

黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2021.2019年4月13日广东徐闻强龙卷天气分析[J].气象,47(2):216-229. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2021. Analysis of the 13 April 2019 strong tornado in Xuwen County, Guangdong Province[J]. Meteor Mon, 47(2):216-229(in Chinese).

2019年4月13日广东徐闻强龙卷天气分析*

黄先香^{1,2} 俞小鼎³ 炎利军¹ 蔡康龙¹ 植江玲¹ 王硕甫¹

1 广东省佛山市气象局/佛山市龙卷风研究中心,佛山 528315

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

提 要: 利用常规高空地面观测、广东省区域加密自动站、湛江多普勒雷达以及 FY-4A 高分辨可见光云图等资料对 2019 年 4 月 13 日广东省湛江市徐闻县 EF3 级强龙卷过程进行分析。结果表明:强龙卷发生在低纬地区海岸带附近,路径长约 16 km,历经“三次陆上、两次海上”的复杂过程,持续约 36 min。产生龙卷超级单体的中尺度对流系统出现在地面暖低压槽前、中低层显著西南气流和偏南急流汇合处;环境条件表现为强的垂直风切变、低的抬升凝结高度、大的风暴相对螺旋度和能量螺旋度,地面存在触发对流的中尺度辐合线和小尺度涡旋。龙卷罕见地经过徐闻县和安镇政府自动站,该站受到龙卷涡旋不同部位影响,风向随时间呈顺转—逆转—顺转的变化特征,并测到 15 级强风;气压和气温陡降,平均气压、平均气温最大降幅分别为 $2.6 \text{ hPa} \cdot (5 \text{ min})^{-1}$ 、 $1.7 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (5 \text{ min})^{-1}$ 。龙卷发生在一个主要伴随正地闪、高质心的超级单体风暴中,钩状回波和回波悬垂特征明显,并伴有低层强中气旋和龙卷涡旋特征;中气旋强度和顶高呈反位相变化,3 次(2 次)强度峰值(谷值)和 3 次(2 次)顶高谷值(峰值)正好与龙卷 3 次(2 次)陆上(入海)活动时间对应,龙卷在陆地上(海面上)时,中气旋较强(较弱)、顶高较低(较高)。龙卷出现在钩状回波顶端、 β 中尺度对流系统上风侧 TBB 梯度最大处、水汽羽之下和中气旋底高低于 500 m 期间。

关键词: 强龙卷,环境条件,超级单体,中气旋,徐闻

中图分类号: P445, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.02.008

Analysis of the 13 April 2019 Strong Tornado in Xuwen County, Guangdong Province

HUANG Xianxiang^{1,2} YU Xiaoding³ YAN Lijun¹ CAI Kanglong¹

ZHI Jiangling¹ WANG Shuofu¹

1 Foshan Tornado Research Center/Foshan Meteorological Office of Guangdong Province, Foshan 528315

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: An EF3 strong tornado in Xuwen County of Zhanjiang City, Guangdong Province on 13 April 2019 was analyzed by using observation data, automatic weather station data, Zhanjiang Doppler Radar data and FY-4A satellite high resolution visible cloud images. The results show that this strong tornado occurred near the coastal zone in the low latitude area, with a path length of about 16 km. It experienced a complex process of “three times on land and two times on sea”, lasting for about 36 minutes. The mesoscale convective system producing tornado supercell appeared in front of the warm and low pressure trough, where the southwest air flow and southerly jet flow converged significantly in the middle and lower

* 广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2018LASW-B18)和国家自然科学基金项目(41175043 和 41675023)共同资助

2019年6月3日收稿; 2020年8月23日收修定稿

第一作者:黄先香,主要从事强对流天气预报预警研究. E-mail:fsqxj@163.com

layers. The environmental conditions were characterized by strong vertical wind shear, low lifting condensation height, large storm relative helicity and large energy helicity. There were mesoscale convergence lines and small-scale vortex triggering convection on the ground. The tornado passed through the automatic weather station of Hean Town Government of Xuwen County, which was affected by different parts of the tornado vortex. The wind direction of the tornado changed from clockwise to reverse to clockwise, and the wind force got to Grade 15. The average pressure and temperature dropped sharply by $2.6 \text{ hPa} \cdot (5 \text{ min})^{-1}$ and $1.7 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (5 \text{ min})^{-1}$, respectively. The tornado occurred in a supercell storm with positive cloud-to-ground lightning and high cell centroid. The hook echo and echo pendency were obviously accompanied by low-level strong mesocyclone and tornado vortex signature. The intensity and top height of the mesocyclone changed in inverse phases, and the three (two) peak value (valley value) of the intensity and three (two) valley value (peak value) of top height exactly corresponded to the time of the three (two) land (sea) activities of the tornado. When the tornado was on the land (sea), the mesocyclone was stronger (weaker) and the top height was lower (higher). The tornado occurred near the top of the hook echo and at the maximum TBB gradient on the windward side of meso- β scale convective system, under the water vapor plume and during the period when the height of the bottom of the mesocyclone was lower than 500 m.

Key words: strong tornado, environmental condition, supercell, mesocyclone, Xuwen

引言

龙卷是对流云产生的破坏力极强的小尺度灾害天气,能在短时间内造成重大生命财产损失(俞小鼎等,2006a;范雯杰和俞小鼎,2015)。虽然我国龙卷发生概率比较低,年均发生次数不及美国十分之一,但龙卷易发生在江淮流域、珠三角、雷州半岛、海南、东北和华北等人口稠密的地区,往往会导致较为严重的人员伤亡。如:2015年10月4日珠三角EF3级龙卷导致7人死亡、214人受伤(朱文剑等,2016),2016年6月23日江苏盐城EF4级龙卷导致99人死亡、846人受伤(郑永光等,2018a;张小玲等,2016)。近年来接连发生的几次强龙卷灾害事件引起了政府和社会对龙卷的高度关注,龙卷的研究也越来越受到重视。

国内外有关龙卷的研究成果已有不少。龙卷通常分为两类,一类为超级单体龙卷(中气旋龙卷),另一类为非超级单体龙卷(非中气旋龙卷)(俞小鼎等,2006a;Wakimoto and Wilson,1989;Markowski and Richardson,2010)。超级单体龙卷(中气旋龙卷)往往强度较强,F2级以上的灾害性龙卷绝大多数由超级单体龙卷产生(Agee and Jones,2009)。从天气形势和影响天气系统来看,我国龙卷主要可以分为两大类,一类是台风龙卷,发生在台风天气背景下,

如2015年10月4日台风彩虹外围广东佛山和广州龙卷(朱文剑等,2016);另一类是西风带系统龙卷,发生在高空槽、低涡、切变线等天气背景下,如2016年6月23日江苏盐城龙卷(郑永光等,2018b;张小玲等,2016),还有极少数是发生在其他天气系统下的龙卷,如热带地区由海风锋触发产生的龙卷(郑艳等,2017)。不少学者对西风带超级单体龙卷分析(张小玲等,2016;俞小鼎等,2006b;2008;2012;郑永光等,2017;郑媛媛等,2009;姚叶青等,2012;赵瑞金等,2010;刘娟等,2009),发现大气处于显著条件不稳定层结、强的深层垂直风切变、较大的低层垂直风切变和较低的抬升凝结高度有利于西风带超级单体龙卷的产生;钩状回波是超级单体龙卷的雷达反射率因子典型特征,龙卷发生在强烈发展、底部很低的中气旋中,有时候伴有龙卷涡旋特征(TVS)。而台风背景下产生的超级单体龙卷的环境大气对流有效位能(CAPE)一般较小,台风龙卷母体风暴属于微型超级单体风暴,其与西风带超级单体龙卷风暴有很多相似特征,但台风龙卷微型超级单体风暴的中气旋尺度较小、伸展高度较低(郑媛媛等,2015;朱文剑等,2016;黄先香等,2018a;2018b;李兆慧等,2017;王炳赟等,2018a;2018b;李彩玲等,2016)。非超级单体龙卷通常由地面辐合切变线上的中小尺度涡旋和快速发展对流风暴中的强上升气流共同作用形成(Wakimoto and Wilson,1989;Pryor,2015;郑

永光等,2018a),具有较强的水平风切变和垂直涡度,但垂直风切变一般较弱(Wakimoto and Wilson, 1989;郑永光等,2018b)。钱维宏等(2017)和吴俞等(2015)还开展了龙卷天气过程的动力特征和局地地形作用的数值模拟分析。

虽然国内外对龙卷做了大量研究,但由于龙卷生消迅速、影响范围小、发生概率低等特点,对龙卷的监测和预警难度极大。龙卷研究依然是中小尺度灾害天气领域的难点。

广东是华南龙卷比较高发的省份之一,根据影响天气系统主要分为台风龙卷和西风带龙卷;从龙卷落区看,台风龙卷集中在珠三角的佛山、广州一带,西风带龙卷则主要发生在湛江的雷州、徐闻和珠三角的佛山、广州等地。目前对低纬度台风龙卷(朱文剑等,2016;李兆慧等,2017;王炳赟等,2018a;2018b;黄先香等,2019a;2019b;2019c)和中纬度西风带龙卷(张小玲等,2016;俞小鼎等,2006b;2008;2012;郑永光等,2017;Meng and Yao,2014;郑媛媛等,2009;姚叶青等,2012;赵瑞金等,2010;刘娟等,2009)的研究较多、认识较深入。陈爱军等(2015)、王沛霖(1996)和陈元昭等(2016)对珠三角西风带龙卷的环境背景及雷达回波特征进行了分析,但目前对低纬度海岸带附近的西风带龙卷,尤其是 EF2 级以上强烈龙卷过境地面测站的分析还较少、认识还不够。2019 年 4 月 13 日下午,受高空短波槽和西南急流影响,广东省湛江市徐闻县出现强龙卷天气,龙卷罕见地经过当地气象自动站,徐闻县和安镇政府自动站观测到 $50.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (15 级)的极强阵风,而以往几乎没有地面气象观测仪器直接记录到龙卷(郑永光等,2016)。按照我国重大强对流天气的定义:直径 $\geq 5 \text{ cm}$ 冰雹、或 $\geq 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 阵风、或 EF2 级(阵风可达 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上)及以上级别龙卷、或 1 h 雨量 $\geq 80 \text{ mm}$ 或 3 h 雨量 $\geq 180 \text{ mm}$ 的短时强降水(郑永光等,2017),本次湛江徐闻龙卷属于重大强对流天气。利用常规高空地面气象观测、广东省区域加密地面气象自动站、闪电定位仪、湛江 S 波段多普勒天气雷达和 FY-4A 高分辨率可见光云图等资料,对此次强烈龙卷发生的环境条件、自动站与雷达观测的中小尺度特征等进行分析,以期进一步加深对低纬度热带地区西风带龙卷的认识,从而提高对此类龙卷的监测、预警能力。

1 龙卷实况及灾情

2019 年 4 月 13 日下午,湛江市徐闻县和安镇出现强对流风灾过程,造成 1 人死亡、5 人受伤。和安镇政府自动站 14:11 录得最大阵风为 $50.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (15 级),另外,14:36 和安镇东南方的锦和镇出现 $32.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12 级)的大风。经湛江市气象局和佛山市龙卷风研究中心对灾害现场沿线的勘查取证、无人机航拍、走访目击者、影像资料收集等方式,再结合湛江多普勒天气雷达等多种气象数据综合分析研判,确认此次风灾为龙卷造成。龙卷最早于 14:00 前后在冬松岛触地;之后向东南偏南方向移动,先后影响金鸡村、和安镇政府、和安中心小学、陈家村等地,14:12 前后和安镇政府附近市民拍到了龙卷视频(图 1a 左侧截图);14:18 后龙卷移入海面;14:35 前后龙卷影响锦和镇,锦和镇外罗码头的视频监控记录到龙卷低层涡旋由海面登陆的过程(图 1a 右侧截图),14:36 距离外罗码头约 600 m 的锦和镇文化站自动站录得了 12 级阵风。龙卷路径经历了“三次陆上、两次海上”的过程,长约 16 km,持续时间约 36 min,平均移动速度为 $27 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。其中,龙卷在和安镇的破坏最明显,受灾最严重的地方位于和安镇政府附近,最大破坏宽度达 220 m,破坏长度约 3.2 km(图 1b)。龙卷造成部分房子顶楼外墙倒塌、直径达 30 cm 的榕树和苦楝树被连根拔起、直径达 97 cm 的细叶榄仁树被折断、多处金属路灯杆被扭曲和四处水泥电线杆被折断。按照美国 2007 年官方采用的 EF 等级风速评估标准(McDonald et al,2006),由于现场灾害标识物(DI)水泥电线杆(DI24)的灾害等级(DOD)达到了第五等级(DOD5),水泥电线杆折断对应的风速期望值是 $61.69 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,得出此次徐闻龙卷强度为 EF3 级,对应我国气象行业标准《龙卷强度等级》(中国气象局,2019)中的三级,属于强龙卷。另外,有重量在 2 t 以上的集装箱(体积为 $2.2 \text{ m} \times 1.7 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$)被龙卷卷起、越过 1.5 m 的矮墙被抛出约 35 m 远。按照 Fujita(1971)有关这种大的飞射物的风速估计可达 F4 级。需要说明的是,F 等级中的飞射物指标在 EF 等级中已不再使用。对照范雯杰和俞小鼎(2015)统计的华南强龙卷情况可知,无论是 F 等级还是 EF 等级估计本次龙卷强度,本次过程都是 1961 年以来华南最强西风带龙卷。



图 1 2019 年 4 月 13 日徐闻龙卷路径及照片(a)和受灾图片(b)

(图 1a 中黑实/虚线为有/无灾路径;图 1b 中黄虚线为图 1a 中 AB 段的放大路径)

Fig. 1 The Xuwen tornado track and photos (a) and damage pictures (b) on 13 April 2019

(Black solid /black dashed line in Fig. 1a is the path with /without disaster;

yellow dashed line in Fig. 1b is the enlarged path of the AB segment in Fig. 1a)

2 天气背景和环境场特征

2.1 天气背景场

从 2019 年 4 月 13 日 08 时的高空形势(图 2a)可以看到,500 hPa 中纬度有西风槽东移至华中一带,有利于槽后西北气流引导冷空气南下,影响江南、华南地区;中低纬高原东侧有短波槽东移下滑,副热带高压(以下简称副高)呈带状控制海南及南海大部海域,588 dagpm 位于 20°N 附近,雷州半岛处于副高北缘和短波槽前偏西气流中;850 hPa 从北部湾到两广交界处存在一支风速为 14 m · s⁻¹ 的强西南急流,另有一支显著西南气流从海南岛吹向雷州半岛一带,为强对流的发生提供了充足的水汽和 不稳定能量;同时 925 hPa 一支风速为 12 m · s⁻¹ 的超低空偏南急流从海南岛吹向雷州半岛,徐闻处于超低空急流左前方的气旋性切变涡度区,有正涡度平流,对强对流天气的发生有利;高空 200 hPa 海南北部到徐闻一带处于明显风场分流区(图略),高层的辐散“抽吸”作用有利于低层上升运动发展;受地面冷空气影响,雷州半岛 13 日早晨最低气温下降了 0.7~3.0℃,13 日白天冷高压主体减弱东移,气压场形势东高西低,等压线呈东南—西北向,雷州半岛处于高压脊后和暖低压槽前,高温高湿,水汽充足(图 2b)。分析 13 日 08 时 850 与 500 hPa 温度差 ($\Delta T = T_{850} - T_{500}$)可知,海口站 ΔT 达 25℃,具有明显的条件不稳定;白天海南岛和徐闻地面气温持续升至 30℃ 以上,露点温度在 26℃ 以上,进一步增大

了徐闻上空的温度垂直递减率,使原已不稳定的垂直层结变得更加不稳定,为此次强对流天气的发生提供了非常有利的不稳定条件。另外,雷州半岛到海南一带存在一条东北—西南向的地面风向风速辐合线,为强对流天气发生提供了有利的动力抬升条件,是此次强天气过程的重要触发系统。

龙卷产生于一个超级单体风暴中,超级单体源自于雷州北部一些零散块状对流单体的合并加强。闪电监测显示,13:30—14:00 闪电密度陡增,表明中尺度对流系统处于强烈发展阶段;对比 14:12 与 14:06 的地闪分布可以看出,在徐闻和安镇地面观测到强烈大风的 14:11,正地闪比例明显增加(图 2c、2d),这与阜宁龙卷闪电活动特征相似(张小玲等,2016)。从葵花 8 号卫星红外图像可以看到,当日下午广东茂名、雷州湾一带共有两个中尺度对流系统(MCS)发展。13:00 导致徐闻龙卷的孤立对流云团在雷州北部发展(图略),之后对流系统在由雷州北部向东南方向移动过程中不断增强;14:10 红外云图(图 2e)显示, -52℃ 的云顶黑体温度(TBB)东西方向空间尺度达到了约 130 km,为椭圆形的 β 中尺度对流系统(M β CS),和安镇一带的 TBB 降低到 -72℃ 以下,表明对流发展非常旺盛;云团云型表现为东西走向,有明显的长轴,上风边界整齐,下风有卷云砧,表明有强的风速垂直切变,有利于雷暴龙卷生成。在 FY-4A 高分辨率可见光图像上(图 2f),雷州半岛东侧的椭圆形 β 中尺度对流云团云体亮白,云团上风侧 TBB 梯度大值区云顶纹理粗糙,上冲云顶特征明显,表明有深对流。龙卷发生在 TBB 冷云区、M β CS 上风侧 TBB 梯度最大处。

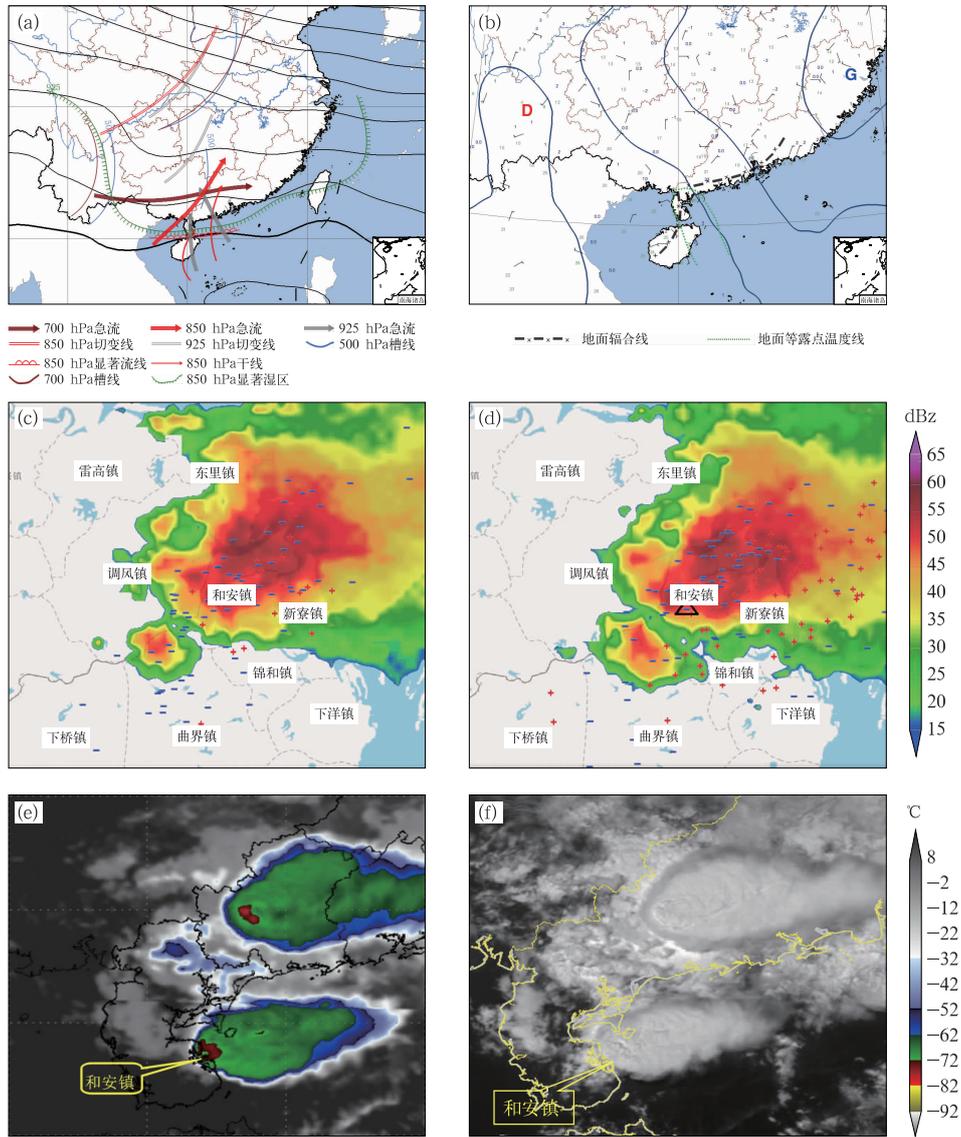


图 2 2019 年 4 月 13 日 08:00 形势综合图(a), 14:00 地面形势图(b), 14:06(c)和 14:12(d)华南雷达组合反射率拼图叠加地闪分布, 14:10 葵花 8 号卫星红外图像(e)和 14:15 FY-4A 可见光图像(f) (Δ 对应龙卷发生地, “+”为正地闪, “-”为负地闪)

Fig. 2 The comprehensive synoptic chart at 08:00 BT (a), surface map at 14:00 BT (b), radar reflectivity mosaic images with cloud-ground lightning flashes in South China at 14:06 BT (c) and 14:12 BT (d) and Hamawari-8 satellite infrared image at 14:10 BT (e) and FY-4A visible cloud image at 14:15 BT (f) 13 April 2019 (Δ stands for tornado, “+” and “-” denote positive and negative flashes respectively)

水汽图上表现为一条水汽带, 能看到清晰的水汽羽, 龙卷出现在水汽羽之下(图略)。

2.2 环境条件特征

强龙卷需要有超级单体风暴产生的环境条件, 有利于超级单体风暴产生的环境条件是较大的

CAPE 和强的深层(0~6 km)垂直风切变(郑永光等, 2017; Brooks et al, 2003)。4 月 13 日 08 时, 徐闻周边两个探空站北海(距龙卷发生地 167 km)、海口(距龙卷发生地 66 km)的 $T-\ln p$ 图(图 3)分析显示, 中低层为西南偏西气流, 近地层为弱东南风, 风向随高度均呈现顺时针旋转特征。垂直风切变较

大,0~6 km 垂直风矢量差($VWS_{0\sim 6\text{ km}}$)为 $17.0\sim 18.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;CAPE 分别为 $1190,1944\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$;抬升凝结高度(LCL)很低,分别为 270、193 m。北海站 600 hPa 以下温度露点差很小,基本处于或接近饱和状态;海口站湿层比较浅薄,850 hPa 附近存在浅薄逆温层;但两者 600 hPa 以上都存在明显的干层,有利于地面大风的出现。由于北海、海口距离龙卷发生地和安镇有一定距离,用 14 时徐闻和安镇自动站的地面温度(28.9°C)和露点温度(27.8°C),计算自地面抬升的气块,相应的 CAPE 值分别为 $4808,4940\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,呈现出强的条件不稳定(图略)。湛江多普勒天气雷达(距徐闻和安镇约 50 km)的 VWP 风廓线产品显示,13 日 13:48 最强垂直风切变出现在 0.3~6.7 km,由 0.3 km 处 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东南风转为 6.7 km 处 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西风,对应的风矢量差值为 $27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相应垂直风切变值为 $4.2\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$,为强的深层垂直风切变。因此,当时的 CAPE、深层垂直风切变等条件有利于超级单体风暴生成。

以往研究指出,有利于 F2/EF2 级以上强龙卷生成的两个有利条件分别是低的 LCL 和较大的 0~1 km 低层垂直风切变(Evans and Doswell, 2002;俞小鼎等,2012)。在徐闻龙卷发生当日(13 日)08 时,北海、阳江和海口三个探空站的 LCL 分别为 270、30 和 193 m,表明粤西及周边地区的抬升凝结高度都很低。用 13 日 08 时北海、海口探空站计算的 0~1 km 垂直风矢量差($VWS_{0\sim 1\text{ km}}$)为 $7.5\sim 8.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而 13 日 13:54 湛江雷达 VWP 风廓线显示 0.3~1.5 km 的风矢量差值为 $13.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

对应的垂直风切变值为 $10.8\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$,是一个相对比较大的低层垂直风切变值。因此,当时的 LCL 和 0~1 km 低层垂直风切变环境条件也是有利于强龙卷的发生。

此外,风暴相对螺旋度(SRH)和能量螺旋度指数(EHI)是衡量风暴旋转潜势的重要指标,也是判别超级单体和龙卷形成的辅助指标。Davies-Jones (1984)把 $150\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 界定为有利于产生超级单体风暴的 SRH 最低值,当 $SRH\geq 150\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 时,也可作为预报有龙卷、冰雹大风、强降水等天气的参考指标之一。Brooks et al(1993)认为尽管 SRH 对超级单体风暴是一个较好的指示量,但在区分龙卷与非龙卷案例上不是很有效。Hart and Korotky (1991)为了更好区分强龙卷(F2~F3 级龙卷)和猛烈龙卷(F4~F5 级龙卷)潜势环境,提出能量螺旋度指数(EHI),定义 $EHI = \text{CAPE} \frac{SRH}{160000}$,并指出美国南部平原非龙卷超级单体环境 EHI 平均值为 2.0,而多数强龙卷案例 EHI 平均值为 3.6。而 Davies(1993)研究指出,EHI 值在 2.0~2.5 的环境预示有可能中气旋引发龙卷,但不一定是强或猛烈龙卷,美国多数强龙卷发生的 EHI 值在 3.0~3.9,猛烈龙卷相伴的 $EHI > 4.0$ 。用 4 月 13 日 08 时北海、海口探空资料计算 SRH 和 EHI,相应的 SRH 分别为 $132,101\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,EHI 分别为 0.9、0.0,表明徐闻周边当天的环境条件是有利于超级单体风暴发生的潜质,用 14 时徐闻和安镇自动站的地面温度和露点温度订正计算后的 EHI 分别为 3.95、3.12,大大增加了强龙卷出现的可能性。

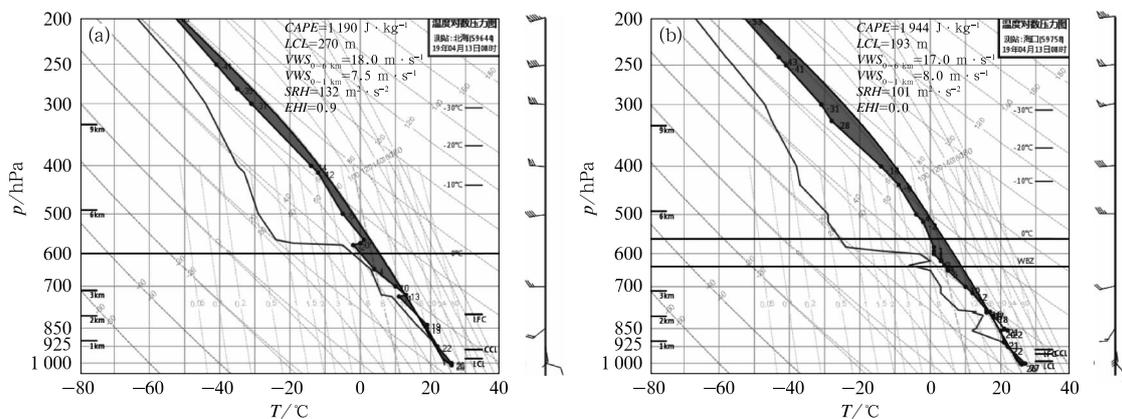


图 3 2019 年 4 月 13 日 08 时北海站(a)和海口站(b)探空图
Fig. 3 Soundings at Beihai (a) and Haikou (b) stations at 08:00 BT 13 April 2019

以上分析表明,此次徐闻强对流事件的大气环境条件既满足了深厚湿对流所需的水汽、抬升和不稳定条件,也满足了超级单体风暴形成所需的较大CAPE、强的深层 $Shear_{0\sim 6\text{ km}}$ 条件,还满足了低的LCL、较大的低层 $Shear_{0\sim 1\text{ km}}$ 、较大的EHI条件,因此此次强对流事件的环境条件非常有利于产生F2/EF2或以上超级单体龙卷。需要指出的是,湛江雷达站、海口和北海探空站距离此次强对流超级单体风暴形成和发展的地点有50~167 km的距离,并不能完全代表超级单体发生地的天气条件,但有很大的参考价值。

3 地面自动气象站观测

进一步分析4月13日下午广东加密地面自动气象站资料可见,在龙卷发生前,徐闻县和安镇位于暖湿舌内,地面温度在29~30℃,地面露点温度在28℃左右,一支东南暖湿气流从海上经下洋镇向锦和镇、和安镇一带输送。早在龙卷发生前的13:00,和安镇北侧的东里镇、调风镇、英利镇到下桥镇一带存在一条东北—西南向的地面风向风速辐合线(图略);13:25调风镇附近开始有小尺度涡旋生成,13:35小尺度涡旋两侧的东北偏北风和东南风加大,小尺度涡旋加强(图4a、4b);之后,地面辐合线和小尺度涡旋南压影响和安镇,14:00—14:15可以清楚地看到和安镇政府站风向先顺转、后逆转、再顺转的变化过程(图4c~4f),龙卷发生时(14:12前后)该站2 min平均风风速突增,由14:10的 $4.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 突增到14:15的 $10.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,14:11该站的3 s瞬时风还录得了 $50.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (15级)的极大偏北阵风。之后,小尺度涡旋继续南压影响锦和镇,14:30—14:40锦和镇同样出现风向顺转和风速加大过程(图略),14:36锦和镇文化站自动站的3 s瞬时风录得 $32.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12级)的强烈东南风。因此,从时间对应关系看,地面辐合线和小尺度涡旋的出现超前于龙卷,这表明地面辐合线和小尺度涡旋是有利于龙卷触发和发展的重要中小尺度天气系统。

为了更清楚地了解龙卷影响前后地面温、压、风等气象要素的变化,下面选取距离龙卷路径最近的六要素自动站点进行分析。徐闻和安镇政府自动气

象站(图5a)距离龙卷路径边缘不足2 m(图5c)。气压变化显示,在13:40前气压已经小幅下降,涡旋影响期间气压出现两次明显降/升过程:13:45—13:50由1006.0 hPa降至1005.5 hPa,14:00—14:05出现明显升压,由1005.6 hPa升至1006.7 hPa,14:10再降至1006.2 hPa,14:20再跃升至1007.3 hPa,5 min内平均气压最大降幅/升幅为0.5/1.2 hPa;而14:11本站3 s瞬时气压录得最低值(1002.1 hPa),1 min内瞬时气压降幅达4.1 hPa,说明此时本站距离龙卷中心最近。需要说明的是,广东自动站的2 min平均气压是每5 min给出一个观测值,3 s瞬时气压是每小时给出一个极值,5 min平均气压降幅和1 min瞬时气压降幅虽然表述类似,但计算过程并不一样。风向在13:45前为一致的东南风,13:50—14:05出现顺转,由东南风依次转为东南偏南、偏南和西北风,14:05—14:10逆转为偏西风,14:15再顺转为偏北风,表明龙卷经过和安镇政府站,该站受到龙卷涡旋不同部位的影响;14:15—14:25维持偏北风,之后风向逐渐恢复到涡旋影响之前的东到东南风,表明涡旋远离该站。2 min平均风速在14:10前为 $3\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,14:10前后风速突增,由14:05的 $3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 突增至14:10的 $7.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;同时10 min平均风速也由14:10的 $4.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 突增到14:15的 $10.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,14:20再增至 $11.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,之后风速明显减小;14:11该站的3 s瞬时风还录得了 $50.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (15级)的极大偏北风。从5 min累积雨量变化可见,龙卷发生前,地面没有降水发生;龙卷发生时(14:12前后)伴随明显降水,5 min累积雨量超过2.5 mm;14:25前后降雨达到最强,5 min降雨量达10 mm以上;强降雨持续到14:30以后;由此推测龙卷位于母体风暴前侧。气温在龙卷发生前维持在29℃左右;龙卷发生时气温明显下降,14:05—14:10由29.1℃降至27.6℃,14:15再降至25.9℃,5 min内平均气温最大降幅达1.7℃;14:30因强降雨气温再降至24.5℃;14:50起气温逐渐上升,17:00气温升至龙卷发生前的水平(28.6℃)。

锦和镇文化站自动站(图5b)距离龙卷路径约600 m。其气压在14:35—14:40出现陡降,由1007.6 hPa降至1005.0 hPa,5 min内平均气压下降2.6 hPa;14:36本站3 s瞬时气压录得最低值

1004.7 hPa,1 min 内瞬时气压下降 2.9 hPa; 降压非常显著,说明此时本站距离龙卷中心最近。风向 14:30 前为一致东南风,14:30—14:40 出现顺转,由东南风依次转为西南、偏北风。风速在 14:35 前后突增,2 min 平均风速由 14:30 的 $3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 突增至 $8.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,10 min 平均风速由 14:35 的 $6.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增至 14:40 的 $10.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 而 14:36 该站的 3 s 瞬时风还记录到 $32.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12 级) 的极大东

南风。气温也在 14:35 前后明显下降,5 min 内平均气温降幅为 $1.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。14:40 后由于断电导致各要素缺测。

4 雷达观测特征

广东湛江多普勒雷达显示,13:30 低层反射率因子的钩状回波和入流缺口还不明显,但径向速度

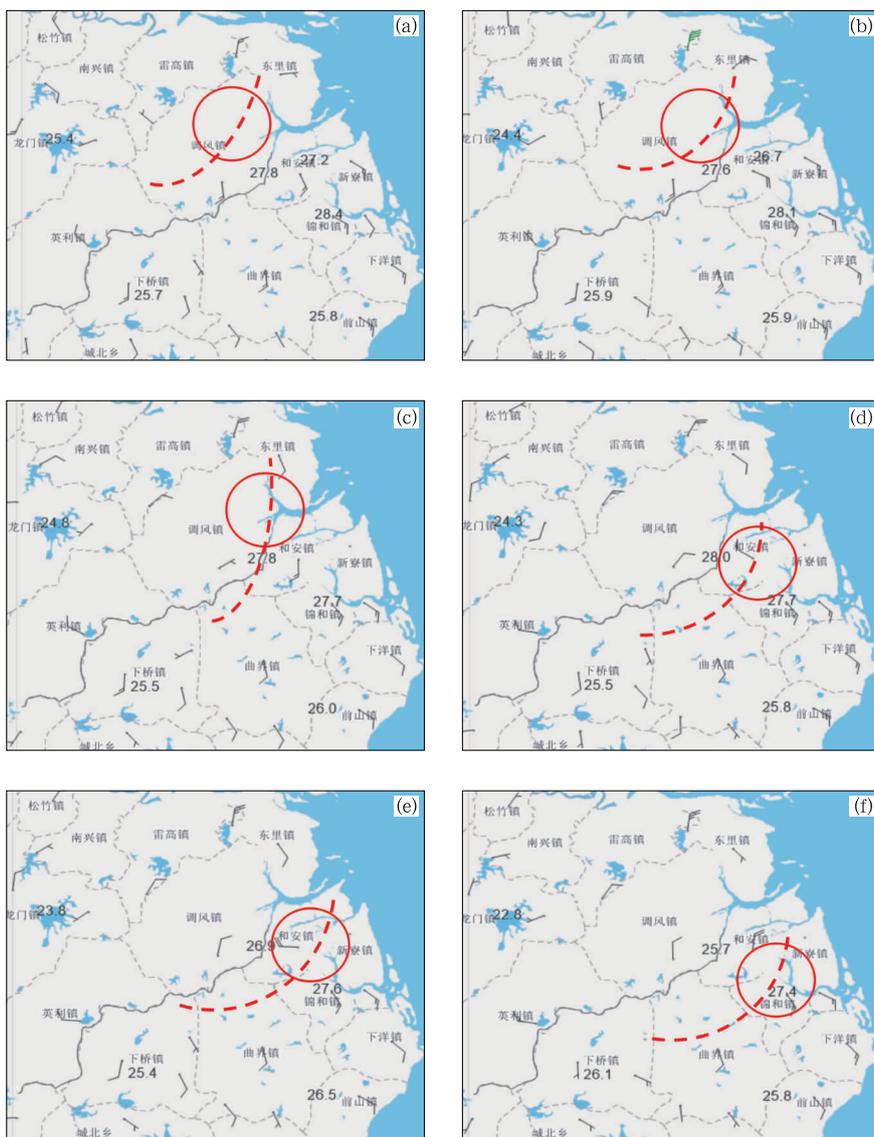


图 4 2019 年 4 月 13 日 13:25(a),13:35(b),14:00(c),14:05(d), 14:10(e)和 14:15(f)湛江区域自动站 2 min 平均风场和露点温度 (虚线为地面风场辐合线,红圈为小尺度涡旋)

Fig. 4 The 2 min average wind fields and dew point temperature of Zhanjiang AWS at (a) 13:25 BT, (b) 13:35 BT, (c) 14:00 BT, (d) 14:05 BT, (e) 14:10 BT and (f) 14:15 BT 13 April 2019 (Dashed line stands for convergence line, and red circle stands for the small scale vortex)

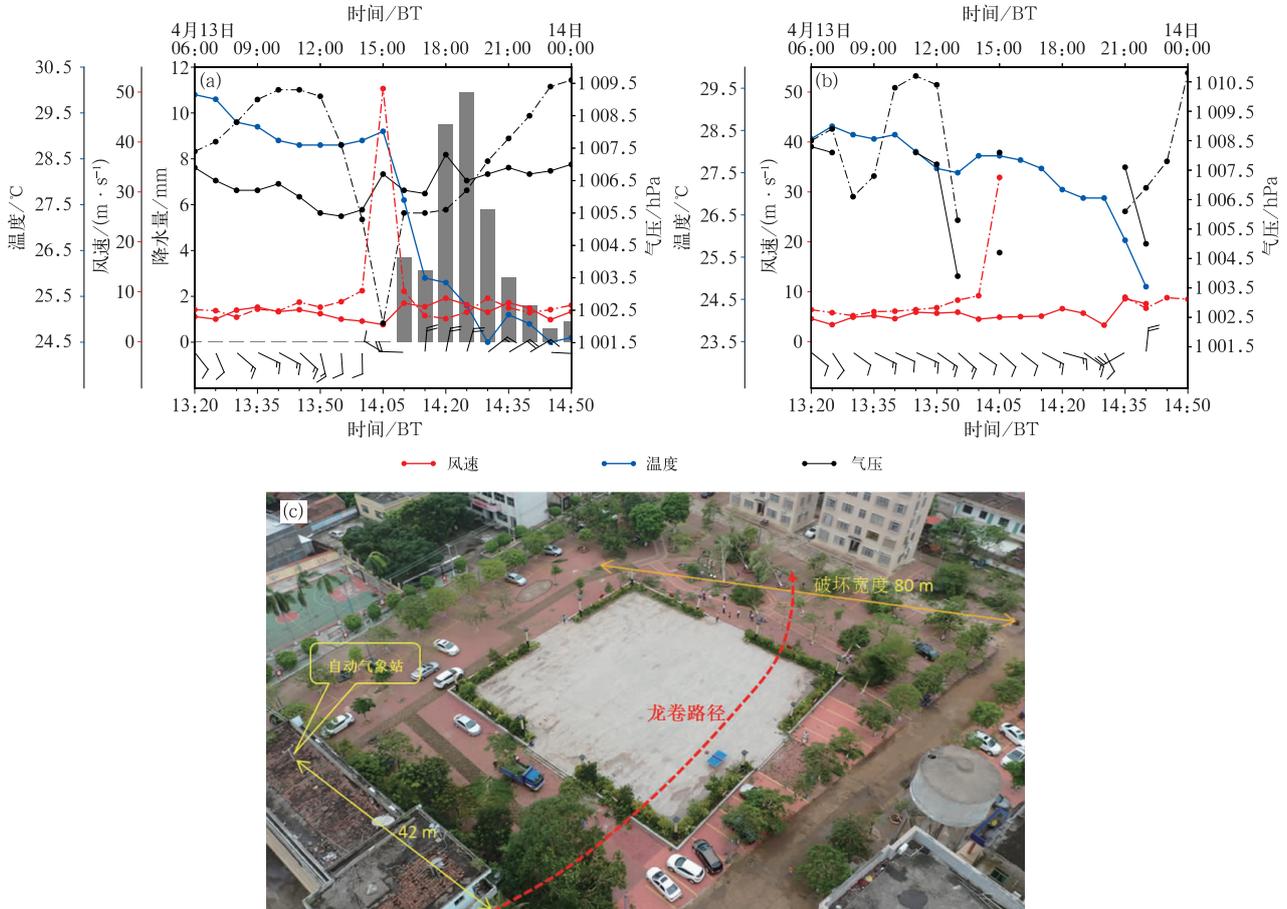


图 5 2019 年 4 月 13 日徐闻和安镇(a)和锦和镇自动气象站(b)13:20—14:50 的温度、气压、2 min 平均水平风速、2 min 平均风向(风向杆)、累积降雨量逐 5 min 演变(柱状,单位: mm),以及 06—24 时的 3 s 极大风速(红虚线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 3 s 最低气压(黑虚线,单位: hPa)逐时演变;和安镇站点位置(c)

Fig. 5 Temperature, pressure, 2 min averaged horizontal wind speed and wind direction (barb), and 5 min accumulated rainfall (bar, unit: mm) at Hean Town (a) and Jinhe Town (b) automatic weather stations in Xuwen County from 13:20 BT to 14:50 BT, as well as 3 s instantaneous wind maximum (red dotted line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and 3 s minimum pressure (black dotted line, unit: hPa) from 06:00 BT to 24:00 BT 13 April 2019; the position of Hean Station (c)

图上在 $2.4^{\circ} \sim 4.3^{\circ}$ 仰角已出现涡旋,对应高度为 1.9 ~ 3.1 km,尺度为 6~7 km,位于雷州东南部的东里镇北部上空,之后涡旋向上向下发展(图略)。13:42 对流单体发展为超级单体风暴,低层最强反射率因子为 52 dBz,出现明显的钩状回波和入流缺口,雷达开始自动识别出低层中气旋, 0.5° 仰角上中气旋旋转速度为 $15.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,底高约 0.5 km, 1.5° 仰角上中气旋旋转速度为 $17.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,达到中等强度中气旋标准,底高约 1.2 km(图略)。13:54 超级单体风暴中气旋移入徐闻和安镇北侧的冬松岛附近,

强度明显加强, 0.5° 仰角上中气旋旋转速度增强至 $21.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,接近强中气旋标准,底高维持在 0.5 km,直径缩小至 2.8 km, 1.5° 仰角上出现强中气旋(旋转速度为 $23.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 TVS(切变值为 $47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),底高约 1.3 km(图略)。14:00 超级单体风暴中气旋影响冬松岛, 0.5° 、 1.5° 仰角均出现类 TVS(切变值为 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,尺度约 1.5 km),其位置与龙卷实际发生位置重合(图 6a)。14:12 前后超级单体风暴中气旋影响和安镇(图 6b),中气旋强度略有减弱,旋转速度为 $17.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,底高约

0.4 km,直径约 4.5 km。14:30—14:36 超级单体风暴东南移动影响锦和镇(图 6c、6d)。龙卷出现在钩状回波顶端附近。14:42 起风暴组织结构明显减弱(图略),中气旋消失。

图 7 是从雷达业务 PUP 产品提取的徐闻龙卷

相关中气旋特征演变图。可见,中气旋强度和顶高呈反位相变化,中气旋强度先后在 13:54—14:00、14:12—14:18、14:30 出现 3 次峰值,中气旋顶高则在 14:00、14:12、14:30 出现 3 次谷值;中气旋 3 次强度峰值和 3 次顶高谷值与龙卷 3 次陆上活动

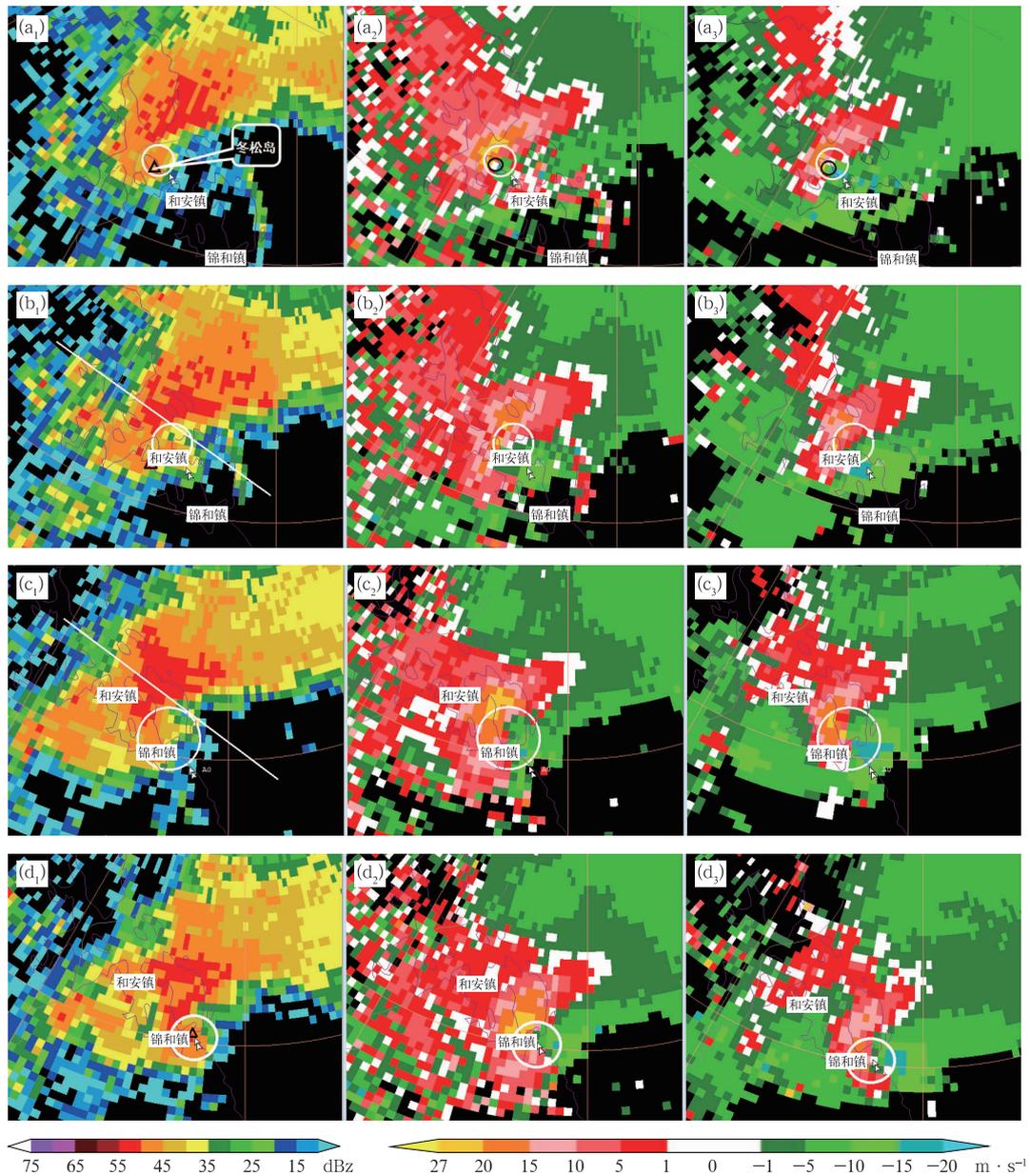


图 6 2019 年 4 月 13 日 14:00(a)、14:12(b)、14:30(c)、14:36(d)湛江雷达 0.5°仰角反射率因子(a₁, b₁, c₁, d₁)、0.5°仰角径向速度(a₂, b₂, c₂, d₂)、1.5°仰角径向速度(a₃, b₃, c₃, d₃) (白圈对应中气旋,黑圈对应 TVS 或类 TVS,△为龙卷发生地,14:30 龙卷在海上无定位信息)

Fig. 6 The 0.5° elevation reflectivity (a₁, b₁, c₁, d₁), 0.5° elevation radial velocity (a₂, b₂, c₂, d₂) and the 1.5° elevation radial velocity (a₃, b₃, c₃, d₃) of Zhanjiang Radar at 14:00 BT (a), at 14:12 BT (b), at 14:30 BT (c), at 14:36 BT (d) on 13 April 2019 (Triangle represents tornado, white circle represents mesocyclone, black circle indicates TVS or similar TVS. At 14:30, there was no position because tornado was on the sea)

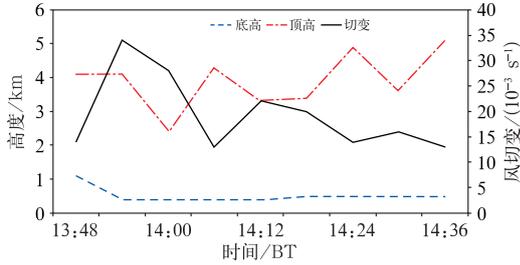


图 7 2019 年 4 月 13 日湛江雷达识别的中气旋特征时间演变

Fig. 7 Temporal evolution of mesocyclones detected by Zhanjiang Radar on 13 April 2019

时间相对应;另外,在 14:06、14:24,中气旋的 2 次强度谷值和 2 次顶高峰值则与龙卷 2 次入海时间相对应;中气旋底高大部分时间维持在 400~500 m,几乎接近地面,表明中气旋触地的可能性比较大。此外,13:54—14:00,湛江雷达上还探测到 TVS,TVS 在 13:54 达到最强,切变为 $71 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,与低

层中气旋最强时间一致。表明,龙卷所处环境的下垫面不同,其中气旋强度和顶高是有较为明显变化的,龙卷在陆上时对应中气旋强度更强、顶高更低,在海上时中气旋强度减弱、顶高增高。更确定的结论还需要通过更多相似个例归纳证实和高分辨率的数值模式进行深入研究。

为进一步揭示龙卷母体风暴的结构,图 8 给出了沿入流缺口和强回波区的反射率因子与径向速度垂直剖面(位置如图 6 中线段所示)。从反射率因子垂直剖面(图 8a、8b)可以看出明显的与低层暖湿入流相联系的弱回波区和位于其上的悬垂回波,表明存在强上升气流。俞小鼎等(2012)指出,强的上升气流有利于冰雹形成,如果 50 dBz 以上的强回波扩展到 -20°C 等温线以上,强冰雹形成的可能性很大。本次过程探空显示 0°C 层和 -20°C 层高度分别为 4.9 和 8.3 km,图 8b 显示对流风暴整体发展高度可达 15 km,50 dBz 的回波一直扩展到 9 km 高度,表现为高质心的雹暴结构,但并没有收到降雹的

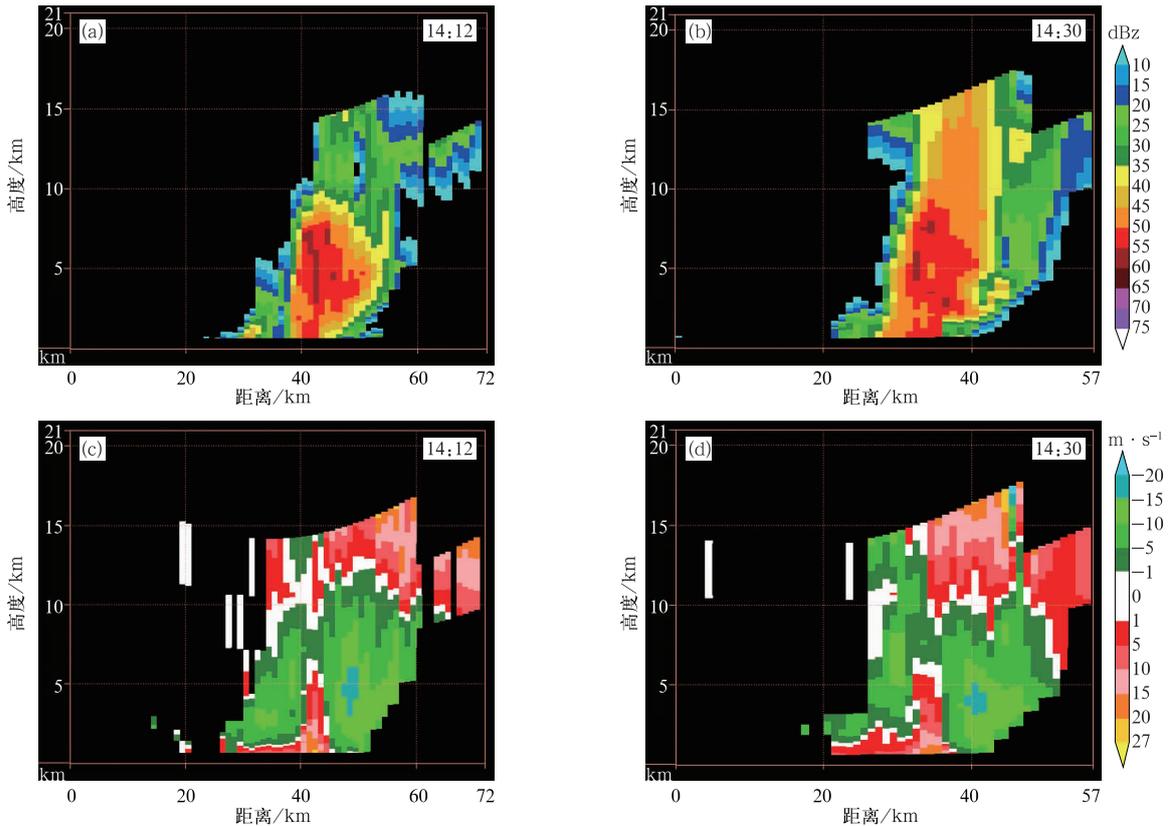


图 8 2019 年 4 月 13 日 14:12(a,c),14:30(b,d)湛江雷达反射率因子(a,b)和平均径向速度(c,d)垂直剖面(剖面位置分别如图 6 中相应时刻白线所示)

Fig. 8 The cross-section of reflectivity (a, b) and mean radial velocity (c, d) of Zhanjiang Radar along the hook echo at 14:12 BT (a, c) and 14:30 BT (b, d) 13 April 2019 (The locations of the cross-section are shown by the white solid lines in Fig. 6 respectively)

目击报告,这可能与 0°C 层高度较高有关。从相应径向垂直剖面(图 8c、8d)可以看到中气旋从 0.5° 仰角一直扩展到 6.0° 仰角(也就是从 0.5 km 扩展到 5.5 km),直径达 6~8 km,是一个比较深厚、水平尺度较大的中气旋。

5 结论与讨论

本文采用现场调查和相关气象综合探测资料,对 2019 年 4 月 13 日下午广东徐闻强龙卷的天气背景和中尺度特征等进行了分析,主要结论如下:

(1) 龙卷发生在海岸带附近,路径历经“三次陆上、两次海上”的复杂过程,长度约 16 km,持续时间约 36 min,平均移动速度为 $27\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,最大破坏宽度约 220 m,强度达到 EF3 级,对应我国行标三级,属于强龙卷。本次龙卷也是自 1961 年以来华南记录的最强西风带龙卷。

(2) 龙卷发生在广东前汛期有利于强对流发生的天气形势下,中低空强西南气流与偏南急流交汇、低层辐合及高层辐散、地面暖低压槽前的高温高湿不稳定气层是此次龙卷发生的有利天气背景;大气具有强的条件不稳定、低的 LCL、强的深层 $\text{Shear}_{0\sim 6\text{ km}}$ 和强的低空 $\text{Shear}_{0\sim 1\text{ km}}$ 、大的风暴相对螺旋度和能量螺旋度等有利于龙卷超级单体风暴发生的环境条件;地面中尺度辐合线和小尺度涡旋是有利于龙卷发生的重要中小尺度系统。

(3) 龙卷罕见地经过当地自动站,和安镇政府与锦和镇文化站自动站先后测到 $50.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (15 级)、 $32.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12 级)的极强阵风。位于龙卷涡旋附近的和安镇政府自动站受到龙卷涡旋不同部位的影响,风向随时间出现顺转—逆转—顺转的变化特征,而位于龙卷路径右侧的锦和镇文化站自动站风向发生顺时针转变;龙卷影响时,还伴随气压陡降和气温急降等变化特征,平均气压、瞬时气压最大降幅分别为 $2.6\text{ hPa}\cdot(5\text{ min})^{-1}$ 、 $4.1\text{ hPa}\cdot\text{min}^{-1}$,平均气温最大降幅达 $1.7^{\circ}\text{C}\cdot(5\text{ min})^{-1}$ 。

(4) 卫星红外图像上,导致龙卷的对流系统为一个近似椭圆形的 β 中尺度对流系统 ($M\beta\text{CS}$),对应高分辨率可见光图像上存在明显上冲云顶特征,龙卷发生在 $M\beta\text{CS}$ 上风侧 TBB 梯度最大处、水汽羽之下。雷达观测资料表明,产生龙卷的对流风暴为一个 β 中尺度经典超级单体风暴,具有明显的钩状回波和穹隆结构特征,质心高,主要伴随正地闪,龙卷

出现在钩状回波顶端附近;低层出现强中气旋和 TVS,最大旋转速度约 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,底高低于 500 m,中气旋 3 次强度峰值和 3 次顶高谷值与龙卷 3 次陆上活动时间相对应,而其 2 次强度谷值和 2 次顶高峰值与龙卷 2 次入海时间相对应。

值得注意的是,本次龙卷发生地是位于新寮岛西北侧的海湾区域,这与龙卷相对高发的珠江三角洲湾区、海南文昌市湾区等地形有些类似,在这些向东到东南呈“喇叭形”开口的三角洲地区,强的偏东风或东南风由于地表摩擦和地形特点,容易产生低层风的强垂直切变、水平辐合和气旋式旋转。吴俞等(2015)曾针对琼海市博鳌镇三角洲地形,采用 1 km 模式同化径向速度模拟计算由 10 m 风旋转分量得到垂直涡度,证实局地的三角洲地形有利于局地垂直涡度的增加。我国大陆海岸线长 1.8 万 km,大大小小的三角洲地形众多,但并非每一个三角洲都会有龙卷发生。三角洲地形如何对龙卷母体风暴的结构和演变产生影响,还需要用高分辨率数值模式做深入分析。

致 谢:感谢湛江市气象局郭湘平、黄晓梅,徐闻县气象局张新新,佛山市气象局陈志芳、何秋蕊,南京信息工程大学陈渭民教授以及广东省生态气象中心邓玉娇博士提供的支持和帮助。

参考文献

- 陈爱军,冯喆,胡胜,2015. 广东一次超级单体龙卷的多普勒天气雷达特征分析[J]. 科学技术与工程,15(23):1-8,27. Chen A J, Feng Z, Hu S, 2015. Analysis of Doppler radar features of a supercell tornado in Guangdong Province[J]. Sci Technol Eng, 15(23):1-8, 27 (in Chinese).
- 陈元昭,俞小鼎,陈训来,等,2016. 2015 年 5 月华南一次龙卷过程观测分析[J]. 应用气象学报,27(3):334-341. Chen Y Z, Yu X D, Chen X L, et al, 2016. A tornado in South China in May 2015 [J]. J Appl Meteor Sci, 27(3):334-341 (in Chinese).
- 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).
- 黄先香,炎利军,蔡康龙,等,2018a. 1415 号“海鸥”台风龙卷天气过程分析[J]. 灾害学,33(4):114-121. Huang X X, Yan L J, Cai K L, et al, 2018a. Analysis of the tornado weather process of No. 1415 Kalmaegi Typhoon[J]. J Catastrophol, 33(4):114-121 (in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2018b. 广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比[J]. 应用气象学报,29(1):70-83. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2018b. Contrastive analysis of two intense typhoon-tornado cases with synoptic and doppler weather

- radar data in Guangdong[J]. *J Appl Meteor Sci*, 29(1):70-83(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, 炎利军, 李兆慧, 等, 2016. 1522 号台风“彩虹”外围佛山强龙卷特征分析[J]. *热带气象学报*, 32(3):416-424. Li C L, Yan L J, Li Z H, et al, 2016. Analysis of a tornado in outside-region of Typhoon Mujigae in 2015[J]. *J Trop Meteor*, 32(3):416-424(in Chinese).
- 李兆慧, 王东海, 麦雪湖, 等, 2017. 2015 年 10 月 4 日佛山龙卷过程的观测分析[J]. *气象学报*, 75(2):288-313. Li Z H, Wang D H, Mai X H, et al, 2017. Observations of the tornado occurred at Foshan on 4 October 2015[J]. *Acta Meteor Sin*, 75(2):288-313(in Chinese).
- 刘娟, 朱君莹, 魏德斌, 等, 2009. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征[J]. *气象*, 35(10):32-39. Liu J, Zhu J J, Wei D B, et al, 2009. Doppler weather radar typical characteristics of the 3 July 2007 Tianchang Supercell Tornado[J]. *Meteor Mon*, 35(10):32-39(in Chinese).
- 钱维宏, 梁卓轩, 金荣花, 等, 2017. 扰动变量在强对流天气分析和模式评估中的应用——以苏北里下河地区引发龙卷的扰动系统为例[J]. *气象*, 43(2):166-180. Qian W H, Liang Z X, Jin R H, et al, 2017. Application of anomalous variables to severe convective system analyses and model evaluation: a case study on tornado-producing anomalous systems near Lixia River, Jiangsu Province[J]. *Meteor Mon*, 43(2):166-180(in Chinese).
- 王炳赞, 魏鸣, 范广洲, 等, 2018a. 1522 强台风“彩虹”螺旋雨带中衍生龙卷的超级单体演变与机理研究 I: 谱宽和速度[J]. *热带气象学报*, 34(4):472-480. Wang B Y, Wei M, Fan G Z, et al, 2018a. The evolution and mechanism of tornadic supercells in the outer rainbands of Strong Typhoon Mujigae(1522). Part I: spectrum width and mesocyclone speed[J]. *J Trop Meteor*, 34(4):472-480(in Chinese).
- 王炳赞, 魏鸣, 范广洲, 等, 2018b. 1522 强台风“彩虹”螺旋雨带中衍生龙卷的超级单体演变与机理研究 II: 回波结构和钩状回波形成机理[J]. *热带气象学报*, 34(4):481-488. Wang B Y, Wei M, Fan G Z, et al, 2018b. The evolution and mechanism of the tornadic supercells in the outer rainbands of strong typhoon Mujigae(1522). Part II: evolution of structure and mechanism of hook echo[J]. *J Trop Meteor*, 34(4):481-488(in Chinese).
- 王沛霖, 1996. 珠江三角洲春季龙卷发生的环境条件[J]. *热带气象学报*, 12(1):60-64. Wang P L, 1996. On the environmental conditions for genesis of tornadoes in Zhujiang River Delta in spring[J]. *J Trop Meteor*, 12(1):60-64(in Chinese).
- 吴俞, 薛湛彬, 郝丽清, 等, 2015. 强台风“山神”外围超级单体引发的龙卷分析[J]. *热带气象学报*, 31(2):213-222. Wu Y, Xue C B, Hao L Q, et al, 2015. The analysis of tornado caused by supercell in outer-band of Typhoon Shanshen[J]. *J Trop Meteor*, 31(2):213-222(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, 2006a. 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, 2006a. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing, China Meteorological Press: 297-305(in Chinese).
- 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等, 2006b. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. *高原气象*, 25(5):914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al, 2006b. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar[J]. *Plateau Meteor*, 25(5):914-924(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).
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. *气象学报*, 70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(3):311-337(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]. *Meteor Mon*, 42(11):1304-1314(in Chinese).
- 赵瑞金, 郝雪明, 杨向东, 等, 2010. 2009 年 7 月 20 日承德龙卷多普勒天气雷达特征[J]. *气象*, 36(11):68-76. Zhao R J, Hao X M, Yang X D, et al, 2010. Analysis on the Doppler weather radar characteristics of the 20 July 2009 tornado in Chengde[J]. *Meteor Mon*, 36(11):68-76(in Chinese).
- 郑艳, 俞小鼎, 任福民, 等, 2017. 海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析[J]. *气象*, 43(6):675-685. Zheng Y, Yu X D, Ren F M, et al, 2017. Analysis on a severe tornado process in Hainan triggered by supercell[J]. *Meteor Mon*, 43(6):675-685(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,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).
- 郑永光,田付友,周康辉,等,2018a. 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, 2018a. 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,朱文剑,田付友,2018b. 2015 年“东方之星”翻沉事件和 2016 年阜宁 EF4 级龙卷对流星暴环境条件、结构特征和机理[J]. 气象科技进展, 8(2):44-54. Zheng Y G, Zhu W J, Tian F Y, 2018b. Environmental conditions, structures, and mechanisms of convective storms of 2015 “Oriental Star” capsizing event and 2016 Funing EF4 Tornado[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(2):44-54(in Chinese).
- 郑媛媛,张备,王啸华,等,2015. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J]. 气象, 41(8):942-952. Zheng Y Y, Zhang B, Wang X H, et al, 2015. Analysis of typhoon-tornado weather background and radar echo structure[J]. Meteor Mon, 41(8):942-952(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).
- 中国气象局,2019. 龙卷强度等级:QX/T 478—2019[S]. 北京:中国气象出版社. China Meteorological Administration, 2019. Tornado intensity scale:QX/T 478—2019[S]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 朱文剑,盛杰,郑永光,等,2016. 1522 号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 35(5):403-414. Zhu W J, Sheng J, Zheng Y G, et al, 2016. Damage survey and mesoscale features analysis on tornado in outer rain-band of Typhoon “Mujigae” on 4 October 2015[J]. Torr Rain Dis, 35(5):403-414(in Chinese).
- Agee E, Jones E, 2009. Proposed conceptual taxonomy for proper identification and classification of tornado events[J]. Wea Forecasting, 24(2):609-617.
- Brooks H E, Doswell III C A, Davies-Jones R, 1993. Environmental helicity and the maintenance and evolution of low-level mesocyclones[M]//Church C, Burgess D, Doswell C, et al. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards. American: The American Geophysical Union; 97-104.
- 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.
- Davies J M, 1993. Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes[C]//Proceedings of the 17th Conference on Severe Local Storms. Saint Louis: American Meteorological Society; 107-111.
- Davies-Jones R, 1984. Streamwise vorticity: the origin of updraft rotation in supercell storms[J]. J Atmos Sci, 41(20):2991-3006.
- Evans J S, Doswell C A, 2002. Investigating derecho and supercell proximity soundings[C]//Proceedings of the 21th Conference on Severe Local Storms. San Antonio: American Meteorological Society; 635-638.
- Fujita T T, 1971. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity[R]. Chicago: University of Chicago; 1-42.
- Hart J A, Korotky W D, 1991. The SHARP workstation user's manual-v1. 50. A skewt/hodograph analysis and research program for the IBM and compatible PC[R]. Charleston: NOAA/NWS Forecast Office; 1-62.
- Markowski P, Richardson Y, 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd; 245-260.
- McDonald J R, Mehta K S, Mani S, 2006. A Recommendation for An Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)[M]. Lubbock: Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University; 60-61.
- Meng Z Y, Yao D, 2014. Damage survey, radar, and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012[J]. Wea Forecasting, 29(3):702-724.
- Pryor K L, 2015. Progress and developments of downburst prediction applications of GOES[J]. Wea Forecasting, 30(5):1182-1200.
- Wakimoto R M, Wilson J W, 1989. Non-supercell tornadoes[J]. Mon Wea Rev, 117(6):1113-1140.