

李智玉, 朱育雷, 杨静, 等, 2026. 2010—2023 年贵州汛期暴雨精细化时空分布特征及其地形影响[J]. 气象, 52(9): 1090–1102.
Li Z Y, Zhu Y L, Yang J, et al, 2026. Fine-scale spatio-temporal characteristics and topographic influence of rainstorms in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023[J]. Meteor Mon, 52(9): 1090–1102 (in Chinese).

2010—2023 年贵州汛期暴雨精细化时空分布特征 及其地形影响^{*}

李智玉^{1,2} 朱育雷² 杨 静² 魏 涛² 顾天红² 尚媛媛³

1 全国暴雨研究中心, 武汉 430205

2 贵州省气象台, 贵阳 550002

3 贵州省生态农业气象中心, 贵阳 550002

提 要: 基于贵州 2010—2023 年汛期(4—9 月)国家级、区域级气象观测站逐小时降水观测资料和地形高程数据、ERA5 再分析资料, 分析贵州暴雨精细化时空分布特征, 并通过多元地形组合分析与地理加权回归模型(GWR)系统探讨地形对暴雨分布的影响。结果表明: 贵州暴雨分布具有空间不均匀性, 降水频次与降水量最大值均位于其东南部边缘, 贵州东北部及中南部地区暴雨降水量占比较高。此外, 贵州暴雨日数及站数占比年际变化明显, 呈逐年增长趋势, 峰值出现在 2020—2021 年。暴雨主要发生在 6—7 月, 多伴随短时强降水, 降水持续时间长, 致灾风险高。降水日变化呈单峰型分布, 小时降水量峰值大约出现在 03 时(北京时); 夜雨特征明显, 夜间累计降水量约为白天的 2 倍, 主要分布在贵州的西部和南部, 并有向东传播的特征。贵州暴雨频发区与地形分布关系密切, 西部、东南部及东北部暴雨中心分别位于北盘江、雷公山及梵净山地形抬升区。坡度、坡向、高程与起伏度等单一地形因子与降水的直接相关性较弱, 利用多元地形组合分析能够一定程度上提高对降水分布的可解释性。进一步研究发现, 暴雨站次在南坡最多, 当坡度 $<20^{\circ}$ 、高程为 800~1000 m、起伏度 <200 m 时, 暴雨频次随相应地形因子的增大而增加, 超过阈值后则逐步减少, 其中急陡/中坡、南坡、中海拔、大/中起伏和迎风坡的组合对暴雨触发最为有利。GWR 模型诊断结果表明, 地形因子对降水的影响存在空间差异性, 高程为贵州大部地区的主导因子, 而起伏度、坡度和坡向的影响则具有局地性, 多体现在地势落差较大或河流、高山地区。

关键词: 贵州暴雨, 精细化特征, 地形影响, 地理加权回归模型

中图分类号: P467

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.051501

Fine-Scale Spatio-Temporal Characteristics and Topographic Influence of Rainstorms in Guizhou Province During the Flood Season from 2010 to 2023

LI Zhiyu^{1,2} ZHU Yulei² YANG Jing² WEI Tao² GU Tianhong² SHANG Yuanyuan³

1 Heavy Rainfall Research Center of China, Wuhan 430205

2 Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002

3 Guizhou Ecological and Agricultural Meteorology Center, Guiyang 550002

Abstract: Based on hourly precipitation data from high-density national and regional stations in Guizhou Province during the flood season (April–September) from 2010 to 2023, as well as Shuttle Radar Topography

^{*} 贵州省基础研究(自然科学)项目(黔科合基础-ZK[2024]一般 623、黔科合基础-ZK[2024]一般 622)、全国暴雨研究开放基金项目(BYKJ2024Q07)、中国气象局暴雨精细化分析和预报青年创新团队(CMA2023QN05)、贵州省气象局贵州雨窝监测预报技术研究创新团队(黔气科合 TD[2024]01 号)、中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题面上项目(23SWQXM023)和中国气象局政策研究气象软科学课题(2025RKXZDIAN29)共同资助

2025 年 8 月 24 日收稿; 2026 年 5 月 15 日收修定稿

第一作者: 李智玉, 主要从事中短期天气预报研究. E-mail: xylizhyu_123@163.com

Mission (SRTM) elevation data and ERA5 reanalysis data, this study systematically investigates the fine-scale spatio-temporal characteristics of rainstorms and their relationships with terrain in Guizhou Province by using multivariate terrain combination analysis and a geographically weighted regression (GWR) model. The results show that rainstorms in Guizhou Province are distributed unevenly with three rainstorm centers. The maximum frequency and intensity of rainstorms are concentrated in the southeastern edge area and extremely heavy rainstorms are scattered. The rainstorm proportion is higher in the northeastern and central-southern parts of Guizhou Province. Rainstorm days show an increasing interannual variability, peaking in 2020—2021. Rainstorms occur mainly in June and July, often accompanied by short-time heavy precipitation and lasting for a long time, which poses high disaster risks. Diurnal variation of precipitation is unimodal and dominated by nocturnal rain (22:00 BT—08:00 BT), and the rainfall intensity often reaches its peaks around 03:00 BT. Short-time heavy precipitation exhibits a pronounced nocturnal peak, and the nighttime precipitation is roughly twice the daytime precipitation, mainly concentrated in the west and south of Guizhou Province and featured with eastward propagation. The Guizhou Province rainstorm-prone areas correspond to the topographic uplift zones of the Beipan River, Leigong Mountain, and Fanjing Mountain, reflecting terrain-wind coupling. Single terrain factors are weak to be directly correlated to precipitation. However, through the analysis of multiple terrain combinations, the explanatory power of precipitation distribution has been enhanced. Slope, aspect, elevation, and relief exert nonlinear effects. Rainstorm stations are the most in south aspects. Rainstorm frequency increases when slope is $< 20^\circ$, elevation ranges in 800—1000 m, and relief is < 200 m, but decreases beyond these thresholds. The combined analysis indicates that the steep/moderate slope, south aspect, medium elevation, large/medium relief, and windward slope has the strongest triggering effect. The GWR model diagnosis suggests that there is obvious spatial heterogeneity in the influence of topographic factors. Elevation is the dominant factor in most areas of Guizhou Province, and the local influence of relief, slope and aspect is strong, mostly concentrated in the vicinity of large relief or near rivers and mountains.

Key words: rainstorm in Guizhou Province, refined characteristic, terrain influence, geographically weighted regression model (GWR)

引 言

暴雨是我国主要灾害性天气之一。西南地区受东亚季风、印度季风、青藏高原环流和复杂地形的共同影响,暴雨事件频率高、强度大(陈炯等,2013;毛冬艳等,2018),突发性和局地性突出,预报难度较大(周明飞等,2016;肖红茹等,2025),同时由于其生态环境脆弱,极易引发滑坡、泥石流等地质灾害,严重威胁西南地区人民的生命财产安全(黄子立等,2021;周文等,2021),因此开展西南地区暴雨相关研究具有重要的现实意义和社会价值。

贵州地处西南地区东部,境内地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜,山地和丘陵约占全省总面积的97%。研究表明,贵州降水具有明显的空间分布不均匀特征,存在三个多雨中心和一个少雨带

(罗乃兴等,2023),同时年际、年代际变化特征明显(Zhu et al,2022),四季均存在明显的夜雨现象,下半夜至凌晨降水概率更大、强度更强(罗乃兴等,2023)。大部分地区雨强 $\geq 28 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,雨强 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水比例明显高于西南其他省份(毛冬艳等,2018)。贵州暴雨期主要集中在5—9月(王芬等,2013),暴雨日数及降水量在空间上呈自南向北递减的分布特征(王芬等,2015),其中暴雨日数范围最广、强度最大的区域位于贵州西南部(白慧等,2012)。近年来贵州暴雨日数整体呈显著增长趋势(王芬等,2013),极端降水日数和降水量也明显上升(甘文强等,2018;Cheng et al,2019),极端降水日数占比可达30%~35%(汪靖等,2021)。

暴雨通常由一定大尺度背景下的中小尺度天气系统引起,地形对其具有重要影响。研究表明,降水对地形分布及高度十分敏感(Yuan et al,2010;Xu

and Zipser, 2011; 陈炯等, 2013; 宇如聪和李建, 2016; 钟水新, 2020), 迎风坡对气流的辐合抬升、山脉对气流的阻挡绕流(张芳等, 2022)以及不同下垫面加热和摩擦效应产生的中尺度环流, 对局地强降水的发生发展有明显促进作用(毕宝贵等, 2005; 廖菲等, 2007; 赵海英等, 2017; 王凌梓等, 2018; 赵衍斌等, 2023)。此外, 地形的动力、热力效应能够通过影响云微物理过程增强降水(Smith, 1979), 下垫面差异也能影响降水的日变化特征(Yu et al, 2007a; 2007b; 2010; Zheng et al, 2008; 曾礼等, 2023)。前人研究发现, 贵州短时强降水南多北少、东多西少的分布特征与地形密切相关(肖蕾等, 2021), 降水随着地形高程和坡度的增加而减少(Tan et al, 2024)。同时, 不同区域地形条件对降水的影响存在差异。例如, 贵州东南部地形高度的变化对山地突发性暴雨的强度与落区有着重要影响(高珩洲和李国平, 2020), 西南部两个小喇叭口地形对气流的辐合抬升作用对于贵州南部山区大暴雨十分关键(杨静等, 2011), 而低层浅薄偏东气流在地形配合下有利于梵净山东侧强降水的发生(陈军等, 2020)。此外, 贵州夜雨特征也与山地热力不均匀及山谷风环流紧密相关(王芬等, 2017)。

全球增暖背景下, 西南地区极端降水频数显著增加(张琪和李跃清, 2014; 陈子凡等, 2022)。受复杂地形影响, 贵州各种天气系统的演变十分复杂, 强降水发生区域差异明显(Liu et al, 2015; Zhang, 2020), 对业务预报和监测服务中的精细化程度需求较高。然而, 目前的研究对于贵州暴雨时空分布特征把握仍不够精细, 相关机理研究较为匮乏。随着近年来贵州区域级气象观测站网的不断完善, 观测密度得到显著提高, 利用现有的高密度观测数据, 可为贵州暴雨精细化特征研究提供有力支撑。本文采用贵州 2010 年以来国家级气象观测站(下文简称国家站)和区域级气象观测站(下文简称区域站)逐小时地面观测降水资料、贵州航天飞机雷达地形测绘任务(SRTM)90 m 分辨率高程数据以及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA5 再分析数据, 对贵州汛期暴雨的精细化特征和日变化特征开展分析研究, 并通过多元地形组合分析和地理加权回归模型, 进一步探讨暴雨分布对复杂地形的精细化响应, 以期对山地强降水预报及数值模式中地形参数化改进提供依据。

1 资料和方法

1.1 资料

本文利用 2010—2023 年贵州省气象信息中心提供的国家站和区域站逐小时降水资料, 针对贵州 4—9 月(汛期)暴雨进行分析。统计过程中首先对各站点小时降水量进行气候阈值质量控制, 随后累加得到逐日降水量。当某一时次降水数据缺测时, 当日降水即按缺测处理; 3、6、12 h 等不同历时降水量的计算方法同上。根据中国气象局规定, 将 1 h 降水量 ≥ 20 mm 定义为短时强降水, 24 h(20 时至次日 20 时)降水量 50~100 mm 为暴雨, 100~250 mm 为大暴雨, ≥ 250 mm 为特大暴雨。此外, 采用 SRTM 90 m 分辨率高程数据进行地形因子计算, 利用 ERA5 再分析风场数据探讨盛行风场与地形配合对降水的影响。全文所用时间均为北京时。

1.2 方法

1.2.1 地形因子

本文利用 SRTM 90 m 分辨率高程数据分别计算坡度、坡向、地形起伏度等地形因子, 并利用临近插值法将各地形因子插值至相应站点。同时, 利用 ERA5 850 hPa 风场数据计算主风方向效应指数(孙鹏森等, 2004)。各地形因子具体计算公式如下:

$$S_{\text{slope}} = \arctan \left[\sqrt{\left(\frac{dz}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dy} \right)^2} \right] \quad (1)$$

$$A_{\text{spect}} = 57.29578 \times \arctan \left(\sqrt{\frac{dz}{dy} - \frac{dz}{dx}} \right) \quad (2)$$

$$R = z_{\text{max}} - z_{\text{min}} \quad (3)$$

$$PWEI = \begin{cases} \cos \left[\frac{\pi(A_{\text{spect}} - \beta + 360^\circ)}{180^\circ} \right] + 1 & 0^\circ \leq A_{\text{spect}} < \beta \\ \cos \left[\frac{\pi(A_{\text{spect}} - \beta)}{180^\circ} \right] + 1 & \beta \leq A_{\text{spect}} < 360^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_{slope} 为坡度值, A_{spect} 为坡向值, R 为地形起伏度, $PWEI$ 为主风方向效应指数; z 为高程, x 和 y 为水平距离, β 为主风向。坡向值按顺时针方向进行测量, 角度范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 并均等划分为 8 个方位, 依次为: 北(N; $0^\circ \sim 22.5^\circ$, $337.5^\circ \sim 360^\circ$)、东北(NE; $22.5^\circ \sim 67.5^\circ$)、东(E; $67.5^\circ \sim 112.5^\circ$)、东南(SE; $112.5^\circ \sim 157.5^\circ$)、南(S; $157.5^\circ \sim 202.5^\circ$)、西南(SW; $202.5^\circ \sim 247.5^\circ$)、西(W; $247.5^\circ \sim 292.5^\circ$)、

西北(NW; $292.5^{\circ} \sim 337.5^{\circ}$)。起伏度计算范围为 $12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$ 单元格。PWEI 范围为 $0 \sim 2$, 其中 $0 \sim 1$ 为迎风坡, $1 \sim 2$ 为背风坡。

图1为计算得到的坡度、坡向以及起伏度等地形因子的空间分布,并叠加了梵净山、雷公山及北盘江等贵州境内主要地形。其中,本文参照李智玉等(2024)确定北盘江主要流域范围。从图1可见,贵州境内坡度呈中部低、四周高,梵净山、雷公山以及北盘江等地形坡度约为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。日最大降水量中心出现在梵净山东侧的松桃县牛郎站,达 371.5 mm (图1a)。相较而言,贵州境内坡向分布较为分散,梵净山、雷公山东侧以东南向或正东坡向为主,西侧以西北向或正西坡向为主,北盘江流域以正北向或西北坡向为主,该特征在其南部地区尤为明显(图1b)。与坡度分布类似,贵州中部、东部及南部边缘地形起伏度较低,梵净山、雷公山两个高山区域及北盘江地区地形起伏度相对较高,其中梵净山最大起伏度为 1036 m ,雷公山为 757 m ,北盘江流域为 945 m (图1c)。

1.2.2 地理加权回归模型

本文采用地理加权回归(GWR)模型进一步诊断不同地形因子对贵州暴雨分布的影响。GWR是一种空间局部加权回归模型,已被广泛应用于地形因子与降水关系的研究(Brunsdon et al, 2001; Kumari et al, 2017; 张铭明等, 2021),该模型通过建立各站点的局部回归方程,诊断气象要素的空间变化及其驱动因子,进而反映自变量对因变量的非线性作用(曾礼等, 2022; 2023)。其计算公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^P \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_{ik} \quad (5)$$

$1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq P$

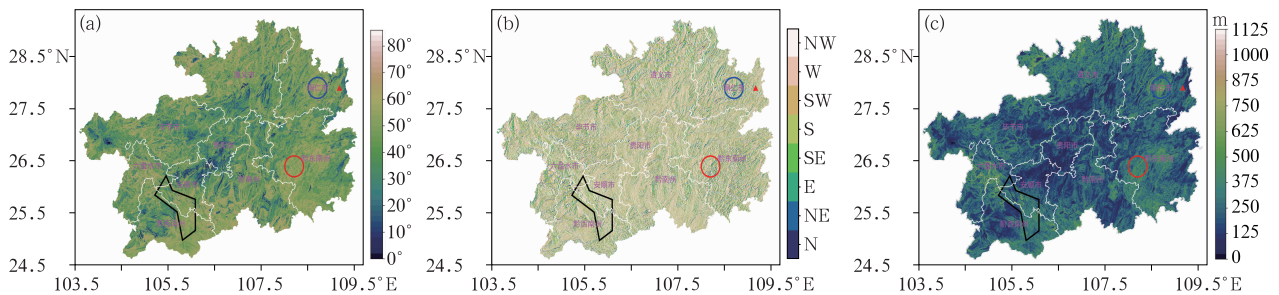
式中: i 为第 i 个站点, n 为研究区域总站数, k 为第 k 个地形因子, P 为地形因子总个数, y_i 为第 i 个站

点的降水量, $\beta_0(u_i, v_i)$ 为该站点空间坐标上的截距, $\beta_k(u_i, v_i)$ 为第 k 个自变量在该站点空间坐标 (u_i, v_i) 上的回归系数, x_{ik} 为第 i 个站点的第 k 个地形因子, ϵ_{ik} 为误差项。

2 统计结果分析

2.1 暴雨时空分布特征

图2为2010—2023年汛期贵州不同量级暴雨的年平均降水量(暴雨总降水量/总年数)空间分布。由图可见,贵州暴雨分布具有明显的空间不均匀性,暴雨量级的降水量大值区主要集中在贵州南部和东部地区,而贵州西北部地区暴雨降水量较少(图2a)。其中,黔东南州南部、铜仁市东部和北部、毕节市南部和安顺市北部、黔西南州西部存在降水量大值中心。暴雨发生频次最高为从江县加勉站和加榜站(各81次),二者多年平均降水量分别达到 393.9 mm 和 378.1 mm , 位居全省前两位。以往基于国家站的研究认为,贵州的暴雨中心主要位于毕节、六盘水和安顺三市交界(肖蕾等, 2021),但在更加精细的空间观测上,可以看到东南部边缘存在更为明显的暴雨大值区。对于大暴雨而言,贵州存在三个明显的降水中心,分别位于贵州西南部、东北部以及东南部(图2b),其中最大降水量位于六盘水市六枝特区中寨站,年平均降水量达 216.6 mm , 同时大暴雨频次也为全省最多(23次)。相比之下,特大暴雨空间分布相对分散,但仍集中在贵州东南部、东北部和西部(图2c)。其中松桃县牛郎站2010—2023年发生4次,平均降水量最大(87.0 mm)。全省大部地区暴雨及以上量级降水量占汛期总降水量比例较高,东北部以及中部以南地区普遍超过30%。铜仁市东部、黔东南州西南部、黔南州东部边缘、安顺市、毕节



注:红色圆圈为雷公山区域,蓝色圆圈为梵净山区域,黑色多边形为北盘江流域,红色三角形为日最大降水量中心。

图1 贵州境内(a)坡度,(b)坡向及(c)地形起伏度空间分布

Fig. 1 Spatial distributions of (a) slope, (b) aspect, and (c) relief in Guizhou Province

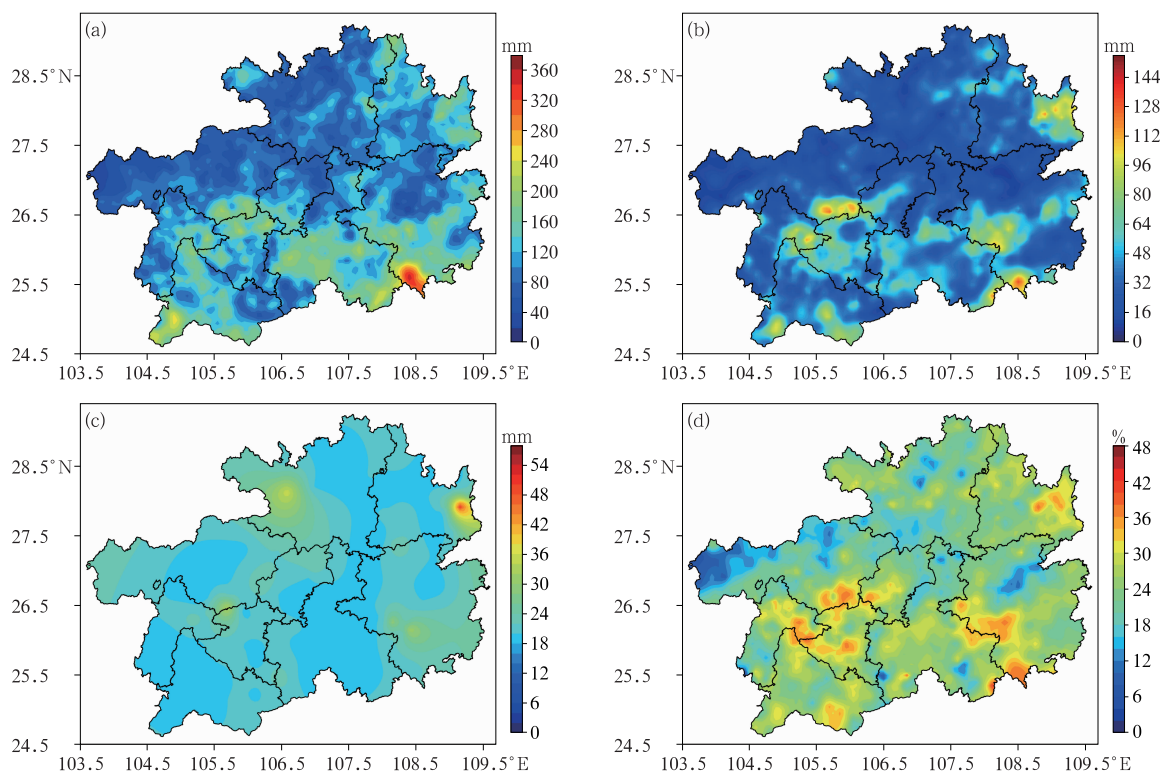


图 2 2010—2023 年汛期贵州年平均(a)暴雨,(b)大暴雨,(c)特大暴雨累计降水量和
(d)暴雨及以上降水占汛期总降水量比例的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of annual mean (a—c) accumulated precipitations of (a) rainstorm, (b) heavy rainstorm and (c) extremely heavy rainstorm, and (d) the proportion of accumulated precipitation of rainstorm and above to total precipitation in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023

市南部、六盘水市东部、黔西南州北部边缘和南部暴雨及以上量级降水占比超过 35%，黔南州西南部、黔东南州西南部和安顺市中部局地占比在 40% 以上(图 2d)。考虑到大暴雨和特大暴雨实际发生频次相对较少，因此统一归入暴雨进行分析，即下文中的暴雨包括暴雨、大暴雨及特大暴雨。

从降水强度来看，贵州暴雨最大小时降水量分布较分散，遵义市北部、毕节市东部、黔南州中东部等地均较大(图 3a)，单站最大值为 167.0 mm，出现在惠水县高镇站。最大 3 h 降水量大值区主要位于贵州东部和南部，最大为 325.0 mm，出现于开阳县顶方茶园站(图 3b)。最大 6 h 和 12 h 降水量分布与 3 h 接近，强降水集中在东部和南部(图 3c, 3d)，二者的最大降水量分别为 358.4 mm 和 367.6 mm，分别出现在开阳县顶方茶园站和雷山县高岩站。

时间分布上，贵州暴雨日数年际变化明显，呈逐年增加趋势，2021 年最多(124 d)，2016 年次之(123 d)，2021 年后有所减少。尽管区域站数量由 2010 年的 1527 个增至 2023 年的 3422 个，暴雨站

数占比(出现暴雨的站点占国家站和区域站总数的比例)仍然显示出增长趋势，2015 年后尤为明显，从 59.4% 上升至 2020 年的 90.9%，之后略有波动，2023 年又有小幅回升(图 4a)。从逐月演变来看，贵州暴雨从 4 月开始逐步增加，6—7 月达到峰值，8—9 月逐渐减少。7 月暴雨日数最多(309 d)，6 月次之(300 d)。在空间覆盖范围上，4 月暴雨站数占比仅为 41.8%，之后逐月升高，6 月达到最大(92.4%)，7 月略有减少(91.1%)，这表明 6 月暴雨日数虽少于 7 月，但影响范围普遍更广(图 4b)。

图 5 显示，2010—2023 年汛期贵州大部分地区暴雨过程都伴随着短时强降水，占比多在 60% 以上，突发性特征明显。其中在贵州北部、中部偏西以及东部局地占比超 80%，北部边缘、西部局地以及东南部部分地区达到 100%。此外，贵州暴雨降水持续时间长，大部分地区在 6 h 以上，北部以及东南部局地达 8 h 甚至 10 h 以上。其中出现在黔东南州中部雷公山南侧的暴雨兼具突发性和持续性，需要注意防范地质灾害的发生。

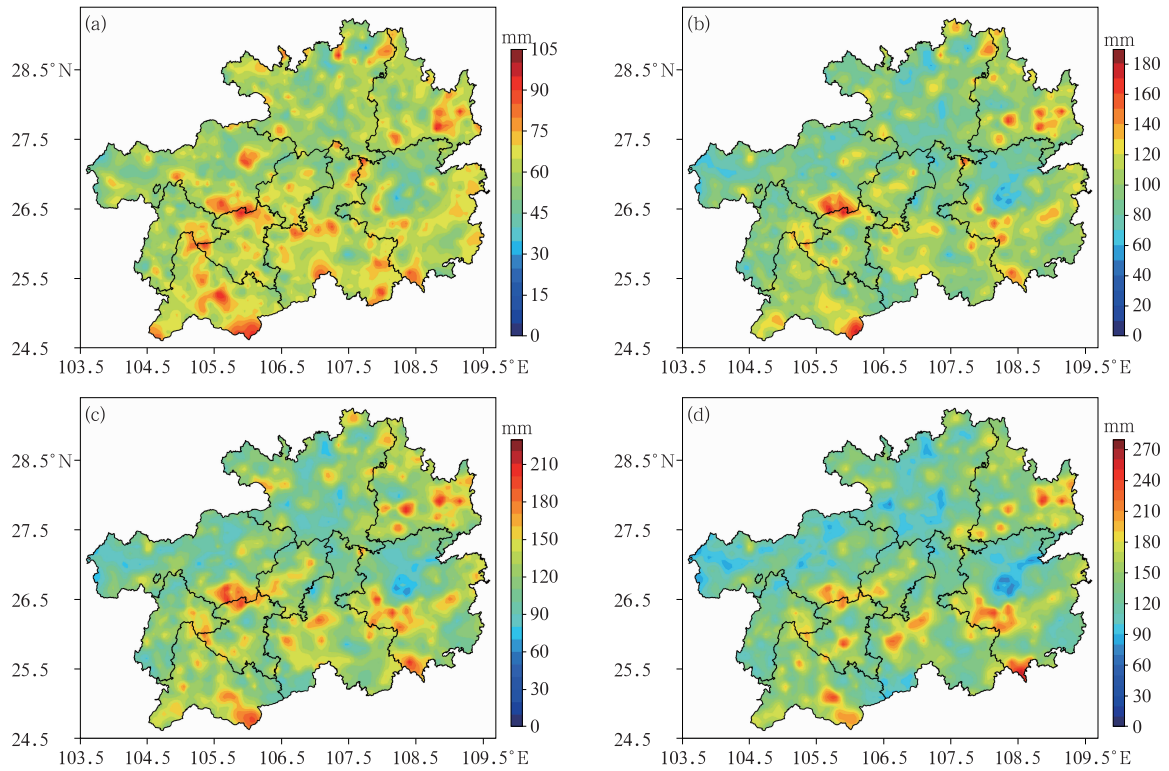


图3 2010—2023年汛期贵州年平均暴雨最大(a)1 h,(b)3 h,(c)6 h和(d)12 h降水量空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of annual mean (a) 1 h, (b) 3 h, (c) 6 h and (d) 12 h maximum precipitations of rainstorm in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023

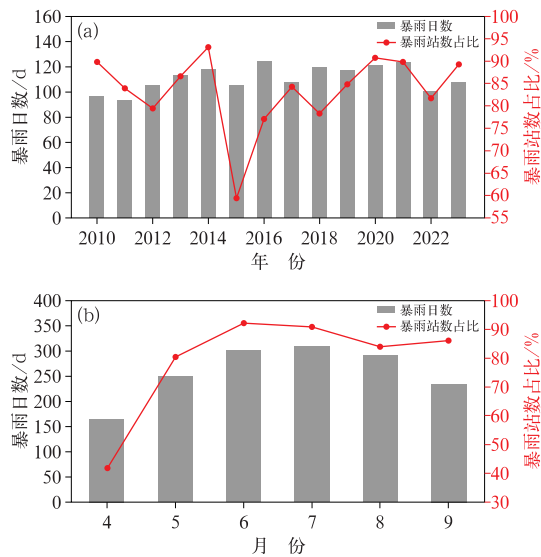


图4 2010—2023年汛期贵州暴雨日数、暴雨站数占比的(a)年变化及(b)月变化分布

Fig. 4 (a) Annual and (b) monthly variations of the number of days and proportion of stations with rainstorm in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023

2.2 暴雨日变化特征

前人研究发现,西南地区降水日变化现象明显(Yu et al, 2007b),夏季降水峰值常出现在午夜(Qian et al, 2015; 张悦含, 2021; 李娟, 2021)。将2010—2023年汛期贵州暴雨事件中各小时降水量分别进行累计,再除以总年数和总站数,得到贵州多年平均的小时降水量逐时变化,可见,贵州暴雨降水日变化主要呈单峰型分布,多集中在22时至次日08时,其中01—05时小时降水量较强,03时达到最大(平均为10.4 mm),白天降水量普遍偏少,11—20时平均小时降水量维持在2.5 mm左右(图6)。暴雨峰值多出现在夜间,尤其是02—03时,达到峰值的暴雨站次为7163站次,而出现在白天的站次较少,仅为1300~1900站次(图略)。此外,短时强降水也具有明显的日变化特征,入夜后频次明显增加,02时达到最大(7553站次),而后逐步减少,13时达到最小。与前两者不同的是,短时强降水在午后至傍晚再次发展,19时出现次峰值,但强度远小于夜间峰值,呈现非对称双峰结构(图略)。

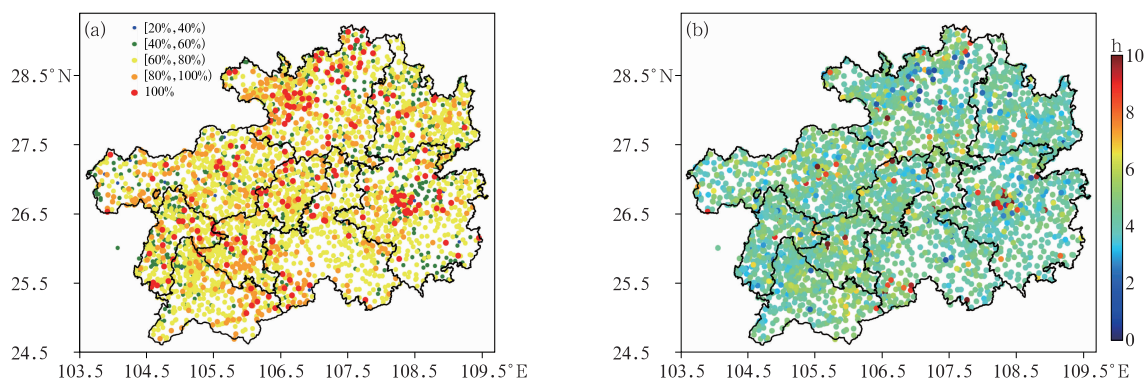


图 5 2010—2023 年汛期贵州暴雨(a)伴随短时强降水的占比和(b)降水持续时间空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of (a) the proportion of short-time heavy precipitation accompanied and (b) precipitation duration of rainstorm in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023

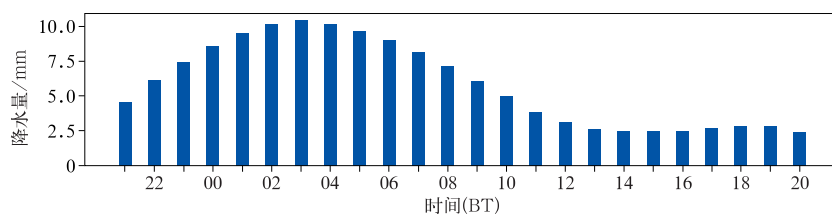


图 6 2010—2023 年汛期贵州暴雨平均小时降水量日变化

Fig. 6 Diurnal variation of average hourly precipitation of rainstorm in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023

肖蕾等(2021)指出,贵州强降水在不同时段存在空间差异。为探讨这一特征,图 7 展示了贵州暴雨的逐 3 h 累计降水量分布。21—23 时强降水主要出现在西部和东北部局地,00—02 时降水明显加强,西部和南部出现降水量大值区,集中在毕节、六盘水与安顺三市交界及黔西南州南部,黔东南州南部强

降水也有所发展。03—05 时,西部强降水中心维持但强度略有减弱,东南部降水发展加强到达峰值,黔东南州西南部最大 3 h 累计降水量达到 150.7 mm,北部降水也有一定增强。到了 06—08 时,西部降水明显减弱,强降水主要出现在东部和南部,强度略有减弱。09—11 时,东部和南部仍有强降水出现但降

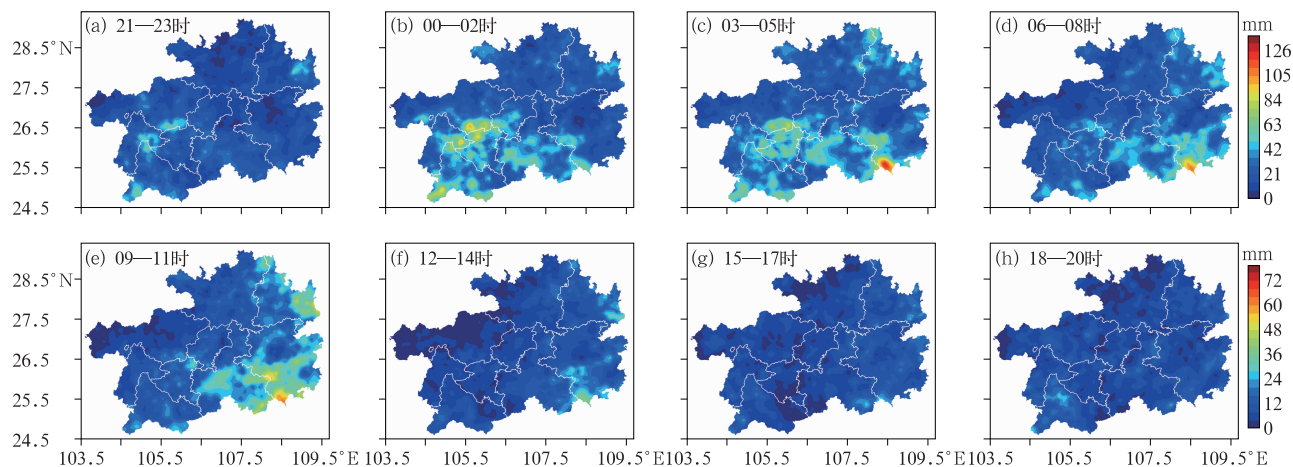


图 7 2010—2023 年汛期贵州年平均暴雨的逐 3 h 累计降水量空间分布

Fig. 7 Distributions of annual mean 3 h accumulated precipitation of rainstorm in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023

水强度进一步减弱,最大3 h累计降水量仅为84.6 mm。12—14时,强降水范围缩小至东部,强度明显减弱。15时以后,强降水在全省呈零星分布。如果将21时至次日08时作为夜间,09—20时作为白天,可以发现贵州汛期夜间强降水主要出现在西部和南部,降水强度大,多年平均夜间累计降水量最大值为414.3 mm,并有逐步东移的趋势,这可能与降水系统的移动路径有关(周明飞等,2016)。相比之下,白天强降水主要出现在贵州东部,最大平均降水量为185.7 mm,仅约为夜间降水量的一半,并且午

后强降水分布分散,这可能与夏季局地热力对流的发展有关。

从图7中可见,贵州强降水具有一定的传播特征(陈炯等,2013;周明飞等,2016)。图8进一步给出2010—2023年贵州暴雨小时降水量的纬度-时间以及经度-时间演变。与图6和图7对应,贵州强降水主要出现在02—03时,集中位于 $24.7^{\circ}\sim 25.2^{\circ}\text{N}$ 、 $25.7^{\circ}\sim 26.7^{\circ}\text{N}$ 的大值区,纬向传播特征并不明显,而其北部 $28.1^{\circ}\sim 29.1^{\circ}\text{N}$ 存在另一个降水中心,随时间表现出略向南传播的倾向(图8a)。另一方面,

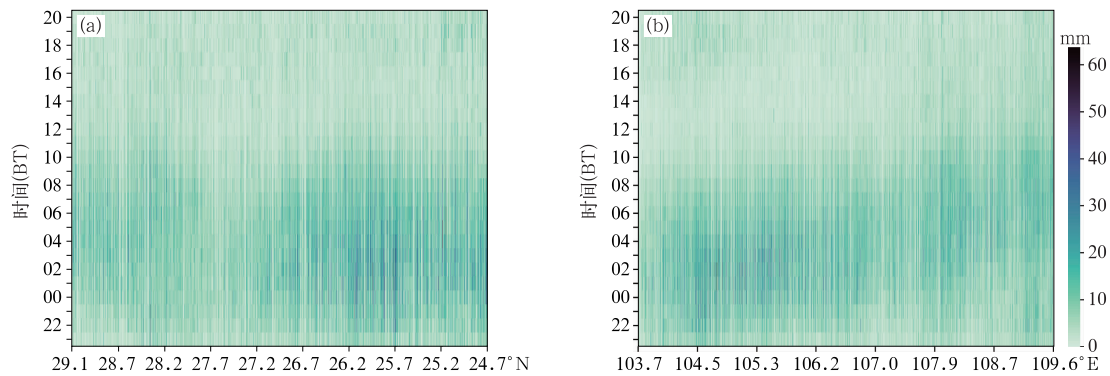


图8 2010—2023年汛期贵州暴雨小时降水量的(a)纬度-时间演变和(b)经度-时间演变
Fig. 8 (a) Latitude-time and (b) longitude-time evolutions of hourly precipitation of rainstorm in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023

从经度-时间演变上可以看到,贵州强降水往往从22时之后开始,自贵州西部地区($104.5^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E}$ 附近)发展加强,在01—04时左右达到峰值,并随着时间逐步向东传播,在11时以后趋于减弱和结束(图8b)。这也部分解释了图7中贵州强降水夜间集中于西部,而白天集中于东部的原因。

3 暴雨与地形的关系

贵州地形复杂,暴雨地域性分布特征明显(姚宁等,2025)。结合暴雨强降水频次、850 hPa气候平均风场与地形分布可见(图9),贵州三个暴雨频发区与地形及低层盛行风向配置密切,体现了动力与地形的耦合作用。西部暴雨频发区位于北盘江流域北侧向高海拔山区的陡峭过渡带。夏季偏南暖湿气流遇地形强烈抬升,加之水汽输送充沛,因此暴雨频次高、范围广、强度大。东南部暴雨频发区位于雷公山南侧,低层偏南风或东南风在迎风坡被迫爬升,促

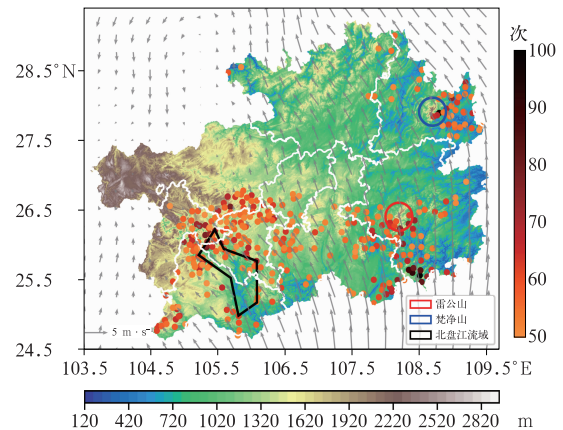


图9 2010—2023年汛期贵州暴雨量级降水频次(彩色圆点),850 hPa气候平均风场(风矢)以及地形高程(填色)分布

Fig. 9 Distribution of frequency of rainstorm (colored dot), 850 hPa climatological mean wind field (vector) and terrain elevation (colored) in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023

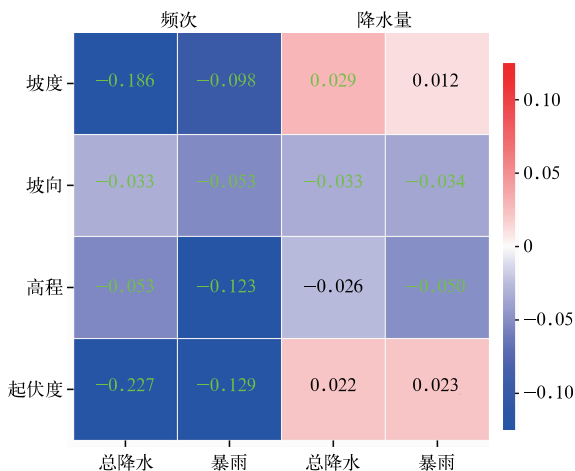
进凝结和降水增强。值得注意的是,暴雨频次最高值出现在东南部边缘的月亮山附近,此处受雷公山迎风坡延伸及月亮山二次阻挡辐合作用,造成水汽汇聚和持续抬升,成为贵州暴雨最集中的区域。东北部暴雨中心位于梵净山东侧,低层浅薄偏东气流受近南北走向的山脉近垂直阻挡,在山脉东侧触发强烈地形抬升,配合适宜的湿层条件,易出现局地强降水(陈军等,2020)。可见,贵州暴雨的时空分布不仅受坡度、山脉走向等静态地形因子制约,更与低层风场和地形的动力配置密切相关,体现了地形动力抬升与水汽输送对暴雨的协同触发机制。

图 10 分析了不同地形因子分别与总降水(所有量级)、暴雨的降水频次和降水量的线性相关。从频次上看,坡度、坡向、高程以及起伏度都与其呈显著负相关,表明坡度量越大、坡向偏西偏北、高程越高、起伏度越大,总降水和暴雨降水频次越小,这与前人的研究一致(Tan et al, 2024)。其中,总降水频次与起伏度的负相关性最高,坡度次之,降水频次则与起伏度和高程相关性较高。从降水量来看,总降水量和坡度呈显著正相关,与坡向呈负相关,表明西北坡向降水量偏少。相比之下,高程和起伏度与总降水量关系不显著。与总降水量类似,暴雨降水量与坡向、高程均为微弱负相关,这可能与降水量随高度先增后减的变化规律有关(蒋忠信,1988),而坡度、起

伏度对暴雨降水量的影响不明显。值得注意的是,各地形因子与降水频次、降水量的相关系数普遍较低,表明单一地形因子可能对降水的直接解释能力有限。为探讨多地形因子的协同作用,本文进一步利用主成分分析法构建多元组合地形参数,其中组合因子与总降水频次的相关系数达到 $-0.213(P < 0.05)$,接近单一因子的最高相关水平,与暴雨降水频次相关系数也提升至 $-0.168(P < 0.05)$ 。同时,与总降水量及暴雨降水量的相关性均较单一因子有所增强且都通过了显著性水平检验($P < 0.05$)。可见,贵州地形与降水的关系十分复杂,通过多地形因子的组合分析可以在一定程度上提高对降水空间分布的解释能力。

Zhu et al(2022)、李智玉等(2024)研究指出,地形因子与暴雨站次并非简单的线性对应关系。就贵州而言,当坡度 $<20^\circ$ 时,暴雨站次随坡度增加而增加, $>20^\circ$ 后随坡度增大而减小。从坡向上来看,南坡暴雨站次最多,西南和东北坡次之,正北坡最少,反映了贵州暖季以夏季风为主的水汽输送特征。高程方面,在 $800\sim 1000\text{ m}$ 范围内暴雨站次随高程增加而增加,当 $>1400\text{ m}$ 后暴雨站次随之快速减少。在起伏度上,当起伏度 $<200\text{ m}$ 时,暴雨站次随起伏度增加, $>200\text{ m}$ 后明显减少(图略)。为探讨多因子协同作用对暴雨分布的影响,本文基于上述规律对各地形因子进行进一步分类,并选取暴雨站次排名前十的地形组合进行分析(表 1)。其中,坡度分为缓坡($<10^\circ$)、中坡($10^\circ\sim 20^\circ$)、陡坡($20^\circ\sim 30^\circ$)和急陡坡($>30^\circ$),高程分为低海拔($<800\text{ m}$)、中海拔($800\sim 1400\text{ m}$)、高海拔($1400\sim 2000\text{ m}$)和极高海拔($>2000\text{ m}$),起伏度为分小起伏($<100\text{ m}$)、中起伏($100\sim 200\text{ m}$)、大起伏($200\sim 300\text{ m}$)和极大起伏($>300\text{ m}$)。统计结果发现,高站次组合主要发生在迎风坡,并且以南坡为主,反映了南坡对夏季风暖湿气流的强烈抬升作用,表明地形因子与气象要素的配合对暴雨发生十分关键。同时,在急陡/中坡、南坡、中海拔、大/中起伏和迎风坡的组合下暴雨站次达到最高(1801~1962 站次),表明南坡、中起伏及中坡度等单一优势地形特征在一定配置下可产生显著的协同增强效应,地形因子间的相互配合对强降水空间分布至关重要。

基于 GWR 模型和气象观测数据,得到贵州暴雨频次主导地形因子的精细化空间分布(图 11)。贵州主导的地形因子包括高程、坡度、坡向和起伏



注:绿色数字表示通过 0.05 的显著性水平检验。

图 10 2010—2023 年汛期贵州总降水、暴雨的降水频次、降水量与各地形因子的相关系数

Fig. 10 Correlation coefficients between the frequency, precipitation of total precipitation and rainstorm and the topographic factors in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023

表 1 2010—2023 年汛期贵州暴雨前十种地形因子组合下的暴雨站次分布

Table 1 Distribution of rainstorm station counts under the combinations of top ten topographic factors in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023

组合编号	坡度分类	坡向分类	高程分类	起伏度分类	迎风坡/背风坡	暴雨站次
1	急陡坡	南坡	中海拔	中起伏	迎风坡	1962
2	急陡坡	南坡	中海拔	大起伏	迎风坡	1867
3	中坡	南坡	中海拔	中起伏	迎风坡	1801
4	缓坡	南坡	中海拔	小起伏	迎风坡	1654
5	陡坡	南坡	中海拔	中起伏	迎风坡	1621
6	急陡坡	南坡	低海拔	大起伏	迎风坡	1620
7	急陡坡	南坡	中海拔	大起伏	迎风坡	1574
8	急陡坡	南坡	低海拔	中起伏	迎风坡	1560
9	缓坡	东坡	中海拔	小起伏	迎风坡	1362
10	中坡	南坡	中海拔	小起伏	迎风坡	1309

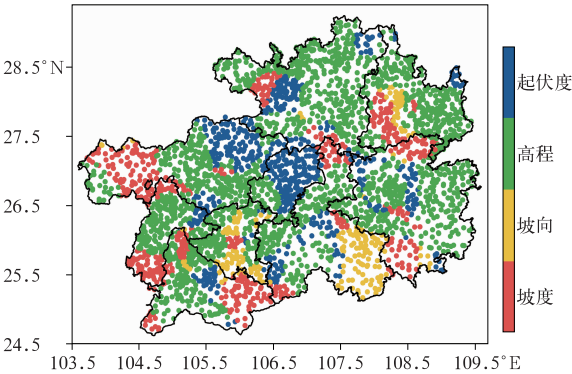


图 11 2010—2023 年汛期贵州各站点暴雨频次主导地形因子空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of dominant topographic factors influencing the frequency of rainstorm at all stations in Guizhou Province during the flood season from 2010 to 2023

度,其中大部地区以高程为主导。贵州地处低纬度地区,暖季受到夏季风的强烈影响,孟加拉湾偏南暖气流带来充沛的水汽,而水汽随着地形抬升凝结是降水的主要机制,因此高程对降水的影响显著。相比之下,另外三个地形因子影响较为局地,其中起伏度主导贵州中部、西北部和东部、南部局地,如遵义市西部赤水河流域;坡度主导贵州西部、南部和中部偏东局地的高山或江河流域;而坡向主导贵州的东部和南部边缘。由于地形起伏、太阳夹角等导致的辐射增暖不均匀可触发局地暴雨,使得起伏度及坡度等局地影响因子的作用较强。贵州西部暴雨频发区主导地形因子相对分散,北盘江北段河谷为坡度主导,其北侧过渡带为起伏度主导,其余大部以高程为主,坡向作用最小。东南部暴雨频发区主要为坡度和高程主导,而东北部强降水中心主要为高程以及部分起伏度因子主导,反映了贵州复杂地形下

多种地形因子的综合作用。

4 结论和讨论

本文利用贵州 2010—2023 年汛期(4—9 月)国家站和区域站逐小时降水资料、SRTM 90 m 分辨率高程数据以及 ERA5 再分析数据,开展贵州暴雨精细化特征研究,并利用多元地形组合分析和地理加权回归模型探讨地形对于暴雨分布的影响。得到结论如下:

- (1)贵州暴雨空间分布非均匀性显著。高分辨率观测数据表明,贵州暴雨频次和降水量最大值均位于贵州东南部边缘,大暴雨具有西南、东北、东南三个中心,而特大暴雨分布相对分散。全省大部地区暴雨降水量占汛期总降水量的 24% 以上,其中东北部及中南部区域占比普遍超过 30%,局地可达 35%~40%。就降水强度而言,贵州暴雨小时降水量分布零散,但随历时的增加逐渐向降水大值区集中。在时间分布上,贵州暴雨一般从 4 月开始增加,6—7 月集中爆发,8—9 月逐步减少。暴雨日数以及站数占比年际变化明显,呈现一定的增加趋势,尤其在 2015 年后,分别在 2021 年和 2020 年达到峰值。此外,贵州暴雨具有突发性和持续性,大部地区暴雨都伴随着短时强降水出现,占比多达 60% 以上,降水持续时间普遍超过 6 h,北部及东南部局地超过 8~10 h,使得贵州暴雨危险性、致灾性较高。
- (2)贵州降水量日变化特征明显。降水量呈单峰型日变化,集中于 22 时至次日 08 时,白天偏少。小时降水量和暴雨站次峰值出现在 03 时,短时强降水站次在 02 时达到峰值后减弱,午后至傍晚略有发展但强度远弱于夜间,呈非对称双峰型分布。夜间

强降水主要位于西部和南部,降水量约为白天的 2 倍,且自西向东传播加强,这可能与降水系统的移动有关。09—14 时东部强降水逐渐减弱,午后呈零星分布,这可能与夏季局地热力对流发展有关。

(3) 贵州地形对暴雨分布影响显著。三个暴雨频发区分别位于北盘江北侧、雷公山南侧和梵净山东侧,位于低层盛行风向的迎风坡。统计结果显示,降水频次与坡度、坡向、高程以及起伏度均呈显著负相关关系,而降水量与各地形因子的关系有所差异,其中总降水量受坡度和坡向影响显著,暴雨降水量则仅与坡向、高程呈微弱负相关。进一步分类后发现,暴雨站次在南坡最多,正北坡最少,而坡度、高程和起伏度与暴雨站次并非简单的线性关系。在坡度 $< 20^\circ$ 、高程 800~1000 m、起伏度 < 200 m 范围内,暴雨站次随因子增大而增加,超出阈值后则有所减少。多因子组合分析表明,急陡坡/中坡、南坡、中海拔、大/中起伏和迎风坡的地形配置最有利于暴雨的发生。利用 GWR 模型诊断发现,在贵州大部地区,高程是主导暴雨分布的重要地形因子,而起伏度、坡度、坡向多为局地作用,出现在地形起伏剧烈或河流、高山附近区域。

中国西南地区受地形影响,降水分布十分复杂,以往受观测密度以及观测精度限制,对于暴雨的精细化研究较为缺乏,本研究基于最新站点资料,系统分析了贵州暴雨的时空分布和日变化特征,有助于加深预报员对暴雨灾害性天气的认识,为精细化预报提供理论参考。同时,当前业务数值模式由于分辨率以及地形平滑问题,对复杂山区局地性强降水的预报效果不佳(Schauwecker et al, 2021)。本研究通过分析暴雨与各地形因子间的关系,反映了精细降水与复杂地形的对应关系,可为业务数值模式在复杂山区的误差诊断和客观订正提供依据。值得注意的是,本文仅采用了 GWR 模型探究地形与降水的关系,还可以运用最小二乘回归(Basist et al, 1994)、分层地理加权回归克里金(Kumari et al, 2017)以及多尺度地理加权回归模型(Fotheringham et al, 2017)等方法,尽管已有研究表明 GWR 模型精度较高,对于地形与降水的关系刻画能力较好(Kumari et al, 2017),但不同构建方法带来的差异仍值得进一步探讨。同时,本研究主要关注静态地形因子,未直接考虑水汽通量、垂直速度等关键气象因子的实时作用,今后还需结合高分辨率再分析资料或数值模拟,定量剖析特定天气形势下地形与水

汽、热力条件的耦合机制,并进一步考察其他地形因子的影响。

参考文献

- 白慧,陈贞红,李长波,等,2012. 贵州省主汛期暴雨的气候特征分析[J]. 贵州气象,36(3):1-6. Bai H, Chen Z H, Li C B, et al, 2012. Climatic characteristics of rainstorms in main flood seasons of Guizhou[J]. J Guizhou Meteor, 36(3):1-6(in Chinese).
- 毕宝贵,刘月巍,李泽椿,2005. 2002 年 6 月 8—9 日陕南大暴雨数值模拟研究[J]. 大气科学,29(5):814-826. Bi B G, Liu Y W, Li Z C, 2005. Numerical simulations of extremely heavy rain in the southern Shaanxi Province during 8—9 June 2002[J]. Chin J Atmos Sci, 29(5):814-826(in Chinese).
- 陈炯,郑永光,张小玲,等,2013. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J]. 气象学报,71(3):367-382. Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season[J]. Acta Meteor Sin, 71(3):367-382(in Chinese).
- 陈军,何为,杨群,等,2020. 低层偏东气流对贵州梵净山东侧强降水的作用[J]. 暴雨灾害,39(2):158-166. Chen J, He W, Yang Q, et al, 2020. Effect of low-level eastward airflow on formation of severe precipitation on the east side of Fanjing Mountain[J]. Torr Rain Dis, 39(2):158-166(in Chinese).
- 陈子凡,王磊,李谢辉,等,2022. 西南地区极端降水时空变化特征及其与强 ENSO 事件的关系[J]. 高原气象,41(3):604-616. Chen Z F, Wang L, Li X H, et al, 2022. Spatiotemporal change characteristics of extreme precipitation in southwestern China and its relationship with intense ENSO events[J]. Plateau Meteor, 41(3):604-616(in Chinese).
- 甘文强,李刚,万雪丽,2018. 近 57a 5—9 月贵州极端强降水变化特征[J]. 干旱气象,36(4):617-623,635. Gan W Q, Li G, Wan X L, 2018. Variation characteristics of extreme precipitation during May—September in Guizhou Province in recent 57 years[J]. J Arid Meteor, 36(4):617-623,635(in Chinese).
- 高珩洲,李国平,2020. 黔东南地形影响局地突发性暴雨的中尺度天气分析与数值试验[J]. 高原气象,39(2):301-310. Gao H Z, Li G P, 2020. Mesoscale synoptic meteorology analysis and numerical experiment of local sudden rainstorm affected by topography in southeast part of Guizhou Province[J]. Plateau Meteor, 39(2):301-310(in Chinese).
- 黄子立,吴小飞,毛江玉,2021. CMIP6 模式水平分辨率对模拟我国西南地区夏季极端降水的影响评估[J]. 高原气象,40(6):1470-1483. Huang Z L, Wu X F, Mao J Y, 2021. An evaluation for impacts of the horizontal resolution of CMIP6 models on simulating extreme summer rainfall over Southwest China[J]. Plateau Meteor, 40(6):1470-1483(in Chinese).
- 蒋忠信,1988. 山地降水垂直分布模式讨论[J]. 地理研究,7(1):73-78. Jiang Z X, 1988. A discussion on the mathematical model of

- mountain precipitation with vertical distribution[J]. Geogr Res, 7(1):73-78(in Chinese).
- 李娟, 2021. 四川盆地夜雨的时空变化特征及形成机理研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Li J, 2021. The spatio-temporal variation and formation mechanism of nocturnal precipitation over the Sichuan Basin[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 李智玉, 杜小玲, 朱育雷, 等, 2024. 贵州典型地形下强降水特征及其模式预报订正研究[J]. 暴雨灾害, 43(6):648-656. Li Z Y, Du X L, Zhu Y L, et al, 2024. Study on characteristics of heavy precipitation and model prediction correction under typical topography in Guizhou[J]. Torr Rain Dis, 43(6):648-656(in Chinese).
- 廖菲, 洪延超, 郑国光, 2007. 地形对降水的影响研究概述[J]. 气象科技, 35(3):309-316. Liao F, Hong Y C, Zheng G G, 2007. Review of orographic influences on surface precipitation[J]. Meteor Sci Technol, 35(3):309-316(in Chinese).
- 罗乃兴, 周林, 李杨, 等, 2023. 基于小时降水资料的贵州降水精细特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 17(4):38-44. Luo N X, Zhou L, Li Y, et al, 2023. Precipitation distribution in Guizhou Province based on hourly rain-gauge data[J]. Desert Oasis Meteor, 17(4):38-44(in Chinese).
- 毛冬艳, 曹艳察, 朱文剑, 等, 2018. 西南地区短时强降水的气候特征分析[J]. 气象, 44(8):1042-1050. Mao D Y, Cao Y C, Zhu W J, et al, 2018. Climatic characteristics of short-time severe precipitation in Southwest China[J]. Meteor Mon, 44(8):1042-1050(in Chinese).
- 孙鹏森, 刘世荣, 李崇巍, 2004. 基于地形和主风向效应模拟山区降水空间分布[J]. 生态学报, 24(9):1910-1915. Sun P S, Liu S R, Li C W, 2004. Estimation of precipitation using altitude and prevailing wind direction effect index in mountainous region[J]. Acta Ecol Sin, 24(9):1910-1915(in Chinese).
- 王芬, 曹杰, 李腹广, 等, 2015. 贵州不同等级降水日数气候特征及其与降水量的关系[J]. 高原气象, 34(1):145-154. Wang F, Cao J, Li F G, et al, 2015. Climate characteristics of rain days and the relationship between rain days and total amount of precipitation in Guizhou[J]. Plateau Meteor, 34(1):145-154(in Chinese).
- 王芬, 严小冬, 谷晓平, 等, 2017. 2006—2015年黔西南初夏短时强降水时空特征分析[J]. 暴雨灾害, 36(5):460-466. Wang F, Yan X D, Gu X P, et al, 2017. Characteristics of one-hour short-time heavy precipitation over southwestern Guizhou in the summer during 2006—2015[J]. Torr Rain Dis, 36(5):460-466(in Chinese).
- 王芬, 杨若文, 唐浩鹏, 等, 2013. 近48年贵州暴雨日数及降水总量的变化特征研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 35(S1):236-243. Wang F, Yang R W, Tang H P, et al, 2013. Climate characteristics of the number of rainstorm days and the total amount of precipitation in Guizhou Province[J]. J Yunnan Univ, 35(S1):236-243(in Chinese).
- 汪靖, 张少波, 袁利平, 2021. 西南地区极端降水变化特征分析[J]. 气象科技进展, 11(6):31-37. Wang J, Zhang S B, Yuan L P, 2021. Analysis on the characteristics of extreme precipitation in southwestern China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 11(6):31-37(in Chinese).
- 王凌梓, 苗峻峰, 韩芙蓉, 2018. 近10年中国地区地形对降水影响研究进展[J]. 气象科技, 46(1):64-75. Wang L Z, Miao J F, Han F R, 2018. Overview of impact of topography on precipitation in China over last 10 years[J]. Meteor Sci Technol, 46(1):64-75(in Chinese).
- 肖红茹, 周春花, 龙柯吉, 等, 2025. 四川盆地两次持续性极端暴雨对比分析[J]. 气象, 51(3):269-284. Xiao H R, Zhou C H, Long K J, et al, 2025. Comparative analyses of two persistent extreme rainstorms in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 51(3):269-284(in Chinese).
- 肖蕾, 杜小玲, 武正敏, 等, 2021. 贵州省短时强降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 40(4):383-392. Xiao L, Du X L, Wu Z M, et al, 2021. Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall in Guizhou Province[J]. Torr Rain Dis, 40(4):383-392(in Chinese).
- 杨静, 罗宇翔, 杨利群, 等, 2011. 贵州南部山区一次大暴雨的数值模拟[J]. 气象科学, 31(3):298-304. Yang J, Luo Y X, Yang L Q, et al, 2011. Numerical simulation and analysis of a heavy rain in south mountainous area of Guizhou[J]. J Meteor Sci, 31(3):298-304(in Chinese).
- 姚宁, 胡玮, 刘勋勋, 等, 2025. 贵州1981~2020年暴雨非均匀性研究[J]. 气候变化研究快报, 14(1):142-149. Yao N, Hu W, Liu X X, et al, 2025. Research on the non-uniformity of rainstorms in Guizhou from 1981 to 2020[J]. Climate Change Res Lett, 14(1):142-149(in Chinese).
- 宇如聪, 李建, 2016. 中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析[J]. 气象学报, 74(1):18-30. Yu R C, Li J, 2016. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China[J]. Acta Meteor Sin, 74(1):18-30(in Chinese).
- 曾礼, 高艳红, 蒋盈沙, 等, 2022. 地形因子对华东地区降水影响的尺度效应研究[J]. 地球科学进展, 37(5):535-548. Zeng L, Gao Y H, Jiang Y S, et al, 2022. Scale effects of terrain factors on precipitation in East China[J]. Adv Earth Sci, 37(5):535-548(in Chinese).
- 曾礼, 高艳红, 张果, 等, 2023. 华东地区主要地形因子对极端小时降水峰型的影响研究[J]. 大气科学学报, 46(3):369-379. Zeng L, Gao Y H, Zhang G, et al, 2023. The influence of main topographic factors on peak types of extreme hourly precipitation in eastern China[J]. Trans Atmos Sci, 46(3):369-379(in Chinese).
- 张芳, 张芳华, 孔期, 等, 2022. 2018年5月21日四川盆地极端大暴雨的中尺度成因和预报偏差分析[J]. 气象, 48(6):691-704. Zhang F, Zhang F H, Kong Q, et al, 2022. Mesoscale mechanisms and forecast bias of the extreme rainstorm in Sichuan Basin on 21 May 2018[J]. Meteor Mon, 48(6):691-704(in Chinese).
- 张铭明, 李建, 甘玉婷, 等, 2021. 基于GWR模型的中国中东部降水与海拔高度关系特征分析[J]. 暴雨灾害, 40(1):1-11. Zhang M M, Li J, Gan Y T, et al, 2021. Analysis of the relationship

- between precipitation and altitude over central and eastern China based on the geographically weighted regression model[J]. *Torr Rain Dis*, 40(1): 1-11(in Chinese).
- 张琪, 李跃清, 2014. 近 48 年西南地区降水量和雨日的气候变化特征[J]. *高原气象*, 33(2): 372-383. Zhang Q, Li Y Q, 2014. Climatic variation of rainfall and rain day in Southwest China for last 48 years[J]. *Plateau Meteor*, 33(2): 372-383(in Chinese).
- 张悦含, 2021. 四川盆地区域降水形成及日变化机制[D]. 南京: 南京大学. Zhang Y H, 2021. Mechanism for the formation and diurnal variation of precipitation over Sichuan Basin regions[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese).
- 赵海英, 薄燕青, 邱贵强, 等, 2017. 地形对山西暴雨影响的数值模拟研究[J]. *气象与环境科学*, 40(2): 84-91. Zhao H Y, Bo Y Q, Qiu G Q, et al, 2017. Numerical simulation study of topography effects on a severe rainstorm in Shanxi Province[J]. *Meteor Environ Sci*, 40(2): 84-91(in Chinese).
- 赵衍斌, 李强, 周盈颖, 等, 2023. 重庆西部平行岭谷地形作用下的一次局地暴雨天气过程的分析[J]. *气象*, 49(6): 657-670. Zhao Y B, Li Q, Zhou Y Y, et al, 2023. Analysis of a local rainstorm process in western Chongqing under the effect of parallel ridge-valley topography[J]. *Meteor Mon*, 49(6): 657-670(in Chinese).
- 钟水新, 2020. 地形对降水的影响机理及预报方法研究进展[J]. *高原气象*, 39(5): 1122-1132. Zhong S X, 2020. Advances in the study of the influencing mechanism and forecast methods for orographic precipitation[J]. *Plateau Meteor*, 39(5): 1122-1132(in Chinese).
- 周明飞, 熊伟, 杜小玲, 2016. 贵州近 10 年短时强降水统计分析[J]. *成都信息工程大学学报*, 31(4): 425-432. Zhou M F, Xiong W, Du X L, 2016. Statistical analysis of severe short time precipitation in Guizhou for the latest 10 years[J]. *J Chengdu Univ Inf Technol*, 31(4): 425-432(in Chinese).
- 周文, 王晓芳, 杨浩, 等, 2021. 造成贵州水城“7·23”山体滑坡的大暴雨成因分析[J]. *气象*, 47(8): 982-994. Zhou W, Wang X F, Yang H, et al, 2021. Causes analysis of severe torrential rain inducing the landslide in Shuicheng of Guizhou Province on 23 July 2019[J]. *Meteor Mon*, 47(8): 982-994(in Chinese).
- Basist A, Bell G D, Meentemeyer V, 1994. Statistical relationships between topography and precipitation patterns[J]. *J Climate*, 7(9): 1305-1315.
- Brunsdon C, McClatchey J, Unwin D J, 2001. Spatial variations in the average rainfall-altitude relationship in Great Britain: an approach using geographically weighted regression[J]. *Int J Climatol*, 21(4): 455-466.
- Cheng Q P, Gao L, Zuo X A, et al, 2019. Statistical analyses of spatial and temporal variabilities in total, daytime, and nighttime precipitation indices and of extreme dry/wet association with large-scale circulations of Southwest China, 1961—2016[J]. *Atmos Res*, 219: 166-182.
- Fotheringham A S, Yang W B, Kang W, 2017. Multiscale geographically weighted regression (MGWR)[J]. *Ann Am Assoc Geogr*, 107(6): 1247-1265.
- Kumari M, Singh C K, Basistha A, et al, 2017. Non-stationary modeling framework for rainfall interpolation in complex terrain[J]. *Int J Climatol*, 37(11): 4171-4185.
- Liu M X, Xu X L, Sun A, 2015. Decreasing spatial variability in precipitation extremes in southwestern China and the local/large-scale influencing factors[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 120(13): 6480-6488.
- Qian T T, Zhao P, Zhang F Q, et al, 2015. Rainy-season precipitation over the Sichuan Basin and adjacent regions in southwestern China[J]. *Mon Wea Rev*, 143(1): 383-394.
- Schauwecker S, Schwarb M, Rohrer M, et al, 2021. Heavy precipitation forecasts over Switzerland—an evaluation of bias-corrected ECMWF predictions[J]. *Wea Climate Extremes*, 34: 100372.
- Smith R B, 1979. The influence of mountains on the atmosphere[J]. *Adv Geophys*, 21: 87-230.
- Tan H M, He Z H, Yu H, et al, 2024. Characterization of extreme rainfall changes and response to temperature changes in Guizhou Province, China[J]. *Sci Rep*, 14(1): 20495.
- Xu W X, Zipser E J, 2011. Diurnal variations of precipitation, deep convection, and lightning over and east of the eastern Tibetan Plateau[J]. *J Climate*, 24(2): 448-465.
- Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al, 2007a. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China[J]. *Geophys Res Lett*, 34(13): L13703.
- Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al, 2007b. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. *Geophys Res Lett*, 34(1): L01704.
- Yu R C, Yuan W H, Li J, et al, 2010. Diurnal phase of late-night against late-afternoon of stratiform and convective precipitation in summer southern contiguous China[J]. *Climate Dyn*, 35(4): 567-576.
- Yuan W H, Yu R C, Chen H M, et al, 2010. Subseasonal characteristics of diurnal variation in summer monsoon rainfall over central eastern China[J]. *J Climate*, 23(24): 6684-6695.
- Zhang C, 2020. Moisture sources for precipitation in Southwest China in summer and the changes during the extreme droughts of 2006 and 2011[J]. *J Hydrol*, 591: 125333.
- Zheng Y G, Chen J, Zhu P J, 2008. Climatological distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its vicinity during summer[J]. *Chin Sci Bull*, 53(10): 1574-1586.
- Zhu D Y, Yang Q, Xiong K N, et al, 2022. Spatiotemporal variations in daytime and night-time precipitation on the Yunnan-Guizhou Plateau from 1960 to 2017[J]. *Atmosphere*, 13(3): 415.

(本文责编:王婷波)