

王宁, 王婷婷, 张硕, 等. 东北冷涡背景下一次龙卷过程的观测分析. 应用气象学报, 2014, 25(4): 463-469.

东北冷涡背景下一次龙卷过程的观测分析

王 宁^{1)*} 王婷婷¹⁾ 张 硕¹⁾ 慕秀香¹⁾ 杨秀峰²⁾

¹⁾(吉林省气象台, 长春 130062) ²⁾(吉林省长春市气象局, 长春 130051)

摘 要

2012 年 6 月 12 日在吉林省白城市洮北区发生一次龙卷过程(简称“612”龙卷), 对此次龙卷过程天气形势和雷达资料分析结果表明: 龙卷发生在高空冷涡的东南象限、中高空急流北侧、低空急流左侧的对流不稳定区域及地面较暖湿的环境中, 大气对流参数计算结果显示龙卷过程低层(0~1 km)的垂直风切变较强(为 $6.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), 抬升凝结高度较低(低于 1 km), 且龙卷发生前对流有效位能较大。同时, 龙卷过程超过 50 dBZ 的强核高度均在 4 km 以下, 为低质心的对流系统, 龙卷产生于一条带状回波与一近似团状回波合并加强后的强回波带中, 并逐渐演变成“S”型, 伴有“V”型缺口, 中心最强值达 61 dBZ。根据多普勒天气雷达导出产品并结合径向速度图反映出“612”龙卷是发生在以龙卷涡旋特征为主的尺度较小且垂直涡度较大(约为 $3.65 \times 10^{-2} \sim 3.83 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)的强对流风暴中, 持续时间较短。

关键词: 龙卷; 大气对流参数; 多普勒天气雷达; 龙卷涡旋特征

引 言

龙卷是从雷暴云向下伸展并接触下垫面高速旋转的漏斗状云柱, 常与雷雨大风、短时强降水或冰雹等相伴出现, 是强对流天气最强烈的表现形式之一。由于龙卷属于小尺度涡旋, 具有突发性强、生命史短、变化急剧、垂直运动强等重要特征, 即使采用加密观测资料, 也难以捕捉到, 预报难度大, 常造成重大人员伤亡和财产损失, 因此一直是广大气象工作者关注和研究的重点之一。比较而言, 我国东部地区多发龙卷, 俞小鼎等^[1]、郑媛媛等^[2]、姚叶青等^[3]对安徽几次较典型龙卷进行了深入分析, 得到一些有应用价值的预报预警指标; 何彩芬等^[4]、蒋义芳等^[5]对台风前部龙卷的环境场和多普勒天气雷达产品进行分析, 认为龙卷一般发生在台风前部的风切变区, 这里极不稳定的大气层结、低空较强的垂直风切变及地形条件为龙卷提供了有利的热力和动力条件, 同时伴有钩状回波、弱回波区和后侧入流缺口以及强回波质心高度骤降等特征出现。在北方, 龙卷

发生的概率相对较低, 张晰莹等^[6]对东北地区中尺度对流云团引发的龙卷等强对流天气进行分析, 认为龙卷发生在中尺度对流云团的发展阶段, 速度场存在明显的中气旋, 金巍等^[7]对辽宁一次由超级单体引发的龙卷过程从大尺度环流背景和雷达回波特征等方面进行了探讨。此外, 还有气象学者从龙卷的诱发原因、维持和加强机制、数值模拟等方面^[8-16]开展相关研究, 结果表明: 低层垂直风切变很大且抬升凝结高度较低, 有利于强龙卷的产生^[17-18]; 观测到强中气旋时, 发生龙卷的平均概率约为 20%; 在观测到中气旋的基础上探测到龙卷涡旋特征, 则发生龙卷的概率提高到 50% 以上^[19-20]。

2012 年初夏, 吉林省白城地区遭受到百年不遇的龙卷袭击, 本文利用 MICAPS 资料、探空资料、区域加密观测资料及多普勒天气雷达产品等对这次龙卷过程的大尺度环流背景、形成龙卷的物理条件及雷达回波特征等方面进行详细分析, 以期对龙卷的监测和预报提供参考, 做到及早预警, 减轻灾害造成的损失。

2013-09-23 收到, 2014-03-03 收到再改稿。

资助项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006006), 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(201109)

* email: wangningwell@126.com

1 天气实况

受高空冷涡影响,2012年6月12日16:20(北京时间,下同),吉林省白城市洮北区遭受龙卷风袭击(简称“612”龙卷),瞬间风力达 $23.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风区直径超过 1 km ,共持续 10 min ,漏斗状结构特征明

显,并伴有雷阵雨,局地出现短时雷雨大风或冰雹天气(图1)。

据当地民政部门统计,“612”龙卷共造成 32 人受伤,1312 间房屋受损严重,1020 hm^2 作物成灾,其中 60 hm^2 作物绝收,受灾人口 3210 人,直接经济损失 1090 万元。根据 Fujita 龙卷划分等级及现场的受灾情况判断,此次龙卷过程为 F1 级以下的弱龙卷。

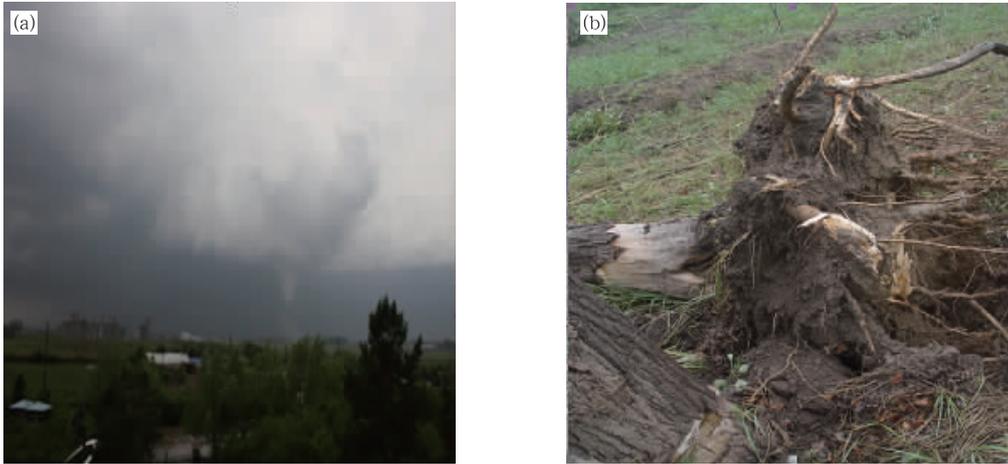


图1 2012年“612”龙卷实况(a)及受灾现场(b)

Fig. 1 The live(a) and the disaster scene(b) of “612” tornado in 2012

图2给出距龙卷发生地 20 km 的白城自动气象站地面气象要素的变化曲线。由图2可以看到,龙卷发生时,风速及气温出现突变,即风速突增、气温陡降,白城站极大风速达到 $23.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,16:00—17:00 白城站气温由 18.2°C 下降到 15.9°C ,

1 h 降温幅度超过 2°C (图2a),同时气压先降后升,并伴有阵性降水,龙卷过后,气压陡升,几小时内从 979.6 hPa 迅速回升至 983 hPa ,升幅为 0.85 hPa/h ,类似于飚线过境,并伴有一些阵性降水(图2b)。

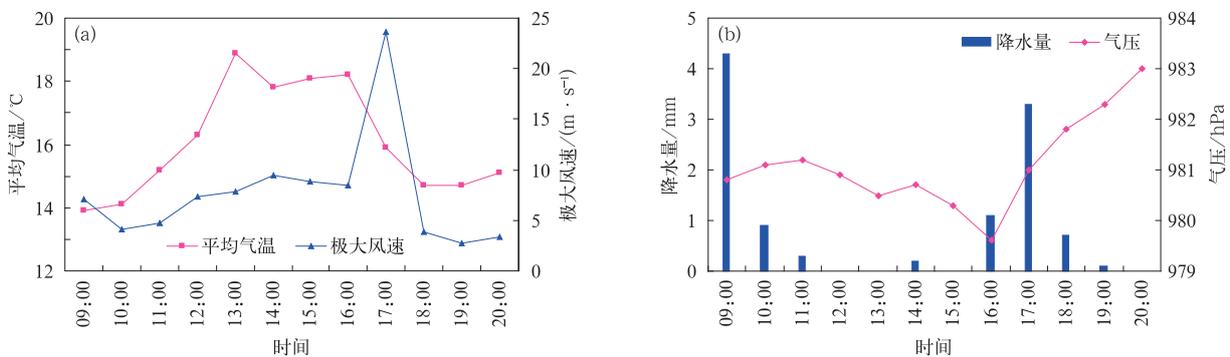


图2 2012年6月12日09:00—20:00白城站气温和极大风速(a)、降水量和气压(b)

Fig. 2 Air temperature and max wind speed(a), rainfall and air pressure(b) variations at Baicheng Station from 0900 BT to 2000 BT on 12 June 2012

2 大尺度环流特征

此次龙卷过程的影响系统为高空冷涡,龙卷发

生当日 08:00 500 hPa 冷涡处于成熟阶段,显著降温区从西北部入侵吉林省,温度槽与高空槽基本重合或略有偏东,冷涡中心强度较强,在 560 dagpm 以下,500 hPa 以西北急流为主,风速为 $20 \sim 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

s^{-1} ,中心最强可达 $32\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;200 hPa 西风急流带明显偏南,风速一般为 $40\sim 44\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中心最强可达 $64\sim 68\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;对应 850 hPa 有高空槽或切变存在,温压场斜压性较强,暖脊穿过吉林省中部,温度露点差低于 3°C 的湿区位于西北部,中西部 850 hPa 与 500 hPa 温度差一般为 $28\sim 32^{\circ}\text{C}$,大气上冷下暖,形成不稳定层结,极有利于强对流天气的产生。龙卷(浅蓝色圆点处)发生在高空冷涡的东南象限、

200~500 hPa 急流北侧、850 hPa 低空急流左侧的对流不稳定区域中(图 3a)。对应地面图上,2012 年 6 月 12 日 14:00,地面为一低压倒槽,龙卷(浅蓝色圆点处)发生在倒槽顶部暖式切变线北侧、露点温度大值区西侧;龙卷发生时伴有雷阵雨天气,白城站温度露点差由 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 迅速下降至 2°C ,地面空气基本呈饱和状态,这种低层暖湿的环境场极有利于龙卷天气的发生(图 3b)。

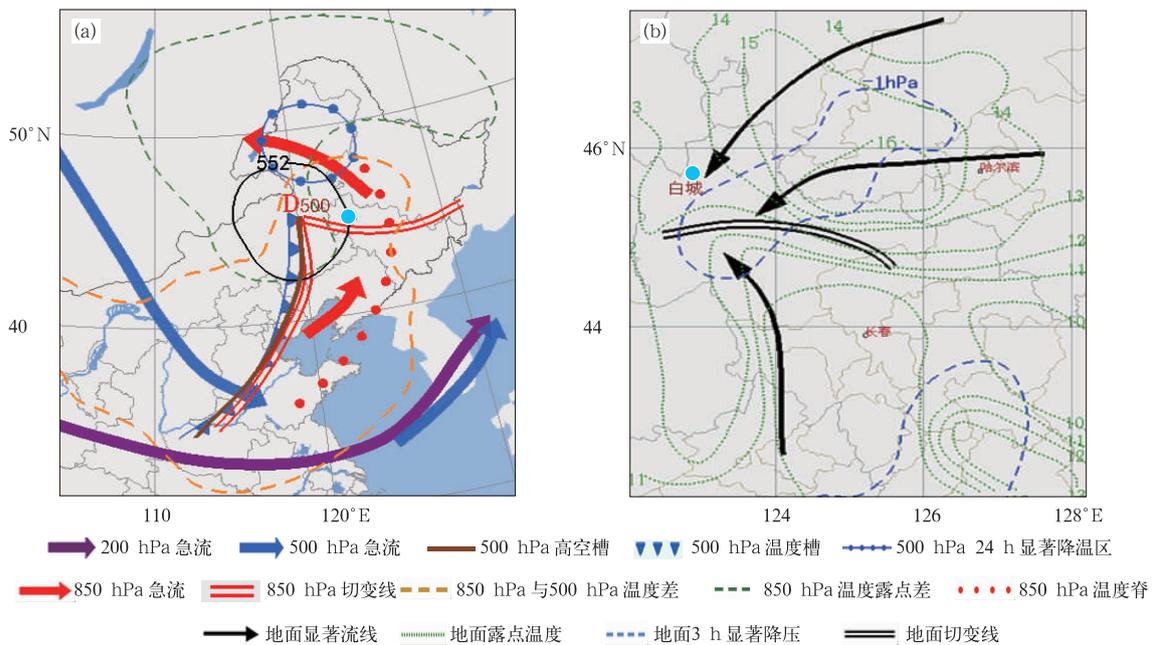


图 3 2012 年 6 月 12 日综合分析图

(a)6 月 12 日 08:00 高空图,(b)6 月 12 日 14:00 地面图

Fig. 3 Comprehensive analysis graphs on 12 June 2012

(a)high graph at 0800 BT 12 June 2012,(b)surface graph at 1400 BT 12 June 2012

3 龙卷过程大气对流参数特征

选取离龙卷发生地较近的上游探空站(索伦站)作为代表站,计算大气对流有效位能、垂直风切变和抬升凝结高度,分析龙卷发生前的大气状况。2012 年 6 月 12 日 08:00 索伦站 K 指数为 30°C 。“612”龙卷发生前 1 天,由于已经出现雷雨、短时大风和冰雹等强对流天气而导致能量释放,所以索伦站对流有效位能较小,为 $374\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。“612”龙卷发生前,索伦站 $0\sim 6\text{ km}$ 和 $0\sim 1\text{ km}$ 的垂直风切变分别为 $1.3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 和 $6.0\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$,即此次龙卷过程 $0\sim 1\text{ km}$ 垂直风切变比较强。Thompson 等^[21]分析了龙卷多种对流参数的统计值,认为 $0\sim 1\text{ km}$ 垂直风

切变对判断龙卷更为有效,当 $0\sim 1\text{ km}$ 垂直风切变平均值为 $9.5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 、下限为 $5.5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 时更有利于 F2 级以上龙卷的产生。“612”龙卷发生时,低层的垂直风切变已达到国外统计出现强龙卷的下限。另外,此次龙卷的抬升凝结高度为 926 m ,小于 1000 m ,即龙卷产生于较大的对流有效位能、较强的低层垂直风切变和较低的抬升凝结高度环境之中^[1]。

4 雷达回波特征

4.1 回波强度演变特征

由图 4 可知,2012 年 6 月 12 日下午在白城南开始出现的絮状回波,并缓慢向北移动,期间有一些

分散的对流单体不断合并,15:45在白城西部30 km处形成一条近似南北方向的强回波带(图4a),回波带长约60 km,宽约10 km,有多个强对流单体纵向排列,中心强度约为53 dBZ,同时白城东南方向16 km处有一近似团状的强回波,中心强度约为51 dBZ,不断移向白城站,并与西部的带状回波逐渐靠近;16:16两个对流系统合并形成强回波带(图

4b),强回波带在北移过程中缓慢转为东西向,并且逐渐演变成“S”型,说明风暴内气旋性旋转特别强,中心强度增至54 dBZ,在强回波带后方开始出现“V”型缺口;16:27回波带对流组织化进一步加强(图4c),中心强度加强至61 dBZ,其后面的“V”型缺口也有所北抬,此时白城市观测到龙卷;16:42强回波带继续北移,强度有所减弱(图4d)。

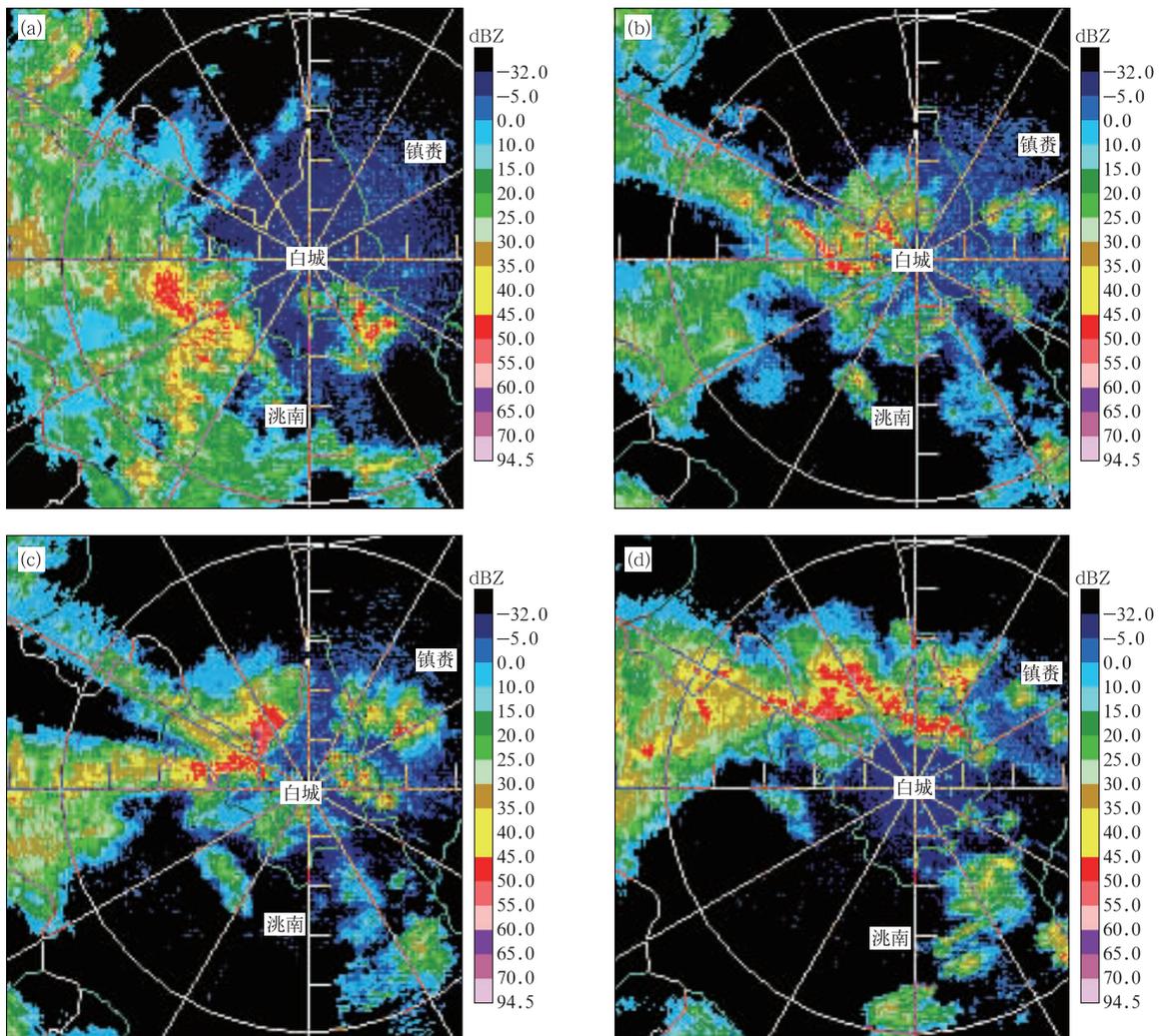


图4 2012年6月12日白城站雷达1.5°仰角回波强度

(a)15:45, (b)16:16, (c)16:27, (d)16:42

Fig. 4 Reflectivity of Baicheng radar of 1.5° on 12 June 2012

(a)1545 BT, (b)1616 BT, (c)1627 BT, (d)1642 BT

由此可知,“612”龙卷产生于一条带状回波与一近似团状回波合并加强后的强回波带中,并逐渐演变成“S”型,最大回波强度达61 dBZ。

过强回波中心做垂直剖面可知,此次龙卷天气

强回波高度较低,超过45 dBZ的强核高度均位于6 km高度以下,超过50 dBZ的强核高度均低于4 km,属于低质心的对流系统,与冰雹天气强回波高度有明显不同(图5)。

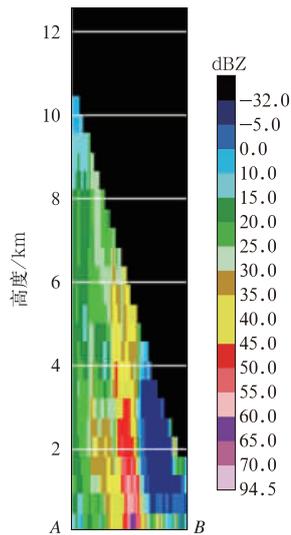


图 5 2012 年 6 月 12 日 16:27 过强回波中心的垂直剖面
(A:方位角为 310.4°,距白城站 29.0 km;
B:方位角为 23.9°,距白城站 4.4 km)

Fig. 5 The vertical profile along the strong echo center at 1627 BT 12 June 2012

(A: position of 310.4°, 29.0 km away from Baicheng Station;
B: position of 23.9°, 4.4 km away from Baicheng Station)

4.2 雷达导出产品综合分析

在多普勒天气雷达导出产品中,中气旋识别、龙卷涡旋特征、风暴内部结构等是龙卷形成的重要标志。尤其是中气旋识别对龙卷预警有重要的应用价值。1978 年 Brown 等^[19]在研究强风暴的雷达资料中,发现了一个可能伴随龙卷过程的比中气旋尺度更小的多普勒天气雷达速度场涡旋特征,它们被称为龙卷涡旋特征(tornadic vortex signature,简称 TVS)。龙卷涡旋特征表现为径向速度图上沿方位角方向两个相邻像素之间的强烈速度切变,其尺度通常在 2 km 以下。

分析此次龙卷发生时的雷达导出产品可知,“612”龙卷发生时,雷达始终未识别出中气旋,但 15:14 开始在白城西南约 20 km 处识别出一个龙卷涡旋特征(R6)(图 6a),并不断向北移动,共持续了 6 个体扫(图 6b),15:55 对应径向速度图上的同一地点可探测到正负速度对,最大正速度和最小负速度分别为 $15.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-22.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,正负速度对相距约 2 km,经计算^[22]可得垂直涡度为 $3.83 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

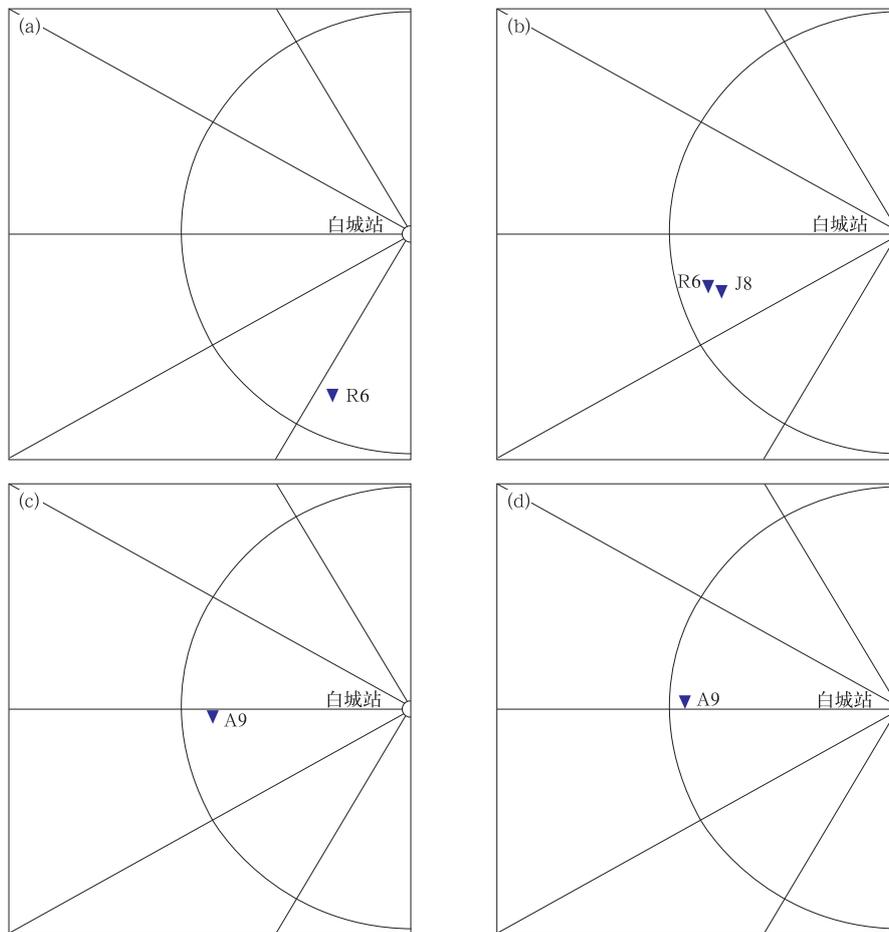


图 6 2012 年 6 月 12 日龙卷涡旋特征 (a)15:14,(b)15:45,(c)16:01,(d)16:06

Fig. 6 Tornadic vortex signature on 12 June 2012 (a)1514 BT, (b)1545 BT, (c)1601 BT, (d)1606 BT

16:01在白城站西侧20 km处又识别出新的龙卷涡旋特征(A9)(图6c),维持两个体扫(图6d),对应径向速度图上16:16探测到最大正速度和最小负速度分别为 $15.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $-21.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相距约2 km,垂直涡度达到 $3.65\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。先后观测到较强的龙卷涡旋特征较龙卷发生时间提前约25 min和4 min,对预警有一定指示作用,但其位置较龙卷发生地点略偏西偏南。由此可见,“6.12”龙卷天气是发生在以龙卷涡旋特征为主的尺度较小且垂直涡度较大的强对流风暴中,强度较强,持续时间较短。

5 结论与讨论

1) “612”龙卷发生时表现为风速突增,气温陡降,同时气压先降后升,漏斗状结构特征明显并伴有对流性降水,龙卷过后,气压陡升,类似于飏线过境。

2) 龙卷发生是天气尺度、中尺度和小尺度对流风暴系统间相互作用的结果。高、低空急流的最佳配置、上冷下暖的位势不稳定层结及较强的垂直风切变为龙卷发生提供了有利的环境条件,地面气旋性辐合的加强及切变线的形成也是诱发龙卷的重要因素。

3) 在有涡源存在的环境中,雷达回波的不断合并发展加强、“S”型结构的演变及“V”型缺口特征的同时出现增加了龙卷发生的可能性。利用多普勒天气雷达导出产品并结合径向速度图,在龙卷发生前几分钟至几十分钟,可提前探测到龙卷涡旋特征,有利于龙卷预警。

与其他强对流天气相比,龙卷发生属于小概率事件。本文主要从观测角度分析“612”龙卷特征,即龙卷发生时,抬升凝结高度较低(为926 m),0~1 km垂直风切变较强(为 $6.0\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$),低层垂直风切变已达到国外统计出现强龙卷的下限,回波强度较强(达61 dBZ)且垂直涡度较大(约为 $3.65\times 10^{-2}\sim 3.83\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$)。今后还要从龙卷形成的机理、结论的普遍适用性及预报因子阈值的确定等方面进行深入探讨。

参考文献

- [1] 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等.安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析.高原气象,2006,25(5):914-924.
- [2] 郑媛媛,朱红芳,方翔,等.强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究.高原气象,2009,28(3):617-625.
- [3] 姚叶青,俞小鼎,郝莹,等.两次强龙卷过程的环境背景场和多普勒雷达资料的对比分析.热带气象学报,2007,23(5):483-490.
- [4] 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.应用气象学报,2006,17(3):370-375.
- [5] 蒋义芳,吴海英,沈树勤,等.0808号台风凤凰前部龙卷的环境场和雷达回波分析.气象,2009,35(4):68-75.
- [6] 张晰莹,吴英,王承伟,等.东北地区MCC雷达回波特征分析.气象,2010,36(8):32-39.
- [7] 金巍,曲岩,安来友,等.超级单体引发的龙卷天气过程分析.气象,2009,35(3):36-43.
- [8] 纪文君,刘正奇,郭湘平,等.龙卷风生成机制的探讨.海洋预报,2003,20(1):14-19.
- [9] 吴海英,沈树勤,蒋义芳,等.龙卷诱发原因的实例分析.气象科学,2009,29(3):335-341.
- [10] 漆梁波,陈永林.一次长江三角洲飏线的综合分析.应用气象学报,2002,15(2):162-163.
- [11] 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.应用气象学报,2003,14(6):656-662.
- [12] 朱君鉴,刁秀广,黄秀韶.一次冰雹风暴的CINRAD/SA产品分析.应用气象学报,2004,15(5):579-589.
- [13] 张一平,俞小鼎,吴秦,等.区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析.气象学报,2012,70(5):961-973.
- [14] 李耀东,刘健文,高守亭.对流量计算及强对流天气落区预报技术研究.应用气象学报,2004,15(1):10-20.
- [15] 姚建群,戴建华,姚祖庆,等.一次强飏线的成因及维持和加强机制分析.应用气象学报,2005,16(6):746-753.
- [16] 刘宁微,马雁军,刘晓梅,等.辽宁省05-6龙卷风过程的诊断与数值模拟.自然灾害学报,2007,16(5):84-90.
- [17] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用.北京:气象出版社,2006:130-145.
- [18] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学.北京:气象出版社,2001:396-397.
- [19] Brown R A, Lemon L R, Burgess D W. Tornado detection by pulsed Doppler radar. *Mon Wea Rev*, 1978, 106: 29-38.
- [20] Doswell C A. Severe convective storms: An overview. *Meteor Monogr*, 2001, 50: 1-26.
- [21] Thompson R L, Edwards R, Hart J A. An Assessment of Supercell and Tornado Forecast Parameters with RUC-2 Model Close Proximity Sounding // Preprints 21st Conf on Severe Local Storm. San Antonio: Amer Meteor Soc, 2002: 595-598.
- [22] 章国材.强对流天气分析与预报.北京:气象出版社,2011:245-246.
- [1] 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等.安徽一次强烈龙卷的多普勒天气

Observation of a Tornado in the Circulation Background of Northeast Cold Vortex

Wang Ning¹⁾ Wang Tingting¹⁾ Zhang Shuo¹⁾ Mu Xiuxiang¹⁾ Yang Xiufeng²⁾

¹⁾ (*Jilin Provincial Meteorological Observatory, Changchun 130062*)

²⁾ (*Changchun Meteorological Bureau of Jilin Province, Changchun 130051*)

Abstract

The synoptic situation and Doppler radar data of the tornado process of Taobei District of Baicheng city in Jilin Province on 12 June 2012 (referred as “612” tornado) are analyzed, results are as follows. The tornado process occurs in the southeast quadrant of the upper cold vortex, and in the convective unstable region of the north of the upper-level jet and the left of the low-level jet, also, in a relatively warm and humid environment of the surface systems. The calculation of atmospheric convective parameters shows that strong vertical wind shear (no less than $6.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) occurs at low layer (0–1 km) and relatively low lifting condensation level (no more than 1 km) exists in the tornado process, and the convective available potential energy is large before the tornado occurs. As for the radar echo characteristics, the height of the strong core (no less than 50 dBZ) is below 4 km in the tornado event, making it a low centroid convective system. The tornado occurs in the strong echo zones where a banded echo with an approximate nodular echo join together, and it gradually evolves into an “S” type with “V” type gap, and the echo of the strongest center value reaches 61 dBZ. Using the Doppler radar derived products and the radial velocity map, tornado vortex signature (TVS) could be detected, indicating that “612” tornado occurs in strong convective storm with smaller-scale TVS and larger vertical vorticity (about $3.65 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1} - 3.83 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$), having short duration. TVS could be identified in advance before the tornado, so it is very useful for estimation and prediction of tornados.

Key words: tornado; atmospheric convective parameter; Doppler weather radar; tornado vortex signature(TVS)