

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.030

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.030

陈新森, 张国涛, 钱晓鹤, 等. 岷江上游山洪灾害的时空演变特征及驱动力[J]. 水土保持学报, 2026, 40(1): 297-309.

CHEN Xinsen, ZHANG Guotao, QIAN Xiaohe, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and driving forces of flash flood disasters in upper Minjiang River basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1): 297-309.

岷江上游山洪灾害的时空演变特征及驱动力

陈新森¹, 张国涛^{2,3}, 钱晓鹤², 张军龙⁴, 马超¹, 李朝月², 靳文⁵, 王中根⁶

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 应急管理部国家减灾中心灾害链监测评估与风险防范应急管理部重点实验室, 北京 100124; 4. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358; 5. 应急管理部国家减灾中心, 北京 100124; 6. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085)

摘要: [目的] 揭示岷江上游山洪灾害时空演变规律及其气候-地形-人类活动耦合驱动山洪灾害发生机制, 阐明灾害形成过程, 为区域防灾规划提供理论依据。[方法] 基于1953—2023年岷江流域山洪灾害实录数据, 结合小波分析、B-G分割、地理探测器等方法, 系统揭示山洪灾害的年际演变规律、季节分布特征、空间集聚格局及多因子耦合作用。[结果] 1) 山洪灾害年际呈显著增长趋势, 2014—2023年山洪频次占总数63.6%, 峰值年为2022年(92次), 呈现56 a主周期与8 a次周期叠加特征; 2) 空间上集中分布在平均坡度 $>24.6^\circ$ 、面积 $<77.8 \text{ km}^2$ 的小流域, 71.1%的灾点位于断层10 km范围内, 茂县、汶川县与大邑县合计占比达52.9%, 尤为集中; 3) 气象因子主导空间分异性(贡献值 $q=0.558$), 农田与不透水面扩张($q=0.539$)及陡峭地形($q=0.502$)形成协同效应, 多因子交互作用(如断层与人类活动耦合 $q=0.81$)显著加剧风险。[结论] 岷江流域山洪灾害发育受“构造-季风”双重控制, 且灾害多发区具有明确的地形与水热特征, 降水与人类活动下垫面为主因, 交互增强风险, 人类工程扰动叠加极端气候可诱发特大山洪灾害链。研究结果拓展了山洪灾害的可预测性与可量化评估路径, 对山洪灾害区域的风险防控具有重要的指导意义。

关键词: 山洪灾害; 岷江上游; 时空演变; 多因子耦合; 地理探测器; 小波分析

中图分类号: TV122

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0297-13

Spatiotemporal Evolution Characteristics and Driving Forces of Flash Flood Disasters in Upper Minjiang River Basin

CHEN Xinsen¹, ZHANG Guotao^{2,3}, QIAN Xiaohe², ZHANG Junlong⁴,
MA Chao¹, LI Chaoyue², JIN Wen⁵, WANG Zhonggen⁶

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Disaster Chain Monitoring, Assessment and Risk Prevention, National Disaster Reduction Center of China, Ministry of Emergency Management, Beijing 100124, China; 4. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China; 5. National Disaster Reduction Center of China, Ministry of Emergency Management, Beijing 100124, China; 6. National Institute of Natural Disaster Prevention, Ministry of Emergency Management, Beijing 100085, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the spatiotemporal evolution patterns of flash flood disasters in the Upper Minjiang River basin and their coupled driving mechanisms driven by climate, topography, and human activities, to elucidate the disaster formation process, and to provide a theoretical basis for regional disaster prevention planning. [Methods] Based on recorded flash flood disaster data (1953—2023) of the Minjiang River Basin, and by integrating methods including wavelet analysis, B-G segmentation, and geodetector, the interannual evolution patterns, seasonal distribution characteristics, spatial agglomeration patterns, and multi-

收稿日期: 2025-07-27

修回日期: 2025-09-06

录用日期: 2025-10-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-03

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3012701, 2022YFC3002902); 国家自然科学基金项目(42201086)

第一作者: 陈新森(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事山洪泥石流水文机理与灾害防控理论研究。E-mail: 15610295235@163.com

通信作者: 张国涛(1991—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事山洪泥石流水文机理与灾害防控理论研究。E-mail: zhangguotao@igsrr.ac.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

factor coupling effects of flash flood disasters were analyzed. [Results] 1) Flash flood disasters showed a significant increasing trend interannually. The frequency from 2014 to 2023 accounted for 63.6% of the total, with the peak year being 2022 (92 events). The disasters exhibited a superposition of a 56-year primary cycle and an 8-year secondary cycle. 2) Spatially, the disasters were concentrated in small watersheds with an average slope greater than 24.6° and an area less than 77.8 km^2 . Specifically, 71.1% of disaster sites were located within 10 km of faults, and Maoxian, Wenchuan, and Dayi counties together accounted for 52.9%, indicating a high concentration. 3) Meteorological factors dominated the spatial differentiation ($q=0.558$). Farmland and impervious surface expansion ($q=0.539$) and steep terrain ($q=0.502$) exhibited synergistic effects. Multi-factor interactions (e.g., the coupling of faults and human activities, $q=0.81$) significantly increased the risks. [Conclusion] The occurrence of flash flood disasters in the Minjiang River basin is dually controlled by "tectonic and monsoon" factors. Moreover, disaster-prone areas possess distinct topographic and hydrothermal characteristics. Precipitation and human-induced changes to the underlying surface are the primary causes, and their interaction enhances risks. Furthermore, human engineering disturbances combined with extreme climate conditions can trigger severe flash flood disaster chains. The research findings expand the pathways for predictability and quantifiable assessment of flash flood disasters and provide important guidance for risk prevention and control in flash-flood-prone areas.

Keywords: flash flood disasters; Upper Minjiang River basin; spatiotemporal evolution; multi-factor coupling; geodetector; wavelet analysis

Received: 2025-07-27

Revised: 2025-09-06

Accepted: 2025-10-10

Online(www.cnki.net): 2025-11-03

山洪通常是由暴雨、冰雪融水等单个或多个因子组合而引发的极端地表径流过程,常发生在 $<200 \text{ km}^2$ 的山丘区流域,并伴有滑坡、崩塌、泥石流等复合链生灾害^[1],严重威胁下游居民人身财产安全与重大工程安全^[2]。深入研究山洪灾害的时空格局与影响因素,能够为区域灾害精准预警、科学防治规划制定及生态环境保护与修复提供关键的科学依据,具有重要的现实意义^[3]。山洪灾害的孕灾环境改变即是水源条件、能量条件及其若干条件组合的变化^[4],受区域环境影响极为显著。目前,研究多倾向于选取某一特定单一流域,或聚焦局部区域内的极端气候事件(如洪水、干旱等)作为切入点,以探究洪水在长时间尺度下的演变规律与气候系统间的内在关联^[5]。

山洪时空演变研究已从单一区域描述转向多尺度机制解析。如美国 Turkey 河流域的研究^[6]表明,小流域($<200 \text{ km}^2$)山洪对降雨时间变率更敏感,而大流域($>2000 \text{ km}^2$)则受降雨空间变异主导;地中海西班牙地区的极端山洪事件呈显著的地形梯度效应,高程 $>1000 \text{ m}$ 区域的灾害频次是平原区的3.2倍^[7]。国内学者聚焦于区域分异特征,如熊俊楠等^[8]研究发现,西南地区山洪灾害在横断山区干热河谷呈现“陡地形-少植被-强降雨”的耦合模式;而孙珑等^[9]研究揭示,黄土高原山洪风险与土壤侵蚀模数呈显著正相关($R^2=0.67$)。在影响因素方面,国外研究多关注降雨特征与地貌因子的交互作用。SAHARIA

等^[10]基于21143次山洪事件发现,当累计降水 $>280 \text{ mm}$ 时,坡度指数与降雨的交互作用可解释77%的瞬间度(Flashiness)变异;ZHOU等^[11]对夏洛特都市圈的分析表明,不透水率 $>40\%$ 的流域单位流量峰值较自然流域高57%。中国学者则强调地质构造的独特作用,如靳文等^[12]通过汶川地震案例证实,震后松散物质(增加43%)与暴雨的耦合使山洪发生频次提升2.8倍,而胡涛等^[13]研究发现,赣江上游流域坡度每增加 5° ,山洪发生概率提升22%。

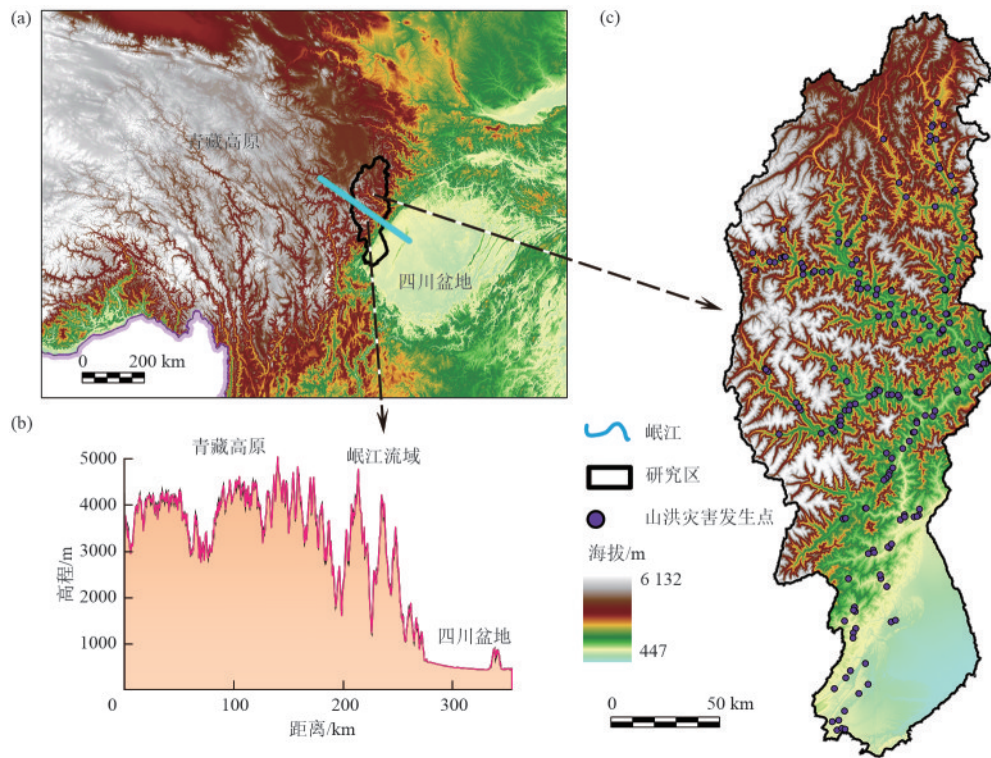
基于上述背景,本研究拟解决以下关键问题:1953—2023年岷江流域山洪灾害的年际与季节演变规律,是否存在显著的周期性 with 突变特征;山洪灾害的空间分布与地形、地质、气候因子的耦合关系与灾害易发区间的形成机制;气象因子(如降水、气温)、地质因子(如断层活动)与人类活动因子(如下垫面变化)对山洪灾害的相对贡献,多因子交互作用对灾害风险影响。据此提出科学假设:岷江流域山洪灾害的时空格局受“构造活动主导的地质背景”与“季风驱动的气候条件”共同控制,且人类活动(如土地覆盖变化)通过改变下垫面性质加剧灾害风险。通过分析岷江流域山洪灾害的时空特征及影响因素,揭示气候、地形与人类活动在山洪灾害形成中的复杂耦合作用,明确灾害发育机制与高风险靶区,为灾害预警和防治提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

岷江流域地处青藏高原向四川盆地的过渡地带(30°06′~33°10′N, 102°35′~103°56′E), 面积约 28 060 km², 地势北高南低, 海拔 447~6 132 m, 地形起伏剧烈^[14](图 1)。地处新近纪印度板块与亚欧板块交接区域, 断层发育, 构造运动活跃, 地

质条件复杂^[15]。受东南季风和西南季风影响, 降水集中在 6—9 月, 年降水量为 681~1 525 mm, 气温 -7.59~17.18 °C, 雨热同期, 季节变化明显。流域内植被类型丰富, 但山洪、滑坡等灾害频发, 使得生态环境较为脆弱^[16], 加之人类活动活跃, 对流域内生态环境和水文条件有着一定程度的干扰^[17]。



注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2023)2767号的标准地图制作,底图边界无修改。

图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 Morlet 小波分析法 Morlet 小波 (Morlet Wavelet) 是一种复值小波, 因其良好的时频局部化特性, 可用于地球物理信号处理^[18], 用 Morlet 小波分析对岷江流域山洪灾害年份和频次数据处理, 探究山洪灾害的周期性变化, 得到小波系数实部周期图与小波方差图, 通过其对山洪灾害发生频次, 可分析山洪灾害发生规律。标准 Morlet 小波的母小波定义为高斯窗调制的复正弦函数, 公式为:

$$\psi_{(t)} = e^{ik_0 t} e^{-t^2/(2\sigma^2)} \quad (1)$$

式中: k_0 为中心频率, 无量纲, 决定正弦波的振荡频率; σ 为高斯窗的标准差, 控制时间局部化程度; i 为虚数单位。

对信号 $x_{(t)}$, Morlet 小波变换定义为:

$$W_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

式中: $\bar{\psi}$ 为共轭复数, 变换结果 $W_x(a, b)$ 关于尺度 a

(对应频率) 和平移 b (对应时间) 的复值函数, 其模值表示信号在对应时频点的能量密度。

1.2.2 核密度估计 核密度估计 (kernel density estimation, KDE) 是一种非参数统计方法, 用于估计随机变量的概率密度函数 (PDF), 通过“核函数”对样本点进行加权平滑, 从而灵活地拟合数据的真实密度形态^[19]。本文采取核密度面积单位为 km², 计算单位面积内的山洪灾害量值用于后续地理探测器分析的因变量, 计算任一点 x 的核密度估计值公式为:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (3)$$

式中: K 为核函数; h 为带宽, 控制平滑程度, h 越小, 估计越贴近样本细节, h 越大, 估计越平滑; $\frac{1}{nh}$ 为归一化因子。

1.2.3 B-G 分割算法 Bernaola-Galavan (B-G) 分割算法是一种基于统计分析的时间序列突变检测方

法,主要用于识别非平稳序列中的结构变化点(如趋势、周期性或均值突变等),通过递归计算时间序列的 t 检验统计量,逐段分割出具有显著统计差异的子序列^[19]。对岷江流域山洪灾害发生频次进行逐段分割,确定山洪灾害发生的突变点,核心思路为:

对时间序列 $X(t)\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,从左到右依次计算每个点左右两边平均值 $U_1(i)$ 、 $U_2(i)$ 和标准偏差 $s_1(i)$ 、 $s_2(i)$,第 i 点合并偏差为 S_D :

$$S_D = \left[\frac{(N_1 - 1) \times s_1(i)^2 + (N_2 - 1) \times s_2(i)^2}{N_1 + N_2 - 2} \right]^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right] \quad (4)$$

$$T(i) = \left| \frac{U_1(i) - U_2(i)}{S_D} \right| \quad (5)$$

式中: N_1 、 N_2 分别为第 i 点左右两边点数; $T(i)$ 为衡量左右差异的统计量,对 $T(i)$ 进行显著性检验,通过将序列分割成2个子序列,再进行子序列显著性检验,直到 $T(i)$ 不通过显著性检验,则突变完成。

1.2.4 地理探测器 地理探测器(GeoDetector)是一种基于统计学原理,计算影响因子的层内和层间方差,分析其空间异质性来揭示地理现象驱动力的研究方法^[20]。可用地理探测器研究环境因子对山洪空间分布的相对影响。影响山洪灾害的因子众多,其中气象、地形地貌、地质活动、人类活动等是常用分析因子^[21],本文从山洪灾害发生的气象水源条件[平均年降水量(mean annual precipitation, MAP)、最湿月降水量(precipitation of wettest month, PWM)、最湿季度降水量(precipitation of wettest quarter, PWQ)、干燥度指数(aridity index, AI)、年平均气温(mean annual temperature, MAT)、最暖月最高温度(maximum temperature of warmest month, MTWM)]、沙源条件与地质条件[土壤平均厚度、峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)、灾害点断层距离]、势能转化条件(沟谷纵比降、平均坡度、平均海拔、流域高差)、水力搬运条件[地形湿度指数(topographic wetness index, TWI)、水流动力指数(stream power index, SPI)、Melton指数、沟谷密度]、人类活动因子[归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、人类用地(农田和不透水面在小流域面积占比)]等方面分析山洪灾害的时空特征与发育过程人类用地。

地理探测器模型通过计算 q 值来衡量影响因子对地理现象的影响程度,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{l=1}^L N_l \sigma_l^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (6)$$

$$SSW = \sum_{l=1}^L N_l \sigma_l^2 \quad (7)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (8)$$

式中: q 为自变量对因变量的影响程度,取值为0~1,越接近1,说明自变量与因变量的相关性越强,反之则与因变量的相关性越弱; l 为1~ L 是自变量的分类; N_l 和 N 是第 l 层内和研究区内的单元数; σ_l^2 和 σ^2 为第 l 层和研究区的方差;SSW和SST是层内和层间方差之和。

1.3 数据获取

山洪灾害通常发生于不受监管的偏远山区流域内,由于数据记录的复杂性,空间上降水和流量监测存在极大不确定性,致使山洪灾害记录与编目通常不完善或不准确,更有甚者对相关年份记录的缺失,如早期(1953—1982年)数据存在显著缺失,山洪灾害数据受记录完整性在一定程度上限制论文的相关结论。同时归一化植被指数与土地覆盖类型数据仅覆盖1990年至今,难以捕捉1990年前人类活动对流域下垫面的长期改造(如森林砍伐、耕地扩张),致使人类活动因子(如农田与不透水面在小流域面积占比)的评估存在时间尺度的偏差和局限性。

本文采用的数字高程(DEM)数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),采用ASTER GDEM V3产品,空间分辨率为30 m×30 m。山洪灾害数据来源于水利部,共收集全国30个省、305个市和2 058个县(区)的历史山洪灾害数据(<http://www.qgshzh.com/>),以及地方志、地方洪涝灾害通报、各类媒体报道等途径。气象数据来源于WorldClim(<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>),空间分辨率为1 km×1 km,重采样为30 m×30 m。归一化植被指数NDVI来源于资源环境科学数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>),空间分辨率为1 km×1 km,重采样为30 m×30 m。土地覆盖类型数据来源于Earth System Science Data(<https://doi.org/10.5281/zenodo.12779975>),空间分辨率为30 m×30 m。干燥度指数(AI)来源于figshare(https://figshare.com/articles/dataset/Global_Aridity_Index_and_Potential_Evapotranspiration_ET0_Climate_Database_v2/7504448/5)空间分辨率为1 km×1 km,重采样为30 m×30 m(表1),由此对表2参数进行计算。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

| 数据类型 | 数据来源 |
|------------|---|
| 地形数据 | DEM从地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)获取,采用ASTER GDEM V3产品,空间分辨率为30 m×30 m |
| 山洪灾害数据 | 水利部历史山洪灾害数据(http://www.qgshzh.com/)、地方志、地方洪涝灾害通报、各类媒体报道等途径 |
| 气象数据 | WorldClim(https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html),空间分辨率为1 km×1 km,重采样为30 m×30 m |
| 植被数据 | 资源环境科学数据注册与出版系统的植被NDVI数据(http://www.resdc.cn/DOI),2018.DOI:10.120 78/2 018 060 601,空间分辨率为1 km×1 km,重采样为30 m×30 m |
| 土地利用 | Earth System Science Data(https://doi.org/10.528 1/zenodo.127 79 975),空间分辨率为30 m×30 m |
| 干燥度指数(AI) | https://figshare.com/articles/dataset/Global_Aridity_Index_and_Potential_Evapotranspiration_ET0_Climate_Database_v2/7 504 448/5 空间分辨率为1 km×1 km,重采样为30 m×30 m |
| 峰值加速度(PGA) | https://www.globalquakemodel.org/products ,空间分辨率为1 km×1 km,重采样为30 m×30 m |
| 断层 | https://journals.sagepub.com/doi/10.117 7/8755293020944182 |
| 土壤厚度 | Depth-to-bedrock Map of China at a Spatial Resolution of 100 meters(https://doi.org/10.608 4/m9.figshare.c.471 4 514.v1)空间分辨率100 m×100 m,重采样为30 m×30 m |

表 2 地貌参数计算公式与释义
Table 2 Calculation formulas and definitions of geomorphic parameters

| 名称 | 公式 | 释义 |
|-----------|--|---|
| 地形湿度指数 | $TWI = \ln\left(\frac{A}{\tan S}\right)$ | A 为上游流域面积;S 为坡度;TWI 反映地势变化及其对地表径流的影响,是对潜在土壤水分和产流能力的量化,越大土壤含水量越易达到饱和 |
| 水流动力指数 | $SPI = \ln(A \times \tan S)$ | A 为上游流域面积;S 为坡度;SPI 为衡量流水侵蚀力 |
| Melton 指数 | $R_m = \frac{dH}{\sqrt{A}}$ | 可反映流域中的泥沙输移机制。 R_m 值越大,泥沙输移主要以泥石流为主; R_m 值越小,泥沙输移主要以洪水为主 |
| 沟谷纵比降 | $i = \frac{\Delta z}{L} \times 1000\%$ | 纵比降也即纵坡降,以千分率或万分率表示。沿沟谷方向的高程差与相应的沟谷长度的投影(即水平距离)之比 |
| 平均坡度 | — | 决定松散物的汇水条件与启动条件 |
| 平均海拔 | — | 描述区域地形基础特征 |
| 流域高差 | — | 体现流域内地形起伏的剧烈程度,影响流域内水流汇流速度 |
| 沟谷密度 | $GD = \frac{\sum N}{A}$ | $\sum N$ 为沟谷中总沟壑长度,沟壑密度影响径流量、含沙量,影响沟谷的汇水能力 |

2 结果与分析

2.1 时间变化特征

岷江流域 1953—2023 年山洪灾害共发生 484 次,年平均发生 6.5 次,最大值为 92 次(2022 年)。1953—1983 年,山洪灾害总数为 18,占总数的 3.7%,山洪灾害发生频率极低,山洪灾害发生峰值年份为 1983 年,发生山洪灾害 4 次,占阶段总数 22.2%;1984—1993 年,山洪灾害总数为 13,占总数的为 2.7%,仍处于低发期,无明显的峰值年份;1994—2013 年,山洪灾害总数为 55 次,占总数的为 11.4%,灾害频次有所上升,峰值年份为 2015 年,发生山洪灾害 13 次,占阶段总数的 23.6%;2014—2023 年,山洪灾害总数为 308 次,平均数为 31 次,占总数的 63.6%,峰值年份为 2022 年,发生山洪灾害 92 次,占阶段总数 29.9%,在此阶段内 2018 年和 2013 年山洪灾害也十分明显,山洪灾害分

别发生 74 次和 85 次,占阶段总数的 24% 和 27.6%。纵观岷江流域 1953—2023 年山洪灾害发生趋势发现,岷江流域山洪灾害发生次数急剧增加,尤其 1953—2023 年增长态势十分显著,岷江流域山洪灾害发生次数变异系数大,呈现出的数据波动性极大。1983 年、2018 年、2020 年、2022 年属于发生灾害事件峰值年份,在划分的山洪灾害发生年际阶段内反映出年度间灾害发生次数波动大(图 2a)。

岷江流域山洪灾害发生次数在 1953—2023 年集中于 6—9 月,占总数的 95.2%,并呈明显的季节性波动,不同季节的灾害发生次数差异显著。夏季(6—8 月)为岷江流域山洪灾害的高发季节,7 月山洪灾害次数达到峰值,为 185 次,是全年灾害最集中的月份;8 月次之,为 155 次;6 月为 43 次;3 个月的山洪灾害次数总和为 383 次,占据山洪总灾害次数的

79.1%，与夏季降水集中、强度大的气候特征密切相关，大量降水极易引发山洪。秋季(9—10月)中，9月发生78次，10月发生5次，共计83次，占据山洪

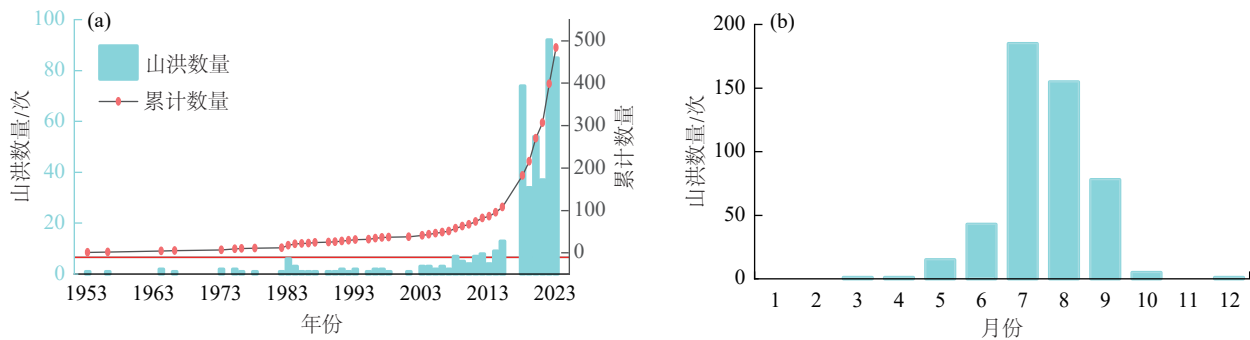


图2 1953—2023年山洪灾害发生年际和月际变化

Fig.2 Interannual and monthly variations of flash flood disasters from 1953 to 2023

小波方差趋势曲线显示，随时间尺度增大，小波方差先有一个较小的峰值后显著上升，表明岷江流域山洪灾害发生时间周期跨度大，方差总趋势增加，但不稳定，有2个周期，分别以8、56 a为周期，周期跨度大，在较长时间尺度上，岷江流域山洪灾害发生频次的波动性增强，该时间尺度下的周期性变化更为显著(图3a)。岷江流域小波实部周期图反映不同时间尺度周期性特征的时空演变，特定年份段内，56 a大时间尺度的颜色变化明显，对应周期性较强；在2020年附近，8 a小时间尺度区域颜色变化剧烈，表明近期短周期变化显著，表明山洪灾害发生频次是在56 a的大时间尺度上演化的，该时间尺度下周期信号波动最强，变化最突出，周期性最明显，是岷江流域山洪灾害发生频次的主周期(图3b)。在山洪灾害发生频次预测研究中，基于长周期数据统计规律的考量，需将56 a作为基础时间尺度框架，符合水文系统长期演变的周期性特征，在56 a的长时序分析框架下，应对8 a时间尺度的短周期波动特征予以重点关注。

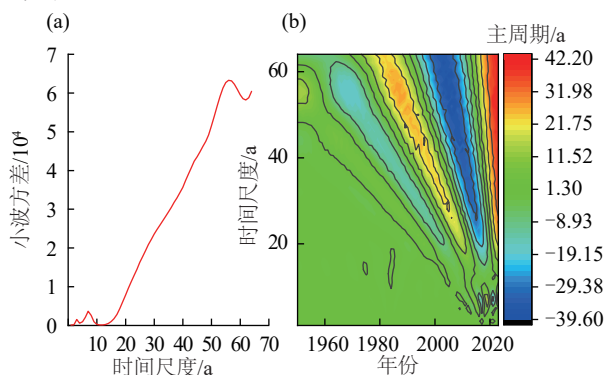


图3 岷江上游灾害小波方差图与小波实部周期

Fig.3 Wavelet variance and real part periodogram of flash flood disasters in Upper Minjiang River basin

基于B-G分割算法^[19]对岷江流域山洪灾害时序突变过程进行分析，1953—1973年山洪频次少；到

总灾害次数的17.1%。春季(3—5月)中，山洪灾害次数较少且分布零散，占据山洪总灾害次数3.0% (图2b)。

1982年和1984年有突变分割线，表示该段时间突变密集；山洪原始序列间隔平均线在1983年有个小高峰，之后又平稳；2003年、2007年又有突变分割线，2017年后，山洪频次原始序列线大幅上升，说明山洪频次剧增，山洪原始序列间隔平均线也同时上升。表明在1953—1973年，山洪灾害频次低，波动小，1982年、1984年出现突变，山洪灾害发生频次开始出现波动，2003年、2007年又出现突变，此时山洪灾害发生频次波动开始剧烈，山洪灾害发生频次波动十分剧烈，山洪灾害频次相较之前大增。其中，1953—2023年发生5次突变，分别是1982年、1984年、2003年、2007年、2017年，基于时间分割点，对历史山洪频次进行统计发现，1953—1982年、1983—1984年、1985—2003年、2004—2007年、2008—2017年、2018—2023年，山洪灾害发生频次分别为12、9、20、10、57、376，突变间隔内山洪灾害发生频次分布十分不均匀(图4)。

2.2 空间格局

岷江流域坡度为0~76.8°，坡度较大值集中在流域内31°~32°N，此区间也是山洪灾害高发区，共发生248次山洪灾害，占总山洪灾害比重为51.2%，其中山洪灾害发生点多集中于山间河谷地带，沿岷江及其支流密集分布(图5a)。从山洪灾害发生小流域来看，岷江流域内山洪灾害发生小流域共计174个，山洪灾害发生小流域内平均坡度为3.55°~39.95°，平均坡度>24.6°的山洪灾害发生小流域为147个，占总山洪灾害发生小流域的84.5%，其中31°~32°N的山洪灾害发生小流域平均坡度多为24.60°~39.95°N，32°~33°N的山洪灾害发生小流域平均坡度多为11.90°~30.25°N，30°~31°N的山洪灾害发生小流域平均坡度多为3.55°~30.25°N (图5b)。

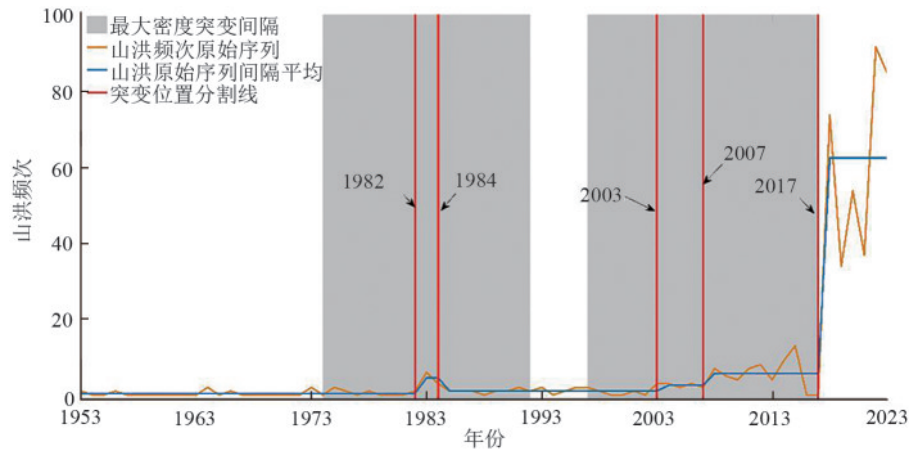


图 4 B-G 分割算法山洪灾害时序过程突变

Fig.4 Abrupt change in time-series process of flash flood disasters based on B-G segmentation algorithm

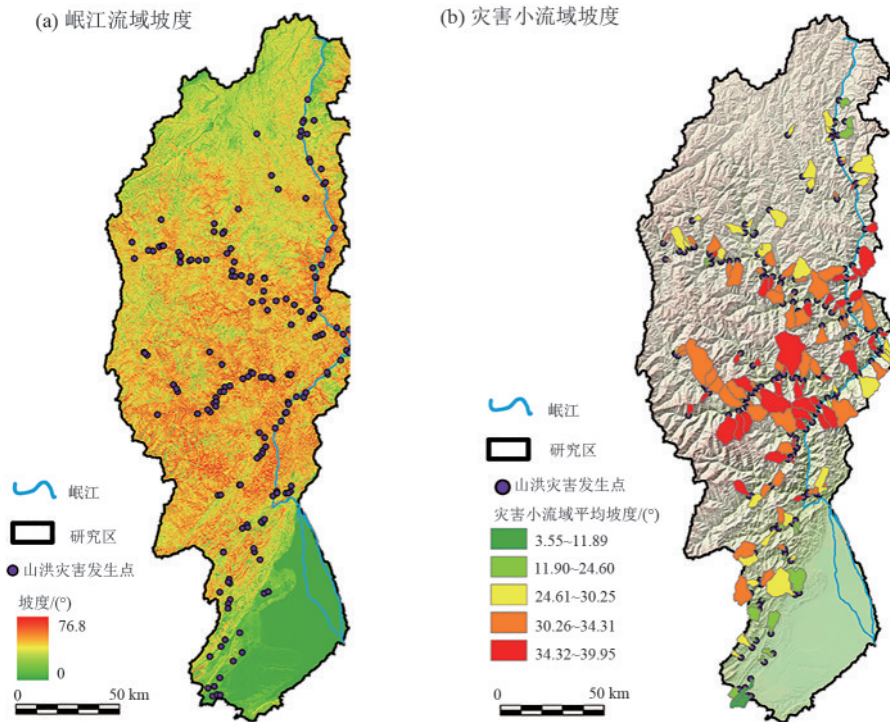


图 5 岷江流域坡度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of slope in Minjiang River basin

从流域面积来看,山洪灾害发生小流域总面积为 4 604.4 km², 面积最小值为 0.03 km², 最大值为 203.37 km², 平均值为 26.46 km², 其中山洪灾害发生小流域面积多在 77.8 km² 以下, 共 165 个, 占总数的 94.8%, 面积为 3 510.1 km², 占总面积的 76.24%(图 6a)。

岷江流域内县级行政区共 11 个, 山洪发生灾害次数为茂县(142 次) > 汶川县(59 次) > 大邑县(55 次) > 理县(49 次) > 松潘县(45 次) > 黑水县(41 次) > 名山区(33 次) > 邛崃市(33 次) > 都江堰市(15 次) > 崇州市(12 次) > 蒲江县(0 次), 山洪灾害的发生主要集中于茂县、汶川县、大邑县, 3 个县共发生山洪灾害 256 次, 占山洪灾害发生总数的 52.9%, 其中茂县山洪灾害发生次数最多, 为 142 次,

占总数的 29.3%, 较少在蒲江县、崇州市、都江堰市等发生, 3 个县共发生山洪灾害 27 次, 占山洪灾害发生总数的 5.6%, 其中蒲江县山洪灾害发生次数为 0, 次数最少(图 6b)。

岷江流域内全新世断层较多, 主要集中在中南部及东北部和西北部, 晚更新世断层与中早更新世断层较少, 在中西部和南部少量分布。山洪灾害发生点在距离断层 10 km 以内共计 344 次, 占总山洪灾害发生数量的 71.1%, 其中山洪灾害发生点在距离全新世断层 10 km 以内有 248 次, 占山洪灾害发生点在距离断层 10 km 以内的 72.1%, 在晚更新世断层距离内有 116 次, 占比为 33.7%, 在早中更新世断层距离内有 94 次, 占比为 27.3%(图 7)。

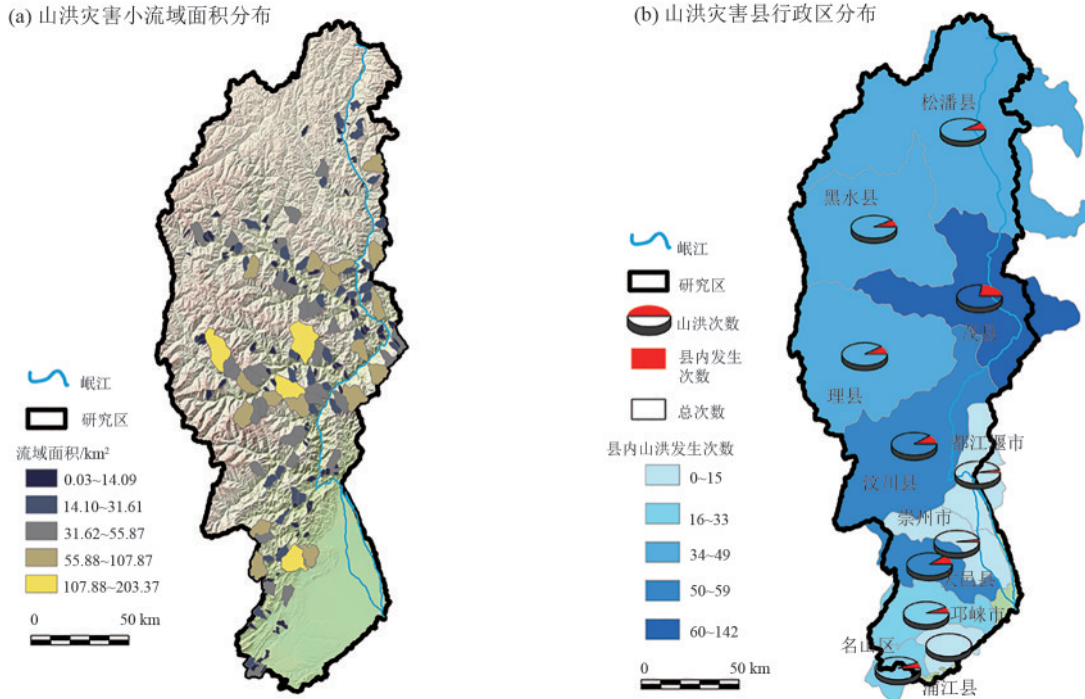


图 6 岷江流域山洪灾害小流域面积空间分布和县行政区空间分布

Fig.6 Spatial distribution of flash flood disasters in small watersheds and counties of Minjiang River basin

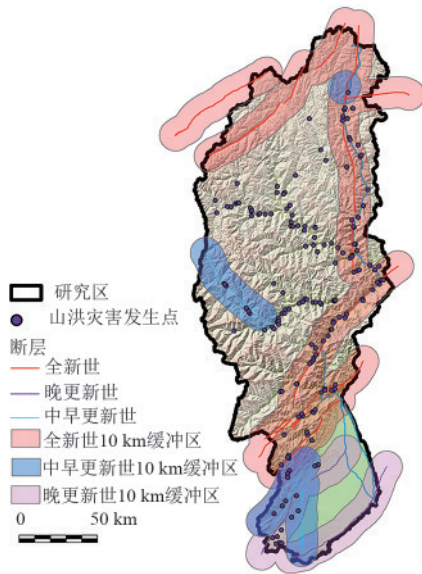


图 7 岷江流域断层 10 km 内山洪灾害分布

Fig.7 Distribution of flash flood disasters within 10 km of faults in Minjiang River basin

岷江流域年平均气温为 $-7.59 \sim 17.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，东南部平原地区年平均气温较高，为 $11 \sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，山间河谷地带年平均气温较温和，为 $5 \sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，年平均气温较低地区多在山区，在 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。岷江流域山洪灾害发生点大多分布在 $5 \sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其中，中北部和北部山洪灾害发生点分布在 $5 \sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，中南部和南部分布在 $11 \sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。综合来看，流域内山洪灾害多发生在温度较为温和的地带(图 8a)，坡体风化物质较为丰富。岷江流域年降水量为 $681 \sim 1\ 525\text{ mm}$ ，年降水量丰富，南部地区降雨量 $> 1\ 000\text{ mm}$ ，中部地区

为 $800 \sim 1\ 000\text{ mm}$ ，北部地区大部分降雨量明显 $< 800\text{ mm}$ 。山洪灾害小流域位于 800 mm 以上的降雨量区域有 114 个，占山洪灾害小流域总数的 65.5%。综合来看，岷江流域内山洪灾害多分布在降雨量较大区域(图 8b)。

2.3 影响因素解析

基于地理探测器对 18 个影响因子进行山洪灾害发生空间分异性 q 分析得出， $PWM(0.558) > PWQ(0.553) > \text{人类用地}(0.539) > AI(0.516) > \text{平均坡度}(0.502) > \text{平均海拔}(0.498) > MAP(0.497) > \text{土壤平均厚度}(0.460) > MAT(0.440) > MTWW(0.437) > \text{Melton 指数}(0.408) > \text{沟谷纵降比}(0.316) > \text{流域高差}(0.270) > \text{断层距离}(0.154) > \text{沟谷密度}(0.121) > NDVI(0.113) > SPI(0.088) > PGA(0.075) > TWI(0.050)$ 。按因子类别进行分析发现，岷江流域内气象因子比其他因子更好地解释了山洪灾害的空间差异，而虽然地处断层密集地带，但地质活动并不是岷江流域山洪灾害的控制因素。其中，山洪灾害和气象因子中的降水有着密切的联系，人类活动所创造的下垫面与流域坡度也是岷江流域山洪灾害发生的重要影响因子，说明降水是岷江流域内山洪灾害发生的重要激发因素，是山洪重要的流量来源，地表陡峭的坡度赋予地表水流动力，而人类活动下的下垫面不易下渗降水，使得地表水流汇集，最终导致山洪暴发(图 9)。

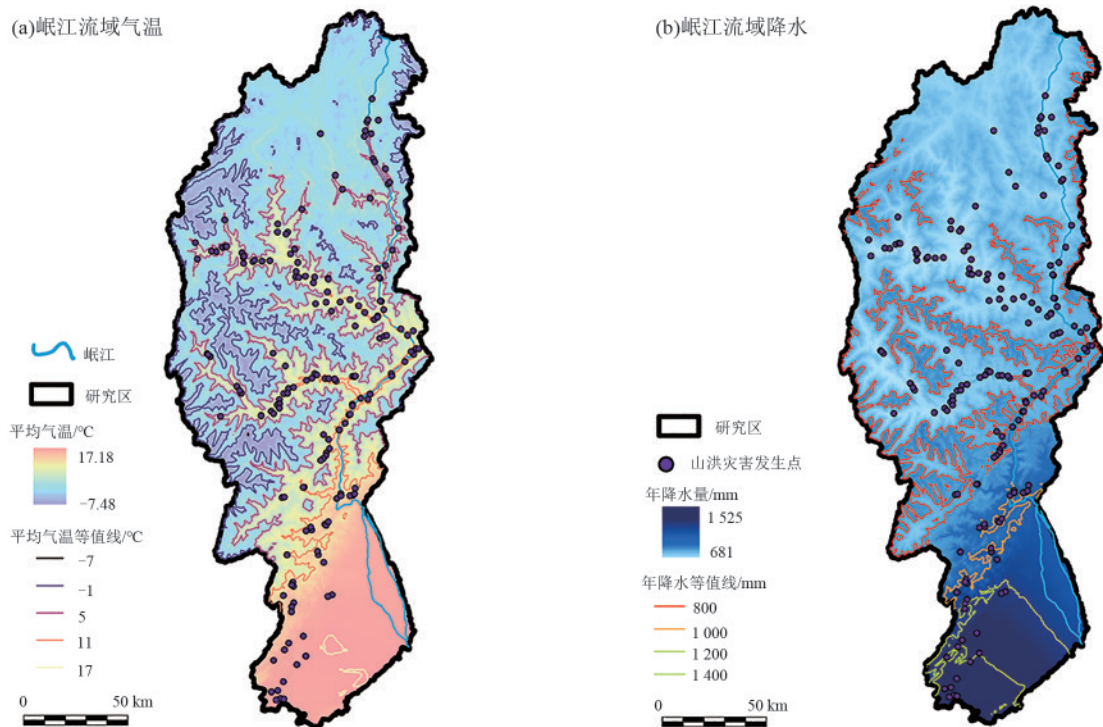


图 8 岷江流域气温和降水情况

Fig.8 Spatial distribution of temperature and precipitation in Minjiang River basin

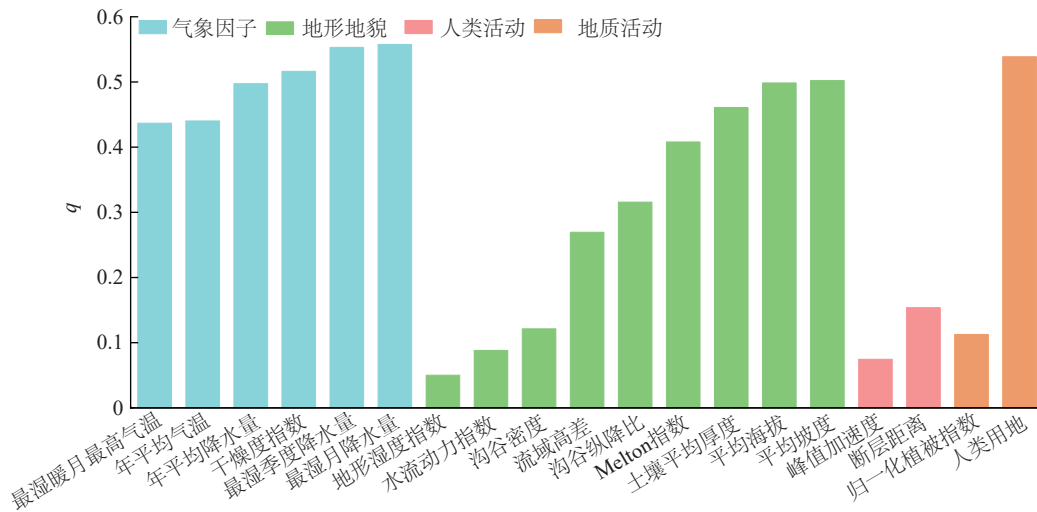
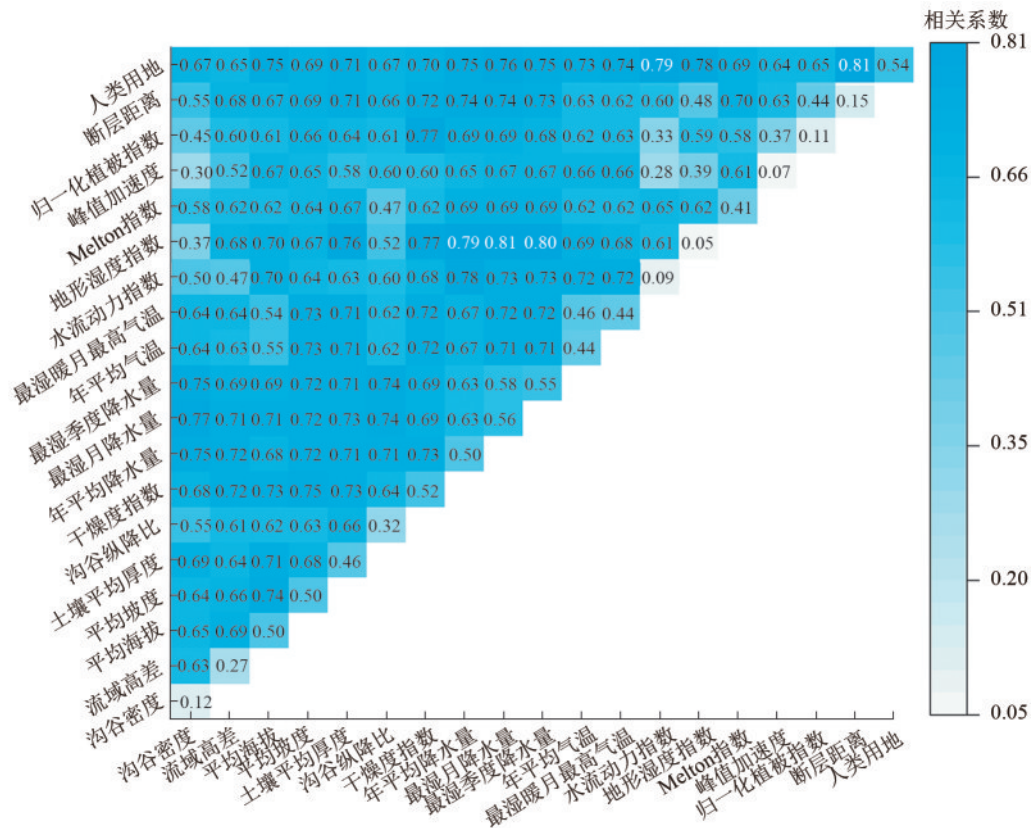


图 9 岷江流域山洪灾害 q

Fig.9 q values of flash flood disasters in Minjiang River basin

对岷江流域山洪灾害影响因子两两交互 q 进行分析发现,经交互后,沟谷密度、断层距离、TWI、SPI、NDVI 较之单因子 q 大大提高。其中沟谷密度与 PWM、PWQ、MAP 3 个代表降水的因子解释 $q > 0.75$,说明一定降水量下,沟谷密度有助于地表水流的汇集,从而推动山洪灾害的发生;灾害点距断层距离与人类用地解释 q 为 0.81,说明人类活动在断层一定距离内促使山洪灾害的发生;TWI 与人类用地解释 q 为 0.78,说明人类改变下垫面有助于地表径流的汇集,增大山洪灾害发生的概率,与 AI、PWM、PWQ、MAP 4 个代表降水的因子解释 $q > 0.75$,说明

在一定降水量下,岷江流域地形累积地表径流更易激发山洪;SPI 与人类用地解释 q 为 0.79,说明人类改变自然地表给予地表径流一定的动力,影响山洪灾害的形成,与 PWM、PWQ、MAP 3 个代表降水的因子解释 $q > 0.73$,说明一定的降雨条件下,水动力激增,促使山洪灾害的形成;NDVI 与 AI 解释 q 为 0.77,说明干燥度指数会影响植物的发育,从而对山洪灾害形成造成一定的影响(图 10)。从交互因子也可以看出,降水因子对岷江流域山洪灾害的发生具有主要影响,并与其他因子形成组合效应,更易促使山洪灾害发生。

图 10 多因子交互 q Fig.10 q values of multi-factor interactions

3 讨论

3.1 山洪灾害时空变化的主控因子

岷江上游流域山洪灾害在 1953—2023 年呈显著的年际增长趋势,尤其是 2014 年后灾害频次激增(占总数 63.6%),符合四川省山洪灾害频次上升的规律^[22],并与全球气候变化背景下极端降水事件增多的趋势一致^[23]。小波分析揭示的岷江流域山洪灾害发生 56 a 主周期和 8 a 次周期,与西藏自治区所发现的 33 a 主周期和 8 a 次周期在次周期上相对吻合^[19],次周期反映共同气候驱动,通常由短期、跨区域的气候触发因子主导(如降水、大气环流波动),该类因子的周期性变化同步影响不同区域的山洪发生频率,是两地 8 a 次周期吻合的核心原因,岷江流域(青藏高原东缘)受东南季风和西南季风共同影响,西藏自治区(青藏高原主体)受西南季风和高原季风主导,尽管季风类型略有差异,但二者均受上述大尺度环流系统调控,降水(山洪最直接的触发因子)的周期性同步传递至山洪灾害,形成次周期吻合。季节尺度上,岷江上游山洪灾害主要集中在夏季,灾害次数占年总数的 95.2%,因该区域属于亚热带湿润气候,并受到东南季风、西南季风与太平洋副热带的交替控制,降水季节变化明显,常有“华西雨屏带”之称,导致岷江上游山洪灾害频发^[15]。

山洪灾害主要控制因子包括水源条件、物源条件、能量条件及其他组合条件等。基于数据分析表明,岷江上游山洪灾害 84.5% 发生在平均坡度 $>24.6^\circ$ 的小流域、94.8% 发生在面积 $<77.8 \text{ km}^2$ 的小流域、71.1% 发生在距离断层 10 km 以内、65.5% 发生在年降水量 $>800 \text{ mm}$ 的小流域。该类要素指出,坡度大地形陡峭,能够在达到降雨阈值时为小流域内地表径流提供充足动力,更易激发山洪,与被认为中国山洪高发区的赣江上游所发现地形影响山洪相符^[13]。岷江上游流域与同等条件下较大流域相比,由于较小流域对短历时强降雨的地表径流响应更敏感,更易于引发山洪灾害^[6],加之断层附近构造运动活跃,且与年平均气温 $5\sim 17^\circ\text{C}$ 的温和地带重合,对地表物质快速输移、极端水文过程有着长期的影响^[12],山洪水沙致灾过程极易发生。

为更加明确岷江上游灾害形成的主导控制因子,笔者通过地理探测器解析 18 种影响因子,涉及水源条件、沙源条件与地质条件、势能转化条件、水力搬运条件及人类活动因子等方面。本研究发现,水源条件的降水相关因子($\text{PWM}=0.558$, $\text{PWQ}=0.553$)主导山洪空间分异,与全国山洪灾害研究^[24]中降水是第一触发因子的结论一致,值得注意的是,干燥度指数($\text{AI}=0.516$)的高 q 表明,区域多重季风主

导的湿润气候特征加剧地表径流稳定性波动。人类活动因子中的农田与不透水面占比 q 为0.539,揭示人类活动破坏地表稳定性,城镇化进程中农田增加与硬化地表削弱流域调蓄能力^[19,21]或增加山洪暴发的沙源条件。多因子交互作用使得单因子的影响得到放大,如沟谷密度与降水因子的交互,本质是水系网络结构对暴雨能量的空间再分配过程,沟谷网络缩短汇流路径,提升流速加速径流汇聚,放大灾害强度,表明水系网络密度放大暴雨的致灾效应,证实沟谷密度提升径流传输的效率,促使山洪的发生^[10];断层距离与人类用地的交互,反映出构造活动与人类扰动在地质、水文、工程等多维度耦合的结果,断层带的岩石破碎、渗流异常、起伏度高为灾害孕育奠定物质和能量基础,人类工程活动破坏稳定性或增加地表快速流,暴雨加速灾害链形成,触发耦合放大效应,使得构造周期与人类活动的时间错位、空间叠加导致风险非线性增长,显著增加灾害风险,与汶川地区构造活跃区人类活动加剧地质灾害,从而引发伴生性山洪灾害链相互印证^[12];TWI与人类用地交互,证实人类改变下垫面增大山洪灾害发生的概率^[11]。说明单因子并不能成为山洪灾害暴发的决定因素,造成山洪灾害发生是流域内众多因素的综合作用,在山洪灾害的预警方面不应只注意单一方面的监测,应该对多方因子共同评估。

基于小波周期预测与地理探测器交互作用方法,拓展山洪灾害的可预测性与可量化评估路径对山洪灾害区域的风险防控具有重要的指导意义。将小波周期识别的主/次周期嵌入区域灾害预测框架,可构建“长周期背景+短周期扰动”的山洪预警时间窗口,在长周期框架下,可识别未来10~20 a整体风险趋势;在短周期窗口内,可结合ENSO、季风强度等指标,构建1~3 a的高频预警模块。地理探测器交互 q 验证“构造-人类活动”耦合放大效应,更可转化为风险权重系数,嵌入县域尺度的山洪风险评估模型,实现从“因子识别”到“风险量化”的跃迁,为国土空间规划中“高风险区限建、中风险区调控、低风险区利用”提供可操作的阈值建议。

3.2 国内外山洪灾害易发区域比较剖析

岷江上游与横断山区、黄土高原、长江三角洲等地区均以短历时强降雨为山洪主要诱因,如岷江上游夏季受西南季风影响,6—9月降水集中,与西南地区^[8]、赣江上游^[23]的暴雨特征一致;福州“杜苏芮”台风引发的极端降雨^[23]、北京密云区的短时暴雨^[24]均印证了降雨强度对山洪的决定性作用。与著名的地中海气候区、阿尔卑斯山区等区域^[25]比较发现,地中

海气候区山洪多分布于沿海山地、丘陵地带及内陆山脉迎风坡地带,以秋季广域强风暴驱动的大尺度流域山洪为主,受秋季副热带高压南退,低纬度暖湿气流与中纬度冷空气交汇影响,加之在山地地形抬升作用下持续输送水汽,快速填满土壤蓄水空间后产生地表径流,形成“强降水-地形-土壤”耦合机制,与岷江上游山洪灾害形成机理较为吻合;但在阿尔卑斯山区,春季暴雨受地形抬升(增强暴雨强度)与冰川融水(补充额外水源)的协同作用影响,显著加剧山洪强度与规模,形成“降水-地形-冰川”三方协同机制,区别于岷江上游暴雨山洪灾害形成的“强降水-地形-土壤”耦合机制^[26]。

怒江大峡谷高程贡献率^[27]、黄土高原地形起伏^[19]与岷江流域构造破碎带共同表明,地形高程、坡度是跨区域山洪的共性影响因子,岷江上游的陡坡地形与横断山区的干热河谷^[28]、甘洛县的深谷地貌^[29]类似,均通过地形汇流加速地表径流形成。岷江流域受西南季风影响,叠加陡峭地形,形成全国罕见的“地形雨-构造破碎带”高风险区^[12],具有显著的“构造-季风”双重控制的独特性,山洪水沙致灾显著,相比之下,中国长江三角洲^[30]、黄土高原^[9]的山洪灾害更多受气候反馈、土壤侵蚀等条件影响,雅鲁藏布江流域的降水呈“东坡多、西坡少”格局,川中丘陵区的极端降雨频次增加与地形起伏关系较弱^[31],均未形成类似岷江流域的高强度耦合效应。

4 结论

1)1953—2023年岷江流域山洪灾害呈“低频-高频”两阶段演化特征,2014年后进入暴发期,年平均频次较前期增长4.9倍,具有56 a主周期与8 a次周期。

2)灾害发育受“构造-季风”双重控制,且灾害多发区具有明确的地形与水热特征:断层带附近(<10 km)聚集71.1%的灾害点,但雨季强降雨(>800 mm/年)与陡峭地形($>24.6^\circ$ 坡度)的协同效应决定灾害阈值突破能力,致使县域分布差异明显,茂县(142次)、汶川县(59次)、大邑县(55次)为高发区。

3)气象因子是主导驱动,人类活动放大风险,最湿季度降水($q=0.558$)和不透水下垫面($q=0.539$)为关键因子,其与沟谷密度、断层距离等相互作用显著增强灾害解释力,并认为构造地带的人类活动可显著提升灾害概率。断层邻近地区因工程扰动引发地表稳定性下降,配合极端降水与地形因素构成典型复合型山洪诱发机制。

参考文献:

[1] 王信,郭富赞,张娟,等.基于滑坡动力学过程的甘肃舟曲

- 磨里滑坡风险评价[J].山地学报,2025,43(1):105-121.
- WANG X, GUO F Y, ZHANG J, et al. A dynamic process-based risk assessment of a resurgent landslide at Moli Village in Zhouqu County, Gansu Province, China [J].Mountain Research,2025,43(1):105-121.
- [2] BEST J, ASHMORE P, DARBY S E. Beyond just floodwater [J]. Nature Sustainability, 2022, 5 (10) : 811-813.
- [3] BORGA M, STOFFEL M, MARCHI L, et al. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows[J].Journal of Hydrology,2014,518:194-205.
- [4] 程德强,崔鹏,邹强,等. Ritter改进算法的丝绸之路经济带大区域坡度求取[J].测绘科学,2020,45(2):159-165.
- CHENG D Q, CUI P, ZOU Q, et al. Large-region slope calculation of the Silk Road Economic Belt based on improved Ritter algorithm [J]. Science of Surveying and Mapping,2020,45(2):159-165.
- [5] LLASAT M C, LLASAT-BOTIJA M, LÓPEZ L. A Press database on natural risks and its application in the study of floods in northeastern Spain[J].Natural Hazards and Earth System Sciences,2009,9(6):2049-2061.
- [6] ZHU Z H, WRIGHT D B, YU G. The impact of rainfall space-time structure in flood frequency analysis[J].Water Resources Research,2018,54(11):8983-8998.
- [7] AMENGUAL A. Characterization of extreme flash floods in Mediterranean Spain[J].Journal of Hydrology, 2025,659:e133229.
- [8] 熊俊楠,李进,程维明,等.西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素[J].地理学报,2019,74(7):1374-1391.
- XIONG J N, LI J, CHENG W M, et al. Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China [J]. Acta Geographica Sinica,2019,74(7):1374-1391.
- [9] 孙珑,江曦,韩剑桥,等.近30年来黄土高原山洪灾害风险时空变化及成因[J].水土保持研究,2024,31(4):241-247.
- SUN L, JIANG X, HAN J Q, et al. Changes and causes of mountain torrent disaster risk on the Loess Plateau in the past 30 years[J].Research of Soil and Water Conservation,2024,31(4):241-247.
- [10] SAHARIA M, KIRSTETTER P E, VERGARA H, et al. On the impact of rainfall spatial variability, geomorphology, and climatology on flash floods [J]. Water Resources Research,2021,57(9):e2020WR029124.
- [11] ZHOU Z Z, SMITH J A, YANG L, et al. The complexities of urban flood response: Flood frequency analyses for the Charlotte metropolitan region [J]. Water Resources Research,2017,53(8):7401-7425.
- [12] 靳文,张国涛,邹强,等.震后泥石流活跃期的新认识:以四川汶川“8·20”灾害事件为例[J].山地学报,2019,37(5):787-796.
- JIN W, ZHANG G T, ZOU Q, et al. A new understanding of the activity behavior of post-earthquake debris flow: Taking the “8·20” event in Wenchuan, Sichuan, China as an example [J]. Mountain Research, 2019, 37 (5):787-796.
- [13] 胡涛,李兴,李青,等.不同降雨重现期下山洪汇流过程关键因子识别研究:以赣江上游为例[J].自然灾害学报,2019,28(6):182-191.
- HU T, LI X, LI Q, et al. Identification of key factors in the process of mountain flood confluence during different rainfall return periods: Upper Ganjiang River as an example [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28 (6) : 182-191.
- [14] 周燕莲,董铭,刘维明,等.基于GIS的岷江流域洪灾动态风险性评价研究[J].人民长江,2022,53(5):20-27.
- ZHOU Y L, DONG M, LIU W M, et al. Research on dynamic risk assessment of flood disaster in Minjiang River basin based on GIS [J]. Yangtze River, 2022, 53 (5):20-27.
- [15] 周燕莲,刘维明,周丽琴,等.青藏高原东缘大渡河与岷江上游山区滑坡堵江分布特征[J].地理学报,2025,80(5):1312-1326.
- ZHOU Y L, LIU W M, ZHOU L Q, et al. Distribution of landslide dams in the Dadu and Upper Minjiang Rivers, eastern Tibetan Plateau [J]. Acta Geographica Sinica,2025,80(5):1312-1326.
- [16] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等.2006—2016年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J].生态学报,2019,39(5):1583-1594.
- ZHU C, PENG W F, ZHANG L F, et al. Study of temporal and spatial variation and driving force of fractional vegetation cover in upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (5) : 1583-1594.
- [17] 马明东,刘跃建.三江流域与岷江上游生态区数量分类及可能生产力的研究[J].中国生态农业学报,2005,13(1):26-31.
- MA M D, LIU Y J. Study on numerical classification and possible productivity of ecological zones in Three-river watershed and upper stream of Min River [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(1):26-31.
- [18] 张羿轲,方一平,杨悦,等.岷江上游山区生态福祉波动的人类活动干扰研究[J].山地学报,2021,39(2):238-247.
- ZHANG Y K, FANG Y P, YANG Y, et al. Disturbance of human activities to mountain ecological well-being fluctuation in the upper reaches of the Minjiang River, China [J]. Mountain Research, 2021, 39 (2) : 238-247.
- [19] GRAPS A. An introduction to wavelets [J]. IEEE Com-

- putational Science and Engineering, 1995, 2(2): 50-61.
- [20] 熊俊楠, 龚颖, 程维明, 等. 西藏自治区近30年山洪灾害时空分布特征[J]. 山地学报, 2018, 36(4): 557-570.
XIONG J N, GONG Y, CHENG W M, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of mountain floods in Tibet, China in recent 30 years[J]. Mountain Research, 2018, 36(4): 557-570.
- [21] 崔鹏, 邹强. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J]. 地理科学进展, 2016, 35(2): 137-147.
CUI P, ZOU Q. Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods[J]. Progress in Geography, 2016, 35(2): 137-147.
- [22] 熊俊楠, 赵云亮, 程维明, 等. 四川省山洪灾害时空分布规律及其影响因素研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(10): 1443-1456.
XIONG J N, ZHAO Y L, CHENG W M, et al. Temporal-spatial distribution and the influencing factors of mountain-flood disasters in Sichuan Province[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(10): 1443-1456.
- [23] 颜悠悠, 高路, 陈仁德, 等. 福州市2305“杜苏芮”台风灾害链致灾与成害过程分析[J]. 灾害学, 2024, 39(4): 228-234.
YAN Y Y, GAO L, CHEN R D, et al. Analysis of disaster and damage process caused by No. 2305 "Doksuri" typhoon disaster chain in Fuzhou City[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(4): 228-234.
- [24] 吴佳亮, 马超, 王锐, 等. 基于树木地貌法重建山洪泥石流历史事件: 以北京密云区龙潭沟流域为例[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 183-190.
WU J L, MA C, WANG R, et al. Reconstruction of torrent and debris flow events based on dendrogeomorphology: A case study of Longtangou basin in Miyun District, Beijing[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(1): 183-190.
- [25] LLASAT M C, MARCOS-MATAMOROS R, PASCUAL R, et al. Western mediterranean flash floods through the lens of alcanar (NE Iberian Peninsula): Meteorological drivers and trends [J]. Atmospheric Research, 2025, 326: e108266.
- [26] 皋子琪, 吕立群, 马超, 等. 基于MaxEnt模型的怒江大峡谷泥石流易发性评价和成因[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 34-41.
GAO Z Q, LÜ L Q, MA C, et al. Assessment and causes of debris flow susceptibility in the Nujiang grand canyon based on maxent model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 34-41.
- [27] 李怡帆, 张晨笛, 张国涛. 横断山区暴雨型山洪灾害发育特征与形成模式[J]. 地理学报, 2024, 79(3): 600-616.
LI Y F, ZHANG C D, ZHANG G T. The development characteristics and formation modes of rainstorm-triggered flash flood disasters in the Hengduan Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(3): 600-616.
- [28] 李钰, 甘滨蕊, 王协康, 等. 四川省甘洛县2019年群发性山洪泥石流灾害的形成机理[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 281-287.
LI Y, GAN B R, WANG X K, et al. Formation mechanism of group flash flood/debris flow disasters in Ganluo County, Sichuan Province in 2019[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 281-287.
- [29] WANG Q, CAIX T, TANG J Y, et al. Climate feedbacks associated with land-use and land-cover change on hydrological extremes over the Yangtze River Delta Region, China[J]. Journal of Hydrology, 2023, 623: e129855.
- [30] HE F, ZHENG C L, MO X G, et al. Study on the spatial distribution patterns and driving forces of rainstorm-induced flash flood in the Yarlung Tsangpo River basin [J]. Remote Sensing, 2025, 17(8): e1393.
- [31] 陈露, 唐家良, 王艳强, 等. 川中丘陵区极端气候演变及其对紫色土坡耕地作物生产的影响[J]. 山地学报, 2025, 43(2): 167-184.
CHEN L, TANG J L, WANG Y Q, et al. Extreme weather trajectory over recent decades and associated impacts on crop production in purple soil sloping farmland in the hilly areas of central Sichuan, China[J]. Mountain Research, 2025, 43(2): 167-184.