

李改琴,许庆娥,吴丽敏,等. 2014. 一次龙卷风天气的特征分析. 气象, 40(5):628-636.

# 一次龙卷风天气的特征分析<sup>\*</sup>

李改琴 许庆娥 吴丽敏 董建设 钟天华

河南省濮阳市气象局, 濮阳 457000

**提 要:** 利用河南濮阳 CINRDA/SB 多普勒雷达探测资料, 结合常规天气图资料、地面加密自动站资料等, 对 2009 年 7 月 16 日发生在河南濮阳的龙卷天气过程进行诊断分析, 结果表明: 这次龙卷天气过程发生在副热带高压边缘西北侧、低空急流左前方的暖切变线附近; 龙卷发生前大气环境具有较大的对流不稳定能量, 低层存在大的风垂直切变和丰富的水汽; 多普勒雷达反射率因子图上表现为移动的弓形回波北段强烈发展形成钩状回波, 龙卷生成于钩状回波弱回波区附近。径向速度图上表现为在大范围入流风场中出现伴有辐合的  $\gamma$  中尺度气旋式涡旋, 涡旋进一步发展加强导致其中央龙卷涡旋的产生, 产生龙卷风天气。另外, 强回波、低回波顶高、低层强垂直风切变都是这次龙卷过程中多普勒雷达产品特征。

**关键词:** 龙卷风, 暖切变线, 钩状回波, 龙卷涡旋特征, 强垂直风切变

**中图分类号:** P445、P458

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.05.014

## Characteristics Analysis of Tornado Weather

LI Gaiqin XU Qinge WU Limin DONG Jianshe ZHONG Tianhua

Puyang Meteorological Office of Henan Province, Puyang 457000

**Abstract:** Using Puyang CINRDA/SB Doppler radar detection data, conventional data, intensive operational data, this paper analyzed a tornado process that occurred in Puyang on 16 July 2009. The diagnostic results show that the tornado occurs in the northwest of subtropical high edge, the left front of low-level jet and near the warm shear line. Before the tornado there are powerful convective instability energy in atmospheric environment, and large wind vertical shear and abundant water vapor in lower levels. In the Doppler radar reflectivity factor chart, the north of mobile bow echo is strongly developed into hooked echo, and the tornado is detected near the weak-echo area. Radial velocity diagram shows there is a meso- $\gamma$  scale cyclonic vortex field with convergence. The strengthened vortex leads to the central tornado vortex, producing the tornado weather. In addition, the strong echo, low echo top high, lower strong vertical wind shear are all the characteristics of Doppler radar products.

**Key words:** tornado, warm shear line, hooked echo, tornado vortex signature, strong vertical wind shear

## 引 言

龙卷风是一种强烈的、小范围的空气涡旋, 是在极不稳定天气条件下由空气强烈对流运动产生的, 龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷(Wilson, 1986, OTB/OSF/NWS, 1996), 它强烈的旋转风给

人民的生命财产和物质财产造成严重的损失, 例如: 2010 年 9 月 4 日 07 时左右, 河南洛阳孟津县遭遇数十年不遇的龙卷风袭击, 瞬时风速达  $43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大降雨量达 60 mm, 龙卷风夹杂着暴雨和冰雹自西向东移, 新安县和孟津县沿黄河的 15 个乡(镇)受灾严重, 多个乡(镇)通讯、电力中断, 因房屋倒塌死亡 1 人; 207 国道孟津段、314 省道孟津段(孟扣路)

\* 河南省气象局“河南致灾强风暴中分析模型和邻近预警技术方法研究”资助

2013 年 2 月 6 日收稿; 2013 年 9 月 2 日收修定稿

第一作者: 李改琴, 主要从事暴雨、强对流灾害天气研究. Email: pyligaiqin@163.com

和新安段(许横公路)等干线公路因大量树木倒伏路面而断行,3处漫水桥坍塌;黄河小浪底库区水面停放的空船沉船7艘,失踪1艘。预计全市因灾造成直接经济损失达9亿元。龙卷风由于尺度小、突发性强,所以预测难度大,新一代多普勒天气雷达能有效地探测龙卷的一些重要特征,但预警时间也较短,多年来,气象专家们利用新一代雷达研究龙卷的探测特征,郑媛媛等(2004)分析了2003年7月8日发生在安徽庐江、无为的龙卷过程,该龙卷发生在大范围降水环境中的非超级风暴单体,存在小尺度的涡旋特征;俞小鼎等(2008)利用新一代天气雷达资料对2005年7月30日发生在安徽灵璧的龙卷过程进行了分析,该龙卷由一个尺度很大的强降水超级单体生成,并且连续表现出中气旋特征;赵瑞金等(2010)研究了2009年7月20日发生在承德的龙卷多普勒天气雷达特征;何彩芬等(2006)应用多普勒天气雷达产品研究2004年8月25日发生在浙江宁波市的一次台风前弱龙卷发生过程,指出该龙卷的发生机理同时具有非超级单体龙卷和超级单体龙卷的特征,很可能是介于两者之间的混合型龙卷。刘娟等(2009)应用多普勒天气雷达产品分析了2007年7月3日发生在安徽天长和江苏高邮的超级单体龙卷的多普勒雷达天气特征。王毅等(2012)对夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件进行了对比研究。大量的分析研究,为广大预报员对龙卷天气的识别、预警和研究提供了参考依据。但是,对龙卷涡旋特征详细要素的分析研究较少,本文应用天气图资料和濮阳 CINRDA/SB 新一代多普勒天气雷达资料等,通过对濮阳龙卷风发生的环流背景和环境条件以及龙卷的回波特征、结构特征、中小尺度涡旋特征和垂直风廓线特征等的研究,进一步认识濮阳发生的中小尺度龙卷天气,为提高预报员对龙卷天气的预测和预警能力提供一定借鉴。

## 1 龙卷风灾情调查

2009年7月16日18:00—18:30,在离雷达站16 km左右的濮阳县子岸乡的大陈、邹铺、梨子园及五星乡的葛丘、西义井村、东义井村、石佛营、八里庄8个村庄自西南向东北突遭龙卷风袭击,玉米等农作物大部分倒伏,房顶被大风刮走、倒塌,畜禽遭殃,农田成灾。直径30 cm左右的大树被龙卷风刮折或

连根拔起,濮渠路八里庄至梨子园区域,随处可见被成片刮倒折断的大树,碗口般粗的大树有的横在路中,有的“飞”到农户的屋顶上,造成交通堵塞,风向有气旋性弯曲的特征,估计最大风速应在 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,据目击者说:龙卷来临时,天空有一大块黑云压境。据县民政局灾情调查初步统计,农作物受灾面积 $918\text{ hm}^2$ ,受灾人口达13007人,倒塌居民住房154间、损坏房屋138间,刮倒树木29460棵,损坏鸡棚两个,瞬间发生的龙卷风还导致八里庄至梨子园区域的通讯、供电、交通一度中断,所幸无人员伤亡,共造成直接经济损失约1100万元。在产生龙卷的时段内,伴有短时强降水,濮阳县城关观测站18—19时1 h降水量达22.7 mm。这次龙卷天气过程,濮阳 CINRDA/SB 新一代天气雷达探测到了它的强回波和钩状回波、低层强切变和龙卷涡旋特征等,但没能自动识别出中气旋。根据雷达探测情况和现场灾情,并根据 Fujita(1981)提出的龙卷分级标准可以推断为 F1 级龙卷。

## 2 龙卷形成发展的环境场特征

中小尺度的强对流天气是在有利的大尺度环流背景下产生的,它的发生、发展、移动及落区跟当地的大气环境条件密切相关。下面从龙卷发生的环流背景场和大气环境条件进行分析。

### 2.1 有利的天气尺度环流背景场

在2009年7月16日08时500 hPa天气图(图1a)上,欧亚大气环流呈纬向环流,中高纬环流特征为两槽一脊型,分别为巴尔喀什湖槽、东北低涡和贝加尔湖脊,东北冷涡后部不断有冷空气扩散南下影响东北及华北地区,濮阳正处于华北南部受此冷空气影响;副热带高压(以下简称副高)呈东西向带状分布,濮阳地区位于副高586 hPa线西北侧西南偏西气流中,到20时,副高略有增强,高空辐散加强,有利于低层的辐合上升运动;在08时850 hPa(图1b)上,河南濮阳处于暖切变线附近,此处有利于中小尺度气旋的产生并辐合上升,且南阳—郑州一线有风速大于 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 西南低空急流,低空急流为龙卷发生地输送大量的水汽和动量,并在濮阳地区形成明显的风速辐合和气旋性弯曲,有利于当地涡旋的形成和辐合上升;在16日17时地面图(图2b)上,濮阳处于高压坝南部水平低压辐合线附近,地面

辐合线容易产生气旋式涡旋,辐合产生上升速度区,当气旋式涡旋区与辐合上升速度区遇到已存在的涡旋时,涡旋由于拉伸而加速旋转龙卷就可能形成。另外,中层 700 hPa 上有明显的干冷空气侵入濮阳(图 2a),从图 2a 可以看到,濮阳地区东北侧为明显

$t-t_d > 43^\circ\text{C}$  的干舌,同时东北到华北南部为一明显的温度槽,干冷空气从东北侵入温暖空气使对流天气增幅。MacGorman 等(1994)指出:龙卷一般发生于近地面层内水汽丰富、中层有干冷空气存在的环境中,这次龙卷过程正是在这种环境中发生的。

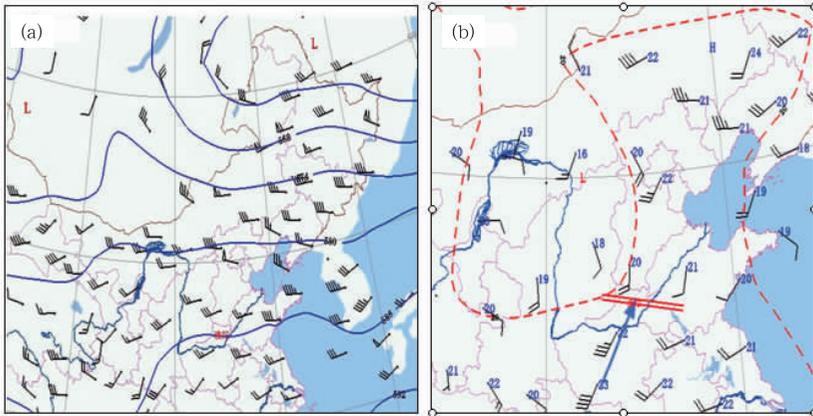


图 1 2009 年 7 月 16 日 08 时(a)500 hPa 和(b)850 hPa 天气图

[(a)中实线为等高线;(b)中虚线为等温线,箭头代表低空急流轴,双实线代表辐合线]

Fig.1 The synoptic charts of 500 hPa (a) and 850 hPa (b) at 08:00 BT 16 July 2009

[In (a) solid line for contour; in (b) dashed line is the isotherm, the arrow represents low level jet axis double solid line shows the convergence line position]

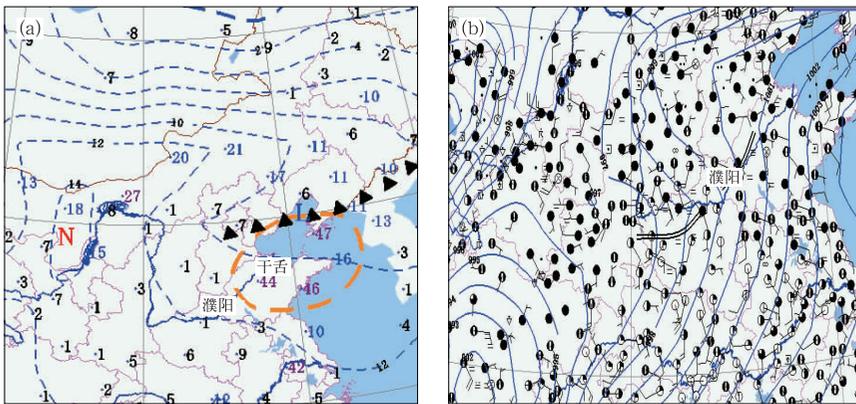


图 2 2009 年 7 月 16 日(a)08 时 700 hPa 和(b)17 时地面天气图

[(a)中虚线为等温线,(黑色数字)为 700 hPa 的温度露点差,三角型表示温度槽,虚线闭合区为干舌;(b)中的双实线为地面辐合线]

Fig.2 The synoptic charts of 700 hPa at 08:00 BT (a) and surface synoptic chart (b) at 17:00 BT 16 July 2009

[In (a) Dotted line for isotherm, black numbers for 700 hPa temperature dew point differences, triangle shows the temperature trough, a dotted line closed area for dry tongue;

In (b) double solid line for the surface convergence line]

## 2.2 有利于龙卷发生的环境条件

陶诗言(1980)、丁一汇(2005)指出,中纬度地区发生强风暴需要三个条件,即对流层明显的位势不

稳定,上干下湿的水汽垂直分布和强的垂直切变。 $T-\ln p$  是一种用来判断测站大气层结稳定度、预报强对流天气的重要工具,濮阳没有探空站,选择最近的郑州站作为参考。本文用濮阳站 17 时龙卷发生

前 1 h 左右的温度和露点,订正 08 时郑州的探空图(图 3),可以看出 17 时大气层具有较大的 CAPE 值  $2739 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,它为龙卷的发展提供了大量的潜在不稳定能量;700 hPa 以下  $t-t_d < 4^\circ\text{C}$ ,较潮湿,500~700 hPa 之间有一明显的干层,下湿上干的不稳定层有利于强对流天气的发生;风场随高度顺转,且低层有较大的风垂直切变,由 1000 hPa 的偏东风  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  顺转到 850 hPa 的西南风  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风向

转  $130^\circ$ ,风速增大了  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,对流层低层大的垂直风切变使对流具有高度的组织性,有利于强风暴单体的形成和维持;强天气威胁指数 SWEAT 为 382.7,接近发生龙卷的临界值 400;以上条件说明大气层存在发生强对流天气的潜势。0~12 h 对流天气展望预报结果为:0~12 h 内有短时强降水和强对流天气发生的可能。结果 18—19 时,濮阳果然出现了 22.7 mm 的短时强降水和龙卷风。

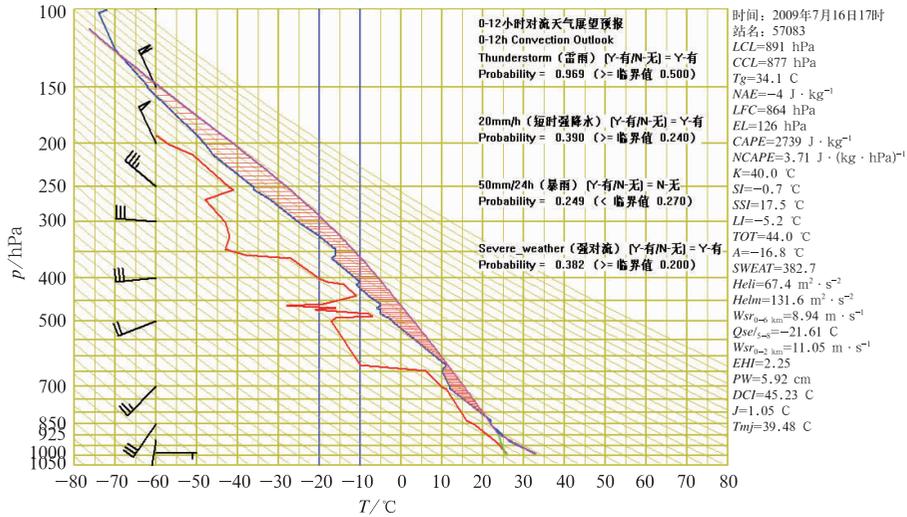


图 3 2009 年 7 月 16 日利用濮阳 17 时地面资料订正郑州探空图

Fig. 3 Corrected sounding diagram in Zhengzhou using surface observation data in Puyang at 17:00 BT 16 July 2009

利用濮阳地面自动站每小时的资料分析(表 1),可以看出 14—18 时,发生龙卷前本站水汽压从 37 hPa 逐渐增大到 40 hPa,露点温度达到  $29^\circ\text{C}$ ,相对湿度逐渐增大到 90%, $(t-t_d) \leq 4^\circ\text{C}$ ,可见近地面暖湿条件很好,19 时龙卷过程结束,水汽压降低了 3 hPa,气压降低 2 hPa,说明龙卷过程中伴随着气压下降,水汽释放。

表 1 2009 年 7 月 16 日龙卷发生前后濮阳站地面要素特征(每小时自动站资料)

Table 1 Characteristics of the surface elements before and after the tornado on 16 July 2009 (hourly automatic weather station data in Puyang)

时间/BT	$e/\text{hPa}$	$t_d/^\circ\text{C}$	$t/^\circ\text{C}$	$RH/\%$	$p/\text{hPa}$
14	37	28	31	81	994
15	39	28	32	82	993
16	40	29	32	83	993
17	40	29	32	86	993
18	40	29	31	90	993
19	37	28	29	91	992

### 3 新一代雷达产品分析龙卷风特征

龙卷风是一种强烈的、小范围的空气涡旋,常常伴有强风、冰雹或短时强降水,新一代雷达能有效探测龙卷风的一些明显特征,这次龙卷过程由于离濮阳雷达站 16 km 左右,距离较近,河南濮阳 CINR-DA/SB 新一代雷达对它进行了比较清楚的探测,回波强度强,并出现钩状回波;过程中虽然雷达没有自动识别出中气旋,但是自动识别出连续 3 个体扫的龙卷涡旋特征,径向速度图中明显出现  $\gamma$  中尺度涡旋和像素到像素之间的强切变等。下面对此龙卷风暴的发生、发展进行跟踪分析。

#### 3.1 龙卷风暴回波强度场

龙卷发生前,回波表现为一个较强的回波短带,自西南向东北向移动,由于风暴强大的后侧入流,使强回波短带形成弓形回波,在继续移动中弓形回波

的北段强烈发展,并向后形成明显的钩状回波,龙卷生成于钩状回波区域弱回波区附近,正是雷达自动识别的龙卷涡旋处。

从  $1.5^\circ$  仰角回波强度图(图4)看,16日15:10雷达站西南部30 km处有一回波短带,最大回波强度53 dBz,沿金堤河东北移,移动中回波短带不断增强,范围增大,17:53逐渐发展成弓形回波,17:59风暴的最大回波强度达58 dBz,强回波造成短时强降水的出现,18:05(图4a),随着弓形回波的东北移,回波中段移速快,南北两端移动慢,北端回波强烈发展且向后呈气旋性弯曲(图4b),18:17(图4c)形成明显的钩状回波,且伴有龙卷涡旋特征出现,龙卷涡旋特征位于钩状回波区域弱回波区附近,回波南端出现明显的羽状;强回波继续东北移,18:23和18:29钩状回波明显(图4d和4e),钩状回波周围是强回波区,中间为弱回波或无回波区,龙卷风生成于钩状回波弱回波区附近,对应径向速度上的强的正负速度切变中心,18:35(图4f)回波钩状减弱,龙卷涡旋特征不再出现,18:41回波钩状消失,弓形回波减弱东移,龙卷过程结束。

在18:00—18:30时间段内强风暴经过的濮阳县子岸乡大陈、邹铺、梨子园和五星乡葛丘及西义井村等8个村庄先后出现龙卷风天气,并伴有短时强降水,造成较大损失。

### 3.2 龙卷风暴结构属性

从该强风暴结构属性(图5)看,在龙卷发生的18:00—18:30之间,从图5a可以看出,风暴单体回波顶小于6 km,比不上夏季一般的强对流,回波底一直在地面,单体最大反射率因子所在高度小于6 km,单体质心高度小于4 km,单体最大回波强度大于55 dBz相对很强(图5d),最大约为59 dBz,因此这次过程属于低质心强扰动,说明在较低层也能发生龙卷天气。从图5c可以看出,垂直累积液态水(VIL)值异常偏小,从17:59开始追踪到18:35,VIL值在龙卷过程中均小于 $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,这是由于龙卷风暴距离雷达较近,雷达的静锥区影响导致垂直累积液态水VIL值偏小。从图5b可以看出大冰雹形成概率在60%以下,一般冰雹形成概率在80%以下,18:23冰雹概率同时降到最小,大冰雹形成概

率在30%以下,一般冰雹形成概率在50%以下,这可能是龙卷最强时发生的现象。

沿18:23的强回波做垂直剖面(图6),可以看到较明显的回波悬垂和弱回波区,强回波离地面4 km左右,回波发展高度不到8 km,同样说明此风暴属低层强扰动。

### 3.3 龙卷风暴径向速度场分析

这次龙卷风过程雷达探测最明显的特征之一,就是在大范围入流风场中出现伴有辐合的 $\gamma$ 中尺度气旋式涡旋,涡旋进一步发展加强导致其中央龙卷涡旋的产生,产生龙卷风天气。

具体从 $1.5^\circ$ 仰角径向速度图上看(图7),产生龙卷的小尺度气旋发生在1 km以下的低层。17:47,在距雷达站20 km处的西南方向,大范围的入流负速度区中出现了小范围正速度区,其东南侧入流风场逐渐加强,18:05,出现伴有辐合的 $\gamma$ 中尺度气旋式涡旋特征,最大入流风速 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大出流风速 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图7a);正、负大速度区逐渐靠近,并旋转东北移,18:11气旋性式辐合流场特征更加明显(图7b);18:17,随着 $\gamma$ 中尺度气旋不断增强,在气旋的中央发展成小尺度的龙卷涡旋,雷达自动识别出龙卷涡旋特征,最大入流速度达 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大出流风速 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图7c);龙卷涡旋继续发展加强东北移,18:23形成了像素到像素之间的强切变(图7d),此时也是这次龙卷较强盛阶段;龙卷继续发展东北移,18:29最大入流风速为 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,出流风速达 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图7e),龙卷旋转特征更强,由于此小尺度的龙卷涡旋处于大范围入流风场中,所以出流速度值偏小,实际值应更大;18:35,龙卷涡旋特征消失,系统减弱东移(图7f)。风切变越大,造成的危害越大,18:29风速最大切变值达 $215 \times 10^{-3}$ ,强烈的低层切变造成旋转上升产生了这次龙卷过程,造成了近地面严重的破坏。

从18:17的径向速度剖面图(图8)可以看出:大概5 km以下风场切变明显,5 km以上有明显的风暴辐散,最强切变在近地面1 km以下,向上减弱,说明这次龙卷发生在低层,对近地面造成损失严重。

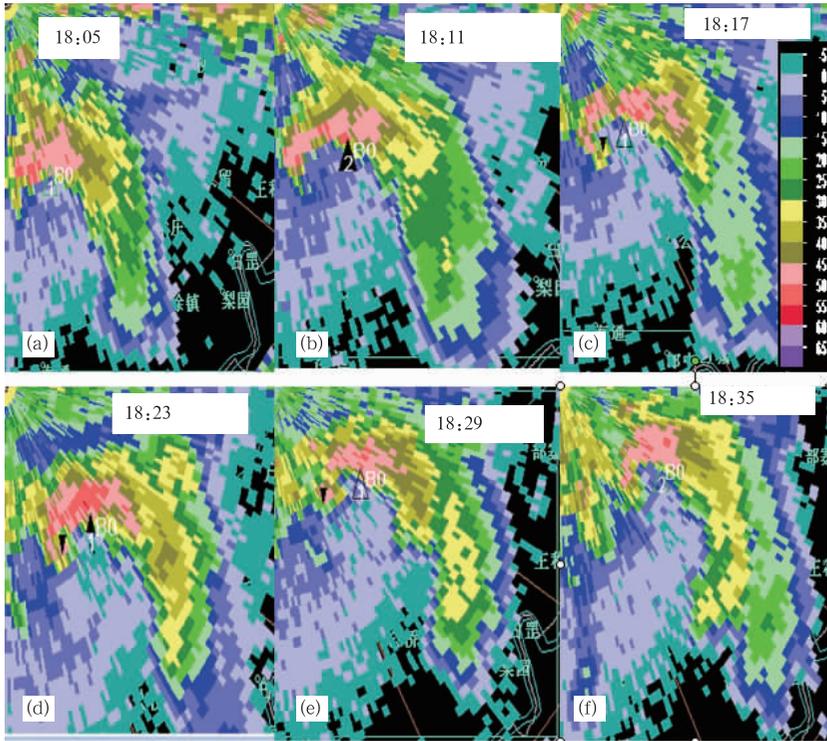


图 4 2009 年 7 月 16 日 1.5° 仰角上龙卷钩状回波演变特征

(▼ 代表龙卷涡旋特征, △▲ 代表风暴的冰雹指数)

Fig. 4 The tornado changing hooked echo characteristics at 1.5° elevation on 16 July 2009

(▼ stands for tornado vortex signature, △▲ stand for B0 hail index)

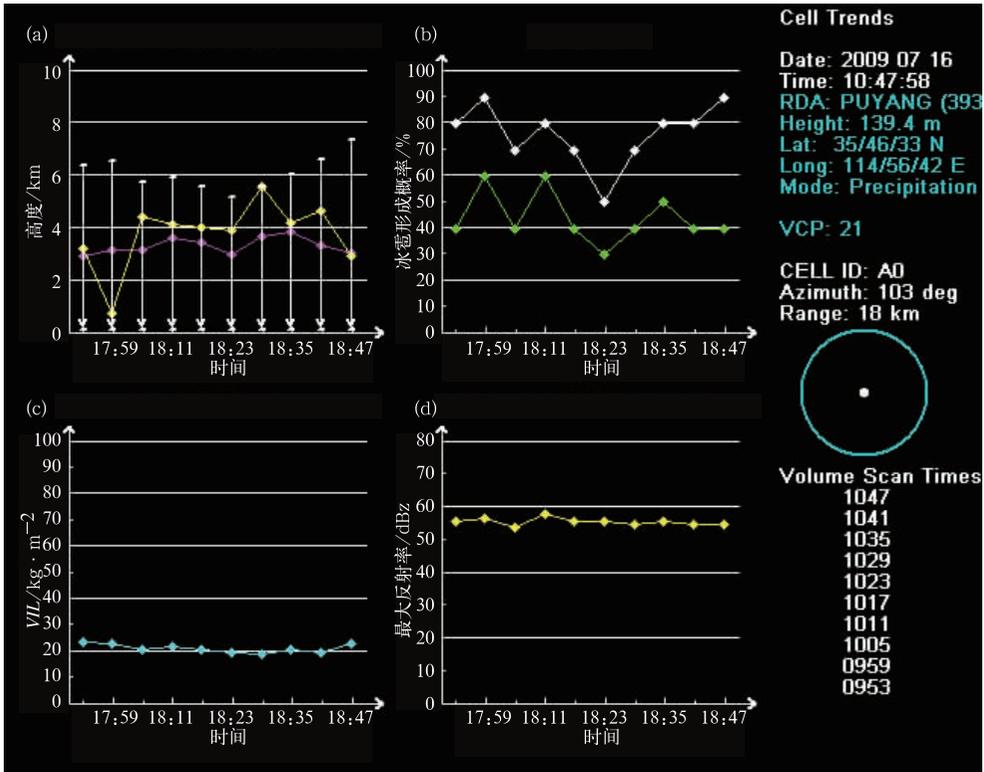


图 5 2009 年 7 月 16 日濮阳龙卷风暴结构属性图

Fig. 5 Storm structure attribute diagram of tornado on 16 July 2009

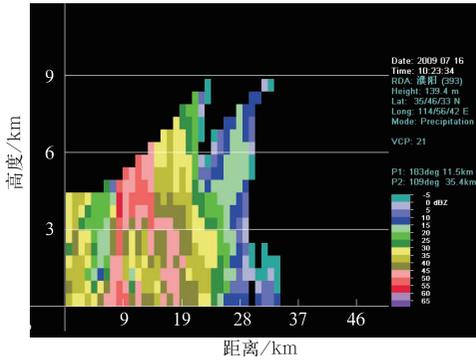


图6 2009年7月16日18:23濮阳龙卷风暴反射率因子垂直剖面

Fig. 6 Reflectance factor vertical profile of tornado storm in Puyang at 18:23 BT 16 July 2009

### 3.4 龙卷涡旋 TVS 产品特征分析

这次龙卷风暴距离河南濮阳雷达站约 16 km, TVS 产品属性表详细描述了此龙卷风暴的一些重要属性。在此龙卷风天气过程中, TVS 产品算法连

续 3 个体扫识别到了 TVS, 时间分别为 18:17、18:23、18:29。从 TVS 产品属性表上可以看出(表 2): 龙卷出现在雷达东南方向距离雷达约 16 km 处, 自西南向东北方向移动; 平均径向速度差  $23 \sim 26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 低层径向速度差从 18:17 的  $37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增大到 18:23 的  $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 18:29 甚至增大到  $54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 从表中还可以看出低层径向速度差就是最大径向速度差, 它所在高度也较低, 位于  $0.1 \sim 0.4 \text{ km}$ , 18:29 最低达到  $0.1 \text{ km}$ , 低层高速旋转的龙卷造成近地面破坏很大。TVS 厚度 3 个时次逐渐增大, 从 18:17 的  $2.6 \text{ km}$  增大到 18:29 的  $4 \text{ km}$  以上, 说明这次龙卷的强度很强。顶最高  $4.1 \text{ km}$ , 底最高  $0.5 \text{ km}$ , 明显为低层强扰动; 3 个龙卷涡旋 TVS 产品特征的最强切变值都很大, 18:17、18:23、18:29 分别依次为:  $123 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $154 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  和  $215 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 最强切变所在高度就是最大径向速度差所在高度, 分别为  $0.2$ 、 $0.4$  和  $0.1 \text{ km}$ 。总之, 这次龙卷过程中, 低层切变强、低层径向速度差大, 涡旋旋转强烈, 龙卷风天气给当地造成严重的破坏。

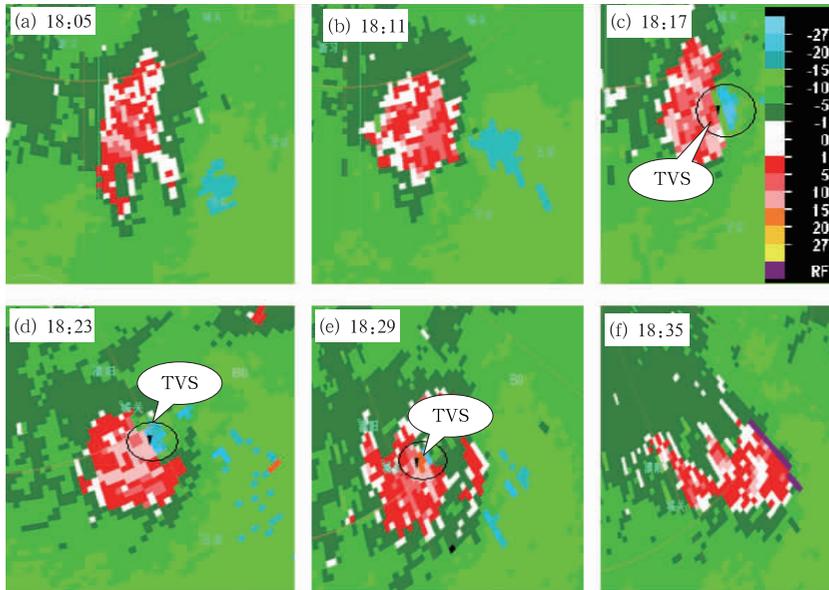


图7 2009年7月16日1.5°仰角上龙卷风暴的径向速度发展变化特征  
(黑色椭圆区域为龙卷发生区域, ▼为龙卷涡旋特征)

Fig. 7 Radial velocity development map of tornado storm at  $1.5^\circ$  elevation on 16 July 2009  
(The black Elliptical areas are for TVS, ▼ stands for tornado vortex signature)

### 3.5 龙卷风暴 VWP 产品分析

新一代多普勒雷达垂直风廓线 VWP 产品能够

直观反映雷达站周围 30 km 范围内测站平均风场的垂直分布随时间变化, 该资料 6 min 一次, 一定程度上弥补了探空数据的不足。这次龙卷的发生地离

测站的直线距离为 16 km 左右,测站的风场一定程度上可反映当地的风场。下面就用该产品来分析风在垂直方向上的分布特征。

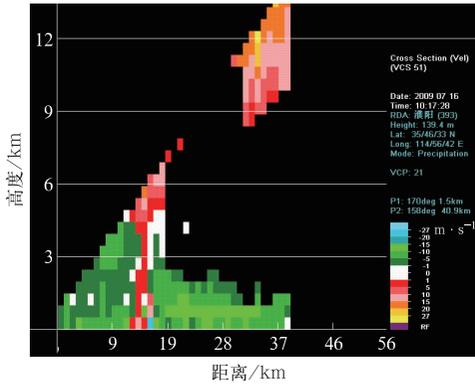


图 8 2009 年 7 月 16 日 18:17 沿垂直于雷达径向和风暴正负速度对的剖面图  
Fig. 8 The storm of the positive and negative velocity on the profile along the radial direction at 18:17 BT 16 July 2009

表 2 2009 年 7 月 16 日连续 3 个体扫龙卷涡旋特征

Table 2 Expressions of TVS product property at 16 July 2009

	TVS 特征出现时间/北京时		
	18:17	18:23	18:29
AZ/RAN:方位/距离/deg, km	159/17	151/16	147/15
AVGDV:平均径向速度差/ $m \cdot s^{-1}$	23	26	23
LLDV:低层径向速度差/ $m \cdot s^{-1}$	37	42	54
MXDV/HGT:最大径向速度差/高度/ $(m \cdot s^{-1}, km)$	37/0.2	42/0.4	54/0.1
DEPTH:厚度/km	>2.6	>3.4	>4.0
BASE/TOP:底/顶/km	0.2/2.8	0.4/3.8	0.1/4.1
MXSHR/HGT:最强切变/高度/ $(E-3/s, km)$	123/0.2	154/0.4	215/0.1

从图 9 看,从 17:40—18:29,从 0.3~1.5 km 风随高度从东南风顺转到西南风,风向顺转 90° 以上,且风速增大  $6 m \cdot s^{-1}$ ,说明龙卷发生前 1 h 内及发生时平均风场低层风垂直切变较强,这样有利于低层气流的旋转上升和龙卷天气的形成。从 17:40—17:53,风场伸展高度在 5 km 左右,而从 17:59—18:29,风场伸展高度达 8 km 左右,且从低层到高层风有规律的一致顺转,这种风场有利于有组织的强风暴的生成,风场的伸展高度反映对流的发展高度,说明从 17:59 对流活动升级,并一直持续到 18:29 龙卷天气结束。18:35 以后,低层风切变明显减弱,4 km 以上中层风风速减小到  $8 m \cdot s^{-1}$ ,

且风向杂乱,说明强对流的组织性遭到破坏,强对流趋于减弱。

另外,从 17:59—18:29,自 1.5~7 km 高度为大于  $12 m \cdot s^{-1}$  一致的西南风且缓慢顺转,到 12 km 以上有风速大于  $20 m \cdot s^{-1}$  西北风,说明中低层有西南急流存在,高空有强辐散存在,这种高低空配置有利于低层气流的辐合上升、涡旋的拉伸发展,龙卷的发生。

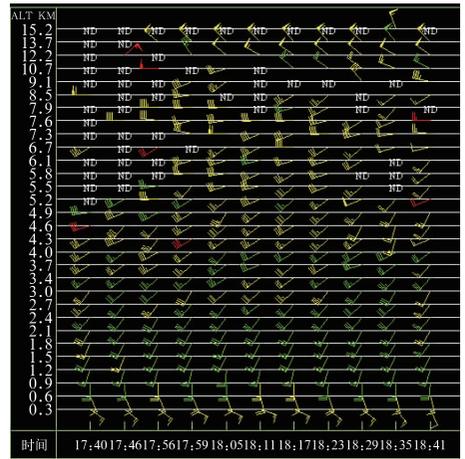


图 9 2009 年 7 月 16 日龙卷风暴发生过程中 VWP 产品图

Fig. 9 The wind profile line product diagram throughout the tornado storm on 16 July 2009

### 4 结 论

(1) 这次龙卷天气过程发生在盛夏 7 月中旬,副高边缘西北侧、低空急流左前方和低空暖切变线附近;龙卷发生前大气环境具有较大的对流不稳定能量,低层存在大的风垂直切变和丰富的水汽;中层存在干冷空气入流;VWP 上表现为低层风场切变大,风场从低层到高层有规律的一致顺转,这种风场有利于有组织的强风暴的生成。

(2) 龙卷影响时多普勒雷达反射率因子图上表现为移动的弓形回波北段强烈发展形成钩状回波,龙卷生成于钩状回波弱回波区附近;风暴结构显示龙卷发生时呈现低回波顶高、低质心、强回波和较小的冰雹指数。

(3) 径向速度图上表现为在大范围入流风场中出现伴有辐合的  $\gamma$  中尺度气旋式涡旋,涡旋进一步发展加强导致其中央龙卷涡旋的产生,产生龙卷风

天气。龙卷涡旋特征 TVS 表现为龙卷产生时低层的径向速度差很大,最大切变值很大,18:29 最大达到  $215 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,充分显示了这次龙卷风的强烈程度。

(4) 每年盛夏 7 月是我国龙卷风的多发季节,特别是中纬度地区是暖湿、干冷空气的交汇区,在有利的环流背景条件和环境条件下,容易形成中小尺度强对流天气,特别是龙卷天气往往在类似暴雨天气形势下产生,预报中容易忽视,工作中我们首先要做好龙卷的潜势预报,另外更要注重利用新一代雷达对强风暴进行跟踪监测分析,尽可能提前发出龙卷等强对流天气预警。

**致谢:**在此对中国气象科学研究院胡志群博士的指导和帮助深表感谢!

#### 参考文献

丁一汇. 2005. 高等天气学. 北京:气象出版社,309-336.  
何彩芬,姚秀萍,胡春蕾,等. 2006. 一次台风前部龙卷的多普勒天气

- 雷达分析. 应用气象学报,17(3):370-375.  
刘娟,朱君鉴,魏得斌,等. 2009. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒雷达天气特征. 气象,35(10):32-39.  
陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京:气象出版社,1-12.  
王毅,郑媛媛,张晓美,等. 2012. 夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究. 气象,38(12):1473-1481.  
俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. 大气科学,32(3):508-522.  
赵瑞金,郝雪明,杨向东,等. 2010. 2009 年 7 月 20 日承德龙卷多普勒天气雷达特征. 气象,36(11):68-76.  
郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 2004. 2003 年 7 月 8 日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析. 气象,30(1):38-40.  
Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. J Atmos Sci,38(8):1511-1534.  
MacGorman D R, Burgess D W. 1994. Positive cloud-ground lightning in tornadic storms and hailstorms. Mon Wea Rev,122(8):1671-1679.  
OTB/OSF/NWS. 1996. WSR288D Operations Course:600.  
Wilson J W. 1986. Tornado genesis by non precipitation induced windshear lines. Mon Wea Rev,114(2):270-284.