Dai L Q, Jiang W, Li Z Y, *et al*. Open-channel diversion on improving water temperature at the natural spawning experimental ground for Chinese sturgeon in the Yanzhiba branch, Yichang [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(8): 082611. [戴凌全, 姜伟, 李志远, 等. 明渠引流对宜昌胭脂坝分汊河道中华鲟自然产卵试验场水温改善效果 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(8): 082611.]

明渠引流对宜昌胭脂坝分汊河道中华鲟自然产卵试验场水温改善效果

戴凌全[1] 姜 伟[1] 李志远[1] 常剑波[1,2] 苏 巍[1] 刘 璇[1]
李秋平[3] 朱佳志[1] 曹光荣[1]

(1. 中国长江三峡集团有限公司长江经济带生态环境国家工程研究中心, 武汉 430014; 2. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072; 3. 长江水利委员会水文局长江三峡水文水资源勘测局, 宜昌 443002)

摘要: 为应对葛洲坝下游中华鲟自然产卵场功能衰退及替代试验场构建中的水温制约难题, 本研究选取中华鲟自然产卵潜在试验场——宜昌胭脂坝右岸分汊河道为研究区域, 重点探究其因水体交换不畅导致的试验期间水温降幅过大及日内变幅显著的问题。首先基于历史数据明确了中华鲟自然产卵的适宜水温区间; 其次通过现场监测与水动力−水温耦合模型揭示了断流条件下分汊河道与长江主河道水温差异的形成原因; 在此基础上设计了4种明渠引流方案, 定量评估了不同引流方案对分汊河道水温的改善效果。结果表明: 断流条件下试验期(11—12月)分汊河道水温受气温变化主导, 较主河道低2.0—5.0℃, 且降温速率快, 导致适宜中华鲟自然产卵的水温窗口期大幅缩短。明渠引流可有效重塑分汊河道水温场, 使明渠下游一定距离内的水温与主河道节律同步, 从而将水温降至产卵下限的时间从11月中旬推迟至12月下旬, 适宜试验窗口期延长至40d左右; 分析了不同明渠规模对分汊河道水温的改善效果, 论证了以较小明渠开挖工程量为基础的水温调控策略的经济性和可行性。基于推荐方案, 2025年在胭脂坝分汊河道上游段开展了中华鲟自然产卵试验并取得了成功, 验证了明渠引流在维持水温方面的实际效果。本研究首次揭示了明渠引流对胭脂坝分汊河道水温的维持机制与改善效果, 为中华鲟自然产卵试验场的选址提供了科学依据和关键技术支撑。

关键词: 自然产卵; 胭脂坝分汊河道; 明渠引流; 水动力−水温耦合模型; 水温; 中华鲟

中图分类号: Q178.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)08-082611-11

doi: 10.3724/1000-3207.2026.2026.0017 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2026.0017

中华鲟是我国特有的珍稀江海洄游型鱼类, 是长江旗舰物种, 属于国家一级重点保护野生动物, 已被世界自然保护联盟(IUCN)列为极危(CR)物种[1, 2]。20世纪后期受过度捕捞、水利工程建设及栖息地退化等多重因素影响, 其自然种群规模萎缩, 洄游路线被阻隔, 葛洲坝建成后中华鲟在坝下约4 km江段形成新的产卵场[3—5]。自2013年起, 葛洲坝下游产卵场繁殖活动首次中断, 2017年至2025年已连续九年未监测到自然产卵, 原因是多方面的, 首先是野生亲鱼数量不足, 2025年底葛洲坝下游中华鲟亲鱼仅存10余尾, 此外产卵场水温节律改变、底质退化及局部流速不足等环境因素也显著降低了繁殖成功率[6, 7]。中华鲟自然种群延续面临较大风险, 保护与种群重建工作刻不容缓[8—10]。增殖放流是目前中华鲟保护最主要的方式, 截至2025年底全国累计放流中华鲟总量约1100万尾, 基本避免了中华鲟走向灭绝的风险, 但没有自然繁殖的保护不是真正的保护, 恢复其自然繁殖始终是最终目标。

收稿日期: 2026-01-15; **修订日期:** 2026-04-03

基金项目: 湖北省自然科学基金创新群体项目: 中华鲟自然产卵集群效应及繁殖互作机制研究(2024AFA036); 中国长江三峡集团公司重大科研项目: 受控条件下中华鲟自然产卵试验研究(WWKY-2021-0351) [Supported by the Innovation Group Project of Hubei Provincial Natural Science Foundation: Study on the Schooling Effect and Reproductive Interaction Mechanism of Nnatural Spawning of Chinese Sturgeon (No. 2024AFA036); Major Scientific Research Project of China Three Gorges Corporation(CTG): Experimental Study on Natural Spawning of Chinese Sturgeon Under Controlled Conditions (WWKY-2021-0351)]

作者简介: 戴凌全(1986—), 男, 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

通信作者: 曹光荣(1972—), 男, 博士; 主要从事水文水资源研究。E-mail: cao_guangrong@ctg.com.cn

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

为拯救野外中华鲟种族延续, 中国长江三峡集团于2021年启动了中华鲟自然产卵试验, 通过“人工+自然”接力的模式, 利用培育成熟的中华鲟亲鱼投放到产卵试验场, 辅以人工造流等调控手段促进中华鲟自然繁殖。试验可为中华鲟自然种群恢复提供关键支撑, 具有重要的现实意义与长远价值。宜昌胭脂坝江段历史上也是中华鲟自然产卵场, 胭脂坝右岸分汊河道底质条件与葛洲坝下游中华鲟自然产卵场相似, 是开展受控条件下中华鲟潜在的自然产卵试验场[11—13]。中华鲟自然产卵需要适宜的水温[14, 15], 自然产卵试验一般从11月中旬开始, 对应的宜昌江段流量在7500 m^3/s左右, 低于胭脂坝分汊河道断流的临界流量, 分汊河道无自然分流, 完全依赖主河道通过下游段倒灌[16]。现场监测表明: 断流后胭脂坝分汊河道因地形封闭、水体交换不畅、水力滞留时间长, 其热动态过程显著区别于主流河道, 呈现强烈的“气温驱动”特征, 水温普遍低于同期长江主河道2.0—5.0 ℃, 导致适宜中华鲟自然产卵的水温区间(16.0—20.0 ℃)在分汊河道内仅能维持约15d。适宜水温窗口期过短已成为制约该区域作为中华鲟自然产卵试验场的关键因素。因此, 如何通过工程延长分汊河道试验区内的适宜水温持续时间, 是实现中华鲟受控自然繁殖亟待解决的关键问题。

项目组提出了明渠引流工程方案, 即在分汊河道上游段通过人工开挖明渠, 将长江主河道水体引入分汊河道, 首要目标是维持分汊河道水温与主河道同步。目前关于河道水温的研究主要聚焦于水库库区[17—19]、坝下河道[20—22], 而引水工程多以水文连通性恢复、流量增加、泥沙淤积控制及常规水质指标的改善为目标, 水温常仅作为附带参数, 并非关注重点[23—26], 引水工程对半封闭河道区域水温维持的机制及引水改善效果的定量化评估研究仍较少。本研究针对胭脂坝分汊河道中华鲟自然产卵潜在试验场存在的水温问题, 在明确自然产卵所需水温的基础上, 通过现场监测与数值模拟相结合的方法, 深入剖析断流状态和明渠引流对分汊河道水温时空分布的影响机制, 定量评估其维持适宜产卵水温的效果, 并以2025年试验场实测水温与预测水温进行对比, 以期为中华鲟自然产卵试验场的选择提供科学依据和实践指导。

1　材料与方法

1.1　研究区域

宜昌胭脂坝右岸分汊河道(简称“分汊河道”)位于葛洲坝下游约10 km, 全长约5 km, 平均宽度约180 m, 平均水深约4 m, 底质以卵石为主, 是历史上中华鲟的自然产卵场之一, 具备作为潜在试验场的地形和底质条件[11—13]。分汊河道水文情势呈显著季节性变化: 汛期参与行洪, 枯水期当宜昌站流量低于10000 m^3/s时, 分汊河道上游断流, 中下游主要依靠主河道倒灌维持一定水体。基于其地貌和水面宽度变化, 可将河道划分为上、中、下三段, 其中中游段河道束窄弯曲、地形复杂, 下游段则较为顺直、宽阔(图 1)。

团队前期研究指出: 在丰水年, 分汊河道下游段的水深与流速可满足中华鲟产卵需求, 但在平水年与枯水年, 则需通过工程措施(如明渠引流、造流泵、水库生态调度)提升流速以营造适宜水动力条件[27]。然而, 研究尚未揭示河道在断流状态下的水温时空变化规律。水温是中华鲟产卵的关键控制因子, 且在断流后难以人为调控, 因此明确其与主河道的水温差异及变化规律至关重要。研究团队在2024年、2025年10月至12月进行了宜昌江段及分汊

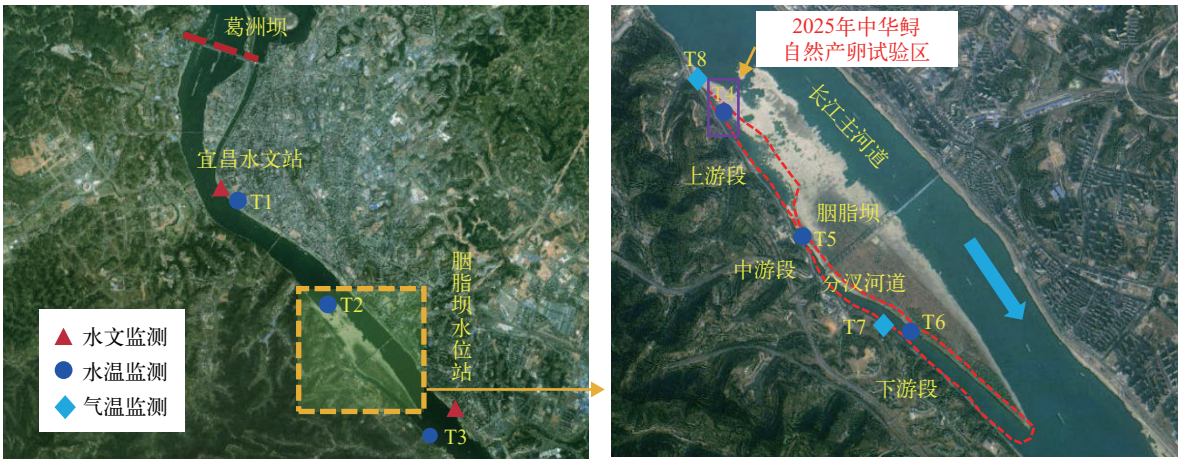


图 1　胭脂坝分汊河道位置和监测站点布设示意图

Fig. 1　Location of the Yanzhiba branch and sketch map of monitoring station layout

河道相关站点水文、水温、气象数据的监测与收集工作, 站点布置如图 1所示。主要包括以下内容:

(1)水文数据: 长江主河道宜昌水文站的逐时流量、水位数据, 胭脂坝水位站逐时水位数据, 数据来源于长江三峡水文水资源勘测局。

(2)长江主河道水温数据: 宜昌水文站逐时水温(T1), 数据来源于长江三峡水文水资源勘测局。宝塔河断面逐时水温(T2)、胭脂坝断面逐时水温(T3): 研究团队在长江主河道宝塔河、胭脂坝右岸断面布置HOBO蓝牙水温监测仪。所有水温记录仪均布设于距水面以下0.5 m的位置, 确保不同站点水温数据的可比性。

(3)胭脂坝分汊河道水温数据: 研究团队在分汊河道上(T4)、中(T5)、下(T6)游断面分别布置HOBO蓝牙水温监测仪。

(4)气象数据: 收集气温(T7、T8)、日照、风速等气象数据, 用于水温模型的率定和验证, 分析水温变化的外部驱动因素。

1.2 中华鲟自然产卵水温需求及试验期分析

中华鲟自然产卵对水温条件具有严格且特定的需求, 根据葛洲坝下游自然产卵场历史上20年共35次自然产卵当日记录的水温数据统计: 中华鲟自然产卵的适宜水温为16.0—20.0℃, 最适水温为18.5—20.0℃[28, 29]。受气候变化、长江中上游干支流水库蓄水等多重因素影响, 葛洲坝下宜昌江段原有的天然水温节律已经发生改变[30, 31]。水库运行前, 宜昌江段水温在10月中旬可达到中华鲟产卵的上限水温(20.0℃), 而水库蓄水后, 宜昌江段水温下降至20.0℃的时间推迟约一个月(图 2)。基于当前宜昌水温变化规律, 中华鲟自然产卵试验一般自11月中旬开始, 此时水温接近适宜产卵范围上限, 明渠引流的目标有两个, 首要目标是使试验区水温与主河道保持一致, 使试验场水温日变幅减小, 降温趋势趋于平缓, 其次是增加试验场的流速。

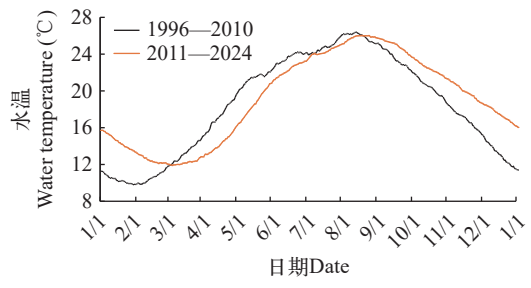


图 2 梯级水库运行前后宜昌站年内水温变化对比

Fig. 2 Comparison of intra-annual water temperature variation processes at the Yichang hydrological station before and after the operation of cascade reservoirs

1.3 水动力−水温耦合模型的构建及验证

基于非结构网格的平面二维水动力−水温耦合模型是研究天然河道水温时空分布的有效工具, 该模型综合考虑气温、短波与长波辐射、河床热交换等气象条件, 通过求解深度积分的浅水方程组获取流场, 进而耦合求解以水温为标量的对流−扩散输运方程。通过调整关键参数可量化模拟时、日尺度上的水温分布并揭示热源的输移扩散规律。

模型计算范围及网格划分 构建了覆盖分汊河道的宜昌江段二维水动力−水温耦合模型, 模型范围上起宜昌水文站, 下至胭脂坝水位站。采用非结构三角形网格进行剖分, 明渠及分汊河道网格进行加密。网格共包含节点9600个、三角形单元17990个, 网格最大面积为1000 m^2, 最小面积为9 m^2, 时间步长为30s。主河道地形数据来源于1∶1000河床地形图, 分汊河道地形采用1∶200河床地形图, 模拟区域底高程介于13.9—41.9 m。地形及网格划分见图 3。

模型边界条件 模型边界条件主要有上下游进出口流量水温边界、气象条件。水流计算中上边界为宜昌水文站的流量, 下边界为胭脂坝断面的水位。水温计算中上边界为宜昌水文站的逐时水温, 下边界为胭脂坝断面实测的逐时水温。模型考虑了水体与大气、河床的热交换过程, 气象条件包括气温、湿度、大气压、风速、日照强度等。

模型率定与验证 采用2024年11月14日—12月13日分汊河道下游段(T6)的实测水温数据对模型的可靠性进行评估。时段内实测水温变化范围为21.3—14.6 ℃, 模拟水温变化为21.3—13.3℃, 两者在整体趋势上具有较好的一致性(图 4)。为量化模型的精度, 采用平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、纳什系数(NSE)等多种统计指标进行评价。结果表明模拟值与实测值之间的平均绝对误差为0.38 ℃, 均方根误差为0.85 ℃, 显示模型整体偏差较小。纳什系数为0.79, 亦反映出模拟结果与观测值之间具有较高的吻合度。在时序变化上, 模型在多数平稳降温阶段表现尤为稳健, 模拟与实测曲线趋势一致。尽管在若干气温陡降或回升节点(如11月18日、12月4日等)存在一定的瞬时误差, 但整体上模型能够较好地反映水温的变化趋势和日际波动。

2 断流状态分汊河道水温分布规律及不同引流工况设计

2.1 断流状态下胭脂坝分汊河道水温分布

2024年9月11日宜昌站流量降至10000 m^3/s, 分

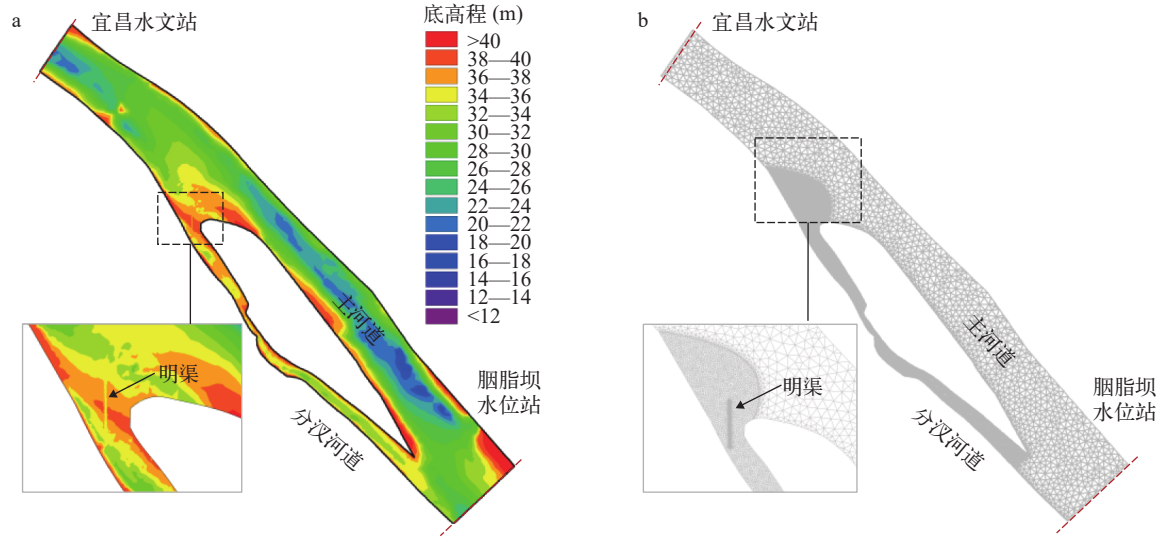


图 3　宜昌江段地形及水动力−水温模型网格划分示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the topography and the mesh for the hydrodynamic-water temperature model in the Yichang reach

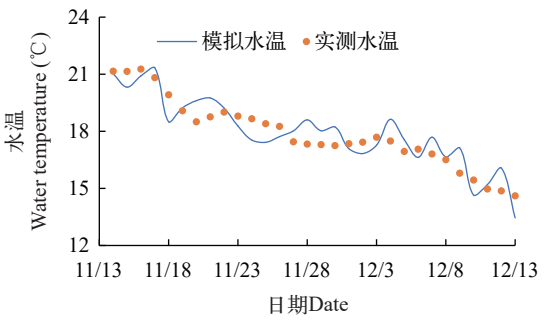


图 4　胭脂坝分汊河道下游段(T6)模拟水温与实测水温对比图

Fig. 4　Comparison between simulated and observed water temperatures in the downstream reach (T6) of the Yanzhiba branch

汊河道首次断流, 10—12月宜昌站流量维持在7000—8000 m^3/s, 分汊河道持续断流。基于11月14日至12月13日研究区域内水温监测及模拟数据, 系统分析主河道与分汊河道的水温变化特征及其与气温的关系, 以期为中华鲟自然产卵试验场的水温调控提供科学依据, 其中图 5a展示的是2024年经历寒潮降温后的11月19日研究区域水温分布图。

主河道与分汊河道整体水温变化规律对比　由图 5b可知主河道水温在监测期内呈现缓慢平稳的下降趋势, 由23.1℃逐渐降至19.3℃, 累计降幅为3.8℃, 日均降温0.12℃。整个过程中表现出较强的热稳定性, 主要得益于主河道水体体积大、流量持续、热容量高, 对气温变化的响应具有显著的滞后性与缓冲性, 属于典型的大尺度河流热响应模式。相比之下, 分汊河道整体水温明显低于主河道, 且降温速率更快、波动性更强。其中分汊河道下游段作为与主河道倒灌直接相连的区域, 水温与主河道最为接近, 但在监测期末降至14.6℃, 降幅达6.6℃, 日均降幅约0.22℃, 显著高于主河道。中游段水温由20.8℃降至13.3℃, 降幅为7.5℃。上游段水温最低, 由16.5℃降至10.1℃, 降幅为6.4℃。总体来看, 分汊河道各段与主河道形成鲜明对比, 水温均呈现起点低、降幅大、波动明显的特征, 说明其热环境受局部地形与气象条件控制显著。

分汊河道上中下游段水温变化规律　分汊河道内部水温存在明显的纵向梯度: 下游段因直接接受主河道倒灌水体的热量输入, 水温相对最高; 向上游方向, 随着水流停滞时间延长、水体与大气及河床的热交换加剧, 水温逐步降低。上游段水温最低, 反映出该区域水体几乎处于静止状态, 热量补充能力最弱。从变化过程看, 三者在降温趋势上具有同步性, 但上游段水温波动最为剧烈, 多次出现单日降温超过0.8℃的情况(如12月8日至9日), 中游段次之, 下游段相对平缓。这说明越往上游水体越封闭, 对气温变化的响应越敏感, 水温的气象驱动特征越明显。

水温与气温的关系　由图 5b可知监测期间气温在7.8—20.2℃波动, 单日变幅最大可达8℃。为定量评价不同水体对气温变化的响应程度, 采用Pearson相关系数和日变化(一阶差分法)相关性两种方法进行不同时间尺度的分析。从长期来看(滑动平均值)长江主河道水温、分汊河道水温(以下游段为例)与气温呈中等正相关(Pearson相关系数0.71 *vs*. 0.75), 两者都与气温存在同步降温趋势, 但主河道水温日变化与气温日变化的相关系数仅为0.12, 表明其日波动受当地气温日波动影响很小, 而分汊

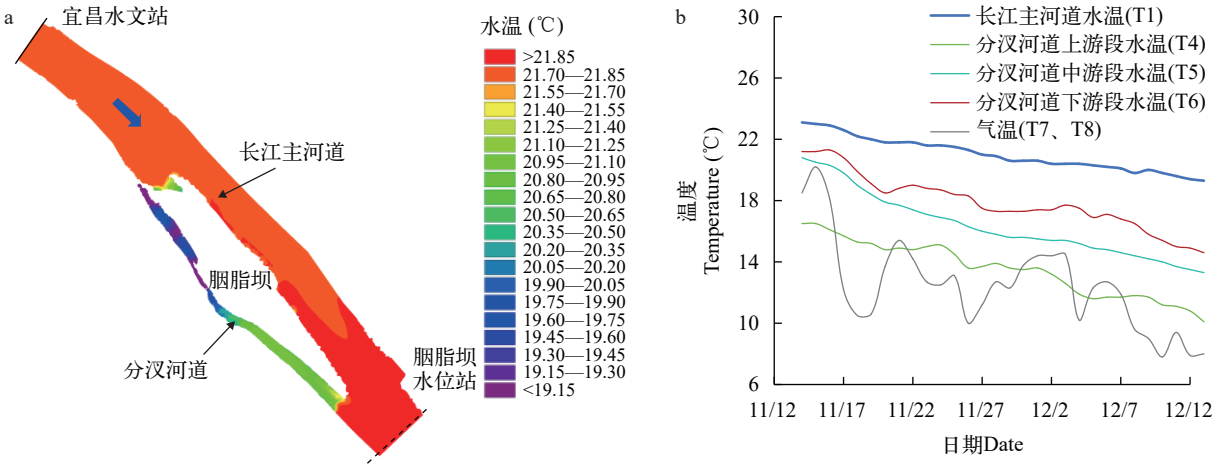
河道下游段水温日变化与当地气温日变化的相关系数为0.48, 呈中等正相关, 说明其水温对气温的短期波动更为敏感。

分汊河道水温与气温则表现出较强的同步变化特征, 尤其是上游段与中游段。在气温骤降时段(如11月17—19日、12月4—5日、12月8—10日), 分汊河道各段水温均出现明显下降, 且上游段响应最为迅速、幅度最大。在气温回升或趋稳时段(如11月21日、12月2—3日)水温也出现短暂回升或降速放缓。分汊河道上、中、下河段水温与当地气温的Pearson相关系数均在0.72—0.75, 差异不大, 均反映长期降温趋势。从下游到上游水温日变化与气温日变化的相关系数依次增大: 下游段(0.48)、中游段(0.62)、上游段(0.69), 上游段相关性最高, 表明其水温波动几乎与气温波动同步; 中游段次之; 下游段相对较低, 因其靠近主河道倒灌口, 受主河道热缓冲影响稍强。

上述分析表明在无自然分流条件下分汊河道演变成以气温驱动为主的半封闭水体, 水温在空间上呈明显的纵向递减梯度, 在时间上表现出对气温快速响应的特征, 也解释了为何在自然状态下分汊河道难以长时间维持中华鲟自然产卵所需的适宜水温窗口。因此若要在该区域开展中华鲟自然产卵试验, 必须通过工程措施(如明渠引流)重建分汊河道与主河道之间的水力联系, 从而削弱气温对分汊河道水温的直接影响, 提升其热稳定性与空间均匀性。

2.2 明渠引流工况设计

针对无分流情况下分汊河道水温受气温影响较大的问题, 为使分汊河道水温尽可能与主河道水温保持相同节律, 计划在分汊河道上游采用明渠引流方式将长江主河道水流引至分汊河道。以自然产卵试验关键期宜昌站典型流量7500 m^3/s分别设置以下两类工况: 无引流时基准工况与4种明渠不同引流方式。由于中华鲟亲鱼体长一般在2.0 m左右, 为保证中华鲟有足够的垂向活动空间, 水深应达到2.0 m, 同时考虑到分汊河道底高程、试验区地形、开挖工程量等因素, 深度按不超过4.0 m来控制。明渠宽度主要考虑给中华鲟提供平面的空间和引流量, 按10.0—20.0 m来控制。明渠引流方案设计及效果如表 1所示。为量化引流水温改善效果, 本研究将“适宜水温维持距离”定义为自明渠末端起沿分汊河道向下游, 与明渠末端水温差值小于0.15℃处的河道长度。差值设置为0.15℃有两个方面考虑的因素: 一是中华鲟属于底栖类鱼类, 历史上葛洲坝下游自然产卵场底部水温日内波动在



宜昌江段水温分布(11月19日)　　主河道、分汊河道水温及气温

图 5　宜昌江段水温分布及代表性站点水温、气温变化过程

Fig. 5　Distribution of water temperature in the Yichang reach and variation process of water temperature and air temperature at the representative station

表 1　胭脂坝分汊河道明渠引流方案设计及效果

Tab. 1　Design schemes and effectiveness for open channel diversion at the Yanzhiba branch

工况	底宽(m)	坡比	顶宽(m)	渠深(m)	渠长(m)	开挖量(万m^3)	引流量(m^3/s)	明渠平均流速(m/s)	适宜水温维持距离(m)
1	10	1:3	22	2	300	0.96	11	0.34	740
2	10	1:3	34	4	300	2.64	18	0.21	1100
3	20	1:3	32	2	300	1.56	24	0.46	1300
4	20	1:3	44	4	300	3.84	30	0.23	1900

0.15℃以内, 可间接反映生物学阈值; 二是监测采用的HOBO水温计, 在野外环境下的测量综合误差范围为0.15℃左右(包括仪器精度、布设误差、环境扰动等), 在野外条件下如果温差小于该值即视为同温, 属测量学定义。

3　结果

3.1　不同引流方案对分汊河道水温的影响

结果显示引流量与明渠断面尺寸呈正相关: 从工况1 (底宽10 m、深2 m)的11 m^3/s增至工况2 (同底宽、深度增至4 m)的18 m^3/s, 工况3 (底宽增至20 m、深2 m)的24 m^3/s, 直至工况4 (底宽20 m、深4 m)的30 m^3/s。明渠引流后, 主河道相对高温、稳定的水体进入分汊河道, 沿程发生动量与热量扩散, 形成温度前锋, 向下游推进。由于明渠直接与长江主河道相连, 故视其末端水温与主河道水温一致。4种引流工况下适宜水温维持距离分别为740 m、1100 m、1300 m及1900 m (图 6)。说明引流量增大后适宜水温维持距离亦显著延长, 突显了引流量或断面规模对热输送能力的决定性作用。

在适宜水温维持距离范围内, 中华鲟自然产卵适宜水温窗口期可达到40d; 超出后逐步下降, 且引流量越小下降越快。例如, 在1100—1300 m, 工况1 (引流量11 m^3/s)窗口期仅26d, 工况2 (18 m^3/s)为30d, 而工况3和工况4 (24和30 m^3/s)仍可保持40d; 在1300—1900 m, 仅工况4能维持40d, 工况1则降至23d (表 2)。

2025年项目组采取了工况2的明渠引流措施, 即优先保证有足够的水深, 使明渠成为试验区的一部分, 同时也兼顾了工程量和施工工期。明渠引流可作为水温调控的基础措施, 在试验过程中还可进一步与推流泵增流、水库生态调度补流等方式相结合, 构建“工程−机械−管理”协同的复合水温水流调控系统。

3.2　2025年中华鲟自然产卵试验场水温改善效果

研究团队于2025年10—12月在胭脂坝分汊河道上游段开展了受控条件下的中华鲟自然产卵试验, 通过拦网构建了试验场, 试验场主要包括引流明渠和试验区等, 试验区面积约2.5万m^2, 水深2.0—5.0 m, 引流明渠和分汊河道均为试验区的组成部分, 底质为卵石和砂质的混合底质(图 7)。

试验选用人工培育成熟的中华鲟亲鱼, 其性腺发育经前期营养强化与温控调控达到同步状态。2025年11月24日完成了全部25尾(雌鱼8尾、雄鱼

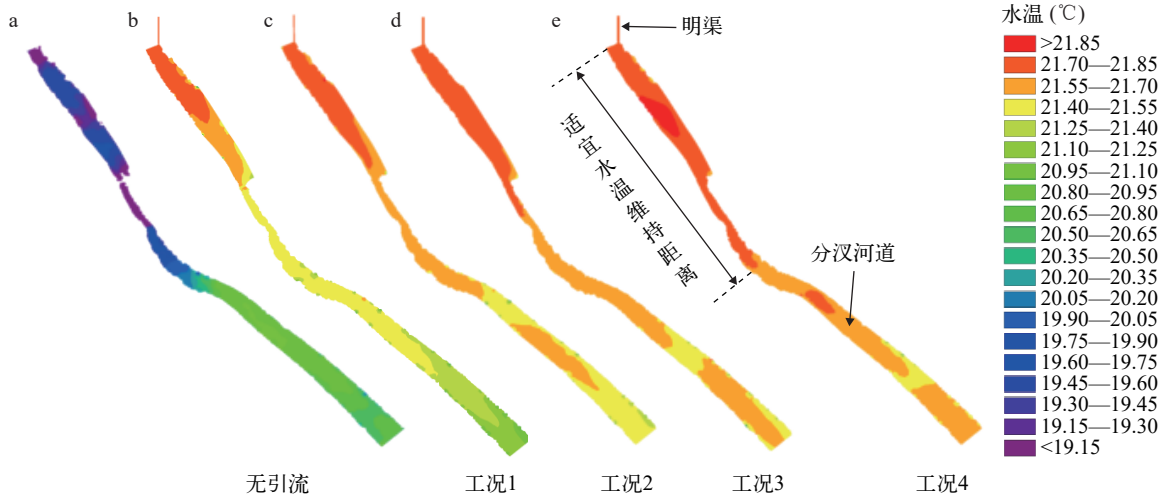


图 6　无引流及不同引流工况下分汊河道水温分布图

Fig. 6　Water temperature distribution in Yanzhiba branch under non-diversion and different diversion operating conditions

表 2　分汊河道不同距离区间对应的适宜水温窗口期

Tab. 2　Suitable water temperature periods for different distance intervals along the branch channel

工况	引流量(m^3/s)	适宜水温维持距离(m)	不同距离区间对应的适宜水温窗口期(d)				
			<740 m	740—1100 m	1100—1300 m	1300—1900 m	>1900 m
1	11	740	40	35	26	23	15—20
2	18	1100	40	40	30	28	15—20
3	24	1300	40	40	40	32	15—20
4	30	1900	40	40	40	40	15—20

17尾)试验亲鱼的投放, 12月1日至12月8日在试验场主流方向陆续监测到中华鲟鱼卵, 产卵点位置如图 7所示, 鱼卵监测结果如图 8所示。这标志着受控条件下中华鲟自然产卵试验取得重要进展。根据流场监测结果推断产卵时流速在0.5—1.0 m/s, 水温为19.9—18.5℃。由于明渠开挖为临时工程, 试验结束后按行政主管部门批复要求进行了回填并恢复原貌。

本次试验初步证实通过明渠引流为核心的水温调控措施, 可在分汊河道断流条件下重建与长江主河道同步的水温节律, 延长了中华鲟自然产卵适宜水温窗口期, 为试验场的选址与设计提供了可靠的技术路径与实证支撑。水温实测数据表明: 试验场水温与主河道水温趋势同步, 实际温差维持在0.3 ℃以内(图 9)。在2025年11月下旬至12月中旬的试验期内, 试验场水温日均降幅约0.08 ℃/日, 显著低于无引流条件下分汊河道0.22 ℃/日的预测降温速率, 试验区水温日变幅不超过0.5 ℃, 体现出良好的热稳定性, 满足中华鲟自然产卵对水温平稳变化的需求。

4 讨论

4.1 明渠规模选择需要考虑的因素

明渠引流实施后分汊河道水温场在空间上形成自引流口向下游递减的纵向梯度。上游段因直接接受主河道较高温度水体的持续输入, 水温最接近主河道, 温差可控制在0.15℃以内, 且热稳定性显著提高。同时引流增强了流速与掺混能力, 为中华鲟亲鱼集群、产卵及鱼卵的发育创造了必要的水动力条件。因此从水温分布、热稳定性及控温效果等方面综合考量, 建议将中华鲟自然产卵试验场设置于分汊河道上游段紧邻明渠出口的区域, 以最大限度延长适宜产卵的水温窗口并提升试验成功率。

明渠规模的确定是一个多目标决策过程, 需统筹生态效益(水温改善效果)、工程成本(开挖量)及管理可行性(行政审批)。由表 1可知, 随着明渠断



图 7 试验场实景及产卵点、卵苗监测网示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the experimental ground, showing spawning sites and the layout of egg and larva monitoring nets

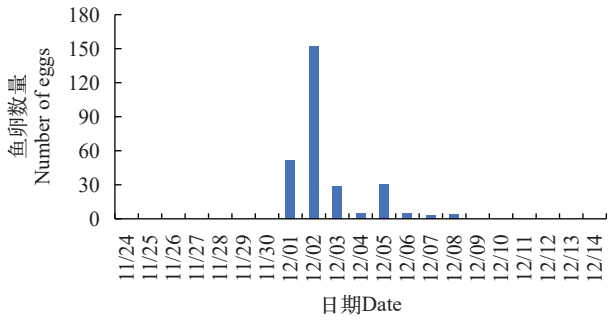


图 8 中华鲟自然产卵试验期间监测到的鱼卵情况

Fig. 8 Number of eggs monitored during the natural spawning experiment of Chinese sturgeon

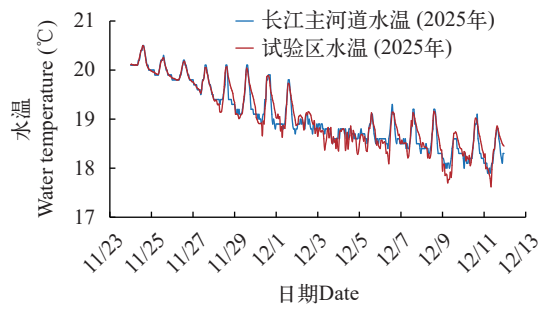


图 9 试验期间长江主河道与试验区实测水温对比图

Fig. 9 Comparison of measured water temperature in the main Yangtze River and the experimental area during the experiment

面尺寸增大, 引流量增加, 适宜水温维持距离相应延长, 但水温改善效果呈现边际递减趋势。在保证明渠较大水深的条件下, 引流量从 18 m^3/s (工况2)增至 30 m^3/s (工况4)时, 适宜水温维持距离虽增长约 73%, 但明渠开挖量由2.64万m^3增加至3.84万m^3, 增加45.45%, 显著提高了工程成本和施工工期。因此, 明渠开挖参数选择并非追求最大引流规模, 而应着眼于在满足主要生态目标(确保产卵试验区水温与主河道同步)的前提下, 选择经济合理的工程量。综合考虑水温改善效果、工程成本、审批周期与施工条件, 2025年实际采用了工况2, 实践证明其在当前约束下具有较好的综合可行性。

4.2 明渠引流对分汊河道水温改善的机制

在无引流条件下, 分汊河道水体交换滞缓, 热动态主要受气温驱动, 水温普遍低于主河道 2.0—5.0℃, 且日际变幅大, 导致适宜产卵水温(16.0—20.0℃)的窗口仅约 15d (下游段)。实施明渠引流后, 显著改变了分汊河道的热量收支与输运模式。4种引流工况均表明随着引流量增加, 水温同步距离相应延长。引流量增加加速了水体交换, 缩短了水力停留时间(HRT), 从而有效抑制了局地净辐射冷却及寒潮引起的快速温降。引流工程使水温降至产卵下限的时间从 11月中旬推迟至12月下旬, 将适宜试验窗口延长至 40d (按主河道水温日降幅 0.1℃估算), 显著提升了分汊河道作为潜在产卵场的可行性。明渠引流对水温的改善本质上是水动力与热输运过程耦合增强的结果, 主要通过以下途径实现: (1)增强平流输热: 引流建立了明确的流向与流速场, 使热量以“羽流”形式沿河道纵向输送; (2)促进湍流掺混: 流速提升增强了水体在横向与垂向上的动量及热量交换, 有助于温度场均质化; (3)提高系统热惯性: 持续的外源高温水体输入增大了水体的有效热容量, 缓冲了短期气温波动的影响, 使水温日变幅减小, 降温趋势趋于平缓。

4.3 明渠引流对中华鲟自然产卵试验场选择的意义

适宜水温维持距离的延长与温度场空间格局的重塑, 实质上反映了分汊河道内水动力与热力响应之间耦合关系的增强。从生态水文学视角看, 较长的适宜水温维持距离意味着河道在纵向空间上维持适宜中华鲟自然繁殖所需水温条件的区间显著延长, 这不仅直接扩大了理论上的潜在自然产卵场范围, 更重要的是为产卵场选址提供了更大的灵活性和空间。当适宜水温河道延长后, 亲鱼在集群互作过程中可在更广阔的空间内寻找同时符合流速、地形、底质等要求的最优组合点位产卵。明渠引流也增强了分汊河道水体的热适应性与气象韧性, 有利于缓解极端气象事件对试验场水温波动的冲击, 缩小水温日间波动, 维持试验场水温的稳定性, 更有利于中华鲟自然产卵条件的形成。中华鲟自然繁殖试验取得的成功验证了两个关键科学假设: 一是长期人工培育的中华鲟仍具有自然繁殖的遗传本能, 二是长江现有水文环境在特定局部区域和时段仍具备支持中华鲟自然繁殖的潜力。

4.4 局限性及下一步研究方向

本研究为中华鲟自然产卵试验场构建中的水温控制提供了思路和实现途径, 同时也深刻认识到中华鲟自然产卵试验具有系统性、复杂性和长期性特点, 涉及众多环节, 包括室内亲鱼培育、生境因子营造、卵苗跟踪监测和亲鱼回捕等。此外, 水温因素固然重要, 但中华鲟自然产卵是否成功是亲鱼性腺发育、水温、流速、底质等多因素协同的结果, 究竟哪种因素起主要作用, 还需要进一步分析。未来应重点开展以下工作: 构建涵盖不同水文年及极端气候的水动力−水温耦合模型, 评估工程对水温改善的稳定性与适用边界; 推动模型从单一水温调控向多要素生境协同集成, 耦合栖息地产卵适宜性与卵苗输移模型, 实现从“水温适宜”到“生境优化”的提升; 深入总结试验场环境与葛洲坝下游中华鲟自然产卵场环境的差异, 区分不同因素对中华鲟自然产卵的贡献, 为探索建立稳定的人工辅助产卵场提供具有参考价值的参数。

5 结论

本文针对长江宜昌胭脂坝分汊河道断流后导致的水温降幅过大及日内变幅显著对中华鲟自然产卵试验可能造成影响的问题, 综合运用数据分析、现场监测、水动力−水温耦合模型等方法系统揭示无分流条件下的水温异化机制, 评估了明渠引流的水温改善效能, 并提出了明渠参数选择策略。主要结论: (1)在断流条件下, 河道呈明显“气温驱动”特征, 水温普遍低于主河道2.0—5.0℃且日间波动大, 适宜中华鲟自然产卵的水温窗口期仅15d左右。(2)明渠引流使引水口下游形成与主河道水温高度同步的区域, 可使明渠下游一定距离内的适宜水温窗口期延长至40d左右。(3)以明渠适宜开挖工程量为基础, 结合局部推流与水库生态调度构建复合水温水流调控体系, 从而实现水温改善效果与工程量的有效平衡。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

[1] Jiang W, Du H J, Chen P, *et al*. Process, difficulties and

directions of species conservation of Chinese sturgeon [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(9): 1617-1624. [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.]

[2] Zhuang P, Zhang T, Zhao F, *et al*. Conservation of the wild population of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) and its habitats [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(9): 1625-1632. [庄平, 张涛, 赵峰, 等. 论拯救中华鲟野生种群及其栖息生境 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(9): 1625-1632.]

[3] Hu D G, Ke F E, Zhang G L, *et al*. Investigation on the spawning ground of Chinese sturgeon down Gezhouba Dam [J]. *Freshwater Fisheries*, 1992(5): 6-10. [胡德高, 柯福恩, 张国良, 等. 葛洲坝下中华鲟产卵场的调查研究 [J]. 淡水渔业, 1992(5): 6-10.]

[4] Zhang H, Wang C Y, Yang D G, *et al*. Spatial distribution and habitat choice of adult Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* Gray, 1835) downstream of Gezhouba Dam, Yangtze River, China [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2014, **30**(6): 1483-1491. [张辉, 王成友, 杨德国, 等. 葛洲坝下游中华鲟成体的空间分布与栖息地选择 [J]. 应用鱼类学杂志, 2014, **30**(6): 1483-1491.]

[5] Gao X, Lin P C, Chang T, *et al*. Ecological and environmental assessment index in the middle-lower reaches of the Yangtze River based on the spawning population size of Chinese sturgeon [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(6): 1396-1399. [高欣, 林鹏程, 常涛, 等. 基于中华鲟繁殖群体数量的长江中下游生态环境考核指标 [J]. 水生生物学报, 2021, **45**(6): 1396-1399.]

[6] Wu J M, Wang C Y, Zhang S H, *et al*. From continuous to occasional: small-scale natural reproduction of Chinese sturgeon occurred in the Gezhouba spawning ground, Yichang, China [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, **24**(3): 425-431. [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.]

[7] Wang H Z, Tao J P, Chang J B. Endangered levels and conservation options evaluations for Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis* Gray [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(9): 2100-2108. [王鸿泽, 陶江平, 常剑波. 中华鲟濒危状况与物种保护对策的评估分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(9): 2100-2108.]

[8] Chang J B, Cao W X. History and prospect of conservation on Chinese sturgeon in the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999(6): 712-720. [常剑波, 曹文宣. 中华鲟物种保护的历史与前景 [J]. 水生生物学报, 1999(6): 712-720.]

[9] Liu H Z. Discussion on the conservation of Chinese sturgeon [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(9): 1603-1609. [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.]

[10] Du H J, Wang B Z, Liu J J, *et al*. Reflections on the conservation strategies for germplasm resources of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, **49**(1): 012509. [杜合军, 王彬忠, 刘娟娟, 等. 中华鲟种质资源保护策略的思考 [J]. 水生生物学报, 2025, **49**(1): 012509.]

[11] Yu Z T, Zhou C S, Deng Z L, *et al*. Investigation on natural reproduction of Chinese sturgeon downstream of Gezhouba Dam [J]. *Reservoir Fisheries*, 1983(2): 2-4. [余志堂, 周春生, 邓中林, 等. 葛洲坝枢纽下游中华鲟自然繁殖的调查 [J]. 水库渔业, 1983(2): 2-4.]

[12] Zhang H J, Yang D G, Wei Q W, *et al*. Hydro-acoustic survey on fishes in the reach from Gezhouba Dam to Gulaobei of the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, **16**(1): 86-91. [张慧杰, 杨德国, 危起伟, 等. 葛洲坝至古老背江段鱼类的水声学调查 [J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(1): 86-91.]

[13] Liu J K, Cao W X. Fish resources of the Yangtze River basin and the tactics for their conservation [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1992, **1**(1): 17-23. [刘建康, 曹文宣. 长江流域的鱼类资源及其保护对策 [J]. 长江流域资源与环境, 1992, **1**(1): 17-23.]

[14] Zhang H, Wei Q W, Du H, *et al*. Relationship between natural spawning activities of Chinese sturgeon and suitability of hydrological conditions [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, **27**(10): 75-81. [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.]

[15] Huang A Y, Yao J Z, Zhu J Z, *et al*. The optimization of flow conditions in the spawning grounds of the Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) through Gezhouba Dam units [J]. *Scientific Reports*, 2021(11): 14403.

[16] Yan J B, Niu L H. Analysis on phase characteristics and influencing mechanism of low-water level corresponding to same flows at Yichang station on Changjiang River [J]. *Yangtze River*, 2022, **53**(12): 75-82. [闫金波, 牛兰花. 长江宜昌站同流量枯水位变化阶段特征及作用机制 [J]. 人民长江, 2022, **53**(12): 75-82.]

[17] Dai L Q, Wang H Y, Liu X, *et al*. Research on selective withdrawal strategy and ecological response of Wudongde Reservoir [J]. *Advances in Water Science*, 2025, **36**(2): 264-274. [戴凌全, 王浩宇, 刘璇, 等. 乌东德水库分层取水策略及生态响应 [J]. 水科学进展, 2025, **36**(2): 264-274.]

[18] Geng J, Zhang G X, Zhang H L, *et al*. Analysis of measured reservoir water temperature and dam temperature field in the Three Gorges Dam [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, **56**(8): 991-1001. [耿峻, 张国新, 张海龙, 等. 三峡实测坝前库水温与坝体温度场分析 [J]. 水利学报, 2025, **56**(8): 991-1001.]

[19] He Y B, Shi X Y, Zhou H J, *et al*. Study on water temperature structure and hydrodynamic mechanism of river-type reservoirs in southwest China [J]. *Journal of Hydroelec-*

tric Engineering, 2024, **43**(5): 24-34. [贺玉彬, 时晓燕, 周洪举, 等. 西南地区典型河道型水库水温结构及水动力机制研究 [J]. 水力发电学报, 2024, **43**(5): 24-34.]

[20] Hu G Y, Yang Z H, Bai F P, *et al*. Water temperature's cumulative effect induced by the construction of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, **37**(1): 293-303. [胡光洋, 杨中华, 白凤朋, 等. 金沙江下游梯级水电开发引起的水温累积效应分析 [J]. 湖泊科学, 2025, **37**(1): 293-303.]

[21] Yang C, Zhang T K, Lu Y F, *et al*. Evolution of water temperature downstream of sandy river reservoirs during the sediment discharge period [J]. *Advances in Water Science*, 2024, **35**(5): 843-852. [杨晨, 张廷奎, 卢一帆, 等. 多沙河流水库排沙期下游水温演变规律 [J]. 水科学进展, 2024, **35**(5): 843-852.]

[22] Huang Y H, Yan Z L, Lu J Y, *et al*. Analysis of water temperature variation in the downstream of Xiangjiaba hydropower station [J]. *Water Power*, 2022, **48**(12): 7-10. [黄膺翰, 严忠銮, 卢晶莹, 等. 向家坝水电站下游水温变化分析 [J]. 水力发电, 2022, **48**(12): 7-10.]

[23] Yu S, Li Y P, Cheng Y X, *et al*. The impacts of water diversion on hydrodynamic regulation of plain river network [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(2): 462-473. [于珊, 李一平, 程一鑫, 等. 调水引流工程对平原河网水动力调控的效果 [J]. 湖泊科学, 2021, **33**(2): 462-473.]

[24] Yang H R, Ma N, Chen J, *et al*. The improvement effect of ecological water replenishment on river water environment in mountain cities [J]. *Journal of Chongqing University*, 2022, **45**(S1): 89-95. [杨海瑞, 马念, 陈杰, 等. 生态补水对山地城市河流水环境的改善效果 [J]. 重庆大学学报, 2022, **45**(S1): 89-95.]

[25] Xiao Y, Liu Y Y, Wang Z M, *et al*. Cumulative influence of water diversion projects on hydrological regime of middle and lower reaches of the Hanjiang River [J]. *Water Resources Protection*, 2025, **41**(3): 161-170. [肖洋, 刘扬扬, 王中敏, 等. 引调水工程对汉江中下游水文情势的累积影响 [J]. 水资源保护, 2025, **41**(3): 161-170.]

[26] Ding L, Chen L M, Wang Y F, *et al*. Study on hydrodynamic simulation and improvement scheme of urban wetlands in tidal reaches [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2024(1): 35-45. [丁磊, 陈黎明, 王逸飞, 等. 感潮河段城市湿地水动力模拟及改善方案研究 [J]. 水利水运工程学报, 2024(1): 35-45.]

[27] Liu X, Zhang Q F, Jiang W, *et al*. Research on the selection strategy for natural spawning trial site of important aquatic species based on hydrological and hydrodynamic requirements [J/OL]. *Engineering Journal of Wuhan University*. [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/OL]. 武汉大学学报(工学版), https://doi.org/10.14188/j.1671-8844.2025.0051].]

[28] Yang D G, Wei Q W, Chen X H, *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. [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.]

[29] Wang Y, Dai H C, Wang B W, *et al*. Study of the eco-scheduling for optimization Chinese sturgeon spawning habitats [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(3): 319-326. [王煜, 戴会超, 王冰伟, 等. 优化中华鲟产卵生境的水库生态调度研究 [J]. 水利学报, 2013, **44**(3): 319-326.]

[30] Zou S, Li Y, Chen J F, *et al*. Temporal and spatial variation of water temperature in Panzhihua-Yichang segment of Changjiang River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(8): 35-41, 48. [邹珊, 李雨, 陈金凤, 等. 长江攀枝花--宜昌江段水温时空变化规律 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37(8): 35-41, 48.]

[31] Qiu R J, Wang Y K, Wang D, *et al*. Impacts of Three Gorges Reservoir on water temperature regime between Yichang and Chenglingji reach [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(3): 108-115. [邱如健, 王远坤, 王栋, 等. 三峡水库蓄水对宜昌——城陵矶河段水温情势影响研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(3): 108-115.]

OPEN-CHANNEL DIVERSION ON IMPROVING WATER TEMPERATURE AT THE NATURAL SPAWNING EXPERIMENTAL GROUND FOR CHINESE STURGEON IN THE YANZHIBA BRANCH, YICHANG

DAI Ling-Quan[1], JIANG Wei[1], LI Zhi-Yuan[1], CHANG Jian-Bo[1, 2], SU Wei[1], LIU Xuan[1], LI Qiu-Ping[3], ZHU Jia-Zhi[1] and CAO Guang-Rong[1]

(1. *National Engineering Research Center of Eco-environment Protection for Yangtze River Economic Belt*, *China Three Gorges Corporation*, *Wuhan* 430014, *China*; 2. *School of Water Resources and Hydropower*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *China*; 3. *Three Gorges Bureau of Hydrological and Water Resources Survey*, *Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources*, *Yichang* 443002, *China*)

Abstract: To address the functional decline of the natural spawning ground for Chinese sturgeon downstream of the Gezhouba Dam and the water temperature constraints in the construction of an alternative experimental ground, this study selected a potential natural spawning site for Chinese sturgeon—the right-bank branch channel of the Yanzhiba reach in Yichang-as the research area, focusing on the problems of excessive water temperature drop and significant diurnal variation during the experimental period caused by poor water exchange in the branch channel. First, the suitable water temperature range for natural spawning of Chinese sturgeon was determined based on historical data. Second, through field monitoring and a coupled hydrodynamic-water temperature model, the causes of water temperature differences between the branch channel and the main Yangtze River channel under disconnected conditions were revealed. On this basis, four open-channel diversion schemes were designed to quantitatively evaluate the improvement effects of different diversion schemes on water temperature in the branch channel. The results show that under disconnected conditions during the experimental period (November–December), the water temperature in the branch channel is dominated by air temperature changes, being 2.0—5.0℃ lower than that in the main channel with a rapid cooling rate, leading to a significant shortening of the suitable water temperature window for natural spawning of Chinese sturgeon. Open-channel diversion can effectively reshape the water temperature field of the branch channel, synchronizing the water temperature within a certain distance downstream of the open channel with the thermal rhythm of the main channel, thereby delaying the time when the water temperature drops to the lower spawning limit from mid-November to late December, and extending the suitable experimental window to about 40d. The effects of different open-channel scales on water temperature improvement in the branch channel were analyzed, demonstrating the economic viability and feasibility of a water temperature regulation strategy based on a small-scale excavation volume. Based on the recommended scheme, a natural spawning experiment of Chinese sturgeon was carried out in the upstream section of the Yanzhiba branch channel in 2025 and achieved success, verifying the practical effect of open-channel diversion in maintaining water temperature. This study reveals for the first time the maintenance mechanism and improvement effect of open-channel diversion on water temperature in the Yanzhiba branch channel, providing scientific basis and key technical support for the site selection of natural spawning experimental grounds for Chinese sturgeon.

Key words: Natural spawning; Yanzhiba branch; Open-channel water diversion; Coupled hydrodynamic-water temperature model; Water temperature; Chinese sturgeon