

龚佃利,朱君鉴,林曲凤,等,2024.一次超级单体引发的秋季特大冰雹和龙卷雷达探测分析[J].气象,50(5):561-576. Gong D L,Zhu J J,Lin Q F,et al,2024. Radar observation analysis of severe hailstorm and tornado caused by a supercell in autumn[J]. Meteor Mon,50(5):561-576(in Chinese).

一次超级单体引发的秋季特大冰雹和 龙卷雷达探测分析^{*}

龚佃利^{1,2} 朱君鉴³ 林曲凤⁴ 郭 建²

1 山东省气象防灾减灾重点实验室,济南 250031

2 山东省人民政府人工影响天气办公室,济南 250031

3 山东省气象台,济南 250031

4 山东省烟台市气象局,烟台 264003

提 要: 利用烟台 S 波段双偏振多普勒雷达和荣成 CINRAD/SA 新一代天气雷达探测数据,结合探空、地面气象观测、ERA5 再分析和冰雹、龙卷实地调查等资料,对 2021 年 10 月 1 日在山东半岛东部烟台、威海发生的特大冰雹和龙卷风暴的天气形势、环境参量和雷达探测特征进行分析。主要结果为:与气候平均场相比,造成本次强对流过程的 500 hPa 东北冷涡异常强盛,850 hPa 自华南到东北地区西部有持续偏南水汽输送;在此异常环流背景下,山东半岛东部具有上干下暖湿、强的 0~6 km 垂直风切变和对流有效位能等有利于强冰雹、龙卷发生的环境条件;近地面的风暴前低压、雷暴高压和冷池特征明显。降雹时的风暴呈现典型超级单体特征,低层具有明显的钩状回波和倒“V”字型前侧入流缺口,垂直剖面显示出明显的有界弱回波区、差分反射率柱(Z_{DR} 柱)特征;根据大冰雹落点和降雹开始时间等信息,统计对应雹云的反射率因子、 Z_{DR} 、相关系数(CC)的中位数分别为 48.7 dBz、0.89 dB 和 0.90;地面出现龙卷和大冰雹时,风暴顶辐散强度最大达到 $71.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。后侧阵风锋对应的出流边界北端的偏北气流与风暴前侧的偏南气流形成强涡旋上升运动,导致 EF1 级龙卷产生;龙卷发生在钩状回波的顶端,大冰雹多出现在入流缺口的北侧。地面发现龙卷发生前约 5 min,雷达探测到龙卷碎片特征, Z_{DR} 和 CC 分别最低至 -0.1 dB 和 0.81;龙卷发生前约 11 min,探测到风暴低层的 Z_{DR} 弧和风暴右侧的下沉反射率因子核特征;荣成、烟台雷达分别提前 22 min、5 min 识别出中气旋和龙卷涡旋,可为龙卷预警提供重要参考。基于观测分析,给出了本次超级单体风暴的低层流场及龙卷、大冰雹落区的示意图。

关键词: 超级单体,冰雹,龙卷涡旋(TVS),龙卷碎片(TDS),下沉反射率因子核(DRC)

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.110101

Radar Observation Analysis of Severe Hailstorm and Tornado Caused by a Supercell in Autumn

GONG Dianli^{1,2} ZHU Junjian³ LIN Qufeng⁴ GUO Jian²

1 Shandong Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Jinan 250031

2 Weather Modification Office of Shandong Province People's Government, Jinan 250031

3 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

4 Yantai Meteorological Office of Shandong Province, Yantai 264003

Abstract: Using observation data from Yantai S-band dual polarization Doppler weather radar, Rongcheng CINRAD/SA radar, radiosonde and surface meteorological stations, as well as the ERA5 (ECMWF reanalysis

^{*} 山东省自然科学基金项目(ZR2023MD004)、国家重点研发计划(2018YFC1507903)和山东省气象局重点课题(2021sdqzx09)共同资助

2023 年 1 月 14 日收稿; 2024 年 3 月 11 日收修定稿

第一作者:龚佃利,主要从事中尺度气象和人工影响天气研究. E-mail:sdgongdl@163.com

通讯作者:朱君鉴,主要从事雷达气象学研究. E-mail:2894380621@qq.com

data) and the hail, and tornado information obtained from field surveys, this article analyzes a severe hailstorm and tornado that occurred on 1 October 2021 in the eastern part of Shandong Peninsula. The results are as follows. Compared to the climatic mean field, the 500 hPa northeast cold vortex responsible for this severe convective process was extremely strong, and at 850 hPa there was continuous southward water vapor transport from South China to the west of Northeast China. Under the abnormal circulation background, the atmospheric thermal and dynamic conditions, such as dry and cold in the upper troposphere, but wet and warm in the low troposphere, with strong 0–6 km vertical wind shear and convective available potential energy (CAPE) on the eastern Shandong Peninsula, were very favorable for the occurrence of severe hailstorm and tornadoes. The features of pre-storm low pressure, thunderstorm high pressure, and cold pool were obvious near the surface. During the hail period, the supercell features were very typical, with distinct hook-shaped echo and inverted “V” anterior inflow gaps in the lower layers, and vertical profiles showed distinct bounded weak echo region (BWER) and differential reflectivity (Z_{DR}) column characteristics. According to the large hail location and starttime information, the median values of reflectivity factor (Z_H), Z_{DR} and correlation coefficient (CC) were 48.7 dBz, 0.89 dB and 0.90 respectively. When tornado and severe hail appeared on the ground, the maximum storm-top divergent outflow reached $71.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The cold pool airflow at the northern end of the rear flank gust front (RFGF) and the south inflow on the pre-storm side formed a strong vortex upward motion, resulting in an EF1-level tornado. The tornado occurred at the top of the hook-like echo, and large hailstones appeared on the north side of the inflow gap. About 5 min before the tornado, the radar detected the tornadic debris signature (TDS) features, with Z_{DR} being as low as -0.1 dB and CC as low as 0.81. About 11 min before the tornado genesis, the Z_{DR} arc in the lower layer and the descending reflectivity core (DRC) in the rear flank side of the supercell was detected. Rongcheng and Yantai radars identified mesoscale cyclones and tornadic vortex signature (TVS) about 22 min and 5 min in advance, respectively. This can provide an important reference for tornado warning. Based on the observation analysis, the schematic diagram of the low-layer air flow field and the tornado and large hail-falling area of the supercell storm is summarized.

Key words: supercell, hailstorm, tornadic vortex signature (TVS), tornadic debris signature (TDS), descending reflectivity core (DRC)

引 言

超级单体风暴引发的冰雹、龙卷可造成严重的经济财产损失甚至人员伤亡。超级单体总伴随着强烈的气流旋转和上升运动,深厚持久的中气旋为大冰雹、龙卷的形成提供重要的动力条件(吴芳芳等, 2013);据统计,大约 90% 直径大于 5 cm 的冰雹(Thompson et al, 2003)和大多数强龙卷(Doswell III, 2001)都与超级单体风暴有关。随着双偏振多普勒天气雷达在国内外的应用,对造成冰雹、龙卷的超级单体风暴的云体结构、双偏振雷达特征等的研究取得了新的进展(Kumjian, 2013; 俞小鼎和郑永光, 2020; 潘佳文等, 2020; 龚佃利等, 2021; 袁潮等, 2022),除观测到超级单体风暴常具有弱回波区或有

界弱回波区(BWER),风暴低层存在钩状回波和倒“V”型入流缺口(FIN)等特征外,还可分析出差分反射率柱(Z_{DR} 柱)、差分反射率弧(Z_{DR} 弧)、下沉反射率因子核(DRC)和龙卷碎片(TDS)等特征(刁秀广等, 2021; 黄先香等, 2019; 袁潮等, 2022),为判别风暴主上升气流区、大冰雹落区和龙卷预警提供了重要依据。

Witt and Nelson(1991)研究认为风暴顶的最大辐散强度(STD)与风暴内最大上升速度和最大冰雹尺寸呈正相关,给出产生大冰雹的 STD 阈值为 $38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Witt et al(2018)利用 S 波段双偏振雷达(WSR-88D)、X 波段快速扫描双偏振移动雷达(RaXPol)等的探测数据,研究了在美国俄克拉何马州产生最大直径为 16 cm 的巨大冰雹的风暴特征和演变过程,发现超级单体风暴顶 STD 达到 $158 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,超过 Blair et al(2011)统计的美国巨雹(直径大于

10.2 cm)的 STD 中位数($72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的一倍多;该研究还发现巨雹发生在低层反射率因子为 40~50 dBz、上升气流的东北和西南方向,距离上升气流中心 6~10 km 的风暴边缘区域。Kumjian et al (2020)通过对 2018 年 2 月 8 日阿根廷科尔多瓦省卡洛斯帕斯镇巨大冰雹(最大直径达到 18 cm)过程的调查研究,对产生巨大冰雹的环境条件和风暴特征进行了分析,并探讨了如何预测和探测这种极端事件。

龙卷可分为中气旋龙卷(超级单体龙卷)和非中气旋龙卷(非超级单体龙卷)(郑永光等,2021)。中气旋龙卷产生在超级单体中气旋内部,通常中气旋先在中层(3~6 km)发展,然后向下延伸,当中气旋底距地高度小于 1 km 时,产生龙卷的可能性显著加大,发生概率约为 40%(Trapp et al,2005)。王秀明和俞小鼎(2019)分析海南一次致灾龙卷形成的物理过程,认为当龙卷初始涡旋与其上方深厚且强烈的上升气流叠置时,拉伸作用加强了垂直涡度,使得龙卷形成。Brown et al(1978)将伴随龙卷过程,多普勒雷达速度场上比中气旋尺度更小的涡旋称为龙卷式涡旋特征(TVS),雷达探测到 TVS 是做出龙卷临近预警的一个重要依据。

Kumjian and Ryzhkov(2008)通过对多个龙卷风暴的分析认为,右移超级单体风暴低层前侧下沉气流区(FFD)的右侧(通常是南侧)多出现 Z_{DR} 弧特征,其 Z_{DR} 值一般为 4~5 dB,厚度在 1~2 km。通过数值模拟论证了 Z_{DR} 弧的强度与低层风暴相对环境螺旋度呈正相关,出现 Z_{DR} 弧表明风暴内涡旋增强。文中对 2007 年 5 月 9 日俄克拉何马州西部一个超级单体龙卷过程的分析发现,风暴单体出现 Z_{DR} 弧之后 21 min 产生了 EF1 级龙卷,雷达探测到清晰的 TDS 特征,龙卷维持了 7 min。

山东半岛三面环海,秋季的半岛地区低层大气降温缓慢,水汽含量多于内陆。张丰启和刘庆泰(2001)对威海市 1960—1997 年的降雹资料分析表明,威海市降雹次数在春末夏初(5—6 月)和夏末秋初(9—10 月)存在明显的双峰分布。2021 年 10 月 1 日,山东半岛东部的烟台、威海遭受了罕见的特大冰雹袭击,并出现龙卷。本文基于地面气象站观测、ERA5 再分析、雷达观测等数据,结合冰雹、龙卷实地调查信息,对本次强对流过程发生的天气形势、环境参量和造成冰雹、龙卷灾害的超级单体风暴的发展演变过程、精细结构和雷达特征参量进行分析,以期加强对强冰雹、龙卷雷达特征的认识,为做好预报预警提供参考。

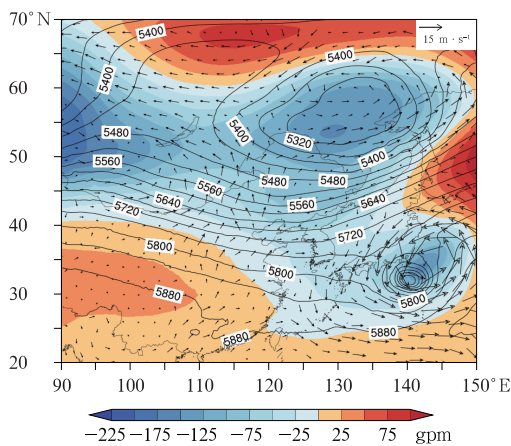
1 资料和方法

本研究分析的雷达资料来自烟台 CINRAD/SA 双偏振多普勒天气雷达和荣成 CINRAD/SA 新一代天气雷达(以下分别简称烟台雷达、荣成雷达),两部雷达相距 95.8 km。地面气象资料来自国家级气象观测站的分钟观测数据。高空气象分析使用荣成探空和 ERA5 再分析资料。冰雹、龙卷实况和灾情来源于冰雹观测志愿者通过“追雹者”微信小程序上传的数据、现场调查和气象部门“气象灾害管理系统”上报的数据。根据《冰雹等级》(全国气象防灾减灾标准化技术委员会,2011),将 $2 \text{ cm} \leq \text{直径} < 5 \text{ cm}$ 的冰雹定为大冰雹,将直径 $\geq 5 \text{ cm}$ 的冰雹定为特大冰雹。雷达分析软件主要采用北京敏视达雷达有限公司开发的 ROSE 版本雷达产品生成软件(RPG)、雷达产品终端软件(PUP)和中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室研发的“多型天气雷达显示分析平台”。

2 冰雹龙卷过程概况

2.1 天气形势和灾情实况

图 1 给出的是利用 ERA5 再分析资料($0.25^\circ \times$



注:气候态为 1991—2020 年 10 月 1 日。

图 1 2021 年 10 月 1 日 08:00 500 hPa 位势高度场(等值线,单位:gpm),以及当日 500 hPa 位势高度距平(填色)、850 hPa 风场距平(风矢)

Fig. 1 Geopotential height (contour, unit: gpm) at 500 hPa at 08:00 BT, and the anomalies of 500 hPa geopotential height (colored) and 850 hPa wind (wind vector) on 1 October 2021

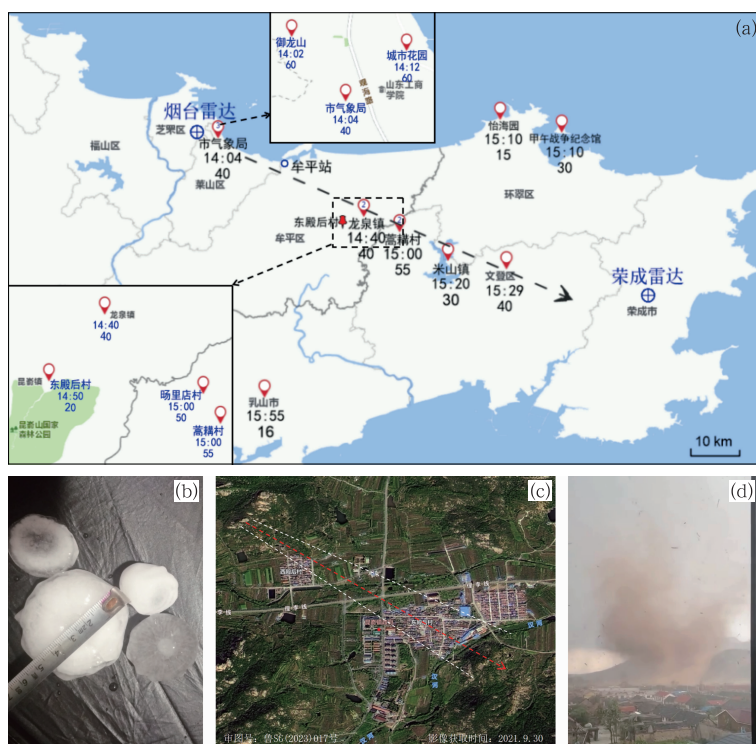
0.25°)绘制的 2021 年 10 月 1 日 08:00(北京时,下同)500 hPa 位势高度场,叠加了该日 500 hPa 位势高度距平、850 hPa 风场距平。

由图 1 可见,08:00 东北冷涡中心在 55°N、130°E 附近,相对于郑永光和宋敏敏(2021)统计的冷涡中心分布区域,处于偏东、偏北位置;冷涡中心的位势高度低于 5280 gpm,比该区域的气候平均值低 150 gpm 以上;冷涡横槽明显,反映出本次冷涡异常强盛。850 hPa 风场距平表现为从华南到东北地区西部均为偏南风,表明低层有持续的偏南暖湿气流向北输送。山东半岛低层为西南气流,日本近海受第 16 号台风蒲公英影响,而该台风对山东半岛没有影响。

分析实际风场可见,山东半岛 500 hPa 受西北气流控制,辽东半岛、渤海中部到山东北部一带在 850 hPa 上有东北风与西北风或西南风的切变。受

冷空气和低层切变线南压影响,10 月 1 日 14:00—17:00,烟台、威海市出现强对流天气,局地伴有强冰雹和雷雨大风,其中烟台市莱山区、牟平区和威海市文登区局地出现直径大于 50 mm 的特大冰雹,牟平区昆嵛山北部出现龙卷。图 2a 标绘了调查的冰雹信息和龙卷出现位置(东殿后村)。本次过程发生在秋季,正值苹果、葡萄和农作物收获期,冰雹对当地经济作物带来严重损失;另外,龙卷造成昆嵛山区的东殿后村、西殿后村多数房屋受损、电线杆折断。据不完全统计,风雹灾害直接损失超过 3 亿元,其中牟平区损失超过 1.5 亿元。在山东半岛秋季出现如此强的冰雹、龙卷实属罕见。

实地调查龙卷发生现场,查看西殿后村(位于东殿后村西北约 800 m)视频监控显示,1 日 14:45 地面刮起阵风,雨雹开始下落,14:50 风速加大,供电中断,判断此时为龙卷袭击西殿后村的时间。此后,



注:图 a 中,红圈为降雹点,红圈下依次为降雹地点、开始时间和最大冰雹直径(单位:mm);
图 c 中红色箭头是目击龙卷移动路径,2 条白虚线间为龙卷致灾范围;图 d 拍摄于昆嵛镇政府三楼。

图 2 2021 年 10 月 1 日山东半岛东部(a)冰雹落点报告,(b)烟台市黄海城市花园小区降雹照片,
(c)龙卷发生地卫星影像和(d)龙卷袭击东殿后村东南侧视频截图
Fig. 2 (a) Map of the hail location report (red circle), (b) the hail photo taken in Yellow Sea Garden
residential district in Yantai City, (c) satellite image of tornado affected the area,
(d) screenshot of video of the tornado hitting the southeast side of the Dongdianhou Village
in the east of Shandong Peninsula on 1 October 2021

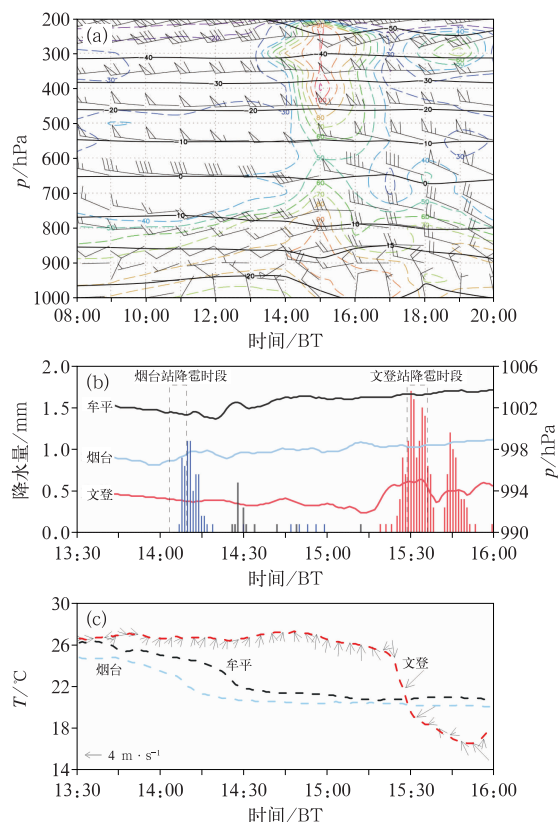
龙卷向东南方向移动穿过东殿后村后,移入村南部山区减弱消失(图 2c),调查可见的龙卷影响范围长度约 1800 m,最大宽度约 500 m,持续约 8 min。由龙卷视频截图可见(图 2d),龙卷卷起尘土、树枝叶和碎屑等,快速旋转散漫在天空,呈黄褐色。由于西殿后村西北、东殿后村东南为山区,龙卷准确的起始点和消亡点无法进一步确定。根据龙卷造成的灾害状况,估计龙卷强度达到 EF1 级。

2.2 环境条件和地面气象要素演变

根据 10 月 1 日 08:00 荣成探空资料,0℃层、-20℃层、-30℃层高度分别为 3.6、6.4 和 7.8 km,0℃湿球温度对应的融化层高度为 2.95 km;800 hPa 以下相对湿度介于 60%~83%,而 800 hPa 以上相对湿度低于 50%,呈现上干下湿的层结;850 hPa 与 500 hPa 温差(ΔT_{85})为 28.9℃,0~6 km 垂直风切变为 $30.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;14:00 山东半岛东部的地面露点温度为 19~21℃,由 ERA5 计算的 CAPE 为 1800~2000 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。上述环境参量与高晓梅等(2018)研究的鲁中地区 4—9 月特强冰雹大风的阈值(第 25%分位数)相比,除 0℃层和融化层高度低于阈值外,其他参量高于鲁中地区的阈值,其中 0~6 km 垂直风切变高出阈值 $18.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,属强深层垂直风切变。

图 3a 为由 ERA5 分析的文登区(37.25°N,122°E)大气温、湿、风的时间-高度演变。可见,1 日 08:00—14:00,文登区上空下层暖湿、中上层干冷,这与荣成 08:00 探空反映的大气层结状况一致,08:00—14:00 近地层有缓慢的增温、增湿过程。15:00 风暴影响文登区,低层出现降温,中低层风向由西南转西北。可见,中高层干冷空气入侵导致切变线南压,以及不稳定能量的累积,为维持超级单体的强盛发展提供了动力、热力条件。

图 3b,3c 给出了烟台、牟平、文登 3 个国家级气象站逐分钟气象要素演变。以文登站为例,风暴影响本站前,本站气压缓慢下降,并在降水前数分钟达到最低,而风暴影响本站时,气压快速增大,出现明显的雷暴高压特征,雷暴高压与风暴前低压的最大气压差为 3.2 hPa;同时风向急转,气温明显下降,1 日 15:20—15:50 气温下降 8.8℃,15:26 的 2 min 平均风速最大为 $10.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 3b 中标出了烟台站、文登站的降雹时段,烟台站降雹早于降水,而文登站在降水开始后 10 min 出现降雹,牟平站则未出现降雹。



注:图 b 中虚线框为降雹时段。

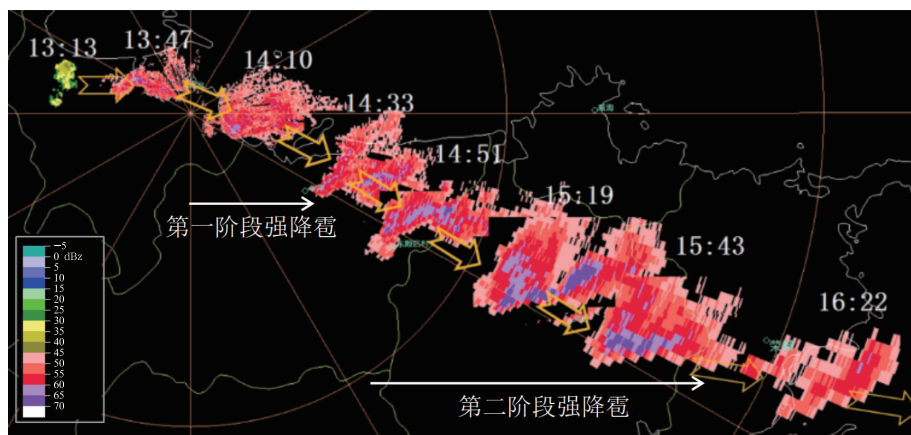
图 3 2021 年 10 月 1 日(a)08:00—20:00 文登 ERA5 分析气温(实线,单位:℃)、相对湿度(虚线,单位:%)和风(风羽)的时间-高度演变,(b,c)13:30—16:00 烟台、牟平、文登站观测逐分钟(b)气压(实线)、降水量(柱状)和(c)气温(虚线)及文登站 2 min 平均风(风矢)演变

Fig. 3 (a) Time-height evolution of temperature (solid line, unit: °C), relative humidity (dashed line, unit: %) and wind (barb) in Wendeng Station from 08:00 BT to 20:00 BT, (b) minutely pressure (solid line), and precipitation (histogram) observed by Yantai, Muping and Wendeng stations, (c) temperature (dashed line) observed by Yantai, Muping and Wendeng stations and the 2 min average wind (wind vector) at Wendeng Station from 13:30 BT to 16:00 BT 1 October 2021

3 超级单体风暴雷达特征分析

3.1 风暴移动路径

图 4 给出了造成烟台市莱山区、牟平区和威海市文登区冰雹、龙卷灾害的超级单体的反射率因子



注:13:13 为 19.5° 仰角 Z_H ,其他时次为 0.5° 仰角 Z_H 。

图 4 2021 年 10 月 1 日烟台雷达探测风暴反射率因子和移动路径

Fig. 4 Evolution of radar reflectivity and moving path of hailstorm observed by Yantai Radar on 1 October 2021

(Z_H)演变及风暴移动路径。由图可见,该风暴单体在初生、发展阶段向东移动;10月1日14:00—16:00 风暴发展为典型的右移超级单体,偏向承载层气流方向的右侧约 30° 向东南方向移动,地面出现降雹;16:22 之后,风暴减弱,移向又逐渐转向偏东方向。据目击者记录和现场调查确认(图 2a),该风暴于 14:00—14:20 在烟台市气象局附近出现强降雨雹,最大冰雹直径 60 mm,降雹持续 5~10 min,可视为第一时段强降雨雹;14:40—15:35 在牟平区东部和文登区西部出现强降雨雹,最大冰雹直径达 55 mm,持续时间最长(约 20 min),为第二时段强降雨雹。下文着重对该单体的雷达特征进行分析,图 2a 中显示的威海市环翠区北部、乳山市降雹是由另一个超级单体造成的,本文不作具体分析。

3.2 风暴单体初生和增强:第一时段强降雨雹

风暴单体初生时处于烟台雷达上空的静锥区,雷达无法探测到风暴中上层的情况,因此采用荣成雷达的产品进行分析。由图 5 可见,风暴单体于 10 月 1 日 13:13 在烟台市西部生成后快速发展,RPG 软件的风暴追踪算法于 13:24 开始识别编码;13:53 低层出现入流缺口(图 5a₁),大于 55 dBZ 的强反射率核发展到 8.3 km 以上(温度低于 -30°C),风暴前方出现悬垂回波和 BWER(图 5a₂),具有典型超级单体的特征;雷达径向速度(V)垂直剖面(图 5a₃)显示中低层存在风速辐合、高层有风速辐散。据观测报告,14:02—14:15 烟台市芝罘区和莱山区出现强烈降雹,最大冰雹直径大于 50 mm。在 14:05 的

Z_H 垂直剖面(图 5b₂)上可看到大于 55 dBZ 的强反射率核发展到 10 km 以上,8 km 高度出现大于 60 dBZ 的强核,悬垂回波很宽;而 14:17 剖面(图 5c₂)风暴高层 Z_H 大于 50 dBZ 的面积大幅减小,强反射率因子核降落到低层,表明大量冰雹下落,风暴强度减弱。14:20—14:40 降雹减弱,没有收到准确冰雹大小的报告。

3.3 风暴单体合并增强:第二时段强降雨雹

据目击者观测报告,10 月 1 日 14:55 后,威海市文登区西北部的杨里店村、蒿耩村先后出现特大冰雹(图 2a);文登区气象局于 15:29 开始降雹,冰雹最大直径达 40 mm,此为第二阶段的强降雨雹。图 6 清楚反映风暴合并加强过程及雷达特征。15:08(图 6a₁),已在昆嵛山出现龙卷的超级单体风暴(标记为 a)的移动前方有一新生单体 b,两者在低层分离,而在 5~10 km 高空,单体 b 与超级单体 a 的悬垂回波连接(图 6a₂),径向速度剖面(图 6a₃)显示单体 b 的低层有偏南入流,而高层有强的偏北出流,单体 a 后部中层有倾斜向下伸向风暴前侧的后侧急流,并与朝向雷达的径向风形成辐合。15:20,单体 a 强回波中心下降,单体 b 进一步加强(图 6b₂),单体 a 的径向速度剖面(图 6b₃)显示,3~7 km 高度的正负径向速度差值大于 $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,具有显著的中层径向辐合特征(俞小鼎等,2012),有利于对流风暴的加强。15:31 之后 2 个单体完成合并(图 6c₁, 6c₂),15:36(图略)2 个单体的强核结合到一起,风暴发展到最强。付丹红和郭学良(2007)通过数值模

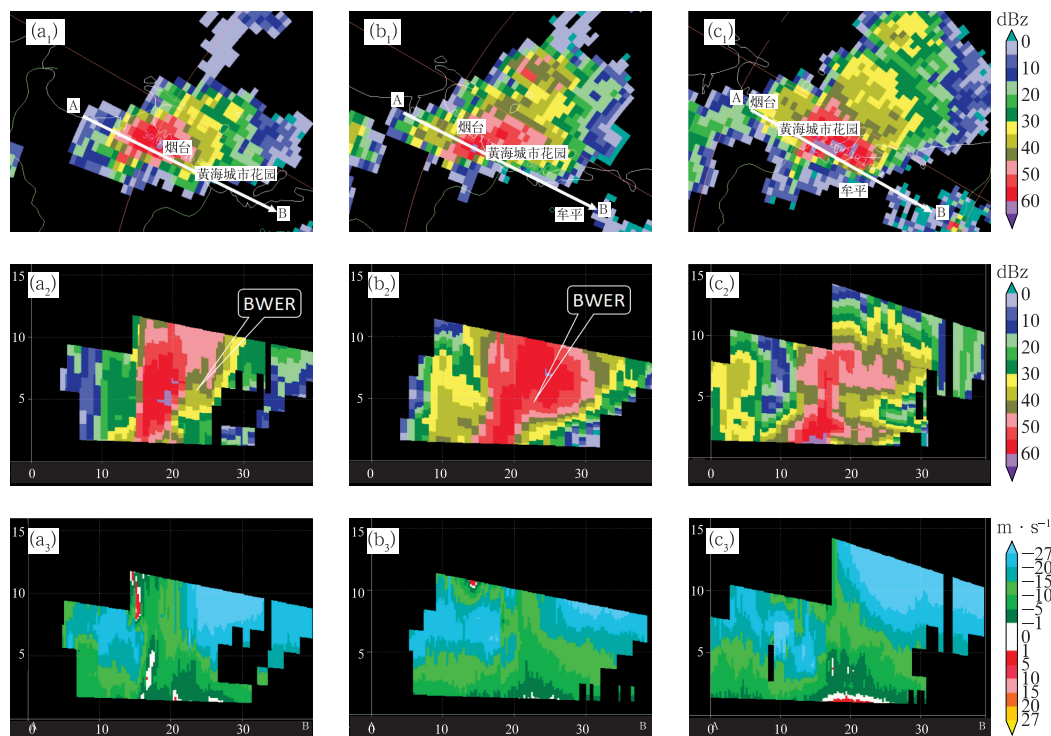


图5 2021年10月1日 (a_1, a_2, a_3) 13:53, (b_1, b_2, b_3) 14:05, (c_1, c_2, c_3) 14:17 荣成雷达 0.5° 仰角 (a_1, b_1, c_1) Z_H 演变,以及沿图5 $a_1, 5b_1, 5c_1$ 箭头线AB的 (a_2, b_2, c_2) Z_H 和 (a_3, b_3, c_3) V垂直剖面
Fig. 5 (a_1, b_1, c_1) Evaluation of Z_H , vertical cross-sections of (a_2, b_2, c_2) Z_H and (a_3, b_3, c_3) V along line AB in Figs. 5 $a_1, 5b_1, 5c_1$ at 0.5° elevation of Rongcheng Radar at (a_1, a_2, a_3) 13:53 BT, (b_1, b_2, b_3) 14:05 BT, (c_1, c_2, c_3) 14:17 BT 1 October 2021

拟表明,积云下沉气流对于积云并合有着重要作用,由强辐散出流形成的上升气流与环境风相互作用有利于并合的形成。对于2个单体的合并机制,有待于结合雷达风场反演和数值模拟作进一步研究。

3.4 风暴单体参量演变

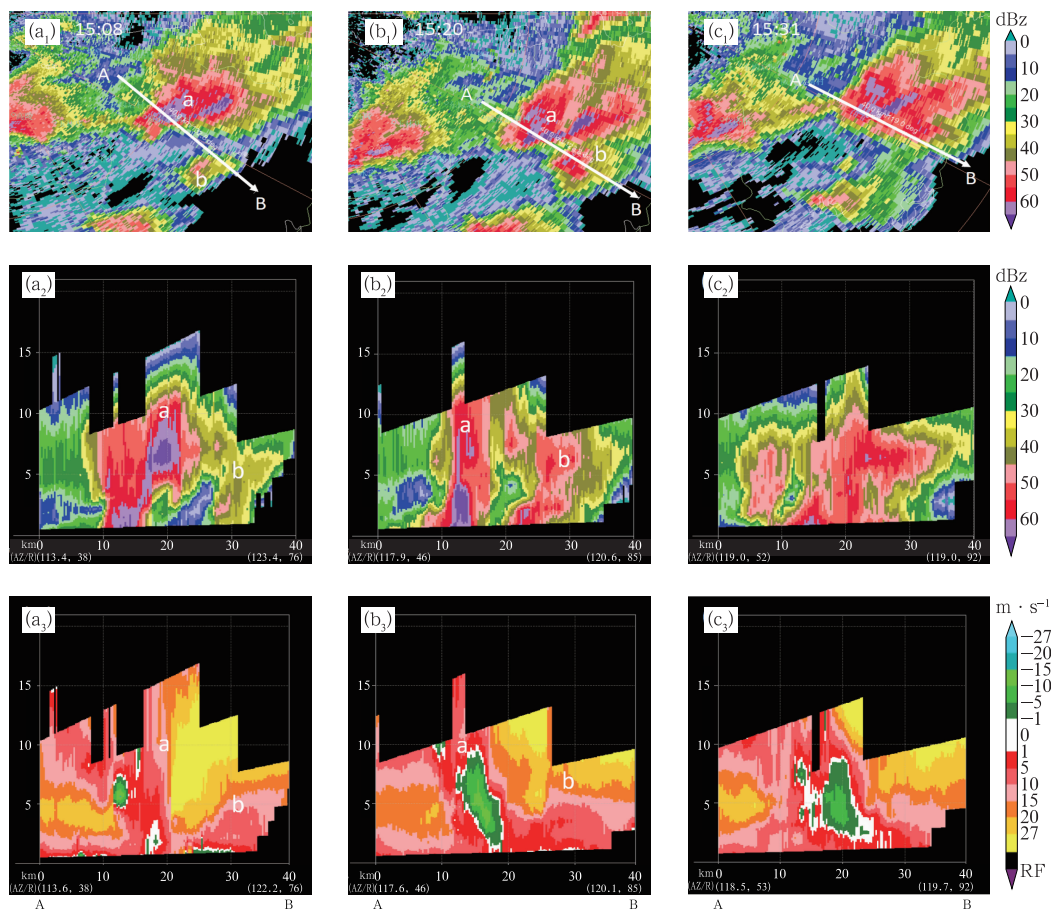
图7是荣成雷达的风暴趋势产品,由风暴顶和风暴底所在高度(Top-Base)可见,因雷达的扫描模式是VCP21,高仰角之间存在较大的间隔,因此风暴顶偏差较大;图7中还绘制了风暴最大反射率因子所在的高度、风暴质心高度、风暴单体的垂直累积液态水含量(VIL)和STD。STD由雷达探测的风暴顶的最大径向正速度减去最大负速度得到(10月1日14:39之后用烟台雷达探测数据计算)。13:24—13:41风暴顶高度由7.5 km增大到11.5 km, VIL则由 $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 增大到 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,表明风暴初生后迅速跃增;13:48后,最大反射率因子所在的高度快速下降,13:59—14:29降低到4 km以下,高度低于质心高度,对应烟台市区内冰雹的下泻。14:35风

暴再次增强,反射率因子最大值为63.5 dBZ,对应最大反射率因子高度再次上升到7 km,质心高度上升到6 km;此后14:47的最大反射率因子高度快速下降到最底层,这与发生龙卷出现TDS有关。STD在风暴跃增阶段也快速增大,降雹期间基本维持在 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,其中用14:51烟台雷达 14.6° 仰角径向速度计算的STD为 $71.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,正、负径向速度中心的间距仅有10 km,该STD数值接近Blair et al(2011)统计的美国出现巨雹时的STD中位数,说明本次风暴内的上升速度非常大,为大冰雹和龙卷的发生提供了持续、强大的上升运动条件。

通过以上分析可见,由于山东半岛陆地的露点温度偏高、CAPE数值更大,加之单体合并作用,第二阶段降雹的超级单体比第一阶段发展更强,造成的降雹范围、持续时间和灾害损失更大。

3.5 冰雹的双偏振参数特征

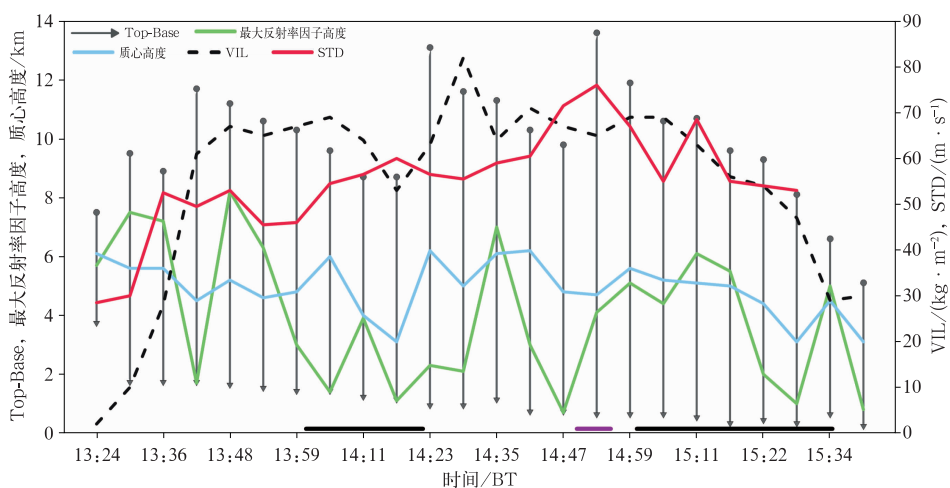
图8a是10月1日15:02烟台雷达 0.5° 仰角 Z_H 产品。此时风暴强中心距离烟台雷达约50 km,



注: a 和 b 为 2 个单体风暴。

图 6 2021 年 10 月 1 日 (a_1, a_2, a_3) 15:08, (b_1, b_2, b_3) 15:20, (c_1, c_2, c_3) 15:31 烟台雷达 0.5° 仰角 (a_1, b_1, c_1) Z_H 演变, 以及沿图 6 $a_1, 6b_1, 6c_1$ 箭头线 AB 的 (a_2, b_2, c_2) Z_H 和 (a_3, b_3, c_3) V 垂直剖面

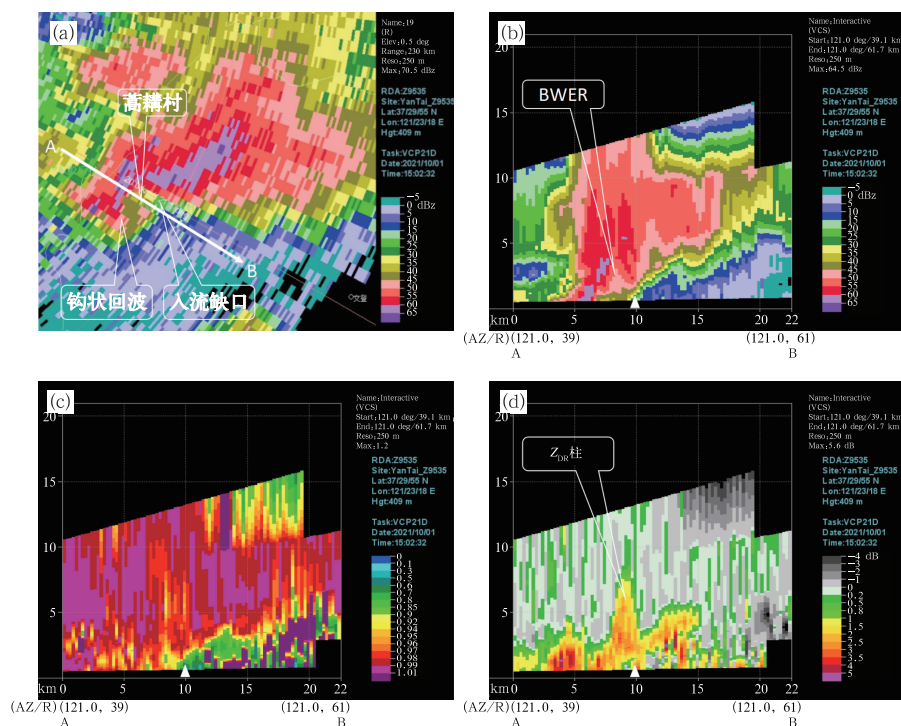
Fig. 6 (a_1, b_1, c_1) Evolution of Z_H , vertical cross-sections of (a_2, b_2, c_2) Z_H and (a_3, b_3, c_3) V along line AB in Figs. 6 $a_1, 6b_1, 6c_1$ at 0.5° elevation of Yantai Radar at (a_1, a_2, a_3) 15:08 BT, (b_1, b_2, b_3) 15:20 BT, (c_1, c_2, c_3) 15:31 BT 1 October 2021



注: 黑色竖线上、下端点分别为风暴顶和风暴底所在高度, 水平轴上方的黑色线段为主要降水时段, 紫色短线为目击龙卷发生时间。

图 7 2021 年 10 月 1 日 13:24—15:40 荣成雷达风暴趋势产品和 VIL 产品

Fig. 7 Products of storm trend and VIL at Rocheng Radar from 13:24 BT to 15:40 BT 1 October 2021



注:图 b~d 中白色三角表示蒿耨村位置。

图 8 2021 年 10 月 1 日 15:02 烟台雷达 0.5° 仰角 (a) Z_H , 以及沿图 8a 中箭头线 AB 的 (b) Z_H , (c) CC, (d) Z_{DR} 垂直剖面

Fig. 8 Products of (a) Z_H , vertical cross-sections of (b) Z_H , (c) CC and (d) Z_{DR} along line AB in Fig. 8a at 0.5° elevation of Yantai Radar at 15:02 BT 1 October 2021

其 0.5° 波束中心高度约 1 km; 可见, 风暴低层具有明显的钩状回波和倒“V”字型入流缺口, 呈现典型超级单体的形态特征。对照地面降雹实况可见, 约 15:00 开始降雹, 同时出现特大冰雹的文登区蒿耨村及该村西北约 1.5 km 的呖里店村位于入流缺口顶端和 Z_H 梯度大值区, 也处于 Z_{DR} 低值区和 CC 低值区, Z_{DR} 最低到 0.5 dB 以下, CC 最低到 0.7 以下, 这与 Blair et al(2011)、龚佃利等(2021)观测的超级单体特大冰雹降落位置一致。类似地, 威海市文登区气象局观测的大冰雹也降落在相似位置(图略)。

图 8b Z_H 剖面显示, Z_H 大于 55 dBz 的高度达到 10 km 以上, 低层大于 60 dBz 的强反射率核接地, 具有明显 BWER 结构, 表明风暴维持强盛, 地面出现降雹。图 8c 中, 对应 BWER 位置的 CC 值相对较小 (<0.94), 而风暴前侧低层入流区的 CC 异常小, 最小低于 0.7, 这与上升气流携带的树叶、杂草碎片和昆虫等有关。图 8d 中对应 BWER 位置的 Z_{DR} 值介于 2~4 dB, 呈现强的 Z_{DR} 柱特征, 指示有极强的上升运动, 而对应 0°C 层 (3.6 km) 以上, Z_H 大于

50 dBz 的区域, Z_{DR} 较小 (<1 dB, 最小到 -1 dB), CC 较大 (>0.99), 表明云中分布有大量冰雹。

第二时段 (1 日 14:40—15:35) 强降雨期间, 风暴主体位于烟台雷达 35~80 km 探测范围, 大冰雹落点 (图 2a) 处于雷达较好探测范围。利用“多型天气雷达显示分析平台”计算获取 6 个直径 ≥ 40 mm 大冰雹落点, 降雹开始前后 2~3 个体扫对应的低层 7 个探测仰角的 Z_H 、 Z_{DR} 和 CC 的数值 (经纬度插值分辨率为 0.01° , 输出范围为降雹点上空 3×3 格点), 按不同高度对 9 个格点数据进行平均, 代表降雹点上空不同高度的平均状况。图 9 给出了大冰雹落点上空不同高度的 Z_H 、 Z_{DR} 和 CC 散点和箱线图。由图可见, Z_H (图 9a) 的中位数为 48.7 dBz, 最大值为 62.8 dBz; 中位数以上的数值自低层到高层近乎均匀分布, 这反映了回波墙呈直立状的特点; 融化层 (WBZ) 以下近一半数值低于 35 dBz, 这源于低层弱回波区的影响。 Z_{DR} (图 9b) 随高度增大而呈下降趋势, 中位数为 0.89 dB, -20°C 以上高度的数值介于 $-0.18 \sim 0.25$ dB, 结合图 9a 可推测 -20°C 以上大

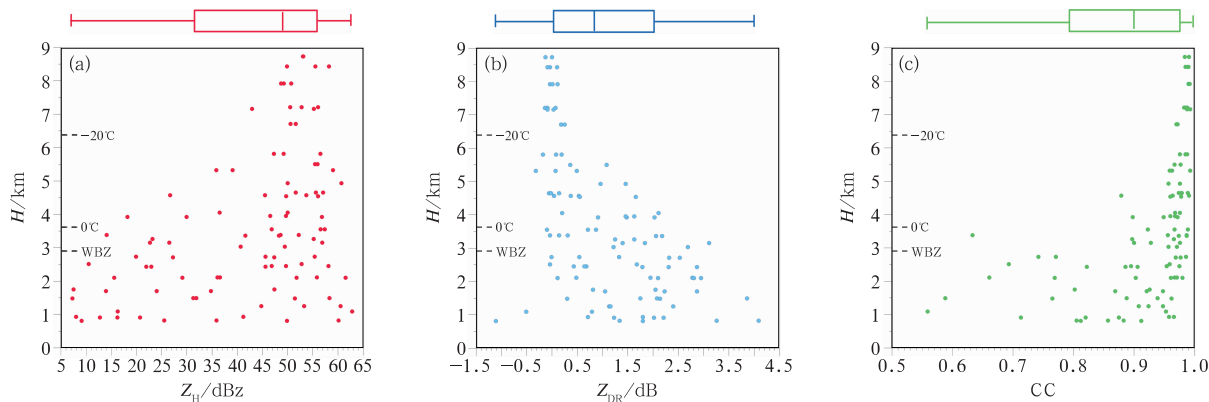
冰雹或已形成;低层 Z_{DR} 数值较大,大于 2 dB 值大多集中于融化层以下高度,可以推测该区间融化加剧,汇集了大量扁平状的大雨滴和包有水膜的冰雹,地面实况为大冰雹和强降水混合出现(图 3b)。CC (图 9c)随高度增加也呈增大特征,中值为 0.900, -20°C 以上高度的数值介于 0.984~0.993,表明冰雹多为干冰雹;而 0°C 层高度以下对应偏小的 CC,最小为 0.560,这表明雨滴、冰粒子等混合相态粒子

及树叶碎片等导致低层 CC 偏低。上述统计结果与图 8 反映的 Z_H 、 Z_{DR} 、CC 垂直分布特征一致。

4 龙卷的雷达探测特征

4.1 后侧阵风锋和龙卷的生成

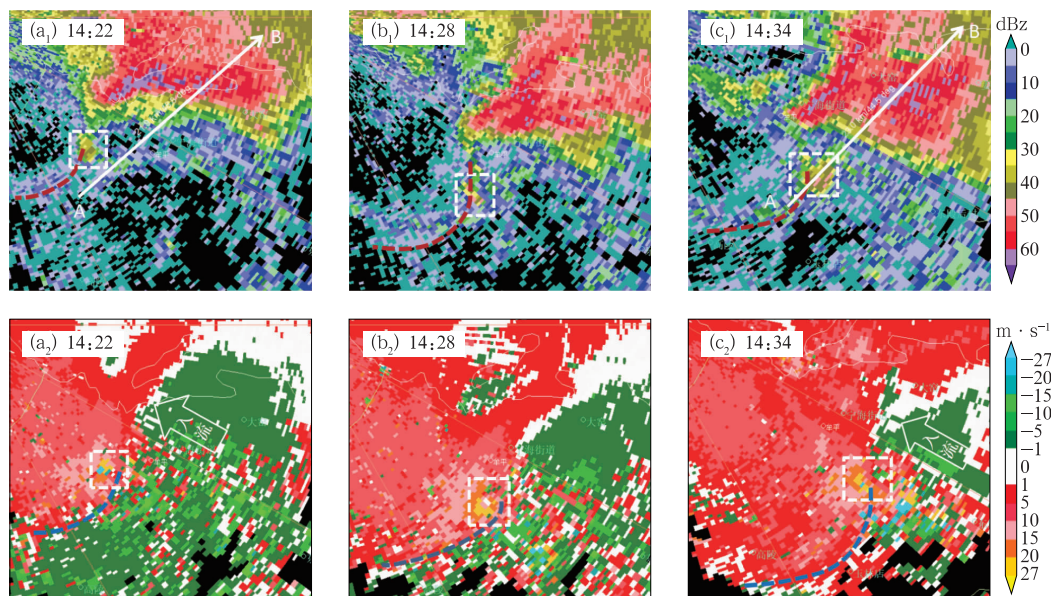
图 10 是 10 月 1 日 14:22—14:34 烟台雷达 0.5°



注:箱线图中竖线自左向右依次为最小值、第 25%分位数、中位数、第 75%分位数和最大值。

图 9 第二段强降雪的大冰雹落点对应不同高度的(a) Z_H 、(b) Z_{DR} 、(c)CC 散点和箱线图

Fig. 9 (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC scatter plots and boxplots of large hail falling site corresponding to different heights in the second stage of heavy hailfall



注:弧线为 RFGF 位置,虚线方框区为发生龙卷的回波区。

图 10 2021 年 10 月 1 日 14:22—14:34 烟台雷达 0.5° 仰角(a₁, b₁, c₁) Z_H 和(a₂, b₂, c₂)V 产品

Fig. 10 Products of (a₁, b₁, c₁) Z_H and (a₂, b₂, c₂) V at 0.5° elevation of Yantai Radar from 14:22 BT to 14:34 BT 1 October 2021

仰角的 Z_H 和 V 产品。烟台雷达采用 VCP21D 扫描模式, 0.5° 采用 320 Hz 脉冲重复频率扫描探测 460 km 半径范围的反射率, 然后采用 1012 Hz 脉冲重复频率探测径向速度, 后者比前者时间滞后约 30 s, 因此雷达探测的阵风锋在径向速度图上的位置较在反射率因子图上的位置略偏向东南一小段距离。分析可见, 14:22(图 10a), 在烟台雷达东南方向(方位 $130^\circ \sim 170^\circ$), 超级单体后部下沉气流激发形成的后侧阵风锋(RFGF)呈弧状自西北向东南方向移动, 对应的 Z_H 多介于 $10 \sim 15$ dBz, 在阵风锋的北端有一小块回波(白色虚线方框), 尺度约为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$, Z_H 最大值为 42 dBz。地面气象站观测显示 RFGF 后部及超级单体影响区, 风向由偏南风转向东北风到西北风, 气温下降 6°C 左右, 具有明显的冷池特征。此后, 该小块回波随超级单体一起向东南方向移动, 强度逐渐增强, 面积不断增大(图 10b₁, 10c₁); 到 14:40(图略), 其北端与超级单体主体回波相连接, 形成超级单体的钩状回波; 同时超级单体再次加强, 造成牟平龙卷和威海市文登区的大冰雹。席宝珠等(2015)研究认为, 当母体雷暴移速等于或接近其产生的阵风锋移速时, 阵风锋与母体雷暴相接地方的雷暴可持续强烈发展, 并对母体雷暴有正反馈作用; 本实例也反映出了类似的雷暴发展机制。

从径向速度看, 1日 14:22(图 10a₂), 阵风锋的后方北段(白色虚线方框)正速度较大, 出现速度模糊, 退模糊后为 $31.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在其东北有一个距离库, 其速度为 $-3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 正、负速度差(ΔV)为 $34.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 在之后的 2 个时次(图 10b₂, 10c₂), ΔV 分别增大到 $40.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $42.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 14:40(图略)的最大正、负速度中心沿雷达径向呈对称分布, ΔV 为 $41.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, PUP 的龙卷涡旋特征算法首次计算出 TVS。慕瑞琪等(2022)统计的伴随 TVS 的江苏台风龙卷中, TVS 最低仰角的 ΔV 为 $20.1 \sim 31.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 可见本次龙卷的 ΔV 远大于江苏的台风龙卷。在 14:45、14:51 这 2 个体扫时次, 雷达探测到龙卷的 TDS 特征, 说明这次龙卷涡旋最初是在低空生成并逐渐增强为龙卷涡旋的。

4.2 下沉反射率因子核特征

Rasmussen et al(2006)提出了一个超级单体反射率特征的定义, 称之为下沉反射率因子核

(DRC)。DRC 发生在超级单体的后侧下沉气流区(RFD), 是自超级单体上升气流区右后侧(相对于风暴运动方向)3~6 km 高度的悬垂回波向下伸出的强反射率回波。在 Kennedy et al(2007)统计的 64 个超级单体中, 59% 产生 DRC, 而 30% 的 DRC 发生在龙卷生成前 10 min 至生成后 5 min。Byko et al(2009)根据雷达观测和数值模拟, 认为 DRC 是由上升气流区后侧的水凝物沉积引起的, 推断其有可能作为龙卷生成的先兆或是伴随特征。图 11 为沿图 10a₁、图 10c₁ 中的白箭头线位置所做的 Z_H 、CC、 Z_{DR} 垂直剖面。由图可见, 自 10 月 1 日 14:22 开始, 超级单体西南侧的悬垂回波($Z_H > 40$ dBz)自 5 km 以上高度向下延伸(图 11a₁), 到 14:34(图 11b₁), 进一步下伸并与图 10 所示 RFGF 激发的对流单体结合, 具有 DRC 特征, 约 11 min 之后龙卷发生。DRC 对应的 CC 多介于 $0.96 \sim 0.99$ (图 11a₂, 11b₂), Z_{DR} 多介于 $3.5 \sim 4.5$ dB(图 11a₃, 11b₃), 14:34 的 Z_{DR} 最大值大于 5.0 dB, 表明主要为雨滴构成。图 11a₂ 和 11b₂ 中标注的入流区的 CC 低于 0.5, 反映风暴前低层入流区已有较大的轻质碎片被带到空中。入流区东北侧 2~4 km 高度的 Z_{DR} 大于 5.0 dB(图 11a₃, 11b₃), 为大雨滴形成的 Z_{DR} 弧。综上所述, DRC 发生在超级单体入流缺口左前部、主上升区的右后侧, 为风暴上升与下沉运动交汇的区域。

4.3 龙卷碎片特征

龙卷碎片(TDS)是指龙卷将地面上的杂物碎片等非气象目标物卷到空中, 由于杂物碎片形状不规则、尺寸很大、介电常数很高, 且在空中排列方向杂乱, 因此双偏振雷达探测时会产生高的 Z_H (> 45 dBz)、异常小的 Z_{DR} (接近 0 dB)和低的 CC (< 0.8)等特征(Ryzhkov et al, 2005)。TDS 可帮助确认龙卷的发生及其位置。

图 12 给出的是 10 月 1 日 14:45 烟台雷达 1.5° 仰角的 Z_H 、 V 、 Z_{DR} 和 CC 产品, 1.5° 仰角雷达波束中心在 TVS 位置的约 1.3 km 高度处。从 Z_H 产品(图 12a)可见, 在这个高度风暴仍然有入流缺口, TVS 位于钩状回波的头部; V 产品(图 12b)中, TVS 西南、东北两侧的速度差 ΔV 为 $39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; Z_{DR} 产品(图 12c)中 TVS 附近的 Z_{DR} 值为 0.2 dB 左右, 最低为 -0.1 dB, 而对应的 CC 值降低到 0.85 以下,

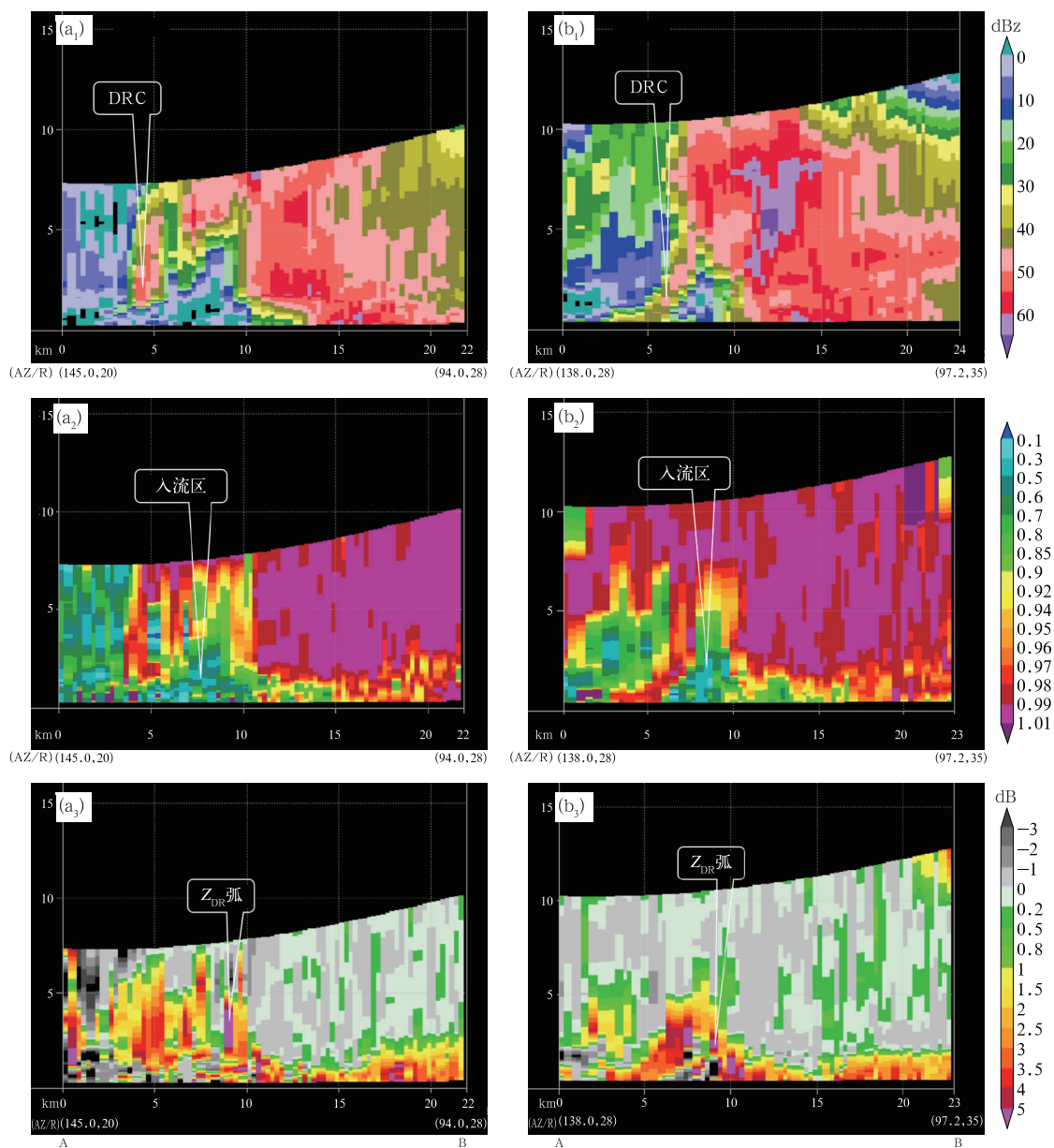


图 11 2021 年 10 月 1 日 (a_1, a_2, a_3) 14:22, (b_1, b_2, b_3) 14:34 烟台雷达分别沿图 10a₁, 10c₁ AB 线的 (a_1, b_1) Z_H , (a_2, b_2) CC 和 (a_3, b_3) Z_{DR} 垂直剖面

Fig. 11 Vertical cross-sections of (a_1, b_1) Z_H , (a_2, b_2) CC and (a_3, b_3) Z_{DR} along the line AB in Figs. 10a₁, 10c₁, respectively, of Yantai Radar at (a_1, a_2, a_3) 14:22 BT and (b_1, b_2, b_3) 14:34 BT 1 October 2021

最低值为 0.81(图 12d);如此低的 Z_{DR} 和 CC 值,说明 TVS 已接地,并显示出龙卷特有的 TDS 特征。此时的 TVS 位于西殿后村西偏北大约 3 km 处,为无人居住的山区,这说明在风暴到达西殿后村之前,龙卷或已生成数分钟。因此,根据雷达识别的 TDS 特征可以推断,龙卷于 14:45 已生成。

4.4 差分反射率弧特征

在引发牟平龙卷的风暴中,烟台雷达检测到

Z_{DR} 弧特征。图 13 是龙卷生成前 10 月 1 日 14:34、14:40 风暴单体 1.5° 的 Z_H 、 Z_{DR} 产品。图 13c (14:34) 中白虚线包围的弧状区域,其 Z_{DR} 值大多大于 5 dB,为典型 Z_{DR} 弧特征,对应图 13a 中超级单体南侧边缘 Z_H 梯度大的区域, Z_H 介于 35~55 dBz。14:40(图 13b, 13d), Z_{DR} 弧处于风暴的位置与 14:34 类似,只是范围稍微增大、 Z_{DR} 数值稍减小。上述 2 个时次的 Z_{DR} 弧中心对应 1.5° 仰角雷达波束中心的高度分别为 1.3 km、1.45 km。分析之前的 Z_{DR} 产

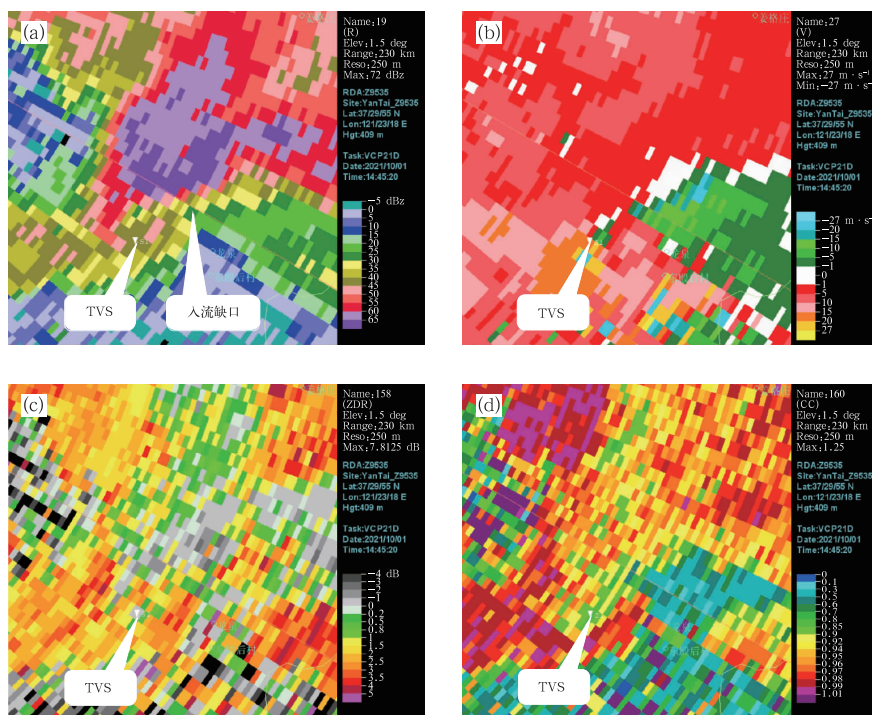
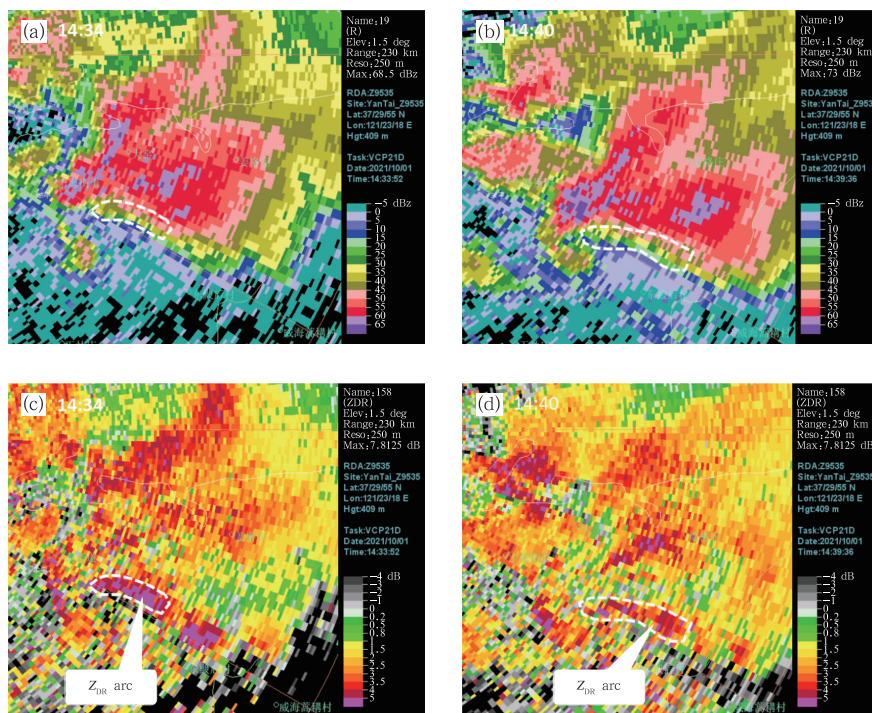


图 12 2021 年 10 月 1 日 14:45 烟台雷达 1.5° 仰角 (a) Z_H , (b) V , (c) Z_{DR} , (d) CC 产品
 Fig. 12 Products of (a) Z_H , (b) V , (c) Z_{DR} and (d) CC at 1.5° elevation
 of Yantai Radar at 14:45 BT 1 October 2021



注:白色虚线所示范围为 Z_{DR} 弧。

图 13 2021 年 10 月 1 日 (a, c) 14:34, (b, d) 14:40 烟台雷达 1.5° 仰角 (a, b) Z_H 和 (c, d) Z_{DR} 产品
 Fig. 13 Products of (a, b) Z_H and (c, d) Z_{DR} at 1.5° elevation of Yantai Radar
 at (a, c) 14:34 BT and (b, d) 14:40 BT 1 October 2021

品发现,14:22 已可看到这种特征(图 11a₃),但没有这 2 个时次典型;14:45 Z_{DR} 弧范围缩小了很多,此后进一步减小。由此可见,在龙卷发生前约 11 min 出现了典型的 Z_{DR} 弧特征,但本过程从探测到 Z_{DR} 弧特征至龙卷生成的时间比 2007 年 5 月 9 日俄克拉何马州西部的龙卷个例短 10 min。

4.5 中气旋特征

RPG 软件给出的中气旋产品可表征风暴单体内上升气流的旋转程度。在风暴距离雷达约 30~80 km 时,雷达探测计算的中气旋参数比较准确。这次超级单体风暴大致在烟台、荣成两部雷达之间的连线上移动,10 月 1 日 14:23—15:22、15:25—15:43 的中气旋参数分别由荣成、烟台雷达计算得到(图 14)。由图可见,中气旋最早于 14:23 在 5~8 km 高度出现,并维持 2 个体扫时间,然后逐渐向下发展,14:47 中气旋底高快速下降到 2 km 以下,中气旋的厚度明显增大,切变中相对低值开始加大,表明旋转上升气流向下延伸并增强。中气旋底高的下降可能对低层的涡旋产生垂直拉伸作用(王秀明和俞小鼎,2019),导致龙卷的产生。14:23 荣成雷达开始计算识别出中气旋和 TVS,比龙卷发生提前 22 min;而烟台雷达因距离风暴单体太近,探测不到风暴上部的状态,到 14:40 才识别出中气旋和 TVS,比龙卷发生只提前了 5 min。龙卷发生时段对应中气旋底高和中气旋顶高的降低,这一特征对龙卷预警具有很好的指示。

4.6 龙卷、大冰雹发生的示意图

根据上文分析,结合龙卷、大冰雹发生的位置和地面风、气温场,总结出本次发生在山东半岛东部的超级单体风暴低层(1.5 km 高度以下)气流场及龙卷、大冰雹落区的示意图(图 15)。风暴的后侧下沉气流与入流缺口处偏南暖湿入流的强烈涡旋辐合,为龙卷的形成提供强大的涡旋上升运动条件;龙卷涡旋出现在钩状回波顶端,大冰雹出现在入流缺口北侧。该示意图根据实际观测分析得出,与 Lemon and Doswell(1979)给出的经典的超级单体风暴低空气流模式,以及 Kunjin and Ryzhkov(2008)总结的超级单体低层偏振特征概念模型很相似,表明本次发生龙卷、大冰雹的超级单体风暴具有很强的代表性。

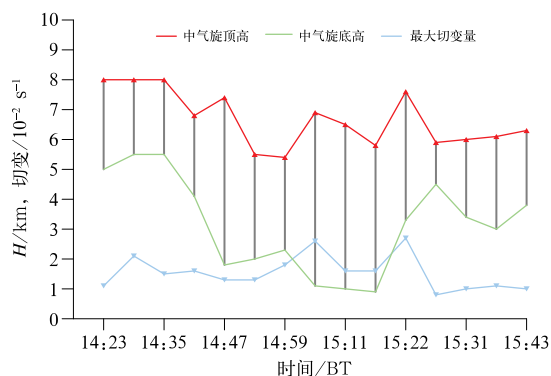
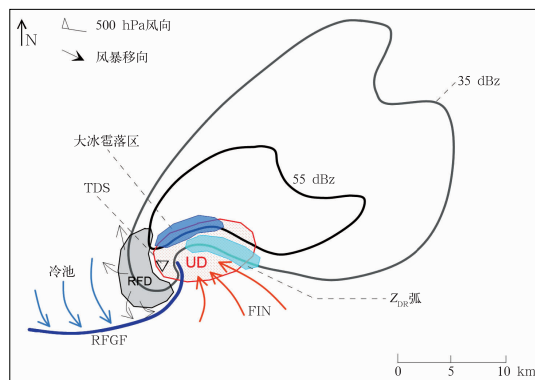


图 14 2021 年 10 月 1 日 14:23—15:43 由荣成、烟台雷达计算的中气旋参数

Fig. 14 Characteristic parameters of mesoscale cyclone in the supercell storm calculated by Rongcheng and Yantai radars from 14:23 BT to 15:43 BT 1 October 2021



注:UD 为上升区。

图 15 2021 年 10 月 1 日山东半岛东部超级单体风暴的低层结构示意图

Fig. 15 Schematic of supercell storm with locations of features at low levels (<1.5 km) in the east of Shandong Peninsula on 1 October 2021

5 结论和讨论

造成本次山东半岛秋季特大冰雹和龙卷的天气系统是东北冷涡,与气候平均场相比,500 hPa 冷涡中心偏北偏东且冷涡异常强盛,850 hPa 具有持续的偏南水汽输送。受高空冷涡和低层切变影响,风暴发生前,山东半岛东部具有上干冷下暖湿、强的 0~6 km 垂直风切变($30.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和对流有效位能($1800 \sim 2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)等有利于强冰雹、龙卷发生的动力、热力条件。地面逐分钟气象要素演变可

反映出明显的风暴前低压、雷暴高压和冷池特征,且以文登区气象站表现最明显。

2个强降雹时段的风暴呈现典型超级单体的形态,尤其第二时段的风暴低层具有明显的钩状回波和倒“V”字型前侧入流缺口,BWER和 Z_{DR} 柱特征也十分明显;大冰雹多出现在入流缺口的北侧,单体合并使风暴明显增强,从而造成更严重的冰雹灾害。统计第二强降雹时段,地面大冰雹对应雹云中的 Z_H 、 Z_{DR} 和CC的中位数分别为48.7 dBz、0.89 dB和0.90; -20°C 以上高度具有 Z_H 大(>48 dBz)、 Z_{DR} 小($-0.18\sim0.25$ dB)、CC大($0.984\sim0.993$)特征,可推测大冰雹在 -20°C 以上高度或已形成。地面出现大冰雹时,STD最大达到 $71.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

后侧阵风锋对应的出流边界回波伴随风暴移动过程中加强,并与主体回波连接形成钩状回波,龙卷发生在钩状回波头部。相对于龙卷发生时间(14:45),龙卷发生前约11 min,雷达探测到风暴低层典型的 Z_{DR} 弧和风暴右后侧的DRC特征。荣成、烟台雷达先后于14:23、14:40计算出中气旋和TVS产品,分别提前22 min、5 min给出发生龙卷的预警信息。

本文主要基于雷达探测产品等资料,结合定量分析,研究本次超级单体风暴的雷达特征,对于单体合并加强、冰雹龙卷形成机制,需要结合风场反演和数值模拟作进一步研究。对于大冰雹对应雹云中的双偏振雷达参量的统计特征,未来可收集更多的冰雹实例进行细化分析。

致谢:感谢中国气象科学研究院胡志群研究员提供的“多型天气雷达显示分析平台”并给予指导,山东省气象服务中心顾谦参与龙卷灾情现场调查,山东省气象信息中心李长军、冯勇分别提供的地面气象站分钟观测资料、荣成雷达基数据资料。

参考文献

- 刁秀广,杨传风,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, 40(3):580-589(in Chinese).
- 付丹红,郭学良,2007.积云并合在强对流系统形成中的作用[J].大气科学,31(4):635-644. Fu D H, Guo X L, 2007. The role of cumulus merger in a severe mesoscale convective system[J]. Chin J Atmos Sci, 31(4):635-644(in Chinese).
- 高晓梅,俞小鼎,王令军,等,2018.鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J].气象学报,76(2):196-212. Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al, 2018. Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin, 76(2):196-212(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).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019.1804号台风“艾云尼”龙卷分析[J].气象学报,77(4):645-661. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2019. An analysis on tornadoes in Typhoon Ewiniar[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):645-661(in Chinese).
- 慕瑞琪,徐芬,孙康远,等,2022.江苏台风龙卷环境条件与雷达关键特征分析[J].气象,48(2):190-202. Mu R Q, Xu F, Sun K Y, et al, 2022. Analysis of environmental conditions and radar key features of typhoon-tornadoes in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 48(2):190-202(in Chinese).
- 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, 46(12):1608-1620(in Chinese).
- 全国气象防灾减灾标准化技术委员会,2011.冰雹等级:GB/T 27957—2011[S].北京:中国标准出版社. SAC/TC 345, 2011. Grade of Hail:GB/T 27957—2011[S]. Beijing, China Standards Press(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,2019.热带一次致灾龙卷形成物理过程研究[J].气象学报,77(3):387-404. Wang X M, Yu X D, 2019. A study on the physical process involved in the genesis of a severe tropical tornado[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):387-404(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).
- 席宝珠,俞小鼎,孙力,等,2015.我国阵风锋类型与产生机制分析及其主观识别方法[J].气象,41(2):133-142. Xi B Z, Yu X D, Sun L, et al, 2015. Generating Mechanism and type of gust front and its subjective identification methods[J]. Meteor Mon, 41(2):133-142(in Chinese).
- 俞小鼎,郑永光,2020.中国当代强对流天气研究与业务进展[J].气象学报,78(3):391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):391-418(in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):311-337(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 Meteor Sin,80(6):878-895(in Chinese).
- 张丰启,刘庆泰,2001.威海市冰雹天气气候特征[J].气象,27(11):35-39.
- Zhang F Q,Liu Q T,2001. Climate feature analysis of hail weather in Weihai City, Shandong Province[J]. Meteor Mon,27(11):35-39(in Chinese).
- 郑永光,刘非凡,张恒进,2021.中国龙卷研究进展[J].气象,47(11):1319-1335.
- Zheng Y G,Liu F F,Zhang H J,2021. Advances in tornado research in China[J]. Meteor Mon,47(11):1319-1335(in Chinese).
- 郑永光,宋敏敏,2021.冷涡影响中国对流性大风与冰雹的分布特征[J].热带气象学报,37(5/6):710-720.
- Zheng Y G,Song M M,2021. Analysis of influence of cold vortexes on distribution of convective high winds and hail in China[J]. J Trop Meteor,37(5/6):710-720(in Chinese).
- Blair S F,Deroche D R,Boustead J M,et al,2011. A radar-based assessment of the detectability of giant hail[J]. Electronic J Severe Storms Meteor,6(7):1-30.
- Brown R A,Lemon L R,Burgess D W,1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar[J]. Mon Wea Rev,106(1):29-38.
- Byko Z,Markowski P,Richardson Y,et al,2009. Descending reflectivity cores in supercell thunderstorms observed by mobile radars and in a high-resolution numerical simulation[J]. Wea Forecasting,24(1):155-186.
- Doswell III C A,2001. Severe convective storms-An overview[M]// Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston: American Meteorological Society:1-26.
- Kennedy A,Straka J M,Rasmussen E N,2007. A statistical study of the association of DRCs with supercells and tornadoes[J]. Wea Forecasting,22(6):1191-1199.
- Kumjian M R,2013. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II: warm- and cold-season applications[J]. J Oper Meteor,1(20):243-264.
- Kumjian M R,Gutierrez R,Soderholm J S,et al,2020. Gargantuan hail in Argentina[J]. Bull Meteor Soc,101(8):E1241-E1258.
- Kumjian M R,Ryzhkov A V,2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol,47(7):1940-1961.
- Lemon L R,Doswell C A,1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. Mon Wea Rev,107(9):1184-1197.
- Rasmussen E N,Straka J M,Gilmore M S,et al,2006. A preliminary survey of rear-flank descending reflectivity cores in supercell storms[J]. Wea Forecasting,21(6):923-938.
- Ryzhkov A V,Schuur T J,Burgess D W,et al,2005. Polarimetric tornado detection[J]. J Appl Meteor Climatol,44(5):557-570.
- Thompson R L,Edwards R,Hart J A,et al,2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle[J]. Wea Forecasting,18(6):1243-1261.
- Trapp R J,Stumpf G J,Manross K L,2005. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones[J]. Wea Forecasting,20(4):680-687.
- Witt A,Burgess D W,Seimon A,et al,2018. Rapid-scan radar observations of an Oklahoma tornadic hailstorm producing giant hail[J]. Wea Forecasting,33(5):1263-1282.
- Witt A,Nelson S P,1991. The use of single-Doppler radar for estimating maximum hailstone size[J]. J Appl Meteor Climatol,30(5):425-431.

(本文责编:何晓欢)