

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).

不同强度强对流云系 S 波段双偏振雷达观测分析^{*}

林 文^{1,2,3} 张深寿⁴ 罗昌荣³ 江慧远⁵ 谢祖欣¹ 李 丹¹ 陈彬彬¹

1 福建省气象科学研究所,福州 350001

2 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室,北京 100081

3 海峡气象开放实验室,厦门 361012

4 福建省龙岩市气象局,龙岩 364000

5 南京信息工程大学,南京 210044

提 要: 通过厦门 S 波段双偏振天气雷达观测到的超级单体、普通降雹单体和非降雹单体三种不同强度的强对流个例,分析其在发展、成熟阶段出现的双偏振参数特征差异,包括差分反射率(Z_{DR})、差分相位差(K_{DP})、相关系数(CC)等,发现: Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱是不同强度强对流云体内部普遍存在的动力特征;超级单体和普通降雹单体在近地层还有表征入流区的 CC 谷特征;此外在超级单体成熟阶段低层还出现了 Z_{DR} 弧、 K_{DP} 印,以及高层对应着大冰雹的 CC 低值区等特征。 Z_{DR} 柱不仅可用于识别过冷水区还具有预测强对流云体未来发展趋势的能力,利用 CC 谷可识别强单体的入流区, K_{DP} 柱、 K_{DP} 印及其空缺可识别强降水、大冰雹区等,因此双偏振参量特征识别在强对流短时临近预警预报、人工防雹方面都具有很强应用潜力。

关键词: 双偏振雷达,差分反射率,差分相位差,相关系数,冰雹

中图分类号: P415, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.006

Observational Analysis of Different Intensity Severe Convective Clouds by S-Band Dual-Polarization Radar

LIN Wen^{1,2,3} ZHANG Shenshou⁴ LUO Changrong³ JIANG Huiyuan⁵
XIE Zuxin¹ LI Dan¹ CHEN Binbin¹

1 Fujian Meteorological Science Institute, Fuzhou 350001

2 Key Laboratory for Cloud Physics, CMA, Beijing 100081

3 Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen 361012

4 Longyan Meteorological Office of Fujian Province, Longyan 364000

5 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Three cases of severe convection with different intensities, including supercell, common hail storm and non-hail storm, observed by Xiamen S-band dual-polarization radar are presented in this paper. The characteristic differences of dual-polarization radar in these cases, containing differential reflectivity (Z_{DR}), specific differential phase (K_{DP}) and co-polar correlation coefficient (CC) during storm developing from growing stage to mature stage were analyzed. The Z_{DR} and K_{DP} columns are common features existing in these different intensities of storms. The supercell and common hail storm also have CC hole characteristics, featuring the inflow area near ground. In addition, Z_{DR} arc and K_{DP} foot also appear at low level and

^{*} 中国气象局云雾物理环境重点实验室开放科研课题(2017Z01606)、福建省科技厅引导性项目(2018Y0003)和福建省气象局开放式气象科学研究基金项目(2018K09)共同资助

2018 年 9 月 27 日收稿; 2019 年 12 月 7 日收修定稿

第一作者:林文,主要从事大气物理与人工影响天气研究. Email:donnakoon@foxmail.com

CC low value region with big hails at high level in mature stage of supercell. The variation of Z_{DR} column can be used to identify super-cooled water area and forecast the developing trend of severe convective clouds. The CC hole can be used to identify the inflow area of convective cell. Then K_{DP} column, K_{DP} foot or its vacancy can be used to identify the areas of heavy rain or big hails. Therefore, the feature identification of dual-polarization radar have great potentials in short-term early warning of severe convection and hail suppression.

Key words: dual-polarization radar, differential reflectivity, specific differential phase, correlation coefficient, hail

引 言

天气雷达是对冰雹、雷雨大风、短时强降水监测预警有效且常用的工具之一。目前业务上普遍使用新一代天气雷达,近几年基于其对冰雹、超级单体等回波特征方面的研究取得了不少新成果(鲁德金等, 2015;徐芬等, 2016;夏文梅等, 2016;陶岚等, 2016;覃靖等, 2017)。福建省南部地区春夏季强对流频发,冰雹灾害是特种农业种植区的主要气象灾害,常对农民增产增收造成重大经济损失,短时预警预报任务艰巨,保护特种经济作物的人工防雹作业量位居全国前列。因此,基于新一代天气雷达针对福建省的强对流回波特征也开展了一系列的研究(冯晋勤等, 2010a; 2010b; 2012a; 2012b;陈秋萍等, 2003; 2015;吴木贵等, 2013)。

为有效地监测灾害性天气,为短时临近天气预报、人工防雹等方面提供及时有效的服务,2016 年厦门完成 S 波段双偏振雷达安装并投入使用,并持续开展相关研究(冯晋勤等, 2018)。与目前业务化的新一代多普勒天气雷达相比较,双偏振多普勒雷达除可探测到宏观要素(反射率因子 Z_H 、多普勒径向速度 V 、谱宽)外,还可获得多个偏振参量(差分反射率 Z_{DR} 、相位差 Φ_{DP} 、差分相位差 K_{DP} 、相关系数 CC 等),通过这些参量可判断降水粒子的形状、尺寸大小、相态分布以及降水类型等信息,是探测和研究降水粒子结构及物理机制的一种有效手段。

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(Bringi et al, 1984; 1997; Giangrande et al, 2016;刘黎平等, 1992; 1993; 1996; 2015;曹俊武等, 2005;黄勇等, 2015;马学谦等, 2015)和降水量估测(Zhang et al, 2001; Brandes et al, 2003;李宗飞等, 2015;王建林等, 2005;汪舵等, 2017)这两个方面。除了以上应用研究,双偏振雷达更有利于观测分析冰雹云的动力结构特征。Brandes et al

(1995)、Kumjian and Ryzhkov (2008)、Snyder et al (2015)在超级单体观测中得到一些偏振参数特征,包括龙卷着地信号(TDS)、 Z_{DR} 弧(Z_{DR} arc)、CC 谷(CC hole)、 Z_{DR} 柱(Z_{DR} column)、 K_{DP} 柱(K_{DP} column)以及 Z_{DR} 环(Z_{DR} ring)或 CC 环(CC ring)等,这些特征能够反映超级单体云系中的部分动力结构,根据这些特征建立超级单体概念模型并应用到美国强风暴识别预警系统(AWIPS)中(Kumjian, 2013a)。周仲岛等(2016)在台湾地区一次暴雨型雷暴过程研究中也观测到了 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱,并发现其与暴雨产生有一定的相关性。王洪等(2018)利用我国首部 S 波段业务双偏振雷达对 2015 年一次典型华南春季冷锋触发的超级单体风暴的偏振观测特征进行了分析,同样也观测到了 Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱等特征。本文通过厦门 S 波段双偏振雷达观测到的超级单体、普通降雹单体和非降雹单体三个不同强度的强对流个例,对比分析不同等级强对流云系在发展、成熟阶段出现的双偏振参数特征的差异,并探讨其在短时临近天气预报、人工防雹中的应用潜力。

1 双偏振参量资料说明

1.1 雷达数据质量

厦门海沧 S 波段双偏振多普勒天气雷达位于厦门市海沧区蔡尖尾山($24^{\circ}30'25''N$, $118^{\circ}0'16''E$),天线馈源海拔高度 393 m,采用双发双收模式,雷达参数见表 1。通过新一代天气雷达双偏振技术试验,选取厦门双偏振雷达测到的降水过程数据与美国 NEXRAD 雷达的分析对比,将相同谱宽等级下三个站(或三次降水过程)测量误差均值差异的最大值记为 Mdx ,将相同谱宽等级下三个站(或三次降水过程)测量误差均值高于采样误差上限的最大值记为 $MSdx$,当小于或等于采样误差上限时,将 $MSdx$ 记为 0,由此得到美国 NEXRAD 雷达和厦门双偏振

雷达测量精度差异(表 2)。其中,Mdx 反映雷达系统的稳定性,值越小,说明系统越稳定;MSdx 反映了雷达系统引入的误差大小,值越小,说明系统引入的误差越小,数据可靠性越高。从表 2 可知:厦门雷达的 Mdx、MSdx 与美国雷达均非常接近,而且 Mdx 与 MSdx 的值很小;厦门雷达与美国雷达的系统稳定,系统引入的误差很小,数据可靠性一致。

1.2 不同类型降水粒子对应的双偏振参量特征

冰雹、雨滴等不同相态、形状的降水粒子在双偏振参量特征上各有差异,因此利用双偏振参量特征

表 1 厦门双偏振多普勒天气雷达主要参数
Table 1 Parameters of Xiamen dual-polarization Radar

物理量	参数值
天线直径/m	8.5
波束宽度/(°)	0.93
工作频率/MHz	2880
输出功率/kW	≥650
脉冲宽度/μs	1.57,4.57
脉冲重复频率/Hz	644~1282
接收机噪声系数/dB	≤4.0
动态范围/dB	≥85
探测范围/km	460,230
距离分辨率/m	250

表 2 美国 NEXRAD 雷达与厦门 SA 雷达数据测量精度对比
Table 2 Comparison of measurement accuracy between NEXRAD and Xiamen SA dual-polarization Radar

物理量	数据等级	Mdx		MSdx	
		美国	厦门站	美国	厦门站
Z/dB	1≤W<3	0.16	0.16	0	0.03
	3≤W<5	0.19	0.18	0.64	0.50
Z _{DR} /dB	1≤W<3	0.08	0.08	0	0
	3≤W<5	0.02	0.04	0.04	0
CC	1≤W<3	0.0016	0.0001	0	0
	3≤W<5	0.0006	0.0003	0	0
Φ _{DP} /(°)	1≤W<3	0.62	0.60	0	0
	3≤W<5	0.08	0.59	0.19	0.29

可分析判断云体的降水粒子微物理结构。Bringi and Chandrasekar(2010)和 Kumjian et al(2016)总结了各种降水粒子类型对应的双偏振参量特征:Z_{DR}反映水凝物粒子的非球形程度,雨滴越大形状越趋于扁平,对应 Z_{DR}的值就越大,大雨滴对应 Z_{DR}达 3~5 dB;K_{DP}值的大小主要由液态水决定,固态降水粒子对 K_{DP}贡献很小,降水时一般 K_{DP}小于 1°·km⁻¹,含融化的冰粒的降水可达 2.5°·km⁻¹;CC 主要反映的是相态的均一性,降水时基本为水滴的单一相态,CC 一般在 0.95~0.96 以上。冰雹在下落过程中不断摆动翻滚,总体接近球形,对应的 Z_{DR}值趋近于 0 dB,大冰雹时会出现负值,可根据大的 Z_H值伴随低的 Z_{DR}值来识别冰雹;由于冰雹属于混合相态,对应的 CC 值减小到 0.9 以下,对于非气象回波 CC 值会降到 0.7 以下。

2 不同等级强对流云系双偏振参数特征

2.1 超级单体

本文选取的个例于 2017 年 4 月 19 日 12—14 时

在厦门西南方向漳州至龙海境内发生发展,由于该单体位于近海岸人口稀疏地区,未有地面降雹观测记录。但从多普勒径向速度(图 1)看,从 2.4°~6.0°仰角均存在中等中尺度气旋(俞小鼎等,2006),同时有明显的穹窿结构(图略),具备超级单体特征。

在发展阶段(12:19,图 2),该单体的双偏振参量特征存在明显的 Z_{DR}柱、K_{DP}柱和 CC 谷,这三个特征是强对流单体内部的气流及微物理结构相互作用的结果。

2.1.1 近地层特征

近地层 CC 值较周围显著减小的区域(CC<0.85)被称为 CC 谷,有时会向上延伸至中层。图 2c 中 CC 谷(0.7~0.85)位于云体前侧近似钩状回波凹陷处(图 2a)的弱中气旋区(图 2b)。由于 CC 值与不同相态物质的介电常数有关,因而这里的 CC 低值形成的原因主要有两种:近地层昆虫、草、树叶等碎片,被带入强对流云系的上升气流区,这些碎片具有不规则形状和随机方向,会导致 CC 值的下降(Kumjian and Ryzhkov, 2008);Ryzhkov et al (2005)认为,CC 的减小还与强上升气流将雨滴带入高层造成低层水成物的缺乏导致返回的信噪比较

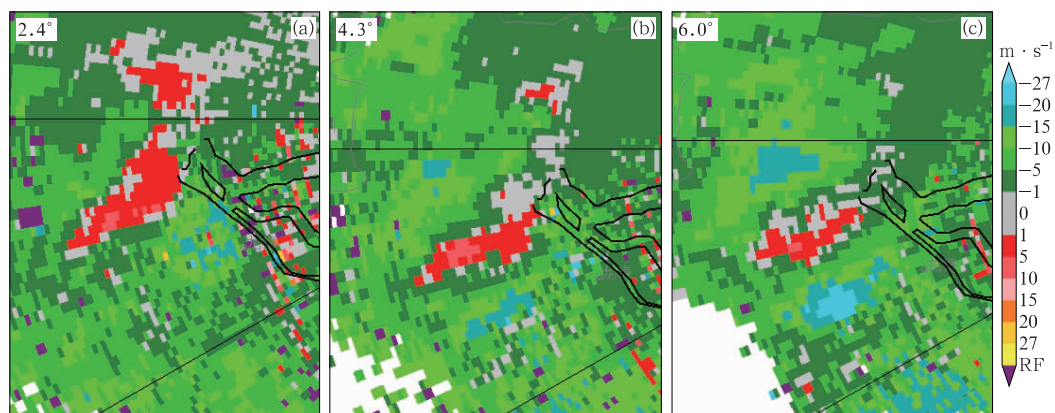


图 1 2017 年 4 月 19 日 12:59 不同仰角的多普勒径向速度

Fig. 1 Doppler velocity display of the dual-polarization radar in different elevations at 12:59 BT 19 April 2017

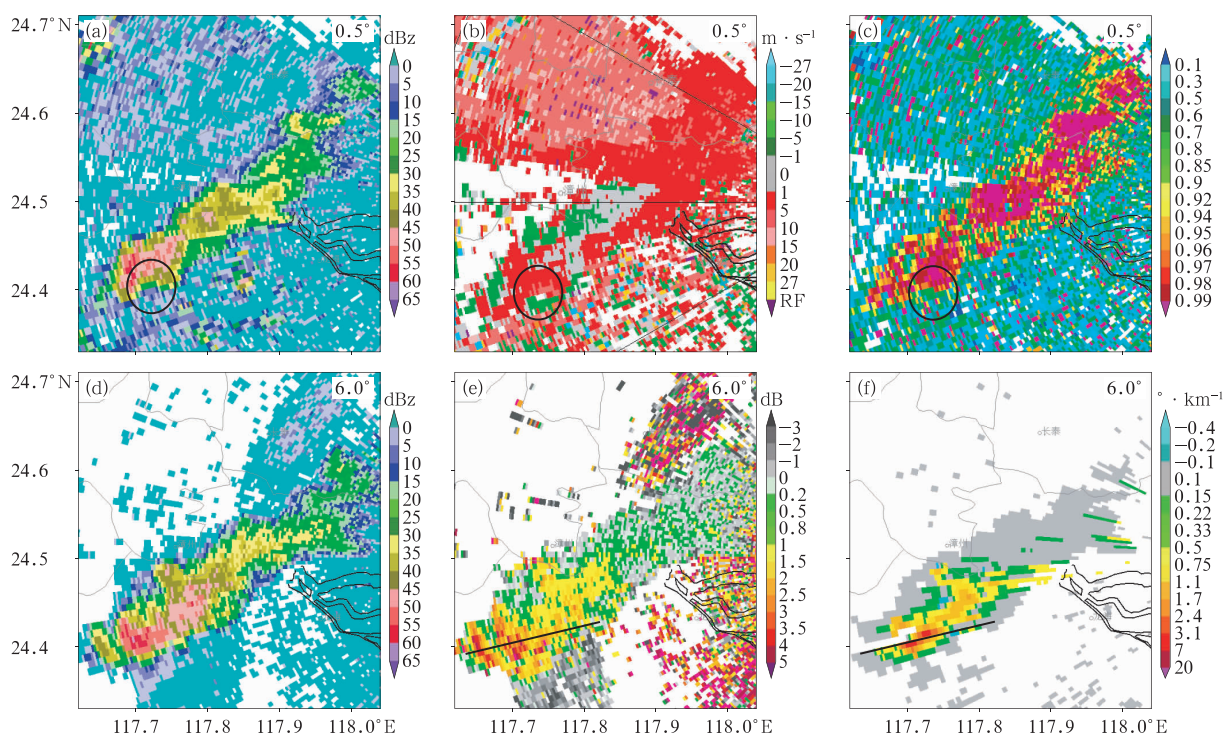


图 2 2017 年 4 月 19 日 12:19 双偏振雷达 0.5°仰角的(a) Z_H , (b) V , (c) CC 和 6.0°仰角的(d) Z_H , (e) Z_{DR} , (f) K_{DP}

(图 2a, 2b 和 2c 中圆圈为中气旋位置; 图 2e 和 2f 直线为图 3 剖面位置)

Fig. 2 PPI display of the dual-polarization radar variables, taken at 0.5° elevation: (a) Z_H , (b) V , (c) CC ; at 6.0° elevation: (d) Z_H , (e) Z_{DR} , (f) K_{DP} at 12:19 BT 19 April 2017

(In Figs. 2a, 2b, 2c circle is the location of the mesocyclone and in Figs. 2e, 2f lines are the location of profiles in Fig. 3)

低(5 dB)有关,即有界弱回波区,图 2c 中的 CC 低值就属于这种情况。总之, CC 谷与强上升气流有关,与 Z_{DR} 柱的不同在于其在低层就会出现,因此通过低层仰角 CC 谷的识别可以判断强单体的入流区

所在位置,这也是人工防雹作业,特别是高炮作业所关注的重要区域之一。

2.1.2 中层特征($\approx 0^\circ\text{C}$)

Z_{DR} 柱、 K_{DP} 柱特征主要出现在云体中层,表现

为超出 0°C 层几千米的高值 ($Z_{\text{DR}} > 3 \text{ dB}$ 或 $K_{\text{DP}} > 2^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$) 柱状区(图 3a, 3b), 通常在高于 0°C 层的仰角[图 2e 和 2f, 仰角 6° 对应高度 4.6 km, 08 时探空融化层高度为 4.44 km, 融化层计算方法参照俞小鼎(2014)]上可观测到。图 3a 中 Z_{DR} 柱可向上延伸至 6 km。由于 Z_{DR} 大值对应着大雨滴, 表明此处云体内 0°C 层以上仍存在大雨滴, 而通常认为水滴在过冷层会发生冻结, 该现象的出现说明此处有强上升气流将暖区的雨滴瞬间带入过冷区且并未立即冻结所形成 (Kumjian et al, 2010; Kumjian and Ryzhkov, 2012)。因此, 利用 Z_{DR} 柱可判断强上升气流以及过冷水含量高值区的位置, 即人工防雹作业冷云催化剂所需要寻找的播撒区。 K_{DP} 柱出现在 Z_{DR} 柱北侧, 即上升气流的左侧(面向移动方向)(图 2f, 图 3b)。虽然 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱表现特征相似, 但从 K_{DP} 对应的降水粒子特征来看, K_{DP} 柱的水成物类型与 Z_{DR} 柱存在明显不同, 即 K_{DP} 柱除了雨滴还包含了大量融化的冰粒子, 该判断与 Loney et al (2002) 的研究结果类似。

2.1.3 近地层~中层特征

12:59 强对流云体发展至成熟阶段(图 4), 此时近地层 0.5° 仰角(图 4a) 回波强度显著增强, 并且出现了钩状回波。Picca and Ryzhkov(2012)指出通常

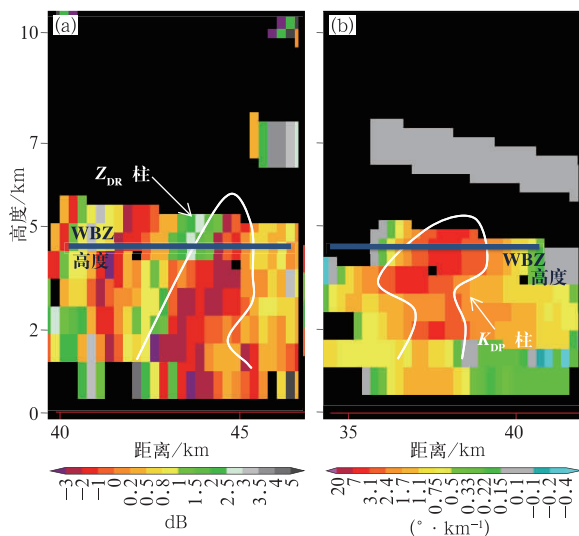


图3 2017年4月19日12:19 双偏振雷达
参量(a) Z_{DR} 柱和(b) K_{DP} 柱剖面
(WBZ 高度为融化层高度)

Fig. 3 Profiles of the dual-polarization radar
variables at 12:19 BT 19 April 2017
(a) Z_{DR} column, (b) K_{DP} column
(WBZ: wet blub zero)

云体内上升气流增强 10~15 min 后地面降水速率或降雹强度出现增加。在 4 月 19 日超级单体个例中, Z_{DR} 柱向上发展比近地层反射率因子 Z_{H} 增强提早了 20 min 以上(图 2a, 图 4a)。与此同时, 在云体移动前侧, 特别是近地面强 Z_{H} 区前侧, Z_{DR} 高值区(最大值可达 4~5 dB)表现为弧状或带状(图 4b), 被称为 Z_{DR} 弧, 其水平尺度较窄但垂直高度可向上延伸至 0°C 层附近(图 4f)。 Z_{DR} 高值和 Z_{H} 低值意味着 Z_{DR} 弧区域主要为大雨滴构成且浓度不高; 而后侧的强 Z_{H} 区域对应 $Z_{\text{DR}} \approx 1 \text{ dB}$ 说明此处以高浓度的小雨滴为主。由此可以认为 Z_{DR} 弧是云体前侧的垂直环境风切变增强导致大、小雨滴下落轨迹及落区出现显著分离的结果 (Kumjian and Ryzhkov, 2008; Jung et al, 2010; Dawson II et al, 2014; 2015)。

在中层 6.0° 仰角(图 4f) Z_{DR} 弧后侧区域 Z_{DR} 的值在 0~1 dB, 而对应的 $Z_{\text{H}} > 45 \text{ dBz}$, 说明此处以冰雹或者霰粒为主, 因而没有观测到 Z_{DR} 柱。但中层仍有 K_{DP} 柱存在(图 4g), 其对应的低层(图 4c) K_{DP} 最大值也增加到 $3^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 以上, 高值区面积明显增加, Romine et al (2008) 将其定义为 K_{DP} 印 (K_{DP} foot)。近地面 K_{DP} 印与 Z_{H} 高值区重合, 但对应的微物理意义又不完全相同, 主要区别在于 Z_{H} 高值区可包含雨滴、融化的小冰雹以及冰雹大粒子等, 而 K_{DP} 印对应的是雨滴和融化小冰雹, 不包含大颗粒的冰雹; 同时, 又由于大冰雹不符合瑞利散射 (Kumjian, 2013b), K_{DP} 在大冰雹区易出现缺值(例如图 4e 中 Z_{H} 高值对应图 4f 中 Z_{DR} 负值和图 4g 中 K_{DP} 的缺值), 因而可用于判断云系中大冰雹区所在位置。

CC 谷依然在成熟阶段的 0.5° 、 6° (图 4d 和 4h) 都能观测到, 说明成熟阶段云系的低层入流结构还是很强, 特别是 CC 谷从低层一直延伸至中层, 部分与 Z_{DR} 弧及 K_{DP} 缺值区重合, 该处低值由冰雹和大雨滴共同造成, 另一部分(图 4e 和 4h 中的圆圈处)与图 2 中 6° 中气旋核以及 Z_{H} 的钩状回波重合, 对应着该单体的有界弱回波区(图略)。

2.1.4 高层特征

云体内的高层(14° 仰角, 图 4l) 存在一个 CC 低值区 (0.85~0.95), 其对应着高值 Z_{H} (图 4i) 以及负值 Z_{DR} (图 4j)。 Picca and Ryzhkov(2012) 的统计研究结果认为负值 Z_{DR} 叠加 $\text{CC} < 0.9$ 预示该处大冰雹的存在, 与此处 K_{DP} 出现缺值相互印证(图 4k)。同

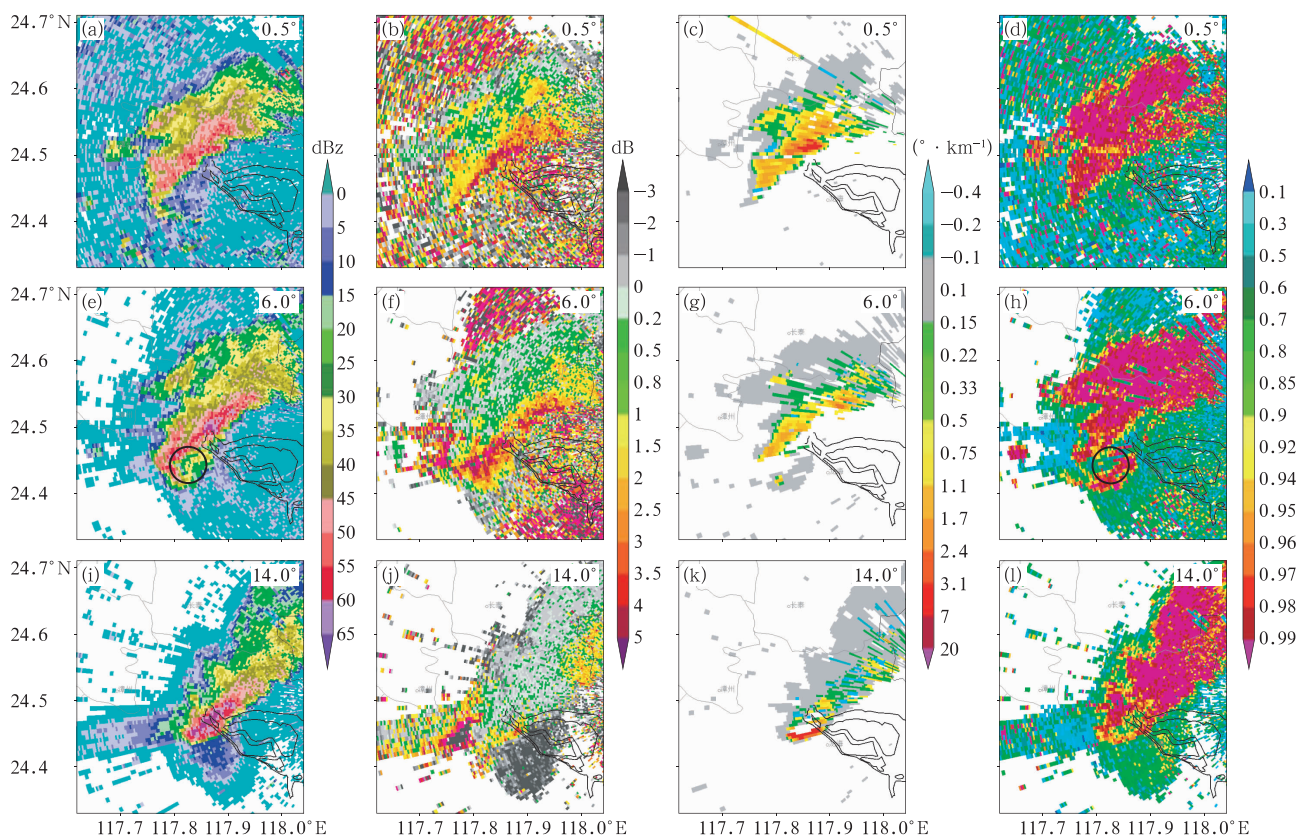


图 4 2017 年 4 月 19 日 12:59 双偏振雷达不同仰角的 Z_H (a, e, i), Z_{DR} (b, f, j), K_{DP} (c, g, k) 和 CC (d, h, l)
(a, b, c, d) 0.5° , (e, f, g, h) 6.0° , (i, j, k, l) 14°
(图 4e, 4h 中的圆圈为中气旋所在位置)

Fig. 4 PPI display of the dual-polarization radar variables at 0.5° elevation (a, b, c, d),
 6.0° elevation (e, f, g, h), and 14.0° elevation (i, j, k, l) at 12:59 BT 19 April 2017
(a, e, i) Z_H , (b, f, j) Z_{DR} , (c, g, k) K_{DP} , (d, h, l) CC
(Circles are the location of mesocyclone in Figs. 4e, 4h)

时,该区域的差分相位 Φ_{DP} 范围在 $24^\circ \sim 72^\circ$ (图略), Balakrishnan and Zrníc (1990) 研究发现干冰雹的 Φ_{DP} 变化幅度很小,基本在 10° 以内,而含水量为 40% 的冰雹最大能达到 50° 以上。另外, Dennis and Musil (1973) 利用模式分析 $-20^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ 层为冰雹主要的湿增长区域,因而图 4i 中的该区域(海拔为 7.5 km, 温度在 -15°C 左右)的大冰雹可能以高含水量的湿增长为主,具体的物理机制还需要通过数值模拟进一步证实。

2.2 普通降雹单体

本节选取 2018 年 8 月 1 日的普通降雹个例(地面 14 时观测到降雹),将双偏振特征(图 5)与超级单体进行对比分析。在云体发展阶段(13:24),低层

能观测到明显的 CC 谷(图 5c)位于图 5b 的中气旋区,在中层(图 5e 中 9.9° 仰角对应高度 5.2 km 左右,当日 08 时融化层温度 4.9 km)有明显的 Z_{DR} 柱(高值区最高可达 6.8 km),此时 K_{DP} 柱较弱(图 5f)。随着云体发展到成熟阶段(13:36),低层的 Z_H 最大值增强至 55 dBZ (图略), 9.9° 仰角的 Z_H 也出现明显增强(图 5g), Z_H 高值区对应 Z_{DR} 值(图 5h)在 0 dB 左右,说明此处有冰雹出现;同时 K_{DP} 柱(图 5i)较发展阶段显著增强,说明云体中部为大量融化冰粒子与雨滴的混合相态。

与超级单体相比较,普通降雹单体主要出现的有 CC 谷、 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱、 Z_{DR} 弧、 K_{DP} 印等其他特征没有出现,这主要与强对流云体内部气流结构和强度差异有关。

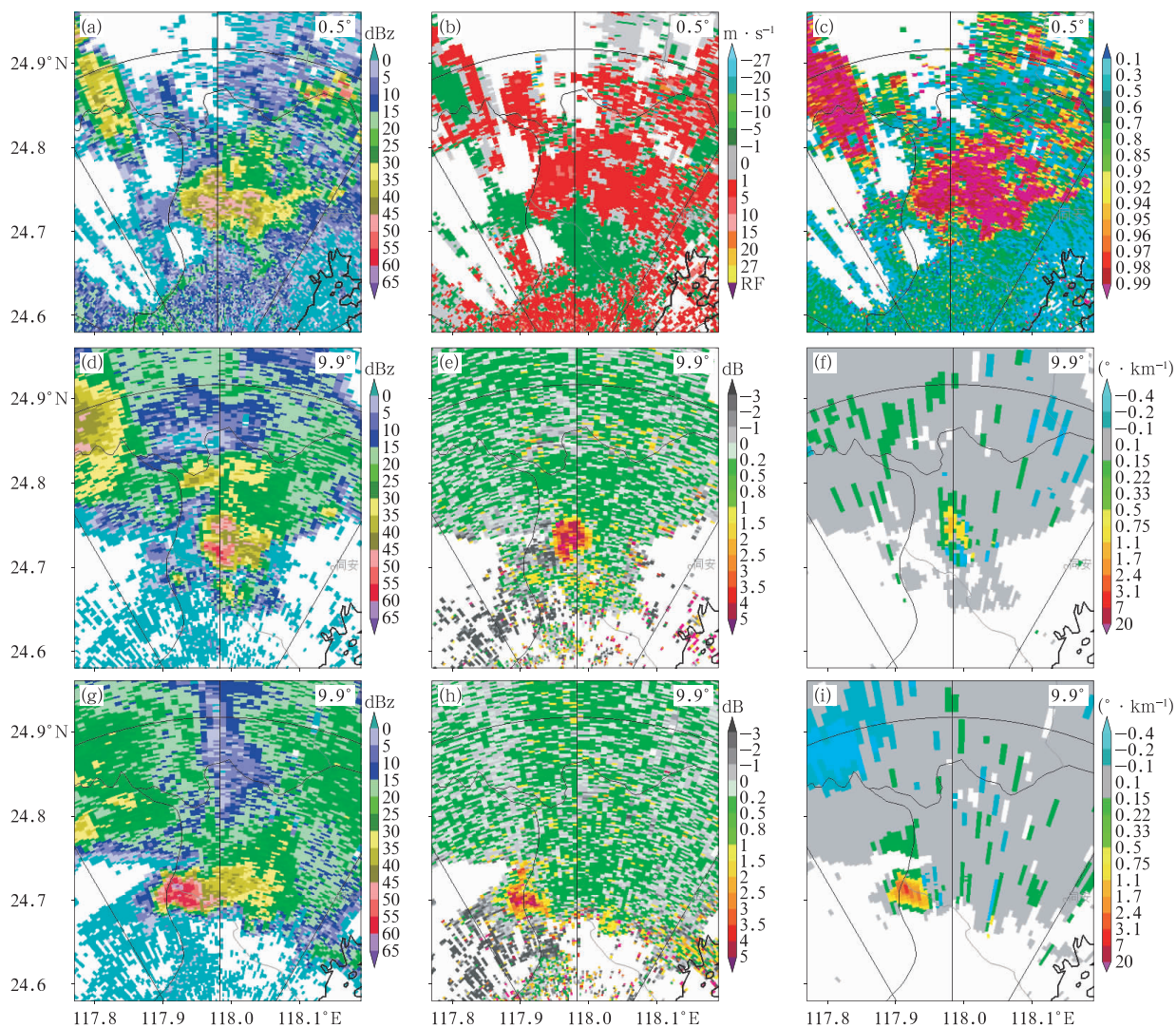


图 5 2018 年 8 月 1 日 13:24 的 0.5° 仰角的 Z_H (a), V (b), CC (c) 以及 13:24 (d, e, f) 和 13:36 (g, h, i) 两时刻 9.9° 仰角的 Z_H (d, g), Z_{DR} (e, h), K_{DP} (f, i)

Fig. 5 PPI display of the dual-polarization radar variables, taken at 13:24 BT at 0.5° elevation:

(a) Z_H , (b) V , (c) CC ; at 9.9° elevation at 13:24 BT: (d) Z_H , (e) Z_{DR} , (f) K_{DP} ;

9.9° elevation at 13:36 BT: (g) Z_H , (h) Z_{DR} , (i) K_{DP} on 1 August 2018

2.3 非降雹强对流单体

另外,还选取 2017 年 9 月 28 日非降雹的强雷暴云体进行对比分析。在雷暴云发展阶段,低仰角 (0.5°) 没有明显的 CC 谷特征 (图 6b), 在中层 (9.9° 仰角对应海拔 5 km 左右, 当日 08 时融化层高度为 4.55 km) 有观测到明显的 Z_{DR} 柱 (图 6c) 和 K_{DP} 柱 (图 6d)。到了强雷暴云成熟阶段,低层 Z_H 、 Z_{DR} 明显增强 (图 6e 和 6f), 且低层 Z_H 的增强 (图 6a 和 6e) 依然在 Z_{DR} 柱增强 15 min 后, 但仍没有形成 Z_{DR} 弧和 K_{DP} 印。同时, 中层 Z_H 以及 K_{DP} 柱强度显著增

强 (图 6h), 而 Z_{DR} 柱结构和强度明显比发展阶段减弱, 但仍大于 1 dB (图 6g), 说明此时云体内部的上升气流减弱, 以大雨滴为主没有出现冰雹。

综上所述, 由于三个不同强度的对流单体中都观测到了 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱, 可以认为这两个特征是强对流云体内部普遍存在的动力特征, 特别是 Z_{DR} 柱在强对流发展初期即可出现, 而 CC 谷则需要对流程度足够形成明显的入流区时才会出现; 随着强对流云体的发展成熟, 中层的 Z_{DR} 随着上升气流强度变化先增后减, 中低层的 Z_H 和 K_{DP} 则是随着降水粒子降落逐步增加, 这与冯晋勤等 (2018) 观测到的

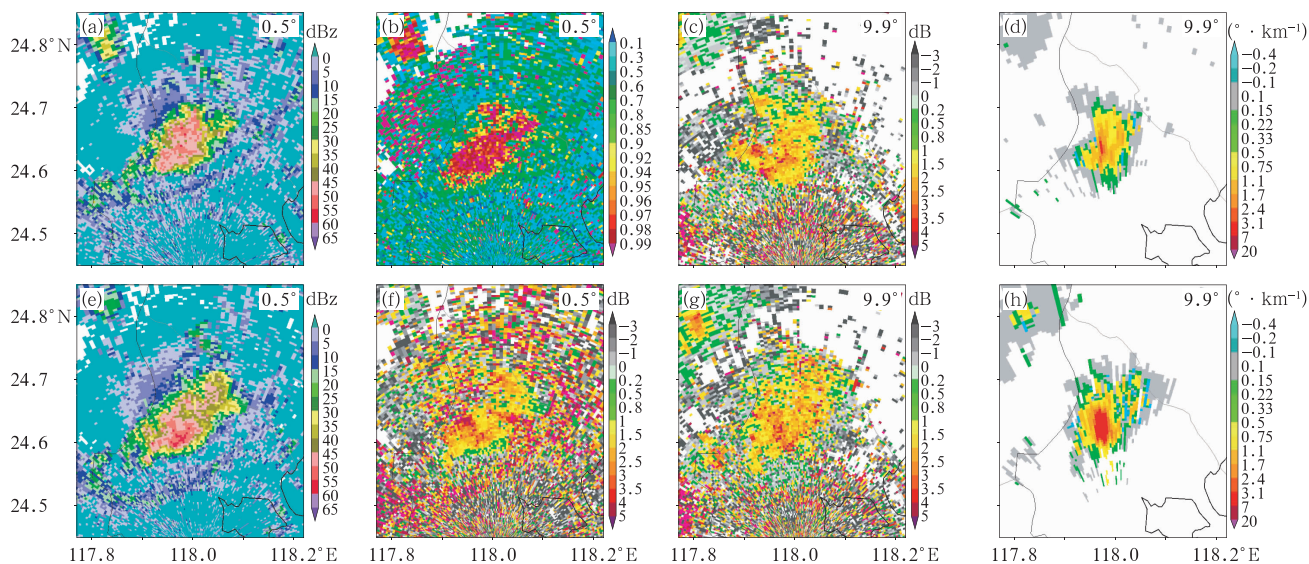


图 6 2017 年 9 月 28 日 15:27(a,b,c,d)和 15:39(e,f,g,h)不同仰角的 Z_H (a,e), CC (b), Z_{DR} (c,f,g)和 K_{DP} (d,h)
(a,b,e,f)0.5°, (c,d,g,h)9.9°

Fig. 6 PPI display of the dual-polarization radar variables, taken at 15:27 BT (a, b, c, d)
and 15:39 BT (e, f, g, h) 28 September 2017
at 0.5° elevation (a, b, e, f) and 9.9° elevation (c, d, g, h)
(a, e) Z_H , (b) CC , (c, f, g) Z_{DR} , (d, h) K_{DP}

福建冬季降雹个例分析结果类似。同时,通过判断 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱的发展可以为提前预测未来云体演变趋势及降雹或强降水提供参考依据。

3 结论与讨论

本文通过厦门 S 波段双偏振雷达分别观测到的超级单体、普通降雹单体和非降雹单体三个不同强度的强对流个例,分析其在发展、成熟阶段出现的双偏振参数特征,具体结论如下:

(1) 超级单体发展阶段,低仰角能观测到 CC 谷对应中气旋区,中层仰角(0℃层附近)能观测到 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱;成熟阶段,低层 Z_H 增强,在云体移动前侧观测到 Z_{DR} 弧(可延伸至中层)以及 K_{DP} 印,利用 K_{DP} 的缺值搭配 Z_H 高值可以定位云中的大冰雹区,由于入流强盛 CC 谷从低仰角一直延伸到中高层,在高层出现部分 CC 低值 Z_H 高值 Z_{DR} 负值区,该特征表征大冰雹的存在;

(2) 普通降雹单体与超级单体相同,在发展成成熟阶段也能观测到低层的 CC 谷、中层的 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱,低层的 Z_H 增强在中层 K_{DP} 柱随着云体成

熟而增强,但没有观测到 Z_{DR} 弧、 K_{DP} 印结构;非降雹云体仍可观测到 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱, Z_{DR} 柱发展增强在低层 Z_H 增强前,但无 CC 谷;

(3) Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱是强对流云体内部普遍存在的动力特征, Z_{DR} 柱不仅可用于识别过冷水区还具有云体发展趋势的预测能力,利用 CC 谷可识别强单体的入流区, K_{DP} 柱、 K_{DP} 印及其空缺可识别强降水、大冰雹区等,因此双偏振参量特征识别在强对流短时临近预警预报、人工防雹方面都具有很强应用潜力。

参考文献

- Bringi V N, Chandrasekar V, 2010. 偏振多普勒天气雷达原理和应用 [M]. 李忱, 张越, 译. 北京: 气象出版社: 263-349. Bringi V N, Chandrasekar V, 2010. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications [M]. Li C, Zhang Y, trans. Beijing: China Meteorological Press: 263-349 (in Chinese).
- 曹俊武, 刘黎平, 葛润生, 2005. 模糊逻辑法在双线偏振雷达识别降水粒子相态中的研究 [J]. 大气科学, 29(5): 827-836. Cao J W, Liu L P, Ge R S, 2005. A study of fuzzy logic method in classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurement [J]. Chin J Atmos Sci, 29(5): 827-836 (in Chinese).
- 陈秋萍, 陈齐川, 冯晋勤, 等, 2015. “2012. 4. 11”两个强降雹超级单体

- 特征分析[J]. 气象, 41(1): 25-33. Chen Q P, Chen Q C, Feng J Q, et al, 2015. Analysis of two severe hail supercell storms on 11 April 2012[J]. Meteor Mon, 41(1): 25-33(in Chinese).
- 陈秋萍, 邓志, 苏万康, 2003. 闽北一次降雹过程的新一代天气雷达回波特征[J]. 气象, 29(3): 41-45. Chen Q P, Deng Z, Su W K, 2003. Echo features of a hail process with CINRAD Data in northern Fujian Province[J]. Meteor Mon, 29(3): 41-45(in Chinese).
- 冯晋勤, 黄爱玉, 张治洋, 等, 2012a. 基于新一代天气雷达产品闽西南强对流天气临近预报方法研究[J]. 气象, 38(2): 197-203. Feng J Q, Huang A Y, Zhang Z Y, et al, 2012a. Studies on strong convective weather forecast method in southwestern Fujian Province based on CINRAD/SA radar products[J]. Meteor Mon, 38(2): 197-203(in Chinese).
- 冯晋勤, 汤达章, 王新强, 等, 2010a. 新一代天气雷达超级单体风暴中气旋特征分析[J]. 大气科学学报, 33(6): 738-744. Feng J Q, Tang D Z, Wang X Q, et al, 2010a. Mesocyclone features of supercell storms from CINRAD/SA[J]. J Nanjing Inst Meteor, 33(6): 738-744(in Chinese).
- 冯晋勤, 汤达章, 俞小鼎, 等, 2010b. 新一代天气雷达中气旋识别产品的统计分析[J]. 气象, 36(8): 47-52. Feng J Q, Tang D Z, Yu X D, et al, 2010b. The accuracy statistics of mesocyclone identification products from CINRAD/SA[J]. Meteor Mon, 36(8): 47-52(in Chinese).
- 冯晋勤, 俞小鼎, 傅伟辉, 等, 2012b. 2010 年福建一次早春强降雹超级单体风暴对比分析[J]. 高原气象, 31(1): 239-250. Feng J Q, Yu X D, Fu W H, et al, 2012b. Comparative analysis on supercell storm structure of a severe hail shooting in Fujian Province in early spring of 2010[J]. Plateau Meteor, 31(1): 239-250(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).
- 刘黎平, 钱永甫, 王致君, 1996. 用双线偏振雷达研究云内粒子相态及尺度的空间分布[J]. 气象学报, 54(5): 590-599. Liu L P, Qian Y F, Wang Z J, 1996. The study of spacial distribution of phase and size of hydrometeors in cloud by dual linear polarization radar[J]. Acta Meteor Sin, 54(5): 590-599(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-B and dual linear polarization radar[J]. Sci Atmos Sic, 16(3): 370-376(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).
- 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).
- 鲁德金, 陈钟荣, 袁野, 等, 2015. 安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析[J]. 气象, 41(9): 1104-1110. Lu D J, Chen Z R, Yuan Y, et al, 2015. Analysis on radar echo characteristics of hail clouds in spring and summer of Anhui Province[J]. Meteor Mon, 41(9): 1104-1110(in Chinese).
- 马学谦, 陈跃, 张国庆, 等, 2015. X 波段双偏振雷达对不同坡度地形云探测个例分析[J]. 干旱气象, 33(4): 675-683. Ma X Q, Chen Y, Zhang G Q, et al, 2015. Analysis of topographic cloud on different slope observed by X-band dual-polarized radar[J]. J Arid Meteor, 33(4): 675-683(in Chinese).
- 覃靖, 潘海, 刘蕾, 2017. 柳州“4·09”致灾冰雹的超级单体风暴过程分析[J]. 气象, 43(6): 745-755. Qin J, Pan H, Liu L, 2017. Analysis of supercell storm leading to disastrous hail in Liuzhou on 9 April 2016[J]. Meteor Mon, 43(6): 745-755(in Chinese).
- 陶岚, 戴建华, 孙敏, 2016. 一次雷暴单体相互作用与中气旋的演变过程分析[J]. 气象, 42(1): 14-25. Tao L, Dai J H, Sun M, 2016. Analysis on interaction of thunderstorms and evolution of mesocyclones[J]. Meteor Mon, 42(1): 14-25(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).
- 王洪, 吴乃庚, 万齐林, 等, 2018. 一次华南超级单体风暴的 S 波段偏振雷达观测分析[J]. 气象学报, 76(1): 92-103. Wang H, Wu N G, Wan Q L, et al, 2018. Analysis of S-band polarimetric radar observations of a hail-producing supercell[J]. Acta Meteor Sin, 76(1): 92-103(in Chinese).
- 王建林, 刘黎平, 曹俊武, 2005. 双线偏振多普勒雷达估算降水方法的比较研究[J]. 气象, 31(8): 25-30, 41. Wang J L, Liu L P, Cao J W, 2005. A comparison of methods of rainfall rate measurements by dual linear polarization Doppler Radar[J]. Meteor Mon, 31(8): 25-30, 41(in Chinese).

- 吴木贵,张信华,傅伟辉,等,2013.2010年3月5日闽北经典超级单体风暴天气过程分析[J].高原气象,32(1):250-267. Wu M G, Zhang X H, Fu W H, et al, 2013. Analysis on weather process of classic supercell storm in northern part of Fujian on 5 March 2010[J]. Plateau Meteor, 32(1):250-267(in Chinese).
- 夏文梅,王晓君,孙康远,等,2016.V型缺口在C波段多普勒雷达中的应用研究[J].气象,42(1):67-73. Xia W M, Wang X J, Sun K Y, et al, 2016. Application study of 'V' notch used in C band Doppler Radar[J]. Meteor Mon, 42(1):67-73(in Chinese).
- 徐芬,郑媛媛,肖芹,等,2016.江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析[J].气象,42(5):567-577. Xu F, Zheng Y Y, Xiao H, et al, 2016. Mesoscale characteristics of a severe hail event over the area along Yangtze River in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 42(5):567-577(in Chinese).
- 俞小鼎,2014.关于冰雹的融化层高度[J].气象,40(6):649-654. Yu X D, 2014. A note on the melting level of hail[J]. Meteor Mon, 40(6):649-654(in Chinese).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社:116-120. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press: 116-120(in Chinese).
- 周仲岛,高聿正,修荣光,等,2016.台北都会区豪雨型午后雷暴的观测特征与预报挑战:2015年6月14日个案研究[J].大气科学,44(1):57-82. Jou B J D, Kao Y C, Hsiu R G R, et al, 2016. Observation characteristics and forecast challenges of heavy rain afternoon thunderstorms in Taipei metropolitan area: June 14, 2015 case study[J]. Atmos Sci, 44(1):57-82(in Chinese).
- Balakrishnan N, Zrnić D S, 1990. Use of Polarization to characterize precipitation and discriminate large hail[J]. J Atmos Sci, 47(13):1525-1540.
- Brandes E A, Vivekanandan J, Tuttle J D, et al, 1995. A study of thunderstorm microphysics with multiparameter radar and aircraft observations[J]. Mon Wea Rev, 123(11):3129-3143.
- Brandes E A, Zhang G F, Vivekanandan J, 2003. An evaluation of a drop distribution-based polarimetric radar rainfall estimator[J]. J Appl Meteor, 42(5):652-660.
- Bringi V N, Knupp K, Detwiler A, et al, 1997. Evolution of a Florida thunderstorm during the convection and precipitation/electrification experiment; the case of 9 August 1991[J]. Mon Wea Rev, 125(9):2131-2160.
- Bringi V N, Seliga T A, Aydin K, 1984. Hail detection with a differential reflectivity radar[J]. Science, 225(4667):1145-1147.
- Dawson II D T, Mansell E R, Jung Y, et al, 2014. Low-level Z_{DR} 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.
- Dennis A S, Musil D J, 1973. Calculations of hailstone growth and trajectories in a simple cloud model[J]. J Atmos Sci, 30(2):278-288.
- 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.
- 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.
- Kumjian M R, 2013a. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II: warm- and cold-season applications[J]. J Operational Meteor, 1(20):243-264.
- 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, Mishra S, Giangrande S E, et al, 2016. Polarimetric radar and aircraft observations of saggy bright bands during MC3E[J]. J Geophys Res: Atmos, 121(7):3584-3607.
- Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(7):1940-1961.
- Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2012. The impact of size sorting on the polarimetric radar variables[J]. J Atmos Sci, 69(6):2042-2060.
- 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.
- Picca J, Ryzhkov A, 2012. A dual-wavelength polarimetric analysis of the 16 May 2010 Oklahoma city extreme hailstorm[J]. Mon Wea Rev, 140(4):1385-1403.
- 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.
- Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al, 2005. The joint polarization experiment: polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification[J]. Bull Amer Meteor Soc, 86(6):809-824.
- Snyder J C, Ryzhkov A V, Kumjian M R, et al, 2015. A Z_{DR} column detection algorithm to examine convective storm updrafts[J]. Wea Forecasting, 30(6):1819-1844.
- Zhang G, Vivekanandau J, Brandes E, 2001. A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 39(4):830-841.