沙漠与绿洲气象
Desert and Oasis Meteorology
第15卷 第1期
2021年2月

晋亮亮,葛海燕.2017年内蒙古赤峰“8·11”龙卷环境场及雷达特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(1):62-68.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2021.01.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

2017年内蒙古赤峰“8·11”龙卷环境场及雷达特征分析

晋亮亮,葛海燕
(赤峰市气象局,内蒙古 赤峰 024000)

摘 要:利用多普勒雷达观测资料,结合NCEP FNL 1.0 °×1.0 °再分析资料、探空资料,对2017年8月11日内蒙古赤峰市龙卷进行了分析。分析表明:(1)大尺度环境场提供了上干下湿不稳定层结条件,切变线和地面干线为对流触发条件;对流有效位能超过2 000 J/kg,抬升凝结高度低于1 km,低层垂直风切变 $10\times10^{-3}\ s^{-1}$,为龙卷发生提供了有利条件。(2)发生龙卷的超级单体风暴低层有明显的钩状回波,弱回波区及与之对应的前侧V型缺口及后侧V型缺口特征;雷达距离龙卷发生地超过100 km,未识别出龙卷涡旋特征,但识别出了三维相关切变和中气旋,中气旋最大转动速度达到了18 m/s,为中到强等级的中气旋。(3)产生龙卷的超级单体风暴最大反射率因子在60 dBZ左右,而且在龙卷发生前基于单体的垂直累积液态水和风暴顶高有明显的跃增。(4)龙卷接地前,对应的中气旋顶高≤6 km,切变≥$15\times10^{-3}\ s^{-1}$。

关键词:龙卷;超级单体风暴;风暴参数;中气旋参数

中图分类号:P445.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002-0799(2021)01-0062-07

龙卷是一种小尺度但破坏力极大的灾害性天气,会造成大量的人员伤亡和财产损失。一般将龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷[1]。超级单体龙卷由超级单体风暴产生,后者与深厚且持续的中气旋相联系[2-3],而非超级单体龙卷与非超级单体风暴相联系,通常与浅薄的、尺度较小的边界层涡旋有关[4-5],能够产生于各种大气环境中。Brown等[6]发现一个伴随龙卷的比中气旋尺度更小的速度场特征,称为龙卷涡旋特征(Tornadic Vortex Signature,简称TVS),在径向速度图上表现为像素到像素的很大的风切变,此后TVS成为龙卷监测和预警的主要手段。

多年来,国内外对龙卷的研究颇多,既有分析产生龙卷的环境场特征[7-8],也有探讨龙卷发生时的反射率因子和速度场特征[9-10]。Philip等[11]在研究2003年一次龙卷时认为,大尺度环境支撑深厚的湿对流,近地层的暖锋、垂直风切变和中气旋则产生了明显的龙卷现象;王秀明等[12]通过对中国东北地区龙卷的环境特征分析,指出东北龙卷多发生在冷涡的天气背景下,其环境特点为:大的环境温度直减率,强的垂直风切变以及低层较干的环境。触发系统通常为干线及其伴随的边界层强辐合。俞小鼎等[13]的分析发现,超级单体风暴反射率因子的主要特征是低层的钩状回波,有时是由风暴主体向低层入流方向伸出的一个突出物,超级单体龙卷发生前的环境往往为中到强的对流不稳定能量和中等到强的螺旋度,低层风切变适量有较大的气旋式曲率;张玉洁等[14]指出龙卷产生前,风暴的最大反射率因子强度、强回波中心高度、回波顶高持续增加,垂直累积液态含水量激增,龙卷发生前2个体扫,强回波中心高度和垂直累积液态含水量出现骤降。许薇[15]等指出在不稳定区生成的强对流回波,移

收稿日期:2020-01-07;**修回日期**:2020-03-21
基金项目:中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2019-014)
作者简介:晋亮亮(1984—),男,工程师,主要从事短期天气预报工作。E-mail:jinliang1984@163.com

入存在中尺度辐合线和强不稳定的区域后，在中尺度辐合线作用下回波进一步加强，小尺度涡旋则触发此次龙卷过程。

1　灾害实况

2017 年 8 月 11 日 14—16 时，内蒙古赤峰市克什克腾旗和翁牛特旗交界地区发生龙卷天气(图 1)。14:28,赤峰市克什克腾旗前进村遭受龙卷袭击,持续 10 min,龙卷路径 2 km;15:26,八里庄、十里铺村、五台山村、山咀子村先后受龙卷袭击,持续约15 min,龙卷路径长度约 6 km。整个龙卷天气过程的 EF0+ 的宽度最大约 1 km。此次龙卷灾害造成 5 人死亡,58 人受伤,转移安置人口 1 760 人;倒塌房屋 360间,损坏房屋 1 004 间;农作物受灾面积21 208.08 hm^2,成灾面积 16 116.37 hm^2,绝收面积5 849.32 hm^2,直接经济损失 10 053.29 万元。

图 1　2017 年 8 月 11 日 14—16 时龙卷路径及影响范围

(黄色工字钉为受灾村庄,橙色线为龙卷路径,白线为受龙卷影响的范围)

2　大尺度环流特征

从 8 月 11 日 08 时 500 hPa 形势场(图 2a)可以看出,在蒙古国东部有冷涡存在,赤峰市西部处于蒙古冷涡的东南象限。从温度场上看,从内蒙古东部到中部与山西中部有明显的冷温度槽存在。从 850 hPa(图 2b)上可以看出,赤峰市处于低涡的底前部,从温度场上看，在 500 hPa 温度槽的位置上有明显的温度脊,上层的温度槽与下层的温度脊叠置,有利于对流不稳定的建立。另外内蒙古中东部偏南地区 850~500 hPa 的温差较大(图 2a),温差在 28~31 ℃之间,这也有利于不稳定层结的建立。从 850 hPa 风场上可以看出，在华北北部到西北地区东部形成一条明显的切变线,切变线东移,系统性抬升可以起到触发对流的作用。在切变线右侧的西南气流有利于水汽和能量向赤峰市输送。从地面露点线(图 2b)可以分析出在内蒙古中部偏南地区到陕西北部有明显的露点梯度大值区，这条干线也是对流系统的触发机制。可以看出,不稳定层结已经建立,而低层切变线和地面干线提供了触发机制，为龙卷的发生提供了有利条件。

从赤峰站 8 月 11 日 08 时(BJT)T-lnP 图(图 3)可以看出,低层存在弱逆温层,逆温层阻断了高低空水汽和能量的交换，增加了高低空水汽和温度的对比,有利于对流的发生发展。低层相对湿度较好,主要集中在 850 hPa 以下,中层以上有干空气的侵入,这种“喇叭口”的形势有利于雷暴大风天气的出现。抬升凝结高度为 927 m,研究表明,抬升凝结高度在 1 200 m 以上会大大降低龙卷产生的概率。赤峰探空站的海拔为 572 m，因此计算了地面到 850 hPa

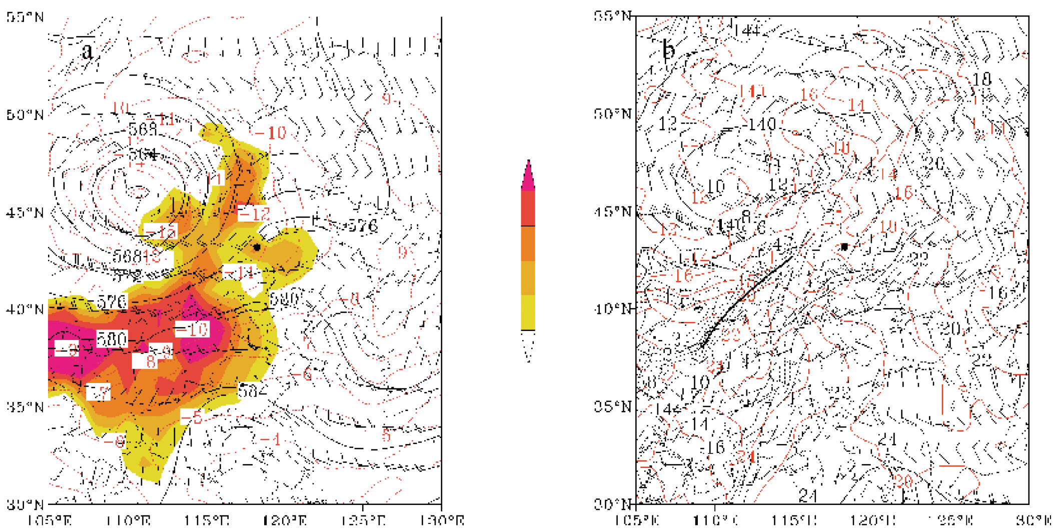

图 2　2017 年 8 月 11 日 08 时(BJT)500 hPa 形势场和 850 hPa 与 500 hPa 温度差(阴影)

(a 为 850 hPa形势场与地面露点线(黑色虚线),干线(粗黑色实线);b为黑色实线为等高线,红线为等温线,黑点为龙卷发生地)

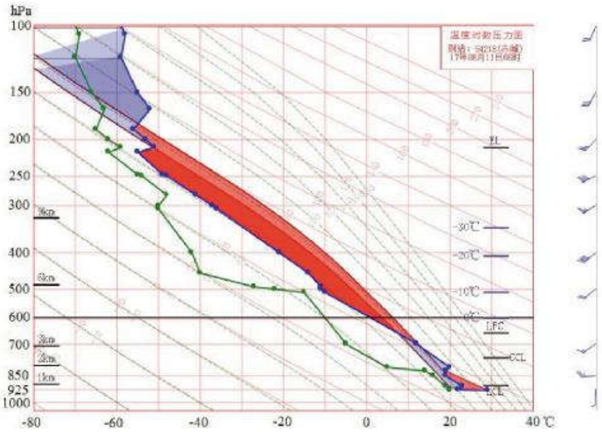

图 3 2017 年 8 月 11 日 08 时(BJT)赤峰站 T-lnP 图
(左侧棕色实线为 08 时状态曲线,右侧侧棕色实线为 14 时订正状态曲线,蓝线实线为温度层结曲线,绿色实线为露点层结曲线)

的垂直风切变表示低层的垂直风切变，地面到 850 hPa 的垂直风切变为 10×10^{-3} s^{-1},为较强的垂直风切变。08 时赤峰探空站的对流有效位能为 2 082 J/kg,龙卷灾害发生在 14 时以后，因此对 08 时 T-lnP 图进行了订正,订正后发现对流有效位能明显增大,达到了 3 700 J/kg，较大的对流有效位能会导致更强的对流风暴的产生。较大的对流有效位能,较大的低层垂直风切变以及较低的抬升凝结高度是产生超级单体龙卷的先决条件。

3 雷达产品分析

3.1 反射率因子和相对风暴径向速度分析

产生龙卷的对流单体在 12:15 被雷达开始跟踪。此后该单体迅速发展,到 13:32 时 0.5 °仰角反射率因子产品(图 4a)中可以看出,单体最大反射率因子达到 58 dBZ,低层出现钩状回波,弱回波区以及与之对应的前侧 V 型缺口(FFN),并且在该时次相对风暴速度图出现三维相关切变(3DC),此时风暴单体已经具有准超级单体风暴的特征。在接下来的 50 min,只有在 13:42 出现了三维相关切变。14:25(图 4c,4d)风暴单体低层钩状回波和前侧 V 型缺口更加明显,并观测到中气旋,0.5°仰角在此处的高度为 2.8 km,中气旋已经达到较低的高度,其旋转速度为 17.5 m/s,达到中等强度的中气旋,成为超级单体风暴,中气旋位于低层钩状回波的顶端。从反射率因子垂直剖面(图 4e)中可以看出,风暴顶高发展到 14 km,最强反射率因子达到 55 dBZ 以上,并且发展到 10 km 左右,由于距离雷达较远低层的弱回波区观察不到,但仍能发现小范围的有界弱回波区。从相对风暴径向速度图(图 4d)上可以分析出比中气旋直径更小的像素与像素之间风切变，即龙卷涡旋特征。相邻方位角之间的速度差达到了 35 m/s,该 TVS 对应的垂直涡度达到 3.5×10^{-2} s^{-1}。从径向速度剖面(图 4f)可以看出,低层有大范围的正速度区,最大速度达到了 17.5 m/s，说明有较强的入流气流进入风暴。在 14:28 左右前进村龙卷发生。之后超级单体略有减弱,低层弱回波区减小,中气旋消失,龙卷在持续 10 min 后消失。

14:40—15:17 虽有中气旋的出现,但在灾情调查时，没有发现龙卷造成的灾害，所以在此不做讨论。从 15:21 开始风暴单体再次发展,低层最大反射率因子达到 60 dBZ 以上,低层存在钩状回波,弱回波区以及与之对应的前侧 V 字型缺口(FFN),15:21 和 15:26 连续出现三维相关切变(图 5a,图 5b),但是三维相关切变位置对比于 13:32 发生了变化,位于强回波的后侧。15:31 低层最大反射率因子在 60 dBZ 以上(图 5c),说明超级单体风暴强度维持,并且在风暴后侧出现了后侧 V 型缺口,表明有强的下沉出流气流存在。该时刻雷达识别出中气旋（图 5e),转动速度达到了 18 m/s,此处距离雷达的距离为 120 km,可判断为中到强的中气旋,而且出现在雷达监测的最低仰角,高度为 2.8 km,该中气旋已发展到较低层。另外,可以分析出龙卷涡旋特征,相邻方位角之间的速度差为 36 m/s，其垂直涡度为 3.6×10^{-2} s^{-1}。龙卷第二次接地时的时间为 15:26 左右,早于低层中气旋出现的时间。从而可以推断,在远距离龙卷预警时，雷达识别出低层强的三维相关切变也可以是预警指标之一。15:36 低层最大反射率因子依然在 60 dBZ 以上(图 5d),低层钩状回波,弱回波区和与之对应的前侧 V 型缺口减弱,但后侧 V 型缺口依然很明显。此时雷达识别出的中气旋(图 5f),转动速度为 15 m/s,较前一体扫略有减弱,仍可达到中等强度,对应着龙卷的持续阶段。15:41 雷达未识别出三维相关切变和中气旋，风暴结构变得松散,龙卷也减弱消弱。

3.2 风暴参数分析

图 6 中双向黑箭头为发生龙卷灾害的时段,从图中可以看出在龙卷发生整个过程中，最大反射率因子的值变化不大,基本在 60 dBZ 上下变动,但是最大反射率因子的高度变化较大，在 1.9 ~10.3 km 变化。基于风暴单体的垂直累积液态水(VIL)变化幅度也较大,在 50~71 $kg\cdot m^{-2}$,龙卷在前进村第一次

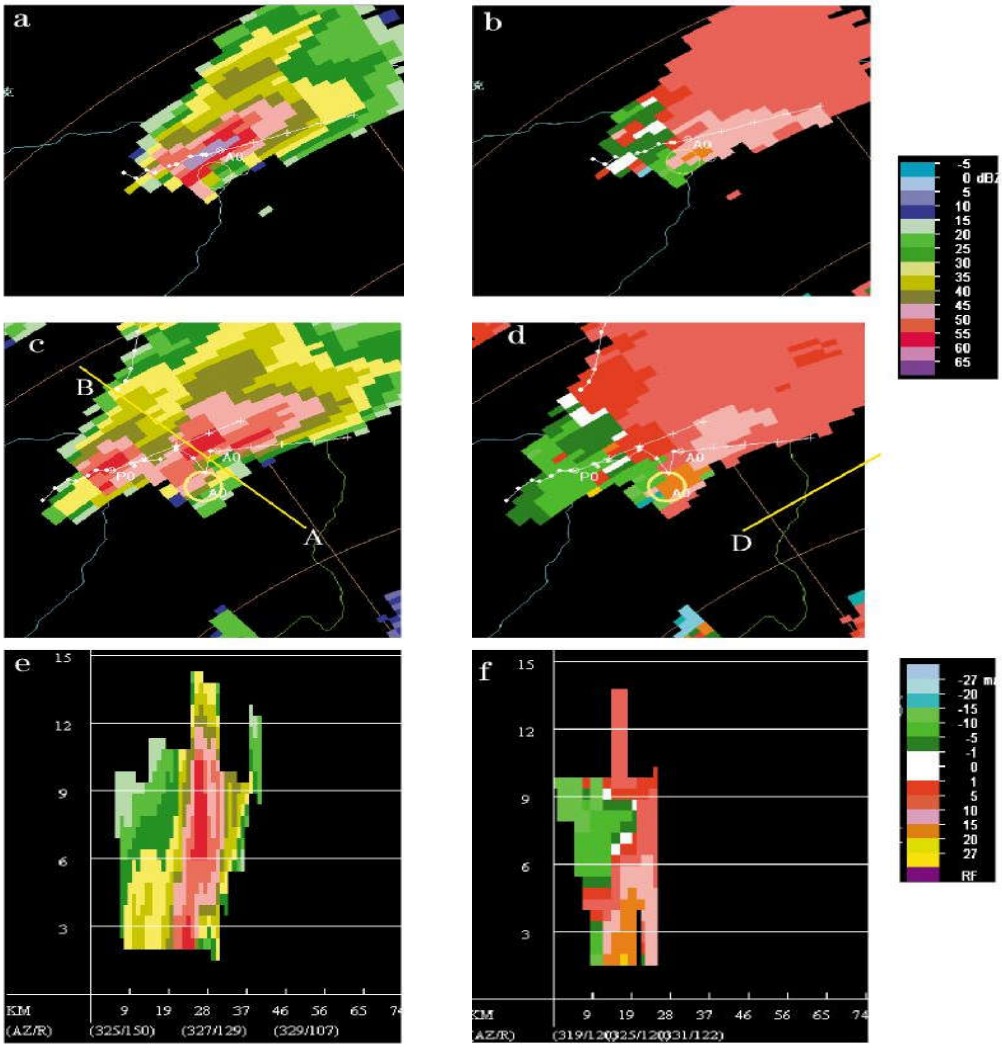

图 4　8 月 11 日 13:32,14:25(BJT)0.5°仰角反射率因子(a、c),相对风暴径向速度(b、d),
14:25 反射率因子剖面(e)和径向速度剖面(f)
(白线为风暴追踪信息,细黄色圆圈为三维相关切变,粗黄色圆圈为中气旋,黄色实线为剖面位置)

接地前 2 个体扫 VIL 有明显的跃增, 从 54 kg·m^{-2} 增加至 68 kg·m^{-2},最高达到 71 kg·m^{-2},并且在龙卷发生前后的 5 个时次 VIL 都在 60 kg·m^{-2} 以上。龙卷在在八里庄第二次接地前,同样也出现了 VIL 的跃增,从 59 kg·m^{-2} 增至 67 kg·m^{-2},之后龙卷发生,在龙卷发生前后有 6 个时次>60 kg·m^{-2}。从回波顶高度可以看出 13:27—14:10 回波顶高在 11 km 左右,观测事实表明:龙卷出现需要雷暴母体的强中心达到较高高度, 但在 14:15 回波顶高出现跃增,从 11 km 迅速增加到 14 km 左右, 并且在接下来的 4 个时次都保持在 14 km 左右,这个时段前进村出现龙卷,到 14:39 顶高下降到 10.4 km,龙卷消失。而在八里庄等 4 个村发生龙卷前,顶高也出现了跃增,从 10.1 km 增加到 13.1 km,并且维持在 12.3 ~13.2 km,持续了 6 h。

3.3　中气旋参数分析

图 7 是龙卷发生过程中中气旋和三维相关切变的变化情况,黑色双箭头表示龙卷发生的时段。从图中可以分析出,龙卷在前进村第一次接地时,中气旋底高2.0 km,顶高 4.3 km,切变为 16×10^{-3} s^{-1},接下来的一个体扫没有出现中气旋或三维相关切变, 第三个体扫时,出现三维相关切变,对应的底高,顶高和切变分别为:2.1 km 、5.8 km,15×10^{-3} s^{-1},随后龙卷消失。在龙卷第二次接地时,三维相关切变和中气旋持续了 4 个体扫,底高在 2 km 左右,顶高在 4~6 km,并且在龙卷接地前顶高有下降, 切变前三个体扫维持在 15×10^{-3} s^{-1} 以上,第四个体扫切变有明显的减小,之后三维相关切变没有监测到,随后龙卷减弱消失。由此可以分析出龙卷接地前, 对应的中气旋顶高≤6 km, 中气旋顶高和底高之间的距离在 2~4 km,

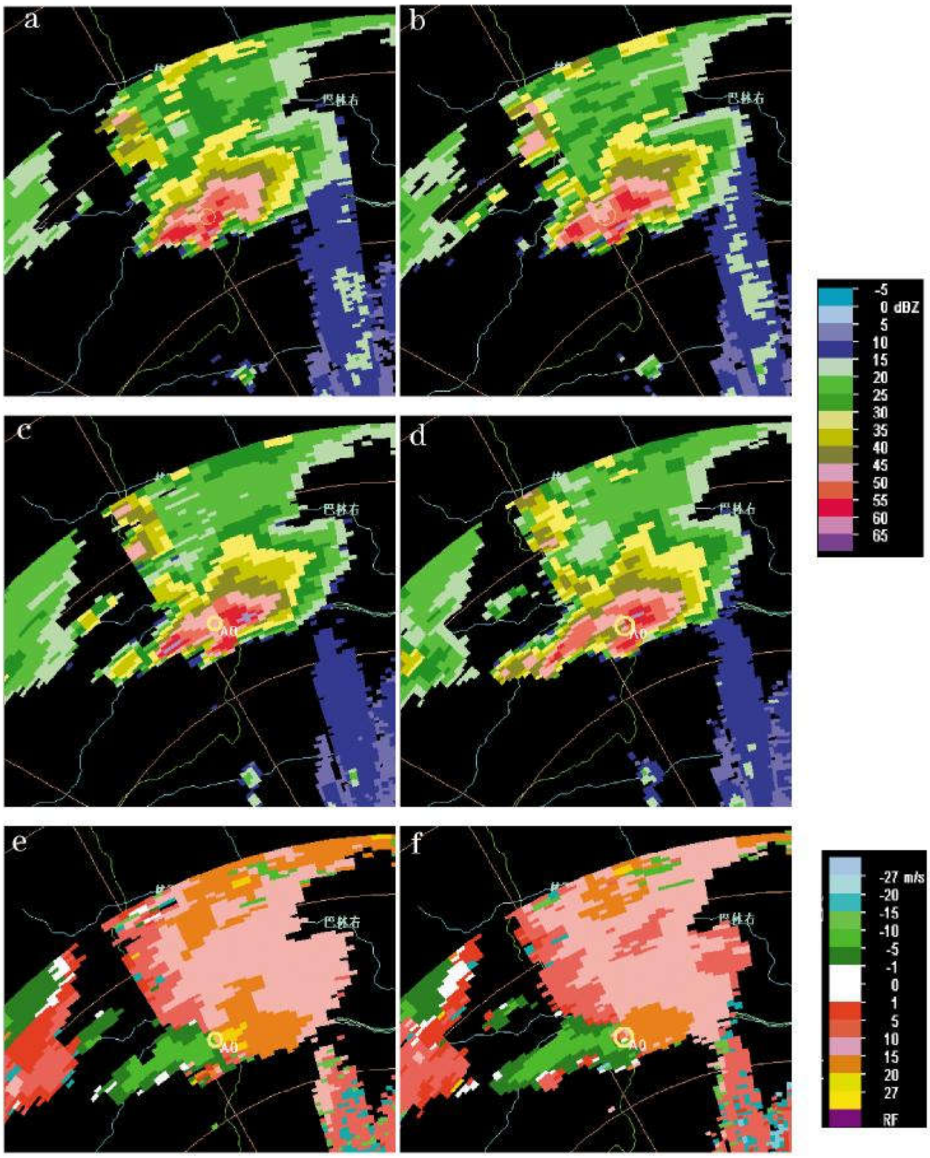

图 5　8 月 11 日 15:21(a)、15:26(b)、15:31(c)、15:36 (d)0.5 °仰角反射率因子和 15:31(e)、15:36(f)0.5 °相对风暴径向速度

（细黄色圆圈为三维相关切变,粗黄色圆圈为中气旋）

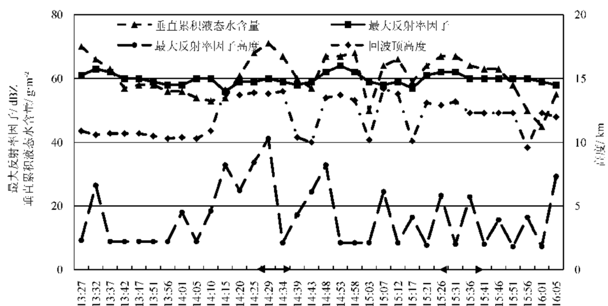

图 6　8 月 11 日 13:27—16:05 龙卷风暴单体参数

（双箭头为龙卷发生时段）

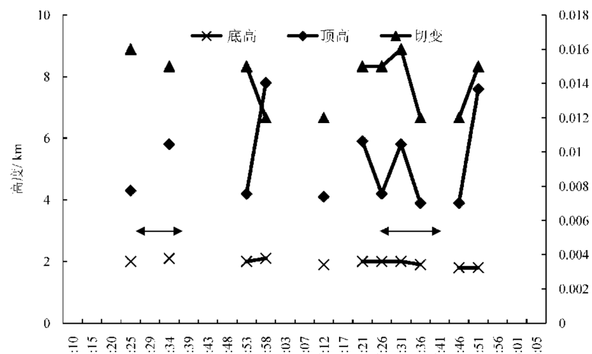

图 7　8 月 11 日 14:10—16:05 中气旋和三维相关切变参数

（双箭头为龙卷发生时段）

中气旋的切变≥$15\times10^{-3}\ s^{-1}$。

4 结论

通过对此次龙卷风灾害天气的环境场和多普勒雷达产品相关特征的分析,得出以下结论:

(1)此次龙卷灾害发生在蒙古冷涡前部,500 hPa 温度槽叠加在 850 hPa 温度脊之上以及低层的逆温层都有利于对流天气的发生发展,其环境场具有较强的对流不稳定性、较大的低层垂直风切变和较低的对流凝结高度。

(2)从雷达产品分析,两次龙卷接地是由同一个超级单体风暴造成的,低层有明显的钩状回波,弱回波区及与之对应的前侧 V 型缺口,由于距离>100 km 雷达未识别出龙卷涡旋特征,但识别出了三维相关切变和中气旋,尤其是发展到低层的中到强等级的中气旋。但龙卷发生时中气旋的位置不同,第一次位于低层钩状回波的顶点,第二次位于强回波的后侧。在远距离龙卷预警时,雷达识别出低层强的三维相关切变也可以是预警指标之一。

(3)通过对风暴参数的分析,整个龙卷天气过程中,超级单体风暴的最大反射率因子都在 60 dBZ 左右,在龙卷接地前基于单体的 VIL 和风暴顶高有明显跃增,VIL 增大到 60 $kg\cdot m^{-2}$ 以上,强回波中心顶高在 10 km 以上。

(4)龙卷接地前,对应的中气旋顶高不超过 6 km,中气旋顶高和底高之间的距离在 2~4 km,中气旋的切变≥$15\times10^{-3}\ s^{-1}$。

参考文献:

[1] Wilson J W.Tornado genesis by non precipitation induced wind shear lines[J].Mon Wea Rev,1986,114:270–284.

[2] 朱平,田成娟.青海东部一次强对流天气的多普勒雷达特征分析[J].干旱气象,2011,29(3):336–342.

[3] 刘维成,杨晓军,史志娟,等.一次超级单体风暴的雷达回波特征分析[J].干旱气象,2009,27(4):320–326.

[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,2006.130–145.

[5] 何彩芬,姚秀萍,胡春蕾,等.一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报,2006,17(3):370–375.

[6] Brown R A,Lemon L R,Burgess D W.Tornado detection by pulsed Doppler radar [J].Mon Wea Rev,1978,106:29–38.

[7] Lee B D,Catherine A F,Timothy M S.Surface Analysis near and within the Tipton,Kansas,Tornado on 29 May 2008[J].Mon Wea Rev,2011,139:370–386.

[8] 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.

[9] 叶成志,唐明晖,陈红专,等.2013 年湖南首场致灾性强对流天气过程成因分析[J].暴雨灾害,2013,32(1):1–10.

[10] 廖玉芳,俞小鼎,郭庆.一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析 [J]. 应用气象学报,2003,14(6):656–662.

[11] Philip N S, Joshua M B. Mesocyclone Evolution Associated with Varying Shear Profiles during the 24 June 2003 Tornado Outbreak [J].Wea Forecasting,2011,26: 808–827.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 张玉洁,苑文华,徐百言.江苏阜宁龙卷超级单体风暴的雷达资料分析[J].干旱气象,2019,37(3):409–418.

[15] 许薇,梁宏升,陈欢欢.2011 年 6 月 16 日汕头龙卷天气过程分析[J].暴雨灾害,2012,31(2):176–181.

[16] 冯佳玮,闵锦忠,庄潇然.中国龙卷时空分布及其环境物理量特征[J].热带气象学报.2017,33(4):530-539.

[17] 周后福,刁秀广,夏文梅,等.江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析[J].气象学报,2014,72(2):306-317,

[18] 姚叶青,郝莹,张义军,等.安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J].高原气象,2012,31(6):1721-1730.

[19] 赵瑞金,郝雪明,杨向东,等.2009 年 7 月 20 日承德龙卷多普勒天气雷达特征[J].气象,2010,36(11):68-76.

[20] 朱颖墨,段长春,潘玉洁.单多普勒雷达对一次龙卷过程的观测和分析[J].气象科学,2019,39(3):405-412.

[21] 林应,王啸华,顾沛澍,等.2016 年夏季如东一次 EF2 级龙卷多普勒天气雷达特征分析 [J]. 气象科学,2018,38(3):392-398.

Analysis of the “8·11” Tornado Environmental Field and Radar Characteristics in Chifeng, Inner Mongolia in 2017

JIN Liangliang, GE Haiyan
(Chifeng Meteorological Bureau, Chifeng 024000, China)

Abstract Based on Doppler radar observation, NCEP FNL 1.0°×1.0° reanalysis data and sonde data, the tornado occurred in Chifeng of Inner Mongolia on August 11th, 2017 is analyzed. It shows that, first, unstable stratification condition is provided by the large scale environmental field and the convection triggering conditions are provided by shear line and dry line on surface. Convective available potential energy is larger than 2000 J/kg, lifting condensation level is less than 1 km, and the low-level wind shear is about 10×10^{-3} s^{-1}. These three favorable conditions are beneficial to tornado's occurance. Second, obvious hook echoes in the lower layer, weak echo area, FNN and RFN are found in the super-cell storm. TVS is not recognized by the radar beyond 100 km from the radar, while its 3DC and the moderate to strong mesocyclone are identified with its maximum circling velocity up to 18 m/s especially the mesocyclone with medium intensity developed to the lower layer. Third, the maximum reflectance factor of the supercell storm is around 60 dBZ, and the cell-based VIL and the height of storm top significantly increased before the tornado occurring. Finally, Before tornado touching the ground, the corresponding mesocyclone top height is lower than 6 km while the shear is larger than 15×10^{-3} s^{-1}.

Key words tornado; supercell storm; storm parameters; cyclone parameters