

基于多尺度分解与深度学习融合的河道水温变化归因分析 ——以金沙江下游梯级水库群为例*

陈璐皓¹, 龙良红^{1,2**}, 马一鸣², 任玉峰², 黄亚男¹, 纪道斌^{1**}

(1. 水利部长江上中游水库群调度运行对河流生态系统影响要素野外科学观测研究站,宜昌 443002)

(2. 中国长江电力股份有限公司, 宜昌 443000)

摘要: 梯级水库运行对于河道水温具有显著影响。本文基于最大重叠离散小波变换(MODWT)与多分辨率分析(MRA), 结合 ERA5-Land 再分析数据与 Bi-LSTM 模型, 构建了气候变化与水库运行对河道水温影响的量化归因框架, 并以金沙江下游向家坝站为例, 探究了梯级水库群运行对下游河道水温的多尺度影响。研究结果表明: (1) 梯级水库联合运行显著削弱了中高频尺度(日、周、月尺度)的水温波动; (2) 在低频尺度(季节及年际尺度)上, 水库运行导致水温变化趋于平缓并出现相位延迟, 且该现象随水库数量增加而增强, 在四库运行期水温相位相较于气温相位滞后 50 天; (3) 归因分析揭示: 在季节尺度, 水库运行是水温改变的主要影响因素, 随着水库数量增加呈现非线性变化; 在年尺度, 两库运行时期年均水温相较于自然时期下降 0.22°C, 水库为主要驱动因素造成降幅达 0.33°C, 进入四库运行时期, 水温相较于自然时期上升 0.41°C, 此时完全由气候变化所驱动。研究揭示了梯级水库对水温影响的多时间尺度特征, 提出了新的归因分析方法, 为水库生态调度与流域水温管理提供了科学依据。

关键词: 梯级水库 水温 Bi-LSTM 模型 归因框架 ERA5-Land

Attribution Analysis of River Water Temperature Changes Based on the Integration of Multi-Scale Decomposition and Deep Learning: A Case Study of the Cascade Reservoir System in the Lower Jinsha River

Chen Junhao¹, Long Lianghong^{1,2**}, Ma Yiming², Ren Yufeng², Huang Yanan¹, Ji Daobin^{1**}

(1. Field Scientific Observation and Research Station of Impacts of Middle and Upper Yangtze River Reservoir Group Operation on River Ecosystem, Ministry of Water Resources, Yichang, Hubei 443002, P.R.China)

2. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang, Hubei 443000, P.R.China)

Abstract: The operation of cascade reservoirs significantly alters river thermal regimes. This study develops a quantitative attribution framework integrating Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform (MODWT), multiresolution analysis (MRA), ERA5-Land reanalysis data, and a Bi-LSTM model to distinguish the effects of climate change and reservoir operation on river water temperature. Using the Xiangjiaba Station on the lower Jinsha River as a case study, the multi-scale impacts of cascade reservoir operation on water temperature were examined. The

* 2025-10-16 收稿; 2025-12-29 收修改稿。

国家自然科学基金项目(52409096、52009066)和水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心开放研究基金项目(GJCZX-JJ-202418)联合资助。

**通信作者, E-mail: long_llh@163.com

results show that: (1) Cascade reservoir joint operation substantially attenuates water temperature fluctuations at medium-to-high frequency scales (daily, weekly, and monthly). (2) At low-frequency scales (seasonal and interannual), reservoir operation leads to smoother water temperature variations with phase delays, an effect that intensifies as the number of reservoirs increases. During the four-reservoir operation period, the water temperature phase lagged behind the air temperature phase by 50 days. (3) Attribution analysis indicates that at the seasonal scale, reservoir operation is the dominant driver of water temperature change, exhibiting a nonlinear increase in influence with the growing number of reservoirs. At the annual scale, during the two-reservoir operation period, the annual mean water temperature decreased by 0.22°C relative to the natural period, primarily due to reservoir operations, which contributed a decrease of 0.33°C. In the four-reservoir operation period, water temperature increased by 0.41°C compared to the natural period, a change entirely attributable to climate change. This study reveals the multi-temporal scale characteristics of cascade reservoir impacts on water temperature, proposes a novel attribution methodology, and provides a scientific basis for ecological reservoir operation and watershed thermal management.

Keywords: Cascade reservoirs; Water temperature; Bi-LSTM model; Attribution framework; ERA5-Land

水温是决定河流生态系统结构与功能的关键环境因子，可直接调控水生生物的代谢、繁殖及空间分布，对维持生态平衡具有重要作用^[2]。河流水温变化主要受气候因子（如气温、太阳辐射和风速等）影响，表现出明显的自然节律^[3]。然而，随着流域水电的梯级开发，水库运行对下游水文情势的影响日益凸显，特别是在水温方面，人类活动的干预已逐渐改变其天然动态，形成气候与水库调度共同主导的新模式^[4-5]。

大量研究表明，水库蓄水削弱了库区水温的季节性波动，引起下游河道水温的相位滞后，且梯级水库的叠加运行可能进一步放大此类效应^[6-7,11]。在这一背景下，深入探究梯级水库运行对河道水温的影响，成为当前研究的重点。长江作为世界最大的清洁能源走廊，梯级水库群建设在发电、防洪、航运等方面发挥着巨大的综合效益。在长江大保护和国家水网建设背景下，河道水温研究对于维持流域生态平衡、保障水资源可持续利用以及应对气候变化影响具有关键意义。已有大量研究致力于揭示长江梯级水库的水温效应：周扬等^[3]研究表明，长江上游梯级水库群运行导致河道水温变化幅度减小、峰值滞后，并表现出显著的沿程累积影响；於孟元等^[11]则针对金沙江下游四大梯级水库，分析了不同水库运行时期对河道水温的影响；胡光洋等^[5]研究进一步定量分析了金沙江梯级水库在不同运行阶段对水温基线、相位及极值变幅等产生的累积效应。然而，近年来，在全球变暖和流域极端气候变化背景下，这些研究忽略了气候对河道水温变化的贡献，进而可能高估了水库建设对下游河道水温的影响。Chen 等^[1]通过融合遥感观测、物理机制指标与可解释机器学习，发现气候变化与梯级水库运行共同重塑河流热力机制，导致河流持续变暖、季节极端性减弱、热力相位延迟，且气候因子的影响力格局发生显著转变。这也表明未来河流热管理需兼顾气候变化趋势与水库运行模式的协同作用。

随着 IPCC 第六次评估报告指出全球气温持续上升，未来气候变暖可能进一步加剧水温变化的复杂性^[12]，气候对于水温的影响将越来越不可忽视。因此，如何准确辨识并分离气候与水库对水温改变的贡献，已成为当前研究面临的核心难点。目前，许多研究通过构建自然情景下的水温重建模型进行归因分析。例如，Tao 等^[13]通过多元线性回归模型重建了三峡“无坝情景”下的水温序列，量化水库对水温的影响；Guo 等^[14]采用长短期记忆网络（LSTM）重建了长江寸滩段“上游无水库情景”下水温过程，实现了水库对水温多尺度改变的精细归因与量化；Wang 等^[34]则集成多元藤 Copula 模型，在月、年尺度上精确剥离了气候变化与水库运行对长江宜昌段水温的贡献。然而，现有归因分析在广泛应用中仍面临挑战，主要受限于自然情景下水温-气候关系的模拟精度不足、用于模型构建与验证的长序列数据稀缺，同时模型模拟结果也易受局部气候干扰^[15]。因此，构建一种数据需求小、抗干扰能力强、精度更高的归因新框架，以深入揭示梯级水库开发对河道水温改变的贡献，显得尤为迫切。

频域分析方法可以将复杂的时域信号分解为不同频率的分量（即频谱），该方法也为揭示水温序列的多尺度特征提供了有效途径。傅里叶变换与小波分析目前已被广泛应用于信号分解与周期识别，其中最大重叠离散小波变换（MODWT）因能够处理非平稳序列并实现高精度信号重构，在分析水温时空变异方面表现出显著优势^[15,17]，且分离出的低频分量能够很好的表征水温和气温变化的长期趋势。Xiao 等^[15]基于 MODWT 也成功解析了三峡水库运行在不同频域上对河道水温波动的影响，发现了中高频水温波动被水库蓄水所削弱，而长期变化趋势仍受气候主导。

基于此，拟构建 MODWT 与神经网络相结合的归因框架，以 2002 - 2024 年金沙江下游向家坝水温与 ERA5-Land 再分析数据、宜宾气温等长时间序列数据为基础，开展多时间尺度信号分解与重构。研究旨在：(a) 揭示金沙江下游梯级水库运行对水温多时间尺度的动态影响；(b) 基于 ERA5-Land 再分析数据，构建耦合归因模型，减弱局部气候影响的同时提升自然情景重建与贡献度量化精度；(c) 解析气候变化与水库运行对河流水温在不同季节内的影响，并探讨梯级水库联合调度产生的耦合效应。研究有助于深化对河流水温演变驱动机制的理解，对促进流域水资源的科学管理与生态保护具有重要意义。

1 研究区域及分析方法

1.1 金沙江下游概况

金沙江流域（24°36'-35°44'N，经 90°30'-105°15'E,图 1）作为长江流域上部干流部分，面积达 47 万 km²，占长江总排水面积的 26 %，位于中国西南部，绵延于之间，高差可达 5142 m^[18]。金沙江下游流域自上而下依次包含乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝四级电站，电站均以发电为主，同时兼顾防洪、改善下游航道等综合效益^[5]。向家坝水文站位于金沙江下游最后一个梯级向家坝水库下游约 2 km 处，距宜宾气象站约 50 km。根据各水库的蓄水时间节点，将长时间序列水温过程分为三个时段：自然河道时期（2002 年-2011 年）、溪洛渡-向家坝两库运行时期（2014 年-2019 年）、乌东德-白鹤滩-溪洛渡-向家坝四库运行时期（2022 年-2024 年）。2012、2013 年以及 2020 年、2021 年为四大梯级水库蓄水的过渡时期，考虑到蓄水过程对水温的短期影响，不考虑该时段的水温变化。

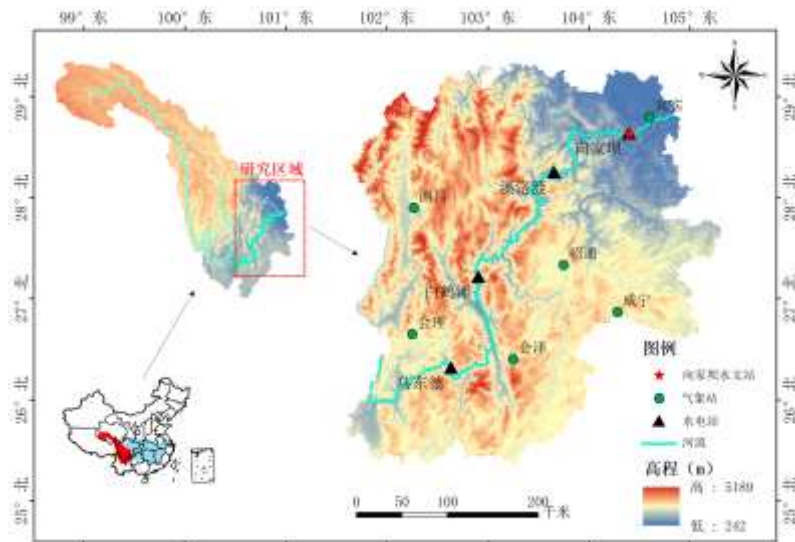


图 1 金沙江下游水库群示意图

Fig.1 Schematic of the Reservoirs in the Lower Jinsha River

1.2 数据来源

所用数据主要包括长时间序列水温及气象资料。向家坝水文站 2002-2009 年及 2021-2024 年数

据由水文局提供，2010–2020 年数据摘自《水文年鉴》。采用欧洲中期天气预报中心（ECMWF）发布的 ERA5-Land 再分析数据集（Muñoz Sabater, 2019），提取了向家坝水文站附近 2001–2024 年逐小时气温数据，并整理成日均值进行分析。为确保分析的可靠性，本研究也获取了同时期金沙江下游西昌、会理、会泽、昭通、威宁、宜宾气象站 2002–2024 年的逐日气温数据。前者能提供稳定的流域尺度气温趋势，但会平滑小尺度波动；而后者作为点位实测，易受局地微气候干扰，却保留了真实的高频信号^[31-33]。气象站数据均来源于美国国家海洋和大气管理局（NOAA）下属的国家气候数据中心（NCDC）。

1.3 研究方法

首先利用 MODWT 和 MRA 多尺度分析将原始水温与气温序列分解为不同时间尺度的信号；随后通过子波方差和相位分析识别水库运行对不同时间尺度的影响；然后，利用自然时期低频时间尺度的气温-水温重构模型，采用此模型基于气温数据还原无水库的情景，定量剥离并评估气候变化与水库调控的独立贡献（图 2）。

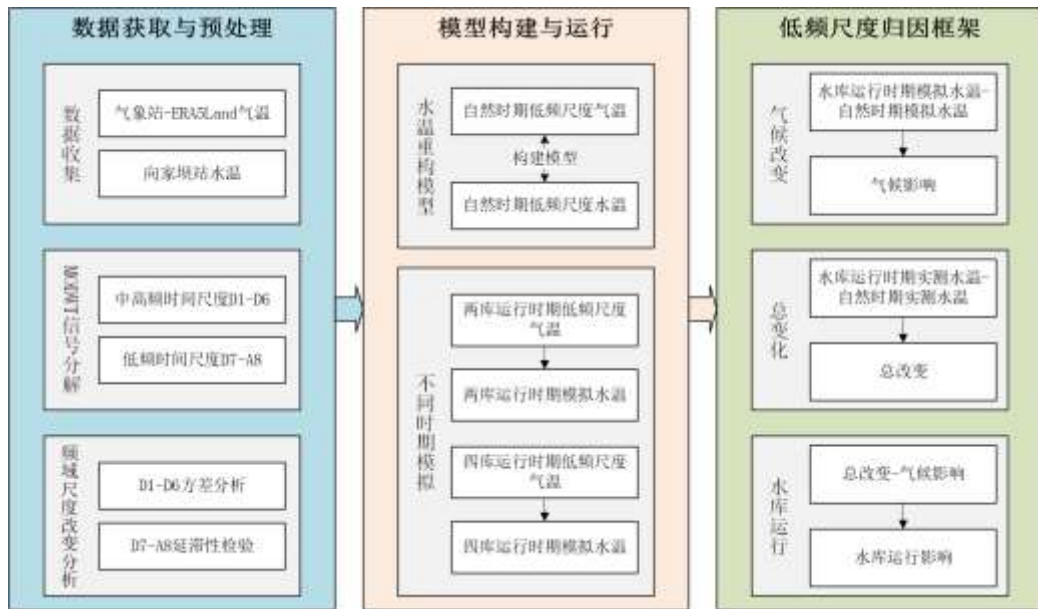


图 2 研究技术路线图

Fig.2. Research Flowchart

1.3.1 最大重叠离散小波变换(MODWT)与多分辨率分析(MRA) 为分离并提取水温与气温序列中不同时间尺度的波动信息^[19]，采用最大重叠离散小波变换（Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform, MODWT）进行分析。MODWT 是经典离散小波变换（DWT）的一种重要变体，具备平移不变性且对数据长度无严格要求的特点，尤其适用于非平稳水文时间序列分析^[21]。该方法允许对信号进行多分辨率分析（Multiresolution Analysis, MRA），从而将原始序列分解为不同时间尺度上的可加子信号，分别表征其高频细节与低频趋势成分^[20]。进一步利用 MRA 对 MODWT 分解后的系数进行重构，获得具有明确物理意义的尺度分量，这一方法已被证明在揭示环境时间序列多尺度特征方面具有显著有效性^[15,22]。其中细节分量的个数即为分解层数，低频趋势成分即为平滑分量：

$$X = \sum_{j=1}^J D_j + A_j \quad (1)$$

式中： X 为原始水温信号； D_j 为基于小波函数捕捉的细节分量（ $j=1,2,3\dots n$ ）； A_j 为去除掉细节分量后的代表趋势的平滑分量。

小波基函数和分解层数对分解效果起至关重要的作用。为了能够更为精准的分离不同时间尺度的细节分量,研究采用 Coiflet 4 (coif4) 小波基函数。该小波函数具有近似对称性,能显著抑制传统小波变换中存在的相位失真现象,确保各分量在时域上的特征与原始信号保持精确对齐。但是“coif4”通常会造成一定的边界效应,为尽可能减少边界效应,且精准还原梯级水库运行造成的影响,因此采用 2002 年和 2024 年的水温数据分别进行过去和未来情景的“周期延拓”。根据数据长度,为保证分解的稳定性选取分解层数为 8,即得到 8 个细节分量(D₁-D₈)和一个平滑分量(A₈)。这些时间尺度范围分别为 D₁(2,4)、D₂(4,8)、D₃(8,16)、D₄(16,32)、D₅(32,64)、D₆(64,128)、D₇(128,256)、D₈(256,512)、A₈(512,+∞)。

1.3.2 小波方差 小波方差基于拆解的小波系数对不同时间尺度的信号计算,能够较好的判别信号在不同时间尺度的波动情况^[15,23]:

$$X_j = \frac{1}{N_j} \sum_{l=1}^{N_j} (W_{j,l})^2 \quad (2)$$

式中: X_j 为 D_j 时间尺度的方差; N_j 为 D_j 时间尺度序列长度; $W_{j,l}$ 为 D_j 时间尺度子波系数;

1.3.3 相位延滞性计算 采用标准互相关性分析研究水温和气温滞后性,具体如下^[15,23]:

$$W'_{j,t} = \frac{W_{j,t} - \mu}{\sigma_W} \quad (3)$$

$$A'_{j,t} = \frac{A_{j,t} - \mu}{\sigma_A} \quad (4)$$

$$\rho(\tau) = \frac{1}{N_j} \sum_{l=1}^{N_j-\tau} W'_{j,t} A'_{j,t+\tau} \quad (5)$$

式中, $W'_{j,t}$ 为基于标准化后 j 时间尺度的水温; $A'_{j,t}$ 为基于标准化后 j 时间尺度的气温; τ 为滞后天数。

1.3.4 气温-水温重构模型 为精准还原“无水库”情景下水温,选用线性回归模型、LSTM 模型和 Bi-LSTM 模型分别构建气温-水温非线性关系,选取模拟效果最优的模型。长短期记忆网络(LSTM)能够有效捕捉时序数据中的长期依赖关系;而双向长短时记忆网络(Bi-LSTM)在此基础上进一步整合时间序列的前后文信息(图 3),从而更全面地刻画气温-水温之间复杂的非线性关系,提升模型稳健性与精度^[24-25]。

模型训练以 2002 - 2011 年自然时期逐日气温与水温数据为基础,使用分解并还原后的 D₇ 至 A₈ 时间尺度气温和水温作为模型输入,构建自然时期气温-水温关系模型。为确保还原水库运行时期时水温不受局部气候因素的干扰,采用 ERA5-Land 再分析气温数据和向家坝站水温作为模型输入数据。为防止验证集和测试集数据泄露影响验证效果,研究严格按时间顺序以 0.70:0.15:0.15 的比例划分为训练集、验证集和测试集,尽管线性模型无需验证集进行早停,但为保证所有模型效果评估的公平性,仍采用相同划分以保持一致性。

模型结构方面,LSTM 模型采用三层隐藏层(单元数分别为 256、64 和 64),在每层 LSTM 后添加 Dropout 层(丢弃率为 0.3、0.3 和 0.2),全连接层采用 0.2 的 Dropout 率。Bi-LSTM 模型同样采用三层架构,隐藏单元数分别为 128、64 和 32,前两层 Bi-LSTM 后添加 Dropout 层(丢弃率为 0.3 和 0.3),全连接层采用 0.2 的 Dropout 率。为了有效捕捉水体对气温变化的滞后响应,模型设置 30 天滞后窗口。训练过程中两模型均使用 Adam 优化器,初始学习率为 0.0005,批量大小为 128,最大训练轮次设为 300。为防止过拟合,采用早停机制(耐心值=30)和动态学习率调整策略(耐心值=15,衰减因子=0.5,最小学习率=1×10⁻⁶)。

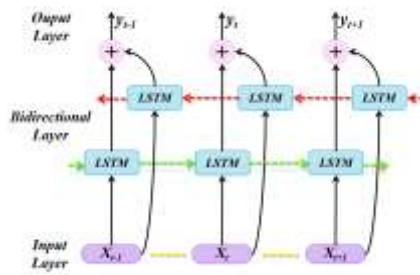


图 3 Bi-LSTM 模型架构

Fig.3. Bi-LSTM Model Architecture Diagram

采用决定系数 (R^2) 和平均绝对误差 (MAE) 作为评价指标 (图 4)。在滤除中高频信号 (D_1 - D_6 时间尺度) 后, 气温与水温之间的关系能够被三类模型准确捕捉。尽管在极值模拟方面仍存在一定偏差, 但各模型在测试集上总体表现良好。具体结果为: 线性模型 ($R^2=0.97$, $MAE=0.51^\circ\text{C}$); LSTM 模型 ($R^2=0.98$, $MAE=0.45^\circ\text{C}$); Bi-LSTM 模型 ($R^2=0.99$, $MAE=0.34^\circ\text{C}$)。结果表明, 基于 MODWT 小波分解并滤除中高频信号后, 能有效提升水温模拟精度, 较好地还原无水库调节影响下的天然水温状态, 可用于构建自然情景下的水温序列。鉴于 Bi-LSTM 模型模拟效果最优, 选用该模型进行“无水库情景”下的水温序列重构。

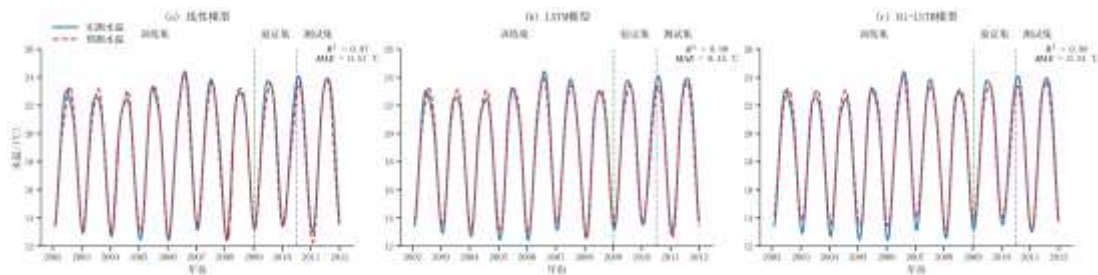


图 4 模型拟合效果对比

Fig.4. Comparison of Model Fitting Performance

1.3.5 水温改变贡献度归因分析 将 MODWT 小波分解的 D_7 、 D_8 、 A_8 时间尺度合并作为低频尺度, 构建了自然河道时期气温-水温的 Bi-LSTM 模型, 并分别模拟了自然河道时期、两库运行时期和四库运行时期的河道水温, 实现了河道水温改变贡献度归因。为定量评估气候变化和水库运行对水温的独立影响, 采用以下归因方法^[14]:

$$TI = RI + CI \quad (6)$$

式中, TI (Total Impact) 为水库运行时期实测水温与自然时期实测水温之差; CI (Climate Impact) 为水库运行时期模拟水温与自然时期模拟水温之差, 表征在无水库情景下仅由气候改变所引起的水温变化; RI (Reservoir Impact) 为剩余影响, 表征由水库运行所引起的河道水温变化 (包括其他人 为活动影响)。

2 结果分析

2.1 多时间尺度分解

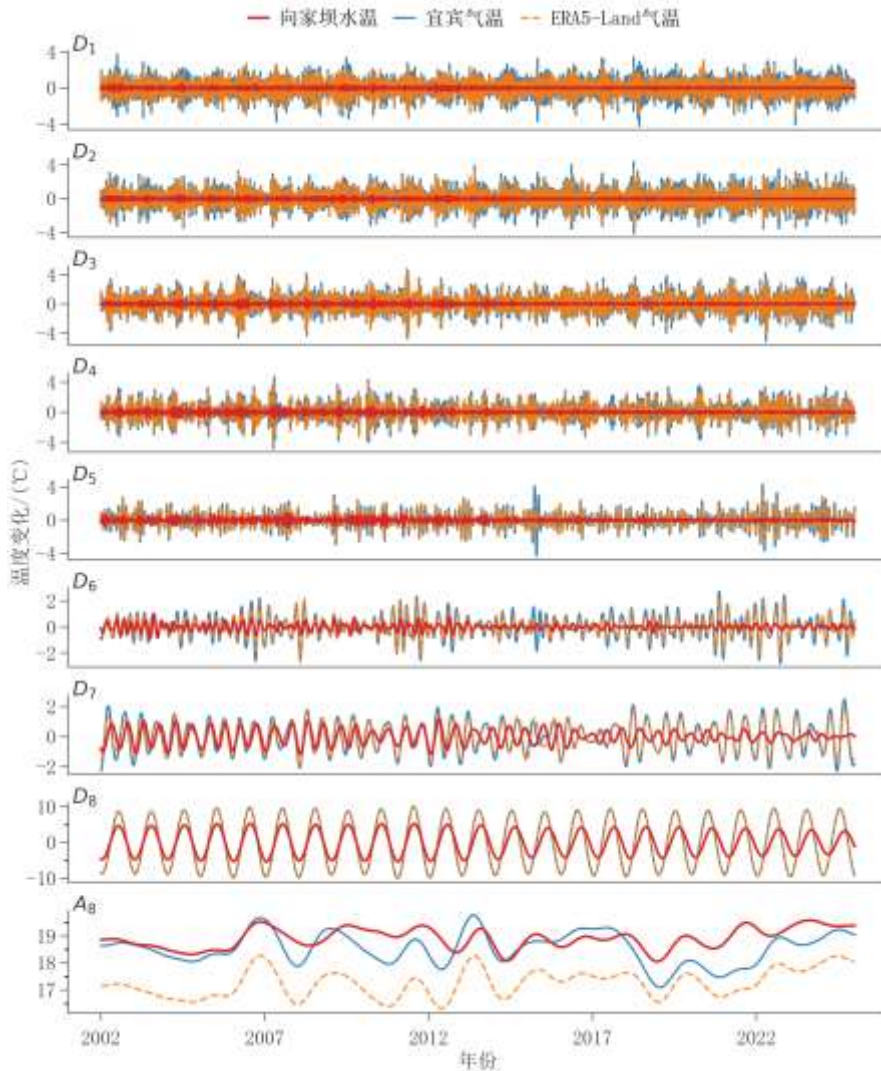


图 5 基于 MODWT 的气温-水温多分辨率分解

Fig.5. MODWT-Based Multiresolution Decomposition of Air and Water Temperature

图 5 呈现了向家坝站水温、宜宾站气温和 ERA5-Land 气温在不同时间尺度上的分解与重构结果。将 D_1 - A_8 不同时间尺度的分量纵向呈现， D_1 - D_6 时间尺度（2-128 d）为中-高频时间尺度波动，为日尺度-季尺度波动，主要呈现出水温-气温短期波动，波动幅度较低频时间尺度波动弱。 D_7 - D_8 时间尺度（128-512 d）为低频时间尺度波动，则呈现出半年尺度-年尺度波动，在这一尺度下波动则已经能够呈现出季节性的变化，变化幅度较中-高频时间尺度更大。近似分量 A_8 （周期 $> 1.4a$ ）则呈现出了水温-气温的长期趋势。由于本文重点探讨水库运行和气候变化对河道水温的改变，为减少边界效应影响故而采用周期性延拓，所以不进行关于未来长期趋势的研究分析。

2.2 梯级水库运行对中-高频时间尺度的影响

按照年份计算向家坝站水温-宜宾站气温和 ERA5-Land 气温的年内子波方差，并将结果按照自然时期-两库运行时期-四库运行时期进行平均。由于目前四库运行时期较短，因此年内只进行 D_1 - D_6 时间尺度的子波方差计算(图 6)。向家坝站水温在不同时期的子波方差呈现下降的趋势，在两库运行时期，各时间尺度下的子波方差下降幅度达到 61.3%~83.4%；进入四库运行时期后，下降幅度进一步增强，不同时间尺度的降幅达到 73.8%~ 95.9%。采用 Mann-Whitney U 非参数检验法评估方差

变化，鉴于四库运行期时间序列较短，将其与两库运行时期合并进行检验。结果表明 D_1 - D_6 时间尺度上的子波方差变化均通过显著性检验 ($p < 0.05$)，其中 D_1 - D_5 尺度置信水平高达 99.9% ($p < 0.001$)， D_6 尺度变化置信水平为 99% ($p < 0.01$)。

宜宾站气温在两库运行时期除 D_3 - D_4 时间尺度呈现微弱的降幅外，其余时间尺度方差均呈现出升高的趋势，升高幅度达到 2.6%-10.5%。在四库运行时期，不同时间尺度的方差升高幅度更为明显，达到了 16.4%-136.1%，但除 D_1 时间尺度外其余时间尺度变化均不显著。相比之下，ERA5-Land 再分析数据的气温序列相比于宜宾站实测气温更为平滑^[26]，因而方差较宜宾站更低。在两库运行时期，ERA5-Land 气温在 D_1 - D_6 时间尺度呈现下降的情势，下降幅度范围在 5.2%-27.1%。而进入四库运行时期，波动幅度则呈现出相反的变化，除 D_1 时间尺度仍呈现微弱降幅外，其余均转变为上升的趋势，升高幅度达到 8.1%-108.1%。综合来看，无论是宜宾站实测气温，还是代表区域气候背景的 ERA5-Land 数据，均未在水库运行时期出现如向家坝站水温显著的方差下降情势。由此可见，水库运行主要导致水温在中-高频时间尺度上的波动减弱，使河道水温序列较自然状态下更为平滑。

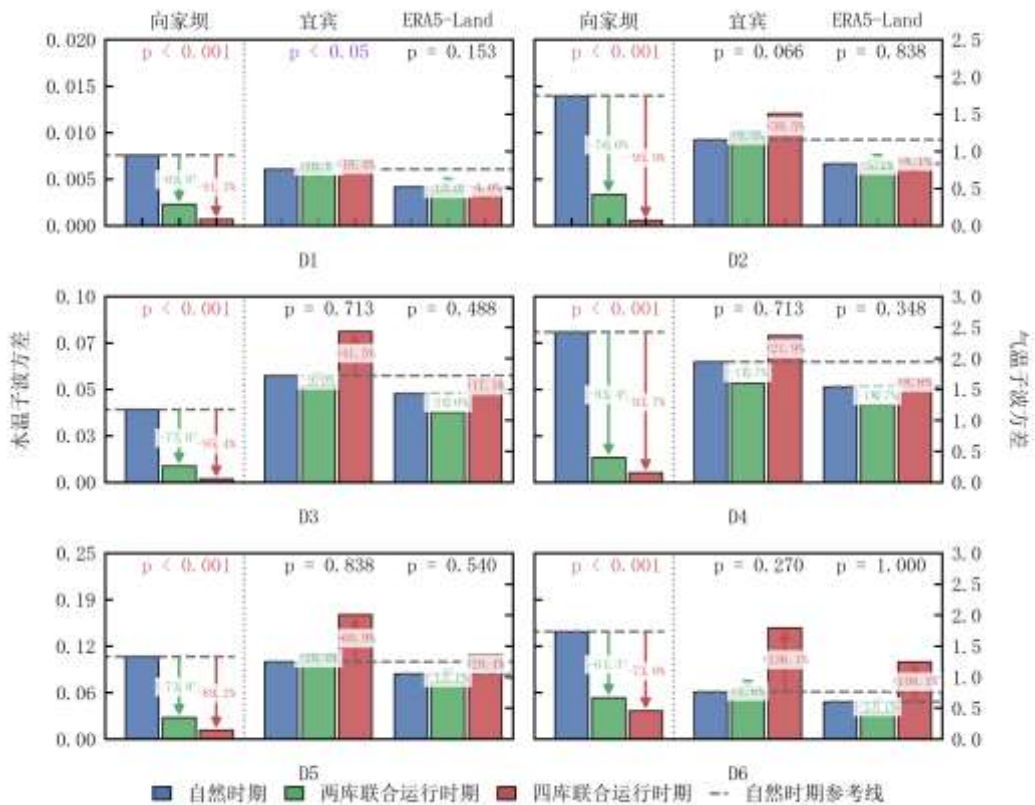


图 6 D_1 - D_6 时间尺度子波方差

Fig.6. Wavelet Variance at D_1 - D_6 Time Scales

2.3 梯级水库运行对低频尺度的影响

为精准量化梯级水库对水温低频尺度的影响，本文基于 MODWT 多分辨率分析 (MRA) 重建了向家坝站水温、宜宾站气温和 ERA5-Land 气温 D_7 - A_8 时间尺度 (周期 $> 128d$) 信(图 7)。自然时期水温与气温呈现高度相关 ($r=0.99$)，相较于宜宾气温和 ERA5-Land 气温相位滞后分别 3d 和 1d，反映出在自然河流系统中水温对气温的即时响应。随着溪洛渡-向家坝水库蓄水运行，相关系数降至 0.95，滞后天数分别增加至 39d 和 38d，可见金沙江下游水库阻断了自然河流系统水温对于气温的即时响应。在四库联合运行阶段，相关系数进一步减小至 0.92，滞后时间平均延长至 50 d。由此可

见，水库运行导致低频尺度的水温较气温出现显著的滞后，且随着上游梯级水库的增多，下游河道水温相较于气温滞后特征会进一步加剧。

进一步对比了三个时期水温-气温多年平均标准差发现，在气温方面，宜宾站气温在自然时期、两库运行时期和四库运行时期的多年平均标准差分别为 6.86°C、6.67°C和 6.96°C，而 ERA5-Land 气温在自然时期、两库运行时期和四库运行时期的多年平均标准差分别为 6.78°C、6.60°C和 6.89°C。可见在 D7-A8 时间尺度上，气温的整体变化趋势并不明显。但是，水温的波动则呈现明显趋势性。三个时期的水温多年平均标准差依次为 3.74°C、3.18°C和 2.62°C。对比水温与气温的波动特征，可以发现水库运行显著降低了 D7-A8 时间尺度的水温波动，即导致河道水温出现“坦化”现象，并且随着水库梯级联合运行（从两库到四库），坦化效应（Dampening Effect）进一步增强。

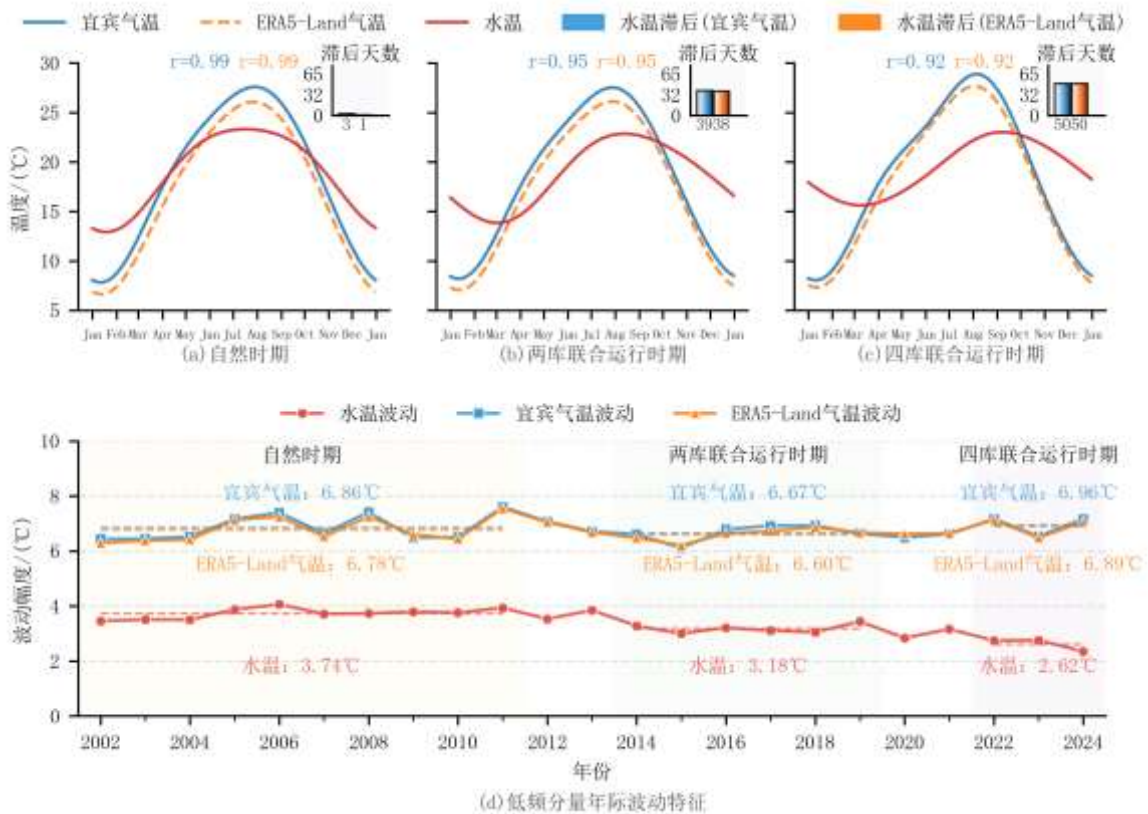


图 7 D7-A8 时间尺度滞后性检验和标准差检验

Fig. 7. Lag Correlation and Standard Deviation Tests at D7-A8 Time Scales

2.4 气候变化与水库运行对水温的影响贡献分割

基于构建的 Bi-LSTM 深度学习模型，分别模拟了自然时期、两库和四库运行对应时期仅在气温变化影响下的河道水温，并采用公式 (5) 进行贡献度归因分析，结果如表 1 所示。在两库运行时期，水库运行产生了“滞冷效应”和“滞温效应”^[27]，分别使得自然河道水温在春、夏季分别降低 3.38 °C 和 1.03 °C，在秋、冬季则分别升高 1.34 °C 和 1.88 °C；而气候变化对河道水温的影响较弱，在夏季和秋季分别降低了 0.07°C 和 0.02°C，在春季和冬季升高了 0.28°C 和 0.17°C。而年均水温整体较自然时期下降 0.22 °C，其中水库运行是使得水温下降 0.33 °C，气候变化使得水温升高 0.11 °C，在两库运行时期水库运行的贡献占主导。

在四库运行时期，水库运行使得春季降温效应减弱至 2.84 °C，夏季降温进一步达到 2.38 °C，而秋冬季升温则增加至 1.89 °C 和 3.4 °C。与此同时，气候变化的影响趋于显著，四季均表现为升温，增幅分别为 0.36 °C、0.49 °C、0.47 °C、0.34 °C。四库运行时期年均水温较自然时期升温 0.41 °C，其中水库造成的水温波动效应在年尺度上基本消失，气候变化成为导致水温年尺度变化的主导因素。

表 1 水库运行和气候变化对河道水温的影响量化

Tab.1 To quantify the impacts of reservoir operations and climate change on river water temperature

	两库运行时期			四库运行时期		
	CI	RI	TI	CI	RI	TI
春季	0.28	-3.38	-3.10	0.36	-2.84	-2.48
夏季	-0.07	-1.03	-1.10	0.49	-2.38	-1.89
秋季	-0.02	1.34	1.32	0.47	1.89	2.36
冬季	0.17	1.88	2.05	0.34	3.40	3.74
年变化	0.11	-0.33	-0.22	0.41	0.00	0.41

3 讨论

3.1 MODWT-Bi-LSTM 归因分析的有效性

为量化气候和水库运行对河道水温的贡献，采用了合并的 D₇、D₈ 和 A₈ 三个低频分量，作为 Bi-LSTM 模型的输入与输出。选择 D₇-A₈ 尺度而去除掉中高频尺度（D₁-D₆ 尺度）的主要依据在于：D₁-D₆ 分量（2-128d）主要反映日、周、月等短时间尺度上的波动；而 D₇-A₈ 分量（周期 > 128d）则主导了季节和年际尺度上的变化，直接地反映了气候和水库运行对于河道水温长时间序列的改变^[15]，同时去掉中高频噪声能够更好的构建气温-水温的响应关系。研究结果也表明（表 2），D₁-D₆ 分量在不同时期对年均水温变化的影响微弱，季节尺度上也仅引起较小变动（最大改变仅 0.07 °C）；对于季节尺度及更长时间尺度上的水温改变，如春季降温达 2.84-3.38 °C，几乎完全由 D₇-A₈ 分量主导。

表 2 细节分量改变度分析

Tab.2 Detail Component Variability Analysis

	两库运行时期		四库运行时期	
	D ₁ -D ₆ 时间尺度	D ₇ -A ₈ 时间尺度	D ₁ -D ₆ 时间尺度	D ₇ -A ₈ 时间尺度
春	0.01	-3.10	-0.07	-2.48
夏	-0.01	-1.10	-0.04	-1.89
秋	-0.00	1.32	-0.02	2.36
冬	-0.01	2.05	-0.03	3.74
年变化	0.00	-0.22	0.00	0.41

因此，将 Bi-LSTM 建模聚焦于 D₇-A₈ 尺度，不仅能够合理的去除中高频噪声对气温-水温关系学习的干扰，同时也能够保留气候与水温之间未被高频扰动的稳健关系。而相较于以往的归因分析模型的构建^[13-14,16]，往往需要大量实测数据，基于 MODWT-Bi-LSTM 模型能够利用较少的数据，实现较以往更加精准的建模。

此外，以往研究大多基于单站点或水文站周边多个气象站点作为构建模型的输入数据^[13-14,28]。而 Xiao 等^[15]的研究结果发现，仅采用单一站点可能会产生对气候影响的区域性低估，虽然深度学习模型能够将多个站点的气象因子作为输入，但若水库建设导致局部气候出现改变，某个站点的气温突变，仍然会影响评估的准确性。因此，基于金沙江下游会泽、会理、西昌、昭通、威宁及宜宾六个气象站的逐日气温观测数据，采用 MODWT 方法将气温序列分解为不同时间尺度的分量，计算各站点 A₈ 分量平均值，以此作为金沙江下游区域的平均气温。从 A₈ 时间尺度的水温-气温趋势图（图 8）可以看出，向家坝站水温与 ERA5-Land、区域平均气温在三个时期均呈现出相似的升温趋

势，而宜宾站气温则在两库运行时期呈现出与三者相反的降温趋势，这一研究结果进一步证实了Xiao等^[15]的研究结论，采用实测的局地气温去估算气候的影响，可能会造成低估或者高估。而相较于直接采用实测数据，ERA5-Land再分析数据则能够保证局部气候细节的同时，不受到人为因素导致的局部气候的改变，能够为模型提供更为稳定的数据输入。

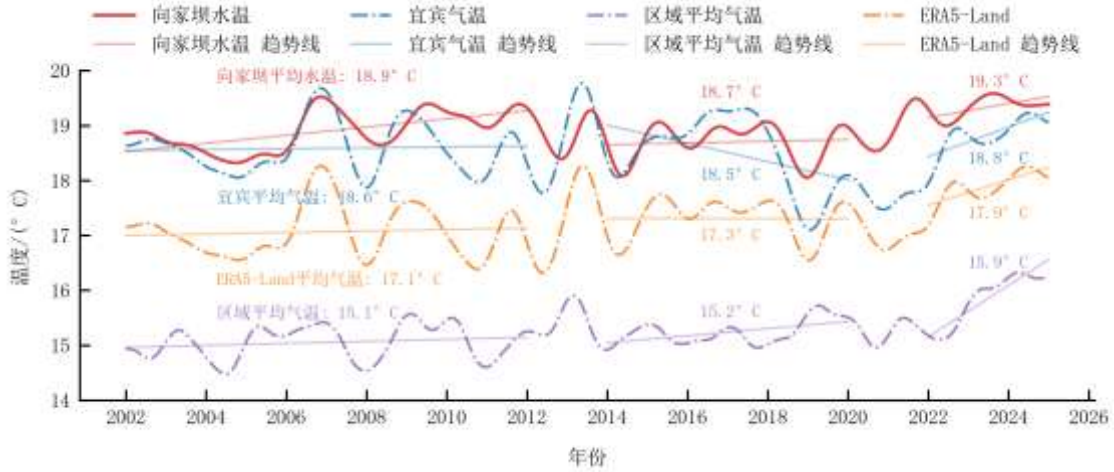


图8 多地气温-水温长期趋势对比图

Fig.8 Comparison of Long-term Trends in Air and Water Temperatures Across Multiple Locations

3.2 梯级水库运行对水温影响的多时间尺度效应

中高频尺度（日、周、月尺度）主要反映了水温的短期波动。基于子波方差的分析表明，随着金沙江下游梯级水库群运行，向家坝站水温的中高频尺度方差能量出现了显著的降低，这一结果与Xiao等^[15]在三峡水库的研究结果相似。水库蓄水会对水温造成显著的“平滑效应(Smoothing Effect)”，这一效应与传统时域尺度描述的“坦化效应”不同，“平滑效应”会显著降低水温短期波动，进而使得长序列水温序列呈现出更为“光滑”的情势，这一效应也在周扬等^[3]的研究中被证明。同时也证实了随着梯级水库数量的增加，“平滑效应”将进一步增强。金沙江下游梯级水库群的形成，就像一个串联的低通滤波系统。上游水库对下泄水温的平滑影响，为下游水库提供了波动更缓的输入，经过梯级的逐级滤波，最终使得向家坝下游的河道水温中高频波动能量被层层削弱。

而时域尺度的“坦化效应”和“滞后效应(Lag Effect)”则主要集中在季尺度及以上尺度(D7-A8)上，水库运行显著降低了水温的年变幅，并产生了相位滞后效应，这在很多研究都被提及^[3,5,11]。但过往的研究普遍依赖于对比水库建设前后极值水温及其出现时间、月均水温等指标来识别影响^[3,5,11]。中高频尺度的忽视使得过往研究将水温极值变化简单的归因于低频“坦化”这一单一贡献，未能认识到水温极值指标变化是中高频“平滑”与低频“坦化”的双重叠加。此外，之前的研究对于水库造成的滞后天数量化往往耦合了气候影响^[5]，而非量化水库运行的单独贡献。本文基于多尺度信号分解克服了上述局限，验证了水库对于河道水温的年尺度“坦化效应”，同时基于低频尺度水温-气温滞后特征准确量化了由于水库导致的水温滞后天数。

3.3 气候变化与水库运行对水温作用机制解析

针对气候变化与水库运行对河道水温季尺度和年尺度的相对贡献，本文结果表明在两库运行和四库运行时期的季节尺度，水库运行均是导致河道水温改变的主导驱动因素，这一结果与大多数研究结果相似^[13-14]。水库蓄水使得库湾出现显著的水温分层现象^[8-9,36]，导致下泄水温呈现反季节特征和滞后效应^[35,37]。以溪洛渡水库为例，龙良红等^[9]的研究表明溪洛渡水库在3月开始出现显著的水温分层，使得水库在春、夏季下泄较同期自然河道更低的中下层低温水，呈现“滞冷效应”；而秋、冬季表层水体降温并发生掺混，入库低温水流从底部潜入，使得下泄水温高于天然河道，表现出“滞

温效应”。Long 等^[6]针对溪洛渡和向家坝水库联合运行的研究进一步指出，水库对水温的影响会随着水库数量的增加而加强。本文也验证了这一现象。如表 1 所示，随着乌东德-白鹤滩水库加入运行，金沙江下游梯级水库群对夏、秋、冬三季影响均进一步加剧；然而，上游水库的运行却使得春季出现减弱，此现象可能源于上游水库热惯性引起的相位滞后或特定调度规则。这也表明，梯级水库对河流热过程的改变并非单个水库效应的简单叠加^[38]。

在年际尺度上，溪洛渡-向家坝两库运行时期，气温升温幅度较小（图 8），水库运行产生的冷却效应（ -0.33°C ）是导致年均水温下降（ -0.22°C ）的主导因素。然而，进入四库运行时期，尽管梯级水库在季节尺度上的调控增强，但其在春夏季的冷却与秋冬季的增温效应在年尺度上相互抵消，致使水库在年尺度影响大幅减弱。与此同时，气温升温幅度较两库时期显著增强，气候变化导致的增温贡献（ $+0.41^{\circ}\text{C}$ ）持续加大，导致年尺度水温变化的主导因子由水库运行转变为气候变化。可见，梯级水库虽能主导季节性的水温变化，但其对年尺度影响取决于各季节效应的平衡状态，当这种内部抵消使水库运行的净效应减弱时，气候变化便凸显为决定长期水温趋势的主导因素。

气候变化与水库运行共同改变河流水温节律，并对水生生态系统产生显著影响，其滞后效应可直接威胁长江上游珍稀特有鱼类的繁殖节律。例如，郝好鑫等^[39]研究表明，金沙江下游梯级水库蓄水后，重要鱼类适宜产卵的水温时段普遍推迟了 30 至 40 天，这与本文结论相印证。近年来，生态调度已成为缓解水温节律改变的重要手段。电站通过分层取水等措施调控下泄水温，能有效降低其对下游河道的影响^[41]。例如，阮娅等^[42]对乌东德水库的研究显示，采用叠梁门分层取水可有效减缓水库导致的天然水温节律变化；姜伟等^[40]研究也表明，金沙江下游梯级水库通过生态调度能对四大家鱼产卵产生刺激作用。由此可见，尽管水库运行在季节尺度上对鱼类繁殖造成一定影响，但通过生态调度能够有效减弱此类不利效应。总体而言，梯级水库联合调度对河流自然节律的影响深远而复杂。目前四库运行时期的观测数据时段尚短，未来仍需开展长期监测，并借助机理模型深入解析水库运行与气候变化之间的交互作用，量化其对特定水生生物栖息地的具体影响，从而为制定科学、有效的生态调度策略提供支撑。

4 结论

（1）金沙江下游四大梯级水库联合运行在日、周、月尺度上表现为波动能量衰减的“平滑效应”，在季尺度及以上尺度（D7-A8）则表现为“坦化效应”和“滞后效应”，三者共同作用构成了梯级水库对下游河道水温时域尺度的改变。

（2）以 ERA5-Land 再分析数据集为驱动的融合 MODWT-Bi-LSTM 的归因框架，能够避免局地气候波动的干扰，确保了归因的可靠性，为准确量化气候与人为活动影响提供了新的思路。

（3）向家坝站季节尺度水温变化主要由水库运行主导。从两库运行到四库运行，春季水温从下降 3.38°C 减小到 2.84°C ；冬季则从升高 1.88°C 增加至 3.40°C 。从长期的年尺度来看，气候变化仍是主导因素，这也表明水库水温对气候变化的长尺度依赖性。

5 参考文献

- [1] Hao Chen, Ling Kang, Liwei Zhou, et al. River system thermal dynamics under Dual pressures of climate change and cascade reservoir operations. *Journal of Environmental Management*, 2025, 394, DOI:10.1016/j.jenvman.2025.127350.
- [2] Kedra, Mariola, Wiejaczka, Lukasz. Climatic and dam-induced impacts on river water temperature: Assessment and management implications, DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.10.044. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, 2018, 626:1474-1483.
- [3] Zhou Yang, Wang Ning, Wen Xiaoxiong, et al. Cumulative influences and ecological effects of cascade hydropower development on water temperature in upper Yangtze River. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43(11): 1-16. [周扬, 王宁, 温潇雄等. 长江上游梯级水电开发的水温累积影响及生态效应. *水力发电学报*, 2024, 43(11): 1-16.]
- [4] Ji Daobin, Long Lianghong, Xu Hui, 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.]
- [5] 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 Lake Sciences*, 2025, 37(1): 293-303.[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.湖泊科学,2025,37,(1):293-303.]
- [6] Long Lianghong, Ji Daobin, Liu Defu, 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).
- [7] Liang Ruifeng, Deng Yun, Tuo Youcai, et al. Analysis on Characteristics of Water Temperature's Cumulative Effects of River Cascade Hydropower Stations . *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(Sup 2): 221-227.[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) ,2012,44,(S2):221-227.]
- [8] Long Lianghong, Xu Hui, Ji Daobin, et al. Temporal and Spatial Characteristics of Water Temperature in the Xiangjiaba Reservoir . *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(5): 738-746.[龙良红,徐慧,纪道斌等.向家坝水库水温时空特征及其成因分析.长江流域资源与环境,2017,26,(5):738-746.]
- [9] Long Lianghong, Xu Hui, Bao Zhengfeng, et al. Temporal and spatial characteristics of water temperature in Xiluodu Reservoir . *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(4): 79-89.[龙良红,徐慧,鲍正风等.溪洛渡水库水温时空特性研究.水力发电学报,2018,37,(4):79-89.]
- [10] Jeznach, Lillian C.Tobiason, John E.Future Climate Effects on Thermal Stratification in the Wachusett Reservoir.*JOURNAL AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION*,2015,107,(4):E197-E209.
- [11] Yu Mengyuan, Chen Xiaobing, Xue Jingyang, et al. Influence of Cascade Hydropower Construction on Water Temperature Downstream of Jinsha River . *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41(5): 65-71.[於孟元,陈孝兵,薛敬阳等.金沙江下游水电站梯级开发对下水温的影响.长江科学院院报,2024,41,(5):65-71.]
- [12] Wu Jian, Xia Jun, Zeng Sidong, et al. Evaluation and projection of climate change over the Yangtze River Basin based on CMIP6 global climate models. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(1): 137-150.[吴健,夏军,曾思栋等.CMIP6 全球气候模式对长江流域气候变化的模拟评估与未来预估.长江流域资源与环境,2023,32,(1):137-150.]
- [13] Tao, Yuwei,Wang, Yuankun,Rhoads, Bruce , et al.Quantifying the impacts of the Three Gorges Reservoir on water temperature in the middle reach of the Yangtze River.*JOURNAL OF HYDROLOGY*,2020,582.
- [14] Guo, Wenxian,Yang, Huan,Ma, Yinchu , et al.Multi-scale impact of climate change and cascade reservoirs on hydrothermal regime alteration in regulated rivers.*JOURNAL OF HYDROLOGY-REGIONAL STUDIES*,2022,44.
- [15] 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.*ECOLOGICAL INDICATORS*,2023,148.
- [16] Jie, Yongsheng,Qin, Hui,Jia, Benjun , et al.A multiscale attribution framework for separating the effects of cascade and individual reservoirs on runoff.*SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*,2024,933,172784.
- [17] Ouyang, Ying,Parajuli, Prem B.Li, Yide , et al.Identify temporal trend of air temperature and its impact on forest stream flow in Lower Mississippi River Alluvial Valley using wavelet analysis.*JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT*,2017,198,(PT 2):21-31.
- [18] Dong, Zengchuan,Jia, Wenhao,Sarukkalige, Ranjan , et al.Innovative Trend Analysis of Air Temperature and Precipitation in the Jinsha River Basin, China.*WATER*,2020,12,(11).
- [19] Milne, A. E.Macleod, C. J. A.Haygarth, P. M. , et al.The wavelet packet transform: A technique for investigating temporal variation of river water solutes.*JOURNAL OF HYDROLOGY*,2009,379,(1-2):1-19.
- [20] Zhu, Li,Wang, Yanxin,Fan, Qibin.MODWT-ARMA model for time series prediction.*APPLIED MATHEMATICAL MODELLING*,2014,38,(5-6):1859-1865.
- [21] D.B. Percival, A.T. Walden, *Wavelet Methods for Time Series Analysis*, Cambridge University Press, 2000.
- [22] Ciria, Teresa Perez,Labat, David,Chiogna, Gabriele.Detection and interpretation of recent and historical streamflow alterations caused by river damming and hydropower production in the Adige and Inn river basins using continuous, discrete and multiresolution wavelet analysis.*JOURNAL OF HYDROLOGY*,2019,578.
- [23] Whitcher, B., Guttorp, P., Percival, D.B., 2000. Wavelet analysis of covariance with application to atmospheric time series. *J. Geophys. Res. Atmos.* 105 (D11), 14941-14962.

- [24] Zhao Yu, Huo Yonghua, Huang Wei, et al. Traffic Anomaly Detection Method Based on Bidirectional LSTM Models . Radio Engineering, 2023, 53(7): 1712-1718.[赵瑜,霍永华,黄伟等.基于双向 LSTM 模型的流量异常检测方法.无线电工程,2023,53,(7):1712-1718.]
- [25] Alfwzan, Wafa F.Selim, Mahmoud Mohamed,Almalki, Awad Saleh , et al.Water quality assessment using Bi-LSTM and computational fluid dynamics (CFD) techniques.ALEXANDRIA ENGINEERING JOURNAL,2024,97,346-359.
- [26] Munoz-Sabater, Joaquin,Dutra, Emanuel,Agusti-Panareda, Anna , et al.ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications.EARTH SYSTEM SCIENCE DATA,2021,13,(9):4349-4383.
- [27] Jing Zheng, Zhang Juehong, Cao Huiqun, et al. Advances and Trends in Reservoir Water Temperature Research. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(2): 52-59,66.[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.]
- [28] Cai, Huayang,Piccolroaz, Sebastiano,Huang, Jingzheng , et al.Quantifying the impact of the Three Gorges Dam on the thermal dynamics of the Yangtze River.ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS,2018,13,(5).
- [29] Muñoz Sabater, J. (2019). ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac> (Retrieved 20-Mar-2025).
- [30] Menne, Matthew J., Imke Durre, Bryant Korzeniewski, Shelley McNeill, Kristy Thomas, Xungang Yin, Steven Anthony, Ron Ray, Russell S. Vose, Byron E. Gleason, and Tamara G. Houston (2012): Global Historical Climatology Network - Daily (GHCN-Daily), Version 3. [indicate subset used]. NOAA National Climatic Data Center. doi:10.7289/V5D21VHZ.
- [31] Zhao, Peng,He, Zhibin,Ma, Dengke , et al.Evaluation of ERA5-Land reanalysis datasets for extreme temperatures in the Qilian Mountains of China.FRONTIERS IN ECOLOGY AND EVOLUTION,2023,11,DOI:10.3389/fevo.2023.1135895.
- [32] Lopes, Francisco M.Dutra, Emanuel,Boussetta, Souhail.Evaluation of Daily Temperature Extremes in the ECMWF Operational Weather Forecasts and ERA5 Reanalysis.ATMOSPHERE,2024,15,(1)DOI:10.3390/atmos15010093.
- [33] Dai, Aiguo.The diurnal cycle from observations and ERA5 in surface pressure, temperature, humidity, and winds.CLIMATE DYNAMICS,2023,61,(5-6):2965-2990.DOI:10.1007/s00382-023-06721-x.
- [34] Wang, Xu,Shen, Yong Ming.A quantification and classification framework for water temperature variation features induced by climate change and reservoir construction and operation: Application to the middle Yangtze River.HYDROLOGICAL PROCESSES,2024,38,(6)DOI:10.1002/hyp.15210.
- [35] Dingjiang Chen, Minpeng Hu, Yi Guo , et al. Changes in river water temperature between 1980 and 2012 in Yongan watershed, eastern China: Magnitude, drivers and models.Journal of Hydrology,2016,533,191-199.DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.12.005.
- [36] He Yubin, Shi Xiaoyan, Zhou Hongju, et al. Study on water temperature structure and hydrodynamic mechanism of river-type reservoirs in southwest China. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(5): 24-34. DOI: 10.11660/slfdbx.20240503. [贺玉彬,时晓燕,周洪举,等.西南地区典型河道型水库水温结构及水动力机制研究.水力发电学报, 2024, 43(5): 24-34.]
- [37] Chenxu Zhao, Yuling Liu, Ce Song, et al. Study on water temperature variation trend and disturbance patterns in hydropower development section of the upper Yellow River. Ecohydrology & Hydrobiology, 2025, 25, (3): 705-717. DOI:10.1016/j.ecohyd.2024.12.002.
- [38] Huang Feng, Wei Lang, Li Lei, 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. DOI: 10.3969/j.issn.1004-8227.2009.04.007. [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.]
- [39] Hao Haoxin, Yang Xia, Yang Mengfei, et al. Impacts of the Cascade Reservoirs of Jinshajiang River on Water Temperature and Fish Spawning Time. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(1): 247-256, I0009. 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, I0009.]
- [40] Jiang Wei, Pu Yan, Deng Huatang, et al. Ecological Scheduling of Xiluodu-Xiangjiaba Cascade Reservoirs on the Reproduction of the Four Major Chinese Carps in the Jiangjin Section of the Upper Yangtze River. Acta Hydrobiologica Sinica, 2025, 49(10): 36-45. DOI: 10.3724/1000-3207.2025.2024.0488. [姜伟,蒲艳,邓华堂,等.溪洛渡-向家坝梯级水库生态调度对长江上游江津江段

四大家鱼繁殖的影响.水生生物学报, 2025, 49(10): 36-45.]

- [41] Zhang Shijie, Peng Wenqi, Liu Changming. Alternative withdrawal schemes for layered water in large reservoir. *Shuili Xuebao*, 2012, 43(6): 653-658. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2012.06.012. [张士杰, 彭文启, 刘昌明. 高坝大库分层取水措施比选研究. *水利学报*, 2012, 43(6): 653-658.]
- [42] Ruan Ya, Tuo Youcai, Deng Yun, et al. Prediction of water temperature in Wudongde reservoir and mitigation measures of low-temperature water. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(11): 1912-1918. DOI:10.11870/cjlyzyyhj201711020. [阮娅, 脱友才, 邓云, 等. 乌东德水库水温预测及低温水减缓措施. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(11): 1912-1918.]