

东高红,刘一玮,黄冬梅,等,2023. 2018 年 8 月 13 日天津静海龙卷的雷达特征和发生条件[J]. 气象,49(9):1063-1074. Dong G H, Liu Y W, Huang D M, et al, 2023. Radar characteristics and occurrence conditions of Jinghai Tornado in Tianjin on 13 August 2018[J]. Meteor Mon, 49(9):1063-1074(in Chinese).

2018 年 8 月 13 日天津静海龙卷的 雷达特征和发生条件*

东高红^{1,2} 刘一玮² 黄冬梅³ 林晓萌²

1 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110052

2 天津市气象台, 天津 300074

3 天津市静海区气象局, 静海 300060

提 要: 利用常规观测资料、地面自动气象站资料、多普勒天气雷达和风廓线雷达资料等,对 2018 年 8 月 13 日 17:30 左右发生在天津静海的 EF2 级龙卷天气进行分析,重点分析龙卷发生前后的环境背景条件、局地不稳定条件、触发抬升条件及雷达回波特征等。结果表明:这次龙卷天气发生在 500 hPa 高空槽东移、副热带高压加强西进及台风摩羯北上的过程中;龙卷发生前环境大气处于明显不稳定状态,对流有效位能为 $1797 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (对流抑制能量为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、0~6 km 风矢量差约为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且存在较低抬升凝结高度;同时龙卷发生地局地存在较大对流有效位能(最大值超过 $4000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)和较低抬升凝结高度,且龙卷发生前抬升凝结高度出现突降现象(最低降到 897 hPa 附近)。龙卷发生前后上下游两站近地层(0~1 km 高度及以下)垂直风切变值均出现先迅速增大后又迅速减小的特征,且垂直风切变值的迅速减小是由上层开始并迅速向下,而 0~1 km 以上高度的垂直风切变值没有明显变化。多普勒天气雷达观测表明,龙卷回波单体尺度小(正负速度中心直径为 2 km 左右)、正负速度中心最大旋转速度为 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、垂直涡度为 $2.4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,回波具有明显悬垂结构和有界弱回波区及龙卷涡旋(TVS)等特征,后侧低层入流也非常强,应是微超级单体龙卷。海风锋移动到本地与上游雷暴单体出流形成的阵风锋相遇发生碰撞,触发局地不稳定能量强烈释放、激发雷暴单体新生并发展为有组织的强雷暴单体,应是此次龙卷发生的直接触发条件。

关键词: 龙卷,阵风锋,海风锋,雷达回波特征,发生条件

中图分类号: P445, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.070801

Radar Characteristics and Occurrence Conditions of Jinghai Tornado in Tianjin on 13 August 2018

DONG Gaohong^{1,2} LIU Yiwei² HUANG Dongmei³ LIN Xiaomeng²

1 Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110052

2 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

3 Jinghai District Meteorological Office of Tianjin, Jinghai 300060

Abstract: Using conventional observation data, ground automatic weather station data, Doppler weather radar and wind profiler radar data, etc., this paper analyzes the EF2 tornado that occurred in Jinghai, Tianjin at about 17:30 BT 31 August 2018. The focus is on the analysis of environmental background conditions, local instability conditions, trigger uplift conditions and radar echo characteristics, etc. before and after the occurrence of tornado. The results show that this tornado weather occurred when the 500 hPa high-altitude trough moved eastward, the subtropical high strengthened its westward movement and

* 中国气象局沈阳大气环境研究所东北冷涡重点实验室联合开放基金课题(2023SYIAEKFMS10)资助

2022 年 2 月 20 日收稿; 2023 年 7 月 12 日收修定稿

第一作者:东高红,主要从事城市气象和中尺度天气预报技术研究. E-mail:qwerty8825@sina.com

Typhoon Capricorn was moving northward. Before the tornado occurred, the environmental background conditions were obviously unstable, the CAPE value was $1797 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (CIN was $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) and the wind vector difference in the height of 0–6 km was approximately $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and there was lower lifting condensation level (LCL). At the same time, there was high CAPE (maximum value exceeded $4000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), lower LCL. Before the tornado occurred, LCL showed a sudden drop (lowest to around 897 hPa). With the occurrence of tornado, the vertical wind shear values near the ground (0–1 km height and below) at both upwind and downwind stations showed the characteristics of rapid increase first and then rapid decrease. The rapid decrease of the vertical wind shear value started from the upper layer and descended rapidly, while the vertical wind shear value above the 0–1 km height did not change significantly. Doppler weather radar observations show that the tornado echo had a small individual scale (with a diameter of about 2 km at the positive and negative velocity centers), a maximum rotational speed of $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at the positive and negative velocity centers, and a vertical vorticity of $2.4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. The echo of this tornado had obvious overhanging structure, bounded weak echo zone and tornado vortex. Moreover, the low-level inflow at the rear side was very strong, so it should be a micro supercell tornado. The collision between the sea breeze front moving to the locale and the gust front formed by the upwind thunderstorm cell outflow triggered the vigorous release of unstable energy locally, stimulating the regeneration of thunderstorm cells, and developing into organized strong thunderstorm cells, which should be the direct trigger conditions for the occurrence of this tornado.

Key words: tornado, gust front, sea breeze front, radar echo characteristic, occurrence condition

引 言

龙卷是由对流云产生的破坏力极大的小尺度灾害性天气,它的直径一般从几十米到几百米,可造成重大的人员伤亡和财产损失(俞小鼎等,2006a;2006b),而且具有突发性强、生命史短、变化急剧等特点。和冰雹、雷暴大风等强对流天气相比较,龙卷的发生属于小概率事件,因此提前并准确预报预警龙卷天气发生的难度较大。雷达是龙卷观测最常用的工具,龙卷的钩状回波特征于1953年在美国伊利诺伊州的雷达图像上被偶然观察到后,Fujita(1971;1981;1989)利用雷达监测,结合地面观测数据、龙卷图片以及龙卷灾情等对龙卷展开了大量研究工作。自多普勒天气雷达在气象灾害天气研究中使用以来,Donaldson(1970)首次利用多普勒天气雷达观测到了超级单体中的“龙卷气旋”。之后不少专家学者利用多普勒天气雷达对龙卷天气进行分析研究,其中Brown et al(1978)利用美国国家强风暴实验室的多普勒天气雷达资料,发现了一个可能伴随龙卷过程的比中气旋尺度更小的多普勒雷达速度场涡旋特征,表现为径向速度图上沿方位角方向两个紧挨着的像素之间的强烈速度切变,尺度通常在2 km以

下,被称为龙卷涡旋特征(TVS)。在国内,随着新一代天气雷达布网之后,相关专家对龙卷天气过程的分析研究也逐渐增多(俞小鼎等,2008;郑媛媛等,2004;2009;2015;何彩芬等,2006;李改琴等,2014;张晰莹等,2013;陈元昭等,2016;李兆慧等,2017;蒋义芳等,2009;郑艳等,2017;徐芬等,2021;郑永光等,2020;张楠等,2020;慕瑞琪等,2022;朱江山等,2015),其中俞小鼎等(2008)和郑媛媛等(2004;2009)利用多普勒天气雷达数据对超级单体龙卷过程进行详细分析后指出,伴随龙卷的发生,天气雷达上基本能够观察到中气旋或小尺度强切变(TVS)特征;李兆慧等(2017)和黄先香等(2019)及邱阳阳等(2021)利用多普勒天气雷达资料等对当地发生的台风龙卷过程进行了详细分析。针对我国龙卷发生的空间分布特征,魏文秀和赵亚民(1995)分析统计1980—1993年我国发生的龙卷分布特征指出,中国的长江三角洲经苏北平原至黄淮平原和广东与广西地区是龙卷的两个多发带;范雯杰和俞小鼎(2015)则对1961—2010年全国记录到的EF2级以上的165次龙卷的发生地进行统计后发现,江淮流域、华南、东北和华北地区东南部等地形平坦地区为龙卷高发区;之后冯佳玮等(2017)利用2004—2012年的中国气象局气象灾害年鉴和CFSR再分析资料对我

国龙卷的空间分布统计后指出,中国龙卷在空间上主要分布于东部地区,以江苏和广东地区最多;而辽宁、吉林和内蒙古交界处及黑龙江中部也是龙卷集中发生区域。相对而言,位于华北的天津地区观测到的龙卷很少,近30年来仅在20世纪90年代有几次龙卷风灾情记录,所以目前对当地龙卷天气的分析研究相对较少。2018年8月13日下午,天津局地出现强对流天气,17:30左右(北京时,下同)静海区出现龙卷天气,龙卷发生的时间短、强度大、突发性强、局地受灾严重,从回波新生到龙卷击地仅有40 min左右,所以预报预警难度很大。而且龙卷的发生地和影响区域恰好没有布设自动气象站,只能利用周边的自动气象站观测和风廓线雷达及多普勒天气雷达等资料,对此次龙卷天气的发生条件和雷达特征等进行分析,探讨其触发机制和预报预警可能性,为今后预警龙卷等强对流天气提供预报思路。

1 龙卷实况及强度定级

2018年8月13日下午天津局地出现强对流天气,17:30左右在静海区北五里村附近发生龙卷天气(图1),龙卷自静海区魏家庄村附近生成后,自东北向西南方向移动,先后影响静海区北五里村—西五里村—梁头镇小李庄村,生命史约为15 min,移动速度约为 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,造成的明显灾情路径长度大约为5 km、宽度几米至上百米,伴随局地的雷电

和短时强降水,其中自动站17:00—18:00的小时最大降水量为57.8 mm(图1d),龙卷天气发生30 min后在其移动路径下游的A2563自动气象站监测到的地面最大风速仍达 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图1c),可见此次龙卷造成的灾害大风强度很强。受龙卷影响,静海区共造成2人受伤,房屋倒塌4间、损坏179间,倒断电杆8根、电塔3座,损坏蔬菜大棚138座,农作物受灾面积为 854.7 hm^2 ;据不完全统计,龙卷共造成农业、交通等直接经济损失达4731.4万元。依据Fujita(1981)提出的龙卷分级标准判定,此次龙卷等级应为EF2级。

2 环流背景和不稳定条件

2.1 天气背景条件

分析2018年8月13日高低空天气形势看到,08:00的500 hPa高度场上蒙古至河套西部有一高空槽,东部副热带高压(以下简称副高)位于海上,588 dagpm线西脊点位于 36°N 、 122°E 附近,南面台风摩羯中心位于 30°N 、 118°E 附近(图2a),级别为热带风暴,低层850 hPa上在高空槽前北京西侧有一西南风与东南风的中尺度切变,天津处于副高外围西北侧584 dagpm线内;地面图上天津处于均压场内,东部地区有一东北—西南向的地面中尺度辐合线(图略)。随着500 hPa高空槽东移略北缩,副高

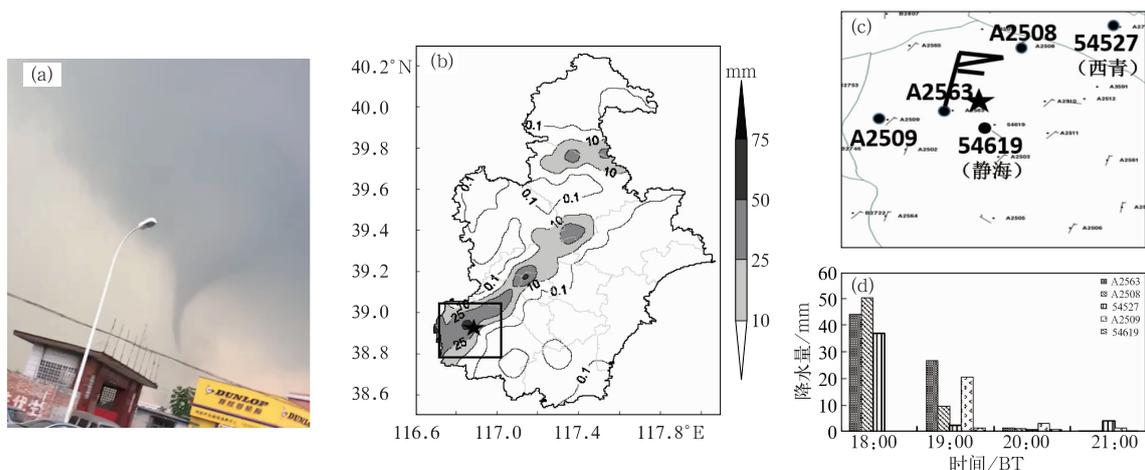
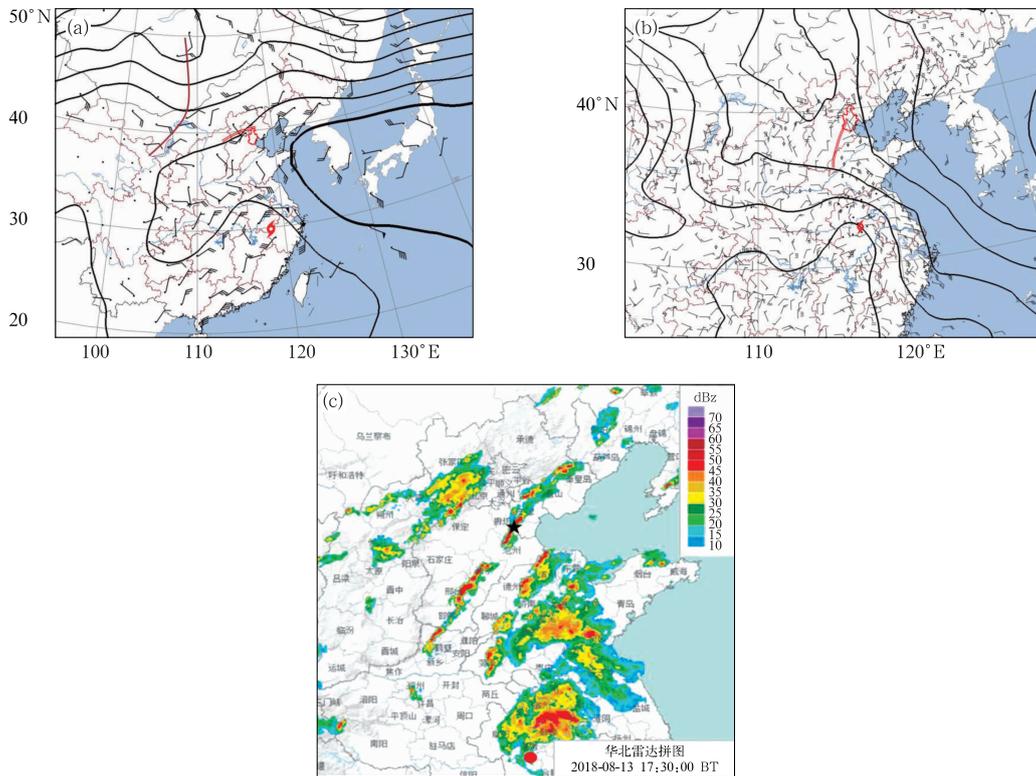


图1 2018年8月13日(a)天津静海龙卷照片,(b)16:00—19:00降水量(★为龙卷发生地), (c)图1b中黑色方框位置放大图,(d)自动气象站点降水量随时间变化(站点位置见图1c)

Fig. 1 (a) Tianjin Jinghai tornado photo, (b) precipitation distribution from 16:00 to 19:00 BT, (c) the enlarged view of the position of the black box in Fig. 1b, (d) time evolution of the automatic station precipitation on 13 August 2018



注:棕色线为 500 hPa 槽线,红色双线为 850 hPa 切变线,“●”为台风位置;
“★”为台风摩羯位置,“★”为静海龙卷位置。

图 2 2018 年 8 月 13 日(a)08:00 500 hPa 天气形势图,(b)17:00 海平面气压图和(c)17:30 华北雷达拼图
Fig. 2 (a) The 500 hPa synoptic chart at 08:00 BT, (b) sea level pressure chart at 17:00 BT
and (c) North China radar puzzle at 17:30 BT 13 August 2018

明显加强西进略北抬,台风摩羯以 $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右的速度向西北方向移动,副高外围与台风摩羯之间东南气流明显加强并向西北方向伸进,850 hPa 上天津和北京地区上空转为一致的东南风,并在天津南部出现明显东南风风速辐合,东南海上大量水汽随低空东南气流向北输送至天津上空。到 17:00 地面图上天津仍处于弱气压场里,中尺度辐合线位置略向西移,其后侧东南风有所加大(图 2b);此时台风摩羯中心位置位于 32.4°N 、 116.9°E ,中心最大风速为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,龙卷发生位置位于副高脊线的北侧、北上台风摩羯中心位置的偏北方向,距离台风中心约 650 km,副高外围和台风东北侧之间的东南气流明显加强。

2.2 环境不稳定条件

由于天津本地没有探空观测,我们利用北京探空资料(龙卷发生地位于北京探空站的南偏东方向约 94.8 km 处)对龙卷发生前的背景条件进行分

析,看到(图略),13 日 08:00 从底层到 400 hPa 整层湿度较大、低层垂直风切变较大、风向随高度顺转,对流有效位能(CAPE)为 $224.1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、对流抑制(CIN)为 $140 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,K 指数较高(39.6°C)、抬升指数(LI)为 -1.5°C 、风暴强度指数(SS1)为 252、沙氏指数(SI)为 -1.48°C 、强天气威胁指数(SWEAT)为 242.4,同时抬升凝结高度较低,在 988.8 hPa 附近。上述物理量参数值说明环境大气处于不稳定状态下,只是不稳定能量较小、对流抑制较大,不太容易触发强对流天气。到 14:00 从北京探空图上看到(图 3a,表 1 所列为 14:00 北京探空物理量参数值),此时近地层湿度仍较大,但 850~700 hPa 两层温度露点差明显加大,出现中层干冷空气层,说明有干冷空气侵入,低层垂直风切变仍较大,同时 CAPE 增大为 $1797 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅达 $1550 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,CIN 减小为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,K 指数维持 39.6°C ,LI 降为 -5.1°C ,SS1 达到 271.4,SI 为 -2.1°C ,SWEAT 为 255.5;此时抬升凝结高度虽然升高到

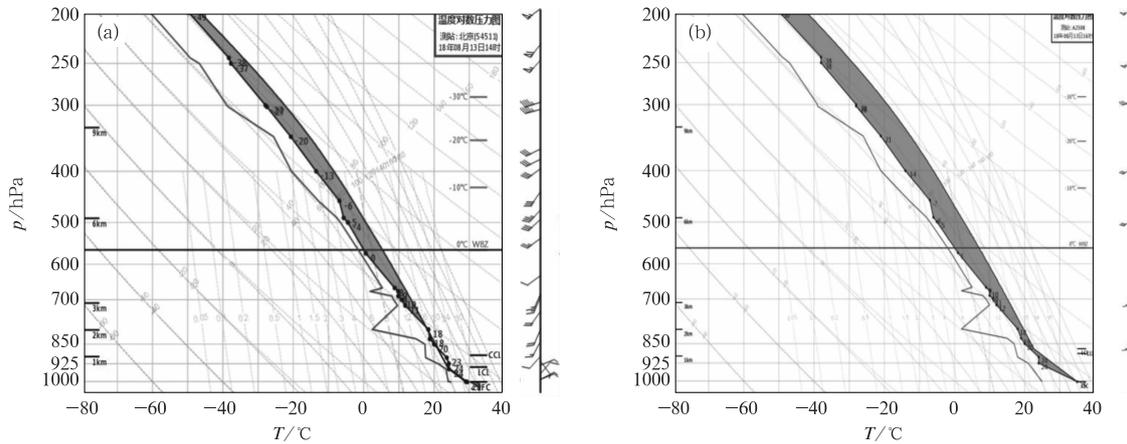


图 3 2018 年 8 月 13 日(a)14:00 北京探空图和(b)16:00 龙卷发生地订正探空图
 Fig. 3 (a) Sounding at Beijing Station at 14:00 BT and (b) corrected sounding at tornado location at 16:00 BT 13 August 2018

表 1 2018 年 8 月 13 日 14:00 北京探空部分参数值

Table 1 Partial parameter values of Beijing sounding at 14:00 BT 13 August 2018

参数	T/°C	T _d /°C	T ₈₅₀₋₅₀₀ /°C	CAPE /(J·kg ⁻¹)	CIN /(J·kg ⁻¹)	DCAPE /(J·kg ⁻¹)	LCL /hPa	K 指数 /°C
值	29.7	25.0	25.0	1797.0	0	0	938.7	39.6
参数	LI 指数 /°C	0~1 km 风矢 量差/(m·s ⁻¹)	0~3 km 风矢 量差/(m·s ⁻¹)	0~6 km 风矢 量差/(m·s ⁻¹)	PW /mm	SSI	SI/°C	SWEAT
值	-5.1	4.3	8.0	13.8	57.7	271.4	-2.1	255.5

938.7 hPa 附近(有所升高应是日变化),但相对而言仍然较低。俞小鼎等(2008)研究指出,抬升凝结高度较低表明低层相对湿度较大,下沉气流中的气块在低层大气被蒸发降温的可能性就较小,其具有正浮力的可能性也就较大,因此会有利于龙卷形成。对比 08:00 和 14:00 各项动力、热力物理量参数值变化看,龙卷天气发生前京津地区环境大气变得更不稳定,特别是对流有效位能迅速增大,对流抑制降为 0 J·kg⁻¹,说明从低层到高层大气均处于不稳定状态,同时在 850~700 hPa 层出现干冷空气侵入,干冷空气叠加在低层暖湿空气上,大气呈现显著条件(静力)不稳定,再加上较低的抬升凝结高度,环境条件非常有利于产生强雷暴、龙卷等强烈天气的高度组织单体、多单体风暴或超级单体风暴。Evans and Doswell III (2002)和 Rasmussen(2003)的研究也指出,这是较强龙卷风发生的有利天气背景条件。

2.3 局地不稳定条件

为了进一步分析龙卷发生前后局地的不稳定条件,利用天津地面自动气象站资料和北京探空资料相结合,重新计算得到龙卷发生前后局地自动气象站逐时的新探空资料(图 3b 为 16:00 龙卷发生地探

空),并提取得到各物理量参数随时间的变化,用于近似分析龙卷发生前后局地物理量参数变化特征。通过分析看到,16:00 静海区局地的 CAPE 高达 3273.4 J·kg⁻¹,比 14:00 北京探空得到的 CAPE 高出近 1 倍,同样 CIN 为 0 J·kg⁻¹,K 指数达 40°C,LI 降到 -9.7°C,SSI 增大到 321.9,SI 降到 -2.25°C,SWEAT 基本维持,上述物理量参数值均说明静海区局地不稳定条件更强。另外从计算得到的最大上升速度值对比看到,局地最大上升速度由 08:00 的 21.2 m·s⁻¹到 16:00 加大到 80.9 m·s⁻¹。因为天津近 20 年没有出现龙卷天气,将上述物理量参数值和之前统计出的本地强对流天气物理量参数阈值(图略)对比看到,此次龙卷天气的对流有效位能、对流抑制、K 指数、抬升指数以及最大上升速度值等均超过本地强对流天气极值,说明如有触发将导致局地不稳定能量强烈释放,将造成剧烈强对流天气。

3 龙卷发生条件

近年来,国内外专家研究指出近地层(0~1 km)

存在强的垂直风切变、较低的抬升凝结高度和很大的对流有效位能等是龙卷天气发生的主要动力、热力条件。如 Weisman and Klemp(1982)和 McCaul(1991)的研究就指出,近地层(0~1 km)强垂直风切变是造成龙卷的主要动力条件;Rasmussen and Blanchard(1998)和 Rasmussen(2003)通过研究也指出,低层 0~1 km 垂直风切变和较低的抬升凝结高度是影响龙卷发生的主要条件;Thompson et al(2000)进一步统计发现产生较强龙卷的平均抬升凝结高度低于 981 m,弱龙卷的平均抬升凝结高度为 1179 m。国内,陈元昭等(2016)通过分析也指出龙卷发生前环境有很大的对流有效位能和强的垂直风切变。为进一步分析此次龙卷发生的动力、热力条件和发生潜势,利用龙卷发生地上下游观测站点(西青站代表上游站,静海站代表下游站,两站点位置见图 1c)风廓线雷达观测资料,计算得到龙卷发生前后两站点不同高度垂直风切变值随时间的变化,并利用前面计算得到的两站的对流有效位能和抬升凝结高度参数值随时间变化特征进行具体分析。

3.1 对流有效位能随时间变化特征

对比分析两站的 CAPE 随时间演变可以看到(图 4a),龙卷发生前,局地 CAPE 均很大,基本在 $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,而且龙卷发生地上游的西青站的 CAPE 值明显高于下游的静海站,龙卷发生前

2 h 西青站的 CAPE 值最大达到 $4898.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,比静海站高出近 $2870 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,这说明龙卷发生地上游的局地不稳定能量更大,遇有局地触发抬升,会率先触发不稳定能量强烈释放,造成强烈天气发生。从图 4a 看到,龙卷发生前 45 min 西青站的 CAPE 由 $4402.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 迅速下降到 $995 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,对比实况,这一时间段上游出现局地强雷雨天气,自动气象站 17:00—18:00 的小时最大降水量为 37.6 mm。而静海站的 CAPE 在这一时间段没有下降反而出现跃增,其值从 $1872.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 突增到 $4003.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,且随后 1 h 一直维持在 $3300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,17:50 后才迅速降低,此时龙卷天气已经发生。这说明此次龙卷发生前不但环境场具有较大 CAPE,龙卷发生地局地不稳定能量更大,这与陈元昭等(2016)的分析结论一致。但需要指出的是,上述修订中只考虑了低空的加热作用,订正后的 CAPE 在龙卷发生前后的变化特征还需要今后更多个例的分析验证。

3.2 抬升凝结高度随时间变化特征

对比两站的抬升凝结高度值随时间演变看到(图 4b),13 日白天两站的抬升凝结高度随时间均有所升高,西青站在出现局地雷雨天气前 2 h 抬升凝结高度开始降低,35 min 约降低了 35 hPa 左右,之后一直维持在较低高度,到 17:00 抬升凝结高度出

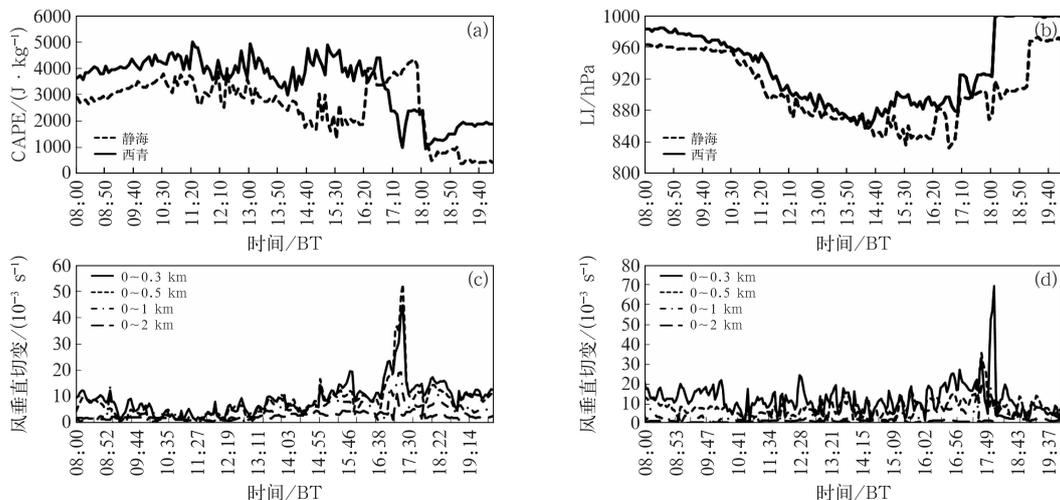


图 4 2018 年 8 月 13 日 08:00—19:40(a)两个站对流有效位能,(b)两个站抬升凝结高度,(c)西青站和(d)静海站低空不同高度风垂直切变随时间的变化

Fig. 4 Changes with time in (a) CAPE of the two stations, (b) LI of the two stations, (c, d) wind vertical shear at different heights at the low level of (c) Xiqing Station, and (d) Jinghai Station from 08:00 BT to 19:40 BT 13 August 2018

现突降,10 min下降了46.6 hPa,达到924.6 hPa附近(约700 m高度附近),但随后其高度又迅速升高。对应实况,抬升凝结高度出现突降时正好对应该地出现强雷暴天气。而静海站的抬升凝结高度在16:00之前一直维持较高高度,16:15出现首次突降,10 min降低了38 hPa,之后又出现升高,16:45再次出现突降,降低高度达64.2 hPa,17:10高度降低到897 hPa处(接近1000 m高度),随后一直维持在较低高度。对应实况,静海站抬升凝结高度第二次出现突降的时间正好与龙卷生成时间相对应,抬升凝结高度维持在最低高度(低于900 hPa)时正好是龙卷生成击地时间。这说明抬升凝结高度在局地强雷暴发生前会出现突降现象,当降低幅度较大(超过50 hPa)并在较低高度(低于900 hPa)维持一段时间时,有利于出现龙卷天气。这一结论与Thompson et al(2000)统计出的产生强—弱龙卷的平均抬升凝结高度的结论基本一致。

3.3 低空垂直风切变随时间变化特征

分析龙卷发生前后上下游两站0~3 km及0~6 km垂直风切变值均不大,随时间也没有明显变化,而0~1 km垂直风切变值随时间变化较大(图4c,4d),其中西青站低层垂直风切变值在龙卷发生前3 h有所增大,近地层0~0.3 km和0~0.5 km高度垂直风切变值增大较明显,平均增幅为 $8 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。龙卷生成前从16:47(此时0~1 km高度垂直风切变值为 $0.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)开始近地层不同高度垂直风切变值均迅速增大,0~1 km高度垂直风切变值增大了 $18.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,到17:17达到 $19.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,而0~0.3 km和0~0.5 km高度垂直风切变值增幅更大,分别为 $35.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 $46.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,到龙卷发生前的17:23时0~0.3 km和0~0.5 km高度的垂直风切变值达到最大,分别为 $44.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 $52.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,之后伴随龙卷的发生,低层(0~1 km及以下)各高度垂直风切变值均迅速减小,而且垂直风切变值的迅速减小是由上层开始并迅速向下,0~0.5 km高度垂直风切变值降幅最明显,仅十几分钟垂直风切变值降幅就达 $42.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,这也正好说明龙卷的发生是由高到低再击地造成严重灾害的过程。而对比静海站,龙卷发生前低层各高度之间的垂直风切变值没有明显增大,只是在龙卷发生的17:33—17:36这几分钟内0~1 km高度及以下的垂直风切变值

出现瞬间增大,随后又迅速减小,持续时间仅有10 min左右;但在龙卷发生15 min后0~0.3 km高度垂直风切变值发生突增,2 min增幅达 $31 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,13 min内增幅达 $64 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,到17:57时0~0.3 km高度垂直风切变值达到最大,为 $69.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,而0~1 km以上高度的垂直风切变值没有明显变化。依据上文分析龙卷移动速度约为 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,静海站距离龙卷发生地约5 km,该站在龙卷发生15 min后近地层0~0.3 km高度垂直风切变值达到最大,应是由龙卷击地后迅速向下游移动的灾害性大风造成的,这也说明此次龙卷向下伸展致灾的高度在1 km以下。

3.4 地面触发抬升条件

由天津地面自动气象站风场(图5a₁~5c₁)看到,8月13日中午开始在天津东部有一条偏北风和东南风的中尺度辐合线。该中尺度辐合线随时间自渤海沿岸向西移动,移动过程中其经过地区自动气象站温度略降、相对湿度略增大,对应多普勒天气雷达0.5°仰角反射率因子图和径向速度图上也有一条窄带回波带(图5a₂~5c₂),由之前分析知这是海陆差异形成的海风锋(东高红等,2011)。由于13日地面处于弱低压前部,系统风虽然很弱,但也是东南风,所以该地面中尺度辐合线应是叠加了弱系统东南风的海风锋(以下简称为海风锋)。海风锋随时间不断向西移动,15:00以后在海风锋后侧附近有雷暴单体新生发展,到16:00后不断有雷暴单体发展成熟,单体中心最大回波强度达到50 dBz,受其影响天津西青区和市区局地出现雨强较大的雷暴天气(这应与城市热岛和海风锋叠加触发加强有关,本文不做讨论),同时雷暴单体内强下沉气流到达地面形成出流边界(阵风锋)。其中影响西青区雷暴单体前侧的阵风锋向西南推进,16:40后与移动到此处的海风锋相遇,因本地存在较大不稳定能量,两条中尺度辐合线相遇发生碰撞,造成该地不稳定能量强烈释放,随后该地出现新生回波单体并迅速发展加强,17:06回波单体中心强度达到50 dBz,到17:30单体回波强度达到55 dBz,并出现回波悬垂结构,而且雷达自动监测到TVS。分析看到雷暴单体是在海风锋附近发展起来的,产生龙卷的雷暴单体是由上游雷暴单体前侧阵风锋南移与海风锋在当地相遇发生碰撞后新生发展起来的。

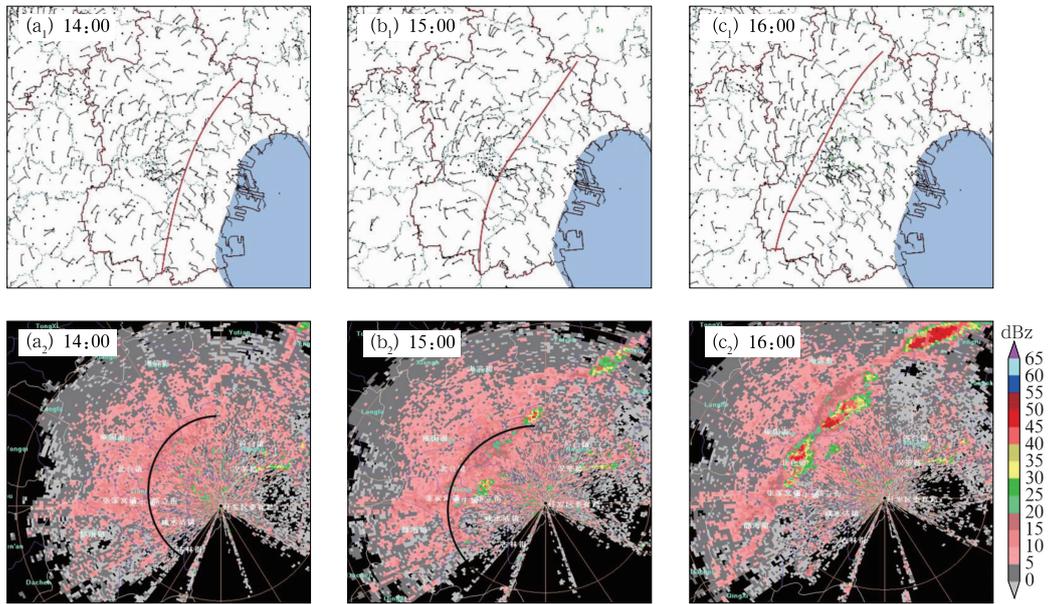
为进一步分析龙卷发生的触发条件,利用西青

站风廓线雷达观测资料进行具体分析。从龙卷发生前西青站的地面风场与风廓线雷达资料看到,下午该站地面一直维持弱的偏北风,16:40 后低层转为偏东风,对应前面分析知是海风锋移动到此地造成的风向变化,从风廓线图上看(图 6a),偏东风的伸展高度仅有 0.7 km 左右。随后在 1.2 km 高度以上风向出现突转,由之前的偏南风突转为偏北风,对应实况和雷达观测,这应是上游雷暴单体内由降水拖曳作用造成的下沉气流,随后偏北风风速明显增大并迅速向下侵入到近地层偏东风层内,10 min 后近地层偏东风转为东南风且风速迅速加大并向上层伸展,说明低层偏东气流被抬升,在 0.3~1.2 km 高度出现强的东南上升气流,气流中心最大风速达到 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对应垂直速度看到(图 6b),此时垂直上升速度明显加大,在对应高度层出现垂直上升速度大值区,1 km 高度附近出现强上升中心,中心最大垂直上升速度达 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,同时 17:20 开始近地面出现弱西北风,风向随高度顺转,低层垂直风切变值明显加大,0~1 km 高度风矢量差最大达到 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,转换为切变值为 $25 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,有如此强的低层垂直风切变和强的垂直上升速度,加之上下干冷下暖湿的不稳定层结和本地又处于高能区且几乎没有对流抑制(CIN 为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),所以雷暴被触发后可以在较短时间内迅速发展为有组织的强雷暴单体。龙卷发生在西青站下游,其发生的环境条件和局地条件基本相同,当海风锋移动到静海本地与上游雷暴出流形成的阵风锋相遇发生碰撞,触发不稳定能量强烈释放,激发雷暴单体的新生发展并迅速发展加强为有组织的强雷暴单体,最终产生龙卷天气。可以说,海风锋与阵风锋相遇发生碰撞应是此次龙卷天气的直接触发条件。

4 雷达回波特征分析

从天津地面自动气象站风场演变看到(图 5),地面有一中尺度辐合线随时间不断向西移动,对应雷达观测和上面分析,此辐合线应为叠加弱系统东南风的海风锋。15:00 以后在海风锋后侧不断有雷暴单体新生发展,16:00 雷暴单体发展成熟,单体中心回波强度最大达到 50 dBz,受其影响天津西青区和市区局地出现雨强较大的雷暴天气,同时雷暴单

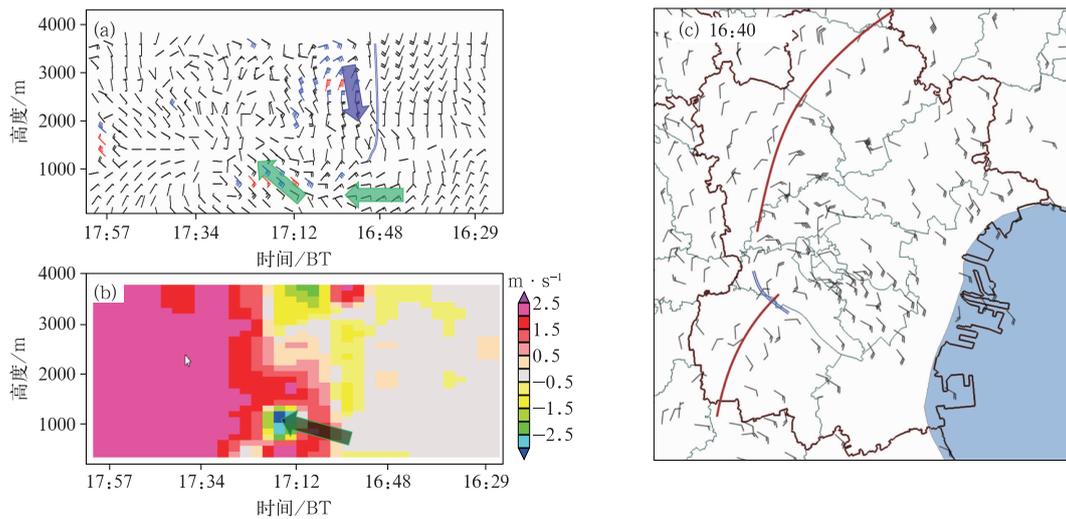
体内强下沉气流到达地面发生辐散形成出流(阵风锋)。随时间阵风锋向西南移动,到 16:42 与向西移动的海风锋相遇(图 7a),过二者相遇处沿雷达径向方向的反射率因子垂直剖面图上可以清楚看到近地层海风锋自身的弱回波及上层的弱回波(图 7b₁)。东高红等(2011)分析指出海风锋自身的弱回波伸展高度约为 1.5 km,而从图 7b₁ 上看到弱回波的伸展高度已经到 9 km 附近,说明这应是阵风锋和海风锋相遇后触发出来的新单体回波。随时间单体回波迅速发展,3~4 个体扫时间单体回波中心强度最大已达到 50 dBz(图 7b~7d),之后仍不断发展,到 17:30(图 7e,7e₁,7e₃)已发展成中心强度为 55 dBz 的成熟单体回波,对应 4.3°仰角径向速度图上出现正负速度对和明显 TVS(图 7e₁)。由过回波单体中心沿雷达径向的反射率因子及径向速度垂直剖面(图 7e₅,7e₆)看到,此时该单体回波顶高在 13 km 高度附近,55 dBz 最强回波中心位于 5~6 km 高度,而且出现明显有界弱回波区和回波悬垂结构,低层后侧入流弱回波区非常清楚,这说明单体后侧入流很强,单体内垂直上升运动非常强。从对应的径向速度垂直剖面看到,该单体低层辐合高层辐散特征明显,同时在 6~11 km 高度上有一对正负径向速度像素对,其中负径向速度最大值为 $-17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,正径向速度最大值为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结合 4.3°仰角径向速度图上最大正负速度中心之间的距离为 2 km 左右,可以算出正负速度中心的最大旋转速度为 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直涡度为 $2.4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。另外通过风暴相对平均径向速度图(SRM)产品提取出 TVS(表 2),从表上看到 17:30 该 TVS 距离天津雷达约 71 km,最大转动速度差为 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大转动速度差高度为 2.4 km,伸展高度为 4.7 km,最大风切变达到 $37 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,对照龙卷强度标准(俞小鼎等,2006a),此时龙卷已经达到较强强度。6 min 后雷暴单体移到离雷达 73 km 处,最大转动速度差加大到 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大转动速度差高度为 1.1 km,伸展高度为 4.9 km,最大风切变达 $40 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。从此时反射率因子垂直剖面图上看到(图 7f₂),50 dBz 强回波高度明显降低,悬垂结构特征已经明显减弱,但回波随高度还是向入流方向倾斜,在径向速度图 0.5°仰角上仍可以看到正负径向速度像素对(图 7f₁),只是强度明显减弱,对应径向速度剖面图上可以看到近



注:线段为海风锋。

图 5 2018 年 8 月 13 日 14:00—16:00(a₁~c₁)天津地面自动气象站风场分布, (a₂~c₂)天津雷达 0.5°仰角反射率因子

Fig. 5 (a₁—c₁) Wind field distribution of the automatic weather station in Tianjin and (a₂—c₂) the 0.5° elevation reflectivity factor of Tianjin Radar from 14:00 BT to 16:00 BT 13 August 2018



注:棕色线表示海风锋,蓝色线表示阵风锋。

图 6 2018 年 8 月 13 日(a)16:29—17:57 西青站风廓线雷达观测风场,(b)16:29—17:57 西青站风廓线雷达观测垂直速度随时间变化(负值表示垂直上升),(c)16:40 天津地面自动站风场

Fig. 6 Variation of (a) wind field and (b) vertical velocity of Xiqing Station from 16:29 BT to 17:57 BT (negative value: vertical rise), (c) wind field of Tianjin automatic weather stations at 16:40 BT 13 August 2018

地层正负径向速度对已落地并明显减弱(图 7f₃),这说明此时该龙卷已经击地。对应实况,龙卷击地时间基本可以确定在 17:30—17:36。另外,分析看到

从雷暴单体新生并迅速发展成熟到雷达监测到 TVS 仅有 40 min 左右,虽然径向速度图上没有监测到中气旋和钩状回波,但连续两个个体扫监测到正

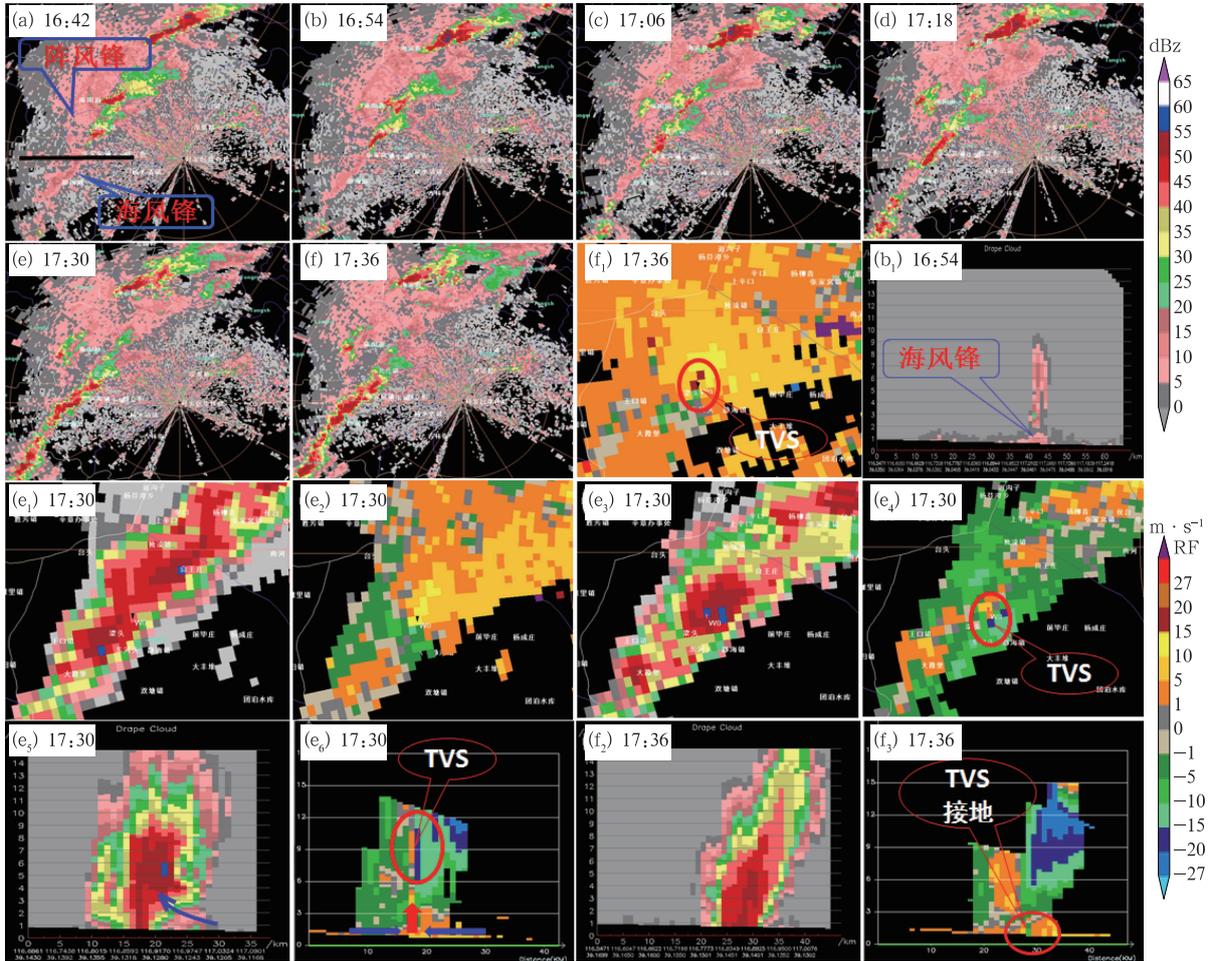


图 7 2018 年 8 月 13 日天津雷达回波产品

(a~e) 逐 12 min 0.5° 仰角反射率因子; (e₁, e₃) 反射率因子和 (e₂, e₄) 平均径向速度; (e₁, e₂) 1.5° 仰角, (e₃, e₄) 4.3° 仰角; (f) 17:36 反射率因子和 (f₁) 平均径向速度; (b₁, e₅, e₆, f₂, f₃) 沿图 7a 中黑色线的垂直剖面; (b₁, e₅, f₂) 反射率因子, (e₆, f₃) 径向速度

Fig. 7 Radar products in Tianjin on 13 August 2018

(a—e) 12 min reflectivity factor at 0.5° elevation from 16:42 BT to 17:30 BT;

(e₁, e₃) reflectivity factor and (e₂, e₄) average radial velocity

(e₁, e₂) 1.5° elevation, (e₃, e₄) 4.3° elevation;

(f) reflectivity factor and (f₁) average radial velocity at 0.5° elevation at 17:36 BT;

(b₁, e₅, e₆, f₂, f₃) vertical cross-section along the black line in Fig. 7a;

(b₁, e₅, f₂) reflectivity factor, (e₆, f₃) radial velocity

表 2 2018 年 8 月 13 日 17:00—17:36 龙卷涡旋 (TVS) 参数特征

Table 2 Parameter characteristics of TVS from 17:30 BT to 17:36 BT 13 August 2018

时间/BT	方位/(°)	距离/km	最大速度差/(m·s ⁻¹)	最大速度差高度/km	底高/km	顶高/km	最大风切变/(10 ⁻³ s ⁻¹)
17:30	262	71	22	2.4	1.1	5.8	37
17:36	261	73	25	1.1	1.1	6.0	40

负径向速度像素对, 考虑应是微超级单体龙卷, 只是中气旋尺度较小(直径为 2 km 左右), 雷达中气旋探测算法识别不出来, 但这也需在今后分析中通过更多个例进行验证。

5 结论

通过对 2018 年 8 月 13 日 17:30 左右发生在天

津静海的龙卷天气进行分析,重点分析龙卷天气发生前后的环境背景条件和局地物理量参数变化及雷达回波特征等,得到以下结论:

(1)此次龙卷天气发生在500 hPa高空槽东移、副高加强西进及1814号台风摩羯北上的过程中,副高外围和台风摩羯之间的低空东南气流加强、水汽源源不断向北输送并在天津上空出现明显气流辐合。龙卷发生前环境大气处于明显不稳定状态,CAPE值达到 $1797 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (CIN为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、0~6 km风矢量差约为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且存在较低抬升凝结高度等,这均有利于龙卷等强对流天气发生。

(2)龙卷发生前局地存在大的对流有效位能(最大值超过 $4000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、较低抬升凝结高度,且龙卷发生前抬升凝结高度出现突降现象(最低降到897 hPa附近)。龙卷发生前后上下游两站近地层(0~1 km高度及以下)垂直风切变值均出现先迅速增大后又迅速减小的特征,且垂直风切变值的迅速减小是由上层开始并迅速向下,而0~1 km以上高度垂直风切变值没有明显变化。另外下游静海站在龙卷发生15 min后0~0.3 km高度垂直风切变值再次发生突增,13 min内增幅达 $64 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,这应是由龙卷击地后迅速向下游移动的灾害性大风造成的。

(3)多普勒天气雷达观测表明此次龙卷的回波具有明显悬垂结构和有界弱回波区及龙卷涡旋(TVS)等特征,且后侧入流非常强并在龙卷击地时从高层到近地层出现明显中尺度径向辐散;通过计算得出龙卷发生时 4.3° 仰角径向速度图上正负速度对的最大旋转速度为 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直涡度为 $2.4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,应是微超级单体龙卷,只是中气旋尺度较小,雷达中气旋探测算法没有识别出来。

(4)海风锋的触发抬升为龙卷发生发展提供动力条件,上游雷暴单体前侧强下沉干冷气流与近地面海风锋携带的相对暖湿空气叠加形成上干冷、下暖湿的局地条件(静力)不稳定,在环境不稳定叠加局地不稳定的有利条件下,阵风锋与海风锋相遇发生碰撞,导致本地不稳定能量强烈释放,激发雷暴单体新生并迅速发展为有组织的雷暴单体,应是此次龙卷发生的直接触发条件。

参考文献

陈元昭,俞小鼎,陈训来,等,2016.2015年5月华南一次龙卷过程观测分析[J].应用气象学报,27(3):334-341.Chen Y Z, Yu X D,

- Chen X L, et al, 2016. A tornado in South China in May 2015 [J]. J Appl Meteor Sci, 27(3): 334-341 (in Chinese).
- 东高红,何群英,刘一玮,等,2011.海风锋在渤海西岸局地暴雨过程中的作用[J].气象,37(9):1100-1107. Dong G H, He Q Y, Liu Y W, et al, 2011. The role of sea breeze front in local storm of Bohai Coast [J]. Meteor Mon, 37(9): 1100-1107 (in Chinese).
- 范雯杰,俞小鼎,2015.中国龙卷的时空分布特征[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).
- 冯佳玮,闵锦忠,庄潇然,2017.中国龙卷时空分布及其环境物理量特征[J].热带气象学报,33(4):530-539. Feng J W, Min J Z, Zhuang X R, 2017. The spatial and temporal distribution of Chinese tornados and their characteristics analysis of environmental physical variations [J]. J Trop Meteor, 33(4): 530-539 (in Chinese).
- 何彩芬,姚秀萍,胡春蕾,等,2006.一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析[J].应用气象学报,17(3):370-375. He C F, Yao X P, Hu C L, et al, 2006. Analyses on a tornado event in front of a typhoon [J]. J Appl Meteor Sci, 17(3): 370-375 (in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019.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, 2019. Analysis of typhoon-tornado activity characteristics and environmental condition in the Pearl River Delta [J]. Meteor Mon, 45(6): 777-790 (in Chinese).
- 蒋义芳,吴海英,沈树勤,等,2009.0808号台风凤凰前部龙卷的环境场和雷达回波分析[J].气象,35(4):68-75. Jiang Y F, Wu H Y, Shen S Q, et al, 2009. Analysis on environmental conditions and Doppler radar data for tornado events in front of Typhoon Fenghuang (0808) [J]. Meteor Mon, 35(4): 68-75 (in Chinese).
- 李改琴,许庆娥,吴丽敏,等,2014.一次龙卷风天气的特征分析[J].气象,40(5):628-636. Li G Q, Xu Q E, Wu L M, et al, 2014. Characteristics analysis of tornado weather [J]. Meteor Mon, 40(5): 628-636 (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).
- 慕瑞琪,徐芬,孙康远,等,2022.江苏台风龙卷环境条件与雷达关键特征分析[J].气象,48(2):190-202. Mu R Q, Xu F, Sun K Y, et al, 2022. Analysis of environmental conditions and radar key features of typhoon-tornadoes in Jiangsu [J]. Meteor Mon, 48(2): 190-202 (in Chinese).
- 邱阳阳,程向阳,杨祖祥,等,2021.登陆台风温比亚引发的龙卷过程分析[J].暴雨灾害,40(5):531-540. Qiu Y Y, Cheng X Y, Yang Z X, et al, 2021. Analysis of a tornado event induced by landing Typhoon "Rumbia" [J]. Torr Rain Dis, 40(5): 531-540 (in Chinese).
- 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).
- 徐芬,郑媛媛,孙康远,2021.江苏龙卷时空分布及风暴形态特征[J].

- 气象, 47(5):517-528. Xu F, Zheng Y Y, Sun K Y, 2021. Characteristics of spatio-temporal distribution and storm morphologies of tornadoes in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 47(5):517-528(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:297-306. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006a. Principle and Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing:China Meteorological Press:297-306(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 tornadoic heavy precipitation supercell storm[J]. Chin J Atmos Sci, 32(3):508-522(in Chinese).
- 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).
- 张晰莹, 吴迎旭, 张礼宝, 等, 2013. 利用卫星、雷达资料分析龙卷发生的环境条件[J]. 气象, 39(6):728-737. Zhang X Y, Wu Y X, Zhang L B, et al, 2013. Analysis of tornado ambient conditions based on the FY-2 satellite and radar data[J]. Meteor Mon, 39(6):728-737(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, 张备, 王啸华, 等, 2015. 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).
- 朱江山, 刘娟, 边智, 等, 2015. 一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究[J]. 气象, 41(2):182-191. Zhu J S, Liu J, Bian Z, et al, 2015. Analysis of cell merger and vortex signature during generation of tornado in Anhui based on Doppler radar observation[J]. Meteor Mon, 41(2):182-191(in Chinese).
- Brown R A, Lemon L R, Burgess D W, 1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar[J]. Mon Wea Rev, 106(1):29-38.
- Donaldson Jr R J, 1970. Vortex signature recognition by a Doppler radar[J]. J Appl Meteor Climatol, 9(4):661-670.
- Evans J S, Doswell III C A, 2002. Investigating derecho and supercell proximity soundings[C]//Preprints, 21st Conference on Severe Local Storms. San Antonio:AMC:635-638.
- Fujita T T, 1971. Proposed mechanism of suction spots accompanied by tornadoes[C]//Preprints, Seventh Conference on Severe Local Storms. Kansascity:AMC:208-213.
- Fujita T T, 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales[J]. J Atmos Sci, 38(8):1511-1534.
- Fujita T T, 1989. The Teton-Yellowstone Tornado of 21 July 1987[J]. Mon Wea Rev, 117(9):1913-1940.
- McCaul Jr E W, 1991. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments[J]. Mon Wea Rev, 119(8):1954-1978.
- Rasmussen E N, 2003. Refined supercell and tornado forecast parameters[J]. Wea Forecasting, 18(3):530-535.
- Rasmussen E N, Blanchard D O, 1998. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters[J]. Wea Forecasting, 13(4):1148-1164.
- Thompson R L, Edwards R, Hart J A, 2000. An assessment of supercell and tornado forecast parameters with RUC-2 model close proximity soundings[C]//Preprints 21st Conference on Severe Local Storms. San Antonio:AMC:595-598.
- 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.

(本文责编:俞卫平 王婷波)