暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

近10 a偏东气流影响下梵净山东侧暴雨时空特征

吕春艳 向楠 冉红玲 杜小玲 桂永刚 陈超

Spatial-temporal characteristics of rainstorm on the eastern Fanjing Mountain under the influence of easterly airflow in recent ten years

LYU Chunyan，XIANG Nan，RAN Hongling，DU Xiaoling，GUI Yonggang，CHEN Chao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-135

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

低层偏东气流对贵州梵净山东侧强降水的作用

Effect of low-level eastward airflow on formation of severe precipitation on the east side of Fanjing Mountain

暴雨灾害. 2020, 39(2): 158-166 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.006

梵净山东南侧夏季暖区暴雨中尺度系统演变与环境场特征个例分析

Analysis on mesoscale system evolution and environmental field characteristics of a warm-sector heavy rainfall event in summer in the southeast of Fanjing Mountains

暴雨灾害. 2021, 40(2): 125-135 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.003

贵州典型地形下强降水特征及其模式预报订正研究

Study on characteristics of heavy precipitation and model prediction correction under typical topography in Guizhou

暴雨灾害. 2024, 43(6): 648-656 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-079

近10 a气候变化影响下四川山地暴雨事件的演变特征

Evolution characteristics of mountain rainstorms over Sichuan Province in the past ten years under the influence of climate change

暴雨灾害. 2020, 39(4): 335-343 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.003

近10 a浙江省极端短时强降水时空特征分析

Spatio-temporal characteristics of short-duration extreme rainfall in the recent ten years in Zhejiang Province

暴雨灾害. 2021, 40(6): 599-607 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.004

超低空急流形成的爬、绕流对长白山地区一次突发性暴雨的影响

Impact of flow over and flow around caused by super low-level jet on a sudden rainstorm over the Changbai Mountains

暴雨灾害. 2023, 42(3): 273-282 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-035

关注微信公众号，获得更多资讯信息

吕春艳,向楠,冉红玲,等.2025.近 10 a 偏东气流影响下梵净山东侧暴雨时空特征[J].暴雨灾害,44(3):400−409. LYU Chunyan, XIANG Nan, RAN Hongling, et al. 2025. Spatial-temporal characteristics of rainstorm on the eastern Fanjing Mountain under the influence of easterly airflow in recent ten years [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):400−409 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−135

近 10 a 偏东气流影响下梵净山东侧暴雨时空特征

吕春艳[1], 向楠[2], 冉红玲[1], 杜小玲[3], 桂永刚[1], 陈超[1]

(1. 贵州省铜仁市气象局, 铜仁 554000; 2. 贵州省山地气象科学研究所, 贵阳 550081; 3. 贵州省气象台, 贵阳 550002)

摘　要: 受地形和低层偏东气流共同影响, 梵净山东侧强降水频发, 给当地人民生命财产安全造成严重威胁。利用 2014—2023 年贵州省铜仁市国家气象站和区域气象站降水观测数据以及 ERA5 再分析数据, 分析低层偏东气流影响下梵净山东侧暴雨 (Rainstorm on the eastern Fanjing Mountain under the influence of easterly airflow, RF) 的时空特征。结果表明: (1) RF 常出现在 925 hPa 盛行偏东气流背景下, 每年发生 15 次左右, 集中在 5—9 月, 6 月和 8 月发生次数最多, 其次是 7 月, 6—8 月的 RF 占所有 RF 事件的 65.3%。(2) RF 降水具有显著的区域性特征, 地形显著影响降水分布, 降水量、频率和强度大值中心出现在海拔高度差最大的梵净山东麓, 其次是梵净山东北侧开口朝向东北方向的喇叭口地形狭窄处。大暴雨以上量级的降水频率和强度分布表明梵净山东侧比东北侧更易发生较大范围的极端暴雨。(3) RF 降水量、强度和频率均呈现白天低、夜间高的日变化特征, 降水强度显著影响降水量日变化, 降水量在 08 时的主峰值受 5 月和 6 月降水强度的影响, 22 时左右的次峰值受 8 月降水强度的影响, 而 15 时左右的第三峰值受 5 月和 7 月降水强度的影响。同时 5—9 月各月在 22 时左右均具有降水量大、强度较强的特征。(4) 6 月和 7 月的 RF 具有极端性, 持续时间达 6~7 h, 8 月的 RF 持续时间为 4 h 左右。

关键词: 偏东气流; 梵净山东侧暴雨; 地形; 区域性特征

中图法分类号: P426.62^{+}3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−135

Spatial-temporal characteristics of rainstorm on the eastern Fanjing Mountain under the influence of easterly airflow in recent ten years

LYU Chunyan[1], XIANG Nan[2], RAN Hongling[1], DU Xiaoling[3], GUI Yonggang[1], CHEN Chao[1]

(1. *Tongren Meteorological Bureau*, *China Meteorological Administration*, *Tongren* 554300; 2. *Guizhou Mountainous Meteorological Science Research Institute*, *Guiyang* 550081; 3. *Guizhou Meteorological Observatory*, *Guiyang* 550002)

Abstract: The frequent heavy rainfall on the eastern Fanjing Mountain due to the combined influence of topography and easterly airflow at low-level have bad significant effects on the lives and property of local people. This paper focuses on revealing the spatial-temporal distribution characteristics of rainstorm on the eastern Fanjing Mountain under the influence of easterly airflow (RF) at low-level based on the precipitation observation data from the national and regional automatic weather stations in Tongren City,Guizhou Province, as well as ERA5 reanalysis data during 2014-2023.The results are as follows. (1) RF often occurs under the background of prevailing easterly airflow at 925hPa,with about 15 occurrences per year, and it is concentrated from May to September of the year with the most appearance occurring in June and August, followed by July. The RF events from June to August account for 65.3% of all RF events. (2) The RF is affected by topography significantly with regional characteristics. The maximum of precipitation amount, frequency, and intensity are located at the eastern foot of Fanjing Mountain where the altitude difference is the greatest, followed by the narrow trumpet-shaped topography facing northeastward at the northeastern Fanjing Mountain. Also, it is more likely to occur that widespread extreme rainstorm on the eastern Fanjing Mountain than that on the northeastern Fanjing Mountain according to the distribution of precipitation frequency and intensity above the downpour. (3) RF precipitation amount, intensity, and frequency all show a diurnal variation pattern of being low value during the daytime and high value at nighttime. And the diurnal variation of precipitation amount is mainly affected by the

收稿日期: 2024−07−10; **定稿日期**: 2024−10−12

资助项目: 铜仁市科技局项目 (2022-44); 铜仁市短历时暴雨监测预警技术研究攻关团队项目 (QHLSSLJ -2022-05); 贵州省气象局创新团队项目 (TD-2024-01)

第一作者: 吕春艳, 主要从事极端天气预报及方法研究。E-mail: 1357971975@qq.com

通信作者: 向楠, 主要从事短期气候变化诊断研究。E-mail: 751448126@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

precipitation intensity, because the main peak value of precipitation amount around 08:00 is contributed by the precipitation intensity in May and June, meanwhile the secondary (third) peak value of precipitation amount around 22:00 (15:00) is contributed by the precipitation intensity in August (May and July). Furthermore, it is obvious to see that the characteristics of larger precipitation aomunt and stronger precipitation intensity from May to September around 22:00. (4) It is clear that the RF in June and July lasting 6~7 h is extreme, while RF lasting 4 h is prone to occur in August.

Key words: easterly airflow; rainstorm on the eastern Fanjing Mountain; topography; heterogeneous distribution

引　言

地形对暴雨有显著影响 (陶诗言, 1980; 丁一汇和张建云, 2009; 丁一汇, 2014), 暴雨极值多出现在山脉迎风坡、平原与山脉的过渡地区 (朱乾根等, 2007)。地形对降水的增幅主要取决于气流是否被阻塞, 如果气流被阻塞, 地形对降水的增幅作用主要发生在山脉迎风坡, 尤其山脉第一个陡峭的迎风坡可使降水快速增强 (Johansson et al., 2003; Chow et al., 2013; Min et al., 2021)。如太行山、大别山和秦岭山脉地区, 降水主要发生在迎风坡 (毕宝贵等, 2006; 王丛梅等, 2017; 倪婷等, 2018)。秦岭山脉对南北麓低层流场均有阻挡和绕流作用, 秦岭北麓的西风带系统在地形作用下, 对流层低层形成中尺度气旋式环流, 通过热力作用触发暴雨; 秦岭南麓在地形作用下, 对流层低层流场形成中尺度辐合线触发暴雨 (武麦凤等, 2025)。李超等 (2018) 认为大别山脉、幕阜山脉、皖南山地以及幕阜山脉和皖南山地之间的狭窄河谷地形共同构成类似“喇叭口”地形, 产生的狭管效应使进入地形区内的偏南气流辐合加强, 利于局地降水发展增强。如果有充沛的水汽供应和显著的水汽输入, 低空急流与边界层急流的耦合形成低层水汽辐合上升中心, 地形对山前的暖湿空气有动力阻挡抬升和热力抬升作用, 迫使大范围降水出现在山前 (汪小康等, 2022)。当山脉走向与风向相交时, 地形通过强迫抬升作用使得降水强度大幅增强效果显著 (李修仓等, 2023; 张江涛等, 2023)。孙继松等 (2015) 通过统计 2006—2013 年发生在北京地区的 10 次极端暴雨事件, 指出位于北京西部山前的暴雨中心与低空偏东气流的地形强迫作用有关。偏东气流被地形强迫抬升产生异常强的上升运动, 并与雷暴出流形成的中尺度辐合线触发新的雷暴, 进而增强降水 (王丛梅等, 2017; 昌立伟等, 2019; 李明娟等, 2025)。东风气流的垂直分布也显著影响降水落区, 当低空偏东气流随高度减小时, 降水主要落区位于南北向山体东侧, 且低层东风最大时间段与暴雨中心的最大降水强度有很好的对应关系 (孙继松, 2005)。

梵净山位于贵州省铜仁境内, 为武陵山之巅, 位于印江、江口、松桃三县交界处, 最高海拔达 2 572 m (图 1)。山脉走向呈东北−西南向, 地形复杂, 河网密度大, 且降水时空分布变化大, 是暴雨、洪涝和地质灾害多发区。2015 年 5 月 14 日夜间梵净山区域出现强对流天气, 梵净山东侧的黑湾河降水量达到 304.7 mm, 最大小时雨强为 109 mm·h^{-1}。强降水造成太平河、桃映河洪水暴涨, 多处山体滑坡, 冲毁了沿岸农田、农房、道路、电力等各种基础设施。2023 年 7 月 8 日夜间梵净山区域同样出现强降水, 梵净山东侧快场 4 h 累计降水量达 282.2 mm, 小时最大雨强为 97.5 mm·h^{-1}。相较于长时间积累造成的强降水事件, 发生在这种次日尺度上的短时极端降水往往发展更为迅速且更具破坏力 (Westra et al., 2014)。梵净

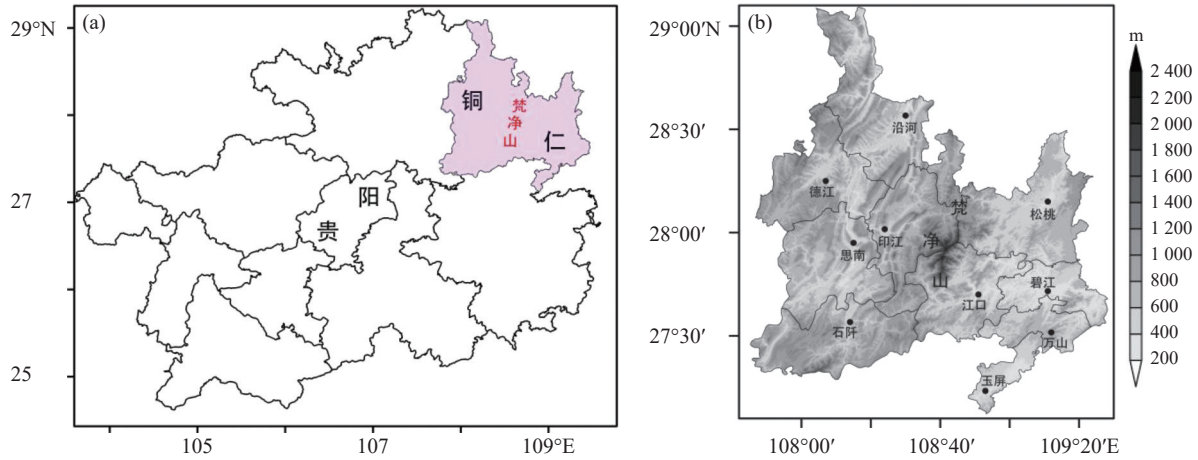


图 1 梵净山在贵州省的地理位置 (a) 及地形 (b, 灰色阴影为地形高度, 下同) 分布

Fig. 1 (a) The geographical location and (b) topography of Fanjing Mountain in Guizhou Province (gray shadow is terrain height, same below)

山东侧降水强度大并具有极端性，且地形降水特征明显。以往对梵净山强降水的研究大多基于个例分析，多从环流背景、环境场和雷达回波特征分析暴雨成因，发现边界层偏东风与地形相互作用是产生特大暴雨的主要原因 (杨群等, 2016; 聂云等, 2021)。陈军等 (2020) 通过讨论梵净山东侧 4 次强降水形成机制，指出低层偏东气流对梵净山东侧强降水起着关键作用。上述研究均是通过个例分析表明偏东气流与梵净山强降水关系密切，但面对越来越精细化的气象服务实际需求，需基于长期统计分析，加强对偏东气流影响下梵净山东侧暴雨精细变化特征的科学认识。因此本文利用铜仁市国家气象站和高时空分辨率的区域气象站降水资料来研究梵净山东侧暴雨的精细特征，这对更好认识梵净山东侧降水规律，提高气象灾害预报预警服务能力、积极采取防范和应对措施极具现实意义。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的资料包括：(1) 2014—2023 年铜仁市逐日 (08:00—08:00，北京时，下同)、逐时降水观测数据，来自中国气象局国家气象信息中心“天擎”数据库，选取国家气象站 (4 个) 和缺测率低于 20% 的区域气象站 (72 个) 来分析降水的特征。(2) 925 hPa、850 hPa 和 700 hPa 逐时风场，来自于欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析数据集 (ERA5)，水平分辨率为 0.25º×0.25º。(3) 全球 1 km 分辨率的基础高程地形数据，来源于美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 网站 (https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/topo.html)。

1.2 研究方法

1.2.1 降水量、降水频率和降水强度的定义

用日降水量 (≥1.0 mm) 和小时降水量 (≥0.1 mm) 作为判据分别计算日降水频率、日降水强度和小时降水频率、小时降水强度。首先判定所有区域自动站的日降水量：对某一天某一个站点，若日降水量≥1.0 mm，则该站有降水量为降水日和非缺测日；若日降水量<1.0 mm，则该站无降水量但为非缺测日；若该站无数据，则该站无降水量且为缺测日，由此得出所有站点的总降水量、总降水日数和非缺测日数。根据这些统计结果计算每个站点的日平均降水量 (PA)、频率 (PF)、强度 (PI)。其中，PA 为总降水量除以总非缺测日数；PF 为总降水日数除以总非缺测日数；PI 为总降水量除以总降水日数。同样地，利用逐小时降水数据分析降水日变化特征，分别统计每个站点逐时总降水量、有降水的小时数和非缺测小时数，并计算每个站点平均小时降水量 (HPA)、平均小时降水频率 (HPF)、平均小时降水强度 (HPI)。其中，HPA 为该时次总降水量除以该时次非缺测小时数；HPF 为该时次有降水的小时数除以该时次非缺测小时数；HPI 为该时次总降水量除以该时次有降水的小时数 (Dai et al., 2007; 赵玮等, 2022)。

1.2.2 梵净山东侧暴雨的定义

对于梵净山东侧暴雨 (Rainstorm on the eastern Fanjing Mountain under the influence of easterly airflow, RF) 的定义，需同时满足以下两个条件：(1) 梵净山东侧区域 (图 2 红框) 至少有一个站点日降水量≥50 mm 且该站点至少有一个时次小时雨强≥20 mm·h^{-1}，同时周围相邻站点至少有一个站点日降水量达大雨及以上量级；(2) 在梵净山东侧区域至少有一个站点出现小时雨强≥20 mm·h^{-1}，并且在其前后相邻的时次 925 hPa、850 hPa、700 hPa 梵净山东侧至少有一层出现偏东气流，这里偏东风指有北北东到南南东的东风分量 (Agosta et al., 2019)。

不考虑天气过程的持续性，根据条件 (1)，本文共筛选出 223 次梵净山东侧暴雨过程 (日)，根据条件 (1) 和 (2)，共筛选出 150 个 RF 事件 (暴雨日)，其中，低层无偏东气流影响下梵净山东侧暴雨过程仅有 73 次，可见梵净山东侧三分之二的暴雨均发生在低层偏东气流影响背景下。

通过对铜仁市 2014—2023 年年平均降水量空间分布可知，铜仁市年平均降水量有明显的经向分布，以梵净山为界，梵净山东侧地区的降水明显多于梵净山西侧地区的降水 (李智玉等, 2024)。年平均降水量在梵净山西侧普遍在 800~1 200 mm 之间，东侧普遍在 1 100~1 600 mm之间，尤其是梵净山东麓，个别站点达 1 943 mm (图 2a)。可见，梵净山是铜仁市降水分布的分水岭，降水大值区集中在梵净山东侧区域，这里发生暴雨的几率比其它地方高，因此计算了梵净山东侧所有暴雨日的平均降水量 (图 2b)。可以看出，梵净山东侧平均降水量除个别站点外，其余日平均降水量量级相差不大，整体在 26~32 mm 之间；当低层有偏东气流影响时 (图 2c)，在梵净山东侧山脚以及东北侧出现明显的降水大值中心，最大可达 49 mm 以上，降水量量级明显大于图 2b 所示；当低层没有东风气流影响时，梵净山东侧暴雨日的平均降水量量级明显减小，降水大值中心东移，位于松桃南部至碧江一带，紧邻梵净山东侧区域的降水量也明显减小 (图 2d)。由上分析可知，低层偏东气流显著影

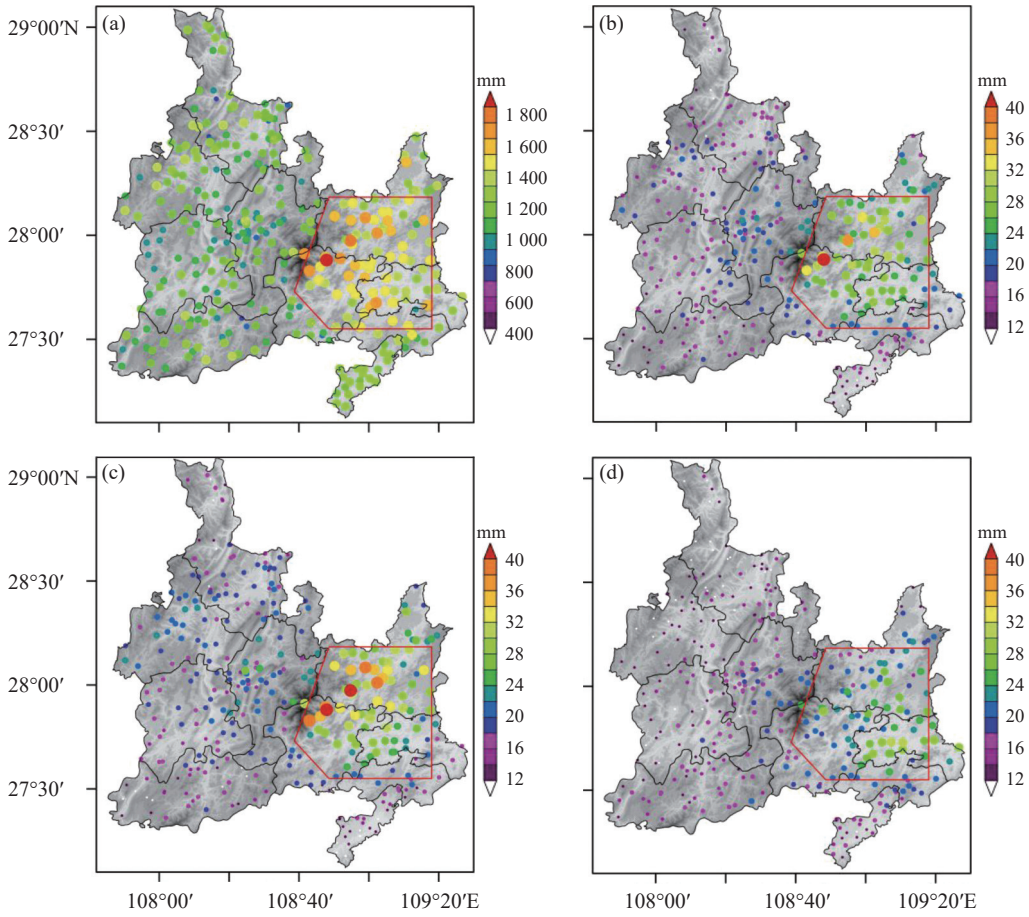


图 2 2014—2023 年铜仁市年平均降水量 (a)、梵净山东侧出现暴雨日的日平均降水量 (b)、低层偏东气流影响下梵净山东侧出现暴雨日的日平均降水量 (c) 和无偏东气流影响下梵净山东侧出现暴雨日的日平均降水量 (d) 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of (a) averaged annual precipitation amount, (b) averaged daily precipitation amount of all rainstorm days on the eastern Fanjing Mountain, (c) averaged daily precipitation amount of all rainstorm days on the eastern Fanjing Mountain under the influence of easterly airflow at low-level, (d) is the same as fig. c, but there is no easterly airflow at the low-level during 2014-2023

响梵净山东侧降水量级、范围和大值分布, 因此, 分析偏东气流影响下梵净山东侧暴雨极有意义。本文筛选梵净山东侧区域站点分析 RF 事件时空分布特征, 站点分布见图 2 红框内圆点所示。该区域包含 72 个区域自动站和松桃、江口及铜仁 3 个国家级有人值守自动站, 此外还包含海拔 2 278 m 且靠近山顶的梵净山国家级无人值守自动站, 一共 76 个站点。

计算低层各层偏东气流与 150 个 RF 事件之间的关系, 如表 1。所有 RF 事件中, 其中 925 hPa 盛行偏东气流占比高达 98%, 其中近一半都表现为东北风 (图略); 850 hPa 盛行偏东气流达 71.3%, 700 hPa 仅 12%。从低层盛行气流配置来看, 925 hPa 和 850 hPa 同时盛行偏东气流占比达 69.3%, 925 hPa 和 700 hPa、以及 925 hPa、850 hPa 和 700 hPa 同时盛行偏东气流占比较小, 只有 10.7% 和 10%。由此可见, 925 hPa 的偏东气流对梵净山东侧暴雨有重要指示意义, 当其与 850 hPa 偏东气流相互配合时, 在有利条件下梵净山东侧超一半几率会发生暴雨。

1.2.3 极端降水的定义

为了分析 RF 事件降水的极端情况, 本文采用百分位阈值法对极端降水进行分析, 具体方法: 对 76 个站点, 将 24 h 降水量 (≥0.1 mm) 所有样本按升序排列, 对 150 个 RF 事件取降水序列的 95th 百分位值作为极端降水阈值 (翟盘茂和潘晓华, 2003)。

表 1 2014—2023 年 925 hPa、850 hPa 和 700 hPa 各层偏东气流出现高度与梵净山东侧暴雨日的关系

Table 1 The relationship between easterly airflow at 925 hPa, 850 hPa and 700 hPa and the rainstorm days on the eastern Fanjing Mountain during 2014-2023

偏东气流出现高度	暴雨日/d	占总暴雨日比例/%
925 hPa	147	98.0
850 hPa	107	71.3
700 hPa	18	12.0
925 hPa和850 hPa	104	69.3
925 hPa和700 hPa	16	10.7
925 hPa、850 hPa和700 hPa	15	10.0

1.2.4 降水持续时间和持续降水总量

降水持续时间是衡量降水极端性的重要指标之一，在一定程度上决定了累计降水量的上限。为了客观考察 RF 事件降水的持续性，将某一时次降水量大于等于 0.1 mm 时为降水开始时间 (中国气象局, 2003)，当某一时次有降水且之后连续 2 h 没有降水发生时记为降水结束时间，降水持续时间为降水开始至降水结束时的有降水小时数 (李建等, 2008)，降水持续期间的降水为持续降水总量。

2 RF 时空分布特征

2.1 RF 时间分布特征

图 3 给出了 RF 事件频次的年际变化、月际变化和旬分布，并计算了各月以及 5—9 月各旬极端降水量。从图 3a 可以看出，RF 平均每年发生约 15 次，其中以 2021 年的 20 次最多，其次是 2014 年的 19 次；RF 次数最少出现在 2022 年，仅为 7 次，这是因为 2022 年我国出现了自 1961 年以来最强的大范围高温干旱天气，降水严重减少 (林纾等, 2022)，导致 RF 事件偏少。

从月际变化来看 (图 3b)，一年中仅有 3—11 月会发生 RF 事件，其中 5—9 月发生较为频繁，发生次数分别为 21、36、25、37、17，而 6—8 月是 RF 事件的高发期，占全部 RF 事件的 65.3%。通过以 95th 百分位阈值来衡量 RF 降水的极端性，可以看出，3—7 月阈值逐渐增大，8—11 月阈值总体逐渐减少。7 月 RF 降水极端性最强，阈值为 134.6 mm，其次是 6 月，为 114 mm；8 月和 9 月相近，分别为 97.1 mm 和 98.0 mm，5 月略低，为 86.8 mm。

从 5—9 月 RF 事件降水旬分布来看 (图 3c)，除 6 月中旬外，5 月上旬至 6 月下旬，RF 发生频次逐渐增多；7 月 RF 事件主要出现在上旬和中旬，下旬出现频次较低；8 月上旬到 9 月下旬 RF 频次逐渐减少。RF 频次峰值出现在 6 月下旬，为 17 次，其次是 6 月上旬，为 15 次，而 8 月上旬和中旬皆为 14 次。从 95th 百分位阈值分布来看，6 月上旬至 7 月中旬、8 月中旬 RF 降水极端性较强；极端性最强出现在 7 月上旬，为 139.4 mm，7 月中旬稍弱于上旬，为 137.8 mm，6 月中旬位居第三，为 128.7 mm；6 月下旬和 8 月中旬阈值接近 120 mm。降水这种分布与影响铜仁汛期降水的主要天气系统有关，5—6 月多为低涡、切变线影响，以系统性降水为主；7—8 月随着西太平洋副

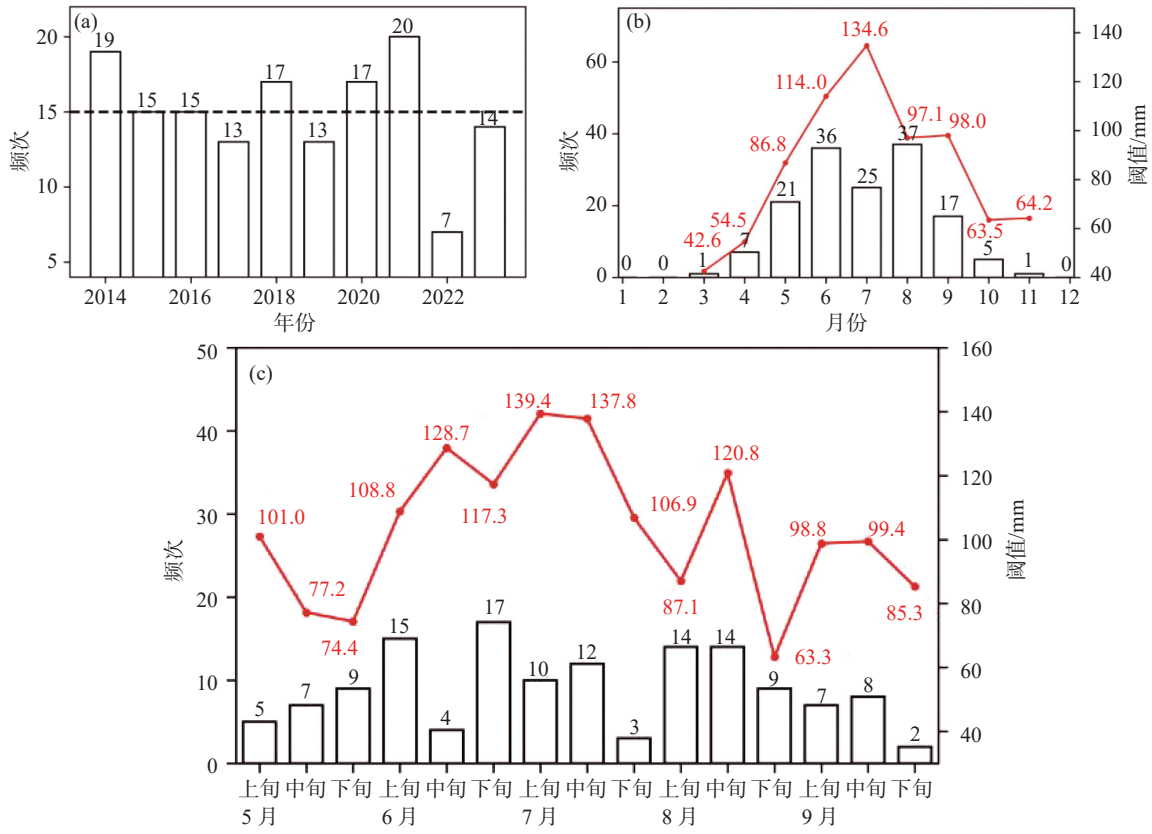


图 3 2014—2023 年梵净山 RF 频数的年 (a)、月 (b) 和旬变化 (c)(空心柱为事件频数，虚线为平均值，红色折线为 24 h 降水量 95th 百分位阈值)

Fig. 3 (a) Inter-annual, (b) inter-monthly, and (c) ten-day variation of the RF in Fanjing Mountain from 2014 to 2023, the hollow column represents the number of event (dashed line represents the average and the red broken line is the 95th percentile threshold of 24 h precipitation)

热带高压西伸北抬, 铜仁由系统性降水转为局地对流性降水; 9 月多受西移北抬的台风外围环流影响, 降水持续时间久但降水强度较弱。

2.2 RF 空间分布特征

从图 4a 可以看出, RF 降水具有明显的区域性特征, 强降水区集中在梵净山东侧丘陵向山脉过渡地带, 呈东北—西南走向, 离山体越远, 降水量逐渐减弱。PA 最大值出现在梵净山东麓江口快场站, 为 49.8 mm·d^{-1}, 这里海拔高度差近 2 000 m, 地势陡峭, “平地起高楼”般的地形众多, 使得地形动力抬升作用非常明显, 常出现短时强降水; 其次是松桃寨英, PA 值为 43.5 mm·d^{-1}, 它位于梵净山东北侧开口朝向东北方向的喇叭口地形狭窄处, 相对东侧山脚这里地势较缓, 但当低层盛行东北气流时, 气流常在此处辐合抬升, 地形的这种狭管效应常常造成局地降水发展增强 (李超等, 2018), 形成短时强降水、暴雨和山洪。

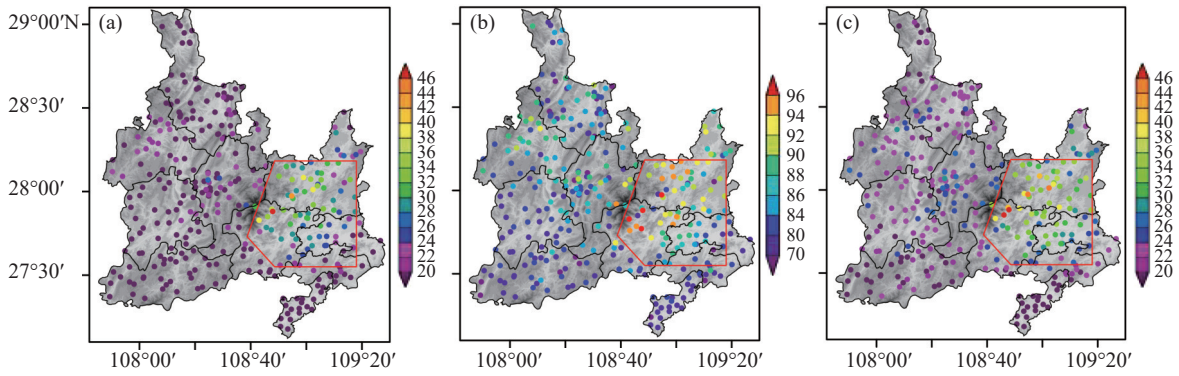


图 4 2014—2023 年梵净山 RF 事件的日平均降水量 PA (a, 单位: mm)、降水频率 PF (b, 单位: %) 和降水强度 PI (c, 单位: mm·d^{-1}) 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of averaged daily (a) precipitation amount PA (unit: mm), (b) frequency PF (unit:%) and (c) intensity PI (unit: mm·d^{-1}) of the RF events in Fanjing Mountain from 2014 to 2023

降水频率和强度的分布与降水量分布较为一致 (图 4b—c), 日平均降水量值大的区域降水频率和强度也大。PF 普遍在 86% 以上, 最大的站点是江口快场站, 达 98%, 紧邻快场站的黑湾河站为 75.3%, 两者都位于梵净山东侧海拔高度差最大的山脚, 相距仅 10 km 左右, 降水频率差异较大, 这使得该地区暴雨预报极具挑战性和难度。东北侧寨英站和孟溪站、东南部山脚实验场站和低洼处太平站降水频率均位于前茅, PF 在 96% ~97.3% 之间。从降水强度来看, 快场站依旧稳居第一, 为 50.9 mm·d^{-1}, 其次黑湾河站达 46.8 mm·d^{-1}; 兴隆塘和寨英站占据第三和第四高位, 分别为 44.8 mm·d^{-1} 和 44.7 mm·d^{-1}。综上, RF 事件中高频率、高强度的降水大值中心位于梵净山东侧山脚, 其次是梵净山东北侧, 降水的这种空间分布与地形关系非常密切。由于梵净山东侧和东北侧水资源非常丰富, 一旦发生强降水, 极易使得江水暴涨且影响下游沿岸地区, 致灾风险高。

通常情况下, 除短时强降水以外, 当累积降水量达到一定程度时致灾性也强, 因此本文进一步分析了所有 RF 事件中日降水量达 50 mm 以上和 100 mm 以上 PA、PF 和 PI 的空间分布 (图 5)。从图中可见, PA、PF 和 PI 分布与图 4 较为一致, 高值区位于梵净山东侧及其东北侧。值得注意的是, 暴雨以上量级降水的 PA、PF 和 PI 的高值区范围在梵净山东侧和东北侧差距不明显, 但大暴雨以上量级降水却差异明显, 呈现东侧大于东北侧的特征, 其中 PF 和 PI 最明显, 这说明梵净山东侧比东北侧更易发生较大范围的暴雨及以上量级的极端降水。

3 RF 降水日变化特征

3.1 降水日变化特征

图 6 为 2014—2023 年梵净山 RF 事件 HPA、HPF 和 HPI 的日变化。从平均值来看, HPA、HPF 和 HPI 都呈现了白天低、夜间高的日变化特征, 其中平均小时降水量和降水频率最显著, 表明梵净山东侧区域夜间暴雨更显著, 这与前人的结论较为一致 (王夫常等, 2011; 罗乃兴等, 2023)。

5 月 HPA 峰值出现在 07:00, 峰值显著高于其余月份, 此外在 15:00 和 22:00 都存在一个次峰值; 6 月峰值出现时间为 08:00—10:00, 比 5 月略晚, 在 22:00—23:00 存在次峰值; 7 月 HPA 峰值出现在 00:00, 此外在午后 17:00 前后出现次峰值; 8 月峰值出现在 22:00, 没有次峰值; 9 月平均降水量夜间显著大于白天, 谷值出现在 14:00。由上分析可知, 5 月和 6 月容易在早上出现峰值, 6 月比 5 月晚 2 h 左右; 7 月和 8 月峰值多出现在午夜, 8 月比 7 月提前 3 h 左右; 9 月峰值

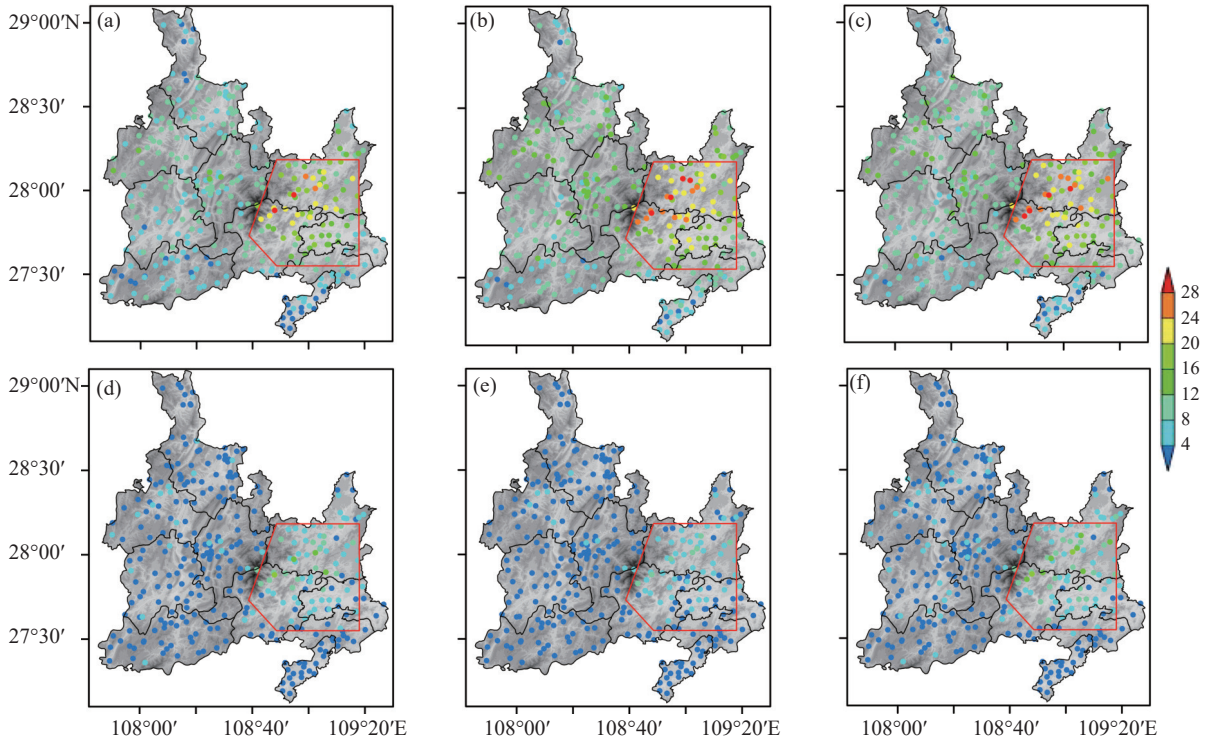


图 5 2014—2023 年梵净山 RF 中站点降水量≥50 mm (a—c) 和≥100 mm (d—f) 的日平均降水量 PA (a、d, 单位: mm)、降水频率 PF (b、e, 单位: %) 和降水强度 PI (c、f, 单位: mm·d^{-1}) 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of averaged daily (a, d) precipitation amount PA (unit: mm), (b, e) frequency PF (unit:%) and (c, f) intensity PI (unit:mm·d^{-1}) of the daily precipitation have more (a-c) 50 mm and (d-f) 100 mm at stations for all the RF in Fanjing Mountain from 2014 to 2023

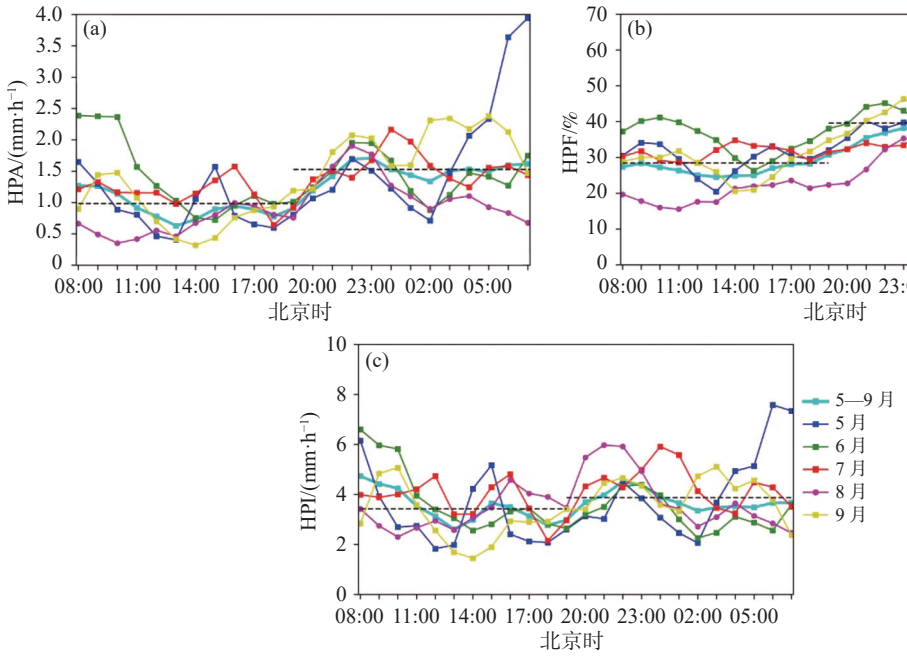


图 6 2014—2023 年 5—9 月梵净山 RF 事件平均小时降水量 HPA (a)、降水频率 HPF (b) 和降水强度 HPI (c) 的日变化 (虚线为时段平均值, 下同)

Fig. 6 Diurnal variation of averaged hourly (a) precipitation amount HPA (unit: mm·h^{-1}), (b) frequency HPF (unit: %) and (c) intensity HPI (unit: mm·h^{-1}) of RF events in Fanjing Mountain during May-September from 2014 to 2023 (dashed line represents the average, same below)

出现在后半夜; 5—9 月各月 HPA 在 22:00 前后都出现高值, 中午 11:00 和傍晚 18:00 时段均达到日最小值 (图 6a)。

从 HPF 日变化来看 (图 6b), RF 事件整体降水频率从下午至夜间逐渐增加。总体上, 6 月降水频率高于 5 月、7 月、8 月和 9 月, 在 08:00—13:00 时段和

22:00 前后最显著; 8 月与 6 月相反, 是 RF 降水频率最低的月份; 9 月降水频率在 08:00—22:00 时段与其他月份相差不大, 但是在 23:00 至次日 07:00 明显高于其余月份。

5—9 月平均 HPI 总体呈三峰型, 在 08:00、15:00 和 22:00 各存在一个高值, 这与 HPA 变化较为一致, 可见 RF 事件降水量日变化主要受制于降水强度。HPI 在 08:00 的主峰值主要受制于 5 月和 6 月的降水强度, 因为 5 月和 6 月 08:00 左右 HPI 峰值明显高于其余月份。22:00 左右的次峰值主要受制于 8 月的降水强度, 该时刻 8 月 HPI 明显高于其余月份。值得一提的是, 5—9 月在 22:00 前后 HPI 维持较高值, 同时也是 HPA 主峰值出现时刻, 可作为 RF 事件短时临近预报预警的重点关注时刻; HPI 在 15:00 的第三峰值受制于 5 月、7 月和 8 月的降水强度, 但由于 8 月在该时刻降水频率较低, 因此对平均降水量的贡献不大, 然而由于午后太阳照射, 地表不稳定能量积聚, 容易造成单点的短时暴雨。综上 5 月和 7 月 15:00 左右梵净山东侧局地暴雨也值得注意。

3.2 持续时间和降水总量

图 7 为所有 RF 事件中梵净山东侧站点 5—9 月降水持续时间和降水持续时间期间累积降水量的箱线图。从图 7a 可以看出, 6 月和 9 月 RF 事件持续时间整体最久, 降水持续时间中位数都为 7 h; 5 月和 7 月降水持续时间略短, 中位数为 6 h; 8 月降水持续时间最短, 降水持续时间中位数为 4 h。

降水持续时间在一定程度上反映了降水量大小, 持续降水总量中位数在 5 月最大, 为 27.3 mm, 且数值集中在中位数以下; 6 月和 9 月相近, 分别为 25.8 mm 和 24 mm, 但 6 月持续降水总量值在中位数上下分布较为均匀, 表明 6 月出现持续降水总量大值的几率比 9 月高; 持续降水总量在 7 月位居第四, 为 16.2 mm, 8 月中位数最小, 仅有 9.6 mm。此外不难看出 6—8 月出现许多降水异常值, 单站累积降水量最大值出现在 6 月, 为 358.9 mm, 其次是 7 月, 为 322.1 mm, 8 月为 210.4 mm (图 7b)。结合降水极端性分布和降水持续时间可见, 6 月和 7 月易发生极端暴雨, 持续时间为 6—7 h, 8 月暴雨持续时间为 4 h 左右。

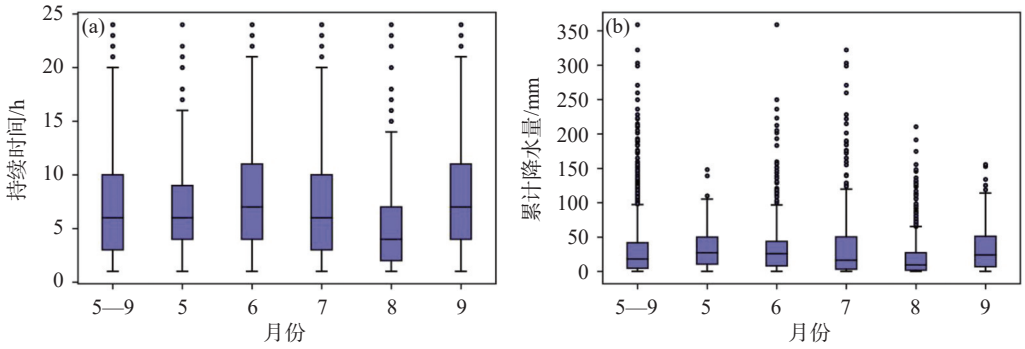


图 7 2014—2023 年 5—9 月梵净山 RF 事件降水持续时间 (a) 和累计降水量 (b) 的箱线图

Fig. 7 Boxplot of the (a) precipitation duration and (b) cumulative precipitation during precipitation duration of RF events in Fanjing Mountain from 2014 to 2023

4 结论与讨论

本文利用 2014—2023 年铜仁市国家气象站和区域气象站降水观测数据和 ERA5 再分析数据, 分析了低层偏东气流影响下梵净山东侧暴雨 (RF) 的时空特征, 得出以下主要结论:

(1) RF 常出现在梵净山东侧 925 hPa 和 850 hPa (尤其是 925 hPa) 均盛行偏东气流背景下, 每年发生 15 次左右, 主要集中在 5—9 月, 6 月和 8 月发生次数最多, 其次是 7 月, 6—8 月的 RF 占所有 RF 事件的 65.3%。7 月 RF 降水极端性最强, 其次是 6 月, 8 月和 9 月相近, 5 月是 5—9 月中 RF 降水极端性最弱的月份。7 月最强出现在上旬, 95th 百分位阈值为 139.4 mm, 中旬稍弱于上旬, 为 137.8 mm; 6 月中旬位居第三, 为 128.7 mm; 6 月下旬和 8 月中旬阈值接近 120 mm。

(2) RF 降水具有显著的区域性特征且与地形关系密切, 强降水区集中在梵净山东侧丘陵向山脉过渡地带。PA、PF 和 PI 强中心出现在海拔高度差近 2 000 m 的梵净山东侧山脚, 其次是东北侧开口朝向东北方向的喇叭口地形狭窄处。从大暴雨以上量级降水分布来看, 相对于梵净山东北部, 东侧更易发生较大范围的极端性暴雨。

(3) RF 夜间明显, 5—9 月 HPA、HPF 和 HPI 均呈现了白天低、夜间高的日变化特征。降水量的日变化主要受制于降水强度, 总体呈三峰型, 08:00 的主峰值受 5 月和 6 月降水强度的影响, 22:00 左右的次峰值受 8 月降水强度的影响, 同时 5—9 月各月在

22:00 前后也是 HPI 峰值出现时刻，可作为 RF 时间短时临近预报预警的重点关注时刻；而 15:00 的第三峰值受 5 月和 7 月降水强度的影响。

(4) 6 月和 7 月的 RF 具有极端性，持续时间为 6—7 h，8 月的 RF 持续时间为 4 h 左右。

降水受诸多因素影响，如南亚高压、急流、水汽输送等，其中低空急流、地形、山谷风、局地对流等对降水日变化有重要作用。本文利用较长时间序列的降水资料对低层偏东气流影响下梵净山东侧暴雨的特征进行了较为细致的分析，在一定程度上揭示了梵净山降水的季节、旬分布，以及日变化的特征和差异，但对梵净山降水日变化的机制还不清楚，这需要利用再分析数据和中尺度数值模式进一步研究降水日变化产生的机理。此外，面对梵净山景区越来越精细化的气象服务需求，景区全域降水精细特征也需进一步深入分析研究。

参考文献 (References):

毕宝贵,刘月巍,李泽椿.2006.秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响[J].高原气象,25(3):485−494. Bi B G, Liu Y W, Li Z C. 2006. Study on influence of the mechanical forcing of mesoscale topography on the extremely heavy rainfall in southern Shanxi on 8-9 June 2002 [J]. Plateau Meteorology,25(3):485−494 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1000−0534.2006.03.016

昌立伟,贾岸斌,黄卓禹.2019.偏东风和地形的相互作用对湖南极端强降水的影响分析[J].中低纬山地气象,43(5):36−41. Chang L W, Jia A B, Huang Z Y. 2019. Analysis of the influence of interaction between easterly wind and topography on extreme heavy precipitation in Hunan Province [J]. Mid-low Latitude Mountain Meteorology, 43(5):36−41 (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,38(2):1−6. 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]. Torrential Rain and Disasters, 38(2):1−6 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.02.006

丁一汇,张建云.2009.暴雨洪涝[M].北京:气象出版社:1-290. Ding Y H, Zhang J Y. 2009. Heavy precipitations and floods [M]. Beijing: China Meteorological Press:1-290 (in Chinese)

丁一汇.2014.陶诗言先生在中国暴雨发生条件和机制研究中的贡献[J].大气科学,38(4):616−626. Ding Y H. 2014. Contributions of Prof. Tao Shiyan to the study of formation conditions and mechanisms of heavy precipitations in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(4):616−626 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2013.13226

李超,崔春光,蒋兴文,等.2018.特殊地形对鄂东北一次局地强降水过程的作用机制分析[J].气象,44(9):1117−1135. Li C, Cui C G, Jiang X W, et al. 2018. Mechanism analysis of the effect of special topography in middle-lower reaches of Yangtze River on local severe precipitation in Northeast Hubei [J]. Meteorological Monthly,44(9):1117−1135 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.09.001

李建,宇如聪,王建捷.2008.北京市夏季降水的日变化特征[J].科学通报,53(7):829−832. Li J, Yu R C, Wang J J. 2008. Diurnal variation of summer precipitation in Beijing [J]. Chinese Science Bulletin,53(7):829−832 (in Chinese)

李明娟,郭大梅,张蔚然,等.2025.陕西一次突发性大暴雨的中尺度特征及触发机制[J].暴雨灾害,44(1):19−30. Li M J, Guo D M, Zhang W R, et al. 2025. Mesoscale characteristics and triggering mechanism of a sudden heavy rainstorm in Shaanxi [J]. Torrential Rain and Disasters, 44(1):19−30 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−224

李修仓,张颖娴,李威,等.2023. “23·7”京津冀暴雨极端性特征及对我国城市防汛的启示[J].中国防汛抗旱,33(11):13−18. Li X C, Zhang Y X, Li W, et al. 2023. Extreme characteristics of "23.7" heavy rain in Beijing-Tianjin-Hebei and its implications for urban flood control in China [J]. China Flood & Drought Management,33(11):13−18 (in Chinese). doi:10.16867/j.issn.1673−9264.2023381

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川[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]. Torrential Rain and Disasters,43(6):648−656 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−079

林纾,李红英,黄鹏程,等.2022. 2022 年夏季我国高温干旱特征及其环流形势分析[J].干旱气象,40(5):748−763. Lin S, Li H Y, Huang P C, et al. 2022. Characteristics of high temperature, drought and circulation situation in summer 2022 in China [J]. Journal of Arid Meteorology,40(5):748−763 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2022)−05−0748

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 and Oasis Meteorology,17(4):38−44 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.04.006

倪婷,黄勇,凌新锋,等.2018.大别山区地形降水特征分析[J].气象科技,46(3):556−562. Ni T, Huang Y, Ling X F, et al. 2018. Characteristics of orographic precipitation in Dabie Mountain [J]. Meteorological Science and Technology,46(3):556−562 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20170280

聂云,周继先,杨帆,等.2021.梵净山东南侧夏季暖区暴雨中尺度系统演变与环境场特征个例分析[J].暴雨灾害,40(2):125−135. Nie Y, Zhou J X, Yang F, et al. 2021. Analysis on mesoscale system evolution and environmental field characteristics of a warm-sector heavy rainfall event in summer in the southeast of Fanjing Mountains [J]. Torrential Rain and Disasters,40(2):125−135 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.02.003

孙继松,雷蕾,于波,等.2015.近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J].气象学报,73(4):609−623. Sun J S, Lei L, Yu B, et al. 2015. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing area [J]. Acta Meteorologica Sinica,73(4):609−623 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2015.044

孙继松.2005.气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J].高原气象,24(1):62−69. Sun J S. 2005. Effect of vertical distribution of air flow on topographic precipitation region [J]. Plateau Meteorology,24(1):62−69 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1000−0534.2005.01.010

陶诗言.1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社:1-225. Tao S Y. 1980.

The rainstorm in China [M]. Beijing:Science Press:1-225 (in Chinese)

汪小康,崔春光,王婧羽,等.2022. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J].气象,48(5):533−544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al. 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province [J]. Meteorological Monthly,48(5):533−544 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.122902

王丛梅,俞小鼎,李芷霞,等.2017.太行山地形影响下的极端短时强降水分析[J].气象,43(4):425−433. Wang C M, Yu X D, Li Z X, et al. 2017. Investigation of extreme flash-rain events on the impact of Taihang Mountain [J]. Meteorological Monthly,43(4):425−433 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.04.004

王夫常,宇如聪,陈昊明,等.2011.我国西南部降水日变化特征分析[J].暴雨灾害,30(2):117−121. Wang F C, Yu R C, Chen H M, et al. 2011. The characteristics of precipitation diurnal variation over the southwestern China [J]. Torrential Rain and Disaster,30(2):117−121 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2011.02.003

武麦凤,乔舒婷,郭大梅,等.2025.秦岭山脉南北麓暴雨触发条件对比分析[J].高原气象,44(1):178−190. Wu M F, Qiao S T, Guo D M, et al. 2025. Comparative analysis of rainstorm triggering conditions at the Northern and Sorthern Piedmont of the Qinling Mountains [J]. Plateau Meteorology,44(1):178−190 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.10000534.2024.00051

杨群,陈关清,方标,等.2016.梵净山一次局地特大暴雨雷达回波特征分析[J].干旱气象,34(5):820−827. Yang Q, Chen G Q, Fang B, et al. 2016. Analysis of radar echo features of a local torrential rain in Fanjing Mountain [J]. Journal of Arid Meteorology,34(5):820−827 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2016)−05−0820

翟盘茂,潘晓华.2003.中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,58(S1):1−10. Zhai P M, Pan X H. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. Acta Geographica Sinica,58(S1):1−10 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0375−5444.2003.z1.001

张江涛,何丽华,李江波,等.2023.河北“23.7”极端暴雨过程特征及成因初探[J].大气科学学报,46(6):884−903. Zhang J T, He L H, Li J B, et al. 2023. Preliminary study on the characteristics and causes of the "23.7" extreme rainstorm in Hebei [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,46(6):884−903 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230905001

赵玮,郝翠,曹洁,等.2022.近 40 年北京地区夏季降水日变化及不同持续时间降水事件的特征[J].大气科学,46(5):1167−1176. Zhao W, He C, Cao J, et al. 2022. Diurnal variation characteristics of summer precipitation and precipitation events with different durations in Beijing in the past 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(5):1167−1176 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2204.22028

中国气象局.2003.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社. China Meteorological Administration. 2003. The criterion of surface meteorological observation [M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese)

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2007.天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,1-649. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2007. Principle and method of synoptic meteorology [M]. Beijing:China Meteorological Press,1-649 (in Chinese)

Agosta E A, Martin P B, Serio L A. 2019. Persistent easterly winds leading to precipitation in the Atlantic Coast of Patagonia [J]. International Journal of Climatology,39(13):5063−5090. doi:10.1002/joc.6127

Chow F K, De Wekker S, Snyder, B J. 2013. Mountain weather research and forecasting [M]. Springer Netherlands: Springer Atmospheric Sciences.

Dai A, Lin X, Hsu K L. 2007. The frequency, intensity and diurnal cycle of precipitation in surface and satellite observations over low-and mid-latitudes [J]. Climate dynamics,29(7):727−744. doi:10.1007/s00382−007−0260−y

Johansson B, Chen D. 2003. The influence of wind and topography on precipitation distribution: A case study in Sweden [J]. International Journal of Climatology,23(12):1523−1535. doi:10.1002/joc.951

Min Y F, Huang W L, Ma M J, et al. 2021. Simulations in the topography effects of Tianshan mountains on an extreme precipitation event in the Ili river valley, China [J]. Atmosphere,12(6):750. doi:10.3390/ATMOS12060750

Westra S, Fowler H J, Evans J P, et al. 2014. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme precipitation [J]. Reviews of Geophysics,52(3):522−555. doi:10.1002/2014rg000464

(责任编辑　闵爱荣)