

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.02.034 CSTR:32310.14.stbxb.2026.02.034

杨玉华,贺中华,谭红梅,等.河流筑坝对南盘江流域局地旱涝特征变化的驱动[J].水土保持学报,2026,40(2):329-338.

YANG Yuhua, HE Zhonghua, TAN Hongmei, et al. Driving mechanisms of river damming on changes in local drought and flood characteristics in Nanpan River basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2):329-338.

河流筑坝对南盘江流域局地旱涝特征变化的驱动

杨玉华¹, 贺中华^{1,2,3}, 谭红梅¹, 郭站群¹, 余欢¹, 杨秋云¹

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵阳 550001)

摘要: [目的] 为了探究筑坝对流域长时段旱涝变化特征的影响。[方法] 利用1980—2023年25个站点的逐月降水数据, 基于降雨Z指数表征南盘江流域旱涝, 通过一元线性回归分析、通径分析、小波分析与地理探测器等方法, 探究筑坝前后南盘江流域旱涝的时空变化特征及大气环流对其的影响情况, 剖析下垫面因子、气候因子等区域环境因子对旱涝的影响。[结果] 1) 时间上筑坝前后降雨Z指数呈不明显下降趋势, 波动趋于平稳, 空间上呈“西旱东涝”的格局分布。2) 筑坝改变流域旱涝主导大气环流因子, 从筑坝前DMI变为NAO, 皆为正相关, 但系数有所减小。3) 筑坝前后降水、气温等气候因子对局地旱涝的影响较大, 但筑坝后影响程度更大, 下垫面因子的影响力也随着筑坝有所增加, 且各因子的交互作用大于单因子。[结论] 研究结果可为提升流域旱涝灾害应对能力提供一定科学依据。

关键词: 旱涝; 筑坝; 特征变化; 地理探测器; 南盘江流域

中图分类号: P461

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0329-10

Driving Mechanisms of River Damming on Changes in Local Drought and Flood Characteristics in Nanpan River Basin

YANG Yuhua¹, HE Zhonghua^{1,2,3}, TAN Hongmei¹, GUO Zhanqun¹, YU Huan¹, YANG Qiuyun¹

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3. Guizhou Provincial Key Laboratory of Remote Sensing Application of Mountain Resources and Environment, Guiyang 550001, China)

Abstract: [Objective] To investigate the impact of dam construction on long-term drought and flood dynamics in the Nanpan River Basin. [Methods] Monthly precipitation data from 25 stations during 1980—2023 were utilized to characterize drought and flood conditions in the Nanpan River Basin based on the rainfall Z index. Simple linear regression analysis, path analysis, wavelet analysis, and geographical detector method were employed to investigate the spatiotemporal characteristics of droughts and floods before and after dam construction, as well as the influence of atmospheric circulation. The impact of regional environmental factors, including underlying surface and climatic factors, on drought and flood were analyzed. [Results] 1) Temporally, the rainfall Z index showed a non-significant decreasing trend before and after dam construction, with fluctuations tending to stabilize. Spatially, it exhibited a pattern of drought in the west and flood in the east. 2) Dam construction altered the dominant atmospheric circulation factor influencing basin drought and flood, changing from DMI before construction to NAO after construction. Both indices were positively correlated, although the correlation coefficient decreased. 3) Climatic factors, such as precipitation and temperature, had considerable impacts on local droughts and floods before and after dam construction, but their influence was greater after construction. The influence of underlying surface also increased following dam construction, and the interaction effects among factors were greater than

收稿日期: 2025-09-24

修回日期: 2025-11-06

录用日期: 2025-11-14

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-01-04

资助项目: 国家自然科学基金项目 (u1612441, 41471032); 贵州省自然科学基金项目 (黔科合基础-ZK[2023]重点028); 贵州省水利厅自然科学基金项目 (KT202517, KT202237)

第一作者: 杨玉华 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail: 1474427703@qq.com

通信作者: 贺中华 (1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail: hezhonghua7621@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

individual effects. [Conclusion] The findings provide a scientific basis for enhancing the basin's capacity to respond to drought and flood disasters.

Keywords: drought and flood; dam construction; characteristic changes; geographical detector; Nanpan River basin

Received: 2025-09-24

Revised: 2025-11-06

Accepted: 2025-11-14

Online(www.cnki.net): 2026-01-04

河流筑坝作为人类改造自然、利用水资源的重要举措,在全球范围内广泛实施。大坝与水库系统在防洪、发电、灌溉、供水等方面发挥巨大效益,然而,大型水库在带来巨大社会效益的同时,还影响着水库区域气候、环境、生态方面的变化^[1]。尤其是在局地气候及早涝变化方面,旱涝灾害作为影响最广泛的自然灾害类型,其发生频率与强度直接关系到流域粮食安全、生态稳定和社会经济可持续发展。所以深入剖析筑坝对流域旱涝的影响以及探究流域旱涝的真正驱动因子,对于科学评估大坝工程的综合效应、合理的水资源管理策略具有重要意义。

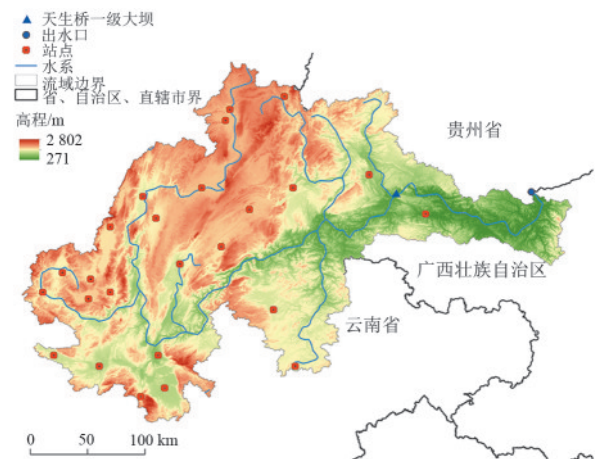
河流筑坝通过改变区域水文循环、能量平衡等过程,对流域的旱涝程度以及成因产生复杂且深远的影响。降雨Z指数作为常见的表征旱涝的指数,不少学者^[2-6]广泛运用于国内外,具有很强的适用性,如费龙等^[7]利用降雨Z指数研究朝鲜旱涝时空特征,宾振等^[8]运用降雨Z指数研究江西省旱涝指标分布特征。探究旱涝的影响方面,不少学者^[9-11]通过各种方法从长时间尺度来研究旱涝变化特征与驱动机制,而只有少部分人探究在筑坝、水库等的影响下流域旱涝的变化特征以及成因分析,如郭海峰等^[12]研究发现,水库流域的区域年均降水随时间变化呈上升趋势,旱涝成因与地区气流有关;黄亚^[13]基于RegCM4分析三峡水库流域的气候变化效应及未来趋势;徐元顺^[14]根据水库流量划分旱涝年,研究多年水库流域的旱涝特征变化;吴杰峰^[15]采用SSI和SPI指数,探究水库对区域水文干旱和气象干旱的影响;XING等^[16]研究发现,大型水库延长水库流域干旱的持续时间,对干旱的传播具有较强的加剧作用。这些学者仅研究非喀斯特水库大坝地区,而童锦施将研究区聚焦于喀斯特地区,研究发现大型水库建立对区域降水年与夏秋季呈下降趋势,秋冬季呈增加趋势,洪旱风险有所增加^[17],表明水库大坝对区域旱涝具有一定的影响,而熟悉此类影响可以一定程度上预测未来旱涝情况,为治理或预防地区旱涝灾害提供一定的帮助。

南盘江流域大部分位于喀斯特地区,具有独特的下垫面结构^[18],其旱涝的驱动因素也有区别于其他非喀斯特地区^[19],其他研究往往只聚焦于非喀斯特流域或喀斯特小型水库区域,对于喀斯特地区大

流域缺乏研究。本研究以南盘江筑坝建成时间为节点,以降雨Z指数表征旱涝,探究河流筑坝对局地旱涝的特征变化驱动,了解筑坝前后南盘江流域旱涝的时空变化特征及大气环流对筑坝前后局地旱涝的影响,用地理探测器探寻气候因子、下垫面因子和人类活动对其的影响程度,为提升流域旱涝灾害应对能力提供科学依据。

1 研究区概况

南盘江流域跨及贵州、云南和广西三省(23°04'~26°00'N, 102°10'~106°10'E),整个流域面积达55 989 km²,发源于中国云南省曲靖市乌蒙山余脉马雄山麓,出水口位于北盘江与红水河汇集的三江口;地势西北高东南低,海拔271~2 802 m;属亚热带季风气候,夏季炎热多雨,冬季温和少雨,干湿季节变化明显,常年发生季节性干旱;流域大部分地区位于喀斯特地貌区域,拥有独特的下垫面结构(图1)。



注:该图基于国家测绘地理信息标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作,底图无修改。

图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

南盘江流域水系分布广阔,河流众多,主要河流有曲江、泸江、黄泥河、马别河等。南盘江上下游落差大,存在许多防洪工程与水电开发设施,直至2023年共计分布3个水电站、3个港口和7个码头,其中最典型的为2000年竣工的天生桥水电站等。天生桥水电站作为南盘江流域发电第一大站,被称为“亚洲第一坝”,形成的水库流域面积达50 139 km²,深度可达170 m,多年平均流量612 m³/s,年径流量193亿 m³。年平均输沙量1 574万 t,平均含沙量0.81 kg/m³,水

库总库容 102.60 亿 m³, 调节库容 57.96 亿 m³, 为不完全多年调节水库, 对整个南盘江流域的气候有着显著的调节作用。

2 材料与方法

2.1 研究数据

本研究的降雨、气温、蒸散发、气压、蒸腾数据来源于全球陆面数据同化系统(<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets>), 选取 GLDAS, 分辨率为 0.25° × 0.25°, 时段为 1980—2023 年逐月数据; 全球大气环流数据: 大西洋经向模(DMI)、多元 ENSO 指数(MEI)、北大西洋涛动(NAO)、太平洋十年涛动(PDO)、太平洋-北美遥相关型(PNA)主要来源于美国国家海洋和大气管理局, 时段为 1980—2023 年逐月; 土地利用数据主要来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>), 分辨率为 1km; DEM 来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>); 坡度(SLOPE)数据是基于 DEM 数据运用 ArcGIS 计算而得。

2.2 研究方法

2.2.1 降雨 Z 指数 降雨 Z 指数能明显表征一个地区的旱涝程度, 常用于众多领域。其涉及的公式主要为^[20]:

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s}{2} \varphi_i + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{1}{n\sigma^3} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^3 \quad (2)$$

$$\varphi_i = \frac{x_i - x}{\sigma} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \quad (4)$$

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

式中: Z_i 为旱涝指数; C_s 为偏态系数; φ_i 为标准变量; x_i 为某一时段降雨量, mm; n 为样本数; x 为 n 年内某一时间尺度的平均降雨量, mm; σ 为标准差。

根据降雨 Z 指数的正态分布曲线, 将旱涝强度划分为 7 个不同的等级并确定相应的 Z 指数界限值^[20]。Z 值旱涝等级划分见表 1。

2.2.2 小波分析 采用交叉小波与小波相干分析主导大气环流因子与南盘江流域旱涝的周期关系。交叉小波变换(XWT)是将小波变换与交叉谱分析相结合, 从多时间尺度来研究 2 个时序在时频域中的相关性。该技术主要用于分析 2 个信号之间的相关性, 并反映序列间“共有周期”的强度^[21]。2 个时间序列 $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间的交叉小波变换被定义为 $x(t)$ 小波变换与 $y(t)$ 小波变换之复共轭的乘积, 公式为^[21]:

$$W_n^{xy} = W_n^x \times W_n^{y*} \quad (6)$$

式中: W_n^x 和 W_n^y 分别为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的连续小波变换; W_n^{y*} 为 W_n^y 的复共轭; W_n^{xy} 为交叉小波谱, 其模值 $|W_n^{xy}|$ 表示 2 个序列的协同能量强度。

表 1 旱涝等级划分

Table 1 Drought and flood level classification

等级	Z 指数	旱涝等级
1	$Z > 1.645$	重涝
2	$1.037 < Z \leq 1.645$	大涝
3	$0.524 < Z \leq 1.037$	偏涝
4	$-0.524 \leq Z \leq 0.524$	正常
5	$-1.037 \leq Z < -0.524$	偏旱
6	$-1.645 \leq Z < -1.037$	大旱
7	$Z < -1.645$	重旱

小波相干谱分析(WTC)可以反映时频空间中两时间序列的协方差强度, 涵盖其低能量区的相关性^[21]。小波相干计算公式为^[21]:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{xy}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^x(s)|^2)S(s^{-1}|W_n^y(s)|^2)} \quad (7)$$

式中: S 为平滑子, 小波相干值 R^2 为 0~1, 与 Pearson 相关系数相似, 可看作是在时频空间下的局部相关系数, 其值越大, 说明相关性越强。

2.2.3 地理探测器 地理探测器(GD)是广泛应用于各个领域探测地理要素空间分异性及揭示其背后驱动力的一种空间分析模型。其数学原理基于空间分层异质性, 通过方差分析和信息熵构建统计量, 本研究主要运用因子探测器和交互探测器 2 个模板, 探究人类活动在不同时间段上对区域气候的影响, 进一步探讨区域气候的驱动机制。Q 值的计算公式为^[22]:

$$Q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (8)$$

式中: L 为驱动因子 X 的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值的方差。Q 值为 0~1, 值越大表明该驱动因子对径流的解释力越强。交互探测器能够计算 2 个因子叠加后的 Q 值, 通过与单因子的 Q 值相比, 可以判断 2 个因子是否具有交互作用和作用的强弱等。

3 结果与分析

3.1 南盘江流域旱涝时空变化特征

3.1.1 旱涝时间演化特征 本研究将 1980—2023 年南盘江流域年平均降雨量进行 MK 突变点检验发现, 多年来南盘江流域降雨呈波动缓慢下降的趋势, 波动幅度大, 导致存在多个突变点, 但其中 1980—1989 年多个突变点间隔较近, 并非单一事件的冲击, 可能由

于大环流气候连续变化的原因,而2000年突变点独立与其他连续突变点,与其他突变点间隔较大。根据1980—2023年平均降雨量趋势可知,2000年前后几年的降雨量差异并不大,总体呈缓慢下降趋势,按理论与实际情况结合来看,可能与南盘江流域2000年大坝建成有一定的关系,且并不存在滞后效应,故本研究以2000年为节点,探讨南盘江流域筑坝前后旱涝特征变化的差异。

以南盘江流域大坝建成时间2000年为节点,基于降雨Z指数表征南盘江流域1980—2023年的旱涝情况,运用R语言对降雨Z指数进行一元线性趋势分析和方差分析,探究其时间变化特征。整体来看,1980—2023年降雨Z指数(旱涝程度)呈不明显下降趋势并趋于平稳,筑坝前降雨Z指数斜率为0.052 1,呈上升趋势,筑坝后斜率降低为0.004 1,更加接近于0,近似直线,趋于平稳(图2)。

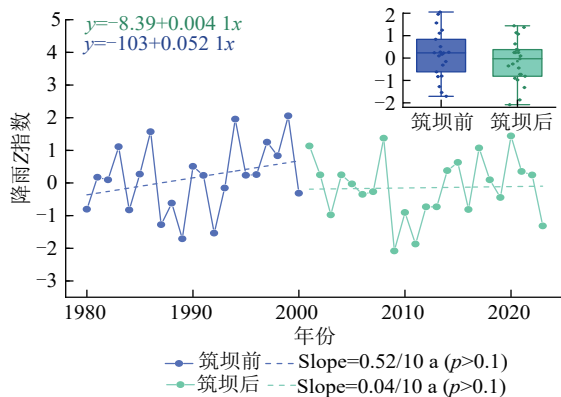


图2 南盘江流域筑坝前后旱涝时间变化特征

Fig.2 Characteristics of drought and flood time variation before and after dam construction in Nanpan River basin

筑坝前Z指数的平均值为0.157,筑坝后的平均值为-0.144,其筑坝前的年平均降雨量从1 141.51 mm到1 095.26 mm,整体呈缓慢下降趋势,意味着随着天生桥大坝的建立南盘江流域的偏旱态势趋于明显;其中筑坝前最高值为1999年的2.058,最小值为1989年的-1.709,筑坝后最小值为2009年的-2.083,最大值为2020年的1.440,筑坝前的1989年和1999年分别为这时段最早年和最涝年,年平均降雨量分别为853.03、1 432.05 mm,筑坝后的最早年和最涝年分别为2009年和2020年,年平均降雨量分别达794.53、1 338.49 mm,与现实情况中南盘江流域旱涝年情况大致符合,故将这4 a作为典型旱涝年;筑坝前后降雨Z指数方差分别为1.14、0.92,筑坝前比筑坝后方差值更大,意味着筑坝前降雨离散程度更高,波动性更强,筑坝后波动趋于平稳,与图2中右上角的箱线图相呼应,进一步验证筑坝后南盘江流域旱涝波动小。

3.1.2 旱涝空间分布特征 为探究南盘江流域筑坝前后的空间分布特征和趋势特征,根据南盘江流域25个站点1980—2023年的空间Z指数数据,利用ArcGIS采用反距离权重法对南盘江流域降雨Z指数进行插值分析,并分类成重旱、大旱、偏旱、正常、偏涝、大涝、重涝7类,从而得到南盘江流域1980—2000年和2001—2013年的旱涝空间分布图。由此分析南盘江流域筑坝前后的旱涝空间分布、趋势变化特征。

由图3可以看出,南盘江流域西部降水偏少,属于偏旱大旱地区,南部东部地区降雨偏多,属于偏涝正常区域,降水量从西到东,从南到北呈现逐渐增加的分布特征,呈“西旱东涝”的分布特征。由图3可以看出,西部偏旱、大旱地区范围有所减少,一部分地区从偏旱转为正常,说明该地区随着大坝的建立降水量增加。南盘江流域东部靠近出水口与大坝区域,降雨明显增加,呈现正常偏涝到大涝的现象,出现洪涝区域明显扩散。不同的是,南部个旧、蒙自站点区域降水相对减少,该区域从原来的偏涝转为正常。

3.2 大气环流对南盘江流域旱涝的影响

3.2.1 大气环流对旱涝的影响 将大气环流因子与南盘江流域筑坝前后旱涝做通径分析,得到各大气环流因子与南盘江流域旱涝、各大气环流因子间的相关关系,在此基础上寻找出与南盘江流域旱涝相关性最强的因子。判断DMI、MEI、NAO、PDO、PNA与降雨Z指数之间的系数大小。

通径分析既可得到各个因子与南盘江旱涝的直接关系与间接关系,也可得到各个大气环流之间的相互影响系数。对比图4筑坝前后的通径分析路径图,筑坝前大气环流主导因子从DMI(0.470)换成NAO(0.210),且影响系数有所降低;筑坝前后对各个大气环流因子都有很大影响,MEI因子从原来的正相关,系数为0.010转到负相关(-0.060),PDO从筑坝前的-0.064变化到0.140,相关系数的正负相关都发生明显变化;相较于其他因子来说,PNA变化相对较小,从筑坝前的0.020增加到0.110。筑坝前后主导因子之间的间接关系也随着大坝建成有所改变,筑坝前DMI因子通过MEI因子间接作用于降雨Z指数,DMI先直接影响MEI(系数为0.064),再通过MEI直接作用(0.179)最后间接影响降雨Z指数,形成较强的间接传导;筑坝后NAO通过PDO因子间接作用于降雨Z指数,NAO对PDO的间接影响系数增加到0.038,方向不变,强度有所增强,NAO对PDO的直接影响从0.018升至0.118,PDO对降雨Z指数的直接影响从0.064升至0.473,间接传导的正向促进作用显著增强。

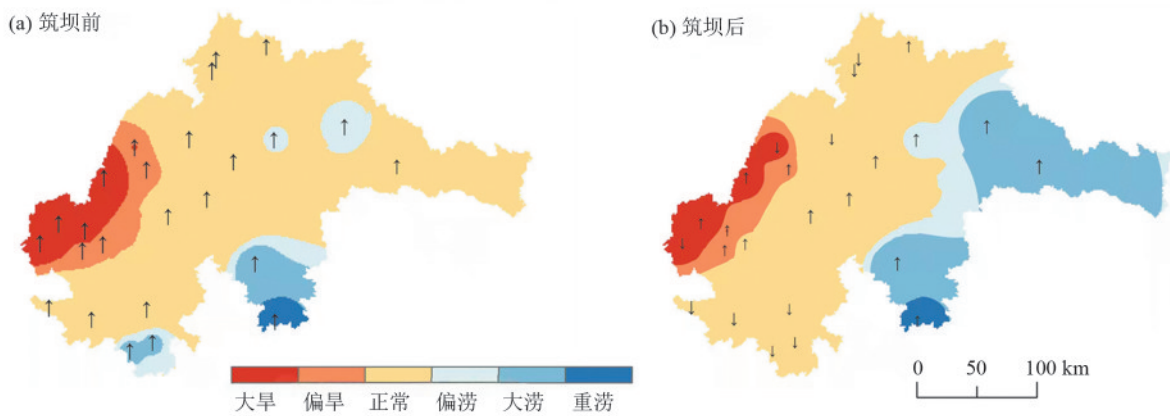


图 3 南盘江流域筑坝前后空间分布

Fig.3 Spatial distribution before and after dam construction in Nanpan River basin

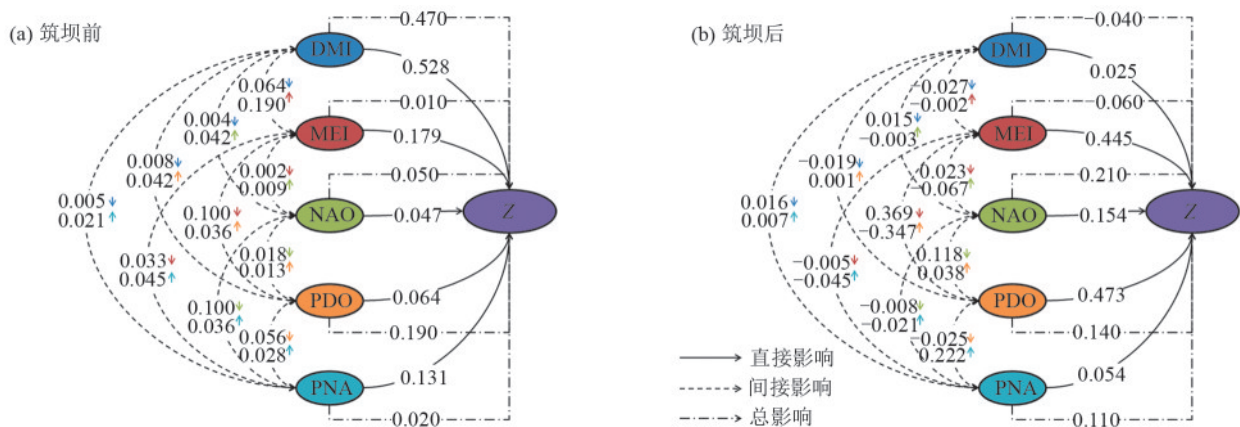


图 4 筑坝前后大气环流对旱涝的影响路径

Fig.4 Impact pathways of atmospheric circulation on droughts and floods before and after dam construction

3.2.2 主导大气环流因子对旱涝的影响 在通径分析主导因子的基础上,借助交叉小波与小波相干,分析南盘江流域筑坝前后旱涝与主要大气环流因子间

的响应关系。由通径结果可知,对南盘江流域旱涝影响最大的因子为 DMI,筑坝前后 DMI 与南盘江流域旱涝的响应关系见图 5。

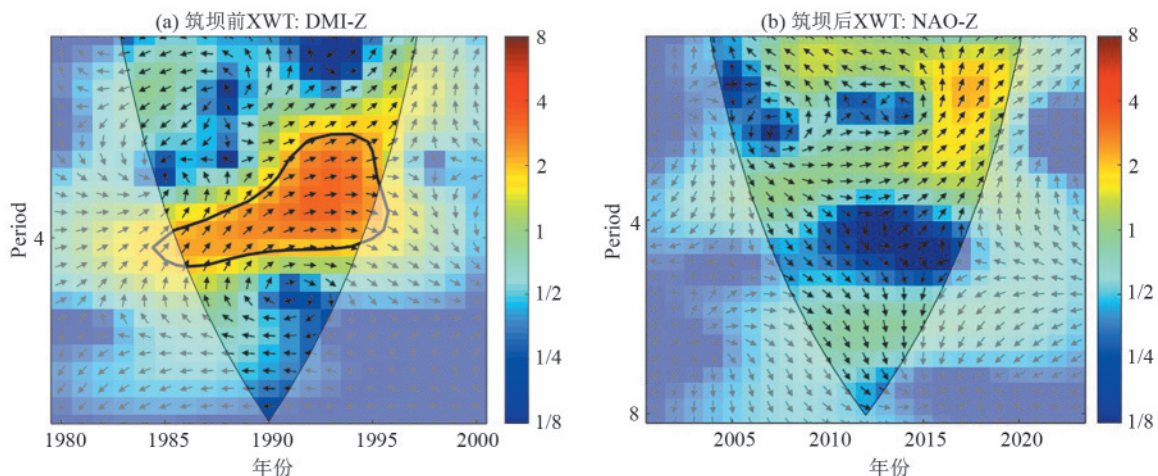


图 5 筑坝前后主导大气因子与旱涝的 XWT

Fig.5 XWT of dominant atmospheric factors and droughts and floods before and after dam construction

由图 5 可知,筑坝前 DMI 与降雨 Z 指数在 1985—1995 年存在高频区,具有显著中长周期强震荡、周期相对稳定;该区域箭头向右,说明 DMI 与 Z 呈显著正相关,同向位强关联,与通径分析筑坝前 DMI 的相关系数为 0.470 相呼应,证明筑坝前 DMI 与南

盘江流域旱涝具有正影响;筑坝后 NAO 与降雨 Z 无明显高能量区,且震荡能量显著减弱,共振周期不显著;箭头杂乱,大部分颜色较蓝,说明整体相干性较弱,仅局部可能存在弱的相干关系,但无持续、稳定的强相干区。

对比图 6,根据图右侧小波相干值,颜色越红,代表相关性越强。由图 6 可知,筑坝前主导大气因子与旱涝的相关性大于筑坝后,筑坝前 DMI 与降雨 Z 指数存在 2 个高频区,分别在 1991—1993 年和 1996—2000 年,且在 1996—2000 年相关性达到最大,说明筑坝前 DMI-Z 相关序列间在多个时间-周期尺度上具有强相干性,强相干区域内箭头方向较为一致,同为

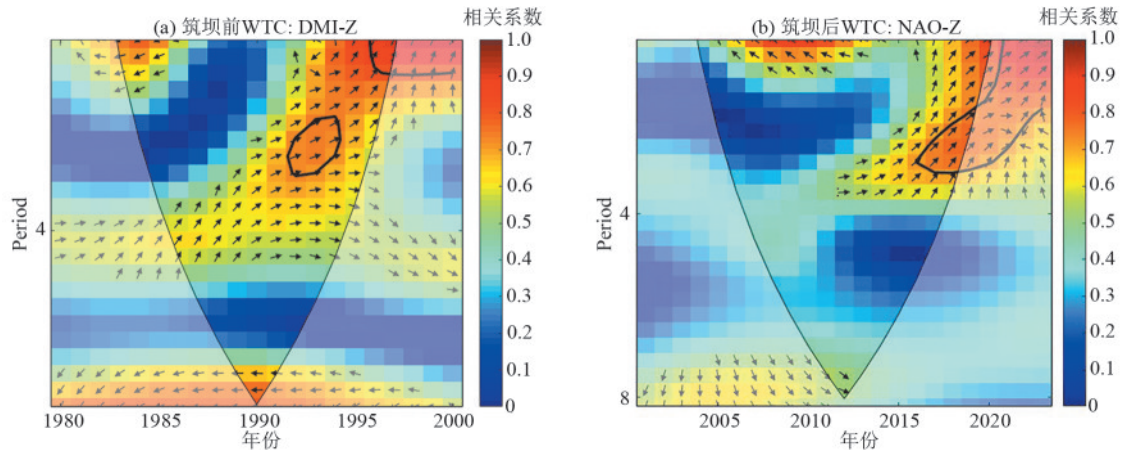


图 6 筑坝前后主导大气因子与旱涝的 WTC

Fig.6 WTC of dominant atmospheric factors and droughts and floods before and after dam construction

3.3 局地环境因子对南盘江流域旱涝的影响

3.3.1 单一局地环境因子对旱涝的影响 利用地理探测器求出各环境因子与筑坝前后旱涝的回归系数,分析区域环境因子对筑坝前后旱涝的影响。根据旱涝时间特征分析的结果,选取筑坝前后典型的旱涝年份 1989 年和 2009 年为旱年,1999 年和 2020 年为涝年。本研究选取下垫面因子(T)、气候因子(C)、人类活动因子(H),3 类 8 个区域因子与降雨 Z 指数(Y)进行分析各环境因子在不同区域对旱涝的影响。各因子分别为坡度(X1)、高程(X2)、降雨量(X3)、气温(X4)、气压(X5)、蒸散(X6)、蒸腾(X7)和土地利用(X8)。通过地理探测器得到各单因子与旱涝的关系,由图 7 可知,颜色越深其对南盘江流域旱涝的影响越大,T、C、H 分别代表不同类型因子,整体来看,气候因子对旱涝影响最大,其中 2009 年气压因子的相关性系数高达 0.860,仅次于降雨因为子,其次是下垫面类因子,相关性最大因子高程,其相关系数可达 0.280,最小的为人类活动,旱涝年相关系数均 < 0.100;对比筑坝前(1989 年和 1999 年)和筑坝后(2009 年和 2020 年)的 2 组图可知,筑坝前随着时间变化,多个单一区域因子对南盘江旱涝的影响逐渐增加,如气温因子的相关性系数从 1989 年的 0.290 增加到 1999 年的 0.520,蒸散、蒸腾因子的相关系数也从 1989 年少于 0.100 分别增加到 0.390、0.370;筑坝后气候因子中的气温与气压对旱涝的影响有一定程度的减小,相关系数气温因子从 2009 年的 0.470 减少到 0.130,气压因子从 0.730 减少

向右,说明 2 个序列的相位关系稳定,反映 DMI 和南盘江旱涝的变化具有同步性;筑坝后 NAO 与降雨 Z 指数只存在 1 个高频区(2015—2023 年),2015—2023 年的相关性大于 2015—2010 年,颜色以蓝-绿色为主,说明筑坝后 NAO-Z 相关序列间的相干性显著减弱,整体协同变化的程度远低于筑坝前,说明该时段可能存在其他影响大气的因子。

到 0.340,其他下垫面因子与土地利用的影响变化程度不大,除 2009 年高程因子相关系数从 0.290 减少到 2020 年的 0.270,其他因子均 < 0.100;对比筑坝前后旱年与涝年的因子图可知,旱涝年筑坝后气候因子与下垫面因子的影响力均有所增加,旱年气压、蒸散、蒸腾和高程因子影响力增长明显,涝年增长效果不如旱年,如气压因子相关系数从 1989 年的 0.150 增加到 2009 年的 0.850,而涝年相关系数仅从 1999 年的 0.060 增加到 2020 年的 0.340。

3.3.2 交互局地环境因子对旱涝的影响 单个环境因子对旱涝有一定影响,但因子与因子之间同样存在一定关系,运用交互探测可得到双因子交互对旱涝的影响回归系数,系数越大,影响力越大。

通过对旱涝与局地环境因子进行交互探测,可得 8 个因子之间的交互均存在显著差异(图 8)。由图 8 可知,筑坝后对区域旱涝影响最大的为降雨与其他因子的交互,一个地区降雨量的多少直接影响该地的旱涝情况,而 1999 年是气温与蒸散的交互影响。1989 年交互因子除降雨因子外,影响最大的为 X5 和 X6,即气压与蒸散的交互影响,高达 0.913,其次为气压与蒸腾的交互影响(0.792),气压越小,大气密度越小,水汽扩散强,蒸散速率高,从而进一步影响降雨的多少,最终影响该区域旱涝情况;影响最小的是坡度与土地利用的交互(0.104)。1999 年交互因子影响最大的分别为气温与气压、蒸散、蒸腾的交互作用,均 > 0.900,其中最高的还有降雨与气温的交互作用,

高达 0.966,随着近年来气温的增加,降雨也呈现不同的变化,即气温增加,水面蒸发、路面蒸腾的水汽越多,导致云量增加,流域降雨量增加,从而交互作用于旱涝特征的变化,影响最小的为土地利用与蒸腾

的交互。2009年与2020年由于大坝的建成,各区域环境因子对旱涝的影响逐渐增大,影响系数 >0.700 的交互因子比筑坝前多,影响最小的均为坡度与土地利用的交互作用。

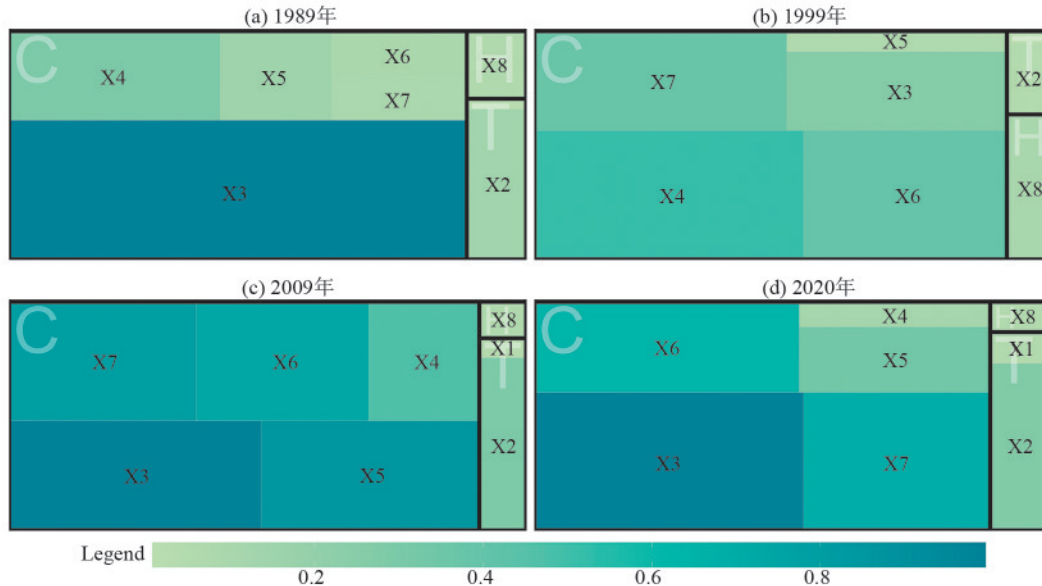


图 7 典型年各因子与旱涝单因子

Fig.7 Typical year factors and drought-flood single factor

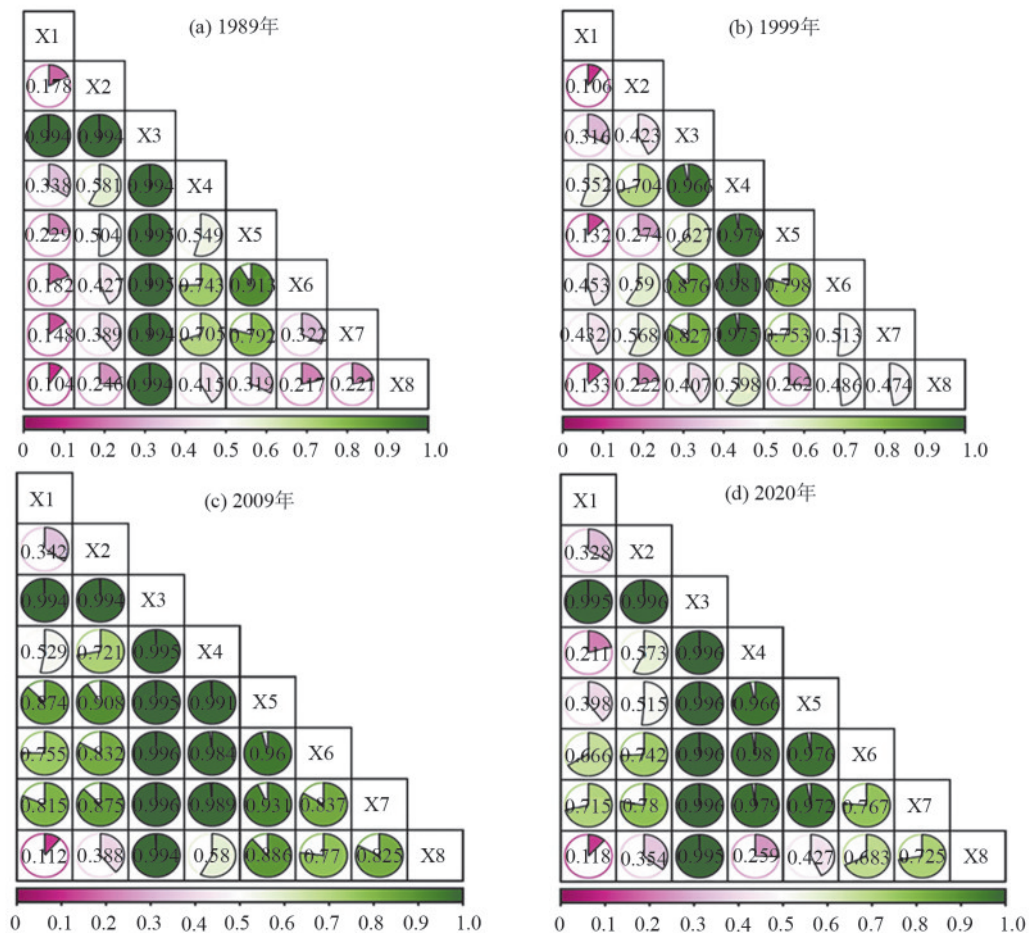


图 8 典型年各因子与旱涝双因子图

Fig.8 Typical year factors and drought-flood dual factor

4 讨论

本研究基于1980—2023年的降雨数据计算降雨Z指数,以表征流域旱涝情况。同时,以流域内典型大坝建立为时间节点,将研究时间划分为筑坝前和筑坝后,探究筑坝前后流域旱涝的时空变化特征。本研究发现,筑坝后南盘江流域降雨呈现不明显下降趋势,筑坝前降雨随着时间变化呈上升趋势,且比筑坝后更显著。筑坝扩大流域面积,增加流域水面蒸散发量,南盘江流域降水量本应增加,但研究发现与该理论相反,与相关研究^[23]结果相符。不管是非喀斯特地区水库流域,还是喀斯特地区小型水库流域的旱涝研究得出的结论均与本文相符,水库流域随着筑坝的建成,区域降雨量均有所减少,可能由于一个区域的降水量受多方面的影响,如大气环流、其他气候因素及其他人类活动等,最终综合影响使得南盘江流域筑坝后降水量出现下降趋势。空间上,筑坝后靠近筑坝口及南盘江下游区域洪涝程度加重,旱涝情况呈现从西到东越来越涝。

全球气候变化背景下,降水模式发生改变,极端降水事件增多,与河流筑坝的影响相互交织,使得旱涝演变更为复杂。有研究^[24-30]表明,气候变化对流域旱涝灾害有显著影响,在气候变化与筑坝的双重影响下,可能导致旱涝灾害的频率和强度发生显著变化。本研究发现,筑坝前后大气环流影响因子也有所改变,从筑坝前主导因子DMI变成NAO,各个气候因子的影响系数也呈下降趋势,说明在筑坝和气候变化的条件下,具有其他因子驱动旱涝情况变化,如下垫面因子及其他人类活动等。

由于南盘江流域大部分位于喀斯特地区,具有独特的下垫面结构,区域因子对旱涝的影响也与其他地区有所不同,且对比其他喀斯特水库流域降雨特征变化的驱动机制研究,本研究不仅增加区别非喀斯特地区的下垫面因子,还增加人类活动因子,小型水库流域由于其流域面积较小,人类活动范围小,其影响权重占比小于大环流水汽活动而被忽略。本文讨论人类活动因子后发现,筑坝后气象因子和下垫面因子对南盘江流域旱涝的影响都有所加大,特别是下垫面因子,且双因子交互效果比单一因子影响效果好,而人类活动影响最小。南盘江流域西高东低,旱涝情况也呈现从西到东越来越涝。筑坝后,气象因子对旱涝的调节可由大坝调控,下垫面因子的影响有所提高。研究^[31-33]表明,人类活动对筑坝前后旱涝的影响力较小,可能是由于运用土地利用表征人类活动,对于南盘江流域的旱涝影响,较显著的人类因素为自然林与人工林的转变,土地利用将二

者划分为一种类型,无法区分该特征变化,使人类活动与南盘江流域旱涝的相关性较低。一个地区旱涝的演变是由多个因素造成的,不能简单归因于某个单因素^[34-35],因此后续研究可进一步耦合多个影响因素,将人类活动中自然林与人工林的转变更加细致化划分,更加全面、深入地探讨旱涝演变的驱动力分析,为流域水资源管理和生态保护提供更具有针对性和科学性的决策依据。

5 结论

1)1980—2023年,时间上随着大坝的建成,南盘江流域降水整体呈下降趋势,变化程度趋于平稳,降雨波动小,朝着平稳减少的趋势发展;空间上,整体筑坝前后的旱涝情况呈“西旱东涝”的格局分布,筑坝后流域下游靠近出水口的区域涝的程度有所增加。

2)由于2000年大坝的建立,筑坝前主导大气环流为DMI,筑坝后变为NAO,各个环流因子系数随着大坝的建立逐渐减小,其中PDO和MEI筑坝前后对旱涝的影响性发生显著改变,性质相反。

3)区域环境因子中气候因子比下垫面因子对旱涝的影响更大,尤其是降雨与气温,土地利用影响最小;筑坝后气候因子与下垫面因子的影响力有所增加;各因子交互作用影响力比单一的区域环境因子大。

综上所述,为保证流域旱涝正常和用水可持续性,水库调控应分区管理,根据降水趋势提前判断未来趋势,合理调控;流域旱涝风险评估不仅仅聚焦于降雨等气候因子,还应考虑人类活动,如人工林的种植等。

参考文献:

- [1] 刘晓冉,程炳岩,李国平.三峡库区夏季旱涝变化特征及成因[J].应用气象学报,2010,21(5):590-597.
LIU X R, CHENG B Y, LI G P. Variation characteristics and causes of the flood and drought in the Three Gorges area in summer[J].Journal of Applied Meteorological Science,2010,21(5):590-597.
- [2] TAO J, QIAO W Z, LI H, et al. Spatial and temporal evolution characteristics and causes of drought and flood in the Henan section of the Yellow River[J].Natural Hazards,2022,113(2):997-1016.
- [3] 张美娜,王发信,吕海深,等.标准化降水指数(SPI)和Z指数在淮北平原适用性研究[J].节水灌溉,2024(9):82-88.
ZHANG M N, WANG F X, LÜ H S, et al. Study on the applicability of standardised precipitation index (SPI) and Z-index in Huaibei Plain[J].Water Saving Irrigation, 2024(9):82-88.
- [4] 焦军同,李晶.汉中地区近51 a降水时空变化及旱涝特征分析[J].云南地理环境研究,2025,37(1):58-65.
JIAO J T, LI J. Study on the spatiotemporal evolution of

- interannual precipitation and drought and flood in Hanzhong area in 51 recent years [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2025, 37(1): 58-65.
- [5] 吴伟伟. 基于Z指数的晋中地区干旱变化特征及成因分析[J]. *水文*, 2022, 42(2): 91-95.
WU W W. Analysis of drought variation characteristics and causes in Jinzhong area based on Z-index [J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(2): 91-95.
- [6] 钱莉莉, 贺中华, 梁虹, 等. 基于降水Z指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 37(1): 10-14.
QIAN L L, HE Z H, LIANG H, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of agricultural drought based on precipitation Z index in Guizhou [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2019, 37(1): 10-14.
- [7] 费龙, 邓国荣, 张洪岩, 等. 基于降水Z指数的朝鲜降水及早涝时空特征[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(12): 3051-3063.
FEI L, DENG G R, ZHANG H Y, et al. Spatiotemporal patterns of precipitation and drought and flood using Z-index in Democratic People's Republic of Korea [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(12): 3051-3063.
- [8] 宾振, 蔡娟, 邱璐, 等. 基于Z指数的江西省旱涝的指标与时空分布特征[J]. *气象与减灾研究*, 2023, 46(2): 94-102.
BIN Z, CAI J, QIU L, et al. Indexes and temporal-spatial distribution characteristics of drought and flood based on Z-index in Jiangxi Province [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2023, 46(2): 94-102.
- [9] 吴战平, 何玉龙, 严小冬, 等. 贵阳旱涝气候变化特征及其趋势分析[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 32(6): 30-34.
WU Z P, HE Y L, YAN X D, et al. Characteristics of the climate change in Guiyang dryness and wetness and rainfall trends in summer [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2014, 32(6): 30-34.
- [10] 李维京, 张若楠, 孙丞虎, 等. 中国南方旱涝年际年代际变化及成因研究进展[J]. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 577-591.
LI W J, ZHANG R N, SUN C H, et al. Recent research advances on the interannual-interdecadal variations of drought/flood in south China and associated causes [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2016, 27(5): 577-591.
- [11] 肖贻青, 王健, 姚静. 西安地区近五百年旱涝变化趋势与近百年旱涝成因分析[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(6): 1448-1456.
XIAO Y Q, WANG J, YAO J. Trends of drought and flood in recent 500 years and their causes in recent 100 years in Xi'an [J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(6): 1448-1456.
- [12] 郭海峰, 刘瑞琪, 刘祥, 等. 柘溪水库流域降水特征及早涝成因分析[J]. *水文*, 2022, 42(2): 96-101.
GUO H F, LIU R Q, LIU X, et al. Analysis of precipitation characteristics and causes of drought and flood in Zhexi reservoir basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(2): 96-101.
- [13] 黄亚. 三峡水库区域水气候效应及其未来趋势预测[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
HUANG Y. Regional hydroclimatic effect and its trend prediction in the three gorges reservoir [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [14] 徐元顺. 丹江口水库流域近75年旱涝气候特征[C]//中国气象学会2005年年会论文集. 苏州, 2005: 4670-4674.
XU Y S. Climate characteristics of drought and flood in Danjiangkou Reservoir basin in recent 75 years [C]// Chinese Meteorological Society. Proceedings of the 2005 Annual Meeting of Chinese Meteorological Society. Danjiangkou Administration Bureau, 2005: 4670-4674.
- [15] 吴杰峰. 水文干旱对气象干旱的响应及大型水库的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2017.
WU J F. Response of hydrological drought to meteorological drought and the impact of a large reservoir [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2017.
- [16] XING Z K, MA M M, ZHANG X J, et al. Altered drought propagation under the influence of reservoir regulation [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: e127049.
- [17] 童锦施. 喀斯特区域大型水库建设的局地降水响应与洪旱风险评价: 以万峰湖为例[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
TONG J S. Local precipitation response to large reservoir construction and flood-drought risk assessment in karst areas [D]. Guiyang: Guizhou University, 2024.
- [18] 谭红梅, 贺中华, 顾小林, 等. 基于下垫面结构的喀斯特地区洪涝演化特征研究[J]. *人民长江*, 2024, 55(5): 33-42.
TAN H M, HE Z H, GU X L, et al. Characteristics of flood evolution in karst area based on underlying surface structure [J]. *Yangtze River*, 2024, 55(5): 33-42.
- [19] 戴丽, 尹昌应, 毛春艳, 等. 喀斯特山地城市景观格局对城市内涝的影响研究: 以贵阳市为例[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(2): 53-61.
DAI L, YIN C Y, MAO C Y, et al. The influence of the landscape pattern on urban waterlogging in karst mountains: Take Guiyang as an example [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2024, 42(2): 53-61.
- [20] 侯雨乐, 赵景波. 气候突变下基于Z指数的松潘县旱涝演变分析[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 165-170.
HOU Y L, ZHAO J B. Analysis of evolution of drought and flood disasters in Songpan County under abrupt climate change based on Z index [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4): 165-170.
- [21] 郭冠森, 包含, 兰恒星, 等. 基于交叉小波与小波相干的黄土高填方体浅表层水分相关关系研究[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(5): 1389-1402.

- GUO G M, BAO H, LAN H X, et al. Correlation of surface moisture in loess high-filling body based on cross wavelet and wavelet coherence[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(5): 1389-1402.
- [22] 王世佳, 田静. 黄河流域干旱传播特征及其驱动因子分析[J]. *中国农业大学学报*, 2025, 30(7): 24-35.
- WANG S J, TIAN J. Drought propagation characteristics in the Yellow River basin and its driving factor analyse[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(7): 24-35.
- [23] 黄亚, 肖伟华, 李艳萍. 基于RegCM4模式的三峡库区水域变化对区域降水的影响研究[C]//中国水利学会, 西安理工大学. 2024中国水利学术大会论文集(第三分册). 河海大学, 中国水利水电科学研究院, 2024: 43-49.
- HUANG Y, XIAO W H, LI Y P. Study on the impact of water area change in the Three Gorges Reservoir Area on regional precipitation based on the RegCM4 model [C]//Chinese Hydraulic Engineering Society, Xi'an University of Technology. Proceedings of the 2024 China Hydraulic Engineering Academic Conference (Volume III). Hohai University, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024: 43-49.
- [24] 赵亮, 邹力, 王恩华. 与ENSO有关和无关系年江、淮旱涝可能成因研究[J]. *气象科学*, 2007, 27(6): 618-625.
- ZHAO L, ZOU L, WANG E H. Study on causes of drought and flood over the Huaihe and mid-lower Yangtze valleys during the summers with and without ENSO[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, 27(6): 618-625.
- [25] 王学凤, 路洁, 曹永强. 辽宁省近54年旱涝特征分析及其对大气环流响应研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(12): 1514-1524.
- WANG X F, LU J, CAO Y Q. Analysis of drought and flood characteristics in Liaoning Province and its response to atmospheric circulation in the last 54 years[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(12): 1514-1524.
- [26] LIU L, LI L P, ZHU G H. Effects of low-frequency oscillation at different latitudes on summer precipitation in flood and drought years in southern China[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(8): e1277.
- [27] FAN L, WANG Y, CAO C L, et al. Teleconnections of atmospheric circulations to meteorological drought in the Lancang-Mekong River basin[J]. *Atmosphere*, 2024, 15(1): e89.
- [28] DAI Y X, DONG J L, WEI Y N, et al. Investigate the spatiotemporal evolution of drought and its interaction with atmospheric circulation in the Yellow River middle basin[J]. *Water*, 2024, 16(13): e1786.
- [29] 何裕强, 刘燕. 2000—2022年益阳8—10月旱涝指数时空变化及大气环流特征[J]. *农业灾害研究*, 2024, 14(12): 323-325.
- HE Y Q, LIU Y. Spatiotemporal variation of drought-flood index and atmospheric circulation characteristics in Yiyang from August to October during 2000—2022[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2024, 14(12): 323-325.
- [30] 方兴义, 马思雨. 1960—2022年宁夏南部山区气候变化特征与旱涝区域响应[J]. *气象水文海洋仪器*, 2025, 42(3): 75-79.
- FANG X Y, MA S Y. Climate change characteristics and regional response to droughts and floods in the southern mountainous areas of Ningxia from 1960 to 2022[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2025, 42(3): 75-79.
- [31] YU H, CUI W G, HE Z H, et al. Soil moisture loss in planted forests and its driving factors: A case study of the Nanpan River basin[J]. *Forests*, 2025, 16(4): e665.
- [32] 谢静, 蒋薇, 刘进祖, 等. 土壤水分有效性决定人工林水分利用效率应对极端干旱的响应机制[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2025, 23(5): 162-167.
- XIE J, JIANG W, LIU J Z, et al. Soil water availability determining the responding mechanism of water use efficiency of an plantation ecosystem to extreme drought[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(5): 162-167.
- [33] 张皓茹, 杨坪坪, 高雄, 等. 基于RUSLE模型的贵州省植被景观格局演变对土壤保持的影响[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 43(1): 46-59.
- ZHANG H R, YANG P P, GAO X, et al. An analysis of the impact of vegetation landscape pattern evolution on soil conservation in Guizhou Province by utilizing the RUSLE model[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2025, 43(1): 46-59.
- [34] 林琳, 蒙嘉川, 郭战峰. 川渝旱涝不能简单归因三峡大坝[N]. *中国气象报*, 2007-07-26(1).
- LIN L, MENG J C, GUO Z F. Floods and droughts in Sichuan-Chongqing cannot be simply attributed to the Three Gorges Dam [N]. *China Meteorological News*, 2007-07-26(1).
- [35] 徐帆, 赵俊三, 林伊琳, 等. 耦合气候与土地利用变化的洱海流域径流预测及影响机制[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(5): 80-91.
- XU F, ZHAO J S, LIN Y L, et al. Runoff prediction and influencing mechanisms in Erhai Lake basin under coupled climate and land use changes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(5): 80-91.