

孙彤, 鱼京善, 干建丽, 等. 基于 FLOW-3D 的滩坑水电站下泄水温改善效果模拟分析 [J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 210-223. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.016

SUN Tong, YU Jingshan, GAN Jianli, et al. Simulation analysis of the improvement effect on downstream water temperature at Tankeng Hydropower Station based on FLOW-3D [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 210-223. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.016

# 基于 FLOW-3D 的滩坑水电站下泄水温改善效果模拟分析

孙彤<sup>1,2</sup>, 鱼京善<sup>1,2</sup>, 干建丽<sup>3</sup>, 李占杰<sup>1,2</sup>, 岳启蒙<sup>1,2</sup>, 张皓天<sup>1,2</sup>, 许虎<sup>1,2</sup>,  
徐淑高<sup>1,2</sup>, 李爽<sup>1,2</sup>, 杨陟扬<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 浙江浙能北海水力发电有限公司, 浙江 杭州 310009)

**摘要:** 【目的】滩坑水电站建成运行后, 库区水温分层结构和下游河道水温时空分布均发生显著改变。为优化水库调度策略、缓解低温水下泄对河道生态系统的影响, 亟需明晰水库运行要素与下泄水温的响应关系, 并量化评估调控措施的改善效果。【方法】以滩坑水库为研究对象, 基于 FLOW-3D 模型构建取水口局部三维数值模型, 分别模拟春、夏、秋、冬四季不同水位条件、6—8 层叠梁门布设层数组合工况下的下泄水温过程, 分析其热分层响应规律及调控机理。【结果】结果显示: (1) 滩坑水库垂向热分层结构呈现显著季节性分异特征, 于 3 月开始出现水温分层现象, 10 月基本消失, 受叠梁门影响, 垂向水温主要温差集中在水深 25 m 范围内。(2) 强分层季节(春、夏、秋), 水位对水温的作用分别为 0.1~0.2 °C/m、0.1~0.5 °C/m、0.1~0.3 °C/m, 单层叠梁门对下泄水温的调控范围分别为 0.4~0.8 °C、1.5~2.3 °C、0.6~2.1 °C; 而在弱分层季节(冬), 单位水位和叠梁门对下泄水温的影响分别在 0.1 °C 和 0.3 °C 以下。(3) 叠梁门设置在温跃层以下时, 取水温度较低, 春、夏、秋、冬季节增设一层叠梁门, 可使下泄水温分别提升 0.7 °C、2.2 °C、1.8 °C、0.2 °C。【结论】结果表明: 在强分层期, 叠梁门通过控制取水深度, 对下泄水温的改善效果显著优于单一水位调控措施, 且其设置在温跃层上时调控效果更优; 而在热分层较弱的季节, 两类措施的调控作用均显著减弱, 这与垂向水温梯度趋平直接相关。基于此, 建议在水库运行调度时, 结合季节性温跃层变化, 合理安排水库蓄水和叠梁门布设, 保证在温跃层以上取水。

**关键词:** FLOW-3D; 取水口局部; 叠梁门; 水位; 下泄水温; 影响因素; 水电站; 时空分布

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.016

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0210-14



与作者互动  
听语音  
聊科研

收稿日期: 2025-03-28; 修回日期: 2025-05-12; 录用日期: 2025-05-12; 网络出版日期: 2025-05-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3204403)

作者简介: 孙彤(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文模型方向研究。E-mail: suntong@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 干建丽(1972—), 女, 高级工程师, 副总工程师, 大专, 主要从事水电站生产运行、大坝监测维护等管理和研究。E-mail: 673429375@qq.com

李占杰(1978—), 女, 高级实验师, 硕士, 主要从事水文过程、水动力模拟研究。E-mail: lzhan@bnu.edu.cn

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

## Simulation analysis of the improvement effect on downstream water temperature at tankeng hydropower station based on FLOW-3D

SUN Tong<sup>1,2</sup>, YU Jingshan<sup>1,2</sup>, GAN Jianli<sup>3</sup>, LI Zhanjie<sup>1,2</sup>, YUE Qimeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Haotian<sup>1,2</sup>, XU Hu<sup>1,2</sup>, XU Shugao<sup>1,2</sup>, LI Shuang<sup>1,2</sup>, YANG Zhiyang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Water Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. Zhejiang Zheneng Beihai Hydropower Co., Ltd., Hangzhou 310009, Zhejiang, China)

**Abstract** [Objective] After the completion and operation of the Tankeng Hydropower Station, significant changes have occurred in the water temperature stratification structure of the reservoir area and the spatio-temporal distribution of the water temperature in the downstream river. To optimize the reservoir operation strategy and mitigate the impact of low-temperature water discharge on the river ecosystem, it is urgent to clarify the response relationship between reservoir operation factors and the discharged water temperature, and quantitatively evaluate the improvement effect of regulatory measures. [Methods] Taking the Tankeng Reservoir as the research object, a local three-dimensional numerical model of the water intake was constructed based on the FLOW-3D model. The discharged water temperature processes under different water level conditions in spring, summer, autumn and winter, and the combination of 6~8 layers of stop-log gates were simulated respectively. The response law of thermal stratification and the regulation mechanism were analyzed. [Results] The results show that: (1) The vertical thermal stratification structure of the Tankeng Reservoir presents significant seasonal differentiation characteristics. The water temperature stratification phenomenon begins to appear in March and basically disappears in October. Affected by the stop-log gates, the main vertical water temperature difference is concentrated within a water depth of 25 m. (2) In the strong stratification seasons (spring, summer, autumn), the effects of water level on water temperature are 0.1~0.2 °C/m, 0.1~0.5 °C/m, and 0.1~0.3 °C/m respectively. The regulation ranges of a single-layer stop-log gate on the discharged water temperature are 0.4~0.8 °C, 1.5~2.3 °C, and 0.6~2.1 °C respectively. In the weak stratification season (winter), the impacts of unit water level and stop-log gate on the discharged water temperature are below 0.1 °C and 0.3 °C respectively. (3) When the stop-log gate is set below the thermocline, the intake water temperature is low. Adding one more layer of stop-log gate in spring, summer, autumn and winter can increase the discharged water temperature by 0.7 °C, 2.2 °C, 1.8 °C and 0.2 °C respectively. [Conclusion] The results indicate that during the strong stratification period, the stop-log gate can significantly improve the discharged water temperature by controlling the intake water depth, which is better than the single water-level regulation measure, and the regulation effect is better when it is set above the thermocline. In the seasons with weak thermal stratification, the regulation effects of both measures are significantly weakened, which is directly related to the flattening of the vertical water temperature gradient. Therefore, it is recommended that during the reservoir operation and regulation, the reservoir storage and the arrangement of stop-log gates should be reasonably planned in combination with the seasonal changes of the thermocline to ensure water intake above the thermocline.

**Keywords:** FLOW-3D; local part of the water intake; stop-log gate; water level; discharged water temperature; influencing factors; hydropower station; spatiotemporal distribution

## 0 引言

我国拥有丰富的水能资源和长期的水电开发历史, 2010 年三峡大坝全面蓄水, 我国水电装机容量突破 2 亿 kW, 一跃成为全球总库容和水电装机容量最大的国家。在“十三五”期间(2016—2020 年), 水电建设速度加快, 大型水电站集中投产<sup>[1]</sup>, 但进入“十四五”时期(2021—2025 年), 新增水电项目的规模和速度有所放缓, 重点更多转向优化现有资源、提升效率以及生态环境保护<sup>[2]</sup>。纵观我国的水电开发, 虽然提供低成本可再生能源, 改善水资源时

空分布不均的矛盾, 实现防洪功能和社会经济效益<sup>[3]</sup>, 但与此同时, 对下游水生生态系统健康与演变造成了诸多不利影响<sup>[4]</sup>。大深型水库蓄水后, 水体深度的增加和流速的显著降低, 不同深度的水体所接收的太阳辐射显现出很大的差异, 加上气温、风速和来流条件等因素影响, 水库垂向温度分层呈现出季节性的变化规律。受库区垂向水温结构影响, 泄水温度异于天然河道<sup>[5]</sup>, 特别在温热季节大量低温水释放, 影响下游鱼类正常代谢和产卵, 降低物种多样性<sup>[6]</sup>。随着生态保护力度的持续加大, 如何有效缓解下泄低温水带来的负面效应, 已成为水利水电工程

管理的核心议题。

传统工程中,为了增大水头差、清淤排沙和提高发电效益,取水口通常设置在水库底层,这一取水方式导致低温水排入下游河道<sup>[7]</sup>,对河道中水生生物生存和生态系统稳定性产生不利影响<sup>[8]</sup>。对此,国内外水库多采用分层取水装置<sup>[9]</sup>来调节水温,包括隔水幕墙、多层取水、叠梁门分层取水等方式。其中,叠梁门在工程实践中展现出优异的水温调节效能<sup>[10]</sup>,在我国大深型水库中被广泛采用<sup>[11-12]</sup>。高学平等<sup>[13-14]</sup>通过对比浮式、多层与叠梁门取水方案,证实叠梁门可显著提升取水温度。戴凌全等<sup>[15]</sup>进一步证实叠梁门运行能对水库库区水温结构和下泄过程产生显著的调节作用。尽管已有研究验证了叠梁门的效能,然而,在实际运行调度时,叠梁门仍面临操作流程繁琐、水温恢复响应滞后等问题<sup>[16]</sup>,且其调控效果受水位动态变化的显著制约<sup>[17]</sup>,往往难以达到工程既定目标。因此,叠梁门分层取水设施的精细化调度与效果提升是工程运行中研究的重点。

水库取水口温度是衡量叠梁门调控效果的关键指标<sup>[18]</sup>,目前关于水库水温的研究主要聚焦于原型观测和数值模拟。原型观测法获得的数据直观且真实可靠,但其需要布设大量的监测点,且难以适用于不同来流条件和气候条件的情景,应用受限因素多。随着计算机技术的迭代发展,数值模型同样已成为水库热分层效应精细化模拟与分析的核心手段,尤其是三维数值模拟模型,能够清晰表征水库细部水温特征及各向异性特性<sup>[19-20]</sup>,在水库水温模拟领域应用前景广阔。代表性的模型有 EFDC 模型<sup>[21]</sup>、Delft3D 模型<sup>[22]</sup>、Mike 模型<sup>[23]</sup>和 FLOW-3D 模型<sup>[24]</sup>等。相较于其他三维模型,FLOW-3D 采用 Tru-VOF 方法对气液界面进行精准描述<sup>[25]</sup>,凭借独有的 FAVOR 技术精准刻画局部流场异质性<sup>[26]</sup>,具有较高的计算精度和效率,在水库局部建模中具有突出优势。HE 等<sup>[27]</sup>以三板溪水库为例,构建 FLOW-3D 模型,深入研究了大深型水库热分层规律及水库分层对下泄水温的影响;黄安阳等<sup>[28]</sup>利用 FLOW-3D 模型,对分层水库坝区附近的流场及温度场分布进行精确模拟,探讨了浸没高度、下泄流量及出流方式等因素与下泄水温的关联性;刘俊<sup>[29]</sup>基于 FLOW-3D 开展了多工况模拟计算,揭示了影响浮式取水口前流场的主要因素,并归纳了该区域水体流动的特征规律。

滩坑水电站地处瓯江二级支流小溪的中游河段,具有多年调节能力。工程运行后,库区及下游河段水温的时空分布发生显著变化,对水生生态系统造成严

重影响,尤其威胁到下游珍稀鱼类(鳊、香鱼)的产卵场适宜性和种群繁衍<sup>[30]</sup>。通过文献调研发现,目前关于滩坑水库水温的研究仍存在一定优化空间。以往的研究水温模拟精度有限<sup>[31]</sup>,对叠梁门调控效果的分析较为概化<sup>[32]</sup>,且大多未结合垂向水温进行系统分析,难以直接为工程实际调度提供具体方案。鉴于此,本研究借助 FLOW-3D 构建滩坑水电站取水口局部三维数值模型,仿真模拟四个季节中不同水位和不同叠梁门调控方案下的下泄水温变化,系统评估了取水温度对调控措施的敏感性,以期为滩坑水电站的生态环保措施管理提供对策与建议。

## 1 研究区概况

滩坑水电站位于浙江省丽水市内,横跨景宁畲族自治县和青田县,地理位置如图 1(a)所示。受东南亚季风影响,雨量充沛,四季分明。坝区多年平均气温为 19.7℃,多年平均河道水温为 18.8℃。

### 1.1 滩坑水库运行实况

滩坑水库上游无梯级水电站,径流主要受控于降雨和山区地下水渗流。2023 年 2 月—2024 年 2 月期间,坝前水位、入库流量、出库流量日均变化如图 2 所示。滩坑水库运行平稳,出库流量几乎全年在 400 m<sup>3</sup>/s 以下,且主要通过机组出流,受汛期影响,2023 年 7 月底入库日均流量达到最大值 952.51 m<sup>3</sup>/s。水位在 148.19~154.69 m 之间波动,受降雨和水库调度影响,水位于 2023 年 5 月 3 日达到最大值,最低水位出现在 2024 年 1 月 27 日。

### 1.2 滩坑水库实测水温数据

为了获取滩坑水电站库区及受影响河段的现状水温变化过程,在坝前布设垂向监测断面,在坝下设置监测点位,具体位置如图 1(b)所示。2023 年 2 月—2024 年 2 月期间,实现垂向温度梯度与下泄水温过程的同步连续观测。垂向温度链布设方案为表层 0.5~30 m,以间距 2 m 布设 16 个探头;水深 30~81 m,以间距 3 m 布设 17 个探头;共计 33 个探头。

监测结果表明,滩坑水库垂向水温分层呈现显著的季节性特征(见图 3):春季(3—5 月)进入升温期,分层程度随升温过程逐渐增强,温跃层由 10 m 逐渐增厚至 18 m,梯度 0.34℃/m,呈现弱分层;夏季(6—8 月)在高温和强太阳辐射作用下,上下层水温差异显著增大,差值最大可达 20℃。温跃层下移至 24 m 深度,梯度达 0.77℃/m,形成强分层;秋季(9—11 月)随气温下降,温跃层继续下移至 28 m,梯度减至 0.65℃/m,分层结构开始衰减;冬季

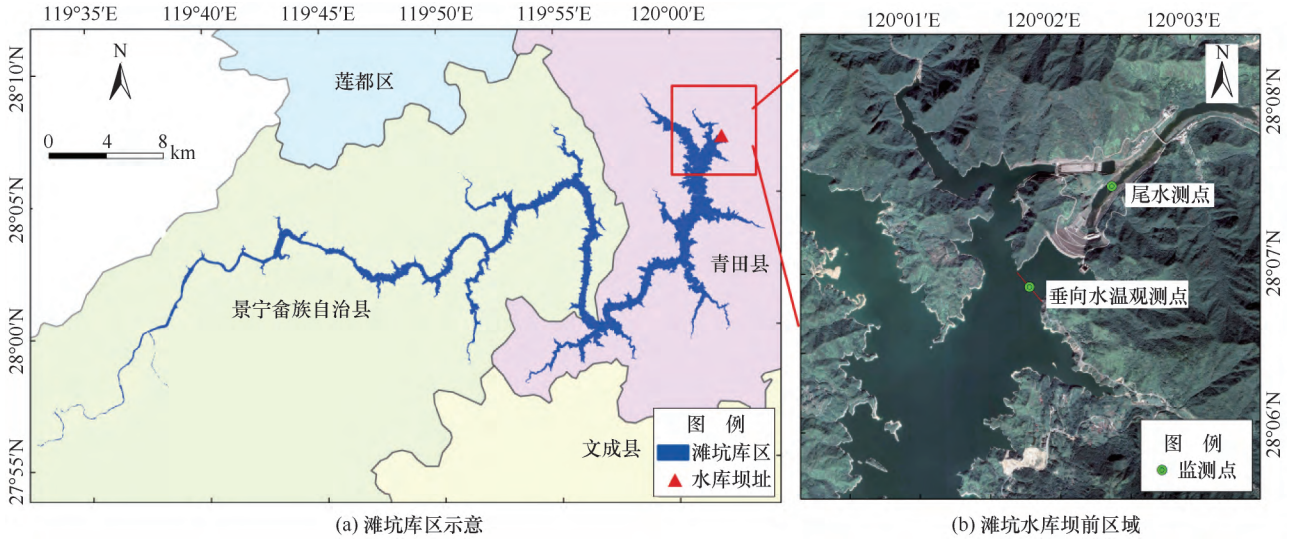


图 1 研究区示意

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

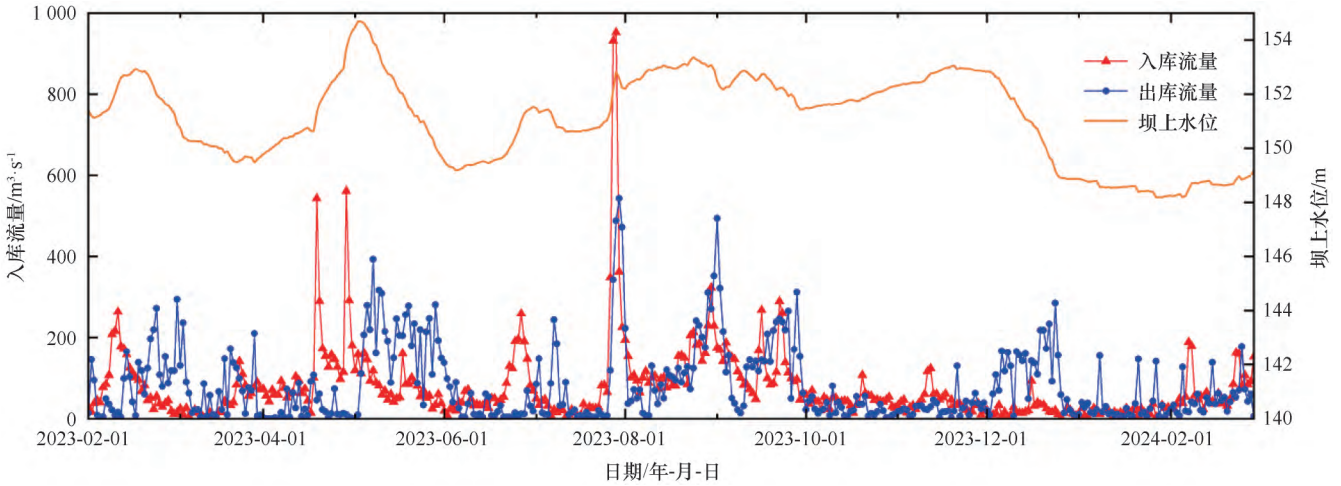


图 2 2023 年 2 月—2024 年 2 月滩坑水库运行实况

Fig. 2 Operational status of Tankeng Reservoir from February 2023 to February 2024

(12 月一次年 2 月) 受低温影响, 水体完全混合, 形成 18 m 厚同温层, 垂向温度梯度不足 0.1 °C / m。

### 1.3 滩坑水库工程概况

滩坑电站具有多年调节能力, 校核洪水位以下总库容 41.90 亿 m<sup>3</sup>, 调节库容 21.26 亿 m<sup>3</sup>。电站运行水位在正常蓄水位 160 m 和死水位 120 m 之间波动, 单台机组设计引用流量为 213 m<sup>3</sup> / s。取水系统设计方面, 电站采用集中式布置方案, 三个分层取水口均设置在坝体中部通仓式进水塔内。进水塔总高度 79 m, 取水口底板安装高程为 95 m。每个取水口设有双孔结构, 全站共配置 6 个取水孔, 采用叠梁门垂直布置方式, 每孔安装 8 块叠梁门体(见图 4)。为满足分层取水需求及流速控制精度, 叠梁门采用 95~135 m 高程分层布置方案, 并由设置于 171.00 m 高程平台的

共用门机系统执行吊装及移位作业。

## 2 研究方法

### 2.1 基本方程

FLOW-3D 是一款基于有限体积法(Finite Volume Method, FVM)的高精度计算流体动力学(CFD)软件, 广泛应用于水利工程、环境科学等领域<sup>[33-34]</sup>。本文构建取水口局部数值模型模拟下泄水温, 使用模块包括流体流动模块、湍流模型模块和热传递模块, 计算公式如下。

连续性方程

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \\ \rho(T) = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \end{cases} \quad (1)$$

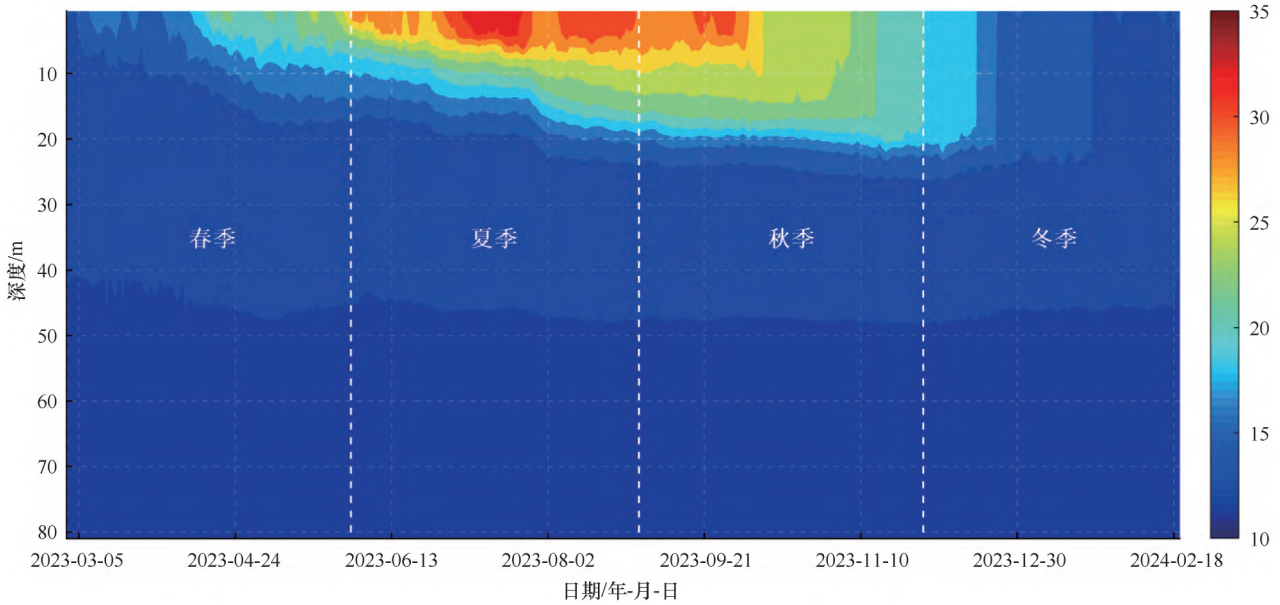


图3 滩坑水电站各季节坝前垂向水温分布(单位: °C)

Fig. 3 Vertical water temperature distribution in front of the dam at Tankeng Hydropower Station for each season( Unit: °C)

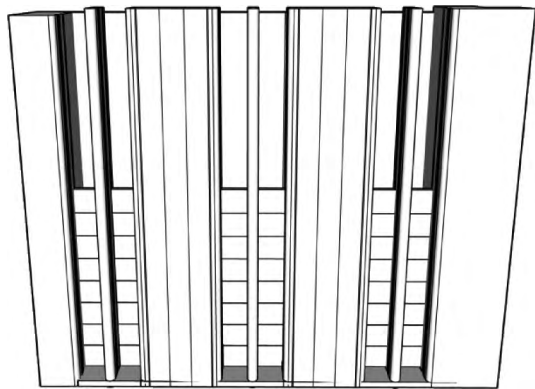


图4 滩坑水电站叠梁门布设示意

Fig. 4 Schematic diagram of stop-log gate arrangement at Tankeng Hydropower Station

式中,  $\rho$  为流体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), 与温度呈线性关系;  $\rho_0$  为参考温度下的流体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\beta$  为热膨胀系数 (无量纲);  $T$  和  $T_0$  分别为温度 (K) 和参考温度 (K);  $\mathbf{u}$  为速度矢量 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $t$  为时间 (s)。

动量方程

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + F_s \quad (2)$$

式中,  $p$  为压力 (Pa);  $\mu$  为动力黏度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );  $\mathbf{g}$  为重力加速度矢量 ( $\text{m}/\text{s}^2$ );  $F_s$  为表面张力项 ( $\text{N}/\text{m}^3$ )。

紊动动能为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} k) = \nabla \cdot (a_k \mu_{eff} \nabla k) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

紊动动能耗散率为

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \varepsilon) = \nabla \cdot (a_\varepsilon \mu_{eff} \nabla \varepsilon) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中,  $k$  为流体紊流动能 ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ );  $\varepsilon$  为流体紊动耗散率 ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ );  $a_k$  为紊动动能的湍流普朗特数 (无量纲);  $\mu_{eff}$  为有效黏度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ),  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ ,  $\mu_t$  为湍流黏度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ),  $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ ;  $G_k$  为紊动动能生成项 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-3}$ );  $C_\mu$ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  为经验常数项 (无量纲), 分别取 0.084 5、1.42、1.68。

传热方程

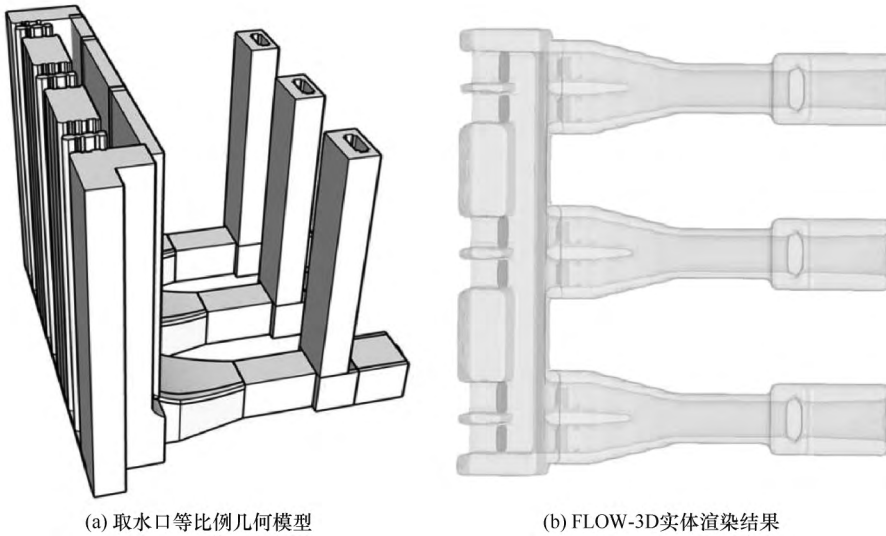
$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = -\nabla \cdot (k_t \nabla T) + S_T \quad (5)$$

式中,  $c_p$  为比热容 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $k_t$  为热传导系数 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $S_T$  为热源项 ( $\text{W}/\text{m}^3$ )。

2.2 分层取水口三维模型计算条件

2.2.1 几何模型与网格划分设置

按照水电站引水建筑物布置图和进水口尺寸, 等比例建立三维水动力几何模型 [见图 5(a)]。模型主要分为叠梁门段和进水口段, 叠梁门段 17.17 m, 进水口段 65.5 m。通过测试影响模拟精度的范围以及模型的性能, 本文拟定坝前 200 m 至坝后 80 m 为计算域。为平衡计算精度与计算量, 计算域分块划分网格, 宽度方向尺寸为 0.5~1 m, 主流方向为 0.5~2 m, 深度方向为 0.5~1 m, 网格在取水口近区加密, 总计网格划分数量为 75 万。该条件下, FLOW-3D 实



(a) 取水口等比例几何模型 (b) FLOW-3D 实体渲染结果

图 5 滩坑水电站取水口几何模型示意和实体结构

Fig. 5 Schematic diagram of the geometric model and rendering of the physical structure of the intake at Tankeng Hydropower Station

体渲染结果如图 5(b) 所示, 由图 5(b) 可知, 当前网格密度能够保障模拟过程中结构体不受损。

### 2.2.2 计算条件设置

边界条件设置上, 水体上层和上游均给定压力边界, 压力值为标准大气压, 并且上游设置对应来流温度和水位; 取水口出口边界设定为特定流速出流, 流速值根据单机引用流量和管道出口面积计算得到; 固壁和相接边界采用无滑移边界。对于初始条件的设置, 根据实测数据, 给定初始水位和水温分层情况。

## 2.3 模型验证

### 2.3.1 验证工况

根据坝前实测垂向温度链数据, 对各工况初始温度场进行分层设置。在春、夏、秋、冬 4 个季节中选择垂向水温结构差距较大的 4 个典型时刻, 对比实测垂向水温分布与模拟初始温度分布, 验证温度场设置的合理性。在模型验证中, 主要模拟不同水温分布、运行条件下的取水温度, 并与实测值进行对比, 分析所建模型的可行性。验证工况初始条件如表 1 所列。

### 2.3.2 精度评价指标

为了全面评估模型的精度, 本研究采用均方根误差 (*RMSE*) 和平均绝对误差 (*MAE*) 作为垂向水温模拟情况评价指标, 从误差分布和平均水平两个维度全面验证模型的可靠性。计算公式为

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

式中,  $y_i$  为第  $i$  个实测值 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\hat{y}_i$  为第  $i$  个模拟值 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $n$  为样本数量。

### 2.3.3 验证结果

(1) 初始场设置合理性。模型稳定后, 提取取水口前中线处垂向水温模拟值, 与实测值进行对比, 结果如图 6 所示。校核结果表明模拟初始温度分布与实际分布趋势一致, 且温跃层拐点基本吻合, 能够较好地反映水库水温分层规律。经计算, 所选取的四个时段内垂向水温模拟值与实测值之间 *MAE* 分别为  $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , *RMSE* 分别为  $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 证明初始温度场设置合理。

表 1 模型验证工况初始条件

Table 1 Initial conditions of the model verification working conditions

| 日期               | 坝前垂向水温 | 水位 /m  | 叠梁门数量/层 | 取水深度 /m |
|------------------|--------|--------|---------|---------|
| 2023 年 4 月 15 日  | 实测值    | 150.71 | 8       | 15.71   |
| 2023 年 7 月 15 日  | 实测值    | 150.63 |         | 15.63   |
| 2023 年 10 月 15 日 | 实测值    | 151.79 |         | 16.79   |
| 2024 年 1 月 15 日  | 实测值    | 151.12 |         | 16.12   |
| 2022 年 3 月 17 日  | 实测值    | 143.94 | 7       | 13.94   |
| 2022 年 5 月 6 日   | 实测值    | 148.09 |         | 18.09   |

(2) 模型可行性。图 7 汇总了各验证工况下, 模型模拟的下泄水温与实测水温的对比结果。由图可知, 研究时段内模拟值与监测值的绝对误差在  $0.14\sim 1.28\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 在 7 月、10 月出现较大偏差。这很可能是由于在热分层显著的季节, 有限的监测点位使得实测数据难以精准地刻画垂向水温的变化特征。此外, 下泄水温受气温影响, 导致模型模拟值与实测值存在一定差异。总体上, 模拟误差在可接受范围内, 证明所建取水口近区数值模型精度较高, 模拟结果可信。

## 3 不同工况下泄水温模拟分析

### 3.1 工况条件设置

滩坑水库取水口附近下泄水温主要受水库垂向水温结构、叠梁门层数及水位变化三类因素影响。基于滩坑水库呈现显著季节性水温分层的特征, 本文将

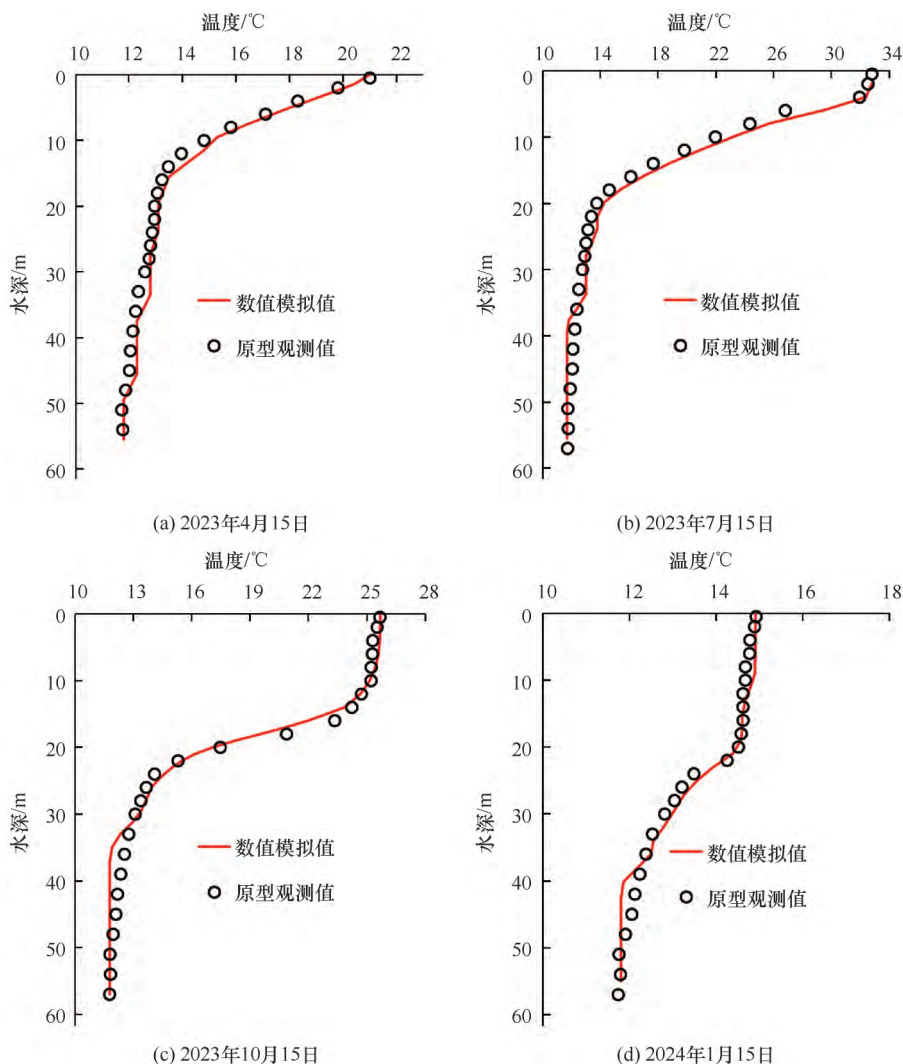


图 6 滩坑水电站实测垂向水温分布与模拟初始温度分布对比

Fig. 6 Comparison between the measured vertical water temperature distribution and the simulated initial temperature distribution of Tankeng Hydropower Station

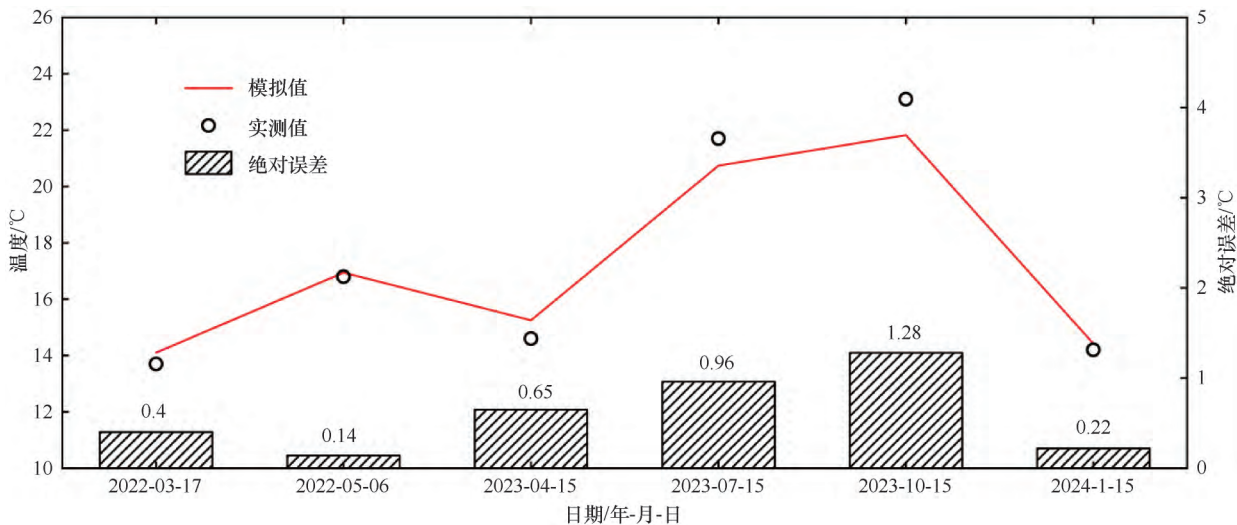


图 7 各月份模型模拟结果与实测数据对比验证

Fig. 7 Comparison and verification diagram between the model simulation results and the measured data for each month

4 个季节的分层工况作为基本工况。通过分析 2013—2023 年坝前水位时序数据, 选取极值水位与年际均值作为特征水位, 定量分析水位变化对下泄水温的调控机理。针对滩坑水库一般不从底部取水的调度特征, 重点模拟 4 个季节 6—8 层叠梁门组合工况, 覆盖常规运行条件下的取水高程变化范围。

工况设置情况如表 2 所列, 共 36 种工况。工况名称按照“季节-水位-叠梁门数量”的格式命名。其中, A 代表春季(B、C、D 分别代表夏、秋、冬季), 数字对应水位和每个进水口使用叠梁门的数量。

表 2 不同工况情景设置情况

| 研究时段 | 特征水位/m | 工况编号    | 叠梁门数量 X       |
|------|--------|---------|---------------|
| 春季   | 147    | A-147-X | 每孔 6/7/8 块叠梁门 |
|      | 151    | A-151-X |               |
|      | 153    | A-153-X |               |
| 夏季   | 149    | B-149-X |               |
|      | 151    | B-151-X |               |
|      | 154    | B-154-X |               |
| 秋季   | 147    | C-147-X |               |
|      | 151    | C-151-X |               |
|      | 154    | C-154-X |               |
| 冬季   | 147    | D-147-X |               |
|      | 152    | D-152-X |               |
|      | 156    | D-156-X |               |

注: X 代表叠梁门层数, 取值范围为 6 层、7 层、8 层。

### 3.2 水库水位对下泄水温的改善效果分析

利用验证后的 FLOW-3D 模型, 模拟了滩坑水库布设 8 层叠梁门(135 m) 在极值水位与年际均值水位下的下泄水温, 共涵盖 12 种工况(A-147-8、A-151-8、A-153-8、B-149-8、B-151-8、B-154-8、C-147-8、C-151-8、C-154-8、D-147-8、D-152-8、D-156-8), 以此来探讨水位-下泄水温关系特征, 模拟结果如表 3 所列。选取典型工况(春季和夏季的最高、最低水位) 绘制纵剖面如图 8 所示, 直观展示了不同水位条件下取水口近区水温分布。

表 3 四个季节不同水位条件下取水温度模拟情况

Table 3 Simulation of water intake temperatures under different water level conditions in four seasons

| 工 况     | 季 节 | 水位/m | 叠梁门层数 | 取水温度/℃ |
|---------|-----|------|-------|--------|
| A-147-8 | 春季  | 147  | 8     | 16.38  |
| A-151-8 |     | 151  |       | 15.93  |
| A-153-8 |     | 153  |       | 15.79  |
| B-149-8 | 夏季  | 149  |       | 21.61  |
| B-151-8 |     | 151  |       | 21.33  |
| B-154-8 |     | 154  |       | 19.95  |
| C-147-8 | 秋季  | 147  |       | 22.79  |
| C-151-8 |     | 151  |       | 22.25  |
| C-154-8 |     | 154  |       | 21.45  |
| D-147-8 | 冬季  | 147  |       | 14.54  |
| D-152-8 |     | 152  |       | 14.49  |
| D-156-8 |     | 156  |       | 14.36  |

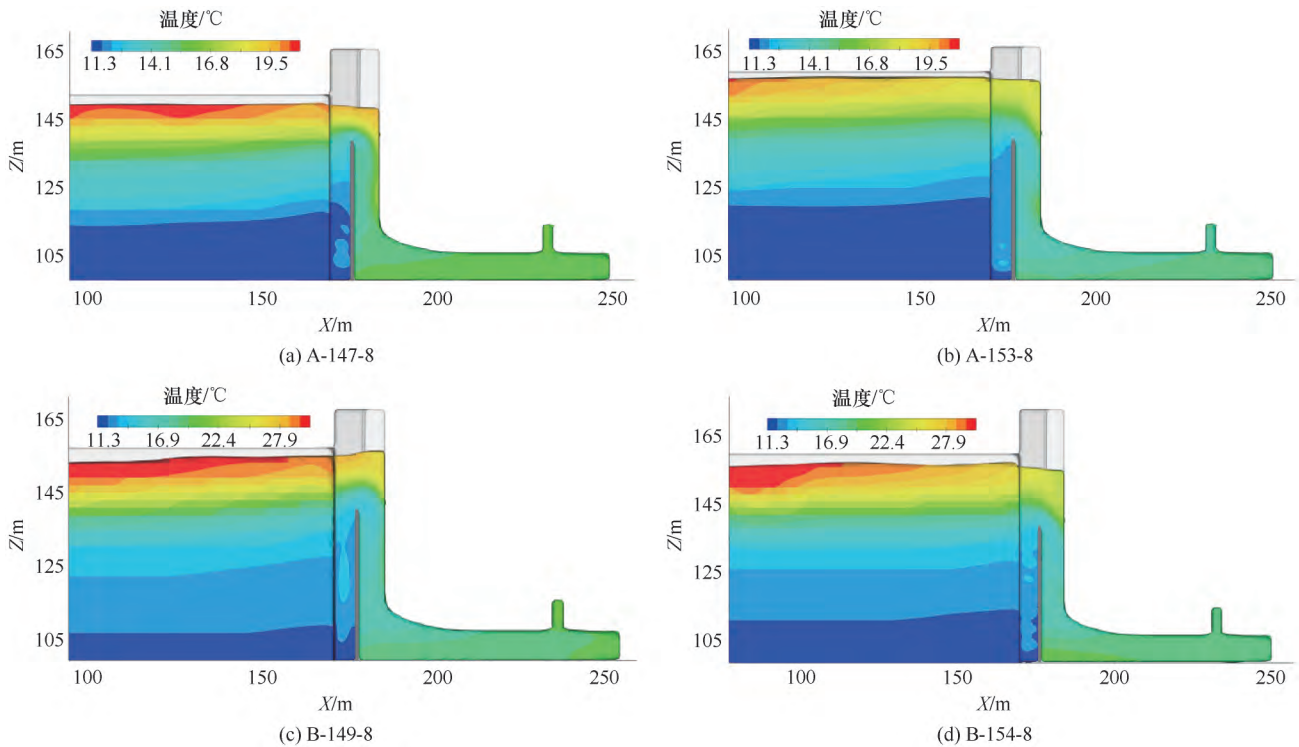


图 8 典型库水位水温分布纵剖面

Fig. 8 Longitudinal sectional profile of water temperature distribution at typical reservoir water levels

由表 3 可知, 春季, 当水位从 147 m 升至 153 m 时, 取水口抽取到的水体深度增加, 水温从 16.38 °C 降至 15.79 °C。这个过程中, 水位每升高 2 m, 水温的降幅分别为 0.25 °C、0.20 °C 和 0.14 °C。这表明, 叠梁门布置层数一致的情况下, 下泄水温随着水位升高逐渐下降, 每 1 m 水位变化对水温的影响在 0.13 °C 以内, 且下泄水温下降速率与水位呈负相关关系。分析其原因, 这与春季垂向温度梯度有关, 在取水深度为 12~18 m 范围内, 垂向温度梯度逐渐减小, 导致高水位条件下单位水位变化对水温的影响减弱(见图 8)。

夏季, 最高水位与最低水位之间相差 5 m, 下泄水温温差 1.66 °C。通过拟合曲线计算得到, 水位 149~150.5 m, 1.5 m 内水温下降 0.2 °C; 从 150.5 m 到 152 m, 水温下降 0.4 °C; 152.5~154 m, 水位水温下降 0.8 °C。总的来看, 夏季下泄水温对水位的敏感性较高, 每 1 m 水位变化对水温的影响为 0.1~0.5 °C, 且其影响程度在高水位条件下更加明显, 这是因为取水深度为 14~19 m 时, 垂向温度梯度呈上升趋势(见图 8)。

秋季, 最高水位水温相比最低水位下降了 1.34 °C。具体分析, 147~151 m, 水位每升高 2 m, 水温分别下降 0.19 °C 和 0.35 °C; 151~154 m, 水位上升 3 m 水温下降约 0.8 °C。总的来看, 在水温梯度为 0.65 °C/m 的秋季, 每 1 m 水位变化对水温的影响为 0.1~0.3 °C, 水位-下泄水温关系与夏季一致。

冬季, 最高水位与最低水位对应的下泄水温温差

为 0.18 °C, 相比其他季节垂向温差缩小。具体分析, 147~149.5 m, 水位升高 2.5 m, 水温下降 0.01 °C; 从 149.5 m 到 152 m, 水温下降 0.04 °C; 152~156 m, 水位每上升 2 m, 水温分别下降 0.05 °C 和 0.07 °C。总的来看, 垂向温度掺混明显的冬季, 水位变化对水温的影响不大, 平均为 0.02 °C/m。

综上所述, 下泄水温随着水位的升高而降低, 且其响应程度与水库垂向水温梯度成正比, 强分层季节, 水位对水温的作用最大可达 0.53 °C/m, 而在弱分层季节, 水位对取水温度的影响则相对有限。鉴于此, 在强分层期, 水库可结合取水深度和水温梯度变化情况, 通过调节水位来精确调控水温满足下游生境需求。

### 3.3 叠梁门分层取水效果分析

叠梁门分层取水设施通过调整层数改变取水口高程, 优先抽取表层较高温度水体, 其取水效果受水库水位变化及垂向水温分层影响显著。本节基于三维数值模型, 模拟其余 24 种工况, 分析四季不同水位条件下, 6—8 层叠梁门调整对下泄水温的影响, 统计结果如图 9 所示。同时, 分别绘制强分层期(夏季)和弱分层期(冬季)采用 6—8 层叠梁门情况下的纵剖面图, 如图 10 所示。

由图 9 可知, 春季, 单层叠梁门对水温的调控范围在 0.4~0.8 °C, 平均计算, 使用 8 层叠梁门比使用七层温度提高了 0.48 °C, 比使用 6 层提高了 1.13 °C。水位从低到高, 水温对 1 层叠梁门的平均响应程度分别是 0.44 °C、0.57 °C 和 0.68 °C, 即水位越高, 下泄水温对单层叠梁门的响应程度越大。同

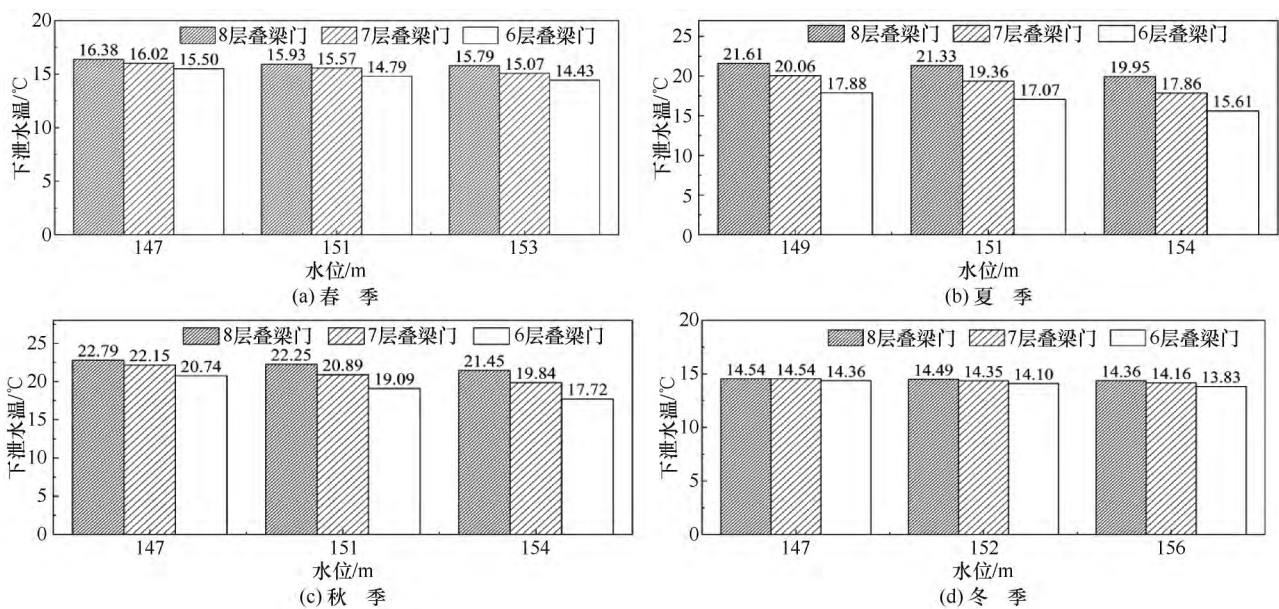


图 9 叠梁门-水位-水温关系统计

Fig. 9 Statistical diagram of stoplog gate-water level-water temperature relationship

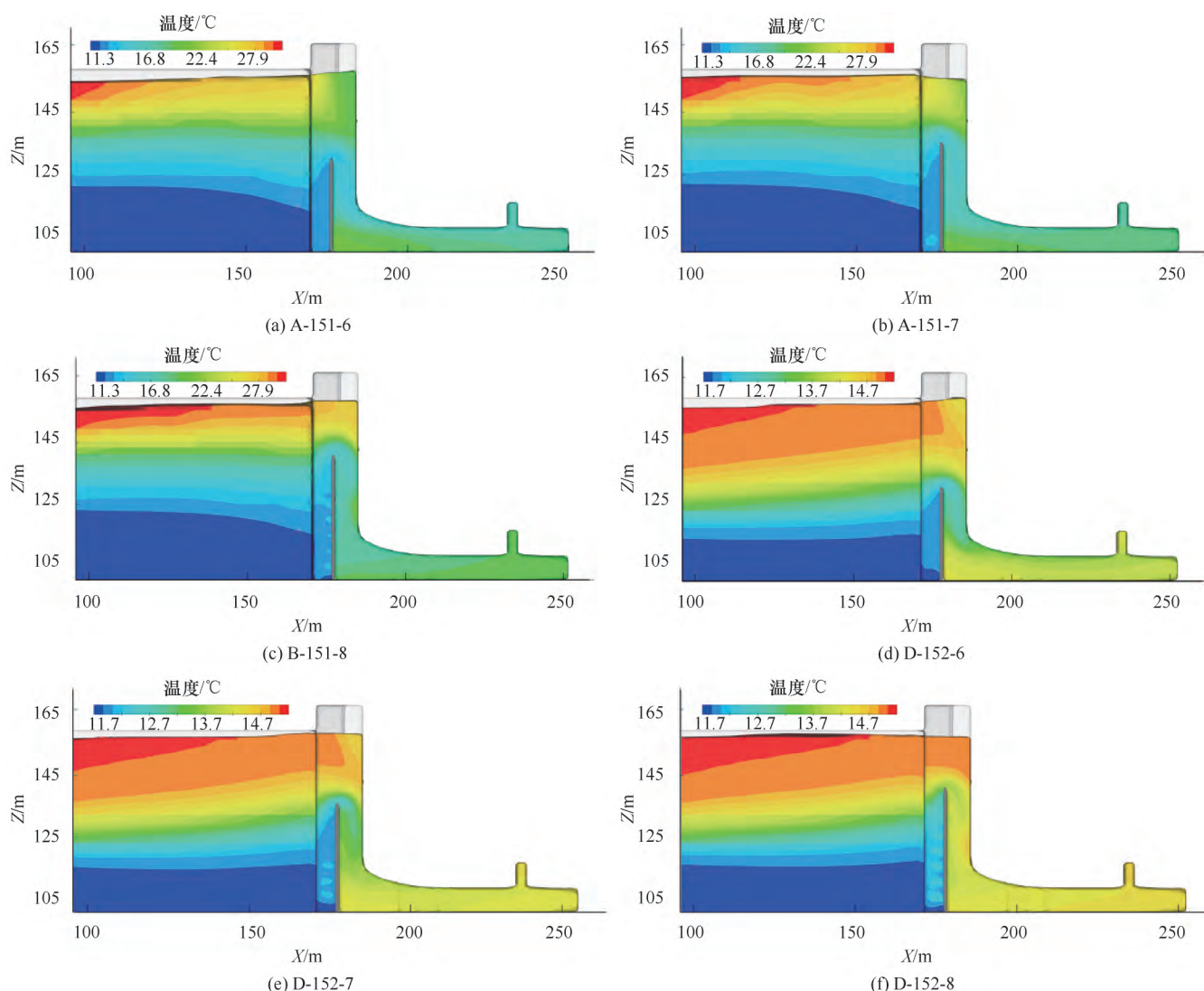


图 10 典型工况水温分布纵剖面

Fig. 10 Longitudinal sectional profile of water temperature distribution under typical working conditions

时,对比发现,低水位条件下,使用七层叠梁门相比使用六层能够让下泄水温提高 $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而加上8层叠梁门后,下泄水温仅提高了 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。库水位较高时,两者差距不大。

夏季,叠梁门分层取水方式能够很好地缓解低温水下泄的情况,对下泄水温具有明显的提升作用[见图10(a)~(c)],单层叠梁门对水温的影响在 $1.5\sim 2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间(见图9)。对比发现,使用8层叠梁门比使用7层下泄水温提高 $1.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且调控作用在高水位情况下会更加明显;使用7层叠梁门比使用6层叠梁门温度提升了 $2.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,3种水位条件下调控效果差距不大。

秋季,单层叠梁门对水温的影响在 $0.6\sim 2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。平均计算,使用8层叠梁门比使用7层温度提高了 $1.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,比使用6层提高了 $2.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。水位从低

到高,水温对单层叠梁门的响应分别为 $1.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.86\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与上述结论一致,在高水位情况下,叠梁门能够发挥更大的调控效果,最大调控温差为 $0.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

冬季,库区表底层温差小于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,同温层厚度加大[见图10(d)~(f)],叠梁门对下泄水温影响程度在 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下(见图9),平均计算,使用8层叠梁门比使用7层温度提高了 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,比使用6层提高了 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,调控作用相比其他季节减弱。且对比发现,叠梁门同样在高水位情况下调控作用更好。

综上所述,叠梁门在缓解下泄低温水问题方面效果显著,且在高水位条件下,水温对单层叠梁门的响应程度更大。尽管水库水位变化会对叠梁门的运行产生一定影响,但下泄水温的改善幅度主要由叠梁门的淹没水深决定。无论是水位变化或叠梁门层数调整,

当叠梁门位于温跃层内, 即调节的水体垂向温度梯度较大时, 增设一层叠梁门从靠近表层的温跃层取水, 将显著提升下泄水温。

#### 4 结果与讨论

滩坑水库叠梁门分层取水工程于 2010 年 3 月 15 日开始运行, 是我国较早使用叠梁门分层取水的大型水库之一。其单孔常年使用 6~8 块叠梁门, 相比锦屏一级(3 层)、糯扎渡(4 层)、溪洛渡(4 层)、白鹤滩(6 层)等水库, 在叠梁门应用方面具有较好的代表性。目前, 国内水库水温的研究主要聚焦于西南地区, 针对华东地区分层型水库的水温预测研究相对匮乏。

已有研究中, LIU 等<sup>[35]</sup>、LU 等<sup>[16]</sup>研究结论表明分层结构、水位、取水深度等因素都会影响下泄水温, 且下泄水温改善效果与各季节热分层情况直接相关, 在强分层期改善效果更显著。本文研究得出, 叠梁门调控和水位变化下泄水温的改善效果与库区垂向分层程度成正比, 这与以上结论相符, 形成互证。龚梦园<sup>[30]</sup>通过三维水温模型模拟表明, 受气温和太阳辐射的影响, 低水位工况下分层取水温度相较于高水位工况偏高。傅倩倩等<sup>[31]</sup>基于实测数据发现, 叠梁门顶水深与下泄水温显著相关, 滩坑水库通过降低水位或增设叠梁门可有效提升下泄水温。这与本研究下泄水温随着水位的升高而降低的结论一致, 且本文更进一步探讨了不同季节内单位水位变化对下泄水温的影响。

对比其他大深型水库叠梁门调控研究结果, 刘志成等<sup>[36]</sup>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, 指出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; 周思佳等<sup>[37]</sup>通过二维水温数学模拟发现, 糯扎渡水库在 4—8 月期间使用三层叠梁门后, 下泄水温仅平均提升 1.9℃。相比之下, 本文对滩坑水库的模拟结果表明, 调整滩坑水库 6—8 层叠梁门, 下泄水温的波动范围为 0.35~2.3℃, 夏季下泄水温对单层叠梁门的响应程度可达 1.5℃以上。滩坑水库通过设置多层叠梁门并优化取水位置, 能够取到更接近表层的水体, 充分发挥分层取水优势, 在提升下泄水温方面表现尤为突出。该结论可为其他大型水库的叠梁门设计与优化提供重要参考。

本研究中利用三维仿真模型 FLOW-3D 开展下泄水温改善效果模拟, 该方法在工程优化设计中具有显著优势, 但也存在一定局限性, 对比各模型优劣以及适用条件如表 4 所列。相比物理模型, FLOW-3D 更具灵活性和模拟可重复性, 通过调整边界条件和参数, 模拟不同工况下温度场变化, 可为工程优化设计提供大量数据支撑, 然而, 模型的准确性受限于对实际情况的简化和假设程度。与 Delft3D、MIKE、EFDC 等传统数值模型相比, FLOW-3D 采用 VOF 方法和 TrueVIST 网格技术, 能够更精确地模拟复杂水工结构与水流-温度场的相互作用, 但其计算复杂度较高, 对计算资源需求较大, 更适用于分层取水口等小尺度精细化模拟。本文基于该方法在滩坑水库取水口近区开展三维数值模拟研究, 可为该领域相关研究提供参考。

在三维模型构建方面, 本研究借鉴戴杰等<sup>[38]</sup>、

表 4 各模型在水库温度场及下泄水温模拟方面的对比分析

Table 4 Comparative analysis table of each model in the simulation of reservoir temperature field and discharged water temperature

| 模 型     | 优 势   | 局限性                         | 适用条件  |
|---------|---|-----------------------------|---|
| 物理模型    | 结果直观、可靠性高   | 1. 成本高、周期长<br>2. 复杂工况下操作难度大 | 1. 适用于地形复杂、边界条件难以数字化的情况<br>2. 用于验证和校准数值模拟结果     |
| FLOW-3D | 1. 高分辨率 VOF 法精确捕捉分层界面<br>2. 湍流模型适应强分层流动<br>3. 后处理功能强大 | 1. 计算资源需求量大<br>2. 大尺度模拟耗时   | 1. 局部流动特征精细化模拟<br>2. 短期强分层或异重流模拟<br>3. 工程结构设计优化 |
| Delft3D | 1. 支持二维/三维水动力-水质-生态耦合模拟<br>2. 水温预测模块成熟, 考虑太阳辐射、风生流等因素 | 1. 垂向分层分辨率不高<br>2. 三维计算效率较低 | 1. 河流、湖库长期水温过程模拟<br>2. 结合生态效应分析的研究              |
| MIKE 系列 | 1. 模块化架构支持多尺度模拟<br>2. 后处理工具强大                         | 1. 商业许可费用高<br>2. 计算资源需求大    | 1. 复杂条件下水动力水质模拟<br>2. 多因素耦合的精细化模拟               |
| EFDC    | 1. 支持长期气候驱动<br>2. Z/σ 混合坐标平衡计算效率与精度                   | 1. 参数敏感性高<br>2. 界面操作复杂      | 适用于湖泊、湿地等地表水系统的流场、温度场模拟                         |
| FLUENT  | 1. 复杂流动模拟精度高<br>2. 支持多物理场耦合                           | 1. 计算成本高<br>2. 模型设置复杂       | 1. 局部区域高精度湍流模拟研究<br>2. 工程结构优化设计                 |

ERSOY 等<sup>[39]</sup>的研究, 设置初始场和边界条件, 结合垂向温度链实测数据分层设置水体温度分布, 具有一定的合理性和准确性。然而, 垂向温度监测点的布设间隔在各季节保持一致, 导致在温度梯度较大时期, 监测数据对实际温度分布的刻画精度有限, 进而对模拟结果造成影响。为了弥补这一不足, 未来研究可考虑构建数值模型模拟库区水温时空分布特征, 通过连续模拟分析水库温度的长期变化趋势, 进一步提升模型的实用性。同时, 本研究所建模型在工况较多的情况下工作量大、耗时长, 未来研究可以重点探讨如何利用机器学习方法替代复杂的模拟过程。

## 5 结 论

本研究结合滩坑水电站建设工程实际, 构建取水口等比例几何模型, 基于 FLOW-3D 开展温度场三维数值模拟研究, 分析了不同垂向水温结构、不同水位、不同叠梁门分层取水方案对下泄水温的改善情况, 得到以下结论。

(1) 针对滩坑水库取水口建立的数值仿真模型, 经与现场实测数据对比验证, 在重现库区水温垂向分布规律和取水温度变化特征方面表现出良好性能, 为工程实践中的下泄水温调控提供了科学依据。

(2) 滩坑水电站垂向水温呈现季节性分布规律, 叠梁门调控和水位变化下泄水温的改善效果与库区垂向分层程度成正比, 且下泄水温度对叠梁门调度的响应程度大于单一水位变化。鉴于此, 建议水库在垂向水温差异较大的季节, 根据下游生境水温需求灵活调整水位以及叠梁门设置高程, 而在垂向混合充分的季节, 采用低层数叠梁门引水方案有效平衡发电效率与生态调控需求。

(3) 对比结果发现, 当叠梁门门顶高度在温跃层以下, 即下泄水体包含温跃层以下的低温水时, 水温会很低。因此, 在水库运行调度时, 为了保护下游生态系统健康, 要根据各季节温跃层的变化, 尽量将叠梁门设置在温跃层以上。

## 参考文献(References):

- [1] 于倩倩, 钱钢粮, 董占飞, 等. 基于“十三五”规划实施评估的水电发展思路分析[J]. 水力发电, 2022, 48(11): 4-9.  
YU Qianqian, QIAN Gangliang, DONG Zhanfei, et al. Research on the strategies of hydropower development based on the implementation assessment of the 13th Five-Year Plan[J]. Water Power, 2022, 48(11): 4-9.
- [2] 罗斌, 白小龙, 臧天磊, 等. 风光水互补发电系统研究综述[J]. 发电技术, 2025, 46(6): 1097-1111.

- LUO B, BAI X L, ZANG T L, et al. Review of research on wind-solar-hydro complementary power generation systems [J]. Power Generation Technology, 2025, 46(6): 1097-1111.
- [3] WU W Y, EAMEN L, DANDY G, et al. Beyond engineering: A review of reservoir management through the lens of wickedness, competing objectives and uncertainty[J]. Environmental Modelling & Software, 2023, 167: 105777.
- [4] WU J G, HUANG J H, HAN X G, et al. Three-Gorges Dam: Experiment in habitat fragmentation? [J]. Science, 2003, 300(5623): 1239-1240.
- [5] 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.  
HE Yubin, SHI Xiaoyan, ZHOU Hongju, et al. Study on water temperature structure and hydrodynamic mechanism of river-type reservoirs in southwest China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(5): 24-34.
- [6] 周扬, 王宁, 温潇雄, 等. 长江上游梯级水电开发的水温累积影响及生态效应[J]. 水力发电学报, 2024, 43(11): 1-16.  
ZHOU Yang, WANG Ning, WEN Xiaoxiong, et al. Cumulative influences and ecological effects of cascade hydropower development on water temperature in upper Yangtze River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(11): 1-16.
- [7] ZHANG Y N, GAO X P, SUN B W, et al. Tracking thermal structure evolution: An objective practice in a stratified reservoir based on high-frequency measurements[J]. Journal of Hydrology-Regional Studies, 2022, 39: 100989.
- [8] 张士杰, 彭文启, 刘昌明. 高坝大库分层取水措施比选研究[J]. 水利学报, 2012, 43(6): 653-658.  
ZHANG Shijie, PENG Wenqi, LIU Changming. Alternative withdrawal schemes for layered water in large reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(6): 653-658.
- [9] WANG H Y, DENG Y, YAN Z L, et al. Thermal response of a deep monomictic reservoir to selective withdrawal of the upstream reservoir [J]. Ecological Engineering, 2023, 187: 106864.
- [10] LIU L J, TUO Y, XIA H, et al. Assessment of Stoplog Gates' operational effectiveness for improving discharged-water temperatures during the thermal stratification period in a reservoir [J]. Water, 2023, 15(23): 4145.
- [11] 张弛, 张洋, 吴雨娇, 等. 缓解水温失调问题的水库生态调控策略[J]. 水科学进展, 2023, 34(1): 134-143.  
ZHANG Chi, ZHANG Yang, WU Yujiao, et al. Reservoir ecological regulation strategy to alleviate water temperature imbalances [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(1): 134-143.
- [12] 尹辉, 蔡宝柱, 郑铁刚. 典型工程叠梁门分层取水方案优化分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, (4): 369-376.  
YIN Hui, CAI Baozhu, ZHENG Tiegang. Optimization analysis of selective water withdrawal with stop-log gate in typical engineering

- projects [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, (4): 369-376.
- [13] 高学平, 任庆钰. 多层孔型取水口下泄水温试验研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5): 103-107.  
GAO Xueping, REN Qingyu. Experimental study on temperature of water released from multi-level orifice intake [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(5): 103-107.
- [14] 高学平, 陈弘, 宋慧芳. 水电站叠梁门多层取水下泄水温公式[J]. 中国工程科学, 2011, 13(12): 63-67.  
GAO Xueping, CHEN Hong, SONG Huifang. A prediction formula of water temperature released from the multi-level stop-log gate intake of hydropower stations[J]. Engineering Sciences, 2011, 13(12): 63-67.
- [15] 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.  
DAI Lingquan, WANG Haoyu, LIU Xuan, et al. Research on selective withdrawal strategy and ecological response of Wudongde Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(2): 264-274.
- [16] LU Y A, TUO Y C, XIA H, et al. Prediction model of the outflow temperature from stratified reservoir regulated by stratified water intake facility based on machine learning algorithm [J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110560.
- [17] 柳海涛, 孙双科, 王晓松, 等. 大型深水库分层取水水温模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 129-134.  
LIU Haitao, SUN Shuangke, WANG Xiaosong, et al. Water temperature model test for a multi-level power intake of large deep reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(1): 129-134.
- [18] 郑铁刚, 孙双科, 柳海涛, 等. 叠梁门分层取水水温-水动力动态过程模拟及分析[J]. 水利学报, 2020, 51(3): 305-314.  
ZHENG Tiegang, SUN Shuangke, LIU Haitao, et al. Simulation and analysis of dynamic process on the temperature dynamics through selective withdrawal intake [J]. SHUILI XUEBAO, 2020, 51(3): 305-314.
- [19] 宋清林. 温度分层型水库分层取水流动特性及下泄水温研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.  
SONG Qinglin. Study on Flow Characteristics and Outflow Temperature through Selective Withdrawal from Thermally Stratified Reservoir[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [20] 王笑. 黄河上游梯级水电站群间高坝水库的水温分异特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.  
WANG Xiao. Study on Water Temperature of High Dam Reservoir between Cascade Hydropower Station in Upper Yellow River[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [21] LIU Y Y, HE H M, ZHOU J, et al. Understanding thermal stratification and circulation dynamics in Fuxian Lake: Insights from EFDC simulation study [J]. Ecological Indicators, 2024, 165: 112202.
- [22] WANG L F, XU B, ZHANG C, et al. Surface water temperature prediction in large-deep reservoirs using a long short-term memory model[J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108491.
- [23] 孔洋洋. 龙羊峡水库库面温层水温变化特征及驱动因素研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.  
KONG Yangyang. Study on Water Temperature Variation Characteristics and Driving Factors of Surface Warm Water Layer in Longyangxia Reservoir[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [24] 牛彬, 徐火清, 王飞龙, 等. 溪洛渡水库分层取水下近坝区浮力流三维数值模拟[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6): 83-87.  
NIU Bin, XU Huoqing, WANG Feilong, et al. Three-dimensional numerical simulation of buoyant flow in the near-dam area of Xiluodu Reservoir[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(6): 83-87.
- [25] GUVEN A, MAHMOOD A H. Numerical investigation of flow characteristics over stepped spillways [J]. Water Supply, 2021, 21(3): 1344-1355.
- [26] HIEN L T, DUC D H. Numerical simulation of free surface flow on spillways and channel chutes with wall and step abutments by coupling turbulence and air entrainment models [J]. Water, 2020, 12(11): 3036.
- [27] HE W, LIAN J J, DU H C, et al. Source tracking and temperature prediction of discharged water in a deep reservoir based on a 3-D hydro-thermal-tracer model [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2018, 20: 9-21.
- [28] 黄安阳, 邓云, 脱友才. 分层水库近坝区的浮力流三维数值模拟研究[J]. 人民长江, 2015, 46(S1): 172-175.  
HUANG Anyang, DENG Yun, TUO Youcai. Three-dimensional numerical simulation study of buoyancy-driven flow in the near-dam area of a stratified reservoir [J]. Yangtze River, 2015, 46(S1): 172-175.
- [29] 刘俊. 温度分层型水库浮式取水口前流场研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.  
LIU Jun. Study on the Flow Field of Floating Point-Sink Intake in Thermal Stratified Reservoirs[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [30] 龚梦园. 基于下游河道水温改善的滩坑水库分层取水效果研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022.  
GONG Mengyuan. Study on the effect of Tankeng Reservoir Stratified Intake based on the Improvement of Downstream River Water Temperature[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022.
- [31] 傅菁菁, 李嘉, 芮建良, 等. 叠梁门分层取水对下泄水温的改善效果[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(7): 589-595.  
FU Jingjing, LI Jia, RUI Jianliang, et al. Raising discharge water temperature by using water-level-selection with stoplog gate [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2014, 47(7): 589-595.

- [32] 叶舟, 龚梦园. 基于下游生境水温需求的水库分层取水调度研究 [J]. 人民长江, 2022, 53(6): 105-110.  
YE Zhou, GONG Mengyuan. Study on stratified water intake operation of reservoir based on water temperature demand of downstream habitat [J]. Yangtze River, 2022, 53(6): 105-110.
- [33] LU G W, LIU J X, CAO Z X, et al. A computational study of 3D flow structure in two consecutive bends subject to the influence of tributary inflow in the middle Yangtze River [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2023, 17(1): 2183901.
- [34] EBRAHIMI M, MOHAMMADI M, MESHKATI S M H, et al. Embankment dams overtopping breach: A numerical investigation of hydraulic results [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2024, 48(5): 3707-3716.
- [35] LIU C X, LIAN J J, WANG H J. Experimental analysis of temperature-control curtain regulating outflow temperature in a thermal-stratified reservoir [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(15): 9472.
- [36] 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.  
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.
- [37] 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 outflow temperature under different reservoir operation at Nuozhadu Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(9): 170-179.
- [38] 戴杰, 戴启璠, 李晗玫. 水电站叠梁门进水口水力特性数值模拟研究 [J]. 人民黄河, 2023, 45(1): 140-144.  
DAI Jie, DAI Qifan, LI Hanmei, et al. Numerical simulation study on hydraulic characteristics of stop-log gates intake of hydropower stations [J]. Yellow River, 2023, 45(1): 140-144.
- [39] ERSOY H, SÜNNETCI M O, KARAHAN M, et al. 3D simulations of impulse waves originating from concurrent landslides near an active fault using FLOW-3D software: A case study of Çetin Dam Reservoir (Southeast Turkey) [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(7): 267.

(责任编辑 王海锋)