

## 金沙江下游梯级水电开发引起的水温累积效应分析\*

胡光洋<sup>1</sup>, 杨中华<sup>1\*\*</sup>, 白凤朋<sup>2</sup>, 任玉峰<sup>3</sup>, 马一鸣<sup>3</sup>, 李文晖<sup>3</sup>

(1: 武汉大学, 水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072)

(2: 长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051)

(3: 中国长江电力股份有限公司, 宜昌 443000)

**摘 要:** 金沙江下游梯级水库群在流域水温调控中扮演着关键角色, 然而, 对于梯级水库联合运行对下泄水温影响的认知仍然不够充分。本研究基于金沙江下游龙街(三)、乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝水文站长序列实测水温数据, 从水温基线偏移、相位偏移和极值变幅 3 方面定量分析了金沙江下游梯级水库在不同运行阶段对沿程水温的累积影响。结果表明: (1) 金沙江下游梯级水库建成后“热源效应”显著, 乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝年均下泄水温逐年升高, 年内水温变幅较天然水温最大减小 4.1、2.4、1.6、3.2 °C, 沿程增温率由天然状态的 0.348 °C/100 km 降至现阶段的 0.256 °C/100 km。(2) 随着建库时间的增长, 金沙江下游梯级水库水温累积程度逐渐增强, 变化速度趋缓, 至 2022 年四级水电全部投产运行后, 乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝下泄水温比天然水温分别滞后 19、58、49、65 d。(3) 金沙江下游 4 个水库中白鹤滩对水温的影响最大, 且不同类型水库在水温传递和累积方面呈现出独特的规律, 混合型水库作为“龙头”水库时表现为正效应, 稳定分层型水库表现为正效应, 不稳定分层型和过渡型水库在不同阶段分别表现出正效应和负效应。本研究对于优化水资源管理、提高水电效益具有指导作用, 同时为维护下游生态系统的健康提供了科学依据。

**关键词:** 金沙江下游; 梯级水库; 水温; 累积效应

## Water temperature's cumulative effect induced by the construction of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River\*

Hu Guangyang<sup>1</sup>, Yang Zhonghua<sup>1\*\*</sup>, Bai Fengpeng<sup>2</sup>, Ren Yufeng<sup>3</sup>, Ma Yiming<sup>3</sup> & Li Wenhui<sup>3</sup>

(1: State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R.China)

(2: Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, P.R.China)

(3: China Yangtze Power Co., Ltd, Yichang 443000, P.R.China)

**Abstract:** Cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River play a crucial role in watershed temperature regulation. However, there is still a lack of knowledge on how cascade reservoirs affect downstream temperature. This study quantitatively analysed the cumulative effect of four cascade reservoirs (Wudongde, Baihetan, Xiluodu and Xiangjiaba) in the lower reaches of Jinsha River on downstream temperatures. It examined overall temperature deviation, phase deviation, and extreme amplitude using long-term temperature data from Longjie (Three), Wudongde, Baihetan, Xiluodu, and Xiangjiaba stations. The results indicated that: (1) after the completion of the lower reaches of the Jinsha River cascade reservoirs, the “heat source effect” was significant. The average annual discharge water temperature of Wudongde, Baihetan, Xiluodu and Xiangjiaba increased year by year. The annual water temperature variation decreased by 4.1, 2.4, 1.6 and 3.2 °C compared with that of the natural water temperature. The increased rate of the temperature along the reservoir decreased from 0.348 °C/100 km in the natural state to 0.256 °C/100 km at the present stage. (2) As the operational period of the cascade reservoirs along the Jinsha River increased, the cumulative effect on water temperature in the downstream reservoirs gradually intensified, with a slowing rate of change. By the year 2022, following the full commissioning of the four hydropower stations, Wudongde, Baihetan, Xiluodu, and Xiangjiaba exhibited temperature lag times of 19, 58, 49 and 65 days, respectively. (3) Among these four reservoirs, Baihetan exerted the greatest effect on temperature. Different

\* 2024-01-18 收稿; 2024-05-06 收修改稿。

国家自然科学基金项目(U2340216, 52020105006, U2040210)资助。

\*\* 通信作者; E-mail: yzh@whu.edu.cn。

types of reservoirs exhibited diverse patterns in temperature transmission and accumulation. A hybrid reservoir showed positive effect when acting as a “head” reservoir. Stable stratification reservoirs showed positive effect. Unstable stratification and transitional reservoirs showed positive or negative effect at different stages. This study provided valuable guidance for optimizing water resource management and enhancing hydropower efficiency, while offering a scientific foundation for maintaining the health of downstream ecosystems.

**Keywords:** Lower reaches of the Jinsha River; cascade reservoirs; water temperature; cumulative effects

我国西南地区蕴藏着丰富的水能资源,金沙江下游目前已开发了乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 个巨型高坝深水库,形成了世界上规模最大的梯级水库群<sup>[1]</sup>。水库建设和大坝运行在向人类社会提供防洪、发电、航运、灌溉等综合生态系统服务的同时会引发库区及下游河段水环境的剧烈变化,对生物多样性、生物地球化学循环和温室气体排放产生显著影响<sup>[2-3]</sup>。其中,水温作为重要的水环境因子之一,其变化对水生生物的分布和水体新陈代谢等关键生态过程产生着深远影响<sup>[4-6]</sup>,而梯级水库蓄水使得下泄水温明显异于天然河道水温,同单个水库相比,梯级水库群对水温的影响集中表现为群体性、系统性和累积性<sup>[7-8]</sup>。

随着流域开发程度的提高和建库时间的增长,梯级水库引起的水温累积效应及生态影响日益显著,成为梯级水库建设后最突出的环境问题之一。一些学者结合实测数据和数学模型对这一问题展开研究<sup>[9-13]</sup>,结果表明流域开发程度越高,库区水温同温化和下泄水温均化、延迟效应越明显,下游的水温累积效应强度随着与控制水库距离的增加而减弱。黄峰等<sup>[14]</sup>和张士杰等<sup>[15]</sup>分别针对乌江流域和开都河中游进行研究,发现不同类型的水库对水温累积效应的影响各不相同,稳定分层型水库对水温累积具有正效应,混合型水库具有负效应,过渡型水库处于两者之间,梯级电站布置个数和控制性水库工程对水温累积效应起到决定性作用。赵高磊等<sup>[16]</sup>的研究还发现河流梯级开发带来的水温累积影响存在极限,梯级开发使水温分层现象极大地弱化,但库区分层结构不会消失。同时,国内外许多学者结合实测数据对梯级水库建设后的水温累积问题进行了统计分析,如 Žganec 等<sup>[17]</sup>和 Mihailova 等<sup>[18]</sup>通过统计多年实测数据定量分析了水电梯级开发对水温、氮、磷等水环境因子的影响。黄膺翰等<sup>[19]</sup>、於孟元等<sup>[20]</sup>、任实等<sup>[21]</sup>基于实测数据定量分析了金沙江下游梯级水电开发对向家坝下游水温的影响。然而,这些研究在空间尺度上多局限于水电工程的直接影响区域,在时间尺度上缺乏长时间的水温累积影响研究,且不同流域的累积效应及其表现形式存在空间异质性,对于金沙江下游这种高强度、高密度开发的山区河流型梯级水库,其水温累积效应独具特点,加之 2022 年底金沙江下游四级水电才全部投产运行,对其水温改变沿梯级水库的传播和潜在累积的规律缺乏全面认识。因此,本文基于最新的实测水温资料,借助基线偏移指标、相位偏移指标、极值变幅指标对金沙江下游水温累积效应进行量化研究,旨在深入探讨金沙江下游梯级水库运行后的水温变化趋势及累积响应,全面了解梯级水库群对水文循环、生态系统健康以及社会可持续发展的综合影响,为金沙江下游地区的可持续发展提供科学支持。

## 1 研究区域及分析方法

### 1.1 金沙江下游梯级开发情况

金沙江下游为攀枝花至宜宾河段,流经川、滇两省,流域面积为 24.35 万 km<sup>2</sup>,水力资源理论蕴藏量为 2907.9 万 kW,装机容量为 4310 万 kW,年发电量为 1936.5 亿 kW·h,规划按四级开发,自上而下依次为乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝(图 1),根据库水交换次数  $\alpha$ - $\beta$  法<sup>[22]</sup>并结合各个水库季平均水温判断,乌东德为混合型水库,白鹤滩为稳定分层型水库,溪洛渡为不稳定分层型水库,向家坝为过渡型水库,各个水库的工程特性见表 1,每个季节的典型水温结构见图 2。四级电站的开发任务均以发电为主,同时兼顾防洪、拦沙、发展库区航运和改善下游通航条件等综合利用效益,这一地区因其地理位置的特殊性和其梯级水库系统的复杂性而呈现独特的水温时空分布特性。

### 1.2 数据来源

金沙江下游干流主要有龙街(三)、乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 5 个水文站(图 1),后 4 个既是上游水库的出库站,也是下游水库的入库站。本次研究共收集了龙街(三)和乌东德水文站 2020—2022 年、华弹/白鹤滩水文站 1989—2022 年、溪洛渡水文站 2014—2022 年、屏山/向家坝水文站 1960—2022 年的逐日

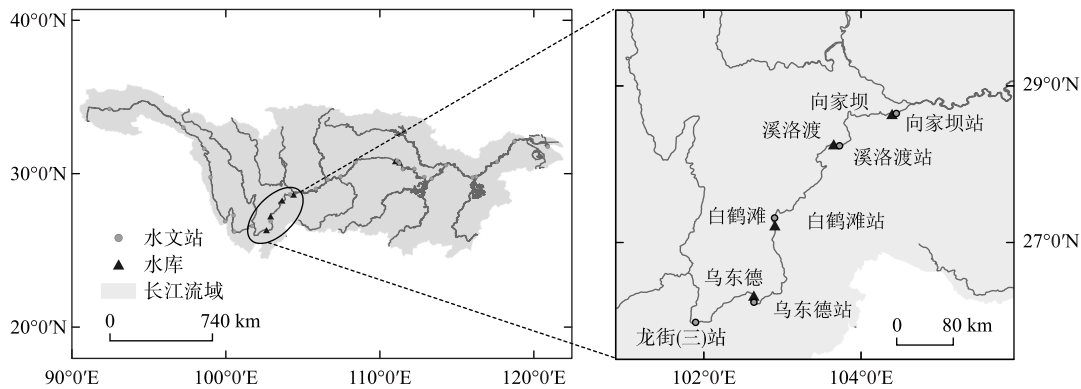


图 1 金沙江下游梯级水库群  
Fig.1 Cascade reservoirs of lower reaches of Jinsha River

表 1 金沙江下游梯级水库工程特性  
Tab.1 Engineering characteristics of the lower reaches of Jinsha River cascade reservoirs

| 水库名称 | 正常蓄水位/m | 库容/<br>( $\times 10^8 \text{ m}^3$ ) | 平均水深/m | 调节性能 | 水温结构类型 | 建成时间    | 平均水力滞留<br>时间/d |
|------|---------|--------------------------------------|--------|------|--------|---------|----------------|
| 乌东德  | 975     | 74.08                                | 40     | 季调节  | 混合型    | 2020-06 | 23             |
| 白鹤滩  | 825     | 206.27                               | 90     | 年调节  | 稳定分层型  | 2021-06 | 57             |
| 溪洛渡  | 600     | 126.70                               | 86     | 季调节  | 不稳定分层型 | 2013-07 | 32             |
| 向家坝  | 380     | 51.85                                | 53     | 季调节  | 过渡型    | 2012-11 | 13             |

水温监测数据及乌东德、溪洛渡水库 1999—2006 年的月均水温数据。

1.3 研究方法

1.3.1 累积效应评价指标 梯级水电的开发会打破自然河流生态系统的平衡,进而对水环境产生一定的累积影响。1979 年美国环境质量委员会提出在环境评价中要考虑累积影响<sup>[8]</sup>,随之美国国家政策法规定:累积效应是指当异向活动与过去、现在及可预见将来可能开展的其他活动结合在一起时,因影响增加而产生的对环境的影响<sup>[8]</sup>。许多学者从不同角度对累积效应进行了分类,无论何种形式的分类方法,其本质上都是对环境累积效应时空异质性的认识<sup>[8]</sup>。

水温过程可视作年周期内的简谐波,简谐波波动变化取决于波的相位和变幅<sup>[23]</sup>,因此可以根据相位偏移和极值变幅来评价波动效应,本文基于收集到的实测水温数据,借助宋策等<sup>[23]</sup>提出的量化水库对水温影响的基线偏移指标、相位偏移指标、极值变幅指标来反映梯级水库对河道水温的累积影响。

基线偏移指标( $I_{BD}$ )定义为下泄水温与天然基准水温整体的偏离程度:

$$I_{BD} = \frac{\sum_{i=1}^{12} (T_{i,c} - T_{i,n})^2}{\sum_{i=1}^{12} (T_{i,n} - \bar{T})^2} \tag{1}$$

式中, $T_{i,c}$ 为建库后第*i*月的河流水温, $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{i,n}$ 为第*i*月的天然河流基准水温, $^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{T}$ 为天然河流基准水温的年均值, $^{\circ}\text{C}$ ;  $i$ 为月序( $i=1,2,3,\dots,12$ )。  $I_{BD}$ 越大,说明与天然水温的偏离程度越大。

相位偏移指标( $I_{PS}$ )定义为下泄水温与天然水温集中期的相位差异:

$$I_{PS} = \frac{\arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^{12} T_{i,c} \sin\theta_{i,c}}{\sum_{i=1}^{12} T_{i,c} \cos\theta_{i,c}}\right) - \arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^{12} T_{i,n} \sin\theta_{i,n}}{\sum_{i=1}^{12} T_{i,n} \cos\theta_{i,n}}\right)}{P_{\max}} \tag{2}$$

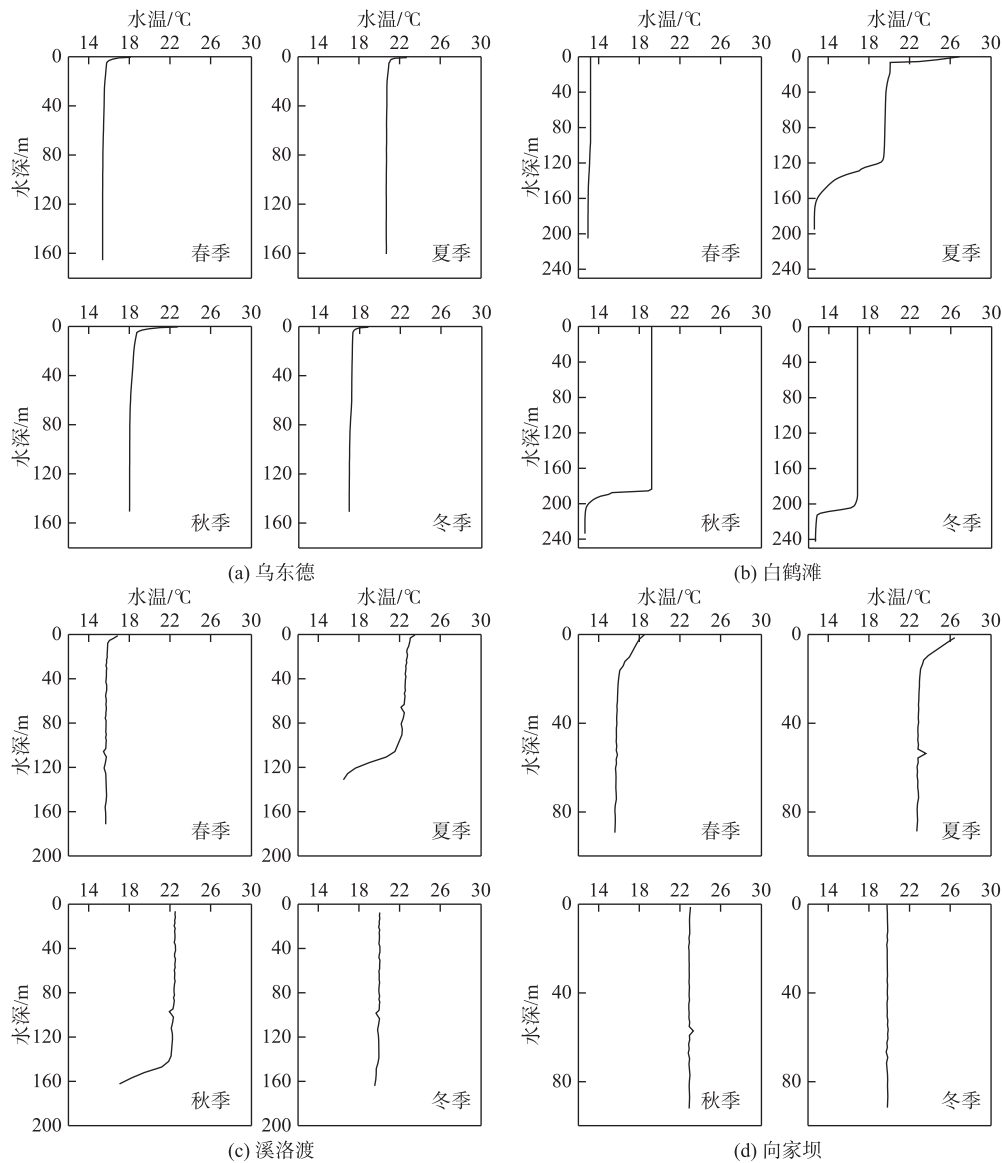


图 2 金沙江下游梯级水库坝前断面典型水温结构  
Fig.2 Typical water temperature structure in the pre-dam section of the lower reaches of Jinsha River cascade reservoirs

式中,  $P_{\max}$  为最大相位偏移量, 本研究为 60 d;  $\theta_{i,c}$  和  $\theta_{i,n}$  为建库后和天然情况下第  $i$  月水温的矢量角度;  $I_{ps}$  为正代表相位滞后, 为负则代表相位超前。

其原理为将一年内所有月均水温看作向量, 水温大小作为该月均水温矢量的模, 所处的月份作为月均水温矢量的方向, 将一年中各月均水温矢量求和, 合矢量方向即为年水温集中期, 建库后下泄水温集中期与天然河流水温集中期的差值即为相位偏移值<sup>[23]</sup>。

极值变幅指标 ( $I_{EC}$ ) 定义为下泄水温与天然水温年内极值变幅的比值:

$$I_{EC} = (T_{\max,c} - T_{\min,c}) / (T_{\max,n} - T_{\min,n}) \quad (3)$$

式中,  $T_{\max,c}$  和  $T_{\min,c}$  分别为建库后河流水温的月极大值和月极小值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\max,n}$  和  $T_{\min,n}$  为天然基准水温的月极

大值和月极小值,℃。 $I_{EC}$ 越小,说明水温平坦化效应越强。

在应用以上指标评估水温累积效应时,为解析水库对水温的影响,定义水库建库所产生的工程效应为水库蓄水后的水温波动减去蓄水前由自然因素所引起的水温波动。

1.3.2 STL 时间序列分解法 STL 时间序列分解法是以局部加权回归作为平滑方法的时间序列分解方法,是一种非参数统计方法,能够将时间序列分解为趋势项、周期项及不规则的残差项<sup>[24]</sup>:

$$Y_t = T_t + S_t + R_t \tag{4}$$

式中, $Y_t$ 为  $t$  时刻的观测数据值, $T_t$ 、 $S_t$  和  $R_t$  分别为  $t$  时刻的趋势项、周期项和残差项。通过 STL 时间序列分解,可以揭示时间序列的变化趋势、周期长度、随机波动范围等,并了解它们之间的联系。

定义趋势强度为:

$$F_t = \max\left(0, 1 - \frac{\sigma(R_t)}{\sigma(T_t + R_t)}\right) \tag{5}$$

式中, $F_t$ 代表趋势强度,其值在 0~1 之间, $\sigma(R_t)$ 代表残差项的方差, $\sigma(T_t + R_t)$ 代表去除周期项数据的方差。 $F_t$ 越接近于 1,说明数据的趋势性程度越高,数据的可预测性越好。

2 结果分析

2.1 水温变化特征分析

金沙江下游已经建成 4 座大型梯级水库,根据乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝水文站历史水温统计数据,得到 4 个梯级水库的特征年水温变化过程。其中,天然水温为 1999—2006 年平均水温,以排除二滩水库的影响,2013 年为向家坝投产发电时间,2014 年为溪洛渡投产发电时间,2021 年为乌东德投产发电时间,2022 年为白鹤滩投产发电时间。由图 3 可知,4 座水库建成之后,下泄水温较天然情况下都出现了秋冬季高于天然水温、春夏季低于天然水温、年内水温变幅减小和年均水温升高的特点。

水库运行使年内水温过程发生改变,4 座水库均呈现 9 月—翌年 2 月下泄水温高于天然水温,3—8 月下泄水温低于天然水温。其中 1 月份上升幅度最大,5 月下降幅度最大,乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝下泄水温年内变幅较天然水温最大分别减小 4.1、2.4、1.6、3.2℃,梯级水库沿程增温率由天然状态的 0.348℃/100 km 降至现阶段的 0.256℃/100 km。随着梯级水库逐渐投入运行,其“热源效应”逐渐凸显,各个库区下泄水温呈现逐年上升的趋势。截至 2022 年,乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝年均下泄水温分别为 17.4、19.1、20.5、19.6℃,分别比天然年均水温升高 0.1、1.5、2.0、1.0℃。

2.2 累积效应特征分析

2.2.1 时间累积效应 根据收集到的乌东德站 2020—2022 年、白鹤滩站 1989—2022 年、溪洛渡站 2014—2022 年、向家坝站 1960—2022 年逐日水温,计算得到各个库区逐年的基线偏移指标  $I_{BD}$ 、相位偏移指标  $I_{PS}$  和极值变幅指标  $I_{EC}$ 。金沙江下游四级水库分两阶段投入使用,2013—2020 年为溪洛渡—向家坝两级水电联合运行期,2021—2022 年为乌东德—白鹤滩—溪洛渡—向家坝四级水电联合运行期,白鹤滩和向家坝分别作为金沙江下游上、下两级的控制水库,其各指标变化情况见表 2 和图 4。金沙江中游梯级水库群 2011 年之后相继投产发电,但其总库容仅为金沙江下游梯级水库群的 15%,且距金沙江下游入口 130 km 左右,其水温影响传递至金沙江下游时已基本消失,故下文分析中不考虑金沙江中游梯级水库群的影响。

表 2 白鹤滩和向家坝特征时间段累积效应指标均值

| 白鹤滩         |          |          |          | 向家坝         |          |          |          |
|-------------|----------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|
| 时间          | $I_{BD}$ | $I_{PS}$ | $I_{EC}$ | 时间          | $I_{BD}$ | $I_{PS}$ | $I_{EC}$ |
| 1989—2010 年 | 0.06     | -0.04    | 1.10     | 1960—2008 年 | 0.07     | -0.14    | 1.11     |
| 2011—2015 年 | 0.12     | 0.14     | 1.01     | 2009—2012 年 | 0.05     | 0.02     | 1.02     |
| 2016—2022 年 | 0.35     | 0.29     | 0.82     | 2013—2022 年 | 0.41     | 0.59     | 0.84     |

由 5 年滑动平均曲线可以看出,白鹤滩站 1989—2010 年  $I_{BD}$ 、 $I_{PS}$ 、 $I_{EC}$  变化平稳,3 项指标的均值分别为

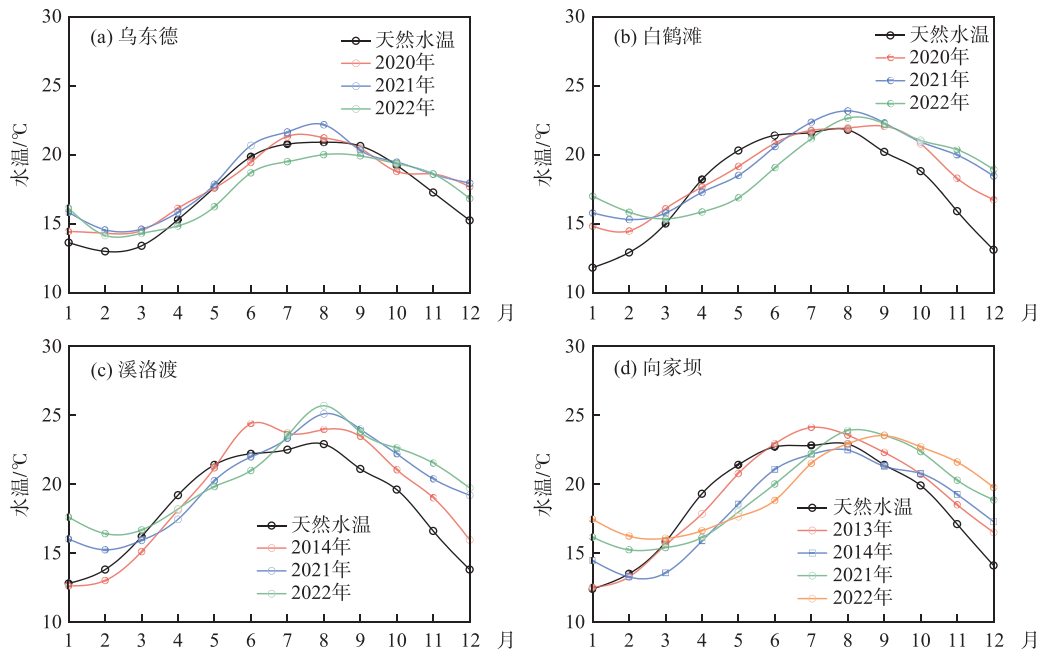


图3 金沙江下游梯级水库特征水温变化过程

Fig.3 Process of characteristic water temperature variation in the lower reaches of Jinsha River cascade reservoirs

0.06、-0.04 和 1.10, 代表天然水温波动。自 2011 年起, 各项指标出现小范围波动, 原因是下游溪洛渡水库拦坝蓄水后库区储存的高温水减少了与上游来水之间的相互传热, 对白鹤滩库区河道水温产生了一定的逆影响。2015 年白鹤滩拦坝蓄水,  $I_{BD}$ 、 $I_{PS}$  逐渐增大, 增长速率分别为  $0.0387$ 、 $0.0362 \text{ a}^{-1}$ ,  $I_{EC}$  逐渐减小, 减小速率为  $0.0202 \text{ a}^{-1}$ 。2021 年白鹤滩投产发电, 3 个指标的变化速率加快。向家坝站 1960—2008 年  $I_{BD}$ 、 $I_{PS}$ 、 $I_{EC}$  变化平稳, 3 项指标的均值分别为 0.07、-0.14、1.11, 代表天然水温波动。2008 年溪洛渡、向家坝拦坝蓄水, 水库对水温的影响凸显,  $I_{BD}$ 、 $I_{PS}$  逐渐增大,  $I_{EC}$  逐渐减小, 2012 年向家坝投产发电之后,  $I_{BD}$ 、 $I_{PS}$ 、 $I_{EC}$  变化速率加快, 分别为  $0.0423$ 、 $0.0524$ 、 $0.0245 \text{ a}^{-1}$ , 其变化速率大于白鹤滩同时段的变化速率, 体现了溪洛渡—向家坝两级水电联合运行对向家坝下泄水温的影响。2021 年白鹤滩投产发电后, 向家坝下泄水温受四级水电的共同影响, 3 项指标变化速率进一步加快。由于白鹤滩投产发电时间较短, 水温影响仍需根据后续的监测数据确定。

在利用描述性统计揭示白鹤滩和向家坝各项累积指标多年总体变化特征的基础上, 利用 STL 时间序列分解进一步对  $I_{BD}$ 、 $I_{PS}$ 、 $I_{EC}$  进行时序分解<sup>[24]</sup>, STL 分解的特征参数见表 3,  $I_{BD}$ 、 $I_{PS}$ 、 $I_{EC}$  分解所得残差项的平均值都在 0 附近, 证实了 STL 分解的可行性, STL 分解的结果 (图 5) 与滑动平均的结果基本一致, 趋势强度均大于 0.5, 说明水温变化的趋势性良好。从残差项可以看出, 白鹤滩 2010 年之后下泄水温的波动程度大于之前的时间序列, 向家坝 2012 年之后下泄水温的波动程度大于之前的时间序列, 说明水温受水库运行的影响较大。

金沙江下游梯级水库特征年累积效应指标见图 6, 溪洛渡、向家坝水库刚建库时, 与天然水温状态接近, 至 2018、2017 年 (建库 5 年), 与天然水温分别存在 11 和 50 d 的相位延迟; 至 2022 年乌东德、白鹤滩水库投产发电时, 上游乌东德、白鹤滩下泄水温与天然水温分别产生 14% 和 90% 的整体偏离, 19 和 58 d 的相位延迟, 水温变幅较天然水温均减小 24%; 受四级水电联合运行的影响, 下游溪洛渡和向家坝两库下泄水温与天然水温分别产生 72% 和 75% 的整体偏离, 49 和 65 d 的相位延迟, 水温变幅较天然水温分别减小 19% 和 40%。

**2.2.2 空间累积效应** 以龙街 (三)、乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝多年平均水温为梯级水库天然基准水温, 基于 2020—2022 年的水温监测数据分析水温变化沿梯级水库的传递及累积规律。由图 7 可以看出,

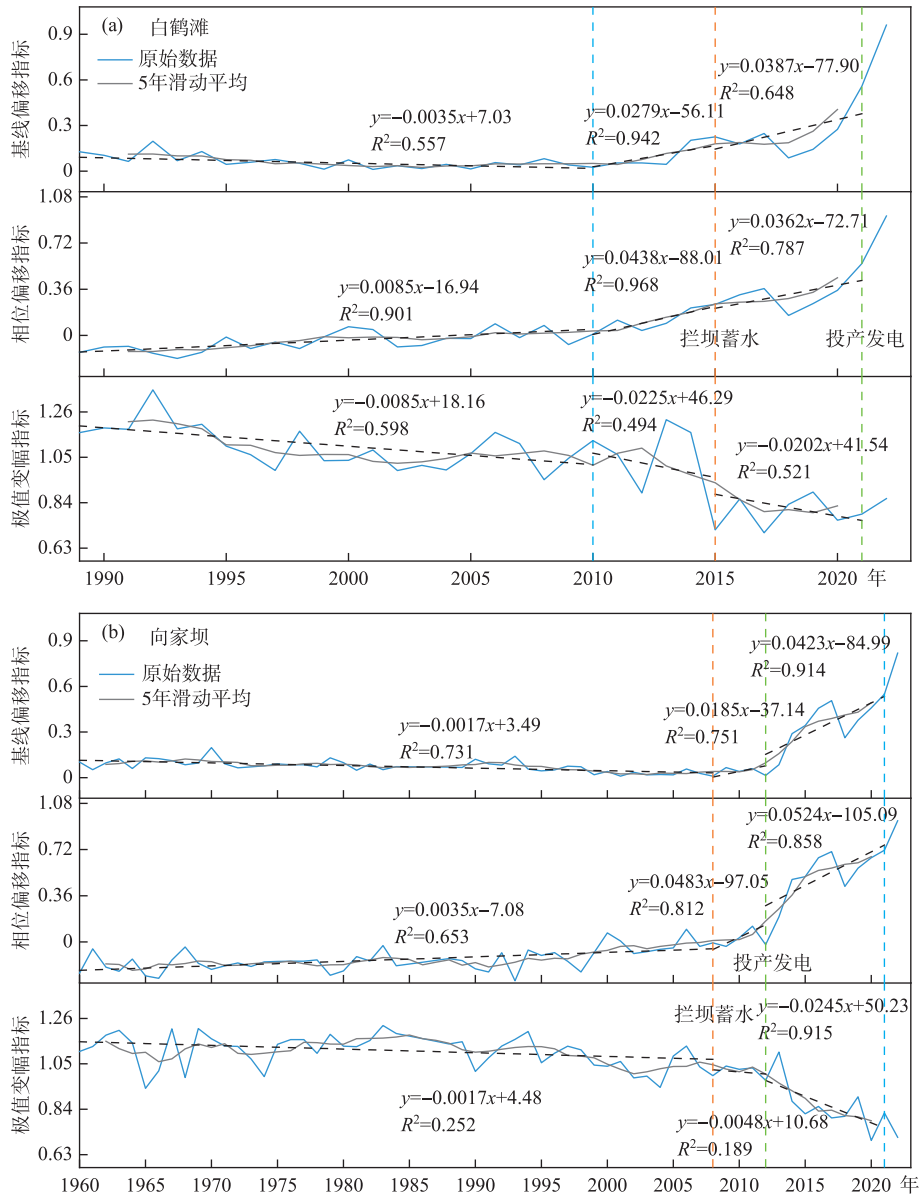


图4 白鹤滩和向家坝累积效应指标变化过程

Fig.4 Process of cumulative effect indicators variation of Baihetan and Xiangjiaba

2020年乌东德、白鹤滩未投产发电时,下游溪洛渡、向家坝水库对水温影响较大, $I_{BD}$ 和 $I_{PS}$ 在龙街—白鹤滩逐渐减小,在白鹤滩—向家坝逐渐增大。2021—2022年乌东德、白鹤滩相继投产发电后,金沙江下游水温受四级水库联合影响, $I_{BD}$ 在龙街—溪洛渡沿程逐渐增大,到向家坝时减小, $I_{PS}$ 在龙街—白鹤滩逐渐增大,传递到溪洛渡库区下游时减小,到向家坝又增大。 $I_{EC}$ 呈现龙街—乌东德减小、乌东德—溪洛渡增大、至向家坝时减小的规律。

### 3 讨论

金沙江下游梯级水库具有良好的温度缓冲特性和稳定性,大面积的水体和较大的水深使得水库有极强

表 3 STL 分解特征参数  
Tab.3 Feature parameters of STL decomposition

| STL 特征<br>参数  | 白鹤滩      |          |          | 向家坝      |          |          |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|               | $I_{BD}$ | $I_{PS}$ | $I_{EC}$ | $I_{BD}$ | $I_{PS}$ | $I_{EC}$ |
| $\bar{R}_t$   | -0.009   | -0.007   | 0.001    | -0.002   | -0.002   | 0.001    |
| $\sigma(R_t)$ | 0.002    | 0.003    | 0.009    | 0.002    | 0.005    | 0.003    |
| $F_t$         | 0.931    | 0.943    | 0.627    | 0.933    | 0.941    | 0.792    |

的储热能力,改变了库区水体的热量分布,减缓了外部环境变化对水温的影响,进而引起水温分层,库区水体分层期水温分布通常呈现顶部高温水、底部低温水。电站的取水口一般位于高温水层,导致下泄年均水温高于天然年均水温,而水库中的水体循环和混合过程可以将水体中的温度尽可能均匀地分布到不同深度,减小水温的垂向梯度,进而降低下泄水温的变幅。

随着时间的推移,金沙江下游梯级水库对水温的调节作用逐渐显现出来,在春夏季,水库可以吸收和储

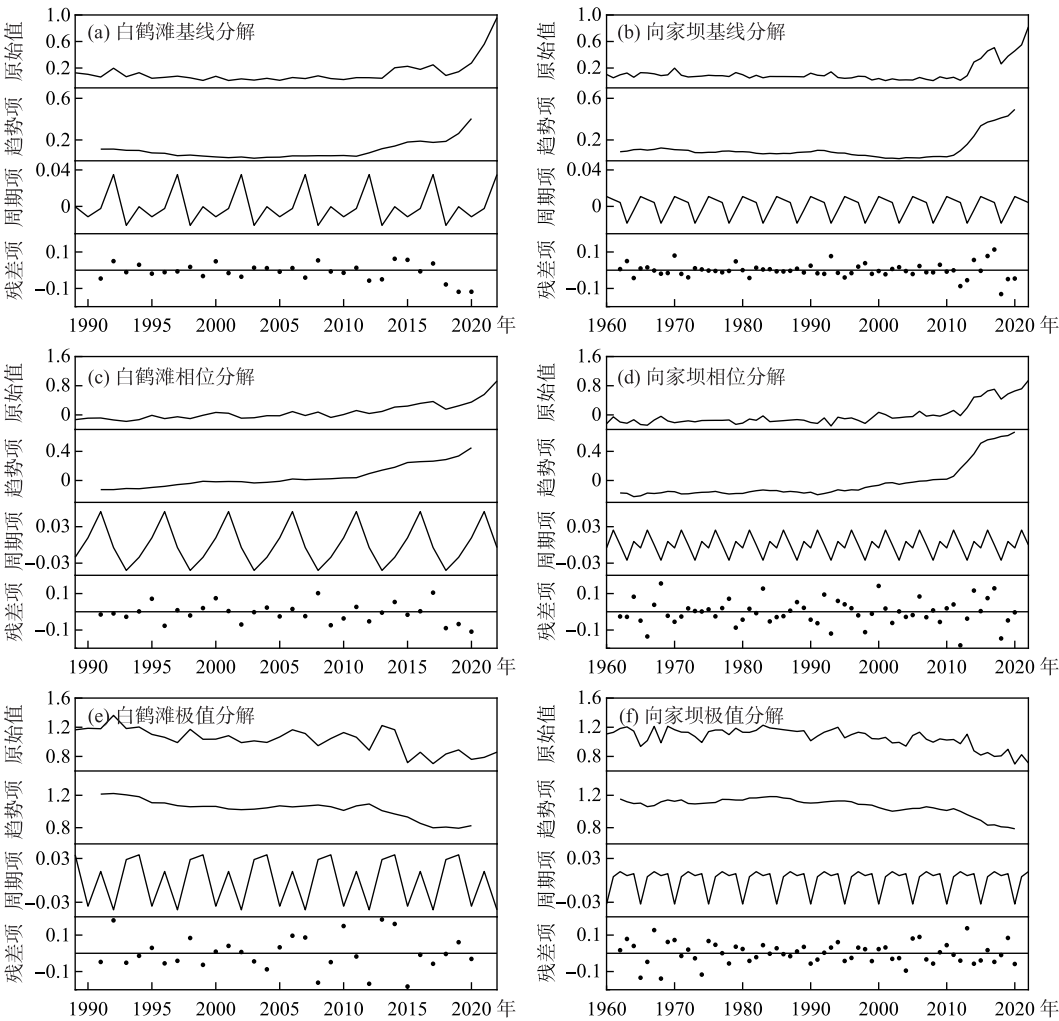


图 5 白鹤滩和向家坝累积效应指标 STL 分解  
Fig.5 STL decomposition of cumulative effect indicators for Baihetan and Xiangjiaba



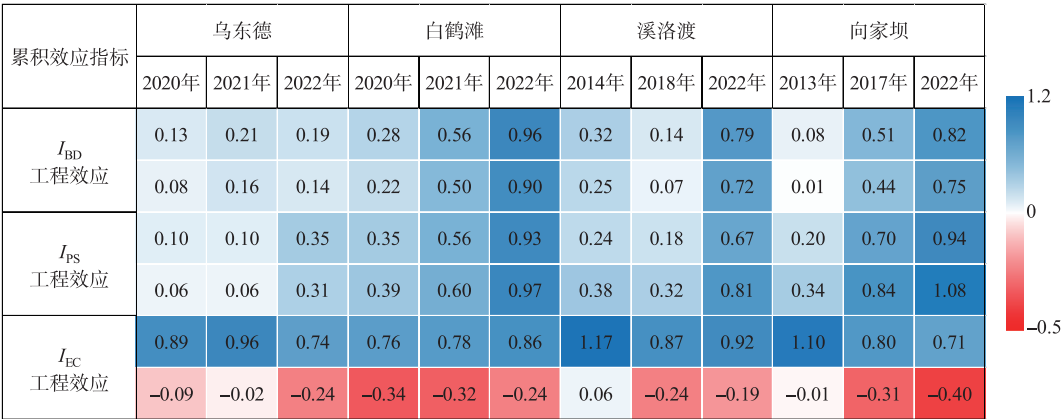


图 6 金沙江下游梯级水库特征年累积效应指标热力图(工程效应=建库后水温波动-天然河道水温波动)

Fig.6 Heatmap of cumulative effect indicators for the characteristic periods in the lower reaches of Jinsha River cascade reservoirs

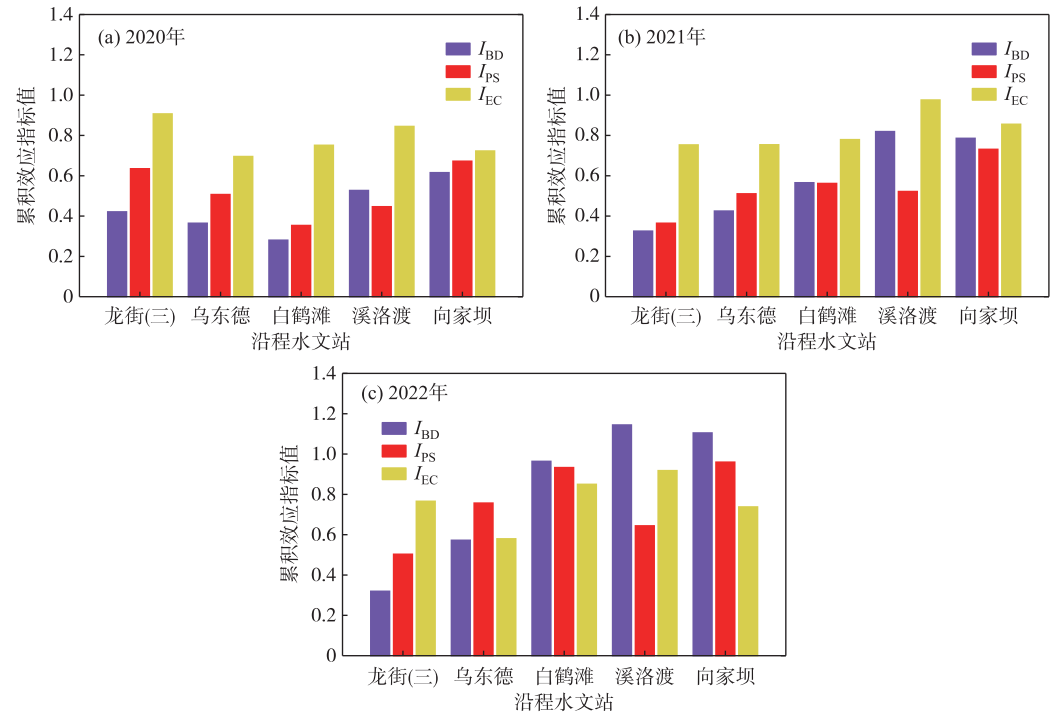


图 7 金沙江下游累积效应指标沿程变化

Fig.7 Changes in cumulative effect indicators along the lower reaches of Jinsha River

存大量的热量,使得下泄水温低于天然水温;在秋冬季,则能够释放储存的热量,使得下泄水温高于天然水温,水库的这种储热与放热过程对下泄水温产生持续影响,因此,水温的累积效应随着时间的增长而逐渐增强,具体体现为下泄水温与天然水温整体偏离程度、相位延迟天数逐渐增大,年内极值变幅逐渐减小。累积变化速度逐渐减缓与 3 个因素有关:首先,水库在一定程度上能够平滑外部环境的温度变化,减缓水温的剧烈波动;其次,随着时间的推移,库区水温逐渐趋于稳定,增加了水温改变的难度,使得累积效应速度相对减缓

缓;最后,水库对下游水温的调节作用可能会逐渐受到周边和自然环境的综合影响,例如气候变暖、人工调度、流域水循环等因素,这些因素会影响库区水温分布,导致水温累积效应的变化速度逐渐减慢。

此外,由空间累积效应的结果可以看出,各级水库对水温的累积作用不仅仅是简单的叠加关系,不同类型的水库对水温累积效应呈现不同的影响。水温改变沿梯级水库传播的过程与水库物理特性和调度过程有关,水库物理特性包括水库在河流纵向上的位置和调节性能,调度过程包括水库运行调度和叠梁门生态调度,与水库的水量条件、库水位管理规程、取水口深度、叠梁门落门层数等因素有关。乌东德(季调节型水库)为混合型水库,其作为金沙江下游的“龙头”水库,具有最大的控制范围,对水温累积影响呈现正效应(沿程增强),而黄峰等<sup>[14]</sup>的研究发现混合型水库非“龙头”水库时对水温的累积影响呈现负效应,可见当混合型水库在梯级水库中处于不同位置时对水温累积呈现不同的影响;白鹤滩(年调节型水库)为稳定分层型水库,是金沙江下游第二级水库,其调节能力和对水温的改变程度最大,致使  $I_{BD}$  最大改变 0.39,  $I_{PS}$  最大改变 0.17,  $I_{EC}$  最大改变 0.27,对整体水温的累积影响呈现正效应;溪洛渡(季调节型水库)为不稳定分层型水库,调节性能仅次于白鹤滩水库,在溪洛渡—向家坝两级水电联合运行期,其对水温累积效应呈现正效应,在乌东德—白鹤滩—溪洛渡—向家坝四级水电联合运行期,受白鹤滩水库调度的影响,库区来水量减小,其对水温整体偏移和极值变幅呈现正效应,对相位偏移呈现负效应(沿程减弱);向家坝(季调节型水库)为过渡型水库,其对水温整体偏移和极值变幅呈现负效应,对相位偏移呈现正效应。需要说明的是,目前仅根据实测水温数据不能完全说明调度过程对于水温的影响,随着梯级水库运行的不断调整和优化,水温累积效应可能会呈现不同的变化趋势,未来需结合丰富的实测水温及运行调度资料进行精细化地分析。

#### 4 结论

1)金沙江下游4座大型梯级水库的建设导致下泄水温升高,年内水温变幅减小,沿程增温率减小。此外,水库运行还对水温的季节性变化产生了显著影响,表现为秋冬季高于天然水温、春夏季低于天然水温。

2)通过计算基线偏移指标、相位偏移指标和极值变幅指标,揭示了水库运行对水温的影响。在水库未建成之前,水温波动呈现相对平稳状态,随着梯级水库运行时间的增长,与天然水温整体偏离程度逐渐增大,相位延迟天数逐渐加长,年内变幅逐渐减小,但变化速度趋缓。STL时间序列分解进一步印证了这一趋势,残差项的波动程度在水库运行后明显增大。

3)在四级水电联合运行期,不同类型的水库对水温的影响呈现不同的效果。混合型水库作为梯级“龙头”水库,对整体水温变化呈正效应;稳定分层型水库具有较强的调节能力,对整体水温变化呈正效应;不稳定分层型水库对水温整体偏移和极值变幅呈正效应,对相位偏移呈负效应;过渡型水库对水温整体偏移和极值变幅呈负效应,对相位偏移呈正效应,不同梯级布置方案的水温累积效果不同。

#### 5 参考文献

- [1] Wang C. Research conception of ecological protection and restoration of high dams and large reservoirs construction and hydropower cascade development in southwestern china. *Advanced Engineering Science*, 2017, **49**(1): 19-26. DOI: 10.15961/j.jsuese.2017.01.003. [王超. “西南水电高坝大库梯级开发的生态保护与恢复”研究构想. 工程科学与技术, 2017, **49**(1): 19-26.]
- [2] Long LH, Ji DB, Liu DF *et al.* Effect of cascading reservoirs on the flow variation and thermal regime in the lower reaches of the Jinsha River. *Water*, 2019, **11**(5): 1008. DOI: 10.3390/w11051008.
- [3] Duka MA, Shintani T, Yokoyama K. Thermal stratification responses of a monomictic reservoir under different seasons and operation schemes. *Science of the Total Environment*, 2021, **767**: 144423. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144423.
- [4] Hao HX, Yang X, Yang MF *et al.* Impacts of the cascade reservoirs of Jinshajiang River on water temperature and fish spawning time. *J Lake Sci*, 2023, **35**(1): 247-256. DOI: 10.18307/2023.0118. [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. 湖泊科学, 2023, **35**(1): 247-256.]
- [5] Peng SM, Shang WX, Wang Y *et al.* Research on ecological impacts of the joint operation of cascade reservoirs in the upstream of the Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, **49**(10): 1187-1198. [彭少明, 尚文绣, 王煜等. 黄河上游梯级水库运行的生态影响研究. 水利学报, 2018, **49**(10): 1187-1198.]
- [6] Zhang C, Zhang Y, Wu YJ *et al.* Reservoir ecological regulation strategy to alleviate water temperature imbalances? *Advances in Water Science*, 2023, **34**(1): 134-143. [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. 水科学进展, 2023, **34**(1):

- 134-143.]
- [ 7 ] Zhang CR, Dai HC, Gao JZ *et al.* The major coming science and technology problems in construction and operation of super hydropower engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, **38**(S1): 7-14. [张超然, 戴会超, 高季章等. 特大型水电工程建设和运行面临的主要科技问题. 水利学报, 2007, **38**(S1): 7-14.]
- [ 8 ] Ji DB, Long LH, Xu H *et al.* Advances in study on cumulative effects of construction of cascaded reservoirs on water environment. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, **37**(3): 7-14. [纪道斌, 龙良红, 徐慧等. 梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展. 水利水电科技进展, 2017, **37**(3): 7-14.]
- [ 9 ] Liu LF, Chen KQ, Zhang SJ *et al.* Study on cumulative effects of water temperature by cascade hydropower stations built on rivers. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2007, (3): 173-180. [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. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, (3): 173-180.]
- [10] Deng Y, Li J, Li KF *et al.* Cumulative impact of cascade power stations on water temperature. *Advances in Water Science*, 2008, **19**(2): 273-279. [邓云, 李嘉, 李克锋等. 梯级电站水温累积影响研究. 水科学进展, 2008, **19**(2): 273-279.]
- [11] Hao HS, Deng Y, Li KF *et al.* Study on water temperature cumulative effects of diversion type cascade development. *Advanced Engineering Sciences*, 2009, **41**(2): 29-34. [郝红升, 邓云, 李克锋等. 有“龙头水库”的河流引水式梯级开发的水温累积影响. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, **41**(2): 29-34.]
- [12] Tuo YC, Zhou CY, Liang RF *et al.* Influence of hydroelectric development on water temperature downstream the Pubugou hydropower station of the Dadu River. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(2): 299-306. [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. 水科学进展, 2016, **27**(2): 299-306.]
- [13] Liang RF, Deng Y, Tuo YC *et al.* Analysis on Characteristics of water temperature's cumulative effects of river cascade hydropower stations. *Journal of Sichuan university (Engineering Science Edition)*, 2012, (S2): 221-227. DOI: 10.15961/j.jsuese.2012.s2.056. [梁瑞峰, 邓云, 脱友才等. 流域水电梯级开发水温累积影响特征分析. 四川大学学报(工程科学版), 2012, (S2): 221-227.]
- [14] Huang F, Wei L, Li L *et al.* Cumulative effects of water temperature by cascade hydropower stations built on upper and middle reaches of the Wujiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(4): 337-342. [黄峰, 魏浪, 李磊等. 乌江干流中上游水电梯级开发水温累积效应. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(4): 337-342.]
- [15] Zhang SJ, Yan JP, Li GQ. Cumulative effects of cascade development project adjustment on water temperature. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, **45**(11): 1336-1343. [张士杰, 闫俊平, 李国强. 流域梯级开发方案调整的水温累积影响研究. 水利学报, 2014, **45**(11): 1336-1343.]
- [16] Zhao GL, Lin L, Pu XC *et al.* The limit of water temperature influence of cascade reservoir. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(1): 120-128. [赵高磊, 林玲, 蒲迅赤等. 梯级水库水温影响的极限. 水科学进展, 2020, **31**(1): 120-128.]
- [17] Žganeć K. The effects of water diversion and climate change on hydrological alteration and temperature regime of Karst Rivers in central Croatia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(9): 5705-5723. DOI: 10.1007/s10661-011-2375-1.
- [18] Mihailova P, Traykov I, Tosheva A *et al.* Changes in biological and physicochemical parameters of river water in a small hydropower reservoir cascade. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2013, **19**(2): 286-289.
- [19] Huang YH, Yan ZL, Lu JY *et al.* Analysis of water temperature variation in the downstream of Xiangjiaba hydropower station. *Water Power*, 2022, **48**(12): 7-10, 97. [黄膺翰, 严忠奎, 卢晶莹等. 向家坝水电站下游水温变化分析. 水力发电, 2022, **48**(12): 7-10, 97.]
- [20] Yu MY, Chen XB, Xue JY *et al.* Influence of cascade hydropower construction on water temperature downstream of the Jinsha River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023; 1-7. [於孟元, 陈孝兵, 薛敬阳等. 金沙江下游水电梯级开发对下游水温的影响. 长江科学院院报, 2023; 1-7.]
- [21] Ren S, Liu L, Zhang DJ *et al.* Research on water temperature distribution in Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoirs. *Yangtze River*, 2018, **49**(3): 32-35. [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. 人民长江, 2018, **49**(3): 32-35.]
- [22] Jing Z, Zhang JH, Cao HQ *et al.* Research progress and trend of reservoir water temperature. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023, **40**(2): 52-59, 66. DOI: 10.11988/ckyyb.20211026. [靖争, 张爵宏, 曹慧群等. 水库水温研究进展及趋势. 长江科学院院报, 2023, **40**(2): 52-59, 66.]
- [23] Song C, Zhou XD, Tang W. Evaluation indicators for assessing the influence of reservoirs on downstream water temperature. *Advances in Water Science*, 2012, **23**(3): 419-426. [宋策, 周孝德, 唐旺. 水库对河流水温影响的评价指标. 水科学进展, 2012, **23**(3): 419-426.]
- [24] Cleveland RB, Cleveland WS, McRae JE *et al.* STL: A seasonal-trend decomposition. *Journal of Official Statistics*, 1990, **6**(1): 3-73.