

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.004; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.004.

池博英, 赵乾佐, 彭李, 等. 金沙江流域极端气候时空演变及综合风险[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 305-316.

Chi Boying, Zhao Qianzuo, Peng Li, et al. Spatiotemporal evolution of extreme climate and comprehensive risk in Jinsha River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1): 305-316.

金沙江流域极端气候时空演变及综合风险

池博英¹, 赵乾佐¹, 彭李², 张璇¹, 宋儒霖³, 张秀¹, 李冲¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100080;

2. 华能澜沧江水电股份有限公司, 昆明 650200; 3. 水电水利规划设计总院有限公司, 北京 100010)

摘要: [目的] 深入理解金沙江流域极端气候指数的时空演变规律, 评估流域内极端气候的综合风险, 以揭示区域气候系统的脆弱性和潜在威胁, 为流域防灾减灾、水资源管理和适应性规划提供科学依据和决策支持。[方法] 选取 1960—2010 年金沙江流域内气象站点的气温与降水数据, 计算了最高气温(TX_x)、最高气温极小值(TX_n)、年降水量(PRCPTOT)及降水强度(SDII)等 26 项气温及降水极端气候指数。通过克里金插值法、Sen 斜率检验、线性回归以及滑动 t 检验, 研究了极端指数的时空演变趋势; 并利用层次分析法(AHP)评估该区域的极端气候综合风险。[结果] 金沙江流域的极端高温和低温事件均呈现由下游至上游递减的格局。平均温差在流域上游地区较高, 下游地区较低。霜冻日数呈下降趋势, 生长季长度则缓慢上升。在降水方面, 年降水量和降雨强度从上游至下游递增, 而持续干旱期则在上游地区更为常见, 下游地区较少见, 年降水量的波动较大, 尤其在中下游。流域内的上游地区发生极端气候的风险更高, 下游风险较低, 其中重大风险所占面积为 17.8%, 较低风险区所占面积最多, 为 28.5%, 低风险区所占面积最小, 为 3.2%。[结论] 金沙江流域的下游极端高温指数较高, 上游降水量低于下游, 上游地区发生极端气候的风险更高。

关键词: 极端气候指数; 变化趋势; 时空演变; 金沙江流域; 综合风险评价

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0305-12

Spatiotemporal evolution of extreme climate and comprehensive risk in Jinsha River Basin

Chi Boying¹, Zhao Qianzuo¹, Peng Li², Zhang Xuan¹, Song Rulin³, Zhang Xiu¹, Li Chong¹

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100080, China; 2. Huaneng Lancang River

Hydropower Inc., Kunming 650200, China; 3. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100010, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the spatiotemporal evolution of extreme climate indices and evaluates the comprehensive risk of extreme climate events in the Jinsha River Basin, in order to reveal the vulnerability and potential threats of the regional climate system, and to provide a scientific basis and decision-making support for disaster prevention and mitigation, water resource management, and adaptive planning in the basin. [Methods] Temperature and precipitation data from meteorological stations within the Jinsha River Basin from 1960 to 2010 were selected, and 26 extreme climate indices for temperature and precipitation were calculated, including maximum temperature (TX_x), minimum value of maximum temperature (TX_n), annual precipitation (PRCPTOT), and precipitation intensity (SDII). The spatiotemporal evolution trends of the extreme indices were investigated using Kriging interpolation, Sen's slope test, linear regression, and moving t-tests. The comprehensive risk of extreme climate in the region was assessed using the Analytic Hierarchy

收稿日期: 2025-02-27

修回日期: 2025-04-10

接受日期: 2025-04-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(42271023); 国家重点研发计划项目(2023YFF0805604)

第一作者: 池博英(2001—), 女, 陕西澄城人, 硕士研究生, 从事气候变化研究。E-mail: chiboying@163.com。

通信作者: 李冲(1995—), 男, 山东菏泽人, 博士, 助理研究员, 主要从事气候变化下流域生态水文和水环境过程模拟等研究。E-mail: chong@bnu.edu.cn。

<http://stbcyj.paperonce.org>

Process (AHP). [Results] Both extreme high-temperature and extreme low-temperature events showed a decreasing pattern from the downstream to the upstream regions of the Jinsha River Basin. The average temperature difference was higher in the upstream region and lower in the downstream region. The number of frost days showed a decreasing trend, while the growing season length exhibited a slowly increasing trend. In terms of precipitation, annual total precipitation and precipitation intensity increased from the upstream to the downstream regions. In contrast, consecutive dry days were more common in the upstream region and less common in the downstream region. Annual precipitation fluctuated considerably, particularly in the middle and lower reaches. The risk of extreme climate events was higher in the upstream region of the basin and lower in the downstream region. Areas at major risk accounted for 17.8% of the total area, areas at relatively low risk accounted for the largest proportion (28.5%), and areas at low risk accounted for the smallest proportion (3.2%). [Conclusion] In the Jinsha River Basin, the extreme high-temperature indices are higher in the downstream region, while the annual precipitation is lower in the upstream region than in the downstream region. The upstream region faces a higher comprehensive risk of extreme climate events.

Keywords: extreme climate indices; changing trend; spatiotemporal evolution; Jinsha River Basin; comprehensive risk assessment

极端气候引发的干旱、洪水等极端事件,对农业、工业和居民生活产生深远影响^[1]。受全球气候变暖和人类活动的影响,全球极端气候发生的频率和强度呈现出增加的趋势,对人类生活和社会经济造成严重的威胁^[2]。解析极端气候时空演变特征,评估极端气候综合风险,对于预测未来气候变化趋势、制定应对策略和保障区域水安全具有重要价值^[3-4]。

目前已有学者利用线性拟合、R/S分析、突变检验、空间插值法及结构性方程模型等方法分析不同的极端气候指数或指标,探究了流域或区域的极端气候演变特征。例如,Hao等^[5]基于不同时间尺度的干旱和高温指标介绍了复合干旱和高温事件的特征、驱动因素以及影响等;Xu等^[6]对1960—2018年珠江流域的12个极端降水指数的时空动态及其与海拔的关系进行研究,结果表明区域平均年总降水量呈减少趋势,极端降水事件主要发生在低海拔地区;Hu等^[7]对中国1981—2015年极端高温的时空变化及城市化影响进行分析,结果发现极端高温的时间趋势在不同生物群系中有所不同,其中热带和亚热带湿润阔叶林及温带阔叶混交林中出现了最显著的增加趋势;祝莹等^[8]对沱江流域1960—2016年汛期极端降水的时空演变特征进行了分析,结果发现极端降水呈衰减趋势,极端降水分布于流域中上游。由于极端气候指数的演变趋势复杂多变,气温、降水等单一类型指数无法表征其演变过程,面对这个复杂的系统,需要综合考虑各极端气候指数。开展灾害风险评估研究对预防极端气候带来的灾害具有重要意义,已有研究通过构建风险评估框架和加权综合法进行分析。例如,许浩然等^[9]基于信息扩散模型分析

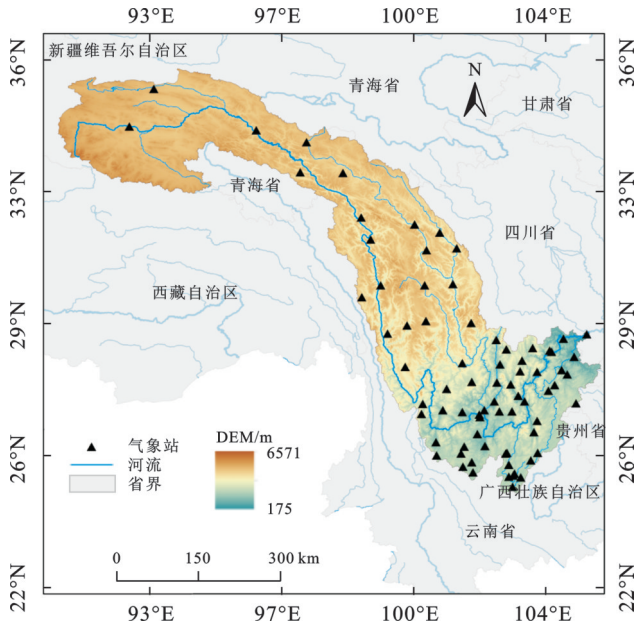
了湖南省由极端气候引发的灾害风险;王健鹏等^[10]基于加权综合法得出西安城市内涝灾害风险指数。只考虑某一特定的驱动因素或致灾因子会导致对评价风险的低估。因此,本研究基于极端气温指数和极端降水指数综合分析金沙江流域极端气候时空演变特征的同时,选取研究区内变化显著的指数进行极端气候综合风险评价,可以提高对流域气候风险评估的精准度。

金沙江流域地处高原与盆地过渡带,属于气候变化的敏感地区,区域的水能资源丰富,其对长江的水量和水质有着不可替代的作用^[11]。由气候变化引发的极端事件对流域的水安全与能源安全造成严重威胁,不同的极端气候特征对水电开发会产生不同程度的影响。例如,极端高温导致电网负荷及用电量增加,同时导致河道水位下降,水力发电保障不足,进而引发能源危机^[12];极端降水引发的洪涝灾害威胁大坝基建等^[13]。因此,综合分析极端气候指数的时空演变特征,厘清极端气候变化的规律,对极端气候风险进行评估,为保障水电能源安全提供科学支撑,为水电调度管理提供依据。本文旨在通过对金沙江流域1960—2010年极端气候的时空演变进行分析,探讨其变化规律,并对极端气候的综合风险进行评价,为流域内的气候适应、水资源管理和灾害预防提供科学依据。

1 研究区概况

金沙江流域作为中国长江上游的重要组成部分,发源于青藏高原的唐古拉山脉,流经青海、西藏、四川和云南4个省份,最终在四川宜宾与岷江汇合后

称为长江^[11]。流域面积 50.2 万 km², 约占长江流域面积的 26%。流域地理位置独特, 地势西高东低, 地形复杂多变, 由高原、山地、丘陵和盆地组成, 气候类型从高原寒冷气候到亚热带湿润气候均有分布, 降水量丰富但分布不均, 易引发干旱或洪涝灾害。水系发达, 除主河道外, 还有雅砻江、大渡河等众多支流, 对金沙江水量和水质有显著影响^[11]。流域内水资源和水能资源极为丰富, 是水力发电的重要基地, 同时对农业灌溉、城市供水和生态保护也至关重要。生态环境脆弱, 受气候变化和人类活动影响较大, 森林覆盖率、生物多样性及水土流失状况对水资源和生态平衡有重要影响。金沙江流域概况如图 1 所示。



注: 基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2020)4630 号的标准地图制作, 底图未做修改, 下同。

图 1 金沙江流域概况

Fig. 1 Overview of Jinsha River Basin

2 研究方法与数据来源

2.1 数据来源

采用的气象数据来自中国气象数据网(<https://data.cma.cn>)提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)^[14], 数据集包含了中国 824 个基准、基本气象站 1951 年 1 月以来的气压、气温、降水量、蒸发量、相对湿度、风向风速、日照时数和 0 cm 地温要素的日值数据。数据采集遵循国际气象组织(World Meteorological Organization, WMO)的标准, 确保数据的全球可比性和准确性。数据经过质量控制后, 1951—2010 年各要素数据的质量及完整性相对于以往发布的地面同类数据产品明显提高, 各要素项数据的实有率普遍在 99% 以上, 数据的正确率均接近 100%。研究提取数据集中金沙江流域气象站

1960—2010 年的日最高气温、日最低气温、日平均气温和日降水量的观测数据, 基于气候变化监测与极端气候事件指标专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)确定的极端气候指标^[15]对数据进行计算, 得出流域内的极端气候指数。金沙江流域共 77 个气象站点, 考虑到各站点数据的完整性与可靠性, 最终选取 76 个站点数据计算分析极端气温指数, 选取 75 个站点数据计算分析极端降水指数。

2.2 研究方法

2.2.1 极端气候指数计算 本研究采用的极端气候指数选自世界气象组织(WMO)和世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)等联合成立的气候变化监测与极端气候事件指标专家组(ETCCDI)确定的 27 个极端气候指标^[15]。极端气候指数计算概念清晰、弱极端性、普适性强和显著性强等特点, 有利于更加全方位地描述极端气温和极端降水的强度、频率和持续时间等属性^[16-17]。由于自定义两级日数(Rnn)具有一定的主观性, 因此本文选择 26 个极端气候指数研究金沙江流域极端气候的变化情况, 其中 16 个极端温度指数见表 1, 10 个极端降水指数见表 2。

2.2.2 极端气候指数的趋势计算 本研究依据极端气候指数的定义^[17], 利用金沙江流域气象站 1960—2010 年的气象数据, 计算得出 26 个极端气候指数, 利用线性拟合^[8, 17-18]和 Sen's 斜率估计法^[11, 17]分析极端气温指数 51 年间的年际变化, 其线性拟合计算公式如下:

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (1)$$

式中: a 为斜率; n 为数据点个数; $\sum xy$ 为 x 和 y 的乘积之和; $\sum x$ 和 $\sum y$ 分别为 x 和 y 的和; $\sum x^2$ 为 x 的平方和;

Sen's 斜率计算公式如下:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (2)$$

式中: x_j 和 x_i 为时间序列数据; $\text{median}(\ast)$ 代表取中值; $\beta > 0$ 表示时间序列呈上升趋势, 反之则呈下降趋势。

采用滑动 t 检验法^[18]将达到显著性水平且置信区间为 99% 的年份确定为突变年份, 其计算公式如下:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (4)$$

式中： n_1 和 n_2 为两个子样本长度； \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 为两个子样本的均值； s_1 和 s_2 为两个子样本的方差。

表 1 极端气温指数定义

Table 1 Definitions of extreme temperature indices

指数名称	单位	定义
最高气温(TXx)	°C	年最高气温的最大值
最高气温极小值(TXn)	°C	年最高气温的最小值
最低气温极大值(TNx)	°C	年最低气温的最大值
最低气温(TNn)	°C	年最低气温的最小值
平均气温(DTR)	°C	日温差的平均值
结冰日数(ID)	d	日最高气温(Tmax)<0 °C的日数
霜冻日数(FD)	d	日最低气温(Tmin)<0 °C的日数
冷昼日数(TX10p)	d	日最高气温(Tmax)<10%分位数的日数
冷夜日数(TN10p)	d	日最低气温(Tmin)<10%分位数的日数
暖昼日数(TX90p)	d	日最高气温(Tmax)>90%分位数的日数
暖夜日数(TN90p)	d	日最低气温(Tmin)>90%分位数的日数
夏天日数(SU)	d	日最高气温(Tmax)>25 °C的日数
热夜日数(TR)	d	日最低气温(Tmin)>20 °C的日数
生长期长度(GSL)	d	至少 6 日平均日均气温>5 °C初日与<5 °C终日间日数
暖日持续日数(WSDI)	d	每年至少连续 6 日日最高气温(Tmax)>90%分位数日数
冷日持续日数(CSDI)	d	每年至少连续 6 日日最高气温(Tmin)<10%分位数日数

表 2 极端降水指数定义

Table 2 Definitions of extreme precipitation indices

指数名称	单位	定义
年降水量(PRCPTOT)	mm	≥1 mm 降水日累积量
降水强度(SDII)	mm/d	年降水量≥1 mm 的日数
日最大降水量(Rx1day)	mm	日最大降水量
5日最大降水量(Rx5day)	mm	连续 5 日最大降水量
强降水量(R95p)	mm	日降水量>95%分位值的总降水量
极强降水量(R99p)	mm	日降水量>99%分位值的总降水量
中雨日数(R10)	d	日降水量≥10 mm 的日数
大雨日数(R20)	d	日降水量≥20 mm 的日数
持续干期(CDD)	d	最长连续无降水日数
持续湿期(CWD)	d	最长连续降水日数

根据克里金插值法^[19]对极端气候指数进行空间插值,研究极端气候指数在空间上的变化情况,以及不同区域极端气候指数的分布状况。

2.2.3 极端气候综合风险评价 本研究采用层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)^[20]确定极端气候综合风险评价的指标体系。极端气候综合风险评估系统具体由致灾因子危险性,承灾体脆弱性以及孕灾环境敏感性构成^[21]。故本研究以极端气候综合风险评价为目标层,以危险性、暴露性、脆弱性^[22]为准则层的一级指标,以暴雨、干旱、高温、低温为危险性^[23]的二级指标,以人口密度、经济指标、农作物

面积为暴露性^[24]的二级指标,以敏感性和恢复能力为脆弱性^[25]的二级指标,选取流域内时空变化明显的极端气候指数为方案层^[18-25]构建评价体系,专家基于确定的评价体系对各层指标进行两两比较,构建一致的综合判断矩阵A,再按式(5)和式(6)分别计算特征向量U和最大特征值λ_{max}。

$$U_k = \frac{\sum_{j=1}^n a_{kj}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}}, U = (u_1, u_2, \dots, u_n)^Z \quad (5)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AU)_i}{u_i} \quad (6)$$

式中： a_{ij} 表示判断矩阵对应第*i*行第*j*列的数值；U表示判断矩阵A对应的特征向量；n表示矩阵阶数。

按式(7)和式(8)进行一致性检验,通过检验的特征向量U可确定合理的权重。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

$$CR = CI/RI \quad (8)$$

式中：CI表示不一致程度指标；CR表示随机一致性比率,当CR<0.1,判定为通过一致性检验,否则,不通过；RI表示平均随机一致性指标,只与矩阵阶数n有关,各阶矩阵对应的RI见表3。

最后,再基于通过一致性检验的权重进行综合风险评价。

表 3 各阶矩阵对应随机一致性指标

Table 3 Random consistency indices for matrices of various orders

n	1	2	3	4	5	6	7
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32

3 结果与分析

3.1 极端气温的时空演变

3.1.1 时间变化 如图 2 所示,金沙江流域的极端气温指数变化最明显的是木里站,其霜冻指数(FD)下降斜率接近 2 d/a,夏天日数(SU)和生长期长度(GSL)的上升斜率接近 1.5 d/a,玉树站的霜冻指数(FD)下降斜率超过 1.5 d/a,攀枝花站的热夜日数

(TR)上升斜率超过 1 d/a。大部分站点的极端气温指数都介于-0.5~0.5之间,霜冻日数(FD)减少,热夜日数(TR)和夏天日数(SU)增多。其中,结冰日数(ID)在金沙江上游流域呈下降趋势,在中下游流域变化并不显著;霜冻日数(FD)在单个站点不同指数间的差异较大,尤其是玉树站和木里站的霜冻日数下降斜率最大,木里站的霜冻指数高达-2 d/a;夏天日数整体呈上升趋势,其中木里站的夏天日数斜率最高,高达 1.32 d/a,且下游流域的夏天日数上升更明显,中上游流域变化不明显;下游流域的热夜日数(TR)呈上升趋势较为明显;生长期长度(GSL)在中下游流域呈上升趋势更明显,上游变化较稳定。

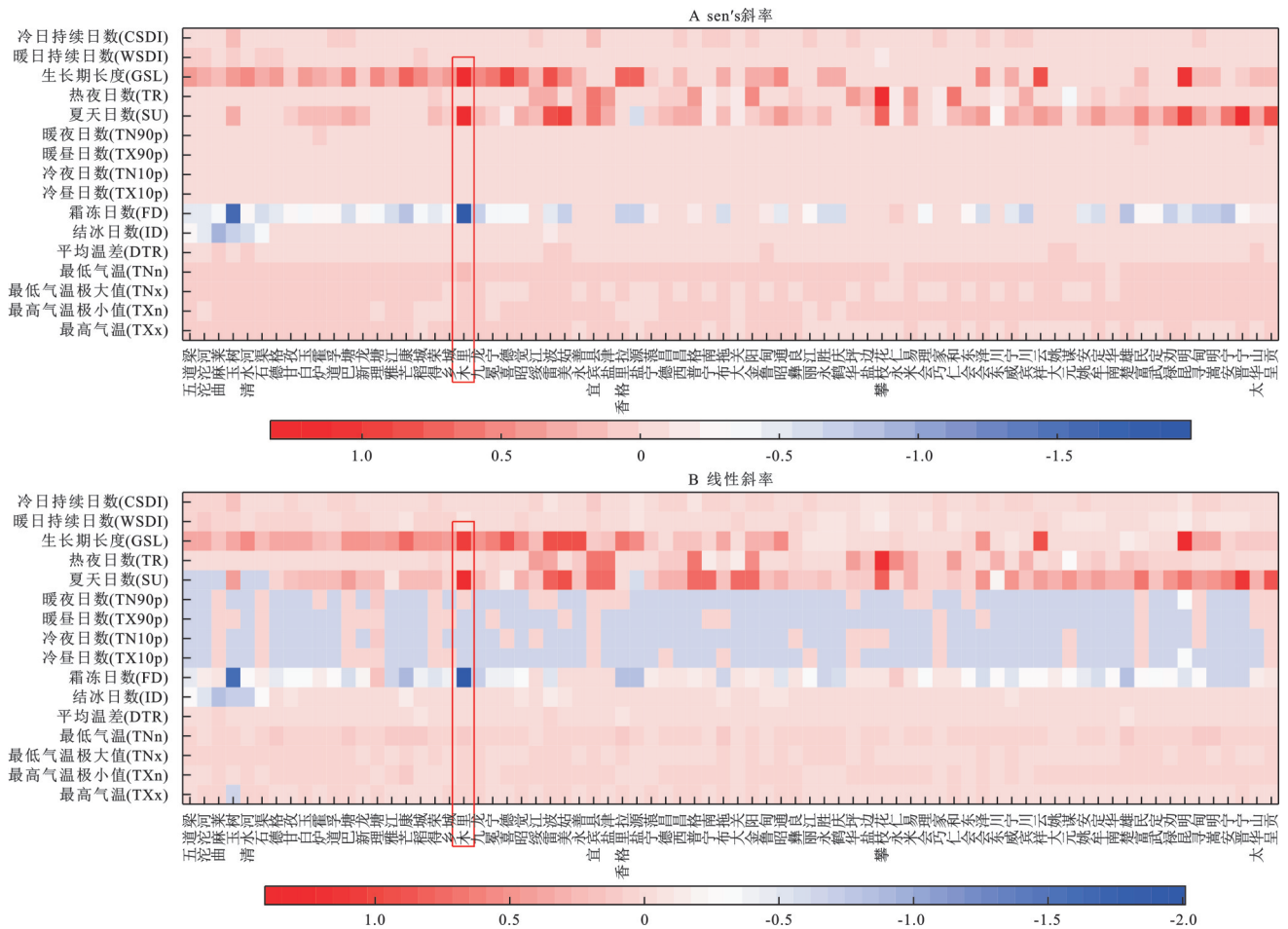


图 2 极端气温指数年际斜率热点图

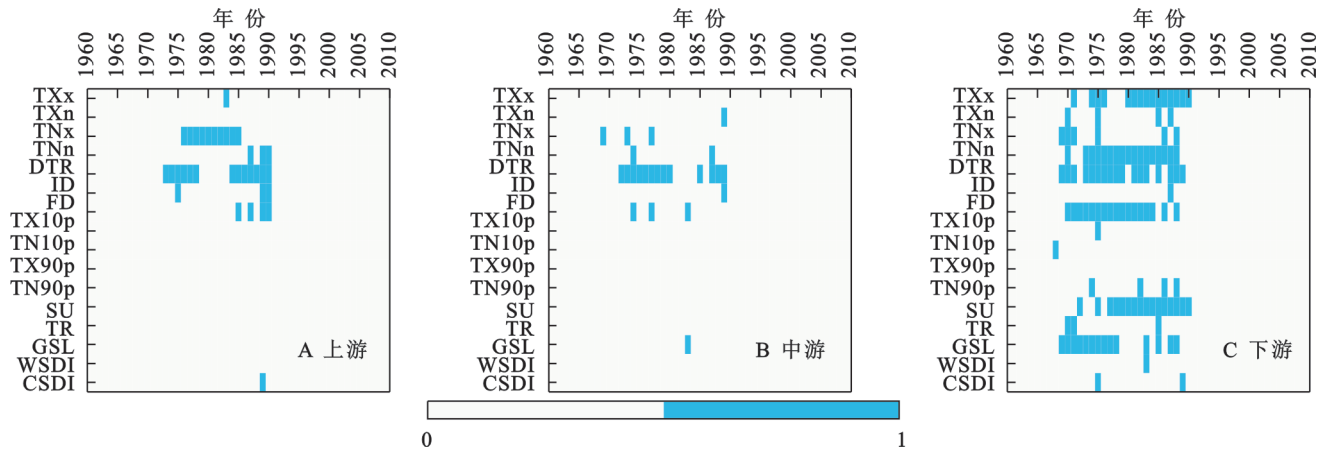
Fig. 2 Hotspot map of interannual slopes for extreme temperature indices

流域极端气温指数的突变年份如图 3 所示。由图 3A 可以看出,在上游地区最低气温极大值(TNx)和平均温差(DTR)的突变期为 1973—1990 年;最高气温(TXx)、最低气温(TNn)和霜冻日数(FD)的突变年集中在 80 年代;结冰日数(ID)突变年为 1975 年、1989 年和 1990 年。由图 3B 可以看出,流域中游的平均温差(DTR)的突变期主要在 70,80 年代;最高气温极小值(TXn)和生长期长度(GSL)的突变年发生在 80 年

代;最低气温极大值(TNx)的突变年发生于 70 年代;最低气温(TNn)在 70,80 年代各突变一次。由图 3C 可以看出,流域下游地区与中游和上游地区相比,突变期更长且发生突变的极端气温指数也相对较多,除了暖昼日数(TX90p)外均发生突变,冷夜日数(TN10p)的突变年在 70 年代;结冰日数(ID)和暖日持续日数(WSDI)的突变年主要在 80 年代;最高气温(TXx)、最低气温(TNn)、平均温差(DTR)、霜冻日数

(FD)、夏天日数(SU)和生长期长度(GSL)的突变期都较长,集中在70、80年代。综上得出,金沙江流域的平均温差(DTR)最易发生突变,呈突变减少,且突变期较长,发生于1970—1990年;最高气温(TXx)突

变后呈升高状态,结冰日数(ID)突变后减小,夏天日数(SU)和生长期长度(GSL)突变增大,且下游最易发生突变;金沙江流域的极端气温指数突变年主要集中在70、80年代。



注:其中0表示没有突变;1表示发生突变。下图同。

图3 极端气温指数突变年

Fig. 3 Years of abrupt change in extreme temperature indices

3.1.2 空间分析 金沙江流域气温和日温差都呈上游至下游逐渐升高的趋势(图4),结冰日数和霜冻日数也是上游地区最大,下游较少。生长期长度则是流域西南部地区最大,由下游至上游逐渐递减。其中,冷昼日数、暖昼日数、冷夜日数和暖夜日数在流域中游最大,上游和下游地区数值较小。流域上游地区夏天日数出现降低,中下游地区的夏天日数逐渐升高。

金沙江流域的极端气温强度指数中,最高气温(TXx)和最低气温极大值(TNx)的空间分布基本一致,在沱沱河站以南附近指数达到最小值,自上游向下游逐渐升高,其中最高气温低至20℃,最低气温极大值低至7℃。曲麻莱站、沱沱河站和五道梁站区域的最高气温极小值(TXn)和最低气温(TNn)达到最低,其中最高气温极小值最低为-12℃,最低气温低至-32℃。在流域下游地区,绥江站的最高气温极小值在-3~1℃,比周围地区的最高气温极小值略低。平均温差(DTR)在流域的空间分布呈自上游向下游逐渐降低,最高温差为17℃,最低温差为8℃。这是由于上游地区受海拔影响,辐射强、空气稀薄,导致气温常年偏低,昼夜温差大,而下游地区海拔降低,纬度南移,云量增多,湿度增大,气温较高,温差减小。

金沙江流域的极端气温频率指数中,结冰日数(ID)自上游向下游逐渐降低,沱沱河站的结冰日数最高至167d,五道梁站的结冰日数为99~132d,流域中下游的结冰日数低至0d。霜冻日数(FD)由上游至下游也是逐渐降低,最高霜冻日数为307d,最低为0d。热夜日数(TR)在流域中游和上游地区为0~

20d,下游地区为20~50d,其中在宜宾县站、彝良站、大关站和普格站附近地区的热夜日数为40~50d。夏天日数(SU)在沱沱河站以西的地区为34~68d,沱沱河站以东的流域上游夏天日数为0~34d,流域下游南部地区的夏天日数出现最大,为170d。热夜日数(TR)和夏天日数(SU)的空间分布特征与结冰日数(ID)和霜冻日数(FD)成反比。冷昼日数(TX10p)和冷夜日数(TN10p)的空间分布基本一致,石渠站、清水河站、玉树站和曲麻莱站的地区出现最大值,最大值均为45d,沱沱河站、巴塘站和理塘站的冷昼日数和冷夜日数最小,冷昼日数最小为30d,冷夜日数最小为32d。暖昼日数(TX90p)和暖夜日数(TN90p)的空间分布基本一致,石渠站、清水河站、玉树站和曲麻莱站的地区出现最大值,暖昼日数最大值为44d,暖夜日数最大仅为45d,流域上游和下游暖昼日数和暖夜日数较小,最小值均为33d。暖昼日数(TX90p)和暖夜日数(TN90p)的空间分布与冷昼日数(TX10p)和冷夜日数(TN10p)成反比。

金沙江流域的极端气温持续时长指数中,生长期长度(GSL)自上游向下游逐渐增大,最大为365d,最小为74d,上下游的生长期长度差异明显。暖日持续日数(WSDI)在流域上游和下游南部地区较大,最大为12d,在流域下游的东部地区最小,为8~9d。冷日持续日数(CSDI)在金沙江流域下游东部地区最大,为12~16d,在沱沱河站以南部分地区最小,为8~10d。流域极端气温指数的演变呈现上游低温韧性减弱、中游气候波动加剧、下游高温风险集聚的差异化趋势,对区域生态安全和灾害防治提出层级化应对需求。

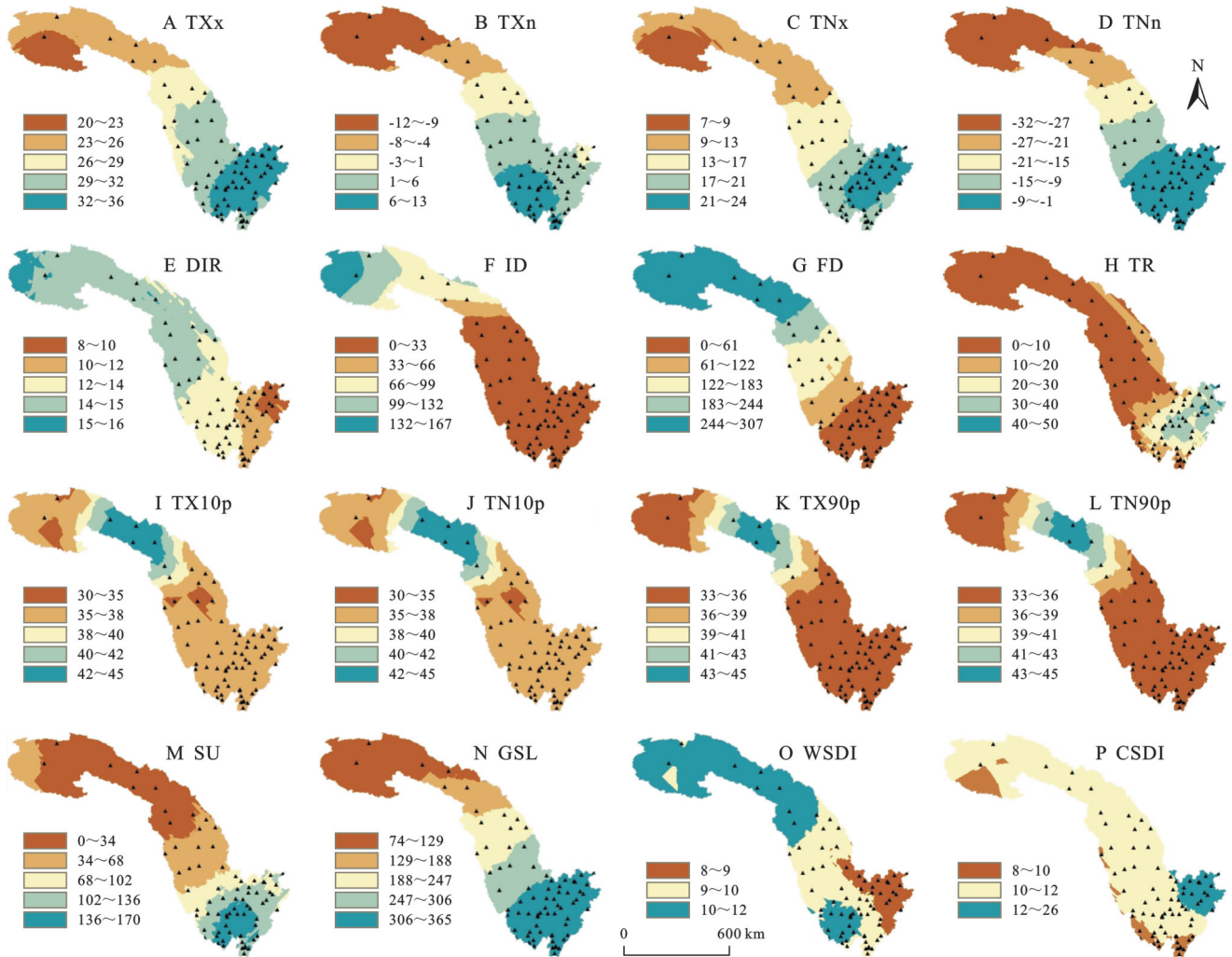


图 4 极端气温指数的时空分布

Fig. 4 Spatiotemporal distribution of extreme temperature indices

3.2 极端降水的时空演变

3.2.1 时间变化 图 5 表明流域内的极端降水指数中,年降水量(PRCPTOT)、强降水量(R95p)和极强降水量(R99p)的年际斜率变化最大。年降水量在整个金沙江流域的年际斜率有正有负,其中宁南站的上升斜率高达 2.92 mm/a,普格站的下降斜率接近 -4.52 mm/a,威宁站的下降斜率接近 -3.5 mm/a。元谋站强降水量(R95p)的上升斜率接近 2 mm/a,喜德站、西昌站元胜站强降水量的上升斜率约为 1.6 mm/a,绥江站和威宁站强降水量的下降斜率接近 -1 mm/a。盐边站极强降水量(R99p)的上升斜率为 1.22 mm/a。仁和站持续干期(CWD)的上升斜率最高为 0.7 d/a,其余气象站的持续干期斜率都在 ±0.5 d/a 以内。

通过滑动 t 检验统计检验法对金沙江流域极端降水指数的演变规律进行显著性检验,得到金沙江流域 1960—2010 年极端降水指数的突变年份,由于站点数量较多,仅取较有研究意义的部分站点,如图

6 所示。

由图 6A 可以看出,金沙江流域上游地区的降水强度(SDII)、强降水量(R95p)和中雨日数(R10)的突变年为 1988 年,突变后 SDII 从 3~5 mm/d 增至 5~7 mm/d, R95p 增加 150~200 mm, R10 从 15~20 d 增至 25~30 d,这种同步增强现象可能与 20 世纪 80 年代末期高原季风系统的强化有关;极强降水量(R99p)在 1978 年发生突变;年降水量(PRCPTOT)发生过 3 次突变,主要集中在 1970—1990 年。由图 6B 可以看出,金沙江流域中游的极端降水指数显著性变化很小,只有日最大降水量(Rx1day)(从 30~40 mm 增至 45~55 mm)、5 日最大降水量(Rx5day)(从 60~80 mm 增至 90~110 mm)、强降水量(R95p)和极强降水量(R99p)在 1975—1980 年各发生过一次突变。由图 6C 可以看出,金沙江流域下游地区的年降水量(PRCPTOT)(增加 200~300 mm)、降水强度(SDII)(从 7~9 mm/d 增至 10~12 mm/d)、日最大降水量(Rx1day)(从 50~60 mm 增至 70~80 mm)、大雨日数(R20)和持续湿期

(CWD)的突变年发生在 80 年代;5 日最大降水量 (Rx5day)和中雨日数(R10)的突变年发生在 70 年代;

强降水量(R95p)、极强降水量(R99p)和持续干期 (CDD)的突变年主要发生在 1970—1990 年。

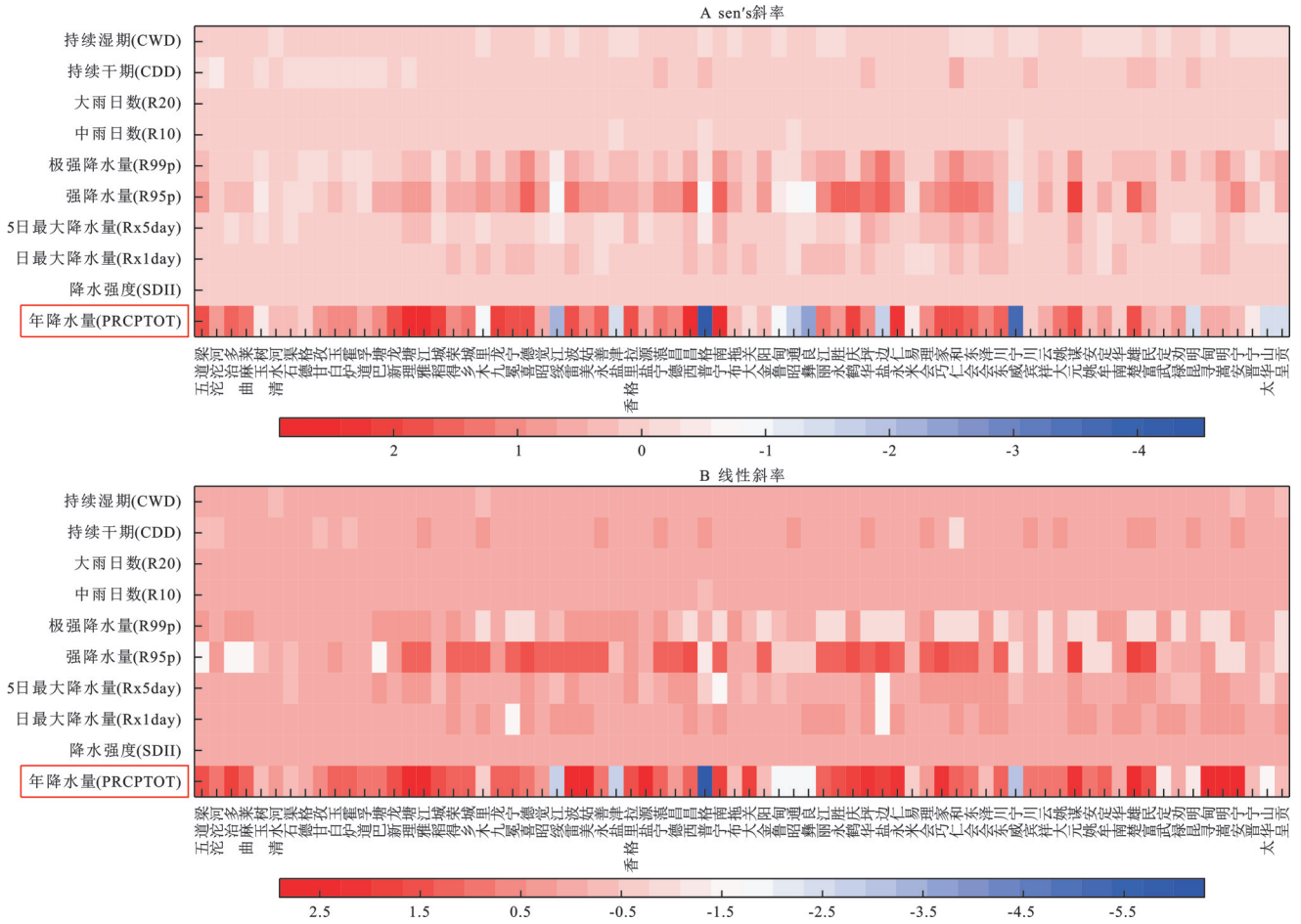


图 5 极端降水指数年际斜率热点图

Fig. 5 Hotspot map of interannual slopes for extreme precipitation indices

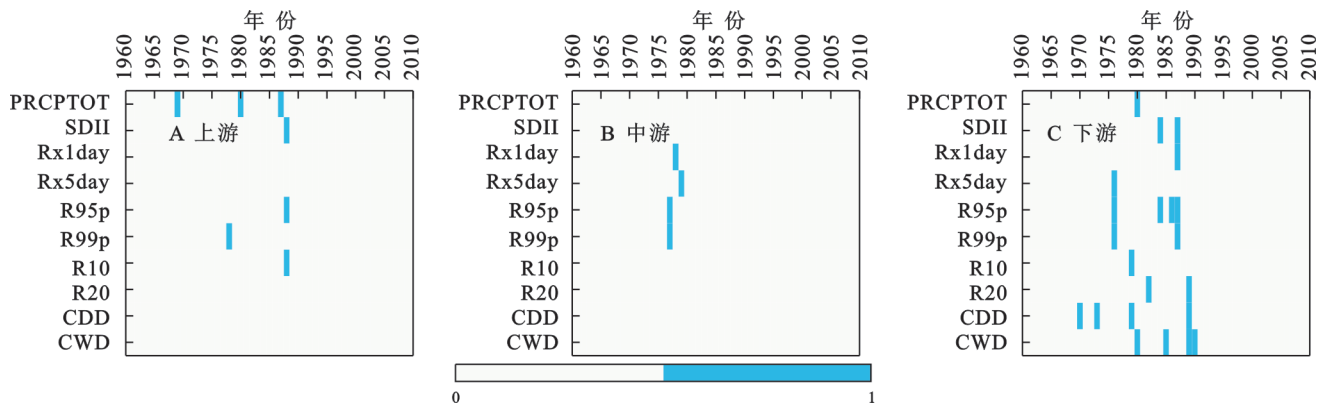


图 6 极端降水指数突变年

Fig. 6 Years of abrupt change in extreme precipitation indices

3.2.2 空间分析 图 7 表明极端降水指数除持续干期(CDD)以外,其他指数由流域上游至下游均为由低到高分布。金沙江流域中代表极端降水强度的指数中,年降水量(PRCPTOT)在金沙江上游地区由北至南逐渐升高,上游地区的玉树站附近地区的年降水量达到最大值 1 102 mm,上游出现降水高值是由于受高原切变线和地形抬升影响,导致降水较多。

金沙江流域中游地区的年降水量为 476~882 mm,流域下游地区的年降水量最大为 1 102 mm。降水强度(SDII)在流域上游地区的沱沱河站和清水河站以北有最小值,降水强度最小值为 3 mm/d,金沙江流域中游地区的降水强度为 5~9 mm/d,流域下游地区的降水强度为 7~14 mm/d,其中下游地区的南部降水强度最大,为 14 mm/d,下游地区的东部地区降水强度小于

西南地区,这与四川盆地地形阻滞降水历时延长有关。日最大降水量(Rx1day)自流域上游至下游逐渐升高,最小值为 13 mm,最大值为 74 mm。5 日最大降水量(Rx5day)在金沙江流域上游最小,为 22~47 mm,流域中游地区的 5 日最大降水量为 47~92 mm,流域下游的东部地区和中部地区出现最大值,为 138 mm。强降水量(R95p)在金沙江流域的上游地区由北向南逐渐增加,五道梁站以北的强降水量最小,为 102~250 mm,玉树站附近的强降水量为 500~600 mm,金沙江流域中游地区的强降水量由西向东逐渐降低,流域中游的西部地区强降水量为 400~500 mm,流域中游的东部地区强降水量为 250~320 mm,金沙江流域下游地区的南部强降水量出现最大值,为 600 mm。极强降水量(R99p)在流域上游地区由北至南逐渐升高,流域上游地区的极强降水量最低 71 mm,最高 163 mm,流域中游地区由西向东逐渐减少,中游地区的极强降水量为 101~194 mm,流域下游地区的南部极强降水量出现最大值为 225 mm。

金沙江流域中代表极端降水频率的指数中,中雨日数(R10)在金沙江流域上游地区由北向南逐渐增大,中雨日数最低为 2 d,最高为 36 d,在金沙江流域中游地区中雨日数为 15~28 d,流域下游地区中雨

日数达到最大值,为 36 d。大雨日数(R20)在流域上游地区由北向南逐渐升高,最低为 0 d,最高为 7 d,在流域中游地区的大雨日数除了理塘站附近的大雨日数为 0~3 d,其余地区的大雨日数为 3~7 d,流域下游地区的中地区大雨日数最大为 18 d,最小为 7 d。

金沙江流域中代表极端降水持续时长的指数中,持续干期(CDD)在流域上游地区由北至南逐渐减少,最高持续干期为 69 d,最低持续干期为 21 d,石渠站附近的持续干期在流域上游地区最小,为 21 d,流域中游地区的持续干期为 30~54 d,由西向东逐渐减少,流域下游的持续干期由西向东逐渐减少,持续干期最少为 0 d。持续湿期(CWD)在金沙江流域上游地区由北向南逐渐升高,持续湿期最小为 6 d,最大为 14 d,在流域中游地区持续湿期达到最大值 18 d,在流域下游持续湿期由北向南逐渐减少,最小持续湿期为 10 d。

综上所述,金沙江流域下游降水强度和频率同步上升,反映出季风降水的强化,需重点防范短时强降雨引发的次生灾害;中游地区降水总量相对较少但湿期较长,易出现连阴雨天气,需优化排水系统;上游地区降水较多,未来若变暖导致相态转变,可能加剧冰川消融与径流变异,需加强冰雪融水监测。

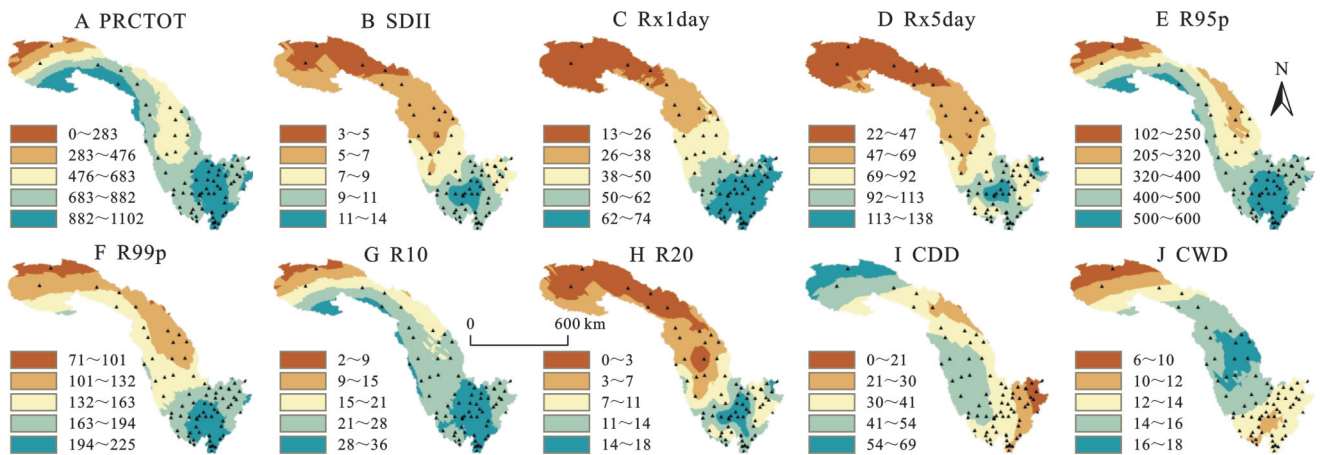


图 7 极端降水指数的时空分布

Fig. 7 Spatiotemporal distribution of extreme precipitation indices

3.3 极端气候的综合风险评价

极端气候对人类健康、作物产量、生态系统和基础设施所造成的综合风险严重威胁人类社会安全和自然生态安全^[4,20]。在极端气候的危险性、脆弱性和综合风险评估方面,国内外学者都取得了不少成果,主要体现在不同致灾因子结合不同评估模型的计算,针对不同承灾体根据其环境分析其脆弱性。本研究采用层次分析法(AHP)^[20]确定极端气候综合风险评价的指标体系,选取时空演变特征中具有代表性的极端指数 TX_x、TN_n、PRCPTOT、CDD、GSL、ID

为方案层^[25]构建综合判断矩阵。判断矩阵构建权重及一致性检验见表 4 和表 5。

根据上述综合风险评价指标权重,得出极端气候的综合风险评价等级图,如图 8 所示。图中危险性分布与综合风险评价的风险分布相似。暴露性和脆弱性在上游发生重大风险概率较大,所占面积为流域面积的 9.4%~10.9%,下游风险较小;综合风险评价上游地区发生重大风险概率较高,所占面积为流域面积的 17.8%,较大风险区占 22.8%,一般风险区占 27.7%,较低风险区占 28.5%,低风险区占 3.2%;

整体来说,金沙江流域的上游地区发生极端气候的风险更高,下游地区风险较低。

4 讨论

金沙江流域中上游地区的极端气温指数变化趋势明显,如霜冻日数呈下降趋势,而热夜日数呈上升趋势,这表明流域内 1960—2010 年的气温呈上升趋势,且下游地区的生长期长度呈上升趋势,说明下游地区的生态更加稳定,承灾能力相比上游更强。流域内的年降水量整体呈上升趋势,且呈现很大的波动,与赵庆由等^[26]的研究结果一致。金沙江流域内的极端气温上游高下游低,极端降水则是下游降水较多,这与流域的地貌结构有关。流域上游呈高山峡谷地貌,中下游呈南高北低的地貌格局,形成了在不同地域气温分布及降水分配的差异。这一发现与 Xu 等^[6]对珠江流域极端降水海拔依赖性的研究形成对比,表明不同流域的

地形—气候相互作用机制存在显著差异,凸显了金沙江流域作为高原—盆地过渡带的独特性。

表 4 极端气候综合风险评价指标权重

Table 4 Weights of indicators for comprehensive risk assessment of extreme climate events

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重
危险性	0.5	暴雨	0.175
		干旱	0.571
		高温	0.171
		低温	0.063
暴露性	0.25	人口密度	0.101
		经济指标	0.226
		农作物面积	0.674
脆弱性	0.25	敏感性	0.750
		恢复能力“—”	0.250

注:“—”为负向指标,其余为正向指标。

表 5 方案层判断矩阵汇总结果

Table 5 Summary results of judgment matrices at scheme levels

指标层/方案层	TXx	TNn	PRCPTOT	CDD	GSL	ID	CR 值	一致性检验	
危险性	暴雨	0.132	0.045	0.601	0.072	0.095	0.054	0.064	通过
	高温	0.628	0.041	0.118	0.088	0.070	0.055	0.076	通过
	低温	0.048	0.604	0.055	0.052	0.061	0.179	0.052	通过
	干旱	0.473	0.038	0.097	0.236	0.109	0.046	0.037	通过
暴露性	人口密度	0.082	0.082	0.263	0.099	0.332	0.142	0.042	通过
	经济指标	0.092	0.092	0.288	0.130	0.275	0.124	0.052	通过
	农作物面积	0.056	0.056	0.223	0.108	0.458	0.099	0.041	通过
脆弱性	敏感性	0.153	0.096	0.079	0.150	0.217	0.306	0.093	通过
	恢复能力	0.086	0.077	0.334	0.136	0.221	0.146	0.027	通过

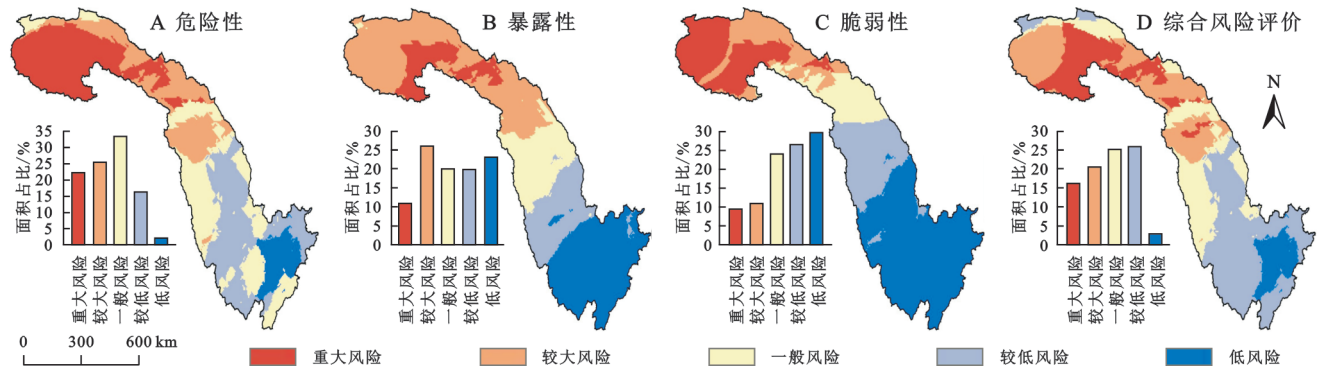


图 8 极端气候的综合风险评价等级

Fig. 8 Levels of comprehensive risk assessment for extreme climate events

与唐瑜聪^[9]和王健鹏^[10]等研究相比,本研究基于危险性、暴露性和脆弱性三大维度,并引入暴雨、干旱、高温、低温等多重致灾因子,以及人口密度、经济指标等社会要素,对极端气候综合风险进行全面评价。结果表明,金沙江上游地区发生极端气候的综合风险最大,这可能是由于流域上游的地理位置和地貌形态造就了我国南方极为典型的生态脆弱地

带^[11,26]。水土流失、环境污染等多方面的生态环境问题导致其发生极端气候灾害风险重大^[27]。

因此,针对综合风险最高的金沙江上游地区,需加强水土保持综合治理^[28],着力解决水土流失的瓶颈问题,加大水土保持监督执法力度,充分发挥生态自然修复的作用,对高风险区进行生态补偿措施,改善生态环境,降低极端气候灾害风险^[26-28]。基于“生

态整体保护智慧”^[28-29]这一共识性的理念建立生态屏障,在此基础上进行全面系统的生态建设规划,将金沙江流域划分出不同的生态类型区,明确各生态类型区在金沙江流域生态环境建设中的地位、功能和建设标准,并制定出生态建设各项重大工程的实施区域、时序和实施措施^[30],预防极端气候灾害发生。

通过探究金沙江流域的极端气候时空特征及其综合风险评价,有利于加强流域的极端气候灾害防范和预警机制,帮助水电调配规划,有利于自然、社会、经济系统的耦合^[28-30],以此充分应对及预防生态脆弱和极端气候导致的灾害风险。

5 结论

(1)金沙江流域中游的霜冻指数(FD)呈明显的下降趋势,夏天日数呈明显上升趋势。全流域的霜冻日数呈现下降趋势,而生长长期长度呈缓慢上升趋势。流域指数突变期集中在70年代和80年代,且下游地区的突变期更长,发生突变的指数也更多。流域内的极端高温、低温和生长长期长度都呈现流域下游高上游低,平均温差流域上游至下游逐渐降低。

(2)金沙江流域极端降水指数的年降水量(PRCPTOT)变化相对较大,有上升也有下降趋势;强降水量(R95p)在流域中下游变化较为明显;极强降水量(R99p)在全流域呈缓慢上升趋势。流域中游地区的指数突变主要发生在1975—1980年,上游和下游地区的突变期则在70年代和80年代。流域内的降水量和降雨强度等都呈上游低下游高,持续干旱期则呈现上游高下游低。

(3)基于AHP的综合风险结果表明,金沙江流域的上游地区风险较高,下游地区风险等级较低。综合风险评价的重大风险所占面积为17.8%,较大风险区占22.8%,一般风险区占27.7%,较低风险区所占面积最多,为28.5%,低风险区所占面积最小,为3.2%。

参考文献(References):

- [1] Dai X, Wang L C, Gong J, et al. Extreme weather characteristics and influences on urban ecosystem services in Wuhan Urban Agglomeration [J]. *Geography and Sustainability*, 2025, 6(1):100201.
- [2] 曹永旺,延军平.1961—2013年山西省极端气候事件时空演变特征[J].*资源科学*,2015,37(10):2086-2098.
Cao Y W, Yan J P. Temporal and spatial analysis of extreme climatic events in Shanxi Province from 1961 to 2013[J]. *Resources Science*, 2015, 37(10):2086-2098.
- [3] Jiang J, Wang Z L, Zhang Z X, et al. Extreme drought-heatwave exacerbates water quality deterioration in China [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170:113008.
- [4] Tian R K, Li J H, Zheng J H, et al. The impact of compound drought and heatwave events from 1982 to 2022 on the phenology of Central Asian grasslands [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 365:121624.
- [5] Hao Z C, Hao F H, Xia Y L, et al. Compound droughts and hot extremes: characteristics, drivers, changes, and impacts [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 235:104241.
- [6] Xu F, Zhou Y Y, Zhao L L. Spatial and temporal variability in extreme precipitation in the Pearl River Basin, China from 1960 to 2018 [J]. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(2):797-816.
- [7] Hu X F, Cao J, Qian Y G, et al. Extreme heat events in mainland China from 1981 to 2015: spatial patterns, temporal trends, and urbanization impacts [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 100:104999.
- [8] 祝莹,敖天其,陈婷,等.沱江流域汛期极端降水事件时空演变特征[J].*水电能源科学*,2021,39(7):1-4,15.
Zhu Y, Ao T Q, Chen T, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of extreme precipitation events during flood period in Tuojiang River Basin [J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(7):1-4, 15.
- [9] 许浩然,杨兆前,陈中举,等.湖南省极端气候时空特征分析及风险评估[J].*科学技术与工程*,2024,24(9):3543-3553.
Xu H R, Yang Z Q, Chen Z J, et al. Temporal and spatial characteristics analysis and risk assessment of extreme climate in Hunan Province [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(9):3543-3553.
- [10] 王建鹏,金丽娜,薛荣,等.基于加权综合法的西安市内涝灾害区划分析[J].*气象科技*,2012,40(6):1056-1060.
Wang J P, Jin L N, Xue R, et al. Disaster regionalization of urban waterlogging over Xi'an based on weighting synthesis method [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2012, 40(6):1056-1060.
- [11] 史雯雨,杨胜勇,李增永,等.近57年金沙江流域气温变化特征及未来趋势预估[J].*水土保持研究*,2021,28(1):211-217.
Shi W Y, Yang S Y, Li Z Y, et al. Variation characteristics and the future trend estimation of temperature in chinsha river basin over the past 57 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1):211-217.
- [12] 雷生鑫,尹鑫,刘何静,等.黄河羊曲水电站河岸缓冲带生态安全评价与功能区划[J].*中国水土保持*,2024(11):16-21.
Lei S X, Yin X, Liu H J, et al. Ecological security assessment and functional zoning of the riverside buffer zone of the Yellow River Yangqu hydropower station [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2024(11):16-21.
- [13] 郝东敏.电力系统防御极端天气气候灾害的策略措施研究[J].*中国软科学*,2010(S2):38-42.
Hao D M. Power system disasters defense strategy of

- extreme weather climate[J]. *China Soft Science*, 2010(S2):38-42.
- [14] 国家气象信息中心. 中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)[DS/OL]. (2012-05-31)[访问日期:2024.06.10].
National Meteorological Information Center. Daily Data Set of Basic Meteorological Elements from National Ground Meteorological Stations in China (V3.0) [DS/OL]. (2012-05-31)[Date of visit:2024.06.10]
- [15] Nalbantis I, Koutsoyiannis D. A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems [J]. *Water Resources Research*, 1997,33(9):2165-2177.
- [16] Ahmadianfar I, Samadi-Koucheksaraee A, Asadzadeh M. Extract nonlinear operating rules of multi-reservoir systems using an efficient optimization method [J]. *Scientific Reports*, 2022,12:18880.
- [17] 杨晨,董晓华,董立俊,等. 雅砻江流域1961—2018年极端气候时空演变研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(2):46-56,65.
Yang C, Dong X H, Dong L J, et al. Research on the temporal and spatial evolution of extreme climate in the yalong river basin from 1961 to 2018 [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(2):46-56,65.
- [18] 孟钰,徐文静,管新建,等. 淮河上游径流变化多元影响因素敏感性及其贡献率分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2024,32(3):801-812.
Meng Y, Xu W J, Guan X J, et al. Sensitivity and contribution rate analysis of multiple factors affecting runoff change in the upper Huaihe River [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024,32(3):801-812.
- [19] Yang Y, Jia M Y. 3D spatial interpolation of soil heavy metals by combining Kriging with depth function trend model [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 461:132571.
- [20] 李泉. 基于层次分析法的桥梁施工安全风险评估[J]. *科学技术创新*, 2024(15):195-198.
Li Q. Safety risk assessment of bridge construction based on hierarchical analysis method [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2024(15):195-198.
- [21] 张月霞,王辉. 台风风暴潮灾害风险评估研究综述[J]. *海洋预报*, 2016,33(2):81-88.
Zhang Y X, Wang H. Review of risk assessment of typhoon storm surge disaster [J]. *Marine Forecasts*, 2016,33(2):81-88.
- [22] Zscheischler J, Westra S, van den Hurk B J J M, et al. Future climate risk from compound events [J]. *Nature Climate Change*, 2018,8(6):469-477.
- [23] Hao Z C, Chen Y. Research progresses and prospects of multi-sphere compound extremes from the Earth System perspective [J]. *Science China Earth Sciences*, 2024,67(2):343-374.
- [24] Yu R, Zhai P M. Changes in compound drought and hot extreme events in summer over populated Eastern China [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2020,30:100295.
- [25] Pan Z Z, Gao G Y, Fu B J. Spatiotemporal changes and driving forces of ecosystem vulnerability in the Yangtze River Basin, China: quantification using habitat-structure-function framework [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,835:155494.
- [26] 赵庆由,明庆忠. 1971—2009年金沙江流域气候变化特征及对生态环境的影响[J]. *气象与环境学报*, 2010,26(6):18-23.
Zhao Q Y, Ming Q Z. Climate change characteristics and its effect on ecological environment from 1971 to 2009 in the Jinsha river valley of Yunnan Province [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2010,26(6):18-23.
- [27] 刘俸汝,赵俊三,林伊琳,等. 基于气候和土地利用变化的云南省水源涵养功能时空演变及驱动力分析[J]. *水土保持学报*, 2024,38(5):212-224.
Liu F R, Zhao J S, Lin Y L, et al. Temporal and spatial evolution and driving force analysis of water conservation function in Yunnan Province based on climate and land use change [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(5):212-224.
- [28] 田培,任益伶,陈妍. 水土保持措施识别与提取方法的研究进展[J]. *水土保持学报*, 2024,38(5):1-9.
Tian P, Ren Y L, Chen Y. Research progress on identification and extraction methods of soil and water conservation measures [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(5):1-9.
- [29] 杨庆媛,汪军,王锡桐,等. 云南省金沙江流域生态环境建设的问题与对策研究: 长江上游生态屏障建设重点地区调查报告之一 [J]. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2003,28(3):487-491.
Yang Q Y, Wang J, Wang X T, et al. Studies of the problem and the countermeasure to ecological environment construction in Jinshajiang River valleys of Yunnan Province: one of the research reports of the ecological barrier's keystone regions in the Changjiang River upper reaches [J]. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science*, 2003,28(3):487-491.
- [30] 杜香玉,周琼. 生态命运共同体视野下中国本土生态智慧的理念表达与实践路径 [J]. *云南社会科学*, 2020(4):100-107.
Du X Y, Zhou Q. The idea expression and practice path of China local ecological wisdom from the perspective of ecological destiny community [J]. *Social Sciences in Yunnan*, 2020(4):100-107.