

2021年7月2日内蒙古兴安盟龙卷环流背景和雷达特征分析

祁蕾¹ 蔡康龙² 植江玲² 孙荣宇¹ 高红霞¹ 徐蔚军¹

(1 兴安盟气象局, 乌兰浩特 137400; 2 佛山市龙卷风研究中心/中国气象局龙卷风重点开放实验室, 佛山 528000)

摘要: 利用常规观测、再分析资料和雷达数据等对2021年7月2日兴安盟翁根海拉苏嘎查EF3级龙卷的天气背景、环境条件、雷达特征等进行分析。结果表明: 该龙卷发生在东北冷涡背景下, 直接影响系统为冷涡后部下摆的横槽, 处于横槽的强偏西气流中, 龙卷发生在槽后干冷空气与低层浅薄湿层叠加区域, 并配合强垂直风切变和强烈的垂直上升运动, 促使对流风暴迅速发展; 龙卷发生前环境条件不稳定, 低层湿度条件较差, 中低层存在明显的逆温层; 临近龙卷时段, 低层的相对湿度迅速增加, 相当位温随高度明显减小, 层结趋于不稳定, 风速随高度增大, 高层存在明显干区; 该对流单体呈现典型超级单体风暴结构, 龙卷母体风暴具有明显的有界弱回波区、钩状回波和“V”形缺口; 龙卷发生前首先在低层存在气旋式旋转结构, 识别到中气旋, 发展成成熟阶段, 中气旋在中层发展最为强盛; 龙卷发生前具有回波强度 > 60 dBz 的特征, 最大反射率因子高度有持续性的增长, 回波顶高度呈连续下降。

关键词: 龙卷, 超级单体风暴, 中气旋

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.05.008

Analysis of the Tornado Circulation and Radar Characteristics in Hinggan, Inner Mongolia on 2 July 2021

Qi Lei¹, Cai Kanglong², Zhi Jiangling², Sun Rongyu¹, Gao Hongxia¹, Xu Weijun¹

(1 Hinggan Meteorological Bureau, Ulanhot 137400; 2 Foshan Tornado Research Center/CMA Tornado Key Laboratory, Foshan 528000)

Abstract: Based on the conventional observation data, reanalysis data and radar data, the paper gives an analysis on the synoptic background, environmental conditions and radar characteristics of the EF3 tornado in Wenggenhailasugacha, Hinggan on 2 July 2021. The results show that the tornado occurred in the background of the northeast cold vortex. The direct impact system was the downward transverse groove behind the cold vortex. The tornado lay in a strong westerly airflow in the transverse trough, and it occurred in the overlapping area of the dry cold air behind the trough and the thin moisture layer at the lower level. The convective storm developed rapidly, fueled by the strong vertical wind shear and strong vertical upward movement. Prior to the occurrence of the tornado, the environmental conditions were unstable, accompanied with poor moisture conditions at the lower level and the obvious inversion layer in the middle and lower levels. As the tornado occurrence time approached, the relative humidity in the lower layer increased rapidly, while the equivalent potential temperature decreased significantly with height. Consequently, the stratification became unstable, and the wind speed increased with height. There was an obvious dry area in the upper level. The convection cell presented the typical structure of a supercell storm. Bounded weak echo zone, hooked echo and V-notch were identified in the primitive storm of this tornado. Before the tornado occurred, an cyclonic structure was found in the lower level, which was recognized as a mesocyclone. As it evolved and matured, it peaked in the middle level. In addition, prior to the tornado, the radar echo intensity was greater than 60 dBz, the height of maximum reflectivity factor kept growing, and the height of the echo top showed a continuous downward trend.

Keywords: tornado, supercell storm, mesocyclone

0 引言

龙卷是在强烈不稳定天气条件下产生的一种小范围空气涡旋, 其中心风力可达100~200 m/s, 直径一

般为几米到数百米。龙卷形成后, 一般维持十几分钟到几小时, 袭击范围很小, 但破坏力大^[1-2], 除极大的阵风 and 气压变化外, 还常伴随雷暴大风、冰雹和强降雨等灾害性天气^[3-5]。国内外学者对产生龙卷的环流形势和环境场特征等已有较多研究。Bluestein等^[6]在一次龙卷过程中发现龙卷超级单体形成于冷锋和干线交汇处附近, 处于中等强度垂直风切变和高对流有效

收稿日期: 2023年3月2日; 修回日期: 2023年9月1日

第一作者: 祁蕾(1991—), Email: 1069135324@qq.com

资助信息: 内蒙古自治区气象局科技创新项目(nmqxkjcx202306)

位能 (CAPE) 的环境中, 位于多单体对流风暴线的南端。Sessa等^[7]使用观测数据检验了强烈的龙卷更容易在广泛的旋转上升气流中形成的假设。王秀明等^[8]发现东北地区龙卷多发生在冷涡背景下, 主要由干线及其伴随的强边界层辐合触发, 龙卷发生前几小时环境参数变化显著。王婷婷等^[9]发现龙卷发生前低层存在逆温, 抬升凝结高度较低, 湿层较薄, 辐合切变线或冷锋是龙卷直接接触机制。姚叶青等^[10]发现龙卷产生于低空急流左侧, 起源于中高层向低层发展的 γ 中尺度气旋中。陈海涛等^[11]和钱维宏等^[12]发现龙卷易发生在冷暖温度扰动气团交界线附近, 温度层结曲线与露点温度曲线呈“X”形, 有利于雷暴大风生成。袁潮等^[13]发现超低空两条辐合线相遇形成的中尺度气旋性环流为龙卷提供初始的垂直涡度来源, 在上升气流的拉伸作用下, 垂直涡度收缩助力龙卷形成。从上述研究来看, 龙卷过程发生前的环境条件不稳定, 中低层存在辐合上升运动。

要了解龙卷的形成原因及其与对流风暴的关系, 需要利用雷达对龙卷的形成进行高分辨率近地观测。Bluestein等^[14]基于雷达数据记录了一次大型龙卷的形成和演变过程, 此次龙卷主要环流最初在地面附近形成, 龙卷的突然爆发与下沉气流的激增有关。Houser等^[15]利用龙卷碎片特征 (TDS) 等高分辨率数据分析龙卷的特征变化及其演变过程。张琳娜等^[16]基于雷达反射率和径向速度研究表明, 龙卷发展最强阶段在中层会存在有界弱回波区和强中气旋。刘勇等^[17]发

现龙卷出现在冷锋爬线带状回波尾部, 呈典型的弓状回波。阎琦等^[18]发现钩状回波处最容易产生龙卷, 速度产品上中气旋出现向下延伸和迅速收缩, 预示龙卷的发生。项阳等^[19]发现龙卷相关的特征参数在龙卷过程中的急剧变化, 对判断龙卷是否发生有较好的指示意义。

本文通过地面自动气象站观测资料、欧洲中期天气预报中心ERA5再分析资料 (水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间间隔为1 h) 和多普勒天气雷达资料等, 从大尺度环流背景、环境特征及中小尺度对流特征3个方面对2021年7月2日发生在内蒙古兴安盟翁根海拉苏嘎查附近的龙卷形成前和发生发展情况进行分析, 旨在对我国东北地区冷涡背景下龙卷的天气特征进行探究, 尝试在龙卷监测和预报预警方面探索有价值的信息, 以降低龙卷所造成的影响和损失。

1 天气实况

受高空冷涡的影响, 2021年7月2日13:00 (北京时, 下同) 至夜间兴安盟中部出现强对流天气, 15:07—15:22在翁根海拉苏嘎查附近发生龙卷。通过察看受灾现场破坏程度、走访目击者、多渠道获取视频照片资料等方式^[20], 确认此次龙卷自西北偏西向东南偏东方向移动, 灾情路径长度约11 km, 最大影响宽度约480 m (图1), 共造成两座电力架线塔损毁 (图1a为其中一座)、配套水泥线杆折断、多处通信光缆线杆和树木折断 (图1c)、破损棚圈10余所, 导致牛羊伤亡20余只, 所幸未造成人员伤亡。图1d为居民拍



图1 2021年7月2日内蒙古兴安盟龙卷灾害破坏带 (红色阴影) 和受灾现场图

Fig. 1 Tornado-impact zone (red shadow) and disaster scenes in Hinggan, Inner Mongolia on 2 July 2021

摄龙卷漏斗云15:21(根据视频拍摄时间确定)的视频截图。通过分析受灾现场的灾情指示物(输电铁塔、树木等)受损情况,参考Fujita龙卷分级标准^[21],翁根海拉苏嘎查龙卷破坏程度为EF3级,相当于我国国家标准的强龙卷等级^[22]。

此次强对流天气中,多地出现雷暴大风。通过统计区域站实况资料(图2),距龙卷发生地点最近的巴仁哲里木站极大风速为15.1 m/s,出现在15:00,部分乡镇出现冰雹和短时强降水。据统计,冰雹最大直径为5 cm,最长持续时间为40 min,最大雨强出现在科尔沁右翼前旗红忠村,23:00—24:00为39.1 mm/h。

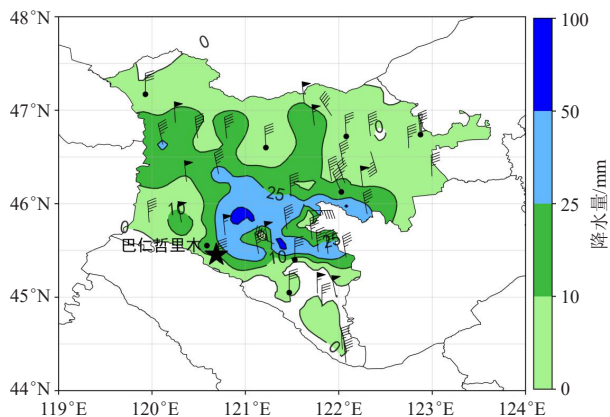


图2 2021年7月2日当地极大风速和降水量实况(★为龙卷发生地附近)

Fig. 2 Observed local maximum wind speed and precipitation on 2 July 2021 (★: near the location of the tornado)

2 环境场特征

从7月2日08:00高空形势场来看(图略),200 hPa存在明显的风速辐散,有利于其下方大范围上升气流的发展;500 hPa存在东北冷涡,涡旋中心位于蒙古国与呼伦贝尔交界一带,中低层存在“人”字形切变。龙卷发生地翁根海拉苏嘎查位于500 hPa横槽中强偏西气流与西南气流交汇地带,850 hPa位于“人”字形切变中西北气流与偏南气流交汇处,850 hPa相对湿度为70%~80%,附近站点平均露点温度在16℃以下,可见,龙卷发生前环境大气的低层湿度条件较差,湿层相对浅薄。850~500 hPa温差($\Delta T_{850-500}$)约为30℃,对流层中低层的环境温度直减率大。其东北侧127 km处索伦探空站08:00探空资料显示(图3a),CAPE和对流抑制能量(CIN)分别为231.9 J/kg和0.1 J/kg,0~6 km风矢量差为15.5 m/s。低层偏南气流起到增暖增湿的作用,与500 hPa高空槽后干冷空气在垂直方向上叠加,这种配置有利于对流不稳定的加强,但难以推断极端天气可能发生的位置和时间。

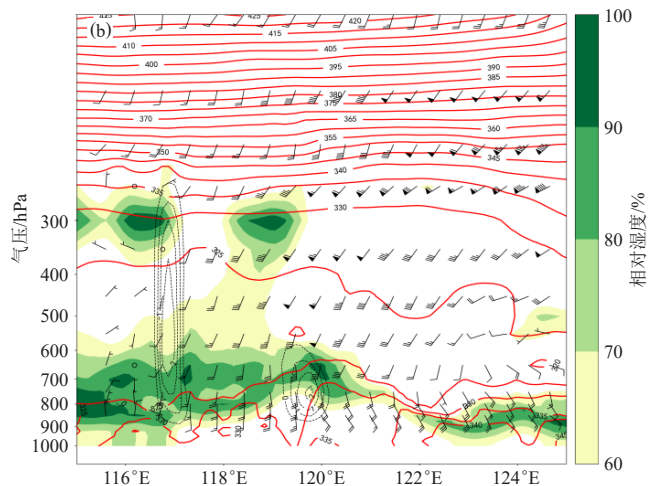
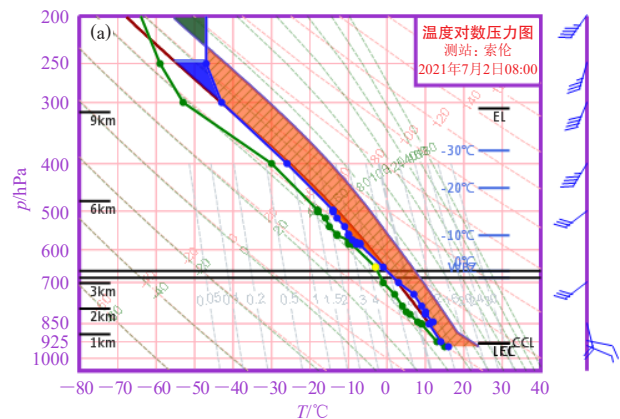


图3 2021年7月2日08:00索伦探空站T-lnp图(a)和(50°N, 115°E) — (40°N, 125°E)垂直剖面(b, 红色实线为相当位温, 黑色虚线为垂直速度)

Fig. 3 T-lnp diagram of Suolun Sounding Station (a) and vertical section of (50°N, 115°E) — (40°N, 125°E) (b, the red solid lines: the equivalent potential temperature; the black dotted lines: the vertical velocity) at 08:00 BT on 2 July 2021

7月2日14:00(图4),500 hPa东北冷涡减弱,闭合线消失,风场高低层仍有气旋式辐合中心存在,系统随高度略向后倾斜,强对流区受横槽后部偏西气流控制,对流风暴在低层西南气流与东南气流交汇处迅速发展,850 hPa相对湿度增加了10%, $\Delta T_{850-500}$ 约为30℃。附近站点平均露点温度在19℃以上,与08:00相比有3℃的增幅。通过距离龙卷发生地最近的巴仁哲里木站实况对索伦探空站进行探空订正,订正后的CAPE明显增大,达到3494.0 J/kg。由于14:00索伦探空站没有探空作业,并无大面积降水,多普勒雷达的垂直风廓线产品只在1~2 km有数据,无法得到比较完整的垂直风廓线,因此不对垂直风切变做订正。垂直于翁根海拉苏嘎查一带的低层切变线做14:00西北—东南向剖面(图3b),可见辐合中心大致位于116.5°E,随高度略向后倾斜,倾斜幅度不大:

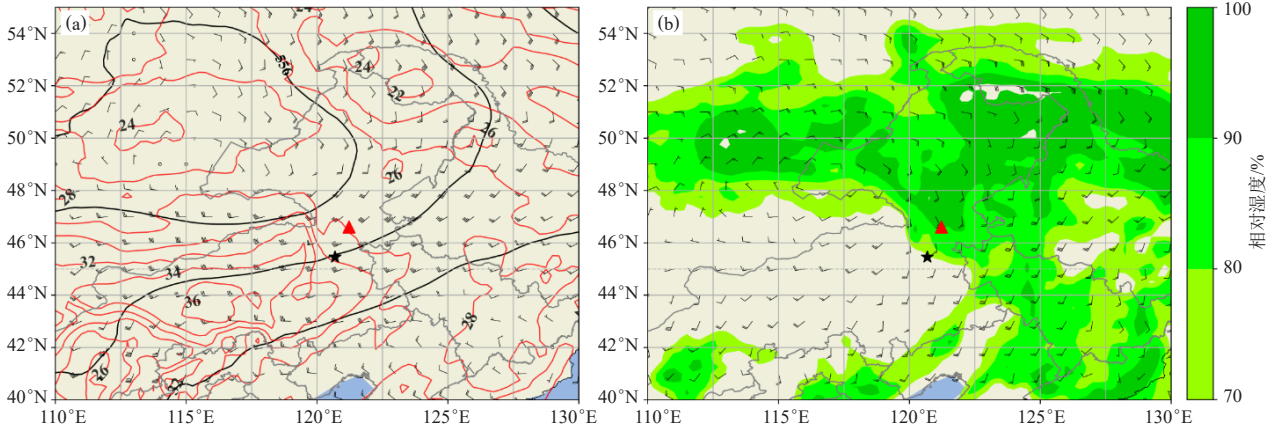


图4 2021年7月2日14:00 中高层形势场 (▲为索伦探空站所在位置; ★为龙卷发生地附近; 图a中黑色实线为500 hPa等高线, 红色实线为850~500 hPa温差; 图b为850 hPa风场和相对湿度场)

Fig. 4 Synoptic situation in the middle and upper levels at 14:00 BT on 2 July 2021 (▲: the location of Suolun Sounding Station; ★: near the location of the tornado; in Fig. 4a, the black solid lines: the contour line of 500 hPa; the red solid line: the temperature difference of 850~500 hPa; in Fig. 4b, the wind field and relative humidity field at 850 hPa)

120°E附近整层受西南气流控制, 存在强烈的上升运动, 垂直速度中心值达到 -2 Pa/s , 近地层相对湿度在70%以下, 明显低于中低层相对湿度, 相当位温随高度明显减小, 层结不稳定加强, 风随高度不断增大, 600~300 hPa存在明显的干区, 该分布特征具有出现对流大风的潜势。综合分析, 伴随干侵入的横槽配合强垂直风切变以及低层浅薄湿层环境配置, 有利于此次龙卷天气的发生。

3 雷达回波演变特征

3.1 雷暴单体发展

参考对流风暴类型与环境条件的关系^[4], 中等或以上的CAPE配合中等强度的垂直风切变, 易出现较高组织程度的多单体强风暴。产生龙卷的中尺度对流系统在红外云图上(图略)呈现明显的带状, 雷达图上该对流带有4~5个对流单体, 不同的对流单体出现雷暴大风、冰雹、局地短时强降水, 最南端对流单体出现时间最晚, 14:30—15:30迅速发展, 15:07—15:22出现龙卷, 龙卷天气结束后与北侧对流单体合并并东移发展。

3.2 龙卷风暴单体反射率因子和径向速度

通过分析霍林郭勒雷达资料, 发现产生龙卷的对流单体风暴初生于7月2日13:51, 持续时间超过2 h, 龙卷主要发生在15:07—15:22。对龙卷形成前、发生和发展情况进行分析(图5), 14:47的0.5°仰角反射率因子图上(图5a1)可看到对流单体已呈现出超级单体风暴结构, 中心强度达到60 dBz以上, 存在明显的有界弱回波区、钩状回波和“V”形缺口, “V”形缺口位于对流单体风暴的右后侧, 表明边界层具有强暖

湿气流入流和非常强盛的上升气流^[23]。0.5°仰角(距地约1.76 km)相对径向速度图上(图5a2)出现速度模糊, 龙卷发生地翁根海拉苏嘎查附近出现1个 γ 中尺度涡旋扰动, 有明显的气旋式旋转, 涡旋的尺度仅5 km左右, 此时距离雷达站70 km, 旋转速度为20 m/s, 根据中气旋识别判据^[4], 判别为强中气旋。在2.4°及以上高仰角的速度图上(图略), 未见明显的气旋式旋转结构, 表明龙卷发生前地面辐合线汇合附近, 低层首先生成气旋式环流。从14:53的0.5°仰角反射率因子(图5b1)及垂直剖面图(图6a、6b)来看, 回波中心强度的范围扩大, 对流单体垂直发展旺盛, 垂直高度发展到12 km以上, 存在明显的悬垂回波结构。上一时刻入流缺口处的强中气旋继续加强, 此时距离雷达站73 km, 对流单体产生强烈的辐合, 0.5°仰角在此处的底高为1.8 km, 中气旋旋转速度为23 m/s, 正负速度极值区更加对称, 中气旋强烈发展; 且在中气旋中心出现龙卷涡旋特征(TVS), TVS切变值为30 m/s(图5b2)。14:58在0.5°仰角反射率因子图上(图5c1), 雷暴单体强度维持, “V”形缺口再次出现, 后侧出现钩状回波。此时距离龙卷发生还有8 min。0.5°仰角反射率因子和相对径向速度图上(图5c1、5c2)对于中气旋中向着雷达速度极大值的入流缺口在14:47开始堵塞, 此时仍存在明显的入流缺口。在再次出现的“V”形缺口处有 γ 中尺度涡旋扰动存在, 其旋转速度为20 m/s, 距离雷达站74 km, 达到强中气旋等级。通过查看现场和走访, 确认在15:07出现龙卷天气。从15:04反射率因子(图5d1)及反射率因子垂直剖面图(图6c、6d)上可以看到, 雷暴单体在中低层存在明显的有界弱回波区和钩状回波, 中高层存在悬垂回波结

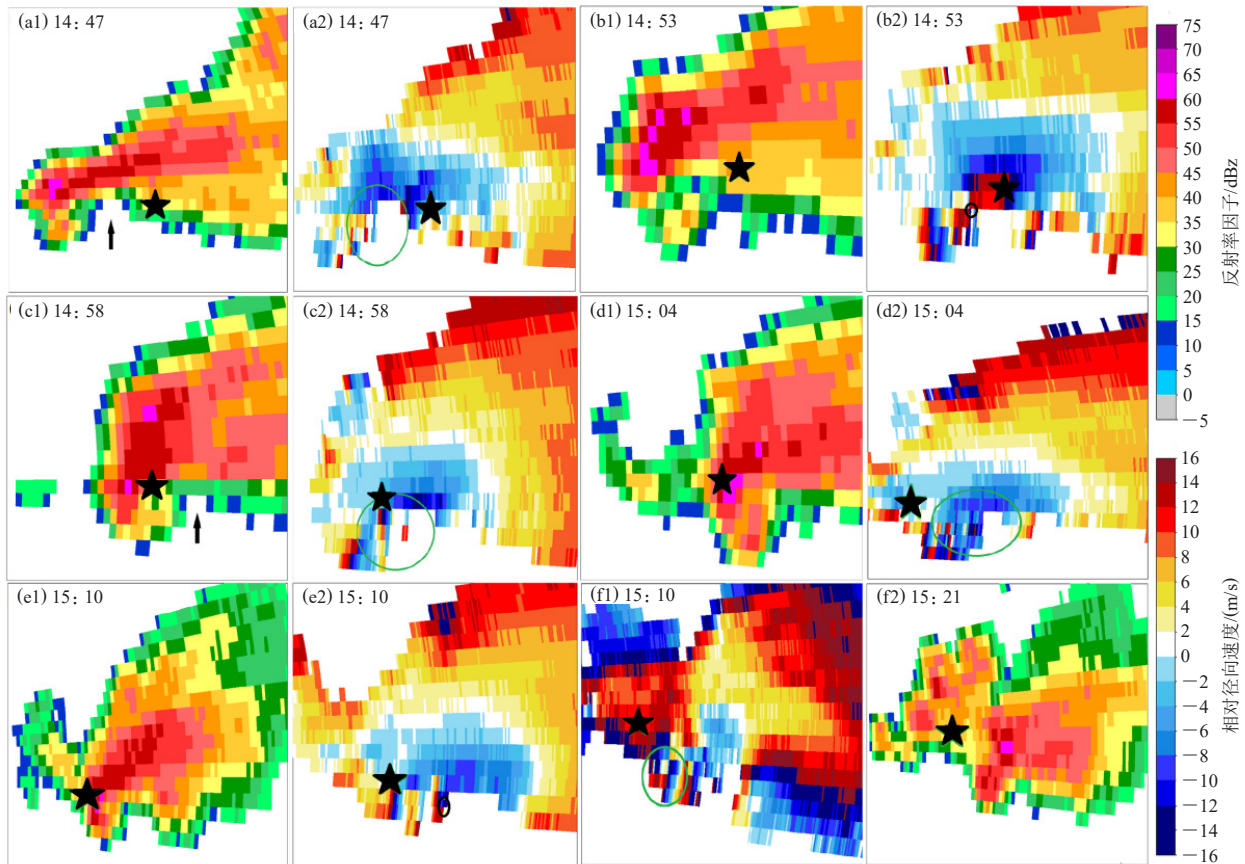


图5 2021年7月2日0.5°仰角反射率因子(a1, b1, c1, d1, e1, f2)和0.5°仰角相对径向速度(a2, b2, c2, d2, e2)和2.4°仰角相对径向速度(f1) (★为龙卷发生地附近; ○为中气旋位置; ○为TVS位置; 黑色箭头为“V”形缺口位置)
 Fig. 5 Reflectivity factors (a1, b1, c1, d1, e1, f2) and relative radial velocities (a2, b2, c2, d2, e2) of 0.5° elevation angle and relative radial velocities (f1) of 2.4° elevation angle on 2 July 2021 (★: near the location of the tornado; ○: the position of mesocyclone; ○: the position of TVS; the black arrow: the position of V-notch)

构, 回波中心高度达到4 km, 有界弱回波区上方强回波区域核心强度达到60 dBz以上, 回波顶高达到11 km左右, 表征了龙卷上升气流的强度和伸展高度。从相对径向速度(图5d2)和速度垂直剖面图(图6e、6f)来看, 低层入流缺口处的辐合与中气旋的旋转相结合, 超级单体在0.5°(图5d1)、1.5°和2.4°仰角的相对径向速度基本表现为气旋性辐合旋转。3.3°仰角(高度约11 km)速度图上(图略)表现为气旋性辐散。4.3°仰角速度图上(图略)只存在强烈的辐散。15:10反射率因子图上(图5e1), 上述特征仍然持续。从垂直剖面图(图略)来看, 有界弱回波区上方强回波区域核心强度达到60 dBz以上, 核心区域达到6 km, 回波顶高达到11 km以上; 15:10在0.5°仰角相对径向速度图上(图5e2)再次探测到TVS, 切变值为25 m/s; 2.4°仰角相对径向速度图上(图5f1)中气旋的强度是各仰角中最强的, 离开雷达的速度大值区强度增加范围加大, 中气旋结构更加对称, 此时中气旋在低层开始减弱, 中层发展强盛。15:16—15:21, 反射率因子图上

(图5f2)不再具备超级单体风暴的典型特征, 龙卷发生区域回波结构变得松散, 相对径向速度图上高低层 γ 中尺度涡旋扰动的强度和范围逐渐减小, 龙卷减弱消散。

3.3 龙卷风暴参数及属性特征

从霍林郭勒多普勒雷达站二次产品可知, 中气旋产品(图略)在龙卷发生前的14:41识别出, 随后25 min至龙卷发生均未被识别出, 在实际情况中产品的预警作用较小。通过分析龙卷风暴参数(图7)可以看出, 最大反射率因子值的变化范围在55.0~65.0 dBz, 最大值为64.5 dBz(14:41), 龙卷发生前20 min(14:41—15:04)的最大反射率因子变化不大, 在60.0~65.0 dBz, 与龙卷发生时段(15:07—15:22)相比略高, 龙卷发生后明显下降, 最大反射率因子的下降对龙卷的发生有一定的指示意义^[24]。从最大反射率因子高度变化来看, 龙卷发生前最大反射率因子高度总体呈上升的态势, 在龙卷发生前一个体扫(15:04)达到最大值10 km后, 开始

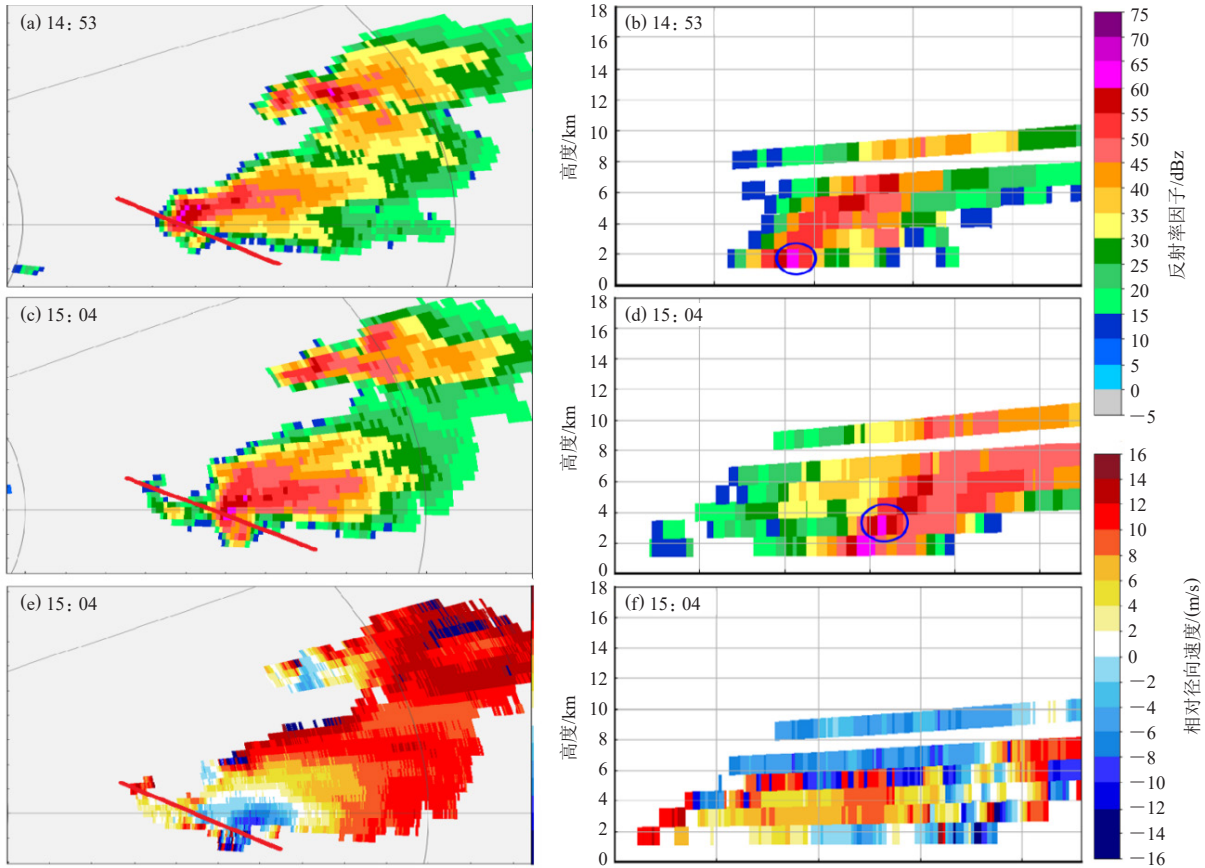


图6 2021年7月2日反射率因子(a, b, c, d)和相对径向速度(e, f)的平面(a, c, e)和垂直剖面(b, d, f) (红色实线为剖面位置)
Fig. 6 Platform (a, c, e) and vertical sections (b, d, f) of reflectivity factors (a, b, c, d) and relative radial velocities (e, f) on 2 July 2021 (the solid red lines: the section positions)

下降,龙卷发生在最大反射率因子高度的增长期之后。从产生龙卷的对流单体风暴垂直累积液态水含量(VIL)变化来看,龙卷发生前(14:13—15:04),VIL的变化呈现一定的规律,14:13—14:24 VIL增长幅度最大,14:24—14:53 VIL呈现出两个体扫增加一

个体扫下降,总体呈上升趋势的变化规律,龙卷发生后在15:10 VIL达到最大值 56 kg/m^2 ,随后呈下降趋势。从回波顶高度产品(ET)来看,14:19迅速增大至13.4 km左右,随后连续6个体扫维持在13.2~13.7 km,至14:53回波顶高下降到12.3 km左右,说明该单体发展高度较高,龙卷发生在ET下降后2~3个体扫。由此来看,龙卷发生前2~3个体扫最大反射率因子值在60 dBz左右;最大反射率因子高度有持续性的增长;回波顶高度呈连续下降;垂直累积液态水含量总体呈上升趋势,最大可达 50 kg/m^2 以上。

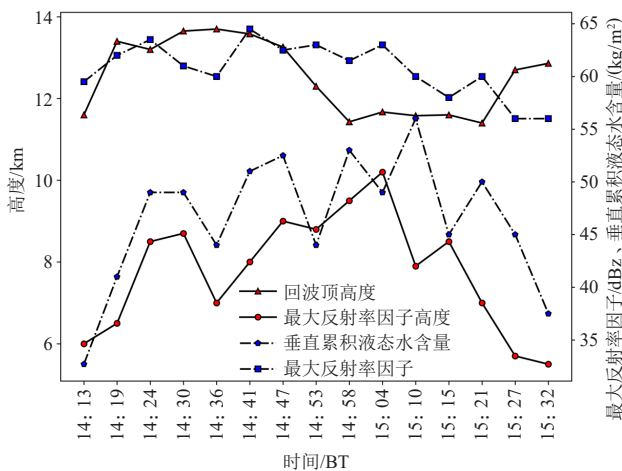


图7 2021年7月2日龙卷风暴参数演变
Fig. 7 Evolution of tornado parameters on 2 July 2021

4 结论

本文对2021年7月2日内蒙古兴安盟的EF3级龙卷环境背景及中小尺度特征进行分析,并分析龙卷发生的可能物理机制,得到以下主要结论。

1) 此次龙卷发生在东北冷涡背景下,直接影响系统为冷涡后部下摆的横槽,处于横槽的强偏西气流中,龙卷发生在槽后干冷空气与低层浅薄湿层叠加区域,并配合强垂直风切变,与王秀明等^[8]东北龙卷研究中多个龙卷个例的环境特征极其相似,因此可以

为东北地区龙卷的多尺度影响系统预报提供较好的参考。

2) 龙卷过程发生前环境条件趋于不稳定, (08:00) 环境大气的低层湿度条件较差, 湿层相对浅薄, 环境温度直减率大, 850~500 hPa温差达到30℃, CAPE值较小, 中低层存在明显的逆温层。临近龙卷时段, 根据龙卷发生地附近的地面温度、露点温度进行订正后CAPE达到3000 J/kg以上; 低层的相对湿度迅速增加, 相当位温随高度明显减小, 层结不稳定加强, 风随高度不断增大, 高层存在明显的干区, 这样的层结配置具有出现对流大风的潜势, 对局地水汽辐合抬升及CAPE增大起到关键作用。

3) 龙卷母体风暴位于对流云带最南侧, 具有明显的有界弱回波区、钩状回波和“V”形缺口。龙卷发生前首先在低层存在气旋式旋转结构, 识别到中气旋。龙卷发生在入流缺口处和TVS附近, 低层表现为气旋性辐合旋转, 中高层超级单体风暴顶部的辐散和中气旋的旋转相结合, 表现为气旋性辐散, 风暴顶只存在强烈的辐散。在龙卷发展成熟阶段, 中气旋在中层发展最为强盛, 在低层开始减弱。消亡阶段回波结构逐渐松散, 中气旋的强度和范围逐渐减小, 龙卷减弱至消散。雷达回波的不断发展加强, 有界弱回波区、钩状回波和“V”形缺口特征的同时出现增加了龙卷发生的可能性, 结合径向速度图, 分析中气旋的位置和龙卷的涡旋特征, 有利于龙卷的监测和预警。

4) 龙卷发生前具有回波强度>60 dBz的特征, 最大反射率因子高度、回波顶高度和垂直累积液态水含量的变化趋势可反映回波单体强度变化, 对龙卷的发生发展具有一定的研究意义。

由于龙卷的尺度通常仅几百米, 基于数值模式产品结合实况探空资料预报东北冷涡背景下龙卷的难度依然较大, 在短时临近预报工作中, 应利用多种观测资料加强对龙卷等极端强对流天气的监测能力。今后仍要在东北地区龙卷的环境特征和雷达回波特征等方面深入研究, 提高龙卷预报预警提前量。

参考文献

[1] 黄大鹏, 赵珊珊, 高歌, 等. 近30 a中国龙卷风灾害特征研究[J]. 暴

- 雨灾害, 2016, 35(2): 97-101.
- [2] 朱红蕊, 张洪玲, 孙爽, 等. 1956—2011年黑龙江省龙卷风气候特征[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(3): 98-103.
- [3] 郑峰, 谢海华. 我国近30年龙卷风研究进展[J]. 气象科技, 2010, 38(3): 295-299.
- [4] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [5] 俞小鼎, 王迎春, 陈明轩, 等. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象, 2005, 24(3): 456-464.
- [6] Bluestein H B, Snyder J C, Houser J B. A multiscale overview of the El Reno, Oklahoma, tornadic supercell of 31 May 2013[J]. Weather and Forecasting, 2015, 30(3): 525-552.
- [7] Sessa M F, Trapp R J. Observed relationship between tornado intensity and pre-tornadic mesocyclone characteristics[J]. Weather and Forecasting, 2020, 35(4): 1243-1261.
- [8] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析[J]. 气象学报, 2015, 73(3): 425-441.
- [9] 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.
- [10] 姚叶青, 魏鸣, 王成刚, 等. 一次龙卷过程的多普勒天气雷达和闪电定位资料分析[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(5): 587-594.
- [11] 陈海涛, 张晶, 姚文, 等. 辽宁营口2019-08-16龙卷过程双偏振雷达特征分析[J]. 陕西气象, 2020(6): 9-14.
- [12] 钱维宏, 艾阳, 陈笑晨. 辽宁开原龙卷强对流过程的扰动天气环境[J]. 地球物理学报, 2021, 64(5): 1531-1541.
- [13] 袁潮, 王武功, 马湘宜, 等. 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, 2021, 40(2): 384-393.
- [14] Bluestein H B, Thiem K J, Snyder J C, et al. Tornadogenesis and early tornado evolution in the El Reno, Oklahoma, supercell on 31 May 2013[J]. Monthly Weather Review, 2019, 147(6): 2045-2066.
- [15] Houser J L, Bluestein H B, Snyder J C. A finescale radar examination of the tornadic debris signature and weak-echo reflectivity band associated with a large, violent tornado[J]. Monthly Weather Review, 2016, 144(11): 4101-4130.
- [16] 张琳娜, 郭锐, 何娜, 等. “7·21”北京特大暴雨过程龙卷形成可能性探究[J]. 高原气象, 2015, 34(4): 1074-1083.
- [17] 刘勇, 刘子臣, 马廷标, 等. 一次飑线过程中龙卷及飑锋生成的中尺度分析[J]. 大气科学, 1998, 22(3): 326-335.
- [18] 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.
- [19] 项阳, 吴林林. 一次超级单体龙卷双偏振多普勒天气雷达分析[J]. 气象科技, 2021, 49(4): 579-588.
- [20] 植江玲, 黄先香, 白兰强, 等. 2021年中国龙卷活动及灾情特征[J]. 气象科技进展, 2022, 12(1): 26-36.
- [21] Fujita T T. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity[R]. SMRP-RP-91, Chicago: The University of Chicago, 1971.
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 龙卷风强度等级(GB/T 40243—2021)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [23] 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 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, 2008, 32(3): 508-522.
- [24] 张同, 王婷婷, 胡中明, 等. 东北冷涡背景下一次强对流过程环境条件和对流风暴特征分析[J]. 气象灾害防御, 2020, 27(4): 1-6.

(编辑: 郑秋红)