

陈红专,张昆,曾志明,2025.2023 年 6 月湘西一次特大暴雨中尺度特征与预报偏差分析[J].气象,51(12):1596-1607. Chen H Z,Zhang K,Zeng Z M,2025. Analysis of mesoscale characteristics and forecast bias of a severe torrential rain in western Hunan Province in June 2023[J]. Meteor Mon,51(12):1596-1607(in Chinese).

2023 年 6 月湘西一次特大暴雨中尺度 特征与预报偏差分析*

陈红专^{1,2} 张 昆^{1,2} 曾志明^{1,2}

1 湖南省怀化市气象局,怀化 418000

2 气象防灾减灾湖南省重点实验室,长沙 410118

提 要: 2023 年 6 月 29—30 日,湖南西部突发特大暴雨,预报员及数值模式预报均与实况偏差较大。采用多源观测资料、ERA5 再分析资料和模式预报数据对特大暴雨的中尺度特征和预报偏差的可能原因进行了诊断分析。结果表明:高空槽后西北气流引导冷空气南下,与夜间加强的西南暖湿气流汇合,导致了特大暴雨的发生。特大暴雨是由一个准静止后向传播中尺度对流系统(MCS)产生的,该 MCS 由多个强烈发展的 γ -MCS 合并而成,表现为一条有组织的线状回波带。在有利的环境背景下,边界层辐合线的长时间维持、低空急流的风速脉动和低层辐合高层辐散的垂直结构导致对流单体的触发和组织,MCS 的合并加强、后向传播以及对流单体“列车效应”是特大暴雨产生的重要原因。由于数值模式低层动力、热力场的预报偏差,预报员对模式预报的订正能力不足,以及湘西地区复杂的地形地貌影响,导致短期时效主观预报出现较大偏差。因此,需使用高时空分辨率的地面加密自动气象站资料、卫星资料和雷达资料分析中尺度环境场的要素变化,加强短时临近预报,及时发布预警信号。

关键词: 特大暴雨,中尺度特征,预报偏差,风速脉动

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.122601

Analysis of Mesoscale Characteristics and Forecast Bias of a Severe Torrential Rain in Western Hunan Province in June 2023

CHEN Hongzhuan^{1,2} ZHANG Kun^{1,2} ZENG Zhiming^{1,2}

1 Huaihua Meteorological Office of Hunan Province, Huaihua 418000

2 Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Changsha 410118

Abstract: From 29 to 30 June 2023, a localized abrupt severe torrential rain occurred in the western region of Hunan Province, but forecasters and numerical models both failed to forecast the rainfall intensity. In this study, the mesoscale characteristics and possible causes of forecast biases are analyzed based on the multiple observations data, ERA5 reanalysis data and numerical forecast products. The results show that the northwest air flow behind the upper-level trough drove the cold air to the south and merged with the southwest warm-humid air flows which were strengthened at night, which led to the occurrence of this process. The severe torrential rain was generated by a backward propagation of quasi-stationary mesoscale convective system (MCS), which was composed of multiple strongly developing γ -MCSs, manifested as an organized linear echo band. Under the favorable environmental background, the long-time maintenance

* 中国气象局预报与网络司复盘总结专项(FPJ2024-087)、湖南省自然科学基金重大项目(2021JC0009)和湖南省气象局创新发展专项(CXFZ2025-ZDXM01)共同资助

2024 年 7 月 18 日收稿; 2025 年 4 月 8 日收修定稿

第一作者:陈红专,主要从事短期天气预报及相关研究. E-mail:306676963@qq.com

of the boundary layer convergence line, the wind velocity fluctuation of the low-level jet and the vertical structure of low-level convergence and high-level divergence contributed to the triggering and organization of the convective cells. The merging, strengthening backward propagation of MCS and the train effect of convective cells were important causes for the severe torrential rain. Significant errors were made in the short-time subjective forecasts because of the forecast biases of the low-level dynamic and thermodynamic fields of the numerical models, the deficiency of forecasters' ability to correct the model forecast, and the complex topography of western Hunan Province. Therefore, it is very crucial to use the automatic weather station data, satellite data and radar data with high spatio-temporal resolution to analyze the changes of the mesoscale environmental conditions, strengthen the short-time nowcasting and issue early warning in time.

Key words: severe torrential rain, mesoscale characteristic, forecast bias, wind speed fluctuation

引 言

中国位于东亚季风气候区,雨季受东亚夏季风影响常出现暴雨天气(罗亚丽等,2020;黄垭飞等,2021),局地突发性极端暴雨由于事发突然,降水时间短却雨强大,多出现破纪录极值而备受关注(陈双等,2016;田付友等,2018;孔期等,2022;杨磊等,2023)。

暴雨虽然是多尺度系统相互作用的结果(陶诗言等,2003),但与中尺度对流系统(MCS)的生成环境、组织结构及运动学特征等密切相关(Maddox et al,1979;Schumacher and Johnson,2005;张家国等,2013)。MCS 的发生需要一定的环境条件(夏茹娣等,2006;王婧羽等,2022;荆浩等,2024;徐姝等,2024),Jirak and Cotton(2007)对暖季发生在美国中部地区的近 400 个中尺度对流系统形成条件进行分析后认为,低层暖平流、低层垂直风切变和对流不稳定是决定对流系统是否发展成 MCS 的最重要参数。低空急流的湿度输送会降低环境的稳定度,急流末端的水平辐合导致大尺度抬升,为夜间 MCS 的触发提供了有利的对流初生环境(Shapiro et al,2018;Weckwerth et al,2019),急流上的风速脉动传播也有利于低空扰动加强,为 MCS 的发展提供了有利的抬升条件(刘淑媛等,2003;郑丽娜和孙继松,2024)。

MCS 的组织、移动和传播特征非常复杂,受环境风场、地形和多尺度系统相互作用等因素影响(林宗桂等,2009;张家国等,2013;徐珺等,2018;杨磊等,2023)。王晓芳和崔春光(2012)将长江中下游地区线状 MCS 分为 8 种典型类型,其中准静止后向建立的 MCS 发展旺盛,移动缓慢,易导致局地极端

强降水。MCS 的后向传播、“列车效应”等在山区附近容易产生暴雨(张家国等,2013;徐珺等,2018;荆浩等,2024)。张家国等(2013)的研究表明,大别山脉对雷暴冷池的阻挡导致冷空气在山前堆积并形成回流,是产生鄂东北特大暴雨的向后传播-准静止 MCS 发生发展的原因。徐珺等(2018)针对“5·7”广州特大暴雨的研究表明,中尺度对流系统的单体移动方向和传播方向近乎相反导致系统移动非常缓慢,后向传播明显,最终导致强降水长时间维持。

2023 年 6 月 29 日 20:00 至 30 日 20:00(北京时间,下同),湖南西部遭遇了一次突发性特大暴雨,强降水中心位于武陵山脉南侧和沅江支流酉水河谷地带,降水区域集中,最大累计降水量超过 300 mm;雨强大,最大 1 h 雨强和最大 3 h 雨强均创湖南北极值。预报员和业务数值模式对强降水落区、量级预报均存在明显偏差。本文利用常规地面和高空观测资料、吉首 SAD 多普勒雷达、FY-4A 卫星、欧洲中期天气预报中心的全球再分析资料(ERA5)以及业务中常用的欧洲中期天气预报中心全球模式(EC)、CMA 全球模式(CMA-GFS)及 CMA-MESO、CMA 上海(CMA-SH3)和 CMA 广东(CMA-GD)中尺度模式,对此次特大暴雨的中尺度特征和预报偏差的可能原因进行分析,旨在揭示造成强降雨的 MCS 演变特征和触发维持机制,为此类突发性暴雨的预报预警提供有效参考。

1 过程概述

2023 年 6 月 29 日 20:00 至 30 日 20:00,湘西及湘东北地区出现大暴雨到特大暴雨(图 1a),共有 55 个自动气象观测站 24 h 累计降水量超过 100 mm。湘西地区雨带呈东西向带状分布,是此次过程的最

强降雨区,共有 34 个站累计降水量超过 100 mm,其中 8 个站超过 250 mm。主雨带位于云贵高原向洞庭湖平原过渡的区域,尤其是武陵山脉南侧和沅江支流西水河谷地带,地形特征明显(图 1b)。

此次降水过程具有以下特点:

(1)时空分布集中:暴雨区集中在湘西州中部、怀化北部(沅陵)、常德西部和岳阳北部;降水发生时间集中,其中保靖、古丈和肖家桥 3 个代表站的降水量分别集中在 7、6、4 h 之内(图 1c)。

(2)极端性强:保靖国家气象观测站日降水量为 316.9 mm,超过该站历史极值,为湖南国家气象观测站最大日降水量历史第二高;肖家桥最大小时雨强($137.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)和最大 3 h 雨强($227.1 \text{ mm} \cdot 3 \text{ h}^{-1}$)均创湖南有气象观测数据以来极值。

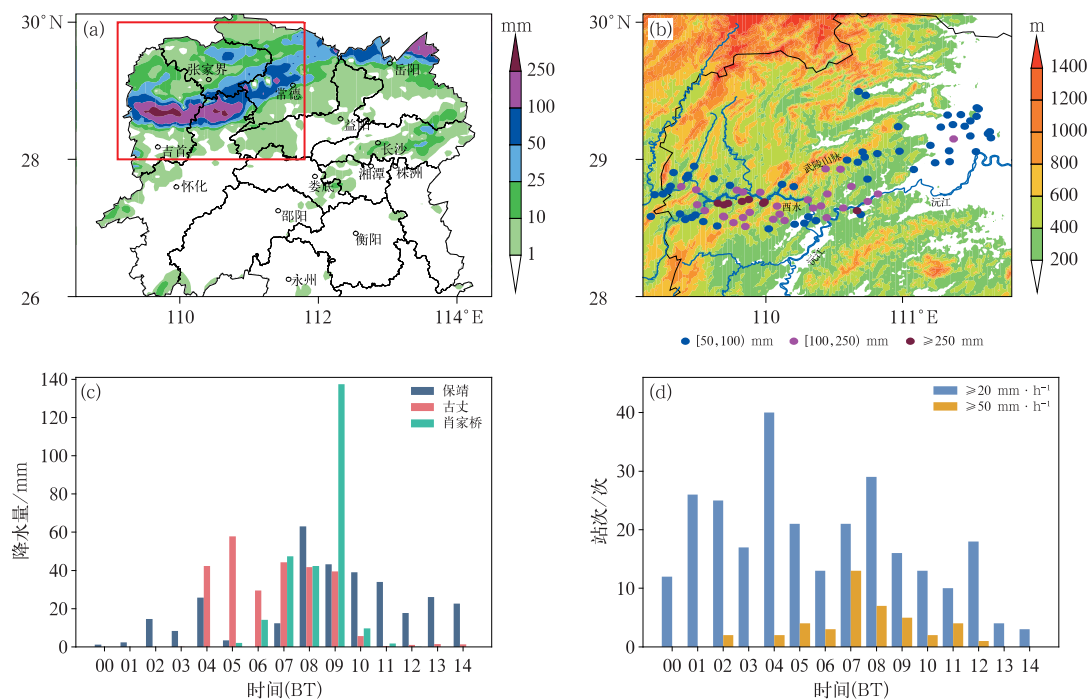
(3)强对流特征明显:过程期间湖南共出现小时雨强 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 短时强降水 330 站次,其中小时雨强 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 极端短时强降水 43 站次;短时

强降水集中出现在 30 日 00:00—14:00,04:00 区域内共出现 42 站次短时强降水,07:00 出现极端短时强降水 13 站次(图 1d)。

(4)致灾性强:由于雨强大、时空集中,造成湘西州保靖、古丈等县城及多个乡镇出现严重内涝,部分交通路段出现积水及塌方导致交通受阻,受灾人口 11.77 万人,直接经济损失 6.25 亿元。

2 天气形势和环境条件

6 月 29 日 20:00,200 hPa 南亚高压呈东西带状分布,湖南位于其东北侧分流区(图略);500 hPa 西太平洋副热带高压北界位于湘南,东北冷涡南侧高空槽东移加深,引导冷涡后侧冷空气南下(图 2a);低层切变线位于湖北境内,且位于高空槽后侧,暴雨区高低空系统的配置呈前倾形势;地面上贵州西部到湘西地区有辐合线维持(图 2b)。高空槽后西北气



注:图 b 为图 a 中红框区域。

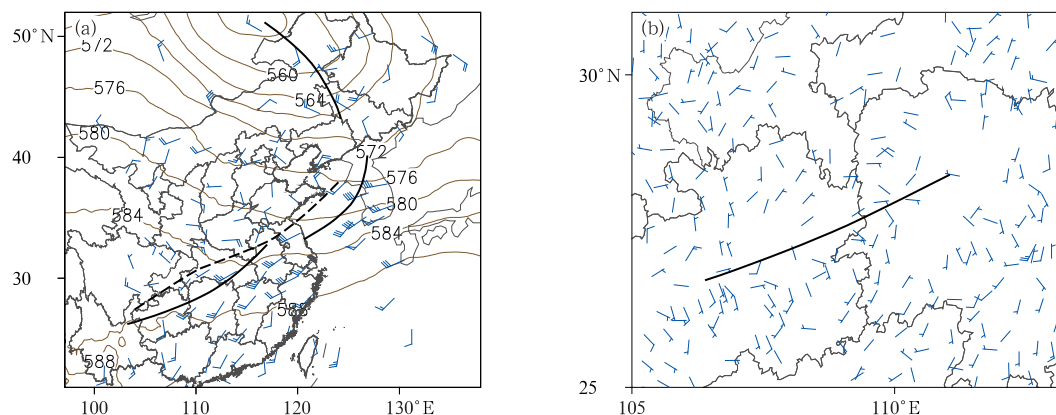
图 1 2023 年 6 月(a,b)29 日 20:00 至 30 日 20:00(a)累计降水量(填色)和(b)累计降水量 $\geq 50 \text{ mm}$ 的站点(彩色圆点)和地形(填色),(c,d)30 日 00:00—14:00(c)代表站小时降水量和(d)小时雨强 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 站次

Fig. 1 (a) The accumulated precipitation (colored), (b) the stations with accumulated precipitation $\geq 50 \text{ mm}$ (color dot) from 20:00 BT 29 to 20:00 BT 30 and terrain (colored), (c) hourly precipitation of representative stations and (d) number of stations with hourly precipitation intensity greater than $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ and $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ respectively from 00:00 BT to 14:00 BT 30 June 2023

流引导冷空气南下,与夜间加强的西南暖湿急流汇合,导致了特大暴雨的发生。

29 日白天贵州东部至湘西地区以多云天气为主,气温在 $30\sim 32^{\circ}\text{C}$,露点温度在 $23\sim 25^{\circ}\text{C}$ 。从 29

日 20:00 怀化探空(图 3a)来看,降雨发生前,环境大气具备较高的对流不稳定能量($\text{CAPE}>1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$)、较小的对流抑制能量($50\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$)和较好的低层水汽条件(850 hPa 温度露点差 $<2^{\circ}\text{C}$)。同时,

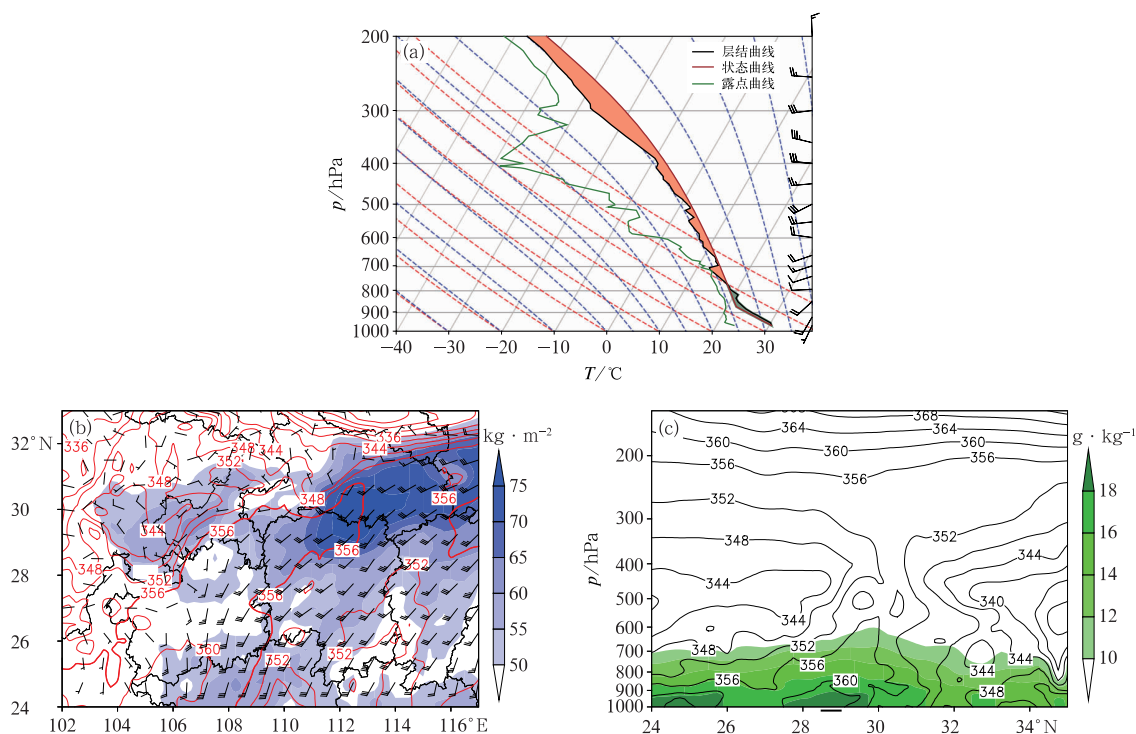


注:图 a 中黑色粗实线为 500 hPa 槽线,虚线为 850 hPa 切变线;图 b 中黑色粗实线为地面辐合线。

图 2 2023 年 6 月 29 日 20:00(a)500 hPa 高度场(等值线,单位: dagpm)和 850 hPa 风场(风羽), (b)10 m 风场(风羽)

Fig. 2 (a) 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and 850 hPa wind field (barb),

(b) 10 m wind field (barb) at 20:00 BT 29 June 2023



注:图 c 中黑色粗实线代表暴雨区位置。

图 3 2023 年 6 月(a)29 日 20:00 怀化站探空, (b,c)30 日 02:00(b)整层水汽含量(填色)、850 hPa 假相当位温(等值线,单位: K)和风场(风羽), (c)比湿(填色)和假相当位温(等值线,单位: K)沿 110°E 的垂直剖面

Fig. 3 (a) $T\text{-ln}p$ of Huaihua Station at 20:00 BT 29, (b) vertically integrated water vapour (colored),

850 hPa pseudo-equivalent potential temperature (contour, unit: K) and wind field (barb), and

(c) cross-section of specific humidity (colored) and pseudo-equivalent potential temperature

(contour, unit: K) along 110°E at 02:00 BT 30 June 2023

垂直风切变较小(地面至 500 hPa 为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 925~500 hPa 为 $6.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 雨滴不容易蒸发, 有利于高效率降雨的发生(Davis, 2001)。贵州西南部至湘西北地区处在假相当位温高能舌区, 整层水汽含量大于 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 3b), 垂直剖面显示暴雨区 500 hPa 以下为对流不稳定层结, 低层比湿在 $10 \sim 18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 3c), 环境条件符合产生暴雨的层结、能量和水汽条件。虽然降雨具有一定的极端性, 但各要素并未出现异常值, 属于湖南暴雨的正常值范围。

3 中尺度对流系统演变

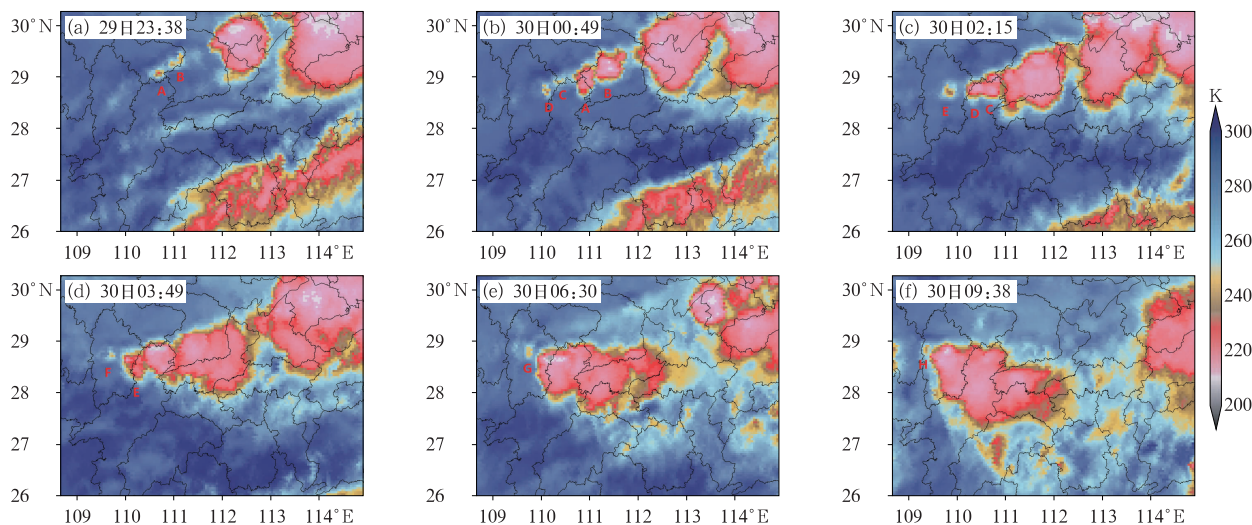
3.1 卫星云图

FY-4A 卫星红外云图显示(图 4), 此次过程是由一个 α -MCS 造成的。29 日 20:00 后, 湘西地区先后有 8 个 γ -MCS 生成, 造成特大暴雨的 α -MCS 即是由这 8 个 γ -MCS 合并而成, 其生命周期经历了 γ — β — α 尺度的发展过程, 生命史超过 12 h; α -MCS 移动缓慢, 尤其是其西侧(上风向)几乎稳定在源地, 其长轴方向由西南—东北向转为西北—东南向, 云顶亮温呈非对称结构, 西侧(上风向)云顶亮温低, 梯度大, 东侧则相反; 新的对流云团初生在老的对流云团西侧, 后向传播特征明显; 8 个 γ -MCS 中, 对湘西特大暴雨贡献最大的是 E、F 和 G(图 4c~4e), 这 3

个云团几乎在相同的位置生成, 生成后在东移合并过程中呈“列车效应”先后影响暴雨区, 造成了持续强降水; 3 个云团生成至合并持续时间约为 1 h 左右, 在东移合并过程中云顶亮温迅速下降, 最低云顶亮温分别为 -91 、 -88 和 -82°C , 降温幅度分别为 -41 、 -50 和 -45°C , 强烈的降温说明对流发展非常旺盛, 导致暴雨区出现成片短时强降水(图 1d)。造成此次特大暴雨的 MCS 与 Schumacher and Johnson(2005)提出的准静止后向建立型 MCS 的概念模型相似, 此类 MCS 移动缓慢, 其新生单体在对流系统上风向不断产生, 平行于系统移动方向, 并不断与母体合并, 易造成极端强降水。

3.2 雷达回波

与卫星云图对应, 该 α -MCS 在雷达回波图上表现为一条线状回波带(图 5)。降雨开始前回波带由孤立的回波单体组成, 29 日 22:00 后孤立的带状回波单体逐渐连接合并成一条有组织的线状回波带, 长度超过 200 km, 后侧宽度较窄, 前侧较宽, 回波带自西向东依次为积云、积云层云混合和层云回波, 分别对应新生、成熟和消亡单体。上游重庆南部和贵州北部不断有单体新生, 其平行于对流线方向移入线状回波带后侧, 与老单体合并, 形成一条移动极为缓慢的强回波带。线状回波带也由西南—东北向逐渐转变为西北—东南向, 其符合准静止后向建立 MCS(Schumacher and Johnson, 2005; 王晓芳和崔



注: 字母代表云团。

图 4 2023 年 6 月 29—30 日 FY-4A 红外云图演变

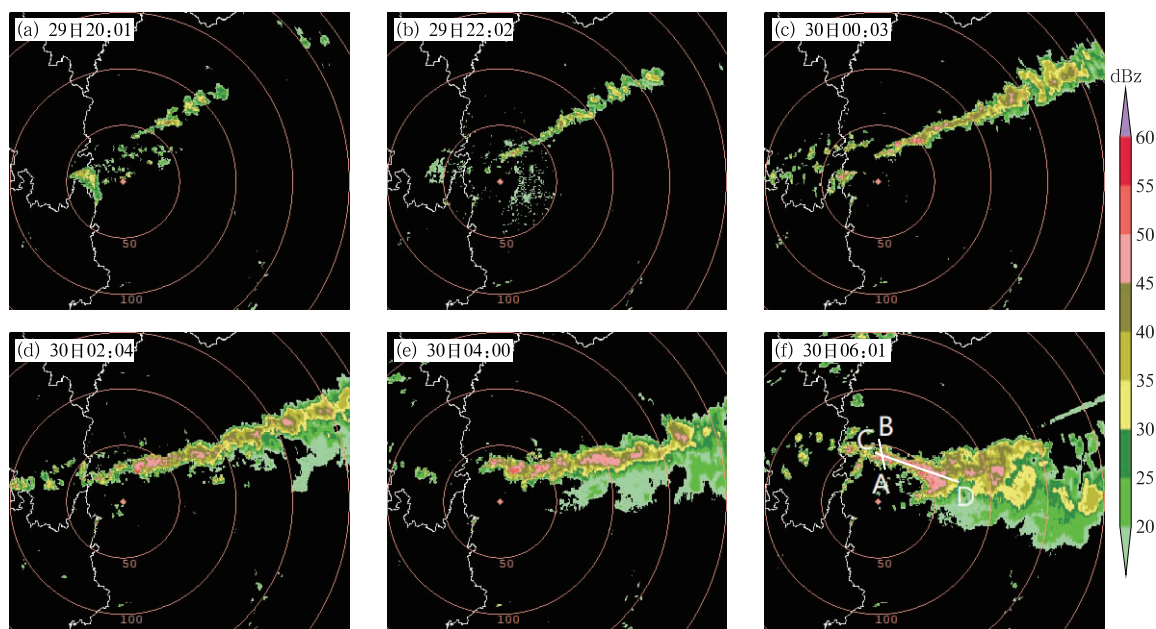
Fig. 4 Evolution of FY-4A infrared cloud image during 29–30 June 2023

春光,2012)的特征,此类 MCS 移动缓慢,发展旺盛,影响时间长,强回波单体呈“列车效应”持续经过暴雨区,导致极端降水的发生。

MCS 的移动可以用 Corfidi 向量法(孙军等,2011)近似表示为单体的移动(风暴承载层的平均风矢量)和传播的合成。承载层的平均风为 925~200 hPa 平均风矢量,根据图 4 和图 5,单体传播矢量方向近似向西,速度大小采用 925 hPa 风速,采用怀化探空站资料计算发现,29 日 20:00(30 日 08:00)承

载层平均风向和风速分别为 263° 和 $9.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (282° 和 $8.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),而单体传播矢量方向为 90° ,速度为 $7.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($9.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),可见单体的移动与传播方向几乎相反,而速度大小相差不大,导致对流系统移动缓慢。另外,承载层的平均风向由西南风转为西北风,可能是线状回波带由西南—东北向顺转为西北—东南向的原因。

沿图 5f 中白线 CD 的基本反射率因子垂直剖面(图 6a)显示,回波带具有多单体结构特征,其后



注:图 5f 中白线 CD、AB 分别为图 6a 和 6b 剖面位置。

图 5 2023 年 6 月 29—30 日吉首雷达组合反射率因子演变

Fig. 5 Evolution of composite reflectivity factor of Jishou Radar during 29–30 June 2023

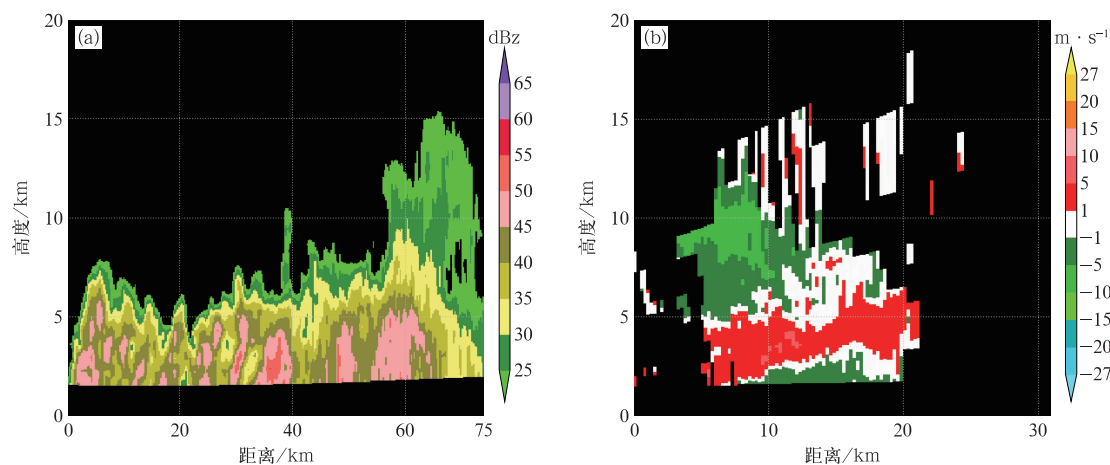


图 6 2023 年 6 月 30 日 06:01 沿图 5f 白线(a)CD 的反射率因子和(b)AB 的径向速度剖面

Fig. 6 Cross-section of (a) reflectivity factor along the white line CD and (b) radial velocity along the white line AB in Fig. 5f at 06:01 BT 30 June 2023

侧为积云降水回波,顶高基本维持在 10 km 以下,大部分在 5 km 以下,最强回波高度显示的对流质心一般维持在较低高度(2~4 km),即对流云团质心较低。暴雨区南侧怀化站 0℃层高度为 4.6 km,北侧恩施站 0℃层高度为 5.7 km,推测暴雨区 0℃层高度约为 5 km 左右,说明降水主体和强回波中心主要由 0℃层高度以下的液态雨滴构成(孙继松等,2015),属于低质心、高效率的暖云降水回波(Houze,2014)。参照 Xu and Zipser(2011)的标准,将 20 dBz 回波高度超过 12 km 作为深对流,6~12 km 的对流属于中等深对流标准,此次过程中对流云团普遍未达到深对流的垂直伸展高度,这可能与前倾形势有关,即由于中层受槽后偏北气流影响,不利于深对流发展。

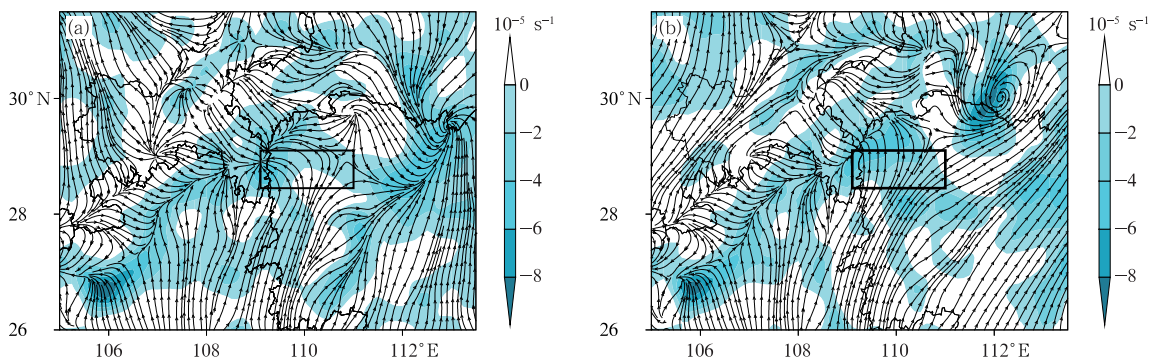
沿图 5f 中白线 AB 的雷达径向速度垂直剖面(图 6b)可以看出,2 km 以下存在偏南风与偏北风辐合,高层 10 km 以上则为辐散,偏南暖湿气流沿低层偏北气流爬升,低层辐合、高层辐散的垂直结构增强了大气垂直上升速度,有利于触发新生雷暴或使雷暴快速加强。

4 中尺度对流系统触发和维持机制

廖移山等(2011)、张家国等(2013)、伍志方等(2018)研究表明,边界层中尺度天气系统往往是 MCS 的触发机制,与其发生发展和暴雨的发生有着密切关系。过程期间,重庆南部和贵州北部不断有对流单体新生和东移,对流单位的新生与该区域长时间维持的边界层辐合线密切相关。29 日 20:00,

贵州中部至重庆南部和湘西地区有一条明显的地面辐合线(图 2b),925 hPa 湘西至贵州北部也有一条辐合线(图略),在高温、高湿的对流不稳定环境条件下,边界层辐合线有利于对流触发及加强,沿辐合线在散度场上对应有一条带状的辐合区。随着夜间南风加强,辐合线逐渐北抬至贵州北部—湘西地区并维持少动,对应散度场上辐合增强(图 7),雷达径向速度剖面也显示了边界层的风场辐合(图 6b)。在有利的不稳定环境条件下,边界层辐合线的长时间维持导致冷暖气流交汇,触发 MCS 的新生和组织化发展加强,是该区域不断有回波单体新生东移的重要原因。

过程期间低空急流具有明显的脉动特征,怀化站 850 hPa 西南风由 29 日 20:00 的 $8.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增强到 30 日 08:00 的 $16.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而北侧恩施站则由西南风转为偏北风,切变线的南压与西南气流的加强同步,导致暴雨区低层辐合加强。29 日 22:00(图 8a),850 hPa 切变线位于湘北地区,将风速脉动定义为整点风速与 29 日 20:00 至 30 日 08:00 平均风速的差,此时风速脉动区并未推进到暴雨区。随着西南风加强,风速脉动区逐渐北推,30 日 04:00 贵州北部、重庆南部到湘西地区出现大范围风速脉动区(图 8b),同时,850 hPa 切变线随西南风加强略北移。切变线和脉动区的风速辐合有利于水汽和不稳定能量的辐合,也为 MCS 的发展提供了有利的抬升条件(刘淑媛等,2003;郑丽娜和孙继松,2024)。从吉首雷达风廓线也可以看出(图 9),29 日 22:00 后低层西南风开始加强,30 日 01:00 达到低空急流标准,具有明显的脉动特征,而中高层则由于高空槽

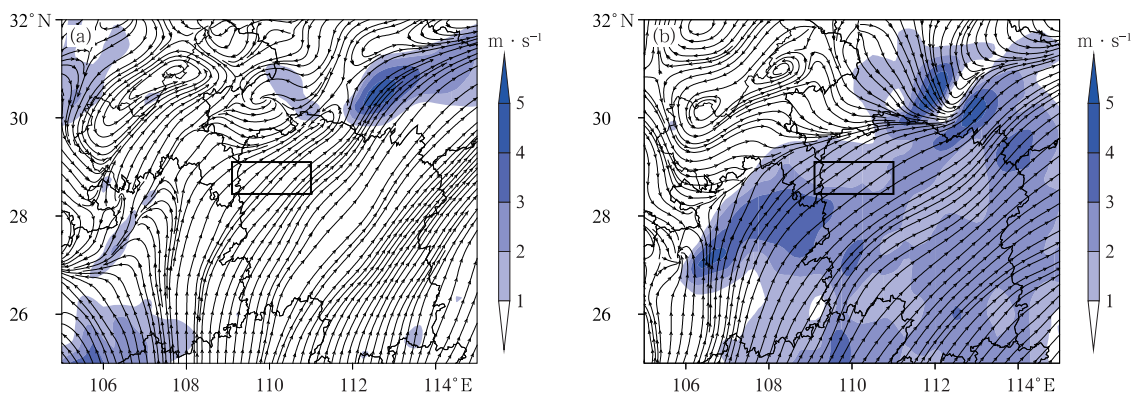


注:方框代表暴雨区。

图 7 2023 年 6 月 30 日 02:00(a)地面和(b)925 hPa 散度(填色)和流场(流线)

Fig. 7 Divergence (colored) and wind stream (streamline) at

(a) surface and (b) 925 hPa at 02:00 BT 30 June 2023



注:方框代表暴雨区。

图 8 2023 年 6 月(a)29 日 22:00 和(b)30 日 04:00 850 hPa 风速脉动(填色)和流场(流线)

Fig. 8 850 hPa wind speed fluctuation (colored) and wind stream (streamline) at (a) 22:00 BT 29 and (b) 04:00 BT 30 June 2023

过境,西南气流逐渐转为西北气流。新生对流单体在偏西风气流的引导下不断东移,导致 MCS 的合并加强和后向传播以及“列车效应”,是特大暴雨产生的主要原因。

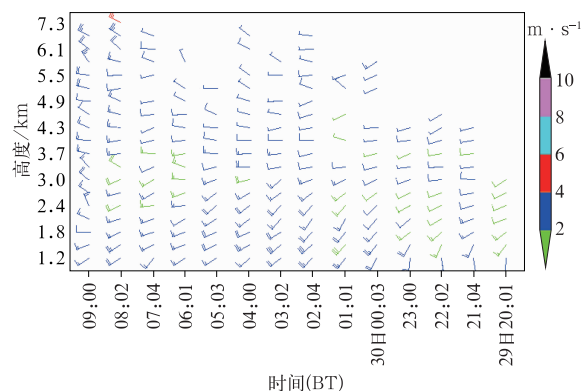
以上分析表明,在有利的环境条件下,边界层辐合线的长时间维持、低空急流的风速脉动和低层辐合、高层辐散的垂直结构有利于对流单体的触发新生和组织化发展,从而导致特大暴雨的发生。

5 降水预报检验及偏差分析

5.1 24 h 降水预报检验

29 日 20:00 起报的 24 h(29 日 20:00 至 30 日 20:00)降水量预报结果显示(图略),中央气象台预报在湖南北部为大雨、东北部局地暴雨;湖南省气象台只预报了湘北部分地区中到大雨、局地暴雨;怀化市气象台仅在沅陵北部的武陵山区预报了局地大雨。可见,各级台站主观预报对湘西的特大暴雨均出现了漏报。

全球模式 29 日 08:00 起报的 36 h 时效预报均漏报了湘西的特大暴雨,其中 EC 仅在湘北预报了局地暴雨,落区明显偏北,强度明显偏弱,范围明显偏小(图 10a);CMA-GFS 也仅预报了常德的暴雨(图 10b)。3 个中尺度模式中,CMA-MESO 预报主雨带明显偏北(图 10c),CMA-GD 和 CMA-SH3 预报明显偏东(图 10d,图 10e),只有 CMA-SH3 在湘西报出了局地暴雨,有一定的参考价值,但仍与实况有较大偏差。客观产品中,湖南省气象台智能网格预报也与实况偏差较大(图 10f)。整体来看,各家模



注:彩色代表水平风速的均方根误差。

图 9 2023 年 6 月 29—30 日吉首雷达风廓线

Fig. 9 Wind profile of Jishou Radar during 29—30 June 2023

式和客观产品对降水落区和强度预报均出现较大偏差。

5.2 预报偏差分析

此次湘西地区特大暴雨 24 h 主观预报偏差的可能原因主要有以下三个:

(1)数值模式低层动力、热力场的预报出现偏差。分析 29 日 08:00 起报的预报场发现,EC 模式对 29 日 20:00 中低层的主要影响系统及前倾形势预报与实况基本一致(图略),但低层风场预报出现偏差。850 hPa 风场上,暴雨区南侧西南风风速预报较实况偏小 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而北侧实况为北偏西气流,预报为偏西气流,导致低层辐合区较实况位置偏北且强度偏弱(图略)。925 hPa 上,预报出了 29 日 20:00 的弱辐合线(图 11a),但对辐合线的稳定维持

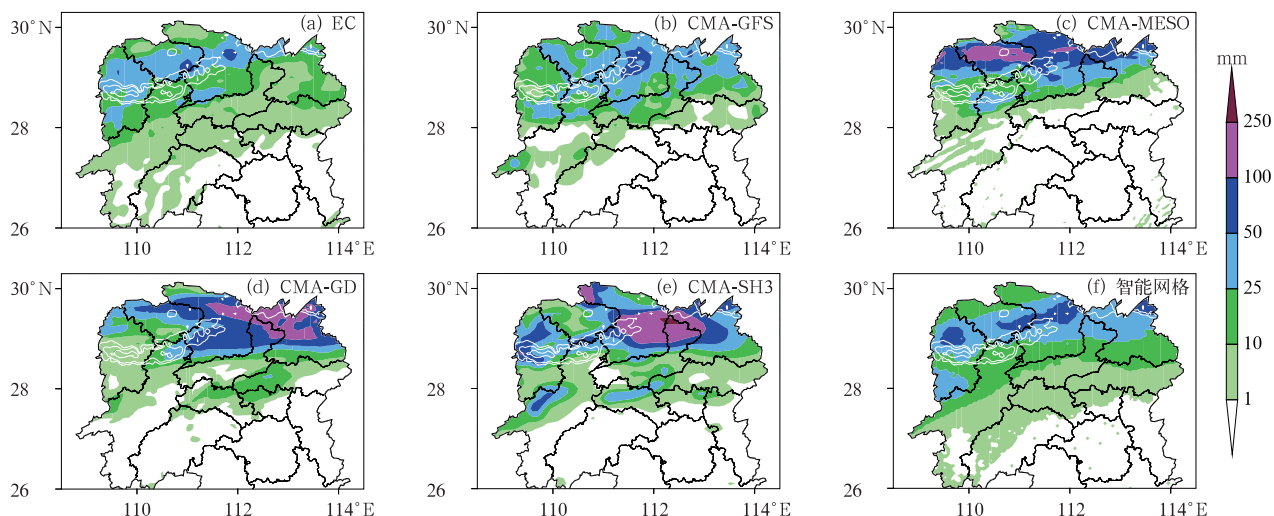
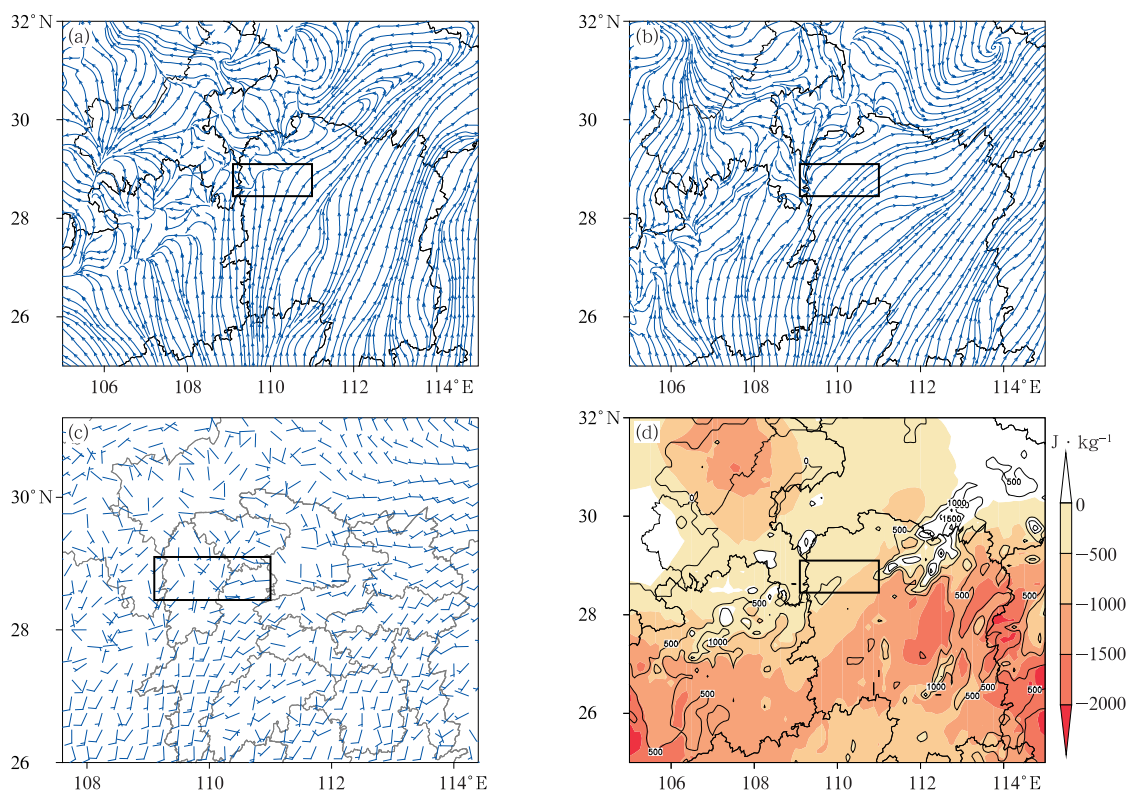


图 10 模式和客观产品 2023 年 6 月 29 日 08:00 起报的 29 日 20:00 至 30 日 20:00

累计降水量预报(填色)和实况(白线, ≥ 50 mm)

Fig. 10 The observed (white line, ≥ 50 mm) and forecasted accumulated precipitation (colored) from 20:00 BT 29 to 20:00 BT 30 by models and objective product initiated at 08:00 BT 29 June 2023



注:方框代表实况暴雨区。

图 11 EC 2023 年 6 月 29 日 08:00 起报的物理量场

(a)29 日 20:00、(b)30 日 02:00 925 hPa 流场(流线), (c)30 日 08:00 10 m 风场(风羽),

(d)29 日 20:00 CAPE(等值线,单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) 及其与实况的差值(填色)

Fig. 11 (a, b) 925 hPa wind stream (streamline) at (a) 20:00 BT 29 and (b) 02:00 BT 30, (c) 10 m wind field (barb) at 08:00 BT 30, (d) CAPE (contour, unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) at 20:00 BT 29 forecasted by EC model initiated at 08:00 BT 29 June 2023 and the difference from observation (colored)

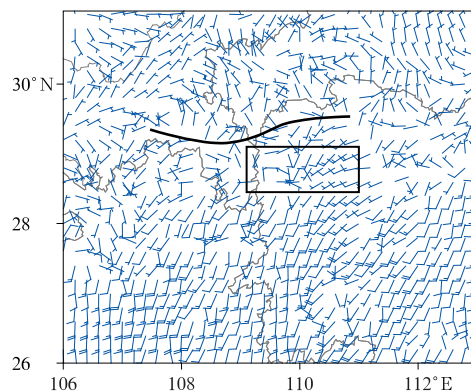
则表现不好(图 11b)。10 m 风场的预报也与实况偏差较大,30 日 08:00 实况暴雨区北侧为偏北风,而预报为偏南风(图 11c)。可见 EC 对边界层辐合线的预报出现偏差,CMA-GFS 的预报与 EC 类似(图略)。以往的个例预报检验(张芳等,2022)表明,低层动力场的预报偏差是导致强降水预报偏差的重要原因。

对于热力场预报,29 日 20:00,EC 预报的湘西地区和贵州东部 $\text{CAPE} < 500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,仅贵州北部在 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,与实况相比普遍偏小约 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,且越往南偏差越大(图 11d)。

分析 CMA-SH3 的预报发现,CMA-SH3 也基本预报出了 29 日 20:00 的主要影响系统和前倾形势(图略)。但预报的 850 hPa 风速($14 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)较实况偏大 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但夜间西南气流的增幅($2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)却远小于实况($8.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),导致预报的西南气流脉动偏弱,低层切变线始终维持在湘北。925 hPa 和地面辐合线预报(图 12)与 EC 类似,即预报辐合线快速北移,而非实况的稳定少动(图略)。

CMA-SH3 预报的湘西至贵州北部地区 CAPE 值明显偏大(图略),以保靖为例,29 日 20:00 预报值接近 $1300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,30 日 08:00 增至 $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而实况 $\text{CAPE} < 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,30 日 08:00 进一步减小。因此,尽管大的 CAPE 值有利于局地对流发展,但由于南风偏强,切变线和辐合线偏北,无法将局地对流组织起来,导致 CMA-SH3 的降水预报也与实况偏差较大。

(2)短期时效内预报员对模式预报的订正能力有限。29 日 08:00 实况显示,怀化站 850 hPa 西南风风速为 $19.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且切变线位置偏北,更有利于湘北地区强降雨的发生。预报员根据影响系统的前倾形势配置,29 日上午在湘西仅预报大到暴雨、局地大暴雨。特大暴雨发生在切变线南侧的西南气流中,为暖区暴雨,而数值模式对暖区暴雨预报能力较差(覃武等,2020),短期时效内对降雨落区和强度进行较大的订正和调整的难度较大。虽然短期时效预报出现偏差,但短时临近预警非常及时,古丈、保靖、沅陵等县暴雨黄色预警信号提前量分别为 152、185、179 min,且后续均及时升级为橙色和红色*,各级台站的递进式预报预警服务极大地弥补了短期



注:黑色粗线代表预报的地面辐合线,方框代表实况暴雨区。

图 12 CMA-SH3 2023 年 6 月 29 日 08:00

起报的 30 日 02:00 10 m 风场(风羽)

Fig. 12 10 m wind field (barb) at 02:00 BT 30 forecasted by CMA-SH3 model initiated at 08:00 BT 29 June 2023

预报的不足。

(3)湘西地区复杂地形地貌为暴雨预报增加了不确定性。此次特大暴雨发生在云贵高原向洞庭湖平原过渡的区域,区域内地形地貌极为复杂,而地形对 MCS 的触发、组织以及移动和传播具有重要影响。Houze(2014)研究表明,如果复杂地形背景下大气是浮力不稳定的,那么大气对地形响应会激发出积雨云,这些积雨云将进一步发展为 MCS。其可能的机制包括中小尺度地形对夜间增强的西南气流的阻挡抬升和山地河谷间辐射降温差异导致的山谷风和高温度梯度等(徐珺等,2018;Smith,2019)。当天湘西地区是满足浮力不稳定的,过程期间该区域也出现了多个 γ -MCS 的新生,从图 1b 也可以看出,强降雨主要发生在武陵山脉南侧和沅江支流西水河谷地带,地形为强对流的发展和特大暴雨的发生提供了有利条件,然而目前的数值模式很难精细描述地形影响及其所产生的物理过程(Ebert and McBride,2000),预报员的主观经验也存在偏差,从而增加了预报难度。

6 结论与讨论

本文采用多源资料对 2023 年 6 月 29 日湘西地区一次局地突发性特大暴雨的中尺度特征和预报偏差的可能原因进行了分析,主要结论有:

(1)此次过程具有降水时空分布集中、强对流特

* 湘气(2023)11 号文件《湖南省气象局关于保靖、古丈、沅陵等县特大暴雨气象服务情况的报告》。

征明显、极端性和致灾性强的特点。高空槽后西北气流引导冷空气南下,与夜间加强的西南暖湿气流汇合,导致了特大暴雨的发生。

(2)特大暴雨由一个准静止后向传播 MCS 引起,该 MCS 由多个强烈发展的 γ -MCS 合并而成,其生命周期经历了 $\gamma-\beta-\alpha$ 的发展过程。该 MCS 表现为一条有组织的线状回波带,属于低质心、高效率的暖云降水回波,MCS 的合并加强、后向传播以及“列车效应”是极端强降水产生的重要原因。在有利的环境条件下,边界层辐合线的长时间维持、低空急流的风速脉动和低层辐合、高层辐散的垂直结构有利于对流单体的触发和组织发展。

(3)主观预报及数值模式确定性预报对此次局地突发性特大暴雨的短期预报均出现偏差,其可能原因包括数值模式低层动力、热力场预报偏差,预报员对模式预报的订正能力不足以及湘西地区复杂地形地貌等。

全球模式大多是静力模式,而中小尺度天气过程往往是非静力的,简单的参数化方案无法准确描述复杂的中小尺度对流过程(漆梁波和徐珺,2018)。而中尺度模式虽然是非静力、显式对流处理但对复杂的物理过程和局地的地形影响精细描述仍有限,因此,各类模式对极端暴雨过程的预报能力尤显不足。如北京“12·7”特大暴雨(孙军等,2012)、广州“5·7”暴雨(田付友等,2018)、河南“21·7”特大暴雨(孔期等,2022)等极端暴雨过程,模式均出现漏报或弱报。集合预报虽能提供更多的极端暴雨信息,但如何从各个成员预报中提取有效信息也是一个难题。对此类局地、突发性极端强降水,应重点在短时限临近预报阶段,采用高时空分辨率加密自动站资料、卫星资料和雷达资料等分析中尺度环境场的要素变化,动态订正强降水预报,及时发布预警信号。

参考文献

- 陈双,王迎春,张文龙,2016. 北京香山“7.29” γ 中尺度短时局地大暴雨过程综合分析[J]. 暴雨灾害,35(2):148-157. Chen S, Wang Y C, Zhang W L, 2016. A comprehensive analysis of the meso- γ scale local heavy rain event around Xiangshan in Beijing on 29 July 2009[J]. Torr Rain Dis, 35(2):148-157(in Chinese).
- 黄堃飞,管兆勇,蔡倩,等,2021. 近 41 年来江南地区暴雨洪涝灾害时空变化特征分析[J]. 气象学报,79(4):582-597. Huang Y F, Guan Z Y, Cai Q, et al, 2021. Spatiotemporal variation characteristics of rainstorms and related flood disasters in Jiangnan Region in the recent 41 years[J]. Acta Meteor Sin, 79(4):582-597(in Chinese).

- 荆浩,亢妍妍,吴宏议,等,2024. 北京“23·7”极端强降雨特征和成因分析[J]. 气象,50(5):616-629. Jing H, Kang Y Y, Wu H Y, et al, 2024. Characteristics and causes of the July 2023 extremely torrential rain in Beijing[J]. Meteor Mon, 50(5):616-629(in Chinese).
- 孔期,符娇兰,湛芸,等,2022. 河南“21·7”特大暴雨过程中尺度低空急流和低涡的演变特征及成因分析[J]. 气象,48(12):1512-1524. Kong Q, Fu J L, Chen Y, et al, 2022. Evolution characteristics and formation analysis of mesoscale low-level jet and vortex in Henan Province during the July 2021 severe torrential rain[J]. Meteor Mon, 48(12):1512-1524(in Chinese).
- 廖移山,冯新,石燕,等,2011. 2008 年“7.22”襄樊特大暴雨的天气学机理分析及地形的影响[J]. 气象学报,69(6):945-955. Liao Y S, Feng X, Shi Y, et al, 2011. Analysis of the mechanism for “2008. 7. 22” excessive rain event in Xiangfan with a focus on the terrain effect[J]. Acta Meteor Sin, 69(6):945-955(in Chinese).
- 林宗桂,李耀先,林开平,等,2009. 一个长生命期中尺度对流系统维持机制的研究[J]. 气象学报,67(4):640-651. Lin Z G, Li Y X, Lin K P, et al, 2009. A study on maintain mechanism of a long life-cycle mesoscale convective systems[J]. Acta Meteor Sin, 67(4):640-651(in Chinese).
- 刘淑媛,郑永光,陶祖钰,2003. 利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J]. 热带气象学报,19(3):285-290. Liu S Y, Zheng Y G, Tao Z Y, 2003. The analysis of the relationship between pulse of LLJ and heavy rain using wind profiler data[J]. J Trop Meteor, 19(3):285-290(in Chinese).
- 罗亚丽,孙继松,李英,等,2020. 中国暴雨的科学和预报:改革开放 40 年研究成果[J]. 气象学报,78(3):419-450. Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al, 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):419-450(in Chinese).
- 漆梁波,徐珺,2018. 豫北“7·9”特大暴雨的短期预报分析和反思[J]. 气象,44(1):1-14. Qi L B, Xu J, 2018. Rethink on short-range forecast of the 9 July severe rainstorm in northern Henan[J]. Meteor Mon, 44(1):1-14(in Chinese).
- 覃武,刘国忠,赖珍权,等,2020. 华南暖区暴雨预报失误及可预报性探讨[J]. 气象,46(8):1039-1052. Qin W, Liu G Z, Lai Z Q, et al, 2020. Study on forecast errors and predictability of a warm-sector rainstorm in South China[J]. Meteor Mon, 46(8):1039-1052(in Chinese).
- 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 Meteor Sin, 73(4):609-623(in Chinese).
- 孙军,湛芸,杨舒楠,等,2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象,38(10):1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteor Mon,

- 38(10):1267-1277(in Chinese).
- 孙军,代刊,樊利强,2011. 2010年7—8月东北地区强降雨过程分析和预报技术探讨[J]. 气象,37(7):785-794. Sun J, Dai K, Fan L Q, 2011. Analysis and forecasting technology on the heavy rainfall processes in the Northeast China during July to August 2010[J]. Meteor Mon, 37(7):785-794(in Chinese).
- 陶诗言,赵思雄,周晓平,等,2003. 天气学和天气预报的研究进展[J]. 大气科学,27(4):451-467. Tao S Y, Zhao S X, Zhou X P, et al, 2003. The research progress of the synoptic meteorology and synoptic forecast[J]. Chin J Atmos Sci, 27(4):451-467(in Chinese).
- 田付友,郑永光,张小玲,等,2018. 2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. 气象,44(4):469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):469-484(in Chinese).
- 王婧羽,崔春光,陈杨瑞雪,等,2022. 西南山区5—8月产生突发性暴雨事件的中尺度对流系统的时空分布特征[J]. 气象学报,80(1):21-38. Wang J Y, Cui C G, Chen Y R X, et al, 2022. Temporal and spatial characteristics of mesoscale convective systems associated with abrupt heavy rainfall events over Southwest China during May-August[J]. Acta Meteor Sin, 80(1):21-38(in Chinese).
- 王晓芳,崔春光,2012. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I:组织类型特征[J]. 气象学报,70(5):909-923. Wang X F, Cui C G, 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part I: organization mode features[J]. Acta Meteor Sin, 70(5):909-923(in Chinese).
- 伍志方,蔡景就,林良勋,等,2018. 2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象,44(4):485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):485-499(in Chinese).
- 夏茹娣,赵思雄,孙建华,2006. 一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统环境特征的分析研究[J]. 大气科学,30(5):988-1008. Xia R D, Zhao S X, Sun J H, 2006. A study of circumstances of meso- β -scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 30(5):988-1008(in Chinese).
- 徐琨,毕宝贵,谌芸,等,2018. “5·7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报,76(4):511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al, 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):511-524(in Chinese).
- 徐姝,易笑园,熊明明,等,2024. 华北局地大暴雨过程中多个 β 中尺度对流系统发生发展对比分析[J]. 气象,50(2):181-194. Xu S, Yi X Y, Xiong M M, et al, 2024. Comparative analysis of occurrence and development of multiple meso- β scale convective systems during a localized severe torrential rain event in North China[J]. Meteor Mon, 50(2):181-194(in Chinese).
- 杨磊,郑永光,袁子鹏,等,2023. 2019年8月16日沈阳极端降水事件的低空 γ 中尺度涡旋观测特征和机理分析[J]. 气象学报,81(1):19-39. Yang L, Zheng Y G, Yuan Z P, et al, 2023. The low-level meso- γ -scale vortices during the extreme rainfall in Shenyang on 16 August 2019: formation, merging, and rain-producing mechanisms[J]. Acta Meteor Sin, 81(1):19-39(in Chinese).
- 张芳,张芳华,孔期,等,2022. 2018年5月21日四川盆地极端大暴雨的中尺度成因和预报偏差分析[J]. 气象,48(6):691-704. Zhang F, Zhang F H, Kong Q, et al, 2022. Mesoscale mechanisms and forecast bias of the extreme rainstorm in Sichuan Basin on 21 May 2018[J]. Meteor Mon, 48(6):691-704(in Chinese).
- 张家国,黄小彦,周金莲,等,2013. 一次梅雨锋上中尺度气旋波引发的特大暴雨过程分析[J]. 气象学报,71(2):228-238. Zhang J G, Huang X Y, Zhou J L, et al, 2013. Analysis of an excessive rainstorm event initiated by a mesoscale cyclonic wave along the Meiyu front[J]. Acta Meteor Sin, 71(2):228-238(in Chinese).
- 郑丽娜,孙继松,2024. 泰山地形对一次副高边缘大暴雨过程影响的观测分析[J]. 气象学报,82(2):155-167. Zheng L N, Sun J S, 2024. Observational analysis of the topographic effect of Mount Tai on an extreme rainfall event occurring at the edge of the subtropical high[J]. Acta Meteor Sin, 82(2):155-167(in Chinese).
- Davis R S, 2001. Flash flood forecast and detection methods[J]. Sev Convect St-AMS Meteor Mon Ser, 28(50):481-525.
- Ebert E E, McBride J L, 2000. Verification of precipitation in weather systems: determination of systematic errors[J]. J Hydrol, 239(1/2/3/4):179-202.
- Houze Jr R A, 2014. Cloud Dynamics[M]. 2nd ed. Oxford: Academic Press:187-277.
- Jirak I L, Cotton W R, 2007. Observational analysis of the predictability of mesoscale convective systems[J]. Wea Forecasting, 22(4):813-838.
- Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R, 1979. Synoptic and meso- α scale aspects of flash flood events[J]. Bull Amer Meteor Soc, 60(2):115-123.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev, 133(4):961-976.
- Shapiro A, Fedorovich E, Gebauer J G, 2018. Mesoscale ascent in nocturnal low-level jets[J]. J Atmos Sci, 75(5):1403-1427.
- Smith R B, 2019. 100 years of progress on mountain meteorology research[J]. Meteor Monogr, 59(1):20.1-20.73.
- Weckwerth T M, Hanesiak J, Wilson J W, et al, 2019. Nocturnal convection initiation during PECAN 2015[J]. Bull Amer Meteor Soc, 100(11):2223-2239.
- Xu W X, Zipser E J, 2011. Diurnal variations of precipitation, deep convection, and lightning over and east of the eastern Tibetan Plateau[J]. J Climate, 24(2):448-465.

(本文责编:张芳)