



四川盆地春季一次罕见区域性大风过程特征及成因分析

刘伯骏 夏繁 邓承之 杨华 周燕秋

Analysis of characteristics and mechanism of a rare regional gale event in the Sichuan Basin during Spring

LIU Bojun, XIA Fan, DENG Chengzhi, YANG Hua, ZHOU Yanqiu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-118>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

四川盆地一次暖性西南低涡大暴雨的中尺度分析

Mesoscale analysis on one warm Southwest Vortex rainstorm in the Sichuan basin

暴雨灾害. 2023, 42(1): 24–36 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-024>

基于多源资料的四川盆地西部一次持续性极端暴雨过程分析

Analysis of a sustained extreme rainstorm event in western Sichuan Basin by using multi-source data

暴雨灾害. 2024, 43(1): 13–22 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-221>

四川盆地秋季一次层状云弱降水过程的微物理特征观测分析

Analysis on the microphysical characteristics of weak precipitation process observation of a stratiform cloud in Sichuan Basin in autumn

暴雨灾害. 2022, 41(4): 445–457 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.009>

四川盆地一次暴雨过程中西南低涡非对称结构特征及其成因分析

Analysis on characteristics and causes of the Southwest Vortex asymmetric structure during one rainstorm in the Sichuan Basin

暴雨灾害. 2024, 43(6): 627–636 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-239>

一种X波段相控阵天气雷达反射率因子订正算法

A reflectivity factor correction algorithm for X-band phased array radars

暴雨灾害. 2023, 42(4): 446–454 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-025>

基于双偏振雷达资料的洞庭湖区一次强对流过程的分阶段特征分析

Staged characteristics analysis of a severe convection over the Dongting Lake area based on dual-polarization Doppler weather radar data

暴雨灾害. 2023, 42(6): 692–703 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-170>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘伯骏,夏蓁,邓承之,等.2026.四川盆地春季一次罕见区域性大风过程特征及成因分析[J].暴雨灾害,45(5):633–643. LIU Bojun, XIA Fan, DENG Chengzhi, et al. 2026. Analysis of characteristics and mechanism of a rare regional gale event in the Sichuan Basin during Spring [J]. Torrential Rain and Disasters,45(5):633–643 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-118

四川盆地春季一次罕见区域性大风过程特征及成因分析

刘伯骏^{1,2}, 夏蓁¹, 邓承之¹, 杨华³, 周燕秋⁴

(1. 重庆市气象台, 重庆 401147; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072;

3. 重庆市开州区气象局, 开州 405449; 4. 重庆市铜梁区气象局, 铜梁 402560)

摘要: 四川盆地地形特殊、大风事件少见, 对其特征及具体成因认识尚不充分。利用加密气象观测站、探空、X 波段相控阵雷达、S 波段雷达及拼图、ERA5 再分析等资料, 对 2022 年 4 月 11—12 日四川盆地一次罕见区域性大风过程特征及成因进行分析, 并对强雷暴大风落区的可预报性和 X 波段雷达的应用进行了探究。结果表明: (1) 高空槽东移携带干冷空气叠加在低层暖脊之上, 配合地面冷锋和辐合线, 为强对流的发生提供了有利的环境条件。(2) 过程极大风速的空间分布具有明显的地域差异。四川盆地北部大风强度偏弱, 多为 8~9 级, 但分布广泛; 盆地中部一线, 大风强度最强, 达 11~13 级, 且呈西北-东南线状; 而盆地南部的大风站数极少, 但强度仍可达 12 级。(3) 大风强度和分布特征与其成因直接相关。盆地北部受天气尺度冷锋过境影响, 形成大范围混合性大风; 盆地南部暖湿气流北上触发对流, 出现强且分散的雷暴大风; 而中部一线, 冷暖空气交汇触发飑线等强烈对流天气, 强下沉有效位能造成的对流下沉支与密度流共同作用, 形成西北—东南向线状分布的大风。(4) 此次强雷暴大风精细落区具有一定的可预报性, 地面 3 h 负变压区能表征冷锋前暖平流强度, 并提前 1~2 h 指示较周边地区更强的对流风暴发生位置。(5) X 波段相控阵雷达可观测到直接造成重庆中心城区雷暴大风的 γ 中尺度对流风暴精细演变过程, 大风出现前主体回波前侧新生单体的雷达反射率因子质心在 10 min 内快速下降, 该特征可提前 10~20 min 预警雷暴大风。

关键词: 雷暴大风; 强对流; X 波段相控阵雷达; 3 h 变压

中图分类号: P458.1⁺23

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2024-118

Analysis of characteristics and mechanism of a rare regional gale event in the Sichuan Basin during Spring

LIU Bojun^{1,2}, XIA Fan¹, DENG Chengzhi¹, YANG Hua³, ZHOU Yanqiu⁴

(1. Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147; 2. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072; 3. Kaizhou Meteorological Bureau of Chongqing, Kaizhou 405449; 4. Tongliang Meteorological Bureau of Chongqing, Tongliang 402560)

Abstract: Due to the special topography and rare gale events in the Sichuan Basin, its characteristics and mechanism are not fully understood. Using the meteorological observation station data, sounding data, X-band phased array radar, S-band radar and its mosaic, the fifth-generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis data (ERA5), this study analyzes the characteristics and mechanism of a rare regional gale event occurring in the Sichuan Basin on April 11-12 2022, and further explores the predictability of strong gale locations and application of X-band radar. The results are as follows. (1) The eastward-moving upper-level trough brings dry and cold air which overlays a low-level warm ridge, aligning with the ground cold front and convergence line to create favorable conditions for deep convection. (2) The distribution of gales exhibits evident regional variations. In the northern Sichuan Basin, gale intensity is relatively weak, mostly force 8-9, but widely distributed. In the central basin, intensity is the strongest, reaching force 11-13 scale and distributed in a northwest-southeast linear pattern. In the southern basin, only a few stations recorded gales, yet the intensity

收稿日期: 2024-06-18; 定稿日期: 2024-12-18

资助项目: 重庆市科技局技术创新与应用发展专项重点项目 (CSTB2023TIAD-KPX0065); 四川省科技厅科技计划项目 (2023YFS0430); 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2023-108); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目 (SZKT202206); 重庆市气象局创新团队项目 (ZHCXTD-202003)

第一作者: 刘伯骏, 主要从事雷达气象和人工智能研究。E-mail: Sinklbj@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

exceed force 12. (3) The intensity and distribution characteristics of gales are directly linked to their formation mechanisms. The northern basin experienced mixed-type gusts due to the passage of synoptic-scale cold fronts. The northward intrusion of warm and moist airflow into the southern basin triggered convection, producing strong and scattered thunderstorm gusts. In the central basin, the convergence of warm and cold air leads to severe convection such as a squall line. The combined effects of convective downdrafts caused by the downdraft convective available potential energy and density currents form a northwest-southeast linear distribution of gusts. (4) The precise locations of these thunderstorm wind gusts show some predictability. The three-hour negative ground pressure variation areas indicate the intensity of warm advection ahead of the cold front and provide a 1-2-hour advance indication of the potential locations of stronger convective storms are more likely than in surrounding areas. (5) X-band phased array radar provides detailed observations of γ -mesoscale convective storms that directly caused the wind gusts in Chongqing. Observations reveal that prior to the onset of wind gusts, the radar reflectivity centroid of the new cell rapidly descends within 10 minutes, which allows for a 10-20-minute lead time to issue warnings for severe thunderstorm wind gusts.

Key words: thunderstorm wind gust; severe convection; X-band phased array radar; 3-hour pressure variation

引 言

瞬时风速 $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (8 级) 的大风天气, 对人民生活造成很大影响 (俞小鼎和郑永光, 2020)。其中, 雷暴大风是由大气对流活动所导致的地面及近地面的强阵风 (王秀明等, 2013), 易发生在中层干、下层湿的环境中, 具有局地性强、预警难度大等特点 (马淑萍等, 2019; 盛杰等, 2019; 徐诚等, 2024), 造成如 2015 年“东方之星”客轮翻沉等特重大事故 (唐明晖等, 2016)。另外, 冷锋雷暴回波带和冷空气大风相伴随时, 会产生同时具有雷暴大风和冷空气大风特征的混合性大风 (马中元等, 2011), 如 2019 年 6 月 5 日造成川渝地区数万人受灾的大风天气过程中, 重庆铜梁站出现 $30.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的混合性大风 (邓承之等, 2024)。不同过程中雷暴大风的成因往往由不同物理机制主导, 主要包括负浮力作用、动量下传、冷池出流等 (孙继松等, 2014)。风暴内部的垂直运动是雷暴大风的直接驱动因子, 而与风暴内部的蒸发 (凝结)、融化 (凝华) 等云-水微物理过程直接相关的“热力学作用造成的扰动气压垂直变化”和对流冷池效应, 是垂直运动的主要强迫源 (孙继松, 2023); 当近地层温度递减率接近干绝热线且低层伴有急流时, 垂直交换使得高空动量下传, 是造成地面大风的重要原因之一 (吴海英等, 2013; 万夫敬等, 2021); 同时地面强冷池有利于飚线型灾害大风的产生 (孙建华等, 2014; Falk and Heever, 2023)。上述研究表明, 雷暴大风成因复杂、预警难度大, 亟需结合高分辨率观测开展精细化个例分析。

雷达是监测预警雷暴大风的重要手段, 国内外学者对雷暴大风的雷达特征开展诸多研究 (孙晓磊等, 2023; 唐明晖等, 2023; 王艳春等, 2023)。Houze 等 (1989) 提出的典型飚线结构中, 雷达回波呈准二维分布, 包含移动方向前侧的线状对流区域和其后

的大片层云区域。俞小鼎等 (2020) 总结得出, 雷暴大风在多普勒天气雷达观测中多存在弓形回波、中层径向辐合 (MARC)、低层径向速度大值区、对流风暴和阵风锋移速较快等特征。X 波段相控阵雷达凭借更高的时空分辨率、更强的中小尺度涡旋捕捉能力而被用于雷暴大风分析中。于明慧等 (2019) 通过对比一次超级单体造成的大风天气中不同波段雷达的观测数据指出, X 波段相控阵雷达的时空分辨率远高于 S 波段, 可以弥补 S 波段雷达仰角层不足的缺陷, 能更精确地描述超级单体的短时演变。王清川等 (2022) 分析 X 波段双偏振雷达反射率因子径向剖面图发现, $\geq 50\text{ dBz}$ 强回波向高层伸展后迅速下降与地面灾害性大风出现有很好的对应关系。

受四川盆地特殊下垫面影响, 当地雷暴大风的发生环境、统计特征、雷达特征有一定的地域性。孙继松等 (2014) 研究指出, 斜压锋生型是西南地区最容易发生强对流的天气类型, 偏北路径冷空气沿青藏高原东坡南下时, 多在地面锋面与低层切变线之间触发雷暴大风等强对流天气。陈贵川等 (2011) 对一次强风雹过程的分析表明, 四川盆地东部平行岭谷地形起到抬升气流和触发对流的作用, 地形阻挡形成的狭管效应, 加强了下击暴流形成的地面大风。费海燕等 (2016)、陈晓欣等 (2022) 指出四川盆地为雷暴大风的低发区, 在 2004—2013 年间出现 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上雷暴大风的频次为 $0.5 \times 10^{-4}\text{ 次}\cdot\text{km}^{-2}$, 远低于华北 ($4.1 \times 10^{-4}\text{ 次}\cdot\text{km}^{-2}$) 和东北 ($4.0 \times 10^{-4}\text{ 次}\cdot\text{km}^{-2}$) 地区。董丹丹等 (2021) 研究指出, 重庆永川地区大风日变化存在午后和凌晨两个峰值。龙柯吉等 (2020) 统计四川盆地 34 次雷暴大风过程指出, 82% 的雷暴大风伴有径向速度大值区。由于四川盆地大风事件较少, 对其形成机制的认识尚不足, 准确预警大风仍是预报业务面临的巨大挑战。X 波段相控阵

雷达可用于分析直接造成雷暴大风的 γ 中尺度系统, 为深入探究大风成因提供精细化技术支撑。2022 年 4 月 11 日 18 时—12 日 08 时 (北京时, 下同), 四川盆地出现一次罕见区域性大风过程, 本文利用加密气象观测站、探空、X 波段相控阵雷达、S 波段雷达及拼图、ERA5 再分析等资料, 对此次大风天气的特征及成因开展分析, 并对强雷暴大风落区的可预报性和 X 波段雷达的应用进行探究, 以期对四川盆地春季雷暴大风的预警提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用资料包括: (1) 2022 年 4 月 11—12 日四川盆地加密气象观测站逐时资料, 主要包括气温、气压、露点和风速风向等气象要素, 用于分析地面气象要素变化; (2) 4 月 11 日 20 时沙坪坝、宜宾和达州探空资料, 用于分析对流环境条件; (3) 重庆南泉 X 波段相控阵雷达资料 (以下简称南泉雷达), 其空间分辨率为 30 m (径向) $\times 3.6^\circ$ (方位角方向) $\times 1.8^\circ$ (仰角方向), 时间分辨率为 1 min , 所使用的产品主要包括组合反射率因子 (CR) 和水凝物相态分类 (HCL) 产品, 产品空间分辨率与基数据相同, 用于分析风暴精细结构; (4) 重庆、永川和南充雷达资料, 过程期间 3 部雷达均采用 VCP21 体扫模式, 所使用的产品主要包括反射率因子和径向速度的等射束高度和剖面产品, 产品空间分辨率为 250 m , 用于分析雷达回波特征; (5) 雷达拼图产品, 基于中国气象局灾害性天气短时临近预报预警业务系统 (Severe Weather Automatic Nowcast System, SWAN) 生成, 使用重庆、万州、黔江、永川、涪陵共 5 部新一代多普勒天气雷达, 产品分辨率为 1 km , 用于呈现对流系统总体特征。探空站、南泉雷达和南充雷达的位置见图 1。

1.2 研究方法

本文分析时使用了水凝物分类及锋生函数计算。在水凝物分类中, 主要参考偏振量和零度层亮带高度信息, 使用水凝物识别算法 (Park et al., 2009) 进行分类。锋生函数 (F) 基于 ERA5 数据诊断分析而得, 其表达式 (Chen et al., 2007) 为

$$F = \frac{d}{dt} |\nabla \theta_e| = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

$$F_1 = -\frac{1}{2|\nabla \theta_e|} \left[\left(\frac{\partial \theta_e}{\partial x} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial \theta_e}{\partial x} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (2)$$

$$F_2 = -\frac{1}{2} |\nabla \theta_e| \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$F_3 = -\frac{1}{|\nabla \theta_e|} \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \left(\frac{\partial \theta_e}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \quad (4)$$

式中, F_1 为变形项, F_2 为辐合项, F_3 为垂直项。当 $F > 0$ 时锋生, $F < 0$ 时锋消。本文进一步利用锋生函数 F 诊断冷锋附近的锋生/锋消及锋面位置, 具体分析见第 3 节。

2 天气实况和环流形势

2022 年 4 月 11 日 18 时—12 日 08 时, 四川盆地自西北向东南出现了一次罕见区域性大风过程, 盆地大部地区出现 8 级以上大风, 最大瞬时风速为 $37.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 出现在 11 日 21 时 58 分四川安岳站, 为该站建站以来观测到的最强风速。过程中极大风速分布具有明显的地域差异, 四川盆地内最强风速呈西北—东南线状分布 (图 1 中 B 区); 偏北地区风速稍小、大风分布广泛 (图 1 中 A 区); 偏南地区零散分布着阵风超过 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速 (图 1 中 C 区)。11 日 20—21 时, 9 级以上雷暴大风较为分散, 主要出现在四川盆地西部、北部; 11 日 21—12 日 01 时, 大风范围扩大呈南北线状分布且快速向东移动; 12 日 02 时以后, 大风强度和范围均有所减弱, 零散的分布在重庆西部和四川中东部地区 (图 1)。

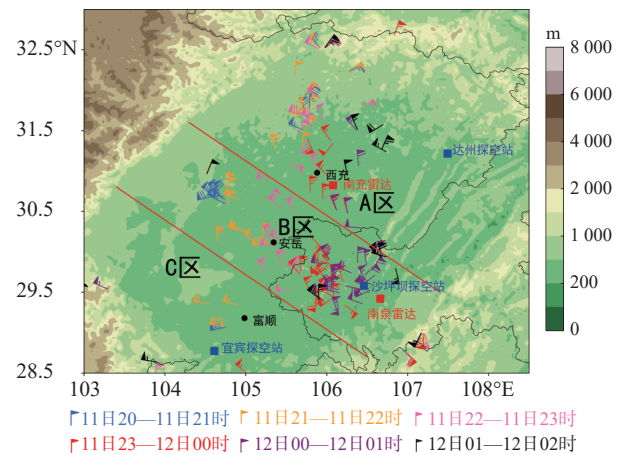


图 1 2022 年 4 月 11 日 20 时—12 日 02 时四川盆地 9 级以上大风及雷达、探空站、代表站的空间分布及地形 (填色) (红色实线为 A、B、C 区的分界线, 下同)

Fig. 1 Spatial distribution of wind gusts exceeding force 9 gale in Sichuan Basin from 20:00 BT on April 11 to 02:00 BT on April 12, 2022, and the locations of radars, sounding stations, and representative stations with terrain (Shaded) (red line marks the boundary between areas A, B, and C, the same hereinafter)

4 月 11 日 20 时, 500 hPa 高空槽东移至四川盆地西部, 四川盆地位于高空槽前西南气流中, 槽后西

北风引导北方冷空气南下,与南支槽前的西南暖湿气流在四川盆地交汇,槽前急流风速达 $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,垂直风切变强。700 hPa 低涡中心位于四川南部,低涡前的暖平流促使地面低压发展,在四川与重庆交界地区存在露点锋。850 hPa 低涡中心位于宜宾自贡一带,四川盆地东部受高能舌控制。地面冷高压中心位于内蒙古中北部,中心强度为 1 012.5 hPa;地面冷锋呈东北—西南走向,从陕西南部南压过境,具有深厚的锋面大尺度动力强迫条件(图 2a)。四川盆地受地面热低压影响,地表温度高,热力不稳定强。随着地面辐合线的触发抬升,在锋面及锋前暖区中造成大范围强对流天气。

沙坪坝探空(图 2b)显示,自逆温层顶抬升的对流有效位能(CAPE)为 $1\,371 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,850—500 hPa 温度差为 32.8°C ,地面露点为 18°C ,700—500 hPa 为深厚干层,平均温度露点差为 26.8°C ,最大单层温度露点差高达 43°C 。中高层干空气的卷入,进一步促使热力不稳定增长和强下沉对流有效位能(DCAPE)

的形成,由 600 hPa 计算的 DCAPE 达 $1\,386 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,为雷暴大风的发生提供了良好的热力条件。过程中垂直风切变较大且主要集中在低层,0—3 km 垂直风切变为 $14.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,0—6 km 垂直风切变为 $16.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。相比于单体型风暴,此类强垂直风切变更有利于高度组织化的条形结构飚线的产生(俞小鼎等,2020)。800 hPa 到地面的层结曲线接近于干绝热线、露点曲线贴近等饱和比湿线,表明 800 hPa 以下充分混合。

与沙坪坝相比,位于图 1 中 C 区的宜宾探空(图 2c)和 A 区的达州探空(图 2d)均显示有同等强度的 CAPE 和 0—6 km 垂直风切变。二者差异在于宜宾整层水汽条件更好, K 指数为 38.8°C ,850—700 hPa 有一支 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东南急流带来充沛水汽,600 hPa 高度处干层不明显;而达州水汽条件稍差,整层略偏干,且自由对流高度达 600 hPa,对流抑制能量较大。综上所述,盆地内环境条件利于强对流发展,但北部触发条件更为苛刻。

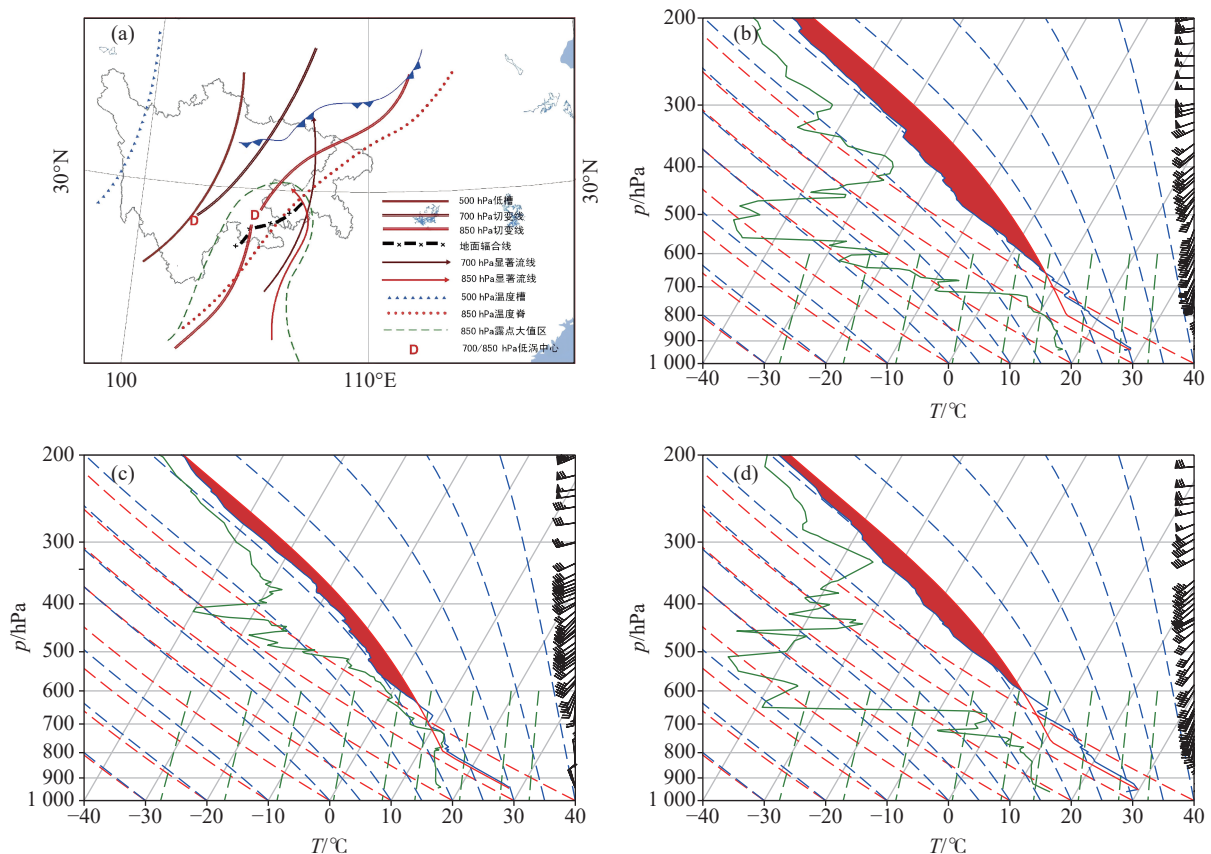


图 2 2022 年 04 月 11 日 20 时中尺度综合分析图 (a) 及沙坪坝 (b)、宜宾 (c)、达州站 (d) T - $\ln p$ 图

Fig. 2 The (a) Map of mesoscale analysis and T - $\ln p$ of (b) Shapingba, (c) Yibin, and (d) Dazhou stations at 20:00 BT on April 11, 2022

3 对流系统演变分析

利用 ERA5 再分析资料和 SWAN 拼图分析此过程中对流系统演变特征(图 3)。当冷锋位于四川盆

地北部时,受特殊地形影响,四川盆地南侧重庆—泸州一带常有热低压发展增强,冷空气与热低压之间的气压差导致气象观测站在冷锋过境前已转为弱北

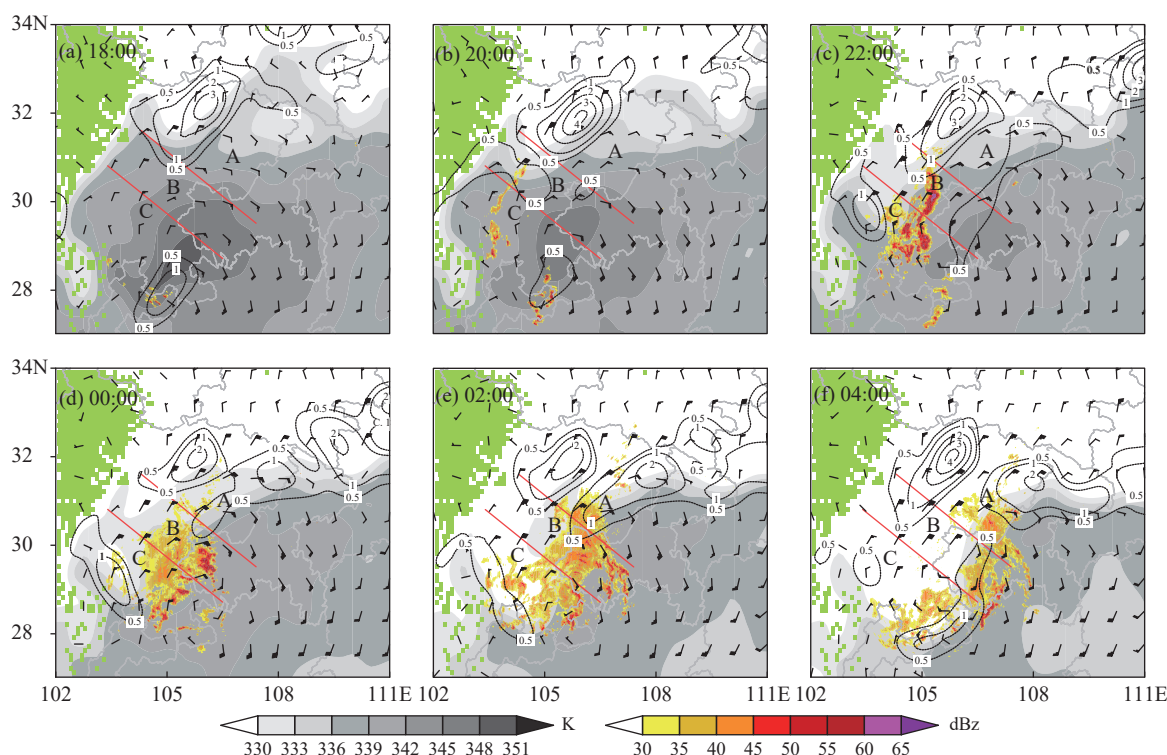


图3 2022年4月11日18时(a)、11日20时(b)、11日22时(c)、12日00时(d)、12日02时(e)、12日04时(f)四川盆地850 hPa风场(风向杆,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、相当位温(灰度阴影,单位: K)、组合反射率因子(彩色阴影,单位: dBZ)和锋生函数(黑色等值线,单位: $10^{-8}\text{K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)空间分布(地图左侧绿色阴影代表青藏高原)

Fig. 3 Spatial distribution of 850 hPa wind field (wind barb, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), equivalent potential temperature (gray shaded, unit: K), composite reflectivity mosaic (color shaded, unit: dBZ), and frontogenesis function value (black contour line, unit: $10^{-8}\text{K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) at (a) 18:00 BT, (b) 20:00 BT, (c) 22:00 BT, on April 11 and (d) 00:00 BT, (e) 02:00 BT, (f) 04:00 BT on April 12, 2022 in Sichuan Basin (Green shaded in the left map represents Tibetan Plateau)

风。此时,气象观测站温度、露点未明显降低;锋面主体表现为相当位温梯度大值区及锋生函数大值区。

11日18时—20时,冷锋位于四川盆地北部,锋后海平面气压多高于1004 hPa;重庆附近有热低压发展增强,中心气压为998 hPa。受二者之间气压差影响,四川盆地中部转为北风,其与低层暖湿空气在图1中C区交汇,增强了上升运动和垂直风切变,并在C区触发零散对流,伴随着时间推移对流持续生成并向东移动。11日20—22时,850 hPa偏北气流进一步加强,且与锋区联系紧密,呈强斜压性,A区开始出现大范围8~9级阵风,而B区内700 hPa偏南暖湿气流与850 hPa偏北气流交汇,对流组织成准线状,并逐渐发展为结构紧密、强度>45 dBZ的飑线。此时C区同样存在强回波,但呈团块状分布,组织性弱于B区对流,而B区出现过程中最强的安岳极端雷暴大风。23时起,飑线迅速解体,50 dBZ以上强回波逐渐由南北向演化为西北—东南向。12日00—04时,暖空气上升绝热冷却,冷空气下沉增温,趋于锋消,对流强度随之减弱。纵观整个过程,在飑线解体前,强对流主要出现在冷锋前侧,强回波与锋生大值区并不匹配;而飑线解体后,锋生函数大值区与锋

面及强对流落区相对应,此时斜压性显著,锋面作用对于对流的组织化起主导作用。

4 地面气象要素演变特征

11日20时—12日02时,由冷空气、对流下沉支共同造成的冷池与前方暖区形成了8~14℃的温差,强水平温度梯度表征冷暖空气的密度差异较大,密度差异大值区均有8级以上大风出现。11日23时(图4a),冷暖空气交绥于川渝交界处,交绥区内温度梯度大,锋前高温达26℃,锋后冷气团温度普遍低于18℃。国家级气象观测站中最大小时负变温出现在安岳站,达10.2℃,此时安岳东北侧多站尚未出现对流,但已受冷空气影响,小时负变温普遍在2℃左右,这表明安岳降温主要由对流风暴的冷池导致。12日00时(图4b)—01时(图4c),强回波区东移南压过程中地面温度梯度加大,且与冷池出流方向相近;大范围的偏北大风主要出现在锋区附近及冷锋后部冷气团中。可见强冷池密度流是造成大范围雷暴大风的重要原因之一。

气象观测站显示11日21时安岳附近3h变压为-0.7~0.3 hPa(图5a),这种异于日变化且强于周边

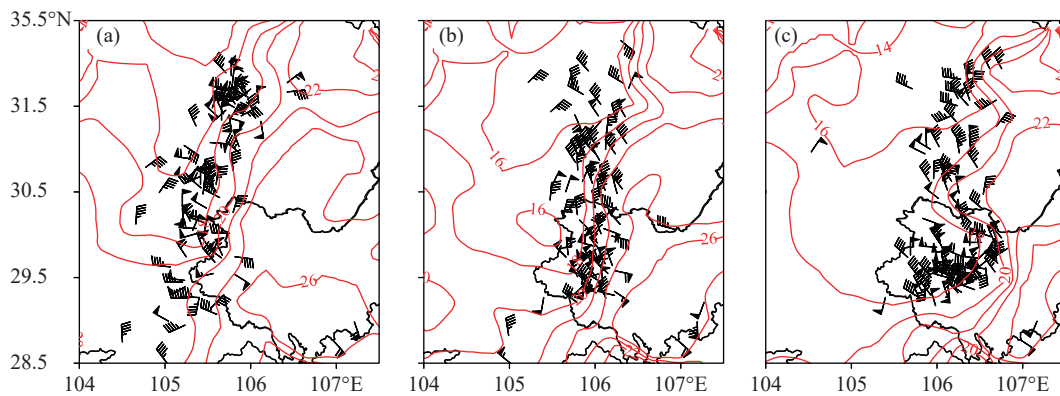


图 4 2022 年 4 月 11 日 23 时 (a)、12 日 00 时 (b)、12 日 01 时 (c) 四川盆地地面温度 (红色等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 与小时极大风速 (风向杆, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of surface temperature (red contour line, unit: $^{\circ}\text{C}$) and hourly maximum wind speed (wind barb, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at (a) 23:00 BT on April 11, and (b) 00:00 BT, (c) 01:00 BT on April 12, 2022 in Sichuan Basin

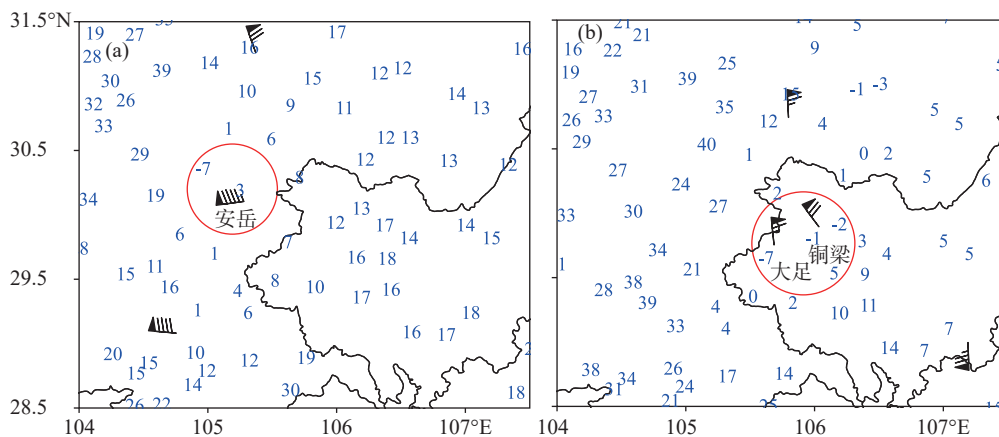


图 5 2022 年 4 月 11 日 21 时 (a) 和 22 时 (b) 3 h 变压 (数字, 单位: 0.1 hPa) 与大风 (红色圆圈中风向杆, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 安岳、大足和铜梁大风分别发生于 21 时 58 分、23 时 30 分、23 时 58 分)

Fig. 5 The 3-hour pressure variation (number, unit: 0.1 hPa) at (a) 21:00 BT and (b) 22:00 BT on April 11, 2022, with wind gusts (wind label in red circle, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Anyue, Dazu and Tongliang wind gusts occurred at 21:58 BT, 23:30 BT, and 23:58 BT on April 11, 2022, respectively)

的降压 (增暖) 也恰好对应着 1 h 后的极端大风。类似的, 重庆大足、铜梁等地在 22 时出现负变压中心 (图 5b), 也对应后续 11 日 23 时—12 日 00 时强雷暴大风位置。可见, 地面 3 h 负变压区能表征冷锋前暖平流强度, 并在此次过程中提前 1~2 h 指示较周边地区更强的对流风暴发生位置。

从雷暴大风分布看, 四川盆地中部、北部均出现大范围大风, 两地均受高空槽、冷锋影响, 且对流环境条件大体相近, 但大风强度不同; 而四川盆地南部大风虽强, 但分布零散。可见本次过程中极大风速的分布具有明显的地域差异。

为研究不同区域间大风差异的成因, 选取西充、安岳、富顺三个站分别代表四川盆地北部、中部和南部的大风特征。分析图 6 可知, 位于最北端的西充站在 11 日 22 时 33 分出现 9 级大风 ($22.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 而在大风发生前, 18 时西充站为北风且逐渐加强; 20—22 时, 西充未出现降水, 但露点迅速降低 (由

15.9°C 降至 9.1°C), 地面气压上升 1.1 hPa, 气温由 20 时的 26.9°C 降至 22 时的 23.7°C 。此时对流处于西充西侧 60 km 附近, 气象观测站、雷达也未观测到阵风锋脱离对流风暴主体快速东扩的现象。这表明在大风发生前, 已有干冷空气影响西充。22—23 时, 西充站气温下降、气压上升、北风增强, 并伴有雷电 (图 7a), 呈典型的锋面系统过境特征。与之相比, 位于最南端的富顺在 21 时 22 分左右出现 9 级大风, 对流发生前, 露点逐渐升高, 而地面气压略有下降。由于该站在此阶段 (大风发生前) 未出现明显降水天气, 露点的升高应为低空暖湿平流带来水汽充分混合至地面所致。探空 (图 2c) 显示 800 hPa 以下层结曲线贴近干绝热线, 露点曲线贴近等饱和比湿线, 表明近地面上下层充分混合, 使得此高度之下的暖湿平流所带来的水汽更容易扩散至地面, 即在富顺发生雷暴大风前, 有一支暖湿气流在此输送水汽和能量。此外, 富顺要素变化呈典型阵风锋过境特征。

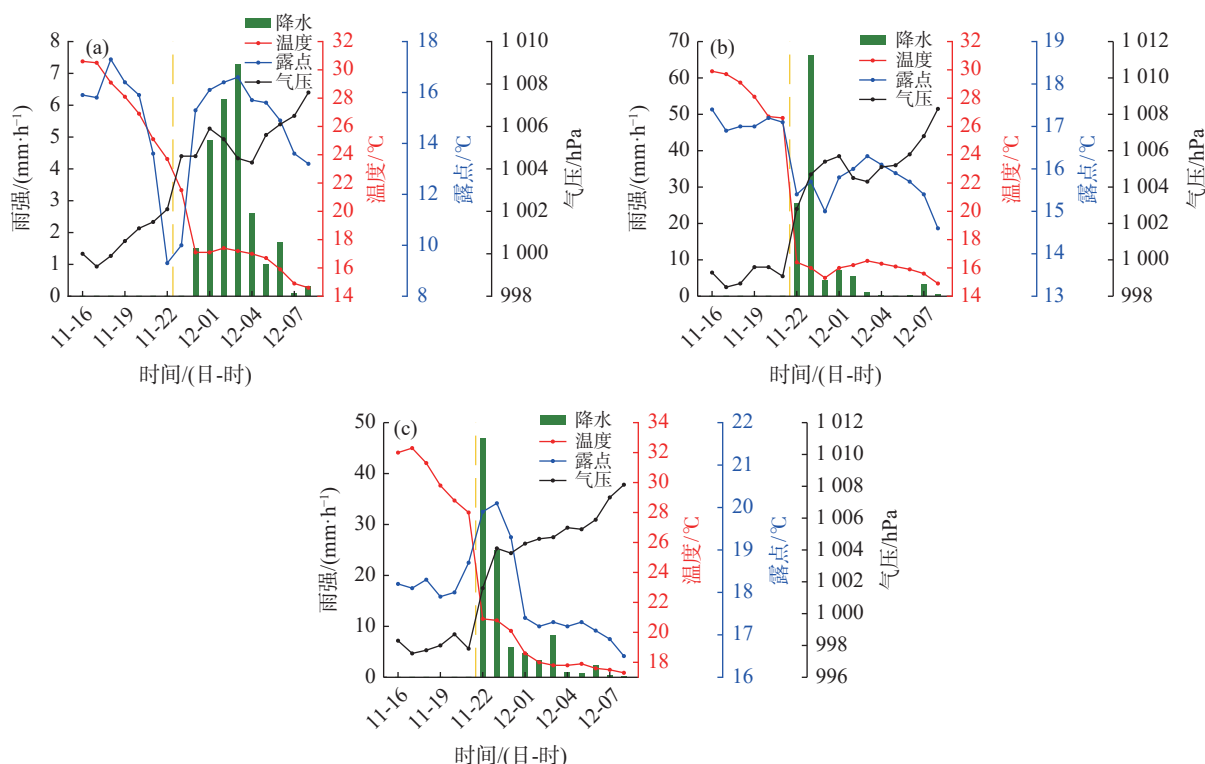


图6 2022年4月11日16时—12日08时西充(a)、安岳(b)、富顺(c)气象观测站要素时间变化(黄色虚线表示当地大风发生时刻)

Fig. 6 Time variations of meteorology elements at (a) Xichong, (b) Anyue, and (c) Fushun stations from 16:00 BT on April 11 to 08:00 BT on April 12, 2022 (yellow dashed line indicates the occurrence time of wind gust)

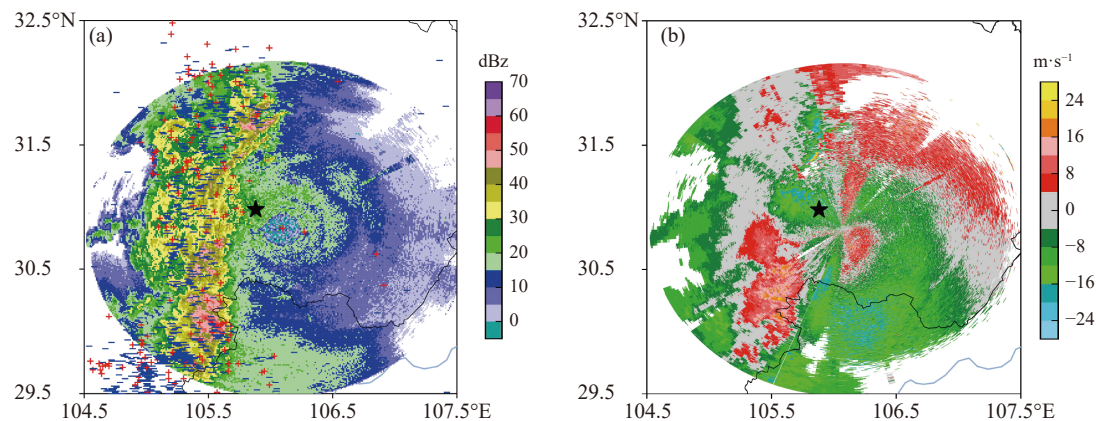


图7 2022年4月11日22时30分南充雷达组合反射率(a)和1.5°仰角径向速度(b) (“+”、“-”分别表示22—23时正负地闪分布, 黑星代表西充站)

Fig. 7 The (a) Composite reflectivity and (b) radial velocity at 1.5° elevation of Nanchong radar at 22:30 BT on April 11, 2022 (“+” and “-” respectively represent the distribution of positive and negative cloud-to-ground lightning from 22:00 BT to 23:00 BT on April 11, 2022, and the black star indicates the position of Xichong station)

安岳站在21时58分出现13级大风, 对流发生前20—21时温度、露点和气压基本不变, 21—22时地面出现10℃的小时负变温和3~4 hPa的小时正变压。结合南北两站分析可知, 暖湿气流顶端与冷空气交汇处位于安岳站附近。因冷空气随高空槽自西向东移动, 其与暖湿气流的主要交汇处呈西北—东南走向, 与过程中四川盆地中部自西北向东南依次发生的11~13级大风区域相对应。同时, 对于四川

盆地南部零散分布的极端大风, 其发生时间明显较早, 主要为暖湿气流影响下发生的局地对流所导致, 具有强度较大、分布零散的特征。

5 不同区域大风的雷达回波特征

5.1 四川盆地北部大风的雷达特征

以西充站为例, 分析四川盆地北部(图1中A区)大风成因。11日22时近南北向的锋面逐渐移近西

充站,观测显示偏北风加强、气压升高、气温下降,22时33分该站出现 $22.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风。11日22时30分南充雷达组合反射率(图7a)显示,四川盆地北部的带状对流系统结构松散,反射率因子强度普遍在 $20\sim 40\text{ dBz}$,并伴有雷电; 1.5° 仰角径向速度图(图7b)上出现“牛眼”结构,表明 1 km 高度存在西北急流。冷锋过境前后急流强度位置稳定,其方向与地面大风基本一致。地面风速在系统过境时明显增强,表明对流增强了上下层垂直交换,形成动量下传效应。与西充类似,四川盆地北部大片区域在系统过境前已出现 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 偏北风,这是冷空气密度流直接造成的影响;而冷锋过境时的风速增强,是由冷空气密度流和冷锋雷暴共同导致的。综上,四川盆地北部受天气尺度冷锋过境影响,形成大范围8~9级混合性大风。

5.2 盆地中部一线大风的雷达特征

5.2.1 安岳极端大风

11日21时57分,重庆和永川雷达CR图(图8a、b)显示,飊线系统过境时,安岳出现极端雷暴大风($37.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。飊线上对流强度并不一致,安岳位于飊

线中部略向东凸起位置,上空对流发展最为旺盛,强度超 65 dBz ;飊线其余位置回波强度以 $35\sim 55\text{ dBz}$ 为主,明显弱于安岳。 1.5° 仰角径向速度图(图8c、d)中,最强回波处伴有明显的中层径向辐合(MARC)。与典型飊线不同,径向速度场上未见明显的后侧入流急流,但在飊线西北侧有明显的后侧缺口,配合径向速度的入流区,表明中层(5 km 左右)干空气的进入。强下沉气流由回波前侧强入流(约 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)导致的MARC与粒子蒸发造成的负浮力共同作用造成,这与西充大风的成因有明显区别。沿重庆雷达径向对安岳上空强回波作AB两点间的垂直剖面,可见对流发展旺盛, 60 dBz 高度伸展至 9 km ,回波主体呈东倾,低层为弱回波区(图8e),回波前侧有一支强入流向上爬升,在 $4\sim 10\text{ km}$ 高度内形成了较强的中层径向辐合(图8f)。强上升气流倾斜方向与强回波倾斜方向并不一致,表明主要降水区与上升气流分离,利于飊线的组织化和生命史延长。对流风暴东西两侧均存在低层弱回波区,其中东侧弱回波区与强上升气流位置对应,而西侧弱回波区与速度场中辐散区对应,此处是风暴的主要下沉支,也是导致安

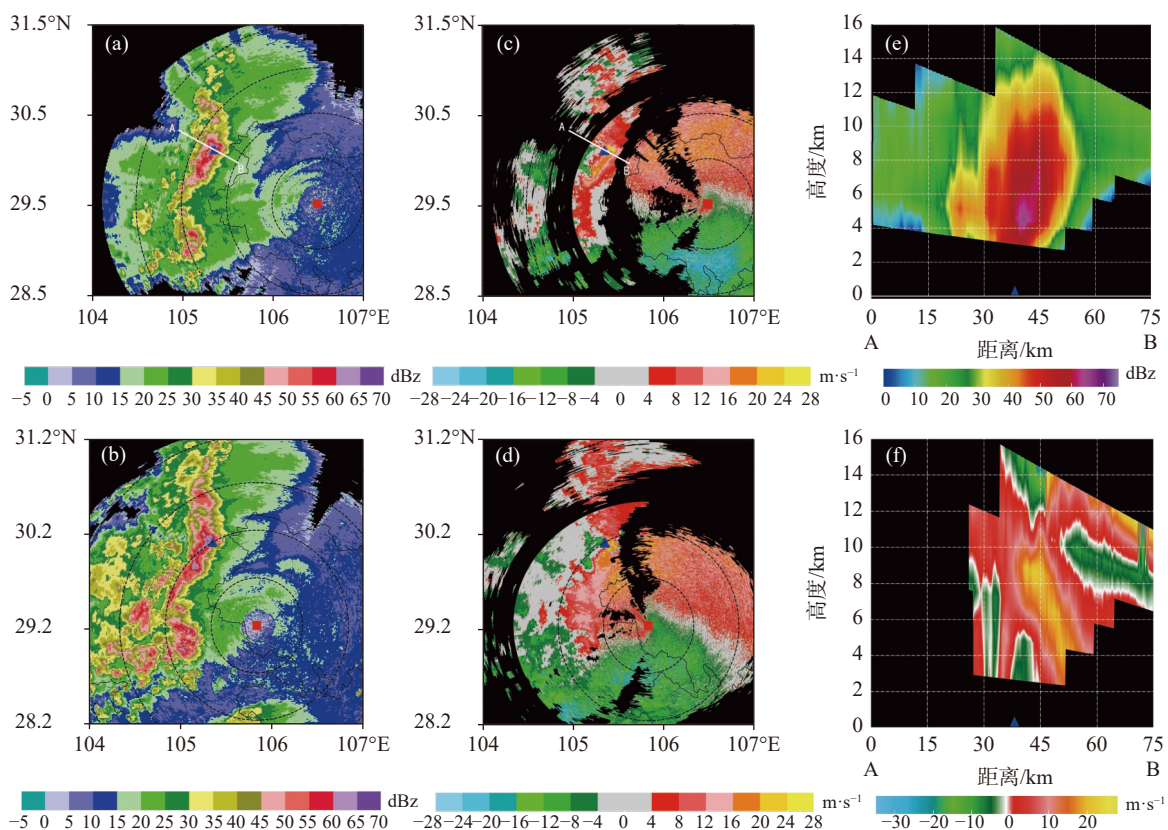


图8 2022年4月11日21时57分重庆雷达(a、c)、永川雷达(b、d)组合反射率(a、b)和 1.5° 仰角径向速度(c、d)及沿图8a、b对应白线所作的反射率因子(e)和径向速度(f)剖面(黑色虚线为 50 km 等距离圈,红色方框为雷达站,蓝色三角为安岳站)

Fig. 8 The (a, b) Composite reflectivity and (c, d) radial velocity at 1.5° elevation of (a, c) Chongqing radar and (b, d) Yongchuan radar, and vertical cross-section of (e) reflectivity and (f) velocity along the white line in Fig. 8a, Fig. 8b at 21:57 BT on April 11, 2022 (black dotted line is the 50 km isometric circle, the red square is the location of radar, and the blue triangle indicates the position of Anyue station)

岳地面大风的直接原因之一。

除了对流负浮力外, 结合图4、5分析可知, 冷空气密度流向东南方向推进, 变压风也由西北指向东南。上述由冷池密度流造成的偏西北风与对流下沉支共同作用, 造成安岳极端大风。

5.2.2 重庆大风

12日00时, 系统移近重庆中心城区, 并进入南泉雷达观测范围。X波段相控阵雷达可观测到直接造成雷暴大风的 γ 中尺度系统的精细结构演变特征。00时10分(图9a), 多单体风暴向东偏北方向移动, 其东侧暖区内有 γ 中尺度单体新生。垂直剖面(图9b)显示, 新单体初始质心高度在6~8 km, 强度约为35 dBZ; 5 min后, 3~5 km处反射率因子增强至50 dBZ, 并逐渐靠近西北侧的多单体风暴(图9c、d);

随后5 min内, 单体与多单体风暴合并, 其反射率因子质心快速下降。下降过程出现后10~20 min, 重庆中心城区(蓝色三角形位置处)出现了雷暴大风天气(图9e、f)。分析可知, 从 γ 中尺度单体生成到其反射率因子质心下落接地, 整个持续时间约10 min。过程中现有S波段天气雷达仅能完成1~2个体扫, 无法完整呈现该过程。

12日00时16分反射率因子与水凝物分类产品垂直剖面(图10)显示, 风暴单体内有大量雹、霰等固态粒子在下降过程中转化为大雨滴。单体东侧接近环境干区, 低层有回波减弱, 表明粒子强烈的蒸发作用。相比较于固态粒子的融化, 水滴蒸发时吸收的潜热更加剧烈, 可达到融化时的8倍左右(俞小鼎, 2014), 这为单体内的下沉气流提供了充足的负浮力。

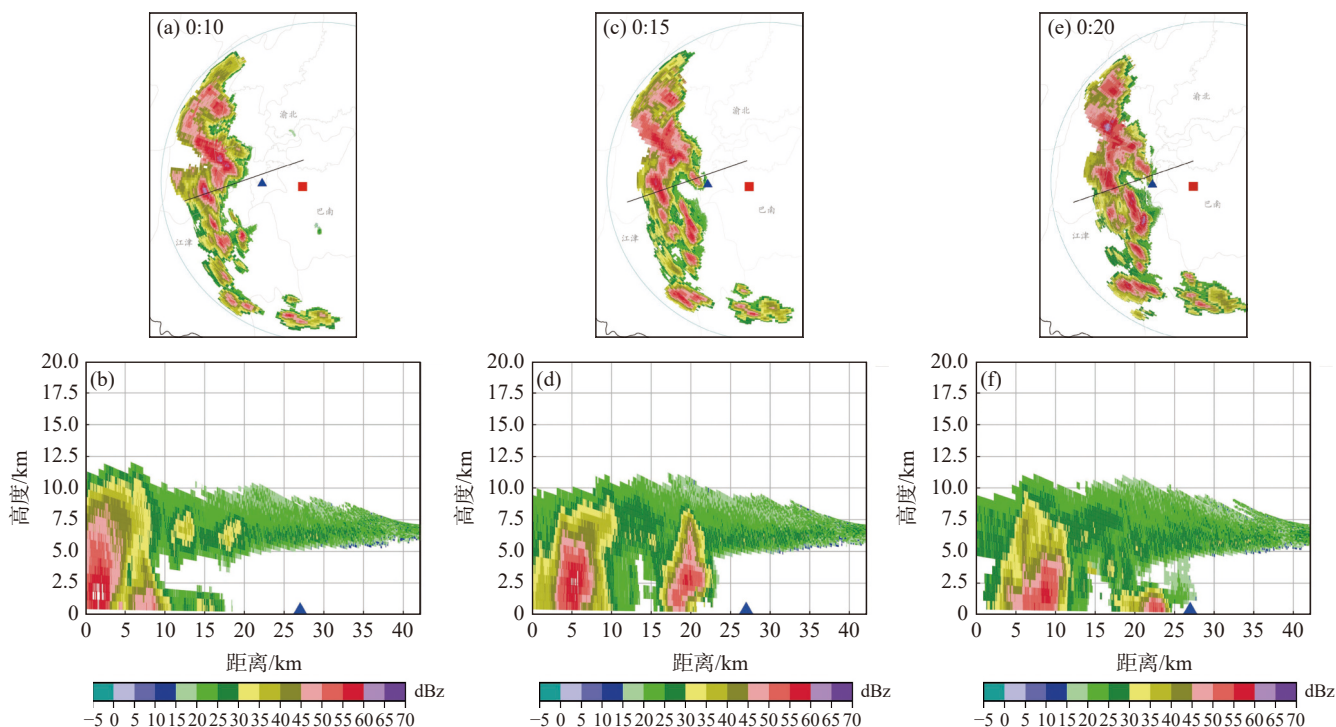


图9 2022年4月12日00时10分(a、b)、00时15分(c、d)和00时20分(e、f) X波段南泉雷达组合反射率因子(a、c、e)及垂直剖面(b、d、f) (蓝色三角形为观测到雷暴大风的气象观测站位置, 红色方形为南泉雷达)

Fig. 9 The (a, c, e) composite reflectivity and (b, d, f) vertical profile of Nanquan X-band radar at (a, b) 00:10 BT, (c, d) 00:15 BT, and (e, f) 00:20 BT on April 12, 2022, respectively (The blue triangle indicates the position of thunderstorm wind gust observation, and the red square represents the position of Nanquan radar)

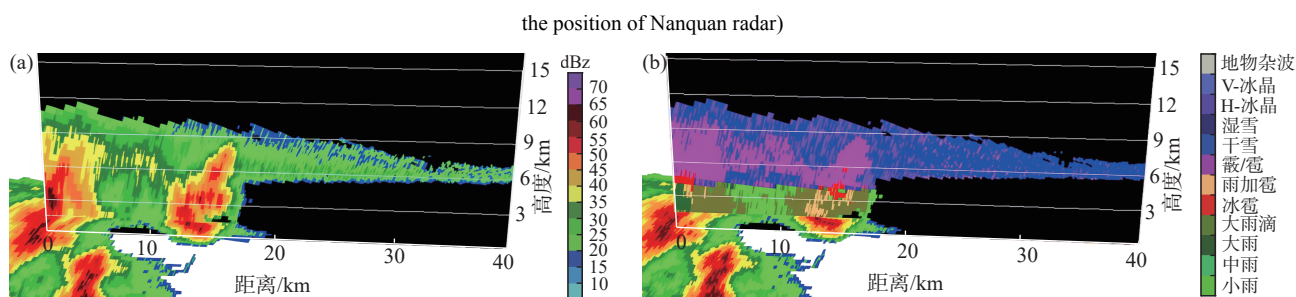


图10 2022年4月12日00时16分南泉雷达反射率因子(a)和水凝物分类产品(b)垂直剖面

Fig. 10 Vertical cross-section of (a) reflectivity and (b) hydrometeor classification products of Nanquan X-band radar at 00:16 BT on April 12, 2022

6 结 论

利用加密气象观测站、探空、X 波段相控阵雷达、S 波段雷达及拼图、ERA5 再分析等资料,分析 2022 年 4 月 11—12 日四川盆地一次罕见区域性大风过程的特征及成因,并对强雷暴大风落区的可预报性和 X 波段雷达的应用进行了探究,得出如下主要结论:

(1) 此次大风过程中极大风速空间分布存在地域特征,四川盆地大部分地区出现 8 级以上大风,其中最强风速位于四川盆地中部且呈西北—东南线状分布,以 11~13 级风为主;盆地北部风速稍小,多为 8~9 级大风,但分布广泛;盆地南部观测到大风的站次较少、分布零散,但仍有超 12 级的风速。

(2) 500 hPa 高空槽、中层干空气、低空锋区等为此次过程提供了极强的天气尺度强迫条件;上干下湿、较大的 CAPE、DCAPE 为雷暴大风的产生提供了有利的环境条件。

(3) 盆地内不同区域的大风成因不同。盆地北部在出现大风前已受干冷空气影响,暖湿气流无法抵达,对流性弱,冷锋过境时造成了大范围 8~9 级阵风,这是与冷锋雷暴回波带和冷空气大风相伴随的混合性大风天气;盆地南部则主要受暖湿气流北上所触发的对流影响,出现的雷暴大风虽强,但较为分散;盆地中部一线恰好处于冷暖气流交汇处,配合较好的对流环境条件,形成了本次过程最强的雷暴大风。

(4) 此次过程中强雷暴大风精细落区具有一定可预报性。地面 3 h 负变压区能表征冷锋前暖平流强度,并在此次过程中提前 1~2 h 指示较周边地区更强的雷暴大风发生位置。

(5) X 波段相控阵雷达可观测到直接造成雷暴大风的 γ 中尺度系统精细结构演变特征。对流系统过境重庆中心城区时,呈多单体风暴形式向北偏东方向移动,其东侧暖区内有 γ 中尺度单体生成。新生单体初始回波高度 6~9 km、最大回波强度超过 50 dBz,其并入主体回波时反射率因子质心快速下降,产生了强雷暴大风,从生成到反射率因子接地,整个持续时间约 10 min。现有 S 波段天气雷达在此期间仅能完成 1~2 个体扫,无法完整呈现该过程。

参考文献 (References):

陈贵川,湛芸,乔林,等. 2011. 重庆“5.6”强风雹天气过程成因分析[J]. 气象, 37(7): 871–879. Chen G C, Chen Y, Qiao L, et al. 2011. The causation analysis of the 6 May 2010 severe windstorm weather process in Chongqing [J]. Meteorology Monthly, 37(7): 871–879 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.7.012

陈晓欣,俞小鼎,王秀明. 2022. 中国大范围雷暴大风事件 (Derechos) 研究: 时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J]. 气象学报, 80(1): 67–81. Chen X X, Yu X D, Wang X M. 2022. Large-scale thunderstorm gale events (Derechos) in China: spatial and temporal distribution, environmental background and morphological characteristics of convection system [J]. Acta Meteorologica Sinica, 80(1): 67–81 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.067

邓承之,周国兵,李强,等. 2024. 四川盆地一次西南低涡影响下的飑线天气特征及其成因[J]. 气象, 50(7): 777–790. Deng C Z, Zhou G B, Li Q, et al. 2024. Characteristic and formation of a squall line influenced by the southwest vortex in Sichuan Basin [J]. Meteorology Monthly, 50(7): 777–790 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2024.043001

董丹丹,邓承之,杜爱军,等. 2021. 重庆永川汛期大风特征研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 15(5): 68–75. Dong D D, Deng C Z, Du A J, et al. 2021. Study on characteristics of strong wind in Chongqing Yongchuan during flood season [J]. Desert and Oasis Meteorology, 15(5): 68–75 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2021.04.009

费海燕,王秀明,周小刚,等. 2016. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 42(12): 1513–1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al. 2016. Analysis of climatic characteristics and environmental parameters of strong thunderstorm gale in China [J]. Meteorological Monthly, 42(12): 1513–1521 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.12.009

龙柯吉,康岚,罗辉,等. 2020. 四川盆地雷暴大风雷达回波特征统计分析[J]. 气象, 46(2): 212–222. Long K G, Kang L, Luo H, et al. 2020. Statistical analysis of echo characteristics of thunderstorm gale radar in Sichuan Basin [J]. Meteorological Monthly, 46(2): 212–222 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.02.007

马淑萍,王秀明,俞小鼎. 2019. 极端雷暴大风的环境参量特征[J]. 应用气象学报, 30(3): 292–301. Ma S P, Wang X M, Yu X D. 2019. Environmental parameter characteristics of severe wind with extreme thunderstorm [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 30(3): 292–301 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20190304

马中元,叶小峰,张瑛,等. 2011. 江西三类致灾大风天气活动与回波特征分析[J]. 气象, 37(9): 1108–1117. Ma Z Y, Ye X F, Zhang Y, et al. 2011. Analysis on three types of hazard wind activities and echo characteristics in Jiangxi [J]. Meteorological Monthly, 37(9): 1108–1117 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.9.007

盛杰,郑永光,沈新勇,等. 2019. 2018 年一次罕见早春飑线大风过程演变和机理分析[J]. 气象, 45(2): 141–154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al. 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018 [J]. Meteorological Monthly, 45(2): 141–154 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.001

孙建华,郑淋淋,赵思雄. 2014. 水汽含量对飑线组织结构和强度影响的数值试验[J]. 大气科学, 38(4): 742–755. Sun J H, Zheng L L, Zhao S X. 2014. Impact of moisture on the organizational mode and intensity of squall lines determined through numerical experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 38(4): 742–755 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13187

孙继松. 2023. 与直线型对流大风相关的强风暴形态结构和热力学过程[J]. 气象, 49(1): 1–11. Sun J S. 2023. The Pattern structure and thermodynamic and dynamic processes of severe storms associated with linear convective gales [J]. Meteorological Monthly, 49(1): 1–11 (in

- Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.111802
- 孙继松,戴建华,何立富,等.2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法:中国强对流天气预报手册[M].北京:气象出版社,282. Sun J S, Dai J H, He L F, et al. 2014. Basic Principles and Technical Methods of Strong Convective Weather Forecasting [M]. Beijing:China Meteorological Press,282 (in Chinese)
- 孙晓磊,王科,左涛,等.2023.引发“6.25”天津极端雷暴大风的超级单体与中尺度对流系统分析[J].暴雨灾害,42(3):312-323. Sun X L, Wang K, Zuo T, et al. 2023. Analysis of supercell and meso-scale convective system causing an extreme thunderstorm gale in Tianjin on 25 June 2020 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(3):312-323 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-093
- 唐明晖,陈龙,陈鹤,等.2023.基于双偏振雷达资料的洞庭湖区一次强对流过程的分阶段特征分析[J].暴雨灾害,42(6):692-703. Tang M H, Chen L, Chen H, et al. 2023. Staged characteristics analysis of a severe convection over the Dongting Lake area based on dual-polarization Doppler weather radar data [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(6):692-703 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-170
- 唐明晖,姚秀萍,杨湘婧,等.2016.基于多普勒天气雷达资料的“6.1”监利极端大风成因分析[J].暴雨灾害,35(5):393-402. Tang M H, Yao X P, Yang X J, et al. 2016. Cause analysis of an extreme gale event occurred in Jianli on 1 June 2015 based on Doppler weather radar data [J]. *Torrential Rain and Disasters*,35(5):393-402 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.05.001
- 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 Meteorologica Sinica*,79(5):717-731 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.056
- 王清川,彭敏,周涛,等.2022.一次罕见超级单体风暴的X波段双偏振雷达特征分析[J].气象研究与应用,43(1):107-111. Wang Q C, Peng M, Zhou T, et al. 2022. Characteristic analysis of X-band dual polarization radar for a rare supercell storm [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*,43(1):107-111 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.1.19
- 王秀明,周小刚,俞小鼎.2013.雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究[J].气象学报,71(5):839-852. Wang X M, Zhou X G, Yu X D. 2013. Comparative study of environment of a windstorm and the impacts on storm structure [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,71(5):839-852 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.073
- 王艳春,陈宏,尉英华,等.2023.天津雷暴大风天气的环流场及雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(6):119-126. Wang Y C, Chen H, Wei Y H, et al. 2023. Circulation field and radar characteristics of thunderstorm gales in Tianjin [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,17(6):119-126 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.06.016
- 吴海英,陈海山,蒋义芳,等.2013.“090603”强飑线过程动力结构特征的观测与模拟分析[J].高原气象,32(4):1084-1094. Wu H Y, Chen H S, Jiang Y F, et al. 2013. Observation and simulation analyses on dynamical structure features in a severe squall line process on 3 June 2009 [J]. *Plateau Meteorology*,32(4):1084-1094 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00102
- 徐诚,袁媛,张虹娇,等.2024.2018—2023年四川省气象灾害预警信息发布特征分析[J].高原山地气象研究,44(S1):118-124. Xu C, Yuan Y, Zhang H J. 2024. Analysis on the characteristics of meteorological disaster early warning information release in Sichuan Province [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,44(S1):118-124 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2024.Z1.018
- 于明慧,刘黎平,吴翀,等.2019.利用相控阵及双偏振雷达对2016年6月3日华南一次强对流过程的分析[J].气象,45(3):330-344. Yu M H, Liu L P, Wu C, et al. 2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased array and dual polarization Radar [J]. *Meteorological Monthly*,45(3):330-344 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.004
- 俞小鼎.2014.关于冰雹的融化层高度[J].气象,40(6):649-654. Yu X D. 2014. About the height of the hail [J]. *Meteorological Monthly*,40(6):649-654 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.06.001
- 俞小鼎,王秀明,李万莉,等.2020.雷暴与强对流临近预报[M].北京:气象出版社,119. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2020. Thunderstorm and Severe Convection Nowcasting [M]. Beijing:China Meteorological Press,119 (in Chinese)
- 俞小鼎,郑永光.2020.中国当代强对流天气研究与业务进展[J].气象学报,78(3):391-418. Yu X D, Zheng Y G. 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,78(3):391-418 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.035
- Chen G T J, Wang C C, Wang A H. 2007. A case study of subtropical frontogenesis during a blocking event [J]. *Monthly Weather Review*,135(7):2588-2609. doi:10.1175/MWR3412.1
- Falk N M, Heever S C. 2023. Environmental modulation of mechanical and thermodynamic forcing from cold pool collisions [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,80(2):375-395. doi:10.1175/JAS-D-22-0020.1
- Houze R A Jr. 1989. Observed structure of mesoscale convective heating and implications for large-scale heating [J]. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society*,115:425-461. doi:10.1002/qj.49711548702
- Park H S, Ryzhkov A V, Zrníc D S, et al. 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: description and application to an MCS [J]. *Weather and Forecasting*,24(3):730-748. doi:10.1175/2008WAF2222205.01

(责任编辑 唐永兰)