

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.

## 2009 年 7 月 20 日承德龙卷多普勒天气雷达特征<sup>\*1</sup>

赵瑞金<sup>1,2,3</sup> 郝雪明<sup>2</sup> 杨向东<sup>4</sup> 杨雷斌<sup>4</sup>

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 河北省气象台, 石家庄 050021

3 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021

4 河北省承德市气象局, 承德 067000

**提 要:** 为了研究 2009 年 7 月 20 日发生在河北省承德市龙卷过程的多普勒天气雷达特征, 利用承德 CINRAD/CB 多普勒天气雷达结合天气图、风廓线雷达、自动气象站等实况观测资料, 对该次龙卷过程进行了详细的分析。结果表明: 龙卷出现前低层大气相对暖湿, 受高空冷涡影响, 在对流层中层有较强的干冷空气下传, 中高层有较强的垂直风切变。龙卷风出现过程中, 在多普勒天气雷达径向速度产品上自低层到 6.8 km 都存在强烈的气旋性涡旋, 风暴单体顶高、最大反射率因子高度、风暴质心高度等位置较高。垂直积分液态含水量产品显示在龙卷风出现前 VIL 数值产生了跃增, 但  $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上维持时间短。定位分析表明, 受风暴运动和结构影响, 雷达龙卷涡旋特征位置位于实际龙卷风的东南侧。

**关键词:** 龙卷风, 多普勒天气雷达, 中气旋

## Analysis on the Doppler Weather Radar Characteristics of the 20 July 2009 Tornado in Chengde

ZHAO Ruijin<sup>1,2,3</sup> HAO Xueming<sup>2</sup> YANG Xiangdong<sup>4</sup> YANG Leibin<sup>4</sup>

1 State Key Laboratory of Severe Weather, CAMS, Beijing 100081

2 Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021

3 Hebei Provincial Meteorological and Eco-Environmental Key Laboratory, Shijiazhuang 050021

4 Chengde Meteorological Office of Hebei Province, Chengde 067000

**Abstract:** In order to study the Doppler weather radar characteristics of the 20 July 2009 tornado in Chengde, the CINRAD/CB, weather charts, wind profile radar, and automatic weather station observation data are analyzed synthetically. The results show as follows: Before the tornado, the low-level air is wet and warm. Affected by the upper cold vortex, the strong cold air at the middle troposphere descends, and there are strong vertical shears in the upper-middle troposphere. There are strong cyclonic vortices from low level to 6.8 km at Doppler weather radar radial velocity products when tornado appears. The top height of the cell, maximum reflectivity, and echo centroid are higher also. VIL value abruptly increases before the tornado appears, but the sustaining time above  $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  is short. Orientation analysis shows that affected by movement and storm structure, the tornadic vortex signature is at the southeast of real tornadic position.

**Key words:** tornado, Doppler weather radar, mesocyclone

\* 本文由中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题 2010LASW-A10 和公益性行业(气象)科研专项 GYHY200706042 资助  
2009 年 10 月 16 日收稿; 2010 年 4 月 20 日收修定稿  
第一作者: 赵瑞金, 主要从事天气雷达应用研究. Email: zhaoruijin@sina.com

## 引 言

龙卷是对流云产生的破坏力极大的小尺度灾害性天气,是一个平均直径为 100 m 左右从积雨云内部扩展到地面的猛烈旋转的空气柱,其视觉特征是一个从云底悬挂下来的漏斗云和/或地面旋转的尘云。其产生的最大地面风速可达  $125 \sim 140 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,可造成重大的人员伤亡和财产损失。

魏文秀等<sup>[1]</sup>对我国龙卷风发生的时空分布特征进行了统计分析,指出龙卷风多出现在我国东南部的平原地区。曹治强等<sup>[2-3]</sup>利用卫星云图等资料对龙卷风天气系统的活动与演变进行了分析。多普勒天气雷达是对龙卷进行探测和预警的最有力的工具,与传统天气雷达相比,多普勒天气雷达除了可以测量降水的回波强度外,还可以测量降水粒子沿着雷达径向的速度,从而可以识别出中小尺度的涡旋、辐合和辐散特征。俞小鼎等<sup>[4-7]</sup>利用新一代天气雷达资料对 2003 年 7 月 8 日、2005 年 7 月 30 日发生在安徽无为和灵璧的两次龙卷过程进行了分析,刘娟等<sup>[8]</sup>对 2007 年 7 月 3 日发生在安徽天长和江苏高邮的龙卷风天气的多普勒天气雷达特征进行了分析。何彩芬等<sup>[9]</sup>对 2004 年 8 月 25 日发生在宁波的一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达特征进行了分析。

对于北方山区龙卷风的研究目前还很少,赵亚

民等<sup>[10]</sup>曾使用每小时卫星云图、地面天气图、高山观测记录和重要天气通报等资料,对 1987 年 8 月 26 日下午发生在河北南部和山东的龙卷风群作了简要分析。本文利用承德 CINRAD/CB 新一代天气雷达数据对 2009 年 7 月 20 日发生在承德平泉县的龙卷风过程进行了分析,为龙卷风的预报提供科学依据。

## 1 龙卷风实况

2009 年 7 月 20 日 14 时至 14 时 35 分左右(文中时间均采用北京时)在河北省承德市平泉县的黄土梁子镇出现龙卷,现场目击者很多,并拍下了视频和照片,如图 1 所示。承德地处燕山山脉,龙卷风比较少见,中央电视台等多家新闻媒体对此进行了报道。据目击者叙述,该次龙卷过程 13 时 59 分左右开始在铁匠沟出现,龙卷风从北向南快速移动。14 时 20 分左右,该镇北洼子自然村遭受龙卷风袭击,龙卷风横扫之处树木被连根拔起,房屋倒塌,电话线、电线及闭路电视线均被刮断。据初步统计,造成该村一人受伤,损坏 54 间房屋,玉米地受灾面积至少达到  $36.7 \text{ hm}^2$ ,其中至少  $18.7 \text{ hm}^2$  绝收。根据 Fujita<sup>[11]</sup>提出的龙卷分级标准,按照房屋倒塌和损坏情况及目击者关于漏斗云的描述,此次龙卷的强度大致为 F1 级。区域观测站资料显示,龙卷风出现时黄土梁子镇没有降雨。



图 1 2009 年 7 月 20 日 14 时现场目击者拍摄的龙卷风(a)和龙卷风过后的灾情实况(b)

Fig. 1 The tornado photo shot by witness (a) at 14:00 BT July 20, 2009 and the disastrous situation after the tornado (b)

## 2 天气形势及观测实况资料分析

### 2.1 天气形势分析

在 2009 年 7 月 20 日 08 时地面图上,河北省处

于低压带里,低压中心位于我国东北地区( $45^{\circ} \text{N}$ 、 $122.5^{\circ} \text{E}$ ),中心气压为 996 hPa,到 14 时位置略有东移。08 时在贝加尔湖东南部有冷空气南下,冷空气中心 08 时在  $49^{\circ} \text{N}$ 、 $112^{\circ} \text{E}$ ,14 时移动到  $45^{\circ} \text{N}$ 、 $115^{\circ} \text{E}$ ,移动速度较快,到 14 时,冷空气已经影响张

家口和承德地区。平泉县处于锋前暖区的辐合线上。

在 500 hPa 高空图上,20 日 08 时,从河套向北到贝加尔湖地区为高压脊控制,我国东北地区有一冷涡。承德、唐山、秦皇岛一带主要受冷涡底部的浅槽影响。同时在河套南部存在短波槽,且该处温度槽落后于高度槽,850 hPa 有一暖舌伸到承德、唐山和秦皇岛附近。

通过对 08 时物理量分析,可以看出承德、唐山、秦皇岛一带处于北下沉与南部上升运动的交合处,且低层 700 hPa 为辐合,高层 500 hPa 为辐散,说明中高层有干冷空气侵入。在水汽通量散度上,08 时 700 hPa 承德、唐山、秦皇岛一带有水汽辐合。

承德、唐山、秦皇岛一带的  $K$  指数由 08 时的 24  $^{\circ}\text{C}$  上升到 20 时的 33  $^{\circ}\text{C}$  以上, $SI$  指数由 4~6  $^{\circ}\text{C}$  下降到 20 时的 0~2  $^{\circ}\text{C}$  之间。这种演变也说明了该地区的大气稳定度由稳定逐渐变为不稳定。

7 月 20 日 08 时高低空综合分析显示,平泉县位于 200 hPa 急流轴入口区右侧,500 hPa 的 20  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  偏西气流的急流轴出口区左侧,同时 700 hPa 的西南风和 850 hPa 的西北风均有  $\geq 10 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  大风区。19 日 20 时至 20 日 20 时 500 hPa 天气图上 584 dagpm 特征线是一个明显南撤的过程,该过程伴随着明显的动量下传,且高层干冷、低层暖湿的大尺度背景为龙卷的产生提供了必要的动力条件。

## 2.2 风廓线雷达和探空资料分析

图 2 为 20 日 12—15 时距离承德最近的唐山风廓线雷达观测到的垂直风场变化情况,可以看出,从地面至 4 km 左右偏北风随高度转变为偏西风,风向随高度逆转,为冷平流,风速随高度增加。4 km 以上风向随高度顺转,为暖平流,其中 4~7 km 左右风速较低,在 7 km 左右有偏西风与偏东风或偏南风的切变,在 7~8 km 转成以偏南风为主,其中 13:12、13:53、14:19、14:50、14:55 为偏北风,风速随高度增大。因此,在龙卷风出现前后,在 4 km 以上的中高层存在暖平流和较强的垂直风切变。

根据距离承德最近的北京探空站资料,20 日 08 时低层地面至 700 hPa 之间的  $T-T_d$  都在 0~4  $^{\circ}\text{C}$  之间,较为湿润。 $K$  指数为 35  $^{\circ}\text{C}$ , $SI$  为 0.16  $^{\circ}\text{C}$ , $CAPE$  为 157  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,从探空和风廓线资料

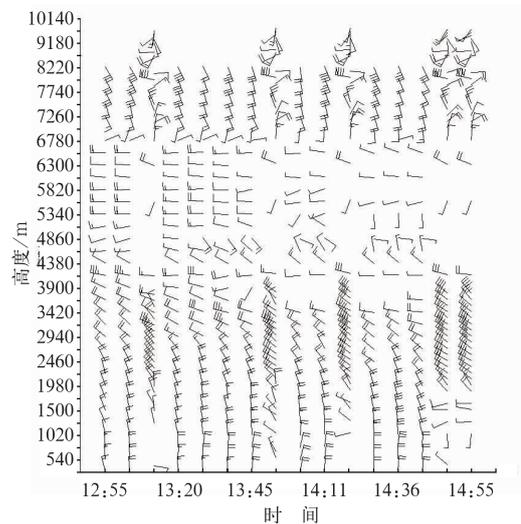


图 2 2009 年 7 月 20 日 12—15 时唐山风廓线雷达资料

Fig. 2 The wind profile radar data at Tangshan from 12:00 BT to 15:00 BT July 20, 2009

来看,主要是低层相对暖湿的大气和高层较强的垂直风切变为龙卷风的发生提供了热力和动力条件。

## 2.3 地面自动站资料分析

图 3a 是 2009 年 7 月 20 日 14:00 承德及周边地区的地面加密观测图,小圆圈所在位置为龙卷发生地,可以看出,龙卷风发生地处在西北风和西南风之间的一条气旋性切变线附近。图 3b 至图 3f 是在龙卷发生地 10 km 范围以内布设的 5 个 2 要素自动站观测的温度变化情况,从图中可以看出在 13:00—15:00 温度总体呈上升趋势,但 14:00 左右有明显下降,最大降温出现在柳溪,幅度为 2.1  $^{\circ}\text{C}$ 。另外,除柳溪自动站在 14:12 有 0.1 mm 降水,其他 4 个自动站均未出现降水。图 3g 至图 3i 是距离龙卷风发生地西南方向约 25 km 左右的平泉县 7 要素自动气象站 13:00—15:00 的观测实况,该站没有遭受龙卷袭击。从图 3g 和图 3h 分别可以看出在 14:10 左右有西南风向偏西北风的转变,气压下降。从图 3i 可以看出,除干球温度在 14:00 以后随时间呈上升趋势外,水汽压、相对湿度、露点温度在 14:00 达到最大,而后略有下降。

## 3 多普勒天气雷达资料分析

### 3.1 回波的移动和演变特征

新一代天气雷达承德 CINRAD/CB 详细探测

了这次过程。图 4 是风暴单体生消和移动路径图。本次观测采用了 VCP21 模式,体扫间隔时间为 6 分钟,图中点出了每两个体扫间隔单体的位置,产品是

组合反射率(CR)。可以看出,从 12:48 在内蒙古喀喇沁旗与平泉交界处有一非常小的孤立的回波单体 1 生成,13:06 中心强度单体 1 迅速达到 60 dBz,回

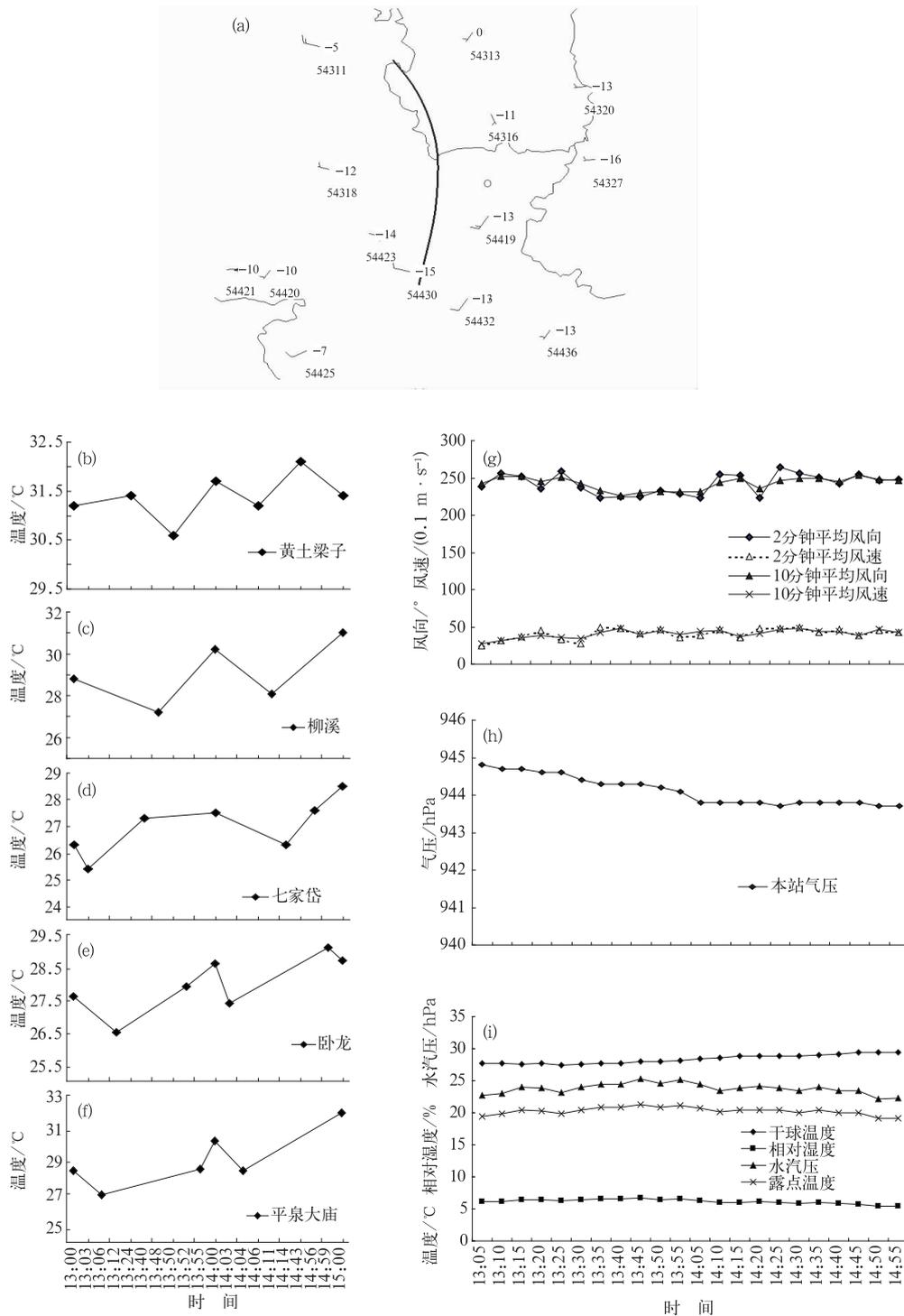


图 3 2009 年 7 月 20 日 14:00 左右龙卷风发生地附近地面自动站观测实况

Fig. 3 The surface automatic weather station data at 14:00 BT or so,

July 20, 2009 near the place where tornado happened

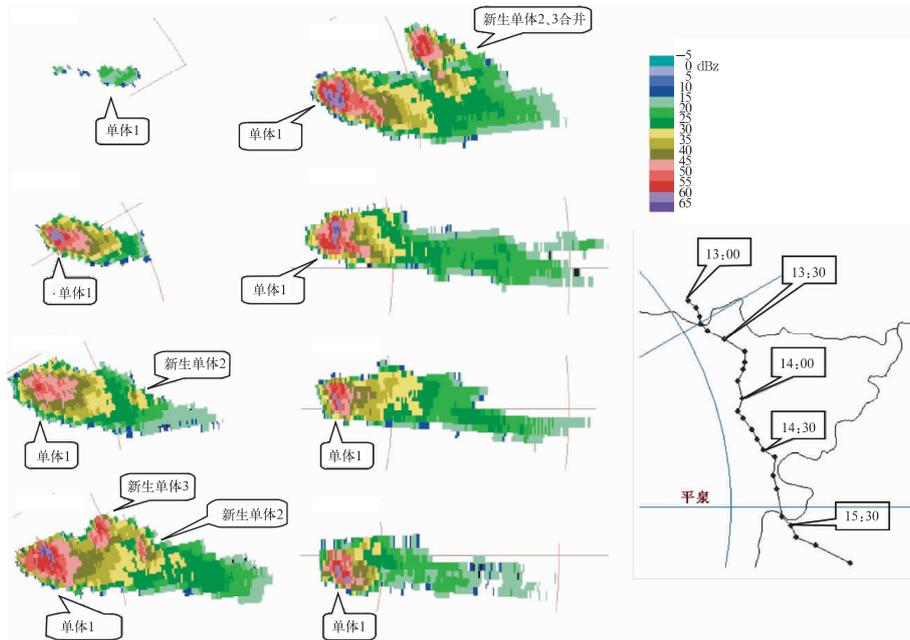


图 4 2009 年 7 月 20 日回波的移动路径及演变

(右下角为根据多普勒雷达风暴追踪信息产品(STI)绘制的回波的移动路径,每个黑点间隔为 6 分钟)

Fig. 4 The movement track and evolvement of the echo on July 20, 2009

The map at the right bottom is the storm tracking information (STI), and the interval between every two dots is 6 min.

波呈椭圆形,在强中心下方具有羽毛状伸展的回波。该单体自西北向东南方向迅速移动,在 13:36 有新的单体 2 产生,13:54 单体 1 的强中心达到 60 dBz 以上,呈肾形,回波羽向东伸展到 70 km 以上,并有新的单体 3 产生。14:06 单体 2 和单体 3 合并。14:36 单体 1 与单体 2 和单体 3 彻底分离。14:48 以后开始减弱,15:06 之后移出平泉,至 15:30 基本消散。回波在整个演变过程中,移动速度平均约为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,呈现演变迅速、移动快的特点。通过对 20 日 12—15 时唐山风廓线雷达观测资料分析,如果用 500 hPa 层上的平均风来代表风暴承载层平均风,此时风暴承载层平均风向约为  $300^\circ$  左右,风暴成熟阶段移动方向为  $330^\circ$ ,偏向风暴承载平均风右侧约  $30^\circ$ ,因此,该单体风暴为右移风暴。

### 3.2 风暴参数及属性分析

CINRAD/SA 雷达产品能提供丰富的风暴信息,如风暴位置(经纬度)、底部和顶部高度、强中心强度和高度、垂直积分液态含水量(VIL)等。

#### 3.2.1 单体高度及强度变化

图 5 是单体 1 的顶和底高(TOP-BASE)、最大

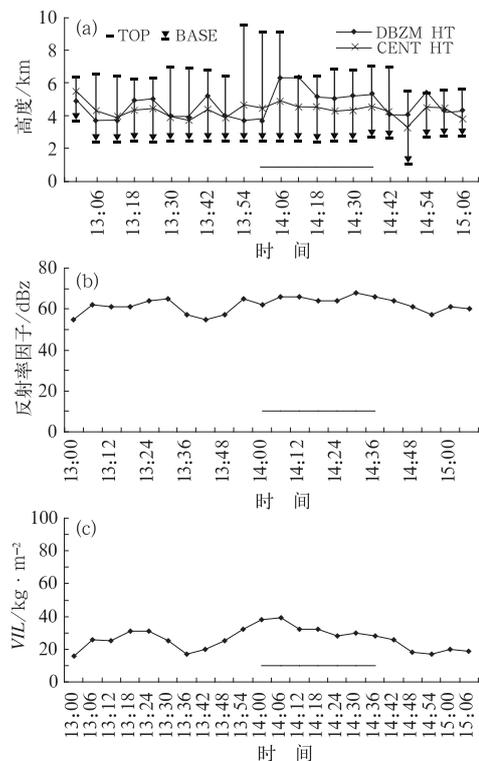


图 5 2009 年 7 月 20 日风暴参数的演变情况

Fig. 5 The evolvement of parameters of the storm on July 20, 2009

反射率因子高度 (DBZM HGT)、单体质心高度 (CENT HT)、垂直积分液态含水量 (VIL)、最大反射率因子的演变情况,其中顶高和底高是指 30 dBz 的高度。图中横线为目击者观测到龙卷风的时段。从图 5a 可以看出,风暴生成于 4~6 km 的高度,13:54 发展到最高,13:54—14:06 顶高维持在 10 km 以上高度,14:06 以后回波顶高下降。最大反射率因子高度也在 14:06 达到最大。单体的质心高度始终维持在 3~6 km。强中心高度维持在较高的高度。减弱消散期顶高降低,强度逐渐减弱。

从图 5b 可以看出,最大反射率因子在风暴的演变过程中始终维持在 50 dBz 以上,在 13:54—14:48 强度始终在 60 dBz 以上。

### 3.2.2 垂直积分液态含水量变化

图 5c 给出了基于格点的承德龙卷风过程中 VIL 随风暴演变而变化的情况。由图可以看出,在

整个龙卷风演变过程中,VIL 值始终在 30~40  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  之间,从 13:36 开始从 20  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  开始跃增,到 14:06,达到最大值,即 40  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。演变过程中 VIL 的数值相对较低,在 40  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上也仅维持了 1 个体扫,时间很短,说明云体内部含水量较低。地面观测实况也没有出现冰雹或降水。

### 3.3 反射率因子和径向速度产品特征分析

图 6 为 14:06:01 不同仰角的反射率因子产品、速度产品和强回波中心的放大图。图中所示高度为龙卷涡旋特征在不同仰角产品上对应位置高度。在图 6a 反射率因子产品上入流缺口不十分明显。在图 6b 0.5°和 1.5°速度产品上可以看出在右前侧气流是气旋式向后延伸,形成了一个涡旋结构。在回波中心的放大(图 6c)上可以看出,自低层到 6.8 km 都存在强烈的气旋性涡旋,9 km 以上为辐散。

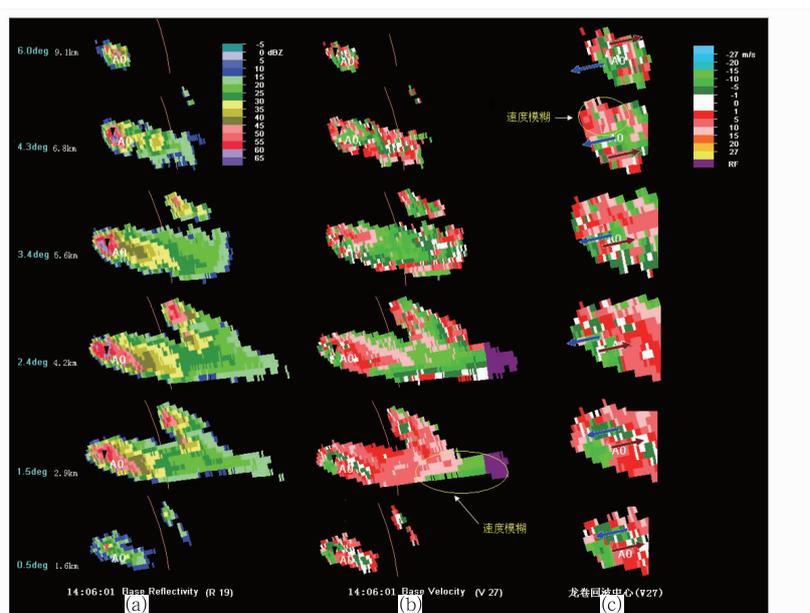


图 6 2009 年 7 月 20 日 14:06:01 不同仰角的反射率因子产品(a)、速度产品(b)、和回波中心的放大图(c)

Fig. 6 The reflectivity (a), radial velocity (b), and amplified maps echo center (c) at 14:06:01 BT 20 July 2009

图 7a 和图 7b 分别是沿径向和垂直于径向方向的反射率因子垂直剖面,可以看出,强中心高度为 4.5 km,强度达到了 65 dBz 以上,并且 50 dBz 反射率因子区主要在 3 km 以上。从剖面还可以看出,

中高层回波悬垂以及有界弱回波区并不明显。在龙卷出现时,由于回波强度很强,在剖面上还出现了旁瓣回波,如图 7b 所示。

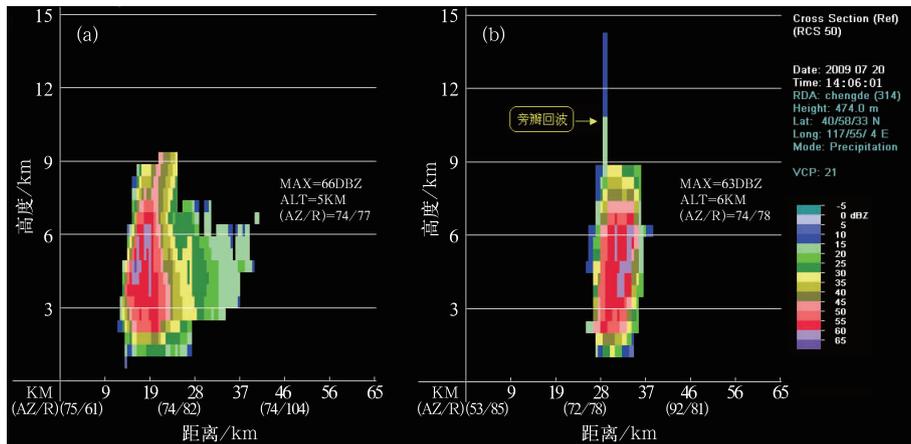


图 7 2009 年 7 月 20 日 14:06:01 沿雷达径向(a)和垂直于雷达径向(b)的反射率因子剖面产品

Fig. 7 The reflectivity cross sections along radial (a) and perpendicular (b) directions at 14:06:01 BT 20 July, 2009

#### 4 龙卷风移动路径、多普勒天气雷达风暴追踪信息、径向速度、中气旋和龙卷涡旋特征产品叠加分析

图 8 为根据实地调查,利用 GPS 定位绘制的龙卷风实际移动路径、13:48 至 14:54 多普勒天气雷达风暴追踪信息、龙卷涡旋特征产品、中气旋产品和 14:06 径向速度产品的组合图。从图中可见,这次龙卷风首先在铁匠沟(41°13'21"N、118°42'45"E)出现,然后向三家北沟(41°13'4"N、118°43'59"E)方向移动,再转向北洼村(41°12'41"N、118°44'6"E),然后继续向南移动,并逐渐减弱,其中北洼受灾最为严重。通过与 14:06 径向速度图叠加,可以看出实际龙卷出现的位置处于回波的后部。

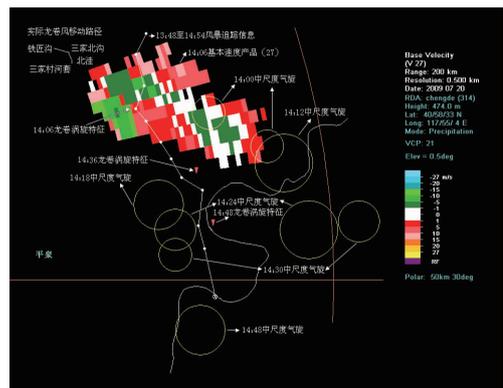


图 8 2009 年 7 月 20 日龙卷风移动路径、多普勒雷达风暴追踪信息、径向速度、中气旋和龙卷涡旋特征产品的组合图

Fig. 8 The combination map of tornado track, storm tracking information, radial velocity, mesocyclone and tornadic vortex signature concerning the 20 July 2009 tornado

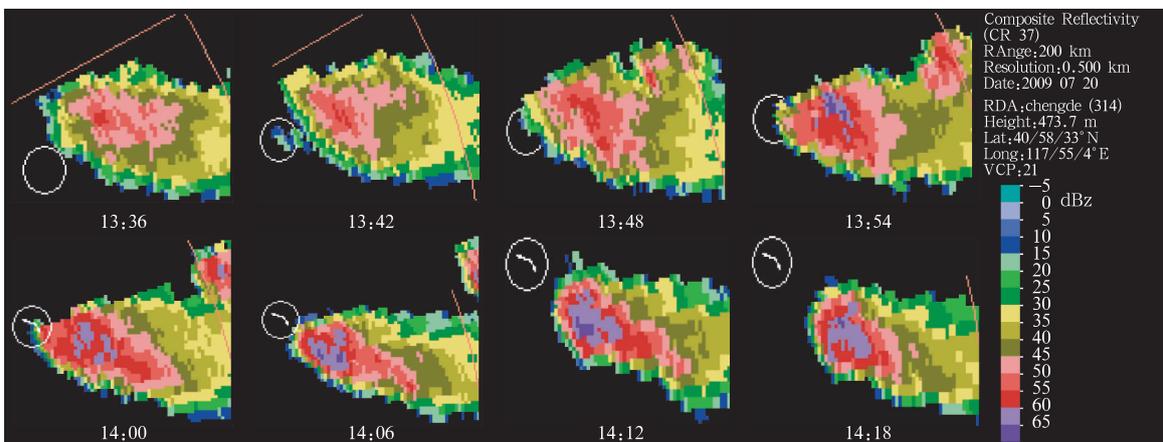


图 9 2009 年 7 月 20 日龙卷风出现地回波演变情况

Fig. 9 The echo evolvement at the place where the tornado appears

从风暴追踪信息产品看 14:00 风暴向西南方向移动,14:06 转向东南。此时该风暴单体的反射率因子垂直剖面如图 7 所示,根据 14:06 雷达观测的龙卷涡旋特征位置和此时龙卷所在的北洼自然村的实际地理位置,可以计算出龙卷涡旋特征分别位于实际龙卷位置东南方向约 9.6 km 左右。

在 14:06 至 14:36 回波向东南移动过程中,龙卷虽然也随回波向偏南方向移动,但始终处在对流云的后部。中气旋产品、龙卷涡旋特征位置都处在实际龙卷位置的东南方向。

图 9 为在龙卷风出现地回波的演变情况。图中小圆圈为龙卷风出现的区域。14:00 以后圆圈内细线为龙卷风自西北向东南的移动轨迹。可以看出,龙卷风出现地在 13:36 处于回波中心的西南侧,随着回波向东南移动,14:00 龙卷风出现地位于强回波中心的西侧,此时开始出现龙卷。14:06 以后,龙卷风出现地位于回波强中心的西北方向,并且龙卷风所在地与回波强中心的距离逐步增大。此外,龙卷风出现地始终处于回波外围边缘,回波很弱或无回波。此次龙卷出现时没有出现降水,从现场拍摄的照片和视频图像上,还可以看到蓝天,雷达回波情况与现场目击观测事实是一致的。

图 10 是根据 Lemon 等<sup>[12]</sup>总结的经典超级单体的概念模型,粗实线勾画出低层反射率因子的轮廓线,超级单体由西南向东北移动,低层入流方向位于超级单体的右后侧(相对于风暴移动方向而言)。对应于低层入流,低层反射率因子出现一个入流缺口和钩状回波。FFD和RFD分别代表前侧和后侧

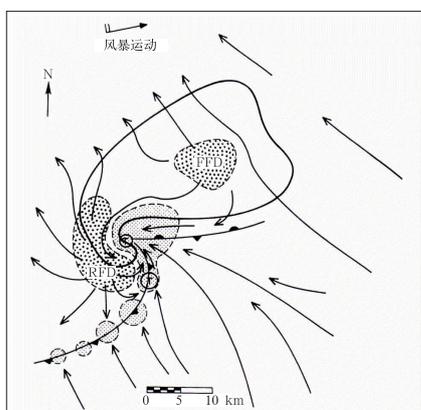


图 10 超级单体风暴概念模型图

Fig. 10 Plane schematic diagram of a tornadic supercell storm at the surface

下沉气流。在下沉气流出流与入流之间的边界称为外流边界或阵风锋,通常后侧阵风锋更加明显。龙卷的可能发生位置(T)有两个,一个位于中气旋中心附近,一个位于超级单体后侧阵风锋上。承德平泉龙卷出现地与强回波主体相距近 10 km,可能属于后者,应该是发生在超级单体的后侧阵风锋上,而不是发生在超级单体的中气旋内部。

此外,由于雷达最低仰角为  $0.5^\circ$ ,而此时龙卷涡旋特征所在位置雷达能够测得的最低高度约 1.5 km,因此,低层的龙卷特征无法观测到。从实际龙卷风的观测来看,与一般龙卷风不同,此次龙卷风的漏斗云在向南移动过程中逐渐向东倾斜,形成了一条自东向西延伸近乎水平分布的漏斗,如图 1a 所示,而雷达观测到的是偏东的漏斗云的顶部,这种龙卷风的结构也是造成龙卷风出现地与雷达回波位置出现差异的原因,这种实际位置与雷达观测位置的不一致性也进一步说明了龙卷结构的复杂性。

同时,承德雷达为敏视达 CB 型,测速范围只有  $-14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  到  $+14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,没有使用双 PRF 功能,因此速度模糊出现较多,如图 6 中圆圈所示,导致有关中气旋和 TVS 的自动识别出现错误,造成雷达识别的中气旋和龙卷涡旋特征与龙卷实际位置存在一定偏差。

## 5 结 论

北方山区龙卷风比较少见,此次发生在承德的龙卷风有较准确的时间、地点,具有大量目击者和视频、照片等资料。通过对该次龙卷过程分析,得到以下主要结果:

(1) 龙卷出现前低层大气相对暖湿,受高空冷涡影响,在对流层中层有较强的干冷空气下传,在中高层有较强的垂直风切变。自动站观测表明,龙卷风出现时温度降低、气压下降。

(2) 在速度产品上自低层到 6.8 km 都存在强烈的气旋性涡旋,9 km 以上为辐散。龙卷出现时,中高层强烈的旋转伴随强烈的辐合上升运动,使得风暴发展旺盛,对流深厚,有利于龙卷风的产生。回波的顶高、最大反射率因子高度、风暴质心高度等产品的位置较高。

(3) 垂直积分液态含水量产品显示在龙卷风出

现前 VIL 数值产生了跃增,但整个龙卷演变过程中 VIL 在  $30\sim 40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  以上维持时间短,含水量较低。

(4) 龙卷风移动路径、风暴追踪信息、中气旋和龙卷涡旋特征产品的叠加分析表明雷达观测的龙卷涡旋特征的位置位于龙卷风实际位置的东南侧。

### 参考文献

- [1] 魏文秀,赵亚民. 中国龙卷风的若干特征[J]. 气象,1995,21(5):37-40.
- [2] 曹治强,方宗义,方翔. 2007年7月皖苏北部龙卷风初步分析[J]. 气象,2008,34(7):15-19.
- [3] 徐继业,姚祖庆. 登陆热带气旋引发的龙卷过程之个例分析[J]. 气象,2000,27(7):27-29.
- [4] 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[J]. 高原气象,2006,25(5):914-924.
- [5] 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.
- [6] 姚叶青,俞小鼎,郝莹,等. 两次强龙卷风过程的环境背景场和多普勒雷达资料的对比分析[J]. 热带气象学报,2007,23(5):483-490.
- [7] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 2003年7月8日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析[J]. 气象,2004,30(1):38-40.
- [8] 刘娟,朱君鉴,魏德斌,等. 070703天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征[J]. 气象,2009,35(10):32-39.
- [9] 何彩芬,姚秀苹,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.
- [10] 赵亚民. 华北龙卷风群发生环境条件的分析[J]. 气象,1990,16(5):36-38.
- [11] Fujita T T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales[J]. J Atmos Sci, 1981, 38: 1511-1534.
- [12] Lemon L R, C A Doswell III. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. Mon Wea Rev,1979,107:1184-1197.