

基于 CE-QUAL-W2 和 CMIP6 的溪洛渡库区 未来水温预测

王远坤¹, 王 森¹, 赵 磊¹, 尤 扬¹, 赵忠伟², 覃书豪¹, 张验科¹

(1. 华北电力大学水利与水电工程学院; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院)

摘要:为探究未来气候变化背景下溪洛渡库区水温分层结构的演变特征,基于 CMIP6 气候情景数据,提出了耦合 CE-QUAL-W2 与 LSTM 模型的水温模拟方法。该方法采用 LSTM 模型模拟水库入流边界条件,利用 CE-QUAL-W2 模型预测不同排放情景下溪洛渡库区水温分布,并引入施密特稳定性指数(SSI)与垂向温度梯度(VTG)两种指标,对水温分层结构的演变趋势进行预测分析。结果表明:不同排放情景下,溪洛渡水库 SSI 呈逐年增强趋势,分层稳定性逐渐提高;VTG 表现出初期上升、后期下降的变化特征;排放强度越高,表层水温的线性拟合优度和升温速率越大,水体对气候变暖的热响应更为显著;表层至底层水体对气候变化的响应程度逐渐减弱,但深层水体的长期热积累趋势仍不容忽视。

关键词:水温预测;水温分层结构;CE-QUAL-W2 模型;CMIP6;溪洛渡水库

Future water temperature prediction for Xiluodu Reservoir area based on CE-QUAL-W2 and CMIP6//Wang Yuankun¹, Wang Sen¹, Zhao Lei¹, You Yang¹, Zhao Zhongwei², Qin Shuhao¹, Zhang Yanke¹ (1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University)

Abstract: To investigate the evolution characteristics of the water temperature stratification structure in the Xiluodu Reservoir under future climate change, this study proposed a water temperature simulation method coupling the CE-QUAL-W2 model with the LSTM model based on CMIP6 climate scenario data. The LSTM model was used to simulate the reservoir inflow boundary conditions, enabling the CE-QUAL-W2 model to predict water temperature distribution in the Xiluodu Reservoir under different emission scenarios. In addition, the Schmidt stability index (SSI) and vertical temperature gradient (VTG) were introduced to predict and analyze the evolutionary trends of the water temperature stratification structure. The results show that, under different emission scenarios, SSI of the Xiluodu Reservoir exhibits an increasing trend over time, indicating a gradual enhancement of stratification stability, and VTG shows an initial increase followed by a subsequent decrease. Higher emission intensities correspond to greater linear fitting goodness and higher warming rates of surface water temperature, suggesting a more pronounced thermal response of the water body to climate warming. The response intensity to climate change gradually weakens from the surface layer to the bottom layer; however, the long-term heat accumulation trend in deep water remains non-negligible.

Key words: water temperature prediction; water temperature stratification structure; CE-QUAL-W2 model; CMIP6; Xiluodu Reservoir

水温是河流生态系统中关键的环境因子之一^[1],深刻影响各类物理、化学过程及水生生物的生长与繁殖^[2-4]。水库建设与运行对环境的影响具有长期性^[5-6],尤其在水温分布与局地气候变化方面尤为显著^[7-10]。水库调度引起的水温迟滞效应,扰乱了鱼类洄游与产卵规律,驱动微生物群落进行适应演化^[11-12],进而影响生态系统结构与功能稳定。

随着全球变暖,表层水温上升增大了上下层温差,减弱了垂向混合能力,进而影响溶解氧、营养盐及水质结构。因此,系统研究水库分层结构及坝前垂向水温的长期演变规律,对于理解水体热交换过程与制订生态调度策略具有重要意义。

在国内外水库水温模拟与分析领域,具有物理机制的水温模型应用较为广泛^[13-16]。Dugdale 等^[17]

基金项目:国家自然科学基金项目(52279064,52579010)

作者简介:王远坤(1981—),男,教授,博士,主要从事水资源与能源科学研究。E-mail:yuankunw@ncepu.edu.cn

通信作者:张验科(1983—),男,教授,博士,主要从事水资源配置与调度研究。E-mail:ykzhang2008@163.com

评述了基于物理过程的河流温度建模方法,指出了未来发展方向;Xiao 等^[18]揭示了三峡水库运行与气候变化在多时间尺度上共同驱动长江干流水温变化的机制;Syvitski 等^[19]结合热力学的沉积物传输方程,探讨了河流水温与沉积物之间的相互作用关系;Feng 等^[20]构建了 MIKE11-2DV 模型对芹村水库进行逐年水温变化模拟,评估了新建水库成库后的时序水温响应;Politano 等^[21]采用 Fluent 模型对麦克纳里坝前区温度结构进行了高精度模拟。其他研究主要关注梯级水库水温累积效应^[22-23],也有学者尝试利用遥感技术进行大尺度水温监测^[24-25],但该方法在垂向结构识别方面仍面临分辨率和精度的限制。近年来,部分学者对溪洛渡库区的水温变化特征进行了研究,如龙良红等^[26]利用 CE-QUAL-W2 模型模拟了溪洛渡库区水温变化,发现当前热分层具有明显的季节性;刘有志等^[27]利用 CE-QUAL-W2 模型对水库从初始蓄水至初期运行阶段的水温演化规律进行了模拟分析,揭示了狭长深水型水库典型的温度分层特征及其演变趋势;谢奇珂等^[28]研究了溪洛渡水库的水温垂向结构、日变化特征以及水面热通量的作用机制。

已有研究未考虑未来气候变化的影响,对水库库区在长期运行过程中的分层结构演变关注不足。本文结合数值模型和数据驱动模型及实测水温数据和多源边界条件提出溪洛渡库区水温模拟方法,采用 CE-QUAL-W2 模型预测溪洛渡库区水温,系统分析未来不同气候情景下水库热分层结构的长期演变特征,揭示库区水温的时空变化趋势,为溪洛渡水库生态调度策略的制订提供理论依据与技术支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

溪洛渡水电站位于四川省雷波县和云南省永善县交界的金沙江峡谷段,是中国第三、世界第四大水电站。该电站是金沙江下游 4 个梯级电站中的第三梯级,是国家“西电东送”骨干工程,在金沙江梯级大坝体系中发挥着极为重要的作用。电站以发电为主,兼具防洪、拦沙和改善下游航运条件等综合效益。溪洛渡水库采用双曲拱坝,其垂向水动力学特性有较强差异,而横向变化不明显,具有典型立面二维特性。水库坝顶高程 610 m,最大坝高 285.5 m,总库容约 126.7 亿 m^3 ,死水位 540 m,调节库容为 64.6 亿 m^3 ,可进行不完全年调节。正常蓄水位 600 m,库容可达 115.7 亿 m^3 ,库区长约 200 km,平均宽度约 700 m,属于典型的狭长式河道型水库^[29]。

1.2 数据来源

本文所需数据包括溪洛渡水库库区大断面地形资料、溪洛渡水库调度数据(2020 年)、溪洛渡水库入流水温数据(2020 年、2009—2012 年)、雷波气象站点观测数据(2020 年、2009—2012 年)、CMIP6 气象数据集(2026—2100 年)以及溪洛渡水库坝前垂向水温分布数据(2020 年)。CMIP6 气象数据集^[30-31]在国内已有诸多应用,本文选取了 4 种常用的大气环流模式,分别为中国科学院大气物理研究所的 FGOALS-g3、法国气候研究中心的 CNRM-ESM2-1、美国国家气候预测中心的 GFDL-ESM4 和德国气候计算中心的 MPI-ESM1-2-HR。为保证区域适用性,4 种模式的气象数据采用与雷波站位置匹配的溪洛渡库区气象数据均值,并通过常用降尺度变化因子法进行偏差订正。垂向水温分布数据来源于现场勘测;雷波气象数据来源于中国气象数据网;露点温度由气温和相对湿度计算得到;风速采用近地表 2 m 的速度;云量由当地理论日照时数和气象资料实际记录日照时数计算得到,取值 0~10,0 代表无云层遮蔽,10 代表全遮蔽。

2 研究方法

构建的库区水温模拟框架,包括两部分:①基于长短期记忆网络(LSTM)的数据驱动入流水温预测模型(LSTM 模型),用于建立气象因子与入流水温之间的非线性映射关系,并预测未来不同气候情景下的入流水温过程;②CE-QUAL-W2 模型,用于在给定入流、出流、水位、气象和入流水温等边界条件的基础上,模拟溪洛渡库区水动力过程、垂向水温分布及热分层结构。LSTM 模型为 CE-QUAL-W2 模型提供未来时期的入流水温边界条件;CE-QUAL-W2 模型则是本文开展库区水温分层结构预测的核心机理模型。

2.1 LSTM 模型构建与入流水温预测

LSTM 是一种特殊的循环神经网络,其核心思想是引入一个细胞单元状态和一组门控机制(包括遗忘门、输入门和输出门 3 部分),通过这些机制控制信息的流动,使得 LSTM 能够在每个时间步选择性地保留或遗忘信息,从而有效捕捉序列中的长期依赖关系。LSTM 模型已在水温模拟中运用并得到验证^[32-33]。研究表明,LSTM 模型对非线性时间序列数据的处理能力优于其他模型,能在考虑多种气象因子的情景下充分捕捉水温随时间的复杂变化。

为实现对未来入流水温的合理预测,基于溪洛渡水库 2009—2012 年日尺度气象数据(气温、太阳辐射、风速等)及实测入流水温数据,构建 LSTM 模

型。其中,2009—2011年数据用于模型训练,2012年数据作为独立验证集。测试结果表明,模型表现出较高精度,决定系数(R^2)达到0.97,纳什效率系数(NSE)为0.95,说明构建的LSTM模型能够有效刻画气象驱动条件下入流水温的时序变化规律。在此基础上,结合CMIP6多模式气象数据集,采用训练完成的LSTM模型预测未来时期(2026—2100年)的入流水温,为后续CE-QUAL-W2模型的模拟提供关键边界条件。

2.2 CE-QUAL-W2 模型

本文采用CE-QUAL-W2模型预测溪洛渡库区未来水温,该模型在我国西南地区已有诸多应用^[34-35]。CE-QUAL-W2模型所需的主要数据为地形、出入流边界(上下游流量、上游来水水温、水库库区初始水温、水库初始水位、水表边界及库底边界)和气象资料(气温、露点温度、风速、风向、云量、太阳辐射等)。

2.2.1 地形与边界条件

由于分支流量占比远小于库区干流,故建立的溪洛渡水库CE-QUAL-W2模型仅考虑干流。溪洛渡水库库区长度约为200 km,网格划分为纵向159段(包含段首尾2个虚拟断面),垂向121层(包含表底2个虚拟层),段长为50~3 500 m,层高统一为2 m。对坝前主要研究区域网格断面数量进行加密处理,网格顶部适当高于正常蓄水位600 m。网格生成沿程纵剖面、坝前断面见图1。

均绝对误差(MAE)为0.6亿 m^3 ,NSE和 R^2 均大于0.99,说明模型地形概化情况良好,可用于后续水动力计算。利用CE-QUAL-W2模型模拟2020年库区水位变化情况,结果如图2所示。计算过程中引入分布式流量文件对年内水位变化进行了水量平衡,确保模型来水过程的变化情况和实际变化一致。水位计算结果RMSE为0.4 m,MAE为0.2 m,NSE和 R^2 均大于0.99,说明模型对水量模拟的效果良好。

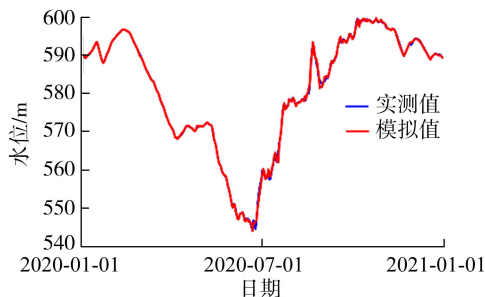


图2 水位过程曲线

Fig.2 Water level process curve

为确保CE-QUAL-W2模型计算过程的稳定性,采用最小时间步长为0.1 s,最大时间步长为100 s,计算过程中时间步长在范围内自动调整。对模型初始条件和计算参数进行设定:水体分支为1;水体类型为淡水;初始水位沿程不变,为年初水位(589.93 m);初始入流量采用年初来水量;初始水温沿垂向赋初值,为15℃;沉积物温度采用多年平均来水温度14.63℃;曼宁摩擦系数为0.04;界面摩擦系数为0.015;垂向湍流闭合算法采用湍流动能算法;底部热交换系数为0.3 W/($m^2 \cdot s$);纵向涡流黏度和纵向涡流扩散系数为1.0 m^2/s ;经率定的风遮蔽系数和光遮蔽系数分别为0.7、1.0;纯水消光系数为0.45。

水体表面热交换是影响水温分布和温跃层形成的关键因素,包含太阳短波辐射、大气长波辐射、水面蒸发、显热对流、温度梯度引起的热传导过程。利用上游实际入流作为CE-QUAL-W2模型的上游入流边界条件,根据实际情况设置下游流出边界条件,泄水高程依据实际参数确定。

2.2.2 模型验证

利用2020年每月中旬的坝前垂向水温实测分布与CE-QUAL-W2模型模拟结果进行对比(图3),验证CE-QUAL-W2模型对水温的模拟效果。从图3可以看出,垂向水温模拟效果良好,平均RMSE、MAE分别为0.37℃和0.27℃,说明CE-QUAL-W2模型能够较为精确地模拟水库水温分布。最大RMSE和MAE分别为0.78℃和0.58℃,出现在7月中旬;最小RMSE和MAE分别为0.06℃和

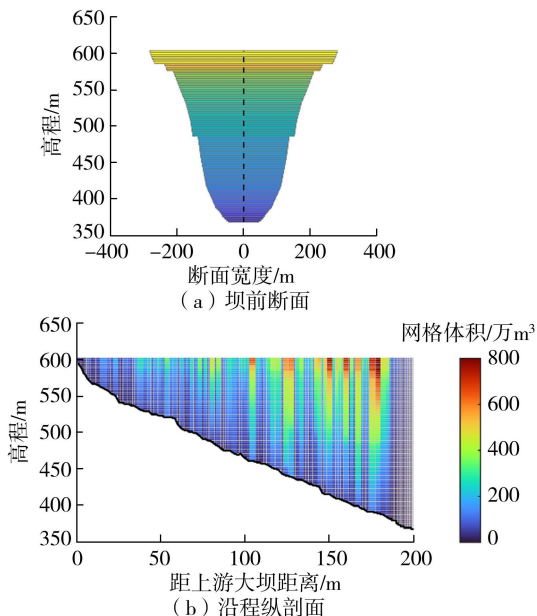


图1 溪洛渡水库网格划分

Fig.1 Grid division of Xiluodu Reservoir

由CE-QUAL-W2模型计算得到的溪洛渡水库库容-水位曲线与实测库容-水位曲线对照良好,库容计算结果的均方根误差(RMSE)为0.7亿 m^3 ,平

0.05℃,出现在2月中旬。7月在100m左右水深处水温模拟结果有一定偏差(图3(d)),这可能是由于夏季汛期库区水位波动幅度大,为控制库区水位使用动态泄洪方式进行深孔泄洪,此外,模型设置的定点式取水口高程,未能精确考虑7—8月深孔低温水下泄而产生一定偏差。

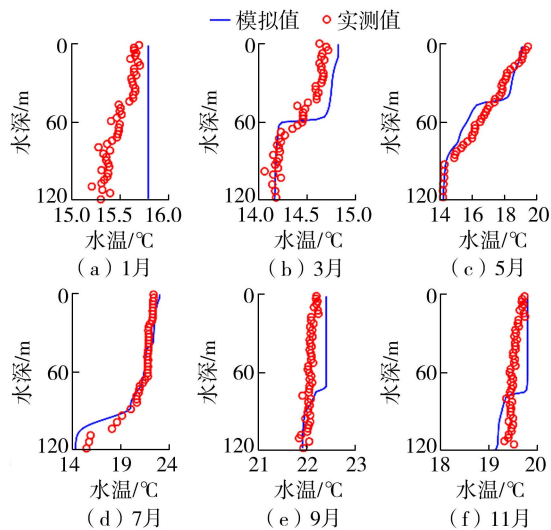


图3 模拟与实测水温对比

Fig. 3 Comparison between simulated and observed water temperatures

2.3 模型评价指标

选取 RMSE、MAE、 R^2 和 NSE 作为水温模拟精度的评价指标。MAE 与 RMSE 数值越低,表示模型模拟效果越好。 R^2 通过比较模型预测值与实际值之间的差异来评估模型的解释能力,NSE 可以清晰地反映模型对整个时间序列趋势的模拟能力,二者数值越大,表示模型解释能力越强,对整个时间序列趋势模拟能力越强。

采用施密特稳定性指数 (Schmidt stability index, SSI) 和垂向温度梯度 (vertical temperature gradient, VTG) 作为水温分层特性的评价指标。SSI 表示将分层水体完全混合为等温状态所需的能量;VTG 表示单位深度水温变化率,反映水体不同深度的水温变化速率,用于表征水温变化的陡峭程度。SSI 和 VTG 能够有效描述水体热分层的稳定性和变化趋势,尤其适用于分析气候变化情景下热分层结构的演变。

3 结果与分析

3.1 入流边界预测

为获取 CE-QUAL-W2 模型在未来不同排放情景下的入流边界条件,选用 LSTM 模型捕捉溪洛渡水库入流水温与气象因子的映射关系,结果如图4所示。从图4可以看出,未来不同排放情景下的入

流水温均呈现上升趋势,且升温幅度与温室气体排放强度密切相关。在低排放情景(SSP1-2.6)下,年均水温整体升幅最小,相较于2026年,2100年升高不足0.2℃,最大峰值差不超过0.4℃,整体表现为较为平稳的波动状态。中低和中高排放情景(SSP2-4.5与SSP3-7.0)下,入流水温的升温幅度明显高于低排放情景,并在2050年前后开始出现显著分化,随后呈现持续稳定的上升趋势。高排放情景(SSP5-8.5)下的升温最为剧烈,自2040年起升温速率显著加快,至2100年入流水温较初始时期升高超过1.2℃,平均每10a升温约0.16℃,反映出入流水温对气候变暖的高度敏感性。此外,各情景下年际波动特征存在差异。SSP1-2.6情景下的年均水温波动幅度较大,而SSP5-8.5情景下则相对较小,表现出以长期升温趋势为主导的特征。

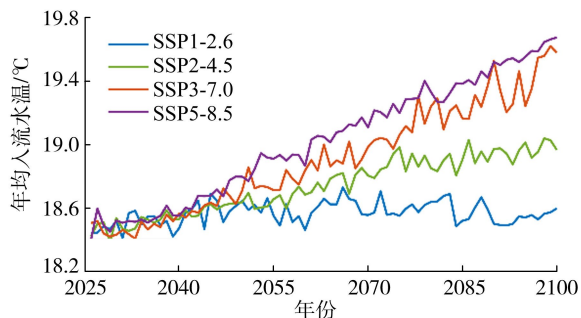


图4 不同排放情景下年均入流水温

Fig. 4 Annual average inflow water temperature under different emission scenarios

3.2 未来情景下溪洛渡水库坝前水温对比

利用构建的 CE-QUAL-W2 模型对未来溪洛渡水库区水温进行模拟,低排放和高排放两种情景下的模拟结果如图5和6所示。由图5可知,低排放情景下,低水位典型日各年份均表现出明显的热分层结构(图5(a)~(c)):表层水温显著高于底层,温跃层清晰可见,2030—2060年温跃层无明显变化,大致位于高程500m处,厚度约为20m;随着表层水温的热积累,2060—2090年库区上游温跃层出现些许下移,但整体厚度无明显变化。高水位典型日水体趋于垂向混合状态,年内热分层基本消失,水温整体垂向变化幅度维持在较小的状态;未来库区水体热分层结构没有明显变化,分层持续时间与温跃层厚度也基本不变,对于库区的水生态系统稳定性不会造成较大的负担(图5(d)~(f))。

由图6可知,高排放情景下,低水位典型日热分层现象在各年份均表现明显(图6(a)~(c))。2030—2060年,表层水温随年份推移显著上升,从2030年的约23℃上升至2060年的25℃以上,深层水温变化不显著;温跃层厚度略有增加,主要表现为

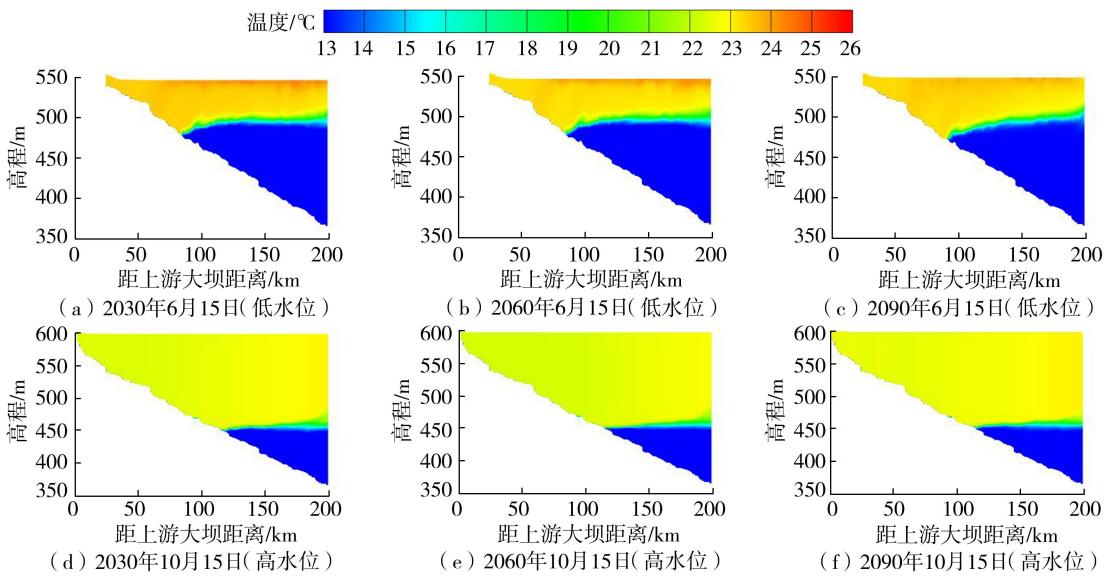


图5 低排放情景下库区水温结构

Fig. 5 Water temperature structure in reservoir area under low-emission scenario

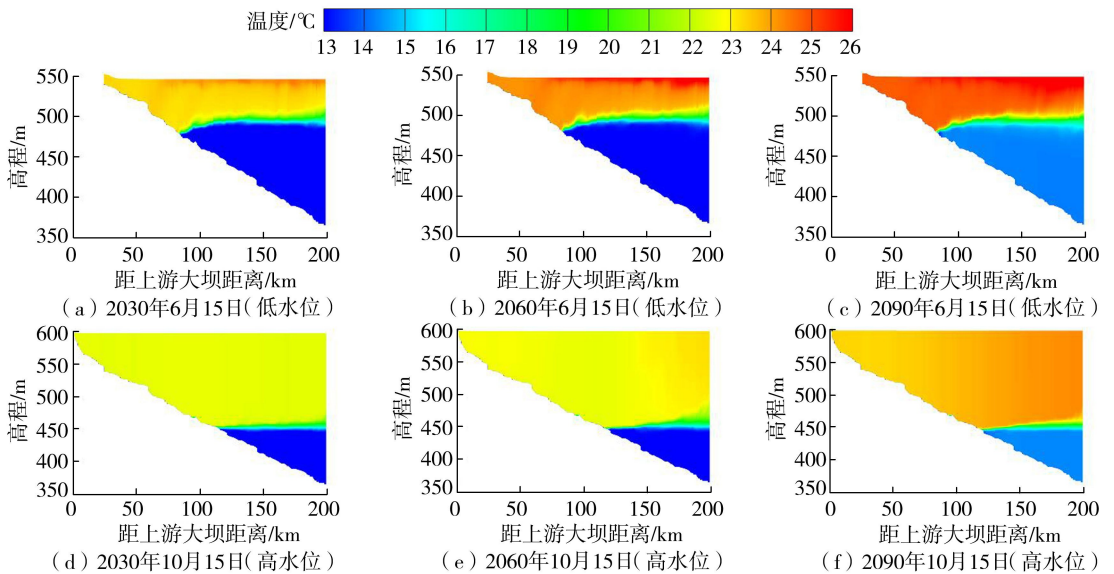


图6 高排放情景下库区水温结构

Fig. 6 Water temperature structure in reservoir area under high-emission scenario

浅层水体与原温跃层之间出现新的温度界线。2060—2090年水温整体上升幅度明显,浅层水体升温幅度更加剧烈,受气温影响严重的表层高温区域厚度激增(坝前区域最厚可达30 m);伴随入流水温的上升(图4),深层水体滞后升温的现象逐渐呈现,与模拟初期相比升温近 2°C ;随着下层低温水区域范围收缩,温跃层厚度随时间推移增加,位置逐渐向深层移动,高程下降至480 m以下。2030—2090年高水位典型日水体均接近全混合,库区趋于同温,入流水温从2030年的约 18°C 上升到 22°C 以上,水温整体变化显著;未来库区水体热分层结构表现出清晰演化特征,表层水温持续升高,深层水温呈现缓慢上升趋势,典型分层时期温跃层厚度增加,分

层界限向深层迁移,库区水生态系统稳定性受到较大影响(图6(d)~(f))。

低排放情景下库区水温分层结构基本保持稳定,主要是由于气候影响较弱,表层增温幅度有限,深层水体热量积累不足,因而温跃层的位置与厚度变化不显著。而在高排放情景下,表层受气温升高和入流加热的共同作用呈现快速升温,深层水体升温滞后,导致上下层温差持续加大,分层强度增强,温跃层逐渐加厚并向深层迁移。

3.3 水温变化趋势

不同排放情景下溪洛渡水库坝前表层水温的年均变化趋势及拟合回归关系见图7(图中不同颜色的线为拟合回归线,色块区域为95%置信带。图9

同)。4种排放情景下表层水温均呈上升趋势,且升温速率与排放强度正相关。在SSP1-2.6情景下,表层水温虽有轻微上升,但年际波动较大,长期趋势性不显著,水温基本稳定在约18.5℃;而在SSP5-8.5情景下,升温最为显著,到2100年水温可达20℃左右。从增幅来看,随着排放强度的增大,表层水温上升速率由SSP1-2.6情景下的0.0021℃/a增加至SSP5-8.5情景下的0.0291℃/a,线性拟合优度 R^2 也由0.187大幅提升至0.985,表明高排放情景下表层水体热响应更为剧烈,年际波动性相对减弱,升温趋势具有更强的确定性。

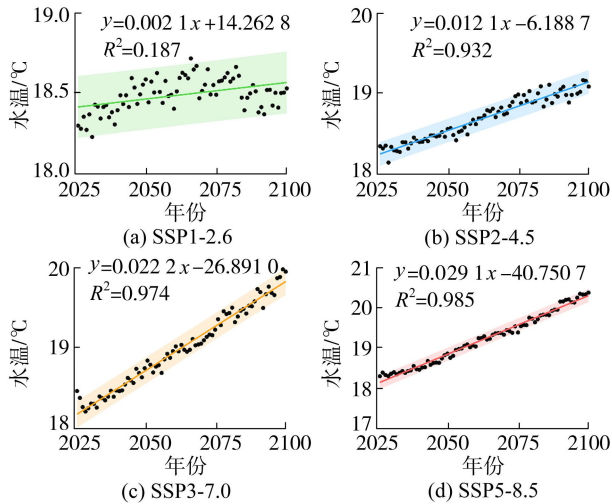


图7 坝前表层水体年均水温变化过程

Fig. 7 Annual variation of surface water temperature in front of dam site

在4种典型排放情景下,库区不同深度水体年均水温均呈逐年上升趋势(图8,图中色块区域表示对应排放情景下,年均最值水温波动区间)。21世纪中期之后,不同排放情景间差异逐渐扩大,且随水深增加,年均水温波动区间逐渐减小。进一步分析表明,浅层水体(0~30 m)对气候变化最为敏感,在低排放情景下升温不足0.2℃,而在高排放情景下升温近2℃,波动幅度显著加大。中层水体(>30~60 m)表现出一定滞后与缓冲效应,但在高排放情景

下升温幅度仍超过1.7℃。深层水体(>60~100 m)年均升温最小,仅0.1~1.4℃,但在高排放情景下水温依然呈现持续上升趋势,长期热积累使2100年底层温度明显高于其他情景。上述结果表明,不同深度水体对气候变化的响应存在显著差异,浅层升温快、波动大,中层响应滞后、波动适中,深层积热缓慢,但趋势明确。此外,高排放情景下的长期气候变暖将进一步强化库区的热分层结构,并可能对水库的生态稳定性和运行调度模式提出更高的挑战。

3.4 水库水温分层指数

3.4.1 SSI

在4种典型排放情景下,溪洛渡水库坝前断面SSI年际变化趋势及拟合回归关系如图9所示。整体上,SSI随年份增长呈现上升趋势,但增长幅度在不同情景之间存在明显差异。在SSP1-2.6情景下,SSI增长速率最小;在SSP2-4.5和SSP3-7.0情景下,SSI增长速率明显增加。在SSP5-8.5情景下,回归方程斜率为0.0082 kJ/(m²·a),表明在高排放情景下,水库坝前热分层稳定性增强。值得注意的是,除低排放情景外,其他排放情景下SSI增长速率相差较小,这一现象反映出深水水库SSI非线性增长。随着水体整体升温,温度梯度年际变化速率趋于稳定,高排放情景下气候的极端扰动、入流水温与气温对水体的共同作用限制了SSI增长速率进一步增大,最终表现为SSI增长速率的趋同性。

3.4.2 VTG

在4种典型排放情景下,VTG的长期演变总体呈先上升、后下降、最终趋于稳定的趋势,但可分为两种演变形态(图10)。在SSP1-2.6和SSP2-4.5两种较低排放情景下,由于全球气温升幅较小,表层水体升温相对缓慢,模拟初期VTG的变化幅度较小。随着水库水温的热积累,底层水温逐渐升高,同时表层水温持续上升,导致一定阶段内VTG波动增强。但由于库底水温滞后性升温的持续推进,表底层之间的温差逐渐减小,VTG整体呈下降趋势,并在模拟末期趋于稳定。对于SSP3-7.0和SSP5-8.5

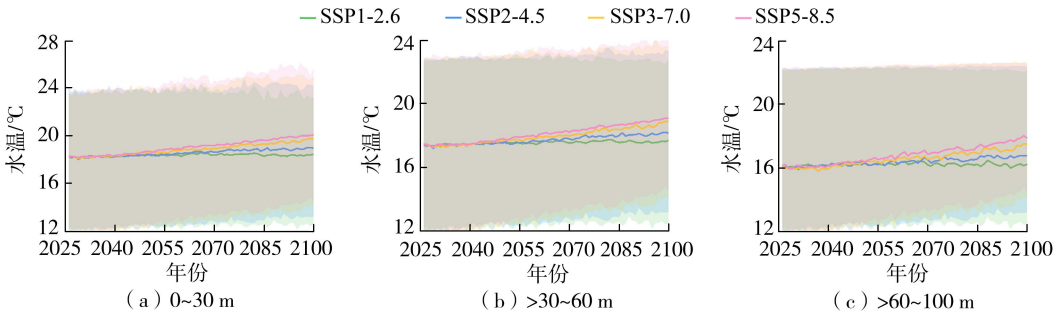


图8 不同深度水体年均水温变化过程

Fig. 8 Annual variation of water temperature at different depths

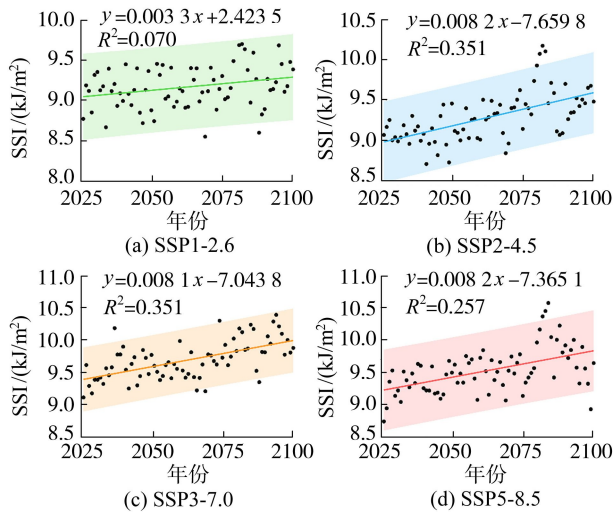


图9 坝前年均 SSI 值变化过程

Fig. 9 Variation of annual average SSI in front of dam site

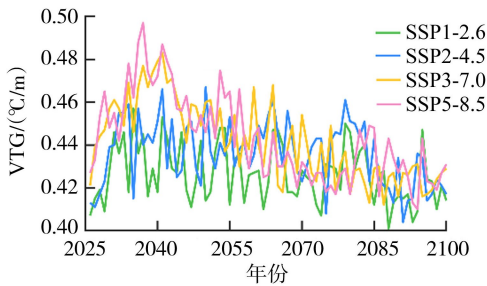


图10 坝前年均 VTG 变化趋势

Fig. 10 Trend of annual average VTG in front of dam site

两种较高排放情景,受全球显著升温驱动,表层水体在模拟初期迅速升温,导致 VTG 迅速上升并达到峰值。伴随着底层水温滞后性升高,表底层温差减小,导致温度梯度逐步减小,VTG 呈较为显著的下降趋势,并最终趋于稳定。这一演变特征表明,用于刻画水体垂向热结构的 SSI 和 VTG 之间并非简单的正相关关系^[36]。

SSI 是反映整个水柱密度分布稳定性的综合指标,能够累积气候变暖对分层的长期效应;而 VTG 则是瞬时局部温度差分量,对表层快速升温与深层滞后之间的差异较为敏感。二者共同揭示了分层稳定性增强、温度梯度趋缓的水库热分层演变机制。在气候变暖初期,表层升温快于深层,导致 VTG 上升;但随着深层逐渐受热,局部温差被削弱,VTG 出现下降,而 SSI 仍因整体温差的长期积累持续升高^[37]。这种热分层格局的演变不仅具有物理学意义,也对水生态系统产生深远影响,分层稳定性增强意味着底层缺氧和养分滞留风险加大,可能对下游水质与生态安全造成不利影响。因此,在未来气候变化背景下,应通过生态调度等措施,调控水库水温的分层结构,为流域生态环境保护与水资源管理提供科学支撑。

4 结论

a. 未来气候变化背景下,低排放情景下水温分层结构较为稳定;高排放情景下,夏季温跃层增厚,中心深度下移,分层结构变化显著,可能对水生态系统稳定性构成挑战。

b. 水温对气候变化的响应程度随深度增加而减弱,表现为水温上升趋势减缓,最值波动明显收缩。针对不同深度水体水温对气候变化响应的差异性,未来进行水生态调度时,应充分考虑深层水温的热积累效应,降低水温分层引发的水库水质恶化风险。

c. 低排放情景下年均 SSI 增长速率较小,VTG 整体变化幅度较弱,并在后期趋于稳定;中高排放情景下 SSI 持续升高,VTG 表现为前期上升、中后期下降并逐渐趋稳。未来溪洛渡库区整体热分层稳定性将增强,但局部垂向温度梯度在深层水体逐渐升温后可能有所减小。

参考文献:

- [1] 靖争,张爵宏,曹慧群,等. 水库水温研究进展及趋势[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(2): 52-59. (Jing Zheng, Zhang Juehong, Cao Huiqun, et al. Research progress and trends in reservoir water temperature [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(2): 52-59. (in Chinese))
- [2] Chen Qiuwen, Li Qinyuan, Lin Yuqing, et al. River damming impacts on fish habitat and associated conservation measures [J]. Reviews of Geophysics, 2023, 61(4): e2023RG000819.
- [3] Ouellet V, St-Hilaire A, Dugdale S J, et al. River temperature research and practice: recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2020, 736: 139679.
- [4] Djurichkovic L D, Donelson J M, Fowler A M, et al. The effects of water temperature on the juvenile performance of two tropical damselfishes expatriating to temperate reefs [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 13937.
- [5] Ahmad S K, Hossain F, Holtgrieve G W, et al. Predicting the likely thermal impact of current and future dams around the world [J]. Earth's Future, 2021, 9(10): e2020EF001916.
- [6] 黄德春,朱宇昂,张修忠,等. 基于多理论视角的我国现代化水库运行管理矩阵建设研究[J]. 水利经济, 2025, 43(3): 84-93. (Huang Dechun, Zhu Yuang, Zhang Xiuzhong, et al. Research on the construction of modern reservoir operation and management matrix in China from

- multiple theoretical perspectives[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2025, 43(3):84-93. (in Chinese)
- [7] Li Jiaxian, Zhang Shulei, Obulkasim O, et al. Impact of reservoirs on local precipitation-temperature coupling relationships[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(14):e2023GL103453.
- [8] Zhao Yiyang, Liu Suning, Shi Haiyun. Impacts of dams and reservoirs on local climate change: a global perspective [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(10): 104043.
- [9] 陈求稳, 张建云, 莫康乐, 等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 793-810. (Chen Qiuwen, Zhang Jianyun, Mo Kangle, et al. Evaluation methods and regulation measures for aquatic eco-environmental effects of hydropower projects [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 793-810. (in Chinese))
- [10] 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 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))
- [11] 胡鹏, 杨泽凡, 王浩, 等. 满足不同鱼类产卵需求的水库分组生态调度技术[J]. *中国科学: 技术科学*, 2025, 55(6): 955-967. (Hu Peng, Yang Zefan, Wang Hao, et al. A grouped ecological operation technique to accommodate the spawning needs of different fish species [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2025, 55(6): 955-967. (in Chinese))
- [12] Ji Li, Zhang Huayong, Wang Zhongyu, et al. Temperature alters bacterial community structure in sediment of mountain stream [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 31159.
- [13] 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. Ecological regulation strategies for reservoirs to alleviate thermal regime disturbance [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(1): 134-143. (in Chinese))
- [14] 徐凡奇, 赵阳, 王兴平, 等. SDSM 在黄河流域水源涵养区降水和气温降尺度预报中的适用性[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(2): 19-28. (Xu Fanqi, Zhao Yang, Wang Xingping, et al. Applicability evaluation of SDSM in the downscaling forecast of precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(2): 19-28. (in Chinese))
- [15] Kim S K, Choi S U. Assessment of the impact of selective withdrawal on downstream fish habitats using a coupled hydrodynamic and habitat modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125665
- [16] He Wei, Wang Haiyang, Zhang Jian, et al. Diurnal variation characteristics of thermal structure in a deep reservoir and the effects of selective withdrawal [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 333: 117459.
- [17] Dugdale S J, Hannah D M, Malcolm I A. River temperature modelling: a review of process-based approaches and future directions [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 175: 97-113
- [18] Xiao Zijun, Sun Jian, Lin Binliang, et al. Multi-timescale changes of water temperature due to the three gorges reservoir and climate change in the Yangtze River, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110129.
- [19] Syvitski J, Cohen S, Miara A, et al. River temperature and the thermal-dynamic transport of sediment [J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 178: 168-183.
- [20] Feng Xinyue, Lu Baohong, Wang Meng, et al. Reservoir water temperature simulation and sensitivity analysis: a case study of the Qincun Reservoir in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 940: 173594.
- [21] Politano M, Haque M, Weber L J. A numerical study of the temperature dynamics at McNary Dam [J]. *Ecological Modelling*, 2008, 212(3/4): 408-421.
- [22] 肖洋, 姚晨欣, 张涛涛, 等. 交汇区水流结构对水温分布特征的影响机理[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(2): 1-11. (Xiao Yang, Yao Chenxin, Zhang Taotao, et al. Influence mechanisms of flow structure on water temperature distribution characteristics in junction areas [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(2): 1-11. (in Chinese))
- [23] 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. Analysis of cumulative water temperature effects induced by cascade hydropower development in the lower Jinsha River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(1): 293-303. (in Chinese))
- [24] 石希, 夏军强, 孙健. 基于热红外遥感影像的河流水温反演方法比较: 以长江上游流域为例 [J]. *湖泊科学*, 2022, 34(1): 307-319. (Shi Xi, Xia Junqiang, Sun Jian. Comparison of methods to derive river water temperature using thermal infrared imagery: a case study of the upper Yangtze River catchment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(1): 307-319. (in Chinese))
- [25] 马卫国, 王远坤, 陶家欣. 基于 MODIS 遥感影像的太湖表层水温演变及归因分析[J]. *水资源保护*, 2025, 41(6): 259-268. (Ma Weiguo, Wang Yuankun, Tao Jiabin. Study on evolution and attribution of Taihu Lake surface

- water temperature based on MODIS remote sensing images [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41 (6): 259-268. (in Chinese)
- [26] 龙良红,徐慧,鲍正凤,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. Temporal and spatial characteristics of water temperature in Xiluodu Reservoir[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(4): 79-89. (in Chinese))
- [27] 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. Water temperature evolution in a long and narrow reservoir from impoundment to the initial operation stage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51 (11): 1412-1422. (in Chinese))
- [28] 谢奇珂,刘昭伟,陈永灿,等. 溪洛渡水库水温日变化的测量与分析[J]. *水科学进展*, 2018, 29(4): 523-536. (Xie Qike, Liu ZhaoWei, Chen Yongcan, et al. Observation and analysis of diurnal water temperature variation in Xiluodu Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(4): 523-536. (in Chinese))
- [29] 唐玉川,张勇,赵忠伟,等. 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[J]. *水利水电科技进展*, 2026, 46(3): 102-109. (Tang Yuchuan, Zhang Yong, Zhao Zhongwei, et al. Analysis of water temperature variation trends in Xiluodu Reservoir area after impoundment of Wudongde and Baihetan reservoirs[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2026, 46(3): 102-109. (in Chinese))
- [30] 武传号,逯家宝,周君,等. 基于CMIP6多模式集合的中国洪水-热浪复合极端事件特征预测[J]. *水资源保护*, 2025, 41(3): 20-30. (Wu Chuanhao, Lu Jiabao, Zhou Jun, et al. Projection of compound flood-heatwave extreme events in China based on CMIP6 multi-model ensembles [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(3): 20-30. (in Chinese))
- [31] 鞠琴,马啸赞,刘艳丽,等. 基于秩评分方法的CMIP6全球气候模式对淮河流域降水和气温模拟能力评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(6): 12-20. (Ju Qin, Ma Xiaozan, Liu Yanli, et al. Evaluation of the ability of CMIP6 global climate models to simulate precipitation and temperature over the Huaihe River Basin based on a rank-scoring method [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(6): 12-20. (in Chinese))
- [32] 郑铁刚,吴茂喜,张迪,等. 基于改进长短期记忆网络模型的水库库区水温模拟[J]. *农业工程学报*, 2025, 41 (3): 144-153. (Zheng Tiegang, Wu Maoxi, Zhang Di, et al. Simulating water temperature in reservoir using improved LSTM model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41 (3): 144-153. (in Chinese))
- [33] 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. Thermal stratification characteristics and ecological effects in the headwater area of the Three Gorges Reservoir during different operation periods [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 34-42. (in Chinese))
- [34] 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. Selective withdrawal strategies and ecological responses in the Wudongde Reservoir [J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(2): 264-274. (in Chinese))
- [35] 任玉峰,胡光洋,杨中华,等. 溪洛渡水库分层取水对向家坝库区水温的影响分析[J]. *水电能源科学*, 2024, 42 (4): 128-132. (Ren Yufeng, Hu Guangyang, Yang Zhonghua, et al. Analysis of the effects of selective withdrawal from the Xiluodu Reservoir on water temperature in the Xiangjiaba Reservoir area [J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42 (4): 128-132. (in Chinese))
- [36] Hu Guangyang, Yang Zhonghua, Lu Jing, et al. Thermal response of deep monomitic reservoir under different selective withdrawal types [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 373: 123794.
- [37] Nikoo M R, Zamani M G, Vanda S, et al. Future projections of thermal and chemical stratifications in reservoir under the impact of climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 984: 179722.

(收稿日期:2025-09-05 编辑:施业)

