

张楠,杨晓君,林晓萌,等,2020.线状对流中 EF3 级强龙卷的多尺度机理研究[J].气象,46(7):873-884. Zhang N, Yang X J, Lin X M, et al, 2020. Multi-scale mechanisms of EF3 tornado in linear convection[J]. Meteor Mon, 46(7):873-884(in Chinese).

## 线状对流中 EF3 级强龙卷的多尺度机理研究\*

张楠<sup>1</sup> 杨晓君<sup>1</sup> 林晓萌<sup>1</sup> 李彩玲<sup>2</sup> 王莹<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 天津市气象台,天津 300074

<sup>2</sup> 广东省佛山市龙卷风研究中心,佛山 528000

**提 要:** 利用 NCEP 再分析资料、地面观测资料、多普勒雷达资料、风廓线雷达资料、FY-4A 卫星资料、雷达变分同化分析系统输出的高分辨率分析场资料对 2018 年 8 月 13 日 17:30 发生在天津静海地区的 EF3 级强龙卷过程进行分析,结果表明:此次过程为发生在线状对流中的强龙卷,且引发龙卷的对流风暴不具备超级单体风暴典型特征,龙卷形成后,在涡旋不断加强的基础上,旋转中心不断下降,且 TVS 的伸展厚度不断增大。两个线状对流之间新单体的形成发展促使了线状对流的合并,新生对流单体强回波接地时间与龙卷的发生时间有较好的对应关系。在龙卷发生前 20 min,分别位于两条边界层辐合线北侧和西侧的偏北风和前方入流的偏东风构成了中低压的辐合旋转流场,当雷暴出流与龙卷发生地的局地风垂直切变中心(在 180 m 高度可达  $90 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )相遇,辐合线上水平分布极不均匀的上升运动迫使水平涡管倾斜,加强了垂直涡度,涡管在垂直方向上被拉伸,根据角动量守恒,旋转加强形成龙卷母体涡旋,因此,发生在线状对流中的强龙卷虽然在对流模态上与超级单体龙卷不同,但龙卷母体涡旋形成的物理机理是一致的。

**关键词:** 龙卷母体涡旋,辐合旋转流场,冷池,垂直切变,角动量守恒

**中图分类号:** P425, P445

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.07.001

## Multi-Scale Mechanisms of EF3 Tornado in Linear Convection

ZHANG Nan<sup>1</sup> YANG Xiaojun<sup>1</sup> LIN Xiaomeng<sup>1</sup> LI Cailing<sup>2</sup> WANG Ying<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

<sup>2</sup> Foshan Tornado Research Center of Guangdong Province, Foshan 528000

**Abstract:** Based on NCEP reanalysis data, surface observation data, Doppler radar data, wind profiler radar data, FY-4A satellite data and VDRAS data, the EF3 tornado event that occurred in Jinghai Area of Tianjin at 17:30 BT 13 August 2018 was analyzed. The results show that this tornado process was a strong tornado occurring in linear convection, and the convective storm causing tornado did not have the typical characteristics of supercell storm. After the formation of the tornado, on the basis of the continuous enhancement of the vortices, the center of rotation was declining, and the extension thickness of TVS was increasing. The formation and development of new convections between two linear convections promoted the merger of linear convections. There was a good correspondence between the grounding time of strong echoes of new convection and the occurrence time of the tornado. Twenty minutes before the tornado, the northerly wind on the north and west sides of the two convergence lines in boundary layers and the easterly wind constituted the convergent rotating flow field of the mesoscale low pressure. When the thunderstorm outflow met the local vertical shear center (up to  $90 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  at the height of 180 meters), the uneven upward motion along the convergence line forced the horizontal vortex tube to tilt, forming a vertical

\* 国家自然科学基金项目(41675046、41575049)、天津市自然科学基金青年项目(18JJCQNJC09300)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-009、CMAYBY2020-008、CMAYBY2018-005)、“天津市气象局数值预报创新团队”和“天津市气象局气象预报预警创新团队”共同资助

2019 年 7 月 11 日收稿; 2020 年 5 月 28 日收修定稿

第一作者:张楠,主要从事暴雨等强对流天气中尺度机制研究. E-mail: nanzhangnanzhang@163.com

vortex tube and being stretched in the vertical direction. According to the law of conservation of angular momentum, the strong tornado parent vortex was caused by the intensification of rotation. Thus, although the convective mode of non-supercell tornado in linear convection is different from that of supercell tornado, the physical mechanism of tornado parent vortex formation is the same.

**Key words:** tornado parent vortex, convergent rotating flow field, cold pool, vertical shear, conservation of angular momentum

## 引 言

龙卷是最猛烈的大气对流现象,是一种伴随着猛烈旋转的、由雷暴云底伸展到地面的漏斗状小尺度涡旋,直径一般从几十米到几百米,影响范围虽小,但破坏力极大(Bates, 1968; Fujita, 1971; Brown et al, 1978; Doswell III, 2001; Davies-Jones et al, 2001),可造成严重人员伤亡和损失。龙卷包括超级单体龙卷和非超级单体龙卷(Browning and Foote, 1976; Fujita, 1987)。超级单体龙卷由超级单体风暴产生,通常与中气旋相联系。Fujita(1963)首次提出中气旋的概念,即在速度图上表现为沿方位角方向相隔不远的正负速度对,其尺度通常小于 10 km。在 0~1 km 风切变较大和抬升凝结高度较低的环境下,持续的中气旋容易诱发龙卷发生(Ray et al, 1975; Lemon and Doswell III, 1979; Moller et al, 1994; Doswell III and Burgess, 1993; Craven and Brooks, 2004)。国内学者也分析表明典型的超级单体龙卷一般都发生在强垂直风切变环境下,强烈的垂直不稳定、较低的抬升凝结高度、中高层强垂直风切变都有利于强龙卷的发生,并对其中尺度特征进行了大量的研究(俞小鼎等, 2008; 陈永林, 2000; 郑媛媛等, 2009; 吴芳芳等, 2012; 张小玲等, 2016; 周海光, 2018; 周后福等, 2014; 李兆慧等, 2017; 黄先香等, 2019a; 2019b)。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(郑艳等, 2017)。但是,并非所有引发龙卷的对流风暴都具备超级单体风暴典型特征,此类龙卷通常与非超级单体风暴相联系, Wakimoto and Wilson(1989)将其生命史分为三个阶段,一是生成阶段,小涡旋首先在云底下方辐合边界的切变区得以发展,随着上升气流的发展,涡旋沿切变带移动;二是成熟阶段,小涡旋由上升气流拉伸时,旋转运动得到进一步发展;三是消亡阶段,降水形成

下落,诱发涡旋内下沉气流,使得龙卷减弱,其发生发展与浅薄的、尺度较小的低层涡旋气流有关(Bruce and Robert, 1997),且与边界层辐合切变线密切相关(郑媛媛等, 2004),为了提升其预报预警能力,刁秀广等(2014)对山东境内 6 个非超级单体龙卷风暴特征进行分析表明,低层大的湿度和 0~1 km 垂直风切变 $\geq 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 是非超级单体龙卷发生的有利条件,单体的迅猛发展,特别是风暴顶部迅速增高,对非超级单体龙卷的预警有一定的指示意义。徐学义等(2014)通过对山东境内三次非超级单体龙卷风暴研究发现,低层湿度大、低层明显的垂直风切变和有利的地形是三次非超级单体龙卷发生的有利条件,上升气流的加强和复杂的地形是诱发小尺度强切变的主因。由于非超级单体可以产生在各种利于对流风暴产生的环境下(马中元等, 2011; 周宏伟等, 2011),有的发生在弱的风垂直切变环境条件,而有的则发生在强的风垂直切变条件下(俞小鼎等, 2006a),因此对该类龙卷的预警非常困难。

2018 年 8 月 13 日 17:30 天津静海地区发生 EF3 级强龙卷。该过程属于发生在线状对流中的强龙卷,且引发龙卷的对流风暴不具备超级单体风暴典型特征(具体分析详见正文), Gallus et al(2008)和 Duda and Gallus(2010)的研究指出,美国大平原及密西西比河上游和中游的龙卷有 35% 是准线状对流。徐学义等(2014)和刁秀广等(2014)研究的非超级单体龙卷风暴中有多个也发生在线状对流中,但其研究多集中在龙卷发生的环境条件以及临近预警指标,然而龙卷是一个多尺度的复杂系统,其中包含从数十米到数十千米的多种尺度结构,对于发生在线状对流中的强龙卷的多尺度机制目前尚无比较系统的分析。因此本文综合利用 NECP 再分析资料、地面观测资料、多普勒雷达资料、风廓线雷达资料、FY-4 可见光云图资料、VDRAS 资料对 2018 年 8 月 13 日 17:30 发生在静海地区的线状对流中强龙卷过程进行多尺度机制研究,以期增强对龙卷对

流模态多样性的理解。

## 1 资料介绍

(1)美国大气环境中心(NCEP)提供的全球分析资料(final operational global analysis,以下简称“FNL”资料),时间间隔为6 h(00、06、12和18 UTC),水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,垂直方向分层31层,该资料用于分析龙卷发生的环流背景。

(2)地面观测资料:采用加密观测资料,时间分辨率为1 h,要素包括降水、风、露点温度、气温等,该资料用于分析龙卷发生的近地面层中尺度环境,距离龙卷发生地最近的测站(静海站)位置已在图1中标明。

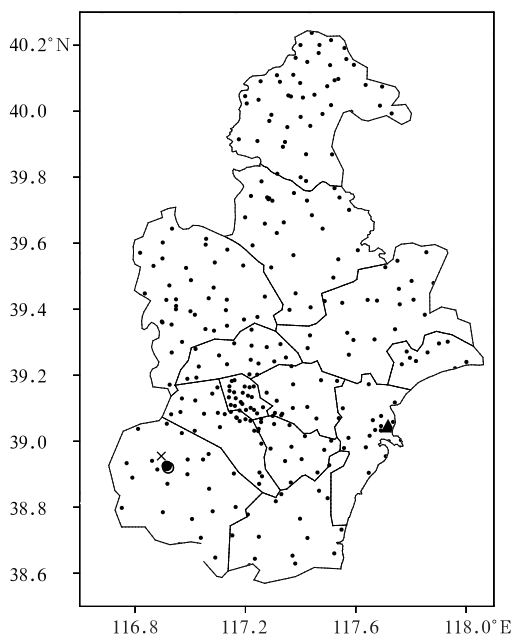


图1 2018年8月13日EF3级龙卷发生地和相关测站位置分布

(叉号:龙卷发生地位置,实心圆:静海风廓线位置,空心圆:静海观测站位置,三角:塘沽雷达位置,小圆点:天津自动气象站)

Fig. 1 Location distribution of EF3 tornado occurrence on 13 August 2018 and related stations

(fork: location of tornado, solid circle: location of wind profile in Jinghai, hollow circle: location of Jinghai Observatory, triangle: position of Tanggu Radar, dot: location of Tianjin automatic weather stations)

(3)雷达资料:风廓线雷达位于天津静海观测站,其位置如图1所示,该资料用于分析天津静海上空的风场随时间变化;塘沽S波段多普勒雷达位置如图1所示,该资料用于分析龙卷发生地的回波特征和径向速度特征。

(4)FY-4A可见光云图资料:来源于国家卫星气象中心官网(<http://www.nsmc.org.cn/NSMC/Home/Index.html>),该资料用于分析龙卷发生前对流云的演变。

(5)Variational Doppler Radar Analysis System (VDRAS)资料:该系统为北京城市气象研究院研发,通过快速刷新四维同化技术和三维数值云模式,实时同化京津冀地区多部新一代天气雷达资料(反射率因子和径向速度),同时融合京津冀区域5 min地面自动站观测资料和BJ-RUC v2.0数值模式结果,分析输出低层的动力场和热力场,以及与之相关的解释应用产品。其中,系统的三维云模式采用考虑温度冷却影响的暖雨参数化方案,该资料为非静力模式输出资料。该系统资料水平分辨率为5 km,同化京津冀6部雷达资料:范围为 $550 \text{ km} \times 550 \text{ km}$ ,覆盖京津冀大部分地区,垂直分辨率为400 m,时间分辨率为18 min,该资料可用于分析龙卷母体涡旋发生地上空的动力、热力结构。

## 2 天气实况

2018年8月13日17:30左右,天津静海地区出现龙卷风天气,龙卷过后有局地短时强降水、短时大风天气,龙卷破坏力极强,所到之处使农作物倒伏、房屋倒塌、水泥钢筋电线杆折断、汽车被卷起,致使静海区部分乡镇厂房、民房、农业等遭受损坏。龙卷移动路线为静海区静海镇的魏家庄村—北五里村—西五里村到梁头镇,自东北向西南移动。路径长度为5 km左右,宽度几米至百米以上,致灾过程持续时间大约为15 min。8月14日,国家气象中心、中国气象科学研究院、天津市气象局、天津市静海区气象局等4个单位的专家对此次龙卷过程进行现场勘查和灾情调查,依据多普勒天气雷达资料及现场灾情调查结果,现场专家鉴定此次过程最强等级为EF3级龙卷。根据天津自动站统计特征(图2a),8月13日17—18时,在天津龙卷发生地以北地区出现了局地以短时强降水为主的强对流天气,同时伴

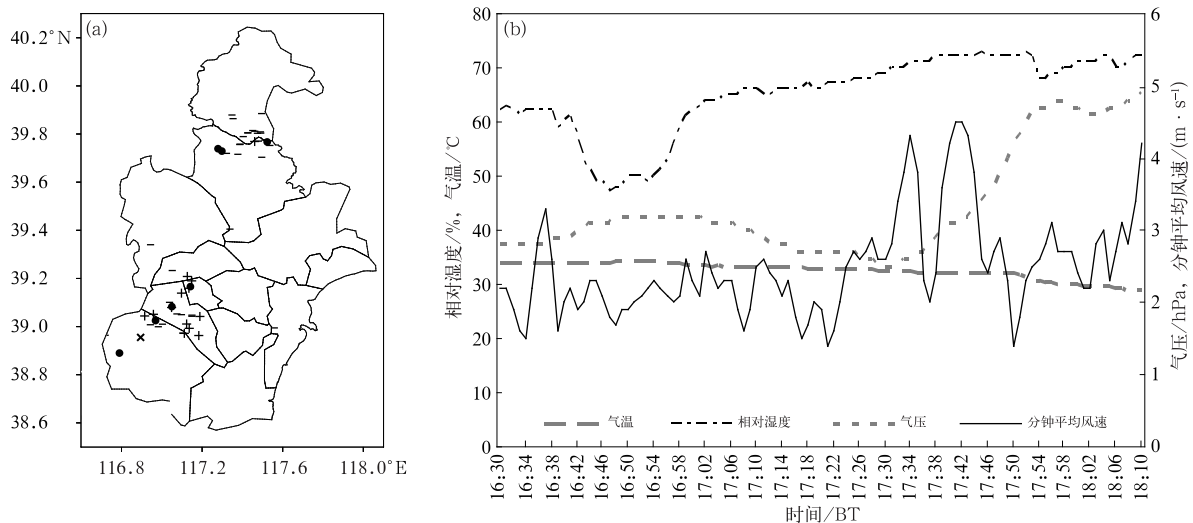


图 2 2018 年 8 月 13 日 (a) 17:00—18:00 天津强对流天气业务监测图

(“+”: 正闪, “-”: 负闪, 实心圆: 发生  $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的短时强降水, 叉号: 龙卷发生地位置);

(b) 16:30—18:10 天津静海观测站气压、气温、相对湿度、分钟平均风速逐分钟演变

Fig. 2 (a) Operational monitoring map of strong convective weather in North China in 17:00—18:00 BT 13 August 2018, (b) air pressure, air temperature, relative humidity and minutely mean wind speed at Jinghai Observatory evolving with time from 16:30 BT to 18:10 BT 13 August 2018

(In Fig. 2a, lightning activities are represented by ‘+’ and ‘-’, solid circle represents short-time heavy precipitation  $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , fork is the location of tornado occurrence)

随闪电活动。从距离龙卷发生地最近的静海观测站(具体位置见图 1)要素的逐分钟演变(图 2b)来看, 16:53—17:03 相对湿度迅速上升, 从 50% 上升到 64%, 随后缓慢上升, 17:30 (龙卷发生时) 上升至 69%, 在龙卷发生后, 仍呈缓慢上升态势, 17:53 达到最大, 为 73%。地面气压在 17:01 时开始下降, 于 17:30 (龙卷发生时) 降到最低, 从 1003.2 hPa 下降到 1002.5 hPa, 下降幅度仅为 0.7 hPa, 逐分钟风场在龙卷发生后两次达到峰值, 分别为  $4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (17:34) 和  $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (17:42), 虽然静海观测站距离龙卷发生地仅为 4 km, 但从其探测到的气压降幅以及风力大小来看, 静海观测站只能分析出龙卷发生时要素变化趋势, 并未能真正探测到龙卷过程中的要素变化特征, 因此仍需要综合其他多种观测资料进行分析。

### 3 环流背景分析

典型的暴雨天气背景, 台风和冷涡背景是我国龙卷最易发生的三类天气条件(姚叶青等, 2012; 王秀明等, 2015)。2018 年 8 月 13 日正值华北主汛期, 13 日 14 时, 500 hPa 上(图 3a), 副热带高压(以下简

称副高)脊线在  $37^\circ \text{N}$  左右, 天津地区位于副高西北侧, 受西南气流控制, 有利于水汽输送, 且此时正值台风摩羯北上, 在 850 hPa 上(图 3b)与副高相互作用形成东南急流, 风速最大达到  $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与副高西北侧的西南气流在华北东部交汇, 在 200 hPa 上(图 3c), 天津位于急流入口区, 为明显的风速辐散区, 低层辐合、高层辐散, 且具有充足的水汽供应, 是华北地区典型暴雨过程天气形势。

探空站观测通常能代表站点周围 100~200 km 范围的大气状态。根据距离天津 120 km 的北京站 8 月 13 日 14 时探空分析(图 3d), 在龙卷发生前, 大气处于较强的条件性不稳定状态, CAPE 值达到  $1832 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 对流抑制能量仅为  $0.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 自由对流高度和抬升凝结高度都很低, 分别为 945.5、970.7 hPa。0~1.5 和 0~6 km 垂直切变分别为 8、15  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 吴芳芳等(2013)的统计研究表明, 苏北产生龙卷, 特别是 F2 级以上强龙卷对应的 0~1 km 风切变为 6~19  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 89% 的龙卷发生前环境探空 CAPE 达到  $1300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  及以上。由此可见, 8 月 13 日静海附近满足龙卷发生的环境条件, 但对于强龙卷, 其低层的垂直风切变条件还相对较弱。

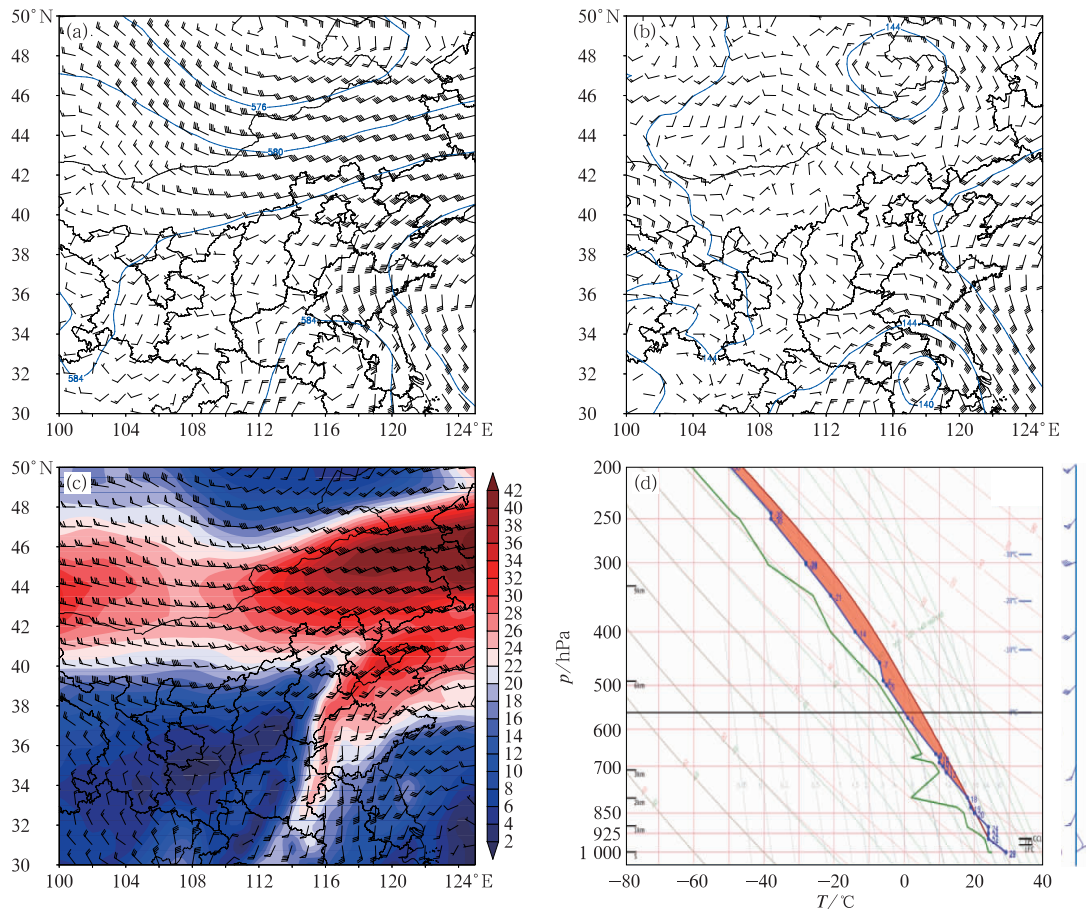


图 3 2018 年 8 月 13 日 14 时 (a)500 hPa, (b)850 hPa 位势高度场(等值线,单位: dagpm)、风场(风羽), (c)200 hPa 风速(填色,单位:  $m \cdot s^{-1}$ )、风场(风羽), (d)北京探空图  
(图 3a~3c 基于 NCEP 再分析资料绘制,图 3d 基于北京探空观测资料绘制)

Fig. 3 Geopotential height field (contour, unit: dagpm) and wind field (barb) at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa, (c) wind speed (colored, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) and wind field (barb) at 200 hPa, (d) Beijing sounding at 14:00 BT 13 August 2018

(Figs. 3a–3c based on NCEP reanalysis data and Fig. 3d based on Beijing sounding data)

## 4 对流系统演变特征分析

### 4.1 径向速度特征

在我国有不少 EF2 级以上的龙卷具有超级单体风暴的雷达气象学特征(郑媛媛等,2009;俞小鼎等,2006b;姚叶青等,2012),Brown et al(1978)对超级单体风暴概念进行了修正,强调超级单体是具有深厚中气旋的对流单体。超级单体龙卷通常在雷达上能观测到中气旋,有时还能在雷达径向速度上观测到比中气旋更小、旋转更快的 TVS,此次产生龙卷的对流单体是否具有这样的特征,本文将利用多

普勒雷达径向速度资料进行诊断分析。

通过对塘沽雷达(距离龙卷发生地 71.9 km)径向速度图进行分析发现,在 17:30 和 17:36 两个体扫时间可探测到中涡旋(图 4)。龙卷发生时(17:30),在  $0.5^\circ$  仰角径向速度图(图 4a)上可以看出,在龙卷发生地上空(约 1.1 km 高度)可探测到中涡旋,具有速度切变,相邻像素点的正负速度差为  $15 m \cdot s^{-1}$ ,在  $1.5^\circ$  仰角(约 2.4 km 高度)径向速度图(图 4c)上也可探测到中涡旋,具有较强的切变特征,相邻方位角的速度差达到  $22 m \cdot s^{-1}$ ,PUP 产品在速度切变区可以识别出 TVS,最大速度差位于 2.4 km 高度,TVS 的伸展厚度为 4.7 km(表 1)。17:36,  $0.5^\circ$  仰角的径向速度图上(图 4b),龙卷发生



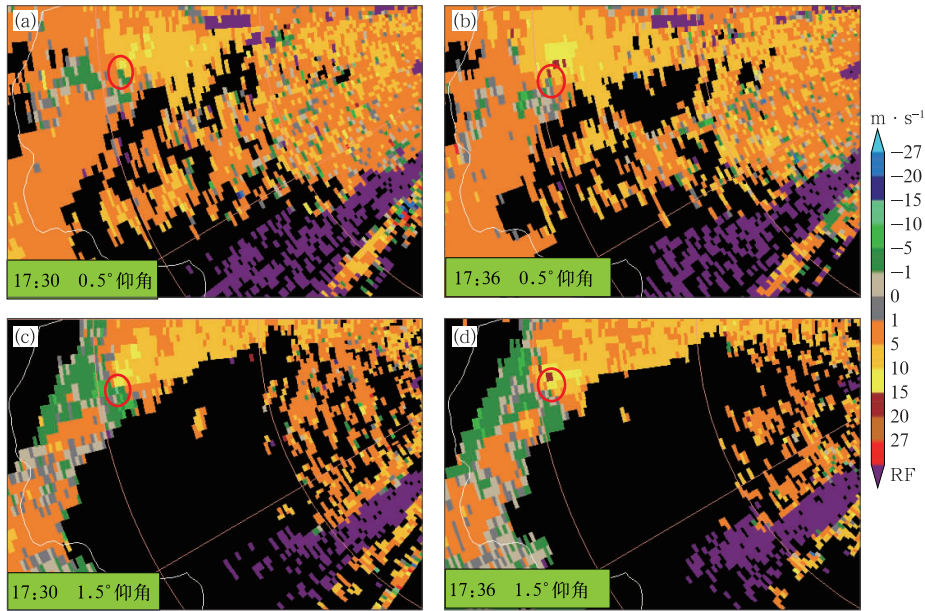


图 4 2018 年 8 月 13 日天津塘沽多普勒雷达(a,b)0.5°仰角,(c,d)1.5°仰角  
(a,c)17:30 和(b,d)17:36 径向速度  
(红色圆圈:速度切变区位置)

Fig. 4 Radial velocity maps of (a, b) 0.5° and (c, d) 1.5° elevations at (a, c) 17:30 BT,  
(b, d) 17:36 BT 13 August 2018 based on Tanggu Doppler Radar  
(red circle; position of velocity shear zone)

地上空(约 1.1 km 高度)可探测到中涡旋,具有强切变特征,相邻方位角的速度差达到  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在 1.5°仰角(约 2.4 km 高度)径向速度图(图 4d)上也可探测到中涡旋,具备速度切变,相邻方位角的速度差减小为  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 PUP 产品中可以识别出 TVS,最大速度差位于 1.1 km 高度,TVS 的伸展厚度增加至 4.9 km(表 1)。综上所述,在 17:30—17:36,中涡旋相邻方位角的最大速度差在增大,从  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而最大速度差的高度

在降低,从 2.4 km 下降到 1.1 km,说明中涡旋在旋转加强的基础上,旋转中心在下降,而伸展厚度在加大。此次过程虽然存在中涡旋,但距离龙卷发生地相对较近的天津塘沽雷达(图 4)和河北沧州雷达(图略)在整个过程中探测到的中涡旋均未达到中气旋标准,说明该次龙卷风暴不具有超级单体风暴典型特征(俞小鼎等,2006a),那么此次过程的回波形态具有怎样的特征? 如何不断发展加强并形成龙卷?

表 1 PUP 识别出的 TVS 特征参数

Table 1 TVS characteristic parameters identified by PUP

时间/BT	最大速度差/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	最大速度差所在高度/km	底高/km	顶高/km	伸展厚度/km
17:30	22	2.4	1.1	5.8	4.7
17:36	25	1.1	1.1	6.0	4.9

## 4.2 反射率因子演变特征

Grams et al(2012)在对美国强龙卷进行统计研究时,将产生 EF2 级以上的龙卷的对流模式分为三类:第一类为相对独立的单体聚集成圆形或椭圆形的离散单体,最大回波可达 50 dBz 以上;第二类为主轴长度超过 100 km 并且至少是短轴三倍且有共同前导边界以串联方式移动的准线状对流;第三类为多个单体聚集成团并且难以区分是非连续的还是

线状的簇类对流,其 40 dBz 以上回波区域范围至少为  $2500 \text{ km}^2$ 。如图 5 所示,此次天津静海 EF3 级强龙卷是发生在第二类准线状对流中。8 月 13 日 17:00(图 5a),在天津的中部地区和沧州地区各有一线状对流发展,并且两个线状对流发展在同一条直线上,但两支对流之间的静海区并没有对流发展。随后,在两支对流连线上,开始有回波发展,并逐渐增强,17:30(图 5b),南北两支线状对流相连,形成一条线状对流,此时龙卷发生。

为研究线状对流合并过程中的垂直结构,沿龙卷发生地(图 5a、5b 中蓝线)做反射率因子纬向剖面(图 5c~5f),17:00(图略),龙卷发生地还没有降水回波形成,17:12(图 5c),在龙卷发生地上空南北均有回波生成,中心强度均在 25 dBz 以上,南侧回波高度在 6~7 km 左右,且回波并未接地,北侧回波质心较低,在 3 km 左右,17:18(图 5d),龙卷发生地南侧的回波向北移动,与北侧回波合并,中心达到 40 dBz,且中心高度在 6 km 以上,此时回波主体仍在龙卷发生地北侧,17:24(图 5e),中心达到 55 dBz

以上,且中心高度仍维持在 6 km,有所南移,但回波中心仍位于龙卷发生地北侧,发生地上空大于 45 dBz 的回波还在 3 km 以上,由于龙卷发生前强盛上升气流发展的影响,发生地上空具备一定的悬垂特征;17:30(图 5f),45 dBz 以上的强回波接地,强回波中心下降到 4~5 km,此时龙卷生成。综上所述可以看出,两个线状对流通过连线上局地生成的对流系统的发展加强促使了线状对流的合并,其强回波接地时间与龙卷的发生时间有较好的对应关系。

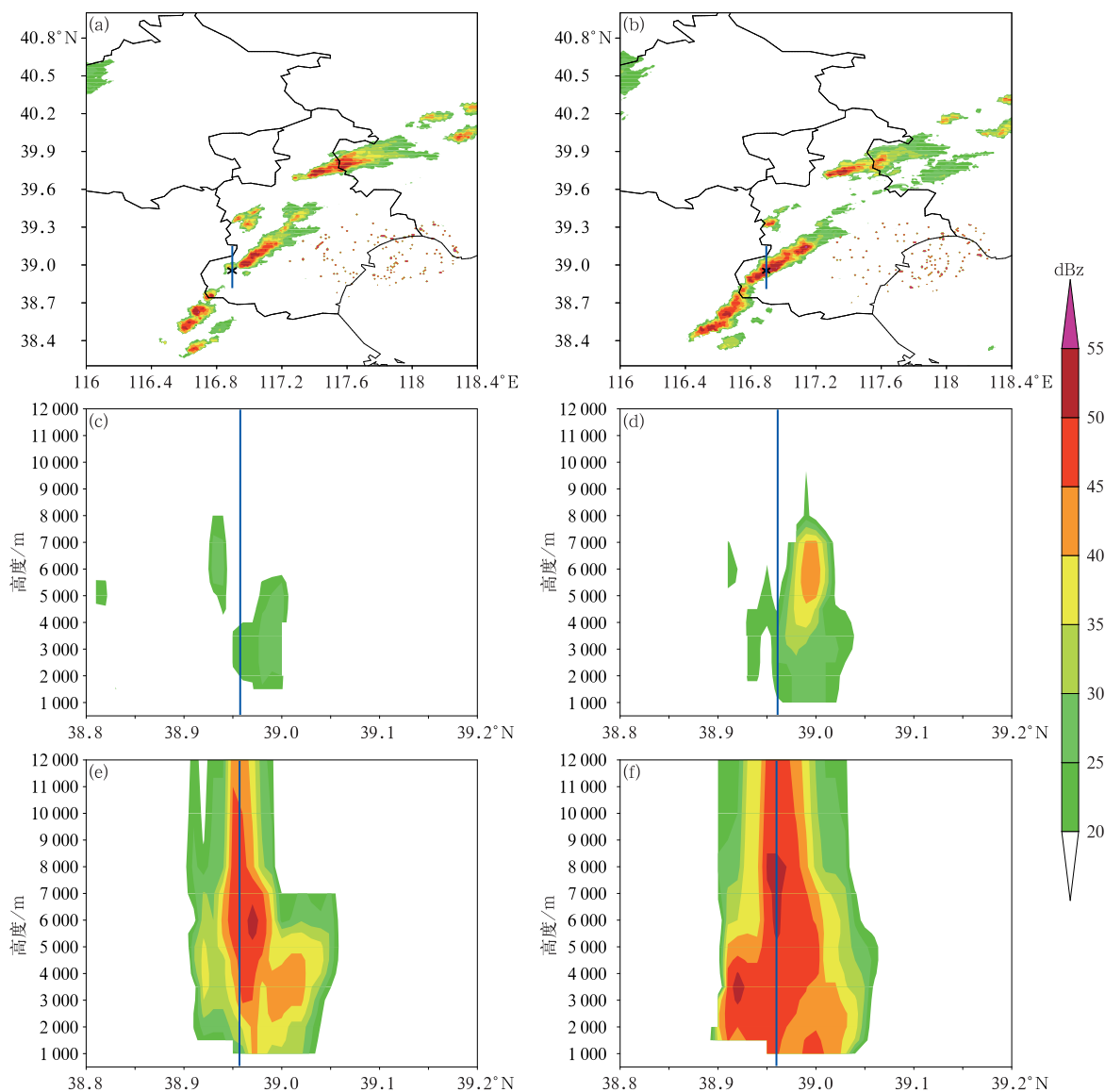


图 5 2018 年 8 月 13 日塘沽雷达(a)17:12,(b)17:30 组合反射率(填色)和(c)17:12,(d)17:18,(e)17:24,(f)17:30 沿龙卷发生地反射率纬向剖面(填色)

(图 5a、5b 中“×”代表龙卷发生地位置,蓝线代表剖面位置;图 5c~5f 中蓝线代表龙卷发生地位置)

Fig. 5 Tanggu Radar composite reflectivity (colored, unit: dBz) at (a) 17:12 BT, (b) 17:30 BT and zonal cross-sections of reflectivity (colored) along tornado at (c) 17:12 BT, (d) 17:18 BT, (e) 17:24 BT and (f) 17:30 BT 13 August 2018 (In Figs. 5a, 5b, '×' represents the location of tornado occurrence, blue line represents the section position; in Figs. 5c-5f, blue lines represent the location of tornado occurrence)

### 4.3 回波顶高

从雷达回波顶高产品中可以看出,在 17:12 之前(图 6a),龙卷发生地附近回波发展基本在 5 km 以下,17:18(图 6b),回波高度发展到 8 km,到了 17:24(龙卷发生前 6 min),如图 6c 所示,龙卷发生地的回波高度达到 12~14 km,但回波顶高中心并不在龙卷发生地上空,而在其北侧 10 km 左右,回波顶高达到 18 km,说明引发龙卷的对流云在强的垂直风切变下具有一定的倾斜结构。同时,在回波顶高中心(18 km)的相邻像素点的回波顶高仅有 8 km,在水平方向 4 km 之内,回波顶相差 10 km,说明对流的发展在水平方向的分布极其不均匀,同时这也说明对流云团所对应的上升气流强度在空间上也呈不均匀分布,且具有较大的水平梯度。

### 4.4 FY-4A 可见光云图

从雷达回波图上来看,在龙卷发生前,17:00 前

后在龙卷的发生地(两条线性对流中间)并没有明显的对生成。从 FY-4A 可见光云图上来看,在 17:00(图略),在两条线状对流之间,虽然其对流发展强度尚不如两条线状对流,但是可以看出已有暗影出现,说明对流已经有所发展。到 17:15(图 7),在可见光云图上两条线状对流已经相连,对流云团右侧的暗影也连接在一起,说明此时,龙卷发生地的对流已经发展旺盛,而从 17:18 的雷达回波(图略)来看,两条线状对流之间对流已经有所发展,但两条线状对流还没有相连,由此可以说明,应用 FY-4A 高时空分辨率云图分析对流天气的发展具有一定的提前量,具备一定的预报预警价值。

同时,从 FY-4A 可见光云图(图 7)上也可以看出,在 17:15 之后虽然对流云团及其对应的暗影已经连为一体,但在整个线状对流中,存在多个上冲云顶,说明在线状对流中各单体发展并不均匀,所对应的上升气流强度在空间上也呈不均匀分布。

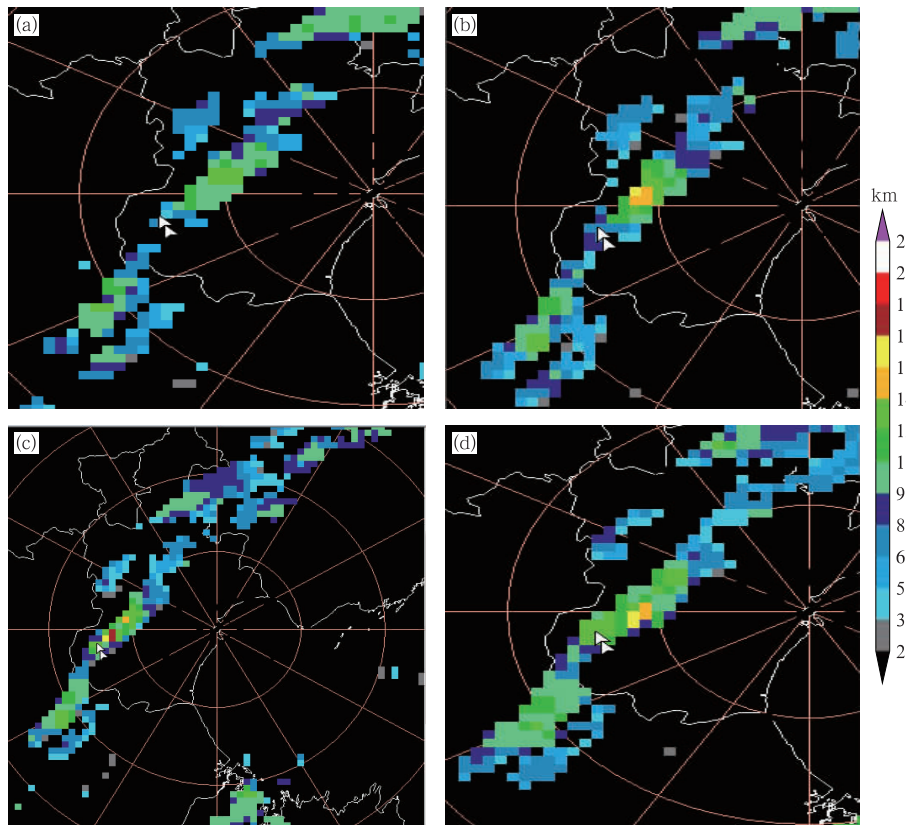


图 6 2018 年 8 月 13 日(a)17:12,(b)17:18,(c)17:24,(d)17:30 塘沽雷达回波顶高产品(填色)  
(双箭头代表龙卷发生地所在位置)

Fig. 6 The height of echo top (colored) of Tanggu Radar at (a) 17:12 BT,  
(b) 17:18 BT, (c) 17:24 BT and (d) 17:30 BT 13 August 2018  
(double arrow: the location of the tornado)



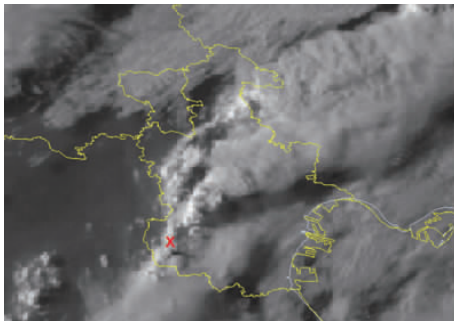


图 7 2018 年 8 月 13 日 17:15 的 FY-4A 卫星可见光云图

(红色“×”代表龙卷发生地位置)

Fig. 7 Visible channel of FY-4A satellite at 17:15 BT 13 August 2018 (Red ‘×’ represents the location of tornado occurrence)

## 5 龙卷物理机制研究

### 5.1 辐合旋转流场的建立

线状对流北侧雷暴产生的降水粒子在下沉过程中蒸发冷却, 17:00 在近地面形成冷中心(冷池)(图 8a), 强密度梯度增强了雷暴出流, 如图 9a 所示, 17:10 在北段线状对流区地面上存在三个辐散中心, 辐散中心 C 向南辐散的气流与东南风形成边界层辐合线, 在天津西侧, 偏北气流与东南风也形成一条边界层辐合线, 分别位于两条边界层辐合线北侧和西侧的偏北风和前方入流的偏东风构成了中低压的辐合旋转流场。

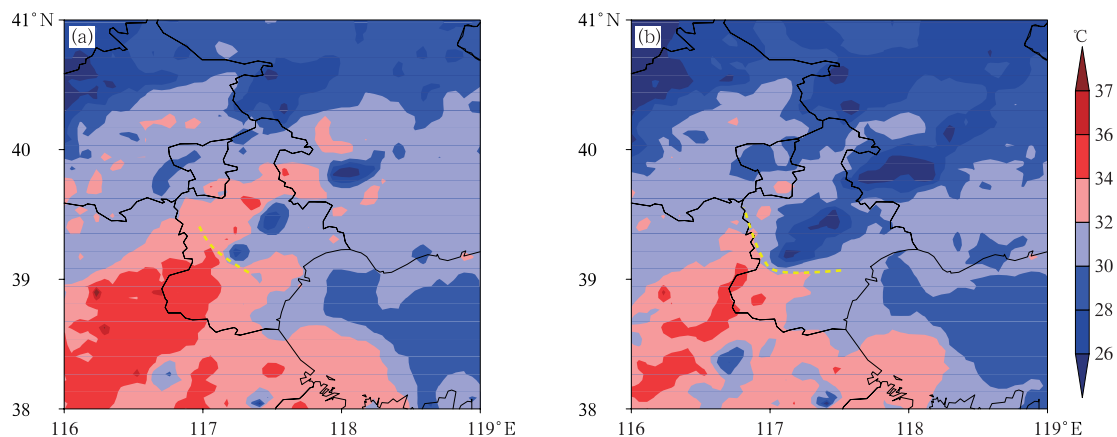


图 8 2018 年 8 月 13 日 (a) 17:00, (b) 17:30 地面自动气象站 2 m 温度分布

Fig. 8 The 2 m temperature observed by automatic weather stations at (a) 17:00 BT and (b) 17:30 BT 13 August 2018

### 5.2 旋转增强的成因分析

前文中已经基于探空资料对低层风垂直切变条件进行了分析, 但由于探空站空间分布较稀疏, 北京探空距离龙卷发生地有一定的距离, 难以较好地反映风垂直切变的真实情况。本文利用地面加密自动站资料和 VDRAS 在 1 km 高度风场资料, 计算了龙卷发生及周边地区 0~1 km 垂直风切变。如图 9a 所示, 在龙卷发生地静海前期并未发生降水天气过程, 低层强劲的东南风与 1 km 高度的西风形成了切变中心, 地面和 1 km 高度风矢量差为  $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 相当于风垂直切变达到  $7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。为了在垂直方向上获取低层更为精细的垂直切变信息, 本文还利用静海风廓线资料(垂直方向为 60 m 间隔, 时间分辨率为 3 min)计算垂直方向上各层的切变值。如图 9b 所示水平风的垂直切变中心在 180 m 高度, 达到  $90 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 折合成每千米的切变量可以达到  $90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 在边界层形成强劲的水平涡管。北侧线状对流雷暴产生的降水粒子在下沉过程中蒸发冷却, 在近地面形成冷中心(冷池)(图 8a), 强密度梯度增强了雷暴出流, 如图 9a 所示, 在北段线状对流区存在三个辐散中心, 辐散中心 C 向南辐散的气流与东南风形成辐合抬升, 沿  $39^\circ\text{N}$ (辐合线约在  $39^\circ\text{N}$  附近)做散度和垂直速度的垂直剖面(图 9c), 在雷暴出流和东南风交汇区域 1000 m 以下为辐合, 上层为辐散区, 辐散中心中心位于 2000 m 高度, 由此在地面到 3 km 高度为上升运动, 并存在四个上升运动中心, 上升运动中心的垂直速度均在  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上, 这个上升运动的诊断数值虽然不能代表真实的对流系

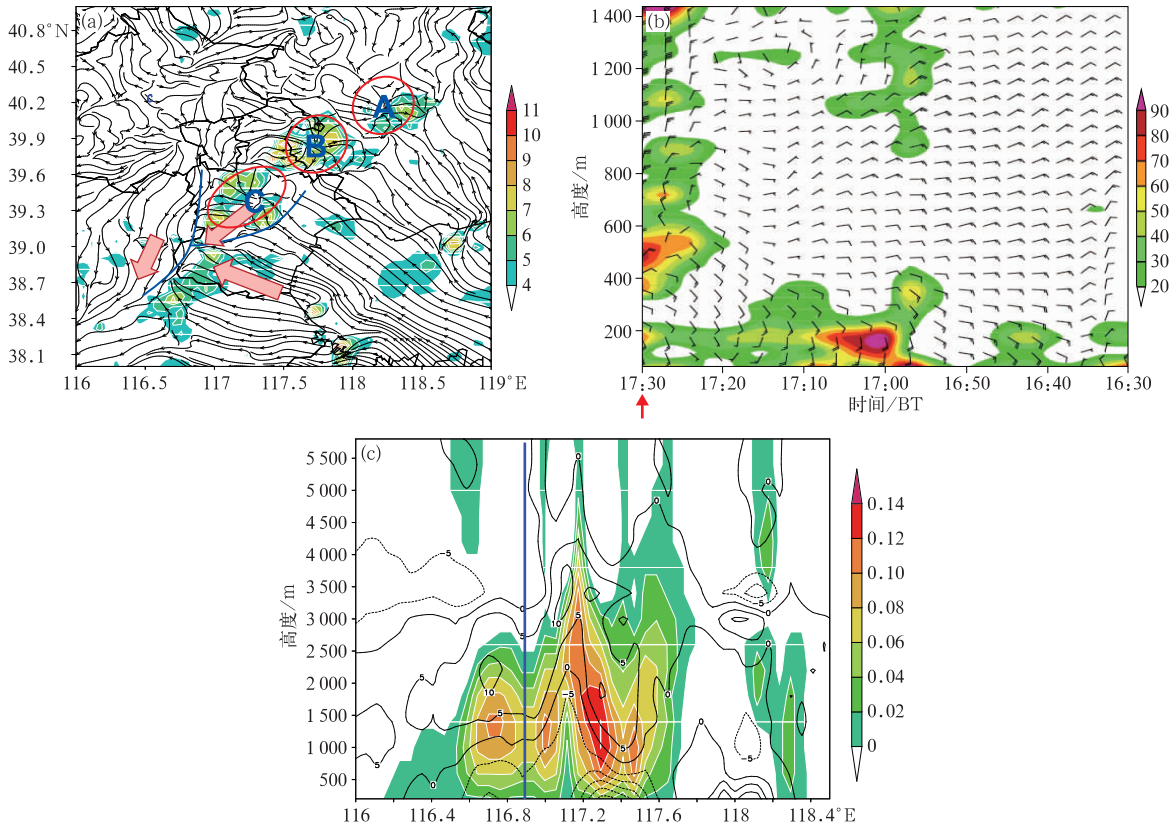


图 9 2018 年 8 月 13 日 (a)17:10 加密自动气象站风场(流线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、0~1 km 风速差值(填色,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )的空间分布,(b)16:30—17:30 静海风廓线探测风场(风向杆,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和风垂直切变(填色,单位: $10^{-3} \text{s}^{-1}$ )的时间-高度剖面,(c)17:00 基于 VDRAS 资料沿  $39^\circ\text{N}$  的散度(等值线,单位: $10^{-5} \text{s}^{-1}$ )和垂直速度(填色,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )的纬向-高度剖面

(图 9a 中地面为加密自动气象站资料,1 km 高度选择 VDRAS 风场资料,蓝色线代表辐合线,红色圆圈代表辐散中心位置;图 9b 中红色箭头代表龙卷发生时间;图 9c 中蓝色线代表龙卷发生位置)

Fig. 9 (a) Wind field (stream, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of automatic weather station, difference of 0–1 km wind speed (colored, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 17:10 BT 13; (b) time-height cross-section of wind field (barb, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and vertical shear of horizontal wind (colored, unit:  $10^{-3} \text{s}^{-1}$ ) based on wind profiler in Jinghai from 16:30 BT to 17:30 BT 13; (c) cross-sections of divergence (contour, unit:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ ) and vertical speed (colored, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) along  $39^\circ\text{N}$  based on VDRAS data at 17:00 BT 13 August 2018 (in Fig. 9a, surface data from automatic weather stations and the VDRAS data at 1 km height, blue line: convergence line, red circle: divergence center position; in Fig. 9b, red arrow: the occurrence time of tornado; in Fig. 9c, blue line: the location of tornado)

统内部由于热力和动力作用造成的垂直运动的程度,但至少在一定程度上说明了辐合线上存在较大的上升运动,且上升运动在辐合线上分布并不均匀(在 FY-4A 可见光云图和雷达回波顶高的分析中也得到相类似的结论),在强降水的作用下,近地面冷池范围不断扩大(图 8b),其产生的雷暴出流推动辐合线不断南压,当辐合线与静海的水平风的垂直切变中心(水平涡管)相遇时,水平分布不均的上升运动会使水平涡管倾斜,导致垂直涡度的增加,同时从图 9c 还可以看出,上升运动中心发生在 1500 m 高度,那么从地面到 1500 m 高度垂直上升速度逐渐增大,

说明低层垂直涡管形成后存在垂直方向上的拉伸,气旋尺度减小,根据角动量守恒,旋转加速,导致龙卷母体涡旋的发生。通过上述分析发现,虽然线状对流龙卷在对流模态上与超级单体龙卷不同,但二者母体涡旋的生成物理机理相同。

## 6 结 论

综合以上分析,得到以下结论:

(1)在龙卷发生前,其发生地低层辐合、高层辐散,且具有充足的水汽供应,是华北地区典型暴雨过

程天气形势。

(2)龙卷发生前,CAPE 值达  $1832 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,对流抑制能量仅为  $0.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,自由对流高度和抬升凝结高度都很低,分别为  $945.5$ 、 $970.7 \text{ hPa}$ 。 $0 \sim 1.5 \text{ km}$  垂直风切变为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $0 \sim 6 \text{ km}$  垂直切变为  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,具备龙卷发生的环境条件。

(3)此次过程是一次发生在线状对流中的 EF3 级强龙卷,具备 TVS 特征,龙卷形成后,在中涡旋不断加强的基础上,旋转中心在不断下降,且 TVS 的伸展厚度在不断增大,但中涡旋的强度并未达到中气旋标准,说明引发龙卷的对流风暴不具备超级单体风暴典型特征。两个线状对流通过连线上新单体的发生发展促使了线状对流的合并,其强回波接地时间与龙卷的发生时间有较好的对应关系。

(4)引发龙卷的线状对流上存在多个上冲云顶,且回波顶高空间分布极其不均匀(在相邻像素点可相差  $10 \text{ km}$ ),说明对流云团所对应的上升气流强度在空间上也呈不均匀分布,且具有较大的水平梯度。

(5)在龙卷发生前  $20 \text{ min}$ ,分别位于两条边界层辐合线北侧和西侧的偏北风和前方入流的偏东风构成了中低压的辐合旋转流场。雷暴出流与龙卷发生地的局地垂直切变中心( $90 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )相遇,水平涡管倾斜,垂直涡度增加,且涡管在垂直方向上被拉伸,根据角动量守恒,旋转加强导致龙卷母体涡旋的发生发展,由此可见,线状对流龙卷虽然在对流模态上与超级单体龙卷不同,但龙卷母体涡旋的形成发展机制是一致的。

**致谢:**感谢北京城市气象研究院陈明轩博士为本研究提供基于 BJ-ANC 系统 VDRAS 技术的雷达变分分析数据。

## 参考文献

陈永林,2000.上海一次龙卷风过程分析[J].气象,26(9):19-23.  
Chen Y L,2000. An analysis of a tornado in Shanghai[J]. Meteor Mon,26(9):19-23(in Chinese).  
刁秀广,万明波,高留喜,等,2014.非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警[J].气象,40(6):668-677. Diao X G, Wan M B, Gao L X, et al,2014. Doppler radar product features and warning of non-supercell tornadic storms[J]. Meteor Mon,40(6):668-677(in Chinese).  
黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019a.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,2019a. 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,2019b.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,2019b. An analysis on tornadoes in Typhoon Ewiniar[J]. Acta Meteor Sin,77(4):645-661(in Chinese).  
李兆慧,王东海,麦雪湖,等,2017.2015年10月4日佛山龙卷过程的观测分析[J].气象学报,75(2):288-313. Li Z H, Wang D H, Mai X H, et al,2017. Observations of the tornado occurred at Foshan on 4 October 2015[J]. Acta Meteor Sin,75(2):288-313(in Chinese).  
马中元,叶小峰,张璞,等,2011.江西三类致灾大风天气活动与回波特征分析[J].气象,37(9):1108-1117. Ma Z Y, Ye X F, Zhang Y, et al,2011. Analysis on three types of hazard wind activities and echo characteristics in Jiangxi[J]. Meteor Mon,37(9):1108-1117(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).  
吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2012.对流风暴内中气旋特征与强烈天气[J].气象,38(11):1330-1338. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al,2012. The characteristics of the mesocyclone and severe weather associated with convective storms[J]. Meteor Mon,38(11):1330-1338(in Chinese).  
吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2013.苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J].气象学报,71(2):209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al,2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin,71(2):209-227(in Chinese).  
徐学义,赵振东,梁红新,2014.三次非超级单体龙卷风暴多普勒雷达特征对比分析[J].高原气象,33(4):1164-1172. Xu X Y, Zhao Z D, Liang H X,2014. Comparative analysis on Doppler radar echo features of three non-supercell tornadic storms[J]. Plateau Meteor,33(4):1164-1172(in Chinese).  
姚叶青,郝莹,张义军,等,2012.安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J].高原气象,31(6):1721-1730. Yao Y Q, Hao Y, Zhang Y J, et al,2012. Synoptic situation and pre-warning of Anhui tornado[J]. Plateau Meteor,31(6):1721-1730(in Chinese).  
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:116-120. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al,2006a. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing, China Meteorological Press:116-120(in Chinese).  
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. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al,2006b. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar[J]. Plateau Meteor,25(5):914-924(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).
- 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. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al, 2016. Analysis of the EF4 tornado in Funing-County, Jiangsu Province on 23 June 2016[J]. *Meteor Mon*, 42(11):1304-1314(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 M, et al, 2017. Analysis on a severe tornado process in Hainan triggered by supercell[J]. *Meteor Mon*, 43(6):675-685(in Chinese).
- 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等, 2004. 2003 年 7 月 8 日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析[J]. *气象*, 30(1):38-40, 45. Zheng Y Y, Yu X D, Fang C, et al, 2004. Analysis of a series of tornado events during 8 July 2003 in Anhui Province with new generation weather radar data[J]. *Meteor Mon*, 30(1):38-40, 45(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).
- 周海光, 2018. “6·23”江苏阜宁 EF4 级龙卷超级单体风暴中尺度结构研究[J]. *地球物理学报*, 61(9):3617-3639. Zhou H G, 2018. Observations of 23 June 2016 EF4 tornado supercell thunderstorm mesoscale structure in Funing County, Jiangsu Province[J]. *Chin J Geophys*, 61(9):3617-3639(in Chinese).
- 周宏伟, 王群, 夏文梅, 等, 2011. 盐城一次龙卷、短时强降水的地面中尺度分析和雷达回波特征[J]. *大气科学学报*, 34(6):763-768. Zhou H W, Wang Q, Xia W M, et al, 2011. Ground and mesoscale analysis of a tornado and heavy rainfall and their radar echo characteristics in Yancheng[J]. *Trans Atmos Sci*, 34(6):763-768(in Chinese).
- 周后福, 刁秀广, 夏文梅, 等, 2014. 江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析[J]. *气象学报*, 72(2):306-317. Zhou H F, Diao X G, Xia W M, et al, 2014. Analysis of the tornado supercell storm and its environmental parameters in the Yangtze-Huaihe Region[J]. *Acta Meteor Sin*, 72(2):306-317(in Chinese).
- Bates F C, 1968. A theory and model of the tornado[C]// *Proceedings of International Conference on Cloud Physics*. Toronto: Amer Meteor Soc:559-563.
- Brown R A, Lemon L R, Burgess D W, et al, 1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar[J]. *Mon Wea Rev*, 106(1):29-38.
- Browning K A, Foote G B, 1976. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 102(433):499-533.
- Bruce D L, Robert B W, 1997. The numerical simulation of non-supercell tornadogenesis. Part I: initiation and evolution of pre-tornadic meso cyclone circulations along a dry outflow boundary[J]. *J Atmos Sci*, 54(1):32-60.
- Craven J P, Brooks H E, 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection[J]. *Nat Wea Digest*, 28:13-24.
- Davies-Jones R, Trapp R J, Howard B, Bluestein H B, 2001. Tornadoes and Tornadic Storm[M]// *Doswell C A. Severe Convective Storms*. Boston: American Meteorological Society:167-221.
- Doswell III C A, 2001. *Severe Convective Storms*[M]. New York: American Meteorological Society.
- Doswell III C A, Burgess D W, 1993. Tornadoes and toraadid storms: A review of conceptual models[M]// *Church C, Burgess D, Doswell C, et al. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*. US: American Geophysical Union:161-172.
- Duda J D, Gallus Jr W A, 2010. Spring and summer Midwestern severe weather reports in supercells compared to other morphologies[J]. *Wea Forecasting*, 25(1):190-206.
- Fujita T T, 1963. Analytical meso-meteorology: a review. severe local storms[J]. *Meteor Monogr*, 5(27):77-125.
- Fujita T T, 1971. Proposed characterization of tornados and hurricanes by area and intensity[R]. Chicago: University of Chicago: 42.
- Fujita T T, 1987. U. S. Tornadoes Part 1: 70-Year Statistics[D]. Chicago: University of Chicago: 122.
- Gallus Jr W A, Snook N A, Johnson E V, 2008. Spring and summer severe weather reports over the Midwest as a function of convective mode: a preliminary study[J]. *Wea Forecasting*, 23(1):101-113.
- Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al, 2012. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States[J]. *Wea Forecasting*, 27(1):106-123.
- Lemon R L, Doswell III C A, 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. *Mon Wea Rev*, 107(9):1184-1197.
- Moller A R, Doswell III C A, Foster M P, et al, 1994. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures[J]. *Wea Forecasting*, 9(3):327-347.
- Ray P S, Doviak R J, Walker G B, et al, 1975. Dual-Doppler observation of a tornadic storm[J]. *J Appl Meteor*, 14(8):1521-1530.
- Wakimoto R M, Wilson J W, 1989. Non-supercell tornadoes[J]. *Mon Wea Rev*, 117(6):1113-1140.