

刘志成, 张迪, 林俊强, 等. 乌东德水库水温结构时空演化特性及下泄水温时滞效应[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(4): 145-157. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.012

LIU Zhicheng, ZHANG Di, LIN Junqiang, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of water temperature structure and lag effect of discharge water temperature in Wudongde Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 145-157. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.012

乌东德水库水温结构时空演化特性及 下泄水温时滞效应

刘志成^{1,2}, 张迪¹, 林俊强¹, 夏继红², 朱博然¹, 彭期冬¹, 任玉峰³, 靳甜甜¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏南京 210098;
3. 中国长江电力股份有限公司智慧长江与水电科学湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443133)

摘要:【目的】明晰高坝大库水温结构时空演化特性和滞温效应, 可为叠梁门调度提供科学依据, 是缓解低温水下泄, 保护下游河段鱼类生存繁衍的基础性工作。【方法】通过数值模拟的方法, 基于2020—2022年实测水文数据、水温数据、气象边界数据以及平水年设计运行资料, 构建乌东德库区三维水温数值模拟模型, 分析了水库运行后库区水温结构的时空演化特性和下泄水温的时滞效应。【结果】结果显示: (1)春夏季, 乌东德水库垂向水温存在明显分层现象, 温差可达11~12℃, 汛期过后随着水体热交换程度的增加, 垂向水温逐渐混匀, 秋冬季节未发现明显的水温分层现象; (2)水库出流水温明显存在春夏季低温水, 冬季高温水下泄问题, 2020—2022年监测数据显示, 5月下泄水温比坝址天然水温平均降低2.68℃, 12月下泄水温平均升高4.78℃; 稳定运行期模拟结果显示, 3—6月, 下泄月均水温比坝址天然水温降低0.91~4.09℃, 12月—次年2月, 下泄月均水温升高1.34~4.34℃; (3)蓄水后, 各年份相比建坝前水温达到14℃、18℃的时间皆有不同程度的推迟, 河段鱼类适宜产卵水温出现时间向后推迟30~50d, 推迟时间排序为: 长鳍吻鮡>中华金沙鳅、四大家鱼、鲤、鲫>犁头鳅。【结论】结果表明: 乌东德水库水温分层及其引发的低温水下泄问题对下游河段鱼类繁殖产生了不同程度的不利影响, 需要科学采取应对措施。

关键词: 乌东德水库; 库区水温结构; 下泄水温; 滞温效应; 鱼类繁殖; 数值模拟

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV697.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)04-0145-13



听语音
与作者互动

收稿日期: 2024-03-06; 修回日期: 2024-04-23; 录用日期: 2024-05-06; 网络出版日期: 2024-10-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52209107); 智慧长江与水电科学湖北省重点实验室基金项目(2422020009); 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ20-H26)

作者简介: 刘志成(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事土木水利研究。E-mail: liuzc0608@qq.com

通信作者: 张迪(1991—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事生态水力学研究。E-mail: zhangd_91@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Spatiotemporal evolution characteristics of water temperature structure and lag effect of discharge water temperature in Wudongde Reservoir

LIU Zhicheng^{1,2}, ZHANG Di¹, LIN Junqiang¹, XIA Jihong², ZHU Boran¹,
PENG Qidong¹, REN Yufeng³, JIN Tiantian¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 3. Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443133, Hubei, China)

Abstract: [Objective] Clarifying the spatiotemporal evolution characteristics and temperature lag effect of high dams and large reservoirs can provide a scientific basis for stacked beam gate scheduling, which is fundamental for alleviating discharge of low-temperature water and protecting the survival and reproduction of fish in the lower reaches. [Methods] Through numerical simulation and based on the measured hydrological data, water temperature data, meteorological boundary data from 2020 to 2022, and design operation data in an average water year, a three-dimensional numerical simulation model of water temperature for the Wudongde Reservoir area was developed. The spatiotemporal evolution characteristics of water temperature structure and lag effect of discharge water temperature after reservoir operation were analyzed. [Results] The result showed that: (1) In spring and summer, a distinct vertical stratification of water temperature was observed in the Wudongde Reservoir, with a temperature difference of 11~12 °C. After the flood season, as the thermal exchange within the water body increased, the vertical water temperature gradually became uniform. No significant water temperature stratification was observed in autumn and winter. (2) There was a clear issue of low-temperature water discharge in spring and summer, and high-temperature water discharge in winter from the reservoir. Monitoring data from 2020 to 2022 indicated that the discharge water temperature in May was, on average, 2.68°C lower than the natural water temperature at the dam site, and the discharge water temperature in December was, on average, 4.78°C higher. Simulation result during the stable operation period indicated that from March to June, the monthly average discharge water temperature was 0.91~4.09 °C lower than the natural water temperature at the dam site. From December to February of the following year, the monthly average discharge water temperature was 1.34~4.34 °C higher. (3) After the impounding of reservoir, the time for the water temperature to reach 14°C and 18°C each year was delayed to varying degrees compared to before the dam construction. The occurrence time of suitable spawning water temperature for fish in the lower reaches was postponed by 30~50 days, with the delay ranked as follows; *Rhinogobio ventralis* > *Jinshaia sinensis*, *Four major Chinese carps*, *Common carp*, *Crucian carp* > *Lepturichthys fimbriata*. [Conclusion] The result show that the stratification of water temperature in the Wudongde Reservoir, along with the low-temperature discharge water it causes, has varying degrees of negative effects on fish reproduction in the lower reaches of the river. Therefore, scientific measures must be implemented to address these issues.

Keywords: Wudongde Reservoir; water temperature structure in reservoir area; discharge water temperature; temperature lag effect; fish reproduction; numerical simulation

0 引言

我国水电蕴藏量丰富, 常规水电装机容量已达 3.68 亿 kW^[1]。西南地区是我国的水能资源富集区, 理论蕴藏量约占全国的 70%, 其高山深切河谷的独特地貌结构, 为大型水电工程开发提供了有利的地形优势, 我国 200 m 以上高坝几乎全部集中于西南地区。在大型水电工程在充分利用水头势能的同时, 随之而来的是一些生态环境问题, 值得我们关注的是深水水库所引发的库区水温分层和低温水下泄等问题。

水温是水环境学研究中的重要参数, 与水体的各种理化性质都息息相关, 可以直接或间接影响水生动

植物的生存繁殖。一方面, 水温可以通过直接影响鱼类的新陈代谢, 影响其生长、摄食、繁殖等行为^[2]。根据现有研究成果, 在适宜的水温内, 鱼类对食物的吸收和消化同水温成正比, 水温上升会提高鱼机体内的代谢水平, 进而促进生长发育与繁殖^[3]; 另一方面, 水温可以通过影响水体溶解氧含量和水质状态进而影响鱼类的正常生命活动^[4], 例如, 王志红等^[5]研究发现在允许温度变化内, 温度提高 10 °C, 藻类代谢强度增加 2 倍, 藻量增加导致水体溶氧量下降, 进而影响鱼类生长发育。河流筑坝成库后, 在水库的调蓄作用下, 原始水文情势发生改变, 库区水面加宽、水位抬升、流速减缓, 影响库区水热分配过程,

改变水库热力学性质, 库区水体垂向形成水温分层, 造成低温水下泄问题, 进而可能对下游鱼类的繁衍产生不利影响^[6]。现阶段研究表明, 糯扎渡水库在建成后, 库区水温会产生不稳定分层现象, 造成3—9月低温水下泄, 其中6月份水温比建坝前河道水温最大偏低 5°C ^[7], 在澜沧江下游, 温热带鱼类繁殖期主要在4—8月, 水库低温水下泄可能会对其繁殖发育产生不利影响^[8-10]; 溪洛渡、向家坝工程蓄水后年内水温过程坦化, 滞温效应明显, 向家坝站水温过程推迟达36 d, 鱼类适宜产卵水温时间延迟30~40 d^[11-12]。

为了缓解深水大库导致的水温问题, 分层取水设施被广泛采用。分层取水设施的工作原理是通过设置不同高程的取水口, 以此达到引取目标层水体, 提高下泄水温的目的^[13]。而水库垂向水温结构对于取水口高程的选择至关重要, 因此掌握库区水温时空分布特性, 对指导分层取水设施运行调度, 缓解低温水下泄具有重要意义。目前大多深水大库已经通过布设水温监测装置, 观测水库水温结构及下泄水温过程, 以掌握水温时空分布特性。但同时水库垂向水温的观测难度大, 且监测数据仅能表征局部点位在部分时刻的水温特性, 难以连续刻画库区水温整体变化规律^[14]。针对监测数据的局限性, 结合监测数据与数值模拟的方法进行水温分布特性研究是目前常用的技术手段。

国外在水温模拟模型方面起步较早, 研发了CE-QUAL-W2、EFDC、Fluent等成熟的商业软件, 其中CE-QUAL-W2是立面二维模型, 适用于狭长形水库垂向水温分布模拟^[15-16], KI等^[17]采用CE-QUAL-W2模型和物理栖息地模拟(PHSs)相结合对韩国索阳岗大坝进行模拟计算, 发现采用选择性退水作业可明显降低下泄冷水对下游鱼类栖息地的不利影响。ZHU等^[18]将简化后的平衡温度模型融入到CE-QUAL-W2中对明尼苏达河下游进行模拟, 模拟结果与原始的平衡温度模型和逐项过程模型对水温的预测结果相同; EFDC是由HAMRICK等^[19-20]研发的先进的环境流体动力学三维数值计算模型, 可高精度地预测和分析河流、湖泊、水库等大型水面物体的流场和温度场的具体情况。JUNG等^[21]对韩国汉江流域某河段的出水温度恢复距离进行估算时采用传热方程与EFDC模型对比法, 结果发现传热方程估算的水温恢复距离结果比EFDC模型的结果变化更大。Fluent是一款精细化三维模拟模型, 适用于小范围的水体的水温精细化模拟, POLITANO等^[22]通过Fluent软件分析了坝前池与进水流道内的水温及水流情况, 模拟

结果较好。我国近年来也积极推进水温预测模型研发, 邓云^[23]依据水库湍浮力流的原理, 结合温度分层的过及变化规律, 构建出适合大型深水水库水温预估的立面二维水温模型。梁瑞峰等^[24]利用SIMPLE算法融入压力校准的基本原则, 设计了一种将流动场、标量方程、系数矩阵以及方程的求解过程同时执行的方法并被广泛地运用在具有相同宽度的立体二维水库的水温模拟中。李冰冻等^[25]运用剪切应力传递紊流数学模型, 考虑紊动剪切应力的传递作用, 创立了水库温度分层流动的三维数值模拟模型。GUO等^[26-27]考虑到大型水库当中频繁出入流造成的水体垂向掺混, 引入流量相关扩散因子对WRF-lake进行了改进, 并在糯扎渡水库测试了模型性能, 结果显示改进后的模型对水库垂向水温变化过程模拟精度更高。

乌东德水电站是金沙江下游四座巨型梯级中的第一级, 最大坝高270 m, 总库容74.08亿 m^3 , 是典型的高坝大库, 水库下游江段分布有长鳍吻鮡、圆筒吻鮡等长江上游珍稀特有鱼类。阮娅等^[28]在水库建设阶段, 采用数值模拟方法对库区水温分布进行了预测, 发现乌东德水库水温结构季节性分层现象明显, 水库蓄水后可能造成春夏低温水和秋冬高温水下泄。2020年, 乌东德水库开始蓄水, 2021年6月全部机组正式投产发电, 但已有水库建设对库区及下泄水温影响分析成果仍多依托于设计阶段的模拟结果, 缺少运行期实测资料的支撑, 另一方面, 乌东德水库目前尚处于初期运行阶段, 水库运行水位并未严格按照正常运行期要求调控, 随着水库逐步迈入正常运行阶段, 水温结构是否会发生变化尚未有清晰的认知。

综上所述, 本研究计划依托运行期实测水库调度、水温等数据资料, 构建三维水温模型, 并结合实测数据和模拟结果, 对比分析水库初期运行和稳定运行阶段乌东德水库水温结构的时空演变特性, 探究由此引起的下泄水温时滞效应, 研究成果可为分层取水设施运行调度和下游鱼类保护提供参考依据。

1 研究区概况和方法

1.1 研究区概况

乌东德水库位于金沙江下游干流上, 是典型的窄深型河道式水库。回水长度约200 km, 正常蓄水位975 m, 总库容74.08亿 m^3 , 具有不完全年调性能, 年库水交换次数15次, 属于不稳定分层型水库。

1.2 模型控制方程

模型水平方向为正交曲线坐标系, 垂向为Sigma

坐标系, 方程式如下

$$\begin{cases} x = x(x^*, y^*) \\ y = y(x^*, y^*) \\ z = (z^* + h)/(\zeta + h) \end{cases} \quad (1)$$

式中, x^* 、 y^* 、 z^* 为实际物理空间上的横向、纵向、垂向坐标; x 、 y 为坐标转换后正交曲线坐标系中的横向与纵向坐标; z 为转换后 Sigma 坐标系中的垂向坐标; h 为平均水深; ζ 为自由表面的物理垂向坐标^[29]。

模型控制方程主要包括质量守恒和动量守恒, 基于流体不可压缩、Boussinesq 假设和静水压力假定, 得到如下控制方程, 即

连续性方程

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_yHu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_xHv)}{\partial y} + \frac{\partial(mv)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(mHu)}{\partial t} + \frac{\partial(m_yHuu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_xHvu)}{\partial y} + \\ & \frac{\partial(mwu)}{\partial z} - (mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y})Hv \\ & = -m_yH \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial x} - m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial h}{\partial x} + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{mA_v}{H} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(mHv)}{\partial t} + \frac{\partial(m_yHuv)}{\partial x} + \frac{\partial(m_xHvv)}{\partial y} + \frac{\partial(mwv)}{\partial z} + \\ & \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right)Hu = -m_xH \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial y} - \\ & m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{mA_v}{H} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -gH(p - p_0)p_0^{-1} = -gHb \quad (5)$$

状态方程

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (6)$$

温度输移方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(mHT)}{\partial t} + \frac{\partial(m_yHuT)}{\partial x} + \frac{\partial(m_xHvT)}{\partial y} + \\ & \frac{\partial(mwT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{mA_b}{H} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial I}{\partial z} + Q_T \end{aligned} \quad (7)$$

垂向速度

$$\begin{aligned} w & = w^* - z \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} + um_x^{-1} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + um_y^{-1} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) + \\ & (1 - z) \left(um_x^{-1} \frac{\partial h}{\partial x} + um_y^{-1} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, I 为太阳辐射; H 为总水深, $H = h + \zeta$; u 为 x

方向水平速度分量; v 为 y 方向上的水平速度分量; w^* 为变换前的垂向速度; m_x 、 m_y 为水平坐标转换因子, $m = m_x m_y$ ^[30]; p 为相对静水压力; b 为相对浮力; f 为科氏力系数; ρ 为水体密度, ρ_0 为参考密度, S 为盐度; Q_u 和 Q_v 为动量方程的源汇项; Q_T 为热量源汇项; A_v 为垂向紊动黏性系数; A_b 为垂向紊动扩散系数。

其中, 垂向紊动黏性系数 A_v 和垂向紊动扩散系数 A_b , 采用 Gelperin 等修正的 2.5 阶 Mellor-Yamada 紊流闭合模型求解^[31-32]。

2 乌东德水库水温模拟模型构建

2.1 网格划分

本文基于曲线坐标系统且适应不规则边界的正交曲线网格构建乌东德水库数值模拟模型^[33], 考虑到乌东德水库为狭长形水库, 因此横向概化成一个网格, 纵向网格 183 个, 尺寸约为 500~1 500 m; 垂向上的水温变化是水库水温模拟的重点, 但是过度增加垂向网格层数会导致计算时间过长, 在权衡模型精度和计算时间后, 将水体在垂向上大体上划分为上下两层, 水温在上层水体变化较为明显, 故而将上层水体设置为 20 层网格, 占总水深的一半; 水温在下层水体变化较为缓慢, 故而将下层水体设置为 10 层网格, 占总水深的另一半。垂向共 30 层, 库区总网格数为 5 490(见图 1)。

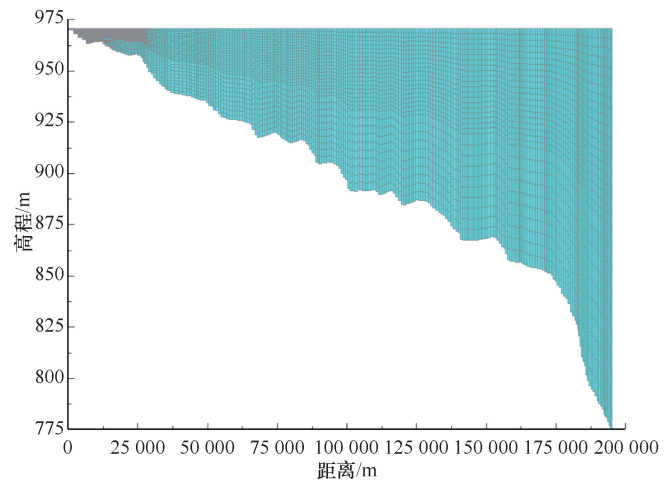


图 1 库区网格划分

Fig. 1 Grid division of the reservoir area

2.2 边界设置

模型输入边界包括水库调度数据(入库流量、出库流量), 水温数据(入流水温)、气象数据(气温、太阳辐射、风速、风向、相对湿度、降水量、蒸发

量、云量)等。本研究首先基于2021年实际运行观测数据率定模型参数,分析乌东德水库初期运行阶段的水温特性;在此基础上,以乌东德水库平水年设计出入库流量为调度边界,结合2021年水温,通过3 a循环运算,模拟了乌东德水库长期运行工况下的水温特性。2021年和平水年详细水库调度运行过程和入流水温变化过程如图2—图4所示。

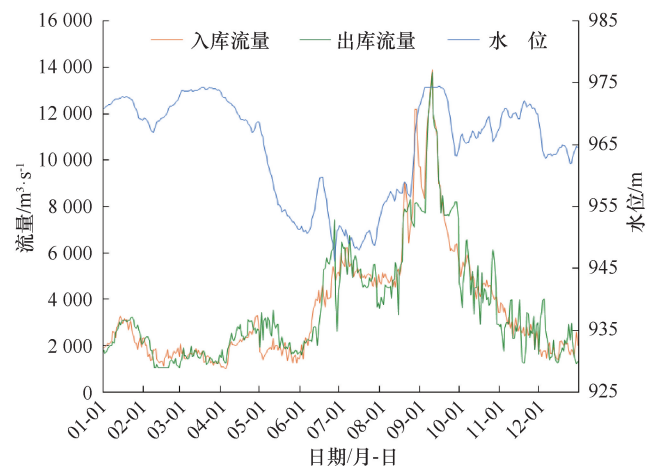


图2 2021年出入库流量与水位

Fig. 2 Inflow, outflow, and water levels in 2021

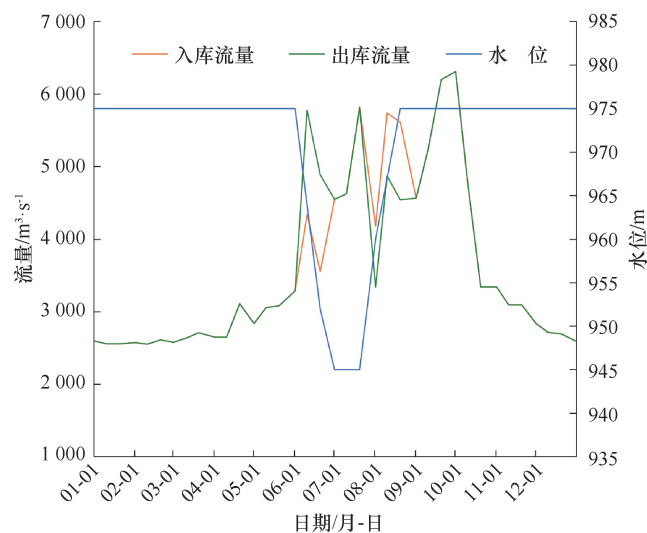


图3 平水年设计出入库流量与水位

Fig. 3 Design inflow, outflow, and water levels in an average water year

3 模型参数率定与结果校验

3.1 模型参数率定

本模型参数率定依据主要为2021年库区实际垂向监测水温资料。经率定,对水动力学过程影响较大的参数设置如下:垂向涡粘系数取0.000 1、垂向扩

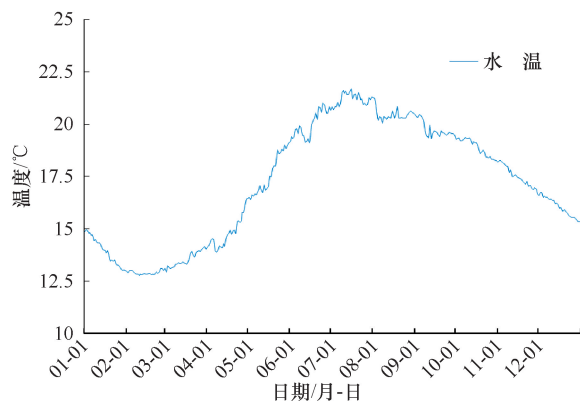


图4 2021年逐日入流水温过程

Fig. 4 Daily inflow water temperature change in 2021

散系数0.000 01,对水温模拟影响较大的参数包括热交换参数,主要参数设置如下:太阳辐射快速衰减系数取0.6,太阳辐射慢速衰减系数取0.025。

研究通过计算绝对平均误差(AME)和均方根误差(RMSE)来评价模型精度,AME、RMSE越小,模型精度越高。计算表达式为

$$AME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i^* - y_i| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i^* - y_i)^2} \quad (10)$$

式中, y_i^* 为实测值; y_i 为模拟值。

3.2 库区垂向水温模拟结果校验

2021年乌东德水库处于运行初期,水温在全年尺度呈现不稳定分层特征,1—2月垂向水温没有明显分层,水温约为15℃,3—8月,垂向水温存在分层现象,表层水温主要在20~24℃之间变化,底层水温低于15℃,垂向温差最大可达11℃;且在夏季,随着气温逐渐升高,表层与底层水温温差逐渐减小。9—12月份,随着水体热交换程度的增加,垂向水温逐渐混匀,并呈现逐渐降低趋势,9月份垂向水温约为20℃,12月份降至17.5℃左右。

2021年模拟水温与监测水温对比情况如图5所示。从模拟精度来说,秋、冬季水温不分层时期,模型对于库区坝前垂向水温分布的模拟效果最好,AME、RMSE分别在0.27、0.29左右;春、夏季水温分层时期,模型的模拟精度下降,最大AME、RMSE分别为0.73、0.96,误差主要表现在中上层水体。造成上述现象的原因可能有两点,一是中上层水体水温变化剧烈,其模拟难度较大,一直是水温模拟领域的难点问题;二是春、夏季气象条件多变,而本研究中采用的太阳辐射度、云量、风速等资料为历史

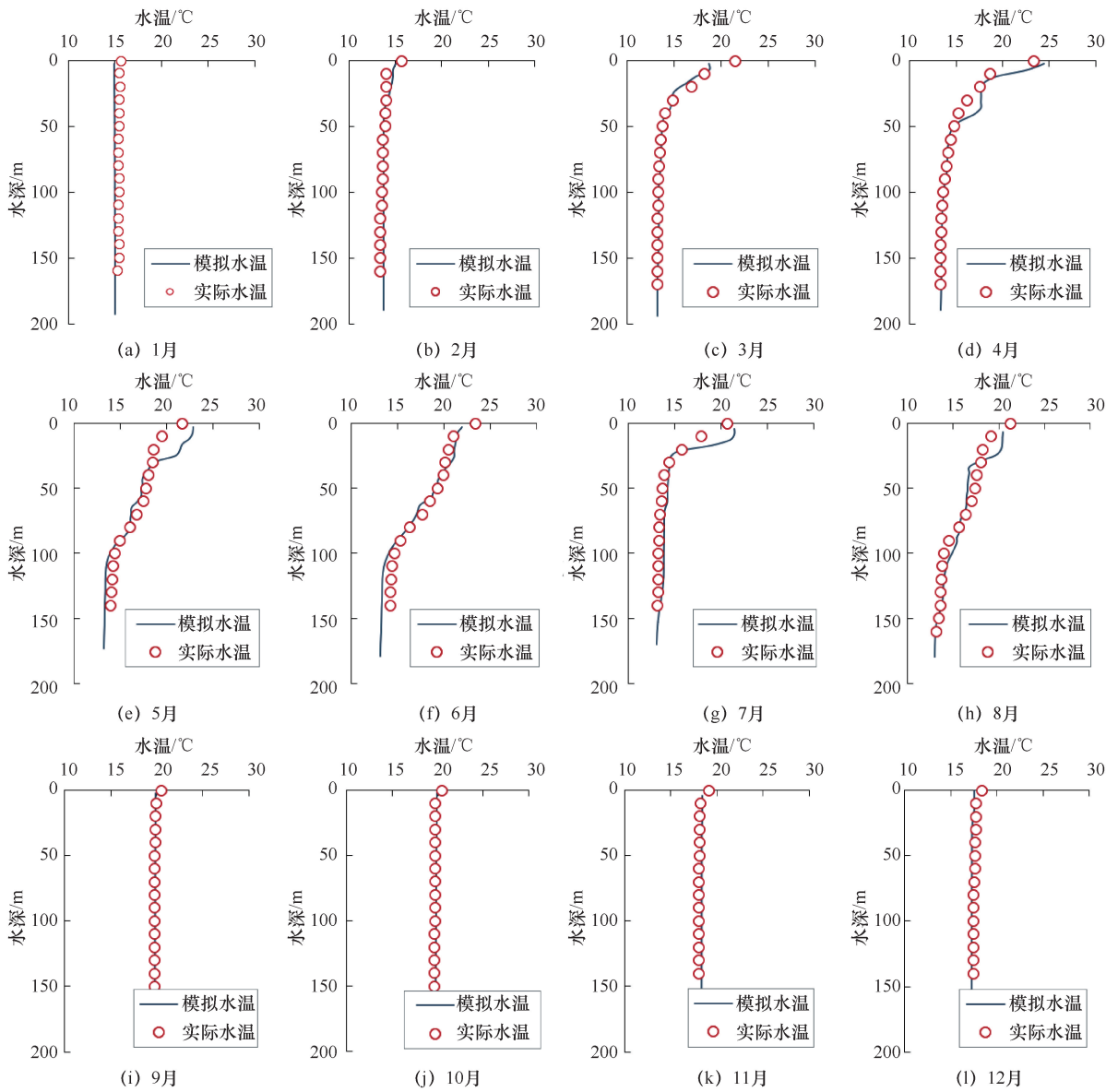


图5 2021年模拟水温与监测水温对比

Fig. 5 Comparison of simulated water temperature and monitored water temperature in 2021

数据,可能与实际气象条件存在较大偏差,而上述资料对水温的影响较大,因此导致水温值与实测水温值有所差异,但总体精度能够满足要求。

3.3 下泄水温模拟结果校验

2021年实测尾水水温与模拟下泄水温对比情况如图6所示。通过计算结果可知,模拟水温与实际监测水温变化趋势总体一致,计算时段内的 AME 值为0.76, $RMSE$ 值为0.93,表明模型可信度较高。

4 结果分析

4.1 库区水温时空演变特性

乌东德水库稳定运行期库区垂向水温时空分布结构预测结果如图7所示。结果显示,水库全年呈现不

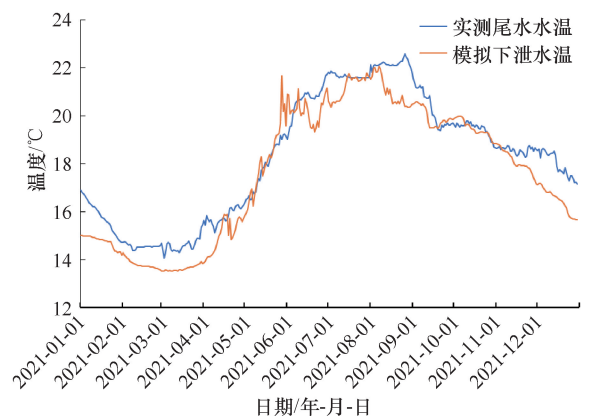
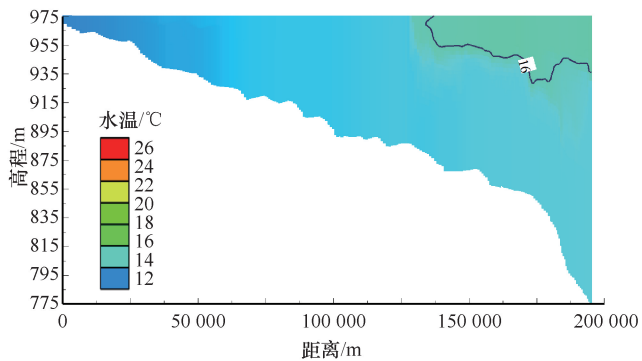
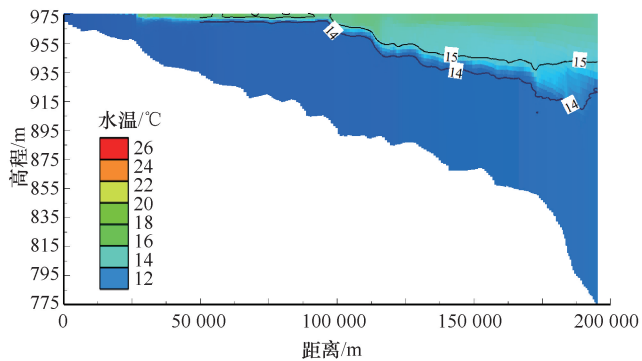


图6 2021年实测尾水水温与模拟下泄水温对比

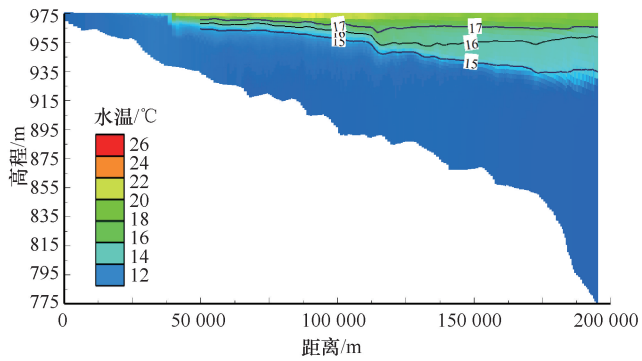
Fig. 6 Comparison of measured tailwater temperature and simulated discharge water temperature in 2021



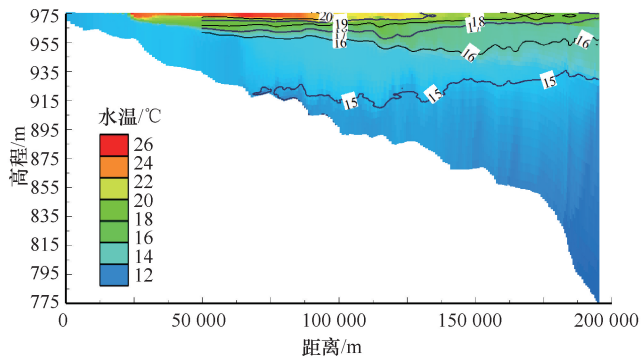
(a) 1月



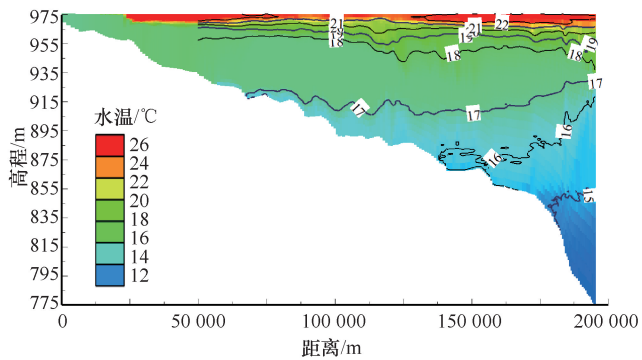
(b) 2月



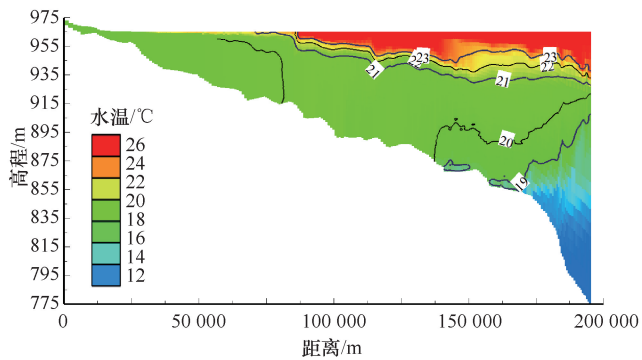
(c) 3月



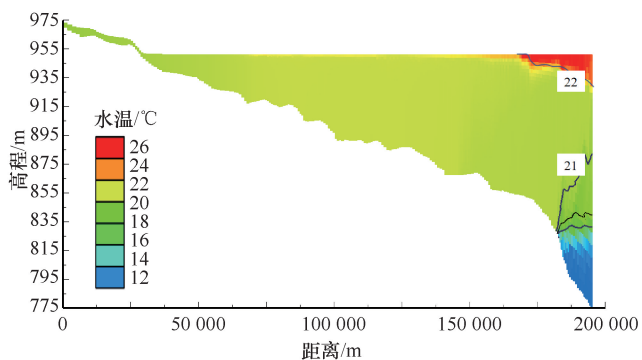
(d) 4月



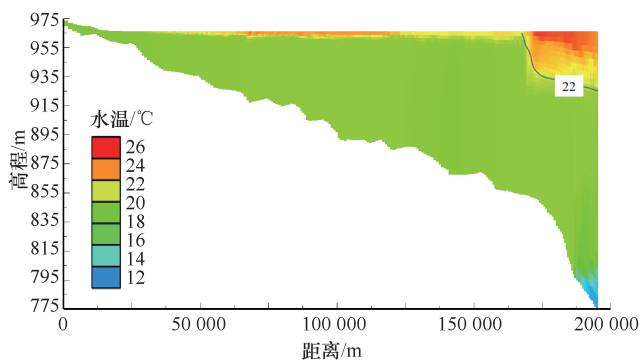
(e) 5月



(f) 6月



(g) 7月



(h) 8月

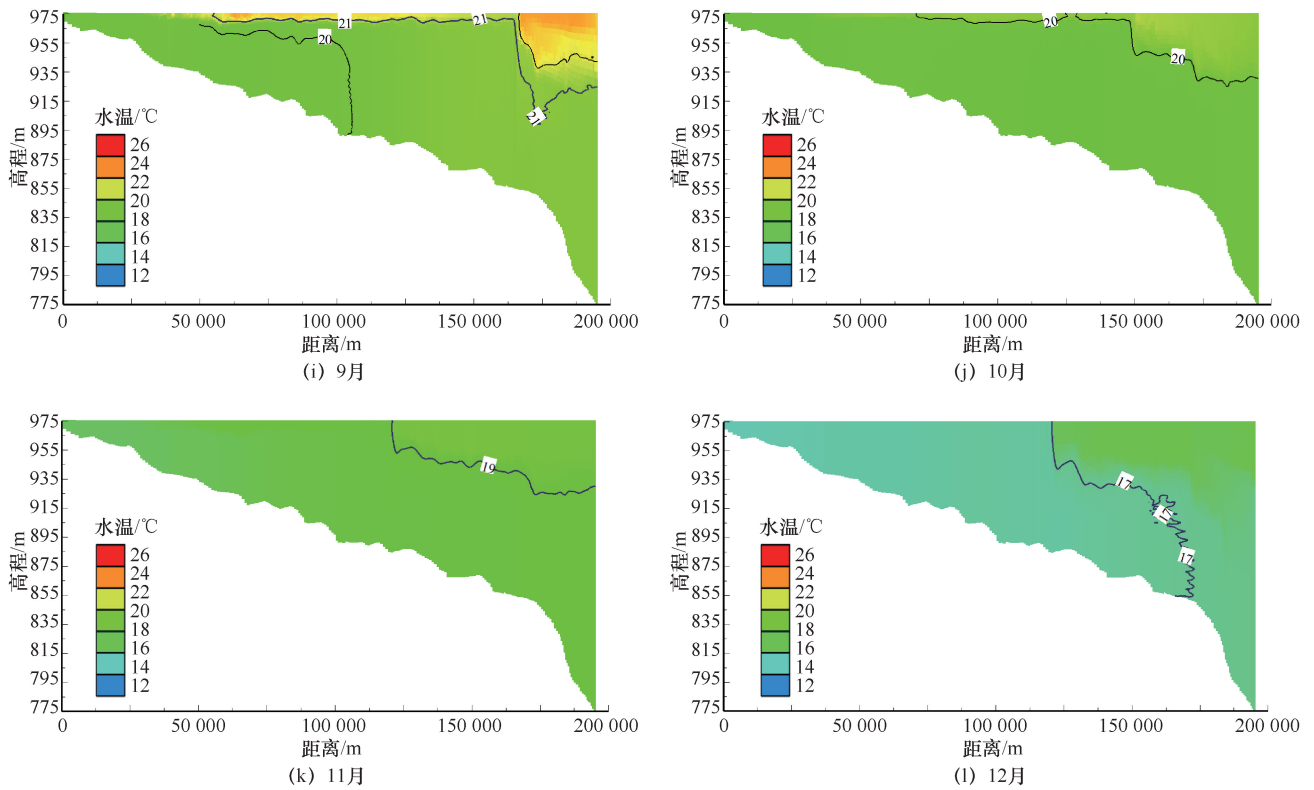


图7 稳定运行期下乌东德库区水温时空分布特性

Fig.7 Spatiotemporal distribution characteristics of water temperature in the Wudongde Reservoir area during stable operation period

稳定分层现象, 3—6月库区水温分层现象明显。详细而言, 1月入流水温和气温为较低, 无明显水温分层现象, 中下层水体趋于同温, 约16℃; 2月随着入流水温的降低, 低温水体下潜导致下层水体温度下降, 垂向温差略有增加, 水体产生微弱水温分层现象; 3月继续维持正常蓄水位进行, 随着气温的大幅提升, 热量从大气向水体传递, 水库上层开始产生较明显分层现象, 温跃层处于高程935m以上, 厚度约为40m, 垂向温差最大为8℃左右; 4—5月分层现象趋于稳定, 热量逐渐下移, 温跃层向下移动至875m附近, 温跃层厚度增加, 最大垂向温差为12.09℃; 6—8月, 水库将维持低水位运行, 6月中旬开始, 水库运行水位开始下降, 坝前水温分层现象依旧明显, 7月降到最低水位952m, 8月水位逐渐升高至正常蓄水位, 期间随着水位变幅加大, 库区水体混掺运动加剧, 出水口高程位置水温混掺逐渐向均匀发展, 与来流水温较为接近; 9月后, 水位恢复至正常蓄水位, 随着垂向水温的进一步混掺, 库区水体趋于同温, 除了表层水体受高气温影响温度较高外, 整体趋于20~21℃左右; 10月后入流水温以及气温开始下降, 库区整体水温逐渐下降, 10月最高水温为21℃, 整体稳定在20℃左右, 到12月最高水温

为18℃, 整体稳定在17℃左右。

另外, 本研究对比了2021年水库初期运行阶段和稳定运行阶段库区水温分布特性, 以探究库区水温的时空演化规律, 结果显示, 各时期水温对比而言, 水温分布结构较为接近。稳定运行期与2021实际水温结构对比结果显示, 在1—2月、9—12月水温不分层的月份, 稳定运行期与2021年垂向水温结构较为接近, 整体温差较低; 在3—6月稳定运行期与2021年实际水温结构大致相同, 其中3—4月温跃层下边界处于水深50m附近, 随着气温以及入流水温的增加, 温跃层下边界向下移动到水深100m附近, 且温跃层厚度大致相同; 7—8月稳定运行期与2021年实际水温结构有所不同, 2021年7月中层水温较低, 8月中层水温随着水位上升而增高, 但稳定运行期模拟结果显示, 7—8月中层水体整体与来水温度较为接近, 无明显变化, 其原因可能是6月模拟稳定运行期水位直线快速消落, 7月水库加大下泄流量, 水库维持在低水位运行, 垂向水体掺混加大导致中层水体水温上升。

4.2 下泄水温的滞温特性

水温影响着鱼类繁殖时间和规模以及个体生长速率。当环境水温降低, 鱼类生长缓慢; 水温升高, 当

温度积累到相应温度时, 鱼类生殖细胞加快形成, 开始产卵^[34-35]。金沙江下游梯级电站的运行势必会对下游鱼类产生影响。已有研究发现, 溪洛渡、向家坝水库运行后造成库区多种鱼类适宜产卵水温时间推迟30~40 d, 且溪洛渡水库下泄水温变化对鱼类的影响高于向家坝水库^[36]。三峡蓄水后, “四大家鱼”产卵时间平均推延了约10 d^[37]。在乌东德、白鹤滩两个水电站投入使用后, 上下游水库间的相互作用更加复杂, 可能进一步加剧下水水温影响。

为缓解下泄水温变化对河段鱼类的影响, 乌东德水库采用了叠梁门式分层取水方案。水库左、右岸地下电站进水口采用岸塔式, 进水塔内设有叠梁门槽。左、右岸进水口底坎高程分别为916.5 m、913.0 m, 叠梁门顶高程分别为952.5 m、953.0 m, 相应门高分别为36 m、40 m; 左岸叠梁门分为4 m×7节+8 m×1节, 右岸分为4 m×6节+8 m×2节^[28]。依据乌东德水库叠梁门的调度规程, 乌东德水库每年3—6月份启用叠梁门分层取水设施, 本研究结合实际运行情况, 重点模拟了两层叠梁门调度方案下水库的下泄水温过程。

不同时期下泄水温对比变化情况如图8所示。结果显示, 乌东德水库建坝后, 2020—2022年下泄水温总体变化趋势如下: 3月随着气温增长, 水温慢慢升高, 在7—8月份达到最高22℃附近, 9月后随着气温下降水温也逐渐下降, 在2月降到最低温度14℃附近。各年份下泄水温与历史同期最大温差在2.17℃附近, 总体来说温差变幅较小。

乌东德建坝前后实测下泄水温和坝址天然水温对比结果显示, 乌东德建坝后明显存在春夏季低温水下泄, 冬季高温水下泄的问题。在5月, 下泄水温比坝址天然水温降低3.67℃, 平均水温变幅为-2.68℃, 而12月下泄水温则比坝址天然水温高出5.24℃, 平均水温变幅为4.78℃。

水库稳定运行期模拟下泄水温整体变化趋势与2020—2022年下泄水温一致, 和坝址天然水温对比结果显示, 水库进入稳定运行期后, 同样存在明显的春季低温水下泄, 冬季高温水下泄问题; 3—6月, 下泄月均水温比坝址天然水温降低0.91~4.09℃; 冬季12月—次年2月下泄月均水温比坝址天然水温升高1.34~4.34℃。

4.3 下泄水温变化对鱼类繁殖影响

根据乌东德水库现有调查成果, 乌东德坝下河段产卵鱼类包括鲤、鲫等产黏沉性卵鱼类和四大家鱼、长鳍吻鲈、中华金沙鳅、犁头鳅等产漂流性卵鱼类,

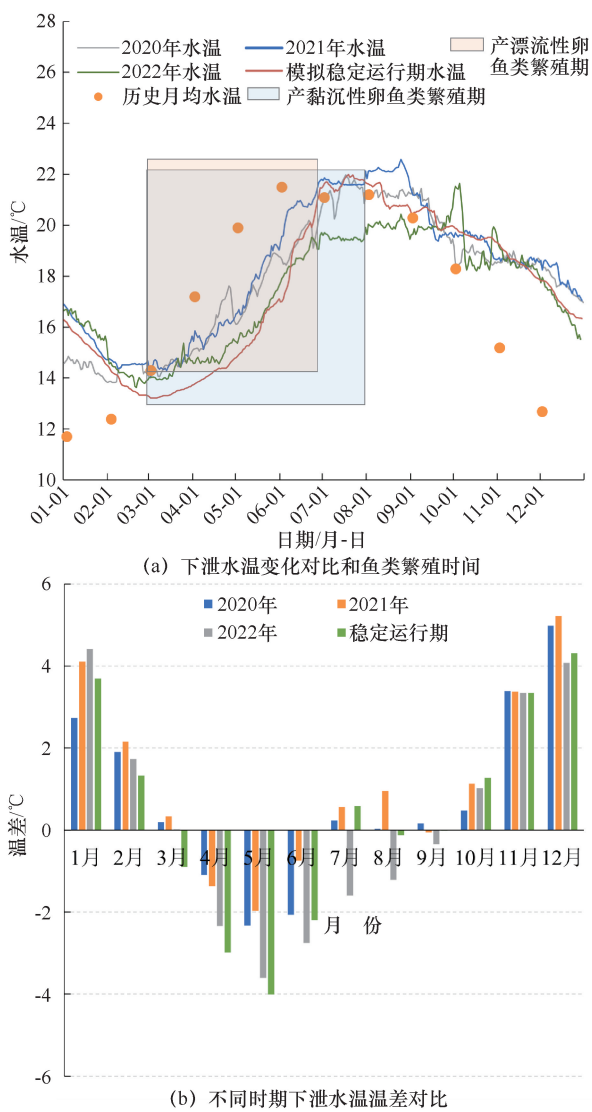


图8 不同时期下泄水温变化对比

Fig. 8 Comparison of changes in discharge water temperature at different periods

其中长鳍吻鲈、中华金沙鳅、犁头鳅为金沙江水系特有鱼类。鲤、鲫等产黏沉性卵鱼类, 繁殖期一般为每年的3—7月, 繁殖盛期为4—5月, 适宜开始产卵水温为14℃; 四大家鱼繁殖期为5—6月, 在水温达到18℃时产卵^[38], 长鳍吻鲈产卵繁殖期在3—5月, 适宜产卵水温16.5~18.3℃^[39], 犁头鳅产卵时间在5—6月, 适宜产卵水温为16.9~27.0℃^[40], 中华金沙鳅产卵时间在5—6月, 适宜产卵水温为17.8~23.2℃^[41]。

水库运行后, 鲤、鲫产卵适宜温度对应时间向后推迟到4月中旬, 推迟天数为40 d左右; 四大家鱼产卵适宜温度对应时间向后推迟到6月上旬, 推迟天数为40 d左右; 长鳍吻鲈产卵适宜温度对应时间向后推迟到5月下旬, 推迟天数为50 d左右; 犁头鳅

产卵适宜温度对应时间向后推迟到5月下旬, 推迟天数为30 d左右; 中华金沙鳅产卵适宜温度对应时间向后推迟到6月上旬, 推迟天数为40 d左右。整体而言, 五种鱼类产卵时间皆往后推迟月余时间(见表1), 且乌东德蓄水后对五种鱼类影响程度为: 长鳍吻鮡>中华金沙鳅、四大家鱼、鲤、鲫>犁头鳅。

5 结果讨论

本文采用数值模拟方法, 以水温实际监测资料为基础, 构建乌东德水库水温模拟模型。经过2021年垂向水温实际监测数据率定后, 以平水年调度数据、2021年入流水温数据等为边界, 模拟预测了稳定运行期水库库区水温结构变化和下水温过程。

对于乌东德水库水温预测, 目前相关研究较少, 且多缺乏实测资料支撑。阮娅等^[28]在水库建设阶段, 基于二滩水库观测数据率定构建了乌东德水库立面二维水温模型, 模拟了平水年、多年平均入流水文年条件下水库水温变化, 结果显示, 乌东德水库库区水温结构呈季节性分层特征, 2—10月存在明显的水温分层现象。上述研究与本文模拟结果趋势相近, 研究结果均表明乌东德水库存在季节性水温分层现象, 但在分层月份和库表温差上有所差异, 可能与模型的参数设置和采用的边界条件不同有关, 本研究基于乌东德水库实测数据进行参数率定, 模拟结果可能在一定程度上具备更高的准确性。为此, 本文对比了所构建模型精度与同类型深水湖库模拟精度的差异。

从库区水温结构的模拟精度而言, 本研究构建模型的 AME 、 $RMSE$ 值分别在0.27~0.73、0.29~0.96。贾洪涛^[42]构建了基于EFDC的乌江渡水库三维水温模型温度误差在0.1~1.1℃; 龙良红等^[11]构建了基于CE-QUAL-W2的溪洛渡水温模型 AME 、 $RMSE$ 最小在0.40、0.41以内, 最大为0.72、0.81; TASNIM等^[43]构建的明尼苏达州湖泊EFDC+水温模型, $RMSE$ 为1.32℃; 同比之下, 本文模型精度处于相

对较高水平, 由此说明, 本研究构建的三维水温模拟模型适用于库区大范围水温结构模拟。

从下水温模拟精度而言, 本研究构建模型的 AME 、 $RMSE$ 分别在0.76、0.93, 误差主要集中在1—4月份, 存在模拟值普遍低于实测值的情况, 造成上述现象的原因可能由以下几点: (1) 水库流出过程涉及坝前复杂三维流场过程, 加之水层之间的黏滞性, 可能导致模型模拟等效取水高程与实际流出高程有所偏差, 进而造成下水温模拟误差; (2) 对比2021年库区垂向水温监测资料和下水温资料, 发现每个月垂向水温低于对应下水温, 推测下水温和垂向水温分别监测, 监测数据或监测点位也可能存在偏差; (3) 实测值采用距水电站下游约10 km处的乌东德水文站监测数据, 根据气象资料, 气温在1月下旬已达20℃左右, 然后持续升温在4月上旬最高气温达到28℃左右, 下水温受到下游气温等因素影响, 可能发生复温现象, 因此导致模型下水温实际下水温略有出入。

综上所述, 本文构建的乌东德水温模型对于狭长形库区大范围水温结构研究较为适用, 在需要考虑取水口复杂流态关系下水库下水温预测方面, 模型性能仍有待提升, 未来可探索构建坝前精细化的三维水温模型, 模拟坝前取水口温度场变化及下水温过程。

6 结论

本文通过构建乌东德三维水温数值模拟模型, 利用实际水温监测数据进行参数率定, 结合实际调度数据, 研究了乌东德水库水温分布规律特性。通过对比水库蓄水后下水温与天然水温, 分析坝前垂向水温和稳定运行期库区水温分布, 得到以下结论:

(1) 本研究中的三维水温数值模拟模型能够较好的模拟乌东德水库库区水温时空分布和坝前垂向水温分布特性, 水库稳定运行期春季存在明显分层现象,

表1 乌东德水库蓄水前后重要鱼类繁殖适宜水温和对应时间

Table 1 Suitable water temperature and corresponding time periods for the reproduction of key fish species before and after impounding in the Wudongde Reservoir

鱼类种类	适应产卵水温/℃	水温到达适宜产卵温度对应时间		
		蓄水前	蓄水后(稳定运行期)	延迟天数/d
鲤、鲫	14.0	3—7月	4月中旬	40
四大家鱼	18.0	5—6月	6月上旬	40
长鳍吻鮡	16.5~18.3	3—5月	5月下旬	50
犁头鳅	16.9~27.0	5—6月	5月下旬	30
中华金沙鳅	17.8~23.2	5—6月	6月上旬	40

垂向最大温差为 12.09℃。通过对 2021 年坝前垂向水温监测数据分析,2021 年 3—8 月存在明显分层现象,垂向最大温差为 11℃。

(2) 水库蓄水后,明显改变下游水温过程,春夏季滞温现象显著。根据乌东德建坝前后下泄水温和坝址天然水温对比水温降低最大为 3.67℃,水温升高最大为 5.24℃,水温滞后期约为 1 个月,多种鱼类产卵收到不同程度不利影响。通过水库稳定运行期模拟成果和坝址天然水温对比,3—6 月,下泄月均水温比坝址天然水温降低 0.91~4.09℃。冬季 12—次年 2 月下泄月均水温比坝址天然水温升高 1.34~4.34℃,14℃、18℃等重要水温节点出现期向后推迟了一个多月。

(3) 水库蓄水后,乌东德库区下游江段达到鱼类产卵适宜温度的时间皆推迟月余时间,其中鲤、鲫适宜产卵温度出现时间推迟约 40 d;四大家鱼推迟约为 40 d;长鳍吻鮡、犁头鳅、中华金沙鳅分别推迟约 50 d、30 d、40 d 左右。乌东德蓄水后对五种鱼类影响程度为:长鳍吻鮡>中华金沙鳅、四大家鱼、鲤、鲫>犁头鳅。

参考文献 (References):

- [1] 水利水电按规划设计总院. 中国可再生能源发展报告 2022[EB/OL]. (2023-07-01) [2024-03-04]. <http://www.creei.cn/web/content.html?id=5429>.
Water Conservancy and Hydropower Planning and Design Institute. China renewable energy development report 2022[EB/OL]. (2023-07-01) [2024-03-04]. <http://www.creei.cn/web/content.html?id=5429>.
- [2] 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. Effects of water temperature on life activities of freshwater warm water fish [J]. Journal of Water Ecology, 2021, 42(4): 117-122.
- [3] 陈松波. 不同温度条件下鲤鱼摄食节律与呼吸代谢的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2004.
CHEN Songbo. Study on Feeding Rhythm and Respiratory Metabolism of Carp Under Different Temperature Conditions [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2004.
- [4] 潘向忠, 高玉蓉, 李佳, 等. 2011. 钱塘江杭州段水体中溶解氧现状及其影响因素[J]. 环境保护科学, 37(4): 13-16.
PAN Xiangzhong, GAO Yurong, LI Jia, et al. 2011. Status quo and influencing factors of dissolved oxygen in the water of Hangzhou section of Qiantang River[J]. Environmental Protection Science, 37(4): 13-16.
- [5] 王志红, 崔福义, 安全. 水温与营养值对水库藻华态势的影响

[J]. 生态环境, 2005(1): 10-15.

WANG Zhihong, CUI Fuyi, AN Quan. Effects of water temperature and nutrient value on algal bloom situation in reservoir[J]. Ecology and Environment, 2005(1): 10-15.

- [6] 匡亮, 张鹏, 杨洪雨, 等. 梯级水库叠梁门分层取水水温改善效果的衰减[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1244-1251.
KUANG Liang, ZHANG Peng, YANG Hongyu, et al. Attenuation of the improvement effect of water temperature in the stratified water intake of the cascade reservoir[J]. Resources and Environment of the Yangtze River Basin, 2019, 28(5): 1244-1251.
- [7] 周思佳, 秦鑫, 薛文豪, 等. 糯扎渡水电站不同调度下下泄低温水改善效果研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(9): 170-179.
ZHOU Sijia, QIN Xin, XUE Wenhao, et al. Research on the improvement effect of low-temperature water discharge under different dispatching of Nuozhadu Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2023, 54(9): 170-179.
- [8] 王海龙, 陈豪, 肖海斌, 等. 糯扎渡水电站进水口叠梁门分层取水设施运行方式研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(10): 79-83.
WANG Hailong, CHEN Hao, XIAO Haibin, et al. Research on the operation mode of layered water intake facilities at the inlet of Nuozhadu Hydropower Station [J]. Hydropower Energy Science, 2015, 33(10): 79-83.
- [9] 梁斯琦. 澜沧江出境前河段水温分异及其模拟研究[D]. 昆明: 云南大学, 2022.
LIANG Siqi. Water Temperature Differentiation and Simulation Study of the River Section Before the Exit of the Lancang River [D]. Kunming: Yunnan University, 2022.
- [10] 苗雨池. 大型水库分层取水方式对下游河道鱼类生态环境影响研究[J]. 水利规划与设计, 2020(4): 158-163.
MIAO Yuchi. Study on the impact of stratified water intake mode of large reservoir on the ecological environment of fish in downstream rivers [J]. Water Conservancy Planning and Design, 2020(4): 158-163.
- [11] 龙良红, 徐慧, 鲍正风, 等. 溪洛渡水库水温时空特性研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(4): 79-89.
LONG Lianghong, XU Hui, BAO Zhengfeng, et al. Study on spatiotemporal characteristics of water temperature in Xiluodu Reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(4): 79-89.
- [12] 郝好鑫, 杨霞, 杨梦斐, 等. 金沙江下游梯级水库对水温及鱼类适宜产卵时间的影响[J]. 湖泊科学, 2023, 35(1): 247-257.
HAO Haoxin, YANG Xia, YANG Mengfei, et al. Effect of cascade reservoir in the lower reaches of Jinsha River on water temperature and suitable spawning time of fish[J]. Journal of Lake Sciences, 2023,

- 35(1): 247-257.
- [13] 严忠鑫, 卢晶莹, 王小明, 等. 叠梁门分层取水对下泄水温影响的分析方法研究[J]. 水力发电, 2023, 49(1): 6-9.
YAN Zhongxin, LU Jingying, WANG Xiaoming, et al. Research on the analysis method of the influence of layered water intake on the temperature of the lower discharge water of the stacked beam gate[J]. Hydroelectric Engineering, 2023, 49(1): 6-9.
- [14] 张锦鹏, 吴越, 田泽斌, 等. 基于EFDC模型的洱海水温模拟[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(3): 368-376.
ZHANG Jinpeng, WU Yue, TIAN Zebin, et al. Erhai water temperature simulation based on EFDC model [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(3): 368-376.
- [15] ORLOB G, SELNA L. Temperature variations in deep reservoirs[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1970, 96: 391-410.
- [16] 赖红, 杨延东, 袁嫫, 等. 基于CE-QUAL-W2模型的功果桥水库与景洪水库水温模拟对比[J]. 水电能源科学, 2023, 41(4): 114-117.
LAI Hong, YANG Yandong, YUAN Yan, et al. Simulation comparison of water temperature between Gongguoqiao Reservoir and Jinghong Reservoir based on CE-QUAL-W2 model[J]. Hydropower Energy Science, 2023, 41(4): 114-117.
- [17] KI S K, UK S C. Assessment of the impact of selective withdrawal on downstream fish habitats using a coupled hydrodynamic and habitat modeling[J]. Journal of Hydrology, 2020, 593: 125665.
- [18] ZHU S, DU X, LUO W. Incorporation of the simplified equilibrium temperature approach in a hydrodynamic and water quality model-CE-QUAL-W2[J]. Water Supply, 2019, 19(1): 156-164.
- [19] ABBAS S H, AN R, AMIR S, et al. A 3D numerical modeling of the links between hydrodynamics, dissolved oxygen, and water temperature of a northern rural-urban shallow lake with two distinct basins[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(10): 1198.
- [20] LEE H D, JIN A T, SUB K K. Simulations of the water temperature & circulation in the Asan Bay using EFDC Model[J]. Journal of the Korean Society for Environmental Technology, 2015, 16(6): 566-573.
- [21] JUNG J, NAM J, KIM J, et al. Estimation of temperature recovery distance and the influence of heat pump discharge on fluvial ecosystems[J]. Water, 2020, 12(4): 949.
- [22] POLITANO M, HAQUE M, WEBER J L. A numerical study of the temperature dynamics at McNary Dam [J]. Ecological Modelling, 2007, 212(3-4): 408-421.
- [23] 邓云. 大型深水库的水温预测研究[D]. 成都: 四川大学, 2003.
DENG Yun. Research on Water Temperature Prediction of Large Deep Reservoir[D]. Chengdu: Sichuan University, 2003.
- [24] 梁瑞峰, 李嘉, 李克峰, 等. 立面二维水库水温模型的并行研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(1): 30-33.
LIANG Ruifeng, LI Jia, LI Kefeng, et al. A parallelism study on laterally average 2-D Reservoir water temperature model[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science), 2009, 41(1): 30-33.
- [25] 杨宇, 蒋定国, 梁犁丽, 等. 溪洛渡水库水温模拟与叠梁门分层取水效果分析[J/OL]. 水利水电技术(中英文), 2025. [2025-04-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20241016.1545.004.html>.
- [26] YANG Yu, JIANG Dingguo, LIANG Lili, et al. Simulation of water temperature in Xiluodu Reservoir and analysis of the influence of layered water intake by stoplog gates[J/OL]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025. [2025-04-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20241016.1545.004.html>.
- [27] GUO S, ZHU D, CHEN Y. Improvement and Evaluation of the Latest Version of WRF-Lake at a Deep Riverine Reservoir [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2023, 40(4): 682-696.
- [28] GUO S, WANG F, CHEN Y. Evaluation of the WRF-Lake Model in the large dimictic reservoir: Comparisons with field data and another water temperature model [J]. Journal of Hydrometeorology, 2022, 23(8): 1227-1244.
- [29] 阮娅, 脱友才, 邓云, 等. 乌东德水库水温预测及低温水减缓措施[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(11): 1912-1918.
RUAN Ya, TU Youcai, DENG Yun, et al. Prediction of water temperature in Wudongde Reservoir and mitigation measures of low-temperature water[J]. Resources and Environment of Yangtze River Basin, 2017, 26(11): 1912-1918.
- [30] 张迪. 基于人工智能算法的大型水库水温调控优化技术研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2020.
ZHANG Di. Research on optimization technology of water temperature regulation and control in large reservoirs based on artificial intelligence algorithm [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020.
- [31] BROWN L C, BARWEL T. The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2UNCAS: Documentation and user manual[Z]. Washington: Environmental Protection Agency, 1987.
- [32] GALPERIN B, HASSID L H, HASSID S, et al. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1988, 45(1): 55-62.
- [33] 甘衍军, 李兰, 武见, 等. 基于EFDC的二滩水库水温模拟及水温分层影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(4): 476-485.
GAN Yanjun, LI Lan, WU See, et al. Simulation of water temperature in Ertan Reservoir based on EFDC and the impact of water temperature stratification [J]. Yangtze River Basin Resources and Environment, 2013, 22(4): 476-485.
- [34] 李一平, 施媛媛, 姜龙, 等. 地表水环境数学模型研究进展[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 1-8.
LI Yiping, SHI Yuanyuan, JIANG Long, et al. Research progress on mathematical models of surface water environment [J]. Water

- Resources Protection, 2019, 35(4): 1-8.
- [34] 邹家祥. 环境影响评价技术手册: 水利水电工程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
ZOU Jiayang. Technical Manual of Environmental Impact Assessment: Water conservancy and Hydropower Engineering[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009.
- [35] 纪道斌, 成再强, 龙良红, 等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 34-42.
JI Daobin, CHENG Zaiqiang, LONG Lianghong, et al. Stratification characteristics and ecological effects of reservoir temperature at the beginning of the reservoir in different operation periods of the Three Gorges Reservoir[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 34-42.
- [36] 王康, 肖洋, 毛劲乔, 等. 水温变化影响下金沙江下游典型鱼类繁殖期研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 50-55.
WANG Kang, XIAO Yang, MAO Jinqiao, et al. Study on the reproductive period of typical fish in the lower reaches of Jinsha River under the influence of water temperature change[J]. Journal of Hohai University(Natural Science Edition), 2023, 51(2): 50-55.
- [37] 郭文献, 王鸿翔, 夏自强, 等. 三峡-葛洲坝梯级水库水温影响研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 182-187.
GUO Wenwen, WANG Hongxiang, XIA Ziqiang, et al. Study on the influence of water temperature of the Three Gorges-Gezhouba cascade reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(6): 182-187.
- [38] 张迪, 徐薇, 吴凡, 等. 面向产漂流性卵鱼类的三峡水库生态调度效果评价[J]. 水生态学杂志, 2024, 45(1): 58-66.
ZHANG Di, XU Wei, WU Fan, et al. Evaluation of the effect of ecological dispatch of the Three Gorges Reservoir for drifting spawning fish[J]. Journal of Water Ecology, 2024, 45(1): 58-66.
- [39] 曲焕韬, 郭文韬, 杨元金, 等. 长江干流长鳍吻鲈(Rhinogobio ventralis)繁殖生物学[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(1): 1-7.
QU Huantao, GUO Wentao, YANG Yuanjin, et al. Reproductive biology of Rhinogobio ventralis in the main stream of the Yangtze River[J]. Progress in Fishery Science, 2016, 37(1): 1-7.
- [40] 闫峰陵, 阮娅, 樊皓, 等. 金沙江乌东德水电站环境影响报告书[R]. 武汉: 长江水资源保护科学研究所, 2015.
YAN Fengling, RUAN Ya, FAN Hao, et al. Environmental impact report of Wudongde Hydropower Station on Jinsha River[R]. Wuhan: Yangtze River Water Resources Protection Research Institute, 2015.
- [41] 李倩, 李翀, 骆辉煌. 长江上游珍稀、特有鱼类生态水温目标研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(2): 86-91.
LI Qian, LI Chong, LUO Huanghuang. Ecological target water temperature of rare and endemic fish in Yangtze River upstream[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012, 10(2): 86-91.
- [42] 贾洪涛. 乌江梯级电站对乌江渡水库水温累积性影响分析[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(5): 89-95.
JIA Hongtao. Analysis of the cumulative effect of Wujiang River stepped power station on the water temperature of Wujiangdu Reservoir[J]. Marine Lake and Marsh Bulletin, 2022, 44(5): 89-95.
- [43] TASNIM B, FANG X, HAYWORTH J S. One- and three-dimensional hydrodynamic, water temperature, and dissolved oxygen modeling comparison[J]. Water, 2024, 16(2): 317.

(责任编辑 王璐)