

北京地区强冰雹风暴的双偏振特征观测分析

陈程^{1,2}, 肖辉^{2*}, 冯亮², 李宗飞^{1,2}, 周筠珺¹

(1. 成都信息工程学院, 四川成都 610225; 2. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029)

摘要 针对2008年6月23日北京地区出现的冰雹天气过程, 结合再分析资料(NECP)分析此次降水天气过程的天气背景, 利用中国科学院大气物理研究所车载X波段双偏振天气雷达的差分相位移 Φ_{DP} 、差分反射率 Z_{DR} 、相关系数 ρ_{HV} 等偏振参量的图像和数值分布数据, 得到此次强冰雹云的偏振参量结构和演变特征; 然后利用模糊逻辑算法对强冰雹云粒子进行相态识别, 结果与分析一致, 表明双偏振雷达在强对流风暴云和降水微物理结构分析中具有重要作用。

关键词 冰雹云; 双偏振雷达; 偏振参量; 相态识别

中图分类号 S161; P412.25 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)22-07511-05

A Dual-Polarimetric Analysis of a Strong Hailstorm in Beijing

CHEN Cheng, XIAO Hui et al (Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225; Key Laboratory of Cloud - Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract This paper analyzed the environmental condition of the hailstorm process which occurred in Beijing on 23 June 2008 (based on the NECP data). The vehicle-borne X-band dual-polarization radar system set up by the Laboratory of Cloud-Precipitation and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences, can obtain several dual-polarization radar parameters, such as differential propagation phase Φ_{DP} , differential reflectivity Z_{DR} , and correlation coefficient ρ_{HV} . By analyzing the images and numerical distribution characteristics of the polarimetric parameters, we can get the structure of the polarimetric parameters and the evolution features of the strong hail cloud. Then, the results were consistent with the analysis after using fuzzy logic algorithm for hydrometeor classification to strong hail cloud particles. It showed the importance of dual-polarization radar in the strong convective storm clouds and the precipitation microphysical structure analysis.

Key words Hailstorm; Dual-polarization radar; Polarization parameters; Hydrometeor classification

双线偏振雷达理论自20世纪70年代中期提出以来, 得到世界各国广泛应用。它发射2种相互正交的线极化波, 得到很多非常有用的参数^[1], 如双线偏振雷达中可得到水平反射率 Z_H 、差分反射率 Z_{DR} 、线退偏振比 LDR 、互相关系数 ρ_{HV} 、差分传播相位移 Φ_{DP} 、差分传播相位移率 K_{DP} , 这些偏振参量的综合运用对于提高雷达定量测定降水的准确度以及了解降水粒子的相态、尺度分布、形状等均十分有用。目前国内外利用双偏振天气雷达开展强对流的观测研究主要体现在强对流降水估测应用^[2-6]、强对流风暴降水粒子的相态识别^[7-10]、雷电探测应用^[11-13]、龙卷和冰雹强对流过程观测^[14-16]。当粒子粒径分布改变时, 降水物理过程会在偏振雷达参量上产生显著的变化表现, 这些在雷达参量上的可观察的变化模型称之为“微物理识别”^[17]。Ryzhkov等利用S波段双偏振雷达观测研究产生龙卷的超级单体结构特征, 发现 Z_H 取值45~55 dBZ, $Z_{DR} < 0.5$ dB的区域就表示那个部位为碎片(碎片是指龙卷侵袭过程中从地面卷起的各种垃圾、碎石片等), $\rho_{HV} < 0.8$ 的低值区是龙卷信号的一个预测参量^[14]。笔者利用X波段双线偏振雷达在首都机场观测的雷达强度、偏振参量等产品, 分析了2008年6月23日北京地区一次较强的降雹天气过程中双偏振雷达探测参量的变化特征, 以期对双线偏振天气雷达在我国冰雹探测应用提供参考。

1 观测仪器介绍

运用中国科学院大气物理研究所(IAP)车载X波段双偏振气象雷达2008年6月23日在北京首都国际机场(116.35°E, 40.04°N)观测的雷达资料。该车载X波段双偏振气象雷达系统采用直径为2.4 m的旋转抛物面天线, 通过同时发射水平和垂直偏振波来获取目标体的双偏振参量。雷达系统的主要性能指标如表1所示。

表1 IAP X波段双偏振气象雷达系统性能指标

序号	项目	参数值
1	工作频率	9.370 GHz
2	天线转速	12°s ⁻¹
3	天线增益	41.6 dB
4	波束宽度	1°
5	峰值功率	80 kW
6	发射脉冲宽度	0.5、1.0、2.0 μs
7	脉冲重复频率	500、1 000、2 000 Hz
8	变PRF(脉冲重复频率)功能	2/3、3/4、4/5 可选
9	雷达波极化状态	水平、垂直
10	信噪比	2.3 dB
11	通道数	2
12	线性动态范围	>90 dB
13	雷达探测量	Z_H 、 V 、 W 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV}
14	反射率因子 Z_H	1 dBZ *
15	平均径向速度 V 和速度谱宽 W	1 m/s *
16	差分反射率 Z_{DR}	0.2 dB *
17	差分相位移 Φ_{DP}	1° *
18	相关系数 ρ_{HV}	0.01 *

注: *指可观测量的测量精度。

2 天气实况与背景

2.1 天气实况 自2008年6月23日起, 北京受蒙古深厚

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB441403, 2013CB430105); 国家自然科学基金资助项目(41205099); 贵州省黔科合项目(G[2013]4001)。

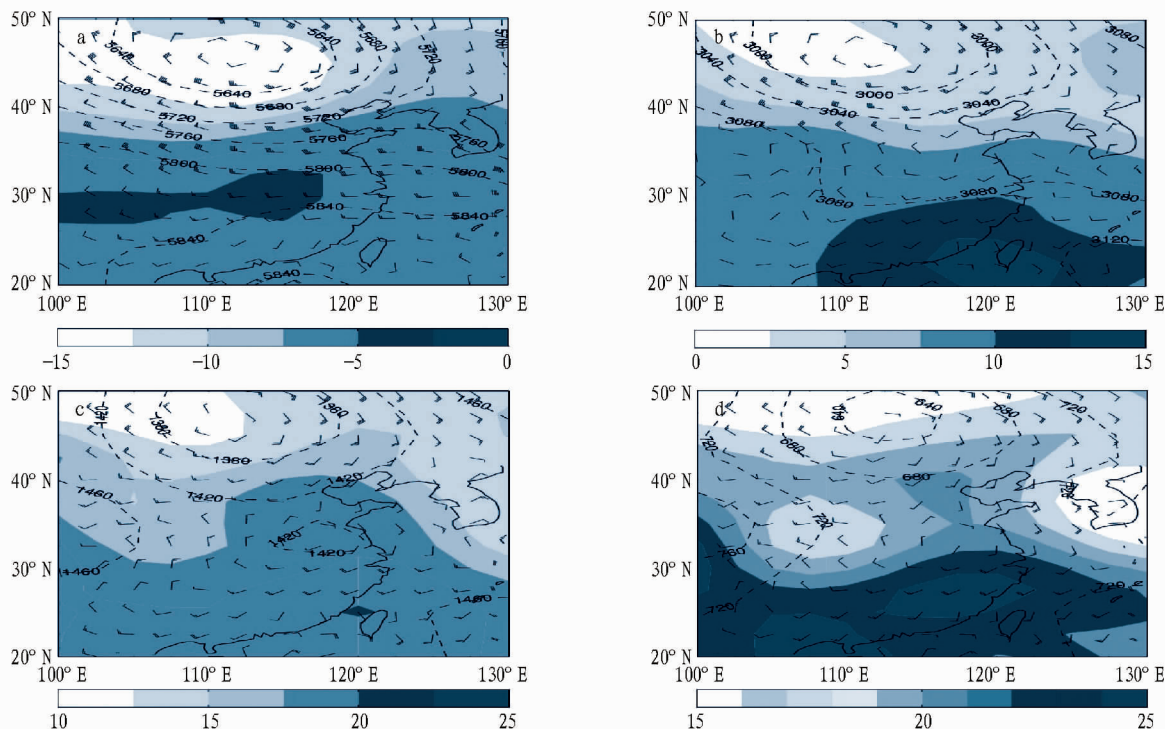
作者简介 陈程(1990-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向: 大气物理。*通讯作者, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事云降水物理、人工影响天气及雷达探测研究。

收稿日期 2014-06-30

低涡冷空气的影响,从午后到傍晚连续9 d出现了雷阵雨天气,雨量分布不均匀,北京地区有的观测站仅有微量降水记录,而有的地方降水却达到大雨甚至暴雨的量级。6月23和25日局部地区短时雨强较大。6月23日下午,北京地区发生强对流雷雨天气,海淀、石景山、丰台、房山、大兴、昌平、顺义、延庆、门头沟等区县出现了局部冰雹。据北京市气象局人工台站观测,6月23日14:45~16:34 海淀(116.27°E、39.97°N)、丰台(116.25°E、39.87°N)、石景山(116.18°E、39.95°N)、大兴(116.33°E、39.97°N)、房山(116.13°E、39.68°N)、佛爷顶(116.12°E、40.58°N)等观测站均有短时降

雹,最长降雹时间为19 min,出现在丰台区,最大降雹尺度为15 mm,出现在海淀区;此次降雹过程造成北京17个乡镇220个村约5 866.7 hm²农作物受损,直接经济损失5 670万元。

2.2 天气背景 利用2008年6月23日08:00的NECP资料,得出此次强对流天气过程的天气背景(图1)。6月23日08:00,500 hPa高度上在蒙古东部有深厚的气旋活动,从气旋伸展出来的槽线南端到达我国江南地区,在中低层均有切变线与其配合;槽线附近有较强的冷平流输送。北京处在850 hPa的暖脊中,且在中蒙边界有低涡发展,有较好的动力和不稳定条件的配合,易引发强对流天气。



注:a~d分别是500、700、850、925 hPa高度场(等值线,gpm)、温度场(阴影,℃)、风场。

图1 2008年6月23日08:00天气形势

3 双偏振雷达对降水过程的分析

3.1 雷达PPI数据分析

3.1.1 利用雷达反射率分析冰雹云降水回波演变。由6月23日在首都国际机场观测的不同时刻雷达反射率强度图(图2)可见,从12:06开始,大约在雷达站西部65 km和北部100 km处有孤立对流单体生成,回波强度在35 dBz以上,且正在向东南方向移动;从12:50开始,孤立的对流单体与周边对流单体合并发展,向东北方向延伸,前部生成新的对流单体,降水回波强度增加,最高可达55 dBz以上;14:06,距离雷达50 km以内出现了强度>55 dBz的回波,雷达西北部生成了新的对流单体,其回波强度值也在45 dBz以上,随后,回波在东移过程中稍有减弱,14:29以后又有加强;14:59,由于首都机场开始受到降水回波的影响,机场开始降水,距雷达西南方向50 km以内有2块强对流单体回波,强度值最大为55 dBz,西南方向100 km有2块对流单体生成;15:06和15:46在雷达西南方向50 km左右有一强雷暴单体回波,其

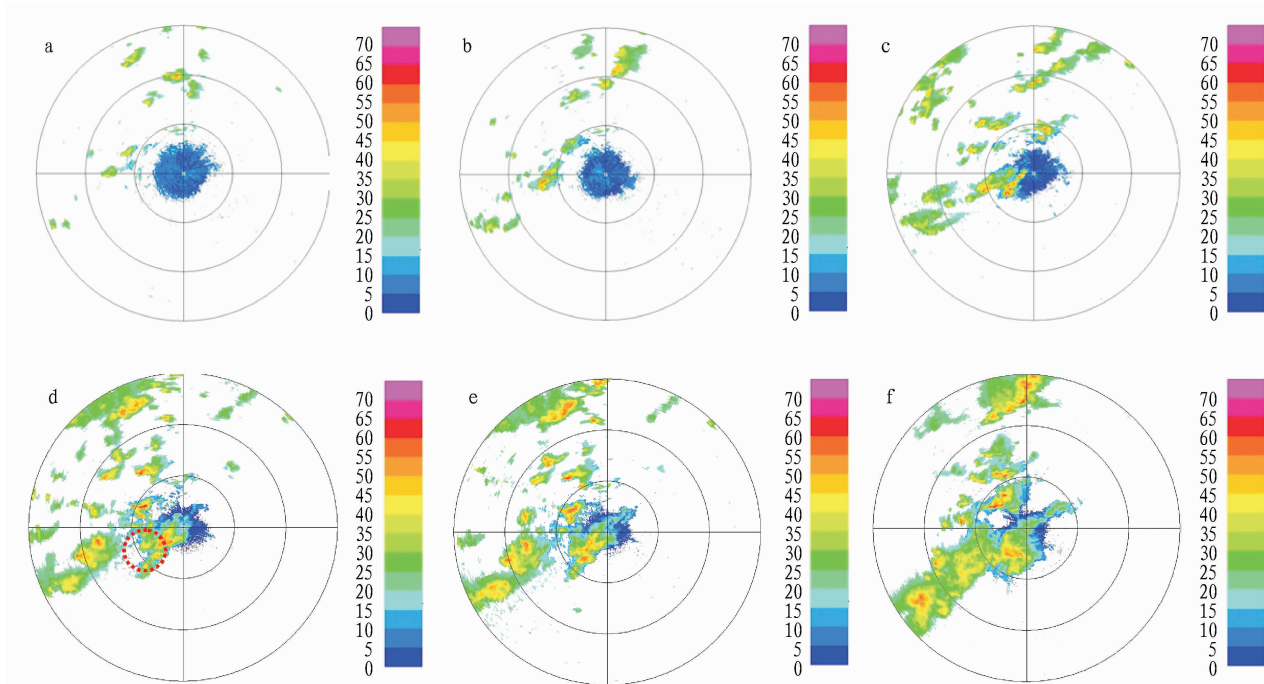
共同特点为强回波中心均在55 dBz以上。

3.1.2 利用差分反射率观测冰雹云特征。差分反射率在雷达上的回波变化(图3)大致与反射率回波一致,23日14:59距雷达西南方向50 km处的回波发展旺盛,强度增大,图像清晰可见有“V”型缺口出现,这是由于冰雹强回波区对雷达电磁波的强衰减所致;距雷达西南方向50 km以内有2块强对流单体回波,差分反射率 Z_{DR} 的值达4.0 dB。据地面观测资料显示,此时刻有降雹。由此可见,在强的对流降水和冰雹一同出现时, Z_{DR} 的值超过4.0 dB。

3.2 雷达偏振参量与降水分析与普通天气雷达发射水平偏振波对比,IAP X波段双线偏振雷达可以同时发射水平和垂直偏振波,并同时接收2个偏振方向的回波信号,除同样能测定云、降水的反射率因子外,还可以得到差分反射率 Z_{DR} 、差分传播相移率 K_{DP} 、相关系数 ρ_{HV} 等偏振参量,这些参量与目标体中粒子的尺度大小、取向、形状、相态等有密切关系。 Z_{DR} 与粒子谱形与相态有关, K_{DP} 与粒子谱形、浓度和相态相关, ρ_{HV} 与

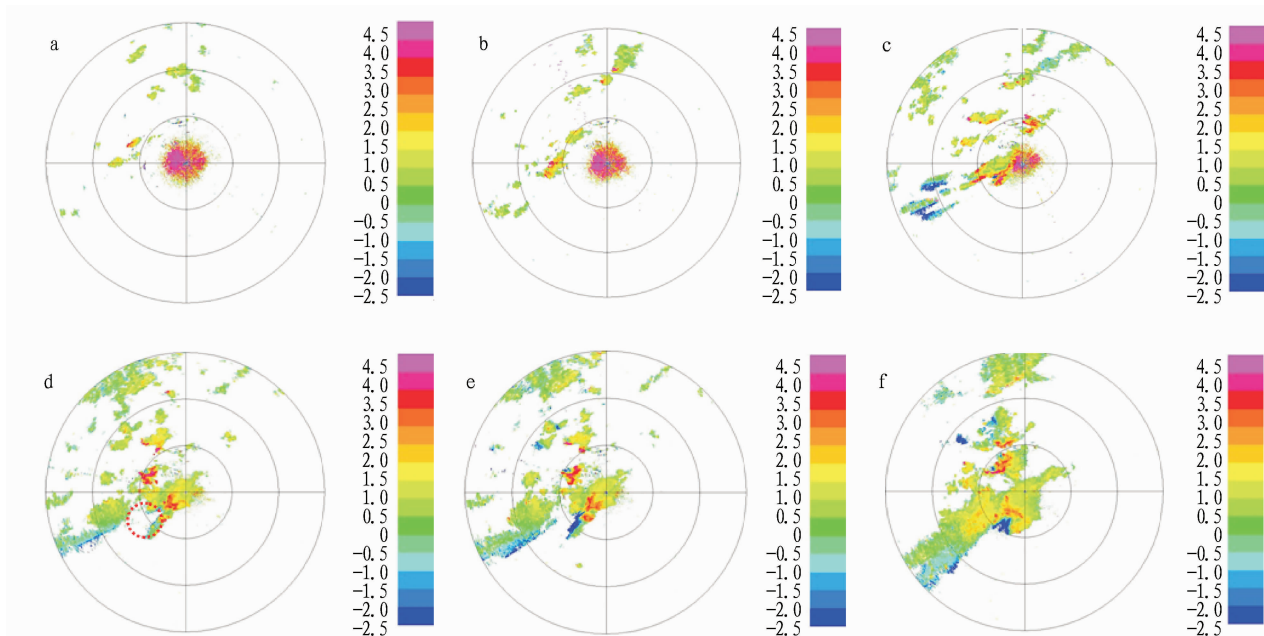
粒子谱形、相态、浓度以及雷达信噪比相关^[18]。因此,利用这些参量在一定的假设下可以更加准确地推测出云和降水粒子

尺度大小、形状、取向、相态信息,这些信息对研究云粒子的演变过程和降水形成机制有重要的应用价值。



注: a. 12:06:05; b. 12:50:24; c. 14:06:16; d. 14:59:15; e. 15:06:55; f. 15:46:15。

图2 2008年6月23日雷达探测的1.5°仰角PPI反射率强度(单位: dBZ)



注: a. 12:06:05; b. 12:50:24; c. 14:06:16; d. 14:59:15; e. 15:06:55; f. 15:46:15。

图3 2008年6月23日雷达探测的1.5°仰角PPI差分反射率(单位: dB)

3.2.1 回波强度 Z_H 和差分反射率 Z_{DR} 垂直分布特征。 差分反射率因子 Z_{DR} 为水平反射率因子 Z_{HH} 与垂直反射率 Z_{VV} 的差值,与粒子的尺寸和轴比有关。观测表明,一般水滴形状大部分呈扁平状, Z_{DR} 值在 0 ~ 5.0 dB, Z_{HH} 值通常不大;而冰雹在下落过程中翻滚和形状不规则,认为其是各向同性的,导致冰雹云具有较大的 Z_{HH} 值和较小的 Z_{DR} 值^[19]。为能更直观地了解6月23日降雹过程,分析了 IAP X 波段雷达

在6月23日14:49 衰减订正前的 RHI 回波强度分布,结果发现(图4),回波强中心为 55 dBz,强中心高度为 2 ~ 10 km,呈现垂直分布,且随着探测距离的增大,回波强度有比较明显的衰减。

与 S 波段和 C 波段较长波长的雷达相比, X 波段雷达衰减更严重。为了得到比较真实的雷达观测数据,需要对 X 波段双偏振雷达的反射率 Z_H 和差分反射率 Z_{DR} 进行衰减订正。

在此运用何宇翔等建立的 X 波段双偏振雷达反射率和差分反射率的衰减订正方法^[20-21], 利用强度衰减率 A_H 、差分衰减率 A_{DP} 与相移率 K_{DP} 间的线性关系建立 Z_H 和 Z_{DR} 衰减订正量与差分传播相位移 Φ_{DP} 的关系表达式。由于较大的粒子产生 Mie 散射, 造成 Φ_{DP} 观测数据存在后向传播效应(即 δ 效应), 并存在雷达机内噪声的影响, 因此, 利用何宇翔等提出的卡尔曼滤波来滤除 δ 效应和噪声对 Φ_{DP} 的影响^[20]。由图 5 可见, 经过衰减订正后的反射率 Z_H 和差分反射率 Z_{DR} 比订正前在整体上有了明显的增强, 说明对雷达的观测资料进行衰减订正具有一定必要性和实际性。从图 5a 和 5b 来看, Z_H 及 Z_{DR} 在垂直分布结构上是一致的。订正后的反射率因子垂直分布图(图 5a) 与未作订正的反射率因子图比较显示出较明显的强回波核, 其高度超过 10 km, 云顶高度达 12 km, 回波强度达 60~65 dBz, 回波强度随高度是减小的。 Z_{DR} 在 14:59:42, 对照图 5a 与图 5b, Z_H 的值较大处 Z_{DR} 值也较大。距离约为 37~53 km, 高度 1~4 km 的范围内 Z_{DR} 达 4.5 dB。根据 6 月 23 日 08:00 北京探空资料, 0 °C 层高度为 3 764 m, 考虑到

雷达的海拔高度为 36 m, 这样, 0 °C 层位于雷达高度约为 3 728 m。从图 5b 看到, 在距离 7~17 km 处, 0 °C 层的下方 Z_{DR} 出现明显增大的现象, 形成一条 Z_{DR} 亮带。这个结果与上述给出的偏振参量 Z_{DR} 基本特点一致, 说明图 5 中左边的对流云已经开始层状化。然而, 雷达反射率强度 Z_H 回波图(图 5a) 上亮带结构尚不明显。

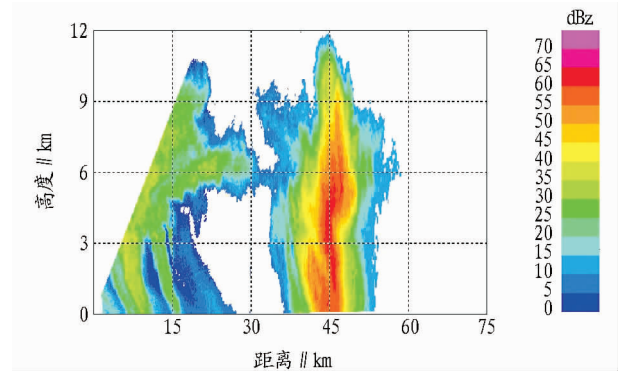
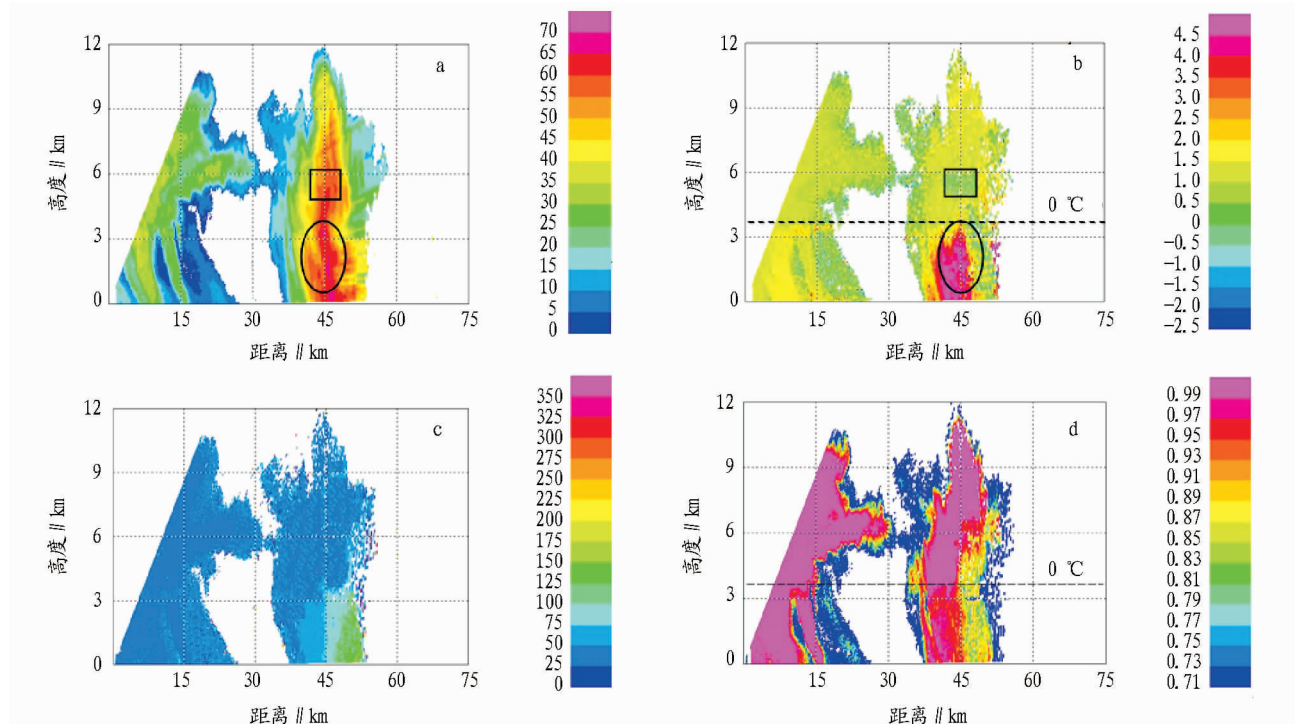


图 4 2008 年 6 月 23 日 14:59:42 衰减订正前 RHI 回波强度



注: a. 反射率 Z_H (单位: dBz); b. 差分反射率 Z_{DR} (单位: dB); c. 差分传播相位移 Φ_{DP} (单位: °); d. 互相关系数 ρ_{HV} 。方位为 296.56°; 图 b 和 d 中的粗虚线为 0 °C 层高度。

图 5 2008 年 6 月 23 日 14:59:42 订正后 RHI 回波

3.2.2 相关系数 ρ_{HV} 和差分相位移 Φ_{DP} 垂直分布特征。 2 种不同偏振之间的相关系数 ρ_{HV} 定义为水平偏振回波信号与垂直偏振回波信号的零滞后互相关系数, 反映了水平和垂直偏振波的后向散射特征的相关性。从 ρ_{HV} 的定义来看, 粒子的空间取向和形状以及降水粒子的总体数量是影响它的主要原因, ρ_{HV} 对于雷达数据质量评估和回波分类是重要的参考参数^[19]。 ρ_{HV} 对于降雨和干雪时其值较大, 接近于 1, 说明水平信号和垂直信号相关性好; 而融化层中冰雹和湿雪时 ρ_{HV} 值相对较小, 非气象目标散射时 ρ_{HV} 值更小。

通过运用上述偏振参量特点并结合实际观测资料, 具体说明偏振参量在这次降雹过程中的运用。从图 5c 中可看出, 随着距离的增大, Φ_{DP} 的值逐渐增大, 距离 52~57 km 处出现最大值, 通过最小二乘法计算, K_{DP} 值约为 3°/km。在图 5d 中, 与强度图最强回波位置相对应(水平距离 37~53 km), ρ_{HV} 数值从 0.97~0.99 减小至 0.71~0.75, 与之对应的 Z_{DR} 值(图 5b) 为 -1.0~-2.0 dB, 而与强度大值区相对应的其他位置, Z_{DR} 大的值均在 3 dB 以上。根据 Bringi 等不同降水粒子时各偏振变量的情况^[22], 在强度值较高的大片

区域中, Z_{DR} 大值区, ρ_{HV} 值也表现为大值, 该区域可能为雨加雹, 这个结果与地面观测的实况吻合。此外, 从图 5d 左边的对流云回波看到, 在 0°C 层之上和 3 km 高度以下区域, ρ_{HV} 值为 $0.97 \sim 0.99$, 说明降雨和干雪时 ρ_{HV} 值很接近于 1, 而在 0°C 层(高度 3.7 km)至 3 km 高度的区域, ρ_{HV} 出现了一条数值仅为 0.95 的带状弱回波, 表明冰雹和湿雪等冰相粒子在融化层中的融化使 ρ_{HV} 值变小, 与上述给出的偏振参量 ρ_{HV} 特点一致。这个结果也进一步说明图 5 中左边的对流云已经开始层状化。

4 水凝物粒子的相态识别

以上仅从宏观的角度对 2008 年 6 月 23 日双偏振雷达在首都机场观测的资料进行分析, 为了解此次降雹过程的微观结构, 全面分析 X 波段双偏振雷达探测降雹的特征特性, 运用模糊逻辑算法对此次强对流云降水粒子进行相态识别, 并对识别的结果与上文分析进行比较。参考刘亚男等关于 X 波段双偏振雷达识别降水粒子相态的研究方法^[23], 采用模糊逻辑算法对云中水凝物粒子进行相态识别。模糊逻辑算法系统由模糊化、规则推理、聚合和去模糊化 4 个部分组成。模糊逻辑水凝物分类算法的示意图如图 6 所示。其中, 输入变量为 5 个, 分别是雷达观测参量 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV} 以及环境温度 T , 输出为降水粒子类型 C , 可识别毛毛雨(DR)、大雨(RA)、湿霰(WG)、干霰(DG)、小雹(SH)、大雹(LH)、雨加雹(HR)、湿雪(WS)、干雪(DS)、冰晶(IC) 10 种降水粒子类型。

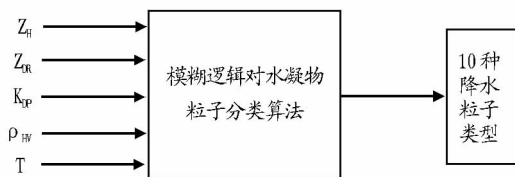


图 6 模糊逻辑水凝物分类算法框图

肖辉等曾对旬邑地区冰雹云的早期识别和数值模拟中总结出冰雹云和雷雨云的雷达回波特征是有明显区别, 雷雨云的最大回波强度 $< 45 \text{ dBz}$, 云顶温度 $> -14^\circ\text{C}$, 而冰雹云的 45 dBz 强回波的顶高 $> 7.0 \text{ km}$, 对应的温度 $< -14^\circ\text{C}$; 强冰雹云的 45 dBz 强回波顶高 $> 8.0 \text{ km}$, 对应的温度 $< -20^\circ\text{C}$ ^[24]。此次 2008 年 6 月 23 日强对流个例, 从图 5a 可以看出, 距离 45 km 处的对流云(图 5a 中右边的对流云) 45 dBz 强回波顶高达 9.0 km , 对应的环境温度为 -30.5°C , 符合上述强冰雹云的识别指标, 说明该冰雹云为强冰雹云。然而, 这个冰雹云识别指标只能说明所识别的对流云是冰雹云类型的, 但不能给出云中各种粒子的空间分布结构。为此, 笔者运用创建的模糊逻辑识别算法对 2008 年 6 月 23 日强对流个例进行水凝物粒子相态辨别, 并利用地面观测实际情况检验 X 波段双偏振雷达观测和辨别冰雹的准确性和有效性。从模糊逻辑识别算法对该冰雹云观测个例进行水凝物粒子分类的结果(图 7)可以看出, 距离雷达 $42 \sim 53 \text{ km}$ 的强对流云, 从地面延伸到 10 km 高度上的区域, 从上到下依次出现霰(DG)、大雹(LH)、小雹(SH)、雨加雹(HR), 整个垂直分布情况与图 5a 中 45 km 处出现的强回波大值区位置基本吻合。在 0°C 层亮带

以上(大约 3.7 km 处), 水平 $0 \sim 30 \text{ km}$ 、高度在 $0 \sim 10 \text{ km}$, Z_H 低值区 ($< 30 \text{ dBz}$) 识别为干雪(DS)、冰晶(IC)和湿雪(WS); 在 0°C 层亮带之下, 这些粒子融化成大雨(RA)或毛毛雨(DR)。图 5a 中黑方框位置为大于 45 dBz 的强度区, 与之对应的 Z_{DR} 值在 $0 \sim 1 \text{ dB}$ 被识别为冰雹(包括大冰雹 LH 和小冰雹 SH)。根据 Z_{DR} 的定义, 冰雹在下落过程中翻滚和形状不规则, 认为其是各向同性的, 导致冰雹云具有较大的 Z_H 值和较小的 Z_{DR} 值^[19]。高空 $4 \sim 6 \text{ km}$ 处的大冰雹和小冰雹粒子在下落到融化层之后出现部分融化, 因此, 在 4 km 到地面的范围上呈现出雨夹雹, 对应于图 5a、b 黑圈位置中, Z_{DR} 的正值区是由水平尺度明显大于垂直尺度的大雨滴下落造成的。另外, 对 2008 年 6 月 23 日 15:02 RHI 数据做一次相态识别(方位 230.01°), 4 km 以下、水平距离 $18.75 \sim 40 \text{ km}$ 处识别为雨加雹。根据当时雨加雹天气现场观测记录显示, 北京西南部和西部地区地面有降冰雹的观测报告一致, 说明根据水凝物粒子相态模糊逻辑识别算法得到的结果是可信的。

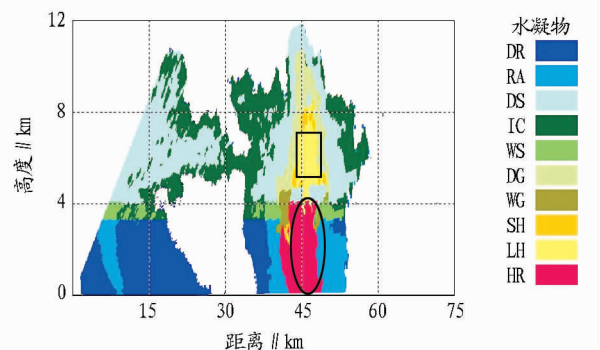


图 7 2008 年 6 月 23 日冰雹云降水粒子分类结果

5 小结与讨论

(1) 在 2008 年 6 月 23 日北京地区的这次强冰雹天气过程中, 华北有深厚冷涡东移, 北京地区高层有强的冷平流输送, 而低层有暖舌配合, 大气处于不稳定状态。较好的动力和大气不稳定条件配合是引发这次强冰雹天气的主要原因。

(2) 从雷达反射率看, 2008 年 6 月 23 日午后强回波区从西北向东南移动, 并逐渐加强。从 14:59 开始, 降水回波开始影响首都机场, 机场降水, 最强反射率达 55 dBz 以上, 然后回波继续持续增强。

(3) 针对在 2008 年 6 月 23 日北京地区出现的强对流天气, 根据双偏振雷达观测资料, 利用模糊逻辑算法对强对流云降水粒子进行识别, 得到的结果与实际情况比较吻合, 且强对流云的垂直分布也能很好地反映冰雹降水粒子的不同相态结构特征。

(4) 对北京这次强降雹过程分析显示, 在强对流风暴中双偏振参量 Z_H 达 60 dBz 以上, Z_{DR} 达 4.5 dB , 出现降冰雹, 可以为冰雹的监测和预报提供参考。

(5) 利用双偏振雷达对强对流云的分析还只是初步的, 在今后的工作中需要结合径向速度场的分析, 探讨出更多强对流云的结构特征。

条件落后、市场机制不完善、对非木质林产品的认识不足等问题。政府应该进一步完善主要非木质林产品产区的基础设施建设,改善交通运输条件。基层乡镇政府应该成立主抓非木质林产品贸易的工作组,帮助山区群众加深认识非木质林产品的价值。同时通过招商引资等途径在地区内建立起完善的非木质林产品贸易市场,从源头上加大对非木质林产品的开发和利用。②坚持合理开发的原则,避免盲目开采非木质林产品资源过程中带来的生态环境问题,走可持续发展的道路。③加强市场信息的掌控和发布,建立完善的市场信息发布渠道。搜集、掌握国内外非木质林产品贸易的政策变化、产品供需量、价格走势等信息,使经营者能够在第一时间查询了解,进而创造更多的价值^[10]。④结合山区和林区的实际情况,动员各方面力量投入非木质林产品生产与经营,实现参与式森林管理,让当地人参与毗邻森林的规划、管理、监控等活动,这种方式既合理地开发了非木质林产品资源,又增加了当地居民的收入,一举多得^[11]。

(上接第 7515 页)

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] ULBRICH C W, ATLAS D. Assessment of the Contribution of Differential Polarization to Improved Rainfall Measurements[J]. Radio Sci, 1984, 19(1): 49-57.
- [3] SACHIDANANDA M, ZRNIC D S. Rain Rate Estimates From Different Polarization Measurements[J]. J Atmos Oceanic Technol, 1987, 4(4): 588-598.
- [4] RYZHKOV A V, ZRNIC D S. Comparison of Dual-polarization Radar Estimators of Rain[J]. J Atmos Oceanic Technol, 1995, 12(2): 249-256.
- [5] MATROSOV S Y, KINGSMILL D E, MARTNER B E. The Utility of X-Band Polarimetric Radar for Quantitative Estimates of Rainfall Parameters[J]. J Hydrometeor, 2004, 6: 248-262.
- [6] CIFELLI R, CHANDRASEKAR V, LIM S, et al. A New Dual-Polarization Radar Rainfall Algorithm: Application in Colorado Precipitation Events[J]. J Atmos Oceanic Technol, 2010, 28: 352-364.
- [7] DOVIK R J, ZRNIC D S. Doppler Radar and Weather Observation[M]. New York: Academic Press, 1993: 554.
- [8] 刘黎平, 钱永甫, 王致君. 用双线偏振雷达研究云内降水粒子相态及尺度的空间分布[J]. 气象学报, 1996, 54(5): 590-598.
- [9] ZRNIC D S, RYZHKOV A, STRAKA J, et al. Testing a Procedure for Automatic Classification of Hydrometeor Types[J]. J Atmos and Oceanic Tech, 2001, 18: 892-913.
- [10] AYDIN K, SINGH J. Cloud Ice Crystal Classification Using a 95-GHz Polarimetric Radar[J]. J Atmos Oceanic Technol, 2004, 21: 1679-1688.
- [11] CAYLOR I J, CHANDRASEKAR V. Time-varying Ice Crystals Orientation in Thunderstorms Observed with Multiparameter Radar[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1996, 34(4): 847-858.
- [12] SCOTT R D, KREHBIEL P R, RISON W. The Use of Simultaneous Hori-

参考文献

- [1] 迟诚. 去年我国林产品进出口额达 1260 亿美元[EB/OL]. (2014-02-25) <http://www.forestry.gov.cn/main/72/content-659502.html>.
- [2] 王虹. 新贸易壁垒——中国对外贸易的绊脚石[J]. 对外经贸实务, 2006(9): 74-77.
- [3] 贾祥翔, 石峰, 吴盛富, 等. 我国林产品对外贸易壁垒及应对策略[J]. 林产工业, 2011(1): 12-15.
- [4] 马春雷. 新时期我国林产品对外贸易研究分析[J]. 南方农村, 2013(3): 59-62, 68.
- [5] 简介: 国家林业局林产品经济贸易研究中心[EB/OL]. <http://www.rcetfor.org/>
- [6] 张雅, 郑屿. 绿色贸易壁垒对我国农产品贸易的影响[J]. 对外经贸, 2013(1): 29-30.
- [7] 印中华, 宋维明, 张英, 等. 中国林业产业应对国际贸易壁垒的策略研究[J]. 世界林业研究, 2011(6): 55-60.
- [8] 刘小丽, 郑小贤, 徐斌, 等. SC 在我国的发展现状与趋势分析[J]. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2010(3): 86-90.
- [9] 卢萍, 罗明灿. 非木质林产品开发利用研究综述[J]. 内蒙古林业调查设计, 2009(4): 97-100.
- [10] 杨春玉. 我国非木质林产品开发利用现状与对策分析[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷). 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [11] 耿利敏, 沈文星. 非木质林产品与减少贫困研究综述[J]. 世界林业研究, 2014(1): 1-6.

- zontal and Vertical Transmissions for Dual-polarization Radar Meteorological Observation[J]. J Amer Meteor Soc, 2001, 18(4): 232-241.
- [13] 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.
- [14] RYZHKOV A V, SCHUUR T J, BURGESS D W, et al. Polarimetric Tornado Detection[J]. J Appl Meteor, 2005, 44: 557-570.
- [15] BLUESTEIN H B, FRENCH M M, TANAMACHI R L. Close-Range Observations of Tornadoes in Supercells Made with a Dual-Polarization, X-Band, Mobile Doppler Radar[J]. Mon Wea Rev, 2006, 135: 1522-1543.
- [16] KUMJIAN M R. Precipitation Properties of Supercell Hook Echoes[J]. Electronic J Severe Storms Meteor, 2011, 6(5): 1-21.
- [17] KUMJIAN M R, RYZHKOV A V, TRÔMEL S, et al. Taking the Microphysical Fingerprints of Storms with Dual-polarization Radar[C]//ERAD 2012-The Seventh European Conf on Radar in Meteorology and Hydrology. Toulouse, France, 2012.
- [18] 李宗飞, 肖辉, 姚振东, 等. 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14021.
- [19] ZHANG G, VIVEKANANDAN J, BRANDES E. A Method for Estimating Rain Rate and Drop Size Distribution From Polarimetric Radar Measurements[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1999, 39(2): 23-28.
- [20] 何宇翔, 吕达仁, 肖辉, 等. X 波段双线极化雷达反射率的衰减订正[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 1027-1037.
- [21] 何宇翔, 吕达仁, 肖辉, 等. X 波段双线极化雷达差分反射率的衰减订正[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 607-616.
- [22] BRINGI V N, CHANDRASEKAR V. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001: 43-88.
- [23] 刘亚男, 肖辉, 姚振东, 等. X 波段双极化雷达对云中水凝物粒子的相态识别[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 925-936.
- [24] 肖辉, 吴玉霞, 胡朝霞, 等. 旬邑地区冰雹云的早期识别及数值模拟[J]. 高原气象, 2002, 21(2): 159-166.