

金沙江干热河谷水电站水库局地气候效应及驱动机制

叶凯¹, 赵爽¹, 岳昂², 汪东川¹, 刘昊汕¹, 聂谦雨¹

(1. 天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300384; 2. 天津市生态环境监测中心, 天津 300457)

摘要: [目的] 量化水电站水库蓄水对局地气候的影响, 以服务于区域生态管理。[方法] 选取金沙江中下游干热河谷4座水电站(龙开口、观音岩、溪洛渡、向家坝), 计算各水电站水库消落期与汛期降水温度归一化指数(PT); 并构建局地气候效应强度指数(RLCEI), 利用Spearman相关分析揭示其驱动因子。[结果] 水库蓄水普遍使2期水电站研究区气候趋于湿润, 干旱范围缩小。各水库局地气候效应强度存在明显差异, 且消落期强影响区域面积远小于汛期。在汛期, 下游溪洛渡水电站影响最为显著, 强影响区占比达44%, 向家坝次之; 中游龙开口与观音岩水电站效应相对较弱。相关分析结果表明, 库容与强影响区面积占比($\rho=0.900$)及平均影响半径($\rho=0.800$)相关性最强, 表明水库规模对局地气候效应强度具有决定性影响; 河谷地形因子中, 平均谷宽与横向扩散极限宽度相关性系数 ρ 值最大, 显著影响局地气候效应空间格局。[结论] 研究结果揭示了水电站水库局地气候效应受库容与河谷地形的协同调控, 为金沙江干热河谷区水电开发与生态保护提供科学依据。

关键词: 水电站水库; 局地气候效应; 金沙江; 降水温度归一化指数; 局地气候效应强度指数

中图分类号: P468.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0231-12

Local Climate Effects and Driving Mechanisms of Hydropower Reservoirs in Dry-Hot Valley of Jinsha River

YE Kai¹, ZHAO Shuang¹, YUE Ang², WANG Dongchuan¹, LIU Haotian¹, NIE Qianyu¹

(1. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Ecological and Environmental Monitoring Center, Tianjin 300457, China)

Abstract: [Objective] This study aims to quantify the impact of hydropower reservoir impoundment on local climate, thereby providing scientific support for regional ecological management. [Methods] Four hydropower stations (Longkaikou, Guanyinyan, Xiluodu, and Xiangjiaba) in the dry-hot valley of the middle and lower reaches of the Jinsha River were selected. The precipitation-temperature normalization index (PT) during the drawdown period and the flood season of hydropower reservoirs was calculated. Additionally, a regional local climate effect intensity index (RLCEI) was constructed, and Spearman correlation analysis was applied to reveal the driving factors. [Results] Reservoir impoundment generally caused the climate in the study areas of the hydropower stations during both periods to become more humid, with a reduction in the drought-affected areas. Significant differences in local climate effect intensity were observed among the reservoirs, with the area of strong impact during the drawdown period being much smaller than that during the flood season. During the flood season, the downstream Xiluodu hydropower station exhibited the most significant impact, with the proportion of strong impact areas reaching 44%, followed by Xiangjiaba. In contrast, the effects of the midstream Longkaikou and Guanyinyan hydropower stations were relatively weaker. Correlation analysis indicated that reservoir capacity had the strongest correlations with the proportion of strong impact areas ($\rho=0.900$) and the average impact radius ($\rho=$

收稿日期: 2025-12-11

修回日期: 2026-01-05

录用日期: 2026-01-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-02-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(42271103)

第一作者: 叶凯(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事景观遥感动态监测研究。E-mail: yekai0215@163.com

通信作者: 岳昂(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事生态监测与评价研究。E-mail: contra050009@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

0.800), indicating that the reservoir scale had a decisive impact on the intensity of local climate effects. Among valley terrain factors, the average valley width showed the highest correlation coefficient (ρ) with the lateral diffusion limit width, significantly affecting the spatial patterns of local climate effects. [Conclusion] The findings demonstrate that the local climate effects of hydropower reservoirs are jointly regulated by reservoir capacity and valley topography, providing a scientific basis for hydropower development and ecological protection in the dry-hot valley of the Jinsha River.

Keywords: hydropower reservoirs; local climate effects; Jinsha River; precipitation-temperature normalization index; regional local climate effect intensity index

Received: 2025-12-11

Revised: 2026-01-05

Accepted: 2026-01-25

Online(www.cnki.net): 2026-02-04

水电开发后形成的水库通过改变下垫面特性(如反照率、蒸发量、地温、土壤湿度等)对周边气候产生影响,进而影响流域生态系统的稳定性^[1]。然而,水库局地气候效应通常是一个缓慢而复杂的过程,其影响的空间范围及强度具有较大不确定性,需要通过长期的观测与量化分析予以明确^[2]。

近年来,学者针对不同地区水电站建设蓄水前后局地气候指标变化展开了研究。ARIAS等^[3]基于第5次耦合模式比较计划进行多模式模拟,表明赞比西河流域水电站的运营可能导致流域涌水量减少和蒸发量增加;AKMATOV等^[4]基于区域站点气候资料研究发现,水库具有调节局地气温的作用,凯特门-秋贝河谷气温的升高与否取决于托克托古尔水库水量;孙佳歆等^[5]通过对珥春河流域极端气候的分析发现,水库运行对局部气候变暖情况具有抑制作用,能够减少局部极端高温情况的发生,缓解局部持续干燥,但也增加夜晚局部极端低温事件的发生。综上,不同地区水电站水库蓄水后导致的气候响应各异。随着全球范围内水电开发的推进,水库局地气候效应研究逐渐成为气候变化、水文学与生态环境领域的交叉热点^[6]。

目前,水库局地气候效应评价研究多采用多时相数据对比、趋势分析或区域均值差法^[7],这类方法不能有效剔除自然气候波动的干扰,导致难以精准识别水库蓄水的真实气候影响。近年来,尽管已有学者^[8-9]尝试使用经验模态分解法、趋势分解、平滑样条等方法来弱化自然气候背景的干扰,但仍缺乏一种能够系统性剔除自然气候波动、同时量化影响强弱程度的综合性指标。此外,现有研究多聚焦于水库局地气候效应的现象描述,对影响局地气候效应强度与空间分布的关键驱动因子的量化关联分析仍较为薄弱,难以明确各因子的贡献程度与作用路径。

金沙江干热河谷地区常年高温干旱,水热矛盾突出,且受人类活动强烈干扰,水土流失严重、植被覆盖率低,气候条件复杂多变。水电站的建设与蓄水加剧该区

域局地气候变化的复杂性,进一步增加生态保护与修复的难度^[10]。因此,亟须在该区域系统开展水库局地气候效应研究。不仅要揭示水库蓄水前后局地气候要素的时空变化特征,更需在自然气候波动背景下,定量剥离自然气候变化影响,精准识别水库蓄水引起的真实气候响应,并表征其影响强度及空间分异特征。

为全面反映水库运行对局地气候的影响,本研究选取金沙江干热河谷的4座典型梯级水电站作为研究对象,依据其建设与蓄水时序,将研究时段划分为建库前的基线期与蓄水后的运行期。并进一步结合水库运行特征,将每年的1—5月划分为水库消落期,7—8月划分为汛期,从而构建2个典型运行阶段进行对比研究。基于研究区气象数据,首先计算各水库的降水温度归一化指数(PT),进而构建局地气候效应强度指数(RLCEI),以剥离自然气候波动的干扰,系统揭示4座水电站局地气候效应的空间格局与强度差异。同时,通过Spearman相关分析,探讨水库物理因子与地形因子对水库局地气候效应强度的驱动机制。研究结果旨在深化干热河谷地区水库蓄水对局地气候影响的认识,为水电开发条件下的区域生态保护与风险管理提供科学依据。

1 研究区概况

金沙江是长江的上游干流,发源于云南省丽江市石鼓镇,流经四川、云南两省,最终于宜宾汇入长江。其中中下游河段长约1 326 km,穿越典型的干热河谷地区,该区域地貌复杂多样,生态系统极为脆弱^[11]。本研究选取位于金沙江干热河谷地区具有代表性的4座大型水电站:位于流域中游的龙开口与观音岩水电站及位于流域下游的向家坝与溪洛渡水电站(图1)。上述水电站均为装机容量超过1 200 MW的Ⅰ等大型水电工程,具备显著的局地气候调节能力。为确保研究区的空间范围能覆盖水库局地气候效应的影响区域,本研究基于干热河谷的地貌范围,并结合流域第一重山的分界标准划定研究区。

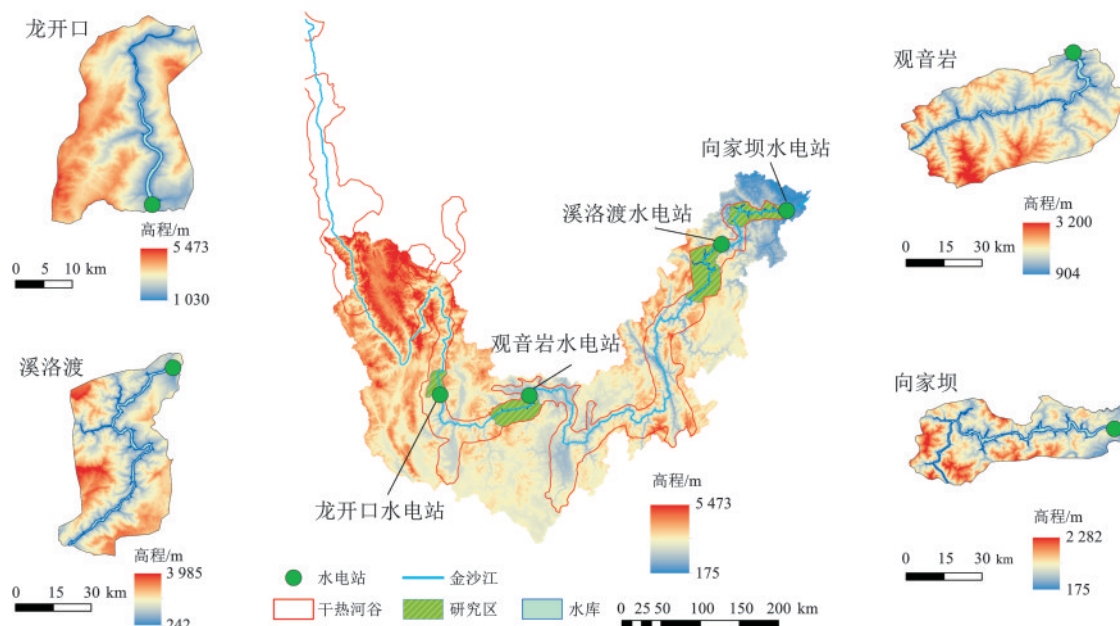


图1 研究区域

Fig.1 Study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

本研究采用来自国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>) 的逐月气温与降水栅格数据(空间分辨率 1 000 m)进行分析。在数据使用前,对原始栅格进行预处理操作。

研究区内4座水电站的建设与蓄水时间存在一定差异:龙开口水电站于2008年开工建设并于2014年开始蓄水,观音岩水电站分别为2007年和2012年,溪洛渡水电站为2005年和2013年,向家坝水电站为2006年和2012年。为准确评估水库蓄水对局地气候的影响,并增强不同水电站之间结果的可比性,本研究统一设置建库前基线期时长为20 a^[12],自1986—2005年;运行期为2015—2024年共10 a,以保证气象数据的代表性与可靠性。

2.2 研究方法

2.2.1 降水温度归一化指数 由于金沙江干热河谷地处西南干旱区,具有“高温伴随低降水”的明显气候特征,因此气温与降水量是表征其区域气候变化的2个关键要素^[13]。为综合反映区域局地气候状况,本文选取降水温度归一化指数(precipitation-temperature normalization index, PT)作为核心评价指标,用以揭示水电站水库蓄水前后局地气候的时空演变与分布格局。

PT指数的月尺度计算公式^[14]为:

$$PT_i = w_p \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma_P} - w_T \frac{T_i - \bar{T}}{\sigma_T} \quad (1)$$

式中: PT_i 为第 i 年某月的降水温度归一化指数; P_i 为

该年该月的累积降水量, mm; T_i 为该年该月平均气温, °C; $\bar{P}$ 为研究时段内对应月份的多年平均降水量, mm; $\bar{T}$ 为研究时段内对应月份多年平均气温, °C; σ_P 为对应月份降水量的标准差, mm; σ_T 为对应月份气温的标准差, °C; w_P 、 w_T 分别为降水量和温度的权重系数。

考虑到降水量和温度对局地气候的影响在不同区域有所不同,为反映降水量和温度自身变异幅度对综合指数的相对贡献,本研究采用灵活权重方法,根据每个栅格像元的降水量和温度波动程度自适应分配权重。降水量和温度的权重系数由它们各自的标准差决定, w_P 与 w_T 的计算公式为:

$$w_P = \frac{\sigma_P}{\sigma_P + \sigma_T} \quad (2)$$

$$w_T = 1 - w_P \quad (3)$$

本研究参照适用于干热河谷地区的分级标准^[15],将PT指数划分为干旱(< -0.48)、半干旱($-0.48 \sim 0.32$)、正常($-0.32 \sim 0.22$)、半湿润($0.22 \sim 0.53$)、湿润(> 0.53) 5个等级。

2.2.2 局地气候效应强度指数构建 为定量评估水电站水库蓄水对局地气候的影响强度,并剔除区域气候自然波动的干扰,本研究基于Z-Score标准化思想^[16],结合研究区基线期气候趋势特征,构建局地气候效应强度指数(regional local climate effect intensity index, RLCEI)。该指数首先基于水库基线期的气候数据,拟合自然气候趋势并据此预测水库运行期内无水库干扰情况下的PT指数多年平均值(μ_{pre_pred}),进而计算水库运行期内PT指数的实际观测平均值(μ_{post})与该预测值的差值($\mu_{post} - \mu_{pre_pred}$),最

后以基线期 PT 指数的标准差(σ_{pre} , 表征气候自然年际波动幅度)为基准进行标准化处理, 以分离自然气候背景的干扰, 实现对水库蓄水气候效应强度的精准量化。计算公式为:

$$\text{RLCEI} = \frac{\mu_{\text{post}} - \mu_{\text{pre_pred}}}{\sigma_{\text{pre}}}$$

(4)

式中: $\mu_{\text{post}} - \mu_{\text{pre_pred}}$ 为已剔除自然趋势干扰后, 由水库导致的局地气候效应量; σ_{pre} 为基线期 PT 指数的标准差; $\mu_{\text{pre_pred}}$ 为基于自然气候趋势预测得到的水库运行期内 PT 指数的多年平均值; μ_{post} 为水库运行期内实际观测到的 PT 指数的多年平均值。

为计算 RLCEI, 需首先确定其 3 个核心组分 σ_{pre} 、 $\mu_{\text{pre_pred}}$ 、 μ_{post} , 具体步骤为:

1) 气候自然年际波动幅度(σ_{pre})

将逐月计算的 PT 指数进行年平均, 得到逐年 PT 指数栅格数据。选取基线期数据, 计算基线期内 PT 指数的多年平均值(μ_{pre})与基线期内 PT 指数的标准差(σ_{pre}), 以此反映研究区自然气候背景特征。计算公式为:

$$\mu_{\text{pre}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{PT}_i$$

(5)

$$\sigma_{\text{pre}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\text{PT}_i - \mu_{\text{pre}})^2}$$

(6)

式中: n 为基线期年份数量; PT_i 为基线期第 i 年的 PT 指数值。

2) 无水库干扰情况下自然气候趋势的预测平均值($\mu_{\text{pre_pred}}$)

为了表征无水库干扰下的局地气候演变规律, 本研究对基线期逐年份的研究区 PT 平均值序列进行线性回归分析, 构建自然气候趋势模型^[17-18]。根据前人^[19]在该区域降水与温度 M-K 检验的结果, 气温和降水序列在基线期内存在显著的趋势性, 因此本

研究的线性回归模型建立在这一基础上, 用于预测水库运行期各年的 PT 值 $\text{PT}_{\text{trend}_t}$ 。计算公式为:

$$\text{PT}_{\text{trend}_t} = a \times t + b$$

(7)

式中: t 为年份; a 为趋势斜率; b 为截距。

随后, 将运行期各年的预测 PT 值 $\text{PT}_{\text{trend}_t}$ 通过栅格平均值运算得到无水库干扰情况下自然气候趋势的预测平均值 $\mu_{\text{pre_pred}}$, 计算公式为:

$$\mu_{\text{pre_pred}} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \text{PT}_{\text{trend}_t}$$

(8)

式中: m 为运行期年份数量。

3) 水库运行期内所有年份 PT 指数的逐像元多年平均值(μ_{post})

计算公式为:

$$\mu_{\text{post}} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \text{PT}_t$$

(9)

式中: PT_t 为建库后第 t 年的 PT 指数实际值。

4) 效应强度分级

根据 RLCEI 的绝对值大小, 借鉴气候异常分析中常用的标准差倍数方法, 将水库局地气候效应强度划分为 3 个等级: $|\text{RLCEI}| < 1$ 表示气候变化处于自然趋势预测的年际变率范围内, 为无影响; $1 \leq |\text{RLCEI}| < 2$ 表示变化已超出自然波动的正常区间, 但偏离程度有限, 为弱影响; $|\text{RLCEI}| \geq 2$ 表明偏离幅度超过 2 倍自然标准差, 显著超出自然演变轨迹, 为强影响。

2.2.3 Spearman 相关分析 为明确水库驱动因子与水库局地气候效应强影响区空间特征的关联, 本研究采用 Spearman 相关分析法, 探究水库物理因子与河谷地形因子对强影响区空间特征(表 1)的影响。为消除量纲差异并平衡各水电站规模差异对分析的影响, 所有驱动因子与响应变量均经 Min-Max 方法进行归一化处理, 以确保分析结果的可比性与可靠性。

表 1 因子定义与计算方法

Table 1 Factor definitions and calculation methods

因子类别	名称	定义与计算方法
水库物理因子	库容/亿 m ³	水电站水库库容
	水面面积/km ²	水库正常蓄水位对应的水面总面积
河谷地形因子	平均谷宽/m	沿水库中心线每 1 km 提取垂直方向谷宽(河谷两侧分水岭间距), 取研究区范围内平均值
	平均坡度/(°)	强影响区范围内所有栅格坡度的算术平均值
	平均谷深/m	水库河谷底部高程与两侧第一重山平均高程的差值平均值
强影响区空间分布特征	强影响区面积占比/%	(强影响区栅格数/各等级总栅格数)×100%
	平均影响半径/km	强影响区所有栅格到坝址的欧氏距离平均值
	横向扩散极限宽度/km	垂直于水库走向, 强影响区连续分布的最大横向跨度

3 结果与分析

3.1 降水温度归一化指标时空分布特征

由图 2 可知,1986—2005 年基线期内,各水电站 PT 指数平均值年际变化幅度较小,整体保持相对稳定,而 2015 年水库蓄水运行后,PT 指数平均值的年际波动明显增强,二者差异显著。说明在水库建设前,研究区区域气候较为稳定。因此,本文选取 2000 年和 2005 年作为基线期的典型代表年份,选取 2015 年和 2024 年作为运行期的典型代表年份进行分析。

位于金沙江流域中游的龙开口水电站和观音岩水电站,其水库蓄水前后局地气候的空间分布差异显著。由图 3、图 4 可知,水电站建设及水库蓄水后,无

论在消落期还是汛期,水电站区域的整体气候等级变化趋势一致,即湿润等级区域普遍扩大,干旱等级面积减少,但在具体空间分布上仍存在显著差异。

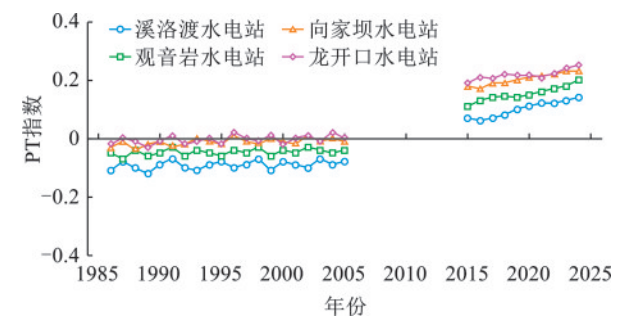


图 2 各水电站 PT 指数平均值年际变化
Fig.2 Interannual variations in average PT index for each hydropower station

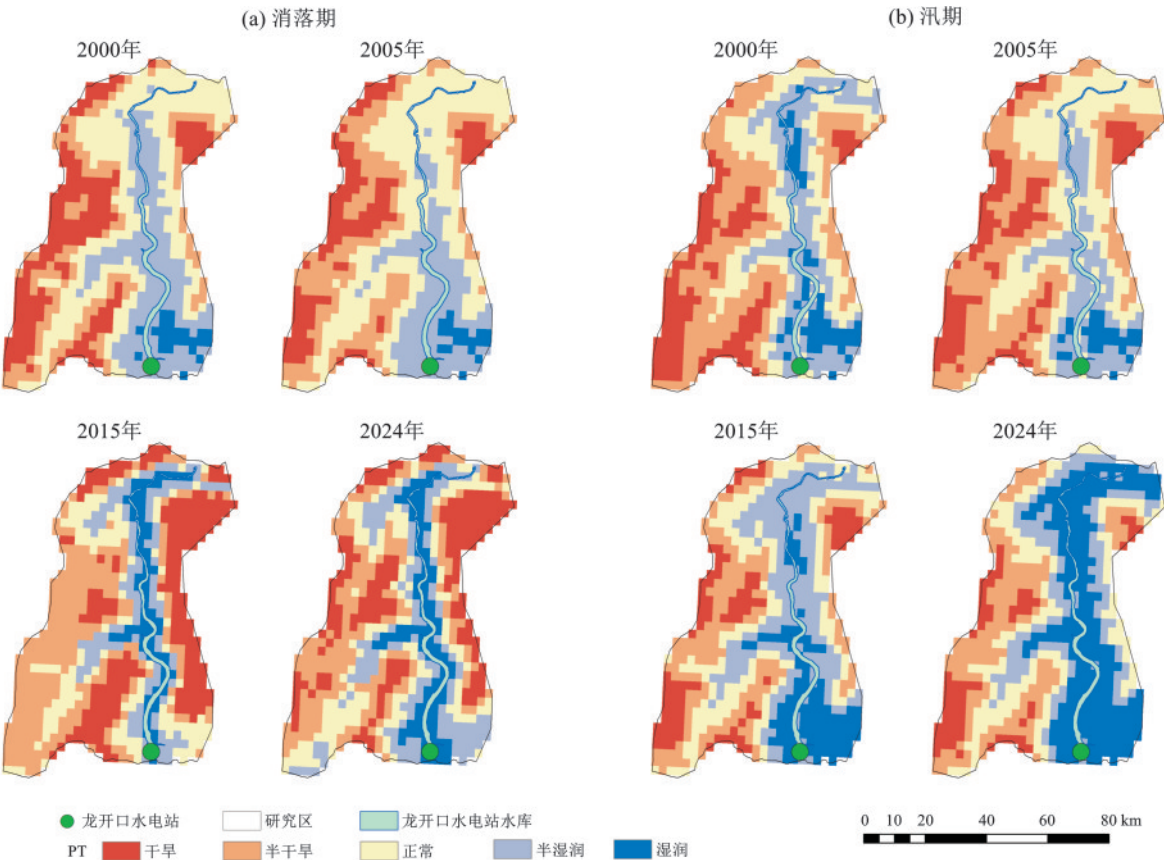


图 3 龙开口水电站降水温度归一化指数空间分布
Fig.3 Spatial distribution of precipitation–temperature normalization index for Longkaikou hydropower station

2000 年 2 期内龙开口水电站半湿润等级区域主要沿水库分布,湿润等级集中在水库东侧,干旱与半干旱等级主要位于研究区西部;至 2005 年建设前,这一格局基本稳定。2015 年水电站建成并蓄水后,2 期气候等级分布虽发生变化,但总体格局仍与建库前相似:沿水库两岸的半湿润等级区域扩张并向上游延伸,研究区内干旱与半干旱等级面积减少。至 2024 年,湿润等级几乎覆盖水库两侧,且越靠近水电站,湿润等级面积越大;而干旱与半干旱等级空间分

布变化仍较小。
观音岩水电站气候等级分布情况在水电站水库蓄水前后变化较龙开口水电站明显(图 4)。在水电站建设前的 2000 年和 2005 年,研究区在消落期与汛期大部分区域处于干旱或半干旱等级,仅在上游地区存在半湿润及湿润等级地区;在 2015 年水电站水库蓄水后半湿润面积自上游至下游扩张,但水电站所在位置附近地区仍然存在大面积的干旱与半干旱等级区域;在 2024 年,半湿润及湿润等级地区覆盖研

究区内的大部分地区,说明观音岩水电站水库蓄水对局地气候造成明显的改变,相比建库前区域内降水增多,温度降低。

整体来看,观音岩水电站蓄水对局地气候的调节作用明显强于龙开口水电站,且二者的影响空间分布存在显著差异。观音岩水电站的湿润区主要分布在

距离坝址较远的上游河段,而龙开口水电站的湿润区则集中在坝址附近及水库的下游区域。此外,观音岩水电站水库对研究区干旱状况具有显著的缓解作用,而龙开口水电站水库的干旱抑制作用相对不明显,且 2 个水电站在同一年份内,汛期的湿润等级面积均大于消落期,干旱等级面积小于消落期。

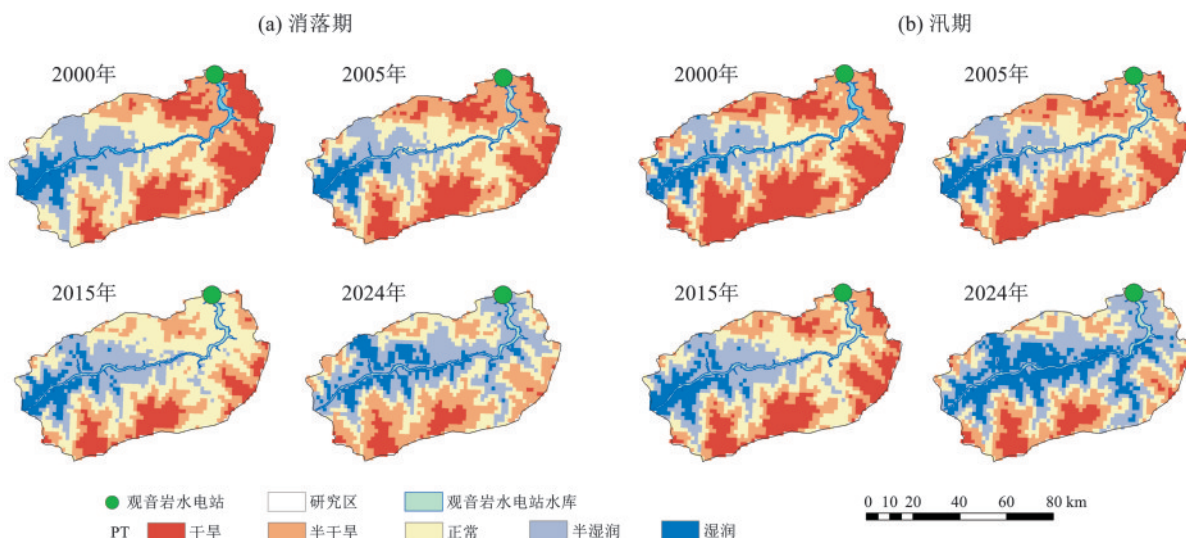


图 4 观音岩水电站降水温度归一化指数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of precipitation-temperature normalization index for Guanyinyan hydropower station

由图 5 可知,位于金沙江流域下游的溪洛渡水电站水库在 2000 年和 2005 年气候等级分布情况基本保持一致,2 个年份内 2 期干旱等级区域几乎占据研究区绝大部分,仅在水库沿岸及部分地区分布少量正常等级区域。与中游 2 座水电站相同,在水电站水库蓄水后,局地气候发生明显变化,2015 年研究区内水库大面积的干旱等级区域转变为半干旱区,其中,消落期变化区域主要位于水电站坝址附近,而汛期变化区域则呈现为沿河流分布。至 2024 年,各个等级分布情况相比 2015 年发生更加明显的变化:半湿润与湿润等级区域自水电站坝址沿河流扩张,并且干旱面积进一步减少。

向家坝水电站研究区在水电站建设前的 2000 年气候等级分布情况较为复杂(图 6)。干旱及半干旱等级区域主要分布在研究区水库的上游,并且水库南侧面积大于北侧;半湿润等级区域主要沿水库分布,湿润等级区域主要集中在水电站所在位置周边,以及研究区水库中上游的部分地区,其中汛期湿润等级面积大于消落期。2005 年 2 期内该区域干旱面积增加,2000 年分布于水电站所在位置周边的半湿润与湿润等级区域转变为正常及半干旱等级。在水电站水库蓄水后的 2015 年,该区域出现大面积的半湿润等级区域及少量的湿润等级区域,主要集中在研究区水库的下游,且半干旱及干旱区域面积减少;

在 2024 年,半湿润及湿润等级面积进一步增加,与其他 3 座水电站不同的是,湿润等级区域主要分布在远离水电站站点的水库上游地区,在水电站附近区域主要以半湿润等级为主。

综合分析 4 座水电站可以发现,水库蓄水均在不同阶段不同程度地促进湿润等级面积的扩大、干旱等级面积的减少,表明水电站建设蓄水对局地气候有显著的影响作用。在消落期与汛期 2 期内,由于水位的变化,2 期内虽然气候等级分布大体一致,但强度存在差异。由于库容规模、地形条件及水库形态等方面的差异,各水电站在局地气候等级变化的空间分布与影响方向上呈明显不同的特征。金沙江下游水库分布形态相比中游更加曲折、水库宽度变化大,且下游 2 个水电站水库库容较中游水电站大,因此下游地区水电站水库蓄水带来的变化相比中游水电站水库更加复杂。

3.2 水库局地气候强度特征及驱动因子分析

根据图 7 中龙开口、观音岩、向家坝和溪洛渡 4 座水电站在消落期与汛期的 RLCEI 指数强度等级空间分布结果可以看出,各水电站在不同影响等级的分布格局上既具有共性,也表现出一定差异。其共性主要表现为消落期 RLCEI 指数强等级区域面积普遍低于汛期。无论是消落期还是汛期,4 座水电站坝址及水库周边普遍形成连续的强影响区,直接证实水库蓄水

对局地气候的显著影响;从强度变化趋势来看,各电站的RLCEI指数强度等级均随距水库距离的增加而降低:由靠近水库的强影响等级到远离水库的无影响

等级。其差异体现在4座水电站强影响区的空间覆盖范围与主要延伸方向存在明显不同,这种现象与水库物理因子及河谷地形条件密切相关。

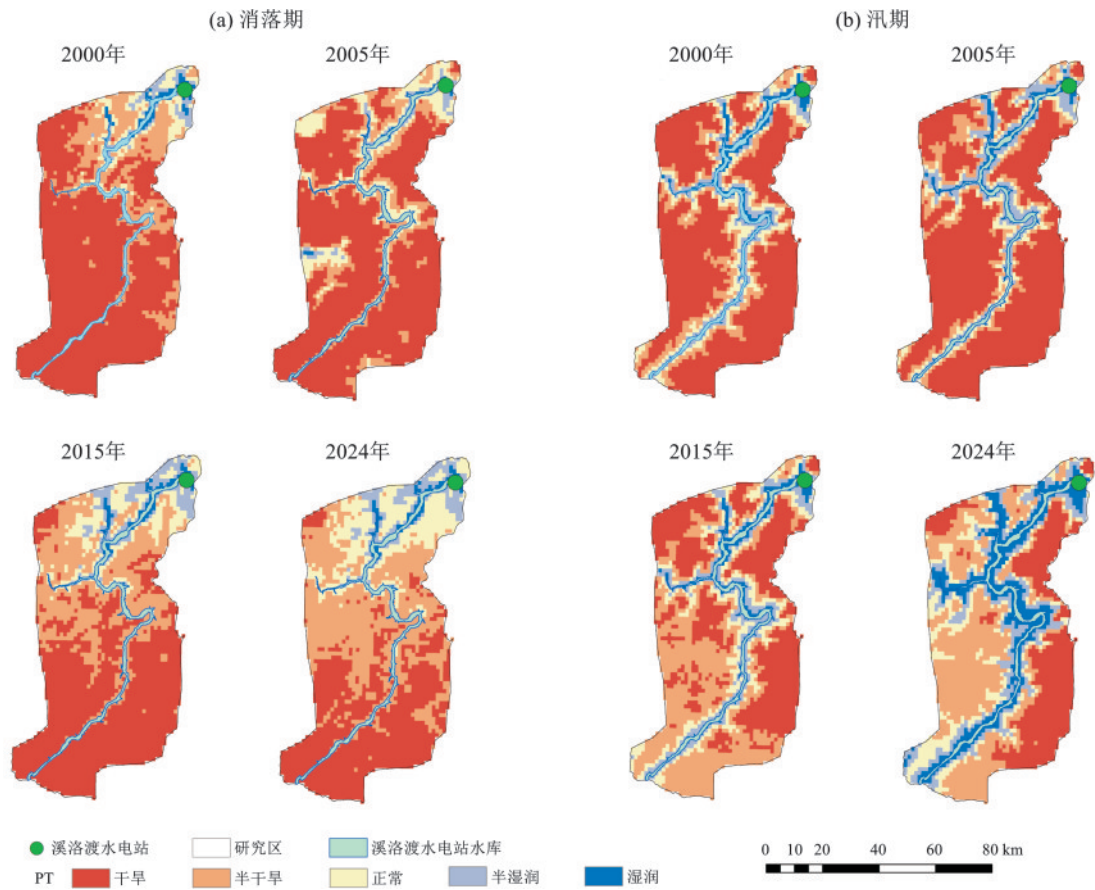


图 5 溪洛渡水电站研究区降水温度归一化指数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of precipitation-temperature normalization index for study area of Xiluodu hydropower station

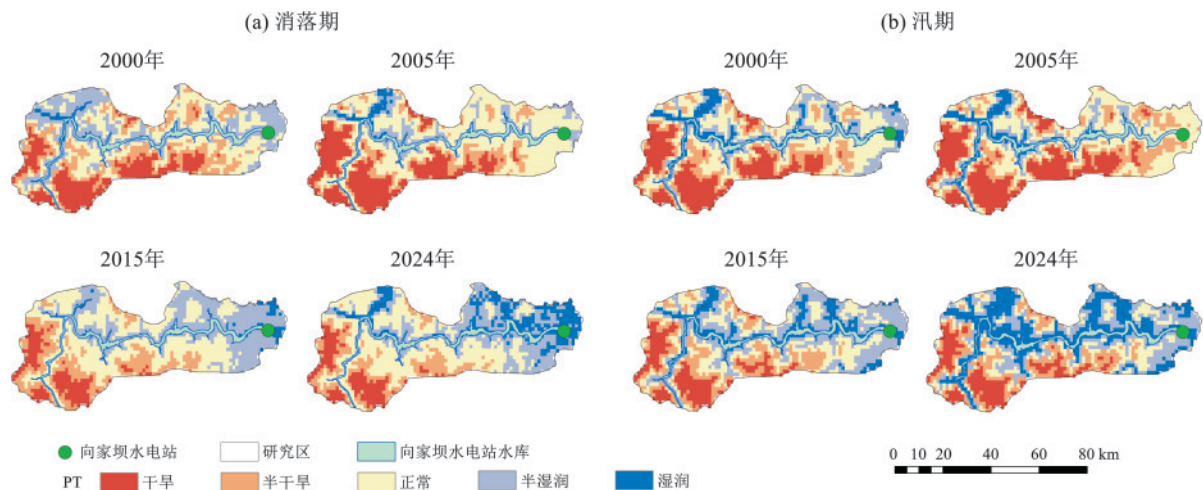


图 6 向家坝水电站研究区降水温度归一化指数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of precipitation-temperature normalization index for study area of Xiangjiaba hydropower station

由表 2 在消落期与汛期 4 座水电站不同影响等级的面积占比可得到消落期除向家坝水电站外,其余 3 座水电站均以无影响等级为主。且各水电站消落期强影响区等级面积均小于汛期,其中溪洛渡水

电站在消落期与汛期之间的变化幅度最大,消落期相比汛期强影响等级面积占比减少 21%。从汛期空间差异特征分析,中游的龙开口、观音岩水电站以无影响区为主导,占比分别达 33%、50%,强影响区占

比仅为 21%、24%，反映出 2 座水库蓄水引发的局地气候效应整体强度较弱、影响范围有限；下游的溪洛渡、向家坝水电站则呈现相反的格局，强影响区占比

分别达 44%、35%，显著高于无影响区占比（17%、22%），说明 2 座大型水库的局地气候影响强度更高、空间覆盖更广。

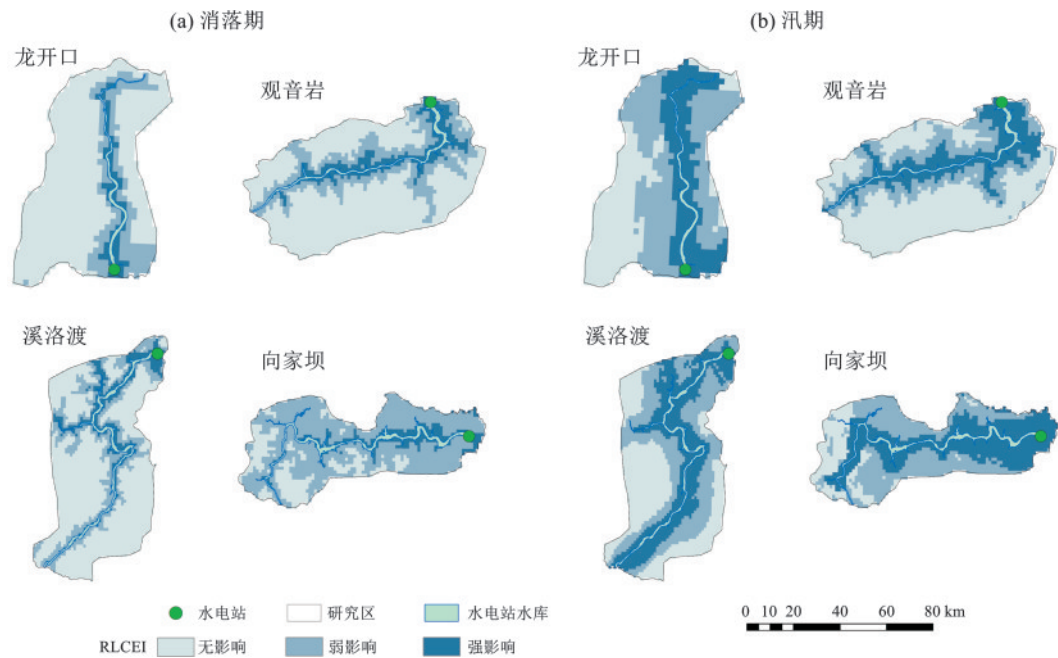


图 7 消落期与汛期 RLCEI 指数强度等级空间分布

Fig.7 Spatial distribution of RLCEI intensity levels during drawdown period and flood season

表 2 消落期与汛期 4 座水电站研究区 RLCEI 指数不同等级面积占比

Table 2 Area proportions of different RLCEI levels for study area of four hydropower stations during drawdown period and flood season %

水电站	汛期面积占比			消落期面积占比		
	无影响	弱影响	强影响	无影响	弱影响	强影响
龙开口	33	46	21	71	21	8
观音岩	50	26	24	63	24	13
溪洛渡	17	39	44	66	21	13
向家坝	22	43	35	18	66	16

本研究分别计算 4 个水电站在汛期与消落期的水库局地气候效应强度指数(RLCEI)。在此基础上,选取水电站物理因子、河谷地形因子与强影响区空间特征因子等开展 Spearman 等级相关分析,以探讨水库气

候效应的主要驱动因子。然而,空间统计结果表明,消落期 RLCEI 强影响等级在研究区内的分布面积明显小于汛期,空间样本数量有限。相比之下,汛期 RLCEI 强影响等级分布范围广、空间异质性明显,更能反映水库对局地气候的显著调节作用。因此,综合考虑样本代表性、统计稳定性及水库气候效应的物理特征,本文选取汛期 RLCEI 开展 Spearman 相关分析,以保证分析结果的可靠性与解释意义。

表 3 为汛期 4 座水电站的物理因子、河谷地形因子与强影响区空间特征数据。为揭示水库局地气候效应强影响区分布的关键驱动机制,本研究选取库容、水面面积等水库物理因子,平均谷宽、平均坡度、平均谷深等河谷地形因子,与强影响区面积占比、平均影响半径、横向扩散极限宽度等效应特征参数开展 Spearman 相关分析。

表 3 汛期水电站物理因子、河谷地形因子与强影响区空间特征数据

Table 3 Physical factors, valley terrain factors, and spatial characteristics of strong impact areas for hydropower stations during flood season

水电站	库容/ 亿 m ³	水面面积/ km ²	平均谷宽/ m	平均坡度/ (°)	平均谷深/ m	强影响区 面积占比/%	平均影响 半径/km	横向扩散 极限宽度/km
龙开口	5.07	15.05	370.12	15.77	388.02	21	19	5
观音岩	22.50	50.87	442.25	17.09	713.66	24	27	6
溪洛渡	129.10	133.65	540.63	16.46	856.57	44	35	7
向家坝	51.63	95.60	960.08	13.49	978.64	35	29	10

由图8可知,在水库物理因子中,库容和水面面积与强影响区面积占比、平均影响半径均呈较强的正相关($\rho \geq 0.700$)。其中,库容与强影响区面积占比的相关性最强($\rho=0.900$):库容最大的溪洛渡水电站(129.1亿 m^3),其强影响区面积占比(44%)与平均影响半径(35 km)均为4座电站最高;库容最小的龙开口水电站(5.07亿 m^3)对应最低的面积占比(21%)与影响半径(19 km)。库容和水面面积与横向扩散极限宽度的相关性相对较弱($\rho=0.600$)。

在河谷地形因子中,平均谷宽与横向扩散极限宽度的正相关性最强($\rho=1.000$):平均谷宽最大的向家坝水电站(960.08 m),其横向扩散极限宽度达10 km;平均谷宽最小的龙开口水电站(370.12 m),横向扩散极限宽度仅5 km。平均谷宽与平均影响半径呈正相关($\rho=0.800$),与强影响区面积占比的相关性相对较弱($\rho=0.600$)。平均谷深与强影响区面积占比($\rho=0.800$)、平均影响半径($\rho=0.700$)及横向扩散极限宽度($\rho=0.800$)均呈强正相关,向家坝水电站(平均谷深978.64 m)与溪洛渡水电站(856.57 m)的强影响区扩展相关参数数值,显著高于谷深较浅的龙开口水电站(平均谷深388.02 m)。此外,平均坡度与各强影响区特征参数均呈负相关(ρ 值为 $-0.600 \sim -0.200$)。



图8 Spearman相关系数

Fig.8 Spearman correlation coefficients

4 讨论

4.1 中下游水电站研究区局地气候变化特征

本研究基于降水温度归一化指数(PT)等级空间分布特征,系统对比金沙江流域4座水电站在水电站水库蓄水前后消落期与汛期的局地气候变化规律,结果显示,水库蓄水对研究区局地气候具有普遍影响,但这种影响在时间、空间格局、强度和方向上呈显著差异。

从时间上来说,各个水电站水库蓄水后无论汛期还是消落期,湿润等级区域均明显扩大,干旱等级面积相应减少。此现象表明,水库运行对局地气候

条件产生持续性调节作用,全面反映了水库蓄水对局地气候的显著影响。然而,空间分布结果表明,各个水电站在汛期建设蓄水前后气候等级变化远大于消落期。主要由于汛期水库水位普遍处于高位,水面面积达到全年最大,充足的水体蒸发提供大量水汽来源,在高温背景下进一步促进水汽输送、抬升与凝结过程,从而更容易在水库周边及河谷区域形成湿润化效应^[18],使得局地气候区域湿润。

从空间格局、强度和方向上来说,4座水电站蓄水后2期均表现出湿润等级区域的扩张及干旱等级面积的减少,说明水库运行普遍增强局地水分条件和湿润程度,与已有研究^[19]中关于大型水体可提升近地面湿度与局地降水量、降低极端高温出现概率的结论相一致。同时,该现象也印证了干热河谷地区对地表水分及温度变化较为敏感的特点^[20],因此水库蓄水带来的降水量与温度的改变能够直接反映在区域气候等级上。

不同河段水电站的局地气候响应空间格局差异显著,在2期内龙开口水电站与溪洛渡水电站在水库蓄水后的湿润区域主要沿水库两侧分布,紧贴河谷展开,且上下游方向的变化幅度较小。此格局与2座水电站研究区上下游普遍处于低海拔河谷、而河谷外地形迅速抬升的地貌特征密切相关;观音岩水电站在水库蓄水后的湿润区域则主要分布在远离坝址的上游河段,呈“上游先变、坝址后变”的模式;向家坝水电站与观音岩水电站类似,湿润区域大面积出现在水库上游且向周边大范围扩展,而坝址附近以半湿润等级为主,形成独特的空间分异结构。这种现象与2座水电站的地形特征密切相关:坝址附近河谷较为开阔且海拔低,而上游区域谷地狭窄。上游河段海拔高、坡度大,容易形成坡谷环流,增强水汽在谷地的抬升和凝结,从而更容易在高海拔的狭窄谷地内形成湿润化效应^[21]。同时,狭窄河谷对湿空气具有通道效应,使水汽沿谷地上升方向传输效率更高^[22]。并且水体蒸发产生的水汽在开阔河段往往更容易水平扩散,而在狭窄河段上游则更容易聚集,增强局地湿润程度^[23],使得观音岩与向家坝均表现出研究区内上游响应更强、坝址附近响应滞后的现象。此外,在汛期溪洛渡水电站研究区水库两岸呈显著的不对称气候响应,即左岸变化幅度较大,而右岸相对较弱,可能与研究区范围内的水库河道的“S”形弯曲改变局地风场结构与水汽扩散路径有关^[24]。

4.2 局地气候效应强度分布特征及影响因素

本研究表明,金沙江流域4座典型水电站蓄水后对局地气候的调控作用显著且空间异质性突出,这

种差异由“水库物理因子主导效应强度、河谷地形因子约束空间结构”的双重驱动机制所决定。

从空间分布规律来看,4座水电站均在坝址周边形成连续而集中的强影响区,与坝址附近水面蒸发最强、水体热惯量最大相吻合。随着距离水库距离增大,RLCEI等级由强影响等级变为弱影响等级,呈现典型的空間衰减特征。说明水库影响并非均匀扩散,而是表现为以水源区为中心向外逐级衰减的空间过程。此规律与现有研究^[25]中水体湿润效应的空间衰减模型一致,反映出水体所带来的水汽补给与能量调节在空间上具有有限作用半径。

进一步对不同时期进行对比发现,汛期RLCEI强影响区的空间范围明显大于消落期。是由于汛期处于7—8月,该时期区域气温高、降水充沛,水库水位较高且水面面积显著扩大,从而强化水体对周边气温与湿度的调节效应;在消落期,随着库区水位下降和水面缩小,水体调控效应相应减弱,强影响区范围随之收缩。表明水库局地气候效应不仅具有显著的空间梯度特征,同时也呈现出明显的季节响应特性。

Spearman 相关分析结果明确水库物理因子的核心驱动作用,库容与水面面积与强影响区面积占比及平均影响半径之间均呈正相关。大库容水库具有更大的水体热容量与蒸发能力,可显著增加近地层水汽通量,进而对局地温湿场产生更持续、更强烈的调节作用^[26]。因此,大库容梯级水库对局地气候具有更强、更广的影响能力^[27],与本研究金沙江流域下游水库表现出研究区强影响区域占比更高的结果高度一致。然而,库容与横向扩散极限宽度的相关性较弱,表明其主要影响沿河谷方向的扩散,而横向扩散则更受地形控制。综上,水库规模是影响局地气候效应强度的关键因子,但库容与水面面积对于局地气候效应强度影响重要性有所不同。本研究中,下游溪洛渡和向家坝水电站虽在库容规模上具有优势,但其更显著的局地气候效应,与其较大的水面面积及复杂的库岸形态密切相关。从局地气候调控机制来看,相较于库容,水面面积更直接决定水库对近地气候要素的影响强度。由于水面面积的大小直接控制蒸发通量、潜热交换及感热调节的空间范围。库容则更多反映水库的整体蓄水能力和水文调蓄特征,其对局地气候的影响具有一定的间接性,通常通过影响水位变动幅度和水面稳定性来发挥作用;而在相同或相近库容条件下,水面形态更为开阔、岸线更为复杂的水库,其实际参与能量交换的有效水面往往更大,从而产生更强的局地气候响应。

河谷地形因子对局地气候效应空间结构的约束作用主要体现在3个方面:横向控制、效应强化与扩散阻滞。首先是平均谷宽表现出的横向控制效应。平均谷宽与横向扩散极限宽度的相关系数达1.000,表明平均谷宽对横向扩散范围起关键作用。宽阔河谷(如向家坝研究区)为水汽横向扩散提供充足空间,而狭窄河谷(如龙开口研究区)受地形束缚,水汽难以向两侧扩展,只能沿谷地纵向输送,与已有研究^[28]提出的地形形态在调控水汽输送方向与扩散通道中扮演关键角色一致:宽谷更有利于水汽横向扩散,而窄谷则形成“通道效应”,使气候影响主要沿河谷方向延伸。同时,平均谷宽与强影响区面积占比的相关性相对较弱($\rho=0.600$)。主要受到溪洛渡水电站的影响:其研究区平均谷宽(540.63 m)远小于向家坝水电站,但强影响区面积(44%)却为最大。表明局地气候效应的强度不仅受谷宽制约,还受到水库规模、谷深等因子的共同作用。其次,平均谷深呈现明显的效应强化作用。谷深与强影响区面积占比、平均影响半径及横向扩散极限宽度均表现出正相关,说明深谷能够显著增强气候效应。深谷环境中常出现冷空气下沉、夜间逆温与稳定层结等现象,使水库蒸发产生的水汽与热量更易在谷底滞留并沿谷地输送,从而放大温度与湿度变化^[29]。最后,坡度体现出横向阻滞效应。坡度与各强影响区特征参数均呈负相关,表明较陡坡面会限制水汽横向扩散。陡坡一方面通过增强坡面湍流、改变能量通量等方式削弱冷湿空气扩散能力;另一方面形成显著的地形屏障,使局地气候效应更多局限于谷底区域^[30]。

5 结 论

1)水电站水库蓄水显著影响局地气候。4座水电站均使湿润等级区域扩大、干旱等级面积减少,表明水库蓄水对局地气候具有显著调节作用。从不同时期来看,汛期水库对局地气候的调控效应整体强于消落期,水电站水库蓄水后湿润等级区域扩展范围更大。此外,下游溪洛渡水电站和向家坝水电站由于库容较大及水库形态复杂,蓄水后局地气候变化表现出更复杂的空间分布特征。

2)水库蓄水对局地气候的调节作用具有显著的空间异质性,其强度与形态受水库物理因子与河谷地形因子的双重影响。水库规模是水库局地气候效应强度的首要决定因子。库容与强影响区面积占比及平均影响半径之间的相关系数均 >0.7 ,库容最大的溪洛渡水电站(129.1亿 m^3)其强影响区面积占比(44%)与平均影响半径(35 km)均达到最大值。同时,河谷地形也调控着效应的空间形态。平均谷宽

与横向扩散极限宽度正相关,决定效应的横向范围,使得拥有最宽河谷的向家坝(960.08 m)其扩散宽度达10 km;平均谷深与强影响区面积占比、平均影响半径及横向扩散极限宽度均表现出正相关,溪洛渡、向家坝水电站(平均谷深>800 m)的效应扩展能力显著高于龙开口水电站(平均谷深388.02 m);坡度则阻滞气候效应的扩散。综上,水库局地气候效应是库容主导强度、地形塑造形态共同作用的结果,下游大型水库因其库容巨大,对局地气候的影响更为显著,但其具体形式取决于不同水电站特定的库容地形组合模式。

3)本研究存在的不足及未来研究方向。本研究Spearman相关分析基于流域内4座典型梯级水电站展开,虽然揭示金沙江流域梯级水库局地气候效应的驱动机制,能够代表整个干热河谷段不同尺度水库的主要特征,但总体样本量仍较有限。因此,本研究所得的相关性与驱动机制主要适用于金沙江干热河谷地区。后续应扩大样本覆盖范围,例如,引入澜沧江、怒江及雅砻江等相似地形背景下的梯级水库案例,构建更大规模数据库,以提升统计分析的可靠性,并进一步检验库容、地形因子与局地气候效应的因果链条是否具有区域间一致性。

参考文献:

- [1] 武慧铃,周建中,田梦琦,等.三峡水库蓄水前后气候变化分析[J].水力发电,2021,47(5):30-35.
WU H L, ZHOU J Z, TIAN M Q, et al. Analysis of climate change before and after the impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. Water Power, 2021, 47(5): 30-35.
- [2] BIESS B, GUDMUNDSSON L, SENEVIRATNE S I. Assessing global and regional trends in spatially co-occurring hot or wet annual maxima under climate change[J]. Earth's Future, 2024, 12(4): e2023EF004114.
- [3] ARIAS M E, FARINOSI F, HUGHES D A. Future hydropower operations in the Zambezi River basin: Climate impacts and adaptation capacity[J]. River Research and Applications, 2022, 38(5): 926-938.
- [4] AKMATOV R T, ALAMANOV S K, POCHCHUN V A. The influence of water masses to local climate of the Toktogul reservoir[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 834(1): e012018.
- [5] 孙佳歆,杜崇,齐鹏,等.珙春河流域极端气候时空演变特征及水库运行的反馈效应[J].绿色科技,2023,25(4):10-16.
SUN J X, DU C, QI P, et al. Spatiotemporal change of extreme climate and feedback effects of reservoir operation in Hunchun River basin[J]. Journal of Green Science and Technology, 2023, 25(4): 10-16.
- [6] 王思凡,徐慧,任玉峰,等.水库建设对河道水温及生态环境的影响研究进展[J].三峡生态环境监测,2025,10(1):2-17.
WANG S F, XU H, REN Y F, et al. Research progress on the impacts of reservoir construction on river water temperature and ecological environment[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2025, 10(1): 2-17.
- [7] XU Z F, HAN Y, TAM C Y, et al. Bias-corrected CMIP6 global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979—2100)[J]. Scientific Data, 2021, 8: e293.
- [8] TRISOLINO P, DI SARRA A, SFERLAZZO D, et al. Application of a common methodology to select *in situ* CO₂ observations representative of the atmospheric background to an Italian collaborative network[J]. Atmosphere, 2021, 12(2): e246.
- [9] WANG Y Z, LIU X, LIU R, et al. Research progress on spatiotemporal interpolation methods for meteorological elements[J]. Water, 2024, 16(6): e818.
- [10] 起德花,杨大新,宋清海,等.2013—2015年元江干热河谷生态站碳水通量观测数据集[J].中国科学数据,2021,6(1):106-118.
QI D H, YANG D X, SONG Q H, et al. An observation dataset of carbon and water fluxes at Yuanjiang Dry-hot Valley Ecological Station (2013—2015)[J]. China Scientific Data, 2021, 6(1): 106-118.
- [11] 张峻铭,孙永玉,周姗,等.2000—2020年金沙江干热河谷景观生态风险的时空变化[J].应用生态学报,2023,34(10):2767-2776.
ZHANG J M, SUN Y Y, ZHOU S, et al. Spatial and temporal variations of landscape ecological risk in the dry and hot valley of the Jinsha River during 2000—2020[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(10): 2767-2776.
- [12] ESPOSTE COUTINHO P, CATALDI M. Evaluation of extreme hydroclimatic trends in river basins located in the northeast and south regions of Brazil[J]. Atmosphere, 2023, 14(9): e1388.
- [13] 刘娇,郎学东,苏建荣,等.基于InVEST模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估[J].生态学报,2021,41(20):8099-8111.
LIU J, LANG X D, SU J R, et al. Evaluation of water conservation function in the dry-hot valley area of Jinsha River basin based on InVEST model[J]. Acta Ecologica

- Sinica, 2021, 41(20):8099-8111.
- [14] 吴友均, 师庆东, 常顺利. 1961—2008年新疆地区旱涝时空分布特征[J]. 高原气象, 2011, 30(2):391-396.
- WU Y J, SHI Q D, CHANG S L. Characteristics of temporal and spatial distributions of the drought and flood in Xinjiang region from 1961 to 2008[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(2):391-396.
- [15] 庞晶, 张荣, 徐迎春, 等. 降水温度均一化指标修正及在西南地区的适用性[J]. 中低纬山地气象, 2019, 43(3):56-61.
- PANG J, ZHANG R, XU Y C, et al. Modification of homogeneity index of precipitation and temperature and its application in southwest China[J]. Mid-Low Latitude Mountain Meteorology, 2019, 43(3):56-61.
- [16] ZHAO Y Y, LIU S N, SHI H Y. Impacts of dams and reservoirs on local climate change: A global perspective[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(10):e104043.
- [17] HE W Y, CHEN H P. More extreme-heat occurrences related to humidity in China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2023, 16(5):e100391.
- [18] 李祖忠, 张旭东, 江聪, 等. 基于 Landsat 影像的近40年来(1982—2021年)三峡库区水面面积及其蒸发损失变化[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5):1822-1831.
- LI Z Z, ZHANG X D, JIANG C, et al. Evolutions of water surface area and evaporation loss of Three Gorges Reservoir based on Landsat images, 1982—2021[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(5):1822-1831.
- [19] 汪东川, 俞长锦, 孙苗苗, 等. 金沙江干热河谷典型水电开发对局地气候的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1):158-166.
- WANG D C, YU C J, SUN M M, et al. Impacts of typical hydropower development on local climate in the dry-hot valley of the Jinsha River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):158-166.
- [20] 杨逢春, 马秀花, 何琼, 等. 元江-红河流域(中国段)过去57年(1962—2018)主要气候因子变化[J]. 环境影响评价, 2023, 45(5):115-121.
- YANG F C, MA X H, HE Q, et al. Processing of the major climate factors in Yuanjiang-red river (China section) in the past fifty-seven years (1962—2018)[J]. Environmental Impact Assessment, 2023, 45(5):115-121.
- [21] GÖBEL M, SERAFIN S, ROTACH M W. Adverse impact of terrain steepness on thermally driven initiation of orographic convection [J]. Weather and Climate Dynamics, 2023, 4(3):725-745.
- [22] DE BODE M, HEDDE T, ROUBIN P, et al. Fine-resolution WRF simulation of stably stratified flows in shallow pre-Alpine valleys: A case study of the KASCADE-2017 campaign[J]. Atmosphere, 2021, 12(8):e1063.
- [23] 王晓春, 闫金波, 吕超楠, 等. 三峡水库水面蒸发年内滞后效应分析[J]. 湖泊科学, 2024, 36(3):890-900.
- WANG X C, YAN J B, LÜ C N, et al. Analysis of the intra-annual hysteresis effect of water surface evaporation in the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(3):890-900.
- [24] BO T, RALSTON D K. Frontogenesis, mixing, and stratification in estuarine channels with curvature[J]. Journal of Physical Oceanography, 2022, 52(7):1333-1350.
- [25] CALBET X, CARBAJAL HENKEN C, DESOUSA-MACHADO S, et al. Horizontal small-scale variability of water vapor in the atmosphere: Implications for inter-comparison of data from different measuring systems[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2022, 15(23):7105-7118.
- [26] VILLANI L, CASTELLI G, FORZINI E, et al. Large dams and small reservoirs: Co-modeling water storage strategies in a Mediterranean catchment under a changing climate[J]. Frontiers in Water, 2025, 7:e1673203.
- [27] LI H B, WANG W G, LIU G S, et al. Divergent seasonal biophysical effects induced by the Three Gorges Reservoir [J]. Water Resources Research, 2025, 61(9):e2024WR039325.
- [28] ZHOU H, QIU J, LI M J, et al. Assessment of large-scale reservoirs' impact on the local precipitation [J]. Water Resources Research, 2025, 61(5):e2025WR039938.
- [29] LI M H, SEYBOLD H, WU B S, et al. Interaction between tectonics and climate encoded in the planform geometry of stream networks on the eastern Tibetan Plateau [J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(14):e2023GL104121.
- [30] FARINA S, ZARDI D. Understanding thermally driven slope winds: Recent advances and open questions [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2023, 189(1):5-52.