夏凡，吴举秀，申高航，等，2024. 泰山一次强雹暴微物理特征双偏振雷达和雨滴谱观测分析[J]. 气象，50(9)：1129-1141. Xia F，Wu J X，Shen G H，et al，2024. Observation analysis of dual-polarization radar and raindrop spectrum for microphysical characteristics of a hailstorm in Mount Taishan[J]. Meteor Mon，50(9)：1129-1141(in Chinese).

泰山一次强雹暴微物理特征双偏振雷达和雨滴谱观测分析*

夏 凡[1,2,3,4] 吴举秀[1,5] 申高航[6] 潘佳文[7]

1 山东省气象防灾减灾重点实验室，济南 250031
2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室，北京 100081
3 山东省气象科学研究所，济南 250031
4 长岛国家气候观象台，山东长岛 265800
5 山东省气象工程技术中心，济南 250031
6 山东省临沂市气象局，临沂 276004
7 厦门市气象局，厦门市海峡气象开放重点实验室，厦门 361012

提 要： 为了研究雹暴的微物理特征，利用双偏振雷达和雨滴谱仪探测资料，结合粒子相态分类算法，对2020年6月1日发生在泰山的一次降雹天气进行了分析，获得了雹暴云影响泰山站时附近区域雷达参量、水凝物粒子、降水粒子谱分布特征。研究表明：雹暴云前缘开始影响泰山站时，反射率因子(Z_H)梯度大值区紧邻泰山站，与差分反射率(Z_{DR})弧位置大致重合，此处主要为大滴粒子，由上空霰粒子融化形成；雨滴谱为双峰结构，对降水贡献较大的为2～3 mm粒子。当雹暴云主体影响泰山站时，其前侧径向出现三体散射，上空出现悬垂回波，泰山站附近区域主要识别为雹粒子；泰山站南侧出现有界弱回波，该处辐合升运动增强，被Z_{DR}大值半环绕，主要分布大滴与雹粒子，夹杂霰与湿雪粒子；归一化等高频率(CFAD)显示冰相过程增强；－10℃层以下雹粒子主要由－10～0℃层的霰粒子淞附上升气流携带的大滴与中小雨粒子形成，这些粒子无法下落碰并形成尺寸较大的降水粒子，雨滴谱变为单峰结构，对降水贡献最大的为14～16 mm粒子。雹暴云主体离开泰山站，CFAD显示冰相过程减弱，冰晶淞附过冷云滴转化成霰的效率降低，泰山站上空识别出大量的冰晶与干雪粒子，出现层状云降水特征；雨滴谱再次变为双峰结构，第二峰值为2～3 mm粒子，对降水贡献最大。

关键词： 雹暴云，双偏振雷达，雨滴谱，微物理特征

中图分类号： P412，P458 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.092802

Observation Analysis of Dual-Polarization Radar and Raindrop Spectrum for Microphysical Characteristics of a Hailstorm in Mount Taishan

XIA Fan[1,2,3,4] WU Juxiu[1,5] SHEN Gaohang[6] PAN Jiawen[7]

1 Shandong Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Jinan 250031
2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
3 Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031
4 Changdao National Climatology Observatory, Shandong Changdao 265800
5 Shandong Meteorological Engineering Technology Center, Jinan 250031

* 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD072、ZR2023MD004、ZR2023MD025、ZR2021QD028)、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2024LASW-B03)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J030)共同资助
2023年6月9日收稿； 2024年4月9日收修定稿
第一作者：夏凡，主要从事多源观测资料分析应用与数值天气预报研究. E-mail：xf0718@126.com
通讯作者：吴举秀，主要从事雷达气象学研究. E-mail：gurunmin@163.com

6 Linyi Meteorological Office of Shandong Province, Linyi 276004
7 Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen Key Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen 361012

Abstract: In order to investigate microphysical characteristics in hailstorm, this paper uses the dual-polarization radar and raindrop spectrum data, as well as the hydrometer classification algorithm to analyze a hail event that occurred in Mount Taishan on 1 June 2020. The distribution features of radar variables, hydrometer and the raindrops in the region around the Mount Taishan Station are obtained when the hailstorm cloud passes through the Mount Taishan. The results show that when the front edge of hailstorm began to affect the Mount Taishan Station, the large gradient area of reflectivity (Z_H) was next to the Mount Taishan Station coinciding with differential reflectivity (Z_{DR}) arc position. The particles identified in Z_{DR} arc were mainly composed of abundant big raindrops, which were formed by melting graupel particles over Mount Taishan Station. The structure of the raindrop spectrum was double-peak, and the greater contribution to precipitation was from 2—3 mm particles. When the main body of the hailstorm cloud influenced the Mount Taishan Station, there occurred three-body scattering echo in radial front of the station and overhang echo over the station. The particles in the vicinity of the station were mainly identified as hail. On the south side of Mount Taishan Station, there was the bounded weak echo region (BWER), where the convergent ascending motion was enhanced. The BWER was semi-surrounded by the large value of Z_{DR} (Z_{DR} ring), and the particles in Z_{DR} ring were mainly identified as big drops and hail, mixed with small amount of graupel and wet snow. The contoured frequency by altitude diagram (CFAD) shows that the ice phase process was enhanced. The hail particles under the −10℃ were mainly formed by the graupel particles between −10℃ layer and 0℃ layer riming the big drops and light rain particles carried by updrafts. These particles could not fall and collide to form larger precipitation particles during this period. Therefore, the structure of the raindrop spectrum became single-peak. The most contribution to precipitation was made by 14—16 mm particles. When the hailstorm cloud left the Mount Taishan Station, CFAD shows the Z_H corresponding to the high frequency region decreased, the ice phase process was weaken, and the efficiency of the cold cloud droplets attached to the ice crystals to convert into graupel was reduced. A large number of ice crystals and dry snow particles were identified above Mount Taishan Station, where the feature of the stratiform cloud precipitation appeared. The structure of the raindrop spectrum became double-peak again, and the second peak value of particles was 2—3 mm, which contributed more to the precipitation.

Key words: hailstorm cloud, dual-polarization radar, raindrop spectrum, microphysical characteristic

引 言

冰雹是一种严重的灾害性天气，常出现在中尺度对流系统雹暴中，由于其尺度小、发展迅速，常规观测资料或数值模式很难将其捕获，给预警预报业务带来了极大挑战。深入研究掌握雹暴云的微物理特征，对降雹的预报预测至关重要。近年来中国的气象监测业务体系不断完善升级，探测设备类型日渐丰富，观测的时空分辨率大大提高，为各类降水天气微物理特征分析提供了硬件基础与数据支撑。

双偏振雷达与雨滴谱仪是研究降水过程微物理特征常用的仪器。双偏振雷达基于水平极化反射率因子(Z_H)、零滞后相关系数(CC)与差分反射率因子(Z_{DR})等观测量，可以给出降水系统中粒子相态、形状等特征；雨滴谱仪可以观测到降水粒子数浓度随尺度的分布并以此计算液态水含量与降水强度等微物理特征量。在双偏振雷达观测方面，刘黎平等(1992)利用C波段双偏振雷达切向扫描资料分析甘肃平凉两次雹暴过程，推测Z_{DR}负值和大扁冰雹、小锥状冰雹关系密切；冯晋勤等(2018)利用双偏振雷达产品分析出冰雹的相态演变特征；杨吉等(2020)利用双偏振雷达研究了江淮地区一次雹暴过程，发现冰雹区Z_{DR}为负值，CC较小，三体散射区差

分相移(Φ_{DP})的纹理值是北美地区的 2 倍；潘佳文等(2020b)研究发现，超级单体低层存在差分传播相移率(K_{DP})增大的区域，其可以指示冰雹融化；Kumjian(2013)发现强上升气流会使冰雹有更多的时间生长，而刁秀广等(2021)指出 Z_{DR} 柱出现(消失)对应上升气流的增强(减弱)、雹暴的快速发展(消亡)；高丽等(2021)分析发现超级单体的有界弱回波区附近的 Z_{DR} 柱不仅可指示上升运动，同时对降雹单体不同的成长阶段具有指示作用；刁秀广等(2022)利用多源观测资料对比了两次冰雹过程，差异主要体现在 Z_H、Z_{DR} 柱与 K_{DP} 柱的高度；潘佳文等(2021)利用 46 次冰雹个例，总结了冰雹在各高度层的偏振参数特征，以及 Z_{DR} 柱与三体散射参量特征。雨滴谱仪观测方面，很多学者研究了层状云降水(杨文霞等，2019；程鹏等，2021)、台风(Bao et al，2020；李欣和张璐，2022)、飑线(Chen et al，2016；Wen et al，2017；冯璐等，2019)与梅雨(Chen et al，2019；梅海霞等，2020)等不同降水系统的雨滴谱特征。冰雹方面，岳治国和梁谷(2018)分析了降雹过程中的最大冰雹直径、数浓度及下落末速度等物理量随时间的演变，发现相同直径的冰雹下落末速度可能不同；王俊等(2021a)分析 2019 年 8 月 16 日出现在山东北部的一次雹暴过程不同阶段与不同位置雨滴谱分布特征；王俊等(2021b)发现伴随冰雹的对流降水雨滴谱主要是单峰型，比大陆性对流降水的雨滴谱有更大粒子直径；刘彦等(2023)利用二维雨滴谱仪分析了一次含雹混合降水过程不同直径-速度和不同直径-轴比下的粒子数量分布以及粒子谱等参数随时间的演变特征。

2020 年 6 月 1 日泰山出现了一次强降雹天气过程，泰山国家级气象观测站(以下简称泰山站)观测到直径为 3.1 cm 的冰雹。本文利用齐河多普勒 S 波段双偏振雷达与泰山站雨滴谱仪探测资料，结合水凝物粒子相态分类技术，分析探讨雹暴云影响泰山站前后的双偏振参量、粒子相态和雨滴谱分布特征，强化对雹暴云微物理特征的认识，为冰雹预报预警业务提供可靠的参考依据。

1　资料和方法

1.1　资　料

雷达资料来自 2020 年 6 月 1 日 17：00—18：00(北京时，下同)齐河站多普勒 S 波段双偏振雷达原始体扫数据，径向分辨率为 250 m，方位分辨率为 0.93°，有 9 层仰角，最大探测斜距为 460 km，采用双发双收的工作模式，除了 Z_H 与平均径向速度(V_R)，还可以获取 Z_{DR}、CC、Φ_{DP} 和 K_{DP}。雨滴谱资料来自泰山站 Parsivel 雨滴谱仪，可以测量降水粒子的尺寸与下落速度，包含 32 个粒子直径和 32 个速度测量通道，时间分辨率为 1 min，根据粒子的直径与下落末速度判别相态类型，可将降水分为雨、雪与冰雹。

1.2　水凝物分类方法

水凝物分类结果使用 Park et al(2009)提出的水凝物相态识别(HCA)法，公式如下：

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^{6} W_{ij} Q_j P^i(\mathrm{Var}_j)}{\sum_{j=1}^{6} W_{ij} Q_j} \tag{1}$$

式中：i 表示水凝物类型，包括干雪(DS)、湿雪(WS)、冰晶(CR)、霰(GR)、大滴(BD)、中小雨(RA)、大雨(HR)、雨雹混合(RH)，同时还识别地物或超折射地物(GC/AP)与生物(BS)；A 表示集成概率值，最大值对应的类型作为识别结果；P 是隶属函数，W 为权重因子，Q 为置信度因子，具体取值见 Park et al(2009)；Var 表示雷达参量，j 表示参量类型，包括 Z_H、Z_{DR}、CC、K_{DP} 对数形式[lg(K_{DP})]、Z_H 纹理[SD(Z_H)]与 Φ_{DP} 纹理[SD(Φ_{DP})]，同时利用夏凡等(2023)提出的算法对 HCA 进行优化。

1.3　雨滴谱诊断量计算

降水粒子的体积数密度公式(Friedrich et al，2013)如下：

$$N(D,v)_{ij} = \sum_{i,j} \frac{10^6 n(D,v)_{ij}}{180(30-0.5D_i)v_j \Delta D_i \Delta t} \tag{2}$$

式中：$N(D,v)_{ij}$ 为第 i 个直径、第 j 个速度分区内粒子体积数密度(单位：个·$\mathrm{mm^{-1}}$·$\mathrm{m^{-3}}$)，$n(D,v)_{ij}$ 为第 i 个直径、第 j 个速度分区内粒子数(单位：个)，D_i 是第 i 个尺度分区的平均等效直径(单位：mm)，v_j 是第 j 个速度分区的平均速度(单位：m·$\mathrm{s^{-1}}$)，ΔD_i 是第 i 个尺度分区的宽度(单位：mm)，Δt 是取样的时间间隔。

降水强度(R，单位：mm·$\mathrm{h^{-1}}$)的公式(Friedrich et al，2013)如下：

$$R = 3.6 \times 10^{-3} \frac{\rho\pi}{6} \sum_i N(D)_i D_i^3 v(D)_i \Delta D_i \quad (3)$$

式中：ρ 为降水粒子的密度，水密度取 1 g·cm^{-3}，冰雹密度取 0.82 g·cm^{-3}；$v(D_i)$ 为第 i 个尺度分区的平均速度（单位：m·s^{-1}）。

雨滴末速度（V，单位：m·s^{-1}）与等效直径（D_e，单位：mm）的关系（刘西川等，2013）如下：

$$V = 9.65 - 10.3e^{-0.6D_e} \quad (4)$$

冰雹末速度与等效直径的关系（Heymsfield and Wright，2014）如下：

$$V = 2.549 D_e^{0.6413} \quad (5)$$

D_e 为冰雹等效体积直径，其与实测最大直径（D，单位：mm）的关系（Grieser and Hill，2019）如下：

$$D_e = 10\left(\frac{6a}{\pi\rho 10^b} D^b\right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

式中：$a=0.372$，$b=2.69$，ρ 为冰雹密度。

2 强雹暴的微物理特征分析

2.1 天气实况

2020 年 6 月 1 日 17:00，500 hPa 和 850 hPa（图略）西风槽位置相当，位于河套以东地区，山东处于前倾槽前，850 hPa 上山东附近槽前西南风急流带来水汽供应，温度脊从西部伸入山东，形成上冷下暖的不稳定层结。从 T-ln$p$（图 1）可以看出，泰山站近地面到 500 hPa 附近风向随高度顺转，有暖平流；低层温度垂直递减率近乎干绝热，850～700 hPa 相对较湿，500～400 hPa 有相对干区，有利于不稳定层结的建立和地面大风的产生。

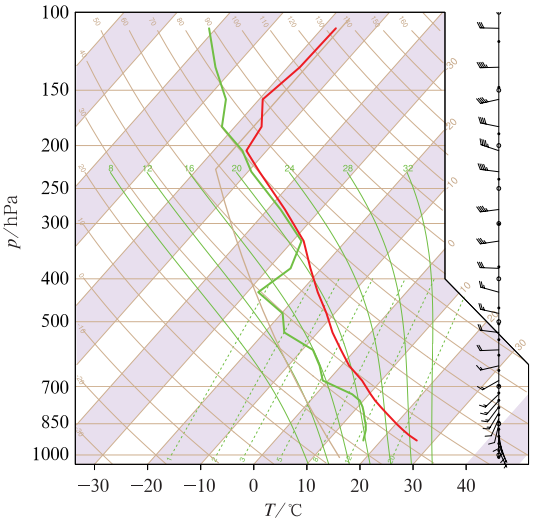


图 1 2020 年 6 月 1 日 17:00 泰山站 ERA5 T-ln$p$ 图

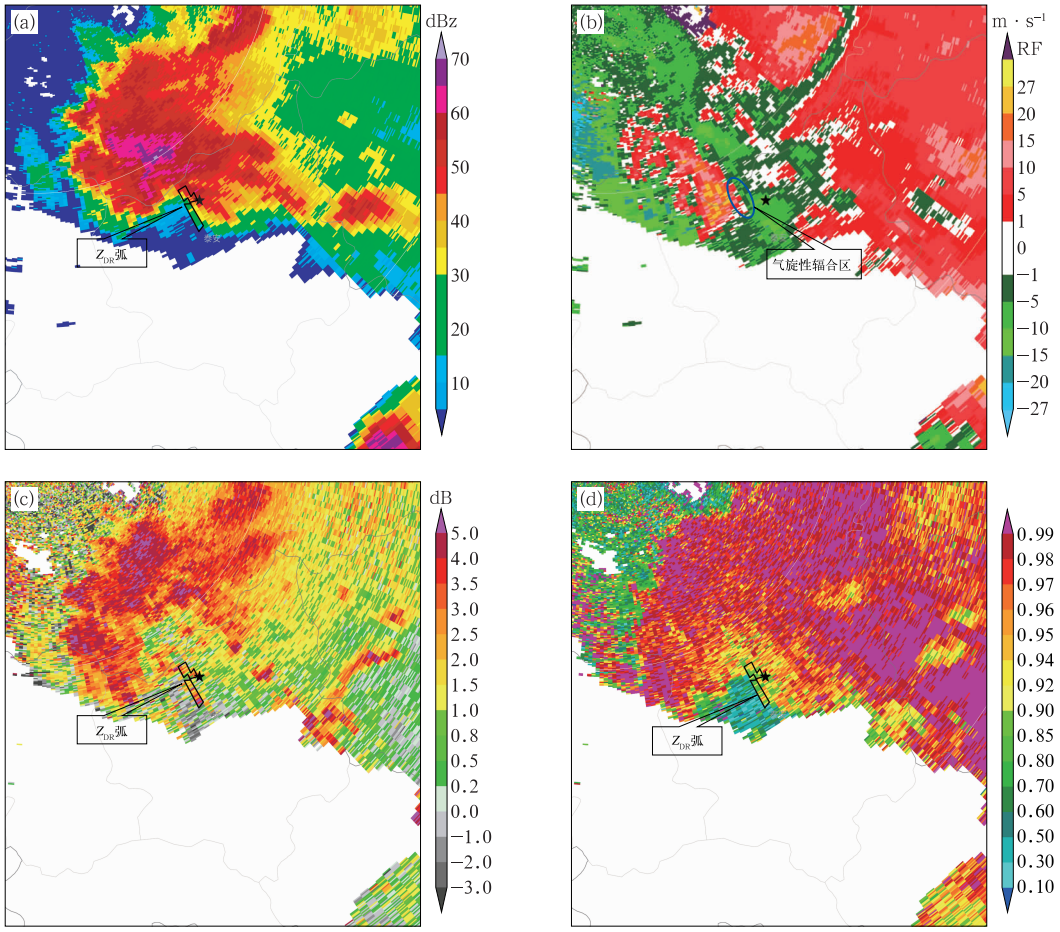
Fig. 1 T-ln$p$ diagram of Mount Taishan from ERA5 at 17:00 BT 1 June 2020

2.2 雷达双偏振参量分布特征

2.4°仰角，在泰山处的距离库探测高度大约为 3 km，位于泰山站上空。17:36，泰山站处于雹暴云回波主体前缘（图 2a），Z_H 分布在 45～55 dBz，紧邻 Z_H 梯度大值区；从径向风（V_R）分布可以看出，泰山西侧有一个气旋性辐合区（图 2b），在辐合区边缘（图 2c 黑框）分布细长的 Z_{DR} 大值区（2～4 dB），为 Z_{DR} 弧，高度分布在 2.8～3.2 km，在融化层之下，Z_{DR} 弧与 Z_H 梯度大值区位置吻合，Kumjian et al（2010）指出 Z_{DR} 弧一般为霰融化形成的大滴；Z_{DR} 弧区域 CC 分布在 0.85～0.95（图 2d），说明存在固液混合相态粒子。

17:47，雹暴云回波主体移至泰山站区域，Z_H 分布在 60～70 dBz（图 3a），强回波前侧径向出现三体散射特征，指示有大冰雹出现（潘佳文等，2021）。泰山站南侧出现有界弱回波（BWER），BWER 处气旋性旋转出流与入流最大速度差较之前增大到 40～50 m·s^{-1}（图 3b），辐合上升运动增强，这可将更多液态粒子向上输送，0℃以上 Z_{DR} 主要分布在 0～0.5 dB，部分 CC 在 0.97 以下，说明液态粒子被冰相粒子凇附，形成翻滚的雹粒子；BWER 周围半环绕 Z_{DR} 大值区（>3 dB），为 Z_{DR} 环（图 3c），高度分布在 3.2～3.5 km，靠近 0℃层。潘佳文等（2020a）研究指出，上升气流存在正的温度扰动，雹、霰等固态粒子在上升气流周边下落后不断融化，液态水凝物含量增大，介电常数增大，导致 Z_{DR} 环出现；Kumjian et al（2010）研究指出，上升气流边缘掉落的冰雹或霰凇附液态粒子进行湿增长，粒子直径变大，也会导致 Z_{DR} 变大。从 2.4°～6.0°仰角（图略），在上升气流周围都存在 Z_{DR} 环，表明上升气流强劲而且深厚。Z_{DR} 环处 CC 较小（<0.9）（图 3d），上升气流区域粒子相态较为复杂。18:05，雹暴云回波主体移出泰山（图略），降雹趋于结束。

17:36，在 147°方位角剖面，泰山站位于距离雷达 61～62 km 处（图 4 中三角），雹暴云位于距离雷达 45～55 km 处（图 4a），强回波区（>60 dBz）主



注：五角星示意泰山站位置。

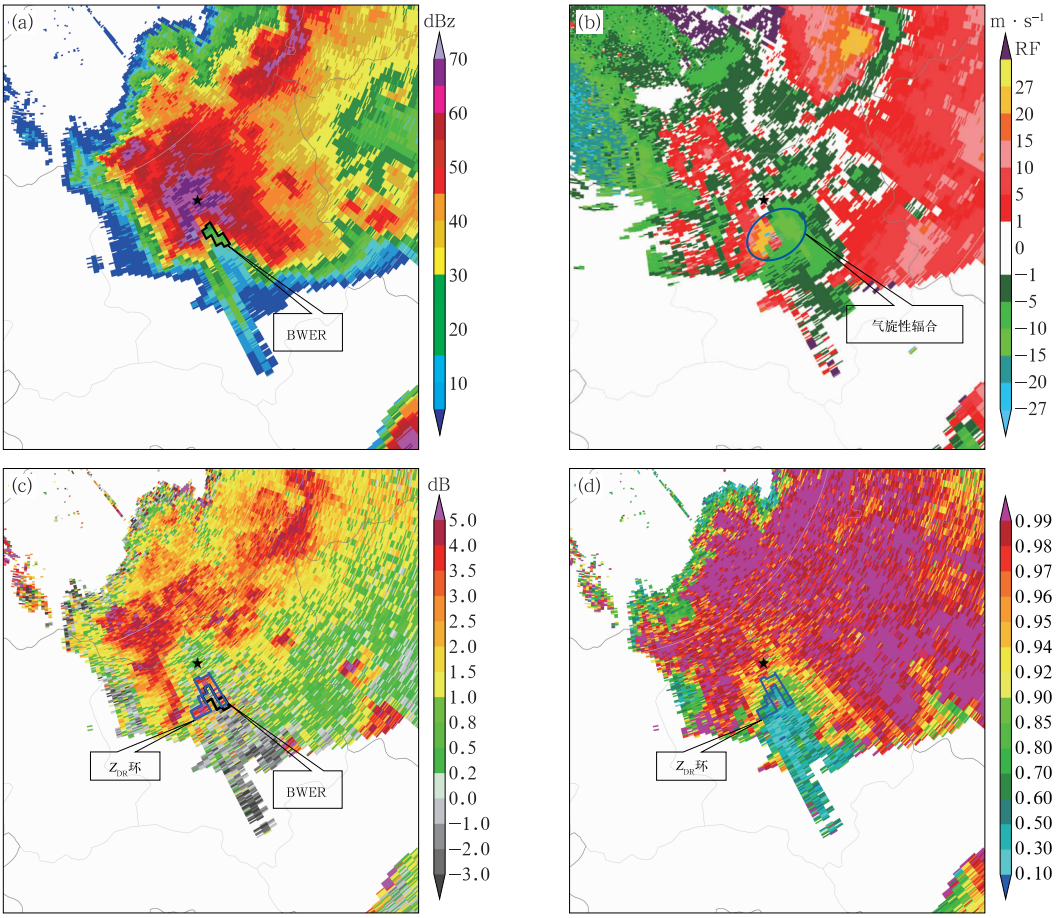
图 2　2020 年 6 月 1 日 17:36 齐河雷达 2.4°仰角(a)Z_H，(b)V_R，(c)Z_{DR}，(d)CC 分布

Fig. 2　Distribution of (a) Z_H, (b) V_R, (c) Z_{DR} and (d) CC at 2.4° elevation of Qihe Radar at 17:36 BT 1 June 2020

要分布在 1～4 km，强回波区在 2～3 层仰角为下沉气流(图 4b)，说明上升气流无法托举冰相粒子，此处开始降雹，部分距离库 Z_{DR} 分布在 1.5～3.5 dB，CC 分布在 0.8～0.9，冰雹在下降的过程融化为外包水膜、直径较大的粒子。泰山站上空的 Z_H 分布在 30～50 dBz，低层仰角 Z_{DR} 较大(图 4c)，对应 CC(图 4d)较小，中高层仰角 Z_{DR} 较小，对应 CC 较大，可以推测此时泰山站上空中高层主要为雹或霰粒子，低层为下落融化形成的大滴和外包水膜的小的湿冰粒子。

17:47，雹暴云进一步发展(图 5a)，强回波区(>60 dBz)增大，泰山站上空出现悬垂回波结构；雹暴云强回波区 Z_{DR} 较小(图 5c)，0℃层以上 CC 较大(图 5d)，表明粒子水平和垂直直径较为一致，粒子属性单一，此处多为翻滚的冰雹粒子，0℃层以下 CC 变小，此处冰雹已经融化；雹暴云回波主体边缘 Z_{DR} 较大(图 5c)，倾斜向上延伸至 8 km，形成倾斜 Z_{DR} 柱，此处为强上升气流区(图 5b)(刁秀广等，2021)，其 CC 较小(图 5d)，说明此处混合有直径较大的液态粒子与固态粒子，低层仰角主要为冰相粒子融化形成，中层主要为上升气流携带的过冷水滴混合悬垂回波处掉落的冰相粒子重新卷入上升气流所导致(Loney et al，2002)。

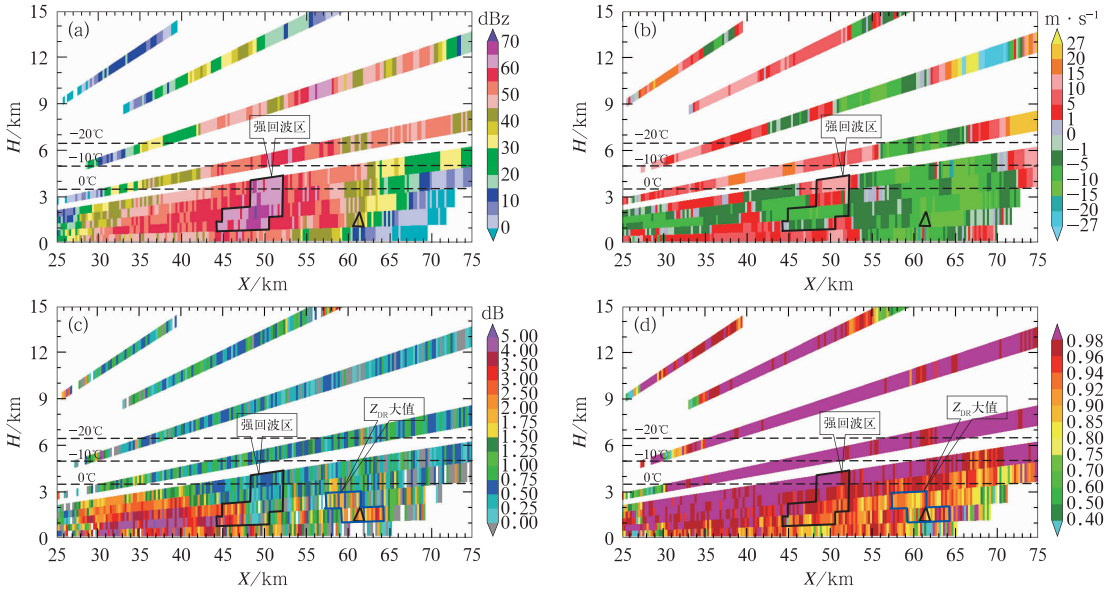
利用归一化等高频率(CFAD)进一步分析雹暴的垂直结构与微物理特征，以泰山站所在位置为中心，选取左右 5 个方位角(即 142°～152°)、前后 20 个距离库(距离雷达第 220～260 个距离库)、0.5°～9.9°仰角的雷达参量进行统计。17:36，Z_H 高频区(50%以上等值线)分布在 45～55 dBz，高度在 4～5 km，10%等值线延伸到 8 km，Z_H 分布在 45～55 dBz，



注：五角星示意泰山站位置。

图 3 2020 年 6 月 1 日 17:47 齐河雷达 2.4°仰角(a)Z_H,(b)V_R,(c)Z_{DR},(d)CC 分布

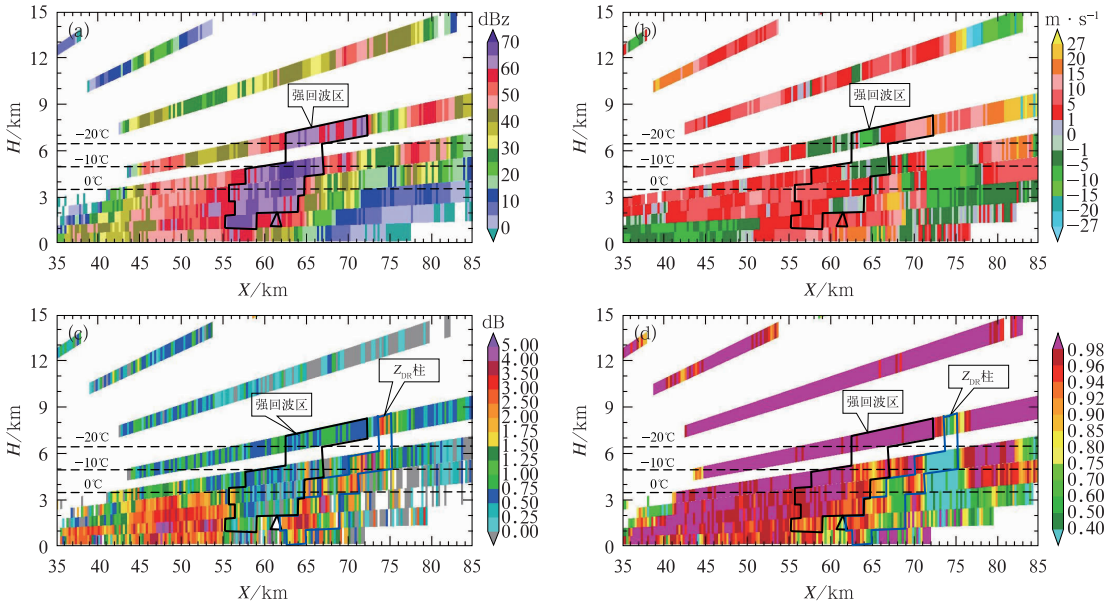
Fig. 3 Distribution of (a) Z_H, (b) V_R, (c) Z_{DR} and (d) CC at 2.4° elevation of Qihe Radar at 17:47 BT 1 June 2020



注：三角示意泰山站位置。

图 4 2020 年 6 月 1 日 17:36 齐河雷达沿 147°方位角(a)Z_H,(b)V_R,(c)Z_{DR},(d)CC 的垂直剖面

Fig. 4 Vertical profile of (a) Z_H, (b) V_R, (c) Z_{DR} and (d) CC along 147° azimuth angle from Qihe Radar at 17:36 BT 1 June 2020



注：三角示意泰山站位置。

图 5　2020 年 6 月 1 日 17:47 齐河雷达沿 147°方位角(a)Z_H，(b)V_R，(c)Z_{DR}，(d)CC 的垂直剖面

Fig. 5　Vertical profile of (a) Z_H, (b) V_R, (c) Z_{DR} and (d) CC along 147° azimuth angle from Qihe Radar at 17:47 BT 1 June 2020

冰相过程较强(图 6a)；Z_{DR} 高频区分布在 0.5～1.0 dB，高度在 3.5～6.0 km，随高度降低离散度不断增大，在 0℃层之下，10%等值线分布在 0.5～3.0 dB(图 6d)；CC 在 0℃层以下的离散度高于 0℃层以上，指示此时已有冰相粒子降落，在 0℃层以下分布着部分融化或完全融化的粒子(图 6g)。17:47，Z_H 整体大于 40 dBz，高频中心分布在 65～70 dBz，高度较之前降低，10%等值线在 8 km 的 Z_H 分布在 55～70 dBz(图 6b)，冰相过程进一步增强，Z_{DR} 与 CC 分布与前一刻较为相似(图 6e，6h)，在 0℃层之下 Z_{DR} 离散度增大，1～2 km 高度 Z_H 分布在 40～75 dBz，说明有雹粒子降落。17:59，Z_H 高频区分布在 50～55 dBz(图 6c)，高度继续降低，回波顶 Z_H 位于 20～30 dBz，冰相过程减弱，Z_{DR} 与 CC 在 0℃层附近离散度增大，Z_{DR} 数值增大，CC 数值变小(图 6f，6i)。

2.3　水凝物粒子分布特征

从分类结果可见，17:36 在 2.4°仰角(图 7a)Z_{DR} 弧区域以大滴粒子为主，这主要由雹或霰粒子融化形成(图 7d)，这与 Romine et al(2008)研究结论较为一致，Z_H 梯度大值区夹杂地物、生物，地物主要是由冰雹后方的三体散射导致，生物则是由于树叶、杂草等被卷入上升气流导致。17:47，泰山站附近区域为冰雹粒子(图 7b)，Z_{DR} 环区域主要为大滴与冰雹粒子，还夹杂着霰和湿雪粒子；倾斜 Z_{DR} 柱区域(图 7e)，低层仰角主要为大滴与小雨粒子，中高层仰角主要为冰雹与霰粒子，与第 2.2 节分析较为吻合，同时和 Kumjian et al(2014)研究结论较为一致。17:59，当雹暴云回波主体移出泰山，泰山站附近主要为大雨与大滴粒子(图 7c)，泰山站上空主要为干雪与冰晶粒子(图 7f)，出现层状云降水特征，对流降水结束。

图 8 统计了 0.5°～9.9°仰角、142°～152°方位角与第 220～260 个距离库对应区域的水凝物粒子相态分布情况。17:36，霰粒子共有 1037 个距离库，主要分布在 −10～0℃层(图 8b)与 −20℃层以上(图 8d)，此时该区域 Z_H 由前一时次 35～45 dBz 增大到 45～55 dBz，Z_{DR} 普遍超过 0.5 dB，部分超过 1.0 dB，大部分 CC 在 0.95 以下(图略)，说明冰相过程较强，大量冰晶凇附过冷云滴形成霰，而霰为雹胚的主要来源，这为成雹提供了有利条件。

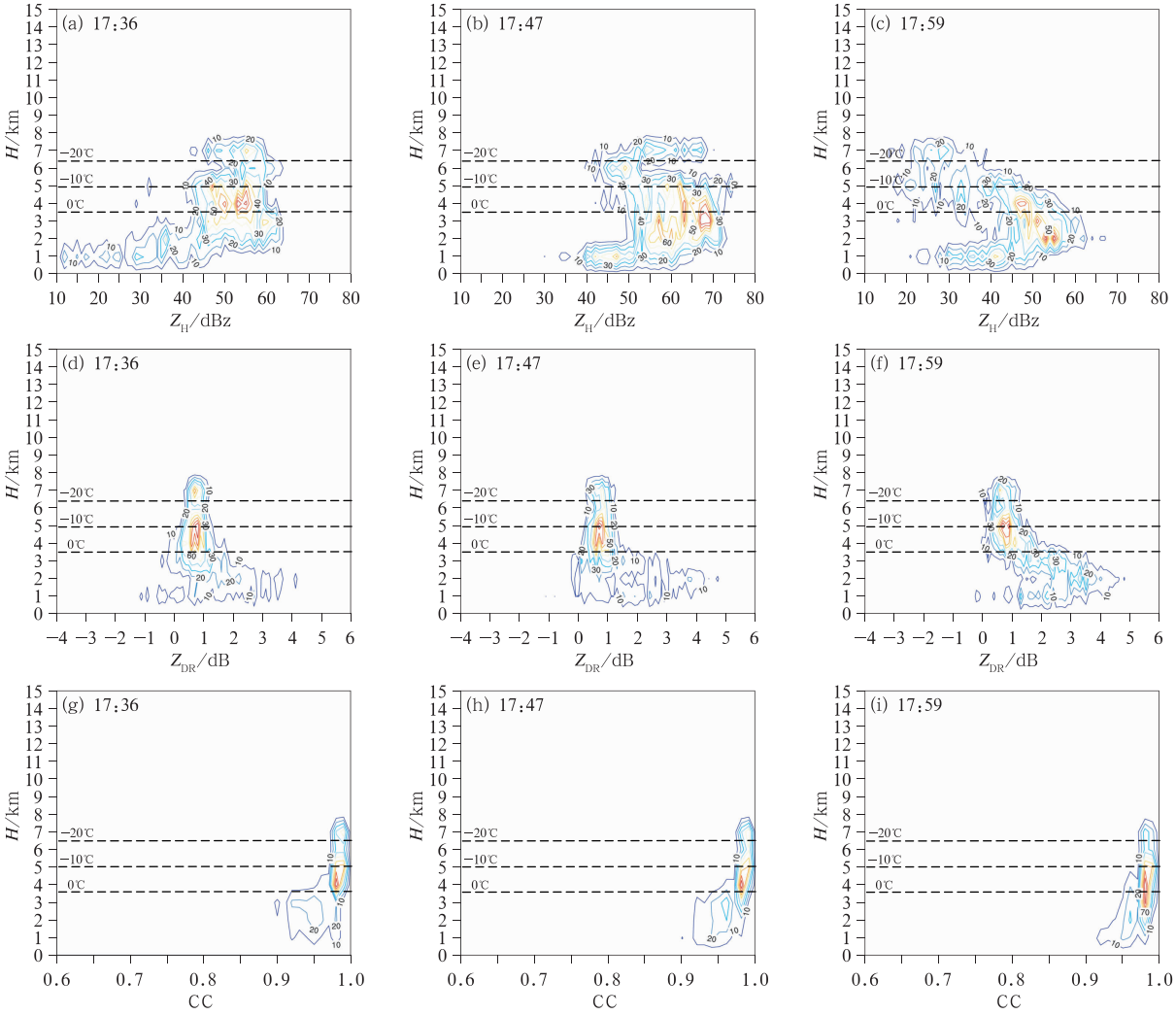
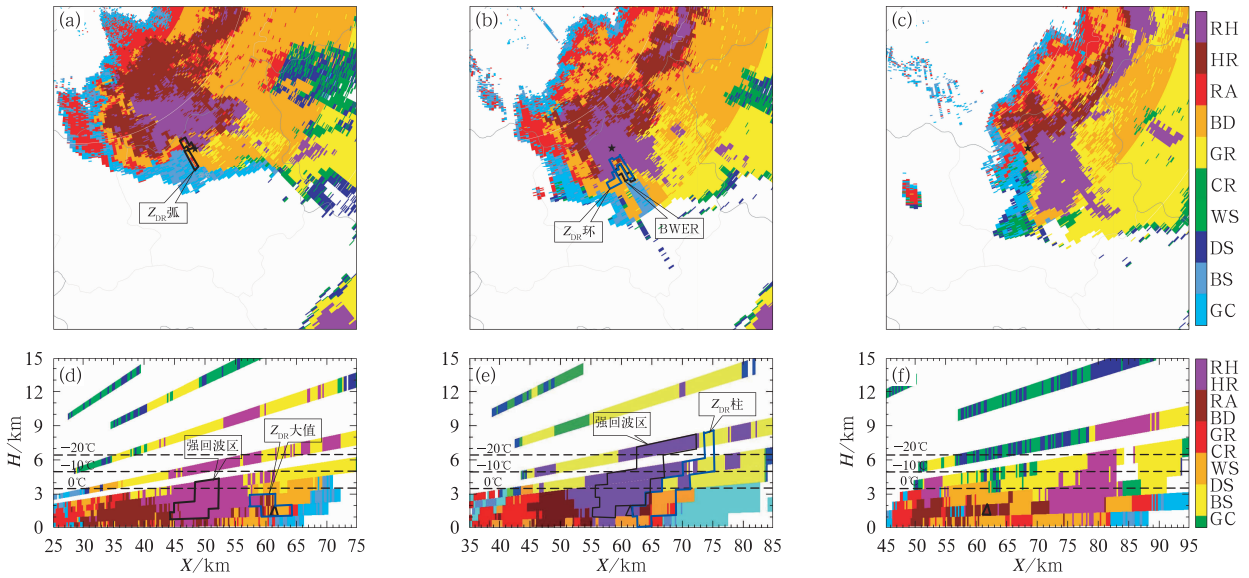


图 6 2020 年 6 月 1 日泰山站周边区域 (a～c)Z_H,(d～f)Z_{DR} 和 (g～i)CC 的 CFAD(等值线,单位:%) 分布

Fig. 6 Distribution of CFAD (isoline, unit: %) (a－c) Z_H, (d－f) Z_{DR} and (g－i) CC of the region around Mount Taishan Station on 1 June 2020

17:47,0℃ 层以下(图 8a)与 －10～0℃ 层(图 8b)雹粒子距离库数明显增多,0℃层以下由 414 个增至 892 个,－10～0℃层高度层由 195 个增加至 464 个,0℃层以下的大滴、中小雨粒子与－10～0℃层的霰粒子较之前减少,此时－10～0℃层的 Z_H 增大至 60～70 dBz,Z_{DR} 主要分布在 0～0.5 dB,大部分 CC 在 0.95 以上(图略),说明更多大滴与中小雨粒子被上升气流运送到 0℃层以上,形成过冷水滴然后被霰粒子淞附,进行湿增长形成冰雹。－10℃层以上,冰雹距离库数略微减少,说明有些冰雹发展成熟、质量增大,云内上升气流无法支持其滞留而掉落,霰转化成冰雹的过程减弱,霰粒子略微增加,这两个方面导致冰雹吸附冰晶干增长过程减弱,－20℃层以上冰晶距离库数增加。

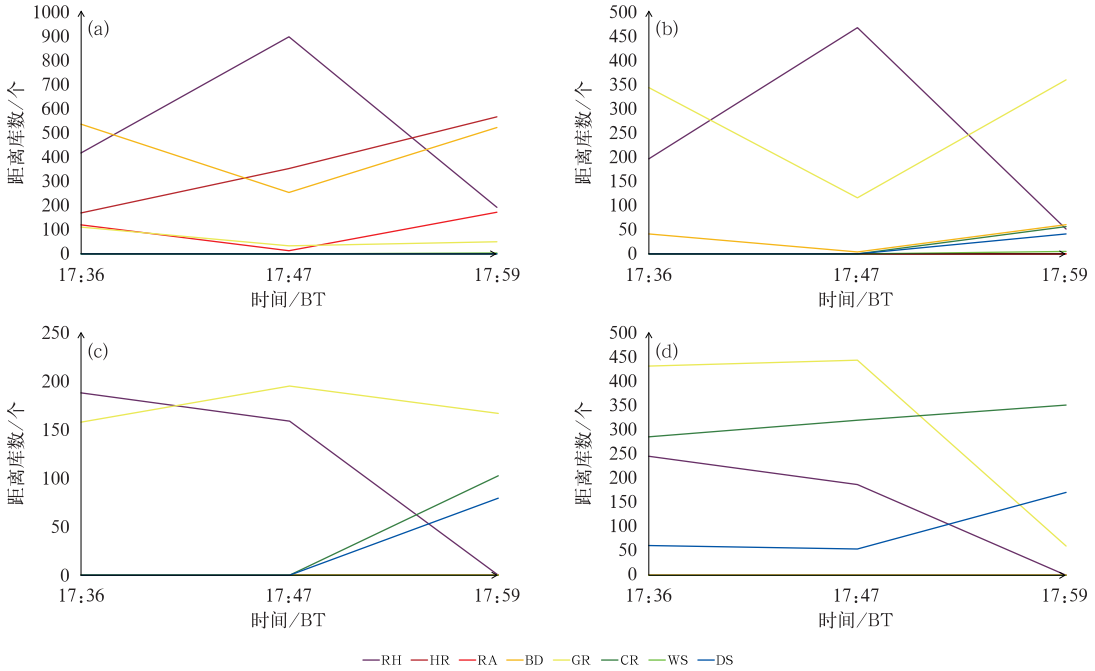
17:59,随着雹暴云移出泰山,统计区域内的整层冰雹粒子明显减少,只存在于 0℃层以下(191 个)与－10～0℃层(51 个),此时泰山站上空以下沉气流为主,更多大滴粒子无法运送到 0℃层以上,导致霰淞附过冷水滴形成冰雹的过程减弱。在－10℃层以下,Z_H 主要分布在 40～50 dBz;在－10～0℃层,Z_{DR} 分布在 0.5～1.5 dB,CC 分布在 0.97 以上;在 0℃层以下,Z_{DR} 分布在 1.5～2.5 dB,CC 分布在 0.95以下(图略)。－10～0℃层霰粒子距离库数增多,0℃层之下大滴粒子增多,同时大雨和中小雨粒



注：图 a～c 中五角星和图 d～f 中三角示意泰山站位置；RH：雨雹混合，HR：大雨，RA：中小雨，BD：大滴，GR：霰，CR：冰晶，WS：湿雪，DS：干雪，BS：生物，GC：地物。

图 7　2020 年 6 月 1 日(a,d)17:36,(b,e)17:47 和(c,f)17:59 齐河雷达(a～c)2.4°仰角和(d～f)沿 147°方位角剖面水凝物粒子分类结果分布

Fig. 7　Distribution of the hydrometeor identified by HCA (a－c) at 2.4° elevation and (d－f) along 147° azimuth angle from Qihe Radar at (a, d) 17:36 BT, (b, e) 17:47 BT and (c, f) 17:59 BT 1 June 2020



注：RH：雨雹混合，HR：大雨，RA：中小雨，BD：大滴，GR：霰，CR：冰晶，WS：湿雪，DS：干雪。

图 8　2020 年 6 月 1 日 17:36—17:59 泰山站周边区域(a)0℃层之下，(b)－10～0℃层，(c)－20～－10℃层与(d)－20℃层之上的水凝粒子距离库数时间分布

Fig. 8　Temporal distribution of gate number for every hydrometer (a) below 0℃ layer, (b) between －10℃ layer and 0℃ layer, (c) between －20℃ layer and －10℃ layer and (d) above －20℃ layer of the region around Mount Taishan Station on 1 June 2020

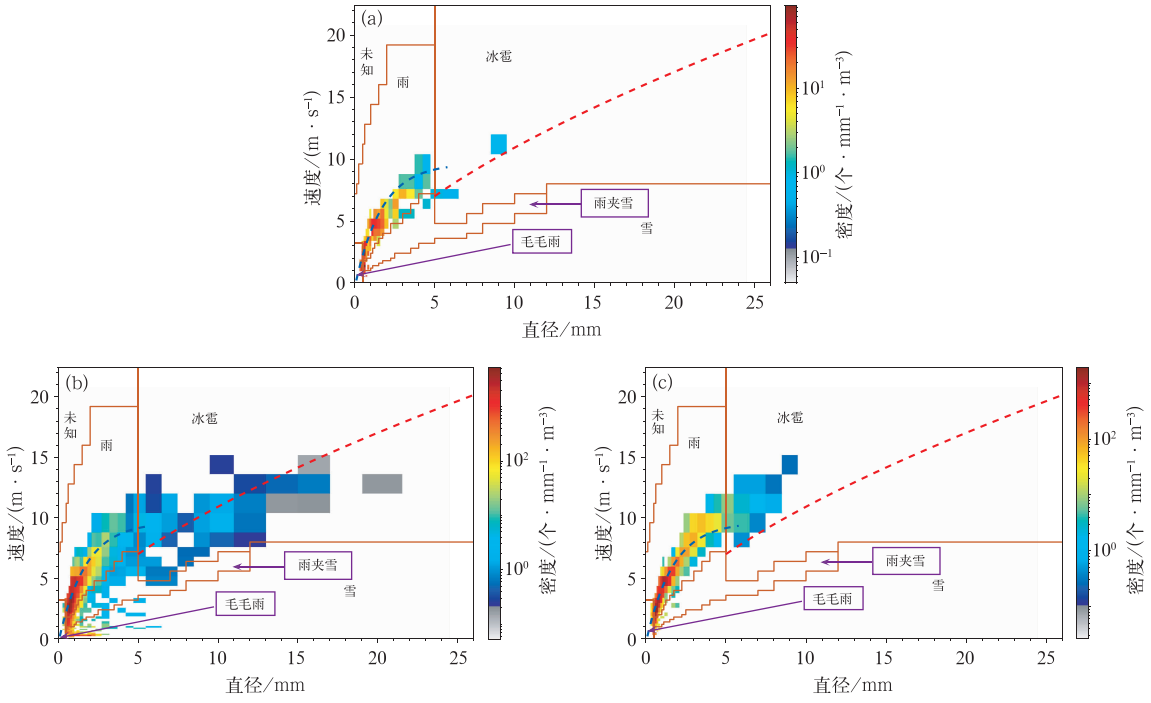
子距离库数也增多，这均由 0℃层之下雹粒子融化后形成。0℃层以上，随着高度升高，更多距离库 Z_H 分布在 20～30 dBz，Z_{DR} 分布在 0～0.5 dB，CC 在 0.99 以上（图略），冰晶与干雪的距离库数呈增多趋势，霰不断减少，说明冰晶凇附过冷云滴的转化成霰的效率降低（唐洁等，2018），更多冰晶碰并为干雪，侧面反映泰山站附近雹暴云范围减小，对流趋于结束。

2.4 滴谱特征

由于雷达 2.4°仰角探测到的回波位置距离和地面雨滴谱仪存在一定高度差，雨滴谱仪观测到各类降水粒子要比雷达滞后 3 min 左右，因此，分别用 17:38—17:40、17:49—17:51 与 18:01—18:03 的雨滴谱观测数据对应 17:36、17:47 与 17:59 的雷达数据。

雹暴云刚影响泰山站（图 9a），雨滴下落末速度和尺度的离散度较小，均匀分布在理论雨滴线两侧，整体数密度较小，主要以 0～2 mm 粒子为主，自然界中雨滴直径超过 5 mm 容易破碎，因而超过 5 mm 直径的雨滴很少，可以解释成冰雹，由图 9a 可见此时泰山站出现零星的雹粒子；当受雹暴云主体影响时，雨滴下落末速度和尺度的离散度加大（图 9b），粒子谱宽增大，雹粒子明显增多；当雹暴云主体离开泰山站（图 9c），雨滴下落末速度和尺度的离散度再度变小，3～5 mm 的降水粒子较之前明显增多，冰雹粒子数减少，谱宽变窄。

雹暴云前缘开始影响泰山站时，粒子直径在 0.5～0.6 mm 出现峰值（图 10a），在 2 mm 出现不明显的第二峰值，此时以暖云的碰撞-破碎过程为主，泰山上空 Z_H 主要分布在 50 dBz 左右（图 2a），Z_{DR} 在 1.5 dB 左右（图 2c），CC 在 0.9 左右（图 2d），说明存在多种尺寸较大粒子，2～3 mm 粒子对降水贡献较大，结合粒子相态分类结果可见（图 7a），这些粒子主要由大滴粒子与霰粒子融化后的湿冰粒子构成。当雹暴云主体影响泰山站时（图 10b），降水粒子数密度成指数级增加，雨滴谱分布为单峰，峰值出现在粒子直径 0.7～0.8 mm，2～3 mm 粒子数密度较之前降低，从图 8a 可以看出，此时 0℃层以下大滴与中小雨粒子减少，更多被强上升气流输送到



注：填色为单位尺度间隔下单位体积降水粒子密度；蓝、红虚线分别为雨滴、冰雹末速度与等效直径拟合关系；棕线区分不同相态。

图 9 2020 年 6 月 1 日(a)17:38—17:40，(b)17:49—17:51 和(c)18:01—18:03 泰山站降水粒子速度-尺度图

Fig. 9 Velocity-scale diagrams of precipitation particles from Mount Taishan Station at (a) 17:38 BT—17:40 BT, (b) 17:49 BT—17:51 BT and (c) 18:01 BT—18:03 BT 1 June 2020

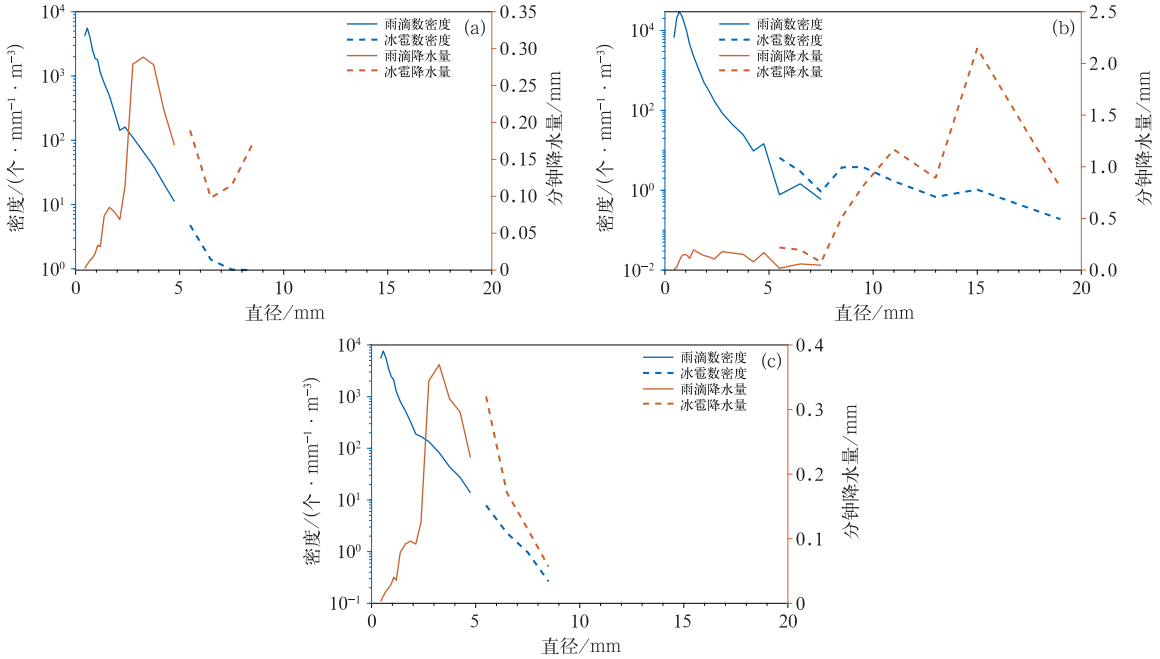


图 10　2020 年 6 月 1 日(a)17:38—17:40,(b)17:49—17:51 和(c)18:01—18:03 泰山站雨滴和冰雹粒子数密度及降水量随粒子直径的演变

Fig. 10　Variation of particle density and precipitation amount with particle diameter of rain and hail from Mount Taishan Station at (a) 17:38 BT−17:40 BT, (b) 17:49 BT−17:51 BT and (c) 18:01 BT−18:03 BT 1 June 2020

0℃层以上，无法下落碰并形成尺寸较大的降水粒子，进而无法形成第二峰值；泰山站上空 Z_H 在 60 dBz 以上(图 3a)，Z_{DR} 在 1 dB 以下(图 3c)，CC 较大(图 3d)，结合粒子相态分类结果(图 7b)，此处主要为下落翻滚的冰雹粒子，而对降水贡献最大为 14～16 mm 雹粒子。当雹暴云主体离开泰山站时(图 10c)，降水粒子数密度降低，雨滴谱再次变为双峰型，第一峰值依然为 0.5～0.6 mm，第二峰值为 2～3 mm，大粒子浓度较上一个时次升高，对降水贡献最大的为 2～3 mm 粒子；此时泰山站上空 Z_H 为 40 dBz 左右，Z_{DR} 在 2.5 dB 左右，CC 在 0.92 左右(图略)，相态分类结果(图 7c)显示该处主要为大滴与大雨粒子，冰雹融化生成的大滴或大雨粒子没有充足时间进行碰撞-破碎过程，导致大粒子浓度升高(王俊等，2021a)。

3　结　论

本文利用齐河多普勒 S 波段双偏振天气雷达与泰山站雨滴谱资料，结合水凝物分类技术，细致分析了 2020 年 6 月 1 日泰山一次强降雹天气的微物理特征。

(1)当雹暴云前缘影响泰山站时，Z_H 梯度大值区紧邻泰山站，与 Z_{DR} 弧位置大致重合；粒子相态分类结果显示，Z_{DR} 弧处为大滴粒子，主要由泰山站上空霰粒子融化形成；此时以暖云的碰撞-破碎过程为主，雨滴谱为双峰结构，对降水贡献较大的为 2～3 mm 粒子，这些粒子主要为大滴与霰融化后的湿冰粒子组成。

(2)当雹暴云主体影响泰山站时，其前侧径向出现三体散射特征，上空出现悬垂回波结构，说明雹暴云对流单体发展较为成熟，泰山站周围区域识别为冰雹；泰山站南侧出现 BWER，被 Z_{DR} 大值半环绕，此处辐合上升运动增强，主要为大滴与冰雹粒子，还夹杂着霰和湿雪粒子。CFAD 显示，高频中心对应的 Z_H 增大至 65～70 dBz，高度降低，冰相过程增强；−10℃ 层以下雹粒子主要由−10～0℃层的霰粒子淞附 0℃层以下的大滴粒子形成，−10℃层以上，随着冰雹发展成熟掉落与霰自动转化成冰雹的过程减弱，导致冰雹干增长效率降低，冰晶距离库数增加；受强上升运动影响，较多的大滴粒子与中小雨粒子无法下落碰并形成尺寸较大的降水粒子，雨滴

谱变为单峰结构，对降水贡献较大为14～16 mm粒子。

(3)当雹暴云主体离开泰山站，CFAD显示高频中心对应的Z_H减小，高度继续降低，冰相过程减弱，在0℃层附近的Z_{DR}和CC离散度增大，冰晶凇附过冷云滴的转化成霰的效率降低，使得0℃层以上霰粒子距离库数减少，冰晶与干雪粒子距离库数增多，泰山站上空识别出大量的冰晶与干雪粒子，出现层状云降水特征，指示对流活动结束；此时雨滴谱再次变为双峰结构，第二峰值为2～3 mm，主要为雹粒子融化生成的大滴与大雨粒子构成，对降水贡献较大。

参考文献

程鹏，常祎，刘琴，等，2021. 祁连山春季一次层状云降水的雨滴谱分布及地形影响特征[J]. 大气科学，45(6)：1232-1248. Cheng P，Chang Y，Liu Q，et al，2021. A case study of raindrop size distribution and orographic impact characteristics in spring stratiform precipitation over the Qilian Mountains[J]. Chin J Atmos Sci，45(6)：1232-1248(in Chinese).

刁秀广，李芳，万夫敬，2022. 两次强冰雹超级单体风暴双偏振特征对比[J]. 应用气象学报，33(4)：414-428. Diao X G，Li F，Wan F J，2022. Comparative analysis on dual polarization features of two severe hail supercells[J]. J Appl Meteor Sci，33(4)：414-428(in Chinese).

刁秀广，杨传凤，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 Meleor，40(3)：580-589(in Chinese).

冯晋勤，张深寿，吴陈锋，等，2018. 双偏振雷达产品在福建强对流天气过程中的应用分析[J]. 气象，44(12)：1565-1574. Feng J Q，Zhang S S，Wu C F，et al，2018. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian[J]. Meteor Mon，44(12)：1565-1574(in Chinese).

冯璐，夏丰，万齐林，等，2019. 广东两次飑线过程的微物理特征分析研究[J]. 热带气象学报，35(6)：812-821. Feng L，Xia F，Wan Q L，et al，2019. Characteristics of the raindrop size distribution in two squall lines measured by two-dimensional video disdrometer at Guangdong[J]. J Trop Meteor，35(6)：812-821(in Chinese).

高丽，潘佳文，蒋璐璐，等，2021. 一次长生命史超级单体降雹演化机制及双偏振雷达回波分析[J]. 气象，47(2)：170-182. Gao L，Pan J W，Jiang L L，et al，2021. Analysis of evolution mechanism and characteristics of dual polarization radar echo of a hail caused by long-life supercell[J]. Meteor Mon，47(2)：170-182(in Chinese).

李欣，张璐，2022. 北上台风强降水形成机制及微物理特征[J]. 应用气象学报，33(1)：29-42. Li X，Zhang L，2022. Formation mechanism and microphysics characteristics of heavy rainfall caused by northward-moving typhoons[J]. J Appl Meteor Sci，33(1)：29-42(in Chinese).

刘黎平，徐宝祥，王致君，等，1992. 用C波段双线偏振雷达研究冰雹云[J]. 大气科学，16(3)：370-376. Liu L P，Xu B X，Wang Z J，et al，1992. Study of hail with C-Band dual linear polarization radar[J]. Sci Atmos Sin，16(3)：370-376(in Chinese).

刘西川，高太长，刘磊，等，2013. 雨滴微物理特征研究及测量技术进展[J]. 地球科学进展，28(11)：1217-1226. Liu X C，Gao T C，Liu L，et al，2013. Advances in microphysical features and measurement techniques of raindrops [J]. Adv Earth Sci，28(11)：1217-1226(in Chinese).

刘彦，苏德斌，杨宁，等，2023. 基于二维雨滴谱仪的巴彦淖尔地区降雹谱个例分析[J]. 高原气象，42(3)：748-757. Liu Y，Su D B，Yang N，et al，2023. Case study of hail size distribution in Bayannur Area based on two-dimensional video disdrometer[J]. Plateau Meteor，42(3)：748-757(in Chinese).

梅海霞，梁信忠，曾明剑，等，2020. 2015—2017年夏季南京雨滴谱特征[J]. 应用气象学报，31(1)：117-128. Mei H X，Liang X Z，Zeng M J，et al，2020. Raindrop size distribution characteristics of Nanjing in summer of 2015－2017[J]. J Appl Meteor Sci，31(1)：117-128(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[J]. 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[J]. Acta Meteor Sin，79(1)：168-180(in Chinese).

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

潘佳文，魏鸣，郭丽君，等，2020b. 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，2020b. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in southern Fujian[J]. Meteor Mon，46(12)：1608-1620(in Chinese).

唐洁，郭学良，常祎，2018. 2014年夏季青藏高原云和降水微物理特征的数值模拟研究[J]. 气象学报，76(6)：1053-1068. Tang J，Guo X L，Chang Y，2018. Numerical studies on microphysical properties of clouds and precipitation in the summer of 2014 over the Tibetan Plateau[J]. Acta Meteor Sin，76(6)：1053-1068(in Chinese).

王俊，王文青，王洪，等，2021a. 短时强降水和冰雹云降水个例雨滴谱特征分析[J]. 高原气象，40(5)：1071-1086. Wang J，Wang W Q，Wang H，et al，2021a. Characteristics of the raindrop size distribution during a short-time heavy rainfall and a squall line accompanied by hail[J]. Plateau Meteor，40(5)：1071-1086(in Chinese).

王俊，王文青，王洪，等，2021b. 山东北部一次夏末雹暴地面降水粒子谱特征[J]. 应用气象学报，32(3)：370-384. Wang J，Wang W

Q, Wang H, et al, 2021b. Hydrometeor particle characteristics during a late summer hailstorm in northern Shandong[J]. J Appl Meteor Sci, 32(3): 370-384(in Chinese).

夏凡,龚佃利,潘佳文,等,2023. 双偏振雷达水凝物分类算法优化及在雹暴云的应用分析[J]. 气象,49(11):1343-1358. Xia F, Gong D L, Pan J W, et al, 2023. The hydrometeor classification optimum algorithm for polarimetric radar and its application for the hailstorm cloud[J]. Meteor Mon, 49(11): 1343-1358(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[J]. 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[J]. Acta Meteor Sin, 78(4): 568-579(in Chinese).

杨文霞,范皓,杨洋,等,2019. 一次层状云降雨过程多源遥感特征参量演变分析[J]. 气象,45(9):1278-1287. Yang W X, Fan H, Yang Y, et al, 2019. Evolution analysis of physical quantities obtained by multi-source remote sensing in a process of stratiform cloud rainfall[J]. Meteor Mon, 45(9): 1278-1287(in Chinese).

岳治国,梁谷,2018. 陕西渭北一次降雹过程的粒子谱特征分析[J]. 高原气象,37(6):1716-1724. Yue Z G, Liang G, 2018. Characteristics of precipitation particles in a hailstorm process in Weibei Area of Shaanxi Province[J]. Plateau Meteor, 37(6): 1716-1724(in Chinese).

Bao X W, Wu L G, Zhang S, et al, 2020. Distinct raindrop size distributions of convective inner- and outer-rainband rain in Typhoon Maria (2018)[J]. J Geophys Res Atmos, 125(14): e2020JD032482.

Chen B J, Wang J, Gong D L, 2016. Raindrop size distribution in a midlatitude continental squall line measured by thies optical disdrometers over East China[J]. J Appl Meteor Climatol, 55(3): 621-634.

Chen G, Zhao K, Wen L, et al, 2019. Microphysical characteristics of three convective events with intense rainfall observed by polarimetric radar and disdrometer in eastern China[J]. Remote Sens, 11(17): 2004.

Friedrich K, Kalina E A, Masters F J, et al, 2013. Drop-size distributions in thunderstorms measured by optical disdrometers during VORTEX2[J]. Mon Wea Rev, 141(4): 1182-1203.

Grieser J, Hill M, 2019. How to express hail intensity-modeling the hailstone size distribution[J]. J Appl Meteor Climatol, 58(10): 2329-2345.

Heymsfield A, Wright R, 2014. Graupel and hail terminal velocities: does a "supercritical" reynolds number apply?[J]. J Atmos Sci, 71(9): 3392-3403.

Kumjian M R, 2013. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part Ⅲ: warm- and cold-season applications[J]. J Oper Meteor, 1(20): 243-264.

Kumjian M R, Khain A R, 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]. J Appl Meteor Climatol, 53(7): 1820-1843.

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[J]. Mon Wea Rev, 138(10): 3762-3786.

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]. J Appl Meteor, 41(12): 1179-1194.

Park H S, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al, 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: description and application to an MCS[J]. Wea Forecasting, 24(3): 730-748.

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[J]. Mon Wea Rev, 136(8): 2849-2870.

Wen J, Zhao K, Huang H, et al, 2017. Evolution of microphysical structure of a subtropical squall line observed by a polarimetric radar and a disdrometer during OPACC in Eastern China[J]. J Geophys Res Atmos, 122(15): 8033-8050.

(本文责编:何晓欢)