

雷州半岛一次台风外围龙卷天气过程分析

植江玲^{1,2} 李彩玲^{1,2} 蔡康龙^{1,2} 黄先香^{1,2}

(1 广东省佛山市气象局, 佛山 528000; 2 广东省佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528000)

摘要: 2013年11月11日早晨, 距离第30号台风海燕中心约350 km的湛江市徐闻县出现了龙卷, 强度为EF1级。利用现场灾情调查、常规高空和地面观测、广东省地面自动站观测和湛江S波段多普勒天气雷达数据等, 对此次龙卷天气过程进行分析。结果表明, 龙卷发生在副热带高压和台风海燕之间的东南急流辐合的环流形势下, 环境条件表现为中等强度对流有效位能、低的对流抑制能量和抬升凝结高度、强的0~6 km和0~1 km垂直风切变以及大的低层相对湿度; 地面层的中尺度辐合线和小尺度涡旋提前于龙卷出现, 龙卷发生在小尺度涡旋附近。龙卷风暴母体的下沉气流导致的地面冷池气温与周围环境的温差约为1~4 °C, 较小的温差有利于龙卷的形成。龙卷风暴母体为低质心的微超级单体, 低层具有钩状回波和入流缺口特征, 伴有中等到强中气旋和TVS特征, 中气旋和TVS伸展高度在2 km以下; 龙卷触地前, 中气旋强度增大, 直径缩小, 底高降低, TVS特征较龙卷提前约24 min出现。

关键词: 台风龙卷, 环境条件, 雷达特征, 中气旋

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.007

Analysis of Typhoon-Tornado Weather Process in Leizhou Peninsula

Zhi Jiangling^{1,2}, Li Cailing^{1,2}, Cai Kanglong^{1,2}, Huang Xianxiang^{1,2}

(1 Foshan Meteorological Service, Foshan 528000 2 Foshan Tornado Research Center, Foshan 528000)

Abstract: On the morning of November 11, 2013, a tornado occurred in Xuwen County, Zhanjiang City, about 350 km away from the center of Typhoon No.30 "Haiyan", with the intensity of tornado event was rated EF1. Based on the disaster investigation, conventional observations data, surface automatic weather station, a Zhanjiang S-band Doppler radar and so on, the environmental background and radar echo characteristics of tornado occurrence and development are analyzed. The results show that the tornado was generated southeast jet convergence zone between the subtropical high and typhoon. The atmospheric conditions show that typhoon-tornado occurred in an environment with medium convective available potential energy, weak convective inhibitory energy, low elevation condensation height, strong 0-6 km and 0-1 km vertical wind shear and large low-level relative humidity. The surface mesoscale convergence line and micro vortex occurred before the tornado. The difference between the temperature of the ground cold pool caused by the sinking airflow of the tornado storm and the environment is about 1-4 °C and the smaller temperature difference is conducive to the formation of tornado. The convective storm which produced tornado was mini supercell storm with low center of mass, which has the characteristics of hook echo, inflow gap, moderate to strong mesocyclone and TVS in the lower layer. The mesocyclone and TVS have an extension height below 2 km. Before the tornado occurs, the intensity of the mesocyclone increases, the diameter decreases and the base height decreases. The TVS appears about 24 minutes earlier than the tornado.

Keywords: typhoon-tornado, environmental background, radar echo characteristics, mesocyclone

0 引言

龙卷是大气最猛烈的大气对流现象, 可在短时间内造成重大的人员伤亡和财产损失^[1]。由于突发性强、时空尺度小以及生命史短等特点, 对龙卷的预报预警难度大, 对龙卷的研究仍是中小尺度天气学的难点。龙卷多发生在华南、华东以及东北等地的地势平坦地带^[2]。在我国的东部沿海, 部分龙卷的产生在台

风外围(以下简称台风龙卷), 而华南和江浙的平原地带和海南岛作为台风龙卷的高发区^[2-3], 许多学者上述地区的台风龙卷进行了研究。黄先香等^[3]、李彩玲等^[4]、郑媛媛等^[5]、郑艳等^[6]对珠江三角洲、长江三角洲和海南岛等20多次台风龙卷过程的活动特征和环境条件进行分析指出, 台风龙卷多发生在台风前进方向的东北象限, 所处的环境多为中等强度的大气热力不稳定环境条件、低的抬升凝结高度和较强的低层垂直风切变, 产生龙卷的风暴母体多为微型超级单体, 与一般西风带系统中的超级单体不同, 风暴伸展高度低, 产生龙卷的中气旋尺度小。李兆慧等^[7]利用地面

收稿日期: 2020年7月21日; 修回日期: 2020年8月18日
第一作者: 植江玲(1990—), Email: 252335251@qq.com
资助信息: 广东省佛山市气象局科技项目(201905)

自动气象站观测资料对2015年10月发生在佛山境内的一次EF3级台风龙卷进行分析,指出气象要素表现出受龙卷影响的特征,气压下降、风速增大、风向明显改变,且龙卷移动路径上风场呈气旋性辐合。

由于观测手段所限,灾害现场调查仍然是分析龙卷和下击暴流等中小尺度强风天气过程的风力和精细分布的重要手段。Fujita等^[8]在1970年开创性的开展了风灾调查工作,根据破坏程度和风速的对应关系,将龙卷分成6个等级,F0~F5级,即“藤田级别”或F等级。2000年起,美国得克萨斯技术大学联合多部门对F等级进行修订,采用28类灾害标识物(DI),每一类标识物有多个灾害等级(DoD),调整F等级各个级别对应的风速,即为“增强藤田级别”或EF等级^[9]。目前EF等级已被美国、法国和加拿大等各国广泛使用并进行修订^[10]。虽然雷州半岛作为龙卷的易发区之一^[11],但过去对发生在雷州半岛的龙卷天气的环境背景和雷达特征等研究还较少。本文利用现场灾情

调查、高空和地面常规观测、广东地面自动气象站观测资料、湛江s波段多普勒天气雷达,对发生在雷州半岛徐闻县的一次台风外围龙卷过程的环境背景、物理量参数和雷达特征进行分析,以期增强对发生在雷州半岛的台风龙卷天气过程的环境条件和风暴特征的认识,为今后同类天气的预警提供借鉴。

1 龙卷过程及现场灾情调查

2013年11月11日07:06—07:12(北京时,下同),广东省湛江市徐闻县前山镇复兴村、后岭村和麟角村先后出现龙卷(图1a)。经现场灾情调查,龙卷造成瓦房被刮坏或掀顶、树木和农作物倒伏或拦腰折断(图1b)。由于龙卷没有经过地面自动气象站,因此参照“改进的藤田级别”(Enhanced Fujita Scale, EF-Scale)龙卷定强标准来判断此次龙卷的强度,根据此次龙卷灾害特点,软木树干折断对应的风速期望值为46.5 m/s,小于20%的屋顶受损,对应风速期望值为35.3 m/s,认定强度为EF1级,属于弱龙卷。



图1 龙卷移动路径(a)及受灾现场图片(b)
Fig. 1 Tornado path (a) and damage picture (b)

2 天气背景

2.1 台风海燕活动概况

2013年第30号台风海燕于11月4日在西北太平洋生成后,强度快速增强,8日以超强台风级登陆菲律宾中部莱特岛北部沿海,横穿菲律宾中部地区后,夜间进入南海东南部海域,11月10日下午从海南岛西南部近海掠过并转向偏北方向移入北部湾,11日05:00前后以台风级别在越南广宁省沿海登陆,09:00移入广西境内。龙卷发生在11日07:00前后,距离台风登陆越南后2.0 h,此时“海燕”处于减弱阶段,为强热带风暴级别,龙卷发生在台风海燕前进方向东南象限约350 km处的螺旋雨带中(图2)

2.2 环流背景

11月11日08时(图3),200 hPa上雷州半岛处于南海高压脊后的辐散区,500 hPa西太平洋副热带高压(以下简称副高)主体偏东偏南,脊线位于20°N附近,雷州半岛位于副高西侧边缘与“海燕”外围东侧之间的强劲东南气流中,同时700 hPa、850 hPa和925 hPa上低空急流风速强劲,各层风速都在20 m·s⁻¹以上,雷州半岛处于东南风与偏南风气流辐合区,为强对流天气的产生提供了充足的水汽和暖湿不稳定能量;地面上,冷高压中心位于华北到华东地区,锋面南压到广西中北部,有弱冷空气影响到广东中南部并在雷州半岛中部形成一条东北风与东南风汇合的辐合



图2 台风海燕移动路径 (红色三角形为龙卷发生地)

Fig. 2 The path of Typhoon "Haiyan" (The tornado is marked by red triangle)

线。徐闻龙卷发生在地面冷暖空气交界处的暖空气一侧，同时也是低空急流和高空辐散耦合的区域，提供了有利的天气尺度动力强迫。

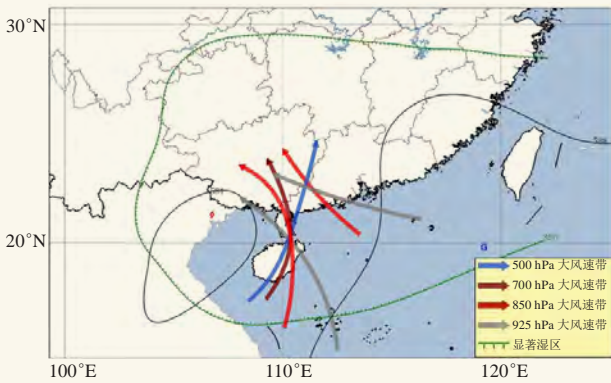


图3 2013年11月11日08时环流综合形势

Fig. 3 The synoptic map at 08:00 BT on 11 November 2013

3 环境条件分析

研究表明，龙卷的风暴母体多产生在条件不稳定且低层水汽充沛的环境下，而对流有效位能 (CAPE) 和对流抑制能量 (CIN) 常用来表征大气深厚湿对流发生的潜势；抬升凝结高度、低层垂直风切变和风暴相对螺旋度也是判断龙卷潜势的重要对流参数^[3, 12-13]。

3.1 热力条件分析

探空站观测通常能代表站点附近100~200 km以内的大气状态，选取位于龙卷发生地上游最近的约50 km的海口站的探空资料进行分析。10日20时和11日08时 (图4)，海口站上空的风随高度顺转，表明低层有暖平流，各层风速都在20 m/s⁻¹以上，风速强劲。大气湿层从地面向上延伸到400 hPa以上，湿层深厚，400~850 hPa温差为31 °C，与温度廓线接近的湿中性曲线400~850 hPa的温差30 °C相差不大，表明

龙卷发生在弱的条件不稳定环境中。从表1可见，10日20时—11日08时海口站对流有效位能 (CAPE) 从510 J/kg明显增大为1064 J/kg，达到中等强度大小。可见近地层上游地区通过偏南气流为两次龙卷发生地都输送了较好的水汽和热量。由于低层相对湿度和露点

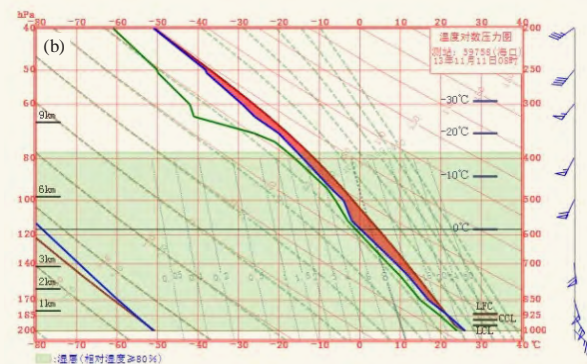
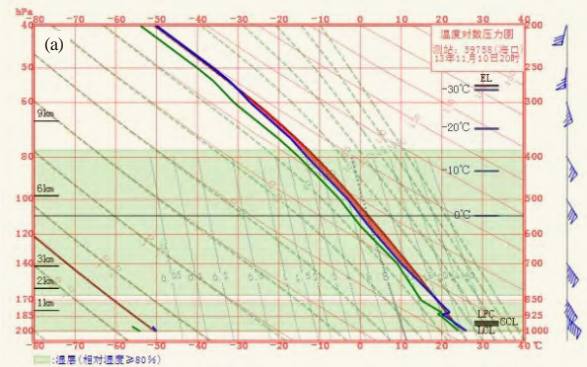


图4 2013年11月10日20时 (a) 和11日08时 (b) 海口探空曲线 (蓝色和绿色实线分别为环境温度和露点温度，红色实线为状态曲线)

Fig. 4 T -log P chart at Haikou sounding station at 20:00 BT on 10 November 2013 (a) and at 08:00 BT on 11 November 2013 (b) (The blue and green solid line denote the environmental temperature and dew-point temperature, the red solid line is the state curve)

表1 2013年11月10日20时和11日08时海口探空站环境参数
Table 1 Parameters of Haikou Sounding Station at
20:00 BT on 10 November 2013 and at 08:00 BT on 11
November 2013

时间	CAPE/ (J/kg)	CIN/ (J/kg)	LCL/m	0~6 km风矢量 差/(10^{-3} /s)	0~1 km风矢量 差/(10^{-3} /s)
10日20时	510	3.6	287.0	3.8	33.1
11日08时	1064	14	332.0	3.6	13.4

都很大, 大气环境的对流抑制能量 (CIN) 都很小, 表明大气稳定层很薄, 极易触发深厚湿对流天气。

3.2 水汽条件分析

有利于中气旋龙卷的环境条件需要较大的低层相对湿度, 较高的低层相对湿度有助于风暴母体的下沉气流不至于太强^[14-15]。10日20时和11日08时 (图4), 海口站的温湿探空曲线显示近地层相对湿度很大, 湿层从地面向上伸展到400 hPa, 非常深厚。大气环境中低层的水汽充沛, 为雷暴的生成提供了充足的能量来源, 且大气中低层较大的湿度不利于中层空气卷入导致的蒸发冷却形成负浮力, 导致下沉气流不会太强, 配合低层饱和的大气环境保证了风暴后侧的下沉气流形成的冷池强度不至于太强, 配合风暴前部的暖湿上升气流, 使得近地面的水平顺流涡度倾斜和拉伸形成垂直涡度, 有利于龙卷的发生。

3.3 垂直风切变分析

研究表明, 中等到强的深层垂直风切变是产生超级单体风暴和冰雹的必要条件之一^[12], 而要产生超级单体龙卷, 还需要强的0~1 km垂直风切变和低的抬升凝结高度, 低空垂直风切变是造成龙卷的主要动力, 可以将低层斜压水平涡度倾斜扭转形成垂直涡度, 而低的抬升凝结高度则有利于涡旋触地形成龙卷^[16-17]。从附近海口站的探空资料可知 (表1), 10日20时和11日08时, 海口上空的抬升凝结高度都较低, 高度都在300 m以下, 有利于雷暴的触发。由于雷州半岛到海口站附近都处于台风海燕和副高之间气压梯度大值区, 东南风急流强盛, 10日20时, “海燕”强度为台风级, 距离海口站较近, 此时0~6 km和0~1 km的垂直风切变都很强, 分别为 $3.8 \times 10^{-3}/s$ 和 $33.1 \times 10^{-3}/s$; 随着“海燕”登陆后摩擦近地面风速迅速减弱, 11日08时的0~6 km垂直风切变和0~1 km垂直风切变有所减弱为 $3.6 \times 10^{-3}/s$ 和 $13.4 \times 10^{-3}/s$ 。Thompson等^[18]统计发现产生超级单体龙卷的0~6 km垂直风切变下限值为 $3 \times 10^{-3}/s$, 0~1 km垂直风切变下限值为 $5.5 \times 10^{-3}/s$ 。此次龙卷过程的0~6 km垂直风切变都超过统计值下限, 而0~1 km垂直风切变显著大于下限值, 虽然“海燕”台风龙卷发生在垂直风切

变减弱的过程, 但过程中仍维持较强的0~1 km垂直风切变, 有利于龙卷的产生。

4 自动站观测

超级单体中的下沉气流对龙卷的生成至关重要, 当其与环境之间形成的温差存在一个平衡点, 即通常下沉气流形成的冷出流与环境之间的温差小于4 °C时, 有利于近地面垂直涡度的发展从而形成龙卷^[19]。从07:05的广东省地面自动气象站观测温度分布显示 (图5), 龙卷风暴母体的下沉气流导致的地面冷池气温约为24~25 °C, 周围环境的温度约为26~29 °C, 两者的温差约为1~5 °C, 较小的温差有助于近地面垂直涡度的加强, 从而有利于龙卷的形成。

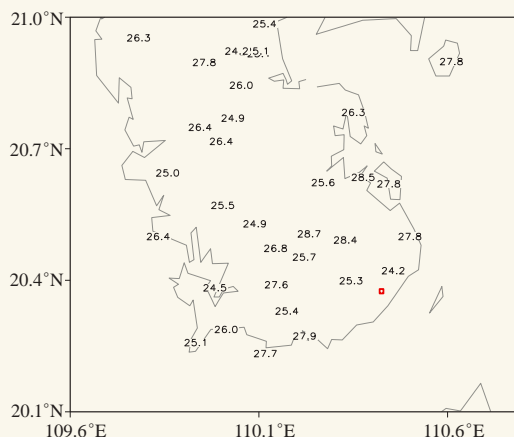


图5 2013年11月11日07:05地面自动气象站观测温度
(单位: °C, □为龙卷发生地)

Fig. 5 Temperatures of automatic weather stations at
07:05 BT 11 November 2013 (unit: °C, the tornado is
marked by red square)

进一步分析地面自动站风场发现, 11日06:30 (图6a), 在龙卷发生前, 龙卷生成地附近已经有一条地面辐合线和小尺度涡旋存在。这个涡旋和辐合线随时间向东北方向移动。07:10 (图6b), 小尺度涡旋移动到徐闻县复兴村附近时风场的气旋性涡旋特征更为明显, 风暴单体强烈发展产生龙卷。涡旋的路径走向和龙卷的移动路径对应较好, 对比地面辐合线、涡旋和龙卷出现时间, 辐合线和涡旋提前于龙卷出现, 可见地面风场辐合线和小尺度涡旋为此次强对流系统提供了有利的抬升触发条件。

5 雷达回波演变特征

湛江多普勒雷达 0.5°仰角反射率因子产品显示, 2013年11月11日早晨, 1330号台风海燕外围不断有回波自海南岛方向向北移动影响雷州半岛, 产生徐闻龙卷的对流风暴母体是来自从琼州海峡向北移动的一对流风暴。06:30, 对流风暴从海南岛向北移动进入琼

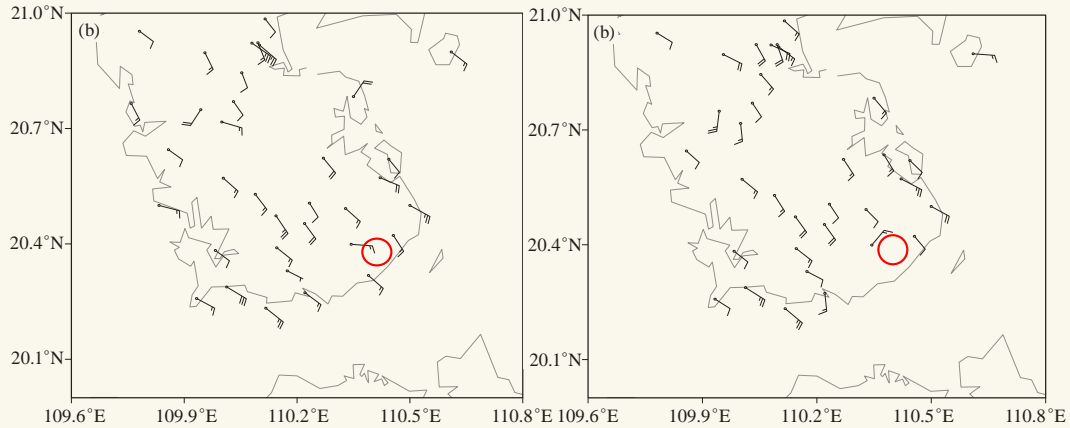


图6 2013年11月11日06:30 (a) 和07:10 (b) 地面自动气象站风场 (红色圆圈为龙卷发生地)

Fig. 6 Winds of automatic weather stations at 06:30 BT (a) and 07:10 BT (b) 11 November 2013 (The tornado is marked by red circle)

州海峡。07:00 (图7a), 对流风暴北上靠近徐闻复兴村沿岸, 最强反射率因子为54 dBZ, 此时风暴已经呈现出低层钩状回波和与暖湿气流相连接的入流缺口回波等特征, 属于微型超级单体风暴。07:06—07:12 (图7b—c), 对流风暴上岸进入徐闻县复兴村境内, 然后北上影响后岭村和连角村, 最强反射率因子为56 dBZ。07:18—07:24 (图略), 对流风暴向北

偏西方向移动, 远离连角村, 强度维持 (56 dBZ)。对应 0.5° 仰角平均径向速度图上, 06:42—06:52 (图略), 对流风暴在海上时雷达在微型超级单体风暴钩状回波附近持续探测到强中气旋; 06:42, 中气旋旋转速度为26 m/s, 底高约1.7 km, 最大入流速度和出流速度中心距离约为3.4 km, 且在在中气旋中心探测到龙卷涡旋特征 (TVS), TVS切变为50 m/s;

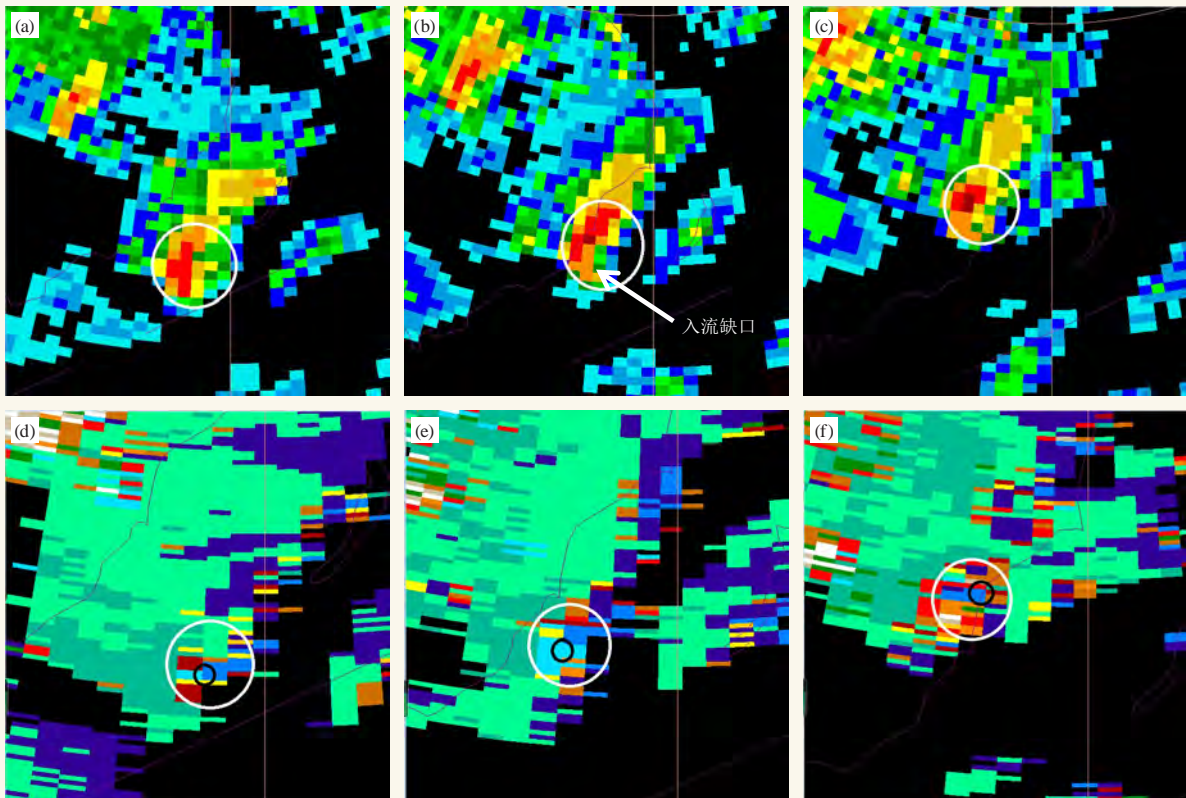


图7 2013年11月11日07:00 (a、d), 07:06 (b、e), 07:12 (c、f) 湛江S波段雷达 0.5° 仰角反射率因子 (单位: dBZ) 和和径向速度图 (单位: $m \cdot s^{-1}$) (白色圆圈为钩状回波和中气旋, 黑色圆圈为TVS)

Fig. 7 The reflectivity (unit: dBZ) and radial velocity (unit: $m \cdot s^{-1}$) of 0.5° elevation by Zhanjiang S-band radar at 07:00 (a, d), 07:06 (b, e) and 07:12 (c, f) BT on 11 November 2013 (white circles are hook echoes and mesocyclones, black circles are TVS)

06: 48—06: 52, 中气旋直径缩小至1.7 km左右, 并且在中心继续探测到龙卷涡旋特征(TVS), TVS切变为52.0~53.0 m/s, 底高约1.4~1.6 km。07: 00(图7d), 中气旋流出速度出现速度模糊, 退速度模糊后中气旋旋转速度为32 m/s, 在中气旋中心仍然探测到TVS特征, 切变值为54 m/s。07: 06(图7c), 对流风暴快上岸前, 中气旋旋转速度为30 m/s, TVS切变增强为57 m/s, 底高为1.2 km。07: 12(图7d), 对流风暴上岸进入复兴村, 中气旋旋转速度为31 m/s, TVS切变增强为54 m/s, 中气旋底高为1.1 km。07: 18开始, 中气旋强度迅速减弱, 旋转速度减弱为17 m/s, 减弱为中等强度中气旋, 中气旋中心仍然探测到像素到像素的类TVS特征, 切变值为34 m/s。17: 24, 旋转速度减小为15 m/s, 减弱为弱中气旋。结合雷达观测资料, 判断徐闻县的龙卷是在徐闻县的龙卷是发生在11月11日07: 06—07: 12, 07: 12—07: 18减弱消失, 持续时间约为6 min, 龙卷出现在微型超级单体风暴右后侧的钩状回波顶端、中气旋中心及TVS附近。钩状回波和强中气旋提前于龙卷超过30 min, 龙卷出现前中气旋和TVS旋转速度处于最强阶段, 底高降到1.1 km附近。07: 18后, 虽然回波强度维持, 但中气旋迅速减弱后, 龙卷消失。

6 结论

本文利用常规高空和地面观测、广东省地面自动站观测和湛江S波段多普勒天气雷达数据以及现场灾害调查资料等, 对2013年11月11日早上湛江市徐闻县龙卷的天气背景、环境条件、自动站观测和雷达回波等观测事实进行分析, 主要结果如下:

此次龙卷在台风外围螺旋雨带中出现的, 强度为EF1级, 影响时间约为6 min, 龙卷发生在台风前进方向的右前侧的东北象限内, 距离台风中心约350 km。龙卷发生时, “海燕”强度处于减弱阶段, 为强热带风暴量级。

龙卷发生副高和台风之间的强劲东南气流影响的环流形势下, 高空辐散和低空各层急流耦合的配置为龙卷提供了有利的天气尺度动力强迫。龙卷发生前, 临近的海口探空表现为中等强度对流有效位能、低的对流抑制能量和抬升凝结高度、强的0~6 km和0~1 km垂直风切变, 尤其是低层0~1 km垂直风切变远远大于统计值下限, 有利于龙卷等强对流天气的发生。充足的水汽为强对流天气的发生奠定了物质基础, 尤其是低层大的相对湿度不利于中层空气卷入导致的蒸发冷却形成负浮力, 导致下沉气流不会太强, 有助于龙卷的产生。

3) 分析地面自动气象站风场发现, 地面层的中尺

度辐合线和小尺度涡旋提前于龙卷出现, 龙卷发生在小尺度涡旋附近, 辐合线和小尺度涡旋为龙卷的产生提供了有利的动力抬升作用。地面自动气象站温度观测显示, 龙卷风暴母体的下沉气流导致的地面冷池气温约为24~25 °C, 周围环境的温度约为26~28 °C, 两者的温差约为1~4 °C, 较小的温差有助于近地面垂直湍度的加强, 从而有利于龙卷的形成。

4) 龙卷产生于台风外围螺旋雨带中低质心的微超级单体, 低层具有钩状回波和入流缺口特征, 对应径向速度图上低层出现中等到强中气旋和TVS特征, 中气旋和TVS伸展高度在2 km以下, 龙卷触地前, 中气旋强度增大, 直径缩小, 底高降低, TVS特征较龙卷提前约24 min出现。龙卷出现在钩状回波的弱回波区附近, 当中气旋逐渐增强、直径收缩、底高不断降低时龙卷触地产生。

参考文献

- [1] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 2006.
- [2] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [3] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件分析. 气象, 2019, 45(6): 777-790.
- [4] 李彩玲, 炎利军, 李兆慧, 等. 1522号台风“彩虹”外围佛山强龙卷特征分析. 热带气象学报, 2016, 32(3): 416-424.
- [5] 郑媛媛, 张备, 王啸华, 等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析. 气象, 2015, 41(8): 942-952.
- [6] 郑艳, 俞小鼎, 任福民, 等. 海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析. 气象, 2017, 43(6): 675-685.
- [7] 李兆慧, 王东海, 麦雪湖, 等. 2015年10月4日佛山龙卷过程的观测分析. 气象学报, 2017, 75(2): 288-313.
- [8] Fujita T T, Brandbury D L, Van Thullenar C F. Palm Sunday tornadoes of April 11 1965. Mon Wea Rev, 1970, 98(1): 29-69.
- [9] McDonald J R, Mehta K C. A Recommendation for An Enhanced Fujita Scale (EF-scale). Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, 2006.
- [10] 郑永光, 田付友, 周康辉, 等. 雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查. 气象科技进展, 2018, 8(2): 55-61.
- [11] 纪文君, 张羽. 雷州半岛强对流天气及触发机制分析. 海洋预报, 2005, 22(3): 1-4.
- [12] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [13] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析. 气象学报, 2015, 73(3): 425-441.
- [14] Doswell III C A, Evans J S. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences. Atmos Res, 2003, 67-68: 117-133.
- [15] 郑永光, 蓝渝, 曹艳察, 等. 2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理. 气象, 2020, 46(5): 589-602.
- [16] Weisman M L, Klemp J B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. Mon Wea Rev, 1982, 110(6): 504-520.
- [17] McCaul E W. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments. Mon Wea Rev, 1991, 119: 1954-1978.
- [18] Thompson R L, Edwards R, Hart J A. An assessment of supercell and tornado forecast parameters with RUC-2 model close proximity soundings. Preprints 21st Conf On Severe Local Storm. San Antonio: American Meteorological Society, 2000.
- [19] Markowski P M. Hook echoes and rear-flank downdrafts: a review. Mon Wea Rev, 2002, 130(4): 852-876.