

吴福浪,施思,秦婷,等,2026. 厦门地区一次阵风锋与海风锋碰撞触发强对流的数值模拟[J]. 气象,52(7):810-821. Wu F L, Shi S, Qin T, et al, 2026. Numerical simulation of severe convection triggered by the collision between gust front and sea-breeze front in Xiamen[J]. Meteor Mon, 52(7):810-821(in Chinese).

厦门地区一次阵风锋与海风锋碰撞触发 强对流的数值模拟^{*}

吴福浪¹ 施 思² 秦 婷³ 汪冬冬^{4,5}

1 中国民用航空宁波空中交通管理站气象台, 宁波 315154

2 中国民用航空厦门空中交通管理站气象台, 厦门 361100

3 中国民用航空华东地区空中交通管理局气象中心, 上海 200335

4 宁波市气象局, 宁波 315012

5 宁波市气象台院士工作站, 宁波 315012

提 要: 利用常规观测资料、地面自动气象站加密观测资料、NCEP/FNL 再分析资料、多普勒雷达资料及 WRF 模式模拟结果, 对厦门地区一次阵风锋与海风锋碰撞触发强对流过程及其机制进行分析。结果表明: 此次过程发生在副热带高压边缘, 高空辐散叠加低层辐合, 上干下湿的不稳定层结及较强的热力不稳定条件为对流发展提供了有利环境条件。前期对流单体产生的冷性下沉气流向外扩展形成阵风锋, 海风锋则在厦门沿海地区持续发展; 两条辐合线在厦门城区附近碰撞后, 低层辐合和局地抬升显著增强触发对流。WRF 模拟进一步表明, 碰撞发生后, 碰撞区域浅层比湿增加约 $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最大对流有效位能增加超过 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 涡度增强至 $25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 表明水汽条件、不稳定能量和动力抬升条件均明显加强; 辐合上升作用促使气块突破自由对流高度, 从而触发并维持对流发展。随后, 碰撞区附近对流单体合并并激发云桥单体, 进一步发展多单体合并过程; 其后, 碰撞区域后侧的地面辐合线及浅层切变系统维持了较深厚的辐合上升条件, 出现对流再生过程。研究结果对东南沿海地区局地强对流的临近预报和预警具有一定参考作用。

关键词: 阵风锋, 海风锋, 对流初生, 短时强降水, 数值模拟

中图分类号: P458, P435

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.051401

Numerical Simulation of Severe Convection Triggered by the Collision Between Gust Front and Sea-Breeze Front in Xiamen

WU Fulang¹ SHI Si² QIN Ting³ WANG Dongdong^{4,5}

1 Meteorological Observatory of Ningbo Air Traffic Management Station of CAAC, Ningbo 315154

2 Meteorological Observatory of Xiamen Air Traffic Management Station of CAAC, Xiamen 361100

3 Meteorological Department of East China Air Traffic Administration of CAAC, Shanghai 200335

4 Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo 315012

5 Academician Workstation of Ningbo Meteorological Observatory, Ningbo 315012

Abstract: Using conventional observations, surface automatic meteorological station data, NCEP/FNL re-analysis, Doppler radar data, and WRF model simulations, this paper studies a severe convective event triggered by the collision between a gust front and a sea-breeze front in the Xiamen Region, and also analyzes its underlying mechanisms. The results show that this event occurred at the edge of the subtropical

^{*} 宁波市重点研发计划暨“揭榜挂帅”项目(2023Z139)、浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划项目(2024C03256)、宁波市公益性计划项目(2022S181 和 2023S065)、宁波市气象科技项目(NBQX2023004B)和浙江省自然科学基金项目(ZJMY25D050017)共同资助

2025 年 1 月 10 日收稿; 2026 年 5 月 14 日收修定稿

第一作者: 吴福浪, 主要从事民航气象预报研究. E-mail: 15990276093@163.com

high, where upper-level divergence overlapped with low-level convergence. An unstable thermodynamic stratification characterized by dry upper levels and moist lower levels, together with strong thermal instability, provided a favorable environment for convective development. The cold outflow generated by earlier convective cells expanded outward forming a gust front, while the sea-breeze front developed continuously along the Xiamen coast. After the two boundaries collided near the urban area of Xiamen, low-level convergence and local lifting were markedly enhanced, thereby initiating the severe convection. WRF simulations further indicate that following the collision, the shallow-layer specific humidity in the collision zone increased by about $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the maximum convective available potential energy increased by more than $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the vorticity intensified to $25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, which indicate significant enhancement of moisture supply, instability, and dynamic lifting. The convergence-induced ascending motion allowed air parcels to overcome the level of free convection, thereby initiating and sustaining convection. Subsequently, convective cells near the collision zone merged and triggered a cloud-bridge cell, which further developed into a multicellular merging process. Thereafter, a surface convergence line and shallow shear system on the rear side of the collision area maintained a deeper convergence-ascending structure, and with sufficient moisture and instability, a subsequent convective regeneration process occurred. The findings could provide a useful implication for nowcasting and warning of local severe convection in Xiamen and other coastal regions.

Key words: gust front, sea-breeze front, convective initiation, short-time heavy rainfall, numerical simulation

引 言

雷暴通常伴随大风、冰雹和短时强降水等强对流天气,因此长期以来一直备受气象学者关注(Dickerson et al, 1987; 徐蓉等, 2013; 王婷婷等, 2023)。雷暴的发展依赖于大气的动力、热力及水汽条件,常由近地面中尺度系统触发(Colby, 1984; 汪雅等, 2013)。雷暴天气的形成与边界层辐合线密切相关(Wilson and Schreiber, 1986; Wilson and Megenhardt, 1997),阵风锋、海风锋等边界层辐合系统对雷暴的影响逐渐成为研究热点(苏爱芳等, 2022; 孙永刚等, 2025)。随着多普勒天气雷达的广泛布设,气象学者进一步开展了对阵风锋与海风锋系统结构(Banta et al, 1993; 许长义等, 2022)及其回波带特征和形成机制的研究(刘娟等, 1996; 刘彬贤等, 2015; 万夫敬等, 2021)。

地面加密自动气象观测站(简称自动站)资料凭借其高时空分辨率的特点,可在一定程度上弥补常规观测与雷达探测的不足。因此,为更清晰揭示中小尺度系统的演变机制,不少研究借助该类资料深入分析了阵风锋触发对流新生的环境场特征(何娜

等, 2023; 蒋超等, 2023)。然而,边界层辐合线空间尺度较小、持续时间短、形成高度较低,不仅为雷达探测与自动站分析带来挑战,也对其机理和结构研究造成困难。为此,许多学者采用高分辨率数值模式对阵风锋和海风锋系统开展模拟研究。Caniaux et al(1994)发现在引发阵风锋的快速移动飑线系统中,中层气压梯度及地面中高压的扩散对系统内部环流具有重要影响,并强调气压变化与对流系统中水平动量变化密切相关。Crook and Sun(2004)通过将双多普勒雷达、地面观测网、风廓线仪及10 min一次的分析资料同化至数值模式中,实现了对阵风锋结构的精细分析与预报。吴福浪等(2019)利用高分辨率中尺度模式,对杭州湾地区一次由海风锋触发的雷暴过程模拟发现,海风锋能显著增强局地比湿与涡度,为雷暴的发生与发展提供有利的水汽和动力条件。

虽然,目前国内外关于边界层辐合线触发雷暴的研究已取得较多进展,但国内相关工作多集中于渤海湾、长三角等区域,针对闽东南地区海陆风、阵风锋触发新生雷暴过程的分析仍相对较少。因此,本文综合利用各类观测和再分析数据,利用高分辨率中尺度模式 WRF,对 2023 年 8 月 16 日发生在厦

门地区的一次阵风锋与海风锋碰撞触发新生对流天气过程进行模拟与分析,重点研究边界层辐合线触发对流发生的环流背景、雷达回波演变特征及其物理机制,以期对厦门地区强对流天气的预报预警提供科学参考。

1 数据说明

文中使用的数据有:常规探空数据,时间分辨率为 12 h;福建省自动气象观测站的风场、温度、气压、降水等数据,时间分辨率为 5 min;环流背景分析以及 WRF 模式初始条件和边界条件来自 NCEP/FNL 再分析数据,时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$;厦门 S 波段双偏振多普勒天气雷达基数据,约 6 min 扫描一次,距离分辨率为 0.25 km,最大探测距离为 460 km,最大不模糊速度为 $30.73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2 天气概况

2023 年 8 月 16 日,福建省东南部地区自 12:00 (北京时,下同)开始先后经历了 2 次对流天气过程:第 1 次对流主要发生在 14:00—17:00,由海风锋触发,累计降水量总体较小,以小到中雨为主(图略)。第 2 次对流主要发生在 18:00—21:00,闽东南地区有 99 个站累计降水量在 25~50 mm,23 个站超过 50 mm(图 1),其中,共有 79 站次出现短时强降水

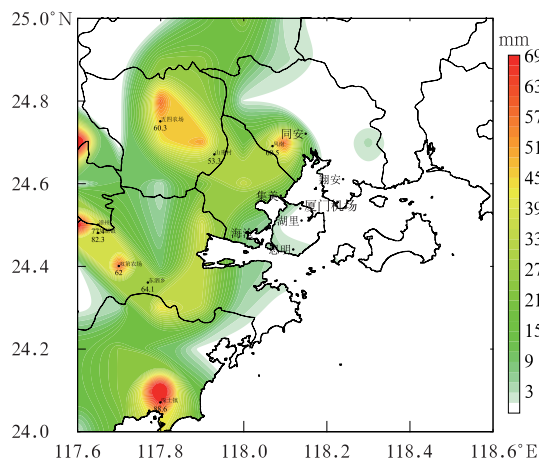


图 1 2023 年 8 月 16 日 18:00—21:00
累计降水量分布

Fig. 1 Distribution of accumulated precipitation
from 18:00 BT to 21:00 BT 16 August 2023

(小时雨强 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。受短时强降水影响,厦门机场航班受到显著影响。由于第 2 次对流过程具有触发系统尺度小、突发性强、短时降水量大、预报难度高等特点,下文将重点针对影响厦门地区的对流系统及其环境场进行详细分析。

3 环流背景及对流条件分析

3.1 环流背景

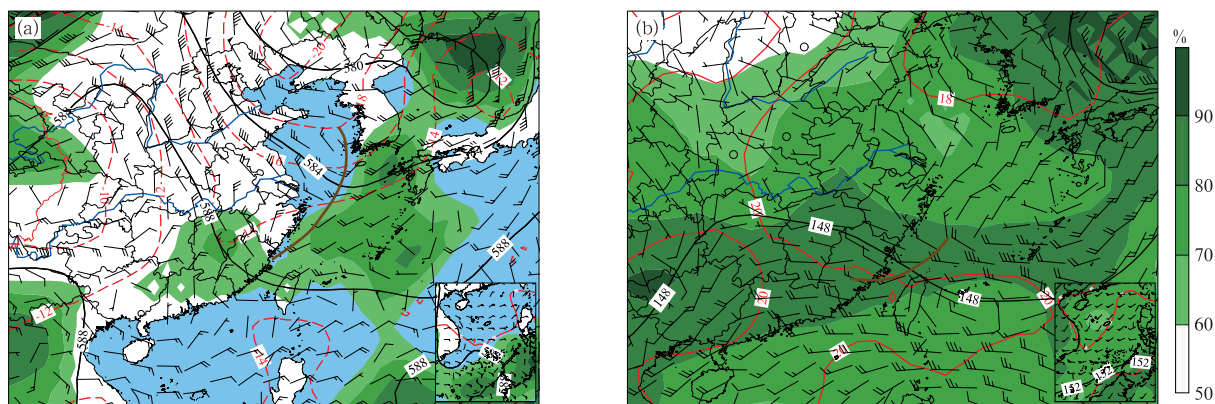
2023 年 8 月 16 日 08:00,闽东南地区位于 200 hPa 南亚高压脊线东侧,辐散条件较好(图略)。15 日 08:00 至 16 日 08:00,2307 号台风“兰恩”环流并入北方冷槽,槽线南伸至福建中部沿海,主体位于海上,闽东南地区位于 500 hPa 副热带高压(以下简称副高)588 dagpm 线边缘(图 2a)。400 hPa 上我国东部沿海受明显冷槽控制,槽后西北气流较强,福建北部风场与等温线交角接近 90° ,冷平流显著输送(图 2a);850 hPa 上闽东南地区则为弱暖平流输送(图 2b)。850~400 hPa 存在较为明显的温度差动平流,有利于加强大气不稳定层结,其中以 400 hPa 强冷平流的强迫作用为主导,与许爱华等(2014)提出的“高空冷平流强迫”型类似。

进一步分析湿度场发现,闽东南地区高空相对湿度普遍低于 60%(图 2a),而 850 hPa 及以下则在 80%以上(图 2b),形成上干下湿的层结配置,亦有利于对流不稳定发展。16 日 14:00 沿海地面存在弱辐合线(图 2b 棕色粗线),有利于抬升触发对流。

3.2 对流条件

16 日 08:00 厦门探空(图 3)显示,500 hPa 以下温度露点差 $< 3^{\circ}\text{C}$,表明湿层较为深厚,400 hPa 左右温度露点差较大,最大超过 15°C ,探空曲线呈现上干下湿的配置,有利于形成雷暴大风(樊李苗和俞小鼎,2013)或者冰雹天气,但是由于 0°C 、 -20°C 以及湿球 0°C 层高度(WBZ)均较高,不利于产生冰雹。400 hPa 以上风随高度逆转,有冷平流,400 hPa 以下风随高度顺转,有暖平流,这种明显的上冷下暖的高低空配置有利于热力强迫作用加强,使得大气层结变得不稳定,有利于强对流天气的发生和发展。

通常用 0~6 km 高度的风矢量差表示深层垂



注:图 a 和 b 中棕色粗线分别为 400 hPa 槽线和 14:00 地面辐合线。

图 2 2023 年 8 月 16 日 08:00(a)500 hPa 位势高度(黑色等值线,单位:dagpm)、400 hPa 风场(风羽)、温度(红色等值线,单位:℃)和相对湿度(填色),(b)850 hPa 位势高度(黑色等值线,单位:dagpm)、风场(风羽)、温度(红色等值线,单位:℃)和相对湿度(填色)

Fig. 2 (a) 500 hPa geopotential height (black contour, unit: dagpm), 400 hPa wind field (barb), temperature (red contour, unit: °C) and relative humidity (colored), (b) 850 hPa geopotential height (black contour, unit: dagpm), wind field (barb), temperature (red contour, unit: °C) and relative humidity (colored) at 08:00 BT 16 August 2023

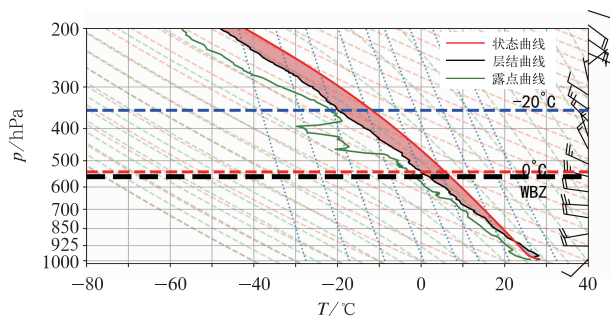


图 3 2023 年 8 月 16 日 08:00 厦门站 T - $\ln p$ 图

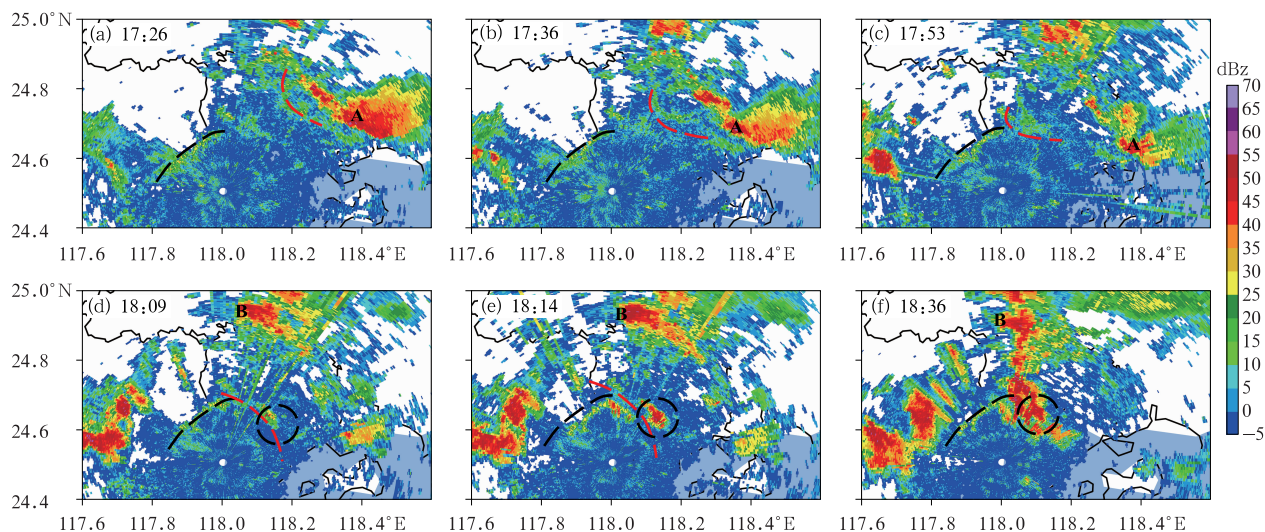
Fig. 3 T - $\ln p$ diagram of Xiamen Station at 08:00 BT 16 August 2023

直风切变。16 日 08:00, 0~6 km 深层垂直风切变为 $7.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 为弱环境风垂直切变(俞小鼎等, 2007), 但是对流有效位能(CAPE)超过 $2500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 弱的 0~6 km 垂直风切变配合高 CAPE 值也有利于强对流维持和发展。同时, 850 hPa 和 500 hPa 的假相当位温差为正值, 指示对流不稳定层结, K 、 SI 、 LI 指数均指示了较好的热力对流条件, 易触发新生对流。

4 雷达回波特征分析

由于海陆温度差异, 16 日上午厦门沿海有海

风锋不断向内陆推进, 多普勒雷达 0.5° 仰角表现为一条弱窄带回波(强度在 $10 \sim 20 \text{ dBz}$), 稳定少动(图略)。17:26, 由于第 1 次对流过程已趋于结束, 风暴 A 不断减弱(图 4a), 其西南侧出现了冷池密度流, 即阵风锋(图 4a 红色虚线), 是由风暴 A 的冷性下沉气流在近地面低层向外扩展, 与风暴运动前方的低层暖湿空气交汇而形成的。同时, 海风锋稳定少动(图 4a 黑色虚线)。17:36, 风暴 A 强度继续减弱, 阵风锋向西南方向移动并不断远离风暴 A(图 4b)。17:53, 阵风锋向西南方向移动, 与海风锋东北段产生碰撞(图 4c)。18:09, 在两条锋线碰撞区的东南侧激发出新的对流单体(图 4d 黑色圆圈), 即对流初生(CI), 但强度和面积均较小。18:14, 该对流单体强度迅速加强, 超过 55 dBz , 面积也明显增大(图 4e)。18:36, 对流单体面积进一步增大并且与其北侧风暴 B 合并为带状对流(图 4f), 后续在环境气流引导下, 带状对流向东北向西南发展、移动, 并在海风锋区域进一步加强, 最大超过 60 dBz 。该带状对流给厦门同安区、集美区、海沧区带来较强短时强降水, 影响范围内有 11 个站 3 h 累计降水量达 $25 \sim 50 \text{ mm}$, 1 个站超过 50 mm 。



注:红色虚线表示阵风锋,黑色虚线表示海风锋,字母 A 和 B 表示风暴单体,黑色圆圈指示新生对流发展,下同。

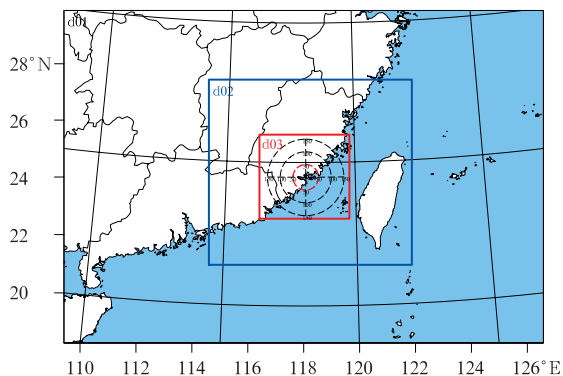
图 4 2023 年 8 月 16 日厦门雷达 0.5°仰角基本反射率因子

Fig. 4 Basic reflectivity factor at 0.5° elevation of Xiamen Radar on 16 August 2023

5 数值模拟设计和结果分析

5.1 模拟设计

数值模拟试验采用 WRF 模式 V4.1 版本,采用 Lambert 地图投影的三重双向嵌套网格 d01、d02 和 d03(图 5),网格分辨率分别为 9、3、1 km,格点数分别为 216×150 、 274×250 、 364×340 ,输出时间分别



注:圆圈由小到大分别表示厦门雷达 50、100、150 km 探测范围。

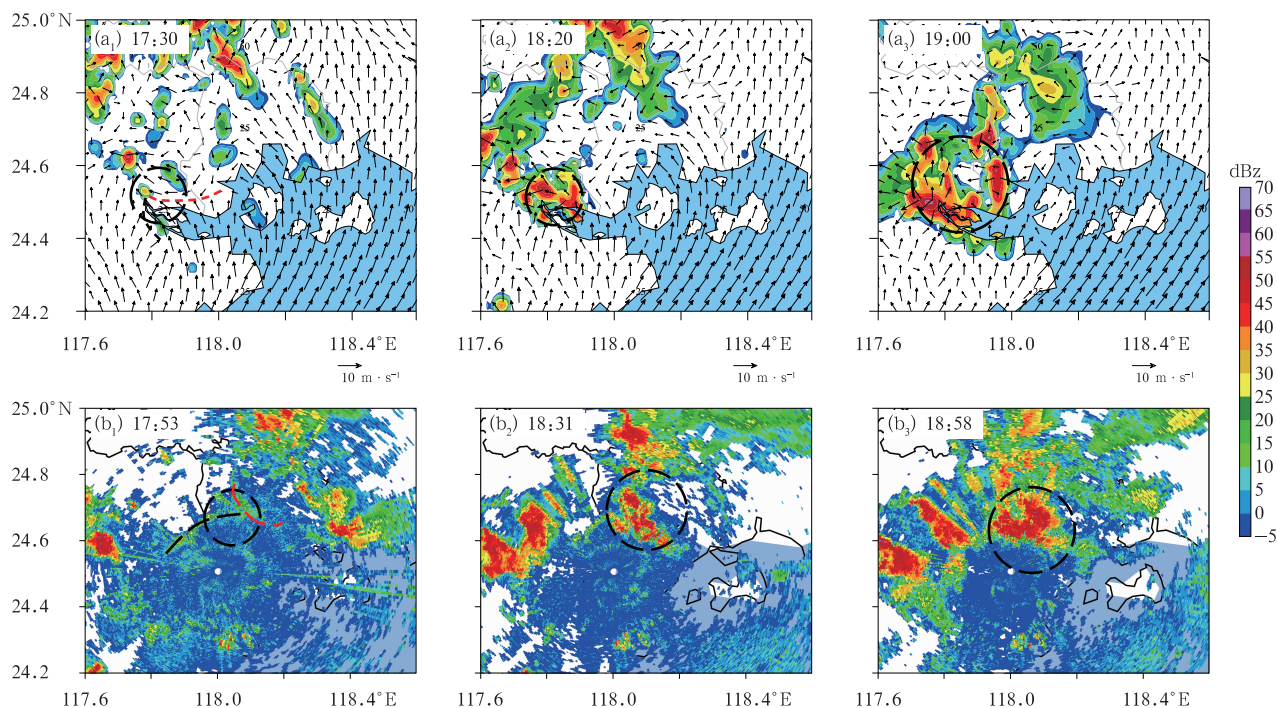
图 5 模拟试验的三重嵌套区域

Fig. 5 Triple nested area of simulation experiment

为 60、60、10 min。d01 和 d02 模拟时间为 2023 年 8 月 15 日 20:00 至 17 日 02:00,采用 Kessler 暖雨方案;d03 模拟时间为 16 日 08:00 至 17 日 02:00,采用 Thompson 方案。积分步长均为 120 s,垂直方向均取不等距的 40 个 σ (无量纲垂直坐标)层,模式顶层气压为 50 hPa。d01 采用 Kain-Fritsch 积云对流方案,由于 d02 和 d03 分辨率低于 5 km,故关闭积云对流方案(段海霞等,2013;闵锦忠等,2019)。三重网格均采用 RRTM 长波辐射方案及 Dudhia 短波辐射方案、Monin-Obukhov 近地层方案、MYJ 边界层方案和 Noah 陆面过程方案,地形数据选用 MODIS_30s。初始场及 d01 侧边界条件由 NCEP/FNL 再分析资料提供,内层网格的侧边界条件由外层网格插值得到。下文主要对 d03 区域模拟结果进行分析。

5.2 雷达回波模拟与实况对比

图 6 为实况和模拟的厦门雷达 0.5°仰角基本反射率因子对比。模拟的阵风锋与海风锋在 17:30 左右发生碰撞(图 6a₁ 红色圆圈),同时碰撞区域附近有 CI 发生,强度约在 25~35 dBZ。而实况则是在 17:53 左右发生碰撞(图 6b₁ 红色圆圈),但 CI 是在 18:09,强度在 30~35 dBZ。即模拟的阵风锋与海



注:图 a 中风矢为模拟的 10 m 风场。

图 6 2023 年 8 月 16 日厦门雷达 0.5°仰角基本反射率因子

(a) 模拟, (b) 实况

Fig. 6 Basic reflectivity factor at 0.5° elevation of of Xiamen Radar on 16 August 2023

(a) simulation, (b) observation

风锋碰撞时间较实况偏晚,且位置偏西,相差约 36 km,同时模拟的阵风锋与海风锋碰撞与 CI 同时发生,但实况则是先发生碰撞,后出现 CI。

在对流发展阶段,模拟的对流单体于 18:20 开始显著增强,回波强度增至 45~50 dBz,范围略有扩大(图 6a₂);实况对流回波强度增强至 50~55 dBz 且范围略增大。19:00,模拟的对流单体进一步增强至 55~60 dBz,同时其东北侧约 5 km 处又有新的对流单体发展;实况对流仍维持较强水平,并持续向东北侧扩展。无论是对流单体强度变化趋势还是多单体组织形式,模拟较实况的演变趋势一致,即对流在海风锋和阵风锋碰撞触发后并未快速消散,而是持续维持、增强并伴随新单体生成。

由于模拟的碰撞后 CI 位置与实况存在差距,导致 1 h 累计降水量分布也有所不同。18:00—19:00,模拟降水带位置与实况降水带相距约 30 km,模拟的中心降水量(约 49.1 mm)与实况(51.6 mm)接近(图 7a)。19:00—20:00,模拟的降水带位置和形态均与实况接近,但降水范围偏小,中心降水量(约

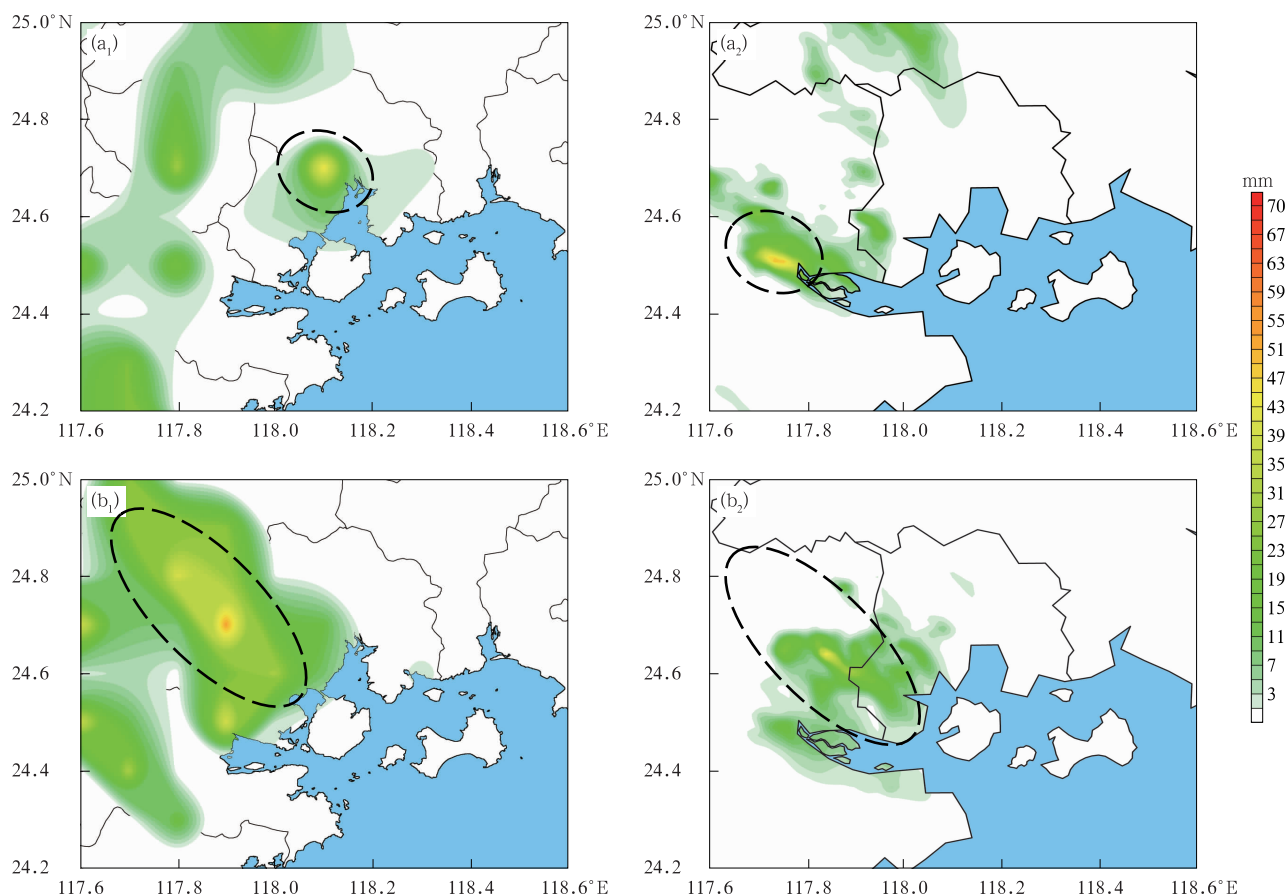
45.6 mm)略偏小(图 7b)。

需要指出的是,CI 具体位置及降水量级的偏差,恰恰反映了中小尺度对流系统的局地性、突发性和非线性特征。虽然模拟在对流触发的时刻和空间位置上与实况存在一定差异,但其能够较好地再现阵风锋与海风锋碰撞触发 CI、CI 原地增强以及多单体接力发展的关键特征,说明模拟结果在过程演变和机制识别上具有较高可信度。因此,后文将基于模拟资料开展物理量分析,进一步揭示阵风锋与海风锋碰撞触发强对流的动力、热力机制。

5.3 模拟的阵风锋水平和垂直结构

5.3.1 水平结构

对流风暴产生的冷性下沉气流抵达近地面层向外扩散,与低层暖湿空气交汇形成中尺度边界,该边界即为阵风锋,阵风锋实际上是对流内部下沉冷空气和近风暴环境暖空气之间的分界线(许长义和王彦,2021)。图 8 绘制了模拟的 0.5°仰角基本反射率因子、10 m 风场以及 2 m 温度分布。



注:椭圆指示降水中心。

图 7 2023 年 8 月 16 日 (a) 18:00—19:00, (b) 19:00—20:00 累计降水量分布

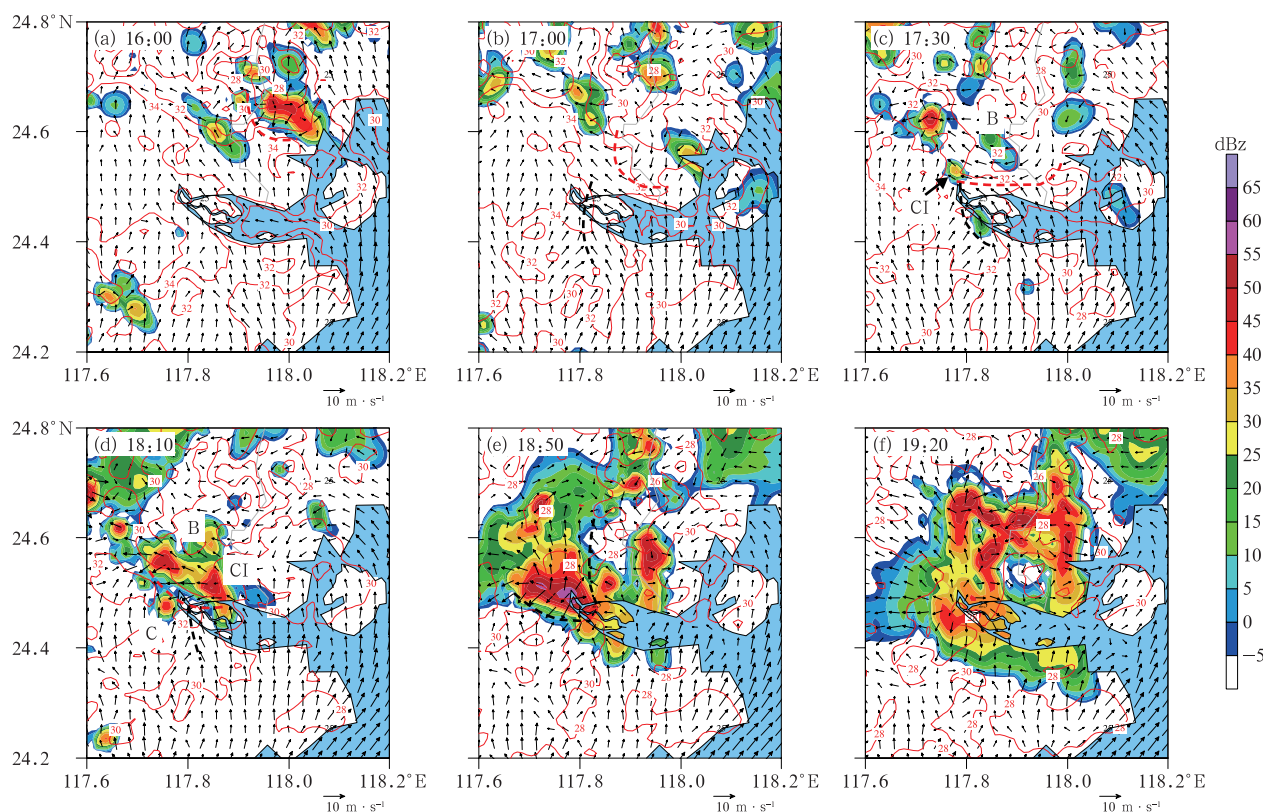
(a_1, b_1) 实况, (a_2, b_2) 模拟

Fig. 7 Distribution of accumulated precipitation from (a) 18:00 BT to 19:00 BT and (b) 19:00 BT to 20:00 BT 16 August 2023

(a_1, b_1) observation, (a_2, b_2) simulation

16:00(图 8a),前期发展的对流单体逐渐减弱,下沉气流向西南方向扩展,与环境风在单体前侧约 10 km 位置形成风向辐合线,虽然 WRF 模式没有直接模拟出辐合线对应的弱窄带回波,但是辐合线前侧为暖区(34°C),后侧为冷池(27°C),密集的温度锋区基本呈西北—东南走向,冷池强度较大(约为 $0.35^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$),是对流内部下沉形成的阵风锋(图 8a 红色虚线),对应于实况 17:26(图 4a 红色虚线)雷达 0.5° 仰角观测到的阵风锋。17:00(图 8b),模拟的对流单体进一步减弱,阵风锋向西南方向移动并不断远离单体,阵风锋前后温差超过 5°C 。同时阵风锋西南侧约 15 km 存在海风(东南风)与西南风之间的辐合线,即海风锋(图 8b 黑色虚线)。17:30(图 8c),阵风锋与海风锋发生碰撞,碰撞区域

附近有 CI 发生,强度约 $25 \sim 35 \text{ dBz}$ 。同时在 CI 西北侧也有对流单体 B 发展,强度超过 45 dBz 。18:10(图 8d),对流单体 B 和碰撞区域的对流不断加强并合并,强度为 $45 \sim 50 \text{ dBz}$;在两者合并时,由于下沉气流在低层产生的辐合作用,两个单体之间激发出云桥单体 C(Simpson et al, 1980; 易笑园等, 2012),之后三者不断合并加强。18:50(图 8e),合并后的对流单体发展至最强,最大反射率因子达到 58 dBz 。该强对流单体对应的冷性下沉气流在近地面辐散,并在单体西南侧及东北侧均形成辐合线(图 8e 黑色虚线)。随后,该强对流单体逐渐减弱。19:20(图 8f),碰撞区域对流单体逐渐减弱,但是单体后侧东北方向有新单体发展,并继续影响厦门地区。20:30(图略)之后,整体回波东移入海减弱,对



注:图 c 中黑色粗箭头指示 CI。

图 8 2023 年 8 月 16 日模拟的 0.5° 仰角基本反射率因子(填色)、
10 m 风场(风矢)和 2 m 温度(红色等值线,单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 8 Simulated basic reflectivity factor (colored) at 0.5° elevation, 10 m wind field (vector),
2 m temperature (red contour, unit: $^\circ\text{C}$) on 16 August 2023

流过程趋于结束。

综上分析可知,尽管 WRF 模式未能直接模拟出阵风锋或海风锋对应的弱窄带状回波特征,但较好地再现了海风与环境风场相互作用所形成的海风锋辐合结构,以及雷暴单体减弱后其后侧冷出流与前侧环境暖空气之间形成的阵风锋水平结构。模拟结果进一步表明,阵风锋与海风锋的碰撞作用触发并促进了新生对流的发展与增强。

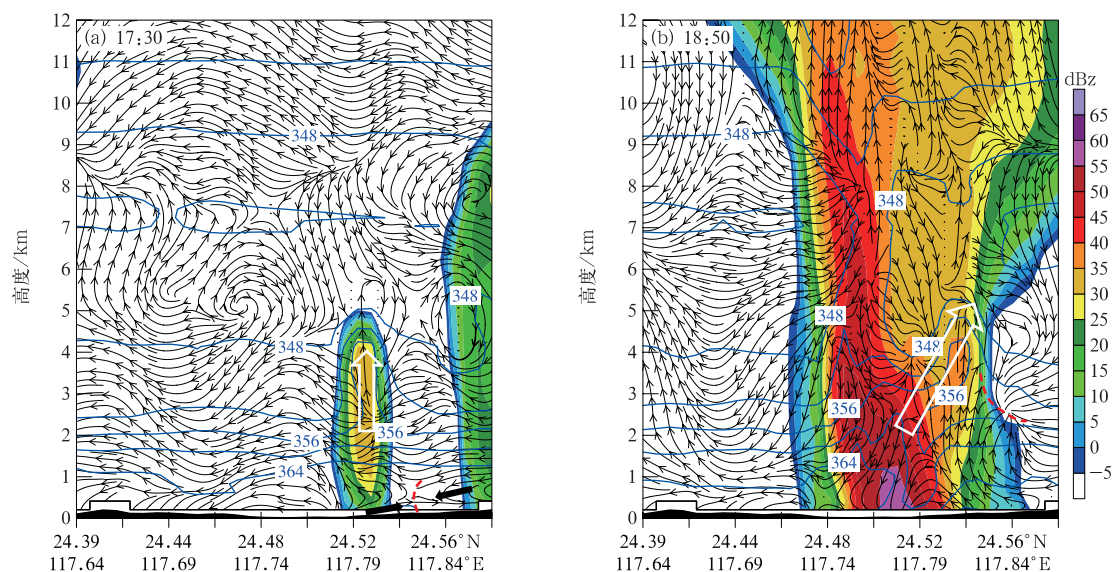
5.3.2 垂直结构

图 9 为沿图 10c 黑线做模拟的基本反射率因子、风场、假相当位温(θ_{se})等要素的垂直剖面。

模拟的 17:30,碰撞区域(24.54°N 、 117.82°E)附近,前侧低层为西南风,后侧为东北风,两支气流交汇造成辐合上升,形成阵风锋(图 9a 红色虚线)。由上文分析可知,模拟的 10 m 风场(图 8c)显示有海风锋,但可能由于海风锋发展高度较低,因此模拟的垂直剖面上无法对其捕捉到。碰撞区域内 θ_{se} 上

凸(图 9a 白色箭头),表明有上升运动且湿度大(朱乾根等,2007),同时 5 km 高度以下 θ_{se} 随高度递减,大气为不稳定层结,在有利的水汽、不稳定层结以及阵风锋辐合抬升共同作用下,碰撞区域内开始触发新生对流。

实况的 18:36(图略),触发的对流单体发展至最强,强回波高度(>50 dBZ)超过 -20°C 层,后续对流单体不断沿着海风锋方向移动,给厦门带来较大范围长时间的强降水天气。模拟的 18:50,碰撞区域内 θ_{se} 向后侧东北方向倾斜上凸(图 9b 白色箭头),表明对流单体后侧有倾斜上升运动,同时地面至 5 km 高度大气维持不稳定层结状态,超过 40 dBZ 的回波伸展至 11 km 以上,此时对流发展到最强(57 dBZ)。由图 8e 可知,模拟的地面对流单体西南和东北方向均出现了边界层辐合线,同时刻垂直剖面上对流单体右侧东北方向 2.5~3.5 km 高度存在风向切变,近地面至 5 km 高度涡度均超过



注:黑色阴影为地形高度,白色箭头指示 θ_{se} 上凸区域,黑色箭头指示辐合区。

图 9 2023 年 8 月 16 日模拟的雷达基本反射率因子(填色)、流场(流线)和 θ_{se} (蓝色等值线,单位:K)垂直剖面

Fig. 9 Vertical cross-section of simulated basic reflectivity factor (colored), flow field (streamline), θ_{se} (blue contour, unit: K) on 16 August 2023

$20 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,表明对流单体右侧东北方向地面辐合线至浅层切变提供更为深厚的辐合上升条件;而对流单体左侧西南方向近地面至 5 km 高度涡度分布在零值附近(图略),辐合抬升条件较差。在有利不稳定能量、水汽条件、地面辐合线至浅层切变的深厚辐合抬升共同作用下,后续东北方向有新对流单体发展并与其他单体合并加强,继续给厦门地区带来短时强降水天气。

综上所述可知,WRF 模式能够较好再现阵风锋与海风锋碰撞触发新生对流的主要演变过程。在有利不稳定能量、水汽条件以及地面辐合线至浅层切变共同作用下,模拟结果显示碰撞后续阶段仍可维持对流再生和增强过程,进一步说明阵风锋与海风锋碰撞对强对流的触发与维持具有重要作用。

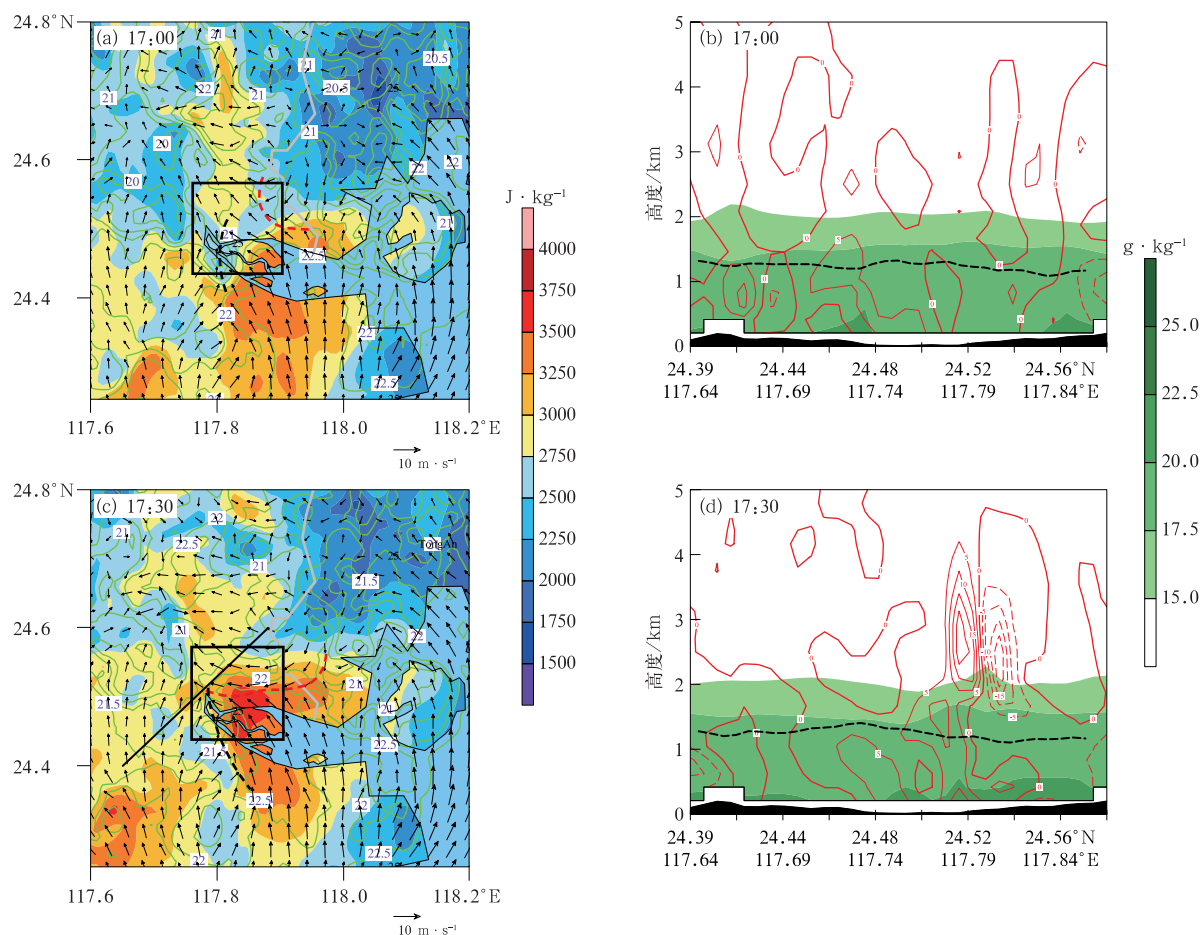
5.4 阵风锋与海风锋碰撞前后物理量变化

图 10 绘制了模拟的阵风锋与海风锋碰撞前与碰撞时的最大对流有效位能(MCAPE)、2 m 比湿以及 10 m 风场分布。17:00(图 10a),阵风锋与海风锋碰撞前,碰撞区域(图 10a 黑色方框)内 2 m 比湿约为 $21.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,MCAPE 在 $2000 \sim 2750 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。17:30(图 10c),阵风锋与海风锋碰撞时,碰撞区域

内 2 m 比湿增加了 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,MCAPE 增加超过 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

进一步沿图 10c 黑线绘制比湿、涡度以及自由对流高度(LFC)的垂直剖面(图 10b,10d)。由图可知,17:00,近地面至 LFC 高度(图 10b 黑色虚线)比湿约在 $17.5 \sim 20.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明对流发生前的水汽条件较为充沛;然而此时涡度值较小,基本分布于零线附近,表明动力抬升条件较弱。17:30(图 10d),碰撞区域低层比湿增加至 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,涡度增强至 $25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,辐合抬升明显加强,强辐合抬升作用将近地面湿空气抬升至 LFC 以上,此时模拟的近地面有新生对流触发(图 8c)。10 min 后,强辐合抬升作用将比湿超过 $22.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的水汽抬升至 LFC 以上(图略),对流单体进一步发展加强。

综上所述可知,在阵风锋与海风锋发生碰撞前后,碰撞区域内不稳定能量、浅层比湿及涡度均出现明显增长;在不稳定能量、水汽条件与强辐合抬升机制的共同配合下,边界层内的暖湿不稳定空气被抬升至 LFC 以上,从而触发新生对流并促使其后继发展与加强,该结果与何娜等(2023)关于碰撞型阵风锋触发对流的环境场特征研究结论一致。



注: 方框表示阵风锋和海风锋碰撞区域, 图 b 和 d 中黑色阴影代表地形。

图 10 2023 年 8 月 16 日模拟的(a,c)MCAPE(填色)、2 m 比湿(绿色等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

和 10 m 风场(风矢), (b,d)沿图 10c 黑线的比湿(填色)、

涡度(红色等值线,单位: 10^{-4} s^{-1})和 LFC(黑色虚线,单位: km)的垂直剖面

Fig. 10 Simulated (a, c) MCAPE (colored), 2 m specific humidity (green contour,

unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and 10 m wind field (vector), (b, d) vertical cross-section

of specific humidity (colored), vorticity (red contour, unit: 10^{-4} s^{-1}) and

LFC (black dashed line, unit: km) along the black line in Fig. 10c on 16 August 2023

6 结论与讨论

本文利用常规观测资料、地面自动气象站加密观测资料、NCEP/FNL 再分析资料、多普勒雷达资料等,对 2023 年 8 月 16 日副高边缘、阵风锋和海风锋共同触发新生对流的影响过程进行分析,并借助高分辨率中尺度模式 WRF 进行数值模拟,得出的主要结论如下:

(1)此次雷暴天气发生在副高边缘,高层辐散叠加低层辐合,在较为显著的高低空温度差动平流和上干下湿配置造成的不稳定大气层结下,对流由地

面辐合线触发。实况雷达低层回波和自动站显示阵风锋西南侧有一条海风锋存在,在阵风锋向该海风锋靠近并碰撞过程中,两者之间的辐合区域触发对流。

(2)WRF 模式较好地再现了海风与环境风场相互作用所形成的海风锋辐合结构,以及雷暴单体减弱后其后侧冷出流与前侧环境暖空气之间形成的阵风锋水平和垂直结构。

(3)阵风锋与海风锋碰撞发生后,低层辐合和局地抬升显著增强,并在充足水汽和不稳定能量配合下触发对流发展。模式结果进一步表明,碰撞后续阶段仍可维持对流再生与组织化增强过程,对强降

水的维持具有重要作用。

本文通过较为合理的一次模拟结果分析推断出中小尺度对流发生发展的过程以及 CI 发生机理。但是目前通过数值模式完全合理模拟出局地对流的发展过程还较为困难,后续应加强相关加密观测资料同化技术的应用,进一步深入分析中小尺度发生发展特征以及 CI 发生机理。

参考文献

- 段海霞,刘新伟,蒲朝霞,2013.不同云方案对祁连山降水模拟的影响[J].大气科学学报,36(3):367-378. Duan H X, Liu X W, Pu Z X, 2013. Cloud microphysical processes on simulation of precipitation in Qilian Mountains[J]. Trans Atmos Sci, 36(3):367-378 (in Chinese).
- 樊李苗,俞小鼎,2013.中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J].高原气象,32(1):156-165. Fan L M, Yu X D, 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China[J]. Plateau Meteor, 32(1):156-165 (in Chinese).
- 何娜,俞小鼎,丁青兰,等,2023.北京地区雷暴阵风锋触发对流新生的环境场特征分析[J].高原气象,42(5):1285-1297. He N, Yu X D, Ding Q L, et al, 2023. Analysis of environmental field characteristics of convective initiation triggered by thunderstorm gust fronts in Beijing Area[J]. Plateau Meteor, 42(5):1285-1297 (in Chinese).
- 蒋超,才奎志,杨磊,等,2023.辽东湾北部海风锋与阵风锋碰撞形成的一次雷暴大风天气过程分析[J].气象与环境学报,39(5):19-27. Jiang C, Cai K Z, Yang L, et al, 2023. Analysis of a thunderstorm gale process formed by the collision of sea breeze front and gust front in the northern Liaodong Bay[J]. J Meteor Environ, 39(5):19-27 (in Chinese).
- 刘彬贤,王彦,刘一玮,2015.渤海湾海风锋与阵风锋碰撞形成雷暴天气的诊断特征[J].大气科学学报,38(1):132-136. Liu B X, Wang Y, Liu Y W, 2015. Diagnostic features of thunderstorm events triggered by collision between sea breeze front and gust front over Bohai Bay[J]. Trans Atmos Sci, 38(1):132-136 (in Chinese).
- 刘娟,宋子忠,李金城,1996.一次强雹暴系统及其阵风锋的雷达回波研究[J].气象,22(1):13-17. Liu J, Song Z Z, Li J C, 1996. Radar echo of a severe hail storm system and its gust front[J]. Meteor Mon, 22(1):13-17 (in Chinese).
- 闵锦忠,靳奎峰,陈虹杏,等,2019. CCN 浓度对安徽一次强对流天气影响的数值模拟[J].大气科学学报,42(4):542-551. Min J Z, Jin K F, Chen H X, et al, 2019. Numerical simulation of the influence of CCN concentration on a strong convective weather event in Anhui[J]. Trans Atmos Sci, 42(4):542-551 (in Chinese).
- 苏爱芳,郑永光,张宁,等,2022.边界层辐合线触发深厚湿对流研究进展[J].气象学报,80(2):177-189. Su A F, Zheng Y G, Zhang N, et al, 2022. A review of research on boundary convergence lines triggering of deep and moist convection[J]. Acta Meteor Sin, 80(2):177-189 (in Chinese).
- 孙永刚,孟雪峰,计燕霞,等,2025.河套地区边界层辐合线形成及其对流触发作用[J].气象,51(1):85-96. Sun Y G, Meng X F, Ji Y X, et al, 2025. Formation of boundary layer convergence lines in Hetao Area and their convection triggering effect[J]. Meteor Mon, 51(1):85-96 (in Chinese).
- 万夫敬,孙继松,孙敏,等,2021.山东半岛海风锋在一次飑线系统演变过程中的作用[J].气象学报,79(5):717-731. Wan F J, Sun J S, Sun M, et al, 2021. Impacts of sea breeze front over Shandong Peninsula on the evolution of a squall line[J]. Acta Meteor Sin, 79(5):717-731 (in Chinese).
- 汪雅,苗峻峰,谈哲敏,2013.宁波地区海-陆下垫面差异对雷暴过程影响的数值模拟[J].气象学报,71(6):1146-1159. Wang Y, Miao J F, Tan Z M, 2013. Numerical study of the impact of differences between sea and land underlying surface on thunderstorm in the Ningbo Area[J]. Acta Meteor Sin, 71(6):1146-1159 (in Chinese).
- 王婷婷,朱文剑,姚凯,等,2023.2021年吉林中部一次极端雷暴大风的中尺度成因分析[J].气象,49(10):1215-1226. Wang T T, Zhu W J, Yao K, et al, 2023. Mesoscale analysis of an extreme thunderstorm gale in central Jilin Province in 2021[J]. Meteor Mon, 49(10):1215-1226 (in Chinese).
- 吴福浪,李晓丽,於敏佳,等,2019.盛夏杭州湾一次海风锋触发雷暴的数值模拟分析[J].大气科学学报,42(4):581-590. Wu F L, Li X L, Yu M J, et al, 2019. Numerical simulation study on a thunderstorm triggered by sea breeze front in Hangzhou Bay in summer[J]. Trans Atmos Sci, 42(4):581-590 (in Chinese).
- 徐蓉,苗峻峰,谈哲敏,2013.南京地区城市下垫面特征对雷暴过程影响的数值模拟[J].大气科学,37(6):1235-1246. Xu R, Miao J F, Tan Z M, 2013. Numerical simulation of the impact of urban underlying surface characteristics on thunderstorm in Nanjing[J]. Chin J Atmos Sci, 37(6):1235-1246 (in Chinese).
- 许爱华,孙继松,许东蓓,等,2014.中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J].气象,40(4):400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon, 40(4):400-411 (in Chinese).
- 许长义,卜清军,黄安宁,2022.环渤海湾连续两条阵风锋的关联与成因分析[J].气象,48(6):729-745. Xu C Y, Bu Q J, Huang A N, 2022. Analyses on correlation and causes for the consecutive thunderstorm gust fronts over the Bohai Sea Bay[J]. Meteor Mon, 48(6):729-745 (in Chinese).
- 许长义,王彦,2021.渤海湾阵风锋垂直结构特征及维持机制分析[J].海洋预报,38(6):21-32. Xu C Y, Wang Y, 2021. Analysis on the characteristics and maintenance mechanism of the vertical structure of thunderstorm gust front in the Bohai Bay[J]. Mar Forecasts, 38(6):21-32 (in Chinese).
- 易笑园,张义军,沈永海,等,2012.一次海风锋触发的多单体雹暴及合并过程的观测分析[J].气象学报,70(5):974-985. Yi X Y,

- Zhang Y J, Shen Y H, et al, 2012. Observational analysis of a multicell hailstorm triggered by a sea-breeze front and its merging process[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(5):974-985(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2007. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社:130-163. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2007. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press: 130-163(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理和方法:第4版[M]. 北京:气象出版社:71-72. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Principles and Methods of Atmospheric Science[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press:71-72(in Chinese).
- Banta R M, Olivier L D, Levinson D H, 1993. Evolution of the Monterey bay sea-breeze layer as observed by pulsed Doppler lidar[J]. *J Atmos Sci*, 50(24):3959-3982.
- Caniaux G, Redelsperger J L, Lafore J P, 1994. A numerical study of the stratiform region of a fast-moving squall line. Part I: general description and water and heat budgets[J]. *J Atmos Sci*, 51(14):2046-2074.
- Colby F P Jr, 1984. Convective inhibition as a predictor of convection during AVE-SESAME II [J]. *Mon Wea Rev*, 112(11):2239-2252.
- Crook N A, Sun J Z, 2004. Analysis and forecasting of the low-level wind during the Sydney 2000 forecast demonstration project[J]. *Wea Forecasting*, 19(1):151-167.
- Dickerson R R, Huffman G J, Luke W T, et al, 1987. Thunderstorms; an important mechanism in the transport of air pollutants[J]. *Science*, 235(4787):460-465.
- Simpson J, Westcott N E, Clerman R J, et al, 1980. On cumulus mergers[J]. *Arch Meteorol Geoph Biokl Ser A*, 29(1-2):1-40.
- Wilson J W, Megenhardt D L, 1997. Thunderstorm initiation, organization, and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines[J]. *Mon Wea Rev*, 125(7):1507-1525.
- Wilson J W, Schreiber W E, 1986. Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines[J]. *Mon Wea Rev*, 114(12):2516-2536.

(本文责编:张芳)