

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.038

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 Dongchuan, YU Changjin, SUN Miaomiao, 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.

金沙江干热河谷典型水电开发对局地气候的影响

汪东川^{1,2}, 俞长锦¹, 孙苗苗³, 魏奥泽¹, 王思润¹, 李亭蓉¹, 张万恒¹

(1. 天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300384; 2. 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384;

3. 航天宏图信息技术股份有限公司, 天津 300384)

摘要: [目的] 探究水电开发对局地气候的影响, 是预防和减轻水电开发可能带来的负面效应, 实现能源的可持续发展与环境保护的重要保障。[方法] 选取金沙江中游的龙开口、观音岩及下游的溪洛渡、向家坝 4 个典型水电站, 运用气候倾向率、M-K 趋势检验和小波分析等方法, 定量分析了中下游水电局地气温、降水在蓄水前后的月、季、年变化及在水电开发中的突变情况和周期性特征。[结果] (1) 蓄水后, 水电站对河谷内最高温起抑制作用, 最低温起抬升作用; 夏季和秋季, 下游水电站发挥了降温作用, 月平均气温 2, 6, 7, 9, 10, 11 月下降显著, 而中游水电站调温作用不明显, 仅 7 月平均气温略有下降。(2) 蓄水后, 各季节降水量均有增加, 在 4, 8, 9 月增加显著, 增幅为 0.71~27.95 mm。(3) 气温、降水与水电开发相关, 中下游水电站的气温、降水在开发中和蓄水后发生不同时间的突变。(4) 气温和降水在小波变化周期上呈现相似的特征, 蓄水后, 局地降水呈现出更显著的周期性, 并且具有一定稳定性。[结论] 不同时间尺度上, 水电开发在不同河段上影响局地气温和降水的程度不同, 受到地理位置、周边环境及蓄水时长的多重因素制约。

关键词: 局地气候; 金沙江; 河谷; 蓄水; 定量分析; 时间尺度

中图分类号: P463.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0158-09

Impacts of Typical Hydropower Development on Local Climate in the Dry-Hot Valley of the Jinsha River

WANG Dongchuan^{1,2}, YU Changjin¹, SUN Miaomiao³, WEI Aoze¹, WANG Sirun¹,

LI Tingrong¹, ZHANG Wanheng¹

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

2. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin 300384, China;

3. PIESAT Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: [Objective] Exploring the impact of hydropower development on local climate is an important guarantee for preventing and mitigating the possible negative effects of hydropower development and realizing sustainable energy development and environmental protection. [Methods] Four typical hydropower stations, Longkaikou and Guanyinyan in the middle reaches of the Jinsha River and Xiluodu and Xiangjiaba in the lower reaches of the river, were selected. By applying the climatic propensity rate, the M-K trend test, and the wavelet analysis, this study quantitatively analyzed the monthly, seasonal and yearly changes of temperature and precipitation before and after the impoundment of water in the middle and lower reaches of the river, as well as the sudden changes in the development of hydropower and the cyclical characteristics. [Results] (1) After water storage, the hydropower station had an inhibitory effect on the highest temperature and an uplifting effect on the lowest temperature in the valley. In summer and autumn, the downstream hydropower station played a cooling role, and the average monthly temperature decreased significantly in February, June, July, September, October and November, while the midstream hydropower

收稿日期: 2023-09-06

修回日期: 2023-10-14

录用日期: 2023-10-20

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-12-19

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42271103)

第一作者: 汪东川 (1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事景观格局动态监测分析与模拟研究。E-mail: mrwangdc@126.com

通信作者: 汪东川 (1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事景观格局动态监测分析与模拟研究。E-mail: mrwangdc@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

station did not have the temperature regulation effect, with only a slight decrease in average air temperature in July. (2) After water storage, precipitation in each season increased significantly, with an increase of 0.71~27.95 mm in April, August, and September. (3) Air temperature and precipitation were related to hydropower development, and the air temperature and precipitation of the mid-and downstream hydropower stations underwent abrupt changes at different times during the development and after the water storage. (4) Air temperature and precipitation showed similar characteristics in wavelet change period, and after water storage, local precipitation showed more significant periodicity and had a certain degree of stability. [Conclusion] At different time scales, hydropower development affected local temperature and precipitation varied across river reaches, and was constrained by multiple factors such as geographic location, the surrounding environment and water storage duration.

Keywords: local climate; Jinsha River; river valley; reservoir impoundment; quantitative analysis; time scales

Received: 2023-09-06

Revised: 2023-10-14

Accepted: 2023-10-20

Online(www.cnki.net): 2023-12-19

我国干热河谷主要分布在金沙江、元江、怒江等沿江地区。其中,金沙江是国内最主要的水电开发区之一,也是全球最大的大河之一,“既干又热”的河谷气候条件在水电开发中起着重要的作用,是不可或缺的可利因素。水电站投入使用后,在大坝上游形成一个水库,其属于人工湖泊,伴随水库蓄水量增加和水面扩大,库区下垫面发生变化,影响土质、热力性质和热量平衡等,进而引起库区局地气候发生变化^[1-2]。在全球气候变化的影响下,河谷水电面临诸多风险,包括气温变化、降水量和水流条件的不确定性增大^[3],其影响距离约近库区 10~30 km 范围内^[4]。因此,探究水电开发对周边环境的具体影响程度,准确把握干热河谷气候特征和变化趋势,有助于高效地管理和调度当地水资源。

相关学者针对水电开发对局地气候的影响已开展大量的研究。大型水库可以改变周边地区气候,导致局地降水模式、蒸发量及温度等气候要素发生变化^[5-6]。ARIAS 等^[7]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的运营可能减少涌水量和增加蒸发量;AKMATOV 等^[8]基于区域站点气候资料研究发现,水库具有提高气温的作用,在凯特门—秋贝河谷上,气温的升高取决于托克托古尔水库的水量;史雯雨等^[9]从时空角度对流域站点气温要素进行分析后的结果表明,金沙江流域年及四季平均气温均表现为显著上升的趋势;王圆圆等^[10]基于广义加性模型插值算法,估算三峡库区 1 km 空间分辨率的月气温数据,在此基础上分析得出水库蓄水后气温、风速呈现上升趋势;李艳等^[11]利用 WRF 中尺度天气预报模式分析表明,大渡河流域水电开发后下垫面水体拓宽,近库区年均气温下降,相对湿度与平均风速呈微弱变化;孙晨等^[12]结合

CRU、ERA-Interim 和 JRA-55 这 3 种再分析资料与气象站点数据,结果表明,蓄水后年平均气温略微下降,区域降水年际变化不显著,但在季节上存在较强的波动。以上研究主要从流域尺度分析年度和季度上的气候变化,而河谷尺度上,水库影响下的干热河谷库区局地气候变化可能有着与流域尺度不同的结果。鉴于此,选择河谷内的气温和降水作为 2 个关键气候指标,进一步分析不同河谷地段的水电开发在多时间尺度上对局地气候的影响。

目前金沙江中下游的水电开发已基本建设完毕并投入运营,关于河谷尺度上水电开发对局地气候的影响还没有明确一致的结论。为探究水电站开发在长时间尺度上的局地气候效应,本文建立在前人已有的研究基础上,根据水电站的开发进程、装机规模和蓄水时间,选择了 4 个相近时间段内的典型水电站进行研究,即中游河谷的龙开口和观音岩水电站,以及下游河谷的溪洛渡和向家坝水电站。收集水电站 20 km 内的气象资料分析 2000—2020 年各气候要素的周期变化特征、蓄水前后差值及突变情况,讨论中游河谷水电与下游河谷水电在不同地段对局地气候的影响,为水利开发水资源调度提供合理有效的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于金沙江中下游河谷内观音岩、龙开口、向家坝和溪洛渡 4 个典型水电站,介于四川和云南两省之间(图 1)。

观音岩水电站位于四川省攀枝花市与云南省华坪县交界处,于 2008 年 12 月 28 日开工建设,2014 年 10 月 21 日开始下闸蓄水,至 2016 年 8 月全部投入运营,水库正常水位 1 134 m,水库总库容可达

22.50 亿 m³, 调节库容 5.55 亿 m³。

龙开口水电站位于云南省大理州鹤庆县龙开口镇境内。水电站于 2007 年 9 月开工建设, 2012 年 11 月 25 日开始下闸蓄水, 至 2013 年 5 月开始投入运营, 水库正常水位 1 298 m, 水库总库容为 5.07 亿 m³, 调节库容为 1.13 亿 m³。

向家坝水电站为金沙江水电基地最后一级水电站, 位于四川省宜宾县与云南省水富县交界处。水电站于 2006 年 11 月 26 日开始建设, 2012 年 10 月 10

日开始下闸蓄水, 至 2015 年 6 月工程全面竣工, 水库正常蓄水位 380 m, 水库总容量为 51.63 亿 m³, 调节库容为 9 亿 m³。

溪洛渡水电站是国内第三大水电站, 位于四川省雷波县与云南省永善县交界处、云南省东北部高原与四川省西南部山区之间的金沙江下游干热河谷内。水电站于 2005 年 12 月 26 日开工建设, 2013 年 5 月 4 日开始下闸蓄水, 至 2015 年 10 月竣工, 水库正常水位 600 m, 水库总容量可达 128 亿 m³, 调节容量为 64 亿 m³。

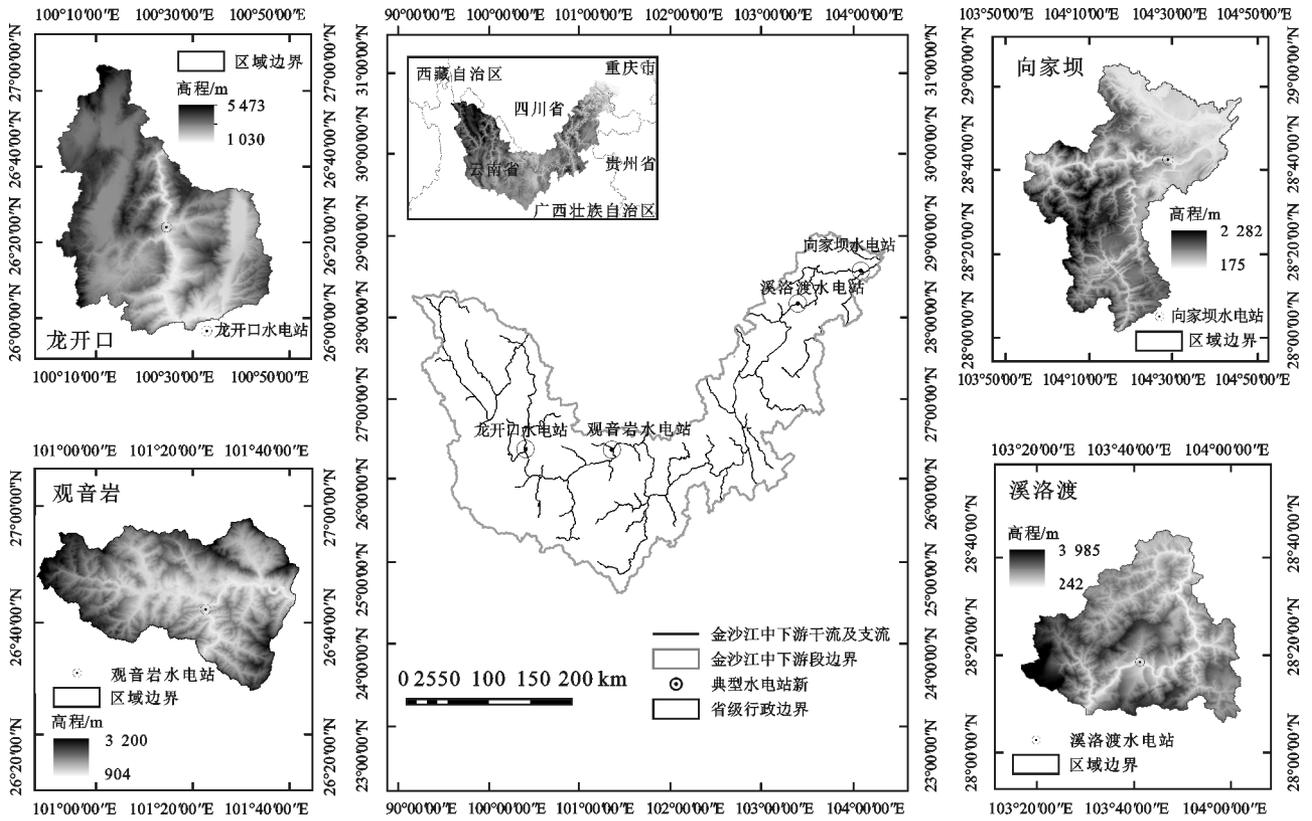


图 1 研究区流域分布

Fig. 1 Distribution of watersheds in the study area

1.2 数据来源

气象资料: 选取溪洛渡水电站、向家坝水电站、龙开口水电站和观音岩水电站 4 个研究区近 20 km 范围内的雷波、宜宾、丽江和华坪站点, 数据时间序列为 2000—2020 年逐日气温和降水观测资料。

数据来源: 国家气候中心获取的云南与四川区域内气象站实测的日值数据(<http://data.cma.cn/>)。

1.3 研究方法

(1) 气候倾向率法

收集气候相关的数据, 如近 20 年来气温和降水量数据, 按时间序列整理, 采用一元线性回归分析^[13], 计算公式为:

$$\hat{y}_i = a_i t + b, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: \hat{y}_i 为各气候要素的拟合值; a 为线性回归系数, 表示 t 时间序列年平均趋势的变化率, 当 $a > 0$ 时呈现

上升趋势, 反之则呈下降趋势; b 为线性回归常数项。

(2) M-K 检验

M-K (mann-kendall) 是一种适用于检验气候变化显著性的非参数检测方法, 对每个气候要素的数据点值进行长时序的趋势检验分析^[14], 计算统计量 S 的期望值和方差, 并将其标准化进行假设检验, 以确定是否存在趋势变化。M-K 检验公式为:

具有 n 个样本量的时间序列 x , 构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k R_i (i = 1, 2, \dots, k; k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$R_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i = x_j \\ -1, & x_i < x_j \end{cases} i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} (k = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: S_k 为大于*i*前一时间段内第*i*时刻的累积数值; UF_k 为标准化的统计量; x_i, x_j 为各气候要素时间序列数值;其中, $UF_1 = 0, E(S_k)$ 与 $\text{var}(S_k)$ 为累积数值 S_k 的期望与方差。当时间序列 x_i 相互独立且具有相同连续分布时,均值和方差公式为:

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \\ \text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (5)$$

标准正态分布下 UF_i ,按时间序列顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出统计量序列,给定显著性水平 α ,若 $|UF_i| > U_\alpha$,则表示该时间序列存在明显的趋势变化; $UB_i = -UF_i$,若 UF, UB 曲线交点位于置信区内,则认为该交点为对应时刻的突变点。

(3)小波分析

本文选用常见 Morlet 小波分析法进行周期变化的局部分析,在气候研究中被广泛应用^[15],利用伸缩平移运算聚焦多尺度信号的细化,分析时间序列中信号的变化趋势、变化的时间与相位信息并以二维图形的形式呈现出来。计算公式为:

$$\psi(t) = \pi^{\frac{1}{4}} e^{ift} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (6)$$

$$\psi_{c,d}(t) = |c|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-d}{c}\right) \quad (7)$$

式中: $\psi(t)$ 为小波母函数; $\psi_{c,d}(t)$ 为子小波系数; c 为伸缩尺度; d 为平移距离; i 为虚数单位; f 为角频率; t 为时间。

2 结果与分析

2.1 气温、降水量蓄水前后月值分析

选取 4 个水电站周边的雷波、宜宾、丽江和华坪站点处理 2000—2020 年逐日气温和降水观测资料,根据陈鲜艳等^[16]的划分方式,以 2014 年为界,探究水电开发蓄水前后各月的差值变化(图 2~图 5)。

与蓄水前相比,蓄水后,下游溪洛渡与向家坝水电站在 2,6,7,9,10,11 月起降温作用,其余月份以增温为主,而中游龙开口与观音岩水电站整体呈现增温效应(图 2);下游水电站蓄水后在 5,6,9 月最高气温显著下降,中游仅龙开口水电站在 6 月和 7 月下降较为显著(图 3);下游仅在 2,7,11 月的最低气温有所下降,而中游在蓄水后,局部区域的最低气温呈现上升趋势(图 4)。不论是下游水电站还是中游水电站,在蓄水后,降水量都会增加,尤其是在 4,8,9 月,这一增加趋势最为明显(图 5)。总体来看,水电站的发展在干热河谷地区可以起到关键的气候调节作用,缓解局地的高温和干旱特征。它不仅可以降低气温,还有助于增加降水量,并且对农业灌溉和人类居住更加有利。

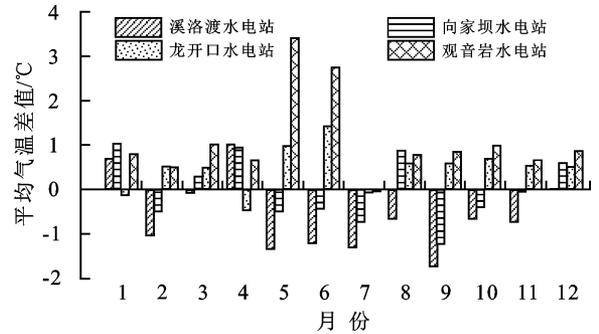


图 2 蓄水前后月平均气温差值

Fig. 2 Difference in monthly average temperature before and after impoundment

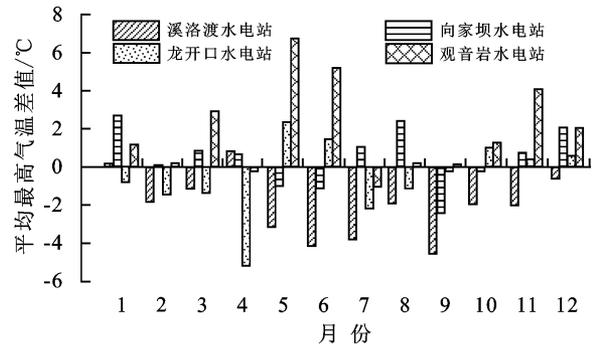


图 3 蓄水前后月平均最高气温差值

Fig. 3 Difference in monthly average maximum temperature before and after impoundment

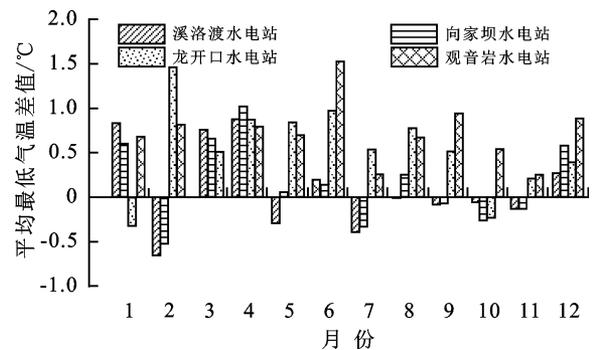


图 4 蓄水前后月平均最低气温差值

Fig. 4 Difference in monthly mean minimum temperature before and after impoundment

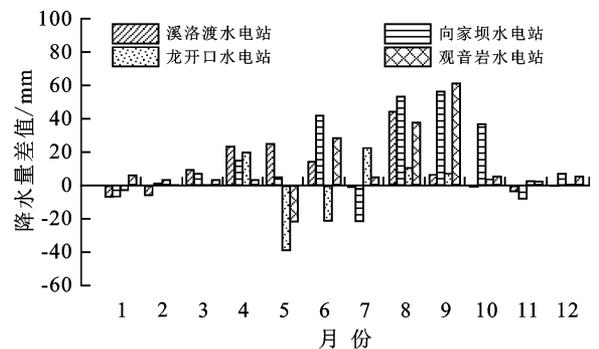


图 5 蓄水前后月降水量差值

Fig. 5 Difference in monthly precipitation before and after impoundment

2.2 气温、降水量蓄水前后季值分析

通过对月值特征进行分析发现,水电站在蓄水前后气温和降水方面存在显著变化。为了更好地把握季节性特征,根据气象学四季划分,对蓄水前后的差值进行分析。

表 1 蓄水前后气温、降水量差值

Table 1 Difference in temperature and precipitation before and after impoundment

指标	季节	蓄水后均值(2014—2020年)－ 蓄水前均值(2005—2013年)			
		溪洛渡	向家坝	龙开口	观音岩
		平均气温/ ℃	春季 -0.15	0.24	0.32
	夏季	-1.06	-0.11	0.63	1.16
	秋季	-1.03	-0.55	0.58	0.82
	冬季	-0.11	0.39	0.29	0.71
平均最高 气温/℃	春季	-1.14	0.17	-1.39	3.13
	夏季	-3.27	0.84	-0.61	1.42
	秋季	-2.81	-0.63	0.42	1.82
	冬季	-0.75	1.63	-0.51	1.13
平均最低 气温/℃	春季	0.42	0.61	0.79	0.66
	夏季	-0.08	0.04	0.75	0.81
	秋季	-0.09	-0.24	0.16	0.57
	冬季	0.15	0.22	0.51	0.79
降水量/mm	春季	18.59	8.86	-6.92	-5.15
	夏季	19.05	25.20	3.75	23.50
	秋季	0.71	27.95	3.65	22.52
	冬季	-3.91	2.42	0.77	3.82

从表 1 可以看出,蓄水前后,溪洛渡水电站蓄水对局部地区四季平均气温起到降温作用,其降温效应

在 0.11~1.06℃;向家坝水电站夏季和秋季起到降温作用,降温效应在 0.11~0.55℃,春季与冬季起到增温作用,增温效应在 0.24~0.39℃;龙开口与观音岩水电站蓄水后四季平均气温较蓄水前增加,龙开口水电站四季局地气温增加 0.29~0.63℃,观音岩水电站局地气温增加 0.71~1.69℃。在 4 个水电站中,溪洛渡的蓄水效果对区域内最高气温具有显著的调节作用,降温范围为 0.75~3.27℃;向家坝水电站蓄水后秋季最高气温略降,最高气温下降 0.63℃;龙开口水电站除秋季外局地最高温较蓄水前下降,降温范围为 0.51~1.3℃;观音岩水电站蓄水后四季局地最高气温增加,春季增温显著,最高气温增加 3.31℃。观测局地最低气温发现,各水电站在蓄水后四季平均最低气温较蓄水前局地最低气温增加,增温范围为 0.04~0.81℃。此外,水电开发后水电站蓄水还导致中下游地区的降水量有所增加,降水增加量为 0.71~27.95 mm,其中,以向家坝和观音岩水电站的降水增加最为显著。

2.3 气温、降水量年变化及突变分析

对 2000—2020 年溪洛渡、向家坝、龙开口和观音岩水电站流域范围内年平均气温和降水量的时间序列进行趋势分析及 M-K 非参数趋势检验分析(图 6)。通过 M-K 检验分析 2000—2020 年溪洛渡、向家坝、龙开口和观音岩水电站流域范围内年平均气温、降水突变情况与趋势,UF 均呈标准正态分布且显著水平为 0.05,4 个水电站的 UF 与 UB 曲线交点均未超出置信水平线。

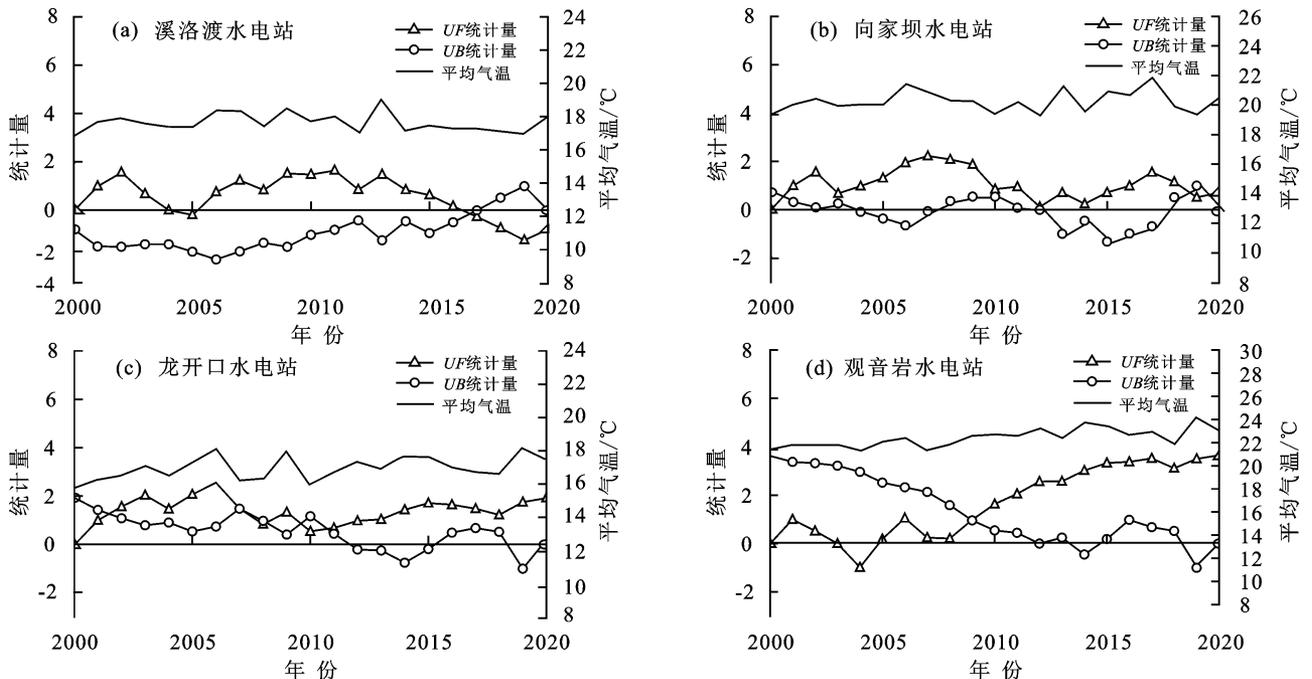


图 6 年平均气温 M-K 检验曲线及变化趋势

Fig. 6 M-K test curve and trend of annual average temperature

从图 6 可以看出,溪洛渡水电站在 2000—2016 年, $UF > 0$, 平均气温呈上升趋势, 2016 年发生突变后, $UF < 0$, 气温开始呈现下降趋势; 向家坝水电站在 2001 年是突变点, 2008 年后平均气温上升趋势变缓, 2018 年是第 2 突变点; 龙开口水电站在 2001 年、2007 年、2010 年为突变年, 2007 年后平均气温上升趋势略微下降; 观音岩水电站在 2009 年发生突变, 2011 年后 UF 超出置信区间, 平均气温上升趋势显著。水电开发过程发生不同时间节点的突变, 下游水电站突变点发生在蓄水后, 且蓄水后平均气温有所下降; 中游水电站在开发过程发生突变, 而突变年后平

均气温仍处于持续上升趋势。对 4 个水电站 2000—2020 逐日的降水量进行统计得出逐年累计降水量时间序列。由图 7 可知, 4 个水电站在蓄水后均存在不同突变时间点, 且蓄水后降水量 4 个区域均存在明显突变, 溪洛渡与向家坝水电站以 $38.73 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$) 和 $44.84 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$) 呈上升趋势, 蓄水后分别在 2013 年和 2018 年发生突变, 在 2014 年和 2015 年降水量显著上升; 龙开口水电站降水量以 $46.35 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$) 呈下降趋势, 蓄水后在 2018 年发生突变; 观音岩水电站以 $4.70 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$) 呈上升趋势, 降水量增加较缓, 蓄水后 2017 年发生突变。

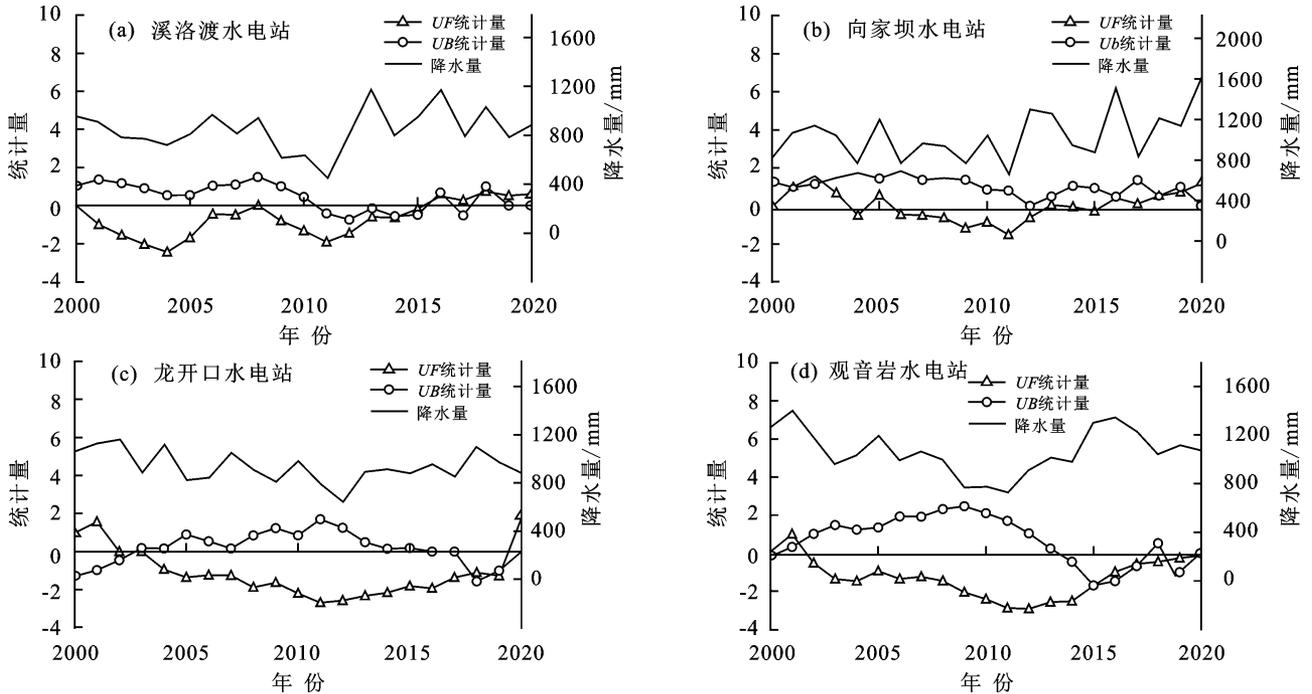


图 7 年降水量 M-K 检验曲线及变化趋势

Fig. 7 M-K test curve and trend of annual precipitation

2.4 气温、降水周期性分析

采用 Morlet 小波函数分析 4 个水电站年均气温和降水量时间周期的演变(图 8、图 9)。确定了气温、降水量周期时间, 并结合小波等直线示意图分析各时间尺度的周期变化在不同时域中的分布情况。图 8 为 4 个水电站 2000—2020 年年均气温小波变换系数等值线示意图与距平方差图, 图中实线表示小波系数实部值为正, 对应年平均气温的升高, 虚线为实部的负值, 对应着温度的降低。由图 8 可知, 溪洛渡水电站 5~7 年的短周期波动贯穿整个时间尺度, 其中心尺度为 6 年; 2008—2020 年间存在 9~11 年的振荡周期, 其中心尺度为 10 年。向家坝水电站平均气温在准 8 年下有较为明显周期变化, 不断经历冷—暖交替变化。龙开口水电站在 2002—2010 年存在 4~7 年振荡周期, 以准 5 年为中心尺度; 在 2014—2018 年存

在 7~8 年的短周期波动, 对应中心时间尺度为 8 年; 相对于周期振荡还存在更大尺度的周期为准 12 年, 在 2000—2015 年周期波动明显。观音岩水电站存在 5~8 年左右的振荡周期, 对应小波峰值为 8 年。

从图 9 分析降水量的小波变换系数等值线示意图与距平方差图可知, 溪洛渡水电站降水量存在 9~12 年和 3~4 年周期变化特征, 小波方差对应的时间尺度分别为 10, 4 年; 9~12 年时间尺度变化在 2000—2010 年振荡较为稳定, 在该时间段上大约经历了 3 次丰—枯期转变, 其中, 2003—2005 年、2010—2012 年降水量处于偏低时期; 3~4 年时间尺度变化尺度在 2014—2020 年存在较为明显的周期变化。向家坝水电站的降水量显示出 3 个不同的周期变化特征: 10~12 年、4~6 年和 2~3 年, 通过小波方差分析, 确定对应的时间尺度分别为 12, 6, 3 年; 4~6

年的周期变化在整个观测时间段内都有较好的覆盖性,可以被视为向家坝水电站在 6 年尺度下的主要周期性变化规律,大约经历了 8 次丰—枯期交替变换。龙开口与观音岩水电站均存在 2 个较为显著的周期变化特征,其都存在准 12 年周期波动,该周期的波动覆

盖整个区域的时间段,并对降水量的周期波动起到一定的控制作用;2 个水电站还存在较短周期波动,龙开口水电站存在 3~5 年的短周期波动,观音岩水电站存在 4~6 年的周期振荡且均在 2014 年后周期波动越来越显著,这与水库蓄水存在一定关联性。

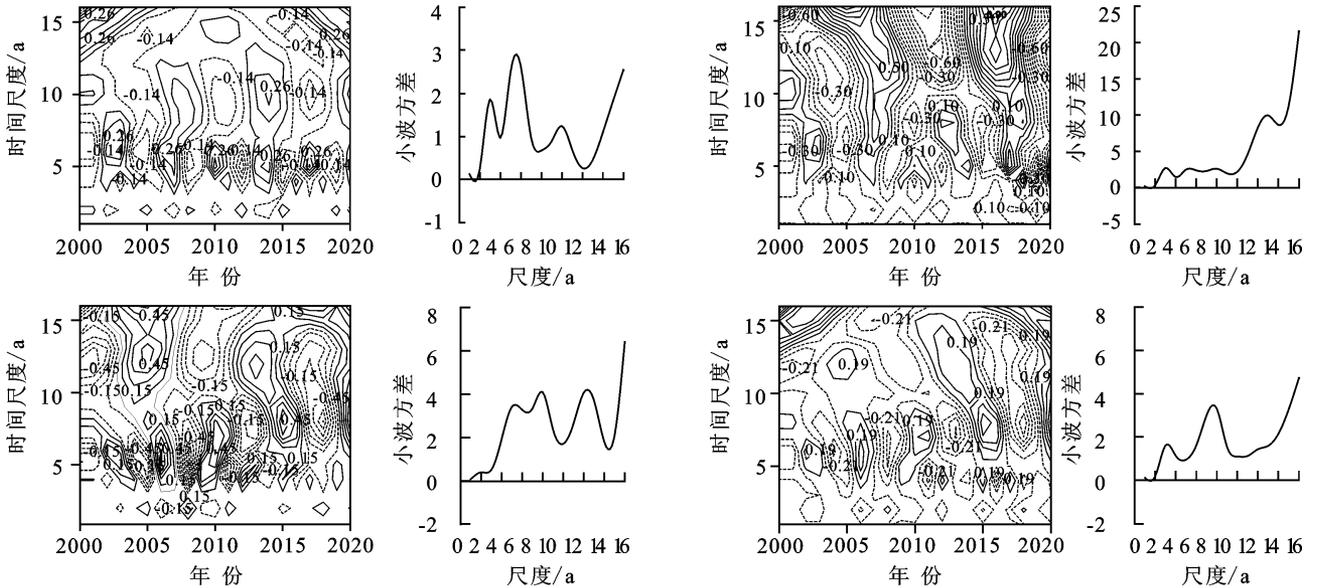


图 8 年平均气温 Morlet 小波变换系数与方差

Fig. 8 Morlet wavelet transform coefficients and variance of annual mean temperature

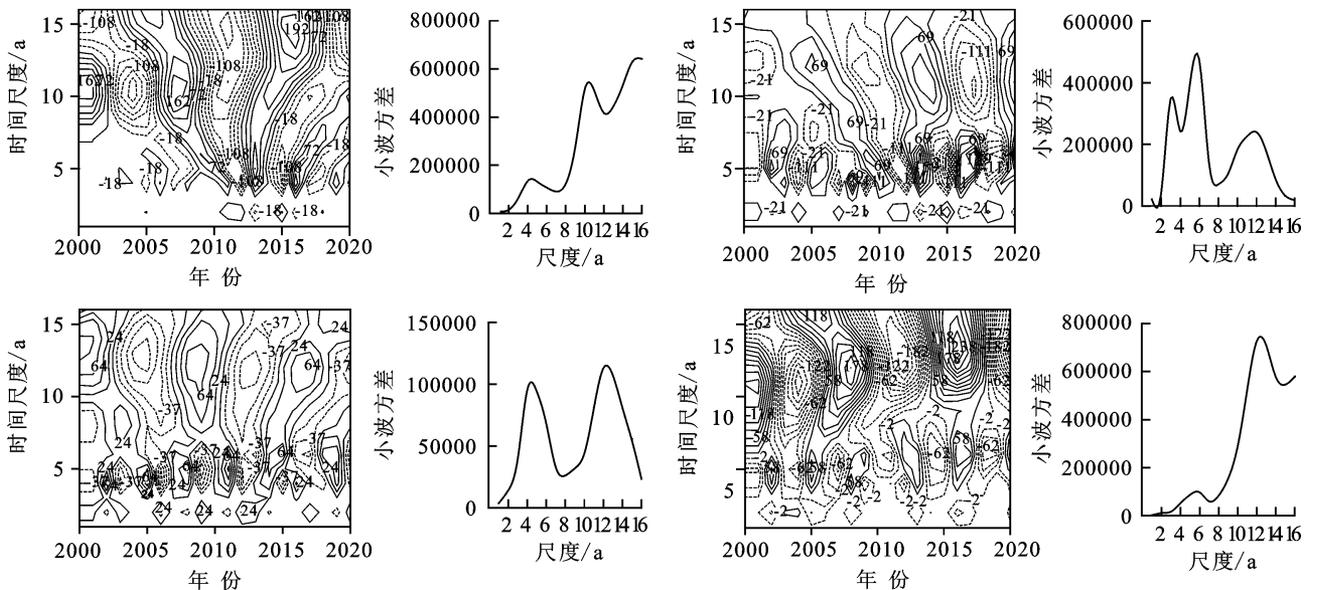


图 9 年降水量 Morlet 小波变换系数与方差

Fig. 9 Morlet wavelet transform coefficients and variance of annual precipitation

3 讨论

金沙江干热河谷水电开发是从单个电站向整个流域的连续滚动开发过渡的过程,这一开发方式改变了地区的水循环、植被、土壤状态及温室气体排放,从而对当地气候造成影响,并对整个流域产生潜在的累积效应^[17]。因此,本研究定量分析了水电开发后局地气候的变化及蓄水前后的差值,可以为干热河谷地区水电站的管理和后续建设提供一定指导意义。

根据年平均和四季平均气温数据显示,中下游河谷水电开发区域与西南地区整体气温变化一致,均呈上升趋势,但中下游地区升温幅度较小^[18]。水电开发对局地气候的影响程度在河谷不同地段上有所差异,局地气温在水电开发的不同时间节点发生突变^[19-20],中游区域的气温上升趋势相对下游更为显著,但随着时间的推移,突变时间节点后河谷高温现象逐渐缓解;下游区域在夏季对局地气温起到有效的

调节作用,这与杨大文等^[21]在藏木水库对周边区域气候影响结论一致。降水量突变时间节点主要发生在蓄水后,且蓄水后整体降水量增加,与前人^[22-23]研究结果基本一致,但中游河谷降水量增加不显著。这可能与中游河谷的空气流动和水电开发后形成的水库有关,改变地热与风模式,进而降低中游降水量。降水量在 3~4 年和 12 年出现显著的周期变化,蓄水量增加后,更多的水资源参与循环,地区的水循环系统会更加活跃^[24],有利于维持降水的周期性和稳定性。此外,气温和降水量小波长短周期相近,与吴利华等^[25]研究结论相似,在气温升高时,丰水期的降水量也增加,表明气温和降水量存在同步关系。由于中下游河谷区域气温的升高,大气中的水蒸气含量增加,有利于更多的云和水滴形成,导致局地降水量增加^[26]。

综上所述,水电站蓄水后有缓解河谷地区的持续升温 and 降水匮乏等作用,对于中游一些降水偏少的区域建议合理增建水电站,根据当地气候和地形科学规划和管理,以应对气候环境变化趋势,来维护流域生态和局地气候稳定,以实现下游地区的稳定供水、防洪控制、经济发展和生态保护等效益^[27]。由于水电开发对于局地气候的影响是长期的累积效应^[28],后续的研究将结合流量、流域和库区表面积变化等因素,对整个流域水电开发所产生的影响进行分析,了解更长时间段内局地气候的变化情况。

4 结论

(1)根据 M-K 突变检验法分析 4 个水电站年平均气温突变点、年平均降水量蓄水后的突变点可知,气温、降水与水电开发存在一定相关性。从年度变化趋势来看,下游水电站突变年后,平均气温呈下降趋势,中游水电站区域平均气温呈持续上升趋势;下游水电站区域降水在突变年后,降水量呈上升趋势,上升趋势较缓,而中游水电站区域降水量在突变年后降水量略有增加,但变化趋势不明显,整体上呈现上升趋势。

(2)按月与季来分析中下游水电站气温和降水蓄水前后的变化情况,月度和季度变化基本一致。对于不同季节中下游水电站局地气温效应,水电站蓄水后,下游水电站夏季和冬季降温效应显著,中游水电站全年都有升温作用;蓄水后,下游水电站局地最高气温有所降低,而中游水电站局地最高气温变化不明显;最低气温的变化,各水电站蓄水后局地最低气温略有抬升。对于水电站局地降水效应,在蓄水后局地降水量增加,在 4,8,9 月最为显著。

(3)根据气温、降水的周期性分析,各水电站小波周期相近,丰水期降水量和暖周期下气温具有同步性,中下游水电站局地气温振荡周期在 5~8 年最为显著;中游水电站局地降水在 12 年振荡周期显著,下游水电

站蓄水后局地降水在 3~4 年有较为稳定的周期变化。

参考文献:

- [1] 吴柏清,何政伟,闫静,等.基于遥感与 GIS 技术的水电站库区植被覆盖度动态变化分析[J].水土保持研究,2008,15(3):39-42,275.
WU B Q, HE Z W, YAN J, et al. Analysis on dynamic changes about vegetation cover in hydroelectric power station reservoir area based on RS and GIS[J].Research of Soil and Water Conservation,2008,15(3):39-42,275.
- [2] WANG W Y, LIU W, MA X J. Analysis for influence upon local climate factors of reservoir area of hydropower station after water storage[J].Applied Mechanics and Materials,2012,212/213:245-252.
- [3] 古作良,任尚万,高焰.元江流域梯级水电开发及气候变化对径流量和水生态环境的影响[J].水电能源科学,2021,39(6):20-24.
GU Z L, REN S W, GAO Y. The effects of climate change and cascade hydropower development on river runoff and water ecological environment[J].Water Resources and Power,2021,39(6):20-24.
- [4] 赵子皓,江晓东,杨沈斌.三峡蓄水对局地气候变化的影响[J].长江科学院院报,2022,39(6):40-49.
ZHAO Z H, JIANG X D, YANG S B. Impact of water storage in Three Gorges Reservoir on local climate change[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2022,39(6):40-49.
- [5] 郑祚芳,任国玉,王耀庭,等.大型人工湖气候效应观测研究:以密云水库为例[J].地理科学,2017,37(12):1933-1941.
ZHENG Z F, REN G Y, WANG Y T, et al. Observational study on climate effect of large artificial lake: taking Miyun Reservoir as an example[J].Scientia Geographica Sinica,2017,37(12):1933-1941.
- [6] TOMCZYK P, WIATKOWSKI M J. Shaping changes in the ecological status of watercourses within barrages with hydropower schemes: Literature review[J].Archives of Environmental Protection,2020,46(4):78-94.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 史雯雨,李增永,李娜,等.金沙江流域 1957—2016 年气温时空变化特征[J].水土保持研究,2019,26(1):162-167.
SHI W Y, LI Z Y, LI N, et al. Temporal and spatial characteristics of distribution of temperature in Jinsha River Basin from 1957—2016[J].Research of Soil and Water Conservation,2019,26(1):162-167.

- [10] 王圆圆,李贵才,郭徽,等.1979年—2014年三峡库区月平均气温的时空变化分析[J].遥感学报,2018,22(3):487-496.
WANG Y Y, LI G C, GUO Z, et al. Spatial-temporal analysis of monthly air temperature changes from 1979—2014 in the Three Gorges Dam region [J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(3): 487-496.
- [11] 李艳,张倩倩,陈鲜艳.大渡河流域水电开发对区域气候的可能影响[J].大气科学学报,2017,40(1):90-99.
LI Y, ZHANG Q Q, CHEN X Y. The impact of the land-use change associated with the development of a hydropower station on regional climate [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2017, 40(1): 90-99.
- [12] 孙晨,刘敏.再分析资料在三峡库区气候效应研究中的应用[J].长江流域资源与环境,2018,27(9):1998-2013.
SUN C, LIU M. Applications of reanalysis data in the study of climate effect over the Three Gorges Reservoir Area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(9): 1998-2013.
- [13] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007.
WEI F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. 2nd Ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [14] LOU S J, MO L, WANG Y Q, et al. Trend analysis of monthly and annual runoff based on a segmented M-K method in Fuhe River Basin, China [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 344(1): e012108.
- [15] AHMADI F, RADMANESH F. Trend analysis of monthly and annual mean temperature of the northern half of Iran over the last 50 years [J]. Majallah-i Āb Va Khāk, 2014, 28(4): 855-865.
- [16] 陈鲜艳,张强,叶殿秀,等.三峡库区局地气候变化[J].长江流域资源与环境,2009,18(1):47-51.
CHEN X Y, ZHANG Q, YE D X, et al. Regional climate change over Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(1): 47-51.
- [17] WINEMILLER K O, MCINTYRE P B, CASTELLO L, et al. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong [J]. Science, 2016, 351(6269): 128-129.
- [18] 刘晓琼,孙曦亮,刘彦随,等.基于REOF-EEMD的西南地区气候变化区域分异特征[J].地理研究,2020,39(5):1215-1232.
LIU X Q, SUN X L, LIU Y S, et al. Spatial division of climate change and its evolution characteristics in Southwest China based on REOF-EEMD [J]. Geographical Research, 2020, 39(5): 1215-1232.
- [19] 封瑞雪,刘军旗,姚梦辉,等.三峡水库蓄水前后重庆气候变化分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(4):994-1002.
FENG R X, LIU J Q, YAO M H, et al. Analysis of climate change in Chongqing before and after impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(4): 994-1002.
- [20] 徐火清,周佳,孙然好,等.金沙江下游梯级水电站对区域气候的影响分析[J].人民长江,2023,54(2):132-140.
XU H Q, ZHOU J, SUN R H, et al. Analysis on impacts of cascade hydropower stations on regional climate in lower reaches of Jinsha River [J]. Yangtze River, 2023, 54(2): 132-140.
- [21] 杨大文,唐莉华,严冬,等.基于WRF模型的藏木水库局地气候影响分析[J].水力发电学报,2022,41(6):43-52.
YANG D W, TANG L H, YAN D, et al. Investigating impact of Zangmu Reservoir on local climate based on WRF model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(6): 43-52.
- [22] 李博,唐世浩.基于TRMM卫星资料分析三峡蓄水前后的局地降水变化[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):617-625.
LI B, TANG S H. Local precipitation changes induced by the Three Gorges Reservoir based on TRMM observations [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(5): 617-625.
- [23] 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.
- [24] BARNETT T P, PIERCE D W, HIDALGO H G, et al. Human-induced changes in the hydrology of the western United States [J]. Science, 2008, 319(5866): 1080-1083.
- [25] 吴利华,成鹏,董李勤,等.1951—2017年丽江极端气温和降水事件的变化特征[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2022,14(3):253-266.
WU L H, CHENG P, DONG L Q, et al. Variation characteristics of extreme temperature and precipitation events of Lijiang from 1951 to 2017 [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 14(3): 253-266.
- [26] SHERWOOD S, FU Q. Climate change. A drier future [J]. Science, 2014, 343(6172): 737-739.
- [27] Buma N, Nakaya T, Namihira A, et al. Operation of regulating reservoirs in irrigation canal systems to improve upstream water delivery flexibility [J]. Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering, 2022, 90(1): e2.
- [28] 李明.梯级水电开发对岷江上游径流特征的累积影响[D].成都:成都理工大学,2014.
LI M. Cumulative influence of cascade hydropower development on runoff in upper reaches of Minjiang River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.