

祁凯,张庆奎,董海林,等. 基于双偏振多普勒雷达的一次强雷暴特征分析[J]. 陕西气象,2024(4):9-14.

文章编号:1006-4354(2024)04-0009-06

基于双偏振多普勒雷达的一次强雷暴特征分析

祁 凯,张庆奎,董海林,牛雪梅,杨晓钰

(阜阳市气象局,安徽阜阳 236000)

摘 要:利用阜阳 S 波段双偏振多普勒雷达和闪电定位系统资料分析 2021 年 6 月 13 日发生在阜阳市境内的一次强雷暴过程特征;将闪电定位仪探测的闪电频次与双偏振多普勒雷达的偏振参量进行匹配分析,并采用插值算法绘制雷达回波偏振产品剖面图,分析回波偏振参量的垂直分布特征与闪电的关系,进一步研究阜阳地区的雷暴特征。结果表明:闪电频次与水平反射率因子(Z_H)有较好的相关性,相关系数达 0.78;有闪电时的 Z_H 、差分反射率因子(Z_{DR})、差分相移率(K_{DP})平均值均大于无闪电时。闪电发生时的 Z_H 达 40 dBZ 以上,且强回波突破 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高度层以上, Z_{DR} 、 K_{DP} 在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层为较小的正值或局部的负值; $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层以下 Z_{DR} 和 K_{DP} 值均较高,其大值区出现在风暴前侧入流区。

关键词:双偏振;多普勒雷达;雷暴特征

中图分类号:P446

文献标识码:A

闪电是一种发生在雷暴天气中的放电现象,这种放电主要发生在云间或云与地面之间,会造成较大的财产损失和人员伤亡。提高闪电预报精度是当前气象工作的重点和难点。近年来,国内外学者利用闪电定位系统和天气雷达在闪电预测预警方面做了不少研究工作^[1-10]。魏雪等^[11]利用江苏天气雷达和闪电定位资料得出 40 dBZ 回波强度发展到 7 km 以上,垂直液态含水量达到 25 kg/m^3 ,风场为强烈的辐合上升运动,回波顶高发展到 9 km 以上。Brandon 等^[12]研究得出 40 dBZ 回波强度发展到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度是预测初次地闪发生的最佳预测因子。李超等^[13]分析得出负地闪主要发生在强回波中心及其附近,少数正闪和负闪零散分布在 20 dBZ 以上的回波区域,闪电起始区域的相关系数(ρ_{HV})比较大、差分反射率因子(Z_{DR})比较小。吴少峰等^[14]分析得到水平反射率因子(Z_H)、 Z_{DR} 、差分相移率(K_{DP})在一定程度上反映出雷暴发展变化的特征, ρ_{HV} 与闪电频

次的相关性不高。杨磊等^[15]利用双偏振雷达、大气电场仪和闪电定位系统研究得出在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高层以上冰晶区域出现 K_{DP} 的负值区,与闪电活动具有很好的相关性。贺宏兵等^[16]分析有闪电回波和无闪电回波,得到有闪电的 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 分布均大于无闪电时的值,判断闪电发生时云中主要为雨滴、冰晶和霰粒子的混合。雷暴天气的发生主要与 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 的关系密切相关,该特征在不同季节有所不同^[17-18],不同地区的特征也不尽相同,具有一定的地域性。本文利用阜阳双偏振多普勒雷达与闪电定位仪资料,对雷暴回波进行特征分析,为阜阳地区雷暴监测预警提供参考依据。

1 资料来源与数据处理

雷达数据选自阜阳 S 波段双偏振天气雷达 2021 年 6 月 13 日 12—20 时的雷达产品,包含径向速度(V)、 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV} 等。阜阳 S 波段双偏振天气雷达默认工作模式为 VCP21D,其基数

收稿日期:2023-06-13

作者简介:祁凯(1985—),男,汉族,安徽濉溪人,学士,高工,主要从事综合气象观测研究。

基金项目:安徽省气象局研究型业务科技攻关项目子专题(YJG202102);安徽省气象局预报员专项(KY202204;KY201806)

据仅包含 9 个仰角的体扫数据,没有距离高度显示 RHI(range height indicator)产品。为便于分析雷暴内部的回波垂直特征,利用体扫数据进行插值绘制雷暴回波垂直剖面图 VCS(vertical cross section),不足之处是因仰角稀疏,插值使部分结构特征被平滑处理。

闪电定位数据来源于阜阳 DDW1 型闪电定位系统。由于闪电定位仪是实时探测闪电数据,而多普勒雷达每 6 min 完成一次体扫,所以选择 6 min 为间隔,将雷达一个体扫时间内发生在对应回波单体内闪电总数统计到本体扫时次内,并将本时次的总闪电次数和该回波单体内所有仰角中最大水平反射率因子处的偏振参量(Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV})进行配对。如果本时次内未发生闪电,统计为无闪电 1 次,将回波参量也进行配对。分别统计得到发生闪电和未发生闪电时的频次与回

波参量配对数据。

利用阜阳高空观测站 2021 年 6 月 13 日 20 时探空数据获得 0 °C、-10 °C、-15 °C、-20 °C 层对应的高度分别为 5.0 km、6.8 km、7.6 km、8.4 km。

2 闪电频次与雷达回波偏振参量关系

2021 年 6 月 13 日阜阳地区出现强雷暴天气,太和县气象台发布雷电橙色预警信号,并伴有 9 级大风和短时强降水,引发了严重的城市内涝。本次雷暴过程闪电频次较高,达到年度极值。当日 12—20 时闪电日变化和空间分布如图 1 所示。从图 1a 可以看出,选取的雷暴回波从 13 时开始发生闪电,在 17 时闪电频次达到最大值,20 时闪电消失。雷暴回波从上游周口、驻马店地区发展进入阜阳市境内,并在阜阳地区发展为强雷暴,闪电集中分布在阜阳中部偏北一带(图 1b)。

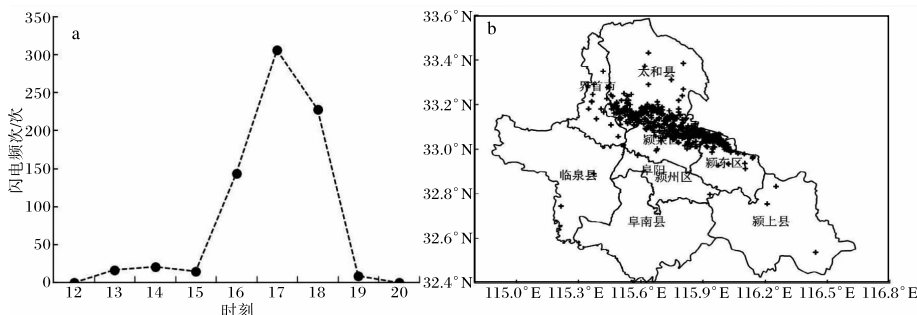


图 1 2021-06-13T12—20 时阜阳地区闪电频次日变化图(a)和空间分布图(b, 十字星表示闪电;审图号为 GS 京(2022)1061 号)

研究表明,闪电主要发生在强回波中心及其附近^[13],闪电活动与多普勒雷达的偏振参量具有一定的相关性^[15-16]。利用 2021 年 6 月 13 日 12—20 时的雷达回波数据,选取雷暴回波范围(图 2 红框内),将闪电频次与雷达回波参量分别配对,绘制发生闪电和未发生闪电时的频次与回波参量(Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV})分布直方图(图 3、图 4)。

从图 3a 和图 4a 可以看出,发生闪电的回波区, Z_H 强度明显高于未发生闪电的回波区,且回波 Z_H 越强,闪电频次越高。闪电频次与回波 Z_H 强度具有较好的相关性,其相关系数为 0.78。在发生闪电的回波区,闪电频次峰值发生在 Z_H 为 65 dBZ 时,集中在 61~67 dBZ 之间;在无闪电回

波区,未发生闪电的频次峰值在 Z_H 为 56 dBZ 时,分布范围在 52~64 dBZ 之间。

如图 3b 和图 4b 所示,闪电频次在 Z_{DR} 为 3 dB 时出现峰值,分布范围在 -1~5 dB 之间, Z_{DR} 出现较大值区间,其平均高度为 2.9 km,结合 K_{DP} 值判断在 0 °C 层(5 km)以下主要以大雨滴降雨为主。出现 Z_{DR} 负值的高度出现在 6 km 左右(-5 °C 层),说明有冰晶、霰或小冰雹等冰相粒子存在。在未发生闪电回波处的 Z_{DR} 峰值,集中分布在 1~3 dB 之间,其高度比较低,均在 4 km 以下,其平均高度为 2.4 km,说明未发生闪电的强回波中心发展高度较低,产生闪电的冰相粒子较少,不足以产生闪电,低层主要以较大雨滴降雨为主。

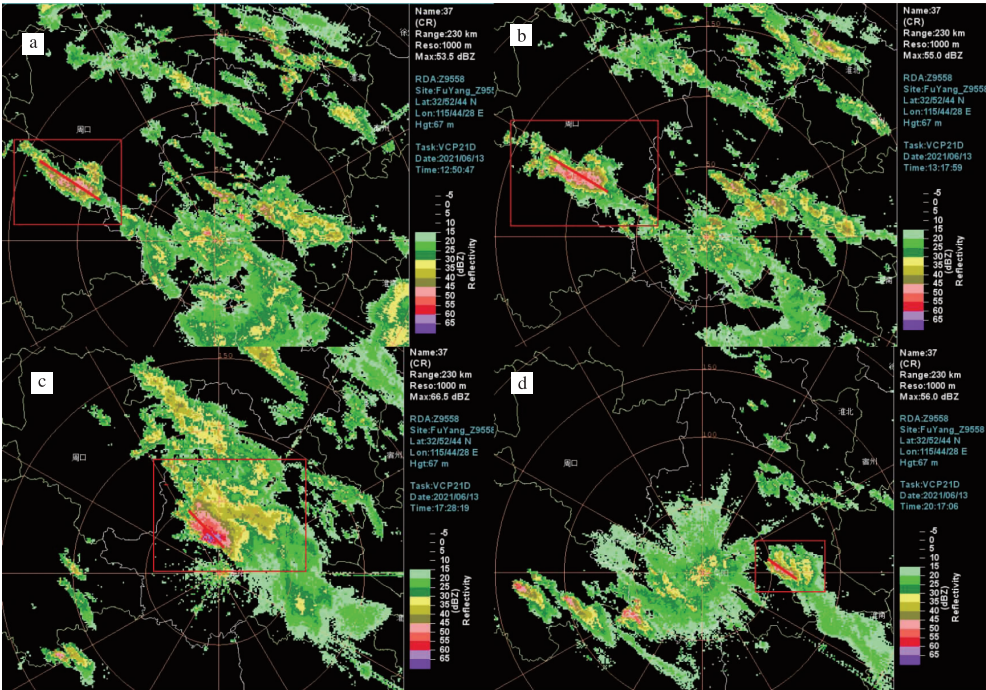


图2 2021-06-13T12—20 阜阳 S 波段双偏振天气雷达不同阶段雷达组合反射率因子图(a 闪电未发生, b 闪电初生, c 闪电频次峰值, d 闪电消失;直线表示剖面位置,方框表示选取的雷暴回波范围)

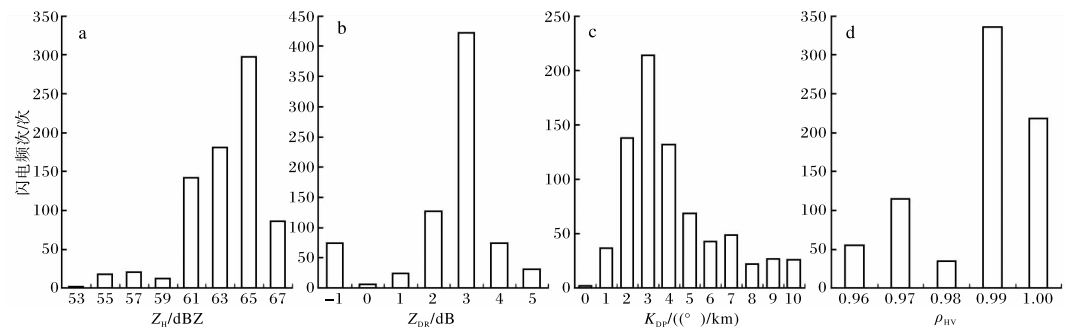


图3 2021-06-13T12—20 时阜阳地区闪电频次与 S 波段双偏振天气雷达参量分布图(a Z_H ; b Z_{DR} ; c K_{DP} ; d ρ_{HV})

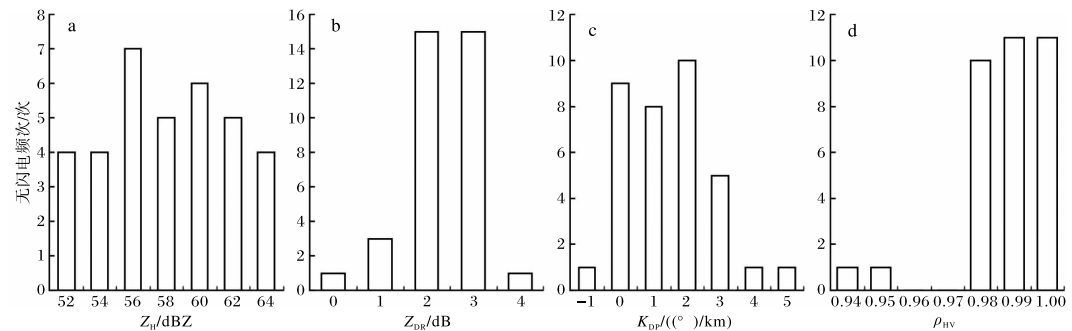


图4 2021-06-13T12—20 时阜阳地区无闪电频次与 S 波段双偏振天气雷达参量分布图(a Z_H ; b Z_{DR} ; c K_{DP} ; d ρ_{HV})

由图 3c 和图 4c 可知,发生闪电回波的 K_{DP} 主要分布在 $1\sim10(^{\circ})/\text{km}$ 之间,闪电频次峰值出

现在 3 (°)/km,其平均值为 4 (°)/km, K_{DP} 比较大说明液态水含量较高,预示着有足够的液态水可在 0 °C 层以上形成软雹、冰晶等冰相粒子。未发生闪电的回波块内 K_{DP} 集中分布在 0~3 (°)/km, K_{DP} 平均值为 1.9 (°)/km,比有闪电时明显降低。

从图 3d、图 4d 可以看出, ρ_{HV} 在有闪电和无闪电时,两者数值均较高,有闪电时闪电频次极值处相关系数为 0.99,主要分布在 0.96~1.00 之间,而无闪电时集中分布在 0.98~1.00 之间。

表 1 2021-06-13T12—20 时阜阳地区有闪电和无闪电 S 波段双偏振天气雷达回波参量

回波参数	有闪电				无闪电			
	Z_H /dBZ	Z_{DR} /dB	$K_{DP}/((^{\circ})/\text{km})$	ρ_{HV}	Z_H /dBZ	Z_{DR} /dB	$K_{DP}/((^{\circ})/\text{km})$	ρ_{HV}
峰值	67.5	5.3	10.2	1.00	64.0	4.0	5.2	1.00
均值	62.2	3.1	4.0	0.98	57.3	2.8	1.9	0.98

3 雷暴回波偏振参量垂直分布特征

研究表明,闪电的发生不仅与反射率强度有关,还与强回波发展高度和冰相粒子分布密切相关^[17]。利用多普勒雷达回波数据结合闪电定位仪数据分别从闪电未发生、闪电初生、闪电频次峰值和闪电消失 4 个阶段选择 12:50、13:17、

分别统计有闪电和无闪电回波内 Z_H 极值处的偏振参量的峰值、均值(表 1)。有闪电回波块内的水平反射率因子较高,均值达 62.2 dBZ,其 Z_{DR} 为 3.1 dB 和 K_{DP} 为 4.0 (°)/km,表明闪电发生时强回波中心的液态含水量较高,强回波中心主要以大雨滴降雨为主。无闪电回波内的各项参量均低于有闪电时,其回波发展高度也低于有闪电回波,与贺宏兵等^[16]的研究结论基本一致。

17:28、20:06 等 4 个时刻的回波数据进行分析。为便于分析雷暴内部的回波垂直特征,利用体扫数据进行插值处理方法获得雷暴回波的垂直剖面结构(剖面位置如图 2 直线标注),分别绘制 4 个体扫 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 剖面图(图 5、图 6、图 7)。

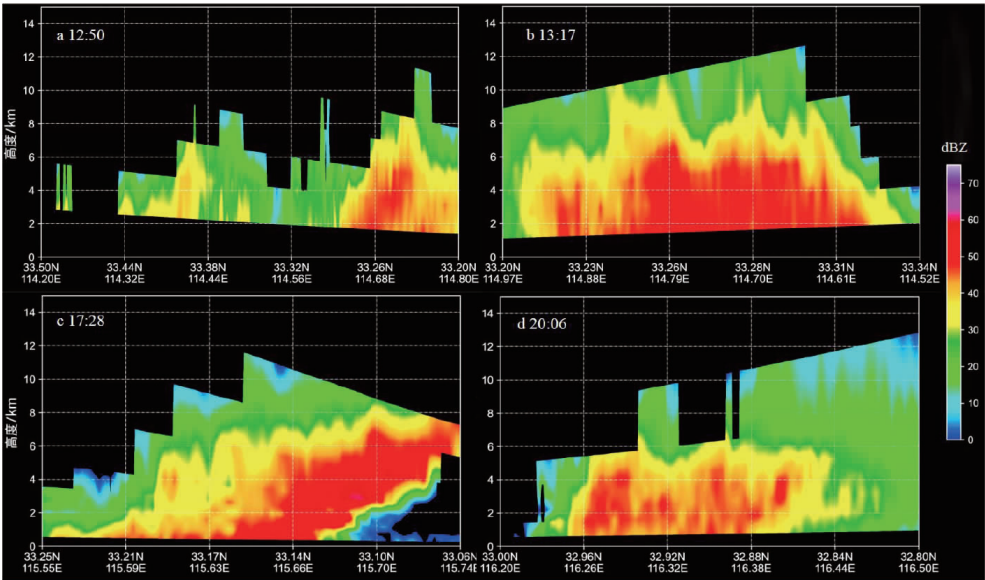
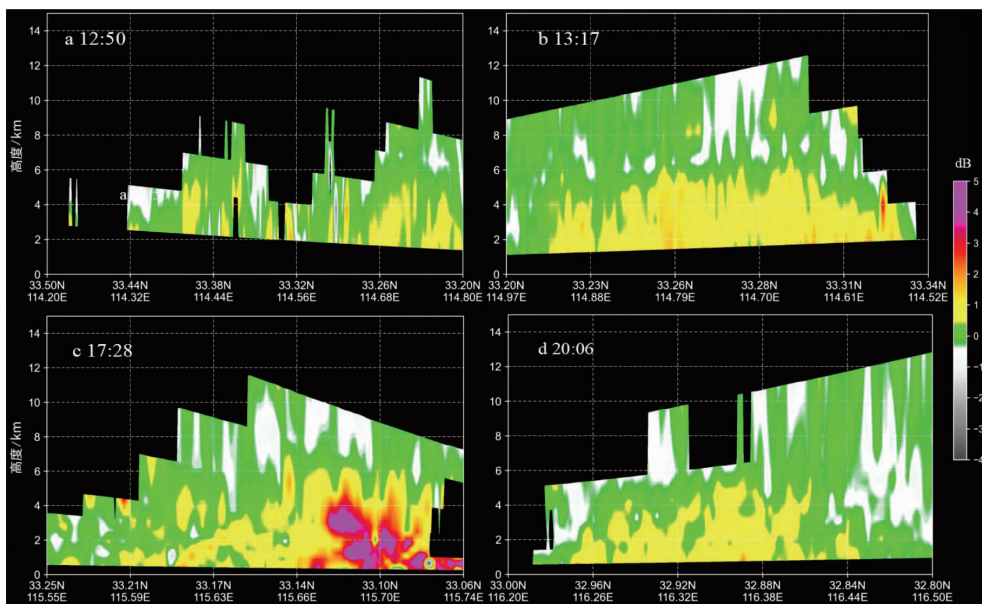
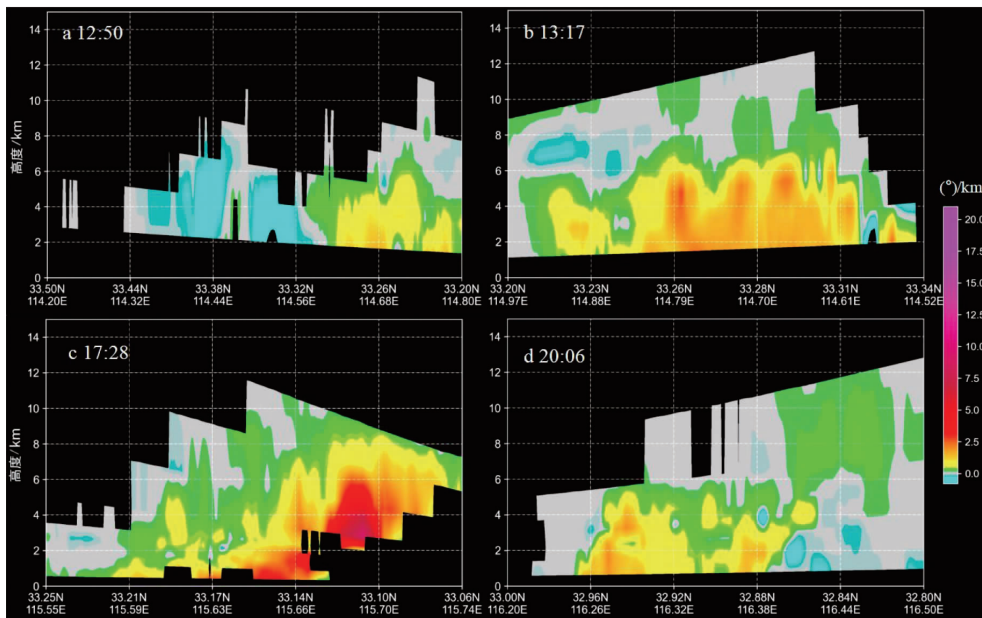


图 5 2021-06-13 阜阳 S 波段双偏振天气雷达 Z_H 垂直剖面图

图 5 为雷达回波 Z_H 剖面图。由图 5a 可看出, Z_H 达到 40 dBZ 以上,最大值为 53.5 dBZ,其强回波中心高度在 6 km 以下且回波范围不大,

无回波穹窿或弱回波区,此时没有闪电发生。图 5b 为闪电初次出现时的回波,可以看到 Z_H 值进一步增大,最大值达到 55 dBZ。对流发展旺盛,

图6 2021-06-13 阜阳 S 波段双偏振天气雷达 Z_{DR} 垂直剖面图图7 2021-06-13 阜阳 S 波段双偏振天气雷达 K_{DP} 垂直剖面图

强回波面积明显增大,此时 40 dBZ 以上的强回波高度达到 7 km,突破 -10°C 层(6.8 km)。图 5c 右侧出现了有界弱回波区, Z_H 极值达到 60 dBZ 以上,其 40 dBZ 以上的强回波高度进一步增长到 8 km,此时闪电频次也达到极值。图 5d 为闪电消失时的回波,其回波强度降低到 50 dBZ 以下,并且强回波中心高度也降低到 6 km 以下。

由图 6 Z_{DR} 剖面图可以看出,在未发生闪电时刻(图 6a), Z_{DR} 值主要分布在 0~1 dB 之间,说明

此时主要以小雨滴降雨为主。在闪电初生时刻(图 6b),中低层 Z_{DR} 值明显增大,最大值达到 3.5 dB,普遍出现了 1 dB 以上的值,并在 -10°C 层(6.8 km)上下出现了 $-1.0\sim 0.5$ dB 的小值区;同时图 7b 中 K_{DP} 在相同高度为 $0^{\circ}/\text{km}$ 左右的小值区,判断在 -10°C 层上下存在大量的霰、冰晶或干雪等冰相粒子。在闪电频次峰值时刻(17:28), Z_{DR} 值进一步增大,最大值达 5 dB, K_{DP} 在对应高度同样为大值区(图 7c),最大值达

到 $9.7 (^{\circ})/\text{km}$, 说明 0°C 层以下的强回波对应大雨区。雨强越大, Z_{DR} 和 K_{DP} 值越大, Z_{DR} 和 K_{DP} 值的大值区出现在风暴前侧入流区, 在强上升气流区, 雨滴会随上升气流到达 0°C 层以上, 为软雹、冰晶等冰相粒子的形成提供支持。大量冰相粒子为闪电提供了条件, 进而促进了闪电的形成, 此时 -10°C 层的水平反射率因子 Z_{H} 在 40 dBZ 以上, 且 Z_{DR} 和 K_{DP} 为小的正值或局部负值, 闪电频次也达到峰值。在闪电消失时刻 (20:06), Z_{DR} 和 K_{DP} 值与范围明显减小, 其大值区高度也降至 6 km 以下, 此时降雨以小雨滴为主。

4 结论

(1) 发生闪电时 Z_{H} 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 的平均值均大于无闪电时, 水平反射率因子 Z_{H} 越强, 闪电频次越高, 闪电频次与 Z_{H} 的相关系数达 0.78 。

(2) 闪电发生时的 Z_{H} 达 40 dBZ 以上, 且发展高度突破 -10°C 层。 Z_{DR} 值在 -10°C 层分布在 $-1.0\sim 0.5\text{ dB}$ 之间, K_{DP} 的值为 $0 (^{\circ})/\text{km}$ 左右。 0°C 层以下 Z_{DR} 和 K_{DP} 值均较高, Z_{DR} 和 K_{DP} 值的大值区出现在风暴前侧入流区。

(3) 雷暴发展的强弱与对流发展的强度关系密切, 对流越强闪电活动越强烈。闪电活动主要受对流高度与环境温度对雷暴云内部冰相粒子的影响, 冰相粒子越多, 越利于闪电发展。利用双偏振天气雷达探测冰相粒子的分布范围, 可以作为预测闪电的重要依据。

(4) 本文仅分析了一次典型的雷暴个例, 样本个例较少, 今后需收集更多典型个例, 进一步分析闪电与偏振参量的量化关系。

参考文献:

- [1] 李南, 魏鸣, 姚叶青, 等. 安徽闪电与雷达资料的相关分析以及机理初探[J]. 热带气象学报, 2006, 22(3): 265-272.
- [2] 孙玉婷, 赖安伟, 王明欢, 等. 基于地形差异的闪电频次与雷达回波关系分析[J]. 高原气象, 2019, 38(6): 1320-1331.
- [3] 陈星登, 郭泽勇, 张弘豪, 等. 不同强度云系的双偏振雷达特征[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(2): 19-23.
- [4] 杨光, 朱明佳, 金祺, 等. 利用双偏振雷达反演对流云降水粒子相态[C]//第32届中国气象学会年会论文集. 北京: 中国气象学会, 2015: 7-11.
- [5] 杨波, 孟鑫, 杨磊, 等. 基于 S 波段双线偏振天气雷达的降水粒子相态识别[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(4): 127-132.
- [6] 林文, 张深寿, 罗昌荣, 等. 不同强度对流云系 S 波段双偏振雷达观测分析[J]. 气象, 2020, 46(1): 63-72.
- [7] 李云, 沃伟峰, 方艳莹. 双偏振雷达偏振参量产品在宁波的初步释用[J]. 浙江气象, 2021, 42(2): 38-44.
- [8] 姚叶青, 袁松, 张义军, 等. 利用闪电定位和雷达资料进行雷电临近预报方法研究[J]. 热带气象学报, 2011, 27(6): 905-911.
- [9] 李静睿, 刘佩佩, 陈小婷, 等. 秦巴山区一次罕见雷暴大风天气成因分析[J]. 陕西气象, 2020(3): 9-15.
- [10] 彭力, 徐浩天, 刘嘉慧敏, 等. 陕西盛夏一次强雷暴天气成因分析[J]. 陕西气象, 2020(5): 1-5.
- [11] 魏雪, 黄兴友, 孙伟, 等. 基于雷达资料的雷电特征分析及预警[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(3): 31-36.
- [12] BRANDON R V, LAWRENCE D C, SCHNEIDER D, et al. Using WSR-88D reflectivity for the prediction of cloud-to-ground lightning: a central North Carolina study[J]. National Weather Digest, 2003, 27: 35-44.
- [13] 李超, 胡明宝, 胡鹏. 双偏振多普勒天气雷达探测雷电的初步研究[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(3): 26-30.
- [14] 吴少峰, 赵琴, 郝笑, 等. 一次雷暴过程的双偏振雷达观测量与闪电频次的关系分析[J]. 广东气象, 2019, 41(5): 6-10.
- [15] 杨磊, 贺宏兵, 杨波, 等. S 波段双偏振多普勒天气雷达对一次局地强雷暴过程的探测分析[J]. 气象科学, 2019, 39(6): 786-796.
- [16] 贺宏兵, 胡明宝, 李超, 等. 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), 2014, 15(2): 184-190.
- [17] 徐迎港, 陈新甫, 杨波, 等. 江苏地区夏季雷暴的雷达回波特征研究[J]. 气象科学, 2021, 41(5): 668-667.
- [18] 杨波, 孟鑫, 杨磊, 等. 南京地区一次冬季雷暴过程的雷达回波特征分析[J]. 气象科学, 2019, 39(1): 62-69.