

申高航,高安春,李君,2021. 雨滴谱及双偏振雷达等资料在一次强降水过程中的应用[J]. 气象,47(6):737-745. Shen G H,Gao A C,Li J,2021. Application of raindrop spectrum and dual polarization radar data to a heavy rain process[J]. Meteor Mon,47(6):737-745(in Chinese).

## 雨滴谱及双偏振雷达等资料在 一次强降水过程中的应用\*

申高航<sup>1</sup> 高安春<sup>2</sup> 李 君<sup>3</sup>

1 山东省莒南县气象局,莒南 276600

2 山东省临沂市气象局,临沂 276004

3 山东省淄博市气象局,淄博 255025

**提 要:** 2019 年 8 月 9 日 20 时至 13 日 20 时,受西风槽和台风利奇马的共同影响,山东省出现了大范围的强降水,其中心在章丘站。利用多源资料研究台风雨带强降水的微物理结构特征,分析了强降水过程中章丘站的分钟降水量、雨滴谱、双偏振多普勒雷达、风廓线雷达等资料。分析发现:本次降水过程开始阶段,存在明显的冷云降水机制。降水过程中雨滴的尺度谱随时间存在明显变化。降水较强时段,雨滴谱较宽,呈现出明显的双峰结构,直径大于 1 mm 的雨滴数序列与分钟降水量序列相关系数达到 0.9568;降水减弱时段,谱宽逐渐变窄,呈现出明显的单峰结构,直径大于 1 mm 的雨滴数变少。雷达回波高度较高时段,直径大于 1 mm 的雨滴数比例增大,谱宽较大,并出现多峰分布。强的湿湍流团可以形成差分反射率因子大值区,它既不对应于强对流,也不对应于地面大雨滴,是由上升和下沉气流引起的湿湍团变形以及其他原因综合导致的。降水较强时段,在风廓线时间剖面 0.9~1.4 km 高度,出现一个风向和风速突变的薄层结构;对应该薄层,分钟雨量最强,直径大于 1 mm 雨滴数的比例明显偏大。分析结果为了解台风强降水的滴谱特征和微物理结构提供了参考依据。

**关键词:** 雨滴谱,双偏振多普勒雷达,台风强降水

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.009

## Application of Raindrop Spectrum and Dual Polarization Radar Data to a Heavy Rain Process

SHEN Gaohang<sup>1</sup> GAO Anchun<sup>2</sup> LI Jun<sup>3</sup>

1 Junan County Meteorological Station of Shandong Province, Junan 276600

2 Linyi Meteorological Office of Shandong Province, Linyi 276004

3 Zibo Meteorological Office of Shandong Province, Zibo 255025

**Abstract:** From 20:00 BT 9 to 20:00 BT 13 August 2020, due to the combined effects of the westerly trough and the Typhoon Lichma, large-scale severe precipitation occurred in Shandong Province. The center of the severe precipitation was at Zhangqiu Station. In order to use multi-source data to study the microphysical structure characteristics of heavy rainfalls in the typhoon rain belt, this paper analyzes the data of minutely precipitation, raindrop spectrum, dual polarization Doppler radar, wind profiler radar, etc. during the severe rainfall process at Zhangqiu Station. The results show that there was an obvious cold cloud precipitation

\* 山东省自然科学基金(ZR2016DM20)、山东省气象局预报员专项(SDYBY2018-14)和临沂市气象局自立课题(2019lyqx06)共同资助  
2020 年 8 月 11 日收稿; 2020 年 12 月 27 日收修定稿

第一作者:申高航,主要从事大气探测及预报与预警服务方面工作. E-mail:841872850@qq.com

通讯作者:高安春,主要从事天气预报与预警方面工作. E-mail:841872850@qq.com

mechanism at the beginning of this precipitation process. During the precipitation, the scale spectrum of raindrops changed significantly with time. During the period of severe precipitation, the spectrum of raindrops was broad, showing an obvious bimodal structure. The correlation coefficient between the sequence of raindrop numbers with a diameter greater than 1 mm and the sequence of minutely precipitation reached 0.9568. However, during periods of weakening precipitation, the spectrum of raindrops gradually narrowed, showing a single-peak structure clearly, and the number of raindrops with a diameter greater than 1 mm decreased. When the radar echo height was high, the proportion of raindrops with a diameter greater than 1 mm increased, the raindrop spectrum was wider, and the multimodal distribution appeared. Strong wet turbulence clusters formed a large value area of the differential reflectance factor ( $Z_{DR}$ ), which neither corresponded to severe convection nor to surface heavy raindrops. This was caused jointly by the deformation of the wet turbulence resulting from updraft, downdraft and other reasons. During heavier precipitation, a thin layer structure with abrupt changes in wind direction and wind speed appeared in the time cross-section of wind profile in the 0.9–1.4 km height. Corresponding to the thin layer, the minutely rainfall was the heaviest, and the proportion of raindrops with a diameter greater than 1 mm was obviously biased. The phenomenon revealed by the analysis results could provide a reference for understanding the droplet spectrum characteristics and microphysical structure of typhoon heavy rainfall.

**Key words:** raindrop spectrum, dual polarization radar, typhoon heavy precipitation

## 引 言

地面降水是天气系统热力、动力、水汽等相互作用的综合结果,其中包含有云降水微物理过程的复杂信息。加强对这些信息和过程的了解,可以更好地把握天气过程,对改进和优化气候模式中的降水参数化方案、提高雷达定量估测降水的精度均具有重要意义(Gilmore et al,2004)。

对地面雨滴谱进行观测,由雨滴谱分布可以计算和解读出相应降水过程中的各种微物理特征量,长时期以来一直是云降水物理观测的重要项目之一(罗俊颖等,2012;柳臣中等,2015)。近年来,国内外开展了很多雨滴谱的观测,研究了不同地区、不同季节、不同降水类型以及同一降水过程不同时间的雨滴谱特征及其时间变化(陈磊等,2013;申高航等,2020;周黎明等,2014;陈聪等,2015)。

双偏振多普勒雷达发射水平和垂直两种极化方向的电磁波,除了获取常规雷达的监测信息外,还可以获取差分反射率因子( $Z_{DR}$ )、差分相移率( $K_{DP}$ )以及相关系数(CC)等偏振参数。对这些参数进行分析、反演,可以获取有关降水粒子的形状、尺寸大小、相态分布、空间取向等更为具体的气象信息,是探测

和研究降水粒子结构及物理机制的一种有效手段(冯晋勤等,2018;林文等,2020)。国内外对双偏振雷达的应用研究主要集中在粒子相态识别(Giangrande et al,2016;刘黎平等,2015;黄勇等,2015)和降水量估测(李宗飞等,2015;汪舵等,2017)两个方面。

风廓线雷达以大气折射指数起伏(湍流块)为示踪物,可以提供大气风场、垂直气流等气象要素随高度的分布和随时间的变化,具有很高的时间和空间分辨率。20世纪80年代以来,我国学者先后利用风廓线雷达资料对局地暴雨与低空急流做了分析研究,并陆续将其应用到雾-霾机理、边界层特点分析等,取得了良好效果(王栋成等,2019;廖菲等,2017;黄兴友等,2015)。

2019年8月9日20时至13日20时(北京时,下同),受西风槽和台风利奇马的共同影响,山东大部地区出现极端强降水,最大降水出现在章丘。台风影响期间,章丘站布设的自动气象站、探空站、DSG5型降水天气现象仪和风廓线雷达记录下整个过程的完整观测资料。本文根据这些资料,结合齐河双偏振多普勒雷达资料,分析了降水过程中章丘站分钟降水量、雨滴谱、双偏振多普勒雷达各参量、风廓线的时空分布特点及相互关系,加深了对本次

极端强降水过程的理解,得出了许多有意义的结果,对于研究台风强降水的滴谱特征和微物理结构、做好此类天气过程的预报预警服务具有重要参考价值。

## 1 资料来源及说明

选用了章丘风廓线雷达 11 380 m 以下的高度层次,其中:100~820 m 为 60 m 一个间隔,820~2 020 m 为 120 m 一个间隔,2 020~11 380 m 为 240 m 一个间隔,时间分辨率为 6 min。

地面分钟降雨量记录数据和雨滴谱数据均来自章丘国家基本气象站,观测场经纬度、海拔高度与风廓线雷达一致。雨滴谱资料取自 DSG5 型降水天气现象仪,共包括 32 个尺度通道和 32 个速度通道,其中降水粒子尺度测量范围为 0.1~22.4 mm,降水粒子速度测量数据范围为 0.125~26 m·s<sup>-1</sup>。每分钟数据为 32×32=1 024 个。雨滴谱资料将尺度测量范围和速度测量范围分别由小到大编码为 32 个等级,这种编码是非线性的,本文中有关图表的雨滴速度和尺度坐标轴也使用了同样的编码。

章丘站位于济南(齐河)双偏振多普勒雷达站偏东方向 70 km 处(图 1),能被雷达有效覆盖,本文选用了齐河双偏振多普勒雷达观测的基数据,包括了反射率因子( $Z$ )、径向速度( $V$ )、速度谱宽( $W$ )、差分反射率因子( $Z_{DR}$ )、差分相移率( $K_{DP}$ )以及相关系数( $CC$ )等参量。基数据采用 VCP21 扫描方式,6 min 完成体扫中 9 个不同仰角,最低仰角为 0.5°,最低仰角波束中心在章丘站距地面 1.5 km 左右,仅能探测到章丘站 1.5 km 以上的气象目标。章丘上空的双偏振雷达数据通过查找体扫数据中的最近距离库得到,绘制时间廓线图时用了线性插值方法。

以上资料均从气象数据统一服务接口(MU-SIC)下载并解码,时间统一由世界时变换为北京时。

## 2 天气形势概况及山东省降水分布

2019 年 1909 号台风利奇马于 8 月 10 日 01:45 在浙江台州市温岭城南镇登陆。登陆后经浙江中北

部、上海、江苏一路沿偏北路径北上(图 1),11 日 12 时左右,“利奇马”从连云港灌云县进入黄海中部,11 日 20:50 在青岛市黄岛区沿海再次登陆,12 日凌晨到达渤海南部的莱州湾一带,此后一直回旋,于 13 日上午减弱为热带低压,移向东北,逐渐结束对山东的影响。在“利奇马”北上过程中,西风槽位于台风的西北方向,受副热带高压阻挡,缓慢东移。

10 日 08 时红外云图上,“利奇马”位于(28.9°N、120.8735°E),章丘站在台风外围云系和西风槽云系之间。欧洲中心数值预报模式再分析场,400 hPa 以下,“利奇马”北部偏东气流在西风槽前偏折分离转向,一支转向偏北,另一支转向偏南,章丘站处在转向的偏北气流中;400 hPa 以上,章丘站处在西风槽前的西南气流中。

受西风槽和“利奇马”的共同影响,9 日 20 时至 13 日 20 时,山东大部分地区均出现了极端强降水,123 个国家站平均降水量为 179.7 mm,其中,降水量 250 mm 以上的有 28 个站,100~250 mm 的有 51 个站,50~100 mm 的有 39 个站。

由图 1 可见,过程降水 200 mm 以上的区域呈南北走向,分布在山东中部,最大降水在章丘,为 488.1 mm。

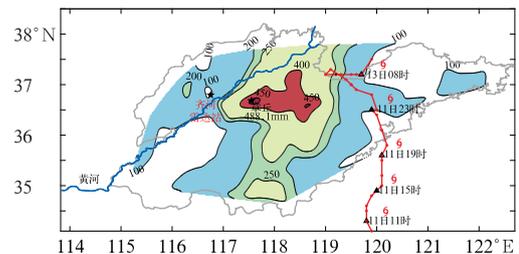


图 1 “利奇马”影响山东的概况及章丘和齐河站的位置分布  
(填色为>100 mm 的降水区域,五角星为章丘气象站和齐河雷达站的位置,带点红色实线为台风路径)  
Fig. 1 Overview of the impact of Typhoon Liqima in Shandong and the locations of Zhangqiu and Qihe stations  
(Colored spots indicate precipitation areas greater than 100 mm, and five-pointed stars indicate the locations of Zhangqiu Weather Station and Qihe Radar Station; red dotted solid line marks the typhoon path)

### 3 降水过程中章丘站各观测参量随时间的变化特征

#### 3.1 雨滴谱、降水量、大小雨滴数的时间变化

从图 2a 中可以看出:过程中雨滴的尺度谱随时间存在明显变化;从 10 日 10 时到 11 日 20 时(对应图 2b 中降水较强的时段),雨滴谱较宽,呈现出明显的双峰结构,一个峰在 0.7 mm 左右,另一个在 1.2 mm 左右,雨滴直径 1.2 mm 左右的峰位置稳定,另一个峰的位置随时间有明显变化(申高航等, 2020);从 12 日 17 时 36 分到 13 日 15 时(对应图 2b 中降水逐渐减弱的时段),雨滴谱谱宽逐渐变窄,呈现出明显的单峰结构,峰所在的位置向小雨滴偏移;11 日 03:12—20:00(对应图 2b 中降水最强的时段),出现了少量直径  $>4.8$  mm 的大雨滴,最大雨滴直径  $>6.4$  mm。

从图 2b 中可以看出:10 日 10 时到 11 日 20 时,小雨滴数与大雨滴数曲线走向吻合,峰值对应,两序列的标准化相关系数为 0.677 4,信度  $>99.9\%$ ;总体来看,小雨滴数明显多于大雨滴数,但在 11 日 09:00—11:00、11 日 15:30—17:36,出现

了大雨滴多于小雨滴的情况;从 12 日 04 时到降水结束,降水逐渐减弱,小雨滴数明显增加,大雨滴数明显减少,单位时间内雨滴总数明显多于前期降水较强的时段,但大雨滴比例很低;从 10 日 10 时降水开始到 12 日 12 时的主要降水时段内,大雨滴数序列与分钟降水量序列表现出非常强的相关性,两序列的标准化相关系数达到 0.956 8,信度  $>99.9\%$ ,这说明了较强降水与大雨滴贡献有关(申高航等, 2020)。

#### 3.2 双偏振多普勒雷达各参量廓线的时间变化

对双偏振多普勒雷达参数进行分析、反演,可以获取有关降水粒子的形状、尺寸大小、相态分布、空间取向等更为具体的气象信息。 $Z_{DR}$  表达一个探测空间体(距离库)的粒子的平均的形状, $Z_{DR}$  值与雨滴大小密切相关; $K_{DP}$  表达一个探测空间体的平均的液态水含量,与降水率成比例。 $CC$  描述探测空间体内粒子的水平和垂直极化的回波信号变化的平均相似度,反映探测空间体中降水粒子相态相似度,主要用于降水粒子的相态识别。

分析双偏振雷达降水粒子判别的基本依据,可以发现  $Z_{DR}$  出现负值是判断冰相降水粒子的重要指标。分析 2019 年 8 月 10—11 日章丘站 4 次定时探

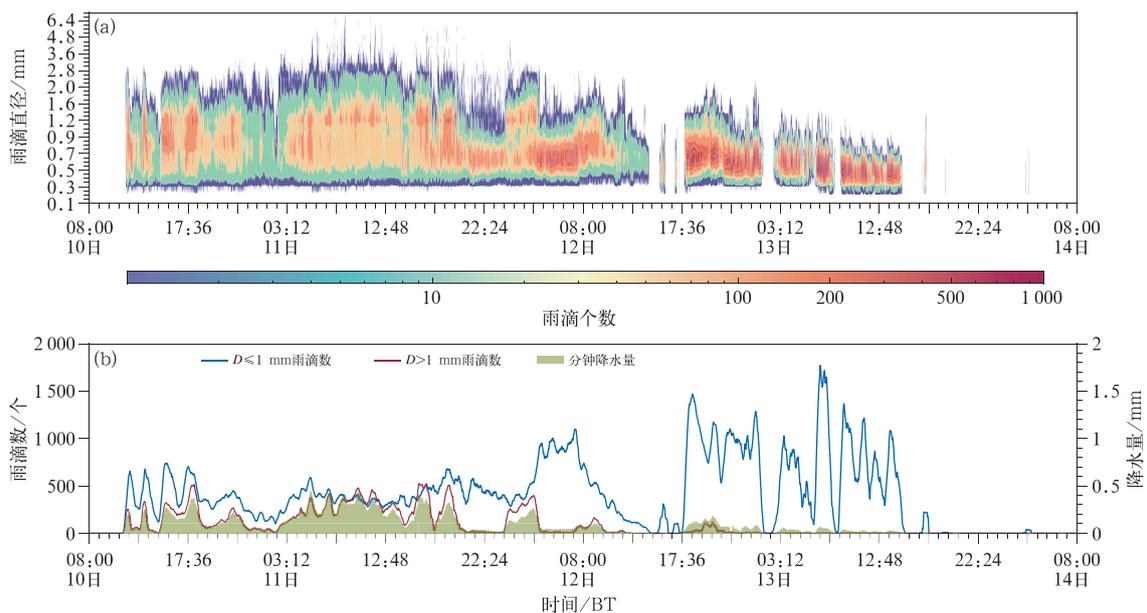


图 2 2019 年 8 月 10 日 08 时至 14 日 08 时章丘站雨滴谱(a)和分钟降水量及大小雨滴数(b)随时间变化

Fig. 2 The raindrop spectrum (a), time change of minutely precipitation and the number of large and small raindrops (b) at Zhangqiu Station from 08:00 BT 10 to 08:00 BT 14 August 2019

空资料,本次降水过程内,章丘站上空 0℃层高度维持在 5.06~5.75 km,7 km 环境温度为 -8℃左右,9 km 环境温度为 -18℃左右,10 km 环境温度为 -27℃左右,12 km 环境温度为 -42℃左右。以下制作章丘站上空双偏振多普勒雷达各参量廓线的时间变化,并结合环境温度条件和双偏振雷达降水粒子判别的基本依据,了解章丘站本次强降水过程的降水粒子结构及物理机制。

选取图 3 中 10 日 12:48 至 11 日 12:48 的主要降水时段进行分析。

由图 3a 可以看出,该时段 6~10 km 的高度层内  $K_{DP}$ 明显大于  $0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ,最大值超过  $0.6^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ,高度在 8 km 处。结合环境温度条件,判断该区域存在比较丰富的过冷却水及冰水转化过程。从 8~11 km,  $K_{DP}$ 随高度下降逐渐增加,6 km 以下,  $K_{DP}$ 随高度下降逐渐减少。

图 3b 中,11~8 km 的高度层次内,  $Z_{DR}$ 有正有负,最小值为 -2 dBz,最大值为 3 dBz。8~6 km,  $Z_{DR}$ 负值区域明显增加。5 km 以下,随高度下降,  $Z_{DR}$ 逐渐变为正值。

图 3c 中,从 11~8 km,粒子相态迅速趋于一致,  $CC$ 快速增加到 0.9 以上,部分区域达到 0.97。从 8~5 km,  $CC$ 逐渐减少到 0.95 左右。从 5~2 km,粒子相态再次趋于一致,  $CC$ 又逐渐增加到 0.97 以上。

图 3d 是回波反射率因子廓线的时间变化,回波反射率因子大小与雨滴谱分布密切相关。选定时间段内,从 10~6 km 高度,回波逐渐增强,表明该高度层内降水粒子繁生和增长效应明显;10 日 20:24 至 11 日 02:10 存在较强的回波(>42 dBz)悬垂于 2 km 以上的现象,说明悬垂强回波下可能存在大雨滴的破碎或雨滴蒸发。对比图 2a 和图 3d 发现,雨滴谱出现双峰结构的时间段对应较厚的回波厚度

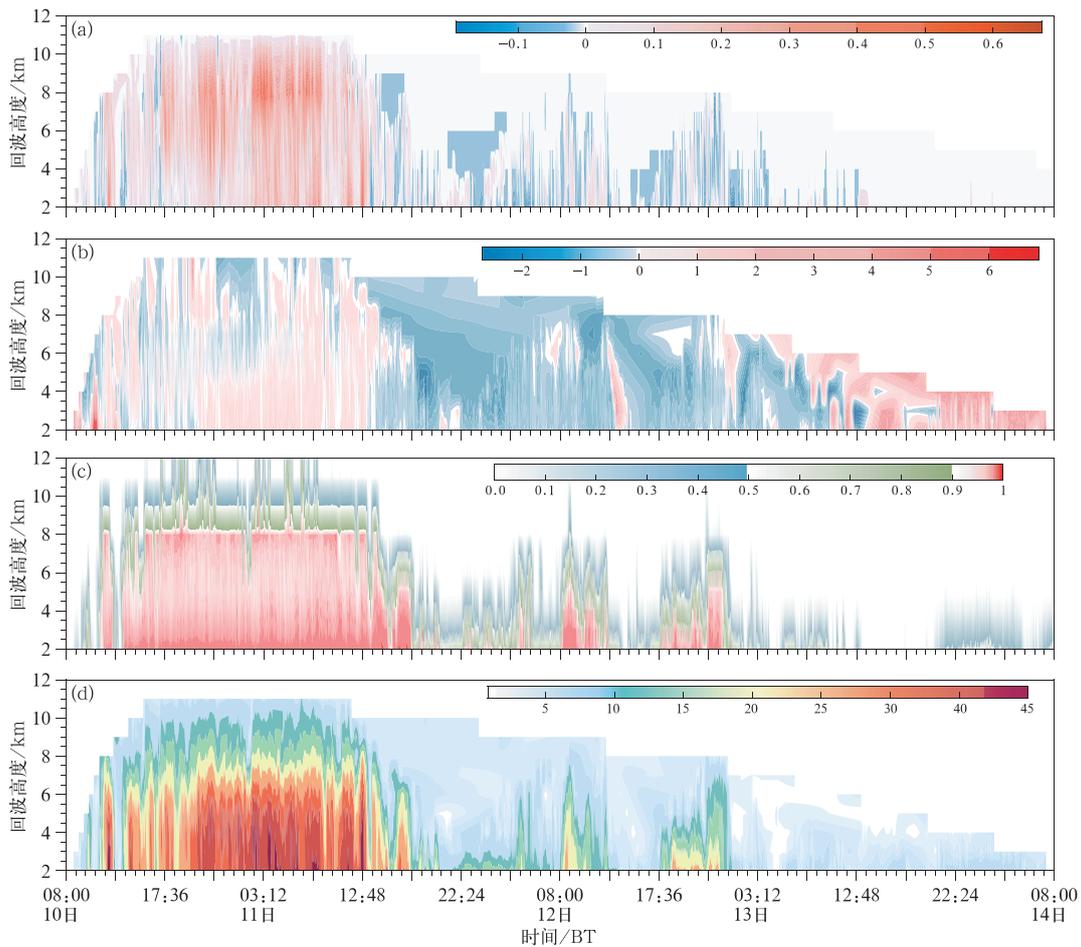


图 3 2019 年 8 月 10 日 08 时至 14 日 08 时章丘站上空双偏振多普勒雷达(a)  $K_{DP}$ (单位:  $^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ), (b)  $Z_{DR}$ (单位: dBz), (c)  $CC$ , (d)  $Z$ (单位: dBz)各参量廓线的时间变化

Fig. 3 Time variation of each parameter profile of dual polarization Doppler radar over Zhangqiu Station from 08:00 BT 10 to 08:00 BT 14 August 2019  
(a)  $K_{DP}$ (unit:  $^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ), (b)  $Z_{DR}$ (unit: dBz), (c)  $CC$ , (d)  $Z$ (unit: dBz)

(特别是强度大于 10 dBz 的回波厚度),说明较厚的回波厚度可使雨滴在适宜的环境中存在较长时间,凝结增长和碰并增长使雨滴谱宽和有效半径增加,并出现多峰分布(宋跃辉等,2018)。

针对图 3d 中较强的回波悬垂于 2 km 以上的现象,分析 10 日 20:24 至 12 日 04:02 时间段内齐河双偏振雷达的 PPI 和 RHI 图像。发现该时间段

内,0.5°仰角的 PPI 图像上,章丘以西的边界非常整齐;RHI 图像上,回波西边界到章丘以东,较强回波悬垂于 2 km 以上的现象比较普遍。该区域由于处在西风槽与台风的相互作用区,高层暖湿东风气流中形成的雨滴,进入低层干冷空气后,出现了蒸发和破碎,回波强度减弱,从而出现了较强回波(>42 dBz)悬垂于 2 km 以上的现象(图 4)。

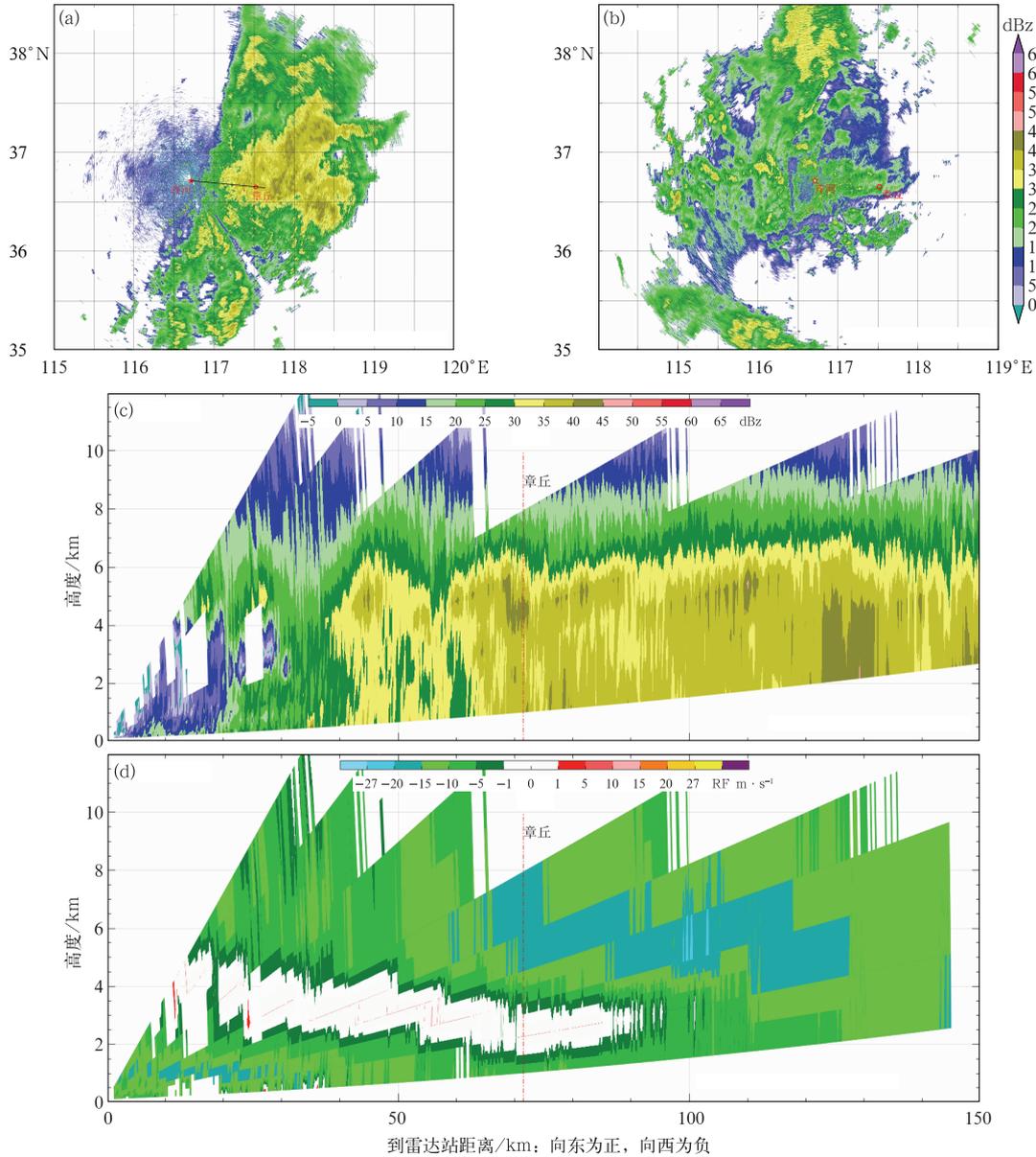


图 4 2019 年 8 月 10 日 22:06 齐河雷达(a)0.57°仰角的回波强度 PPI, (c)齐河—章丘径向上的回波强度 RHI,(d)径向速度和 (b)12 日 04:02 0.57°仰角的回波强度 PPI

Fig. 4 (a) The intensity PPI at 0.57° elevation, (c) intensity RHI on the Qihe—Zhangqiu radial direction, (d) radial speed at 22:06 BT 10 August, (b) intensity PPI at 0.57° elevation at 04:02 BT 12 August 2019

综合分析该时段章丘站上空双偏振多普勒雷达各参量廓线的时间变化,可以得出降水过程的如下信息:在接近 11 km 的高层,降水粒子相态比较复杂,可能同时存在冰晶、雪、霰和雨滴,同时这里降水粒子尺度小、浓度低,因而回波  $Z$  和  $CC$  都很小;降水粒子下落进入 10~6 km 高度层次的丰富过冷却水区,经过冰水转化的贝吉龙过程加快了冰晶的增长、繁生和凇附,促进了过冷却水滴等其他粒子向冰晶的转化,降水粒子浓度和尺度增大、相态趋于一致,相应地  $Z_{DR}$  由正转负,  $K_{DP}$  逐渐减小,回波反射率因子和  $CC$  迅速增大;零度层(5 km 左右)以下,在降水粒子下落过程中,冰晶等固态降水粒子逐渐融化,雨滴通过凝结和碰并继续增长,到 2 km 高度,回波反射率因子增加到 30 dBz 左右,  $CC$  增大到 0.97,基本全部为雨滴。

### 3.3 风廓线时间变化

在 10 日 10:53、12 日 13:45 以及降水过程后期,图 3b 中出现了类似  $Z_{DR}$  柱的  $Z_{DR}$  大值区。 $Z_{DR}$  大值区一般对应大雨滴,  $Z_{DR}$  柱是判断强对流天气的重要指标。但这些  $Z_{DR}$  大值区出现的时间内,既没有

强对流天气,也没有观测到大雨滴。为了分析这种现象并加深对本次过程的了解,制作了章丘站本次过程风廓线的时间变化(图 5)。风廓线雷达以大气折射指数起伏(湍流块)为示踪物,在晴空区,其探测的风速接近环境风,但在降水时段,其观测的垂直速度值是大气垂直风速和降水粒子垂直下降速度的复合值,而且在很大程度上反映的是后者(邱黎等, 2017)。

从风廓线原始数据中每间隔十个时次选一个,每间隔一个高度选一个,绘制图 5。由图 5 可以看出:降水开始前,章丘站上空水平方向全为弱的偏南风,垂直方向有弱的上升运动。降水开始后,随着时间推移,1 km 以下的边界层内,水平风向由偏东风转为东北风、再转为偏北风,风速逐渐增强,强降水主要出现该时间段内;随后,边界层内的水平风向由偏北风转为西北风,风速逐渐减小,该时间段降水较小且逐渐减弱;边界层以上水平风也有类似变化,但时间滞后。

对照图 5 和图 3b 可以看出:  $Z_{DR}$  廓线中那些特殊的  $Z_{DR}$  大值区,对应着风廓线时间变化图中弱下沉运动中出现弱上升运动的区域。这些区域湍流

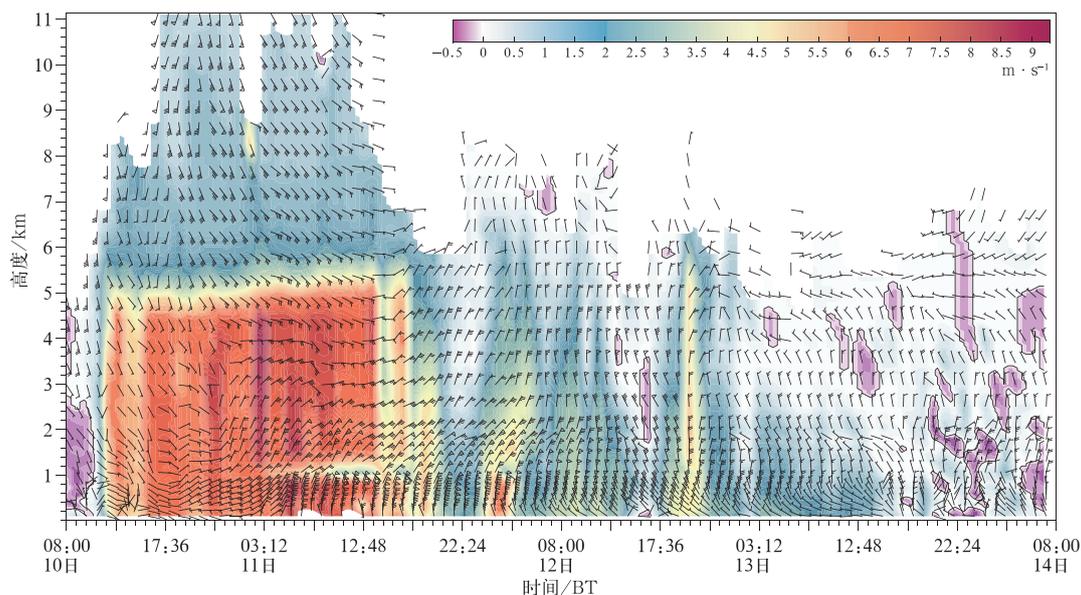


图 5 2019 年 8 月 10 日 08 时至 14 日 08 时章丘站风廓线的时间变化

(风矢为水平速度,色标为垂直速度,方向向上为负,向下为正)

Fig. 5 Time change of wind profile at Zhangqiu Station from 08:00 BT 10 to 08:00 BT 14 August 2019

(Wind vector is the horizontal speed, colored area is the vertical speed, upward direction is negative and downward direction is positive)

强,在上升和下沉运动的挤压、拉伸和水平风的作用下,湿湍流团变大,形状和取向也发生了较大改变,形成了不对应于实际地面降水的  $Z_{DR}$  大值区,这是湍流变形和其他原因综合所致(黄琴等,2018)。

分析强降水时间段的风廓线图可以发现:该时间段 6 km 以上均为一致的偏南风,垂直速度均在  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右;偏南暖湿气流的输送,有利于该层丰富的过冷却水的维持,促进降水粒子的繁生和增长。在  $0^\circ\text{C}$  层附近非常短的高度层内 ( $5.5 \sim 4.6 \text{ km}$ ),冰雪晶等冰相降水粒子融化为雨滴,空气阻力减小,降水粒子下落加速,垂直速度由  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  快速增加到  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;而  $4.6 \text{ km}$  以下至  $2 \text{ km}$ ,垂直速度变化不大。 $2 \text{ km}$  以下至贴地层内,11 日 03:12—17:36 期间,在  $0.9 \sim 1.4 \text{ km}$  高度,出现一个风向和风速突变的薄层结构;薄层内垂直速度为  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,该层上方和下方垂直速度  $> 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,水平风速分布也有类似特征(图略);薄层上方为东北风,薄层下方为偏北风;薄层内从上到下,风向出现了东北风—东风—东南风—偏北风的快速变化;图 2b 中对应薄层出现的时间段,分钟雨量最强,直径  $\geq 1 \text{ mm}$  雨滴数的比例明显偏大,大部分时间大雨滴数多于小雨滴数。

## 4 结 论

2019 年 8 月 11 日受西风槽和“利奇马”的共同影响,章丘出现了极端强降水。通过分析章丘站强降水过程中分钟降水量、雨滴谱、双偏振多普勒雷达、风廓线雷达等资料的时间变化及彼此之间的联系,加深了对本次强降水过程中降水粒子结构的变化及物理机制的认识,主要可归纳为以下几点:

(1)降水过程中雨滴的尺度谱随时间存在明显变化。降水较强时段,雨滴谱较宽,呈现出明显的双峰结构,小雨滴数与大雨滴数的两条曲线走向吻合,较强降水主要与大雨滴贡献有关,大雨滴数序列与分钟降水量序列相关系数达到 0.9568;降水减弱时段,雨滴谱谱宽逐渐变窄,呈现出明显的单峰结构,峰所在的位置向小雨滴方向偏移,大雨滴数变得很少。

(2)降水较强时段,存在明显的冷云降水机制。 $6 \sim 10 \text{ km}$  高度层内为偏南暖湿气流, $K_{DP}$  可以揭示丰富的过冷却水位置, $Z_{DR}$  可以反映降水粒子主要的相态及形状变化; $Z$ 、 $CC$ 、风廓线雷达的垂直速度都

表现为明显的层次结构,反映了从上升到下降水粒子繁生、增长和融化的过程。

(3)风廓线时间剖面  $0.9 \sim 1.4 \text{ km}$ ,出现一个风向和风速突变的薄层结构;对应该薄层,分钟雨量最强,直径大于  $1 \text{ mm}$  雨滴数的比例明显偏大。

(4)强的湿湍流团可以形成  $Z_{DR}$  大值区,它既不对应于地面强对流,也不对应地面大雨滴,是由上升和下沉气流引起的湍团变形及其他原因综合导致的。

## 参考文献

- 陈聪,银燕,陈宝君,2015. 黄山不同高度雨滴谱的演变特征[J]. 大气科学学报,38(3):388-395. Chen C, Yin Y, Chen B J, 2015. Rain-drop size distribution at different altitudes in Mt. Huang[J]. Trans Atmos Sci, 38(3):388-395(in Chinese).
- 陈磊,陈宝君,杨军,等,2013. 2009—2010 年梅雨锋暴雨雨滴谱特征[J]. 大气科学学报,36(4):481-488. Chen L, Chen B J, Yang J, et al, 2013. Characteristics of raindrop size distribution of rain-storm on Meiyu front during 2009—2010[J]. Trans Atmos Sci, 36(4):481-488(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).
- 黄琴,魏鸣,胡汉峰,等,2018. 晴空回波的大气风湿温结构及双偏振雷达参量分析[J]. 气象,44(4):526-537. Huang Q, Wei M, Hu H F, et al, 2018. Analysis of atmospheric wind, temperature and humidity structure and dual polarization radar parameters of clear air echo[J]. Meteor Mon, 44(4):526-537(in Chinese).
- 黄兴友,何雨琴,刘俊,2015. 风廓线雷达资料反演雨滴谱和水汽通量的研究[J]. 气象科学,35(6):751-759. Huang X Y, He Y Q, Liu J, 2015. Retrieval and analysis of raindrop size distribution and water vapor flux based on wind profile radar data[J]. J Meteor Sci, 35(6):751-759(in Chinese).
- 黄勇,吴林林,冯妍,等,2015. 两次对流云合并过程的双偏振雷达观测研究[J]. 高原气象,34(5):1474-1485. Huang Y, Wu L L, Feng Y, et al, 2015. Two clouds merger cases observation by dual linear polarization radar[J]. Plateau Meteor, 34(5):1474-1485(in Chinese).
- 李宗飞,肖辉,姚振东,等,2015. X 波段双偏振雷达反演雨滴谱方法研究[J]. 气候与环境研究,20(3):285-295. Li Z F, Xiao H, Yao Z D, et al, 2015. Retrieval of raindrop size distribution by X-band dual-polarization radar[J]. Climatic Environ Res, 20(3):285-295(in Chinese).
- 廖菲,邓华,李旭,2017. 基于风廓线雷达的广东登陆台风边界层高度特征研究[J]. 大气科学,41(5):949-959. Liao F, Deng H, Li X, 2017. A study on boundary layer height characteristics of landing typhoons by wind profilers in Guangdong Province[J].

- Chin J Atmos Sci, 41(5): 949-959(in Chinese).
- 林文, 张深寿, 罗昌荣, 等, 2020. 不同强度强对流云系 S 波段双偏振雷达观测分析[J]. 气象, 46(1): 63-72. Lin W, Zhang S S, Luo C R, et al, 2020. Observational analysis of different intensity severe convective clouds by S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 46(1): 63-72(in Chinese).
- 柳臣中, 周筠珺, 谷娟, 等, 2015. 成都地区雨滴谱特征[J]. 应用气象学报, 26(1): 112-121. Liu C Z, Zhou Y J, Gu J, et al, 2015. Characteristics of raindrop size distribution in Chengdu[J]. J Appl Meteor Sci, 26(1): 112-121(in Chinese).
- 刘黎平, 郑佳锋, 阮征, 等, 2015. 2014 年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果[J]. 气象学报, 73(4): 635-647. Liu L P, Zheng J F, Ruan Z, et al, 2015. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the various radars[J]. Acta Meteor Sin, 73(4): 635-647(in Chinese).
- 罗俊颖, 贺文彬, 李金辉, 等, 2012. 2003 年春季陕西省层状云降水的雨滴谱特征[J]. 气象, 38(9): 1129-1134. Luo J J, He W B, Li J H, et al, 2012. Characteristics in size distribution of raindrops of stratiform precipitation in spring 2003 of Shaanxi Province[J]. Meteor Mon, 38(9): 1129-1134(in Chinese).
- 邱黎, 王栋成, 李娟, 等, 2017. 风廓线雷达垂直速度与地面降雨关系研究: 以济南为例[J]. 海洋气象学报, 37(4): 91-100. Qiu C, Wang D C, Li J, et al, 2017. Study on the relationship between vertical velocity of wind profiler and rainfall: a case in Jinan[J]. J Mar Meteor, 37(4): 91-100(in Chinese).
- 申高航, 高安春, 李君, 2020. 台风利奇马不同强降水中心的雨滴谱特征分析[J]. 气象科学, 40(1): 106-113. Shen G H, Gao A C, Li J, 2020. Analysis of the characteristics of raindrop spectrum in different heavy precipitation centers caused by Typhoon "Lekima"[J]. J Meteor Sci, 40(1): 106-113(in Chinese).
- 宋跃辉, 周煜东, 王玉峰, 等, 2018. 水云增长过程中的云滴谱及散射特性分析[J]. 物理学报, 67(24): 249201. Song Y H, Zhou Y D, Wang Y F, et al, 2018. Analysis of particle size distribution and scattering characteristics of water cloud in condensation and coalescence growth[J]. Acta Phys Sin, 67(24): 249201(in Chinese).
- 王栋成, 邱黎, 董旭光, 等, 2019. 济南边界层风廓线雷达与 L 波段雷达大风探空测风对比[J]. 气象, 45(8): 1169-1180. Wang D C, Qiu C, Dong X G, et al, 2019. Comparing strong wind data observed by boundary layer wind profiling radar and L-band radar in Jinan[J]. Meteor Mon, 45(8): 1169-1180(in Chinese).
- 汪舵, 刘黎平, 吴翀, 2017. 基于相态识别的 S 波段双线偏振雷达最优化定量降水估测方法研究[J]. 气象, 43(9): 1041-1051. Wang D, Liu L P, Wu C, 2017. An optimization rainfall algorithm of S band dual polarization radar based on hydrometeor identification[J]. Meteor Mon, 43(9): 1041-1051(in Chinese).
- 周黎明, 王俊, 龚佃利, 等, 2014. 山东三类降水云雨滴谱分布特征的观测研究[J]. 大气科学学报, 37(2): 216-222. Zhou L M, Wang J, Gong D L, et al, 2014. A study on the distribution of raindrop size in three types of precipitation in Shandong Province[J]. Trans Atmos Sci, 37(2): 216-222(in Chinese).
- Giangrande S E, Toto T, Bansemer A, et al, 2016. Insights into riming and aggregation processes as revealed by aircraft, radar, and disdrometer observations for a 27 April 2011 widespread precipitation event[J]. J Geophys Res: Atmos, 121(10): 5846-5863.
- Gilmore M S, Straka J M, Rasmussen E N, 2004. Precipitation uncertainty due to variations in precipitation particle parameters within a simple microphysics scheme[J]. Mon Wea Rev, 132(11): 2610-2627, doi:10.1175/MWR2810.1.