

一次左移超级单体的双偏振雷达观测分析¹

彭恩翔^{1,4} 俞小鼎² 钱学成^{3,4} 陈娟^{3,4} 张帆⁵ 孙素琴^{3,4}

1 江西省吉安市气象局, 吉安 343000

2 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

3 江西省气象台, 南昌 330096

4 气候变化风险与气象灾害防御江西省重点实验室, 南昌 330096

5 江西省赣州市气象局, 赣州 341000

提 要: 2021 年 5 月 10 日午后, 江西中北部发生一次罕见的由风暴分裂产生的左移超级单体过程。本文利用吉安 CINRAD/SC 双偏振雷达、高空与地面观测以及 ERA5 再分析资料, 对此次过程的环境条件、风暴结构特征和动力机制进行了分析。结果表明: 该左移超级单体形成于强对流有效位能($CAPE > 3000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 $0 \sim 6 \text{ km}$ 强垂直风切变($> 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)环境中, $3 \sim 4.9 \text{ km}$ 风切变矢量随高度逆时针旋转并产生显著负水平涡度, 是左移超级单体选择性加强的关键环境因素。成熟阶段风暴中高层呈现“双涡旋”结构, 其中中层中反气旋对应前侧强上升气流区, 中气旋位于后侧并与前侧下沉气流区(FFD)相伴, 整体与经典右移风暴呈近似镜像对称。双偏振参量显示, 风暴低层 Z_{DR} 大值区与强垂直风切变引起的粒子分选机制相关; 中层 Z_{DR} 环和 Z_{DR} 柱分别指示中反气旋的强旋转和强上升运动。中反气旋的形成机制源于负水平涡度在强上升气流作用下倾斜为负垂直涡度; 风暴左移则与 FFD 位置、南北涡旋强度差异引起的 Magnus 效应密切相关。本研究为深入理解中国地区左移超级单体的发生发展机制、风暴结构特征和微物理特征提供了参考。

关键词: 中反气旋, 超级单体, 双偏振雷达, 涡度, 左移风暴

中图分类号: P446, P447

文献标志码: A

Analysis of Dual-polarization Radar Observation of a Left-moving Supercell

PENG Enxiang^{1,4} YU Xiaoding² QIAN Xuecheng^{3,4} CHEN Juan^{3,4}

ZHANG Fan⁵ SUN Suqin^{3,4}

1 Ji'an Meteorological Office of Jiangxi Province, Ji'an 343000

2 CMA Training Centre, Beijing 100081

3 Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330096

4 Key Laboratory of Climate Change Risk and Meteorological Disaster Prevention of Jiangxi Province, Nanchang 330096

5 Ganzhou Meteorological Office of Jiangxi Province, Ganzhou 341000

Abstract: A rare left-moving supercell generated by storm splitting occurred in north-central

*中国气象局气象能力提升联合研究专项(23NLTSZ004)、江西省气象局气象科研项目(JX2022Y05、JX2022M11、JX2024RCM03)和吉安市生态气象重点实验室项目(2022JEM201)共同资助

第一作者: 彭恩翔, 主要从事中短期和短时临近天气预报预警技术研究.E-mail: 2621924690@qq.com

通讯作者: 俞小鼎, 主要从事雷暴和强对流天气临近预报和雷达气象学研究.E-mail: xdyu1962@126.com

Jiangxi Province from 14:00 to 18:00 BT 10 May 2021. Using dual-polarization radar data from the Ji'an CINRAD/SC radar, upper-air and surface observations and ERA5 reanalysis data, this paper analyzes the environmental conditions, structural characteristics, and dynamic mechanisms of this event. The results show that the left-moving supercell was generated in an environment with high convective available potential energy ($CAPE > 3,000 \text{ J kg}^{-1}$) and strong 0-6 km vertical wind shear ($>20 \text{ m s}^{-1}$). The wind shear vector of 3-4.9 km exhibited counterclockwise rotation with height, generating significant negative horizontal vorticity, which was a key factor for the selective intensification of the left-moving supercell. During its mature stage, the storm displayed a “dual-vortex” structure at mid-to-upper levels, with a meso-anticyclone located in the leading (northern) sector corresponding to a strong updraft, and a mesocyclone in the trailing (southern) sector associated with the forward-flank downdraft (FFD). Its overall appearance was approximately mirror-symmetrical to the structure of classic right-moving supercell. Dual-polarization parameters demonstrate that the large Z_{DR} zone in the lower levels was related to particle sorting under strong vertical wind shear, while the Z_{DR} ring and Z_{DR} column at mid-levels indicated strong rotation and updraft within the meso-anticyclone, respectively. The formation of the meso-anticyclone was attributed to the tilting of negative horizontal vorticity into negative vertical vorticity by the robust updraft. The leftward motion of the storm was closely related to the location of FFD and the Magnus effect resulting from the pressure gradient force induced by the asymmetry between the northern and southern vortices. This study provides a valuable case for understanding the development, structure, and microphysical characteristics of left-moving supercells in China.

Key words: meso-anticyclone, supercell, dual polarization radar, vorticity, left-moving supercell

引 言

超级单体风暴是一个具有单一的较大垂直环流特征的雷暴云,往往伴随着强降水、大风、冰雹和龙卷等强烈的灾害性天气,其区别于一般雷暴的本质特征是具有一个持久深厚的中气旋。有一种特殊类型的超级单体,就是具有中反气旋结构的左移(相对于风暴承载层平均风向)超级单体风暴,这类超级单体占超级单体总数的比例很小,绝大部分超级单体都是具有中气旋的右移超级单体(俞小鼎等, 2020)。

Klemp and Wilhelmson (1978) 首次利用三维数值模型成功模拟了风暴分裂过程,向右移动的风暴形成的结构与 Browning (1964) 提出的超级单体概念模型非常相似,而向左移动的风暴则具有镜像特征,有时会迅速衰弱,有时会逐渐加强,取决于环境的风矢端图特征。

Klemp (1987) 又在此基础上总结了超级单体风暴动力学理论和模型,研究发现当垂直风切变矢量随高度顺时针旋转,分裂后的右移风暴将选择性加强,左移风暴受到抑制;相反,当垂直风切变矢量随高度逆时针旋转,分裂后的右移风暴将被抑制,左移风暴将选择性增强。之后也有研究(Bunkers, 2002; Markowski and Richardson, 2010)进一步验证了该理论。

Davies-Jones (1985) 在统计 143 次强旋转风暴中,只有 3 次发生了反气旋旋转。Yuet al (2012) 统计中国 200 多次超级单体风暴过程,发现经过明显对流分裂过程形成的超级单体

占比不超过 15%，而左移反气旋风暴占比不超过 2%。吴芳芳等（2013）统计分析了苏北 72 次超级单体风暴过程，其中，除 6 例路径复杂难以分辨外，其余 66 例均相对于风暴承载层平均风向右移动。由于我国地处北半球，从气候统计来看，多数情况下垂直风切变矢量随高度的变化均以顺时针旋转占主导地位，故多产生右移超级单体风暴(俞小鼎等，2006)，而左移超级单体风暴相对罕见。

目前，国内对于左移超级单体过程有明确文献记载的只有 9 例，分别发生在：山西（2004 年 7 月 3 日）、甘肃（2006 年 8 月 10 日）、河北（2007 年 7 月 9 日）、黔西南（2009 年 4 月 14 日）、广东（2012 年 4 月 10 日）、吉林（2012 年 7 月 2 日）、山东（2016 年 6 月 14 日）、成都（2016 年 8 月 7 日）、浙江（2019 年 4 月 23 日），其中 6 次为风暴分裂产生，3 次未发生明显分裂但期间有风暴合并。陈晓燕等（2011）通过雷达径向速度图分析发现，2009 年黔西南左移超级单体风暴伴随强中反气旋，中反气旋低层为反气旋式辐合，中层为纯粹的反气旋旋转。王福侠等（2014）、付双喜等（2014）、伍志方等（2014）、朱义青等（2020）、罗辉等（2020）和韩颂雨等（2023）分别对左移超级单体风暴过程分析发现，在对流发生当天的环境风场中，对流层中低层存在垂直风切变矢量随高度逆时针旋转的特征，这与 Klemp（1987）的数值模拟结果非常相似。王福侠等（2014）和韩颂雨等（2023）还发现左移超级单体风暴与经典的右移超级单体风暴的回波特征非常类似，除了是反气旋涡旋外，无论在形态或是流场结构上都与气旋式超级单体近似成镜像。罗辉等（2020）发现左移超级单体存在气旋式旋转和反气旋式旋转共存的涡旋偶特征。王伏村等（2008）和付双喜等（2014）分析发现，左移超级单体风暴发展期的风暴螺旋度为负的。

目前，国内天气雷达观测到的左移超级单体风暴过程较少。2021 年 5 月 10 日 14:00~18:00（北京时，下同）发生在江西中北部的左移超级单体风暴过程，被吉安 CINRAD/SC 双偏振雷达完整观测记录到，双偏振雷达资料的补充更有助于风暴内部微物理过程的探究，该案例对于我国超级单体风暴动力学的研究具有重要价值。

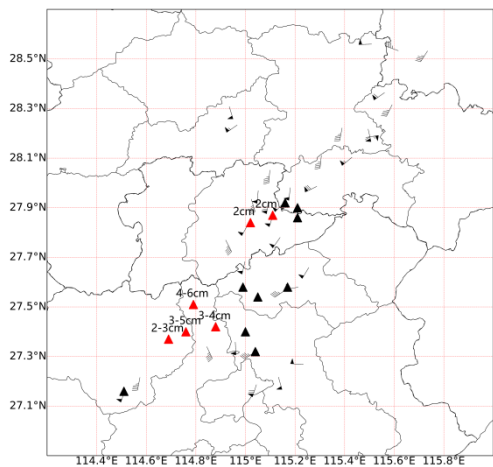
1 资料

本文所用资料包括：2021 年 5 月 10 日高空和地面气象观测资料，要素包括高空形势场、垂直探空、10 m 极大风速、5 min 降水量、冰雹尺寸等；吉安 CINRAD/SC 双偏振雷达观测资料，主要用到的特征量有反射率因子、径向速度、差分反射率因子、差分相移率、相关系数等；欧洲中期天气预报中心的 ERA5 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 分辨率的逐小时再分析资料。

98 2 天气实况

99 2.1 天气实况和天气形势

100 2021 年 5 月 10 日 14:00 左右，对流在吉安西部触发，随后迅速加强并往东北方向（吉
101 安—南昌方向）移动发展，风暴生消持续时间达 3.5h 以上，在移动路径上产生了西南—东北
102 走向的大风速带（图 1），最大风速达 11 级（ $28.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ），吉安、新余和宜春的部分乡镇
103 出现了直径 2 cm 以上的大冰雹，其中吉安县油田镇最大冰雹直径可达 5 cm 以上（图 1），
104 经过的多个测站出现 5 min 4 mm 以上的强降水，最大达 9 mm（图 2）。



注：红色三角形上方数字为冰雹直径，单位：cm。

图 1 2021 年 5 月 10 日沿风暴路径 8 级以上大风（风羽）和冰雹分布

Fig. 1 Distributions of wind speed $\geq$ scale 8(barb) and hail along the storm track on 10 May 2021

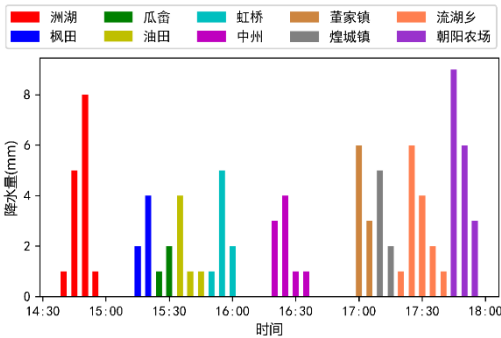


图 2 2021 年 5 月 10 日风暴经过站点的 5min 降水量时间序列

Fig. 2 Time-series of 5 min precipitation at the stations with the storm passing through on 10 May 2021

110 10 日 08:00 实况形势场上（图略），500 hPa 在四川东部有一低涡中心，低涡中心南部
111 南支槽穿过四川、重庆、贵州交界处。700 hPa 与 500 hPa 低涡中心位置基本重合，从 700 hPa
112 113 114 115

低涡中心向东延伸出暖式切变线穿过重庆和湖南北部，切变线以南 700、850 和 925 hPa 分别有一支西南急流向江西输送水汽，急流强度分别达 20、12、10 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。江西区域 850 hPa 露点温度达到 15~16℃，850 hPa 与 500 hPa 温差达 25℃，华东区域处于 925 hPa 暖脊中，与 400~500 hPa 的干冷层形成上干冷下湿层结，午后升温对流触发并发展，造成多地大冰雹和雷暴大风等强对流天气。

2.2 对流条件分析

10 日 08:00，南昌站探空的对流有效位能 (CAPE) 为 890 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，上游长沙站探空的 CAPE 为 670 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，两站最大抬升指数 (BLI) 均低于 -3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；14:00 江西中北部 2 m 气温和露点温度分别达 32~34℃、22~24℃，下垫面具备高温高湿的条件。将 14:00 南昌站 2m 气温和露点温度用于订正 08:00 南昌站探空，订正后的 CAPE 可达 3370 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 3)，露点温度曲线呈现典型的“喇叭口”形状，对流层中层 400~600 hPa 存在明显干区，湿球 0℃ 高度 (WBZ) 为 3.6 km，-20℃ 层高度约 7.8 km。大气环境有利于冰雹、雷暴大风等强对流天气的产生，且下垫面高温高湿的条件有利于风暴的长时间维持。

综合分析 10 日 08:00、20:00 实况资料和 ERA5 再分析资料形势场 (图略)：500 hPa 南支槽快速东移，江西区域午后高空环境风场相对于早晨发生较大改变，用南昌站 08:00 实况探空垂直风切变代表当天午后对流环境下的垂直风切变有待商榷。根据外推法，上游站点 (长沙站、怀化站) 08:00 的对流层中层的风向风速相对于南昌站，更接近于当天午后赣中北区域对流层中层的风向风速。08:00 南昌站、长沙站、怀化站 500 hPa 均为偏西风，但风速分别为 8、13、22 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，使用不同站点 500 hPa 风向风速计算 0~6 km 垂直风切变差距很大。利用 ERA5 高分辨率再分析资料作为辅助参考，插值计算后对左移超级单体移动路径上 14:00 的水平风场进行垂直剖面 (图 4) 发现：6km 高度以偏西风为主，风速 20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，与 08:00 怀化站 500 hPa 的风向风速接近。

吉安雷达风廓线产品 (VWP) (图 5) 显示，14:00 吉安上空 6 km 高度为偏西风 20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，与 ERA5 高分辨率再分析资料 6 km 风向风速和怀化站 08:00 的 500hPa 实况风向风速非常接近，因此选用 VWP 资料 14:00 的垂直风场用于 0~6 km 垂直风切变的分析具有极大可靠性。计算得到 0~6 km 垂直风切变为 22.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，属于强垂直风切变，绘制成风矢端图发现 (图 6)，0~2.7 km 的垂直风切变矢量随高度顺时针旋转，3~4.9 km 转为随高度逆时针旋转且曲率非常大，这样的环境风场有利于风暴分裂后左移风暴的选择性加强，右移风暴被抑制 (Klemp, 1987)。

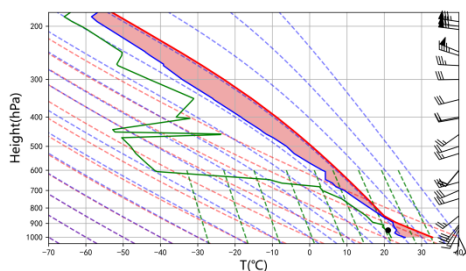


图 3 2021 年 5 月 10 日 08:00 南昌站订正探空

Fig.3 Corrected sounding profile at Nanchang Station at 08:00 BT 10 May 2021

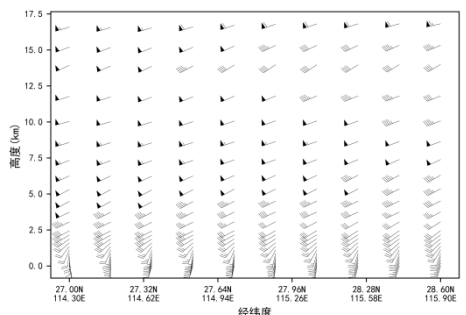


图 4 2021 年 5 月 10 日 14:00 ERA5 逐小时再分析资料的沿左移超级单体移动路径的水平风场垂直剖面

Fig.4 Vertical cross-section of horizontal wind field along the movement path of the left-moving supercell based on ERA5 hourly reanalysis data at 14:00 BT 10 May 2021

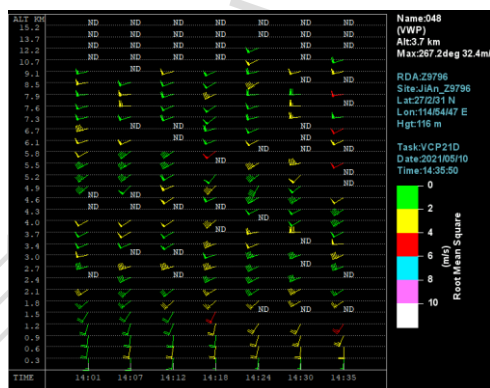


图 5 2021 年 5 月 10 日 14: 35 吉安雷达风廓线

Fig.5 Wind profiling at Ji'an Radar at 14:35 BT 10 May 2021

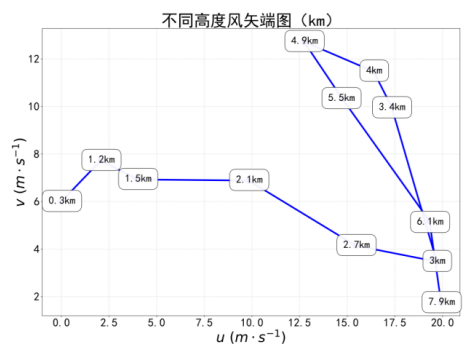


图 6 2021 年 5 月 10 日 14:00 吉安上空不同高度风矢端分布

Fig.6 Distribution of wind hodograph at different heights over Ji'an Station at 14:00 BT 10 May 2021

160 3 超级单体风暴分裂演变与结构特征

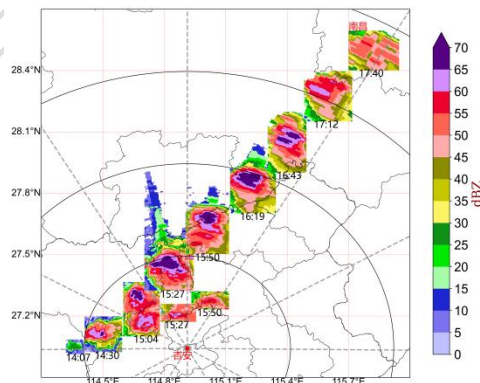
161 3.1 风暴分裂演变概述

162

163 10 日 14:07, 在吉安西部对流单体触发新生(图 7), 随后向东北方向移动并迅速增强,
164 于 14:30 最大反射率因子达 65 dBz 以上; 14:53 前后风暴强回波核分裂成两个强中心, 15:04
165 风暴大致分裂形成南北两个强单体雏形, 分裂后的南部单体向东北方向(风暴承载层平均
166 风的右侧)移动, 北部单体向东北方向(风暴承载层平均风的左侧)移动, 将分别称其为右
167 移单体和左移单体。分裂后的右移单体在移动过程中迅速衰减, 并在 16:02 前后被其他单体
168 合并。

169 重点分析破坏力强、持续时间长的左移单体。分裂后的左移单体在 15:04~15:27 持续
170 增强, 65 dBz 以上的回波面积也随之扩大, 风暴经过的安福县枫田镇、瓜畲乡和吉安县油
171 田镇先后出现大冰雹(图 1), 其中安福瓜畲乡和吉安县油田镇最大冰雹直径达 5 cm。15:27~
172 15:39 风暴有所减弱, 65 dBz 以上的回波面积缩小, 经过的吉水县北部、峡江县西部的部分
173 乡镇出现小冰雹。15:39~15:56, 左移单体再次加强, 65 dBz 以上的回波面积再次扩大, 风
174 暴维持强盛状态至 16:19, 途径的新余水西镇、罗坊镇和姚圩镇均出现直径 2 cm 左右的大冰
175 雹。16:19~16:25 风暴经过短暂的衰减后, 在 16:25~16:37 迎来生命史的第三次增强, 途径
176 的樟树市中州乡、黄土岗镇出现小冰雹。16:37~17:46 风暴逐渐衰减, 60 dBz 以上的回波在
177 17:29 后消失。17:46 以后, 左移单体最大反射率因子降至 55dBz 以下, 最后被并入赣北的
178 中尺度对流系统(MCS)。

179



180

181 图 7 2021 年 5 月 10 日 14: 07—17: 40 吉安雷达组合反射率因子

182 Fig.7 Composite reflectivity at Ji' an Radar from 14:07 BT to 17:40 BT 10 May 2021

183 此次风暴生命史超过 3.5 h, 右移单体从分裂完成到减弱再到被合并经历了近 1 h
184 的时间; 左移单体从分裂完成到中途经历 3 次增强、减弱再到被合并的过程, 经历 2.5 h 以
185 上的时间, 风暴生命史非常长, 灾害破坏性极强。

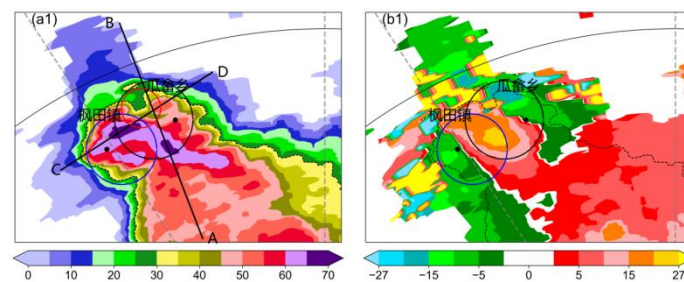
3.2 左移超级单体的结构特征

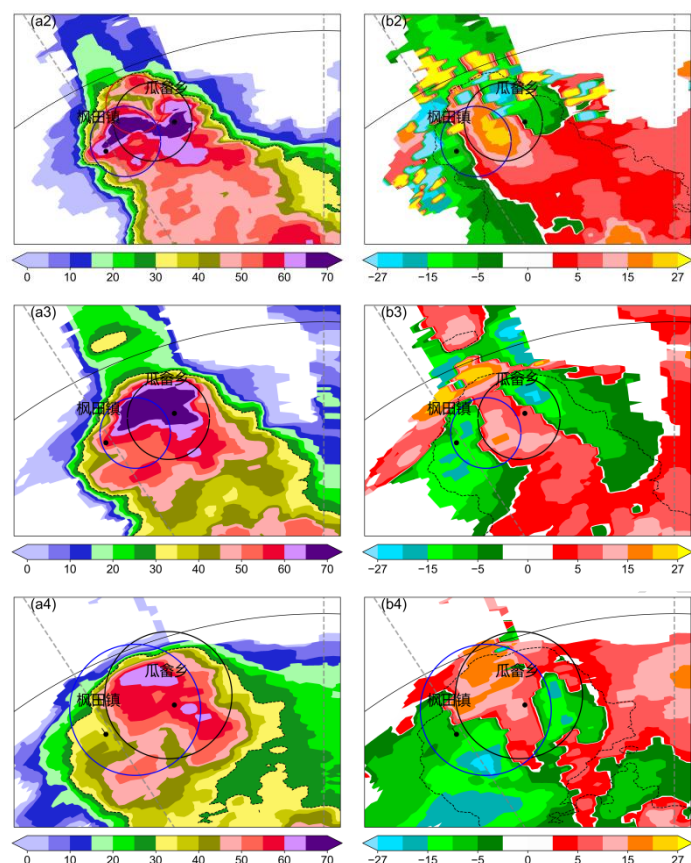
15: 10~15: 33 为冰雹最严重阶段, 选取 15:16 的吉安雷达观测数据进行分析, 此时左移超级单体位于吉安西北部, 风暴中心距雷达 43 km, 位于雷达最佳探测范围内。风暴处于成熟阶段, 风暴最大反射率因子、垂直液态水含量、强回波中心高度、回波顶高分别为 77 dBz、 $67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、7.5 km、17.1 km, 将 0~3、3~8、8 km 以上分别表述为风暴的低层、中层和高层。

3.2.1 水平结构特征

风暴低层 ($0.5 \sim 3.4^\circ$ 仰角) 枫田站和瓜畲站之间为弱回波区 (图略); 中层 (4.3° 仰角、 6.0° 仰角) 回波呈现钩状向北弯曲, 被包围的区域为有界弱回波区 (图 8a₁, 8a₂); 高层 (9.9° 仰角、 14.6° 仰角) 强回波位于中低层弱回波区、有界弱回波区上空 (图 8a₃, 8a₄)。多仰角出现三体散射, 其中 9.9° 仰角三体散射长达 37.5 km, 并出现旁瓣回波 (图 8a₃)。这些是典型的降雹超级单体的雷达回波特征。

由于雹云发展强盛, 多仰角出现三体散射或旁瓣回波等虚假回波, 与之对应的径向速度 (V_R) 也出现异常值 (图 8b), 图中用黑色虚线描绘雹云主体 (反射率因子 $\geq 30 \text{ dBz}$), 以便区分真实可用和虚假回波的 V_R 值。风暴低层 ($0.5 \sim 3.4^\circ$ 仰角) 存在出流速度大值区 (图略), 位于弱回波区附近, 最大值达 $23.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 无明显出入流速度辐合, 但由于该出流速度较环境风速偏大, 也能形成低层的气流辐合抬升。风暴中层在枫田站与瓜畲站之间存在出流速度大值中心, 最大值 $23.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8b₁, 8b₂); 风暴前侧对应入流速度大值中心, 最大值介于 $17.5 \sim 27.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 二者构成反气旋式辐合系统, 旋转速度达 $20.5 \sim 25.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此时中反气旋中心距雷达 43 km, 速度核区直径约 8 km, 根据我国中气旋识别标准 (俞小鼎等, 2020), 已达强中气旋强度, 但因其呈反气旋式旋转, 可判定为强中反气旋。风暴中层后侧另有一入流区, 最大入流速度 $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 与出流中心共同构成气旋式涡旋, 旋转速度达 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 属于中等强度中气旋 (图 8b₁, 8b₂)。风暴高层仍保留风暴前侧反气旋与后侧气旋并存的双涡旋结构, 但随高度由纯粹的反气旋与气旋式旋转转为反气旋与气旋式辐散的结构 (图 8b₃, 8b₄)。风暴顶部 (19.5° 仰角) 仅存在强辐散 (图略)。





注：黑色圆点从左至右分别为枫田站、瓜畲站位置，黑色圆圈为中反气旋所在位置，蓝色圆圈为中气旋所在位置，红色圆圈为有界弱回波区，AB、CD 线段分别为径向、切向剖面位置，黑色虚线为 30dBz 以上的回波主体轮廓。

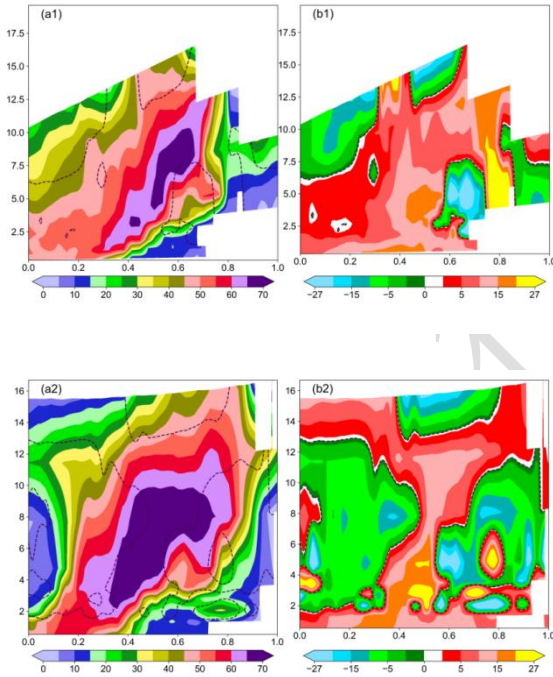
图 8 2021 年 5 月 10 日 15:16 吉安雷达 (a) 反射率因子和 (b) 径向速度

Fig.8 (a) Reflectivity factor and (b) radial velocity at Ji'an Radar at 15:16 BT 10 May 2021

3.2.2 垂直结构特征

沿图 8 a₁ 线段穿过左移超级单体有界弱回波区对反射率因子 (Z_H) 和 V_R 作垂直剖面。AB 方向沿雷达径向，可反映风暴内部气流的辐散与辐合特征；CD 方向沿雷达切向，且与风暴的移动方向接近，可反映风暴内部气流的旋转特征，两种剖面均表现出典型的回波墙—悬垂回波—弱回波区结构 (图 9a)。从雷达径向剖面可见，风暴北侧的速度零线穿过弱回波区到达 7.5 km 高度的强回波核 ($Z_H \geq 65$ dBZ) 底部 (图 9 a₁)，其速度零线上是上升速度的高值区，甚至是最大值 (龚佃利等, 2021)，两侧的最大正负速度分别达 $17.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 9b₁)，为强烈的径向辐合，在强上升气流承托下，大量 60dBz 以上的强回波位于 -20℃ 层 (08:00 南昌站探空 -20℃ 层高度为 8 km) 以上。从雷达切向剖面可见，风暴移动方向前侧的速度零线穿过弱回波区、有界弱回波区和强悬垂回波到达 12 km 附近高度 (图 9a₂)，其速度零线为气流旋转方向的临界线 (龚佃利等, 2021)，风暴中层最大旋转速度达 $25.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 9b₂)，对应强盛的反气旋式上升气流；风暴后侧的另一条速度零线从低层穿过回波墙到达 12 km 以上的高度 (图 9a₂)，对应气旋式下沉气流。

综合分析来看,成熟阶段左移超级单体的反气旋式上升气流区位于风暴移动方向的前部(北侧),气旋式下沉气流区位于后部(南侧),故该左移超级单体虽是双涡旋结构,却是以中反气旋为主体的超级单体风暴。与陈瑞敏等(2021)在河北观测到的双涡旋超级单体不同,其观测的右移风暴气旋式涡旋较强,位于移动方向的前部,反气旋式涡旋较弱,位于后部。左移超级单体与经典的右移风暴呈近似的镜像对称。并且这种在强垂直风切变环境中发展而形成的风暴涡旋对,外部环境风绕过风暴后侧的涡旋而过,不会穿越风暴,使得前侧的中气旋或中反气旋受环境风的影响小,风暴得以长时间维持(刁秀广等,2009),这也是导致本次左移超级单体超长生命史的原因之一。



注: 黑色虚线为径向速度零线。

图 9 沿图 8 a₁ 中线段 (a₁, b₁) AB、(a₂, b₂) CD 的 (a) 反射率因子和 (b) 径向速度的垂直剖面 Fig.9 Vertical cross-sections of (a) reflectivity factor and (b) radial velocity along the line (a₁, b₁) AB and (a₂, b₂) CD in Fig.8 a₁

4 成熟阶段左移超级单体双偏振雷达参量特征

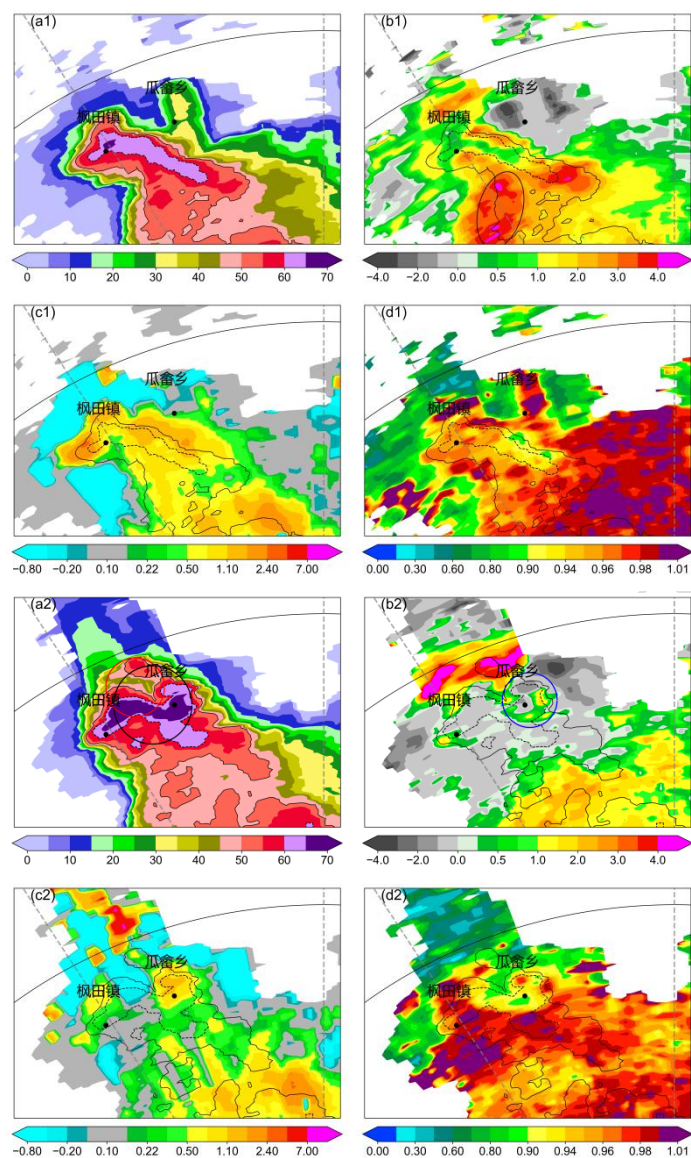
4.1 风暴低层特征

观测显示, 15:16 左右, 在枫田镇出现了最大直径为 2~3 cm 的大冰雹, 风暴低层 (2.4° 仰角) 强回波核 ($Z_H \geq 60$ dBZ) (图 10a₁) 距离地面约 2 km, 对应的差分反射率因子 (Z_{DR}) (图 10b₁) 和相关系数 (CC) (图 10d₁) 偏小, 这是由于融化层以下的大冰雹在降落过程中由于翻滚作用其 Z_{DR} 往往偏小, 且大冰雹中往往还伴随着一定数量的融化小冰雹和大雨滴粒子, 当多相态粒子共存、粒子大小不均时, 将导致 CC 降级, 这与唐明晖等(2023)、王福侠等(2024)利用 S 波段双偏振雷达观测到的洞庭湖地区和河北地区的两次降雹超级单

体得出的结果相似。此外, 风暴前侧下沉气流区 (FFD) 的西部存在 Z_{DR} 大值区 (图 10b₁), 强度达 3~5 dB, 呈西南—东北向分布, 该区域 Z_{DR} 自西向东由 3~5 dB 降至 0.75~1.5 dB, Z_H 由 55 dBz 降至 30 dBz (图 10a₁), 差分传播相移率 (K_{DP}) 由 $0.5\sim1.1^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ 升至 $1.6\sim2.4^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ (图 10c₁), CC 由 0.94~0.96 升至 0.98~1 (图 10d₁)。由此可以判断, FFD 自西向东逐渐由稀疏的大雨滴粒子转为分布更密集的中等及偏小的雨滴粒子, 要形成这样的粒子分布结果, 必然存在相应的粒子分选机制。Dawson et al (2014) 的数值模拟试验结果表明, 深层的垂直风切变使较轻的粒子 (下落末速度小, 受环境风作用时间更长) 比较重的粒子 (下落末速度大, 受环境风作用时间更短) 平流到更加远离粒子源地的位置, 不同大小的雨滴粒子有不同的降落抛物线轨迹。吉安雷达 VWP 产品显示 (图 5), 环境中高层 (3~9 km) 存在 $16\sim20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏西风, 较轻的中小雨滴粒子平流到 FFD 东部, 重的大雨滴粒子则在 FFD 西部聚集, 从而形成该 Z_{DR} 大值区。

4.2 风暴中层特征

15:16, 风暴中层 (6.0° 仰角) 前侧存在一环状分布的 Z_{DR} 大值区 ($0.5\sim1.5\text{ dB}$) (图 10b₂), 对应较小的 CC ($0.85\sim0.94$) (图 10d₂) 和较大的 K_{DP} ($0.5\sim1.7^\circ\cdot\text{km}^{-1}$) (图 10c₂), 该区域距离地面约 4.7 km, 接近南昌站 08:00 干球 0°C 高度 (4.8 km), 表明风暴前侧中反气旋的强上升气流将部分大雨滴粒子、包有水膜的小冰雹和地面杂物带到 0°C 层, 并在中层中反气旋的强旋转离心力的作用下形成环状分布, 称为 Z_{DR} 环 (Kumjian and Ryzhkov, 2008; 李芳等, 2024)。强回波核雷达径向上存在明显的三体散射 (图 10a₂), 该三体散射与强回波核的交界处出现 Z_{DR} 骤增但又随着远离强回波核迅速减小的现象 (图 10b₂), 同时其 CC 发生明显衰减 (图 10d₂), Hubbert and Bringi (2000) 在对冰雹三体散射的仿真模型中也得出相似的结果。



注：黑色圆点从左至右分别为枫田站、瓜畲站位置，黑色圆圈为中反气旋所在位置，红色圆圈为有界弱回波区，蓝色圆圈为 Z_{DR} 环，黑色椭圆为 Z_{DR} 大值区，黑色实线为 50dBz 等值线，黑色虚线为 60dBz 等值线。

图 10 2021 年 5 月 10 日 15:16 吉安雷达 (a) Z_H ,
(b) Z_{DR} , (c) K_{DP} , (d) CC

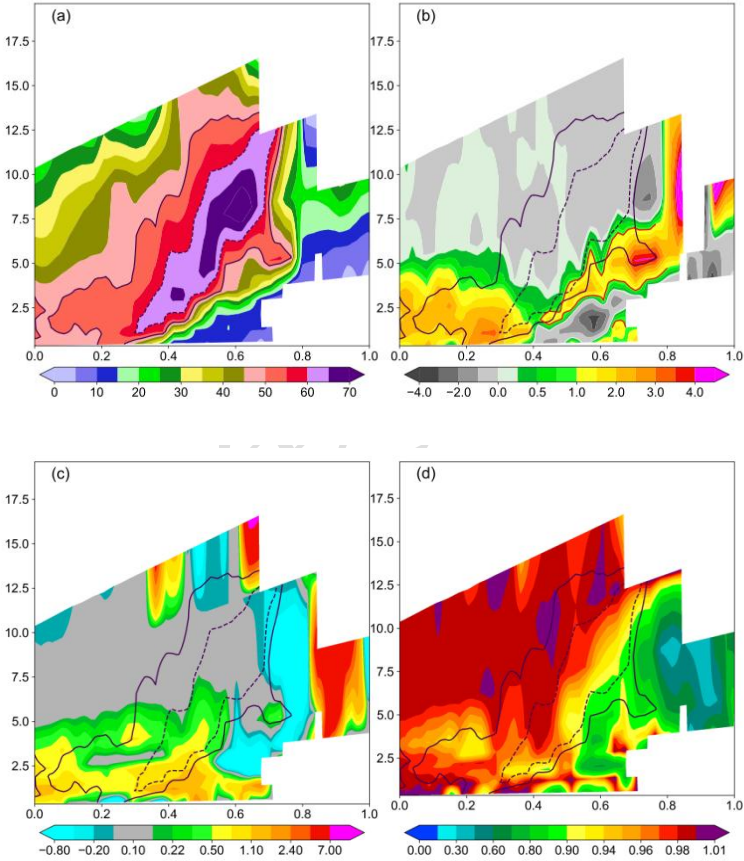
Fig.10 (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) K_{DP} and (d) CC at Ji'an Radar at 15:16 BT 10 May 2021

4.3 风暴垂直剖面特征

沿雷达径向方向（，图 8a₁ 线段 AB）对左移超级单体的 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 作垂直剖面，结果显示，回波墙和风暴前沿中低层存在明显的 Z_{DR} 大值区（ $Z_{DR} \geq 1$ db）（图 11b）。回波墙的 Z_{DR} 大值区水平宽度较大，垂直方向上 1 dB 的等值线高度略低于 5 km。风暴前沿的 Z_{DR} 大值区，垂直方向上 1 dB 的等值线延伸至接近 7.5 km 的高度，其中心强度达到 4 dB 以上，为显著的 Z_{DR} 柱特征，对应 6.0° 仰角的 Z_{DR} 环、 Z_{DR} 柱附近 CC 较小（图 11d），这

是由于成熟阶段的超级单体上升气流强盛，能将大雨滴吹至接近-20℃层高度（7.8 km）成为过冷水滴，从而形成从低层延伸至较高海拔的 Z_{DR} 大值区(周聪等, 2024; 王文青等, 2026)，强上升气流中还包含着沙尘、昆虫、小石子等杂物，导致 CC 偏低(刁秀广和郭飞燕, 2021)。

回波墙 5 km 以下高度存在 K_{DP} 较大 ($0.5 \sim 2.4^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$) 的区域 (图 11c)，其中 $K_{DP} \geq 0.75^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 的区域主要位于 3.5 km 以下的高度。俞小鼎 (2014) 指出，当冰雹降至干球 0℃ 层高度 (DBZ) 以下时，冰雹表面融化产生水膜，但由于中层干空气的卷入使得水膜剧烈蒸发降温，迅速冻结；而当冰雹降落至 WBZ 以下，冰雹才开始真正融化。故冰雹降至 DBZ 和 WBZ 之间的高度时，由于融化作用使得液态水含量增加，但同时存在蒸发降温冻结的效应，使 K_{DP} 有所增大，但不会达到很大；而当冰雹降落至 WBZ 以下，冰雹才开始真正融化，液态水含量增加， K_{DP} 也迅速增大。当天 08:00 南昌站探空 DBZ、WBZ 分别为 4.8 km、3.6 km，与 K_{DP} 两次跃增的高度非常接近。



注：黑色实线为 50 dBz 等值线，黑色虚线为 60dBz 等值线，红色实线为 Z_{DR} 柱。

图 11 (a) Z_H ，(b) Z_{DR} ，(c) K_{DP} ，(d) CC 沿图 8 a₁ 中线段 AB 的垂直剖面

Fig.11 Vertical cross-sections of (a) Z_H ，(b) Z_{DR} ，(c) K_{DP} and (d) CC along line AB in Fig .8 a₁

5 左移超级单体成因分析

有无中气旋是判断超级单体的标准,因此垂直涡度的形成与加强是形成超级单体的关键(俞小鼎等, 2006)。目前主流观点认为, 超级单体中层中气旋的形成是由中等或强的垂直风切变产生水平涡度, 形成水平涡管, 强的上升气流将水平涡管扭曲倾斜成垂直方向, 转化为强的垂直涡度(Klemp, 1987; 王秀明等, 2025)。Z 坐标的水平涡度如式(1), 单纯由垂直风切变引起的水平涡度表达式可简化为式(2)。要形成以中反气旋为主体的左移超级单体, 需要形成强的负涡度, 当 Y 轴速度分量 v 随着高度增加、X 轴速度分量 u 随着高度减小时, 能形成负的水平涡度。

$$\zeta_h = \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\zeta_h = -\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2)$$

式中: ζ_h 表示水平涡度, w 、 u 、 v 分别代表气体在垂直方向上(Z 轴)以及水平面上 X 轴、Y 轴方向上的速度分量, $\frac{\partial \omega}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial \omega}{\partial y}$ 则分别表示 ω 随 X 轴、Y 轴的变化, $\frac{\partial u}{\partial z}$ 、 $\frac{\partial v}{\partial z}$ 分别表示 u 、 v 随高度的变化。

从本次对流发展的垂直风切变矢端图可见(图 6), 3~4.9 km 风随高度逆时针旋转, 且 u 随高度减小、 v 随高度显著增大, 因此 3~4.9 km 的环境风场能产生显著的负水平涡度, 从而形成具有负涡度的水平涡管。配合当天良好的对流条件, 上升气流将水平涡管扭曲倾斜成垂直方向, 转化为负的垂直涡度, 为中反气旋的形成提供了物理条件。

常规风暴的移动通常沿着风暴承载层平均风向移动, 但据大量实际观测, 以中气旋为主体的超级单体通常沿着风暴承载层平均风向的右侧移动, 以中反气旋为主体的超级单体则沿左侧移动。要形成偏离风暴承载层平均风向的移动, 必然有相应的力作用于超级单体一侧。此次左移超级单体强的中反气旋位于风暴的北侧, 中等强度的中气旋和 FFD 位于风暴的南侧, 根据伯努利原理 Magnus 效应, 风暴北侧的气流旋转速度大于南侧, 将形成风暴南北两侧的气压差, 从而产生由南侧指向北侧的气压梯度力, 在环境风和气压梯度力的共同作用下, 使得中反气旋超级单体向着风暴承载层平均风向的左侧移动。右移风暴反之亦然。

6 结论

在特定的环境条件下, 形成以中反气旋为主体的左移超级单体较为罕见。2021 年 5 月 10 日, 发生在江西中北部的一次左移超级单体过程被吉安 CINRAD/SC 双偏振雷达完整观测记录到, 15:16 的左移超级单体处于成熟阶段, 距离雷达 43 km, 位于最佳观测范围。因此, 利用该雷达数据对左移超级单体成熟阶段低层至高层的结构特征进行了细致分析, 并利用双偏振参量讨论了该风暴的微物理特征, 结合动力机制分析, 得出结论如下:

(1) 此次左移超级单体发生在高空槽东移与低层西南急流共同影响的环流背景下, 强

对流有效位能 ($CAPE > 3000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 $0 \sim 6 \text{ km}$ 强垂直风切变 ($> 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 为超级单体发展提供了有利条件。特别地, $3 \sim 4.9 \text{ km}$ 垂直风切变矢量随高度逆时针旋转, 导致环境产生负水平涡度, 这一条件有利于风暴分裂后左移超级单体的选择性增强, 是左移超级单体形成的关键环境因素。

(2) 风暴成熟阶段中高层呈现“双涡旋”结构, 其中中层中反气旋位于风暴前侧(北侧)并占主导地位, 中气旋位于后侧(南侧), 整体结构与典型右移风暴呈近似镜像对称。中反气旋对应强上升气流区, 中气旋则与 FFD 相伴, 这种配置源于垂直风切变所导致的负水平涡度经强上升气流倾斜拉伸为负垂直涡度, 从而形成并维持中反气旋涡旋。

(3) 双偏振观测表明, 风暴低层强回波核 ($\geq 60 \text{ dBz}$) 对应较低的 Z_{DR} 和 CC 值, 指示大冰雹的存在; FFD 西侧的 Z_{DR} 大值区则由环境垂直风切变引起的粒子分选机制形成——较重粒子在该区域聚集, 较轻粒子被平流至下游。中层出现的 Z_{DR} 环与中反气旋强旋转引起的粒子分布有关, Z_{DR} 柱则与强上升气流将大雨滴抬升高海拔相关。三体散射与强回波交界处 Z_{DR} 和 CC 的偏振特征对大冰雹也有一定指示意义。

(4) 左移超级单体的运动偏离风暴承载层平均风向, 其物理机制可通过伯努利原理 Magnus 效应解释: 强中反气旋位于风暴北侧, 中等强度的中气旋和 FFD 位于风暴南侧, 将在风暴南北两侧产生气压梯度力, 在该力与环境风场的共同作用下, 风暴整体向风暴承载层平均风向的左侧移动。

本研究利用双偏振雷达详细分析了一次左移超级单体的三维结构和微物理特征, 并从涡度和动力学角度阐释其形成与移动机制, 可为中国地区此类罕见风暴的过程理解与预报提供重要参考。

参考文献:

- 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]. Torr Rain Dis, 40(4): 419-429 (in Chinese).
- 陈晓燕, 付琼, 岑启林, 等, 2011. 黔西南州一次分裂型超级单体风暴环境条件和回波结构分析[J]. 气象, 37(4): 423-431. Chen X Y, Fu Q, Cen Q L, et al, 2011. Analysis of environmental conditions and the structure of radar echo for a split supercell in southwest prefecture of Guizhou[J]. Meteor Mon, 37(4): 423-431 (in Chinese).
- 刁秀广, 朱君鉴, 刘志红, 2009. 三次超级单体风暴雷达产品特征及气流结构差异性分析[J]. 气象学报, 67(1): 133-146. Diao X G, Zhu J J, Liu Z H, 2009. Analysis of three supercell storms with Doppler weather radar data[J]. Acta Meteor Sin, 67(1): 133-146 (in Chinese).
- 刁秀广, 郭飞燕, 2021. 2019年8月16日诸城超级单体风暴双偏振参量结构特征分析[J]. 气象学报, 79(2): 181-195. Diao X G, Guo F Y, 2021. Analysis of polarimetric signatures in the supercell thunderstorm occurred in Zhucheng on 16 August 2019[J]. Acta Meteor Sin, 79(2): 181-195 (in Chinese).
- 付双喜, 王伏村, 郭良才, 2014. 一次左移反气旋超级单体的观测分析[J]. 干旱气象, 32(6): 996-1002. Fu S X, Wang F C, Guo L C, 2014. Observation and analysis of a left-moving supercell[J]. J Arid Meteor, 32(6): 996-1002 (in Chinese).
- 龚佃利, 王洪, 许焕斌, 等, 2021. 2019年8月16日山东诸城一次罕见强雹暴结构和大雹形成的观测分析[J]. 气象学报, 79(4): 674-688. Gong D L, Wang H, Xu H B, et al, 2021. Observational analysis of a rare and severe hailstorm cloud structure and large hailstones formation on 16 August 2019 in Zhucheng, Shandong province[J]. Acta Meteor Sin, 79(4): 674-688 (in Chinese).

n Chinese).

韩颂雨, 司波, 勾亚彬, 等, 2023. 一次飑前降雹超级单体分裂过程的雷达回波及流场特征分析[J]. 气象学报, 81(3): 430-444. Han S Y, Si B, Gou Y B, et al, 2023. Analysis on radar echo and airflow fields of a splitting hail-producing supercell ahead of a squall line[J]. Acta Meteor Sin, 81(3): 430-444 (in Chinese).

李芳, 刁秀广, 魏鸣, 2024. 一次强冰雹超级单体风暴双偏振参量特征分析[J]. 气象, 50(2): 195-209. Li F, Diao X G, Wei M, 2024. Characteristic analysis of dual-polarization parameters of a severe hail supercell storm[J]. Meteor Mon, 50(2): 195-209 (in Chinese).

罗辉, 苟阿宁, 康岚, 等, 2020. 四川盆地一次中反气旋超级单体的雷达回波特征研究[J]. 气象, 46(10): 1362-1374. Luo H, Gou A N, Kang L, et al, 2020. Radar echo characteristics of an meso-anticyclonic supercell of Sichuan in August 2016[J]. Meteor Mon, 46(10): 1362-1374 (in Chinese).

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]. Torr Rain Dis, 42(6): 692-703 (in Chinese).

王伏村, 李耀辉, 牛金龙, 等, 2008. 甘肃河西走廊两次强对流天气对比分析[J]. 气象, 34(1): 48-53. Wang F C, Li Y H, Niu J L, et al, 2008. A comparative analysis of two strong convective weather in Hexi Corridor[J]. Meteor Mon, 34(1): 48-53 (in Chinese).

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 Meteor Sin, 72(1): 152-167 (in Chinese).

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]. Meteor Mon, 50(10): 1216-1230 (in Chinese).

王文青, 杨慧玲, 孙跃, 等, 2026. 冰雹预警的差分反射率特征: 以山东三次冰雹过程为例[J]. 气象, 52(2): 146-159. Wang W Q, Yang H L, Sun Y, et al, 2026. Characteristics of differential reflectivity for early warning of hail: three hail cases in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 52(2): 146-159 (in Chinese).

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 supercell storm research[J]. Acta Meteor Sin, 83(3): 813-832 (in Chinese).

吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚, 等, 2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. 气象学报, 71(2): 209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin, 71(2): 209-227 (in Chinese).

伍志方, 庞古乾, 贺汉青, 等, 2014. 2012年4月广东左移和飑线内超级单体的环境条件和结构对比分析[J]. 气象, 40(6): 655-667. Wu Z F, Pang G Q, He H Q, et al, 2014. Comparative analysis of environmental conditions and structural features for the left-moving supercell and the supercell in squall line in April 2012 Guangdong[J]. Meteor Mon, 40(6): 655-667 (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: 116-129. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Doppler Weather Radar Principle and Business Application[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese): 116-129.

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. A note on the melting level of hail[J]. Meteor Mon, 40(6): 649-654 (in Chinese).

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: 417. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Approaching Forecast of Thunderstorms and Severe Convection[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese): 417.

周聪, 张涛, 夏昕, 等, 2024. 基于S波段双偏振雷达的成都初春冰雹特征分析[J]. 干旱气象, 42(1): 95-106. Zhou C, Zhang T, Xia X, et al, 2024. Characteristic analysis of early spring hail in Chengdu based on S-band polarization radar[J]. J Arid

Meteor, 42(1): 95-106 (in Chinese).

朱义青, 管叶莉, 王玉亮, 2020. 山东中西部一次超级单体分裂过程的雷达回波结构和环境条件分析[J]. 气候与环境研究, 25(3): 320-332. Zhu Y Q, Guan Y L, Wang Y L, 2020. Analysis of environmental conditions and the structure of radar echo for a supercell splitting process in the midwestern Shandong Province[J]. Climatic Environ Res, 25(3): 320-332 (in Chinese).

Browning K A, 1964. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds [J]. J Atmos Sci, 21(6): 634-639.

Bunkers M J, 2002. Vertical wind shear associated with left-moving supercells[J]. Wea Forecasting, 17(4): 845-855.

Davies-Jones R P, 1985. Tornado dynamics[M]/Kessler E. Thunderstorm: A Social and Technological Documentary. 2nd ed. Norman, Okla: University of Oklahoma Press: 197-236.

Dawson II D T, Mansell E R, Jung Y, et al, 2014. Low-level Z_{DR} signatures in supercell forward flanks: the role of size sorting and melting of hail[J]. J Atmos Sci, 71(1): 276-299.

Hubbert J C, Bringi V N, 2000. The effects of three-body scattering on differential reflectivity signatures[J]. J Atmos Ocean Technol, 17(1): 51-61.

Klemp J B, Wilhelmson R B, 1978. Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting[J]. J Atmos Sci, 35(6): 1097-1110.

Klemp J B, 1987. Dynamics of tornadic thunderstorms[J]. Annu Rev Fluid Mech, 19(1): 369-402.

Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(7): 1940-1961.

Markowski P, Richardson Y, 2010. Organization of isolated convection[M]/Markowski P, Richardson Y. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd: 202-244.

Yu X D, Wang X M, Fei H, et al, 2012. Investigation of supercells in China: environmental and storm characteristics[C]/Preprints, 26th Conference on Severe Local Storms. Nashville: AMS.