

阎琦, 张爱忠, 沈历都, 等. 2019年辽宁开原龙卷风观测事实分析[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 112–116. [YAN Qi, ZHANG Aizhong, SHEN Lidu, et al. Observational Analysis of tornado in Kaiyuan of 2019[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 112–116. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.021.]

2019年辽宁开原龙卷风观测事实分析^{*}

阎琦¹, 张爱忠², 沈历都³, 崔锦⁴, 赵梓淇⁴

(1. 辽宁省气象台, 辽宁 沈阳 110166; 2. 民航东北地区空中交通管理局气象中心, 辽宁 沈阳 110169;
3. 沈阳区域气候中心, 辽宁 沈阳 110166; 4. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166)

摘要: 利用加密自动站、FY-4A卫星及多普勒雷达等观测资料, 对2019年7月3日辽宁开原突发龙卷天气进行分析。结果表明: 在冷涡减弱阶段, 中纬度冷空气活动频繁, 冷涡底部500 hPa与850 hPa的短波槽垂直分布, 利于辽宁北部对流不稳定加强。FY-4A可见光云图显示, 开原龙卷生消迅速, 有明显的上冲云顶。雷达反射率因子特征是, 对流单体合并形成超级单体, 出现连续体扫的中气旋、并伴有钩状回波, 三维显示出现空洞结构; 强回波区向移动方向一侧倾斜、垂直剖面存在穹隆结构和有界弱回波区时, 钩状回波处最容易产生龙卷; 空洞的位置与中气旋和钩状回波中心区相吻合, 表明超级单体在此处产生强烈涡旋, 有利于漏斗云脱离母体向地面发展。速度产品上出现对称的正负速度区, 旋转速度持续增大, 且正负速度区不断向下发展, 低仰角探测到紧邻的速度对时, 中气旋相应也出现向下延伸和迅速收缩, 预示龙卷的发生。东北冷涡以及蒙古气旋前侧低压带、低层干冷空气侵入导致锋生等动力条件, 是辽宁北部对流的天气尺度和中 α 尺度的触发机制。

关键词: 冷涡; 突发; 龙卷; 中尺度特征; 触发机制; 辽宁开原

中图分类号: X43; X915.5; P458 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)01-0112-05
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.021

强对流天气通常来势猛、危害大, 社会关注度高。随着观测和预报技术的发展, 广大学者^[1-7]对典型强对流过程进行综合分析, 发现在不稳定的天气状况下, 强对流天气生成于中小尺度天气系统中, 预报难度大。而龙卷风是一种少见的小尺度局地突发强对流天气, 王婷婷等^[8]对东北冷涡背景下两类龙卷形成机制对比分析, 郑艳等^[9]对海南一次强烈龙卷过程进行观测分析, 张小玲等^[10]对江苏阜宁EF4级龙卷天气分析, 发现龙卷风的时空尺度很小, 生消时间在几分钟到几十分钟, 气象观测设备难以监测到龙卷风。徐小红等^[11]从云微物理特征角度分析了一次龙卷过程, 而更多的研究集中在关于龙卷天气雷达特征的分析^[12-14], 生成龙卷的超级单体风暴的共性特点是具有钩状回波、有界弱回波、悬垂回波等特征。由于龙卷风空间尺度小、生消快, 是预报业务中的难题之一, 加强对其进行分析, 探索其预报的可能性具有业务应用价值。

1951–2018年辽宁省共出现153次龙卷风, 其中有气象观测记录的为45次; 龙卷风多发生在辽宁西部及沿海地区, 阜新县最多为12次, 葫芦岛市次之为11次; 开原市历史上曾出现过2次龙卷风天气, 分别发生在1958年7月18日和1979年7月17日, 但都没有发现致灾的记录。2019年7月3日, 辽宁省铁岭市开原地区出现龙卷风等强

对流天气, 给当地造成严重损失, 属于比较罕见的对流天气, 有必要从不同角度展开分析, 以期不断积累预报经验。本文使用常规观测、10 min间隔的加密观测资料、FY-4A卫星资料以及沈阳桃仙国际机场多普勒雷达资料, 对开原龙卷风过程观测事实进行分析。

1 实况及灾情

7月3日下午铁岭地区龙卷风始发生于开原市金钩子镇金英村北约0.5 km, 途经大清河、污水处理厂东侧, 穿过京哈高速公路、开发区北区、信访局、尚品名城小区、开发区南区、兴开街榆树堡村东侧、兴开街瓜台子村, 在中固镇清水沟子村北约1.5 km消散, 全程直线距离约15 km。铁岭开原国家气象观测站在17:25(北京时, 下同)到17:37目测到龙卷风, 17:46观测站最大瞬时风速为23.0 m/s, 17:00–18:00时降水量25 mm。根据多源气象观测资料和现场灾情调查结果判定, 此次龙卷风的强度达我国气象行业标准的四级^[15]。

截至2019年7月6日统计, 开原市4个乡镇(街道)、19个村受灾, 城市房屋、农村房屋受损, 部分农作物绝收, 电力通讯等公共基础设施严重

^{*} 收稿日期: 2020-06-02 修回日期: 2020-08-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1506801, 2018YFC1507305); 辽宁省气象局重点科研项目(201802); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-015, CMAYBY2019-024)

第一作者简介: 阎琦(1974-), 女, 汉族, 辽宁法库人, 正研级高级工程师, 主要从事短期天气预报及灾害性天气形成机理研究。

E-mail: yq.mete@163.com

损坏, 总计直接经济损失约 10.8 亿元。如此强的龙卷风, 在辽宁并不多见, 因此拟通过对现有观测资料的分析, 探究该龙卷特征和成因。

2 环流及环境场分析

2.1 环流及影响系统演变

2019 年 6 月 29 日 20 时(图略), 500 hPa 高度场以 130°E , 50°N 附近为中心, 切断东北冷涡形成。6 月 30 日 - 7 月 1 日东北冷涡旋转加强, 7 月 2 日 08 时(图 1a)东北冷涡达最强阶段。7 月 3 日 08 时开始减弱(图 1b), 西太平洋副热带高压总体偏南偏东, 中纬度地区多短波槽活动。辽宁位于副热带高压南部、东北冷涡底部, 500 hPa 与 850 hPa 短波槽位置接近, 低层短波槽前西南气流起到增暖增湿作用, 与 500 hPa 高空槽后干冷空气在垂直方向上叠加, 利于辽宁北部对流不稳定加强。

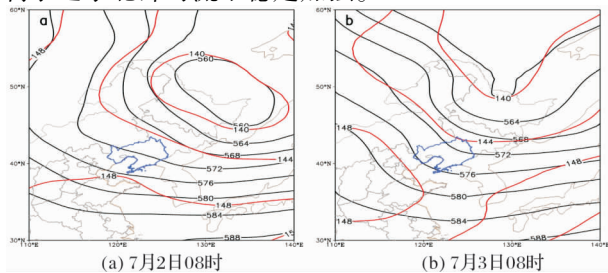


图 1 500 (黑色)、850 (红色) hPa 高度 (单位: dagpm)

2.2 环境场分析

由于龙卷出现在傍晚, 开原站没有探空观测, 选通辽站的探空资料来分析(图略), 3 日 08 时 800 hPa 以下比较干, 800 ~ 700 hPa 之间为比较薄的湿层, 700 ~ 400 hPa 之间为明显干空气, 该分布特征具有出现对流大风的潜势。对流有效位能为 408.8 J/kg , 白天太阳辐射作用, 利于午后对流不稳定增强, 经过订正后 3 日 17 时的 CAPE 值在 3000 J/kg 以上。对流抑制 288.4 J/kg 比较适中, 若存在对流触发条件, 容易克服对流抑制, 使得对流不稳定能量释放。综上, 7 月 3 日傍晚辽宁北部的环境场具有较强的对流潜势。

3 中小尺度特征分析

3.1 云图特征分析

7 月 3 日 17:15 - 18:00 是龙卷迅速生消阶段, 辽宁北部受东北冷涡云系尾部影响。从每 15 min 一次的辽宁区域可见光云图的演变(图 2)可以看出, 17:15 辽宁北部对流快速加强, 对流云呈现比较独立的椭圆形, 且出现暗影, 说明云顶高度开始增加。17:15 - 17:30 椭圆形对流云发展近乎圆形, 出现上冲云顶, 对流达到最强阶段, 龙卷出现在上冲云顶附近。17:30 - 18:00 辽宁北部对流云团迅速减弱。因此, 从云图演变情况上看, 此次强对流天气具有突发性。

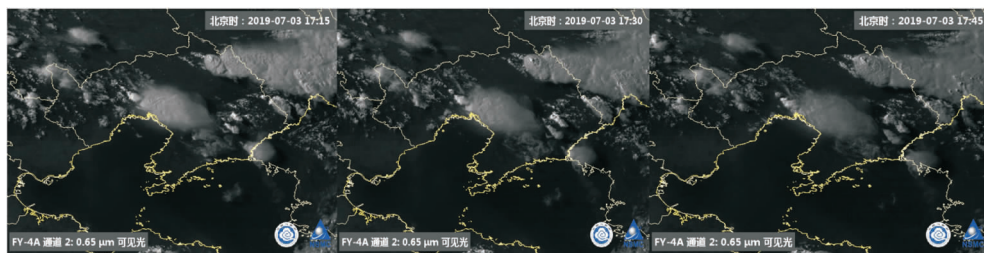


图 2 2019 年 7 月 3 日 17:15、17:30、17:45 FY-4A 可见光云图

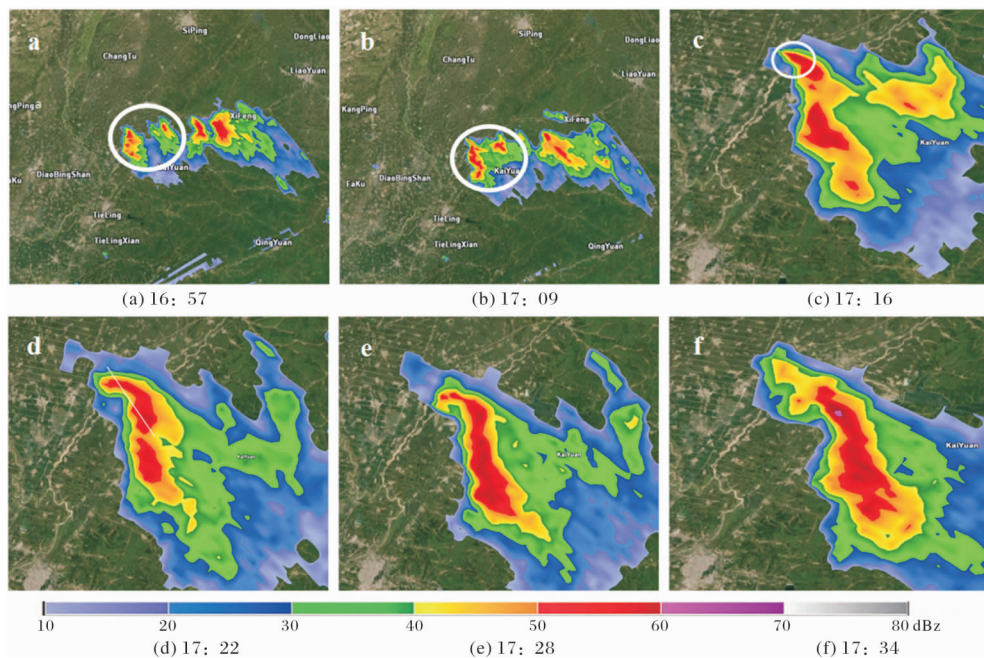


图 3 7 月 3 日桃仙机场多普勒天气雷达资料 GR2analyst 显示基本反射率图 (单位: dBZ)

3.2 雷达回波演变特征分析

3.2.1 反射率因子

本文利用沈阳桃仙机场多普勒天气雷达观测资料和 GR2analyst 软件对龙卷单体进行特征分析。7月3日 16:32(图略), 在开原北部开始有分散性对流单体发展并向东南方向移动。16:57(图 3a)对流单体在移动过程中迅速发展, 并且多个对流单体呈现出合并的趋势, 反射率因子最强达到 58 dBz, 开原西北侧两个相互移近的单体(图 3a 白圈所示区域)发展迅速, 反射率因子达到 50 dBz 左右。17:09(图 3b 白圈所示区域)开原西北侧两个对流单体进一步靠近, 合并趋势更加明显, 最强反射率因子增大到 60 dBz, 回波顶高超过 15 km。17:16(图 3c), 对流单体移动方向的后部开始出现钩状回波。17:22 至 17:34(图 3d, 图 3e, 图 3f), 合并后的对流单体一直以超级单体雷暴的形态向南偏东移动发展, 钩状回波十分清晰。沿图 3d 中白线做垂直剖面(图 4a), 可以看到在钩状回波处有明显的穹窿结构, 并且存在有界弱回波区, 表明此处有强烈的上升气流, 并且强回波高度较低, 有利于龙卷向下发展。

对钩状回波进行三维处理, 可以看到超高分辨率的半透明 3D 等值面产品, 强回波区(图 4b)呈现向移动方向倾斜的结构, 表明低层有强的上升气流, 在强回波区前进方向的右侧高度在 1~1.5 km 左右存在一个水平结构的空洞, 强烈的旋转产生离心力, 使得可探测到的粒子减少, 导致空洞的产生, 空洞的位置与中气旋和钩状回波中心区的位置相吻合, 表明此处产生强烈涡旋, 有利于漏斗云脱离母体向地面发展。

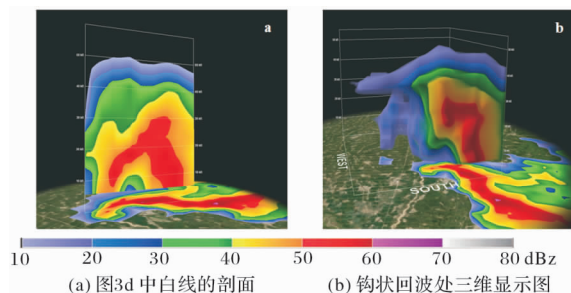


图4 17:22 多普勒天气雷达资料 GR2analyst 三维显示图

3.2.2 径向速度产品

对流单体在 16:44-17:03 连续 3 个体扫均出现了中气旋特征(图 5)。白线为正负速度中心的连线, 雷达站沈阳在左下角, 距离中尺度气旋中心约 120 km。

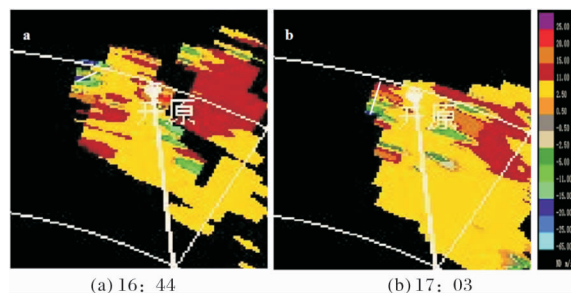


图5 3.4°仰角风暴相对径向速度场

3.4°仰角的风暴相对平均径向速度(图 5a)表明, 在龙卷发生地上游有两个对称的正负速度区, 呈反气旋性旋转, 最大正负速度分别为 +11 m/s、-20 m/s, 旋转速度 $[(V_{\max} - V_{\min})/2]$ 达到 15 m/s, 为中等强度的中气旋(BROWNING 认为出现中气旋的单体可认为是超级单体)。垂直涡度达到 1.24 个中气旋单位。虽然龙卷出现地点离雷达相距 120 km, 但可明显看出龙卷产生于一个很强的中气旋内且垂直涡度较大。17:03(图 5b)对称的正负速度区更加清晰, 最大正负速度分别为 15 m/s、-25 m/s, 旋转速度达到 20 m/s, 中气旋旋转速度明显增强。同时, 风暴相对径向速度场上不同仰角中气旋演变分析发现, 本次龙卷中气旋在 16:44 的 3.4°仰角(约 3.6 km 高)上最先出现(图 5a), 随后低层才开始出现(图 6), 然后向低层发展。

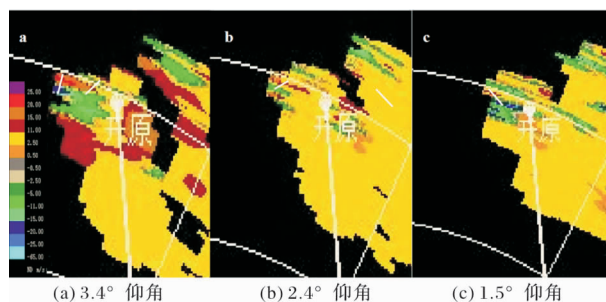


图6 16:51 风暴相对径向速度

综上, 速度产品上出现对称的正负速度区, 旋转速度持续性增大, 并且正负速度区不断向下发展, 低仰角探测到紧邻的速度对时, 中气旋相应也出现向下延伸和迅速的收缩, 预示着龙卷的发生。

4 触发机制分析

4.1 天气尺度触发条件分析

经开原站附近做温度平流、垂直速度的剖面, 3日 20:00(图略)700 hPa 以下冷平流从西北向东南方向侵入, 低层冷空气经过开原期间出现强对流, 因此低层干冷空气侵入, 形成锋生的动力抬升作用, 是对流触发条件之一。3日 08:00-20:00 垂直速度场演变来看(图略), 受短波槽过境影响, 开原上空由弱上升转为下沉运动, 大尺度上升运动, 也为对流触发提供一定的正贡献。

4.2 中、小尺度触发条件分析

3日白天华北暖脊向辽宁西部、北部伸展, 16:00(图 7a)辽宁北部气温维持较高状态。黑龙江东南部、吉林东北部为冷中心, 冷暖空气在吉林中部交汇, 该阶段吉林对流天气已经出现。16:30-17:15 冷空气向南扩散, 与辽宁北部暖气团间温度梯度加大, 利于锋生, 此时辽宁北部边缘对流开始加强。17:15-17:30(图 7b)冷空气强度加强, 暖空气强度维持, 辽宁北部气温开始下降, 对流天气突然发展, 龙卷(图 7 黑圈所示位置)在该阶段出现。17:30-18:00 冷空气继续东移, 由于辽宁东部暖空气不强, 加之傍晚气温开始下降, 导致冷空气移动到辽宁东北部后, 对

流减弱。在比较长的带状区域内均出现冷暖空气交汇条件,为什么开原附近的对流如此强且具有局地突发性,还需要寻找更为精细的原因。

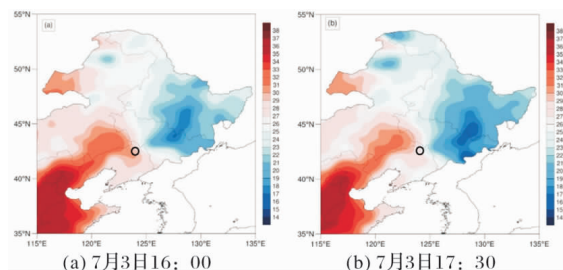


图7 加密气温演变(黑圈为龙卷位置,单位:℃)

利用 10 min 一次的加密观测资料,对开原龙卷风触发条件进行精细分析。从气温变化可以判断,767593 站从 16:50 开始气温出现下降趋势,16:50–17:40 气温陡降 10℃,因此该站是距龙卷发生最近的加密站。3 日白天辽宁北部天空无云,太阳辐射非常强,白天最高气温快速升高,15:00–16:30 开原(图略)附近地区(767593、767556、56256 站)由于太阳辐射及局地加热作用,气温达到 30~31℃,明显高于周边地区 1~2℃,利于局地产生上升运动。

从地面加密风场演变情况上看,15:00 前(图略)地面受蒙古气旋前侧低压带影响,在辽宁中北部到吉林中南部范围内,风场存在中 α 尺度松散的气旋性闭合环流,该系统与发生在吉林中部的对流天气相对应。14:00 在开原以南出现中 γ 尺度的南、北风辐合;15:00 该辐合向北发展到开原附近,此时对流天气还没有开始,所以风场辐合加强先于对流发展;17:00(图8)开原附近的中 γ 尺度西北风-偏南风辐合区变得更窄,且在切变顶端可以发现西北、西南、偏东风三股气流的闭合环流(图8中D所示位置)。由于局地加热产生上升气流,地面减压风场气旋性辐合增强,利于上升运动加强,进而触发对流不稳定能量释放,是局地突发强对流的小尺度触发条件。

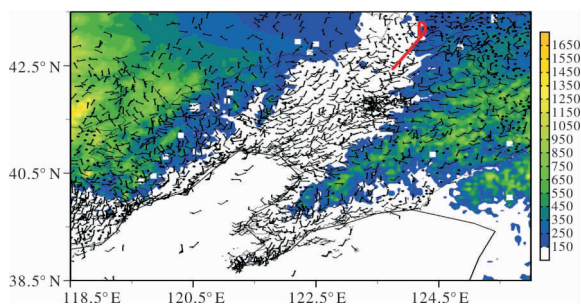


图8 2019年7月3日17时加密风场(单位:m/s)和地形(填色,单位:m)

综上,东北冷涡以及蒙古气旋前侧低压带、低层干冷空气侵入导致锋生等动力条件,加之开原附近局地热力条件,开原附近地面中 γ 尺度西北风-偏南风辐合发展,是对流局地触发的机制。

5 结论

本文利用常规观测、地面加密自动站、FY4 卫星、多普勒雷达观测资料,对 2019 年 7 月 3 日冷涡背景下辽宁北部突发龙卷天气,从环境场、中尺度特征及触发条件等方面进行了观测事实分析。

(1)东北冷涡减弱阶段,中纬度冷空气活动频繁。3 日 08 时辽宁位于副热带高压后部、东北冷涡东南象限,冷涡底部 500 hPa 与 850 hPa 短波槽垂直分布,利于辽宁北部对流不稳定发展。

(2)冷涡云系控制东北地区,辽宁北部对流开始阶段表现为非常窄的线状云系,对流发展迅速,有明显的上冲云顶。

(3)龙卷雷达产品特征是,对流单体合并形成超级单体,最大基本反射率因子在龙卷发生前半小时内均维持在 50 dBz 以上,出现连续体扫的中气旋、并伴有钩状回波,三维显示出现空洞结构;强回波区向移动方向一侧倾斜、反射率因子垂直剖面存在穹隆结构和有界弱回波区时,钩状回波处最容易产生龙卷;空洞的位置与中气旋和钩状回波中心区相吻合,表明超级单体在此处产生强烈涡旋,有利于漏斗云脱离母体向地面发展;速度产品上出现对称的正负速度区,旋转速度持续性增大,且正负速度区不断向下发展,低仰角探测到紧邻的速度对时,中气旋相应也出现向下延伸和迅速收缩,预示龙卷的发生。

(4)东北冷涡以及蒙古气旋前侧低压带、低层干冷空气侵入导致锋生等动力条件,是吉林到辽宁北部对流的天气尺度和中 α 尺度触发机制。而开原附近局地加热产生上升气流,地面减压使得风场气旋性辐合增强,利于上升运动发展,是局地突发强对流的触发条件之一。

参考文献:

- [1] 曹治强,方宗义,方翔. 2007 年 7 月皖苏北部龙卷风初步分析[J]. 气象, 2008, 34(7): 15–19.
- [2] 蔡寿强,牛生杰,郭彬,等. 湖北保康两次冰雹天气过程的综合分析[J]. 大气科学学报, 2014, 37(1): 108–118.
- [3] 黄莉,白龙,李紫甜. 适当冷空气对秋季台风暴雨增幅作用研究[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 38–44.
- [4] 闵锦忠,贾瑞怡,王晨珏. 苏北一次强降水超级单体风暴过程的诊断分析[J]. 大气科学学报, 2018, 41(4): 463–474.
- [5] 阎琦,赵梓淇,李爽,等. 2018 年辽宁两次致灾台风暴雨动力机制对比分析[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 76–84.
- [6] 朱平,俞小鼎. 青藏高原东北部一次罕见强对流天气的中小尺度系统特征分析[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 1–13.
- [7] 杨波,孙继松,刘鑫华. 两类不同风灾个例超级单体特征对比分析[J]. 气象学报, 2019, 77(3): 427–441.
- [8] 王婷婷,王宁,姚瑶,等. 东北冷涡背景下两类龙卷形成机制的对比分析[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(6): 9–15.
- [9] 郑艳,俞小鼎,任福民,等. 海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析[J]. 气象, 2017, 43(6): 675–685.
- [10] 张小玲,杨波,朱文剑,等. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析[J]. 气象, 2016, 42(11): 1304

- 1314.
- [11] 徐小红, 余兴, 朱延年, 等. 6·23 龙卷 FY-2G 卫星云微物理特征分析[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1737-1748.
- [12] 侯淑梅, 闵锦忠, 刁秀广, 等. 飚线发展过程中回波合并的特征分析[J]. 大气科学学报, 2018, 41(3): 367-376.
- [13] 周海光. “6·23”江苏阜宁 EF4 级龙卷超级单体风暴中尺度结构研究, 地球物理学报, 2018, 61(9): 3617-3639.
- [14] 吴芳芳, 俞小鼎, 王慧, 等. 一次黄海之滨中尺度对流复合体多尺度结构特征观测研究[J]. 气象学报, 2019, 77(5): 785-805.
- [15] 张涛, 关良, 郑永光, 等. 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, 2020, 46(5): 603-617.

Observational Analysis of Tornado in Kaiyuan of 2019

YAN Qi¹, ZHANG Aizhong², SHEN Lidu³, CUI Jin⁴ and ZHAO Zhiqi⁴

(1. *Shenyang Central Meteorological Observatory, Shenyang 110016, China*; 2. *Air Traffic Management Bureau in Northeast China of CAAC, Shenyang 110169, China*; 3. *Shenyang Regional Climate Center of Liaoning, Shenyang 110166, China*; 4. *Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110016, China*)

Abstract: Using the observation data of automatic stations, the FY-4A satellite data and the Doppler radar data, the sudden strong convective weather are analyzed in northern Liaoning on July 3th, 2019. Results show that in the context of the weakening stage of the cold vortex, the cold air activity at mid-latitudes is frequent, and the short wave troughs at the bottom of the cold vortex on the 500hPa and the 850hPa levels form a forward-inclined structure, which is conducive to the strengthening of the convection instability in northern Liaoning. The tornado in Kaiyuan generates and disappears rapidly, and clear overshooting cloud tops on the visible images of the FY-4A satellite. The radar reflectivity factor is characterized by the combination of convective cells to a supercell, the continuous mesocyclone, the hook echo, and the three-dimensional display of a hollow structure; When the strong echo area is inclined to the side of the moving direction, there is a dome structure and a bounded weak echo area in the vertical section, and the tornado is most likely to occur in the hook echo area; The location of the cavity coincides with the central region of the mesocyclone and the hook-shaped echo, indicating that the supercell has a strong vortex there, which is conducive to the movement of the funnel cloud from the parent body to the ground. There are symmetrical positive and negative speed zones on the radar speed product. The rotation speed continues to increase, and the speed zones develop downward continuously. When the adjacent speed pair is detected at a low elevation angle, the mesocyclone also extends downward and shrinks rapidly, indicating the occurrence of tornado. The cold vortex in the northeast of China, the low-pressure zone in front of the Mongolian cyclone, and the invasion of cold and dry air on low levels caused the frontogenesis and other dynamic conditions, which are the triggering mechanism of the convection from Jilin to northern Liaoning on the weather and the middle α scale. Whereas the local heating near Kaiyuan generates updrafts, and the decrease of the surface pressure enhances the cyclonic convergence of the wind field and the development of the ascending movement, which are the triggering mechanism.

Key words: cold vortex; sudden; tornado; mesoscale characteristic; triggering mechanism; Liaoning Kaiyuan