

黎立页,孟智勇,白兰强,等. 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,2023,39(4):507-521.

文章编号: 1004-4965(2023)04-0507-15

2017-08-11内蒙赤峰EF4级山地多发龙卷灾调与成因分析

黎立页^{1,2,3,4}, 孟智勇⁴, 白兰强^{3,4}, 李巍⁵, 马小林⁶, 韩经纬⁶,
炎利军³, 姚聃^{1,7}, 程银琳³

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 佛山市龙卷风研究中心, 广东 佛山 528000; 4. 北京大学物理学院大气与海洋科学系/
中国气象局龙卷风重点开放实验室, 北京 100871; 5. 通辽市气象局, 内蒙古 通辽 028000;
6. 内蒙古自治区气象局, 内蒙古 呼和浩特 010051 7. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要: 2017年8月11日下午,三个EF4级龙卷袭击了内蒙古自治区赤峰市的地形复杂地区,造成5人死亡,58人受伤。这是1961年以来中国有记录的最强山地龙卷事件。首先给出了此次龙卷过程的灾情调查结果,接下来分析了此次龙卷母体风暴-龙卷超级单体产生的天气背景、关键环境参数以及多普勒天气雷达观测特征。本次龙卷事件发生在东北冷涡东南象限的地面锋前和干线向湿侧发展处,CAPE(对流有效位能)值为1 800 J/kg,0~6 km风垂直切变为12.9 m/s,0~1 km风垂直切变达到10.8 m/s;同时,0~1 km相对风暴螺旋度达到67.3 m²/s²,接近美国龙卷发生环境的中位数,有利于超级单体龙卷的发生。现场灾害调查发现,灾害路径具有多涡旋和不连续的特点,可能与当地的复杂地形有关。基于多普勒天气雷达相对径向速度图识别出三个龙卷涡旋特征(TVS),TVS径向速度差最大达到38 m/s。三个龙卷及对应TVS出自同一个超级单体的同一个中气旋,其中两个TVS出现时间重叠。

关键词: EF4级龙卷;灾害调查;复杂地形;赤峰;多普勒雷达

中图分类号: S42 **文献标志码:** A **Doi:** 10.16032/j.issn.1004-4965.2023.046

1 引言

龙卷是上接雷暴云底下接地面的快速旋转空气柱,中心风速可达140 m/s^[1],破坏力巨大。美国是龙卷发生频次最多的国家,年均约1 200个^[2-3]。中国龙卷的年平均频次为美国龙卷频次的5%~10%^[4]。强龙卷的发生频次尤其少,根据范雯杰等^[5]的统计,中国在1961—2010年间共有165次强龙卷事件(增强藤田级数EF2级或以上),多发生在江淮流域、华南地区、东北地区和华北地区东南部

等地势平坦的地区,其中江苏北部发生最频繁。

对于高影响和典型个例的龙卷分析,灾害调查是补充观测的重要手段^[6]。中国龙卷的精细化灾害调查始于2012年7月21日北京通州区的EF3级龙卷^[7],之后逐步常规化。其他灾调工作包括2015年10月4日广东佛山EF3级热带气旋龙卷^[8]、2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷^[9-10]以及2019年7月3日的辽宁开原EF4级龙卷^[11]等。此外,灾害调查可帮助区分致灾原因。例如,2015年6月1日“东方之星”客轮倾覆事件发生后,借助现场灾害调查和雷达观测,判断其遭遇的强对流天

收稿日期:2021-10-27;修订日期:2023-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41875051、42030604)共同资助

通讯作者:孟智勇,女,河北省人,教授,博士,从事强对流天气的机理、可预报性和资料同化。E-mail:zymeng@pku.edu.cn

气是下击暴流而非龙卷^[12]。

从2016年至今,我国共有5个EF4级龙卷发生,包括2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷^[9-10]、2017年8月11日内蒙古自治区赤峰的三个EF4级龙卷(后简称“8.11赤峰龙卷”)和2019年7月3日的辽宁开原龙卷^[11]。其中,8.11赤峰龙卷是中国自1961年以来观测到的最强的山地龙卷事件,也是山地下垫面有记录的最强龙卷。据当地政府统计,8.11赤峰龙卷共造成5人死亡、58人受伤、1458栋建筑物损坏、4万公顷农作物受损。总经济损失达22.056亿人民币。主要受灾点为内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗和翁牛特旗的五个行政村组(前进村、八里庄村、十里铺村、五台山村和山咀子村)。

相比平原地区,山地龙卷的记录较少^[6]。此次8.11赤峰龙卷的受灾村庄海拔高度在700~1080 m之间,处于西高东低、丘陵起伏、下垫面不均匀的过渡地带(图1)。复杂下垫面可能对这次龙卷及母体雷暴的发展演变有重要影响,具有调查和分析的价值。在8.11赤峰龙卷发生次日,北京大学、中国气象科学研究院、佛山市龙卷风研究中心、内蒙古自治区气象局、赤峰市气象局组成调查小组,结合无人机航拍和地面走访,对此次龙卷灾害进行了为期两天的灾害调查。

本文将基于灾害调查和气象观测数据,揭示8.11赤峰龙卷的灾害分布、母体风暴的观测特征及形成环境,并探讨复杂地形的可能影响。

2 数据和分析方法

8.11赤峰龙卷的灾害调查首先采用大疆无人机在距离地面50~500 m高度航拍,共记录了3.34小时4 K视频和514幅照片。随后,在谷歌地球高清图^①上标出航拍视频和照片中的灾害指示物(Damage Indicator,简称DI),以确定龙卷灾害的分布范围。树木和庄稼倒伏方向、碎屑也一并标出,以确定龙卷的中心位置和路径。通过路径上树木倒伏的涡旋辐合中心判定龙卷中心。结合群

众走访和视频证据确定龙卷的具体袭击时间。

本文采用美国灾害指示物和EF分级^[13]作为标准来判定受灾程度(Damage of Degree,简称DOD)和最高灾害等级。该标准已多次用于中国以往的龙卷灾调分析工作中^[7-8,10],其中,独栋或双栋联排住宅、厂房、树木、电线杆等DI的级别判识基本适用于中国。内蒙古赤峰市的民宅多为砖瓦屋顶和红砖墙体(有的覆盖水泥)的单层建筑,与美国的独栋或双栋联排民宅相似^[14]。前进村少量房屋的承重墙有钢筋加固。因此,本文将参考美国住宅建筑,使用赤峰民宅类灾害指示物作为估计龙卷强度的依据。

本文使用赤峰市C波段多普勒雷达(后文简称为赤峰雷达)分析龙卷的母体雷暴特征。赤峰雷达位于距离受灾村庄约120 km的东南侧(距离前进村120.9 km,距离十里铺村和山咀子村126.9 km),最大不模糊速度是24.5 m/s。龙卷发生时,赤峰雷达体扫模式为VCP21,即6 min完成9层^②仰角体扫。赤峰雷达天线底座的海平面高度为841 m,其0.5°仰角波束在受灾点距地面高度约1890 m。雷达数据的三维分析通过Gibson Ridge Level II (GR2)雷达可视分析软件完成^③。旋转速度 V_{rot} 的计算为2~10 km尺度速度对的风暴相对径向速度差的一半。此外,因为赤峰雷达距离受灾村庄较远,观测质量受到限制,比如单个雷达像素块在受灾地点处的覆盖面积较大,杂波较多;同时,有些时刻和仰角上的雷达回波没有完整覆盖中气旋,无法准确判断速度对或TVS大小。所以,本文仅给出能够准确识别的中气旋速度对及TVS数值,没有数值的时刻或层次严格意义上并不代表没有中气旋或TVS发生。此外,由于雷达径向速度质量较差,GR2无法做自动退模糊处理,我们对人工读取的中气旋和TVS逐一做了检查,发现未出现速度模糊。

本文所使用的地形高度文件来自谷歌地球。对龙卷事件的天气背景分析基于ERA5全球再分析场(1小时间隔,水平网格为0.25°×0.25°)、地面站点观测、以及日本葵花8号静止卫星图像^④。温

① 前进村的卫星照片拍摄于2012年9月26日,龙卷路径上其他村落的卫星照片拍摄于2016年5月27日。

② 赤峰雷达VCP 21扫描模式的9个仰角为0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°和19.5°。

③ <http://www.grlevelx.com/>。

④ <https://himawari8.nict.go.jp/>。

度对数压力探空图采用2017年8月11日08时(北京时间,下同)赤峰站的观测(距离受灾村庄约110 km)。此外,对2017年8月11日08时的赤峰站点探空和ERA5插值探空进行了对比,温度对数压力图较一致(图略),说明ERA5资料用于分析此次龙卷发生的天气环境是可靠的。

3 灾害路径和分布

2017年8月11日下午,当地村庄共受到三个龙卷的袭击,通过调查给出其灾害分布(图1a),前进村(图2a)、十里铺村(图2b)、以及五台山到山咀

子村(图2c)的灾害分布。以上三处龙卷在后文分别以前进村龙卷,十里铺龙卷以及五台山龙卷代表,其持续时间、路径长度以及发生地的海拔高度如表1所示。前进村、十里铺村和五台山-山咀子之间的距离分别为12.6 km和3.4 km(图1b)。从灾害分布和龙卷发生时间来看,三个地点的龙卷均为独立涡旋。首先,前进村和十里铺之间为连绵的山地,其间未发现灾害,且龙卷的时间间隔长达29 min,说明前进村龙卷和十里铺龙卷为独立的龙卷涡旋。同时,十里铺龙卷和五台山龙卷在时间上有重叠,也是两个独立的龙卷涡旋。

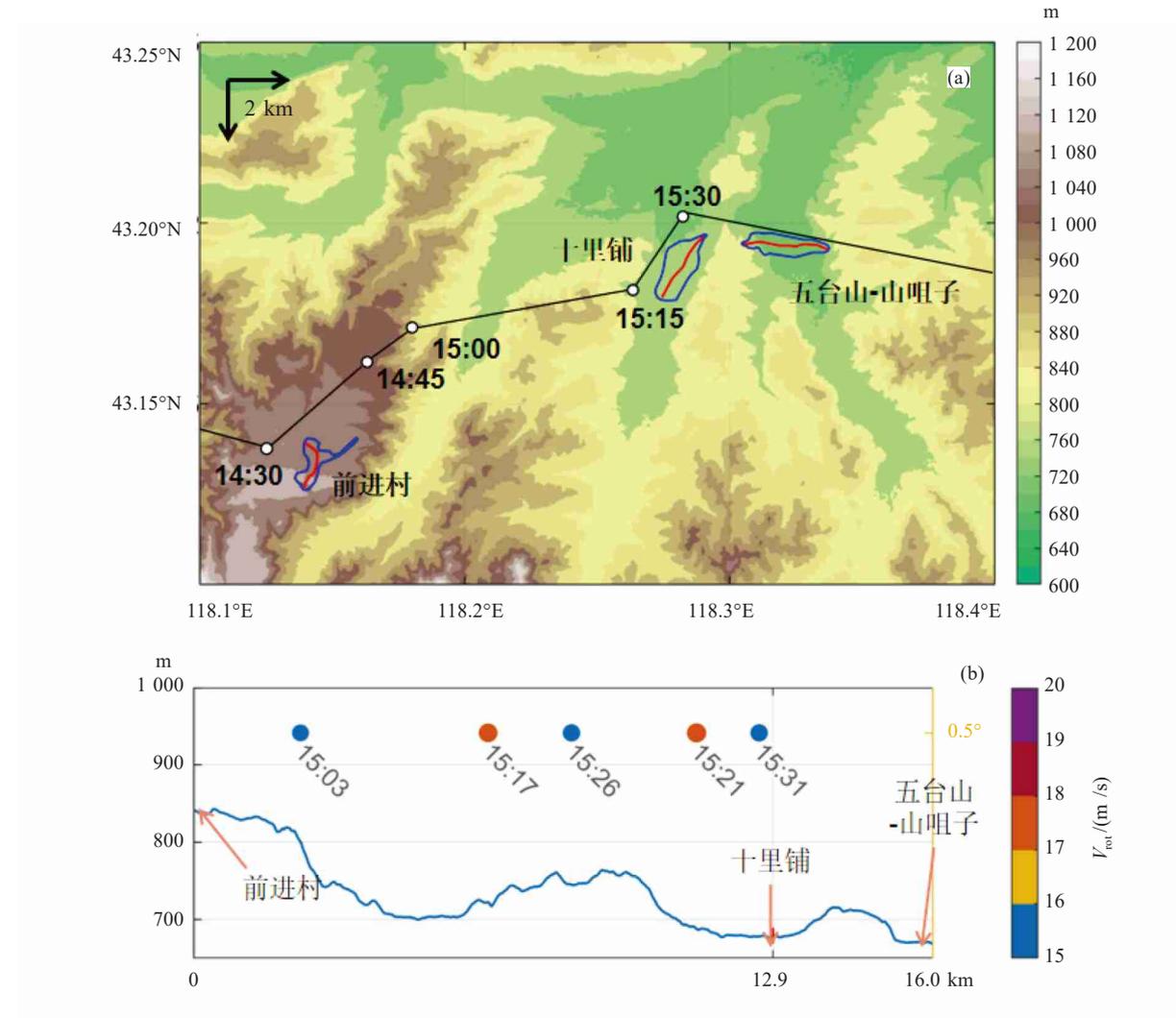


图1 a. 2017年8月11日赤峰龙卷在前进村、十里铺和五台山-山咀子造成的灾害范围(蓝色实线)和中心路径(红色实线)以及母体中气旋的路径(黑色实线)(填色为地形高度);b. 前进村到十里铺、十里铺到五台山村的地形高度垂直剖面(蓝色实线)及水平距离,不同颜色的点表示赤峰雷达0.5°仰角观测到的中气旋,填色代表旋转速度(V_{rot})大小(横坐标为距离前进村的水平距离)。

三次龙卷有如下共同点:(1)均为EF4级龙卷;(2)持续时间较短,均约10 min;(3)灾害路径较短,约2 km,远短于中国1961—2010年记录的强龙卷(大于等于EF2级)的平均路径长度(35.7 km)^[5];(4)当地丘陵地形崎岖复杂,但龙卷发生在相对平缓地带和下坡区,下垫面较均匀,多为农田和草坡。

三次龙卷之间也存在差异。从EF0级分布来

看,前进村龙卷较蜿蜒且伴随多涡旋(图2a),十里铺龙卷为西南偏南-东北偏北(图2b)条状分布,五台山龙卷为西北偏西-东南偏东(图2c)条状分布。从地形高度来看(图1),前进村龙卷发生在海拔高度1 080 m的平坦高地上,十里铺龙卷发生在五台山(高800 m)西侧山脚下(高760 m),而五台山龙卷发生在五台山东侧,下垫面高度自西向东从790 m下降到740 m。

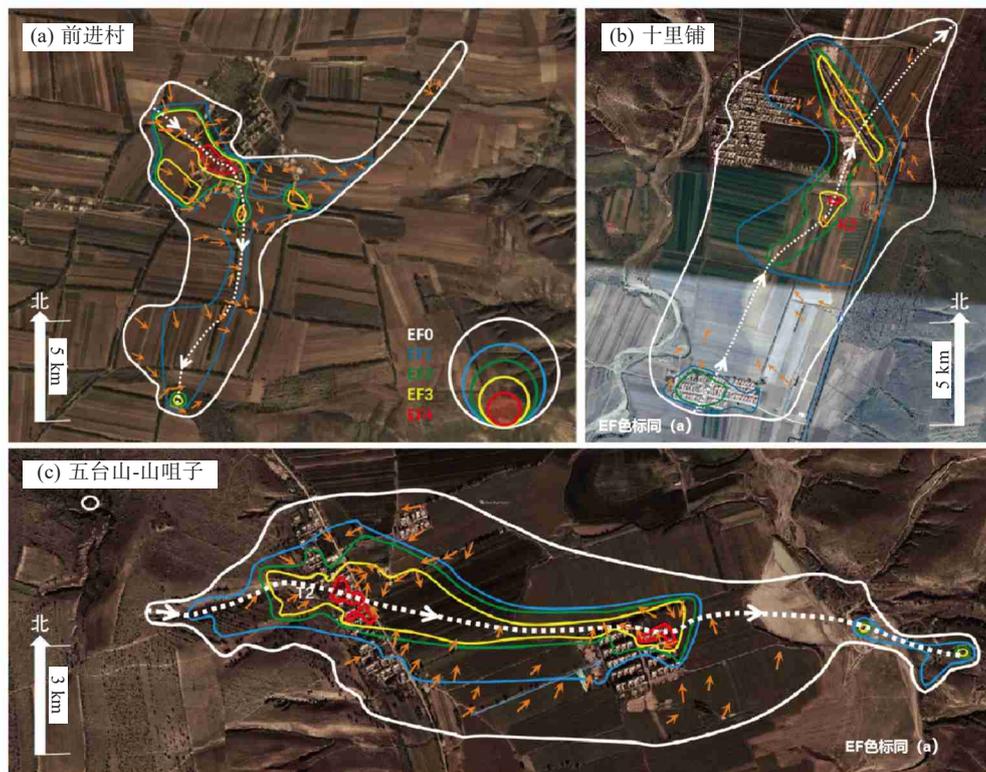


图2 2017年8月11日赤峰龙卷分别在前进村、十里铺、五台山-山咀子的灾害分布等值线(白色实线)、树木倒伏(橘色箭头)和EF分级等值线(白、蓝、绿、黄和红色实线分别代表EF0~EF4级) b中的R2为EF4灾害等级的住宅位置,其照片见图3h。c中的T2处有一棵树树皮扭曲剥落。

表1 2017年8月11日赤峰三次龙卷的基本情况

龙卷	受灾点	持续时间	路径长度	地形高度
前进村龙卷	前进村	14时28—39分	1.9 km	1 080 m
十里铺龙卷	十里铺	15时17—31分	1.4 km	760 m
五台山龙卷	五台山-山咀子	15时26—36分	1.6 km	790 ~ 740 m

3.1 前进村的龙卷灾害

龙卷最先发生在前进村,持续约为10 min(14时28—39分),路径全长为1.9 km,最大宽度为1.1 km(图2a)。前进村龙卷从西南偏南-东北偏北方向靠近前进村,于14时28分首先被S1和S2处

摄像头拍到(图3c, 3d和3g)。S1处视频截图(图3d)清晰显示了前进村龙卷漏斗云触地特征。随后,龙卷的移动方向转为西北偏北,于14时39分穿过前进村,此时S3处摄像头(图3c)记录到龙卷漏斗云和被卷起的屋顶瓦片(图3a)。

树木倒伏方向(图2a橘色箭头)指示了前进村龙卷的辐合中心。EF3(图2a黄实线)和EF4级(图2a红实线)灾害发生在前进村的西侧。程度最高的灾害指示物为龙卷中心路径上的房屋R1(图3c和3b),当龙卷穿过R1时,房顶垂直坠下,墙体被向外推开,整栋建筑被完全摧毁,受损程度指示为

EF4级。在前进村龙卷路过的树林(图3c的T1处)里,树木被连根拔起、树冠被剥去、只留下较粗的主干。C1处(图3c)原本停靠的农用卡车被大风推动滑向龙卷中心(图3f)。此外,在路径东北方向的农田发现一处小范围EF0级辐合,表明该龙卷周围可能伴随其他涡旋。



图3 c、k和o分别为前进村、五台山和山咀子的灾害分布和指示物,黑色箭头指示北方;a、d、g为S1~S3处摄像拍摄;b、e、f为前进村的灾害指示物;h为十里铺的EF4灾害指示物;i、j、l、m、n为五台山灾害指示物;p~r为山咀子灾害指示物。

3.2 十里铺的龙卷灾害

十里铺龙卷发生在五台山西侧的平坦山谷(图1,图2b),持续约14 min(15时17—31分),比前进村龙卷晚约50 min。十里铺龙卷从西南偏南移动至东北偏北,留下约2.4 km长的灾害路径。EF0级等值线最宽处约1.0 km。从EF3级等值线(图2b黄实线)可见,十里铺东侧出现明显灾害,包括辐合倒伏的树木和电线杆(图2b橘色箭头)。龙卷中心路径上的一栋单层住宅R2受灾达到EF4级(图2b,图3h)。

3.3 五台山-山咀子村的龙卷灾害

五台山龙卷发生于15时26分,持续约10 min,总路径长度为1.6 km,EF0级等值线最宽处为0.7 km。五台山龙卷自西南偏西向东南偏东方向移动,先后穿过五台山和山咀子村(图1a)。如EF0到EF4级灾害等值线所示(图2c),龙卷从五台山东侧下坡时增强变宽,造成位于五台山下坡处的T2处(图2c)树皮扭曲剥落,随后在五台山村完全摧毁房屋R3和R4(图3j和3m),造成最高EF4级的灾害(图3k红色方框)。同时,C2处有一辆农用汽车被严重扭曲(图3i)。P1处(图3k)有直径25 cm的钢筋混凝土电线杆被损毁(图3l),指示了EF3级灾害。房屋R5距离五台山龙卷路径中心约50 m(图3k,3n),少于20%的屋顶被吹毁,受损程度为EF0级。

五台山龙卷移向山咀子村的过程中EF2和EF3级等值线变窄(图2c),但强度维持,随后在山咀子村造成了另一处EF4级灾害中心(图3o)——完全损毁的房屋R6(图3r)。其他灾害指示物包括T3处树冠和树皮被剥去的树木(图3q)。此外,R7处房屋墙体上有一块喷射嵌入的砖块,留下深1 cm的凹痕(图3p)。龙卷经过山咀子村后继续东移,下垫面由平坦农田变为崎岖上坡,龙卷强度减弱,灾害痕迹消失。

4 龙卷生成环境和雷达观测特征

4.1 天气尺度和中尺度环境

本次龙卷事件发生的天气背景是南下加强的东北冷涡(NCCV)和增强的Yakutsk-Okhotsk(YO)阻塞高压。2017年8月9日14时(图4a),东北冷涡发展并从蒙古南下,中层温度槽略落后于气压槽,

在其东南侧有一个宽广的低压槽。赤峰位于500 hPa低压槽底弱风区、850 hPa的水汽高值区(图4d)和地面干线北侧(图5a)。

8月10日14时(图4a、4b和4d、4e),鄂霍次海阻塞高压加强并南移。500 hPa东北冷涡加强并向东南靠近内蒙古自治区;冷涡中心距赤峰约1 010 km。同时,中层低压槽扫过赤峰。赤峰上空500 hPa处于中层冷涡东侧和低压槽西侧,受槽后西北风控制;850 hPa位于低层冷涡的东南象限,受西南风影响,水汽输送加强。由于冷涡的靠近,经向水汽梯度加大,地面干线向北延伸并靠近赤峰,赤峰地区达到干线标准但仍然位于干冷区域的北侧(图5b)。上述天气变化有利于对流发展。

龙卷发生前6小时,即8月11日08时,赤峰探空站的观测数据(图5f)显示,850 hPa和500 hPa存在逆温且中层较干,地面至850 hPa水汽丰富,上干下湿的配置有利于深湿对流的发展。抬升凝结高度(LCL)为862 hPa。0~6 km风垂直切变为12.9 m/s,0~6 km相对风暴螺旋度(SRH)为82.7 m^2/s^2 ; 0~1 km风垂直切变为10.8 m/s,0~1 km SRH达到67.3 m^2/s^2 。对比Rasmussen^[6]统计的美国超级单体龙卷探空环境,赤峰龙卷的0~6 km SRH未达到美国龙卷历史统计的25%分位(100 m^2/s^2),但0~1 km SRH数值超过了其历史统计的25%分位(33.2 m^2/s^2),接近中位数(89.2 m^2/s^2)。ERA5逐小时分析显示,随着时间推移,龙卷发生地的SRH在进一步增大(图6)。这说明较强的0~1 km SRH是此次超级单体及龙卷发生维持的重要条件。

8月11日14时(图4c,4f)的500 hPa等压面上,冷涡进一步加强,形状上更加接近圆形。此时,赤峰处于冷涡东南象限的强西南风区域,距离冷涡中心约656 km。850 hPa上,赤峰上空为约10 m/s偏南风并伴随水平辐合,水汽及其梯度进一步加强,水汽混合比超过16 g/kg。地面上,赤峰位于气旋中心东南侧,介于冷锋和湿舌之间(图5e)。地面干线沿着气旋边缘发展并移到赤峰西侧(图5c,5d),同时赤峰附近存在局地干线,东侧和南侧露点梯度均超过5 K/(100 km)。该时刻的ERA5数据表明(图7),干线的位置和强度基本决定着不稳定能量、对流抑制能量、风暴相对螺旋度和综合参数的分布特征和高值区位置。赤峰处于考虑了夹

卷效应的对流有效位能(E-CAPE)^[15]和混合层(地面上1 km)气块抬升计算得到的CAPE(MLCAPE)的高梯度边缘。赤峰上空的整层大气对流有效位能(CAPE)在14时和15时分别为1 628.2 J/kg和1 800 J/kg,后者接近美国龙卷历史统计的75%分位(1 877 J/kg)^[16]。同时,平均层气块抬升计算得到的对流抑制能量(MLCIN)很小,其

0~1 km SRH以及超级单体组合参数(Supercell Composite Parameter; SCP)和强龙卷参数(Significant Tornado Parameter; STP)虽不在极大值区,但都位于伴随着干线较高露点梯度的高值带上,700~500 hPa温差为19.6℃,850~500 hPa温差为31.7℃。综合MLCIN的极小值以及其它量的分布可判断赤峰附近有龙卷发生的可能性。

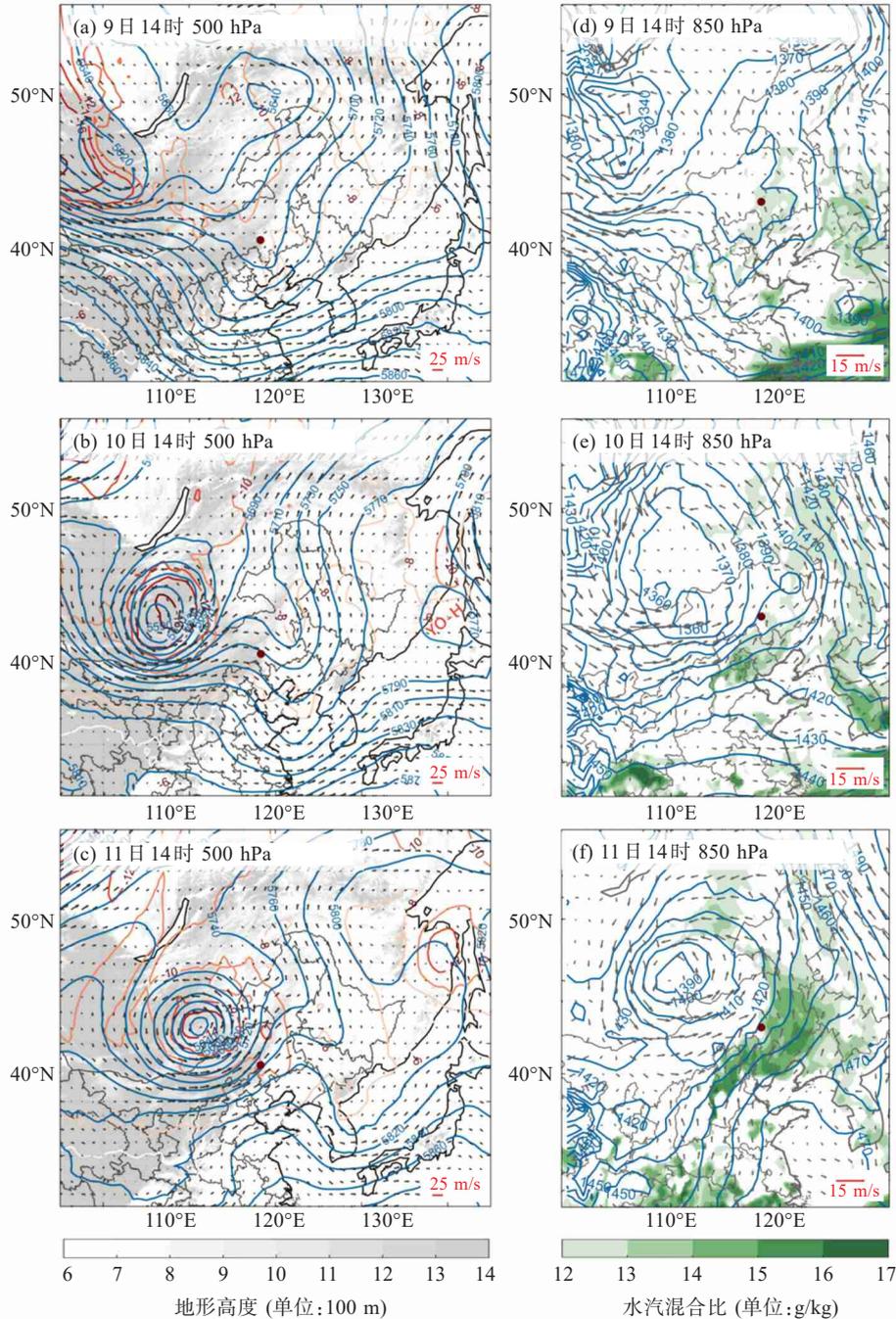


图4 a~c分别为2017年8月9—11日14时的500 hPa位势高度场(蓝色等值线,单位:gpm)、温度(红色渐变线,单位:℃)和风场,灰色阴影代表地形高度,红点代表龙卷性超级单体的触发位置。“YO-H”代表鄂霍次克海阻塞高压所在位置; d~f为相应时次的850 hPa位势高度场(蓝色等值线,单位:gpm)、水汽混合比(绿色阴影,单位:g/kg)和风场。

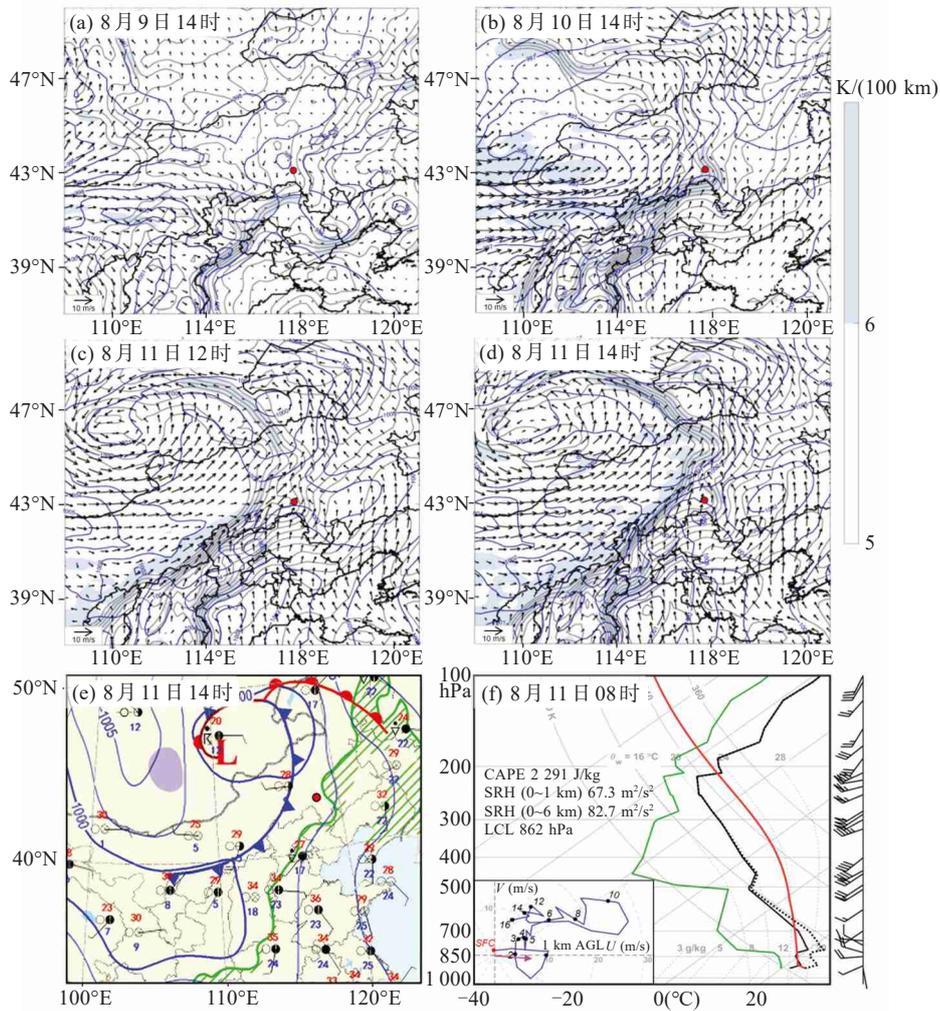


图5 2017年8月9日14时(a)、10日14时(b)、11日12时(c)、11日14时(d)的ERA5海平面气压(蓝色实线)、地面露点(灰色实线)、5 K/(100 km)以上的地面露点梯度(阴影,代表干线)、地面风,11日14时中国气象局国家气象中心的地面天气图(e),2017年8月11日08时的温度对数压力探空图(赤峰站)及混合层抬升气块计算得到的对流有效位能(CAPE),风暴相对螺旋度(SRH)和抬升凝结高度(LCL)(f) a~e中L为气旋中心,带三角形的蓝色实线代表冷锋,带半圆形的红色实线代表暖锋,绿色斜线代表湿舌(地面相对湿度超过70%或温度露点差小于等于5°C);红色圆点代表11日12时19分对流触发的位置。f中的风杆短杆代表2 m/s,长杆代表4 m/s,旗子代表20 m/s。左下小图为风速端曲线。

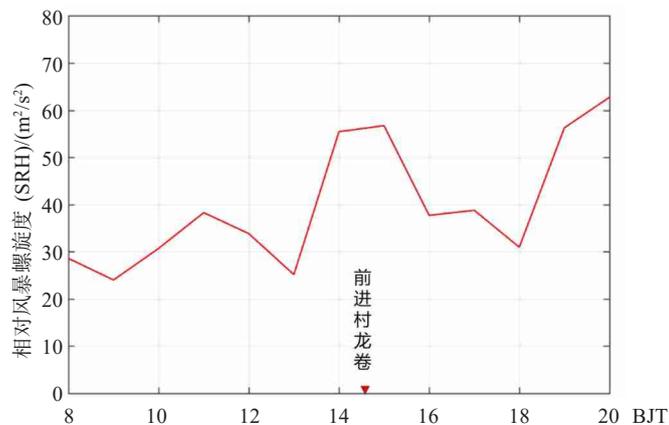


图6 2017年8月11日08—20时ERA5在前进村龙卷位置的0~1 km SRH时间演变 红色三角形所在横轴位置为前进村龙卷的发生时间。

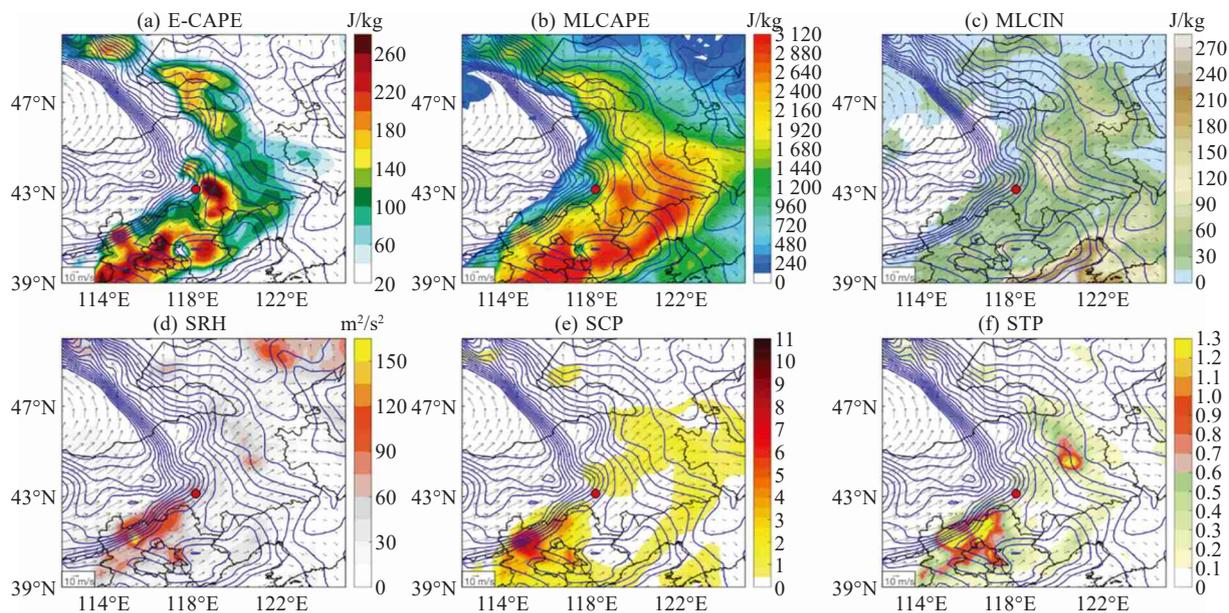


图7 2017年8月11日14时ERA5的500 hPa 风场、地面露点(K)与E-CAPE(a)、MLCAPE(b)、MLCIN(c)、0~1 km SRH (d)、SCP(e)和STP(f) 图中圆点为前进村龙卷位置。

本次龙卷事件的天气背景特征接近王秀明等^[17]对东北龙卷事件的分析结果。该研究表明,东北龙卷多发生在东北冷涡槽前或前倾槽后,伴随对流层中层急流、强低空急流和较大的高低空温度直减率;0~1 km风垂直切变为12.0 m/s,0~6 km风垂直切变大于24.0 m/s,700~500 hPa温差为20~22 °C,850~500 hPa温差为30~33 °C,触发机制多为干线及其伴随的边界层辐合。

4.2 超级单体和龙卷涡旋特征

2017年8月11日的赤峰三次EF4级龙卷来自同一个超级单体。当日下午12时19分,对流在冷涡东南侧的干线边缘触发(图5c),随后向东北方向移动。13时27分,赤峰雷达0.5°仰角反射率(图8a)显示,对流单体的西南部有清晰的钩状回波形成,前进村位于钩状回波东侧约111 m,前侧下沉气流区(FFD)边缘呈V型。距地面4.349 km高度旋转速度(V_{rot})达到19.8 m/s(图8s),预示着中气旋(本文采用中气旋判定标准为 V_{rot} 达到15 m/s^[10])和超级单体的形成。13时37分中气旋厚度加深(4~6 km)但随后减弱。13时56分(图8b),超级单体的西南侧有新的对流触发,新对流不断发展并与前一单体逐渐相连,东侧的中气旋再次发展加深(图8s)。至14时20分(图8c,8l),东侧超级单体钩状回波东侧到达前进村,西侧单体继续加强,但没有形成清晰的钩状回波。

14时25分,中气旋在4 km高度达到16.8 m/s(图8s);同时具有下沉反射率核(Descending Reflectivity Core, DRC)结构(图9a,9b)。0.5°(图8d,8m)和1.5°仰角均探测到前进村西南方向的龙卷涡旋特征(TVS,本文采用判定标准为相邻像素径向速度差超过20 m/s^[7-8,10]) (图10e)。随后,14时29分的中气旋在4 km高度继续加强至18.5 m/s(图8s)。14时30分可见光云图显示(图11a),东侧对流云团赤峰附近(红色箭头)可见粗糙颗粒状的上冲云顶。与此同时,0.5°仰角TVS的径向速度差从14时25分的38 m/s维持至14时34分的25 m/s。时间上,TVS的出现与14时28—39分的龙卷维持时长一致。路径上,TVS从西南向东北移动,和前进村龙卷的中心路径方向吻合(图10a,10b)。14时39分(图8f,8o),随着超级单体向东北方向移动,中气旋减弱至判定阈值以下(图8s),TVS减弱消失(图10e),前进村龙卷也随之结束。14时25—34分,超级单体几乎在原地维持,移动速度十分缓慢(图8d,8e),随后超级单体向东北方向加速。

14时48分中气旋再次在0.5°和1.5°仰角出现,质心下沉,且强度均增加至16.5 m/s(图8s),到15时03分(图8g,8p),超级单体的钩状回波变大,钩的顶端再次出现DRC(图9c,9d)。15时17分,十里铺村位于上升入流区(图8h,8q),但钩状回波

弯曲度低于在前进村的时段。同时,2~4 km 高度有中气旋加强维持(图 8s)。此时,0.5°仰角出现 TVS(图 10f),对应有龙卷袭击十里铺。15 时 26

分,0.5°和 1.5°仰角的 TVS 加强(图 10f,0.5°仰角最大径向速度差达到 25.5 m/s),中气旋在 2 km 高度的旋转速度达到 15.8 m/s(图 8i,8r,8s)。

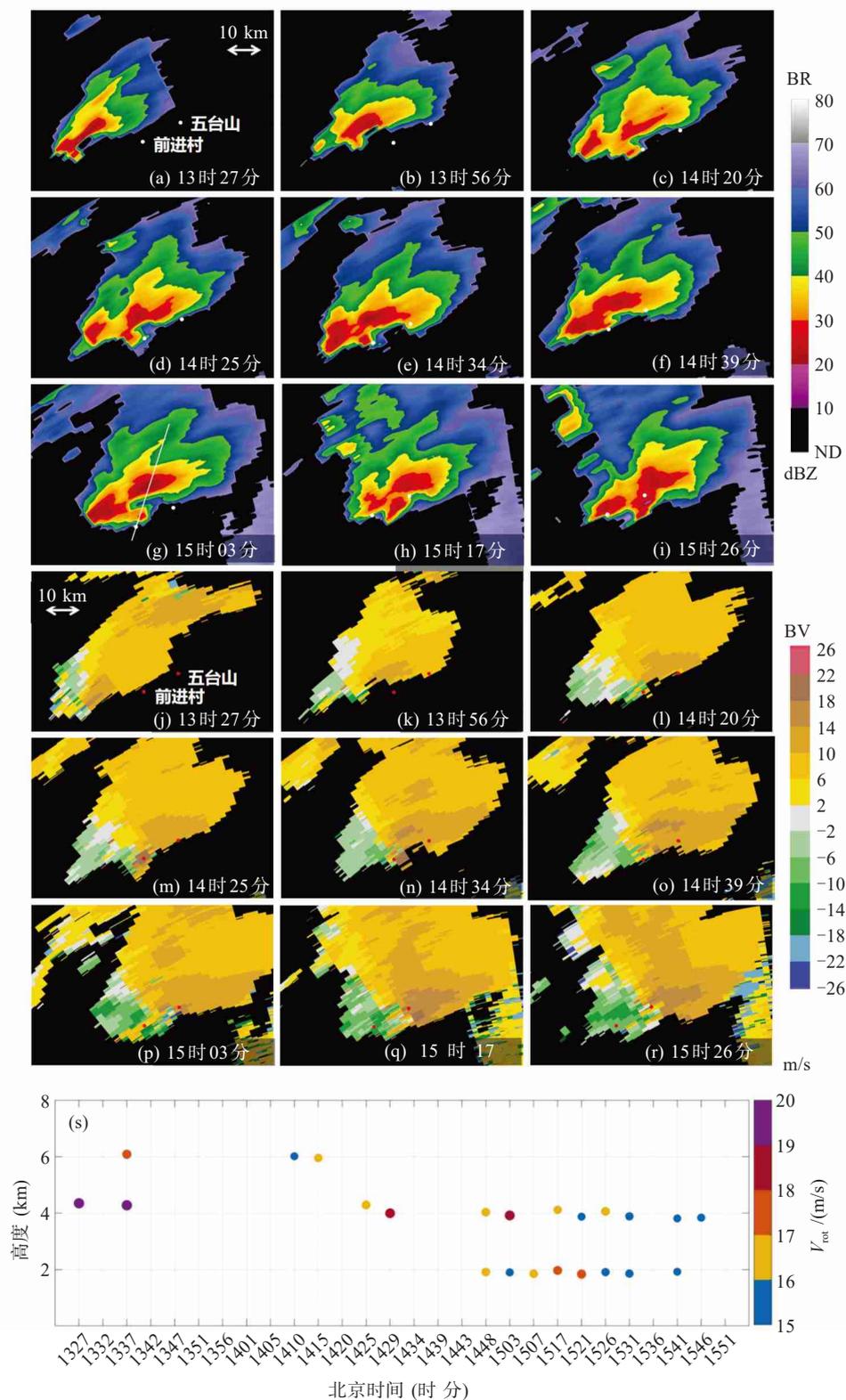


图 8 2017年8月11日赤峰雷达0.5°仰角的基本反射率(a~i)(单位:dBZ)、雷暴相对径向速度(j~r)(单位:m/s)、及中气旋的旋转速度(V_{rot})的时间序列(s)

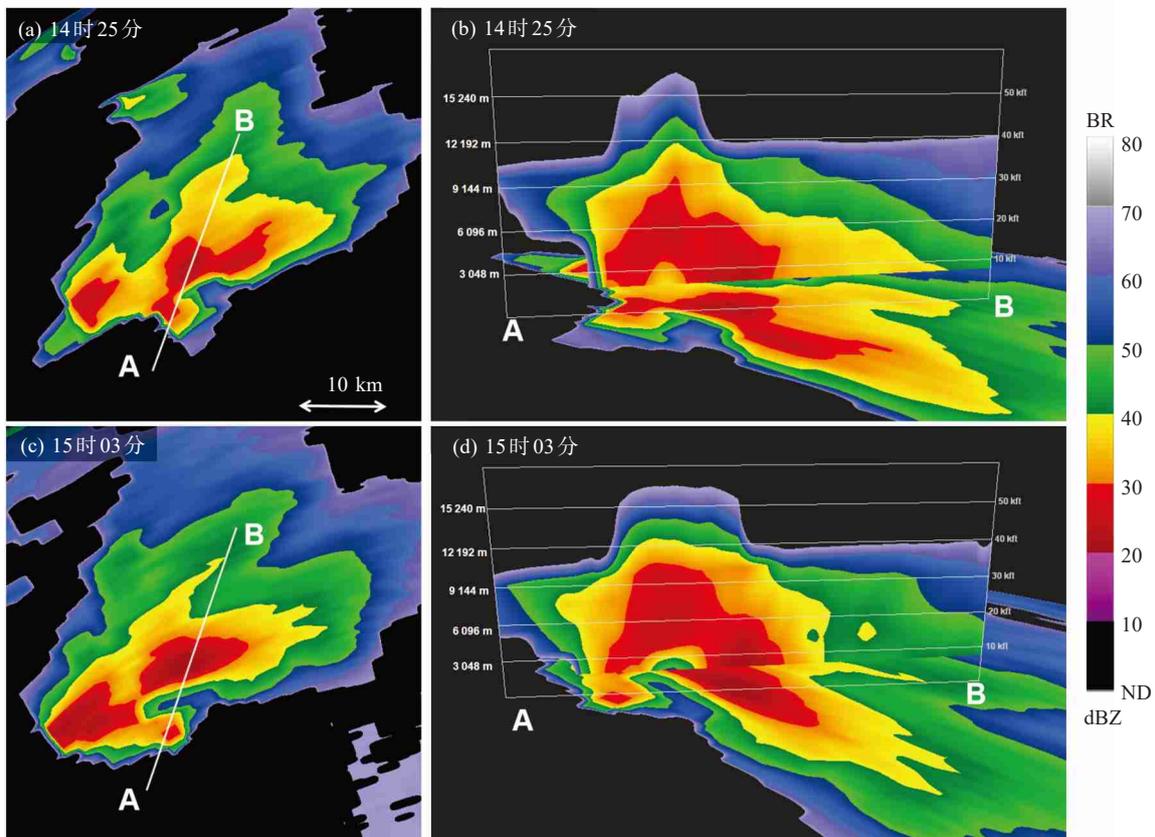


图9 2017年8月11日14时25分和15时03分的赤峰雷达 0.5° 仰角基本反射率(a、c)和沿AB线所示的垂直剖面图(b、d)

在十里铺的TVS还没消失之际,另一个TVS于15时26分出现在五台山东侧(图10d, 10g);袭击五台山和山咀子村。在同一个中气旋里同时出现两个龙卷是该个例的一个特色。山顶两侧可能存在较强的近地面垂直涡度,在中气旋抽吸下形成龙卷。当十里铺和五台山-山咀子村处于超级单体的强入流上升区,十里铺TVS和五台山TVS达到各自最大径向速度差(图8i, 8r)。此时,超级单体的对流性降水区的面积向北扩大,15时30分可见光云图也显示(图11b),对流云团出现多个粗糙颗粒状的上冲云顶,赤峰处于南侧云体边缘入流附近的上冲云顶之下(红色箭头)。随着超级单体继续东移,下垫面更加崎岖,海拔高度增加,龙卷的灾害痕迹消失。

总结以上过程,超级单体和中气旋的加强及TVS主要出现在以下两个时段:(1) 14时20—34分,超级单体钩状回波特征明显(图8c~8e),期间中气旋出现在4 km高度左右(图8s),与之对应的是,前进村于14时25—34分出现龙卷涡旋(TVS)

(图10e)。中气旋在离开前进村后强度减弱。(2) 14时48分—15时46分,超级单体重新加强维持(图8g~8i),减弱的中气旋再次加强达到中气旋标准并下沉至2~4 km(图8s),两个TVS也于15时17—31分和15时26—46分出现在十里铺村和五台山-山咀子村(图10e)。以上三个TVS出自同一个经历了加强、减弱再加强的超级单体和中气旋;其中,后两个TVS存在时间重叠。TVS强度与2~4 km中气旋及超级单体的强弱基本对应。当中气旋在2~4 km高度上加强,TVS也随之增强或维持(图10e~10g, 8s)。前进村、十里铺村和五台山-山咀子村最强的TVS均出现在2~4 km高度中气旋较强的时刻。

此外,超级单体自身移速的变化对TVS以及龙卷触地造成的灾害路径有一定的影响。在前进村龙卷出现的时间段(14时25—39分),超级单体东移缓慢,龙卷路径呈现弯曲特征;在十里铺龙卷和五台山-山咀子龙卷发生时(15时17—36分),超级单体东移速度较快,龙卷中心路径更长更直。

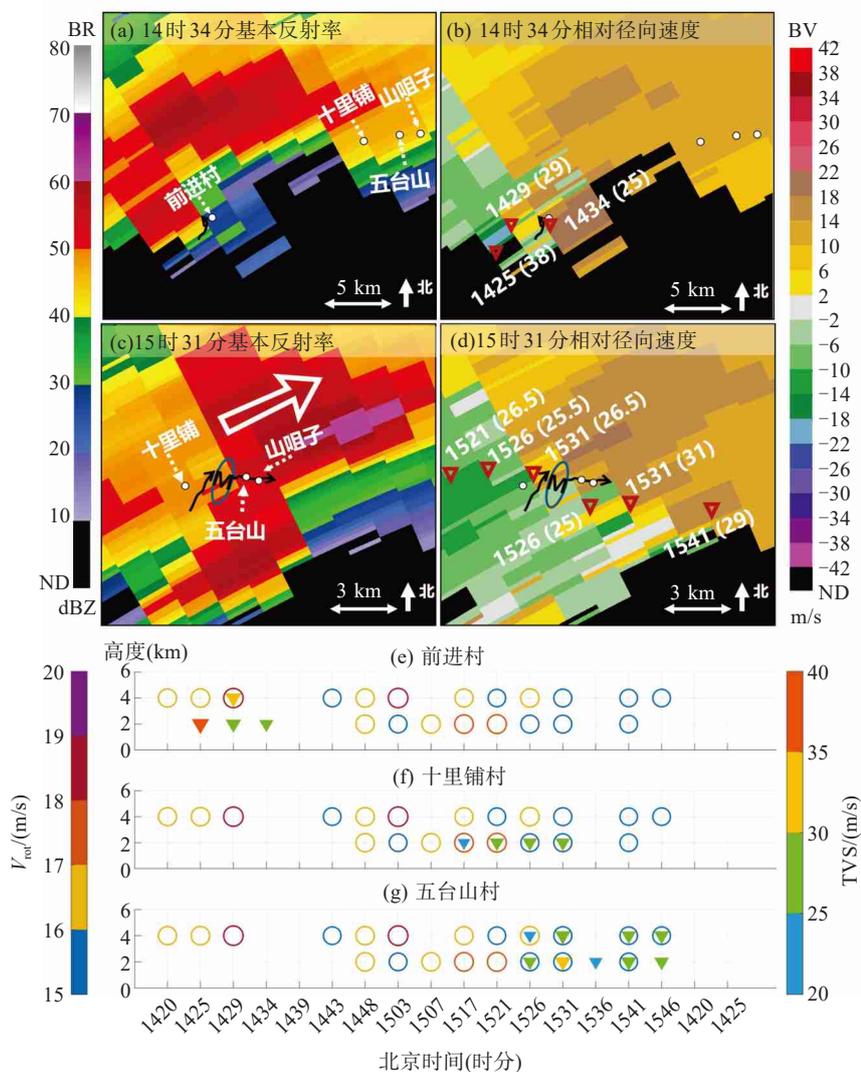


图10 赤峰雷达在2017年8月11日14时34分(a、d),15时31分(c、d)的 0.5° 仰角基本反射率和风暴相对径向速度地点如图中白色文字所示。带箭头的黑色实线为龙卷中心路径;图b和d的红色三角代表影响前进村的龙卷涡旋(TVS);图e~j为不同高度上TVS(彩色倒三角符号)最大风暴相对径向速度差(m/s)的时间演变图,不同的颜色代表不同强度的TVS,大小如右侧色标所示。图中的彩色圆圈代表赤峰雷达识别出的中气旋距地面约2~4 km高度的旋转速度(V_{rot})时间演变,大小如左侧色标所示。

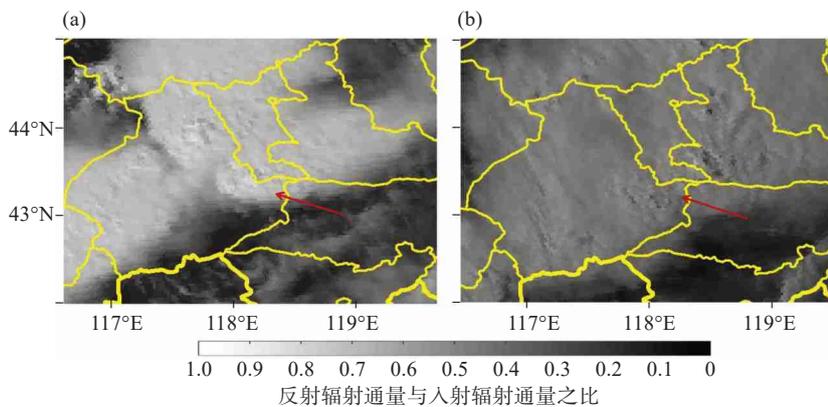


图11 日本静止卫星葵花八号在2018年8月11日14时30分(a)和15时30分(b)拍摄的可见光云图箭头所指为影响赤峰的对流云团上冲云顶。

5 地形对超级单体和龙卷的可能影响

早前研究表明,地形、下垫面的非均一性、地面粗糙度的变化都可能对龙卷及母体雷暴造成影响^[18-19]。相比于更粗糙的下垫面,均匀地形上有更多龙卷生成^[20-21],地面粗糙度会降低龙卷的平均切向速度^[22],从而减弱龙卷强度。对复杂地形上的龙卷研究表明,上坡时龙卷强度减弱,下坡时龙卷强度增加^[23]。山地的起伏会增大龙卷近地面涡旋特征的多样性^[24-25],例如上坡时可能发生左偏、加速、扩张现象,下坡时则可能发生右偏、减速、收缩等现象。此外,地形的峡谷效应可能加强低层风力和风切变,增强水汽辐合导致抬升凝结高度降低,从而有利于超级单体和龙卷的维持^[26]。本次龙卷事件包含多个TVS,造成了分散不连续的龙卷灾害路径,其母体超级单体的强度和结构也变化多样,这可能与该地区下垫面复杂的地形变化有一定关系。

超级单体从西南偏西向东北偏北移动,扫过前进村、十里铺村、五台山村和山咀子村总共约50 km的距离(图1a,图8s)。超级单体在前进村的平地时较强,且具有DRC和明显钩状回波结构,造成前进村龙卷。当超级单体离开前进村向东北进入陡峭山地,其钩状回波变得不清晰,强度减弱。当超级单体15时03分移到山谷平坦地区,0.5°仰角观测到的中气旋旋转速度加强至15.3 m/s(图1b),钩状回波和DRC再次出现。之后由于遇到十里铺西侧的山,强度再次减弱,钩状回波也变得模糊。当超级单体移近十里铺村时,地形变得平缓,超级单体的中气旋在15时17分又一次加强并发展出清晰的钩状回波,0.5°仰角的中气旋旋转速度为17 m/s(图1b),造成了十里铺龙卷。之后超级单体横跨相对低矮的五台山,又经历了一次小幅度的上坡减弱下坡增强的过程。15时40分之后超级单体离开山咀子进入连绵山地,强度逐步减弱。

相对于中气旋的强度变化,龙卷对下垫面地形变化的反应更加敏感。龙卷主要出现在超级单体路径上的相对平坦地带。当前进村龙卷离开前进村进入崇山峻岭,便迅速消失。十里铺龙卷移

出村庄后受五台山地形抬高影响,强度减弱,灾害分布缩小。而在五台山的东侧,第三个龙卷生成并随着下坡明显增强;而在离开山咀子后因遇爬坡而减弱消亡。龙卷的强度演变特征与地形变化的关系与前人的研究结果基本一致^[22-23]。

相比这次赤峰龙卷,中国另一次EF4级龙卷于2016年6月23日发生在江苏北部平原,下垫面平坦均匀。超级单体和龙卷表现为连续发展特征,强度更强也更易识别,龙卷灾害范围长达34.5 km,最大宽度达4.1 km^[10]。

6 总 结

2017年8月11日下午,三个EF4级龙卷袭击中国内蒙古自治区赤峰市,造成5人死亡及58人受伤。这是1961年以来中国山地丘陵地带记录到的第一次也是最强的龙卷。本文根据现场灾害调查结合多普勒天气雷达、卫星观测和ERA5分析数据,确定了8.11赤峰龙卷的维持时长、中心路径、EF0~EF4级灾害分布、龙卷母体及其天气背景特征。相比于中国1961—2010年的历史龙卷记录,三个龙卷的生命史(~10 min)和灾害路径(2 km)较短,但最强均造成了EF4级灾害。

此次多龙卷事件产生于同一个超级单体雷暴的同一个中气旋。该超级单体生成于发展南移的东北冷涡东南象限、地面冷锋前沿和干线的湿侧边缘,同时也是CIN的极小值区与STP和SCP的叠加区域。上干下湿的垂直层结,充足的低层水汽输送和风场辐合均有利于对流发生发展。较强的0~1 km SRH也是此次超级单体及龙卷发生维持的重要条件。母体超级单体随环境风场向东北北移动,扫过前进村、十里铺、五台山和山咀子村。在造成三次龙卷的时刻,超级单体都具有清晰的钩状回波和DRC结构,最大基本反射率达到61.5 dBZ,中气旋旋转速度最大达到19.8 m/s,TVS径向速度差最大达到38 m/s,受当地复杂地形影响,此次事件表现为多龙卷和不连续特征。中气旋移经山地时强度减弱,钩状回波和DRC等结构变得模糊,进入相对平坦的地区,中气旋加强,钩状回波和DRC结构更清晰。龙卷灾害主要出现在相对平坦或下坡地带。当龙卷爬坡(如十里铺龙卷和五台山龙卷的尾端),灾害分布缩小,强度减弱;

当龙卷下坡(如五台山龙卷的初段)时,强度明显增强。地形对于龙卷详细的影响机制还有待未来基于高分辨数值试验进行深入探讨。

致谢:感谢内蒙古自治区气象局和赤峰市气象局对该工作的大力支持。

参 考 文 献:

- [1] DAVIES-JONES R, TRAPP R J, BLUESTEIN H B. Tornadoes and Tornadoic Storms. In: Doswell C A. (eds) *Severe Convective Storms, Meteorological Monographs*[M]. Boston, MA: Amer Meteor Soc, 2001: 167-221.
- [2] BROOKS H E, DOSWELL C A, KAY M P. Climatological estimates of local daily tornado probability for the United States[J]. *Wea Forecasting*, 2003, 18(4): 626-640.
- [3] FARNEY T J, DIXON P G. Variability of tornado climatology across the continental United States. [J]. *Int J Climatol*, 2015, 35(10): 2 993-3 006. <https://doi.org/10.1002/joc.4188>.
- [4] ZHOU R, MENG Z, BAI L. Differences in tornado activities and key tornadic environments between China and the United States[J]. *Int J Climatol*, 2021(1): 1-18. <https://doi.org/10.1002/joc.7248>.
- [5] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征[J]. *气象*, 2015, 41(7): 793-805.
- [6] BLUESTEIN H B, GOLDEN J H. A review of tornado observations. in the tornado: its structure, dynamics, prediction, and hazards (eds C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jone) [M]. American Geophysical Union, 1993: 319-352. <https://doi.org/10.1029/GM079p0319>.
- [7] MENG Z, YAO D. Damage Survey, Radar and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012[J]. *Wea Forecasting*, 2014, 29(3): 702-724.
- [8] BAI L, MENG Z, HUANG L, et al. An integrated damage, visual, and radar analysis of the 2015 Foshan, Guangdong EF3 Tornado in China produced by the landfalling Typhoon Mujigae (2015)[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2017, 98(12): 2 619-2 640.
- [9] XUE M, ZHAO K, WANG M, et al. Recent significant tornadoes in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 2016, 33(11): 1 209-1 217. <https://doi.org/10.1007/s00376-016-6005-2>.
- [10] MENG Z, BAI L, ZHANG M, et al. The deadliest tornado (EF4) in the past 40 years in China[J]. *Wea Forecasting*, 2018, 33(3): 693-713.
- [11] 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.
- [12] MENG Z, YAO D, BAI L, et al. Wind estimation around the shipwreck of the "Oriental Star" based on field damage survey and radar observations[J]. *Science Bulletin*, 2016, 61(4): [doi:10.1007/s11434-016-1005-2](https://doi.org/10.1007/s11434-016-1005-2).
- [13] LADUE J G, MAHONEY E A. Implementing the new enhanced Fujita scale within the NWS. 23rd Conf. on Severe Local Storms[C]. St. Louis, MO, Amer Meteor Soc, 2006. 5.5. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/115420.pdf>.
- [14] WSEC. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EFscale)[C]. Texas Tech University Wind Science and Engineering Center Rep., 2006: 108. <https://www.depts.ttu.edu/nwi/Pubs/FScale/EFScale.pdf>.
- [15] 白兰强, 孟智勇, SUEKI K, 等. 中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006~2018) [J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50: 619-634.
- [16] RASMUSSEN E N. Refined supercell and tornado forecast parameters[J]. *Wea Forecasting*, 2003, 18: 530-535. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)18<530:RSATFP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)18<530:RSATFP>2.0.CO;2).
- [17] 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.
- [18] BOSART L F, SEIMON A, LAPENTA K D, et al. Supercell tornadogenesis over complex terrain: the great barrington, massachusetts, tornado on 29 May 1995[J]. *Wea Forecasting*, 2006, 21(6): 897-922. https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/21/6/waf957_1.xml.
- [19] MARKOWSKI P M, DOTZEK N. A numerical study of the effects of orography on supercells [J]. *Atmos Res*, 2011, 100(4): 457-478. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.12.027>.
- [20] KARPMAN D, FERREIRA M A, WIKLE C K. A point process model for tornado report climatology[J]. *STAT*, 2013, 2: 1-8. <https://doi.org/10.1002/sta4.14>.
- [21] ELSNER J B, FRICKER T, WIDEN H M, et al. The relationship between elevation roughness and tornado activity: a spatial statistical model fit to data from the central great plains[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2016, 55(4): 849-859.
- [22] NATARAJAN, D. Numerical simulation of tornado-like vortices[D]. Western University, 2011: 89.
- [23] KARSTENS, CHRISTOPHER D. Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions[D]. Iowa State University, 2012: 12778. <https://lib.dr.iastate.edu/etd/12778>.

- [24] LEWELLEN D C, LEWELLEN W S, XIA J. The influence of a local swirl ratio on tornado intensification near the surface[J]. *J Atmos Sci*, 2000, 57(4): 527-544.
- [25] SATORIO M A, BODINE D J, REINHART A E, et al. Understanding how complex terrain impacts tornado dynamics using a suite of high-resolution numerical simulations[J]. *J Atmos Sci*, 2020. 77(10): 3 277-3 300.
- [26] TANG B, VAUGHAN M, LAZEAR R, et al. Topographic and boundary influences on the 22 May 2014 Duanesburg, New York, tornadic supercell[J]. *Wea. Forecasting*, 2016, 31(1): 107-127.

DAMAGE SURVEY AND ANALYSIS OF A MULTIPLE TORNADO EVENT OVER COMPLEX TERRAIN IN CHIFENG, INNER MONGOLIA ON 11 AUGUST 2017

LI Liye^{1,2,3,4}, MENG Zhiyong⁴, BAI Lanqiang^{3,4}, LI Wei⁵, MA Xiaolin⁶,
HAN Jingwei⁶, YAN Lijun³, YAO Dan^{1,7}, CHENG Yinlin³

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Foshan Tornado Research Center, Foshan Meteorological Service, Foshan, Guangdong 528000, China;

4. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University/CMA Key Open Lab on Tornado, Beijing 100871, China; 5. Meteorological Bureau of Tongliao, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China;

6. Meteorological Bureau of Inner Mongolia, Huhhot 010051, China;

7. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: In the afternoon of 11 August 2017, three EF4 tornadoes occurred over the complex terrain in Chifeng, Inner Mongolia, China, causing five fatalities and 58 injuries. It is the most violent tornado event ever recorded on a hilly plateau in China since 1961. First, the results of a damage survey are presented in this work. Then, synoptic environments and key mesoscale parameters of the parent storm, a tornadic supercell, are analyzed, together with the signatures of tornadoes on a Doppler weather radar. This event occurred in the pre-frontal quadrant of the Northeast China Cold Vortex (NCCV) and on a bulge toward the moist side of a dry line associated with the NCCV. The CAPE (Convective Available Potential Energy) was 1 800 J/kg. The vertical wind shears in the 0~6 km and 0~1 km layer were 12.9 m/s and 10.8 m/s, respectively. The 0~1 km storm relative helicity (SRH) reached 67.3 m²/s², which is close to the statistical median of U. S. climatology, indicating a storm environment favorable for tornadic supercells. Multiple vortices and an intermittent damage swath were observed via the Doppler weather radar, which was likely to result from the local complex terrain. The evolution of three radar-based tornado vortex signatures (TVS) were recognized, and the peak strength (maximum gate-to-gate azimuth radial velocity difference) reached 38 m/s. The three tornadoes and related TVS were generated from the same mesocyclone from a tornadic supercell, and two of them were overlapped in time.

Key words: EF4 tornado; damage survey; complex terrain; Chifeng; Doppler radar