

文章编号: 2096-1618(2018)05-0477-13

龙卷的雷达探测研究进展

何建新^{1,2}, 曾强宇^{1,2}, 王皓^{1,2}, 史朝^{1,2}

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

摘要:综述国内外龙卷探测技术、外场观测试验、组网观测技术等研究进展,总结全球龙卷风雷达探测技术和分析方法现状,介绍龙卷探测雷达,展望中国龙卷风探测、研究和预警业务发展的未来。

关键词:龙卷风; 雷达; 观测实验; 雷达组网; 探测技术; 分析方法

中图分类号:P445⁺.1

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2018.05.001

0 引言

龙卷是在强烈不稳定天气条件下产生的小尺度的对流涡旋,中心风速可达100~200 m/s,是破坏性极大的灾害性天气。龙卷生消迅速,通常维持时间几分钟到几十分钟,最长不超过数小时^[1],所以龙卷探测和预警预报十分困难。目前对龙卷的探测主要有三种方式,第一种是自动气象站进行的观测,第二种是灾情评估进行间接分析,第三种是雷达监测。由于自动气象站分布极不均匀且密度稀疏(相对龙卷尺度),难以准确地跟踪龙卷的实时演变状况,而灾情评估方法也很难反应龙卷的变化特征,雷达测量可以提供高时空分辨率的龙卷及其雷暴云体的三维风场结构以及降水分布状况,可以有效地对龙卷的发生发展过程进行跟踪与识别,获得预警预报信号。

龙卷研究始于1916年,美国开始龙卷的灾情分析报告。1952年,美国国家气象局开始发布龙卷预报^[2](Grazulis,1990)。1953年,实施了龙卷探测预警计划并建立了龙卷观察员网络。20世纪70年代,美国气象局(National Weather Service, NWS)使用藤田级数(Fujita Scale),根据损害程度对龙卷进行评级^[3],并通过报纸和照片对历史龙卷报告进行追溯评级。20世纪80年代,随着多普勒天气雷达(WSR-88D)的应用,正式开启了利用雷达探测技术对龙卷进行识别与跟踪^[4]。20世纪90年代初,随着移动式多普勒雷达技术发展和DOWs(Doppler on Wheels, DOWs)计划雷达的应用,龙卷探测能力进一步提高,FO级龙卷报告数量持续增长,观察到的龙卷和实际数量之间的差值逐渐减小^[5-6]。在此期间龙卷的检测率从之前的35%增

加到60%,预警平均时间从5.3 min增加到9.5 min,误报率也略有下降^[7]。1994年VORTEX(verification of the origins of rotation in tornadoes experiment)的研究成果将龙卷的预警时间提前到13 min^[8]。2012年,相控阵雷达“创新感知实验”验证了快速扫描的相控阵天气雷达能有效提高龙卷预警时间,可将龙卷预警时间提前到20 min^[9]。

由于气象部门对提升龙卷预警时间的需求愈发强烈,对雷达的研制及探测方式上也提出了更高的要求。本文将以龙卷的雷达探测方法及技术两个方面总结目前雷达探测龙卷的研究现状,并提出目前存在的问题及未来龙卷探测雷达的发展趋势,以期为中国龙卷探测雷达的研制与理论分析研究提出更多的参考。

1 龙卷观测

1.1 观测试验

VORTEX三次观测试验在雷达探测龙卷的研究中具有里程碑式的重要意义,这些试验使用并检验了大量的最新设备,得到了许多全新的观测结论。

1.1.1 VORTEX(1994-1995年)

20世纪后期,龙卷和超级单体风暴的研究取得了很大的进展,但大部分研究成果来自理论、数值模型以及低分辨率观测数据。VORTEX项目始于1994年,旨在解释龙卷如何形成。VORTEX项目开创了连续二十多年使用移动雷达对龙卷风暴的探测实验,并大大增强了对龙卷的理解^[10]。

1994-1995年两年多的观测,扩大了龙卷风暴样本的规模,通过数据分析,改进了探测技术和组网探测方法。VORTEX试验在美国南部和中部平原,该地区

收稿日期:2018-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41375043、41405030、41505031)

是观察龙卷和龙卷风暴的理想区域,地形相对平坦有较好的能见度,具备良好的道路和网络条件。观测团队部署大约18辆配备定制仪器的车辆,实现精细化测量和分析龙卷及周围的环境场。为监测潜在的龙卷风暴,研发和使用了一系列的仪器用于观测龙卷,包括快速扫描移动多普勒雷达^[11-12], FM-CW和W波段雷达^[13], 移动中尺度站^[14], 移动气球探测系统, 以及一架装备机载雷达的飞机^[15]。这些当时最先进的观测仪器能够观测到龙卷和超级单体的精细化结构, 为龙卷理论研究提供了前所未有的细节和广度。VORTEX项目侧重于研究以下3个科学问题: 龙卷风暴与环境场的相互作用, 龙卷和中气旋和低层中气旋的关系以及龙卷的结构和动力学。

1996-2008年, 基于VORTEX项目的研究成果, 开展了几个针对龙卷和超级单体的VORTEX后续研究计划。SUB-VORTEX重点研究RFD(rear-flank downdraft)^[16]。ANSWERS(analysis of the near-surface wind and environment along the rear-flank of supercells)侧重于热力学观测, 主要使用移动观测车辆来研究下沉气流(downdraft)的性质及其与龙卷发生的关系^[17]。ROTATE(radar observation of thunderstorms and tornadoes experiment)^[8]利用移动高分辨率雷达研究龙卷的消过程。ROTATE在VORTEX项目的13年(1996-2001年和2003-2008年)中, 使用了多部DOW雷达, 包括Rapid DOW, 移动中尺度站等设备收集了大约140种不同龙卷和许多非龙卷超级单体的雷达数据, 构建了基于雷达的龙卷动力学、气候学特征。

1.1.2 VORTEX2(2009-2010年)

VORTEX2是历史上最大的龙卷研究项目, 旨在探索龙卷形成的时间和原因。VORTEX2项目由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和美国国家科学基金会(NSF)资助, 100多名来自世界各地的科学家参与了这个项目。VORTEX2以VORTEX的研究成果为基础, 重点研究以下4个科学问题^[8]: ①龙卷的成因, 包括downdrafts对龙卷生成的影响, 龙卷发生对微物理和热力学环境, 超级单体发展成重大龙卷的模式; ②超级单体与环境场的关系, 包括超级单体之间的相互作用对形成龙卷的影响, 环境差异性对超级单体形成龙卷的影响; ③龙卷的低层风场, 包括龙卷的低层风场特性, 损害与风速, 加速度和持续时间之间的关系; ④暴风尺度数值天气预报, 包括分析和预测超级单体、中气旋和龙卷, 风暴尺度模式的参数化误差评估和风暴尺度的资料同化方法, 风暴发生前中尺度环境的分析与预测。

相比VORTEX, VORTEX2使用了更多更先进的探

测仪器。VORTEX2项目使用了12部雷达, 包括2部C波段雷达(SMART-R1, SMART-R2), 6部X波段雷达(DOW6, DOW7, Rapid DOW, NOXP, UMass XPol, MWR-05XP), 2部Ka波段雷达(TTUKa1, TTUKa2), 1部W波段雷达(UMass W)和1部车载测风激光雷达(TWOLF)^[18]。探测仪器包括18部龙卷探测器(Tornado Pods)^[19], 24部移动气象观测平台(Stick-Net)^[20], 无人机系统, 10部移动中尺度气象站(Mobile Mesonets), 11部激光雨滴谱仪等。

1.1.3 VORTEX-SE(2016-2017年)

VORTEX-SOUTHEAST(以下简称VORTEX-SE)旨在了解美国东南部特有的环境因素如何影响该地区龙卷的形成、强度、结构和路径特征, 如何将龙卷预报的不确定性告知公众并评估公众的反应, 提高龙卷预报预警质量。主要目标是获取新知识, 提高预测和预警系统的准确性, 降低美国东南部龙卷的伤亡率^[21]。在VORTEX和VORTEX2的基础上, VORTEX-SE重点研究以下5个科学问题: ①对流可用势能(convective available potential energy, CAPE)对龙卷的影响, 包括CAPE的数值分析和CAPE与风暴持续时间的关系; ②美国东南部的夜间龙卷和夜间边界层演化模型; ③使用历史数据分析地形和大尺度环境对龙卷风暴的影响; ④准线性对流系统龙卷(quasi-linear convective systems, QLCS); ⑤龙卷及其龙卷风暴与环境特征的相关性。VORTEX-SE侧重于使用历史数据集对龙卷的机理与环境变量进行研究, 研究大于单个风暴尺度的天气现象及地形对风暴的影响, 研究龙卷发生环境中的风暴内部过程。VORTEX-SE使用高分辨率的X波段雷达网络可以非常高的时空分辨率观测低层对流层, 有利于提高恶劣天气的预警能力, 补充现有天气雷达网络, 提高对龙卷的监测能力^[22]。

1.2 观测方法

随着技术的不断提升以及对精细化观测的进一步需求, 对龙卷的监测经历了传统的定点雷达观测到移动雷达观测, 目前采用雷达组网观测的方式则成为了龙卷预警预报工作研究的重点。当前开展的雷达组网研究工作具有代表性的主要有以下几个。

1.2.1 IPs

为提高中小尺度危险天气预报的准确性, 延长预报预警时间, 2003年9月, 大气协同自适应遥感工程研究中心CASA(collaborative adaptive sensing of the atmosphere)提出一种新的探测技术, 计划布置5个试验站点, 被称为IPs(integrative projects)。IPs采用分布式协同自适应探测模式。利用大量的小功率雷达, 通

过合理的空间分布进行全方位的扫描,以减小地球曲率和地形阻挡的影响。多部雷达组成网络进行协同观测,实现对对流型降水、雷暴、冰雹、龙卷、局地暴雨、山洪和下击暴流等气象灾害精细化观测^[23]。

IP1 位于俄克拉荷马州的西南部,于 2006 年 1 月开始布设,4 月开始运行。主要研究低空风灾及相关灾害性天气的观测。它由 4 部低成本、低功耗、短程、X 波段双极化多普勒天气雷达组成,每一部雷达的探测距离为 30 km,4 部雷达分布在近似菱形的顶点,雷达间相距约 25 km,能够提供时间分辨率为 60 s 和空间分辨率为 100 m 的高分辨率数据。IP2 安装在德克萨斯州的休斯顿,主要目的是改进城市洪水的监测和预报。IP3 于 2010 年 1 月成功安装在波多黎各,是一个学生主导的实验平台,研究复杂地形下的热带降水和由此引发的洪水和山体滑坡。IP4 被称为 CLEAR,主要研究无降水大气中的风场测量,以改进对对流的发源地和污染物输送的预报。IP5 是 IP1 的升级实验平台,综合采用 CASA 工程中发展的技术。

1.2.2 DFW

Dallas-Fort Worth (DFW) 城市遥感网络由高分辨率 X 波段雷达 (XUTA) 网络和国家气象服务 S 波段雷达系统 (即 KFWS 雷达) 组成。在 DFW 雷达网的基础上,CASA 开发了端到端警报系统,包括传感器、软件架构、产品、数据传播和可视化以及用户决策模块。CASA 设计的 DCAS 架构包括分布式双极化 X 波段雷达、动态数据收集处理模块、实时天气特征检测以及管理系统资源分配的算法和用户交互接口。

DFW X 波段雷达使用高性能基座组件,该组件能够实现高加速度和快速来回 PPI 和 RHI 扫描。DFW 城市演示网络有两种扫描策略。一种是 DCAS 模式,根据不断变化的大气条件和最终用户需求快速配置每个雷达节点。在 DCAS 模式下进行体积扫描时间约为 1 min。另一种是常规扫描模式,每个雷达在 1 min 内以 1°、2° 和 3° 仰角进行 3 次完整 PPI 扫描^[24]。DFW 城市遥感网络的主要目标如下:①探测边界层为重点的大气条件,获取高分辨率三维数据。②检测和预报恶劣天气灾害,包括大风、龙卷、冰雹和山洪。③为决策者创建社区规模的气象预测和预警,并评估预警收益。④使用 X 波段雷达网络评估现有天气预报产品的性能指标和附加价值。

高分辨率 X 波段雷达网络与其他仪器之间的数据融合是创建高质量网络产品的关键。CASA 对各种雷达之间时空采样差异提出了解决方案。时间上,KFWS 雷达每 5~6 min 完成一次体积扫描,X 波段雷达网络每 1 min 完成一次体积扫描。空间上,随着到雷

达的距离增加,波束展宽,KFWS 雷达空间分辨率严重下降,而 X 波段雷达网络具有更高的分辨率。多个 X 波段雷达首先组合为单一网以产生高分辨率产品 (250 m×250 m×1 min)。为了匹配 X 波段网络产品的分辨率,通过使用分段三次多项式 Hermite 插值将 S 波段 KFWS 雷达的产品内插到 1 min 分辨率。空间上使用 Cressman 加权将距离雷达 100 km 范围内的极坐标的 KFWS 雷达产品映射到 250 m×250 m 网格上。随后将 KFWS 雷达和 X 波段雷达网络的相同时空尺度的产品合并以生成网络级产品。

DFW 雷达网络的拓扑结构允许对对流层低层进行高分辨率观测,同时提供大面积重叠覆盖,在龙卷期间获取实时产品。数据处理系统接收到雷达数据后自动化处理,每分钟处理不断更新,适用于突发风灾的实时检测,如龙卷和微爆。实时风产品立即发送到预报和应急管理部门,发布龙卷和高风警告。

1.2.3 其他雷达网络

德国气象局 (Deutscher Wetterdienst, DWD) 的雷达网络获取 3D 高时空分辨率多普勒数据,用于识别和跟踪动态小尺度天气现象。DWD 开发了软件框架极化雷达算法 (POLARA),以便更好地利用现有遥感数据。POLARA 包括数据处理和质量控制算法,双 PRF 预处理算法,中气旋检测算法 (MCD)。预报员利用环境数据、MCD 产品、瞬时方位角剪切产品和预测轨迹相结合来分析超级单体^[25]。

2 技术与方法

2.1 龙卷探测技术

2.1.1 多普勒天气雷达探测

20 世纪 70 年代美国强风暴实验室 (the national severe storms laboratory, NSSL) 首次开展了多普勒天气雷达对龙卷的探测研究工作^[26]。NSSL 的 S 波段脉冲多普勒天气雷达于 1973 年 5 月 24 日在 Oklahoma Union City 附近第一次观察到了龙卷的涡旋特征 (tornado vortex signature, TVS)^[27-28]。该特征主要出现在强风暴的中层位置,随着时间的推移逐渐下降至地面附近,具有垂直连续性及时间持续性的特点^[27]。进一步分析发现该涡旋周围相邻的两个距离库之间 (相距约 900 m) 存在较大的速度切变,在这两个位置上分别具有该区域中最大的正负径向速度值。同时,还观测到该特征在龙卷形成前 23 min 就已非常明显地出现在了强风暴的中层位置,根据该特征可以提升龙卷的预警时间。1973-1976 年,NSSL 多普勒雷通过对龙卷多次

的观测以及模式模拟等方法深入分析了 TVS 所具有的特征来验证 TVS 作为预警指标的可行性^[29]。通过对 10 次龙卷事件的观测,发现 TVS 通常出现在龙卷形成前 10 多分钟,从而将 TVS 作为了实时的龙卷预警信号。

随着对 TVS 作为龙卷预警指标研究的进一步深入,研究者逐渐将龙卷的探测集中在了对龙卷及中气旋相关特征的自动识别上。在 20 世纪 80 年代,NSSL 的研究者通过计算中气旋的尺度及径向风速的方位切变特征设计开发了一套中气旋的自动识别算法 MDA (mesocyclone detection algorithm)^[30]。该算法通过建立新的阈值范围(包括强度、时空连续性等)降低了之前 WSR-88D B9MA 算法中存在的高虚警率问题,同时也克服了之前算法对较远距离出现的中气旋难以探测到的缺点^[31]。在 20 世纪 90 年代末 NSSL 对 MDA 算法进行了进一步改进,它代替了原算法中需要首先判断强度阈值这一步骤,增加了对所有具有对流尺度的涡旋(直径在 1~10 km)的探测和分析,同时再判定该涡旋是否具有产生龙卷的可能性。该算法的改进为龙卷预警工作提供了更多更可靠的诊断信息。改进后的 MDA 算法大大提升了强对流天气过程中存在的涡旋的识别^[32]。

随着大量龙卷事件的出现,研究者发现由于 TVS 严格的阈值范围,导致了出现较低的 POD(<5%),尽管同时也具有较低的 FAR(<5%)^[33,34]。为了解决低探测率的问题,从 1990 年开始,NSSL 便与美国联邦航空管理局(federal aviation administration, FAA)和美国国家气象局设备设施处(NWS operational support facility, OSF)合作,开发研究出了一套新的龙卷探测算法(tornado detection algorithm, TDA)。该算法主要对 TVS 的三维特征进行分析,并建立了一种追踪龙卷涡旋及描述龙卷强度的新方法。该算法与 TVS 相比最大的区别在于 TVS 是只针对发生在超级单体风暴中的龙卷,并且该超级单体风暴还需要具有不断旋转上升的中气旋。而 TDA 在此基础上增加了对非超级单体龙卷^[35]的识别,扩大了算法的检测范围。同时,伴随着 WSR-88D 雷达网的布设,在获取不同区域、不同季节、不同环境条件下大量的龙卷数据的基础上,研究者通过不断测试与改进该算法^[34],为预报员提供了龙卷涡旋发展更为详尽的信息^[36-37]。

尽管基于 WSR-88D 雷达的 TDA 龙卷探测方法目前已成为龙卷预警预报的主要方法之一,但是其探测龙卷的能力会受到雷达采样能力的限制。比如对尺度(直径 1~2 km 的龙卷)大于雷达采样体积,并且发生位置离雷达较近(<20 km)的龙卷的探测就会出现困

难,因为 TDA 难以检测到相邻距离库间存在的风速切变。同时,由于许多龙卷的生命史不足 5 min,当前的 WSR-88D 体扫模式也不足以对龙卷整个生成和消亡过程进行全面刻画^[38]。

2.1.2 双极化天气雷达探测

伴随着 WS-88D 雷达的升级换代,双极化天气雷达的应用为龙卷微物理特征及动力学机制的研究提供了强有力的手段。双极化雷达不仅能提供目标对两种不同极化状态电磁波的后向散射信号强度的变化信息(水平反射率因子(Z_H))和相位(平均径向速度(V)、谱宽(W)),还能提供目标相对两种不同极化状态电磁波后向散射回波的差异信息(差分反射率因子(Z_{DR}),双程传播相位差(Φ_{DP}),差分传播相移(K_{DP}),同步互相关系数(ρ_{HV})和线性退极化率(L_{DR}))。这些双极化变量对于水成物的形状、尺寸、取向、相态等属性敏感,所以综合这些变量能够有效识别目标物的类型^[39],尤其是对于龙卷碎片特征(tornadic debris signatures, TDS)的识别。Ryzhkov 等(2002)第一次利用 NSSL 的 Cimarron 双极化天气雷达对一次龙卷过程进行了分析,显示了基于双极化天气雷达对龙卷进行探测和预警的巨大潜力^[40]。他们详细研究了龙卷接地之前地面和高空中双极化雷达参量的三维分布情况,认为在钩状回波区域中当 ρ_{HV} 异常偏低,同时 Z_{DR} 接近于 0 时大概率会出现龙卷事件。为了进一步验证双极化天气雷达在龙卷探测与预警的能力,Ryzhkov 等(2005)对 Oklahoma 地区的 3 次龙卷进行了深入研究,呈现出的共同点都是在钩状回波区域龙卷碎片表现出非常低的相关系数 ρ_{HV} (低于 0.8)和差分反射率 Z_{DR} (低于 0.5 dB)^[41]。Bluestein(2007)在研究中除了得到类似的结论外,还发现相关系数 ρ_{HV} 相对于差分反射率 Z_{DR} 而言在判断 TDS 时更为有效,因为其对信号的衰减并不敏感^[42]。在此基础上,对龙卷的探测与预警研究逐渐发展出自动化的探测算法。Wang 和 Yu(2015)认为由于龙卷主要具有四大特征,即相邻方位角上的速度巨大差异(涡度或切变特征),较大的谱宽(谱特征),低差分反射率及相关系数(双极化特征)。在这些特征的基础上,利用神经元自适应系统提出了一种新的龙卷自动探测算法(neuro-fuzzy tornado detection algorithm, NFTA),利用该算法对 17 次龙卷事件进行了识别,得到了较满意的预警预报结果,其中 POD 达到了 86%,FAR 为 11%^[43]。另外,近年来对实际龙卷风速的研究也有了一定的进展,Umeyama 等(2017)重点研究了龙卷过程中的谱特征,因为龙卷中碎片和水凝物的速度是不一样的,所以双极化谱密度可以用于碎片和水凝物的识别,然后进一步利用碎片

离心法将碎片产生的速度偏差滤除^[44]。

双极化技术的出现对多普勒天气雷达探测中气旋和龙卷进行了有力的补充,全面提升了对龙卷微物理特征分析与预警预报水平。①由于多普勒天气雷达对较小尺度的龙卷涡旋探测需要具有良好的空间分辨率,然而对双极化探测而言并不需要太高的精度^[45]。②双极化特征信号不同于多普勒特征信号,由于其是“各向同性”的,所以并不依赖于观测角度的变化。③当龙卷在夜间发生或被大量降水包裹着难以通过多普勒雷达观测发现时,双极化信息更能有效地将其识别。

2.1.3 快速扫描雷达探测

当前 WSR-88D 雷达探测网采用 VCP12 模式完成一次体扫的最快时间需要4.2 min^[46],而对于像龙卷这样的小尺度系统往往生命史低于4.2 min,甚至有些龙卷只持续了数十秒^[47],所以在这种条件下是很难观测到龙卷的整个演变过程。为了对龙卷发生发展情况能达到全面完整的探测,这就需要发展具有快速扫描能力的雷达系统。由于常规的相控阵雷达成本较高,并且固定的快速扫描雷达在龙卷发生位置较远时分辨率会受到极大影响。

基于上述原因,Wurman 设计开发了第一部 X 波段移动式快速扫描雷达 Rapid DOW,该雷达每7 s可以完成一次 360°的体扫,在14 s的时间里可以探测到12个波束范围的数据,并且其距离分辨率达到11 m,更易于对龙卷三维结构进行研究^[48]。Kosiba 等利用 Rapid DOW雷达第一次研究了龙卷边界层三维结构及其演变情况,并且发现龙卷的边界层与流入层非常浅薄,距离地面约10~14 m^[49]。随着技术的不断发展,Bluestein 等引入了第二部用于探测龙卷的快速扫描雷达 MWR-05XP^[50],该雷达采用电子扫描技术,是一部 X 波段、移动式相控阵多普勒雷达,其波速宽度(半功率)为1.8°(方位角)及2.0°(高度角),能在24 s的时间里获得 360°×20°的体扫数据,同时也具有较高的灵敏度(在10 km的范围为-15 dB)。2007 年开始,该雷达就已用于对超级单体和龙卷的三维结构变化的观测,尤其是对龙卷涡旋特征(TVS)的垂直发展情况展开研究^[51]。鉴于前面两部雷达在观测雷达结构时不具有粒子相态的识别功能,这限制了对龙卷形成微物理特征的研究,故第三部快速扫描雷达 RaXPoI 增加了双极化的功能^[52],由于其具有高速天线基座与频率捷变雷达系统,可以在2 s的时间里完成 360°的 PPI 扫描。RaXPoI 雷达的出现为超级单体中层位置信息的获取起到了非常关键的作用,因为可以通过双极化变量得到关于云微物理信息同超级单体中主要上升气流间的关系,可以进一步促进对云动力学更深入了解^[53]。目

前最新的移动式快速扫描雷达是由 Isom 等设计完成的一部大气成像雷达 AIR^[54],该雷达第一次尝试利用雷达成像技术对强对流风暴、龙卷、阵风风及密度流等过程进行观测与分析^[55]。该雷达使用多波束技术,主要特点是每一个脉冲信号形成一个 RHI(距离高度显示),并且天线只沿方位角的方向转动,AIR 能在6 s内完成 90°×20°的三维扫描信息,可以获得此区间各个方位角上的 RHI 信息^[56]。在研究相控阵天气雷达的工作中,许多预报员也积极参与到相控阵雷达创新遥感实验(phased array radar innovative sensing experiments, PARISE)中,进一步评估更高时间分辨率的相控阵雷达数据对其预报的影响,他们认为,快速扫描数据可以有效帮助他们识别恶劣天气早期特征,并提高对龙卷预警准确性^[57]。

从当前对龙卷的探测技术来看,快速扫描雷达在时空尺度上对龙卷观测独特优势。而美国计划的下一代天气雷达网络也定位为多功能相控阵雷达(multi-function phased array radar, MPAR)^[58]。所以可见该技术未来必将成为研究该类天气的主要手段。

2.2 龙卷分析方法

2.2.1 双(多)多普勒三维风场反演

由于多普勒天气雷达可以提供反射率因子径向速度、速度谱宽和的测量值,而不能测得风矢量的另外两个投影分量(水平方向和垂直方向),从而导致只有在水平均匀流场等假设下才能获得三维风场结构。但在强对流条件下这种条件就难以达到,因为在强风暴中气流速度在时空上的分布极不均匀,所以仅用单部雷达获得的速度资料来推断风场的三维分布变得难以实现。1969 年,Armijo 在笛卡儿坐标系下提出了利用两部 and 三部多普勒天气雷达联合探测大气三维风场的方法,该方法理论上可以通过多部雷达同时对空中某一点进行探测,联合求解多个方程从而获得水平风速风向以及垂直速度的大小^[59]。但该方法存在很多的局限性,首先它需要将地球曲面视为平面,并且探测范围要处于地球平面垂直正交面的同一侧。另外,对粒子下落末速度的计算、连续方程边界条件的设定、空间插补方案的确定、径向风场的离散化、和观测的协同性等都会对反演精度产生较大的影响^[60]。后续的研究中,大量的研究者^[61-65]在此算法的基础上进行了不断的改进,通过减少运算中的迭代次数、优化插值算法、改良雷达扫描方式等从很大程度上提高了雷达风场反演精度和可靠性。

总的来说,这些反演方法普遍附加了线性、局地均匀等过程的假设条件,反演结果的质量会受到限制,适

用范围较窄。由于龙卷系统变化十分迅速,这就要求雷达具有良好的协同扫描能力,能够保证数据的同步性(尤其是对于三部雷达协同扫描的同步性)。另外,对于双多普勒雷达反演风场的误差分析表明,只有在观测基线(两部多普勒雷达之间的连线)左右两侧的一定范围内,反演所得的风场才能获得令人满意的结果,难以满足中尺度业务分析的要求。并且观测基线不能太长,否则反演结果将有较大误差。

2.2.2 基于地基速度的示踪法(ground-based velocity track display, GBVTD)

对于三维风场结构的获得,其中一个重要条件就是需要两个或多个多普勒雷达位于特定的位置上,但这对发生在该雷达网较近位置的龙卷就很难探测到。而且,双(多)多普勒分析的空间分辨率会受到消除噪声数据所需的客观分析的限制。因此,研究者开展了利用单多普勒技术用于三维风场的反演。在20世纪90年代末, Lee 提出了基于地基速度的示踪技术(GBVTD)^[66], 该方法的原理是利用中尺度气旋环流本身风场具有轴对称的特性(比如热带气旋、龙卷等),使用几何方法将雷达观测的水平多普勒径向速度风场进行傅立叶级数展开,从而获得中尺度气旋的径向风速和切向风速的轴对称平均值、高次项的振幅和相位值,进一步求出各次项的径向与切向风速后,便可以得到中尺度气旋三维风场结构^[67]。目前 GBVTD 方法已经广泛应用到对龙卷的研究工作中, Tanamachi 与 Bluestein 基于 W 波段雷达数据,采用 GBVTD 方法分析了发生于1999年5月 Stockton, Kansas 地区的一次龙卷过程,他们发现龙卷强度最大的时候平均最大方位角风速会随着最大风速半径的减小而增加,而在龙卷消散时,平均最大方位角风速、最大风速半径以及龙卷中心涡度都会同时减小^[68]。Kosiba 等基于该方法研究了一次强龙卷过程的轴对称三维风场结构,并进一步得到了更为详细的风场内部信息^[69]。Wakimoto 等利用 GBTVB 方法揭示了龙卷过程中的垂直速度,径向和切向速度,扰动压强,垂直涡度以及角动量与其可视化特征之间的关系^[70]。

GBVTD 具有更为重要的优点是它可以应用于原始多普勒速度数据,从而提供优于双多普勒分析的分辨率。但该方法存在的缺点也很明显,由于雷达测量的是散射体的反射率加权平均值而不是实际的龙卷风速,因为在实际的龙卷发展过程中,尤其是在龙卷尺度发展较大的时候,由于离心力的原因会使得龙卷所携带的碎片和水凝物粒子间的速度具有较大的差异,从而影响到对实际龙卷风速的判断和分析。

2.2.3 雷达资料在数值模式中的同化

在现有观测的基础上为了对龙卷这样的小尺度天气系统能有更深入的内部机理研究,这就需对该系统的相关三维热力特征、动力特征、水汽特征等进行重建与模拟。所以数值模拟为研究龙卷外部环境、内在结构、演变机制及预警预报提供了可能。Lilly 讨论了对对流尺度天气系统进行数值预报的可行性以及面临的挑战,并认为大范围的雷达探测网、快速提升的计算机水平、不断改进的数值模拟技术和先进资料同化方法都为对流尺度数值预报的实现和应用奠定了基础^[71]。由于数值模式常规的初始场资料来源于大尺度观测网,通过模式自身的运行,从而获得相应气象要素的演变情况。但对于中小尺度天气系统而言,利用该初始场资料所得到的模拟结果和实际相比往往会产生较大的偏差。若可以将中小尺度天气系统的相关信息提供到模式初始条件中,理论上便达到提升对流天气预报精度的可能性。鉴于雷达资料在对流天气监测和临近预报上具有的独特优势,许多研究者逐渐尝试将雷达观测资料同化到数值预报模式的初始场中^[72],目前对雷达资料进行同化主要有三维变分同化法^[73], 四维变分同化法^[74]以及集合卡曼滤波法^[75],进一步提升了对龙卷进行模拟及预报的水平。Snook 等将 CASA 雷达数据同化进对流尺度的数值模式中,并作了一系列的试验。结果表明:在不加入 CASA 数据,只同化常规的 WSR-88D 数据就能得到对流系统较准确的模拟结果,但进一步加入 CASA 数据时,还能呈现出对流系统的环流特征以及低层的风场结构^[76]。Wheatley 等利用集合卡曼滤波法同化了多普勒反射率和径向速度数据,同化后的结果显示,在龙卷发生前的30 min就能获得雷暴云低层位置气流的旋转状况及涡旋的范围^[77]。Supinie 等基于 VORTEX2 外场观测试验对发生于2009年6月5日 Goshen, Wyoming 地区的一次龙卷过程进行了数值模拟研究。研究结果表明,大多数移动雷达观测资料的加入,都能对模拟结果起到正效果^[78]。

尽管目前将雷达资料同化加入数值模式中对龙卷过程进行研究已取得了许多显著成果,但目前仍面临各种困难和挑战。除了常规的雷达资料预处理和质量控制以外,如何建立天气尺度和对流尺度间的动力平衡也是需要考虑的问题。另外,随着双极化天气雷达的业务化普及,如何将双极化资料同化进数值模式中也是需要解决的一大课题。

3 存在的问题及展望

尽管目前利用雷达观测与数值模式对龙卷的发生

发展过程有了更深的认识,但对龙卷的生成机理的认识还不全面。比如,在相似的外部环境下,有些超级单体会产生龙卷,而另一些则不会;而每次龙卷过程的发生是否都会经历斜压作用形成水平涡管这一过程;大气环境场的动力、热力、水汽条件达到怎样的程度才能导致龙卷的发生等诸如此类的问题目前依然存在争论,但也相应地对探测方式以及数值模式方法提出了新的要求。

在探测方式上,无疑采用快速扫描雷达是目前对龙卷探测的最佳选择,其对TVS特征快速完整的获取保证了对中气旋涡旋位置的及时定位^[79],另外具有双极化功能的快速扫描雷达还能进一步全面呈现龙卷过程中水凝物粒子的相态演变特征。这些信息能更详细准确地给出龙卷的预警预报信息。但目前利用快速扫描雷达积累的龙卷个例有限,相应的研究工作也较匮乏,所以对快速扫描雷达在龙卷探测上所具有的优势还有待进一步挖掘。在数值模式方面,由于受到模拟技术和计算资源的限制,对小尺度的天气系统模拟依然困难^[80],尤其针对龙卷系统及漏斗云结构的数值模拟^[81],对于进一步提升龙卷分辨率的数值模拟目前仍是该领域研究的关键技术难题。在雷达资料同化的研究上,雷达资料的预处理和质量控制、分析场的多尺度平衡、背景误差的改进、不同雷达资料的同化方法等问题也都是需要进一步提升的关键环节^[82]。

在未来发展趋势上,多波段龙卷探测雷达组网是未来精细化探测的必要手段,并且具备快速扫描能力的双极化相控阵雷达也将会广泛用于龙卷探测。另外,加速研制 1° 以下波束宽度的相控阵雷达能进一步有效提高龙卷的探测能力。对于中国龙卷探测而言,目前中国双极化雷达技术逐步开始业务应用,部分省市气象局试点建设了面向业务的双极化雷达,快速扫描和相控阵天气雷达正在研制中,相信这些研究进展会大大提升中国对龙卷的预警预报能力。

参考文献:

- [1] 范雯杰,俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象,2015,41(7):793-805.
- [2] Grazulis T P. Significant Tornadoes, 1880-1989: A chronology of events (Vol. 2) [Z]. St Johnsbury, VT: Environmental Films, 1990.
- [3] McCarthy D W, Schaefer J T, Edwards R. What are we doing with (or to) the F-Scale [C]. Preprints 23rd Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, St. Louis, MO, 2006, 6-10 November: 5-6.
- [4] Doswell C A. Small sample size and data quality issues illustrated using tornado occurrence data [J]. E-Journal of Severe Storms Meteorology, 2007, 2(5): 1-10.
- [5] Bluestein H B, Unruh W P, LaDue J, et al. Doppler radar wind spectra of supercell tornadoes [J]. Monthly Weather Review, 1993, 121(8): 2200-2221.
- [6] Wurman J, Straka J M, Rasmussen E N. Finescale Doppler radar observation of tornadoes [J]. Science, 1996, 272: 1774-1777.
- [7] Simmons K M, Sutter D. WSR-88D radar, tornado warnings, and tornado casualties [J]. Weather and Forecasting, 2005, 20(3): 301-310.
- [8] Wurman J, Dowell D, Richardson Y. The Second Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment: VORTEX2 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(8): 1147-1170.
- [9] Heinselman P, Ladue D, Kingfield D M. Tornado Warning Decisions Using Phased-Array Radar Data [J]. Weather and Forecasting, 2015, 30(1): 57-78.
- [10] Rasmussen E N, Straka J M, Davies-Jones R P, et al. Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment: VORTEX [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1994, 75(24): 995-1006.
- [11] Wurman J, Straka J, Rasmussen E, et al. Design and Deployment of a Portable, Pencil-Beam, Pulsed, 3-cm Doppler Radar [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1996, 14(6): 1502-1512.
- [12] Wurman J. The DOW mobile multiple Doppler network [C]. Preprints, 30th International Conference on Radar Meteorology, Munich, Germany, American Meteorological Society, 2001.
- [13] Bluestein H B, Pazamany A L, Galloway J C, et al. Studies of the substructure of severe convective storms using a mobile 3-mm-wavelength Doppler radar [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 76(11): 2155-2169.
- [14] Straka J M, Rasmussen E N, Fredrickson S E. A

- mobile mesonet for fine-scale meteorological observations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, 13(5): 921–936.
- [15] Wakimoto R M, Atkins N T. Observations on the origins of rotation: The Newcastle tornado during VORTEX 94 [J]. *Monthly Weather Review*, 1996, 124(3): 384–407.
- [16] Shabbott C J, Markowski P M. Surface in situ observations within the outflow of forward-flank downdrafts of supercell thunderstorms[J]. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(5): 1422–1441.
- [17] Lee J, Samaras T, Young C. Pressure measurements at the ground in an F-4 tornado[C]. Preprints, 22nd Conference on Severe Local Storms, Hyannis, MA, American Meteorological Society, 2004.
- [18] Bluestein H B, Coauthors C. A summary of data collected during VORTEX-2 by MWR-05XP/TWOLF, UMass X-Pol, and the UMass W-band radar[C]. Preprints, 25th Conf. on Severe Local Storms, Denver, CO, American Meteorological Society, 2010.
- [19] Wurman J, Robinson P, Lee W, et al. Rapid-scan mobile radar 3D GBVTD and traditional analysis of tornadogenesis [C]. Preprints, 24th Conf. on Severe Local Storms, Savannah, GA, American Meteorological Society, 2008.
- [20] Weiss C C, Schroeder J L. StickNet: A new portable, rapidly deployable surface observation system [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(10): 1502–1503.
- [21] Rasmussen. VORTEX-Southeast Program Overview[R]. 2015.
- [22] Philips B, Ryan T, Chandrasekar V. Tracking tornados down streets: Using casa radars in real time severe weather warning operations in north central texas[C]. IGARSS 2017–2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2017: 5973–5976.
- [23] Mahale V N, Brotzge J A, Bluestein H B. The Advantages of a Mixed-Band Radar Network for Severe Weather Operations: A Case Study of 13 May 2009 [J]. *Weather and Forecasting*, 2014, 29(1): 78–98.
- [24] Chandrasekar V, Chen H, Philips B. Principles of High-Resolution Radar Network for Hazard Mitigation and Disaster Management in an Urban Environment[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2018, ser ii.
- [25] Hengstebeck T, Wapler K, Heizenreder D. Network Radar-based Detection of Mesocyclones at the German Meteorological Service[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 35(2): 299–321.
- [26] Lemon L R, Donaldson R J, Burgess D W, et al. Doppler Radar Application to Severe Thunderstorm Study and Potential Real-Time warning [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1977, 58(11): 1187–1193.
- [27] Burgess D W, Leslie R, Lemon L R, et al. Tornado characteristics revealed by Doppler radar[J]. *Geophysical research letters*, 1975, 2(5): 183–184.
- [28] Burgess D W. Single Doppler radar vortex recognition: Part I. Mesocyclone signatures [C]. 17th Radar Meteorology Conference, Seattle, WA, Boston, American Meteorological Society(Preprints), 1976: 97–103.
- [29] Brown R A, Lemon L R, Burgess D W. Tornado detection by pulsed Doppler radar [J]. *Monthly Weather Review*, 1978, 106(106): 29–38.
- [30] Zrnicek D S, Burgess D W, Hennington L D. Automatic detection of mesocyclonic shear with Doppler radar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1985, 2(4): 425–438.
- [31] Stumpf G J, Witt A. The new NSSL mesocyclone detection algorithm functional description [R]. Rep. for the NWS Operational Support Facility, 1994: 11.
- [32] Stumpf G J, Witt A, Mitchell E D, et al. The National Severe Storms Laboratory mesocyclone detection algorithm for the WSR-88D [J]. *Weather and Forecasting*, 1998, 13(2): 304–326.
- [33] Vasiloff S V. Comparison of several mesocyclone and tornado detection algorithms [R]. OSF Rep, 1992: 50.
- [34] Mitchell E D. An enhanced NSSL tornado detection algorithm [C]. Preprints, 27th Conference on Radar Meteorology, Vail, CO, Amer. Meteor.

- Soc. ,1995,406–408.
- [35] Wakimoto R M, Wilson J W. Nonsupercell tornadoes [J]. Monthly Weather Review, 1989, 117 (6):1113–1140.
- [36] Johnson J T, Coauthors C. Operations testing of enhanced WSR-88D algorithms and display concepts in National Weather Service Offices [C]. Preprints, 27th Conf. on Radar Meteorology, Vail, CO, American Meteorological Society, 1995:170–172.
- [37] Stumpf M, Foster P. The 1995 NSSL warning decision support system test at the Fort Worth National Weather Service Forecast Office [C]. Preprints, 18th Conference on Severe Local Storms, San Francisco, CA, American Meteorological Society, 1996, 570–573.
- [38] Mitchell E D, Vasiloff S V, Stumpf G J, et al. The national severe storms laboratory tornado detection algorithm [J]. Weather and Forecasting, 1998, 13 (2):352–366.
- [39] Zrnić D S, Ryzhkov A V. Polarimetry for weather surveillance radars. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80 (80):389–406.
- [40] Ryzhkov A V, Burgess D W, Zrnić D S, et al. Polarimetric analysis of a 3 May 1999 tornado [C]. In 21th Conference on Severe Local Storms, San Antonio, TX. Boston: American Meteorological Society (Preprints), 2002.
- [41] Ryzhkov A V, Schurr T J, Burgess D W, et al. Polarimetric tornado detection [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2005, 44 (44):557–570.
- [42] Bluestein H B, French M M, Tanamachi R L, et al. Close-range observations of tornadoes in supercells made with a dual-polarization, X-band, mobile Doppler radar [J]. Monthly Weather Review, 2007, 135 (4):1522–1543.
- [43] Wang Y, Yu T Y. Novel tornado detection using an adaptive neuro-fuzzy system with S-band polarimetric weather radar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2015, 32 (2): 195 – 208.
- [44] Umeyama A Y, Torres S M, Cheong B L. Bootstrap dual-polarimetric spectral density estimator [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55 (4):2299–2312.
- [45] Skow K D, Cogil C. A high-resolution aerial survey and radar analysis of quasi-linear convective system surface vortex damage paths from 31 August 2014 [J]. Weather and Forecasting, 2017, 32 (2):441–467.
- [46] Brown R A, Wood V T, Sirmans D. Improved tornado detection using simulated and actual WSR-88D data with enhanced resolution [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19 (11):1759–1771.
- [47] Leslie R, Lemon L R, Aurora Stan-Sion, et al. A strong, long-track, Romanian tornado [J]. Atmospheric Research, 2003, 67 (3):391–416.
- [48] Wurman J. The DOW mobile multiple-Doppler network [C]. In 30th International Conference on Radar Meteorology, 2001.
- [49] Kosiba K A, Wurman J. The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer [J]. Weather and Forecasting, 2013, 28 (6):1552–1561.
- [50] Bluestein H B, French M M, PopStefanija I, et al. A mobile, phased-array Doppler radar for the study of severe convective storms [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91 (5):579–600.
- [51] French M M, Bluestein H B, PopStefanija I, et al. Reexamining the vertical development of tornadic vortex signatures in supercells [J]. Monthly Weather Review, 2013, 141 (12):4576–4601.
- [52] Pazmany A L, Mead J B, Bluestein H B, et al. A mobile rapid-scanning X-band polarimetric (RaX-Pol) Doppler radar system [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30 (7): 1398–1413.
- [53] Kumjian M R, Ryzhkov A V. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 2008, 47 (7): 1940–1961.
- [54] Isom B, Palmer R, Kelley R, et al. The atmospheric imaging radar: simultaneous volumetric observations using a phased array weather radar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,

- 2013,30(4):655–675.
- [55] Mahre A, Yu T Y, Palmer R, et al. Observations of a cold front at high spatiotemporal resolution using an X-band phased array imaging radar[J]. *Atmosphere*, 2017, 8(2):30–40.
- [56] Kurdzo J M, Nai F, Bodine D J, et al. Observations of severe local storms and tornadoes with the atmospheric imaging radar[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(5):915–935.
- [57] Bowden K A, Heinselman P L. A qualitative analysis of NWS forecasters' use of phased-array radar data during severe hail and wind events[J]. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(1):43–55.
- [58] Zrnić D S, Kimpel J F, Forsyth D E, et al. Agile-beam phased array radar for weather observations[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(11):1753–1766.
- [59] Armijo L. A Theory for the Determination of Wind and Precipitation Velocities with Doppler Radars[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1969, 26(3):570–573.
- [60] 古金霞. 双多普勒天气雷达联合探测大气风场技术进展[J]. *气象科学*, 2004, 24(2):246–252.
- [61] Lhermitte R M, Miller L J. Doppler radar methodology for the observation of convective storms[C]. 14th Conference on Radar Meteorology, Tucson, AZ, American Meteorological Society, 1970:133–138.
- [62] Miller L J, Strauch R G. A dual-Doppler radar method for the determination of wind velocities within precipitating weather systems[J]. *Remote Sensing Environment*, 1974, 3(4):219–235.
- [63] Ray P S, Wagner K K, Johnson K W, et al. Triple-Doppler observations of a convective storm[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17(8):1201–1212.
- [64] Chong M, Campos C. Extended overdetermined dual-Doppler formalism in synthesizing airborne Doppler radar data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, 13(3):581–597.
- [65] Bousquet O, Chong M. A Multiple-Doppler Synthesis and Continuity Adjustment Technique (MUSCAT) to Recover Wind Components from Doppler Radar Measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(15):343–359.
- [66] Lee W C, Jou B J D, Chang P L, et al. Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part I: Doppler velocity patterns and the GBVTD technique[J]. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(10):2419–2439.
- [67] 马翠平, 张培昌, 匡晓燕等. 单多普勒天气雷达反演中尺度气旋环流场的方法[J]. *南京气象学院学报*, 2000, 23(4):579–585.
- [68] Tanamachi R L, Bluestein H B, Lee W, et al. Ground-Based Velocity Track Display (GBVTD) Analysis of W-Band Doppler Radar Data in a Tornado near Stockton, Kansas, on 15 May 1999[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(3):783–800.
- [69] Kosiba K, Wurman J. The Three-Dimensional Axisymmetric Wind Field Structure of the Spencer, South Dakota, 1998 Tornado[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, 67(9):3074–3083.
- [70] Wakimoto R M, Stauffer P, Lee W, et al. Fine-scale Structure of the LaGrange, Wyoming, Tornado during VORTEX2: GBVTD and Photogrammetric Analyses[J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(11):3397–3418.
- [71] Lilly D K. Numerical prediction of thunderstorms has its time come[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1990, 116(494):779–798.
- [72] Jung Y, Xue M, Zhang G. Simultaneous Estimation of Microphysical Parameters and the Atmospheric State Using Simulated Polarimetric Radar Data and an Ensemble Kalman Filter in the Presence of an Observation Operator Error[J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(5):539–562.
- [73] Xue M, Wang D H, Gao J D, et al. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2003, 82(1):139–170.
- [74] Sun J, Flicker D W, Lilly D K. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated single-Doppler radar data[J]. *Journal of the*

- Atmospheric Sciences,1991,48(4):876–890.
- [75] Snyder C, Zhang F. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter [J]. Monthly Weather Review, 2003, 131(8):1663–1677.
- [76] Snook N, Xue M, Jung Y. Analysis of a Tornadic Mesoscale Convective Vortex Based on Ensemble Kalman Filter Assimilation of CASA X-Band and WSR-88D Radar Data [J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(11):3446–3468.
- [77] Wheatley D M, Knopfmeier K H, Jones T A, et al. Storm-Scale Data Assimilation and Ensemble Forecasting with the NSSL Experimental Warn-on-Forecast System. Part I: Radar Data Experiments [J]. Weather and Forecasting, 2015, 30(1):1795–1817.
- [78] Supinie T A, Jung Y, Xue M, et al. Impact of VORTEX2 observations on analyses and forecasts of the 5 June 2009 Goshen county, Wyoming, supercell [J]. Monthly Weather Review, 2016, 144(1):429–449.
- [79] French M M, Bluestein H B, PopStefanija I, et al. Reexamining the vertical development of tornadic vortex signatures in supercells [J]. Monthly Weather Review, 2013, 141(12):4576–4601.
- [80] Markowski P M, Richardson Y P. Tornado genesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research [J]. Atmospheric Research, 2009, 93(1):3–10.
- [81] Yao D, Xue H, Yin J, et al. Investigation into the formation, structure and evolution of an EF4 tornado in east china using a high-resolution numerical simulation [J]. Journal of Meteorological Research, 2018, 32(2):157–171.
- [82] 孙娟珍, 陈明轩, 范水勇. 雷达资料同化方法: 回顾与前瞻 [J]. 气象科技进展, 2016, 6(3):17–27.
- [83] Suzuki S I, Maesaka T, Iwanami K, et al. X-band Dual-Polarization Radar Observations of the Supercell Storm that Generated an F3 Tornado on 6 May 2012 in Ibaraki Prefecture, Japan [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2018, 96A:25–33.
- [84] Skow K D, Cogil C. A high-resolution aerial survey and radar analysis of quasi-linear convective system surface vortex damage paths from 31 August 2014 [J]. Weather and Forecasting, 2017, 32(1):441–467.
- [85] Skinner P S. TTUKa Mobile Doppler Radar Observations of Near-Surface Circulations in VORTEX2 [R].
- [86] Tanamachi R L, Bluestein H B, Lee W C. Ground-Based Velocity Track Display (GBVTD) Analysis of W-Band Doppler Radar Data in a Tornado near Stockton, Kansas, on 15 May 1999 [J]. Monthly Weather Review, 2007, 135(3):783–800.
- [87] Bluestein H B, Weiss C C, French M M. 2007. The Structure of Tornadoes near Attica, Kansas, on 12 May 2004: High-Resolution, Mobile, Doppler Radar Observations [J]. Monthly Weather Review, 135(2):475–506.

Advances in Radar Detection of Tornadoes

HE Jian-xin^{1,2}, ZENG Qiang-yu^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, SHI Zhao^{1,2}

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Key Open Laboratory of Atmospheric Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China)

Abstract: The research progress are reviewed, including tornado observation technology, field observation experiment, and observation network technology in China and abroad, the current status of tornado radar detection technology and analysis methods are summarized, the tornado detection radars are introduced. Looking ahead to the future of Chinese tornado detection, research and early warning development.

Keywords: tornado; radar; observation experiment; radar network; detection technology; analysis methods

附表

表 1 主要龙卷探测雷达性能参数^[6,8-11,13,18,24,42,48,50,54,83-87]

	OU-PRIME	SMART-R1/R2	DFW X-Band	DOW
工作频率	C 波段	C 波段	X 波段	X 波段
雷达类型	固定式	车载式	固定式	车载式
发射机	1000 kW	250 kW MAG	8 kW MAG	45 kW MAG
极化方式	双极化	水平极化	双极化	水平或垂直极化
波束宽度	0.45°	1.5°	1.4°	1.2°
距离分辨率	125 m	63 m	60 m	75 m
天线类型	抛物面	抛物面	抛物面	抛物面
天线大小	8.5 m	2.54 m	1.8 m	1.83 m
天线增益	50 dB	40 dB	41 dB	
最大扫描速率	30°/s	33°/s	60°/s	30°/s
体扫时间			60 s	50 ~ 180 s
雷达所有者	OU	OU	CASA	CSWR
雷达图片				

	EBN	KSR	Saitama	PX-1000
工作频率	X 波段	X 波段	X 波段	X 波段
雷达类型	固定式	固定式	固定式	车载式
发射机	50 kW MAG	50 kW KLY	100 kW KLY	
极化方式	双极化	双极化	双极化	双极化
波束宽度	1.3°	1.3°	1.2°	1.9°
距离分辨率	100 m	100 m	150 m	
天线类型	抛物面	抛物面	抛物面	抛物面
天线大小	2.13 m	2.2 m	2.2 m	
天线增益	41.6 dB	42.5 dB	42 dB	
最大扫描速率				50°/s
体扫时间	5 min	5 min	5 min	
雷达所有者	日本气象局	日本气象局	日本气象局	OU
雷达图片				

	DOW6/7	NOXP	RaXPol	UMASS XPOL
工作频率	X 波段	X 波段	X 波段	X 波段
雷达类型	车载式	车载式	车载式	车载式
发射机	2×250 kW MAG	250 kW MAG	20 kW TWT	25 kW MAG
极化方式	双极化双频段	双极化	双极化	双极化
波束宽度	0.93°	0.95°	0.93°	1.2°
距离分辨率	30 ~ 60 m	75 m	30 m	60 ~ 150 m
天线类型	抛物面	抛物面	抛物面	抛物面
天线大小			2.4 m	1.8 m
天线增益			44.5 dB	41 dB
最大扫描速率	50°/s	30°/s	180°/s	24°/s
体扫时间	60 ~ 120 s	120 ~ 180 s	17/40 s	120 ~ 180 s
雷达所有者	CSWR	NOAA	OU	UMass
雷达图片				

表 1 (续)

	Rapid DOW	MWR-05XP	AIR	UMass PTWR
工作频率	X 波段	X 波段	X 波段	X 波段
雷达类型	车载式	车载式	车载式	车载式
发射机	40 kW TWT	16 kW TWT	3.5 kW TWT	3 kW
极化方式	水平极化	水平极化	水平极化	双极化
波束宽度	0.8°	1.8°(水平) 2°(垂直)	1.0°	1.8°~2.6°(水平) 3.6°(垂直)
距离分辨率	11 ~ 50 m	75 m	37.5 m	75 ~ 150 m
天线类型	相控阵	相控阵	相控阵	相控阵
天线大小			1.8m	
天线增益			27dB	
最大扫描速率	50°/s	180°/s	20°/s	90°/s
体扫时间	7/14 s	7 s(90°×20°)/24 s	5.5 s(90°×20°)	
雷达所有者	CSWR	CIRPAS	OU	UMass
雷达图片				

	TTUKa1/TTUKa2	UMass-W
工作频率	Ka 波段	W 波段
雷达类型	车载式	车载式
发射机	200 W TWT	1 kW MAG
极化方式	水平极化	垂直极化
波束宽度	0.49°	0.2°
距离分辨率	15 ~ 30 m	30 ~ 60 m
天线类型	抛物面	抛物面
天线大小		
天线增益	50 dB	
最大扫描速率	20°/s	5°/s
体扫时间		
雷达所有者	Texas Tech	UMass
雷达图片		