暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

一次超级单体风暴长时间维持的双偏振特征和机制分析

李海俊 金米娜 徐渊 李婕 周安平 陈娟

Analysis of dual-polarization characteristics and mechanisms of a supercell storm with long-term maintenance

LI Haijun，JIN Mina，XU Yuan，LI Jie，ZHOU Anping，CHEN Juan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-090

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

湘东北一次降雹超级单体过程的双偏振雷达回波特征

Dual-polarization radar echo characteristics of a hail supercell event in northeastern Hunan

暴雨灾害. 2023, 42(2): 211-222 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-235

一次长生命史超级单体风暴的雷达观测特征

Characteristics of a supercell storm with long life cycle based on analysis of weather radar data

暴雨灾害. 2021, 40(4): 419-429 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.010

伊犁河谷两次短时强降水过程的双偏振雷达特征对比分析

A comparative analysis of Dual-Polarization Radar characteristics of two short-term heavy precipitation events in the Ili river valley

暴雨灾害. 2025, 44(4): 504-514 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-124

低层暖平流强迫下两次大冰雹超级单体风暴结构特征分析

Structural characteristics of two heavy hail supercell storms forced by low-level warm advection

暴雨灾害. 2023, 42(1): 37-46 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-022

南岭地区一次高架雷暴冰雹过程双偏振特征分析

Dual polarization characteristics of an elevated thunderstorm hail event in the Nanling region

暴雨灾害. 2024, 43(3): 332-341 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-165

双偏振天气雷达精细化探测技术对2021年两个龙卷风暴识别能力的影响分析

Analysis on the influence of fine detection technology of dual polarization weather radar on recognition ability of two tornado storms in 2021

暴雨灾害. 2022, 41(2): 130-141 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.003

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李海俊,金米娜,徐渊,等.2026.一次超级单体风暴长时间维持的双偏振特征和机制分析[J].暴雨灾害,45(3):361−372. LI Haijun, JIN Mina, XU Yuan, et al. 2026. Analysis of dual-polarization characteristics and mechanisms of a supercell storm with long-term maintenance [J]. Torrential Rain and Disasters,45(3):361−372 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−090

一次超级单体风暴长时间维持的双偏振特征和机制分析

李海俊[1, 2, 3], 金米娜[1, 2, 3], 徐渊[1], 李婕[1], 周安平[4], 陈娟[1]

(1. 江西省气象台, 南昌 330096; 2. 气候变化风险与气象灾害防御江西省重点实验室, 南昌 330096; 3. 南昌国家气候观象台, 南昌 330046; 4. 江西省铅山县气象局, 铅山 334500)

摘　要: 2025 年 3 月 3 日 00:00 (北京时, 下同) 到 07:00, 江南北部一个超级单体风暴生命史达 7 h, 突出特征是不断发生合并和分裂, 厘清这一特征与超级单体风暴长时间维持的关系, 有利于提高对长生命超级单体风暴的认识。基于地面和高空观测、双偏振雷达、风廓线雷达等资料, 使用 ROSE2.1 和 PyDDA 软件对雷达基数据处理后, 结合云桥量化分析其双偏振特征和维持机制, 并给出此类风暴天气的预报关注重点。结果表明: (1) 此次超级单体风暴后侧存在短线状风暴并不断向前伸出云桥与超级单体风暴合并, 表现为 0 ℃ 层以上差分反射率因子 (Z_{DR}) 柱和差分传播相移率 (K_{DP}) 柱水平宽度加大, 且 K_{DP} 柱高度更高。(2) 超级单体风暴合并的同时伴随自上而下迅速分裂, 分裂后南部单体承接中气旋, 且中气旋半径显著减小, 强烈拉伸作用使上升运动突增。(3) 超级单体风暴后侧小单体沿移向的切向合并显著加强了其南侧的上升运动。超级单体风暴南侧分裂出的单体快速发展, 替代原超级单体风暴, 如此迭代的若干次分裂、合并过程, 是其维持长生命史的主要机制。(4) 预报业务中, 在强垂直风切变环境下, 超级单体风暴后侧有雷暴向前合并, 出现云桥, 伴随超级单体风暴自身分裂, 尤其需关注超级单体风暴长时间维持的可能性。

关键词: 超级单体风暴; 中气旋; 维持机制; 分裂; 合并; 双偏振雷达

中图法分类号: P458.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−090

Analysis of dual-polarization characteristics and mechanisms of a supercell storm with long-term maintenance

LI Haijun[1, 2, 3], JIN Mina[1, 2, 3], XU Yuan[1], LI Jie[1], ZHOU Anping[4], CHEN Juan[1]

(1. *The Meteorological Observatory of Jiangxi Province*, *Nanchang* 330096; 2. *Jiangxi Province Key Laboratory of Climate Change Risk and Meteorological Disaster Prevention*, *Nanchang* 330096; 3. *Nanchang National Climate Observation*, *Nanchang* 330046; 4. *Yanshan County Meteorological Bureau of Jiangxi Province*, *Yanshan* 334500)

Abstract: From 00:00 BT to 07:00 BT on March 3, 2025, a supercell in northern Jiangnan persisted for 7 hours, with recurrent merging and splitting as its prominent feature. Elucidating how these behaviors contribute to its prolonged duration can improve the understanding of long-lived supercell storms. Based on surface and upper-air observation data, dual-polarization radar data, and wind profiler radar data, the radar base data were processed using ROSE 2.1 and PyDDA software. The dual-polarization characteristics and maintenance mechanisms of the storm are analyzed quantitatively in combination with cloud bridges. Finally, the key points for forecasting such storm weather are presented. The results are as follows. (1) A short linear storm existed at the rear of the supercell and continuously extended cloud bridges forward to merge with the supercell. This merging process was characterized by an increase in the horizontal width of the differential reflectivity factor (ZDR) column and specific differential phase (KDP) column above the 0 °C level, along with a higher height of the KDP column. (2) Concurrently with the merger, the supercell split rapidly from top to bottom. After splitting, the southern cell inherited the mesocyclone, and the radius of the mesocyclone decreased significantly; the strong stretching effect led to a sudden increase in upward motion. (3) The tangential merger of small cells at the rear of the supercell (along the storm's moving direction) significantly enhanced the upward motion on the supercell's southern side. The cells that split from the southern side of the supercell developed rapidly and replaced the original supercell. Such a repeated iterative process of multiple splits and mergers is the main mechanism underlying the

收稿日期: 2025−05−15; **定稿日期:** 2025−09−02

资助项目: 江西省气象局创新团队项目 (JXCX202304); 中国气象局面上项目 (CXFZ2025J027); 江西省重点研发计划项目 (20243BBH81005); 江西省气象局重点项目 (JX2021Z01, JX2021Z09); 江西省气象局人才培养面上专项 (JX2024RCM03)

第一作者: 李海俊, 主要从事强对流、雾等天气预警技术研究。E-mail: lihaijun862097@outlook.com

通信作者: 金米娜, 主要从事天气预报技术和灾害天气机理研究。E-mail: 41923381@qq.com

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

supercell's long lifespan. (4) In operational forecasting, under an environment with strong vertical wind shear, if thunderstorms at the rear of a supercell merge forward with the supercell (accompanied by cloud bridge formation) and the supercell itself splits, special attention should be paid to the possibility of the supercell maintaining for a long duration.

Key words: supercell storm; mesocyclone; maintenance mechanism; split; merger; dual-polarization radar

引　言

超级单体风暴是局地对流风暴中最猛烈的形式(Browning, 1962; 王秀明等, 2025), 中国超级单体风暴 80% 以上会导致强冰雹、雷暴大风甚至龙卷等最强致灾性强对流天气 (Yu et al., 2012)。因此, 超级单体风暴的形成和维持机制研究对强对流天气预报预警及其防灾减灾均具有十分重要的意义。

多普勒天气雷达因时空分辨率高, 能够较好捕捉超级单体快速发展和天气剧变的特征。基于多普勒天气雷达观测, 郑媛媛等 (2004) 分析了皖北地区一次典型超级单体, 揭示其强风暴顶辐散、强中气旋、出流边界等结构特征; 王福侠等 (2014) 分析河北一次多个超级单体连续生成和分裂过程后指出, 超级单体的分裂与垂直风切变有关, 并从中高层开始迅速向下延伸。众多研究成果为超级单体雷达探测特征的认识提供了参考, 但限于单偏振量, 难以描述超级单体内部粒子相态特征和反映垂直运动的风暴动力结构。

当前, 中国中东部地区业务运行的多普勒天气雷达已逐步完成单偏振向双偏振的升级。双偏振雷达不仅能获取反射率因子 (Z_H)、径向速度 (V), 还可获取差分反射率因子 (Z_{DR})、相关系数 (CC) 和差分传播相移率 (K_{DP}), 并通过 Z_{DR} 柱、Z_{DR} 弧、K_{DP} 柱等双偏振特征, 判断风暴内垂直运动。Bringi 等 (1991) 利用飞机观测到环境温度场 0 ℃ 层以上风暴强上升区附近存在液态大水滴, 原因在于风暴上升气流中的正浮力和正温度扰动使环境场 0 ℃ 层之上风暴内温度依然可以大于 0 ℃, 所以环境场 0 ℃ 层之上, 雨滴依然具有液态特征。最终因液态大雨滴呈现扁平状, 在雷达图上呈现出环境场 0 ℃ 层高度之上的 Z_{DR} 大值区, 即 Z_{DR} 柱。0 ℃ 层之上的 K_{DP} 柱则直接指示液态水或包裹液体表面的固态粒子, 同样可以表示深厚的上升气流。因此, 已有研究 (Kumjian et al., 2014; 唐明晖等, 2023; 袁韬等, 2024) 将 0 ℃ 层以上的 Z_{DR} 柱与 K_{DP} 柱作为上升运动的判识指标。上升气流增强是表征超级单体发展和强度增强的重要指标 (戴建华等, 2012), 也可通过双偏振雷达特征 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱描述强上升运动, 进而表征超级单体强度。王福侠等 (2024) 对石家庄一次长生命史超级单体双偏振参量及风暴结构演变特征作了分析, 指出低层 Z_{DR} 弧加强和 Z_{DR} 柱一直存在是超级单体长时间维持的机制。陈瑞敏等 (2021) 分析石家庄一次长生命史超级单体的双偏振雷达特征指出, 超级单体维持期间反射率因子大于 55 dBz 的区域, 对应 Z_{DR} 为−0.5~0.5 dB、K_{DP} 为 1.5~2.0 °·km^{-1}、CC 为 0.75~0.92, 进而判断有液滴和较大冰雹同时存在, 且一直有中气旋和中反气旋对相伴的特征, 中气旋发展深厚强烈是超级单体发展和维持的重要动力机制。以上研究表明, 双偏振量可以通过描述风暴垂直运动、云内粒子相态等, 解释超级单体风暴内部结构演化特征, 从而揭示其长时间维持的相关机制。

以往对超级单体风暴长时间维持的研究多局限于其本身, 而忽略了其与周围单体的合并。事实上, 雷暴合并是一种促使包括超级单体在内的所有对流风暴增强和维持的关键机制, 并会增强冰雹、雷暴大风、短时强降水等灾害性天气 (黄勇等, 2016; 易笑园等, 2017)。雷暴合并是一个复杂的非线性过程, 常伴随雷暴间雷达回波相连的狭窄连接, 及云桥 (付丹红和郭学良, 2007; 易笑园等, 2017)。云桥一般存在于低层, 主要由于雷暴冷池形成低层密度流, 两个对流单体间的两支密度流交汇, 上升作用加强, 激发出新的回波并与原先两侧雷暴本体回波相连; 另外, 在 4—5 km 和 7—9 km 的中层高度也会有云桥现象, 一般是由于云中上部风切变强而导致旋转倾向大于上升倾向而出现 (易笑园等, 2017)。江南北部早春季节, 常有线状风暴和超级单体同时存在 (金米娜等, 2013; 陈云辉等, 2019), 并发生以云桥为特征的雷暴合并, 这些合并对超级单体的作用显著, 却未被充分关注。当前, 鲜有针对以云桥为特征的雷暴合并对超级单体长时间作用的维持机制研究。

2025 年 3 月 3 日一个初生于湖南东北部、移过江西北部和安徽南部并最终在浙江西部消亡的生命史 7 h 的超级单体风暴给江西北部带来明显强对流天气。超级单体生命史一般为 1 h 以上, 已有研究 (陈瑞敏等, 2021; 刁秀广等, 2021; 王福侠等, 2024) 将维持时间 2~9 h 的超级单体称为长生命史超级单体, 本次超级单体符合长生命史特征。本文基于地面和高空观测、双偏振雷达、风廓线雷达等多源资料, 研究本次过程雷暴合并时云桥的双偏振雷达特征, 分析超级单体风暴长时间维持的作用机制, 该研究结果对于预报员准确把握类似超级单体风暴的生消过程、有无长生命史发展潜势和强对流天气的精准预警具有一定的参考意义。

1 资料和方法

1.1 资料介绍

本文使用的地面观测、高空观测、多普勒天气雷达和风廓线雷达数据均来自于国家气象信息中心官方数据平台“天擎”, 时间范围高空观测数据为 2025 年 3 月 2 日 20:00—3 日 08:00 (北京时, 下同), 其余数据为 2025 年 3 月 3 日 00:00—07:00, 具体选取的数据集为: (1) 中国地面观测逐小时数据集“SURF_CHN_MUL_HOR”的区域气象站 (以下简称区域站) 和国家气象站 (以下简称国家站) 数据, 并经质控码质控, 用于展示强对流实况; (2) 中国高空定时探测数据“UPAR_CHN_MUL_FTM”的探空站数据, 用于分析环流形势; (3) 宜春、南昌、九江、上饶、黄山的 5 部 CINRAD/SAD 双偏振雷达的质控前标准格式基数据“RADAR_L2_FMT”, 用于风暴结构分析; (4) 宜春的风廓线雷达数据“UPAR_WPR_RTIME”, 用于急流演变分析; (5) 多普勒天气雷达组合反射率组网拼图产品“RADA_L3_MST_CREF”, 应用单站雷达的反射率因子数据校验拼图正确性, 用于标定超级单体在三维风场中的位置。

冰雹观测数据来源于江西县级台站信息员的实时上报, 并应用多普勒天气雷达的反射率因子大于 60 dBz 的回波特征进行校验。

1.2 研究方法

1.2.1 雷达基数据处理

中国气象局气象探测中心天气雷达官方业务软件 ROSE2.1 可实现将雷达基数据质控并生成各类子产品。已有研究 (毛倩等, 2024; 李海俊等, 2025) 表明其在雷达数据可视化、天气过程分析及其他相关研究的可用性。因此, 本文应用 ROSE2.1 软件生成的各类子产品进行研究和分析。

PyDDA 软件 (Jackson et al., 2020) 可将多部雷达的基数据反演成三维风场数据, 并支持水平和垂直分辨率的自由设定。已有学者使用其进行公里尺度强对流天气过程分析 (Wang et al., 2023; 李淑璠等, 2025), 表明其具有可靠性。本文应用 PyDDA 软件使用南昌、九江、宜春三部雷达, 实现研究区域的三维风场反演, 水平和垂直分辨率均设为 1 km。

1.2.2 云桥量化

云桥的存在与否及其数量变化, 对本次过程对超级单体长时间维持至关重要, 为了揭示这种对应关系, 需将云桥做量化处理。量化关键在于选取合适的反射率数值。由于云桥是雷暴合并的一种现象, 因此本文对雷暴合并现象参考易笑园等 (2017) 的定义, 即两个单体 30 dBz 回波边缘合围在一起, 将组合反射率因子拼图上两个雷暴间的大于 30 dBz 的狭窄回波定义为一个云桥。本文将超级单体风暴 A 后侧存在的云桥, 定义为云桥 a。

2 强对流天气实况和环流形势

2025 年 3 月 3 日 00:00—07:00 江南北部自西向东出现剧烈强对流天气, 雷暴大风最强达 12 级, 短时强降水最大达 50 mm·h^{-1}, 冰雹直径最大达 2.6 cm (图 1a)。强对流天气发生位置与一个质心强度始终维持在 60 dBz 以上的强对流单体关联性较好, 冰雹发生在该强对流单体移动轨迹上 (图 1a 中 60 dBz 以上区域), 01:12—03:40 监测到有冰雹落地, 其中 01:18—03:06 监测到直径 2 cm 以上的大冰雹。04:00 左右, 强对流单体移动到鄱阳湖东部时, 发生了最大 12 级瞬时大风。

因强对流发生时间、位置和强单体移动轨迹较

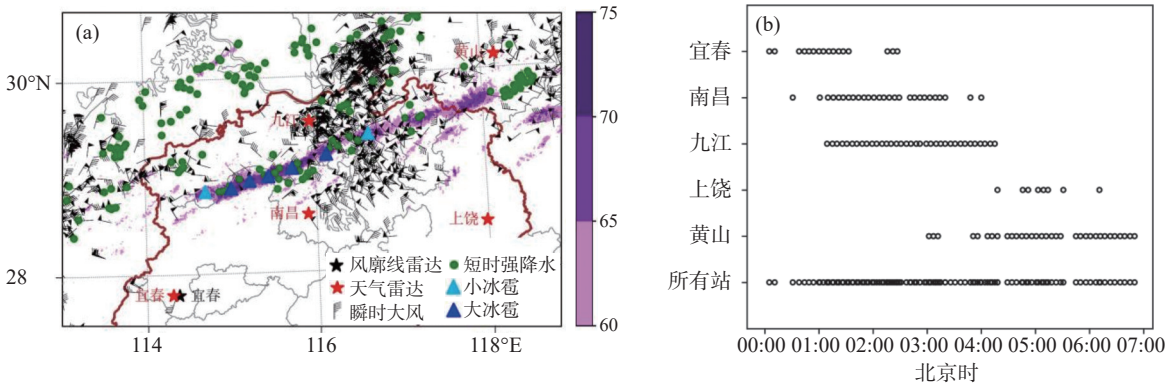


图 1 2025 年 3 月 3 日 00:00—07:00 分类强对流落区及逐体扫组合反射率因子 (色斑, ≥60 dBz) 回波动态分布图 (a) 和 ROSE2.1 识别的附近雷达站探测的超级单体中气旋时间序列图 (b, 黑圈代表识别出中气旋)

Fig. 1 (a) Dynamic distribution map of classified severe convection falling areas and volume-scan composite reflectivity factor (color patches, ≥60 dBz) echoes and (b) time series plot of supercell mesocyclones in nearby radar supercells identified by ROSE 2.1 in the period 00:00 BT–07:00 BT on March 3, 2025 (black circles represent identified mesocyclones)

好的对应关系，判断该强对流单体是导致本次强对流天气的直接影响系统。距离强对流单体移动轨迹最近的 5 部 CINRAD/SAD 双偏振雷达的中气旋识别结果显示，从 00:00—07:00 对该强对流单体均识别出有连续中气旋 (图 1b)，因此可以判断该强对流单体为生命史达 7 h的长生命史超级单体风暴。

3 月 2 日 20:00—3 日 08:00，天气尺度系统的显著特征表现为：(1) 对流层中层 500 hPa 高度上 105°E 附近有南北两段高空槽东移，槽前江南上空西南气流风速达 28~36 m·s^{-1} (图 2a、d)，低层 700 hPa 江南上空西南气流风速达 18~26 m·s^{-1} (图 2b、e)，持续而强的对流层中层西南气流和低层西南气流为长生命史超级单体风暴的维持提供了有利的深层垂直风切变和低层垂直风切变；(2) 边界层 925 hPa 冷空气由长江中下游沿岸地区逐渐推进到江南中部 (图 2c、f)，超级单体风暴在 2 日 20:00 的锋区前沿触发和初生，从对流风暴的热力学、动力学结构特征来看，判断超级单体风暴为斜压锋生类对流 (许爱华等, 2014)。为进一步揭示超级单体的中尺度环境动力特征，给出 01:00—03:00 风暴西南侧的宜春风廓线雷达水平风时间序列图 (图 3)。可见边界层内约 0.5 km 以下近地面急流加强至 15~20 m·s^{-1}，有利于新单体的触发和超级单体的维持，同时对流层中低层 4 km 左右急流也加强至 35~40 m·s^{-1}，有利于中低层垂直风切变的显著加强，为超级单体在该时段的爆发式发展提供了有利的环境条件。

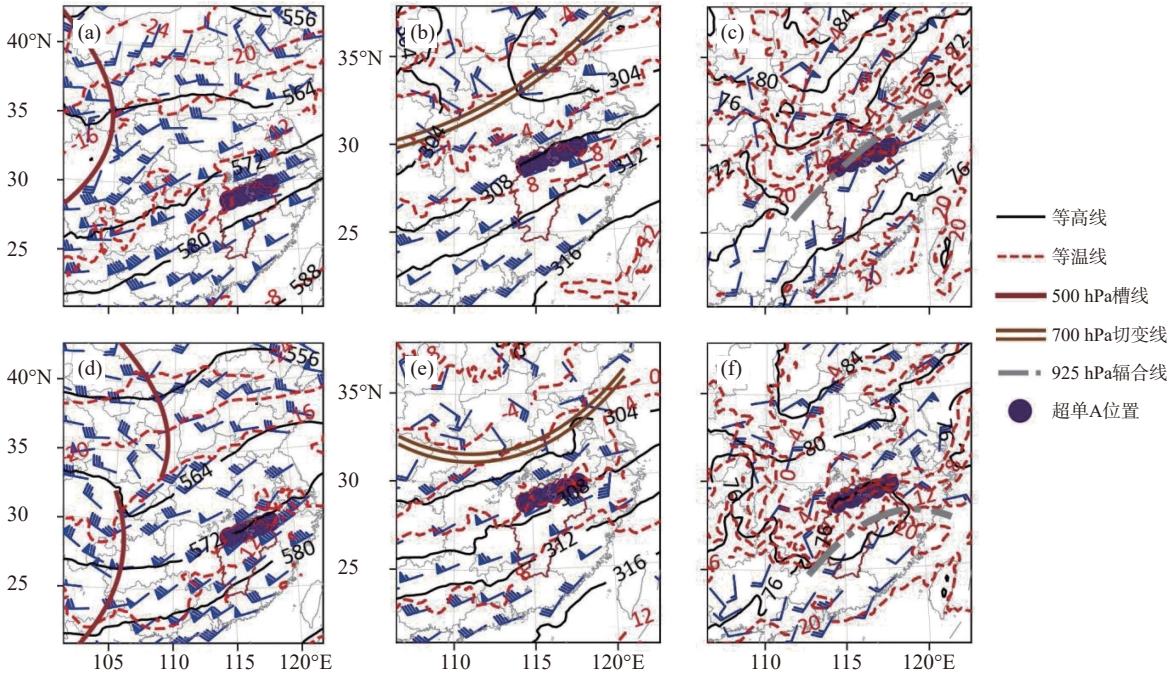


图 2 2025 年 3 月 2 日 20:00 (a—c)、3 日 08:00 (d—f) 500 hPa (a, d)、700 hPa (b, e)、925 hPa (c, f) 风场 (风羽，单位：m·s^{-1})、高度场 (黑色实线，单位：dagpm)、温度场 (红色虚线，单位：℃) 及主要天气系统分布

Fig. 2 Distribution of wind fields (barbs, unit: m·s^{-1}), geopotential height fields (black solid lines, unit: dagpm), temperature fields (red dashed lines, unit: ℃), and major synoptic systems at (a, d) 500 hPa, (b, e) 700 hPa, and (c, f) 925 hPa at (a-c) 20:00 BT March 2 and (d-f) 08:00 BT March 3, 2025

3 长生命史超级单体的双偏振特征

为描述超级单体发展演变和增强维持特征，给出组合反射率 CR 2025 年 3 月 2 日 23:49—3 日 06:50 逐 5 个体扫演变 (图 4) 及 01:44、02:12、03:37、05:28 移向平行 (纵向) 的雷达剖面图 (图 5)。2025 年 3 月 2 日 20:00 南昌探空 0 ℃ 层高度为 4.46 km，用于判定雷达剖面图上的 0 ℃ 层高度。

将长生命史超级单体风暴记为“A”，图 4a—p 在超级单体移动方向右前方标注字母“A”，以表征超级单体的动态特征。超级单体演变 (图 4a—p) 显示，其后侧始终有南北向短线状风暴存在，且短线状风暴南部或南侧频繁有空间尺度小的单体 (小单体) 并入 A。图 4e—p 均显示在超级单体风暴 A 后侧存在约 30~40 dBz 的云桥 (云桥 a)。从云桥数和超级单体强回波面积随时间变化图 (图 6) 可见，云桥 a 的存在和数量不仅与强回波维持和消失表现出一致性，强回波面积变化趋势也有一致性。说明随着小单体若干次并入超级单体 A，超级单体会若干次重新发展，小单体合并现象消失，则超级单体 A 难以继续维持。例如，01:44 (图 5a) 大于 60 dBz 的反射率因子区域下

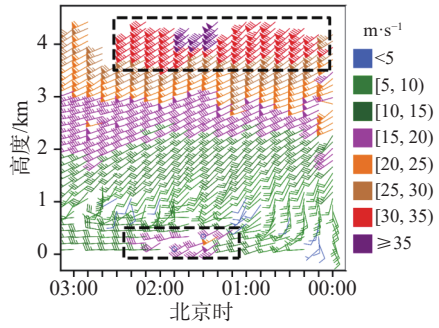


图 3 2025 年 3 月 3 日 00:00—03:00 宜春风廓线雷达水平风 (风向杆, 不同颜色代表不同风速范围) 演变 (黑框为急流加大区域)

Fig. 3 Evolution of horizontal wind (wind barb, different colors represent different wind speed ranges) from Yichun wind profiler radar during 00:00 BT–03:00 BT on March 3, 2025 (Black boxes indicate regions with jet stream intensification)

边界降至 1 km 左右高度, 表征此时下沉气流占主导; 02:12 (图 5b) 清晰的有界弱回波区 (Bounded Weak Echo Region, BWER) 最高延伸至 8 km, 60 dBz 以上的强回波再次向上伸展至 10 km 左右高度, 表征上升气流重新加强 (图 5c、d)。上升气流因若干次雷暴合并加强而得到长时间维持, 如 03:37、05:28 存在 0 ℃ 层以上的 Z_{DR} 柱 (图 5g、h) 或 K_{DP} 柱 (图 5k、l), 之前无此特征 (图 5e、f、i、j)。

另一个显著特征是超级单体 A 由孤立单体转变为镶嵌在短线状风暴内部的单体, 或超级单体 A 转变为包含超级单体的短线状风暴 (图 4a—p)。雷暴合并不仅存在于超级单体 A 后侧, 在其北侧纵向排列的单体也会和其后侧短线状风暴之间出现云桥。云桥出现, 单体合并加强上升气流, 这是超级单体

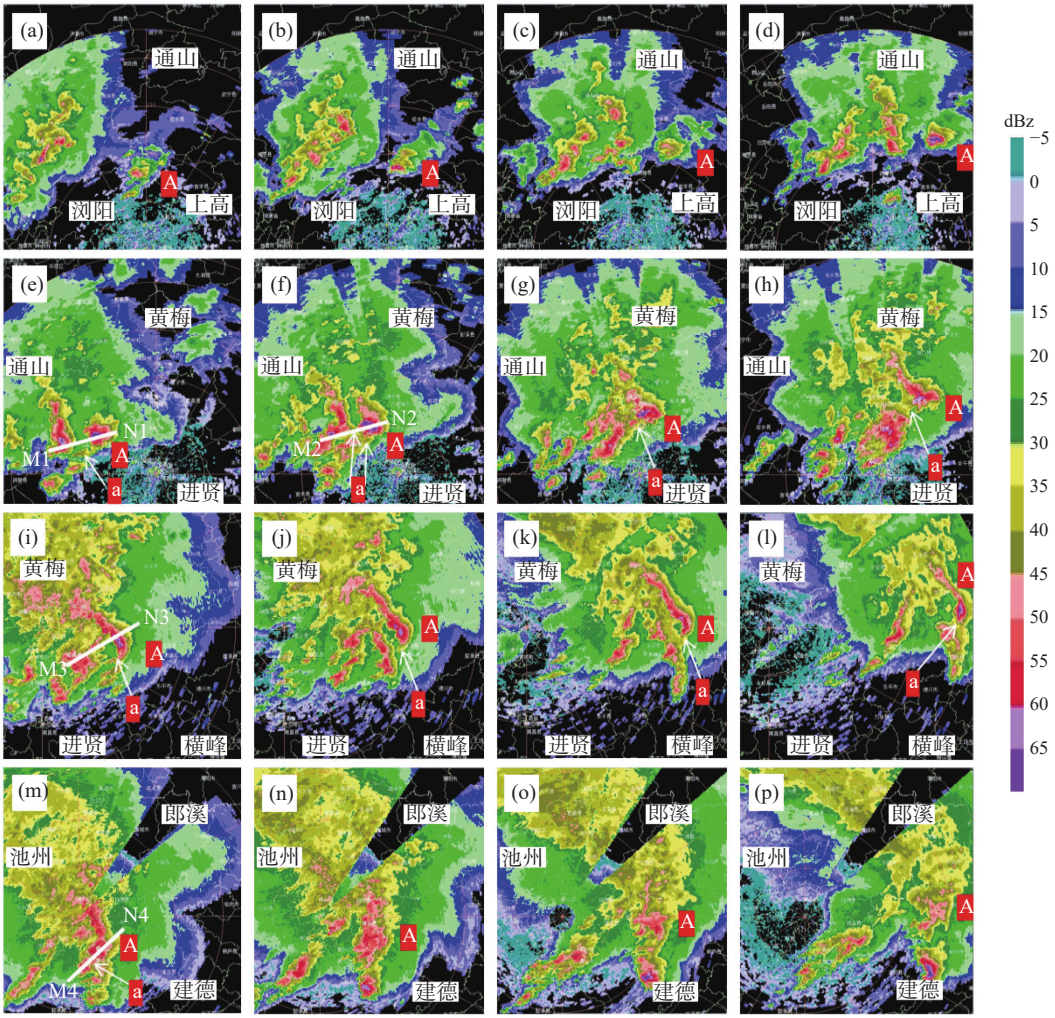


图 4 宜春雷达 2025 年 3 月 2 日 23:49 (a) 与 3 日 00:22 (b)、00:49 (c)、01:16 (d), 南昌雷达 3 日 01:44 (e)、02:12 (f)、02:41 (g)、03:09 (h), 九江雷达 3 日 03:37 (i)、04:04 (j)、04:31 (k)、04:59 (l) 以及黄山雷达 3 日 05:28 (m)、05:56 (n)、06:23 (o)、06:50 (p) 每 5 个体扫组合反射率因子 CR 演变图 (超级单体风暴 A 和云桥 a 分别用“A”和“a”标出)

Fig. 4 Evolution diagrams of the combined reflectivity (CR) for every 5 volume scans from Yichun radar at (a) 23:49 BT on March 2, (b) 00:22 BT, (c) 00:49 BT, and (d) 01:16 BT, Nanchang radar at (e) 01:44 BT, (f) 02:12 BT, (g) 02:41 BT, and (h) 03:09 BT, Jiujiang radar at (i) 03:37 BT, (j) 04:04 BT, (k) 04:31 BT and (l) 04:59 BT, Huangshan radar at (m) 05:28 BT, (n) 05:56 BT, (o) 06:23 BT, and (p) 06:50 BT on March 3, 2025 (Super single A and cloud bridge a are marked with "A" and "a" respectively)

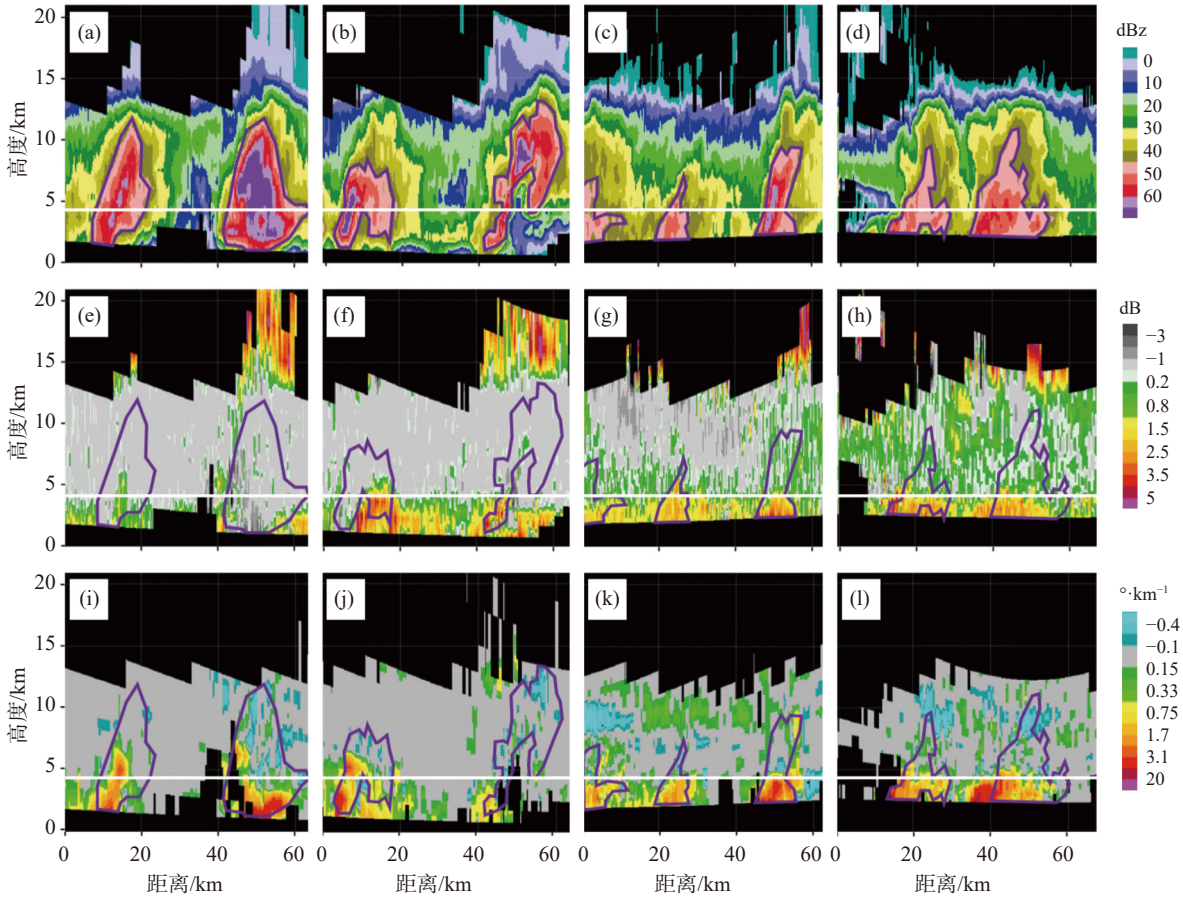


图 5 南昌雷达 2025 年 3 月 3 日 01:44 (a、e、i)、02:12 (b、f、j)、03:37 (c、g、k)、05:28 (d、h、l) 反射率因子 Z_H (a—d)、差分反射率因子 Z_{DR} (e—h)、差分传播相移率 K_{DP} (i—l) 垂直剖面图 (a、e、i 对应图 4e 的 M1N1, b、f、j 对应图 4f 的 M2N2, c、g、k 对应图 4i 的 M3N3, d、h、l 对应图 4m 的 M4N4; 紫色实线为 45 dBz 线; 白色实线为 0 ℃ 层高度)

Fig. 5 Vertical cross-sections of (a—d) reflectivity factor Z_H, (e—h) differential reflectivity factor Z_{DR}, and (i—l) specific differential phase K_{DP} from Nanchang radar at (a, e, i) 01:44 BT, (b, f, j) 02:12 BT, (c, g, k) 03:37 BT, and (d, h, l) 05:28 BT on March 3, 2025 (a, e, i correspond to M1N1 in Fig. 4e, b, f, j correspond to M2N2 in Fig. 4f, c, g, k correspond to M3N3 in Fig. 4i, d, h, l correspond to M4N4 in Fig. 4m. The purple solid line is the 45 dBz line, and the white solid line is the zero-degree line)

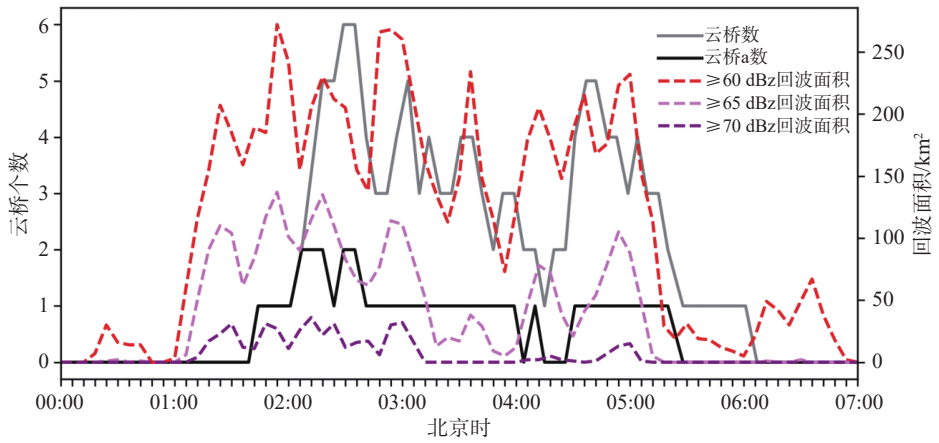


图 6 2025 年 3 月 3 日 00:00—07:00 超级单体风暴与后侧短线状风暴间云桥个数、云桥 a 个数及大于 60、65、70 dBz 回波面积的时间变化图

Fig. 6 Change of cloud bridges number, cloud bridge a number and the radar echoes areas with intensities greater than 60, 65 and 70 dBz between supercells and rear short linear storms from 00:00 BT to 07:00 BT on March 3, 2025

A 转变为短线状风暴伴随出现的重要特征。02:12—03:09, 超级单体 A 完成了由孤立单体向镶嵌在短线状风暴中的单体转化 (图 4f—h), 伴随的云桥数在 02:12 出现激增, 并一直持续至 06:12。

事实上, 01:36—05:30 云桥 a 存在时, 超级单体 A 处于持续横向分裂和纵向合并的过程。分裂造成了其由孤立单体转变为包含超级单体的短线状风暴; 合并致使上升气流加强, 超级单体重新发展。

4 超级单体分裂、合并及维持机制

为揭示此次超级单体后侧短线状风暴激发出小单体并向前 (纵向) 并入超级单体、致使其长时间维持的机制, 对 01:22—02:01 雷暴合并过程的双偏振雷达特征及三维风场演变情况进行分析, 并给出此次过程的概念模型示意图。

4.1 双偏振雷达参量特征

为揭示雷暴合并的雷达特征, 给出单站双偏振雷达某仰角绕垂直轴 360°扫描 (PPI) 图 (图 7), 以及给出沿着图 7c (01:44)、图 7d (01:55) 与超级单体 A 移向垂直 (横向) 的剖面图 (图 8)。从图 7a—d 可以看到, 边界层内近地面急流显著加强, 促使 01:22 小单体 C 在短线状风暴 B 右侧前端新生发展, 4 km 左右高空急流显著加强, C 移速大于超级单体 A 而逐渐由纵向并入 A, 01:55 建立起连接超级单体 A 和短线状风暴 B 的云桥, C 最终完全并入超级单体 A, 完成了一次云桥建立和雷暴合并过程。

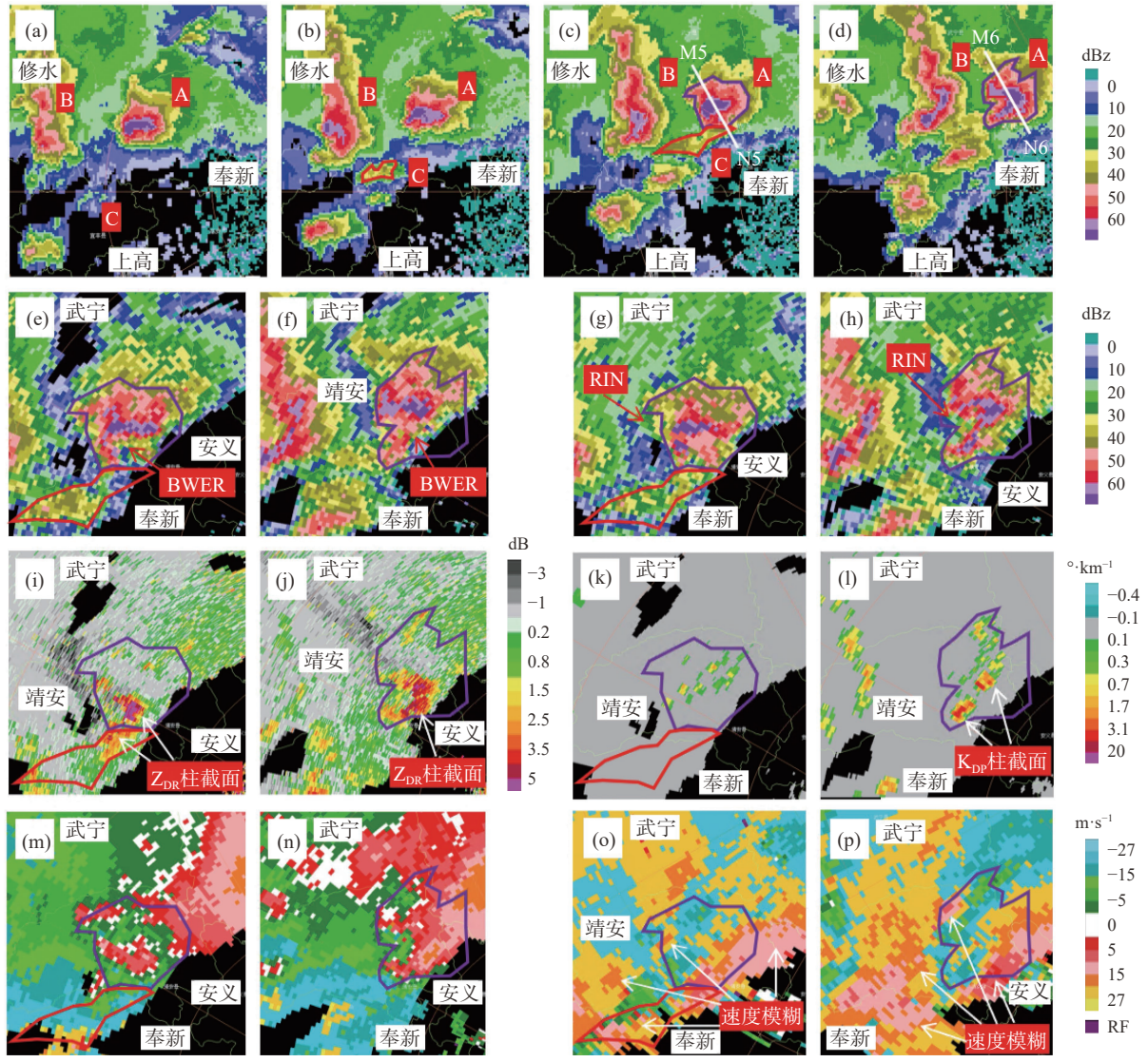


图 7 2025 年 3 月 3 日南昌雷达 01:22 (a)、01:33 (b)、01:44 (c)、01:55 (d) 组合反射率 CR, 01:44 (e、g、i、k、m)、01:55 (f、h、j、l、n) 的 1.5 °仰角 (e、f)、3.3 °仰角 (g、h) 反射率因子 Z_H、2.4 °仰角差分反射率因子 Z_{DR} (i、j) 及差分传播相移率 K_{DP} (k、l)、4.3 °仰角径向速度 V (m、n), 九江雷达 01:42 (o)、01:53 (p) 2.4 °仰角径向速度 V 演变图 (紫色轮廓为超级单体 A, 红色轮廓为小单体 C)

Fig. 7 Evolution diagrams of the combined reflectivity (CR) at (a) 01:22 BT, (b) 01:33 BT, (c) 01:44 BT, (d) 01:55 BT, reflectivity factor Z_H of (e, f) 1.5° and (g, h) 3.3° elevation angle, (i, j) differential reflectivity factor Z_{DR} and (k, l) specific differential phase K_{DP} of 2.4° elevation angle, and (m, n) radial velocity V of 4.3° elevation angle from Nanchang radar at (e, g, i, k, m) 01:44 BT and (f, h, j, l, n) 01:55 BT, radial velocity V of 2.4° elevation angle from Jiujiang radar at (o) 01:42 BT and (p) 01:53 BT on March 3, 2025 (The purple outline represents supercell A, and the red outline represents small cell C)

小单体 C 纵向并入超级单体 A 的过程，伴随着上升气流显著加强。除单偏振量 Z_H 识别出的 BWER，双偏振量 Z_{DR} 柱、K_{DP} 柱也可判识上升气流。01:44 和 01:55 的 1.5 °仰角反射率因子图 (图 7e、f) 上，在钩状回波右侧附近均有一个清晰的回波弱值区 BWER。01:44 的 2.4 °仰角 Z_{DR} 图 (图 7g) 上，小单体 C 右前侧和超级单体 A 的 BWER 右侧各有一个 Z_{DR} 为 3.5 dB 以上的大值区，并表现为向右侧凸出的 Z_{DR} 弧特征，01:55 (图 7h)，随着纵向合并，Z_{DR} 大值区也合并 (图 7i、j)。较 01:44 (图 8e)，在 Z_{DR} 剖面中能看到 01:55 (图 8f) Z_{DR} 柱在 0 ℃ 层高度以上的水平宽度更大，表征合并过程促使超级单体 A 上升气流加强。较 01:44 (图 7k)，01:55 (图 7l) 合并中的超级单体 A 的 K_{DP} 柱截面更大且有两个，分别在 Z_{DR} 柱截面东北侧和西南侧，K_{DP} 剖面中 (图 8g、h) 也能清晰看到 0 ℃ 层高度以上 K_{DP} 柱水平宽度更大、发展高度更高，K_{DP} 达到 3.1 °·km^{-1}。0 ℃ 层高度以上，01:44—01:55 的 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱的加强均表明雷暴合并过程中上升气流也合并，且使超级单体 A 获得一支水平尺度更大、发展高度更高的强盛上升气流。

超级单体 A 纵向 (平行于移向) 发生合并，横向 (垂直于移向) 却在发生分裂。01:55 组合反射率因子 (图 7d) 和 3.3 °仰角反射率因子图 (图 7h) 上，超级单体 A 后侧均有入流缺口 (Rear Inflow Notch, RIN)，并出现单体弓形回波形态 (俞小鼎等, 2006)，具有逆时针辐合性旋转 (图 7m、n)，且对应 2.4°仰角的九江雷达径向速度图 (图 7o、p) 上，RIN 附近 (图 7g、h) 出现速度模糊，识别为 39~49 m·s^{-1} 的径向速度大值区，风暴上游 (西南侧) 宜春风廓线雷达 (图 3) 监测到 4 km 左右高空水平风加强至 35~40 m·s^{-1}。因此 RIN 的出现表征超级单体 A 后侧中层入流急流加强。中层入流急流加强的过程中，中层干冷空气夹卷进入风暴内部的蒸发冷却效应致使负浮力作用加强，从而加强下沉支气流，加速超级单体 A 自上而下分裂，垂直于移向的反射率因子剖面图 (图 8a、b) 上表现为 5 km 以上 RIN 南北两侧各有一个质心强度 50 dBz 以上的强回波区，这与王福侠等 (2014) 观测到的超级单体分裂特征类似。对于分裂中的超级单体 A (图 8a、b)，RIN 右侧的记为 A1 (离雷达位置更近)，左侧的记为 A2 (远离雷达方向)。A1 质心强度达 65 dBz，质心伸展到 5—10 km，在 5 km 以下，有明显的低层入流缺口，对应径向速度剖面图 (图 8c、d) 上 5 km 以下表现为较强的远离雷达的正速度，随高度升高则表现为上升支的特征，5 km 以上表现为指向雷达的负速度，随高度下降表现为下沉支的特征。A2 的质心

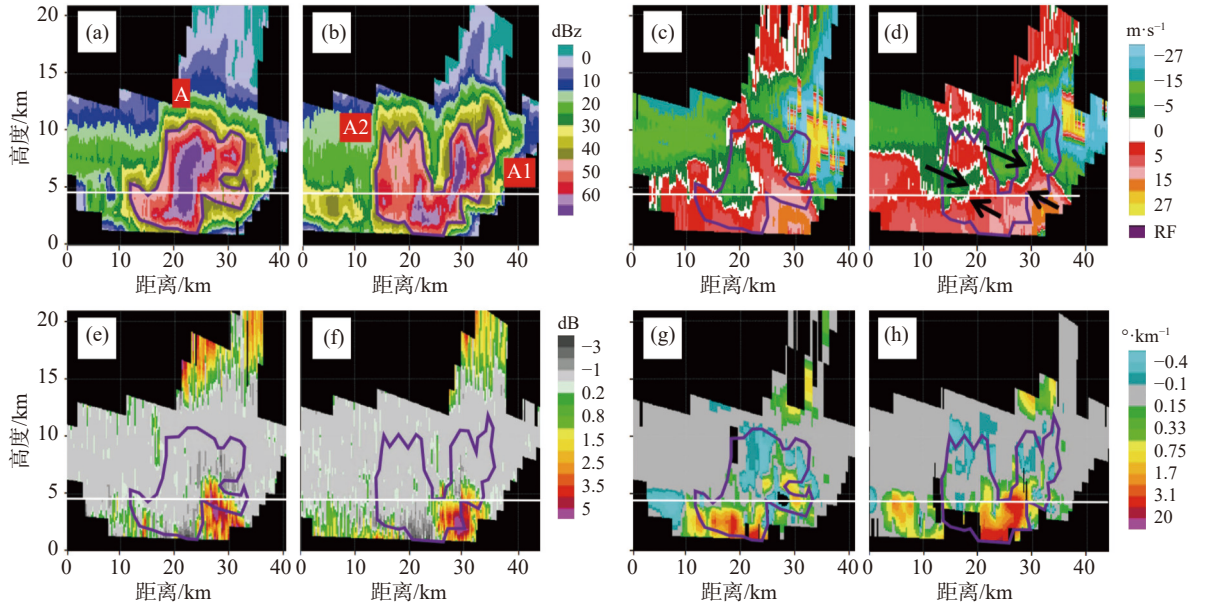


图 8 2025 年 3 月 3 日南昌雷达沿图 7c 中 M5N5 白色线 01:44 (a、c、e、g)、沿图 7d 中 M6N6 白色线 01:55 (b、d、f、h) 的反射率因子 Z_H (a, b)、径向速度 V (c, d)、差分反射率因子 Z_{DR} (e, f)、差分传播相移率 K_{DP} (g, h) 垂直剖面图 (紫色轮廓为 45 dBz 线，白色实线为 0 ℃ 线，超级单体 A 分裂为右侧 A1、左侧 A2，黑色箭头为径向速度方向)

Fig. 8 Vertical cross-sections of (a, b) reflectivity factor Z_H, (c, d) radial velocity V, (e, f) differential reflectivity factor Z_{DR}, and (g, h) specific differential specific differential phase K_{DP} from Nanchang radar at (a, c, e, g) 01:44 BT along the white line M5N5 in Fig. 7c and (b, d, f, h) 01:55 BT along the white line M6N6 in Fig. 7d on March 3, 2025 (Purple contours represent the 45 dBz reflectivity contour; white solid lines denote the 0 ℃ isotherm. Supercell A splits into A1 (on the right) and A2 (on the left); black arrows indicate the direction of radial velocity)

强度为 60~65 dBz, 弱于 A1, 且质心主要位于 5 km 以下, 径向速度剖面图上 5 km 以下的上升运动弱于 A1, 5 km 以上的下沉运动也弱于 A1。因此, 超级单体 A 由中层急流干冷空气入流导致雷暴分裂, 在 RIN 右侧的分裂单体质心强度更强, 发展高度更高, 中低层上升和中高层下沉均更强, 符合超级单体右移选择性加强的特征。

综上, 在超级单体 A 生命周期中, 存在迭代的雷暴合并和分裂过程, 雷暴的合并和分裂是超级单体 A 维持长生命史的主要机制之一。雷暴合并出现在平行于超级单体移动方向上, 边界层内近地面急流显著加强, 促使新单体新生, 并在中层显著加强的西南急流的引导下, 并入超级单体 A, 与超级单体 A 完成合并, 促使超级单体 A 维持一定强度, 云桥是雷暴合并的主要特征之一。雷暴的分裂出现在垂直于超级单体移动方向上, 中层急流显著加强促使超级单体 A 后部中层干冷空气入流加强, 从而促使中层下沉支加强, 导致超级单体 A 发生分裂, 并表现为选择性右移加强的特征, 中层入流缺口是雷暴分裂的主要特征之一。

4.2 三维风场反演特征

俞小鼎等 (2020) 和王秀明等 (2025) 均认为超级单体的中气旋位置在 3—7 km 高度, 并伴有一支宽而强的上升气流, 当上升运动加强时, 会使中气旋向上拉伸。本节聚焦超级单体 A 内部风场和结构特征, 反演超级单体 A 及其附近三维风场 (图 9), 并给出合并过程中 1 个体扫间隔的 01:48、01:54 两个时刻 5—12 km 高度的垂直速度 (表 1)。

01:54 (图 9d—f) 上升运动区分布在风暴南部并向中部延伸, 南部中气旋所在处呈开口向西的弧状, 与图 7j 中 01:55 Z_{DR} 柱截面、图 7l 中 01:55 的 K_{DP} 柱截面合围区域的位置和形态特征表现较一致, 验证了三维风场反演的上升运动区和双偏振雷达的观测较为一致。中气旋范围内, 01:48 和 01:54 上升运动在 5—12 km 高度分别为 4.89~7.62 m·s^{-1} 和 8.10~16.42 m·s^{-1}, 其中 01:54 上升运动更强。最强上升运动 01:48、01:54 均出现在 9 km, 其中 5—9 km 上升运动随高度增加而增加, 9—12 km 上升运动随高度增加而减小。结合中气旋半径大小 (图 9a、d) 来看, 01:48 至 01:54 超级单体南部中气旋半径减小, 高度抬高。

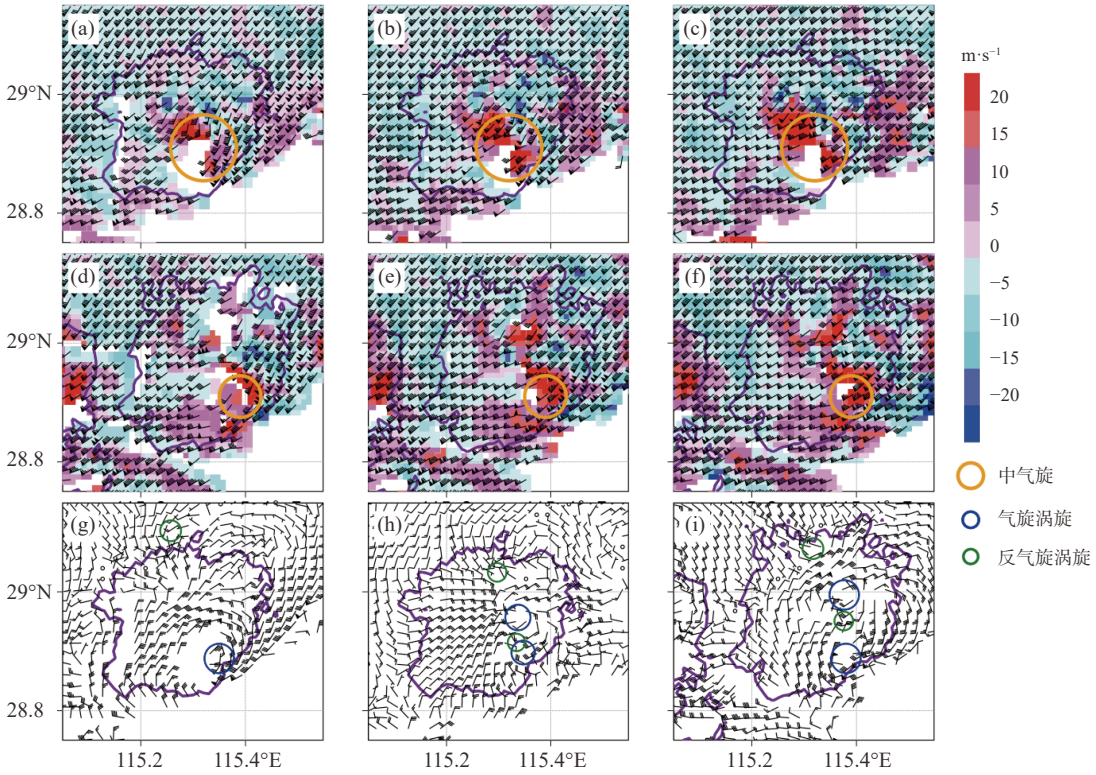


图 9 2025 年 3 月 3 日 01:48 (a—c)、01:54 (d—f) 时 5 km (a、d)、6 km (b、e)、7 km (c、f) 高度三维反演的水平风 (风羽, 单位: m·s^{-1})、垂直风 (填色) 及去除背景水平风后 01:48 时 6 km (g)、8 km (h) 高度, 01:54 时 6 km (i) 高度水平风 (风羽, 单位: m·s^{-1}) 分布 (紫色轮廓为 45 dBz 线, 黄圈、蓝圈、绿圈分别为中气旋和逆时针涡旋、顺时针涡旋涡管截面)

Fig. 9 Distribution of horizontal wind (wind barb, unit: m·s^{-1}) and vertical wind (filled color) at (a, d) 5 km, (b, e) 6 km, and (c, f) 7 km height at (a—c) 01:48 BT and (d—f) 01:54 BT, horizontal wind (wind barb, unit: m·s^{-1}) after removing background horizontal wind at (g) 6 km and (h) 8 km height from 3D inversion at 01:48 BT, and (i) 6 km height at 01:54 BT on March 3, 2025 (The purple contour represents the 45 dBz line. yellow circles, blue circles, and green circles denote mesocyclones, counterclockwise vortices, and clockwise vortices vortex tube cross-sections, respectively)

表 1 2025 年 3 月 3 日 01:48、01:54 时 5—12 km 不同高度层中气旋范围内的平均垂直速度 (单位:m·s^{-1})

Table 1 Average vertical velocity (unit: m·s^{-1}) within the mesocyclone range at different height layers (5—12 km) at 01:48 BT and 01:54 BT on March 3, 2025

时间	高度层/km							
	5	6	7	8	9	10	11	12
01:48	5.93	6.93	7.16	7.52	7.62	6.55	5.81	4.89
01:54	8.10	9.61	13.53	14.90	16.42	16.02	15.02	14.78

图 9a—f 中最大上升区 (红色) 均表现为集中在中气旋北部或中气旋以北的风暴区域, 由于中气旋内北部垂直速度大于南部, 致使涡管北侧向上抬升扭曲, 01:48—01:54 扭曲作用有利于中气旋加强。中气旋半径 01:54 小于 01:48, 表明中气旋中的气块收缩, 同时, 01:48 (图 9a—c) 和 01:54 (图 9d—f) 中气旋范围内 5—7 km 上升运动随高度增加而增加, 表明 01:48—01:54 垂直拉伸作用有利于中气旋加强。因强烈拉伸作用, 垂直速度差达到 3.92 m·s^{-1}, 垂直拉伸作用致使上升运动突增。结合图 7、图 8 的超级单体分裂、合并过程, 进一步证明超级单体分裂、合并过程中伴随中气旋加强和上升运动的加强, 说明超级单体分裂、合并过程是其强度维持或加强的主要机制之一。

4.3 概念模型

为进一步阐述维持机制, 给出超级单体分裂、合并过程的概念模型 (图 10), 因 01:54 分裂和合并特征较为典型, 所以概念模型选用这一时刻的反射率因子表示风暴位置。

值得关注的是, 雷暴纵向合并并入超级单体 A 的过程伴随超级单体 A 的横向分裂, 出现单体弓形回波形态 (图 7a—d)。在分裂过程中, 超级单体后侧中层急流显著增强 (图 8), 干冷空气夹卷作用加强, 进而促使 RIN 附近下沉气流加强, 致使超级单体 A 内涡管中部向下弯曲, 呈现为“M”状。01:48 (图 9h), 超级单体 A 高层 8 km 截面有自南向北气旋性-反气旋性-气旋性-反气旋性横线排列的涡旋, 即分裂出两对涡偶, 01:48 (图 9g) 中层 6 km 截面上仅有一对相距较远的涡偶。下一个体扫时次 01:54 (图 9i), 中部 6 km 截面也表现为和 01:48 的 8 km 截面类似的两对涡偶, 体现了超级单体 A 的分裂是从中高层开始并迅速向下延伸的特征。此外, 气旋性涡旋比反气旋性涡旋更强烈、水平尺度更大, 涡旋环流也更清晰。

图 10 中, 随着超级单体 A 的分裂, 小单体 C 前侧上升气流和超级单体 A 合并, 加强的上升气流发生形变, 由集中在超级单体南侧向北拉伸, 在分裂形

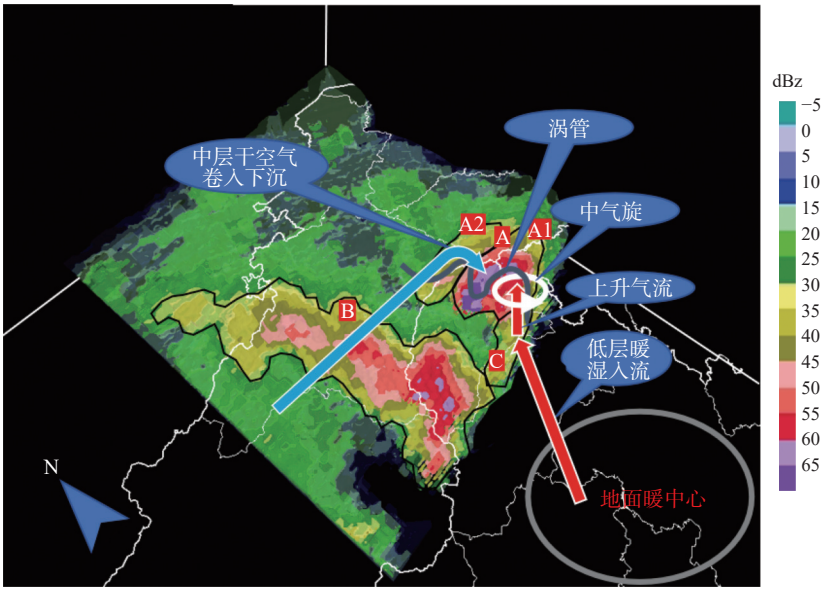


图 10 2025 年 3 月 3 日超级单体分裂、合并的概念模型图 (底图为宜春雷达 01:54 的三维反射率因子 (色斑); 黑色实线为风暴边界; 超级单体 A 分裂为右侧 A1、左侧 A2; 后侧短线状风暴为 B; 小风暴为 C)

Fig. 10 Conceptual model diagram of the splitting and merging of supercells on March 3, 2025 (The base map is the three-dimensional reflectivity factor (shaded map) from the Yichun radar at 01:54 BT. The black solid line is the storm boundary. Supercell A splits into A1 on the right side and A2 on the left side. The rear short linear storm is B, and the small storm is C)

成的北侧气旋涡旋附近, 形成上升气流中心, 但其强度弱于南侧超级单体 A 原来的上升气流中心。超级单体 A 分裂的右侧部分 A1 承接超级单体 A 南侧强度更强的上升气流主体, 左侧部分 A2 仅承接北侧分裂出的弱上升气流。事实上, 通过横向分裂和纵向合并, 右侧部分 A1 承接了上升气流主体和中气旋, 上升气流在 A1 中占支配地位, A1 实现了对超级单体 A 的替代, 完成了一次超级单体的生命周期迭代。在超级单体 A 长达 7 h 的生命史中, 出现多次类似于 01:22—02:01 的分裂、合并过程。超级单体 A 的若干次分裂、合并表征其出现若干次生命周期迭代, 是其维持长生命史的主要机制之一。

5 结论和讨论

本文基于地面观测、高空观测、双偏振雷达、风廓线雷达数据, 对 2025 年 3 月 3 日 00:00—07:00 江南北部一次 7 h 长生命史超级单体的双偏振特征和维持机制进行了分析, 得出主要结论如下:

(1) 在超级单体长达 7 h 的生命史中, 始终存在分裂和合并过程, 云桥特征是超级单体分裂、合并的主要现象之一, 云桥数量与超级单体强回波面积具有一致性。超级单体的分裂造成了其由孤立单体转变为包含超级单体的短线状风暴, 超级单体的合并致使其上升气流加强, 实现超级单体的重新发展。若干次分裂、合并迭代, 进而超级单体维持长生命史特征。

(2) 01:22—02:01 超级单体分裂、合并的一次过程中, 小单体纵向并入超级单体也伴随着超级单体的横向分裂。合并的双偏振特征表现为 0 ℃ 层以上 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱水平宽度加大, 且 K_{DP} 柱发展高度更高。分裂的雷达特征表现为单体弓形回波, RIN 附近下沉气流使涡管中部向下弯曲。超级单体从中高层开始迅速向下分裂, 剖面上呈“M”状特征。超级单体分裂出的右侧单体对应上升气流更强, 选择性右移加强。分裂、合并实现了超级单体新老替代, 完成了一次生命周期迭代。

(3) 中气旋尺寸越小, 垂直拉伸作用越大, 进而增加中气旋内 6—7 km 高度的上升运动。01:48—01:54 中气旋半径由 5.5 km 减小到 2.5 km, 中气旋范围内 5—7 km 高度的上升运动随高度增加而增加。由于强烈拉伸作用致使上升运动突增, 01:54中气旋内 6—7 km 高度的上升运动增加 3.92 $m\cdot s^{-1}$。

以往超级单体风暴长时间维持的机制研究, 多着眼于环境条件和超级单体的相互作用, 最终致使超级单体风暴内部上升气流或中气旋长时间维持(陈瑞敏等, 2021; 刁秀广等, 2021; 王福侠等, 2024)。本文针对此次过程, 进一步总结了上升气流长时间维持与风暴合并有关, 并结合三维风场反演, 定量揭示了合并和分裂过程超级单体内部物理量变化特征。图 10 所述超级单体风暴长时间维持机制, 本质上是在特定环境场条件下诱导超级单体分裂和与小风暴合并, 致使其内部结构新老更替长时间保持顺畅, 使得上升气流长时间维持。此外, 不连续线、高程、地表覆盖类型等对此次案例也有不同程度影响, 且不同时刻的影响机制有较大区别, 不似分裂合并现象能贯穿超级单体大部分生命史, 因此此次讨论未涉及。

参考文献 (References):

陈云辉,许爱华,许彬,等.2019.江西一次极端雷暴大风过程的中尺度特征与成因分析[J].暴雨灾害,38(2):126−134. Chen Y H, Xu A H, Xu B, et al. 2019. Analysis on mesoscale characteristics and causes of an extreme thunderstorm gale event in Jiangxi [J]. Torrential Rain and Disasters,38(2):126−134 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.02.004

陈瑞敏,赵孝伟,于海磊,等.2021.一次长生命史超级单体风暴的雷达观测特征[J].暴雨灾害,40(4):419−429. Chen R M, Zhao X W, Yu H L, et al. 2021. Characteristics of a supercell storm with long life cycle based on analysis of weather radar data [J]. Torrential Rain and Disasters,40(4):419−429 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.04.010

戴建华,陶岚,丁杨,等.2012.一次罕见飑前强降雹超级单体风暴特征分析[J].气象学报,70(4):609−627. Dai J H, Tao L, Ding Y, et al. 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(4):609−627(in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.050

刁秀广,杨传凤,张骞,等.2021.二次长寿命超级单体风暴参数与 Z_{DR} 柱演变特征分析[J].高原气象,40(3):580−589. Diao X G, Yang C F, Zhang Q, et al. 2021. Analysis on the evolution characteristics of storm parameters and Z_{DR} column for two long life supercells [J]. Plateau Meteorology,40(3):580−589 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2020.00034

付丹红,郭学良.2007.积云并合在强对流系统形成中的作用[J].大气科学,31(4):635−644. Fu D H, Guo X L. 2007. The role of cumulus merger in a severe mesoscale convective system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,31(4):635−644 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2007.04.08

黄勇,冯妍,翟菁.2016.对流云合并的国内外研究进展[J].暴雨灾害,35(1):91−96. Huang Y, Feng Y, Zhai J. 2016. A review of convective cloud merger studies [J]. Torrential Rain and Disasters,35(1):91−96 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2016.01.013

金米娜,陈云辉,许爱华,等.2013. 2013 年 3 月 19 日江西省冰雹天气成因分析[J].暴雨灾害,32(2):158−166. Jin M N, Chen Y H, Xu A H, et al. 2013. Cause analysis of a hail event occurred in Jiangxi on 19 March 2013 [J]. Torrential Rain and Disasters,32(2):158−166 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.02.009

李海俊,吴静,李婕,等.2025. ROSE2.1 南昌雷达 2021—2023 年定量降水估测产品检验评估[J].沙漠与绿洲气象,19(3):147−156. Li H J, Wu J, Li J, et al. 2025. Assessment of ROSE2.1 quantitative precipitation estimation product from Nanchang radar during 2021 — 2023 [J]. Desert and Oasis Meteorology,19(3):147−156 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2402.04001

李淑璠,王秀明,刘屹靖,等.2025.江西南昌“3.31”极端大风成因分析[J].大气科学,49(3):609−628. Li S F, Wang X M, Liu Y J, et al. 2025. Analysis on the causes of the extreme winds on march 31, 2024, in Nanchang, Jiangxi province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,49(3):609−628 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2503.24089

毛倩,龙凌云,刘埙勋,等.2024.ROSE2.1 产品在黔东南一次冰雹天气过程中的应用检验[J].山地气象学报,48(4):24−32. Mao Q, Long L Y, Liu X X, et al. 2024. Application verification of ROSE2.1 products in hail process in the southeast of Guizhou Province [J]. Journal of Mountain Meteorology,48(4):24−32 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1003−6598.2024.04.004

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

王秀明,汤欢,俞小鼎,等.2025.超级单体风暴研究进展[J].气象学报,83(3):813−832. Wang X M, Tang H, Yu X D, et al. 2025. Advances in research on supercell storms [J]. Acta Meteorologica Sinica,83(3):813−832 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2025.20240156

王福侠,薛学武,杨吕玉慈,等.2024.一次长生命史超级单体风暴双偏振参量结构及演变特征[J].气象,50(10):1216−1230. Wang F X, Xue X W, Yang L Y C, et al. 2024. Dual-polarization parameter structure and evolution characteristics of a long-life supercell storm [J]. Meteorological Monthly,50(10):1216−1230 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2024.031801

王福侠,俞小鼎,闫雪瑾.2014.一次超级单体分裂过程的雷达回波特征分析[J].气象学报,72(1):152−167. Wang F X, Yu X D, Yan X J. 2014. Analysis of the splitting processes of the supercell storms based on the Doppler weather radar data [J]. Acta Meteorologica Sinica, 72(1):152−167 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2014.010

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]. Meteorological Monthly,40(4):400−411 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2014.04.002

易笑园,孙晓磊,张义军,等.2017.雷暴单体合并进行中雷达回波参数演变及闪电活动的特征分析[J].气象学报,75(6):981−995. Yi X Y, Sun X L, Zhang Y J, et al. 2017. Evolution of radar parameters and lightning activity during thunderstorm cells merging [J]. Acta Meteorologica Sinica,75(6):981−995 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2017.073

袁韬,唐明晖,陈伟,等.2024.南岭地区一次高架雷暴冰雹过程双偏振特征分析[J].暴雨灾害,43(3):332−341. Yuan T, Tang M H, Chen W, et al. 2024. Dual polarization characteristics of an elevated thunderstorm hail event in the Nanling region [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):332−341(in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−165

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:125-157. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2020. The nowcasting on thunderstorms and severe convection [M]. Beijing: Meteorological Press: 125-157 (in Chinese)

俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社:125-157. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006. Principles and operational applications of doppler weather radar [M]. Beijing: Meteorological Press: 163-169 (in Chinese)

郑媛媛,俞小鼎,方翀,等.2004.一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J].气象学报,62(3):317−328. Zheng Y Y, Yu X D, Fang C, et al. 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data [J]. Acta Meteorologica Sinica,62(3):317−328 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577−6619.2004.03.006

Browning K A. 1962. Cellular structure of convective storms [J]. Australian Meteorological Magazine,91(1085):341−350. doi:10.1016/j.atmosres.2019.04.015

Bringi V N, Burrows D A, Menon S M. 1991. Multiparameter radar and aircraft study of raindrop spectral evolution in warm-based clouds [J]. Journal of Applied Meteorology And Climatology,30(6):853−880. doi:10.1175/1520−0450(1991)030<0853:MRAASO>2.0.CO

Jackson R, Collis S, Lang T, et al. 2020. PyDDA: A pythonic direct data assimilation framework for wind retrievals [J]. Journal of Open Research Software,8(1). doi:10.5334/jors.264

Kumjian M R, Khain A P, Benmoshe N, et al. 2014. The anatomy and physics of Z_{DR} columns: investigating a polarimetric radarsignature with a spectral bin microphysical model [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,53(7):1820−1843. doi:10.1175/JAMC−D−13−0354.1

Wang X M, Zheng Y G, Fan L M, et al. 2023. The key mesoscale systems and mesoscale vortices of the Henan extreme precipitation in 2021 [J]. Sustainability,15(6). doi:10.3390/su15064875

Yu X D, Wang X M, Zhao J, et al. 2012. Investigation of supercells in China: environmental and storm characteristie [C]//Psocedings of the 26th Conference on Severe Local Storms. Nashville: American Meteorological Society

(责任编辑 张 文)