

文章编号:2096 - 5389 (2022)06 - 0063 - 07

北京强对流天气中 X 波段双偏振雷达特征及应用

宋 歌¹, 雷 蕾², 马建立³, 马俊岭¹

(1. 北京市房山区气象局, 北京 102488; 2. 北京市气象台, 北京 100089; 3. 北京市城市气象研究院, 北京 100089)

摘 要:针对 2018 年夏季北京 15 次强对流天气过程, 利用房山单站 X 波段双偏振雷达与北京观象台 S 波段天气雷达探测产品进行对比分析, 探讨新探测手段的应用价值。结果表明: 相对于常规天气雷达来说, 双偏振雷达在粒子识别方面具有明显优势, 成为冰雹等天气监测、预报预警的强有力手段。在冰雹识别上, X 波段双偏振雷达的差分反射率因子 (Z_{DR}) 和相关系数 (ρ_{hv}) 是 2 个重要的偏振量, Z_{DR} 较小, 接近 0, 有时为负值; $\rho_{hv} < 0.9$ 。在强降水识别方面, Z_{DR} 大值和差分传播相移率 (K_{DP}) 能够较好地指示雨强较大的降水。低仰角的 Z_{DR} 达 5 dB 以上, K_{DP} 在 $8^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 以上, ρ_{hv} 达 0.95 以上时, 地面 5 min 雨量 $\geq 10 \text{ mm}$ 。从 2 种雷达的对比分析来看, 反射率因子强度 (R)、垂直累积液态水含量 (VIL) 均较 SA 天气雷达强度偏强。此外, 由于 X 波段雷达波长较短, 单部雷达的探测波束经过强降水区会发生比较严重的电磁衰减, 致使强降水后部的降水回波强度偏弱, 严重影响预报员对降水强度和降雨持续时间的判断, 需要与 SA 天气雷达配合使用或者利用多部 X 波段雷达组网进行强降雨的监测分析。

关键词: X 波段双偏振雷达; 冰雹识别; 强降水偏振参数特征

中图分类号: P412.25 **文献标识码:** A

Characteristic and Application of X - band Dual - polarization Radar in Severe Convection Weather in Beijing

SONG Ge¹, LEI Lei², MA Jianli³, MA Junling¹

(1. Beijing Fangshan Meteorological Bureau, Beijing 102488, China; 2. Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089, China; 3. Beijing Academy of Urban Meteorology, Beijing 100089, China)

Abstract: By using the detection products of X - band dual - polarization radar of Fangshan district and S - band weather radar of Beijing Observatory, a comparative analysis of 15 severe convective weather processes in Beijing in the summer of 2018 was carried out to explore the data value of new detection equipment. The results show that, compared with conventional weather radar, dual - polarization radar has obvious advantages in particle identification and has become a powerful means of weather forecast and warning such as hail. In hail recognition, the differential reflectivity factor (Z_{DR}) and correlation coefficient (ρ_{hv}) of X - band dual - polarization radar are two important polarization quantities, Z_{DR} which are small, closes to 0 and sometimes negative and ρ_{hv} is less than 0.9. In terms of heavy precipitation identification, large value of Z_{DR} and differential propagation phase shift rate (K_{DP}) can better indicate precipitation with high rainfall intensity. When the 5 - minute rainfall is close to 10 mm, Z_{DR} is usually above 5 dB, K_{DP} is above $8^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, and ρ_{hv} is above 0.95 at low elevation. According to the comparative analysis of the two radars, the reflectivity factor intensity (R) and the vertical accumulation liquid water content (VIL) are stronger than SA weather radar. In addition, due to the short wavelength of X - band radar, the detection beam of a single radar will have a relatively serious electromagnetic attenuation when passing through the strong precipitation area, resulting in the weak intensity of precipitation echo behind the heavy

收稿日期: 2021 - 09 - 27

第一作者简介: 宋歌 (1983—), 女, 高工, 主要从事天气预报服务工作, E-mail: sge_yaya@163.com。

资助项目: 中国气象局预报员专项 (CMAYBY2018 - 001); X 波段雷达在对流性降水天气中的应用。

precipitation, which seriously affects the forecaster's judgment of precipitation intensity and rainfall duration. Therefore, it is necessary to cooperate with SA weather radar or use multiple X-band radars to network for the monitoring and analysis of heavy rainfall.

Key words: X-band dual polarization radar; hail recognition; heavy precipitation polarization parameter characteristics

0 引言

北京地形复杂,夏季强对流天气频发,区域性暴雨、局地短时强降水、冰雹、雷暴、大风等灾害性天气,对城市运行、经济社会发展以及人民生命财产安全产生严重威胁。夏季受西南季风北上影响,暴雨频发,2012 年“7·21”,房山区成为北京特大暴雨重灾区,直接经济损失 61 亿元。2018 年“8·11”,大安山乡军红路受暴雨影响发生大规模塌方,落石方量约 30 000 m³。此外,冷涡等天气背景下,山区也经常受冰雹天气的影响,对农业生产造成较大的危害。2016 年“6·30”强冰雹造成北京西南部房山区农业受灾面积 0.5 万 hm²,经济损失达 1.26 亿元。

目前在业务上,已有不少地区开始使用双线偏振多普勒天气雷达(以下简称“双偏振雷达”)进行灾害天气的监测和预报、预警。与常规天气雷达不同,双偏振雷达能交替(或同时)发射和接收水平和垂直的偏振波,即采用单发双收(或双发双收)模式,除常规天气雷达的反射率因子(R)、径向速度(V)以及速度谱宽基本参量外,能探测到更多的偏振参量,如差分反射率因子(Z_{DR})、相关系数(ρ_{hv})、差传播相移(θ_{dp})以及差传播相移率(K_{DP})。使用这些新的参量可以提高探测精度和识别冰雹的准确率,了解一定区域内降水粒子相态与形状,确定雨滴谱参数等,并可将这些新物理量用于中小尺度云数值模式,提高预报时效及准确率。为提高北京地区灾害性天气监测的精细化水平,自 2015 年开始,北京市气象局陆续在房山、昌平、顺义、密云、通州、怀柔、门头沟区建设了 7 部 X 波段双偏振雷达,并建设了配套的组网应用系统。

目前国内外利用双偏振雷达开展的研究主要集中在降水及云粒子相态识别^[3-7]、强对流降水估测应用^[8-10]、双偏振雷达数据衰减订正^[11-13]、龙卷和冰雹等强对流过程观测^[14-16]等方面。北京地区的 X 波段双偏振雷达投入使用时间不长,还未在短临预报业务的应用中进行深入的分析总结。因此迫切需要研究它在对流性天气中的特征,从而进一步提升灾害性天气临近预报预警能力。

1 资料与方法

本文资料有:①乡镇信息员上报和测站冰雹记录资料、房山区加密雨量站资料,用来筛选 2018 年冰雹、暴雨天气过程。②北京房山 X 波段双偏振雷达资料,包括 Z_{DR} 、 ρ_{hv} 、 K_{DP} 等。用来分析冰雹、强降水的观测特征,总结在短临预报、预警中可利用的信息。③北京观象台常规 SA 多普勒天气雷达资料(以下简称“SA 雷达”)。用来与双偏振雷达观测特征进行对比。北京房山 X 波段雷达站位于北京西南部,北京观象台 SA 雷达站位于北京南部,2 站直线距离约 27 km。

1.1 双偏振雷达资料介绍

差分反射率因子(Z_{DR}):

$$Z_{DR} = 10 \lg(Z_{hh}/Z_{vv}) \quad (1)$$

式中 Z_{hh} 和 Z_{vv} 分别为水平偏振的雷达反射率因子和垂直偏振的雷达反射率因子。 Z_{DR} 反映降水粒子偏离球形情况,同时反映粒子群体在空间的取向情况,它的大小还与粒子的形态有关。雨滴呈扁旋转的椭球, $Z_{hh} > Z_{vv}$, 故 $Z_{DR} > 0$; 冰雹由于翻转作用,总体效果接近球形, Z_{DR} 值在零值附近。

差分传播相移(θ_{dp})及差分传播相移率(K_{DP}):

$$\theta_{dp} = \theta_{hh} - \theta_{vv} \quad (2)$$

式中 θ_{hh} 和 θ_{vv} 分别表示水平及垂直偏振发射波通过相同长度的降水区后,散射回天线处的相位值。它的大小既与粒子形状、相态、取向有关,也与通过降水区的长度有关。 θ_{dp} 经过降水区时,是单调累积递增,当 θ_{dp} 增加到很大时,很难用其描述降水区的变化,因此需要引入 K_{DP} 。设 r_m 与 r_n 是降水区中相邻 2 个距离库的中心离雷达的距离, $\theta_{dp}(r_m)$ 及 $\theta_{dp}(r_n)$ 是从该 2 库分别获得的差分传播相移,则 K_{DP} 定义式:

$$K_{DP} = \frac{\theta_{dp}(r_n) - \theta_{dp}(r_m)}{2(r_n - r_m)} \quad (3)$$

式中, K_{DP} 反映降水粒子浓度和大小,以及降水粒子成分构成。

相关系数(ρ_{pv}):指先后间隔 1 个脉冲周期 T 接收到的回波水平偏振分量与垂直偏振分量之间的相关程度。粒子的形状和空间取向以及降水粒子

的数量是影响其值的主要因素。

1.2 个例筛选

考虑到 X 波段双偏振雷达探测距离短,以及衰减的影响,选取距离 X 波段雷达站较近的 15 次强对流天气过程,包含 3 次冰雹天气过程以及 12 次雨强 $>20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的强降雨过程。

2 强对流天气 X 波段双偏振雷达特征分析

2.1 冰雹天气

6 月 30 日冰雹天气过程:受高空槽后冷空气和切变线共同影响,6 月 30 日北京房山区中部、西南部地区部分乡镇出现降雹,最大冰雹直径 $1\sim2\text{ cm}$ 。

15 时前后在雷达站西南部有回波单体生成,快速加强发展并向东北方向移动,同时在其后侧不断有回波生成,前侧回波强度不断加强。此次冰雹强度强,且范围较大,S 波段雷达和 X 波段雷达的反射率因子和垂直累积液态水含量表现一致:在相同高度上,最大回波强度均大于 65 dBz ,且均有明显的入流缺口特征(图 1);垂直累积液态水含量均大于 $60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,回波顶高超过 14 km ,预示着出现冰雹的可能性很大。而 X 波段雷达的偏振参量表明, 2.4° 仰角强回波对应的 Z_{DR} 较小,为 $-1\sim3\text{ dB}$, K_{DP} 为 $4\sim8^\circ\cdot\text{km}^{-1}$, ρ_{hv} 显著降低为 $0.7\sim0.9$ (图 2),由此结合反射率因子等信息,可判断强回波区域有降雹,且在降雹时伴有降水。

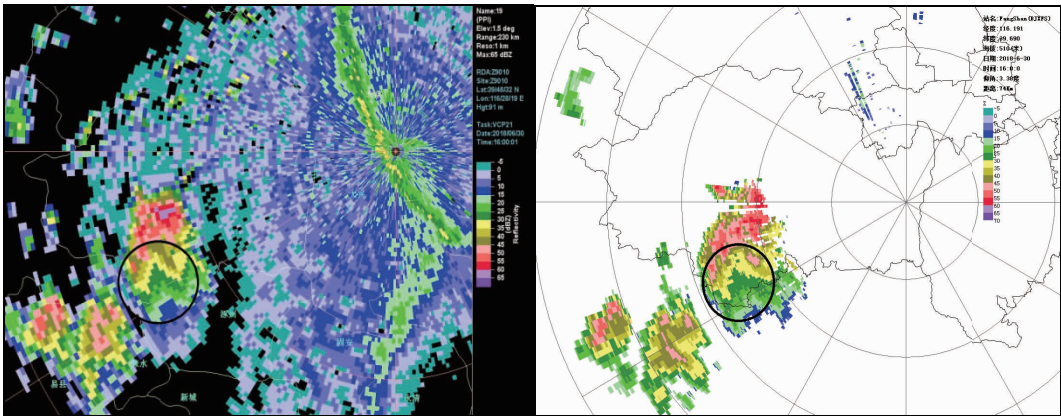


图 1 2018 年 6 月 30 日 16 时北京观象台 SA 雷达(1.5° 仰角)和北京房山 X 波段雷达(3.4° 仰角)反射率因子对比
Fig.1 Reflectivity factor comparison between SA radar (1.5° elevation) and X – band radar (3.4° elevation) at 16:00, June 30, 2018

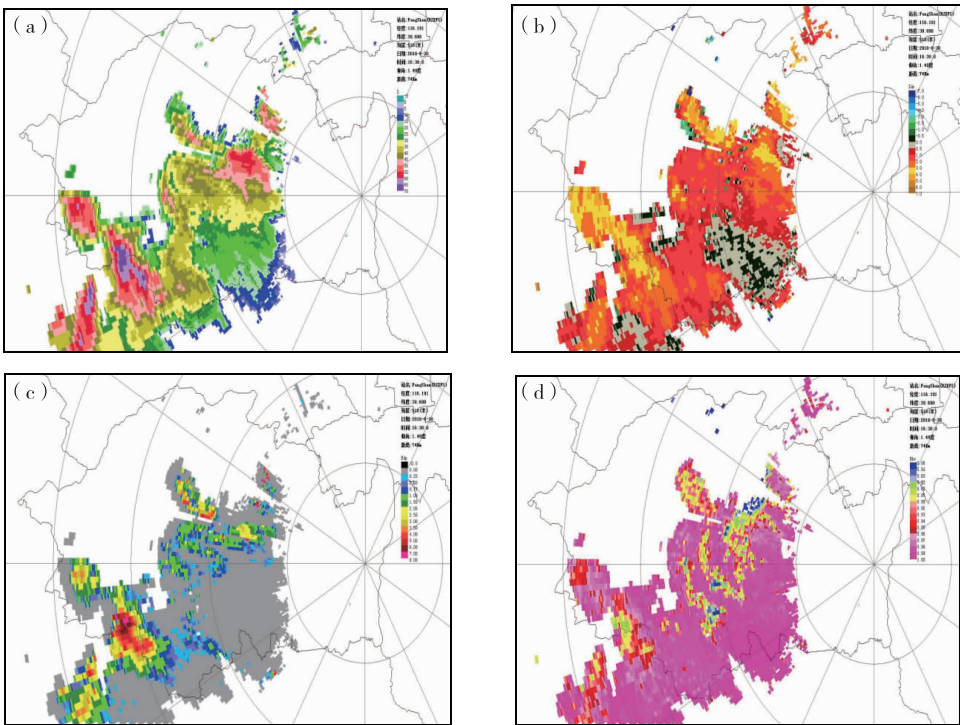


图 2 2018 年 6 月 30 日 16 时 30 分 X 波段雷达 2.4° 仰角反射率(a); Z_{DR} (b); K_{DP} (c); ρ_{hv} (d)
Fig. 2 X – band radar (2.4° elevation) Reflectivity factor(a); Z_{DR} (b); K_{DP} (c); ρ_{hv} (d) at 16:00, June 30, 2018

从双偏振雷达相态识别产品上看(图3),该强回波上空1~8 km内识别出大量小冰雹,其中2~6 km高度上识别出大冰雹,说明高空部分小雹在强上升气流中不断增长为大雹。此外,3 km以下识别出雨夹雹,1~2 km处识别出大冰雹,预示空中的大雹在下降,与地面降雹实况观测较为吻合。近地面除了雨夹雹外还有大范围的大雨区,对应雷达反射率因子强,自动站雨强大,张坊站15—16时降雨量达12.2 mm。综合分析,X波段双偏振雷达的丰富信息在6月30日这次过程中能很好地监测和预警地面可能出现的冰雹、强降水等多种灾害性天气,为预警的发布提供有效的可参考信息。

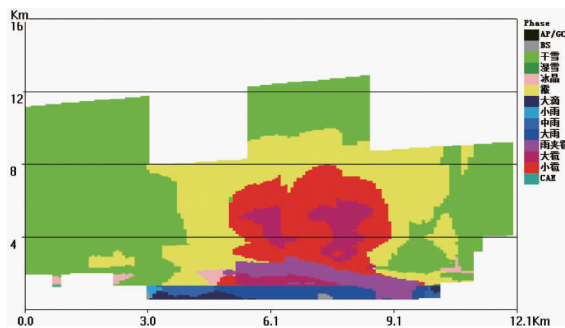


图3 2018年6月30日16时30分
X波段雷达相态识别剖面
Fig.3 Phase identification profile of X - band
radar at 16:30, June 30, 2018

6月13日冰雹天气过程:在相同高度上X波段雷达最大回波强度较SA雷达偏强(与衰减订正有关)。SA雷达1.5°仰角有入流缺口、有界弱回波区特征,但X波段雷达未表现出类似特征。X波段雷达垂直累积液态水含量达60~70 kg·m⁻²,明显大于SA雷达的45~50 kg·m⁻²,2部雷达探测的强回波顶高均大于10 km。降雹时段X波段雷达2.4°仰角Z_{DR}为负值;对应的ρ_{hv}在0.7~0.9;K_{DP}在2~5°·km⁻¹。但是由于降雹区域靠近雷达的区域有较大范围降水,造成严重的电磁衰减,因此Z_{DR}出现大片小于-2 dB的失真区域;对应的ρ_{hv}和K_{DP}也出现明显虚假值,给判定降雹区域造成一定困难。

6月26日冰雹天气过程:在相同高度上衰减订正后的X波段雷达最大回波强度较SA雷达偏强约5 dBz。X波段雷达垂直累积液态水含量50~60 kg·m⁻²,较SA雷达35~40 kg·m⁻²明显偏大。降雹区域X波段雷达2.4°仰角Z_{DR}在-2~3 dB,对应的ρ_{hv}在0.7~0.9;K_{DP}在2~8°·km⁻¹,偏振量较好地指示了降雹。此外,在Z_{DR}和K_{DP}取值较大的区域,

对应地面有明显降雨,自动站小时雨量>20 mm。

综上3次冰雹天气,X波段雷达反射率因子强度、垂直累积液态水含量(VIL)一般较SA雷达强度偏强。Z_{DR}较小,接近0 dB,或在0 dB附近,有时为负值;ρ_{hv}也较低,在0.9左右。但是,如果在冰雹天气中伴有强降雨,强回波附近Z_{DR}和K_{DP}取值较大。此外,由于强降水造成的电磁衰减也往往给冰雹判别造成困难。

2.2 强降雨天气

以2018年1次强降雨过程为例,分析偏振参数的特征。受高空槽和副高外围暖湿气流的影响,7月15日夜间北京地区出现强降雨天气,局地大暴雨,个别点达特大暴雨,最大降雨288.7 mm(北京东北部的密云区西白莲峪站),最大小时雨强也出现在该站,16日02—03时降雨117.0 mm(图4)。

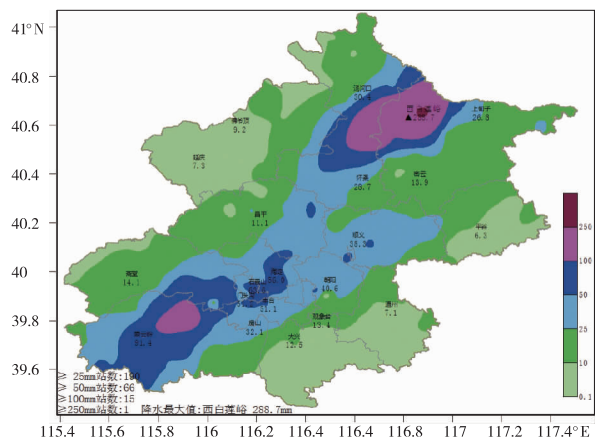


图4 2018年7月15日20时—16日08时
北京降雨量分布(单位:mm)
Fig.4 Rainfall distribution in Beijing from 20:00
to 08:00 on July 15, 2018(unit: mm)

这次降水过程自北京西南部向北影响全市,因此X波段雷达能监测到降雨发生前和降雨初期的状况。15日19时前后,有零散降雨回波在西南部生成,SA雷达1.5°仰角最大回波强度维持在55~60 dBz,X波段雷达在相同高度最大回波强度60~65 dBz(3.4°仰角)。23时前后,大范围片状降水回波从西南方向进入房山区,X波段雷达开始出现电磁衰减,强降雨区后部回波强度显著偏弱,甚至出现完全遮挡的“V”型缺口空白区域(图5)。02时降雨开始显著加强,2.4°仰角的强降雨回波区,Z_{DR}最大值大于3 dB,K_{DP}最大值大于8°·km⁻¹,ρ_{hv}大于0.96,对应地面最大5 min雨强超过10 mm(图6)。由于衰减,在强降雨回波后部出现Z_{DR}负值、K_{DP}接近0,ρ_{hv}小于0.9。

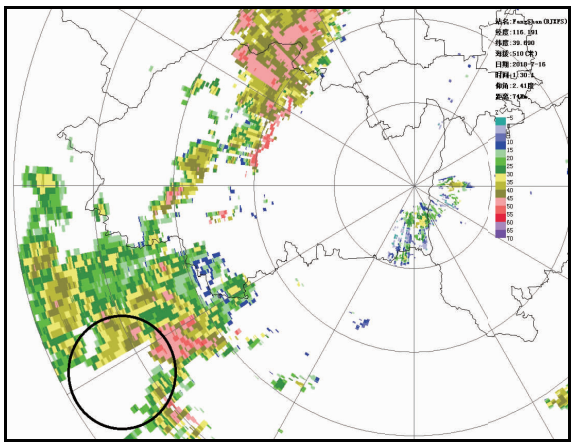


图5 2018年7月16日01时30分
X波段雷达(2.4°仰角)反射率因子
Fig.5 X-band radar (2.4°elevation) reflectivity
factor at 01:30, July 16, 2018

根据房山国家气象观测站雨滴谱观测数据分析得知:在强降雨时段(16日03—04时,小时降水量19.5 mm),雨滴直径范围在0~7 mm之间,粒子

最大下落速度可达 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且雨滴直径与下落速度呈现正相关的关系。03时00—05分,5 min降水量达到最大值7.6 mm。在这一时段(图7),直径在0~3 mm范围的粒子浓度最大。对比X波段雷达观测资料进一步分析:根据X波段雷达波长,参考赵城城等^[17]对大雨滴直径的计算方法,将直径在1.3 mm以上的雨滴定义为大雨滴。那么由图7可见,这一时段的降雨中既存在大量的小雨滴,同时也有数量较多的直径约1.3~3 mm的大雨滴,并且还有少量的直径达4~7 mm的非常大的雨滴。 Z_{DR} 的取值主要取决于采样体积内降水粒子的直径,研究表明^[19-21]:直径大于1.3 mm的雨滴对应的 Z_{DR} 取值范围在1.3 dB以上。从X波段雷达的观测来看,03时前后,房山站附近 Z_{DR} 取值约为1.5~2.0 dB,由此也可以判断在此区域,降水粒子有大雨滴存在。此外,偏振参量 K_{DP} 的取值与降水粒子的直径与浓度均相关,而该时刻 K_{DP} 可达 $6\sim7^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$,综合雨滴谱的特征,判断此区域浓度大的小雨滴和直径大的大雨滴共同造成了地面的强降雨。

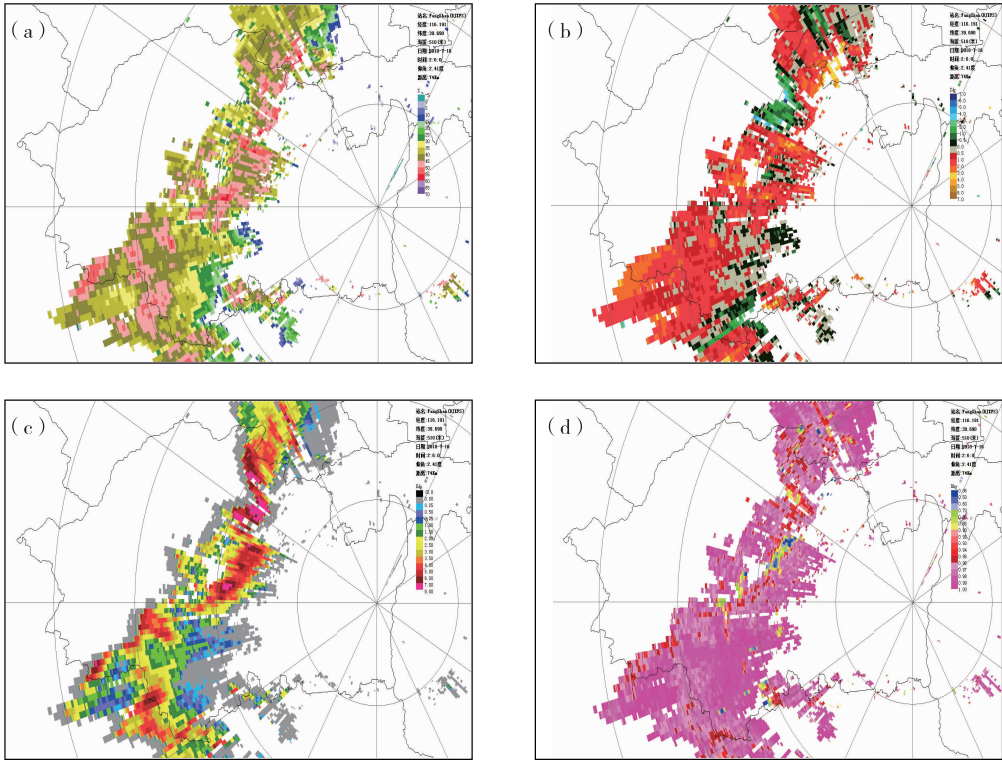


图6 2018年7月16日02时06分X波段雷达2.4°仰角反射率(a); Z_{DR} (b); K_{DP} (c); ρ_{hv} (d)
Fig.6 X-band radar (2.4°elevation) Reflectivity factor(a); Z_{DR} (b); K_{DP} (c); ρ_{hv} (d) at 02:06, July 16, 2018

此外,针对选取的12个强降水个例进行统计(表1),相同高度上X波段雷达最大反射率因子强度也同样较SA雷达略偏强。并且,当出现大范围降水且降水强度较大时,X波段雷达探测方向上,在

强降雨的后方会发生严重衰减导致回波强度偏弱,甚至出现大片无回波区域(缺口),分析时应结合SA雷达进行判断。

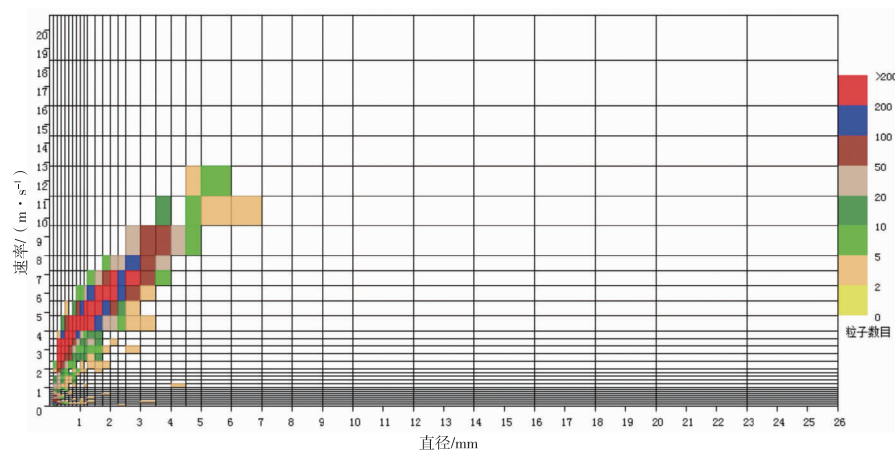


图 7 2018 年 7 月 16 日 03 时 05 分房山站 5 min 雨滴谱观测

Fig. 7 Raindrop spectrum observation for5 minutes at Fangshan Station for at 03:05 ,July 16, 2018

表 1 2018 年强降雨两个例 SA 雷达(1.5°仰角)与相同高度 X 波段雷达对比

Tab. 1 Comparison between SA radar (1.5°elevation) and X - band radar of the same height in heavy rainfall in 2018

时间	反射率因子特征	SA 雷达最大回波强度/dBz	X 波段雷达最大回波强度/dBz
2018 - 6 - 17	片状回波	60 ~ 65	60 ~ 65
2018 - 7 - 5	多单体,组织化弱	60 ~ 65	60 ~ 65
2018 - 7 - 9	带状回波,有一定组织性	55 ~ 60	60 ~ 65
2018 - 7 - 16	片状回波	55 ~ 60	60 ~ 65
2018 - 7 - 17	片状回波	50 ~ 55	55 ~ 60
2018 - 7 - 22	片状回波	50 ~ 55	60 ~ 65
2018 - 7 - 27	片状回波	50 ~ 55	60 ~ 65
2018 - 8 - 5	片状回波	50 ~ 55	55 ~ 60
2018 - 8 - 7	单体合并成片状回波	50 ~ 55	55 ~ 60
2018 - 8 - 11	片状回波	45 ~ 50	60 ~ 65
2018 - 8 - 12	片状回波	50 ~ 55	60 ~ 65
2018 - 8 - 13	单体发展合并组织化加强	50 ~ 55	60 ~ 65

此外,从 X 波段雷达偏振量统计来看(表 2),当 5 min 雨量接近 10 mm 时(雨强非常大),2.4°仰角的 Z_{DR} 值可达 5 dB 以上, K_{DP} 值达 $8^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 以上, ρ_{hv} 一般大于 0.95,有时高达 0.99。因此,在短临预警监测中,利用 K_{DP} 的值,结合强反射率因子和比较大的 Z_{DR} ,即可考虑发布分区暴雨蓝色预警信号(1 h 雨量超过 30 mm)。

表 2 2018 年强降雨两个例 X 波段雷达偏振量特征统计(2.4°仰角)

Tab. 2 Statistics of Polarization Quantity characteristics of X - band Radar in heavy Rainfall in 2018 (2.4°Elevation)

时间	Z_{DR} /dB 最大值	$K_{DP}/(^{\circ} \cdot \text{km}^{-1})$ 最大值	ρ_{hv}
2018 - 6 - 17	>5	>8	大部地区 >0.95
2018 - 7 - 5	>5	>8	大部地区 >0.95
2018 - 7 - 9	>6	>8	大部地区 >0.95
2018 - 7 - 16	>5	>8	大部地区 >0.96
2018 - 7 - 17	接近 4	>8	大部地区 >0.95
2018 - 7 - 22	>5	>8	大部地区 >0.95
2018 - 7 - 27	>4	>8	大部地区 >0.95
2018 - 8 - 5	>4	>7	大部地区 >0.96
2018 - 8 - 7	接近 4	接近 8	大部地区 >0.96
2018 - 8 - 11	接近 3	>7	大部地区 >0.95
2018 - 8 - 12	>5	>8	大部地区 >0.95
2018 - 8 - 13	>5	>8	大部地区 >0.95

3 结论与讨论

本文利用北京房山区单站 X 波段双偏振雷达、观象台 S 波段常规天气雷达探测产品,对 2018 年夏季北京 15 个强对流天气过程进行回波特征对比分析,得到以下结论:

①双偏振雷达相对于常规雷达来说在降水粒子识别上具有明显优势。临近预报中可将反射率因子与偏振量结合使用进行强对流天气类型的判别,使之成为冰雹、强降水等天气监测和预报预警的强有力手段。

②X 波段雷达监测时,若 Z_{DR} 较小,接近 0,有时为负值, ρ_{hv} 明显降低,约 0.9 左右,同时配合较高的反射率因子,可判别降雹。有时会出现较大的 Z_{DR} 及 K_{DP} ,结合 ρ_{hv} 降低,此时可能降雹的同时伴随强降水。

③强降水 X 波段雷达反射率因子强度最大可达 60~65 dBz,同时具有较大的 Z_{DR} 和 K_{DP} 。较低的高度上 $Z_{DR} > 5$ dB, $K_{DP} > 8^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, ρ_{hv} 达 0.95 以上,能够较好地指示地面将发生 5 min 达 10 mm 以上的强降水,这一特征在分钟雨强的估计和暴雨预警信号发布时具有非常好的参考价值。

④目前单部 X 波段雷达的反射率因子强度、垂直累积液态水含量等相比较 SA 天气雷达探测强度偏强,并且在应用中也有很明显的局限性:电磁波波束经过强降水区会发生衰减,致使探测路径上强降水后部回波强度偏弱或缺失,严重影响对降水强度和持续时间的估计。此外,当较强降雨出现在距离雷达更近的区域时,偏振量会出现虚假值。但是,不可否认相比 SA 雷达,X 波段雷达不仅能探测到边界层的对流触发,同时由于 1 个体扫时间短,在时效性上也具备一定优势,能更早地发现对流单体的新生。因此,目前北京地区采用 7 部 X 波段雷达组网的方式,搭配使用原有的 SA 雷达,获取较为准确的探测信息,从而在强对流天气过程中及时准确地发布预报和预警。

参考文献

[1] 张培昌,魏鸣,黄兴友,等. 双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用[M]. 北京:气象出版社,2018:38-42.

- [2] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [3] 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.
- [4] 曹俊武,刘黎平,葛润生. 模糊逻辑法在双线偏振雷达识别降水粒子相态的研究[J]. 大气科学,2005,29(5):827-836.
- [5] 曹俊武,刘黎平. 双线偏振多普勒天气雷达识别冰雹区方法研究[J]. 气象,2006,32(6):13-19.
- [6] 苏德斌,马建立,张蕾,等. X 波段双线偏振雷达冰雹识别初步研究[J]. 气象,2011,37(10):1228-1232.
- [7] 郭凤霞,马学谦,王涛,等. 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,2014,72(6):1231-1244.
- [8] 马学谦,董万胜,楚荣忠,等. X 波段双偏振多普勒天气雷达降雨估算试验[J]. 高原气象,2008,27(2):382-391.
- [9] 杨金红,郭建侠,王佳,等. 雷达气候学分析方法在 2020 年汛期强降水中的应用[J]. 气象水文海洋仪器,2022,39(2):86-89.
- [10] 袁微,郭春辉,谭丹凤,等. 肇庆 X 波段双偏振天气雷达降水估测研究[J]. 气象水文海洋仪器,2022,39(2):58-61.
- [11] 刘黎平,徐宝祥. 双线偏振雷达雨区衰减订正问题的模拟计算与讨论[J]. 高原气象,1992,11(3):235-240.
- [12] 刘黎平,徐宝祥. 雨区衰减和雷达取样误差对 713 型双线偏振雷达测量精度的影响[J]. 高原气象,1989,8(2):181-188.
- [13] 毕永恒,刘锦丽,段树,等. X 波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正[J]. 大气科学,2012,36(3):495-506.
- [14] 张建云,张持岸,葛元,等. 1522 号台风外围佛山强龙卷 X 波段双偏振多普勒雷达反射率因子特征[J]. 气象科技,2018,46(1):163-169.
- [15] 吴舫,刘黎平,吴海涛. 多部 X 波段天气雷达测偏差分布及组网拼图结果分析[J]. 高原气象,2016,35(3):823-833.
- [16] 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.
- [17] 赵城城,杨洪平,刘晓阳,等. 大雨滴对雷达定量测量降水的影响研究[J]. 暴雨灾害,2014,33(2):106-111.
- [18] 杨忠林,赵坤,徐坤,等. 江淮梅雨期极端对流微物理特征的双偏振雷达观测研究[J]. 气象学报,2019,77(1):58-72.
- [19] BRANDES E A, ZHANG G, and VIVEKANANDAN J. Experiments in Rainfall Estimation with a Polarimetric Radar in a Subtropical Environment[J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41: 674-685.
- [20] BRANDES E A, ZHANG G, and VIVEKANANDAN J. An evaluation of a drop distribution-based polarimetric radar rainfall estimator[J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42: 652-660.
- [21] BRANDES E A, ZHANG G, and VIVEKANANDAN J. Comparison of Polarimetric Radar Drop Size Distribution Retrieval Algorithms[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21: 584-598.