

何清芳,林文,张深寿,等,2022. 闽西南地区一次春季降雹过程的双偏振参量及降水粒子谱特征[J]. 气象,48(7):856-867. He Q F,Lin W,Zhang S S,et al,2022. Dual polarization parameters and precipitation particle spectrum characteristics of a spring hail event in southwestern Fujian[J]. Meteor Mon,48(7):856-867(in Chinese).

闽西南地区一次春季降雹过程的双偏振 参量及降水粒子谱特征*

何清芳¹ 林文^{2,3} 张深寿¹ 肖秀珠¹ 张红梅¹

1 福建省龙岩市气象局,龙岩 364000

2 福建省气象科学研究所,福州 350001

3 福建省灾害天气重点实验室,福州 350001

提 要: 基于福建龙岩 S 波段双偏振雷达和地面降水现象仪资料对 2020 年 3 月 27 日龙岩永定的冰雹云以及同时发生在龙岩漳平的短时强降水云体进行观测对比分析。结果表明:降雹单体在降雹前出现回波高度跃增,存在有界弱回波区,在云体移动方向前部出现了强度为 2~4 dB 的 Z_{DR} 弧,内部 K_{DP} 柱发展较高,最高至 7~8 km,强降水云体也出现 K_{DP} 柱,但高度较低;两个强对流云体前部雨滴谱增宽时大滴端先增加,呈现双峰或多峰结构,靠近云体强中心小滴端(直径 ≤ 1 mm)数浓度呈量级增多,与云体前部强环境垂直风切有关;在降雹或强降水阶段,永定站冰雹为低密度冰雹,滴谱呈现弱双峰结构,漳平站则为单峰结构,两站的大滴(直径 > 3 mm)多为小冰雹融化造成;降雹后滴谱双峰结构主要由雨滴的碰并造成,云体后部滴谱收窄伴随着小粒子数浓度呈量级减少。

关键词: 双偏振雷达,降水现象仪,冰雹,雨滴谱

中图分类号: P416,P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.050702

Dual Polarization Parameters and Precipitation Particle Spectrum Characteristics of a Spring Hail Event in Southwestern Fujian

HE Qingfang¹ LIN Wen^{2,3} ZHANG Shenshou¹ XIAO Xiuzhu¹ ZHANG Hongmei¹

1 Longyan Meteorological Office of Fujian Province, Longyan 364000

2 Fujian Institute of Meteorological Sciences, Fuzhou 350001

3 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001

Abstract: Using the S-band dual polarization radar data and the surface precipitation phenomenon instrument data, the process of a hailstorm with severe convective weather in Yongding District of Longyan, Fujian Province on 27 March 2020 is analyzed, and compared with the characteristics of short-term heavy precipitation that occurred in Zhangping of Longyan at a similar time. The results show that the echo height of hail cloud in Yongding jumped before the hail shooting. There was a bounded weak echo in the front of the cloud moving direction, and the Z_{DR} arc with an intensity of 2–4 dB also appeared there. The K_{DP} column developed highly within the hailstorm simultaneously, up to 7–8 km. The K_{DP} column also appeared in the heavy rainfall cloud in Zhangping, but its height was lower. There were hailstones aloft in Zhangping,

* 福建省自然科学基金项目(2019J01098)、福建省气象局开放式科研基金项目(2021K04)共同资助

2021 年 1 月 29 日收稿; 2022 年 4 月 8 日收修定稿

第一作者:何清芳,主要从事天气预报与服务研究. E-mail: chinahqf2011@163.com

通讯作者:林文,主要从事大气物理与人工影响天气研究. E-mail: donnakoon@foxmail.com

but heavy rainfalls with large raindrops appeared on the ground for hailstones melting during falling. In the front of these two severe convective clouds, the large drop (>3 mm) ends increased firstly with raindrop spectrum boarding, showing double or multi-peaks. While the strong center of convective cloud was moving closer, the concentration of small rain drops (≤ 1 mm) increased in magnitude, which was related to the separate fall tracks of large and small raindrops caused by the strong environmental vertical wind shear in the front of convective cloud. In the hail shooting or heavy precipitation stage, the hailstones had low density and the raindrop spectrums showed weak double peaks at Yongding Station, while single-peak presented at Zhangping Station. The large drops at the two stations in this stage were mostly caused by the melting from small hails. The double-peak structure of the raindrop spectrum after hail shooting was mainly caused by the collision of raindrops. The raindrop spectrums at the tail of the cloud became narrow, decreasing in magnitude with small particles.

Key words: dual polarization radar, precipitation phenomenon instrument, hail, raindrop spectrum

引 言

冰雹天气是华南地区主要气象灾害之一,具有生命史短、局地性强、突发性强等特点,常给农业生产带来严重的影响,因此冰雹云的识别一直是气象界的一大课题。研究冰雹的发生和发展,了解云内部微物理特征及冰雹分布谱的演变,对冰雹天气监测预警及人工防雹作业指挥和效果评估都具有重要意义。

近年来,新型遥感探测设备在灾害性天气中得到较好的应用。激光雨滴谱仪通过对地面降水粒子的自动识别,能够全天候自动观测降水粒子谱变化,谱特征能在一定程度上反映自然降水的物理结构及演变特征(Hu and Srivastava, 1995; Konwar et al, 2014; Wu et al, 2019; 蒋年冲等, 1986; 宫福久等, 1997; 石爱丽等, 2004; 余东升等, 2011; 林文等, 2016; 王俊和刘畅, 2019)。在降雹过程中的雨滴谱资料分析应用也有一定成果, Federer and Waldvogel(1975)基于雨滴谱观测数据分析了多细胞风暴的冰雹和雨滴特征分布,李聪等(2017)利用雨滴谱仪观测资料分析了南京一次冰雹天气降水粒子微结构特征,岳治国和梁谷(2018)结合激光粒子谱仪及天气雷达资料分析了降雹过程中粒子物理量随时间的演变特征,陶涛等(2020)利用雨滴谱观测资料对比分析了一次非典型强对流天气过程中降雨和降雹的微物理特征。激光雨滴谱仪是基于地面降雹粒子谱特征来反映冰雹粒子在云内物理的发展过程,双偏振雷达则可通过探测空中粒子的雷达回波参数来认识云的发展和演变规律,其相比常规天气雷达,还能探测到差分反射率因子(Z_{DR})、差分相移率(K_{DP})

及相关系数(CC)等偏振参数,通过对偏振参数分析可判断云中粒子的尺寸大小、形状、相态、降水类型等信息,有利于识别冰雹云,在研究冰雹云的微物理特征及动力结构等方面具有较好的应用价值。国内外学者应用双偏振雷达在冰雹云识别方面开展了许多研究, Aydin et al(1986)研究了基于 Z_{DR} 技术识别冰雹区的方法; Höller et al(1994)、Kumjian et al(2008)基于双偏振雷达参数,分别对 V 型风暴和超级单体风暴带来冰雹天气的动力结构和微观物理特征进行了研究;刘黎平等(1993)、曹俊武和刘黎平(2006)研究了双偏振雷达识别冰雹区的方法;冯晋勤等(2018)、潘佳文等(2020)利用厦门双偏振雷达资料研究了冰雹相态演变特征;林文等(2020)研究了不同强度降雹天气及非降雹天气双偏振参数特征。

利用雨滴谱仪资料联合双偏振雷达资料对灾害性天气发生发展及演变特征的研究工作仍不多,因此,本文利用地面及高空探测资料、地面雨滴谱仪、双偏振多普勒雷达等资料,对 2020 年 3 月 27 日龙岩永定区出现的一次冰雹天气的云物理特征及动力结构进行分析,并与同一天气系统下龙岩漳平发生的强降水水体及 2021 年 5 月 31 日龙岩上杭县发生的暖区暴雨云系进行对比分析,研究冰雹云和非雹云的双偏振参量及地面降水粒子谱特征,为短时临近预报预警及有效实施人工防雹作业提供相关依据。

1 资料处理及天气背景分析

1.1 资料和方法

本文所使用的资料主要包含冰雹发生当日的高

空和地面天气资料,经过数据质量控制的龙岩 S 波段双偏振雷达资料及龙岩永定、漳平国家基准气象站降水现象仪资料。

DSG4 降水现象仪是一种采用现代激光技术的光学测量系统(探头同 Pasivel 第二代激光雨滴谱仪),根据降水粒子对激光信号的衰减影响程度,测量和计算降水粒子的直径 D 和下落末速度 V ,共有 32 个尺度等级和 32 个速度等级,其中粒子速度测量范围为 $0.050\sim 20.800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,粒径测量范围为 $0.062\sim 24.5\text{ mm}$,采样间隔为 1 min ,基于降水粒子的速度-尺度谱分布可对雨、阵雨、毛毛雨、雨夹雪、冰雹等降水现象类型进行分类识别。

参考 Yuter et al(2006)、Friedrich et al(2013)、Jia et al(2019)的方法先对所用观测数据进行质量控制:(1)剔除仪器前两档($D<0.3\text{ mm}$)的观测数据;(2)选取原始粒子数大于 10 个;(3)剔除掉强风造成慢落速大滴($V<1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且 $D>5\text{ mm}$)的观测误

差;(4)剔除雨滴在仪器探头溅散(V 低于雨滴线向下 60% 下限且 $D<2\text{ mm}$)造成的观测误差;(5)剔除仪器采样区边缘不完整观测的降水粒子(V 高于雨滴线向上 60% 上限且 $D<8\text{ mm}$)造成的误差。

冰雹过程中降水粒子的相态为固态和液态,冰雹的不同形状导致了不同的下落末速度-直径关系,本文中雨滴、冰雹的下落末速度选用前人提出的理论公式来表示,具体见表 1,其中为了区分大雨滴和小冰雹(直径在 $5\sim 8\text{ mm}$),使用雨的下落末速度-直径关系和冰雹之间的平均值,即冰雹低密度式(2)(Knight and Heymsfield, 1983)。根据 Niu et al(2010)和 Jia et al(2019)的方法对不同粒子的下落末速度进行修正,采用订正系数为 $(\rho_0/\rho)^{0.5}$ (ρ 为实际空气密度, ρ_0 为标准大气空气密度),永定和漳平根据地面自动站该次过程中的平均温度、气压计算出订正系数为 1.05。

表 1 雨滴、冰雹下落末速度-尺度关系

分类	直径范围	理论公式	文献来源
雨	$D<8\text{ mm}$	低密度($0.31\sim 0.61\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$): $V=9.65-10.3e^{-0.6D}$ (1) $V=8.445(0.1D)^{0.553}$ (2) $V=12.43(0.1D)^{0.5}$	Gunn and Kinzer(1949)
雹	$D>5\text{ mm}$	高密度($0.82\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$): $V=10.58(0.1D)^{0.267}$	Knight and Heymsfield(1983)

经过处理后计算本文中的雨滴谱参量为:雨滴总数浓度 NT (单位: $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$);雨强 $R = \frac{\rho\pi}{6}N(D)D^3V(D)dD$, 其中: $N(D)$ 为单位尺度间隔下单位体积雨滴数(单位: $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{mm}^{-1}$), $V(D)$ 为各档粒子下落末速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); D 为雨滴直径(单位: mm)。

1.2 天气实况及环流背景

从 2020 年 3 月 27 日 08 时(北京时,下同)500 hPa 高空图来看(图略),西风槽和南支槽东移,龙岩市受南支槽前西南气流影响,福建省东部 $T-T_d>15^\circ\text{C}$,龙岩市东南部存在部分干区;925~700 hPa 切变东移南压,龙岩市受切变南侧西南气流影响,有较强的垂直上升速度,西南气流带来充沛的水汽,低层比湿为 $10\sim 12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,湿度条件较好,龙岩市东南部存在部分上干下湿的不稳定层结,为降雹提供有利条件;从地面来看,西路和东路冷空气逐渐南下影响福建

省,高层冷空气叠加在低层暖湿气流上,大气层结处于不稳定状态,为降雹提供了热力条件;从 08 时龙岩站探空曲线图表明, 0°C 层高度为 4031 m, -20°C 层高度为 7640 m,在春季两层对应高度较为适宜,有利于冰雹天气的发生;CAPE 值为 $1929\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, K 指数为 36°C ,对流储存能量较大,层结不稳定明显。从风廓线资料分析可见(图略),垂直上升速度大值中心与风速大值中心基本重合,17—18 时垂直风切变约为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,18—19 时龙岩站上空高层风速达 $22.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而 900 hPa 到地面风速在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,高低空风速差超过 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,达到中至强垂直风切变的标准,激发高低层能量交换,促进对流发展。

15:03—21:00 龙岩市中西部出现剧烈的强对流天气,部分地区出现短时强降水和局地小冰雹,其中永定气象站于 18:05—18:07 人工观测到冰雹,其直径约为 8 mm ,持续时间约为 2 min ,小时雨强大于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$;漳平自动站小时累计雨量超过 30 mm ,

为短时强降水天气。

2 双偏振雷达特征分析

永定区 18 时左右的降雹过程是受强回波单体移入影响。根据双偏振雷达组合反射率监测显示(图 1), 16:47(图 1a)强对流单体位于广东梅州境内, 经过回波分裂增强, 回波强度达 60 dBz, 强中心高度约为 5.1 km, 云体大于 60 dBz 的回波强度持续 10 个体扫。17:37(图 1b)风暴单体移至永定西南边界, 略有减弱, 回波强中心为 60.5 dBz, 高度降至 3.9 km, 速度图上开始出现明显辐合区。17:43(图 1c)强回波单体移入永定峰市镇, 受辐合影响, 回波又出现显著增强至 62.5 dBz, 强中心高度出现跃增再次发展至 7.3 km。17:48(图 1d)强回波进一步发展到成熟阶段, 强中心达 65.0 dBz(高度达 7.3 km)。从剖面(图 2a)来看, 大于 60 dBz 的强回波已发展到 -20℃ 高度, 且存在旁瓣回波, 在入流一侧存在有界弱回波区; 速度零线对应强回波, 在速度

入流即强回波前部存在强度为 2~4 dB 的 Z_{DR} 弧, 其从地面发展延伸至 7~8 km, 对应着较强环境风切变(Kumjian and Ryzhkov, 2008); -20~0℃ 强回波区对应的 CC 值为 0.8~0.96, 说明此处已有冰雹粒子存在; 从 K_{DP} 图中可以看到强度达 $2\sim3^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ 的 K_{DP} 柱, 最高至 7~8 km, 说明云中已出现大粒子下泄拖曳造成的强下沉气流。17:59(图 1e)云体风速辐合减弱, 强回波单体再次分裂为双核, 西侧强回波前沿移至永定城区, 强中心达 62.5 dBz(图 2b), 其高度下降至 4.3 km, 对应的 Z_{DR} 高值区下降, 对应的 CC 的低值区以及 K_{DP} 柱同样下降至 0℃ 层, 说明此时云内冰雹粒子开始大量下落。18:05(图 1f)雷达回波移至永定站上空(即测站观测到的降雹期), 云体强度较上一时刻减弱, 最强回波减至 58 dBz(图 2c), 近地面 Z_{DR} 增大至 4 dB, CC 值仍在 0.9~0.92, 说明此时地面降水粒子为大雨滴和小冰雹混合, 与地面观测相符。随着降水过程的持续, 云体回波整体变松散, 风暴减弱消亡(图 1f)。

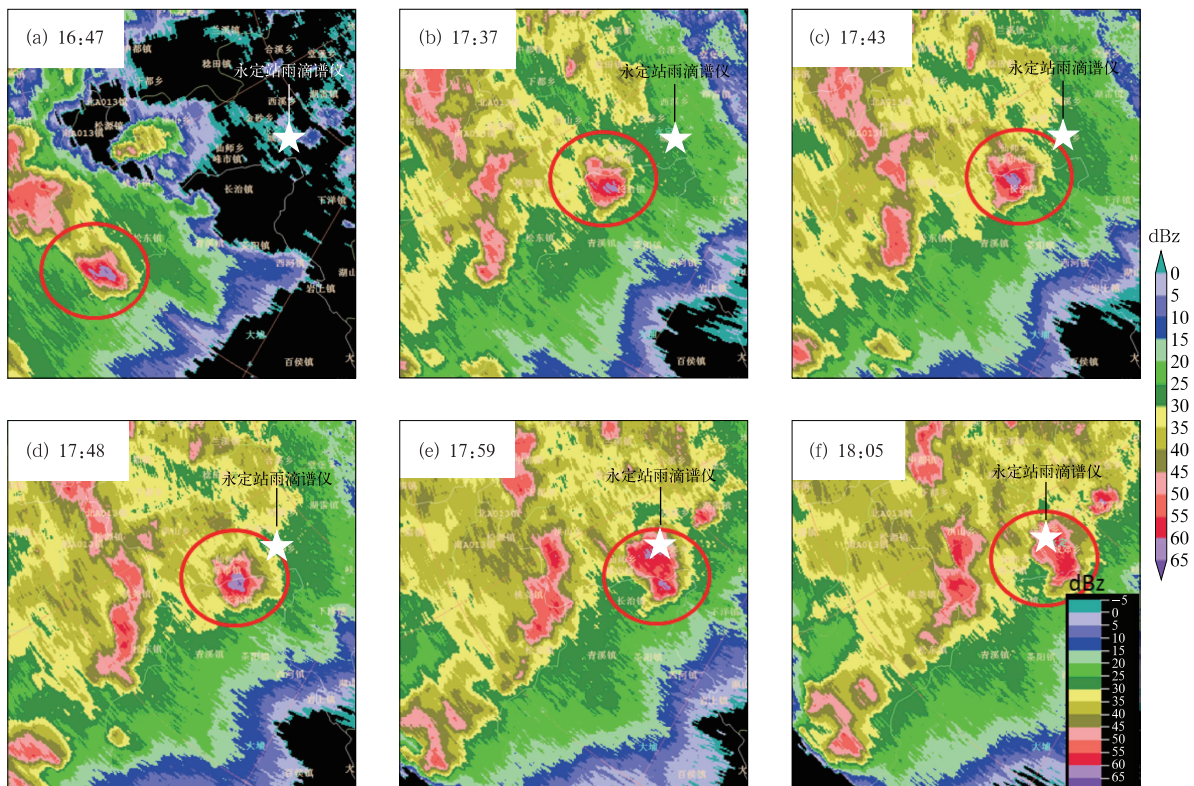


图 1 2020 年 3 月 27 日 16:47—18:05 永定强对流天气过程组合反射率 CR 演变 (红色圆圈所示为此次观测的雷达回波单体)

Fig. 1 The composite reflectivity evolution of severe convective clouds in Yongding from 16:47 BT to 18:05 BT 27 March 2020 (The red circle mark is the radar echo cells observed this time)

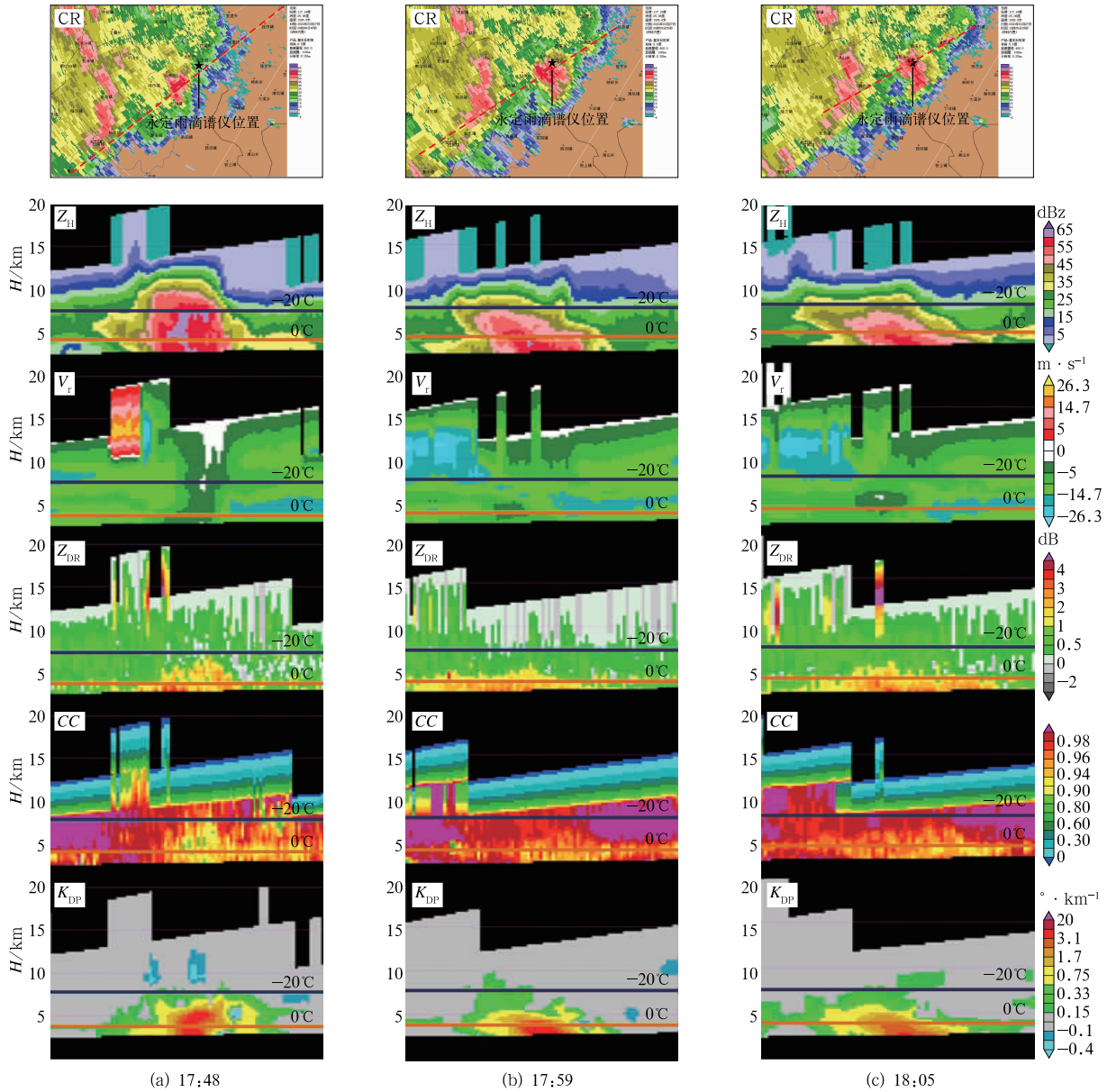


图 2 2020 年 3 月 27 日 (a)17:48, (b)17:59, (c)18:05 永定站强对流单体中心沿径向剖面的双偏振雷达回波特征 (Z_H : 水平反射率因子, V_r : 径向速度, Z_{DR} : 差分反射率因子, CC : 相关系数, K_{DP} : 差分相移率; 组合反射率 CR 图中红色虚线为相应的剖面位置, 五角星为永定站雨滴谱仪位置; 下同)

Fig. 2 Dual polarization radar echo characteristics along the radial profile of the center of the severe convection cell at Yongding Station at (a) 17:48 BT, (b) 17:59 BT, (c) 18:05 BT 27 March 2020 (Z_H : horizontal reflectivity factor, V_r : radial velocity, Z_{DR} : differential reflectivity factor, CC : correlation coefficient, K_{DP} : differential phase shift rate; The red dotted lines in the combined reflectivity CR diagram are the position of the radar profile, the star mark is the location of the raindrop spectrometer at Yongding Station; the same below)

相近时刻, 18:27 左右漳平本站出现较明显短时强降水, 其回波单体发展与永定站较为相似, 同样由外县移入经过单体分裂、发展加强, 因此选取该片区强回波块与永定降雹单体进行对比。该云系于 15:46 在漳州奎洋镇发展成多单体, 向东北方向移

动并逐渐加强; 17:26 西侧分裂出强对流单体, 移至漳平南部边界, 此时回波强度达 60 dBz, 强中心高度在 1.8 km。强对流云体在移动过程中继续发展增强, 18:11(图 3a)强回波中心超 65.0 dBz, 最强在 0°C 层附近, 对应的 CC 值约为 0.85, Z_{DR} 接近 0, 此

处有冰雹出现。18:16(图 3b)云体继续加强,回波顶高突破 -20°C 层,最大回波强度仍大于 60 dBz, K_{DP} 柱高度降低,近地层 K_{DP} 增大至 $5^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$, Z_{DR} 减小为 2~2.5 dB 且 CC 为 0.94 以上,说明此时地面以强降水为主。18:27(图 3c)回波单体移入漳平本站上空,

回波强度仍可达 63 dBz,但其高度下降至 2.4 km, K_{DP} 柱高度降低,近地层 K_{DP} 增大至 $5^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$, Z_{DR} 减小为 2~2.5 dB 且 CC 为 0.94 以上,说明此时地面以强降水为主。

为更好地分析冰雹等强对流降水云系的双偏振参数特征,选取 2021 年 5 月 31 日龙岩上杭县发生的暖切南侧西南气流影响产生的暖区暴雨云系进行对比分析。此次过程中,上杭县蓝溪镇 11—12 时的小时雨量达 52.8 mm。从 08 时探空资料表明 0°C

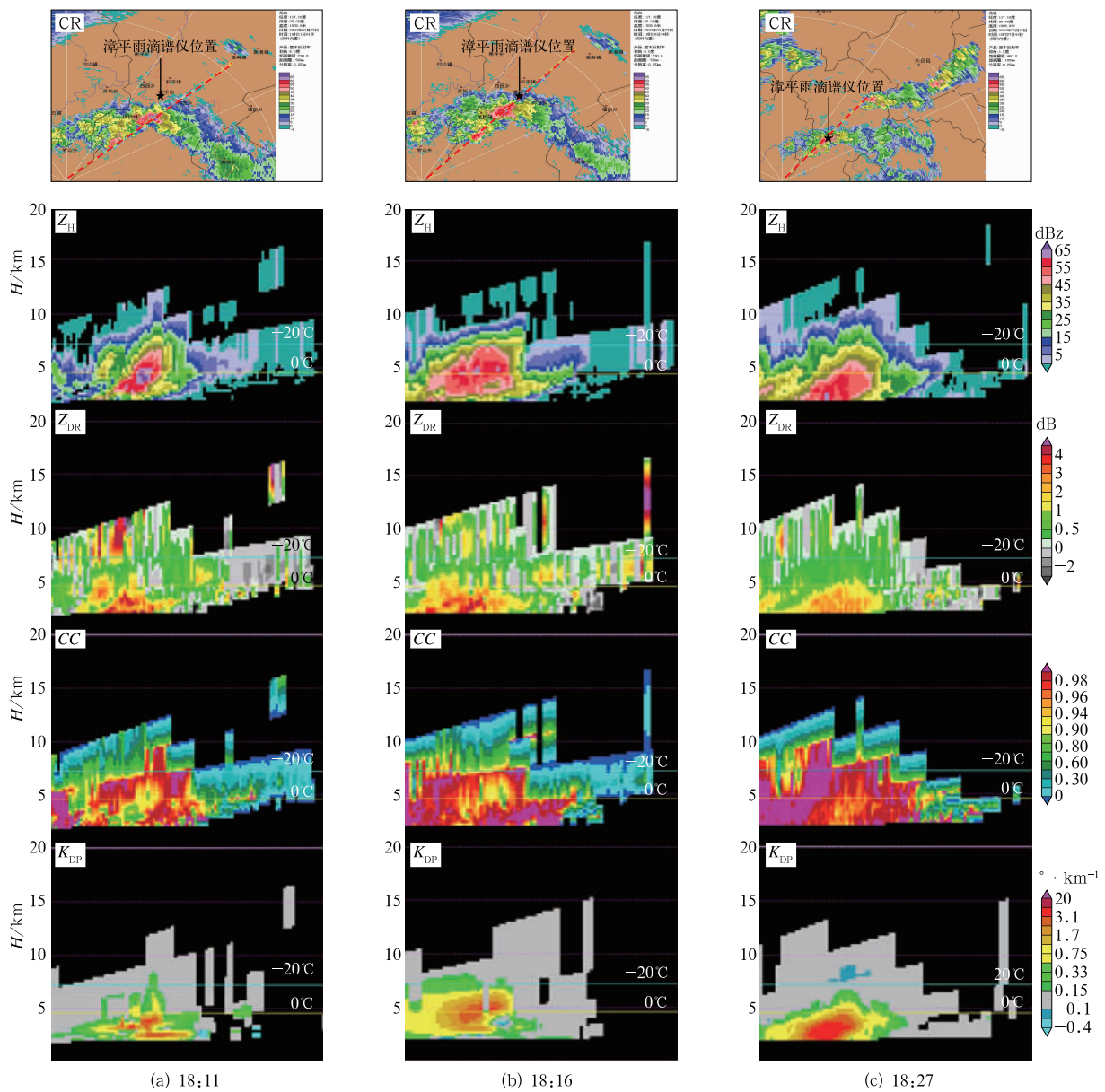


图 3 2020 年 3 月 27 日 (a)18:11, (b)18:16, (c)18:27 漳平站强对流单体中心沿径向剖面的双偏振雷达回波特征
Fig. 3 Dual polarization radar echo characteristics along the radial profile of the center of the severe convection cell at Zhangping Station at (a) 18:11 BT, (b) 18:16 BT, (c) 18:27 BT 27 March 2020

层高度为 5.3 km, -20°C 层为 9 km。从雷达回波来看, 31 日 09:30 前后龙岩西南部有多单体发展, 11:02 在上杭蓝溪镇西南方向有强回波合并加强发展, 并沿东北方向向蓝溪镇靠近(图 4a), 云系最强回波强度为 51.5 dBz, 强中心最高为 5.8 km, K_{DP} 柱发展高度也发展至 5.8 km, 除了在 0°C 层附近(CC 接近

0.95 且 Z_{DR} 为 1~2.5 dB) 有明显的融化层亮带特征外, 其余高度 $CC > 0.98$, 无冰雹特征; 11:13—11:35 回波块移入蓝溪镇上空维持(图 4b), 最强回波强度为 54 dBz, 其高度达 5.4 km, K_{DP} 柱发展高度为 5.5 km, 此时高空仍无冰雹特征。与永定站冰雹云、漳平短时强降水个例对比可见, 暖区降水云系强

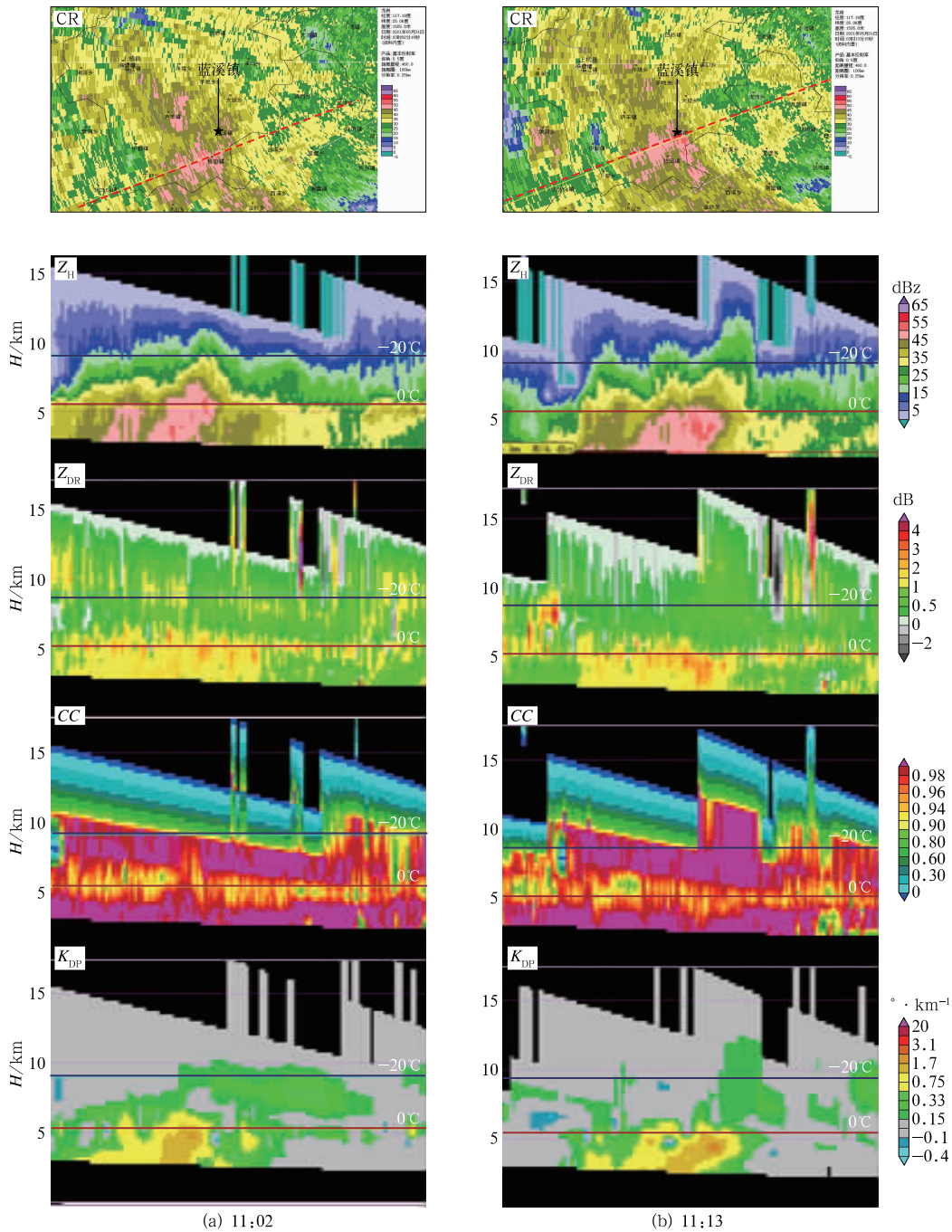


图 4 2021 年 5 月 31 日 (a) 11:02, (b) 11:13 蓝溪镇暖区降水云中心沿径向剖面的双偏振雷达回波特征

Fig. 4 Dual polarization radar echo characteristics along the radial profile of the warm-sector precipitation cloud center in Lanxi Town at (a) 11:02 BT, (b) 11:13 BT 31 May 2021

回波主体大部分位于 0℃ 以下, 强回波、 Z_{DR} 大值区、 K_{DP} 柱发展高度相较前两个强对流云系低, 偏向暖云降水机制主导; 而永定站和漳平站的强对流降水则更多包含了冰相降水过程。

3 强对流雨滴谱特征分析

3.1 微物理参数的演变

从降水粒子数浓度、最大直径和降水雨强随时间的变化可见(图 5a), 永定站雨滴谱仪记录的最大冰雹直径为 7.5 mm, 这与人工观测的直径 8 mm 基本一致。17:43—17:54 受强回波单体前侧弱回波影响, 地面出现了零星弱降水, 此时雨滴尺度小、数浓度低。17:54—18:02 为强回波单体前部降水, 雨滴直径显著增大, 但数浓度增长较缓慢(93~204 个· m^{-3}), 说明强回波前部降水以数量少的大滴为主。随着云体主体回波进入永定站上空, 18:03 个别降水粒子直径达到 7.5 mm, 平均直径为 1.187 mm, 含

水量及雨强也达到第一个小峰值, 数浓度开始增大。18:04 粒子最大直径减小至 5 mm, 平均直径减小至 0.937 mm, 含水量略有减小, 数浓度才出现第一个峰值, 此时降水以高浓度的雨滴组成。18:05—18:07 地面降水粒子最大直径及平均直径均再次达到峰值, 分别为 7.5 mm、1.375 mm, 含水量也达到峰值 56.64 $g \cdot m^{-3}$, 同时数浓度又出现降低, 此时人工观测到冰雹。18:08 以后粒子最大直径及平均直径均减小, 同时数浓度再次增大到第二峰值。随着强回波单体移出, 降水粒子数浓度快速减小, 粒子尺度逐步减小。同时漳平站降水的雨滴谱参量演变与永定站类似(图 5b), 18:05 对流单体前侧弱回波区, 雨滴尺度小、数浓度低。18:20—18:25 单体前部出现 5.5 mm 的大雨滴, 含水量较小、数浓度较低。18:27—18:30 回波强中心移入后, 降水粒子最大直径、含水量和雨强均达到最大, 与永定降雹不同的是粒子平均直径减小, 而雨滴数浓度同时也达最大。18:32 随着强回波单体移出, 降水粒子也是直径逐渐减小, 含水量降低, 数浓度迅速下降。

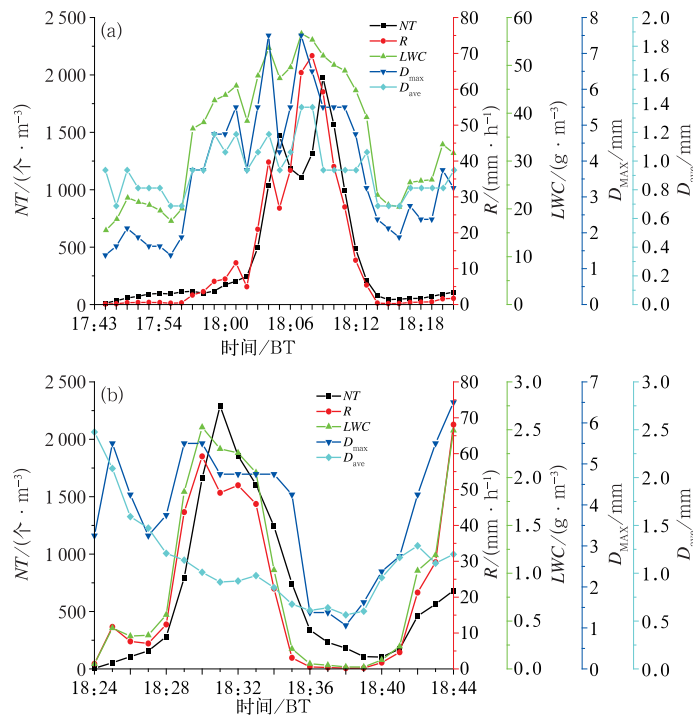


图 5 2020 年 3 月 27 日(a)永定站 17:43—18:20 和(b)漳平站 18:24—18:44 降水粒子参数(数浓度 NT 、雨强 R 、含水量 LWC 、最大直径 D_{max} 、平均直径 D_{ave})随时间的变化

Fig. 5 Variation of precipitation particle parameters (NT , R , LWC , D_{max} , D_{ave}) with time at (a) Yongding Station from 17:43 BT to 18:20 BT and (b) Zhangping Station from 18:24 BT to 18:44 BT 27 March 2020

3.2 降水粒子谱的特征对比

由于永定站降水包含液相和冰相粒子,漳平站通过双偏振雷达分析判断为液相降水,因此分析了永定和漳平两站降水期间的降水粒子速度-尺度谱分布来研究两站降水粒子的相态(图 6),图中雨滴线、低密度雹 1 线、低密度雹 2 线、高密度雹线为根据表 1 公式计算所得。永定站受云体前侧影响时(图 6a),雨滴下落末速度和尺度的离散度不大,均匀分布在理论雨滴线两侧,整体数浓度较小;受强回波主体影响时,雨滴下落末速度和尺度的离散度加大(图 6b),有样本出现在低密度雹 1 线上,根据 Friedrich et al(2013)结论认为低密度雹 2 线和高密度雹线在粒子直径 5~8 mm 仍以大雨滴为主,因此此时地面观测到的冰雹可判断为低密度冰雹;降雹后(图 6c),强回波主体后部降水粒子又均匀分布在理论雨滴线两侧,基本为液相,而数浓度则较之前显

著增加。漳平站的降水粒子下落末速度-尺度图(图 6d)与永定冰雹云后部降水(图 6c)近乎类似,判断其为以雨滴为主的降水,与双偏振雷达分析结论一致。

从永定站地面降水粒子尺度谱的时间变化情况来看,17:55—18:00(图 7a,7b,7c)强回波前部雨滴谱迅速变宽,谱型从单峰向双峰、多峰演变,此时 62.5 dBz 强中心高度为 4.3 km,对应的 Z_{DR} 高值区以及 K_{DP} 柱均下降至 0°C 层,可见此时云内冰雹粒子开始下落。18:02—18:03(图 7d,7e)小雨滴数目呈数量级增长,大雨滴数目有所增长,最大直径达 7.5 mm,18:03(图 7e)的粒子速度-尺度谱中已有个别粒子分布在低密度雹 1 线上(图略),此刻已有小冰雹夹杂在大雨滴中,但由于数量较少,未被观测到。18:04(图 7f)粒子尺度谱宽变窄,大滴数减少且未有冰雹出现,小雨滴数目进一步增长达到最大值 1469.8 m^{-3} ,此刻碰并破碎机制产生大量的小雨滴。

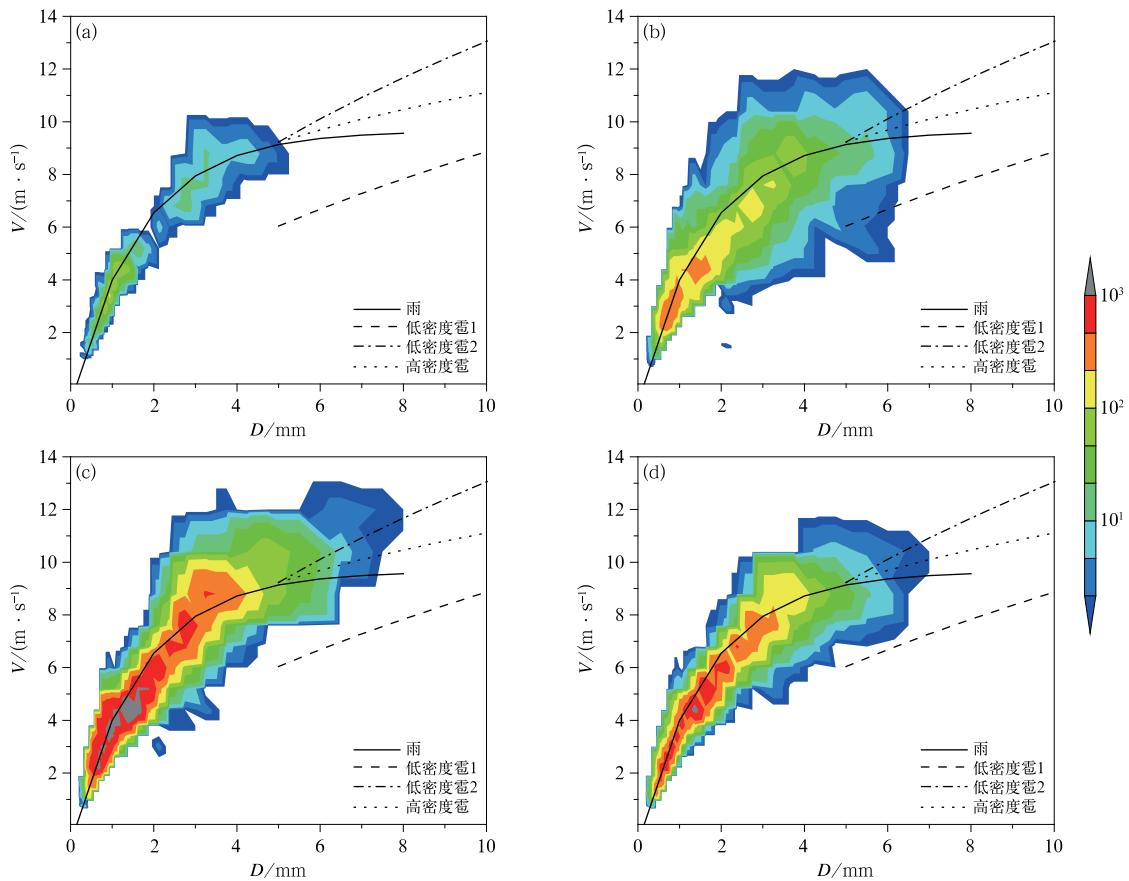


图 6 2020 年 3 月 27 日(a,b,c)永定站(a)17:43—18:02,(b)18:03—18:08,(c)18:09—18:20,和(d)漳平站 18:24—18:40 的降水粒子速度-尺度图
(填色为单位尺度间隔下单位体积雨滴数,单位: $\text{个} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$)

Fig. 6 Velocity-scale diagrams of precipitation particles at (a, b, c) Yongding Station in (a) 17:43—18:02 BT, (b) 18:03—18:08 BT, (c) 18:09—18:20 BT, and (d) Zhangping Station in 18:24—18:40 BT 27 March 2020 [colored: $N(D)$, unit: $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$]

18:05—18:07 为明显的雨夹雹阶段, 小雨滴数目有所下降(图 7g, 7h, 7i), 谱宽增大至 7.5 mm, 落在低密度雹 1 线附近的粒子数较 18:03 多(图略), 最强回波为 58 dBz、 Z_{DR} 及 K_{DP} 最大值区均下降至 0°C 层以下, 说明降雹发生, 因此能被地面人工观测到。18:08 后以降水为主, 粒子尺度谱谱宽逐渐收窄, 呈现由双峰向单峰结构演变, 小粒子数浓度减少幅度

较为显著(图 7j)。

漳平站当 18:24—18:28 强回波靠近时, $Z_H > 55$ dBz 强中心高度为 3.9 km, 对应 K_{DP} 柱及 Z_{DR} 柱在 4.1 km 左右, 可见粒子下落、以降水为主, 云体前部雨滴谱与永定站一样也是呈现双峰结构, 但小雨滴的数浓度明显较永定少, 第二峰与第一峰强度相当(图 8a, 8b)。随着主体回波影响, 18:29—18:31 最强

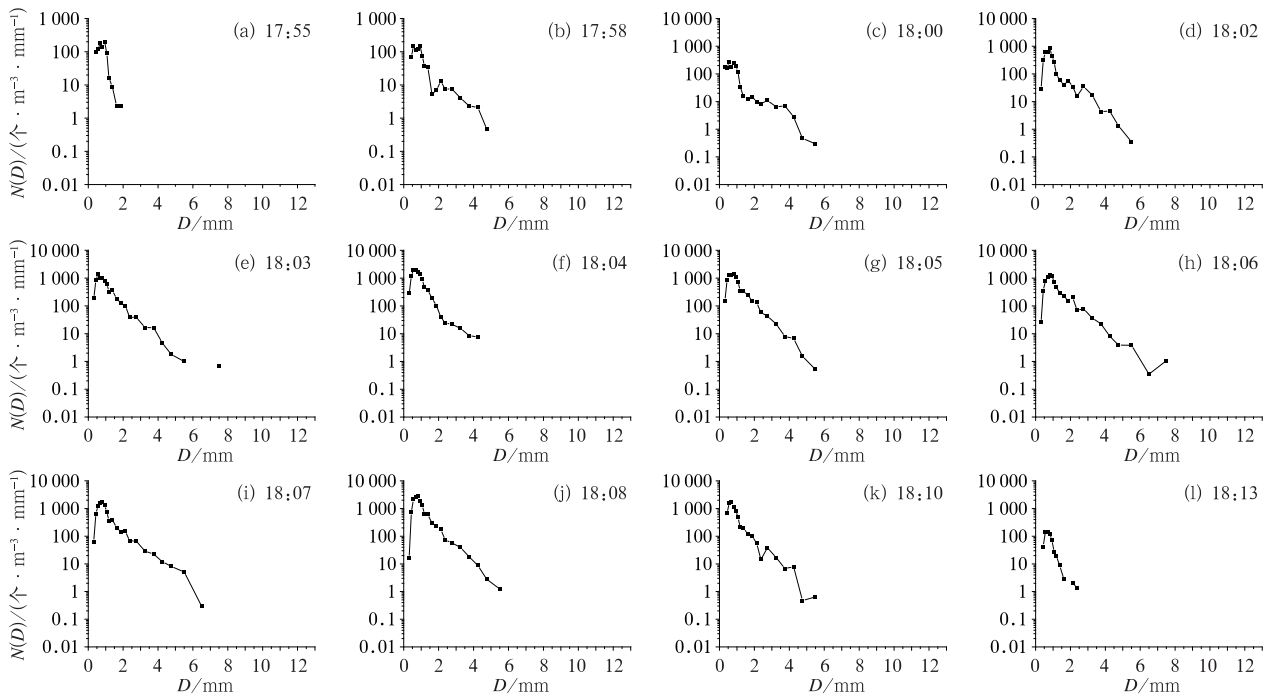


图 7 2020 年 3 月 27 日 17:55—18:13 永定站雨滴谱演变

Fig. 7 Variation of raindrop size spectrum at Yongding Station from 17:55 BT to 18:13 BT 27 March 2020

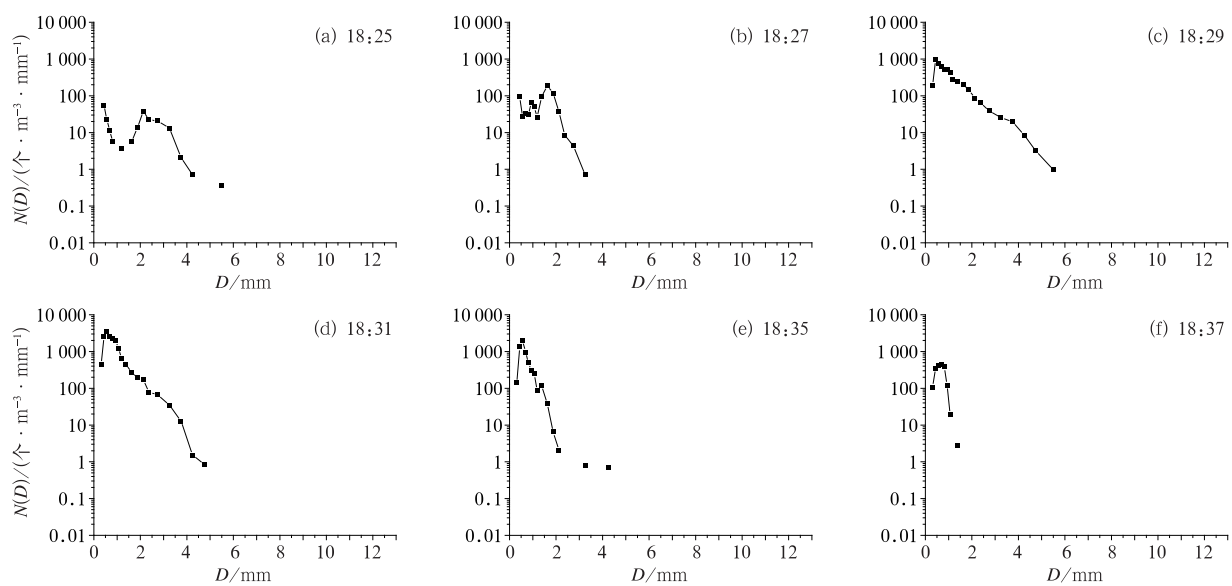


图 8 2020 年 3 月 27 日 18:25—18:37 漳平站雨滴谱演变

Fig. 8 Variation of raindrop size spectrum at Zhangping Station from 18:25 BT to 18:37 BT 27 March 2020

降水期,强回波高度降低至 3.1 km, K_{DP} 柱及 Z_{DR} 柱高度也降低,雨滴谱迅速增宽至 5.5 mm,小滴端数浓度较之前呈量级增长,但滴谱反而呈单峰分布(图 8c,8d)。随着回波移出减弱,雨滴谱谱宽变窄,雨滴数浓度减小(图 8e,8f),与永定类似,小粒子数浓度减少幅度较为显著。

综合永定和漳平两站的滴谱瞬时变化来看,在强对流云体前部雨滴谱增宽都是大滴端先增加,出现明显的双峰或多峰结构,随着云体强中心的靠近才使小滴端数浓度呈量级增多,这与强对流云体前部垂直环境风切变较强导致大、小雨滴下落轨迹及落区出现显著分离,与 Z_{DR} 弧结构(Kumjian and Ryzhkov,2008;Jung et al,2010;Dawson II et al,2014;2015)类似,即云体前部为浓度不高大雨滴构成,靠近强中心则出现高浓度的小雨滴。在降雹或强降水阶段,雨滴谱呈现单峰或幅度较之前弱的双峰结构,根据 0℃层至地面的双偏振参量 CC 值在 0.95 左右可判断此时的大滴多为小冰雹或霰融化造成(图 2c,图 3c);在降雹后,降水粒子谱先呈现双峰结构,该部位对应的 CC 值接近 0.99,因此可判断双峰结构主要由雨滴的碰并造成;随着云体的移出滴谱逐渐谱宽收窄,呈现由双峰减弱向单峰结构演变,小粒子数浓度呈量级减少。

4 结 论

2020 年 3 月 27 日在槽前西南气流影响的背景下,龙岩东南部出现强对流天气过程,本文基于双偏振雷达和地面降水粒子谱对在永定站有观测到冰雹的云体以及同时发生在漳平只观测到短时强降水的云体进行分析,主要有以下结论:

(1)永定的降雹单体在降雹前出现回波高度跃增,存在有界弱回波区,在云体移动方向前部出现了强度为 2~4 dB 的 Z_{DR} 弧,内部出现了发展高度较高的 K_{DP} 柱,最高至 7~8 km;而漳平的强对流云体也可观测到 K_{DP} 柱,但发展高度较低,空中出现了冰雹但在下落过程中融化,地面以大雨滴强降水为主。

(2)在强对流云体前部雨滴谱增宽呈现双峰或多峰结构,此时大滴端先增加,随着云体强中心的靠近才是小滴端($D \leq 1$ mm)数浓度呈量级增多,这与云体前部强环境垂直风切导致的大、小雨滴降落轨迹分离有关。

(3)在降雹或强降水阶段,永定站观测到的冰雹

为低密度冰雹,滴谱呈现幅度较弱的双峰结构,漳平站则是呈现单峰结构,此时两站的大滴($D > 3$ mm)多为小冰雹融化造成。

(4)在降雹后降水粒子谱的双峰结构主要由雨滴的碰并造成,云体后部降水的滴谱谱宽收窄伴随着小粒子数浓度呈量级减少。

参考文献

- 曹俊武,刘黎平,2006. 双线偏振多普勒天气雷达识别冰雹区方法研究[J]. 气象,32(6):13-19. Cao J W, Liu L P, 2006. Hail identification with dual-linear polarimetric radar observations[J]. Meteor Mon,32(6):13-19(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).
- 宫福久,刘吉成,李子华,1997. 三类降水云雨滴谱特征研究[J]. 大气科学,21(5):607-614. Gong F J, Liu J C, Li Z H, 1997. Study of the raindrop size distributions for three types of precipitation [J]. Sci Atmos Sin,21(5):607-614(in Chinese).
- 蒋年冲,卞礼智,邢克溥,1986. 梅雨锋暴雨的雨滴谱分析[J]. 气象,12(5):6-10. Jiang N C, Bian L Z, Xing K P, 1986. Analysis of raindrop spectrum of Meiyu front rainstorm[J]. Meteor Mon,12(5):6-10(in Chinese).
- 李聪,姜有山,姜迪,等,2017. 一次冰雹天气过程的多源资料观测分析[J]. 气象,43(9):1084-1094. Li C, Jiang Y S, Jiang D, et al, 2017. Observation and analysis of a hailstorm event based on multi-source data[J]. Meteor Mon, 43(9): 1084-1094 (in Chinese).
- 林文,林长城,李白良,等,2016. 登陆台风麦德姆不同部位降水强度及谱特征[J]. 应用气象学报,27(2):239-248. Lin W, Lin C C, Li B L, et al, 2016. Rainfall intensity and raindrop spectrum for different parts in landing typhoon Matmo[J]. J Appl Meteor Sci, 27(2):239-248(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).
- 刘黎平,张鸿发,王致君,等,1993. 利用双线偏振雷达识别冰雹区方法初探[J]. 高原气象,12(3):333-337. Liu L P, Zhang H F, Wang Z J, et al, 1993. Preliminary research for method of hail detection with C band dual linear polarization radar[J]. Plateau Meteor,12(3):333-337(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[J]. 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

- [J]. Meteor Mon, 46(12):1608-1620(in Chinese).
- 石爱丽,郑国光,黄庚,等,2004. 2002年秋季河南省层状云降水的雨滴谱特征[J]. 气象, 30(8):12-17. Shi A L, Zheng G G, Huang G, et al, 2004. Characteristics of raindrop spectra of stratiform cloud precipitation in autumn 2002 in Henan Province[J]. Meteor Mon, 30(8):12-17(in Chinese).
- 陶涛,张立新,桑建人,等,2020. 六盘山区一次非典型冰雹天气过程微物理量特征的分析[J]. 干旱区地理, 43(2):299-307. Tao T, Zhang L X, Sang J R, et al, 2020. A case analysis of microphysical characteristics of atypical hail formation over Liupan Mountain China[J]. Arid Land Geogr, 43(2):299-307(in Chinese).
- 王俊,刘畅,2019. 一次拖曳型飑线过程雨滴谱演变特征研究[J]. 海洋气象学报, 39(2):43-57. Wang J, Liu C, 2019. Study on evolution characteristics of raindrop size distribution during a trailing stratiform squall line[J]. J Mar Meteor, 39(2):43-57(in Chinese).
- 余东升,徐青山,徐赤东,等,2011. 雨滴谱测量技术研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 6(6):403-408. Yu D S, Xu Q S, Xu C D, et al, 2011. Progress of measurement of raindrop size distribution[J]. J Atmos Environ Opt, 6(6):403-408(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 Wei-bei Area of Shaanxi Province[J]. Plateau Meteor, 37(6):1716-1724(in Chinese).
- Aydin K, Seliga T A, Balaji V, 1986. Remote sensing of hail with a dual linear polarization radar[J]. J Appl Meteor Climatol, 25(10):1475-1484.
- Dawson II D T, Mansell E R, Jung Y, et al, 2014. Low-level ZDR signatures in supercell forward flanks: the role of size sorting and melting of hail[J]. J Atmos Sci, 71(1):276-299.
- Dawson II D T, Mansell E R, Kumjian M R, 2015. Does wind shear cause hydrometeor size sorting? [J]. J Atmos Sci, 72(1):340-348.
- Federer B, Waldvogel A, 1975. Hail and raindrop size distributions from a Swiss multicell storm[J]. J Appl Meteor Climatol, 14(1):91-97.
- 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.
- Gunn R, Kinzer G D, 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air[J]. J Atmos Sci, 6(4):243-248.
- Höller H, Hagen M, Meischner P F, et al, 1994. Life cycle and precipitation formation in a hybrid-type hailstorm revealed by polarimetric and Doppler radar measurements[J]. J Atmos Sci, 51(17):2500-2522.
- Hu Z L, Srivastava R C, 1995. Evolution of raindrop size distribution by coalescence, breakup, and evaporation: theory and observations[J]. J Atmos Sci, 52(10):1761-1783.
- Jia X C, Liu Y G, Ding D P, et al, 2019. Combining disdrometer, microscopic photography, and cloud radar to study distributions of hydrometeor types, size and fall velocity[J]. Atmos Res, 228:176-185.
- Jung Y, Xue M, Zhang G F, 2010. Simulations of polarimetric radar signatures of a supercell storm using a two-moment bulk microphysics scheme[J]. J Appl Meteor Climatol, 49(1):146-163.
- Knight N C, Heymsfield A J, 1983. Measurement and interpretation of hailstone density and terminal velocity[J]. J Atmos Sci, 40(6):1510-1516.
- Konwar M, Das S K, Deshpande S M, et al, 2014. Microphysics of clouds and rain over the Western Ghat[J]. J Geophys Res, 119(10):6140-6159.
- Kumjian M R, 2013a. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: description of the polarimetric radar variable[J]. J Operational Meteor, 1(19):226-242.
- Kumjian M R, 2013b. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part III: artifacts [J]. J Operational Meteor, 1(21):265-274.
- Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(7):1940-1961.
- Niu S J, Jia X C, Sang J R, et al, 2010. Distributions of raindrop sizes and fall velocities in a semiarid plateau climate: convective versus stratiform rains[J]. J Appl Meteor Climatol, 49(4):632-645.
- 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.
- Wu Z H, Zhang Y, Zhang L F, et al, 2019. Characteristics of summer season raindrop size distribution in three typical regions of Western Pacific[J]. J Geophys Res, 124(7):4054-4073.
- Yuter S E, Kingsmill D E, Nance L B, et al, 2006. Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow[J]. J Appl Meteor Climatol, 45(10):1450-1464.

(本文责编:戴洋)