

水沙调控影响下小浪底水库水温模拟与演变特性

孙晓娟^{1, 2}, 余真真², 左其亭¹, 刘佳政¹, 田锦涛¹, 张 伟³, 刘玉倩²

(1. 郑州大学水利与交通学院; 2. 黄河水资源保护科学研究院; 3. 郑州大学生态与环境学院)

摘要:为应对小浪底水库汛期排沙时底部低温水和泥沙突然释放对下游水温和生态系统的影响,基于立面二维 CE-QUAL-W2 模型构建了小浪底水库水温模型,并利用小浪底水库全库区水温原型观测数据率定了模型关键参数,结合 2009—2023 年调度规程、水位及流量边界条件,模拟反演了库区 2009—2023 年水温时空演变特征。结果表明:所建模型对狭长河道型水库的水温动态及水位波动具有良好的模拟能力,能准确反映实际调度中的温度变化特征;水库对下泄水温具有平坦化与时滞效应,水库库区水温呈现显著季节性分层规律,冬季(12 至次年 2 月)水体混合均匀,温跃层消失,春季(3—5 月)随太阳辐射增强,温跃层逐步发育扩展,夏季(6—8 月)调水调沙引发的高流量紊动破坏分层,水体趋向均匀混合,秋季(9—11 月)温跃层厚度快速减小,11 月分层完全瓦解;大坝上游近坝区垂向平均水温 8 月达到峰值,1—2 月最低,表底温差最大值出现在 5 月,最小值出现在 11 月;调水调沙期水温呈阶段性变化,前期高流量削弱分层,中期水体完全掺混呈同温,后期表层受来流影响显著;水温变化受气象条件、水文过程、水库调度及水体物理特性多因子协同驱动。

关键词:水沙调控;水温时空演变;水温模拟;CE-QUAL-W2 模型;小浪底水库

Simulation and evolution characteristics of water temperature in the Xiaolangdi Reservoir under influence of water-sediment regulation//Sun Xiaojuan^{1,2}, Yu Zhenzhen², Zuo Qiting¹, Liu Jiazheng¹, Tian Jintao¹, Zhang Wei³, Liu Yuqian² (1. College of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University; 2. Yellow River Water Resources Protection Research Institute; 3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University)

Abstract: To address the impacts of sudden releases of low-temperature bottom water and sediment on downstream water temperature and aquatic ecosystems during flood season sediment flushing of the Xiaolangdi Reservoir, a water temperature model for the reservoir was developed based on the vertical two-dimensional CE-QUAL-W2 model, and the critical parameters of the model were calibrated using prototype water temperature observation data from the reservoir area. Combined with the operational regulations, water level fluctuations, and hydrological boundary conditions from 2009 to 2023, the spatiotemporal evolution characteristics of reservoir water temperature over the past 15 years were simulated. The results show that the established model demonstrates strong simulation capabilities for the water temperature dynamics and water level fluctuations in the long and narrow reservoir, and can accurately reflect the thermohydrodynamic process during actual operational scenarios. The reservoir exerts a flattening and time-lag effect on the temperature of discharged water, while the water temperature within the reservoir area exhibits a distinct seasonal stratification pattern. In winter (December to Februar of next year), the water body is well mixed, and the thermocline disappears. In spring (March to May), with increasing solar radiation, the thermocline gradually develops and expands. In summer (June to August), the high-flow turbulence caused by water-sediment regulation disrupts the stratification, leading to the trend toward uniform mixing of the water body. In autumn (September to November), the thickness of thermocline rapidly decreases, and stratification completely dissipates by November. The vertically averaged water temperature near the dam in the upstream area reaches its peak in August and is the lowest in January to February. The maximum difference between surface and bottom water temperatures occurs in May, while the minimum difference is observed in November. During the water-sediment regulation period, the water temperature exhibits phased variations: the high flow rate weakens stratification in the early stage, the water body becomes completely mixed and isothermal in the mid-stage, and the surface temperature is significantly influenced by inflow in the later stage. The water temperature changes are jointly controlled by multiple factors, including meteorological conditions, hydrological processes, reservoir operation, and physical properties of the water body.

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3208605);河南省重点研发与推广专项(252102320234);黄委优秀青年人才科技项目(HQK-202320)

作者简介:孙晓娟(1987—),女,高级工程师,硕士,主要从事黄河流域水环境研究。E-mail:sunxiaojuan@gs.zzu.edu.cn
通信作者:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事黄河流域人水关系模拟与和谐调控研究。E-mail:zuoqt@zzu.edu.cn

近年来,水库水沙联合调控已成为大型水利工程运行管理的重要模式。小浪底水利枢纽作为黄河流域重大水利工程,在水沙调控、水安全保障、水资源调配和生态环境保护等方面发挥着极其重要的作用^[1]。自黄河小浪底水利枢纽建成后,枯水期增加下泄流量,洪水期削减洪峰流量^[2-3],同时实现了拦沙减淤与人工洪峰输沙^[4-5],在调度过程中,库区及下游河道水位也发生大幅变化^[6],改变了原有黄河下游干流的水文条件^[7-9],进而影响了河流水温时空分布特征和生态系统热平衡^[10]。自2002年实施黄河调水调沙以来,通过水库群联合调度,塑造人工洪水和异重流,使库区及下游河流水文情势、含沙量、水质因子等发生较大变化^[11-12]。特别是在小浪底水库汛期排沙时,底部低温水及泥沙的突然释放会引起下游水温等因子波动^[13-14],干扰水生生物及其栖息地^[15-16],影响黄河流域土著鱼类(如黄河鲤等)繁育过程^[17-18]。水温作为河流生态系统物理、化学、生物过程的关键调控因子^[19-20]影响着水生生物生存繁衍、物种多样性^[21]、化学反应速率^[22]、水体溶解氧含量^[23-24]等生态要素,对维系生态系统结构与功能稳定性至关重要^[25]。因此,深入研究小浪底水库水温变化规律对多泥沙河流优化调度运行、保护河流生态系统具有重要意义。

国内外水库水温数值模拟研究不断发展。20世纪60年代末,Orlob^[26]和Harleman^[27]分别提出了经典水温垂向WRE模型和MIT模型;70年代中后期Imberger等^[28]提出了DYRESM(dynamic reservoir simulation model);脱友才等^[29]对考虑机械能影响的纵向一维数学模型进行了验证;方晴等^[30]运用垂向一维DYRESM模拟了松涛水库水温分布及垂向水温年内变化规律;杨晨等^[31]构建了一维非恒定水-沙-温耦合传导数学模型,模拟分析了小浪底水库排沙期下游水温传导过程。在二维模型方面,美国陆军工程兵团和波特兰州立大学开发了CE-QUAL-W2模型^[32];Farrel等^[33]用 $k-\epsilon$ 模型模拟水库密度流;Karpik等^[34]改进了LAHM(lateral averaged hydrodynamic model)二维水库水温模型;梁瑞峰等^[35]对立面二维水温模型的并行计算进行了研究。三维水温模型包括CE-QUAL-ICM、MIKE3、EFDC(environmental fluid dynamics code)等,段扬等^[36]基于Delft3D软件构建丹江口水库三维模型,分析了其不同季节的水流和水温分层特性;邱进生等^[37]把常用的一维、二维和三维模型应用于河道型

与湖泊型水库,明确了常用模型的适用性。立面二维水温模型对于狭长河道型水库具有一定的优势,能较为精准地模拟水库水动力学过程和密度梯度作用^[38],魏小旺等^[39]初步建立了小浪底水库立面二维水温模型,虽证实了其良好的适应性,并利用模型探讨了水温分布结构及年内变化规律,但缺乏实际调度运行对水库水温的影响分析。因此,亟须根据小浪底水库的运行调度规则精细化模拟其水温时空变化规律,旨在明晰水温变化对生态环境造成的不利影响程度与范围,未来有望通过基于水温生态阈值(如鲤鱼产卵期水温不低于16℃)等提出生态友好型泄流时序优化方案。

黄河调水调沙于2002年正式实施,截至2024年共组织开展了29次。经过梯级水库超过20a的调水调沙运用,达到了冲刷下游河道、延缓水库淤积、改善下游与河口生态环境的良好效果。已有实践表明,利用人造洪水异重流排沙的方式能够实现黄河高效输沙,下游河道平均冲刷深度达2.6m,最小过流能力接近5000m³/s,小浪底水库泥沙累计淤积量低于35亿m³,未达到设计淤积值。在此背景下,本文基于立面二维CE-QUAL-W2模型构建小浪底水库水温模型,模拟水库水温结构变化,系统探究2009—2023年水库水温的时空演变规律,以期对小浪底水库进一步加大实施生态调度提供数据支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

小浪底水库位于河南省洛阳市以北,地处黄河中游,控制流域面积69.4万km²,占黄河流域面积的92.3%。水库多年平均入库径流量为281.43亿m³,实测最大含沙量为941kg/m³。小浪底水库坝顶高程281m,正常蓄水位275m,设计洪水位274m,电站总装机容量1800MW,总库容126.5亿m³,其中淤沙库容75.5亿m³,调水调沙库容10.5亿m³,长期有效库容51亿m³,现状相应库容93.3亿m³(2024年实测),正常蓄水位时淹没影响面积277.8km²。作为治理黄河水沙的大型水利枢纽工程,小浪底水库可控黄河87%的径流量和近100%的泥沙量,在防洪(防凌)、减淤、供水、灌溉和发电等方面发挥着重要作用。坝址多年平均流量为1342m³/s,库水交换次数为4.6,水库对流量和水温调节作用强。枢纽设置的引水泄洪建筑物包括6条发电引水洞、1条灌

溉引水洞、3 条明流洞、3 条排沙洞、3 条孔板洞和正常溢洪道。校核洪水位 275 m 相应的泄流能力为 $15\,307\text{ m}^3/\text{s}$ 。1~4 号发电引水洞、5 号和 6 号发电引水洞、灌溉引水洞进口底板高程分别为 195、190、223 m。孔板洞进口高程 175 m,运行条件为水位超过 200 m,其中 1 号孔板洞在水位超过 250 m 时停止使用(工程条件限制)。排沙洞进口高程 175 m,运行条件为水位超过 186 m,220 m 以上水位需局部开启(工程条件限制),一般控制单洞泄流量不超过 $500\text{ m}^3/\text{s}$ 。1、2、3 号明流洞进口高程分别为 195、209、225 m,其中 2、3 号明流洞运行条件分别为水位超过 220、235 m。正常溢洪道堰顶高程 258 m,运行条件为水位超过 265 m。泄水道大体分为 3 层,底层排沙排污,上层排漂,中层取水发电。小浪底为狭长河道型水库,本文研究范围及水文、水温监测点分布如图 1 所示,从大坝上游近坝区至库尾均匀布设 10 处监测点位。

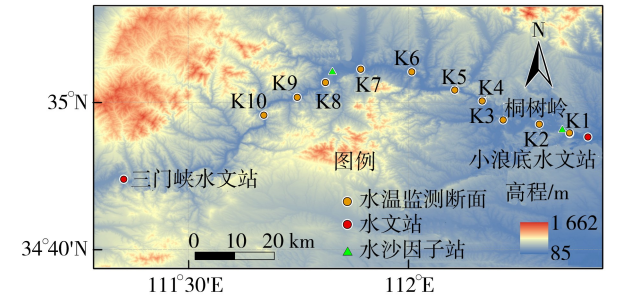


图 1 研究范围及水文、水温监测点分布
Fig. 1 Research area and distributions of hydrological and temperature monitoring points

1.2 数据来源

2009—2022 年小浪底水库入库、出库流量及含沙量数据来源于《中华人民共和国水文年鉴(第 4 卷):黄河流域水文资料》。2009—2023 年小浪底水库库容数据来源于《黄河泥沙公报》。水温数据为原位监测数据,在三门峡、小浪底水文站设置水温监测站点,使用水温自动监测仪器(LGSC 自记式温度仪)每小时自动监测 1 次数据,数据自动上传并存储于云平台,水温监测时间为 2023 年 3 月 29 日至 2024 年 3 月 28 日。气象数据来源于小浪底库区附近的济源、孟津和新安 3 个气象站,该气象站属于同一个气候带,气象条件的总体变化趋势一致,模型采用 3 个气象站的平均值。

以 2009 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日为研究时段,探究小浪底水库水温变化,主要基于以下考虑,①水库自 1999 年下闸蓄水后,初期(2009 年前)因库区泥沙淤积明显、水位波动较大、水温结构尚未稳定,监测数据受干扰较大,2009 年后水库进入相

对稳定运行期,水沙调控体系趋于成熟,水温变化更能反映人工调度的影响,而非初期蓄水的随机性;②从调度管理角度分析,2009 年后的调度模式(如万家寨-三门峡-小浪底联合调度)趋于稳定,数据更具规律性,便于分析长期调控效应;③15 a 的研究跨度能有效捕捉年际变化和年代际趋势(如气候变化影响),避免短期波动导致的结论偏差。

2 CE-QUAL-W2 水温模型构建

CE-QUAL-W2 立面二维水温模型假设横向水温保持不变,适合模拟狭长河道型水库的水温变化。该模型能够较好地模拟浮力流和温度分层特征的纵向形成和发展过程,以及全库区大尺度范围的水温特性及下泄水温过程,精确计算水位和水平、垂向流速等。模型考虑了温度对水密度的影响,可更好地模拟水温分层现象,从而准确反映水流运动状态,为分析立面水工建筑物周边的水流情况提供可靠依据,已在国内外大型水利工程的水温模拟中得到较好的应用。

本文根据小浪底水库高精度库区河道测量数据构建地形文件,同时考虑水库淹没、回水范围以及水动力条件和当地气象因素,基于 CE-QUAL-W2 模型构建小浪底水库水温模型,模拟库区及下泄水温时空变化。

2.1 地形数据输入与网格剖分

在小浪底大坝至上游三门峡大坝之间,库区干流共布设 56 个泥沙淤积测验断面,采用无人测量船和无人机相结合的测量方法,无人测量船搭载单波束测深仪进行水下地形测量,无人机搭载激光雷达获取河道断面的正射影像和数字高程模型(DEM),以确保数据的精确性和完整性。采用 2009—2023 年小浪底水库实测地形资料,对原始地形数据进行高程插值,按照垂向间距 1 m 划分纵向网格,对同一高程左右岸距离计算平均值,得到单元格宽度,形成 56 个断面的网格化数据,再在断面间通过线性插值按照纵向 500 m 的网格长度形成不同年份动态地形文件。经 CE-QUAL-W2 模型预处理后形成每层网格的高程、面积和体积数据,与小浪底库容曲线^[40]对比并逐层微调一致。

根据网格划分原则,由于小浪底水库支流众多,东洋河、石井河、畛水和大峪河 4 个支流的库容占支流总库容的 76%,因此支流库湾仅考虑这 4 条支流,其他支流忽略不计。小浪底水库干流回水区长度约 130 km,干支流划分为 361×100 个矩形单元,纵向网格单元长度为 500 m,共 361 个断面(包括上下游各一个虚拟断面);在垂向网格处理中,模型包括表底

虚拟层在内共分为 100 层,层厚为 1 m,模型网格设置如图 2 所示。

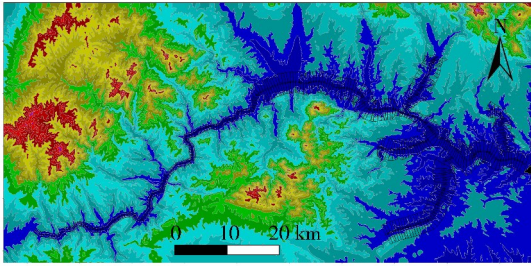


图 2 小浪底库区模型网格

Fig. 2 Model grid of Xiaolangdi Reservoir area

考虑小浪底水库所有泄洪、发电引水构筑物进口,设置 6 个高程分别为 175、190、195、209、223、225 m 的出口和 1 个高程为 258 m 的溢洪道,根据实际调度运行方式输入 2009—2023 年水库入流、出流边界条件。模型的时间框架采用连续的儒略日表示,将模拟起始日期 2009 年 1 月 1 日设为儒略日第 1 天,后续日期依次连续计数,直至模拟结束日期 2023 年 12 月 31 日,对应儒略日第 5 478 天。

2.2 模型参数取值及精度评价

小浪底水库水温模型主要包含水动力和水温两个模块,水动力模块采用 $k-\varepsilon$ 模型,其经验参数中湍流黏系数的比例常数 C_μ 为 0.09,湍流耗散率生成系数 C_{ε_1} 为 1.44,湍流耗散率耗散系数 C_{ε_2} 为 1.92,这些参数是标准 $k-\varepsilon$ 模型的经典经验常数,分别用于确定涡黏系数以及调节耗散率方程中的产生项和衰减项。对应湍动能 k 和耗散率 ε 的湍流普朗特数 σ_k 和 σ_ε 分别取 1.0 和 1.3,风的拖曳力系数 C_{wind} 取 1.0×10^{-3} 。水温模块中,涉及水体与辐射相互作用的参数包括:水体表面对太阳辐射的吸收系数 β_w ,取值为 0.65;反射率 γ_w ,取值为 0.1;长波发射率 ε_w ,取值为 0.965;太阳短波辐射在水体内的衰减系数 η_w ,取值为 0.55 m^{-1} ;温度普朗特数 σ_T ,取值为 0.9。

采用平均误差 (ME)、绝对平均误差 (AME)、均方根误差 (RMSE) 评价构建的小浪底水库水温模型的模拟精度。

结合浮力频率来表征小浪底水库水动力变化,计算公式为:

$$N^2 = (g/\rho_0) (d\rho/dz) \tag{1}$$

式中: N 为浮力频率; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; ρ_0 为水体在 3.98°C 时对应的密度; z 为水深,以水体表面为起始原点坐标,向下为正。浮力频率值越大,表示水体温度梯度越大,水体越稳定,分层现象越明显。当 $N^2 < 0.5\times10^{-4}\text{ s}^{-2}$ 时,判定水体为混合水体;当 $N^2 > 5\times10^{-4}\text{ s}^{-2}$ 时,判定水体为稳定分层水体;当

$0.5\times10^{-4}\text{ s}^{-2} \leq N^2 \leq 5\times10^{-4}\text{ s}^{-2}$ 时,判定水体为过渡 (弱分层) 水体^[41]。

3 结果与分析

3.1 水温模型率定结果

以率定后的参数为基础,模拟了小浪底水库 2009 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日的水温过程。从大坝上游近坝区至库尾均匀布设了 10 处监测点位 (图 1),利用 AML-6 多参数水质监测仪测量水温,采用库区水温监测数据分别于 2023 年 6 月 16 日 (调水调沙前期)、2023 年 7 月 3 日 (调水调沙中期) 和 2023 年 8 月 7 日 (调水调沙后期) 进行水温模型率定,采用 2023 年 3 月至 2024 年 3 月小浪底水文站 (出库) 逐日表面水温进行水温模型验证,并采用 2009—2023 年大坝上游近坝区水位进行 CE-QUAL-W2 模型率定及验证。

监测点位验证结果如图 3~5 所示,结果表明模型能够较好地模拟不同时期库区水温变化规律,模拟结果与实测垂向水温分布表现出良好的一致性,ME 为 $0.013\sim0.614^\circ\text{C}$,AME 为 $0.053\sim0.684^\circ\text{C}$,RMSE 为 $0.084\sim0.828^\circ\text{C}$ 。2023 年 3 月至 2024 年 3 月小浪底水文站 (出库) 逐日表层水温的验证结果如图 6 所示,与实测水温相比,出库模拟水温 ME 为 -0.149°C ,AME 为 0.504°C ,RMSE 为 0.667°C 。小浪底水库 2009—2023 年大坝上游近坝区水位验证结果如图 7 所示,结果显示 ME 为 0.04 m ,AME 为 0.09 m ,RMSE 为 0.29 m 。水温和水位验证结果均表明,所建水温模型能够较好地反映小浪底水库水温和水位的变化情况。

3.2 小浪底水库水温时空变化分析

3.2.1 长时间序列水温变化

根据水温监测结果 (图 6),2023 年 3 月下旬至 7 月上旬、2024 年 3 月出库水温受低温水影响,旬均降温 4.3°C ,2023 年 8 月上旬最大降温 9.9°C ;2023 年 9 月中旬至 2024 年 2 月上旬、2024 年 3 月受高温水影响,旬均升温 5.7°C ,2023 年 12 月下旬最大升温 9.7°C 。入库水温的变化幅度为 $0.1\sim31.7^\circ\text{C}$,出库水温的变化幅度为 $3.6\sim29.7^\circ\text{C}$,3—7 月出库水温低于入库水温,9 月至次年 2 月出库水温高于入库水温,出库水温相对于入库水温表现出明显的水库对下泄水温的平坦化和时滞效应。

夏季是黄河流域的雨季,降雨较为集中,河流天然径流量较大,能够为调水调沙调度运行提供充足的水量,利用较大的水流能量冲刷河道,提高黄河下游河槽过流能力。如图 8 所示,小浪底水库建成后出入库流量和含沙量具有明显的季节变化特征,

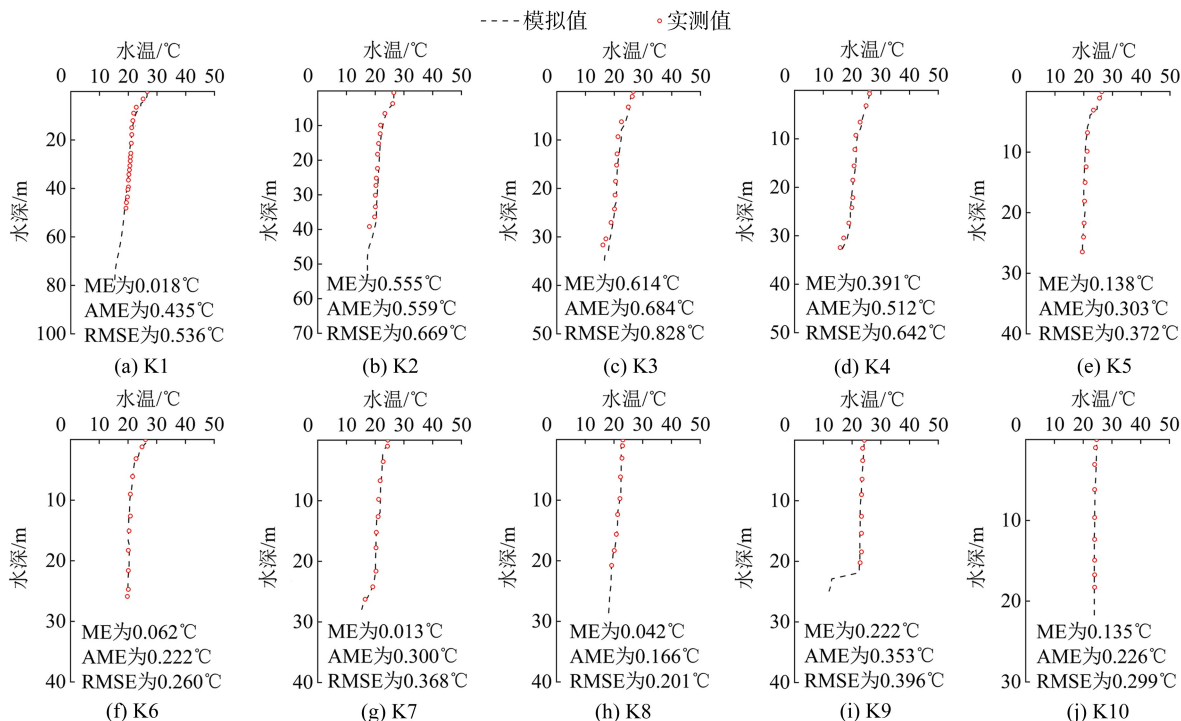


图 3 调水调沙前期水温实测与模拟值对比

Fig. 3 Comparison between measured and simulated water temperatures before water-sediment regulation

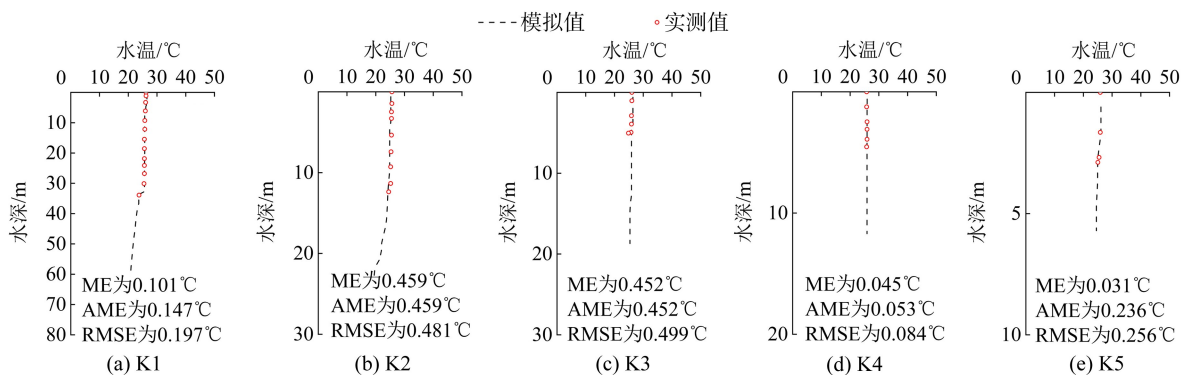


图 4 调水调沙中期水温实测与模拟值对比

Fig. 4 Comparison between measured and simulated water temperatures during water-sediment regulation

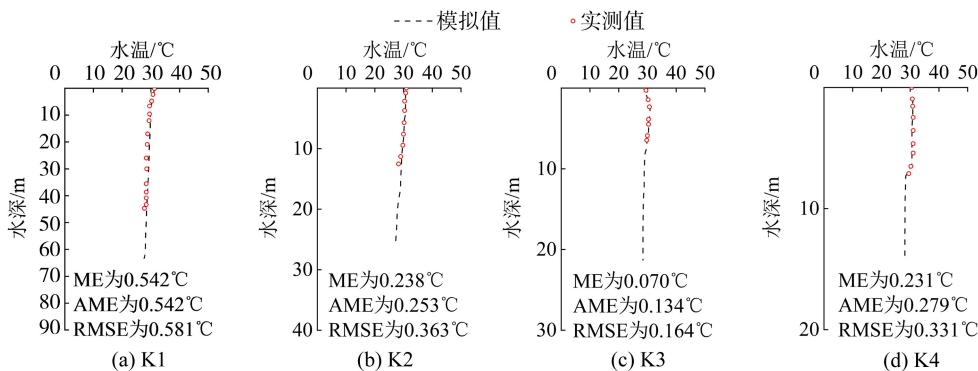


图 5 调水调沙后期水温实测与模拟值对比

Fig. 5 Comparison between measured and simulated water temperatures after water-sediment regulation

2009—2022 年入库平均流量为 $1\,277\text{ m}^3/\text{s}$, 入库流量变化范围为 $2.11 \sim 8\,200\text{ m}^3/\text{s}$; 出库平均流量为 $1\,244\text{ m}^3/\text{s}$, 出库流量变化范围为 $24 \sim 5\,520\text{ m}^3/\text{s}$; 调

水调沙期基本处于夏季, 三门峡水文站(入库)流量为 $2\,402 \sim 3\,711\text{ m}^3/\text{s}$, 峰值流量为 $3\,650 \sim 4\,630\text{ m}^3/\text{s}$, 其中, 日平均流量为 $1\,000 \sim 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $>2\,000 \sim$

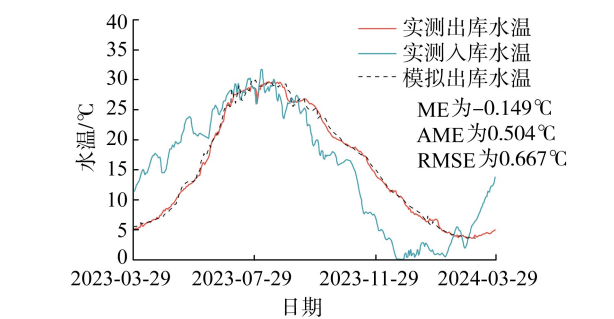


图 6 小浪底水库实测入库、出库水温过程及模拟结果验证
Fig. 6 Measured inflow and outflow water temperature processes and verification of simulation results of the Xiaolangdi Reservoir

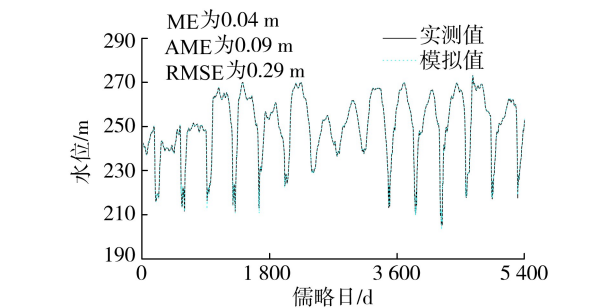


图 7 小浪底水库模拟与实测水位对比
Fig. 7 Comparison between simulated and measured water levels of the Xiaolangdi Reservoir

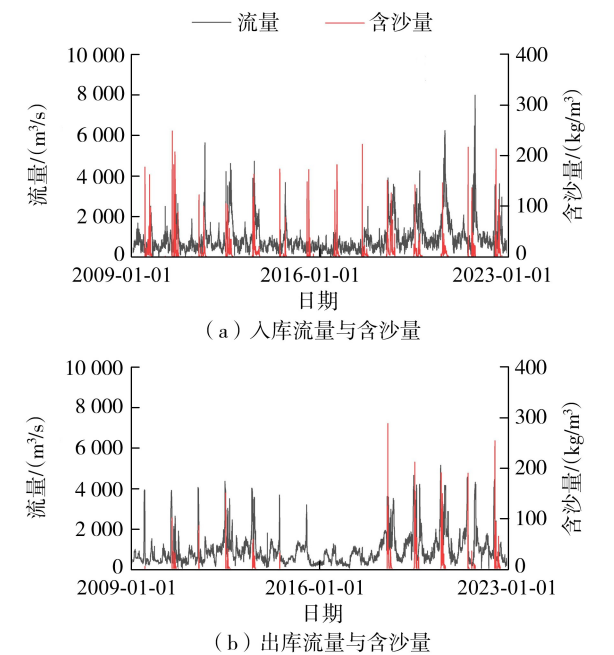


图 8 小浪底水库 2009—2022 年水沙调控过程流量及含沙量变化
Fig. 8 Changes in flow and sediment concentration during water-sediment regulation processes of the Xiaolangdi Reservoir from 2009 to 2022

3 000 m³/s、>3 000 ~ 4 000 m³/s、>4 000 m³/s 的各级流量占比分别为 14.1%、27.1%、42.4% 和 16.4%。2009—2022 年汛前调水调沙期,小浪底水文站(出

库)平均含沙量变化范围为 21.8~85.9 kg/m³,含沙量峰值变化范围为 69.4~289.0 kg/m³,其中含沙量为 < 20 kg/m³、20 ~ < 40 kg/m³、40 ~ < 60 kg/m³、60 ~ < 80 kg/m³、≥ 80 kg/m³ 的各级含沙量占比分别为 35.0%、15.0%、22.5%、17.5% 和 10.0%。

小浪底水库 CE-QUAL-W2 模型对 2009—2023 年大坝上游近坝区水温模拟结果如图 9 所示。结果显示,研究期内坝前表层和底层水温以及表底温差均呈现显著的季节性变化,且每年温差最大、最小值与气温变化并不处于同一时间段。小浪底水库一年内垂向最高平均水温通常出现在 8 月,最低平均水温则在 1—2 月,表底温差最大值基本出现在 5 月。从水温季节性变化来看,冬季(12 月至次年 2 月)库水整体呈现低温状态,近 15 a 这一特征基本保持不变,这与非汛期小浪底水库运行调度规则基本不变密切相关。冬季水体交换缓慢,来水水温逐步降低,表层水温降低,逐步与底层水温趋于一致,形成较为均匀的混合状态,温跃层不明显,这主要归因于冬季气温偏低、热量传递有限,促使水体整体趋于同温。值得注意的是,冬季强混合状态是春季温跃层形成的热力前提。春季(3—5 月)随着气温回升,表层水温逐渐升高,尤其在 5 月和 6 月,水温从表层到深层形成了较为明显的温跃层。夏季(6—8 月)由于调水调沙和防汛需求,小浪底水库水位相对较低,在高温环境下,大坝上游近坝区表层水温分层现象较为明显。而夏季洪水期的强扰动打破了春

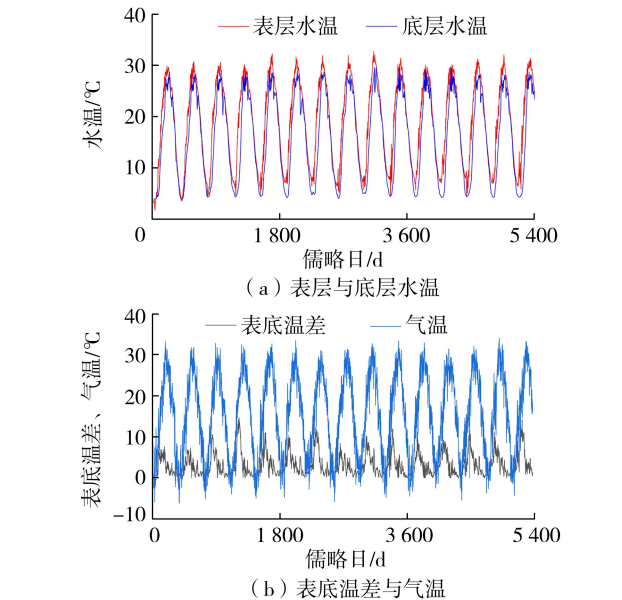


图 9 小浪底水库上游近坝区 2009—2023 年水温变化与气温对比
Fig. 9 Comparison between water temperature changes and air temperature in near-dam area upstream of the Xiaolangdi Reservoir from 2009 to 2023

库)平均含沙量变化范围为 21.8~85.9 kg/m³,含沙量峰值变化范围为 69.4~289.0 kg/m³,其中含沙量为 < 20 kg/m³、20 ~ < 40 kg/m³、40 ~ < 60 kg/m³、60 ~ < 80 kg/m³、≥ 80 kg/m³ 的各级含沙量占比分别为 35.0%、15.0%、22.5%、17.5% 和 10.0%。

季稳定的分层结构,伴随着入库流量和出库流量的大幅增加,水库水体迅速交换,库水水温与来水水温基本一致。6月坝前表底温差波动幅度为7.5~13℃,7—8月为1.7~7.1℃,这与小浪底汛期水沙调控伴随较大水位波动和水体交换有关。秋季(9—11月)随着气温逐渐下降,表层水温随之降低,温跃层开始减弱,尤其是11月,表底温差明显减小,表明此时水体重新趋于混合。

3.2.2 水温季节变化

以2023年大坝上游近坝区水温模拟结果为例分析小浪底水库水温季节变化。如图10所示,2023年大坝上游近坝区表层水温为6.8~31.2℃,表层最高水温基本出现在7—8月;底层水温为4.3~27.9℃,底层最高水温基本出现在8月;年际表层水温的波动幅度大于底层水温变幅,反映了表层水对来水水温、大气温度和太阳辐射变化的敏感性,也体现了小浪底水库垂向水温的分层变化。

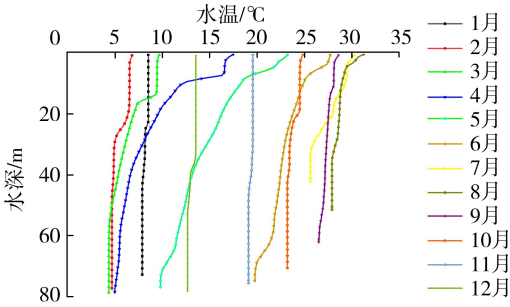


图10 2023年小浪底水库上游近坝区垂向水温变化
Fig. 10 Vertical water temperature changes in near-dam area upstream of the Xiaolangdi Reservoir in 2023

小浪底水库水温分季节表现为:

a. 冬季(12月至次年2月)表层水温为6.8~13.5℃,底层水温为4.7~12.6℃,表底温差不大,为0.6~2.1℃,基本呈现垂向同温状态,且浮力频率较小,温跃层几乎消失,显示出冬季水温均匀化,符合混合均匀、分层弱的特征。李德水等^[42]采用统计学模型对小浪底水库水温进行研究,得出11月至翌年3月水温总体呈垂向均匀分布,与本文结果基本一致。

b. 春季(3—5月)太阳辐射强度快速增强,表层水温以0.8~1.2℃/d速率回升,形成垂向温度梯度。表层水温为9.6~23.2℃,底层水温为4.3~9.8℃,3—5月表底温差逐步变大,逐月温差分别为5.3℃、12.5℃和13.4℃。随着表层水体密度降低,温跃层厚度由初始的3~5m逐步扩展至5~8m。由于温跃层尚未完全稳定,表层至底层水体仍存在弱紊动混合,导致底层水温以0.3~0.5℃/d的滞后速

率响应表层变化,呈现表层快速升温、底层缓慢响应的热力结构。

c. 夏季(6—8月)受副热带高压控制,库区进入强太阳辐射阶段,表层水温持续攀升至27.7~31.2℃,底层水温为19.7~27.9℃,表底温差较春季变小,为3.3~8.0℃。夏季调水调沙产生的高流量缩短了水体滞留时间,强烈的紊动掺混作用使水温垂向分布趋于均匀。

d. 秋季(9—11月)随着太阳辐射量锐减,表层水温以0.6~0.9℃/d速率下降,垂向温度梯度逐渐减小。表层水温为19.5~28.6℃,底层水温为19.1~26.5℃,表底温差变化不大,为0.4~2.1℃,温跃层厚度自9月初的12~15m快速减小至10月底的3~5m,分层逐步瓦解伴随混合层下边界(即温跃层顶部)从浅处不断向深处移动,于11月趋于消失。此阶段表层至底层水体混合加剧,底层水温因前期蓄积热量缓慢释放,降温速率(0.2~0.4℃/d)显著低于表层,呈现表层快速降温、底层缓慢冷却的热力结构。

结合小浪底水库浮力频率随水深和季节的变化特征(图11),揭示了水体密度分层的时空演变规律及其驱动机制。垂向分布上,除11月至次年2月外,其他月份表层(0~20m) N^2 值普遍较大,表明受太阳辐射作用或温度波动影响导致分层明显;7—8月中层(20~60m) N^2 值分布不稳定,这与调水调沙从不同孔洞泄流有关;6月深层(>60m) N^2 值较大,可能与泄洪扰动或沉积物再悬浮相关。

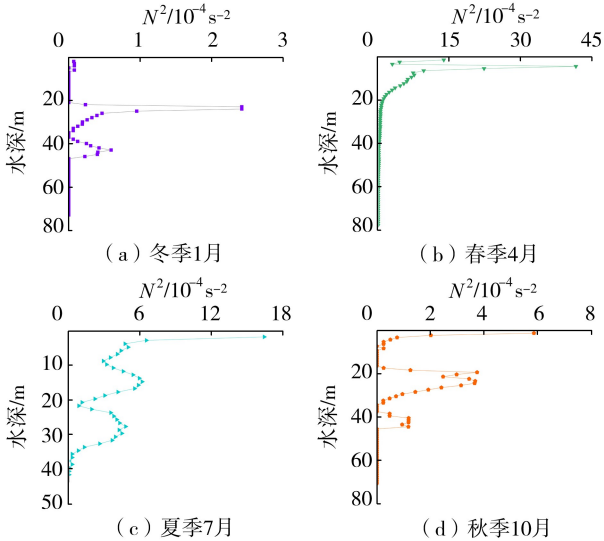


图11 2023年小浪底水库上游近坝区垂向浮力频率
季节变化对比

Fig. 11 Comparison of seasonal variations of vertical buoyancy frequency in near-dam area upstream of the Xiaolangdi Reservoir in 2023

3.2.3 调水调沙期水温变化

小浪底水库利用不同高程泄流孔洞组合调控出库流量和含沙量,达到调控指标的要求。为使排沙效率最大化,汛前调水调沙期间排沙过程一般为后期流量压减后的平稳阶段,小浪底水库同时开启3条排沙洞,排沙期为3~5 d,含沙量变化过程持续4~8 d,小浪底下泄沙量0.036亿~1.048亿t,平均每年下泄沙量0.535亿t。水库异重流排沙基本完成后,库水位逐步回蓄至221 m附近,结束调水调沙调度运行。

根据水温原型监测结果(图4~6),小浪底水库调水调沙前期水位257.53 m,来流流量为455 m³/s,下泄流量为2580 m³/s,来流水温约24℃,下泄水温19.3℃。大流量下泄减弱了坝前点位水温分层,K1、K2点表层水温在来流与太阳辐射的共同影响下约为26.5℃,由于垂向热传导的影响,越接近水面位置水温越高。K3~K7点水温结构相似,越靠近上游表层水温受到高温来流影响越明显,水温分层沿河道向上游逐渐减弱。K8~K10点无明显分层,水温沿水深逐渐降低,垂向同温且温度均与来流温度基本一致。

小浪底水库库区调水调沙中期水位229.36 m,来流流量达到2160 m³/s,下泄流量为1720 m³/s,来流水温27.7℃,下泄水温26.1℃。调水调沙前期小浪底水库大流量下泄,使得库区水位大幅下降,各测点水深均明显减小,此时大流量来流使得库区水体充分置换并在垂向完全掺混,呈现垂向同温。K1~K5各点的水温为25.7~26.2℃。

调水调沙后期库区水位230.95 m,来流流量为862 m³/s,下泄流量为872 m³/s,来流水温30.2℃,下泄水温19.2℃,来流以浮力流的形式进入水库,到达坝前K1点时仅对表层水温产生影响。K1点表层5 m内水温与来流温度基本一致,约为30.0℃,5 m及更深位置水温逐渐减小,至库底后水温为27.8℃。K2~K4各点水深较浅,温度与来流基本一致。

图12为小浪底水库2023年调水调沙期(2023年6月21日至7月11日)不同出水口水温变化,模型设置的6个不同高程出水口,除了灌溉引水洞没有引水外,其他出水口水温随着高程增加而上升,随着水位进一步下降,在2023年7月4日左右,所有出水口水温趋于一致。

3.2.4 水温变化影响因素分析

已有大量研究证明水库水温受气候条件和人为调控的共同影响,包括水文过程、气象条件、入库径流、出库流量、降水量、风速、太阳辐射、水工构筑物

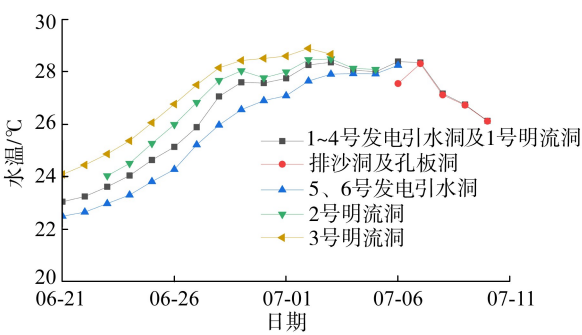


图12 小浪底水库2023年调水调沙期不同出水口水温变化

Fig. 12 Variation of water temperature at different outlets of the Xiaolangdi Reservoir during water-sediment regulation period in 2023

位置、水库水位等因素^[43]。宋策等^[14]基于1988—2008年龙羊峡水库运行与水温观测资料研究发现,水库水温结构演变及其对下游河道水温影响程度与水库运行过程密切相关,12月至次年3月库区水温为弱分层或等温分布,高水位运行下的蓄热增温效应明显。杨晨等^[31]以小浪底水库为例模拟排沙期下游水温传导过程,发现在小浪底水库现行排沙调度方案下,下泄流量增加和出库含沙量降低会加剧低温水下泄,二者对下游水温的最大影响幅度均为2℃左右。

对小浪底水库水温变化的模拟结果表明,其水温受气象条件、水文过程、水库调度及水体物理特性等多因素综合影响:

a. 气象条件。太阳辐射和大气温度的季节性变化是驱动水温变化的关键因素。春季太阳辐射增强促使表层水温快速回升,形成垂向温度梯度;夏季强太阳辐射使表层水温升至最高;秋季太阳辐射量锐减,表层水温下降;冬季大气温度较低,促使水温均匀化。

b. 水文过程。来水水温变化影响水库水温,秋季来水水温逐渐降低,使得表底温差减小;水体滞留时间也对水温分布产生影响,夏季调水调沙产生的高流量导致水体滞留时间变短,促使温度在强烈的水循环作用下基本均匀分布。

c. 水库调度。调水调沙调度运行显著影响水温结构。夏季调水调沙期间,高流量引发强紊动,水体中层(20~60 m)呈现不稳定的密度跃层,破坏原有的水温分层结构,使水体温度趋于均匀;同时,泄洪扰动可能影响深层水温,如6月水体深层(>60 m)N²值较大,可能与泄洪扰动或沉积物再悬浮相关。

d. 水体物理特性。水体密度分层对水温分布影响显著。浮力频率表征水体密度分层强度,其随

水深和季节变化。水体表层(0~20 m)在太阳辐射或温度波动影响下,除冬季外 N^2 值普遍较高,水温分层较为明显;调水调沙期水体中层 N^2 值不稳定;在特定月份水体深层受泄洪等因素影响, N^2 值发生变化。此外,水体热传导与垂向混合等物理过程,调节表层至底层水体的热量交换,影响水温分层结构和垂向温度梯度。

4 结 论

a. 小浪底水库水温呈现显著季节性动态特征,水库对下泄水温具有平坦化与时滞效应。模拟结果表明,大坝上游近坝区水温变化尤为显著:垂向平均水温8月达到最高,1—2月降至最低,且表层水温年际波动大于底层水温;5月表底温差达到最大值(13.4℃),11月降至最小值(0.4℃)。冬季(12月至次年2月)水体混合均匀,温跃层消失;春季(3—5月)温跃层逐步形成并扩展;夏季(6—8月)调水调沙引发强扰动,分层结构破坏,水体混合加剧,温差减小;秋季(9—11月)温跃层逐步衰退,11月水体趋向混合,并呈现表层快速降温、底层缓慢冷却的降温特征。上述变化规律与水库调度及水动力学过程密切相关。

b. 小浪底水库调水调沙期水温呈现显著阶段性变化。前期高流量下泄,削弱坝前水温分层,表层水温受来流与太阳辐射影响,垂向温度梯度自水面至库底递减,上游测点受高温来流影响更显著。中期库区水位骤降,大流量导致水体完全掺混,垂向呈同温状态。后期来流以浮力流形式入库,坝前表层水温接近来流,底层水温递减至27.8℃,浅水区测点水温与来流一致。不同高程出水口水温随水位下降趋同,揭示调水调沙通过流量调控改变库区水温垂向分布与混合过程。

c. 小浪底水库水温变化受多因素综合影响。气象条件是关键驱动因子,太阳辐射与大气温度的季节性变化主导水温分层演变,如春季辐射增强促使表层升温形成温度梯度,冬季低温促使水体均匀化;水文过程通过来水水温与水体滞留时间改变水库水温结构,秋季低温来水缩小表底温差,夏季调水调沙期高流量缩短滞留时间,加剧水体混合;水库调度显著改变水温结构,调水调沙期高流量引发强紊动,破坏分层并形成不稳定密度跃层,泄洪扰动可能影响深层水温;浮力频率变化、水体热传导、垂向混合等物理过程调节表层至底层水体的热量交换,影响水温分层结构和垂向温度梯度。

参考文献:

[1] 陆中桂,康哲,李巍,等. 水量-水质-生态需水综合视角下黄河流域水稀缺评估[J]. 水资源保护, 2024, 40(4):73-81. (Lu Zhonggui, Kang Zhe, Li Wei, et al. Water scarcity assessment in the Yellow River Basin from comprehensive perspective of water quantity-water quality-ecology water demand[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4):73-81. (in Chinese))

[2] 鲁俊,朱呈浩,陈翠霞,等. 古贤和小浪底水库联合调水调沙运用方式研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(12):31-36. (Lu Jun, Zhu Chenghao, Chen Cuixia, et al. Research on the joint water and sediment regulation operation mode of Guxian Reservoir and Xiaolangdi Reservoir[J]. Yellow River, 2024, 46(12):31-36. (in Chinese))

[3] 李宪栋,刘士祥,刘哲杰. 小浪底水库2021—2023年排沙过程分析[J]. 人民黄河, 2024, 46(增刊1):11-12. (Li Xiandong, Liu Shixiang, Liu Zhejie. Analysis on the sediment discharge process of the Xiaolangdi Reservoir from 2021 to 2023[J]. Yellow River, 2024, 46(Sup1):11-12. (in Chinese))

[4] 申冠卿,张原锋,王平,等. 小浪底水库降水排沙对其下游河床演变的影响[J]. 水科学进展, 2024, 35(6):927-937. (Sheng Guanqing, Zhang Yuanfeng, Wang Ping, et al. Impacts of sediment flushing of Xiaolangdi Reservoir on fluvial processes in the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(6):927-937. (in Chinese))

[5] 李洁玉,李航,王远见,等. 黄河水沙调控多目标协同模型构建及应用[J]. 水科学进展, 2023, 34(5):708-718. (Li Jieyu, Li Hang, Wang Yuanjian, et al. Construction and application of a multi-objective collaborative model of water and sediment regulation in the Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(5):708-718. (in Chinese))

[6] 陈翠霞,朱呈浩,赵翔,等. 小浪底水库调控后黄河下游冲淤规律与水沙调控指标[J]. 水科学进展, 2024, 35(4):606-616. (Chen Cuixia, Zhu Chenghao, Zhao Xiang, et al. Scouring and silting law of the Lower Yellow River and water and sediment regulation indicators after the regulation of Xiaolangdi Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(4):606-616. (in Chinese))

[7] 闫戈丁,景海涛,王磊. 小浪底水库水体时空变化特征与驱动因素分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(3):72-75. (Yan Geding, Jing Haitao, Wang Lei. Spatio-temporal change characteristics and driving factor analysis of Xiaolangdi Reservoir[J]. Geospatial Information, 2024, 22(3):72-75. (in Chinese))

[8] Wang Ruimeng, Pan Li, Niu Wenhui, et al. Monitoring the spatiotemporal dynamics of surface water body of the

- Xiaolangdi Reservoir using Landsat-5/7/8 imagery and Google Earth Engine [J]. Open Geosciences, 2021, 13 (1):1290-1302.
- [9] 黄建雄,冶运涛,曹引,等. 黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024,52(3):25-33. (Huang Jianxiong, Ye Yuntao, Cao Yin, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the north main reach of Yellow River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3):25-33. (in Chinese))
- [10] Chen Ziyi, Liu Zhixin, Yin Lirong, et al. Statistical analysis of regional air temperature characteristics before and after dam construction[J]. Urban Climate, 2022, 41:101085.
- [11] 陈述,陈琼,任康,等. 考虑新能源消纳的黄河上游水电站群生态优化调度研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (3):20-27. (Chen Shu, Chen Qiong, Ren Kang, et al. Ecological optimal scheduling of hydropower stations on the upper Yellow River considering renewable energy accommodation[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3):20-27. (in Chinese))
- [12] 张启凡,胡铁松,戴凌全,等. 考虑生态流量的梯级水库主从博弈优化调度研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5):69-77. (Zhang Qifan, Hu Tiesong, Dai Lingquan, et al. Research on leader-follower game optimal operation of cascade reservoirs considering ecological flow[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5):69-77. (in Chinese))
- [13] Zhang Xueqin, Zhang Min, Zhang Chunjin, et al. Impact of the Xiaolangdi Reservoir operation on water-sediment transport and aquatic organisms in the lower Yellow River during flood events[J]. Sustainability, 2025, 17 (18), 8136.
- [14] 宋策,周孝德,辛向文. 龙羊峡水库水温结构演变及其对下游河道水温影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(3):421-428. (Song Ce, Zhou Xiaode, Xin Xiangwen. Water temperature dynamics of Longyangxia Reservoir and its influence on downstream water temperature[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3):421-428. (in Chinese))
- [15] Chapman J M, Proulx C L, Veilleux M A N, et al. Clear as mud: a meta-analysis on the effects of sedimentation on freshwater fish and the effectiveness of sediment-control measures[J]. Water Research, 2014, 56:190-202.
- [16] Affandi F A, Ishak M Y. Impacts of suspended sediment and metal pollution from mining activities on riverine fish population: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(17):16939-16951.
- [17] 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. Effect of water temperature on the life activities of temperate freshwater fish [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42 (4):117-122. (in Chinese))
- [18] 贺蔚,王海洋,李国岭,等. 引水式电站对下游水动力与鱼类洄游适宜度的影响及其优化[J]. 水资源保护, 2025, 41 (3):255-264. (He Wei, Wang Haiyang, Li Guoling, et al. Impacts of diversion-type hydropower stations on downstream hydrodynamics and fish migration suitability and their optimization [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3):255-264. (in Chinese))
- [19] 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. (in Chinese))
- [20] 饶贵康,王玲玲,徐津,等. 调水期风场对淮河入江水道浅水湖泊水动力水质的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (3):31-37. (Rao Guikang, Wang Lingling, Xu Jin, et al. Study on the effect of wind field on hydrodynamic water quality of shallow lakes in Huaihe River watercourse entering Yangtze River during the water diversion period[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3):31-37. (in Chinese))
- [21] Liu Liu, Zhang Xin, Schorn S, et al. Strong subseasonal variability of oxalic methane production challenges methane budgeting in freshwater lakes[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(44):19690-19701.
- [22] Zhang Yuanning, Gao Xueping, Sun Bowen, et al. Oxygen evolution and its drivers in a stratified reservoir: a supply-side perspective for informing hypoxia alleviation strategies [J]. Water Research, 2024, 257:121694.
- [23] 余晓,诸葛亦斯,刘晓波,等. 大型深水库溶解氧层化结构演化机制[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5):1496-1507. (Yu Xiao, Zhuge Yisi, Liu Xiaobo, et al. Evolution mechanism of dissolved oxygen stratification in a large deep reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32 (5):1496-1507. (in Chinese))
- [24] Ji Qianfeng, Li Kefeng, Wang Yuanming, et al. Effect of floating photovoltaic system on water temperature of deep reservoir and assessment of its potential benefits: a case on Xiangjiaba Reservoir with hydropower station [J]. Renewable Energy, 2022, 195:946-956.
- [25] Juracek E K. The aging of America's reservoirs: in-reservoir and downstream physical changes and habitat implications [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2015, 51(1):168-184.
- [26] Orlob G T. Mathematical modeling of water quality: streams, lakes, and reservoirs [M]. Chichester: Wiley,

- 1983.
- [27] Harleman D R F. Hydrothermal analysis of lakes and reservoirs [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1982, 108(3):301-325.
- [28] Imberger J, Loh I, Hebbert B, et al. Dynamics of reservoir of medium size [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1978, 104(5):725-743.
- [29] 脱友才, 周晨阳, 梁瑞峰, 等. 水电开发对大渡河瀑布沟以下河段的水温影响 [J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 299-306. (Tuo Youcai, Zhou Chenyang, Liang Ruifeng, et al. Influence of hydroelectric development on water temperature downstream the Pubugou hydropower station of the Dadu River [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(2):299-306. (in Chinese))
- [30] 方晴, 马剑波, 沈文龙, 等. 松涛水库水温数值模拟研究 [J]. 水力发电, 2020, 46(2): 6-11. (Fang Qing, Ma Jianbo, Shen Wenlong, et al. Study on numerical simulation of water temperature in Songtao Reservoir [J]. Water Power, 2020, 46(2):6-11. (in Chinese))
- [31] 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. (Yang Chen, Zhang Tingkui, Lu Yifan, 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. (in Chinese))
- [32] Cole T M, Wells S A. CE-QUAL-W2: a two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3. 1, technical report EI-2001-1 [R]. Vicksburg: U. S. Army Engineering and Research Development Center, 2002.
- [33] Farrell G J, Stefan H G. Mathematical modeling of plunging reservoir flows [J]. Journal of Hydraulic Research, 1988, 26(5):525-537.
- [34] Karpik S R, Raithby G D. Laterally averaged hydrodynamics model for reservoir predictions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(6):783-798.
- [35] 梁瑞峰, 邓云, 脱友才, 等. 流域水梯级开发水温累积影响特征分析 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2012, 44(增刊2):221-227. (Liang Ruifeng, Deng Yun, Tuo Youcai, et al. Analysis on characteristics of water temperature's cumulative effects of river cascade hydropower stations [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(Sup2):221-227. (in Chinese))
- [36] 段扬, 秦韬, 王京晶, 等. 丹江口水库三维水动力模拟研究 [J]. 人民黄河, 2018, 40(3):119-122. (Duan Yang, Qin Tao, Wang Jingjing, et al. Research on three-dimensional hydrodynamic simulation of Danjiangkou Reservoir [J]. Yellow River, 2018, 40(3):119-122. (in Chinese))
- [37] 邱进生, 邓云, 颜剑波, 等. 水库水温数学模型适用性研究 [J]. 环境影响评价, 2017, 39(2):57-62. (Qiu Jinsheng, Deng Yun, Yan Jianbo, et al. Study on applicability of mathematical models of reservoir water temperature [J]. Environmental Impact Assessment, 2017, 39(2):57-62. (in Chinese))
- [38] 刘有志, 相建方, 陈文夫, 等. 狭长型水库蓄水至初期运行阶段水温演化规律研究 [J]. 水利学报, 2020, 51(11):1412-1422. (Liu Youzhi, Xiang Jianfang, Chen Wenfu, et al. Analysis of the water temperature evolution of long and narrow reservoir from impoundment to first operating period [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11):1412-1422. (in Chinese))
- [39] 魏小旺, 苗伟波, 张风云. 小浪底水库垂向二维水温数值模拟研究 [J]. 水科学与工程技术, 2023(6):5-7. (Wei Xiaowang, Miao Weibo, Zhang Fengyun. Numerical simulation research on the 2-D vertical water temperature of Xiaolangdi Reservoir [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2023(6):5-7. (in Chinese))
- [40] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2023 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2024.
- [41] 杨正健, 刘德富, 马骏, 等. 三峡水库香溪河库湾特殊水温分层对水华的影响 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2012, 45(1):1-9. (Yang Zhengjian, Liu Defu, Ma Jun, et al. Effects of special vertical layered water temperatures on algal bloom in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(1):1-9. (in Chinese))
- [42] 李德水, 任小凤, 李树森, 等. 小浪底水库坝前水温统计分析 [J]. 人民黄河, 2008, 30(2):77-78. (Li Deshui, Ren Xiaofeng, Li Shusen, et al. Analysis on water temperature statistics in front of the dam of Xiaolangdi Reservoir [J]. Yellow River, 2008, 30(2):77-78. (in Chinese))
- [43] 黄国兵, 黄卫, 段文刚, 等. 水库水温分层取水研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.

(收稿日期: 2025-01-06 编辑: 施业)

