

李峰,李柏,唐晓文,等,2020.近 20 年美国龙卷探测研究进展——对我国龙卷风研究的启示[J].气象,46(2):245-256. Li F, Li B, Tang X W, et al, 2020. Advances in tornado detection in the United States in recent 20 years—inspiration to the study of tornadoes in China[J]. Meteor Mon, 46(2):245-256 (in Chinese).

近 20 年美国龙卷探测研究进展—— 对我国龙卷风研究的启示^{*}

李 峰¹ 李 柏¹ 唐晓文² 张 林¹ 李瑞义¹

¹ 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

² 南京大学大气科学学院, 南京 210089

提 要: 对美国近 20 年龙卷探测雷达技术和观测研究进行了文献调研, 文献表明美国龙卷探测雷达研制目标主要为实现快速扫描、获取高时空分辨率和高精度的资料, 目的基本达到, 雷达体扫时间达到 10 秒级更新, 在雷达近距离范围内分辨率可达到 10 m, 甚至更低, 这些都使得采集龙卷精细化结构和细致连续演变过程成为可能。美国雷达发展采用多种技术体制和扫描策略并进, 双极化、相控阵、大气成像等技术方面不断改进与应用, 效果良好。基于先进雷达, 美国进行了大量的龙卷观测试验, 取得了丰富成果, 对龙卷的结构和演变规律刻画得越来越精细和准确。许多成果已经转化为概念模型, 形成重要的龙卷监测与预报指标、预警信号, 并在业务中实施, 提高了龙卷预警能力。高频次高精度的龙卷雷达探测资料的数值模式应用也明显缩短了资料同化周期, 同时提高了对龙卷等对流尺度系统的模拟能力。参照美国的成功经验, 我国应汲取其技术成果, 尽快选定雷达发展技术体制, 加快业务雷达技术升级和高性能龙卷探测雷达研制, 组织龙卷科学观测试验, 采集龙卷精细数据, 开展科学研究, 探索中国的龙卷结构和活动规律, 为构建龙卷监测预警业务提供基础的科学支撑。

关键词: 龙卷探测, 研究进展, 美国

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.02.010

Advances in Tornado Detection in the United States in Recent 20 Years —Inspiration to the Study of Tornadoes in China

LI Feng¹ LI Bai¹ TANG Xiaowen² ZHANG Lin¹ LI Ruiyi¹

¹ CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

² School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210089

Abstract: This paper investigates the tornado detection radar technology and observation research in the United States in the past 20 years. The literature shows that the development targets of the tornado detection radar in the United States are mainly to achieve fast scanning, high spatial-temporal resolution and high precision data acquisition. The purpose has been basically achieved. The volume scanning time of the radar is up to 10 s and the radar is updated. In close range, the resolution can reach 10 meters or even lower, which makes it possible to collect the fine structure and detailed continuous evolution of tornadoes. The development of radar in the United States adopts a variety of technical systems and scanning strategies, and the dual polarization, phased array, atmospheric imaging and other technologies are constantly improved and applied, with good results. Based on advanced radar, the United States has carried out a large number of tornado observation experiments, achieving rich results. The structure and evolution of

^{*} 国家重点研究计划(2018YFC1506103)资助

2018 年 12 月 17 日收稿; 2019 年 5 月 16 日收修定稿

第一作者: 李峰, 主要从事灾害性天气探测技术与试验研究. Email: liflif04@cma.cn

tornadoes are described more and more precisely and accurately. Many achievements have been transformed into conceptual models, forming important tornado monitoring and forecasting indicators, early warning signals, and implemented in operations, improving the tornado early warning capability. The application of high-frequency and high-precision numerical models for tornado radar data has also significantly shortened the data assimilation period and improved the simulation ability of convective scale systems such as tornadoes. Referring to the successful experience of the United States, China should draw on its technical achievements, select the technical system for radar development as soon as possible, speed up the upgrading of operational radar technology and the development of high-performance tornado detection radar, organize tornado scientific observation experiments, collect fine tornado data, carry out scientific research, and explore the structure and activity regularity of tornadoes in China, providing a scientific support for the construction of tornado monitoring and warning.

Key words: tornado detection, research progress, the United States of America

引 言

龙卷是突发性最强、破坏力最大、最难被观测和预报的小尺度天气系统和气象灾害之一,一直受到世界各国政府、组织、科研机构的关注。龙卷的研究很早就引起了欧美国家科学家的兴趣和重视,17—18 世纪欧洲一些学者就发表了一些有关龙卷的研究成果,对龙卷生成的气候特征、气象条件和灾害影响进行了广泛的描述。进入到 20 世纪后半叶,随着气象雷达等先进探测技术的发展和运用,更多的研究揭示了龙卷发生的天气条件、气候特征以及结构特征,并利用粗分辨率的数字雷达和实验室模拟构建了龙卷的概念模型(Lemon and Doswell III, 1979),并不断在观测、研究中验证、完善(Burgess and Lemon, 1990; Donaldson and Desrochers, 1993; Dunn, 1990)。

20 世纪 90 年代美国组织了第一次大规模的 VORTEX(Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment)试验,取得了许多振奋人心的发现和成果(Wurman et al, 1996a; 1996b; 1997; Trapp et al, 1999; Collins et al, 2000; Zrnic et al, 2007),对龙卷的生成、结构和动力学机理提出了越来越合理的理论,也较好地改进和提高了美国龙卷的预警能力(Polger et al, 1994)。2009—2010 年美国在大平原地区又开展了第二次 VORTEX 试验,该次试验采用了最先进的探测设备和技术,包括移动 X 波段极化雷达、移动相控阵雷达、无人机系统等,获取了龙卷的精细化资料,在龙卷的精细结构、演变特征、预警指标、环境条件以及生成机

制研究取得了突破性的进展,也验证了新型探测雷达的能力和应用潜力(Pazmany et al, 2013; French et al, 2013; 2014; Bluestein et al, 2010)。随着对龙卷的深入研究和成果应用,美国国家天气局对龙卷提前预警能力已经提高到 13 min(Erickson and Brooks, 2006),甚至在一些试验中提前预警时间可以达到 20 min 以上(Heinselman et al, 2015)。2012 年美国 NSSL 组织 12 名预报员做了一次试验,通过使用相控阵雷达观测到的 4 个龙卷个例回放,让预报员依据对龙卷既有模型的认知和预报着眼点,利用高时空分辨率新资料,考察龙卷发布预警时效的改进情况,结果表明,预报员通过对 43 s 更新的体扫数据的分析,不但明显提高龙卷预警时间(平均 20 min),而且平均 PPOD(polygon probability of detection)为 0.96,远高于官方的 0.74,POFA(probability of false alarm)平均为 0.33,远远低于官方的 0.72,同时,在分析预警成败的原因时,快速扫描的龙卷体资料提供了精细化结构特征,也不断修正经典的龙卷概念模型,使得预报员对龙卷的认识和预测更加准确和自信。最近,模式同化试验也证明了利用快速扫描的(1 min)雷达资料不但比 WSR-88D(5 min)资料同化周期明显缩短,而且同化和预报的效果更加好(Yussouf and Stensrud, 2010; Xue et al, 2006)。

上述有关龙卷研究和预警能力的突破进展,主要来源于 3 个方面的贡献:(1)新的雷达探测技术和新装备的研发应用;(2)龙卷精细化结构与演变的观测与分析;(3)龙卷生成机理研究,尤其是随着资料同化和模拟技术的进步,推进了龙卷动力热力以及微物理探索。这些方面是促进科学认知和预警龙卷

能力提高的关键因素。当然,过去几十年对龙卷的气候特征、环境条件以及灾害调查、影响评估等也取得了巨大进步,但该方面本文不做评述。

美国不是开展龙卷研究最早的国家,但是美国是开展现代龙卷探测技术和相关科学研究最系统、最全面、最深入、最先进的国家,代表国际最高的科研水平和领先的探测技术。从最新的统计来看,全球龙卷研究领域论文的产出机构产出量在国际上排在前十家中的九家均为美国的高校及科研机构,而国际上龙卷研究领域排名前十的高产作者无一例外来自美国(张萌,2018),由此可见,美国在此领域的地位和水平。本文主要以文献调研方式阐述美国在龙卷观测技术与观测研究方面的最近20年的新进展,以供我国在该领域研究工作参考和借鉴。

1 龙卷探测雷达技术的发展

众所周知,雷达是现代天气探测最有力最重要的技术手段。20世纪60、70年代,美国天气局一直使用WSR-54和WSR-74型号雷达,采用10 cm和5 cm两种波长,探测主要目标是降雨,对风暴发展阶段观测能力十分有限。80年代美国多个部门联合攻关,研制了具备多普勒效应的新一代天气雷达(WSR-88D;Crum and Alberty,1993)。WSR-88D为S波段(波长10.0~11.1 cm),发射功率为750 kW,采用1.57 μs 或者4.7 μs 脉冲宽度,抛物面天线的直径为8.5 m,天线主瓣单向3 dB波束宽度约为0.95°,发射信号具备水平极化,径向速度和谱宽水平分辨率为250 m,精度达到0.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,反射率水平分辨率为1 km,精度达到0.5 dBz。1991年,WSR-88D开始投入业务使用,并逐步建立了全美范围天气监测雷达网,1997年完成了全国166部雷达建设,对天气尺度系统观测和灾害性天气的监测预警能力得到极大提高,天气尺度系统例如锋面、干线、雷暴阵风锋、不连续线等基本都能够较准确地监测到,尤其是径向速度、谱宽、风廓线等产品及丰富的气象算法应用推进了局地风暴、超级单体和龙卷的预警能力,取得明显改进(Witt et al,1998;Crum et al,1998)。2007年,为了进一步提高雷达降水和灾害性天气监测能力,美国开始了WSR-88D双极化升级改造工作,2013年全部改造完成。通过评估,双极化WSR-88D雷达网对降水估测改进效果较明显,并明显提高了对降水相态的监测能力

(Cunha et al,2013;Berkowitz et al,2013;Junyent and Chandrasekar,2010),而且双极化产品应用也较好地提高了龙卷的识别能力(Ryzhkov et al,2005;Bluestein,2013)。

20世纪90年代,在WSR-88D建设过程中,为了提高观测资料时空分辨率和机动性,推进灾害天气的科学研究,美国NSSL联合有关大学发展了移动多普勒雷达系统(Doppler of wheel,DOW),包括3 cm(X波段)波长天气雷达(Wurman et al,1997),还有3 mm云雷达(Bluestein et al,1995)。X波段DOW频率为9.375 GHz,峰值发射功率为250 kW,波束宽度为0.983°,扫描速率为60° s^{-1} ,双极化模式,可在3 km范围内达到64 m \times 64 m \times 75 m分辨率(表1),在观测弱龙卷时,它可以靠近距离龙卷核心区至30 m处,波束宽度分辨率达到3 m,该系统研制完成就被用于第一次VORTEX试验,开展对超级单体和龙卷的观测,并得到了许多龙卷精细结构和钩状回波特征的新发现(Wurman,2002;Wurman and Kosiba,2008)。经过升级,在第二次VORTEX试验发挥了重要作用,取得丰富成果。

相控阵技术首先长期应用于军事领域,进入21世纪后,被推荐为未来取代WSR-88D的新一代雷达技术,为此美国建立了国家气象雷达试验平台。2004年,美国国家灾害风暴实验室联合多个部门在俄克拉何马诺尔曼,利用海军SPY-1A相控阵天线、改进的WSR-88D发射机和专门设计的控制处理系统,组合安装了一套国家天气雷达测试相控阵雷达系统(National Weather Radar Tested Phased Array,NWRT-PAR;Zrnice et al,2007)。该系统(Yu et al,2007)为S波段高时间分辨率灵活波束相控阵体制,天线有4352个T/R组件,阵面法向 $\pm 45^\circ$ 内可使用电子扫描,波束宽度为1.5°~2.0°,分辨率为150 m,并且在方位上可以实现18° s^{-1} 转动。该系统最大的优势就是采用波束复用技术实现快速采样,它可以28 s完成一个90°扇区42个仰角的扫描,被美国确定为未来天气雷达发展方向,试验证明NWRT-PAR对龙卷TV快速变化具有较好的捕捉能力。2007年以后,该套系统进一步实现了软硬件升级,进一步改进了电子自适应扫描,缩短了更新时间,完成VCP11和VCP21模式扫描分别仅需要1.2和1 min(Isom et al,2013)。

同样,为了尽快投入科研试验,探索相控阵雷达

应用价值,2007 年春季,俄克拉何马大学联合商业公司改造军事雷达开发了第一部移动的地基相控阵多普勒雷达 MWR-05XP (Meteorological Weather Radar 2005 X-band Phased Array; French et al, 2014; 图 1), 其被用于灾害风暴研究。MWR-05XP 雷达采用混合式发射机制, 垂直方向采用移相器控制阵面单元发射波相位变化实现快速仰角电子扫描, 水平方向采用频率捷变技术实现有限方位角度 ($6^{\circ} \sim 8^{\circ}$) 水平电子扫描, 同时可以 $180^{\circ} \text{ s}^{-1}$ 快速机械旋转天线方位角, 因此, 它的体扫 (垂直方向 $0 \sim 20^{\circ}$ 范围内 12 个仰角) 更新周期达到 24 s。但是, 由于波束较宽, 在 $10 \sim 20 \text{ km}$ 范围内, 它的方位角分辨率只有 $300 \sim 600 \text{ m}$, 径向分辨率可以达到 150 m (具体参数见表 1)。这样, 它在距离 5 km 范围内可以较好地观测直径为 1 km 的龙卷, 而更远距离, 它则无法分析龙卷的精细结构。MWR-05XP 研制完成后, 就成功地观测到 4 个龙卷系统, 清楚地展现了 TV 的时空演变特征, 细致地刻画了龙卷加强和消

亡阶段 TV 的结构和时间-高度演变。除了龙卷, 在 2007—2008 年该系统还多次成功地观测到中尺度对流复合体、飑线、超级单体、冰雹、中气旋系统。

2010 年, 俄克拉何马大学又与 ProSensing 公司利用快速机械扫描的极化抛物面天线与跳频技术结合方案合作开发了一种极化快速扫描移动 X 波段双极化多普勒雷达 (RaXPOL; Pazmany et al, 2013; 图 1)。该系统完成 1 个 360° 扫描仅需要 2 s, 20 s 就完成 10 个仰角的体扫, 波束宽度为 1° , 水平径向分辨率为 $15 \sim 75 \text{ m}$ (表 1)。该系统另一优势是具有“双发双收”双线偏振技术, 可以探测目标物的差分反射率、差分相移和水平垂直偏振相关系数等, 能够清晰分辨龙卷碎片和降水的区别。2011 年春季投入野外试验后, 成功地观测到多个龙卷、超级单体系统、下击暴流和冰雹, 利用其提供的 2 s 间隔的资料可以十分清晰地反映出龙卷结构和低层的 TDS (低相关系数 ρ_{hv}) 特征及变化。

表 1 美国四种新型快速扫描探测雷达的性能参数 (Kurdzo et al, 2017)

Table 1 Performance parameters of four new fast scanning detection radars in the United States (Kurdzo et al, 2017)

| 型号 | AIR ^a | RaXPOL ^b | MWR-05XP ^c | Rapid-DOW ^d |
|--------------------------------------|------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| 频率 | X 波段 | X 波段 | X 波段 | X 波段 |
| 发射功率 | 3.5 kW | 20 kW | 16 kW | 40 kW |
| 极化 | 单极化(H) | 双极化(H/V) | 单极化(H) | 单极化(H) |
| 水平波束宽度 | 1.0° | 1.0° | 1.8° | 0.9° |
| 垂直波束宽度 | 1.0° | 1.0° | 1.9° | 0.9° |
| 垂直波束间隔 | 1.0° | 1.0° | 1.9° | 可变 |
| 10 km 处灵敏度 | 12 dBz | -7 dBz | -15 dBz | 10 dBz |
| 距离分辨率 | 37.5 m | 30 m | 150 m | 11 m |
| 天线类型 | 相控阵 | 抛物线盘 | 相控阵 | 相控阵 |
| 扫描方式 ^e | 成像 | 聚点(M) | 聚点(E) | 聚点(M/E) |
| $90^{\circ} \times 20^{\circ}$ 扫描时间 | 5.5 s | N/A | 7 s | N/A |
| $360^{\circ} \times 20^{\circ}$ 扫描时间 | N/A | 40 s | 24 s | 7/14 s |

^a 引自 Isom 等 (2013). 为了灵敏度和距离分辨率增加了脉冲压缩。

^b 引自 Pazmany 等 (2013). 灵敏度为高分辨率 (30 m) 模式情况。

^c 引自 Bluestein 等 (2010)。

^d 引自 Wurman and Randall (2001)、Wurman (2016, 个人通信). 扫描时间表示为可变垂直波束间距下完成一个/两个 6 波束模式的时间。

^e M: 机械式扫描, E: 电子式扫描。

为了更好地监测龙卷灾害, 美国在技术体制上采用多种并举发展。2013 年, 俄克拉何马大学、高级雷达研究中心 (ARRC) 采用成像技术开发了移动大气成像雷达 (AIR; Isom et al, 2013; 图 2)。与相控阵不同, 在波束发射原理方面, AIR 成像雷达是在雷达的视场 (FOV) 发射一个宽波束, 然后同时采集整个体积的数据, 每个波束生成通过软件后处理执行 (称为数字波束成形技术 DBF), 而没有物理相

位切换。在距离方向上, 它将发射频率脉冲改变为脉冲允许在距离维度中应用成像技术, 并导致改善的距离分辨率 (称为距离成像)。距离成像和 DBF 的组合就在角度和范围上都产生高空间分辨率。在水平方位角, 同样采用机械扫描。这样, 通过采集每个雷达脉冲的 RHI 型扫描, 提高了体扫数据采集的时间分辨率。此外, 通过使用自适应波束成形技术, AIR 从而允许改善的空间分辨率和杂波抑制。

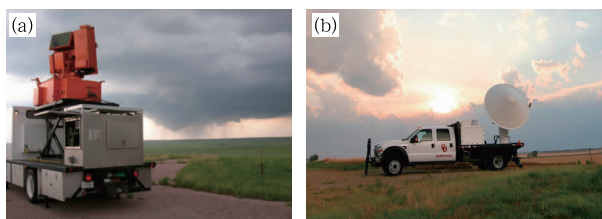


图1 参与 VORTEX2 观测试验的 MWR-05XP 雷达(a;Bluestein et al,2010)和 RaXPoL 雷达(b;Pazmany et al,2013)

Fig.1 MWR-05XP radar (a; Bluestein et al, 2010) and RaXPoL radar (b; Pazmany et al, 2013) participating in VOR-TEX2

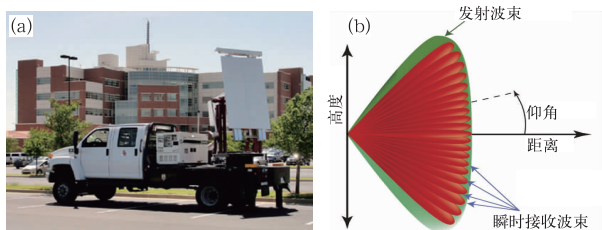


图2 大气成像雷达(a)和其发射、接收波束模式(b)

(红波瓣代表同时接收的波束,绿波瓣代表决定雷达视场值的宽发射波束;Isom et al,2013)

Fig.2 The atmospheric imaging radar (a) and its transmitting and receiving beam modes (b)

(The red lobe represents the received beam while the green one represents the wide transmitting beam which determines the view field of the radar; Isom et al, 2013)

2013年,一部移动式X波段(3.14 cm波长)AIR完成研制后,可以发射垂直 20° 扇形波束,采用36元接收阵列,形成波束宽度为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的瞬时RHI扫描。方位旋转可以在6 s内实现 $20^\circ \times 90^\circ$ 的体积更新,而先进的脉冲压缩技术可实现37.5 m的距离分辨率(表1),投入观测试验后对龙卷的结构和演变提供了非常精细的图像。

除了在双极化、相控阵等雷达技术研究改进之外,与移动观测并行发展的另一思路就是探索建立灵活敏感的局地探测网,同时弥补S或C波段天气雷达的探测分辨率和盲区等不足,以及投资成本等因素。21世纪初,由美国国家自然基金资助筹建一个协同自适应大气遥感探测(the Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere,CASA)试验项

目,由科罗拉多州立大学、俄克拉何马大学等4所大学与国家实验室、工业部等联合研发,其主要目的就是通过低成本、低功率、短距离联网雷达的协调扫描,提高大气最低部分的覆盖率。2006年该项目在俄克拉何马组建了由4部低功率、短距离、双偏振雷达组成的第一个试验网(Junyent and Chandrasekar, 2010)。就雷达本身而言,最大发射功率为25 kW,最大脉冲长度为 $1 \mu\text{s}$,采用双PRF(1.6和2.4 kHz)波形解决方案提高最大不模糊速度。天线是支持双极化的中心馈电反射器,安装在灵活的方位基座上,高速扫描速率可达到 120°s^{-1} 。CASA系统最大的优势就是通过网络运行控制中心(SOCC)和气象命令控制软件(MCC),实时监测分析天气特征,形成雷达扫描策略,控制多部雷达以不同的角度和扫描方式协同观测,发挥网络化雷达的敏感性和灵活性,可以实现对流层3 km高度以下灾害性天气的监测,获得高时空分辨率(体扫更新速度是WSR-88D的5倍,空间分辨率达到8倍)的衰减校正的反射率、双极化参数和矢量风场。CASA成立以来获得了许多的观测数据,并被用于分析、预报和模式同化研究(Schenkman et al, 2011a; 2011b; Snook et al, 2011),有效地改进了临近预报系统、QPE和模式同化系统的能力,提高对暴雨、强对流以及龙卷的监测预警能力,但其衰减缺陷性也更多引起了大家的重视。

从近20年美国气象雷达技术发展来看,其目标就是实现快速扫描、高精度、高分辨率的探测能力以适应快速生成变化的小尺度短生命的灾害性天气系统(包括龙卷、超级单体、中气旋、冰雹以及飑线等),从试验效果来看,这些目标都正在逐步被实现。

2 龙卷结构和演变特征的雷达观测新进展

20世纪末,随着天气雷达技术进步和试验应用,科学家已经积累了丰富的龙卷观测实例,提出了较为成熟的龙卷结构概念模型(Lemon and Doswell III, 1979),发现了“中气旋 mesocyclone”“龙卷涡旋特征 TVS(tornadic vortex signature)”“龙卷碎片特征 TDS(tornadic debris signature)”“前侧下沉气流 FFD(forward-flank downdraft)”“后侧下沉气流 RFD(rear-flank downdraft)”等重要的龙卷和相关母体风暴结构成分(Smith and Leslie, 1978; Lemon

and Doswell III, 1979; Burgess and Lemon, 1990; Donaldson and Desrochers, 1993), 并基于观测事实开展相关的数值模拟, 探索龙卷的形成机理(Leslie, 1971; Trapp and Fiedler, 1995; Wicker and Wilhelmson, 1995)。至 20 世纪末, 科学家们较一致认为典型超级单体龙卷结构是由龙卷涡旋、前/后侧下沉气流、上升气流、前/后侧阵风锋、低层入流、出流和高层出流等构成(Lemon and Doswell III, 1979)。龙卷涡旋一般生成在超级单体上升气流和后侧下沉气流之间, 常有中尺度涡旋存在, 在涡源的研究中, 中层垂直风切变对应的水平涡度向低层垂直涡度的转化占据主导的观点, 后来有很多的观测发现龙卷也经常发生低层强涡旋向上发展的现象(Trapp et al, 1999)。

进入 21 世纪后, 随着新雷达技术不断进步和观测积累, 对龙卷结构和演变的认识也在不断完善, 尤其是前文所记载的多种快速扫描、双极化、高精度的探测雷达系统投入观测试验, 获得了大量精细化数据, 揭示了龙卷的细致结构和演变特征, 成果非常丰富, 下文将着重阐述有关 RFD、RFGF、TV 以及复合性的龙卷结构的观测进展。

2.1 后侧下沉气流

后侧下沉气流(rear-flank down-draft, RFD)是龙卷形成的必要条件, 它一般形成于超级单体风暴成熟期。RFD 在龙卷形成过程中起到重要作用, 不仅是阵风锋(RFGF/FFGF)的强迫源, 而且它的变化也是龙卷生成、加强和消亡的重要因素, 在雷达低仰角图上表现为与强回波相邻的辐散区, 特征较明显, 往往作为龙卷监测的重要参考信息。早期, RFD 已经得到观测支持, 但其演变的细节还是依赖模拟。Wurman et al (2007a) 基于 DOW 资料利用双多普勒合成分析了龙卷附近的涡度收支, 细致地描述了龙卷生成前, 首先要存在后侧下沉气流, 龙卷形成后, 它将围绕龙卷系统缠绕, 当 RFD 完全包裹在龙卷周围时, 将会切断流入龙卷的近地面气流, 风暴系统被阻塞或消亡。RFD 的这种气流包裹阻断作用在很多个例研究中得到了证实(Wurman et al, 2007b; Dowell and Bluestein, 2002b)。RFD 的重要作用还体现它对水平涡管的动力作用, 下沉气流不仅能够制造水平涡管, 而且与上升气流作用可以导致水平涡管向垂直涡管倾斜, 从而为龙卷提供动力, 这一过程被认为是龙卷形成的重要机制(Bluestein,

2013; Markowski and Richardson, 2014; 郑永光等, 2017), 已经通过 ELDORA、DOW 雷达观测得到有力的证实(Wurman et al, 2007a; 2007b; Dowell and Bluestein, 2002a; 2002b; Bluestein et al, 2007), 后面会进一步阐述。很多学者也研究了超级单体冷池内部结构与龙卷形成的关系, 针对超级单体低层动力和热力特征的外场观测试验(Grzych et al, 2007)指出, 形成龙卷和未形成龙卷的超级单体在冷池的内部结构上存在较大的差异, 其中形成龙卷的个例冷池出流(RFD)的浮力较强, 假相当位温仅略低于入流区。但 RFD 导致的地面冷出流与环境大气温度的差异需要有一个平衡点才有利于龙卷生成(Schultz et al, 2014), 这个温度差异通常小于 4°C (Markowski and Richardson, 2009; 2010; Markowski et al, 2002)。

2.2 后侧阵风锋

后侧阵风锋(rear-flank dust front, RFGF)来源于 RFD, 在雷达图上表现为弱回波线或速度不连续线。在龙卷整个生命周期中, 后侧阵风锋和前侧阵风锋的发展演变至关重要, 这些子系统的多重匹配和相互转化是十分复杂的, 包括与降水粒子的相互作用, 造成了龙卷结构演变的复杂性(Burgess and Lemon, 1990; Donaldson and Desrochers, 1993; Dunn, 1990; Brown and Wood, 2012)。Dowell and Bluestein(2002a; 2002b)利用 ELDORA 雷达资料分析了麦克林附近的一组龙卷暴, 证明了后侧阵风锋在龙卷形成时对涡旋形成的位置起到重要作用, 当龙卷形成时, 在龙卷下沉气流区会出现一条 $3\sim 5\text{ km}$ 宽的出流涌浪, 形成的阵风锋前部形成局部隆起, 则一个新的涡度极值就形成在出流前沿附近, 利用双多普勒资料对这个过程描述得非常细致。2007 年, Wurman et al(2007a) 首次利用 DOW 观测到了龙卷的双阵风结构, 验证了 Adlerman(2003)的模拟结构。Marquis et al(2008)利用双多普勒合成分析和轨迹分析方法进一步揭示了在龙卷低层双阵风锋结构中, 后侧下沉气流会沿着次级阵风锋上升, 在次级阵风锋靠近龙卷的区域会影响龙卷周围的辐合场, 经过相互作用, 龙卷的结构和强度发生明显变化, 在涡度场西侧出现多个垂直涡度极值, 形成了垂直涡度不对称结构。Wurman et al(2010)利用高精度单、双多普勒方法分析了一个超级单体龙卷的三维结构, 清楚地看到初级后侧阵风锋 PRFGF

(Primary-RFGF)表现为朝内的垂直倾斜结构,它的存在超前于龙卷涡旋,来源于主上升气流的分支。而在 PRFGF 后面降雨区边缘存在次级后侧阵风锋 (Secondary-RFGF, SRFGF), 由下沉气流在低层形成, SRFGF 形成加速了初始龙卷的消亡和新的龙卷涡旋的生成。最近, Bluestein et al(2015)的观测研究,再次表现了龙卷形成过程中 RFGF 作用的复杂性,他们利用 RaXPOL 雷达提供的 17 s 更新体扫(9个仰角)资料分析了两个连续发生的龙卷,结果表明第一个龙卷因 RFGF 而消散,第二个龙卷因 SRF-GF 涌浪而形成。从上述观测来看, RFGF 确实是龙卷系统的重要组成部分,且它的演变对监测和预测龙卷变化具有重要指示意义。

2.3 龙卷涡旋

在早期研究中,通常认为龙卷涡旋(tornado vortices, TV; 直径 $10 \sim 10^3$ m) 涡度首先在中层(3~4 km)产生后向下传播,直至到达地面(Leslie, 1971; Brown and Lemon, 1976; Dunn, 1990; Donaldson et al, 1993), 20 世纪 90 年代后,随着 WSR-88D 雷达的投入应用,观测到越来越多的 TV 先发生在近地面层,然后向上发展(Trapp and Fiedler, 1995; Trapp et al, 1999; Burgess et al, 2002)。这两种类型的龙卷也得到数值模拟研究结果的支持,被定义为两类龙卷生成模型,即 TV 下降型(I)和上升型(II)(Trapp and Davies-Jones, 1997)。最近, French et al(2013)提出了重新审视超级单体风暴中 TV 特征的垂直发展的观点,利用 MWR-05XP 雷达资料分析了 3 个龙卷个例,定量地描述了 TV 在近地面生成的事实,然后快速向上发展,同时旋转速度增加,水平尺度减小,表现龙卷明显的增强变化。2014 年,他们在分析另外 3 个龙卷个例(French et al, 2014)中利用 10 s 间隔的雷达资料更加细致地描述了龙卷在生命周期的各阶段 TV 的演变规律,生成阶段 TV 首先在中层加强然后向下发展,而消散阶段 TV 衰减首先发生在 1.5 km 高度,然后向上下传递,而 TV 在强度演变的过程中还存在瞬间的振荡性(图 3),这些微观的特征也是首次发现,有助于探索龙卷涡旋强度变化的原因和维持机制。

关于 TV 涡源的研究,科学家较为一致的观点是水平涡向垂直方向倾斜,然后经历垂直涡的拉伸作用增强(Davies-Jones and Brooks, 1993; Wicker and Wilhelmson, 1995)。但是,该观点由于缺乏精

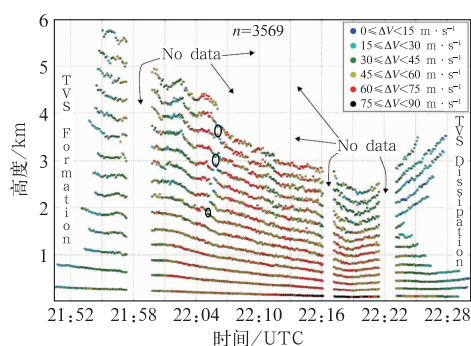


图3 2011年5月24日MWR-05XP观测到Goshen附近一次龙卷内部TV时间-高度演变图
(黑色圆圈表示该时刻同时有两个TV存在; French et al, 2014)

Fig. 3 The time-height evolution of TV in a tornado near Goshen observed by MWR-05XP on 24 May 2011
(Black circle indicates that two TVs exist at the same time; French et al, 2014)

细资料一直无法得到直接证明。而新的雷达资料提供了帮助,近20年,许多科学家利用双多普勒雷达合成,完成了对TV演变的研究(Wurman et al, 2007b; 2008; 2010; Bluestein et al, 2007; Marquis et al, 2008)。Wurman et al(2007b)首次利用DOW双多普勒合成揭示了超级单体龙卷中与龙卷有关水平涡度向龙卷附近的垂直方向倾斜,以及垂直涡度在龙卷中伸展,观测计算表明紧靠龙卷南面和东南面的RFD区域则出现气旋垂直涡度压缩。与辐合上升气流和发散RFD相关的峰值正值和负值分别在龙卷附近,在龙卷东北部阵风锋区域也观测到气旋垂直涡度的展宽,另外,700 m高度及以上下沉气流和上升气流之间的水平涡度向垂直涡度的倾斜也由观测计算得到,量值合理。垂直涡度伸展和水平涡度倾斜的观测值证实了前期的模拟结果(Wicker and Wilhelmson, 1995; Adlerman et al, 1999)。但遗憾的是,100 m以下的转换量无法计算。在后续的研究中,不同的龙卷个例也证明了水平涡度的倾斜与下沉气流与环境入流相互作用有关,垂直涡度的伸展与龙卷周围强辐合向上运动(如RFGF),压缩与下沉运动相关(RFD)(Marquis et al, 2008; Wurman et al, 2010)。

2.4 复合性(多涡旋)结构龙卷

早期,受观测能力限制,龙卷通常被认为是一个

单独系统,即使偶尔发生多龙卷事件,也被作为各自独立的系统来研究(Fujita,1981)。这种观点自 20 世纪 90 年代随着新型雷达新的观测事实而逐渐改变。2002 年,在 Wurman(2002)利用 DOW 雷达清楚地观测到了龙卷的多涡旋结构,并首次用雷达资料定量刻画了龙卷中存在的多涡旋的大小、强度、运动、水平和垂直结构以及持续性(图 4)。后续更多的观测(Lee and Wurman,2005;Wurman and Kosiba,2008)发现,在一些较强龙卷系统中存在多个涡旋系统,龙卷涡旋直径一般在几十到几百米,而中气旋直径一般达到 1~2 km,有时还可以清楚观测到 LREs(low reflectivity eyes)和 DREs(debris ring

echos),这种多涡旋结构通常更多出现在龙卷消亡阶段。更多的观测发现,龙卷多涡旋结构还存在多种形式,在一些龙卷中多涡旋结构表现为在一个旋转气柱内存在多个准同心的多普勒风极值,反射率场上能够看到多个 DRES 碎片环状回波(Wurman and Kosiba,2008)。2015 年,在俄克拉何马州中部的一次超级单体龙卷中,观测到强龙卷吸收次龙卷后,尺度变宽,并存在多个小的子涡流,龙卷随后减弱的复杂过程(Bluestein et al,2015)。Bluestein et al(2018)利用 RaXPoI 雷达快速扫描和偏振参数分析了发生在 El Reno,俄克拉何马附近的超级单体龙卷,利用每隔 2 s 收集的数据对 24 个次生涡进行

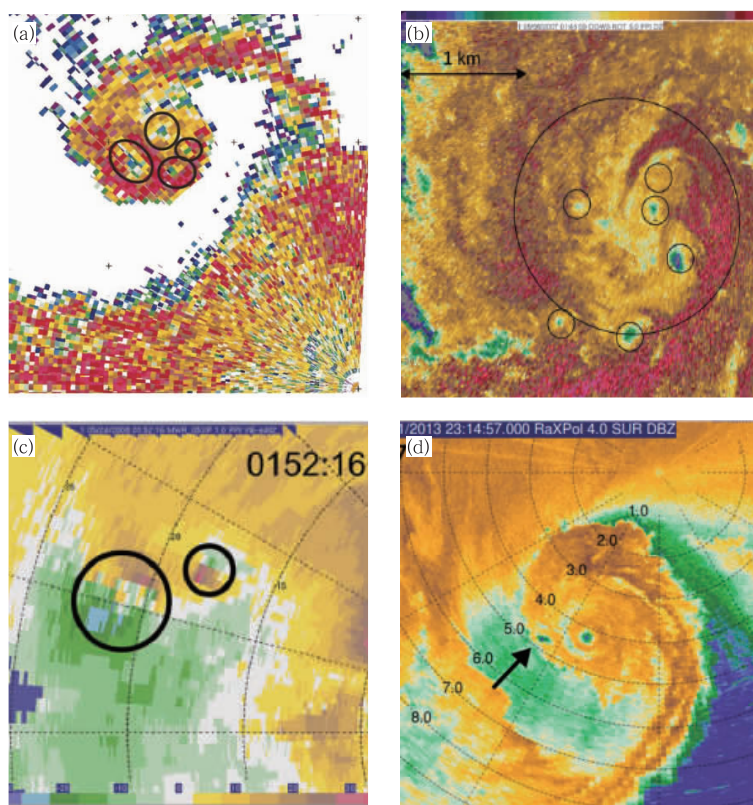


图 4 不同雷达系统观测到龙卷多涡旋结构:

- (a)1998 年 5 月 31 日 01:36:00 UTC DOW 雷达首次观测到距离 3 km 处一个多涡旋结构龙卷(Wurman,2002);
 (b)2007 年 6 月 6 日,Seward,KS 附近观测到的一次超级单体龙卷多涡旋结构(Wurman and Kosiba,2013);
 (c)2008 年 5 月 24 日 01:52:16 UTC MWR-05XP 在 Kansas 观测到一个气旋性龙卷伴有反气旋结构
 (Bluestein et al,2010);(d)2013 年 5 月 31 日 23:14:57 UTC RAXPOL 雷达观测到的龙卷多涡旋
 结构(箭头指示一个伴随龙卷 TV)(Bluestein et al,2015),具体分析参见相关文献

Fig. 4 Tornado multi-eddy structures observed by different radar systems;

- (a) a multi-eddy structure tornado (Wurman, 2002) first observed by DOW radar at 01:36:00 UTC 31 May 1998;
 (b) a super single tornado multi-eddy structure (Wurman and Kosiba, 2013) observed near Seward, KS on
 6 June 2007; (c) a cyclonic tornado accompanied by anticyclone structure observed by MWR-05XP in
 Kansas at 01:52:16 UTC 24 May 2008 (Bluestein et al, 2010); (d) tornado multi-eddy structure observed
 by RAXPOL radar at 23:14:57 UTC 31 May 2013 (arrow indicates a tornado TV) Kansas
 (Bluestein et al, 2015). For detailed analysis, see the relevant literature

追踪,发现大多数长寿涡(≥ 15 s的涡)是在最大风半径内形成,初始主要存在于龙卷母体风暴左后象限,绕着母龙卷的中心移动,然后在右前和左前象限中向龙卷中心附近消散,这种细致的演变在以往的观测中很难发现。另外,还有一些精细观测揭示了多龙卷共存和生消迭代过程(Dowell and Bluestein, 2002a; 2002b)、正反涡旋龙卷对、钩状回波内的线状或独立涡旋结构等,这让我们对龙卷系统的复杂性有了越来越多的客观认识。

基于快速扫描、高精度的观测事实,对龙卷结构和演变特征了解越来越深入,美国科学家们(Bluestein et al, 2007; 2015; Lee and Wurman, 2005; Wurman and Kosiba, 2008)对龙卷或者涡旋做出了更细致具体的定义与分类。Wurman and Kosiba(2013)对此进行了总结和归纳,根据龙卷内部涡旋复杂结构将龙卷分为 MT(marginal tornado), MTMC(multiple tornadoes under different broad circulations/mesocyclones), MVMC(multiple vortices within broad surface circulations/mesocyclones), TMQC(tornadoes and other vortices with multiple, quasi-concentric, wind field maxima)以及 IVHE(individual vortices in hook echoes)等,这集中体现了美国龙卷随着雷达新技术发展而取得的丰富观测成果。

3 结论与讨论

从美国近20年的雷达探测技术发展和龙卷观测取得成果来看,美国龙卷探测雷达主要可实现快速扫描、获取高时空分辨率和高精度的资料,目的基本达到,雷达体扫时间达到10秒级更新,在雷达近距离范围内分辨可达到10 m,甚至更低,这些都使得采集龙卷精细化结构和细致连续演变过程成为可能。美国雷达发展采用多种技术体制和扫描策略并进,效果良好。虽然,美国曾经有将相控阵技术作为取代现有 WRS-88D 的计划,但并没有限制其他技术的发展。通过本文调研可知,各种体制雷达,各有优劣,为未来选型提供了比较和技术积累。比较而言,美国业务雷达 WSR-88D 时空分辨率没有优势,但观测范围大,在监测天气尺度风暴和对流系统发生、演变具有较好的适用性,但对局地风暴和中小尺度系统的微观结构变化作用十分有限。移动多普勒雷达系统 DOW,针对龙卷进行了快速扫描和发射波束改造,时空分辨率达到几十米,在靠近龙卷位置

上对龙卷的结构能够较好的观测,更为有利的是该类雷达可以提供双极化信号,能够利用偏振参量实现对龙卷结构特征的诊断,但总的来说它的时空分辨率还需要进一步提高。相控阵雷达体扫时间更新更快,但波束较宽,空间分辨率受到限制,对近距离的观测效果较好。大气成像雷达通过电子调制方式实现了更短时间更新,尤其在一个扇形区域 RHI,对快速演变得龙卷立体结构捕获能力更强,但其空间分辨率并没有优于其他类型雷达,且目前其无法提供极化信号。基于上述雷达技术利弊,美国业务化雷达目前还没有大规模实现相控阵技术的计划,快速机动的试验雷达也无法满足业务化需求,美国更倾向于采用 CASA 组网模式,利用小型化 X 波段偏振雷达在龙卷高发区进行组网协同观测,从而提供快速精细准确的龙卷监测预警。

依据先进的雷达,美国进行了大量的龙卷观测试验,取得了丰富成果,对龙卷的结构和演变规律刻画得越来越精细和准确。许多成果已经凝练为概念模型(图5),形成重要的龙卷监测与预报指标、预警

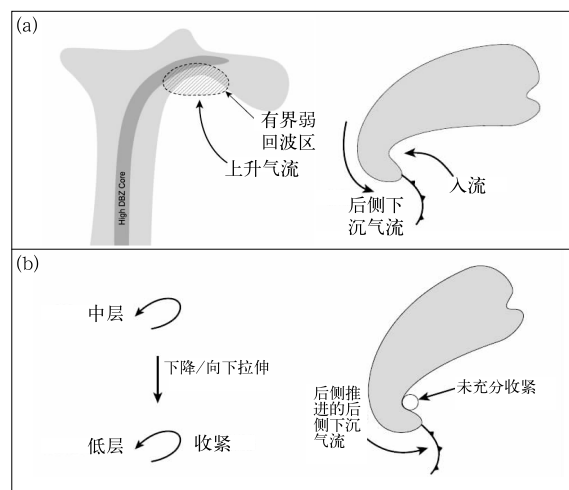


图5 美国预报员根据龙卷观测简化的预报概念模型

(a)典型的回波反射率垂直结构,龙卷经过中气旋紧缩与RFD强度同时加强后生成;(b)描绘了龙卷的下降和伸展环流形态,低层环流未能充分收紧以指示龙卷的发生

Fig. 5 A simplified conceptual model of tornado forecasting is developed by American forecasters based on tornado observations

(a) a typical vertical structure of echo reflectivity which is generated by both mesocyclone contraction and enhanced RFD intensity;
(b) downward and extended circulation patterns of tornado with the lower circulation not tightened sufficiently to indicate the occurrence of tornado

信号,并在业务中实施。例如:RFD的强度和范围演变,有界弱回波区(bounded weak-echo region, BWER)高度和强度变化,RFGF变化及前部的隆起特征,TV位置的垂直变化和倾斜、垂直拉伸表现,多涡旋在龙卷母体中产生和位置变化等。以及这些变化的相应雷达回波特征,包括偏振参数反映,如WEH(弱回波洞)、TDS(碎片特征)、LRE(低反射率眼)、DRE(碎片环形回波)、DB(碎片球)、DRCs(下沉反射核)、以及DV(相对速度差)、DX(涡旋直径)等。这些特征连续变化跟踪让预报人员更有信心,也大大提高了龙卷预警能力。根据评估,美国龙卷提前预警时间由5 min(1986年)提高到13 min(2004年)(Erickson and Brooks, 2006),而利用相控阵快速更新资料,平均预警时间可以达到20 min(Heinselman et al, 2015)。另外,高频次高精度的龙卷雷达探测资料被用于模式同化系统和模拟试验,明显缩短了资料同化周期(从30~60 min缩短到15 min)(Yussouf and Stensrud, 2010),同时也提高了数值模式对龙卷等对流尺度系统的模拟能力(Xue et al, 2006; Yussouf and Stensrud, 2010)。

我国目前业务天气雷达系统还不及美国WSR-88D,要实现快速扫描、精细高效雷达建设目标,更为遥远,但这是未来气象探测发展的必经之径。我国应该深入了解美国雷达技术,吸取经验和成果,缩短技术积累时间,根据美国经验直接选择适合中国国情的技术机制,聚焦发展,实现超速发展。从美国龙卷探测技术发展来看,双极化具有较好的技术优势和应用前景;快速扫描可以选择相控阵或者大气成像技术,后者似乎更有优势;高精度多种体制似乎都有实现可能,但也存在较大难度。就短期来看,我国应在现有业务雷达网基础上,尽快实现双偏振技术升级,结合建设区域小雷达试验网,增强局地风暴监测能力。长期则需要尽快选定雷达技术体制,开展快速扫描、高精度新型雷达研制和试验。根据美国雷达发展的组织经验,采用国家资助、部门主导、大学主力、公司联合等措施是十分有效的,我国也应该参照组建有关研发机构,集合国内技术领域优势力量,集中攻关,研用结合,持续发展。

由于缺乏精细化观测,我们对中国龙卷的结构和演变特征还多停留在环境条件研究方面,没有建立科学准确的中国龙卷的概念模型,甚至无法验证美国龙卷的监测预警模型是否适用,因而也无法支撑龙卷的精准预测,甚至监测。在模式同化方面,我国基本跟踪掌握了先进的同化方法,建立4DVar、

EnKF等同化系统,但却无法提供高频次的观测资料,从而不能达到理想结果(孙娟珍等, 2016)。我国需要参考美国龙卷探测技术发展经验,适时开展龙卷观测试验,结合现场天气调查(郑永光等, 2016a; 2016b),加深对我国龙卷的科学认知,并及时将高分辨率、高精度雷达应用到数值模式,从而为发展和提高我国龙卷的监测和预警能力提供基础的科学支撑。但我国龙卷发生频率远低于美国(范雯杰和俞小鼎, 2015),加之多发生在暴雨或者台风这样的天气背景下(郑永光等, 2018),如何有效进行龙卷观测试验,需要精心谋划和设计。

本文仅阐述了美国龙卷雷达探测技术发展事实和观测研究,内容仅仅涉及到相关领域和成果的一部分,也没有深入探讨有关技术和方法,具有很大局限性。但旨在为读者提供一个发展脉络、成果展示和调研线索,抛砖引玉,希望国内有关专业机构和科技人员,寻根溯源,更加深入了解相关的技术细节,助力中国龙卷探测能力提升和监测预警业务建设。

参考文献

- 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).
- 孙娟珍,陈明轩,范水勇,2016. 雷达资料同化方法:回顾与前瞻[J]. 气象科技进展, 6(3): 17-27. Sun J Z, Chen M X, Fan S Y, 2016. Radar data assimilation methods: review and future perspective [J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 17-27(in Chinese).
- 张萌,2018. “龙卷”主题文献计量分析[J]. 气象科技进展, 8(2): 62-63. Zhang M, 2018. A bibliometrical analysis of the scientific literature on tornado [J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(2): 62-63(in Chinese).
- 郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 43(6): 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6): 641-652(in Chinese).
- 郑永光,田付友,周康辉,等,2018. 雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查[J]. 气象科技进展, 8(2): 55-61. Zheng Y G, Tian F Y, Zhou K H, et al, 2018. Forecasting techniques and damage survey of convectively driven high winds and tornadoes[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(2): 55-61(in Chinese).
- 郑永光,田付友,孟智勇,等,2016a. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析 [J]. 气象, 42(1): 1-13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al, 2016a. Survey and multi-scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship “Dongfangzhixing”[J]. Meteor Mon, 42(1): 1-13(in Chinese).
- 郑永光,朱文剑,姚聘,等,2016b. 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, 2016b. 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).
- Adlerman E J, 2003. Numerical simulations of cyclic storm behavior, mesocyclogenesis and tornadogenesis[D]. Oklahoma: University of Oklahoma: 217.
- Adlerman E J, Droegemeier K K, Davies-Jones R P, 1999. A numerical simulation of cyclic mesocyclogenesis[J]. J Atmos Sci, 56(13): 2045-2069.
- Berkowitz D S, Schultz J A, Vasiloff S, et al, 2013. Status of dual pol QPE in the WSR-88D network[C] // Proceedings of the 27th Conference on Hydrology. Austin, TX: Amer Meteor Soc.
- Bluestein H B, 2013. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics[M]. Berlin: Springer: 307-360.
- Bluestein H B, French M M, PopStefanija I, et al, 2010. A mobile, phased-array Doppler radar for the study of severe convective storms: THE MWR-05XP[J]. Bull Amer Meteor Soc, 91(5): 579-600.
- Bluestein H B, Pazmany A L, Galloway J C, et al, 1995. Studies of the substructure of severe convective storms using a mobile 3-mm-wavelength Doppler radar[J]. Bull Amer Meteor Soc, 76(11): 2155-2170.
- Bluestein H B, Snyder J C, Houser J B, 2015. A multiscale overview of the El Reno, Oklahoma, tornadic supercell of 31 May 2013[J]. Wea Forecasting, 30(3): 525-552.
- Bluestein H B, Thiem K J, Snyder J C, et al, 2018. The multiple-vortex structure of the El Reno, Oklahoma, tornado on 31 May 2013[J]. Mon Wea Rev, 146(8): 2483-2502.
- Bluestein H B, Weiss C C, French M M, et al, 2007. The structure of tornadoes near Attica, Kansas, on 12 May 2004: high-resolution, mobile, Doppler radar observations[J]. Mon Wea Rev, 135(2): 475-506.
- Brown R A, Lemon L R, 1976. Single Doppler radar vortex recognition: Part II tornadic vortex signatures[C] // Preprints, 17th Conf on Radar Meteorology. Seattle: Amer Meteor Soc: 104-109.
- Brown R A, Wood V T, 2012. The tornadic vortex signature: an update[J]. Wea Forecasting, 27(2): 525-530.
- Burgess D W, Lemon L R, 1990. Severe thunderstorm detection by radar[M] // Atlas D. Radar in Meteorology. Boston: Amer Meteor Soc: 619-647.
- Burgess D W, Magsig M A, Wurman J, et al, 2002. Radar observations of the 3 May 1999 Oklahoma city tornado[J]. Wea Forecasting, 17(3): 456-471.
- Collins W G, Paxton C H, Golden J H, 2000. The 12 July 1995 Pinellas county, Florida, tornado/waterspout[J]. Wea. Forecasting, 15(1): 122-134.
- Crum T D, Alberty R L, 1993. The WSR-88D and the WSR-88D operational support facility[J]. Bull Amer Meteor Soc, 74(9): 1669-1687.
- Crum T D, Saffell R E, Wilson J W, 1998. An update on the NEXRAD program and future WSR-88D support to operations[J]. Wea Forecasting, 13(2): 253-262.
- Cunha L K, Smith J A, Baek M L, et al, 2013. An early performance evaluation of the NEXRAD dual-polarization radar rainfall estimates for urban flood applications[J]. Wea Forecasting, 28(6): 1478-1497.
- Davies-Jones R, Brooks H, 1993. Mesocyclogenesis from a theoretical perspective[M] // Church C, Burgess D, Doswell C, et al. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards. Washington: Amer Geophys Union: 105-114.
- Donaldson R J Jr, Desrochers P R, 1993. Tornado detection and warning by radar[M] // Church C, Burgess D, Doswell C, et al. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards. Washington: Amer Geophys Union: 203-221.
- Dowell D C, Bluestein H B, 2002a. The 8 June 1995 McLean, Texas, storm. Part I: Observations of cyclic tornadogenesis[J]. Mon Wea Rev, 130(11): 2626-2648.
- Dowell D C, Bluestein H B, 2002b. The 8 June 1995 McLean, Texas, storm. Part II: Cyclic tornado formation, maintenance, and dissipation[J]. Mon Wea Rev, 130(11): 2649-2670.
- Dunn L B, 1990. Two examples of operational tornado warnings using Doppler radar data[J]. Bull Amer Meteor Soc, 71(2): 145-153.
- Erickson S, Brooks H, 2006. Lead time and time under tornado warnings: 1986 - 2004[C] // Preprints, 23rd Conf on Severe Local Storms. St. Louis: Amer Meteor Soc.
- French M M, Bluestein H B, PopStefanija I, et al, 2013. Reexamining the vertical development of tornadic vortex signatures in supercells[J]. Mon Wea Rev, 141(12): 4576-4601.
- French M M, Bluestein H B, PopStefanija I, et al, 2014. Mobile, phased-array, Doppler radar observations of tornadoes at X band[J]. Mon Wea Rev, 142(3): 1010-1036.
- Fujita T T, 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales[J]. J Atmos Sci, 38(8): 1511-1534.
- Grzych M L, Bruce D Lee, Catherine A F, 2007. Thermodynamic analysis of supercell rear-flank downdrafts from project AN-SWERS[J]. Mon Wea Rev, 135(1): 240-246.
- Heinselman P, LaDue D, Kingfield D M, et al, 2015. Tornado warning decisions using phased-array radar data[J]. Wea Forecasting, 30(1): 57-78.
- Isom B, Palmer R, Kelley R, et al, 2013. The atmospheric imaging radar: simultaneous volumetric observations using a phased array weather radar[J]. J Atmos Oceanic Technol, 30(4): 655-675.
- Junyent F, Chandrasekar V, 2010. The CASA integrated project 1 networked radar system[J]. J Atmos Oceanic Technol, 27(1): 61-78.
- Kurdzo J M, Nai F, Bodine D J, et al, 2017. Observations of severe local storms and tornadoes with the atmospheric imaging radar[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(5): 915-935.
- Lee W C, Wurman J, 2005. Diagnosed three-dimensional axisymmetric structure of the Mulhall tornado on 3 May 1999[J]. J Atmos Sci, 62(7): 2373-2393.
- Lemon L R, Doswell III C A, 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. Mon Wea Rev, 107(9): 1184-1197.
- Leslie L M, 1971. The development of concentrated vortices: a numerical study[J]. J Fluid Mech, 48(1): 1-21.

- Markowski P M, Richardson Y P, 2009. Tornadogenesis: our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research[J]. *Atmos Res*, 93(1-3): 3-10.
- Markowski P M, Richardson Y P, 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd: 245-260.
- Markowski P M, Richardson Y P, 2014. The influence of environmental low-level shear and cold pools on tornadogenesis: insights from idealized simulations[J]. *J Atmos Sci*, 71(1): 243-275.
- Markowski P M, Straka J M, Rasmussen E N, 2002. Direct surface thermodynamic observations within the rear-flank downdrafts of nontornadic and tornadic supercells [J]. *Mon Wea Rev*, 130(7): 1692-1721.
- Marquis J, Richardson Y, Wurman J, et al, 2008. Single- and dual-Doppler analysis of a tornadic vortex and surrounding storm-scale flow in the Crowell, Texas, supercell of 30 April 2000[J]. *Mon Wea Rev*, 136(12): 5017-5043.
- Pazmany A L, Mead J B, Bluestein H B, et al, 2013. A mobile rapid-scanning X-band polarimetric (RaXPo) Doppler radar system [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 30(7): 1398-1413.
- Polger P D, Goldsmith B S, Przywarty R C, et al, 1994. National weather service warning performance based on the WSR-88D [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 75(2): 203-214.
- Ryzhkov A V, T J Schuur, D W Burgess, et al, 2005. Polarimetric tornado detection[J]. *J Appl Meteor*, 44: 557-570.
- Schenkman A D, Xue M, Shapiro A, et al, 2011a. The analysis and prediction of the 8-9 May 2007 Oklahoma tornadic mesoscale convective system by assimilating WSR-88D and CASA radar data using 3DVAR[J]. *Mon Wea Rev*, 139(1): 224-246.
- Schenkman A D, Xue M, Shapiro A, et al, 2011b. Impact of CASA radar and Oklahoma mesonet data assimilation on the analysis and prediction of tornadic mesovortices in an MCS[J]. *Mon Wea Rev*, 139(11): 3422-3445.
- Schultz D M, Richardson Y P, Markowski P M, et al, 2014. Tornadoes in the central United States and the "Clash of Air Masses" [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 95(11): 1704-1712.
- Smith R K, Leslie L M, 1978. Tornadogenesis [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 104(439): 189-198.
- Snook N, Xue M, Jung Y, 2011. Analysis of a tornadic mesoscale convective vortex based on ensemble Kalman filter assimilation of CASA X-band and WSR-88D radar data[J]. *Mon Wea Rev*, 139(11): 3446-3468.
- Trapp R J, Davies-Jones R, 1997. Tornadogenesis with and without a dynamic pipe effect[J]. *J Atmos Sci*, 54(1): 113-133.
- Trapp R J, Fiedler B H, 1995. Tornado-like vortexgenesis in a simplified numerical model[J]. *J Atmos Sci*, 52(21): 3757-3778.
- Trapp R J, Mitchell E D, Tipton G A, et al, 1999. Descending and nondescending tornadic vortex signatures detected by WSR-88Ds[J]. *Wea Forecasting*, 14(5): 625-639.
- Wicker L J, Wilhelmson R B, 1995. Simulation and analysis of tornado development and decay within a three-dimensional supercell thunderstorm[J]. *J Atmos Sci*, 52(15): 2675-2703.
- Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al, 1998. Evaluating the performance of WSR-88D severe storm detection algorithms[J]. *Wea Forecasting*, 13(2): 513-518.
- Wurman J, 2002. The multiple-vortex structure of a tornado[J]. *Wea Forecasting*, 17(3): 473-505.
- Wurman J, Kosiba K A, 2008. DOW observations of multiple vortex structure in several tornadoes[C]//Preprints, 24th Conf on Severe Local Storms, Savannah: Amer Meteor Soc.
- Wurman J, Kosiba K, 2013. Finescale radar observations of tornado and mesocyclone structures[J]. *Wea Forecasting*, 28(5): 1157-1174.
- Wurman J, Kosiba K, Markowski P, et al, 2010. Finescale single- and dual-Doppler analysis of tornado intensification, maintenance, and dissipation in the Orleans, Nebraska, supercell[J]. *Mon Wea Rev*, 138(12): 4439-4455.
- Wurman J, Randall M, 2001. An inexpensive, mobile, rapid-scan radar. 30th Int Conf on Radar Meteorology[R/OL]. [2018-12-17] [hps://ams.confex.com/ams/30_radar/techprogram/paper_21577.htm](https://ams.confex.com/ams/30_radar/techprogram/paper_21577.htm)
- Wurman J, Richardson Y, Alexander C, et al, 2007a. Dual-Doppler and single-Doppler analysis of a tornadic storm undergoing mergers and repeated tornadogenesis[J]. *Mon Wea Rev*, 135(3): 736-758.
- Wurman J, Richardson Y, Alexander C, et al, 2007b. Dual-Doppler analysis of winds and vorticity budget terms near a tornado[J]. *Mon Wea Rev*, 135(6): 2392-2405.
- Wurman J, Robinson P, Lee W, et al, 2008. Rapid-scan mobile radar 3D GBVTD and traditional analysis of tornadogenesis[C]//Preprints, 24th Conf on Severe Local Storms, Savannah: Amer Meteor Soc.
- Wurman J, Straka J M, Rasmussen E, et al, 1997. Design and deployment of a portable, pencil-beam, pulsed, 3-cm Doppler radar[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 14(6): 1502-1512.
- Wurman J, Straka J M, Rasmussen E N, 1996a. Preliminary radar observations of the structure of tornadoes[C]//Preprints, 18th Conf on Severe Local Storms, San Francisco: Amer Meteor Soc: 17-22.
- Wurman J, Straka J M, Rasmussen E N, 1996b. Fine-scale Doppler radar observations of tornadoes[J]. *Science*, 272(5269): 1774-1777.
- Xue M, Tong M J, Drogemeier K K, 2006. An OSSE framework based on the ensemble square root Kalman filter for evaluating the impact of data from radar networks on thunderstorm analysis and forecasting[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 23(1): 46-66.
- Yu T Y, Orescanin M B, Curtis C D, et al, 2007. Beam multiplexing using the phased-array weather radar [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 24(4): 616-626.
- Yussouf N, Stensrud D J, 2010. Impact of phased-array radar observations over a short assimilation period: observing system simulation experiments using an ensemble Kalman filter[J]. *Mon Wea Rev*, 138(2): 517-538.
- Zrnic D S, Kimpel J F, Forsyth D E, et al, 2007. Agile-beam phased array radar for weather observations[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(11): 1753-1766.