

刘瑾, 2021. 海南一次微型超级单体引发的 EF1 级龙卷天气过程分析[J]. 气象与减灾研究, 44(2):97-104.
Liu Jin, 2021. Analysis of EF1 tornado weather process in Hainan triggered by Micro-supercell[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 44(2):97-104.

海南一次微型超级单体引发的 EF1 级龙卷天气过程分析

刘瑾

三亚市气象局, 海南 三亚 572000

摘要: 利用常规高空地面资料、海南省区域加密观测资料、NCEP 再分析资料、海口多普勒雷达、风云 2G 高分辨可见光云图和欧洲中心预报场等资料, 对 2019 年 2 月 18 日发生在海口三江镇的一次 EF1 级龙卷天气进行分析, 并对欧洲中心 18 日 08 时预报场进行检验。结果表明: 1) 副热带高压较弱、500 hPa 槽前、低层切变线南侧、高低空辐合辐散为此次龙卷的发生提供有利的天气背景; 良好的不稳定条件、较强的低层垂直风切变与较低的抬升凝结高度为龙卷的发生提供较高的环境条件; 2) 对流带发展前期呈辐合速度带, 东移加强中变粗变短, 逐渐发展为气旋式旋转的辐合速度对, 最后发展为微型超级单体, 强盛高度仅 3 km, 回波顶高 5 km; 风廓线产品在近地面风速增强、风向转向, 0—1 km 垂直风切变加大, 对龙卷的预警有一定作用; 3) 南支槽前西风汇入海风, 与近地面背景风相对, 补充加强边界层切变线上的次级环流, 伴随增强的边界层垂直风切变造成水平涡度管对垂直涡度的正输送, 直至在海南岛北部形成具有若干中 β 尺度涡旋的边界层切变线, 是龙卷的主要发展机制; 4) 欧洲中心(ECMWF)较准确把握了此次过程的环流形势与发展时间, 但预报的对流强势区域偏移对能否预判此次龙卷的作用很小。

关键词: 龙卷, 超级单体, 中气旋, 垂直风切变

中图分类号: P458

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2021)02-0091-08

doi: 10.12013/qxyjzyj2021-014

Analysis of EF1 Tornado Weather Process in Hainan Triggered by Micro-Supercell

Liu Jin

Sanya Meteorological Observatory, Sanya 572000, China

Abstract: A case study of an EF1 tornado and its radar echo characteristics that occurred in Sanjiang town, Haikou on 18 February 2019 was carried out by using observation data, automatic weather station data, NCEP reanalysis data, Haikou Doppler radar data and 2G high resolution visible cloud images of FengYun Meteorological Satellite. The results showed that: 1) The case occurred in front of 500 hPa trough and south of lower level shear line, and in the background of weak subtropical high and appropriate divergence. The favorable unstable conditions, strong vertical wind shear at lower level and lower uplift condensation height provided the environmental conditions for tornado occurrence. 2) In the early stage of the development of convective zone, the convergence velocity band appeared on the radial velocity map, and gradually became thicker and shorter in the process of eastward migration, then developed cyclonic rotating convergence velocity pair, finally formed a micro-supercell with low-level mesocyclone, the strongest height of the storm is only 3 km, and the echo top is 5 km. The wind profile products played an important role in the early warning of tornado when the surface wind speed increased, the wind direction turned and the 0—1 km vertical wind shear increased. 3) In front of the south branch trough, the westerly wind converged into the sea

收稿日期: 2021-04-10; 修订日期: 2021-05-14.

基金项目: 海南省气象局青年基金项目(编号: HNQXQN201803).

作者简介: 刘瑾, 硕士, 工程师, 主要从事中尺度气象研究, E-mail: 843022142@qq.com.

breeze, which was opposite to the near surface background wind and strengthened the secondary circulation on the boundary layer shear line. The enhanced vertical wind shear in the boundary layer resulted in the positive transport of vertical vorticity by horizontal vorticity tubes, until forming the boundary layer shear with several meso- β -scale vortices in the northern part of Hainan Island, which was the main development mechanism of tornado. 4) European Center (ECMWF) can accurately grasp the circulation situation and development time of this process, but the predicted strong convection regional migration had little effect on the prediction of this tornado.

Key words: tornado; supercell; mesocyclone; vertical wind shear

0 引言

龙卷是一种小尺度的天气系统,尺度小、突发性强、强度大、生命史短、危害严重,在实际业务中预报难度较大。运用多普勒天气雷达测量降水粒子沿雷达径向的速度,从而识别中小尺度的涡旋、辐合和辐散等特征,是目前基层台站探测龙卷和短临预警最有效的方法。范雯杰和俞小鼎(2015)对1961—2010年国内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、两湖平原、华南、东北和华北东南部等平原地区;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。根据影响系统又可分为热带气旋龙卷和非热带气旋龙卷。近年来,多位学者结合多普勒雷达资料进一步分析台风龙卷个例的发生发展及中小尺度特征(郑峰等,2012;李彩玲等,2016;植江玲等,2019)。海南省作为我国龙卷多发的省份之一,郑艳等(2017)运用业务预报即时可用的资料对超级单体和海风锋辐合线相互作用产生的一次EF2级龙卷过程进行分析。现有研究大致弥补对强台风和经典超级单体造成强龙卷的环境特征的认识,但仍有由较弱天气系统伴随的微型超级

单体引发EF0—EF1级龙卷,此类龙卷在多普勒雷达中仅有局地较强回波,且风切变较弱,无法及时预警,是业务临近预报的难点之一,而且会对所经之处的农业、交通等造成不可忽视的损失。

文中选取2019年2月18日发生在海口市三江镇的一次由微型超级单体引发的EF1级龙卷天气过程,使用NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析数据(间隔6 h)、FY-2G高分辨可见光云图、海口市多普勒雷达资料(平分辨率0.01°)、常规高空地面观测及海南省区域加密自动站等观测资料,对雷达回波特征和中尺度环境进行具体分析,并结合EC模式预报资料对此次过程预报失败进行经验总结,以期为此类龙卷天气过程的监测和预警提供参考。

1 天气实况

2019年2月18日17:50左右,海口市三江镇眼镜塘村上东西洋出现龙卷,并自西向东移动,移动距离2—3 km,过程大约持续5—15 min,在大致坡镇端仍村减弱消失,4间房屋房顶被掀翻,沿途有树木折断,车辆被掀翻,苗圃损坏。经现场调查分析,龙卷风强度为EF1级(风力13—15级)。分析强对流发生附近区域3个站点逐小时降水量和风速变化(图1a)可知,本次过程集中发生在17—18时,且没

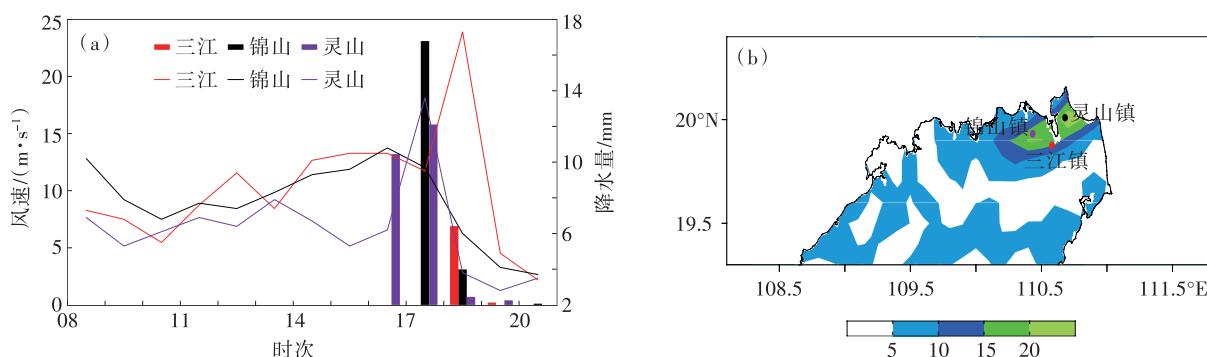


图1 2019年2月18日(a)三江镇、锦山镇、灵山镇逐小时降水量(柱状)/大风(折线)变化和(b)14—20时海南岛北部地区累积降水量(单位:mm)

Fig. 1 Hourly precipitation and extreme gale of Sanjiang, Jinshan and Lingshan (a), and the accumulated precipitation of the northern part of Hainan Island from 14:00 to 20:00 (b, unit:mm) on February 18, 2019

有伴随大范围强降水。分析 14—20 时累积降水量(图 1b)可知,海口市三江镇站点仅达 17.4 mm。

分析 2019 年 2 月 18 日 08 时大尺度环流背景,200 hPa 南亚高压较弱,蒙古国中部有一冷中心(图略),陕西南部—云南的浅槽槽前西南气流控制我国华南地区,海南位于显著气流右后方,高层辐散为强上升运动的发生提供可能。500 hPa 西风槽自冷涡中心延伸至中南半岛北部地区(图 2a),副热带高压较弱,海南岛有较弱冷平流。850 hPa 切变线位于

长江中下游一带,海南位于切变线南侧,西南暖湿气流为海南强对流的发生提供不稳定能量。925 hPa(图 2b)切变线南倾至广东、广西地区,并伴有露点锋,其两侧露点差为 8—12 ℃,广东西部沿海地区有辐合中心,海南北部也有较明显辐合,与 200 hPa 高度层的辐散配合较好,为对流发生提供较好的动力条件。副热带高压较弱、500 hPa 槽前、低层切变线南侧、高低空辐合辐散为此次龙卷的发生提供有利的天气背景。

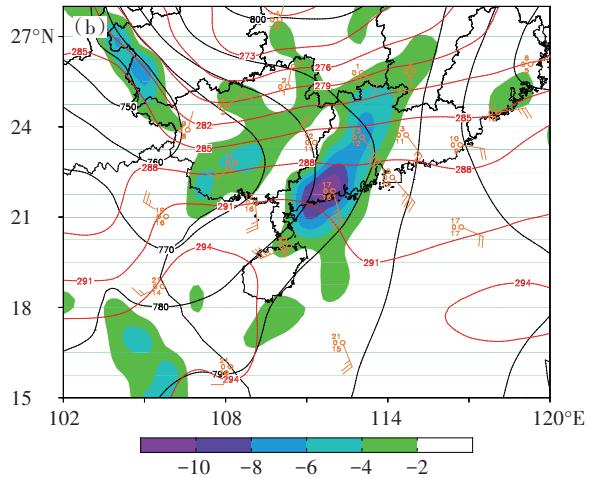
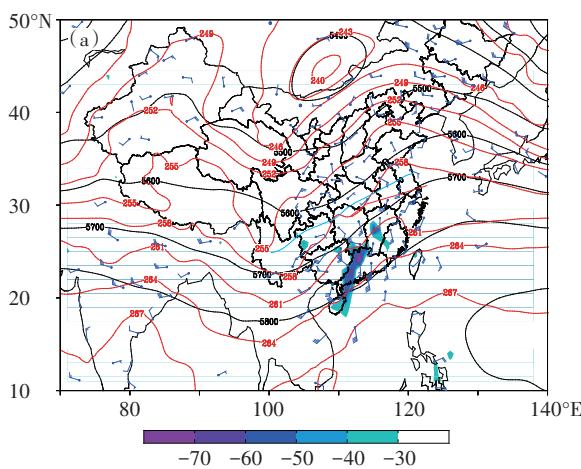


图 2 2019 年 2 月 18 日 08 时(a)500 hPa 高度场(黑色实线,单位:gpm)、温度场(红色实线,单位:K)、850 hPa 风场(风向杆)、水汽通量散度(阴影;单位: 10^{-6} g/(hPa·cm²·s),蓝色实线为切变线)和(b)925 hPa 高度场(黑色实线)、温度场(红色实线)、散度场(阴影,单位: 10^{-5} s⁻¹)以及探空温度、露点、风场(风向杆及数字)

Fig. 2 The 500 hPa height field (black solid line, unit: gpm) and temperature field (red solid line, unit: K), 850 hPa wind field and water vapor flux divergence at 08:00 (a, shaded; unit: 10^{-6} g/(hPa·cm²·s), the blue solid line represents the shear line respectively), (b) 925 hPa height field (black line), temperature field (red line), divergence field (shaded, unit: 10^{-5} s⁻¹) and sounding temperature, dew point and wind field at 08:00 on February 18, 2019

结合探空图分析可知,首先对海口 08 时探空数据进行修正:露点达 20 ℃,850 hPa 层与 500 hPa 层的温差为 25 ℃,对流有效位能为 1 079 J/kg,对流抑制有效位能为 241.58 J/kg,LI 指数为 -3.9 ℃,K 指数为 29 ℃,抬升凝结高度为 934 m,0—6 km 垂直风切变达 18.86 m/s,0—2 km 垂直风切变达 17.87 m/s。低层大气不稳定有利于触发深厚湿对流天气(吴风波等,2016),有研究表明(Brooks et al,2002;Evans et al,2002),低的抬升凝结高度和较大的低层(0—1 km)垂直风切变有利于强龙卷的发生,此次过程在对流不稳定大气环境下,中等的对流有效位能、较低的抬升凝结高度及较强的低层垂直风切变为龙卷提供可能。

2 多普勒天气雷达回波分析

2.1 雷达回波移动和演变特征

前期受槽前西南气流控制,海口无明显降水。分析 2019 年 2 月 18 日海口站雷达组合反射率因子(图 3)可知,南支槽上东北—西南走向带状雷达回波 A 经广西南部东移至北部湾,15:04 距海口约 100 km,海南岛北部开始有零散弱回波。回波 A 东移,至雷州半岛时,南支槽开始影响海南岛北部地区,逐渐出现降水。接下来回波进一步加强发展,16:00 发展成较强对流回波带 B,径向速度图配合明显辐合带(图略)。于 16:55 对流带 A 入海减弱,其南部对流残余与对流带 B 北段合并,对流带 B 南段变粗变短,强度加强,径向速度有辐合带逐渐演变

为辐合对,期间最大反射率因子达 63 dBz,于 17:50 (图略)在对流带南侧出现钩状回波,速度对呈气旋辐合式旋转,17:57 钩状回波前侧入流更加明显,速度对气旋性加强,1.5°仰角旋转速度达 18 m/s,中气旋强度维持 2 个体扫后减弱演变成弓状回波,以

20—30 km 的时速东移,19:00 入海后减弱消失。

由于低层大多为过路水汽,辐合不强,对流带移速过快,此次南支槽过境没有造成强降水,仅在局地带来大风天气,极大风最大值达 17.3 m/s,位于三江镇丁荣水库站点,即龙卷发生地附近区域。

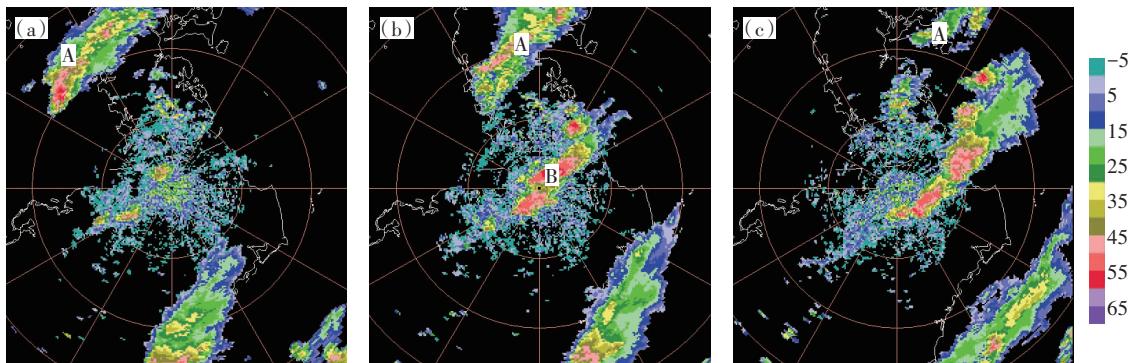


图 3 2019 年 2 月 18 日(a)15:04、(b)16:00 和(c)16:55 海口站雷达组合反射率因子(单位:dBz)

Fig. 3 Radar combined reflectivity factor of Haikou station at (a) 15:04, (b) 16:00 and (c) 16:55 on February 18, 2019 (unit: dBz)

2.2 微型超级单体回波特征

具体分析 2 月 18 日 17:57 微型超级单体雷达特征,0.5°仰角反射率因子出现钩状回波,1.5°仰角径向速度上存在中气旋。分别沿径向和垂直于径向作反射率因子和径向速度的垂直剖面(图 4)。可以看出,此超级单体上升气流高度明显较低,对流强盛高度仅有 3 km,回波顶高约 5 km,在经典超级单体的范畴属微型超级单体(Kennedy et al, 1993; Burgess et al, 1995; Suzuki et al, 2000)。反射率因子沿径向上有明显回波悬垂,配合径向速度,0—2 km 存在显辐合,3—4 km 存在风暴顶风速辐散;垂直于径向方向上,反射率因子存在弱回波区,中气旋高度延伸至对流顶以下。

由于超级单体对流高度较低,中气旋速度不够大,无法通过切变阈值,无中气旋和 TVS 被识别,为临近预报增加了难度。风暴趋势图中可以看出,此超级单体对流高度一直较低,不超过 4 km,反射率因子最大值所在高度略高于质心所在高度,但于 17:50 骤降,与质心所在高度一致,大约位于 2 km,为零度层高度的一半。风廓线产品中,近地面风速存在明显“南风—东南风—偏东风”的转变,导致垂直风切变有明显增强,在实际预报中,由于中低层风速风向变化不大,仅从 17:40 开始近地面偏东分量明显加大,使 0—1 km 高度垂直风切变增强,费海燕等(2016)指出,低层中气旋若在较强近地面垂直

风切变环境中维持较长时间,发生龙卷的可能就比较大。

3 触发机制分析

海南地形四面环海,中间高、四周低,水汽充沛。陆地比热容量小于海洋的,白天太阳辐射使陆地升温幅度大于海洋,海风与近地面东南风相遇,容易在海南岛西北部边界形成边界层辐合线。分析风云 2G 气象卫星可见光云图(图略)可知,2019 年 2 月 18 日 14:00 地面气温接近日最高气温,海风最强,开始出现中尺度对流云线;15:00 起北部湾东北—西南走向对流带向东移动,与组合反射率因子配合一致(图 3a),即将影响海南北部地区;16:00 对流带与地面辐合线相互作用,触发此次强对流天气。

借助地面站 1 h 极大风数据,对流带加强东移过程中,海南岛一直存在辐合性质的边界层切变线(图 5a),至 17:00—18:00 时段,切变线发展至贯穿整个海南岛(图 5b),同时存在伴有若干中 β 尺度涡旋的气旋族,龙卷出现在地面辐合最强区域附近。

进一步使用 NCEP 再分析数据研究龙卷附近区域的中尺度环境特征,由于数据有限的时间分辨率(6 h)和空间分辨率($1^\circ \times 1^\circ$),使用 14 时资料进行讨论,鉴于对流发展高度较低,着重分析 500 hPa 以下环境特征。沿 20°N 做剖面,结合雷达数据,可判断南支槽对流带位于 105°E ,在较弱的低层辐合高

层辐散中呈上升运动(图 6a),并其东侧较弱下沉气流配合正涡度区域(图 6b),中低层温差达 30°C ,呈

较强垂直不稳定特征,但边界层垂直风切变较小。南支槽对流带低层中具有下沉性质的弱西风汇入海

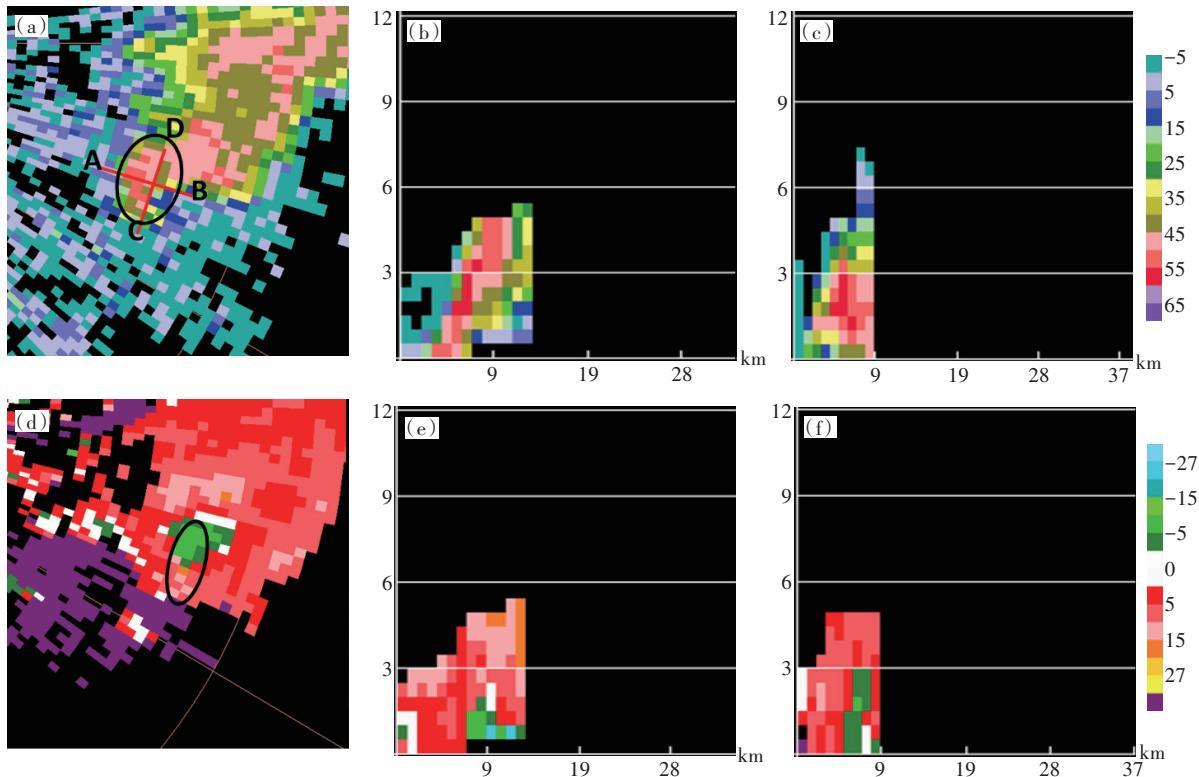


图 4 2019 年 2 月 18 日 17:57 海口雷达 0.5° 仰角反射率因子(a, 黑圈为钩状回波位置)沿 AB(b)和 CD(c)的反射率因子(单位: dBz)以及 1.5° 仰角径向速度(d, 黑圈为中气旋位置)沿 AB(e)和 CD(f)的径向速度剖面(单位: m/s)

Fig. 4 Reflectivity factor on 0.5° at 17:57 on February 18, 2019 (a, the black circle indicates the hook echo), reflectivity factor along AB (b) and CD (c), and radial velocity on 1.5° (d, the black circle represents the location of the mesocyclone), and radial velocity along AB (e) and CD (f), respectively

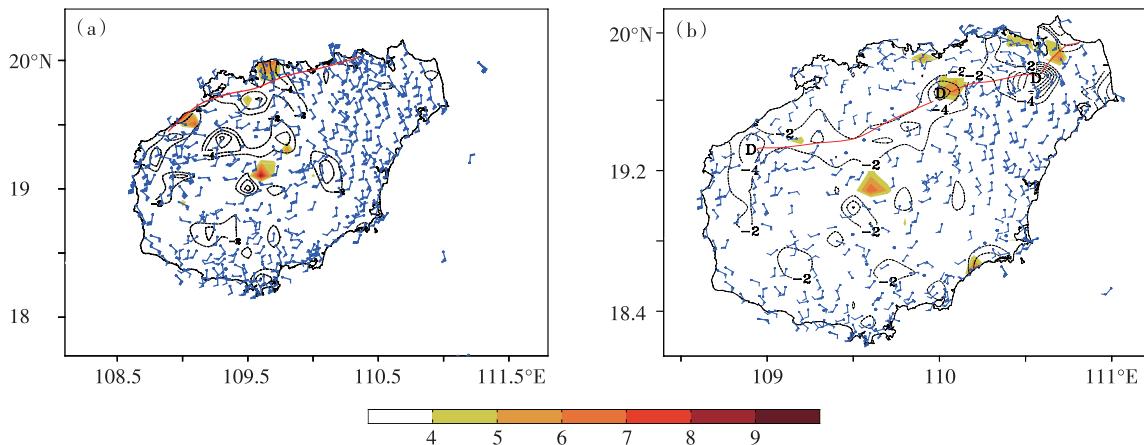


图 5 2019 年 2 月 18 日 13—14 时(a)和 17—18 时(b)海南省区域自动站极大风矢、涡度(阴影, 单位: 10^{-4} s^{-1})和散度(虚线, 单位: 10^{-4} s^{-1})(红色线为切变线)

Fig. 5 The vector of extreme gale, vorticity (shaded, unit: 10^{-4} s^{-1}) and divergence (dashed line, unit: 10^{-4} s^{-1}) during 13:00 to 14:00 (a) and 17:00 to 18:00 (b) on the 18 February 2019 at Hainan regional automatic station (the red line is the shear line)

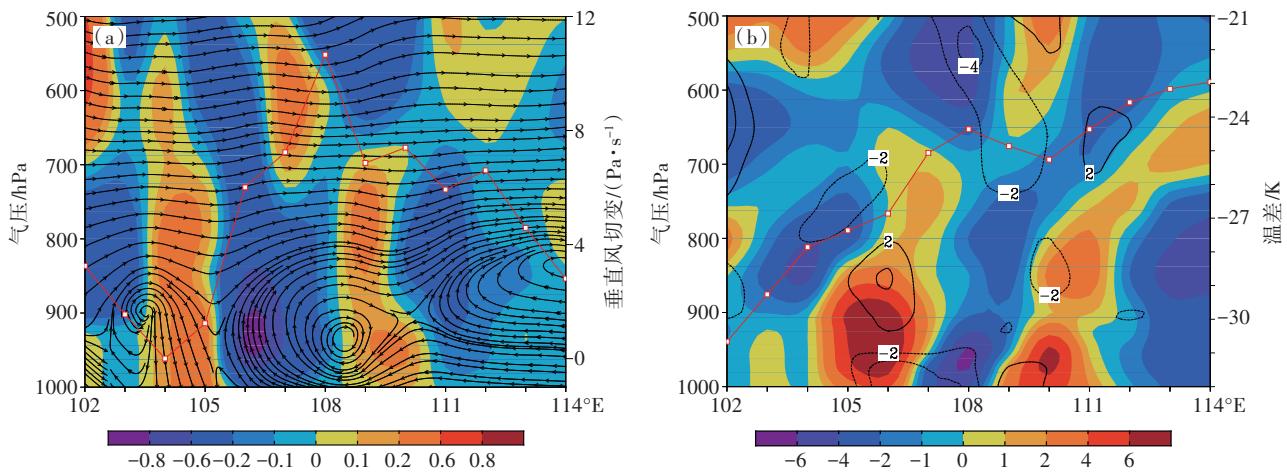


图 6 2019 年 2 月 18 日 14 时(a)流场和垂直速度(阴影, 单位: Pa/s; 红色折线为 900—1 000 hPa 垂直风切变)沿 20°N 的垂直剖面、(b)涡度(阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1})和散度(虚实线, 单位: 10^{-5} s^{-1})沿 20°N 的垂直剖面(红色折线为 500—850 hPa 温度差)

Fig. 6 Vertical section of flow field and vertical velocity (a, shaded, unit: Pa / s) along 20 °N at 14:00 on February 18, 2019 (the red broken line is 900 – 1 000 hPa vertical wind shear), (b) vertical section of vorticity (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) and divergence (virtual real line, unit: 10^{-5} s^{-1}) along 20 °N (the red broken line is 500 – 850 hPa temperature difference)

风, 加强边界层切变线附近区域的辐合抬升, 于 108°E 上升后汇入南支槽中层西风带在 110°E 下沉, 形成一个低层的次级环流, 同时下沉区也配合正涡度中心。为进一步揭示对流的发展机制, 根据涡度收支方程, 对下沉区配合出现的正涡度进行诊断, 计算涡度收支的方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{V}\zeta - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - (f + \zeta) \nabla \cdot \vec{V} - \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + Z \quad (1)$$

式中, ζ 是 p 坐标中的相对涡度, 左端是相对涡度的局地变化; $-\nabla \cdot \vec{V}\zeta$ 是相对涡度的水平平流项; $-\omega \frac{\partial \zeta}{\partial p}$ 是垂直输送项; $-(f + \zeta) \nabla \cdot \vec{V}$ 为涡度的散度输送项; $-\left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} \right)$ 为倾侧项; Z 作为余项, 不计入考虑。

图 7 给出了 2019 年 2 月 18 日 14 时 (20°N , 110°E) 的涡度收支。分析表明, (20°N , 110°E) 附近区域 850 hPa 高度层以下涡度变化的主要贡献来源于散度项和倾侧项, 850 hPa 高度层以上涡度变化的主要贡献则来源于散度项, 说明低层对流的发展除与南支槽东移带来大尺度的动力发展外, 还与垂直风切变产生的低层水平涡度管对垂直涡度的转换有关。

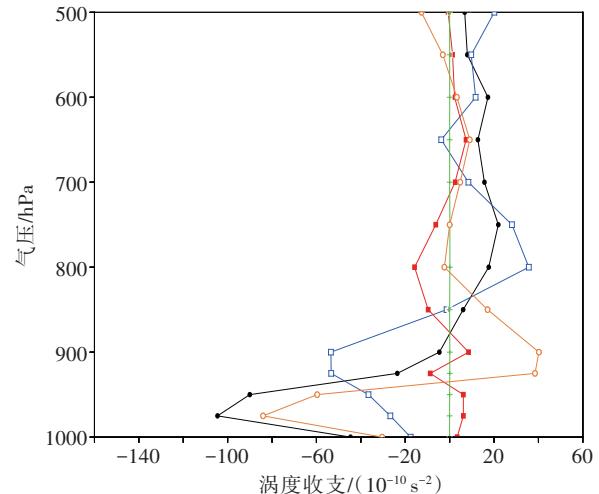


图 7 2019 年 2 月 18 日 14 时($20^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E}$)涡度收支(黑色折线表示涡度方程右侧总和, 红色折线表示相对涡度平流项, 绿色表示涡度垂直输送项, 蓝色表示散度项, 黄色表示倾侧项(单位: 10^{-10} s^{-2}))

Fig. 7 Vorticity budget ($20^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E}$) at 14:00 on February 18, 2019 (the black curve represents the sum on the right side of the vorticity equation, the red curve represents the relative vorticity advection term, the green represents the vorticity vertical transport term, the blue represents the divergence term, and the yellow represents the tilting term (unit: 10^{-10} s^{-2}))

进一步对前几个时次的物理量特征进行对比(图略),发现在海南岛由海陆温度高低的日夜交替带来的海陆风,常常伴随与背景风场辐合上升、辐散下沉的近地面次级环流,使大气具有较强的边界层垂直风切变,水平风场在垂直方向上的不均匀分布,为垂直涡度的发展提供可能,但前期由于没有动力系统的相互作用,边界层垂直风切变较弱,在龙卷发生前 36 h,由 9 m/s 逐渐增加到 12 m/s、16 m/s 直至 20 m/s。综上,南支槽东移过程中,槽前西风汇入海风,与近地面背景风相对,不断补充加强边界层辐合线上的次级环流,伴随增强的边界层垂直风切变造成水平涡度管对垂直涡度的正输送,直至形成具有若干中 β 尺度涡旋的气旋族,可能由于南支槽本身扫过海南岛部分的对流带强度比较弱,移速比较快,没有充分对流发展的时间,仅在近地面形成较强的垂直风切变,这可能是仅在局地强辐合上升区产生龙卷,而没有大范围造成大风的原因。

4 EC 模式预报检验

预报员当天主要通过实况场以及各类模式产品把握天气形势,业内准确率较高的是欧洲中心的预报产品。欧洲中心 18 日 08 时起报 14 时的海南岛湿度整体较差,北部地区无明显降水中心,与实况比较一致,但 10 m—500 hPa 与 10 m—900 hPa 垂直风切变较大值均位于雷州半岛东部海面;20 时的海南岛湿度转好,垂直不稳定中心东移并大范围减弱,海南岛北部地区 6 h 累积降水仅达小到中雨量级,降水中心明显位于雷州半岛。

模式较准确地预报了对流发生的时间,但对流强盛区域预报在雷州半岛及其附近海面;海南北部地区不够大的相对湿度以及较小的累积降水量,可排除强降水天气过程;雷州半岛东部海面 10 m—500 hPa 垂直风切变达 28 m/s,近地面垂直风切变达到 12 m/s,但距离海南北部地区较远,在实际预报中,可能预测对流带经过海南将带来局地雷雨大风天气,但对此次龙卷提前预报起到的作用很小。

5 结 论

文中利用常规高空地面资料、海南省区域加密观测资料、NCEP 再分析资料、海口多普勒雷达、风云 2G 高分辨可见光云图和欧洲中心预报场等资料,对 2019 年 2 月 18 日发生在海口的一次 EF1 级龙卷进行分析,得出以下结论:

1) 这次龙卷发生在副高较弱,高纬度冷涡建

立、华南地区高层辐散低层辐合的大背景下。中层弱冷平流叠加在低层露点锋前的暖湿西南气流上,增强了大气层结的条件不稳定。为此次强对流天气过程提供大尺度动力条件。

2) 南支槽东移在海南岛北部地区生成的对流带,前期径向速度图呈辐合速度带,在东移发展过程中,南半部变短变粗,逐步转变为辐合速度带,继而气旋式旋转的辐合速度带,最后发展成伴有中气旋的微型超级单体,并持续两个体扫。该超级单体对流强盛高度仅 3 km,回波顶高 5 km,回波悬垂内部显示低层辐合、高层辐散的风暴结构。风廓线产品在近地面有“偏南风—东南风—偏东风”的转变,风速增强,0—1 km 垂直风切变增大为龙卷的预警有一定作用。反射率因子最大值所在区域大约为零度层高度的一半,符合引发龙卷的环境特征。

3) 进一步分析对流的形成机制,南支槽槽前西风汇入海风,与近地面背景风相对,不断补充加强边界层切变线上的次级环流,伴随增强的边界层垂直风切变造成水平涡度管对垂直涡度的正输送,直至在海南岛北部形成具有若干中 β 尺度涡旋的边界层切变线,辐合达到最强,龙卷出现,可能由于南支槽本身扫过海南岛部分的对流带强度比较弱,上升气流高度较低,移速又较快,没有充分发展对流的时间,仅在近地面形成较强的垂直风切变,这可能是仅在局地强辐合上升区产生龙卷,而没有大范围造成大风的原因。

实际工作中,模式对天气系统的推算和主要降水落区的预测有不可替代的指导作用,但对于复杂多样的强对流天气形式,仍需要更准确地捕捉天气系统,在临近预报中,此类微型超级单体风速切变较弱不能实时被识别中气旋和龙卷,更增加了预报难度,需要更多的学者加以研究。

参 考 文 献 (References)

- 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.
- Burgess D W, Lee R R, Parker S S, et al, 1995. A study of mini supercells observed by WSR-88D radars [C]. //Preprints, 27th Conf. on Radar Meteorology, San Antonio: Amer Meteor, 4-6.
- 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.
- 范雯杰,俞小鼎,2015.中国龙卷的实况分布特征[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)
- 费海燕,周小刚,王秀明,2016.多普勒雷达中气旋判据及算法的发展与应用[J].气象科技进展,6(5):24-29. Fei H Y, Zhou X G, Wang X M, 2016. The development and application of Doppler radar mesocyclone criterion and algorithm[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(5):24-29.(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,35(3):416-424. Li C L, Yan L J, Li Z H, et al, 2016. Analysis of typhoon Mujigae in 2015[J]. J Trop Meteor, 5(3):416-424. (in Chinese)
- Kennedy P C, Westcott N E, Scott R W, 1993. Single doppler radar observations of a mini-supercell tornadic thunderstorm[J]. Mon Wea Rev, 121(6):1860-1870.
- Suzuki O H, Hiino H O, Nirasawa H, 2000. Tornado producing mini supercells associated with Typhoon 9019[J]. Mon Wea Rev, 128:1868-1882.
- 魏文秀,赵亚民,1995.中国龙卷风的若干特征[J].气象,21(5):36-40. Wei W X, Zhao Y M, 1995. The characteristics of tornadoes in China[J]. Meteor Mon, 21(5):36-40.(in Chinese)
- 吴风波,李岩松,苏丽蓉,2016.2014年春季华南地区两次强对流天气过程对比分析[J].气象与减灾研究,32(3):179-189. Wu F B, Li Y S, Su L R, 2016. Comparative analysis of two severe convective weather processes in southern China area[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 32(3):179-189. (in Chinese)
- 郑峰,钟建锋,张灵杰,2012.超强台风“圣帕”引发温州类龙卷的特征分析[J].高原气象,31(1):231-238. Zheng F, Zhong J F, Zhang L J, 2012. Analysis on a severe storm of Wenzhou similar tornado in the outer-region of the super typhoon “Sepat”[J]. Plateau Meteor, 31(1):231-238.(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 J, et al, 2017. Analysis on a severe tornado process in Hainan triggered by supercell[J]. Meteor Mon, 43(6):675-685. (in Chinese)
- 植江玲,张伟强,黄先香,2019.“山竹”(1822)台风外围佛山强龙卷天气过程观测分析[J].气象与减灾研究,42(2):251-260. Zhi J L, Zhang W Q, Huang X X, 2019. Analysis of tornado weather process of No.1822 Typhoon “Mangkhut”[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 42(2):251-260.(in Chinese)