杨祖祥,李萌萌,王磊,等,2024.2023年9月19日阜宁致灾强龙卷多源观测分析[J]. 气象,50(12):1467-1479. Yang Z X,Li M M,Wang L, et al,2024. Analysis of multi-source observation of the disastrous tornado in Funing County on 19 September 2023 [J]. Meteor Mon,50(12):1467-1479(in Chinese).

2023年9月19日阜宁致灾强龙卷多源观测分析*

杨祖祥1 李萌萌2 王 磊3,4 徐 怡1 赵素蓉5

1 安徽省气象台,合肥 230031

2 安徽省人工影响天气办公室,合肥 230031

3 江苏省气象台,南京 210008

4 中国气象局水文气象重点开放实验室,北京 100081

5 国家气象中心,北京 100081

提要:2023年9月19日,黄淮和江淮地区自北向南出现了一次混合型强对流过程,并伴有多个龙卷。其中最强龙卷出现 在江苏盐城阜宁,达到强龙卷(EF3级)级别,距其1.2 km的童营村观测到41.8 m·s⁻¹(14级)极大风。利用地面观测资料、 探空资料、S波段双偏振雷达等资料对阜宁强龙卷进行分析。结果表明:本次龙卷发生于西太平洋副热带高压与低空切变线 之间的高温高湿辐合区中;低层锋面坡度较大,地面辐合线快速南移,配合极低的抬升凝结高度和对流抑制能量,较高的对流 有效位能和垂直风切变的环境条件有利于形成龙卷。阜宁龙卷是典型的强降水超级单体龙卷,具有钩状回波、有界弱回波区 和持久深厚的中气旋等特征,高耸倾斜的强回波伸展高度超过16 km。双偏振雷达观测到龙卷碎片特征(TDS)范围较大,表 明龙卷强度大、破坏强;龙卷发生前和维持阶段,受强垂直风切变影响,钩状回波中差分反射率(Z_{DR})弧与强差分传播相移率 (K_{DP})中心分离,形成的倾斜垂直环流有利于风暴维持和发展;TDS前侧出现低质心强降水回波,地面出现降水和降温后,Z_{DR} 弧和 Z_{DR}柱减弱消失,龙卷风暴快速减弱。

关键词:超级单体,冷池,双偏振雷达,龙卷涡旋特征,龙卷碎片特征

中图分类号: P445, P412 文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.070101

Analysis of Multi-Source Observation of the Disastrous Tornado in Funing County on 19 September 2023

YANG Zuxiang¹ LI Mengmeng² WANG Lei^{3,4} XU Yi¹ ZHAO Surong⁵

1 Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031

2 Anhui Weather Modification Office, Hefei 230031

3 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

4 CMA Hydro-Meteorology Key Laboratory, Beijing 100081

5 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: One mixed severe convection process which was accompanied by tornadoes, occurred in Huang-Huai Region (Yellow River and Huaihe River) and Jiang-Huai Region (Yangtze River and Huaihe River) from north to south on 19 September 2023. Funing strong tornado (corresponding to EF3) was the strongest tornado, which was 1.2 km away from Tongying Village where extremely strong wind of 41.8 m \cdot s⁻¹

^{*} 国家重点研发计划(2022YFC3004104)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J012)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2024-163)、中国气 象局水文气象重点开放实验室开放研究课题(23SWQXZ002)、安徽省气象局创新发展专项(YJG202302)和长江流域气象开放基金项目 (CJLY2022Y04)共同资助

²⁰²³年12月4日收稿; 2024年8月4日收修定稿

第一作者:杨祖祥,主要从事强对流天气和气象雷达应用研究.E-mail:yangzuxiang1@sina.com

通讯作者:赵素蓉,主要从事强对流天气研究. E-mail:srzhao@cma.gov.cn

(Scale 14) was observed. Based on the data from ground automatic weather stations and sounding stations, data from S-band dual-polarization radar, we analyze the Funing strong tornado in this paper. The results show that the tornado occurred in the strong warm and moist zone between the subtropical anticyclone and the low-level shear line. The slope of low-level front was large. The convergence line moved southward on the ground rapidly, combined with extremely low height of lifting condensation, low convective inhibition, high convective available potential energy and vertical wind shear. These conditions were favorable for the formation of tornadoes. The Funing strong tornado was a typical severe rainfall supercell tornado, characterized by hook echo, bounded weak echo region and deep strong meso-cyclone. The high, slanting, strong echo extended to the height over 16 km. Tornado debris signature (TDS) observed by dual-polarization radar was wide, indicating the tornado was strong and destructive. Affected by strong vertical wind shear, the differential reflectivity ($Z_{\rm DR}$) arcs separated from the strong specific differential phase ($K_{\rm DP}$) center in the hook echo, and the inclined vertical circulation was conducive to the maintenance and development of the storm. Heavy precipitation echo with low centroid appeared in the front of TDS. After rainfall and temperature cooling appeared on the ground, $Z_{\rm DR}$ arcs and $Z_{\rm DR}$ columns weakened and disappeared, and then the tornado weakened rapidly.

Key words: supercell, cold pool, dual-polarization radar, tornado vortex signature (TVS), tornado debris signature (TDS)

引 言

龙卷表现为雷暴云底向下伸展到地面的漏斗 云,伴随小尺度的剧烈旋转风,具有尺度小、生命期 短、突发性强、破坏性极大等特点。由于其很难被常 规观测手段捕捉到,因此预报预警难度非常大,常造 成严重的人员伤亡和财产损失(Davies-Jones et al, 2001; Doswell III, 2001; 俞小鼎等, 2006; 郑永光等, 2016)。龙卷一般分为超级单体龙卷和非超级单体 龙卷(Browning and Foote, 1976), 其中超级单体龙 卷常发生于强垂直风切变环境下,即强烈的垂直不 稳定、较低的抬升凝结高度和中高层强垂直风切变 (俞小鼎等,2008;郑媛媛等,2009;周海光,2018),这 类龙卷强度一般强于非超级单体龙卷。龙卷在我国 是一种低概率、高影响天气,强龙卷主要发生于华南 地区、东部平原地区和东北平原地区(范雯杰和俞小 鼎,2015;王秀明等,2015)。我国幅员辽阔,南北差 异较大,产生龙卷的环流背景和物理量参数差异明 显。东北地区的龙卷大多发生在冷涡背景下,大气 温度垂直递减率和垂直风切变较大,低层大气的水 汽含量和湿层厚度比华东和华南显著偏低,边界层 辐合线常表现为干线(王秀明等,2015;才奎志等, 2022;袁潮等,2023)。郑永光等(2020)对辽宁开原 EF4级强龙卷研究指出,强度适宜的冷池有利于龙 卷产生,当冷池温差大于 7℃则不利于近地面垂直

涡旋维持。华南地区 EF2 级以上强龙卷主要发生 在台风外围雨带中,位于台风中心的东北象限,且其 中气旋尺度和垂直伸展高度低于西风带超级单体龙 卷(白兰强等,2020)。台风强龙卷的发生条件与弱 龙卷相比,一般具有更强的深层、低层垂直风切变与 风暴相对螺旋度(黄先香等,2019b)。苏皖平原地 区也是龙卷高发区之一,龙卷常发生于梅雨期和台 风螺旋雨带中。这两类天气系统中除了不稳定能 量、充足的水汽和触发机制等普通雷暴所需条件,还 具有较低的抬升凝结高度、低层强垂直风切变(尤其 是 0~1 km 垂直风切变)和较小的对流抑制能量等 环流背景(Brooks et al, 2003; Grams et al, 2012; 张 小玲等,2016;王磊等,2023)。姚叶青等(2012)和曾 明剑等(2016)对江淮地区梅雨期龙卷观测分析指 出,地面中尺度强气旋右侧、低空低涡右下方和低空 急流左后侧之间的区域是龙卷的高度关注区。

新一代多普勒天气雷达可以获得高时空分辨率 资料,填补常规地面观测的不足,为有效的龙卷预报 预警提供了可能。研究表明钩状回波、中气旋、龙卷 涡旋特征(TVS)等雷达特征对龙卷的形成、发展和 预警有重要价值(吴芳芳等,2012;周后福等,2014; 黄先香等,2019a)。TVS在雷达径向速度图上表现 为相邻速度对结构,利用速度对的强度、水平尺度、 伸展高度和持续时间等作为指标,同时结合中气旋 特征,可以明显提高龙卷发生的监测概率(Brown et al,1978)。我国S波段双偏振雷达改造完成后, 增加了双偏振参量,进一步提高了空间分辨率,可以 更加细致地探测到强风暴云雨团参数和内部结构, 如双偏振雷达探测到强反射率因子、低差分反射率 和低相关系数的龙卷碎片特征时,基本可以确定地 面龙卷的发生(Kumjian and Ryzhkov,2008;张建云 等,2018;李彩玲等,2019;杨祖祥等,2021)。

2023年9月19日,江苏北部发生多个龙卷,有 三个龙卷被观测到,分别位于宿迁市南蔡乡、宿迁市 大兴镇和盐城市阜宁县童营村。不同于我国常见的 龙卷——梅雨期龙卷、台风龙卷和冷涡龙卷(郑永 光,2020),此次龙卷过程发生在西太平洋副热带高 压(以下简称副高)边缘,海平面气压较高,与苏皖平 原常见龙卷天气形势有所区别,并且该区域有记录 以来9月中下旬从未出现过龙卷,非常罕见。本文 重点针对阜宁强降水超级单体强龙卷(EF3级),对 其发生、发展和消亡过程中对应的双偏振雷达观测 特征进行分析,以加深对此类龙卷的认识,从而提高 龙卷监测识别和临近预报能力。

1 资料

本文使用资料包括 2023 年 9 月 19 日(1)20:00 (北京时,下同)常规高空观测资料和射阳探空站资 料;(2)17:00—23:00 地面自动气象站逐 5 min 观 测数据,包括气压、气温和降水量;(3)17:00—23:00 宿迁和盐城多普勒天气雷达资料,时间分辨率为 6 min,空间分辨率为 0.25 km×1°。观测站点分布 见图 1。

2 龙卷实况

2023年9月19日傍晚至夜间,黄淮和江淮地





区自北向南出现一次大范围混合型强对流过程。地 面自动气象观测站显示有大范围短时强降水天气, 最大雨强(95.5 mm \cdot h⁻¹)出现在淮安涟水南集镇: 多个站点出现8级以上雷暴大风,其中阜宁强龙卷 TVS 路径附近出现 3 个站次 10 级以上大风,最强 为阜宁童营村 41.8 m • s⁻¹(14 级)(图 2a),该站距 龙卷约1.2 km。实况观测和灾情调查显示,江苏北 部发生的部分龙卷涂经城镇、村落等居民聚集区,造 成10人死亡、多人受伤,给当地群众生命财产和公 共安全等造成严重伤害。阜宁龙卷发生于 20:20 左 右,国家气象中心和江苏省气象局联合调查发现居 民区有砖木混合结构的房屋倒塌,龙卷途经的厂房 遭到严重破坏(图 2b),据此认定此次龙卷强度达到 强龙卷级别(EF3级)。以下将主要对阜宁龙卷的环 流背景、物理量和双偏振雷达观测演变特征进行分 析。





图 2 2023 年 9 月 19 日阜宁龙卷(a) TVS 路径和(b) 灾情航拍照片

Fig. 2 (a) TVS path and (b) disaster aerial photo of Funing tornado on 19 September 2023

3 龙卷过程分析

3.1 环流背景

阜宁龙卷发生在副高边缘(图 3a),苏皖北部上 空受低空暖式切变线影响,9月19日20:00,700、 850和925hPa切变线接近,中低层锋面坡度大,动 力抬升条件较好;切变线南侧风向、风速辐合明显, 为暖湿辐合区;低层切变线两侧等温线密集,百千米 气温差超过4℃,冷暖空气交汇剧烈。宿迁雷达反 演的风廓线水平风场时间演变(图 3b)显示,18:00 左右0.3 km高度上的风场由东南风经偏西风转为 西北风;低空0.3~1.5 km风向随高度逆转,出现 冷平流,即近地面及低层冷锋锋面逐渐经过宿迁雷 达站。盐城雷达反演的风廓线水平风场时间演变 (图 3c)显示,低层维持较强的偏南风,4 km以下风 向随高度顺转明显,有较强的暖平流;20:00 低空风 速逐渐增强到 14 m·s⁻¹,超低空急流建立并加强, 暖湿空气输送趋于加强。曾明剑等(2016)、戴建华 等(2021)对华东梅雨期龙卷环流背景分析发现,梅 雨期龙卷发生于地面准静止锋附近,低空切变线北 侧有弱冷平流,低空急流左后侧是龙卷的高度关注 区。而此次阜宁龙卷发生于秋季副高边缘,海平面 气压较高,中低层水平温度梯度较大,地面锋面移速 较快,环流形势与梅雨期环流形势有一定差异,但与 姚叶青等(2012)总结的第一类龙卷概念模型相似 (主要发生于 5 月、6 月,500 hPa 低槽后有强冷空气 南下,锋区密集,中低层有低槽或切变线),此类龙卷 较为少见。

3.2 探空资料

我国超级单体龙卷与低抬升凝结高度和低层强 垂直风切变对应较好,但不同地区产生的超级单体 龙卷物理量参数也有较大差异。分析 19 日 20:00 龙卷发生地附近探空站的 *T*-ln*p* 图(图 4)发现,此





图 3 2023 年 9 月 19 日(a)20:00 阜宁龙卷中尺度分析,17:00-21:00(b)宿迁、 (c)盐城雷达反演的风廓线水平风场(风羽)

Fig. 3 (a) Mesoscale analysis of Funing tornado at 20:00 BT, and (b, c) the retrieved horizontal wind (barb) of wind profiles by (b) Suqian Radar and

(c) Yancheng Radar from 17:00 BT to 21:00 BT 19 September 2023



注:绿色阴影为相对湿度大于 80%的区域。



次龙卷发生时大气环境具有高温、高湿、高能的特点:整层大气接近饱和,中低层大气的温度露点差低于 2℃,尤其是地面气温达 26.5℃,露点温度达 26.3℃,抬升凝结高度仅为 27.8 m,远低于国内外 各类龙卷抬升凝结高度的指标;925 hPa 比湿达到 18.6 g•kg⁻¹,低空水汽充足,与梅雨期龙卷低空水 汽条件相仿(王磊等,2023);对流有效位能(CAPE)达到 2270.6 J•kg⁻¹,超过苏皖地区龙卷发生时所需 的平均值(姚叶青等,2012),对流抑制能量(CIN)只有 0.1 J•kg⁻¹;相比于不稳定能量,龙卷对较低的 抬升凝结高度和低层垂直风切变更加敏感(Brooks et al,2003;杨波等,2019),射阳站 0~1 km 垂直风 切变约 10.9 m•s⁻¹,0~6 km 垂直风切变达到 21.9 m•s⁻¹,略低于吴芳芳等(2013)对苏北龙卷统 计分析结果。

3.3 地面自动站资料

沿淮地区存在地面辐合线,龙卷发生前地面气 温达到 27~28℃,露点温度为 27℃左右,接近饱和, 为显著的高温高湿区。图 5 为龙卷移动路径前后侧 涟水站和苏嘴镇站的 5 min 气温、气压和降水量,两 站相距 18 km(图 2a)。19:40 左右强对流开始影响 涟水站,该站气压为 1006.8 hPa,气温为 27.2℃。 随后出现强降水,10 min 降水量达到 21 mm;气压 迅速升高,20 min 升高 2 hPa,20:00 气压达到 1008.8 hPa;气温迅速下降,10 min 降温 2.6℃。涟 水站发生强降水时,苏嘴镇站位于雷暴高压前侧, 19:45 气压为 1006.7 hPa,而后迅速下降,20:00 最 低,降为 1005.6 hPa。与近年江苏龙卷发生时地面 特征相比,气压明显偏高,但变温和变压幅度相仿 (慕瑞琪等,2021;王磊等,2023)。19:58—20:10,雷



苏嘴镇站气压、气温和 5 min 降水量的时间演变 Fig. 5 Time series of pressure, temperature and 5 min precipitation at Lianshui Station and Suzui Town Station from 19:00 BT to 21:00 BT 19 September 2023

达探测到的 TVS 位于涟水站和苏嘴镇站之间 (图 2a),20:00 两站气压差值最大 3.2 hPa,温差达 到2.7℃(图5)。此时雷暴移动路径前侧有高温高 湿区,伴随局地气压陡降和风场辐合;风暴后侧出现 强降水,气压陡升、气温陡降,产生冷池和高压中心; 风暴前后侧温度梯度和气压梯度增强,近地面冷空 气渗透叠加雷暴高压产生的冷池密度流,有利于辐 合线前侧对流触发和增强。风暴后侧的下沉气流和 冷池对龙卷的生成至关重要,其与环境生成的温差 有利于近地面垂直涡度发展,通过上升和下沉运动 使得水平涡度在倾斜和拉伸作用下生成垂直涡度, 从而产生龙卷涡旋(Davies-Jones et al, 2001)。 20:23 以后, 雷暴移向前侧的板湖镇开始产生强降 水(图 2a),在 20:45 前的 15 min 内降水量达 18 mm,降温 1.9℃(图略)。Wurman et al(2007)指 出龙卷生成前首先要存在后侧下沉气流,但当后侧 下沉气流完全包裹在龙卷周围时则使龙卷消亡。此 时龙卷前侧邻近位置的强降水和降温产生冷池和下 沉气流,破坏了龙卷风暴前侧低层暖湿环境和垂直 环流,不利于龙卷风暴的维持和发展。

综合分析来看,苏皖北部位于副高边缘北侧,低 空切变线水平位置接近,锋面坡度较大,垂直度较 高;但地面辐合线(锋线)位于沿淮地区,与 925 hPa 切变线距离超过 120 km;地面辐合线及其北侧上空 为偏南暖湿平流辐合区。对流风暴在低空切变线南 侧高温、高湿、高能辐合区内发展,水汽和能量充足, 配合极低的抬升凝结高度和 CIN、较高垂直风切变, 有利于形成龙卷。龙卷触地之前,TVS 位于涟水站 和苏嘴镇站之间时,两站气压和温差值分别达到 3.2 hPa 和 2.7℃;龙卷风暴前侧为暖湿区和低压辐 合区,后侧为冷池和高压中心,斜压作用加强近地面 的水平顺流涡度,通过上升和下沉运动,使得水平涡 度在倾斜和拉伸作用下生成垂直涡度,是有利于形 成龙卷的一个近地面机制。

4 双偏振雷达产品分析

4.1 雷达回波和龙卷涡旋演变特征

阜宁龙卷单体最早生成于泗阳县,初生时对流 范围较小,强度较弱,而后向东偏南移动过程中不断 增强,最后龙卷发生于阜宁县童营村附近(图 6a₁)。 为了详细分析强降水超级单体发生、发展和移动的 变化特征,选取 33.43°~34.23°N、118.65°~ 119.85°E范围(图 6a₁,6b₁和图 7a₁~7d₁)基本反射 率因子($Z_{\rm H}$),并将反射率因子图中方框所示区域径 向速度、差分反射率因子($Z_{\rm DR}$)、相关系数(CC)和差 分传播相移率($K_{\rm DP}$)等产品放大显示,以便更清晰 地分析龙卷附近风场旋转特征和双偏振参量特征。 18:40,宿迁雷达(图 6a₁)中单体 A 最强反射率因子 为 52 dBz,0.5°仰角的径向速度图中有弱风速辐合 (图 6a₂);抬高仰角,表现为一致的西南风。 $Z_{\rm H}$ 剖面 (图 6a₃)显示,单体 A 的质心非常低,伸展高度也不高,30 dBz 伸展高度约 5 km;倾斜较为明显,出现回 波悬垂,此时单体处于初生发展阶段。随后单体 A 快速地东移发展,19:15 与东北侧单体 B 合并 (图 6b₁),最强 $Z_{\rm H}$ 达到 58 dBz 以上;径向速度图中 观测到逆时针旋转辐合风场(图 6b₂),宿迁雷达和 淮安雷达均首次观测到较弱的龙卷 TVS 切变速度 对; $Z_{\rm H}$ 剖面(图 6b₃)的强度、范围、伸展高度等比之 前时刻均有明显增强,出现了悬空的高 $Z_{\rm H}$ 核心, 40 dBz 回波伸展到 12 km 高空。

之后几个时次切变速度对时有时无,但中尺度 旋转风场逐渐加强。19:46,对流风暴移至淮安区和 涟水县交界处,盐城雷达 0.5°仰角观测显示有钩状 回波(图 7a₁)。0.5°仰角径向速度图中有中气 旋(图 7a₂),直径约7.0 km(表1),旋转速度达到



注:蓝色实线为 45 dBz 基本反射率因子等值线;红色折线为 TVS 路径;三角为阜宁龙卷位置;黑色方框为 径向速度和双偏振参量产品的放大区域;红线为自西北向东南的垂直剖面位置;字母为对流单体。

图 6 2023 年 9 月 19 日宿迁雷达 0.5°仰角的(a₁,b₁)基本反射率因子(填色),(a₂,b₂)径向速度(填色), 及(a₃,b₃)分别沿图 6a₁,6b₁ 中红线的基本反射率因子(填色)剖面

Fig. 6 (a₁, b₁) Basic reflectivity factor (colored), (a₂, b₂) radial velocity (colored) at 0.5° elevation of Suqian Radar and (a₃, b₃) cross-section of basic reflectivity factor (colored) along the red line in Figs. 6a₁ and 6b₁ respectively on 19 September 2023



注:蓝色实线为 45 dBz 基本反射率因子等值线;三角为 TVS 位置;黑色方框为径向速度 和双偏振参量产品的放大区域;红线为自西北向东南的垂直剖面位置;圆圈为中气旋位置。

图 7 2023 年 9 月 19 日盐城雷达 0.5°仰角的(a₁~d₁)基本反射率因子(填色),(a₂~d₂)径向速度(填色), 及(a₃~d₃)分别沿图 7a₁~7d₁ 中红线的基本反射率因子(填色)剖面 Fig. 7 (a₁-d₁) Basic reflectivity factor (colored), (a₂-d₂) radial velocity (colored) at 0.5° elevation of Yancheng Radar and (a₃-d₃) cross-section of basic reflectivity factor (colored) along the red line in Figs. 7a₁-7d₁ respectively on 19 September 2023

19.0 m • s⁻¹,底高约 1.4 km,并开始稳定识别出 TVS,此刻 TVS 切变速度为 25.0 m • s⁻¹,回波顶 有明显的风场辐散。 $Z_{\rm H}$ 剖面分析(图 7a₃)发现,钩 状回波头部前侧出现有界弱回波区和回波悬垂,悬 垂中有超过60 dBz 的强 Z_H核心,并且强回波伸展 高度非常高,40 dBz 回波伸展高度达到16 km;雷达 识别出的 TVS 位于近地面层强回波和弱回波之间 的反射率因子强梯度区内。20:04,TVS 切变速度

跃增到 50.5 m \cdot s⁻¹,此后连续 6 个体扫识别出切 变速度超过 40 m • s⁻¹的 TVS(表 1)。20:10,超级 单体东移发展(图 7b₁),钩状回波头部附近的中气 旋旋转速度达到 28.5 m \cdot s⁻¹, 直径缩小至 5.0 km, 观测到的中气旋底高为1.1 km,受探测仰角和距离 影响,实际高度可能更低;Z_H剖面中强回波倾斜向 上伸展(图 7b₃),40 dBz 回波伸展高度维持 16 km 左右,回波悬垂仍然存在;钩状回波前部出现宽广的 强回波悬垂,此处的回波悬垂并非对流单体倾斜形 成,而是低层暖湿环境中形成的低质心暖云降水回 波。图 3c 显示,18:00-20:00 盐城雷达站上空 0.9 km 及以下高度的风速逐渐增强到 14 m \cdot s⁻¹,超低空 急流建立并增强;而宿迁雷达站上空 0.9 km 高度 为西偏南风,风速约6m·s⁻¹,水平辐合出现在超 低空近饱和的暖湿空气中,产生龙卷风暴前侧的低 质心降水云团。此后超级单体维持并向东偏南移 动,20:16 深厚的强中气旋最强旋转速度达 35.5 m· s^{-1} (图 7c₂),直径最小达到 3.0 km。随着中气旋直 径缩小,垂直涡度增强,底高降低,使得龙卷维持和 增强,TVS 切变速度最大达到 59.0 m · s⁻¹。强龙 卷涡旋维持时间较长,20:41 开始减弱,TVS 切变 速度降低到 29.5 m · s⁻¹,但中气旋旋转速度仍达 到 20.0 m • s⁻¹(图 7d₂),直径扩大到 6.0 km; $Z_{\rm H}$ 产 品显示(图 7d₁)钩状回波消失。剖面图分析显示, 高耸倾斜的强 Z_H维持到 20:41 后减弱、坍塌 (图 7c₃,7d₃),45 dBz 强回波顶高降至 5 km 左右, 龙卷 TVS 切变速度也显著降低(表 1)。超级单体 前侧低质心暖云回波的高度和质心持续降低 (图 7d₃),并产生强降水。

4.2 龙卷风暴的双偏振参量特征

盐城双偏振雷达距阜宁龙卷发生地约为 70 km,距离适中,龙卷移动方向接近雷达径向方 向,对龙卷风暴演变特征观测效果较好,故使用盐城 雷达观测数据对龙卷风暴进行详细研究。

19:46,钩状回波头部前侧的弱回波区中出现 ZDR 弧(图 8a1),中心最大值达 5.65 dB;钩状回波头部 CC 值高于 0.97 (图 8a₂), 较高的 CC 值持续到 20:04(表 1),即风暴中以液态降水粒子为主,而强 ZDR表明此处以扁平的大雨滴为主,对应强烈的上升 气流。钩状回波尾部区域有大范围 K_{DP} 大值区 (图 8a₃),中心值超过 3.9°•km⁻¹,超级单体内液 态降水粒子较多,后侧出现强降水,涟水陈师站 19:30-19:45 降水量达 35 mm。强降水区多伴有 下沉气流,此时 Z_{DR}弧的位置与强 K_{DP}中心分离,低 层水平辐合和上升气流在较强的垂直风切变作用 下,小粒子被风暴环流输送到风暴核心区,向后侧斜 升碰并下落聚集,形成降水粒子的"分选机制"(管理 等,2022)。Z_{DR}柱倾斜向上伸展(图 9a₁),1 dB 伸展 高度达到8km,可以定位对流单体的上升气流区, 表明风暴内部上升气流的强度增强、高度增高,预示 着风暴会迅速发展(Ryzhkov et al, 1994; 刁秀广等, 2021),并且伸展高度较高的强上升运动有利于水平 涡度转换为垂直涡度。

20:10,超级单体头部的双偏振参量出现显著变 化, Z_{DR} 产品显示 TVS及其附近格点为低值区域; TVS周边出现环状大值区(图 8b₁), Z_{DR} 值跃增超过 1.5 dB,最大达到 3.5 dB; Z_{DR} 剖面显示(图 9b₁), TVS附近出现 Z_{DR} 低值柱。同时 CC 产品在 TVS 附近观测到水平尺度约 3°×3 km 范围的低值区 (图 8b₂),中心极低值从 0.98 陡降为 0.55(表 1); CC 产品剖面(图 9b₂)表现为显著低值柱,伸展高度 较高。该时刻低空首次出现龙卷碎片特征(TDS), 其是由大尺度碎屑、形状不规则、运动较为杂乱和高 介电常数等因素导致,表现为高 Z_{H} (图 7b₁,7b₃)、低 Z_{DR} (图 8b₁,图 9b₁)和异常低的 CC(图 8b₂, 图 9b₂)。TDS的出现表明已经有龙卷接地并将地 面杂物卷到空中,在龙卷监测预警业务中具有重要

表 1 2023 年 9 月 19 日盐城双偏振雷达龙卷特征量 Table 1 Tornada characteristics of Vanchang Dual-Polarization Padar on 19 Sontember 2023

Table 1 Tornado characteristics of Tableheng Duar Fotarization Radar on 19 September 2025											
特征量	19:46	19 : 52	19:58	20:04	20:10	20:16	20:23	20:29	20:35	20:41	20:47
中气旋旋转速度/(m・s ⁻¹)	19.0	20.5	20.0	30.5	28.5	35.5	27.5	25.5	22.5	20.0	15.5
中气旋直径/km	7.0	6.5	5.5	5.5	5.0	3.0	3.0	4.0	4.5	6.0	5.5
中气旋底高/km	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8
TVS 切变速度/(m・s ⁻¹)	25.0	25.0	21.0	50.5	43.5	59.0	54.5	47.5	40.0	29.5	22.0
$Z_{ m DR}/ m dB$	2.0	2.0	2.3	1.2	-3.4	-2.8	-1.6	-1.6	-1.4	-0.7	1.3
CC	0.99	0.97	0.96	0.98	0.55	0.68	0.73	0.71	0.67	0.74	0.96

注:中气旋旋转速度、直径和底高均为雷达最低仰角探测数据;ZDR和 CC 为 TVS 相邻格点最低值。



注:蓝色实线为 45 dBz 基本反射率因子等值线;三角为 TVS 位置。

图 8 2023 年 9 月 19 日盐城雷达 0.5°仰角的 $(a_1 \sim d_1)Z_{DR}(填色), (a_2 \sim d_2)CC(填色), (a_3 \sim d_3)K_{DP}(填色)$ Fig. 8 $(a_1 - d_1)Z_{DR}$ (colored), $(a_2 - d_2)CC$ (colored) and $(a_3 - d_3)K_{DP}$ (colored) at 0.5° elevation of Yancheng Radar on 19 September 2023

作用,尤其是龙卷发生在强降水区或夜间等视觉不易观测到的时候,可以辅助确认龙卷发生和位置 (Ryzhkov et al,2002;张建云等,2018)。图 2b 为阜 宁龙卷触地位置,当地厂房屋顶有大片彩钢瓦被破 坏,导致迅速产生大范围的 TDS。20:16, TDS 水平 范围达到最大(图 8c₁,8c₂),包含约 5°×4 km 的扇形 区域,水平尺度明显大于杨祖祥等(2021)分析的 2020 年梅雨期 EF2 级龙卷,也超过黄先香等 (2019c)研究的台风 EF3 级龙卷,表明阜宁龙卷强 度和破坏可能更强。TDS 前侧 Z_{DR} 礁和 Z_{DR} 柱强度 达到最强,中心值超过 4 dB。20:10 和 20:16 的 TDS 特征最明显,受被卷起的地物碎片分布影响, TDS 中的 Z_{DR}范围和大小随机性较大,导致强 Z_{DR} 区域内出现低值中心;而 TDS 前侧的 Z_{DR}弧和 Z_{DR} 柱则反映出非常强烈的上升运动,使得龙卷风暴的 强度维持或加强。TDS 特征持续存在约 6 个体扫, CC 值均低于 0.74(表 1),表现为非气象回波,滞后 于强 TVS 切变速度对 1 个体扫。

20:23 之后, TDS 前侧 Z_{DR}强度开始减弱,且其 伸展高度和水平范围逐渐降低。20:41 以后,龙卷 风暴中气旋强度和 TVS 切变速度迅速减弱, TDS 特征范围缩小, 仅出现于最低仰角近地面附近



注:蓝色实线为 45 dBz 基本反射率因子等值线;三角为 TVS 位置。

图 9 2023 年 9 月 19 日盐城雷达 $(a_1 \sim d_1)Z_{DR}($ 填色), $(a_2 \sim d_2)CC($ 填色),

(a₃~d₃)K_{DP}(填色)分别沿图 7a₁~7d₁ 中红线的剖面

Fig. 9 Cross-sections of $(a_1 - d_1) Z_{DR}$ (colored), $(a_2 - d_2) CC$ (colored) and $(a_3 - d_3) K_{DP}$

(colored) along the red line in Figs. $7a_1-7d_1$ respectively of Yancheng Radar on 19 September 2023

(图 8d₁~8d₃和图 9d₁~9d₃)。20:47 CC 值恢复至 0.96(表 1),风暴中非气象回波减弱消失。值得注 意的是,探空资料显示 0℃层位于 4.6~5.1 km (图 4),0℃层附近冰相粒子在下降过程中融化,粒 子属性不一,在融化层顶部和底部之间形成 CC 低 值带(图 9 $a_2 \sim 9d_2$),即融化层亮带(夏凡等,2023;杨 祖祥等,2019)。结合 Z_H (图 7 c_3)和 K_{DP} (图 9 c_3)可 见,20:16 超级单体钩状回波的头部前侧出现低质 心、暖云降水强回波,地面观测显示龙卷运动方向前 侧的板湖镇(图 2a)15 min 降水量达 18 mm,气温下 降 1.9℃。强 Z_H和 K_{DP}核心从融化层附近快速下降,表征较强的下沉气流(Kuster et al,2021)。龙 卷前侧出现冷池和下沉气流,对龙卷风暴减弱有一 定影响。

综合分析表明,盐城雷达19:46 已经观测到龙 卷 TVS 切变速度对,但此时距离较远,切变速度较 小,中气旋直径较大且旋转速度不强;而后中气旋直 径缩小,旋转加强,底高降低。20:04 TVS 切变速 度跃增,低层大气旋转剧烈,钩状回波头部前侧出现 Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱, 对流单体强回波伸展高度达到 18 km 以上。20:10 出现显著 TDS 特征,并且碎片 区域大、伸展高度高,表明龙卷已经接地并造成严重 灾害。龙卷灾调显示,龙卷途经村庄居住区,有平房 整体受损、厂房顶部彩钢瓦被卷起、树木折断倒伏等 灾情,剧烈的旋转和上升运动将地面复杂物体卷到 空中并被双偏振雷达探测到,从而形成较大范围的 TDS 特征。较强的 TVS 切变速度、大范围的 TDS、 较长的持续时间,体现了此次龙卷过程强度大、破坏 力强。龙卷减弱消失前,在龙卷移动路径前侧有低 质心强降水回波快速生成发展,而后在地面观测到 强降水和降温;同时融化层附近强 Z_H和 K_{DP}质心快 速下降,伴随的下沉气流扰乱了龙卷风暴前侧的上 升气流,破坏垂直环流,对龙卷风暴减弱有一定影 响。

5 结论和讨论

2023年9月19日,黄淮和江淮地区自北向南 出现了一次混合型强对流过程,以短时强降水为主, 伴有雷暴大风和多个龙卷。阜宁强龙卷过程是一次 发生在秋季副高边缘的强降水超级单体龙卷,且近 年来9月中下旬当地尚未有龙卷过程记录,非常罕 见。利用高密度地面观测站资料、探空资料、S波段 双偏振雷达资料等,对阜宁强龙卷过程进行分析,并 探讨此次强龙卷天气的发生、发展和消亡过程对应 的双偏振雷达观测特征。结果表明:

(1)阜宁强龙卷发生于副高与低空切变线之间 的高温高湿辐合区中。低空锋面坡度大,冷暖空气 交汇剧烈,水汽条件和抬升条件较好,是发生于秋季 副高边缘的罕见龙卷天气过程。极低的抬升凝结高 度和 CIN、较高的能量和垂直风切变的配置符合有 利于龙卷形成的环境条件;风暴后侧出现强度适宜 的冷池和雷暴高压,也是有利于龙卷近地面涡旋增

强的一个重要机制。

(2) 阜宁强龙卷超级单体发展迅速,盐城雷达观 测到钩状回波、有界弱回波区、持久深厚的强中气旋 等特征,40 dBz 高耸倾斜的强回波伸展高度超过 16 km,提前 24 min 能稳定识别出 TVS;超级单体 前侧生成低质心暖云强降水回波,其产生的强降水 和降温对龙卷风暴减弱有一定影响。

(3)双偏振雷达观测到异常的低 Z_{DR}、低 CC 和 强 Z_H的 TDS 特征,其影响范围较大、持续时间较 长,表明龙卷过程强度大、破坏强。龙卷产生前和维 持阶段,钩状回波头部出现环状或弧状的 Z_{DR}高值 区,垂直方向上出现 Z_{DR}倾斜柱,对应于风暴头部的 强上升区;伸展高度较高的强上升运动有利于水平 涡度转换为垂直涡度。强垂直风切变使得风暴前侧 上升运动与后侧下沉运动分离,表现为 Z_{DR}弧与强 K_{DP}中心分离,其有利于风暴强度维持和发展。龙 卷风暴前侧强降水发生后,头部 Z_{DR}弧和 Z_{DR}柱消 失,龙卷强度减弱并逐渐消散。

与实况相比,全球模式9月18日20:00起报的 19日20:00射阳站近地面水汽条件、能量条件、抬 升条件、垂直风切变、风暴相对螺旋度等相对偏弱, 整体条件不是很有利于龙卷产生,使得短期预报时 效内对此类极端天气事件的预报较为困难。19:15 首次在阜宁龙卷单体中识别出TVS,20:20左右地 面观测到龙卷实况,TVS预警比实况提前约1h; 19:46开始稳定识别出TVS,20:00之后有多部雷 达同时识别出TVS,雷达稳定识别的TVS和TDS 等对对流风暴下游地区有明确的警示作用。

参考文献

- 白兰强,孟智勇,Sueki K,等,2020.中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006—2018)[J].中国科学:地球科学,50(5):619-634.Bai L Q,Meng Z Y,Sueki K,et al,2020.Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018[J].Sci China Earth Sci,50(5):619-634(in Chinese).
- 才奎志,姚秀萍,孙晓巍,等,2022. 冷涡背景下辽宁龙卷气候特征和 环境条件[J]. 气象学报,80(1):82-92. Cai K Z, Yao X P, Sun X W,et al,2022. Climatic characteristics and environmental conditions of tornadoes in Liaoning under the background of cold vortex[J]. Acta Meteor Sin,80(1):82-92(in Chinese).
- 戴建华,王国荣,龚剑,等,2021. 梅雨锋中尺度涡旋内微型超级单体 龙卷的形成研究[J]. 热带气象学报,37(5/6):693-709. Dai J H, Wang G R, Gong J, et al, 2021. Analysis of the formation of mini-supercells and associated tornadogenesis within a mesoscale vortex embedded in a Meiyu front[J]. J Trop Meteor,37(5/6): 693-709(in Chinese).

刁秀广,杨传凤,张骞,等,2021.二次长寿命超级单体风暴参数与

- 范雯杰,俞小鼎,2015.中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象,41(7): 793-805.Fan W J,Yu X D,2015.Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China[J]. Meteor Mon,41(7): 793-805(in Chinese).
- 管理,戴建华,袁招洪,等,2022. 双偏振雷达 K_{DP}足及 Z_{DR}弧的自动 识别及应用研究[J]. 气象学报,80(4):578-591. Guan L, Dai J H, Yuan Z H, et al, 2022. Research on dual-polarimetric radar K_{DP} foot and Z_{DR} arc recognition and application[J]. Acta Meteor Sin,80(4):578-591(in Chinese).
- 黄先香,炎利军,王硕甫,等,2019a.1822 号"山竹"台风龙卷过程观 测与预警分析[J].热带气象学报,35(4):458-469. Huang X X, Yan L J, Wang S F, et al, 2019a. An analysis on the observations and warnings of tornado induced by Typhoon Mangkhut[J]. J Trop Meteor, 35(4):458-469(in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019b. 珠江三角洲台风龙卷的活动特 征及环境条件分析[J]. 气象,45(6):777-790. Huang X X,Yu X D,Yan L J, et al, 2019b. Analysis of typhoon-tornado activity characteristics and environmental condition in the Pearl River Delta[J]. Meteor Mon,45(6):777-790(in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019c.1804 号台风"艾云尼"龙卷分析 [J]. 气象学报,77(4):645-661. Huang X X,Yu X D,Yan L J, et al,2019c. An analysis on tornadoes in Typhoon Ewiniar[J]. Acta Meteor Sin,77(4):645-661(in Chinese).
- 李彩玲,吴乃庚,王硕甫,等,2019. 台风"艾云尼"(2018) 外围两次近 距离龙卷的环境条件和雷达特征[J]. 热带气象学报,35(4): 446-457. Li C L, Wu N G, Wang S F, et al, 2019. The environmental conditions and radar characterstics of two tornadoes in the periphery of Typhoon Ewiniar in 2018[J]. J Trop Meteor, 35(4):446-457(in Chinese).
- 纂瑞琪,吴海英,李杨,等,2021.2020年7月22日苏北地区 EF2~
 EF3级龙卷天气分析[J].热带气象学报,37(5-6):759-769.Mu
 R Q,Wu H Y,Li Y,et al,2021.Analysis of EF2-EF3 tornado
 on July 22,2020 in northern Jiangsu Province[J].J Trop Meteor,37(5-6):759-769(in Chinese).
- 王磊,王啸华,李杨,等,2023.2020 年江苏高邮 EF2 级龙卷多尺度特 征分析和预警思考[J]. 气象,49(3):291-303. Wang L, Wang X H, Li Y, et al, 2023. Multi-scale characteristic analysis and warning thoughts of EF2 tornado in Gaoyou County, Jiangsu Province in 2020[J]. Meteor Mon,49(3):291-303(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,2015.中国东北龙卷研究:环境特征分析 [J]. 气象学报,73(3):425-441. Wang X M,Yu X D,Zhou X G, 2015. Study of Northeast China tornadoes: the environmental characteristics[J]. Acta Meteor Sin,73(3):425-441(in Chinese).
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2012. 对流风暴内中气旋特征与强烈天 气[J]. 气象,38(11):1330-1338. Wu F F,Yu X D,Zhang Z G, et al,2012. The characteristics of the mesocyclone and severe weather associated with convective storms[J]. Meteor Mon,38 (11):1330-1338(in Chinese).

- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件 与雷达回波特征[J]. 气象学报,71(2):209-227. Wu F F,Yu X D,Zhang Z G, et al,2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin,71(2):209-227(in Chinese).
- 夏凡,吴炜,张乐坚,等,2023. 基于 S 波段双偏振雷达融化层识别算 法的研究[J]. 气象,49(2):146-156. Xia F,Wu W,Zhang L J, et al,2023. Study of designation algorithm of the melting layer based on S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon,49 (2):146-156(in Chinese).
- 杨波,孙继松,刘鑫华,2019. 两类不同风灾个例超级单体特征对比分 析[J]. 气象学报,77(3):427-441. Yang B, Sun J S, Liu X H, 2019. Comparative analysis of supercells associated with two different types of wind disaster[J]. Acta Meteor Sin,77(3):427-441(in Chinese).
- 杨祖祥,谢亦峰,项阳,等,2019.2018 年 1 月初安徽特大暴雪的双偏 振雷达观测分析[J]. 暴雨灾害,38(1):31-40. Yang Z X,Xie Y F,Xiang Y,et al,2019. Analysis on dual polarization radar observations of a heavy snowstorm event in Anhui in the beginning of January 2018[J]. Torr Rain Dis,38(1):31-40(in Chinese).
- 杨祖祥,赵森,李萌萌,等,2021.2020 年 7 月 22 日安徽梅雨期龙卷 的双偏振雷达观测分析[J]. 热带气象学报,37(5-6):836-844. Yang Z X,Zhao S,Li M M,et al,2021. Polarimetric signatures in tornadic supercell thunderstorms on July 22,2020 in Anhui Province[J]. J Trop Meteor,37(5-6):836-844(in Chinese).
- 姚叶青,郝莹,张义军,等,2012. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预 警[J]. 高原气象,31(6):1721-1730. Yao Y Q, Hao Y, Zhang Y J, et al, 2012. Synoptic situation and pre-warning of Anhui tornado[J]. Plateau Meteor,31(6):1721-1730(in Chinese).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京:气象出版社:297-305. Yu X D,Yao X P,Xiong T N, et al, 2006. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar [M]. Beijing: China Meteorological Press: 297-305(in Chinese).
- 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等,2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级 单体风暴研究[J]. 大气科学,32(3):508-522. Yu X D,Zheng Y Y,Liao Y F, et al,2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm[J]. Chin J Atmos Sci, 32(3):508-522(in Chinese).
- 袁潮,杨文艳,李得勤,等,2023.1971—2020 年辽宁龙卷的气候特征 及环境条件分析[J]. 气象,49(11):1285-1298.Yuan C,Yang W Y,Li D Q, et al,2023. Climatology and environmental features of tornadoes in Liaoning Province during 1971—2020[J]. Meter Mon,49(11):1285-1298(in Chinese).
- 曾明剑,吴海英,王晓峰,等,2016. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷 对流风暴结构特征分析[J]. 气象,42(3):280-293. Zeng M J, Wu H Y,Wang X F,et al,2016. Analysis on environmental conditions and structural features of typical convective tornado storm in Meiyu period[J]. Meteor Mon,42(3):280-293(in Chinese).
- 张建云,张持岸,葛元,等,2018.1522 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,46(1):163-169.

Zhang J Y,Zhang C A, Ge Y, et al, 2018. Characteristics of Xband dual-polarization Doppler radar products during strong tornado around Typhoon Mujigae in Foshan[J]. Meteor Sci Technol,46(1):163-169(in Chinese).

- 张小玲,杨波,朱文剑,等,2016.2016年6月23日江苏阜宁 EF4级 龙卷天气分析[J]. 气象,42(11):1304-1314. Zhang X L, Yang B,Zhu W J, et al, 2016. Analysis of the EF4 tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016[J]. Meter Mon,42 (11):1304-1314(in Chinese).
- 郑永光,2020. 中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述[J]. 气象 科技进展,10(6):69-75. Zheng Y G,2020. Review of climatology and favorable environmental conditions of tornado in China [J]. Adv Meteor Sci Technol,10(6):69-75(in Chinese).
- 郑永光,蓝渝,曹艳察,等,2020.2019 年 7 月 3 日辽宁开原 EF4 级强 龙卷形成条件、演变特征和机理[J]. 气象,46(5):589-602. Zheng Y G,Lan Y,Cao Y C,et al,2020. Environmental conditions,evolution and mechanisms of the EF4 tornado in Kaiyuan of Liaoning Province on 3 July 2019[J]. Meteor Mon,46(5): 589-602(in Chinese).
- 郑永光,朱文剑,姚聃,等,2016. 风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日 阜宁龙卷强度估计[J]. 气象,42(11),1289-1303. Zheng Y G, Zhu W J,Yao D,et al,2016. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County,Jiangsu Province[J]. Meteor Mon,42(11);1289-1303(in Chinese).
- 郑媛媛,朱红芳,方翔,等,2009.强龙卷超级单体风暴特征分析与预 警研究[J]. 高原气象,28(3):617-625. Zheng Y Y,Zhu H F, Fang X,et al,2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm[J]. Plateau Meteor,28(3):617-625(in Chinese).
- 周海光,2018. "6 · 23"江苏阜宁 EF4 级龙卷超级单体风暴中尺度结构研究[J]. 地球物理学报,61(9):3617-3639. Zhou H G,2018. Observations of 23 June 2016 EF4 tornado supercell thunderstorm mesoscale structure in Funing County, Jiangsu Province [J]. Chin J Geophys,61(9):3617-3639(in Chinese).
- 周后福,刁秀广,夏文梅,等,2014. 江淮地区龙卷超级单体风暴及其 环境参数分析[J]. 气象学报,72(2):306-317. Zhou H F, Diao X G, Xia W M, et al, 2014. Analysis of the tornado supercell storm

and its environmental parameters in the Yangtze-Huaihe Region [J]. Acta Meteor Sin, 72(2): 306-317(in Chinese).

- Bai L Q, Meng Z Y, Sueki K, et al, 2020. Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018[J]. Sci China Earth Sci,63(1):37-51.
- Brooks H E, Lee J W, Craven J P, 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data[J]. Atmos Res, 67/68:73-94.
- Brown R A, Lemon L R, Burgess D W, 1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar[J]. Mon Wea Rev, 106(1):29-38.
- Browning K A, Foote G B, 1976. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 102(433):499-533.
- Davies-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B, 2001. Tornadoes and tornadic storms[M] // Doswell C A. Severe Convective Storms. Boston: American Meteorological Society:167-222.
- Doswell Ⅲ C A,2001. Severe convective storms—an overview[J]. Meteor Monogra,28(50):1-26.
- Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al. 2012. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States[J]. Wea Forecasting, 27(1):106-123.
- Kumjian M R,Ryzhkov A V,2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(7): 1940-1961.
- Kuster C M, Bowers B R, Carlin J T, et al, 2021. Using K_{DP} cores as a downburst precursor signature[J]. Wea Forecasting, 36(4): 1183-1198.
- Ryzhkov A V, Burgess D, Zrnic D S, et al, 2002. Polarimetric analysis of a 3 May 1999 tornado[C]//Preprints, 21st Conference on Severe Local Storms. Hyannis: Amer Meteor Soc.
- Ryzhkov A V,Zhuravlyov V B,Rybakova N A,1994. Preliminary results of X-band polarization radar studies of clouds and precipitation[J]. J Atmos Ocean Technol,11(1):132-139.
- Wurman J, Richardson Y, Alexander C, et al, 2007. Dual-Doppler analysis of winds and vorticity budget terms near a tornado[J]. Mon Wea Rev,135(6):2392-2405.

(本文责编:张芳)