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 Zhiyu, DU Xiaoling, ZHU Yulei, 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

贵州典型地形下强降水特征及其模式预报订正研究

李智玉,杜小玲,朱育雷,谢清霞,魏涛,周文钰,李典南
(贵州省气象台,贵阳 550002)

摘　要: 利用2016—2020年贵州省国家气象站和区域气象站逐小时地面降水观测资料,分别选取北盘江作为贵州河谷地形、雷公山和梵净山作为贵州高山地形的典型代表,对贵州典型地形下的强降水时空特征进行分析,并利用2019—2020年欧洲中期天气预报中心逐3 h降水预报资料,采用频率匹配法对三个地区的强降水预报进行客观订正。结果表明:(1) 三个地区的强降水多发生在6月,其中北盘江与雷公山强降水的频次逐年增加,而梵净山增加不明显。两个高山地区强降水频次主要集中在夜间至早晨,而北盘江强降水频次在午后和夜间各有一个峰值。(2) 三个地区的强降水与地形有一定关系,北盘江强降水的频发区和降水量集中区主要出现在流域北部的低洼地带,雷公山出现在山体以南,而梵净山集中在山体东侧。当北盘江与梵净山地区地形坡度小于20°—30°,雷公山地区地形坡度小于40°—50°时,强降水频次随坡度增加而增加,而后强降水频次随坡度减少。(3) 采用频率匹配法分别对三个地区的强降水进行客观订正后,当北盘江降水量小于8.2 mm,雷公山降水量小于10.3 mm,梵净山降水量小于7.3 mm时,频率匹配订正对模式预报降水有一定的消空作用;当三个地区降水量分别大于对应阈值时,频率匹配订正可明显提升降水预报量级;三个地区的强降水预报技巧整体有所提升,强降水预报频次有明显提高,空间分布特征基本符合实况,其中以北盘江订正效果最优。

关键词: 地形;强降水;频率匹配;模式订正
中图分类号: P463.21^{+}3　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-079

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

LI Zhiyu, DU Xiaoling, ZHU Yulei, XIE Qingxia, WEI Tao, ZHOU Wenyu, LI Diannan

(*Guizhou Meteorological Observatory, Guizhou Meteorological Bureau, Guiyang* 550002)

Abstract: Based on the hourly ground precipitation observations from the national and regional stations in Guizhou Province from 2016 to 2020, the spatial and temporal characteristics of heavy precipitation in the typical terrains of Guizhou were analyzed in this study. For typical terrains, the Beipan River was selected as the typical representative of Guizhou´s valley terrain, while Leigong Mountain and Fanjing Mountain were chosen as the typical representatives of Guizhou´s high mountain terrain. The three-hour precipitation forecast datasets during 2019-2020 provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) were used, and a frequency matching method was applied to objectively correct the heavy precipitation forecast in the above three regions. The results are as follows. (1) Heavy precipitation in the three regions mostly occurs in June. The heavy precipitation frequency increases in Beipan River and Leigong Mountain year by year, while the increase in Fanjing Mountain is not significant. The heavy precipitation in the two mountainous regions mainly occurs during the night and early morning. While two heavy precipitation peaks are found in the Beipan River basin, one in the afternoon and one at night. (2) The distribution of heavy precipitation in the three areas is somewhat related to the terrain. The frequent and concentrated areas of heavy precipitation in the Beipan River are mainly located in the low-lying areas in the northern part of the basin, with that being in the south of Leigong Mountain and on the eastern side of Fanjing Mountain. Considering the slope of the terrain, the distribution of rainfall shows similar characteristics. In the regions of Beipan River and Fanjing Mountain with slopes less than 20°-30°, and the regions in Leigong Mountain with slopes less than 40°-50°, the frequency of heavy precipitation increases with the slope. While in other regions, the frequency of heavy precipitation decreases with the slope. (3) Objective corrections of heavy precipitation in these regions are applied using the frequency match-

收稿日期: 2023-04-27;**定稿日期:** 2024-01-25
资助项目: 贵州省基础研究(自然科学)项目(黔科合基础-ZK[2024]一般623);贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2023]一般235);贵州省气象局省市联合基金项目(QHLSSLJ[2022]-09,QHLSSLJ[2022]-12)

第一作者: 李智玉,主要从事中短期天气预报及相关理论与方法研究。E-mail:xylizhyu_123@163.com

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

ing method. It is found that the frequency adjustment method has a certain effect in reducing the over-forecast of precipitation when the precipitation amount is less than 8.2 mm in Beipan River, less than 10.3 mm in Leigong Mountain, and less than 7.3 mm in Fanjing Mountain. When precipitation is greater than the above thresholds, the frequency matching method can significantly improve the levels of the predicted precipitation. After the correction, the overall performance of heavy precipitation prediction in the three regions has improved. A noticeable increase in the frequency of heavy precipitation prediction and comparable spatial distributions between the predictions and observations can be found, with the best improvement observed in the Beipan River.

Key words: topography; heavy precipitation; frequency matching method; model correction

引 言

贵州省地处云贵高原东部斜坡，地质背景特殊，地表崎岖破碎，境内地势西高东低，山地和丘陵占全省总面积的97%。由于贵州位于东亚副热带季风区，夏天在孟加拉湾和南海充足水汽的输送以及西太平洋副热带高压、青藏高原和喀斯特地形的共同作用下，常常出现强降水。贵州作为我国短时强降水发生频率最高的区域之一，其强降水具有局地性、突发性、灾害性等特点(周晓敏等，2023)，强降水引发的洪涝影响大范围广，且在强烈岩溶作用下诱发崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频繁发生。一直以来贵州强降水预报具有很大的难度，提高其预报预警能力是防灾减灾面临的重大挑战之一(甘文强等，2018)。

高海拔山脉以及复杂地形可以通过动力、热力效应以及云微物理等导致或增强局地降水(Yamada and Kuribayashi，2021；周芳弛等，2023)。贵州地形复杂，强降水往往受到复杂地形的影响(程晓龙等，2021)。研究表明，贵州强降水的空间分布和演变特征与地形有密切联系(肖蕾等，2021)。贵州强降水日数与降水量随海拔高度增加而增大，尤其是降水日数受地形影响最为明显(甘文强等，2018)。杨静等(2011)研究指出，贵州西南部两个小喇叭口地形对气流的辐合和抬升作用，对于贵州南部山区大暴雨的落区和强度十分关键。顾欣等(2006)研究指出，由于暖湿气流在苗岭山脉迎风坡强迫抬升成云致雨，贵州黔东南西部常出现暴雨甚至大暴雨，而位于云贵高原向湖南丘陵过渡斜坡面上的黔东南东部，是西南水汽主要通道和冷空气回流前锋的交汇区，因此也是暴雨的频发区。高珩洲和李国平(2020)研究表明，黔东南地形高度的变化对山地突发性暴雨的强度与落区有重要影响，山脉高度上升能增强对气流的阻挡作用从而加强气流的低空辐合、高空辐散，加上迎风坡地形的抬升作用，容易产生强烈的上升运动，增强大气层结不稳定性，触发不稳定能量释放，再配合充足的水汽，最终导致暴雨的发生。

随着数值天气预报模式高速发展，降水预报已经从预报员经验判断逐渐演变到对数值模式的释用和订正(Novak et al.，2014；Mao and Sorteberg，2020；Wang et al.，2021)。但目前大部分业务数值模式由于分辨率以及预报时效的问题，对局地性强降水的预报效果不佳，尤其是在地形复杂的山区(Simone et al.，2021)，降水预报准确率的提高主要依靠改进模式预报订正方法(Han et al.，2017；任萍等，2020；Wang et al.，2020；Xiang et al.，2020；Zhang and Ye，2021)。代刊等(2018)将目前常用的降水预报客观订正方法归纳为非参数化后处理方法、参数化后处理方法以及考虑预报量时间、空间和多变量依赖关系或结构的处理方法。在非参数化后处理方法中，频率匹配法应用较为广泛(智协飞和赵忱，2020)。美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction，NCEP)利用频率匹配法在业务中显著减小了全球模式定量降水预报的系统偏差(Zhu and Luo，2015)。国内基于频率匹配法也先后开发了欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF)、中国全球/区域数值天气预报系统(Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System，GRAPES)-全球中期预报系统(Global Middle-range Forecast System，GFS)等确定性降水预报的频率订正产品，并成功实现了业务运行(代刊等，2016)。吴启树等(2017)基于频率匹配法思路，提出了最优TS评分算法，并有效提高了ECMWF和NCEP等模式定量降水预报的TS评分。尽管目前频率匹配法在极端天气事件方面仍然具有一定局限性，但对降水强度订正具有明显的积极作用(赵渊明和漆梁波，2021)。

在全球增暖背景下，强降水的发生频率更高，破坏性更大(IPCC，2021)，加强对复杂地形下强降水的认识和理解，提高强降水的预报预警能力对于防灾减灾有着重要意义。尽管学者对于贵州强降水的空间分布和演变特征已取得大量研究成果(谷晓平等，2020；肖蕾等，2021)，但在高时空分辨率上的分析仍然缺乏，难以准确反映强降水在贵州复杂地形下的变化规律。此外，尽管目前已经有很多关于降水预报客观方法的订正研究，但对贵州强降水的客观订正技术探索较少，针对典型地形下的降水订正研究仍然缺乏。因此，本文分别选取北盘江作为贵州河谷地形、雷公山

和梵净山作为贵州高山地形的典型代表，利用高时空分辨率资料对贵州复杂地形下的强降水时空分布特征进行分析，并采用频率匹配法对这三个地区的强降水预报进行客观订正，以期为提高对贵州不同地形下强降水的预报能力提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文利用贵州省气象信息中心提供的2016—2020年国家气象站(以下简称国家站)和区域气象站(以下简称区域站)逐小时降水资料，分别对北盘江、雷公山以及梵净山地区汛期(4—9月)强降水进行统计分析，并利用ECMWF提供的2019年汛期08时(北京时，下同)和20时起报0—72 h逐3 h降水预报资料与同期实况数据构建频率匹配模型，并以2020年汛期预报结果进行检验。此外，采用贵州省气候中心提供的贵州省90 m数字高程模型(Digital Elevation Model，DEM)数据绘制三个地区地形分布图，并计算地形坡度。

1.2 有关定义与分析检验方法

1.2.1 站点选取

北盘江位于云贵高原斜坡地带，东接黔中山原丘陵盆地，在贵州省境内流域范围包括六盘水市、黔西南州除兴义外的7个县和安顺、镇宁、关岭等6市县。雷公山位于黔东南州雷山、榕江、台江、剑河4县之间，地形高耸，山势脉络清晰，主山脊自东北向西南呈“S”形状延伸，主峰海拔2 178.8 m。梵净山位于铜仁地区中部印江、江口、松桃三县交界处，自北向南纵贯铜仁地区中部，其金顶海拔高达2 493 m，山体庞大，地势显著隆起，均高出两侧山麓丘陵地2 000 m以上。

本文参照贵州预报员手册，北盘江主要流域以六枝–关岭–晴隆–紫云–贞丰–望谟–册亨为参照点，利用ArcGIS软件确定范围并提取站点。针对雷公山和梵净山两个高山地形，分别以雷山和金顶两个观测站为圆心，以半径50 km范围选取站点，并考虑山体地形，以高于榕江(285.7 m)和江口(497.2 m)站的部分作为梵净山和雷公山山体。由图1可见，北盘江内站点119个，雷公山区域内站点122个，梵净山区域内站点119个。以下研究基于北盘江、雷公山和梵净山区域内选取的站点进行。

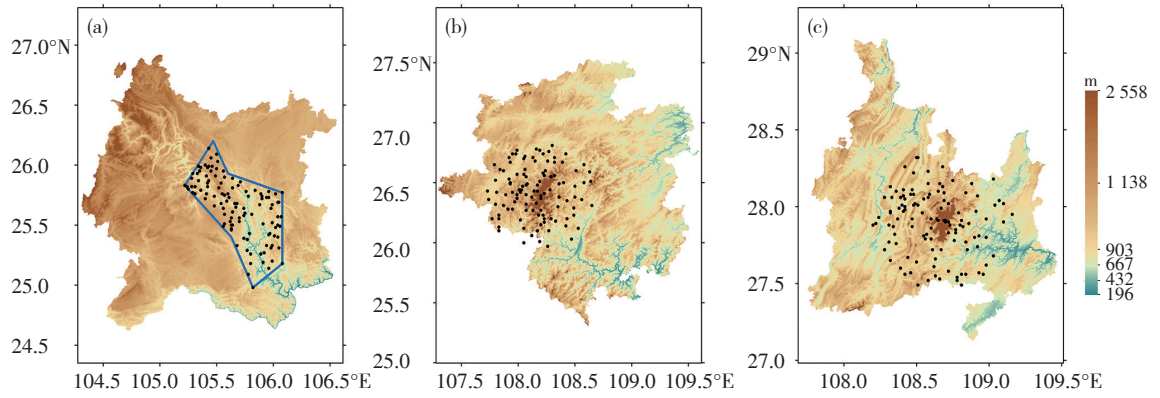


图1 北盘江(a)、雷公山(b)和梵净山(c)地形(填色)以及区域内站点(圆点)的空间分布(蓝线为利用ArcGIS确定的北盘江范围)

Fig.1 Space distribution of topography (shaded) of (a) Beipan River, (b) Leigong Mountain, and (c) Fanjing Mountain and the associated regional stations (dot) (The blue line represents the boundary of the Beipan River identified by ArcGIS software)

1.2.2 强降水定义

参照中国气象局规定，1 h降水量≥20 mm定义为一次强降水。预报订正时，由于ECMWF提供的降水预报数据为逐3 h累计降水量，为方便对比，首先将实况降水进行3 h累加处理；同时，考虑到ECMWF模式对强降水预报存在强度偏弱的现象(潘留杰等，2022)，本文对ECMWF模式进行强降水预报订正和检验时，参考赵渊明和漆梁波(2021)对于模式短历时强降水的评估标准以及贵州不同历时强降水(谷晓平等，2020)的标准，定义3 h≥20 mm降水为贵州一次强降水。

1.2.3 坡度定义

为进一步探讨强降水与地形的关系，以坡度反映地形在高度上的变化，并利用DEM数据计算贵州境内地形的坡度分布，利用临近插值法(沈剑华，1999)将坡度分别插值到北盘江、雷公山和梵净山地区的站点上。坡度(记为S_{lope})具体计算公式(Burrough and McDonell，1998)如下

$$S_{lope}=\arctan\sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2+\left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \tag{1}$$

其中，S_{lope}为坡度值，z为高程，x和y为水平距离。坡度值越小，地势越平坦；坡度值越大，地势越陡峭。

1.2.4 频率匹配法

频率匹配法的原理是利用一段时期内确定性预

报和对应实况资料建立原始预报和预报订正值之间的映射关系，以消除模式预报降水各量级频率分布的系统性偏差。本文首先分别统计模式逐3 h降水预报与实况不同降水量级的频率，并计算相应的累计频率曲线，然后将模式预报与实况对应的百分位数进行匹配，建立一一对应关系，利用该关系可将有偏差的预报频率调整到参考频率，并根据参考频率与实际降水量的对应关系，进一步订正模式预报降水量(智协飞和赵忱，2020)。

1.2.5　预报检验

以强降水预报TS评分(记为T_S)和BIAS (记为B_{IAS})为检验标准，对模式订正前后的预报效果进行检验，计算公式如下

$$T_S=\frac{N_A}{N_A+N_B+N_C} \tag{3}$$

$$B_{IAS}=\left|\frac{N_A+N_B}{N_A+N_C}-1\right| \tag{4}$$

$$S_{BI}=\frac{B_N-B_P}{B_N} \tag{5}$$

其中，N_A为预报正确的站次数，N_B为空报站次数，N_C为漏报站次数。S_{BI}为BIAS预报技巧，B_P为模式订正后BIAS偏差幅度，B_N为模式BIAS偏差幅度。当模式订正效果越好，即偏差越小时，S_{BI}越接近于1。

2　强降水时空分布特征

利用2016—2020年贵州地面逐小时降水观测资料，对贵州三个地区汛期的强降水时空分布特征进行分析。

2.1　强降水时间变化特征

以某站某时出现一次强降水记为一站次，图2分别给出2016—2020年汛期三个地区强降水累计站次即频次，可见北盘江近5 a年均发生强降水728.4站次；雷公山年均发生731.4站次，为三个地区最高；而梵净山年均发生560站次。北盘江和雷公山地区的强降水频次表现出逐年增加的趋势，其中2020年雷公山强降水频次达1 126站次。相比之下，梵净山这一特征并不明显，其2018年和2019年强降水频次减少至420站次左右，而在2020年又增加到631站次。

对比三个地区近5 a汛期强降水频次的逐月变化(图3)可知，三个地区的强降水主要出现在6月，月际差异在北盘江尤为明显，其6月发生1 381站次，5月和7—9月均在500站次左右，4月最少，仅为98站次。与之类似，雷公山强降水在6月出现990站次，但5月和7月多于4月、8月和9月，分别达657和658站次。相比之下，梵净山在5—8月强降水频次分布相对平均，6月、7月均在650站次左右，而5月略高于8月，达561站次，4月和9月强降水站次相对较少。

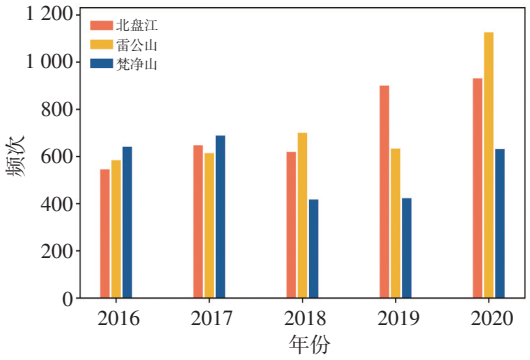


图2 2016—2020年汛期北盘江、雷公山和梵净山累计强降水频次逐年变化

Fig. 2 Annual variation of cumulative frequency of heavy precipitation in Beipan River, Leigong Mountain, and Fanjing Mountain during flood season from 2016 to 2020

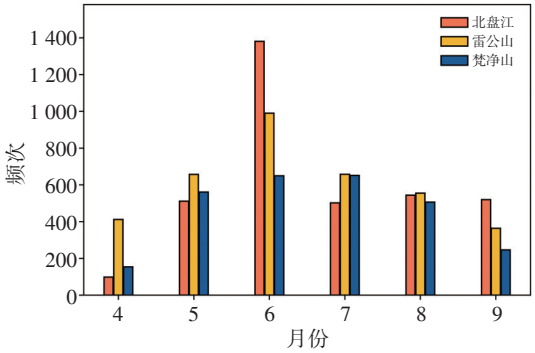


图3 2016—2020年汛期北盘江、雷公山和梵净山强降水频次逐月变化

Fig. 3 Monthly variation of the frequency of heavy precipitation in Beipan River, Leigong Mountain, and Fanjing Mountain during flood season from 2016 to 2020

对强降水频次的逐时变化进一步统计发现，三个地区的强降水在早晨发生较少，午后至夜间开始增多，但不同地区强降水频次的时间变化规律有所不同。由图4可知，与两个高山地区相比，北盘江地区强降水在早晨发生最少，午后到夜间具有明显双峰结构，第一个峰值出现在17—19时，第二个峰值在23—

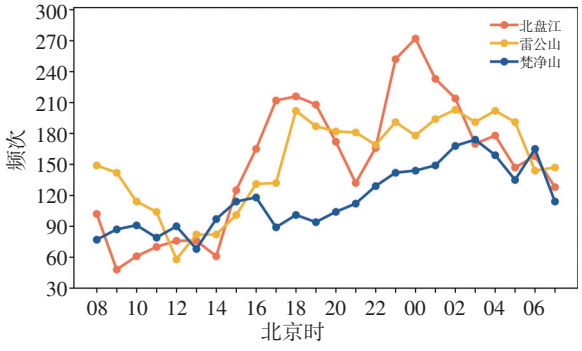


图4 2016—2020年汛期北盘江、雷公山和梵净山强降水频次逐时变化

Fig. 4 Hourly variation of the frequency of heavy precipitation in Beipan River, Leigong Mountain, and Fanjing Mountain during flood season from 2016 to 2020

24时，峰值达272站次。雷公山在08—09时存在一个强降水频次高峰，随后逐渐减少，在12—14时减少到最小值，而到18时至次日05时，强降水频次一直较高，平均在190站次左右。梵净山强降水频次在早晨较少，在15—16时出现一个小峰值，随后减弱，到夜间迅速增加，于02—03时达到峰值，为174站次。

2.2 强降水空间分布特征

对三个地区强降水频次的空间分布特征(图5)进行对比可知，雷公山单站发生强降水频次较北盘江、梵净山高，其单站频次最高达73次，而梵净山最高为63次，北盘江最高为59次。北盘江频发区位于黔西南州东北部和安顺市西南部，处于北盘江狭长的河谷地带(图1a)。河谷两侧的高山对水汽的汇聚具有一定的促进作用，同时高山与河谷间由于日变化产生的局地环流，尤其是在夜间由河谷吹向高山形成的爬升气流，为强降水发生提供了较好的动力条件。雷公山强降水集中出现在山体南部，这可能与其东北—西南向的地形走向有关，山体南侧的暖湿气流受地形阻挡抬升，为强降水的发生提供了有利条件。而梵净山强降水较多的地区位于山体东部，由于梵净山脉呈准南北向分布，它的东坡处于北上暖湿汽流的迎风面，庞大的山体阻挡了气流的运动，并迫使其抬升成云致雨，形成降水，当气流翻越山脉后，因下沉增温，又会使降水减少(吕春艳等，2023)。可见，强降水的发生与山脉走向以及地形坡度均有着密切联系。

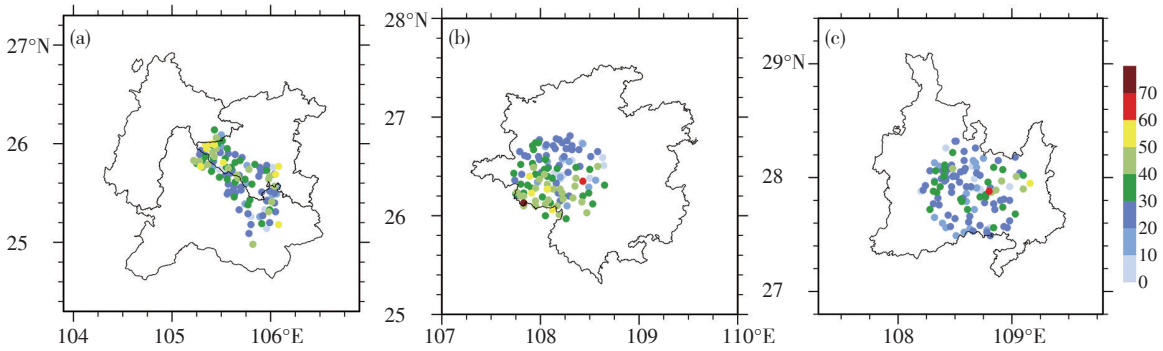


图5 2016—2020年汛期北盘江(a)、雷公山(b)和梵净山(c)强降水频次的空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of the frequency of heavy precipitation in (a) Beipan River, (b) Leigong Mountain, and (c) Fanjing Mountain during flood season from 2016 to 2020

在强降水量空间分布(图6)上也可见类似特征。北盘江强降水量较大的地区位于北部以及东部等高山向河谷的过渡地区，多年平均的强降水量超过300 mm，甚至达到400 mm。雷公山强降水量大值区对应强降水频发区，集中出现于山体南侧，单站最大降水量达523.76 mm，为三个区域最大。梵净山强降水量较大的区域同样位于梵净山东部，但相对北盘江、雷公山，其降水量大值站点相对较少，≥300 mm以上的站点仅5个。

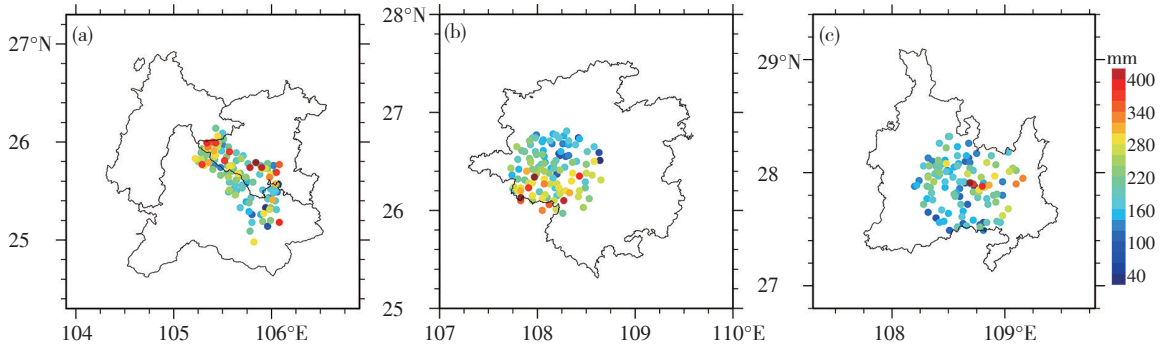


图6 同图5，但为强降水量的空间分布(a—c)

Fig. 6 Same as Fig.5, but for (a–c) spatial distribution of the accumulated precipitation of heavy precipitation

为进一步探讨地形与强降水之间的关系，分别统计了三个地区在不同坡度下强降水的频次(图7)。可见强降水的发生与地形坡度并非简单的线性关系。对于北盘江，当坡度小于20°—30°时，坡度越大，强降水频次越多，而超过30°时，强降水频次逐渐减少。在坡度较缓(0°—30°)时，北盘江相对两个高山地区更容易发生强降水，最大为910站次。雷公山强降水频次也随着坡度的增加而增加，在坡度达到40°—50°时，频次(911站次)远高于其他两个地区，随后随着地形坡度增加而减少。与北盘江类似，梵净山在坡度为20°—30°时强降水频次最大，为672站次，随后逐渐减少。可见，尽管地形坡度对于强降水产生具有明显的促进作用，地形高度的上升有

利于强降水的发生，但当超过一定阈值时，强降水反而会减少。这可能是由于过大的坡度对气流的阻挡作用更明显，不利于强降水的产生(慕建利等，2014)。此外，一些水汽在低坡度的作用下已产生抬升降水，水汽含量有部分损耗，随着地形海拔的增高，气团进行二次爬坡时降水强度有所下降(史岚等，2014)。

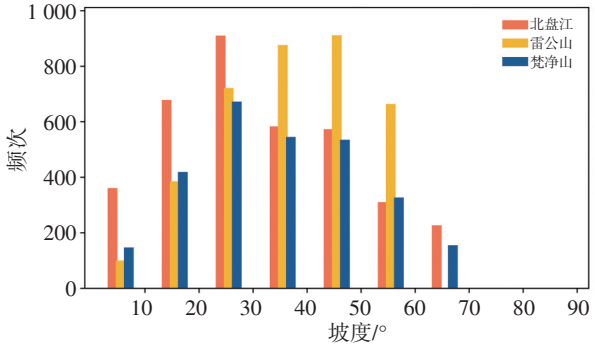


图7 2016—2020年汛期北盘江、雷公山和梵净山不同坡度下的强降水频次

Fig. 7 The frequency of heavy precipitation with different slopes in Beipan River, Leigong Mountain, and Fanjing Mountain during flood season from 2016 to 2020

3 ECMWF模式预报结果订正

贵州强降水发生发展受地形影响明显，频次多、强度大，但模式对强降水的预报效果却并不理想。ECMWF等全球模式对于强降水模拟强度偏弱(Zhong and Chen，2020)，对西南地区强降水预报形态误差较大(符娇兰和代刊，2016)。2020年ECMWF模式对贵州暴雨24 h预报的TS评分仅为8% (周皞等，2021)，对汛期北盘江、雷公山和梵净山三个地区的强降水预报TS评分最高仅为0.7%。ECMWF模式对于贵州复杂地形下强降水预报的适用性有待进一步提高。

本文采用频率匹配法对ECMWF模式预报结果开展客观订正，以提升ECMWF模式预报产品对贵州强降水预报的准确率。首先将实况逐小时降水量进行逐3 h累加，并与插值为站点后的ECMWF模式逐3 h预报场进行匹配，分别计算2019年4—9月北盘江、梵净山和雷公山地区实况与模式预报不同量级降水量对应的累计频率分布。考虑到频率匹配法对于落区订正效果不明显，因此未对模式无降水的站点进行订正。从预报与实况的降水量累计频率分布(图略)来看，三个地区的实况降水量以0.1 mm左右居多。以北盘江为例，0.1 mm降水频率达到83.05%，而模式降水量在0.1 mm相对实况偏少，但也主要集中在0.1~1 mm，由0.1到1 mm频率增加52%左右；在降水量达到8 mm左右时，二者累计频率接近，而后随着降水量增大模式累计频率增加快于实况，表明模式预报8 mm以上降水量小于实况。雷公山与梵净山的累计频率分布与之类似。

图8为三个地区强降水量模式预报在频率匹配订正前后的对应关系，可见，降水量小于7.3~10.3 mm时(北盘江：8.2 mm，雷公山：10.3 mm，梵净山：7.3 mm)，订正曲线低于模式输出曲线，表明在这一量级以下，频率匹配订正对模式预报降水有一定的消空作用；在7.3~10.3 mm以上，频率匹配订正明显提高了各地区强降水预报的量级。对于北盘江来说，当模式预报20 mm降水时，订正后的降水量可以提升至32.2 mm，对于强降水的预报量有明显提升。梵净山的订正效果同样明显，在模式预报降水量为20 mm时，订正后的降水量提升至38.7 mm。而相比之下，雷公山订正效果稍差，当模式降水预报量为20 mm时，订正后的降水量为27.4 mm左右。

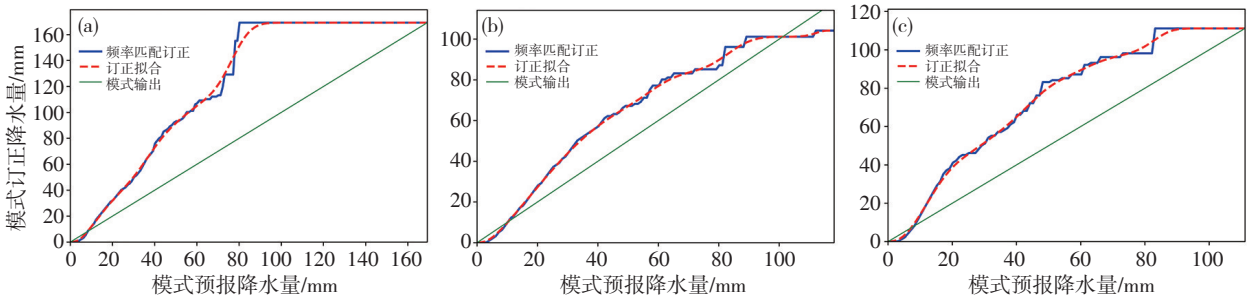


图8 北盘江(a)、雷公山(b)、梵净山(c)模式预报与模式订正降水量对应关系

Fig. 8 The relationship between model forecast (green curve) and model-corrected precipitation in (a) Beipan River, (b) Leigong Mountain, and (c) Fanjing Mountain from 2016 to 2020

本文针对2020年汛期模式强降水预报进行了订正，并分别检验了三个地区模式预报订正后相对模式输出对于强降水的预报技巧(图略)。经频率匹配订正后，三个地区的强降水预报技巧整体有所提升。强降水TS预报评分本身偏低(潘留杰等，2022)，经订正后北盘江效果在三个地区中最优，强降水TS评分提升0.19%，同时强降水S_{BI}也达0.46；其次为梵净山，尽管其强降水TS评分提升较低，但强降水S_{BI}较高，达0.78；雷公山订正效果不够理想，强降水TS评分仅提高0.06%，而强降水S_{BI}仅为0.1。

图9为北盘江、雷公山和梵净山实况、模式输出以及经频率匹配订正后的强降水频次以及降水量。可见

ECMWF模式对于三个地区的强降水预报存在频次偏少、降水偏弱的问题，尤其是在雷公山地区，其发生强降水频次最多、降水量最大，模式预报与实况在数值上却存在约10倍的误差，北盘江与梵净山模式预报与实况也存在约5倍的差异。而经过频率匹配订正后，三个地区的强降水频次以及降水量预报均有明显提升。其中北盘江强降水预报频次订正后提高到1 841站次，占实况(3 050站次)的60.4%，订正降水量(576.32 mm)达到实况(1 005.98 mm)的57.3%；梵净山订正后改进效果显著，强降水频次与降水量接近实况，分别达到1 787站次和515.28 mm，分别占实况(2 158站次和596.31 mm)的82.8%和86.4%；雷公山订正后虽然预报强降水频次和降水量有所提升，但效果有限，仅在模式预报基础上提升了约一倍的数值，这可能导致了雷公山强降水预报订正后TS评分与S_{BI}偏低。

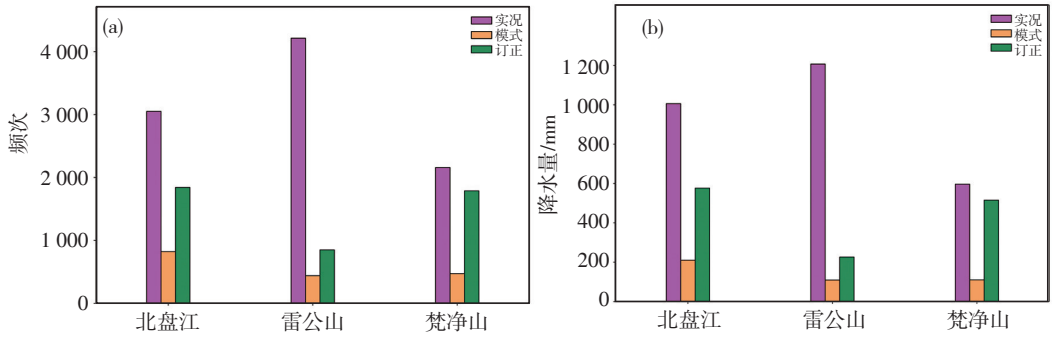


图9 北盘江、雷公山和梵净山实况、模式预报以及订正后强降水频次(a)和降水量(b)

Fig. 9 The (a) frequency and (b) precipitation of heavy precipitation from observation, before and after model correction in Beipan River, Leigong Mountain, and Fanjing Mountain

在模式预报的北盘江、雷公山和梵净山强降水频次空间分布(图10)上，模式本身具有一定的预报能力，但是存在强度预报偏弱导致强降水频次预报偏少的现象。经频率匹配订正后强降水频次有明显提高，且空间分布特征与实况基本吻合(图5)，能大致反映北盘江北部河谷地区、雷公山南部地区以及梵净山东部地区等强降水频发的分布特征。但值得注意的是，在实况中雷公山强降水频次最高，但在模式中强降水频次却最低，经过订正后仍与实况差异明显(图9、10)。

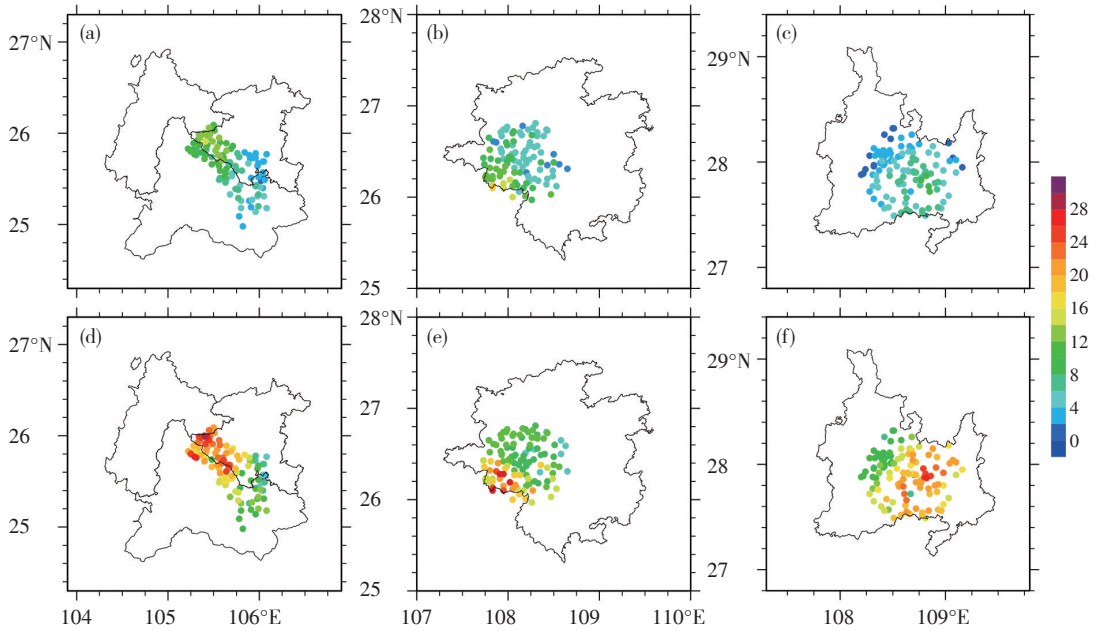


图10 北盘江(a，d)、雷公山(b，e)和梵净山(c，f)模式预报(a—c)以及订正后(d—f)的强降水预报频次的空间分布

Fig. 10 The spatial distribution of model (a–c) forecast and (d–f) model-corrected heavy precipitation frequency (unit: time) in (a, d) Beipan River, (b, e) Leigong Mountain and (c, f) Fanjing Mountain

4 结论与讨论

利用2016—2020年贵州省国家气象站和区域气象站逐小时地面观测降水资料，对贵州北盘江、雷公山和梵净山地区的强降水时空分布特征进行分析，并利用ECMWF提供的2019—2020年逐3 h降水预报资

料，采用频率匹配法对三个地区的强降水模式预报进行客观订正。得到以下主要结论：

(1) 北盘江与雷公山强降水的发生频次逐年增加，而梵净山增加趋势不明显。三个地区的强降水多发生在6月，尤其是北盘江和雷公山地区。两个高山地区强降水主要出现在夜间至早晨，而北盘江在午后和夜间各出现一个峰值，呈双峰型分布。

(2) 三个地区的强降水分布跟地形有一定联系，其中北盘江强降水频发区位于北部流域的低洼地带，雷公山位于山体以南地区，而梵净山地区集中在山体东侧，强降水量也具有类似的分布特征。当北盘江与梵净山地区地形坡度小于20°—30°，雷公山地区地形坡度小于40°—50°时，坡度越大，越利于强降水发生，但当超过该坡度时，强降水随坡度减少。

(3) 采用频率匹配法分别对北盘江、雷公山和梵净山三个地区的强降水进行客观订正，当北盘江降水量小于8.2 mm，雷公山降水量小于10.3 mm，梵净山降水量小于7.3 mm时，频率匹配对模式预报降水有一定的消空作用；大于这些阈值时，频率匹配订正可明显提高降水预报量级。经频率匹配订正后，三个地区的强降水预报技巧整体有所提升，北盘江订正效果最优，而雷公山订正效果提升有限。三个地区的强降水预报频次和降水量在订正后有明显增加，且空间分布特征与实况吻合。

本文研究结果有助于加深对贵州复杂地形下强降水的认识和理解，并为强降水预报的客观订正提供一定思路，但仍存在一定不足。尽管本文对北盘江、雷公山和梵净山等典型地形下强降水的时空分布特征及其与地形的关系进行了分析，但并未深入探讨地形对强降水的具体影响机制。此外，本文采用频率匹配法进行客观订正后，虽然强降水预报能力有所提高，但由于计算样本有限、ECMWF模式对强降水预报能力不足以及订正方法局限性等原因，订正效果提升不够明显，对于地形复杂地区，还需结合多种方法进行订正。智协飞和霍志强(2023)利用左删失的非齐次Logistic回归方法和标准化模式后处理方法对复杂地形下的强降水预报改进效果显著。针对贵州复杂山区的强降水预报客观订正，今后可采用多种订正方法进行进一步探讨。

参考文献(References):

程晓龙,李跃清,衡志炜.2021.川贵渝复杂地形下横槽诱发双涡贵州暴雨过程的数值模拟[J].气象学报,79(4):626–645. Cheng X L, Li Y Q, Heng Z W.2021.Numerical simulation of a torrential rain process in Guizhou triggered by two vortices originating from a transverse trough over the Sichuan–Guizhou–Chongqing complex terrain [J]. Acta Meteorologica Sinica,79(4):626–645 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.039

代刊,曹勇,钱奇峰,等.2016.中短期数字化天气预报技术现状及趋势[J].气象,42(12):1445–1455. Dai K, Cao Y, Qian Q F, et al. 2016. Situation and tendency of operational technologies in short–and medium–range weather forecast [J]. Meteorological Monthly,42(12):1445–1455 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2016.12.002

代刊,朱跃建,毕宝贵.2018.集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J].气象学报,76(4):493–510. Dai K, Zhu Y J, Bi B G. 2018. The review of statistical post–process technologies for quantitative precipitation forecast of ensemble prediction system [J]. Acta Meteorologica Sinica,76(4):493–510 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2018.015

符娇兰,代刊.2016.基于CRA空间检验技术的西南地区东部强降水EC模式预报误差分析[J].气象,42(12):1456–1464. Fu J L, Dai K. 2016. The ECMWF model precipitation systematic error in the east of Southwest China based on the contiguous rain area method for spatial forecast verification [J]. Meteorological Monthly,42(12):1456–1464 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2016.12.003

甘文强,李刚,万雪丽.2018.近57 a 5—9月贵州极端强降水变化特征[J].干旱气象,36(4):617–623. 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]. Journal of Arid Meteorology, 36(4):617–623 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006–7639(2018)–04–0617

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 Meteorology,39(2):301–310 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2019.00079

顾欣,田楠,潘平珍.2006.黔东南暴雨气候特征及其地形影响[J].气象科技,34(4):441–445. Gu X, Tian N, Pan P Z. 2006. Climatic characteristics of heavy rainfall over Southeastern Guizhou Province and terrain effect [J]. Meteorological Science and Technology,34(4):441–445 (in Chinese)

吕春艳,陈军,刘艺朦,等.2023.贵州铜仁一次持续性暴雨水汽收支定量分析[J].暴雨灾害,42(6):648–658. Lv C Y, Chen J, Liu Y M, et al. 2023. Quantitative analysis of water vapor budget of a persistent rainstrom event in Tongren of Guizhou Province [J]. Torrential Rain and Disasters,42(6):648–658 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–064

慕建利,李泽椿,谌芸,等.2014.一次陕西关中强暴雨中尺度系统特征分析[J].高原气象,33(1):148–161. Mu J L, Li Z C, Chen Y, et al. 2014. Feature analyses of mesoscale convective system of a heavy rainfall in the Central Shaanxi Plain [J]. Plateau Meteorology, 33(1):148–161 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20131015005

潘留杰,薛春芳,张宏芳,等.2022.基于卡尔曼动态频率的ECMWF降水预报订正[J].气象,48(1):73–83. Pan L J, Xue C F, Zhang H F, et al. 2022. ECMWF precipitation calibration based on the Kalman dynamic frequency matching method [J]. Meteorological Monthly, 48(1):73–83 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2021.111001

任萍,陈明轩,曹伟华,等.2020.基于机器学习的复杂地形下短期数值天气预报误差分析与订正[J].气象学报,78(6):1002–1020. Ren P, Chen M X, Cao W H, et al. 2020. Error analysis and correction of short–term numerical weather prediction under complex terrain based on machine

learning [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(6):1002–1020 (in Chinese). doi: 10.11676/qxxb2020.060

沈剑华.1999.数值计算基础[M].上海:同济大学出版社. Shen J H. 1999. Fundamentals of Numerical Calculation [M]. Shanghai:Tongji University Press (in Chinese)

史岚,张狄,乔森,等.2014.基于NCEP–FNL资料与DEM数据的日地形降水估算模型研究[C]//第31届中国气象学会年会S10第四届气象服务发展论坛:682–693. Shi L, Zhang D, Qiao M, et al. 2014. Study on the estimation model of daily orographic precipitation based on NCEP–FNL data and DEM data[C]//Meteorological Service Development Forum:682–693 (in Chinese)

吴启树,韩美,刘铭,等.2017.基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比[J].应用气象学报,28(3):306–317. Wu Q S, Han M, Liu M, et al. 2017. A comparison of optimal–score–based correction algorithms of model precipitation prediction [J]. Journal of Applied Meteorological Science,28(3):06–317(inChinese).doi:10.11898/1001–7313.20170305.

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]. Torrential Rain and Disasters,40(4):383–392 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2021.04.006

杨静,罗宇翔,杨利群.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. 2011. Numerical simulation and analysis of a heavy rain in south mountainous area of Guizhou [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 31(3):298–304 (in Chinese).

赵渊明,漆梁波.2021.短时强降水频率预报的多模式集成技术研究[J].气象,47(5):10. Zhao Y M, Qi L B. 2021. Multi–model integration technology for probabilistic forecasting of short–time severe rainfall [J]. Meteorological Monthly,47(5):10 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2021.05.002

智协飞,霍自强.2023.中国东南地区复杂地形下降水概率预报的订正研究[J].大气科学学报,46(2):230–241. Zhi X F, Huo Z Q. 2023. Calibration of the probabilistic forecast of precipitation over complex terrain in Southeast China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,46(2):230–241 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210128001

智协飞,赵忱.2020.基于集合成员订正的强降水多模式集成预报[J].应用气象学报,31(3):303–314. Zhi X F, Zhao C. 2020. Heavy precipitation forecasts based on multimodel ensemble members [J]. Journal of Applied Meteorological Science,31(3):303–314 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20200305

周皞,醋院科,朱文达,等.2021.基于EC集合预报动态百分位的降水订正算法研究[J].气候变化研究快报,10(4):414–420. Zhou H, Cu Y K, Zhu W D, et al. 2021. Study on the precipitation correction algorithm based on EC set forecast dynamic percentile [J]. Climate Change Research Letters,10(4):414–420 (in Chinese). doi:10.12677/CCRL.2021.104048

周芳弛,李国平,黄楚惠.2023.四川山地暖季夜间暴雨的空间分布以及对海拔高度的依赖性[J].沙漠与绿洲气象,17(4):78–86.Zhou Fang chi, Li G P, Huang C H. 2023. Spatial distribution of nighttime rainstorms in warm season in Sichuan mountains and the dependence on altitude [J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology,17(4):78–86 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2023.04.011

周晓敏,田付友,郑永光等,2023.中国短时强降雨对暴雨的贡献特征[J].气象,49(3):267–278.Zhou X M, Tian F Y, Zheng Y G, et al. 2023. Contribution of short–duration heavy rainfall to rainstorm in China. Meteorological Monthly,49(3):267–278 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2022.071201

Burrough P A, McDonell R A. 1998. Principles of geographical information systems [M]. Oxford University Press:190

Han L, Sun J Z, Zhang W, et al. 2017. A machine learning nowcasting method based on real–time reanalysis data [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,122(7):4038–4051. doi:10.1002/2016JD025783

IPCC. 2021. Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge University Press:35–144

Mao Y, Sorteberg A. 2020. Improving radar–based precipitation nowcasts with machine learning using an approach based on random forest[J]. Weather and Forecasting,35(6):2461–2478. doi:10.1175/WAF–D–20–0080.1

Novak D R, Bailey C, Brill K F, et al. 2014. Precipitation and temperature forecast performance at the weather prediction center [J]. Weather and Forecasting,29:489–504. doi:10.1175/WAF–D–13–00066.1

Simone S, Manfred S, Mario R, et al. 2021. Heavy precipitation forecasts over Switzerland –An evaluation of bias–corrected ECMWF predictions [J]. Weather and Climate Extremes,34:100372. doi:10.1016/J.WACE.2021.100372

Wang C, Wang P, Wang D,et al. 2020. Nowcasting multicell short–term intense precipitation using Graph Models and Random Forests[J].Monthly Weather Review,148: 4453–4466. doi:10.1175/mwr–d–20–0050.1

Wang Y, Dai K, Zong Z, et al. 2021. Quantitative precipitation forecasting using multi–model blendingwith supplemental grid points: experiments and prospects in China [J]. Journal of Meteorological Research,35,521–536. doi:10.1007/s13351–021–0172–5

Xiang B, Zeng C, Dong X, et al. 2020. The application of a Decision Tree and Stochastic Forest Model in summer precipitation prediction in Chongqing [J]. Atmosphere,11(5):508. doi:10.3390/atmos11050508

Yamada K, Kuribayashi M. 2021. Topographic effect on heavy rainfall caused by typhoon Hagibis (2019) in Nagano, Japan [J]. Scientific Online Letters on the Atmosphere,17A:45–50. doi:10.2151/SOLA.17A008

Zhang Y, Ye A. 2021. Machine learning for precipitation forecasts postprocessing: multimodel comparison and experimental investigation [J]. Journal of hydrometeorology,22:3065–3085. doi:10.1175/JHM–D–21–0096.1

Zhong S X, Chen Z T. 2020. A study on the predict ability of GRAPES model over south china:comparisons by two initialization conditions between ECMWF and NCEP[J].Journal of Tropical Meteorology,26:27–34. doi:10.16555/J.1006–8775.2020.003

Zhu Y J, Luo Y. 2015. Precipitation calibration based on the frequency–matching method [J]. Weather and Forecasting,30(5):1109–1124. doi:10.1175/WAF–D–13–00049.1

（责任编辑 唐永兰）