

张尚弘, 唐海云, 汪浩, 等. 基于 GEE 研究长江干流梯级大坝建设对河流水温的时空影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 263-275. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.020

ZHANG Shanghong, TANG Haiyun, WANG Hao, et al. Based on GEE to research the spatiotemporal impact of cascade dam construction on river water temperature in the upper reaches of Yangtze River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 263-275. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.020

基于 GEE 研究长江干流梯级大坝建设对河流水温的时空影响

张尚弘¹, 唐海云¹, 汪浩¹, 周扬¹, 唐彩红¹, 何红艳², 邢坤², 节永师²

(1. 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206; 2. 北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要:【目的】水温是影响河流水生态系统演变的关键要素, 其对生源物质转化、生物栖息与繁衍等物理、化学和生物过程起着重要作用。梯级水电开发阻隔了河流的连续性, 改变了河流水温沿程的传递性, 严重影响河流水温节律, 亟需开展梯级大坝建设前后河流水温沿程的演变规律的研究。【方法】基于 Google Earth Engine(GEE)平台, 利用 Landsat 系列遥感数据集, 通过大气辐射传输模型反演长江干流 2000—2020 年水体表面温度, 揭示长江干流梨园、阿海、金安桥等梯级水电站建设下表层水温的时空演变规律。【结果】结果表明, 建坝前梨园—观音岩段、乌东德—向家坝段、三峡库区段年均表层水温分别为 21.58 ℃、21.31 ℃和 17.79 ℃, 建坝后金沙江中游库区年均表层水温下降明显, 下降到 15.47 ℃, 其中旱季水温平均下降 5.43 ℃, 雨季平均下降 2.46 ℃, 坝下年均水温与自然河流水温接近, 且与周围实测气温相关性显著; 库区内水温呈现片段化分布, 各梯级大坝库首温差最大; 三峡库区表现出“滞冷”和“滞温”现象。遥感反演的数据与华弹、朱沱水文站点实测数据的纳什效率系数分别为 0.925 和 0.907, 均方根误差分别为 0.92 ℃和 1.24 ℃, 结果可靠性高。【结论】梯级大坝建设打破了河流水温连续性, 使河流水温传递效应显著减弱; 各库区库首及回水区域水温呈现显著相关, 但库区水温与坝下游泄水水温相关性较弱。遥感方法可有效反演河流表层水温, 为河流水温反演及流域水温管理提供方法支持和理论参考。

关键词: 河流水温; 梯级水电开发; Landsat 遥感卫星; Google Earth Engine; 水电站; 三峡水库; 水生态系统

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.020

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV697.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0263-13



Based on GEE to research the spatiotemporal impact of cascade dam construction on river water temperature in the upper reaches of Yangtze River

ZHANG Shanghong¹, TANG Haiyun¹, WANG Hao¹, ZHOU Yang¹, TANG Caihong¹, HE Hongyan², XING Kun², JIE Yongshi²

(1. College of Water Resources and Hydroelectric Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

收稿日期: 2025-02-12; 修回日期: 2025-03-01; 录用日期: 2025-03-01; 网络出版日期: 2025-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC32020002); 国家自然科学基金项目(52379065, 52209087); 中国空间技术研究院 CAST 创新基金项目

作者简介: 张尚弘(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事数字流域模拟研究。E-mail: zhangsh928@126.com

通信作者: 周扬(1991—), 男, 副教授, 博士, 主要从事生态水利研究。E-mail: zhouyang@ncepu.edu.cn

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

Abstract: [Objective] Water temperature is a key factor affecting the evolution of river ecosystems, playing an important role in the conversion of biogenic elements, biological habitat, and other physical, chemical, and biological processes. Hydropower development has obstructed the continuity of rivers and altered the transmission of river water temperature along the river, especially under the cascade hydropower development, which has seriously affected the rhythm of river water temperature. It is necessary to reveal the impact patterns of cascade dam construction on water temperature in the Yangtze River mainstream. [Methods] Based on the Google Earth Engine (GEE) platform, Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, and Landsat-8 TIRS remote sensing datasets were utilized to retrieve surface water temperature of the Yangtze River from 2000 to 2020 through atmospheric radiative transfer models. The retrieved result were validated by comparison with measured data from Zhutuo hydrological station, and the spatiotemporal characteristics of surface water temperature before dam construction (2000—2005) and after dam construction (2015—2020) were analyzed in the Liyuan-Guanyin section, Wuduode-Xiangjiaba section, and Three Gorges Reservoir area. [Results] The result show that the average annual surface water temperatures before the construction of dams in the Liyuan-Guanyin section, Wuduode-Xiangjiaba section, and Three Gorges Reservoir area were 21.58 °C, 21.31 °C, and 17.79 °C, respectively. After the construction of dams, the water temperature in the middle reaches of the Jinsha River reservoir area decreased significantly to 15.47 °C, with an average decrease of 5.43 °C in the dry season and an average decrease of 2.46 °C in the rainy season. The average annual water temperature downstream of the dams was close to the natural river water temperature, and the correlation with the surrounding measured air temperature was significant. Water temperature within the reservoir areas exhibited fragmented distribution, with maximum temperature differences observed at the heads of cascade dams. The Three Gorges Reservoir area exhibited phenomena of “cold retention” and “temperature retention”. The Nash efficiency coefficient between remote sensing inversion and measured data reached 0.907, with a root mean square error of 1.24 °C, indicating high reliability of the result. [Conclusion] The continuity of river water temperature has been disrupted by cascade dam construction, significantly weakening the temperature transmission effect. The water temperature in the head of each reservoir area and the backwater area showed a significant correlation, but the correlation between the water temperature in the reservoir area and the water temperature discharged from dam was weak. Remote sensing method can effectively retrieve river surface water temperature, providing methodological support and theoretical references for river water temperature inversion and watershed water temperature management.

Keywords: river water temperature; cascade hydropower development; Landsat satellite; Google Earth Engine; hydropower station; Three Gorges Reservoir; water ecosystem

0 引言

水温是河流水生态系统的重要物理变量之一, 强烈影响水的物理、化学和生物特性, 决定了水生生态系统中大部分的生物化学过程, 如溶解氧水平、水华爆发、鱼类产卵等过程^[1-2]。水利工程建设改变了河流形态, 使河流由急流状态转为静水环境, 破坏了自然水温节律。据统计, 人类建造了 300 多座巨型水坝 (高度超过 150 m, 水库蓄水量超过 25 km³) 和数量惊人的小型水坝, 导致全球 292 条大河中有一半以上 (172 条) 河流水体破碎化, 水库的形成严重改变了区域水文循环过程, 影响河流水温^[3-4]。诸多研究表明, 水利工程建设导致河流热条件的各个方面发生了变化, 包括水温的变幅程度、水温季节变化规律、水温分层特征等, 对河流生态系统演变造成了巨大的干扰^[5-6]。

水电开发对河流水温的影响具有阻断性、累积性、迟滞性等效应。郭文献等^[7]分析了三峡与葛洲坝之间水温的变化特征, 发现三峡蓄水导致水温滞后影响鱼类产卵; 周思佳等^[8]发现澜沧江下游梯级联合运行对高温水产生叠加影响, 对低温水表现出削弱影响; HEGGENES 等^[9]表明冬季水库泄水温度较天然河道水温偏高, 使下游河道无法结冰; KE DRA 等^[10]发现坝下水温的影响范围受气候与流量的共同影响; 刘兰芬等^[11]研究了梯级大坝水温累积效应, 发现春夏季水电站下泄水温低于天然水温, 但秋冬季相反, 梯级大坝数量越多下游水温均化越明显; 邓云等^[12]研究了山区小流域梯级水电开发的累积效应, 发现龙头水库对水温的影响较大。目前, 国内外学者通过实测资料和数学模型研究了水电开发对河流水温结构及下泄水温的影响, 研究河流涉及区域较多, 说明了水电开发对水温影响过程及机理复杂, 仍需要进一步探

索其影响结果。

当前, 基于原位测量的传统温度记录方法只具有小范围点位特征, 且测量时间和深度不同导致数据具有高度的异质性, 所以监测的数据可能难以清晰的反映人类干扰对水温的影响过程^[13-14]。基于遥感数据开展水温反演研究具有空间反演范围广、时间序列持续等特点, 能够满足水温演变的多时空尺度研究^[15], 同时经过实测数据的校验和验证, 可以增加水温反演结果的说服力^[16]。热红外遥感为反演地表热量变化提供了巨大的优势, 目前全球已经部署了多个卫星来收集热辐射数据。随着遥感大数据时代的到来, 数据量呈链式增加, 促使遥感数据处理平台及云计算的快速发展。Google Earth Engine (GEE) 平台是目前应用最为广泛的遥感数据云处理平台, 改变了传统软件处理影像模式, 扩展了遥感数据应用的时空范围, 极大提高了遥感数据处理的效率^[16-18]。GEE 平台在水色反演、地理信息提取、土地利用变化等领域已取得了广泛应用, 为水温反演提供了良好的平台。目前, 利用遥感卫星长时间序列反演河流水温的研究逐渐增加, 但基于 GEE 分析梯级大坝建设对河流水温影响过程的研究相对较少, 是未来全面揭示在众多干扰下河流水温演变趋势的重要手段。

本文选用金沙江中下游及三峡库区作为研究河段, 基于 Landsat5 专题制图仪 (Thematic Mapper, TM)、Landsat7 增强型专题制图仪 (Enhanced Thematic Mapper Plus, ETM+) 和 Landsat8 热红外传感器 (Thermal InfraRed Sensor, TIRS) 遥感数据集, 利用 RTM (大气辐射传输模型) 反演了研究区域内长时间序列水体表面温度, 在 GEE 平台中计算了长江干流梯级开发的热点 (金沙江中游—三峡库区) 地区河流水温的时空演变特征, 揭示了建坝前后金沙江中下游梯级水电建设对河流水温节律的影响规律, 对比了气象与水温的演变趋势, 阐明了建坝后水温的时空变化特征, 同时分析了水文站点水温监测与遥感反演的误差, 证明了数据的可靠性, 为今后采用遥感数据反演河流水温提供了一种可行的参考, 也为水库调度提

供了管理依据。

1 研究方法

1.1 数据概况

Landsat 卫星波段信息由多光谱传感器拍摄获取, 可监测蓝、绿、红、近红、中红外、热红外、全色波段等地物光谱信息^[19]。表 1 描述了本研究中使用的每个 Landsat 的光谱带的特性。除热红外 (TIR) 波段外, 还利用红光 (*Red*) 和近红外 (*NIR*) 波段导出归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*), *NDVI* 由 SR 值 (而不是精度较低的 TOA 值) 计算得到。对于 Landsat-5, 可见光和红外光谱区域的数据采集由 Thematic Mapper (TM) 传感器完成, 而对于 Landsat 7, 则由 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) 完成, TM 的改进版本。对于 Landsat 8, 操作陆地成像仪 (OLI) 获取可见光和短波红外范围的数据, 热红外传感器 (TIRS) 提供 TIR 数据。Landsat 7 的 TIR 波段有低增益和高增益两种变体。这里选择使用低增益版本, 它具有较低的辐射分辨率, 但具有较高的动态范围, 因此可以防止在高亮度温度下饱和^[17]。

1.2 计算流程

物体的比辐射率是物体向外辐射电磁波的能力表征。它不仅依赖于地表物体的组成, 而且与物体的表面状态 (表面粗糙度等) 及物理性质 (介电常数、含水量等) 有关, 并随着所测定的波长和观测角度等因素有关。在大尺度上对比辐射率精确测量的难度很大, 目前是基于某些假设获得比辐射率的相对值, 本文主要根据可见光和近红外光谱信息来估计比辐射率^[19-21]。

(1) 利用绿色植被近红外反射率和红光反射率的差异来确定 *NDVI*, 其取值范围为 -1 ~ 1。*NDVI* 的计算公式为

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

式中, *NIR* 为红光波段反射率; *Red* 为近红外波段

表 1 本研究应用的遥感数据信息

Table 1 Landsat related data information applied in this study

卫星源	波段	波长/ μm	数据类型	分辨率/m	赤道穿越时间	使用期限
Landsat 5 (TM)	<i>Red</i> : B3	0.63~0.69	C01/T1_SR	30	9:45 am (16 d/次)	1984 年 1 月—2012 年 5 月
	<i>NIR</i> : B4	0.76~0.90	C01/T1_SR	30		
Landsat 7 (ETM+)	<i>Red</i> : B3	0.63~0.69	C01/T1_SR	30	10:00 am (16 d/次)	1999 年 1 月至今
	<i>NIR</i> : B4	0.77~0.90	C01/T1_SR	30		
Landsat 8 (OLI; TIRS)	<i>Red</i> : B4	0.64~0.67	C01/T1_SR	30	10:00 am (16 d/次)	2013 年至今
	<i>NIR</i> : B5	0.85~0.88	C01/T1_SR	30		

反射率。

(2) 计算植被覆盖度。植被覆盖度是指植物在地表上的垂直投影面积所占的比例。通过遥感图像获取植被覆盖度的方法, 具有较好的效果, 具体公式为

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (2)$$

式中, $NDVI_{\min}$ 和 $NDVI_{\max}$ 分别为完全裸露和完全植被像素的 $NDVI$ 值。

水面比辐射率 ε 计算方法

$$\varepsilon = 0.004 \times FVC + 0.986 \quad (3)$$

(3) 计算水体表面温度。通过辐射定标将原始的热红外影像中的 DN (像元值) 转化为传感器在大气顶端探测到的光谱辐射亮度, 公式为

$$L_{\lambda} = gain \times DN + bias \quad (4)$$

式中, L_{λ} 为传感器在大气顶端探测到的光谱辐射亮度 ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$); DN 为原始热红外影像中的像元值; $gain$ 与 $bias$ 分别为辐射定标增益值与偏置值, 对于不同卫星不同波段辐射定标常数不一致, Landsat5 和 Landsat7 的增益值和偏置值如表 2 所列, 对于 Landsat8, 这两个参数的值是可变的, 可在产品的头文件中找到^[20]。

此外, 为提高水体表面温度反演精度, 本研究采用辐射传输模型 (RTM) 方法。RTM 方法考虑了大气对热红外辐射的吸收和散射作用, 通过求解辐射传输方程, 得到更准确的水表面温度。其中, 大气辐射传输方程可表示为

$$L_{\lambda} = \tau \varepsilon L_s + L_u + \tau(1 - \varepsilon)L_d \quad (5)$$

式中, L_s 为水体表面辐射亮度; τ 为大气透射率; L_u 为大气向上辐射亮度; L_d 为大气向下辐射亮度; ε 为水面比辐射率。通过 MODTRAN 等大气辐射传输模型可获取 τ 、 L_u 和 L_d 参数。

最后, 利用普朗克函数, 根据修正后的亮度温度 T 反演水温, 其确定公式为

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_s(T_s)} + 1\right)} \quad (6)$$

$$LST = \frac{T}{\left[1 + \left(10.895 - \frac{T}{14380}\right)\right] \ln(\varepsilon)} - 273.15 \quad (7)$$

式中, T_s 为亮度温度; K_1 、 K_2 为普朗克公式常数; LST 为水体表面温度; 系数 10.895 是适应于 Landsat8 的计算过程, Landsat5 和 Landsat7 对应的系数是 11.45。

表 2 Landsat5、Landsat7 和 Landsat8 各常量统计

Table 2 Statistical table of Landsat5, Landsat7 and Landsat8 constants

项 目	$gain$	$bias$	K_1	K_2
Landsat5	0.055 2	1.237 8	607.76	1 260.56
Landsat7	0.037 1	3.2	606.09	1 282.71
Landsat8	—	—	774.89	1 321.08

1.3 结果验证方法

为了验证数据的可靠性与准确性, 选用纳什效率

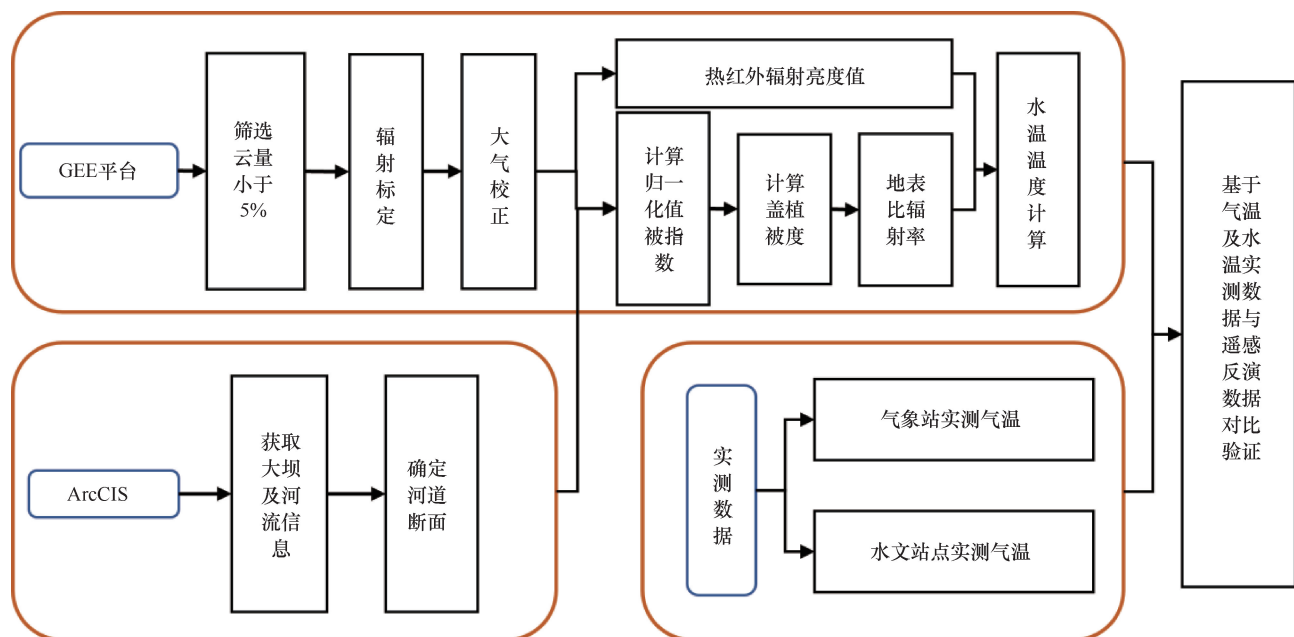


图 1 Landsat 遥感反演水温流程

Fig. 1 Calculation procedures of water temperature by Landsat remote sensing

系数证明观测值与遥感计算值之间的关系, 纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, 简称 NSE), 一般用以验证水文模型模拟结果的准确度。在实际参数率确定和模型验证中, 一般认为 NSE 为 0.5, 仿真结果与监测值相符。 NSE 值越接近 1, 说明仿真结果与监测值的吻合程度越高。计算公式为

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (T_i^{rs} - T_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (T_i^{obs} - T^{av})^2} \quad (8)$$

式中, T_i^{rs} 代表遥感计算获取的月均水温值; T_i^{obs} 代表水文站点观测的月均水温值; T^{av} 代表所有观测值的平均值。

此外, 用均方根误差反映反演值和观察值之间的偏差程度, 均方根误差是预测值与真实值偏差的平方与观测次数 n 比值的平方根, 计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i^{rs} - T_i^{obs})^2}{n - 1}} \quad (9)$$

2 研究区域

2.1 研究区概况

长江干流落差大、地理纬度跨度大, 蕴含了丰富

的水能资源, “世界水电在中国, 中国水电在西南, 西南水电在金沙”的水电大开发格局已然形成。金沙江干流是梯级水电开发的热点地区, 区域规划 27 个梯级水电站(见图 2), 总装机容量相当于 4 座三峡, 其中上游 13 座, 中游 10 座, 下游 4 座。其中金沙江中游地区: 虎跳峡—两家人—梨园—阿海—金安桥—龙开口—鲁地拉—观音岩—金沙—银江; 下游地区: 乌东德—白鹤滩—溪洛渡—向家坝。下游区域为 4 个世界级巨型大坝, 均已完成全面发电投产。中游地区按照“一库八级”的布置建设, 其中虎跳峡区段的龙盘水电站和二级两家人水电站仍在论证阶段, 其他六级已全部投入使用, 中游攀枝花段建成了银江、金沙水电站, 表 3 列出了金沙江中下游及三峡建坝的信息。

2.2 断面选取特征

选取金沙江中下游建坝热点区域以及三峡库区部分断面进行分析, 断面选择建坝前河道中心宽度, 避免河道外陆地部分的干扰, 断面长度为 3 km, 断面布设与大坝距离均匀, 以保证数据的统一性。断面的命名规则如表 4 所列, LY2 表示大坝名字缩写的上游第二个断面, 一般距离大坝 60 km, LY1 表示距离该大坝 30 km 处, LY 为该大坝的库区地段, LYd 为该大坝下游 1 km 处。由于金沙江下游的四个梯级大

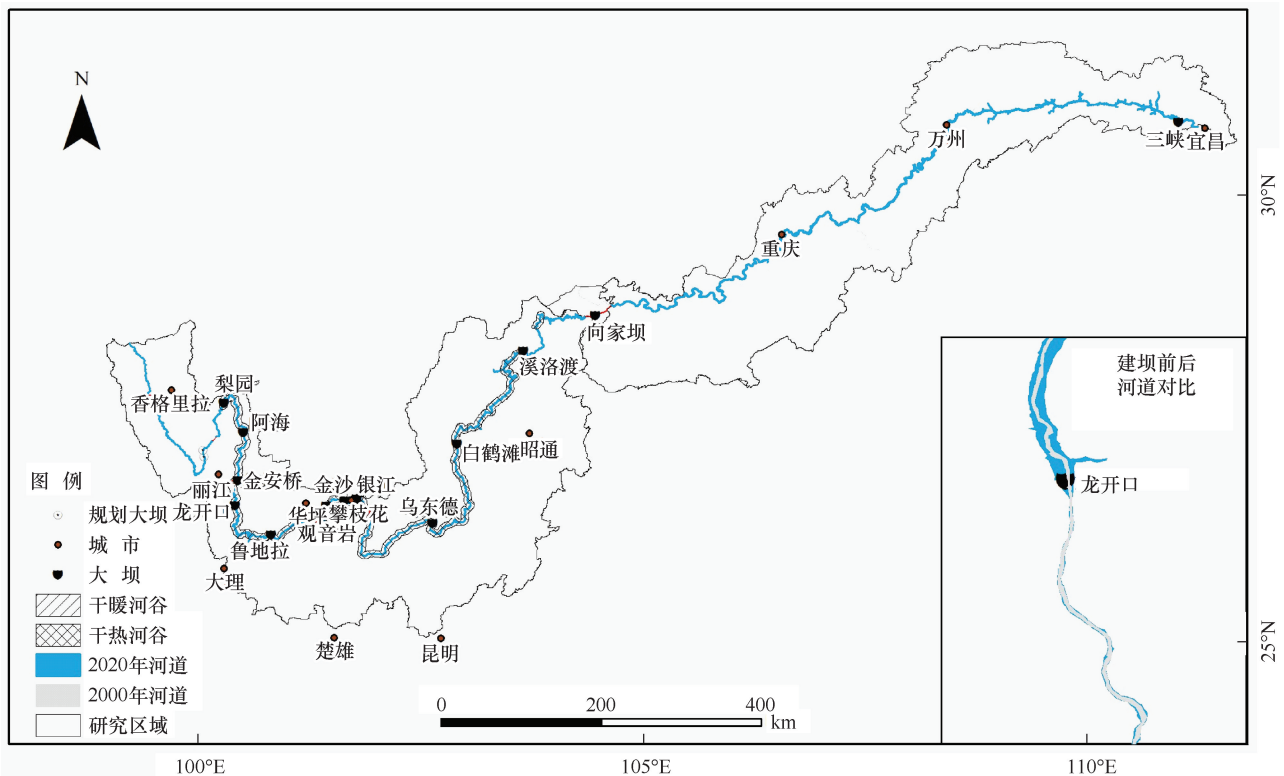


图 2 研究区域

Fig. 2 Research area map

表 3 金沙江中下游梯级大坝信息

Table 3 Information of cascade dams in the middle and lower reaches of the Jinsha River

大坝名称	建坝时段	大坝高度/m	蓄水位/m	区间河长/km
龙盘	规划	276.0	2 100	
两家人	规划	81.0	1 800	6
梨园	2007—2014 年	155.0	1 618	80
阿海	2008—2014 年	130.0	1 504	74
金安桥	2005—2009 年	160.0	1 421	73
龙开口	2008—2012 年	116.0	1 298	40
鲁地拉	2009—2014 年	140.0	1 223	99
观音岩	2006—2014 年	159.0	1 134	98
乌东德	2015—2020 年	265.0	975	253
白鹤滩	2017—2022 年	289.0	825	182
溪洛渡	2005—2013 年	285.5	600	192
向家坝	2006—2014 年	162.0	380	157
三峡	1994—2008 年	181.0	175	909

坝建设时间相对较短,选择此区域主要是为了对比建坝后初期水温的变化特征,选取三峡库区典型断面是为了反映 2000—2020 年水温的变化趋势,跟金沙江上游地区水温变化形成对比,说明水温的演变规律。

2.3 干热河谷特征

金沙江干热河谷地区是我国特殊的地理形态,地处横断山区腹地,由于受到气候、地形以及人类活动等诸多方面的影响,在流域内的低海拔河谷区域,形成了独特的景观区域——干旱河谷,当地人称之为“干旱坝子”或“干坝子”。干旱河谷根据热量及降雨情况又分为干热、干暖、干温河谷,其中金沙江部分河段属于干暖河谷,如梨园大坝—鲁地拉地区,从鲁地拉大坝到溪洛渡大坝属于干热河谷,受大气环流及地形要素的影响,干旱河谷一般 10 月下旬到次年 5 月上旬为旱季,其余时间为雨季,旱季中 4 月、5 月气温较高^[22]。为了便于解释金沙江干流水温沿程变化规律,分析了干旱河谷地区和长江上游地区的气温变化规律,结果发现丽江、大理、攀枝花、华

表 4 断面命名规则

Table 4 The rules of section name

断面名称	代表含义	断面名称	代表含义	断面名称	代表含义	断面名称	代表含义
LY2	梨园上 60 km	GYy	观音岩上 1 km	JAQ	金安桥上 1 km	XLDd	溪洛渡下 1 km
LY1	梨园上 30 km	GYyd	观音岩下 1 km	JAQd	金安桥下 1 km	XJB1	向家坝上 30 km
LY	梨园上 1 km	WDD1	乌东德上 30 km	LKK1	龙开口上 30 km	XJB	向家坝上 1 km
LYd	梨园下 1 km	WDD	乌东德上 1 km	LKK	龙开口上 1 km	XJBd	向家坝下 1 km
AH2	阿海上 60 km	WDDd	乌东德下 1 km	LKKd	龙开口下 1 km	SX2	三峡上 60 km
AH1	阿海上 30 km	BHT1	白鹤滩上 30 km	LDL2	鲁地拉上 60 km	SX1	三峡上 30 km
AH	阿海上 1 km	BHT	白鹤滩上 1 km	LDL1	鲁地拉上 30 km	SX	三峡上 1 km
AHd	阿海下 1 km	BHTd	白鹤滩下 1 km	LDL	鲁地拉上 1 km	SXd	三峡下 1 km
JAQ2	金安桥上 60 km	XLD1	溪洛渡上 30 km	LDLd	鲁地拉下 1 km	SXd1	三峡下 30 km
JAQ1	金安桥上 30 km	XLD	溪洛渡上 1 km	GYy1	观音岩上 30 km		

坪、万州在近 20 年期间气温呈现逐步上升的趋势,而宜昌在 2008 年三峡蓄水后气温呈下降的趋势。

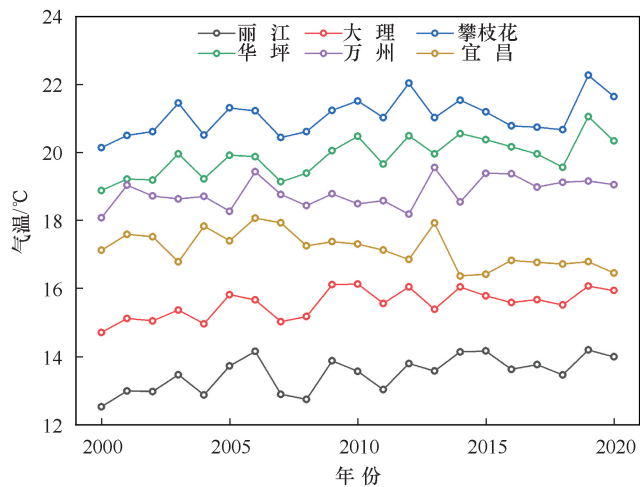


图 3 气温变化

Fig. 3 The change of temperature

3 结果分析与讨论

经过 GEE 计算获取了 2000—2020 年金沙江中下游地区和三峡库区的水温断面数据,由于 2006—2014 年为金沙江中下游段建坝的高峰期,筛选出建坝前 2000—2005 年与建坝后 2015—2020 年作为分析建坝前后水温的变化特征,揭示梯级水电开发对水温的影响规律。

3.1 建坝前后的水温沿程变化特征

水温是反映水环境变化特征的关键要素之一,基于建坝前和建坝后两个时间区间,分析金沙江中下游地区和三峡库区的表层水温沿程的变化特征,结果如图 4 所示。建坝前从梨园水电站到三峡库区沿程水温呈现先升高后下降的趋势,建坝前金沙江中下游及三峡库区年均水温分别为 21.58 °C、21.31 °C 和 17.79 °C,其中在观音岩、攀枝花干热河谷区段水温较高,该

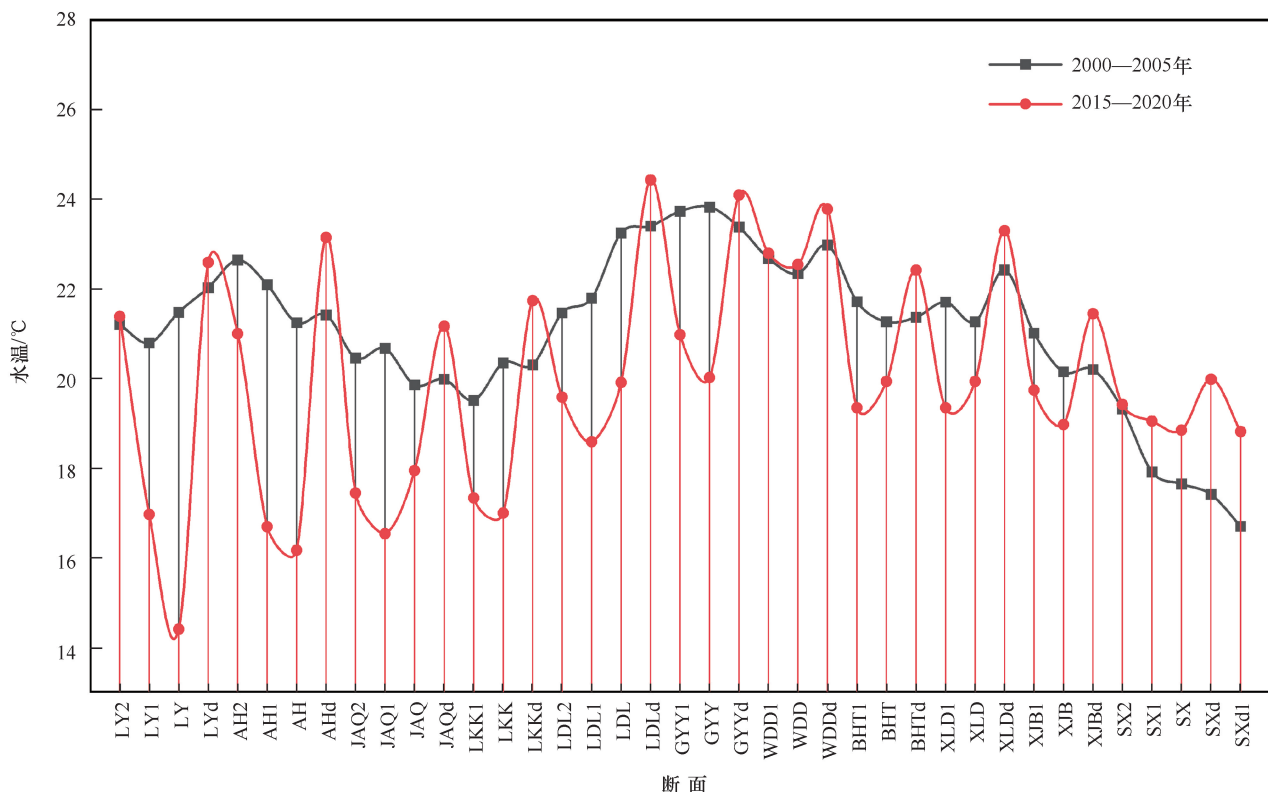


图4 河流沿程建坝前后水温变化特征

Fig. 4 Characteristics of water temperature changes before and after dam construction along the river

区段是干热河谷的气候特征明显的区域, 气温高于其他区段, 如图4所示, 区段的平均水温达到了23.22℃。建坝后水温波动明显, 尤其是各大水库的库首, 水温与建坝前差距最大, 金沙江中游地区6个大坝库区平均水温下降了3.5℃。与库区相反, 坝下的下泄水温与建坝前相比略有上升, 但幅度偏小, 平均抬升0.95℃。白鹤滩和乌东德水电站在2015—2020年处于建设期, 已有截留蓄水, 库区水温有下降趋势, 三峡大坝建设历时较长, 且对水温影响过程比较复杂, 呈现出2015—2020年的均温要高于2000—2005年的均温, 陶雨薇等^[23]研究发现三峡库区较蓄水前水温增加, 证明三峡水库在升温 and 降温季节对中游河道水温有较强的调节作用, 出现了“滞冷”和“滞温”的现象。同时, 水温升高增加水分蒸发, 加快物质循环速率, 可能提高浮游植物的生长率和初级生产, 会影响养分循环和浮游生物动力学, 进一步促进藻类改变水生态系统^[24]。

基于建坝前后水温的变化特征, 分析库区(见图5)、坝下(见图6)之间的水温差异, 结果发现库区建坝前年际水温落差较大, 且最高水温与最低水温均大于建坝后的水温情况, 建坝后库区水温较自然河流年均水温出现明显的下降趋势, 分析主要有

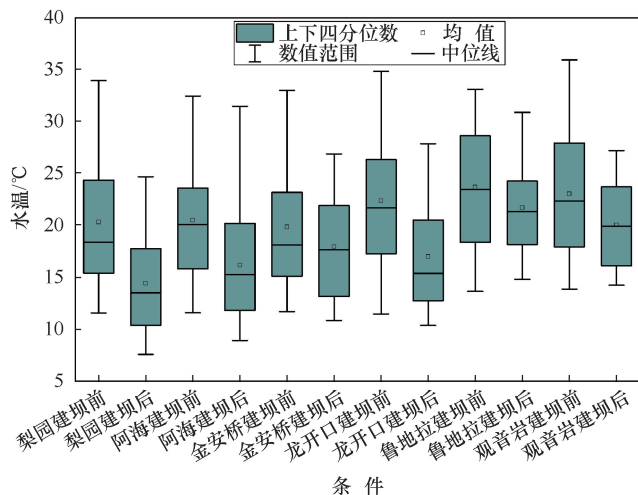


图5 建坝前后库区水温对比

Fig. 5 Comparison of water temperature in the reservoir before and after dam construction

以下几点原因: (1) 建坝后库区水深显著增加, 导致太阳辐射热量在垂向上逐层衰减, 形成表层温水、底部冷水的分层现象, 且相对静止的库区分层水体抑制了表底层之间的热交换, 使得整体水温下降; (2) 水库在泄洪、发电过程中采用分层取水设施, 不断提取上层温水并输送至下游, 造成库区热

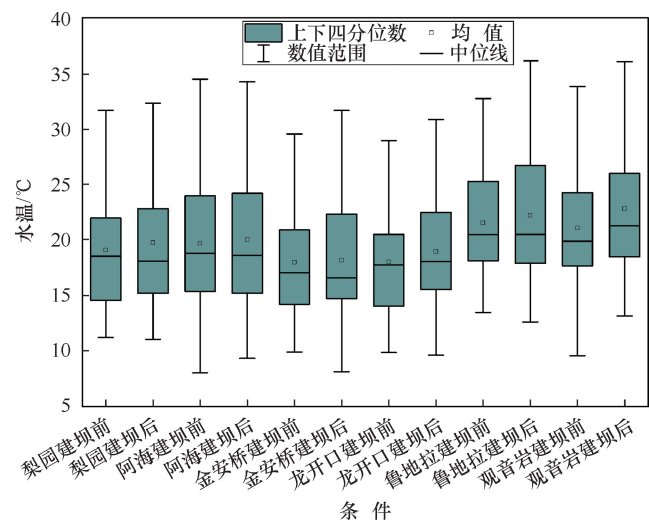


图 6 建坝前后坝下水温对比

Fig. 6 Comparison of water temperature under the dam before and after dam construction

量持续损失, 进一步加剧了库区水温下降趋势, 同时也导致下泄水温相对升高; (3) 在梯级开发条件下, 上游水库下泄的冷水进入下一级库区, 多级水库的串联运行加剧了这种冷水效应, 形成了库区水温的持续下降趋势^[25]。

河流蓄水后, “滞冷” “滞热” 现象显著, 对河流生态影响尤甚^[26]。分析金沙江干旱河谷 6 个大坝建坝后的水温变化特征发现, 建坝后下泄水温较自然河流水温均有所提升, 平均提升 0.95 °C, 这主要是水库调度过程中采用分层取水设施, 泄洪发电时优先使用表层相对温暖的水体, 导致下泄水温相对升高。同时, 下泄水体与空气接触后发生热交换, 进一步改变了水温特性。此外, 可能是接触周围空气导致了下泄水温增加, 同时也有可能是水轮机组发电对提升水温导致的瞬时水温提高, 但这种影响相对较小。下泄的水通常具有较高的流速, 这可能会增加水体中的动能和热能, 从而导致下泄水温的升高^[27-28]。图 4 表明只在大坝下泄的时候水温出现瞬时抬升的过程, 水库泄流后, 水体在下游河道中逐渐与环境达到热平衡, 因此到下个梯级水库前, 水温逐渐下降到与周围温度相当的水平。

3.2 建坝前后旱雨季水温变化特征

针对大坝建设在时间上的影响程度, 分析金沙江中游地区 6 个大坝建设前后旱季和雨季两个时期库区和坝下的水温变化特征, 结果如图 7 和图 8 所示。结果表明在库区旱季水温比雨季水温下降多, 平均下降了 4.79 °C, 雨季平均下降 2.56 °C, 金沙江中游地段处于干旱河谷, 旱季大部分月份又干又热, 水库建成

后局部气温下降, 旱季库区蓄水降低了干旱河谷的干热状况, 水温下降明显。建坝前库区旱季沿程水温呈现逐渐增加的趋势, 由梨园断面的 19.58 °C 增加到观音岩断面的 23.16 °C, 增加了 3.58 °C, 建坝后旱季水温沿程变化幅度增加, 增加了 5.86 °C。

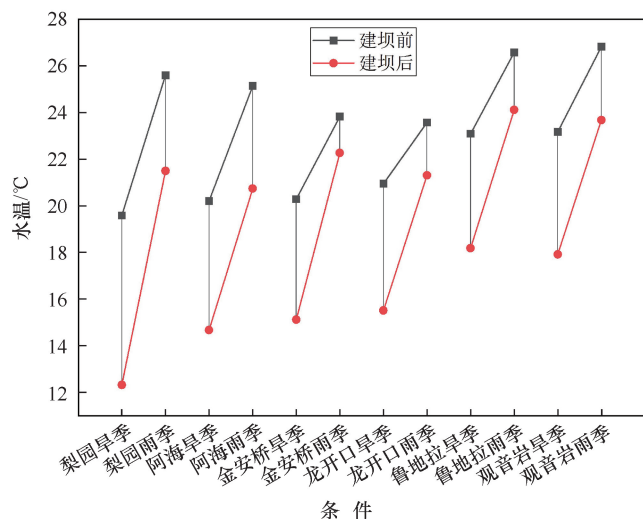


图 7 建坝前后库区雨季和旱季水温变化对比

Fig. 7 Comparison of water temperature changes in the reservoir during the rainy and dry seasons before and after dam construction

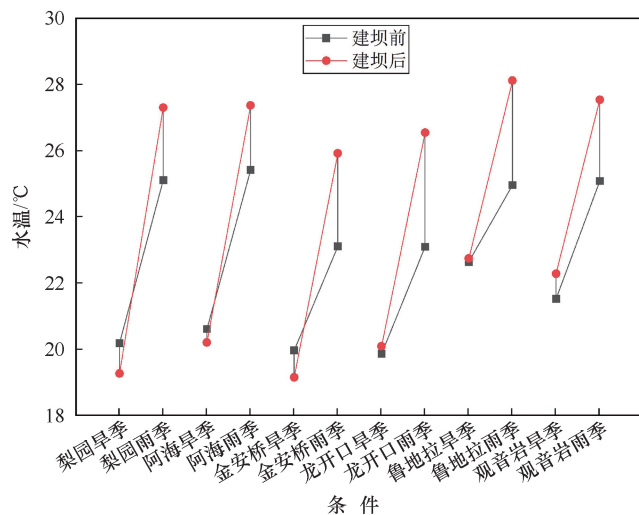


图 8 建坝前后坝下雨季和旱季水温对比

Fig. 8 Comparison of water temperature under the dam during the dry season before and after dam construction

这一现象受气象条件的影响, 同时也与水库调度过程密切相关: 旱季以维持基本生态流量为主, 发电量较小, 通过分层取水设施从较深水层取水, 导致较低温度的水体释放; 而雨季以防洪调度为主, 入库流量大, 水体交换频繁, 垂向混合加强, 使得水温下降幅度相对较小。从热量输送变化规律角度分析, 山区

随着海拔的下降, 气温逐渐增加, 水温沿程亦呈现逐渐增加的趋势, 但建坝后水温整体下降, 库区之间的水体交换受限, 水温变幅增加, 这将影响水体中溶解氧、营养物质等要素的分布, 间接扰动水生态系统的平衡。

建坝前后坝下区域雨季水温增加较旱季明显, 雨季平均增加 $2.28\text{ }^{\circ}\text{C}$, 建坝前后旱季水温增加不明显, 建坝前旱季与雨季平均温差约 $3.15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 建坝后两者温差约 $5.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。河段蓄水后, “滞冷” “滞热” 现象显著, 雨汛期水库以防洪为主要目标, 下泄流量大, 且优先使用表层水体进行调度, 表层水温较高, 导致下泄水温升高明显; 而旱季以发电和生态用水为主, 下泄流量小且可能来自较深水体, 导致水温变化相对较小^[29]。且水库水温分层现象主要受气候条件(如太阳辐射)和水库形态(如深度)影响, 夏季大型水库水温分层显著, 库面温水层和库下冷水层温差可达 $15\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加大了雨旱季节的水温差异^[30]。

3.3 水温传递效应分析

建坝后坝下受上游来水的影响较小, 主要受到库区积温以及大坝运行的影响, 分析了建坝前和建坝后的水温自相关性, 结果发现建坝前由梨园到三峡大坝区段的水温自相关性为 0.906 , 而建坝后该区段的水温自相关性为 0.106 (见图 9), 说明建坝前后河流沿程水温发生了变化, 主要是由于梯级水库泄洪发电调度运行对热量传递过程的干扰所致。上游中小型电站, 大多采用逐日调节方式, 水温扰动较大; 而下游

梯级电站, 多采用年际调节运行方式, 水温扰动相对较小, 从而导致整个河段水温传递的连续性被打破。基于沿程水温的变化分析了河道水温差值变化, 结果表明建坝前水温差为 $-1.41\sim 1.45\text{ }^{\circ}\text{C}$, 建坝后水温差为 $-5.70\sim 8.19\text{ }^{\circ}\text{C}$, 变幅扩大了 $4\sim 5$ 倍(见图 10), 说明建坝后水温节律受到巨大干扰, 这种扰动主要由梯级水库的调度运行造成, 是由于不同水库库容、水深、调度方式等因素的差异。另外, 从建坝后水温沿程的变化幅度看出, 随着梯级水库的持续运行, 水温调节能力逐渐增强, 沿程水温之间的差异在逐渐减少, 水温显示出逐渐平坦化的趋势^[31-32]。

基于 2000—2020 年年均水温的变化情况, 分析其与周围气温站点年均气温的相关性(见图 11), 主要气象站点包括丽江(LJ)、大理(DL)、华坪(HP)、攀枝花(PZH), 结果发现周边气象站的气温与坝下出口水温的相关性均达到显著性水平, 主要由于下泄水流与空气充分混合, 受到气温的显著影响; 而气温与库区的水温相关性未呈现显著性水平, 主要由于库区水温的演变受到梯级水库的累积影响, 与气温的自然演变趋势相关性较弱, 甚至出现了负相关。6 个库区水温之间的相关性均达到显著性水平, 库区回水区域水温之间达到显著相关性水平, 库区与坝下水温的关系相关性较弱。梯级大坝建设后河流水温受到诸多因素的影响, 坝下区段与水库区段水温差异明显, 会相应地改变水生态环境, 导致洄游性鱼类产卵场分布及产卵时间发生改变, 如三峡库区蓄水后四大家鱼的

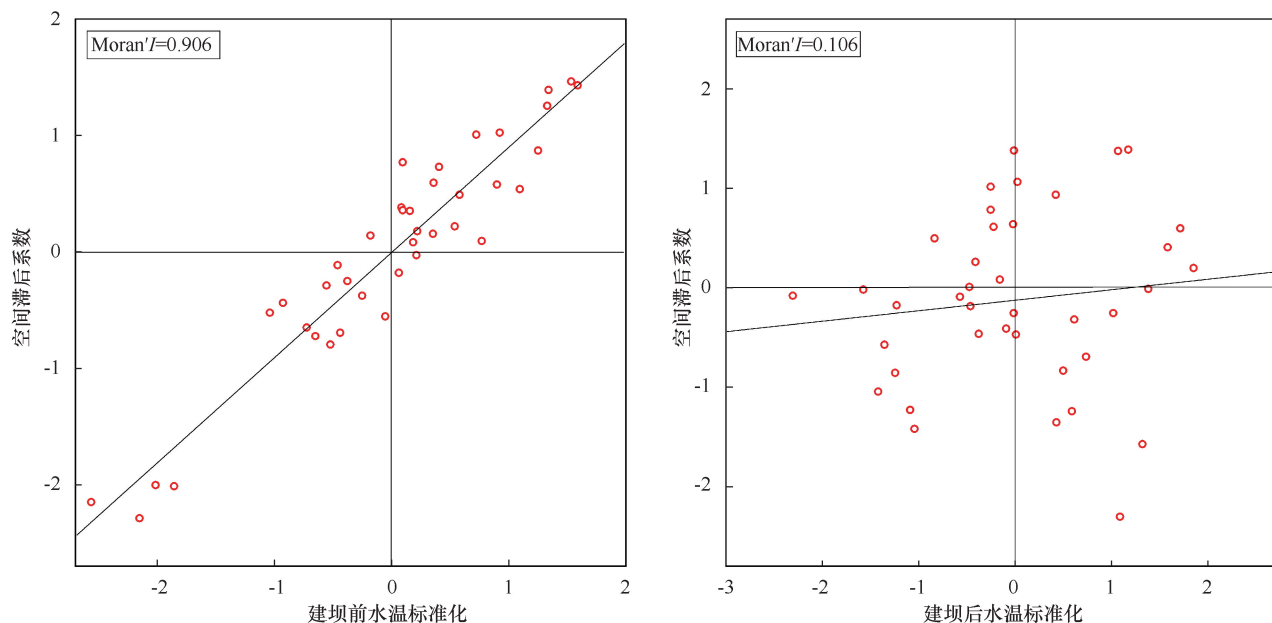


图 9 沿程水温自相关性

Fig. 9 Autocorrelation of water temperature along the river

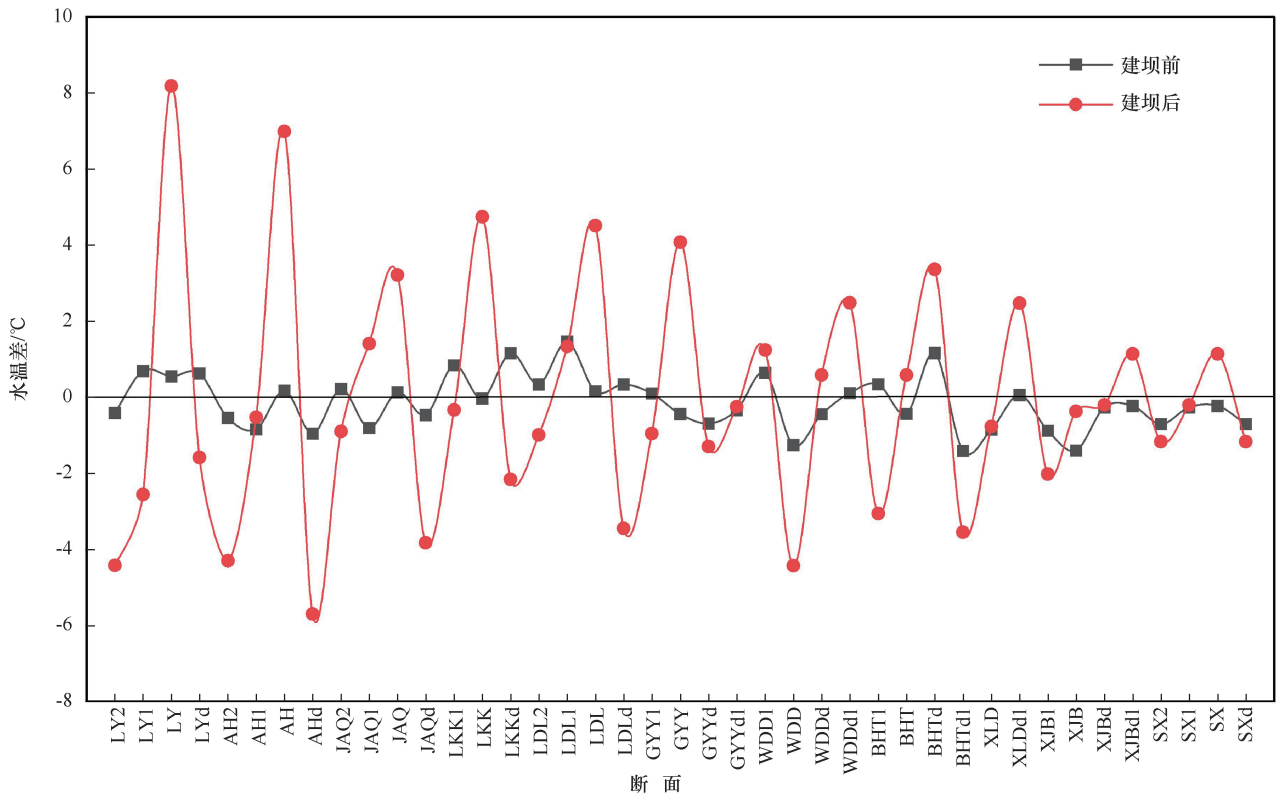


图 10 建坝前后沿程的水温差

Fig. 10 Difference in water temperature along the river before and after dam construction

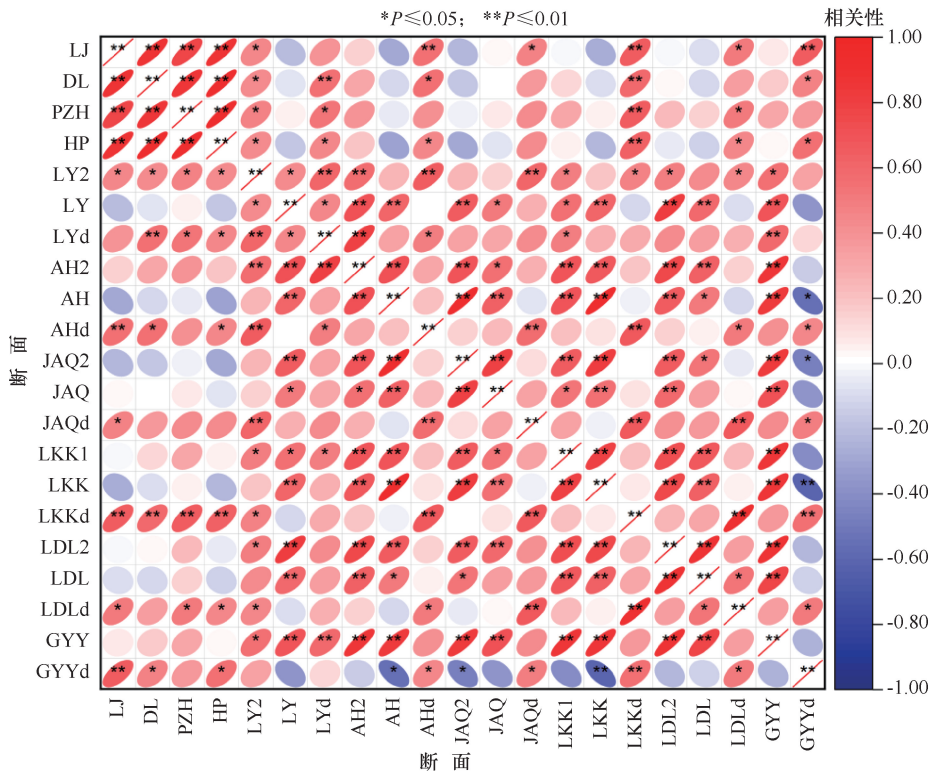


图 11 气温与水温的相关性热图

Fig. 11 Heat map of correlation between air temperature and water temperature

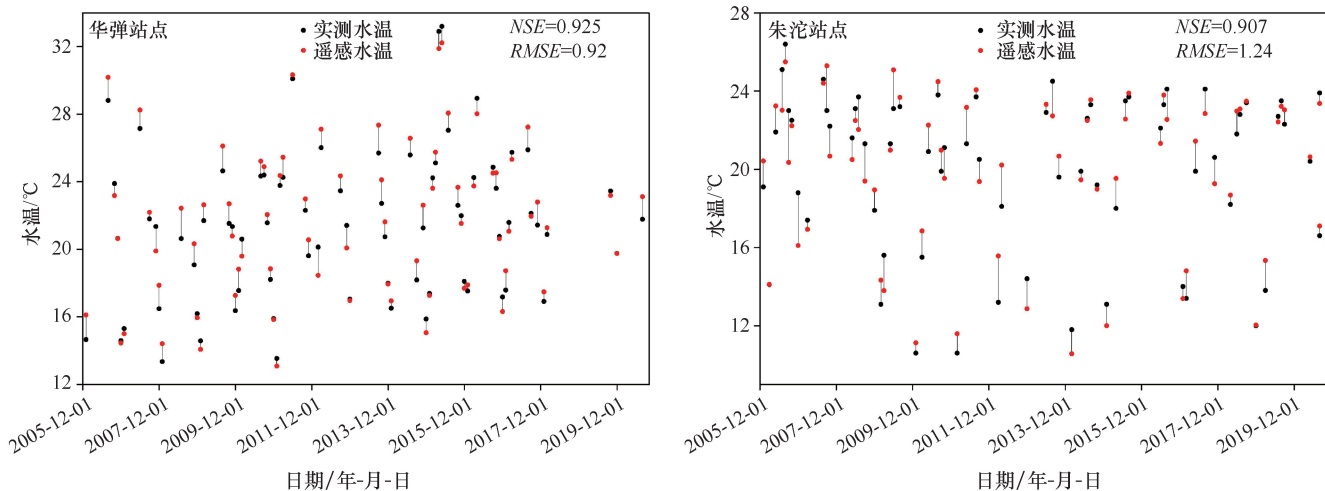


图 12 实测与遥感反演水温对比

Fig. 12 Comparison of measured and remote sensing inversion of water temperature

产卵时间推迟并压缩了繁殖季节时长。

3.4 水温验证

为了说明遥感反演水体温度的准确性, 利用华弹水文站点与朱沱水文站点的月尺度水温数据与遥感月尺度水温数据进行对比验证(见图 12), 时间序列为 2006 年 1 月到 2020 年 12 月的数据, 主要选取了在该段时间内存在 Landsat 数据的月份进行分析, 结果发现遥感计算的月均水温值和水文站点的月均水温值之间的纳什效率系数分别为华弹站点 0.925 和朱沱站点 0.907, 均方根误差分别为 0.92 °C 和 1.24 °C, 说明数据具有一定的可靠性和准确性。

3.5 结果讨论

本研究利用基于 GEE 平台的 Landsat 遥感数据对长江干流水温进行反演, 相较传统反演方法具有以下优势: GEE 平台云计算能力对大量遥感数据的处理效率很高, 能分析长时间序列的水温; Landsat 系列卫星的长期观测记录能提供大量连续的历史数据, 捕捉建坝前后水温变化趋势, 空间分析功能使沿程水温变化特征可视化, 给出直观依据去理解梯级大坝的累积效应。邱如健等^[33]发现三峡库区较蓄水前水温增加, 与本文观察到 2015—2020 年三峡库区均温高于 2000—2005 年均温一致, 证实了三峡水库的“滞冷”和“滞温”现象。周思佳等^[8]发现梯级大坝使下游水温均化明显, 与结果中建坝后沿程水温差异逐渐减少的现象一致。GUO 等^[34-35]发现三峡蓄水导致水温滞后影响鱼类产卵, 结果中水温传递效应减弱现象可能是这一生态影响的机理基础。研究存在如下局限: 遥感技术仅能获取表层水温数据, 无法直接测量水体垂向温度分布; 受云层覆盖影响, 部分时段数据缺

失; 热红外传感器自身精度可能限制反演结果的精度。未来研究将重点关注如下方向: 一是结合数值模拟与遥感反演, 构建完整的水温垂向分布模型; 二是增加水温实测点位, 构建天-空-水一体化的水温监测预警体系; 三是深入研究水温变化对鱼类等水生生物的影响机制, 为生态调度提供科学依据; 四是拓展研究区域, 建立全流域水温监测与预警体系, 为梯级水库联合生态调度提供技术支持。

4 结论

水温是影响水生生态系统发展的关键指标, 对系统物质循环和能量流动过程具有方向性的影响, 从而对水生生物个体、种群、群落以及生态系统结构和功能演变趋势产生差异化影响。本文基于 Google Earth Engineering(GEE) 平台, 利用 Landsat 系列卫星数据反演了金沙江中下游及三峡库区的表层水温, 揭示了梯级水电开发下河流水温的时空演变规律, 反演数据与观测数据的纳什效率系数为 0.907, 证明了数据的可靠性, 显著提高了河流水温反演的效率。

基于此分析了金沙江建坝高峰前 2000—2005 年期间与建坝后期 2015—2020 年之间的表层水温演变特征, 结果发现建坝前河流表层水温沿程受干热河谷气候的特征呈现先增加后降低的趋势, 但建坝后河流表层水温沿程呈现片段化的演变, 库区表层水温呈现显著下降的趋势, 而坝下表层水温与建坝前水温差异性不明显, 且与气温的变化趋势呈显著相关。

上述水温的时空分布变化是多种因素共同作用的结果: 首先, 库区蓄水后水深显著增加, 太阳辐射热量在垂向上逐层衰减, 形成表层温水、底部冷水的分

层现象;其次,水库调度运行过程中通过分层取水设施不断提取上层温水并输送至下游,造成库区热量持续损失;第三,梯级水库的串联运行加剧了冷水效应,使得整个河段水温传递的连续性被打破;此外,季节性气候变化与水库调度模式的相互作用进一步影响了水温的季节性变化规律。梯级大坝建设严重影响了河流水温节律,扰动了河流 C、N、P 等生源物质的传输、沉降转化等过程,干扰了水生生物栖息环境。值得注意的是,基于遥感技术仅获取了水体表面温度,而水库中下层的水温变化对鱼类等水生生物的栖息与繁殖影响更大,未来需要结合垂向水温监测数据进行综合分析,深入研究水热变化对河流水生生态系统的影响机理。在未来河流调度调节过程中,需要建立连续的水温监测设备,考虑高坝大库调节下不同季节水温的演变特征,增加水温调节的措施,降低沿程水温的差异性,保证水温的连续性,为生态系统提供适宜的水温条件,保障生态系统可持续发展。

参考文献 (References):

[1] 王锦旗,宋玉芝,黄进. 水温升高对水体性质及水生生物的影响研究进展[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(1): 100-109.
WANG Jinqi, SONG Yuzhi, HUANG Jin. Research progress on the effects of rising water temperature on water properties and aquatic organisms [J]. Journal of Water Ecology, 2020, 41(1): 100-109.

[2] 戴会超,毛劲乔,蒋定国. 大型水利水电工程水沙生态环境调控研究进展[J]. 水利水电技术(中英文)2023, 54(5): 118-125.
DAI Huichao, MAO Jingqiao, JIANG Dingguo. Research progress of water-sediment and ecological environment control of large hydropower projects [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(5): 118-125.

[3] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers[J]. Nature, 2019, 569(7755): 215-221.

[4] NILSSON C, REIDY C A, DYNESIUS M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems[J]. Science, 2005, 308(5720): 405-408.

[5] 钟天凤. 水库下泄低温水治理中隔水幕布的应用探析[J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7(12): 4-8.
ZHONG Tianfeng. Exploration of the application of barrier water curtain in the treatment of low temperature water discharge from reservoirs[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2024, 7(12): 4-8.

[6] 何晓枫,黄翔,陈旻,等. 梯级开发对河流生境连通性的影响与优化路径[J]. 水力发电学报, 2023, 42(8): 32-41.
HE Xiaofeng, HUANG Xiang, CHEN Min, et al. Impact of Hydropower Cascade Development on River Habitat Connectivity and Its Path to Optimization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(8): 32-41.

[7] 郭文献,王鸿翔,夏自强. 三峡-葛洲坝梯级水库水温影响研究

[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 182-187.
GUO Wenxian, WANG Hongxiang, XIA Ziqiang. Study on the Influence of Water Temperature on Three Gorges Gezhouba Cascade Reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(6): 182-187.

[8] 周思佳,秦鑫,薛文豪,等. 糯扎渡水电站不同调度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.

[9] HEGGENES J, STICKLER M, ALFREDSEN K, et al. Hydropower-driven thermal changes, biological responses and mitigating measures in northern river systems [J]. River Research and Applications, 2021, 37(5): 743-765.

[10] KEDRA M, WIEJACZKA L. Climatic and dam-induced impacts on river water temperature: Assessment and management implications [J]. Science of the Total Environment, 2018, 626: 1474-1483.

[11] 刘兰芬,陈凯麒,张士杰,等. 河流水电梯级开发水温累积影响研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(3): 173-180.
LIU Lanfen, CHEN Kaiqi, ZHANG Shijie, et al. Research on the cumulative impact of water temperature on the development of river water elevator cascade [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5(3): 173-180.

[12] 邓云,张棚,脱友才,等. 山区小流域梯级开发的水温累积影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(4): 1-7.
DENG Yun, ZHANG Peng, TUO Youcai, et al. Study on the cumulative impact of water temperature on the cascade development of small watersheds in mountainous areas [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(4): 1-7.

[13] MARTI-CARDONA B, PRATS J, NICLOS R. Enhancing the retrieval of stream surface temperature from Landsat data[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 224: 182-191.

[14] 石希,孙健,史立地. 基于 Landsat 卫星遥感资料的河流水温反演研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(2): 121-130.
SHI Xi, SUN Jian, SHI Lidi. Research on river water temperature inversion based on Landsat satellite remote sensing data[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(2): 121-130.

[15] XIE G, ZHANG H, NIU Q. Progress of remote sensing inversion research on surface temperature of lakes and reservoirs[J]. Advances in Computer and Engineering Technology Research, 2024, 1(2): 600-605.

[16] LARANCE S, WANG J, DELAVAR M A, et al. Assessing water temperature and dissolved oxygen and their potential effects on aquatic ecosystem using a SARIMA model[J]. Environments, 2025, 12(1): 25.

[17] ERMIDA S L, SOARES P, MANTAS V, et al. Google Earth Engine open-source code for land surface temperature estimation from the Landsat series[J]. Remote Sensing, 2020, 12(9): 1471.

[18] 田梦祺,段克勤,石培宏. 基于 Google Earth Engine 平台的青藏高原冰川变化研究:以普若岗日冰原为例[J]. 地理科学, 2023,

- 43(6): 943-951.
- TIAN Mengqi, DUAN Keqin, SHI Peihong. Research on glacier changes in the Qinghai Tibet Plateau based on Google Earth Engine platform; Taking the Puruogangri ice field as an example [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(6): 943-951.
- [19] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 79-85.
- XU Hanqiu. Research on extracting water body information using modified normalized difference water body index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 79-85.
- [20] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7853-7862.
- XU Hanqiu. The creation and application of urban remote sensing ecological index[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [21] RAHAMAN M H, MASROOR M, SAJJAD H. Integrating remote sensing derived indices and machine learning algorithms for precise extraction of small surface water bodies in the lower Thoubal River Watershed, India [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 422: 138563.
- [22] 刘刚才, 纪中华, 方海东. 干热河谷退化生态系统典型恢复模式的生态响应与评价[M]. 北京: 科学技术出版社, 2011.
- LIU Gangcai, JI Zhonghua, FANG Haidong. Ecological response and evaluation of typical restoration models for degraded ecosystems in dry-hot river valleys[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2011.
- [23] 陶雨薇, 王远坤, 王栋, 等. 三峡水库坝下水温变化及其对鱼类产卵影响[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(10): 48-55.
- TAO Yuwei, WANG Yuankun, WANG Dong, et al. Assessing water temperature variations and impacts on fish spawning downstream of Three Gorges Dam[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(10): 48-55.
- [24] 许栋, 杨海滔, 及春宁, 等. 梯级水库影响下南渡江干流浮游生物群落沿程变化[J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(4): 63-72.
- XU Dong, YANG Haitao, JI Chunping, et al. Variation of plankton community in Nandujiang River in flood and draught seasons under the influence of cascaded reservoirs[J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(4): 63-72.
- [25] HE T, DENG Y, TUO Y, et al. Impact of the dam construction on the downstream thermal conditions of the Yangtze River [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(8): 2973.
- [26] 龙良红, 徐慧, 鲍正风, 等. 溪洛渡水库水温时空特性研究[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(4): 79-89.
- LONG Lianghong, XU Hui, BAO Zhengfeng, et al. Temporal and spatial characteristics of water temperature in Xiluodu Reservoir[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(4): 79-89.
- [27] BONACCI O, DURIN B, BONACCI T R, et al. The influence of reservoirs on water temperature in the downstream part of an open watercourse; A case study at Botovo Station on the Drava River[J]. *Water*, 2022, 14(21): 3534.
- [28] ZAIDEL P A, ROY A H, HOULE K M, et al. Impacts of small dams on stream temperature [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106878.
- [29] JAIN S K, SHILPA L S, RANI D, et al. State-of-the-art review: Operation of multi-purpose reservoirs during flood season[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 618: 129165.
- [30] 高学平, 张少雄, 张晨. 糯扎渡水电站多层进水口下泄水温三维数值模拟[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(1): 195-201.
- GAO Xueping, ZHANG Shaoxiong, ZHANG Chen. 3-D numerical simulation of water temperature released from the multi-level intake of Nuozhadu Hydropower Station [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(1): 195-201.
- [31] CAISSIE D. The thermal regime of rivers; A review[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(8): 1389-1406.
- [32] 蔡玉鹏, 杨志, 徐薇. 三峡水库蓄水后水温变化对四大家鱼自然繁殖的影响[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(1): 70-77.
- CAI Yupeng, YANG Zhi, XU Wei. Effect of water temperature variation after impoundment of the Three Gorges Reservoir on natural reproduction of four major Chinese carps[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(1): 70-77.
- [33] 邱如健, 王远坤, 王栋, 等. 三峡水库蓄水对宜昌—城陵矶河段水温情势影响研究[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(3): 108-115.
- QIU Rujian, WANG Yuankun, WANG Dong, et al. Impacts of Three Gorges Reservoir on water temperature regime between Yichang and Chenglingji reach[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(3): 108-115.
- [34] GUO W, HE N, DOU G, et al. Hydrothermal regime variation and ecological effects on fish reproduction in the Yangtze River [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(22): 12039.
- [35] 刘振旗, 李建, 江善虎. 基于 Almon-BP 时滞神经网络模型的叶绿素 a 趋势预测[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(6): 1137-1147.
- LIU Z Q, LI J, JIANG S H. Chlorophyll-a prediction based on the Almon-BP delayed neural network model[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(6): 1137-1147.

(责任编辑 王海锋)