

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.

## 海南一次超级单体引发的强烈龙卷 过程观测分析\*

郑 艳<sup>1,3</sup> 俞小鼎<sup>2</sup> 任福民<sup>3</sup> 蔡亲波<sup>1</sup>

1 海南省气象台,海口 570203

2 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

**提 要:** 利用常规高空地面观测、海南省区域加密自动站、海口多普勒雷达、海口风廓线雷达以及风云 2G 高分辨可见光云图资料对 2016 年 6 月 5 日海南省文昌市一次 EF2 级龙卷过程进行分析。结果表明:(1)这次龙卷过程发生在副热带高压边缘、500 hPa 槽前、850 hPa 切变线和地面热低压的南侧,是由超级单体引发的;由于海陆风效应而显著增大的 0~2 km 垂直风切变,较低的抬升凝结高度,随着白天地面太阳辐射加热迅速增大的 CAPE 值为超级单体风暴的生成提供了有利的环境条件。(2)超级单体是在东移爬线的东侧,由  $\beta$  中尺度海风锋辐合线和雷暴外流边界触发并加强的,沿着海风锋辐合切变线自东向西传播,与风暴承载层平均风向相反,即后向传播;超级单体具有勾状回波、中高层回波悬垂、中气旋和类似龙卷式涡旋特征(TVS)的小尺度强切变等特征,中层中气旋向低层延伸加强期间龙卷漏斗云生成、触地,小尺度强切变自中层同时向上、向下发展时龙卷达到最强;龙卷发生在勾状回波低层反射率因子最大梯度区域靠近弱回波区域一侧,也是小尺度强切变(类 TVS)所在位置;(3)海风锋辐合线与超级单体的下沉气流外流边界合并,形成位于超级单体南侧的阵风锋,从而形成由东指向西的水平涡管,该水平涡管在钩状回波旁的弱回波区被上升气流扭曲拉伸,形成低层中气旋,超级单体南侧的阵风锋与东移的爬线阵风锋相遇而加强的地面辐合,有助于低层中气旋获得拉伸旋转加速而形成龙卷。

**关键词:** 西移超级单体,龙卷,后向传播

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.06.004

## Analysis on a Severe Tornado Process in Hainan Triggered by Supercell

ZHENG Yan<sup>1,3</sup> YU Xiaoding<sup>2</sup> REN Fumin<sup>3</sup> CAI Qinbo<sup>1</sup>

1 Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203

2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

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

**Abstract:** A case study of an EF2 tornado that occurred in Wenchang, Hainan on 5 June 2016 was carried out by using observation data, automatic weather station data, Haikou Doppler radar data, wind profile data and 2G high resolution visible cloud images of Fengyun Meteorological Satellite. The results showed that: (1) This tornado was triggered by a supercell, corresponding to the edge of subtropical high, front of trough at 500 hPa, shear line at 850 hPa and the south side of ground thermal low. The favorable environmental conditions for the developing of the supercell were the significant increase of vertical wind shear in 0-2 km and the lower lifting condensation level, both caused by sea-land breeze, and the quick increase of CAPE with solar radiation heat. (2) Both the meso- $\beta$  scale convergence line (sea-breeze front) and the

\* 海南省自然科学基金项目(414200)、国家自然科学基金项目(41175043)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306009)和海南省气象局重点项目(HNQXZD201410)共同资助

2016 年 7 月 19 日收稿; 2017 年 1 月 13 日收修定稿

第一作者:郑艳,主要从事强对流天气预警及台风预报研究. Email:hnzyan@126.com

通信作者:俞小鼎,主要从事强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警以及临近天气预报研究. Email:xduy1962@126.com

outflow boundary of thunderstorm triggered and enhanced the developing of the supercell, which was on the east side of eastward squall line, spreading from east to west along the meso- $\beta$  scale convergence line, and in contrast to the average wind direction of the storm bearing layer, that is, back-propagating. Some characters of the supercell including hook-shaped echo, high-level echo overhang, meso-cyclone and small scale severely shear (similar with TVS) were observed. The middle meso-cyclone tornado funnel cloud was generated during extension strengthening, touchdown to low level. The tornado reached its strongest stage during the time of the small scale shear developing both upwardly and downwardly from the middle level. Tornado occurred at the maximum gradient area of weak echo reflectivity of low level. (3) The merge of sea breeze front line and sinking air outflow border of supercell, generated the breeze front located in the south of supercell, and finally a horizontal vorticity tube formed from east to west orientation. A upright vorticity tube twisted when the horizontal tube met the updraft near the weak hook-like echo, forming a low-level meso-cyclone. The breeze front located in the south of supercell met with eastward moving gust front, and the boundary layer convergence was enhanced, favoring low-level meso-cyclone to gain the stretch rotating acceleration, and eventually tornado formed.

**Key words:** west-moving supercell, tornado, back-propagating

## 引 言

龙卷是强对流天气最强烈的表现形式,平均直径为 100 m 左右,是从积雨云内部扩展到地面的猛烈旋转的空气柱,其产生的最大地面风速可达  $140 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,可造成重大的人员伤亡和财产损失(俞小鼎等,2006a;2006b)。龙卷具有突发性强、生命史短等特点,在实际业务中对其的预报和预警难度较大。多普勒天气雷达除了能探测回波特征,还可测量降水粒子沿着雷达径向的速度,从而识别出中小尺度的涡旋、辐合和辐散等特征,识别多普勒雷达回波特征是日前基层台站对龙卷进行探测和短临预警最有效的方法。范雯杰和俞小鼎(2015)对 1961—2010 年中国 165 次 EF2 或以上级强龙卷统计分析表明,强龙卷主要分布在中国江淮地区、两湖平原、华南地区、东北地区和华北地区东南部等平原地区;魏文秀和赵亚民(1995)指出我国有两个龙卷多发带,一是自长江三角洲经苏北平原至黄淮,另一个是在广东和广西,呈东西走向,其中一个中心在海南省。近年来,多位学者(姚叶青等,2007;郑媛媛等,2009;刘娟等,2009;唐小新和廖玉芳,2007;张晰莹等,2013;王宁等,2014;张小玲等,2016;郑永光等,2016)先后对江苏、安徽、湖南和东北地区的龙卷过程进行环境条件和雷达、卫星特征等统计分析,指出强烈的龙卷多是由超级单体产生的。曾明剑等(2016)对江苏梅雨期龙卷天气的环境特征进行合成分析并提炼对流参

数特征。陈元昭等(2016)研究了深圳宝安机场附近的一次 EF1 级超级单体水龙卷过程。海南省是我国龙卷多发的省份之一,根据影响系统可分为热带气旋龙卷和非热带气旋龙卷;2004—2015 年海南省共发生热带气旋龙卷 7 次,非热带气旋龙卷 14 次,龙卷发生的时间、等级、灾情等概况详见表 1,热带气旋龙卷普遍达到 EF1 级或 EF2 级,非热带气旋龙卷大多为 EF0 级;从龙卷落区来看(图 1),热带气旋龙卷位于海南岛东部沿海地区和西北部沿海地区,非热带气旋龙卷集中在海南岛东北部地区的海口、文昌和澄迈 3 市(县)。郑媛媛等(2015)对发生在我国东部沿海地区(包括海南省)的 10 次热带气旋龙卷过程的环境背景和回波结构演变特征进行了分析,但目前对  $20^{\circ}\text{N}$  以南热带地区的非热带气旋龙卷,尤其是 EF2 级及以上的强烈龙卷过程尚无相关研究。

利用常规高空地面观测资料、海南省区域加密自动站资料、海口多普勒雷达产品、海口风廓线资料和风云 2G 高分辨率可见光云图对 2016 年 6 月 5 日海南省文昌市锦山镇和冯坡镇一次强烈龙卷过程的环境背景和雷达回波、中气旋、类似 TVS 的小尺度强切变等特征进行研究,以期对热带地区的龙卷预报、监测和预警提供依据和参考。

## 1 龙卷实况及灾情

2016 年 6 月 5 日 15:12—15:27(北京时,下

表 1 2004—2015 年海南省龙卷过程概况

Table 1 Tornado survey in Hainan Province in 2004—2015

序号	时间	地点	主要影响系统	等级	灾情
01	2004 年 4 月 16 日 16:00—17:00	海口红旗镇、三门坡镇	西风槽	EF1	直径 30 cm 橡胶树折断, 经济损失约 1000 万元
02	2005 年 9 月 27 日 01:00	临高临城镇	0518 达维	EF2	6 人死亡, 10 多人受伤, 倒塌房屋 6 间
03	2006 年 8 月 2 日 18:40	文昌蓬莱镇	0606 派比安	EF0	损失轻微
04	2006 年 9 月 30 日 23:20	万宁南桥镇、东澳镇	0616 象神	EF2	1 人死亡, 12 人受伤, 倒塌损坏房屋 77 间
05	2008 年 5 月 29 日 16:40	海口三江镇	西风槽、西南热低压	EF2	损坏房屋 211 间, 4 艘渔船掀上岸, 10 根电杆折断
06	2008 年 9 月 24 日 06:03	澄迈桥头镇	0814 黑格比	EF1	掀翻 30 间房屋屋顶
07	2009 年 3 月 24 日 23:00	海口三门坡镇	切变线、静止锋	EF0	损坏房屋 46 间, 经济损失约 526 万元
08	2009 年 3 月 29 日 17:30	文昌蓬莱镇	切变线、静止锋	EF1	大批橡胶树折断, 经济损失约 70 万元
09	2009 年 4 月 13 日 15:30	文昌公坡镇	西风槽	EF0	损坏房屋 20 间
10	2009 年 4 月 18 日 05:30	海口演丰镇	西风槽	EF0	损坏房屋 25 间
11	2009 年 6 月 23 日 16:26、17:30	海口三江镇、云龙镇	切变线	EF0	经济损失约 125 万元
12	2012 年 7 月 27 日 16:00	琼海嘉积镇	切变线、西南热低压	EF0	经济损失约 10 万元
13	2012 年 10 月 27 日 17:00	琼海博鳌镇	1223 山神	EF2	倒塌损坏房屋 10 间, 8 根电杆刮倒
14	2013 年 4 月 30 日 14:45	海口东山镇	西风槽、静止锋	EF0	损坏房屋 20 间
15	2013 年 9 月 30 日 03:50	万宁后安镇	1321 蝴蝶	EF2	2 人受伤, 房屋倒塌、树木和电杆折断数目不详
16	2014 年 5 月 16 日 15:10	澄迈福山镇	西风槽、西南热低压	EF0	经济损失约 9 万元
17	2014 年 5 月 17 日 16:00	澄迈福山镇	西风槽、西南热低压	EF0	经济损失约 4 万元
18-1	2014 年 5 月 20 日 14:00—14:30	澄迈仁兴镇	切变线	EF1	大批橡胶树折断, 损坏房屋 40 间
18-2	2014 年 5 月 20 日 16:00—16:20	文昌东路镇	切变线	EF0	3 人受伤, 损坏房屋 11 间
19	2014 年 8 月 21 日 16:00	海口大致坡镇	切变线	EF0	损失轻微
20	2014 年 9 月 15 日 21:45	澄迈桥头镇	1415 海鸥	EF1	倒塌房屋 15 间
21	2015 年 5 月 24 日 15:30	海口大致坡镇	西南热低压	EF0	损失轻微

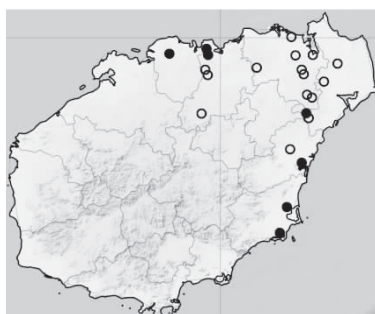


图 1 2004—2015 年海南省龙卷落区  
(●代表热带气旋龙卷, ○代表非热带气旋龙卷)

Fig. 1 Tornado falling area in Hainan Province, during 2004—2015

(●: typhoon-tornado, ○: non-typhoon-tornado)

同),海南省文昌市锦山镇和冯坡镇发生龙卷。距离龙卷发生地西南方约 1.2 km 的鱼塘摄像头全程记录了这次龙卷生成过程(图 2a<sub>1</sub>~2a<sub>6</sub>):15:11:10 龙卷母云下方的地面出现气旋性旋转的尘云 A; 15:12:10 从龙卷母云中伸出漏斗状气旋性龙卷涡管云体,龙卷漏斗云逐渐向下伸展至涡旋尘云 A 中;15:12:47 龙卷漏斗云向上收缩,同时在其左侧的地面又有一气旋性旋转的尘云 B 快速向 A 靠近; 15:13:00 尘云 A 和 B 合并后龙卷漏斗云持续加强;15:13:30 强烈旋转的龙卷漏斗云与地面的尘云合并,龙卷逐渐触地。从目击者描述和灾后调查分析,这次龙卷过程 15:12:00 首先在冯坡镇白茅村西南方生成,短暂地沿顺时针移到白茅村北方,然后向

西南方向移动,先后经过锦山镇峰上村、峰下村、排田村、下坡湾村和下坡村,最后进入湖山水库消失(图 2b);路径长度约为 3.7 km,持续时间约为 15 min。灾情照片显示,大量的瓦片嵌入到荔枝树干中,部分砖木结构的房屋被摧毁(图 2c<sub>1</sub>),大部分树木(都是软木类)被扭断或枝叶剥落只剩主干(图 2c<sub>2</sub>);根据增强藤田级别(EF)的龙卷分级标准可判定为 EF2 级龙卷,是海南省有记录以来最强的龙卷之一。

这次强烈龙卷过程造成文昌市锦山镇和冯坡镇 1 人死亡、11 人受伤,倒塌房屋 44 间、掀顶 250 间,农作物损失 145.5 亩,畜禽死亡 2.1 万只,直接经济损失约为 3185 万元。

## 2 环境背景特征

### 2.1 天气形势

2016 年 6 月 5 日 08 时,500 hPa 低涡中心位于华北东部,西风槽自黄河下游伸展至湖南中西部,江西南部到广西西部为一横槽,副热带高压(以下简称副高)控制海南及南海大部海域,海南岛处于副高北缘吹西南风;20 时,低涡中心东移至渤海附近,西风槽与横槽合并加深,槽底位于广西南部(22°N 附近)。5 日 08 时,850 hPa 重庆到广西西部为一近乎南北向的切变线;20 时,切变线东移并逐渐演变为准东西向,位于两广南部。5 日白天,地面西南热低压中心在四川盆地维持,海南岛处于低压槽控制下。这次龙卷过程发生在副高边缘、500 hPa 槽前、850 hPa 切变线和地面热低压南侧。

### 2.2 层结不稳定条件

6 月 5 日 08 时,海口站(距离龙卷发生地 50 km)850 与 500 hPa 温度差  $\Delta T_{850-500}$  为 27°C,具有明显的条件不稳定,低层水汽充沛,露点较高,易于发生深厚湿对流天气(朱乾根等,2010;许爱华等,2006)。地面海南岛一直处于西南热低压控制下,受持续偏南风影响,5 日白天海南岛气温持续升高,14 时前后北部地区普遍升至 36~38°C,大大增加了地面至 850 hPa 温度递减率,因而增加了低层大气的条件不稳定。

5 日 08 时海口站  $T-\ln p$  图显示(图 3a),925 hPa 附近存在较强逆温,此时对流有效位能

(CAPE)为  $900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;用 14 时海口站气温 34°C、露点 26°C 对 08 时  $T-\ln p$  图订正后发现(图 3b),CAPE 显著增大到  $4360 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,是 08 时 CAPE 的近 5 倍,边界层逆温被破坏,地面气块抬升到自由对流高度时会加速上升,释放 CAPE,形成有较强上升气流的深厚湿对流(Moller et al,1994)。不过,0~6 km 垂直风切变不大,根据探空只能判断午后可能会出现深厚湿对流,出现超级单体风暴的几率很低。

对龙卷的研究表明(Brooks and Creven,2002;Evans and Doswell,2002;Erikson,2003;Rasmussen and Blanchard,1998),较大的 0~1 km 低层垂直风切变和较低的抬升凝结高度是有利于 EF2 级及以上强烈龙卷产生的环境条件。6 月 5 日 08 时,海口站抬升凝结高度为 960 m,较 Thompson et al (2000)统计的美国南部大平原龙卷走廊地区产生较强龙卷的平均抬升凝结高度 980 m 大致相当。5 日 08 时,受副高边缘、500 hPa 槽前和西南热低压影响,海口站地面至 400 hPa 为一致的西南风,风速介于  $2\sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,垂直风切变较小;但海口风廓线风场演变显示,龙卷发生前 13:36—14:54,随着海南岛北部地区气温快速升高,海陆风效应增强,海口站地面至 1.2 km 近地层由西南风  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  转为偏北风  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,2 km 高度仍维持西南风  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,0~2 km 风矢量差值增大至  $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,对应的垂直风切变为  $6.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,呈现出较大的低层垂直风切变。这次龙卷过程 0~1 km 低层垂直风切变较小,但 0~2 km 垂直风切变显著增加可能是随后超级单体风暴形成的原因之一(俞小鼎等,2008;王秀明等,2012)。

### 2.3 抬升触发条件

海南省区域加密自动站 2 min 平均风向风速和风云 2G 高分辨率可见光云图可以显示此次龙卷过程中  $\beta$  中尺度海风锋辐合线的演变及其对雷暴云团的触发作用。6 月 5 日 14:00,随着海陆风效应增强,海南岛北部沿海地区转为一致的偏北风;有两条  $\beta$  中尺度海风锋辐合线,一条位于海口西部—儋州东南部一带,为东北—西南向的西北风与偏西风辐合,另一条位于文昌—海口北部沿海地区,为东西向的偏北风与偏南风辐合,龙卷发生地冯坡镇和锦山镇位于东西向辐合切变线附近;在两条  $\beta$  中尺度海风锋辐合线的作用下,在海南岛北部沿海地区激发

出对流云带 C 和对流云团 A、B(图 4a)。15:00, 东北—西南向的海风锋辐合线移至海口中部—屯昌西部一带, 转为偏北风与偏南风的辐合, 东西向的辐合切变线在文昌—海口北部沿海地区稳定少动; 区域加密自动站显示: 由于降水蒸发冷却作用, 两条辐合线北侧的气温 1 h 普遍下降 6~8℃, 最大降幅达到

10℃, 辐合线南北两侧小时极大风速明显增大, 北侧普遍转为偏北或西北风 7~9 级, 南侧的偏南风增大到 5~7 级; 对流云带 C 东南侧的雷暴外流边界进一步加强了海风锋辐合线(图 4b); 可见光云图上, 对流云团 A 与东移的对流云带 C 合并加强为东北—西南向的 MCS, 文昌北部沿海地区的对流云团



图 2 2016 年 6 月 5 日海南省文昌市龙卷生成过程录像截屏(a<sub>1</sub>~a<sub>6</sub>)、龙卷路径(b)及灾后调查照片(c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>)

Fig. 2 Video screenshots of tornado in Wenchang, Hainan on 5 June 2016 (a<sub>1</sub>—a<sub>6</sub>), tornado path (b) and pictures of its damages (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>)

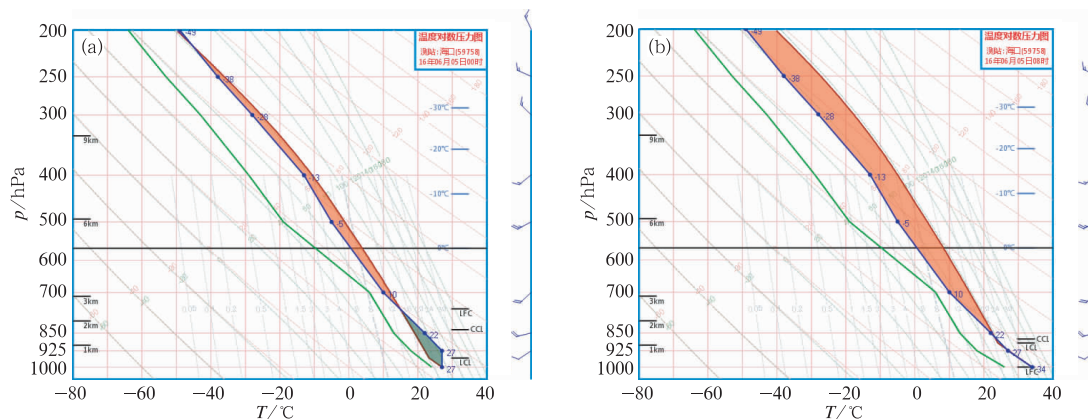


图 3 2016 年 6 月 5 日 08 时海口站  $T-\ln p$  图(a)和 14 时订正后的  $T-\ln p$  图(b)

Fig. 3  $T-\ln p$  of Haikou observation at 08:00 BT (a) and modified  $T-\ln p$  at 14:00 BT (b) 5 June 2016

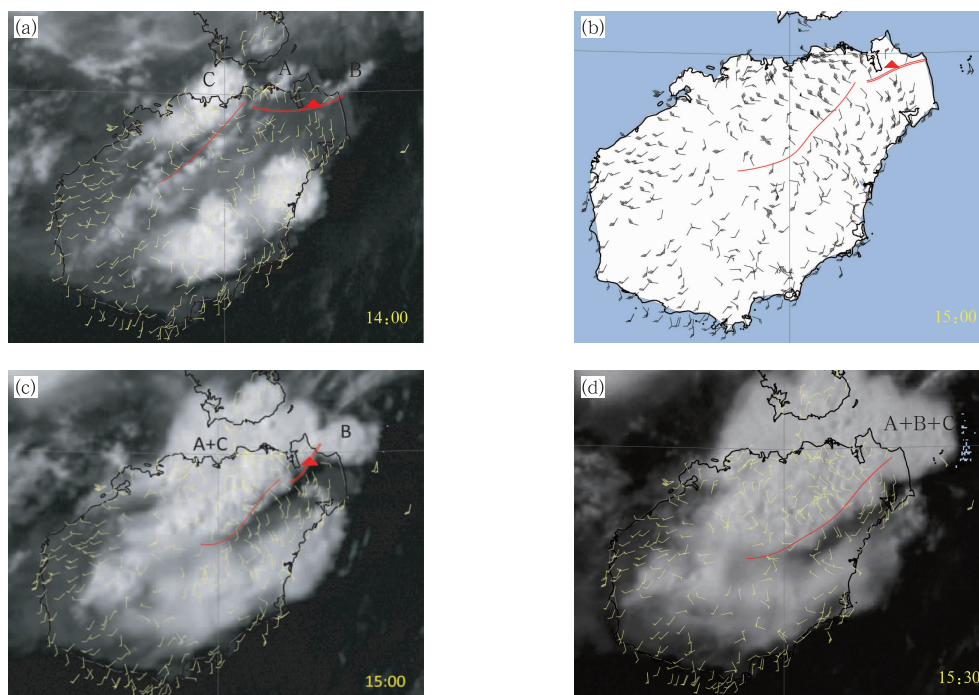


图 4 2016 年 6 月 5 日海南省区域加密自动站 2 min 平均风向风速和同时刻的风云 2G 高分辨率可见光云图(a,c,d)及 15:00 海南省区域加密自动站小时极大风向风速(b)  
(单实线代表雷暴外流边界,双实线代表  $\beta$  中尺度海风锋辐合线,三角是龙卷发生地)

Fig. 4 The 2 min average wind direction and wind speed of Hainan automatic weather station network and 2G high resolution visible cloud image of FY satellite (a,c,d) and 1 h class gale wind direction and wind speed of Hainan automatic weather station network at 15:00 BT (b) 5 June 2016

(Single solid line stands for the boundary of outflow of thunderstorm, double solid line stands for convergence line of meso- $\beta$  scale sea-breeze front, and triangle stands for location of the tornado)

B 也显著增强,显示为多个排列整齐的上冲云顶,雷暴云团南侧有狭长的暗影(图 4c)。随着西北风(海风)逐渐深入内陆,15:30,两条海风锋辐合线合并,缓慢东移至文昌—琼中一带;雷暴云团 B 也与 MCS 合并(图 4d)。受到雷暴外流边界加强的  $\beta$  中尺度海风锋辐合线是此次导致强烈龙卷天气超级单体风暴的触发机制。海南岛北部地区的雷暴外流边界(阵风锋)也是引发龙卷的超级单体发展加强的机制之一,这部分内容将在 3.1 节中详细分析。

### 3 海口多普勒雷达产品特征

#### 3.1 超级单体回波演变

0.5° 仰角反射率因子产品显示,6 月 5 日 14:00,海南岛西部的澄迈到昌江有多个对流单体生成发展,沿着  $\beta$  中尺度海风锋辐合线逐渐组织成东

北—西南向的对流回波带 C;与此同时,在海口东北部沿海地区的对流单体快速加强为对流风暴 A;14:37,对流风暴 A 南侧和对流回波带 C 东侧同时探测到清晰的雷暴外流边界 A1 和 C1,A1 向偏南移动,C1 向偏东移动,在两条雷暴外流边界交界处附近不断有新生单体生成发展;15:02,东移的对流回波带 C 与新生单体合并加强为飚线 C,强度增大到 55 dBz(图 5a),飚线 C 后侧入流较强,平均径向风速达到  $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与辐合线北侧的加密自动站实测的极大风速相当(图 4b)。

这次强烈龙卷过程是由超级单体 B 引发的,0.5° 仰角反射率因子产品监测到超级单体 B 的演变过程(图 5b<sub>1</sub>~5b<sub>12</sub>)。5 日 14:19,文昌东北部近海有一对流单体活动,最大反射率因子为 35 dBz,其西侧的文昌东北部沿海地区维持一条近东西向的辐合线,尺度为 20~25 km,与图 4 中的  $\beta$  中尺度海风锋辐合线相对应;14:25 以后,沿着海风锋辐合

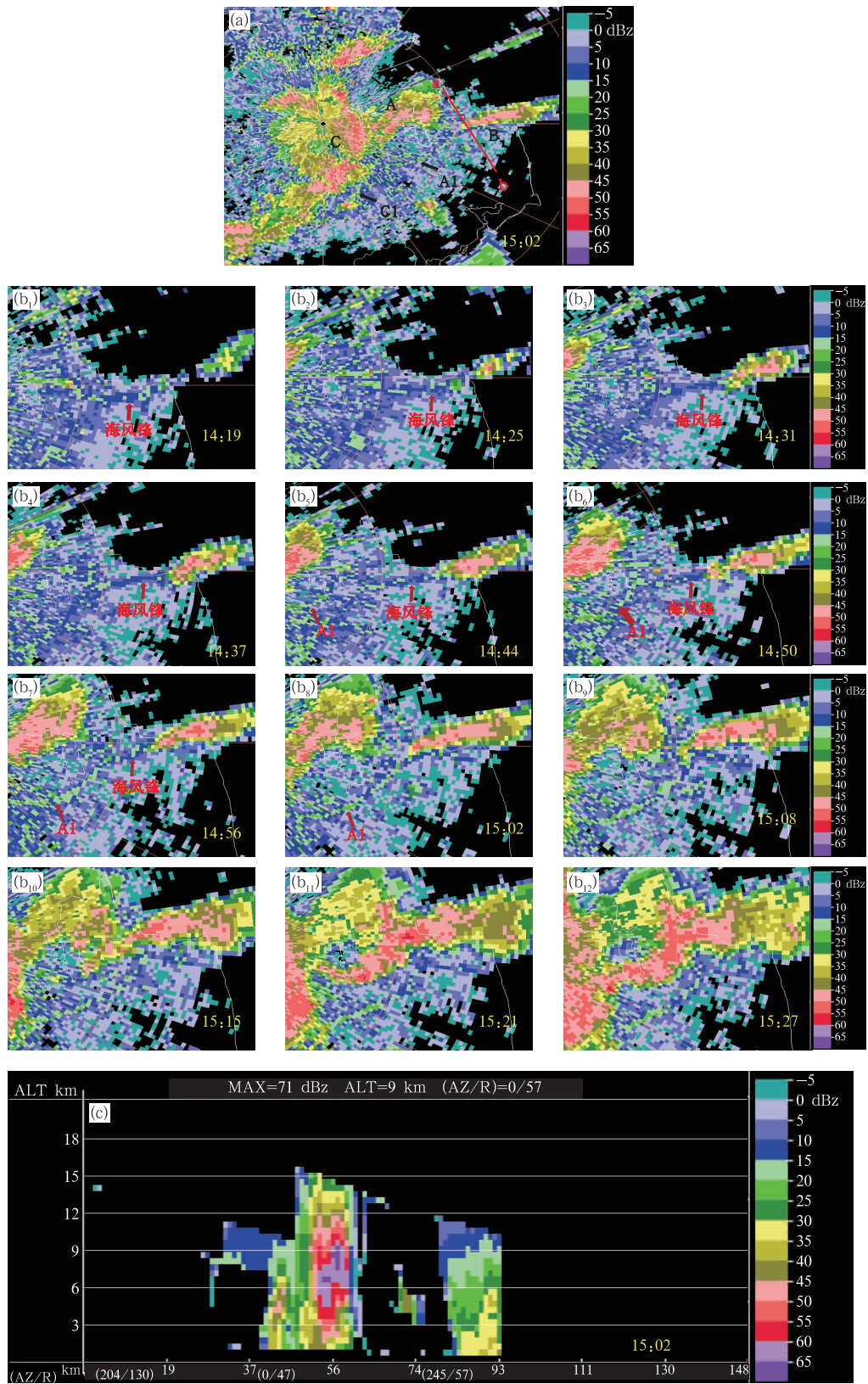


图 5 2016 年 6 月 5 日海口多普勒雷达 0.5°仰角反射率因子(a,15:02;b<sub>1</sub>~b<sub>12</sub>,14:19—15:27)及 15:02 沿图 5a 中线段 ab 的垂直剖面图(c)

Fig. 5 The 0.5° elevation reflectivity of Haikou Doppler Radar on 5 June 2016 (a,15:02; b<sub>1</sub>—b<sub>12</sub>, 14:19—15:27) and vertical cross-section diagram of Line ab on Fig. 5a (c)

线,对流单体西侧不断有新生单体生成,并在缓慢向偏西方向伸展过程中加强对对流风暴,反射率因子增大到 50 dBz;15:02,对流风暴与雷暴外流边界 A1 相遇迅速加强为超级单体 B(Paul et al,1998;Nolan et al,1999);15:21,超级单体 B 与东移的对流风暴 A 相遇,再次加强到 55 dBz,超级单体 B 南侧仍清晰可见一条东北—西南向的雷暴外流边界。15:02—15:27 超级单体 B 持续出现了勾状回波,勾状回波位于超级单体 B 移动方向的左前方。15:33,持续向偏西方向伸展的超级单体 B 与东移的飢线 C 合并,超级单体特征(勾状回波、中气旋)消失。风暴的移动方向是由平流和传播共同决定的(俞小鼎等,2006a)。超级单体 B 的新生单体在其西侧不断生成,与对流风暴 B 和飢线 C 相向而行;6 月 5 日 08 时,850~500 hPa 为  $8\sim 9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的西南西风,风暴承载层平均风速较小,平流作用不明显,超级单体 B 主要以后向传播为主,沿着海风锋辐合切变线自东向西移动。对流风暴 A、超级单体 B 和飢线 C 分别与图 4a 中的对流云团 A、B 和对流云带 C 相对应。

特别需要指出的是,如上所述,对流风暴与雷暴外流边界 A1 相遇迅速加强为超级单体 B,与已经存在雷暴的外流边界(阵风锋)相遇可能是此次超级单体风暴在较弱的深层垂直风切变条件下生成的重要原因之一。但其内在的机理并不清楚(Nolan et al,1999)。

为了进一步揭示超级单体 B 的结构及其生消过程,沿着图 5a 中的线段 ab 在勾状回波附近做垂直剖面。14:56,对流风暴 B 具有高悬的反射率因子核,55 dBz 回波位于 6~10 km,回波陡直,没有出现低层弱回波区和中高层回波悬垂。15:02(图 5c),对流风暴 B 加强为超级单体,回波强度达到 65 dBz,大于 60 dBz 的强回波核位于 5~9 km,55 dBz 回波向下伸展到 4 km,出现了非常明显的与低层入流对应的弱回波区和位于其上的中高层回波悬垂,表明在这个区域具有很强的上升气流(Lemon,1980)。15:15 以后,高反射率因子核快速下降,强度减弱为 55 dBz,15:27 下降到近地面 1 km 以下,龙卷过程趋于结束。

### 3.2 中气旋与类 TVS 演变

图 6a<sub>1</sub>~6a<sub>8</sub> 是 1.5°仰角反射率因子和同时刻平均径向速度对比图。6 月 5 日 15:08—15:21,雷

达在超级单体 B 的勾状回波反射率因子最大梯度区附近持续探测到中气旋。15:02,首次探测到 10 km 尺度弱的涡旋,旋转速度为  $7.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ );15:08,涡旋的正负速度同时增大,旋转速度达到  $14.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),达到了中气旋的标准,中气旋的底高 3.2 km,顶高 5.8 km;15:15,中气旋的旋转速度继续增大到  $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),达到了中等到强的中气旋标准,中气旋的底高下降到 0.6 km,顶高下降到 1.4 km;研究表明(郑媛媛等,2009),引发龙卷的超级单体,一般中层(3~6 km)中气旋先发展成熟,然后延伸到低层,只有低层出现中气旋,才有可能出现龙卷;此次 EF2 级龙卷(15:12)就是在 15:08—15:15 中层中气旋向低层延伸加强过程中发生的。15:15,2.4°仰角平均径向速度产品在 2.5 km 高度上首次探测到像素到像素的小尺度强切变(类似于龙卷式涡旋特征 TVS,只是没有达到其判别阈值),切变值为  $34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),然后强切变向上和向下伸展;15:21,1.5°和 3.4°仰角同时探测到强切变,高度分别为 1.6 和 3.4 km,切变值分别为  $36\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。海口雷达上首次探测到类 TVS 时间为 15:15,落后于龙卷漏斗云从母云中下探的时间(15:12),与龙卷触地时间接近。因此龙卷预警应该建立在探测到低层中等或以上强度中气旋基础上,而不是探测到 TVS 或类 TVS,在探测到后者时,龙卷通常已经触地。

沿着图 6a 中平均径向速度图的中气旋中心径向做垂直剖面。15:02—15:27,近地层维持气旋性辐合流场,12 km 以上高层表现为风暴顶辐散;15:08,超级单体前侧的入流明显加强,高度伸展到 6 km(图 6b<sub>1</sub>);15:15,雷达在 8~11 km 高度探测到中层径向辐合区(图 6b<sub>2</sub>);15:27,超级单体前侧的入流迅速下降到 3 km 以下,龙卷过程趋于结束。海口多普勒雷达平均径向速度剖面产品探测到的特征与渔场摄像头记录的龙卷生成加强过程一致,即地面涡旋尘云先于龙卷涡旋漏斗云发展,雷达探测到的近地层气旋性辐合对应地面气旋性旋转的尘云,中层径向辐合区对应龙卷柱中强烈的气旋性旋转。

上述分析表明:6 月 5 日文昌的 EF2 级龙卷过程是由超级单体引发的,龙卷发生地与超级单体勾



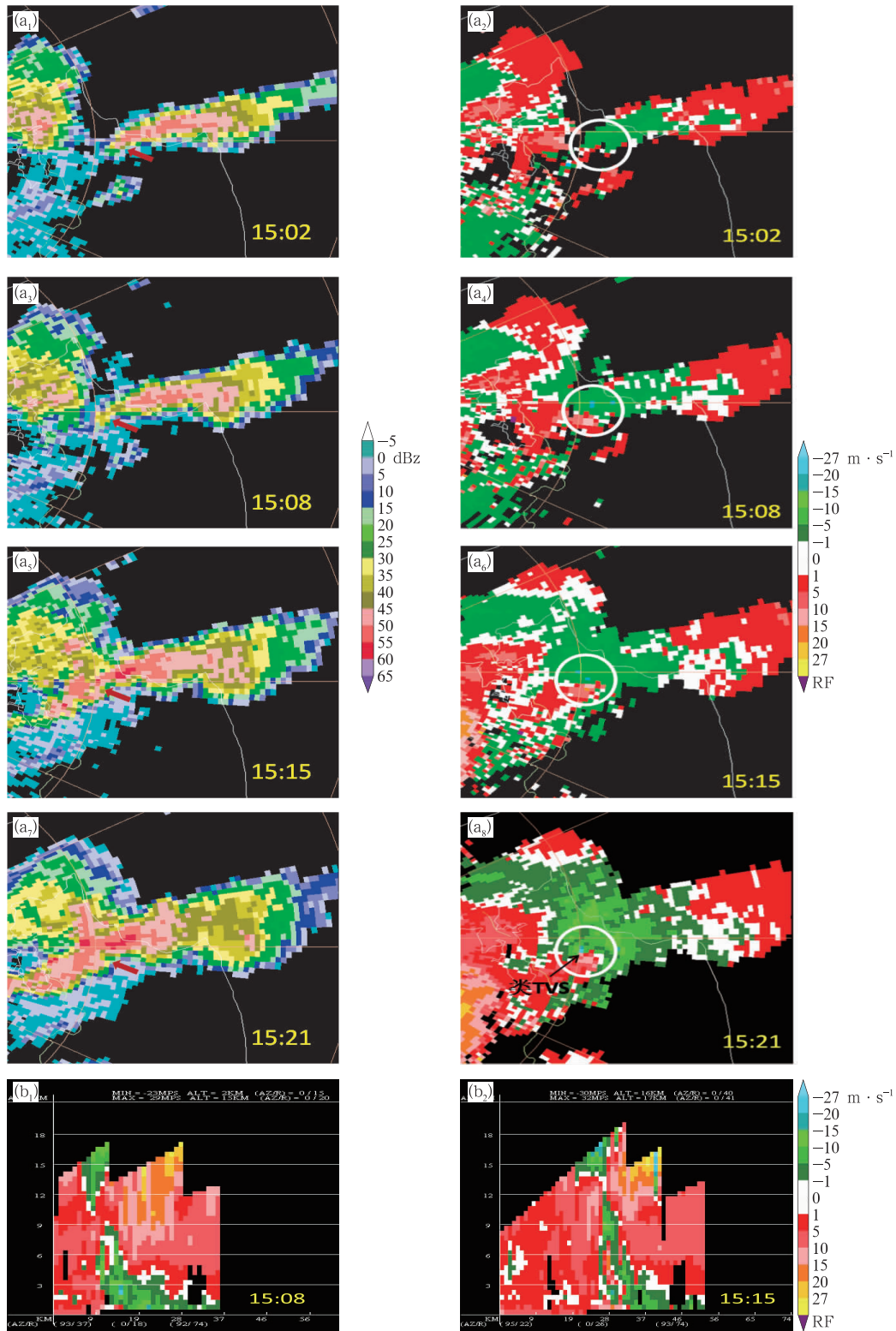


图 6 2016 年 6 月 5 日 15:02—15:21 海口多普勒雷达 1.5°仰角同时刻的反射率因子(a<sub>1</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>5</sub>, a<sub>7</sub>, 单位: dBZ)和平均径向速度(a<sub>2</sub>, a<sub>4</sub>, a<sub>6</sub>, a<sub>8</sub>, 单位: m · s<sup>-1</sup>), 15:08(b<sub>1</sub>)和 15:15(b<sub>2</sub>)沿着中气旋切向的平均径向速度垂直剖面图 (箭头是钩状回波位置, 圆圈是中气旋位置)

Fig. 6 The 1.5° elevation reflectivity (a<sub>1</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>5</sub>, a<sub>7</sub>, unit: dBZ) and mean radial velocity (a<sub>2</sub>, a<sub>4</sub>, a<sub>6</sub>, a<sub>8</sub>, unit: m · s<sup>-1</sup>) of Haikou Doppler Radar at 15:02 BT—15:21 BT June 2016, the vertical cross-section diagram of mean radial velocity along the tangent direction of the meso-cyclone at 15:08 BT (b<sub>1</sub>) and 15:15 BT (b<sub>2</sub>) 5 June 2016 (The arrow stands for the location of hook-shaped echo, circle stands for the location of meso-cyclone)

状回波低层弱回波区反射率因子梯度最大区域相对应,也是雷达探测到的中气旋和类似 TVS 的小尺度强切变所在位置;超级单体是在东移的飏线东侧,由  $\beta$  中尺度海风锋辐合线和雷暴外流边界触发加强的;超级单体沿着海风锋辐合切变线自东向西传播,即后向传播;龙卷发生在中层中气旋向低层延伸加强过程中。

需要指出,当说到中层中气旋向低层延伸,很可能只是一个表象。注意图 5 中 15:02 和 15:08 时刻  $0.5^\circ$  仰角反射率因子图,原来的海风锋辐合线与超级单体主体的下沉气流外流边界合并,形成位于超级单体东西向主体南侧的外流边界(阵风锋),图上表现为一条东西向的窄带回波,由于力管项的作用,沿着该窄带回波,形成由东指向西的水平涡管,该水平涡管在钩状回波旁的代表上升气流区的弱回波区被上升气流扭曲拉伸,形成低层中气旋(Paul et al, 1998),看上去好像是中层中气旋向低层的延伸。这条东西向由超级单体风暴主体内降水下沉气流外流导致的阵风锋与东移的飏线阵风锋相遇,加强了地面辐合,有助于低层中气旋获得拉伸旋转加速而形成龙卷(Paul et al, 1998)。

## 4 结论和讨论

2016 年 6 月 5 日 15:12—15:27 海南省文昌市冯坡镇和锦山镇出现的 EF2 级龙卷是海南省有记录以来最强的龙卷过程之一,这次龙卷的生成发展过程有录像全程记录,明确的时间对分析多普勒雷达回波、中气旋和小尺度强切变等特征非常有利。分析结果如下:

(1) 这次龙卷过程发生在副高边缘、500 hPa 槽前、850 hPa 切变线和地面热低压的南侧;中低层的弱冷平流叠加在地面暖湿空气上,增强了大气层结的条件不稳定性。但较弱的 0~6 km 垂直风切变似乎并不有利于超级单体风暴的形成。由于海陆风效应而显著增大的 0~2 km 垂直风切变,很大的 CAPE 值( $4360 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )只能部分解释超级单体风暴的形成。沿着海风锋辐合线西移的深厚湿对流与东移飏线阵风锋的相遇似乎是使得该西移深厚湿对流转变为超级单体风暴的重要因素,只是其中的机理并不清楚,有待进一步探讨。

(2) 这次龙卷过程是由超级单体引发的。最终演变为超级单体的雷暴是在飏线东侧,由  $\beta$  中尺度

海风锋辐合线所触发,而由西向东移动的雷暴群的外流边界(阵风锋)与该雷暴相遇对其演化为超级单体起到促进作用;超级单体沿着  $\beta$  中尺度最初有海风锋导致的辐合切变线自东向西传播。超级单体具有勾状回波、中高层回波悬垂、中气旋和小尺度强切变(类 TVS)等特征。小尺度强切变首先在 2.5 km 高度出现,然后同时向上和向下伸展,在 1.6 km 高度强度略有加强,雷达连续两个体扫探测到强切变。龙卷发生在从回波表象上看中层中气旋向低层延伸加强期间,位于勾状回波低层反射率因子最大梯度区域靠近弱回波区域一侧,也是雷达探测到的中气旋中心和类 TVS 强切变所在位置。

(3) 原来的海风锋辐合线与超级单体主体的下沉气流外流边界合并,形成位于超级单体东西向主体南侧的加强的外流边界(阵风锋),由于力管项的作用,沿着该窄带回波,形成由东指向西的水平涡管,该水平涡管在钩状回波旁的代表上升气流区的弱回波区被上升气流扭曲拉伸,形成低层中气旋,看上去好像是中层中气旋向低层的延伸。此外,这条东西向由超级单体风暴主体内降水下沉气流外流导致的阵风锋与西移的飏线阵风锋相遇,加强了地面附近的辐合,有助于低层中气旋获得拉伸旋转加速而形成龙卷。

值得注意的是,引发这次强烈龙卷的超级单体是自东向西移动的,勾状回波位于其前进方向的左前方,与文献(俞小鼎等, 2006a)中提到的超级单体勾状回波位于其前进方向的右后方不一致。导致其西移的主要原因是风暴承载层平均风速较小,而超级单体风暴沿着辐合切变线向西传播,即后向传播,传播矢量明显大于平流矢量,导致超级单体回波向西移动。目前对热带地区超级单体引发的龙卷过程尚无研究,单一个例没有代表性,有待于今后对多个个例进行分析,提炼共性。

## 参考文献

- 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.
- 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.
- 刘娟,朱君鉴,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): 33-39.
- 唐小新,廖玉芳,2007. 湖南省永州市 2006 年 4 月 10 日龙卷分析[J]. 气象, 33(8): 23-28.
- 王宁,王婷婷,张硕,等,2014. 东北冷涡背景下一次龙卷过程的观测

- 分析[J]. 应用气象学报, 25(4):463-469.
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 2012. “6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J]. 高原气象, 31(2):504-514.
- 魏文秀, 赵亚民, 1995. 中国龙卷风的若干特征[J]. 气象, 21(5):36-40.
- 许爱华, 詹丰兴, 刘晓辉, 等, 2006. 强垂直温度梯度条件下强对流天气分析与潜势预报[J]. 气象科技, 34(4):376-380.
- 姚叶青, 俞小鼎, 郝莹, 等, 2007. 两次强龙卷过程的环境背景场和多普勒雷达资料的对比分析[J]. 热带气象学报, 23(5):483-490.
- 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.
- 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.
- 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.
- 曾明剑, 吴海英, 王晓峰, 等, 2016. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析[J]. 气象, 42(3):280-293.
- 张晰莹, 吴迎旭, 张礼宝, 2013. 利用卫星、雷达资料分析龙卷发生的环境条件[J]. 气象, 39(6):728-737.
- 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.
- 郑永光, 朱文剑, 姚聘, 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.
- 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.
- 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.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2010. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社.
- Brooks H E, Craven J P, 2002. Database proximity soundings for significant thunderstorms, 1957 - 1993 [C] // Preprints, 21th Conf. on Local Severe Storms. San Antonio: Amer Meteor:639-642.
- Erik R, 2003. Refined supercell and tornado forecast parameters [J]. Wea Forecasting, 18(3):530-535.
- Evans J S, Doswell C A, 2002. Investigating derecho and supercell proximity soundings [C] // Preprints, 21th Conf on Local Severe Storms. San Antonio: Amer Meteor:635-638.
- Lemon L R, 1980. Severe thunderstorms radar identification techniques and warnings criteria [J]. NOAA Tech Memo, (67):60.
- Moller A R, Doswell C A III, Foster M P, et al, 1994. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures [J]. Wea Forecasting, 9(3):327-347.
- Nolan T Atkins, Morris L Weisman, Louis J Wicker, 1999. The influence of preexisting boundaries on supercell evolution [J]. Mon Wea Rev, 127(12):2910-2927.
- Paul M Markowski, Erik N Rasmussen, Jerry M Straka, 1998. The occurrence of tornadoes in supercells interacting with boundaries during VORTEX-95 [J]. Wea Forecasting, 13(3):852-859.
- Rasmussen E N, Blanchard D O, 1998. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters [J]. Wea Forecasting, 13(4):1148-1164.
- Thompson R L, Edwards R, Hart J A, 2000. An Assessment of Supercell and Tornado Forecast Parameters with RUC-2 model Close Proximity Sounding [C] // Preprints, 21th Conf on Severe Local Storm. San Antonio: Amer Meteor Soc:595-598.