

2023 年 6 月 1 日辽宁龙卷风暴环境及演变特征分析*

杨磊^{1,2,4,5} 郑永光^{3*} 袁潮^{1,5} 曹世腾⁴ 才奎志⁴ 王瀛⁴ 蔡康龙¹

1 中国气象局龙卷风重点开放实验室, 广东佛山 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 国家气象中心, 北京 100081

4 辽宁省气象灾害监测预警中心, 沈阳 110166

5 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

摘要: 2023 年 6 月 1 日午后辽宁发生 5 个龙卷, 本文利用多源观测和 ERA5 再分析资料分析了本次多龙卷出现的原因, 重点探讨了阜新“增强藤田等级”1 级(EF1)和开原“增强藤田等级”2 级(EF2)龙卷风暴的环境条件、演变特征和龙卷形成的可能机制。结果表明: 辽宁位于东北冷涡西南象限和高空槽南侧, 地面(或 850 hPa)与 500 hPa 的强垂直减温率是造成本次过程的极端环境条件因子。辽宁西北部的阜新受低空切变线和干线影响, 龙卷风暴由干线上生成的两个孤立风暴合并而成, 具有钩状回波、下沉反射率因子核(DRC)和龙卷涡旋特征(TVS); 其东侧强回波产生 1 小时降温超过 6℃的强冷池, 强冷池出流与干线交汇, 在强冷池边缘形成强辐合; 当钩状回波移到强辐合区域时, 在 DRC 和 TVS 下方生成阜新龙卷。而辽宁北部受低空急流影响, 0~1 km 垂直风切变更强, 地面辐合线上触发的多个风暴快速合并为线状对流系统, 风暴合并期间地面辐合线上出现多个微气旋并导致辽宁北部 4 个龙卷。其中造成开原龙卷的微气旋的西侧风暴产生 1 小时降温达到 10℃的冷池, 该冷池形成更强的出流, 与地面辐合线交汇形成了较阜新更强的辐合; 当微气旋经过强辐合区时, 低层旋转达到生命期最强且首次达到 TVS 标准时, 其下方产生开原龙卷。

关键词 龙卷 东北冷涡 干线 微气旋

文章编号

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2410.24027

Environmental Conditions and Evolutionary Characteristics of the Tornadoic Storms in Liaoning Province on June 1 2023

YANG Lei^{1,2,4,5}, ZHENG Yongguang^{3*}, YUAN Chao^{1,5}, Cao Shiteng⁴, CAI Kuizhi⁴, WANG Ying⁴, CAI Kanglong¹

收稿日期 2024-03-15; 网络预出版日期

作者简介: 杨磊, 男, 1987 年出生, 高级工程师, 主要从事暴雨、强对流预报技术研究。E-mail: yanglei_nuist@163.com

通讯作者: 郑永光, 主要从事强对流和强降水等中尺度气象学研究。E-mail: zhengyg@cma.gov.cn

资助项目: 国家自然科学基金(U2342204、42305013), 气象能力提升联合研究专项(24NLTSQ001、23NLTSQ002), 中国气象局重点创新团队(2023Z019), 中国气象局青年创新团队(CMA2024QN05), 中国气象局复盘专项(FPZJ2024026), 中国气象局龙卷风实验室开放课题(TKL202307), 中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2023Z019), 灾害天气国家重点实验室开放课题(2024LASW-B25), 辽宁省气象局研究项目(202507)。

Funded by National Natural Science Foundation of China (U2342204、42305013), Joint Research Project for Meteorological Capacity Improvement (24NLTSQ001、23NLTSQ002), China Meteorological Administration Key Innovation Team Fund (CMA2022ZD07), China Meteorological Administration Youth Innovation Team Fund (CMA2024QN05), China Meteorological Administration Replay Fund(FPZJ2024026), China Meteorological Administration Tornado Key Laboratory Fund (TKL202307), Research Project of the Chinese Academy of Meteorological Sciences (2023Z019), the open Grants of the State Key Laboratory of Severe Weather (2024LASW-B25), Liaoning Meteorological Bureau Research Project (202507)

1 China Meteorological Administration Tornado Key Laboratory, Guangdong, Foshan 528315

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 National Meteorological Centre, Beijing 100081

4. Liaoning Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning Centre, Shenyang 110166

5. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166

Abstract: On the afternoon of June 1, 2023, five tornadoes occurred in Liaoning Province. Multi-source observations and ERA5 reanalysis data are used to analyze the causes of the occurrence of multiple tornadoes, especially the environmental conditions, evolutionary characteristics, and possible formation mechanisms of the Fuxin enhanced Fujita 1 scale and Kaiyuan enhanced Fujita 2 scale tornado storms. The results show that Liaoning is located in the southwest quadrant of the Northeast China Cold Vortex and on the south side of the upper trough. The strong vertical temperature lapse rate between the surface (or 850 hPa) and 500 hPa is the key environmental condition factor causing this process. Fuxin in the northwest of Liaoning Province is affected by the low-level shear line and dry line. Fuxin EF1 tornado storm is formed by the merger of two isolated storms generated on the dry line, characterized by hook echo, descending reflectivity core (DRC), and tornado vortex signature (TVS). The strong echo at the east side of Fuxin EF1 tornado storm produces a strong cold pool with a temperature drop of more than 6°C in an hour, and the outflow of the strong cold pool intersects with the dry line, forming a strong convergence on the edge of the strong cold pool. The Fuxin tornado is generated under the DRC and TVS, when the hook echo moves to the strong convergence area. In the meantime, the northern part of Liaoning Province is located inside the low-level jet stream, where the vertical wind shear from 0 to 1 km is much stronger. Multiple storms triggered on the ground convergence line quickly merge into a linear convective system. During the storm merger, multiple microcyclones appear on the ground convergence line, leading to four tornadoes in the northern part of Liaoning Province. Among them, the microcyclone causing the Kaiyuan tornado has a western storm that produces a cold pool with a temperature drop of 10°C in an hour. This cold pool forms a stronger outflow, intersecting with the ground convergence line to form a stronger convergence than that in Fuxin. When the microcyclones pass through the strong convergence area, the low-level rotation reaches the strongest of its life and first meets the TVS criteria, and influenced by the favorable environment, the Kaiyuan tornado is generated.

Keywords Tornado, Northeast China Cold Vortex, Dry line, Microcyclone

引言

龙卷是地球大气中最猛烈的强对流天气 (Brooks et al., 2003; Craven and Brooks, 2004; Rotunno, 2013; Markowski et al., 2018), 常造成重大的人员伤亡和财产损失, 但是由于其尺度小, 精准监测和提前预警难度极大, 因此龙卷的形成机理和预报预警方法研究目前仍然是全球气象研究的热点 (刘勇等, 1998; Trapp et al., 2005; Schenkman et al., 2012; 郑永光等, 2021)。

东北地区是中国龙卷相对多发区之一, 而辽宁北部和内蒙古东南部交界区域是东北地区龙卷的高发区 (王秀明等, 2015; 郑永光, 2020), 易于出现致灾强龙卷, 例如 2017 年 8 月 11 日内蒙古赤峰市 EF4 级龙卷 (黎立页等, 2023) 和 2019 年 7 月 3 日辽宁开原市 EF4

级龙卷（简称“7·3”龙卷）（郑永光等，2020；袁潮等，2021）。因此对该地区龙卷的观测特征和形成机理已有较多研究（王秀明等，2015；才奎志等，2022）。

东北冷涡（简称“冷涡”）是常位于东北地区的闭合低压系统（Nieto et al., 2005, 2007; Porcù et al., 2007; 黄丽君和崔晓鹏, 2023; 孙建华等, 2024），且常导致东北地区出现龙卷（王秀明等，2015；才奎志等，2022）。相比于中国江淮流域和华南的龙卷，东北地区冷涡龙卷常发生在抬升凝结高度较高、近地面相对湿度较低的环境下，同时环境具有较大的温度直减率、强垂直风切变、对流层中层急流和强低空急流等特征，东北龙卷的母体风暴常由干线触发（王秀明等，2015）。因此，东北地区冷涡龙卷的形成条件和发生在偏暖湿（通常有暴雨）背景下的龙卷存在差异，所以非常有必要对冷涡环境下龙卷发生的有利因素继续深入研究。

龙卷通常可分为中气旋龙卷（也称超级单体龙卷）和非中气旋龙卷（或称非超级单体龙卷）（Davies-Jones et al., 1984），东北地区同样出现过不同类型的龙卷。中气旋是指位于超级单体内深厚持久的直径在 2 到 20 km 的 γ 中尺度涡旋；当中气旋底距离地面高度小于 1 km 时，龙卷的发生概率可达 40%（Trapp et al., 2005; 俞小鼎等，2020），“7·3”龙卷就是经典的中气旋龙卷（郑永光等，2020；袁潮等，2021）。非中气旋龙卷也可以分为两类，第一类非中气旋龙卷出现在线状对流系统前沿维持时间不足 1 h、位于大气低层的 γ 中尺度涡旋（常被称为中涡旋）内（Weisman et al., 2003; Trapp et al., 2003; Atkins et al., 2009a, 2009b），例如 2020 年 8 月 18 日新民龙卷（Yang and Zheng, 2024）；第二类非中气旋龙卷通常出现在直径小于 2 km 的微尺度气旋内，该类涡旋龙卷通常出现在近地面不同性质气团所形成的边界层辐合线上，例如 2019 年 8 月 16 日营口龙卷（袁潮等，2022）。不同类型龙卷形成机理存在差异，但都强调近地面弱的冷池对下沉气流的维持和龙卷的形成起到重要作用（Markowski and Richardson, 2010; Schultz et al., 2014）。另外，如果辐合线或者干线同阵风锋相遇，会形成中小尺度的强辐合区域（Reed and Albright, 1997; Wakimoto et al., 2006），通过垂直上升运动对涡旋的拉伸作用进而有利于形成和加强龙卷（Wurman et al., 2014; Schumacher, 2015; Bai et al., 2024a, 2024b）。

2023 年 6 月 1 日 13:20~14:20（北京时，下同），辽宁共发生 5 个龙卷，为 1951 年首次记录到 1 天内出现如此多的龙卷（白华等，2023），因此本次多龙卷过程引起广泛关注。那么本次过程为何出现如此多的龙卷，引起本次过程极端性最主要的因子是什么？不同龙卷母体风暴和涡旋的发生的环境条件、演变规律、形成机制及有利龙卷形成的局地条件都有哪些，又有何不同？已有研究表明龙卷通常发生在对流风暴的弱冷池区域（Markowski and Richardson, 2010; Schultz et al., 2014; 郑永光等，2020），这次过程又为何在产生强冷池的对流风暴会产生如此多的龙卷？本文从观测资料角度进行分析，并同“7·3”龙卷（郑永光等，2020）和东北龙卷已有统计研究成果（王秀明等，2015）对比，期望总结适用于辽宁北部龙卷的预报预警着眼点，以便加深对冷涡背景下多龙卷过程形成机制的认知。

1 资料与方法

本研究使用的资料包括灾调调查、多源观测和 ERA5 再分析资料。

首先使用灾情调查资料介绍本次龙卷实况，参考我国龙卷（中国气象局，2019）和美国 EF 龙卷（McDonald and Mehta, 2006）分级标准，介绍每个龙卷的持续时间、最强等级和灾情等信息。使用质量控制后的时间分辨率为 5 min 的自动气象站资料，分析强对流实况和地面气象条件，将 1 小时降温在 0~4℃、4~10℃和大于 10℃的冷池分别定义为弱冷池、强冷池和极强冷池。基于盘锦国家站的风廓线雷达资料计算 1 km 以下最大风速，分析风垂

直廓线和 1 km 以下最大风速的演变特征，分辨率为 5 min。使用葵花 9 号卫星中心波长为 11.2 μm 的红外亮温资料来分析对流云特征。

使用朝阳 CD 和沈阳 SC 多普勒天气雷达逐 6 min 基本反射率和径向速度资料，分析风暴雷达回波演变和龙卷母体涡旋结构。参考超级单体、线状对流及其相关中小尺度涡旋研究总结的概念模型（Lemon and Doswell III, 1979; Schenkman and Xue, 2016），根据风暴所处雷达探测范围的方位以及径向速度图上小尺度不连续风场特征，确定涡旋所处的位置和旋转方向，从涡旋的正、负速度区域内分别提取相应的退模糊后最大速度，进而获取涡旋的旋转特征。

利用 ERA5 再分析资料分析本次过程的主要影响系统和环境条件，时、空分辨率分别为 1 h 和 0.25°；使用强对流风暴出现前的 11 时自动气象站资料订正 ERA5 再分析资料近地面层相关温湿量，分析开原和阜新龙卷发生时环境参量。

为了区分本次过程与以往冷涡雷暴大风过程环境特征差异，基于杨磊和郑永光（2023）研究中收集的 2017~2021 年雷暴大风样本，提取发生在 5 月 15 日~6 月 15 日冷涡西南象限雷暴大风样本（合计 477 站次），计算该期间雷暴大风环境参量的平均值和标准差 σ 。通过对比本次龙卷和以往同样环境雷暴大风过程环境差异，进而提出本次过程的极端因素。

2 龙卷天气实况

2023 年 6 月 1 日，辽宁出现以雷暴大风为主的强对流天气，其中阜新市区、沈阳法库（视频显示有相距不太远的双龙卷）、康平、铁岭开原先后出现龙卷（图 1a）。在发生龙卷的区域，186 站观测到 8 级以上雷暴大风，10 站观测到 10 级以上雷暴大风，但仅出现 3 站短时强降水，雷暴大风出现的站次显著高于短时强降水，充分表明这是发生在雷暴大风环境中的龙卷过程，与 2015 年 10 月 4 日广东彩虹台风龙卷、2016 年 6 月 23 日江苏盐城龙卷和 2018 年 8 月 14 日摩羯台风龙卷等发生在暴雨环境中的龙卷个例明显不同（郑永光，2020；徐敬涵等，2024）。

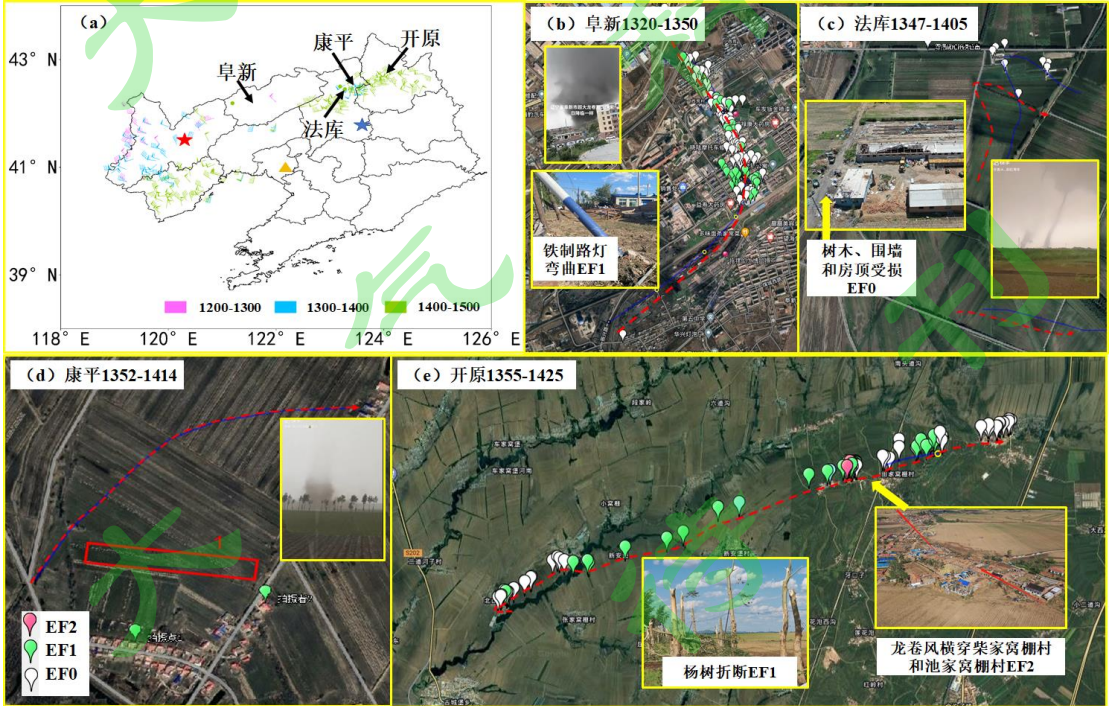


图 1 2023 年 6 月 1 日强对流天气观测实况 (a) 和各个龙卷路径图 (b~e)

（图 a 中风向杆为雷暴大风，圆点为短时强降水，蓝色和红色五角分别为沈阳 SC 和朝阳 CD 波段雷达位置，

三角表示盘锦风廓线雷达位置；图 b-e 中的红色线表示龙卷移动路径，EF0、EF1 和 EF2 分别表示“增强藤田等级”0 级、1 级和 2 级）

Fig.1 Observations of severe convective weather (a) and the pathes of the different tornadoes (b~e) on 1 June 2023. (The wind barb in Fig.a represent thunderstorm gusts, the circle represent short-duration heavy rain, the blue and red pentagrams represent the locations of Shenyang SC and Chaoyang CD radar, respectively, and the triangle denotes the location of Panjin wind profiler; The red lines in Fig.b-e represent the moving paths of tornados, EF0, EF1 and EF2 represent Enhanced Fujita scale 0, 1 and 2)

前文所述本次“6·1”过程是 1951 年以来辽宁首次发现如此多的龙卷，非常具有调查和深入分析研究价值。6 月 2 日，国家气象中心、辽宁省气象局、黑龙江省气象局和广东省佛山市气象局等 4 个单位专家立即对此次龙卷过程进行了详细现场勘查和灾情调查(表 1)。

6 月 1 日 13:20，阜新市区最先发生龙卷（图 1b），主要影响了阜新市区西南部的海州区，移动方向首先是由西南向东北移动，在途经机动车辆小区后，向西北方向移动，移动路径出现明显转折。13:50，在细河至海清路附近消亡，持续时间约 30 分钟。该龙卷的特点是移动极为缓慢，30 分钟生命史仅移动了 3 km，最大致灾宽度约 0.3 km，移动速度约 6 km/h，较“7·3”开原龙卷（28 km/h）和一般龙卷移速（30~60 km/h）显著偏慢（张涛等，2020）。由于导致路灯等金属杆体弯曲，因此定级为国家标准中等强度龙卷，相当于 EF1 级龙卷。

阜新龙卷发生后，13:47~14:05 和 13:52~14:14（图 1c~d），位于辽宁北部的康平县和法库县发生龙卷，如前所述法库为双龙卷，这些龙卷强度较弱，仅造成树木、围墙和房顶受损，强度等级为国家标准弱龙卷，相当于 EF0 级。

13:55~14:25，开原又发生龙卷(图 1e)，从西南向东北方向移动，移动路径较为平直，长度达 11 km，最大致灾宽度约 0.2 km，位于金钩子镇柴家窝棚村；其中李家水库监控设备拍摄到龙卷从 13:58:24 到 13:58:56 期间移动距离约 190 m，估算移动速度为 21 km/h，移速明显快于阜新龙卷。随后，龙卷正面袭击了金钩子镇柴家窝棚村和池家窝棚村，造成较多的水泥屋顶外墙倒塌，强度达到国家标准强度等级的强龙卷级，相当于 EF2 级，导致 13 人受伤，是本次龙卷过程强度最强的龙卷。该龙卷的主要影响区域同“7·3”龙卷都发生在开原市的金钩子镇（张涛等，2020）。

总结本次龙卷过程（表 1），第一个阜新龙卷东移缓慢、龙卷路径呈现弯曲特征；最后一个开原龙卷向东移动较快，龙卷中心移动路径更长更直，同 2017 年 8 月 11 日内蒙古赤峰多龙卷过程具有类似的特征（黎立页等，2023）。阜新和开原龙卷持续时间最长、强度最强，因此本文重点分析阜新和开原龙卷的影响因素。

表 1 2023 年 6 月 1 日辽宁龙卷调查信息
Table 1 Field survey of the tornadoes in Liaoning Province on 1 June 2023

名称	起始和消亡时间	受灾区域	龙卷最强等级 (国家标准/ EF 等级)	判识依据	路径长度	最大影响宽度
阜新龙卷	13:20~13:50	阜新市区海州区站前街道机动车辆小区、韩家店镇西荒村、细河村、海清路	中等强度/ EF1	树木倒伏；建筑的门窗破碎	2.8 km	0.3 km
法库龙卷	13:47~14:05	法库县孟家镇孤树子村东侧	弱/EF0	铁皮顶砂浆砖墙结构的鸡舍	0.8 km	-

1					顶受损		
法库 龙卷	13:47~14:05	法库县孟家镇孤树子村东南 侧	弱/EF0	杨树树枝折断	0.6 km	-	
2							
康平 龙卷	13:52~ 14:14	康平县赵家窝堡村	弱/EF0	杨树树枝折断	1.0 km	-	
开原 龙卷	13:55~ 14:25	开原市北山村、李家水库、 新安堡村、柴家窝棚村、池 家窝棚村和马千台山村	强/EF2	较多的水泥房 屋外墙倒塌	11 km	0.2 km	

3 大气环流和环境条件

3.1 大气环流配置

6月1日500 hPa天气形势显示(图2a),东北地区位于冷涡的西南象限,冷涡西南侧存在一个天气尺度高空槽和一个次天气尺度短波槽,而辽宁北部位于次天气尺度短波槽南侧,为大尺度上升运动区。历史上多数东北龙卷发生在冷涡高空槽的槽区内(王秀明等,2015),“7·3”龙卷也是如此,只是“7·3”龙卷距离冷涡中心更近(郑永光等,2020)。冷涡后侧的冷空气逐渐南下,在内蒙古、吉林和辽宁交界处出现冷中心,温度仅-20℃,显著低于“7·3”开原龙卷(-11℃)(袁潮等,2021)。

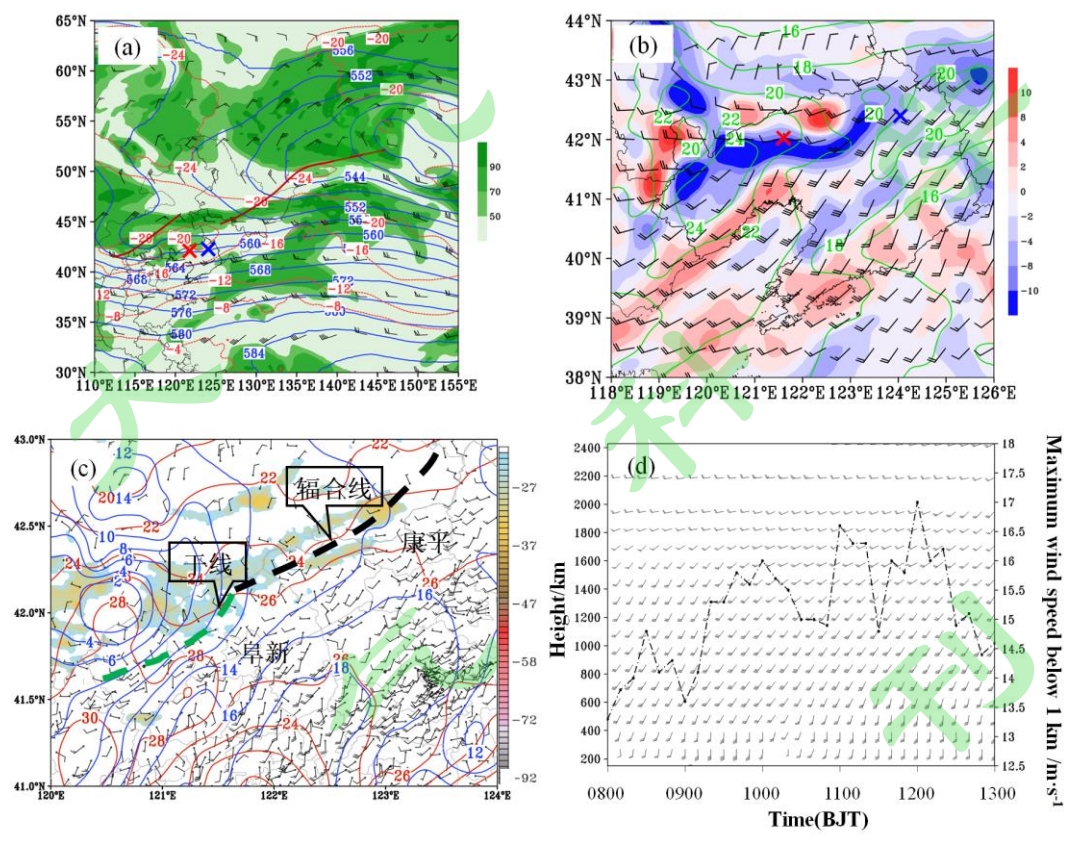


图2 2023年6月1日(a)11时500 hPa位势高度(蓝色等值线,单位: dagpm)、温度(红色虚线,单位: ℃)、风场(风向杆)和相对湿度(填色,单位: %)和(b)11时925 hPa风场(风向杆)、温度(等值线,单位: ℃)和散度(填色,单位: $10^{-5} s^{-1}$)(红色×为阜新,蓝色×为开原);(c)11时地面风场(风向杆)、温度(红色等值线,单位: ℃)、露点温度(黄色等值线,单位: ℃)和红外黑体亮温(填色,单位: ℃);(d)8:00~13:00 盘锦风廓线演变(填色表示垂直速度,单位: m/s;左侧坐标轴为距地高度,单位 m)和1km以下最大风速(点划线,单位: m/s,右侧坐标轴)

Fig. 2 The geopotential height (blue lines, unit: dagpm), temperature (red lines, unit: ℃), wind (barbs) and

relative humidity (shaded, unit: %) at 500 hPa at 11:00 BT (a) and wind (barb), temperature (contour, unit: °C) and divergence (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) at 925 hPa at 11:00 BT (b) 1 June 2023 (the red × denotes Fuxin, and the blue × Kaiyuan); the surface winds, temperatures (red line, unit: °C), dew point temperature (yellow line, unit: °C) and infrared blackbody brightness temperature (shaded, unit: °C) at 11:00 BT 1 June 2023 (c); the time-height wind profiles and the maximum wind speed below 1 km during 8:00~13:00 BT from Panjin wind profiler (the shaded areas denotes vertical speed, unit: m/s; the left vertical axis represents the height from ground, unit: m; the right vertical axis represents wind speed and the dotted line is the maximum wind speed below 1 km, unit: m/s) (d)

925 hPa (图 2b)，在辽宁北部的上游即内蒙—吉林交界处存在低空切变线，同时辽宁北部位于温度脊中，配合 500 hPa 冷空气，形成垂直减温率很大的温度层结。锦州探空站 08 时观测显示该时刻大气低层风速并未达到低空急流强度，但 ERA5 再分析资料 (图 2b) 和盘锦风廓线雷达观测 (图 2c) 均显示 850 hPa 和 925 hPa 辽宁中部西南气流明显加强，普遍超过 12 m/s，达到低空急流的标准，开原正位于该急流的末端，强于“7·3”开原龙卷 (袁潮等, 2021)，有利于低层垂直风切变加强和从渤海等地输送水汽至辽宁北部。而阜新位于切变线底部、强辐合区边缘，925 hPa 散度达到 $-8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，低空辐合抬升条件较开原更强。但由于阜新位于低空急流的西侧，850 hPa 和 925 hPa 均为偏西风，风速较开原低 6~8 m/s，所以阜新的水汽和低层风切变数值均低于开原。

地面观测显示，温度方面，辽宁北部温度达到 26~28°C (图 2c)，和“7·3”龙卷过程相当，表明此次过程地面温度条件非常有利。从气压和风场来看，辽宁北部位于低压底部 (图略)，地面风场具有辐合特征，但是不同区域地面辐合线的类型不同。其中辽宁北部的沈阳至铁岭地区 (以平原为主) 存在与地面冷锋相伴随的且尺度更大的地面辐合线。而辽宁西北部的辐合线具有明显干线特征，南北两侧露点梯度接近 $16^\circ\text{C}/100 \text{ km}$ ，露点的梯度明显大于温度梯度且超过以往东北干线的统计特征 (方祖亮等, 2020)。干线和地面辐合线连在一起，11 时开始在这条西南至东北走向的辐合线上有对流云新生，红外黑体亮温最低低于 -32°C ，本次龙卷过程的母体风暴的触发机制和以往东北地区龙卷相似 (王秀明等, 2015)。

3.2 环境条件

大气层结方面，11 时阜新和开原 850 hPa 与 500 hPa 的垂直减温率分别为 $8.3^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $7.9^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ (表 2)，标准化距平达到同期冷涡西南象限雷暴大风过程的 2.5~4 个 σ ，通常标准化距平绝对值达到 2.5 个 σ 即可视为非常强的异常 (孙军等, 2012)。所以本次过程垂直减温率显著强于以往雷暴大风过程，也高于冷涡龙卷的研究结果 (王秀明等, 2015; 郑永光等, 2020)，是引起本次过程极端性的主要因子之一。我国热带气旋、温度气旋导致的多龙卷事件也发生在强温度直减率的环境中，这不仅是因为此种环境条件有利于形成对流风暴，也会形成更强的上升气流，有助于龙卷的生成 (Wen et al., 2024)。这种层结下，阜新和开原的 CAPE 分别为 1959 J kg^{-1} 和 1828 J kg^{-1} ，对流抑制能量 CIN 分别为 65.4 J kg^{-1} 和 3.2 J kg^{-1} ，对流抑制基本消失。

水汽方面，辽宁北部整层大气可降水量 PWV 仅为 22~24 mm，925 hPa 比湿仅 4~9 g/kg，显著低于气候上同月强对流发生时需要的水汽条件 (杨磊等, 2016)，同时也低于“7·3”龙卷 (郑永光等, 2020; 袁潮等, 2021)，这是龙卷区域并没有出现短时强降水的原因。但是 11 时，龙卷发生区域都出现 PWV 增加的现象，2 h 增量达到 4 mm，相应地面露点为 14~16°C，较 2 h 前高 2°C。因此，本次过程虽然发生在更为干燥的大气环境中，但强对流发生前水汽有所增加，尽管水汽增量没有“7·3”开原龙卷那么明显 (袁潮等，

2021)，但表明环境条件向更有利于强对流天气发生转变。

由于 500 hPa 辽宁北部位于风速大于 20 m/s 的急流区内，而地面位于低压底部气压梯度大值区内，具有了强垂直风切变的有利条件，辽宁中北部 0~6 km 风矢量均超过 18~23 m/s，达到了美国强垂直风切变的标准（Weisman and Klemp, 1982; Grams et al., 2012），但稍弱于 2016 年阜宁龙卷（郑永光等, 2016; 李佳等, 2017）。

中气旋龙卷发生时常需要较大的 0~1 km 风矢量差(≥ 8 m/s)、较低的抬升凝结高度 LCL (≤ 1.2 km)（俞小鼎等, 2020）。ERA5 资料显示阜新和开原的 0~1 km 风矢量差分别为 2.3 m/s 和 5.3 m/s，和“7·3”龙卷大致相当（郑永光等, 2020），较中国西风带龙卷和美国 F2/EF2 级龙卷发生时的结果（普遍达 10 m/s 以上；Doswell III and Evans, 2003）显著偏弱，也普遍小于王秀明等（2015）统计的相应数值（12 m/s）。但从盘锦风廓线雷达资料可见（图 2c），在 08 时后存在边界层急流逐渐加强现象，“7·3”龙卷过程中也存在类似现象（郑永光等, 2020）。这支来自于渤海的边界层急流不仅有利于向辽宁北部输送水汽，而且还可增加低层垂直风切变的强度，因此开原 0~1 km 风矢量差大小约是阜新的 2 倍（表 2）。

ERA5 资料计算的阜新和开原 LCL 分别为 1.8 km 和 1.5 km，高于中国西风带龙卷研究结果和东北龙卷的统计特征（王秀明等, 2015; 俞小鼎等, 2020），和“7·3”龙卷相当（郑永光等, 2020）。阜新和开原 LCL 至近地面最低相对湿度分别为 18%和 45%，另外 700~500hPa 存在明显的干层，相对湿度仅 30~50%。以上环境条件和冷涡西南象限气候特征有关（杨磊和郑永光, 2023），也是近地面容易出现强冷池并造成雷暴大风的有利因素（杨磊和郑永光, 2023），并不是很有利于龙卷形成（Doswell III and Evans, 2003; Schultz et al., 2014; 郑永光等, 2021）。后文会重点探讨强冷池的特征及其对龙卷的影响。

表 2 2023 年 6 月 1 日 11 时阜新、开原环境参数和东北龙卷统计特征、“7·3”开原龙卷及冷涡雷暴大风对比

Table 2 Comparison between environmental conditions of the tornadoes in Fuxin, Kaiyuan at 11:00 BT on 1 June 2023, tornadoes in Northeast China, the tornado in Kaiyuan on 3 July 2019, and thunderstorm gusts in Northeast China

物理量	阜新	开原	东北龙卷统计 (王秀明等, 2015)	2019 年开原 EF4 级龙卷(郑永光 等, 2020; 袁潮等, 2021)	东北冷涡西南象限雷 暴大风环境参量平均 值/标准差(杨磊和郑 永光, 2023)
影响系统	冷涡后侧 短波槽	冷涡后侧 短波槽	冷涡南侧次天 气尺度短波槽	东北冷涡	--
触发机制	干线	地面辐合线	干线和地面辐 合线	干线辐合线与 东侧的阵风锋辐 合线	--
大气可降水量 PWV (mm)	15	22	10~45	33	19/6
925hPa 比湿 (g/kg)	4.0	9.3	7.5~12.5	8.8	6/2
CAPE (J/kg)	1959	1828	200~2100	3450	662/192
地面与 500hPa 垂直减温率 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)	8.6	8.2	5.3~6.2	7.1	7.1/0.4
850hPa 与 500hPa 垂直减温率 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)	8.3	7.9	7.5~8.3	7.3	7.0/0.5
对流抑制能量	65.4	3.2	0~300	20	--

CIN (J/kg)					
850-925hPa 平均 风速 (m/s)	6	12	/	12	11/3
0-6 km 风矢量差 (m/s)	18	23	12-42	21	16/6
0-1 km 风矢量差 (m/s)	2.3	5.3	12	6	6/3
抬升凝结高度 LCL (km)	1.8	1.5	0.3-1.5	1.5	1.6/0.6
LCL 至地面最低 相对湿度 (%)	18	45	/	44	44/13

4 龙卷风暴和涡旋演变

4.1 阜新龙卷雷达特征

阜新龙卷发生的区域位于朝阳雷达东北方向 105 km。13:12 时，朝阳雷达 0.5° 反射率因子图（距地 1.5 km）（图 3a）监测到阜新市区东南部存在一个尺度仅 27 km 的风暴 A_1 ，3.4° 仰角（图 3b）（距地 5.1 km）显示阜新市区西部海州区出现尺度更小（仅 12 km）、最强回波仅 35 dBz 的风暴 A_2 。13:12~13:17（图 3c~d）， A_1 和 A_2 在距地 5~8 km 处合并，合并期间 A_2 风暴的反射率因子逐渐向下发展。

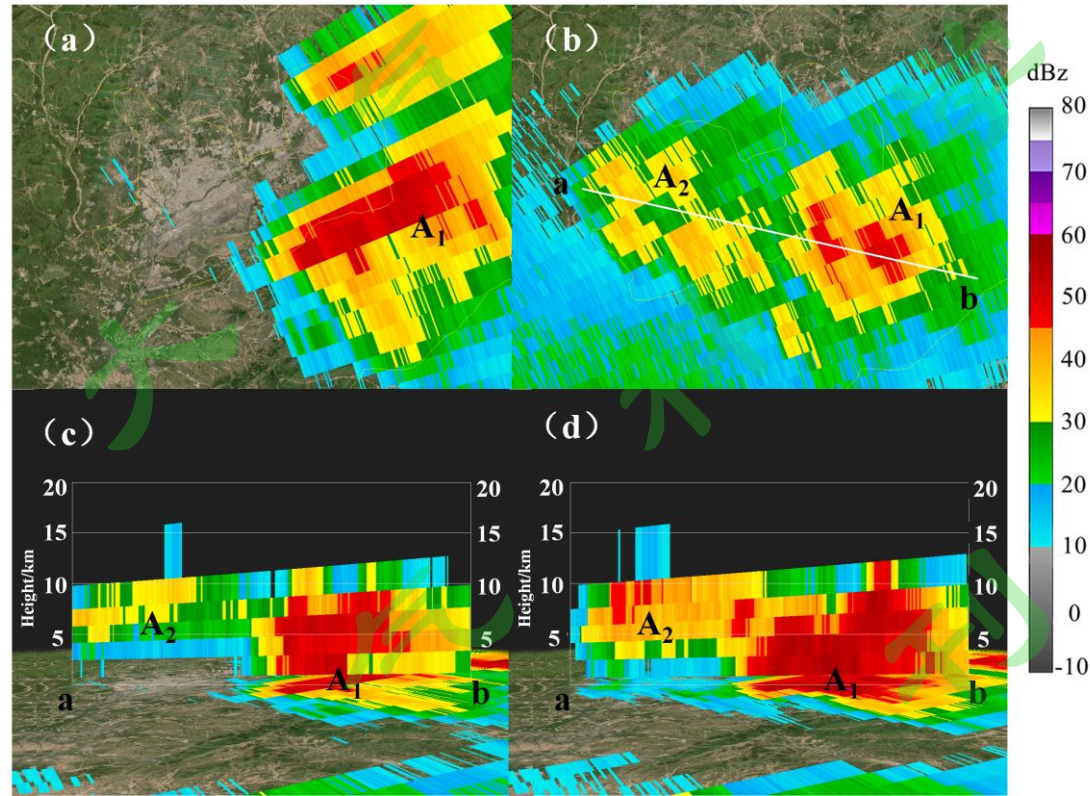


图3 2023年6月1日辽宁朝阳雷达反射率因子(单位: dBz)(a.13时12分0.5°仰角; b.13时12分3.4°仰角)和沿着白色直线反射率因子垂直剖面(单位: dBz)(c.13时12分; d.13时17分)

Fig.3 Radar reflectivity of Chaoyang radar on 1 June 2023 (unit: dBz) (a.13:12 0.5° elevation; b.13:12 3.4° elevation) and vertical cross section of reflectivity along the white line (unit: dBz) (c.13:12; d.13:17)

13:23 时(图 4a~b)， A_1 和 A_2 完全合并，合并后的风暴 A_3 具有钩状回波特征(图 4a)；大于 60 dBz 的反射率因子高度达到 9.2 km (图 4c)，相比前个时刻升高 0.6 km，高于“7·3”龙卷过程的 8 km (郑永光等，2020)。从风暴垂直结构来看(图 4c)，4 km 高度

以下存在有界弱回波区，表明边界具有强暖湿气流流入流和强盛的上升气流。另外，此时钩状回波处存在下沉反射率核（Descending Reflectivity Core, DRC），DRC 距地面高度为 1.5 km，最强回波达到 32 dBz，与周围弱回波相差约 8 dBz，位于风暴上升气流的右后象限，满足 Rasmussen et al. (2006) 提出的 DRC 定义。DRC 的形成是由上升气流区后侧的水凝物沉积引起的，可作为龙卷生成的先兆或是伴随特征（Rasmussen et al., 2006; Kennedy et al., 2007; Byko et al., 2009）。但是本次过程 DRC 最强回波强度要低于 2017 年 8 月 11 日赤峰龙卷过程（黎立页等，2023）。本次过程中，风暴 A_3 在出现钩状回波和 DRC 特征后，随后造成龙卷。钩状回波仅维持 2 个体扫，向东北方向仅移动 0.8 km，其向东缓慢的移动特征也和阜新龙卷一致。13:52 时，从阜新市区西部再次快速移来的风暴 A_4 （图略），与 A_3 合并，阜新龙卷随后消亡。

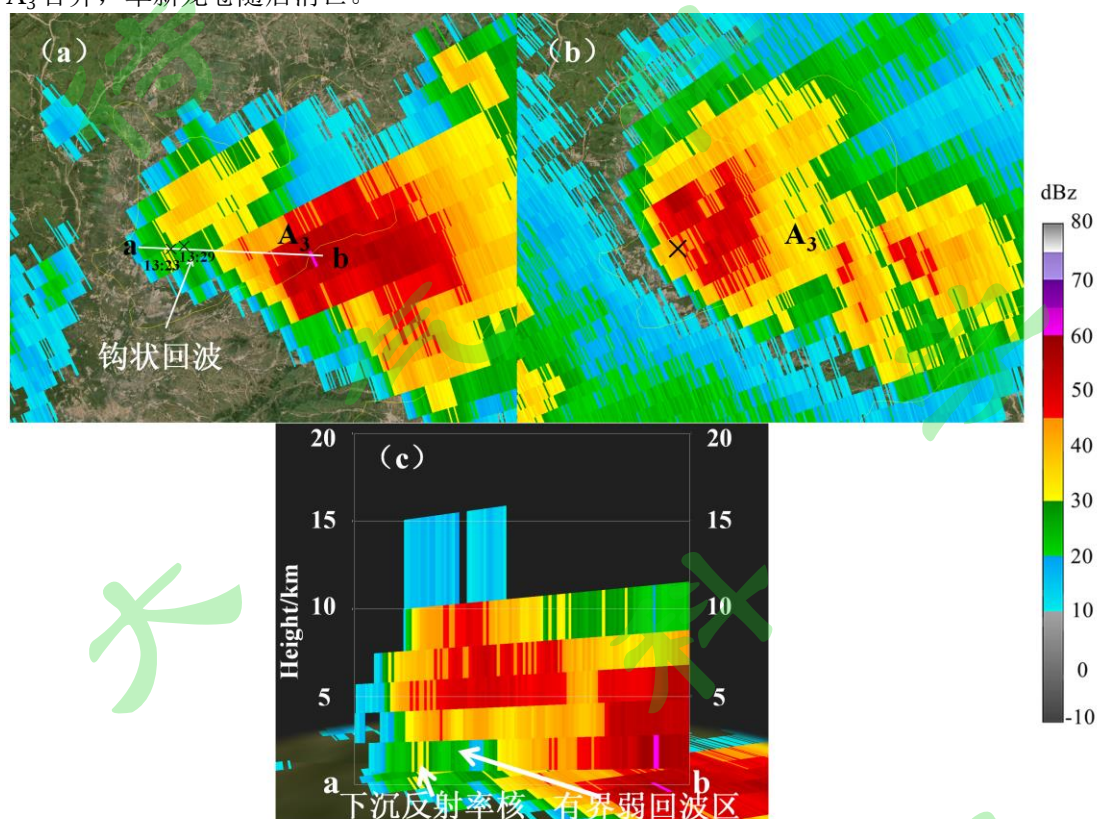


图 4 2023 年 6 月 1 日 13 时 23 分朝阳雷达反射率因子（单位：dBz）（a. 0.5° 仰角，b. 3.4° 仰角）以及沿着白色直线的反射率因子剖面（c）（图 a 中“×”表示下沉反射率核的位置）

Fig.4 The radar reflectivity (unit: dBz) at 13:17 on 1 June 2023 (a. 0.5° elevation angle, b. 3.4° elevation angle) and vertical cross section of reflectivity along the white line(c) (the “×” represents the position of the Descending Reflectivity Core)

13:23 时（图 5a），风暴 A_3 的钩状回波区存在 γ 中尺度涡旋，旋转强度并未达到中气旋的标准，但是在 γ 中尺度涡旋内、DRC 下方有清楚的龙卷涡旋特征（Tornado Vortex Signature, 简称 TVS）。相邻像素径向速度差为 24.5 m/s，符合 TVS 要求的相邻像素径向速度差超过 20 m/s 的判定标准（Meng et al., 2018）。13:29（图 5b）和 13:35（图 5c），TVS 缓慢移动，速度差分别为 22 m/s 和 18.5 m/s，存在减小的特点。13:20~13:50，风暴 A_3 在阜新市区停滞，具有超级单体风暴的钩状回波、有界弱回波区和 DRC 等形态特征

(Lemon and Doswell III, 1979; 郑永光等, 2021); 在弱回波区、DRC 下方存在 TVS, 灾情调查获得的龙卷位置也位于 TVS 下方。TVS 在雷达观测到的 2 个体扫内向东移动约 0.58 km, TVS 缓慢移动规律与灾调获得的阜新龙卷移动特征相符。

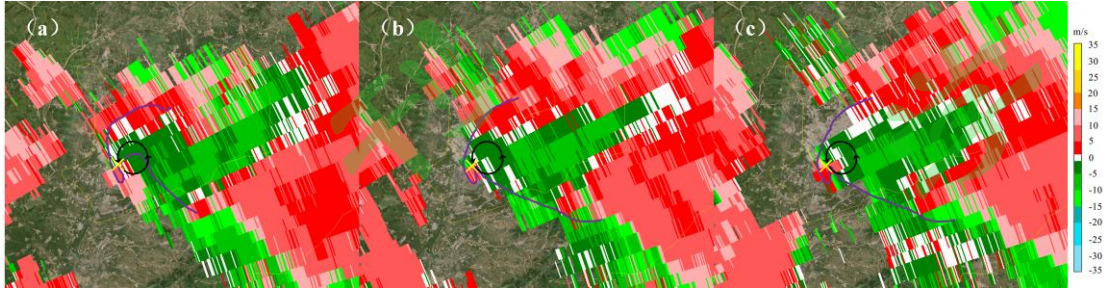


图 5 2023 年 6 月 1 日朝阳雷达 0.5°仰角径向速度 (单位: m/s, a.13 时 23 分, b.13 时 29 分, c.13 时 35 分. 黑色实线为相应时刻和仰角上反射率因子为 35 dBz 等值线, $\odot$ 为 γ 中尺度涡旋, “x”为龙卷涡旋特征 TVS 的位置)

Fig.5 Radial velocity at 0.5° elevation on 1 June 2023 (unit: m/s, a.13:23 BT, b.13:29 BT, c.13:35 BT. the black line is the 35 dBz contour of reflectivity, the $\odot$ denotes the meso- γ -scale vortex, the “x” represents the position of TVS)

4.2 开原、法库、康平龙卷雷达特征

开原、法库、康平位于沈阳 SC 波段雷达站的东北方向约 70~75 km, 0.5°仰角距地高度为 0.9~1.0 km。图 6a 为开原龙卷生成前对流风暴 (回波强度大于 30 dBz) 演变, 其中紫色线为 13:36 时 30 dBz 反射率因子等值线分布, 辽宁北部的地面辐合线快速触发 B₁、B₂ 和 B₃。13:36 时 (图 6a), 这些风暴向东北方向传播, 在约 5 km 处合并 (图 6b~d), 于 13:52 合并为线状风暴 (图 6a), 造成法库、康平、开原等地出现 4 个龙卷。

通过比对自动站和雷达资料可以发现, B₁、B₂ 和 B₃ 是在地面辐合线上生成, 随后沿着辐合线向东北方向传播, 这与以往冷涡西南象限强对流过程风暴向东南方向 (与辐合线或锋面垂直方向) 传播的规律存在不同 (蒋超等, 2024)。Bai et al. (2024a, 2024b) 通过模拟分析发现, 地面辐合线上的辐合抬升运动比周围强, 如果风暴沿着辐合线传播, 涡度被垂直速度拉伸的时间更久, 因此更容易形成龙卷风暴。在本次过程中, 辽宁北部风暴向东北方向传播的原因与前文提到的高低空影响系统稳定少动有关, 同时辽宁中部从地面到 500 hPa 均为西南风, 引导气流使得风暴向东北方向传播。

在龙卷生成前的最临近时刻 13:52 (图 6d~e), 线状风暴强回波向下伸展到地面。另外, 线状风暴移动方向前侧 (风暴东北端) 的低层具有反射率因子梯度大值区 (图 6e), 垂直方向上存在弱回波区 (图 6d~e), 这意味着风暴北侧存在强上升运动, 涡旋在强上升气流的拉伸作用下得以旋转加强, 进而有利于龙卷的生成。

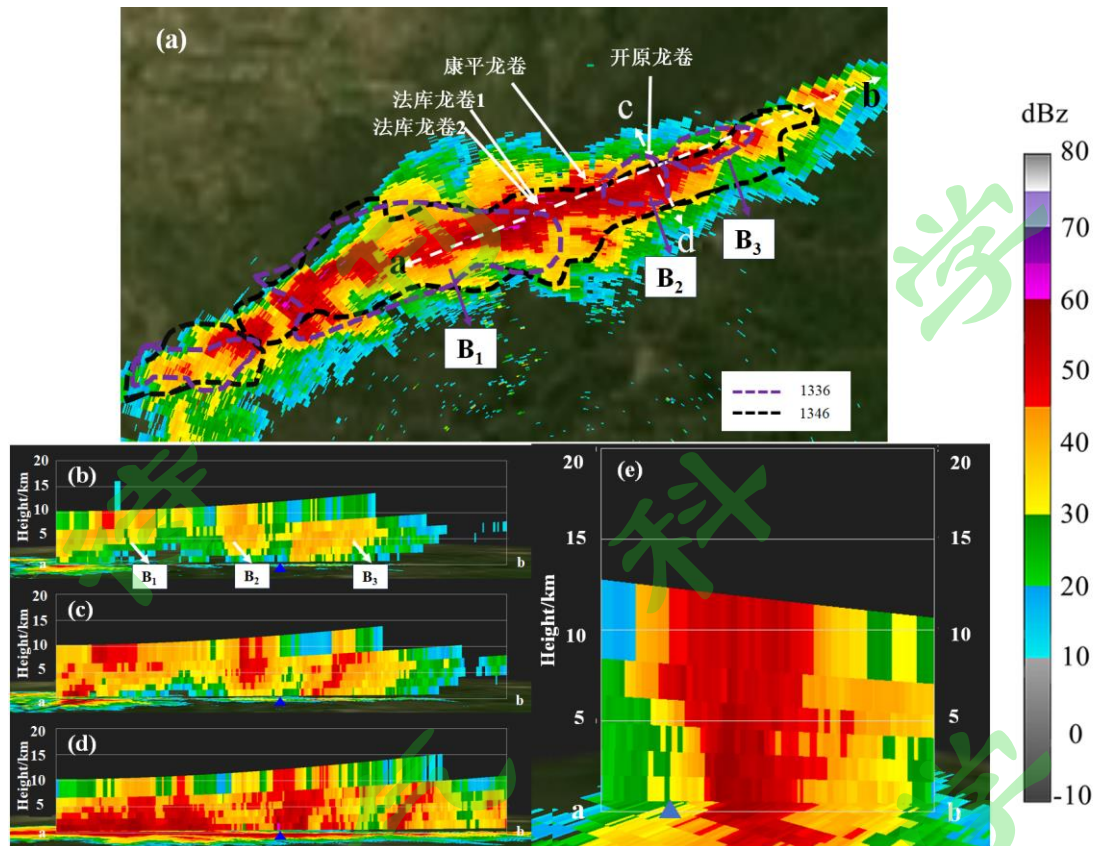


图6 2023年6月1日沈阳雷达(a) 13:52 0.5°仰角反射率因子(单位: dBZ)(紫线和黑线分别为13:36和13:46 30 dBZ等值线);(b) 13:36、(c) 13:46、(d) 13:52沿着图(a)中ab直线的反射率因子垂直剖面(单位: dBZ);(e) 13:52沿着图(a)中cd直线的反射率因子垂直剖面(单位: dBZ)

Fig. 6 Reflectivity at 0.5° elevation at 13:52 BT on 1 June 2023 (the purple and black line is the 30 dBZ contour of reflectivity at 13:36 and 13:46, respectively) (a); the vertical cross section of reflectivity along the ab line in Fig. a at 13:36 (b), 13:46 (c), and 13:52 (d); the vertical cross section of reflectivity along the cd line in Fig. a at 13:52 (e)

13:41时, 0.5°仰角径向速度图(图7a)上存在着与地面辐合线相对应的切变带。随着风暴的合并, 13:57时(图7b), 在风场切变带上可见多个龙卷母体涡旋, 首先在低层生成, 尺度小于2 km, 已有文献常称为微气旋(Fujita, 1981; Wakimoto et al., 1989), 这些微气旋造成辽宁北部出现4个龙卷。

由于开原龙卷强度更强、持续时间更长, 重点分析开原龙卷母体涡旋的演变特征。13:41时(图7a), 开原龙卷母体涡旋表现为径向速度图上的相邻方位角切变, 初始相邻像素径向速度差为11 m/s, 速度差随高度升高明显减弱(图7c)。13:46时(图7c), 在地面辐合线上的辐合抬升以及风暴北侧弱回波区内上升气流的拉伸作用下, 龙卷母体涡旋出现“自下而上”的发展特征。图6(c)显示此时线状风暴在约5 km处已开始合并, 龙卷母体涡旋在此高度附近(4~7 km处)表现为 γ 中尺度涡旋, 而低层仍然是微气旋, 低层旋转强度略微加强。13:52时, 龙卷母体涡旋的相邻像素径向速度差较前时刻显著加强, 最强速度差为20 m/s, 出现在4 km处, 达到TVS标准(Meng et al., 2018)。

13:57时(图7b, c), 接近龙卷生成时刻, 龙卷母体涡旋整层具有 γ 中尺度涡旋的特征, 底高接近0.9 km。尽管 γ 中尺度涡旋的旋转强度最大仅12 m/s, 未达到中气旋的标准。但是龙卷母体涡旋的相邻像素径向速度差为生命期最强, 2.4°仰角(距地约3.9 km)达到33

m/s, 0.5°仰角（距地约 0.9 km）也加强到 24.5 m/s, 最低仰角首次达到 TVS 标准, 此时在其下方产生龙卷。

γ 中尺度涡旋持续时间较短, 在 14:02 后快速减弱消失, 与龙卷相关的涡旋仍然是位于边界层辐合线上的微气旋, 其强度仍然接近 TVS 标准。14:18~14:23 时, 微气旋的旋转减弱、垂直厚度减小, 首先在低层消失, 随后龙卷也随之消亡。

开原龙卷母体涡旋具有以下特征: (1) 母体涡旋首先生成于低层辐合边界的切变区, 最初表现为微气旋, 切变速度随着高度升高逐渐减弱; (2) 在上升气流的拉伸作用下, 母体涡旋出现“自下而上”且旋转加强的特征, 在风暴合并的高度处表现为 γ 中尺度涡旋, 而低层仍然表现为微气旋; (3) 当母体涡旋最低仰角相邻像素径向速度差达到生命期最强, 首次达到 TVS 标准的时刻, 在其下方产生龙卷; (4) 龙卷生命期内, 母体涡旋整层仅 1 个时刻具有 γ 中尺度涡旋特征, 旋转强度也未达到中气旋标准, 更多时刻表现为边界层辐合线上、强度达到 TVS 标准的微气旋, 微气旋的位置和移动方向与龙卷一致, TVS 的强度也要强于阜新龙卷过程, 这是开原龙卷强度强于阜新龙卷的原因之一。

以上分析表明, 辽宁北部的多龙卷是线状对流风暴直接导致的, 母体涡旋是形成并始终位于地面辐合线上, 其特征与以往边界层辐合线上微气旋龙卷特征更为一致 (French et al., 2013; 王秀明和俞小鼎, 2019)。

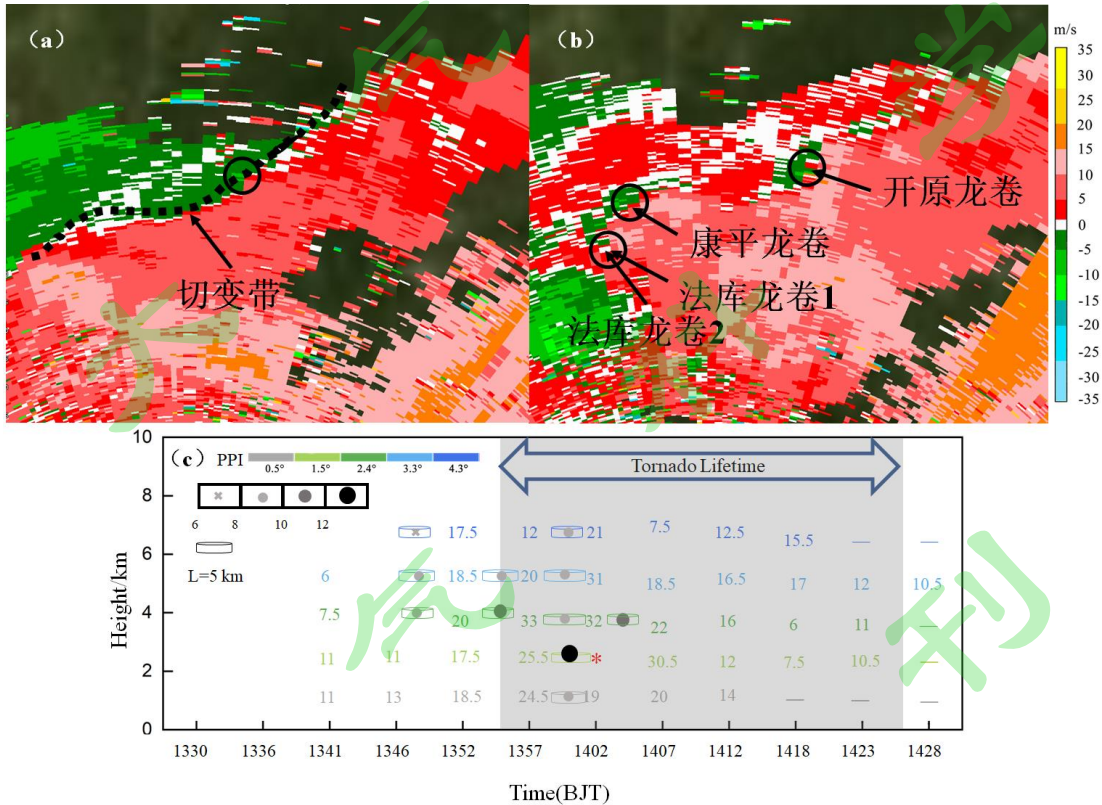


图 7 2023 年 6 月 1 日 13:41 时 (a)、13:57 时沈阳雷达 0.5 仰角径向速度 (单位: m/s) (圆圈为龙卷涡旋特征 TVS); (c) 2023 年 6 月 1 日 13:30~14:28 开原龙卷涡旋的演变 (数字为相邻方位角切变; 圆柱的大小表示涡旋的直径, 圆柱的颜色表示涡旋的旋转速度, 红色星号为噪音影响无法识别; 灰色阴影区域代表龙卷持续时段)

Fig. 7 Radial velocity at 0.5° elevation at 13:41 BT (a) and 13:57 BT 1 June 2023 (unit: m/s) (The circle represents the tornado vortex signature TVS); (c) Time—height evolution of tornado vortex in Kaiyuan during 13:30~14:28 BT on 1 June 2023 (the digits are the adjacent azimuthal shears; the size of the cylinder represents the

diameter of the vortex, and the color of the cylinder represents the rotational speed of the vortex, the red asterisk indicates the vortex that cannot be identified due to noise effects; the gray shaded area represents the existing time period of the tornado)

5 地面气象条件与龙卷生消关系

并不是所有 γ 中尺度涡旋或 TVS 都会产生龙卷，这是因为近地面气象条件也会影响低层垂直涡度的演变（郑永光等，2020），下面分析阜新和开原近地面气象条件的演变特征及其对龙卷的影响。

阜新龙卷发生前，以 12:30 时（图 8a）和 13:10 时为例（图 8b），受风暴 A_1 和 A_2 影响，阜新县与阜新市区的交界以及阜新市区的东部出现强冷池，冷池区域内地表气温在 1 小时内降幅最大超过 6°C ，在强冷池区域内，出现阵风最强达 7 级的雷暴大风。而 13:10 时（图 8b），阜新龙卷生成地位于强冷池的西侧、距离强冷池中心约 30 km，此刻受风暴 A_3 西侧弱回波区影响，处于强冷池边缘，该处地表气温在 1 小时内仅降低约 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ ，龙卷常发生在这种强度不太强的冷池环境中（郑永光等，2020）。另外，在 12:30 时（图 8a），阜新市区北部的冷池形成辐散风场，该冷池的出流最大为 4 m/s，与其南侧偏南风形成辐合，辐合中心强度达 $-5\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 。随后 13:10 时（图 8b），风暴 A_1 向东南方向移动和 A_2 合并，该冷池的西侧出现偏北和偏东气流，最大风速增强到 6 m/s，更强的冷池出流与干线两侧的两股气流交汇，形成了引言部分中提到的强辐合（Reed and Albright, 1997; Wakimoto et al., 2006），辐合中心强度增强到 $-6\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ ，局地辐合抬升会通过垂直拉伸作用进一步增强近地面垂直涡度，进而促进了龙卷形成（Wurman et al., 2014; Schumacher, 2015）。

对于开原地区，其上游移来的风暴 B_2 从 13:36 时到 13:50 时出现强回波快速下降接地的特征（图 6b~d），从而产生了强下沉气流，于 13:50 时在近地表形成极强的冷池（图 8d），地表气温最低由 27°C 骤降到 17°C ，1 小时内降温高达 10°C （图 8d），这个小时降温的强度显著高于本次阜新地区冷池、以往雷暴大风（蒋超等，2024）和“7·3”龙卷（最强降温为 7°C ）（郑永光等，2020）等过程。如此强的冷池表明对流风暴极其有利于形成雷暴大风天气，因此在 13:30~13:50 时期间，风暴 B_2 造成的强下沉气流产生了 9 站次的 8 级以上雷暴大风。而此时开原龙卷生成地点位于极强冷池的东侧，距离冷池中心同样约 30 km，处于强冷池边缘，地表气温在 1 小时内仅降低了约 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ ，以上特征和阜新龙卷一致。当小时变温大于 4°C 后，龙卷也随之消亡。另外，在 13:20（图 8c），冷池出流为西南风，最大风速为 8 m/s，与地面辐合线上两股气流交汇，也形成辐合风场特征，辐合强度同样达到了 $-5\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 。随后 13:50 时（图 8d），极强冷池的出流最强达到 12 m/s，更强的冷池出流与地面辐合线周边的两股气流形成更强的辐合，辐合强度增强到 $-7\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 。随后，当微气旋经过强辐合区时，在强辐合拉伸作用旋转加强，进而形成龙卷。开原龙卷处的辐合强度要强于阜新地区，因此辐合拉伸作用对开原龙卷的形成可能更为重要。

综合以上分析表明，两个龙卷发生前，距离龙卷生成 30 km 处地表均出现 1 小时内降温超过 6°C 的强冷池，其中开原附近的冷池更强（1 小时降温高达 10°C ），如此强的冷池在我国华南、江南等地常发生在暴雨环境中的龙卷很少见（郑媛媛等，2015；唐嘉蕙等，2019），这也与冷涡背景下 LCL 较高、大气相对湿度较低的气候特征有关（杨磊和郑永光，2023）。正如前人研究结果显示（俞小鼎和郑永光，2020），本次过程强冷池区域也是仅出现雷暴大风。强冷池导致的出流与干线或辐合线附近的两股气流形成了更强辐合，与美国干线上常出现的强辐合的形成机制相同（Reed and Albright, 1997; Wakimoto et al., 2006），尽管不同于华南海陆边界热力差异导致的强辐合（Bai et al., 2024a, 2024b），但

都有利于垂直上升运动的拉伸作用加强垂直涡旋，最终导致强冷池的边缘、强辐合区内出现龙卷。

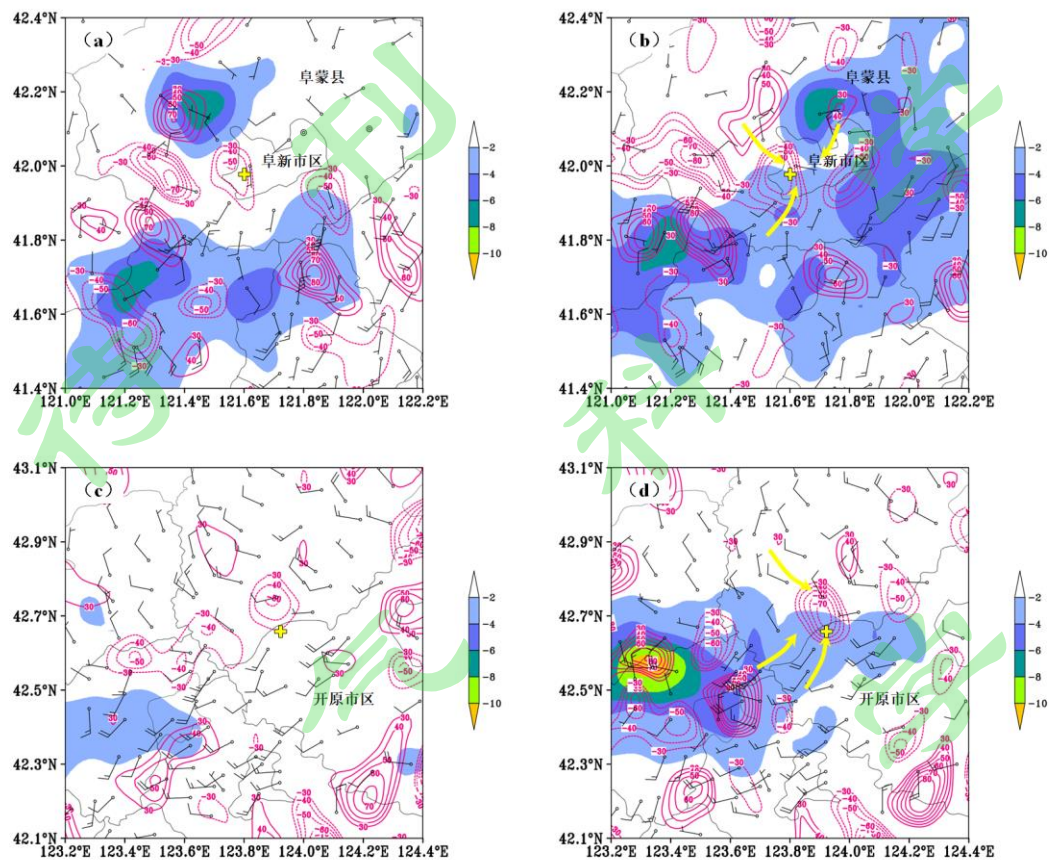


图8 2023年6月1日12:30 (a)、13:10 (b)、13:20 (c)和13:50 (d)地面风场、1小时变温(填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$)和散度(填色, 单位: 10^{-5}s^{-1})

Fig. 8 The surface winds, 1-hour temperature variations (shaded, unit: $^{\circ}\text{C}$) and divergence (shaded, unit: 10^{-5}s^{-1}) at 12:30 (a)、13:10 (b)、13:20 (c)和13:50 (d) on June 1, 2023

6.结论与讨论

2023年6月1日午后辽宁出现了5个龙卷, 本文分析了多龙卷的形成原因, 重点分析了阜新和开原的两个强度较强的龙卷的风暴环境及演变特征, 给出了本次辽宁多龙卷形成机制的概念模型(图9), 得到以下主要结论:

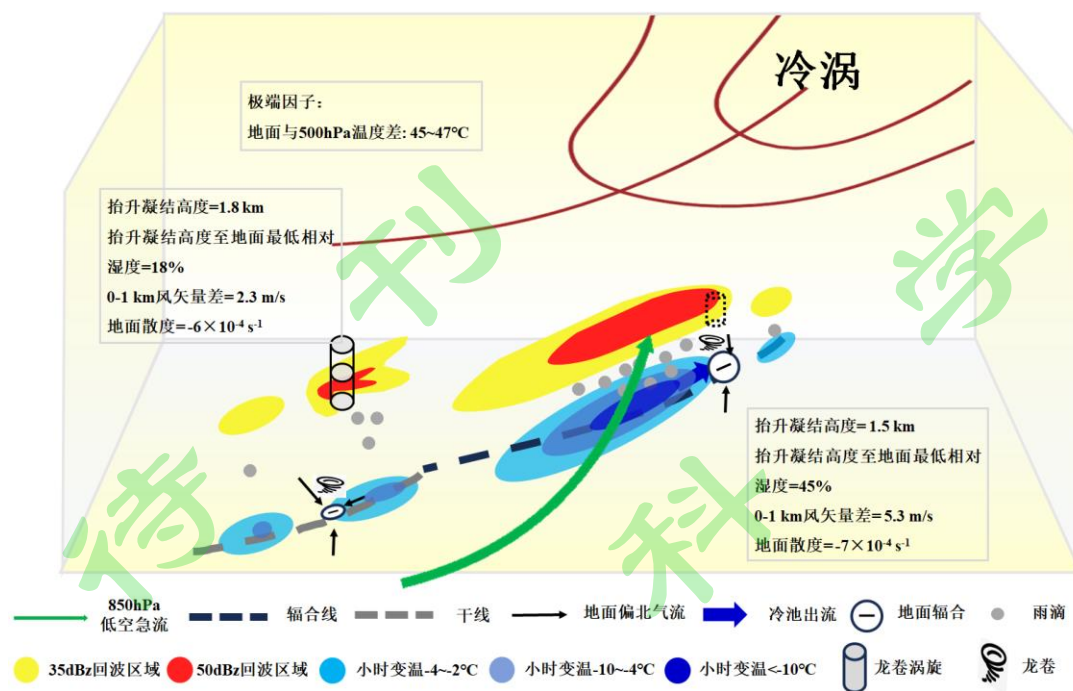


图9 2023年6月1日辽宁多龙卷形成机制概念模型

Fig. 9 The formation conception model of the tornadoes of Liaoning Province on 1 June 2023

(1)本次过程受冷涡后侧次天气尺度短波槽影响，虽然近地面相对湿度低于50%、LCL高于1.2 km等环境条件不利于龙卷发生，但强的0~6 km垂直风切变以及较以往冷涡西南象限雷暴大风、冷涡龙卷和我国多龙卷事件等更强的垂直减温率，是本次过程出现多龙卷的有利因素。

(2)不同地区龙卷发生的环境条件存在差异，辽宁西北部的阜新位于低空切变线底部，动力抬升条件更好，地面受干线影响。而开原等北部地区位于低空急流的末端，地面受辐合线影响，存在边界层急流加强的特点，0~1 km风矢量差的大小约是阜新的2倍。

(3)位于阜新地区的干线上触发多个风暴，风暴快速合并后的风暴具有DRC和TVS等有利于出现龙卷的雷达特征，该风暴在阜新市区东侧造成强冷池。强冷池西侧的偏东方向出流与干线两侧气流交汇，在阜新市区西部形成强辐合。DRC和TVS等雷达特征也位于冷池较弱的区域，当钩状回波部分移动到该区域时，在DRC和TVS下方产生龙卷。

(4)辽宁北部地面辐合线上触发的多个风暴快速合并为线状风暴，在风暴合并初期，辐合线上出现多个微气旋，导致辽宁北部出现多龙卷。其中造成开原龙卷的微气旋西侧风暴产生冷池的降温强度强于阜新龙卷及以往辽宁龙卷、雷暴大风过程，强冷池出流与辐合线交汇形成较阜新更强的辐合，在低层强垂直上升运动拉伸作用下，当微气旋出现“自下而上”垂直发展和旋转加强的特征，随后导致开原龙卷。

本文仅对本次多龙卷过程进行初步分析，结合“7·3”龙卷发现存在以下共性问题需要解决，例如为何刚刚合并的风暴和沿着地面辐合线（或干线）移动的风暴产生了龙卷，又为何在风暴合并的初期，较为平直的切变带上快速生成多个造成龙卷的微气旋，这些微气旋的形成是否与风水平切变不稳定相关等。这些问题需要在加强该地区观测和分析基础上，结合高分辨率数值模拟和理论分析进一步研究。

参考文献

- Atkins N T, Laurent M S. 2009a. Bow echo mesovortices. Part I: Processes that influence their damaging potential[J]. *Mon Wea Rev*, 137 (5) : 1497-1513.
- Atkins N T, Laurent M S. 2009b. Bow echo mesovortices. Part II: Their genesis[J]. *Mon Wea Rev*, 137 (5) : 1514-1532.
- 白华, 袁潮, 潘晓, 等. 2023. 辽宁省温带气旋龙卷的环境参数特征[J]. *应用气象学报*, 34(1): 104-116. Bai H, Yuan C, Pan X, et al. 2023. Environmental characteristics of extratropical cyclone tornadoes in Liaoning[J]. *J Appl Meteor Sci (in Chinese)* , 34 (1) : 104-116.
- Bai L Q, Yao D, Meng Z Y, et al. 2024a. Influence of irregular coastlines on a tornadic mesovortex in the Pearl River Delta during the monsoon Season. Part I: pre-storm environment and storm evolution[J]. *Adv Atmos Sci*, 41 (6) : 1115-1131.
- Bai L Q, Yao D, Meng Z Y, et al. 2024b. Influence of irregular coastlines on a tornadic mesovortex in the Pearl River Delta during the monsoon Season. Part II: numerical experiments[J]. *Adv Atmos Sci*, 41 (9) : 1704-1720.
- Brooks H E, Lee W, Craven J P. 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data [J]. *Atmos Res*, 67-68: 73-94.
- Byko Z, Markowski P, Richardson Y, et al. 2009. Descending reflectivity cores in supercell thunderstorms observed by mobile radars and in a high resolution numerical simulation [J]. *Wea Forecasting*, 24 (1) : 155-186.
- 才奎志, 姚秀萍, 孙晓巍, 等. 2022. 冷涡背景下辽宁龙卷气候特征和环境条件[J]. *气象学报*, 80 (1) : 82-92. Cai K Z, Yao X P, Sun X W, et al. 2022. Climatic characteristics and environmental conditions of tornadoes in Liaoning under the background of cold vortex[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)* , 80 (1) : 82-92.
- Craven J P, Brooks H E. 2004. Baseline climatology of sounding de-rived parameters associated with deep moist convection [J] . *Natl Wea Dig*, 28: 13-24.
- Davies-Jones R. 1984. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms [J]. *J Atmos Sci*, 41 (20) : 2991-3006.
- Doswell III C A , Evans J S. 2003. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences[J]. *Atmos Res*, 67-68 :117-133.
- 方祖亮, 俞小鼎, 王秀明. 2020. 东北暖季干线统计分析[J]. *气象学报*, 78 (2) : 260-276. Fang Z L, Yu X D, Wang X M. 2020. Statistical analysis of drylines in Northeast China[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)* , 78 (2) :260-276.
- French M M, Bluestein H B, PopStefanija I, et al. 2013. Reexamining the vertical development of tornadic vortex signatures in supercells[J]. *Mon Wea Rev*, 141 (12) : 4576-4601.
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales [J]. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1511–1534.
- 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.
- 黄丽君, 崔晓鹏. 2023. 2000~2019 年东北冷涡统计特征及其影响期间的降水分布[J]. *大气科学*, 47 (6) : 1925–1938. Huang L J, Cui X P. 2023. Statistical characteristics of the Northeast China Cold Vortex and its impact on precipitation distribution from 2000 to 2019 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)* , 47(6): 1925–1938.
- 蒋超, 陈传雷, 张凯, 等. 2024. 辽宁地区飚线特征和形成条件[J]. *气象*, 50(7):791-803. Jiang C, Chen C L, Zhang K, et al. 2024. Squall line characteristics and formation conditions in Liaoning province[J]. *Meteor Mon (in Chinese)* , 50 (7) : 791-803.
- 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.
- Lemon L. R, Doswell III C A. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornado genesis [J]. *Mon Wea Rev*, 107 (9) : 1184-1197.
- 李佳, 陈葆德, 张旭, 等. 2017. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁龙卷的高分辨率快速更新同化预报与分析[J]. *大气科学*, 41 (6) : 1221-1233. Jia L, Chen D B, Zhang X, et al. 2017. High-resolution rapid refresh analysis and prediction of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)* , 41 (6) : 1221-1233.

- 黎立页, 孟智勇, 白兰强, 等. 2023. 2017-08-11 内蒙赤峰 EF4 级山地多发龙卷灾调与成因分析[J]. 热带气象学报, 39 (4) : 507-521. Li L Y, Meng Z Y, Bai L Q, et al. 2023. Damage survey and analysis of a multiple tornado event over complex terrain in Chifeng, Inner Mongolia on 11 August 2017[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese) , 39 (4) : 507-521.
- 刘勇, 刘子臣, 马廷标, 等. 1998. 一次飏线过程中龙卷及飏锋生成的中尺度分析[J]. 大气科学, 22 (3) : 326-335. Liu Y, Liu Z C, Ma T B, Qiao X X. 1998. A Meso-scale analysis of tornado and squall front forming in a squall line process[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese) , 22 (3) : 326-335.
- Markowski P, Richardson Y. 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes [M]. Wiley-Blackwell Publication, 202-244.
- Markowski P M, Hatlee T P, Richardson Y P. 2018. Tornado genesis in the 12 May 2010 supercell thunderstorm intercepted by VORTEX2 near Clinton, Oklahoma [J]. Mon Wea Rev, 146 (11) : 3623-3650.
- McDonald J R, Mehta K C. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale) [M]. Texas: Texas Tech University press, 2006.
- Meng Z Y, Bai L Q, Zhang M, et al. 2018. The deadliest tornado (EF4) in the past 40 years in China[J]. Wea Forecasting, 33 (3) : 693-713.
- Nieto, R., L. Gimeno, T. L. De, et al. 2005. Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere [J]. J. Climate., 18: 3085-3103.
- Nieto, R., L. Gimeno, T. L. De, et al. 2007. Analysis of the precipitation and cloudiness associated with COLs occurrence in the Iberian Peninsula [J]. Meteor. Atmos. Phys., 96, 103-119.
- Porcù F., A. Carrassi, C. M. Medaglia, et al. 2007. A study on cut-off low vertical structure and precipitation in the Mediterranean region [J]. Meteor Atmos Phys, 96: 121-140.
- Rasmussen E N, Straka J M, Gilmore M S, et al. 2006. A preliminary survey of rear-flank descending reflectivity cores in supercell storms [J]. Wea Forecasting, 21 (6) : 923-938.
- Reed R J, Albright M D. 1997. Frontal structure in the interior of an intense mature ocean cyclone[J]. Wea. Forecasting, 12, 866-876.
- Rotunno R. 2013. The fluid dynamics of tornadoes[J]. Annu Rev Fluid Mech, 45: 59-84.
- Schenkman A D, Xue M. 2016. Bow-echo mesovortices: A review[J]. Atmos Res, 170: 1-13.
- Schultz D M, Richardson Y P, Markowski P M, et al. 2014. Tornadoes in the central United States and the “Clash of Air Masses” [J]. Bull Amer Meteor Soc, 95(11): 1704-1712.
- Schumacher R S. 2015. Resolution dependence of initiation and upscale growth of deep convection in convection-allowing forecasts of the 31 May-1 June 2013 supercell and MCS[J]. Mon Wea Rev, 143: 4331-4354.
- 孙建华, 周玉淑, 傅慎明, 等. 2024. 近十年我国涡旋系统的研究进展[J]. 大气科学, 48 (1) : 228-260. Sun J H, Zhou Y S, Fu S M, et al. 2024. Progress on vortices in China in the past ten years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese) , 48 (1) : 228-260.
- 孙军, 湛芸, 杨舒楠, 等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (二) 极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 38 (10) : 1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al. 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteor Mon (in Chinese) , 38 (10) : 1267-1277.
- 唐嘉蕙, 冉令坤, 沈新勇, 等. 2019. 广东佛山 EF3 级龙卷超级单体风暴高分辨率数值模拟[J]. 地球物理学报, 62 (11) : 4082-4097. Tang J H, Ran L K, Shen X Y, et al. 2019. High-resolution numerical simulation of the EF3 tornadic storm in Foshan city, Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese) , 62 (11) : 4082-4097.
- Trapp R J, Weisman M L. 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: Their genesis and implications[J]. Mon Wea Rev, 131 (11) : 2804-2823.
- Trapp R J, Stumpf G J, Manross K L. 2005. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones[J]. Wea Forecasting, 20(4): 680-687
- Wakimoto R M, Wilson J W. 1989. Non-supercell tornadoes [J]. Mon Wea Rev, 117 (6) : 1113-1140.

- Wakimoto R M, Murphey H V, Browell E V, et al. 2006. The “Triple Point” on 24 May 2002 during IHOP. Part I: Airborne Doppler and LASE analyses of the frontal boundaries and convection initiation[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134: 231–250.
- 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 Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 73 (3) : 425–441.
- 王秀明, 俞小鼎. 2019. 热带一次致灾龙卷形成物理过程研究[J]. *气象学报*, 77 (3) : 387–404. Wang X M, Yu X D. 2019: A study on the physical process involved in the genesis of a severe tropical tornado[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 77 (3) : 387–404.
- 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.
- Weisman M L, Trapp R J. 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part I: Overview and dependence on environmental shear[J]. *Mon Wea Rev*, 131(11) : 2779–2803.
- Wen J Y, Meng Z Y, Bai L Q, et al. 2024. A comparison between the only two documented tornado outbreak events in China: tropical cyclone versus extratropical cyclone environments[J]. *Wea. Forecasting*, 39 (4) : 613–638.
- Wurman J, Kosiba K, Robinson P, et al. 2014. The role of multiple-vortex tornado structure in causing storm researcher fatalities[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95: 31–45.
- 徐敬涵, 冉令坤, 炎利军, 等. 2024. 台风“山竹”外围强龙卷的结构和机理分析[J]. *大气科学*, 48 (3) : 843–858. Xu J H, Ran L K, Yan L J, et al. 2024. Analysis of the structure and mechanism of the tornado at the periphery of Typhoon Mangkhut [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 48 (3) : 843–858.
- 杨磊, 蒋大凯, 王瀛, 等. 2016. 辽宁省汛期 GPS 大气可降水量的特征分析[J]. *干旱气象*, 34 (1) : 82–87. Yang L, Jiang D K, Wang Y, et al. 2016. Analysis of atmospheric precipitable water vapor characteristics during flood season in Liaoning province based on GPS remote sensing data[J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 34 (1) : 82–87.
- 杨磊, 郑永光. 2023. 东北地区雷暴大风观测特征及其与东北冷涡的关系研究[J]. *气象学报*, 81 (3) : 416–429. Yang L, Zheng Y G. 2023. Observational characteristics of thunderstorm gusts in Northeast China and their association with the Northeast China Cold Vortex[J]. *Acta Meteor Sin (in Chinese)*, 81(3): 416–429.
- Yang L, Zheng Y G. 2024. The short-duration heavy rainfall in different quadrants of Northeast China cold vortices[J]. *J. Meteor. Res.*, 38 (2) : 321–338.
- 袁潮, 王式功, 马湘宜, 等. 2021. 2019 年 7 月 3 日开原龙卷形成环境背景及机理探究[J]. *高原气象*, 40(2): 384–393. Yuan C, Wang S G, Ma X Y, et al. 2021. Environmental background and formative mechanisms of a tornado occurred in Kaiyuan on 3 July 2019[J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 40(2): 384–393.
- 袁潮, 李得勤, 杨磊, 等. 2022. 冷涡背景下一次微型超级单体龙卷的雷达特征和物理过程探究[J]. *气象学报*, 80 (6) : 878–895. Yuan C, Li D Q, Yang L, et al. 2022. A case study on the radar characteristics and physical process involved in the genesis of a mini supercell tornado under the background of cold vortex[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 80 (6) : 878–895.
- 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, 375pp. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Nowcasting of Thunderstorms and Severe Convection[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese) : 375.
- 俞小鼎, 郑永光. 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. *气象学报*, 78 (3) : 391–418. Yu X D, Zheng Y G. 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 78 (3) : 391–418.
- 张涛, 关良, 郑永光, 等. 2020. 2019 年 7 月 3 日辽宁开原龙卷灾害现场调查及其所揭示的龙卷演变过程[J]. *气象*, 46 (5) : 603–617. Zhang T, Guan L, Zheng Y G, et al. 2020. Damage survey of the 3 July 2019 Kaiyuan tornado in liaoning province and its evolution revealed by disaster[J]. *Meteor Mon (in Chinese)*, 46 (5) : 603–617.

- 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 (in Chinese), 41(8): 942-952.
- 郑永光, 朱文剑, 姚聘, 等. 2016. 风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度估计[J]. 气象, 42(11): 1289-1303. Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al. 2016. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County, Jiangsu Province[J]. Meteor Mon (in Chinese), 42(11): 1289-1303.
- 郑永光. 2020. 中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述[J]. 气象科技进展, 10(6): 69-75. Zheng Y G. 2020. Review of climatology and favorable environmental conditions of tornado in China[J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 10(6): 69-75.
- 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, Chao 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 (in Chinese), 46(5): 589-602.
- 郑永光, 刘非凡, 张恒进. 2021. 中国龙卷研究进展[J]. 气象, 47(11): 1319-1335. Zheng Y G, Liu F F, Zhang H J. 2021. Advances in tornado research in China[J]. Meteor Mon (in Chinese), 47(11): 1319-1335.
- 中国气象局. 2019. 龙卷强度等级: QX/T 478-2019[S]. 北京:中国气象出版社: 1-4. China Meteorological Administration. 2019. Tornado intensity scale: QX/T 478-2019[S]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese): 1-4.