

2020年5月31日佛山超级单体龙卷过程分析

李婉仪¹ 黄先香² 蔡康龙² 植江玲² 张晶晶² 周晓仪¹ 田良钰¹

(1 广东省佛山市高明区气象局/佛山市高明区突发事件预警信息发布中心, 佛山 528000;

2 广东省佛山市气象局/佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528000)

摘要: 利用常规高空地面观测、广东区域自动站以及广州多普勒雷达等资料对2020年5月31日发生在佛山市高明区的西风带超级单体龙卷天气过程进行分析, 结果表明: 高层辐散场与中低层弱辐合区叠交, 中低层深厚强盛的西南暖湿气流, 配合地面辐合线长时间维持, 为龙卷超级单体风暴发生发展提供了有利的天气背景; 大的CAPE、较强的低层垂直风切变和低的抬升凝结高度为龙卷的发生提供了有利的环境条件; 龙卷产生于 β 中尺度超级单体风暴, 雷达探测到较明显的钩状回波、回波悬垂和低层中等强度中气旋, 但中气旋尺度较大, 龙卷触地前后中气旋直径在6 km以上, 龙卷出现在钩状回波顶端和中气旋中心。

关键词: 龙卷, 西风带系统, 环境背景, 雷达回波特征, 中气旋

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.006

Analysis of Supercell Tornado in Westerly Zone of Foshan on 31 May 2020

Li Wanyi¹, Huang Xianxiang², Cai Kanglong², Zhi Jiangling², Zhang Jingjing², Zhou Xiaoyi¹, Tian Liangyu¹

(1 Foshan Gaoming District Weather Service/Gaoming Emergency Early Warning Release Center, Foshan 528000

2 Foshan Weather Service/Foshan Tornado Research Center, Foshan 528000)

Abstract: Based on the data of conventional meteorological observations, Guangdong regional automatic weather stations and Guangzhou Doppler radar, the weather process of westerly supercell tornado occurred in Gaoming District of Foshan City on 31 May 2020 was analyzed. The results show that the high-level divergence field which overlaps with the weak convergence area in the middle and low-level, and the deep and strong southwest warm and humid air flow in the middle and low-level, combined with the long-term maintenance of the surface convergence line, provide favorable weather background for the occurrence and development of supercell storm. Large Cape, strong low-level vertical wind shear and low LCL provide favorable environmental conditions for tornado occurrence. Tornado is produced in meso- β scale supercell storms, and radar detects obvious hook echo, echo suspension and low-level moderate intensity mesocyclone, but the mesocyclone scale is large and the diameter of mesocyclone is more than 6 km before and after the tornado hits the ground, and the tornado appears at the top of hook echo and the center of mesocyclone.

Keywords: tornado, westly system, weather background, radar echo features, mesocyclone

0 引言

龙卷是对流云产生的破坏力极大的小尺度灾害系统, 虽然持续时间短, 但其产生的强烈阵风常造成重大的财产损失和人员伤亡^[1]。与短时强降水、雷雨大风等类型强对流相比, 龙卷属于小概率事件, 短临预报预警技术欠缺。为加强龙卷研究, 最大程度做好龙卷防灾工作, 不少学者对龙卷在我国的地域分布^[1-4]、

龙卷发生的大气环流形势、物理量条件和雷达回波结构特征^[5-13]进行了分析, 并对开展超级单体龙卷和非超级单体龙卷的监测预警技术进行了深入探讨^[14-18]。

佛山是珠三角及广东龙卷最为高发的地区之一, 根据影响天气系统, 佛山龙卷大致分为四类: 台风外围型、锋面暖区型、地面辐合线型和热带扰动型^[19], 其中, 锋面暖区型和地面辐合型主要发生在西风带系统的环流背景中。佛山龙卷以台风外围龙卷为主^[17, 20-24], 西风带系统龙卷相对较少。从龙卷落区看, 佛山龙卷主要发生在佛山东部的平原地带, 西部山区和丘陵地带鲜有发生^[19]。2020年5月31日19时(北京时, 下同)左右, 佛山市西部的高明区丘陵地带发生了龙卷灾害, 这在历史上是少见的。为此, 本文利用预报员

收稿日期: 2020年10月9日; 修回日期: 2020年11月5日

第一作者: 李婉仪(1992—), Email: leewanyilwy@163.com

通信作者: 黄先香(1974—), Email: fsqxj@163.com

资助信息: 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)

日常可获取的多种气象资料，对此次龙卷进行细致分析，旨在为此类极端天气过程监测预警提供经验参考。

1 龙卷灾情概况

2020年5月31日11—21时，佛山高明区出现强降雨天气，更合镇、明城镇出现暴雨，最大阵风6级。其中，19时许佛山市高明区更合镇停步工业区附近出现大风灾害，造成两家公司严重经济损失，没有人员伤亡。经佛山市龙卷风研究中心和高明区气象局对灾害现场沿线的目击者走访、影像资料收集、勘查取证、无人机航拍等方式，再结合天气雷达等多种气象数据综合分析研判，确认局地风灾为龙卷造成的。龙卷影响时间是18:59—19:01，龙卷主要在停步工业区造成明显破坏痕迹，最大破坏直径80 m，影响路径长度约670 m，两棵直径10 cm的芒果树被拦腰截断，龙卷破坏程度对应我国龙卷强度行业标准二级，相当于EF1级；目击者拍摄的多个视频以及工厂监控视频可见，被卷起的厂房铁皮顶及其他碎片逆时针方向旋转上升，且旋转时间超过1 min（图1a—1d）；航拍破坏现场可见，破坏痕迹狭长，纵横比大，是明显的龙卷风破坏特征（图1e）。该龙卷大风范围小，周边区域气象自动站布设仍较稀疏，距离龙卷发生地最近的3个气象站均在3 km以上，仅有处龙卷发生地下游方向的歌乐村委站录得极大风速达6级（12.9 m/s）。

2 天气背景和环境条件

2.1 天气背景

由2020年5月31日08时环流形势（图2）可见，500 hPa副热带高压（以下简称副高）较为强盛，588线控制广东，但受高原上西风槽东移下滑和云桂交界处短

波槽东传的影响，副高有所减弱，广东处于短波槽前和副高不稳定边缘间不断增大的西南风场中，广东中西部一带的西南风风速由08时的14 m/s增至20时的16 m/s。700~925 hPa贵州附近有低涡发展，广东受低涡东南侧与副高西北侧之间的强盛西南气流影响，700、850、925 hPa存在一支风速分别为12、10、8 m/s的显著西南气流，由海上向珠江口西侧输送水汽和不稳定能量。同时，200 hPa广东处于南亚高压西北侧和高空急流轴右侧之间的辐散区内。31日午后，地面暖低压槽稳定少动，佛山处于槽前，南部沿海风力较大，有利于海上水汽向广东输送，且珠江口北侧经佛



图1 2020年5月31日18:59高明区更合镇龙卷视频截图（a—d）和灾情（e）（弧线箭头为飞物方向）

Fig. 1 Video screenshots (a–d) and disaster situation (e) of the tornado occurred in Genghe Town, Gaoming District on May 31, 2020 (The arc arrows show direction of flying objects)

山有一条东北—西南走向的地面辐合线，佛山高明区正好处于辐合区（图略）。综上所述，低层辐合、高层辐散的配置以及中低层显著西南气流在珠江口西侧的叠加汇聚，为强天气的发生发展提供了较为有利的天气尺度条件。

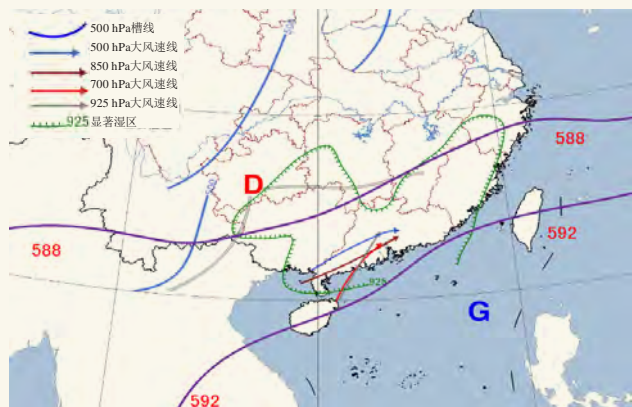


图2 2020年5月31日08时高空形势综合图

Fig. 2 High altitude situation data at 08:00 BT 31 May 2020

2.2 环境条件

图3给出了2020年5月31日08时龙卷发生地周边的清远和阳江站T-lnP图。可以看到，佛山高明区周边大气具有较大的对流不稳定能量，对流有效位能CAPE在2100~2700 J/kg，用14时高明区更合地面自动站气温和露点资料订正后，CAPE高达4000 J/kg以上，呈现出强的条件不稳定；整个对流层的湿度都很大，接近或基本处于饱和状态；对流抑制很小，CIN为0 J/kg，抬升凝结高度LCL很低，在350 m以下，有利于深厚湿对流的触发。

龙卷等强天气的产生与抬升凝结高度及垂直风切变特别是低层的垂直风切变有密切的关系。表1给出了具体的环境参数，可以看到，清远0~6 km垂直风切变为13.0 m/s，属于中等偏弱的深层垂直风切变，阳江站0~6 km垂直风切变只有7.0 m/s，属于弱的深层垂直风切变；两个站的0~3 km的垂直风切变为10 m/s，属于较大的中层垂直风切变；0~1 km垂直风切变分别为5.7、7.1 m/s，属于较弱的低空垂直风切变。31日18:30—19:00广州雷达VWP风廓线显示0.3~1.2 km的风矢量差值为12.0 m/s，是一个相对比较大的低层垂直风切变。另外，风暴相对螺旋度SRH和能量螺旋度EHI也是判别超级单体风暴和龙卷形成的重要指标^[25]。从表1还可以看到，风暴相对螺旋度SRH在48~65 m²/s²，明显小于珠三角台风龙卷发生的SRH值^[26]；能量螺旋度EHI在0.6~1.0，用14时高明更合地面气温和露点资料订正后EHI在1.4~1.9，环境条件有利于超级单体风暴发展的潜势。

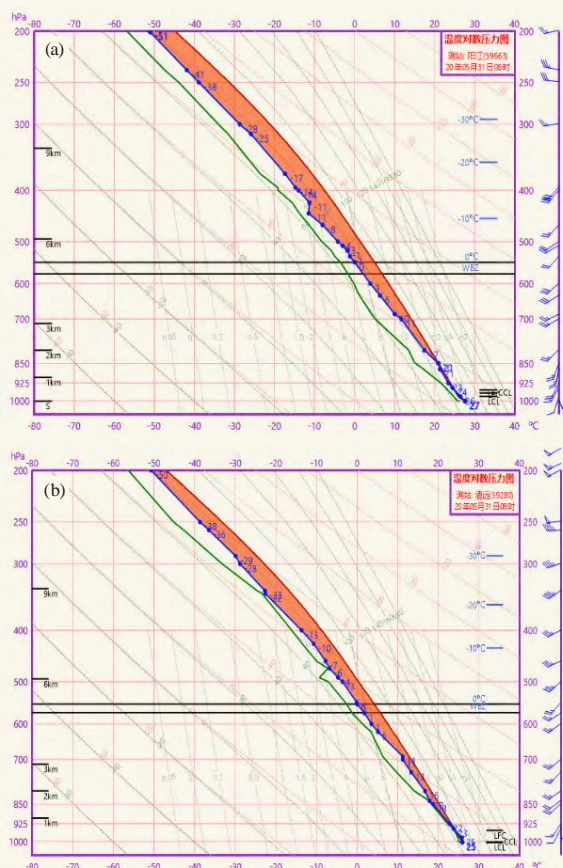


图3 2020年5月31日08时阳江站和清远站T-lnP图

Fig. 3 T-lnP data of Yangjiang station and Qingyuan station at 08:00 BT 31 May 2020

2.3 地面风场

根据区域气象自动站监测资料（图4）可以看出，18:00—18:30肇庆到云浮有地面切变线发展，并缓慢东移，南风加大，在更合镇与偏东风辐合，两条辐合线逐渐并拢，呈人字形分布，并在高要与高明边界形成小尺度涡旋；18:50—19:00随着南风进一步加强，辐合线发展，两区交界处及更合镇出现强对流，并出现12.7 m/s阵风（6级），离龙卷发生地最近的3个自动站（围绕龙卷发生地呈三角分布）录得风向呈现向龙卷发生地辐合分布，意味着这段时间内龙卷发生地处于辐合中心的上升区域，当涡旋与辐合上升区相遇，便有可能由于涡旋拉伸，使旋转加速形成龙卷；地面辐合线减弱，高明中西部地区转为偏北风，小尺度涡旋消散。

高明区处于珠三角西翼，呈西、南、北部三面环山、自西南向东北倾斜的地形。本次龙卷发生地更合镇处于高明区西北侧，四周以低山丘陵为主，故本次龙卷过程持续时间短，强度弱。

表1 2020年5月31日08时清远和阳江探空站环境参数

Table 1 Environmental parameters at Yangjiang station and Qingyuan station at 08:00 BT 31 May 2020

环境参数	CAPE/ (J/kg)	CIN/ (J/kg)	LCL/m	0~6 km风矢量差 / (m/s)	0~3 km风矢量差 / (m/s)	0~1km风矢量差 / (m/s)	SRH/ (m ² /s ²)	EHI
清远	2154	0	50	13.0	10.0	5.7	48	0.6
阳江	2706	0	349	7	10.0	7.1	65	1.0

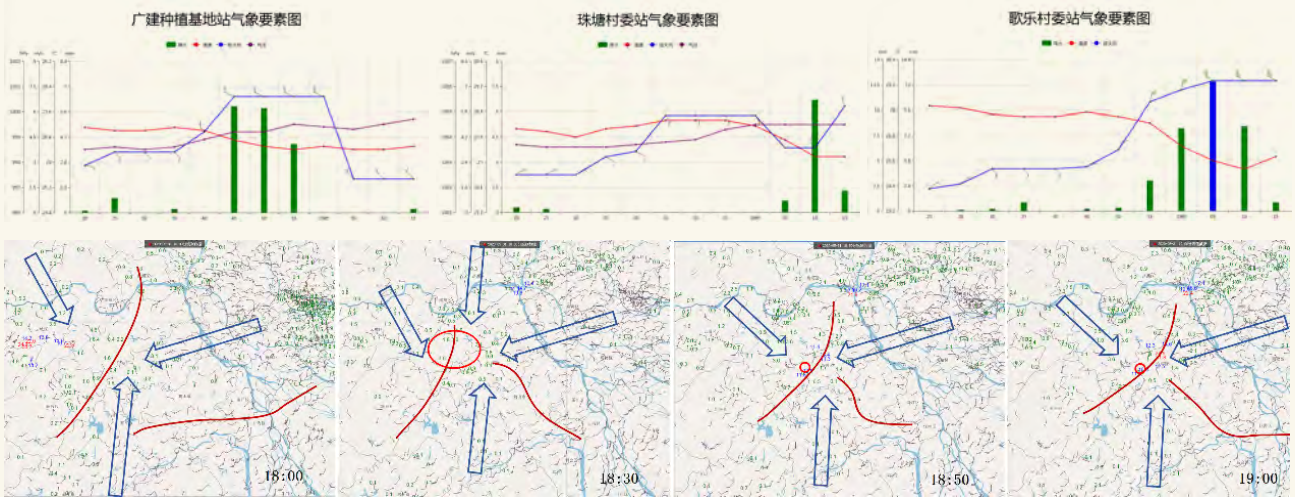


图4 2020年5月31日18: 00—19: 00地面气象要素 (箭头为气流, 实线为辐合线、圆圈为小尺度气旋式环流)

Fig. 4 Surface meteorological elements between 18:00 and 19:00 BT 31 May 2020 (Arrows show airflows, solid lines show convergence lines, circles show small-scale cyclonic circulations)

3 雷达回波特征

根据广州多普勒雷达0.5°反射率因子产品显示, 2020年5月31日18: 00—18: 30云浮到高要方向有零散雷雨云团向东移近高明西北部地区, 并在高要与高明边界处连成西南—东北向的带状回波, 强度逐渐加强。18: 36, 对流风暴移入更合境内, 强度继续加强。18: 48, 对流风暴发展为超级单体, 最强反射率因子为63 dBZ, 低层开始出现钩状回波和入流缺口, 中层出现回波悬垂结构 (图5a—5c); 径向速度图0.5°仰角上探测到气旋式旋转的速度对, 底高约1.4 km, 旋转速度约8 m/s, 距离广州雷达约86 km, 速度对尺度较大, 直径约8km (图略)。沿着与穿过中气旋中心的方向做反射率因子和径向速度的垂直剖面 (图5j—5k), 18: 48可观测到有界弱回波区, 水平尺度约5 km, 该超级单体的强反射率因子顶高约8 km, 中气旋从底部2 km处向上延展至5 km左右, 并在13 km左右高度上, 气流成反气旋式向外辐散。18: 54—19: 00, 回波强度略有减弱, 最强反射率因子为58 dBZ, 但钩状回波更加明显, 速度对旋转速度增强至10 m/s, 距离广州雷达约85 km, 达到弱中气旋标准, 其直径逐渐缩小至6.8 km左右, 高明更合龙卷发生在19时前后, 龙卷出现在钩状回波的弱回波区附近和弱中气旋中心 (图5d—5i), 此时超级单

体弱回波区仍隐约可见, 强反射率因子顶高仍保持在7~8 km, 中气旋延伸高度下降至3~4 km (图略)。可见, 引发本次龙卷的超级单体风暴中气旋直径较大。

4 结论

1) 本次龙卷过程发生在较有利的大气环流背景和环境条件下。高层辐散与低层辐合的上下配置, 中低层深厚的显著西南暖湿气流汇聚叠加, 配合地面辐合线长时间维持, 为强天气的发生提供了有利的天气背景。大的CAPE、较强的低层垂直风切变和低的抬升凝结高度为龙卷的发生提供了较为有利的环境条件。

2) 地面辐合线是有利于龙卷发生的中小尺度系统。这次过程发生在珠江口暖湿气流与渗透到广东省中部弱冷空气交汇处, 高明区处在“人”字形地面辐合线上, 有利于形成小尺度涡旋, 进而有助于龙卷的发生发展。

3) 龙卷产生于β中尺度超级单体风暴, 雷达监测到较为明显的钩状回波、回波悬垂和低层中等强度中气旋, 龙卷出现在钩状回波顶端和中气旋中心附近; 中气旋维持4个扫体, 但其尺度较大, 龙卷触地前后中气旋直径在6 km以上, 属于尺度较大而强度较弱的中气旋, 因此龙卷强度也较弱。

高明多山地丘陵, 发生龙卷的概率极低。本次

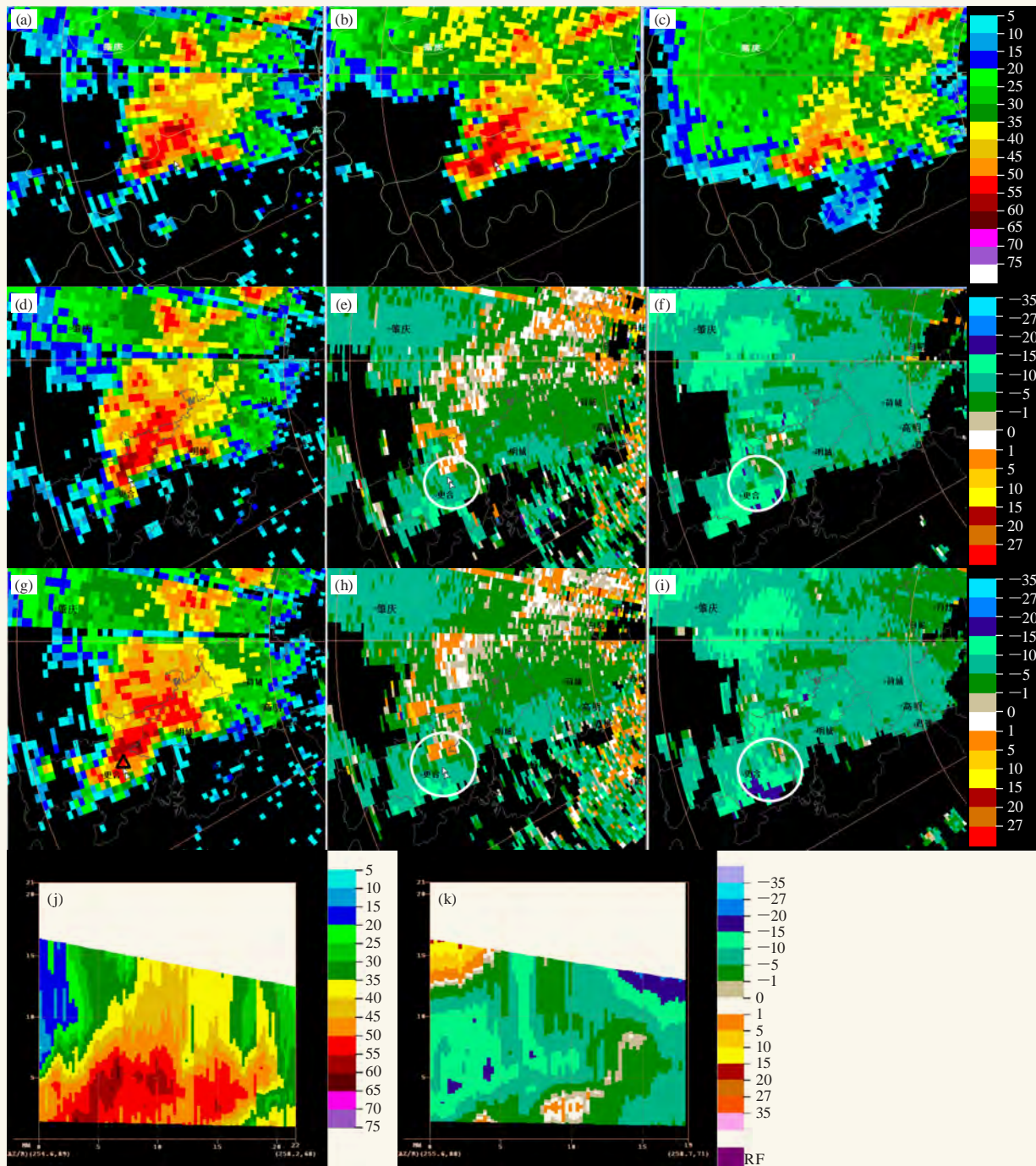


图5 2020年5月31日18:48广州雷达0.5°、2.4°、4.3°反射率因子(单位:dBZ)(a-c)和18:54—19:00广州雷达0.5°反射率因子(单位:dBZ)和0.5°、1.5°径向速度(单位:m/s)(d-f, g-i)(三角形为龙卷发生地,圆圈为中气旋所在位置)和18:48反射率因子(单位:dBZ)(j)、径向速度(单位:m/s)垂直剖面(k)

Fig. 5 Guangzhou Radar 0.5°, 2.4°, 4.3° reflectivity factor at 18:48 BT 31 May 2020 (a-c) and Guangzhou radar 0.5° reflectivity factor and 0.5°, 1.5° radial velocity diagram between 18:54 and 19:00 (d-f, g-i) (The triangle show the place where the tornado occurs, circles show the location of the mesocyclone) and reflectivity factor (j), vertical profile (k) at 18:48

天气过程的对流云团在高明及高要边界丘陵地带的迎风波得到进一步发展加强,进入高明境内在较为有利的环境条件下触发了龙卷,但很可能是受地理地貌影响,龙卷持续时间短、强度弱。对于复杂下垫面如何影响龙卷的发生发展还需要通过模式进一步研究。

参考文献

[1] 魏文秀,赵亚民.中国龙卷风的若干特征.气象,1995,21(5):36-40.
 [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] 冯佳玮,闵锦忠,庄潇然.中国龙卷时空分布及其环境物理量特

(下转68页)

同, 3·27过程回波强度最强, 强回波中心范围最大。2·21和3·27过程出现前侧暖湿气流流入流缺口、明显中气旋, 3·27过程在高仰角还探测到明显三体散射长钉。值得注意的是, 这3次冰雹过程VIL值不大, 可能的原因是春季地面气温较低, 垂直上升气流较夏季弱, 冰雹不需要长得很大就能下降到地面, 这可能是春季冰雹与夏季冰雹区别之一, 但春季冰雹是否具有低VIL还需要更多事件验证。

5 小结

本文对近2年影响佛山地区的3次春季冰雹天气过程进行天气形势、层结结构及雷达回波特征进行分析, 得出如下结论:

1) 2·21和3·27冰雹过程是地面冷高压推动冷锋南压进入广东省, 低层切变线跟随地面冷锋向南移动, 冰雹出现在锋面、切变线附近, 高空槽前, 属锋面低槽型, 强对流启动时间在午后至傍晚。3·18冰雹过程对流抬升从800 hPa开始, 中高层有切变线、高空槽配合, 地面是冷脊后部均压场, 属高架雷暴型, 强对流启动时间在早晨。

2) 表征不稳定的物理量总指数、K指数、沙氏指数表现很好, 达到广东强对流发生的高阈值, 但CAPE表现不太理想, 只有2·21过程超过1000 J/kg, 其余2次过程均低于100 J/kg, 3·18过程低CAPE值可能是高架雷暴的一个特性, 另一个低CAPE值过程有待更深入研究。3次过程“上冷下暖”层结结构不明显, 不满足 ΔT_{85} 越大, 冰雹直径越大的规律; “上干

下湿”层结结构明显, 3·18和3·27过程“上干下湿”层结特征比2·21过程更加突出, “上干下湿”的特征更能促进热力不稳定增长, 因而在做冰雹潜势预报时需多加关注垂直湿度层结结构。2·21和3·27冰雹过程最大热浮力强度大于6 °C, 具备出现大冰雹潜势, 但3·27过程最大热浮力高度都位于冰雹有效增长层之下, 使得雹胚不能生长成更大的冰雹, 这可能是实况出现小冰雹原因之一。2·21和3·27冰雹过程满足 $H-/H+$ 值越大, 冰雹直径越大的规律。

3) 3次冰雹过程出现明显悬垂回波, 2·21和3·27冰雹过程还出现前侧暖湿气流流入流缺口、明显中气旋, 3·27冰雹在高仰角还探测到明显三体散射长钉, 但3次冰雹过程的VIL值都不大, 可能是初春冰雹与夏季冰雹区别之一。

参考文献

- [1] 陈立祥, 刘运策. 广州地区强对流天气的统计特征和分类特征. 热带气象学报, 1989, 5(2): 170-178.
- [2] 林仲青. 广东省2—5月各类强对流天气的时空分布. 广东气象, 1999(1): 21-22.
- [3] 伍志方, 叶爱芬, 胡胜, 等. 中小尺度天气系统的多普勒统计特征. 热带气象学报, 2004, 20(4): 391-399
- [4] 李怀宇, 何如意, 胡胜, 等. 近10年广东冰雹的统计特征及天气形势. 气象科技, 2015, 43(2): 261-268.
- [5] 曾智琳, 湛芸, 朱克云, 等. 广东省大冰雹事件的层结特征与融化效应. 大气科学, 2019, 43(3): 598-615.
- [6] 林志强, 李献洲, 庄旭东. 一次强风暴天气过程分析. 气象, 1998, 24(12): 22-26.
- [7] 叶爱芬, 伍志方, 程元慧. 一次春季强冰雹天气过程分析. 气象科技, 2006, 34(5): 583-586.
- [8] 谢健标, 林良勋, 颜文胜. 广东2005年“3·22”强飑线天气过程分析. 应用气象学报, 2007, 18(3): 321-329.
- [9] 高晓梅, 俞小鼎, 王令军, 等. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析. 气象学报, 2018, 76(2): 196-212.
- [10] 郑永光, 朱文剑, 田付友. 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理. 气象科技进展, 2018, 8(2): 44-54.
- [11] 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 1822号“山竹”台风龙卷过程观测与预警分析. 热带气象学报, 2019, 35(4): 458-469.
- [12] 刁秀广, 万明波, 高留喜, 等. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警. 气象, 2014, 40(6): 668-677.
- [13] 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 佛山市龙卷风活动的特征及环流背景分析. 广东气象, 2014, 36(3): 20-24.
- [14] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 1804号台风“艾云尼”龙卷分析. 气象学报, 2019, 77(4): 645-661.
- [15] 朱文剑, 盛杰, 郑永光, 等. 1522号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析. 暴雨灾害, 2016, 35(05): 403-414.
- [16] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比. 应用气象学报, 2018, 29(1): 70-83.
- [17] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 1415号“海鸥”台风龙卷天气过程分析. 灾害学, 2018, 33(4): 114-121.
- [18] 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.
- [19] Davies J R. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. J Atmos Sci. 1984, 41: 2991-3006.
- [20] 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.

(上接27页)

- [1] 征. 热带气象学报, 2017, 33(4): 530-539.
- [2] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 2018年中国龙卷活动特征. 气象科技进展, 2019, 9(1): 49-55.
- [3] 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): 942-925.
- [4] 曾明剑, 吴海英, 王晓峰, 等. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析. 气象, 2016, 42(3): 280-293.
- [5] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 2017.
- [6] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. 高原气象, 2006, 25(5): 914-924.
- [7] 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析. 气象, 2016, 42(11): 1304-1314.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 朱君莹, 蔡康龙, 龚佃利, 等. 登陆台风“摩羯”(1814)在山东引发龙卷的灾情调查与天气雷达识别. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 21-34.
- [11] 黄先香, 炎利军, 植江玲, 等. 2014年6月3日佛山龙卷风过程分析. 广东气象, 2016, 38(4): 1-6.
- [12] 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. 高原气象, 2009, 28(3): 617-625.
- [13] 刁秀广, 孟宪贵, 张立, 等. 台风“摩羯”与“温比亚”环流中龙卷小尺度涡旋特征及可预警性分析. 海洋气象学报, 2019, 39(3):