河道整体呈现出下游河段水深适宜度最高、上游次之、中游最低;岸边水深适宜度低于河道中心。各工况下游河段的水深适宜度指数值大多在0.6~1.0,水深适宜度指数较高,表明下游区域的水深更接近中华鲟产卵的适宜水深范围。上游和中游区域的水深适宜度指数较低,尤其是中游束窄河段水深偏浅,不利于形成适宜的产卵环境。

从工况1到工况6随着流量的增加,水深高适宜度区域的范围逐渐增大,表明主河道流量增加可以显著提升试验场的水深适宜度。在平水年工况下,上游和中游河段的流速适宜度指数值大多在0.1~0.4,适宜性较低。表明在平水年工况下,上游和中游河段可能无法满足中华鲟自然产卵的水深需求。在丰水年工况下(工况5、6),下游河段水深基本处于适宜范围,上游河段的部分区域适宜度指数较高,中游区域的水深适宜度虽然有所增加,但仍然无法形成大面积的高适宜区。

(3)胭脂坝分汊河道产卵适宜度指数分析

图9展示了胭脂坝右岸分汊河道组合适宜度指数分布,组合宜度指数综合考虑了流速和水深的共同作用,能够更全面地反映试验场的总体适宜性。由图9可知上游河段的栖息地适宜度指数较低,多在0.4以下,表明上游河段流速和水深的综合条件不理想。下游河段的栖息地适宜度指数较高,尤其是下游河段的上半部分区域,该区域的水动力条件更适宜中华鲟的产卵需求。受流速影响,中游束窄段存在局部地区适宜度指数达到0.6以上,但未能形成大面积高适宜区。在平水年工况下(工况1、2),试验场整体栖息地适宜度指数偏低,只有下游河段局部区域达到较高的适宜水平。在丰水年工况下(工况5、6),栖息地适宜度高值区面积显著增加,表明高流量条件有助于改善试验场的整体适宜性。

胭脂坝右岸分汊河道的适宜度指数分布具有明显的空间异质性。下游区域由于水深较大且流

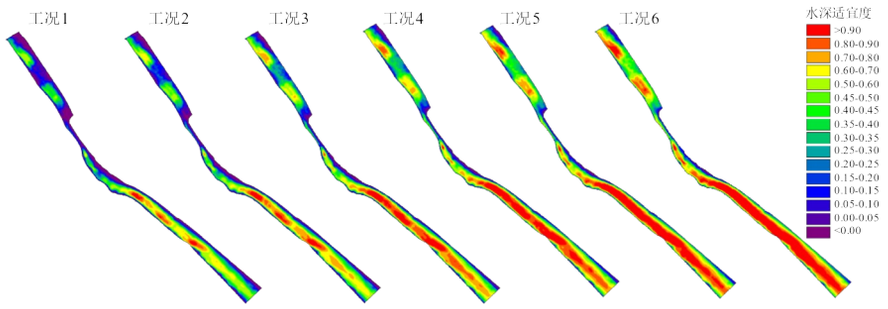


图 10　不同工况下胭脂坝右岸分汊河道水深适宜度指数分布

Fig.10　Water depth suitability index distribution in the right branched river of Yanzhiba under different scenarios

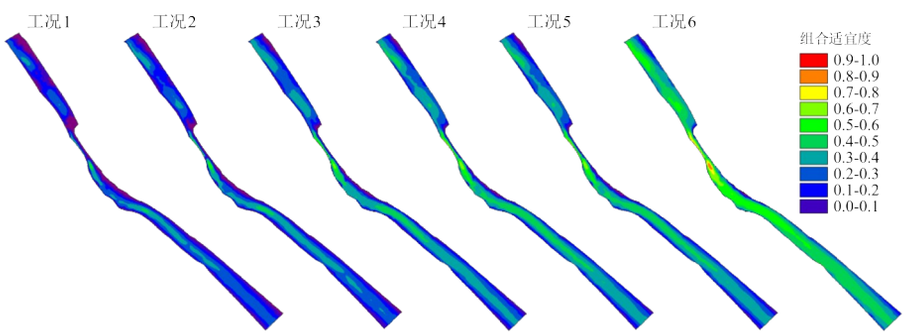


图 11　不同工况下胭脂坝右岸分汊河道栖息地适宜度指数分布

Fig.11　HSI distribution in the right branched river of Yanzhiba under different scenarios

速适宜,是栖息地适宜度指数的高值区,可以优先考虑作为试验场。中游束窄河段,流速偏大,由于部分区域水深偏浅,未能形成大面积适宜性较高的区域。此外流量的变化对适宜度指数的影响较为显著,随着主河道流量增加,高适宜区的面积逐渐增大,尤其是在丰水年工况下,下游区域的产卵适宜度指数显著提升,更有利于中华鲟的产卵活动,表明高流量条件有助于改善试验场的整体适宜性。

5　调控流量对中华鲟自然产卵试验的可行性分析

长江主河道流量变化对胭脂坝右岸分汊河道的水深和流速适宜度具有显著影响,在丰水年、平水年和枯水年不同流量情景下,应采取差异化的试验策略,以最大程度满足中华鲟的生态需求。

丰水年情景下当宜昌站11月日平均流量超过13000 m^3/s时,试验场下游河段大部分区域水深稳定在6.0 m以上,部分区域流速可达到0.6 m/s,符合中华鲟产卵的关键水动力条件。该情景下可利用自然流量在分汊河道下游区域开展中华鲟自然产卵试验,同时可采取拦网、围网等局部区域封闭管理措施,以提升产卵试验的成功率。

在平水年和枯水年情景下,宜昌站11月日平均流量通常低于11000 m^3/s,分汊河道的自然分流量较低,其水深和流速难以满足中华鲟产卵的水文水动力需求。尤其是流量低于9500 m^3/s时分汊河道无自然分流。因此在平水年和枯水年情景下,可采用三峡水库生态调度或分汊河道入口人工明渠引流等流量调控措施,以提高分汊河道的分流量和适宜度。还可采用造流泵局部造流的方式,共同营造更接近中华鲟自然产卵的适宜水动力条件,为中华鲟自然产卵试验提供保障。

6　结论及建议

本研究以长江中游宜昌江段胭脂坝右岸分汊河道为中华鲟产卵潜在试验场,构建了三维水动力模型及中华鲟产卵场适宜度模型,模拟并分析了长江主河道不同典型年下试验场流速、水深及栖息地适宜度指数的空间分布特征,系统评估了潜在试验场环境适宜性。研究提出了中华鲟自然产卵试验场选择策略,为确定中华鲟自然产卵试验区及试验时间提供重要技术支撑。主要结论如下:

(1)试验场的水动力特性具有显著的空间异质性。中游河段束窄区域的水深较浅、流速较大,局部区域出现流速极值,可能对中华鲟产卵环境造成不利影响。下游河段河道逐渐变宽,水深增加,形成深潭区域,流速适宜性较好,可为中华鲟自然产

卵提供较适宜的生境。

(2)长江主河道流量增加对试验场综合适宜度指数具有提升作用。中华鲟产卵试验期(11月)宜昌站流量范围为6369～15157 m^3/s,随着流量增加,试验场的水深和流速适宜度指数逐渐提升。尤其是在丰水年流量大于13000 m^3/s的工况下,下游河段易形成栖息地适宜度指数的高值区,能够满足中华鲟自然产卵对流速和水深的需求。

(3)丰水年可在长江宜昌江段胭脂坝右岸分汊河道下游区域开展中华鲟自然产卵试验,平水年和枯水年工况下,推荐使用生态调度、明渠引流、造流泵造流等方式调控分汊河道流量或流速,营造满足中华鲟自然产卵的生态环境条件。

中华鲟自然产卵试验涉及多个环节,包括室内亲鱼培育、亲鱼转运、生境因子营造、跟踪监测和亲鱼回捕等。在实际开展野外试验工作时,应根据中华鲟的生态需求,在考虑试验场水深、流速、底质等关键生境因子的同时,还需关注水温、溶解氧等要素对产卵的影响。此外由于中华鲟体型大、活动范围广、监测难度高,试验过程中需要结合环境DNA、声学遥测、视频监控及无人机技术等多种手段提升试验数据采集效率和精度。整体而言,中华鲟自然产卵试验需要根据现场实际情况逐步推进,并在多次试验的基础上不断优化监测和管理策略,以提高试验的成功率。

参考文献:

[1] 杨海乐,沈丽,何勇凤,等.长江水生生物资源与环境本底状况调查(2017-2021)[J].水产学报,2023,47(2):3-30.
YANG Haile, SHEN Li, HE Yongfeng, et al. Status of aquatic organisms resources and their environments in the Yangtze River system (2017-2021)[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(2): 3-30.

[2] 王振忠,鲁淼,卢兵友,等.加强长江水生生物多样性保护的若干思考[J].淡水渔业,2023,53,53(1):20-26.
WANG Zhenzhong , LU Miao, LU Bingyou, et al. Several speculations on strengthening protection of aquatic biodiversity in the Yangtze River[J]. Freshwater Fisheries, 2023, 53, 53(1): 20-26.

[3] 刘文成,李君轶,李鹏程,等.三峡蓄水以来葛洲坝下中华鲟产卵场河床质特征变化规律[J].水生生物学报,2024,48(4):568-578.
LIU Wencheng, LI Junyi, LI Pengcheng, et al. Variation regularity of bottom substrate characteristics in spawning ground of Chinese sturgeon downstream the Gezhouba Dam from impounding of the Three Gorge Reservoir[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(4): 568-578.

[4] 班璇,肖飞.葛洲坝下游河势调整工程对中华鲟产卵场的影响[J].水利学报,2014,45(1):58-64.
BAN Xuan, XIAO Fei. Influence of river regime adjustment project on Chinese sturgeon spawning sites downstream of the Gezhouba Dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(1): 58-64.

[5] Li Jian, Xia Ziqiang, Wang Yuankun. Impact of the Three Gorges and Gezhouba Reservoirs on ecohydrological conditions for Sturgeon in the Yangtze River, China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18 (12): 1563-1570.

[6] 吴俊东,王翔,翁永红,等.乌东德水电站集运鱼系统方案设计[J].人民长江,2022,53 (2):88-94.
WU Jundong, WANG Xiang, WENG Yonghong, et al. Scheme design of fish collection and transportation system of Wudongde hydropower station[J]. Yangtze River, 2022, 53 (2): 88-94.

[7] Li Qiongfang, Yu Meixiu, Zhao Jianhua, et al. Impact of the Three Gorges Reservoir operation on downstream ecological water requirements[J]. Hydrology Research, 2012,43(1-2): 48-53.

[8] 戴凌全,郜星晨,黄涛,等.三峡水库生态调度助力长江中游"四大家鱼"种群恢复[J].生命世界,2024,(2):32-35.
DAI Lingquan, GAO Xingchen, HUANG Tao, et al. The ecological operation of the Three Gorges Reservoir helped the recovery of the four major Chinese carps in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Life World, 2024, (2):32-35.

[9] 徐薇,金瑶,陈桂亚,等.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,2023,35(5):1729-1741.
XU Wei, JIN Yao, CHEN Guiya, et al. Changes of natural reproduction of fish producing drifting eggs in downstream Shashi section, middle reaches of Yangtze River during the ten-year (2011-2020) ecological operation of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(5):1729-1741.

[10] 曹光荣,杨霞,范向军,等.金沙江下游-三峡梯级水库生态环保工作实践[J].人民长江,2022,53(S2):28-33.
CAO Guangrong, YANG Xia, FAN Xiangjun, et al. Practice of ecological environmental protection of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River-Three Gorges[J]. Yangtze River, 2022, 53(S2):28-33.

[11] 王煜, 李金峰, 翟振男. 优化中华鲟产卵场水动力环境的梯级水库联合调度研究[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1):56-63.
WANG Yu, LI Jinfeng, ZHAI Zhennan. Research on joint operation of cascade reservoirs to optimize hydrodynamic environment for Chinese sturgeon spawning ground[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 53(S2):28-33.

[12] 姜伟, 杜合军, 陈沛, 等. 中华鲟物种保护的历程、难点和方向[J]. 水生生物学报, 2024, 48(9): 1617-1624.
JIANG Wei, DU Hejun, CHEN Pei, et al. Process, difficulties, and directions of species conservation of Chinese sturgeon[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(9): 1617-1624.

[13] 吴金明, 王成友, 张书环, 等. 从连续到偶发:中华鲟在葛洲坝下发生小规模自然繁殖[J]. 中国水产科学, 2017, 24(3): 425-431.
WU Jinming, WANG Chengyou, ZHANG Shuhuan, et al. From continuous to occasional: Small-scale natural reproduction of Chinese sturgeon occured in the Gezhouba spawning ground, Yichang, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(3): 425-431.

[14] Tao Jiangping, Qiao Ye, Tan Xichang, et al. Species identification of Chinese sturgeon using acoustic descriptors and ascertaining their spatial distribution in the spawning ground of Gezhouba Dam[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54 (21): 3972-3980.

[15] 袁磊. 保护长江水生生物多样性的"三峡方案"[J]. 中国三峡, 2020, (4): 78-81.
YUAN Lei. Three Gorges plan to protect aquatic biodiversity in Yangtze River[J]. China Three Gorges, 2020, (4): 78-81.

[16] 刘焕章. 中华鲟物种保护的若干问题探讨[J]. 水生生物学报, 2024, 48 (9): 1603-1609.
LIU Huanzhang. Discussion on some problems of species protection of Chinese sturgeon[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48 (9): 1603-1609.

[17] 李鹏程, 吴金明, 李君轶, 等. 天然水域产卵生境营造下长江鲟自然繁殖行为特征及效果[J]. 中国科学:生命科学, 2022, 55(2): 366-374.
LI Pengcheng, WU Jinmng, LI Junyi, et al. The characteristics and effect of natural reproductive behavior of Yangtze River sturgeon under the creation of spawning habitat in natural waterbody[J]. Scientia Sinica Vitae, 2022, 55(2): 366-374.

[18] 廖小林, 朱滨, 常剑波. 中华鲟物种保护研究[J]. 人民长江, 2017, 48 (11): 16-20+35.
LIAO Xiaolin, ZHU Bin, CHANG Jianbo. Study on species conservation of Chinese sturgeon[J]. Yangtze River, 2017, 48 (11): 16-20+35.

[19] Huang Anyang, Yao Jinzhong, Zhu Jiazhi, et al. Optimization of the flow conditions in the spawning ground of the Chinese sturgeon (Acipenser sinensis) through Gezhouba Dam generating units[J]. Scientific Reports, 2021, 11 (1): 14403-14403.

[20] Yi Yujun, Sun Jie, Zhang Shanghong. A habitat suitability model for Chinese sturgeon determined using the generalized additive method[J]. Journal of Hydrology, 2016, 534:11-18.

[21] 陶雨薇, 王远坤, 王栋, 等. 三峡水库坝下水温变化及其对鱼类产卵影响[J]. 水力发电学报, 2018, 37 (10): 48-55.
TAO Yuwei, WANG Yuankun, WANG Dong, et al. Assessing water temperature variations and impacts on fish spawning downstream of Three Gorges dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37 (10): 48-55.

[22] 惠二青, 毛劲乔, 戴会超. 上游水库水温情势变化对中华鲟产卵江段水温的影响[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38 (2): 44-48.
HUI Erqing, MAO Jingqiao, DAI Huichao. Effects of temperature variation at upstream of the Three Gorges Reservoir on Chinese sturgeon spawning reach[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (2): 44-48.

[23] 赵越, 周建中, 张华杰, 等. 三峡水库提前蓄水对中华鲟产卵的影响[J]. 水力发电学报, 2013, 32 (5): 83-89.
ZHAO Yue, ZHOU Jianzhong, ZHANG Huajie, et al. Impact of Three Gorges reservoir operation with ahead impounding water on Acipenser sinensis spawning[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32 (5): 83-89.

[24] 张辉, 危起伟, 杜浩, 等. 中华鲟自然繁殖的水文状况适合度研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27 (10): 75-81.
ZHANG Hui, WEI Qiwei, DU Hao, et al. Relationship between natural spawning activities of Chinese sturgeon and suitability of hydrological conditions[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Insitute, 2010, 27 (10): 75-81.

[25] 班璇, 李大美, 李丹. 葛洲坝下游中华鲟产卵栖息地适宜度标准研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42 (2): 172-177.
BAN Xuan, LI Damei, LI Dan. Application of habitat suitability criteria on spawn-sites of Chinese sturgeon in downstream of Gezhouba Dam[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42 (2): 172-177.

[26] Harris A, Mulchandani A, Stone M. Developing a

habitat suitability index with field data and hydraulic models[J]. River Research and Applications, 2024, 40 (10): 1903-1911.

[27] 孙志毅. 基于栖息地生态适宜度指数模型的河流鱼类生境模拟分析[J]. 水利规划与设计, 2020, (6): 86-90+94.
SUN Zhiyi. Habitat simulation analysis of river fish based on habitat ecological suitability index model[J]. Water Resources Planning and Design, 2020, (6): 86-90+94.

[28] Jelovica B, Marttila H, Bin Ashraf F, et al. A probability-based model to quantify the impact of hydropeaking on habitat suitability in rivers[J]. River Research and Applications, 2023, 39(3): 490-500.

[29] 易雨君, 王兆印, 陆永军. 长江中华鲟栖息地适合度模型研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(4):538-543.
YI Yujun, WANG Zhaoyin, LU Yongjun. Habitat suitability index model for Chinese sturgeon in the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 538-543.

[30] 常涛, 高欣, 刘焕章. 梯级调度下宜昌江段径流变化对中华鲟繁殖活动影响[J]. 水生生物学报, 2019, 43 (S1): 97-103.
CHANG Tao, GAO Xin and LIU Huanzhang. Variation of runoff in the Yichang reach of Yangtze River and its influence to the Chinese sturgeon spawning under the cascaded hydropower operation[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43 (S1): 97-103.

[31] 班璇, 高欣, Panayiotis DIPLAS, 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, Panayiotis DIPLAS, 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.

[32] 陶洁, 陈凯麒, 王东胜. 中华鲟产卵场的三维水流特性分析[J]. 水利学报, 2017, 48 (10): 1250-1259.
TAO Jie, CHEN Kaiqi, WANG Dongsheng. Analysis of three-dimensional flow characteristics of Chinese sturgeon spawning ground[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (10): 1250-1259.