

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*

龚佃利^{1,2} 王洪^{1,2} 许焕斌³ 王文青^{1,2} 朱君鉴⁴ 王俊^{1,2}

GONG Dianli^{1,2} WANG Hong^{1,2} XU Huanbin³ WANG Wenqing^{1,2} ZHU Junjian⁴ WANG Jun^{1,2}

1. 山东省气象科学研究所, 济南, 250031
2. 山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南, 250031
3. 北京应用气象研究所, 北京, 100082
4. 山东省气象台, 济南, 250031

1. *Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China*
2. *Weather Modification Office of Shandong Province People's Government, Jinan 250031, China*
3. *Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100082, China*
4. *Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China*

2020-11-03 收稿, 2021-03-29 改回。

龚佃利, 王洪, 许焕斌, 王文青, 朱君鉴, 王俊. 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. 气象学报, 79(4): 674-688

Gong Dianli, Wang Hong, Xu Huanbin, Wang Wenqing, Zhu Junjian, Wang Jun. 2021. Observational analysis of a rare and severe hailstorm cloud structure and large hailstones formation on 16 August 2019 in Zhucheng, Shandong province. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(4):674-688

Abstract A rare and severe hailstorm occurred on 16 August 2019 in Zhucheng, Shandong province is analyzed to investigate the structure of the hailstorm and the formation mechanism of large hailstones. Radar observations from Weifang CINRAD-SA (China New Generation Radar, S-band) and Qingdao S-band dual polarization Doppler weather radar, soundings and surface observations collected at various meteorological stations, and hail information obtained from field surveys are analyzed to reveal the weather background, the storm disaster situation, the evolution of radar echoes, the structure of the hailstorm and the formation mechanism of large hailstones. The results show that under the influence of a cold vortex system, the low levels are warm and wet while the upper levels are dry and cold over the central mountainous area and the southeast of Shandong province. Strong vertical wind shear of around 30.3 m/s from surface to 6 km altitude is conducive to the development of strong hailstorm. The hailstorm developed rapidly and went through five stages: Initiation, leap increase, brewing, hail fall and extinction. In the initiation stage, mesocyclone and Bounded Weak Echo Region (BWER) could be observed, which continuously strengthened and maintained for a long time. In the hail fall stage, the hailstorm showed characteristic structures such as BWER-overhang echo-echo wall and S-type horizontal circulation field. Furthermore, the BWER was associated with the configuration of the rotating updraft and the "0 line" structure where the horizontal velocity was zero. The "0 line" crossed the overhang echo and the strong echo region above the BWER and pointed to the top of the clouds with a specific hail forming function. In the heavy hail fall stage, the horizontal reflectivity factor (Z_H) in the echo wall to the north of BWER and the strong echo region in the upper hail clouds was greater than 60 dBz, and differential reflectivity (Z_{DR}) values were mostly between $-1-0$ dB, indicating it was the accumulation area of hailstones. Based on the shape of the radar echo, radial velocity and three-dimensional circulation field in the mature stage of the hailstorm, the framework of the main updraft in

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507903)、中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题(2020Z00711)。

作者简介: 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

the hailstorm and the schematic diagram of the "0 line" structure with hailstorm forming function are revealed in the present study. The results are helpful for better understanding possible mechanisms of the "0 line" structure in the growth of large hailstorms.

Key words Hailstorm, Structure of the hailstorm, Characteristics of polarization, Observational analysis, Formation mechanism of large hails

摘 要 为研究雹暴结构和大冰雹的形成机制,利用潍坊 CINRAD/SA 新一代天气雷达、青岛 S 波段双偏振多普勒天气雷达探测数据,结合探空、地面气象观测站观测和实地冰雹调查资料,对 2019 年 8 月 16 日发生在山东诸城的一次罕见强雹暴过程的天气背景、风雹灾害、雷达回波演变、雹云结构及大冰雹形成机制进行分析。结果表明,受冷涡天气系统影响,鲁中山区、鲁东南地区低层暖湿、高层干冷,0—6 km 高度风矢量差为 30.3 m/s,十分有利于强雹暴的发展。雹云发展迅速,历经发生、跃增、酝酿、降雹和消亡等 5 个阶段,在发生阶段即观测到中气旋、有界弱回波区等结构并不断增强,长时间维持;降雹阶段的雹云具有典型的有界弱回波区—悬垂回波—回波墙和“S”型水平流场等特征,有界弱回波区与旋转上升气流和水平速度为 0 的“0 线”结构相关联,“0 线”穿过悬垂回波和有界弱回波区顶部强回波区,指向雹云对流上冲云顶,具有特定的成雹功能;强降雹时段,雹云有界弱回波区北侧回波墙及其上方强回波区的水平反射率因子大于 60 dBz,对应的差分反射率因子大多为 -1—0 dB,表明为大冰雹的聚集区。依据对成熟阶段雹云雷达回波形态、径向速度和三维风场的分析,给出了实例雹云内主上升气流框架和具有成雹功能的“0 线”结构示意图,有助于理解“0 线”结构在大雹循环增长中的可能作用机理。

关键词 雹暴, 雹云结构, 偏振特征, 观测分析, 大雹形成机制

中图法分类号 P412.25

1 引 言

雹暴是一种发展速度快、生命期短、局地性强的固态降水过程,常伴有雷暴大风、短时强降水,具有极强的致灾性。为弄清冰雹云结构、发展过程,尤其是大冰雹(直径大于 2 cm)的形成机制,做好冰雹预警和人工防雹,中国众多科研人员基于对中国冰雹云和冰雹的综合观测,在冰雹气候学(Xie, et al, 2010)、冰雹形成的层结和环境参量条件(高晓梅等, 2018; 曾智琳等, 2019)、冰雹云的多普勒雷达特征参量(王令等, 2006; 郑媛媛等, 2004; 潘佳文等, 2021)、雹云结构(许焕斌, 2012; 罗琪等, 2019; 范皓等, 2019; 王建恒等, 2020)等方面开展了大量研究,总结得到了典型雹云的雷达回波形态和流场特征,如有界或无界弱回波区、“S”形旋转上升流场及场间配置成的“0 线(域)”结构等。然而,上述特征在雹云中不一定都会明显呈现,这表明成雹方式的多样性及复杂性;而有些个例,由于雹云不在雷达最佳观测距离或方位等原因,上述典型特征也不易被观测到。因此,对于冰雹云的研究,除要把握冰雹云发展的环境条件、外在形态特征外,还应进一步探寻雹云的内在流场结构,揭示雹云发展的动力框架和演变路径。

总结建立雹云的结构概念模型,对于认识雹云结构和发展机制十分必要。目前看到的雹云概念

模型皆是国外通过大型综合外场试验,总结概括几个资料较完整、形态较典型个例的共性特征,如: Browning 等(1976)利用雷达和飞机观测资料,提出了 Fleming 超级单体的雹云结构和冰雹增长模型; Chisholm 等(1972)基于对雷达观测资料的分析,给出了加拿大 Alberta 超级单体雹云中经典的有界弱回波区(BWER)结构。基于对观测资料分析给出的成熟态雹云结构的物理图像,有力充实发展了雹云物理学(Foote, et al, 1982, 1983; Miller, et al, 1990)。云中冰雹的形成需要适当的环境条件和特定云宏、微观结构。研究表明,云中冰雹落地前不被完全融化,则其尺度应大于某个临界值,融化计算给出的参考值是直径大于 1.0 cm,对应的落速大于 15 m/s(许焕斌, 2012),从静态托住冰雹的角度看,雹云中的最大上升气流速度应大于 15 m/s。雹云中要形成大冰雹,除了具有强的上升气流及过冷水累积区等条件外,还应有能动态托住冰雹的动力结构,使雹或雹胚粒子群在云中过冷云区存留 6—10 min,从而长大成大雹。随着理论研究(许焕斌等, 2001, 2002)和雷达观测分析技术的进步(俞小鼎等, 2020),基于中国观测的雹云实例,总结建立中国典型雹云结构和冰雹增长的概念模型很有必要。

2019 年 8 月 16 日,山东潍坊诸城市出现一次强雹暴过程,潍坊 CINRAD/SA 新一代天气雷达

(简称“潍坊雷达”)对该雹暴的整个生命期进行了观测;雹云移向基本沿潍坊雷达径向,且成熟阶段的雹云处于潍坊雷达的最佳观测范围。刁秀广等(2021)利用青岛S波段双偏振多普勒天气雷达(简称“青岛雷达”)对该雹暴成熟阶段的低层、中层和高层的偏振雷达回波特征进行了分析,给出了雹云的双偏振特征量示意图。文中将主要利用潍坊、青岛雷达观测和实地冰雹调查资料,结合双雷达反演风场,对该雹暴过程进行综合分析,力求剖析得到雹云典型结构、定性勾画出雹云内在流场结构,分析揭示大雹循环增长的过程。

2 实例介绍

2.1 资料和方法

文中分析的降水、大风资料来自地面气象观测站的分钟级观测数据,降雹地点、范围、最大冰雹直径和灾情由实地调查获得。雷达基数据来自潍坊雷达(36.66°N, 118.91°E, 海拔高度 268.5 m)、青岛雷达(35.99°N, 120.23°E, 海拔高度 174.8 m),两部雷达相距 139.9 km。当日雷达扫描模式为 VCP21,从 0.5°到 19.5°共扫描 9 层。

双多普勒雷达风场反演采用直接合成法(刘黎平, 2003; 王俊等, 2007; 王建恒等, 2020),对两部雷达体扫数据经质量控制后,将球坐标系的原始资料(回波强度、径向速度)双线性插值到直角坐标系中,水平格距为 0.01°,垂直格距为 0.5 km,高度从海拔 0.5 km 到 15 km 共 30 层。选择两部雷达观测时间一致的体扫资料进行风场反演,时间间隔不超过 1 min。

2.2 风雹及灾情

受冷涡系统影响,2019年8月16日上午,鲁西北、鲁北出现强对流天气,局地伴有雹暴,但降雹范围小、强度弱,未造成大的灾害(王俊等, 2021)。当日 14 时(北京时,下同)前后,在潍坊临朐县西南部的山区新生的对流云发展迅速,在向东南方向移动过程中,给潍坊安丘、诸城,日照五莲,临沂沂水等地造成持续时间长、灾害强度大、影响范围广的冰雹、大风和短时强降水,其中风雹灾害以诸城市贾悦镇、枳沟镇等 5 个乡镇和五莲县许孟镇、户部乡最重,诸城全市 10000 余公顷农作物受灾,经济损失 2.67 亿元。图 1 给出了造成上述风雹灾害的雨雹分布,降雹区与潍坊雷达 0.5°仰角强回波区(反

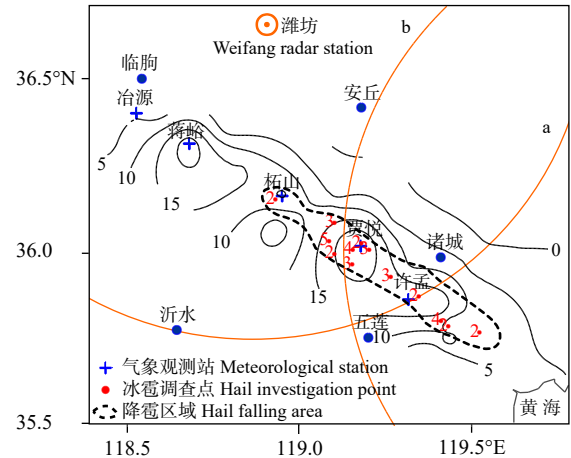


图 1 2019 年 8 月 16 日 14 时—16 时 30 分降水量(细实线,单位: mm,间隔 5)、冰雹落区(黑虚线,红点左侧数字为最大冰雹直径,单位: cm)(圆弧 a、b 分别为潍坊、青岛雷达站 100 km 距离圈)

Fig. 1 Accumulative rainfall between 14:00 and 16:30 BT 16 August 2019 (thin solid lines, unit: mm, interval: 5) and hail falling area (black dotted line, the numbers to the left of the red dots are the maximum hail diameters at various location, unit: cm) (the arcs a and b are 100 km distance circles of Weifang and Qingdao radar stations, respectively)

射率因子 > 65 dBz) 范围基本一致。

图 2 是 8 月 16 日部分地面气象观测站 5 min 降水量和极大风况。雹云发展最初 1 h 内(15 时前)以雷雨大风为主,其中临朐县蒋峪气象站 14 时 35—40 分降水量达到 14.9 mm,为该过程 5 min 最大降雨量。15 时,安丘市柘山镇、石埠子镇和沂水县圈里乡等地出现降雹,最大冰雹直径 2—3 cm;

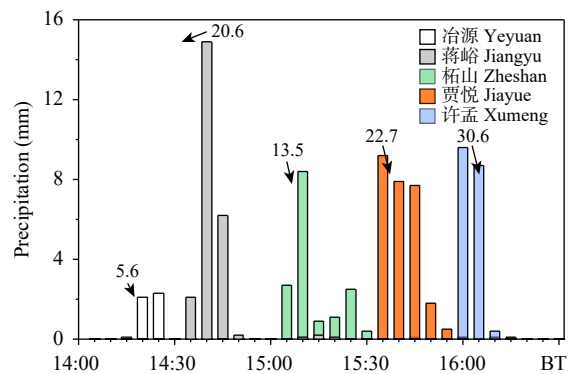


图 2 地面气象站观测 5 min 降水量和极大风向风速(风矢尾所注数字为风速,单位: m/s)

Fig. 2 Precipitation, maximum wind speed and direction at 5 min intervals observed at surface meteorological stations (the numbers beside the wind vectors are wind speeds, unit: m/s)

15时12分,雹云进入诸城贾悦镇,降雹强度和范围增大,降雹持续时间多为5—10 min,最大积雹厚度达10 cm,其中15时30分前后贾悦镇西部的冰雹灾害最重,最大冰雹直径超过5 cm;15时55分—16时10分,五莲县许孟镇、户部乡出现短时强降水、冰雹和大风,许孟镇极大风速达到30.6 m/s。16时30分之后,雹暴在日照境内减弱消散。

2.3 天气形势和层结条件

8月16日08时500 hPa高空形势(图略)显示,

冷涡中心位于华北北部,配合有低于-12℃的冷中心,冷涡西侧有横槽。此后,冷涡中心向东偏南方向移动,横槽逐渐转竖,8月16日14时(图3),冷涡低槽移到鲁中山区东部和鲁东南地区,山东中西部受西北气流控制,而此时850 hPa的横槽影响到鲁西北地区,其位置偏后于500 hPa横槽,鲁中山区为横槽前的西南暖湿气流区,如此低层暖湿、高层干冷的层结条件有利于冰雹发生区不稳定能量的积累。

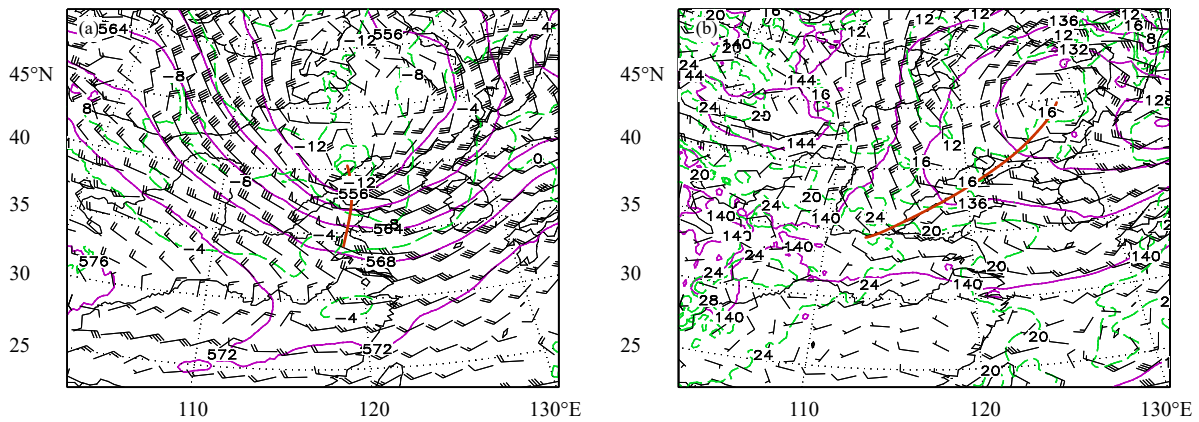


图3 8月16日14时(a)500 hPa、(b)850 hPa环流形势分析
(紫色实线为等高线,间隔4 dagpm;绿色虚线为等温线,间隔4℃)

Fig. 3 Geopotential height (purple solid lines, interval: 4 dagpm) and temperature (green dashed line, interval: 4°C) at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa at 14:00 BT 16 August 2019

8月16日08时,章丘探空站已受冷空气和弱降水的影响,为反映诸城雹暴发生时近地面大气层结的加热变化,利用戴建华等(2012)探空订正方法和探空绘制软件,根据8月16日14时诸城气象站地面气压、气温和露点温度观测值对08时章丘探空进行订正,绘制T-lgp图(图4)。可见,地面及925 hPa为偏东风,850—700 hPa为西南风,而600 hPa以上中高层以西偏北风为主,0—6 km风矢量差为30.3 m/s,属于强的深层风垂直切变(俞小鼎等,2020);此外,整层大气可降水量为36.95 mm,0℃层高度为4341 m,-10℃层高度为5920 m,-20℃层高度为7580 m,湿球温度0℃层对应的融化层高度约4100 m,上述指标均达到鲁中山区特强冰雹大风的阈值(高晓梅等,2018)。从近地面至743 hPa、500—407 hPa存在明显干层;而中层716—507 hPa的温度与露点差为1.2—4.3℃,空气处于准饱和状态。根据订正探空计算得到对流有

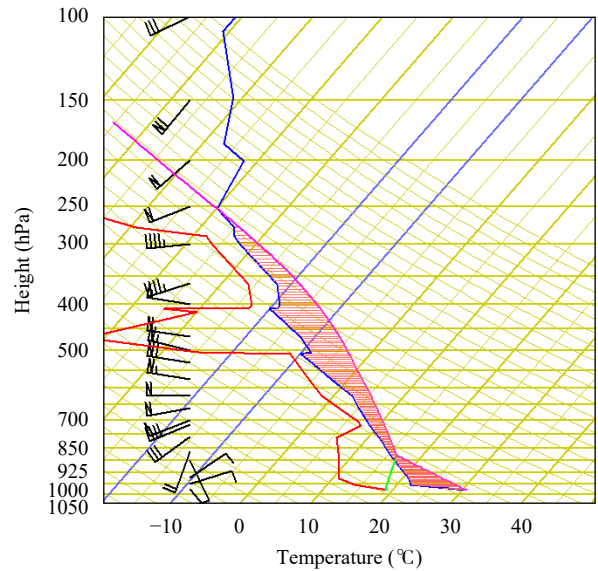


图4 章丘站8月16日14时订正探空(温度对数压力图)
Fig. 4 Sounding skew(T-lgp)at Zhangqiu at 14:00 BT 16 August 2019

效位能(CAPE)为 1385 J/kg, 较 08 时增大 1308 J/kg, 但仍属中等量值。上述分析表明, 大气层结条件十分有利于超级单体风暴的发展及大冰雹、雷暴大风的产生。

3 雹云雷达回波特征

3.1 回波演变特征

本次强雹暴过程从初生到强盛阶段, 雹云中心距潍坊雷达站 40—100 km, 处在潍坊雷达有效探测范围内, 图 5 给出了 8 月 16 日 13 时 55 分—16 时 58 分潍坊雷达的基本反射率因子产品和风暴追踪信息(STI), 结合剖面分析可见, 风暴单体最早于 13 时 55 分在临朐县西南的鲁山东侧初生并快速发展, 14 时 07 分雷达即探测到有界弱回波区(BWER); 14 时 13 分, 风暴中层识别出中气旋和三体散射特征(TBSS), 中气旋最大切变为 $10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; 14 时 36 分, 风暴高层 5 km 处出现三体散射特征, 说明高层有大冰雹生成; 15 时, 0.5° 仰角也出现三体散射特征, 反射率因子大于 65 dBz 的强回波顶高超过 8 km, 风暴发展到强盛阶段, 地面出现降雹并持续到 16 时 11 分; 此后, 风暴逐渐减弱消散。成熟阶段的雹云向东南方向移动, 平均移速约 55 km/h。

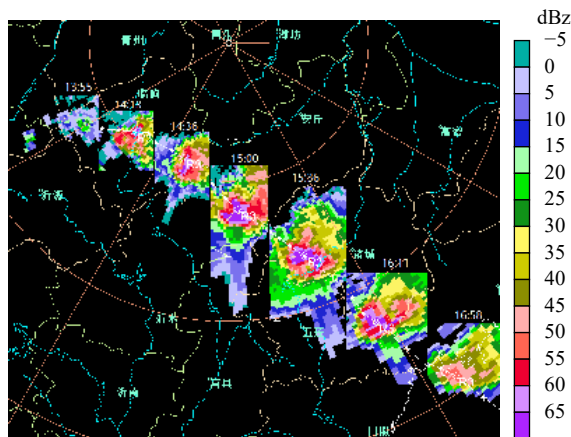


图 5 潍坊雷达观测基本反射率因子 (4.3° 仰角) 和风暴追踪信息 (STI, 标注为 R3)

Fig. 5 Radar reflectivity (4.3° elevation) and storm tracking information (STI, labeled by R3) observed by Weifang Radar

3.2 雹云发展的特征阶段

雹云强回波区面积、垂直累积液态含水量 (VIL) 和回波顶高 (ET) 变化可以反映雹云的发展

过程和强弱。图 6 是由潍坊雷达观测计算的雹云反射率因子不小于 60、65 dBz 面积 (分别以 S_{60} 、 S_{65} 表示)、垂直累积液态含水量和回波顶高逐时次演变。可见, 该雹云发展大致经历了发生、跃增、酝酿、降雹和消亡等完整的 5 个阶段 (王昂生等, 1980): 发生阶段时间较短, 经过 3 个体扫时间, 回波顶高即超过 11 km; 跃增阶段以 S_{60} 、 S_{65} 快速增大为主要表现; 降雹阶段出现强回波区面积、回波顶高的大幅度波动, 其中, 15 时 13—31 分贾悦镇降雹后, 回波顶高由 15 km 下降到 12 km; 此后雹云再次加强, 16 时回波顶高上升到 17 km, 造成五莲县户部乡降下直径约 4 cm 的大雹。可见, 雹云降雹阶段也存在着雹云减弱、再跃增发展过程。

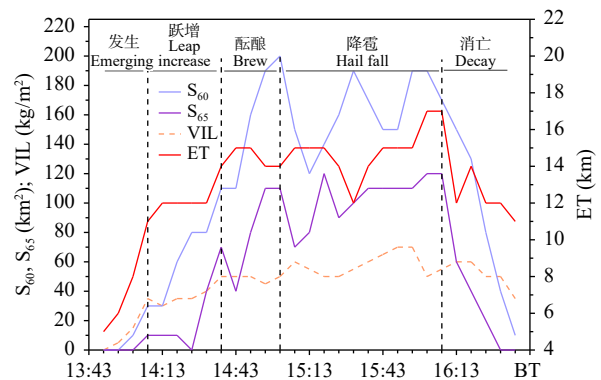


图 6 雹云发展 5 个阶段的强回波区面积 (S_{60} 、 S_{65})、垂直累积液态含水量 (VIL) 和回波顶高 (ET) 演变

Fig. 6 Evolution of the area of strong echo (S_{60} 、 S_{65}), vertically integrated liquid water (VIL) and the height of echo top (ET) in the five stages of hail storm development

3.3 雹云典型结构

普查逐时次雷达产品, 其中 15 时—15 时 47 分共有 9 个体扫呈现出典型成雹结构, 具有明显的有界弱回波区、三体散射特征, 而 15 时 30 分时雹云距离潍坊雷达站东南偏南 70—80 km, 位于雷达最佳探测范围, 此时的回波移向与雷达径向观测方向基本一致, 径向风最接近实际风, 强度最强, 为分析雹云流场特征结构提供了良好的观测资料。

图 7 是 8 月 16 日 15 时 30 分不同垂直高度雹云的反射率因子、径向速度 CAPPI, 图 7a₁—a₆ 为 1—11 km (间隔 2 km) 高度的反射率因子, 图 7b₁—b₆ 为与图 7a₁—a₆ 同高度的径向速度。可见, 雹云

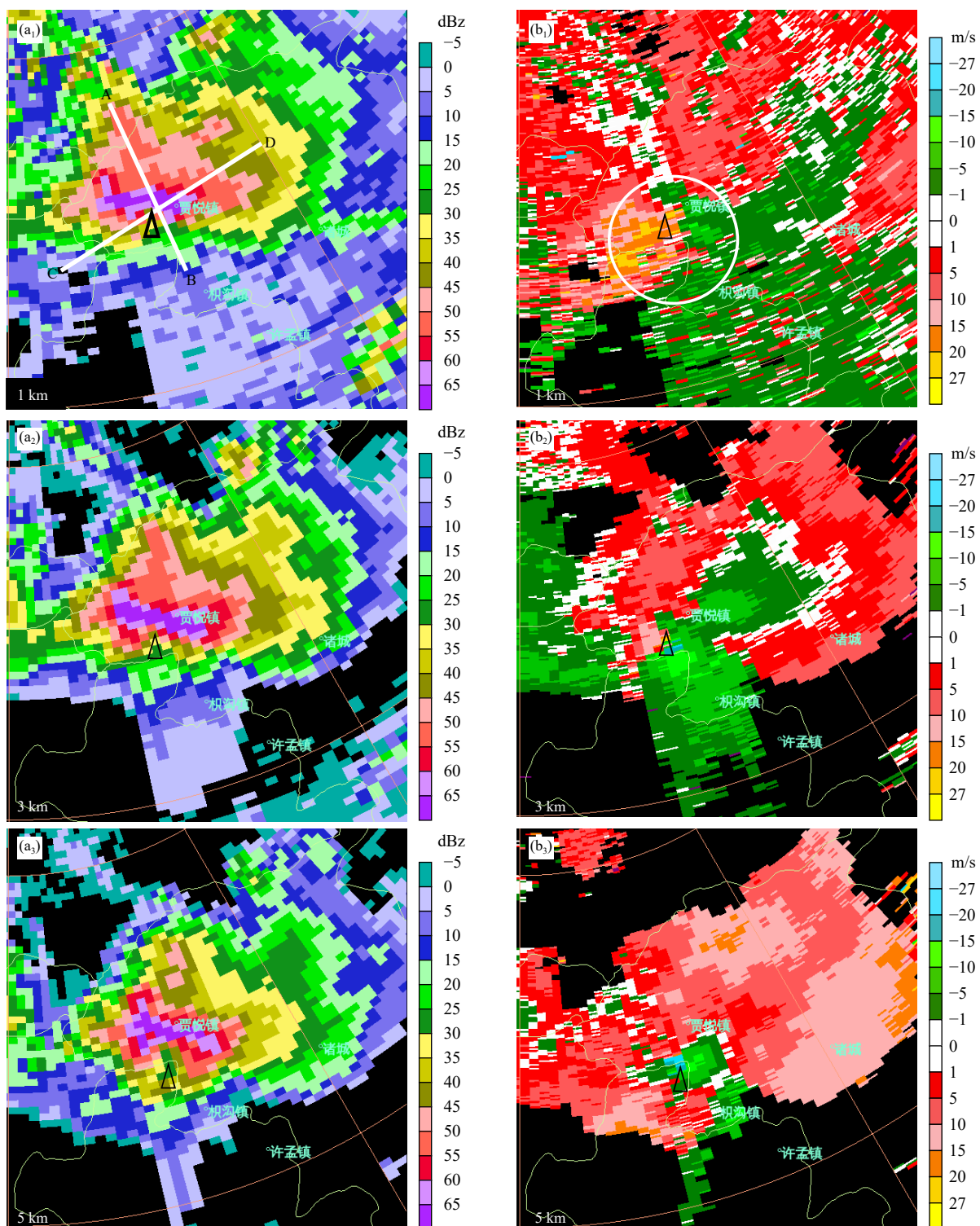
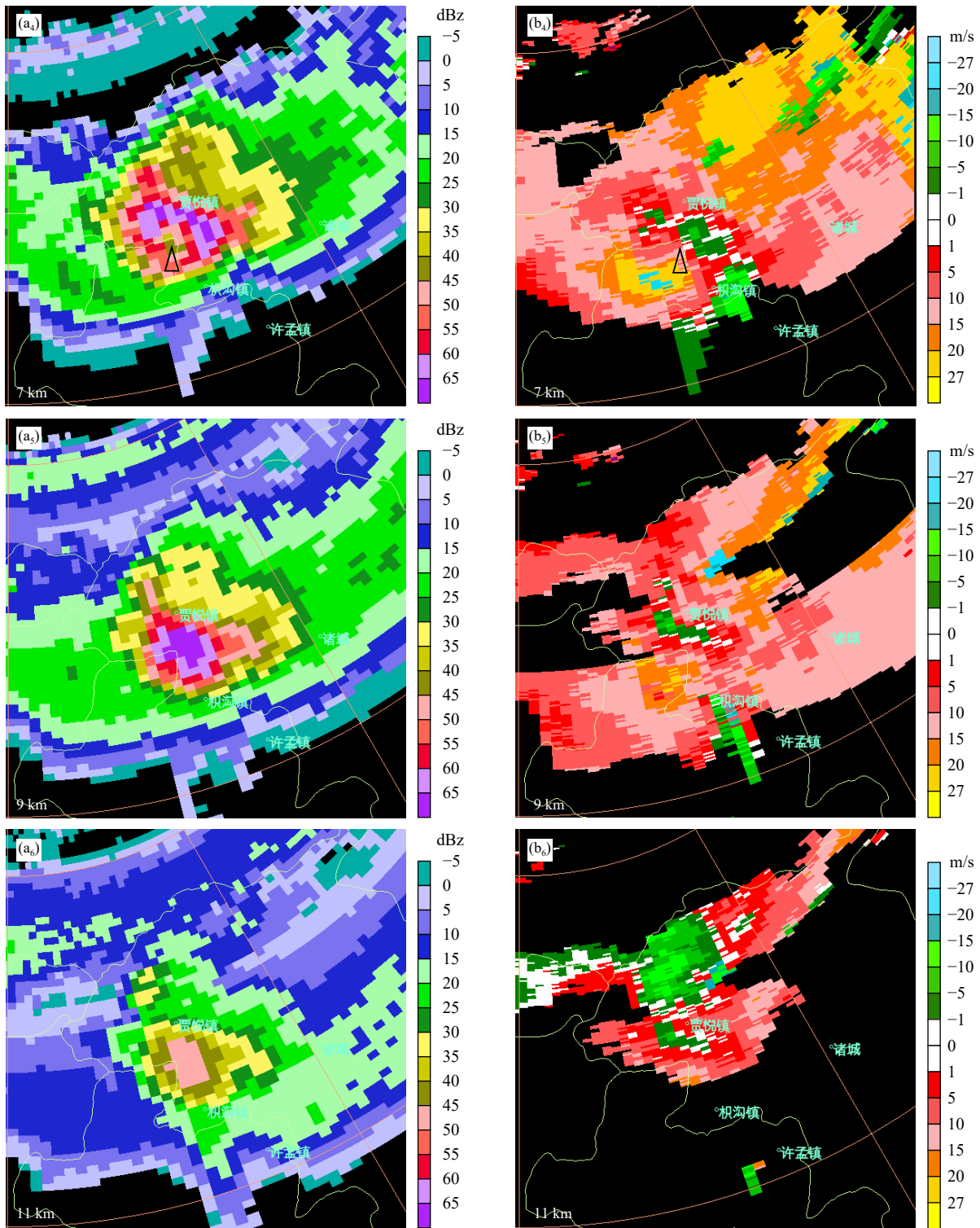


图7 8月16日15时30分不同高度(1—11 km, 间隔2 km)反射率因子(a₁—a₆)、径向速度(b₁—b₆)显示的雹云结构(箭头△所指位置为有界弱回波区, 白色圆圈为中气旋。a₁中AB、CD线段为图8中的剖面位置)

Fig. 7 The hailstorm structure displayed by CAPPI radar reflectivity (a₁—a₆) and radial velocity (b₁—b₆) at various heights (1—11 km, interval 2 km) at 15:30 BT 16 August 2019 (The arrows point to the BWER center. The white circle shows the area of mesoscale cyclone. The lines AB and CD in Fig. a₁ show locations of the vertical cross sections in Fig. 8)



续图 7

Fig. 7 Continued

具有明显的有界弱回波区结构, 其中 1、3 km 高度的有界弱回波区向东南偏南方向开口, 对应为上升气流流入区; 5、7 km 高度的有界弱回波区呈闭合

状; 9 km 高度显示的强反射率因子核密实清晰, 位于有界弱回波区顶部。受环境风的影响, 7、9 km 高度的雹云下风方、上风方具有明显的层状云砧,

与雹云高层的辐散气流对应。

从1—11 km高度径向速度(图7b₁—b₆)可见,有界弱回波区中心东北侧有朝向雷达的负速度区,显示雹暴移动前方中低层有明显的偏南入流;而有界弱回波区中心西侧有正速度大值区,以1、5、7 km高度表现最明显。以上正、负速度对构成气旋性环流,低层(1、3 km)为辐合型气旋式旋转,中层(5、7 km)为纯粹气旋式旋转,高层(9、11 km)为辐散型气旋式旋转,符合成熟阶段中气旋的典型特征(俞小鼎等,2005)。

图8给出的是沿图7a₁中AB、CD线段的15时30分反射率因子、径向速度剖面。AB剖面基本沿径向,可反映径向气流的辐散、辐合;CD大致沿切向,可反映气流的旋转。由图8a反射率因子

径向剖面可见,雹云具有典型的有界弱回波区—悬垂回波—回波墙结构,回波墙接地,宽度约3 km。从沿AB线段的径向速度剖面(图8b)可见,有界弱回波区对应深厚的偏南风入流,在中层与偏北气流形成辐合,3—6 km高度辐合最强,9 km以上为强辐散。图8c是沿CD线段的反射率因子剖面,也清楚地反映出有界弱回波区结构,5 km高度的有界弱回波区东西宽约5 km、南北宽约4 km,反映雹云内具有宽广深厚的上升运动。沿CD线段的径向速度剖面(图8d)显示云体中下部存在深厚的逆时针旋转气流,雷达识别此时的中气旋顶为7.3 km,最大切变达到 $35\times 10^{-3} s^{-1}$,其中心位置基本与有界弱回波区重合,结合图8b流场可分析得出云体中层存在强的旋转上升运动。

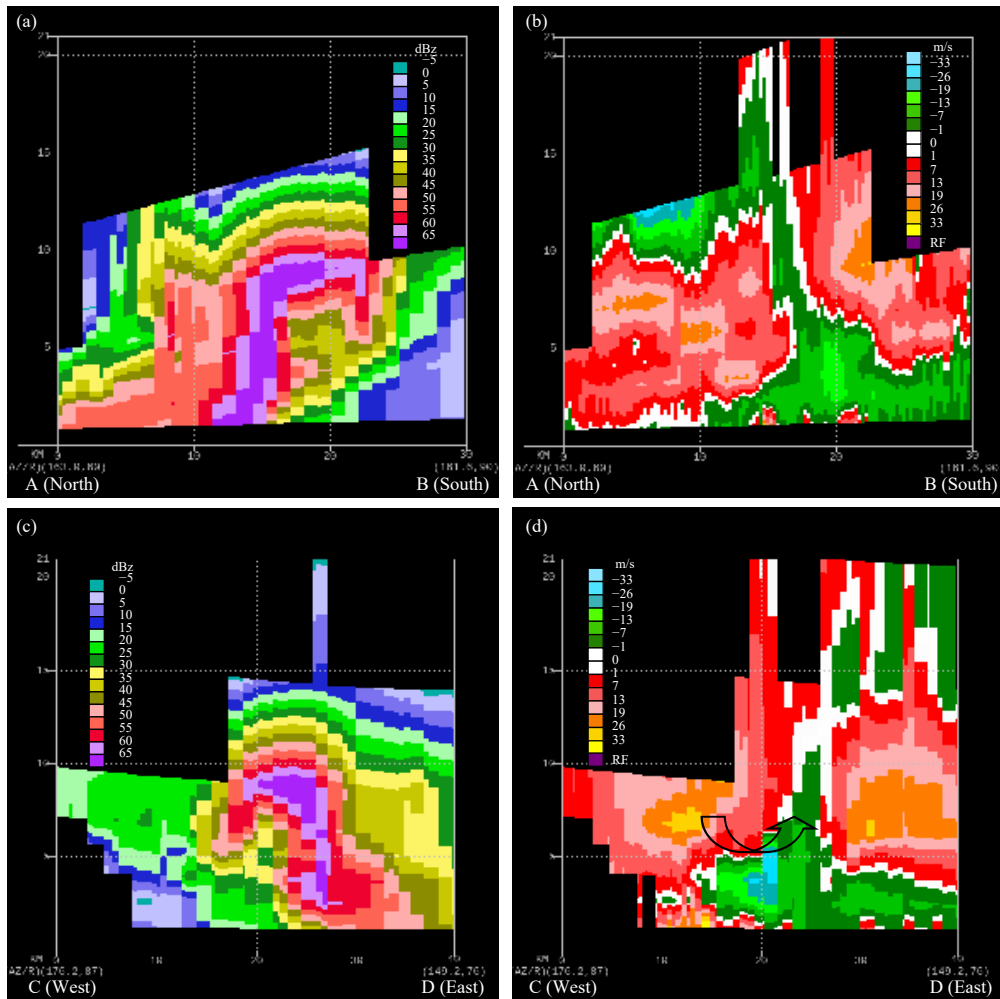


图8 8月16日15时30分沿图7a₁中AB、CD线段的反射率因子(a、c)和径向速度(b、d)剖面
Fig. 8 Vertical cross sections of radar reflectivity (a, c) and radial velocity (b, c) along AB and CD (shown in Fig. 7a₁) at 15:30 BT 16 August 2019

图 7、8 分析给出的本次雹暴过程中不同高度及沿 AB、CD 线段的雹云结构, 与 Chisholm 等 (1972) 研究的加拿大 Alberta 雹云结构对比, 可见两者具有高度一致性, 而本次雹暴的强回波中心强度更强, 雹云水平尺度更大, 结构更紧凑。

3.4 雹云双偏振雷达特征参量

双偏振多普勒天气雷达可为监测识别雹云内冰雹分布提供新的雷达参量。通常可根据大的水平偏振反射率因子(Z_H)、接近于 0 的差分反射率因子(Z_{DR})和较低的相关系数(CC)识别雹云中的大雹 (Kumjian, 2013)。实地调查表明, 15 时 30 分前后贾悦镇降雹最强, 根据 15 时 24 分和 15 时 30 分连续两个体扫的雷达探测资料可以分析雹云的空中

状况。图 9a₁ 给出的是青岛雷达 15 时 24 分探测的 0.5°仰角 Z_H , 沿图中 AB 线段(方位角约为 273°)给出了 Z_H (图 9b₁)、 Z_{DR} (图 9c₁)和 CC 垂直剖面(图 9d₁)。图 9b₁ 中标注了贾悦镇东西降雹区范围和东王庄(最大冰雹直径大于 5 cm)位置。

图 9b₁、c₁ 显示, 15 时 24 分, Z_H 大于 60 dBz 强回波区对应的 Z_{DR} 数值大多为 -1—0 dB, 在强反射率的径向下游, 雹暴强回波西侧中高空为 Z_{DR} 高值区, 对应 CC 为低值区 (<0.7), 表明该区域为三体散射特征 (Kumjian, et al, 2010), 指示雹云中有深厚密集的大冰雹。图 9d₁ 显示贾悦镇西部(东王庄附近)强降雹区的中低层 CC 较低, 大多低于 0.9。图 9a₂ 给出了 15 时 30 分青岛雷达 0.5°仰角的 Z_H ,

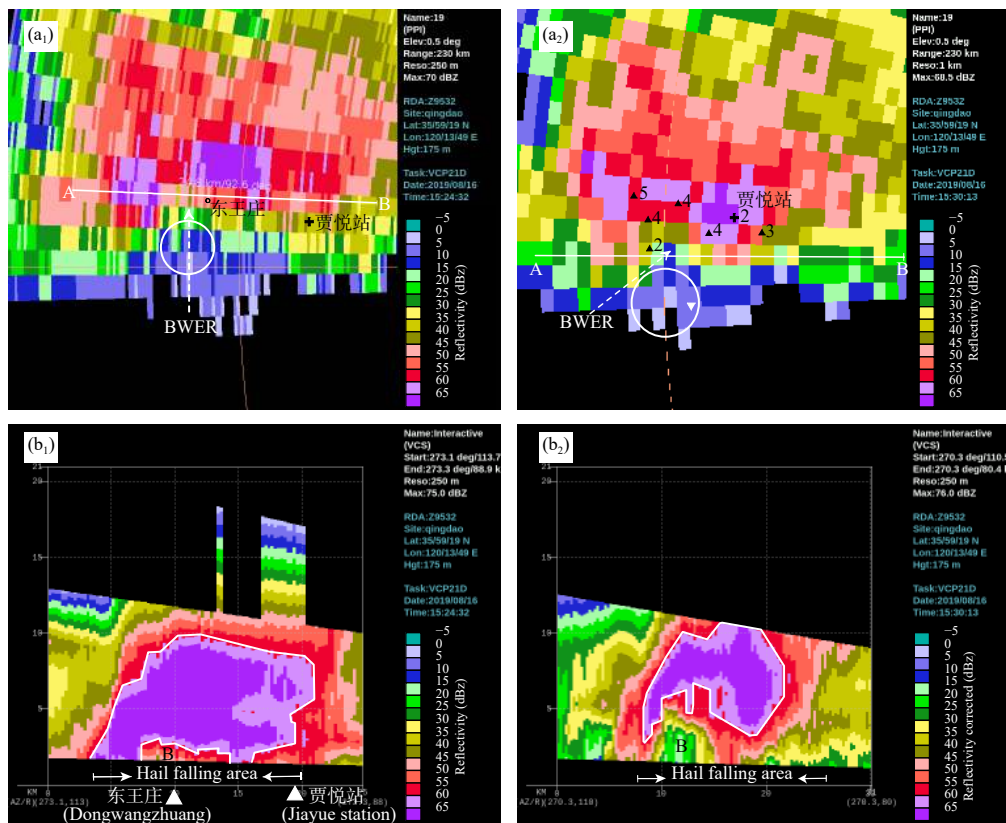
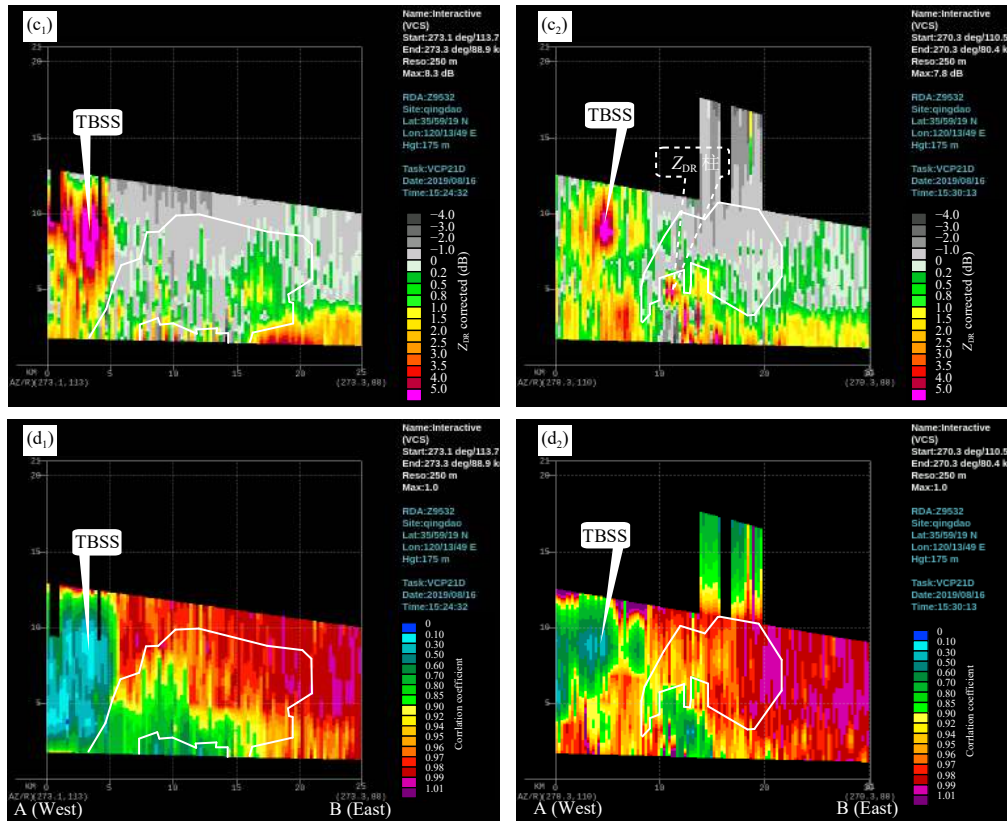


图 9 8 月 16 日 15 时 24 分青岛雷达 0.5°仰角水平偏振反射率因子 Z_H (a₁, 白圆圈为中气旋, AB 线段为图 b₁、c₁、d₁ 剖面的位置)、 Z_H 剖面 (b₁, 白线区为 $Z_H > 60$ dBz 范围, 标“B”区域为有界弱回波区)、差分反射率因子 Z_{DR} 剖面 (c₁) 和相关系数 CC 剖面 (d₁); 图 a₂—d₂ 同图 a₁—d₁, 但为 15 时 30 分的观测分析结果 (图 a₂ 中的 ▲ 及其右侧数字为调查的降雹点和最大冰雹直径 (单位: cm))

Fig. 9 Horizontal polarization reflectivity Z_H (a₁, the white circle is the mesocyclone, and the line AB shows location of the vertical cross section in Fig. b₁, c₁ and d₁), the cross section of Z_H (b₁, the white line area represents $Z_H > 60$ dBz, "B" represents the BWER), differential reflectivity Z_{DR} (c₁) and correlation coefficient CC (d₁) observed by Qingdao radar at 0.5° elevation scan at 15:24 BT 16 August 2019; Fig. a₂—d₂ are the same as Fig. a₁—d₁ but for observations at 15:30 BT (The mark ▲ and the number to its right in Fig. a₂ are the hail-falling point and the maximum hail diameter (unit: cm) based on survey)



续图 9

Fig. 9 Continued

沿 270.3°方位角的 Z_H 剖面(图 9b₂)清晰反映出有界弱回波区的结构;该东西剖面穿过有界弱回波区及其上空的强回波区,可见 4—7 km 高度有界弱回波区的弱回波区对应的 Z_{DR} 为 1.5—3.5 dB(图 9c₂),垂直发展高度超过-10℃层,呈现出典型的 Z_{DR} 柱特征,指示这里存在强上升气流(Brandes, et al, 1995),有利于大冰雹的增长和滞留。图 9d₂与图 9b₂对比可见,有界弱回波区对应的 CC 值小于 0.85,反映该区域存在雹、雨滴等不同相态粒子及伴随入流的碎屑(如树叶、杂草、昆虫等),导致 CC 出现低值(Ryzhkov, 2007; 潘佳文等, 2020)。

综上对雹云双偏振特征的分析可见,紧靠有界弱回波区的强回波区是冰雹积聚区,且有界弱回波区西北侧强回波区更易出现强冰雹,这与贾悦镇西部降雹强于镇东部的实况相符,也与 Kumjian 等(2008)、潘佳文等(2020)总结的超级单体概念模型的冰雹区所在部位一致。

4 雹云主体流场结构

观测和理论分析指出,冰雹云主上升气流多具

有三维旋转、斜升等垂直运动的流型(Miller, et al, 1990; 刘式适等, 2004),各物理量场的轴心不一定重合,单纯用二维剖面来反映其结构具有局限性,而定性勾画其垂直三维运动结构有助于降低这类局限性。例如,通过对太行山东麓雹云个例细致分析,就定性勾画出了处于调整态的雹云流场结构及其演化轮廓(范皓等, 2019; 王建恒等, 2020)。下面结合双雷达风场反演和定性分析方法,以 15 时 30 分观测时次为基础,进一步揭示本次过程成熟阶段雹云的主体流场结构特征。

4.1 雹云水平风场结构

15 时 30 分,雹云中心位于潍坊雷达站南偏东约 75 km、青岛雷达站西约 100 km 处,与两部雷达构成三角形,利用潍坊、青岛两部多普勒雷达探测资料可反演各高度的水平流场(图 10)。反演区域左下角坐标: 35.9°N, 118.95°E, 右上角坐标: 36.25°N, 119.42°E, 左下角为坐标原点, x 轴正东方向为正, y 轴正北方向为正。反演区域东西宽度 0.47°(42 km), 南北宽度 0.35°(39 km), 两部雷达在该区域的径向风夹角为 70°—110°。

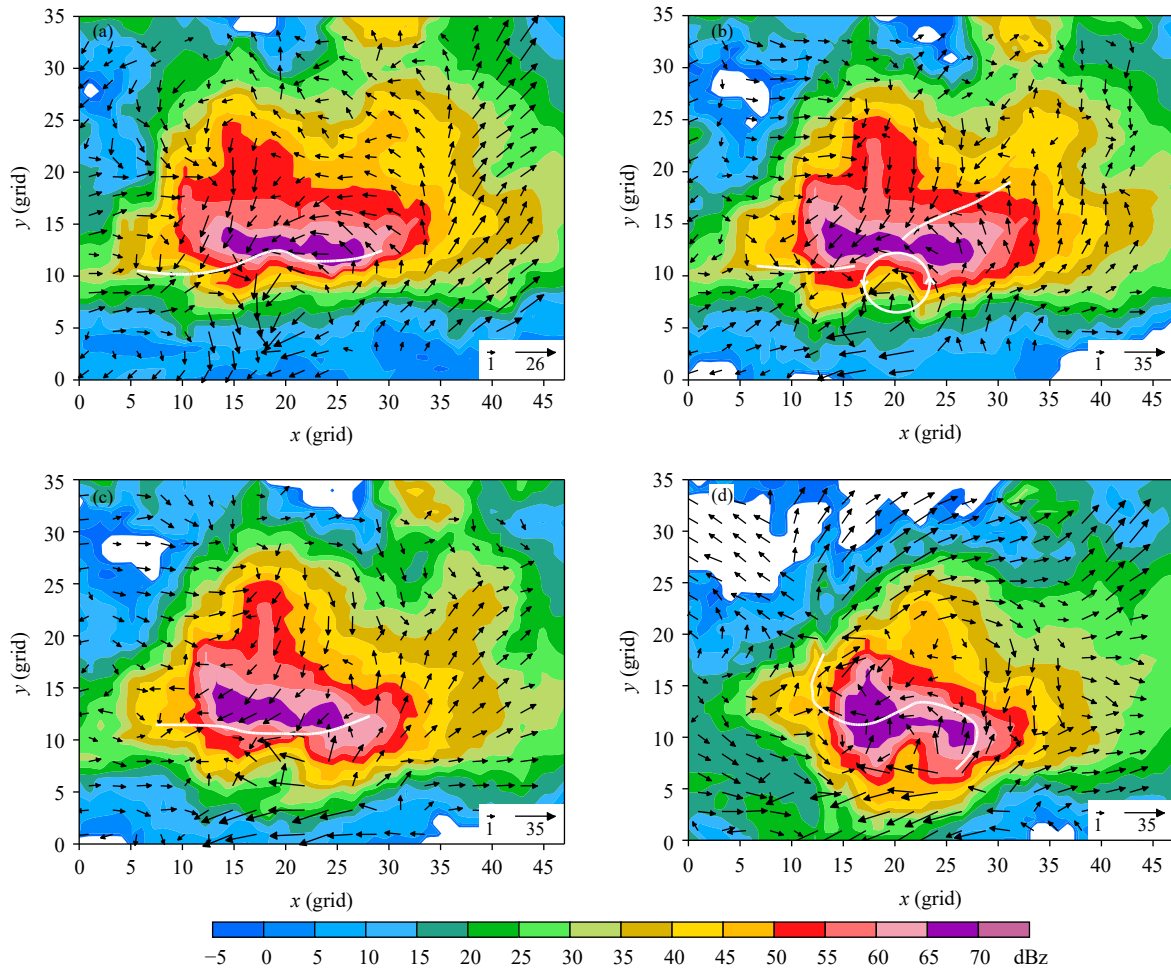


图 10 潍坊、青岛双雷达反演 8 月 16 日 15 时 30 分雹云各高度(a. 2 km, b. 3 km, c. 4 km, d. 6 km)的水平风场和反射率因子(色阶)(a—c 中白色曲线、圆圈指示辐合线、旋转气流;图 d 标出了“S”形水平流场;各图右下角给出的风矢箭头及数值表示最小、最大风速,单位: m/s)

Fig. 10 Horizontal wind field and radar reflectivity (shaded) within hail clouds at the some levels (a. 2 km, b. 3 km, c. 4 km, d. 6 km) at 15: 30 BT August 16 retrieved from Weifang and Qingdao dual Doppler radar (The white curves and circles in Fig. a—c indicate the convergence line and the rotating airflow. Fig. d shows the "S" shaped horizontal circulation field. The wind vector arrow and value in the lower right corner of each panel show the minimum and maximum wind speeds, unit: m/s)

由图 10 可见,在 2 km 高度(图 10a)的雹云主体前沿对应着气流辐合及逆时针旋转环流,低层气流辐合导致上升运动,云体内气流呈上升旋转状态;3 km 高度(图 10b)显示出明显闭环的旋转气流;4 km 高度(图 10c)的气流以辐合上升为主,旋转为辅;当到达 6 km 高度(图 10d),水平流场呈现“S”形,其逆时针部分对应着主云体,而顺时针部分对应着云后侧出流云区;5 km 高度的流场样式与 6 km 相似。由此可见,图 10 直观展示了雹云的旋转上升流场特征,且中层呈现出明显的“S”形流型。雹云有了这样的旋转上升对流流场,粒子群不仅有可能在云中可上可下、可进可出,而且还可左

可右地运行,为其中一部分粒子循环增长成大雹准备了必要的可去可回的三维流场动力驱动框架。

4.2 雹云“0 线”结构

从图 8a、b 径向剖面看,由于剖面取向与云体移向夹角较小,其径向风可以反映云的入流和出流特征,由径向速度剖面可分析水平气流的辐合或辐散。对流云的流场是滚翻气流,低层是辐合上升气流,高层是辐散上升气流;气流由入云上升辐合转到出云上升辐散,必然有个由入云到出云,水平速度为 0 的拐点位置,对于连续空气流场来说,这样的 0 值位置连成曲线段,可称之为“0 线”,据此可勾画出图 11a 中剖面的流场,显示出了入云流、出云

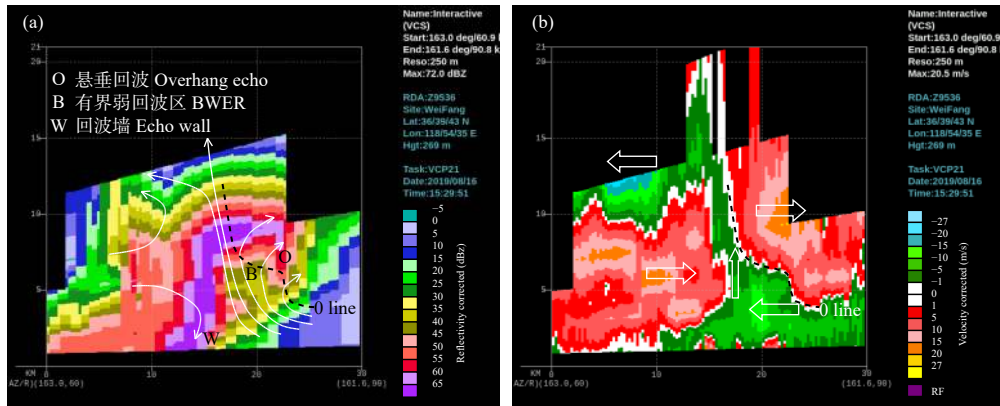


图 11 8月16日15时30分潍坊雷达反射率因子剖面 and 垂直气流分析 (a, 黑粗虚线为“0线”)、径向速度剖面分析 (b, 箭头指示气流运动方向)

Fig. 11 Cross sections of radar reflectivity, vertical airflow (a, black thick dotted line is '0 line'), and radial velocity (b, arrows indicate airflow direction) at 15: 30 BT August 16 observed by Weifang radar

流、主上升气流与“0线”的关系。可见，倾斜“0线”是出云流与入云流的拐点，而直立“0线”接近于雹云对流上冲云顶，“0线”穿越上升气流或与主上升气流平行。在“0线”上虽水平速度为0，但其上升速度不为0，而且会是主上升气流的高值区，甚至可达到最大值。从图11还可看出“0线”与悬垂回波和有界弱回波区的关系，即“0线”穿过悬垂回波达到有界弱回波区顶部，其近直立的强回波墙与悬垂回波间是弱回波穹窿，对应着主上升气流区。

结合3.3节分析可见，“0线”穿过悬垂回波、有界弱回波区顶部强回波区，指向雹云上冲云顶，反映出了低层入流、高层出流和雹云中心主上升气流的配置关系，如此呈现的雹暴云体的流场结构，与分析的太行山东麓雹云实例结构类似(范皓等, 2019; 王建恒等, 2020)，也与过去理论研究得出的“穴道”结构物理图像一致(许焕斌, 2001, 2012, 2015)。

5 “0线”效应及大雹形成示意图

依据上述对潍坊雷达15时30分成熟阶段雹云反射率因子、径向速度的近似径向、切向剖面分析，并参考雷达垂直累积液态含水量所显示的梯度分布及高层云砧走向(图12b)，可勾画出本次雹云成熟阶段“0线”结构及大雹增长运行轨迹示意图(图12a)。由图8d可见，中空气流存在逆时针旋转运动，加之低层存在辐合上升运动，基于连续性要求，可绘出主上升气流：由低层向北、向上斜升入

流，在5—6 km高度(对应中气旋)逆时针旋转，上升到高层后向东北方向出流；图12a中“0线”和上升运动区是依据有界弱回波区结构和径向速度绘出的，并给出了推测的粒子在此流场结构中循环增长成大雹的轨迹，数字0—8表示粒子运行位置，灰色圆表示其增长尺度变化。

可以推测，某个水凝物粒子从0处随主上升气流运行经过1到云体上部并长大后(或已长大成雹胚)，在出流带动下进入弱上升气流区下落到2；在云高层出流和其落速驱动下，下落并穿越“0线”到达3，此处是入流区；在入流区，粒子由下落转随上升气流而上升，转入第二轮循环运行增长。经第一轮1—3的运行，粒子已长大且落速也增大，接下来的运行轨迹就可向上升气流中心区靠拢。处于位置3的粒子继续在斜升气流托带下，在4处穿过“0线”再次进入出流区，完成第二轮循环增长。经历多次往复循环后，粒子运行轨迹逐渐收缩靠近“0线”，进入强上升气流中心区(位置5)；此时粒子已长大为雹，并进一步随主上升气流到达雹云顶(位置6)，由于这里的上升气流小于冰雹落速，无法将其托住，大雹经7直落到地面8处，形成回波墙。

同理，众多大粒子群沿此示意轨迹循环长大。在粒子增长过程中，“0线”结构和气流对不同尺度粒子的运动具有筛选和约束作用，其作用机理为：粒子末速随其尺度增大而增大，当粒子末速小于上升气流速度时，粒子随上升气流向上越过“0线”后随出流向外移动，就无法进到云中强上升中心。但

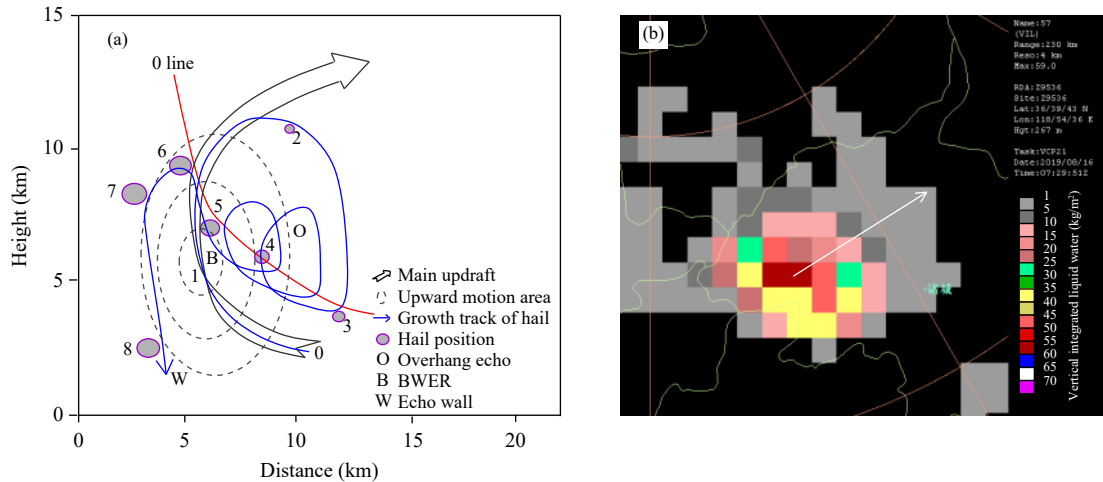


图 12 潍坊雷达 15 时 30 分“0 线”结构及大雹循环增长轨迹示意 (a, 虚线圈表示上升运动区, 由外向内上升速度增大)、垂直累积液态含水量 (b, 白色箭头指示高空云砧走向)

Fig. 12 The "0 line" structure and hailstorm growth track diagram at 15:30 BT derived from observations of Weifang radar (a, dotted circle indicates main updraft area, and the rising speed increases from outside to inside), VIL (b, white arrow indicates the moving direction of high altitude anvil clouds)

随着粒子向外流出, 因所处位置上升气流变弱, 粒子会快速下落, 当下落经过“0 线”后再次进入了入流区, 开始新一轮的循环过程, 即粒子被“0 线”兜回来而不能脱离。粒子在循环增长过程中, 只有长成大冰雹, 末速增大到一定程度, 才能进入并越过云体最强上升气流区, 而后随高层出流偏离主上升气流并下落。总体看, 随着粒子平均尺度的增大, 冰雹的平均位置逐渐向主上升气流中心区上部移动, 此处云体为过冷水的累积区, 可使冰雹尺度进一步增大。

由此可见, 雹云中的“0 线”结构具有特定的成雹功效, 对大粒子群具有向“0 线”附近邻域聚集或吸入效应, 有利于大雹的增长。在此特定结构下, 小粒子(雹胚)汇聚在“0 线”附近形成悬垂回波(O), 不同尺度冰雹、过冷水等集中区形成有界弱回波区顶部, 而冰雹密集下落的区域形成回波墙(W), 在 O—W 之间形成有界弱回波区, 雹云呈现的有界弱回波区—悬垂回波—回波墙结构是这种成雹效应在雷达回波上的表现。上述冰雹增长过程和雹云结构可与数值模式模拟(许焕斌, 2012)相互印证。

6 结论和讨论

(1) 本次过程是冷涡天气系统影响下, 在鲁中山区新生、发展的强雹暴过程。低层暖湿、高层干

冷的层结条件, 0—6 km 强的深层风垂直切变, 较高的整层大气可降水量等条件, 十分有利雹云的发展和特强冰雹、大风的发生。雹云发生、跃增迅速, 降雹阶段的雹云回波顶高、强回波区面积有较大幅度的波动, 存在跃增再加强过程, 导致持续时间长、冰雹密集、冰雹尺度大的降雹。

(2) 潍坊雷达完整探测得到雹云发展演变的回波特征, 强反射率因子核结构密实清晰, 尤其是有界弱回波区结构长时间维持, 其直观物理图像和明确的动力含义堪比典型的加拿大 Alberta 冰雹云, 分析展现了“0 线”结构及其与辐合、辐散、旋转流场间的配置关系。青岛雷达观测雹云的三体散射特征、 Z_{DR} 柱等特征明显, 有界弱回波区北侧和上方强回波区具有 Z_H 大 (>60 dBZ)、 Z_{DR} 小 ($-1—0$ dB)、CC 低 (<0.9) 等特征, 结合地面冰雹调查可判断为大冰雹集聚区。

(3) 基于雷达观测和对成熟阶段雹云雷达回波形态、强度和三维流场结构的分析, 总结给出了雹云内主上升气流框架和“0 线”结构示意图, 可推测分析这种结构在大雹循环增长中的托雹机理及雹云有界弱回波区—悬垂回波—回波墙结构形成中的作用。“0 线”结构的成雹效应取决于主上升气流、环境温度、过冷水含量等因素: 主上升气流上升速度越大, 越能托住大冰雹, 主上升气流速度水平梯度越大, 越能托住在水平移动中快速增长的冰

雹;环境温度低、过冷水含量高,则冰雹增长快。上述各因素场间配置在本个例中有着良好的互动协同关系,十分有利于大雹的生长。

当然,本研究主要利用雷达探测资料,通过定性分析建立雹云三维流场结构,探讨大冰雹形成的机制。事实上,冰雹形成过程十分复杂,大粒子在云中运行增长过程中,伴随着尺度增长和相态变化,其运行增长轨迹不单是流场能确定的,还与云体温度、湿度、水凝物场等的实际状况及云降水物理过程密切相关。可以说,成雹粒子群运行增长的轨迹簇是云体宏、微观场相互作用的综合体现,要进一步揭示其规律及掌握实况,将有赖于对实体雹云内部风场、温度、湿度及过冷水等微物理量的实时探测手段和综合分析能力的加快提升。

致谢:感谢中国气象科学研究院胡志群研究员提供的双雷达风场反演软件并给予指导。感谢上海中心气象台戴建华首席预报员提供探空订正软件及指导。

参考文献

- 戴建华,陶岚,丁杨等. 2012. 一次罕见飑前强降雹超级单体风暴特征分析. 气象学报, 70(4): 609-627. Dai J H, Tao L, Ding Y, et al. 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line. Acta Meteor Sinica, 70(4): 609-627 (in Chinese)
- 刁秀广,郭飞燕. 2021. 2019年8月16日诸城超级单体风暴双偏振参量结构特征分析. 气象学报, 79(2): 181-195. Diao X G, Guo F Y. 2021. Analysis of the polarimetric signatures in Zhucheng supercell thunderstorm on 16 August 2019. Acta Meteor Sinica, 79(2): 181-195 (in Chinese)
- 范皓,杨永胜,段英等. 2019. 太行山东麓一次强对流冰雹云结构的观测分析. 气象学报, 77(5): 823-834. Fan H, Yang Y S, Duan Y, et al. 2019. An observational analysis of the cloud structure of a severe convective hailstorm over the eastern foothill of Taihang Mountain. Acta Meteor Sinica, 77(5): 823-834 (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. 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. Acta Meteor Sinica, 76(2): 196-212 (in Chinese)
- 刘黎平. 2003. 用双多普勒雷达反演降水系统三维风场试验研究. 应用气象学报, 14(4): 502-504. Liu L P. 2003. Experimental study on three-dimensional wind field inversion of precipitation system by dual Doppler radar. J Appl Meteor Sci, 14(4): 502-504 (in Chinese)
- 刘式适,付遵涛,刘式达等. 2004. 龙卷风的漏斗结构理论. 地球物理学报, 47(6): 959-963. Liu S S, Fu Z T, Liu S D, et al. 2004. A theory on the funnel structure of tornado. Chinese J Geophys, 47(6): 959-963 (in Chinese)
- 罗琪,郑永光,陈敏. 2019. 2017年北京北部一次罕见强弓状飑线过程演变和机理. 气象学报, 77(3): 371-386. Luo Q, Zheng Y G, Chen M. 2019. Evolution and development mechanisms of a rare strong arc-shaped squall line that occurred in northern Beijing in 2017. Acta Meteor Sinica, 77(3): 371-386 (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. 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. Meteor Mon, 46(12): 1608-1620 (in Chinese)
- 潘佳文,高丽,魏鸣等. 2021. 基于S波段双偏振雷达观测的雹暴偏振特征分析. 气象学报, 79(1): 168-180. Pan J W, Gao L, Wei M, et al. 2021. Analysis of the polarimetric characteristics of hail storm from S band dual polarization radar observations. Acta Meteor Sinica, 79(1): 168-180 (in Chinese)
- 王昂生,赵小宁,康玉霞等. 1980. 昔阳地区冰雹云形成过程的一些特征. 大气科学, 4(2): 186-194. Wang A S, Zhao X N, Kang Y X, et al. 1980. Some characteristics of hail-cloud formation processes in Xiyang area. Sci Atmos Sinica, 4(2): 186-194 (in Chinese)
- 王建恒,陈瑞敏,胡志群等. 2020. 一次强雹云结构的双多普勒雷达观测分析. 气象学报, 78(5): 796-804. Wang J H, Chen R M, Hu Z Q, et al. 2020. Dual Doppler radar observations and analysis of the structure of a severe hailstorm. Acta Meteor Sinica, 78(5): 796-804 (in Chinese)
- 王俊,朱君鉴,任钟冬. 2007. 利用双多普勒雷达研究强飑线过程的三维风场结构. 气象学报, 65(2): 241-251. Wang J, Zhu J J, Ren Z D. A study of 3-D wind structure of a strong squall line using Dual-Doppler weather radar data. Acta Meteor Sinica, 65(2): 241-251 (in Chinese)
- 王俊,王文青,王洪等. 2021. 山东北部一次夏末雹暴地面降水粒子谱特征. 应用气象学报, 32(3): 370-384. Wang J, Wang W Q, Wang H, et al. 2021. Hydrometeor particle characteristics during a late summer hailstorm in northern Shandong. J Appl Meteor Sci, 32(3): 370-384 (in Chinese)
- 王令,郑国光,康玉霞等. 2006. 多普勒天气雷达径向速度图上的雹云特征. 应用气象学报, 17(3): 281-287. Wang L, Zheng G G, Kang Y X, et al. 2006. Hailstorms characteristics in Doppler radar radial velocity fields. J Appl Meteor Sci, 17(3): 281-287 (in Chinese)
- 许焕斌,段英. 2001. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的“利益竞争”防雹假说. 大气科学, 25(2): 277-288. Xu H B, Duan Y. 2001. The mechanism of hailstone's formation and the hail-suppression hypothesis: "Beneficial Competition". Chinese J Atmos Sci, 25(2): 277-288 (in Chinese)
- 许焕斌,段英. 2002. 强对流(冰雹)云中水凝物的积累和云水的消耗. 气象学报, 60(5): 575-584. Xu H B, Duan Y. 2002. The accumulation of hydrometeor and depletion of cloud water in strongly convective cloud (hailstorm). Acta Meteor Sinica, 60(5): 575-584 (in Chinese)
- 许焕斌. 2012. 强对流云物理及其应用. 北京: 气象出版社, 6-88. Xu H B.

2012. The Physics of Severe Convective Storms and its Application. Beijing: China Meteorological Press, 6-88 (in Chinese)
- 许焕斌. 2015. 人工影响天气科学技术问答. 北京: 气象出版社, 22-54. Xu H B. 2015. Questions and Answers about Science and Technology in Weather Modification. Beijing: China Meteorological Press, 22-54 (in Chinese)
- 俞小鼎, 王迎春, 陈明轩等. 2005. 新一代天气雷达与强对流天气预警. *高原气象*, 24(3): 456-464. Yu X D, Wang Y C, Chen M X, et al. 2005. Severe convective weather warnings and its improvement with the introduction of the NEXRAD. *Plateau Meteor*, 24(3): 456-464 (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. *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. *Acta Meteor Sinica*, 78(3): 391-418 (in Chinese)
- 曾智琳, 谌芸, 朱克云等. 2019. 广东省大冰雹事件的层结特征与融化效应. *大气科学*, 43(3): 598-617. Zeng Z L, Chen Y, Zhu K Y, et al. 2019. Characteristics of atmospheric stratification and melting effect of heavy hail events in Guangdong Province. *Chinese J Atmos Sci*, 43(3): 598-617 (in Chinese)
- 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. *气象学报*, 62(3): 317-328. Zheng Y Y, Yu X D, Fang C, et al. 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data. *Acta Meteor Sinica*, 62(3): 317-328 (in Chinese)
- Brandes E A, Vivekanandan J, Tuttle J D, et al. 1995. A study of thunderstorm microphysics with multiparameter radar and aircraft observations. *Mon Wea Rev*, 123(11): 3129-3143
- Browning K A, Foote G B. 1976. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. *Quart J Roy Meteor Soc*, 102(433): 499-533
- Chisholm A J, Renick J H. 1972. The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. Alberta, Canada: Research Council of Alberta
- Foote G B, Wade C G. 1982. Case study of a hailstorm in Colorado. Part I: Radar echo structure and evolution. *J Atmos Sci*, 39(12): 2828-2846
- Foote G B, Frank H W. 1983. Case study of a hailstorm in Colorado. Part III: Airflow from triple-Doppler measurements. *J Atmos Sci*, 40(3): 686-707
- 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. 2013. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II: Warm- and cold-season applications. *J Oper Meteor*, 1: 243-264
- Miller L J, Tuttle J D, Foote G B. 1990. Precipitation production in a large Montana hailstorm: Airflow and particle growth trajectories. *J Atmos Sci*, 47(13): 1619-1646
- Ryzhkov A V. 2007. The impact of beam broadening on the quality of radar polarimetric data. *J Atmos Ocean Technol*, 24(5): 729-744
- Xie B G, Zhang Q H, Wang Y Q. 2010. Observed characteristics of hail size in four regions in China during 1980-2005. *J Climate*, 23(18): 4973-4982