

赖晨,支树林,李婕,等,2020. SC 型双偏振雷达在江南南部一次对流性天气过程中的应用分析[J]. 气象,46(11):1427-1439.  
Lai C, Zhi S L, Li J, et al, 2020. Application of SC dual-polarization radar to a convective weather case in south to Yangtze River [J]. Meteor Mon, 46(11):1427-1439(in Chinese).

## SC 型双偏振雷达在江南南部一次对流性天气过程中的应用分析\*

赖 晨<sup>1,2</sup> 支树林<sup>2</sup> 李 婕<sup>2</sup> 杨 钢<sup>2,3</sup>

1 江西省大气探测技术中心,南昌 330096

2 江西省气象台,南昌 330096

3 江西省吉安市气象局,吉安 343000

**提 要:** 2019 年 3 月 21 日发生在江南南部地区的区域性对流天气灾害种类多,强度强,范围广,也是江西吉安 SC 型多普勒雷达进行双偏振改造后遇到的首次区域性强对流过程。利用其探测资料,分析了双偏振雷达参量的分布与演变特征,并与地闪等观测资料进行对比,探究了其在短时强降水和风雹天气中的不同特征,结果发现:此次过程中,发生短时强降水期间,低仰角的水平反射率  $Z_H$  和差分反射率  $Z_{DR}$  会出现增大,且比地面分钟级雨量开始增大的时间显著超前,而地闪频数的增大要更超前,比  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  开始增大的时间分别早 6 min 和 5~10 min;差分相移率  $K_{DP}$  峰值出现时间滞后于闪电频数峰值约 15 min,反映出此次过程中这些特征有助于预测地面雨强的演变趋势。在风雹过程中, $Z_H$  开始增加的时刻超前于地面降雹时刻约 15 min,其他偏振量的提前时间更早;同时,冰雹发生时地闪频数迅速增大,这些特征在此次过程中对冰雹的预报具有很好的指示作用。此外还探究了由  $Z_H$  得到的冰相粒子降水含量  $M$  与降雹时间的关系,发现前者提前于后者 15 min 出现激增,且高度越高, $M$  峰值就出现得越早,因此可为提前预报出地面降雹的可能时刻提供参考。

**关键词:** SC 型双偏振雷达,冰雹,短时强降水,地闪

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.004

## Application of SC Dual-Polarization Radar to a Convective Weather Case in South to Yangtze River

LAI Chen<sup>1,2</sup> ZHI Shulin<sup>2</sup> LI Jie<sup>2</sup> YANG Gang<sup>2,3</sup>

1 Jiangxi Atmospheric Detection Technology Center, Nanchang 330096

2 Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330096

3 Ji'an Meteorological Office of Jiangxi Province, Ji'an 343000

**Abstract:** On 21 March 2019, a large-scale convective weather disaster occurred in the southern part of the south to Yangtze River, and it was also the first regional severe convection case encountered after the dual-polarization transformation of the Ji'an SC Doppler Radar in southern Jiangxi. Based on the radar detection data, the distribution and evolution characteristics of the dual-polarized radar parameters were analyzed, and compared with the observation data of cloud-to-ground flashes (CGs). Besides, the differences in performance characteristics between short-time severe rain and hailstorm were explored. The results show that in this case the increase of the horizontal reflectivity  $Z_H$  and the differential reflectivity  $Z_{DR}$  at low elevation

\* 中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2019-058)资助

2019 年 7 月 26 日收稿; 2020 年 7 月 20 日收修定稿

第一作者:赖晨,主要从事雷达资料分析研究. E-mail:laichenqx@163.com

通讯作者:支树林,主要从事短临天气预报方法研究. E-mail:zhisl00@126.com

angles are significantly ahead of the change of ground rainfall, while the changes of CGs frequency are more advanced, over 6 min earlier than  $Z_H$  and about 5–10 min earlier than  $Z_{DR}$ . The peak time of  $K_{DP}$  lags behind lightning for about 15 min, which could help to predict the evolution trend of ground rain intensity in this process. During the hailstorm process, the moment when  $Z_H$  begins to increase is about 15 min before the ground sag, and the other polarizations advance even earlier. At the same time, CGs increase rapidly when hail occurs. These characteristics have a good indication for hail predictions in this process. In addition, this paper also explores the relationship between the precipitation value  $M$  of ice particles and hail. It was found that it surges 15 min ahead of falling to the ground, and the higher the altitude, the earlier the  $M$  peak appears. This could provide reference for predicting the possibility moment of hail.

**Key words:** SC dual-polarization radar, hail, short-time severe rain, cloud-to-ground flashes (CGs)

## 引 言

双偏振雷达作为单偏振雷达的升级产品,正广泛被应用于气象业务,因此对双偏振雷达应用的研究也越来越多。相比于单偏振雷达,它不仅能获取雷达回波的反射率、速度和谱宽,还能获取雷达偏振量,如差分反射率( $Z_{DR}$ )、差分相位( $\Phi_{DP}$ )、差分相移率( $K_{DP}$ )和相关系数( $\rho_{HV}$ )等。这些偏振量不仅能用来分析天气过程、识别粒子相态,还能为降水、降雹的预报提供信息。

国外最早由 Seliga and Bringi(1976)提出了同时利用水平和垂直两种偏振波来探测雷达回波反射率,这是双偏振天气雷达概念首次被提出,之后双偏振雷达便进入快速发展阶段,到现在,国外对双偏振雷达的研究已较成熟,它被广泛应用于雨量反演(Ryzhkov et al, 2005a)、水汽分类(Ryzhkov et al, 2005b)、风暴特征分析(Reinoso-Rondinel et al, 2014)、降水云特征分析(Bechini et al, 2013)、粒子相态识别(Liu and Chandrasekar, 2000)以及冰雹观测(Ryzhkov et al, 2005b)等等。传统的冰雹探测算法(HDA)不能明确指出实际降雹的位置,而偏振雷达水凝物分类算法(HCA)则可精确给出风暴单体中的雹区,且后者的整体准确性和性能均优于前者(Ryzhkov et al, 2005b)。Matthew et al(2010)提出了一种快速高分辨率的扫描策略,这使得国外双偏振雷达能更快速有效地获取各类天气过程的特征。

国内双偏振雷达应用较晚,但也已取得许多成果。利用双偏振雷达可以观测到超级单体的强度、速度和相态分布,当存在钩状回波时,会给附近地面带来降温、大风和强降水,其对认识对流单体中小尺度系统的发展演变有较大帮助(于明慧等, 2019)。

短时强降水和冰雹属于灾害性天气过程,如何对其进行有效的识别并对其进行预报一直深受研究者的青睐。刘黎平等(2016)研究表明,双偏振雷达减小了降水估测随距离变化的影响,并且冰雹存在对降水估测的影响。雨区的  $Z_{DR} > 0$  dB,且雨滴越大,  $Z_{DR}$  越大;  $K_{DP}$  主要是由液态降水产生,且降雨强度越大,  $K_{DP}$  也越大;液态水的  $\rho_{HV}$  一般要大于 0.95,甚至能达到 0.99。根据有限的观测资料,降水区域中出现 60 dBz 以上的回波强度,并不一定就会出现冰雹,还有可能是大粒子液态水(曹俊武等, 2005)。同时,国内利用双偏振雷达分析冰雹过程的研究越来越多(王洪等, 2018; 冯晋勤等, 2018)。大量研究表明,在降雹过程中,回波顶高在 10 km 以上,有明显的三体散射、气旋式辐合、高层回波悬垂和强风暴顶辐散等特征(苏冉等, 2018)。偏振雷达水平探测的反射率值较高,通常大于 50 dBz;因为冰雹在下降过程中形变较小,故  $Z_{DR}$  较低,一般为负数;  $K_{DP}$  在  $-0.5 \sim 1.0$   $^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ ,它对冰雹的判识有一定指示意义;  $\rho_{HV}$  会下降,一般处于 0.88~0.97(钟晨等, 2014)。因此,借助这些可判识出冰雹的存在。另外,强天气过程通常会有雷暴伴随,闪电频次与雷达偏振量也有一定的相关性,随着闪电的发生和频次的增加,水平反射率( $Z_H$ )、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  都有不同程度的增加(袁铁和郅秀书, 2010; 李晓敏等, 2017)。研究表明,在有闪电回波区,闪电频次峰值出现在  $Z_H$  为 42 dBz 处,集中在 34~46 dBz;  $Z_{DR}$  出现在 0.4 dB 处,主要集中在  $-0.4 \sim 1.4$  dB;  $K_{DP}$  出现在  $1^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$  处,主要集中在  $0 \sim 2^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$  附近,  $\rho_{HV}$  出现在 0.98 处,集中在 0.96 以上(贺宏兵等, 2014)。这些研究成果为更好地发挥出双偏振雷达的业务应用效益提供了有益参考,江西省所在的江南南部地区多发生对流性天气,但却缺乏双偏振雷达产品的特征及其与对

流活动关系的研究。

吉安 SC 型多普勒雷达于 2018 年夏季完成偏振化改造,成为国内首部该型号的双偏振雷达,由于投入业务应用的时间较短,因此其对强对流天气的分类监测和预警性能尚缺乏足够的认识和效果检验,有必要加强相关研究。该雷达位于江南南部地区,当地及其附近高山和盆地交错,地形复杂,强对流天气频发,气象灾害较为严重,因此也亟需充分发挥出双偏振雷达的优势和效益,以提升对当地强对流天气的分类监测和预警能力。本文针对 2019 年初春江西中北部的一次区域性对流天气过程,对比分析了雷达偏振量在不同类型对流性天气(短时强降水和风雹)发生过程中的变化特征,并与 2018 年底改造完成的三维雷电探测系统资料进行了对比,分析了雷达偏振量与地闪的变化,进而探讨了 SC 型双偏振雷达对江南南部对流性天气的财类型监测和预警能力,可为同类型和其他型号的双偏振雷达参量的定量化应用提供参考。

## 1 数据来源与强天气实况

江西吉安 SC 型多普勒天气雷达的波长为 10.42 cm,频率为 2880 MHz,距离分辨率为 300 m,体积扫描共 9 层仰角,于 2018 年中旬被升级为双偏振雷达,其空间分辨率较改造前有较大幅度提升,因此能更好地被用来分析回波的精细结构;系统输出的偏振参量有助于判识对流天气的主要类型,也为开展更有针对性的预警提供了便利条件,因此,本文

主要针对该雷达的双偏振量数据,分析了它们的空间分布和时间变化。此外,还利用同期的江西省新升级的三维闪电数据以及自动气象站的雨强资料与雷达偏振量进行对比,分析它们在不同类型强对流天气发生前后的特征,在此基础上探讨了包括多普勒雷达偏振参量在内的多源探测数据对判识强对流类型的作用。江西省甚低频/低频(VLF/LF)三维全闪电定位系统于 2018 年底投入业务应用,它由三维闪电探测仪、数据处理中心和数据库、图形显示与产品制作等构成,利用 GPS 卫星精确测量雷暴放电产生的 VLF/LF 辐射源的位置、时间、高度、强度及极性等信息;不仅能探测地闪和云闪,还能对闪电高度三维定位;其水平位置误差小于 300 m,高度误差小于 500 m(郭润霞等,2018;郭润霞和张文龙,2019)。由于三维全闪电定位仪工作在低频环境,不会受到地形遮挡的显著影响,且在探测范围内无衰减和畸变,因此能有效克服雷达低仰角探测常受遮挡的不足,与多普勒雷达互相补充应用能更好地了解对流活动及其变化过程。

此次强对流天气过程自 2019 年 3 月 20 日 22 时(北京时,下同)开始,至 21 日 18 时渐趋结束,集中影响时段约 20 h。图 1 是 20 日 20 时至 21 日 20 时期间江西境内大风(图 1a)、短时强降水(图 1b)和冰雹或霰(图 1c)的分布,从图可以看到,大风主要发生在 21 日 02—20 时,其中,02—08 时主要位于西北部地区,08—14 时东移至东北部,14 时后南移至中部。统计显示,全省共有 42 个站出现 8 级以上大风,站次之多为 1998 年以来第三位,其中有 7 个

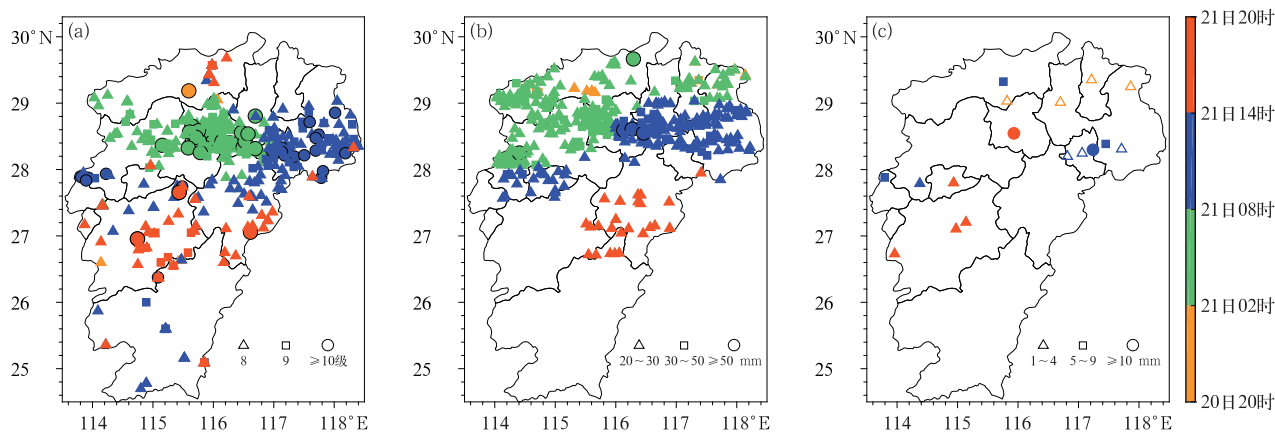


图 1 2019 年 3 月 20 日 20 时至 21 日 20 时雷暴大风(a),短时强降水(b)与冰雹(c)站点分布

Fig. 1 Station distribution of thunderstorm gale (a), short-time severe precipitation (b) and hail (c) from 20:00 BT 20 to 20:00 BT 21 March 2019

站的风速达10级以上,以庐山 $34.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12级)为最大。还可看到,大风天气集中于鄱阳湖平原及其偏东地区,这主要是由于这些地区地势低洼而平坦,且个别地方有喇叭特征,因此有狭管效应存在而易导致形成大风天气。短时强降水主要发生在21日02—20时(图1b),超过200个站次,其中21日02—08时位于江西北部地区,08—14时向东移动,14—20时在中部发展;最大降水强度达 $60.8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。图1c显示冰雹主要发生时段为21日08—20时,共有18个站次,为1998年以来第四位。其发生地集中于环鄱阳湖附近的平原和丘陵地带、以及江西中部的吉泰盆地附近,这些地区地势较低;而地势较高的山区则较少发生冰雹。冰雹的直径以9 mm以下为主,极少超过10 mm。全省因灾死亡5人,直接经济损失达7.4亿元。

## 2 雷达回波演变过程

依据雷达回波形态和主要影响区域,此次强对流天气过程可大致分为三个阶段:纬向多单体回波阶段、飑线回波阶段和多单体雷暴群阶段,对应的时间分别是3月20日23时至21日03时、21日05—15时和21日15—18时。第一阶段的回波呈分散的块状和纬向传播特征(图略),伴随的强对流天气以雷电、短时强降水( $20\sim 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 为主)和局地性风雹为主,影响区域集中于湖北、江西、安徽和浙江四省的交界处;第二阶段的对流性天气最剧烈,表现为对流性回波的范围更广、强度更强,且移速快,江西北部受飑线和多个超级单体回波影响(图略),发生雷暴大风和冰雹天气的站次更多,且短时强降水的分钟级雨量有所增大,其强度达 $30\sim 60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。第三阶段主要受斜压锋生影响阶段,以多单体组成的雷暴群为主,表现为在湖南中部有多单体回波迅速向东发展、进入江西后合并成片状(图略),造成的强对流天气包括冰雹、大风和短时强降水( $20\sim 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 为主),但总体而言较第二阶段弱。

分析造成上述三个影响阶段的环境条件(图略),发现第一阶段是暖平流的强烈发展导致形成强热力不稳定引起的,暖槽和辐合线的稳定少动促使对流天气在地面辐合线附近生成和增强。第二阶段为冷暖平流共同增强引起强烈辐合,从而产生斜压

锋生作用;深厚的正涡度平流和强的垂直上升运动导致中尺度系统强度更强,持续时间更长,因而产生的强对流天气也更剧烈。第三阶段仍受斜压锋生作用,热力不稳定和中尺度温度锋区仍较强,但低空急流较前期有所减弱,垂直风切变也有所减小,因此对流强度有所减弱。

吉安SC型双偏振雷达位于江西中部,该雷达有效探测范围内发生的强对流天气主要为第三阶段,因此本文针对这个阶段,分析了雷达偏振量与其他多源探测资料的定量关系,并在此基础上探讨了双偏振雷达参量判识对流性天气类型的作用。

## 3 雷达偏振量与降水强度的关系

短时强降水是指雨量超过 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水事件,有时会引起局部渍涝危害,因此作为强对流天气的主要类型之一而广受关注,也是预报业务的重要内容。为探究发生短时强降水前后雷达偏振量的变化特征,选取吉安双偏振雷达探测范围内、雨强超过 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的四个自动站雨量资料来进行对比分析,其站号分别为J7246、J7253、J8187和J8220,与吉安雷达的直线距离分别为90.3、98.7、42.3和53.7 km。因空中的云水粒子变成地面降水需要一段时间,故而宜用等高面或低仰角的雷达回波来估计地面降水的强弱,为计算方便,选取了吉安雷达在 $0.5^\circ$ 仰角上的偏振量数据,开展了雷达偏振量与地面分钟级雨量关系的分析。

### 3.1 偏振量与地面分钟级雨量的变化特征

根据雷达体扫时间,将对应时段内的逐分钟雨量进行累加,得出与雷达观测时间对应的分钟级雨量数据,并将其与 $0.5^\circ$ 仰角上的偏振量 $Z_{\text{DR}}$ 、 $K_{\text{DP}}$ 、 $\rho_{\text{HV}}$ 作对比,所得结果如图2所示。

差分反射率 $Z_{\text{DR}}$ 为水平极化与垂直极化回波的反射率因子之比的对数,与粒子的形状有关,它随着粒子扁平程度的增加而增加。对于大雨滴粒子,它在下降过程中形变程度较大,因此 $Z_{\text{DR}}$ 值也较大。以J8220站为例(图2a),分钟级雨量和 $Z_{\text{DR}}$ 均表现为先增大后减小,当分钟级雨量较强时,其 $Z_{\text{DR}}$ 值对应也较大,但两者达到峰值的时间不同;对比发现,分钟级雨量在17:18—17:23最大,达到 $10\text{ mm}\cdot(5\text{ min})^{-1}$ , $Z_{\text{DR}}$ 值则在17:12达到最大值为4.68 dB,超前于前者

约一个体扫的时间,表明低仰角的  $Z_{DR}$  值变化对地面雨量的变化趋势有一定的“预报”作用。同样, J7246 站(图 2b)也呈现出相同的特征:  $Z_{DR}$  达到峰值的时间分别为 16:14 和 16:35,而雨量则在 16:20 和 16:46 达到峰值,  $Z_{DR}$  超前于雨量变化约 6~11 min。J7253 站(图 2c)也是如此。  $Z_{DR}$  值与分钟级雨量的变化有时是同步的,如 J8187 站(图 2d), 17:18 前后雨量最大,为  $9.5 \text{ mm} \cdot (6 \text{ min})^{-1}$ ,此时  $Z_{DR}$  值也达到最大,为 4.53 dB。总体而言,  $Z_{DR}$  值的变化大都超前于地面雨量变化,这有助于提前判断出地面雨强的演变趋势。

差分相移率  $K_{DP}$  是根据前向散射相位计算得到的,不受电磁波衰减和雷达标定误差影响,对滴谱的变化不敏感,且与降水强度呈线性关系,因此常用其进行定量降水估测(Seliga and Bringi, 1976)。从图 2 可以看出  $K_{DP}$  变化也大都超前于地面分钟级雨量的变化,如 J7246 站(图 2b),  $K_{DP}$  双峰值的出现时间分别为 16:20 和 16:41,分钟级雨量出现双峰值的时间分别为 16:20 和 16:47,因此两者基本同步或  $K_{DP}$  略超前一个体扫时间。如 J7253 站(图 2c)的  $K_{DP}$  双峰值出现时间分别为 16:09 和 16:30,分钟级雨量双峰值出现时间为 16:14 和 16:35,因此  $K_{DP}$  较雨量超前约一个体扫时段;再以 J8187 站(图 2d)为

例, 17:07—17:12,  $K_{DP}$  值从  $0.24^\circ \cdot \text{km}^{-1}$  增大至  $1.39^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ,地面雨量则在 17:12—17:18 从  $6 \text{ mm} \cdot (5 \text{ min})^{-1}$  增至最大  $9.5 \text{ mm} \cdot (6 \text{ min})^{-1}$ ,可见  $K_{DP}$  变化更超前;当  $K_{DP}$  值从 17:12 开始逐渐减小,相应的分钟级雨量也在 17:18 之后开始减小,  $K_{DP}$  仍超前约一个体扫。从上述三站的  $K_{DP}$  和雨量分布(图 2b~2d)可以看到,两者的变化趋势几乎完全一致,即  $K_{DP}$  值的变化领先于地面雨量的变化,与 Seliga and Bringi(1976)的研究结果一致,因此可用该参量辅助判断地面降水的演变趋势,但也有例外,如图 2a 可以看到, J8220 站的  $K_{DP}$  与地面雨量的峰值同时出现,因此该站的  $K_{DP}$  变化并没有显著超前雨量变化。

相关系数  $\rho_{HV}$  可用来辅助区分粒子相态,图 2 中这四个站的值都接近 1,尤其 J8187 站(图 2d)的几乎每一个时刻都大于 0.98,显示出它们均以短时强降水为主而无明显风雹伴随。

综上所述,吉安雷达偏振量与地面分钟级雨强的关系密切:在降水过程中,通常  $0.5^\circ$  仰角下探测到的  $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  会超前于地面降水约一个体扫的时间出现跃增,或基本与地面强降水同时发生跃增,  $\rho_{HV}$  维持在 1 附近,它们对判断地面降水演变趋势具有很好的指示作用。

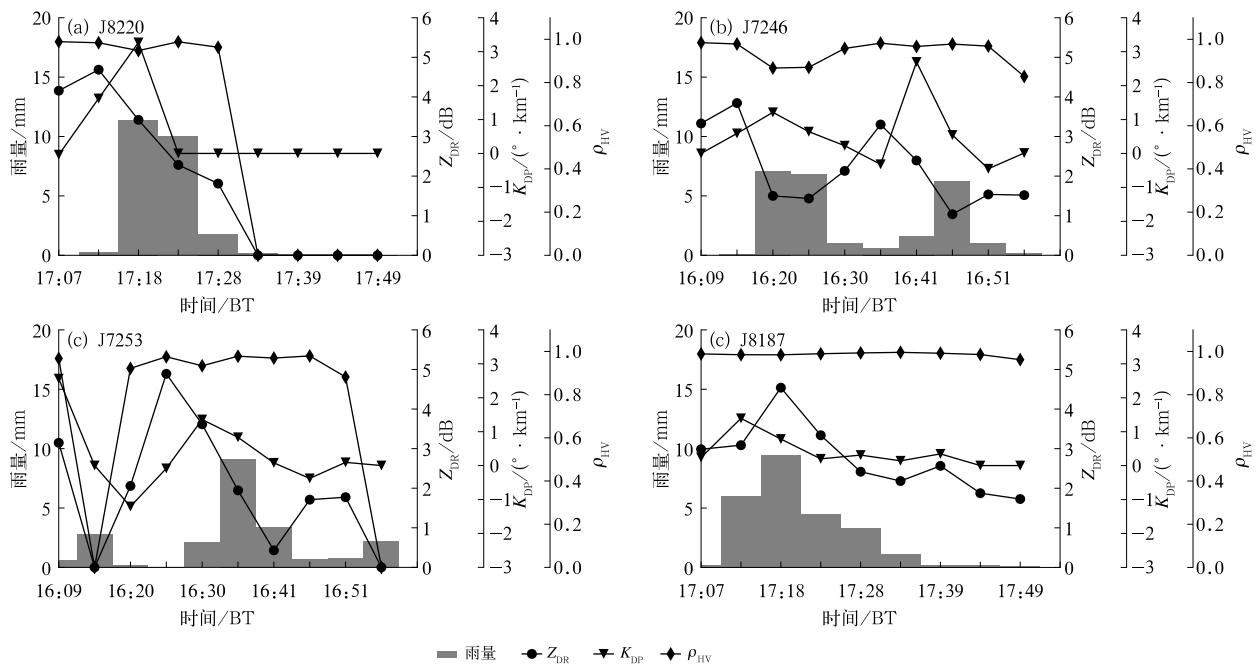


图 2 2019 年 3 月 21 日 16—18 时吉安雷达  $0.5^\circ$  仰角的  $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  和  $\rho_{HV}$  与四个自动站分钟级雨量随时间的变化

Fig. 2  $Z_{DR}$ ,  $K_{DP}$  and  $\rho_{HV}$  of Ji'an Radar at  $0.5^\circ$  elevation and minutely rainfalls of four automatic weather stations with time during 16:00—18:00 BT 21 March 2019

### 3.2 雷达偏振量对降水强度的判识作用

由前文可知,低仰角上的双偏振量与地面分钟级雨强的变化趋势大都一致,且前者变化多超前于后者的变化,因此可利用偏振量来辅助判断雨强的演变趋势;除此之外,它们还能用于判识包括液态降水在内的水凝物的相态(Liu and Chandrasekar, 2000;冯亮等,2018;张杰等,2010)。

当发生短时强降水时,根据张杰等(2010)给出的降水强度识别阈值(表 1),可用来区分小雨、中雨

以及大雨。以两个发生降水的站点(J7253 和 J8187)为例,雷达偏振量如表 2 所示,两个观测站距雷达分别为 98.7 和 42.3 km,根据计算,两站点在  $0.5^\circ$  仰角上的高度分别为 861.6 和 368.7 m。当天温度显示,这两个高度上的温度分别为 20 和  $25^\circ\text{C}$ ,均在零度层以下,因此为液态降水。根据它们的  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  以及  $\rho_{HV}$  的值并与表 1 比较,发现可将两个站点的降水强度划分进中雨等级。为进一步了解降水过程中水凝物粒子的分布,沿着径向的  $280.7^\circ$  方向作各偏振量的垂直剖面产品,得到结果如图 3 所示。

表 1 双偏振雷达降水强度的识别阈值(张杰等,2010)

Table 1 Dual-polarization radar identification threshold of precipitation types (Zhang et al, 2010)

降水类型	$Z_H/\text{dBz}$	$Z_{DR}/\text{dB}$	$K_{DP}/(^{\circ}\cdot\text{km}^{-1})$	$\rho_{HV}$
小雨	$<28.0$	$0.0\sim0.69$	$0.0\sim0.03$	$0.97\sim1.0$
中雨	$28.0\sim44.0$	$0.69\sim2.0$	$0.03\sim0.59$	$0.95\sim1.0$
大雨	$44.0\sim60.0$	$>2.0$	$0.59\sim10.0$	$0.95\sim1.0$

表 2  $0.5^\circ$  仰角上不同降水强度的偏振量值对比

Table 2 Comparison of polarization values of different types of convective weather at  $0.5^\circ$  elevation

站点	时间/BT	降水强度/ $[\text{mm}\cdot(5\text{ min})^{-1}]$	$Z_H/\text{dBz}$	$Z_{DR}/\text{dB}$	$K_{DP}/(^{\circ}\cdot\text{km}^{-1})$	$\rho_{HV}$
站点 1( $98.73\text{ km}, 279.31^\circ$ )	16:35	9.1	44	1.60	0.34	0.98
站点 2( $42.25\text{ km}, 329.21^\circ$ )	16:35	0.4	34	0.80	0.17	0.97

图 3 中,雷达位于图中的左侧位置,黑框处为短时强降水的发生地。由图 3a 可以看到,沿径向上有两个强回波中心,分别位于雷达的西偏北方向约 40~50 km 和 90 km 处,前者的回波水平反射率更强,且强回波面积更大,并有上冲回波高度达到近 15 km 以上,表明对流发展剧烈,因此对应的强天气可能较后者更强,但无相应的地面实况记录来验证;后者则相对弱些,但最大回波强度也高达 55 dBz 左右,其高度约 7 km,且随着高度的增高回波向雷达方向(偏东方向)倾斜,下方的弱回波区则与较强的上升气流相对应,有助于降水的较长时间维持。图 3b 显示,约 4 km 以下  $Z_{DR}$  值介于  $0.5\sim2.5\text{ dB}$ ;基于 ECMWF 再分析资料得到的当天 14 时温度廓线显示, $0^\circ\text{C}$ 、 $-10^\circ\text{C}$  和  $-20^\circ\text{C}$  层高度分别为 3.8、5.6 和 7.3 km,因此 4 km 高度附近为冰水混合层,它的下方区域以液态水为主,可能存在大雨滴。图 3c、3d 显示,4 km 以下发生短时强降水处的  $K_{DP}$  为  $0.2\sim2^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ ,  $\rho_{HV}$  为  $0.96\sim0.99$ ,这是冰水混合态快速过渡到液态降水的高度,因此推测该处以大雨滴为主及可能有霰粒子伴随,而雨夹雹的相关系数在  $0.85\sim0.95$ (郭凤霞等,2014),故排除雨夹雹的可能性,即该处应以大雨滴为主,这也与地面以短时强降水为主的实况相吻合,可见偏振量的垂直剖

面特征有助于判识降水的主要类型及其强度。

### 3.3 雷达偏振量与闪电特征的对比

对流性天气的强度和范围不仅可借助分析雷达产品来认识,还可借助其他探测手段加以了解,闪电资料是其中之一,它具有时空分辨率高等优点,因此可与雷达资料一起作融合应用。本文利用江西省三维闪电系统的地闪资料,对比分析了短时强降水天气发生前后的雷达偏振量与闪电的分布及变化特征,以试图更好地利用多源探测资料的融合来判识降水强度及其演变趋势。

以发生短时强降水的 J7246 和 J7253 站为例,选取了强降水发生时段内的  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  和  $\rho_{HV}$ ,并从三维闪电定位数据中筛选出这两站点附近 10 km 范围内的地闪数据,得到了偏振量与闪电随时间的变化,结果如图 4。可以看到,16:09—16:35 期间是 J7246 站(图 4a)闪电活动均较活跃的时段,地闪最大频数为  $3\text{次}\cdot(6\text{ min})^{-1}$ ;相应地,16:25—16:46 期间  $Z_H$  也有跃增,从 42.5 dBz 增大到 56.5 dBz,该跃增阶段落后于闪电活跃阶段约 20 min。J7253 站(图 4b)也有类似特征:16:09—16:30 期间闪电的活动也很活跃,地闪在 6 min 内发生了 15 次;相应地,16:14—16:25 期间  $Z_H$  从 40.1 dBz 跃增到

60.9 dBz, 其跃增阶段落后于闪电增多阶段 6 min 左右, 可见此次过程中, 地闪活动均超前于雷达  $Z_H$  的变化, 而前文发现  $Z_H$  往往又超前于地面降水的变化, 因此这有助于利用闪电和雷达开展强降水天气的早期识别、跟踪和预警。

分析  $Z_{DR}$  值的变化可以发现, J7246 站(图 4a)于 16:25 开始跃增, 16:30 达峰值, 其值从 1.7 dB

增大到 2.9 dB, 而地闪频数在 16:15 左右首先出现峰值, 因此  $Z_{DR}$  的变化晚于闪电约 10 min。同样, J7253 站点(图 4b)的地闪频数于 16:15 左右达到峰值,  $Z_{DR}$  值则于 16:20 左右达到峰值 3.2 dB, 晚于闪电 5 min, 因此闪电可比雷达  $Z_H$  或  $Z_{DR}$  更早预示出强降水型天气的变化趋势。

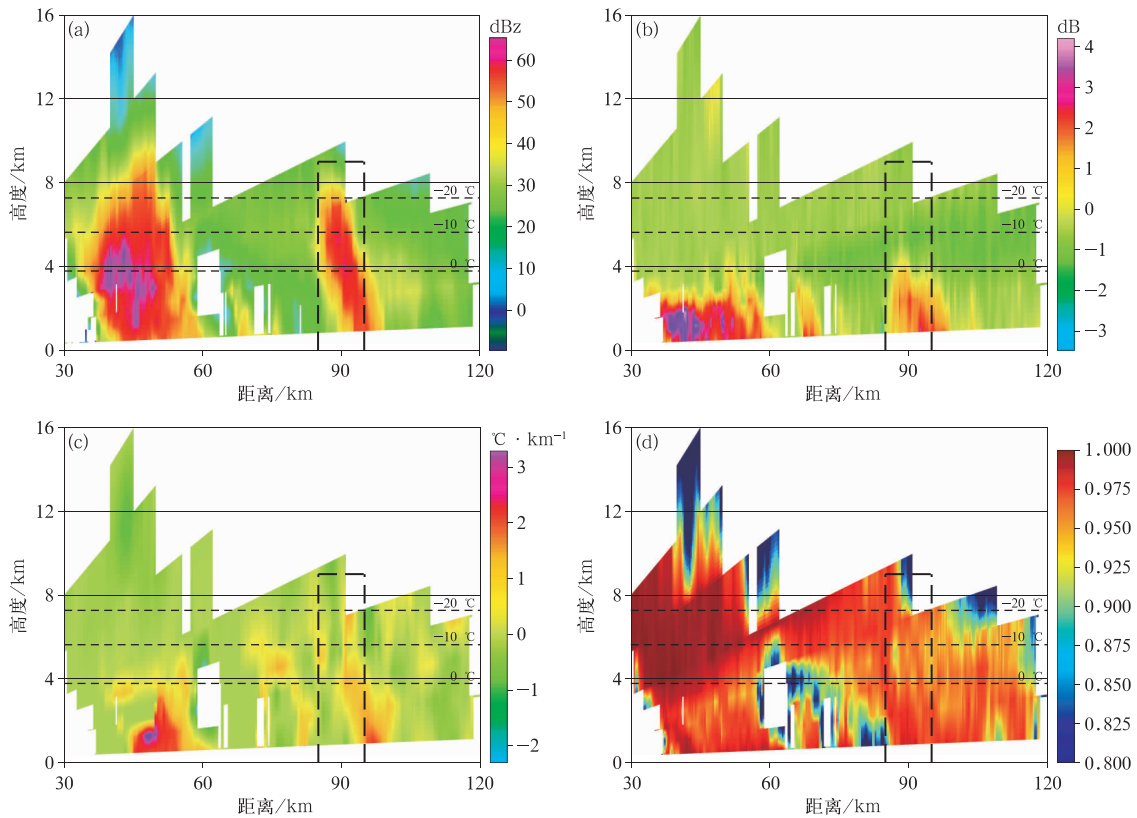


图 3 2019 年 3 月 21 日 16:35 短时强降水站点附近的偏振量垂直分布

(a)  $Z_H$ , (b)  $Z_{DR}$ , (c)  $K_{DP}$ , (d)  $\rho_{HV}$

Fig. 3 Vertical distribution of polarization parameters near short-time severe precipitation

(a)  $Z_H$ , (b)  $Z_{DR}$ , (c)  $K_{DP}$ , (d)  $\rho_{HV}$

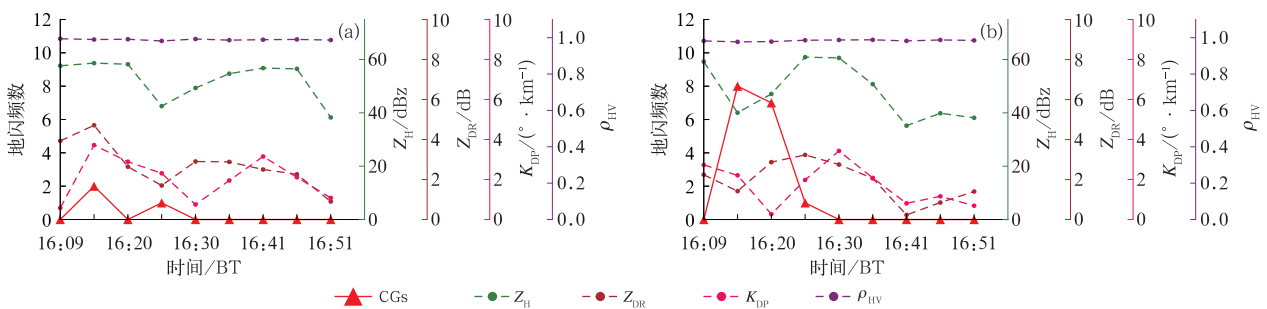


图 4 2019 年 3 月 21 日 16:09—16:51 时段 J7246(a) 和 J7253(b) 短时强降水站点上的地闪(CGs)频数与  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  和  $\rho_{HV}$  随时间的变化

Fig. 4 Cloud-to-ground flash frequency,  $Z_H$ ,  $Z_{DR}$ ,  $K_{DP}$  and  $\rho_{HV}$  of short-time severe precipitation at stations J7246 (a) and J7253 (b) with time during 16:09–16:51 BT 21 March 2019



由  $K_{DP}$  的变化可以看到, J7246 站(图 4a)该值于 16:15 左右跃增至峰值, 与地闪频数出现首次峰值的时间一致; J7253 站点(图 4b)的  $K_{DP}$  峰值出现时间滞后于地闪 15 min。另外这两个站均以短时强降水为主, 其他强对流天气不显著, 因此与  $\rho_{HV}$  基本维持在 1 附近吻合,  $\rho_{HV}$  与两种闪电频数的关系则不明显。

综上所述, 当发生强降水时, 闪电开始变得活跃, 其频数的跃增会比地面降水提前发生, 且闪电频数的增加均超前于雷达偏振量  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  的跃增约 5~10 min, 这对强降水天气的早期识别具有较好的指示性作用。

## 4 雷达偏振量对雹云观测的作用

此次强对流过程除带来短时强降水, 还伴有冰雹, 因此利用双偏振雷达对降雹过程中的水凝物粒子进行识别, 并结合闪电频数的演变进行分析, 了解不同类型水凝物的变化过程特征。

### 4.1 雹云的偏振量分布和变化

选取距离吉安雷达东北方向(方位角为  $49.68^\circ$ ) 28.55 km 的吉水站做分析, 将结果与张杰等(2010)给出的降水粒子属性判识阈值进行对比, 以验证利用雷达偏振量判识地面有降雹的可信性。为更加细致地分析降雹过程前后雷达偏振参量的空间分布与变化特征, 分别用 17:18、17:28 和 17:39 这三个时刻代表降雹过程的初生、成熟和消亡阶段, 并沿着径向  $60.1^\circ$  方向作垂直剖面, 对应的雷达偏振量  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  和  $\rho_{HV}$  的垂直剖面分别如图 5a~5c、5d~5f、5g~5i 和 5j~5l 所示, 图中黑框为地面观测到小冰雹处, 回波远离雷达移动。雹暴过程的演变表现为 40 dBz 以上的对流回波柱从距离雷达约 15 km 处(图 5a~5c)逐渐东移至 45 km 处(图 5i~5k), 最大回波强度也由初始阶段的约 60 dBz 增大至 73 dBz、再减小至 60 dBz 以下。就雷达各偏振量值而言, 在雹暴初始阶段 3.7 km( $0^\circ\text{C}$ )~7.2 km( $-10^\circ\text{C}$ )高度上,  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  分别约为 45 dBz 和  $-0.5 \sim 0$  dB(图 5a, d),  $K_{DP}$  为  $-0.3 \sim 0.3^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ (图 5g),  $\rho_{HV}$  大于 0.975(图 5j); 与张杰等(2010)给出的地面有雨夹雹或小冰雹的判识阈值( $Z_H$  介于 45~80 dBz、

$Z_{DR}$  为  $-1.0 \sim 6.0$  dB、 $K_{DP}$  为  $0 \sim 10^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $\rho_{HV}$  为  $0.88 \sim 0.95$ )相对照, 发现该高度上的降水类型应以小尺寸的冰雹为主; 而在 1~3.7 km 的高度上,  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  分别为 20~30 dBz 及  $0.5 \sim 1.5$  dB,  $K_{DP}$  为  $0 \sim 1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $\rho_{HV}$  大于 0.975, 该高度的温度低于  $0^\circ\text{C}$ , 因此判识结果是以中等强度的液态降水为主, 与地面实况一致。17:28 后雹云逐渐进入成熟阶段, 此时, 回波强度显著增强, 最大达 75 dBz,  $Z_H$  超过 70 dBz 的强回波伸展到 8 km 以上(图 5b), 且有悬垂特征; 在 3.7~7.2 km 高度上,  $Z_{DR}$  为  $-1.5 \sim 0$  dB(图 5e),  $K_{DP}$  为  $0 \sim 1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ (图 5h),  $\rho_{HV}$  为  $0.9 \sim 0.97$ (图 5k), 该高度的温度高于  $-20^\circ\text{C}$  而大都低于  $0^\circ\text{C}$ , 对应着该高度区间上以冰雹或过冷水为主。在 1~3.7 km 高度上,  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  分别为 55~70 dBz(图 5b)和  $1 \sim 2$  dB(图 5e),  $K_{DP}$  为  $2 \sim 3^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $\rho_{HV}$  维持在 0.9 以上, 其上部在  $0^\circ\text{C}$  附近, 为冰水混合态; 1 km 以下的  $Z_H$  小于 50 dBz,  $Z_{DR}$  值也较小, 为  $-1 \sim 1$  dB,  $K_{DP}$  在  $0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$  附近,  $\rho_{HV}$  维持为  $0.9 \sim 0.95$ , 尽管温度高于  $0^\circ\text{C}$ , 但偏振量呈现出较显著的冰雹特征, 因此伴有降雹发生, 降水仍为混合态。天气实况显示, 地面观测到有直径 2 mm 的小冰雹(17:40)。17:39 后(图 5c)为雹暴的减弱消散阶段, 强对流回波进一步东移至距离雷达约 45 km 处,  $Z_H$  大于 2 dB 的高值区也东移且高度下降至地面, 表明地面降雹天气趋于结束转而以降水为主。吉水站附近的  $Z_H$  降至 45 dBz 以下, 近地面  $Z_H$  约为 40 dBz,  $Z_{DR}$  为  $0.5 \sim 1$  dB,  $K_{DP}$  为  $0 \sim 0.1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $\rho_{HV} \geq 0.975$ , 因此对应的天气为降雨, 这也与当时的观测实况吻合。

综上所述, 在雹云影响的初期, 3.7 km( $0^\circ\text{C}$ )以上以小尺寸的冰雹为主, 1~3.7 km 则为强度为中等强度的液态降水; 在成熟阶段, 高空的冰雹下降, 3.7 km( $0^\circ\text{C}$ )高度以下的降水由液态转为混合相态, 地面开始降雹, 与地面的观测事实吻合; 在雹云减弱消散阶段, 雹暴回波东移, 且地面转为以液态降水为主, 吉水站则由雨夹雹转为中等强度的降雨, 也与地面观测实况吻合; 由雷达偏振量判识得到的近地面降水天气相态与实况一致。因此, 通过分析不同高度上的雷达偏振量的值及其变化, 可以很好地了解降水相态的转变过程, 从而能为地面降水类型预报提供很好的参考。



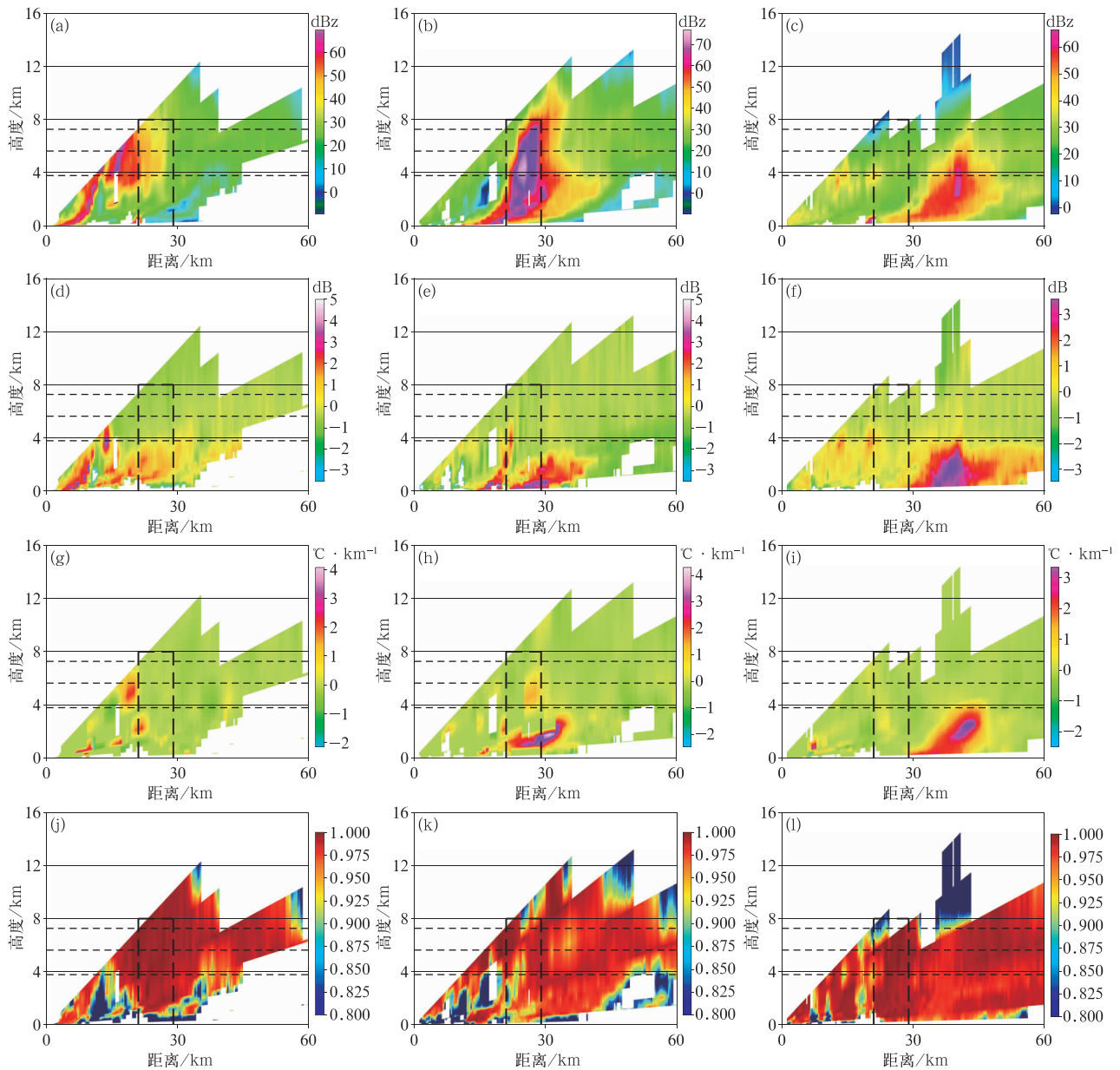


图 5 2019 年 3 月 21 日 17:18(a,d,g,j), 17:28(b,e,h,k), 17:39(c,f,i,l) 冰雹站点附近的偏振参量垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of polarization parameters near hail station at 17:18 BT (a, d, g, i), 17:28 BT (b, e, h, k) and 17:39 BT (c, f, i, l) 21 March 2019  
(a, b, c)  $Z_H$ , (d, e, f)  $Z_{DR}$ , (g, h, i)  $K_{DP}$ , (j, k, l)  $\rho_{HV}$

## 4.2 雹云偏振参量与闪电的对比

为研究冰雹与雷达偏振参量和闪电频数之间的关系,仍以发生小冰雹的吉水站为例。图 6 为地闪频数与  $1.5^\circ$  仰角上的  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  和  $\rho_{HV}$  随时间的变化,从图中可见,地面降雹前,17:23—17:33 时段  $Z_H$  从不到 40 dBz 跃增到大于 65 dBz, 17:33—17:40 时段  $Z_H$  又有所下降。 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  也经历了相似的变化过程:17:18—17:40 时段  $Z_{DR}$  从 1.9 dB 增大到

5.3 dB 再减小至 1.3 dB;  $K_{DP}$  由  $1.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$  跃增到  $3.8^\circ \cdot \text{km}^{-1}$  后又下降到  $2.43^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ , 这种先增大后减小的一致性变化特征均出现在降雹前(17:40),  $Z_H$  开始增大的时刻(17:23)超前于地面降雹时刻(17:40)约 17 min, 其他偏振量的提前时间更早, 因此对降雹趋势的预报具有很好的指示意义。张杰等(2010)的统计结果认为,  $Z_H$  介于 45~80 dBz、 $Z_{DR}$  介于  $-1 \sim 6$  dB、 $K_{DP}$  介于  $0 \sim 10^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $\rho_{HV}$  介于 0.88~0.95 时会出现雨雹混合天气; 对照发现, 图 6

中的参量符合这些区间条件,而且实况也与利用这些区间阈值的判识结果吻合,表明可利用它们提前预报出地面降雹。从闪电的频数变化可以看到,地闪频数在 17:39 左右达到最大值,然后开始降低,小冰雹则于 17:40 发生,因此地闪频数的迅速增大特征在降雹前出现,对后者具有很好的指示意义。

#### 4.3 雷达与闪电资料对强天气类型的融合判识作用

以上探究了在强降水和冰雹过程中闪电与雷达偏振量之间的关系,为更多地了解双偏振雷达在强对流天气类型中的判识作用,选取发生短时强降水、雷暴大风及冰雹的三个站点进行对比,它们的站号分别为 J7246(图 7a)、58705(图 7b)和 58707(图 7c)。短时强降水与雷暴大风选取雷达  $0.5^\circ$  仰角的数值,冰雹选取雷达  $1.5^\circ$  仰角的数值(因当天温度为  $28.5^\circ\text{C}$ ,冰雹接近地面时大规模融化,因此  $0.5^\circ$  仰角下的探测数据不明显),结果如图 7 所示。从图中可以看出,短时强降水发生前(16:25),回波强度

总体呈增大趋势(图 7a),地闪频数也有增大。雷暴大风约在 18:04 发生,在此之前回波也呈持续增强变化,但却在大风发生前有所减弱(图 7b);地闪频数也有大体上先增大后减小的变化特征。冰雹站点也与雷暴大风站点类似,即降雹发生前回波和地闪频数先增大后减小(图 7c)。对比这三类强对流天气发现,由于短时强降水的发生不是瞬间发生而是持续形成的,它伴随的回波反射率和闪电频数变化与雷暴大风和冰雹有较大差异,而后两者则非常相似:当回波强度或闪电频数的增大趋势结束而转为减小时,雷暴大风或冰雹天气随即发生。这有助于提前判识出现这两种强对流天气的潜势,也有助于将风雹类天气与短时强降水区分开来。另外,冰雹天气发生前的地闪频数跃增幅度明显大于雷暴大风,这有助于区分出强天气的类型是以大风为主还是可能有冰雹出现。此次强对流天气过程中的这些特征是否具有普遍性,仍需针对更多天气过程进行更广泛的分析,可在今后给予更多这方面的关注。

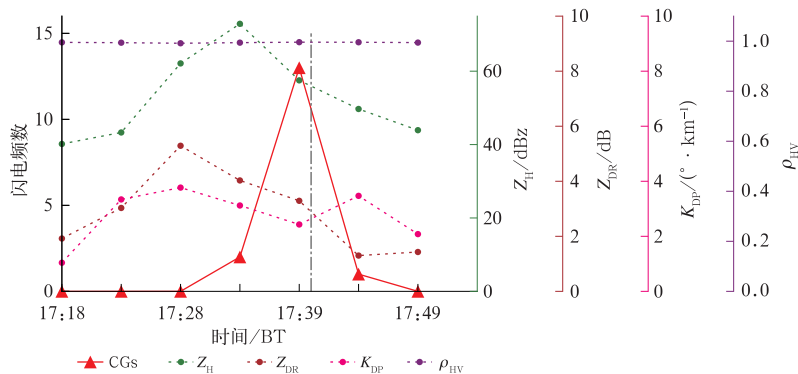


图 6 2019 年 3 月 21 日 17:18—17:49 冰雹站点上的地闪频数与  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  和  $\rho_{HV}$  随时间的变化

Fig. 6 Cloud flash frequency, ground flash frequency,  $Z_H$ ,  $Z_{DR}$ ,  $K_{DP}$  and  $\rho_{HV}$  with time at hail station during 17:18—17:49 BT 21 March 2019

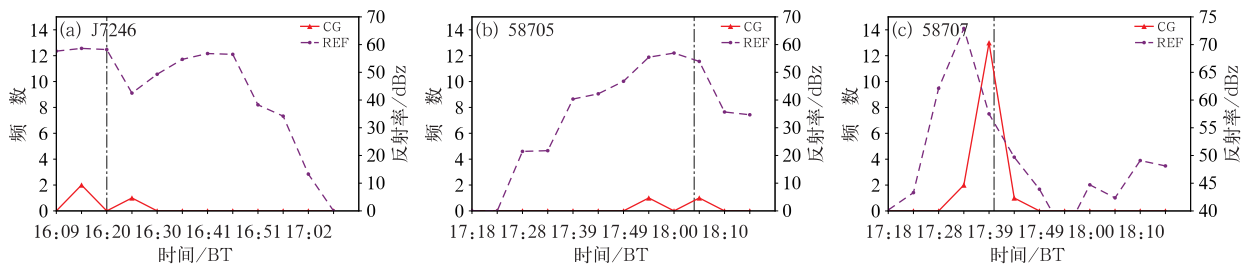


图 7 2019 年 3 月 21 日 16:09—18:15 强天气发生前后的地闪频数及反射率的变化(虚线为强天气发生时刻)

(a)强降水,(b)大风,(c)冰雹

(竖虚线为强对流发生时刻)

Fig. 7 Variations of ground flash frequency and reflectivity before and after severe weather during 16:09—18:15 BT 21 March 2019

(a) heavy precipitation, (b) gale, (c) hail

(The dashed line is the time for severe weather)

#### 4.4 雷达偏振量对冰雹的预报作用

袁铁和郅秀书(2010)在研究华南飊线闪电活动的过程中发现,雷暴的地闪活动与雷达反演的冰相降水含量之间有很好的线性关系,它们均可用于强对流天气的预报,但其反演出的冰相粒子降水含量( $M$ )是基于常规的多普勒雷达探测到的反射率 $Z$ 所得,吉安雷达经历双偏振改造后,能否用水平反射率 $Z_H$ 反演得到 $M$ 值,其变化是否仍有这样的特征尚未经过检验,因此有必要相关研究。

##### 4.4.1 冰相粒子降水含量( $M$ )的计算

此次过程伴随着冰雹天气发生,除了可用雷达偏振量分析降雹前后的特征,还参考使用了 Carey and Rutledge(2000)提出的 $M$ 计算方法,探究该值及其变化与降雹之间的关系,其计算公式如下:

$$M = 1000\pi\rho_i N_0^{3/7} \left( \frac{5.28 \times 10^{-18}}{720} Z \right)^{4/7}$$

式中: $Z$ 为雷达反射率因子(单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ ), $N_0 = 4 \times 10^6 \text{ m}^{-4}$ , $\rho_i = 917 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , $M$ 是冰相粒子降水含量(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )。由于吉安双偏振雷达仅提供了 $Z_H$ ,因此可用 $Z_H$ 代替传统意义上的 $Z$ 来描述回波强度(梅垚等,2018),将 $Z_H$ 代替反射率 $Z$ 代入式中。

##### 4.4.2 $M$ 值随时间的变化与地面降雹的关系

针对出现降雹的两个站点,选取雷达 $1.5^\circ$ 仰角的 $Z_H$ 计算 $M$ ,并与同时段内站点附近6 km范围内的闪电频数作对比,所得结果如图8所示。图8a为上栗站,从中可以看到,09:57—10:07期间,该地的 $M$ 值从0跃增到 $88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,先于地面降雹(10:14)约17 min出现跃增特征;10:02—10:17期间的地

闪频数从0跃增到8,尽管晚于 $M$ 值跃增时段约5 min,但先于地面降雹12 min。图8b为吉水站,与上栗站类似,17:23—17:33期间的 $M$ 值从0跃增到 $89.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,先于降雹时刻(17:40)17 min出现跃增;17:28—17:38期间的地闪频数由0跃增到13,晚于 $M$ 值跃增时段约5 min,但早于地面降雹12 min。由此可见,地面降雹前 $M$ 值均有显著跃增,且该特征早于闪电频数的跃增变化,因此可通过判识 $M$ 值及闪电频数的变化趋势,来推测地面降雹的可能性及时间。此次过程中,通过这种方法,发现可以提前15 min左右预报出地面降雹的可能性。

##### 4.4.3 $M$ 值的空间变化及其与地面降雹的关系

由雷达偏振量 $Z_H$ 得到的 $M$ 值对地面降雹时间有很好的指示性作用,不仅体现在与闪电频数一样具有先增大后减小的时间变化特点,还具有一定的空间变化特征。仍针对上述两个站点,计算了不同仰角上的 $M$ 值随时间的变化,所得结果如图9所示,其中上栗站距离吉安雷达144.4 km,吉水站距雷达28.6 km,竖虚线所在位置为地面降雹时刻,箭头线为 $M$ 峰值的空间变化趋势。由图9a可以看到,上栗站降雹前,不同仰角上的 $M$ 值均呈先增大后减小的变化特征,且高度越高,达到 $M$ 峰值的时间越早。再以吉水站为例,图9b显示,从 $19.5^\circ$ 到 $0.5^\circ$ 仰角, $M$ 峰值出现的时间从17:23变成17:38,即高度越高, $M$ 峰值就出现得越早,表现出该峰值有向右下方“传递”的趋势(图中黑色箭头所示),它们均早于地面降雹时刻(17:40),其中10.11 km高度上的 $M$ 峰值出现时间早于实况17 min,对于预报地面降雹时刻有很好的参考价值。

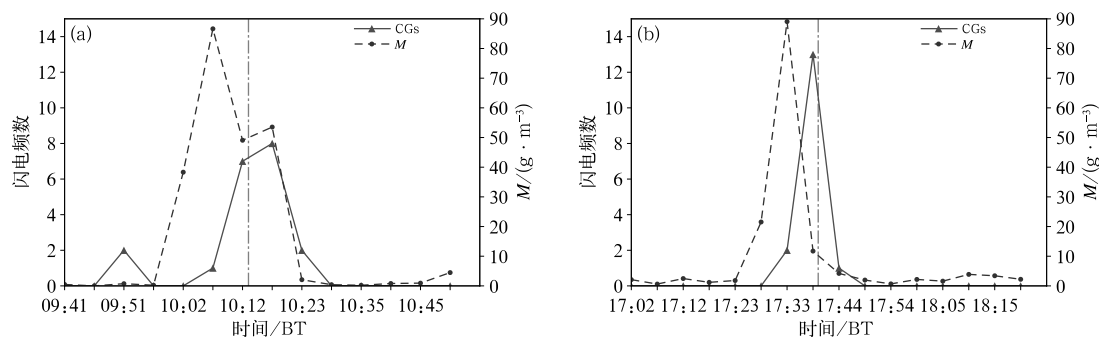


图8 2019年3月21日上栗站(a)和吉水站(b)冰相粒子含量( $M$ )与闪电频数的变化  
Fig. 8 Changes of ice particle content ( $M$ ) and lightning frequency at Shangli Station (a) and Jishui Station (b) on 21 March 2019

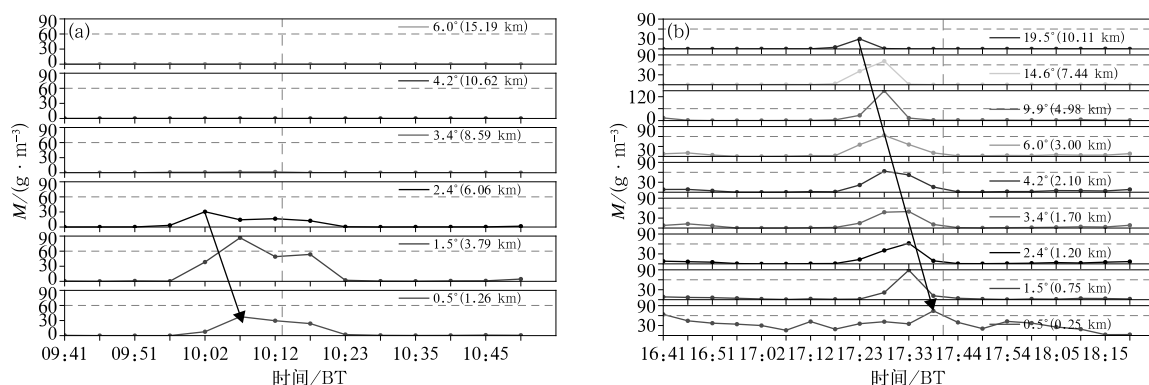


图9 2019年3月21日上栗站(a)和吉水站(b)不同冰雹站点上  $M$  随高度变化

Fig. 9 Variation of  $M$  with height at Shangli Station (a) and Jishui Station (b) on 21 March 2019

## 5 结论与讨论

本文主要利用江西吉安 SC 型多普勒雷达进行双偏振改造后的资料,对遇到的首次区域性强对流过程,分析了雷达偏振量的空间分布与时间演变特征,并与地闪等观测资料进行对比,探究了其在短时强降水和风雹天气中的不同表现特征与差异,结果发现:

(1) SC 型双线偏振雷达可以很好地反映出强天气过程的特征,并能根据各偏振量的值对降水类型进行判别,其中在此次短时强降水过程中,通常  $0.5^\circ$  仰角下探测到的  $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  会超前于地面降水约一个体扫的时间出现跃增,或基本与地面分钟级雨量同时发生跃增。与同时期的闪电频数对比分析表明,发生强天气过程时,地闪会变得活跃,且它们的活动均超前于雷达  $Z_H$  的变化,这对强降水天气的早期识别具有指示性作用。

(2) 当发生雷暴大风或冰雹天气时,回波强度和闪电频数都会迅速增大,且冰雹的地闪跃增幅度明显大于雷暴大风。此次降雹过程,  $1.5^\circ$  仰角的  $Z_H$  提前降雹时刻 15 min 发生跃增,其他偏振参量的提前时间更早,且  $Z_H$  值会大于 60 dBz。

(3) 在此次过程中,冰相粒子含量  $M$  对降雹的发生有很好的指示性作用:  $M$  值激增时,地闪也会变得活跃,它们会提前于冰雹发生时刻(约 15 min)激增;随着雷达探测仰角的增大,  $M$  值达到峰值的时间也越早。一般发生降雹时零度层以下的  $M$  会大于  $60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,零度层以上能达到  $120 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

综上所述,吉安 SC 型双偏振雷达产品在识别强对流天气类型与强度中具有较好的效果,偏振量

及导出量( $M$ 等)能提前判断出对流性质,与地闪等观测资料的结合应用,可对强对流发生时间有一定的提前预报指示作用,因此应用能力较好。但由于吉安雷达为业务应用,因此无法正常获得 RHI 扫描产品,故而难以获得垂直方向上的对流尺度的精细结构特征,一定程度上对更好地分析垂直运动有所影响。另外,吉安雷达所在的江南南部地区多山地地形,在使用过程中要避免遮挡和异常回波的影响,这也是其降低其应用能力的因素之一。未来随着周边雷达的改造升级陆续开展和完成,将有更多的双偏振雷达资料加入与它的对比和融合应用,预期能较好地克服吉安雷达的部分不足,提升其应用能力。今后还需开展更多对流性天气过程的深入对比分析,从而为改进该雷达的探测性能、更好地发挥出其探测和预报效果提供参考。

## 参考文献

- 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).
- 冯晋勤,张深寿,吴陈锋,等,2018. 双偏振雷达产品在福建强对流天气过程中的应用分析[J]. 气象,44(12):1565-1574. Feng J Q, Zhang S S, Wu C F, et al, 2018. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian [J]. Meteor Mon, 44(12):1565-1574 (in Chinese).
- 冯亮,肖辉,孙跃,2018. X 波段双偏振雷达水凝物粒子相态识别应用研究[J]. 气候与环境研究,23(3):366-386. Feng L, Xiao H, Sun Y, 2018. A study on hydrometeor classification and application based on X-band dual-polarization radar measurements[J]. Climatic Environ Res, 23(3):366-386 (in Chinese).
- 郭凤霞,马学谦,王涛,等,2014. 基于 X 波段双线偏振天气雷达的雷暴云粒子识别[J]. 气象学报,72(6):1231-1244. Guo F X, Ma X

- Q, Wang T, et al, 2014. An approach to the hydrometeors classification for thunderclouds based on the X-band dual-polarization Doppler weather radar[J]. *Acta Meteor Sin*, 72(6): 1231-1244 (in Chinese).
- 郭润霞, 王迎春, 张文龙, 等, 2018. 基于 VLF/LF 三维闪电监测定位系统的北京闪电特征分析[J]. *热带气象学报*, 34(3): 393-400.
- Guo R X, Wang Y C, Zhang W L, et al, 2018. Analysis of lightning characteristics in Beijing based on VLF/LF 3D lightning location monitoring system[J]. *J Trop Meteor*, 34(3): 393-400 (in Chinese).
- 郭润霞, 张文龙, 2019. 北京一次大雹天气过程的闪电活动特征分析[J]. *气象与环境学报*, 35(3): 10-17.
- Guo R X, Zhang W L, 2019. Analysis of lightning flash activity characteristics of a severe hailstorm process in Beijing[J]. *J Meteor Environ*, 35(3): 10-17 (in Chinese).
- 贺宏兵, 胡明宝, 李超, 等, 2014. 双偏振多普勒天气雷达监测雷电的分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 15(2): 184-190.
- He H B, Hu M B, Li C, et al, 2014. Analysis of lightning detection with dual-polarization Doppler weather radar[J]. *J PLA Univ Sci Technol (Nat Sci Ed)*, 15(2): 184-190 (in Chinese).
- 李晓敏, 周筠珩, 肖辉, 等, 2017. 基于 X 波段双偏振雷达对雷暴单体中水成物粒子演变特征的研究[J]. *大气科学*, 41(6): 1246-1263.
- Li X M, Zhou Y J, Xiao H, et al, 2017. Research on the evolution characteristics of hydrometeors in a thunderstorm cell with X-band dual-polarimetric radar[J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(6): 1246-1263 (in Chinese).
- 刘黎平, 胡志群, 吴翀, 2016. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和应[J]. *气象科技进展*, 6(3): 28-33.
- Liu L P, Hu Z Q, Wu C, 2016. Development and application of dual linear polarization radar and phased-array radar[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 6(3): 28-33 (in Chinese).
- 梅垚, 胡志群, 黄兴友, 等, 2018. 青藏高原对流云的偏振雷达观测研究[J]. *气象学报*, 76(6): 1014-1028.
- Mei Y, Hu Z Q, Huang X Y, et al, 2018. A study of convective clouds in the Tibetan Plateau based on dual polarimetric radar observations[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(6): 1014-1028 (in Chinese).
- 苏冉, 廖菲, 周芯玉, 2018. 双线偏振雷达在广州“3.19”降雹过程中的应用分析[J]. *热带气象学报*, 34(2): 209-216.
- Su R, Liao F, Zhou X Y, 2018. Research on Guangzhou “3.19” hail event based on observation by dual-polarization weather radar[J]. *J Trop Meteor*, 34(2): 209-216 (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).
- 于明慧, 刘黎平, 吴翀, 等, 2019. 利用相控阵及双偏振雷达对 2016 年 6 月 3 日华南一次强对流过程的分析[J]. *气象*, 45(3): 330-344.
- Yu M H, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased array and dual polarization radar[J]. *Meteor Mon*, 45(3): 330-344 (in Chinese).
- 袁铁, 郗秀书, 2010. 基于 TRMM 卫星对一次华南飑线的闪电活动及其与降水结构的关系研究[J]. *大气科学*, 34(1): 58-70.
- Yuan T, Qie X S, 2010. TRMM-based study of lightning activity and its relationship with precipitation structure of a squall line in South China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 34(1): 58-70 (in Chinese).
- 张杰, 田密, 朱克云, 等, 2010. 双偏振雷达基本产品和回波分析[J]. *高原山地气象研究*, 30(2): 36-41.
- Zhang J, Tian M, Zhu K Y, et al, 2010. Analysis on the products and echo of dual-linear polarization Doppler weather radar[J]. *Plateau Mt Meteor Res*, 30(2): 36-41 (in Chinese).
- 钟晨, 张羽, 高建秋, 等, 2014. 双偏振多普勒天气雷达在冰雹识别中的应用[J]. *广东气象*, 36(4): 76-80.
- Zhong C, Zhang Y, Gao J Q, et al, 2014. Application of dual polarization Doppler weather radar in hail recognition[J]. *Guangdong Meteor*, 36(4): 76-80 (in Chinese).
- Bechini R, Baldini L, Chandrasekar V, 2013. Polarimetric radar observations in the ice region of precipitating clouds at C-band and X-band radar frequencies[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 52(5): 1147-1169.
- Carey L D, Rutledge S A, 2000. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: a C-band polarimetric radar study[J]. *Mon Wea Rev*, 128(8): 2687-2710.
- Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A, et al, 1998. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. National Lightning Detection Network[J]. *J Geophys Res*, 103(D8): 9035-9044.
- 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.
- Liu H P, Chandrasekar V, 2000. Classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurements; Development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 17(2): 140-164.
- Matthew R K, Alexander V R, Valery M 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.
- Reinoso-Rondinel R R, Unal C, Russchenberg H, et al, 2014. Polarimetric weather signatures and Doppler spectral analysis of a convective squall line[C] // *Proceedings of the 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*. Garmisch-Partenkirchen, Germany, 216: 1-9.
- Ryzhkov A V, Giangrande S E, Schuur T J, 2005a. Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D[J]. *J Appl Meteor*, 44(4): 502-515.
- Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al, 2005b. The joint polarization experiment: Polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 86(6): 809-824.
- Seliga T A, Bringi V N, 1976. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation[J]. *J Appl Meteor*, 15(1): 69-76.