

一次暖区短对流组织化发展的成因分析

罗静¹ 郑淋淋^{1,2} 姚晨¹ 邵立瑛¹ 邱学兴¹ 高磊³

1 安徽省气象台, 合肥 230031

2 大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 合肥 230031

3 安徽省肥西县气象局, 合肥 231200

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中 β 尺度短对流形成的列车效应造成 2 h 累计 100 mm 以上突发性局地强降水。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中 γ 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, 这有利于多条短对流结构的维持和发展。

关键词: 暖区, 短对流, 低空急流, 雷暴出流

中图分类号: P458

10.7519/j.issn.1000-0526.2025.012402

Causes of the Organizational Development for Short Convection in a Warm Sector Convective Event

LUO Jing¹ ZHENG Linlin^{1,2} YAO Chen¹ SHAO Liying¹ QIU Xuexing¹ GAO Lei³

1 Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031, China

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

3 Feixi Meteorological Bureau in Anhui Province, Hefei 231200, China

Abstract: A warm sector severe convective event dominated by short-term heavy precipitation occurred in southern Anhui early in the morning of 27 May, 2023. The train effect formed by a number of north-south trend parallel meso- β scale short convections caused more than 100 mm sudden local heavy precipitation in 2 hours. The numerical simulation of this event was carried out by using WRF-EnKF, a rapid update assimilation system for service operation in Anhui

安徽省自然科学基金江淮气象联合基金(2208085UQ11)、安徽省自然科学基金江淮气象联合基金(2408055UQ002)和中国气象局复盘总结专项(FPZJ2024-057)共同资助

2024-09-12 收稿 2025-01-24 收修订稿

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

33 Meteorological Observatory. The results show that the interaction between large-scale
34 environmental field and mesoscale convective system results in the increase of horizontal scale
35 and intensification of several short convections. In terms of dynamic action, after the occurrence
36 of convection, a meso- γ scale cyclonic vortex formed between the short convection and the low
37 level jet core, causing the development of eastward convection. Meanwhile, the surface
38 convergence line formed between the outflow of thunderstorm and the environmental wind
39 triggers new convection in the south side of the short convection, making continuously
40 development linearly to the south for the short convection. In terms of environmental conditions,
41 multiple parallel low level jet cores provide favorable dynamic and thermal conditions for the
42 development of convection. Inverse secondary circulation in the middle and upper levels occurred
43 by the strong development of convection leads to the significant enhancement of atmospheric
44 instability on the south side and the development of convection leads to the strengthen of deep
45 vertical wind shear. The interaction between the convections causes the maintenance of the short
46 convection structure. Parallel convection forms parallel thunderstorm high pressure, and the
47 interaction between the outflow of adjacent thunderstorms leads to the formation of multiple
48 parallel positive and negative divergence pairs, thus bringing about multiple parallel zonal-vertical
49 circulations between adjacent convections in the vertical direction. This is conducive to the
50 maintenance and development of the structure of multiple short convections.

51 **Key words:** warm sector, short convection, low level jet, outflow of thunderstorm

52

53 引言

54 暖区的概念最早由《华南前汛期暴雨》编写组（1986）针对华南前汛期的强降水提出，
55 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
56 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
57 差等特点，一直是气象工作者关注的重点。近年来，除华南地区，我国其他地区也时常有暖
58 区对流发生发展（孙密娜等，2018；张芹等，2023；沈晓玲等，2024）。许爱华等（2001）
59 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
60 量达到 $8-11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 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
61 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，
62 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；
63 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
64 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（张萍萍等，2019；付
65 炜等，2020；黄美金等，2022；张兰等，2023）。

66 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、
67 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（谌芸等，2019）。
68 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
69 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
70 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

71 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
72 平等, 1980; 赵平等, 2003; 徐焱等, 2013)。成熟的强降水风暴出流与边界层暖湿气流形
73 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
74 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
75 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
76 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;
77 Parker and Johnson, 2000; Moore et al, 2003; Zheng et al, 2013; Luo et al, 2014)。

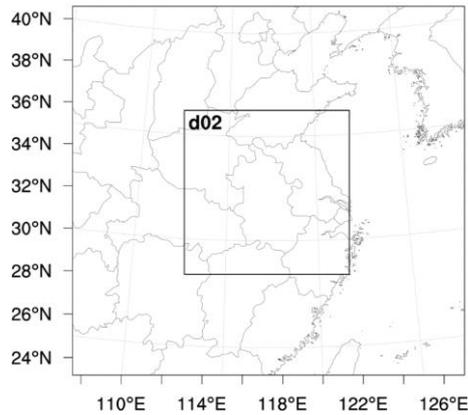
78 安徽南部以山区为主, 西面、南面分别有大别山区和皖南山区, 水网分布也比较密集,
79 是暖区对流的频发区(陈玥等, 2016)。2023年5月27日凌晨, 伴随西南低空急流和地面
80 低压倒槽的强烈发展, 安徽大别山区南部到沿江中部地区发生了一次以短时强降水为主的暖
81 区强对流天气, 多条平行排列的短对流形成列车效应造成短历时局地强降水, 3 h 累计降水
82 量最大为 154.7 mm, 其中 1 h 40 min 累计降水量达到 123.2 mm。本文主要围绕低空急流、
83 雷暴出流对多条短对流组织化发展的作用开展研究。

84

85 1 资料与方法

86 采用地面加密观测分析强对流天气特征(实况累计降水用逐小时资料, 单站降水时序图
87 用逐 5 min 资料)和地面环境条件(风场、辐合线、雷暴出流等用逐 5 min 资料)。采用欧
88 洲中期天气预报中心逐小时再分析资料(ERA5, 水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)分析强对流
89 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、
90 铜陵、宣城、黄山)资料通过中国气象局 SWAN(Severe Weather Automatic Nowcasting System)
91 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
92 强对流过程的雷达演变特征。

93 采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
94 天气过程进行数值模拟。数值模式为 WRFV4.3.3 版本, 采用 2 层嵌套, 分辨率分别为 9 km
95 和 3 km, 格点数分别为 229×217 和 289×289 , 垂直方向 50 层, 模式顶高 50 hPa(图 1)。
96 模式的微物理过程采用 Thompson et al(2008)参数化方案, 该方案考虑了水汽、云水、
97 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
98 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
99 (PSU-EnKF), 系统设置与郑淋淋等(2019; 2023)的设置一致。此次过程选用欧洲中心 2023
100 年 5 月 26 日 20 时(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、
101 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
102 进行积分, 同化时间窗为 5 月 26 日 20 时至 27 日 02 时, 预报时段为 27 日 03—19 时。为细
103 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。



注：模式资料选用第二层嵌套 d02 数据

图 1 模式区域设置

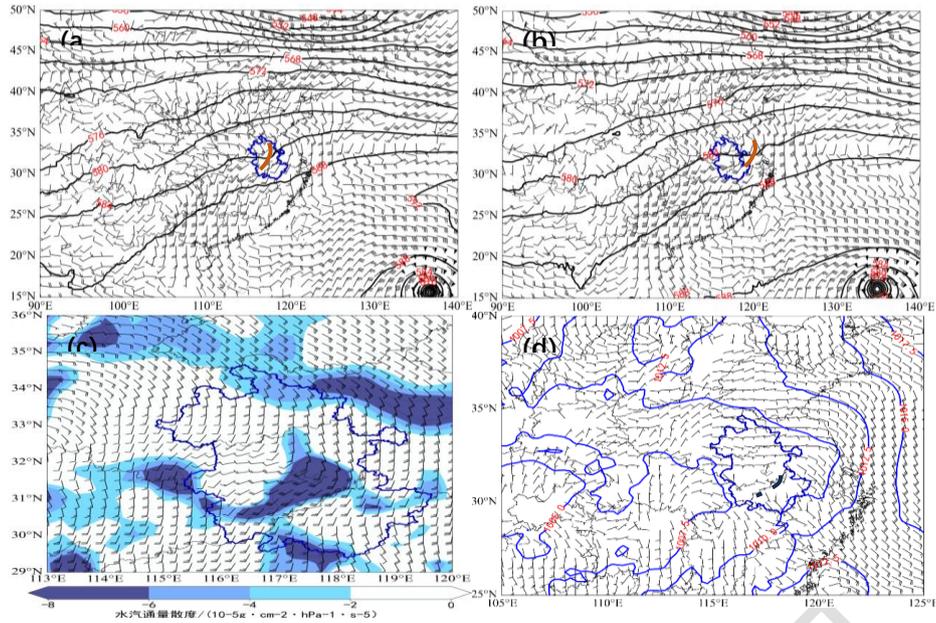
Fig.1 Domain setting of the WRF model

104
105
106
107
108

2 天气实况

2.1 大气环流背景

111 此次过程副热带高压呈东西带状分布，中心强度超过 592 dagpm，其南侧有台风玛娃活
112 动。26 日 20 时，安徽南部位于 584 与 588 dagpm 之间的平直西风气流中，有短波槽活动，
113 850 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 时，随着 850
114 hPa 低空急流的东移北推，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
115 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）；
116 此时，925 hPa 安徽西南部也有大于 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 超低空急流建立，沿急流轴方向有水汽通量
117 的强烈辐合区，超低空急流将暖湿气流源源不断的向沿江中部地区输送（图 2c）。此外，安
118 徽处在地面低压倒槽的前部，以偏东风为主，对流发展的过程中安徽南部始终有偏北风和偏
119 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
120 程是一次以低层暖强迫为主导的强对流天气过程。



注：图 a、b 中棕色曲线为高空短波槽；图 d 中黑色断点线为地面辐合线，下同

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

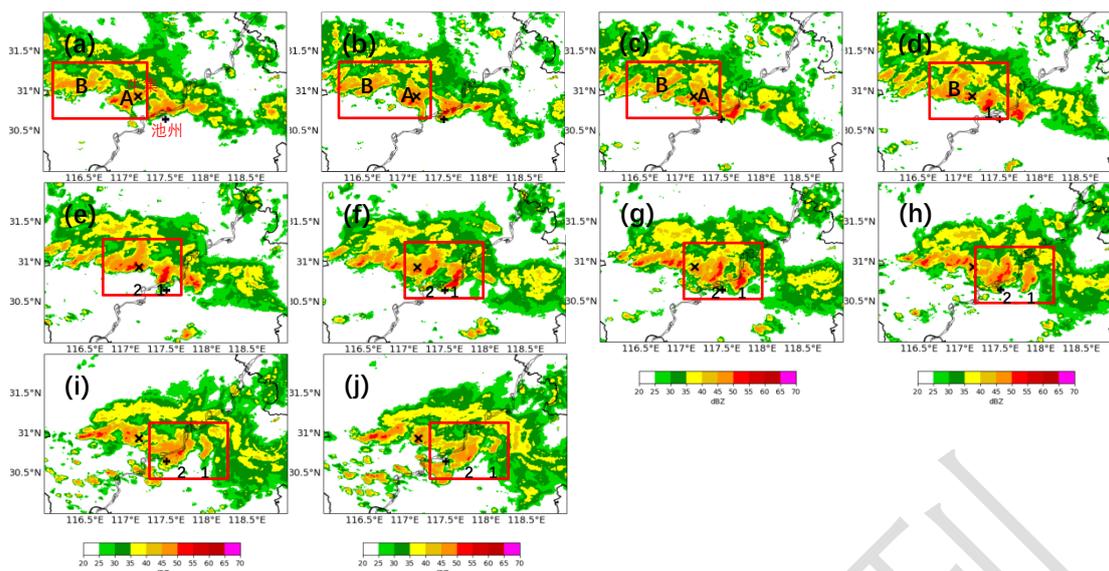
Fig.2 Geopotential height(black contour) at 500 hPa and wind(barb) at 850 hPa at 20:00 on 26 May, 2023(a) and 02:00 on 27 May(b).

Water vapor flux divergence(colored) and wind(barb) at 925 hPa at 02:00 on 27 May(c).

Sea level pressure(blue contour) and wind(barb) of 10 meters at 04:00 on 27 May(d)

2.2 实况对流发展演变

从实况回波的发展演变来看：27 日 03 时，大别山区到江南北部有一条西北-东南走向的带状对流带，对流带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 在东移的过程中逐渐分裂成两部分，前部 04 时前后在沿江中部地区发展成短对流 1 (图 3d)，后部与多单体风暴 B 相结合并于 04:18 在其头部发展成短对流 2 (图 3e)，两条短对流分别于 04:42 (图 3f) 和 05 时 (图 3g) 前后发展到最强，中心强度超过 50 dBz，长度在 30 km 左右；此后，短对流在东移的过程中不断减弱，06 时前后线状结构逐渐消失 (图 3j)，短对流 1 大约维持 2 h，短对流 2 大约维持 1 h 40 min。



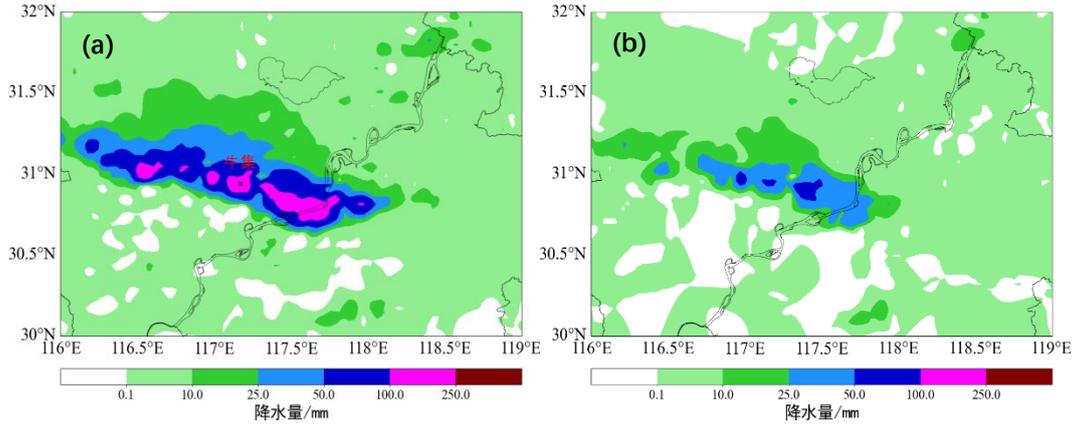
注：红色方框为对流关键区，下同；黑色“x”代表牛集站位置，下同；黑色“+”代表池州站位置

图3 2023年5月27日(a) 03:00、(b) 03:18、(c) 03:42、(d) 04:00、(e) 04:18、(f) 04:42、(g) 05:00、(h) 05:18、(i) 05:42、(j) 06:00 实况组合反射率(填色)

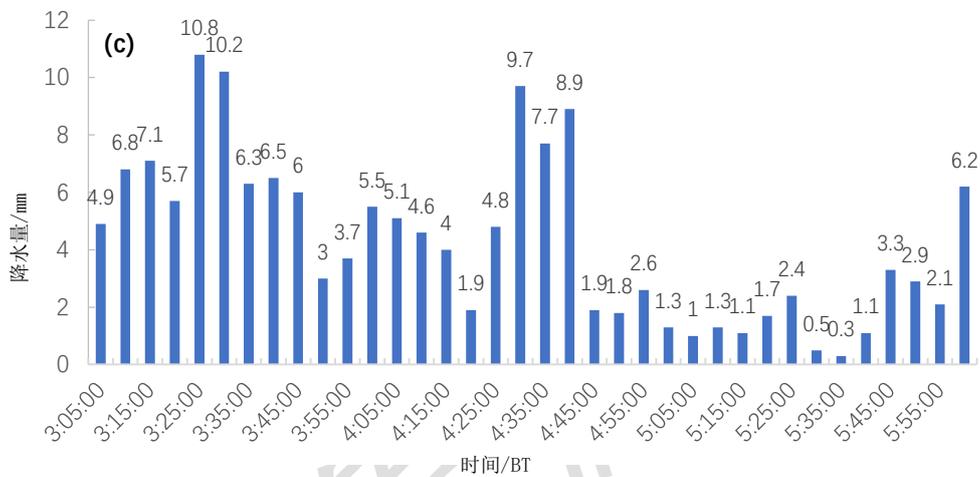
Fig.3 Observational composite reflectivity(colored) at 03:00(a), 03:18(b), 03:42(c), 04:00(d), 04:18(e), 04:42(f), 05:00(g), 05:18(h), 05:42(i), 06:00(j) on 27 May, 2023

2.3 实况降水

27日03—06时，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100mm以上的降水中心，最大降水中心为枞阳县的牛集站154.7mm(图4a)。27日04—05时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64.5mm(图4b)。此外，从03—06时牛集站逐5min降水的时间演变(图4c)可以看出：5min超过5mm的降水集中在27日03时—04时40分，累计降水量达到123.2mm。5min降水呈双峰结构，第一次峰值出现在03:30前后，达到10.8mm，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)；第二次峰值现在04:30前后，达到9.7mm，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。



158



159

160 图4 2023年5月27日(a) 03—06时、(b) 04—05时实况累计降水量(填色), (c) 03—06时牛集站5 min
161 降水时序图

162 Fig.4 Observational cumulative precipitation (colored) from 03:00 to 06:00(a) and 04:00 to 05:00(b) on 27 May,
163 2023.

164 Time series of 5-minute precipitation at Niuji station from 03:00 to 06:00 on 27 May, 2023(c)

165

166 3 模拟结果分析

167

167 3.1 模拟结果与实况对比

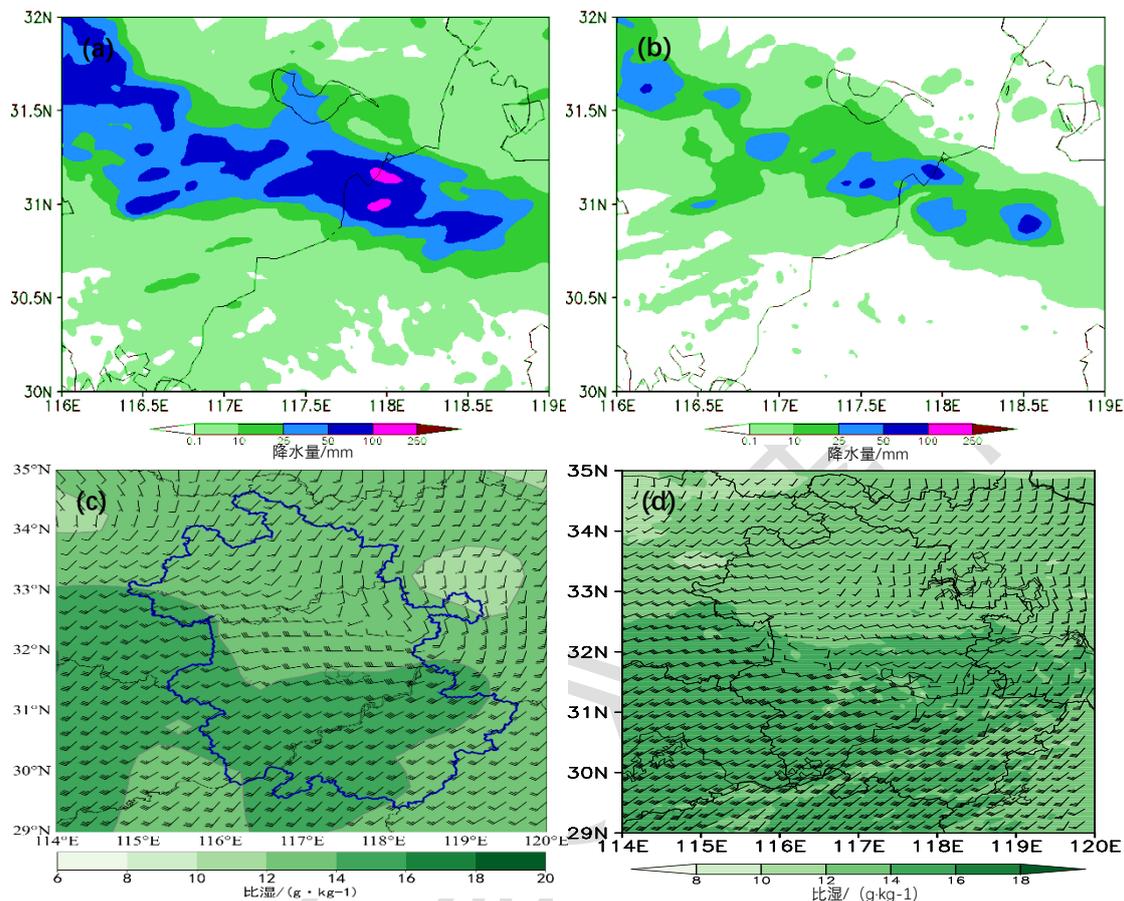
168

168 3.1.1 降水量和环境场检验

169

170 27日03—06时, WRF-EnKF模拟的50 mm以上降水相对较为分散, 但雨带走向与实况较
171 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
172 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
173 (图5a)。从对流发展最强时段1 h降水量对比来看: 27日04—05时, 模拟雨带的走向和
174 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, 中心值为65 mm与实况接近, 但位置相对实况略偏东、偏北(图5b)。

175 对流发展最强阶段实况 850 hPa 暖切位于淮北西部至江淮之间东部，大别山区到江南比
 176 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）。模拟的暖切位置东段较实况略
 177 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
 178 偏强（图 5d）。



179
 180 图 5 2023 年 5 月 27 日 (a) 03—06 时、(b) 04—05 时模拟累计降水量 (填色)，(c, d) 27 日 05 时 (c)
 181 实况和 (d) 模拟 850 hPa 比湿 (填色)、风场 (风羽)

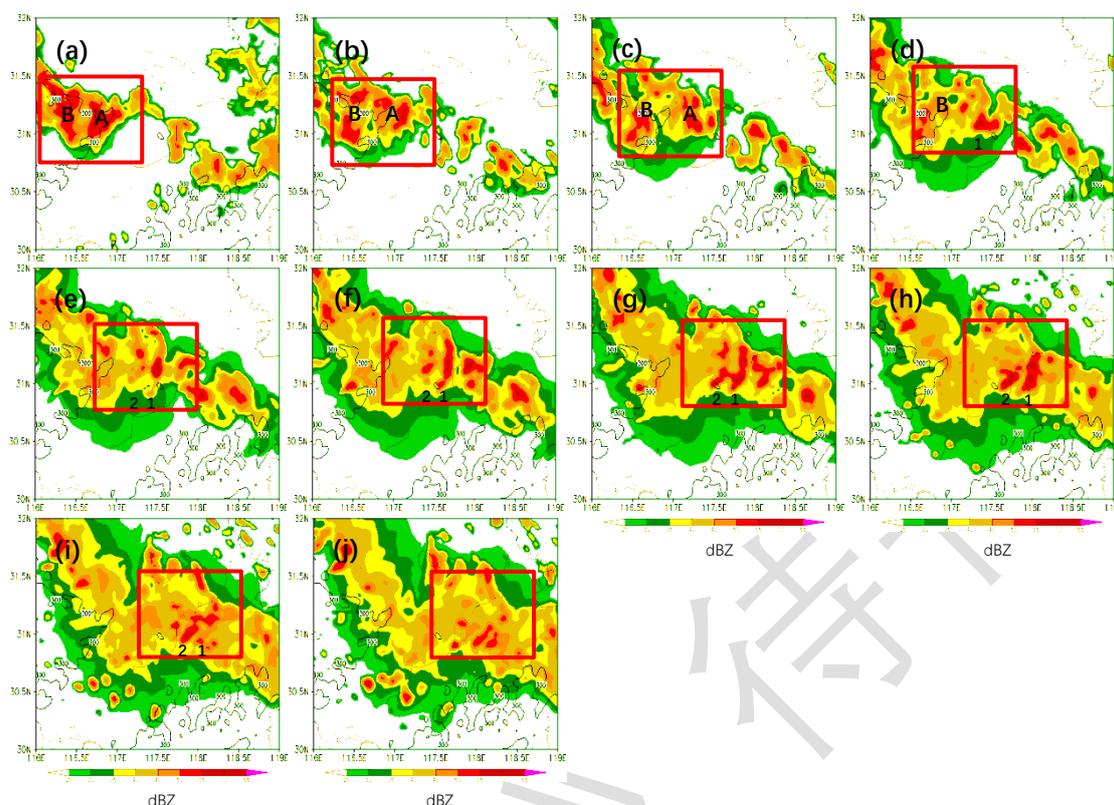
182 Fig.5 Simulated cumulative precipitation (colored) from 03:00 to 06:00(a) and 04:00 to 05:00(b) on 27 May, 2023.
 183 Specific humidity(colored) and wind(barb) at 850 hPa of reanalysis(c) and simulation(d) at 05:00 on 27 May, 2023

184 3.1.2 雷达回波特征检验

185 模拟的回波演变与实况基本一致。27 日 03 时，大别山区至江南东部模拟出西北-东南
 186 走向的带状回波，带状回波中也是镶嵌着多个多单体风暴（图 6a）；大别山区西北侧的两个
 187 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 04 时发展成短对流 1（图 6d），
 188 后部与 B 的前部结合于 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，
 189 位置偏北 20 km 左右；05 时前后，两条短对流发展到最强，中心强度超过 55 dBz，超过 50
 190 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
 191 前后结构松散（图 6i），生命史较实况偏短 20 min 左右。

192 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

193 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
194 据针对短对流组织化发展的原因开展进一步的分析研究。



195
196

注：黑色等值线代表地形高度等于 300 m，下同

197 图 6 WRF-EnKF 模拟的 2023 年 5 月 27 日 (a) 03:00、(b) 03:20、(c) 03:40、(d) 04:00、(e) 04:20、(f)
198 04:40、(g) 05:00、(h) 05:20、(i) 05:40、(j) 06:00 最大反射率 (填色)

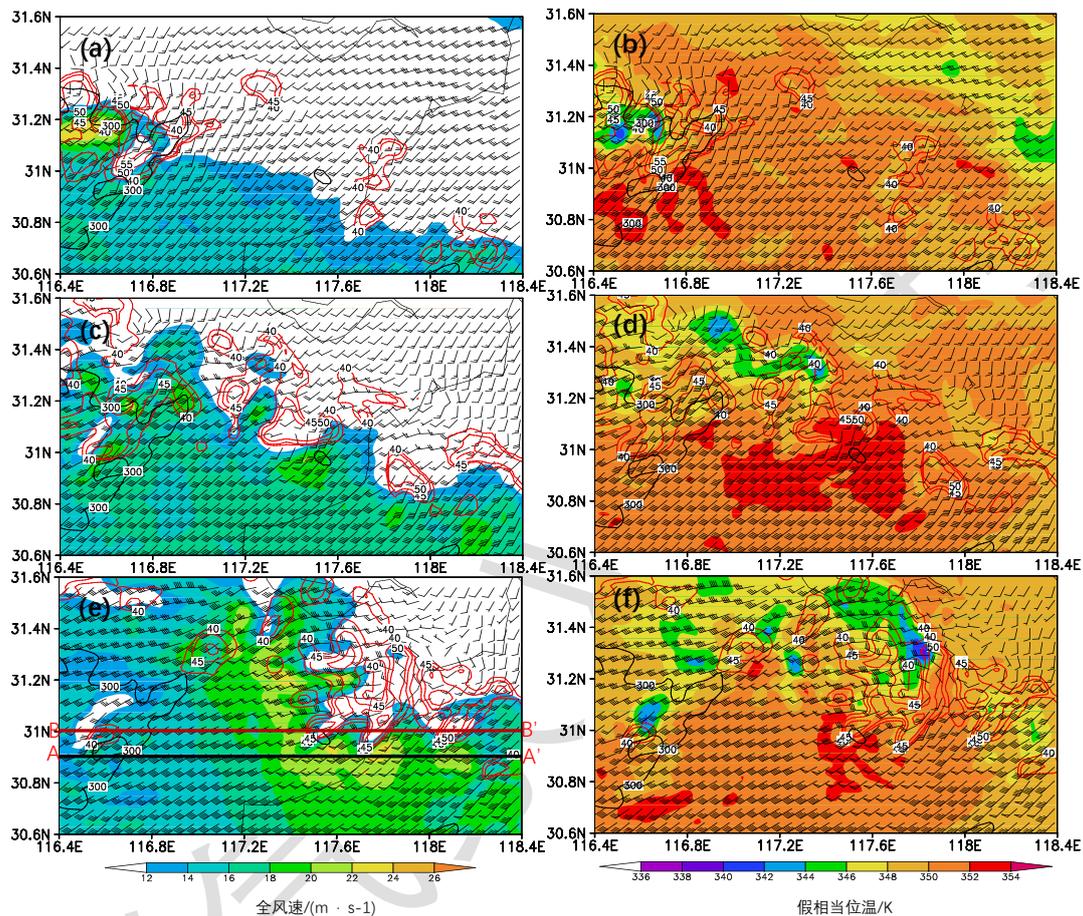
199 Fig.6 Max reflectivity(colored) simulated by WRF-EnKF at 03:00(a), 03:20(b), 03:40(c), 04:00(d), 04:20(e),
200 04:40(f), 05:00(g), 05:20(h), 05:40(i), 06:00(j) on 27 May, 2023

201 3.2 低空急流对短对流组织化发展的作用

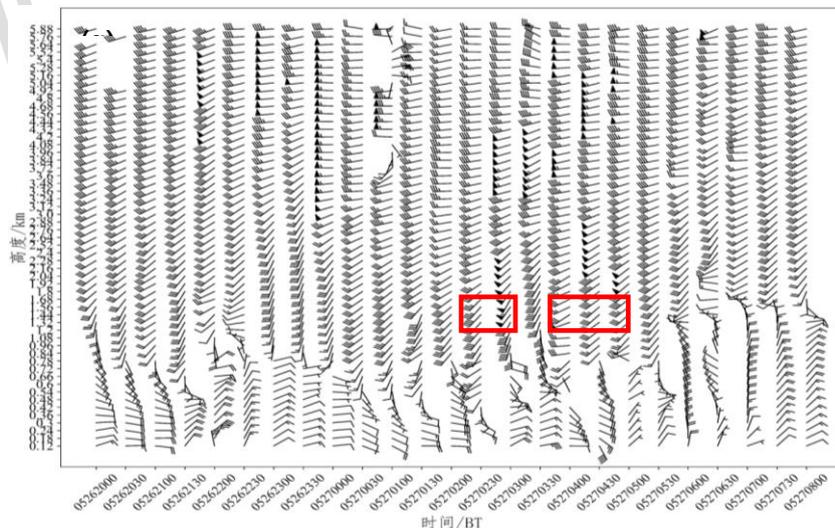
202 此次对流发展过程伴随低空急流的显著增强。27 日 03 时，850 hPa 低空急流的整体位
203 置偏南、强度相对较弱，只在大别山区有 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大值中心存在，此时大别山区西北侧
204 有对流强烈发展 (图 7a)；04 时，低空急流东移发展，在短对流的南侧形成两个急流核 (图
205 7c)；05 时，低空急流发展到最强，中心超过 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，两条短对流也发展到最强 (图 7e)；
206 06 时，随着急流进一步东移北推，原江淮之间南部的短对流迅速减弱 (图略)。池州站风廓
207 线雷达资料显示 (图 7g)：5 月 27 日 00 时开始，边界层急流开始强烈发展，急流发展过程
208 中出现两次明显的增强，第一次增强出现在 27 日 02 时 30 分—03 时，1.5 km 高度附近水平
209 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
210 现在 27 日 04—05 时，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
211 1 强烈发展并经过池州上空(图 3d~3f)。由于短对流 2 在 27 日 05 时之后才经过池州上空，
212 此时低空急流开始减弱，短对流 2 也逐渐减弱 (图 3g~3i)。此外，27 日 06 时之后，池州

213 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
214 较为一致。

215 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
216 过程伴随假相当位温大值中心的东移发展(图 7b~7d); 27 日 05 时短对流发展到最强时，
217 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，低空急流的顶端有大
218 值能量中心存在（图 7f），为对流发展提供能量条件。



219



220

221 图 7 WRF-EnKF 模拟的 2023 年 5 月 27 日 (a, c, e) 850 hPa 反射率 (红色等值线)、全风速 (填色)、风

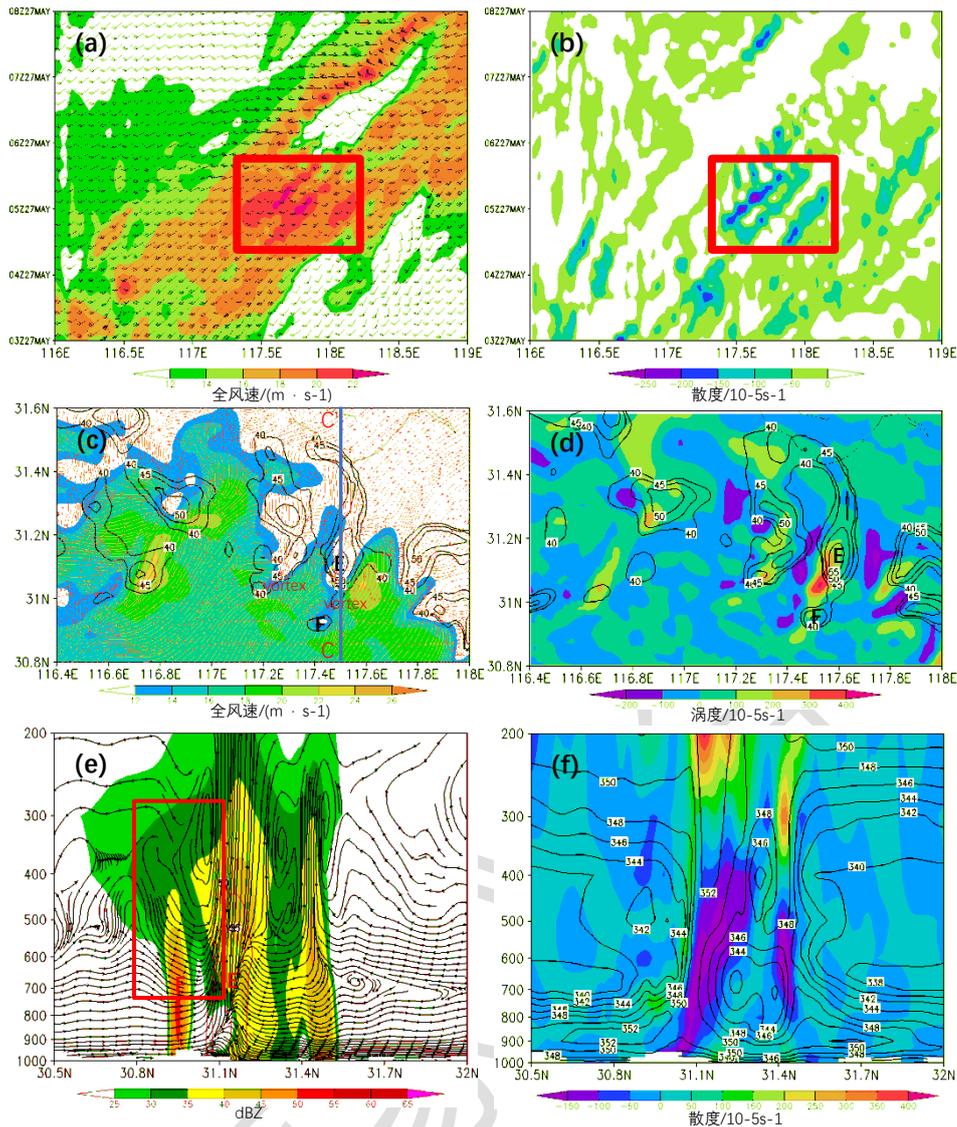
222 场(风羽)和(b, d, f) 850 hPa 反射率(红色等值线)、假相当位温(填色)、风场(风羽)(a, b) 03
223 时、(c, d) 04时、(e, f) 05时,(g) 5月26日20时至27日08时池州风廓线雷达反演的水平风场的垂
224 直分布

225 Fig.7 Reflectivity(red contour), wind speed(colored), wind(barb) (a, c, e) and reflectivity(red contour),
226 θ_{se} (colored), wind(barb) (b, d, f) simulated by WRF-EnKF at 850 hPa at 03:00(a, b), 04:00(c, d), 05:00(e, f) on 27
227 May, 2023.

228 Vertical distribution of horizontal wind field inverted by Chizhou wind profile radar from 20:00 on 26 May to
229 08:00 on 27 May(g)

230 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°N (图7e中
231 AA'线)作850 hPa全风速的时间-纬向剖面(图8a),27日04时之前,超过 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 急流
232 中心的位置偏西,对应大别山区西北侧有对流发展,此后大值中心在东移的过程中不断增强,
233 05时前后,在 117.3°E — 118.1°E 之间形成三个平行排列的强风速中心,其中西侧两个强度
234 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时急流中心明显
235 减弱,平行排列的结构也逐渐不明显。沿急流核北侧 31°N (图7e中BB'线)作850 hPa散
236 度的时间-纬向剖面可以看出:27日05时前后,在急流核北侧有三条平行的辐合带存在,
237 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
238 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,
239 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
240 侧都有对流强烈发展,对流的前部 31° — 31.1°N 之间 117.3°E 和 117.5°E 附近分别有一个
241 中 γ 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
242 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,
243 进而导致中 γ 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
244 更为强烈,对流与环境场的相互作用也就更强,中 γ 尺度涡旋也更加明显。从04:20到04:30,
245 两条短对流均增强,04:20两条短对流南端的中 γ 尺度涡旋对应其前部明显的正涡度区,
246 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中 γ 尺
247 度涡旋对对流有加强作用。

248 在热力相互作用方面,以短对流1为例,沿 117.5°E (图8c中CC'线)作经向-垂直剖
249 面(图8e~8f):27日04时20分, 31.1°N 附近有较强的上升气流并伴有明显的低层辐合、
250 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
251 境大气中, 30.8° — 31°N 之间300—700 hPa为一致的下沉气流,E南部400 hPa以上为偏北
252 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°
253 N以南400—700 hPa之间形成假相当位温的小值区,并与低层假相当位温的大值区之间形
254 成对流不稳定层结。04:30,单体E南侧暖区中 30.9° 附近对流F东移,F经过对流不稳定区
255 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。



256

257

注：图 c 中“vortex”代表中 γ 尺度气旋性涡旋

258

图 8 WRF-EnKF 模拟的 2023 年 5 月 27 日 (a, b) 03—08 时 850 hPa (a) 全风速 (填色)、水平风场 (风羽)

259

沿 30.9°N 的时间-纬向剖面 and (b) 散度 (填色) 沿 31°N 的时间-纬向剖面, (c) 04:20 850 hPa 反射率 (黑

260

色等值线)、全风速 (填色) 和滤波后的流场, (d) 04:30 850 hPa 反射率 (黑色等值线) 和 04:20 涡度 (填

261

色), (e) 04:30 反射率因子 (填色)、04:20 50 dBz 以上反射率 (红色等值线) 和经向-垂直风场沿 117.5°

262

E 的经向-垂直剖面, (f) 04:20 散度 (填色) 和假相当位温 (黑色等值线) 沿 117.5°E 的经向-垂直剖面

263

dBz

264

Fig.8 Time-zonal section of wind speed(colored), wind(barb) along 30.9°N(a) and divergence(colored) along 31°

265

N(b) at 850 hPa from 03:00 to 08:00 on 27 May, 2023 simulated by WRF-EnKF (a, b).

266

Reflectivity(black contour), wind speed(colored) and stream field after filtering at 850 hPa at 04:20 (c).

267

Reflectivity(black contour) at 04:30 and vorticity(colored) at 04:20 at 850 hPa (d).

268

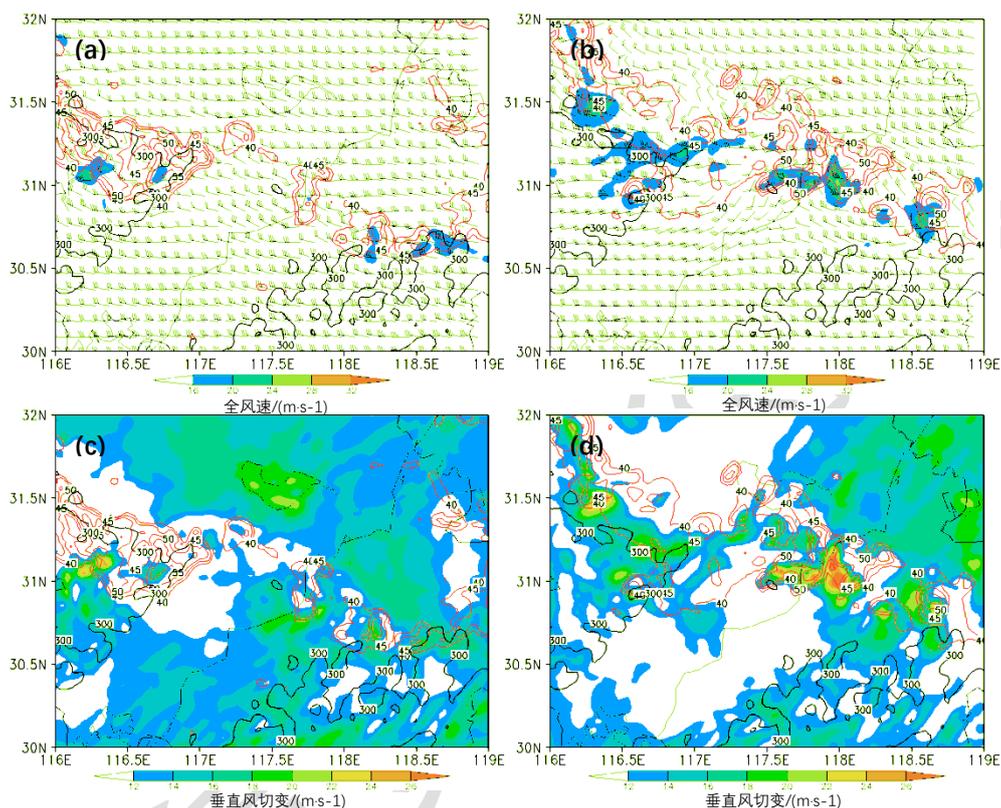
Meridian-vertical section of reflectivity(colored) at 04:30 and reflectivity greater than or equal to 50 dBz(red

269

contour), vertical circulation at 04:20 along 117.5°E(e).

270 Meridian-vertical section of divergence(colored), θ_{se} (black contour) along 117.5°E at 04:20(f)

271 26 日 20 时 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
272 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 时, 苏 皖 地 区 500
273 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
274 (图 9c), 此 时 对 流 的 组 织 化 程 度 不 高; 05 时, 短 对 流 的 南 部 偏 北 风 速 超 过 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图
275 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,
276 组 织 化 程 度 也 达 到 最 高。



277
278 图 9 2023 年 5 月 27 日 (a, b) WRF-EnKF 模 拟 的 最 大 反 射 率 (红 色 等 值 线)、500 hPa 全 风 速 (填 色)、风
279 场 (风 羽) 和 (c, d) 最 大 反 射 率 (红 色 等 值 线)、0~500 hPa 垂 直 风 切 变 (填 色) (a, c) 03 时、(b, d)
280 05 时

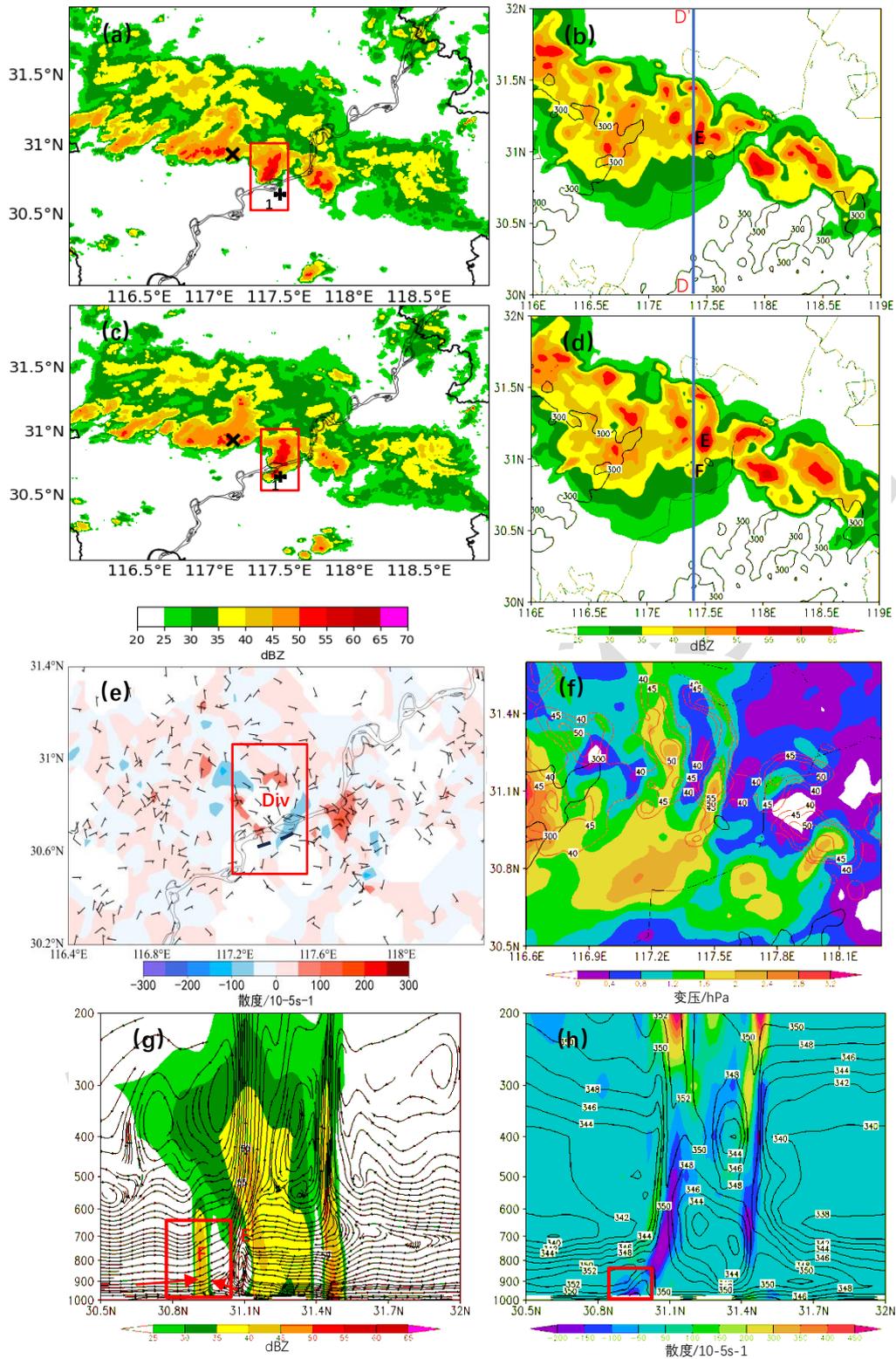
281 Fig.9 Max reflectivity(red contour), wind speed(colored), wind(barb) at 500 hPa(a, b) and max reflectivity(red
282 contour), vertical wind shear(colored) from 0 to 500 hPa simulated by WRF-EnKF at 03:00(a, c), 05:00(b, d)
283 on 27 May, 2023

284 3.3 雷暴高压在短对流形成过程中的作用

285 3.3.1 雷暴高压与环境场相互作用

286 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
287 风场之间又会形成强烈的辐合, 进而触发新的对流。04:12, 实况 30.7° — 31° N 之间、 117.5°
288 E 附近短对流 1 正在强烈发展 (图 10a), 对应临近时刻地面图上为辐散气流区, 其中向南的
289 一支偏北风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

290 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
291 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
292 过 55 dBz（图 10b），04:20 E 南部出现新生单体 F，导致短对流南北尺度增加（图 10d）。
293 单体 E 对单体 F 有触发作用，从 04:20 前一小时变压可以看出：单体 E 附近出现明显的正变
294 压，1 h 变压中心超过 2.4 hPa，表明单体 E 在强烈发展的过程中在近地面附近形成明显的
295 雷暴出流（图 10f）。经 117.4°E（图 10b 中 DD' 线）作经向-垂直剖面，04:10 31.1°N 附近
296 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
297 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
298 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
299 在对流单体 E 南侧触发对流 F，这是短对流线性发展的一个重要原因。



300

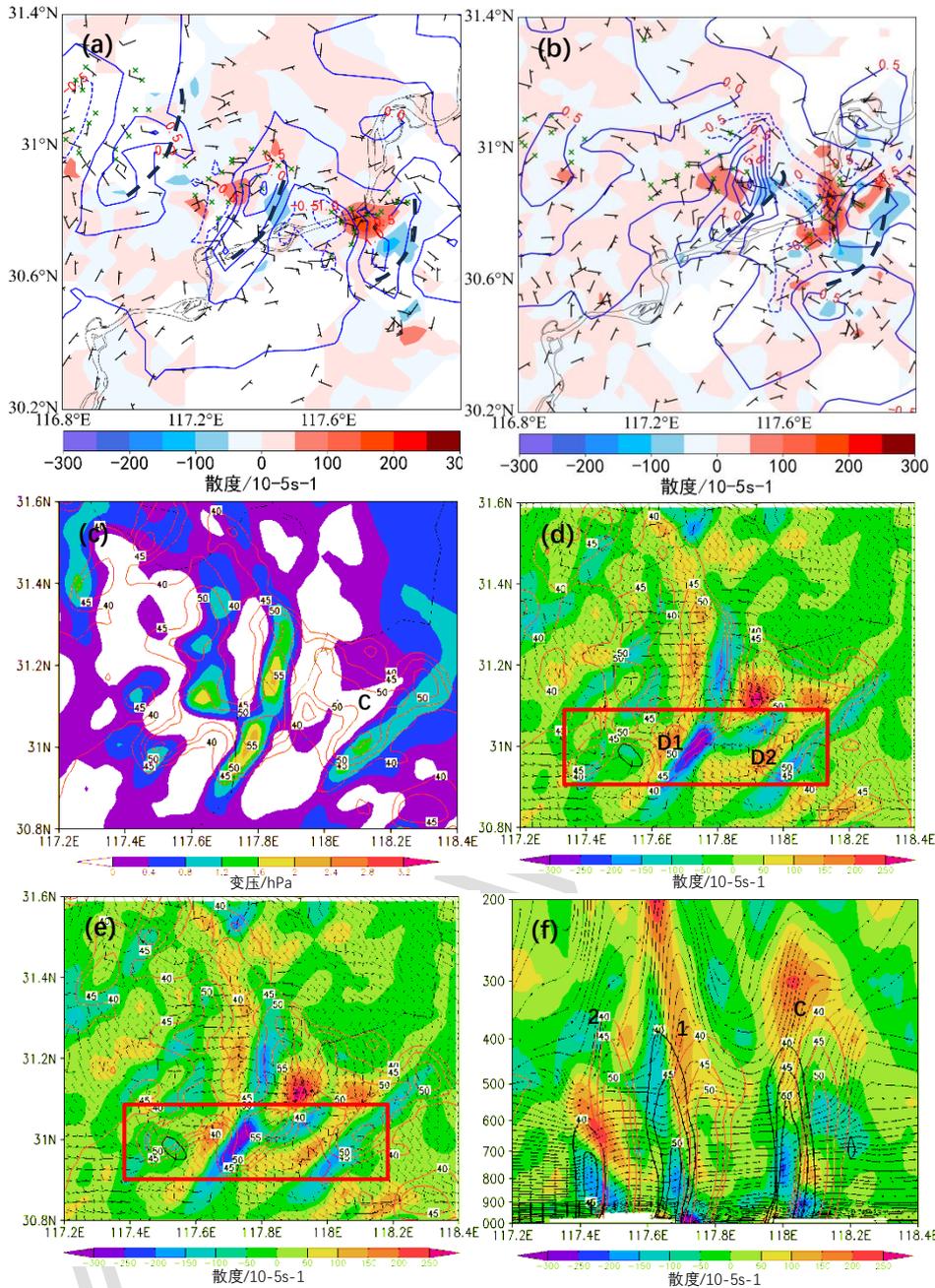
301 图 10 (a, c) 实况组合反射率 (填色) (a) 04:12、(c) 04:24, (e) 04:10 实况地面风场 (风向杆) 和散
 302 度场 (填色), (b, d) WRF-EnKF 模拟的最大反射率 (填色) (b) 04:10、(d) 04:20, (f) 04:20 最大反射
 303 率 (红色等值线) 和 1 h 变压 (填色), (g) 04:20 反射率 (填色)、04:10 50 dBz 以上反射率 (红色等值
 304 线) 和经向-垂直风场沿 117.4°E 的经向-垂直剖面, (h) 04:10 散度 (填色) 和假相当位温 (黑色等值线)

305 沿 117.4 °E 的经向-垂直剖面
306 Fig.10 Observational composite reflectivity(colored) at 04:12(a), 04:24(c).
307 Surface automatic observation of wind(barb), divergence(colored) at 04:10(e).
308 Max reflectivity(colored) at 04:10(b) and 04:20(d) simulated by WRF-EnKF.
309 Simulated max reflectivity(red contour), 1-hour variable pressure(colored) at 04:20(f).
310 Meridian-vertical section of reflectivity(colored) at 04:20, reflectivity greater than or equal to 50 dBz(red contour)
311 at 04:10 and the same moment vertical circulation along 117.4 °E (g).
312 Meridian-vertical section of divergence(colored), θ_{se} (black contour) along 117.4 °E at 04:10(h)

313 3.3.2 雷暴高压之间相互作用

314 实况地面自动观测显示：27 日 03 时（图略），30.5°—31°N 之间有多个不规则分布的辐
315 合辐散中心存在，此时对流的组织化程度不高；04—05 时，对流组织化加强（图 11a~11b），
316 30.5°—31°N 之间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
317 组织化程度越高，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
318 带前部的辐合区有明显的地面辐合线存在；06 时（图略），10 min 大于 5 mm 的降水站点变
319 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
320 也不明显。

321 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 时模拟的最
322 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
323 °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
324 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）
325 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
326 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 D1 和 D2，且由于对流距离较
327 近，两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
328 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 °N 作纬向剖面（图
329 11f）可以看出，04:50 117.4 °E、117.7 °E、118 °E 上空分别有三条强度超过 40 dBz 的
330 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
331 均有辐散中心存在，这与地面雷暴出流相对应，对流柱东侧为辐合区，这样就在东西方向上
332 相邻对流柱之间形成了两个纬向-垂直环流，这不仅有利于多条平行短对流结构的维持，而
333 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 时，三条对流柱无论是强度
334 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
335 暴高压之间的相互作用也更加明显。



336

337

338

339

340

341

342

343

344

345

346

图 11 2023 年 5 月 27 日 (a, b) 实况地面自动观测风场 (风羽)、散度 (填色)、10 min 变压 (蓝色等值线) 和 10 min 降水大于等于 5 mm 的点 (a) 04 时、(b) 05 时, WRF-EnKF 模拟的 (c) 05 时最大反射率 (红色等值线) 和地面 10 min 变压 (填色), (d) 04:50 最大反射率 (红色等值线)、地面散度 (填色) 和风场 (风羽), (e) 05 时最大反射率 (红色等值线)、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)、04:50 40 dBz 以上反射率 (黑色等值线)、散度 (填色) 沿 31°N 的纬向-垂直剖面和 04:50 垂直环流

Fig.11 Surface automatic observation of wind(barb), divergence(colored), 10-minute variable pressure(blue contour) and the points of 10-minute precipitation greater than or equal to 5 mm, (a) 04:00, (b) 05:00 on 27 May, 2023.

Max reflectivity(red contour) and 10-minute variable pressure(colored) at 05:00 simulated by WRF-EnKF(c).

347 Simulated max reflectivity(red contour), surface divergence(colored) and wind(barb) at 04:50(d).
348 Simulated max reflectivity(red contour) at 05:00, surface divergence(colored) and wind(barb) at 04:50(e).
349 Zonal-vertical section of reflectivity greater than or equal to 40 dBz (red contour) at 05:00, reflectivity greater than
350 or equal to 40 dBz(black contour), divergence(colored) at 04:50 and the same moment vertical circulation along
351 $31^{\circ}\text{N}(\text{f})$
352 dBzdBz

353 4 结论与讨论

354 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
355 局地突发短时强降水天气,3h累计降水量最大为154.7mm,其中降水最强时段1h40min
356 累计降水量达到123.2mm。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
357 中 β 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,
358 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:
359 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
360 相互作用的结果,包括大尺度与中尺度的相互作用以及对流之间的相互作用。

361 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
362 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
363 前部强烈发展的低空急流核之间形成强烈的水平风切变,进而导致中 γ 尺度气旋性涡旋的
364 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
365 较强的雷暴出流,其中向东南方向的出流与环境的东南风之间形成明显的地面辐合线,沿地
366 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
367 合增强高层辐散,在对流南侧300—700hPa之间形成了一个反次级环流,反次级环流中的
368 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
369 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
370 展造成中层偏北气流的增强,使得0—6km垂直风切变显著增强,进一步促进对流的组织化
371 发展。

372 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
373 展伴随多个平行排列的线状雷暴高压带,原对流附近近地面为雷暴出流形成的辐散区,相邻
374 雷暴出流形成更强的辐合区,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
375 邻对流之间形成了多个平行的纬向-垂直环流,这不仅有利于多条短对流结构的维持,其上
376 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。

377 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
378 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
379 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
380 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
381 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。

382

383 参考文献

384 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,
385 1980. The gravitational wave in non-uniform stratification atmosphere and its preliminary application for the
386 prediction of heavy rainfall[J]. Sci Atmos Sin, 4(3): 230-235(in Chinese).

387 陈玥, 谌芸, 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,
388 et al, 2016. Characteristics analysis of warm-sector rainstorms over the middle-lower reaches of the Yangtze River[J].
389 Meteor Mon, 42(6): 724-731(in Chinese).

390 谌芸, 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,
391 et al, 2019. A review of the warm-sector rainstorms in China[J]. Torr Rain Dis, 38(5): 483-493(in Chinese).

392 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):
393 500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record
394 heavy rainfall over Guangzhou region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 500-510(in Chinese).

395 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两个案例分析[J]. 气象, 46(8): 1001-1014.
396 Fu W, Tang M H, Ye C Z, 2020. Analysis of two forecast failure cases of warm-sector rainstorms on Hunan-Guangxi
397 border area in severe southwest jet[J]. Meteor Mon, 46(8): 1001-1014(in Chinese).

398 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,
399 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 559-569(in
400 Chinese).

401 《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
402 in South China's Preflood Season, 1986. Rainstorm during pre-rainy season in South China[M]. Guangzhou: Guangdong
403 Science and Technology Press, 94-95 (in Chinese).

404 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
405 学, 46(4): 989-1001. Huang C H, Li G P, Niu J L, et al, 2022. Dynamic and Thermal Structure and Topographic Impact
406 of the Night Torrential Rainfall in Lushan, Sichuan on August 10, 2020[J]. Chin J Atmos Sci, 46(4): 989-1001(in
407 Chinese).

408 黄美金, 俞小鼎, 林文, 等, 2022. 福建沿海冷锋前暖区和季风槽大暴雨环境背景与对流系统特征[J]. 气象, 48(5): 605-617.
409 Huang M J, Yu X D, Lin W, et al, 2022. Environmental background and convective system characteristics of the prefrontal
410 and the monsoon trough torrential rains in Fujian Coastal Area[J]. Meteor Mon, 48(5): 605-617(in Chinese).

411 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
412 Y L, Lu X S, Hu S, et al, 2023. Convective characteristics and development mechanisms of an extreme warm-sector
413 rainfall in the coastal area of South China[J]. Meteor Mon, 49(2): 201-212(in Chinese).

414 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,
415 Feng B, Li F, et al, 2024. Cause analysis of rainstorm in local warm sector under a weak weather background in Zhejiang
416 Province[J]. Meteor Mon, 50(2): 170-180(in Chinese).

417 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
418 N, Wang X M, Hu L, et al, 2018. Study on initiation and propagation mechanism of a warm-sector torrential rain in
419 North China[J]. Meteor Mon, 44(10): 1255-1266(in Chinese).

420 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):
421 469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective
422 systems during Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 469-484(in Chinese).

423 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,
424 2022. Statistical analysis of the characteristics of warm-sector rainstorms in the southern part of the Yangtze
425 River during the period of 2008-2018[J]. Trans Atmos Sci, 45(1): 51-64(in Chinese).

426 汪玲瑶, 谌芸, 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,
427 Xiao T G, et al, 2018. Statistical analysis of warm-sector rainstorm characteristics over the southern of middle
428 and lower reaches of the Yangtze River in summer[J]. Meteor Mon, 44(6): 771-780(in Chinese).

429 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
430 analysis of low level jet over South China during earlier rainy season[J]. J Trop Meteor, 1(2): 121-128(in Chinese).

431 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.
432 Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process
433 in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 485-499(in Chinese).

434 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,
435 Yan J H, Wang Q Q, et al, 2013. A low-level gravity wave triggering mechanism for rainstorm of warm zone in South
436 China[J]. Plateau Meteor, 32(4): 1050-1061(in Chinese).

437 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,
438 Zhang Y, Liu X Y, 2001. Diagnosis of thermal and dynamic conditions of warm area severe convection in Jiangxi Province[J].
439 Meteor Mon, 27(5): 30-34(in Chinese).

440 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):
441 697-710. Zhang L, Chen B H, Zhang D, et al, 2023. Analysis of causation and the meso-scale convective systems in
442 a strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China[J]. J Trop Meteor, 39(5): 697-710(in Chinese).

443 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
444 P, Dong L P, Zhong M, et al, 2019. Characteristics of the southwest airflow warm-sector rainstorm in Hubei Province[J].
445 Desert Oasis Meteor, 13(6): 13-19(in Chinese).

446 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
447 Q, Zhao H J, Zhu C H, 2023. Statistical analysis of the convection characteristics and environment parameters of
448 warm-sector heavy rain in Shandong[J]. Desert Oasis Meteor, 17(3): 71-77(in Chinese).

449 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
450 X J, 2003. Mechanism of formation of low level jets in the South China Sea during spring and summer of 1998 [J].
451 Chinese Science Bulletin, 48(6): 623-627(in Chinese).

452 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,
453 Qiu X X, Qian L, 2019. Simulation study of a squall line case based on assimilation radar reflectivity data[J].
454 Meteor Mon, 45(1): 73-87(in Chinese).

455 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,
456 Zhang S Y, Qiu X X, et al, 2023. Impacts of the Dabie Mountains on a mesoscale convective system that occurred in
457 the background of the northeast cold vortex[J]. Chin J Atmos Sci, 47(6): 2001-2019(in Chinese).

458 Bluestein H B, Marx G T, Jain M H, 1987. Formation of Mesoscale Lines of Precipitation: nonsevere Squall Lines
459 in Oklahoma during the Spring[J]. Mon Wea Rev, 115(11):2719-2727.

460 Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J].
461 Wea Forecasting, 11(4): 560-581.

462 Luo Y L, Gong Y D, Zhang D L, 2014. Initiation and Organizational Modes of an Extreme-Rain-Producing Mesoscale
463 Convective System along a Meiyu Front in East China[J]. Mon Wea Rev, 142(1): 203-221.

464 Moore J T, Glass F H, Graves C E, et al, 2003. The environment of warm-season elevated thunderstorms associated
465 with heavy rainfall over the central United States[J]. Wea Forecasting, 18(5): 861-878.

466 Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational Modes of Midlatitude Mesoscale Convective Systems[J]. Mon Wea
467 Rev, 128(10): 3413-3436.

468 Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al, 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved
469 bulk microphysics scheme. part ii: implementation of a new snow parameterization[J]. Mon Wea Rev, 136(12): 5095-5115.

470 Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al, 2013. Organizational Modes of Mesoscale Convective Systems over Central
471 East China[J]. Wea Forecasting, 28(5): 1081-1098.