

罗静,郑淋淋,姚晨,等,2025.一次暖区对流组织化发展的成因分析[J].气象,51(9):1072-1087. Luo J, Zheng L L, Yao C, et al, 2025. Causes for the organizational development of convections in a warm-sector convective event[J]. Meteor Mon, 51(9): 1072-1087(in Chinese).

## 一次暖区对流组织化发展的成因分析<sup>\*</sup>

罗 静<sup>1</sup> 郑淋淋<sup>1,2</sup> 姚 晨<sup>1</sup> 邵立瑛<sup>1</sup> 邱学兴<sup>1</sup> 高 磊<sup>3</sup> 朱红芳<sup>1</sup> 祁 文<sup>4</sup>

1 安徽省气象台,合肥 230031

2 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室,合肥 230031

3 安徽省肥西县气象局,肥西 231200

4 安徽省铜陵市气象局,铜陵 244000

**提 要:** 2023年5月27日凌晨,安徽南部发生了一次以短时强降水为主的暖区强对流过程,多条南北走向平行排列的 $\beta$ 中尺度短对流形成的列车效应造成突发性局地强降水,降水最强时段100 min累计降水量达到123.2 mm。采用安徽省气象台业务运行的快速更新同化系统WRF-EnKF对此次过程进行数值模拟。结果表明:大尺度环境场和中尺度对流系统的相互作用导致多条短对流水平尺度的增长、强度的增强。动力作用方面,对流发生后,短对流与低空急流核之间形成 $\gamma$ 中尺度气旋性涡旋造成对流东移发展,同时雷暴出流与环境风场形成的地面辐合线导致南侧触发新对流,使短对流不断向南部线性发展;环境条件方面,多个平行排列的低空急流核为对流的发展提供有利的动力和热力条件,对流强烈发展在中高层形成反次级环流,使其南侧的大气不稳定和深层垂直风切变显著增强。对流之间的相互作用造成短对流结构维持。平行排列的对流形成平行排列的雷暴高压,相邻雷暴出流相互作用形成多个平行排列的正负散度对,垂直方向上在相邻对流之间形成多个平行排列的纬向-垂直环流,有利于多条短对流结构的维持和发展。

**关键词:** 暖区,低空急流,雷暴出流

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.012402

## Causes for the Organizational Development of Convections in a Warm-Sector Convective Event

LUO Jing<sup>1</sup> ZHENG Linlin<sup>1,2</sup> YAO Chen<sup>1</sup> SHAO Liying<sup>1</sup> QIU Xuexing<sup>1</sup>

GAO Lei<sup>3</sup> ZHU Hongfang<sup>1</sup> QI Wen<sup>4</sup>

1 Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031

2 Anhui Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

3 Feixi Meteorological Station of Anhui Province, Feixi 231200

4 Tongling Meteorological Office of Anhui Province, Tongling 244000

**Abstract:** A warm-sector severe convective event dominated by short-time severe precipitation occurred in southern Anhui in the early morning of 27 May 2023. The train effect formed by a number of north-south parallel meso- $\beta$  scale short convections resulted in 123.2 mm sudden local severe precipitation in 100 min. The numerical simulation of this event was carried out by using WRF-EnKF, a rapid update assimilation system for meteorological service operation in Anhui Meteorological Observatory. The results show that

<sup>\*</sup> 安徽省自然科学基金江淮气象联合基金项目(2208085UQ11、2408055UQ002)、铜陵市科技计划项目市重点研究与开发计划社发领域类(20230203049)和中国气象局复盘总结专项(FPZJ2024-057)共同资助

2024年9月12日收稿; 2025年1月24日收修定稿

第一作者:罗静,主要从事中尺度气象学研究. E-mail:276829883@qq.com

通讯作者:姚晨,主要从事强对流天气预报预警技术研究. E-mail:ycamo@163.com

the interaction between large-scale environmental field and mesoscale convective system led to the increase of horizontal scale and intensification of several short convections. In terms of dynamic action, after the occurrence of convection, a meso- $\gamma$  scale cyclonic vortex formed between the short convection and the low-level jet core, causing the development of eastward convection. Meanwhile, the surface convergence line formed between the outflow of thunderstorm and the ambient wind triggered new convection in the south side of the short convections, making the short convections continuously development linearly to the south. For the environmental conditions, multiple parallel low-level jet cores provided favorable dynamic and thermal conditions for the development of convection. Inverse secondary circulation in the middle and upper levels occurred due to the strong development of convections resulted in the significantly enhanced atmospheric instability on the south side and the development of convections strengthened the deep vertical wind shear. In addition, the interaction between the convections contributed to the maintenance of the short convection structure. Parallel convection formed parallel thunderstorm high pressure, and the interaction between the outflow of adjacent thunderstorms caused the formation of multiple parallel positive and negative divergence pairs, thus bringing about multiple parallel zonal-vertical circulations between adjacent convections in the vertical direction. These were conducive to the maintenance and development of the multiple short convections.

**Key words:** warm-sector, low-level jet, outflow of thunderstorm

## 引 言

暖区的概念最早由《华南前汛期暴雨》编写组(1986)针对华南前汛期强降水提出,是指华南地面锋线南侧的暖区或者南岭附近至南海北部没有锋面存在、也不受冷空气或变性高压控制的区域。暖区对流具有突发性强、致灾程度高、大尺度动力强迫弱、模式预报性能差等特点,一直是气象工作者关注的重点。除华南地区,我国其他地区也时常有暖区对流发生发展(孙密娜等,2018;Mao et al,2018;张芹等,2023;沈晓玲等,2024)。许爱华等(2001)对江西中北部11次暖区对流过程的动力、热力学指标进行定量统计发现,850 hPa 南风分量达到 $8\sim 11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 是江西中北部发生暖区对流的预报指标之一。其他学者根据特定区域暖区暴雨发生发展的天气学特征,对其进行天气学分类,虽然各地区的划分标准存在一定差异,但低空西南急流型仍是普遍认可的一种暖区暴雨类型(何立富等,2016;汪玲瑶等,2018;田莹等,2022)。低空急流暖湿输送导致高温、高湿、高能的对流不稳定层结反复重建,不稳定能量长时间维持,有利于对流的发展维持,最终导致强降水维持(Du and Chen,2018;张萍萍等,2019;付炜等,2020;黄美金等,2022;张兰等,2023)。

暖区对流具有明显的中尺度对流特征,触发机

制相当复杂,主要涉及低空急流的脉动、中尺度地形(黄楚惠等,2022)、边界层扰动、雷暴出流及其相互作用等方面(Schumacher and Johnson,2005;谌芸等,2019)。低空急流出口区左侧为辐合上升区,其上层有辐散中心配合,并与右侧的下沉运动组成了一个大的垂直次级环流圈,高低空急流同时存在有利于中尺度对流系统的发展(汪永铭和薛纪善,1985)。低空急流的大风核沿急流轴向前传播时,可能导致重力波产生并触发中尺度对流系统在低空急流前沿不断新生并组织化加强,表现出明显的列车效应和准静止特点(巢纪平,1980;赵平等,2003;徐燧等,2013;Geerts et al,2017;Liu et al,2018)。成熟的强降水风暴出流与边界层暖湿气流形成的辐合线不断激发新的对流,也是暖区对流发展维持的一种机制(田付友等,2018;傅佩玲等,2018;伍志方等,2018;蒲义良等,2023)。此外,暖区对流有多种组织形式,其中多个雷暴单体线性排列形成的列车效应是其中一种重要的组织形式,不同类型线状对流系统的发展与环境场垂直切变特征密切相关(Bluestein et al,1987;Doswell III et al,1996;Par-ker and Johnson,2000;Moore et al,2003;Zheng et al,2013;Luo et al,2014;Chang et al,2015)。

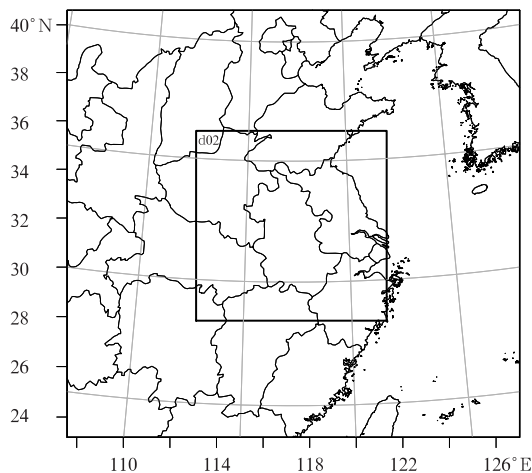
安徽南部以山区为主,其西面、南面分别有大别山区和皖南山区,水网分布也比较密集,是暖区对流的频发区(陈玥等,2016)。2023年5月27日凌晨,

伴随西南低空急流和地面低压倒槽的强烈发展,安徽大别山区南部到沿江中部地区发生了一次以短时强降水为主的暖区强对流天气,多条平行排列的短对流(文中指反射率因子 $>40$  dBz,长度为 $30\sim 50$  km 的对流)形成列车效应,造成短历时局地强降水,3 h 累计降水量最大为 $154.7$  mm。本文主要围绕低空急流、雷暴出流对多条短对流组织化发展的作用开展研究。

## 1 资料与方法

利用地面加密观测分析强对流天气特征(实况累计降水量采用逐小时资料,单站降水时序图采用逐 $5$  min 资料)和地面环境条件(风场、辐合线、雷暴出流等采用逐 $5$  min 资料)。利用风廓线雷达、探空及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)逐小时再分析资料(ERA5,水平分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$ )分析强对流天气发生的环流背景。利用安徽省 $7$ 部 $S$ 波段多普勒天气雷达(阜阳、蚌埠、合肥、安庆、铜陵、宣城、黄山)资料,通过中国气象局 SWAN 系统进行组网得到的组合反射率(时间分辨率为 $6$  min,水平分辨率为 $0.01^\circ\times 0.01^\circ$ )分析强对流过程的雷达演变特征。

利用安徽省气象台从宾夕法尼亚大学引进的快速更新同化系统 WRF-EnKF 对此次强对流天气过程进行数值模拟。数值模式为 WRF V4.3.3 版本,采用二层嵌套,分辨率分别为 $9$  km 和 $3$  km,格点数分别为 $229$  个 $\times 217$  个和 $289$  个 $\times 289$  个,垂直方向为 $50$  层,模式顶高为 $50$  hPa(图 1)。模式的微物理



注:模式资料选用第二层嵌套 d02 数据。

图 1 WRF-EnKF 模式模拟区域设置

Fig. 1 Simulation domain setting of the WRF-EnKF model

过程采用 Thompson et al(2008)的参数化方案,该方案考虑了水汽、云水、雨、云冰、霰和雪粒子相互作用的过程;边界层过程采用 YSU 参数化方案;积云参数化方案选用 Grell 积云参数化方案。资料同化模块采用宾夕法尼亚大学的集合卡尔曼滤波同化系统(PSU-EnKF),系统设置与郑淋淋等(2019;2023)一致。此次过程选用 ECMWF 2023 年 5 月 26 日 20:00(北京时,下同)的预报场资料,同化逐小时雷达径向风、雷达反演风、GPS 水汽、地面加密观测和探空等实况资料形成的 $36$  个集合预报成员的平均场作为初始场进行积分,同化时间窗为 5 月 26 日 20:00 至 27 日 02:00,预报时段为 27 日 03:00—19:00。为细致分析此次暖区对流天气中多条短对流发生发展的过程,模式输出的时间分辨率为 $10$  min。

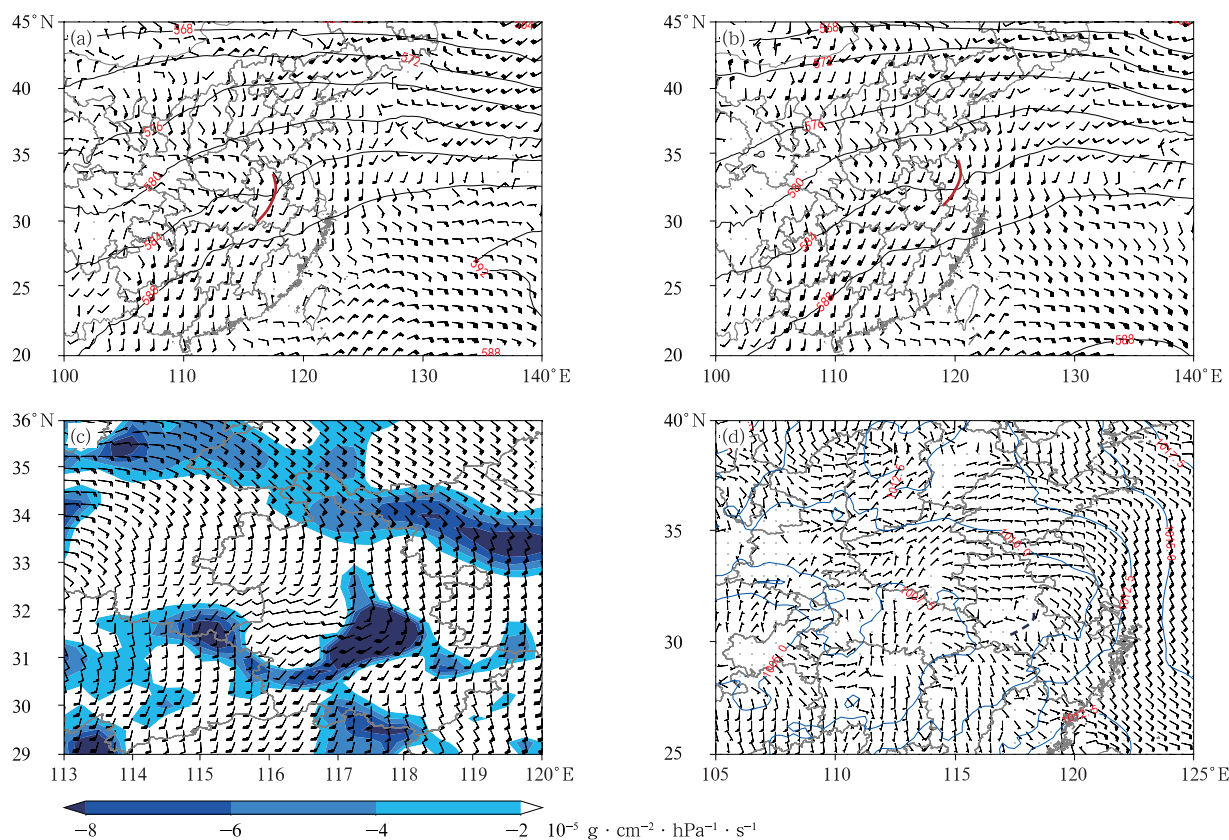
## 2 天气实况

### 2.1 环流背景

5 月 26 日 20:00,在 $500$  hPa 上,安徽南部位于 $584$  dagpm 与 $588$  dagpm 之间的平直西风气流中,有短波槽活动, $850$  hPa 低空急流轴位于广西北部—湖南中部—湖北东部一带(图 2a)。27 日 02:00,随着 $850$  hPa 低空急流东移、北推,急流顶端到达安徽西南部地区,强度超过 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,沿淮西部至江南东部有西北—东南走向的暖式切变线存在,切变线南侧的暖区有对流组织化发展(图 2b);此时, $925$  hPa 安徽西南部也有风速大于 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的超低空急流建立,沿急流轴方向有水汽通量的强烈辐合区,超低空急流将暖湿气流源源不断地向沿江中部地区输送(图 2c)。此外,安徽处在地面低压倒槽的前部,以偏东风为主,对流发展过程中安徽南部始终有偏北风和偏东风的中尺度地面辐合线维持,这可能与对流形成的雷暴出流有关(图 2d)。综上,此次过程是一次以低层暖强迫为主导的强对流天气过程。

### 2.2 实况对流发展演变

从实况回波的发展演变来看:5 月 27 日 03:00,大别山区到江南北部有一条西北—东南走向的带状对流带,其中镶嵌着多个多单体对流风暴并沿着对流带向东南方向移动,此时对流的组织化程度并不高(图 3a);多单体风暴 A 在东移过程中逐渐分裂成两部分,前部于 04:00 前后在沿江中部地区发展成



注:图 a、b 中红色曲线为 500 hPa 短波槽;图 d 中黑色断点线为地面辐合线。

图 2 2023 年 5 月(a)26 日 20:00、(b)27 日 02:00 500 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)、850 hPa 风场(风羽),(c)27 日 02:00 925 hPa 水汽通量散度(填色)、风场(风羽),(d)27 日 04:00 海平面气压场(等值线,单位:hPa)、地面 10 m 风场(风羽)

Fig. 2 (a, b) Geopotential height (contour, unit: dagpm) at 500 hPa and wind (barb) at 850 hPa at (a) 20:00 BT 26 and (b) 02:00 BT 27, (c) water vapor flux divergence (colored) and wind (barb) at 925 hPa at 02:00 BT 27, (d) sea level pressure (contour, unit: hPa) and wind (barb) of 10 m at 04:00 BT 27 May 2023

短对流 1(图 3d),后部与多单体风暴 B 结合并于 04:18 在 B 头部发展成短对流 2(图 3e),两条短对流分别于 04:42(图 3f)和 05:00(图 3g)前后发展到最强,中心强度均超过 50 dBz,超过 50 dBz 的回波长度均在 30 km 左右;此后,短对流在东移过程中不断减弱,06:00 前后线状结构逐渐消失(图 3j),短对流 1 大约维持了 2 h,短对流 2 大约维持了 100 min。

### 2.3 实况降水

5 月 27 日 03:00—06:00,实况强降水集中位于大别山区南部至沿江中部地区,呈西北—东南走向带状分布,有多个累计降水量 100 mm 以上的降水中心,最大降水中心位于枞阳县牛集站(累计降水量 154.7 mm)(图 4a)。27 日 04:00—05:00 是对流组

织化发展的最强时段,同时也是降水最强时段,共出现 3 个暴雨中心,最大小时降水量达到 64.5 mm(图 4b)。此外,从 03:00—06:00 牛集站逐 5 min 降水量的时间演变(图 4c)可以看出:5 min 超过 5 mm 的降水量集中在 27 日 03:00—04:40,累计降水量达到 123.2 mm。5 min 降水量时序呈双峰结构,第一次峰值出现在 03:30 前后,达到 10.8 mm,强降水主要由多单体风暴 A 的前部对流造成,此时多单体风暴 A 的前部正在线性组织化发展(图 3b~3c);第二次峰值出现在 04:30 前后,达到 9.7 mm,强降水主要由短对流 2 造成(图 3e,3f);04:40 之后,随着两条短对流的东移,牛集站的降水逐渐减弱。由此可见,强降水主要由回波的列车效应造成,其中降水峰值发生在两条短对流组织和加强的过程中。

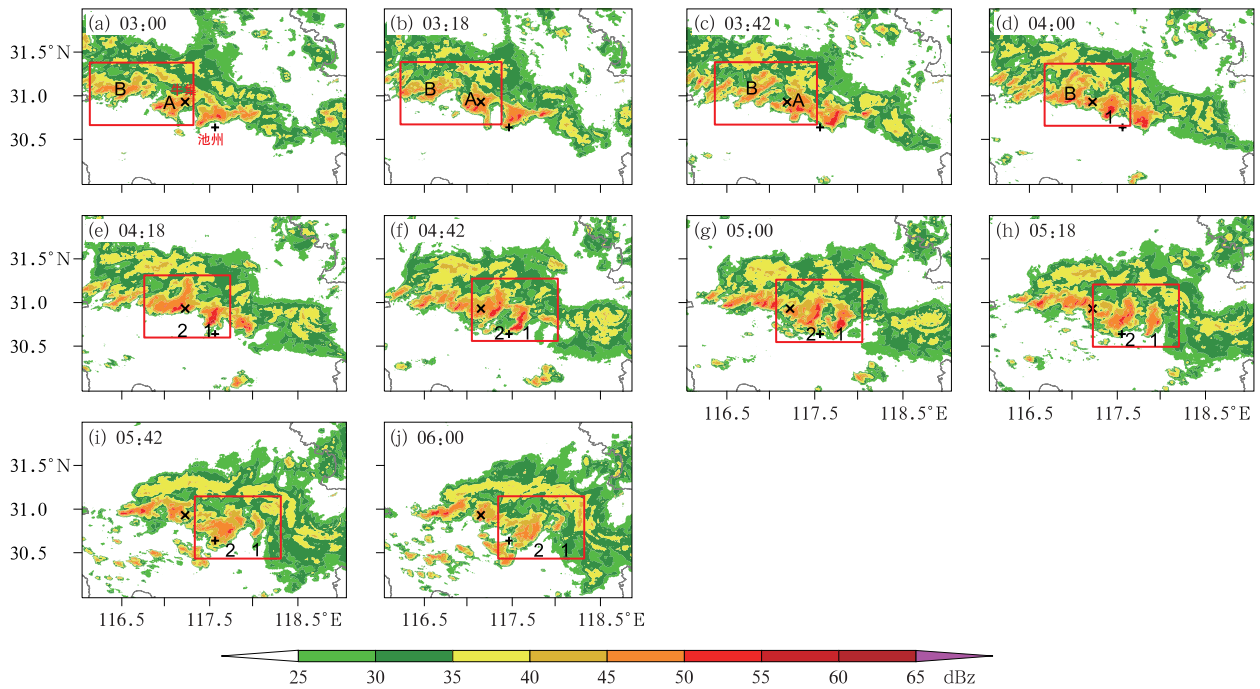


图 3 2023 年 5 月 27 日实况组合反射率

Fig. 3 Observed composite reflectivity on 27 May 2023

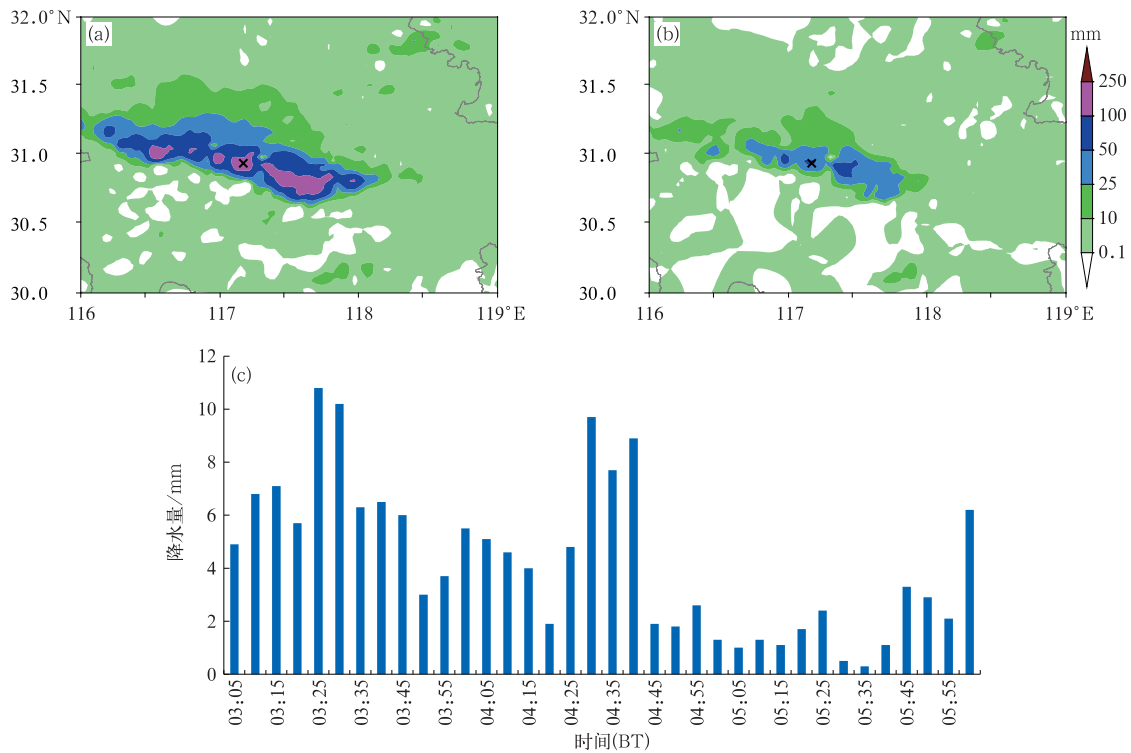


Fig. 4 (a, b) Observed accumulated precipitation from (a) 03:00 BT to 06:00 BT and

(b) 04:00 BT to 05:00 BT, (c) time series of 5 min precipitation at

Niujishi Station from 03:00 BT to 06:00 BT 27 May 2023

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 模拟结果与实况对比

##### 3.1.1 降水量和环境场检验

5月27日03:00—06:00, WRF-EnKF模拟的50 mm以上降水较分散,但雨带走向与实况较为一致,在118°E附近模拟出两个100 mm以上的降水中心,中心值为118 mm,雨带位置较实况略偏东、偏北,整体强度较实况偏弱。此外,模式对大别山区北部的降水模拟明显偏强(图5a)。从对流发展最强时段1 h降水量对比来看:27日04:00—05:00,

模拟雨带的走向和量级与实况较为接近,31.1°N附近江淮之间南部地区也模拟出了三个50 mm以上的降水中心,中心值(65 mm)与实况接近,但位置相对实况略偏东、偏北(图5b)。

对流发展最强阶段,实况850 hPa暖式切变位于淮北西部至江淮之间东部,大别山区到江南比湿普遍超过 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,西南风速最大为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图5c)。模拟的暖式切变位置东段较实况略偏北,超过 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的大湿区范围较实况略偏大,西南风速最大为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,较实况略偏强(图5d)。

##### 3.1.2 雷达回波特征检验

模拟的回波演变与实况基本一致。27日03:00,大别山区至江南东部模拟出西北—东南走向的带状

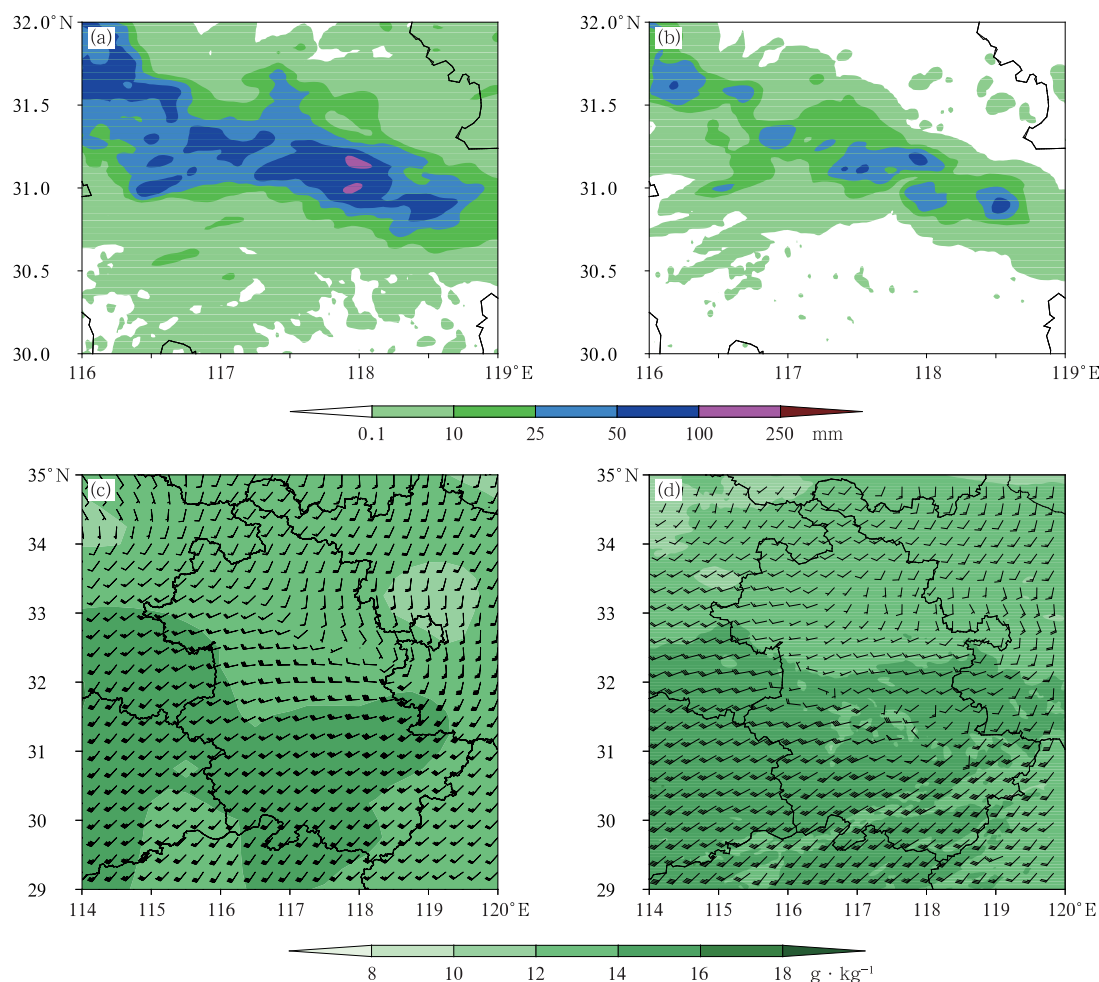


图5 2023年5月27日(a)03:00—06:00、(b)04:00—05:00 WRF-EnKF模拟的累计降水量, 05:00 (c)实况和(d)WRF-EnKF模拟的850 hPa比湿(填色)、风场(风羽)

Fig. 5 (a, b) Accumulated precipitation simulated by WRF-EnKF from (a) 03:00 BT to 06:00 BT and (b) 04:00 BT to 05:00 BT, and (c) observation and (d) simulation of specific humidity (colored) and wind (barb) at 850 hPa at 05:00 BT 27 May 2023

回波,带状回波中也是镶嵌着多个多单体风暴(图 6a);大别山区东北侧的两个多单体风暴 A、B 在东移的过程中组织化发展,其中 A 的前部于 04:00 发展成短对流 1(图 6d),后部与 B 的前部相结合并于 04:20 形成短对流 2(图 6e),两条短对流之间的距离较实况略偏小,且位置偏北 20 km 左右;05:00 前后,两条短对流发展到最强,中心强度超过 55 dBz,超过 50 dBz 的回波长度达到 50 km 左右,较实况略偏大(图 6g);此后,短对流迅速减弱,05:40 前后结构松散(图 6i),生命史较实况偏短 20 min 左右。

综上所述,模式对累计降水量、短时强降水及对流发生发展的环境场模拟效果较好,特别是两条短对流发展、成熟、消亡的全过程模拟与实况十分接近,因此可用精细化的模式数据针对短对流组织化发展的原因开展进一步分析研究。

### 3.2 低空急流对短对流组织化发展的作用

此次对流发展过程伴随低空急流的显著增强。5 月 27 日 03:00,850 hPa 低空急流整体位置偏南、

强度相对较弱,只在大别山区有  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的大值中心存在,此时大别山区东北侧有对流强烈发展(图 7a);04:00,低空急流东移发展,在短对流的南侧形成两个急流核(图 7c);05:00,低空急流发展到最强,中心超过  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,两条短对流也发展到最强(图 7e);06:00,随着急流进一步东移北推,原江淮之间南部的短对流迅速减弱(图略)。池州站风廓线雷达资料显示(图 7g):27 日 00:00 开始,边界层急流开始强烈发展,急流发展过程中出现两次明显的增强,第一次增强出现在 02:30—03:00,1.5 km 高度附近水平风速由  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增强到  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,对应池州上游有对流强烈发展(图 3a);第二次增强出现在 04:00—05:00,1.5 km 高度附近水平风速由  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增强到  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,此时短对流 1 强烈发展并经过池州上空(图 3d~3f)。由于短对流 2 在 05:00 之后才经过池州上空,此时低空急流开始减弱,短对流 2 也逐渐减弱(图 3g~3i)。此外,06:00 之后,池州已位于短对流 2 的后部,受对流影响,1.5 km 高度以下转为一致的偏北风,模拟结果与实况较为一致。

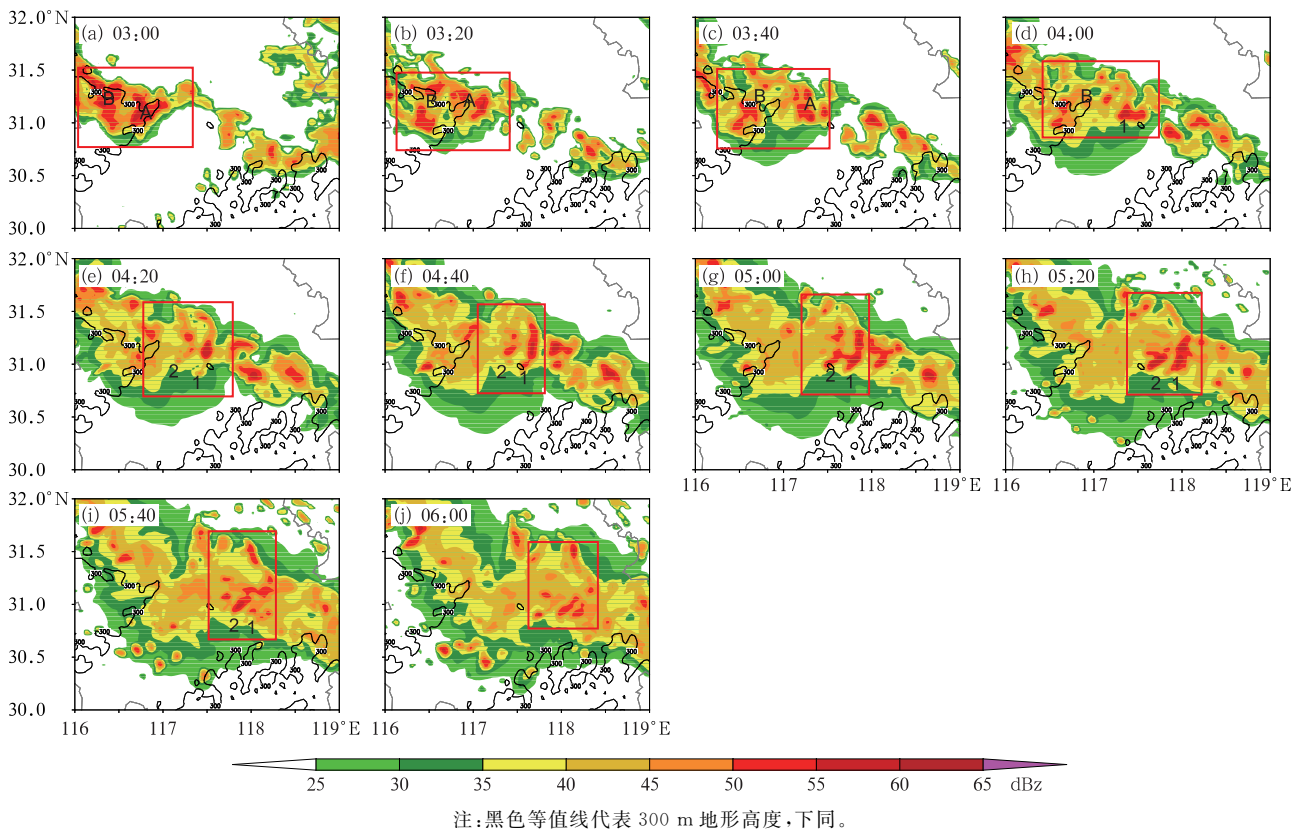
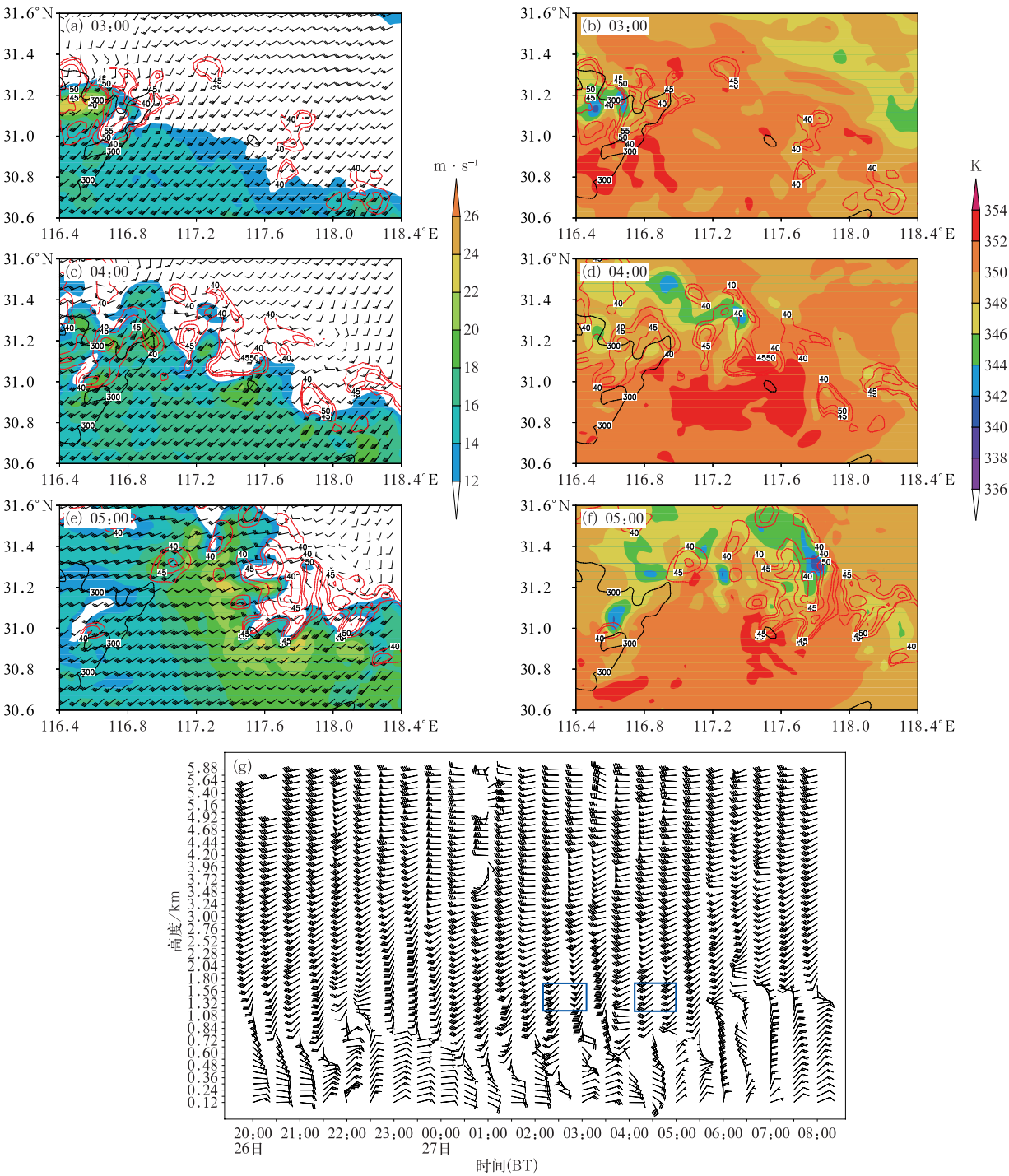


图 6 2023 年 5 月 27 日 WRF-EnKF 模拟的最大反射率

Fig. 6 Maximum reflectivity simulated by WRF-EnKF on 27 May 2023



注：蓝框指示风速增强时间。

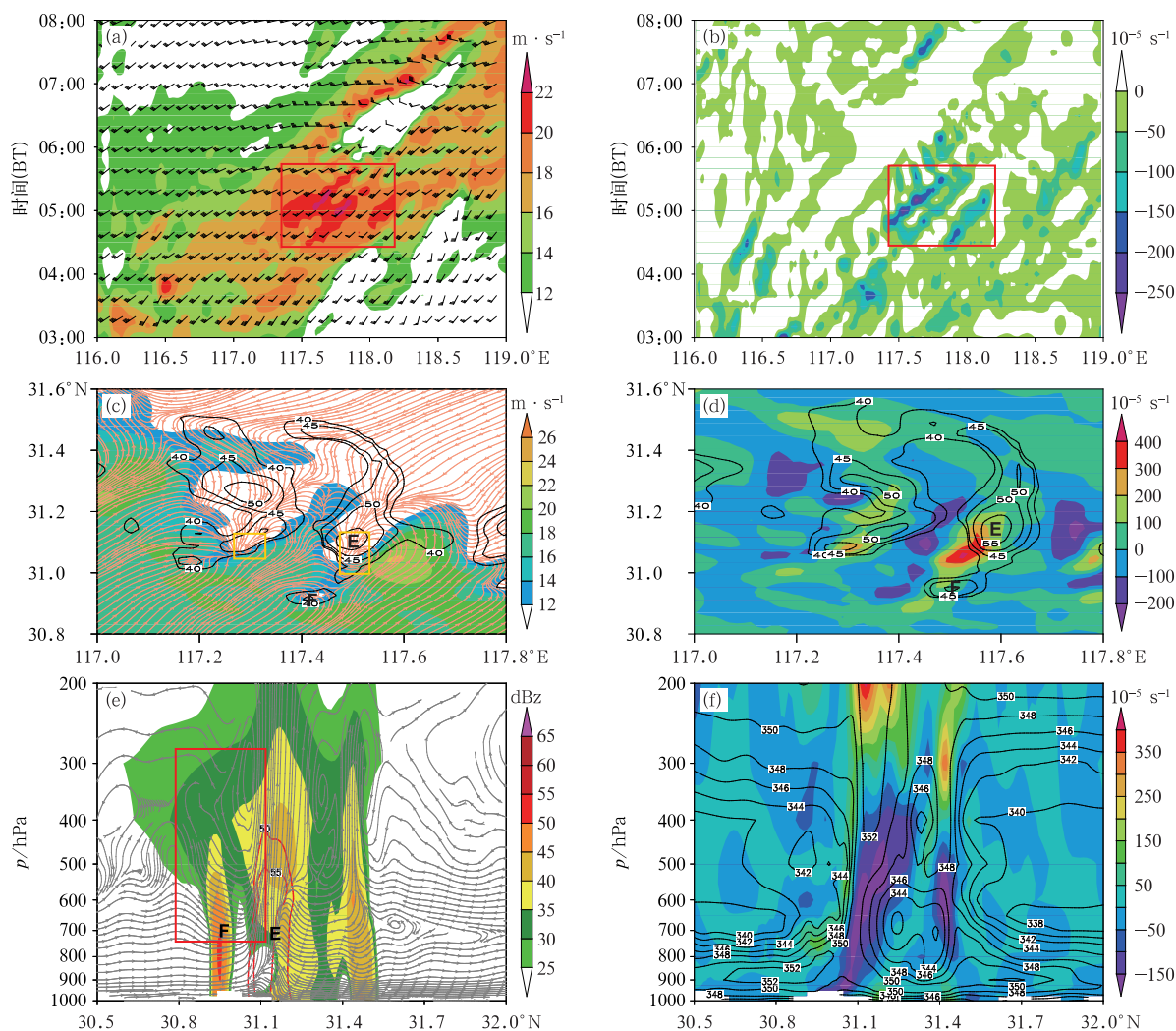
图 7 2023 年 5 月 (a~f) 27 日 WRF-EnKF 模拟的 850 hPa (a, c, e) 反射率 (红色等值线, 单位: dBz)、全风速 (填色)、风场 (风羽) 和 (b, d, f) 反射率 (红色等值线, 单位: dBz)、假相当位温 (填色), (g) 26 日 20:00 至 27 日 08:00 池州风廓线雷达反演的水平风场的垂直分布

Fig. 7 (a, c, e) Reflectivity (red contour, unit: dBz), wind speed (colored), wind (barb) and (b, d, f) reflectivity (red contour, unit: dBz),  $\theta_{se}$  (colored) at 850 hPa simulated by WRF-EnKF on 27 May, (g) vertical distribution of horizontal wind field inverted by Chizhou Wind Profile Radar from 20:00 BT 26 to 08:00 BT 27 May 2023

从对应时刻 850 hPa 假相当位温的分布可以看出:短对流发展前期,低空急流东移发展的过程伴随假相当位温大值中心的东移发展(图 7b,7d);27 日 05:00 短对流发展到最强时,低空急流达到最强,同时 850 hPa 急流核北侧假相当位温超过 352 K,低空急流顶端有大值能量中心存在(图 7f),为对流发

展提供能量条件。

为了进一步分析低空急流在对流组织化发展中的作用,在对流南部沿  $30.9^{\circ}\text{N}$  的 850 hPa 全风速的纬向演变(图 8a)可见,27 日 04:00 之前,超过  $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  急流中心的位置偏西,对应大别山区东北侧有对流发展,此后大值中心在东移过程中不断增强,05:00



注:图 c 中黄色方框区域代表  $\gamma$  中尺度气旋性涡旋;图 c~e 中 E、F 分别代表对流单体,下同。

图 8 2023 年 5 月 27 日 WRF-EnKF 模拟的(a,b)03:00—08:00 850 hPa(a)全风速(填色)、水平风场(风羽)沿  $30.9^{\circ}\text{N}$  和(b)散度沿  $31.0^{\circ}\text{N}$  的纬向演变,(c)04:20 反射率(黑色等值线,单位:dBz)、850 hPa 全风速(填色)和滤波后的流场(红色流线),(d)04:30 反射率(黑色等值线,单位:dBz)和 04:20 850 hPa 涡度(填色),(e)04:30 反射率(填色)、04:20 50 dBz 以上反射率(红色等值线,单位:dBz)和  $v-w$  沿  $117.5^{\circ}\text{E}$  的垂直剖面,(f)04:20 散度(填色)和假相当位温(黑色等值线,单位:K)沿  $117.5^{\circ}\text{E}$  的垂直剖面

Fig. 8 (a, b) Zonal evolution of (a) wind speed (colored) and wind field (barb) along  $30.9^{\circ}\text{N}$  and (b) divergence along  $31.0^{\circ}\text{N}$  at 850 hPa from 03:00 BT to 08:00 BT, (c) reflectivity (black contour, unit: dBz), wind speed (colored) and flow field after filtering (red streamline) at 850 hPa at 04:20 BT, (d) reflectivity (black contour, unit: dBz) at 04:30 BT and vorticity (colored) at 850 hPa at 04:20 BT, (e, f) vertical profile of (e) reflectivity (colored) at 04:30 BT and reflectivity  $\geq 50$  dBz (red contour, unit: dBz) and  $v-w$  at 04:20 BT, and (f) divergence (colored),  $\theta_{se}$  (black contour, unit: K) at 04:20 BT along  $117.5^{\circ}\text{E}$  simulated by WRF-EnKF on 27 May 2023

前后,在  $117.3^{\circ}\sim 118.1^{\circ}\text{E}$  形成三个平行排列的强风速中心,其中西侧两个强度超过  $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的大值中心与图 7e 中两条短对流南侧的急流核相对应,06:00 急流中心明显减弱,平行排列的结构也逐渐不明显。由急流核北侧  $31.0^{\circ}\text{N}$  850 hPa 散度的纬向演变可以看出:05:00 前后,在急流核北侧有三条平行的辐合带存在,并且三条辐合带的维持时间与三个低空急流核的维持时间较为一致,表明低空急流核顶端低层有较强的辐合存在(图 8b),辐合区有对流强烈发展。用区域平均的风场代表环境风场,将实际风与环境风的矢量差作为对流发展形成的风场,如图 8c 所示,04:20 两条短对流南侧都有对流强烈发展,对流前部  $31.0^{\circ}\sim 31.1^{\circ}\text{N}$  区域在  $117.3^{\circ}\text{E}$  和  $117.5^{\circ}\text{E}$  附近分别有一个  $\gamma$  中尺度涡旋存在,涡旋前部有低空急流核伴随,即对流的前部为低空急流核,而对流附近的环境风因对流遭到破坏,在水平方向上对流与低空急流核之间形成强烈的水平风速切变,进而导致  $\gamma$  中尺度气旋性涡旋的形成。由于短对流 1 南侧的对流和其前部的低空急流核发展更为强烈,对流与环境场的相互作用也就更强, $\gamma$  中尺度涡旋也更加明显。从 04:20 到 04:30,两条短对流均增强,04:20 两条短对流南端的  $\gamma$  中尺度涡旋对应其前部明显的正涡度区,04:30 两条短对流在此正涡度区中加强(图 8d),表明对流与环境场相互作用形成的  $\gamma$  中尺度涡旋对对流有加强作用。

在热力相互作用方面,以短对流 1 为例,沿  $117.5^{\circ}\text{E}$  作垂直剖面(图 8e,8f):27 日 04:20, $31.1^{\circ}\text{N}$  附近有强烈的上升气流并伴有明显的低层辐合、高层辐散,对应图 8c 中短对流 1 南部有超过 55 dBz 的对流单体 E 强烈发展,单体南部的环境大气中,即  $30.8^{\circ}\sim 31.0^{\circ}\text{N}$  区域 700~300 hPa 为一致的下沉气流,单体 E 南部 400 hPa 以上为偏北风,以下为偏南风,在对流南侧形成了一个反次级环流。同时,反次级环流的下沉支在  $31.0^{\circ}\text{N}$  以南 700~400 hPa 形成假相当位温小值区,并与低层假相当位温大值区之间形成对流不稳定层结。04:30,单体 E 南侧暖区中  $30.9^{\circ}\text{N}$  附近对流单体 F 东移,其经过对流不稳定区时强烈发展并与单体 E 合并增强,使短对流进一步向南发展,形成一种正反馈。

26 日 20:00 安庆站探空(图略)显示 6 km 高度大概在 500 hPa 附近,以 500 hPa 高度代替 6 km 计算 0~6 km 垂直风切变。从对流的组织化发展来

看,27 日 03:00,苏皖地区 500 hPa 高度以槽后西北气流为主,风速整体较弱(图 9a),对应的 0~6 km 垂直风切变也较弱(图 9c),此时对流的组织化程度不高;05:00,短对流的南部偏北风速超过  $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 9b),地面为偏东风,0~6 km 垂直风切变超过  $26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 9d),此时短对流发展到最强,组织化程度也达到最高。

### 3.3 雷暴高压在短对流形成过程中的作用

#### 3.3.1 雷暴高压与环境场相互作用

雷暴高压发展到一定程度,其下沉气流在近地面会形成出流,近地面出流与合适的环境风场之间又会形成强烈的辐合,进而触发新的对流。5 月 27 日 04:12,实况  $30.7^{\circ}\sim 31.0^{\circ}\text{N}$ 、 $117.5^{\circ}\text{E}$  附近短对流 1 正在强烈发展(图 10a 中红框处),对应临近时刻地面图上为辐散气流区,其中向南的一支偏北气流与环境的偏南风之间形成了一条地面辐合线(图 10e)。04:24,原地面辐合线附近有新的对流强烈发展与原短对流相接(图 10c)。模拟结果同样显示:04:10 左右,短对流 1 的线状结构已经形成,回波强度呈现南强北弱的特征,南侧的对流单体 E 中心强度超过 55 dBz(图 10b),04:20 单体 E 南部出现新生单体 F,导致短对流南北尺度增加(图 10d)。单体 E 对单体 F 有触发作用,从 04:20 前 1 h 变压可以看出:单体 E 附近出现明显的正变压,1 h 变压中心超过 2.4 hPa,表明单体 E 强烈发展过程中在近地面附近形成明显的雷暴出流(图 10f)。经  $117.4^{\circ}\text{E}$  (图 10b 中单体 E)作垂直剖面,04:10  $31.1^{\circ}\text{N}$  附近对流单体 E 强烈发展,超过 50 dBz 的回波发展到接近 400 hPa 的高度,其低层 700 hPa 以下为一致的下沉气流(图 10g),下沉气流在 900 hPa 附近向南北两个方向辐散,形成雷暴高压,其中向南的一支气流与环境的东南风在低层形成强烈的辐合(图 10h),造成 04:20 在对流单体 E 南侧触发对流单体 F,这是短对流线性发展的一个重要原因。

#### 3.3.2 雷暴高压之间相互作用

实况地面自动观测显示:27 日 03:00(图略), $30.5^{\circ}\sim 31.0^{\circ}\text{N}$  有多个不规则分布的辐合、辐散中心存在,此时对流的组织化程度不高;04:00—05:00,对流组织化加强(图 11a,11b), $30.5^{\circ}\sim 31.0^{\circ}\text{N}$  有多条近乎平行的正变压带出现并伴随多个平行排列的正负散度对,对流的组织化程度越高,

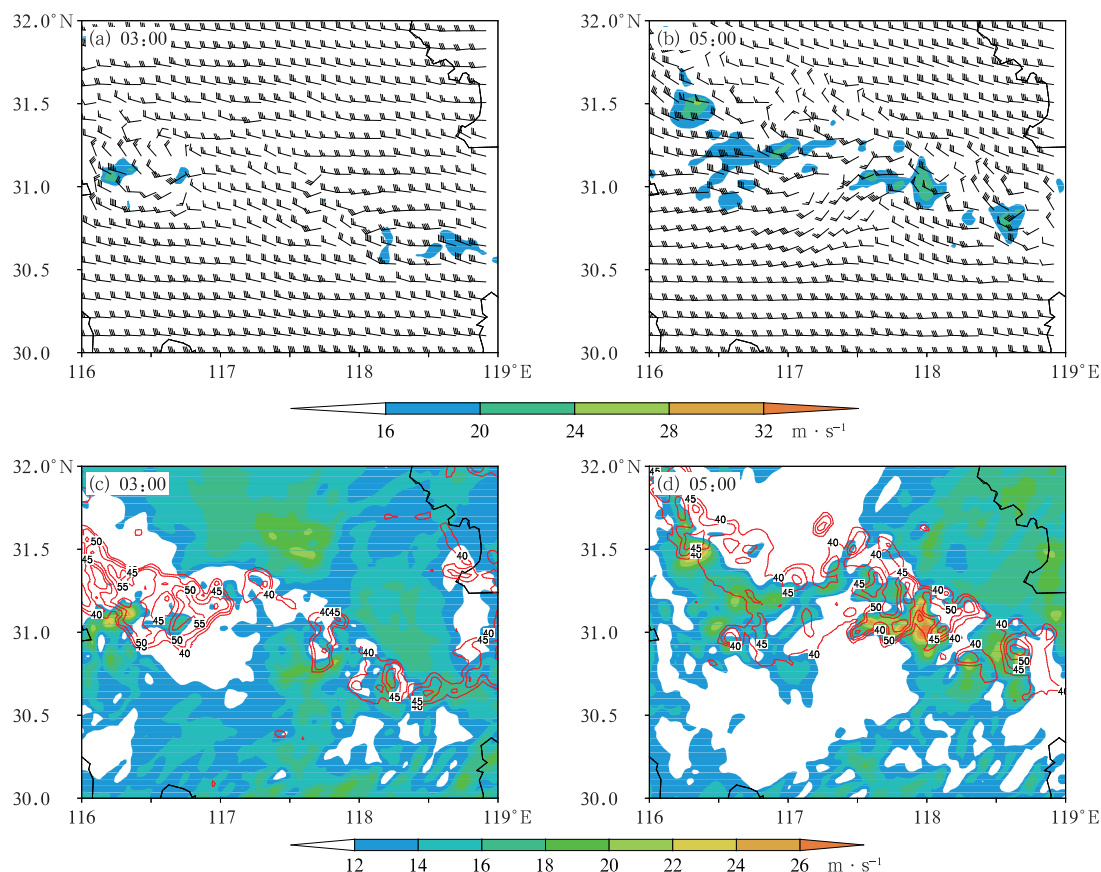


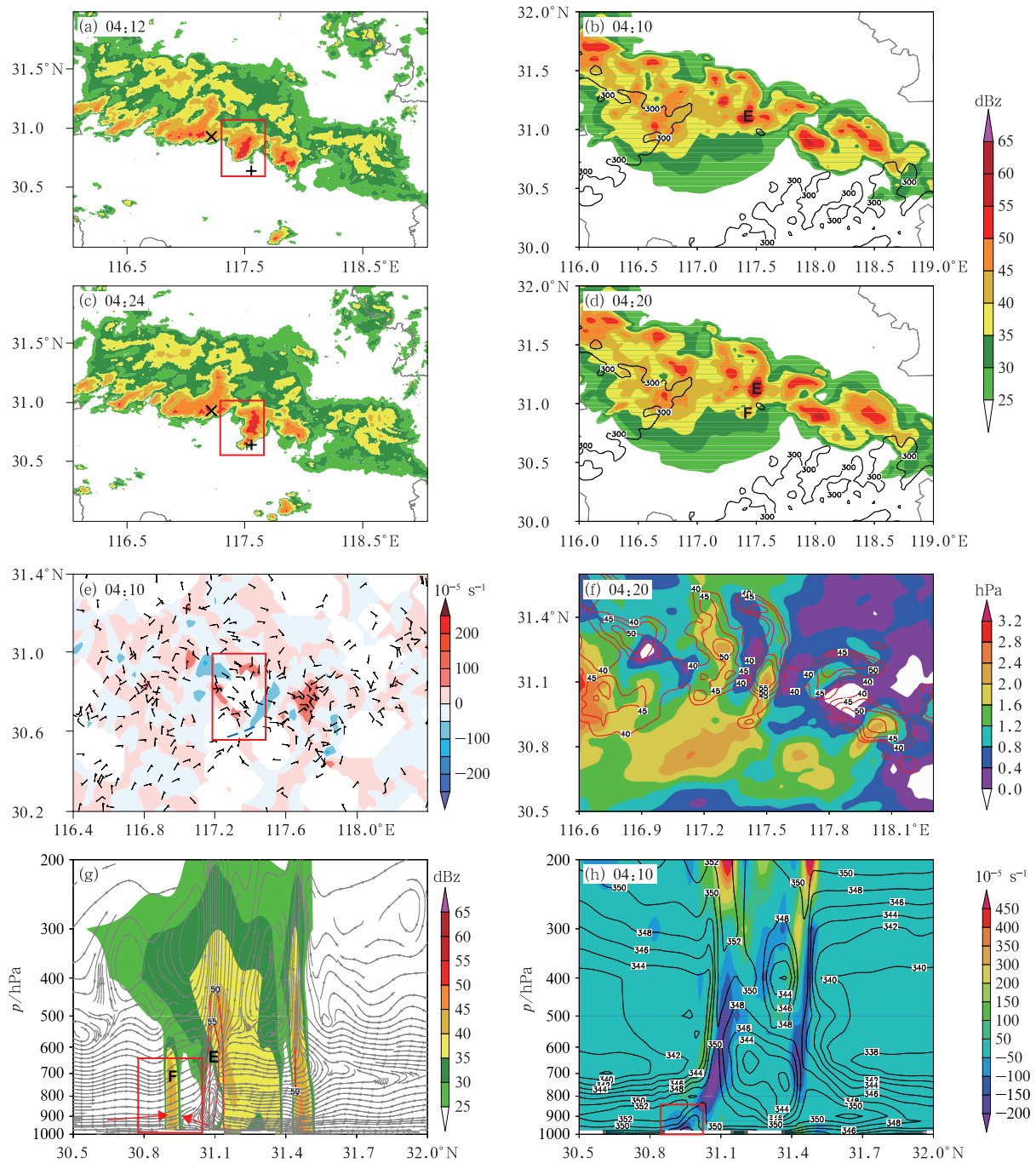
图 9 2023 年 5 月 27 日 WRF-EnKF 模拟的 (a,b) 500 hPa 全风速(填色)、风场(风羽)和 (c,d) 最大反射率(红色等值线, 单位: dBz)、0~6 km 垂直风切变(填色)

Fig. 9 (a, b) Wind speed (colored), wind (barb) at 500 hPa and (c, d) maximum reflectivity (red contour, unit: dBz), vertical wind shear (colored) from 0 to 6 km simulated by WRF-EnKF on 27 May 2023

正负散度中心发展越强, 强降水位于正变压带后部的辐散区, 且正变压带前部的辐合区有明显的地面辐合线存在; 06:00 (图略), 10 min 降水量大于 5 mm 的降水站点变得分散, 对流组织化程度减弱, 对应地面辐合辐散中心减弱、正负散度对消失, 地面辐合线也不明显。

地面平行排列的正负散度对如何形成? 对对流的发展又有何影响? 从 27 日 05:00 模拟的最大反射率和 10 min 变压场(图 11c)可以看出: 短对流 1、2 分别位于 117.7°E 和 117.5°E 附近, 此时短对流 1 的东侧 118°E 附近还有一个中心强度超过 55 dBz 的多单体风暴 C 存在, 沿着两条短对流和多单体 C 有线状排列的正变压带。04:50 地面风场和散度场(图 11d)显示, 相邻的雷暴高压之间存在相互作用, 并且这种相互作用在短对流的南侧更明显。短对流 1 和多单体 C 后部均有雷暴高压发展, 对应地面两个

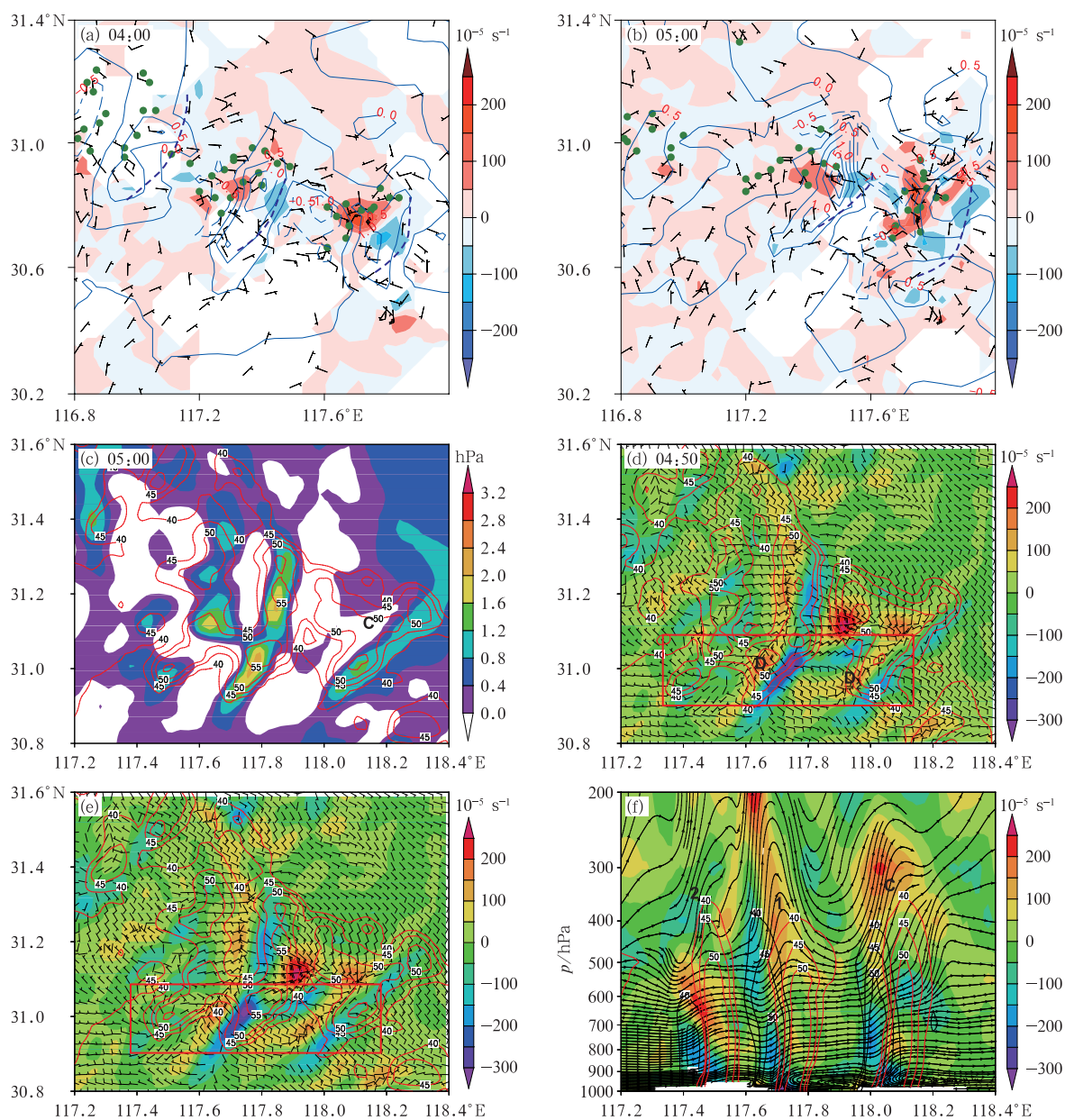
辐散区  $D_1$  和  $D_2$ , 且由于对流距离较近, 两个辐散区的相邻处形成了偏西风 and 偏东风的强辐合, 呈东北—西南走向, 正好位于短对流 1 的前部, 造成短对流东移过程中发展并线性化维持(图 11e)。沿 31.0°N 的垂直剖面(图 11f)可以看出, 04:50 117.4°E、117.7°E、118.0°E 上空分别有三条强度超过 40 dBz 的对流柱存在, 分别与短对流 2、短对流 1 和多单体 C 相对应, 对流柱西侧 900 hPa 高度以下均有辐散中心存在, 与地面雷暴出流相对应, 对流柱东侧为辐合区, 东西方向上相邻对流柱之间形成了两个垂直环流, 这不仅有利于多条平行短对流结构的维持, 而且其上升支还有利于西侧短对流在东移的过程中发展增强, 05:00, 三条对流柱无论是强度还是强回波的高度都明显增强。由于模拟的相邻短对流之间的距离较实况偏小, 所以相邻雷暴高压之间的相互作用也更加明显。



注:图 e 中蓝色断点线为地面辐合线,下同;图 g 中红色箭头指示气流方向。

图 10 2023 年 5 月 27 日(a,c,e)实况(a,c)组合反射率,(e)地面风场(风羽)和散度(填色), WRF-EnKF 模拟的(b,d)最大反射率(填色),(f)最大反射率(红色等值线,单位:dBz)和 1 h 变压(填色), (g)04:20 反射率(填色)、04:10 50 dBz 以上反射率(红色等值线,单位:dBz)和  $v-w$  沿  $117.4^{\circ}\text{E}$  的垂直剖面, (h)散度(填色)和假相当位温(黑色等值线,单位:K)沿  $117.4^{\circ}\text{E}$  的垂直剖面

Fig. 10 (a, c, e) Observed (a, c) composite reflectivity, (e) surface wind (barb) and divergence (colored), (b, d) maximum reflectivity (colored), and (f) maximum reflectivity (red contour, unit: dBz) and 1 h pressure change (colored), (g, h) vertical profile of (g) reflectivity (colored) at 04:20 BT, reflectivity  $\geq 50$  dBz (red contour, unit: dBz) and  $v-w$  at 04:10 BT, and (h) divergence (colored),  $\theta_{se}$  (black contour, unit: K) along  $117.4^{\circ}\text{E}$  simulated by WRF-EnKF on 27 May 2023



注:图 d 中  $D_1$ 、 $D_2$  代表地面辐散区,图 f 中 1、2、C 分别代表三条对流柱。

图 11 2023 年 5 月 27 日 (a, b) 实况地面风场 (风羽)、散度 (填色)、10 min 变压 (蓝色等值线, 单位: hPa) 和 10 min 降水量  $\geq 5$  mm 的站点 (圆点), WRF-EnKF 模拟的 (c) 最大反射率 (红色等值线, 单位: dBz) 和地面 10 min 变压 (填色), (d) 最大反射率 (红色等值线, 单位: dBz)、地面散度 (填色) 和风场 (风羽), (e) 05:00 最大反射率 (红色等值线, 单位: dBz)、04:50 地面散度 (填色) 和风场 (风羽), (f) 05:00 40 dBz 以上反射率 (红色等值线, 单位: dBz)、04:50 40 dBz 以上反射率 (黑色等值线, 单位: dBz)、散度 (填色) 和  $u-w$  沿  $31.0^\circ\text{N}$  的垂直剖面

Fig. 11 (a, b) Observed surface wind (barb), divergence (colored), 10 min pressure change (blue contour, unit: hPa) and the stations of 10 min precipitation  $\geq 5$  mm (dots), (c) maximum reflectivity (red contour, unit: dBz) and 10 min pressure change (colored), (d) maximum reflectivity (red contour, unit: dBz), surface divergence (colored) and wind (barb), (e) maximum reflectivity (red contour, unit: dBz) at 05:00 BT, surface divergence (colored) and wind (barb) at 04:50 BT and (f) vertical profile of reflectivity  $\geq 40$  dBz (red contour, unit: dBz) at 05:00 BT, reflectivity  $\geq 40$  dBz (black contour, unit: dBz), divergence (colored) and  $u-w$  at 04:50 BT along  $31.0^\circ\text{N}$  simulated by WRF-EnKF on 27 May 2023

## 4 结论与讨论

2023年5月27日凌晨,安徽南部发生了一次暖平流强迫类暖区强对流过程,主要造成局地突发短时强降水天气,3 h 累计降水量最大为 154.7 mm,其中降水最强时段 100 min 累计降水量达到 123.2 mm。观测资料表明,强降水增强时段主要由多条平行、南北走向的 $\beta$ 中尺度短对流组织、发展过程中形成的列车效应造成。为进一步研究短对流组织发展的机制,采用安徽省气象台业务运行的快速更新同化系统 WRF-EnKF 开展模拟研究。结果表明:低空急流为短对流发展提供了动力条件和能量条件,同时多条短对流的发展、维持是多尺度系统相互作用的结果,包括大尺度与中尺度系统的相互作用以及对流系统之间的相互作用。

大尺度环境场和中尺度对流系统相互作用对对流的影响体现在动力、热力和线状结构的组织化三个方面。动力作用方面:短对流南侧对流的强烈发展导致环境风场遭到破坏,并与其前部强烈发展的低空急流核之间形成强烈的水平风切变,进而导致 $\gamma$ 中尺度气旋性涡旋的形成,有利于对流在东移的过程中进一步发展增强。同时,低空急流顶端对流强烈发展形成较强的雷暴流出,其中向东南方向的流出与环境的东南风之间形成明显的地面辐合线,沿地面辐合线在原对流的南侧触发新的对流,使得短对流向南线性发展。热力作用方面:低层辐合增强高层辐散,在对流南侧 700~300 hPa 形成了一个反次级环流,反次级环流中的下沉气流在中层形成假相当位温的小值区,叠加在低层假相当位温大值区之上,形成强烈的对流不稳定层结,为对流的进一步向南发展提供不稳定条件。对流组织化方面:对流强烈发展造成中层偏北气流的增强,使得 0~6 km 垂直风切变显著增强,进一步促进对流的组织化发展。

中尺度对流系统之间相互作用表现为雷暴高压的相互作用。多条平行短对流的组织化发展伴随多个平行排列的线状雷暴高压带,原对流附近地面为雷暴流出形成的辐散区,相邻雷暴流出形成更强的辐合区,纬向有多个平行排列的正负散度对,垂直方向上近地面附近相邻对流之间形成了多个平行的垂直环流,这不仅有利于多条短对流结构的维持,其上升支还有利于下游短对流在东移的过程中进一步

发展增强。

此次暖区对流过程还伴随超低空急流的强烈发展,并且超低空急流在大别山区和皖南山区之间的河谷地带发展更强。超低空急流的强烈发展是否跟地形有关,是否对安徽沿江地区短对流的组织化发展有影响还有待进一步研究。此外,本文仅针对一个低空急流影响下暖区对流组织化发展的个例进行分析,今后有必要对多个类似的暖区对流过程展开研究,总结共性特征,建立安徽西南低空急流型暖区对流发生发展的概念模型。

## 参考文献

- 巢纪平,1980.非均匀层结大气中的重力惯性波及其在暴雨预报中的初步应用[J].大气科学,4(3):230-235. Chao J P,1980. The gravitational wave in non-uniform stratification atmosphere and its preliminary application for the prediction of heavy rainfall [J]. Sci Atmos Sin,4(3):230-235(in Chinese).
- 陈玥,湛芸,陈涛,等,2016.长江中下游地区暖区暴雨特征分析[J].气象,42(6):724-731. Chen Y, Chen Y, Chen T, et al, 2016. Characteristics analysis of warm-sector rainstorms over the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. Meteor Mon,42(6):724-731(in Chinese).
- 湛芸,陈涛,汪玲瑶,等,2019.中国暖区暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,38(5):483-493. Chen Y, Chen T, Wang L Y, et al, 2019. A review of the warm-sector rainstorms in China[J]. Torr Rain Dis,38(5):483-493(in Chinese).
- 傅佩玲,胡东明,张羽,等,2018.2017年5月7日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析[J].气象,44(4):500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou Region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon,44(4):500-510(in Chinese).
- 付炜,唐明晖,叶成志,2020.强西南急流背景下湘桂边界两次预报失败的暖区暴雨个例分析[J].气象,46(8):1001-1014. Fu W, Tang M H, Ye C Z, 2020. Analysis of two forecast failure cases of warm-sector rainstorms on Hunan-Guangxi border area in severe southwest jet[J]. Meteor Mon,46(8):1001-1014(in Chinese).
- 何立富,陈涛,孔期,2016.华南暖区暴雨研究进展[J].应用气象学报,27(5):559-569. He L F, Chen T, Kong Q, 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci,27(5):559-569(in Chinese).
- 《华南前汛期暴雨》编写组,1986.华南前汛期暴雨[M].广州:广东科技出版社,94-95. Compiling Group of Rainstorm in South China's Preflood Season, 1986. Rainstorm During Pre-Rainy Season in South China[M]. Guangzhou:Guangdong Science and Technology Press,94-95(in Chinese).
- 黄楚惠,李国平,牛金龙,等,2022.2020年8月10日四川芦山夜发特大暴雨的动热力结构及地形影响[J].大气科学,46(4):989-1001. Huang C H, Li G P, Niu J L, et al, 2022. Dynamic and

- thermal structure and topographic impact of the night torrential rainfall in Lushan, Sichuan on August 10, 2020[J]. *Chin J Atmos Sci*, 46(4):989-1001(in Chinese).
- 黄美金, 俞小鼎, 林文, 等, 2022. 福建沿海冷锋前暖区和季风槽暴雨环境背景与对流系统特征[J]. *气象*, 48(5):605-617. Huang M J, Yu X D, Lin W, et al, 2022. Environmental background and convective system characteristics of the prefrontal and the monsoon trough torrential rains in Fujian coastal area[J]. *Meteor Mon*, 48(5):605-617(in Chinese).
- 蒲义良, 卢翔诗, 胡胜, 等, 2023. 华南沿海一次暖区特大暴雨的对流特征和发展机制分析[J]. *气象*, 49(2):201-212. Pu Y L, Lu X S, Hu S, et al, 2023. Convective characteristics and development mechanisms of an extreme warm-sector rainfall in the coastal area of South China[J]. *Meteor Mon*, 49(2):201-212(in Chinese).
- 沈晓玲, 冯博, 李锋, 等, 2024. 一次弱天气背景下浙江局地暖区暴雨成因分析[J]. *气象*, 50(2):170-180. Shen X L, Feng B, Li F, et al, 2024. Cause analysis of rainstorm in local warm sector under a weak weather background in Zhejiang Province[J]. *Meteor Mon*, 50(2):170-180(in Chinese).
- 孙密娜, 王秀明, 胡玲, 等, 2018. 华北一次暖区暴雨雷暴触发及传播机制研究[J]. *气象*, 44(10):1255-1266. Sun M N, Wang X M, Hu L, et al, 2018. Study on initiation and propagation mechanism of a warm-sector torrential rain in North China[J]. *Meteor Mon*, 44(10):1255-1266(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 Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. *Meteor Mon*, 44(4):469-484(in Chinese).
- 田莹, 叶成志, 姚蓉, 2022. 2008—2018年江南暖区暴雨特征[J]. *大气科学学报*, 45(1):51-64. Tian Y, Ye C Z, Yao R, 2022. Statistical analysis of the characteristics of warm-sector rainstorms in the southern part of the Yangtze River during the period of 2008—2018[J]. *Trans Atmos Sci*, 45(1):51-64(in Chinese).
- 汪玲瑶, 湛芸, 肖天贵, 等, 2018. 夏季江南地区暖区暴雨的统计分析[J]. *气象*, 44(6):771-780. Wang L Y, Chen Y, Xiao T G, et al, 2018. Statistical analysis of warm-sector rainstorm characteristics over the southern of middle and lower reaches of the Yangtze River in summer[J]. *Meteor Mon*, 44(6):771-780(in Chinese).
- 汪永铭, 薛纪善, 1985. 华南前汛期低空急流的诊断分析[J]. *热带气象*, 1(2):121-128. Wang Y M, Xue J S, 1985. Diagnostic analysis of low level jet over South China during earlier rainy season[J]. *J Trop Meteor*, 1(2):121-128(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).
- 徐焱, 闫敬华, 王谦谦, 等, 2013. 华南暖区暴雨的一种低层重力波触发机制[J]. *高原气象*, 32(4):1050-1061. Xu Y, Yan J H, Wang Q Q, et al, 2013. A low-level gravity wave triggering mechanism for rainstorm of warm zone in South China[J]. *Plateau Meteor*, 32(4):1050-1061(in Chinese).
- 许爱华, 张瑛, 刘献耀, 2001. 江西“暖区”强对流天气的热力和动力条件诊断分析[J]. *气象*, 27(5):30-34. Xu A H, Zhang Y, Liu X Y, 2001. Diagnosis of thermal and dynamic conditions of warm area severe convection in Jiangxi Province[J]. *Meteor Mon*, 27(5):30-34(in Chinese).
- 张兰, 陈炳洪, 张东, 等, 2023. 华南前汛期一次锋前暖区暴雨成因及中尺度对流系统分析[J]. *热带气象学报*, 39(5):697-710. Zhang L, Chen B H, Zhang D, et al, 2023. Analysis of causation and the meso-scale convective systems in a strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China[J]. *J Trop Meteor*, 39(5):697-710(in Chinese).
- 张萍萍, 董良鹏, 钟敏, 等, 2019. 湖北省西南气流型暖区暴雨相关特征分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 13(6):13-19. Zhang P P, Dong L P, Zhong M, et al, 2019. Characteristics of the southwest airflow warm-sector rainstorm in Hubei Province[J]. *Desert Oasis Meteor*, 13(6):13-19(in Chinese).
- 张芹, 赵海军, 朱翠红, 2023. 山东暖区暴雨对流特性和环境参量的统计分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 17(3):71-77. Zhang Q, Zhao H J, Zhu C H, 2023. Statistical analysis of the convection characteristics and environment parameters of warm-sector heavy rain in Shandong[J]. *Desert Oasis Meteor*, 17(3):71-77(in Chinese).
- 赵平, 孙健, 周秀骥, 2003. 1998年春夏南海低空急流形成机制研究[J]. *科学通报*, 48(6):623-627. Zhao P, Sun J, Zhou X J, 2003. Mechanism of formation of low level jets in the South China Sea during spring and summer of 1998[J]. *Chin Sci Bull*, 48(6):623-627(in Chinese).
- 郑淋淋, 邱学兴, 钱磊, 2019. 同化雷达反射率资料对一次飑线过程的模拟研究[J]. *气象*, 45(1):73-87. Zheng L L, Qiu X X, Qian L, 2019. Simulation study of a squall line case based on assimilation radar reflectivity data[J]. *Meteor Mon*, 45(1):73-87(in Chinese).
- 郑淋淋, 张申葵, 邱学兴, 等, 2023. 大别山对一次冷涡对流的作用分析[J]. *大气科学*, 47(6):2001-2019. Zheng L L, Zhang S Y, Qiu X X, et al, 2023. Impacts of the Dabie Mountains on a mesoscale convective system that occurred in the background of the northeast cold vortex[J]. *Chin J Atmos Sci*, 47(6):2001-2019(in Chinese).
- Bluestein H B, Marx G T, Jain M H, 1987. Formation of mesoscale lines of precipitation; nonsevere squall lines in Oklahoma during the spring[J]. *Mon Wea Rev*, 115(11):2719-2727.
- Chang W Y, Lee W C, Liou Y C, 2015. The kinematic and microphysical characteristics and associated precipitation efficiency of subtropical convection during SoWMEX/TiMREX[J]. *Mon Wea Rev*, 143(1):317-340.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. *Wea Forecasting*, 11(4):560-581.

- Du Y, Chen G X, 2018. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part I: ensemble-based analysis[J]. *Mon Wea Rev*, 146(11): 3827-3844.
- Geerts B, Parsons D, Ziegler C L, et al, 2017. The 2015 plains elevated convection at night field project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(4): 767-786.
- Liu X, Luo Y L, Guan Z Y, et al, 2018. An extreme rainfall event in coastal South China during SCMREX - 2014: formation and roles of rainband and echo trainings[J]. *J Geophys Res Atmos*, 123(17): 9256-9278.
- Luo Y L, Gong Y, Zhang D L, 2014. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Meiyu front in East China[J]. *Mon Wea Rev*, 142(1): 203-221.
- Mao J H, Ping F, Li X F, et al, 2018. Differences in precipitation efficiency and their probable mechanisms between the warm sector and cold front stages of a heavy rainfall event over Beijing[J]. *Atmos Sci Lett*, 19(4): e802.
- Moore J T, Glass F H, Graves C E, et al, 2003. The environment of warm-season elevated thunderstorms associated with heavy rainfall over the central United States[J]. *Wea Forecasting*, 18(5): 861-878.
- Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 128(10): 3413-3436.
- 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.
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al, 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part ii: implementation of a new snow parameterization[J]. *Mon Wea Rev*, 136(12): 5095-5115.
- Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al, 2013. Organizational modes of mesoscale convective systems over Central East China[J]. *Wea Forecasting*, 28(5): 1081-1098.

(本文责编:王婷波)