

王清川,彭敏,周涛,等. 一次罕见超级单体风暴的 X 波段双偏振雷达特征分析[J]. 气象研究与应用,2022,43(1):107-111.

Wang Qingchuan,Peng Min,Zhou Tao,et al. Characteristic analysis of X-band dual polarization radar for a rare supercell storm[J].

Journal of Meteorological Research and Application,2022,43(1):107-111.

一次罕见超级单体风暴的 X 波段双偏振雷达特征分析

王清川¹, 彭 敏², 周 涛¹, 东高红³, 黄浩杰¹, 王鹤婷¹

(1.河北省廊坊市气象局, 廊坊 065000; 2.河北省人工影响天气中心, 石家庄 050021; 3.天津市气象台, 天津 300074)

摘要: 利用北京房山 X 波段双偏振雷达资料,对 2020 年 6 月 25 日北京市东南部及其周边地区的一次超级单体风暴进行分析。结果表明,高空冷涡前部槽叠加地面冷锋系统是此次超级单体风暴发生的背景条件,强垂直风切变为其发展维持提供了有利的环境条件。演变过程中的有界弱回波区、三体散射等超级单体雷达典型特征明显。X 波段双偏振雷达反射率因子 50dBz 及以上强回波向高层伸展后迅速下降,预示着地面大风或冰雹即将出现;偏振参量中 Z_{DR} 弧、前倾 Z_{DR} 柱的出现可用于冰雹临近预警, K_{DP} 柱特别是 K_{DP} 悬垂的出现预示着强降雨即将发生,其位置与雨强中心存在较好的对应关系;三维空间图像可以直观地展现超级单体的空间结构特征。

关键词: 双偏振雷达;超级单体风暴;短时临近监测预报

中图分类号: P458

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.1.19

引言

近年来,双偏振雷达的应用研究逐渐增多,相较于常规天气雷达,双偏振雷达可以发射水平及垂直两个方向的偏振电磁波,除获得水平反射率因子等常规探测参数外,还能得到差分反射率因子(Z_{DR})等一系列偏振参数。双偏振探测理论是 1976 年由 Seliga 等^[1]提出,在研究云内粒子相态、识别冰雹云等方面有较好的应用价值。2000 年以后,随着国内双偏振雷达建设,利用 SA(SC)双偏振雷达或 X 波段双偏振雷达针对超级单体风暴的研究逐渐增多并取得了大量成果,刘黎平等^[2]建立了 C 波段双线偏振雷达识别冰雹区的方法,指出负 Z_{DR} 对应大冰雹区。冯晋勤等^[3]发现利用双偏振雷达产品可分析出冰雹的相态演变。王洪等^[4]发现超级单体风暴水平反射率因子中心附近存在 Z_{DR} 柱。潘佳文等^[5]研究发现 Z_{DR} 弧先于钩状回波和中气旋出现,对超级单体发展具有较好的指示性。张学泰等^[6]研究发现 K_{DP}

和相关系数(CC)特征表明同一层面上单体存在着雹水共存、干冰雹粒子、大冰雹三种状态。江慧远等^[7]发现冰雹区的差分反射率因子 Z_{DR} 和差分相位常数 K_{DP} 数值小,冰水混合区的相关系数(ρ_{hw})较低。陈星登等^[8]发现冰雹云的双偏振特征整体与非降雹对流云一致,但在冰雹区域内反射率因子(Z_H)大于 62dBz 时, Z_{DR} 迅速降低至 0 附近。赖晨等^[9]研究发现差分相移率 K_{DP} 峰值出现时间滞后于闪电频数峰值约 15min。近年来,X 波段双偏振雷达的应用研究也逐渐增多,王硕甫等^[10]发现 X 波段双偏振雷达的 Z_{DR} 、 ρ_{hw} 、 K_{DP} 等参量能提供更多的冰雹识别特征。李晓敏等^[11]综合 X 波段双线偏振天气雷达的参量及环境温度参数,总结分析了雷暴单体内各类水成物粒子分布、演变。李春娥等^[12]发现 X 波段双偏振雷达的 Z_{DR} 、 R_{HV} 等参量能有效地提高对冰雹的识别能力。上述研究对提高超级单体风暴的认识,提升双偏振雷达在灾害性天气短临监测、预警业务中的应用能力起了积极作用。

收稿日期: 2021-11-02

基金项目: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-012)、河北省气象局科技项目(21zc06)和廊坊市气象局科技项目(202101)

作者简介: 王清川,硕士,高级工程师,主要从事灾害性天气短临预报预警研究。E-mail: hblfwqc@163.com

通讯作者: 东高红,硕士,正研级高工,主要从事城市气象和中尺度天气预报技术研究。E-mail: qwerty8825@sina.com

河北省是超级单体的多发区,所引发的灾害性天气也常常造成严重的经济财产损失,甚至是人员伤亡。裴宇杰等^[13]、王福侠等^[14-15],许多气象工作者利用多普勒雷达做了大量研究,但是,利用X波段双偏振雷达针对超级单体特征的研究还不多。随着X波段双偏振雷达的布网及在灾害性天气监测预警中的广泛业务应用,需要在灾害性天气监测、短临预警、分灾种识别等方面的应用能力研究。2020年6月25日夜间(20:00—23:00,北京时,未特别说明下同)北京东南部、廊坊中部及天津西南部先后出现冰雹、雷暴大风、短时强降水等灾害性天气。本文利用北京市房山X波段双偏振雷达和多普勒雷达资料,对此次超级单体风暴进行研究,希望能为今后该地区灾害性天气的监测、短临预警等提供科学参考依据。

1 资料与方法

本文分析所用资料包括2020年6月25日08时—26日08时(北京时,未特别说明下同)常规观测资料、加密自动站资料、北京房山X波段双偏振雷达和多普勒雷达探测资料等,所用分析数据均经过质量控制。

采用插值法进行双多普勒雷达风场反演,即以球坐标方式表示的多普勒雷达原始资料(回波强度和径向速度)用双线性方法插值到水平格距为1km,垂直格距为0.5km的直角坐标上,根据两部雷达的相对位置进行资料的配对,并对反演的风场进行检验。

2 结果与分析

2.1 天气概况和天气背景

2020年6月25日夜间21:30—22:30,廊坊中部先后出现冰雹、雷暴大风和短时强降水等强对流天气,自动站监测到的最大风速为 $28.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (11级),最大小时雨强为 $50.4\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,廊坊广阳区、安次区南部、永清东部和霸州东部等多地出现冰雹,最大直径2cm以上。

6月25日08时,500hPa冷涡位于内蒙古中部与蒙古国交界处,高空槽分为南北两段,廊坊处于南段槽区里。700hPa北段槽线位置和500hPa槽线位置重合,850hPa北段槽线位于内蒙中部—山西西北部一带,廊坊位于北段槽前;从槽区位置高低空配置看,中低层表现为略后倾形势。地面冷锋位于内蒙古中部至陕西北部。20时,500hPa冷涡东移南压至内

蒙古东部,北段高空槽略东移、南段已移至东部海上,廊坊处于南段槽后西北气流里,有明显的冷平流;700hPa槽快速东移,850hPa北段槽稳定少动,中低层配置演变为前倾的不稳定形势。地面冷锋东移,廊坊处于冷锋前。通过上述分析看到,20时廊坊正好处于高空槽前,且表现为700hPa槽前倾和低层850hPa附近暖湿,700hPa以上为干冷的不稳定层结,同时配合地面冷锋的存在导致此次强对流天气的发生。

从北京站探空资料来看,CAPE值由25日08时 $826\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增大到14时的 $1528\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,K指数由 30°C 增大到 33°C ;20时之前北京地区已经出现强对流天气,在不稳定能量得以释放的前提下,CAPE值仍有 $1073\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,K指数更是增大到 36°C ,说明本地存在很强的不稳定。14时和20时探空图整体看呈上干下湿的喇叭口结构,850hPa及以下比湿 $>10\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $T_{850-500}$ 达到 28°C 左右,大气层结表现为上干下暖湿的不稳定层结;同时,0~6km垂直风切变由08时和14时的 $11.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到20时 $25.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;另外14时和20时抬升凝结高度仅为836.7m和886.4m, 0°C 层高度和 -20°C 高度也较低,分别为3.8km和6.7km,两层高度差不到3km。这些物理量参数特征表明,廊坊地区大气的垂直条件存在着强不稳定,非常有利于冰雹、雷暴大风等强对流天气发生发展。

2.2 X波段双偏振雷达特征分析

2.2.1 反射率因子(Z_H)

从21:09开始到21:36,在 2.3° 仰角反射率因子产品上可以清楚的看到三体散射特征,21:42—21:48三体散射减弱,除 2.3° 和 4.2° 仰角以外,其它仰角上无法观测到三体散射特征,21:54—22:42再次出现三体散射特征,主要出现在 2.3° ~ 4.2° 仰角上,随后回波主体进入天津西南部,三体散射特征减弱消失后又再次出现。与上述北京(54511)多普勒雷达的三体散射特征相比,X波段双偏振雷达三体散射长钉的长度短、持续时间也较短,但与廊坊本地冰雹降落时间的对应关系好于多普勒雷达。

从21:30反射率因子径向剖面图(略)可以看到,在4~8km高度有强度约50dBz的回波,到21:36时,50dBz强回波高度下降,低层回波增强到55dBz,而21:42—21:45,廊坊最贴近强回波区的3个加密气象自动站出现 $17.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的大风,最大风速达 $28.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。21:42的剖面图上(略),55dBz强回波高度伸展到约7km高度,下一体扫达到10km左右,并

且 6~8.5km 中心强度增加到 60dBz, 随后两个体扫, 60dBz 强中心高度迅速下降到 4~7km 后又下降到 2~6km。22:18 的 55dBz 强回波高度再次迅速伸展到 12km 以上, 下一体扫基本维持, 且是 6km 左右出现 60dBz 强回波, 随后两个体扫, 55dBz 强回波高度迅速下降, 60dBz 强回波下降后消失, 22:36 仅在 5~7.5km 出现 55dBz 的强回波。从上述分析可以得出, 反射率因子径向剖面图上 50dBz 及以上强回波迅速向高层伸展后迅速下降与地面灾害性大风出现时间有很好的对应关系, 即 50dBz 及以上强回波迅速向高层伸展后迅速下降预示着地面灾害性大风即将出现。

2.2.2 差分反射率(Z_{DR})- Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱

21:09 的 1.4~4.2° 仰角差分反射率(Z_{DR})产品上, 北京大兴第一次出现 Z_{DR} 弧, 且伴随有 Z_{DR} 柱, 三体散射延伸到回波主体外 8km 以上, 说明此时存在较强的上升气流, 超级单体已达到成熟阶段, 有冰雹的生成, Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱维持一个体扫, 但三体散射基本消失。21:36 发现在反射率因子 55~62dBz 强中心的对应区域, 1.4~4.2° 仰角上出一条 Z_{DR} 小于 0.5dBz 的低值区, 未出现明显的 Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱。21:54 在 0.4~4.2° 仰角上再出现 Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱, 3.3° 及以下仰角上 Z_{DR} 弧呈半圆状, 中心值普遍小 1dBz, 且大片为负值, Z_{DR} 柱中心强度保持在 5~7dBz, 从剖面图上(略)可以看到, Z_{DR} 柱高度达到 5km, Z_{DR} 柱呈前倾悬垂状态, 下一个体扫基本维持, 结合高低仰角 Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱的变化, Z_{DR} 柱的出现意味着此时上升气流非常旺盛, 强的上升气流将低层大量水滴吹到高空, 突破融化层后部分形成冰雹, 部分水滴来不及完全冻结成为过冷水滴。20 时地面温度仍为 25℃ 左右, 说明底层气温仍然较高, 冰雹在下降过程中快速融化成大雨滴或外包水膜的冰雹, 使得在高空形成的大冰雹到地面时仅观测到了小冰雹, 而降雨强度明显增大, 正好对应此次过程中冰雹观测时间和降雨的最集中时段, 此时加密自动站 5min 最大降雨量达到 23.1mm。22:18 的 Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱、三体散射均消失, 随后回波主体逐步移出廊坊。

2.2.3 差分传播相移率(K_{DP})- K_{DP} 柱

6 月 25 日 21:15 在 4.2° 仰角以下空洞连接成片, 大值区极值达 $20.5^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$, 21:36 在 1.4~9.9° 各仰角上, K_{DP} 空洞的旁边相同位置上均出现大值区, 从剖面图(略)可以清楚的看到 K_{DP} 呈柱状, 高度达到接近 10km, 4km 以下略有前倾, 4~8km 竖直且较宽,

呈悬垂状, 两个体扫过后, K_{DP} 柱消失。21:54 在 1.4~9.9° 各仰角相同位置上再次出现大值区, 剖面图上再次呈现 K_{DP} 柱, 且柱体顶部达到 15km 左右, 10km 以下为前倾状, 柱体较宽, 10~15km 柱体宽度减小为 10km 以下的约 1/3, 竖直且上下宽度基本一致, 下一个体扫, K_{DP} 柱基本维持, 但低层柱体范围增大, 6km 以上范围减小。 K_{DP} 柱的反复出现说明超级单体内部存在风场垂直的涡旋结构, 使得降水粒子得以上下循环增长, 大而强的 K_{DP} 悬垂表明对应高度层内液态含水量非常丰富, 当上升气流不足以托举时就会出现倾盆大雨, 21:40—22:00 有 5 个加密自动气象站多次出现 5min 降雨量超过 10mm, 最大达 23.1mm。结合强降水时段和落区分析, 超级单体中 K_{DP} 柱, 特别是 K_{DP} 悬垂的出现预示着地面强降水即将发生, 所在的位置与地面雨强中心存在较好的对应关系。到 22:18 无法分辨出的 K_{DP} 柱, 随后几个体扫 1.4~4.2° 仰角 $20.5^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 大值区范围慢慢缩小, 此时降雨强度减小, 回波主体逐步移出廊坊。

2.3 超级单体三维空间结构特征分析

2.3.1 超级单体三维图像特征

选取廊坊雷暴大风、冰雹和短时强降水等害性天气开始且出现较为集中时段(21:36—22:10)的强单体作为研究对象, 对涵盖整个超级单体的雷达数据进行处理, 由 Voxler 软件所生成的图像可以较为清楚的看到该超级单体整个三维立体空间结构, 从 21:36 开始即可看到悬垂回波和弱的有界弱回波区, 21:42, 有中心强度超过 60dBz 的回波墙、有界弱回波区和穹隆顶部结构, 从 21:54 回波主体移动前右侧视角观察, 30dBz 以上三维空间图像的底部较中层窄而长, 很清楚的看到主体后侧的入流缺口, 正前方有凹陷和悬垂凸起, 凹陷区即为弱回波区, 与悬垂部分一起形成有界弱回波穹隆结构, 前突悬垂部分一直延伸到中上部, 也就是雹云回波的悬垂部分, 说明此时强盛的上升气流支撑冰雹的增长, 为冰雹的快速长大提供了优越的环境条件。22:03 雹暴强回波主体的中上部分裂成南北两个强回波柱, 南强北弱, 此时对应着强回波间隙减弱, 随后南部主体迅速发展再次增强。观测到有界弱回波区的时间较廊坊地面观测到灾害性大风的时间早 6min, 较观测到冰雹的时间早 16min。

2.3.2 超级单体水平风场结构

利用北京多普勒天气雷达和房山 X 波段双偏振雷达数据, 基于中国气象科学研究院灾害天气国家

重点实验室雷达团队开发的风场反演软件“Radar Display”,进行双多普勒雷达风场反演,所用风场反演方法为插值法^[16],反演的风场已经过检验。由于上述两部雷达距离较近,导致高层采样不足,因此本文中双多普勒雷达风场反演结果分析选择 4km 以下高度数据,且只作定性分析。

在 0.5km 高度的超级单体主体前沿也对应着地面大风区,主体南北两端对应着辐散区,主体中部后侧可以看到出流口;在 1km 高度与 0.5km 高度相似(图略);在 2km 高度(图略)的超级单体主体前沿对应着气流辐合及逆时针旋转环流,南部低层气流辐合导致上升运动,超级单体内气流呈上升旋转状态;3km 高度(图略)显示出南部有明显闭合的旋转气流;4km 高度的气流在南端及中部以辐合上升为主,北端以辐合旋转为主。整体可见,雷暴云团北部高层为辐合,低层为辐散,即该雷暴云团北部为消散阶段,而雷暴云团南部则呈旋转上升流场特征。此种情况下,超级单体内的粒子群不仅有可能在云中进行可上下,也可进出的运动,使得其中一部分粒子在这种循环中不断增长成为大冰雹创造了必要的风场结构,说明此时强盛的上升气流支撑冰雹的增长,为冰雹的快速长大提供了有利的环境条件。

3 结论和讨论

通过上述分析,得出如下几点结论:

(1)此次强对流天气过程是高空冷涡配合低层切变线和地面冷锋,由地面辐合线、冷池出流触发机制而成,高 CAPE 值和强垂直风切变、高湿和较合适的 0℃和-20℃高度等为超级单体风暴的发生发展和维持提供了有利的环境条件。

(2)X 波段双偏振雷达反射率因子径向剖面图上 50dBz 及以上强回波迅速向高层伸展后迅速下降与地面灾害性大风出现时间有很好的对应关系;偏振参量 Z_{DR} 弧、 Z_{DR} 柱的出现可用于冰雹的临近预警; K_{dp} 柱的出现,特别是 K_{dp} 悬垂的出现预示着地面强降水即将发生,所在位置与地面雨强中心有较好的对应关系。

(3)超级单体的三维空间图像、双雷达水平风场反演可以直观地展现出超级单体的空间结构特征,有助于我们更清楚地认识致灾超级单体风暴的特征,为预报预警强灾害性对流天气提供参考依据。

上述 X 波段双偏振雷达特征仅为一次多灾种

超级单体过程的观测分析结果,未来还需要通过更多的类似个例开展研究。

参考文献:

- [1] Seliga T A, Brangi V N. Potential Use of Radar Differential Reflectivity Measurements at Orthogonal Polarizations For measuring Pre-cipitation[J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15(1): 69-76.
- [2] 刘黎平, 张鸿发, 王致君, 等. 利用双线偏振雷达识别冰雹区方法初探[J]. 高原气象, 1993, 12(3): 333-337.
- [3] 冯晋勤, 张深寿, 吴陈锋, 等. 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, 2018, 44(12): 1565-1574.
- [4] 王洪, 吴乃庚, 万齐林, 等. 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, 2018, 76(1): 92-102.
- [5] 潘佳文, 蒋璐璐, 魏鸣, 等. 一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析[J]. 气象学报, 2020, 78(1): 86-100.
- [6] 张学泰, 李文婷, 彭窃, 等. 清远一次超级单体降雹的双偏振雷达特征分析[J]. 广东气象, 2017, 39(4): 41-44, 51.
- [7] 江慧远, 魏鸣, 张深寿, 等. 一次冬季冰雹的双偏振多普勒天气雷达回波分析[J]. 气象科学, 2019, 39(6): 755-762.
- [8] 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.
- [9] 赖晨, 支树林, 李婕, 等. 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, 2020, 46(11): 1427-1439.
- [10] 王硕甫, 麦文强, 炎利军, 等. 广东一次冰雹过程中 X 波段双偏振雷达的特征分析[J]. 广东气象, 2017, 39(2): 12-16.
- [11] 李晓敏, 周筠珩, 肖辉, 等. 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, 2017, 41(6): 1246-1263.
- [12] 李春娥, 武麦风, 胡伟, 等. 一次春季冰雹天气过程中 X 波段双偏振雷达的特征分析[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(15): 230-233.
- [13] 裴宇杰, 王福侠, 李云川. 河北中南部两次超级单体雷达特征对比分析[J]. 气象科技, 2006, 34(S1): 99-105.
- [14] 王福侠, 裴宇杰, 杨晓亮, 等. “090723”强降水超级单体风暴特征及强风原因分析[J]. 高原气象, 2011, 30(6): 1690-1700.
- [15] 王福侠, 俞小鼎, 闫雪瑾. 一次超级单体分裂过程的雷达回波特征分析[J]. 气象学报, 2014, 72(1): 152-167.
- [16] 刘黎平. 用双多普勒雷达反演降水系统三维风场试验研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(4): 502-504, 515.

Characteristic analysis of X-band dual polarization radar for a rare supercell storm

Wang Qingchuan¹, Peng Min², Zhou Tao¹, Dong Gaohong³, Huang Haojie¹, Wang Heting¹

(1. Langfang Meteorological Bureau, Langfang Hebei 065000, China; 2. Hebei Weather Modification Center, Shijiazhuang 050021, China; 3. Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074, China)

Abstract: Based on the X-band dual polarization radar data of Fangshan, Beijing, a supercell storm in the southeast of Beijing and its surrounding areas on June 25, 2020 was analyzed. The results show that the superimposed ground cold front system in the front slot of the high-altitude cold vortex was the background condition of the supercell storm, and the strong vertical wind shear provided favorable environmental conditions for its development and maintenance. Typical characteristics of super monomer radar such as bounded weak echo area and three-body scattering appeared in the evolution process. The reflectivity factor of X-band dual polarization radar was 50dBz and above, and the strong echo dropped rapidly after extending to the high level, indicating that the ground gale or hail was about to appear. The appearance of ZDR arc and forward-inclined ZDR column in polarization parameters can be used for hail imminent warning. The appearance of the KDP column, especially the KDP overhang, indicated that heavy rainfall was about to occur, and its position had a good corresponding relationship with the rain intensity center. Three-dimensional spatial images can intuitively show the spatial structure characteristics of supercells.

Key words: dual polarization radar; supercell storm; short-term proximity monitoring and prediction