

贵州铜仁地区汛期暴雨预报研究

向楠^{1,2*}, 冉光镜¹, 吕春艳¹, 蔡成瑶¹, 冉红玲¹, 杨群^{1#}

¹铜仁市气象局, 贵州 铜仁

²贵州省山地环境气候研究所, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年6月2日; 录用日期: 2024年7月3日; 发布日期: 2024年7月9日

摘要

为逐步实现定量降水预报, 提升本地暴雨预报准确率, 利用2014~2022年铜仁市5~9月历史观测降水量数据、ERA5逐小时再分析数据, 结合实况物理量场资料, 从动力、水汽、热力条件中选取多个物理量, 基于阈值条件和多元线性回归模型, 分析了铜仁市汛期暴雨的变化特征以及建立汛期分月暴雨预报模型。结果表明: (1) 铜仁市汛期暴雨日数年变化呈现一个明显的起伏波动变化, 暴雨多发生在刚入夏时期, 集中在月中至下旬, 在7月更容易出现极端性降水, 且暴雨物理量阈值存在显著的季节变化特征。(2) 物理量模型表明5、7、8月选取的物理量因子均为水汽条件多于动力条件, 且在5月选取的动力因子均在中低层, 在7、8月高层水汽条件也较为重要。当形势多为稳定性降水时, 准确率较高。(3) 对2023年汛期28次暴雨个例进行检验, 结果表明: 动力条件中的散度、垂直速度较为稳定, 其中80%个例满足阈值条件, 7月对其反应效果最好。模型对9月预报效果较好, 75%个例预测雨量误差在20 mm内。该暴雨预报方法有效提升对汛期暴雨过程的最大降雨量进行预估, 在本地化应用中有一定指示效果。

关键词

暴雨模型, 暴雨阈值, 多元线性回归, 预报指标

Research on Rainstorm Forecast in Flood Season in Tongren Area of Guizhou Province

Nan Xiang^{1,2*}, Guangjing Ran¹, Chunyan Lyu¹, Chengyao Cai¹, Hongling Ran¹, Qun Yang^{1#}

¹Tongren Meteorological Bureau, Tongren Guizhou

²Guizhou Institute of Mountain Environment and Climate, Guiyang Guizhou

Received: Jun. 2nd, 2024; accepted: Jul. 3rd, 2024; published: Jul. 9th, 2024

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 向楠, 冉光镜, 吕春艳, 蔡成瑶, 冉红玲, 杨群. 贵州铜仁地区汛期暴雨预报研究[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(4): 857-864. DOI: 10.12677/ccrl.2024.134098

Abstract

In order to gradually realize quantitative precipitation forecast and improve the accuracy of local rainstorm forecast, the historical observed precipitation data of Tongren City from May to September from 2014 to 2022, the hourly re-analysis data of ERA5, and the actual physical quantity field data were combined to select a number of physical quantities from dynamic, water vapor and thermal conditions. The variation characteristics of heavy rain in Tongren during flood season and the model of monthly heavy rain forecast in flood season are analyzed. The results indicate that: (1) The annual variation of rainstorm days in flood season in Tongren City presents an obvious fluctuation change. Rainstorm mostly occurs in the early summer, concentrated in the middle to late ten days, and extreme precipitation is more likely to occur in July, and rainstorm physical quantity threshold has significant seasonal variation characteristics. (2) The physical quantity model shows that the physical quantity factors selected in May, July, and August are more water vapor conditions than dynamic conditions, and the dynamic factors selected in May are all in the middle and lower layers, and the water vapor conditions in the upper layers are also more important in July and August. When the situation is mostly stable precipitation, the accuracy is higher. (3) The test of 28 rainstorm cases in flood season 2023 shows that divergence and vertical velocity in dynamic conditions are relatively stable, 80% of which meet the threshold conditions, and the response effect is the best in July. The model performs well in September forecasting, with an error of within 20 mm in predicting rainfall for 75% of the cases. The rainstorm forecasting method effectively improves the prediction of the maximum rainfall in the flood season rainstorm process, and has certain indication effect in the local application.

Keywords

Rainstorm Model, Rainstorm Threshold, Multiple Linear Regression, Forecast Indicators

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铜仁市位于贵州省东北部，处于云贵高原向湘西丘陵方向过度的斜坡地带，雨水集中期出现在每年的4~10月汛期，期间多过程性强降雨，汛期各地的总雨量占全年总降雨量的75%~85% [1] [2]。近年来，极端气候事件多发[3] [4]，在升温背景下，铜仁市暴雨灾害上升态势明显，暴雨预报一直是重点和难点。近年来随着预报技术的提升及数值预报模型的不断发展，针对暴雨、短时强降水等天气的预报方法也在逐步完善[5] [6] [7]，如基于物理量“配料法”的暴雨预报研究，找到有利于发生暴雨的条件[8]-[11]；根据不同地区、不同季节等的暴雨预报指标和阈值，对本地暴雨预报进行估量等[12] [13]；数值预报产品对大范围强降水的环流形势预报准确率不断提高[14] [15] [16]。针对暴雨客观预报建立预报模型的方法，如蒋宗孝等[17]通过对垂直速度、水汽通量、相对湿度等因子进行逐步回归分析，利用完全预报法建立暴雨数值预报模型；徐迎春等[18]运用线性倾向估计和相关分析法，分析了武汉地区梅雨的气候特征，并建立预报方程；白晓平等[19]运用改进的回归法和综合多指标叠加法建立预报模型；邵元亭和高省莉[20]找出与短时暴雨相关性较好的预报因子，利用概率回归方法建立了短时暴雨预报方程；杨煜灿等[21]的研究表明，回归诊断对提高大到暴雨预报准确率具有明显的效果。以上研究成果在暴雨预报业务中得以应用，

并取得较好效果。

天气形势的分析能为暴雨预报提供有力的依据,通过客观预报模型预测的降雨量同时为预报员提供参考,在预报中通常针对 500、700、850 hPa 等层次的常规物理量进行分析,可以通过暴雨过程产生的动力、水汽、热力条件等方面,将一些关键、常用的物理量因子结合起来,建立暴雨预报统计模型,从预报角度出发客观估量一次暴雨过程的累计最大降雨量,逐步实现定量的降水预报,从而提升本地暴雨预报准确率,为当地防灾减灾等提供科学理论依据。

2. 数据与方法

2.1. 数据选取

本文所用资料为 2014~2022 年 5~9 月铜仁市 430 个区域自动站小时降水资料,统计发生暴雨过程的累计最大降水量,并计算开始、中间(过程开始至结束的时间中间点)、结束过程三个时次中的最大物理量,根据降水形成条件和预报中常用的物理量,从动力、水汽、热力条件出发,选取了以下指标:① 散度;② 相对湿度;③ 比湿;④ 垂直速度;⑤ 涡度;⑥ 水汽通量;⑦ 温度平流。物理量场涉及高层的,选取有代表性的 3 层:500 hPa、700 hPa、850 hPa。实况物理量场采用 ERA5 逐小时再分析资料计算得出。

2.2. 暴雨个例筛选

对于 24 h 内时效的累计最大降雨量,当出现 2 个及以上区域站点累计降雨量 ≥ 50 mm 则定义为一个暴雨个例。选取 2014~2022 年铜仁市 5~9 月暴雨个例共计 116 次,其中 5 月 21 次、6 月 39 次、7 月 19 次、8 月 22 次、9 月 14 次。

2.3. 研究方法

根据累计降水量公式 $P = \int_{t_1}^{t_2} Eqw dt$ 可知,累计降水量主要取决于降水的持续时间、比湿和垂直速度 [22] [23] [24]。因此,在选取物理量建立方程时优先考虑比湿和垂直速度,其余因子选取通过显著性的因子进行建模。建立多元线性回归模型如下:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon \quad (1)$$

设累计最大降雨量 Y 与物理量因子 X_1 、 X_2 、 \dots 、 X_m 之间存在相关关系,其中 β_i ($i = 0, 1, \dots, m$) 是回归系数, $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 是随机误差。

回归分析的基本原理是根据已知的数据集合,建立一个能够描述自变量和因变量之间关系的方程,来预测未知的因变量值 [25] [26]。本文将基于此方法建立一套适用于本地暴雨预报的模型,包括主观及客观预报方法。

3. 铜仁市暴雨日数的特征分析

图 1 为铜仁市暴雨日数年变化及各月份暴雨日数分布,可以看出暴雨日数呈现一个“减少-增加-减少”的起伏波动变化趋势,2014 年暴雨日数最多,达 19 次。在 2022 年暴雨日数仅 6 次,2017 年和 2018 年暴雨日数持平。铜仁市在 6 月发生暴雨占比最多,占汛期(5~9 月)日数的 33.91%,8 月次之,9 月最少。从图 2 暴雨日数月变化可知铜仁市出现暴雨最多在刚入夏,出夏时期暴雨相对较少,且除了 6 月下旬暴雨发生最多外,其余月份暴雨均集中发生在月中旬,但平均累计降水量最大在 7 月,超过 180 mm,除 5 月仅 120 mm 左右外,其余月份能达 140~160 mm,可见铜仁市在 7 月更容易出现极端性降水。

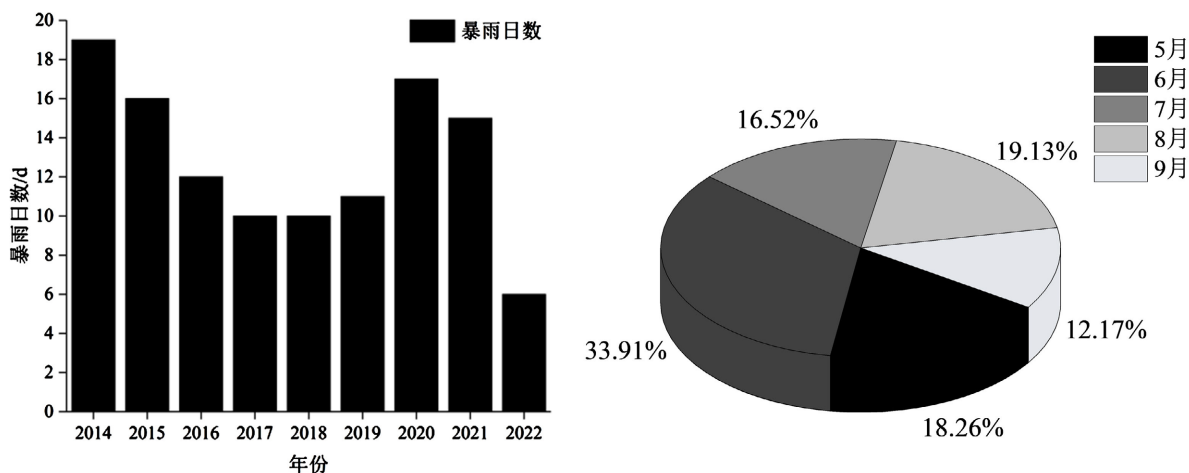


Figure 1. Annual changes in the number of days of heavy rainfall (left) and the distribution of the number of days of heavy rainfall by month (right) in Tongren
图 1. 铜仁市暴雨日数年变化(左)及各月份暴雨日数分布(右)

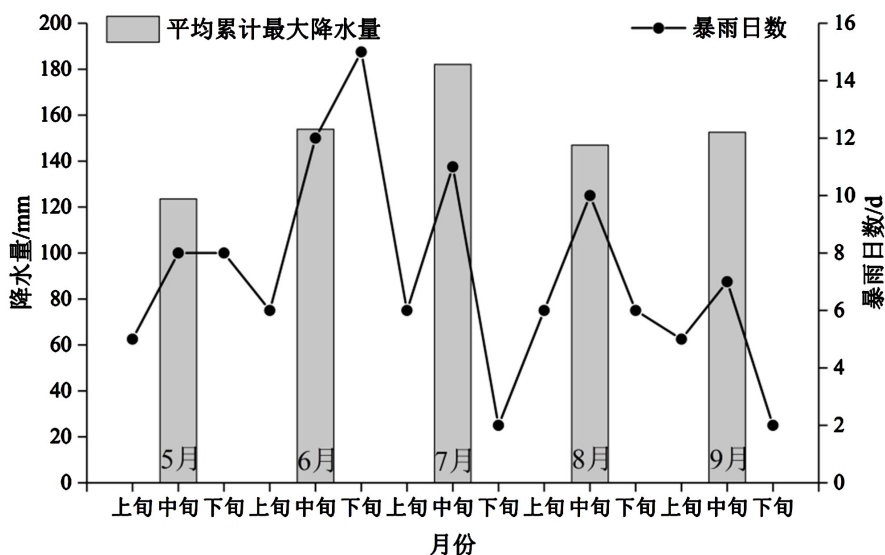


Figure 2. Monthly changes in the number of days of heavy rainfall and monthly average cumulative maximum precipitation in Tongren
图 2. 铜仁市暴雨日数月变化及月平均累计最大降水量

4. 分月暴雨阈值与方程建立

4.1. 分月暴雨指标与阈值

根据铜仁市 2014~2022 年 5~9 月暴雨个例，选取天气预报中常用的 500、700、850 hPa 三层的 3 个水汽条件(相对湿度、比湿、水汽通量)和 3 个动力条件(散度、涡度、垂直速度)以及热力条件(温度平流差)共 19 项物理量因子。取每次过程开始、中间(过程开始至结束的时间中间点)、结束过程三个时次中最大物理量的 70% (本文研究过程中选取了 60%、70%、80% 阈值，结果表明 70% 取值较为合理)百分位作为阈值，见表 1 可知通过计算的阈值指标存在明显的季节性变化特征，如进入夏季，比湿、水汽通量等都较春末和初秋大。当一次降雨过程满足的阈值条件越多，则越可能发生暴雨。

Table 1. Thresholds for monthly storm forecasting indicators**表 1.** 分月暴雨预报指标阈值

物理量指标	阈值							
	hPa		5月	6月	7月	8月	9月	
水汽条件	相对湿度 (%)	500		93.1	95.2	94.8	96.0	94.5
		700	≥	96.1	98.9	95.2	97.1	98.5
		850		99.7	97.4	98.3	99.1	99.7
	比湿 ($10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	500		4.8	6.1	6.2	6.1	5.7
		700	≥	10.6	12.2	12.1	11.6	11.4
		850		14.6	16.3	17.1	16.7	15.3
	水汽通量 ($10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)	500		6.8	6.0	6.3	5.0	5.3
		700	≥	14.4	14.2	14.4	10.4	12.2
		850		12.1	12.4	16.7	10.8	9.8
动力条件	散度 (10^{-5} s^{-1})	500		2.2	2.5	2.1	4.3	3.0
		700	≤	2.1	2.4	2.6	1.8	1.9
		850		2.4	1.2	1.5	2.2	3.0
	涡度 (10^{-5} s^{-1})	500		4.3	3.6	5.4	3.1	1.6
		700	≥	4.9	6.5	5.2	3.4	1.0
		850		7.7	8.2	8.5	8.3	8.7
	垂直速度 ($\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)	500		0.12	0.09	0.07	0.12	0.05
		700	≤	0.12	0.08	0.18	0.11	0.06
		850		0.1	0.04	0.06	0.05	0.03
热力条件	温度平流差值 ($^{\circ}\text{C}$)	850~500	≥	12.3	12.3	12.7	12.8	12.6

4.2. 分月暴雨物理量预报方程建立

选取与暴雨过程相关性较好(除6月选取相关系数大于0.2,其余月份相关系数均大于0.3)的物理量因子作为自变量,过程累计最大降水量作为因变量进行暴雨物理量建模,通过表1可知物理量量级相差较大,因此对物理量进行均一化处理,使方程更具稳定性。如表2列出各月份暴雨物理量预报方程。从预报方程中可知,除6、9月外,5、7、8月选取的物理量因子均为水汽条件多于动力条件外。且在5月选取的动力因子均在中低层,在7、8月高层水汽条件也较为重要。通过物理量预报方程对选取个例进行反推(过程略),当预测累计最大降水量与实况累计最大降水量误差在 $\pm 20 \text{ mm}$ 内时,认为方程推算结果准确,由此可得夏季准确率较低,这可能与铜仁市夏季多发生对流性降水有关,导致准确率降低,当形势多为稳定性降水时(5、9月),准确率较高。

Table 2. Monthly rainstorm forecasting models (equations)**表 2.** 分月暴雨预报模型(方程)

月份	方程
5月	$Y = 123.533 - 17.175X_7 - 6.263X_8 - 0.96X_9 + 14.85X_{10} + 10.897X_{18} + 0.015X_{19}$
6月	$Y = 153.754 + 10.867X_5 - 2.381X_6 + 18.199X_8 - 18.876X_{10} + 1.266X_{14} + 14.994X_{19}$
7月	$Y = 186.14 + 31.704X_3 + 6.829X_4 + 40.791X_9 + 4.901X_{10} - 26.691X_{13} - 21.885X_{15} - 31.107X_{17}$
8月	$Y = 146.959 + 16.649X_2 - 11.242X_8 - 8.42X_{13} + 30.427X_{14} - 17.796X_{18} - 20.959X_{19}$
9月	$Y = 150.17 + 8.902X_6 - 4.214X_3 - 0.239X_{12} - 17.991X_{11} + 16.611X_{14} + 17.425X_{15}$

注: $X_1 \sim X_6$ 、 $X_7 \sim X_{12}$ 、 $X_{13} \sim X_{18}$ 分别对应 500、700、850 hPa 的相对湿度、比湿、水汽通量、散度、涡度、垂直速度, X_{19} 为 850 hPa 与 500 hPa 的温度平流差, Y 为过程累计最大降水量(单位: mm)。

4.3. 个例检验

利用 2023 年 5~9 月共 28 次暴雨个例对上述预报方法进行检验。统计 2023 年分月暴雨个例, 针对 5、6 月各 7 次, 7、8 月各 5 次, 9 月 4 次个例过程中的最大物理量与分月暴雨预报指标和阈值进行对比。表 3 结果表明, 在 28 次暴雨过程中, 有 80% 的过程符合阈值预报的条件。动力条件中的散度、垂直速度多数能达阈值, 如 9 月 4 次个例的散度、700 hPa 和 850 hPa 的垂直速度均达到阈值, 可见散度和垂直速度两个物理量较为稳定。7~9 月达阈值的物理量明显多于 5~6 月, 其中 7 月物理量对阈值预报方法反应效果最好, 多数个例(超过 50%)物理量达阈值。

针对 2023 年 7 月 8 日 17 时至 2023 年 7 月 9 日 08 时过程进行分析, 结果见表 3。据统计区域一最大降雨量 232.6 mm, 区域二最大降雨量 310.3 mm, 通过表 3 可知, 区域一满足 13 个阈值条件, 区域二满足 10 个阈值条件, 通过表 4 模型方程预报最大降雨量可得区域一预报最大降雨量 242.3 mm, 区域二为 200.9 mm, 与实况最大降雨量对比结果表明, 对区域一的预报效果较好, 与区域二的实况数据相差较大, 因此可知同一过程由于区域选取不同可造成物理量相差甚大, 初步推断该方程可能不适用于由地形或环流形势造成的局地小范围暴雨预报。利用暴雨模型对 2023 年分月暴雨 28 次过程进行检验, 如表 4 所示, 可知暴雨模型对 2023 年 9 月暴雨最大降雨量预报效果最好, 准确率(偏差在 ± 20 mm)达 75%, 对 6、7 月预报准确率接近 50%。选取 2023 年 5~9 月发生的典型暴雨个例进行检验, 选取的五次典型暴雨个例空间分布, 如图 3 涉及到铜仁市各区县, 剔除因地形造成的局地小范围暴雨个例, 暴雨个例属当月过程范围最广, 造成影响最大。结果表明, 五次典型暴雨的物理量阈值均有 10 个以上满足阈值预报条件, 通过客观预报模型预测的最大降雨量和实况最大降雨量对比发现, 5、7、9 月预报效果较好, 雨量偏差均控制在 20 mm 内。

Table 3. Process inspection from 17:00 July 8, 2023 to 08:00 July 9, 2023

表 3. 2023 年 7 月 8 日 17 时至 2023 年 7 月 9 日 08 时过程检验

层次 (hPa)	相对湿度 (%)	比湿 (10^{-3} g kg^{-1})	水汽通量 (10^{-3} g cm^{-1} hPa s^{-1})	散度 (10^{-5} s^{-1})	涡度 (10^{-5} s^{-1})	垂直速度 (hPa s^{-1})	温度平流 差($^{\circ}C$)
500	97.4/95.8	6.4/6.1	6.6/7.7	5.6/4.1	2.0/-0.2	0.01/0.7	
700	95.9/98.5	12.9/13.1	14.1/13.4	2.3/0.6	4.8/0.2	0.04/0.05	12.9
850	98.3/99.4	17.4/17.3	23.8/19.7	-0.3/2.8	1.4/7.6	0.1/0.5	

注: 物理量数值为区域一/区域二。

Table 4. The test of the flood season monthly rainstorm model forecasting method in 2023

表 4. 2023 年汛期分月暴雨模型预报方法检验

月份	准确率 (偏差在 ± 20 mm)	典型暴雨个例最大降 雨量(mm)	满足物理量阈值个数	客观预报(模型预报最大降 雨量(mm))
5 月	57.1%	151.6	10	135.7
6 月	42.9%	174.3	10	159.2
7 月	40%	区域一 232.6	区域一 13	区域一 232.5
		区域二 310.3	区域二 10	区域二 200.9
8 月	60%	93.5	10	133.1
9 月	75%	82.1	12	70

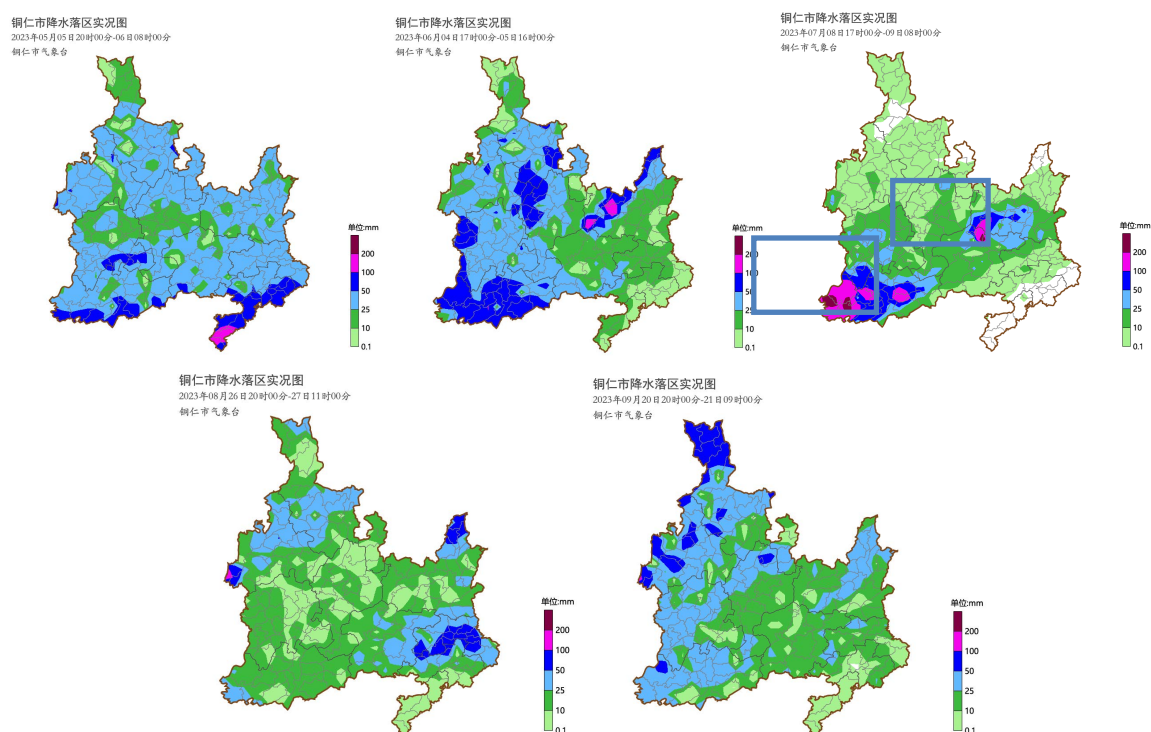


Figure 3. Spatial distribution of typical monthly rainstorm cases in flood season in 2023 (typical rainstorm cases from May to September respectively)

图 3. 2023 年月汛期分月典型暴雨个例空间分布(分别为 5~9 月典型暴雨个例)

5. 结论与讨论

(1) 铜仁市暴雨日数年变化呈现一个“减少 - 增加 - 减少”的波动变化趋势, 在 6 月发生暴雨占比最多, 9 月最少。除 6 月下旬暴雨发生最多外, 其余月份暴雨均集中发生在月中旬, 但平均累计最大降水量在 7 月, 超过 180 mm, 可见铜仁市在 7 月更容易出现极端性降水。分月暴雨阈值存在显著的季节变化特征, 夏季阈值较春末和初秋大。

(2) 依据选取的相关性较好的物理量进行模型建立可知, 5、7、8 月选取的物理量因子均为水汽条件多于动力条件, 且在 5 月选取的动力因子均在中低层, 在 7、8 月高层水汽条件也较为重要。当形势多为稳定性降水时, 准确率较高。

(3) 基于分月暴雨阈值和客观模型预报方法检验可知, 在 2023 年 28 次暴雨过程中, 有 80% 的过程符合阈值条件, 其中 7 月物理量对阈值条件反应效果最好, 同时物理量动力条件中的散度、垂直速度两个物理量较为稳定。检验结果表明该方程可能不适用于由地形或环流形势造成的局地小范围暴雨预报。

(4) 该暴雨的预报方法在本地化应用中有一定指示效果, 对较为稳定的天气形势下的暴雨过程偏差较小, 但本文仅选择了近几年的暴雨个例, 后续需要增加更多暴雨个例, 进一步优化预报模型并长期检验。另一方面暴雨的成因是极其复杂的, 还需要结合其他信息和判断技能, 进行全面的分析和评估。如可将暴雨发生的天气系统分类, 根据不同类型的形式进一步优化预报模型; 同时可引入热力和不稳定能量条件, 因此, 面对多个指标和复杂计算, 开展重点预报指标研究尤为重要。

基金项目

贵州省气象局省市联合科研基金资助项目(黔气科合 SS[2023]31 号)。铜仁市气象局科研项目(铜气科登[2023]02 号)。

参考文献

- [1] 石薇, 吴增宇, 龙河春, 等. 1980-2019年铜仁市气候变化趋势分析[J]. 现代农业科技, 2023(3): 165-169.
- [2] 徐大红, 晏理华, 周长志. 贵州铜仁市暴雨洪涝气候变化特征及灾害风险评估[J]. 贵州科学, 2020, 38(5): 63-67.
- [3] IPCC (2014) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [4] 张辛, 张凌云. 我国极端降水时空分布及大气环流背景研究进展[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(4): 70-77. <https://doi.org/10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.4.11>
- [5] 邢楠, 仲跻芹, 雷蕾, 等. 基于CMA-BJ的北京地区短时强降水预报试验[J]. 应用气象学报, 2023, 34(6): 641-654. <https://doi.org/10.11898/1001-7313.20230601>
- [6] 张博, 张芳华, 李晓兰, 等. “23·7”华北特大暴雨数值预报检验评估[J]. 应用气象学报, 2024, 35(1): 17-32. <https://doi.org/10.11898/1001-7313.20240102>
- [7] 倪允琪, 周秀骥, 张人禾, 等. 我国南方暴雨的试验与研究[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 690-704.
- [8] 张小玲, 陶诗言, 孙建华. 基于“配料”的暴雨预报[J]. 大气科学, 2010, 34(4): 754-766.
- [9] 欧坚莲, 欧进泽, 徐芳. 基于“配料法”的桂东片区持续性暴雨预报方法[J]. 气象研究与应用, 2011, 32(Z2): 56-58, 67.
- [10] 李强, 纪晓玲, 薛宏宇, 等. 配料法在宁夏暴雨预报中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(6): 20-28.
- [11] 杨雪艳, 秦玉琳, 张梦远, 等. 基于“配料法”的东北冷涡暴雨预报研究[J]. 大气科学学报, 2018, 41(4): 475-482.
- [12] 周雪松, 吴炜, 孙兴池. 山东暴雨天气学预报指标的统计特征分析[J]. 气象, 2014, 40(6): 744-753.
- [13] 许向春, 张春花, 林建兴, 等. 琼州海峡沿岸雾统计特征及天气学预报指标[J]. 气象科技, 2009, 37(3): 323-329.
- [14] 王佳津, 王彬雁, 肖递祥, 等. 基于目标对象检验法的四川省两种数值模式暴雨预报对比分析[J]. 气象与环境学报, 2023, 39(6): 44-50.
- [15] 耿飞, 霍朝阳, 魏鸣, 等. 冀南平原“7·27”局地大暴雨中尺度特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024, 18(1): 105-111.
- [16] 孟泽华, 高彦青, 马旭林, 等. 一次江淮暴雨高分辨率数值预报中云微物理方案敏感性分析[J]. 大气科学学报, 2023, 46(5): 765-775. <https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191218001>
- [17] 蒋宗孝, 沈永生, 伍毓柏, 等. 基于数值预报产品的三明市汛期暴雨统计-动力预报模型[J]. 气象科技, 2011, 39(5): 558-561. <https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.2011.05.005>
- [18] 徐迎春, 刘立, 庞晶. 武汉地区梅雨期暴雨预报方法初探[J]. 气象与减灾研究, 2017, 40(3): 231-235.
- [19] 白晓平, 靳双龙, 王式功, 等. 基于Logistic回归和多指标叠加的短时强降水预报模型[J]. 气象科学, 2018, 38(4): 553-558.
- [20] 邵元亭, 高省莉. 三门峡市短时暴雨预报方法[J]. 气象与环境科学, 2004(4): 23.
- [21] 杨煜灿, 谢征, 王国强. 回归诊断在梅雨期大到暴雨预报中的应用[J]. 气象科技, 2004, 32(2): 81-85.
- [22] Doswell, C.A., Brooks, H.E. and Maddox, R.A. (1996) Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology. *Weather and Forecasting*, **11**, 560-581. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1996\)011<0560:fffaib>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1996)011<0560:fffaib>2.0.co;2)
- [23] Chappell, C.F. (1986) Quasi-Stationary Convective Events. In: Ray, P.S., Ed., *Mesoscale Meteorology and Forecasting*, American Meteorological Society, 289-310.
- [24] Johns, R.H. and Doswell, C.A. (1992) Severe Local Storms Forecasting. *Weather and Forecasting*, **7**, 588-612. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1992\)007<0588:slsf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1992)007<0588:slsf>2.0.co;2)
- [25] 赵声蓉, 赵翠光, 邵明轩. 事件概率回归估计与降水等级预报[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 521-529.
- [26] 喻婷婷, 万金红, 高路. 福建省暴雨时空演变规律与洪涝灾害脆弱性曲线研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(12): 64-74. <https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2023.12.006>