

陈鲍发,马中元,王立志,等,2022. 江西昌江流域特大暴雨短时强降水回波特征分析[J]. 气象,48(11):1418-1427. Chen B F, Ma Z Y, Wang L Z, et al, 2022. Echo characteristics of short-term heavy rainfall due to severe rainstorm in Changjiang River basin, Jiangxi Province[J]. Meteor Mon, 48(11):1418-1427(in Chinese).

江西昌江流域特大暴雨短时强降水回波特征分析^{*}

陈鲍发¹ 马中元² 王立志³ 黄龙飞¹ 李燕玲¹ 盛梦婷⁴ 张晓芳⁵

1 江西省景德镇市气象局,景德镇 333000

2 江西省气象科学研究所,南昌 330046

3 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

4 江西省乐平市气象局,乐平 333300

5 江西省婺源县气象局,婺源 333200

提 要: 为了研究江西昌江流域特大暴雨过程中短时强降水的回波特征,使用天气、雷达回波和昌江流域气象水文雨量等资料,对 2000—2020 年昌江流域 10 次特大暴雨过程,采用天气学、统计学、雷达气象学和图像处理学等方法进行研究。结果表明:特大暴雨过程的主要取决于对流活动造成的短时强降水,包括短时强降水雨强和强降水范围。当 3 h 累计雨量 ≥ 100 mm 时即可提前发布特大暴雨红色预警,监测单站累计时长达 3 h 的短时强降水可更早发布预警,提升特大暴雨预报服务效果。超低空急流、中低层低涡、高空低槽、低层辐合、高层辐散在景德镇市特大暴雨过程中发挥了重要作用。强降水由大范围混合性降水中的强回波单体、强回波短带或其他回波导致,回波强度达 45~55 dBz。风暴跟踪信息(STI)产品不仅能反映强回波的移动信息,还可以分析出回波的辐合,对于短时临近预报有很好的参考价值。在覆盖江西宽广东西走向的回波带上,存有多条南北走向的短带回波,由西向东移动,形成“列车效应”,风廓线雷达产品垂直速度 W 可大致反映回波移动情况。造成特大暴雨的组合反射率(CR)强度多为 45~50 dBz,回波顶高(ET)平均为 12~13 km,垂直液态水含量(VIL)在 5~10 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 45 dBz 的强回波伸展高度平均为 6 km。CR 强度在 45 dBz 以上时:强回波面积达到 3 等级时出现短时强降水的可能性很大,强回波面积在 2 等级时雨强大多在 20~30 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$;强回波面积在 1 等级时雨强基本在 20 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下。研究结果为了了解和监测预警昌江流域特大暴雨的短时强降水回波特征及预报提供了参考依据。

关键词: 昌江流域,特大暴雨,短时强降水,回波特征,强回波面积

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.041002

Echo Characteristics of Short-Term Heavy Rainfall Due to Severe Rainstorm in Changjiang River Basin, Jiangxi Province

CHEN Baofa¹ MA Zhongyuan² WANG Lizhi³ HUANG Longfei¹

LI Yanling¹ SHENG Mengting⁴ ZHANG Xiaofang⁵

1 Jingdezhen Meteorological Office of Jiangxi Province, Jingdezhen 333000

2 Jiangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanchang 330046

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Leping Meteorological Station of Jiangxi Province, Leping 333300

5 Wuyuan Meteorological Station of Jiangxi Province, Wuyuan 333200

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项(A类-XDA19040202)、国家自然科学基金项目(41975001)、江西省气象局 2020 年面上项目(JX2020M05)和江西省重点研发计划项目(20171BBG7005)共同资助

2022 年 1 月 13 日收稿; 2022 年 4 月 10 日收修定稿

第一作者:陈鲍发,主要从事天气预报与预报技术研究. E-mail:cbf0604@sina.com

通讯作者:马中元,主要从事天气预报和预报技术研究. E-mail:mazhongyuan1@163.com

Abstract: In order to study the echo characteristics of short-term heavy rainfall in the process of severe rainstorm in Changjiang River Basin, by using the data of weather, radar echo and meteorological, hydrological and rainfall in Changjiang River Basin, as well as the methods of meteorology, statistics, radar meteorology and image processing, this paper studies 10 severe rainstorm processes in Changjiang River Basin from 2000 to 2020. The results show that the severe rainstorm process mainly depends on the short-term heavy rainfall caused by convective activities, including the short-term heavy rainfall and the range of heavy rainfall. When the accumulated rainfall of 3 h is ≥ 100 mm, the red warning of severe rainstorm can be issued in advance. The monitored short-term heavy rainfall accumulated for 3 h at a single monitoring station can be issued earlier to improve the effect of severe rainstorm prediction service. Ultra low-level jet, low-level vortex, high-altitude trough, low-level convergence and high-level divergence play an important role in the process of severe rainstorm in Jingdezhen City. Heavy precipitation is caused by strong echo cell, strong echo short band or other echoes in a wide range of mixed precipitation, and the echo intensity is 45–55 dBz. STI product information can not only reflect the movement information of strong echo, but also analyze the convergence of echo, which has a good reference value for short-term and imminent prediction. On the echo band covering Jiangxi east-west direction, there are many short band echoes in south-north direction, which move from west to east to form “train effect”. The vertical velocity of wind profile radar product can roughly reflect the echo movement. The CR intensity causing the torrential rain is mostly 45–50 dBz, the average height of echo top is 12–13 km, the VIL is 5–10 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, and the average extension height of strong echo of 45 dBz is 6 km. When the CR intensity is above 45 dBz: the strong echo area reaches Grade 3, and there is a great possibility of short-term heavy precipitation. The strong echo area is in Grade 2, mostly between 20–30 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$. When the strong echo area is at Grade 1, the precipitation intensity is basically below 20 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$. These research results could provide a reference basis for understanding, monitoring and early warning the echo characteristics and prediction of short-term heavy rainfall in severe rainstorm in Changjiang River Basin.

Key words: Changjiang River Basin, severe rainstorm, short-term heavy rainfall, echo characteristic, strong echo area

引 言

景德镇市位于江西东北部,是江西的暴雨中心之一,昌江流域由北向南贯穿景德镇市。多年来,强降水导致的洪水一直严重危及昌江流域居民的生命与财产安全。例如:1998年昌江流域出现大洪水,转移受灾群众20多万人,直接损失超20亿元。在经过2000—2009年昌江流域相对平静时期后,2010年昌江流域又进入洪水多发期,2010年7月15日、2012年8月10日、2016年6月19日、2017年7月23—24日、2018年7月5—6日、2020年7月6—8日均为昌江流域历史上罕见的大洪水过程。可以说暴雨、大暴雨的研究仍是景德镇市气象部门最为迫切研究的课题之一,尤其是特大暴雨天气的研究和监测预警。2021年7月河南特大暴雨、2021年8月

11—12日湖北随州特大暴雨,都造成大范围的人员伤亡,使得特大暴雨的研究和监测预警愈发引起社会公众和气象学者的高度关注。

对于暴雨的研究,国内外多有专家进行了研究。张延亭和林铍德(1994)指出致洪暴雨前期500 hPa东亚中低纬度环流平直,低空形成三高一低的形势,切变线上低涡东移。戴泽军等(2019),黄文彦等(2019),张舒阳和闵锦忠(2018),刘蕾等(2018),梁钰等(2019),蓝俊倩等(2018),田畅等(2019)发现低空急流、水汽输送、低层辐合、高层辐散在暴雨产生中起到重要作用,而槽后冷空气侵入加剧了中低层大气的对流性不稳定,触发了不稳定能量的释放暖区暴雨带发生于西南暖湿气流加强的环境下,对流不稳定显著,在暖式中尺度辐合线的触发下产生,具有明显的“列车效应”与后向传播特征,地面辐合线及中尺度涡旋的位置决定了雨带和特大暴雨中心的

位置。锋面系统暴雨带由切变线云系形成的多单体回波带造成的,高低空系统耦合,降水持续时间长,暴雨区面积大(王华等,2019)。暴雨的雷达回波特征各种各样,尉英华等(2019),邓虹霞等(2019)研究发现,回波形状主要有块状、带状、混合型等3种,40 dBz 以上回波是强降水雷达回波的重要系统。辛玮琦等(2021),洪丽霞等(2021)江西短时强降水研究表明:组合反射率 CR 为 40~65 dBz,回波顶高 ET 为 8~15 km,垂直液态水含量 VIL 为 10~50 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,50 dBz 强回波顶高为 5~12 km,这是由于强对流天气回波和稳定性降水回波都有可能出现短时强降水。桂园园等(2020)指出暴雨有对流型降水、混合型降水2种类型,对流性降水的强回波中心强度可达 50~60 dBz;混合型降水回波强度偏弱在 45 dBz,但 45 dBz 强回波顶高不超过 6 km,属于典型“低质心”降水。回波的合并是与回波的“传播”相联系的,回波的传播方式一方面加快了移动速度,另一方面改变了回波的移动方向。强雷电、雷暴大风、冰雹的雷达回波特征与强降水有明显区别,产生强雷电的回波要具备强度 >50 dBz、强回波中心密实、强回波边缘梯度大等条件;雷暴大风主要有短带回波、强回波单体和超级单体回波结构,CR 达 50~60 dBz 或以上,VIL 在 20~40 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,强盛时可达 50~60 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,反射率因子垂直剖面上 50 dBz 以上回波高度在 5~6 km,强盛时达 6~8 km;径向速度垂直剖面上具有相邻的正负速度对的中气旋结构(陈鲍发和马中元,2019;高建平等,2019;何文等,2018;吴才明等,2019)。陈鲍发等(2020)为直观显示强对流回波的移动信息,将江西多部雷达的风暴跟踪信息(STI)产品进行解码,并集成在雷达拼图 CR 或反射率因子 R 的 1.5°仰角产品中,形成雷达拼图组合 STI 产品,并提出了密集指向区的概念,有效地判断未来 1 h 回波系统的移动方向和移动速度。这些研究成果为景德镇地区特大暴雨研究提供了参考依据。

1 资料及研究区域介绍

1.1 资料

雨量资料来源于景德镇市区域气象站和昌江流域水文观测站;景德镇市气象局自 2004 年开始在境

内布设区域自动站,目前已有 60 个自动气象站(含 3 个国家观测站);水文局雨量观测点则更多,目前昌江流域有 112 个水文雨量自动观测点。天气资料和探空资料来源于 MICAPS 平台,主要使用常规天气图;雷达拼图资料来源于江西 WebGIS 雷达拼图平台和景德镇 SA 天气雷达 PUP 产品;风廓线雷达资料来源于江西风廓线雷达产品平台的景德镇(浮梁)TWP3 边界层风廓线雷达产品。

1.2 研究区域

昌江由北向南贯穿景德镇全境,是流经安徽、江西两省的一条河流,发源于安徽祁门县大洪岭深处,向南流经景德镇,注入鄱阳湖,全长为 253 km。市境内干流长约 110 km,50 多条支流。上游在祁门境内,水流湍急,特别是有强降水影响时,洪水陡涨、陡落,具有较为明显的山洪特征。本文研究的强降水区主要位于景德镇境内及安徽祁门南部(图 1a),10 次特大暴雨发生点由北往南依次为茶宝、渚口(祁门境内)、荒坞里、内高山、南溪、瑶里、龚村坞水库、竟成、丽阳、上村(图 1b),后续短时强降水统计数据来源于这些气象观测站。

2 江西昌江流域特大暴雨过程数据统计

在景德镇市区或浮梁县的气象区域站与水文观测站中任意 24 h 满足:1 个站出现 250 mm 以上的特大暴雨且有 3 个站出现 200 mm 以上的大暴雨即为 1 次昌江流域特大暴雨过程。3 个站出现 200 mm 以上的大暴雨引发的昌江流域暴雨过程平均雨量,不亚于 1 个站的特大暴雨过程。

根据对 2000—2020 年气象与水文雨量资料的普查,昌江流域共出现 10 场特大暴雨过程(表 1),平均每两年出现一场特大暴雨。但从特大暴雨出现年份来看,这 10 场特大暴雨中有 9 场出现在 2010—2020 年,表明近 10 年以来昌江流域进入洪水高发期。

从特大暴雨的 24 h 雨量上看(表 1),以 2012 年 8 月 10 日昌江区荷塘乡上村(463 mm)为最大。特大暴雨站点数的多少反映强降水的程度,结合当地洪水的强度与灾情,对 10 场特大暴雨的雨强进行排

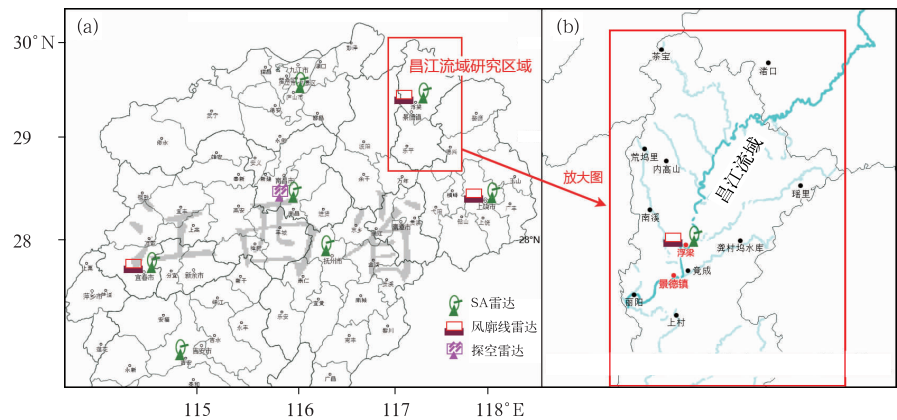


图 1 (a)昌江研究区域和(b)昌江流域的 10 个站点位置
Fig. 1 Location of 10 stations of severe rainstorm in (a) Jingdezhen research area and (b) Changjiang River Basin

名。前三名分别是:2012 年 8 月 10 日、2020 年 7 月 8 日、2016 年 6 月 19 日。对应昌江流域(渡峰坑)的洪峰水位分别为 32.29、33.94、33.89 m。
由此可见,特大暴雨的雨强与昌江流域洪峰水位并未完全对应,雨强最大的 2012 年 8 月 10 日洪

峰水位仅为 32.29 m。昌江流域的洪水不仅与降水的强度有关,同时与降水的时空分布、站点数等因素关系密切;同样的降水强度落区不同、站点数多寡,造成的结果也会明显不同,灾情也不同。

表 1 2000—2020 年昌江流域特大暴雨过程统计
Table 1 Statistics of severe rainstorm process in Changjiang River Basin from 2000 to 2020

排名	过程日期/ 年.月.日	起止时间段/BT	24 h 最大雨量(站点名: 所在乡镇)/mm	≥250 mm 站点数/个	≥200 mm 站点数/个
10	2008.6.9—10	09—09	260(风坑:浮梁县瑶里镇)	1	3
5	2010.7.14—15	20—20	258(丽阳:景德镇市昌江区丽阳乡)	1	14
1	2012.8.9—10	20—20	463(上村:景德镇市昌江区荷塘乡)	44	54
9	2013.6.6—7	14—14	300(渚口:祁门县渚口乡)	3	14
3	2016.6.18—19	20—20	307(南溪:浮梁县黄坛乡)	38	57
7	2017.6.23—24	08—08	275(内高山:浮梁县蛟潭镇)	10	22
4	2018.7.5—6	20—20	377(竟成:景德镇市昌江区)	33	32
8	2019.5.25—26	20—20	303(茶宝:浮梁县西湖乡)	8	31
6	2020.7.6—7	20—20	293(荒坞里:浮梁县黄坛乡)	9	34
2	2020.7.7—8	20—20	381(龚村坞水库:浮梁县王港乡)	31	98

注:站点数是指水文雨量站和气象自动站的总和
Note: The number of stations is the sum of hydrological rainfall sations and automatic meteorological stations.

对 2000—2020 年昌江流域 10 次特大暴雨过程逐小时雨量进行统计(表略),短时强降水由多个时段造成,并非 24 h 都出现短时强降水,短时强降水具有一定的突发性。以雨强 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为短时强降水标准,10 次特大暴雨过程中短时强降水出现小时数和最大小时雨量比较明显看出短时强降水的突发性(表 2)。
由表 2 可见,10 次特大暴雨过程中短时强降水

都有 1~6 h 出现雨强 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水,平均值为 3.3 h,因此,当 3 h 累计雨量 $\geq 100 \text{ mm}$ 、且其他条件都满足时,即可发布特大暴雨红色预警。10 次特大暴雨过程中仅 2008 年 6 月 10 日和 2013 年 6 月 7 日的过程未达到发布特大暴雨红色预警标准,其余 8 次都达到标准。可见,3 h 短时强降水的监测预警是特大暴雨预报服务的关键。

表 2 10 次特大暴雨过程中短时强降水出现的小时数、最大值和出现时间

Table 2 Number of hours, maximum value and occurrence duration of short-term heavy rainfall during 10 severe rainstorms

编号	短时强降水累计小时数/h	小时降水量最大值/(mm·h ⁻¹)	出现时间/BT	出现短时强降水站数/个
1	1	31.0	07	1
2	4	93.6	03	12
3	6	59.0	08	9
4	1	61.5	15	4
5	3	69.5	12	11
6	4	39.0	05	4
7	3	97.5	02	12
8	4	49.0	02	5
9	3	54.0	15	7
10	4	78.5	21	11

3 天气系统、层结条件和物理量

3.1 天气系统配置

超低空西南急流在特大暴雨中起到了重要作用。10 次特大暴雨过程大都伴有超低空西南急流,即存在明显的超地转现象。南昌附近的超低空急流输送边界层暖湿气流,有利于建立位势不稳定,增强不稳定能量,并输送大量水汽,在急流前端的赣东北剧烈辐合,激发强烈上升运动,导致强降水的发生发展。中低层低涡环流有重要影响。低涡环流多位于景德镇东北部的皖南至皖东南,景德镇位于低涡的西南方,低涡西部的偏北气流不断带来冷空气,与赣东北的西南暖湿气流交汇,加剧了上升运动与降水强度,而中层的冷空气叠加在低层的暖湿气流上,又加大了对流的不稳定,增强了不稳定能量。高空低槽的作用明显(图 2)。昌江流域特大暴雨的产生均有高空低槽的影响,槽前有明显的正涡度平流,东移过程中往往造成明显的上升运动,造成降水发生,而槽后西北气流叠加在低层西南暖湿急流上,热力不稳定发展,在中层干冷气流的触发下,强降水剧烈发展。200 hPa 分流区有明显作用。分流区多表现为北风与西北风之间的辐散,表明高空存在强烈的辐散,高空辐散带来的抽吸作用,将低层上升气流带来的水汽、热量向外流出,使得上升气流不断维持发展,对强降水的持续发展有明显促进作用。低层辐合、高层辐散导致暴雨的发生。有明显的低层辐合和低压(有闭合低压等值线)活动,地面气旋与剧烈的辐合形成明显的上升运动,与高层分流区形成的高层辐散相配合,导致强降水的不断发生。

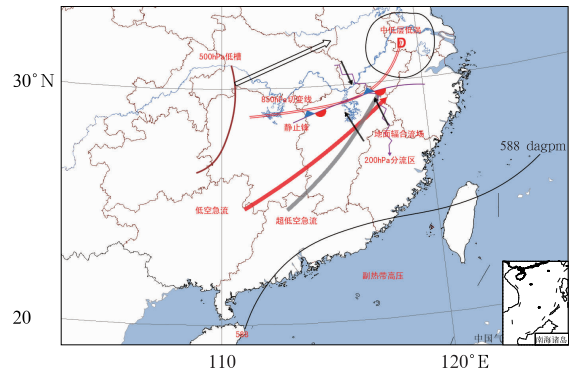


图 2 昌江流域天气系统配置分析

Fig. 2 Analysis of the configuration of the weather system in the Changjiang River Basin

3.2 层结条件和物理量统计

对流有效位能(CAPE)多表现为细长的正能量结构且具有一定的强度。中低层切变线稳定,切变线以南有强盛的西南急流,不断有低涡沿切变线东移,低层辐合与高层辐散均明显,为典型的梅雨型致洪暴雨。风垂直切变主要集中在低层 850 hPa 或边界层 925 hPa。东南风顺转为强西南风,暖平流特征明显。水汽饱和区伸展高度高。700 hPa 以下均为饱和区,有效保证了水汽的供应。

江西昌江流域特大暴雨过程中南昌探空物理量参数统计(表略)发现,CAPE 平均值为 $1485 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、K 指数平均值为 39.6°C 、SI 平均值为 -1.32°C ,风暴强度指数 SSI 平均值为 297、1000~500 hPa 垂直风切变平均值为 $12.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 0°C 层高度平均值为 5164 m、 -20°C 层高度平均值为 8720 m,这些对指导景德镇大暴雨过程预报分析有参考价值。

4 雷达回波和 TBB 云图特征

4.1 典型雷达拼图回波特征

2013 年开始有江西 WebGis 雷达拼图数据,因此选取了景德镇研究区域 2013 年之后的 6 次短时强降水典型雷达拼图回波,昌江流域致洪暴雨主要由大范围混合型回波中的强回波带或回波块造成,如:2016 年 6 月 19 日 07 时(图 3a)、2017 年 6 月 24 日 06:30(图 3b)、2020 年 7 月 7 日 10 时(图 3e)、2020 年 7 月 8 日 16:30(图 3f),强度达 45~50 dBz,呈准东西向、东北—西南向和西北—东南向。45 dBz 以上的强回波带镶嵌在大范围 30~40 dBz 中等强度的降水回波中,强回波带经过的地方出现短时强降水,与中等强度的降水混合、叠加,造成大范围的大暴雨与特大暴雨;当回波带与回波移动方向平行时,强降水时间得到延长、强降水量级加大。2019 年 5 月 25 日 21:30(图 3d),强降水主要由大范围降水回波中的混合型强回波单体及混合型回波短带造成,混合型强回波单体或短带不断经过浮梁北部,造成特大暴雨。2018 年 7 月 5 日 21:30(图 3c),50 dBz 的强回波块稳定维持在景德镇市区上空,造成持续强降水。

由此可见,江西昌江流域特大暴雨的典型雷达回波特征有大范围混合型回波中的强回波带、大范围降水回波中的混合型强回波单体及混合型回波短带、稳定的块状强回波等,大范围混合型回波中的强回波带表现最为明显。

4.2 风暴跟踪信息(STI)特征和“列车效应”

风暴跟踪信息(STI)移动路径,不仅能够反映回波系统的强度,还能反映出回波单体的移动速度与移动方向。STI 经过可信度判别、误差数据过滤等处理,将比较合理的 STI 信息叠加到雷达拼图组合反射率 CR 和反射率因子 R1.5 产品上。产品有两种表现方式:一是 WebGIS 雷达拼图网页版可以交互(图 4a, 4b, 4c);二是简洁方便的手机版(图 4d)。暴雨回波 STI 分布均匀,长度相似,朝向较为一致,均为东北方向,路径较短,表明降水回波从西南向东北方向稳定移动。多个强回波单体上出现密集 STI 指向,即密集指向区。密集指向区表明多部雷达识别出的 STI 路径相似,回波移向、移速等移动信息较为确定。从图 4a~4c 中的密集指向区来看,多个 STI 指向平行且集中在一起,长度与朝向一致,表明不断有强回波经过并影响。图 4d 中手机版本 STI 图左下角的圆圈量化了回波的平均移动信息,该图显示平均 STI 移动方向为 80° ,平均 STI

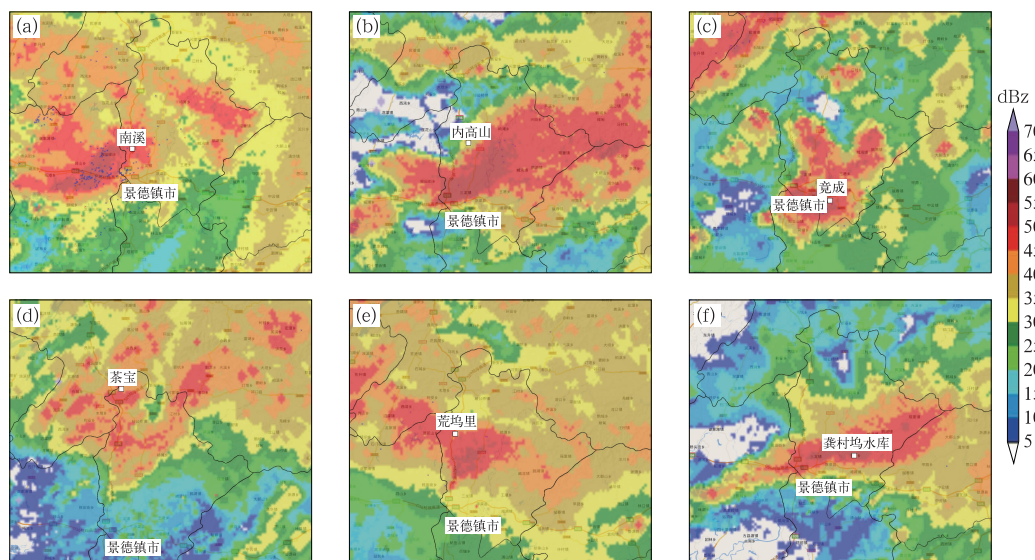


图 3 景德镇研究区域 6 次短时强降水典型雷达拼图 CR 产品回波特征

(a) 2016 年 6 月 19 日 07:00, (b) 2017 年 6 月 24 日 06:30, (c) 2018 年 7 月 5 日 21:30, (d) 2019 年 5 月 25 日 21:30, (e) 2020 年 7 月 7 日 14:00, (f) 2020 年 7 月 8 日 16:30

[白色方块:出现短时强降水($\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)的站点]

Fig. 3 Typical radar mosaic CR product echo characteristics of 6 short-term heavy rainfalls in Jingdezhen research area

(a) 07:00 BT 19 June 2016, (b) 06:30 BT 24 June 2017, (c) 21:30 BT 5 July 2018, (d) 21:30 BT 25 May 2019, (e) 14:00 BT 7 July 2020, (f) 16:30 BT 8 July 2020

[white square: stations with short-term severe rainfall ($\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)]

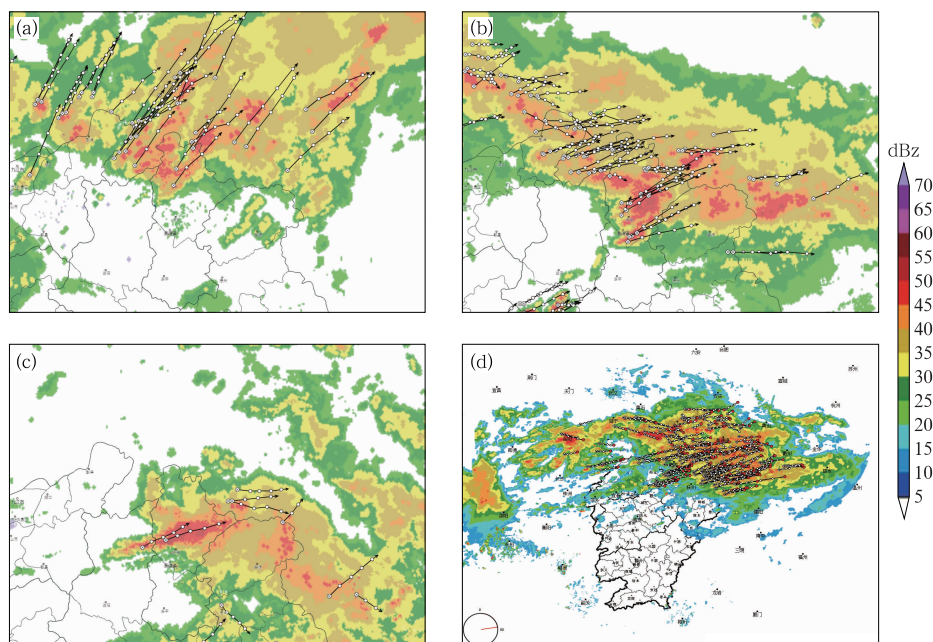


图 4 雷达拼图组合反射率 CR 产品(填色)与风暴跟踪信息 STI 产品(实线箭头)特征
(a)2019 年 5 月 25 日 21:30, (b)2020 年 7 月 7 日 14:00, (c)2020 年 7 月 8 日 16:00, (d)2020 年 7 月 8 日 08:00
Fig. 4 Feature diagram of radar puzzle combined reflectivity CR product (colored)
superimposed by storm tracking information STI product (solid arrow line)
(a) 21:30 BT 25 May 2019, (b) 14:00 BT 7 July 2020, (c) 16:00 BT 8 July 2020, (d) 08:00 BT 8 July 2020

移动速度为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。回波系统移动速度慢 ($\leq 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 有利于产生强降水。

降水回波的“列车效应”是强降水过程中经常出现的一种降水形式,其表现为不同的强回波沿相似的移动路径经过同一地点,强回波之间有明显的间歇,就像一节节列车驶过,故称“列车效应”。2020 年 7 月 8 日,由宜春市移来的 4 个短带回波系统 A1、A2、A3、A4(图 5a),宜春风廓线雷达风场、垂直速度(图 5b)图上也较好地表现出“列车效应”的移动。

短带回波系统 A1 在 7 月 7 日 23 时至 8 日 02 时移过宜春地区,带来中等强度的降水,宜春附近 13 个国家站在 7 日 23 时、8 日 00 时最大雨量分别为 8.1 mm、7.5 mm,风廓线上 5 km 高度附近均为偏西风,风速约为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,所以 A1 主要向偏东方向移动。短带回波系统 A2 在 7 月 8 日 06—09 时移过宜春地区,带来弱降水,宜春附近 13 个国家站最大雨量均不足 1 mm,风廓线上 5 km 高度附近多为西南风,风速在 $14 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,所以 A2 主要向偏东北方向移动。短带回波系统 A3 在 7 月 8 日 12—15 时移过宜春地区,带来中等强度的降水,宜春附近 13 个国家站在 23 时、00 时最大雨量分别为 8.1 mm、7.5 mm,风廓线上 5 km 高度附近均为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西风急流,中低层(1 km 以上)也有 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的西南偏西急流,即 A3 主要向东北

偏东方向移动。短带回波系统 A4 在 7 月 8 日 18—21 时移过宜春地区,带来较强降水,宜春附近 13 个国家站在 18 时、19 时最大雨分别为 24.5 mm、9.1 mm。风廓线上 4~5 km 由西风转西北风,风速由 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而 5 km 以上均为西北风,风速在 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。由于有较为明显的西北风分量,位于北部的 A4 向东移动时有偏南的分量,与位于南部回波短带合并东移。

由此可见,在覆盖江西的东西走向的回波带上,存有多条南北走向的短带回波,由西向东移动,形成“列车效应”。其移动方向、速度受到 3~5 km 的平均风场制约,从相对应的风廓线雷达上可大致量化短带回波的移动信息,同时根据上游降水实况,从而判断该短带回波对下游产生的具体影响。也正是上游不断有短带强回波系统移入景德镇,造成昌江流域持续强降水。

4.3 组合反射率、45 dBz 强回波面积和逐小时雨量统计

大暴雨过程中,雷达拼图监测范围比单部雷达更大,更能反映大暴雨中中小尺度系统活动。大暴雨的形成尤其是短时强降水的形成与回波系统的强度和强回波面积关系密切。针对 6 次特大暴雨过程中的组合反射率 CR、45 dBz 强回波面积 Q_{45} (Q_{45} 的大小直接关系到强降水的大小和影响时间的长短,

划分为 0 等级: $<10 \text{ km}^2$; 1 等级: $10 \sim 100 \text{ km}^2$; 2 等级: $100 \sim 300 \text{ km}^2$; 3 等级: $\geq 300 \text{ km}^2$) 和逐小时降

水量 R_{60} 进行统计分析,得到如下结果(图 6)。

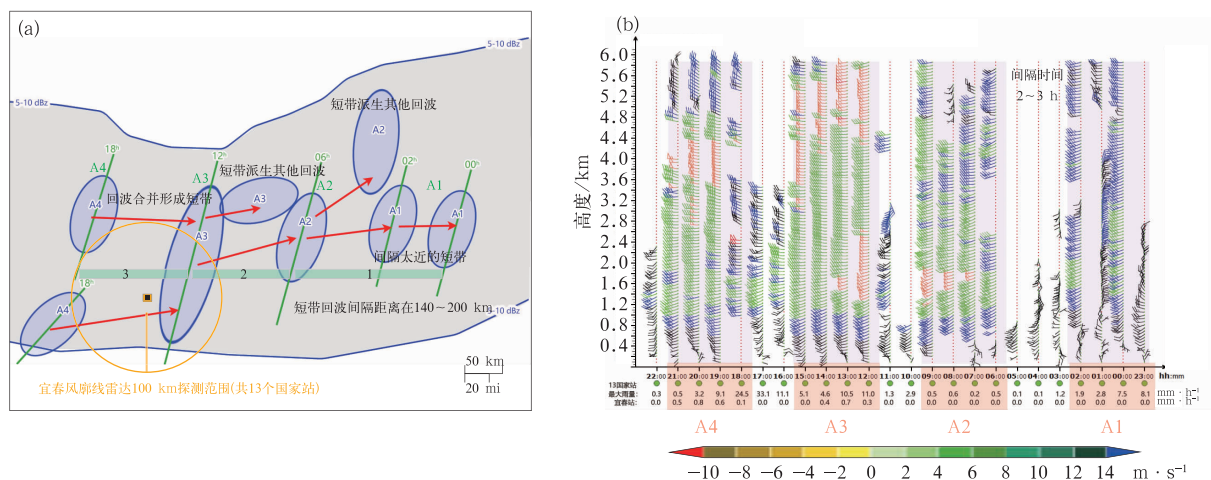


图 5 2020 年 7 月 8 日短时强降水中“列车效应”雷达拼图与宜春风廓线产品特征

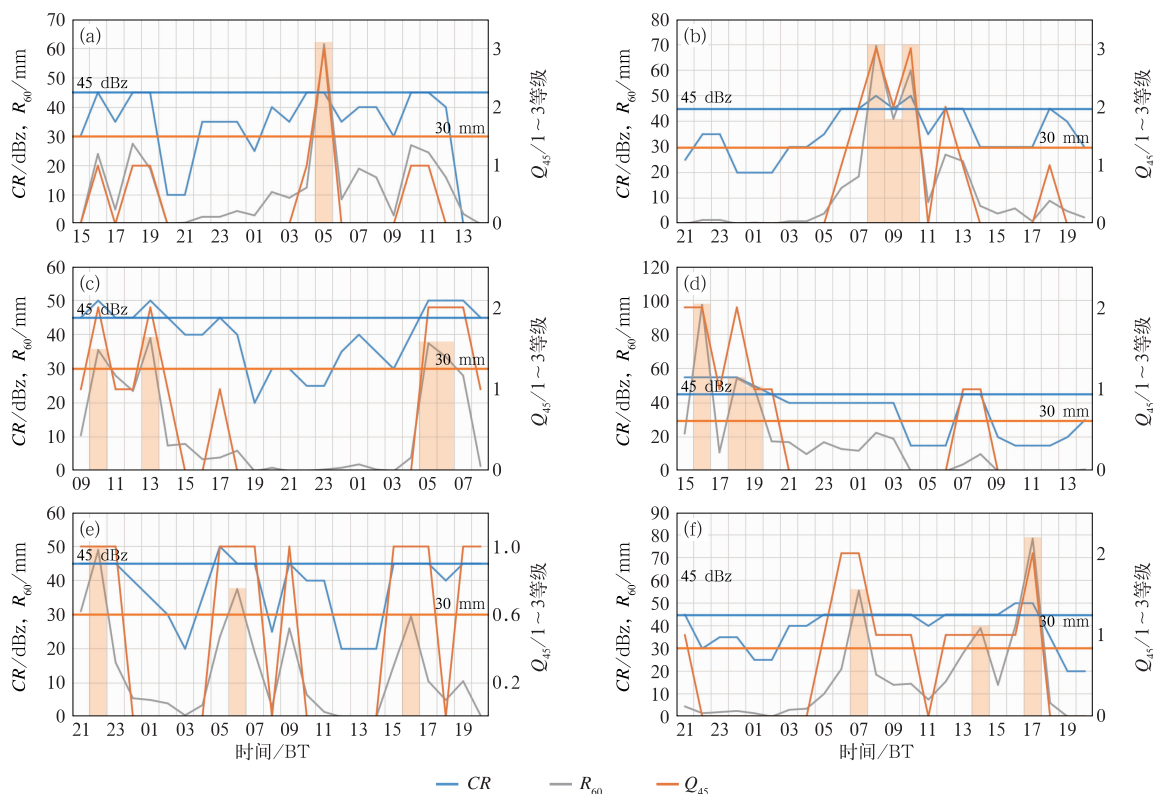
(a) 00—18 时雷达拼图廓线示意及宜春 100 km 半径范围,

(b) 宜春 TWP3 风廓线雷达风场(风羽)、垂直速度(风羽)和 13 个站的最大雨量

Fig. 5 The “train effect” radar puzzle and Yichun wind profile product characteristics in short-term severe rainfall on 8 July 2020

(a) The 00:00 BT–18:00 BT radar puzzle outline and Yichun with 100 km radius range map

(b) Yichun TWP Wind Profile Radar wind field (barbs), vertical velocity and maximum rainfall at 13 stations

图 6 景德镇特大暴雨过程组合反射率 CR、45 dBz 强回波面积 Q_{45} 和逐小时雨量 R_{60} 关系特征

(a)2013 年 6 月 6—7 日渚口, (b)2016 年 6 月 18—19 日南溪, (c)2017 年 6 月 23—24 日内高山,

(d)2018年7月5—6日竟成,(e)2019年5月25—26日茶宝,(f)2020年7月7—8日龚村坞水库

(橙色阴影:45 dBz 回波区域与 $R_{60} > 30$ mm 的重叠区域)

Fig. 6 Relationship between composite reflectivity, strong echo area and hourly rainfall during severe rainstorm in Jingdezhen

(a) 6–7 June 2013, Zhukou; (b) 18–19 June 2016, Nanxi; (c) 23–24 June 2017, Neigaoshan;

(d) 5–6 July 2018, Jingcheng; (e) 25–26 May 2019, Chabao; (f) 7–8 July 2020, Gongcunwu Reservoir

(orange shaded: the 45 dBz echo area overlaps with the hourly rainfall > 30 mm)

R_{60} 是逐小时整点的累计值,CR和 Q_{45} 值取自小时整点前30 min,如:10—11时降水选取10:30回波强度和回波面积数值。

三条曲线叠加在一起可以看出:当 Q_{45} 为0等级时,雨强基本上在 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下;当 Q_{45} 为1等级时,雨强在 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下;当 Q_{45} 为2等级时,雨强 $\geq 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 概率较小,大多在 $20\sim 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$;当组合反射率都在 $45\sim 50\text{ dBz}$ 或以上, 45 dBz 强回波面积 Q_{45} 与短时强降水关系很好,曲线几乎重叠。也就是说,在 45 dBz 以上回波情况下:如果强回波面积达到3等级时,出现短时强降水的可能性很大。

5 结论与讨论

本文研究了昌江流域2000—2020年内10次特大暴雨过程的短时强降水特征、包括:天气形势、层结条件、物理量、雷达拼图回波特征、风暴跟踪信息STI移动特点、“列车效应”、雷达PUP参数特征和风廓线雷达特征等,主要结论如下:

(1) 3~6 h的集中强降水的关注与预报成为特大暴雨预报服务的关键。每次特大暴雨过程都有3~6 h的强降水集中时段,3 h强降水可达约100 mm甚至以上,6 h累计雨量即可达200 mm以上,多数达到暴雨红色预警标准。最大雨强可达 $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上,平均每次特大暴雨过程出现6.2次 $\geq 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的强降水。

(2) 超低空急流、中低层低涡、高空低槽、低层辐合、高层辐散在景德镇市特大暴雨过程中发挥了重要作用:超低空急流输送边界层暖湿气流,建立位势不稳定,增强不稳定能量,输送大量水汽,在急流前端的赣东北剧烈辐合。皖南低涡西部的偏北气流不断带来冷空气,与赣东北的西南暖湿气流交汇。高空低槽移入赣东北后,槽后西北气流叠加在低层西南暖湿急流上。地面气旋与剧烈的辐合形成明显的上升运动,与高层分流区形成的高层辐散相配合,均有利于强降水的不断发生、发展。

(3) 江西昌江流域特大暴雨中CAPE多表现为细长的正能量结构,风垂直切变主要集中在低层或边界层,水汽饱和区伸展高度高,从底层至高层250 hPa多为整层暖平流,中层有部分过程伴有明显干层。CAPE平均值为 $1485\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、K指数平均值为 39.6°C 、SI平均值为 -1.32°C ,风暴强度指

数SSI平均值为297、1000~500 hPa垂直风切变平均值为 $12.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(4) 影响江西昌江流域的强降水多由大范围混合性强降水中的强回波单体、强回波短带或其演化的窄带强回波导致,回波强度大于 45 dBz ,但小于 55 dBz 。典型雷达回波特征有大范围混合型回波中的强回波带、大范围降水回波中的混合型强回波单体及混合型回波短带、稳定的块状强回波等。组合STI产品显示,强降水回波移动方向、移速较为一致,并有平行结构的密集指向区出现。STI不仅能反映强回波的移动信息,还可以分析出回波的辐合等信息,对于短时临近预报有很好的参考价值。在覆盖江西东西走向的回波带上,存有多条南北走向的短带回波,由西向东移动,形成“列车效应”。从相对应的风廓线雷达上可大致量化短带回波的移动信息。

(5) 在 45 dBz 以上回波情况下:如果强回波面积达到3等级时,出现短时强降水的可能性很大;强回波面积在2等级时,出现 $\geq 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 短时强降水概率较小,雨强大多在 $20\sim 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$;当强回波面积在1等级时,雨强基本在 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下。

短时强降水是产生大暴雨和特大暴雨的基本条件,几乎所有大暴雨过程都伴随短时强降水的出现。短时强降水的发生有多种情况,如何定量判断短时强降水的发生,一直是业务工作中的难点,还需要更多深入研究和探讨。

参考文献

- 陈鲍发,马中元,2019.江西局地冰雹WebGIS雷达拼图回波特征分析[J].气象与环境科学,42(2):104-114. Chen B F, Ma Z Y, 2019. Echo characteristic analysis of WebGIS radar mosaic on hailstone in Jiangxi[J]. Meteor Environ Sci, 42(2):104-114(in Chinese).
- 陈鲍发,马中元,徐芬,等,2020.天气雷达风暴跟踪信息拼图技术设计与应用[J].气象科学,40(6):838-848. Chen B F, Ma Z Y, Xu F, et al, 2020. Design and application of weather radar storm tracking information mosaic technology[J]. J Meteor Sci, 40(6):838-848(in Chinese).
- 戴泽军,蔡荣辉,彭莉莉,等,2019.湖南持续性区域暴雨气候特征及暴雨落区分型[J].高原气象,38(3):573-582. Dai Z J, Cai R H, Peng L L, et al, 2019. Climatic characteristics of regional persistent heavy rain and heavy rainfall pattern over Hunan[J]. Plateau Meteor, 38(3):573-582(in Chinese).
- 邓虹霞,智海,马中元,等,2019.2017年江西汛期设区市区暴雨回波特征分析[J].气象科学,39(2):274-284. Deng H X, Zhi H, Ma Z Y, et al, 2019. Analysis on characteristics of rainstorm

- echo in flood season districts and cities of Jiangxi Province in 2017[J]. J Meteor Sci, 39(2): 274-284 (in Chinese).
- 高建平, 马中元, 吴才明, 等, 2019. 2017 年 8 月江西上高雷暴大风雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 13(2): 55-62. Gao J P, Ma Z Y, Wu C M, et al, 2019. Radar echo characteristics of high thunderstorm gale in Jiangxi Province in August 2017[J]. Desert Oasis Meteor, 13(2): 55-62 (in Chinese).
- 桂园园, 马中元, 齐永胜, 等, 2020. 2017 年鹰潭市城区暴雨天气与回波特征分析[J]. 自然灾害学报, 29(3): 63-75. Gui Y Y, Ma Z Y, Qi Y S, et al, 2020. Analysis of rainstorm weather and echo characteristics in Yingtan City in 2017[J]. J Nat Disasters, 29(3): 63-75 (in Chinese).
- 何文, 夏文梅, 马中元, 等, 2018. 江西强雷电天气形势场及雷达回波特征分析[J]. 气象科学, 38(5): 699-706. He W, Xia W M, Ma Z Y, et al, 2018. Characteristics of strong lightning situation field and radar echo in Jiangxi[J]. J Meteor Sci, 38(5): 699-706 (in Chinese).
- 洪丽霞, 马中元, 罗燕, 等, 2021. 宜丰县短时强降水云图回波数值产品特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 38(1): 36-41. Hong L X, Ma Z Y, Luo Y, et al, 2021. Analysis of numerical product characteristics of cloud image echo of Yifeng short-term heavy precipitation[J]. Meteor Hydrol Mar Instrum, 38(1): 36-41 (in Chinese).
- 黄文彦, 孙燕, 卢楚翰, 等, 2019. 近 40 年夏季江苏引发暴雨的江淮气旋统计分析[J]. 气象, 45(6): 843-853. Huang W Y, Sun Y, Lu C H, et al, 2019. Statistical analysis of Jianghuai cyclone causing Jiangsu regional heavy rain in summer nearly 40 years[J]. Meteor Mon, 45(6): 843-853 (in Chinese).
- 蓝俊倩, 张浩川, 徐月飞, 2018. 一次有冷空气侵入的梅汛期大暴雨过程诊断分析[J]. 气象与环境科学, 41(3): 71-80. Lan J Q, Zhang H C, Xu Y F, 2018. Diagnostic analysis of a heavy rainfall process during Meiyu period caused by cold air intrusion[J]. Meteor Environ Sci, 41(3): 71-80 (in Chinese).
- 梁钰, 王君, 吴璐, 2019. 淮河流域(河南段)连续性暴雨天气分型及环流背景[J]. 气象与环境科学, 42(2): 48-54. Liang Y, Wang J, Wu L, 2019. Classification and circulation background of sustained rainstorms in Huaihe River Basin (Henan section)[J]. Meteor Environ Sci, 42(2): 48-54 (in Chinese).
- 刘蕾, 周晶, 付伟, 等, 2018. 安徽沿江一次连续性暴雨过程中急流特征分析[J]. 气象科学, 38(4): 545-552. Liu L, Zhou J, Fu W, et al, 2018. Analysis of jet characteristic during the persistent heavy rainfall in riverside area in Anhui[J]. J Meteor Sci, 38(4): 545-552 (in Chinese).
- 田畅, 隆霄, 韩子霏, 2019. 西藏林芝地区一次暴雨过程的中尺度模拟与分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 13(2): 13-21. Tian C, Long X, Han Z F, 2019. Mesoscale simulation and analysis of rainstorm in Nyingchi Area, Tibet[J]. Desert Oasis Meteor, 13(2): 13-21 (in Chinese).
- 王华, 李宏宇, 仲跻芹, 等, 2019. 京津冀一次罕见的双雨带暴雨过程成因分析[J]. 高原气象, 38(4): 856-871. Wang H, Li H Y, Zhong J Q, et al, 2019. The formation of an unusual two-belt heavy rainfall around Beijing-Tianjin-Hebei Area[J]. Plateau Meteor, 38(4): 856-871 (in Chinese).
- 尉英华, 陈宏, 何群英, 等, 2019. 渤海西岸偏东风对天津局地大暴雨的影响分析[J]. 气象, 45(1): 61-72. Wei Y H, Chen H, He Q Y, et al, 2019. Influence of easterly winds from west coast of Bohai Sea on local heavy rainfall in Tianjin[J]. Meteor Mon, 45(1): 61-72 (in Chinese).
- 吴才明, 马中元, 何文, 等, 2019. 2017 年江西副热带高压边缘雷暴大风回波特征[J]. 气象科学, 39(6): 797-809. Wu C M, Ma Z Y, He W, et al, 2019. An analysis on echo characteristics of thunderstorm gale on the edge of subtropical anticyclone in Jiangxi Province in 2017[J]. J Meteor Sci, 39(6): 797-809 (in Chinese).
- 辛玮琦, 马中元, 湛云, 等, 2021. 宜丰短时强降水雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 15(2): 70-80. Xin W Q, Ma Z Y, Chen Y, et al, 2021. Radar echo characteristics of short-term heavy rainfall in Yifeng[J]. Desert Oasis Meteor, 15(2): 70-80 (in Chinese).
- 张舒阳, 闵锦忠, 2018. 2013 年 6 月 23 日江淮地区梅雨锋暴雨的发展和维持机制[J]. 气象科学, 38(6): 707-718. Zhang S Y, Min J Z, 2018. Development and maintenance mechanism of Meiyu front rainstorm in Jianghuai Area on 23 June 2013[J]. J Meteor Sci, 38(6): 707-718 (in Chinese).
- 张延亭, 林铍德, 1994. 致洪暴雨成因分析及预报[J]. 江西气象科技, 17(2): 10-14. Zhang Y T, Lin P D, 1994. Cause analysis and prediction of flood causing rainstorm[J]. Jiangxi Meteor Sci Technol, 17(2): 10-14 (in Chinese).

(本文责编:王婷波)