

陈雪娇,花家嘉,裴宇杰,等. 2021 年保定清苑 EF2 级龙卷 S 和 X 波段雷达特征. 应用气象学报,2024,35(5):564-576.
DOI: 10.11898/1001-7313.20240505

2021 年保定清苑 EF2 级龙卷 S 和 X 波段雷达特征

陈雪娇¹⁾²⁾³⁾ 花家嘉¹⁾³⁾ 裴宇杰^{4)*} 王振超¹⁾³⁾
刘 姝¹⁾³⁾ 刘姝君¹⁾³⁾ 王福侠⁴⁾

¹⁾(中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室,雄安新区 070001)

²⁾(南京气象科技创新研究院中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210041)

³⁾(河北雄安新区气象局,雄安新区 070001)

⁴⁾(河北省气象台,石家庄 050000)

摘 要

利用石家庄 S 波段天气雷达(SPOL)、雄安 X 波段相控阵雷达(XPAR)、地面自动气象站等多源观测资料,分析 2021 年 7 月 21 日河北省保定市清苑区东吕村 EF2 级龙卷雷达特征。清苑区龙卷发生于低涡降水云系中,风暴后向传播造成的单体合并形成超级单体,钩状回波顶部分裂的强反射率因子核心自东南向西北移动,并与龙卷位置对应关系较好。SPOL 和 XPAR 平均径向速度图上均连续多个时次识别出中气旋,中气旋尺度为 1.4~4.2 km,旋转速度为 10~20 m·s⁻¹,为弱中气旋,属于微型超级单体龙卷,持续时间较短(30~35 min)。在龙卷发展演变过程中,低仰角探测到紧邻的旋转速度对时,中气旋向下延伸 1.2~1.4 km,直径迅速收缩 0.8~1 km,预示龙卷的发生。龙卷风暴在低层旋转速度和涡度最大,有利于龙卷发展增强。SPOL 和 XPAR 在龙卷位置、径向速度及风暴直径的探测结果较为一致,XPAR 回波顶比 SPOL 高约 6 km,且 XPAR 回波顶的峰值时段与风暴出现冲云顶特征的时段一致。15:36—15:42(北京时)龙卷涡旋特征(TVS)最为强盛,垂直伸展厚度达 2~4 km。

关键词: 龙卷; 风暴特征参数; X 波段相控阵雷达; 中气旋

引 言

龙卷作为致灾性极强的小尺度灾害性天气,往往会造成严重经济损失和人员伤亡。中国龙卷主要发生在江淮和黄淮平原、东北和华北平原、两湖平原和华南等地,其中江苏、辽宁、佛山等地龙卷发生频次较高^[1]。西风带系统和热带气旋是中国龙卷的主要影响系统,EF2 级以上强龙卷环境条件包括对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)不低于 1000 J·kg⁻¹、0~6 km 高度垂直风切变不低于 15 m·s⁻¹、0~1 km 高度垂直风切变不低于 8 m·s⁻¹、抬升凝结高度不超过 1.2 km,且

低层(0~1 km 高度)相对湿度较高^[2-4]。通常将龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷^[5-11],超级单体龙卷常生成于超级单体中气旋内部,其形成包括 3 个阶段:上升气流自旋产生、地面自旋产生及导致龙卷形成自旋的融合发展^[12]。Fischer 等^[13]将超级单体龙卷形成的第 3 阶段分为两部分,提出了新的 4 阶段模型,即中气旋发展、近地层涡旋发展、拉伸及组织化和动量转化,而近地层中气旋入流来自接近地表的层次(最低为 0.5~1 km 高度)^[14]。随着多种型号天气雷达布网及预报技术发展,龙卷监测与预警能力大幅提升。国内外学者通过个案总结、统计分析等手段归纳了龙卷风暴的特点以及有利于龙卷发生发展的环境条件,指出超级单体龙卷

2024-05-25 收到,2024-08-14 收到再改稿。

资助项目:中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2023LASW-B07),南京气象科技创新研究院北极阁开放研究基金项目(BJG202409),中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J012),河北省科技厅重点研发计划社会公益事业创新专项(23375401D),河北省气象局青年基金项目(22ky27)

* 通信作者,邮箱:81048870@qq.com

在对流有效位能为中等及以上、垂直风切变强、抬升凝结高度低、中气旋底高度低的条件下更易生成^[15-18],而近地层(几百米以下)的大尺度水平涡旋也有利于龙卷产生^[19-22]。分析多普勒天气雷达产品发现,对流单体在合并过程中易产生龙卷,钩状回波处低仰角连续出现正负速度对和气旋性旋转表明龙卷漏斗云正向下延伸至近地层,可作为龙卷预警发布的重要参考依据之一^[23]。此外,下沉反射率因子核心、弱回波洞、龙卷残片特征等结构亦为龙卷典型雷达特征^[24-29]。虽然多普勒天气雷达提升了龙卷的监测能力,但其时空分辨率对变化快、影响大的中小尺度天气系统的监测存在一定局限性。X 波段相控阵雷达(XPAR)时空分辨率可达分钟级、百米级,有效补充了 S 波段天气雷达(SPOL)在时空分辨率方面的不足,开展 SPOL 与 XPAR 协同应用,有利于进一步提升对暴雨、强对流天气的短时临近预警能力^[30-31]。研究表明:虽然 X 波段雷达观测遇强降水云团衰减严重,但 XPAR 较 SPOL 组合反射率因子更清晰,结构分布较均匀,可探测更精细的回波结构以及回波单体生成发展演变过程,组网后的 XPAR 对低层探测补盲效果提升明显^[32],但 XPAR 在应用过程中存在组合回波偏强、遇强降水云团衰减严重、速度场大风区探测能力欠佳等缺点^[33-34]。对比 SPOL 和 XPAR 对中气旋的识别,发现 XPAR 强天气回波识别性能具有时间分辨率高、垂直结构精细、正负速度对差值大的优势^[35]。

本文研究 2021 年 7 月 21 日保定清苑龙卷(以下简称清苑龙卷)过程成因,重点对比 SPOL 和 XPAR 探测龙卷风暴特征差异,探究中气旋和龙卷涡旋特征(TVS)参数的变化,为龙卷监测预警提供技术支撑。

1 过程概况及天气形势

1.1 龙卷实况

2021 年 7 月 21 日 15:30—16:00(北京时,下同)河北省保定市清苑区东吕乡东吕村发生龙卷(图 1),持续时间约为 30 min,造成 102 户受灾,受灾群众 362 人,农房受损 67 户、202 间,车间受损 48 间,因灾受伤人员 6 人,因灾死亡 2 人,4 人轻微伤,经济损失约为 606 万元。经现场灾调,清苑龙卷造成较大破坏,其中活动板房、厂房倒塌,部分房屋屋顶被吹走,广场上轿车被吹走,多处树木被折断,根据

龙卷等级 EF(enhanced Fujita scale)评判标准^[36],结合地面建筑物损害程度,判断此次龙卷为 EF2 等级。根据无人机航拍结果,清苑龙卷移动路径约为 2.5 km,路径宽度约为 300 m。



图 1 2021 年 7 月 21 日河北省保定市清苑区东吕村龙卷照片

Fig. 1 Photo of tornado at Donglü Village, Qingyuan District, Baoding City, Hebei Province on 21 Jul 2021

1.2 资料与方法

本文使用地面常规探测资料、欧洲中期天气预报中心第 5 代大气再分析资料(ERA5)、石家庄 S 波段天气雷达及雄安 X 波段相控阵雷达资料。清苑区东吕村地处河北省保定东部,距石家庄 S 波段天气雷达(SPOL)约为 81 km,距雄安 X 波段相控阵雷达(XPAR)(安新站)约为 37 km,均处于雷达有效探测范围内。基于常规探测资料、石家庄 S 波段天气雷达、雄安 X 波段相控阵雷达资料分析此次龙卷过程环境背景,使用多普勒天气雷达分析反射率因子和径向速度特征,提取 SPOL 和 XPAR 探测龙卷风暴参数,包括风暴基本特征,如直径、厚度、顶高底高、最大反射率因子及其所在高度等,中气旋及 TVS 特征参数,包括最早识别时间、最大正负速度及旋转速度等,分析 SPOL 和 XPAR 探测的龙卷特征差异及龙卷风暴参数变化特征,讨论 SPOL 和 XPAR 对龙卷风暴的探测性能。

1.3 天气形势

由 7 月 21 日 08:00 高空及地面形势图(图 2)可知,500 hPa 在陕西北部有一低涡,低涡东北象限的横切变东伸到山西北部 and 河北北部,700 hPa(图

略)低涡位置略偏西,位于甘肃南部和陕西西北部,横切变偏南,位于陕西北部、山西南部至河南北部,850 hPa 低涡不明显,河北西南部处于切变顶端。地面气压场呈东高西低型,河北中部处于高压控制之下。由 15:00 和 16:00 地面风场(图略)可见,保

定市清苑区东吕村风向辐合明显,地面温度场分布(图略)显示,山西为冷中心,山东和北京为暖中心,东吕村处于冷暖中心之间的温度梯度区。分析 15:00 和 16:00 地面露点温度,河北中部自北向南为露点高值区域,东吕村位于露点高值中心。

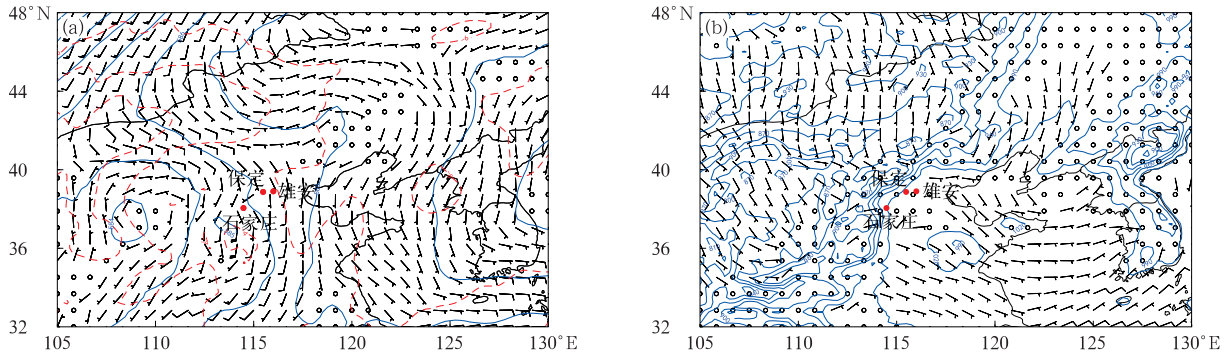


图2 2021年7月21日08:00 500 hPa 高度(蓝线,单位:hPa)、500 hPa 温度(红虚线,单位:℃)和 850 hPa 风场(风羽)(a)及地面气压场(蓝线,单位:hPa)和风场(风羽)(b)

Fig. 2 500 hPa geopotential height(the blue contour,unit:hPa),500 hPa temperature (the red dashed line,unit:℃) with 850 hPa wind(the barb)(a) and pressure(the blue contour,unit:hPa) with wind(the barb) at the surface(b) at 0800 BT 21 Jul 2021

由7月21日08:00邢台和北京探空(图略)可知,邢台探空湿层相对深厚,抬升凝结高度为0,CAPE也很小,仅为 $33 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,0~6 km 高度垂直风切变为 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,0~3 km 高度垂直风切变为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,0~1 km 高度垂直风切变为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。北京探空显示中高层有干冷空气,抬升凝结高度为257 m,CAPE达到 $1347 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,0~6 km 高度垂直风切变为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,0~3 km 高度垂直风切变为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,0~1 km 高度垂直风切变为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。国内研究总结的有利于EF2级及以上龙卷发生的环境条件为抬升凝结高度在1200 m 以下,CAPE在 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,0~6 km 高度垂直风切变在 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,0~1 km 高度垂直风切变在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。北京和邢台的探空各有1项环境条件未达到。保定市清苑区东吕村位于邢台和北京之间,距离北京略近,根据以上环境条件分析,存在发生龙卷的可能性。

为强东南风。综合看,21日清苑具有龙卷发生发展的水汽和低层垂直风切变条件。

图3为清苑站基本物理要素时间-高度分布。由图3可见,7月21日午后东吕村附近湿度条件优越,1000 hPa 比湿超过 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,1000 hPa 温度不低于 $24 \text{ }^\circ\text{C}$,达到强对流天气发生发展的高温高湿条件。从动力条件看,低层为弱偏东风,925 hPa 以上转为东南或南风且风力增大,高层(300 hPa)以上

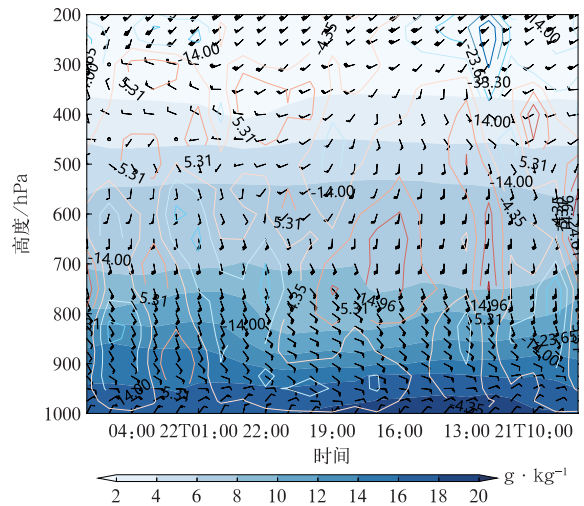


图3 2021年7月21日08:00—22日08:00 清苑站物理要素时间-高度分布(填色为比湿,折线为垂直速度(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$),风羽为风场)

Fig. 3 Time-height section of physical elements at Qingyuan Station from 0800 BT 21 Jul to 0800 BT 22 Jul in 2021 (the shaded denotes specific humidity,the curve denotes vertical velocity(unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and the barb denotes wind)

2 雷达特征

2.1 中尺度特征

2021 年 7 月 21 日下午石家庄 S 波段天气雷达探测到大范围片絮状积层混合云回波,回波主体自北向南移动。21 日 13:00—18:00 保定市清苑区南侧蠡县境内不断生成新的强对流单体,北上并入主体回波,形成后向传播。14:24 强对流风暴单体进入

清苑区境内,回波中心反射率因子不低于 50 dBZ。15:30—16:00 影响东吕村的强风暴 R 回波中心反射率因子维持在 55~60 dBZ,50 dBZ 回波水平尺度达到 5 km,回波中心仅有 1 个时次反射率因子超过 60 dBZ,伸展高度低(50 dBZ 在 6 km 高度以下)。15:42 和 15:48 风暴 R 出现明显钩状回波(图 4 中黑色圆圈处),研究表明超级单体钩状回波的边缘处可产生强烈涡旋,有利于龙卷生成发展。

15:30—16:00 风暴 R 影响清苑东吕村,30 min

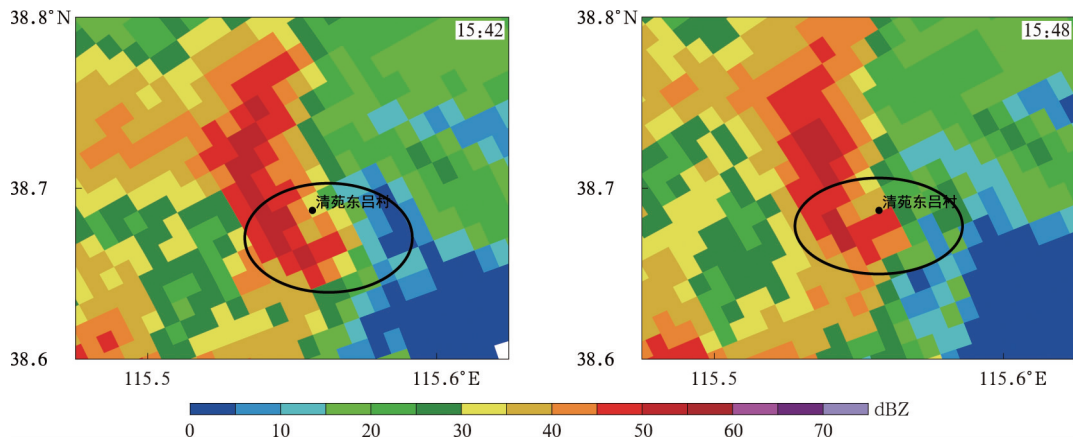


图 4 2021 年 7 月 21 日清苑区东吕村上空石家庄 SPOL 0.5°仰角钩状回波特征

Fig. 4 Hook shaped echoes over Donglü Village, Qingyuan at 0.5° elevation of Shijiazhuang SPOL on 21 Jul 2021

至少两个不同仰角均可探测到中气旋。15:42 在 1.5°、2.4°仰角可探测到中气旋特征,旋转速度基本相同,均超过 $10.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,为弱中气旋,6.0°仰角有辐散,系统未标注中气旋,标注为龙卷涡旋特征(TVS)。随后中气旋快速向上向下伸展,最大旋转速度的位置从 2.6 km 高度(1.5°仰角)下降到

1.2 km 高度(0.5°仰角)。15:48 风暴 R 发展为微型超级单体(中气旋尺度为 1.4~4.2 km),是发展最为旺盛的阶段,在 0.5°、1.5°、2.4°、3.3°、4.3° 仰角均表现出中气旋特征(图 5),其垂直伸展高度最高达到 5.6 km,最低仰角(0.5°)旋转速度达到最大 $13.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,为弱中气旋,风暴高层(6.0°仰角)出

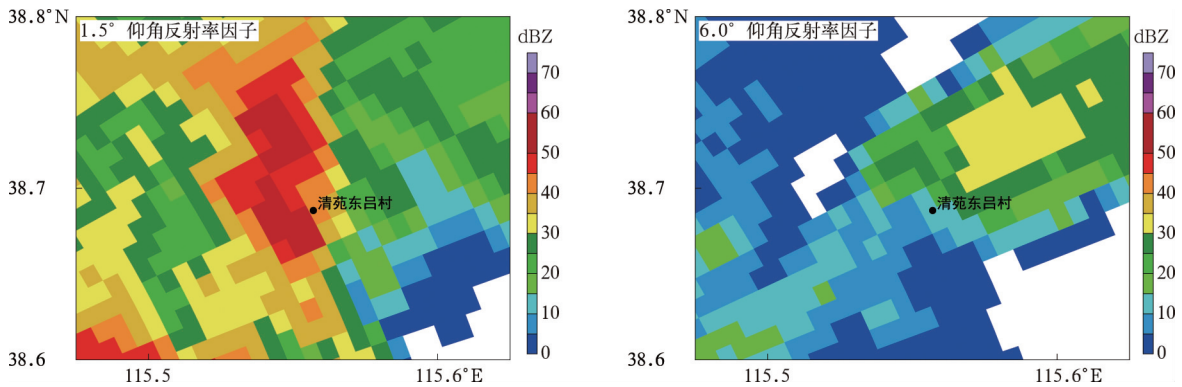
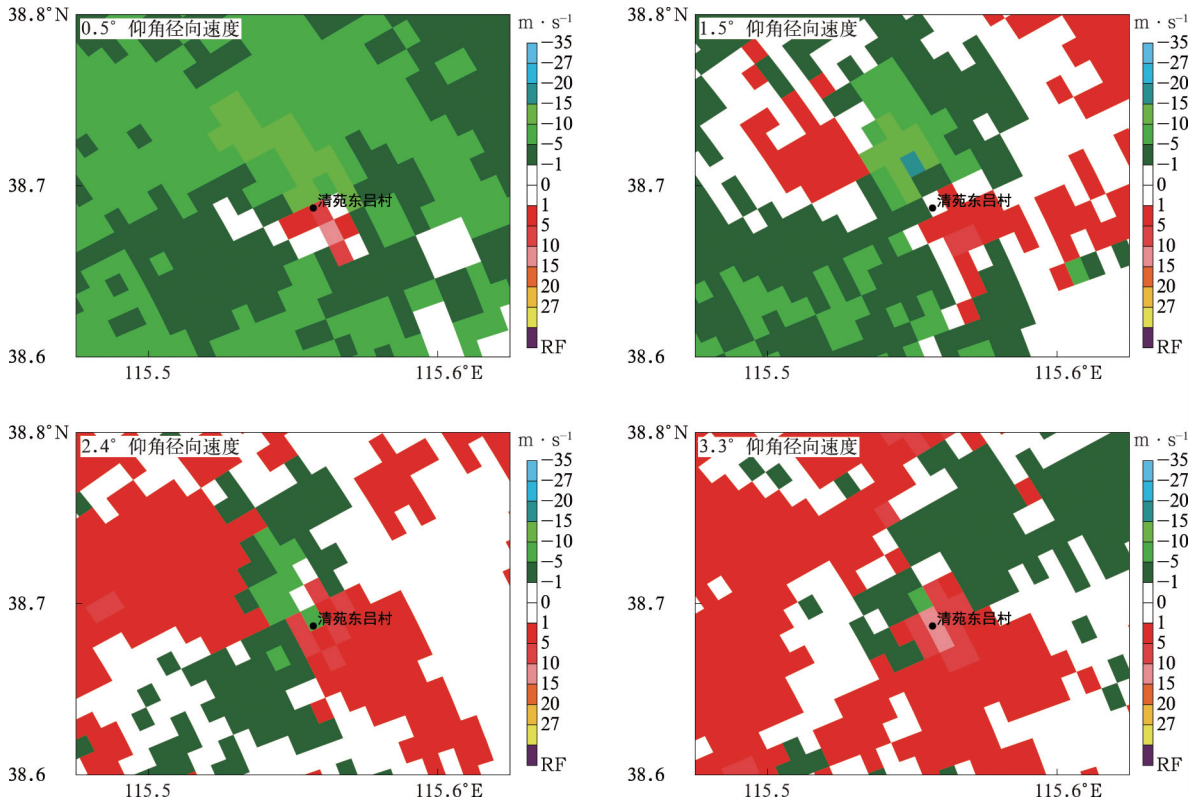


图 5 2021 年 7 月 21 日 15:48 SPOL 反射率因子及径向速度

Fig. 5 Reflectivity factor and radial velocity of SPOL at 1548 BT 21 Jul 2021



续图5

现辐散,系统未标注中气旋,标注为TVS,此时中气旋向上向下伸展的垂直厚度最大,是发展最旺盛阶段,同时最低仰角探测到紧邻的旋转速度对的旋转速度值达到最大,且中气旋在向下延伸和迅速收缩,预示可能发生龙卷。

由2021年7月21日15:54的SPOL和XPAR反射率因子可以看出两部雷达探测的龙卷强回波的位置基本一致,但因XPAR自身衰减较强,反射率因子略偏弱。15:30—15:34 XPAR探测风暴R回波中心反射率因子为45~55 dBZ,此后略有降低并维持在45 dBZ以上,而同时段SPOL的反射率因子无减弱,该时段为龙卷维持发展阶段。XPAR探测的风暴R反射率因子偏低,是XPAR遇强风暴产生的衰减导致(图6c),其东南角为钩状回波。15:48 SPOL径向速度图上出现明显速度对,表明该处出现强的气旋,正、负速度中心值分别为 $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-14.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,旋转速度为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中气旋直径为6.5 km,达到弱中气旋标准(图6b)。XPAR较SPOL径向速度图出现气旋性旋转稍早(提前4 min),正、负速度最大值分别为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且速度对形态狭长,与龙卷母体风暴

相似(图6d)。图7为21日15:51不同仰角径向速度,XPAR空间分辨率较高,其径向速度的切变特征和辐合特征更明显,且气旋性旋转在不同仰角均有体现,3.0°仰角为气旋性辐合,4.5°仰角正负速度对沿雷达径向对称,气旋性旋转特征明显。此外,SPOL和XPAR径向速度图上速度对的正负速度空间分布相反,这是由于两部雷达分别位于清苑龙卷的不同方位所致(石家庄位于清苑西南方向,安新位于清苑东北方向)。

2.2 风暴特征参数

2.2.1 风暴基本特征参数

图8为龙卷发生时段(15:30—16:00)风暴R SPOL和XPAR的特征参数演变,主要包括最大反射率因子、最大反射率因子所在高度、垂直积分液态水含量和回波顶高。

由图8a可知,SPOL探测的最大反射率因子为55~60 dBZ,XPAR则为45~55 dBZ,明显弱于SPOL,XPAR变化幅度较大,且呈不断下降趋势,体现XPAR遇强回波衰减的特征。由图8b可知,15:30 SPOL最大反射率因子所在高度约为5 km,随后(15:36—16:00)维持在8~10 km高度,XPAR

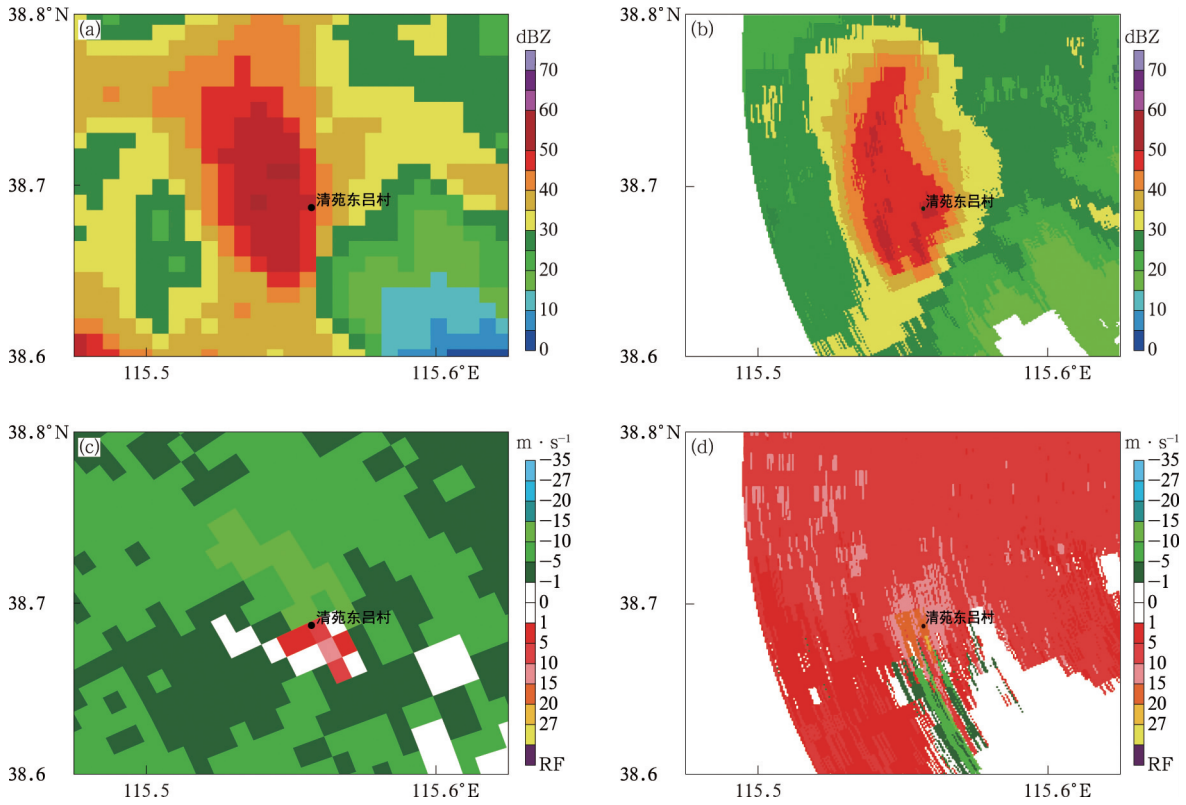


图 6 2021 年 7 月 21 日 15:48 SPOL 和 15:44 XPAR 组合反射率因子及径向速度对比

(a)SPOL 组合反射率因子,(b)XPAR 组合反射率因子,

(c)SPOL 0.5°仰角径向速度,(d)XPAR 3.0°仰角径向速度

Fig. 6 Comparison of combined reflectivity factor and radial velocity of SPOL at 1548 BT and XPAR at 1544 BT on 21 Jul 2021

(a)combined reflectivity factor of SPOL, (b)combined reflectivity factor of XPAR,

(c)radial velocity at 0.5° elevation of SPOL,(d)radial velocity at 3.0° elevation of XPAR

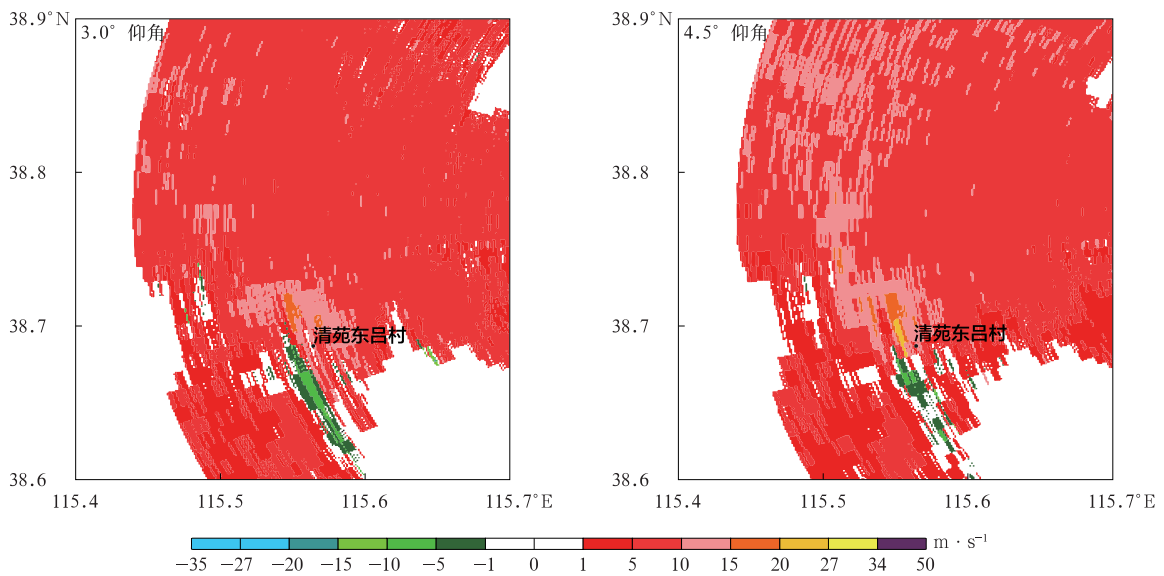


图 7 2021 年 7 月 21 日 15:51:30 XPAR 径向速度

Fig. 7 Radial velocity of XPAR at 155130 BT 21 Jul 2021

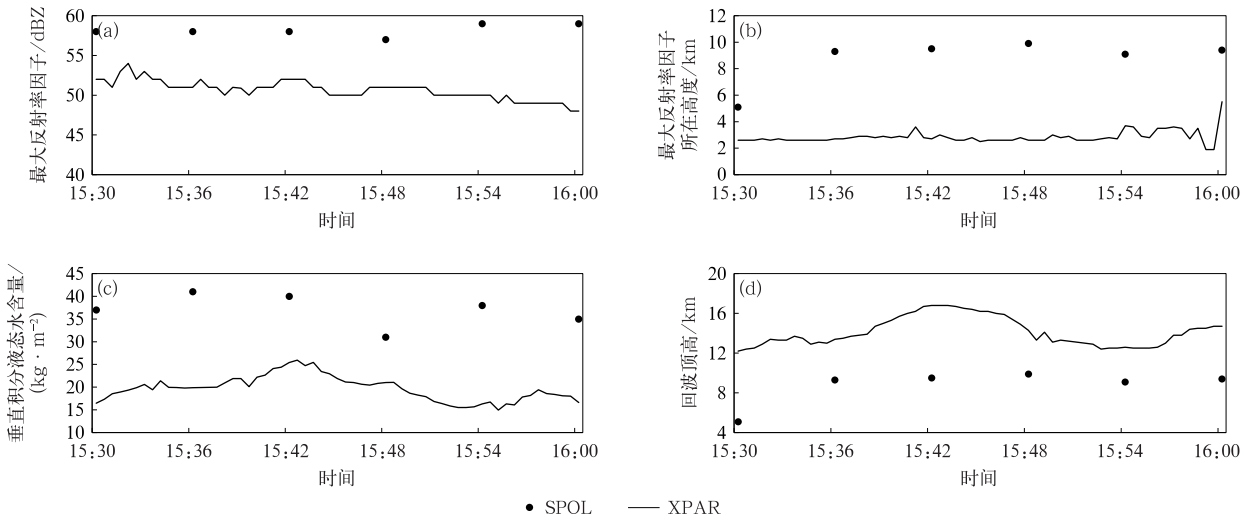


图 8 2021 年 7 月 21 日 15:30—16:00 SPOL 和 XPAR 探测龙卷风暴单体参数
(a)最大反射率因子,(b)最大反射率因子所在高度,(c)垂直积分液态水含量,(d)回波顶高

Fig. 8 Tornado storm parameters of SPOL and XPAR

from 1530 BT to 1600 BT on 21 Jul 2021

(a)maximum reflectivity factor,(b)height of maximum reflectivity factor,
(c)vertical integrated liquid water content,(d)echo top height

最大反射率因子所在高度明显低于 SPOL,集中在 2~4 km 高度,仅在龙卷即将消亡阶段出现了最大反射率因子所在高度突升至约 6 km,符合文献[37]提到的龙卷多发生于最大反射率因子所在高度低于 6 km 这一特征。由图 8c 可知,SPOL 和 XPAR 的垂直积分液态水含量值变化幅度均较大,SPOL 维持在 30~45 kg·m⁻²,XPAR 维持在 15~25 kg·m⁻²,15:42、15:55 分别出现两次峰值。由图 8d 可知,SPOL 探测回波顶高较 XPAR 偏低,XPAR 的回波顶高最高达 16 km,SPOL 探测回波顶高集中在 8~10 km。XPAR 探测回波顶高明显高于 SPOL 的原因可能是 SPOL 采用 VCP21 扫描模式,

俯仰方向共 9 个仰角,仰角数较少,导致 SPOL 探测的风暴 R 存在资料缺失,而 XPAR 为俯仰电子扫描,0°~72°均探测,可得到风暴 R 俯仰范围内完整探测资料。同时,15:36—15:48 XPAR 出现回波顶峰值,与龙卷发生时段出现上冲云顶的时段一致。

2.2.2 中气旋及 TVS 参数

图 9 为 SPOL 和 XPAR 探测的中气旋低仰角最大正负速度,其中最大负速度均指绝对值最大(中高仰角最大正负速度对比图略)。不同仰角的最大正速度 XPAR 均高于 SPOL,特别是在 1.5°和 7.0°仰角,二者差异最明显,其中 SPOL 最大正速度在低仰角(2.4°以下)为 5~10 m·s⁻¹,低仰角以上为

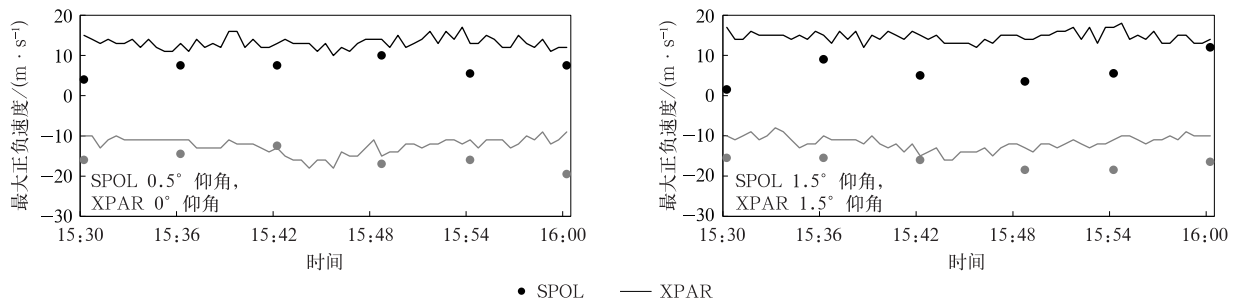


图 9 2021 年 7 月 21 日 15:30—16:00 不同仰角 SPOL 和 XPAR 中气旋最大正负速度

Fig. 9 Maximum positive and negative velocities of mesocyclone with different elevation angles of SPOL and XPAR from 1530 BT to 1600 BT on 21 Jul 2021

10~15 m · s⁻¹, 15:54 在 4.3°仰角最大正速度达 20 m · s⁻¹, 而 XPAR 最大正速度为 10~20 m · s⁻¹, 且各仰角速度差异不大。SPOL 和 XPAR 的最大负速度较为接近, 为 -15~-10 m · s⁻¹, 仅在 7.0°仰角(SPOL 6.0°仰角)出现 SPOL 负速度明显低于 XPAR 的特征。计算 15:30—16:00 时段 SPOL 和 XPAR 平均最大正速度, 3.4°仰角达到 10.7 m · s⁻¹, 4.3°仰角为 10.6 m · s⁻¹, 其余仰角均在 10 m · s⁻¹ 以下, XPAR 最大正速度大值分布在 3.0°~6.0°仰角范围, 4.5°仰角为 16.8 m · s⁻¹, 可见中气旋最大正速度大值区分布在中层 2~3 km 高度。SPOL 最大负速度主要分布在低仰角 0.5°和 1.5°, 极值为 -19.5 m · s⁻¹, 出现在 0.5°仰角。XPAR 各仰角最大负速度绝对值在 10 m · s⁻¹ 以上, 最大负速度为 -18 m · s⁻¹, 出现在 0°仰角。可

见中气旋负速度绝对值最大区分布于低层 1 km 高度以下。

统计 15:30—16:00 SPOL 和 XPAR 探测的各仰角中气旋旋转速度、涡度、风暴直径平均值(表 1), SPOL 低仰角旋转速度高于中高仰角, 为 6~11 m · s⁻¹, XPAR 各仰角差别较小, 为 12~14 m · s⁻¹, 但 SPOL 和 XPAR 旋转速度最小值均分布在最高仰角。SPOL 涡度分布与旋转速度分布相似, 均存在自下向上递减的特征, XPAR 涡度和旋转速度极值分布在 1.5°和 3.0°仰角。风暴直径 SPOL 和 XPAR 差异不大, 为 4~5 km, 仅在 3.4°和 4.3°仰角上 XPAR 风暴直径大于 SPOL。分析 SPOL 和 XPAR 低仰角中气旋旋转速度及涡度变化(图 10), SPOL 旋转速度在 0.5°仰角为 10~16 m · s⁻¹, XPAR 与之接近, SPOL 旋转速度在 1.5°仰角

表 1 中气旋特征参数统计表

Table 1 Statistical table of characteristic parameters of mesocyclone

仰角/(°)		旋转速度/(m · s ⁻¹)		涡度/s ⁻¹		直径/km	
XPAR	SPOL	XPAR	SPOL	XPAR	SPOL	XPAR	SPOL
0.0	0.5	12.8	11.0	12.4	10.4	4.8	4.7
1.5	1.5	13.2	11.1	13.0	9.1	4.9	5.1
3.0	2.4	13.8	8.8	12.0	8.0	5.3	4.6
4.5	3.4	13.6	7.1	12.2	9.3	5.3	3.8
6.0	4.3	13.6	8.3	10.5	8.5	6.1	3.6
7.5	6.0	12.5	5.8	11.6	3.8	5.2	5.8

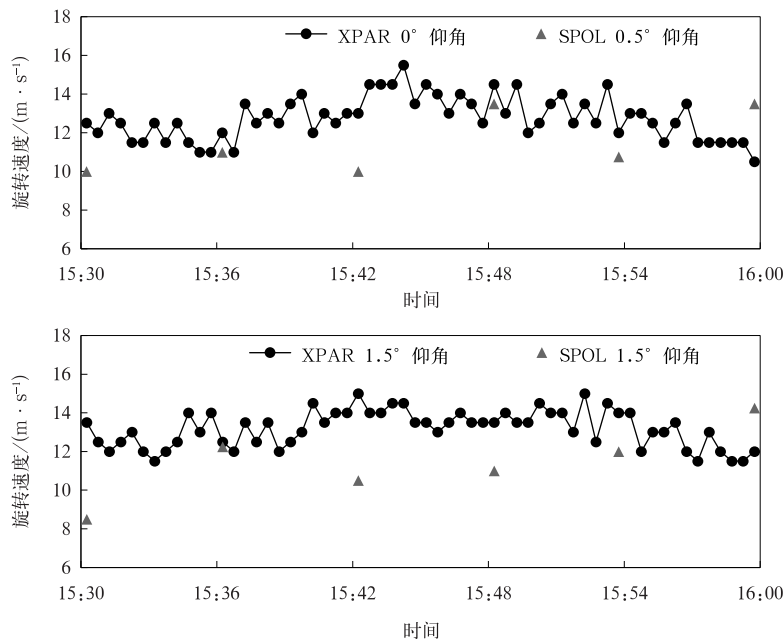
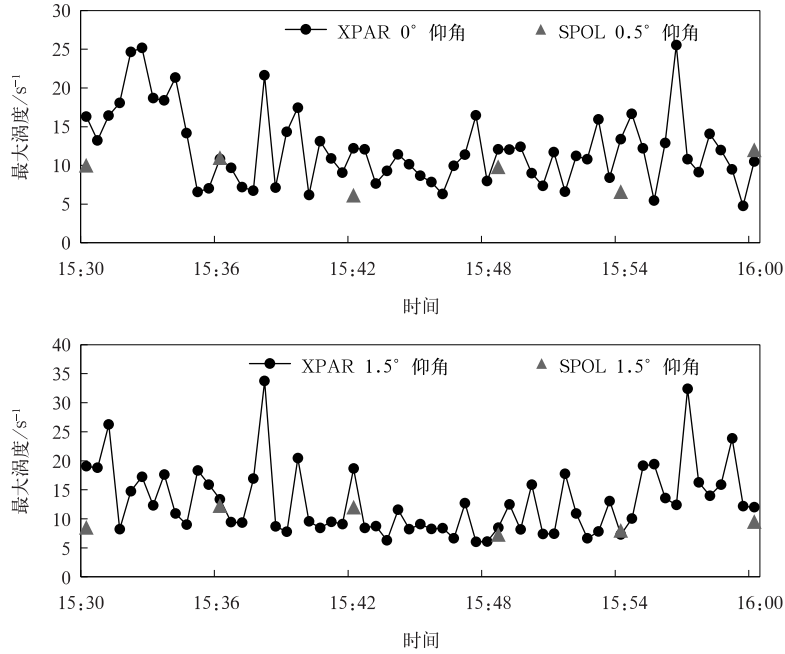


图 10 2021 年 7 月 21 日 SPOL 和 XPAR 探测龙卷中气旋低仰角旋转速度及最大涡度

Fig. 10 Low elevation rotation velocity and the maximum vorticity of mesocyclone from SPOL and XPAR on 21 Jul 2021



续图 10

为 $8 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, XPAR 较 SPOL 偏强。SPOL 和 XPAR 探测中气旋涡度在各时次的对应关系较好, 为 $10 \sim 15 \text{ s}^{-1}$ 。

综上, 龙卷风暴在低层旋转速度和涡度最大, 表明近地层涡旋发展较强, 中气旋尺度较小, 平均直径约为 5 km , SPOL 0.5° 仰角中气旋直径在 4.3 km 以下, 结合清苑龙卷与雷达距离(距离石家庄 SPOL 约为 81 km), 根据 1998 年 Lee 等^[38]关于中气旋判断相关标准, 判断清苑龙卷中气旋为弱中气旋, 属于微型超级单体龙卷。

SPOL 在 15:36、15:42、15:48 连续 3 个时刻标记 TVS, 15:33—16:00 XPAR TVS 报警共 11 次。图 11 为 XPAR 探测 TVS 平均速度差、最低仰角速度差、最大速度差及所在高度、最大切变速度及所在高度和厚度分布曲线。由图 11 可见, 15:36—15:42 TVS 最为强盛, 表现为平均速度差、最低仰角速度差、最大速度差均较大, 最大切变速度大, 垂直伸展厚度约为 $2 \sim 4 \text{ km}$ 。随后最大切变速度减小, 其所在高度降低, 平均速度差等参数略有降低, 直至龙卷消亡。

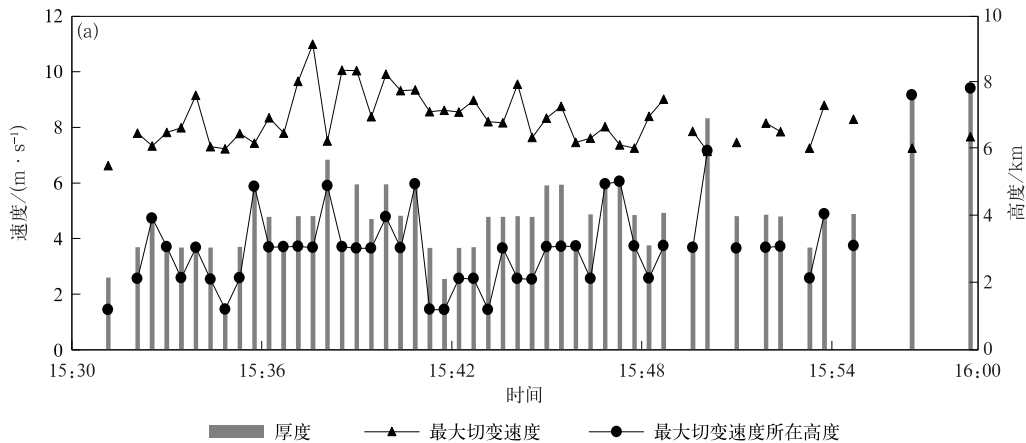
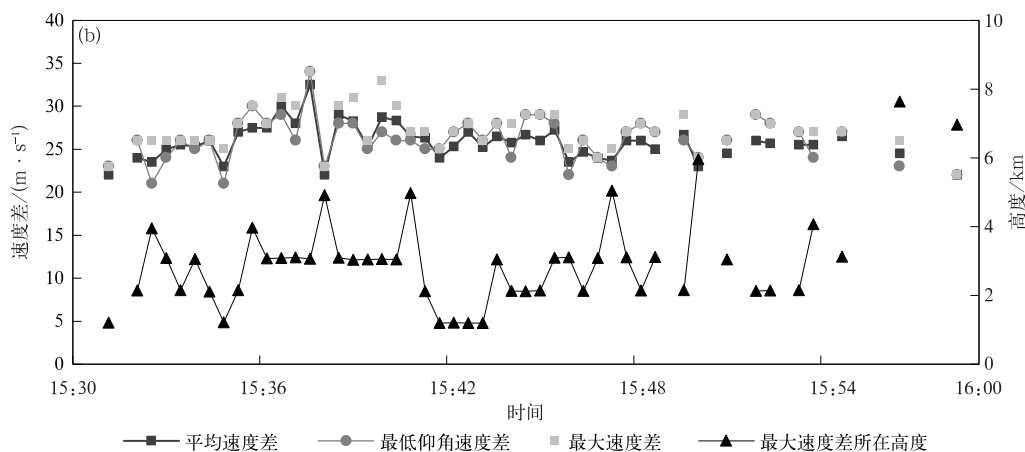


图 11 2021 年 7 月 21 日 XPAR 探测龙卷中气旋(a)及 TVS 参数(b)
Fig. 11 Mesocyclone(a) and TVS parameters(b) of XPAR on 21 Jul 2021



续图 11

3 小 结

1) 2021 年 7 月 21 日河北省保定市清苑区东吕村龙卷位于低涡东北象限横切变线顶端,地面受高压控制,且风向明显辐合、露点高和温度梯度大,同时清苑上空大气具备高温高湿特征,环境条件(抬升凝结高度低于 300 m,对流有效位能大于 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0 \sim 1 \text{ km}$ 高度风切变为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)具有发生龙卷的可能。

2) 龙卷出现在后向传播造成的单体合并形成的超级单体中,在钩状回波附近的平均径向速度图上存在中气旋,在 XPAR 回波图上可清晰看到钩状回波顶部分裂的强反射率因子核心自东南向西北移动,与龙卷位置对应关系较好。清苑龙卷属于微型超级单体龙卷(中气旋尺度为 $1.4 \sim 4.2 \text{ km}$),中气旋平均旋转速度为 $10 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,为弱中气旋,高层辐散明显,持续时间较短($30 \sim 35 \text{ min}$)。

3) SPOL 和 XPAR 对清苑龙卷位置、径向速度及风暴直径的探测结果较为一致。XPAR 回波顶比 SPOL 高约 6 km,且 XPAR 回波顶的峰值时段与风暴出现冲云顶特征的时段一致。但 XPAR 探测风暴反射率因子偏弱,最大反射率因子所在高度偏低,移速变化较大,最大值约为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。XPAR 在径向速度探测上表现为不同仰角中气旋最大正速度均高于 SPOL,二者最大负速度较为接近。

4) SPOL 和 XPAR 径向速度图上均可识别出明显中气旋,XPAR 的速度切变特征表现为狭长速度对。中气旋低层旋转速度和涡度最大,有利于中

层中气旋向下发展。中气旋从 2.6 km 高度下降至 1.2 km 高度,低仰角探测到紧邻的旋转速度对时,中气旋出现向下延伸($1.2 \sim 1.4 \text{ km}$)和迅速收缩(直径迅速收缩 $0.8 \sim 1 \text{ km}$),预示龙卷的发生。TVS 最强时段($15:36 \sim 15:42$)具有平均速度差大、最低仰角速度差大、最大切变速度大等特征。

致 谢:感谢中国气象科学研究院陈军民研究员、王红艳正高级工程师对论文的指导。

参 考 文 献

- [1] 俞小鼎. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京:气象出版社, 2006.
Yu X D. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [2] 冯佳玮, 闵锦忠, 庄潇然. 中国龙卷时空分布及其环境物理量特征. 热带气象学报, 2017, 33(4): 530-539.
Feng J W, Min J Z, Zhuang X R. The spatial and temporal distribution of Chinese tornados and their characteristics analysis of environmental physical variations. *J Trop Meteor*, 2017, 33(4): 530-539.
- [3] 白华, 袁潮, 潘晓, 等. 辽宁省温带气旋龙卷的环境参数特征. 应用气象学报, 2023, 34(1): 104-116.
Bai H, Yuan C, Pan X, et al. Environmental characteristics of extratropical cyclone tornados in Liaoning. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(1): 104-116.
- [4] 王一童, 王秀明, 俞小鼎. 产生致灾大风的超级单体回波特征. 应用气象学报, 2022, 33(2): 180-191.
Wang Y T, Wang X M, Yu X D. Radar characteristics of straight-line damaging wind producing supercell storms. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(2): 180-191.
- [5] 俞小鼎. 雷暴与强对流临近预报. 北京:气象出版社, 2020.
Yu X D. Thunderstorm and Strong Convection Prediction. Beijing: China Meteorological Press, 2020.
- [6] Johns R H, Doswell C A III. Severe local storms forecasting.

- Wea Forecasting*, 1992, 7(4):588-612.
- [7] Davies-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B. Tornadoes and tornadic storms. *Meteor Monogr*, 2001, 28:167-221.
- [8] Moller A R. Severe Local Storms Forecasting//Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society, 2001:433-480.
- [9] Goodnight J S, Chehak D A, Trapp R J. Quantification of QLCS tornado genesis associated characteristics, and environments across a large sample. *Wea Forecasting*, 2022, 37(11):2087-2105.
- [10] Wilson J W, Reum D. The flare echo: Reflectivity and velocity signature. *J Atmos Oceanic Technol*, 1988, 5(2):197-205.
- [11] Wilson J W, Roberts R D. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: Observational and modeling perspective. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(1):23-47.
- [12] Davies-Jones R. A review of supercell and tornado dynamics. *Atmos Res*, 2015, 158:274-291.
- [13] Fischer J, Dahl J M L, Coffe B E, et al. Supercell tornadogenesis; Recent progress in our state of understanding. *Bull Amer Meteor Soc*, 2024, 105(7):E1084-E1097.
- [14] Coffe B E, Parker M, Peters J, et al. Supercell low-level mesocyclones: Origins of inflow and vorticity. *Mon Wea Rev*, 2023, 151(9):2205-2232.
- [15] 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. 高原气象, 2009, 28(3):617-625.
Zheng Y Y, Zhu H F, Fang X, et al. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm. *Plateau Meteor*, 2009, 28(3):617-625.
- [16] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比. 应用气象学报, 2018, 29(1):70-83.
Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al. Contrastive analysis of two intense typhoon-tornado cases with synoptic and Doppler weather radar data in Guangdong. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(1):70-83.
- [17] 王宁, 王婷婷, 张硕, 等. 东北冷涡背景下一次龙卷过程的观测分析. 应用气象学报, 2014, 25(4):463-469.
Wang N, Wang T T, Zhang S, et al. Observation of a tornado in the circulation background of Northeast bold vortex. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(4):463-469.
- [18] 杨伟, 方阳, 蒋帅, 等. 2017年8月13日东洞庭湖水龙卷特征. 应用气象学报, 2020, 31(3):328-338.
Yang W, Fang Y, Jiang S, et al. Characteristics of the waterspout in East Dongting Lake on 13 August 2017. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3):328-338.
- [19] Parker M D. Composite VORTEX2 supercell environments from near-storm soundings. *Mon Wea Rev*, 2014, 142(2):508-529.
- [20] Coffe B E, Parker M D, Thompson R L, et al. Using near-ground storm relative helicity in supercell tornado forecasting. *Wea Forecasting*, 2019, 34(5):1417-1435.
- [21] Coffe B E, Taszarek M, Parker M D. Near-ground wind profiles of tornadic and nontornadic environments in the United States and Europe from ERA5 reanalyses. *Wea Forecasting*, 2020, 35(6):2621-2638.
- [22] Nixon C J, Allen J T. Distinguishing between hodographs of severe hail and tornadoes. *Wea Forecasting*, 2022, 37(10):1761-1782.
- [23] 傅佩玲, 胡东明, 黄浩, 等. 台风山竹(1822)龙卷的双极化相控阵雷达特征. 应用气象学报, 2020, 31(6):706-718.
Fu P L, Hu D M, Huang H, et al. Observation of a tornado event in outside-region of Typhoon Mangkhut by X-band polarimetric phased array radar in 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(6):706-718.
- [24] 徐珩, 邵美荣, 唐凯, 等. 2021年黑龙江两次超级单体龙卷过程多尺度特征. 应用气象学报, 2022, 33(3):305-318.
Xu Y, Shao M R, Tang K, et al. Multiscale characteristics of two supercell tornados of Heilongjiang in 2021. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(3):305-318.
- [25] 何彩芬, 姚秀萍, 胡春蕾, 等. 一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析. 应用气象学报, 2006, 17(3):370-375.
He C F, Yao X P, Hu C L, et al. Analyses on a tornado event in front of a typhoon. *J Appl Meteor Sci*, 2006, 17(3):370-375.
- [26] 郭飞燕, 刁秀广, 褚颖佳, 等. 弱垂直风切变环境下强下击暴流双偏振雷达特征. 应用气象学报, 2023, 34(6):681-693.
Guo F Y, Diao X G, Chu Y J, et al. Dual polarization radar characteristics of severe downburst occurred in weak vertical wind shear. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(6):681-693.
- [27] Browning K A. Cellular structures of convective storms. *Metro Mag*, 1962, 91:341-350.
- [28] Browning K A. The growth of large hail within a steady updraught. *Q J R Meteor Soc*, 1963, 89(382):490-506.
- [29] Browning K A. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J Atmos Sci*, 1964, 21(6):634-639.
- [30] 吴翀, 刘黎平, 汪旭东, 等. 相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响. 应用气象学报, 2014, 25(4):406-414.
Wu C, Liu L P, Wang X D, et al. The measurement influence of reflectivity factor caused by scanning mode from phased array radar. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(4):406-414.
- [31] 王超, 吴翀, 刘黎平. X波段双线偏振雷达数据质量控制方法. 高原气象, 2019, 38(3):636-649.
Wang C, Wu C, Liu L P. Data quality analysis and control method of X-band dual polarization radar. *Plateau Meteor*, 2019, 38(3):636-649.
- [32] 陈强, 柯杭, 赖绍钧, 等. 福州地区X波段相控阵雷达与S波段机械雷达回波数据对比分析. 海峡科学, 2022(12):7-12.
Chen Q, Ke H, Lai S J, et al. Comparative analysis of echo data between X-band phased array radar and S-band mechanical radar in Fuzhou Area. *Straits Sci*, 2022(12):7-12.
- [33] 张曦, 黄兴友, 刘新安, 等. 北京大兴国际机场相控阵雷达强对流天气监测. 应用气象学报, 2022, 33(2):192-204.
Zhang X, Huang X Y, Liu X A, et al. The hazardous convec-

- tive storm monitoring of phased-array antenna radar at Daxing International Airport of Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(2):192-204.
- [34] 张好晴, 张伟, 郑辉, 等. S波段-X波段雷达联合观测在厦门局地短时强降水过程中的应用分析. *气象与环境科学*, 2023, 46(4):85-94.
- Zhang Y Q, Zhang W, Zheng H, et al. Application analysis of S-POL-XPAR joint observation in local short-time heavy precipitation processes in Xiamen. *Meteor Environ Sci*, 2023, 46(4):85-94.
- [35] 苏永彦, 刘黎平. S波段双偏振雷达和X波段相控阵天气雷达中气旋识别结果对比. *气象*, 2022, 48(2):229-244.
- Su Y Y, Liu L P. Comparison of mesocyclone identification results between S-band dual polarization radar and X-band phased array weather radar. *Meteor Mon*, 2022, 48(2):229-244.
- [36] 郑永光, 朱文剑, 姚聘, 等. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计. *气象*, 2016, 42(11):1289-1303.
- Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County, Jiangsu Province. *Meteor Mon*, 2016, 42(11):1289-1303.
- [37] 章国材. 强对流天气分析与预报. 北京:气象出版社, 2011.
- Zhang G C. Analysis and Forecast of Severe Convective Weather. Beijing:China Meteorological Press, 2011.
- [38] Lee R R, White A. Improvement of the WSR-88D mesocyclone algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13(2):341-351.

S-band and X-band Radar Observation Characteristics of EF2 Tornado at Qingyuan of Baoding in 2021

Chen Xuejiao¹⁾²⁾³⁾ Hua Jiajia¹⁾³⁾ Pei Yujie⁴⁾ Wang Zhenchao¹⁾³⁾
Liu Shu¹⁾³⁾ Liu Shujun¹⁾³⁾ Wang Fuxia⁴⁾

¹⁾ (China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary
Layer Key Laboratory, Xiong'an New Area 070001)

²⁾ (Key Laboratory of Transportation Meteorology of CMA, Nanjing Joint Institute
for Atmospheric Sciences, Nanjing 210041)

³⁾ (Hebei Xiong'an New Area Meteorological Service, Xiong'an New Area 070001)

⁴⁾ (Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050000)

Abstract

Using multiple observations such as S-band radar (SPOL) in Shijiazhuang, X-band phased array radar (XPAR) in Xiong'an, and ground-based encrypted automatic stations, detection features and evolutions of EF2 tornado at Donglü Village, Qingyuan District of Baoding City Hebei Province on 21 July 2021 are studied. The tornado occurred within the center of high dew point values and in an area characterized by a significant temperature gradient. There are convergence lines within the center of high dew point temperatures and a temperature gradient zone. From perspectives of environmental conditions such as convective available potential energy (CAPE), 0–6 km vertical wind shear, and the lifting condensation level (LCL), there is a possibility for tornado occurrence. It is evident that the tornado formed within a low-vortex precipitation cloud system, showing significant divergence at high altitudes. The subsequent storm propagation leads to multiple single-cell mergers and a supercell formation. A significant reflectivity factor core moving from southeast to northwest is observed at the top of hook echo, corresponding to the tornado location. Both SPOL and XPAR detected continuous mesocyclones on average radial velocity images, with dimensions ranging from 1.4 to 4.2 km, and rotating speeds of 10–20 m · s⁻¹, indicating weak mesocyclones with short durations (30–35 min). During tornado development, a decrease in the lower angle detection of adjacent rotational speed pairs coincides with mesocyclone downward extension to 1.2–1.4 km and its diameter shrinking to 0.8–1 km, indicating tornado formation. Tornado storm parameters show maximum rotation speed and vorticity at low levels, promoting its intensification. Compared with XPAR storm parameters, SPOL features a larger maximum reflectivity factor (no less than 55 dBZ) and a greater distribution height (8–10 km). The consistency of SPOL and XPAR in detecting the tornado location, radial velocity, and storm diameter is compared. On the radar radial velocity image, there are pairs of positive and negative velocity values arranged symmetrically along the radial direction. The echo top of XPAR radar is approximately 6 km higher than that of SPOL radar, and the peak time of XPAR echo coincides with the storm's appearance. The tornado vortex signature (TVS) reaches its strongest period from 1536 BT to 1542 BT, extending vertically up to 2–4 km.

Key words: tornado; storm characteristic parameters; X-band phased array radar; mesocyclone