

崔丹,肖辉,王振会,等. X波段多参数气象雷达对强风暴云雷电个例的探测研究 [J]. 大气科学学报, 2009, 32 (6): 839-850.

X波段多参数气象雷达对强风暴云雷电个例的探测研究

崔丹^{1,2,3},肖辉¹,王振会²,何宇翔¹,秦元明⁴

(1. 中国科学院 大气物理研究所 云降水物理与强风暴实验室,北京 100029; 2. 南京信息工程大学 遥感学院,江苏 南京 210044;
3. 海南省气象局 气象科学研究所,海南 海口 570203; 4. 吉林省人工影响天气办公室,吉林 长春 130062)

摘要:利用多普勒双偏振多参数气象雷达,结合地面 LD-II 闪电定位仪资料,对一次中尺度对流强风暴云的雷电过程进行观测分析。结果表明,闪电发生前后,对流云上部的差分传播相移率 K_{DP} 、差分反射率因子 Z_{DR} 和差相移 $\Delta\phi_{DP}$ 有明显的变化,反映出云中冰相粒子排列取向随云中电场分布结构的变化而变化。这种闪电发生时冰相粒子排列取向存在明显变化的信息,说明用多参数气象雷达探测的技术以及开展雷电预警预报是可行的。

关键词:闪电;偏振雷达;差分传播相移率;差分反射率;差相移

中图分类号: P435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2009)06-0839-12

Lightning Detection of a Strong Storm with an X-band Multi-Parameter Meteorological Radar

CU IDan^{1,2,3}, XIAO Hui¹, WANG Zhen-hui², HE Yu-xiang¹, QIN Yuan-ming⁴

(1. Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. School of Remote Sensing, NU IST, Nanjing 210044, China;
3. Hainan Institute of Meteorological Sciences, Haikou 570203, China;
4. Jilin Provincial Weather Modification Office, Changchun 130062, China)

Abstract: Using an X-band Doppler dual-polarized meteorological radar, in conjunction with a networked ground LD-II lightning detector system, a lightning process in a mesoscale convective system in Jilin Province on 15th May 2007 was measured and analyzed. The results show that there were discernable changes in specific differential phase shift K_{DP} , differential reflectivity factor Z_{DR} and differential phase shift $\Delta\phi_{DP}$ in the top of the convective cloud before and after the occurrence of lightning, which indicates that the orientation of ice particles in the thunder cloud changed with changes in the distributive structure of the electric field within the cloud. This discernable direction information of ice particles in the thunder cloud around the lightning has proved the application possibility of the multi-parameter meteorological radar technology to the now casting and monitoring of lightning.

Key words: lightning; polarization radar; specific differential phase shift; differential reflectivity; differential phase

0 引言

闪电是自然大气中超强、超长的放电现象。雷电灾害是威胁人类生活的严重自然灾害之一,且对人类造成了巨大的经济损失。2007年5月23日重

庆市开县义和乡兴业村小学就遭遇球形闪电袭击生命事故,造成7人当场死亡44人受伤的重大惨剧。当前的探测闪电技术还比较有限,因此利用有效的探测技术如偏振雷达探测技术来更清楚的了解雷电起电机理和原理,可以为以后更好的雷电预警和减

收稿日期: 2007-12-17; 改回日期: 2008-10-19

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40875080); 国家科技支撑计划项目(2006BAC12B01-01); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(IAP07408); 中国气象局与吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室课题(0603)

作者简介: 崔丹(1981—),男,河南新乡人,硕士,研究方向为雷达、云降水物理及强风暴雷电, cuidan1219@yahoo.com.cn; 肖辉(通信作者),男,研究员,研究方向为云和降水物理及人工影响天气、雷达探测研究等, hxiao@mail.iap.ac.cn

灾服务。

偏振雷达是最近二十多年才发展起来的新型天气雷达,它的问世极大地促进了雷达气象和云降水物理学科的发展,并提高了雷电探测技术水平。偏振雷达可以得到很多非常有用的参数^[1],如双线偏振雷达中可得到线退偏振比 LDR、差相移 DP 、差分传播相移率 K_{DP} 、后向散射相移、互相关系数 hv 、水平反射率 Z_H 、差分反射率 Z_{DR} 。这些参数的综合应用对于改善雷达测雨精度和识别云中水成物粒子的相态及其变化非常有用^[2-3]。

Krehbiel等^[4]利用双通道圆偏振雷达测得云中主电荷区分布结构是上正下负,并发现云中、云地电场在闪电前后的变化过程,提供了远程遥感冰晶粒子分布的一种方法。Richard等^[5]利用偏振雷达做出的云中粒子排列,发现垂直排列粒子预示着强电场,闪电即将发生。Caylor等^[6]用双线偏振雷达发现,云中晶体角度一般是 45° ;偶尔接近垂直,冰晶粒子的再排列方向是和云中闪电有密切关系,远大于云地闪电。李建华等^[7]、程向阳等^[8]利用雷达和闪电频数分析了雷暴天气的地闪特性和前兆特征。冯民学等^[9]、朱飙等^[10]具体分析了闪电定位资料在雷暴天气中的应用。夏文梅等^[11]、罗霞等^[12]利用雷达资料分析了暴雨过程中的速度场以及不同荷电结构下地面电场情况。

本文将利用偏振雷达结合闪电定位仪资料,详细分析我国东北地区一次闪电前后云中粒子的偏振参量特性,了解微物理场分布和闪电的关系,以揭示中尺度对流系统的闪电演变特征,从而为多参数雷达在强对流雷电预报中的应用提供理论依据。

1 天气情况简介和资料的获取

1.1 资料获取

本文所用的地闪资料来自吉林省 LD-II 闪电监测定位系统网。该系统由 12 个远程探测头(分别布设在长春、双辽、白城、松原、吉林、敦化、珲春、和龙、东岗、长白、集安、东丰)和一个中心数据处理总站组成,探测范围基本覆盖吉林全省。位置如图 1 所示,系统定位采取多站时差、定向综合定位方法,是以测量雷电电磁脉冲到达不同基站的时间差作为定位基准,精确确定雷电地理位置。每个单站探测仪都将测到的闪电波到达时间、方向、电磁场强度、极性、上升陡度等参数,实时传输到数据处理中心站,进行实时定位处理。该系统的定向精度和探测效率的理论计算值分别为 1 和 95%,计时精度为 $0.1 \mu s$,传播误差为 $0.1 \sim 10 \mu s$,定位精度为 500 m。本文主要是利用该定位网提供的地闪资料来校验多参数雷达资料预测的闪电发生时间和位置是否准确,从而论证利用多参数雷达监测雷暴云闪电方

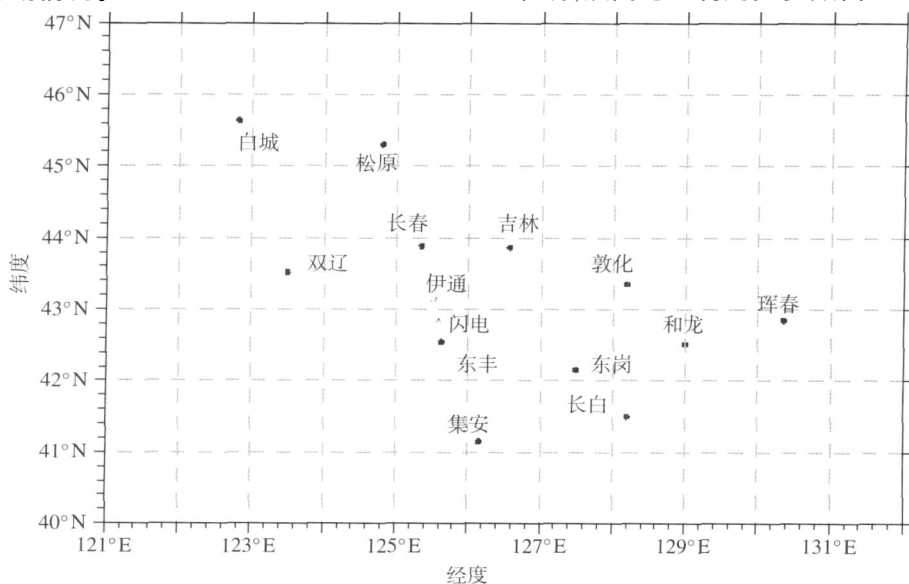


图 1 雷达和吉林省雷电监测定位网分布(“ ”为雷达所在位置,海拔高度 342.5 m;“ ”为闪电发生位置;其余各点为闪电定位仪的位置分布)

Fig 1 Locations of the 714XD P-A radar(“ ”, at 342.5 m height above sea level) and the networked ground LD-II lightning detector system (dot sensors of the system) in Jilin Province “ ” is the position of lightning on 15th May 2007

法的可行性。

多参数雷达资料来自中国科学院大气物理研究所新一代的双通道 X 波段多参数气象雷达 (714XDP-A 型)。该雷达位置在吉林省四平市伊通县,海拔高度是 342.5 m (图 1),它是车载式全相参多普勒偏振天气雷达系统,能够提供多种参数,不仅有气象目标的幅度信息 (强度)、相位信息 (速度和谱宽),还能够根据定量测得的回波信号的偏振信息计算出气象目标的微物理场信息 (如云内粒子的相态、排列取向、空间分布和尺度谱等)。雷达系统的一些主要参数见表 1。

表 1 714XDP-A 型雷达参数

Table 1 The parameters of 714XDP-A radar

主要参数	范围
工作频率	9 370 ±30 MHz
峰值功率	每通道 35 kW
发射脉冲宽度	1 μs, 2 μs
脉冲重复频率	500 ~ 2 000 Hz (1 μs); 500 ~ 1 000 Hz (2 μs)
天线形式	旋转抛物面
反射体直径	2.4 m
波束宽度	1°
天线增益	44 dB

1.2 天气情况

2007 年 5 月 15 日在吉林省出现了大范围对流性中到大雨的降水过程。降水从 15 日 19: 56 (北京时,下同)到 16 日 05: 32,持续了将近 10 h。图 2 给出了 2007 年 5 月 15 日 18: 00、19: 00、20: 00、21: 00 的红外云图,显示的是吉林省上空的云系分布,可以看出大量云团从西南向东北方向移动,18: 00 时的云团 a 和西南方向的云团 b 结合后在 20: 00 正好到达雷达站上空,云团 a 的前端即东北方向在 19: 00 出现强对流云,对应着雷达图上的带状强对流回波。从长春 20: 00 的探空图 (图 3)上可以看出,高空为西风,800 hPa 以下为西南风,约 700 hPa 处为零度层,即海拔高度 2 969 m。从雷达资料看出,这次降水持续时间长,覆盖范围广,同时地闪频数随着云团的发展不断增加。表 2 给出 2007 年 5 月 15 日闪电定位仪监测的部分资料,可以看到,四平市 15 日发生负地闪 87 次,正地闪 11 次,正闪比为 11.22%,电流幅值均值为 17.58 kA。

多参数雷达观测显示,从 19: 56 开始,天空出现

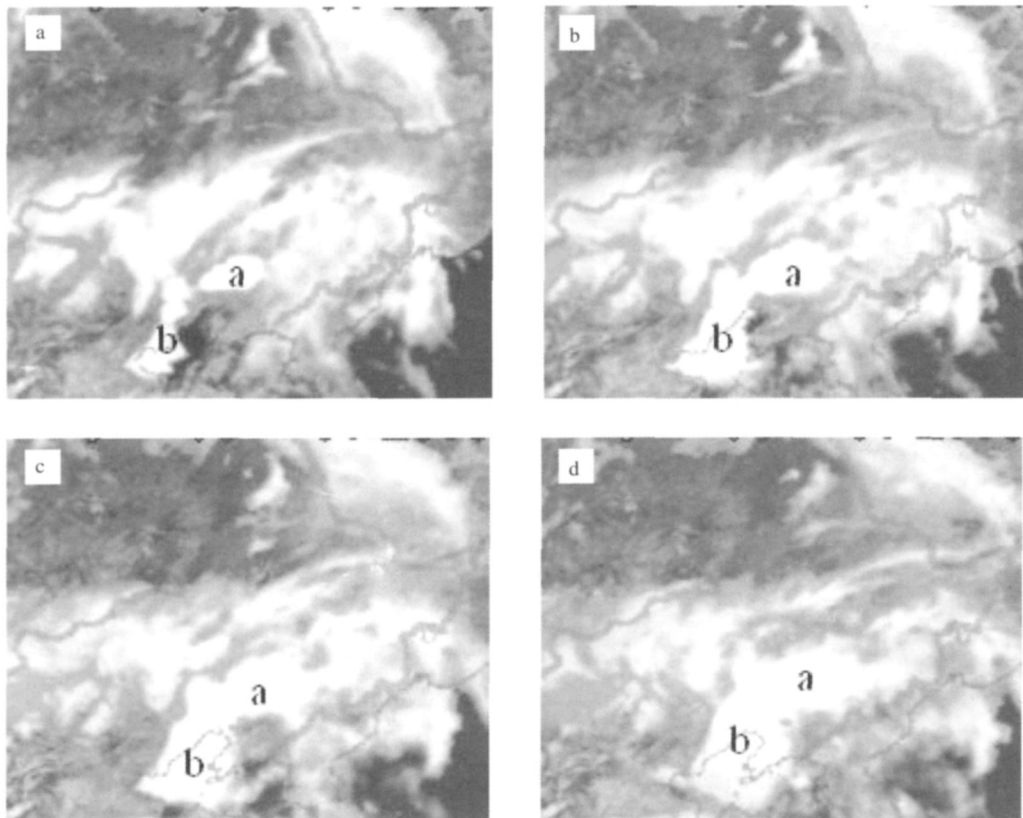


图 2 2007 年 5 月 15 日不同时间红外云图 a 18 时; b 19 时; c 20 时; d 21 时

Fig 2 Infrared cloud images at different time on 15th May 2007 a. 1800 BST; b. 1900 BST; c. 2000 BST; d. 2100 BST

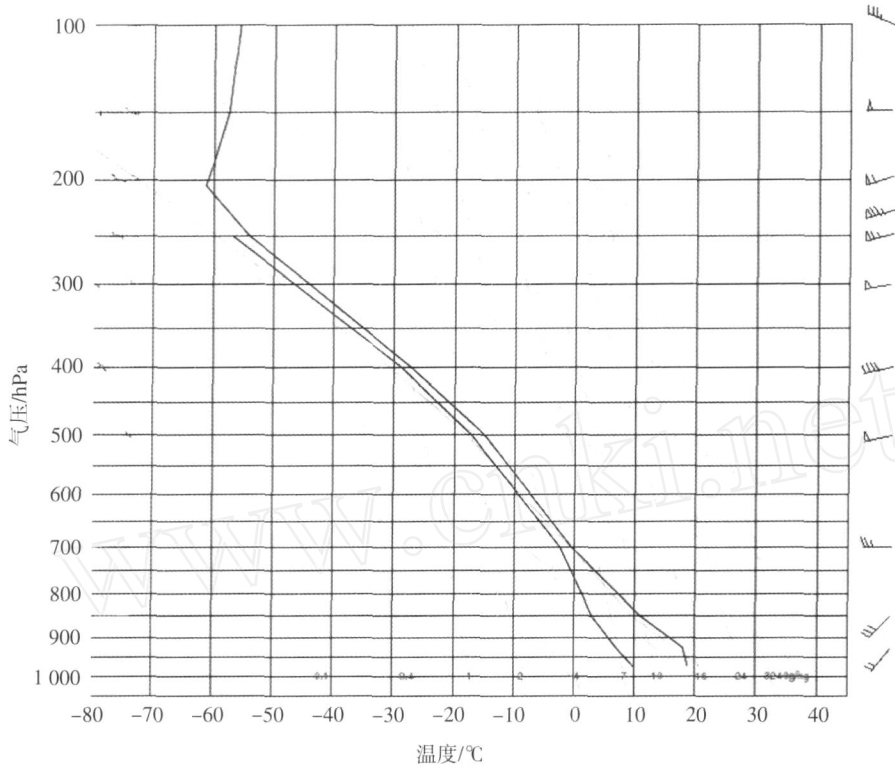


图 3 2007年 5月 15日 20:00探空图

Fig 3 The sounding enagram in Changchun at 2000 BST 15th May 2007

强对流云回波,之后该回波一直向东移动。到 20:22,雷达站正南方出现带状对流回波,由多个对流单体组成。20:20到 20:50之间发生了多次强烈闪电和雷声。21:03,云团边缘到达雷达站上空,地面出现降水,此时雷达回波强度约为 38 dBZ。到 21:24,强对流云减弱,变成大片层状云回波。23:35云团离开本站,向西北方向移动。这期间没有出现强对流云回波,只有稳定的层状云回波。5月 16日 00:51,本站西北和西南方向又有大片云团,强回波中心距离本站 90 km,此时云团边缘到达本站,并产生降水。到 04:38,本站降水基本结束,天空东北方向有小范围云团。05:32,云团基本消散。

2 雷达回波结构与闪电资料对比分析

2.1 闪电资料分析

从表 2 的数据发现四平市地区上空 2007 年 5 月 15 日 18:00 时对流体对应的地闪频数不高,从 19:00 到 20:00 只有 11 次,而 20:00—21:00 地闪频数却迅速增加,达到 45 次,其中正地闪 3 次,负地闪 42 次。这说明对应于发展中的对流系统是处在初生至发展阶段的中尺度对流系统,在对流云发展的初期,没有条件产生足够的电场引发闪电,而处在对流云区和对流云向层云的过渡区,即成熟至消亡阶段,发生的地闪最多。

表 2 2007年 5月 15日四平市闪电定位仪资料统计的雷击参数

Table 2 Hourly lightning statistics of the ground LD-II lightning detector data in Siping on 15th May 2007

统计时刻	正闪数 /次	负闪数 /次	总闪数 /次	正闪比 /%	幅值均值 /kA	正闪幅值均值 /kA	负闪幅值均值 /kA
18	0	13	13	0	15.73	0	-15.73
19	0	11	11	0	16.38	0	-16.38
20	3	42	45	6.67	16.80	23.57	-16.32
21	4	14	18	22.22	21.01	27.98	-19.02
22	2	5	7	28.57	15.19	27.85	-10.13
23	2	2	4	50.00	24.30	33.49	-15.11

2.2 雷达资料 PPI图分析

2007年 5月 15日从 20: 22到 20: 31,该时间段是从表 2地闪频数峰值时间段中选出,这期间地闪频数很高,根据闪电定位仪监测资料统计出四平市地区达到 26次。图 4给出的是 5月 15日 20: 22: 24的 1.00 仰角的雷达回波强度 PPI图,最大探测距离为 150 km,雷达脉冲重复频率是 750 ~ 1 000 Hz(PPI图下同)。从图 4中看出,雷达正南方有带状强对流云回波,西南方为大片层状云,东南方为小片层状云团,对流云中最大回波强度超过 55 dBZ。图 5为 5月 15日 20: 28: 33的雷达回波强度 PPI图。从图 5中看出,对流云带和图 4相比移动速度不大,整体结构仍然是东西两端为层状云回波,中间为带状对流云回波。图 5还标出了表 3中不同时刻闪电发生位置,由于表 3中的闪电发生时间是不相同的,为了便于显示闪电发生位置与云团移动趋势之间的关系,而标注在一张图上,其实闪电位置对应着强回波区,由于对流云团或强回波强度区在移动,而图 5中的图像是静止的,因此看到弱回波强度区也有闪电。同时看到在强对流放电时间段,闪电的位置是随着云团的移动和发展而改变的,基本上对应着强回波强度区的位置。图 5中虚线表示的是在此 PPI扫描一圈后,立即在虚线的位置进行 RHI扫描。从

图 5中看到虚线经过位置上 35 km 左右有闪电发生。同时观察偏振参量的 PPI回波图,看到分布比较均匀,没有太多明显变化,因此不再详细叙述。

2.3 雷达资料 RHI图分析

强对流主要放电时间是从 20: 00到 21: 00,因此在 20: 29: 46对距离本站南面 35 km 处的一块强对流云中心作 RHI扫描,即图 5中虚线位置,方位 166 °仰角范围 0.00 °~ 30.00 °;雷达脉冲重复频率 750 ~ 1 000 Hz(RHI图,下同)。从闪电定位仪的定位结果表 3中看到 20: 31: 15,在 42.84 °N, 125.59 °E发生闪电,电流强度为 - 21.42 kA。由经纬度确定的闪电位置(见图 1或图 5)在雷达图中的方位约为 166 °正好是雷达观测的方位,所以认为雷达观测到的闪电就是闪电定位仪测量到的闪电。从回波强度图(图 6)中可以看到 20: 29: 46时回波最高强度超过 50 dBZ,对应强对流单体,云顶高度达到 12 km,强回波核高度超过 8 km,而到 20: 31: 36时,对流云上部变化明显,强回波核减弱,高度在 4 km 左右。看来,闪电前后强回波中心有所减弱,而对流单体结构基本上没有改变。

图 7给出的是偏振参量 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 D_{F} 的雷达回波 RHI图,从图 7中可以看到:

Z_{DR} 在 20: 29: 46时,距离约为 38 ~ 52 km,高度 6 ~ 9 km 的范围内出现负值。20: 30: 42时,负值区

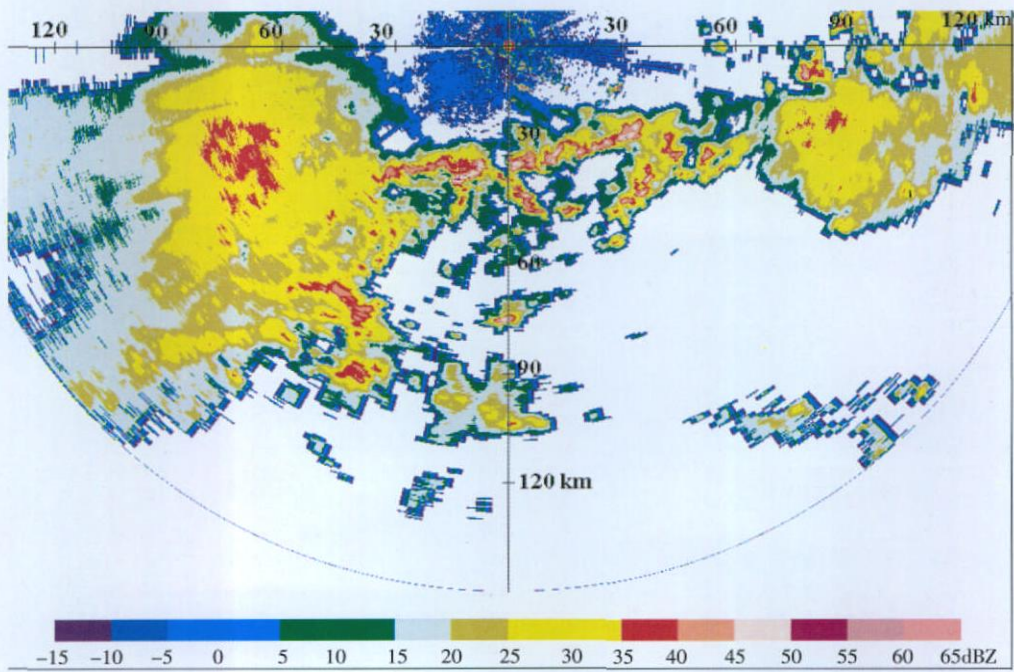


图 4 2007年 5月 15日 20: 22: 44雷达回波强度 PPI图(仰角为 1.00 °;最大探测距离为 150 km)

Fig 4 The radar echo intensity of clouds on PPI at 20: 22: 44 BST 15th M ay 2007 (the elevation angle: 1.00 °; the maximum detecting range: 150 km)

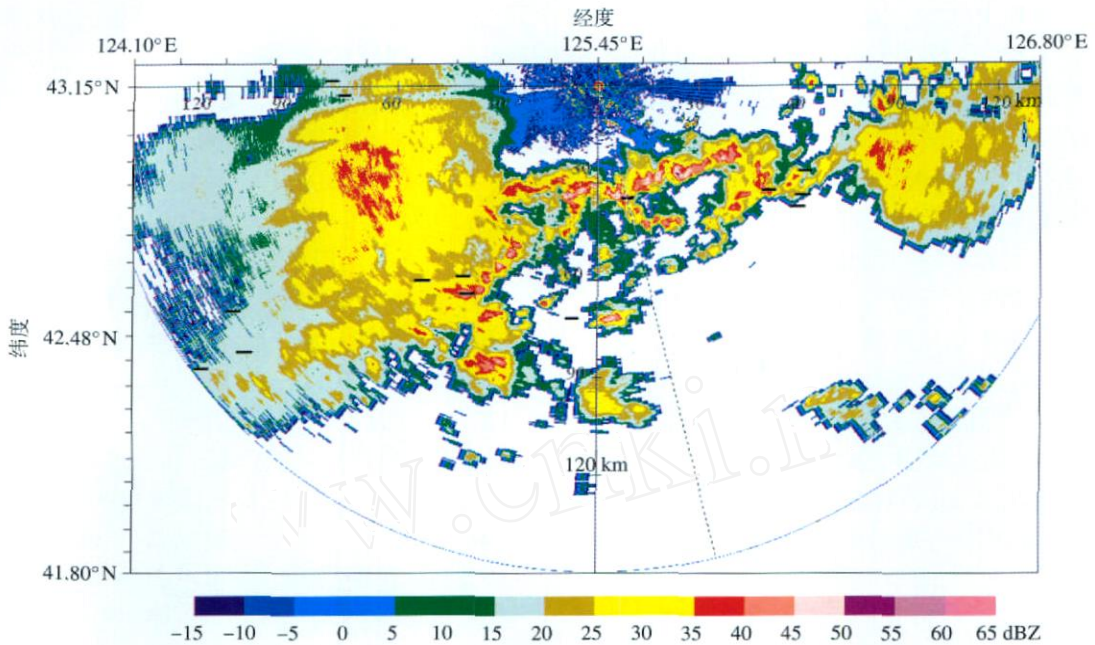


图 5 2007年 5月 15日 20:28:33 雷达回波强度 PPI 图 (仰角为 1.00° 最大探测距离为 150 km, “_” 为表 3 中不同时刻负地闪发生位置)

Fig 5 The radar echo intensity of clouds on PPI at 20:28:33 BST 15th May 2007 (the elevation angle: 1.00°; the maximum detecting range: 150 km; the positions of negative ground lightnings in Table 3 are shown by “_”)

域范围增加到最大。20:31:36时,随着闪电的发生此区域在减小,负值区基本消失,同时 8 km 高度附近的 0.6 dB 以上的正值区也消失了,对应着图 6b 中强回波核高度降到 4 km 左右,说明 Z_{DR} 负值区的变化与闪电发生有密切关系。由定义可知, Z_{DR} 反映了粒子在水平和垂直方向的变形信息,与水成物的大小和椭球形轴对称比相关,并受粒子倾斜度影响。Hall等^[13]曾指出 Z_{DR} 是一个与水成物的形状、

大小、空间取向相关的参量。闪电前高空 Z_{DR} 出现负值区,说明粒子在电场的作用下呈垂直排列,闪电后变为正值即恢复成水平排列。所以说 Z_{DR} 随着闪电发生而变化表明了粒子的轴比是随闪电发生而变化的。同时,从图 7d 中还可以清楚地看到,零度层亮带,确定了零度层的高度约为 2.6 km,从探空图 (图 3) 中知道零度层在 2 969 m,减去雷达的海拔高度 342.5 m,二者是很好的对应。

表 3 闪电定位仪监测资料统计的部分定位结果表

Table 3 Statistics of the lightning measurements by the LD-II lightning detector system

GPS 时间	经度 / (°E)	纬度 / (°N)	电流强度 / kA	雷电流上升陡度 / (kA·μs ⁻¹)	误差椭圆长轴 / m	误差椭圆短轴 / m	椭圆长轴倾角 / (°)
20:29:22	126.12	42.93	-13.703	4.725	619.161	150.846	106.969
20:29:47	126.10	42.84	-17.421	7.259	3 472.159	789.353	104.630
20:29:54	124.31	42.37	-37.131	9.521	2 174.230	249.839	31.857
20:29:54	124.45	42.54	-30.114	13.093	1 527.393	209.247	24.224
20:30:05	125.98	42.87	-17.988	7.821	612.023	151.155	100.363
20:30:06	125.06	42.58	-27.709	6.297	442.234	145.499	105.916
20:30:16	125.06	42.66	-21.335	10.160	416.468	143.881	106.615
20:30:20	124.75	43.12	-13.612	4.861	657.958	204.761	53.483
20:30:44	124.48	42.40	-29.728	14.864	1 917.379	236.679	33.257
20:31:03	126.07	42.81	-17.912	7.165	1 124.221	252.960	103.461
20:31:05	124.93	42.63	-26.388	9.773	1 060.314	182.880	28.785
20:31:14	125.41	42.51	-26.756	2.074	325.778	94.982	135.461
20:31:15	125.59	42.84	-21.417	8.567	9 867.913	2 736.453	15.803
20:31:17	124.71	43.16	-14.516	6.311	654.984	197.943	50.233

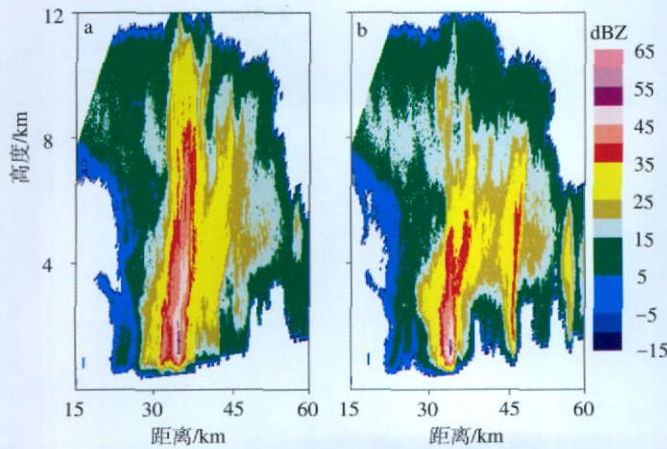


图 6 2007年 5月 15日 20: 29: 46 (a)和 20: 31: 36 (b)的回波强度 RH图 (方位角为 166 ° 仰角范围为 0 ~ 30.00 °,最大探测高度为 12 km)

Fig 6 The radar echo intensity of clouds on RHI at (a) 20: 29: 46 BST and (b) 20: 31: 36 BST 15th May 2007 (the azimuth angle: 166 °, the elevation range: 0 ~ 30.00 °, the maximum detecting height 12 km)

K_{DP} 在 20: 29: 46时, 6 ~ 8 km 高度有两块明显的负值区,随着对流发展,负值区的范围不断变大, 20: 30: 42时负值区范围继续增大, 20: 31: 36时范围开始减小,到 20: 33: 26时,负值区完全消失。由表 3列出的闪电资料看到闪电发生在 20: 31: 15,由于雷达扫描一个 RHI需要 50 s左右,所以没有闪电发生时刻的图,而 20: 30: 42和 20: 31: 36两时刻即闪电前后负值区分别是增加和减小,说明在负值区最大时闪电发生,所以说 K_{DP} 的负值区可以很好的预示闪电发生。由定义可知, K_{DP} 主要来自各向异性粒子对于水平和垂直极化波产生较大的相移差,负值表明粒子在强电场的条件下是垂直排列的,因此可以说粒子的排列方向和闪电有着密切的关系。

W inn等^[14]、B yme等^[15]通过用云内的电场探空仪发现负电荷区的温度层为 - 5 ~ - 15 °C,厚度为 km 量级,高于 0 °C 的温度层基本上不参与起电。Reap^[16]将地闪和 GOES 卫星观测的云顶温度对比也发现地闪倾向于发生在最低温度区域内或周围。所以说起电的粒子在云中最低温度区对应的应该是冰相粒子,而在电场力的作用下正负电荷粒子会形成有序的排列,特别是冰相粒子在电场作用下会产生有序的垂直或接近垂直排列。这种排列加强了电场强度,当场强足够大时,就会发生闪电。在本例子中通过 K_{DP} 的负值表示出垂直排列的冰粒子厚度有 2 km 左右,在云的上部。

D_P 在 20: 29: 46时,高度在 6 ~ 9 km,有明显的小值区。该区域的变化情况同 Z_{DR} 、 K_{DP} 一样,都是当它的范围达到最大时闪电发生,之后不断减小,直

至消失。由定义知道 D_P 小值代表着垂直指向的粒子,垂直极化波在单位长度上有大的相移,传输的速率要比水平极化波慢,而水平指向的粒子情况相反。因此 D_P 随着冰相粒子排列方式的改变而变化,同样可以很好地预示闪电的发生。

3 雷达数据分析对流系统闪电前后时空演变过程

在雷达 RHI图中看到闪电前后偏振参量存在明显变化的区域,在该区域划定一定的距离和高度范围,找到对应的仰角范围,通过每个仰角对应的扫描线在区域内中间点的数据,按照仰角从大到小的顺序排列,进一步分析对流云在闪电前后偏振参量的垂直结构在时空上的演变过程。主要是分析 3个参量对于同一闪电分别在 3个不同时间的变化规律,闪电发生时间为 20: 31: 15。图中闪电前用符号“ A ”表示,最接近闪电时刻用符号“ B ”表示,闪电后用符号“ C ”表示,下同。图 8是 K_{DP} 在距离 35.2 ~ 38.2 km,高度 5.6 ~ 7.7 km 的范围内,中间距离为 36.7 km 的垂直线上的数据在不同时间的变化结构,每个仰角选定的中间点在图右端给出了它的高度。从图 7e、f中看到两块负值区,图 8选取的是变化最明显的一块区域。从图 8中看出 20: 29: 46时刻数据出现负值,平均为 - 1.4 (°) / km,到 20: 30: 42时刻该垂直线上数据整体变小,平均值为 - 1.8 (°) / km,在 10.75 ° ~ 11 ° 仰角范围内达到最小值,小于 - 2.0 (°) / km, 20: 33: 26时刻数据全部增大,且都到达正值区,平均约为 + 0.3 (°) / km,表明

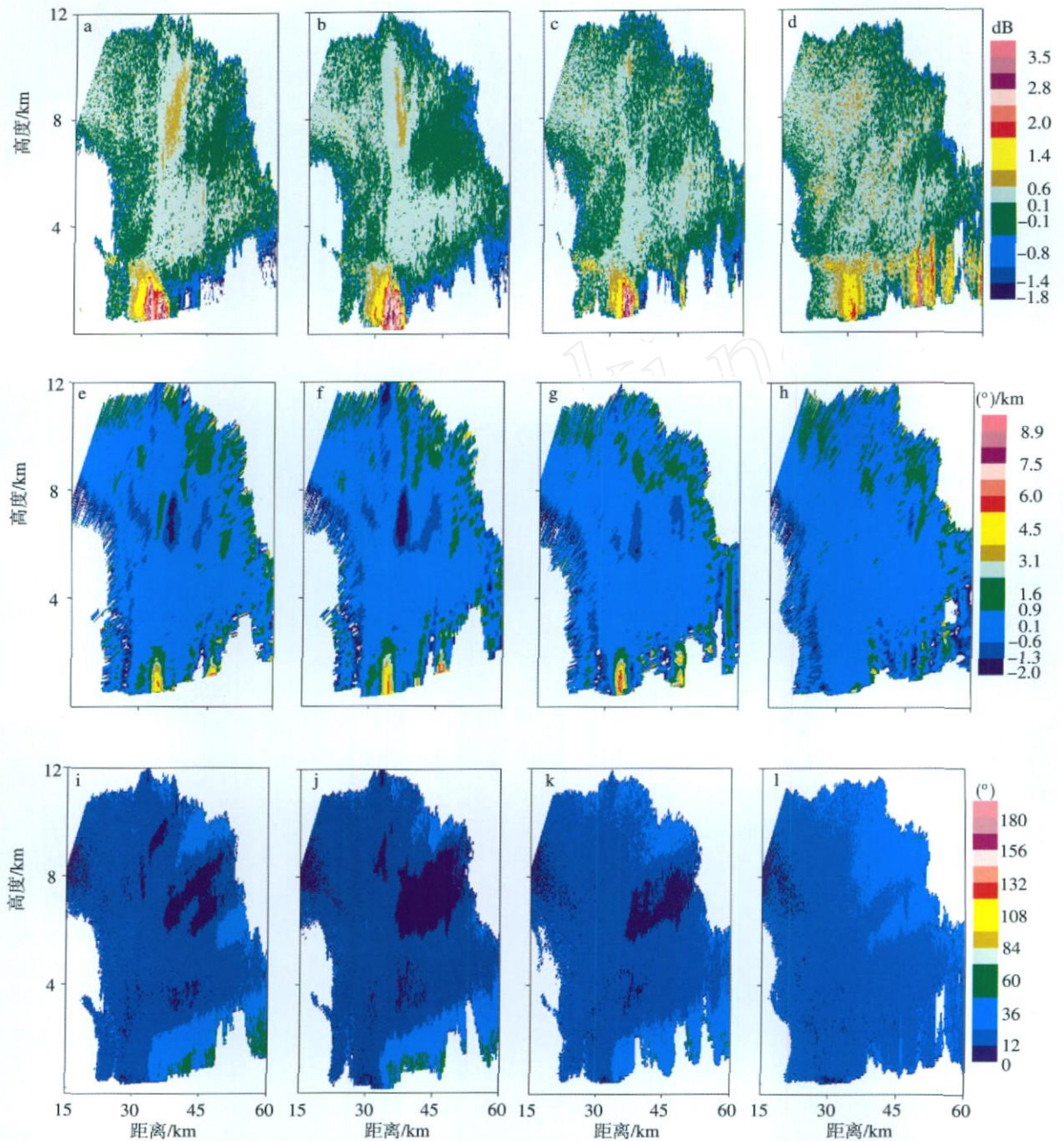


图 7 偏振参量在 2007 年 5 月 15 日闪电发生前后的 RH 图 (方位角为 166° ; 仰角范围为 $0^\circ \sim 30.00^\circ$; 最大探测高度为 12 km) a. 20:29:46 Z_{DR} ; b. 20:30:42 Z_{DR} ; c. 20:31:36 Z_{DR} ; d. 20:33:26 Z_{DR} ; e. 20:29:46 K_{DP} ; f. 20:30:42 K_{DP} ; g. 20:31:36 K_{DP} ; h. 20:33:26 K_{DP} ; i. 20:29:46 DP ; j. 20:30:42 DP ; k. 20:31:36 DP ; l. 20:33:26 DP

Fig 7 RHIs of polarization parameters before and after the lightning strikes on 15th May 2007 at the azimuth angle of 166° (the elevation range: $0^\circ \sim 30.00^\circ$; the maximum detecting height 12 km) a. Z_{DR} at 20:29:46 BST; b. Z_{DR} at 20:30:42 BST; c. Z_{DR} at 20:31:36 BST; d. Z_{DR} at 20:33:26 BST; e. K_{DP} at 20:29:46 BST; f. K_{DP} at 20:30:42 BST; g. K_{DP} at 20:31:36 BST; h. K_{DP} at 20:33:26 BST; i. DP at 20:29:46 BST; j. DP at 20:30:42 BST; k. DP at 20:31:36 BST; l. DP at 20:33:26 BST

粒子方向确实和闪电有着密切关系。

图 9 是 DP 在距离 38.4 ~ 51.0 km, 高度 6.1 ~

8.1 km 的范围内, 中间距离为 44.7 km 的垂直线上数据的时空变化结构。图中看出 20:29:46 时, 数据

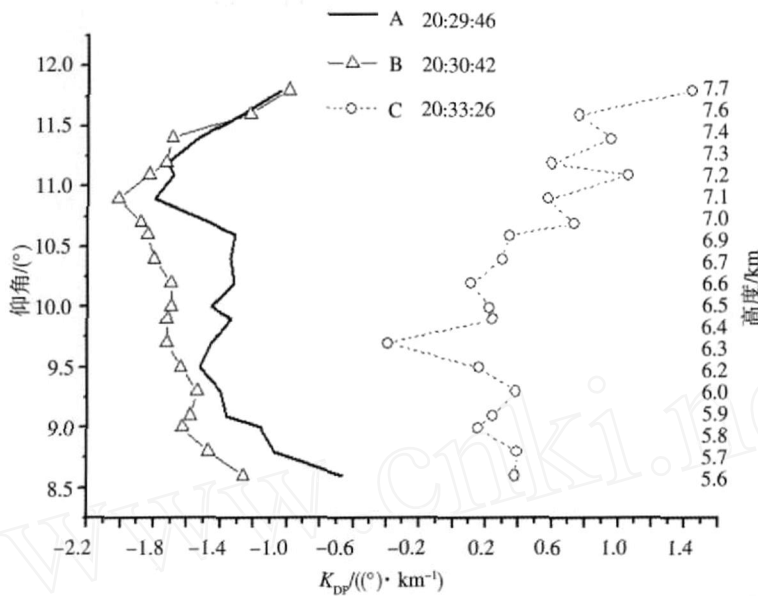


图 8 差分传播相移率在距离 35.2 ~ 38.2 km,高度 5.6 ~ 7.7 km 的范围内,中间距离为 36.7 km 的垂直线数据的时空变化 (仰角实际范围是 8.6 °~ 11.8 °;图形右端给出了每个仰角扫描线在划定距离内中间点的高度)

Fig 8 Spatiotemporal variations of specific differential phase shift K_{DP} on RHI associated with the lightning strikes (the horizontal range of scans: 35.2—38.2 km with the midpoint distance at 36.7 km; the vertical height range: 5.6—7.7 km; the real elevation range: 8.6 °—11.8 °; and the right side ordinate represents the height of scan line on the vertical line at 36.7 km)

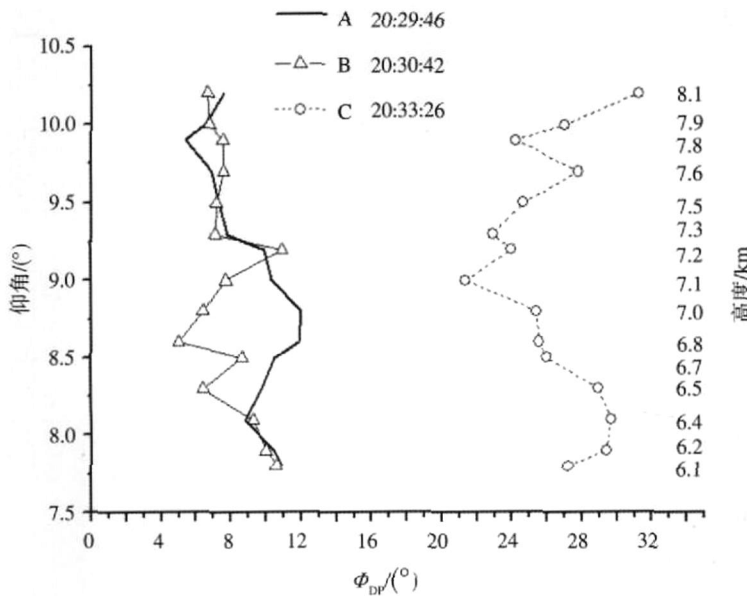


图 9 差相移在距离 38.4 ~ 51.0 km,高度 6.1 ~ 8.1 km 的范围内,中间距离为 44.7 km 的垂直线数据的时空变化 (仰角实际范围是 7.8 °~ 10.2 °;右端给出了每个仰角扫描线在划定距离内中间点的高度)

Fig 9 Spatiotemporal variations of differential phase shift ϕ_{DP} on RHI associated with the occurrence of lightning (the horizontal range of scans: 38.4—51.0 km with the midpoint distance at 44.7 km; the vertical height range: 6.1—8.1 km; the real elevation range: 7.8 °—10.2 °; and the right side ordinate represents the height of scan line on the vertical line at 44.7 km)

已经减小,到 20:30:42 时垂直线上的部分数据继续变小,在 $8.5^{\circ}\sim 9.0^{\circ}$ 仰角范围内的值最小,接近 5° ;而且这部分数据在闪电前后变化幅度最大,高度在 $6.8\sim 7.2$ km。20:33:26 时垂直线上的数据全部增大,并达到最大值,说明了粒子再排列的方向确实和雷暴静电场有着紧密联系,因此可以很好的预示闪电发生。

图 10 是 Z_{DR} 选定中间距离为 46.9 km 的垂直线上数据的时空变化。图中看出 20:29:46 时已经部分出现负值,平均为 -0.05 dB。20:30:42 时基本变为负值,平均为 -0.2 dB。在 $10^{\circ}\sim 11^{\circ}$ 仰角范围内达到最小值,约为 -0.9 dB。20:33:26 时基本都变为正值,平均约为 0.2 dB。证明了差分反射率是随闪电发生而变化的,在闪电时负值达到峰值,并表明了粒子的方向和闪电有着密切关系,因此可以通过 Z_{DR} 值的变化来预示闪电的发生。

比较图 8~10 可以看到,虽然 3 个参量不是选定在同一个距离范围内,而选定在各个参量变化最明显的距离范围,但它们都是在高度 6.9 km 附近闪电前后变化幅度最大,都证明了粒子的方向和闪电的发生确实有着直接关系,而且看到 D_P 和 K_{DP} 有明显的滞后性, Z_{DR} 在 20:31:36 最早完全消失带电分布特征。

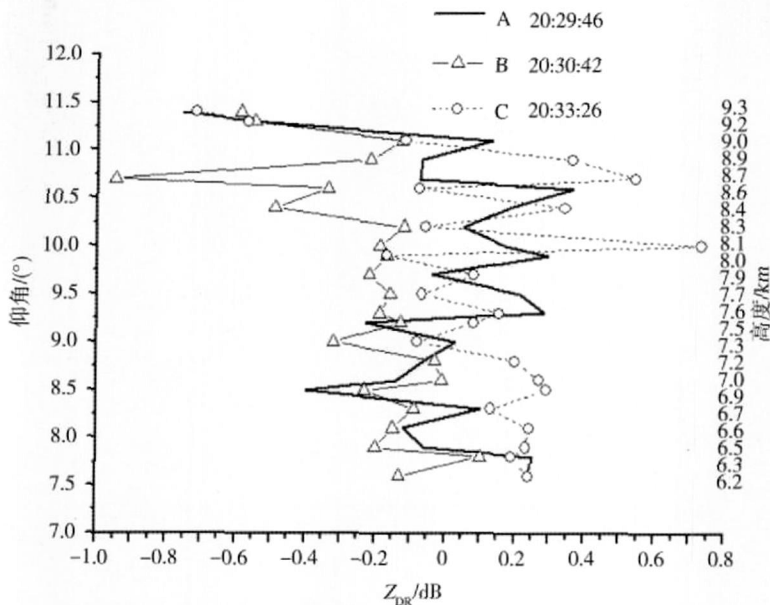


图 10 差分反射率在距离 $41.8\sim 52.0$ km,高度 $6.2\sim 9.3$ km 的范围内,中间距离为 46.9 km 的垂直线数据的时空变化(仰角实际范围是 $7.6^{\circ}\sim 11.4^{\circ}$;图形右端给出了每个仰角扫描线在划定距离内中间点的高度)

Fig 10 Spatiotemporal variations of differential reflectivity Z_{DR} on RHI associated with the occurrence of lightning (the horizontal range of scans: $41.8\sim 52.0$ km with the midpoint distance at 46.9 km; the vertical height range: $6.2\sim 9.3$ km; the real elevation interval: $7.6^{\circ}\sim 11.4^{\circ}$ and the right side ordinate represents the height of scan line on the vertical line at 46.9 km)

4 其他例子

通过上文分析一个闪电发生时的微物理过程,看到了偏振参量的明显变化,同时这种现象在其他闪电发生时也同样存在。图 11 给出的是 2007 年 5 月 15 日 20:53:36 的偏振参量 RHI 图(方位 126° ;仰角范围 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$),图 12 给出的是 2007 年 7 月 18 日 05:05:46 的偏振参量 RHI 图(方位 106° ;仰角范围 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$),他们也都很好地对应了闪电定位仪资料。由此看出,这种现象是具有普遍性的,但通过实地观测和对比闪电定位仪资料,看到虽然有的对流云有很好的带电分布特征,但实际上并没有发生地闪电。Krehbiel 等^[4]曾做过统计分析,发现发展或消退的雷暴云都有可能发生放电现象,有的有很强的带电分布特征,但仍没有放电。

5 总结与讨论

通过新型多参数雷达和闪电定位仪对 2007 年 5 月 15 日的强对流天气过程的观测资料对比分析发现,二者确定的闪电发生地点相同,正好是雷达观测时的强对流云,由经纬度确定的闪电方位也正好是雷达观测时所用方位,所以认为是同一个闪电,从

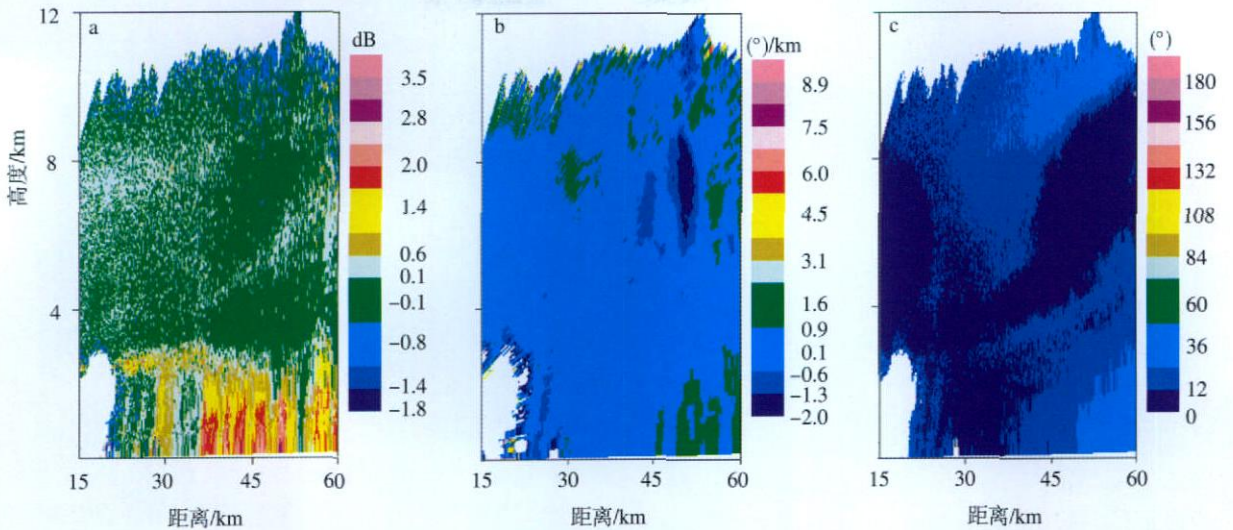


图 11 2007年 5月 15日 20: 53: 36的偏振参量 RHI图 a. Z_{DR} ; b. K_{DP} ; c. D_P

Fig 11 RHIs of polarization parameters (a. Z_{DR} ; b. K_{DP} ; c. D_P) at 20: 53: 26 BST on 15th M ay 2007

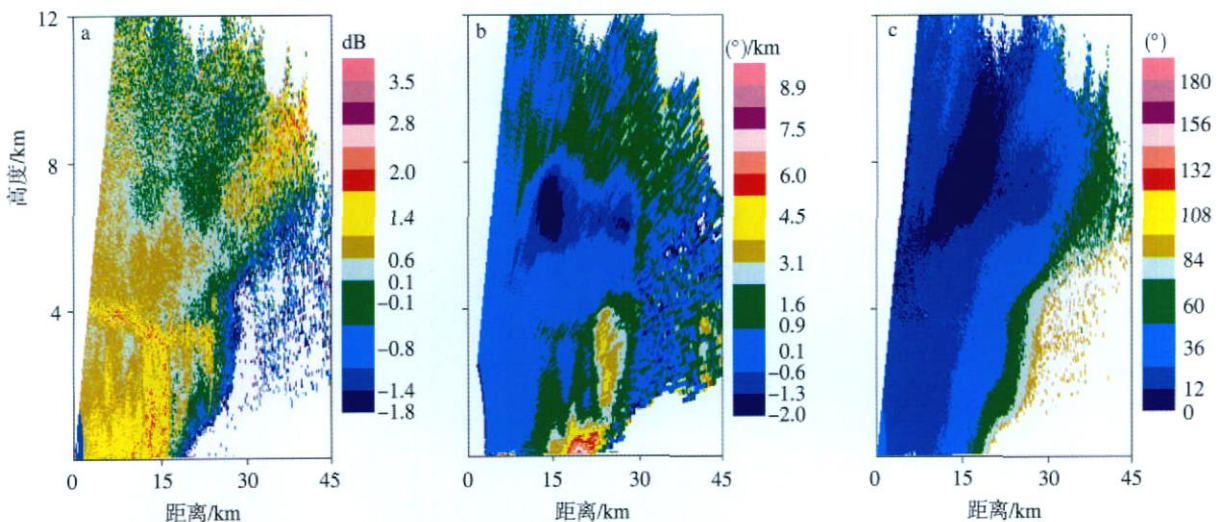


图 12 2007年 7月 18日 05: 05: 46的偏振参量 RHI图 a. Z_{DR} ; b. K_{DP} ; c. D_P

Fig 12 RHIs of polarization parameters (a. Z_{DR} ; b. K_{DP} ; c. D_P) at 05: 05: 46 BST 18th July 2007

而也证明了双偏振雷达可以用于风暴云闪电的观测和分析。因此可得以下结论:

(1)通过双线偏振雷达对一次闪电作 RHI分析,发现闪电前后云中偏振参量有明显的变化,用这部双线偏振雷达可以得到 4个偏振参量 (Z_{DR} 、 H_V 、 K_{DP} 、 D_P),但只有 3个参量 (Z_{DR} 、 K_{DP} 、 D_P)对于闪电的发生而变化明显,常规多普勒雷达参量 (Z_H 、 V 、 W)只能看到宏观的变化,看不到粒子的空间分布和排列方式。

(2)云上层 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 D_P 的值随着闪电发生的变化趋势都是在闪电前不断减小,当达到最小值时闪电发生,之后不断增大。不同的只是 Z_{DR} 和 K_{DP} 减小到了负值。它们值的变化都说明了粒子的取向

确实和闪电有着密切的关系。还发现 K_{DP} 和 D_P 都有明显的滞后性, Z_{DR} 是最早完全消失带电分布特征的。

(3)通过观察 RHI图发现闪电前雷暴云上层是固态冰相粒子,呈垂直分布,下层是液态雨滴,呈水平分布;闪电后上层基本是水平分布,下层仍然是水平分布。所以说闪电和冰相粒子的排列方向有直接关系,而对云下层液态水滴的取向没有影响。

(4)通过比较 RHI图发现: K_{DP} 、 Z_{DR} 和 D_P 三者图形上变化区域的高度、范围大致相同。空间上他们都是在云上部变化区域范围最大时发生闪电的。 K_{DP} 和 D_P 比 Z_{DR} 更能很好的在图形上反映粒子取向的变化,因为 Z_{DR} 量比较小,容易受到噪声偏差或传

播效果的影响。

致谢:感谢吉林省人工影响天气办公室提供的雷电定位监测网的资料!

参考文献:

- [1] 王致君. 偏振气象雷达发展现状及其应用潜力 [J]. 高原气象, 2002, 21 (5): 495-500.
- [2] B ringi V N, Rasm ussen R M, V ivekanandan J. M ultiparameter radar measurements in Colorado convective storms, Part 1, Graupel melting studies [J]. J A tm os Sci, 1986a, 43: 2545-2563.
- [3] B ringi V N, Rasm ussen R M, V ivekanandan J. M ultiparameter radar measurements in Colorado convective storms, Part 2, Hail detection studies [J]. J A tm os Sci, 1986b, 43: 2564-2577.
- [4] Krehbiel P, Chen T, McCrary S, et al. The use of dual channel circular polarization radar observations for remotely sensing storm electrification [J]. Meteor Atmos Phys, 1996, 58: 65-82.
- [5] Richard D S, Paul R K, William R. The use of simultaneous horizontal and vertical transmissions for dual polarization radar meteorological observation [J]. J Amer Meteor Soc, 2001, 18 (4): 232-241.
- [6] Caylor I J, Chandrasekar V. Time-varying ice crystal orientation in thunderstorms observed with multiparameter radar [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1996, 34 (4): 847-858.
- [7] 李建华, 郭学良, 肖稳安. 北京强雷暴的地闪活动与雷达回波和降水的关系 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29 (2): 228-234.
- [8] 程向阳, 王兴荣, 胡雯, 等. 雷暴天气在多普勒雷达资料上的前兆特征分析 [J]. 气象科学, 2003, 23 (4): 485-490.
- [9] 冯民学, 韦海容, 焦圣明, 等. 南京市闪电定位资料的对比分析 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31 (2): 151-157.
- [10] 朱飙, 黄兴友, 王世文. 南京地区闪电定位资料与探空资料的应用分析 [J]. 气象科学, 2008, 28 (6): 659-662.
- [11] 夏文梅, 张亚萍, 汤达章, 等. 暴雨多普勒天气雷达资料的分析 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25 (6): 787-794.
- [12] 罗霞, 陈渭民, 李照荣, 等. 雷暴云电结构与闪电关系初探 [J]. 气象科学, 2007, 27 (3): 280-286.
- [13] Hall M P M, Cherry S M, Goddard J W F, et al. Rain drop sizes and rainfall rate measured by dual-polarization radar [J]. Nature, 1980, 285: 195-198.
- [14] Winn W P, Moore C B, Holmes C R. Electric field structure in an active part of a small, isolated thunderstorm [J]. J Geophys Res, 1981, 86: 1187-1193.
- [15] Byrne G J, Few A A, Weber M E. Altitude, thickness and charge concentration of charged regions of four thunderstorms during trip 1981 based upon in situ balloon electric field measurements [J]. Geophys Res Lett, 1983, 10: 39-42.
- [16] Reap R M. Evaluation of cloud-to-ground lightning data from the western United States for the 1983—1984 summer seasons [J]. J Appl Meteor, 1986, 25: 785-799.

(责任编辑:张福颖)