

李芳,刁秀广,2023. 不同类型强降水风暴低层双偏振参量对比分析[J]. 气象,49(9):1075-1084. Li F, Diao X G, 2023. Comparative analysis of low-level dual polarization parameters of different types of severe rainfall storm[J]. Meteor Mon, 49(9):1075-1084(in Chinese).

不同类型强降水风暴低层双偏振参量对比分析^{*}

李 芳^{1,2} 刁秀广^{1,3}

1 山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031

2 山东省济宁市气象局, 济宁 272000

3 山东省气象台, 济南 250031

提 要: 利用山东 S 波段双偏振多普勒天气雷达资料、探空资料和地面降水实况, 根据环境背景特征将强降水风暴分为雷暴大风(同时伴有强降水或冰雹)为主型(简称“混合型”)和单纯强降水为主型(简称“降水为主型”), 对两种类型风暴分别考虑三种分钟降水量级, 在六种不同情况下对强降水风暴的低层双偏振参量特征进行对比分析。结果表明: 随着分钟降水量级增大, 两种类型强降水风暴低层反射率因子(Z_H)和差分相移率(K_{DP})都随之增大, “降水为主型”风暴差分反射率(Z_{DR})和相关系数(CC)变化不明显, “混合型”风暴 Z_{DR} 和 CC 减小, 说明随着降水量级增大, “混合型”强降水风暴低层尺寸更大的冰雹数量增多, 导致 Z_{DR} 和 CC 减小; 对于 $2\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上高强度降水, “混合型”风暴低层 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 分别集中在 $50.5 \sim 57.0\text{ dBz}$ 、 $1.7 \sim 2.7\text{ dB}$ 、 $2.4 \sim 4.3^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, CC 在 0.960 以上, 而“降水为主型”风暴低层 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 分别集中在 $49.5 \sim 53.5\text{ dBz}$ 、 $1.2 \sim 2.1\text{ dB}$ 、 $2.5 \sim 3.9^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, CC 在 0.970 以上, 说明高强度降水时多数“混合型”风暴含有大量 $5 \sim 10\text{ mm}$ 左右的较小冰雹, 这些较小冰雹在低层融化为大雨滴使 Z_{DR} 值增大, 同时也使回波强度 Z_H 高于“降水为主型”; 相同分钟降水量级情况下, “混合型”风暴低层 Z_H 和 Z_{DR} 大于“降水为主型”, CC 小于“降水为主型”, 因为前者内部不仅存在较多 $5 \sim 10\text{ mm}$ 较小冰雹, 还存在一些大的冰雹粒子; 风暴低层较大的 K_{DP} 对两种类型强降水均有明显的指示意义。

关键词: 强降水, 双偏振雷达, 参量特征, 对比分析

中图分类号: P407, P416

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.072401

Comparative Analysis of Low-Level Dual Polarization Parameters of Different Types of Severe Rainfall Storm

LI Fang^{1,2} DIAO Xiuguang^{1,3}

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031

2 Jining Meteorological Office of Shandong, Jining 272000

3 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

Abstract: Based on the Shandong S-band dual polarization Doppler weather radar data, sounding data and surface precipitation observation as well as the environmental background features, severe rainstorms are divided into the thunderstorm gale (accompanied by severe precipitation or hail) dominated type (referred to as “mixed type”) and the simple severe precipitation dominated type (referred to as “precipitation dominated type”). Three types of minute precipitation magnitudes are considered for each type of rainstorm, and comparative analysis of the low-level dual polarization parameter characteristics of severe rainstorms in

^{*} 山东省自然科学基金项目(ZR2020MD053、ZR2022MD035、ZR2022MD088、ZR2022MD072)、山东省气象局科研项目(2021sdqzx09、2019sdqzx01、2019sdqxm19)共同资助

2022 年 8 月 26 日收稿; 2023 年 7 月 25 日收修定稿

第一作者: 李芳, 主要从事天气雷达应用研究. E-mail: lflifang_321@126.com

通讯作者: 刁秀广, 主要从事天气雷达应用研究. E-mail: radardxg@126.com

the six different scenarios is conducted in this paper. The results show that as the magnitude of minute precipitation increases, the low-level reflectivity factor (Z_H) and specific differential phase (K_{DP}) of both types of severe rainstorms increase. The differential reflectivity (Z_{DR}) and correlation coefficient (CC) of “precipitation dominated type” rainstorms do not show significant changes, while the Z_{DR} and CC of “mixed type” storms decrease. This indicates that with the increase in magnitude of precipitation, the number of large-size hails in the lower layers of “mixed type” severe rainstorms increases, resulting in the decrease in Z_{DR} and CC. For high-intensity precipitation above $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, the low-level Z_H , Z_{DR} , and K_{DP} of “mixed type” rainstorm are concentrated at $50.5\text{--}57.0 \text{ dBz}$, $1.7\text{--}2.7 \text{ dB}$, $2.4\text{--}4.3^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, and CC is above 0.960, while the low-level Z_H , Z_{DR} , and K_{DP} of the “precipitation dominated type” rainstorm are concentrated at $49.5\text{--}53.5 \text{ dBz}$, $1.2\text{--}2.1 \text{ dB}$, $2.5\text{--}3.9^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ with CC above 0.970. This means that most “mixed type” rainstorms contain a large amount of small-size hails around 5–10 mm during high-intensity precipitation. These smaller hailstones tend to melt into larger rain droplets in the lower layers, increasing the Z_{DR} value and also making the echo intensity Z_H higher than that of the “precipitation dominated type”. At the same minute precipitation level, the low-level Z_H and Z_{DR} of the “mixed type” rainstorm are greater than those of the “precipitation dominated type” storm, and CC is smaller than that of the “precipitation dominated type” storm. This is because the former owns not only more 5–10 mm smaller hailstone but also some large hail particles. The larger K_{DP} in the lower layer of rainstorms has obvious indicative significance for the two types of severe precipitation.

Key words: severe rainfall, dual-polarization radar, parametric characteristic, comparative analysis

引 言

暴雨特别是短时强降水是一种影响严重的灾害性天气,也是目前气象科学重点研究解决的难题之一(Chen et al, 2013; 肖靖宇等, 2022; 赵渊明和漆梁波, 2021)。连降暴雨或大暴雨常导致山洪爆发、水库垮坝、江河横溢、交通和电讯中断,给国民经济和人民生命财产带来严重危害。短时强降水天气时间尺度和空间尺度相对较小,且具有局地性特征,突发性强、致灾严重、预报难度大(侯淑梅等, 2020)。短时间内的强降水天气大多由中小尺度对流系统产生,其系统的形成和发展机理是天气预报业务及气象学者关注的重点与难点(王孝慈等, 2022; 吴照宪等, 2022)。

对于短时强降水的估测与外推,天气雷达是主要技术手段。单偏振天气雷达只能获取一个与降水强度相关的参数——反射率因子 Z , 对流性雨强估测最简单易行的方法是将对流性降水分为大陆强对流型和热带海洋型两种类型,分别采用不同的 Z - R 关系(俞小鼎, 2013)。但 Z - R 关系受雨滴谱影响较大,当雨滴谱随地域或降水类型发生变化时,使用单一的 Z - R 关系进行降水估测误差较大(陈静等,

2015)。相比之下,双偏振雷达参量(差分反射率因子 Z_{DR} 、比差分相移 K_{DP} 、相关系数 CC、退偏振因子 L_{DR} 等)对水凝物粒子的类型、形状、尺寸以及下落姿态都有不同的敏感度,这些特点有助于设定阈值以实现水凝物粒子的分类,使得双偏振多普勒天气雷达探测系统具有水凝物相态识别的能力,同时,基于多偏振参数的降水估测算法明显提高了定量降水估测精度(Hall et al, 1980; Gorgucci et al, 2000; Gianngrande and Ryzhkov, 2008; Zrnić and Ryzhkov, 1996; 陈超等, 2019)。液态雨滴的 Z_{DR} 随着直径增大而增大, Z_{DR} 大小主要取决于粒子的大小和形态; K_{DP} 对雨滴浓度较为敏感,雨滴浓度越高 K_{DP} 越大, K_{DP} 可很好地反映雷达取样体积内的液态含水量; CC 与粒子种类和形状有关,种类和形状的多样会导致 CC 降级,而纯雨的 CC 较大,一般大于 0.98 (Warning Decision Training Branch, 2013; 汪舵等, 2017)。

随着双偏振天气雷达技术的发展与应用,国内外学者开展了一系列基于双偏振参量的风暴结构与微物理特征研究(刘黎平等, 1996; Kumjian and Ryzhkov, 2008; Kumjian, 2013; Romine et al, 2008; 冯晋勤等, 2018; 刁秀广等, 2020; 2021; 2022; 李昭春等, 2021)。刘黎平等(2002)运用三个偏振量反演降

水强度和液态含水量,研究指出 Z_{DR} 和 K_{DP} 受滴谱变化影响较小。荀爱萍等(2019)利用厦门双偏振雷达资料,统计分析不同降水强度下的偏振参量特征,当降水类型为小/中雨时,平均 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 分别为 36 dBz、1.0 dB 和 $0.28^\circ \cdot \text{km}^{-1}$;当降水类型为大雨时,平均 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 分别为 44 dBz、1.4 dB 和 $0.63^\circ \cdot \text{km}^{-1}$;当降水类型为暴雨时,平均 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 分别为 49 dBz、1.7 dB 和 $1.32^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 。潘佳文等(2020)对一次强降水超级单体风暴个例分析表明,反射率因子梯度大值区附近存在一个浅薄的差分反射率因子大值区(Z_{DR} 弧), Z_{DR} 柱位于有界弱回波区的上方、主上升气流的东南侧, K_{DP} 柱位于主上升气流的西北侧,主要由大量混合相态水凝物造成,其位置与地面雨强中心存在较好的对应关系。申高航等(2021)利用雨滴谱及双偏振雷达资料对一次强降水过程不同时段进行了分析,发现 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。何清芳等(2022)对同时发生在两个地区的冰雹云和短时强降水风暴进行偏振对比分析,降雹和短时强降水风暴均发现了 K_{DP} 柱,但两者高度不同,短时强降水风暴的 K_{DP} 柱发展高度低于降雹天气过程。目前对于强降水双偏振特征研究仅限于一些个例分析,不同类型强对流双偏振参量的差异性对比分析较少。

本文以山东 SA 双偏振多普勒天气雷达(济南、青岛和济宁)资料为基础,结合地面自动气象站 1~2 mm、2~3 mm 和 3 mm 以上三种分钟降水量级,对两类强对流风暴低层双偏振参量特征进行分析与对比,为进一步提高定量降水估测精度和短时强降水预警技术水平提供客观依据。

1 资料及方法

1.1 资料选取标准

根据环境背景特征将强降水风暴分为雷暴大风为主型(简称“混合型”)和单纯强降水为主型(简称“降水为主型”)两类。“混合型”风暴以雷暴大风(瞬时风速 $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)天气为主,局部伴有短时强降水和(或)冰雹,主要受西风带系统影响,关键环境条件是空气湿度小,存在明显的干层($700 \sim 400 \text{ hPa}$ 温度露点差 $\Delta T_{d_{700-400}} \geq 15^\circ \text{C}$), $850 \sim 500 \text{ hPa}$ 温差 ($\Delta T_{850-500}$)较大($\geq 28^\circ \text{C}$);“降水为主型”风暴以短

时强降水天气为主,个别站点出现雷暴大风或冰雹,主要受副热带高压边缘西南气流或暖式切变影响,大气中水汽丰富,关键环境条件是空气湿度大,不存在明显的干层($\Delta T_{d_{700-400}} < 15^\circ \text{C}$), $\Delta T_{850-500}$ 较小($< 28^\circ \text{C}$),环境 0°C 层高度较高。

“混合型”满足 $\Delta T_{850-500} \geq 28^\circ \text{C}$ 和 $\Delta T_d \geq 15^\circ \text{C}$, 共有 11 次过程,选取分钟降水量连续 2 分钟 $\geq 2 \text{ mm}$ 且小时雨量超过 30 mm 的强降水风暴。“降水为主型”满足 $\Delta T_{850-500} < 28^\circ \text{C}$ 和 $\Delta T_{d_{700-400}} < 15^\circ \text{C}$, 共 17 次过程,选取分钟降水量连续 2 分钟 $\geq 2 \text{ mm}$ 且小时雨量超过 40 mm 的强降水风暴。基于单站双偏振雷达探测数据,强降水按分钟降水量分为 1~2 mm、2~3 mm 和 3 mm 以上三个等级,分别统计风暴低层(0.5~1 km)对应的双偏振参数,包括 Z_H 、 Z_{DR} 、CC 和 K_{DP} 。“混合型”风暴有 56 个样本(23 个地面站),“降水为主型”风暴有 95 个样本(37 个地面站)。

1.2 统计分析方法

利用济南、青岛和济宁双偏振雷达单站观测资料,统计强降水站点上空、风暴低层(0.5~1 km) 12 个距离库双偏振参量。距离库选取以地面雨量站点为参考,根据风暴移动方向,选取站点后侧 3 个径向(站点及左右各 1° 径向),各径向 4 个距离库(库长为 250 m)。低层双偏振参量与地面降水实际情况差别较小,因此选择 1 km 高度作为上限;距离雷达较近的区域在 0.5 km 高度以下会出现明显的杂波干扰,0.5 km 高度以下不做分析。

使用雷达低仰角扫描产品(极坐标), $30 \sim 70 \text{ km}$ 基本用 0.5° 仰角数据(高度在 0.5~1.0 km), 30 km 之内、0.5~1.0 km 高度使用 CC 值较大的仰角产品数据(多为 1.5° 仰角),同时雷达站周围近处低仰角杂波干扰区域、遮挡区域和明显的波束非均匀填充区域不进行偏振量统计。杂波干扰区域主要包括近处固定地物及风力发电机组干扰。济南雷达 0.5° 仰角在 $115^\circ \sim 160^\circ$ 方位有遮挡现象,主要是济南南部山区及泰山山脉遮挡,泰山主峰遮挡较明显;青岛雷达 0.5° 仰角在 $53^\circ \sim 62^\circ$ 方位有明显遮挡(崂山遮挡),西侧 $245^\circ \sim 263^\circ$ 方位 0.5° 和 1.5° 仰角有明显遮挡;济宁雷达无遮挡。有些对流回波会出现明显的波束非均匀填充现象,在 CC 产品上表现为明显的后侧径向上 CC 小值区。

双偏振参量与分钟降水量对应关系要综合考虑,既考虑下降到地面时间,又要考虑单体移动方向及移动速度。大小不同的雨滴降落速度存在差异,1~4 mm 的雨滴(降水量主要贡献者)下落速度基本在 $4\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。远处为 0.5° 仰角数据,1 km 高度下降到地面时间在 $2\sim 4\text{ min}$;近处多为 1.5° 仰角数据,时间要延迟 1 min 左右,0.5 km 高度下降到地面时间为 $1\sim 2\text{ min}$,延迟后为 $2\sim 3\text{ min}$ 。综合考虑,选取雷达扫描时间后延 $2\sim 4\text{ min}$ 地面站的分钟降水量进行对应分析。

依据雷达识别出的单体移动速度,计算 2 min 风暴移动的距离,大致估测 12 个距离库距离地面雨量站点的长度。图 1 是一次“混合型”强对流过程资料选取示例,观测时间是 00:36。风暴移动速度较快,基本沿南偏东方向移动(蓝色箭头),参考站点禹城站周围径向速度较大,综合考虑,选取距离站点约 1 km 后侧北偏西区域 12 个距离库数据(图 1 中蓝色方框区域),对应降水量是 2 min(00:38—00:40)的平均降水量。对于其他过程不同方向移动的风暴,仍然选取站点后侧 12 个距离库数据,数据区方位根据单体移动方向进行调整(图 1 中棕色和绿色虚线方框及箭头线)。对于移动缓慢的风暴,距离站点的距离相对要较近,而对于移动较快的风暴,距离站点的距离相对要较远。

利用双偏振参量统计数据,做出不同等级降水量对应的双偏振参量箱型图,分析 1/4、3/4 分位特征值、中值、平均值等,并对双偏振参量进行对比分析。

2 强降水风暴低层双偏振参量特征

2.1 不同类型强降水环境参数

“混合型”强降水天气过程包括:2019 年 4 月 24 日、5 月 10 日、6 月 8 日、8 月 16 日强降水,2020 年 5 月 17 日、6 月 1 日、6 月 25 日强降水,2021 年 5 月 26 日、6 月 30 日、7 月 9 日、7 月 31 日强降水。

“降水为主型”强降水天气过程包括:2019 年 6 月 20 日、7 月 6 日、7 月 27 日、8 月 10 日强降水,2020 年 7 月 22 日、8 月 1—2 日、8 月 3—4 日、8 月 6 日、8 月 13 日、8 月 26 日、8 月 30 日强降水,2021 年 6 月 14 日、6 月 29 日、7 月 5 日、7 月 7 日、7 月 11 日、

7 月 13—14 日强降水。

“混合型”与“降水为主型”强降水关键环境参数平均值见表 1。表中可以看出,“混合型”强降水天气 K 指数、整层比湿积分 IQ、对流有效位能 CAPE* (订正后的 CAPE) 明显小于“降水为主型”, $\Delta T_{850-500}$ 、垂直风切变 SHR 及干层强度($\Delta T_{d_{700-400}}$)明显大于“降水为主型”,湿球 0°C 层高度 WBZ 和 0°C 层高度 Z_H 明显低于“降水为主型”。“混合型”强降水天气湿度小,有干层存在,利于雷暴大风的出现,垂直风切变大,利于飚线、多单体风暴簇、相对孤立的超级单体等组织性强的风暴发展与维持;WBZ 低,利于地面出现冰雹天气,同时出现融化的冰相粒子和大的液态粒子的概率较高。

2.2 “混合型”强降水

符合选取标准的“混合型”强降水风暴低层双偏振参量(Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC)箱型图见图 2a。

由 $1\sim 2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 降水对应的双偏振参量可以看出, Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 的平均值分别为 52.2 dBz、2.6 dB、 $2.1^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ 和 0.970(数据共有 378 组)。 Z_H 主要集中在 $49.5\sim 54.5\text{ dBz}$,中值为 51.5 dBz,最大为 64.0 dBz; Z_{DR} 主要集中在 $1.9\sim 3.2\text{ dB}$,多数小于 3.2 dB,中值为 2.5 dB; K_{DP} 主要集中在 $1.6\sim 2.5^\circ\cdot\text{km}^{-1}$,多数在 $1.6^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ 以上,中值为 $2.0^\circ\cdot\text{km}^{-1}$;CC 主要集中在 $0.965\sim 0.985$,多数大于 0.965,中值为 0.975。

由 $2\sim 3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 降水对应的双偏振参量可以看出, Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 的平均值分别是 52.6 dBz、2.2 dB、 $2.8^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ 和 0.967(数据共有 202 组)。 Z_H 主要集中在 $50.5\sim 54.0\text{ dBz}$,中值为 52.0 dBz,最大为 67.0 dBz; Z_{DR} 主要集中在 $1.7\sim 2.7\text{ dB}$,多数小于 2.7 dB,中值为 2.1 dB; K_{DP} 主要集中在 $2.4\sim 3.5^\circ\cdot\text{km}^{-1}$,多数在 $2.4^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ 以上,中值为 $2.8^\circ\cdot\text{km}^{-1}$;CC 主要集中在 $0.960\sim 0.980$,多数大于 0.960,中值为 0.975。

由 $3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 以上降水对应的双偏振参量可以看出, Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 的平均值分别是 54.0 dBz、2.2 dB、 $3.7^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ 和 0.968(数据共有 49 组)。 Z_H 主要集中在 $50.6\sim 57.0\text{ dBz}$,中值为 53.7 dBz,最大为 60.0 dBz; Z_{DR} 主要集中在 $1.9\sim 2.5\text{ dB}$,多数小于 2.5 dB,中值为 2.1 dB; K_{DP} 主要

集中在 $3.4 \sim 4.3^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$, 多数在 $3.4^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 以上, 中值为 $3.7^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$; CC 主要集中 $0.960 \sim 0.980$, 多数大于 0.960 , 中值为 0.965 。

“混合型”强降水随着分钟降水量增大, Z_H 和 K_{DP} 也随之增大, Z_{DR} 和 CC 略有减小。 $1 \sim 2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 降水, Z_{DR} 大, 表明液态粒子直径大, K_{DP} 小, 表明液态粒子浓度小, 即浓度偏小、直径偏大的液态粒子降水强度偏弱。 $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上降水, K_{DP} 明显较大, 液态粒子浓度高, 高浓度液态粒子可导致 Z_H 增大; Z_{DR} 偏小, 表明液态粒子直径略有偏小, 高浓度直径偏小的液态粒子降水强度最大。

对于“混合型”强降水(分钟降水量 1 mm 以上, 对应降水强度 $> 60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 风暴低层 CC 多数在 0.960 以上, Z_H 主要集中在 $50 \sim 57 \text{ dBz}$, Z_{DR} 主要集中

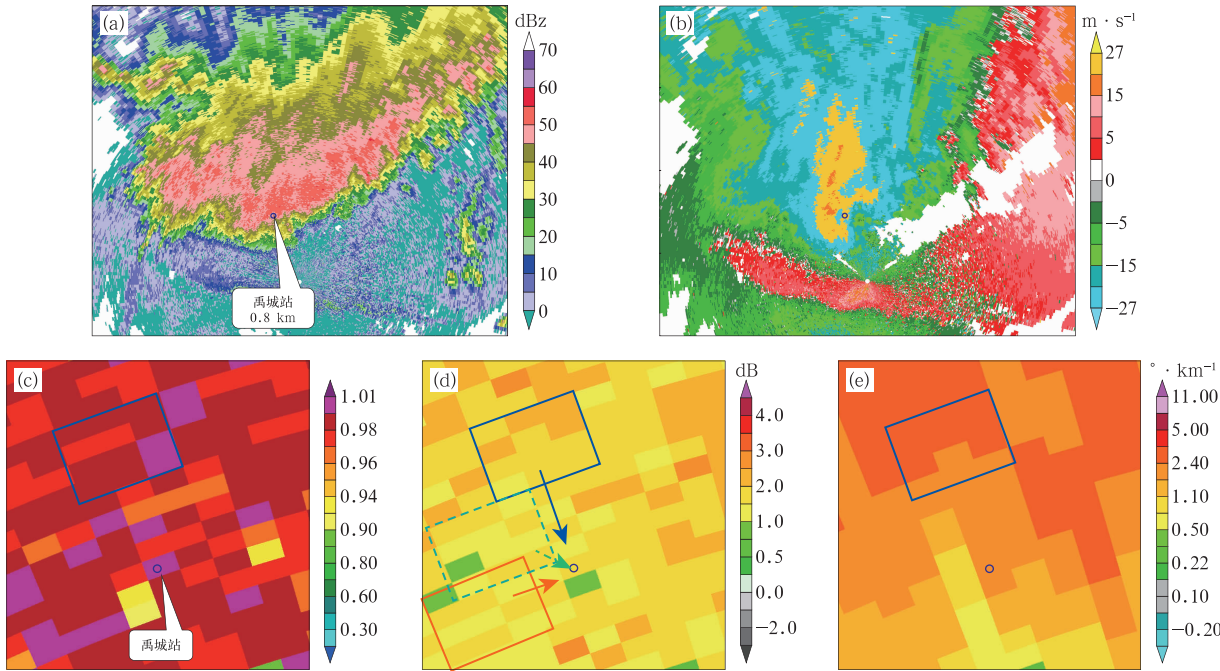
在 $1.7 \sim 3.2 \text{ dB}$, K_{DP} 主要集中在 $1.6 \sim 4.3^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

“混合型”存在较多 0.960 以下的 CC 值, 表明有明显冰相粒子干扰。 $1 \sim 2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $2 \sim 3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的降水风暴低层对应的 Z_H 有 60 dBz 以上数值, Z_{DR} 有负值, CC 有小于 0.900 的数据值, 表明存在明显较大的相对较干的冰粒子干扰。

2.3 “降水为主型”强降水

符合选取标准的“降水为主型”强降水风暴低层双偏振参量(Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC)箱型图见图 2b。

$1 \sim 2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 降水对应的双偏振参量显示, Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 的平均值分别是 49.6 dBz 、 1.7 dB 、 $1.8^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 0.980 (数据共有 522 组)。 Z_H 主要集中在 $48.0 \sim 51.0 \text{ dBz}$, 中值为 49.7 dBz ,



注:方框区为读取数据区,箭头代表风暴移动方向。

图 1 一次“混合型”强对流过程的(a)水平极化反射率因子 Z_H , (b)平均径向速度 V , (c)相关系数 CC, (d)差分反射率因子 Z_{DR} 和 (e)差分相移率 K_{DP}

Fig. 1 (a) The horizontal polarization Z_H , (b) average radial velocity V , (c) correlation coefficient CC, (d) differential reflectivity Z_{DR} and (e) specific differential phase K_{DP} of a “mixed type” convective storm process

表 1 “混合型”与“降水为主型”强降水关键环境参数平均值

Table 1 Average value of key ambient parameters of “mixed type” and “precipitation dominated type” convections									
类型	K/℃	$\Delta T_{850-500}$ /℃	IQ/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	CAPE* / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0~3 km SHR /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0~6 km SHR /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	干层强度 $\Delta T_{d_{700-400}}$ /℃	WBZ /km	Z_H /km
混合型	24	31	2597	2411	13.1	22.1	22.3	3.3	3.9
降水为主型	34	25	5070	3223	8.0	12.1	7.5	4.6	5.0

最大为 61.0 dBz; Z_{DR} 主要集中在 1.4~2.2 dB, 多数小于 2.2 dB, 中值为 1.7 dB; K_{DP} 主要集中在 1.5~2.1°·km⁻¹, 多数在 1.5°·km⁻¹ 以上, 中值为 1.7°·km⁻¹; CC 主要集中在 0.975~0.985, 多数大于 0.975, 中值为 0.980。

2~3 mm·min⁻¹ 降水对应的双偏振参量显示, Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 的平均值分别是 51.2 dBz、1.8 dB、2.9°·km⁻¹ 和 0.977 (数据共有 401 组)。 Z_H 主要集中在 50.5~52.5 dBz, 中值为 51.5 dBz,

最大为 57.0 dBz; Z_{DR} 主要集中在 1.5~2.1 dB, 多数小于 2.1 dB, 中值为 1.8 dB; K_{DP} 主要集中在 2.5~3.3°·km⁻¹, 多数在 2.5°·km⁻¹ 以上, 中值为 2.9°·km⁻¹; CC 主要集中在 0.970~0.985, 多数大于 0.970, 中值为 0.980。

3 mm·min⁻¹ 以上降水对应的双偏振参量显示, Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 的平均值分别是 51.4 dBz、1.6 dB、3.6°·km⁻¹ 和 0.978 (数据共有 147 组)。 Z_H 主要集中在 49.5~53.5 dBz, 中值为 52.0 dBz,

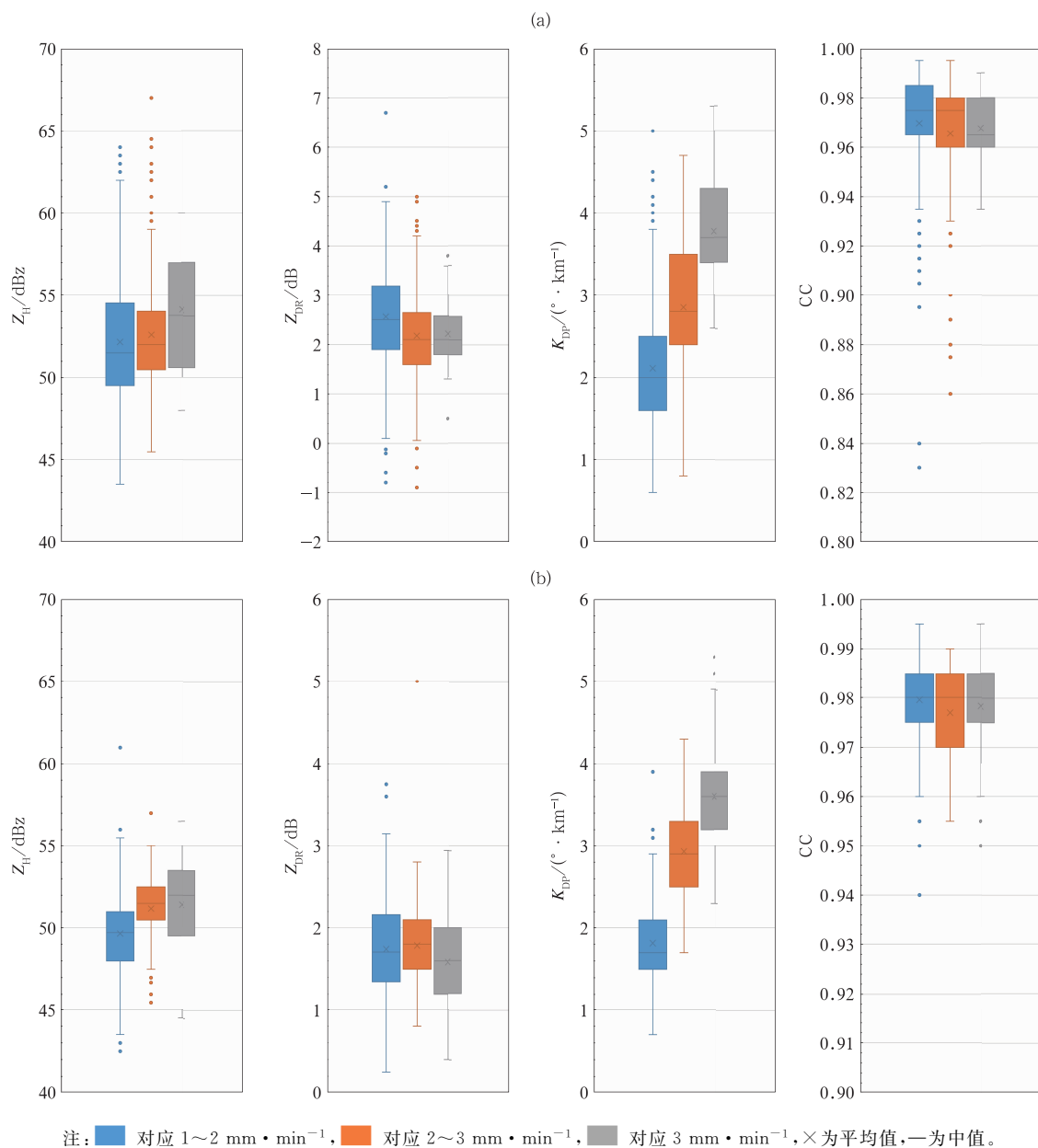


图 2 (a)“混合型”和(b)“降水为主型”强降水双偏振参量箱型图
Fig. 2 Dual polarization parameter box diagram of (a) “mixed type”
and (b) “precipitation dominated type” convections

最大为 57.0 dBz; Z_{DR} 主要集中在 1.2~2.0 dB,多数小于 2.0 dB,中值为 1.6 dB; K_{DP} 主要集中在 3.2~3.9°·km⁻¹,多数在 3.2°·km⁻¹ 以上,中值为 3.6°·km⁻¹;CC 主要集中在 0.975~0.985,多数大于 0.975,中值为 0.980。

“降水为主型”强降水随着分钟降水量增大, Z_H 和 K_{DP} 也随之增大, K_{DP} 增大更加明显, Z_{DR} 和 CC 变化不明显。对于“降水为主型”强降水,不同分钟降水量级 Z_{DR} 变化不明显,表明液态粒子直径基本相当或一致; K_{DP} 明显增强,表明液态粒子浓度明显增强,从而导致回波强度有所增大,降水强度明显加强。

对于“降水为主型”强降水(分钟降水量 1 mm 以上,对应降水强度>60 mm·h⁻¹),风暴低层 CC 多数在 0.97 以上, Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 分别主要集中在 48~54 dBz、1.2~2.2 dB、1.5~3.8°·km⁻¹、0.960 以下的 CC 值较少,表明冰相粒子干扰较少。

2.4 两类强降水风暴低层双偏振特征对比

表 2 是滤除明显冰雹干扰后的不同分钟降水量

级“混合型”与“降水为主型”风暴低层双偏振参量对比。两种类型强降水风暴低层双偏振特征对比时,排除冰雹干扰才更为合理,因此,将 $Z_H \geq 60$ dBz 的距离库数据全部滤除后重新统计出 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 区间值(25%~75%)和平均值(详见表 2)。

可以看出,相同分钟降水量级,“混合型”强降水 Z_H 和 Z_{DR} 平均值均大于“降水为主型”,而 CC 平均值小于“降水为主型”,1~2 mm·min⁻¹ 和 3 mm·min⁻¹ 以上降水的“混合型”强降水 K_{DP} 平均值均稍大于“降水为主型”,而 2~3 mm·min⁻¹ 降水的“混合型”强降水 K_{DP} 平均值稍小于“降水为主型”。

1~2 mm·min⁻¹ 降水,“混合型”强降水与“降水为主型”强降水 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 平均值的差值分别为 2.2 dBz、0.9 dB、0.3°·km⁻¹ 和 -0.009。2~3 mm·min⁻¹ 降水,“混合型”强降水与“降水为主型”强降水 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 平均值的差值分别为 0.7 dBz、0.5 dB、-0.1°·km⁻¹ 和 -0.007。3 mm·min⁻¹ 以上降水,“混合型”强降水与“降水为主型”强降水 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 平均值的差值分别为 2.3 dBz、0.5 dB、0.2°·km⁻¹ 和 -0.010。

表 2 “混合型”与“降水为主型”强降水双偏振参量对比

Table 2 Comparison of dual polarization parameters between “mixed type” and “precipitation dominated type” severe rainfalls

降水强度 /(mm·min ⁻¹)	降水类型	Z_H /dBz		Z_{DR} /dB		K_{DP} /(°·km ⁻¹)		CC	
		区间	平均	区间	平均	区间	平均	区间	平均
[1,2)	混合型	49.5~54.0	51.7	2.0~3.2	2.6	1.7~2.6	2.1	0.965~0.985	0.971
	降水为主型	48.0~51.0	49.5	1.4~2.1	1.7	1.4~2.1	1.8	0.975~0.985	0.980
	差值		2.2		0.9		0.3		-0.009
[2,3)	混合型	50.5~53.5	51.9	1.8~2.7	2.3	2.2~3.3	2.8	0.965~0.980	0.970
	降水为主型	50.5~52.5	51.2	1.5~2.1	1.8	2.4~3.3	2.9	0.970~0.985	0.977
	差值		0.7		0.5		-0.1		-0.007
≥ 3	混合型	51.0~56.0	53.7	1.9~2.4	2.1	3.4~4.4	3.8	0.960~0.980	0.968
	降水为主型	49.5~53.7	51.4	1.2~2.0	1.6	3.3~3.9	3.6	0.975~0.985	0.978
	差值		2.3		0.5		0.2		-0.010

造成两种不同类型强降水风暴低层双偏振参量特征差异与天气环境因素密切相关。对于“混合型”强降水,干层强度较强(平均 ΔT_d 为 22.3℃),700~400 hPa 存在明显的干层,干空气的夹卷及蒸发作用可加强对流风暴下沉气流强度,粒子下降速度较快,同时湿球 0℃ 层高度较低,下降中的固态粒子在湿球 0℃ 层高度以下历时较短,在低层融化后形成偏大的液态粒子,同时还会有部分偏小的固态粒子不会完全融化, Z_H 对粒子大小较为敏感, Z_{DR} 对液态

粒子或融化的冰相粒子大小较为敏感。依据 Rasmussen and Heymsfield(1987a;1987b)、Dolan et al (2013)研究成果,相对湿度为 100% 时,初始尺寸 10 mm 的冰雹下落 2 km 后基本融化成大雨滴,15 mm 的冰雹经过融化后直径约 8 mm 左右(反射率因子约为 54 dBz),“混合型”强降水天气湿球 0℃ 层高度在 3 km 左右,下降 2 km 高度后基本处在 1 km 高度,因此,“混合型”强降水风暴低层出现大雨滴和小于 10 mm 的冰相粒子概率较高,从而导致

大的 Z_H 、 Z_{DR} (甚至 5 dB 以上的 Z_{DR} 高值) 和偏小的 CC, 融化的冰相粒子也可导致 K_{DP} 增大甚至出现奇异值。“降水为主型”强降水天气具有深厚的湿层和较高的湿球 0°C 层高度, 干层强度较弱 (平均 ΔT_d 为 7.5°C), 干空气夹卷与蒸发效应不明显, 粒子下降速度相对偏小, 粒子在 0°C 层高度或湿球 0°C 层高度之下历时较长, 小的冰相粒子融化较为明显, 在低层基本表现为纯的液态粒子, 粒子直径相对偏小, 其结果就是 Z_H 和 Z_{DR} 偏小, CC 偏大。

$1\sim 2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 以上降水, “混合型”强降水的 K_{DP} 平均值均稍大于“降水为主型”强, K_{DP} 区间值上限明显偏大, 结合 CC 区间值下限偏小, 表明“混合型”强降水风暴低层 K_{DP} 不仅存在较高浓度的液态粒子, 而且有融化的冰雹粒子干扰 (K_{DP} 不仅对液态粒子浓度较为敏感, 融化的冰相粒子也可导致 K_{DP} 增大), “降水为主型”强降水风暴低层基本表现为较高浓度的液态粒子。 $2\sim 3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 降水, “混合型”强降水 K_{DP} 平均值稍小于“降水为主型”强对流, 区间值基本相当, 无论是“混合型”强降水还是“降水为主型”强降水基本表现为较高浓度的液态粒子。

3 结 论

本文利用山东 S 波段双偏振雷达探测资料, 对 2019—2021 年 5—8 月两类强降水风暴低层不同分钟降水量级偏振参量特征进行了分析, 讨论了六种不同情况下强降水风暴低层偏振特征差异的环境因素和云微物理特征, 得出如下结论:

(1) 随着分钟降水量级增大, 两种类型强降水风暴低层 Z_H 和 K_{DP} 都随之增大; “降水为主型”风暴 Z_{DR} 和 CC 变化不明显, “混合型”风暴 Z_{DR} 和 CC 减小。说明随着降水量级增大, 两种类型风暴低层液态粒子浓度增大。“混合型”风暴低层尺寸更大的冰雹干扰增多, 导致 Z_{DR} 和 CC 减小。“降水为主型”风暴低层 Z_{DR} 无明显变化, 表明液态粒子大小随着降水强度增大无明显变化。

(2) 对于 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 以上高强度降水, “混合型”强降水风暴低层 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 分别集中在 $50.5\sim 57.0\text{ dBz}$ 、 $1.7\sim 2.7\text{ dB}$ 、 $2.4\sim 4.3^\circ\cdot\text{km}^{-1}$, CC 在 0.960 以上, 液态粒子浓度较高, 回波强度较强; “降

水为主型”强降水风暴低层 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 分别集中在 $49.5\sim 53.5\text{ dBz}$ 、 $1.2\sim 2.1\text{ dB}$ 、 $2.5\sim 3.9^\circ\cdot\text{km}^{-1}$, CC 在 0.970 以上。说明这种情况下多数“混合型”对流风暴含有大量 $5\sim 10\text{ mm}$ 左右的小冰雹, 湿球 0°C 层高度较低, 较小冰雹在低层融化为大雨滴, 明显增加了相应的 Z_{DR} 值, 也导致回波强度 Z_H 高于“降水为主型”。

(3) 对比两类强降水风暴低层相同分钟降水量级偏振特征, “混合型”强降水的 Z_H 和 Z_{DR} 大于“降水为主型”, 而 CC 小于“降水为主型”。主要因为“混合型”强降水内部不仅存在较多 $5\sim 10\text{ mm}$ 较小冰雹, 还存在一些大的冰雹粒子, 在低层融化为大雨滴或小的冰相粒子, 导致 Z_H 和 Z_{DR} 较大而 CC 较小。“降水为主型”强降水中只有少量直径 $5\sim 10\text{ mm}$ 的较小冰雹, 湿球 0°C 层高度较高, 融化后在低层形成尺寸较小的雨滴。

(4) 无论是“混合型”强降水还是“降水为主型”强降水, 风暴低层最典型特征是有大的 K_{DP} , 相同分钟降水量级情况下平均值差别不明显, 因此将 K_{DP} 应用于强降水估测具有明显优势。在无明显冰雹干扰 ($Z_H < 60\text{ dBz}$) 的情况下, $1\sim 2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $2\sim 3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 以上降水 K_{DP} 分别在 $1.4\sim 2.6^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $2.2\sim 3.3^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $3.3\sim 4.4^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ 。

参考文献

- 陈超, 胡志群, 胡胜, 等, 2019. CINRAD-SA 双偏振雷达资料在降水估测中的应用初探[J]. 气象, 45(1): 113-125. Chen C, Hu Z Q, Hu S, et al, 2019. Preliminary application of CINRAD-SA dual polarization radar data in rainfall estimation[J]. Meteor Mon, 45(1): 113-125 (in Chinese).
- 陈静, 铃伟妙, 韩军彩, 等, 2015. 基于动态 $Z-I$ 关系雷达回波定量估测降水方法研究[J]. 气象, 41(3): 296-303. Chen J, Qian W M, Han J C, et al, 2015. An approach for radar quantitative precipitation estimate based on $Z-I$ relations varying with time and space[J]. Meteor Mon, 41(3): 296-303 (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, 杨传风, 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 Meteor, 40(3):580-589(in Chinese).
- 刁秀广, 张磊, 孟宪贵, 等, 2020. 两次强降水风暴双偏振参量特征分析[J]. 海洋气象学报, 40(3):27-36. Diao X G, Zhang L, Meng X G, et al, 2020. Analysis on characteristics of dual-polarization parameters of two heavy precipitation storms[J]. J Mar Meteor, 40(3):27-36(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).
- 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).
- 侯淑梅, 孙敬文, 孙鹏程, 等, 2020. 基于加密自动气象观测站和国家气象观测站的山东省极端短时强降水时空分布特征的对比分析[J]. 气象, 46(2):200-211. Hou S M, Sun J W, Sun P C, et al, 2020. Comparative analysis of spatio-temporal distribution characteristics of extreme short-time severe precipitation in Shandong based on the dense observations from automatic weather stations and national stations[J]. Meteor Mon, 46(2):200-211(in Chinese).
- 李昭春, 朱君鉴, 张持岸, 等, 2021. 海南屯昌儋州台风雨带龙卷双偏振雷达探测分析[J]. 气象, 47(9):1086-1098. Li Z C, Zhu J J, Zhang C A, et al, 2021. Analysis of dual polarization radar detection of tornado typhoon rainband in Danzhou and Tunchang in Hainan Province[J]. Meteor Mon, 47(9):1086-1098(in Chinese).
- 刘黎平, 葛润生, 张沛源, 2002. 双线偏振多普勒天气雷达遥测降水强度和液态含水量的方法和精度研究[J]. 大气科学, 26(5):709-720. Liu L P, Ge R S, Zhang P Y, 2002. A study of method and accuracy of rainfall rate and liquid water content measurements by dual linear polarization Doppler radar[J]. Chin J Atmos Sci, 26(5):709-720(in Chinese).
- 刘黎平, 钱永甫, 王致君, 等, 1996. 双线偏振雷达测雨效果的对比分析[J]. 大气科学, 20(5):615-619. Liu L P, Qian Y F, Wang Z J, et al, 1996. Comparative study on dual linear polarization radar measuring rainfall rate[J]. Sci Atmos Sin, 20(5):615-619(in Chinese).
- 潘佳文, 蒋璐璐, 魏鸣, 等, 2020. 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, 2020. Analysis of a high precipitation supercell based on dual polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 78(1):86-100(in Chinese).
- 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).
- 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).
- 王孝慈, 李双君, 孟英杰, 2022. 武汉地区4次低质点类短时强降水对流风暴特征分析[J]. 气象, 48(5):633-646. Wang X C, Li S J, Meng Y J, 2022. Characteristics of four low-echo-centroid convective storms of short-time heavy rainfall in Wuhan[J]. Meteor Mon, 48(5):633-646(in Chinese).
- 吴照宪, 罗亚丽, 刘希, 等, 2022. 2011—2018年安徽暖季短时强降水及其环流背景统计特征[J]. 气象, 48(8):963-978. Wu Z X, Luo Y L, Liu X, et al, 2022. Statistical characteristics of the hourly heavy rainfall events over Anhui Province during the 2011—2018 warm seasons and the associated synoptic circulation patterns[J]. Meteor Mon, 48(8):963-978(in Chinese).
- 肖靖宇, 杨玲, 俞小鼎, 等, 2022. 佛山相控阵阵列雷达探测2020年9月4日短时强降水天气过程的分析[J]. 气象, 48(7):826-839. Xiao J Y, Yang L, Yu X D, et al, 2022. Analysis of short-time severe rainfall on 4 September 2020 detected by phased array radar in Foshan[J]. Meteor Mon, 48(7):826-839(in Chinese).
- 荀爱萍, 张伟, 黄惠镭, 等, 2019. 厦门市S波段双偏振雷达测雨效果分析[J]. 气象与环境科学, 42(4):103-110. Xun A P, Zhang W, Huang H R, et al, 2019. Analysis of rainfall measuring errors of S-band dual polarization weather radar in Xiamen[J]. Meteor Environ Sci, 42(4):103-110(in Chinese).
- 俞小鼎, 2013. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 32(3):202-209. Yu X D, 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torr Rain Dis, 32(3):202-209(in Chinese).
- 赵渊明, 漆梁波, 2021. 短时强降水概率预报的多模式集成技术研究[J]. 气象, 47(5):529-538. Zhao Y M, Qi L B, 2021. Multi-model integration technology for probabilistic forecasting of short-time severe rainfall[J]. Meteor Mon, 47(5):529-538(in Chinese).
- Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2013. Distribution and diurnal variation of warm-season short-duration heavy rainfall in relation to the MCSs in China[J]. Acta Meteor Sin, 27(6):868-888.
- Dolan B, Rutledge S A, Lim S, et al, 2013. A robust C-band hydrometeor identification algorithm and application to a long-term polarimetric radar dataset[J]. J Appl Meteor Climatol, 52(9):2162-2186.
- Giangrande S E, Ryzhkov A V, 2008. Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(9):2445-2462.
- Gorgucci E, Sarchilli G, Chandrasekar V, 2000. Practical aspects of radar rainfall estimation using specific differential propagation

- phase[J]. J Appl Meteor Climatol, 39(6):945-955.
- Hall M P M, Cherry S M, Goddard J W F, et al, 1980. Rain drop sizes and rainfall rate measured by dual-polarization radar[J]. Nature, 285(5762):195-198.
- Kumjian M R, 2013. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II: warm- and cold-season applications[J]. J Operat Meteor, 1(20):243-264.
- Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(7):1940-1961.
- Rasmussen R M, Heymsfield A J, 1987a. Melting and shedding of graupel and hail. Part I: model physics[J]. J Atmos Sci, 44(19):2754-2763.
- Rasmussen R M, Heymsfield A J, 1987b. Melting and shedding of graupel and hail. Part II: sensitivity study[J]. J Atmos Sci, 44(19):2764-2782.
- 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.
- Warning Decision Training Branch, 2013. Dual-polarization radar operations course[EB/OL]. NOAA: 180-189. <https://training.weather.gov/wdtd/courses/dualpol/documents/DualPolOpsStudentGuide.pdf>.
- Zrnić D S, Ryzhkov A, 1996. Advantages of rain measurements using specific differential phase[J]. J Atmos Oceanic Technol, 13(2):454-464.

(本文责编:俞卫平)