

张桂莲,李一平,江靖,等,2023. 多个超级单体风暴诱发的 EF3 级强龙卷特征分析[J]. 气象,49(11):1315-1327. Zhang G L, Li Y P, Jiang J, et al, 2023. Characteristic analysis of EF3 strong tornado induced by multiple supercell storms[J]. Meteor Mon, 49(11):1315-1327(in Chinese).

## 多个超级单体风暴诱发的 EF3 级强龙卷特征分析<sup>\*</sup>

张桂莲<sup>1</sup> 李一平<sup>1</sup> 江 靖<sup>1</sup> 常 欣<sup>2</sup> 霍志丽<sup>1</sup> 仲 夏<sup>1</sup> 郭炳瑶<sup>1</sup> 贾克寒<sup>3</sup>

1 内蒙古自治区气象台,呼和浩特 010051

2 赤峰市气象局,内蒙古,赤峰 024000

3 锡林郭勒盟气象局,内蒙古,锡林浩特 026000

**提 要:** 2021 年 6 月 25 日内蒙古锡林郭勒盟太仆寺旗发生了历史罕见的 EF3 级强龙卷,导致 6 人死亡,大量建筑物等严重损毁。利用常规高空和地面观测、区域自动气象观测站、FY4 卫星云图、河北省张北 CB 型多普勒雷达等观测资料,以及 NCEP(1°×1°)逐 6 h 再分析资料对这次强龙卷过程进行分析。结果表明:此次龙卷发生在前倾槽不稳定层结环境背景下,较强的对流层中低层条件不稳定(850 hPa 与 500 hPa 温度垂直减温率约为 7.7℃·km<sup>-1</sup>)、低层丰富的水汽、中等强度的对流有效位能和强的 0~6 km 垂直风切变为超级单体风暴形成提供了有利环境背景。此外,0~1 km 风矢量差为 8 m·s<sup>-1</sup>,抬升凝结高度为 1.0 km,为超级单体龙卷的发生提供了相对有利的环境条件。与地面干线伴随的辐合线触发了产生龙卷的母风暴,随后演变为超级单体,其雷达反射率因子呈现典型的钩状回波、低层暖湿气流流入缺口、低层弱回波区和中高层回波悬垂,以及中等强度的中气旋等特征;龙卷的生成和消亡过程中有三个超级单体风暴相继形成,都呈现为孤立的对流风暴形态,龙卷发生在其中一个超级单体钩状回波的顶端,在前侧上升气流和后侧下沉气流交界处,雷达分析的基于中气旋强度演变的龙卷可能起始时间和路径与现场调查时间十分吻合。除了强龙卷,这系列超级单体还产生了大冰雹和直线型对流大风(雷暴大风),强回波中心自低到高明明显倾斜,最大反射率因子高达 65 dBz,径向速度图上除了有中等强度的中气旋,还存在明显的中层径向辐合,超级单体风暴形成时垂直累积液态水含量(VIL)值高达 73 kg·m<sup>-2</sup>,VIL 密度达到 4~5 g·m<sup>-3</sup>,这些雷达回波特征指示大冰雹的存在,而中层径向辐合是雷暴大风的雷达回波特征。

**关键词:** 强龙卷,超级单体风暴,中气旋,“V 型”缺口,钩状回波,大冰雹

**中图分类号:** P445

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.083001

## Characteristic Analysis of EF3 Strong Tornado Induced by Multiple Supercell Storms

ZHANG Guilian<sup>1</sup> LI Yiping<sup>1</sup> JIANG Jing<sup>1</sup> CHANG Xin<sup>2</sup>

HUO Zhili<sup>1</sup> ZHONG Xia<sup>1</sup> GUO Bingyao<sup>1</sup> JIA Kehan<sup>3</sup>

1 Inner Mongolia Meteorological Observatory, Huhhot 010051

2 Chifeng Meteorological Office of Inner Mongolia, Chifeng 024000

3 Xilin Gol League Meteorological Office of Inner Mongolia, Xilinhot 026000

**Abstract:** In Taipusi Banner of Xilin Gol League, Inner Mongolia, a rarely-seen EF3 strong tornado occurred on 25 June 2021, resulting in 6 deaths and a large number of buildings' damage and other losses. Based on meteorological observation data, automatic weather station data, CB-Doppler radar observation data of Zhangbei, Hebei Province, FY-4 satellite data and NCEF FNL (1°×1°) 6 h reanalysis data, this

<sup>\*</sup> 内蒙古自然科学基金项目(2020MS04020)、中国气象局东北冷涡科研业务能力提升攻关团队共同资助

2022 年 9 月 23 日收稿; 2023 年 8 月 8 日收修定稿

第一作者:张桂莲,主要从事暴雨、暴雪和强对流等灾害性天气预报研究. E-mail:2561750566@qq.com

通讯作者:李一平,主要从事天气预报及其灾害性天气相关研究. E-mail:liyiping888@126.com

paper comprehensively analyzes the process of the strong tornado. The results show that this tornado occurred in the background of unstable stratification environment of the forward-tilted trough. The strong conditional instability in the middle and low troposphere (the vertical temperature lapse rate at 850 hPa and 500 hPa was about  $7.7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ), abundant water vapor in the lower layers, medium-strength convective available potential energy, and strong 0–6 km vertical wind shear provided favorable environmental conditions for supercell storms and tornadoes. In addition, the 0–1 km vertical wind shear was  $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , and the lifting condensation height was 1.0 km, which provided relatively favorable environmental conditions for the occurrence of supercell storms and tornadoes. The convergence line accompanying the ground dry line triggered the parent storm that produced the tornado, and then evolved into the supercell. The radar reflectivity factor showed the characteristics of a typical hook echo, the inflow gap of warm and wet air at low level, the weak echo region at low level, the overhang echo at middle and high level, and the moderate-strength mesocyclone, etc. In the process of the formation and extinction of the tornado, three supercell storms formed successively, and all of them appeared in the isolated convective storm form. The tornado occurred at the top of one of the supercells, which was the junction of the front updraft and the rear downdraft. The possible start time and path of tornado based on the evolution of mesocyclone intensity analyzed by radar are in good agreement with the time of field investigation. Except for the strong tornado, this series of supercells also produced large hail and linear convection gale (thunderstorm gale), the strong echo center was significantly tilted from low to high, and the maximum reflectivity factor was as high as 65 dBz. In addition to the moderate-strength mesocyclones, there was also obvious mid-level radial convergence in the diagram of radial velocity. At the time of supercell storm formation, the vertical integrated liquid water content (VIL) was as high as  $73\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , the VIL density was  $4\text{--}5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ . These radar echo characteristics indicate the existence of large-sized hail, while the mid-level radial convergence was the radar echo characteristic of thunderstorm gale.

**Key words:** strong tornado, supercell storm, mesocyclone, V-shaped notch, hook echo, large-sized hail

## 引 言

龙卷是强对流中产生破坏力最强的小尺度灾害性天气,能在短时间内造成重大人员和财产损失,龙卷通常分为超级单体龙卷(或称为中气旋龙卷)和非超级单体龙卷(或称为非中气旋龙卷)(Wakimoto and Wilson, 1989; 俞小鼎等, 2006a);对国内龙卷的研究已经有许多成果,郑永光等(2021)对中国龙卷研究进展进行了深入分析,王秀明等(2015)、郑媛媛等(2015)、黄先香等(2019)、徐芬等(2021)分别对中国东北龙卷的环境特征、东部沿海地区的 10 次台风龙卷过程、珠江三角洲台风龙卷的活动特征、江苏龙卷时空分布进行了区域性研究;中国的强龙卷主要分布在江淮、两湖平原、华南、东北和华北东南部等平原地区,具有在某地频发的特征(范雯杰和俞小鼎, 2015),例如 2016 年 6 月 23 日发生在江苏盐城阜宁的 EF4 级龙卷(郑永光等, 2016; 张小玲等,

2016), 2019 年 7 月 3 日辽宁开原 EF4 级龙卷(郑永光等, 2020; 张涛等, 2020), 2019 年 4 月 13 日广东徐闻强龙卷(黄先香等, 2021);从诱发我国龙卷的天气系统而言,主要分为两类,一类是台风天气背景产生的台风龙卷,例如 2015 年 10 月强台风彩虹螺旋雨带中衍生龙卷对广东的影响(王炳赞等, 2018),另一类是低涡、高空槽、切变线等天气背景下产生的西风带龙卷(俞小鼎等, 2006b; 刁秀广等, 2014; 郑艳等, 2017)。

内蒙古对短时强降水、雷暴大风、冰雹等强对流的研究取得了许多成果,但对龙卷的研究罕见;2016—2020 年内蒙古出现了 3 次龙卷,如 2016 年赤峰市龙卷、2020 年包头市、锡林浩特龙卷,均造成人员伤亡和财产损失,因此加强内蒙古龙卷的研究非常必要。本文对 2021 年 6 月 25 日内蒙古锡林郭勒盟太仆寺旗由多个超级单体风暴诱发的 EF3 级强龙卷特征进行分析,以期对内蒙古龙卷的预报提供一些参考依据。

2021 年 6 月 25 日 14:00—15:00(北京时,下同),内蒙古锡林郭勒盟太仆寺旗千斤沟镇发生龙卷风天气(以下简称“6·25”龙卷),伴随短时强降水和冰雹,龙卷导致 6 人死亡,14 人受伤,砖木结构房屋倒塌 200 余间,部分牲畜被砸死。25 日锡林郭勒盟气象局对太仆寺旗龙卷进行了初步现场调查,26 日由中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室、国家气象中心、内蒙古自治区气象局、锡林郭勒盟气象局、太仆寺旗气象局组成的四级联合现场调查组开展龙卷过程调查,通过无人机航拍等影像资料,获得宝贵的龙卷灾情信息。

## 1 资料和灾情调查

### 1.1 资料

本文选取资料为 2021 年 6 月 25 日内蒙古气象信息中心提供的全区 1134 个加密自动气象站观测资料,中国气象局卫星中心提供的 FY-4 可见光云图和云顶亮温(TBB)以及河北省张家口市张北多普勒雷达(CINRAD/CB 型)资料,NCEP 的 FNL( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ )逐 6 h 再分析资料以及联合调查组提供的灾情调查资料。

### 1.2 灾情调查

2021 年 6 月 25 日 14:10—14:40 内蒙古锡林郭勒盟太仆寺旗千斤沟镇出现龙卷,伴随雷电、短时强降水和强冰雹天气。距离受灾点最近的气象站为建国村和千斤沟镇区域气象站(距离为 15 km),建国村区域站为气温、降水两要素站,龙卷经过前后气温明显下降,从 14:00 的  $20.5^{\circ}\text{C}$  下降到  $11.5^{\circ}\text{C}$ ,下降幅度为  $9.0^{\circ}\text{C}$ ;14:00—15:00 的小时降水量为 26 mm,14:00—16:00 的累计降水量为 31.6 mm,并伴有鸡蛋大小的冰雹(目击者描述)。龙卷发生地有风塔,但刚刚组装未投入使用,因此没有探测到龙卷经过时的极大风速;千斤沟镇六要素区域站 14:00—15:00 极大风速从  $8.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  增至  $11.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,极大风速出现在 14:22,同时风向突变,由西南风转为西北风;气压偏低,后略有上升,从 14:00 的 836.8 hPa 上升至 15:00 的 837.5 hPa;14:00—15:00 的小时降水量为 15.3 mm,13:00—16:00 的 3 h 累计降水量为 23.6 mm。

依据《龙卷灾害调查技术规范》(全国气象防灾

减灾标准化技术委员会,2017),对锡林郭勒盟太仆寺旗千斤沟镇“6·25”龙卷风进行调查,根据现场调查,结合航拍影像和目击者描述,本次龙卷风于 25 日 14:10 左右生成于马坊子村西马坊西北侧,途经东马坊、建国村大营子,14:40 终止于建国村三级地东南 2 km 左右,路径全程为 13 km 左右;受灾宽度为 50~200 m;依据《龙卷强度等级》(中国气象局,2019)强度定级为强龙卷风三级,相当于 EF3 级强龙卷。

根据龙卷风起点处目击者描述,25 日 14:10 左右天气突变,太仆寺旗马坊子村村头西北方天空出现漏斗型云状,后逐渐与地面相接,地面出现黄色尘土,呈螺旋状快速经过村头由北向东南移动,后又向正南方移动,接地宽度为 50~150 m;龙卷所经之地大量树木折断,并有明显扭曲旋转特征,部分大树连根拔起,最大直径达 52 cm,沿途树木成片撺顶,大多树木倒伏方向和龙卷移动方向基本一致,有多处树木向内侧成气旋倒伏,具有龙卷独有的树木倒伏特征。14:20 左右龙卷进入建国村,瞬间天昏地暗,砖混结构房屋倒塌,农机车吹翻损毁、移位,汽车移位至破损墙上、机动三轮车抛到农田,沿途变压器损毁严重,直径 20 cm 的电线杆被折断,并伴有鸡蛋大小的冰雹,冰雹把挖掘机驾驶室挡风玻璃打碎,1 min 后龙卷向东南方向移动;据建国村三级地农民讲述,龙卷在建国村三级地东南 2 km 左右处减弱消失,龙卷消失处位于太仆寺旗与河北省沽源县交界处河北一侧。

## 2 前倾槽下大尺度环流背景

由 6 月 25 日 08:00 高空综合配置图(图 1)可见,在蒙古国和内蒙古河套地区( $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\text{E}$ ) 850 hPa 有高空槽,500 hPa、700 hPa 高空槽位于其下游内蒙古中部、华北东部地区( $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ ),即 850 hPa 高空槽落后于 700~500 hPa 高空槽,高空槽随高度具有明显的前倾结构特点,且 700~500 hPa 西风槽重叠,系统较为深厚,非常有利于强对流的产生;太仆寺龙卷(图中三角代表龙卷中心)位于 700~500 hPa 高空槽后的位势高度大梯度区内,该区域为下沉运动区;与 850 hPa 槽前西南气流上升运动区叠置,龙卷发生地 850~500 hPa 均位于湿区,上游为干区,有干冷空气侵入,并有干线(露点锋)维持。综上所述,此次太仆寺龙卷是发生在前

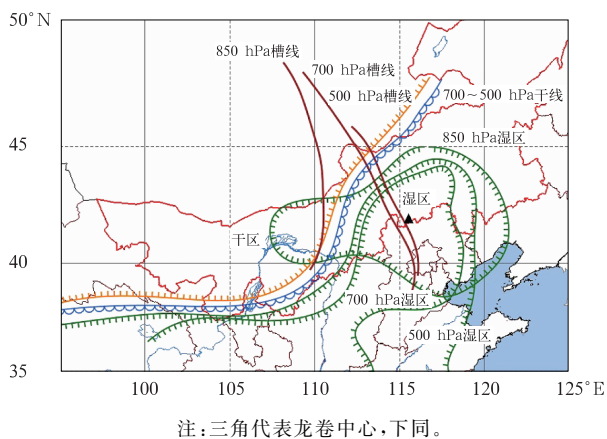


图1 2021年6月25日08:00高空综合配置图  
Fig. 1 High-altitude comprehensive configuration at 08:00 BT 25 June 2021

倾槽结构的大尺度环流背景下,上冷下暖的不稳定层结,且上游有干冷空气入侵,冷暖空气交汇,易发生雷暴大风和冰雹等强对流天气(孙继松和陶祖钰,2012)。

### 3 龙卷发生的中尺度环境条件

对于雷暴(深厚湿对流)生成,大气静力不稳定、低层水汽和抬升触发机制,这三个要素是雷暴生成的充分必要条件(假定微物理条件自动满足)(Doswell et al,1996;俞小鼎,2011);除这三个要素外,

水平风垂直切变大小决定雷暴的组织程度和生命史长短(Weisman and Klemp,1982),下面从这四个方面分析超级单体风暴发生、发展的环境条件。

#### 3.1 低层水汽丰富

6月25日11:00比湿和风沿 $41.79^{\circ}\text{N}$ (龙卷中心为 $41.79^{\circ}\text{N}$ 、 $115.49^{\circ}\text{E}$ )剖面显示(图略),龙卷中心800 hPa以下比湿为 $10\sim 12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,高于内蒙古中部强对流层低层比湿 $8\sim 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的标准,且为西南风,风速不大,普遍为 $4\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,800 hPa以上均为西北风,水汽整体呈现上干下湿的层结分布;大气低层高相对湿度有利于龙卷对流风暴的下沉气流不会太强,从而有利于近地面垂直涡度的增强(Doswell and Evans, 2003; Schultz et al,2014);25日14:00(图2a)龙卷中心800 hPa以下比湿仍为 $10\sim 12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,且为西南风,但风速明显增至 $6\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,其上游( $112^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$ )风向也从11:00的西南风转为西北风,湿度明显下降,比湿从11:00的 $6\sim 8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降至 $2\sim 4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,表明有干冷空气入侵,干冷空气强迫暖湿空气抬升,有利于锋生;800 hPa以上仍维持西北风,但风速也明显加大,400~300 hPa高空西北风风速达 $32\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。中空干冷空气入侵并叠加在西南暖湿气流之上形成强的高低空垂直风切变区是强风暴系统发展和维持的重要因素。

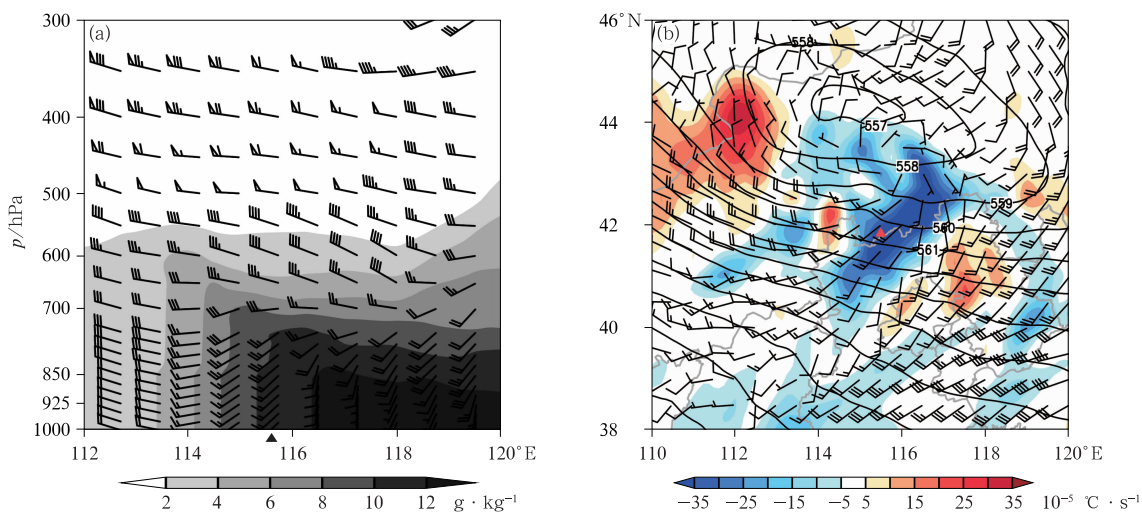


图2 2021年6月25日14:00(a)比湿(阴影)和风场(风羽)沿 $41.79^{\circ}\text{N}$ 剖面,  
(b)500 hPa高度场(黑线,单位:dagpm)、温度平流(填色)和850 hPa风场(风羽)  
Fig. 2 (a) Vertical profile of specific humidity (shaded) and wind field (barb) along  $41.79^{\circ}\text{N}$ , and  
(b) geopotential height (contour, unit: dagpm), tempreture advection at 500 hPa (colored)  
and wind field at 850 hPa (barb) at 14:00 BT 25 June 2021



### 3.2 有利于龙卷生成的不稳定层结

中高层较强干冷空气叠加在低层暖湿气流上,使得大气温度垂直递减率增大,造成低层空气负浮力加大,有利于地面强对流天气特别是冰雹、大风类的强对流天气出现(许爱华等,2014)。

25 日 11:00(图略)500 hPa 温度平流和 850 hPa 风场上,龙卷中心区域 850 hPa 为  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的西南风,500 hPa 位于冷暖温度平流交界处,其上游有明显的冷空气,冷平流中心强度为  $-35 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ;14:00(图 2b)在内蒙古中部 850~500 hPa 冷暖气流同时加强,850 hPa 有西南风、东南风、东北风、西北风形成的气旋式环流中心,并有“人”字型切变线维持,500 hPa 冷空气东南下,且冷平流中心正好经过龙卷中心,龙卷中心区域 850 hPa 仍为西南风,但西南风风速增至  $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,500 hPa 温度平流和 850 hPa 风场配置上,龙卷中心区域 500 hPa 冷平流叠加在 850 hPa 西南暖湿气流之上,垂直温度递减率加大,上冷下暖不稳定层结加强,有利于强对流天气的产生,龙卷在 14:00 之后生成并爆发。

25 日 14:00 850 hPa 假相当位温  $\theta_{se}$ (图略)在华北地区为显著高能区,龙卷中心位于高能区后部  $\theta_{se}$  梯度区;14:00  $\theta_{se}$  沿龙卷中心  $41.79^{\circ}\text{N}$  剖面显示(图 3a),龙卷中心 700 hPa 以下  $\theta_{se}$  分布呈近似倒“ $\Omega$ ”型,850 hPa 以下  $\theta_{se}$  呈高能舌分布,龙卷中心  $\theta_{se}$  为 346 K, $\theta_{se}$  随高度减小,且垂直递减率高; $\theta_{se}$  是表示温度和湿度的特征量,低层高能高湿,有利于强对流的发生。

25 日 11:00 龙卷中心 850 hPa 与 500 hPa 温度差  $\Delta T_{(850-500)}$  为  $29^{\circ}\text{C}$ ,而 14:00(图略)随着 500 hPa 冷平流和 850 hPa 西南风同时加强以及午后太阳辐射的共同作用, $\Delta T_{(850-500)}$  高达  $33^{\circ}\text{C}$ ,明显大于内蒙古中部雷暴大风、冰雹等强对流  $\Delta T_{(850-500)}$  为  $28^{\circ}\text{C}$  的标准;850 hPa 与 500 hPa 温度差可以在很大程度上表示对流层中低层环境温度垂直递减率,也就是条件静力不稳定度的大小, $\Delta T_{(850-500)}$  差值越大,表示大气层结越不稳定,有利于对流天气的产生(吴芳芳等,2013);14:00 温度垂直减温率约为  $7.7^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ ,大于美国显著龙卷垂直减温率(Craven and Brooks, 2004),14:00 龙卷爆发。

强龙卷爆发通常需要有超级单体风暴产生的环境条件,其有利条件是较大的对流有效位能(CAPE)和强的深层( $0 \sim 6 \text{ km}$ )垂直风切变(郑永光等,2017)。25 日 11:00 龙卷中心 CAPE 值(图略)只有  $800 \sim 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,14:00(图 3b)CAPE 的强度和范围在华北地区迅速跃增,龙卷中心 CAPE 值高达  $1200 \sim 1400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,大于内蒙古中部强对流 CAPE 值  $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  的标准,龙卷发生地并不位于 CAPE 最大值区域,而是在 CAPE 最大值后侧梯度区。

25 日 14:00(图略) $0 \sim 1 \text{ km}$  垂直风切变并不大,只有  $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而  $0 \sim 6 \text{ km}$  垂直风切变却一直较大,在 08:00—11:00 为  $18 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,14:00(图略)高达  $20 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高于内蒙古中部强对流  $0 \sim 6 \text{ km}$  垂直风切变  $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的标准。强的垂直风切变有利于对流风暴的加强和维持,水平风垂

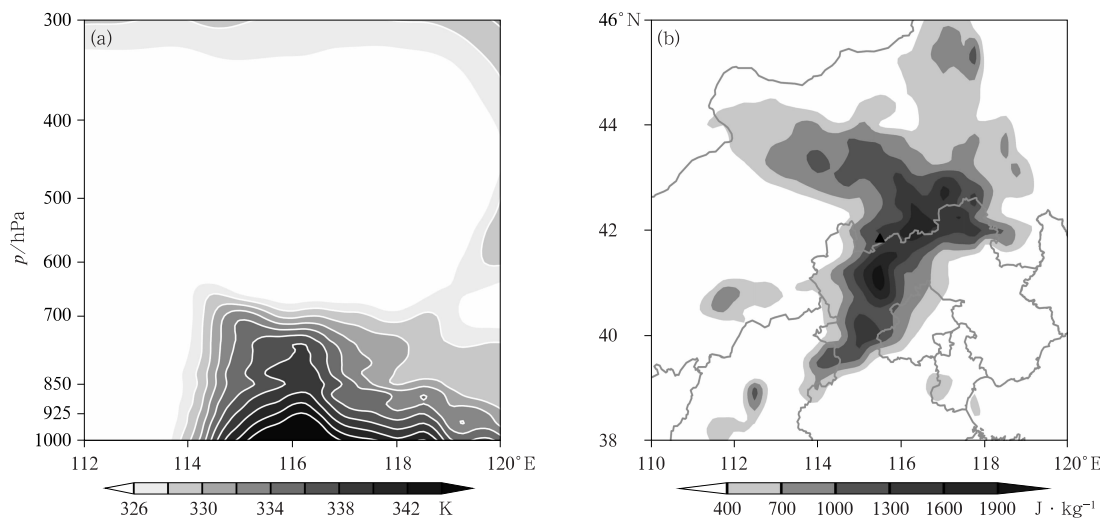


图 3 2021 年 6 月 25 日 14:00(a) $\theta_{se}$ 沿  $41.79^{\circ}\text{N}$  剖面,(b)CAPE 值分布

Fig. 3 (a) Vertical profile of  $\theta_{se}$  along  $41.79^{\circ}\text{N}$ , (b) CAPE at 14:00 BT 25 June 2021

直切变大小决定雷暴的组织程度和生命史长短(Weisman and Klemp,1982),F2/EF2 级以上龙卷通常出现在强垂直风切变环境下(Johns and Doswell,1992;俞小鼎等,2012);CAPE 值和 0~6 km 垂直风切变越大,发生龙卷的可能性越大(Markowski and Richardson,2010),这次太仆寺龙卷环境条件满足了以上两个条件。

探空曲线反映了探空站及其附近一定范围内气象要素的垂直分布,对距离龙卷中心最近的河北省张家口探空资料进行分析(表 1),25 日 08:00 沙瓦特指数(SI)、抬升指数(LI)、最有利抬升指数(BLI)分别为-0.36℃、-0.41℃、-0.8℃,而 CAPE、下

沉对流有效位能(DCAPE)均不高,分别为 125.3 J·kg<sup>-1</sup>、8.4 J·kg<sup>-1</sup>,0~1 km、0~3 km 垂直风切变分别为 8.3 m·s<sup>-1</sup>、15.2 m·s<sup>-1</sup>,但 K 指数为 35.1℃,ΔT<sub>(850-500)</sub>为 22.8℃,特别是 0~6 km 垂直风切变为 21.2 m·s<sup>-1</sup>,达到强的垂直风切变,抬升凝结高度(LCL)也很低,只有 1.038 km;用 14:00 的 2 m 温度、露点温度等对 08:00 的探空资料进行订正,14:00(表 1)CAPE 跃升为 1312.9 J·kg<sup>-1</sup>、BLI 减小至-4.2℃,不稳定条件进一步增强,较强的 CAPE 和 0~6 km 垂直风切变以及较低的 LCL 为午后龙卷天气的发生提供了有利的热力和动力不稳定条件。

表 1 2021 年 6 月 25 日张家口站主要环境参数

Table 1 Main environmental parameters at Zhangjiakou Station on 25 June 2021

时间 /BT	K 指数 /℃	CAPE/ (J·kg <sup>-1</sup> )	SI /℃	LI /℃	BLI /℃	DCAPE/ (J·kg <sup>-1</sup> )	ΔT <sub>(850-500)</sub> /℃	0~1 km 垂直风 切变/(m·s <sup>-1</sup> )	0~3 km 垂直风 切变/(m·s <sup>-1</sup> )	0~6 km 垂直风 切变/(m·s <sup>-1</sup> )	LCL /km
08:00	35.1	125.3	-0.36	-0.41	-0.8	8.4	22.8	8.3	15.2	21.2	1.038
14:00	—	1312.9	—	—	-4.2	—	—	—	—	—	—

注:“—”表示无此时刻资料。

### 3.3 与地面干线伴随的辐合线触发产生龙卷的母风暴

在对流不稳定条件下,对流初始活动需要边界层辐合线、地形和海陆分布、重力波(俞小鼎等,2012)等触发机制。此次太仆寺龙卷是由超级单体风暴诱发生成,与地面干线伴随的辐合线触发产生龙卷的母风暴。

25 日 14:00 在内蒙古锡林郭勒盟南部有中尺

度辐合线生成(图 4a),其后缓慢向东南移动,不断触发对流系统产生,14:30 移出内蒙古境内,随后进入河北省;14:00(图 4b)在内蒙古和河北交界附近有西北风和西南风构成的中尺度辐合线,同时中尺度辐合线附近有干线维持,干线北侧干冷空气不断侵入,地面露点温度只有 2℃,而其南侧由于西南暖湿气流不断输送,露点温度为 16℃,干线南北两侧干湿梯度非常大,表明干线两侧的冷暖气流显著加大,干冷空气和暖湿气流交汇,有利于龙卷超级单体

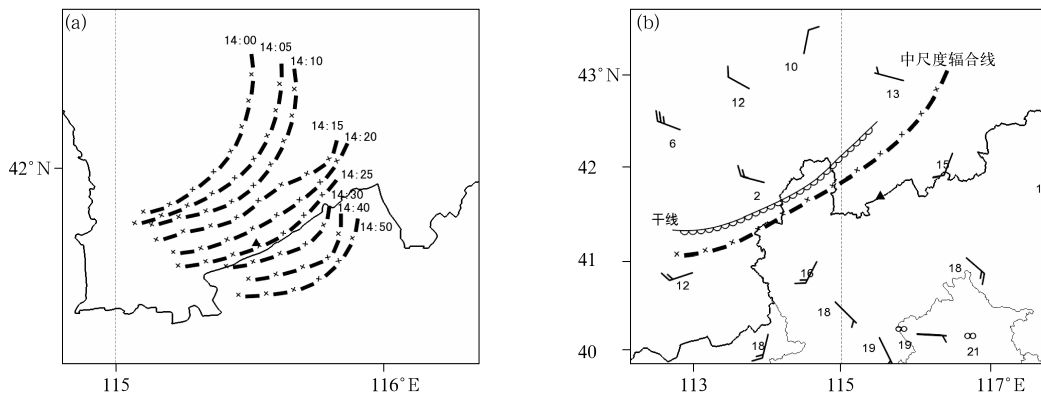


图 4 2021 年 6 月 25 日(a)14:00—14:50 中尺度辐合线演变,  
(b)14:00 2 m 露点温度(数字,单位:℃)和 10 m 风场(风羽)

Fig. 4 (a) Evolution of the mesoscale convergence line from 14:00 BT to 14:50 BT, and (b) 2 m dew point temperature (number, unit: ℃) and 10 m wind filed (barb) at 14:00 BT 25 June 2021

风暴诱发生成。

#### 4 孤立的对流单体形成龙卷

6 月 25 日 13:45(图 5a)FY-4 卫星云图上在内蒙古锡林郭勒盟南部太仆寺旗附近有一个孤立近似圆形的中尺度对流系统(MCS),在其西南侧有三个排列成一线的 TBB $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 冷云区,表明对流发展旺盛;14:00(图 5b)MCS 面积逐渐增大,三个排列成一线的 TBB $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 冷云区合并成一个面积较

大的冷云区;14:10 左右龙卷爆发,14:15(图 5c)孤立近似圆形的 MCS 仍继续维持,TBB 冷云区范围进一步增大,龙卷爆发在 TBB 梯度区,而此时雷达回波反射率强度高达 60 dBz;符合孤立分散的单体对流更易于生成龙卷以及产生 EF2 级以上龙卷的对流模态,其中一类为相对独立的单体聚集成圆形或椭圆形的离散单体,最大回波可达 50 dBz 的统计研究(Grams et al,2012)。14:20(图 6)可见光云图上有白亮的圆形对流单体,在龙卷爆发处 TBB 梯度大值区云顶非常粗糙,有明显上冲云顶,表明有深厚

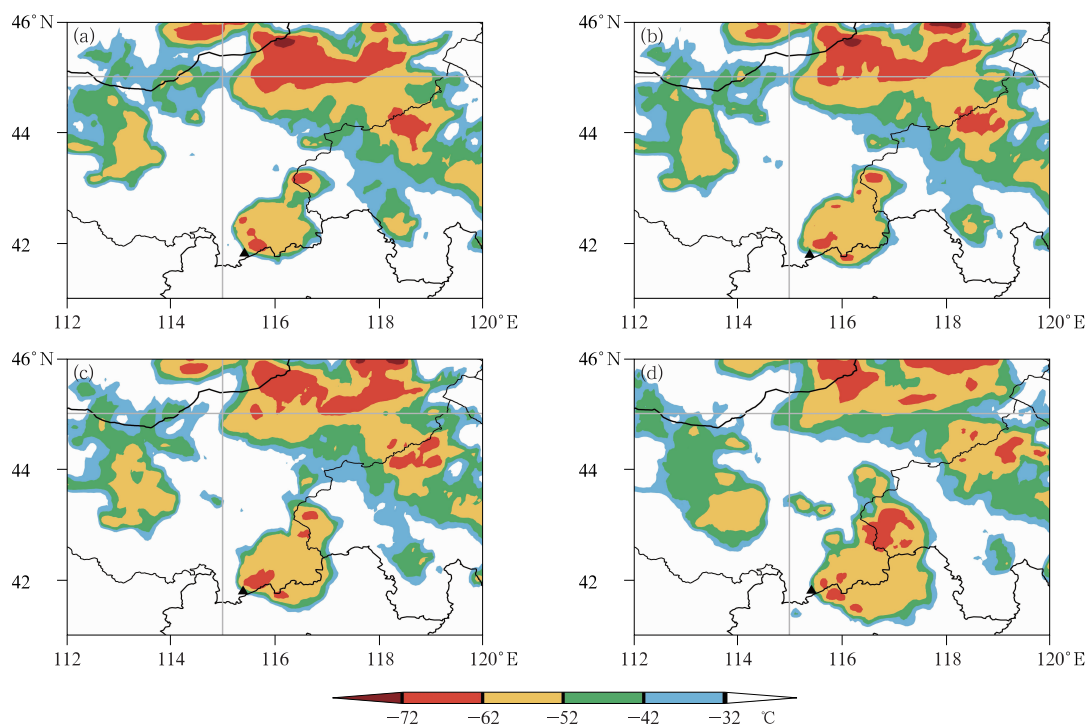


图 5 2021 年 6 月 25 日(a)13:45,(b)14:00,(c)14:15,(d)15:00 FY-4 TBB

Fig. 5 TBB of FY-4 at (a) 13:45 BT, (b) 14:00 BT, (c) 14:15 BT, (d) 15:00 BT 25 June 2021

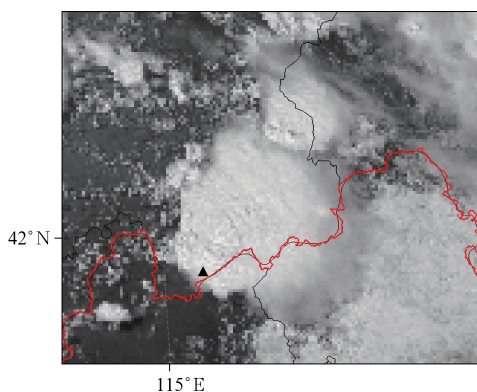


图 6 2021 年 6 月 25 日 14:20 FY-4 可见光云图

Fig. 6 Visible cloud image of FY-4 satellite at 14:20 BT 25 June 2021

对流发生;在对流云团西北侧上风方向边界齐整,而对流云团东南侧下风方向有明显云砧,垂直风切变强,有利于对流风暴龙卷的形成;15:00(图 5d)MCS 主体进入河北沽源,虽然也有龙卷但没有产生明显危害。

#### 5 多个超级单体风暴诱发龙卷

##### 5.1 多仰角的超级单体风暴垂直结构

此次龙卷在 25 日 14:12 爆发,距离龙卷发生地最近的是河北省张家口市张北多普勒雷达,位于龙

卷中心西南方向约 100 km 处。对张北雷达 0.5°、1.5°、3.4°、4.3° 不同仰角基本反射率因子(图 7)进行分析,0.5°仰角(图 7a)有中心强度为 60 dBz 的强回波,在强回波移动方向右侧有倒“V”型缺口,强的上升气流导致了“V”型缺口;低层 1.5°仰角(图 7b)有弱回波,低层弱回波对应的 3.4°仰角(图 7c)、4.3°仰角(图 7d)有强回波及回波悬垂,回波强度高达 60 dBz、中高层有回波悬垂和倾斜的强中心,有利于组织化对流的发展。

25 日 14:00 张北雷达 1.5°基本径向速度图上有明显的  $\pm 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  气旋式切变速度对(图 8a),且 14:06(图 8b)、14:12(图 8c)雷达连续两个体扫仍有气旋式速度对维持,速度对距离张北雷达中心

为 100 km,满足中气旋判据,为中等强度的中气旋(俞小鼎等,2006a),该风暴为超级单体风暴,表明此次太仆寺龙卷由超级单体风暴诱发而成;国内大量研究认为,许多龙卷发生时伴随中气旋,且中气旋底高很低(张小玲等,2016),此次龙卷也具有这个特点。

垂直累积液态水含量(VIL)从 14:00 到 14:12(图略)有明显跃增,VIL 中心值高达  $73 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,VIL 密度为  $6.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  ( $>4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),表明有直径超过 2 cm 的大冰雹(Amburn and Wolf,1997),产生龙卷的超级单体具有大冰雹的回波特征,同时也产生了大冰雹,与龙卷实际调查有大冰雹相吻合。

6 月 25 日 14:48 张北雷达 1.5°仰角反射率因子图上(图 9a),在内蒙古太仆寺旗和河北沽源有两

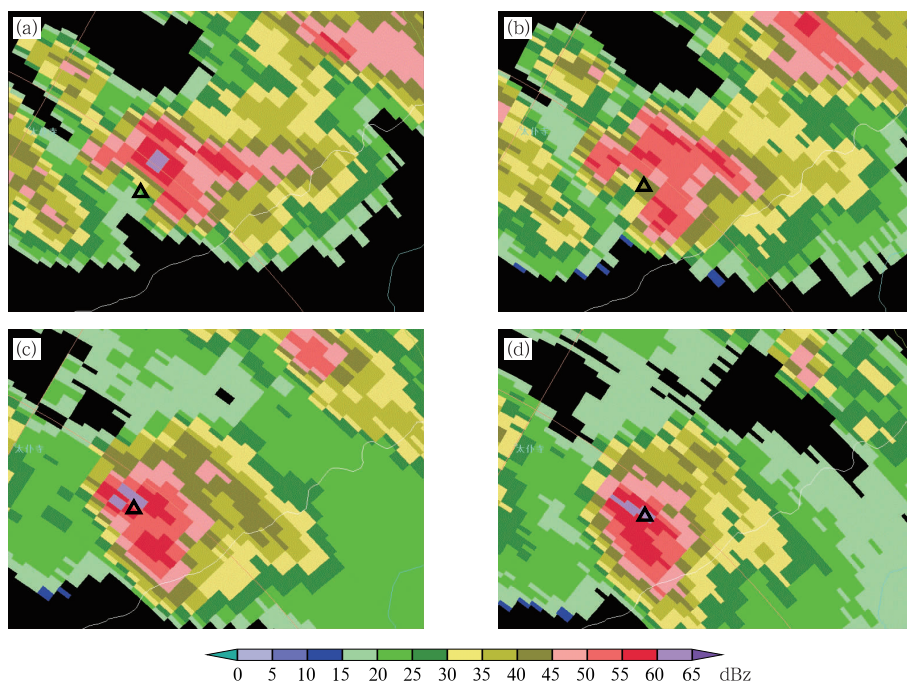


图 7 2021 年 6 月 25 日 14:00 张北多普勒雷达(a)0.5°, (b)1.5°, (c)3.4°, (d)4.3°仰角反射率因子  
Fig. 7 Doppler radar reflectivity factor in Zhangbei at elevations of (a) 0.5°, (b) 1.5°, (c) 3.4°, and (d) 4.3° at 14:00 BT 25 June 2021

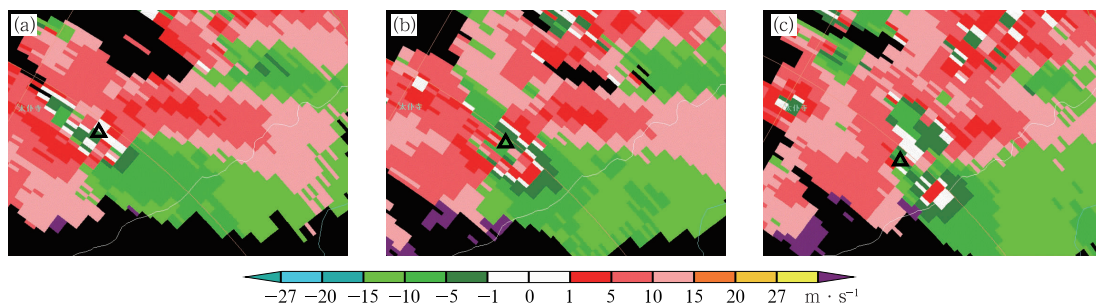


图 8 2021 年 6 月 25 日(a)14:00, (b)14:06, (c)14:12 张北多普勒雷达 1.5°仰角基本径向速度  
Fig. 8 Doppler radar basic radial velocity in Zhangbei at 1.5° elevation at (a) 14:00 BT, (b) 14:06 BT, (c) 14:12 BT 25 June 2021



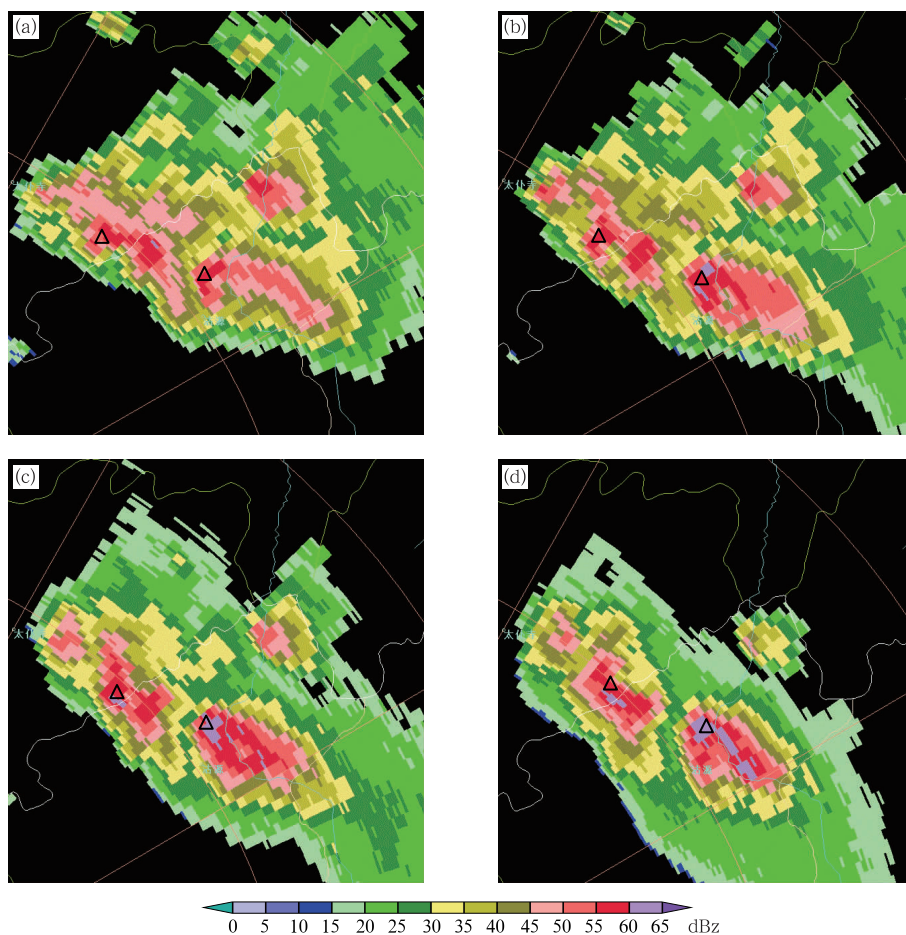


图 9 2021 年 6 月 25 日 14:48 张北多普勒雷达 (a) 1.5°, (b) 2.4°, (c) 3.4°, (d) 4.3° 仰角反射率因子

Fig. 9 Doppler radar reflectivity factor in Zhangbei at elevations of  
(a) 1.5°, (b) 2.4°, (c) 3.4° and (d) 4.3° at 14:48 BT 25 June 2021

个涡旋钩状回波,近似经典超级单体;1.5°仰角在钩状回波处有明显弱回波,2.4°(图 9b)、3.4°(图 9c)、4.3°仰角(图 9d)在弱回波上有强的回波悬垂,且随高度强度明显加大,3.4°、4.3°仰角回波悬垂中心强度高达 65 dBz 以上。

6 月 25 日 14:42(图 10a)、14:48(图 10b)张北雷达 1.5°仰角基本径向速度图上,连续两个体扫,同样有明显的 $\pm 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 气旋式速度对,速度对距离张北雷达中心约为 100 km,表明有两个中气旋,14:42—14:48 又有两个超级单体风暴生成,龙卷发生在钩状回波顶端,在前侧上升气流和后侧下沉气流交界处,这符合龙卷超级单体风暴概念模型(Lemon and Doswell, 1979);雷达分析和现场调查时间十分吻合,此次太仆寺龙卷为三个超级单体风暴诱发而成,这在内蒙古中部地区极为罕见。

## 5.2 超级单体风暴的垂直剖面结构

张北雷达 14:00 反射率因子沿径向方向垂直剖

面图上(图 11a),低层有弱回波区、较大的反射率因子梯度区、5~6 km 处有回波穹隆,回波穹隆之上有强的回波悬垂,悬垂正上方 60.5 dBz 强回波中心高度接近 9 km,大于 55 dBz 的强回波高度已经伸展到 13 km 以上,高悬的强回波也是大冰雹的预报指标;剖面结构表明超级单体风暴内反射率因子从低到高向低层入流一侧倾斜的特征,极强的倾斜入流和上升运动迫使较大直径的冰粒在超级单体风暴中不断生成,有利于大冰雹的生成。

张北雷达 14:06 基本径向速度沿垂直径向方向垂直剖面图上(图 11b),风暴单体(水平方向 1.2~2.2 km)低层 2~4 km 高度处有偏北风斜升入流,与图 11a 反射率因子剖面图中低层反射率因子大梯度区方向一致;垂直方向上 6~12 km 有明显的中层径向辐合(MARC),厚度大于 6 km,中层径向辐合通常可作为地面大风预警指标(俞小鼎, 2006a),一般 MARC 出现 10~30 min 之后,地面会出现大风(Schmocker et al, 1996);8~9 km 高度上存在

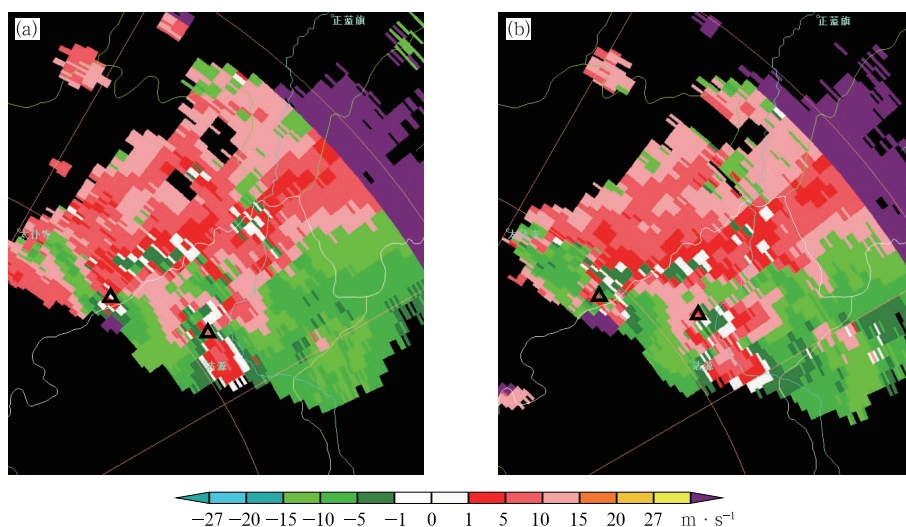


图 10 2021 年 6 月 25 日 (a)14:42, (b)14:48 张北多普勒雷达 1.5° 仰角基本径向速度  
Fig. 10 Doppler radar basic radial velocity in Zhangbei at  
1.5° elevation at (a) 14:42 BT, (b) 14:48 BT 25 June 2021

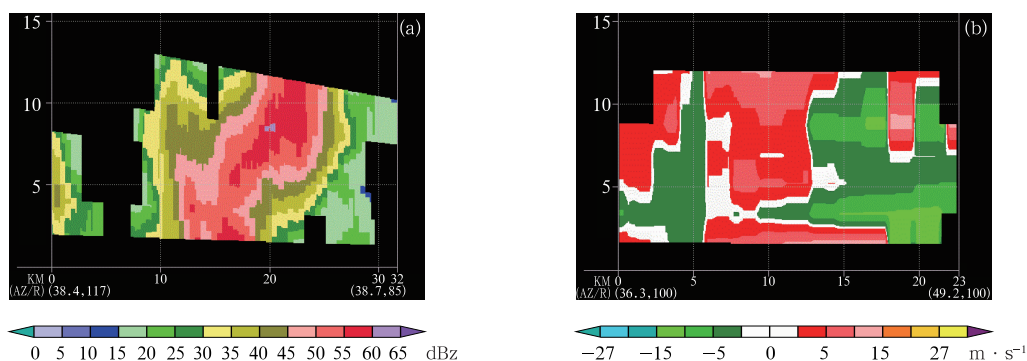


图 11 2021 年 6 月 25 日张北雷达 (a)14:00 反射率因子, (b)14:06 基本径向速度垂直剖面  
Fig. 11 Cross section of (a) reflectivity at 14:00 BT and  
(b) basic radial velocity at Zhangbei Radar at 14:06 BT 25 June 2021

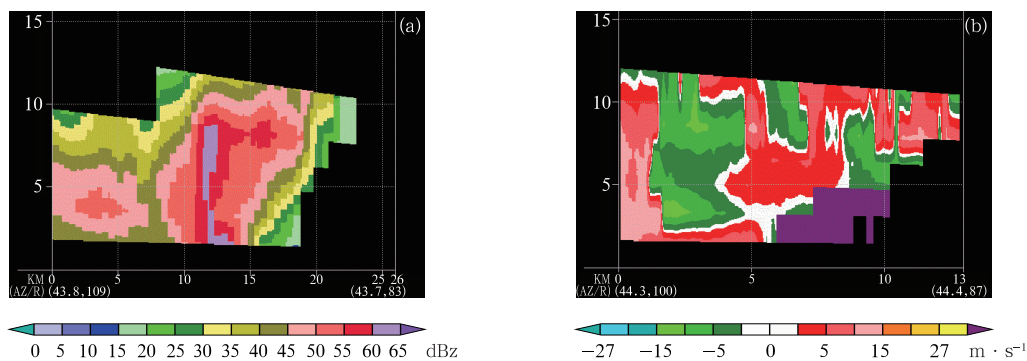


图 12 2021 年 6 月 25 日张北雷达 14:42 (a) 反射率因子, (b) 基本径向速度垂直剖面  
Fig. 12 Cross section of (a) reflectivity and (b) basic radial velocity  
at Zhangbei Radar at 14:42 BT 25 June 2021

$\pm 12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的气旋式切变速度对, 超级单体风暴内具有明显的旋转特征, 这种显著的中层径向辐合

通常在地面有强的出流气流, 造成地面强风的生成, 这也是龙卷产生的重要原因。



张北雷达 14:42 反射率因子沿径向方向垂直剖面图上(图 12a),同样低层有弱回波区、较大的反射率因子梯度区以及位于其上的回波悬垂,大于 55 dBz 强回波高度伸展到 9 km 左右;不同于 14:00,弱回波区左侧有强回波墙,其高度在 2~8 km,最大反射率因子高达 64 dBz,这种近乎接地的强回波墙往往伴有冰雹的落地和地面强风的生成。

张北雷达 14:42 基本径向速度沿径向方向垂直剖面图上(图 12b),超级单体风暴低层 2 km 高度以下有明显的辐散,与图 12a 反射率因子剖面图中回波墙接地造成大风结论一致;垂直方向上 3~11 km 处有明显的中层径向辐合,厚度高达 8 km,8~9 km 高度上有  $\pm 12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度对,这种显著的中层径向辐合同样指示着地面有强的出流气流,造成地面强风。

综上所述,反射率因子和基本径向速度垂直剖面均有利于冰雹和强风的生成。

## 6 结 论

通过对 2021 年 6 月 25 日内蒙古锡林郭勒盟太仆寺旗 EF3 级强龙卷进行分析,结果表明:

(1)太仆寺龙卷发生在前倾槽结构的不稳定层结大尺度环流背景下,龙卷爆发于 700~500 hPa 高空槽后的位势高度大梯度的下沉运动区与 850 hPa 槽前西南气流上升运动区叠置区域内。

(2)较强的对流层中低层条件不稳定(850 hPa 与 500 hPa 温度垂直减温率约为  $7.7 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ )、低层丰富的水汽、中等强度的对流有效位能和强的 0~6 km 垂直风切变为超级单体风暴的形成提供了有利环境背景。此外,0~1 km 风矢量差为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,抬升凝结高度为 1.0 km,为超级单体龙卷的发生提供了相对有利的环境条件。

(3)龙卷爆发在一个孤立的近似圆形的中尺度对流系统 MCS 内的云顶亮温梯度区,该区域云顶非常粗糙,有明显的上冲云顶,表明有深厚的对流发生;在对流云团西北侧上风方向边界齐整,而对流云团东南侧下风方向有明显云砧,垂直风切变强,有利于对流风暴龙卷的形成。

(4)与地面干线伴随的辐合线触发了产生龙卷的母风暴,随后演变为超级单体,其雷达反射率因子

回波呈现典型的钩状回波、低层暖湿气流入流缺口、低层弱回波区和中高层回波悬垂,以及中等强度的中气旋等特征。

(5)龙卷的生成和消亡过程中有三个超级单体风暴相继形成,都呈现为孤立的对流风暴形态,龙卷发生在其中一个超级单体钩状回波的顶端,在前侧上升气流和后侧下沉气流交界处,雷达分析的基于中气旋强度演变的龙卷可能起始时间和路径与现场调查时间十分吻合。

(6)除了强龙卷,系列超级单体还产生了冰雹和直线型对流大风(雷暴大风),强回波中心自低到高明显倾斜,最大反射率因子高达 65 dBz,径向速度图上除了有中等强度的中气旋,还存在明显的中层径向辐合,超级单体风暴形成时垂直累积液态水含量值高达  $73 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其密度达到  $4 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,这些雷达回波特征指示冰雹的存在,而中层径向辐合是雷暴大风的雷达回波特征。

## 参考文献

- 刁秀广,万明波,高留喜,等,2014.非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警[J].气象,40(6):668-677. Diao X G, Wan M B, Gao L X, et al, 2014. Doppler radar product features and warning of non supercell tornadic storms[J]. Meteor Mon, 40(6):668-677(in Chinese).
- 范杰杰,俞小鼎,2015.中国龙卷的时空分布特征.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).
- 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).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2021.2019 年 4 月 13 日广东徐闻强龙卷天气分析[J].气象,47(2):216-229. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2021. Analysis of the 13 April 2019 strong tornado in Xuwen County, Guangdong Province[J]. Meteor Mon, 47(2):216-229(in Chinese).
- 全国气象防灾减灾标准化技术委员会,2017.龙卷灾害调查技术规范:GB/T 34301—2017[S].北京:中国标准出版社. SAC/TC 345, 2017. Technical specifications for tornado damage investigation:GB/T 34301—2017[S]. Beijing:China Standards Press (in Chinese).
- 孙继松,陶祖钰,2012.强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J].气象,38(2):164-173. Sun J S, Tao Z Y, 2012. Some essential

- issues connected with severe convective weather analysis and forecast[J]. Meteor Mon, 38(2):164-173(in Chinese).
- 王炳赞,魏鸣,范广洲,等,2018. 1522 强台风“彩虹”螺旋雨带中衍生龙卷的超级单体演变与机理研究 I:谱宽和速度[J]. 热带气象学报, 34(4):472-480. Wang B Y, Wei M, Fan G Z, et al, 2018. The evolution and mechanism of tornadic super cells in the outer rainbands of Strong Typhoon Mujigae(1522). Part I: spectrum width and mesocyclone speed[J]. J Trop Meteor, 34(4):472-480(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,2015. 中国东北龙卷研究:环境特征分析. 气象学报, 73(3):425-441. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2015. Study of Northeast China tornadoes: the environmental characteristics[J]. Acta Meteor Sinica, 73(3):425-441(in Chinese).
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. 气象学报, 71(2):209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G et al, 2013. A study of environmental conditions and radar echo characteristics of supercell-storms in Northern Jiangsu[J]. Acta Meteor Sinica, 71(2):209-227(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).
- 许爱华,孙继松,许东蓓,等,2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 40(4):400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon, 40(4):400-411(in Chinese).
- 俞小鼎,2011. 基于构成要素的预报方法-配料法[J]. 气象, 37(8):913-918. Yu X D, 2011. Ingredients based forecasting methodology[J]. Meteor Mon, 37(8):913-918(in Chinese).
- 俞小鼎,王秀明,周小刚,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 70(3):311-337. Yu X D, Wang X M, Zhou X G, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sinica, 70(3):311-337(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:118-119, 297-305. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006a. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press: 118-119, 297-305(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).
- 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, 46(5):603-617(in Chinese).
- 张小玲,杨波,朱文剑,等,2016. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析[J]. 气象, 42(11):1304-1314. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al, 2016. Analysis of the EF4 tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016[J]. Meteor Mon, 42(11):1304-1314(in Chinese).
- 郑艳,俞小鼎,任福民,等,2017. 海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析[J]. 气象, 43(6):675-685. Zheng Y, Yu X D, Ren F M, et al, 2017. Analysis on a severe tornado process in Hainan triggered by supercell[J]. Meteor Mon, 43(6):675-685(in Chinese).
- 郑永光,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).
- 郑永光,刘菲凡,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, 47(11):1319-1335(in Chinese).
- 郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 43(6):641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6):641-652(in Chinese).
- 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, 42(11):1289-1303(in Chinese).
- 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, 41(8):942-952(in Chinese).
- 中国气象局,2019. 龙卷强度等级:QX/T 478—2019[S]. 北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 2019. Tornado intensity scales: QX/T 478—2019[S]. Beijing: China Standard Press(in Chinese).
- Amburn S A, Wolf P L, 1997. VIL density as a hail indicator[J]. Wea Forecasting, 12:473-478.
- Craven J P, Brooks H E, 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection[J]. Natl Wea Dig, 28:13-24.
- Doswell III C A, Evans J S, 2003. Proximity sounding analysis for derecho and supercells: an assessment of similarities and differences[J]. Atmos Res, 67/68:117-133.

- Doswell III C A, Harold E B, Robert A M, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. *Wea Forecasting*, 11(4): 560-581.
- Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al, 2012. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in United States[J]. *Wea Forecasting*, 27(1): 106-123.
- Johns R H, Doswell III C A, 1992. Severe local storms forecasting [J]. *Wea Forecasting*, 7(4): 588-612.
- Lemon L R, Doswell III C A, 1979. Severe thunder storm evolution and mesocyclone structures related to tornado genesis[J]. *Mon Wea Rev*, 107(9): 1184-1197.
- Markowski P M, Richardson Y, 2010. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*[M]. New York: Wiley Blackwell.
- Schmocker G K, Przybylinski R W, Lyn Y J, 1996. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the midaltitude radial convergence (MARC) signature[C]. Preprints, 15th Conf on Weather Analysis and Forecasting. Norfolk: Amer Meteor Soc: 306-311.
- 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.
- Wakimoto R M, Wilson J W, 1989. Non supercell tornadoes[J]. *Mon Wea Rev*, 117(6): 1113-1140.
- Weisman M L, Klemp J B, 1982. The dependence of numerically simulated convective storms in vertical wind shear and buoyancy [J]. *Mon Wea Rev*, 110(6): 504-520.

(本文责编:俞卫平 王婷波)