第 50 卷第 4 期
Vol. 50 No. 4
Jul. 2026
大气科学
Chinese Journal of Atmospheric Sciences

钱卓蕾, 吴卓亨, 郭士鑫, 等. 2026. 两次冬季罕见大冰雹超级单体风暴对比分析 [J]. 大气科学, 50(4): 1239−1253. QIAN Zhuolei, WU Zhuoheng, GUO Shixin, et al. 2026. Comparative Analysis of Two Rare Large Hail Supercells in Winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 50(4): 1239−1253. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2508.25067

两次冬季罕见大冰雹超级单体风暴对比分析

钱卓蕾[1] 吴卓亨[1] 郭士鑫[2] 张春艳[1] 罗玲[3]

1 绍兴市气象台, 绍兴 312000
2 浙江省气象数据中心, 杭州 31002
3 浙江省气象台, 杭州 310002

摘　要　利用再分析资料、自动站观测、闪电定位以及 S 波段双偏振雷达资料，对 2024 年 2 月 21 日（简称“24·2·21”）和 2025 年 3 月 3 日（简称“25·3·3”）两次浙江入春前发生的大冰雹超级单体进行分析，结果表明：两次对流均发生在寒潮冷锋后，为高架对流，逆温层顶之上存在条件不稳定层结和正的对流有效位能，深厚垂直对流在 850 hPa 切变线作用下迅速触发。强深层风垂直切变有利于超级单体发展。“25·3·3”干层较“24·2·21”更深厚。降雹过程均伴随着风暴质心和中气旋最大切变高度的下降，降大冰雹区在风暴后侧下沉气流中。“24·2·21”超级单体维持时间长，中层有双涡旋结构，差分反射率（Z_{DR}）柱和差分相移率（K_{DP}）柱高于 6 km，悬垂回波内 Z_{DR} 和 K_{DP} 小，相关系数（C_C）随高度下降而减小，包含融化的小冰相粒子，有利于冰雹湿增长；而“25·3·3”超级单体维持时间较短，有深厚单涡旋（中气旋）结构，并有明显后侧入流，Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱在 5 km 之下，高层 Z_{DR} 和 K_{DP} 小，C_C 大，干的冰相粒子较多，表现为云闪频次增多，可能与后侧干冷空气流入加速冻结有关，有助于冰雹在高层冷云中干增长。

关键词　超级单体　大冰雹　高架对流　双涡旋　中气旋
文章编号　1006-9895(2026)04-1239-15　　**中图分类号**　P458.2　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2508.25067

Comparative Analysis of Two Rare Large Hail Supercells in Winter

QIAN Zhuolei[1], WU Zhuoheng[1], GUO Shixin[2], ZHANG Chunyan[1], and LUO Ling[3]

1 *Shaoxing Meteorological Observatory*, *Shaoxing* 312000
2 *Zhejiang Provincial Meteorological Data Center*, *Hangzhou* 310002
3 *Zhejiang Meteorological Observatory*, *Hangzhou* 310002

Abstract　Two large-hail supercells that occurred before spring in Zhejiang, on February 21, 2024 (“24·2·21”), and March 3, 2025 (“25·3·3”), were analyzed using the reanalysis data, automatic weather station observations, lightning location data, and S-band dual-polarization radar data. The results indicate that both convection events occurred after the passage of a cold wave front and were elevated convection systems. Above the inversion layer, conditionally unstable stratification and positive convective available potential energy were present. Deep convection was rapidly triggered under the influence of the 850 hPa shear line. Strong, deep-layer vertical wind shear favored the development of supercells. The dry layer in the “25·3·3” case was deeper than that in the “24·2·21” case. In both supercell hail processes,

收稿日期　2025-04-26；**网络预出版日期**　2026-01-14
作者简介　钱卓蕾，女，硕士，正高级工程师，主要从事天气预报与短期气候预测研究。E-mail: 1033404758@qq.com
通讯作者　罗玲，女，硕士，正高级工程师，主要从事强对流等中小尺度天气研究。E-mail: 76847787@qq.com
资助项目　中国气象局复盘总结专项 FPZJ2025-054
Funded by　Special Project for Review and Summary by the China Meteorological Administration (Grant FPZJ2025-054)

hailfall was accompanied by a decrease in storm centroid height and in the maximum shear height of the mesocyclone. The "24·2·21" supercell exhibited a long maintenance time, a mid-level double vortex structure, and differential reflectivity (Z_{DR}) and specific differential phase (K_{DP}) columns extending above 6 km. The Z_{DR} and K_{DP} values within the overhanging echo were small, and the cross-correlation coefficient (C_C) decreased with decreasing height, indicating the presence of melting small ice phase particles, which favored moist hail growth. In contrast, the "25·3·3" supercell had a shorter maintenance time, a deep single vortex (mesocyclone) structure, and a pronounced rear inflow. The Z_{DR} and K_{DP} columns were confined below 5 km. Small Z_{DR} and K_{DP} values accompanied by large C_C values at upper levels indicated a greater abundance of dry ice phase particles. This was manifested by an increased frequency of intracloud lightning flashes, which may be associated with accelerated freezing caused by rear-inflow dry cold air and was conducive to dry hail growth in the upper cold cloud region.

Keywords Supercell, Large hail, Elevated convection, Double vortex, Mesocyclone

1 引言

超级单体是发展最为强烈的一种对流风暴，常伴随冰雹等强对流天气（Browning, 1962）。超级单体风暴含有深厚持久的中气旋（Browning, 1977; 俞小鼎等, 2006）。

超级单体的典型雷达特征包括：钩状回波、有界弱回波区、悬垂回波和中气旋等（Browning et al., 1963; Marwitz, 1972; Musil et al., 1986; Markowski, 2002; 郑媛媛等, 2004; Kumjian, 2011; 王福侠等, 2014; 蔡淼等, 2014; 朱义青等, 2020）。近年来，气象学者们发现宽大有界弱回波区以及其上的强悬垂回波、前侧强入流、中层径向辐合以及 V 型回波的存在均表明超级单体具有降雹潜势（牛奔等, 2016; 夏文梅等, 2016; 黄俊杰和苟阿宁, 2018）。垂直累积液态含水量高值与雹云有正相关关系（刘治国等, 2008; 吴芳芳等, 2013）。成熟阶段的超级单体风暴具有高度组织化、显著旋转以及风暴顶辐散等特征，风暴顶高和质心高度明显波动对应降雹（吴海英等, 2017; 高丽等, 2021）。中层中气旋与超级单体降雹有重要联系，超级单体内部涡旋的维持和生成有利于大冰雹的增长（陈秋萍等, 2015; 徐芬等, 2016; 唐佳等, 2023），大冰雹超级单体可伴有双涡旋结构或单涡旋结构（刁秀广等, 2009; 张玉洁等, 2019; 陈瑞敏等, 2021），双涡旋结构有助于超级单体发展及大冰雹的循环增长（潘佳文等, 2020）。

相较于常规雷达，双偏振雷达通过发射水平和垂直两种极化电磁波，可以获取差分反射率（Differential Reflectivity，记为 Z_{DR}）、差分相移率（Differential Propagation Phase shift，记为 K_{DP}）、相关系数（Cross-Correlation Coefficient，记为 C_C）等偏振参数，这些参数演变与降水粒子的形状、相态、空间取向等关系密切（刘黎平等, 1996a, 1996b; 楚荣忠等, 1997; Park et al., 2009; 寇蕾蕾等, 2018; 王洪等, 2018; 刁秀广等, 2020; 刁秀广和郭飞燕, 2021; 申高航等, 2021）。研究发现超级单体风暴低层前侧入流区反射率因子梯度大的部位往往会出现 Z_{DR} 弧，0°C 层高度以上通常会出现 Z_{DR} 柱或 K_{DP} 柱（Kumjian and Ryzhkov, 2008; Kumjian et al., 2010; Kumjian, 2013a, 2013b; Snyder et al., 2013; 王洪等, 2018; 潘佳文等, 2020）。Z_{DR} 柱与强上升气流的对应关系较好（Kumjian et al., 2014; 刁秀广和郭飞燕, 2021）。0°C 层高度以上 K_{DP} 柱的出现表明有丰富的液态水和（或）湿冰存在（Hubbert et al., 1998; Loney et al., 2002）。

以上研究的超级单体主要发生在春夏季，入春以前气温较低，能量弱，强对流天气极少，出现超级单体更是罕见。而 2024 年 2 月 21 日（入春 3 月 11 日，简称"24·2·21"）和 2025 年 3 月 3 日（入春 3 月 10 日，简称"25·3·3"）均出现了超级单体风暴并降大冰雹。本文对两次冬季大冰雹超级单体的环境场和风暴演变结构进行分析，以期加深对大冰雹超级单体形成背景和风暴结构的认识，为此类灾害性天气的预报预警服务提供参考。

2 资料来源

本文所用资料包括:（1）浙江省国家站和区域站逐时资料；（2）"24·2·21"风暴结构分析使用温州 S 波段双偏振雷达，"25·3·3"风暴结构分析使用绍兴 S 波段双偏振雷达；（3）浙江省闪电定位仪资料；（4）ERA5 再分析资料（空间分辨率

为 0.25°×0.25°，时间分辨率为 1 h）。雷达和闪电定位仪分布见图 1。

3　天气实况和对流触发机制

2024 年 2 月 21 日傍晚前后，浙江南部发生强对流过程，强风暴移入浙江后经过丽水、温州和台州，造成 22 个乡镇出现冰雹（图 2a），最大直径达 4.5 cm，本次风暴持续时间长达 14 h（俞小鼎等, 2024），因暂无法获得其他省份的雷达数据，且浙江雷达可以完整探测风暴超级单体阶段以及降雹阶段，本文只分析浙江省内雷达可探测时间段（15:31～20:56；北京时，下同）的风暴特征。

2025 年 3 月 3 日早晨，浙江中北部发生强对流过程，风暴经过杭州、绍兴等地，14 个乡镇（街道）出现冰雹（图 2b），最大直径 3 cm，强风暴维持时间为 3 h 左右。

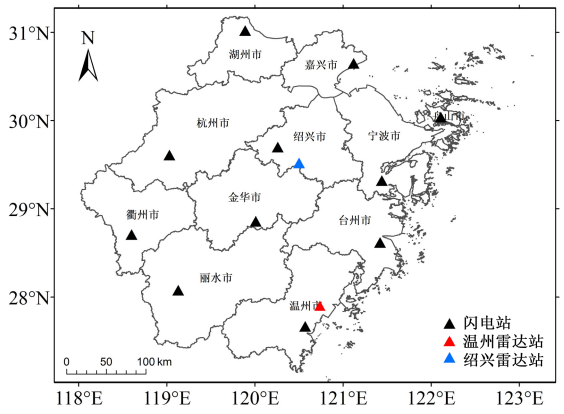


图 1　S 波段双偏振雷达和浙江省闪电定位仪站点分布。

Fig. 1　Distribution of S-band dual polarization radar and lightning locator in Zhejiang Province.

在 2024 年 2 月 21 日 20:00（图 3a），850 hPa 上辐合切变线从湖南中南部一直延伸到浙江西北部边缘，同时，浙江南部还存在一条中尺度辐合切变线，地面锋位于广西北部到福建中北部一线，超前于 850 hPa 两条辐合切变线，850 hPa 上西南暖湿气流叠加在地面锋后冷垫之上，有利于产生高架对流（张一平等, 2014; 俞小鼎等, 2016, 2024; 郭大梅等, 2018; 王宁等, 2023; 张伟等, 2023），风暴在锋后冷空气一侧发展并东移。浙南的切变线与超级单体的发展移动路径较为一致（图 2a），该切变线与风暴发展加强有密切联系。

2024 年 3 月 3 日 08:00，500 hPa 北支槽位于河套地区，南支槽位于四川西部，槽前有强盛西南气流和正涡度平流，有利于上升运动发展，低层 850 hPa 上我国东部的辐合切变线从江西北部边缘到浙江中北部（图 3b），地面冷锋在浙江中南部超前于 850 hPa 辐合切变线，而在江西北部两者接近，因此浙江中北部上空环流配置有利于高架对流发展，对流发生在 850 hPa 切变线附近和近地面冷锋后。

从台州椒江站 2024 年 2 月 21 日 20:00 探空图（图 4a）可知：层结曲线均在状态曲线的右侧，对流有效势能（CAPE）为 0，近地面到 850 hPa 有明显的逆温，逆温层之下为绝对稳定的层结，但 850 hPa 以上存在条件不稳定层结（俞小鼎等, 2024），将探空起始高度抬升至逆温层顶（850 hPa）

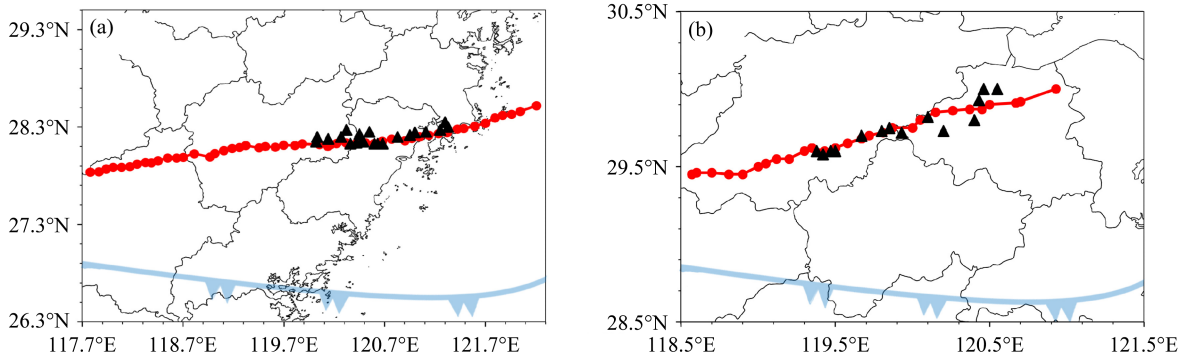


图 2　（a）2024 年 2 月 21 日 17:09～20:56（北京时，下同）和（b）2025 年 3 月 3 日 05:14～08:08 风暴路径（红色圆点连线）和冰雹位置（黑色三角形）。（a、b）中蓝色弧线和三角形组合图形分别为 2024 年 2 月 21 日 20:00 和 2025 年 3 月 3 日 08:00 地面锋线位置。

Fig. 2　The storm tracks (the lines connecting the red dots) and hail positions (the black triangles) from (a) 1709 BJT (Beijing time) to 2056 BJT on 21 February 2024 and (b) 0514 BJT to 0808 BJT on 3 March 2025. The combinations of the blue arcs and the triangles in (a, b) represent the positions of the ground fronts at 2000 BJT on 21 February 2024 and 0800 BJT on 3 March 2025, respectively.

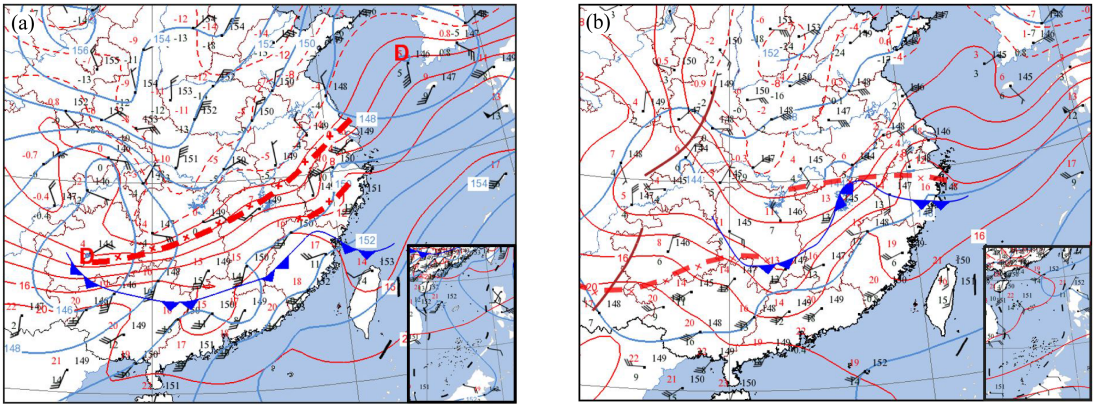


图 3 （a）2024 年 2 月 21 日 20:00 850 hPa 天气图叠加地面冷锋，（b）2025 年 3 月 3 日 08:00 850 hPa 天气图叠加 500 hPa 高空槽线和地面冷锋。蓝色等值线为等高线，红色等值线为等温线，棕色线段为 500 hPa 槽线，红色粗虚线为 850 hPa 辐合切变线，风羽代表 850 hPa 等压面上风矢量，G、D 代表高低压中心，蓝色曲线和三角形组合图形代表地面冷锋。

Fig. 3 (a) Weather situations of 850 hPa analysis superimposed with a ground cold front at 2000 BJT on February 21, 2024, and (b) weather situations of 850 hPa analysis superimposed with a 500 hPa upper-level trough line and a ground cold front on March 3, 2025. The blue contour lines are contours, the red contour lines are isotherms, the brown line segments are 500 hPa trough lines, the red dot lines represent the 850 hPa convergence shear lines, the wind plumes represent wind vectors on the 850 hPa isobaric surface, G and D represent high and low pressure centers, and the combination of blue curves and triangles represents surface cold fronts.

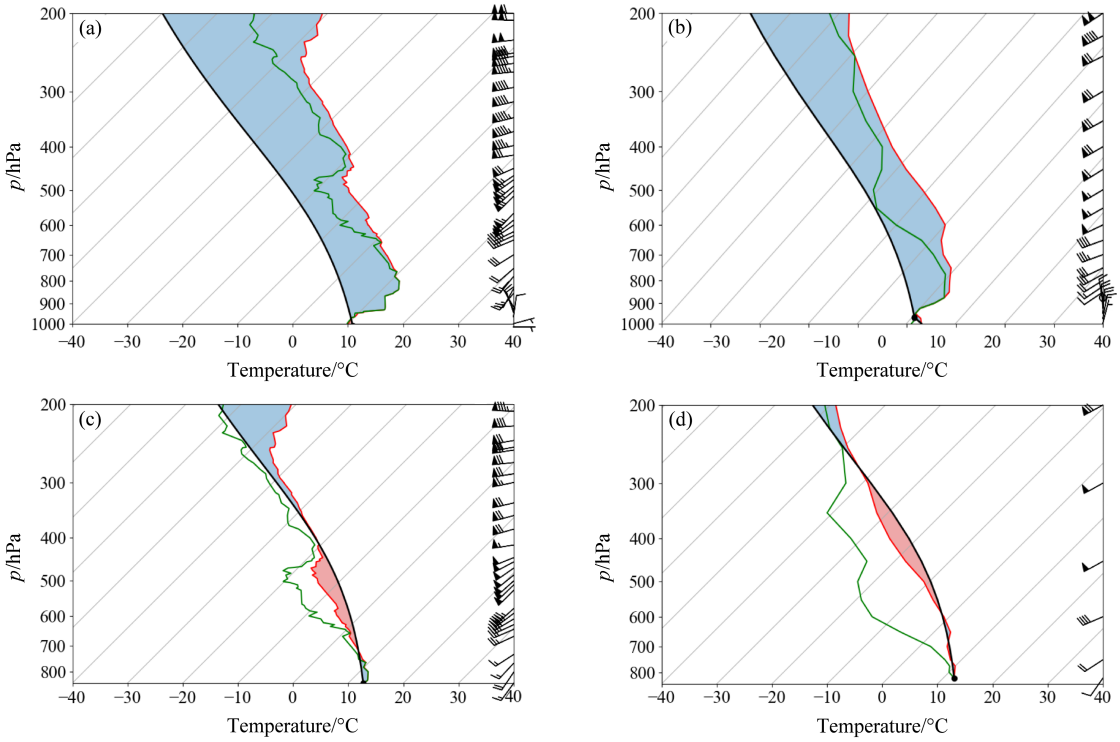


图 4 （a、c）2024 年 2 月 21 日 20:00 台州椒江站和（b、d）2025 年 3 月 3 日 05:00 初始风暴位置上空的起始于（a、b）1000 hPa 和（c、d）850 hPa 的探空图。红色线为层结曲线，黑色线为状态曲线，绿色线为露点曲线、灰色线为等温线，粉色、蓝色区域分别表示对流有效位能和对流抑制能量。

Fig. 4 The sounding map of (a, c) Jiaojiang Station in Taizhou at 2000 BJT on February 21, 2024 and (b, d) sounding map above the initial storm at 0500 BJT on March 3, 2025 from the starting level of (a, b) 1000 hPa and (c, d) 850 hPa. The red line represents the sounding curve, the black line is the state curve, the green line is the dew point curve, and the gray line is the isotherm.Pink and blue areas represent convective available potential energy (CAPE) and convective inhibition (CIN) respectively.

时（图 4c），CAPE 为 770 J kg^{-1}。近地面为东到东北风，850 hPa 以上转为较强的西南风，0～6 km 垂直风切变 32 m s^{-1}。600～450 hPa 有干层，最大温度露点差 6.3°C（500 hPa），湿球温度 0°C 层高度为 3.8 km。

“25·3·3”过程发生在早晨，由于 08:00 风暴已接近消亡，并移出杭州进入绍兴，分析杭州 08:00 探空意义不大，故使用再分析资料绘制风暴初始位置（29.45°N，118.57°E）的 3 月 3 日 05:00 温湿垂直廓线（图 4b、d），逆温层顶在 850 hPa 附近，850 hPa 以上存在条件不稳定层结，850 hPa 起始的 CAPE 为 680 J kg^{-1}，0～6 km 垂直风切变 31 m s^{-1}。干层十分深厚，从 700 hPa 一直到 300 hPa，最大温度露点差 13°C（600 hPa），湿球温度 0°C 层高度为 3.5 km。

两次高架对流的形成机制可解释为：暖湿气流沿着冷垫北上爬升至逆温层顶，冷垫之上存在条件不稳定层结和正的对流有效位能，在逆温层顶附近的切变线作用下深厚垂直对流迅速触发（俞小鼎等, 2016, 2024）。强深层风垂直切变是超级单体发展的重要环境条件（Chisholm and Renick, 1972; 俞小鼎等, 2024; 王秀明等, 2025; 张昕宇等, 2026），适宜的湿球温度 0°C 层高度有利于出现冰雹（俞小鼎, 2014）。此外，两次过程虽然中层均存在条件对称不稳定（图略），但当条件对称不稳定和导致垂直对流的 CAPE 同时存在时，垂直对流占支配地位，倾斜对流上升气流较垂直对流低一个量级，无法生成超级单体（俞小鼎等, 2016, 2020, 2024）。

4　强风暴结构特征

4.1　“24·2·21”过程风暴演变

“24·2·21”风暴在雷达探测范围内发展演变过程可分为发展阶段、成熟阶段和消亡阶段。

发展阶段（15:31～16:31），此阶段风暴由强风暴发展为超级单体，其中 16:13～16:31 为强烈发展阶段，最大水平极化反射率因子（Horizontal reflectance factor，记为 Z_H）由 60 dBZ 增大至 65 dBZ，垂直累积液态水含量（Vertically Integrated Liquid Water，简称 VIL）从 34 kg m^{-2} 增大至 47 kg m^{-2}（图 6a），Z_H 质心从 3.3 km 抬升至 4.8 km，风暴顶从 6.2 km 升至 8.3 km。16:31（图 5a、e 和图 6a）风暴位于江西与丽水交界，由于距离雷达较远，4 km 以下的特征无法显示，但仍可以看到风暴的前倾结构，60 dBZ 以上的 Z_H 扩展到 6 km 之上。该体扫速度图上已出现较为明显的中气旋（图略），风暴已发展为超级单体。此时风暴中以负地闪为主。

成熟阶段（16:31～19:21），该时段风暴内中气旋维持 26 个体扫（16:31～19:01），从 18:03 起高层出现三体散射长钉（图略），表明有大冰雹粒子生成，18:03～19:21 风暴最大 Z_H 均≥70 dBZ（图 6a），VIL≥50 kg m^{-2}。从中气旋参数演变可知（图 6c）：中气旋厚度 1.67～5.79 km，最大切变值在 14×10^{-3}～28.5×10^{-3} s^{-1}，最大切变值高度 1.89～6.95 km。18:27（图 5b、f 和图 6a），风暴移动至丽水和温州交界，最大 Z_H 达 74 dBZ，质心高度为 2.5 km，VIL 达到 60 kg m^{-2}。此时风暴有三体散射和旁瓣回波特征，表明风暴中含有大冰雹。从 18:27 风暴垂直剖面来看，≥65 dBZ 的高 ZH 区向上到达 7 km，并存在有界弱回波区和悬垂回波，10 km 之下均有三体散射，说明生成于中上层的冰雹已开始下降，18:30 丽水青田县内出现 4 cm 大冰雹。18:39（图 5c、g 和图 6a），风暴中心移动至温州永嘉，最大 Z_H 为 75 dBZ，Z_H 质心高度为 5.5 km，VIL 达到 62 kg m^{-2}。风暴后侧有较大范围降水回波，遮挡了三体散射特征，但在垂直剖面上 4 km 之上仍可以观察到三体散射。相比 18:27，60 dBZ 以上的强 Z_H 区高度降低，但质心高度却是升高的。18:53 温州永嘉出现 4 cm 以上大冰雹。图 6a、c 可知降雹过程伴随风暴质心高度和最大切变高度的下降，与唐佳等（2023）的研究结论一致。成熟阶段风暴中仍以负地闪为主，云闪较少。

消亡阶段（19:21～20:56），风暴强度逐渐减弱，最大 Z_H 和 VIL 减小（图 6a）。19:39（图 5d、h 和图 6a）风暴进入台州沿海，虽然最大 Z_H 仍然达到 68 dBZ，但 VIL 减小至 46 kg m^{-2}，随后风暴入海，强度继续减弱直至消亡。

4.2　“25·3·3”过程风暴演变

风暴发展阶段（05:14～06:20），05:14 风暴在杭州西部生成，向东偏北方向移动过程中风暴顶高、最大反射率因子及高度、VIL 迅速增长（图 6b），且风暴底的起始位置在 3 km 附近。06:08（图 7a、e 和图 6b），风暴反射率因子核心 65 dBZ，质心高度 6.4 km，在−20°C 层高度之上，VIL 为 58 kg m^{-2}，从垂直剖面来看，风暴主体在 3～14 km，表现为高架对流风暴特征。06:20 风暴

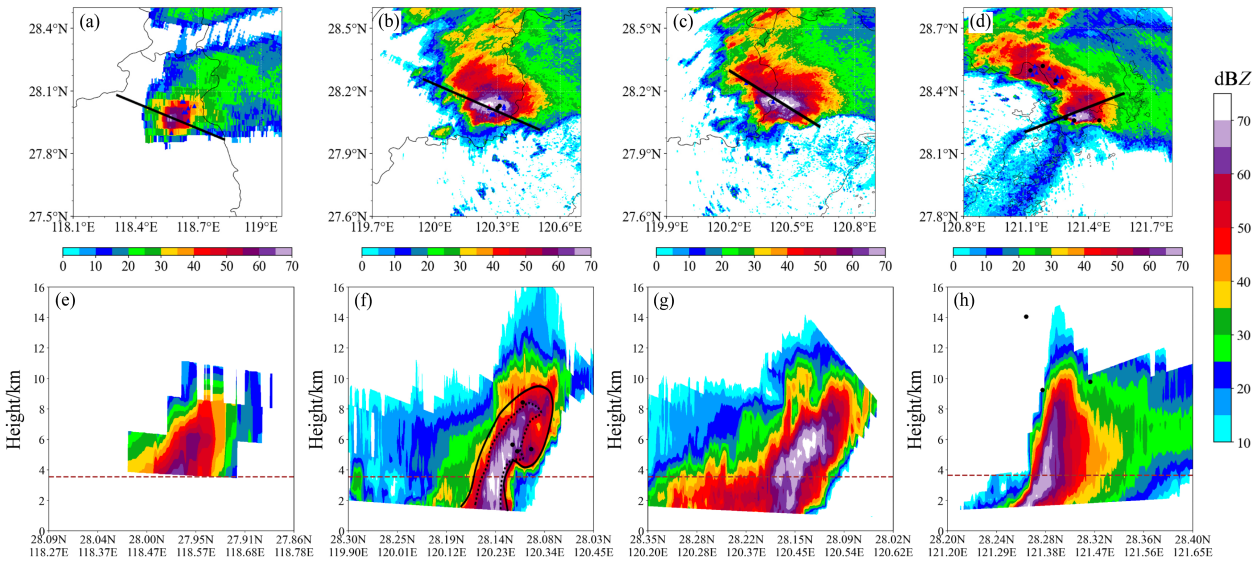


图 5　2024 年 2 月 21 日（a、e）16:31、（b、f）18:27、（c、g）18:39 和（d、h）19:39 温州 S 波段雷达组合反射率因子（第一行，填色，单位：dBZ）和经过第一行图中黑色直线段的水平极化反射率因子（Z_H，单位：dBZ）剖面。（f）中黑色实线为 50 dBZ 等值线，黑色虚线为 60 dBZ 等值线，下图同）、6 min 闪电活动分布（黑色圆点为云闪，（a）-（d）中粉色三角形为正地闪，蓝色三角形为负地闪，（e）-（f）中棕色虚线代表湿球温度 0°C 层高度）

Fig. 5　Composite reflectivity (top line, shadings, units: dBZ) from Wenzhou S-band radar and Z_H (horizontal polarization reflectivity factor, units: dBZ) profile (bottom line) passing through the black straight line segment in (a–d) at (a, e) 1631 BJT, (b, f) 1827 BJT, (c, g) 1839 BJT, and (d) 1939 BJT on February 21, 2024. (The black solid line represents the 50 dBZ contour line, and the black dashed line represents the 60 dBZ contour line in (f)), flash distributions within 6 minutes (The black dots represent cloud-to-ground flashes, while the pink triangles indicate positive ground flashes, and the blue triangles denote negative ground flashes in (a)-(d) .The brown dotted lines represent the height of the wet-bulb temperature layer at 0 °C in (e)-(f))

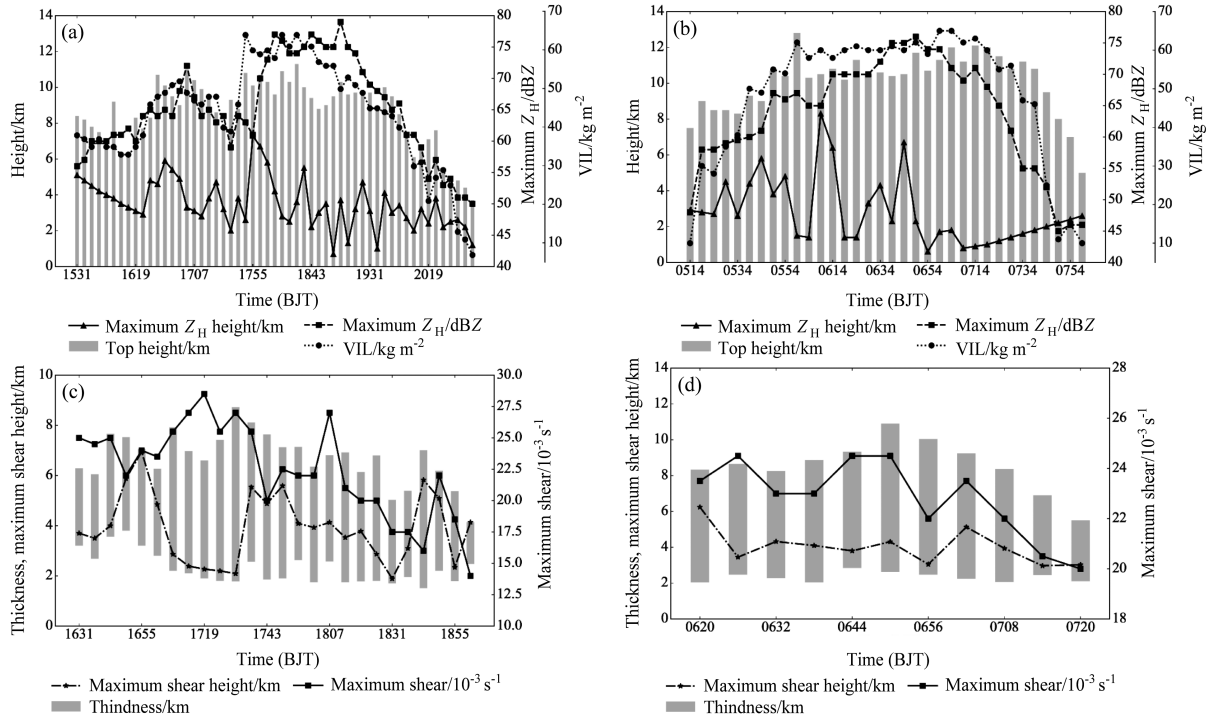


图 6　（a、c）“24·2·21”和（b、d）“25·3·3”过程（a、b）风暴参数和（c、d）中气旋参数随时间演变。

Fig. 6　Time evolutions of (a, b) storm parameters and (c, d) mesocyclone parameters in (a, c) “24·2·21” and (b, d) “25·3·3” processes.

中气旋结构生成，风暴发展为超级单体。发展阶段风暴中以负地闪为主。

风暴成熟阶段（06:20～07:20），最大反射率因子均≥70 dBZ（图 6b），中气旋持续 11 个体扫（06:20～07:20）（图 6d），中气旋厚度 3.4～8.3 km，最大切变值在 20×10^{-3}～24.5×10^{-3} s^{-1}，最大切变值高度 3.0～6.2 km，相比“24·2·21”风暴中气旋更深厚。06:56（图 7b、f 和图 6b），风暴已移动至桐庐，强度增强，强回波范围扩大，最大反射率因子 76 dBZ，VIL 为 62 kg m^{-2}，质心高度 2.3 km，风暴的三体散射和旁瓣回波较短。垂直剖面显示风暴主体已发展到低层，同时 70 dBZ 以上的反射率因子核心到达 10 km 附近，因此高架风暴强回波是同时向上和向下伸展的，低层存在弱回波区，三体散射出现在 5 km 之下，表明冰雹粒子已降至低层，06:57 前后杭州桐庐出现 2～3 cm 大冰雹。此时风暴中的闪电频次增加，其中云闪增加最明显。07:14（图 7c、g 和图 6b），风暴反射率因子核心降至 69 dBZ，VIL 维持 62 kg m^{-2}，质心高度 3.1 km，风暴后侧降水回波遮挡了三体散射特征，07:18 绍兴诸暨出现 2～3 cm 大冰雹。图 6b、d 可知质心高度和最强切变高度的下降也均反映出冰雹的降落。该时次云闪频次继续增加，云闪在 5～17 km 之间。

风暴消亡阶段（07:20～08:08），07:36（图 7d、h 和图 6b），风暴强度减弱，最大反射率因子减小至 61 dBZ，VIL 为 56 kg m^{-2}，风暴质心下降至 1.4 km，同时，50 dBZ 的强回波区在 5 km 之下，近地面以降水为主，之后风暴持续减弱。

5　超级单体动力和微物理结构

5.1　“24·2·21”过程超级单体结构

首先分析动力结构，18:30 前后丽水青田出现 4 cm 大冰雹，在降雹前的体扫（18:27）（图 8 和图 5b、f），0.5°、2.4°仰角风暴右侧有入流缺口，高层强回波叠加在低层弱回波区之上，形成弱回波区和中高层回波悬垂，风暴前侧为强的入流区，径向速度（V）剖面图上风暴中心及前侧有强烈倾斜上升气流，风暴后侧为倾斜下沉气流，中层 3～7 km 为辐合，7～14 km 为辐散。0.5°仰角上，存在辐合速度对，正速度中心为 8 m s^{-1}，负速度中心为 −19 m s^{-1}，两者差值为 27 m s^{-1}，距离约 5 km。2.4°仰角上在钩状回波顶点附近出现明显双涡结构。其中气旋性旋转的正速度中心为 8 m s^{-1}，负速度中心为−25 m s^{-1}，两者差值为 33 m s^{-1}，距离约 4.5 km；反气旋性旋转的负速度中心为−24 m s^{-1}，正负速度差值为 31 m s^{-1}，距离约 5 km；气旋性旋转和反气旋性旋转强度相当。这种双涡旋结构在 3.3°和 4.3°仰角径向速度图（图略）上仍存在。5.3°仰角上靠近雷达的正速度中心转为负速度中心并出现速度模糊，中心风速达 31 m s^{-1}，而正速度中心在后侧，中心风速 3 m s^{-1}，风速差 34 m s^{-1}，正负速度中心 8 km，表明出现了辐散速度对。因此，“24·2·21”

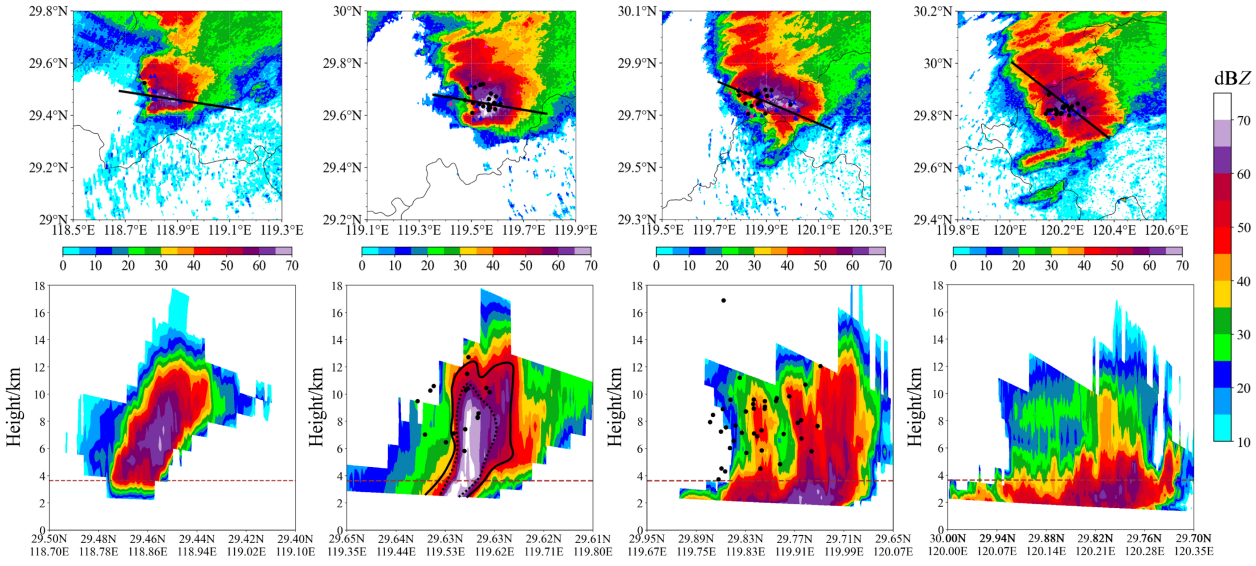


图 7　同图 5，但为 2025 年 3 月 3 日（a、e）06:08、（b、f）06:56、（c、g）07:14 和（d、h）07:36 绍兴 S 波段雷达。

Fig. 7　Same as Fig. 5, but for (a, e) 0607 BJT, (b, f) 0655 BJT, (c, g) 0718 BJT, and (d, h) 0736 BJT on March 3, 2025 from Shaoxing S-band radar.

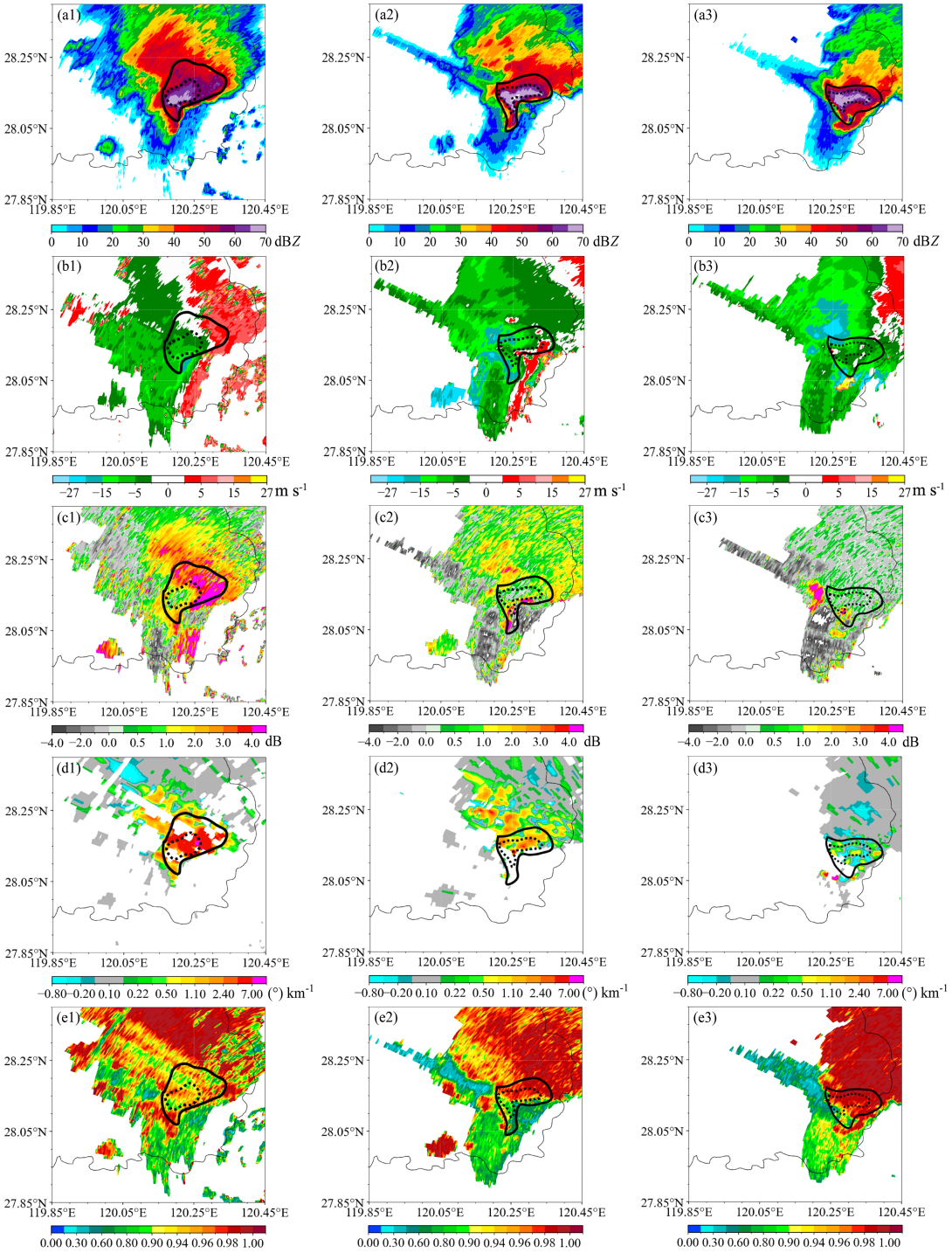


图 8　2024 年 2 月 21 日 18:27（a1–e1）0.5°、（a2–e2）2.4°和（a3–e3）5.3°仰角（a1–a3）水平极化反射率因子（Z_H，单位：dBZ）、（b1–b3）径向速度（V，单位：m s^{-1}）、（c1–c3）差分反射率（Z_{DR}，单位：dB）、（d1–d3）差分相移率（K_{DP}，单位：(°) km^{-1}）和（e1–e3）相关系数 C_C 的空间分布以及经过图 5b 中黑色线的（f1）V、（f2）Z_{DR}、（f3）K_{DP} 和（f4）C_C 垂直剖面。黑色实线为 50 dBZ 等值线，黑色虚线为 60 dBZ 等值线。

Fig. 8　Spatial distributions of (a1–a3) Z_H (horizontal polarization reflectivity factor, units: dBZ), (b1–b3) V (radial velocity, units: m s^{-1}), (c1–c3) Z_{DR} (differential reflectivity, units: dB), (d1–d3) K_{DP} [specific differential phase, units: (°) km^{-1}] and (e1–e3) C_C (cross-correlation coefficient) of the elevation angles of (a1–e1) 0.5°, (a2–e2) 2.4°, and (a3–e3) 5.3°, with the vertical sections of (f1) V, (f2) Z_{DR}, (f3) K_{DP} and (f4) C_C passing the black line in Fig. 5b at 1827 BJT on February 21, 2024. The black solid line represents the 50 dBZ contour line, and the black dashed line represents the 60 dBZ contour line.

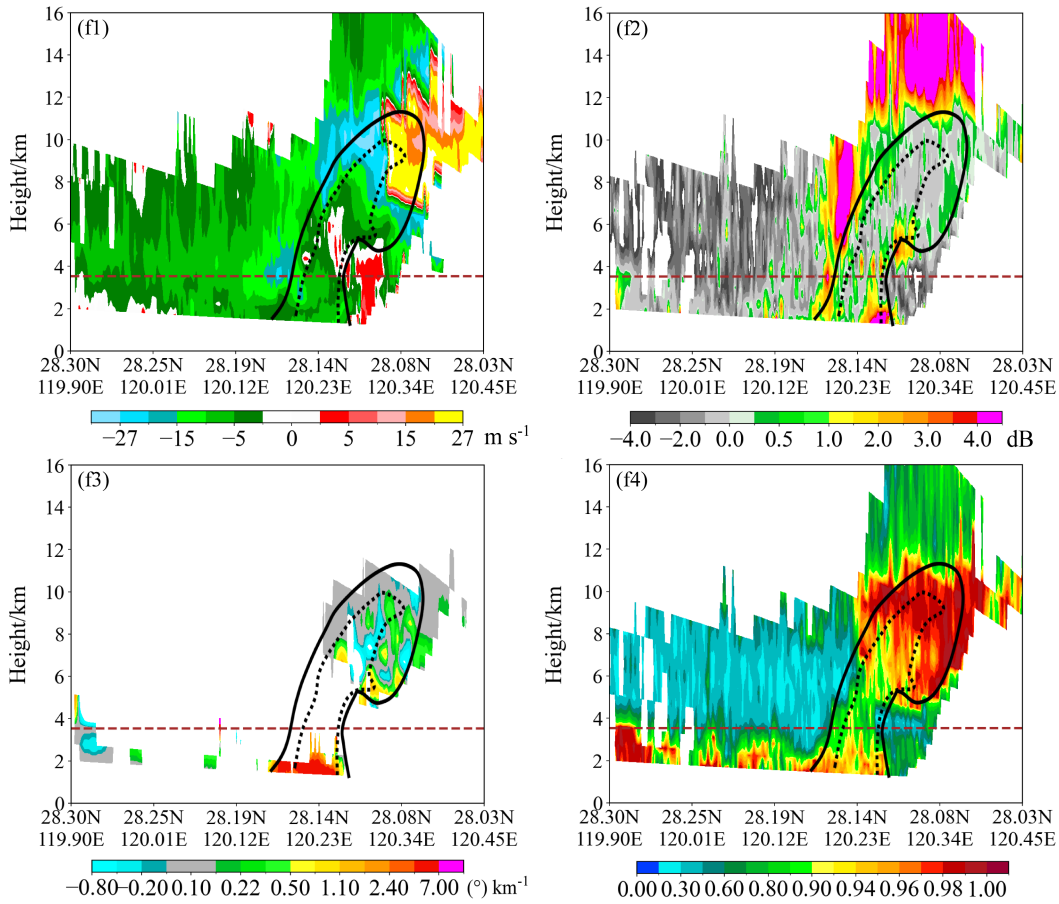


图 8　（续）。

Fig. 8　(Continued).

超级单体主要表现为低层辐合、中层双涡、高层辐散的垂直动力场结构。

在 0.5°和 2.4°仰角上，水平极化反射率因子（Z_H）中心（Z_H≥60 dBZ）右后侧 Z_{DR} 为−1～0.5 dB，K_{DP} 为空值区（C_C<0.85 不被计算而显示为白色），C_C 在 0.75～0.85，而左前侧 Z_{DR} 为 0.5～2 dB，K_{DP} 为 1.1°～3.4° km^{-1}，C_C 在 0.9～0.96，研究表明大冰雹下落翻滚导致 Z_{DR} 值接近 0 dB（高丽等, 2021），因此中心右后侧主要为大冰雹粒子，为主要的降雹区，左前侧主要为较小的湿冰雹粒子。强回波区（50～60 dBZ，除中心外）对应较大的 Z_{DR}（0.5～5 dB）和较大的 K_{DP}（1°～6° km^{-1}），C_C 为 0.8～0.98，该区域以多种尺度的液态粒子和湿冰雹粒子为主，左前侧有较强降水。在入流缺口处存在 Z_{DR} 较大，并表现为弧状，即存在 Z_{DR} 弧。Z_{DR} 弧附近 K_{DP} 为 0.5°～3.4° km^{-1}，并有小范围空值，C_C 为 0.6～0.98，因此 Z_{DR} 弧为较大尺度的液态粒子和湿冰雹粒子。2.4°仰角上三体散射特征较低层显著，且三体散射特征在 Z_{DR} 和 C_C 产品上更清楚，对应位置上 C_C 很小（0.1～0.7），同时 Z_{DR} 在靠近风暴强回波区有较大值（1.0～3.4 dB），远离风暴强回波区 Z_{DR} 为负值，这种现象是强冰雹反射导致的水平和垂直偏振波差异以及电磁波衰减造成的（Ryzhkov, 2007; 刁秀广等, 2021; 高丽等, 2021）。5.3°仰角上在风暴前侧上升气流附近有 Z_{DR} 柱，对应 C_C 为 0.8～0.96，主要包含有水膜的冰粒子和较大尺度液态粒子。垂直剖面图上，湿球温度 0°C 层以下靠近上升气流区为 Z_{DR} 弧，0°C 层之上的上升气流区内为 Z_{DR} 柱，并有 K_{DP} 柱，两者分离，K_{DP} 柱在 Z_{DR} 柱的东侧，Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱均高于 6 km。在强悬垂回波内，除 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱外，其他区域 Z_{DR} 和 K_{DP} 较小，且 C_C 随高度下降而减小，表明存在融化现象，这些区域由小的混合相态粒子组成，有利于冰雹湿增长（洪延超等, 2002; 高丽等, 2021; 李芳等, 2024）。强回波中心后侧下沉气流对应清楚的 Z_{DR} 洞（Z_{DR} 在 0 附近或为

负值）（王福侠等, 2024），Z_{DR} 洞下降到了 3 km 之下，K_{DP} 大范围不显示，C_C 小（0.6～0.9），表明大冰雹已经降到低层，但此时 3 km 以下 $K_{DP}\geqslant 2.4°\ km^{-1}$，$C_C\geqslant 0.92$，此时地面实况还未观测到大冰雹，3 min 后近地面才出现大冰雹。

5.2 “25·3·3”超级单体结构

06:58 前后杭州桐庐出现 2～3 cm 大冰雹，分析降雹前的体扫（06:56）（图 9 和图 7b、f），0.5°、2.4°仰角有入流缺口，高层强回波也是叠加在低层弱回波区之上，形成中高层回波悬垂特征。径向速度垂直剖面上前侧为斜升气流，6～8 km 存在强烈的后侧入流，使得过程的下沉气流更强，并出现速度模糊，去模糊后中心风速达−42 m s^{-1}，因此 3～8 km 的径向辐合更为显著，8～13 km 为辐散。0.5°仰角径向速度图上，0.5°仰角上风暴中心前侧存在辐合旋转速度对，正速度中心为 3 m s^{-1}，负速度中心为−31 m s^{-1}，两者差值为 34 m s^{-1}，距离约 5.5 km。2.4°仰角径向速度（图 9b2）上仍有明显辐合式中气旋，正速度中心为 8 m s^{-1}，负速度中心为−31 m s^{-1}，两者差值为 39 m s^{-1}，距离约 5 km。这种气旋式旋转在 5.3°仰角上仍存在，但为辐散式旋转，正速度中心为 7 m s^{-1}，负速度中心为−36 m s^{-1}，两者差值为 43 m s^{-1}，距离约 5 km。因此“25·3·3”超级单体有深厚中气旋。

0.5°和 2.4°仰角的 Z_H 中心附近 Z_{DR} 为−1～1 dB，且大部分区域 $Z_{DR}\leqslant 0.5$ dB，K_{DP} 为 1.0°～3.4° km^{-1}，中心后侧有空值，2.4°仰角上空值区域较大，对应 K_{DP} 空值区 C_C 为 0.6～0.85，其他区域 C_C 为 0.85～0.96，因此风暴中心后侧为大冰雹粒子，是主要降雹区，中心其他区域为较小的湿冰雹粒子和液态粒子，Z_H 大值区附近 Z_{DR} 为 0.5～4 dB，K_{DP} 为 0.5°～3.4° km^{-1}，C_C 为 0.9～0.96，为多种尺度的湿冰雹粒子和雨滴构成，大值区北侧有较强降水。结合剖面图可知：入流缺口处有明显的 Z_{DR} 弧，Z_{DR} 弧附近 K_{DP} 为 1.1°～3.4° km^{-1}，C_C 为 0.92～0.98，Z_{DR} 弧包含较大尺度的液态粒子和湿冰雹粒子。5.3°仰角上风暴中心和大值区内 Z_{DR} 基本在 0.5 以下，K_{DP} 大部分范围内 $\leqslant 0$，高层无 Z_{DR} 和 K_{DP} 柱，C_C 为 0.92～0.96，以均匀的霰粒子和干冰雹为主，风暴中心高度在后侧三体散射根部 $Z_{DR}\geqslant 4$ dB，随着径向距离增大，Z_{DR} 迅速减小，而 C_C 始终$\leqslant 0.8$。在剖面图上，Z_{DR} 和 K_{DP} 柱较短，仅在 5 km 之下，高层悬垂回波内 Z_{DR} 和 K_{DP} 较小，而 C_C 较大（0.95～0.98），以相对较干的小冰相粒子为主（李芳等, 2024），这可能与深厚干层有关（图 3d），干冷空气大量流入加速风暴内粒子冻结（朱好奇等, 2024），风暴内冰相粒子增多，表现为高层云闪频次显著增多（Williams et al, 1989），有利于冰雹干增长。强回波中心对应清晰的 Z_{DR} 洞，Z_{DR} 洞已向下伸展至 2 km 附近，且为强烈下沉气流区，强回波中心后侧 K_{DP} 不显示，C_C 为 0.6～0.9，大冰雹在此处迅速下降，2 min 后实况监测到大冰雹。

6 结论和讨论

利用再分析资料、自动站观测、闪电定位和 S 波段双偏振雷达探测资料分析“24·2·21”和“25·3·3”两次降雹超级单体风暴的环境场和结构特征，对比分析风暴动力及微物理特征，得到如下结论：

（1）两次对流均为逆温层顶之上的高架对流，逆温层顶上空有条件不稳定层结和正的对流有效位能，深厚垂直对流由 850 hPa 切变线触发。环境层结均为上干冷下暖湿，其中“25·3·3”的干层较“24·2·21”更为深厚。两次过程均有强深层风垂直切变和适宜的湿球温度 0°C 层高度，有利于超级单体发展并降雹。

（2）超级单体降雹伴随着质心高度和中气旋最大切变高度下降，大冰雹区在风暴后侧下沉气流中。“24·2·21”超级单体维持时间长达两个半小时，动力结构表现为低层辐合、中层双涡旋和高层辐散的特征，而“25·3·3”超级单体维持时长仅 1 h，动力结构为低层气旋式辐合、中层单涡旋（中气旋）、高层气旋式辐散，中气旋更深厚，并有明显后侧入流。

（3）“24·2·21”风暴内 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱高于 6 km，悬垂回波内 Z_{DR} 和 K_{DP} 较小，C_C 随高度下降而减小，表明包含融化的小冰相粒子，有利于冰雹粒子湿增长；“25·3·3”风暴内 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱在 5 km 之下，高层 Z_{DR} 和 K_{DP} 较小，C_C 较大，深厚干层导致干冷空气大量涌入加速冻结作用，高层冷云中较干的冰相粒子增多，表现为云闪频次显著增多，有利于冰雹粒子干增长。

冰雹的增长机制比较复杂，本文仅通过分析双偏振参量特征对两次入春前超级单体风暴的冰雹增长进行初步探讨，分析干湿增长的有利条件。从两

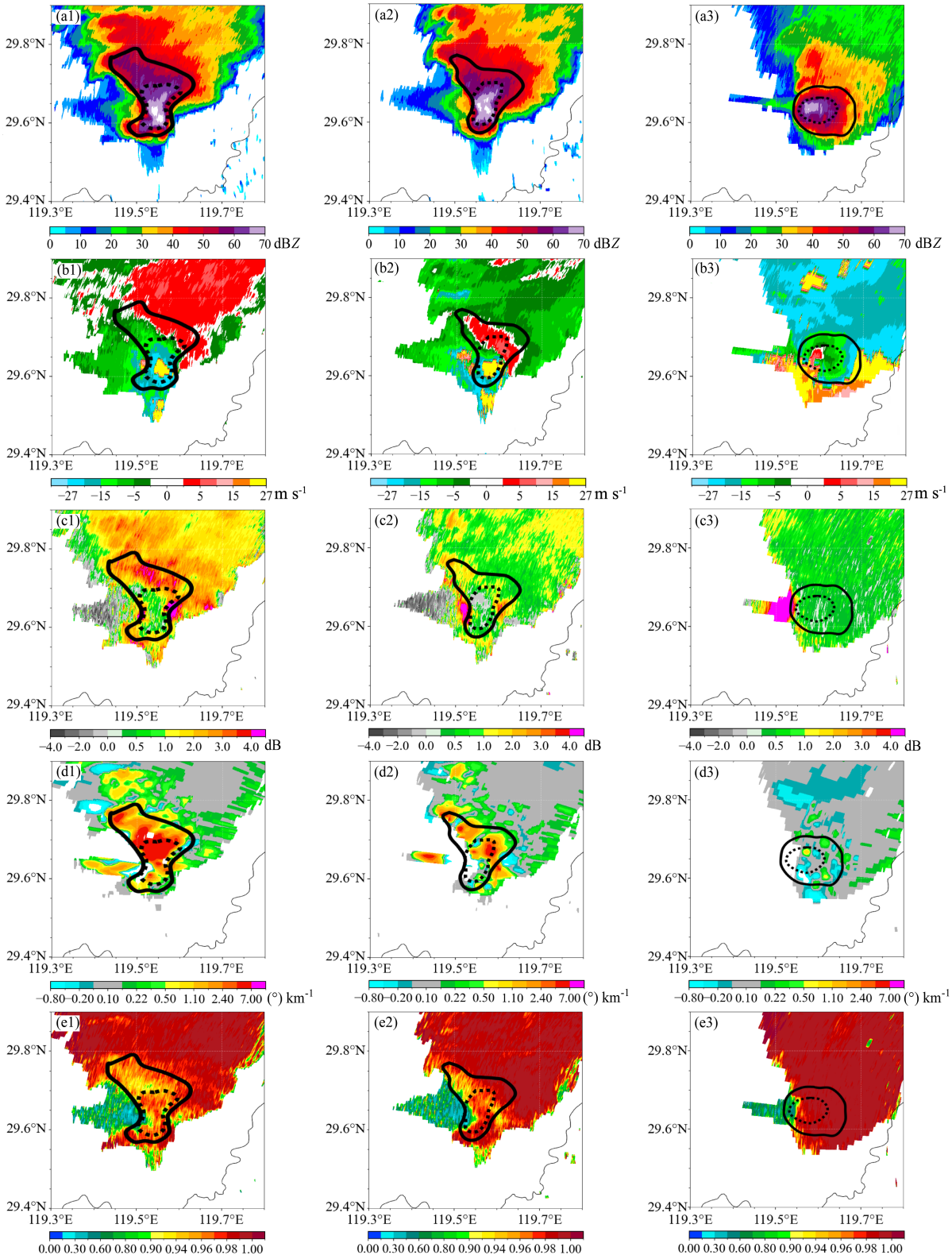


图 9　同图 8，但为 2025 年 3 月 3 日 06:56。

Fig. 9　Same as Fig. 8, but for 0656 BJT 3 March 2024.

个超级单体湿球温度 0°C 层以上的双偏振参量分布来看，干湿增长都是存在的，仍无法判断冰雹增长过程是湿增长还是干增长为主，需要利用数值模拟等方法（陈宝君等, 2012; 朱好奇等, 2024; 殷蕾等,

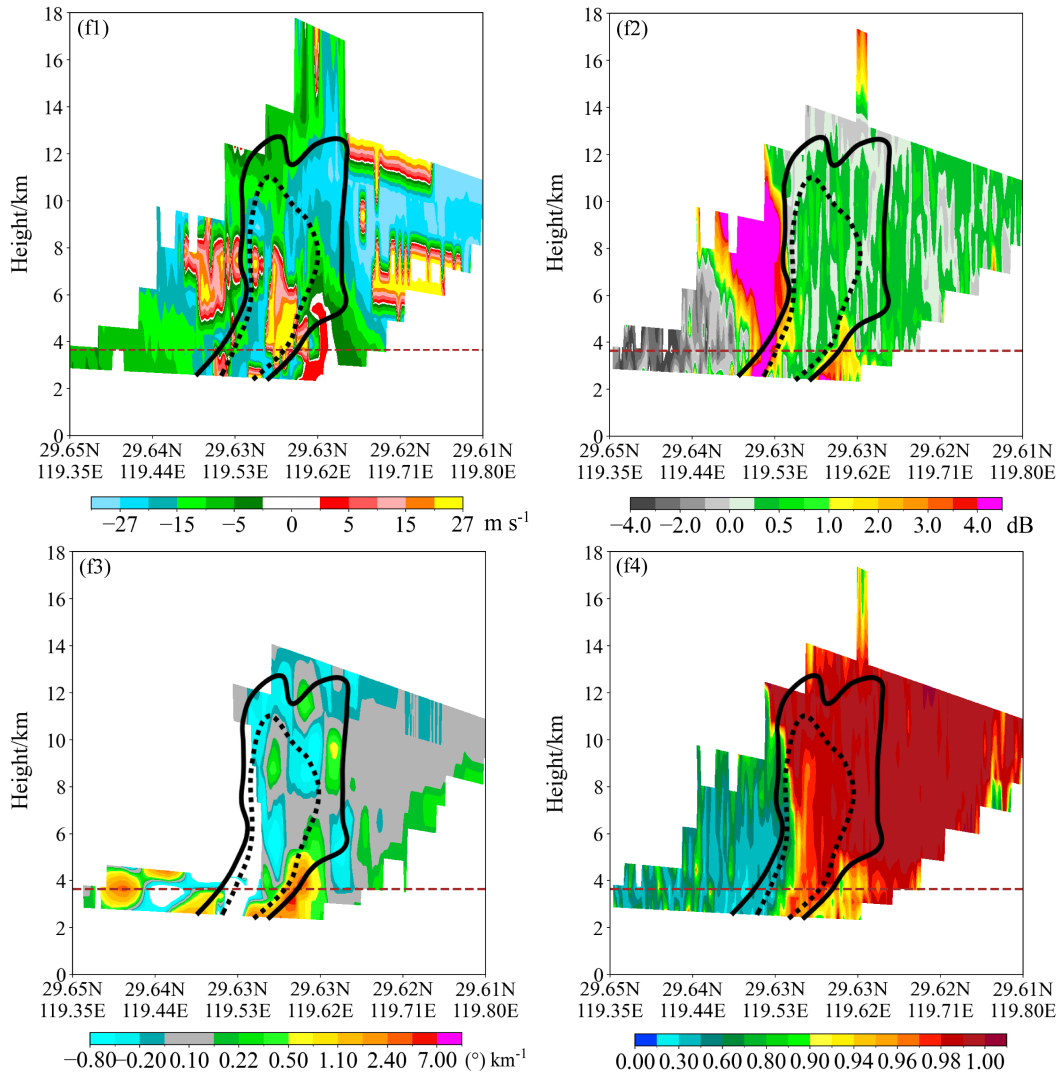


图 9 （续）。

Fig. 9 (Continued).

2024; 张昕宇等, 2026）对两次冰雹形成机理进行深入研究，这是我们下一步迫切需要解决的问题。

参考文献（References）

Browning K A. 1962. Cellular structure of convective storms [J]. Meteor. Mag., 91(1085): 341−350.

Browning K A. 1977. The structure and mechanisms of hailstorms [M]//Foote G B, Knight C A. Hail: A Review of Hail Science and Hail Suppression. Boston: American Meteorological Society, 1–47. doi:10.1007/978-1-935704-30-0_1

Browning K A, Ludlam F H, Macklin W C. 1963. The density and structure of hailstones [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 89(379): 75−84. doi:10.1002/qj.49708937905

蔡淼, 周毓荃, 蒋元华, 等. 2014. 一次超级单体雹暴观测分析和成雹区识别研究 [J]. 大气科学, 38(5): 845−860. Cai M, Zhou Y Q, Jiang Y H, et al. 2014. Observations, analysis, and hail-forming area identification of a supercell hailstorm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(5): 845−860. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13107

陈宝君, 郑凯琳, 郭学良. 2012. 超级单体风暴中大冰雹增长机制的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 17(6): 767−778. Chen B J, Zheng K L, Guo X L. 2012. Numerical investigation on the growth of large hail in a simulated supercell thunderstorm [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 17(6): 767−778. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.14

陈秋萍, 陈齐川, 冯晋勤, 等. 2015. “2012.4. 11”两个强降雹超级单体特征分析 [J]. 气象, 11(1): 25−33. Chen Q P, Chen Q C, Feng J Q, et al. 2015. Analysis of two severe hail supercell storms on 11 April 2012 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 11(1): 25−33. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.01.003

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. (in Chinese), 40(4): 419−429. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.010

Chisholm A J, Renick J H. 1972. The Kinematics of Multicell and Supercell Alberta Hailstorms [M]. Edmonton: Alberta Research Council, 24–31.

楚荣忠, 王致君, 刘黎平, 等. 1997. 双线偏振雷达降雨估测分析 [J]. 气象学报, 55(1): 103−109.　Chu R Z, Wang Z J, Liu L P, et al. 1997. Preliminary analysis of rainfall estimate utilizing dual linear polarization radar [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 55(1): 103−109. doi:10.11676/qxxb1997.011

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. Sinica (in Chinese), 79(2): 181−195. doi:10.11676/qxxb2021.010

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. Sinica (in Chinese), 67(1): 133−146. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.01.014

刁秀广, 张磊, 孟宪贵, 等. 2020. 两次强降水风暴双偏振参量特征分析 [J]. 海洋气象学报, 40(3): 27−36.　Diao X G, Zhang L, Meng X G, et al. 2020. Analysis on characteristics of dual-polarization parameters of two heavy precipitation storms [J]. J. Shandong Meteor. (in Chinese), 40(3): 27−36. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.004

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 Meteor. (in Chinese), 40(3): 580−589. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00034

高丽, 潘佳文, 蒋璐璐, 等. 2021. 一次长生命史超级单体降雹演化机制及双偏振雷达回波分析 [J]. 气象, 47(2): 170−182.　Gao L, Pan J W, Jiang L L, et al. 2021. Analysis of evolution mechanism and characteristics of dual polarization radar echo of a hail caused by long-life supercell [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 47(2): 170−182. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.02.004

郭大梅, 章丽娜, 王秀明, 等. 2018. 2016 年初冬陕西一次高架雷暴天气过程分析 [J]. 气象, 44(11): 1404−1413.　Guo D M, Zhang L N, Wang X M, et al. 2018. Analysis on elevated thunderstorm in Shaanxi in early winter of 2016 [J]. Meteor Mon (in Chinese), 44(11): 1404−1413. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.11.003

洪延超, 肖辉, 李宏宇, 等. 2002. 冰雹云中微物理过程研究 [J]. 大气科学, 26(3): 421−432.　Hong Y C, Xiao H, Li H Y, et al. 2002. Studies on microphysical processes in hail cloud [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26(3): 421−432. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.03.13

黄俊杰, 苟阿宁. 2018. 鄂西北一次超级单体风暴过程的观测分析 [J]. 暴雨灾害, 37(5): 462−469.　Huang J J, Gou A N. 2018. Observation analysis of a supercell storm event in the northwest of Hubei Province [J]. Torr. Rain Dis. (in Chinese), 37(5): 462−469. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.05.009

Hubbert J, Bringi V N, Carey L D, et al. 1998. CSU-CHILL polarimetric radar measurements from a severe hail storm in eastern Colorado [J]. J. Appl. Meteor., 37(8): 749−775. doi:10.1175/1520-0450(1998)037<0749:CCPRMF>2.0.CO;2

寇蕾蕾, 李应超, 楚志刚, 等. 2018. C 波段双偏振多普勒天气雷达资料分析及在定量估计降水中的应用研究 [J]. 热带气象学报, 34(4): 460−471.　Kou L L, Li Y C, Chu Z G, et al. 2018. C-band dual-polarization Doppler weather radar data analysis and its application in quantitative precipitation estimation [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 34(4): 460−471. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2018.04.003

Kumjian M R. 2011. Precipitation properties of supercell hook echoes [J]. E-J. Severe Storms Meteor., 6(5): 1−21. doi:10.55599/ejssm.v6i5.32

Kumjian M R. 2013a. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: Description of the polarimetric radar variables [J]. J. Operat. Meteor., 1(19): 226−242. doi:10.15191/nwajom.2013.0119

Kumjian M R. 2013b. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II: Warm- and cold-season applications [J]. J. Operat. Meteor., 1(20): 243−264. doi:10.15191/nwajom.2013.0120

Kumjian M R, Ryzhkov A V. 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 47(7): 1940−1961. doi:10.1175/2007JAMC1874.1

Kumjian M R, Ryzhkov A V, Melnikov V M, et al. 2010. Rapid-scan super-resolution observations of a cyclic supercell with a dual-polarization WSR-88D [J]. Mon. Wea. Rev., 138(10): 3762−3786. doi:10.1175/2010MWR3322.1

Kumjian M R, Khain A P, Benmoshe N, et al. 2014. The anatomy and physics of Z_{DR} columns: Investigating a polarimetric radar signature with a spectral bin microphysical model [J]. J. Appl. Meter. Climatol., 53(7): 1820−1843. doi:10.1175/JAMC-D-13-0354.1

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. (in Chinese), 50(2): 195−209. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2023.100801

刘黎平, 钱永甫, 王致君, 等. 1996a. 双线偏振雷达测雨效果的对比分析 [J]. 大气科学, 20(5): 615−619.　Liu L P, Qian Y F, Wang Z J, et al. 1996a. Comparitive study on dual linear polarization radar measuring rainfall rate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 20(5): 615−619. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.13

刘黎平, 钱永甫, 王致君. 1996b. 用双线偏振雷达研究云内粒子相态及尺度的空间分布 [J]. 气象学报, 54(5): 590−599.　Liu L P, Qian Y F, Wang Z J. 1996b. The study of spacial distribution of phase and size of hydrometeorsin cloud by dual linear polarization radar [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 54(5): 590−599. doi:10.11676/qxxb1996.061

刘治国, 俞小鼎, 陶健红, 等. 2008. 青藏高原东北侧雹云单体最大垂

直累积液态含水量的演变特征及其在降雹定时判断中的应用 [J]. 气象学报, 66(4): 609−620. Liu Z G, Yu X D, Tao J H, et al. 2008. Vertically integrated liquid water content characters of hail cells in the northeast Tibetan Plateau and its application in estimation of hail-shooting time [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66(4): 609−620. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.04.014

Loney M L, Zrnić D S, Straka J M, et al. 2002. Enhanced polarimetric radar signatures above the melting level in a supercell storm [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 41(12): 1179−1194. doi:10.1175/1520-0450(2002)041<1179:EPRSAT>2.0.CO;2

Markowski P M. 2002. Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review [J]. Mon. Wea. Rev., 130(4): 852−876. doi:10.1175/1520-0493(2002)130<0852:HEARFD>2.0.CO;2

Marwitz J D. 1972. The structure and motion of severe hailstorms. Part I: Supercell storms [J]. J. Appl. Meteor., 11(1): 166−179. doi:10.1175/1520-0450(1972)011<0166:TSAMOS>2.0.CO;2

Musil D J, Heymsfield A J, Smith P L. 1986. Microphysical characteristics of a well-developed weak echo region in a high plains supercell thunderstorm [J]. J. Climate Appl. Meteor., 25(7): 1037−1051. doi:10.1175/1520-0450(1986)025<1037:MCOAWD>2.0.CO;2

牛奔, 张家国, 吴涛, 等. 2016. 鄂西北一次超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析 [J]. 暴雨灾害, 35(1): 45−52. Niu B, Zhang J G, Wu T, et al. 2016. Analysis on weather process of supercell storm in Northwest of Hubei Province [J]. Torr. Rain Dis. (in Chinese), 35(1): 45−52. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.01.007

潘佳文, 魏鸣, 郭丽君, 等. 2020. 闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析 [J]. 气象, 46(12): 1608−1620. Pan J W, Wei M, Guo L J, et al. 2020. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in southern Fujian [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 46(12): 1608−1620. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.008

Park H S, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al. 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS [J]. Wea. Forecasting, 24(3): 730−748. doi:10.1175/2008WAF2222205.1

Ryzhkov A V. 2007. The impact of beam broadening on the quality of radar polarimetricdata [J]. J. Atmos. Ocean. Technol., 24(5): 729−744. doi:10.1175/JTECH2003.1

申高航, 高安春, 李君. 2021. 雨滴谱及双偏振雷达等资料在一次强降水过程中的应用 [J]. 气象, 47(6): 737−745. Shen G H, Gao A C, Li J. 2021. Application of raindrop spectrum and dual polarization radar data to a heavy rain process [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 47(6): 737−745. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.009

Snyder J C, Bluestein H B, Venkatesh V, et al. 2013. Observations of polarimetric signatures in supercells by an X-band mobile Doppler radar [J]. Mon. Wea. Rev., 141(1): 3−29. doi:10.1175/MWR-D-12-00068.1

唐佳, 张昆, 唐明晖, 等. 2023. 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 [J]. 暴雨灾害, 42(1): 37−46. Tang J, Zhang K, Tang M H, et al. 2023. Structural characteristics of two heavy hail supercell storms forced by low-level warm advection [J]. Torr. Rain Dis. (in Chinese), 42(1): 37−46. doi:10.12406/byzh.2022-022

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. Sinica (in Chinese), 72(1): 152−167. doi:10.11676/qxxb2014.010

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. (in Chinese), 50(10): 1216−1230. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2024.031801

王洪, 吴乃庚, 万齐林, 等. 2018. 一次华南超级单体风暴的 S 波段偏振雷达观测分析 [J]. 气象学报, 76(1): 92−103. Wang H, Wu N G, Wan Q L, et al. 2018. Analysis of S-band polarimetric radar observations of a hail-producing supercell [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(1): 92−103. doi:10.11676/qxxb2017.083

王宁, 杨学斌, 杨成芳. 2023. 2021 年山东一次罕见区域性“雷打雪”天气成因分析 [J]. 气象科技, 51(4): 562−572. Wang N, Yang X B, Yang C F. 2023. Cause analysis of a rare regional “thunder snow” process in Shandong in 2021 [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 51(4): 562−572. doi:10.19517/j.1671-6345.20220286

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. Sinica (in Chinese), 83(3): 813−832. doi:10.11676/qxxb2025.20240156

Williams E R, Weber M E, Orville R E. 1989. The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 94(D11): 13213−13220. doi:10.1029/jd094id11p13213

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. Sinica (in Chinese), 71(2): 209−227. doi:10.11676/qxxb2013.016

吴海英, 陈海山, 刘梅, 等. 2017. 长生命史超级单体结构特征与形成维持机制 [J]. 气象, 43(2): 141−150. Wu H Y, Chen H S, Liu M, et al. 2017. Structure characteristics, formation and maintenance mechanism of supercell with long life cycle [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 43(2): 141−150. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.02.002

夏文梅, 王晓君, 孙康远, 等. 2016. V 型缺口在 C 波段多普勒雷达中的应用研究 [J]. 气象, 42(1): 67−73. Xia W M, Wang X J, Sun K Y, et al. 2016. Application study of ‘V’ notch used in C band Doppler radar [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 42(1): 67−73. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.01.008

徐芬, 郑媛媛, 肖卉, 等. 2016. 江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析 [J]. 气象, 42(5): 567−577. Xu F, Zheng Y Y, Xiao H, et al. 2016. Mesoscale characteristics of a severe hail event over the area along Yangtze River in Jiangsu [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 42(5): 567−577. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.006

殷蕾, 王瑾, 唐细坝, 等. 2024. 一次贵阳冰雹过程数值模拟及冰雹形

成微物理机制研究 [J]. 大气科学, 48(4): 1674−1692. Yin L, Wang J, Tang X B, et al. 2024. Numerical simulations of a hailstorm in Guiyang and study on the microphysical mechanisms of hail formation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(4): 1674−1692. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2306.23047

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. (in Chinese), 40(6): 649−654. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.06.001

俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2016. 中国冷季高架对流个例初步分析 [J]. 气象学报, 74(6): 902−918. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2016. A preliminary case study of elevated convection in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 74(6): 902−918. doi:10.11676/qxxb2016.075

俞小鼎, 费海燕, 王秀明. 2024. 2024 年 2 月 17-23 日中国大范围强寒潮雨雪冰冻强对流过程涉及的若干问题 [J]. 气象, 50(9): 1033−1042. Yu X D, Fei H Y, Wang X M. 2024. Some issues concerning the large area rainstorm, snowstorm, sleet, freezing rain and severe convection event over China from 17 to 23 February 2024 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 50(9): 1033−1042. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2024.080902

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, 90–155. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006. Doppler Weather Radar and Business Applications (in Chinese) [M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 90–155.

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, 52–55. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2020. Thunderstorm and Severe Convection Nowcasting [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 52–55.

张伟, 陈琳, 黄惠镕, 等. 2023. 闽西南地区一次高架雷暴中尺度特征分析 [J]. 热带气象学报, 39(1): 55−65. Zhang W, Chen L, Huang H R, et al. 2023. Meso-scale structure analysis of an elevated thunderstorm in southwest Fujian [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 39(1): 55−65. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2023.006

张玉洁, 苑文华, 张武. 2019. 两次长寿命孤立超级单体风暴结构差异性分析 [J]. 高原气象, 38(5): 1058−1068. Zhang Y J, Yuan W H, Zhang W. 2019. The difference analysis of structure between two long-lived isolated supercell storms [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 38(5): 1058−1068. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00055

张一平, 俞小鼎, 孙景兰, 等. 2014. 2012 年早春河南一次高架雷暴天气成因分析 [J]. 气象, 40(1): 48−58. Zhang Y P, Yu X D, Sun J L, et al. 2014. Analysis on weather causes of an elevated thunderstorm in Henan in early spring 2012 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 40(1): 48−58. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.006

张昕宇, 周筠珺, 曾勇, 等. 2026. 贵州山地一次超级单体雹暴的观测和数值模拟研究 [J]. 大气科学, 50(3): 858−877. ZHANG Xinyu, ZHOU Yunjun, ZENG Yong, et al. 2026. Observation and Numerical Simulation of A Supercell Hailstorm over the Mountainous Regions of Guizhou Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 50(3): 858−877. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2505.25026

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 Meteor. Sinica (in Chinese), 62(3): 317−328. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.03.006

朱好奇, 平凡, 谭桂容, 等. 2024. 一次北京冰雹形成的数值模拟及微物理机制研究 [J]. 大气科学, 48(5): 1796−1816. Zhu H Q, Ping F, Tan G R, et al. 2024. Numerical simulation and the microphysical mechanism of hail formation in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(5): 1796−1816. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2303.22123

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. (in Chinese), 25(3): 320−332. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19022