

文章编号:2096 - 5389(2022)04 - 0017 - 08

贵州西部极端对流性暴雨预报失败案例剖析

吴古会¹, 彭 芳², 张艳梅¹

(1. 贵州省气象台, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州省山地环境气候研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘 要:2020 年 6 月 1—2 日, 贵州西部发生了 1 次局地性的对流性暴雨过程, 预报员和各数值模式对此次过程的预报量级显著偏小, 对暴雨范围的低估, 造成了特大暴雨、大暴雨的漏报。该文利用常规地面、高空资料, 加密自动站观测资料, 多普勒天气雷达资料, 卫星资料及业务中常用的数值预报产品等对此次暴雨漏报案例进行剖析, 结果表明: 在弱天气尺度强迫背景下, 高温高湿的环境中, 未能准确判断对流的触发条件, 未分析出露点锋、偏西风和偏南风的辐合、冷池和地面辐合线等的存在及其对强降水的影响, 加之难以在短时间内对风场的发展演变进行精细分析, 导致此次暴雨过程漏报; 对于发生在暖湿气团中的对流性降水的预报, 需考虑高温高湿环境下露点锋、辐合区、冷池、地面辐合线的相互作用触发对流并使其组织化发展, 从而导致局地性、对流性强降水的产生; 基于地面加密自动站资料和雷达资料等的短时临近预报可以帮助捕捉中小尺度系统, 从而提高对此类暴雨的预报准确率。

关键词:对流性暴雨; 漏报; 可预报性

中图分类号:P458.1⁺21.1 **文献标识码:**A

Analysis of a Forecast Failure Case of Convective Torrential Rainfall in Western Guizhou Province

WU Guhui¹, PENG Fang², ZHANG Yanmei¹

(1. Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002, China;

2. Guizhou Institute of Mountainous Environment and Climate, Guiyang 550002, China)

Abstract: On June 1 - 2, 2020, a local convective rainstorm occurred in the west of Guizhou. The magnitude of forecast by forecasters and various numerical models was significantly lower, resulting in the underestimation of the rainstorm scope and the underreporting of extremely heavy rain and heavy rain. The cause of the failure forecast of this convective torrential rainfall case is analyzed by using surface and radiosonde observation, encrypted automatic station observation data, Doppler weather radar data, satellite data and numerical forecast products commonly used in business. The results show that failure of capturing the trigger conditions, such as dew - point front, convergence area which consisted of southerly wind and westerly wind, cold pool, surface convergence line, as well as their effects on heavy rainfall under a high temperature and high humidity conditions was one of the important factors leading to the underestimation of the rainfall. Furthermore, insufficient fine analysis on the wind field also caused the failure. Therefore, in terms of forecasting the convective rainfall within a very thick warm wet air mass, the triggering caused by dew - point front, convergence area, cold pool, surface convergence line, organizational development of local and convective precipitation must be considered. Short - time forecast and nowcasting based on surface automatic weather station observation and weather radar data could effectively enhance

收稿日期:2021 - 08 - 31

第一作者简介:吴古会(1985—),女,高工,主要从事短期及短临天气预报工作,E-mail:19106289@qq.com。

通讯作者简介:张艳梅(1973—),女,高工,主要从事短期及短临天气预报工作,E-mail:451968096@qq.com。

资助项目:中国气象局暴雨创新团队(CMACXTD002-3);西南区域重大科研业务项目(西南区域2014-3);基于配料的西南区域强降水的中尺度分析;贵州省气象局科研业务项目(黔气科登[2021]10-09号);2020年9月贵州初秋极端持续性暴雨成因分析。

the ability in finding mesoscale and small-scale systems, which may improve the accuracy of forecasting convective rainfalls.

Key words: convective torrential rain; forecast error; predictability

0 引言

在贵州特殊的地理位置和复杂的地形地貌条件下,对流性暴雨尤其是极端对流性暴雨天气频繁发生。极端对流性暴雨包括 1 h 雨量 ≥ 50 mm 或 3 h 雨量 ≥ 100 mm 或 24 h 雨量 ≥ 200 mm 的降水事件^[1],极易造成暴洪、滑坡泥石流等灾害,严重威胁人民的生命财产安全。针对极端强降水,气象工作者对其成因展开了大量而深入的研究:一方面,采用诊断分析和数值模拟方法,对直接导致暴雨的中尺度对流系统结构、触发对流的原因等进行分析^[2-6];另一方面,利用多普勒雷达产品和高时空分辨率的气象卫星云图资料,研究造成极端强降水的中尺度对流系统的组织形式与演变特征^[7-10]。已取得的众多研究成果为我国极端强降水预报预警服务提供了参考依据。

对贵州的极端强降水,气象工作者也进行了很多有意义的研究。杜小玲等^[11-12]对 2010 年 6 月 28 日关岭特大滑坡泥石流过程和 2014 年 7 月 13—17 日贵州持续性暴雨过程及贵阳极端降水的研究指出,极端降水过程中的中小尺度系统起到重要作用。池再香等^[13]分析了 2009 年 6 月 28 日贵州省水城县发耳乡特大暴雨,指出中小尺度天气系统对此次强降水雨团的形成和加强起到了重要作用。聂云等^[14]对 2015 年 6 月 18 日梅雨锋西段的强降水,冉仙果等^[15]对贵州沿河县 2016 年 6 月 19 日和 2019 年 6 月 22 日特大暴雨天气都进行了详细的分析,表明在有利的形势背景之下,极端强降水的发生与地形对中小尺度系统的增幅作用有关。由于极端强降水局地性强、生命史短和降水强度大的特点,对极端强降水的预报预警仍然是气象业务的重点和难点。本文对 2020 年 6 月 1 日发生的 1 次南支浅槽背景下贵州西部极端对流性暴雨过程的预报失败案例进行剖析,希望对未来此类天气的预报提供借鉴。

1 天气实况

受南支波动以及强盛偏南气流影响,2020 年 6 月 1 日 08 时—2 日 08 时(北京时,下同),贵州发生了暴雨天气过程。强降水集中在西部地区,其中,1 个区域站出现特大暴雨,40 个区域站出现大暴雨,5

县站 133 个区域站出现暴雨,以关岭县谷目乡 328.4 mm 最大;同时,晴隆、水城、关岭出现雷暴大风,以晴隆县长流乡 $38.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为最大,过程强对流特征明显,1 日 16 时—2 日 07 时,均有 20 mm 以上的短时强降水发生,最强时段为 1 日 18 时—2 日 01 时,小时雨强增加至 50 mm 以上,最强小时雨强达 144.9 mm,具有持续时间长,强度大,局地性强的特点(图 1)。

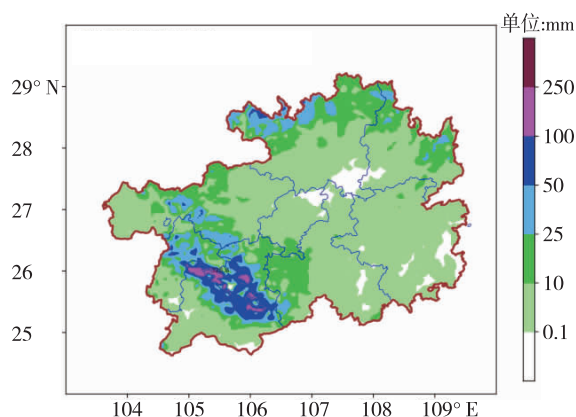


图 1 2020 年 6 月 1 日 08 时—2 日 08 时 24 h 累积降水量
Fig. 1 24 h accumulated precipitation from 08:00 on June 1 to 08:00 on Jun 2, 2020

2 预报过程回顾

2.1 预报情况

5 月 31 日对外发布的服务产品考虑的降水主要时段为 2 日白天到夜间,6 月 1 日根据最新的起始场(5 月 31 日 20 时)资料对预报进行更新调整。由于本文讨论的过程主要降水时段是 6 月 1 日傍晚至夜间,故使用了 6 月 1 日的常规高空、地面实况资料和 5 月 31 日 20 时起始场的模式资料对这次过程的预报进行梳理分析。从各模式 5 月 31 日 20 时起始场对 6 月 1 日 08 时—2 日 08 时的 24 h 累计降水预报来看(预报的主要降水时段也是在 1 日夜间,1 日白天降水较弱),大尺度模式都在贵州预报了中—大雨,其中,欧洲中心细网格模式(EC)在贵州南部地区预报了分散的大雨区,北支的强降水区位于川渝之间,还未进入贵州(图 2a);GFS 模式(图略)的大雨区考虑在贵州北部地区,结合 60 h 时效的 24 h 降水预报,是 1 次自北向南的强降水天气过

程;JP 模式(图略)的趋势与 EC 模式一致,都预报北支系统主要影响时段为 2 日 08 时—3 日 08 时,1 日 08 时—2 日 08 时主要考虑南支波动前偏南气流中的暖区对流性降水。中尺度模式预报分歧也较大,Grapes – meso(图 2b)对于 6 月 1 日的降水预报较弱,华南 3 km 模式(图 2c)对于北支系统的影响也主要考虑在 2 日 08 时以后,除了西北部地区以外,其余地区预报的强降水较分散,范围也较小,具有暖区降水预报的特点;华东中尺度模式(图 2d)对于北支系统影响的时间稍早,至 2 日 08 时,北支系统强降水区已移至贵州北部地区,对贵州其

余地区也考虑了分散的中—大雨。预报员根据实况形势以及大尺度模式在对流性降水天气中强度偏弱的特点,微调了模式预报,结合中尺度模式预报,考虑北支系统于 1 日后半夜开始影响进入贵州,强降水时段主要在 2 日午后至夜间,影响区域为贵州的偏东和偏南部地区;北支南下之前的时段,结合暖区对流的特点,考虑了分散的中—大雨,个别站暴雨天气(实况有 179 站暴雨)。由于暖区对流的预报难度大,地面没有明显的触发系统,漏报了此次贵州西部的暴雨过程。

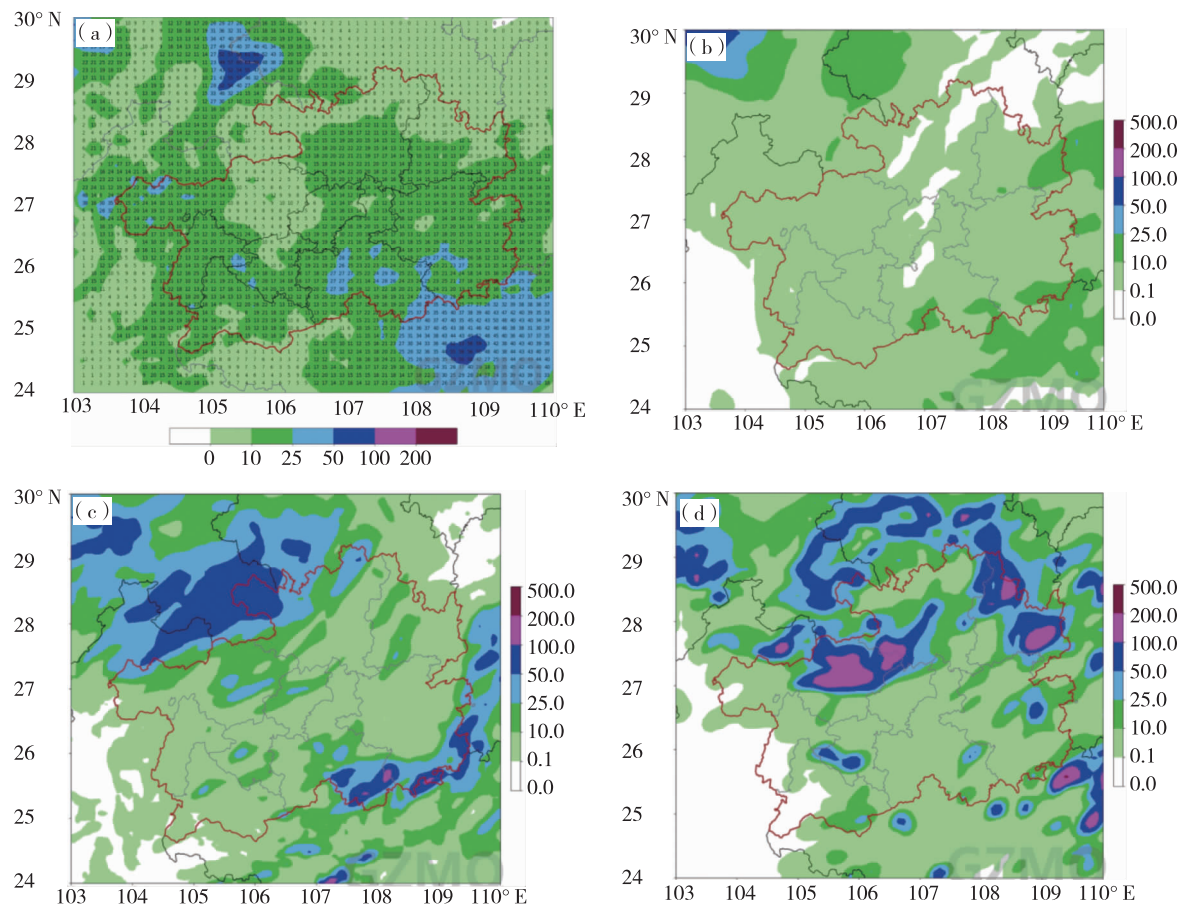


图2 2020年5月31日20时起始场多模式对1日08时—2日08时24 h降水预报:
EC 细网格(a)、Grapes – meso(b)、华南 – 3 km(c)和华东中尺度(d)

Fig.2 Comparison of 24 h accumulated precipitation predicted by different NWP models with 36 h lead time starting from 20:00 on May 31, 2020: EC – Thin Model(a)、Grapes – meso(b)、Guangzhou Mesoscale NWP Model(c)、Shanghai Mesoscale NWP Model(d)

2.2 大尺度环流形势

预报员主要参考了 EC 细网格模式和 JP 模式的趋势,结合中尺度模式和暖区降水特点,对模式产品作了调整,但由于数值模式对暖区降水的预报能力不足^[16],故在预报过程中,预报员只能从产生暴雨的大尺度环境条件着手分析。

1 日 08 时,500 hPa 高纬为两脊一槽的环流形

势,低值中心位于贝加尔湖西北侧,中纬度多波动,中亚地区低值系统分裂低槽东移,低槽位于河西走廊沿线,槽后有明显的冷平流,相应低层切变位于川陕地区,斜压特征明显;低纬地区副热带高压 588 dagpm 线控制 25°N 以南地区,南支波动位于 95°E 附近,贵州受该波动影响,700 hPa 也主要受槽前偏西气流控制,850 hPa 贵州中部的贵阳站为偏东风,

广西的白色和河池站为西南气流,风速都不强($2 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),即贵州南部地区低层为弱辐合区(图 3)。结合地面场资料,冷锋 1 日 08 时位于甘肃中部—四川北部一线,于 2 日 05 时前后进入贵州,在受冷锋影响之前,贵州为均压区控制。

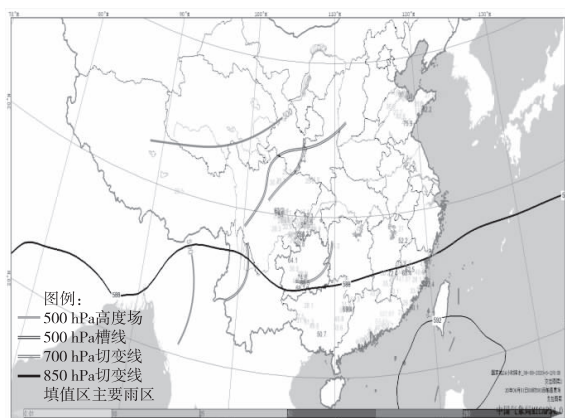


图 3 2020 年 6 月 1 日 08 时高低空系统配置

Fig. 3 Upper- and low-level impact systems at 08:00 on June 1, 2020

2.3 水汽和不稳定条件

6 月 1 日 08 时,贵州 850 hPa 比湿达到 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,700 hPa 比湿为 $8 \sim 11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,都满足贵州强降水对水汽的要求,并且有高比湿的水汽从广西向北输送。另一方面,贵州西部(威宁)700 hPa 与 500 hPa 的温差达到 16°C ,具有较明显的热力不稳定特征;贵阳探空 K 指数达 37°C ,SI 指数贵州位于 $< 0^\circ\text{C}$ 的不稳定区,从实况资料的分析可知贵州处于高能高湿的环境中,不稳定潜势较高。

2.4 预报结果

综合考虑大尺度环流形势、水汽及不稳定条件,结合各模式产品,得出的预报结论为:北支高空槽、低层切变和冷锋主要于 2 日凌晨到夜间影响贵州,重点考虑的时段为 2 日午后到夜间,强降水及强对流的范围为贵州中部及以东以南地区,而 1 日受南支波动影响,配合低层暖湿气流条件,贵州的大部地区可能会有对流性降水,但因地面系统不明显,对流性降水的落区和量级都不好把握,考虑了分散的中—大雨,个别站暴雨的天气。

3 实际天气过程演变

从图 4 可以看出,6 月 1 日 16—17 时,贵州西北部降水开始增强,雨团 A 发展并向南移动,同时位于其西南侧有雨团 B 生成发展。至 19 时,雨团 A 和 B 合并形成东西向雨带,小时雨强增至 50 mm 以上。20 时,雨带南移,雨团 A 强度减弱,雨团 B 增强,小时雨强达到 76.9 mm ,同时,在雨带的南侧有新的雨团 C 生成。21—22 时,雨团 C 强烈发展,并与北侧雨带相接。至 22 时,发展到最强盛阶段,小时雨强达到 144.9 mm 。23 时,雨团 C 维持影响,在其西北侧有新的雨团生成。至 2 日 02 时,雨团 C 南移,强度减弱,其西北侧的雨团 D 也向东南方向移动。03 时,C 雨团和 D 雨团合并,强度有所加强,继续南移影响至 06 时。贵州北部由锋面带来的系统性降水在 2 日 02—08 时影响贵州的北部边缘地区,最大小时雨强 49 mm (2 日 02—03 时),对流强度比西部地区弱。

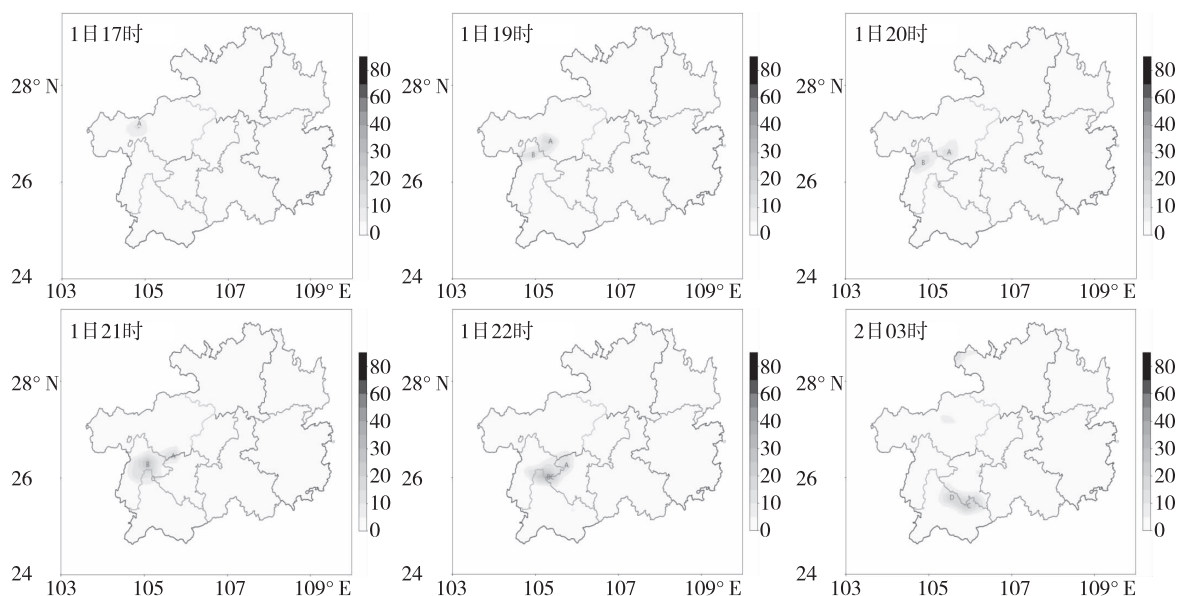


图 4 2020 年 6 月 1 日 16 时—2 日 03 时小时雨量分布图(填色,单位:mm)

Fig. 4 Evolution of automatic weather station hourly precipitation from 16:00 on June 1 to 03:00 on June 2, 2020 (shaded area, unit: mm)

最大小时雨强在自动站之间位置的变化规律(图5)与雨团的踪迹一致,从贵州西北部自北向南先后影响贵州的西部地区;从最大小时雨强的强度变化可知,6月1日20时—2日01时最强,最大小时雨强超过70 mm,其中,21时前后最强,超过90 mm,最大雨量站均在贵州西南部较狭小的范围内,并且伴随着 $38.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 强度的雷暴大风天气。对流性强、降水强度大、集中在较小区域内,中尺度特征明显。06时以后,贵州北部边缘由于受到切变及锋面的影响,降水开始加强。

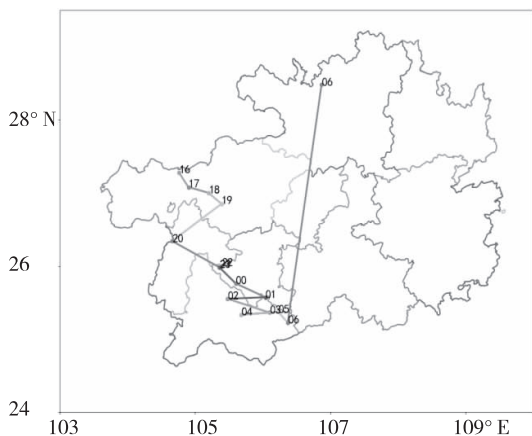


图5 2020年6月1日16时—2日07时
最大小时雨量自动站位置变化

Fig. 5 Location of automatic weather station of the
heaviest hourly precipitation form 16:00
on June 1 to 07:00 on June 2, 2020

4 预报失败原因分析

在此次过程中,针对大尺度环流背景的预报,预报员对模式产品作出了正确的分析判断,但对于在高空槽扰动的有利条件下,强盛偏南暖湿气流中的局地对流性降水估计不足,造成贵州西部地区暴雨过程漏报。以下主要分析6月1日午后到夜间时段贵州西部地区降水预报失败的原因。

4.1 中尺度对流系统的环境场

4.1.1 低层辐合的演变 经检验,EC模式5月31日20时起始场对6月1日08时和20时的高空形势预报(图略)与实况的形势一致。考虑到高空实况时空精度较粗,且主要从预报角度复盘此次漏报过程,因此使用了模式预报的高空要素场而非再分析资料进行分析。1日17时—2日08时(图6),700 hPa低槽位于云南中部,其中,17—23时贵州西部地区为西南气流与偏南气流的辐合区,且20—23时前后,风速加强,辐合相应也加强。23时之后低槽东移减弱,偏西气流与偏南气流的辐合区也随之

东移。结合逐时降水的分布可知,降水区位置和强度的变化与低槽前西南风与偏南风的辐合区演变有关。850 hPa上,17时前后在贵州东南部形成南风与偏东风间的切变辐合线。2日02时,南风增强(风速 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围扩大),急流轴位于广西东部至湘西,切变辐合北抬,贵州西部及云南东部地区受 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的南风控制。2日05时,贵州西部为西南风与偏南风的辐合区,同时受到偏南风的风速切变影响。700 hPa和850 hPa上贵州西部的辐合区都呈南北走向,与强降水区的形态一致,表明槽前的西南气流与偏南风辐合区是造成此次贵州西部强降水的原因之一。由于贵州西部地区平均海拔较高,地形地貌特征复杂,模式预报常有辐合区的存在,在短时间内判断辐合区是否具有天气学意义比较困难,这也是漏报的原因之一。

4.1.2 对流不稳定条件的发展演变 从1日08时实况探空可知(图略),贵州西部(威宁探空)为上干下湿的不稳定层结,SI指数为 $-1.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$,按照当天最高气温 $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的预报订正探空,得到的CAPE为 $850 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,具有较高的不稳定潜势,且抬升凝结高度接近近地层(763 hPa—2.4 km),易于对流天气的触发;垂直风切变不大, $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度为4.8 km,故判断的强对流天气包括雷电、短时强降水或冰雹。从预报的CAPE演变来看(图7),1日14—23时高能区位于贵州的西部和南部,14—20时贵州西北部CAPE由 $1500 \sim 2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,20—23时强降水中心的CAPE值也明显减小,说明模式也在贵州西部地区考虑了强天气的发生,并且CAPE明显释放与实况强天气的发生时段一致。但预报难点依然在于如何迅速判断模式产品反映的信息与强天气的联系,以及会带来的强天气的强度。

4.2 中尺度对流系统的触发及发展演变

4.2.1 MCS的触发 此次过程开始前,无论是地面实况还是模式预报的地面风场变化,都没有清晰的风场辐合线影响。通过加密自动站资料分析可知(图8),1日14—16时,滇黔之间沿着地面露点锋开始有降水发生,17时之后,随着贵州西北部降水增强形成冷池,在冷池的南部形成辐合线并产生强降水,逐渐向南传播,使得贵州西部的强降水区呈南北向分布。而在1日08时地面图上露点锋并不明显,模式对露点场的预报也分析不出露点锋的存在,也没有明显的露点变化,10 m风场上贵州西部也没有明显的辐合影响,加上在高温高湿的不稳定环境中,微小的扰动就能触发对流,由此增加了预报难度。

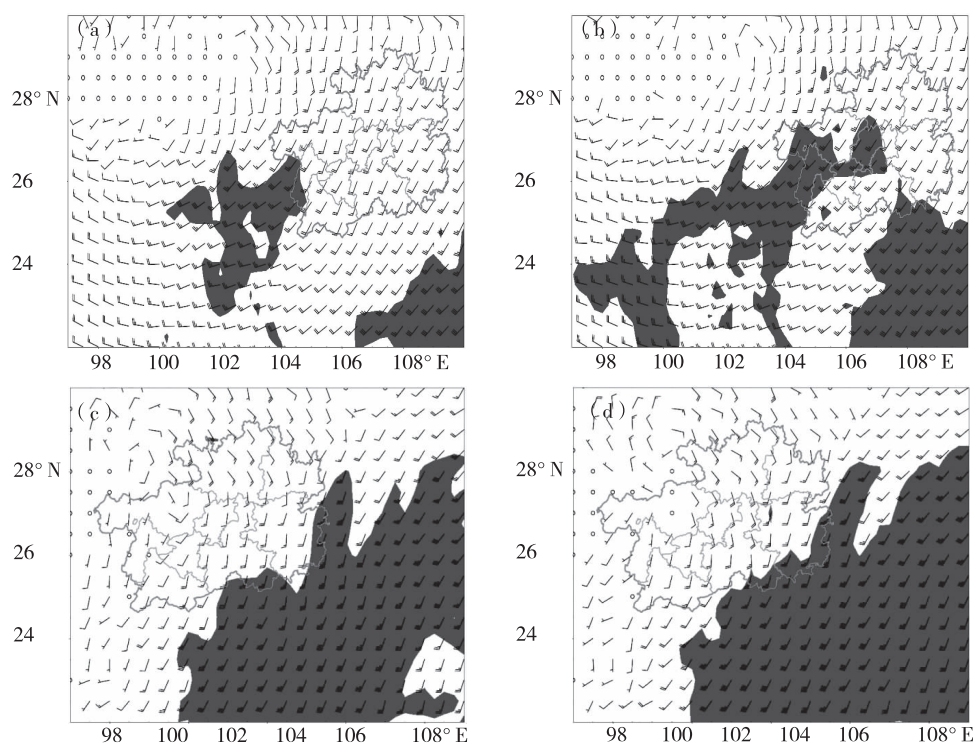


图 6 欧洲中心模式 2020 年 5 月 31 日 20 时起报的 27 h(a) 和 30 h(b) 时效的 700 hPa 风场, 30 h(c) 和 33 h(d) 时效的 850 hPa 风场(填色区风速 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 The wind predicted by ECWMF high - resolution model with lead time of 700 hPa 27 h(a), 700 hPa 30 h(b), 850 hPa 30 h(c) and 850 hPa 33 h (d) starting from 20:00 on May 31, 2020 (shaded area $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

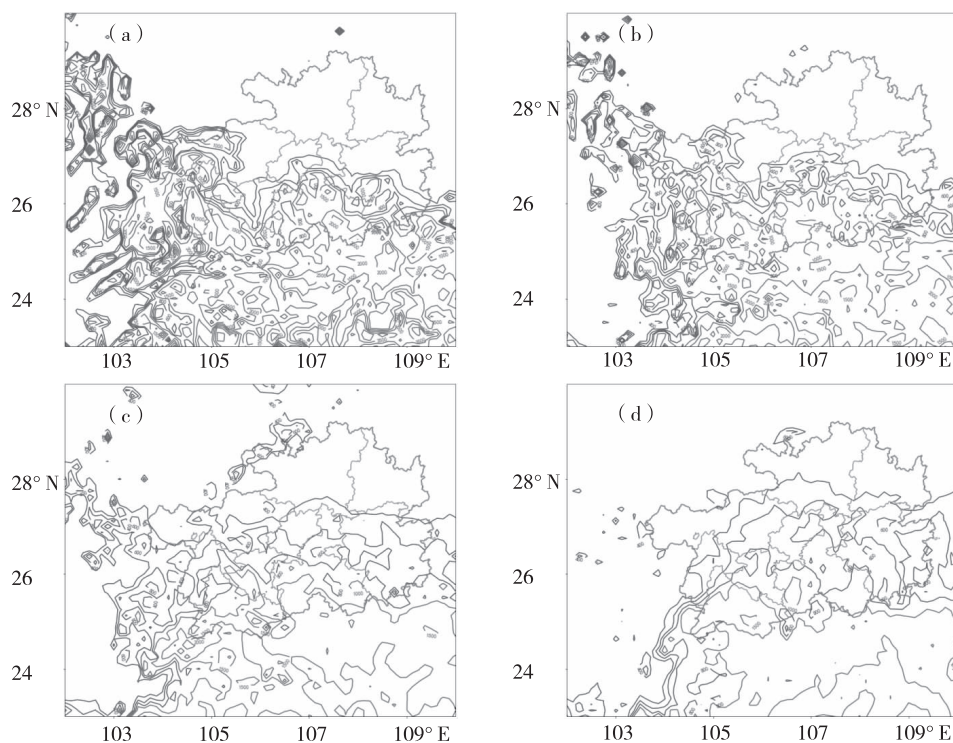


图 7 欧洲中心模式 2020 年 5 月 31 日 20 时起报的 18 h(a)、21 h(b)、24 h(c) 和 27 h(d) 时效的对流有效位能(红线 $\text{CAPE} \geq 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 蓝线 $\text{CAPE} < 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 7 The CAPE predicted by ECWMF high - resolution model with lead time of 18 h(a), 21 h(b), 24 h(c) and 27 h (d) starting from 20:00 on May 31, 2020 (red lines $\text{CAPE} \geq 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, blue lines $\text{CAPE} < 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

4.2.2 MCS的发展演变 由于强降水中心位于安顺市、六盘水市和黔西南州的交界地区,超出了单部雷达的探测范围,所以结合FY-2E的TBB资料对此次过程中的MCS进行分析。从逐时TBB的演变可知(图9),1日16时贵州西北部有对流单体生成,至19时,对流沿地面辐合线发展成东西向的云带,中心TBB < -70℃。21时对流云团已发展成

MCC,至2日03时,MCC逐渐南移影响贵州西南部地区,强降水位于MCC中心TBB低值中心附近。结合多普勒雷达资料可知(图10),1日20时前回波结构较松散,20—22时多单体风暴发展,单体中心强度都超过60 dBz,且位于晴隆、关岭附近的强单体合并,对应该时段对流及降水的明显增强。

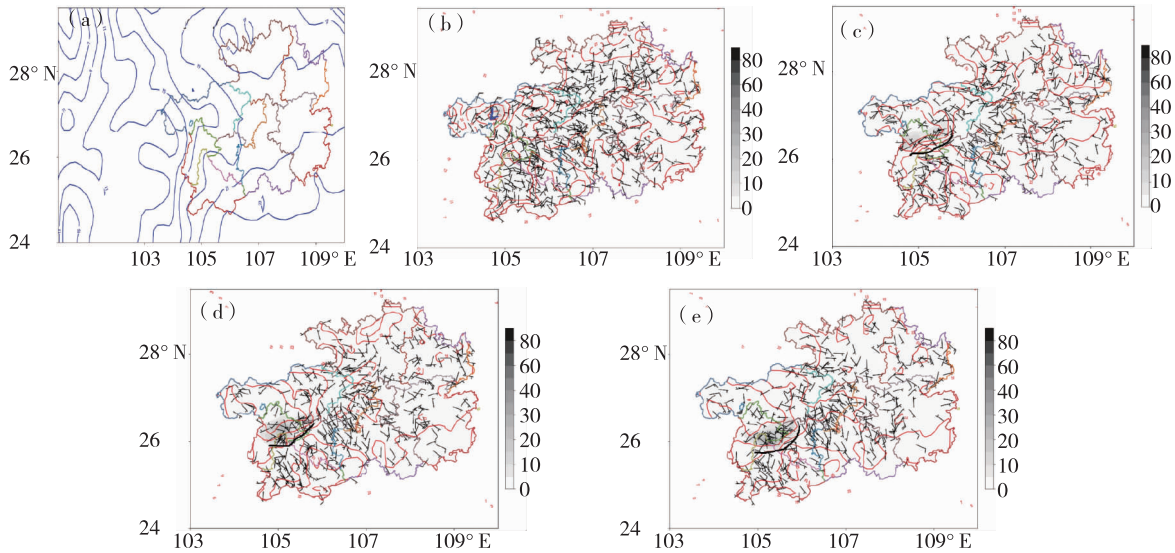


图8 2020年6月1日16时露点温度(a)、17时(b)、20时(c)、21时(d)和22时(e)地面温度场和风场分布图(蓝色等值线代表露点温度,红色等值线代表气温,单位:℃;黑线为地面辐合线,阴影为小时降水,单位:mm)

Fig.8 Surface dew - temperature at 16:00(a), surface temperature and wind at 17:00(b), 20:00(c), 21:00(d), 22:00 (e) on June 1, 2020 (blue lines show the dew - temperature, red lines show the temperature, unit:℃, black line shows the surface convergence line, and shaded area indicated hourly precipitation, unit:mm)

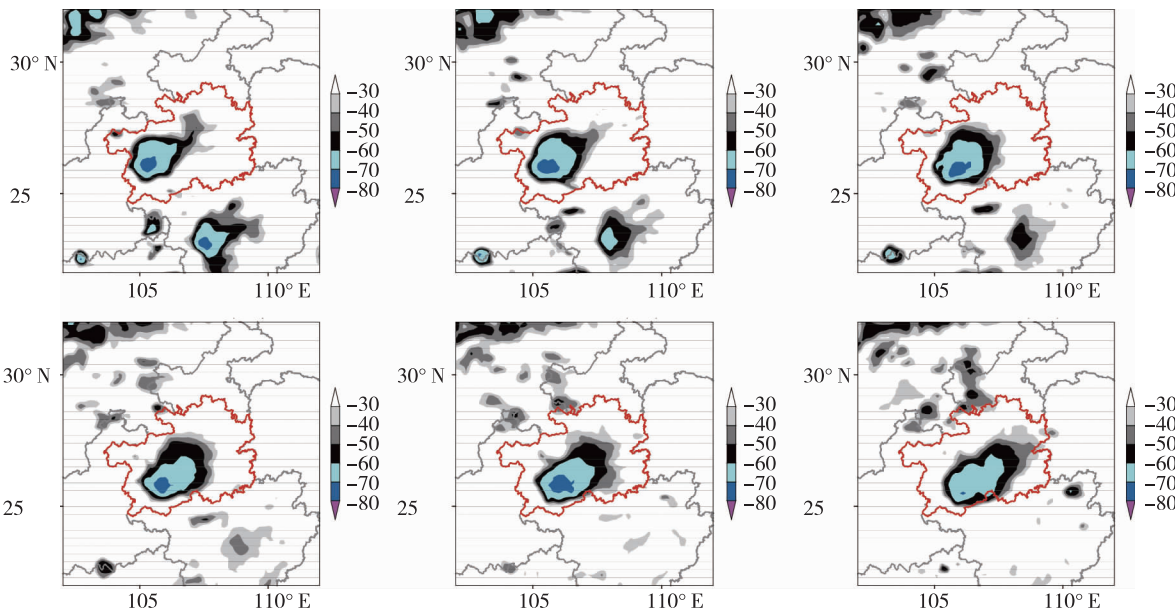


图9 2020年6月1日21时—2日02时TBB演变

Fig.9 Evolution of TBB from 21:00 on June 1 to 02:00 on June 2, 2020

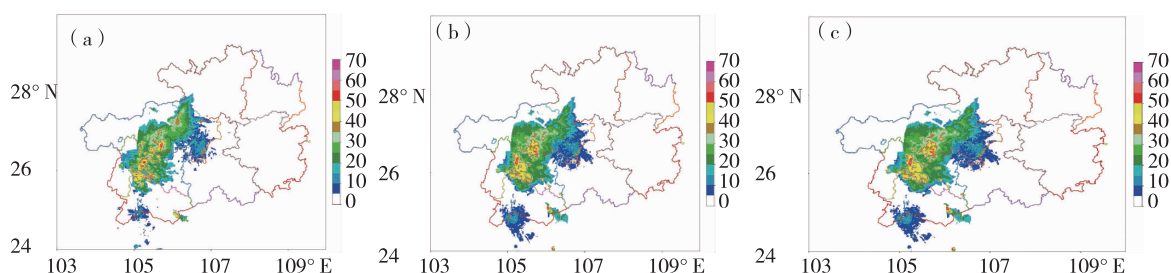


图 10 2020 年 6 月 1 日组合反射率拼图:20 时 30 分(a)、21 时(b)、21 时 30 分(c)(单位:dBz)

Fig. 10 Radar composite Reflectivity at 20:30(a)、21:00(b)、21:30(c) on June 1, 2020(unit:dBz)

5 结论和讨论

①此次对流性暴雨过程是在弱天气尺度强迫背景下,主要由地面露点锋,低空偏西风与偏南风的辐合、冷池及地面辐合线共同作用,配合高温高湿的环境产生的。具有局地性强,雨强大、对流旺盛等中尺度特征。

②此次局地性暴雨过程的预报难点在于对触发系统的判断。由于当天早上实况和模式预报都没有显示将有露点锋的出现,仅凭模式预报的偏西风和偏南风之间的辐合区的天气学意义难以作出迅速准确的判断,继而不能确定是否会有组织性较好的对流发生,加上缺乏对流天气发生后由冷池造成辐合等方面的认识,难以判断对流的强度和强降水落区。另一方面,难以在较短时间内精细分析风场、能量场的变化并对其天气学意义作出判别。导致漏报该次暴雨过程。

③由于贵州特殊的地理位置及复杂的地形地貌特征,高温高湿环境是夏季贵州的常态,在短期时效内,无论模式预报还是预报员的主观预报,对流性暴雨预报在落区和强度都存在明显的偏差。要提高暴雨过程预报准确率,除了继续研究对流性暴雨的形成机制,分析对流触发和组织化发展的条件以外,还应开展数值模式尤其是中尺度模式在强降水预报中的应用检验,并加强短时临近的预报预警工作。

参考文献

[1] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害,

2013,32(3):202-209.

- [2] 田亚杰,王春明,崔强. 2015 年 5 月 19-20 日两广地区暴雨过程数值模拟与诊断分析[J]. 暴雨灾害,2017,36(1):18-25.
- [3] 王坚红,杨艺亚,苗春生,等. 华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究[J]. 大气科学,2017,41(4):784-796.
- [4] 张雅斌,马晓华,冉令坤,等. 关中地区两次初夏区域性暴雨过程特征分析[J]. 高原气象,2016,35(3):708-725.
- [5] 祁秀香,郑永光,伍志方,等. 一次导致大暴雨的中尺度对流系统演变和风场垂直结构特征[J]. 热带气象学报,2015,31(3):345-354.
- [6] 周长春,吴蓬萍,周秋雪. 一次复杂地形暖区强降水的特征及触发机制分析[J]. 暴雨灾害,2015,34(1):27-33.
- [7] 徐明,黄治勇,高琦. 2016 年 5 月 20 日广东信宜特大暴雨中尺度对流系统特征分析[J]. 暴雨灾害,2018,37(1):32-40.
- [8] 孙素琴,郑婧,支树林,等. 一次由“列车效应”引发的梅雨锋暴雨研究[J]. 高原气象,2015,34(1):190-201.
- [9] 张家国,周金莲,谌伟,等. 大别山西侧极端降水中尺度对流系统结构与传播特征[J]. 气象学报,2015,73(2):291-304.
- [10] 孙继松,何娜,郭锐,等. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制[J]. 大气科学,2013,37(1):137-148.
- [11] 杜小玲,彭芳,吴古会,等. 应用新型辐散方程诊断“6.28”关岭大暴雨的激发和维持机制[J]. 高原气象,2013,32(3):728-738.
- [12] 杜小玲,吴磊,杨秀庄,等. 梅雨锋西段持续性暴雨的环境场特征及贵阳极端降水成因[J]. 暴雨灾害,2016,35(5):415-426.
- [13] 迟再香,邱斌,康学良,等. 一次南支槽背景下地形对贵州水城南部特大暴雨的作用[J]. 大气科学学报,2011,34(6):708-716.
- [14] 聂云,周继先,顾欣,等. “6.18”梅雨锋西段黔东南大暴雨两个例诊断分析[J]. 暴雨灾害,2018,37(5):445-454.
- [15] 冉仙果,胡萍,付瑞滢,等. 贵州沿河县两次极端强降水的对比分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(2):31-39.
- [16] 谌芸,陈涛,汪玲瑶,等. 中国暖区暴雨的研究进展[J]. 暴雨灾害,2019,38(5):483-493.