

龚佃利,朱君鉴,王俊,等. 2020年6月1日山东强雹暴过程双偏振雷达观测分析[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(3): 40-51.

GONG Dianli, ZHU Junjian, WANG Jun, et al. Dual-polarization radar observational analysis of a severe hailstorm in Shandong province on 1 June 2020 [J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(3): 40-51. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.03.004. (in Chinese)

## 2020年6月1日山东强雹暴过程双偏振雷达观测分析

龚佃利<sup>1,2</sup>, 朱君鉴<sup>3</sup>, 王俊<sup>1,2</sup>, 陈滔<sup>4</sup>, 于成龙<sup>4</sup>

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2.山东省人民政府人工影响天气办公室, 山东 济南 250031; 3.山东省气象台, 山东 济南 250031; 4.蒙阴县气象局, 山东 蒙阴 276200)

**摘要:** 利用济南S波段双偏振多普勒雷达探测数据, 结合探空、地面气象站观测和实地冰雹调查资料, 对2020年6月1日影响山东中西部的一次强雹暴过程进行分析。结果表明: 1) 此次雹暴过程受高空槽影响, 于当日中午在河北邢台市初生, 移入山东境内后持续降雹近5 h, 其中17:00后雹暴明显加强, 冰雹灾害严重。2) 典型降雹时次具有明显的三体散射特征; 1.5~5.5 km高度冰雹区对应的反射率因子( $Z_H$ )均大于65 dBZ, 差分反射率因子( $Z_{DR}$ )介于-2.6~1.5 dB, 相关系数介于0.80~0.96; 大冰雹多集中在低层前侧入流的左侧和前侧。3) 多个单体于17:00前后演变成超级单体风暴, 具有明显的有界弱回波区和中气旋结构,  $Z_{DR}$ 柱可指示雹暴主上升气流区的位置。4) 水凝物相态分类产品给出的冰雹分布反映了空中冰雹的分布和演变, 可从冰雹色标面积大小、连续性程度预估冰雹强弱, 根据低仰角的冰雹色标预判冰雹落区。

**关键词:** 雹暴; 双偏振特征; 观测分析; 冰雹预警

**中图分类号:** P412.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)03-0040-12

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.03.004

## Dual-polarization radar observational analysis of a severe hailstorm in Shandong province on 1 June 2020

GONG Dianli<sup>1,2</sup>, ZHU Junjian<sup>3</sup>, WANG Jun<sup>1,2</sup>, CHEN Tao<sup>4</sup>, YU Chenglong<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Weather Modification Office of Shandong Province People's Government, Jinan 250031, China; 3. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 4. Mengyin Meteorological Bureau, Mengyin 276200, China)

**Abstract** Using the data of S-band dual-polarization Doppler weather radar in Jinan, sounding and surface meteorological stations data, as well as hail informations obtained from field surveys, a severe hailstorm affecting the middle and western Shandong province on 1 June 2020 is analyzed. The results are shown as follow. 1) The hailstorm is born in Xingtai city, Hebei province at noon on June 1<sup>st</sup>, affected by upper trough, and it continues to hail for nearly 5 hours after moving into Shandong province. The hailstorm is significantly strengthened after 17:00 BST, and the hail disaster is severe. 2) The hailstorm has an obvious characteristic of three-body scatter spike (TBSS) at typical time of

收稿日期: 2021-06-18; 修订日期: 2021-08-17

基金项目: 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)

第一作者: 龚佃利, 男, 正研级高级工程师, 主要从事中尺度气象和人工影响天气研究, sdgongdl@163.com。

通信作者: 朱君鉴, 男, 正研级高级工程师, 主要从事雷达气象学研究, 2894380621@qq.com。

hail-falling, including that the horizontal reflectivity factor ( $Z_H$ ) of the hail area at altitude from 1.5 to 5.5 km is greater than 65 dBZ, the differential reflectivity factor ( $Z_{DR}$ ) is mostly between  $-2.6 \sim 1.5$  dB, correlation coefficient is mostly between  $0.80 \sim 0.96$ . The large hail mostly concentrates on the left and front of the inflow from the front side of the lower layer. 3) Multi-cell storms become supercell storm around 17:00 BST, which has obvious bounded weak echo region and mesocyclone structure, and the  $Z_{DR}$  column can indicate the location of the main updraft zone of the hailstorm. 4) The hydrometeor phase classification products have a good indication effect on the distribution and evolution of hail in the hailstorm. The intensity of hail can be estimated from the size, continuity and compactness of the hail color marker area, and the hail falling area can be prejudged according to the hail color marker at the low elevation angles.

**Key words** hailstorm; dual-polarization characteristics; observational analysis; hail warning

## 引言

偏振雷达用于大气遥感和降水探测的理论研究开始于20世纪50年代<sup>[1-2]</sup>,经过几十年的研究和严谨的科学试验<sup>[3-5]</sup>,目前双偏振天气雷达已经发展到大规模业务应用阶段。2013年美国WSR-88D雷达网全部升级成双偏振雷达,经过系统的业务应用评估,表明双偏振雷达在冰雹探测方面比单偏振雷达具有更大的优势<sup>[6]</sup>,总结给出的小冰雹、大冰雹、巨大冰雹的双偏振参量大致参考值范围,为冰雹判别和预警提供了良好的参考。

双偏振多普勒雷达同时发射和接收水平偏振和垂直偏振电磁波,雷达系统通过对水平通道和垂直通道信息的综合分析,可区分不同形状、不同性质的气象目标物和非气象目标物。冰雹的大小相差非常大,直径小的只有约0.6 cm,大的达到约20 cm,通常将直径大于等于2 cm、小于5 cm的冰雹视为大冰雹,直径大于等于5 cm的冰雹为特大冰雹<sup>[7]</sup>。冰雹不同于雨滴,雨滴尺寸越大下落时变得越扁平,而冰雹的形状不规则,常常有突起,有时呈椭圆形,不同方向的尺寸相差很大。冰雹下落时会不断翻滚,呈现出各向同性的效应。因此,风暴单体内冰雹生成区的典型特征表现为高反射率因子( $Z_H$ )、低差分反射率( $Z_{DR}$ )和低相关系数(correlation coefficient, CC)<sup>[8]</sup>。研究<sup>[9]</sup>表明,冰雹的 $Z_H$ 通常很高( $>55$  dBZ),但是巨大的干冰雹 $Z_H$ 反而可低到40 dBZ。冰雹的 $Z_{DR}$ 通常很小,在 $-0.5 \sim 1.5$  dB之间,当出现融化的冰雹或雨夹冰雹时, $Z_{DR}$ 值会变得很大,有时达到5~6 dB;CC是探测冰雹最稳定的特征参量,即使在雹雨混杂,没有明确的 $Z_{DR}$ 特征时,CC也会在 $0.70 \sim 0.96$ 之间。纯冰雹区的差分传播相移率( $K_{DP}$ )很低( $<0.5$  ( $^\circ$ ) $\cdot$ km<sup>-1</sup>),

但在冰雹融化或雨夹冰雹时 $K_{DP}$ 会变得很高。

有界弱回波区(bounded weak echo region, BWER)、三体散射特征(three-body scatter spike, TBSS)、旁瓣回波是强雹暴的典型雷达特征<sup>[10-11]</sup>,国外学者利用双偏振雷达监测强雹暴及开展冰雹预警做了大量研究<sup>[12-16]</sup>,并总结了业务应用方法。MAHALE et al.<sup>[14]</sup>研究建立了基于S波段偏振雷达判别TBSS的模糊逻辑算法,并将识别的TBSS范围与水凝物分类产品并列给出。KUMJIAN et al.<sup>[15]</sup>研究表明 $Z_{DR}$ 柱高度与上升气流强度大致成正比,相比其它风暴特征指标(如回波顶高)可为冰雹预警提供更多提前时间。KUSTER et al.<sup>[16]</sup>研究建立了 $Z_{DR}$ 柱与风暴强度、高层反射率因子核等的配置模型,供预报员在风暴预警决策中使用。自20世纪70年代起,国内在双偏振雷达探测冰雹的理论研究与应用等方面也取得了不少研究成果<sup>[17-20]</sup>。近年来,我国双偏振雷达进入快速建设阶段,但业务应用积累的个例和经验并不多,利用双偏振雷达对冰雹、龙卷等强对流天气的研究还较少。

受高空槽影响,2020年6月1日下午到夜间,山东省中西部出现一次强雹暴天气,聊城、德州南部、济南、泰安、临沂等地出现了严重风雹灾害,最大冰雹直径超过5 cm。济南CINRAD/SA-D双偏振多普勒雷达(以下简称“济南雷达”)对这次雹暴过程进行了完整探测。刁秀广<sup>[21]</sup>利用济南雷达探测资料重点分析了该雹暴影响济南长清区时的偏振雷达特征。本文利用 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、CC等双偏振雷达参量及水凝物相态分类产品(hydrometeor phase classification products,以下简称HCL),结合地面自动气象站观测和降雹调查资料,分析了这次雹暴的演变过程、典型雹云结构和主要偏振雷达特征,可为业务应用双偏振雷达探测预警冰雹积累经验。

## 1 雹暴过程概况

### 1.1 资料与方法

本文使用的双偏振雷达资料为济南雷达探测的体扫数据,同时使用滨州、临沂新一代天气雷达部分时段的探测资料进行比对。济南雷达位于齐河县境内(坐标为 $116^{\circ}42'50''E, 36^{\circ}42'50''N$ ,雷达天线馈源海拔高度为106.9 m),工作频率为2 830 MHz,脉冲峰值功率为650 kW,工作方式为双发双收<sup>[22]</sup>。除具有新一代天气雷达的反射率因子、平均径向速度( $V_R$ )、速度谱宽( $SW$ )及导出产品外,增加了 $Z_{DR}$ 、 $CC$ 、 $K_{DP}$ 、差分传播相移 $\Phi_{DP}$ 等双偏振基本产品和融化层高度、水凝物相态分类(HCL)等产品。该雷达24 h连续运行,但2020年6月1日14:59—15:34之间缺5个体扫资料,该时段的风暴处于跃增、酝酿到降雹阶段,对文中分析风暴后续的演变及偏振雷达特征没有影响。降雹信息主要由台站观测和实地调查确定,并参考网上消息、新闻媒体的降雹视频、图片等报道信息。

### 1.2 影响系统和环境条件

2020年6月1日08时,华北中南部地区高空为偏西气流,低层为西南到东南风,蒙古到我国河套地区为高空槽(图略)。该高空槽向东南方向移动,引导冷空气南下,于6月1日中午前后在河北邢台市境内触发对流发展,是造成此次强雹暴的主要天气系统。分析6月1日08时章丘探空资料(图略)可见,0℃层、-10℃层、-20℃层高度分别为3.6 km、5.1 km和6.5 km。大气湿层仅在700 hPa附近,底层和中高层为干层。计算850 hPa与500 hPa温差( $\Delta T_{850-500}$ )为31.6℃,0~6 km风切变为 $22.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,下沉对流有效位能(downdraft convective available potential energy, DCAPE)为 $1 093.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,湿球0℃层(wet blub zero, WBZ)高度为3.3 km,上述指标均达到鲁中发生冰雹雷暴大风的阈值<sup>[23]</sup>。根据6月1日15时章丘探空资料进行订正,绘制 $t$ - $\ln p$ 图(图1),计算的对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)由08时的 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增大到 $1 143.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,订正后的CAPE虽然有较大增加,但仍属于中等量值。

### 1.3 雹暴路径与灾情

利用济南雷达的反射率因子产品对雹暴的发生及移动路径进行追踪分析,图2a给出的是7个时次反射率因子及雹暴单体的移动路径,每个时次选

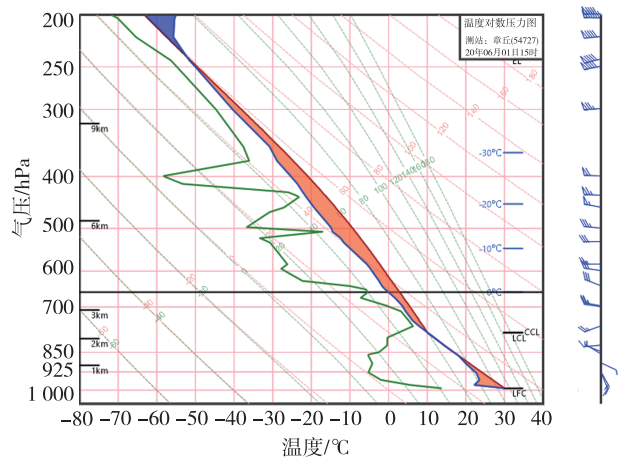


图1 2020年6月1日15时章丘探空(温度对数压力图)

Fig.1 Sounding diagram ( $t$ - $\ln p$ ) from Zhangqiu station at 15:00 BST 1 June 2020

择反射率因子最强的仰角平面,并在图上方标注了雷达探测时间,为叙述方便,将该雹暴命名为雹暴A。雹暴A最早于6月1日13:20(北京时,下同)在河北省邢台市隆尧县境内初生,14:18移动到邢台南宫市,由于雹暴增强,移向开始右转偏向东南方向,15:34移到山东省德州市夏津县,出现雨夹冰雹,夏津渡口驿乡自动气象站观测降水量为40.1 mm,最大风速为 $25.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,夏津县城西出现直径约3.0 cm的大雹。此后,雹暴维持一定强度,先后在聊城市高唐县、德州市齐河县出现短时强降水和冰雹,但降雹范围和冰雹尺寸都不大。17:00前后,雹暴在济南市长清区境内出现明显降雹,造成果树受灾。17:47雹暴影响到泰安市,泰山气象站观测最大冰雹直径为3.1 cm。19:00后新泰市出现降雹,新泰气象站观测最大冰雹直径为3.0 cm。受雹暴A的影响,19:26前后临沂市蒙阴县城出现降雹,降雹持续数分钟,冰雹直径多为1.0~2.0 cm。由图可见,雹暴A除初生阶段(14:18前),此后都具有明显的雹暴特征,15:34—18:22各时次都有明显TBSS,17:47有旁瓣回波特征。

图2b给出的是18:28济南雷达 $2.4^{\circ}$ 仰角 $Z_H$ ,图中白线是叠加的风暴追踪产品(STI),线上的白点显示了每个体扫风暴质心的位置。此时雹暴A开始影响新泰市,而在其移动前方的蒙阴境内有另一个强风暴单体(命名为“雹暴B”)。雹暴B的回波形态、范围与雹暴A相似,也具有明显的TBSS和旁瓣回波。追踪雹暴B移动路径可见,该雹暴于16:38在济宁泗水县初生,16:49雷达系统识别为风

暴。该风暴先向东北方向移动,17:59 后转向东偏南移动,并给新泰、蒙阴造成第一轮降雹。19:00 后,雹暴 A 造成新泰、蒙阴第二轮降雹。雹暴 A、雹暴 B 在蒙阴境内的移动路径和降雹范围相似,但雹

暴 B 在蒙阴的降雹强度大于雹暴 A。据民政部门灾情统计,此次雹暴灾害造成经济损失 6.2 亿元,其中以泰安、临沂受灾最重。

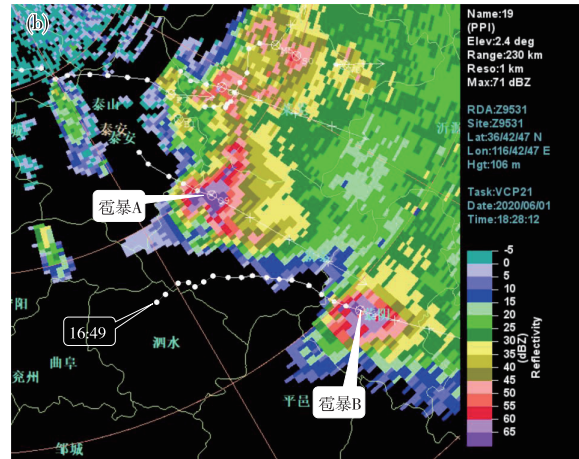
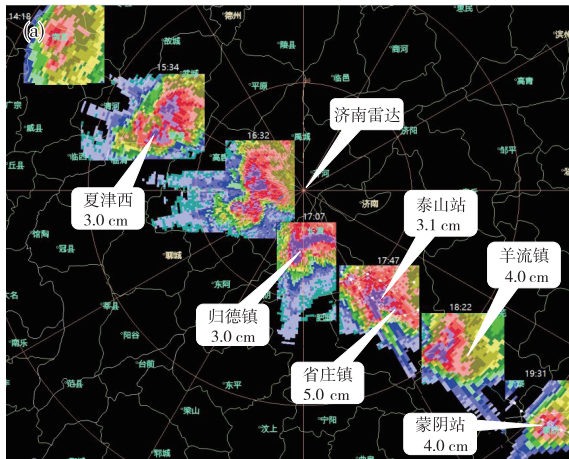


图 2 济南雷达观测雹暴 A 的移动路径(a;标注信息为调查的降雹点和最大冰雹直径)和济南雷达 18:28 探测 2.4° 仰角  $Z_H$  产品(b;白点为风暴追踪信息)

Fig.2 The moving path of hail storm A observed by Jinan radar (a; the labeled informations are the hail-falling point and the maximum hail diameter from field survey) and  $Z_H$  at 2.4° elevation from Jinan radar at 18:28 BST 1 June 2020 (b; the white points are storm tracking information)

#### 1.4 地面观测雹暴中心气象要素变化

风暴导致的短时强降水、大风和冰雹是主要致灾因素。此次雹暴过程中雹暴 A、B 的质心(雷达 STI 产品识别)恰经过蒙阴气象站新站(以下简称“蒙阴站”),该站的自动气象站精细记录了地面风、气压、气温和雨雹等实况(图 3),从而有机会观测到雹暴中心影响前后地面气象要素的演变。分析可见,雹暴 B 影响前,地面为东南风,风速逐渐增大,18:24 开始雨雹同下,4 min 后(对应图 2b 时次,STI 指示的雹暴中心位于蒙阴站附近)雨强加大,并伴随风速快速增大,风向转东北到偏北风。其间,地面气温陡降(18:23—18:51 降幅达 8.2 °C),水汽压快速增大(18:33 达到最大值 20.4 hPa)。风暴影响蒙阴站前 10 min 开始,海平面气压波动增大,18:35 增大到 976.2 hPa。风转向时(18:41)风速骤降到 2.0  $m \cdot s^{-1}$ 后又快速增大,同时连续降雹 2 min。雹暴 B 在蒙阴站的降水持续 31 min,冰雹直径多为 1.0~2.0 cm,最大直径为 4.0 cm。19:28,雹暴 A 开始影响蒙阴站,风压变化与雹暴 B 影响时类似,观测冰雹尺寸较小,但数密度较大。雹暴 A、B 影响蒙阴时处于成熟阶段,其地面短时转北风后仍以偏东风为主,转风前雨强较大伴有冰雹,转风后降雹停止,降水减弱但仍持续十余分钟。

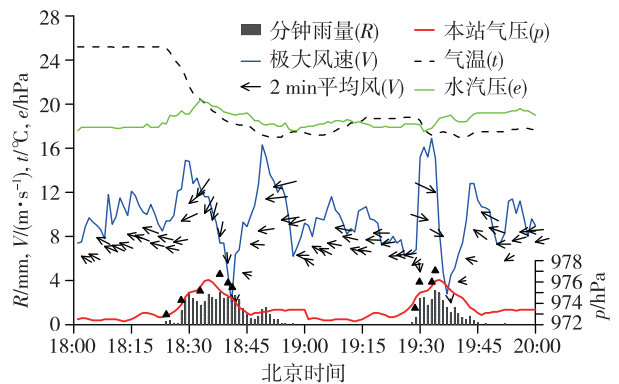


图 3 蒙阴气象站观测逐分钟地面气象要素和降雨量(▲表示该时刻记录有降雹)

Fig.3 Minute-by-minute rainfall (histogram), pressure (red line), maximum wind speed (blue line), temperature (black dashed line), water-vapour pressure (green line) and 2-minute average wind (arrow) observed by Mengyin meteorological station (the mark ▲ indicates hail-falling time)

## 2 典型时次雹暴的雷达特征

### 2.1 15:34 夏津雹暴特征

图 4 是济南雷达 15:34 探测 1.5° 仰角  $Z_H$ 、 $SW$ 、 $Z_{DR}$  和  $CC$  产品,图中圆圈标出的是雹暴强回波区,4 幅图的圆圈位置一致(下同)。此时,强雹暴的  $Z_H$

(图4a)最大值超过65 dBZ;SW图(图4b)上,圆圈的径向下游方向谱宽达到 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,对应为强冰雹区产生的TBSS,表明空中已有大雹存在<sup>[11]</sup>。 $Z_{\text{DR}}$ 图(图4c)中,圆圈中 $Z_{\text{DR}}$ 值大多低于1.5 dB。 $CC$ 图(图4d)上,圆圈位置的 $CC$ 值大多低于0.96,最小值为0.80。此时的雹暴中心距离雷达72 km,

$1.5^\circ$ 仰角雹暴位置的高度约为2.3 km,该位置在湿球 $0^\circ\text{C}$ 层高度以下约1 km,实况显示德州市夏津县15:30出现雨夹雹,网上报告夏津西高速服务区冰雹大得如核桃(约3.0 cm)。夏津县北部的强回波区在SW、 $Z_{\text{DR}}$ 和 $CC$ 产品上表现出更加明显的TBSS特征,地面也出现降雹,但没有冰雹尺寸的报告。

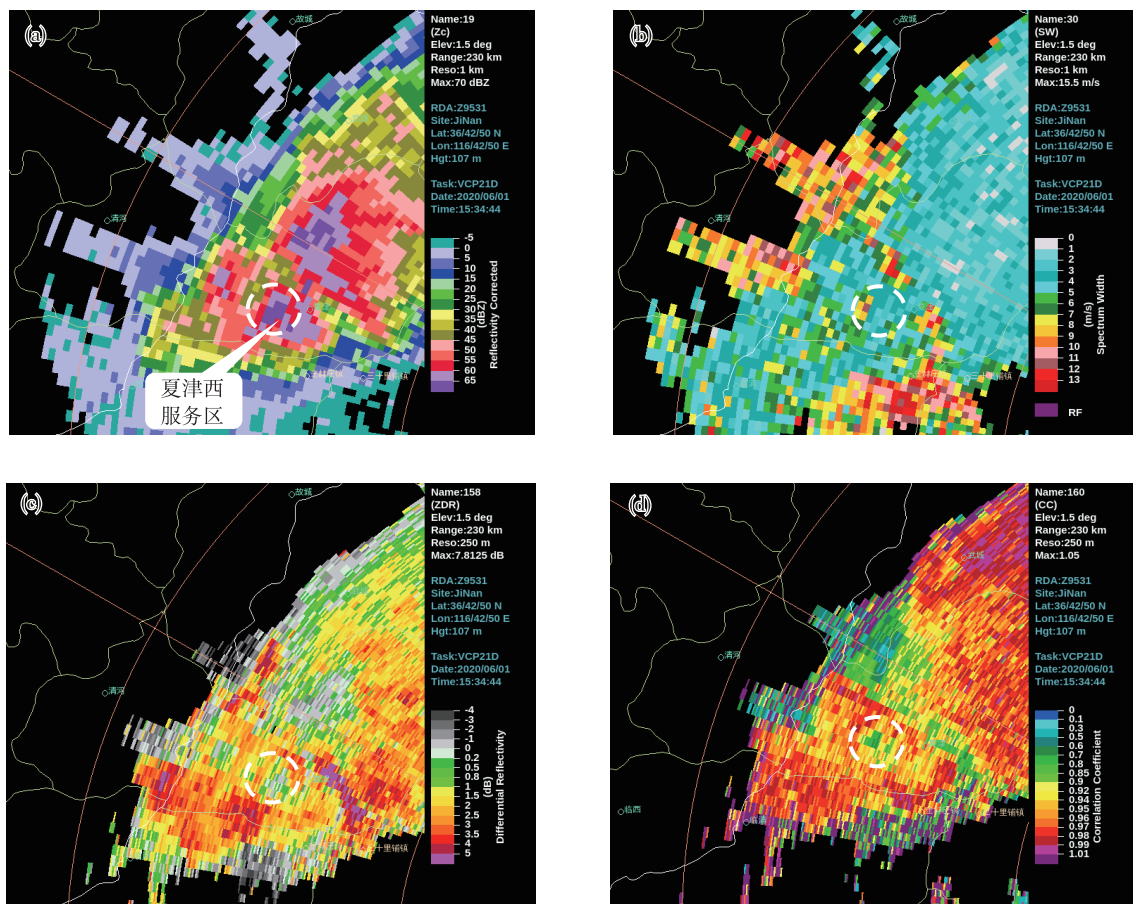


图4 15:34 济南雷达 $1.5^\circ$ 仰角 $Z_{\text{H}}$ (a)、SW(b)、 $Z_{\text{DR}}$ (c)和 $CC$ (d)产品(图中虚线圈标出的是降雹云体范围)

Fig.4 Products of  $Z_{\text{H}}$ (a)、SW (b)、 $Z_{\text{DR}}$ (c) and  $CC$  (d) at  $1.5^\circ$  elevation from Jinan radar at 15:34 BST 1 June 2020 (the dotted circles show the range of hail-falling clouds)

## 2.2 17:07 长清雹暴特征

图5是济南雷达17:07探测 $2.4^\circ$ 仰角 $Z_{\text{H}}$ 、SW、 $Z_{\text{DR}}$ 和 $CC$ 产品。此时, $Z_{\text{H}}$ (图5a)最大值超过72 dBZ,雹暴回波强度和范围明显增大,图中虚线圈所示的雹云造成长清区归德镇、万德镇强降雨。SW图(图5b)中虚线圈的径向下游方向谱宽达到 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,最大为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。 $Z_{\text{DR}}$ 图(图5c)中虚线圈中 $Z_{\text{DR}}$ 数值在0 dB附近,最低达到-2.6 dB,其径向下游的 $Z_{\text{DR}}$ 值由近及远从0 dB逐渐降低到-4.0 dB。 $CC$ 图(图5d)上,虚线圈范围的 $CC$ 值在0.96以下,最小值小于0.92,其下游径向的 $CC$ 值大多低于0.50。此时雹暴中心距离雷达32 km,

$2.4^\circ$ 仰角雹暴位置的高度约为1.5 km,SW、 $Z_{\text{DR}}$ 和 $CC$ 都显示明显的TBSS。刁秀广<sup>[21]</sup>分析该时次高仰角的三体散射,呈现出弱反射率因子,小的 $CC$ (最小为0.20), $Z_{\text{DR}}$ 随着距离增加而减小的特征,但TBSS宽度较低层窄。

## 2.3 17:47 泰安雹暴特征

据国家级气象观测站观测记录,17:40—18:20泰安市区及新泰市出现降雹,其中泰安、泰山、新泰3个气象站观测的冰雹最大直径分别为0.3 cm、3.0 cm、3.1 cm,有目击者报告泰安市泰山区庄庄镇、新泰市天宝镇最大冰雹直径超过5.0 cm,为特大冰雹等级。

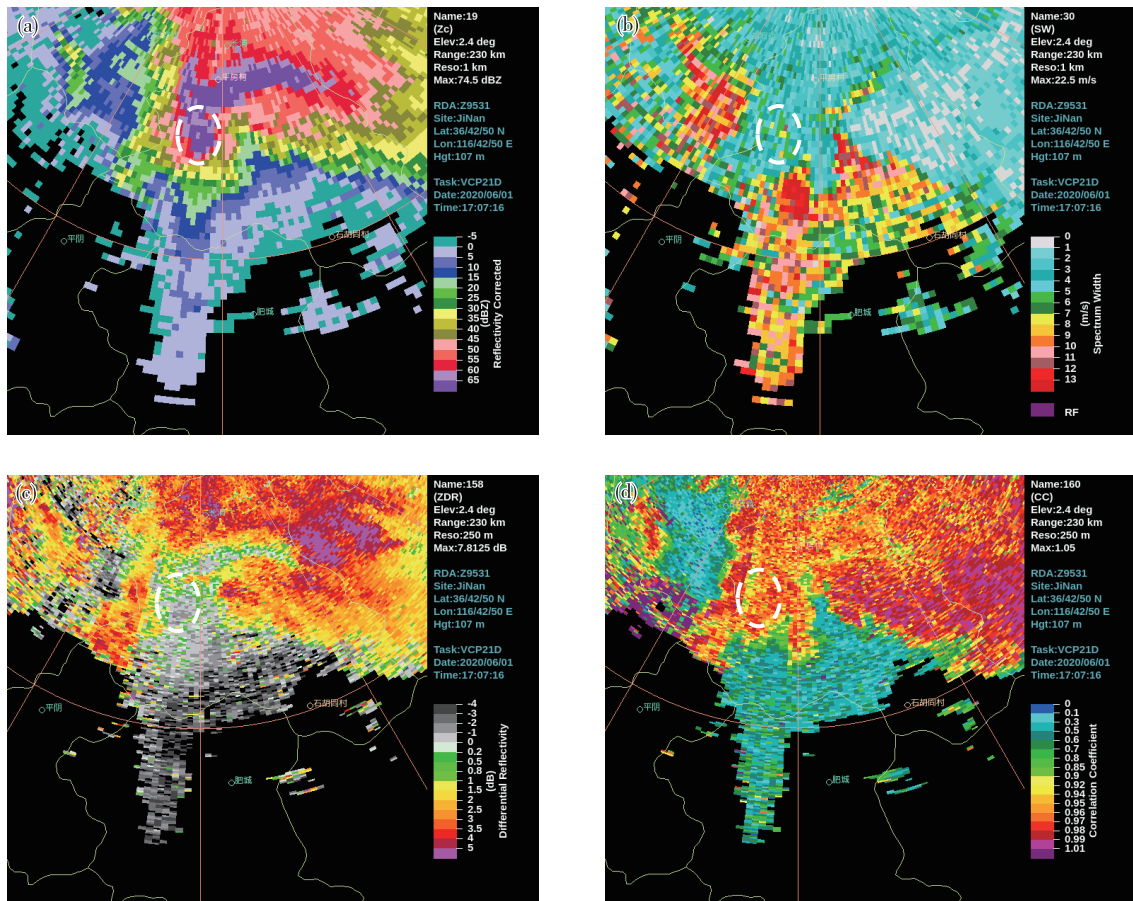


图 5 17:07 济南雷达 2.4° 仰角  $Z_H$ (a)、 $SW$ (b)、 $Z_{DR}$ (c) 和  $CC$ (d) 产品 (虚线圈示意同图 4)

Fig.5 Products of  $Z_H$ (a)、 $SW$ (b)、 $Z_{DR}$ (c) and  $CC$ (d) at 2.4° elevation from Jinan radar at 17:07 BST 1 June 2020 (the dotted circle is same as Fig.4)

图 6 是济南雷达 17:47 探测 4.3° 仰角  $Z_H$ 、 $SW$ 、 $Z_{DR}$  和  $CC$  产品, 同样 4 幅产品图中虚线圈标出的是雹云强反射率核区, 其中心距离雷达约 65 km, 4.3° 仰角雷达波束中心高度约为 5.5 km, 位于 0 °C 层以上 1.9 km。可见, 图 6a 圆圈内的  $Z_H$  最大值超过 73 dBZ, 而 0.5°、1.5°、2.4° 仰角  $Z_H$  大于 60 dBZ 的强回波区大多位于低层前侧入流的前侧和左侧 (图略), 地面大冰雹也集中于此区域, 这与 KUMJIAN and RYZHKOV<sup>[13]</sup> 总结的超级单体冰雹落区位置基本一致。 $SW$  图 (图 6b) 中圆圈径向下游方向的谱宽大于  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大为  $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上。 $Z_{DR}$  图 (图 6c) 中圆圈中的数值大多小于 0.5 dB, 最低达到 -1.0 dB, 其径向下游出现典型的 TBSS<sup>[14]</sup>。紧靠反射率强核的下游边缘,  $Z_{DR}$  出现大于 7.0 dB 的半环状高值区, 其后沿径向的  $Z_{DR}$  逐渐减小, 最小值变为负值, 对应  $CC$  值小于 0.96, 最小至 0.90 (图 6d)。此时, 在强反射率核区的西南方向, 与强回波区距济南雷达相同距离的区域, 出现十分清楚的旁瓣回波, 直至蒙

阴境内降雹结束, 雹暴 A 均识别有旁瓣回波。

### 3 超级单体阶段的双偏振参量特征

17:07 雹暴单体移动到济南市长清区, 已连续 4 个体扫探测到中气旋, 风暴发展成超级单体。图 7a 是济南雷达 17:07 探测的 14.6° 仰角  $Z_H$  产品, 图中叠加的线段  $AB$ 、 $CD$  分别为径向、切向剖面位置。此时, 14.6° 仰角的雹暴中心对应高度约为 8.6 km, 雹暴中心区域  $Z_H$  只有 20~30 dBZ, 周围被大于 55 dBZ 的强回波包围形成 BWER。图 7b 给出的  $Z_H$  径向剖面显示出典型的悬垂回波-BWER-回波墙结构。图 7c 给出是  $Z_{DR}$  径向剖面, 图 7b 所示回波墙及 BWER 顶部强回波区对应的  $Z_{DR}$  值介于 0~1.5 dB, 而在 BWER 中心与回波墙之间  $Z_H$  水平梯度最大区域对应的是  $Z_{DR}$  大值区, 大于 3.5 dB 的高值区向上伸展到 6.5 km 以上 (超过 -20 °C 高度), 形成  $Z_{DR}$  柱<sup>[13,15]</sup>。KUMJIAN and RYZHKOV<sup>[13]</sup> 分析了  $Z_{DR}$  柱的成因, 认为风暴主上升气流将大的液滴或被水膜

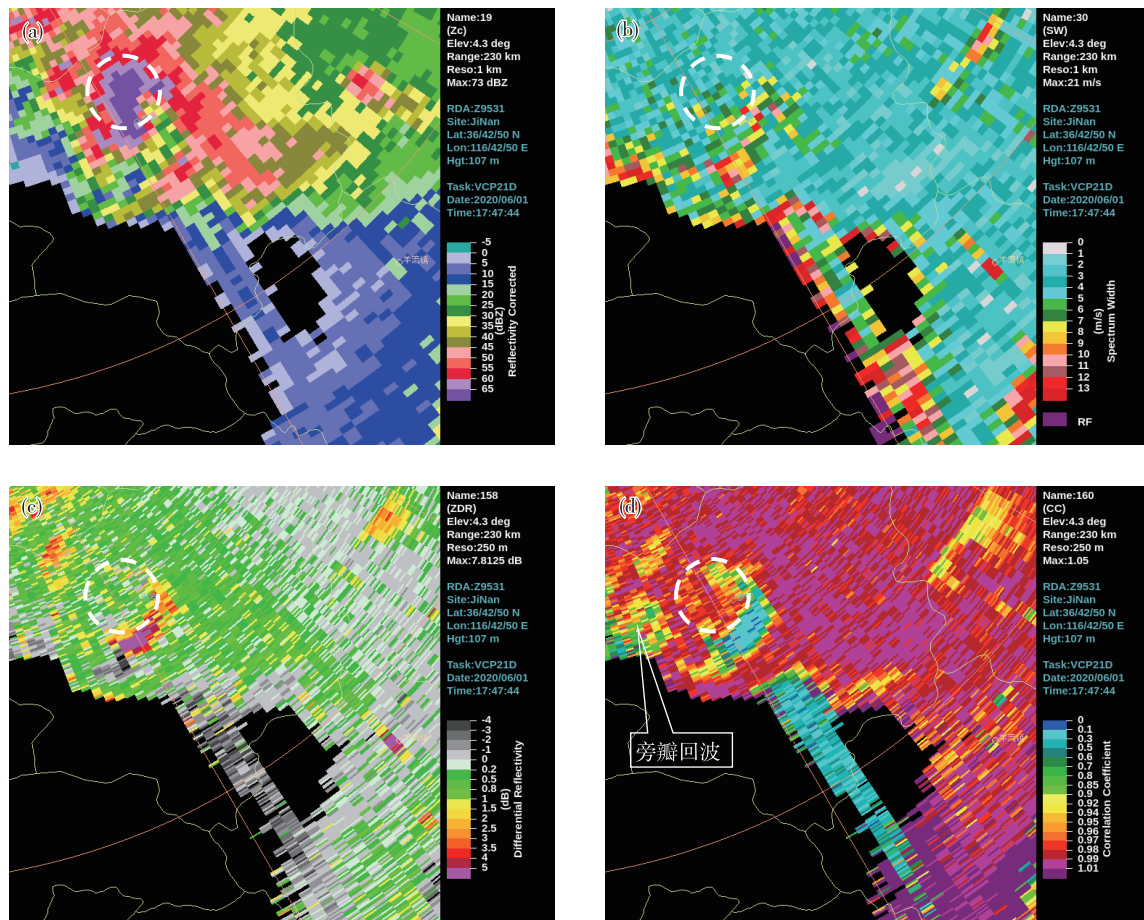


图6 17:47 济南雷达  $4.3^\circ$   $Z_H$  (a)、 $SW$  (b)、 $Z_{DR}$  (c) 和  $CC$  (d) 产品 (虚线圈示意同图4)

Fig.6 Products of  $Z_H$  (a)、 $SW$  (b)、 $Z_{DR}$  (c) and  $CC$  (d) at  $4.3^\circ$  elevation from Jinan radar at 17:47 BST 1 June 2020 (the dotted circle is same as Fig.4)

覆盖的冰雹带到高层,在主上升气流区的边缘,因垂直速度减小,大滴或雹转为下降而使  $Z_{DR}$  增强。KUMJIAN et al.<sup>[15]</sup> 通过对 42 个风暴的统计分析,认为强雹暴发展过程中,  $Z_{DR}$  柱峰值高度要比反射率因子核超过  $-20^\circ\text{C}$  高度这一指标具有更大提前量,可提前 10~20 min 对冰雹进行预警。此次过程在 17 时前后,雹暴具有明显的  $Z_{DR}$  柱特征,对应此后雹暴快速增强,造成济南长清区、泰安市强降雨。对于  $Z_{DR}$  柱反映冰雹,特别是大雹形成过程的基本特征和内在关系,有待于分析更多实例进行研究。图 7d 是  $CC$  垂直剖面,对应 BWER 中心的  $CC$  值很低,中上部降到 0.9 以下,而低层的  $CC$  值下降到 0.6 以下,有学者<sup>[13]</sup> 认为低层的  $CC$  低值是由强烈的入流将地面杂物带进 BWER 区域造成的。

图 7e 给出的是沿  $CD$  切向的  $Z_{DR}$  剖面,对应 BWER ( $Z_H$  剖面图略) 的区域同样存在  $Z_{DR}$  柱。对照沿  $CD$  切向的径向速度剖面 (图 7f) 分析可见,  $Z_{DR}$  柱对应的位置具有明显的中气旋特征,表明在雹暴的

有界弱回波区存在强的旋转上升气流,可为大冰雹的循环增长提供有利的动力条件,这与已有的实例雹暴结构分析<sup>[24]</sup> 一致。

#### 4 冰雹融化过程的雷达特征

模拟研究<sup>[25]</sup> 表明,冰雹自 4 km 高度的冻结层下落,初始直径小于 14 mm 的高密度雹和初始直径小于 15 mm 的密度不均匀雹,在到达地面之前可完全融化。空中冰雹的融化程度与融化层高度、冰雹尺度及形状和云中温湿度等条件有关<sup>[19]</sup>,利用不同高度的雷达产品分析冰雹融化状况,可为判别雨雹落区,提高人工防雹作业的针对性提供参考。16:32,雹暴主体主要影响德州市禹城、齐河,风暴回波结构松散,处于相对平稳阶段,16:32—16:44 未识别出中气旋。图 8 是济南雷达 16:32 探测的  $Z_H$  (图 8a<sub>1</sub>—a<sub>4</sub>)、 $Z_{DR}$  (图 8b<sub>1</sub>—b<sub>4</sub>) 产品,自上至下的仰角分别是  $14.6^\circ$ 、 $9.9^\circ$ 、 $6.0^\circ$ 、 $1.5^\circ$ ,图中标注的实线圈、虚线圈在各图中位置相同,其中心分别距离雷

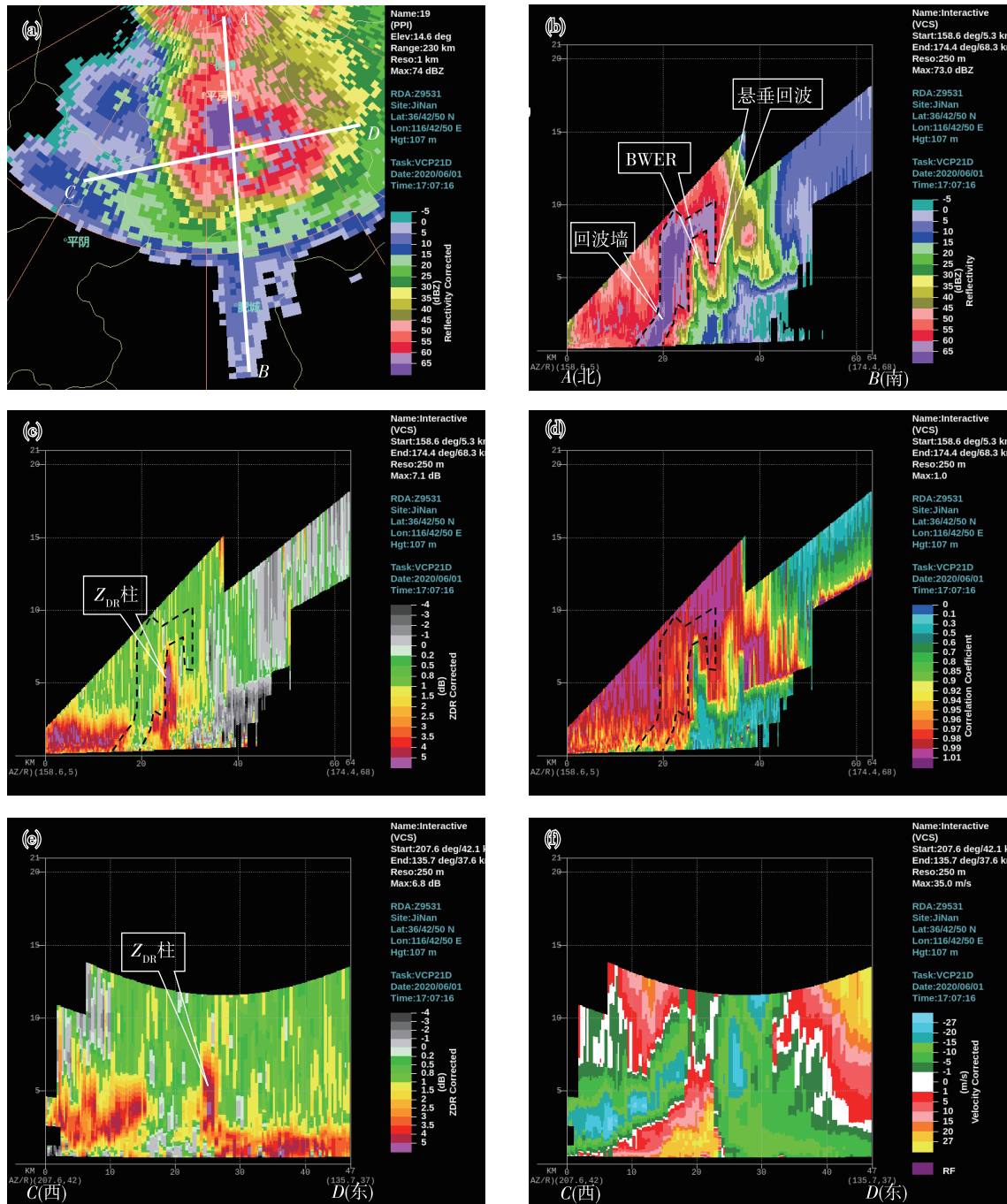


图 7 17:07 济南雷达 14.6° 仰角  $Z_H$  (a; 直线 AB、CD 分别为径向、切向剖面位置)、 $Z_H$  (b)、 $Z_{DR}$  (c)、CC (d) 径向剖面 (b—d 中虚折线所围区域的  $Z_H > 60$  dBZ) 和  $Z_{DR}$  (e)、CC (f) 切向剖面

Fig.7  $Z_H$  at 14.6° elevation (a; the lines AB and CD show the location of vertical cross section), vertical cross section of  $Z_H$  (b; the area enclosed by the black dashed line represents  $Z_H > 60$  dBZ, same as in c and d),  $Z_{DR}$  (c), CC (d) along AB, and vertical cross section of  $Z_{DR}$  (e), CC (f) along CD from Jinan radar at 17:07 BST 1 June 2020

达约 30 km、13 km。分析可见, 9.9° (图 8a<sub>2</sub>)、6.0° (图 8a<sub>3</sub>) 仰角的实线圈内  $Z_H$  最大值超过 70 dBZ, 而同仰角的  $Z_{DR}$  值介于 -0.5~0 dB 之间 (图 8b<sub>2</sub>、b<sub>3</sub>), 说明雹暴在 3.7~6.1 km 高度已有大冰雹生成,  $Z_{DR}$  显示出典型的三体散射特征。从 3.3° (图略) 向下,

温度已高于 0 °C, 强反射率核的强度逐渐减弱, 1.5° (图 8a<sub>4</sub>) 的  $Z_H$  已大多低于 60 dBZ, 其中心高度为 1.0 km。而对应的  $Z_{DR}$  产品上, 随着高度降低,  $Z_{DR}$  的低值范围逐渐缩小, 可以推测冰雹下降到 1.0 km 高度时, 已很大程度上被融化。降雹实况表明, 德



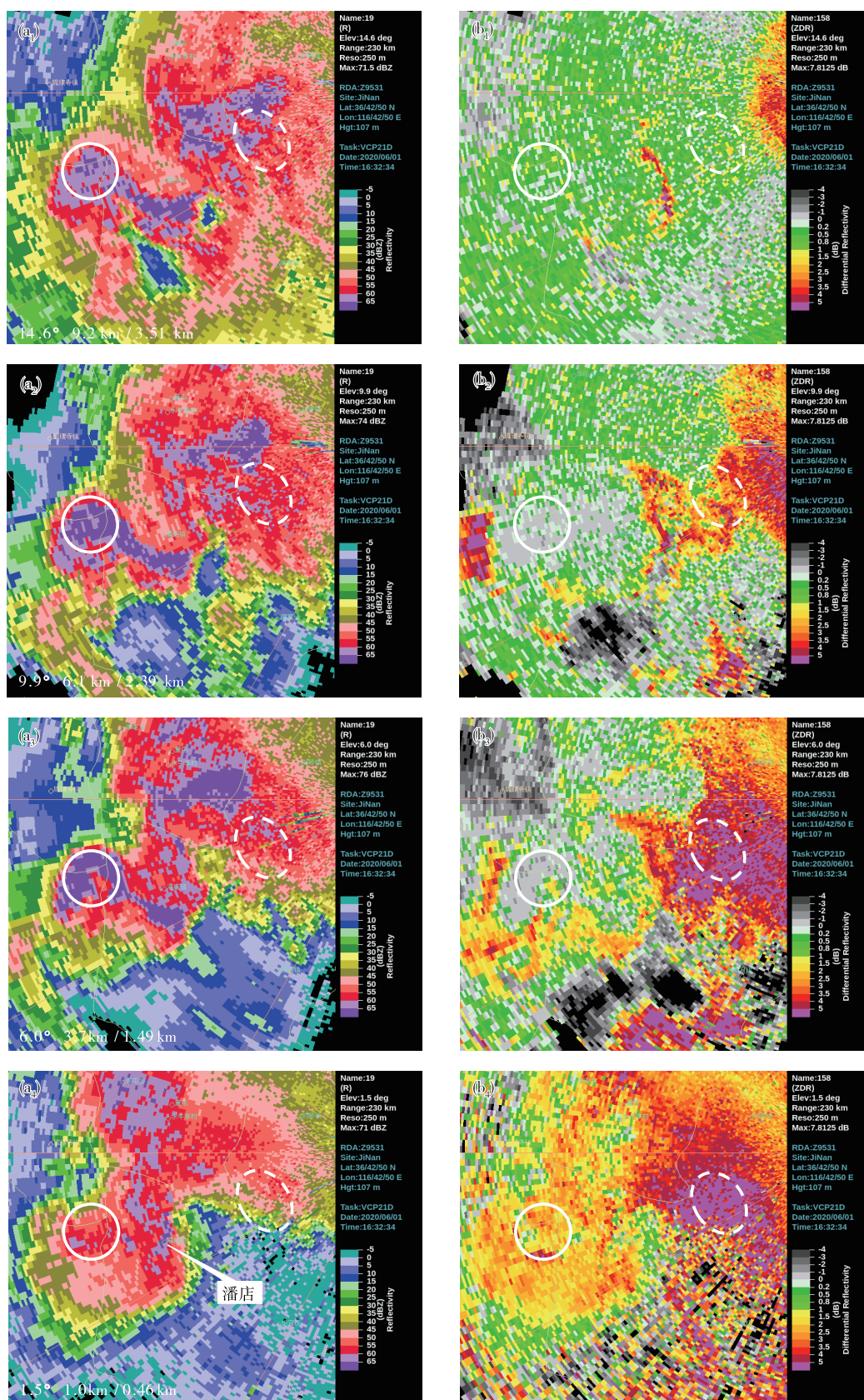


图8 济南雷达 16:32 探测  $Z_H(a_1-a_4)$ 、 $Z_{DR}(b_1-b_4)$  产品(图中左下角给出了扫描仰角和实线圈、虚线圈中心对应高度)

Fig.8 Products of  $Z_H(a_1-a_4)$  and  $Z_{DR}(b_1-b_4)$  from Jinan radar at 16:32 BST 1 June 2020 (the texts at the bottom left of  $a_1-a_4$  show the scanning elevation, and the corresponding altitude of the center of solid and dashed circle)

州齐河县的刘桥、潘店、胡官屯3个乡镇出现降雹,但冰雹直径不足1.0 cm,持续时间约2 min,冰雹灾害较轻。

图8中白虚线圈位于以上分析高空强反射率核的下风方,16:32雷达垂直风廓线(vertical wind profile, VWP)产品显示5 km以上偏西风达到 $20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。分析不同仰角白虚线圈内 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 数值可见,14.6°仰角(图8a<sub>1</sub>)的 $Z_H$ 最强,向下逐渐减弱,1.5°仰角的 $Z_H$ 大多低于45 dBZ。对应右侧的 $Z_{DR}$ 产品,14.6°仰角的 $Z_{DR}$ 值介于0.5~0.8 dB,向下到9.9°仰角,部分区域 $Z_{DR}$ 增大到2.0 dB,6.0°以下的 $Z_{DR}$ 则大多大于5.0 dB,这表明在高空偏西风和风暴高层东北向出流的作用下,部分高空的冰雹被带离风暴中心区域,在风暴下风方下落过程中融化成为大雨滴或半融化状的小雹,对应低层出现 $Z_{DR}$ 大值,该区域的地面实况以降雨为主,几乎未见雹。

## 5 HCL 产品分析及对冰雹的指示

双偏振雷达系统依据目标物在水平和垂直2个通道不同的散射特征,综合 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ 和 $CC$ 等雷达参量建立了水凝物相态分类模糊逻辑算法<sup>[26]</sup>,研发了HCL产品,输出小雨、大雨、冰雹、大雨滴、生物、地物、干雪、湿雪、冰晶、霰和未知等11类分类产品。国内气象业务上对这类产品尚处于应用初期,有必要对其产品特征进行分析,积累其在冰雹监测

预警方面的应用经验。对于VCP21模式,1个体扫可生成9个仰角的HCL产品,同一仰角由近及远,HCL产品代表更高高度的水凝物分类。

图9a是大约5 km高度的HCL冰雹色标,由风暴最接近5 km高度仰角的HCL组合而成,该高度的环境温度接近 $-10^\circ\text{C}$ ,在湿球 $0^\circ\text{C}$ 层高度之上约1.7 km。图9b是雷达0.5°仰角的HCL。为便于分析,图中只保留了冰雹的色标。结合前述对雹暴发展过程的分析可见,16:32前,雹暴处于发生发展阶段,5 km高度层的HCL冰雹色标分布趋于紧凑,面积逐渐增大,但0.5°低仰角显示的HCL冰雹色标松散或几乎没有,地面出现零散降雹,也观测到直径大于2.0 cm的大雹,但数量较少,冰雹尺寸总体较小,未出现明显雹灾。16:32之后的2~3 h,雹暴维持强势,中高层的HCL冰雹色标紧凑密实,低仰角的HCL冰雹色标分布连续性较好,地面出现大范围密集降雹,且在泰安、新泰等地出现直径大于5.0 cm的大雹,造成严重冰雹灾害。可见HCL产品对于判断空中冰雹分布和地面降雹范围及强度有很好的指示作用。值得注意的是,图9b中7个时次的冰雹色标距离雷达不同,对应高度介于0.35~3.0 km,其中16:32、17:07的雹暴中心距济南雷达约25 km,对应0.5°仰角高度约0.35 km,这两个时次的HCL冰雹色标对地面的指示性更强,且具有可比性。

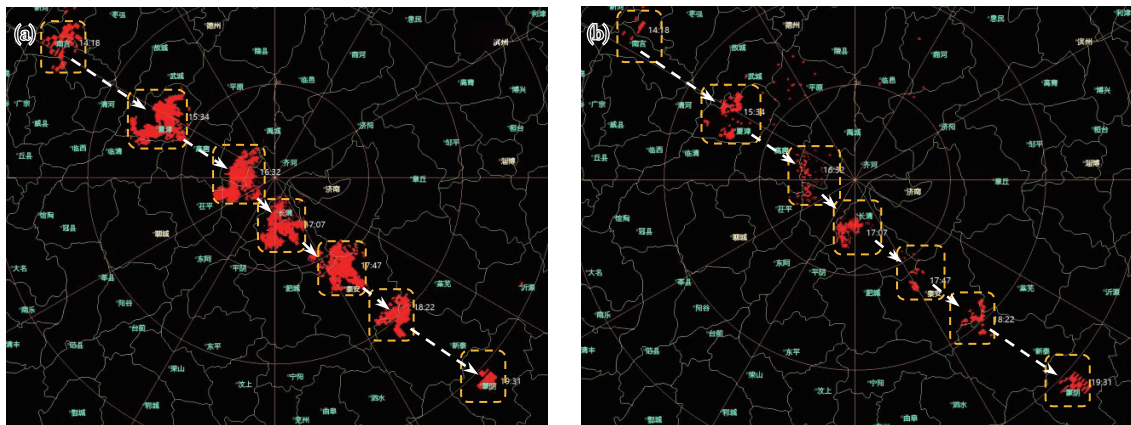


图9 济南雷达HCL产品(a. 约5 km高度,b. 0.5°仰角)

Fig.9 Products of HCL (a. approx. 5 km altitude, b. 0.5° elevation) from Jinan radar

## 6 结论与讨论

1)此次雹暴过程是在高空槽影响之下,于2020年6月1日中午在河北东南部触发并向偏东方向移动,自鲁西进入山东后转向东南移动,在鲁西、鲁中

山区产生大范围风雹灾害,持续影响近5 h。雹暴于15:34在德州市夏津县出现降雹,之后约90 min相对平稳,主要以大风、短时强降水为主,冰雹尺度较小,雹灾较轻。17:07后雹暴明显加强,给济南、泰安、临沂部分地区造成严重的冰雹灾害。

2) 雹暴影响夏津、长清、泰安等典型时次的双偏振雷达特征表明,不同仰角( $1.5^{\circ} \sim 4.3^{\circ}$ ,代表高度 $1.5 \sim 5.5$  km)探测到的冰雹区对应 $Z_H$ 均大于65 dBZ, $Z_{DR}$ 介于 $-2.6 \sim 1.5$  dB, $CC$ 介于 $0.80 \sim 0.96$ 。上述雷达产品均呈现雹暴具有典型的三体散射特征。

3) 此次雹暴发展强盛阶段具有明显的BWER结构和典型的中气旋特征,为大冰雹的生长提供了有利的动力结构, $Z_{DR}$ 柱可指示雹暴主上升气流区的位置。根据冰雹下落融化过程中不同仰角 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 的变化,结合融化层高度及冰雹所处风暴的位置,可以分析冰雹下落过程中的融化程度,判断地面雨雹分布情况。

4) HCL产品综合了 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ 和 $CC$ 等产品信息,对空中冰雹分布和冰雹落区有较好的指示作用。伴随着雹暴的发展加强,高空5 km附近冰雹区对应的冰雹色标分布趋于紧凑,面积增大,而低层( $0.35 \sim 3.0$  km)的冰雹色标范围明显小于高空,与地面冰雹落区有更好的对应关系。

双偏振雷达数据可以提供有关雹暴结构和强度变化的重要信息,通过监测识别BWER、TBSS、中气旋、旁瓣回波等典型特征,可准确研判雹暴发展状态,为提前预判降雹范围、强度和风雹灾害程度提供重要依据。鉴于雹暴发展迅速、结构多变,要准确把握雨雹演变规律,特别是大冰雹的形成过程,做好冰雹预警和人工防雹作业服务,尚需进一步加强对地面雨雹等实况的精细化观测,对照雷达观测数据开展更细致的、定量化的分析,总结出可业务应用的冰雹判别指标,以更好地提升双偏振雷达在冰雹短临预警和人工防雹作业指挥中的应用水平。

**致谢:**泰安市气象局袁超、高唐县气象局李静、德州市气象局李斌、济南市气象局黎明提供了地面气象观测和降雹信息,特此感谢。

### 参考文献:

- [1] 王致君. 偏振气象雷达发展现状及其应用潜力[J]. 高原气象, 2002, 21(5): 495-500.
- [2] ZHANG G F. 双偏振雷达气象学[M]. 闵锦忠, 戚友存, 王世璋, 等译. 北京: 气象出版社, 2018: 10-15.
- [3] SELIGA T A, BRINGI V N. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation [J]. J Appl Meteor, 1976, 15(1), 69-76.
- [4] BRANDES E A, VIVEKANANDAN J, TUTTLE J D, et al. A study of thunderstorm microphysics with multiparameter radar and aircraft observations [J]. Mon Wea Rev, 1995, 123(11): 3129-3143.
- [5] DOVIK R J, BRINGI V, RYZHKOV A, et al. Considerations for polarimetric upgrades to operational WSR-88D radars [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2000, 17(3): 257-278.
- [6] Radar Operations Center, Applications Branch. Operational assessment of pre-deployment WSR-88D dual polarization data [EB/OL]. Norman, Oklahoma. (2010-12-28) [2021-06-16]. <https://www.roc.noaa.gov/wsr88d/publicDocs>.
- [7] 全国气象防灾减灾标准化技术委员会. GB/T 27957—2011 冰雹等级 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 3.
- [8] KUMJIAN M R. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: Description of the polarimetric radar variables [J]. J Oper Meteor, 2013, 1(19): 226-242.
- [9] Warning Decision Training Branch. Dual-polarization radar operations course [EB/OL]. NOAA, 2013 [2021-06-16]. <https://training.weather.gov/wdtd/courses/dualpol/documents/DualPolOpsStudentGuide.pdf>.
- [10] SCHLATTER P T, SCHLATTER T W, KNIGHT C A. An unusual hailstorm on 24 June 2006 in Boulder, Colorado. Part I: Mesoscale setting and radar features [J]. Mon Wea Rev, 2008, 136(8): 2813-2832.
- [11] LEMON L R. The radar “three-body scatter spike”: An operational large-hail signature [J]. Wea Forecasting, 1998, 13(2): 327-340.
- [12] KENNEDY P C, RUTLEDGE S A, PETERSEN W A, et al. Polarimetric radar observations of hail formation [J]. J Appl Meteor Climatol, 2001, 40(8): 1347-1366.
- [13] KUMJIAN M R, RYZHKOV A V. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. J Appl Meteor Climatol, 2008, 47(7): 1940-1961.
- [14] MAHALE V N, ZHANG G F, XUE M. Fuzzy logic classification of S-band polarimetric radar echoes to identify three-body scattering and improve data quality [J]. J Appl Meteor Climatol, 2014, 53(8): 2017-2033.
- [15] KUMJIAN M R, KHAIN A P, BENMOSHE N, et al. The anatomy and physics of  $Z_{DR}$  columns: Investigating a polarimetric radar signature with a spectral bin microphysical model [J]. J Appl Meteor Climatol, 2014, 53(7): 1820-1843.
- [16] KUSTER C M, SCHUUR T J, LINDLEY T T, et al. Using  $Z_{DR}$  columns in forecaster conceptual models and

- warning decision-making [J]. *Wea Forecasting*, 2020, 35(6), 2507-2522.
- [17] 刘黎平,张鸿发,王致君,等.利用双线偏振雷达识别冰雹区方法初探[J]. *高原气象*,1993,12(3):333-337.
- [18] 俞小鼎,郑永光.中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. *气象学报*,2020,78(3):391-418.
- [19] 曾智琳,湛芸,朱克云,等.广东省大冰雹事件的层结特征与融化效应[J]. *大气科学*,2019,43(3): 598-617.
- [20] 苏添记,葛俊祥,章火宝.中国双偏振天气雷达系统发展综述[J]. *海洋气象学报*,2018,38(1):62-68.
- [21] 刁秀广. 2020年5月17日和6月1日山东强冰雹风暴双极化特征分析[J]. *海洋气象学报*,2021,41(1): 68-81.
- [22] 杨传凤,张骞,陈庆亮,等.济南 CINRAD/SA 雷达双偏振升级关键技术分析[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(4):116-123.
- [23] 高晓梅,俞小鼎,王令军,等.鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J]. *气象学报*, 2018, 76(2): 196-212.
- [24] 龚佃利,王洪,许焕斌,等.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*,2021,79(4):674-688.
- [25] RYZHKOV A V, KUMJIAN M R, GANSON S M, et al. Polarimetric Radar Characteristics of Melting Hail. Part I: Theoretical simulations using spectral microphysical modeling[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2013, 52(12): 2849-2870.
- [26] PARK H S, RYZHKOV A V, ZRINIĆ D S, et al. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS[J]. *Wea Forecasting*,2009,24(3):730-748.