

乌东德和白鹤滩水库蓄水后溪洛渡库区水温变化趋势分析

唐玉川¹, 张勇¹, 赵忠伟², 王晓婷³, 谢长江⁴

(1. 中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院;
3. 河海大学水利水电学院; 4. 中国水利水电第八工程局有限公司)

摘要: 为了解乌东德和白鹤滩水库蓄水运行后溪洛渡库区水温的变化规律, 基于2019—2024年水温原型观测数据与2014—2018年历史水文资料, 采用数理统计法、对比分析法和Mann-Kendall趋势分析法, 引入热分层特性评价指标, 分析了溪洛渡库区水温时空变化特征与热分层演变过程。结果表明: 上游梯级水库蓄水后, 热分层稳定性逐渐提高, 下游水温呈现秋冬高春夏低的平坦化趋势和低温出现时间呈滞后化特征, 且水温平坦化和滞后的程度随梯级数量增加而增强, 热分层稳定指数峰值由 2.52 m^{-1} 增至 3.71 m^{-1} , 而垂向温度梯度蓄水后逐年降低; 入库水温夏季均值降低 0.52°C 、冬季升高 2.64°C , 年较差减小 7.78% ; 出库水温夏季均值降低 0.53°C 、冬季升高 1.93°C , 年内极值变幅降低 $0.6\% \sim 11.1\%$, 沿程各断面最低水温出现时间较蓄水前滞后 $4 \sim 26\text{ d}$ 。

关键词: 梯级水库; 下泄水温; 水库热分层; 溪洛渡水库; 乌东德水库; 白鹤滩水库

Analysis of water temperature variation trends in Xiluodu Reservoir area after impoundment of Wudongde and Baihetan reservoirs// Tang Yuchuan¹, Zhang Yong¹, Zhao Zhongwei², Wang Xiaoting³, Xie Changjiang⁴ (1. River Basin Hub Operation and Management Center, China Three Gorges Corporation; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 4. Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd.)

Abstract: To understand the variation patterns of water temperature in the Xiluodu Reservoir area after the impoundment and operation of the Wudongde and Baihetan reservoirs, this study analyzed the spatiotemporal variation characteristics of water temperature and the evolution process of thermal stratification in the Xiluodu Reservoir area based on in-situ water temperature observation data from 2019 to 2024 and historical hydrological data from 2014 to 2018. The analysis was conducted using mathematical statistics, comparative analysis, and the Mann-Kendall trend analysis method, incorporating thermal stratification evaluation indices. The results show that after the impoundment of the upstream cascade reservoirs, the thermal stratification stability gradually increased. Downstream water temperature exhibited a flattening trend, characterized by higher values in autumn and winter and lower values in spring and summer, and the occurrence of low water temperatures showed a lagging characteristic. Furthermore, the degree of water temperature flattening and lagging increased with the number of cascade reservoirs. The peak value of the thermal stratification stability index increased from 2.52 m^{-1} to 3.71 m^{-1} , while the vertical temperature gradient decreased year by year after impoundment. The mean inflow water temperature decreased by 0.52°C in summer and increased by 2.64°C in winter, with the annual temperature range decreasing by 7.78% . The mean outflow water temperature decreased by 0.53°C in summer and increased by 1.93°C in winter, with the intra-annual extreme variation range decreasing by 0.6% to 11.1% . The occurrence time of the minimum water temperature at various cross-sections along the channel was delayed by 4 to 26 days compared with the pre-impoundment period.

Key words: cascade reservoirs; discharge water temperature; reservoir thermal stratification; the Xiluodu Reservoir; the Wudongde Reservoir; the Baihetan Reservoir

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司技术服务项目(JG/19009B, JG/19010B, JG/19011B, JG/19012B); 中国长江三峡集团有限公司自主科研项目(NBYG202300751)

作者简介: 唐玉川(1995—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事环境水力学研究。E-mail: 2050915048@qq.com

通信作者: 谢长江(1982—), 男, 正高级工程师, 主要从事大坝安全监测技术和环境监测研究。E-mail: 54234482@qq.com

水温是水环境中的关键驱动因子,影响水体的理化特性及水生态系统的稳定性^[1-3],尤其对鱼类的生长繁殖具有重要作用^[4-5]。随着流域梯级水电的大规模开发,水电工程在产生巨大发电效益的同时,也对天然水环境造成多方面的影响^[6-7]。大型水库蓄水后常形成明显的热分层现象,热分层主要由温度差异驱动^[8-9],可分为混合期、形成期和稳定期3个阶段^[10]。Castrillo等^[11]采用机器学习方法评估了水库热分层状态,指出水位、太阳辐射和气温是影响温跃层深度的主要因子;Zhao等^[12]基于三维数值模型揭示了水库热分层结构的时空异质性和阶段性演变规律,发现不同热分层阶段具有不同的主导控制因子。

上游水库形成的热分层现象会导致下泄水温春夏偏低、秋冬偏高,引起下游河道水温节律的滞后,且这种滞后效应会沿程累积,对下游生态产生深远影响^[13-14]。任实等^[15]指出上游水库调度会改变下游入库水温和热分层结构;於孟元等^[16]发现水温累积效应会随梯级数量增加而增强,但在支流汇入后受到削弱;胡光洋等^[17]提出水库类型和梯级位置共同主导了累积效应的方向。因此,研究水库热分层及其在梯级系统中的累积效应,对认识水电开发的水环境影响具有重要意义。

溪洛渡水库是金沙江下游水电开发的梯级电站之一,上游连接乌东德和白鹤滩水库,下游连接向家坝水库,水库具有较强的调蓄能力。近年来,国内学者针对溪洛渡库区水温结构开展了较为深入的研究。程帅等^[18]研究发现溪洛渡库区水温分层季节性明显,表层水温与气温相关度较高;戴凌全等^[19]和杨宇等^[20]分别建立了二维和三维数值模型,评估了溪洛渡水库分层取水生态调度对下泄水温的改善效果。

目前,乌东德与白鹤滩水库已完成蓄水,其调度运行会影响下游溪洛渡水库的入库水温和流量过程,进而影响库区水温热分层结构与演变过程。但现有研究多集中于单库分析,对梯级水库联合调度下的水温累积效应仍有待深入研究。本文基于2019—2024年实测水温数据,结合2014—2018年历史水文资料,系统分析上游乌东德和白鹤滩水库蓄水前后溪洛渡库区垂向水温结构的演变规律,探讨梯级水库调度对热分层及下泄水温的影响,以为溪洛渡水库生态调度和下游水生态保护提供理论依据。

1 研究数据与分析方法

1.1 原型观测

1.1.1 监测设备

温度链监测采用基康技术股份有限公司生产的

铂电阻温度计,测温精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$;数据采集采用该公司生产的40通道和32通道自动化数据采集仪,数据传输通过中国移动物联卡实现。垂向水温监测采用Level SCOUT型监测仪。温度链通过数据采集仪每小时采集1次数据,并通过GPRS/GSM通信方式实时传输至设置在中国水利水电第八工程局有限公司总部的G云服务器。

1.1.2 监测点布置

根据HJ 91.2—2022《地表水环境质量监测技术规范》、SL 219—2013《水环境监测规范》、HJ 494—2009《水质采样技术指导》,在溪洛渡坝前断面布设1条垂向温度链,监测坝前垂向水温结构,每小时记录1次垂向水温数据。溪洛渡坝前垂向温度链总长225 m,监测水深181 m,共布设63支温度计:从高程600 m起向下每隔2 m布设8支温度计至高程584 m,然后每隔2.5 m布设42支温度计至高程479 m,最后每隔5 m布设13支温度计至高程419 m。为辅助校准水温监测高程,自垂向温度链底部起每隔30 m布设1支渗压计,共计6支。温度链安装完成后,监测线缆穿镀锌钢管沿防浪墙内侧监测沟敷设至监控房。此外,在溪洛渡库区沿程布设5个表层水温自动监测断面(图1),其监测设备采用固定安装或浮船锚固安装方式,每2 h监测1次表层水温。其中,白鹤滩水文站水温代表溪洛渡库区入库水温特征,溪洛渡水文站水温代表库区出库水温特征,金阳河汇口下游、美姑河汇口下游和溪洛渡坝前断面位于库区内部,其水温代表库区沿程水温变化特征。

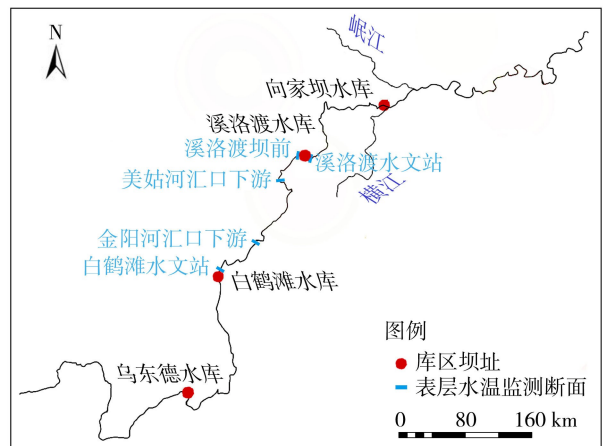


图1 梯级库区及断面布设示意图

1.1.3 研究数据

研究数据主要包括水位、流量、水温及气温数据。水位数据采用溪洛渡坝上(马家河站)2019年8月至2024年7月的逐时水位。流量数据包括溪洛渡水库2019年8月至2024年7月的逐时入库和出库流量。水温数据主要包括白鹤滩水文站、金阳

河汇口下游、美姑河汇口下游、溪洛渡坝前、溪洛渡水文站等断面 2019 年 8 月至 2024 年 7 月的表层与垂向逐时水温。此外,从水文年鉴中获取了白鹤滩水文站 2014 年 8 月至 2019 年 7 月的逐日水温及溪洛渡水文站 2016 年 8 月至 2019 年 7 月的月均水温数据。气温数据选用溪洛渡水库附近云南永善气象站 2019—2024 年的逐日气温数据,采用每日最高与最低气温的平均值进行分析。

结合水温监测时段,以每年 8 月至次年 7 月作为一个完整的监测年分析水温变化。根据上游乌东德、白鹤滩水库蓄水运行时间,将溪洛渡水库水温结构变化的分析时段分为 3 个时期:①运行期 I,乌东德水库蓄水前时段(2014 年 8 月至 2020 年 7 月);②运行期 II,乌东德水库蓄水后、白鹤滩水库蓄水前时段(2020 年 8 月至 2021 年 7 月);③运行期 III,白鹤滩水库蓄水后梯级四库联合运行期(2021 年 8 月至 2024 年 7 月)。

1.2 数据分析方法

1.2.1 数据质量控制

结合水体物理规律和监测断面地理特征,首先剔除明显失真的监测数据;随后通过统计指标(四分位距、滑动均值及数据标准差漂移)对单变量水温序列进行初步筛查,识别与整体分布偏离较大的异常数据。短时间表层水温缺失采用线性插值补齐,长时间表层水温缺失采用分段二次多项式拟合插补,垂向水温缺失及异常数据采用三次样条拟合进行重建。

1.2.2 统计分析法

基于各监测断面长序列水温观测数据,采用数理统计方法从水温的年内分布、年际变化等方面分析溪洛渡库区沿程水温的时空特征;结合水文站历史水温资料,以乌东德和白鹤滩水库蓄水时间为节点划分 3 个时期,从表层水温沿程分布、垂向水温时空分布特征两方面,系统分析上游梯级水库蓄水后溪洛渡库区水温的时空变化特征;此外,采用 Mann-Kendall(M-K)趋势分析法分析溪洛渡库区水温的长期变化趋势。

根据 GB/T 12763.7—2007《海洋调查规范 第 7 部分:海洋调查资料交换》,温跃层的空间特征通过温跃层深度、厚度和强度 3 个核心参数来表征,其中,温跃层深度指温跃层上界的深度,温跃层厚度指温跃层底界与顶界之间的距离,温跃层强度采用垂向温度梯度(VTG)表示,即单位深度上的水温变化率。在水深不足 200 m 的浅水区域中,垂向温度梯度达到或超过 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的水层即可视为温跃层,通常将表层 1 m 以内的浅层区(受太阳辐射和风浪扰

动显著)排除在温跃层判定范围之外。

考虑上下水体密度和深度的共同影响,引入热分层稳定指数 R 来衡量水库热分层稳定水平^[21],并根据指数大小划分不同分层时期: $R < 0.17 \text{ m}^{-1}$ 为未分层期, $0.17 \text{ m}^{-1} \leq R < 1.56 \text{ m}^{-1}$ 为分层形成期或消亡期, $1.56 \text{ m}^{-1} \leq R < 6.99 \text{ m}^{-1}$ 为稳定分层期。

2 结果与分析

2.1 不同时期上游来水水温变化

白鹤滩水文站位于溪洛渡库区库尾,其水温可代表白鹤滩水库出库水温和溪洛渡水库上游来水水温。图 2 为白鹤滩水文站 2014 年 8 月至 2024 年 7 月期间月均和季节平均水温的变化过程。由图 2 可见,白鹤滩水文站春季(3—5 月)平均水温变化范围为 $16.03 \sim 17.62^{\circ}\text{C}$,运行期 I 春季平均水温为 17.27°C ,运行期 II 为 17.18°C ;白鹤滩水库蓄水后第一年春季平均水温降低至 16.03°C ,第二年回升至 16.49°C ,第三年回升至 16.70°C 。对白鹤滩水文站 10 a 的春季平均水温进行 M-K 趋势分析,结果显示统计量 Z 值为 -1.25 ,表明在 0.05 显著性水平下,春季平均水温呈不显著降温趋势。白鹤滩水文站夏季(6—8 月)平均水温变化范围为 $21.11 \sim 22.23^{\circ}\text{C}$,运行期 I 夏季平均水温为 21.78°C ,运行期 III 降低至 21.26°C ,降低了 0.52°C 。夏季平均水温的 Z 值为 -1.79 ,表明水温呈显著降温趋势。白

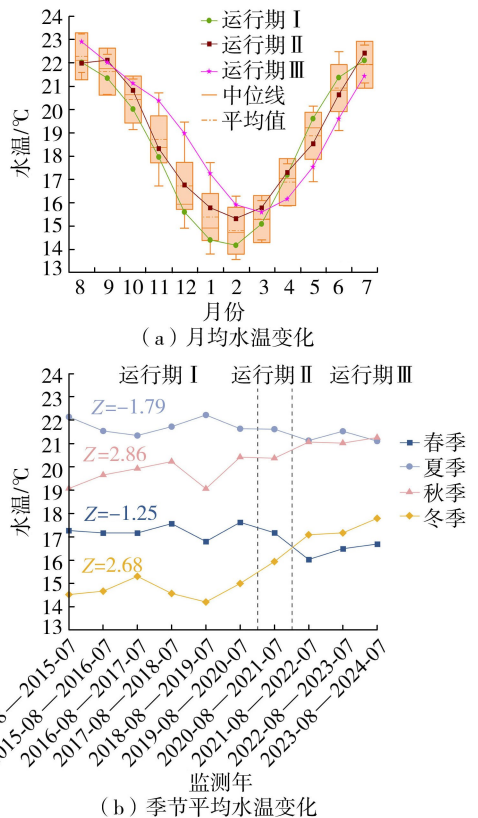


图 2 2014—2024 年白鹤滩水文站水温变化

鹤滩水文站秋季(9—11月)平均水温变化范围为19.07~21.26℃,秋季平均水温的Z值为2.86,表明在0.05显著性水平下,秋季平均水温呈显著升温趋势。运行期Ⅱ秋季平均水温为20.38℃,白鹤滩水库蓄水运行后,运行期Ⅲ秋季平均水温显著升高,第一年升高至21.07℃,第三年升高至21.26℃。白鹤滩水文站冬季(12月至次年2月)平均水温变化范围为14.20~17.80℃,2014—2024年冬季平均水温逐年升高,从运行期Ⅰ的14.71℃升高至运行期Ⅲ的17.35℃,升幅达2.64℃。冬季平均水温的Z值为2.68,表明在0.05显著性水平下,冬季平均水温呈显著升温趋势。

由表1可知,梯级水库蓄水导致下游水温呈现显著的热调节效应。蓄水后季节水温变幅收窄,表现为夏季峰值水温降低(平均降幅0.52℃),冬季谷值水温提升(平均升幅2.64℃);平均最低月均水温从运行期Ⅰ的14.10℃升高至运行期Ⅲ的15.57℃,且最低日均水温出现时间从1—2月滞后至3—4月。整体来看,乌东德和白鹤滩水库陆续蓄水后,水温变化曲线趋于平坦化,具体表现为水温年较差减小7.78%(从运行期Ⅰ的7.89℃降低至运行期Ⅲ的7.28℃)、季节极值趋中移动(运行期Ⅲ冬季水温反超春季0.95℃),形成“夏秋趋近、冬春抬升”的新型水温格局,证实了梯级水库蓄水对河流热力过程的平坦化影响。

2.2 不同时期库区水温结构变化

2.2.1 库首垂向水温结构

图3为不同运行阶段溪洛渡坝前逐时垂向水温分布示意图,表2为2019—2024年溪洛渡坝前水温

分层情况统计。5年数据序列结果表明,溪洛渡坝前水温一般于3月中下旬出现分层,秋冬季水温分层较弱或已消失;温跃层在4—6月形成,9—12月期间消失。

a. 运行期Ⅰ。2019年8—12月期间,溪洛渡坝前垂向水温介于13.95~26.69℃,水温分层持续至当年10月11日。在水温分层发展过程中,温跃层逐渐下移(从高程479m下移至高程439m),VTG逐渐增大,并于9月达到峰值0.51℃/m。2020年3月溪洛渡坝前表层水温开始回升,3月19日开始出现水温分层($R = 0.28 \text{ m}^{-1}$),5月15日R升至 1.95 m^{-1} ,进入稳定分层期。此时温跃层出现在486.5m高程附近,厚度约3m,温度范围为15.06~15.70℃。随着分层进一步发展,温跃层持续下移并带动深层水体升温,表底层温差逐渐缩小,至8月31日前后坝前分层消失,水体进入垂向同温混合阶段。运行期Ⅰ水温分层持续165d,R最大值为 2.52 m^{-1} 。分层期间坝前表层平均水温为20.09℃,底层平均水温为19.18℃,表底层平均温差为0.91℃。

b. 运行期Ⅱ。2020年10月至2021年2月,溪洛渡坝前垂向水温结构基本一致,水体处于同温状态。2021年春季,坝前表层水温开始回升,表底层温差逐渐加大,3月29日水温分层开始形成($R = 0.26 \text{ m}^{-1}$),5月9日R升高至 1.57 m^{-1} ,标志着稳定分层期形成。分层期间,温跃层由高程490~524m逐渐下降至460~489m,VTG逐渐增大,7月9日VTG达到最大值0.57℃/m,温跃层顶部高程位于479m处。随着温跃层下移,深层水体逐渐升温,至

表1 2014—2024年白鹤滩水文站水温统计值

运行期	时间	年平均水温/℃	最低月均水温/℃	最低日均水温/℃	最低日均水温出现时间
I	2014-08-01—2015-07-31	18.26	14.11	13.30	2015-01-13
	2015-08-01—2016-07-31	18.26	13.57	13.00	2016-02-04
	2016-08-01—2017-07-31	18.44	14.90	14.20	2017-02-28
	2017-08-01—2018-07-31	18.53	13.80	12.30	2018-02-05
	2018-08-01—2019-07-31	18.08	13.80	13.40	2018-12-30
	2019-08-01—2020-07-31	18.67	14.43	14.02	2020-02-20
II	2020-08-01—2021-07-31	18.78	15.30	14.91	2021-02-21
	2021-08-01—2022-07-31	18.83	15.35	15.11	2022-03-07
III	2022-08-01—2023-07-31	19.05	15.58	14.95	2023-03-26
	2023-08-01—2024-07-31	19.22	15.77	15.50	2024-04-08

表2 2019—2024年溪洛渡水库坝前水温分层情况统计

运行期	时间	分层开始时间	分层结束时间	分层持续时间/d	平均温跃强度/(℃/m)	表层平均水温/℃	底层平均水温/℃	表底层平均温差/℃
I	2019-08-01—2020-07-31	2020-03-19	2020-08-31	165	0.50	20.11	19.18	0.93
II	2020-08-01—2021-07-31	2021-03-29	2021-10-08	194	0.55	21.23	20.25	0.98
	2021-08-01—2022-07-31	2022-03-19	2022-10-09	204	0.45	21.07	19.90	1.17
III	2022-08-01—2023-07-31	2023-03-09	2023-09-23	198	0.38	20.86	19.64	1.22
	2023-08-01—2024-07-31	2024-04-01	2024-10-02	184	0.34	22.66	19.99	2.67

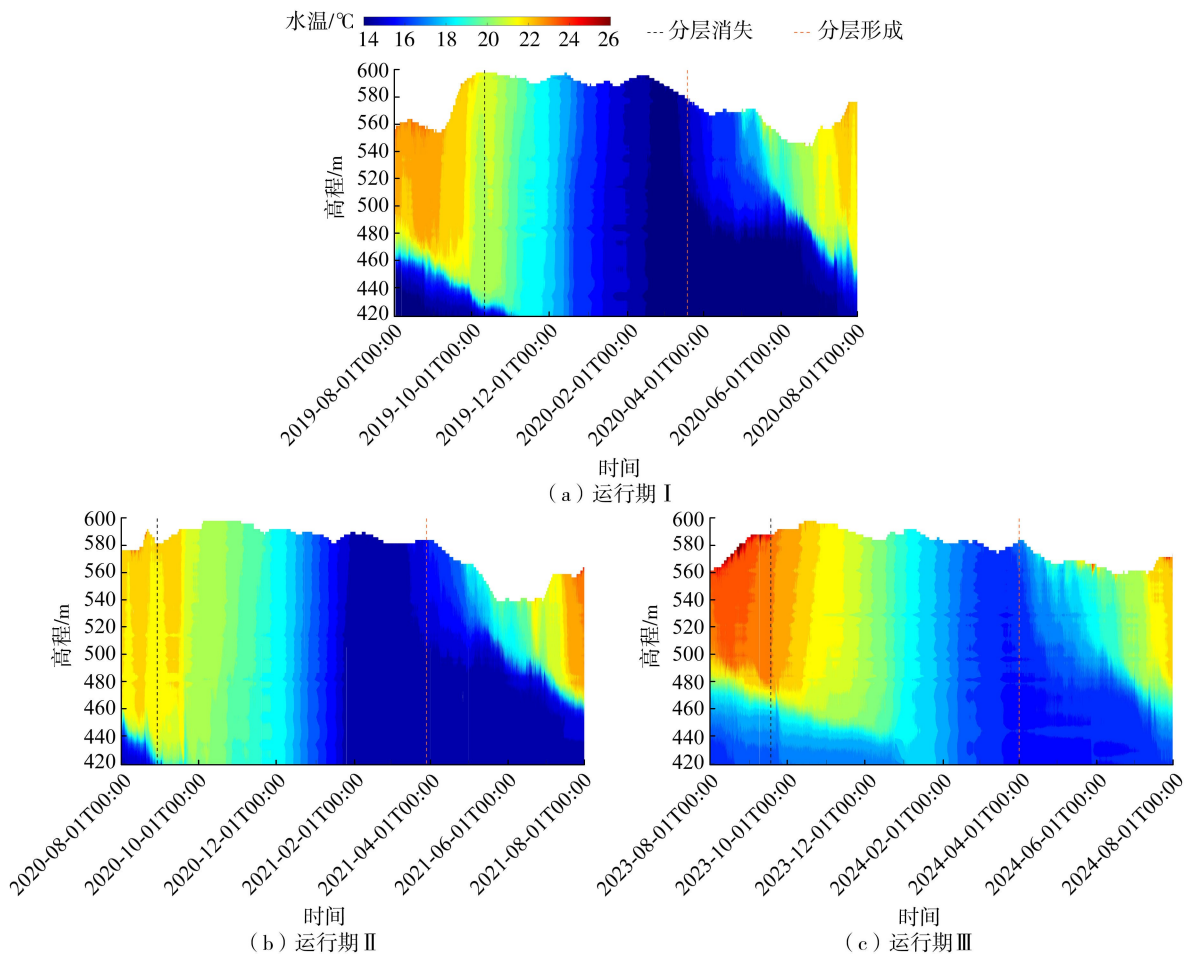


图3 不同运行阶段溪洛渡坝前逐时垂向水温分布

10月8日分层结束($R=0.15\text{ m}^{-1}$)。运行期Ⅱ水温分层持续约194 d,较运行期Ⅰ延长29 d。分层期间,坝前表层平均水温为 $21.23\text{ }^{\circ}\text{C}$,底层平均水温为 $20.25\text{ }^{\circ}\text{C}$,表底层平均温差较运行期Ⅰ增大至 $0.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

c. 运行期Ⅲ。白鹤滩水库蓄水后3年分层期间表底层平均温差分别为 1.17 、 1.21 、 $2.67\text{ }^{\circ}\text{C}$,呈逐年上升趋势;水温分层起始时间分别为3月19日、3月9日和4月1日前后,对应的分层持续时间分别为204、198、184 d。在温跃层发育过程中,3年分层期间VTG的年均值分别为 0.45 、 0.38 、 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$, R 最大值分别达到 2.27 、 2.81 、 3.71 m^{-1} 。与运行期Ⅰ相比,运行期Ⅲ水温分层持续时间逐渐缩短,VTG略有减小,而 R 增大,表明随着水库运行时间延长,热分层结构逐渐趋于稳定。

2.2.2 库区沿程水温分布

溪洛渡库区回水至白鹤滩水文站,回水区水温具有典型的库区调节特征,沿程水温变化较天然河道表现出明显的滞后效应。图4和图5分别为溪洛渡库区沿程断面的年均水温和日均水温变化过程。

由图4可见,溪洛渡库区呈现“入库低温-库中

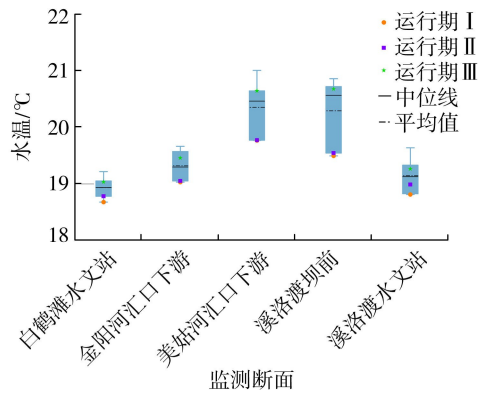


图4 2019—2024年沿程各断面年均水温变化

升温-下泄低温”的沿程年均水温分布规律。运行期Ⅰ沿程年均水温从白鹤滩水文站的 $18.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至美姑河汇口下游的 $19.79\text{ }^{\circ}\text{C}$,经溪洛渡库区调节后,坝下水文站年均水温降至 $18.95\text{ }^{\circ}\text{C}$,出库年均水温较坝前偏低 $0.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。运行期Ⅲ沿程年均水温分布趋于平缓,各断面年均水温提升 $0.33\sim 1.18\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中坝前升温幅度最大($1.18\text{ }^{\circ}\text{C}$),入库和出库断面升温相对较小(分别为 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$),出库水温较坝前降低 $1.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

由图5可见,库区对水温的调节作用在降温期表现明显。运行期Ⅲ10月至次年4月沿程各断面

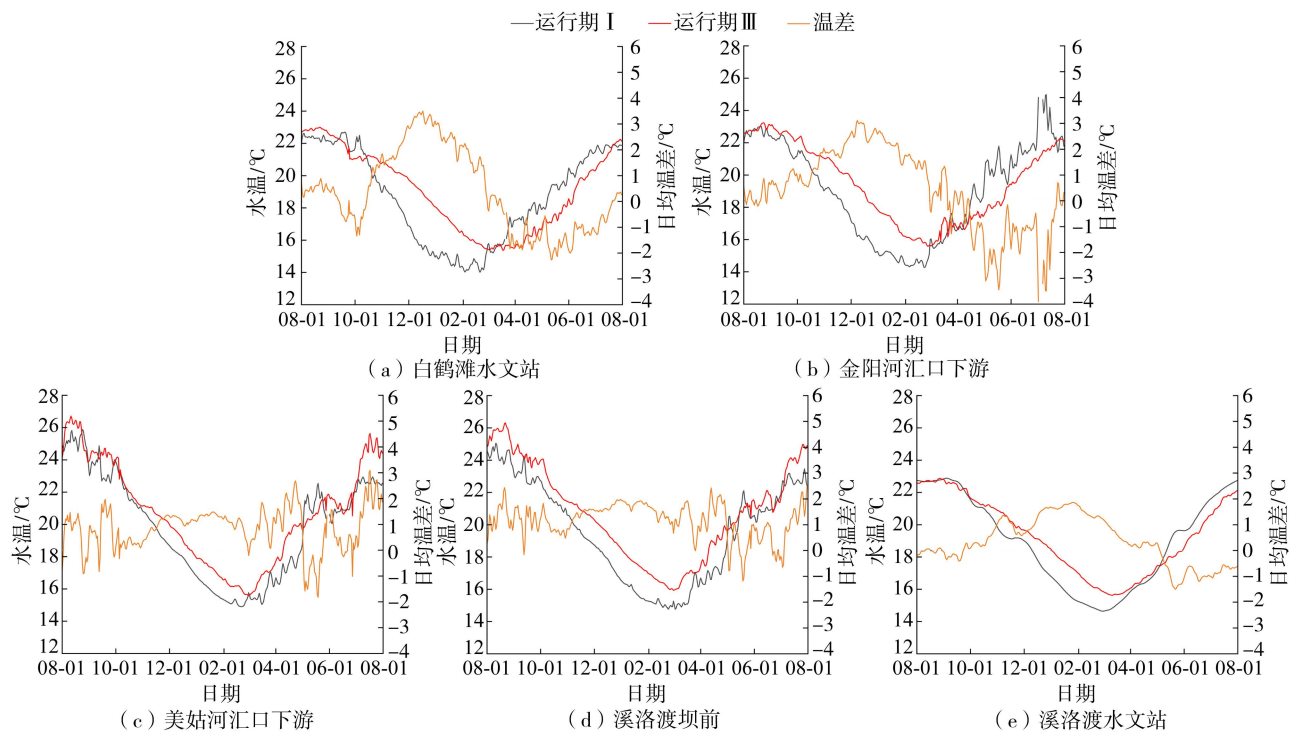


图5 2019—2024年沿程各断面日均水温变化过程

日均水温显著提升,白鹤滩水文站11月至次年2月平均升高 2.28°C ,金阳河汇口下游9月至次年2月升高 1.68°C ,美姑河汇口下游10月至次年4月升高 1.03°C ,溪洛渡坝前8月至次年4月升高 1.38°C ,溪洛渡水文站10月至次年4月升高 0.95°C 。沿程各断面最低水温升高 $0.67\sim 1.36^{\circ}\text{C}$,年内水温极差多数断面降低 $0.99\sim 3.10^{\circ}\text{C}$ 。此外,受库区调蓄影响,各监测断面最低水温出现时间较蓄水前滞后 $4\sim 26\text{d}$ 。

整体而言,梯级水库群蓄水运行后,库区良好的热容量调节能力改变了溪洛渡库区的水温时空分布特征,削弱了沿程水温的季节性波动幅度,增强了水温的时空稳定性。这种温度缓冲作用减缓了环境变化对水温的影响,特别是在低温期显著改善了下游河段的水温条件。

2.3 库区下泄水温的变化过程

溪洛渡水文站位于溪洛渡大坝下游约 3 km 处,受溪洛渡大坝下泄水温的直接影响,其水温可以代表溪洛渡库区出库水温特征。图6为溪洛渡水文站2016年8月至2024年7月的月均水温和季节平均水温的变化过程。表3为2016—2024年溪洛渡水文站水温统计值。

乌东德和白鹤滩水库蓄水运行后,库区热分层调节机制改变了下泄水温特征,水库蓄水后储存夏季高温期的热量,并在秋冬季释放,表现为蓄水后(运行期III)冬季平均水温(17.72°C)较蓄水前(运行期I)的平均下泄水温(15.79°C)升高了 1.93°C 。

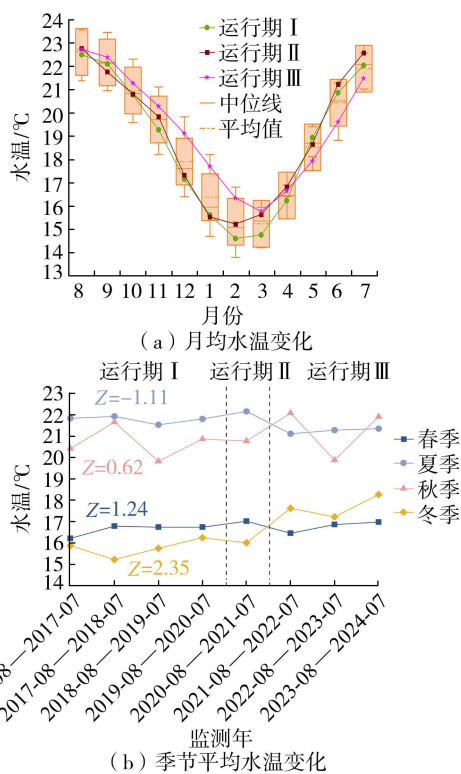


图6 2016—2024年溪洛渡水文站水温变化

冬季平均水温的 Z 值为 2.35 ,表明在 0.05 的显著性水平下冬季平均水温呈显著升温趋势。运行期I的秋季平均水温为 20.70°C ,运行期III的秋季平均水温较运行期I升高了 0.60°C 。

梯级水库蓄水的另一影响表现为,冬季库区储存的低温水使得次年春末夏初下泄水温偏低,下泄水温过程出现滞后化和平坦化特征。运行期III的夏

表3 2016—2024年溪洛渡水文站水温统计值

运行期	时间	年平均水温/℃	最低月均水温/℃	最低日均水温/℃	最低日均水温出现时间
I	2016-08-01—2017-07-31	18.60	14.21		
	2017-08-01—2018-07-31	18.91	13.80		
	2018-08-01—2019-07-31	18.12	13.60		
	2019-08-01—2020-07-31	18.92	14.94	14.65	2020-03-01
II	2020-08-01—2021-07-31	19.00	15.23	15.04	2021-02-11
	2021-08-01—2022-07-31	19.33	15.62	15.41	2022-03-12
III	2022-08-01—2023-07-31	18.82	15.72	15.45	2023-03-08
	2023-08-01—2024-07-31	19.64	15.95	15.72	2024-03-21

季平均水温(21.26℃)较运行期 I (21.78℃)降低了0.52℃,较运行期 II (22.17℃)降低了0.91℃。与秋冬季相比,夏季水温显著升高,但受汛期大流量和库区消落影响,高温水体在库区滞留时间较短,水温调节效应相对较弱。经 M-K 趋势分析,夏季平均水温的 Z 值为-1.11,未达到 0.05 显著性水平检验。由表 3 可见,运行期 III 3 年中最低日均水温的出现时间较运行期 I 平均滞后约 12 d。

2.4 梯级水库蓄水影响

上游梯级水库蓄水运行改变了下游库区的入库水温和流量过程,对溪洛渡库区水温时空分布产生累积影响。该影响主要通过热分层调节机制实现,表现为 3 个方面的变化特征:库区热分层结构演变、下泄水温平坦化和下泄水温滞后化。

2.4.1 库区热分层结构演变

根据溪洛渡坝前 2019—2024 年垂向水温分布结果可知,上游梯级水库运行影响了下游库区热分层结构。乌东德水库蓄水初期(运行期 II),热分层持续时间由蓄水前的 165 d 延长至 194 d,表底层平均温差由 0.93℃ 增至 0.98℃;白鹤滩水库蓄水后(运行期 III),热分层持续时间逐年缩短(由首年 204 d 降至第二年的 198 d 再降至第三年的 184 d),表底层平均温差进一步增大(最高达 2.67℃),热分层稳定指数峰值由蓄水前的 2.52 m⁻¹ 增至 3.71 m⁻¹,表明上游水库调蓄作用增强了热分层稳定性。运行期 III 的分层起始时间较运行期 I 滞后了 13 d,年均 VTG 由运行期 I 的 0.50℃/m 减小至白鹤滩蓄水后(运行期 III)第一年的 0.45℃/m、第二年的 0.38℃/m 及第三年的 0.34℃/m。

库区热分层的季节演变规律表现为:蓄水期受气温下降影响,上游低温水与库区原有高温水体混合,库区水温随之下降;消落期气温回暖,上游干支流的水温开始回升,入库水温介于表层与底层水温之间,同时水库水位持续下降,库区水体热缓冲效应减弱;汛期入库高温水与库区底层低温水形成显著垂向温差,随着底层低温水持续下泄,新汇入的高温水体不断累积,温跃层位置逐渐下移;秋冬季表层水

温降低,垂向掺混促使下层水温相应升高,垂向温差缩小,水体趋于同温状态。由于上游乌东德和白鹤滩梯级水库投产运行时间较短,其对下游库区垂向水温结构的长期影响仍需持续监测。

2.4.2 下泄水温平坦化

水库蓄水运行后吸收和储存大量热能,对外界温度波动起到缓冲作用,能够有效减缓水温的剧烈波动,使得溪洛渡下泄水温呈现“秋冬高春夏低”的新型变化趋势。由于水库巨大的热容量,夏季蓄积的高温水体降温缓慢,在秋冬季仍能持续释放热量,导致秋冬季下泄水温明显升高。白鹤滩水库蓄水后冬季平均水温(17.72℃)较蓄水前升高 1.93℃,M-K 趋势分析显示冬季平均水温呈显著升温趋势($Z=2.35, p<0.05$);秋季平均水温也从蓄水前的 20.70℃ 升高至 21.30℃。冬季滞留库区内的低温水体在次年春夏季下泄,使得夏季下泄水温较蓄水前降低 0.53℃。

水库蓄水增强了库区水体的掺混作用,促进了热量在不同深度间的传递,促使垂向水温分布趋于均匀化,从而降低了下泄水体温度的年内变化幅度,表现为高温降低、低温升高,年内极值变幅逐渐减小,水温变化曲线趋于平坦化。乌东德水库蓄水前下泄水温年内极差为 8.55℃(最高值 22.89℃,最低值 14.34℃);白鹤滩水库蓄水后第一年水温极差降至 8.50℃(最高值 23.90℃,最低值 15.40℃),降幅 0.6%;至蓄水后第三年水温极差进一步缩小至 7.60℃(最高值 23.32℃,最低值 15.72℃),降幅达 11.1%,表明下泄水温的平坦化程度随时间推移逐渐增强。

2.4.3 下泄水温滞后化

梯级水库蓄水运行后,水深增加使水体热容量大幅提升,水体对热量的吸收和释放过程变得更加缓慢,导致水温对气象条件的响应滞后于天然河道,下泄水温变化出现滞后化,蓄水后水温变化曲线相对于天然河道产生时序偏移,最低水温出现时间滞后。乌东德水库蓄水前溪洛渡水文站最低日均水温出现在 3 月 1 日,而乌东德和白鹤滩水库蓄水后,最

低日均水温出现时间总体呈滞后趋势:蓄水第一年推迟至3月12日,第二年略有提前至3月8日,第三年进一步推迟至3月21日前后。统计分析表明,蓄水三年来最低水温出现时间较蓄水前平均滞后约12d。

3 结论

a. 梯级水库蓄水运行通过库区热分层调节机制,改变了下游库区垂向水温结构,增强了热分层稳定性。热分层结构呈现春季形成,夏季达到稳定,秋冬季消失的周期性特征。白鹤滩水库蓄水后溪洛渡水库热分层持续时间由165d增加至195d(3年平均),垂向温度梯度降低,而热分层稳定指数峰值由蓄水前的 2.52 m^{-1} 增至 3.71 m^{-1} ,且分层稳定性随梯级数量增加而增强。

b. 梯级水库蓄水后具有良好的水温缓冲性,下游水温呈现“秋冬高春夏低”的新型变化趋势,蓄水增强了库区水体掺混,降低了下泄水温的年内变幅,水温变化趋于平坦化,且平坦化程度逐年增强。入库水温夏季均值降低 $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季升高 $2.64\text{ }^{\circ}\text{C}$,年较差减小7.78%,季节水温极值趋中移动;出库水温夏季均值降低 $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季升高 $1.93\text{ }^{\circ}\text{C}$,蓄水3年后年内极值变幅降低0.6%~11.1%。

c. 梯级水库蓄水后水体热容量大幅提升,下泄水温相对于天然河流出现明显滞后。从溪洛渡库尾至坝下水文站,最低水温出现时间较蓄水前滞后4~26d,蓄水3年来溪洛渡水文站最低水温出现时间较蓄水前平均滞后约12d。

参考文献:

[1] Boota M W, Soomro S E H, Xia Haoming, et al. Distribution and bioaccumulation of trace elements in two *Cyprinidae* fish species in the Indus river, Pakistan, including the impact of hydraulic structure on macroinvertebrates' biodiversity [J]. Environmental Research, 2024, 252: 118882.

[2] Soomro S E H, Shi Xiaotao, Guo Jiali, et al. Effects of seasonal temperature regimes: does *Cyprinus carpio* act as a health hazard during the construction of Suki Kinari hydropower project on Kunhar River in Pakistan? [J]. Science of the Total Environment, 2024, 907: 168023.

[3] 孙晓娟,余真真,左其亭,等. 水沙调控影响下小浪底水库水温模拟与演变特性[J]. 水资源保护, 2026, 42(1): 162-172. (Sun Xiaojuan, Yu Zhenzhen, Zuo Qiting, et al. Simulation and evolution characteristics of water temperature in the Xiaolangdi Reservoir under influence of water-sediment regulation [J]. Water Resources

Protection, 2026, 42(1): 162-172. (in Chinese))

[4] 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): 247-256. (Hao Haoxin, Yang Xia, Yang Mengfei, et al. Impacts of the cascade reservoirs of Jinshajiang River on water temperature and fish spawning time [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(1): 247-256. (in Chinese))

[5] 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 Jingqiao, et al. Study on the spawning period of typical fishes in the lower reaches of Jinsha River under the influence of water temperature change [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 50-55. (in Chinese))

[6] Lu Shibao, Shang Yizi, Li Wei, et al. Economic benefit analysis of joint operation of cascaded reservoirs [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 179: 731-737.

[7] Sun Qiao, Wang Jigan, Zhang Jie, et al. Selecting reservoir reconstruction schemes from an ecological-economic trade-off perspective: model building and case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376: 134183.

[8] Shi Jianchao, Wang Lianxiang, Yang Yongrui, et al. A case study of thermal and chemical stratification in a drinking water reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2022, 848: 157787.

[9] Wang Li, Liu Jiarui, Bao Zhen, et al. Predictable shifts in diversity and ecosystem function in phytoplankton and zooplankton communities along thermocline stratification intensity continua [J]. Science of the Total Environment, 2024, 912: 168981.

[10] Madyouni H, Magermans P, Benabdallah S, et al. Simulation of thermal stratification and water temperature dynamics in the Joumine reservoir (Tunisia) [J]. Ecological Informatics, 2025, 86: 103012.

[11] Castrillo M, Aguilar F, García-Díaz D. A data-driven approach for the assessment of the thermal stratification of reservoirs based on readily available data [J]. Ecological Informatics, 2024, 82: 102672.

[12] Zhao Wenyan, Zhang Tao, Li Jianhong, et al. Spatio-temporal variability of the reservoir thermocline: insights from monitoring data and numerical modelling [J]. Hydrological Processes, 2025, 39(4): e70109.

[13] He Chunshan, Zhang Zhiguang, Wei Yuanqin, et al. The impact of cascade reservoirs development on the water temperature of a river basin: from the perspective of field data monitoring and historical data analysis [J]. River Research and Applications, 2025, 41(6): 1228-1241.

(下转第139页)

- al. Joint optimal operation of cascade reservoirs considering forecast uncertainty[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(4): 67-75. (in Chinese)
- [21] 钟加星,董增川,孟金玉,等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(6): 30-37. (Zhong Jiaying, Dong Zengchuan, Meng Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(6): 30-37. (in Chinese))
- [22] 李继清,龙健,刘洋. 基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(1): 1-10. (Li Jiqing, Long Jian, Liu Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(1): 1-10. (in Chinese))
- [23] Pan Hong, Luo Zhengliang, Hang Chenyang, et al. Optimization of load distribution method for hydropower units based on output fluctuation constraint and double-layer nested model[J]. *Mathematics*, 2024, 12(5): 662.
- [24] 徐刚,张侃,韦能. 市场环境下梯级电站厂间-厂内负荷分配模型[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(7): 46-56. (Xu Gang, Zhang Kan, Wei Neng. Inter-plant and in-plant load allocation model for cascade hydropower stations under power market [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(7): 46-56. (in Chinese))
- [25] 纪昌明,马皓宇,李传刚,等. 基于可行域搜索映射的并行动态规划[J]. *水利学报*, 2018, 49(6): 649-661. (Ji Changming, Ma Haoyu, Li Chuangang, et al. Research on parallel dynamic programming based on feasible region search mapping [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(6): 649-661. (in Chinese))

(收稿日期:2025-07-11 编辑:俞云利)

(上接第 109 页)

- [14] Mihailova P, Traykov I, Tosheva A, et al. Changes in biological and physicochemical parameters of river water in a small hydropower reservoir cascade [J]. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2013, 19(2): 286-289.
- [15] 任实,刘亮,张地继,等. 溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库水温分布特性[J]. *人民长江*, 2018, 49(3): 32-35. (Ren Shi, Liu Liang, Zhang Diji, et al. Research on water temperature distribution in Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoirs [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(3): 32-35. (in Chinese))
- [16] 於孟元,陈孝兵,薛敬阳,等. 金沙江下游水电站梯级开发对下游水温的影响[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(5): 65-71. (Yu Mengyuan, Chen Xiaobing, Xue Jingyang, et al. Influence of cascade hydropower construction on water temperature downstream of Jinsha river [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024, 41(5): 65-71. (in Chinese))
- [17] 胡光洋,杨中华,白凤朋,等. 金沙江下游梯级水电开发引起的水温累积效应分析[J]. *湖泊科学*, 2025, 37(1): 293-303. (Hu Guangyang, Yang Zhonghua, Bai Fengpeng, et al. Water temperature's cumulative effect induced by the construction of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(1): 293-303. (in Chinese))
- [18] 程帅,左新宇,黄蕙,等. 溪洛渡、向家坝库区及坝下水温分布特性及成因分析[J]. *水利水电快报*, 2019, 40(8): 35-39. (Cheng Shuai, Zuo Xinyu, Huang Hui, et al. Characteristics and causes analysis of water temperature distribution in the reservoir areas and downstream of Xiluodu and Xiangjiaba dams [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2019, 40(8): 35-39. (in Chinese))
- [19] 戴凌全,张青森,任玉峰,等. 来流变化条件下溪洛渡水库生态调度期水温分层特性研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(5): 132-139. (Dai Lingquan, Zhang Qingsen, Ren Yufeng, et al. Water temperature stratification characteristics of Xiluodu Reservoir in ecological regulation period under the condition of inflow change [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(5): 132-139. (in Chinese))
- [20] 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]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(9): 143-155. (Yang Yu, Jiang Dingguo, Liang Lili, et al. Simulation of water temperature and analysis of stratified water intake effect of stoplog gates at Xiluodu Reservoir [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(9): 143-155. (in Chinese))
- [21] 曾康,黄廷林,马卫星,等. 暴雨径流对分层水库水质的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(9): 4979-4986. (Zeng Kang, Huang Tinglin, Ma Weixing, et al. Impact of storm runoff on water quality of one stratified reservoir [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(9): 4979-4986. (in Chinese))

(收稿日期:2025-05-08 编辑:雷燕)