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

# 东北冷涡背景下两类强对流天气的雷达特征对比分析

王太微 谌芸 刘成瀚 王晓丽

## Comparison of radar characteristics of two types of events of severe convective weather under the background of Northeast cold vortex

WANG Taiwei，CHEN Yun，LIU Chenghan，WANG Xiaoli

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-171

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

江西一次冰雹过程的S波段双偏振雷达回波特征分析
Analysis on characteristics of S-band dual-polarization radar echo of a hail event in Jiangxi Province
暴雨灾害. 2022, 41(6): 621-630 https://doi.org/10.12406/byzh.2020-242

东北冷涡背景下弓形回波导致的雷暴大风成因分析
Analysis of the causes of thunderstorm winds caused by bow echoes under the background of Northeast China cold vortex
暴雨灾害. 2024, 43(6): 693-701 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-231

东北冷涡背景下中尺度低涡的演变成因及其对MCS的影响分析
Analysis of the evolution reason of the mesoscale vortex and its influence on MCS under the background of the northeast cold vortex
暴雨灾害. 2021, 40(5): 474-483 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.004

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

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

基于双偏振雷达资料的洞庭湖区一次强对流过程的分阶段特征分析
Staged characteristics analysis of a severe convection over the Dongting Lake area based on dual-polarization Doppler weather radar data
暴雨灾害. 2023, 42(6): 692-703 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-170

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王太微,谌芸,刘成瀚,等.2025.东北冷涡背景下两类强对流天气的雷达特征对比分析[J].暴雨灾害,44(5):688−699. WANG Taiwei, CHEN Yun, LIU Chenghan, et al. 2025. Comparison of radar characteristics of two types of events of severe convective weather under the background of Northeast cold vortex [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):688−699 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−171

# 东北冷涡背景下两类强对流天气的雷达特征对比分析

王太微[1, 2, 3], 谌芸[3], 刘成瀚[2], 王晓丽[4]

(1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166; 2. 辽宁省气象台, 沈阳 110166;
3. 国家气象中心, 北京 100081; 4. 辽宁省气象服务中心, 沈阳 110016)

**摘　要**: 在东北冷涡发展的不同阶段, 其不同象限会出现不同的强对流天气类型。不断加深对冷涡系统影响下强对流天气形成机制的理解, 有助于精准识别不同类型强对流天气。东北冷涡背景下, 辽宁 2020 年 8 月 31 日出现一次强降水过程 (以下简称“8.31”强降水过程), 2021 年 9 月 10 日出现一次大冰雹过程 (以下简称“9.10”大冰雹过程), 利用常规观测资料、双偏振雷达数据及 ERA5 再分析数据, 对这两次强对流过程的雷达特征进行了对比分析, 重点对比了两类强对流天气风暴的发展演变和微物理结构的异同。结果表明: (1) “8.31”强降水过程出现在冷涡发展阶段东南象限, 强降水是由冷涡前部低空暖平流强迫引发; “9.10”大冰雹过程出现在冷涡成熟阶段西南象限, 冷涡后偏北气流携带高纬度地区的强干冷空气向南侵入, 高空干冷平流是造成层结不稳定增长的主要因子。(2) “8.31”强降水过程中低层暖湿强迫的发展与雷达基本反射率在垂直方向上的发展和差分反射率因子 ($Z_{dr}$) 柱的高度变化相对应, 降水的增强过程伴随较显著的低相关系数 (CC) 梯度区和径向速度大值区等低层入流特征; “9.10”大冰雹过程大冰雹出现前中层径向辐合先加强, 随后向下发展, 低层的径向辐合加强, 配合上升运动 (径向速度柱发展), 与强垂直风切变等共同作用, 使强风暴维持并加强。(3) 强降水出现位置与 $Z_{dr}$ 柱和中层最大的径向速度区相邻; 而大冰雹则出现在中层最大的径向速度区, 与 $Z_{dr}$ 环、$Z_{dr}$ 柱和 CC 谷的位置重合, 这些关键信息对短时临近预报预警有很好的指导作用。

**关键词**: 东北冷涡; 强降水; 双偏振雷达; 冰雹; $Z_{dr}$ 柱

**中图法分类号**: P412　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−171

# Comparison of radar characteristics of two types of events of severe convective weather under the background of Northeast cold vortex

WANG Taiwei[1, 2, 3], CHEN Yun[3], LIU Chenghan[2], WANG Xiaoli[4]

(1. *Institute of Atmospheric Environment*, *China Meteorological Administration*, *Shenyang* 110166; 2. *Liaoning Meteorological Observatory*, *Shenyang* 110016; 3. *National Meteorological Centre*, *Beijing* 100081; 4. *Liaoning Meteorological Service Center*, *Shenyang* 110016)

**Abstract:** At different stages of the development of the northeast cold vortex, different types of severe convective weather occur in different quadrants. Continuously deepening the understanding of the formation mechanism of severe convective weather under the influence of cold vortex systems can help accurately identify different types of severe convective weather. Under the background of the Northeast Cold Vortex, Liaoning Province experienced a heavy precipitation event on August 31, 2020 (referred to as "8.31" heavy rain event) and a large hail event on September 10, 2021 (referred to as the "9.10" large hail event). Using conventional observation data, dual polarization radar data, and ERA5 reanalysis data, the radar characteristics of these two heavy convective events were compared and analyzed, with a focus on the similarities and differences in the development and microphysical structure of the two types of heavy convective weather storms. The results are as follows. (1) The "8.31" heavy rain process occurred in the southeastern quadrant during the development stage of the cold vortex. The development of stratification mainly related to strong warm and humid advection at lower levels. The "9.10" large hail process occurred in the southwestern quadrant during the stage of the cold vortex. The northerly flow behind

**收稿日期**: 2023−08−07; **定稿日期**: 2024−08−30

**资助项目**: 国家自然科学基金项目 (52239006, 41930972, 41975001); 中国气象局沈阳大气环境研究所和东北冷涡重点开放实验室联合开放基金课题 (2020SYIAE01); 东北区域气象科技协同创新联合基金项目 (2024ZD001)

**第一作者**: 王太微, 主要从事东北冷涡背景下强对流机理研究。E-mail: taiwei0214@sina.com

**通信作者**: 谌芸, 主要从事中尺度天气机理研究。E-mail: chenyun@cma.gov.cn

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

the cold vortex carried strong dry and cold air from high latitudes to the south, and the cold advection at high altitudes was the main factor causing the increase in instability. (2) The development of low-level warm and moist forcing during the strong precipitation process corresponded to the development of radar reflectivity $Z$ in the vertical direction and changed in the height of the $Z_{dr}$ column. The enhancement of precipitation accompanied by significant low correlation coefficient (CC) gradient zones and large radial velocity zones as low-level inflow characteristics. Before the production of large hail, the strong storm top first experiences strong divergence, which together with upward motion (radial velocity column development) and-level convergence (radial velocity convergence), interacted with strong vertical wind shear to help maintain and strengthen the strong storm. (3) The most severe weather phenomena in the two types of severe convective weather have a good correspondence with the weak echo region, $Z$-pillar and $Z_{dr}$ column, mid-level radial convergence, velocity convergence region, $Z_{dr}$ ring and CC valley, and these key information will have a good indication significance in the short-time forecast and early warning.

**Key words:** northeast cold vortex; heavy precipitation; dual polarization; hail; $Z_{dr}$ column

## 引　言

东北冷涡背景下极易产生中尺度对流系统(MCS), 进而引发强对流天气 (王磊等, 2013)。据统计, 东北地区 22.4% 的暴雨是由冷涡引起的 (Zhang et al., 2008), 然而冷涡背景下的强对流天气具有明显的局地性和突发性, 因此冷涡背景下的强对流天气预报一直是我国北方夏季天气预报的难点。由于环境条件不同, 在冷涡发展的不同阶段和不同位置, 对流系统往往有不同的组织形态。研究表明, 东北冷涡发展阶段远离冷涡中心的东南象限有较强的不稳定能量, 配合西南气流的水汽输送, 易出现维持时间较长的大范围的层状云降水伴随局地短时强降水 (杨磊等, 2023); 而在冷涡的成熟阶段, 接近冷涡中心的东南象限, 配合中高层的干冷平流, 不稳定条件加剧, 极易产生局地的短时强降水、雷暴大风、冰雹等强对流天气, 甚至还时有龙卷的发生 (陈力强等, 2008; 胡鹏宇等, 2021)。

雷达在强对流天气预报预警、降水分类和量化中有其显著的优势。尤其是双偏振多普勒雷达观测业务的开展, 使得学者们可以获取有关降水粒子的形状、尺寸大小、相态分布、空间取向等更为具体的气象信息 (Aydin and Singh, 2004; Giangrande et al., 2016)。中国南方地区的双偏振雷达观测业务开展较早, 针对不同类型对流风暴云的微物理结构演变特征已取得了一些成果 (林文等, 2020; 孙炜文等, 2022; 施娟等, 2025)。潘佳文等 (2020) 分析了一次强降水超级单体的水平和垂直方向双偏振雷达参数的特征, 并得到了超级单体的偏振特征的概念模型。陈龙等 (2023) 发现差分反射率因子 ($Z_{dr}$)柱、相关系数 (CC)、差分相移率 ($K_{dp}$) 演变可为冰雹的云物理特征变化提供重要参考, $Z_{dr}$ 和 CC 表现的偏振三体散射特征和非均匀波束充塞延伸距离可作为识别冰雹及其尺度的重要判据。

东北地区双偏振雷达的观测业务开展较晚, 受观测条件的限制, 前人对东北冷涡背景下强对流系统的组织演变及其中尺度环境特征的研究多集中在环境参数特征 (段祥海等, 2019)。近年来, 随着双偏振雷达的业务升级, 王冠等 (2023) 研究发现双偏振雷达的偏振参量可以对水凝物的种类、空间分布、物理形态进行大致判断, 但水凝物相态识别结果仍需细化。袁潮等 (2022) 研究了一次龙卷风暴产生的环境条件、龙卷风暴结构特征及龙卷形成的可能物理过程, 探测到产生龙卷的微型超级单体钩状回波、下沉反射率核心、弱回波洞、龙卷残片特征等结构。

以上研究虽从多方面对东北冷涡背景下各种强对流天气的雷达特征作了较为深入的探讨, 但针对冷涡背景下不同类型强对流天气雷达特征的对比研究仍然缺乏。因此, 本文选取东北冷涡背景下辽宁 2020 年 8 月 31 日出现的一次强降水过程 (以下简称“8.31”强降水过程) 和 2021 年 9 月 10 日出现的一次大冰雹过程 (以下简称“9.10”大冰雹过程), 对比分析了这两次强对流过程的雷达特征, 研究两类强对流天气风暴的发展演变和微物理结构的异同, 以期加深对冷涡影响下东北地区不同类型强对流天气过程差异的认识, 为辽宁地区各类强天气预报提供科学参考。

## 1 资料与天气概况

### 1.1 资料来源

本文使用的数据包括: (1) 2020 年 8 月 31 日和 2021 年 9 月 10 日地面加密观测站资料, 包括 5 min 降水量、10 m 风、2 m 气温气象要素, 来源于天擎大数据云平台, 用于分析强对流天气的时空演变特征。(2) 质控后的 2020年 8 月 31 日和 2021 年 9 月 10 日辽宁营口 (122.52°E, 40.64°N) S 波段双偏振多普勒雷达和大连 (121.65°E, 38.91°N) S 波段单偏振多普勒天气雷达数据, 雷达数据的空间分辨率 250 m,

时间分辨率为 6 min, 来源于天擎大数据云平台, 用于对比分析两次强对流天气雷达参数特性。(3) 2020 年 8 月 30、31 日和 2021 年 9 月 9、10 日欧洲中期天气预报中心第五代全球再分析格点资料(ERA5), 垂直方向共 30 层、时空分辨率分别为 1 h、和 0.25 °×0.25 °, 用于分析大尺度天气形势演变特征。

### 1.2 天气实况

“8.31”强降水过程出现在辽宁南部, 强降水集中在 8 月 31 日 20:40—23:35 (北京时, 下同), 大连北部有 55 个区域自动气象站出现 20 mm·h$^{-1}$ 以上的短时强降水 (图 1a), 其中大连普兰店区双塔珍珠河站 (强降水点) 21:00—22:00 的最大雨强达到 109 mm·h$^{-1}$ (图略), 该站 5 min 降水量演变 (图 1b 红色柱状图) 有三个超过 10 mm 的波峰。

“9.10”大冰雹过程 (图 1c) 出现在 9 月 10 日 21:00—24:00 辽宁中部渤海湾地区, 大冰雹的直径超过了 5 cm, 为近 10 a 罕见, 过程期间还伴有 8~10 级瞬时大风。

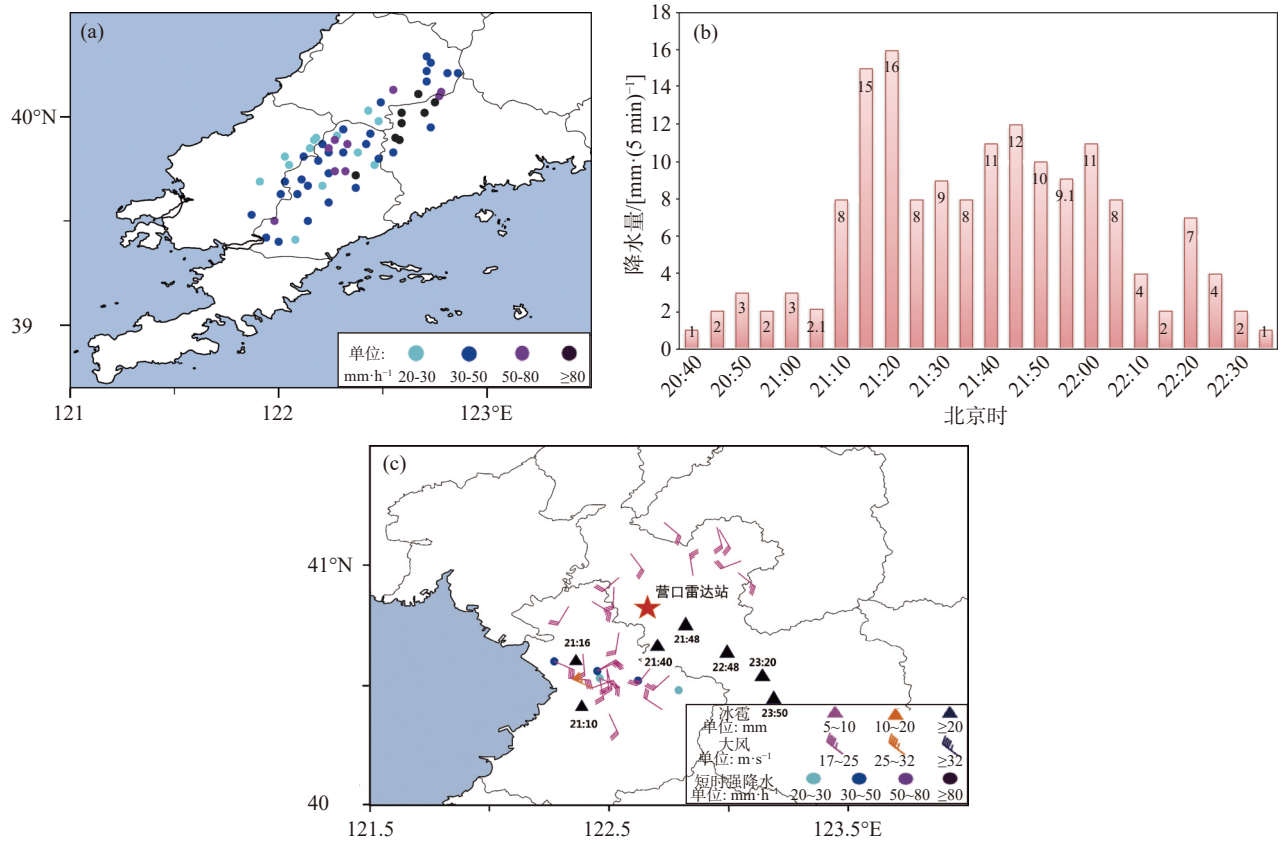



图 1 2020 年 8 月 31 日 20:40—23:35 辽宁省短时强降水站点分布 (a)、8 月 31 日 20:30—22:30 大连普兰店区双塔珍珠河 5 min 降水量变化 (b) 以及 2021 年 9 月 11 日 21:00—24:00 辽宁省冰雹、大风和短时强降水站点分布 (图中红色五角星为营口雷达站位置)(c)

Fig. 1 Distribution of (a) short-time heavy rain from 20:00 BT to 24:00 BT on 31 August 2020, (b) 5 min rainfall from 21:05 BT to 22:05 BT on 31 August 2020, (c) short-time heavy rain, gale and hail from 21:00 BT to 24:00 BT on 10 September 2021 in Liaoning Province(The red five-pointed star in the figure indicates the location of Yingkou Radar Station)

## 2 两次过程的环流形势与环境条件对比

### 2.1 环流形势对比

两次过程 500 hPa 环流同为“一槽一脊”形势, “8.31”强降水过程发生在 2020 年 8 月 31 日 20:40—23:35 (图 2a), 500 hPa 高度场存在闭合的环流中心, 冷涡中心位于贝加尔湖, 中心强度 (564 dagpm) 较弱, 冷涡处于发展阶段, 辽宁位于远离冷涡中心的东南象限, 冷空气活动较弱, 强降水落区位于 850 hPa 西南风和 925 hPa 东南风的急流头部; 而“9.10”大冰雹过程 (图 2b) 发生在 2021 年 9 月 10 日 21:00—24:00, 冷涡在 9 月 7 日就已经于贝加尔湖西侧形成, 9 日东移至黑龙江北部并停滞, 冷暖中心重合, 冷涡已经发展到成熟阶段, 冷涡中心强度 552 dagpm, 明显强于“8.31”强降水过程。涡后不断有干冷空气下滑, 500—850 hPa 的温差达到 30 ℃ 以上, 对流单体初生地渤海湾区域低空为西南和偏南气流的辐合区, 但风速较小未达到急流强度, 水汽集中在 700 hPa 以下, 冰雹发生当日白天辽宁晴空少云, 陆地最高气温达到

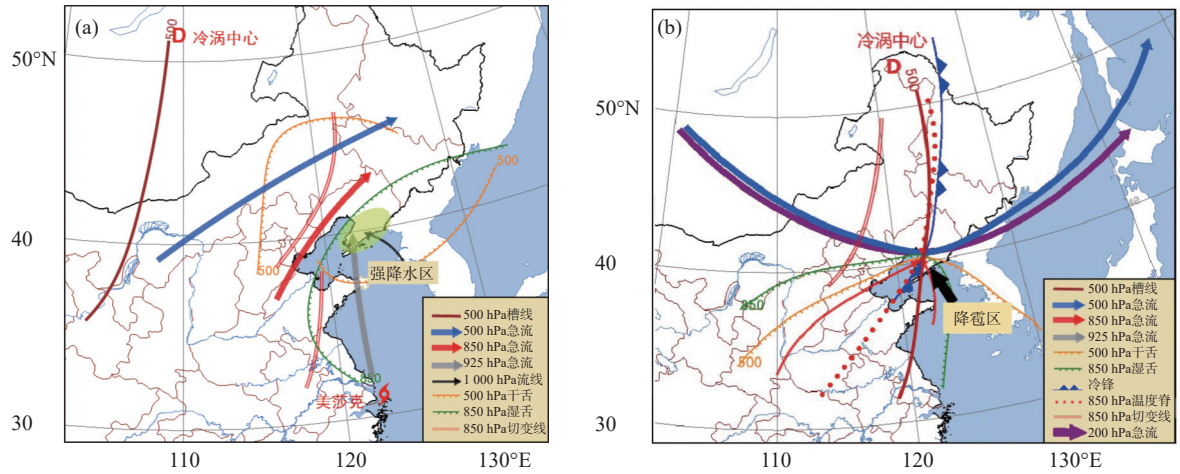



图 2 2020 年 8 月 31 日 20:00 (a) 和 2021 年 9 月 10 日 20:00 (b) 主要天气影响系统的配置

Fig. 2 Configuration of the main weather impact system at (a) 20:00 BT on 31 August 2020 and (b) 20:00 BT on 10 September 2021

26~28 ℃, 辐射增温显著, 在一定的触发条件下, 易出现分散性强对流天气。

### 2.2 环境条件对比

2020 年 8 月 31 日 08:00 大连探空 (图 3a) 显示, “8.31”强降水过程发生前, 低层风随高度呈明显顺转, 0—6 km 风矢量差为 14.2 m·s$^{-1}$, 但自低层到高层基本为偏南风或西南风, 无显著冷平流; 600 hPa 以下为饱和区, 湿层深厚, $K$ 指数为 39.8 ℃, 大连站对流有效势能 (CAPE) 为 140.9 J·kg$^{-1}$, 存在一定的不稳定能量。“9.10”大冰雹过程发生时东北冷涡处于成熟阶段, 由锦州站临近探空 (图 3b) 分析可知, 700 hPa 以上均为西北急流, 高空的冷平流显著, 造成从 08:00—20:00 $K$ 指数由 18.5 ℃ 增加至 30 ℃, 沙氏指数 (SI) 由 5.11 ℃ 下降至-2.11 ℃, 高空干冷平流是层结不稳定增长的主要因子。近地面为东南风, 暖湿输送强烈, 0—6 km 风矢量差为 20.8 m·s$^{-1}$, 风切变更显著, CAPE 值达到 1 457.8 J·kg$^{-1}$, 不稳定能量较高, 对流潜势显著。

## 3 两次过程雷暴单体的雷达回波演变特征对比

### 3.1 “8.31”强降水过程雷暴单体演变

大连站雷达回波显示, 2020 年 8 月 31 日 10:00, 雷暴由渤海海峡沿西南急流向东北方向移动进入辽宁南部的大连地区, 雨带位于近地面东北—西南走向的切变线上。18:00 (强降水开始前 3 h), 造成大连地区强降水的雷暴单体 (图 4a) 在大连南部出现, 其主体呈东北—西南向带状分布, 移动路径前侧和东侧的入流区存在分散的回波 (雷达基本反射率因子为 30~40 dBz), 入流区回波成气旋式弯曲的弧状形态; 19:28, 雷暴前侧分散回波面积减小, 主体结构 (雷达反射率因子>50 dBz 部分) 更为紧密, 说明雷暴在发展加强中; 20:33, 雷暴前沿开始逐渐影响大连普兰店区双塔珍珠河站 (强降水点, 图 4 中“+”所示处), 回波强度 30~40 dBz; 21:33, 雷暴主体缩小, 前侧出现多条气旋式弯曲的弧状回波, 雷暴低层的气旋式旋转加强, 上升运动显著, 此时雷暴主体经过大连普兰店

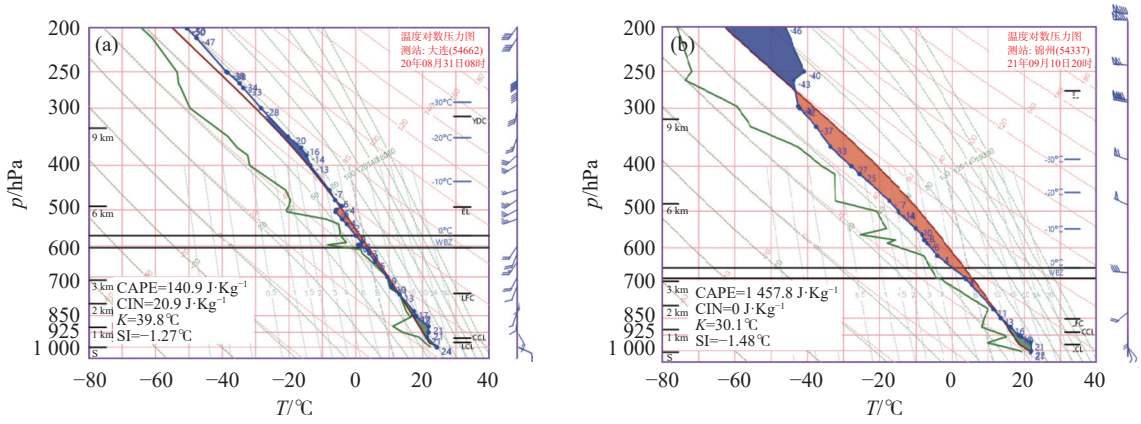



图 3 2020 年 8 月 31 日 08 时大连站 (a) 和 2021 年 9 月 10 日 20 时锦州站 (b) $T$-ln$p$ 图

Fig. 3 The $T$-ln$p$ of (a) Dalian sounding at 08:00 BT on 31 August 2020 and (b) Jinzhou sounding at 20:00 BT on 10 September 2021

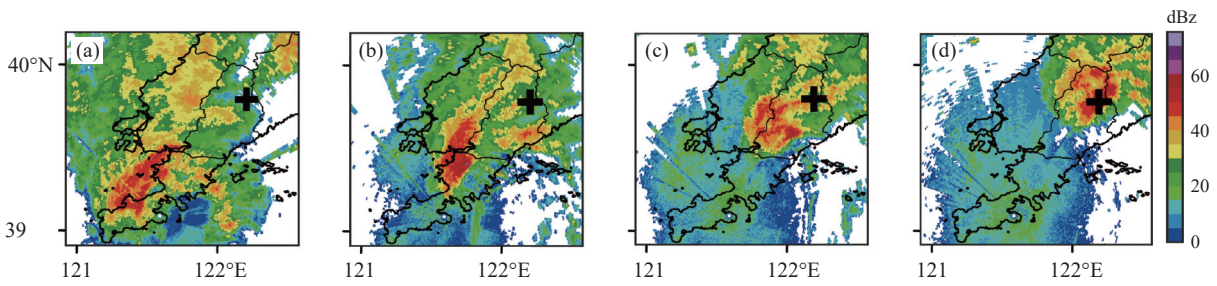



图 4 2020 年 8 月 31 日 18:00 (a)、19:28 (b)、20:33 (c)、21:33 (d) 大连雷达 0.5°仰角基本反射率因子分布
(图中“+”为大连普兰店区双塔珍珠河站, 下同)

Fig. 4 Base reflectivity at 0.5°elevation from Dalian Radar at (a) 18:00 BT, (b) 19:28 BT, (c) 20:33 BT and (d) 21:33 BT on 31 August 2020 (The “+” stands for Dalian City Pulandian shuangtazhenzhuhe station)

区双塔珍珠河站。超过 50 dBz 强度的回波持续影响 1.5 h, 地面观测站显示该强回波影响区域的 20 个观测站出现了超过 50 mm·h$^{-1}$ 的短时强降水, 其中 4 个观测站甚至超过了 100 mm·h$^{-1}$。

沿图 5a 中黑色直线所作的营口雷达 21:13 基本反射率垂直剖面图 (图 5b) 显示, 三个具有高质心的 $Z$ 基本反射率柱对应三个降水峰值(图 1b), 第一个高质心基本反射率柱经过强降水点, 其回波顶高达到 15 km, 组合反射率达到 60 dBz, 10 min 降水量达 30 mm; 当第三个高质心基本反射率柱经过强降水点时, 其回波顶高由 12 km 升至 14 km, 组合反射率达到 55 dBz, 10 min 降水量为20 mm。

### 3.2 “9.10”大冰雹过程多单体雷暴演变

“9.10”大冰雹过程与“8.31”强降水过程相比, 降水强度要明显偏弱, 但出现了大冰雹、雷暴大风等强对流天气。

2021 年 9 月 10 日 20:13, 雷暴单体初生在渤海北部, 初始在渤海湾附近出现两个小的对流单体 D 和 E (图 6a); 在 0.5 h 内迅速增强, 表现为入流区的径向速度增强、范围加大, 0.5°雷达基本反射率图中单体 D 有入流缺口 (图 6g 箭头处), 单体 E 低仰角为弱回波区, 入流处的 CC 降至 80% 左右; 单体 D (图 6b) 在 21:05 出现钩状回波形态, 强度达到 70 dBz, 基本可以判断有冰雹出现。另外在单体 D 发展的同时, 其前侧的出流与单体 E 的入流辐合加强, 使得单体 E 迅速加强; 21:22, 对流单体 E 的回波中心强度也达到 70 dBz (图 6c), 垂直液态水含量超过 80 kg·m$^{-2}$, 此时单体 D 和 E 的中间在沿海陆地观测到直径 5 cm 大冰雹, 同时在 2.5°、3.3°、4.3°、6.1°仰角均出现三体散射长钉, 在有界弱回波区有回波悬垂, 这些都符合超级单体的特征 (俞小鼎等, 2020); 0.5°仰角速度场中两个单体已经成一大片负速度区, 且速度场中心值由 3 m·s$^{-1}$ 增加至 15 m·s$^{-1}$, 地面风场在 D 和 E 单体的入流区出现了 6 级的东南和偏南风向的阵风 (图 6h 中黑色箭头), 另外在雷暴单体的北侧的正速度区有东北风卷入, 形成了气旋式旋转, 此结构在后 3 个体扫都存在, 入流加强表明此时低层的抬升作用显著, 针对此部分的垂直结构的演变将在后文中进行分析。21:28, D 单体的钩状形态消失 (图 6d), 基本反射率的中心值降到 62 dBz, $Z_{dr}$ 最大值由 4~5 dB 减弱到 2~3 dB, 但 CC 值在入流处仍维持在 85%~95% (图 6n), 并向东北方向移动, 而单体 E 向偏东方向移

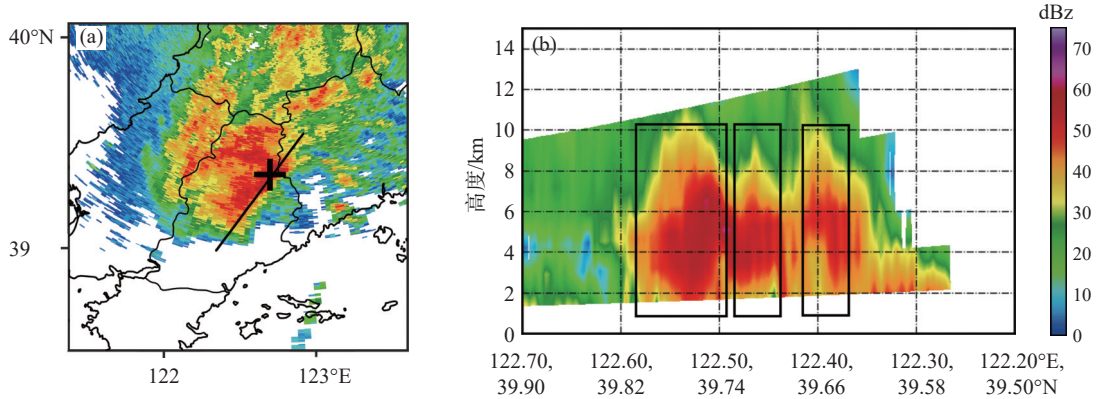



图 5 2020 年 8 月 31 日 21:13 营口雷达 1.5°仰角基本反射率因子 (a) 和沿图 a 中黑色直线的垂直剖面图 (b)

Fig. 5 (a) Radar base reflectivity at 1.5 °elevation from Yingkou Radar and (b) vertical cross-section along the black line in Fig. 5a at 21:13 BT on 31 August 2020

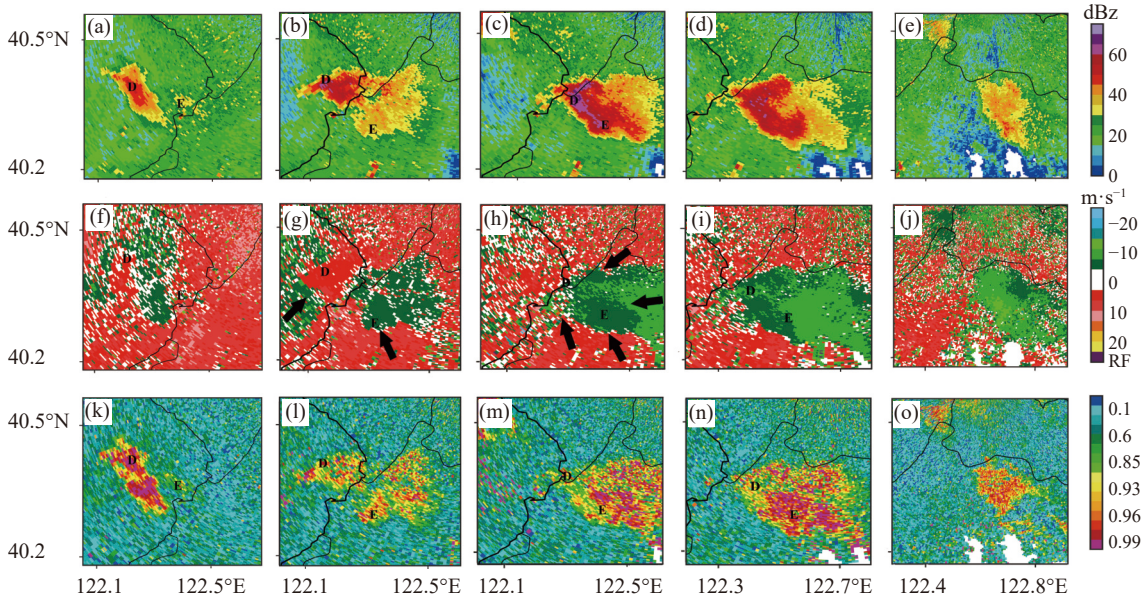



图 6 2021 年 9 月 10 日 20:42 (a, f, k)、21:05 (b, g, l)、21:22 (c, h, m)、21:28 (d, i, n) 和 21:58 (e, j, o) 营口雷达 0.5°仰角基本反射率因子 (a—e)、径向速度 (f—j) 和相关系数 CC (k—o) 图 (雷达站位于图中东北方向, 图中箭头表示入流方向)

Fig. 6 (a-e) Base reflectivity, (f-j) radial velocity and (k-o) correlation coefficient from Yingkou Radar at 0.5°elevation at (a, f, k) 20:42 BT, (b, g, l) 21:05 BT, (c, h, m) 21:22 BT, (d, i, n) 21:28 BT and (e, j, o) 21:58 BT on 10 September 2021 (The radar station is located northeast of the figure, the arrows indicate the inflow)

动, $Z_{dr}$ 最大值仍维持在 4~5 dB, 移动方向前侧的 CC 值大面积高于 95%, 两个单体形成了 C 型的回波形态, D 的入流因被 E 阻挡而快速减弱; 21:58, 两个单体减弱消失 (图 6e)。

### 3.3 两次过程雷暴单体的雷达回波特征的异同

两次天气过程的雷暴单体均受到大气环流的影响, 沿特定方向移动进入影响区域, “8.31”强降水过程是沿西南急流向东北方向移动进入大连地区, “9.10”大冰雹过程则是从渤海北部初生后向东北方向移动。两次过程中, 雷暴单体的雷达回波表现出不同特征。前者呈东北—西南向带状分布, 以及气旋式弯曲的弧状形态, 最强降水时的回波强度达到 50 dBz 以上, 且持续时间较长, 对流结构较为紧密, 气旋式旋转显著; 后者出现大冰雹时回波达到 70 dBz, 强度更强, 但持续时间较短, 对流单体之间存在明显的相互作用, 并出现钩状回波形态、三体散射长钉等特征, 这些特征均为发布冰雹预警的重要参考依据。

## 4 两次过程雷暴单体的形成机制与风暴结构

上文研究发现的钩状回波、后侧入流缺口等反射率因子特征皆为雷暴单体发展到一定程度的指征。相比单偏振雷达, 双偏振雷达可以从 $Z_{dr}$、CC 和 $K_{dp}$ 等产品分析雷暴单体水平和垂直方向的演变特征, 结合前文的环流分析, 可以得到东北冷涡背景下不同类型强对流发生发展的动力条件在雷达产品中的表现特征。

### 4.1 雷暴的触发与发展

强对流的触发与发展机制中, 低层风速的变化往往是关注的重点 (孙继松等, 2014), 尤其在强降水过程中, 低层抬升条件的维持是其必要条件之一, 将径向速度产品与双偏振雷达产品中 CC 结合分析, 可直观地看到强上升运动区。Kumjian 等 (2008) 等认为, 低层 CC 的减小与强上升气流将雨滴带入高层造成低层水凝物的缺乏相关, 另外上升气流中会卷入近地层的昆虫、尘土颗粒等, 与降水粒子混合在一起, 会导致上升气流对应的低层位置产生低的 CC 区域。CC 低值区与强上升气流有关, 与 $Z_{dr}$ 柱的不同在于其在低层就会出现, 因此通过低仰角 CC 低值区的识别可以判断强单体的入流区所在位置 (Ryzhkov et al., 2005; 林文等, 2020)。

“8.31”强降水过程的雷达径向速度图 (图 7) 显示, 21:05 雷暴单体的东南侧有大面积负径向速度 (图 7a) 的梯度区与东南急流区相对应, 同时该处的 CC (图 7b) 中心值降至 90% 以下, 基本反射率因子 (图 5a) 中对应弱回波区, 预示该处上升气流在增强, 沿着雷暴移动方向从 21:00—22:30 有多个观测站都出现了超过 50 mm·h$^{-1}$ 的短时强降水, 且本文关注的最强的短时强降水站点始终在 CC 低值区 (雷达基本反射率的弱回波区) (图 7b、c) 的西侧边缘, 最强上升区附近。

“9.10”大冰雹过程低层的西南风速较小, 没有达

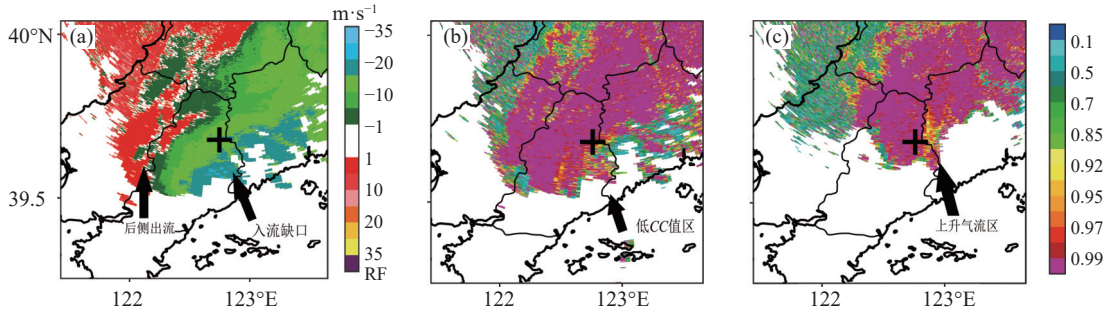



图 7 营口雷达 2020 年 8 月 31 日 21:05 0.5°仰角径向速度 (a) 以及 21:13 (b) 和 22:00 (c) 相关系数 CC

Fig. 7 (a) Radial velocity at 21:05 BT and CC at (b) 21:13 BT and (c) 22:00 BT of Yingkou Radar at 0.5° elevation on 31 August 2020

到急流强度, 对流单体初生于西南和偏南风汇合处 (图 2b), 近地面露点锋区附近, 局地性强。雷暴单体在发展阶段以降水为主, 雷暴主体 CC 接近 1。20:53, 雷暴单体的西侧尾部出现入流缺口, 但 CC 梯度区不显著, 6 min 后下一个体扫入流缺口处 CC 降至 90% 左右 (图 8), CC 梯度增大, 形态呈钩状, 气流成气旋式旋转, 雷暴单体在强烈的发展中。下一个体扫开始从 21:05 一直到 21:28 雷暴主体的 CC 一直维持在 90%~94%, 说明在雷暴单体的低层粒子相态呈不均匀的冰水混合分布。

### 4.2 垂直风切变的作用

Kumjian 等 (2008) 研究指出, 在对流风暴的中层, $Z_{dr}$ 中常会有环形或半环形结构, 其出现的高度往往在融化层附近, 完整或部分环绕在上升气流周边, 这是由于强烈的动力抬升作用会使上升气流具有正的温度扰动, 冰相粒子沿着上升气流周边下落, 部分或完全融化, 使得上升气流周围出现 $Z_{dr}$ 的增大现象。

“8.31”强降水过程, 21:13, 在营口站雷达 1.5°仰角观测到大于 3 dB 区域构成的 $Z_{dr}$ 环 (图 9a), 其位置在强降水中心附近区域的下游; 而从大连站 20:00 的探空 (图 3a) 可见, 0 ℃ 高度在 4.8 km, 沿入流方向 (偏南风) 对 $Z_{dr}$ 环作垂直剖面 (图 9b), 可见 $Z_{dr}$ 环在 4~5 km 左右的高度; 对应径向速度图中 (图 9c), $Z_{dr}$ 环的中心是自下而上的负速度最大区, 且在对流层高层 6~8 km 高度出现了速度模糊。从地面风场看, $Z_{dr}$ 环所环绕的区域地面风场呈气旋式旋转, 低层辐合抬升显著, 自上而下的一致的抬升条件配合弱的垂直风切变利于出现短时强降水 (图略)。

“9.10”大冰雹过程中, 在 6.1 °仰角的 CC 中同样可见环形结构 (图 10a), 高度约为 5 km, 与 0 ℃ 层高度相当, 对应基本反射率的钩状回波处, 低层 CC 值较周围显著减小, 形成 CC 谷 (CC<0.85) (Snyder et al., 2015)。沿 500 hPa 风向对 CC 谷作垂直剖面 (图 10b、c、d), 与强降水过程相似, 环状结构表现为柱状的 CC 低值区, 高度从 3.5 km 到 6 km, 与强上升区域导致的冰相粒子融化区相对应, 在径向速度图中表现与强降水过程相似, 中层 (3—6 km) 为负速度大值区, 并出现了速度模糊, 高层 (6 km 以上) 为正速度辐散区, 由低层到高层径向速度由负值转为正值, 这与探空站中的风向由西南转为西北的风向切变相对应 (图 3b)。这样的垂直风切变对风暴的组织和发展起到重要作用, 使得对流得以较长时间地维持和发展。

### 4.3 雷暴的动力强迫机制

Kumjian 等 (2008) 与 Giangrande 等 (2016) 研究指出, 径向速度随高度的系统性变化(如顺转或逆转)可反映水平风场的垂直结构, 进而用于识别低层

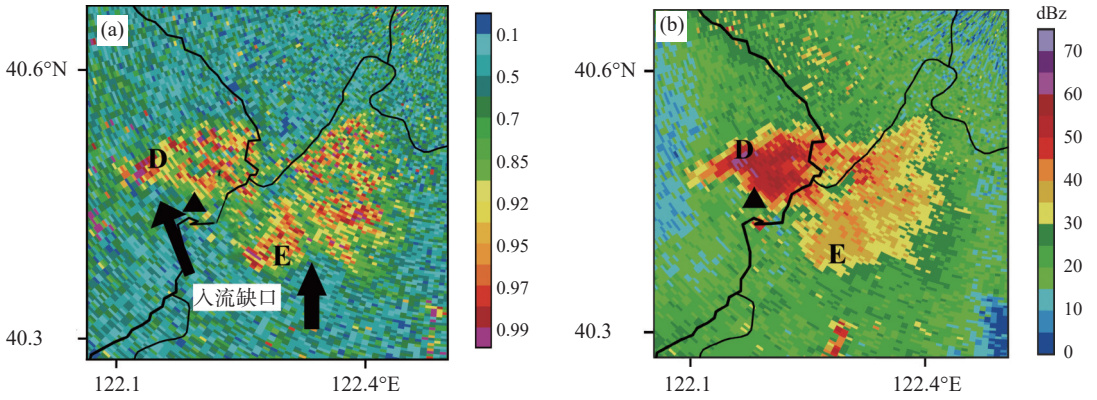



图 8 营口雷达 2021 年 9 月 10 日 21:05 的 0.5°仰角 CC (a) 和基本反射率因子 (b)

Fig. 8 The (a) CC and (b) base reflectivity of Yingkou Radar at 0.5° elevation at 21:05 BT on 10 September 2021

暖平流或高层冷平流的强迫机制。此外, 偏振参数如 $Z_{dr}$ 柱、CC 谷与 $Z_{dr}$ 环的空间分布变化, 也可作为平流强迫的间接指示因子。因此, 结合雷达径向速度剖面与偏振参量演变, 对两次强对流过程中的冷

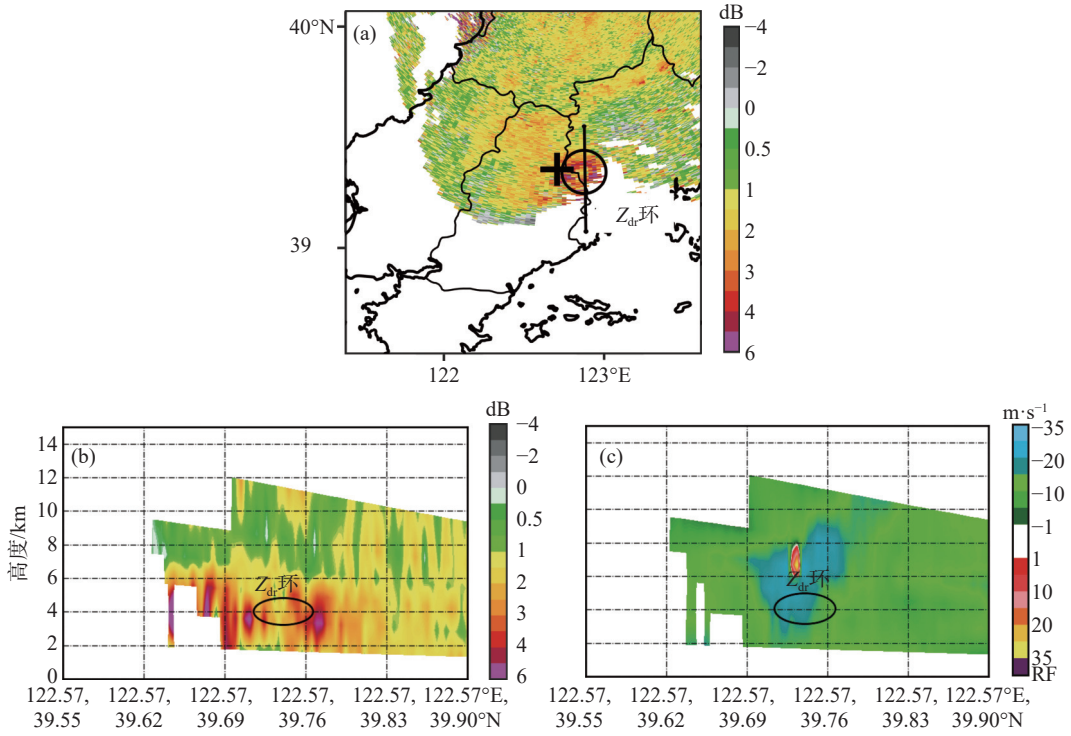



图 9 2020 年 8 月 31 日 21:13 营口站雷达 1.5 °仰角 $Z_{dr}$ (a) 以及沿图 a 中黑色直线的 $Z_{dr}$ (b) 和径向速度 (c) 剖面图

Fig. 9 The (a) $Z_{dr}$ at 0.5° elevation at 21:13 BT, (b) vertical cross-section of $Z_{dr}$ and (c) radial velocity along the black line in Fig. 9a of Yingkou Radar at 21:13 BT on 31 August 2020

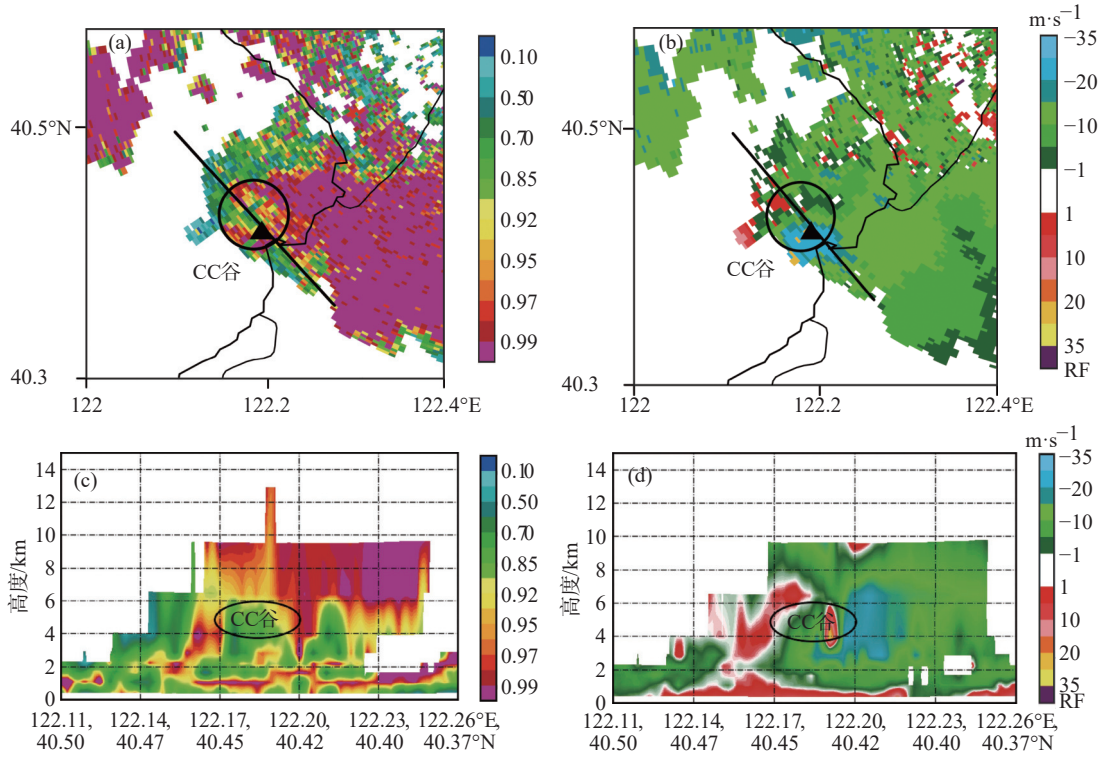



图 10 2021 年 9 月 10 日 20:59 营口雷达 6.1°仰角 CC (a) 和径向速度图 (b) 以及沿图中 a 黑色直线的 CC (c) 和径向速度 (d) 剖面图 (图中“▲”为大冰雹出现的位置)

Fig. 10 The (a) CC and (b) radial velocity, vertical cross-section of (c) CC and (d) radial velocity along the black line in Fig. 10a of Yingkou Radar at 6.1° elevation at 20:59 BT on 10 September 2021 (The “▲” is the location of large hail)

暖平流特征进行了分析。

4.3.1 低层暖平流强迫

在东北和华北地区低空暖平流强迫引发的强对流常常发生在盛夏季节，层结不稳定的发展主要与低空强盛的暖湿平流有关，而在 500 hPa 高度上的冷平流相对较弱 (孙继松等, 2014; 谌芸等, 2019)。“8.31”强降水过程发生在 850 hPa 偏南风急流前端近地面层的东南风急流前端的辐合区和台风“美莎克”外围湿度锋区附近，会形成强烈的上升运动，基本反射率在垂直方向的发展和 $Z_{dr}$ 柱可以很好展示出雷暴前侧上升气流的发展过程。$Z_{dr}$ 柱往往位于回波悬垂的有界弱回波区中，与基本反射率因子大值区位置相接近 (Dawson et al., 2014)。

“8.31”强降水过程，追踪雷暴单体的垂直结构的演变，在降水逐渐增强的 19:00，雷暴单体的初生期，没有明显的 $Z_{dr}$ 柱；随着雷暴的发展，基本反射率大于 50 dBz 在垂直方向伸展到 8 km 高度 (图 11a)，在其前部对应的 $Z_{dr}$ 柱开始形成；20:44，$Z_{dr}$ 大值区发展到 6 km (图 11c)，此时降水强度达到 50 mm·h$^{-1}$，其后 $Z_{dr}$ 柱高度一直维持在较高的状态。Picca 等 (2012) 指出通常雷暴上升气流增强 10~15 min 后地面降水强度或降雹强度出现增加，因此至 21:00 左右，随着近地面层东南风风速和急流宽度的增加 (图略)，大连普兰店出现最强降水，从 21:13 雷达基本反射率可见大值区显著加大，并出现回波悬垂 (图 11b)，回波悬垂的下部发展出多个高度不一的 $Z_{dr}$ 柱 (图 11d)，上升运动的范围加大，此时雷暴已经发展到成熟阶段 (俞小鼎等, 2020)。23:00，$Z_{dr}$ 柱高度逐渐回落，降水强度随之减弱。

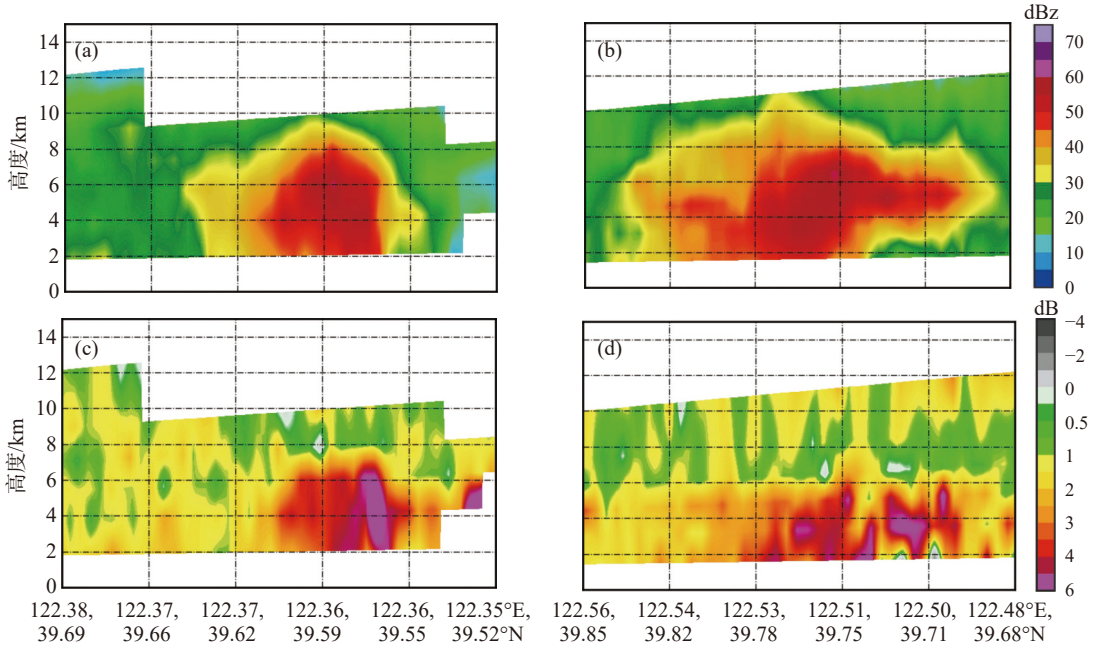



图 11 2020 年 8 月 31 日 20:44 (a、c) 和 21:13 (b、d) 雷暴单体的雷达基本反射率 (a、b) 和沿雷暴移动方向 (同图 5a) 的 $Z_{dr}$ 剖面 (c、d)

Fig. 11 Vertical cross-sections of (a, b) base reflectivity and (c, d) $Z_{dr}$ of the thunderstorm along the direction of the thunderstorm movement (as shown in Fig. 5a) at (a, c) 20:44 BT, (b, d) 21:13 BT on 31 August 2020

4.3.2 高空冷平流强迫

高空冷平流强迫类强对流天气是东北地区最主要的一类形式，主要天气现象表现为冰雹、雷雨大风、短时强降水等，其多发生在500 hPa 高空 (对流层中高层) 西北气流或冷涡背景下，其产生的主要机制是垂直方向上温度差动平流形成的热力不稳定和强风垂直切变形成的动力不稳定，其实高空强干冷平流起着主导作用。翟丽萍等 (2019) 研究表明，中层径向辐合的加强有利于雷暴单体旋转性加大，直径减小，厚度增加，沿“9.10”大冰雹过程中的雷暴单体的移动方向 (西北—东南) 作径向速度垂直剖面，发现在雷暴发展的前期，20:59 (图 12a)，中层径向辐合速度对影响范围不大，正负速度差值为 33 m·s$^{-1}$，从探空观测数据 (图 3b)分析该高度为 20 m·s$^{-1}$ 的西北风；21:05 (图 12b)，中层 6 km 的正速度极值增加到 18 m·s$^{-1}$，正速度强于负速度，这是因为该雷暴以一定速度在槽后西北偏西气流引导下向着东南偏东方向移动。干冷气流卷入加强了下沉气流的作用，径向辐合明显加强，辐合垂直结构随偏西风向东倾斜，随着雷暴发展 (图 12c、d)，中层的正速度值逐渐减小，而 2—4 km 高度低层的负速度值显著增加，并出现速度模糊，低层暖湿入流加强。径向辐合向下

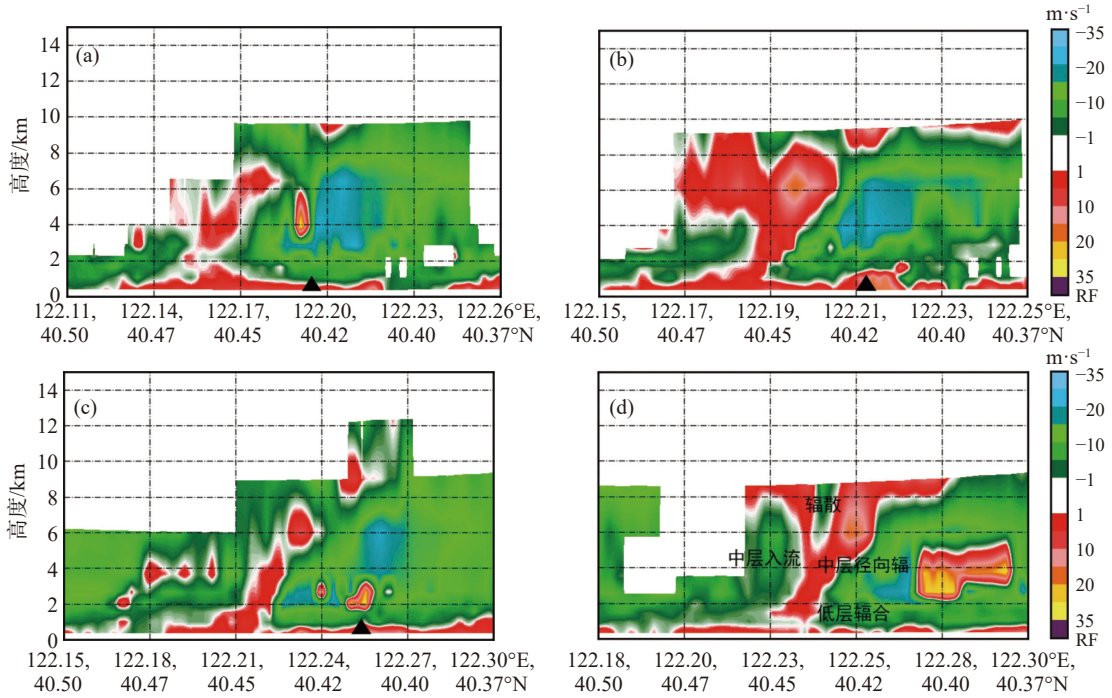



图 12 2021 年 9 月 10 日 20:59 (a)、21:05 (b)、21:11 (c) 和 21:17 (d) 沿雷暴移动方向 (西北—东南) 的径向速度剖面

Fig. 12 Vertical cross-sections of radial velocity of thunderstorm along the direction of the thunderstorm movement (from northwest to southeast) at (a) 20:59 BT, (b) 21:05 BT, (c) 21:11 BT and (d) 21:17 BT on 10 September 2021

扩展, 厚度增加, 直径较小, 能量更集中在辐合区域, 冰雹出现的位置始终与最大的负径向速度区重合。

### 4.4 两次过程强对流雷暴单体结构特征

短临预报中, 针对不同类型的强对流天气进行监测、预警、预报的主要工作难点之一在于对强对流系统的结构异同了解有限, 从而影响对系统的快速诊断、识别能力。沿图 13 的蓝色实线对雷暴作垂直剖面, 并将上升和下沉气流、$Z$、$Z_{dr}$ 环、CC 谷等叠加在雷暴的径向速度剖面图中, 得到两次过程的雷暴单体和对流天气的径向速度水平和垂直分布图 (图 14)。由“8.31”强降水过程天气系统水平分布 (图 13a) 可见, 深绿色是雷暴单体经过的区域, 为主要降水区, 降水量均达到了暴雨以上, 入流方向与雷暴移动方向垂直; 由图 14a 可见, $Z$ 的强回波区位于径向速度大值区的下游与其相邻, $Z_{dr}$ 环围绕着最强速度柱-速度辐合区位于它们的下方, 与 $Z$ 的弱回波区一致。“9.10”大冰雹过程移动方向为低层引导气流的右侧, 由图 14b 可见两处显著的辐合区, 一处与“8.31”强降水过程类似的强速度辐合区, 另一处是有低层气旋式旋转的辐合区, 基本反射率的高值区位于两个辐

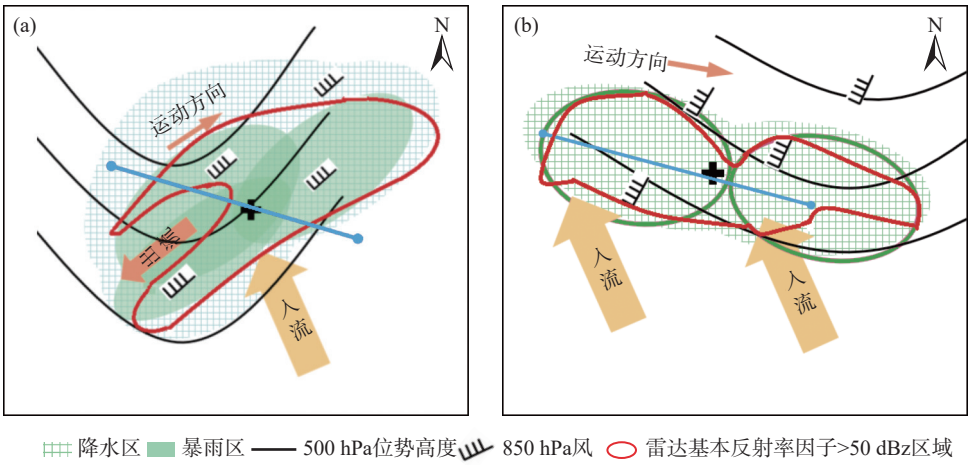



图 13 “8.31”强降水 (a) 和“9.10”大冰雹过程 (b) 高空天气形势与基本反射率因子>50 dBz 叠加的水平分布示意图

Fig. 13 The (a) "8.31" heavy rain and (b) "9.10" heavy hail process horizontal distribution schematic of high-altitude weather system superimposed with radar basic reflectivity >50 dBz

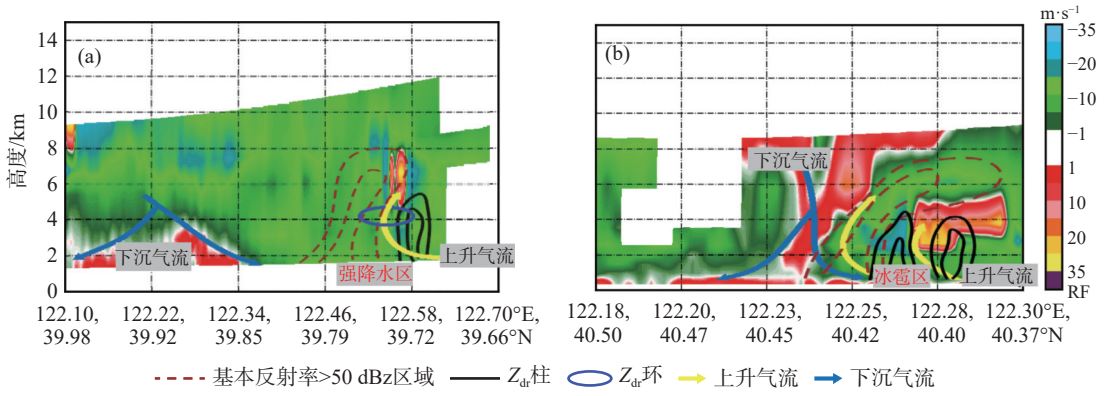



图 14 “8.31”强降水过程 (a) 和“9.10”大冰雹过程 (b) 沿图 13 蓝色直线所作的雷达偏振参量垂直分布图 (填色为径向速度)

Fig. 14 Vertical distribution maps of radar polarization parameters along the blue line in Fig. 13 for (a) "8.31" heavy rain and (b) "9.10" heavy hail process (color filling represents base velocity)

合区之间, $Z_{dr}$ 柱位于 $Z$ 的弱回波区及 CC 谷之间, 两处辐合区均观测到冰雹的产生, 尤其是速度辐合区观测有直径为 5 cm 的大冰雹, 从落地的冰雹可以清晰地看到有多层冰层包裹, 这是由于上游的径向辐合区受西北风影响向下游输送小的雹胚, 两处辐合区前侧都存在入流缺口, 对应强上升运动区, 在两处强烈的上升气流作用 ($Z_{dr}$ 柱) 下, 使得小冰晶不断在生长区上下运动, 与过冷水滴、冰晶碰并形成了大冰雹。另外中层径向辐合出现后, 地面出现了 8~10 级的阵风。两个强对流天气与弱回波区、基本反射率的高值区、$Z_{dr}$ 柱、中层径向辐合、速度辐合区、$Z_{dr}$ 环、CC 谷存在较好的对应关系, 故在短时临近预报中, 找到这些关键因子更易分析出强对流的落区。

## 5 结　论

本文选取东北冷涡背景下辽宁“8.31”强降水过程和“9.10”大冰雹过程的雷达参量进行对比分析, 并比较两类强对流天气风暴的发展演变和微物理结构的异同。得到以下主要结论:

(1) “8.31”强降水过程出现在冷涡发展阶段东南象限, 层结不稳定发展主要与低空强盛的暖湿平流有关; “9.10”大冰雹过程出现在冷涡成熟阶段西南象限, 冷涡后偏北气流携带高纬度地区的强干冷空气向南侵入, 高空的干冷平流是造成层结不稳定增长的主要因子。

(2) “8.31”强降水过程低层暖湿强迫的发展与基本反射率在垂直方向上的发展和 $Z_{dr}$ 柱的高度变化有很好的对应关系; “9.10”大冰雹过程中高空冷平流强迫先于低层发展起来, 干冷平流的卷入加强了下沉运动, 使得对流层中层径向辐合加强并向下发展, 随后低层的径向辐合加强, 与上升运动 (径向速度柱) 共同作用, 使得小冰晶不断在生长区上下运动, 与过冷水滴、冰晶碰并形成了大冰雹。

(3) 在雷暴的触发与发展过程中, 两次强对流天气发展前期均伴随低 CC 梯度区和径向速度大值区等低层入流特征, 而发展的最强阶段中层辐合区则出现了表征最强上升运动的 $Z_{dr}$ 柱、CC 谷和 $Z_{dr}$ 环等结构。强降水出现位置与 $Z_{dr}$ 柱和中层最大的径向速度区相邻; 而大冰雹出现在中层最大的径向速度区, 与 $Z_{dr}$ 环和 CC 谷的位置重合, $Z_{dr}$ 柱位于基本反射率弱回波下部及 CC 谷之间。

本文选取冷涡背景下的不同类型的强对流天气进行雷达特征对比研究, 旨在厘清冷涡不同象限触发的雷暴结构差异如何通过雷达可识别的中尺度特征影响强对流的发生发展, 为冷涡影响区域的强对流天气预报提供更有针对性的指导。但不同地区、不同季节的冷涡特征可能存在差异, 难以建立统一的模型和标准, 未来还需要加强对短时强降水和冰雹天气成因和预报预警技术的研究。

## 参考文献 (References):

湛芸,陈涛,汪玲瑶,等.2019.中国暖区暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,38(5):483−493. Chen Y, Chen T, Wang L Y, et al. 2019. A review of the warm-sector rainstorms in China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):483−493 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2019.05.010

陈力强,张立祥,周晓珊.2008.东北冷涡不稳定能量分布特征及其与降水落区的关系[J].高原气象,27(2):339−348. Chen L Q, Zhang L X, Zhou X S. 2008. Characteristic of unstable energy distribution in cold vortex over Northeastern China and its relation to precipitation area [J]. Plateau Meteorology,27(2):339−348 (in Chinese)

陈龙,唐明晖,唐佳,等.2023.湘东北一次降雹超级单体过程的双偏振雷达回波特征[J].暴雨灾害,42(2):211−222. Chen L, Tang M H, Tang J, et al. 2023. Dual-polarization radar echo characteristics of a hail supercell event in northeastern Hunan [J]. Torrential Rain and Disas-

ters,42(2):211−222 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2021−235

段祥海,谌芸,朱克云.2019.一次冷涡减弱阶段产生的飑线过程分析[J].成都信息工程大学学报,34(5):512−524. Duan X H, Chen Y, Zhu K Y. 2019. Analysis of a squall line occurred with a subdued cold vortex [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 34(5):512−524 (in Chinese). doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2019.05.013

胡鹏宇,陈传雷,林海峰,等.2021.东北冷涡强度定义及特征分析[J].气象与环境学报,37(6):100−105. Hu P Y, Chen C L, Lin H F, et al. 2021. Definition and characteristics analysis of the intensity of Northeast cold vortex [J]. Journal of Meteorology and Environment,37(6): 100−105 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2021.06.013

林文,张深寿,罗昌荣,等.2020.不同强度强对流云系 S 波段双偏振雷达观测分析[J].气象,46(1):63−72. Lin W, Zhang S S, Luo C R, et al. 2020. Observational analysis of different intensity sever convective clouds by S band dual polarization radar [J]. Meteorological Monthly, 46(1):63−72 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.01.006

潘佳文,蒋璐璐,魏鸣,等.2020.一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析[J].气象学报,78(1):86−100. Pan J W, Jiang L L, Wei M, et al. 2020. Analysis of a high precipitation supercell based on dual polarization radar observations [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(1):86−100 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.001

翟丽萍,农孟松,梁维亮,等.2019.造成临桂极端大风的超级风暴单体观测分析[J].暴雨灾害,38(4):346−353. Zhai L P, Nong M S, Liang W L, et al. 2019. Analysis of the observations for a supercell causing extreme gale in Lingui [J]. Torrential Rain and Disasters,38(4): 346−353 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.04.007

施娟,陈翼,刘立兵,等.2025.基于 X 波段相控阵双偏振雷达的短时强降水分析[J].高原山地气象研究,45(1):105−112. Shi J, Chen Y, Liu L B, et al. 2025. Analysis of short-term heavy precipitation process based on X-band phased array dual-polarization radar [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,45(1):105−112. doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2025.01.012

孙继松,戴建华,何立富,等.2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法[M].北京:气象出版社:44-48. Sun J S, Dai J H, He L F, et al. 2014. Basic principles and technical methods of severe convection weather forecasting [M]. Beijing:Meteorological Press:44-48 (in Chinese)

孙炜文,王璇,肖潇.2022.江西一次冰雹过程的 S 波段双偏振雷达回波特征分析[J].暴雨灾害,41(6):621−630. Sun W W, Wang X, Xiao X. 2022. Analysis on characteristics of S-band dual-polarization radar echo of a hail event in Jiangxi Province [J]. Torrential Rain and Disasters,41(6):621−630 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2020−242

王冠,郑石,侯畅,等.2023.一次东北冷涡天气过程双偏振雷达降水粒子相态识别[J].沙漠与绿洲气象,17(4):45−52. Wang G, Zheng S, Hou C, et al. 2023. Hydrometeors classification by dual-polarization radar in cold vortex weather process in Northeastern China [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(4):45−52 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.04.007

王磊,谌芸,张仙,等.2013.冷涡背景下 MCS 的统计分析[J].气象,39(11): 1385−1392. Wang L, Chen Y, Zhang X, et al. 2013. Statistical analysis of mesoscale convective system in the context of cold vortex [J]. Meteorological Monthly,39(11):1385−1392 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2013.11.001

杨磊,郑永光,袁子鹏,等.2023. 2019 年 8 月 16 日沈阳极端降水事件的低空 γ 中尺度涡旋观测特征和机理分析[J].气象学报,81(1):19−39. Yang L, Zheng Y G, Yuan Z P, et al. 2023. The low-level meso-γ-scale vortices during the extreme rainfall in Shenyang on 16 August 2019: Formation, merging, and rain-producing mechanisms [J]. Acta meteorologica Sinica,81(1):19−39 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20220023

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:167-186. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2020. Nowcasting of Thunderstorms and Severe Convection [M]. Beijing:Meteorological Press:167-186 (in Chinese)

袁潮,李得勤,杨磊,等.2022.冷涡背景下一次微型超级单体龙卷的雷达特征和物理过程探究[J].气象学报,80(6):878−895. Yuan C, Li D Q, Yang L, et al. 2022. A case study on the radar characteristics and physical process involved in the genesis of a mini supercell tornado under the background of cold vortex [J]. Acta Meteorologica Sinica,80(6):878−895 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2022.063

Aydin K, Singh J. 2004. Cloud ice crystal classification using a 95 GHz polarimetric radar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 21(11):1679−1688. doi:10.1175/JTECH1671.1

Dawson II D T, Mansell E R, Jung Y, et al. 2014. Low-level ZDR signatures in supercell forward flanks: The role of size sorting and melting of hail [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,71(1):276−299. doi:10.1175/JAS−D−13−0118.1

Giangrande S E, Toto T, Bansemer A, et al. 2016. Insights into riming and aggregation processes as revealed by aircraft radar and disdrometer observations for a 27 April 2011 widespread precipitation event [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,121(10):5846−5863. doi:10.1002/2015JD024537

Kumjian M R, Ryzhkov A V. 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,47(7):1940−1961. doi:10.1175/2007JAMC1874.1

Picca J, Ryzhkov A. 2012. A dual-wavelength polarmetric analysis of the 16 May 2010 Oklahoma city extreme hailstorm [J]. Monthly Weather Review,140(4):1385−1403. doi:10.1175/MWR−D−11−00112.1

Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al. 2005. The joint polarization experiment: polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 86(6):809−824. doi:10.1175/BAMS−86−6−809

Snyder J C, Ryzhkov A V, Kumjian M R, et al. 2015. A $Z_{dr}$ column detection algorithm to examine convective storm updraft [J]. Weather Forecasting,30(6):1819−1844. doi:10.1175/WAF−D−15−0068.1

Zhang C, Zhang Q, Wang Y. 2008. Climatology of warm season cold vortices in East Asia: 1979-2005 [J]. Meteorology and Atmospheric Physics,100(1-4):291−301. doi:10.1007/s00703−008−0310−y

(责任编辑　唐国瑛)