

植江玲,黄先香,顾伯辉,等,2022. 广东两次超级单体导致不同类型强风天气对比分析[J]. 气象,48(7):813-825. Zhi J L, Huang X X, Gu B H, et al, 2022. A comparative study on two different types of gale events caused by supercell in Guangdong [J]. Meteor Mon, 48(7):813-825(in Chinese).

广东两次超级单体导致不同类型强风天气对比分析*

植江玲¹ 黄先香^{1,2} 顾伯辉³ 蔡康龙¹ 李彩玲¹ 张晶晶¹ 李兆明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 广东省佛山市三水区气象局,佛山 528100

提 要: 2019 年 4 月 11 日珠江三角洲、4 月 13 日湛江徐闻分别发生了由超级单体引起的强雷暴大风、强龙卷灾害天气过程。利用多源观测资料对比分析两次过程的天气形势、环境条件、风暴结构、对流触发以及强风的形成机制,结果表明:强雷暴大风发生在低空切变线和地面冷锋南压的斜压锋生类天气形势下,而强龙卷发生在偏南暖湿气流强迫天气背景下。两者均发生在高能、强 0~6 km 深层垂直风切变、低抬升凝结高度及上干下湿的大气环境中,但 11 日 0~1 km 低空垂直风切变较小,中层干层更为显著(700~400 hPa 平均温度露点差为 29.2℃),更有利于产生强下沉气流从而导致强雷暴大风,而 13 日强的 0~1 km 低层垂直风切变,有利于强龙卷发生。11 日强雷暴大风出现在超级单体强回波核心,低层中气旋强度较弱且水平尺度较大(6~7 km),中气旋较浅薄(伸展 ≤ 2 km),而 13 日强龙卷出现在钩状回波顶端,低层中气旋强度更强且尺度小(约 2 km),中气旋更深厚(伸展至 6 km),并伴有龙卷涡旋特征;11 日强雷暴大风发生期间,中气旋垂直涡度维持在 10^{-2} s^{-1} 量级,而 13 日强龙卷触地前后,低层中气旋垂直涡度突增至 10^{-1} s^{-1} 量级,比强雷暴大风大一个量级;11 日风暴内强下沉气流在地面形成大面积强冷池,是强雷暴大风产生的重要原因,而 13 日地面几乎饱和的大气湿度及不太强的下沉气流,有利于强龙卷的发生。

关键词: 超级单体,雷暴大风,龙卷,风暴结构

中图分类号: P458, P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.040802

A Comparative Study on Two Different Types of Gale Events Caused by Supercell in Guangdong

ZHI Jiangling¹ HUANG Xianxiang^{1,2} GU Bohui³ CAI Kanglong¹ LI Cailing¹
ZHANG Jingjing¹ LI Zhaoming¹

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 Sanshui Meteorological Station of Guangdong Province, Foshan 528100

Abstract: One supercell triggered severe thunderstorm gales in the Pearl River Delta on 11 April 2019 and another supercell induced an EF3 strong tornado in Xuwen County of Zhanjiang City on 13 April 2019. Based on multi-source observations, the synoptic situation, ambient conditions, structure of the storm, triggering characteristics of convective storm, and formation of the severe thunderstorm gale and tornado in the two events are comparatively analyzed. The results are as follows. The severe thunderstorm gales

* 广东省科技厅协同创新与平台环境建设专项(20180208)、佛山院士专家工作站项目(2021002)和广东省气象局科研项目(GRMC2021LM06)共同资助

2021 年 1 月 21 日收稿; 2022 年 5 月 9 日收修定稿

第一作者:植江玲,主要从事强对流天气监测研究. E-mail: jlz90@qq.com

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

occurred under the southward shear line in the lower layers and the surface cold front, which was classified as the baroclinic frontogenesis severe convection. The strong tornado was the southerly warm advection forcing sector severe convection. The ambient conditions in both days were characterized by high energy strong 0–6 km vertical wind shear, low lifting condensation height and the stratification of dry in the upper level and wet in the lower level. But the sounding at Qingyuan Station on 11 April shows that 0–1 km vertical wind shear was small and average depression of the dew point was 29.2°C in middle levels. This condition was favorable for the formation of strong downdraft. However, the sounding at Haikou Station on 13 April shows that strong 0–1 km vertical wind shear was favorable for the tornado. On 11 April, the thunderstorm gales were located at the core of the supercell. The low-level mesocyclone was weaker and had a larger diameter of 6–7 km. The rotation depth of mesocyclone was below 2 km. On 13 April, the tornado occurred at the top of the hook echo accompanied by low-level intense mesocyclone with the minimum diameter of 2 km and tornadic vortex signature. The rotation depth mesocyclone was up to 6 km. Vertical vorticity remained unchanged at the order of 10^{-2} s^{-1} before and after the thunderstorm gales. However, the tornado occurred during the magnitude of low-level mesocyclone vertical vorticity increased to be 10^{-1} s^{-1} rapidly, which was an order of magnitude larger than the vertical vorticity of strong thunderstorm gale event. The strong downdraft of the storm produced a large area of intense cold pool on the ground on 11 April, which was favorable for the formation of thunderstorm gales. The saturated atmosphere on the ground and the less strong downdraft of the storm were conducive to the occurrence of strong tornado.

Key words: supercell, thunderstorm gale, tornado, storm structure

引 言

超级单体作为对流风暴类型中猛烈发展的一种类型,通常产生在强的垂直风切变和一定大小的对流有效位能条件下,可以导致冰雹、大风、短时强降水或龙卷等强对流天气(Smith et al, 2001; 俞小鼎等, 2006; 2012)。根据 Doswell III (2001) 的统计,美国 90% 以上的超级单体风暴会导致强冰雹、龙卷和雷暴大风等强对流天气。在国内, Yu et al (2012) 对两百多个超级单体事件统计表明, 80% 以上的超级单体伴随有强冰雹、龙卷或雷暴大风。不少专家学者分别对产生龙卷或雷暴大风等不同类型超级单体的环境条件和形成机制进行了研究。在龙卷方面, 俞小鼎等 (2008)、郑媛媛等 (2015)、王秀明等 (2015)、黄先香等 (2019a; 2019b; 2019c) 和郑永光等 (2020) 先后对安徽、江苏、东北和珠江三角洲地区龙卷个例的环境条件和雷达回波特征进行了研究, 指出龙卷多由超级单体产生, 一般发生在强的低层垂直风切变、低抬升凝结高度和风暴相对螺旋度大值区等环境中。雷暴大风是超级单体产生的灾害性大风的另一种主要类型, 郑媛媛等 (2004)、王秀明等

(2013)、费海燕等 (2016)、郑永光等 (2016; 2018)、周后福等 (2020) 从个例以及气候统计等多方面对产生雷暴大风的环境特征和风暴结构进行了细致分析, 指出绝大多数雷暴大风由强下沉气流导致, 而有利于强下沉气流的环境条件包括对流层中层或以上有明显的干层以及对流层中下层大气环境温度直减率较大。上述研究主要针对产生单一类型强对流天气, 但一次强对流天气过程可以出现一种或多种强对流天气, 其发生的环境条件和物理量阈值都不尽相同。在不同的水汽条件、不稳定层结、垂直风切变和抬升触发机制等因素的共同影响下超级单体的形态结构和导致的强对流类型却存在较大的差异(郑媛媛等, 2009; 俞小鼎等, 2012; 符式红等, 2018; 杨波等, 2019)。对于孤立的雷暴系统, 尤其是具有明显中气旋特征的超级单体风暴造成的局地强风, 往往很难在业务上利用有限的观测资料对其进行判别和预警(龙卷还是雷暴大风), 因此分类强对流预报目前还是难点, 特别是对重大强对流天气事件的预报预警难度更大。

前汛期是广东强对流天气多发的季节, 雷暴大风发生频率较高, 但是 10 级以上的强雷暴大风和直径 $\geq 20 \text{ mm}$ 的大冰雹出现概率较低; 与雷暴大风相

比,龙卷特别是强龙卷发生的概率更低。2019年4月11日,广东珠江三角洲东南部至汕尾一带出现大范围10级、局地12级的强雷暴大风,局地出现直径约20 mm的大冰雹(简称“4·11”过程);2019年4月13日,湛江徐闻局地出现强龙卷(简称“4·13”过程)。按照我国重大强对流天气的定义:小时雨量 ≥ 50 mm的短时强降水、或者直径 ≥ 20 mm的冰雹、或者 ≥ 25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (或10级)的雷暴大风、或者EF2级(阵风可达 50 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上)及以上级别龙卷天气(郑永光等,2017)，“4·11”过程和“4·13”过程均属于重大强对流天气。两次过程在时间上仅隔2 d,都发生在华南地区前汛期,雷达上都探测到具有明显中气旋的超级单体,但却产生了不同类型的强风灾害。基于不同类型强对流天气发生条件(郑永光等,2015;2017;俞小鼎等,2012)和“配料法”(俞小鼎,2011)的分析思路,采用常规高空观测、广东省加密地面自动气象站观测、广州和湛江S波段多普勒天气雷达观测资料等,对比分析“4·11”过程和“4·13”过程的环境条件和对流风暴的中尺度特征,比较两者异同,并讨论这些差异对风暴结构演变进而触发不同天气现象的影响,以期进一步加深对该类强天气的认识、为今后提升该类事件的预报预警能力提供参考。

1 天气过程实况

2019年4月11日和13日广东均出现超级单体天气过程。“4·11”过程,超级单体于11日15:00前后(北京时,下同)在广州北部形成后向东南方向移动,20:00前后由汕尾移入海面,强度减弱并消失。受其影响,广州、惠州至汕尾一带出现了短时强

降水和大范围雷暴大风,有8个自动气象站点出现10~11级大风,增城国家基准气候站和惠阳观测站2个站点出现12级以上大风,最大风速出现在惠阳,录得 34.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12级)阵风(图1a),造成惠州部分地方大树折断、房屋门窗损毁。另外,广州和惠州局地出现直径约20 mm的大冰雹。该超级单体从新生到减弱消失超过5 h,自西北向东南移动约400 km,最强反射率因子超过70 dBz,具有生命史长、雷暴大风强度大和影响范围广的特点。“4·13”过程,超级单体于13日13:42前后在湛江雷州东南部至徐闻北部一带形成,受其影响,14:00—14:36湛江市徐闻县和安镇出现了EF3级强龙卷,造成1人死亡,5人受伤,龙卷路径长约16 km(黄先香等,2021;蔡康龙等,2021)。其中录得10级以上大风的站点有2个站点:14:11和安镇政府自动气象站录得 50.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (15级)的极端大风,14:36锦和镇文化站录得 32.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12级)的大风(图1b)。

2 天气形势和大气环境条件对比

2.1 天气形势对比

4月11日珠江三角洲和13日雷州半岛均位于500 hPa副热带高压北缘(图2),高原上都有西风槽下滑东移至于广西中西部,上空都处于温度露点差 >20 $^{\circ}\text{C}$ 的干区。但11日低槽更为显著,广东处于槽前强盛西南气流中,风速超过 25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,而13日500 hPa等位势高度线较为平直,主要受偏西气流影响,风速在 15 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。两日都处在850 hPa低空急流右侧和温度脊北侧以及温度露点差 <3 $^{\circ}\text{C}$ 的显著湿区。但“4·11”过程850 hPa和

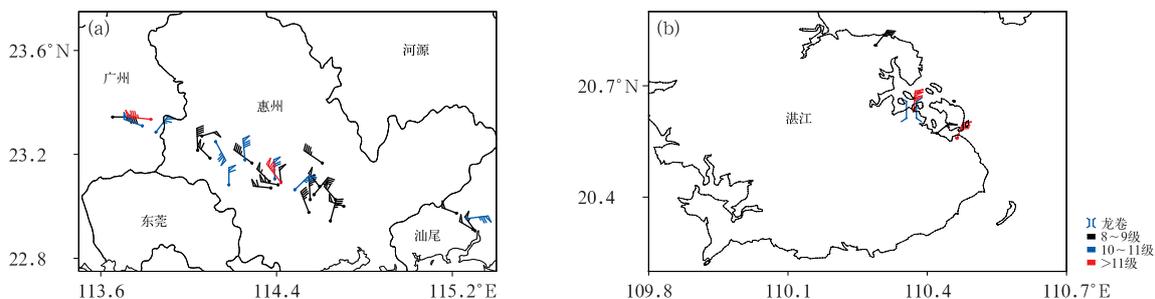


图1 2019年4月(a)11日15:00—19:00和(b)13日13:00—15:00超级单体导致的8级以上极大风分布
(蓝色龙卷符号:龙卷发生地)

Fig. 1 Distribution of thunderstorm gales above scale 8 caused by supercells
(a) from 15:00 BT to 19:00 BT 11 and (b) from 13:00 BT to 15:00 BT 13 April 2019
(blue tornado symbol: where tornado occurred)

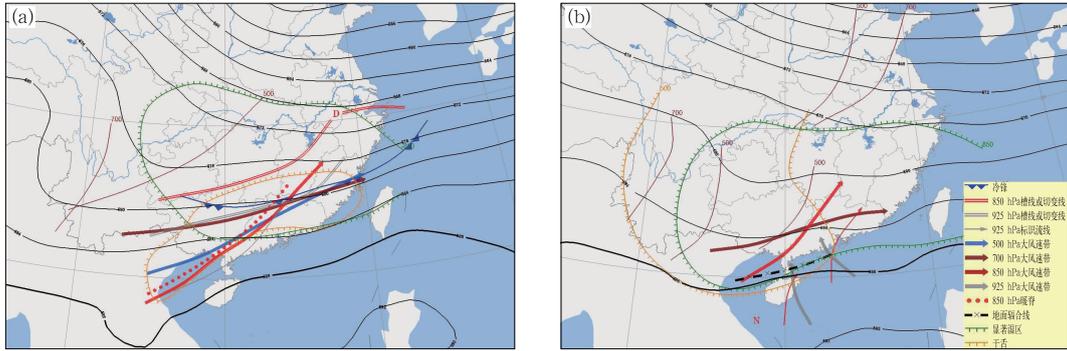


图 2 2019 年 4 月(a)11 日 08:00 和(b)13 日 08:00 综合分析图

Fig. 2 The comprehensive synoptic charts at (a) 08:00 BT 11 and (b) 08:00 BT 13 April 2019

925 hPa 有切变线南压至粤北,地面有冷锋南下,属于斜压锋生类天气形势(许爱华等,2014)。而“4·13”过程无冷空气南压,850 hPa 和 925 hPa 西南风低空急流和偏南风超低空急流在雷州半岛汇合并伴有风速辐合,地面上雷州半岛到海南一带存在东北—西南向的风向风速辐合线,此次龙卷天气发生在偏南风急流暖湿强迫的天气背景下(许爱华等,2014)。

2.2 大气环境条件对比

探空站观测通常能代表站点附近 100~200 km 以内的大气状态,针对“4·11”“4·13”过程,分别选取清远站(距离强风发生地上游约 80 km)、海口站(距离龙卷发生地约 73 km)探空进行分析(图 3,表 1)。两次强风过程发生前,对流有效位能(CAPE)分别为 $2293 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1944 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,属于中等程度,分别用 11 日降水发生前 11:00 的清远和 13 日 14:00 和安镇地面自动站的温度和露点温度对探空进行订正,相应的 CAPE 分别为 $3168 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2669 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,均呈现出强的条件不稳定。两次过程对应的温湿探空曲线形态也很相似,均呈“上干下湿的喇叭形”形态(图 3),低层(900 hPa 以下)都很湿,基本接近饱和状态,600 hPa 以上均为明显的干层,但“4·11”过程,干层的面积和强度明显更大更强,700~400 hPa 的温度露点差均值为 29.2°C ,单层最大温度露点差达 43°C ,925~700 hPa 温度垂直递减率为 $5.9^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$;而“4·13”过程,700~400 hPa 的温度露点差均值仅为 15.7°C ,单层最大温度露点差仅为 28°C ,925~700 hPa 温度垂直递减率为 $5.0^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,较 11 日($0.9^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)小。“4·11”过程更干的中层干层以及更大的中低层温度直减率是

产生强下沉气流的有利环境条件,环境干空气夹卷进入由降水启动的下沉气流,使雨滴蒸发冷却,在负浮力的作用下产生强烈的下沉气流;而“4·13”过程中层干层强度相对较弱,配合近地层水汽含量高的饱和大气,使得下沉气流不会太强(杨波等,2019;郑永光等,2020;周后福等,2020)。两次过程对应的对流抑制能量(CIN)都很小(在 $20 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下),抬升凝结高度(LCL)都很低(在 200 m 以下),极易触发深厚湿对流。两次过程均发生在强的深层垂直风切变环境下,0~6 km 风矢量差分别为 $24.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $18.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但“4·11”过程 0~6 km 垂直风切变更强,这可能与清远站位于地面冷锋和低层切变线附近(约 150 km)有关,这也是“4·11”超级单体能长时间维持高度组织化的重要原因。而要产生超级单体龙卷,不仅需要有利于超级单体形成的环境条件,还需要较强的 0~1 km 低层垂直风切变,强的低层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,美国 F2/EF2 级以上龙卷 0~1 km 垂直风矢量差统计平均值为 $9.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Thompson et al,2003);而低的抬升凝结高度则有利于涡旋触地形成龙卷(Weisman and Klemp,1982;McCaul,1991)。两次过程的 0~1 km 垂直风矢量差分别为 $5.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $8.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,”4·13”过程更强的低层垂直风切变,有利于强龙卷的发生。另外,分析两次过程的 0°C 层和 -20°C 层高度发现,“4·11”过程的 0°C 层和 -20°C 层高度分别为 4192 m 和 7751 m,均位于广东历史冰雹事件统计值区间内(李怀宇等,2015),而“4·13”过程的 0°C 层和 -20°C 层高度分别为 5113 m 和 8355 m,高于历史统计值,这也是前者伴有冰雹、后者没有冰雹天气的重要原因。

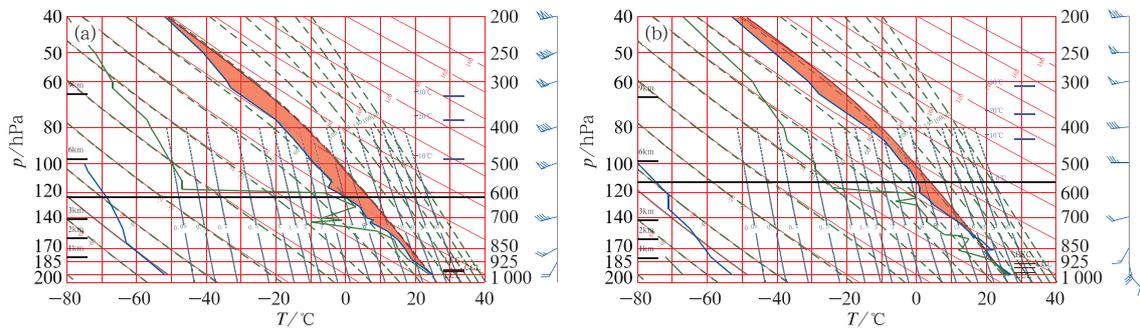


图 3 2019 年 4 月(a)11 日 08:00 清远站和(b)13 日 08:00 海口站探空图

Fig. 3 Soundings at (a) Qingyuan Station at 08:00 BT 11 and (b)Haikou Station at 08:00 BT 13 April 2019

表 1 2019 年 4 月 11 日 08:00 清远站和 13 日 08:00 海口站环境参数

Table 1 Ambient variables of Qingyuan Station at 08:00 BT 11 and Haikou Station at 08:00 BT 13 April 2019

时间/BT	CAPE/ (J · kg ⁻¹)	CIN/ (J · kg ⁻¹)	LCL/m	0~6 km 风矢 量差/(m · s ⁻¹)	0~1 km 风矢 量差/(m · s ⁻¹)	700~400 hPa 平均 温度露点差/°C
11 日 08:00	2293.0	1.1	147.9	24.6	5.7	29.2
13 日 08:00	1944.0	17.0	197.0	18.0	8.1	15.7

综上所述,两次过程都具备较大 CAPE、较强 0~6 km 垂直风切变和低的 LCL 等有利于超级单体发生发展的环境条件,但环境中高层的干层强度、0~1 km 垂直风切变、0°C 层和 -20°C 层高度差异等是两次超级单体造成不同类型强对流天气的重要环境因素。

3 地面单站气象要素分析

为了解两次强风过程影响前后的地面温、压、风等气象要素的变化,下面分别选取距离强风灾害最近的惠州博罗站(距离强雷暴大风灾害约 600 m)和徐闻和安镇站(距离龙卷中心路径仅约 42 m)进行分析。

“4 · 11”过程,其单站气象要素变化(图 4a)显示,16:50 前后,气压先涌升[1.8 hPa · (10 min)⁻¹]、后陡降[0.9 hPa · (10 min)⁻¹];风向突变、风速突增,由弱偏东风(2 m · s⁻¹)转为强偏北风(10.7 m · s⁻¹),并录得 32.2 m · s⁻¹(11 级,16:54)的 3 s 瞬时极大偏北风,17:05 恢复弱偏东风,17:15 后转为偏北风,表明冷锋已经过境;雨量突增,16:50 出现雨量峰值,雨强达 15.9 mm · (5 min)⁻¹,远超强雷暴大风发生征兆的 4 mm · (6 min)⁻¹雨强阈值(周后

福等,2017),强降水的拖曳作用有利于下沉气流快速下冲,降雨峰值提前于强雷暴大风出现;同时,气温骤降,5 min 内骤降 5.6°C,表明地面冷池很强。

“4 · 13”过程,其单站气象要素变化(图 4b)显示,14:05 前后,气压出现两次明显降/升过程,13:45—13:50 突降 0.5 hPa、14:00—14:05 陡升 1.1 hPa、14:10 再突降 0.5 hPa、14:20 再陡升 1.1 hPa;风向出现两次突变,14:00—14:05 由南风顺转为西北风、14:05—14:10 逆转为偏西风、14:10—14:15 再顺转为偏北风,表明该站受到龙卷涡旋不同部位的影响(黄先香等,2021),同时风速突增,该站于 14:11 录得 50.7 m · s⁻¹(15 级)的 3 s 瞬时极大偏北风;降雨峰值出现在 14:20 前后,滞后于强龙卷大风,表明龙卷位于母体超级单体风暴前侧,与“4 · 11”过程的先产生强降雨、后发生强风不同;气温明显下降,但降温幅度较小,5 min 气温最大降幅为 1.7°C,冷池效应明显弱于“4 · 11”过程。

4 超级单体风暴结构对比分析

4.1 超级单体风暴演变的雷达回波分析

“4 · 11”过程,广州雷达 0.5°仰角反射率因子产

品显示, 15:36, 对流风暴向东偏南方向移动至广州北部并加强成为超级单体, 低层开始出现钩状回波和入流缺口特征, 最强反射率因子超过 65 dBz; 对应速度图上开始探测到中气旋, 旋转速度为约 $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 接近强中气旋, 中气旋直径约 7 km, 底高约 0.8 km, 距离雷达约 47 km (图略)。15:42—15:54 (图 5a, 5b), 超级单体迅速增强, 反射率因子增大至 70 dBz 以上, 钩状回波和入流缺口更明显; 对应速度图上有中等到强的中气旋 (图 5d, 5e), 旋转速度为 $15 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 直径约为 6 km, 底高为 0.8~0.9 km,

中气旋中心位置位于入流缺口靠近强回波中心一侧, 正速度中心出现大片模糊区, 为西南偏西风, 最大径向风速达 $39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。16:00 前后, 超级单体风暴影响增城区, 增城国家观测站正好处于超级单体风暴强回波中心 (图 5c) 和中气旋北侧 (图 5f), 此时观测站录得 $34.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12 级) 的偏西大风、大冰雹和短时强降水, 雨强达到 $15.6 \text{ mm} \cdot (5 \text{ min})^{-1}$, 强雷暴大风出现在雨强大值区, 这与雷暴大风的形成机制跟降水粒子的拖曳作用和强烈的蒸发冷却作用是相关的。

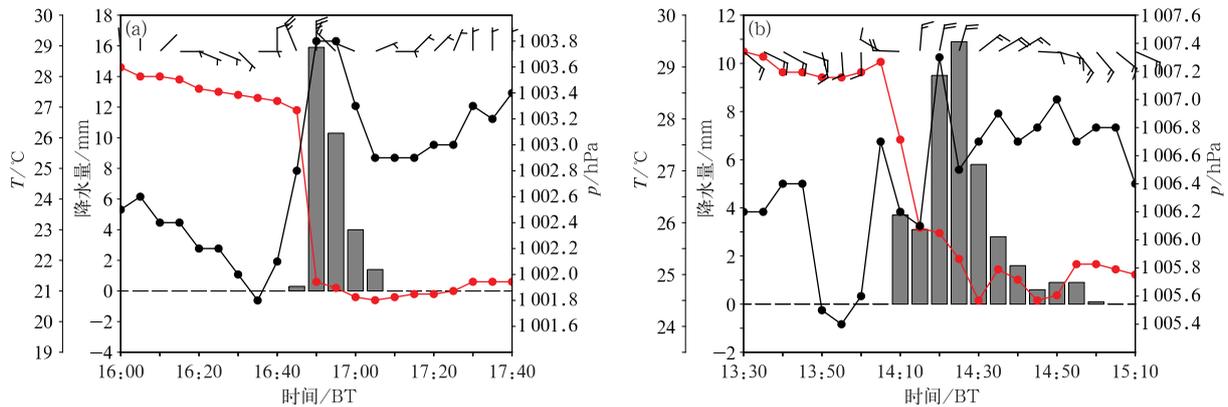


图 4 2019 年 4 月 (a) 11 日 16:00—17:40 博罗站和 (b) 13 日 13:30—15:10 和安镇政府自动气象站 2 m 温度 (红色实线)、气压 (黑色实线)、2 min 平均水平风 (风羽) 和 5 min 累计降水量 (柱状) 随时间演变

Fig. 4 Time series of 2 m temperature (red line), pressure (black line), 2 min averaged horizontal wind (barb) and 5 min accumulated rainfall (bar) at (a) Boluo Automatic Weather Station from 16:00 BT to 17:40 BT 11 and

(b) He'an Town Government Automatic Weather Station from 13:30 BT to 15:10 BT 13 April 2019

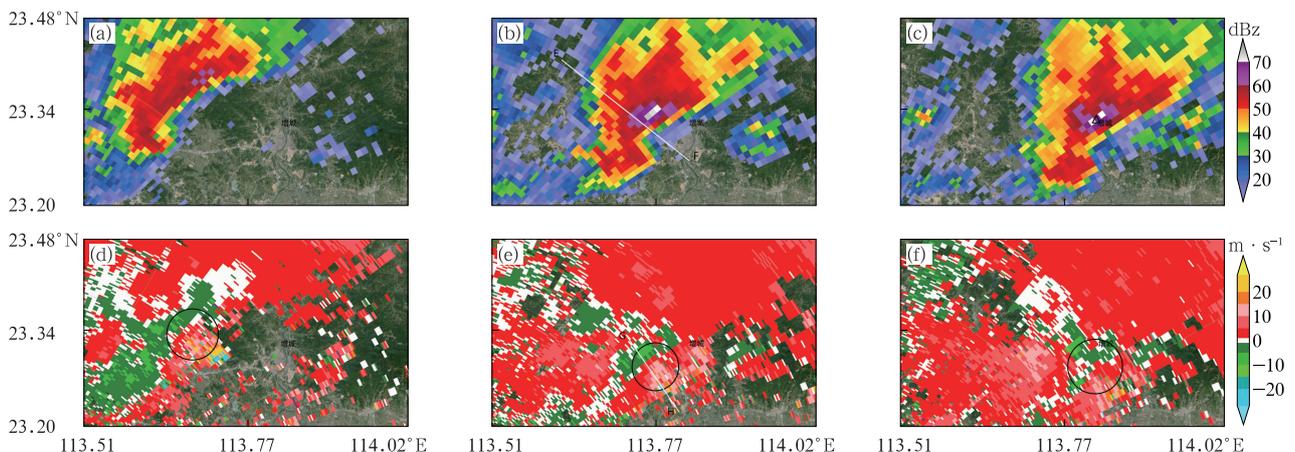


图 5 2019 年 4 月 11 日 (a, d) 15:42, (b, e) 15:54, (c, f) 16:00 广州雷达 0.5° 仰角 (a, b, c) 雷达反射率因子和 (d, e, f) 平均径向速度

(黑圆圈: 中气旋, 白实线: 图 7 中垂直剖面所在位置, 三角形为雷暴大风位置)

Fig. 5 (a, b, c) Reflectivity and (d, e, f) radial velocity at 0.5° elevation by Guangzhou Radar at (a, d) 15:42 BT, (b, e) 15:54 BT and (c, f) 16:00 BT 11 April 2019

(black circles; mesocyclone, white line; vertical cross-section of Fig. 7, triangle; location of thunderstorm gale)

“4·13”过程,湛江雷达 0.5° 仰角反射率因子产品显示,13:42,位于湛江雷达西南方向约 40 km 处的雷州市东部一孤立的对流单体加强发展成超级单体,开始出现明显的钩状回波和入流缺口特征,最强反射率因子为 52 dBz;对应径向速度图上首次探测到中气旋,旋转速度为 $15.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,底高为 0.5 km,直径约为 5.3 km(图略)。14:00(图 6a, 6d),超级单体东南方向移动进入徐闻县冬松岛,中气旋进一步加强,出流速度出现模糊,旋转速度增至 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,达强中气旋标准,直径缩小至 2.8 km,中气旋中心探测到像素的强切变(类龙卷涡旋特征),其切变值为 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,尺度约为 1.4 km,对应冬松岛龙卷触地位置。14:06,超级单体移入海面,钩状回波和入流缺口特征更为明显(图 6b),中气旋直径继续收缩至 2 km(图 6e),最大旋转速度为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在中气旋中心探测到龙卷涡旋特征(TVS),切变值为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。14:12 超级单体风暴影响和安镇(图 6c),中气旋旋转速度略有减弱至 $17.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6f),仍达到中等强度中气旋标准,底高降至 0.4 km,此时龙卷持续,龙卷出现在钩状回波顶端和中气旋中心附近,与 15 级大风位置、拍摄到的龙卷视频位置对应(黄先香等,2021;蔡康龙等,2021)。

4.2 风暴结构及中气旋垂直涡度演变对比分析

为进一步揭示风暴结构,分别沿着两个超级单

体低层入流方向(图 5b 和图 6b 中白色线段所示)做反射率因子垂直剖面、沿着中气旋中心并与雷达径向相垂直的直线(图 5e 和图 6e 中白色线段所示)做径向速度垂直剖面。反射率因子剖面图上,“4·11”过程,15:54 超级单体结构随高度向前倾斜,出现中高层回波悬垂和低层有界弱回波区,表明存在强倾斜上升气流(图 7a),强回波中心在 65 dBz 以上,最大反射因子高度和风暴质心高度达 5 km,50 dBz 以上的强回波从近地面延伸到 8 km 附近,本次过程探空显示 0°C 层和 -20°C 层高度分别为 4.2 km 和 7.8 km,50 dBz 以上的强回波高度超过的 -20°C 层高度,表现为高质心的雹暴结构,实况有观测到直径为 2 cm 的大冰雹;“4·13”过程,14:06 也存在中高层回波悬垂和低层弱回波区(图 7b),强回波中心约为 60 dBz,但 50 dBz 以上的强回波仅延伸至 6 km 左右,最大反射因子高度和风暴质心高度也较低(3 km)。径向速度剖面图上,“4·11”过程(图 7c),中气旋垂直伸展厚度较浅,从低层向上仅伸展至 2 km 附近,低层中气旋正负速度中心相距较远,达 6~7 km;而“4·13”过程(图 7d),中气旋从近地层一直扩展到 6 km,且越往低层中气旋结构越紧凑、涡旋强度越强,并伴有 TVS。

低层中气旋形成后,要形成龙卷,还需要后侧阵风锋附近的低层强辐合区位于适当位置以及中层强上升气流的向上垂直拉伸配合,使得近地层中气旋

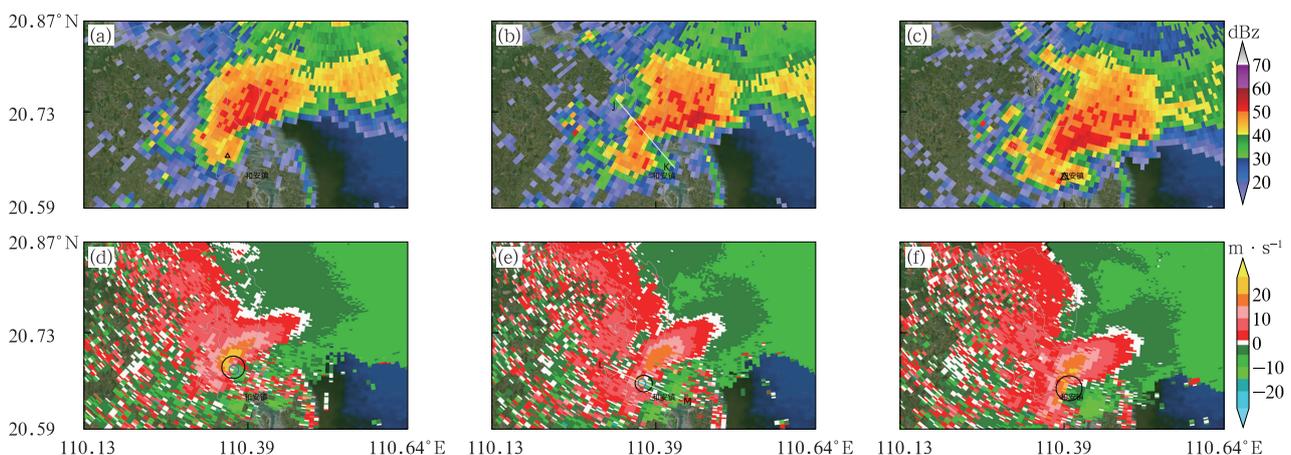


图 6 2019 年 4 月 13 日(a,d)14:00,(b,e)14:06,(c,f)14:12 湛江雷达 0.5° 仰角

(a,b,c) 雷达反射率因子和(d,e,f) 平均径向速度

(大黑圈:中气旋,小蓝圈:TVS 或类 TVS,白实线:图 7 中垂直剖面所在位置,三角型:龙卷发生地)

Fig. 6 (a, b, c) Reflectivity and (d, e, f) radial velocity at 0.5° elevation by Zhanjiang Radar at

(a, d) 14:00 BT, (b, e) 14:06 BT and (c, f) 14:12 BT 13 April 2019

(large black circle: mesocyclone, small blue circle: TVS or similar TVS,

white line: vertical cross-section of Fig. 7, triangle: tornado)

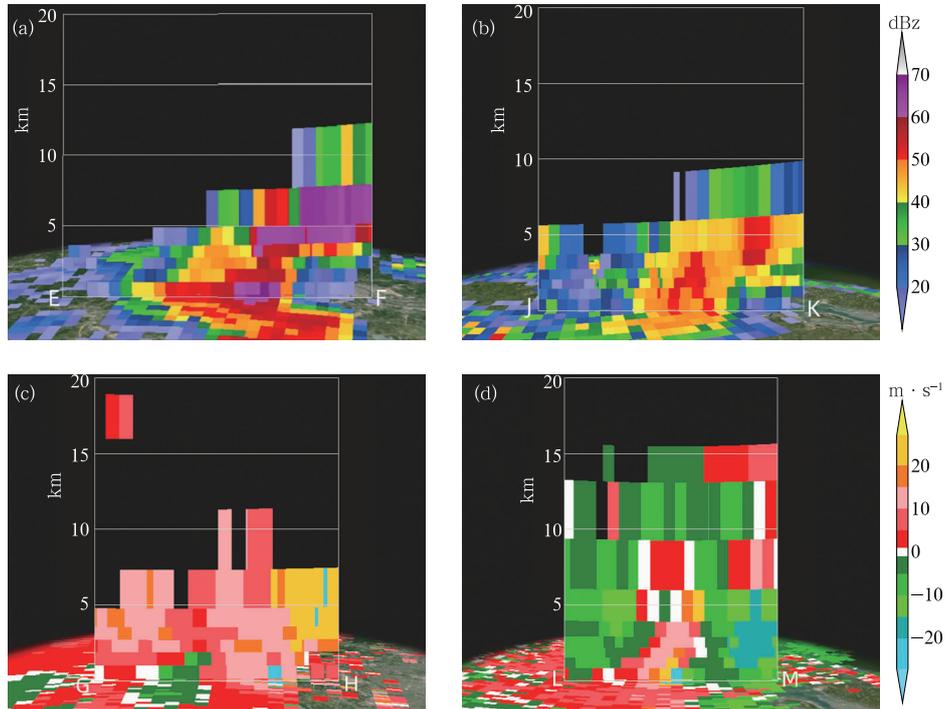


图 7 2019 年 4 月 (a,c)11 日 15:54 沿图 5 和 (b,d)13 日 14:06 沿图 6 白色实线的
(a,b)反射率因子和(c,d)径向速度垂直剖面

Fig. 7 Cross sections of (a, b) reflectivity and (c, d) radial velocity along white lines shown in Fig. 5 and Fig. 6 respectively at (a, c) 15:54 BT 11 and (b, d) 14:06 BT 13 April 2019

的垂直涡度在短时间内迅速加强(俞小鼎等,2020)。两次过程雷达都探测到低层中等强度以上中气旋,底高都在 1 km 以下,但是低层中气旋的直径相差较大,因此计算了雷达 0.5° 仰角上两次超级单体中气旋的垂直涡度随时间变化(图 8)。T 为雷暴大风或龙卷首先出现的体扫时间,雷暴大风或龙卷产生前 1 个体扫时间为 $T-1$,产生后 1 个体扫时间为 $T+1$,以此类推。“4·11”过程,强雷暴大风产生前 4 个体扫,中气旋垂直涡度在 $9.5 \times 10^{-3} \sim 13.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,强雷暴大风发生及发生后 2 个体扫,中气旋垂直涡度从 $9.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 减小至 $6.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,整个过程中气旋垂直涡度维持在 10^{-2} s^{-1} 量级。而“4.13”过程,龙卷触地前 2~4 个体扫期间,中气旋垂直涡度与强雷暴大风发生前中气旋的垂直涡度相差不大,但龙卷触地前 2 个体扫,中气旋垂直涡度出现“爆发式”增长,从 $19.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 突增至 $124 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,增长至原来的 6 倍多,龙卷持续期间,中气旋垂直涡度强度维持在 10^{-1} s^{-1} 量级,比“4·11”过程大一个量级。以上表明,低层中气旋垂直涡度在短时间内的“爆发式”增长对龙卷发生有较好指示性。

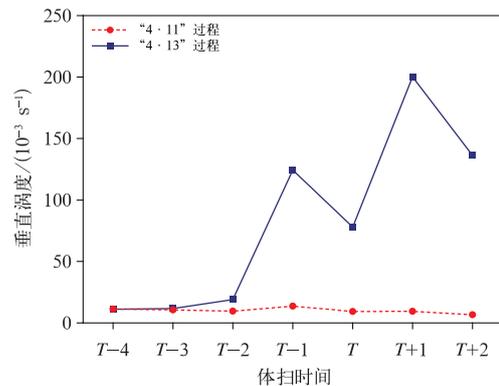


图 8 2019 年 4 月 11 日广州雷达和 13 日湛江雷达 0.5° 仰角识别的中气旋垂直涡度演变

Fig. 8 Vertical vorticity evolution of mesocyclones at 0.5° elevation by Guangzhou Radar on 11 April and by Zhanjiang Radar on 13 April 2019

5 触发和形成机制

5.1 抬升触发系统

“4·11”过程,13:00 冷空气前锋到达粤北

(图 9a),偏北风速增大至 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与粤北南部的东南风形成“人字形”的地面辐合线,怀集与德庆交界处出现一个散度为 $30\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的辐合中心(A),雷暴在辐合线上生成并快速发展;13:30 雷暴单体发展至 6 km 高度且强度超过 60 dBz;14:00 (图 9b),辐合线南压,德庆附近的辐合中心(B)增强至 $40\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,同时四会附近(C)也出现一个散度大于 $40\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的辐合中心。由于珠江三角洲北部山地的阻挡,冷空气沿着北江河谷南下后在山前堆积,在四会附近形成了温度和露点温度梯度大值区,当风暴移至辐合中心 C 附近时,与温度和露点温度梯度高值区叠加,暖空气一侧出现上升、冷空气一侧出现下沉,形成闭合环流,从而加强了上升运动(Trapp,2013;徐珺等,2018),对流迅速发展形成一孤立强雷暴单体,回波强度超过 65 dBz 且发展高度达到 7 km,回波垂直剖面图(图略)上出现弱回波

区,可见风暴内上升气流不断加强。

“4·13”过程,12:00 雷州半岛南部地面气温攀升至 $30\sim 32^\circ\text{C}$,热力条件较好,雷州西北部存在一条偏北风与地面东南风形成地面辐合线和散度为 $20\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的辐合中心(D),从北部湾海面上岸的雷暴单体东移至辐合线附近时在原雷暴南侧触发了新雷暴并强烈发展,同时雷州东南沿海附近存在另一条东北风与东南风的地面辐合线和散度为 $40\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的辐合中心(E)(图 9c)。13:00 当雷暴单体东南移至雷州东南部的辐合线附近时,风暴流出边界与地面辐合线相遇加强了抬升作用,辐合线北侧的偏北风加大至 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,辐合中心(F)增强,散度增大至 $50\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ (图 9d),强辐合使得雷暴单体强烈发展,最终发展为龙卷母体超级单体风暴;13:30 反射率因子核强度超过 55 dBz 同时高度达 6 km,风暴出现了深厚的弱回波区(图略)。

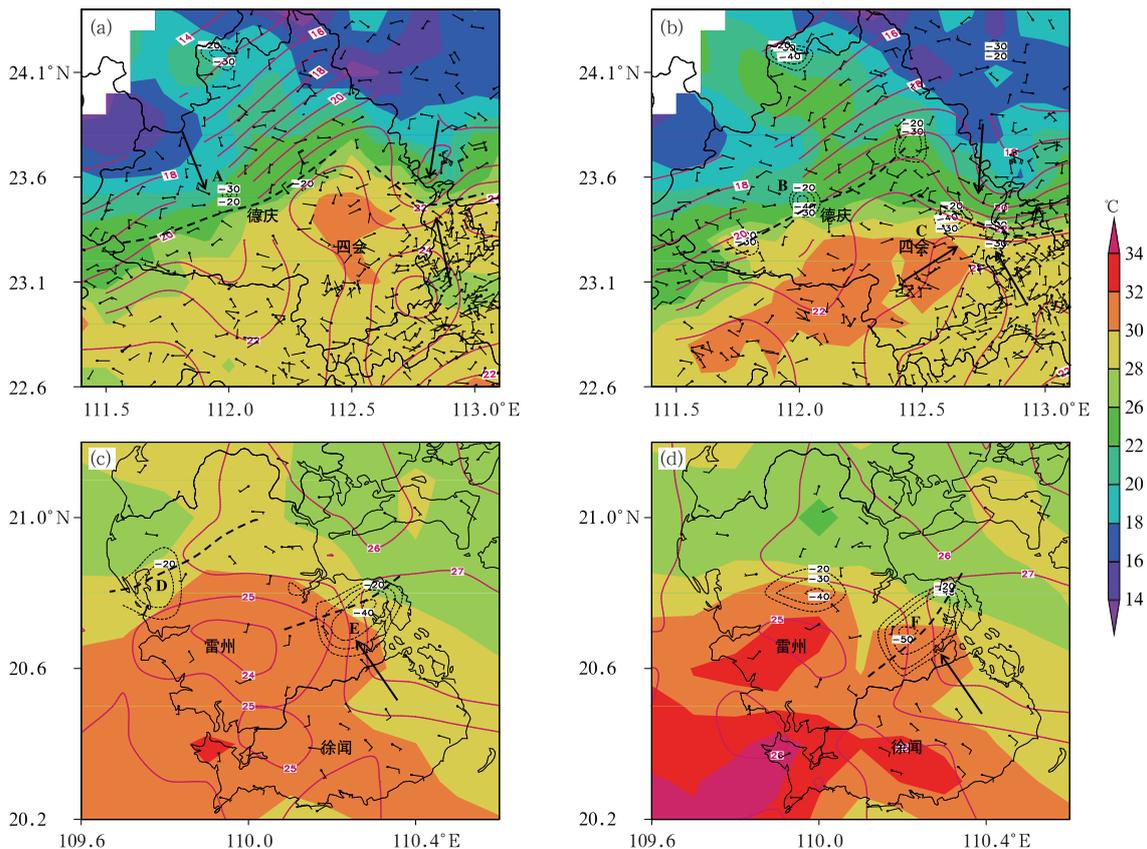


图 9 2019 年 4 月 11 日(a)13:00,(b)14:00 和 13 日(c)12:00,(d)13:00 地面自动气象站分析
(填色为 2 m 温度;红色实线为露点温度,单位: $^\circ\text{C}$;风羽为 2 min 平均风;
细黑色虚线为散度,单位: 10^{-5} s^{-1} ;粗黑色虚线为地面辐合线;A~F:辐合中心)

Fig. 9 Analysis of automatic weather stations at (a) 13:00 BT, (b) 14:00 BT 11 and
(c) 12:00 BT, (d) 13:00 BT 13 April 2019
(colored: 2 m temperature; red line: dew point temperature, unit: $^\circ\text{C}$;
barb: 2 min average wind; thin black dotted line: divergence, unit: 10^{-5} s^{-1} ;
thick dashed line: convergence line; A~F: convergence center)

5.2 冷池强度

以往研究表明,下沉气流对雷暴大风的形成至关重要,风暴内强下沉气流到达地面形成强冷池是造成致灾大风的重要原因(Johns and Doswell III, 1992;俞小鼎等,2012;周后福等,2020)。“4·11”过程,16:00 超级单体在增城附近产生了水平尺度近 50 km 的冷池(图 10a),1 h 降温中心达到 8℃以上,出现 12 级大风的增城观测站恰好处在负变温中心东侧;钩状回波附近气温降至 21~23℃,其南侧外围环境温度为 28~30℃,两者温差达 5~9℃,表明强的下沉气流到达地面后造成空气剧烈降温形成非

常强的冷池,是地面气温陡降和气压陡升(图 4a)的重要原因。对于超级单体龙卷,龙卷的产生是以低层中气旋的形成作为前提条件的,而低层中气旋的生成与后侧下沉气流的作用有关,有利于龙卷生成的下沉气流不能太强,下沉气流到达地面后的冷出流与环境之间的温差要适宜,通常小于 4℃(俞小鼎等,2020;Schenkman et al,2014;郑永光等,2020)。“4·13”过程(图 10b),14:00 冷池中心气温为 23℃左右,1 h 中心降温约 5℃,钩状回波位置距离冷池中心南侧约 20 km,其附近气温为 27~29℃,周围环境温度为 28~32℃,两者温差为 2~5℃,冷池强度明显比“4·11”过程弱。

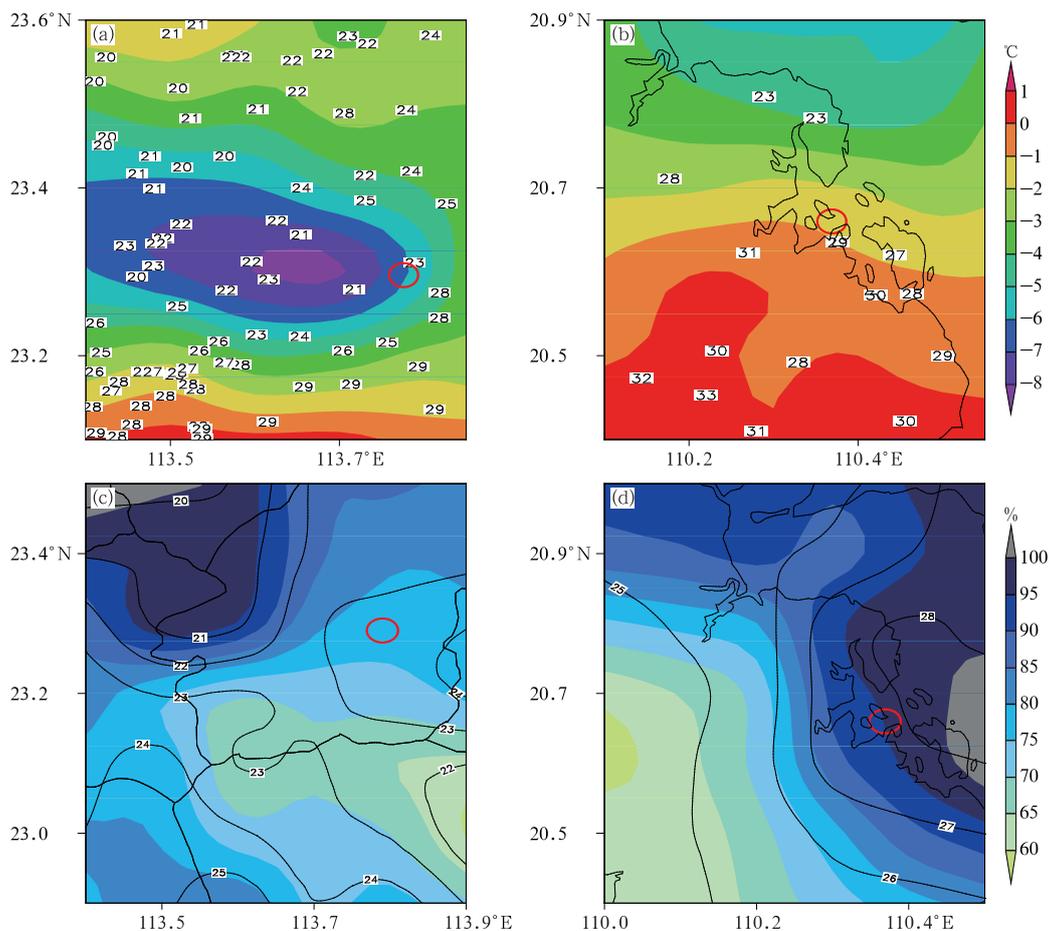


图 10 2019 年 4 月(a,c)11 日 16:00 和(b,d)13 日 14:00(a,b)2 m 温度(数字,单位:℃)、1 h 变温(填色)和(c,d)露点温度(等值线,单位:℃)、相对湿度(填色)分布(红色圆圈:钩状回波位置)

Fig. 10 Distribution of (a, b) 2 m temperature (numbers, unit: °C), 1 h temperature change (colored), (c, d) dew point temperature (contour, unit: °C) and relative humidity (colored) at (a, c) 16:00 BT 11 and (b, d) 14:00 BT 13 April 2019 (red circle: the position of hook echo)

另外,研究表明,近地层较高的相对湿度使得风暴下沉气流到达地面的冷出流与环境暖湿气流之间的温差不会太大(郑永光等,2020)。由“4·11”过程的地面自动站相对湿度和露点温度分布可见(图10c),16:00超级单体的钩状回波附近相对湿度约为75%~80%,露点温度约为23℃,而“4·13”过程(图10d),14:00龙卷移动路径刚好处于雷州半岛的相对湿度和露点温度大值带,相对湿度高达90%~95%,露点温度大于27℃,地面几乎饱和的大气环境使得风暴后侧下沉气流形成的冷池强度较为适宜,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。

6 结 论

2019年4月11日和13日广东分别发生了超级单体导致的强雷暴大风和强龙卷天气过程。通过对比分析两次过程的环流背景、风暴结构、对流触发和大风形成机制等,主要结论如下:

(1)“4·11”过程发生在低空切变线和地面冷锋过境的冷暖平流交汇导致斜压锋生的天气形势下,“4·13”过程无冷空气影响,发生在偏南急流暖湿强迫类强对流天气背景下。

(2)两次过程都具备高能($CAPE > 1900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、强0~6 km垂直风切变等有利于超级单体发生的环境条件。但“4·11”过程更强的中层干层(700~400 hPa平均温度露点差为29.2℃)、更大的环境低层温度直减率和适宜的0℃层、-20℃层高度,利于产生强下沉气流和地面强冷池,导致珠江三角洲大范围强雷暴大风和局地强冰雹;而“4·13”过程更强的0~1 km垂直风切变条件有利于龙卷的发生。

(3)地面观测表明,两次强风发生前后,都呈现出风向突变、风速突增和气温陡降的特征,但“4·11”过程,气压出现先跃升后骤降的“高压鼻”特征,降水峰值比极大风提前4 min出现;而“4·13”过程,龙卷过境前后气压出现先陡降后陡升的“漏斗”特征,风向出现气旋性转变,降水峰值比极大风滞后9 min出现。

(4)两次超级单体都具有明显的低层钩状回波

特征和中气旋。但“4·11”过程强雷暴大风出现在超级单体风暴核心位置,中气旋垂直伸展较为浅薄(2 km以下),低层中气旋较弱且尺度较大(直径为6~7 km),中气旋垂直涡度较弱,整个过程中气旋垂直涡度维持在 10^{-2} s^{-1} 量级;而“4·13”过程龙卷发生在钩状回波顶端,中气旋更深厚、旋转深度高达6 km,低层中气旋更强且尺度更小(直径最小仅为2 km)、并伴有TVS,中气旋垂直涡度更强,龙卷触地前后,中气旋垂直涡度出现“爆发式”增长,从 10^{-2} s^{-1} 量级突增至 10^{-1} s^{-1} 量级,比“4·11”过程大一个量级。

(5)对流系统的地面触发机制和大风的形成机制不同。“4·11”过程,由加大的冷空气北风与环境偏南风形成地面辐合线触发雷暴、并与温度露点锋相遇加强辐合抬升运动,导致雷暴加强形成超级单体风暴;强下沉气流和强冷池(冷池与环境大气温差5~9℃)导致强雷暴大风的发生。而“4·13”过程,地面热力条件较好,地面风场辐合抬升即可触发雷暴,风暴出流边界与地面辐合线相遇加强了辐合抬升,雷暴强烈发展形成龙卷母体风暴;地面暖湿的饱和大气和适宜的弱冷池(冷池与环境大气温差2~5℃)环境有利于龙卷的发生。

参考文献

- 蔡康龙,俞小鼎,李彩玲,等,2021. 2019年广西临桂微下击暴流和广东湛江龙卷现场灾情调查对比分析[J]. 气象,47(2):230-241.
- Cai K L, Yu X D, Li C L, et al, 2021. Comparative analysis of damage survey of microburst in Lingui of Guangxi and tornado in Zhanjiang of Guangdong in 2019[J]. Meteor Mon,47(2):230-241(in Chinese).
- 费海燕,王秀明,周小刚,等,2016. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象,42(12):1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al, 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteor Mon,42(12):1513-1521(in Chinese).
- 符式红,王秀明,俞小鼎,2018. 相似环流背景下海南两次不同类型强对流天气对比研究[J]. 气象学报,76(5):742-754. Fu S H, Wang X M, Yu X D, 2018. A comparative study on two consecutive severe convective weather events in Hainan under similar background[J]. Acta Meteor Sin,76(5):742-754(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).
- 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).
- 李怀宇,何如意,胡胜,等,2015. 近 10 年广东冰雹的统计特征及天气形势[J]. 气象科技, 43(2):261-269. Li H Y, He R Y, Hu S, et al, 2015. Statistical characteristics and circulation patterns of hails in Guangdong in recent 10 years[J]. Meteor Sci Technol, 43(2):261-269(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,2015. 中国东北龙卷研究:环境特征分析[J]. 气象学报, 73(3):425-441. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2015. Study of Northeast China torandoes: the environmental characteristics[J]. Acta Meteor Sin, 73(3):425-441(in Chinese).
- 王秀明,周小刚,俞小鼎,2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究[J]. 气象学报, 71(5):839-852. Wang X M, Zhou X G, Yu X D, 2013. Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures[J]. Acta Meteor Sin, 71(5):839-852(in Chinese).
- 许爱华,孙继松,许东蓓,等,2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 40(4):400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon, 40(4):400-411(in Chinese).
- 徐珺,毕宝贵,湛芸,等,2018. “5.7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报, 76(4):511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al, 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):511-524(in Chinese).
- 杨波,孙继松,刘鑫华,2019. 两类不同风灾个例超级单体特征对比分析[J]. 气象学报, 77(3):427-441. Yang B, Sun J S, Liu X H, 2019. Comparative analysis of supercells associated with two different types of wind disaster[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):427-441(in Chinese).
- 俞小鼎,2011. 基于构成要素的预报方法——配料法[J]. 气象, 37(8):913-918. Yu X D, 2011. Ingredients based forecasting methodology[J]. Meteor Mon, 37(8):913-918(in Chinese).
- 俞小鼎,王秀明,李万莉,等,2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社:265-267. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorm and Severe Convection Nowcasting[M]. Beijing:China Meteorological Press:265-267(in Chinese).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社:130-163. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing:China Meteorological Press:130-163(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).
- 郑永光,蓝渝,曹艳察,等,2020. 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[J]. 气象, 46(5):589-602. Zheng Y G, Lan Y, Cao Y C, et al, 2020. Environmental conditions, evolution and mechanisms of the EF4 tornado in Kaiyuan of Liaoning Province on 3 July 2019[J]. Meteor Mon, 46(5):589-602(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,田付友,孟智勇,等,2016. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J]. 气象, 42(1):1-13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al, 2016. Survey and multi scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship “Dongfangzhixing”[J]. Meteor Mon, 42(1):1-13(in Chinese).
- 郑永光,田付友,周康辉,等,2018. 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, 2018. 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,周康辉,盛杰,等,2015. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报, 26(6):641-657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al, 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather[J]. J Appl Meteor Sci, 26(6):641-657(in Chinese).
- 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等,2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报, 62(3):317-328. Zheng Y Y, Yu X D, Fang C, et al, 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data[J]. Acta Meteor Sin, 62(3):317-328(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).
- 周后福,刁秀广,赵倩,等.2017.一次连续下击暴流天气的成因分析[J].干旱气象,35(4):641-648. Zhou H F, Diao X G, Zhao Q, et al, 2017. Cause analysis of a continuous downburst weather [J]. J Arid Meteor, 35(4): 641-648 (in Chinese).
- 周后福,范伟,陶寅,等.2020.安徽一次局地极端大风观测与成因探讨[J].灾害学,35(2):97-101, 121. Zhou H F, Fan W, Tao Y, et al, 2020. Observation and genesis of an extreme local gale in Anhui Province[J]. J Catastrophol, 35(2): 97-101, 121 (in Chinese).
- Doswell III C A, 2001. Severe Convective Storms[M]. Boston: American Meteorological Society: 1-26.
- Johns R H, Doswell III C A, 1992. Severe local storms forecasting [J]. Wea Forecasting, 7(4): 588-612.
- McCaul E W Jr. 1991. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments[J]. Mon Wea Rev, 119(8): 1954-1978.
- Schenkman A D, Xue M, Hu M, 2014. Tornadogenesis in a high-resolution simulation of the 8 May 2003 Oklahoma City supercell [J]. J Atmos Sci, 71(1): 130-154.
- Smith J A, Baeck M L, Zhang Y, et al, 2001. Extreme rainfall and flooding from supercell thunderstorms[J]. J Hydrometeorol, 2(5): 469-489.
- Thompson R L, Edwards R, Hart J A, et al, 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle[J]. Wea Forecasting, 18(6): 1243-1261.
- Trapp R J, 2013. Mesoscale-Convective Processes in the Atmosphere [M]. Cambridge: Cambridge University Press: 140-141.
- Weisman M L, Klemp J B, 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy [J]. Mon Wea Rev, 110(6): 504-520.
- Yu X D, Wang X M, Zhao J, et al, 2012. Investigation of supercells in China: environmental and storm characteristics [C] // Proceedings of the 26th Conference on Severe Local Storms. Nashville: American Meteorological Society.

(本文责编:戴洋)