

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*

刁秀广¹ 郭飞燕²

DIAO Xiuguang¹ GUO Feiyan²

1. 山东省气象台, 济南, 250031

2. 青岛市气象局, 青岛, 266003

1. *Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China*

2. *Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China*

2020-08-27 收稿, 2020-11-05 改回.

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. 气象学报, 79(2): 181-195

Diao Xiuguang, Guo Feiyan. 2021. Analysis of polarimetric signatures in the supercell thunderstorm occurred in Zhucheng on 16 August 2019. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(2):181-195

Abstract Using Qingdao dual-polarization CINRAD/SA data, conventional observation data and regional automatic station meteorological data, the polarimetric radar signatures of a supercell storm occurred in Zhucheng, Shandong Province on 16 August 2019 are analyzed. The results show that the supercell storm occurred under the background of interaction between the northeast cold vortex and a surface mesoscale convergence line. The CAPE was small, but the vertical wind shear between 0 and 6 km altitude was very strong. This configuration was conducive to the formation and maintenance of supercell storms. The average values of DBZM, C-VIL, HT and TOP of Zhucheng supercell storm, which lasted about 3 hours and accompanied by a deep and persistent mesocyclone, were 74.1 dBz, 67.9 kg/m², 6.3 km and 11.3 km respectively in its mature stage. The echo area with reflectivity above 60 dBz in lower levels of the storm had small Z_{dr} and CC but large K_{dp} , indicating that a certain number of wet (or dry) hails and liquid raindrops existed at the same time. In addition, obvious Z_{dr} arcs near the inflow gap in lower levels of the storm were found. The bounded weak echo region (BWER) was detected in the strong updraft area located in middle levels of the storm, and the top of BWER reached about 7 km. Z_{dr} and CC rings around the BWER were observed in middle levels, and the top of Z_{dr} ring reached the -10°C layer height. The deep Z_{dr} and K_{dp} columns above the 0°C layer were observed in the vicinity of the main rotating updraft with their tops reaching the height of -20°C layer. The Z_{dr} column was located to the east of the BWER and the K_{dp} column was located to the west of the BWER. The Z_{dr} column between -10°C and -20°C layer corresponded to strong Z_h (35–60 dBz) and small K_{dp} , indicating that there were a few large liquid and/or wet ice particles. The K_{dp} column corresponded to strong Z_h (55–72 dBz) and small Z_{dr} , indicating that there were a number of small liquid and/or small wet ice particles and large ice particles. Significant negative Z_{dr} values in the radial direction behind the strong reflectivity core at lower levels of the storm can be used as signals for identification of extremely large hails (diameter ≥ 50 mm). The strong reflectivity core at lower levels of the storm corresponded to an abnormally large K_{dp} value, indicating that it contained hail particles covered by water film and high concentration of liquid raindrops.

Key words Supercell, Polarimetric signature, Z_{dr} columns, K_{dp} columns

摘 要 利用青岛 S 波段双偏振多普勒天气雷达探测资料和常规气象观测资料以及区域自动气象站观测资料, 对 2019 年 8 月

* 资助课题: 山东省自然科学基金项目(ZR2020MD052、ZR2020MD053)、山东省气象局科研项目(2019sdqxz01)。

作者简介: 刁秀广, 主要从事天气雷达应用研究工作。E-mail: radardxg@126.com

16日发生在山东省诸城市的一次长寿命超级单体风暴双偏振结构特征进行了分析。结果表明:超级单体风暴发生在东北冷涡和地面中尺度辐合线共同作用背景之下,对流有效位能偏低,但风垂直切变非常强,这种配置有利于超级单体风暴的形成与维持。诸城超级单体风暴持续3h左右并伴有深厚持久的中气旋,旺盛阶段最强反射率因子、基于单体的垂直累积液态含水量、强中心高度和单体顶部高度平均分别为74.1 dBz、67.9 kg/m³、6.3 km和11.3 km。对偏振特征分析表明,风暴低层60 dBz以上回波区对应偏小的差分反射率(Z_{dr})、小的相关系数(CC)和大的差分相移率(K_{dp}),湿(或干)冰雹和液态雨滴共存。此外,低层入流缺口附近有明显 Z_{dr} 弧存在。风暴中层强上升气流区内有明显的有界弱回波区,其顶部达到7 km左右。有界弱回波区内相关系数较小,其周围有明显的 Z_{dr} 环和CC环, Z_{dr} 环顶部达到-10℃层高度。0℃层高度之上存在深厚的 Z_{dr} 柱和 K_{dp} 柱,顶部都达到-20℃层高度, Z_{dr} 柱位于有界弱回波区东侧, K_{dp} 柱位于西侧。-10—-20℃层, Z_{dr} 柱对应强的水平极化反射率因子(35—60 dBz)和小的差分相移率,表明含有少数偏大的液态或湿冰粒子,而 K_{dp} 柱对应更强的水平极化反射率因子(55—72 dBz)和小的差分反射率,表明含有一定数量的小的液态或(和)湿冰粒子及大的冰雹粒子。风暴低层强反射率核后侧径向上如果出现显著差分反射率负值区,可作为特大冰雹(直径 ≥ 50 mm)的识别依据;如果对应异常大的差分相移率,表明含有浓度较高的雨滴和包有水膜的冰雹粒子。

关键词 超级单体, 双偏振参量, Z_{dr} 柱, K_{dp} 柱

中图法分类号 P407.2

1 引言

对于超级单体风暴结构与演变及致灾性的相关研究已很多。早期的研究主要专注于导致强冰雹或龙卷风的超级单体风暴结构和动力学特征,并提出了超级单体风暴概念模型(Browning, 1964, 1965; Marwitz, 1972; Lemon, et al, 1979; Brandes, et al, 1988)。随着数值模式的发展,超级单体的数值模拟也有助于人们更好地了解该类风暴的结构和形态演变(Wicker, et al, 1995; Adlerman, et al, 1999)。随着双极化技术在天气雷达上的应用,对超级单体风暴双极化特征的个例观测及研究也逐渐增多,这些分析与研究可以对风暴内部的微观物理过程做出推断(Conway, et al, 1993; Hubbert, et al, 1998; Loney, et al, 2002; Kumjian, et al, 2008; Van Den Broeke, et al, 2008)。利用双极化雷达探测发现,一些强风暴特别是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大的差分反射率($Z_{dr} > 3$ dB),类似弧状,称之为 Z_{dr} 弧,而风暴中层强上升气流区周围会出现环状或半环状增强的差分反射率分布(称之为 Z_{dr} 环)、环状或半环状降级的相关系数(即CC环, Kumjian, et al, 2008, 2010; Kumjian, 2013b)。环境0℃层高度以上通常会出现大的差分反射率和差分相移率,差分反射率超过一定阈值(1.0或1.5 dB)即称之为 Z_{dr} 柱,差分相移率超过一定阈值(0.75或1.0°/km)称之为 K_{dp} 柱(Illingworth, et al, 1987; Hubbert, et al, 1998; Zrnice, et al, 1999; Romine, et al, 2008;

Kumjian, et al, 2010)。对于超级单体风暴,融化层之上 Z_{dr} 柱由雨滴、湿的扁球结构或球形结构冰粒混合组成, Z_{dr} 柱与强上升气流区相对应, Z_{dr} 柱高度与上升气流存在正相关, Z_{dr} 柱的高度可以作为判别风暴强度的指标之一(Conway, et al, 1993; Ryzhkov, et al, 1994; Kumjian, et al, 2014)。0℃层高度以上差分相移率大值区的出现表明有丰富的液态雨和(或)湿冰存在,因此, K_{dp} 柱可作为深厚对流上升气流特性的观测量度(Bringi, et al, 1996; Hubbert, et al, 1998; Loney, et al, 2002; Van Lier-Walqui, et al, 2016)。多数情况下, Z_{dr} 柱和 K_{dp} 柱顶部在空间上是分离的, K_{dp} 柱往往位于 Z_{dr} 柱的西或西北侧(Hubbert, et al, 1998; Kumjian, et al, 2008, 2010; Snyder, et al, 2013)。

中国在双偏振天气雷达观测技术、数据质量控制及业务应用方面已做了大量研究工作,取得了一些成果,但还未进入业务化应用。目前正在进行新一代天气雷达网的双偏振改造升级工作,以进一步提高对强降水和强冰雹等灾害天气的监测、预警能力。对于强对流风暴的双偏振特征有较多个例分析(张鸿发等, 2001; 张廷龙等, 2012; 孙丝雨等, 2013; 王洪等, 2016; 张学泰等, 2017; 张羽等, 2017; 温静, 2017; 杨忠林等, 2019; 刁秀广等, 2020),主要包括冰雹识别、强雷暴云微物理过程、数值模拟、强降水监测等。王洪等(2018)在分析华南一次超级单体风暴时发现,在上升气流区附近存在一条 Z_{dr} 柱,宽约5 km,垂直扩展到6 km高度(-8℃层高度),风暴水平反射率因子中心附近出现的 Z_{dr} 柱,

与大雨滴被上升气流(连续分布的正径向风)带入高层冻结且失去取向稳定而导致差分反射率值迅速减小有关。潘佳文等(2020)利用厦门双偏振雷达探测数据对2018年5月7日发生在闽南地区的一次导致特大暴雨的强降水超级单体风暴分析表明, Z_{dr} 柱位于有界弱回波区的上方、主上升气流的东南侧, K_{dp} 柱位于主上升气流的西北侧, 主要由大量混合相态水成物造成, 其位置与地面雨强中心存在较好的对应关系。上述研究利用多普勒雷达双极化参量及相态识别等技术揭示了一些强风暴特别是超级单体风暴发生、发展的动力和微物理结构特征, 但对我国强冰雹超级单体风暴双偏振结构特征的相关研究还较少。

基于青岛 CINRAD/SA 改造升级后双偏振雷达探测资料, 结合地面观测资料, 对2019年8月16日观测到的产生严重冰雹灾害的长寿命超级单体风暴双偏振参量结构特征进行了分析, 目的是初步了解该类超级单体风暴低层、中层、高层及垂直结构上的双偏振特征量, 希望对超级单体风暴微物理特征及相关预警业务有所启示。

2 天气实况及天气背景

2.1 天气实况

2019年8月16日14—20时(北京时, 下同), 山东潍坊、临沂、日照、青岛等地先后遭受强冰雹、雷暴大风等强对流天气袭击, 造成严重经济损失。其中造成诸城特大冰雹的强风暴属于长寿命

超级单体风暴(简称诸城超级单体风暴), 该风暴生成于14时前后, 消散于17时前后, 先后在潍坊市的临朐县、安丘县、诸城市和日照市的五莲县及青岛市的胶南等地出现强冰雹天气, 受灾最为严重的诸城市, 冰雹先后持续了35 min(15时10—45分)左右, 最大冰雹直径超过50 mm, 贾悦、舜王、黄华、南湖、枳沟、龙都6个镇都不同程度的受到冰雹袭击, 作物受灾1.005万 hm^2 , 绝收0.874万 hm^2 。同时, 该风暴影响期间6个区域气象站观测到17 m/s以上大风(最大风速30.6 m/s), 15时59分出现在五莲县许孟区域气象站。有4个区域气象站观测到短时强降水, 最大小时雨量27.2 mm, 15—16时出现在诸城市贾悦气象站。风暴路径及雷达站分布见图1a, 风暴影响诸城时距离青岛雷达站90—100 km。

2.2 天气背景与环境参数

2019年8月16日08时, 500 hPa为冷涡, 中心在河北、内蒙古和辽宁交界处上空, 槽线压在山东半岛中部区域, 低层700和850 hPa存在切变, 850 hPa切变位于山东与河北交界处, 地面辐合线位于黄河北侧(图1b)。可以看出, 低层较暖, 中层较为干冷, 上干冷、下暖湿的配置造成热力不稳定及能量累积。地面 β 中尺度辐合线触发上升运动, 形成对流雷暴, 随着系统的南压, 雷暴系统也随之南移, 14时地面辐合线南压至沂源—临朐—莱州一带, 并在临朐东南部触发新的对流, 演变为超级单体风暴。环境物理量(表1)显示, 青岛附近850与

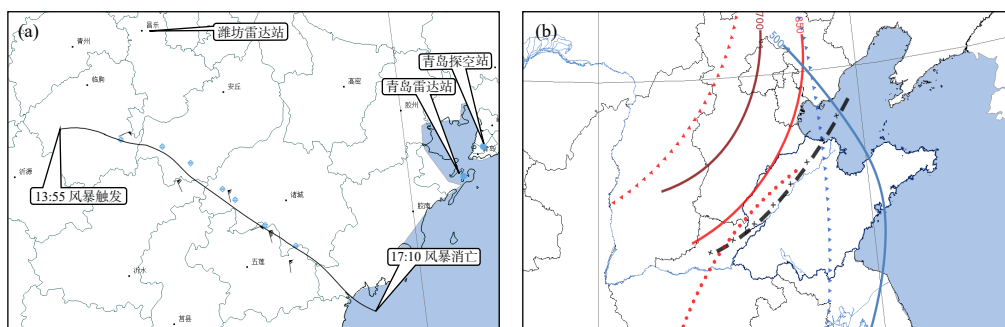


图1 风暴路径(a, \blacklozenge 为冰雹, \blacktriangleright 为风矢)与16日08时天气形势配置(b, 蓝色实线为500 hPa槽线, 棕色实线为700 hPa槽线, 红色实线为850 hPa槽线, 蓝色三角线为500 hPa温度槽, 红色点细线为850 hPa温度脊, 红色三角线为850 hPa温度槽, 黑色虚线为地面辐合线)

Fig. 1 Storm path (a, \blacklozenge is hail symbol, \blacktriangleright is barbed arrow) and synoptic chart (b, blue solid line and blue line with triangle are the height trough and temperature trough respectively at 500 hPa, brown solid line is the height trough at 700 hPa, red solid line, red dotted line and red line with triangle are height trough, temperature ridge and temperature trough respectively at 850 hPa, black dashed line shows the surface convergence line) at 08:00 BT 16 August 2019

表1 环境物理量
Table 1 Environmental physical variables

日期	时次	$K/\Delta T(^{\circ}\text{C})$	LI ($^{\circ}\text{C}$)	CAPE (J/kg)	$W_{sr}(0-6\text{ km})/(0-2\text{ km})$ (m/s)	500 hPa 风速(m/s) /风向($^{\circ}$)	500/850/925 hPa 比湿 (g/kg)	0 $^{\circ}\text{C}$ (湿球0 $^{\circ}\text{C}$)/ -10 $^{\circ}\text{C}$ /-20 $^{\circ}\text{C}$ /-30 $^{\circ}\text{C}$ 层(km)	500 hPa 温度 ($^{\circ}\text{C}$)
20190816	08(章丘)	34/26	-0.4	70/1300*	31.7/6.7	28/285	0.7/8.5/8.9	4.3(4.0)/5.9/7.6/9.2	-9
20190816	08(青岛)	13/29	-3.4	640/740*	12.4/6.6	14/280	2.7/3.5/10.1	4.5(3.6)/6.0/7.7/9.8	-8

500 hPa 温差(ΔT)较大, 抬升指数(LI)为负值, 对流有效位能(CAPE)小于 1500 J/kg(*号数据是订正到诸城 14 时的数据), 虽然对流有效位能值偏小, K 指数较小, 但仍宜于雷暴的发生。风暴触发地位于章丘探空站和青岛探空站之间, 处在章丘探空站下游约 75 km, 距离青岛探空站约 180 km, 由于天气系统东移南压, 上游地区 0—6 km 高度 31.7 m/s 的强风垂直切变(W_{sr})基本可代表风暴触发地的情况。在对流有效位能偏小的情况下, 强风垂直切变有利于组织性强的对流风暴产生。青岛探空站湿球 0 $^{\circ}\text{C}$ 层高度较低, 利于地面出现冰雹。

3 风暴参数演变特征

风暴参数包括最大反射率因子(DBZM)及所在高度(HT)、基于单体的垂直累积液态含水量(C-VIL)和单体顶部高度(TOP), 这些参数可在风暴结构产品(62号)中直接读出。

诸城超级单体风暴在 13 时 59 分生成于潍坊市临朐县西南部, 发展迅速, 1 个体扫后最大回波强度

达到 64 dBz, 之后一直维持在 60 dBz 以上, 16 时后开始逐渐减弱, 17 时 10 分后消散, 持续时间约 3 h。强风暴强盛阶段基本向东南方向移动(雷达来向 305—310 $^{\circ}$, 偏离 500 hPa 风向右侧 25—30 $^{\circ}$), 移动距离约 170 km, 移动速度约 55 km/h。

旺盛阶段(14 时 20 分—16 时 20 分, 图 2)风暴最大反射率因子、基于单体的垂直累积液态含水量、强中心高度和风暴顶高平均值分别为 74.1 dBz、67.9 kg/m 2 、6.3 km 和 11.3 km。风暴强中心高度基本维持在环境 0 $^{\circ}\text{C}$ 层高度(ZH)之上, 风暴顶高维持在 10 km 高度以上。15 时 10—45 分诸城强冰雹持续期间, 最大反射率因子均维持在 75 dBz 以上, 最大为 77 dBz, 并一直伴有深厚的有界弱回波区(BWER)和明显三体散射(TBSS)特征。

风暴在 14 时 39 分—16 时 15 分出现中气旋, 持续 95 min, 占风暴生命期的 1/2。中气旋顶部在 7 km 左右高度, 底部在 1.5—2.0 km(雷达最低仰角所探测高度), 中气旋厚度较厚, 强度强, 最大风垂直切变为 25—30 m/s。

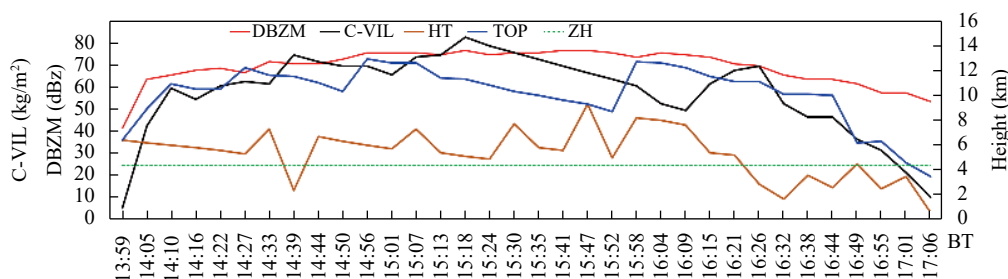


图 2 风暴参数演变(红色曲线为最大反射率因子, 单位: dBz; 黑色曲线为基于单体的垂直累积液态含水量, 单位: kg/m 2 ; 棕色曲线为强中心高度, 单位: km; 蓝色曲线为单体顶高度, 单位: km; 绿色虚线为 0 $^{\circ}\text{C}$ 层高度, 单位: km)

Fig. 2 Evolution of storm parameters in the Zhucheng supercell (red curve is the DBZM, unit: dBz; black curve is C-VIL, unit: kg/m 2 ; brown curve is the HT, unit: km; blue curve is the TOP, unit: km; green dashed line is the height of 0 $^{\circ}\text{C}$ layer, unit: km)

4 诸城超级单体风暴双偏振参量特征

15 时 10—45 分是冰雹最严重阶段, 选取 15 时 30 分青岛雷达观测数据进行分析。此时风暴最大反射率因子、基于单体的垂直累积液态含水量、强

中心高度和风暴顶高分别为 76 dBz、76 kg/m 2 、7.8 km 和 10.4 km, 强中心较高, 达到环境 -20 $^{\circ}\text{C}$ 层高度以上, 表明风暴内部上升气流强度较强, 强上升气流高度较高。

4.1 风暴低层特征

4.1.1 0.5°仰角 PPI

图 3a—e 分别是 15 时 30 分青岛双偏振雷达 0.5°仰角水平极化反射率因子 (Z_h)、平均径向速度 (V)、差分反射率 (Z_{dr})、相关系数 (CC) 和差分相移率 (K_{dp})。图中叠加了中气旋 (白色圆圈), 其中心对应的高度约 1.6 km, 蓝色实线为 50 dBz 等值线, 蓝色点线为 60 dBz 等值线。

风暴低层强回波 (≥ 50 dBz, 下同) 区东西长度和南北宽度均约 15 km, 贾悦站附近水平极化反射

率因子在 66—70 dBz, 风暴南侧有明显的入流缺口 (图 3a), 对应明显的气旋性流场结构 (图 3b), 为低层辐合上升气流区。强回波区对应的差分反射率正负分明 (图 3c), 强回波中心 (≥ 60 dBz, 下同) 对应的差分反射率在贾悦站以西表现为负值区, 最小为 -4.0 dB 左右, 贾悦站以东差分反射率在 -0.5 — 2.5 dB; 强回波中心的北侧和东侧强回波区对应大的差分反射率值 (2.0 — 4.0 dB)。风暴南侧入流缺口附近也存在大的差分反射率。强回波区对应的相系数差别明显 (图 3d), 但强回波中心对应的相

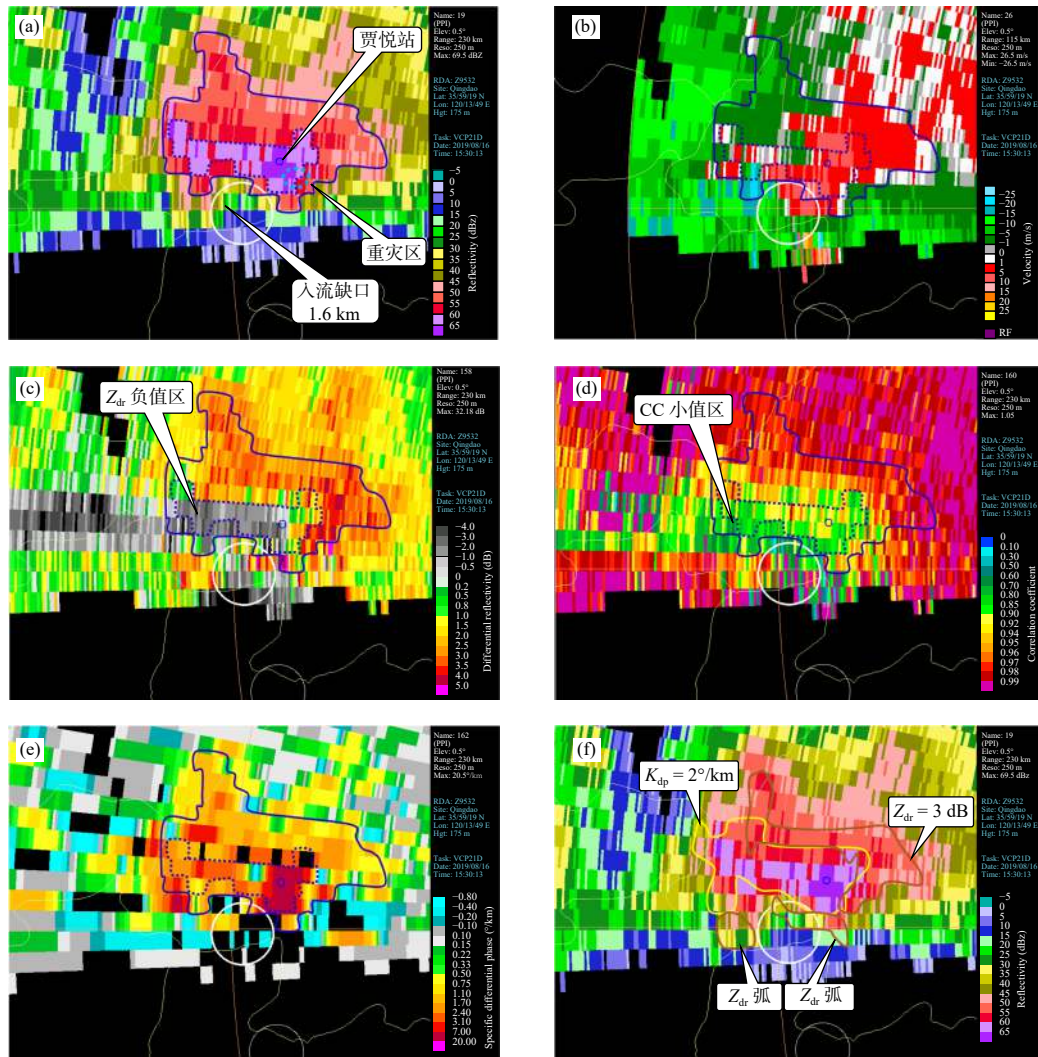


图 3 8 月 16 日 15 时 30 分青岛雷达 0.5°仰角水平极化反射率因子 (a, f, 单位: dBz)、平均径向速度 (b, 单位: m/s)、差分反射率 (c, 单位: dB)、相关系数 (d) 和差分相移率 (e, 单位: $^{\circ}/\text{km}$) (白色圆圈为中气旋, 蓝色实线和点线分别为 50 dBz 和 60 dBz 反射率因子等值线 (a—e), 棕色实线为 3 dB 差分反射率等值线, 黄色实线为 $2^{\circ}/\text{km}$ 差分相移率等值线 (f))

Fig. 3 Z_h (a and f, unit: dBz), V (b, unit: m/s), Z_{dr} (c, unit: dB), CC (d), K_{dp} (e, unit: $^{\circ}/\text{km}$) at 0.5° elevation from the Qingdao radar at 15:30 BT 16 August 2019 (the white circle is mesocyclone, blue solid line and blue dotted line are 50 dBz and 60 dBz isoline of Z_h respectively (a—e), brown solid line is the 3 dB isoline of Z_{dr} , yellow solid line is $2^{\circ}/\text{km}$ isoline of K_{dp} (f))

关系数明显较小,基本小于0.94,最小在0.75左右。强回波区对应大的差分相移率值,多在 $0.75^{\circ}/\text{km}$ 以上(图3e),而强回波中心对应的差分相移率更大,多在 $2.0^{\circ}/\text{km}$ 以上,贾悦站周围出现异常大值,为 $8\text{--}12^{\circ}/\text{km}$ 。

贾悦站以西的3个径向差分反射率表现为显著的负值区(最小值在 $-4\text{--}-5\text{ dB}$),且延伸到178 km(大于178 km无降水回波),这种现象是强冰雹对电磁波的衰减所致(Ryzhkov, 2007),由此可以断定贾悦站周围66—70 dBz的超强回波表明该区域为强冰雹,这种强回波核后径向上较长距离的明显差分反射率负值区也可作为强冰雹的判别依据,同时也表明贾悦站以西的回波强度小于实际值。贾悦站以西的径向上相关系数表现为明显的小值区(≤ 0.9),且延伸到178 km,这种现象是强回波核后径向上波束非均匀填充所致(Ryzhkov, 2007)。贾悦站以东60—70 dBz回波区对应偏小的差分反射率和小相关系数,差分反射率基本在 $-0.5\text{--}2.5\text{ dB}$,相关系数在0.7—0.95。冰雹直径大、多种相态粒子同时存在均可导致相关系数降级,冰雹直径越大,相关系数越小(Ryzhkov, 2007)。贾悦站15时31—41分降水量为17.9 mm,其中15时33、34和35分的分钟降水量分别为2.4、2.2和2.5 mm,具有较大的雨强(小时雨量120 mm以上),雨滴浓度较高。因此,贾悦站周围出现异常大的差分相移率,表明雨滴浓度较高的同时还存在包有水膜的大冰雹粒子。综合判断,贾悦站周围65 dBz以上回波区为伴有较大雨强的强冰雹区,实际情况是冰雹重灾区出现在贾悦站东南方(图3a青色虚线椭圆区域),冰雹密度较大并且有直径超过50 mm的冰雹报告。

图3f是15时30分水平极化反射率因子叠加了差分反射率高值区($Z_{\text{dr}} \geq 3\text{ dB}$,棕色实线)和差分相移率高值区($K_{\text{dp}} \geq 2^{\circ}/\text{km}$,黄色实线)。上升气流一侧(风暴南侧)反射率因子梯度大值区附近存在3 dB以上的差分反射率值,即 Z_{dr} 弧(Kumjian, et al, 2008, 2010; Kumjian, 2013b),对应偏小的相关系数和小差分相移率,表明上升气流周围分布着少数大粒子。强回波中心对应偏小的差分反射率(贾悦站以西由于衰减影响,所对应的水平极化反射率因子和差分反射率小于实际值)和小相关系数及大的差分相移率(差分相移率和相关系数不受衰减影响,

Kumjian, 2013a),该区域表现为一定数量的液态雨滴和大的冰雹粒子或(和)包有水膜的偏小的冰粒子。强回波中心北侧和东侧也存在3 dB以上的差分反射率,对应的水平极化反射率因子为50—59 dBz,差分相移率和相关系数偏低,该区域以少量大的液态雨滴为主,可能伴有少量直径偏小的融化冰雹粒子。

4.1.2 1.5°仰角PPI

图4a—e分别是15时30分青岛双偏振雷达1.5°仰角水平极化反射率因子、平均径向速度、差分反射率、相关系数和差分相移率。图中叠加了中气旋(白色圆圈),其中心对应的高度约3.3 km,在湿球 0°C 层高度(3.6 km)以下,蓝色实线为50 dBz等值线,蓝色点线为60 dBz等值线。

3.3 km高度有明显的有界弱回波区(图4a),与较强的气旋性旋转流场相对应(图4b),有界弱回波区内部 $Z_{\text{h}} < 20\text{ dBz}$ 的距离库对应负的差分反射率(图4c),外围存在增强的差分反射率,再往外又减小,这种增强的差分反射率类似环状或半环状分布在上升气流周围,即 Z_{dr} 环(Kumjian, et al, 2008, 2010; Kumjian, 2013b),对应的相对系数和差分相移率整体较小(图4d、e),表明有界弱回波区周围存在少数大的粒子。

强反射率因子位于中气旋北侧,65 dBz以上反射率因子东西长度约12 km,最大73 dBz(图4a)。强回波中心基本对应小的差分反射率($-1\text{--}1\text{ dB}$,图4c)、小的相关系数(图4d,与图3d类似,小的相关系数由波束非均匀填充所致),而差分相移率(图4e)呈东西两侧大中间小的形态结构,表明该高度以相对干的大冰雹粒子为主,而东西两侧含有浓度较高的直径偏小的液态粒子。

与 0.5° 仰角(1.6 km高度)对比可知,3.3 km高度上反射率因子更强,最大73 dBz,65 dBz以上回波面积明显大于低层(主要原因是该高度未出现明显衰减)。强回波中心中间区域对应小的差分反射率(部分为负值)和小差分相移率(部分为负值),表明该高度以冰雹粒子为主且未出现明显融化,而低层对应大的差分相移率,表明低层部分冰雹粒子已呈现明显融化状态同时含有一定浓度的小液态粒子。强回波中心北侧和东侧的强回波区对应的差分反射率上下差别明显,上层小($1\text{--}2\text{ dB}$),下层大($2\text{--}4\text{ dB}$),主要因素是液态粒子下降过程中随着下落速度的增大而出现较为明显的扁平状态。

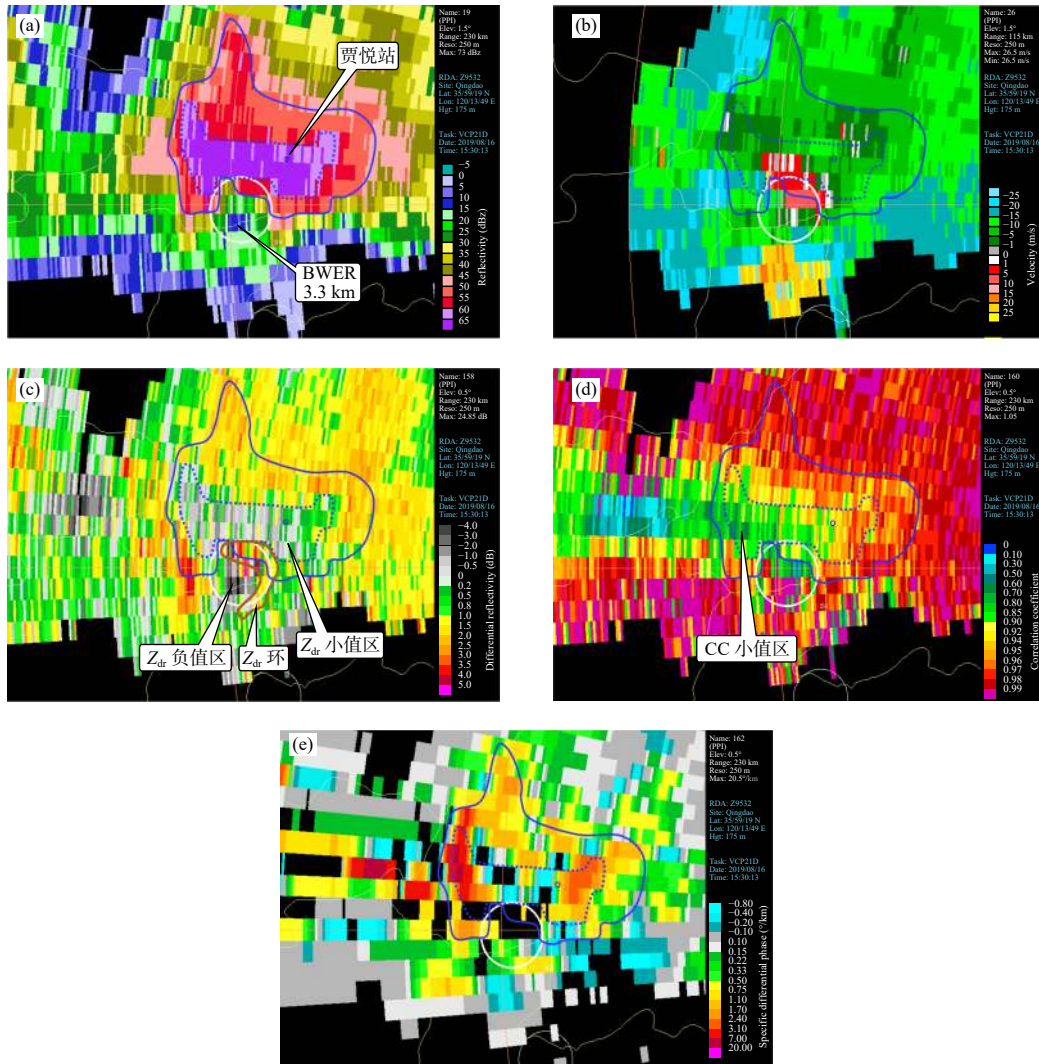


图4 8月16日15时30分青岛雷达1.5°仰角水平极化反射率因子(a,单位:dBz)、平均径向速度(b,单位:m/s)、差分反射率(c,单位:dB)、相关系数(d)和差分相移率(e,单位:°/km)(蓝色圆圈为贾悦区域站,白色圆圈为中气旋,蓝色实线和点线分别为50 dBz和60 dBz反射率因子等值线)

Fig. 4 Z_h (a, unit: dBz), V (b, unit: m/s), Z_{dr} (c, unit: dB), CC (d), K_{dp} (e, unit: °/km) at 1.5° elevation from the Qingdao radar at 15:30 BT 16 August 2019 (The blue circle is Jiayue regional automatic station, white circle is mesocyclone, blue solid line and blue dotted line are 50 dBz and 60 dBz isoline of Z_h , respectively)

4.2 风暴中层特征

图5a—e分别是15时30分青岛双偏振雷达3.3°仰角水平极化反射率因子、平均径向速度、差分反射率、相关系数和差分相移率。产品叠加中气旋(白色圆圈),其中心对应的高度约6.4 km(与环境-10℃层高度大致相当),蓝色实线为50 dBz等值线,蓝色点线为60 dBz等值线,黑色实线为三体散射区。

超级单体风暴中层50 dBz以上强回波区内有明显的有界弱回波区(图5a),强回波区两侧伴有强

的入流区,南侧对应气旋性旋转气流,北侧对应反气旋性旋转气流(图5b)。强回波区对应的差分反射率和差分相移率平均而言都较小(图5c、e),但局部存在大值区。差分反射率在气旋的东、南侧存在>1 dB的大值区,呈“半环状”分布的 Z_{dr} 环(2.4°仰角基本呈“环状”分布的 Z_{dr} 环,高度5.0 km,略高于0℃层高度,图略),最大4.6 dB。相关系数在中气旋周围分布有0.9以下的值,即CC环。有界弱回波区西侧差分相移率存在>1°/km的大值区,即 K_{dr} 柱,最大3.9°/km。

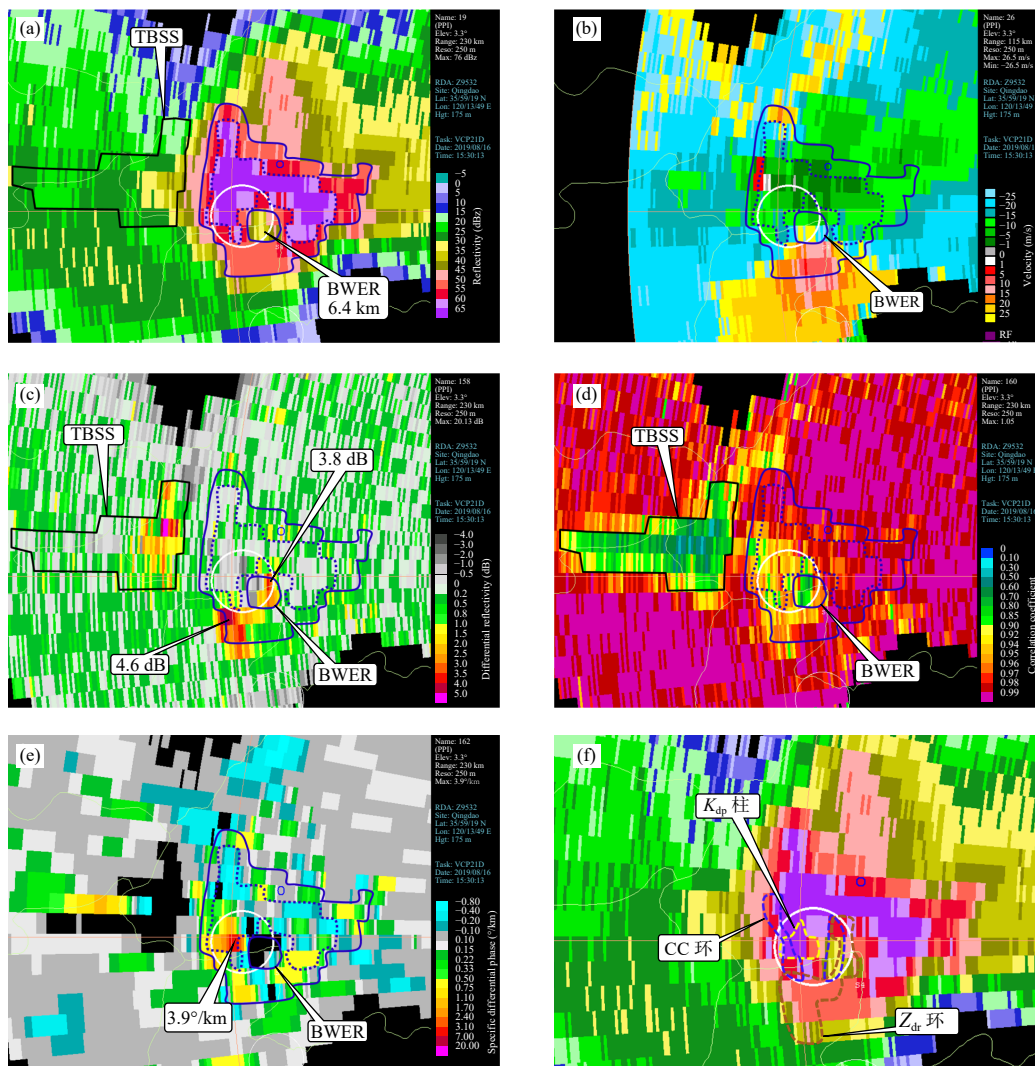


图5 8月16日15时30分青岛雷达3.3°仰角水平极化反射率因子(a、f,单位: dBZ)、平均径向速度(b,单位: m/s)、差分反射率(c,单位: dB)和相关系数(d)和差分相移率(e,单位: °/km)(蓝色圆圈为贾悦区域站,白色圆圈为中气旋,黑色实线为三体散射,蓝色实线和点线分别为50 dBZ和60 dBZ反射率因子等值线(a—e),棕色虚线为1 dB差分反射率等值线,黄色虚线为1°/km差分相移率等值线,蓝色虚线为0.9相关系数等值线(f))

Fig. 5 Z_h (a and f, unit: dBZ), V (b, unit: m/s), Z_{dr} (c, unit: dB), CC (d), K_{dp} (e, unit: °/km) at 3.3° elevation from the Qingdao radar at 15:30 BT 16 August 2019 (The blue circle is Jiayue regional automatic station, white circle is mesocyclone, black solid line is three body scattering, blue solid line and blue dotted line are 50 dBZ and 60 dBZ isoline of Z_h , respectively (a—e), brown dashed line is the 1 dB isoline of Z_{dr} , yellow dashed line is 1°/km isoline of K_{dp} , blue dashed line is 0.9 isoline of CC (f))

图5f是反射率因子叠加 Z_{dr} 环(棕色虚线, $Z_{dr} > 1$ dB)、 K_{dp} 柱(黄色虚线, $K_{dp} > 1$ °/km)、CC 环(蓝色虚线, $CC \leq 0.9$)。可以看出,该高度层 Z_{dr} 环对应的反射率因子差异明显,范围在30—60 dBZ,对应的相系数也大小不一(0.8—0.98),对应的差分相移率较小(< 0.8 °/km);风暴内强上升气流可将少量的呈扁平状态的液态粒子或包有水膜的冰粒子带到环境-10℃层高度附近,从而导致大的差分反射率和小的差分相移率,不同相态粒子(液态雨

滴粒子,干的或湿的冰粒子)同时存在导致相系数明显偏低,如果水平极化反射率因子较大,同时表明粒子直径也大。 K_{dp} 柱对应51—76 dBZ强反射率因子,对应偏低的相关系数(0.85—0.97)和小的差分反射率(-0.5—0.5 dB);差分反射率小表明粒子形态相对双极化波而言较为匀称,相系数偏低表明有混合相态粒子或大的冰雹粒子,水平极化反射率因子值大表明存在大的冰雹粒子,综合而言,该高度 K_{dp} 柱内含有大的雹粒子和一定数量的直径

偏小的液态粒子。CC环主要分布在中气旋东西两侧，东侧主要与有界弱回波区对应，西侧对应的回波强度较大，上升气流周围粒子相态较为复杂。

从图5d可以看出，风暴强反射率因子后侧径向上相关系数明显较小，基本在0.3—0.9，同时差分反射率(图5c)上靠近风暴的区域具有较大值，表明该区域为三体散射区(Hubbert, et al, 2000; Kumjian, et al, 2010; 陶岚等, 2019; 杨吉等, 2020)，而在反射率因子中(图5a)很难识别出三体散射区。

环境-10℃高度具有明显的强回波悬垂、有界弱回波和三体散射等特征。强气旋性旋转气流区存在降级的相关系数，差分反射率和差分相移率大值区分布在上升气流区内或附近，两者基本呈分离状态。差分反射率大值(Z_{dr} 环)区远离低层 Z_{dr} 高值(>3.0 dB)区，中层差分相移率大值区也远离低层差分相移率中心(>7°/km)区。

与1.5°仰角(3.3 km高度)相比，回波强度有所增强，最大76 dBz，60 dBz以上回波面积大致相当，但分布形态有所差别。3.3°仰角强回波中心对应的差分反射率和差分相移率略小于1.5°仰角(K_{dp} 柱除外)且负值占比较多，而相关系数整体偏大，表明该高度以相对干的冰粒子为主且部分粒子长轴呈垂直状态。1.5°仰角和3.3°仰角在上升气流区外围都存在 Z_{dr} 环，表明环境湿球0℃层高度至-10℃层高度之间上升气流区外围存在少数大的粒子，也间接表明上升气流强劲而且深厚。

4.3 风暴高层特征

图6是15时30分青岛双偏振雷达6.0°仰角水平极化反射率因子、平均径向速度、差分反射率、相关系数和差分相移率。中气旋中心对应的高度约11.2 km(对应环境-35℃层高度)。蓝色实线为50 dBz等值线，蓝色虚线为60 dBz等值线。可以看出，10.5 km高度上仍有50 dBz以上强反射率因子，最大66 dBz(图6a)。强回波区对应径向速度表现为强辐散(图6b)，正、负速度差达48 m/s。强回波区对应的差分反射率和差分相移率多为负值(图6c、e)，相关系数为0.95—0.99(图6d)。风暴高层回波强度较强，是冰雹粒子所致，冰雹粒子长轴呈垂直分布，可导致差分反射率和差分相移率多表现为负值。

中气旋西侧差分反射率大值区和相关系数小

值区表明该区域为三体散射区。

4.4 垂直结构特征

图7a—d分别是15时30分青岛双偏振雷达水平极化反射率因子、平均径向速度、差分反射率、相关系数和差分相移率的垂直剖面，剖面是从雷达站点沿269°径向，恰好经过中层差分反射率(图5c)和差分相移率(图5e)大值区，点线从外至内依次是50、55、60和65 dBz反射率因子等值线，蓝色、白色和红色水平直线分别是环境0℃、-10℃和-20℃层高度。可以看出，反射率因子剖面60 dBz回波顶部达到11 km(图7a)，≥60 dBz回波厚度达到6.6 km，风暴非常强盛。有界弱回波区深厚宽广，≤50 dBz的宽度达4.8 km(0℃层高度附近)，顶部达到7 km左右高度。差分反射率垂直剖面上有2条清晰的 $Z_{dr}>1$ dB大值区，即 Z_{dr} 柱(图7b)，分别位于有界弱回波区东、西两侧，顶部高度差别明显。西侧 Z_{dr} 柱顶部达到-10℃层高度附近，东侧 Z_{dr} 柱顶部伸展到-20℃层高度附近(实际上-10℃层高度以下增强的差分反射率为环状结构，即 Z_{dr} 环)。相关系数垂直剖面上，有界弱回波区内较小(图7c)，小于0.9。差分相移率垂直剖面上在有界弱回波区西侧存在 $K_{dp}>1^\circ/\text{km}$ 的大值区，即 K_{dp} 柱，顶部伸展到-20℃层高度以上(图7d)。

图7e是水平极化反射率因子剖面叠加 $Z_{dr}=1$ dB(黑色虚线)和 $K_{dp}=1^\circ/\text{km}$ (棕色虚线)及CC=0.9(浅蓝色虚线)等值线，图7f是差分反射率剖面叠加 $K_{dp}=1^\circ/\text{km}$ (棕色虚线)和CC=0.9(浅蓝色虚线)等值线，蓝色点线是湿球0℃层高度。可以看出， K_{dp} 柱、东侧 Z_{dr} 柱及CC<0.9的顶部区域都在环境-20℃层高度附近，说明风暴内部气旋性旋转上升气流非常强劲，利于强风暴发展与维持及大冰雹的形成。0℃层高度之上有界弱回波区内相关系数小于0.9，表明粒子相态或形状为多样性。

Z_{dr} 柱的形成与风暴内强上升气流区密切相关，强上升气流可以将包有水膜的冰粒子和(或)液态粒子带到环境0℃层高度以上，从而导致0℃层高度以上出现大的差分反射率值。诸城强风暴15时30分垂直剖面上有界弱回波区东、西两侧有 Z_{dr} 柱，西侧 Z_{dr} 柱差分反射率值在1—2.8 dBz，对应的水平极化反射率因子在45—59 dBz，相关系数在0.93—0.98，而东侧 Z_{dr} 柱差分反射率值在1—5.1 dBz，对应的

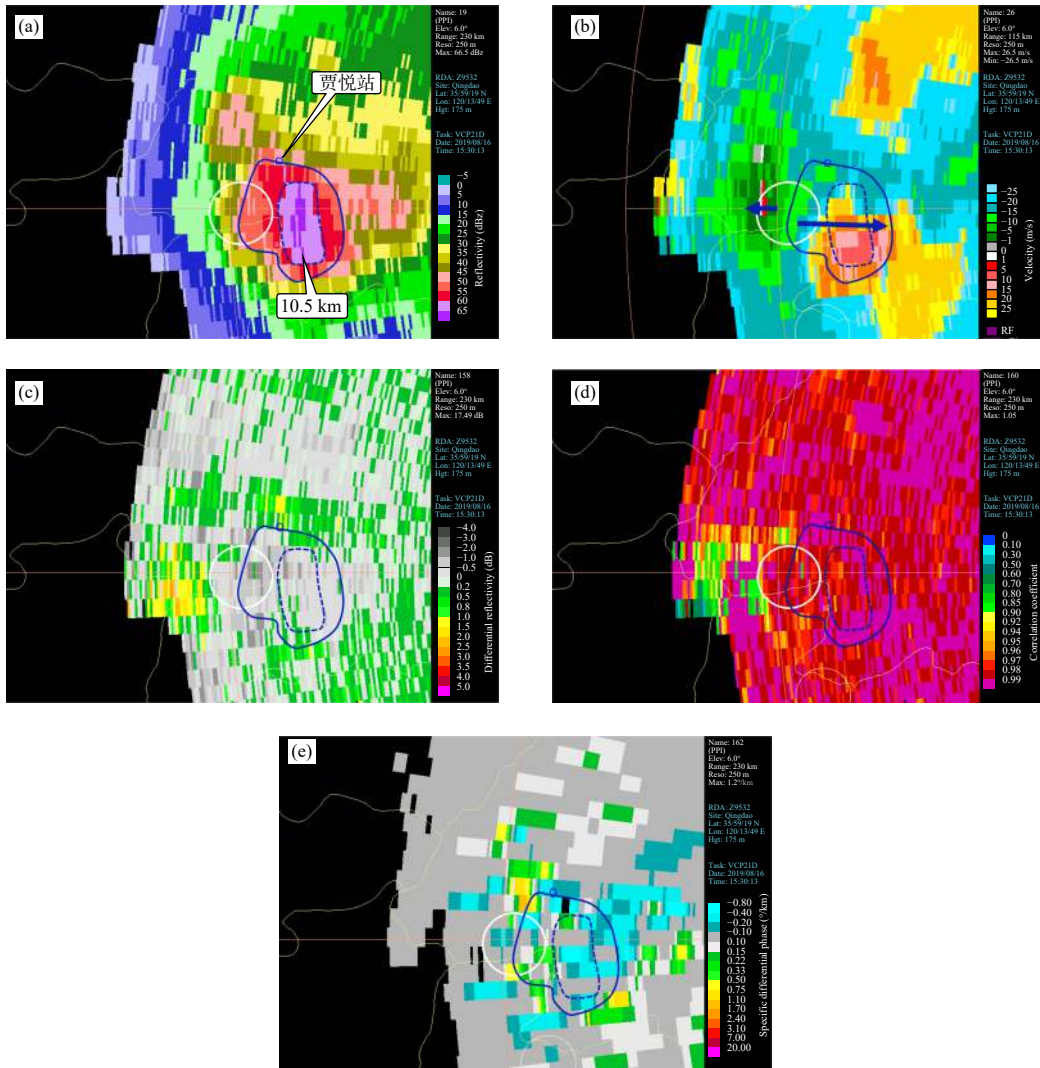


图6 8月16日15时30分青岛雷达6.0°仰角水平极化反射率因子(a,单位:dBz)、平均径向速度(b,单位:m/s)、差分反射率(c,单位:dB)、相关系数(d)和差分相移率(e,单位:°/km)(蓝色圆圈为贾悦区域站,白色圆圈为中气旋,蓝色实线和虚线分别为50 dBz和60 dBz反射率因子等值线)

Fig. 6 Z_h (a, unit: dBz), V (b, unit: m/s), Z_{dr} (c, unit: dB), CC (d), K_{dp} (e, unit: °/km) at 6.0° elevation from the Qingdao radar at 15:30 BT 16 August 2019 (The blue circle is Jiayue regional automatic station, white circle is mesocyclone, blue solid line and blue dashed line are 50 dBz and 60 dBz isoline of Z_h , respectively)

水平极化反射率因子在24—60 dBz, 相关系数在0.51—0.98。东西两侧 Z_{dr} 柱相距较远, 约8 km, 且东侧 Z_{dr} 柱高度较高, 说明此时风暴强上升气流区非常宽广且深厚, 利于冰雹的形成与增长。湿球0℃层高度之下约2.8 km高度至-10℃层高度之间有明显的 Z_{dr} 环, Z_{dr} 环的高度达到-10℃层高度, 间接表明气旋性旋转上升气流非常强劲而且深厚。

诸城超级单体风暴 K_{dp} 柱位于有界弱回波区西侧, 其顶部在-20℃层高度以上, 与 Z_{dr} 柱顶部相距约3.5 km, 也间接表明风暴内部上升气流非常深厚

强盛。-10℃层高度之上对应的回波强度明显大于-10℃层高度之下对应的回波强度, 而对应的差分反射率相反; 0—-10℃层高度之间对应的水平极化反射率因子在45—64 dBz, 差分反射率基本为正值, 在0.2—2.8 dB; -10℃层高度之上对应的水平极化反射率因子在55—72 dBz, 差分反射率基本在-0.5—0.2 dB。-10℃层高度基本可将 K_{dp} 柱分为上、下两层, 上层水平极化反射率因子大于下层, 而上层差分反射率小于下层, 表明上层含有大的冰粒子和浓度较高的直径偏小的液态雨滴, 下层含有浓

度偏高的直径大于上层的液态雨滴或(和)一定浓度的直径小于上层的冰雹粒子。

5 双偏振特征示意图

图 8a₁、a₂ 分别是诸城强冰雹超级单体风暴低

层(1.6 km)和中层(6.4 km)雷达双偏振参数典型特征示意,实线、虚线和点线分别是 35、50 和 60 dBz 反射率因子等值线。图 8b 是非龙卷超级单体风暴双偏振特征示意(Kumjian, et al, 2010, 实线、虚线和点线分别是 0.0°、2.2°和 5.6°仰角 35 dBz 等值

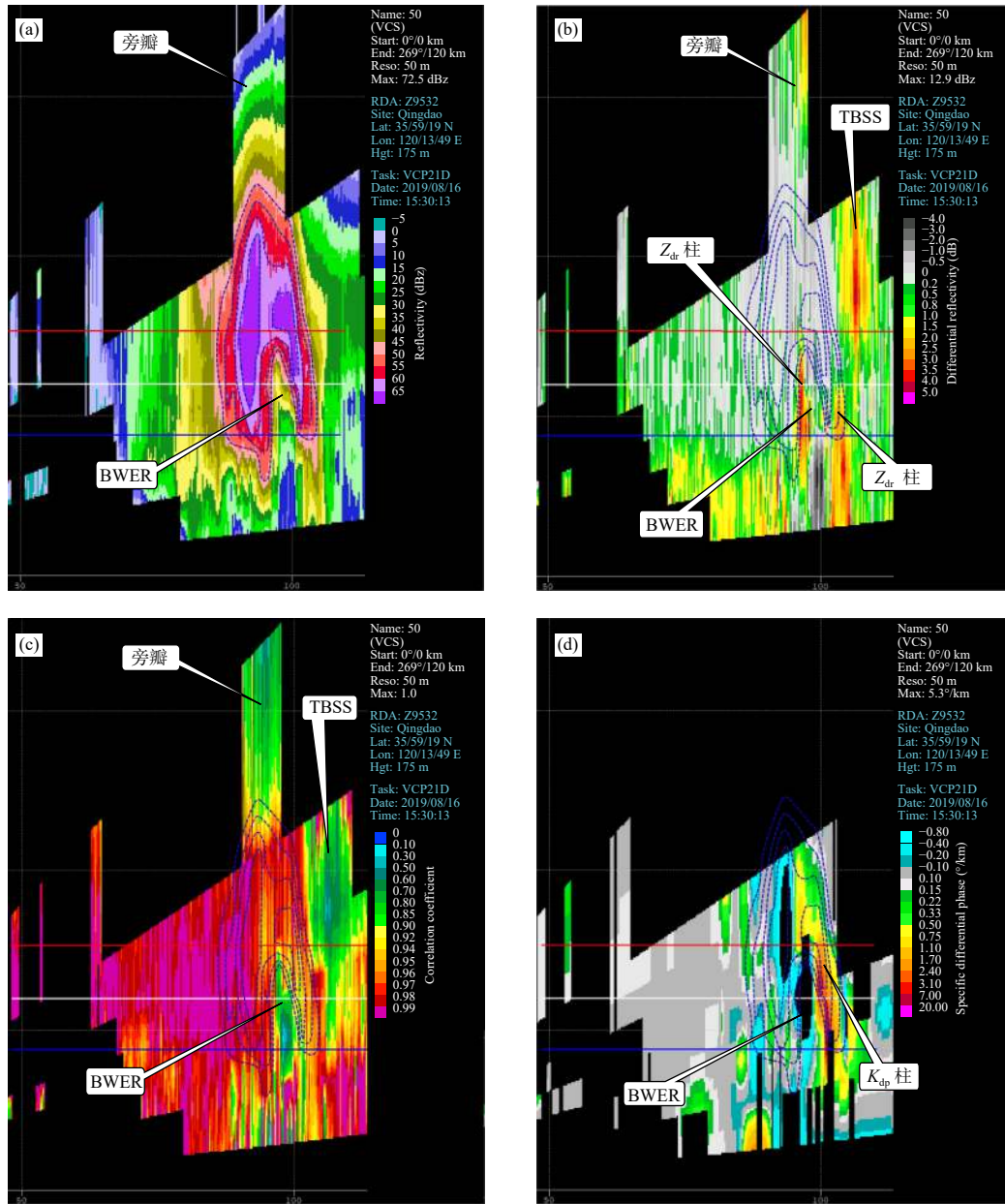
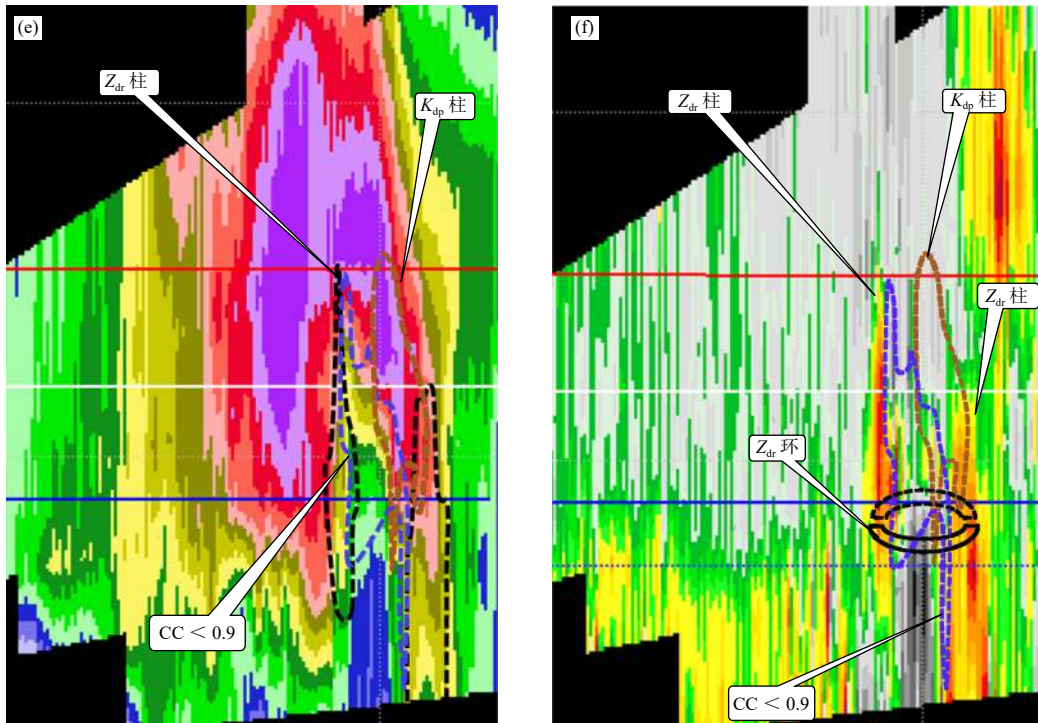


图 7 8月16日15时30分青岛雷达水平极化反射率因子(a, e, 单位: dBz)、差分反射率(b, f, 单位: dB)、相关系数(c)和差分相移率(d, 单位: °/km)垂直剖面(蓝色、白色、红色直线分别为0、-10、和-20℃层高度,蓝色点线由外而内为50—65 dBz 反射率因子等值线,间隔5 dBz(a—d),黑色虚线为1 dB 差分反射率等值线,棕色虚线为1°/km 差分相移率等值线,浅蓝色虚线为0.9 相关系数等值线(e—f))

Fig. 7 Z_h (a and e, unit: dBz), Z_{dr} (b and f, unit: dB), CC (c), K_{dp} (d, unit: °/km) from the Qingdao radar at 15:30 BT 16 August 2019 (The blue, white and red lines are the heights of 0, -10 and -20℃ layers respectively, blue dotted lines are 50—65 dBz reflectivity factor contours from outside to inside with an interval of 5 dBz (a—d), black dashed line is the 1 dB isoline of Z_{dr} , brown dashed line is 1°/km isoline of K_{dp} , light blue dashed line is 0.9 isoline of CC (e—f))



续图 7

Fig. 7 Continued

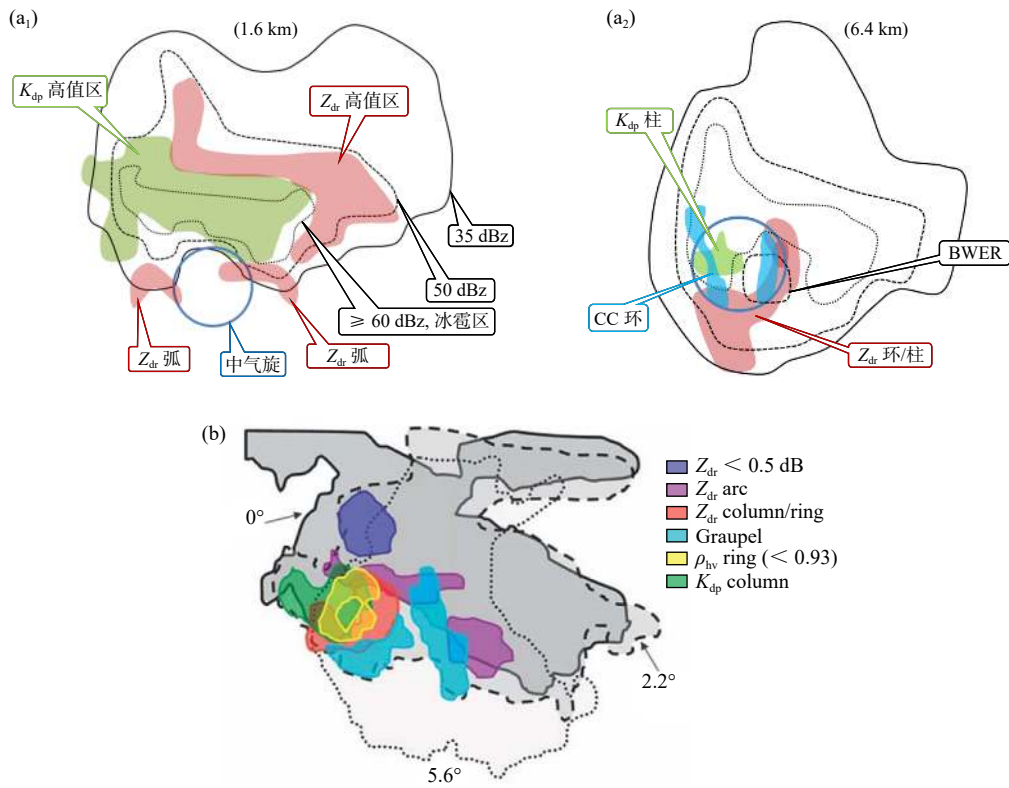


图 8 诸城超级单体 (a₁) 低层和 (a₂) 中层及非龙卷超级单体风暴 (b, Kumjian, et al, 2010) 双偏振特征示意
 Fig. 8 Schematic diagram of polarimetric signatures in the Zhucheng supercell at low level (a₁), middle level (a₂) and in a nontornadic supercell (b, Kumjian, et al, 2010)

线,对应的风暴质心高度分别为0.9、5.0和11.5 km, ρ_{hv} 与相关系数同义)。

诸城超级单体风暴低层(图8a₁)具有明显的入流缺口,风暴南侧上升气流区存在反射率因子梯度高值区。有两段 Z_{dr} 弧($Z_{dr} > 3$ dB)位于入流缺口的东、西两侧,东段与反射率因子梯度高值区相匹配,西段位于风暴强出流区前沿。 Z_{dr} 弧对应的差分相移率和相关系数偏小,上升气流区附近有大的粒子存在。上升气流区北侧60 dBz以上区域对应偏小的差分反射率和小的相关系数,而对应大的差分相移率,湿(或干)冰雹和液态雨滴共存。冰雹区外围(北侧和东侧)存在差分反射率高值区,对应的差分相移率偏小,以浓度较低而直径较大的雨滴为主。

风暴中层(-10℃层高度附近),具有明显的强回波悬垂和有界弱回波区。 Z_{dr} 环呈半包围结构,主要分布在中气旋东侧和南侧周围,对应偏小的差分相移率($< 2^\circ/\text{km}$),表明气旋性旋转上升气流区周围分布着少量大滴粒子和/或冰雹粒子。 Z_{dr} 柱和 K_{dp} 柱呈分离状态,分别位于中气旋东、西两侧。CC环分布在上升气流区东、西两侧,有界弱回波区内部基本对应小的相关系数,表明粒子形状和相态较为复杂。

与图8b对比可知,风暴低层都存在 Z_{dr} 弧,中层强上升气流周围伴有 Z_{dr} 环(柱)、CC环和 K_{dp} 柱。低层 Z_{dr} 弧相同之处是,风暴前侧入流区反射率因子梯度大值区均有 Z_{dr} 弧出现。由于风暴形态结构的差异, Z_{dr} 弧也存在差异,诸城超级单体风暴和图8b均有两段 Z_{dr} 弧,诸城超级单体在入流缺口西侧强下沉气流区前侧出现另一段 Z_{dr} 弧,而图8b中在较远的东侧出现另一段 Z_{dr} 弧。风暴中层,上升气流周围都存在 Z_{dr} 环(柱)、CC环和 K_{dp} 柱, K_{dp} 柱主要位于上升气流西侧而 Z_{dr} 柱主要位于其东侧。由于风暴形态结构的差异或观测高度的差异, Z_{dr} 环和CC环的形态不尽相同,可能是封闭的环状,也可能是半封闭的环状, K_{dp} 柱的面积也存在差别。

6 结 论

利用青岛S波段双偏振雷达探测资料定性分析了2019年8月16日潍坊地区的一次强冰雹超级单体风暴低层、中层、高层和垂直结构双偏振特征,讨论了该强风暴的微物理特征,并与Kumjian等(2010)提出的非龙卷超级单体风暴双偏振特征

进行了对比,得出如下结论:

(1)诸城超级单体风暴产生的天气背景是东北冷涡和地面 β 中尺度辐合线。上干冷、下暖湿的配置,造成强热力不稳定。对流有效位能小于1500 J/kg,风垂直切变较强。在对流有效位能偏弱弱的情况下,强风垂直切变也宜于组织性强的超级单体风暴产生。

(2)诸城超级单体风暴持续时间长,强度强,以冰雹灾害为主。持续时间约3 h,60 dBz以上强回波维持2.5 h。旺盛阶段具有非常明显的三体散射、旁瓣回波和有界弱回波区,风暴参数最大反射率因子、基于单体的垂直累积液态含水量、强中心高度和单体顶部高度平均值分别为74.1 dBz、67.9 kg/m²、6.3 km和11.3 km。中气旋厚度较厚,维持时间长,属于长寿命超级单体风暴。

(3)风暴低层(1.6 km高度)南侧有明显的入流缺口,其东、西两侧有 Z_{dr} 弧存在,上升气流周围存在少量大的粒子。60 dBz以上回波位于入流缺口后侧(北侧),对应偏小的差分反射率、小的相关系数和大的差分相移率,大的湿(或干)冰雹和雨滴共存。60 dBz以上回波北侧和东侧存在差分反射率高值区,对应的差分相移率偏小,以浓度相对较低而直径较大的雨滴为主。

(4)风暴中层(6.4 km高度)具有明显的强回波悬垂、有界弱回波区及 Z_{dr} 环、 K_{dp} 柱和CC环。 Z_{dr} 环主要分布在中气旋东侧和南侧周围,对应偏小的差分相移率($< 2^\circ/\text{km}$)和偏低的相关系数,表明气旋性旋转上升气流区周围分布着少量大的液态粒子和(或)冰雹粒子。 Z_{dr} 环厚度较厚,2.8—6.4 km高度 Z_{dr} 环较为明显,间接表明气旋性旋转上升气流非常强劲而且深厚。CC环主要分布在中气旋东侧和西侧,东侧基本与有界弱回波区对应,西侧对应强的反射率因子,粒子相态和形状较为复杂。

(5)环境0℃层高度以上风暴内部存在 Z_{dr} 柱和 K_{dp} 柱,其顶部呈分离状态,高度大致相当。 K_{dp} 柱位于有界弱回波区西侧,其顶部略高于-20℃层高度。 Z_{dr} 柱位于有界弱回波区东侧,顶部位于环境-20℃层高度。-10℃—-20℃层 Z_{dr} 柱对应大的水平极化反射率因子和小差分相移率,表明含有少数大的液态或湿冰粒子;而 K_{dp} 柱对应大的水平极化反射率因子和小差分反射率,表明含有浓度较高的小的液态或(和)湿冰粒子及大的冰雹粒子。水平极化反射率因子、差分反射率、相关系数

和差分相移率垂直结构特征表明, 风暴内部存在深厚强盛的上升气流, 利于风暴发展或维持, 利于冰雹的形成与增长。

(6) 强回波中心(60 dBz 以上)从高层至底层对应小的差分反射率, -20°C 层高度以下对应偏小的相关系数, 小的差分相移率(底层除外), 大的冰雹粒子及少数小的雨滴共存。50—59 dBz 强回波区差分反射率在 0°C 层高度附近较小($<1\text{ dB}$), 湿球 0°C 层高度附近中等(1—2 dB), 底层较大(2 dB 以上), 同时差分相移率自上而下增大, 表明粒子在湿球 0°C 层高度附近迅速融化, 下降过程中随着降落速度的增大液态粒子呈现更明显的扁平形状结构。

(7) 风暴低层强反射率核(65 dBz 以上)后侧径向上出现显著差分反射率负值区, 是由于强回波对电磁波的衰减所致, 这种现象可作为特大冰雹(直径 $\geq 50\text{ mm}$) 的识别依据。风暴低层强反射率核(65 dBz 以上)对应异常大的差分相移率值, 表明含有浓度较高的液态雨滴, 可导致较强的短时雨强, 同时还含有包有水膜的冰雹粒子。

参考文献

- 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. 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 Mar Meteor*, 40(3): 27-36 (in Chinese)
- 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. 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. *Acta Meteor Sinica*, 78(1): 86-100 (in Chinese)
- 孙丝雨, 沈永海, 霍苗等. 2013. 双线偏振雷达在一次强降雹过程中的初步应用. *暴雨灾害*, 32(3): 249-255. Sun S Y, Shen Y H, Huo M, et al. 2013. Preliminary application of dual-polarization weather radar in a severe hail event. *Torrential Rain Disaster*, 32(3): 249-255 (in Chinese)
- 陶岚, 管理, 孙敏等. 2019. 双线偏振多普勒雷达对一次降雹超级单体发展减弱阶段的演变分析. *气象科学*, 39(5): 685-697. Tao L, Guan L, Sun M, et al. 2019. Evolution analysis of a hail-producing supercell using dual polarization Doppler radar. *J Meteor Sci*, 39(5): 685-697 (in Chinese)
- 王洪, 万齐林, 尹金方等. 2016. 双线偏振雷达资料在数值模式中的应用: 模拟器的构建. *气象学报*, 74(2): 229-243. Wang H, Wan Q L, Yin J F, et al. 2016. Application of the dual-polarization radar Data in numerical modeling studies: Construction of the simulator. *Acta Meteor Sinica*, 74(2): 229-243 (in Chinese)
- 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. *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. *Acta Meteor Sinica*, 76(1): 92-103 (in Chinese)
- 温静. 2017. 中国东部一次飑线过程的微物理结构分析和数值模拟 [D]. 南京: 南京大学. Wen J. 2017. Observing and simulating the microphysical structure of a subtropical squall line in eastern China [D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese)
- 杨吉, 郑媛媛, 徐芬. 2020. 江淮地区一次冰雹过程的双线偏振雷达观测分析. *气象学报*, 78(4): 568-579. Yang J, Zheng Y Y, Xu F. 2020. An analysis of a hail case over the Yangtze and Huai River Basin based on dual-polarization radar observations. *Acta Meteor Sinica*, 78(4): 568-579 (in Chinese)
- 杨忠林, 赵坤, 徐坤等. 2019. 江淮梅雨期极端对流微物理特征的双偏振雷达观测研究. *气象学报*, 77(1): 58-72. Yang Z L, Zhao K, Xu K, et al. 2019. Microphysical characteristics of extreme convective precipitation over the Yangtze-Huaihe river basin during the Meiyu season based on polarimetric radar data. *Acta Meteor Sinica*, 77(1): 58-72 (in Chinese)
- 张鸿发, 鄢秀书, 王致君等. 2001. 偏振雷达观测强对流雷暴云. *大气科学*, 25(1): 38-48. Zhang H F, Qie X S, Wang Z J, et al. 2001. Polarization radar observations on hailstorms. *Chinese J Atmos Sci*, 25(1): 38-48 (in Chinese)
- 张廷龙, 杨静, 楚荣忠等. 2012. 平凉一次雷暴云内的降水粒子分布及其电学特征的探讨. *高原气象*, 31(4): 1091-1099. Zhang T L, Yang J, Chu R Z, et al. 2012. Distribution of precipitation particle and electrical characteristic of a thunderstorm in Pingliang region. *Plateau Meteor*, 31(4): 1091-1099 (in Chinese)
- 张学泰, 李文婷, 彭窈等. 2017. 清远一次超级单体降雹的双偏振雷达特征分析. *广东气象*, 39(4): 41-44, 51. Zhang X T, Li W T, Peng Y, et al. 2017. Analysis of the characteristics of polarimetric weather radar for a super-cell hail in Qingyuan. *Guangdong Meteor*, 39(4): 41-44, 51 (in Chinese)
- 张羽, 胡东明, 李怀宇. 2017. 广州双偏振天气雷达在短时强降水中的初步应用. *广东气象*, 39(2): 26-29. Zhang Y, Hu D M, Li H Y. 2017. Preliminary application of a dual polarization weather radar in Guangzhou during a short-range intensive rain. *Guangdong Meteor*, 39(2): 26-29 (in Chinese)
- Adlerman E J, Droegemeier K K, Davies-Jones R. 1999. A numerical simulation of cyclic mesocyclogenesis. *J Atmos Sci*, 56(13): 2045-2069
- Brandes E A, Davies-Jones R P, Johnson B C. 1988. Streamwise vorticity effects on supercell morphology and persistence. *J Atmos Sci*, 45(6): 947-963
- Bringi V N, Liu L, Kennedy P C, et al. 1996. Dual multiparameter radar observations of intense convective storms: The 24 June 1992 case study. *Meteor Atmos Phys*, 59(1): 3-31
- Browning K A. 1964. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J Atmos Sci*, 21(6): 634-639
- Browning K A. 1965. The evolution of tornadic storms. *J Atmos Sci*, 22(6):

- 664-668
- Conway J W, Zrnić D S. 1993. A study of embryo production and hail growth using dual-Doppler and multiparameter radars. *Mon Wea Rev*, 121(9): 2511-2528
- 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 Appl Meteor*, 37(8): 749-775
- Hubbert J C, Bringi V N. 2000. The effects of three-body scattering on differential reflectivity signatures. *J Atmos Ocean Technol*, 17(1): 51-61
- Illingworth A J, Goddard J W F, Cherry S M. 1987. Polarization radar studies of precipitation development in convective storms. *Quart J Roy Meteor Soc*, 113(476): 469-489
- Kumjian M R, Ryzhkov A V. 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms. *J Appl Meteor Climatol*, 47(7): 1940-1961
- 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. *Mon Wea Rev*, 138(10): 3762-3786
- Kumjian M R. 2013a. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I : Description of the polarimetric radar variables. *J Oper Meteor*, 1(19): 226-242
- Kumjian M R. 2013b. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II : Warm- and cold-season applications. *J Oper Meteor*, 1(20): 243-264
- 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 Appl Meteor Climatol*, 53(7): 1820-1842
- Lemon L R, Doswell III C A. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Mon Wea Rev*, 107(9): 1184-1197
- 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 Appl Meteor*, 41(12): 1179-1194
- Marwitz J D. 1972. The structure and motion of severe hailstorms. Part I : Supercell storms. *J Appl Meteor*, 11(1): 166-179
- Romine G S, Burgess D W, Wilhelmson R B. 2008. A dual-polarization-radar-based assessment of the 8 May 2003 Oklahoma City area tornadic supercell. *Mon Wea Rev*, 136(8): 2849-2870
- Ryzhkov A V, Zhuravlyov V B, Rybakova N A. 1994. Preliminary results of X-band polarization radar studies of clouds and precipitation. *J Atmos Ocean Technol*, 11(1): 132-139
- Ryzhkov A V. 2007. The impact of beam broadening on the quality of radar polarimetric data. *J Atmos Ocean Technol*, 24(5): 729-744
- Snyder J C, Bluestein H B, Venkatesh V, et al. 2013. Observations of polarimetric signatures in supercells by a X-band mobile Doppler radar. *Mon Wea Rev*, 141(1): 3-29
- Van Den Broeke M S, Straka J M, Rasmussen E N. 2008. Polarimetric radar observations at low levels during tornado life cycles in a small sample of classic southern plains supercells. *J Appl Meteor Climatol*, 47(4): 1232-1247
- Van Lier-Walqui M, Fridlind A M, Ackerman A S, et al. 2016. On polarimetric radar signatures of deep convection for model evaluation: Columns of specific differential phase observed during MC3E. *Mon Wea Rev*, 144(2): 737-758
- Wicker L J, Wilhelmson R B. 1995. Simulation and analysis of tornado development and decay within a three-dimensional supercell thunderstorm. *J Atmos Sci*, 52(15): 2675-2703
- Zrnić D S, Ryzhkov A V. 1999. Polarimetry for weather surveillance radars. *Bull Amer Meteor Soc*, 80(3): 389-406