

张一平,牛淑贞,郑世林,等,2019.“07·06”周口龙卷现场调查和可预警性综合分析[J].气象,45(8):1135-1148. Zhang Y P, Niu S Z, Zheng S L, et al, 2019. Investigation and warning practicability analysis of the 6 July 2017 tornado in Zhoukou City[J]. Meteor Mon, 45(8): 1135-1148(in Chinese).

“07·06”周口龙卷现场调查和可预警性综合分析*

张一平^{1,2} 牛淑贞^{1,2} 郑世林^{1,3} 张 宁^{1,2} 王建忠^{1,3} 刘莹莹^{1,3}

1 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003

2 河南省气象台, 郑州 450003

3 河南省气象局, 郑州 450003

提 要: 对 2017 年 7 月 6 日周口局地龙卷致灾强对流天气进行现场调查, 利用常规高空地面、区域加密自动站、新一代天气雷达以及 FY-2G 实时分析资料, 综合分析了龙卷的环境条件和可预警性。结果表明: (1) 此次龙卷灾害主要出现在西华和淮阳两县交界处长约 4.5~5 km、宽约 100~150 m 的地带, 具有显著 γ 中尺度涡旋特征, 龙卷强度整体为 EF1 级, 最强达到 EF2 级。(2) 在中纬度低槽东移和副热带高压边缘西南暖湿气流共同影响下, 高空分流辐散和低空急流发展的配置为暴雨、局地龙卷提供了有利的天气尺度动力条件, 龙卷风暴由强降水冷出流和东部暖湿环境之间形成的辐合线上的气旋性辐合诱发产生, 地面自动站温度、露点和能量梯度大值带偏暖湿的正涡度中心附近是龙卷可能发生的区域。(3) 08 时阜阳探空资料分析大气处于较强的条件不稳定状态, 对流有效位能为 $1712 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (14 时温度、露点订正后为 $3182 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), K 指数为 43°C , SWEAT 指数为 312, SI 为 -4.5°C ; 大气可降水量在 67 mm 左右; 抬升凝结高度很低, 位于 959.2 hPa 处; 代表低层垂直风切变的 0~1 km 风矢量差在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或以上。大的热力不稳定和低层垂直风切变及低的抬升凝结高度为小尺度龙卷的发生提供了环境条件。(4) 在卫星云图上, 龙卷发生在大尺度暖区云带前部, 云顶亮温低至 -72°C , 对流发展非常旺盛。闪电监测龙卷位于闪电密集区东侧。(5) 雷达回波图上, 龙卷发生在东北—西南向暴雨回波带前沿的块状强回波处。中气旋和龙卷涡旋特征在实时业务中可以作为预警龙卷的可靠线索, 根据其持续、移动特点可对局地龙卷提前预警, 旋转速度迅速加强、高度下降预示龙卷将影响到地面。以上结论可作为今后黄淮平原监测预警龙卷的参考依据。

关键词: 龙卷, 现场调查, 环境条件, 雷达监测, 预警性

中图分类号: P458, P429

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.010

Investigation and Warning Practicability Analysis of the 6 July 2017 Tornado in Zhoukou City

ZHANG Yiping^{1,2} NIU Shuzhen^{1,2} ZHENG Shilin^{1,3} ZHANG Ning^{1,2}

WANG Jianzhong^{1,3} LIU Yingying^{1,3}

1 CMA/Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support Applied Technique, Zhengzhou 450003

2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

3 Henan Meteorological Service, Zhengzhou 450003

Abstract: The severe convective weather in Zhoukou City on 6 July 2017 caused by a tornado was investigated and a general analysis of the circumstance and early warning practicability of tornado was made by using the high-level, surface and AWS data as well as the Doppler weather radar and FY-2G satellite data.

* 国家自然科学基金项目(41775044)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-044)、中国气象局气象预报预测核心业务发展专项[YB-GJXM(2018)02-08]、河南省气象局气象科学技术研究项目(KZ201702)和河南省强对流创新团队共同资助

2018 年 3 月 26 日收稿; 2019 年 5 月 10 日收修定稿

第一作者: 张一平, 主要从事天气预报和强对流天气研究. Email: zhangyiping618@163.com

通信作者: 牛淑贞, 主要从事天气预报和强对流天气研究. Email: 421986918@qq.com

The results show that the tornado disaster mainly affected the area with length of 4.5—5 km and width of 100—150 m between Xihua County and Huaiyang County of Henan Province, having considerable meso- γ scale vortex characteristics of the tornado with strength to Grade EF1 and Grade EF2 when strongest. (2) The tornado process was jointly influenced by the mid-latitude trough moving eastward and the warm-moist southwest airflow in the edge of subtropical high. The configuration of upper-level stream divergence and low-level jet offered heavy rain and tornado a favorable synoptically dynamic condition. The tornado was induced by the cyclonic convergent airflows on the convergence line which was between the severe rain cold outflow and the warm-moist airflow in the eastern part. Near the positive vortex center on the big value of surface temperature, dew-point temperature and energy gradient may be where tornado could occur. (3) The Fuyang sounding data at 08:00 BT showed a strong conditional instable air where CAPE was $1712 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($3182 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ corrected with surface temperature and dew point temperature at 14:00 BT), K index was 42°C , SWEAT index was 312, SI index was -4.5°C and the PW was around 65 mm. The LCL was at a very low height of 959.2 hPa, wind vector difference of low-level vertical wind shear at 0—1 km was $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ or above, which offers a profitable circumstance conditions for the tornado. (4) On satellite images, the tornado occurred in the front of warm cloud bands whose TBB was under -72°C where convective clouds developed vigorously. Lightning monitoring result showed the tornado was on the east side of the dense lightning flashes area. (5) On radar echo maps, the tornado occurred at the massive echo area on the front of northeast-southwest heavy rain echo banks. The occurrence of mesocyclone and its tornado features could give a reliable clue to the warning of tornado in the real-time operation. The enhancing of rotating speed and falling down of the height indicate the tornado would come to the ground surface. In a word, the results above could act as references for tornado monitoring and warning over the Huanghuai Plain.

Key words: tornado, on-site investigation, circumstance condition, radar monitoring, warning practicability

引 言

龙卷是一种非常猛烈的天气现象,属于小尺度天气系统,具有局地性、突发性和能量高度集中的特点,剧烈的龙卷往往给社会经济和人民生命财产造成严重威胁(Doswell III, 2001; 张小玲等, 2016)。美国是多龙卷和龙卷灾害严重的国家,国内外气象学者对龙卷灾害天气进行了很多研究(蒋汝庚, 1997; Ziegler et al, 2001; 钱维宏等, 2017)。环境条件方面, F2 级以上超级单体龙卷除了需要较大的对流有效位能和较强的深层垂直风切变外, 较低的抬升凝结高度和较大的 0~1 km 垂直风切变是龙卷超级单体风暴的重要特征(Evans and Doswell III, 2002), 干线、辐合线是龙卷风暴触发的主要条件(王秀明等, 2015)。监测预警方面, 20 世纪 70 年代美国气象学者利用多普勒天气雷达首次观测到了超级单体中的“中气旋”, 并发现第一个伴随龙卷过程的比中气旋尺度更小的龙卷式涡旋特征(TVS)(俞小鼎等, 2012)。统计表明, 在探测到中气旋时, 龙卷发

生概率大约只有 20%, 而在探测到中气旋底部距离地面不超过 1 km 的情况下, 龙卷发生概率约为 40%(Trapp et al, 2005)。

我国龙卷属于低概率、高影响灾害天气, 主要分布在东部地区, 特别在山东、安徽、江苏、河南黄淮平原一带是龙卷频发地(范雯杰和俞小鼎, 2015)。随着新一代天气雷达的布网, 全天候高时空分辨率的监测方式对我国局地龙卷进行了有效监测, 捕捉到了局地龙卷的多普勒雷达产品特征, 国内学者对龙卷灾害天气的研究逐渐增多。龙卷形成环境集中表现为西风带龙卷(俞小鼎等, 2006; 2008; 郑媛媛等, 2009; 王毅等, 2012; 张一平等, 2012; 吴芳芳等, 2013)和台风龙卷(郑媛媛等, 2015; 黄先香等, 2018), 其中西风带龙卷多发生在高温、高湿的强降水过程中。俞小鼎等(2006)利用多普勒天气雷达资料对安徽无为县的一次强烈龙卷过程分析, 发现伴随暴雨的龙卷是由团状对流系统南端的一个低质心超级单体产生, 并对此次龙卷的生成机制进行了探讨。俞小鼎等(2008)对发生在安徽北部的伴随强烈龙卷和暴雨的强降水超级单体风暴进行分析, 认为

其产生在中等大小的对流有效位能和较大的深层垂直风切变条件下,同时抬升凝结高度很低,边界层内的低层垂直风切变很大,地面存在阵风锋,中等强度的对流有效位能和大的深层垂直风切变有利于超级单体风暴的产生,而大的低层垂直风切变、低的抬升凝结高度和地面阵风锋的存在有利于 F2 级以上强龙卷的产生。郑媛媛等(2009)研究了 3 次超级单体强龙卷风暴多普勒雷达回波特征及其与强冰雹超级单体的差异,并对龙卷天气的时空分布、变化趋势、以及产生龙卷的环流形势进行了分析。

由于龙卷等强对流天气时空尺度小,灾害重,常规和加密观测站很难观测到,翔实的现场调查是确定和估计龙卷强度的主要手段。1971 年 Fujita 提出了龙卷风速等级,到现在美国已形成了比较完整规范的龙卷和下击暴流所致风灾强度等级和现场调查体系(Doswell III et al,2009)。近几年,我国强对流灾害天气现场调查工作得到进一步重视,针对龙卷和相关灾害天气的详细现场调查较多。Meng and Yao(2014)对 2012 年“7·21”北京暴雨过程中的龙卷进行了详细现场调查和分析;Meng et al (2016)、郑永光等(2016a)对 2015 年 6 月 1 日导致“东方之星”客轮翻沉的下击暴流和疑似龙卷过程进行了现场调查,基于现场调查结果分别给出了风灾的多尺度特征和风速估计。郑永光等(2016b)通过现场调查和资料分析,确定了 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁龙卷强度为 EF4 级,并系统总结了目前得到较多应用的风速等级。朱文剑等(2016)详细分析了 2015 年 10 月 4 日“彩虹”台风龙卷的风灾特征。以上现场调查和分析,为评估局地灾害等级、揭示致灾天气成因提供了翔实的实况依据。

豫中和豫东平原地区为河南省龙卷风多发地

区,2017 年 7 月 6 日,位于豫东平原的周口出现了局地龙卷天气,灾害发生后河南省气象局组织了实地调查,本文将根据此次龙卷风的灾害分布特征并结合常规和业务中实时应用的多源高分辨率资料对局地龙卷形成的环境条件和可预警性进行综合分析,希望能为今后同类天气的提前预警提供借鉴。

1 龙卷实况和现场调查

1.1 灾情实况和调查概况

2017 年 7 月 6 日,河南省周口市西华、淮阳两县部分乡镇发生龙卷天气,造成 2 人受伤,3300 人受灾,直接经济损失约 918 万元。西华县清河驿乡大李、高胡同两个行政村 1200 人受灾,房屋倒塌 13 间、受损 150 间,树木损毁 1100 棵,蔬菜大棚、高压线路、变压器、围墙等损毁估计 300 万元。黄泛区农场十四分场受灾房屋 210 间,折损树木 100 多棵,包括水利电力大棚设施在内损失 100 多万元。淮阳县曹河乡、白楼镇、临蔡镇等乡镇房屋不同程度受灾,民房损坏 378 间,2100 人受灾,3 台变压器损坏,刮断树木 9600 棵,因灾造成经济损失 518 万元。互联网媒体报道,周口市西华、淮阳县部分乡镇遭遇龙卷风袭击,村民房屋受损(图 1a),一台五六吨重的收割机被刮走 10 多米远(图 1b)。

9 日上午,河南省气象局组织对西华和淮阳县进行现场调查,按照龙卷发生和移动路径(图 2),重点查看了西华县清河驿乡高胡同村、大李村、魏庄(在大李村南部附近)和淮阳县曹河乡焦庄等 4 处灾害现场。需要说明的是,周口地区位于黄淮平原,地势平坦,另外现场调查距龙卷发生已超过两天,部分



图 1 西华县清河驿乡大李村(a)和高胡同村(b)灾情和居民拍摄龙卷视频(c)

Fig. 1 Disaster in Dali (a) and Gaohutong (b) Villages at Qingheyi Town in Xihua County and the tornado video taken by villagers (c)



图 2 龙卷移动路径

(左侧浅蓝色为西华县,右侧为淮阳县)

Fig. 2 Motion path of the tornado

(Xihua County is the blue region on the left while Huaiyang County on the right)

损毁房屋已经修复,部分倒伏树木也进行了清理,尽管如此,现场调查还是获取了大量真实的灾情实况。调查组走访了当地目击证人 30 余人,获取手机视频 1 份(图 1c)。从现场灾情、手机视频并结合新一代雷达监测产品等可以确定此次灾害天气是由局地龙卷风所致。根据当地居民口述和拍摄视频,确定致灾龙卷的发生时间为 6 日 16—17 时(北京时,下同),龙卷灾害发生在高胡同村到焦庄长约 4.5~5.0 km,宽约 100~150 m 的地带(图 2),龙卷移动速度约为 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,通过换算为 3 min 约 500 m,这和当地村民反映的龙卷在一个地方持续约 3 min 的情况基本一致。

1.2 西华现场调查

高胡同村是龙卷开始触及地面的地方,也是灾害比较严重的地方。在村口,当地村民正在用拖拉机运输刮倒的树木(图 3a,为便于清理运输,树木被进行了人工切割),从树木直径可以推测大部分树龄在 5 年以上,村头 6 间超市的屋顶全被风卷走,村中部分房屋顶瓦片被大风吹落,大树被龙卷风连根拔起(图 3b)。龙卷从村西南方生成,这里有成排的树木,也有大树被龙卷风连根拔起,并且有相当多的树木在中下部逆时针方向扭断(图 3c、3d),表现出明显的旋转风致灾特征。约 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的一片树林中树木严重倒伏或折断(图 3e),从倒伏方向看有明显的辐合状,由此可以判断灾害是由旋转风所导致。

大李村位于高胡同村东北方向约 2.2 km,一些村民家中的屋顶被刮飞,村民家中重达五六吨的联合收割机,也被刮走十多米远(图 1b)。田间成排树木大量折断倒伏,倒伏方向整体向东北方向,也有辐合状特征(图 3f),附近约 100 m 处的养殖场房顶被整块掀翻(图略),刮出两米多远,据在养殖场干活的村民描述,当时天空阴暗,龙卷风从村西南向东北方向移动,经过养殖场,整个羊圈瞬间倒塌,砸死了 18 只羊。

邻近大李村的魏庄,附近一个加油站钢架全部被折断,一台固定在水泥地上的加油机从地下被拔

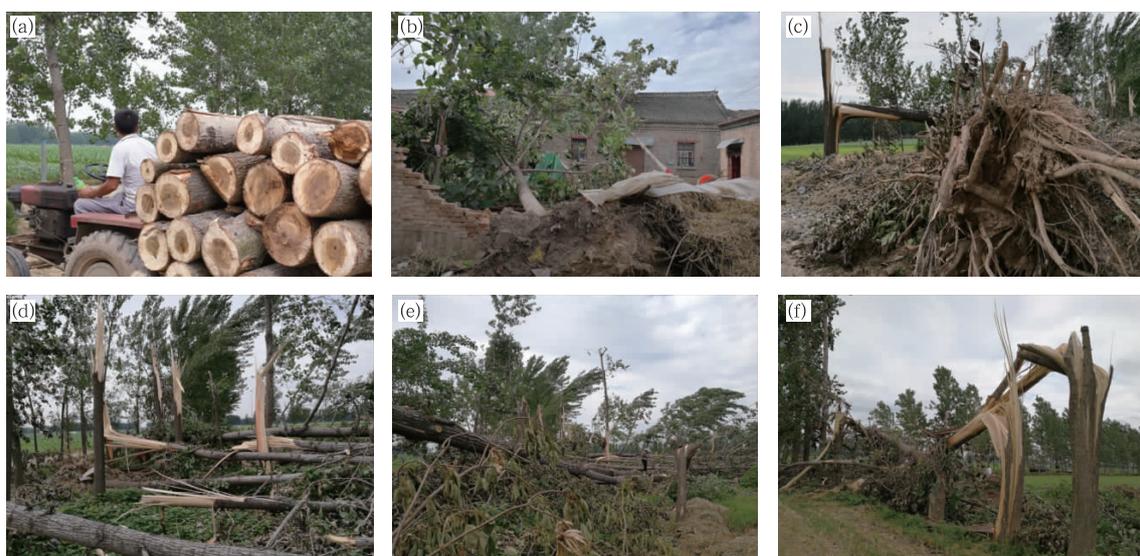


图 3 西华清河驿乡高胡同(a,b,c,d,e)和大李村(f)灾情

Fig. 3 Disaster in Gaohutong (a, b, c, d, e) and Dali (f) Villages of Qingheyi Town in Xihua County

出(图略),附近田间的电线杆被刮倒(图略)。以上可以看出,西华清河驿乡部分村灾情非常严重。

1.3 淮阳现场调查

焦庄村西南方向附近有成排的树木和成片的树林,100~150 m成排的树木大多被折断(图4a),100 m×80 m的一片树林中树木也严重倒伏或刮断,树木整体倒向东北方向的同时又有明显的辐合状,表现出明显的龙卷旋转风灾害特征(图4b)。由图4c可以看到部分受损房屋。此外,该县白楼、林蔡和小河沟等地也出现了不同程度的龙卷灾害。相比较而言,淮阳龙卷灾情较西华略轻。

1.4 龙卷性质和强度

调查组调查过程中,在清河驿乡政府看到了两个村民用手机拍摄的视频,拍摄时间为7月6日16:32,拍摄时长92 s。经反复观看该视频和听声音,可知当时对流风暴云体非常庞大,整个天空布满积雨云,云底很低,积雨云下有黑烟状的漏斗云旋转而下,其直径上大下小,漏斗云气旋性旋转着自西南向东北方向移动,触及地面房屋或树木时,房顶被掀翻,成排树木被刮断,瓦片等杂物被卷入空中,能看到闪电并兼听有雷声,龙卷西侧伴有强降水,这和村民描述的“龙卷风过后暴雨倾盆直灌屋里”一致。另外,此次龙卷的显著特征是大多数受灾树木向北偏东方向倒伏,而龙卷路径两侧的树木倒伏方向呈现出显著辐合特征(图3e、3f和图4a、4b),这与文献(Doswell III, 2003; 郑永光等, 2016b; 朱文剑等, 2016)的结论一致,是龙卷本身流场与龙卷风暴向东北移动矢量相互叠加的结果。

综合研判现场灾损情况、目击者询问记录和手机视频,确定西华、淮阳灾害是由龙卷风导致。但从拍摄视频看,龙卷漏斗云结构比较松散,不很紧密。

对照EF龙卷等级标准(范雯杰和俞小鼎, 2015; 郑永光等, 2016b),西华清河驿乡高胡同和大李村局部龙卷灾情严重,根据该地“场房屋顶被吹走,路上车被吹走,轻的物体快速飞到空中,混凝土电杆摧毁折断和硬木类树木被折断或连根拔起”等灾损情况,确定为EF2级龙卷,最大风速取EF2级标准的下限,3 s平均阵风可达 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或以上。淮阳曹河乡焦庄等地受灾略轻,为EF1级龙卷,3 s平均阵风在 $33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或以上。参照EF龙卷等级标准,综合以上调查确定周口局地龙卷强度整体为EF1级,西华局部达到EF2级。

2 龙卷发生的天气背景和环境场特征

2.1 天气背景分析

7月6日08时,200 hPa豫东上空为明显的分流辐散区(图略),500 hPa周口处于中纬度低槽和副热带高压边缘之间的西南暖湿气流中(图5a),同时低空急流发展迅速,700、850 hPa西南低空急流伸向河南东部地区(图5b,红色三角为龙卷发生地),为周口暴雨和龙卷的产生输送了充足的水汽和暖湿不稳定能量。这种环流形势是河南主汛期典型的暴雨天气类型,其环境条件非常有利于河南黄淮之间的中东部地区出现暴雨,局地大暴雨(实况为当天14—23时豫东国家站累积降水量在30~90 mm,西华、淮阳分别为67和56 mm,最大雨强分别为 40.7 和 $28 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。

在14时地面图上,河南处于1002.5 hPa的低压辐合带中(图5c),河套东部到豫西有弱冷空气南下,周口龙卷发生在地面冷暖空气交界处的暖空气一侧,这里也是低空急流和高空分流辐散耦合的区域,有明显的天气尺度动力强迫,由以上分析可知周



图4 淮阳县曹河乡焦庄村灾情

Fig. 4 Disaster in Jiaozhuang Village of Caohe Town in Huaiyang County

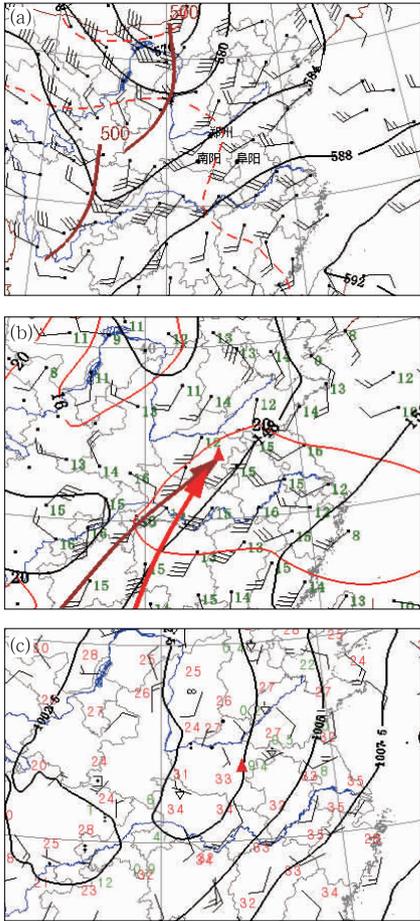


图5 2017年7月6日08时(a)500 hPa和(b)850 hPa高空图,(c)14时地面图(棕色实线为500 hPa槽线,棕色、红色箭头分别为700和850 hPa低空急流,红色三角为龙卷发生地)

Fig. 5 Synoptic chart at 500 hPa (a, brown solid line represents trough), 850 hPa (b, brown arrow line represents low-level jet at 700 hPa and red arrow line for 850 hPa) at 08:00 BT and surface chart at 14:00 BT (c, red triangle point represents where the tornado occurred) on 6 July 2017

口龙卷发生在河南区域暴雨的形势下。

2.2 环境条件分析

探空站观测通常能代表站点周围100~200 km范围的大气状态,阜阳、郑州是距此次龙卷发生地最近的探空站,尽管两站距龙卷发生地均约140 km,但仍基本能够代表周口附近上空的大气状况。考虑郑州站08—14时有降水,以下用阜阳探空资料进行

分析,从6日08时阜阳站探空 $T-\ln p$ 图(图6)可以看出,风随高度顺时针旋转,700 hPa西南风达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,湿层伸展至400 hPa以上,380 hPa以下基本呈准饱和状态,983 hPa到地面有弱的逆温层,500~983 hPa为条件不稳定层结,400~500 hPa为稳定层,400 hPa以上基本为湿中性层结,对整层大气来说,有 $1712 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的对流有效位能(CAPE),抬升凝结高度(LCL)很低(959.2 hPa),且低层垂直风切变较大(图6a)。14时随着气温升高,淮阳站(西华站)已开始降水,14时地面温度和露点温度分别为29和26℃,地面气温由08时的27℃升高到31℃,露点温度和08时一样维持在26℃,用14时淮阳站温度、露点订正后的阜阳探空CAPE明显增大,达到 $3182 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,同时对流抑制能量(CIN)由 $107 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减小为 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图6b),表明大气层结极不稳定。尽管由于气块上升存在空气混合和气块内外气压不完全一致等因素使得估计的CAPE值比实际值偏大,CIN比实际值偏小,但即使1/3的CAPE能量释放也将导致 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升速度,如此大的上升运动配合低层大的垂直风切变和低的抬升凝结高度,非常有利于龙卷的产生。

表1是7月6日阜阳、郑州探空物理量指数,根据阜阳探空资料计算,6日08时大气处于不稳定状态,CAPE为 $1712 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,K指数为 43°C ,SWEAT指数为312,SI为 -4.5°C ;LCL在400 m;0~2、0~1 km垂直风切变(水平风矢量差,下同)分别为 7.2 和 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。20时,SWEAT指数、0~2 km和0~6 km垂直风切变较08时有所增大。SWEAT指数增大至343,对局地龙卷有一定指示意义。大气可降水量为67 mm,水汽条件非常充分,同时LCL低、对流云低高度也很低,为龙卷的形成和触地提供了充足的水汽条件。郑州站探空物理量和阜阳基本一致,都表现出大的CAPE和中层、低层大的垂直风切变,LCL很低。两探空站全球温度 0°C 层高度(DBZ)和 -20°C 层高度较高,由于400 hPa以下没有明显干层,且处于准饱和状态,从而使得湿球 0°C 层高度(WBZ)(俞小鼎,2014)也较高,在4.5 km以上。通过较高的WBZ和DBZ高度可知此次降水过程暖云厚度大,有利于强降水而不利于冰雹的产生。另外值得一提的是,此次龙卷发生前期,7月3—5日豫东连续3 d出现了 35°C 以上的高温,也为局地强风暴的发生集聚了热力不稳定能量。以上分析表明,大的热力不稳定能量和低

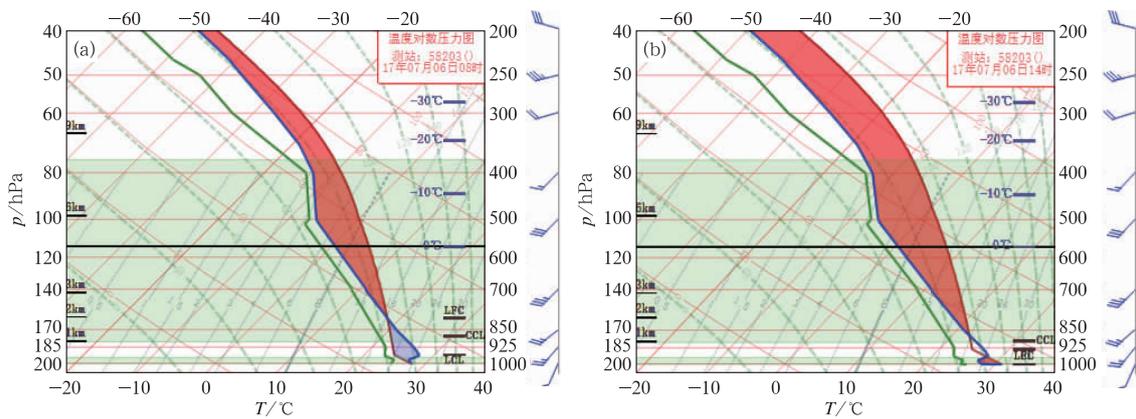


图 6 2017 年 7 月 6 日阜阳(a)08 时 $T\text{-ln}p$ 图,(b)14 时淮阳温度、露点订正的 08 时 $T\text{-ln}p$ 图

Fig. 6 Sounding graph at Fuyang on 6 July 2017

(a) $T\text{-ln}p$ graph at 08:00 BT, (b) $T\text{-ln}p$ graph at 08:00 BT corrected by the temperature and dew point temperature of Huaiyang County at 14:00 BT

表 1 2017 年 7 月 6 日阜阳、郑州探空物理量指数

Table 1 Physical quantity indexes of Fuyang and Zhengzhou sounding on 6 July 2017

站名/时间	物理量											
	CAPE / $J \cdot kg^{-1}$	K / $^{\circ}C$	SI / $^{\circ}C$	PW /mm	0~2 km 风切变 / $m \cdot s^{-1}$	0~6 km 风切变 / $m \cdot s^{-1}$	SWEAT	LCL /km	-20 $^{\circ}C$ 层高度 /km	DBZ /km	WBZ /km	
阜阳	08 时	1712	43	-4.5	67	7.2	9.1	312	0.4	8.7	4.9	4.7
	20 时	1357	38	1.1	67	7.8	14.4	343	1.1	8.9	5.3	4.9
郑州	08 时	1385	33	1.6	59	7.6	6.7	302	0.3	8.7	5.2	4.9
	20 时	951	34	2.0	60	3.5	9.6	227	0.2	8.7	5.2	4.9

层垂直风切变以及低的抬升凝结高度为小尺度龙卷的发生提供了有利的环境条件。

3 龙卷可预警性综合分析

由于龙卷尺度非常小,常规资料很难有所体现。实时业务中卫星、雷达和自动站等高分辨率资料可以为龙卷的估计和预警提供帮助。下面利用业务中常用资料探讨此次局地龙卷的可预警性,找出提前预警的线索。

3.1 地面加密自动站资料分析

2.1 节分析了发生龙卷前的 7 月 6 日 14 时地面图。在 15 时地面加密自动站图(图略)上,开封到南阳为偏南风 and 偏西风形成的东北—西南向的辐合线,两侧温度梯度非常大,左后侧为冷空气和降水回波带形成的冷温区,漯河西侧有一-24 $^{\circ}C$ 的冷舌(冷池),右前侧为降水回波带前沿的暖区。值得一提的

是,漯河西部的冷池是由于 5 日夜里到 6 日上午出现大暴雨,强降水下沉拖曳气流使得地面温度下降而形成,辐合线上漯河附近有中尺度气旋性辐合中心。16 时(图 7)上述系统略东移,商丘到南阳仍维持等温线密集区,50 km 温度相差 5 $^{\circ}C$,暴雨过程中出现如此大的温度梯度是比较少见的,可见冷暖空气在西华附近交汇非常明显,辐合线上出现多个气旋性辐合中心,漯河附近的辐合中心移至周口西华附近,等露点线分析 28 $^{\circ}C$ 的大值中心位于周口附近,其西侧露点梯度也很大,气旋性辐合中心和大湿度中心基本一致(图 7a)。综上所述,西华、淮阳位于地面温度、露点密集带右侧的暖湿气旋性辐合中心附近。

地面总温度(总能量)为单位气块的动能、位能、感热和潜热能的总和,能够很好地反映地面大气的热力条件。利用加密自动站资料计算了 16 时地面总温度,图 7b 可以看出,漯河西侧为 72 $^{\circ}C$ 的低能区,周口附近为 85 $^{\circ}C$ 的高能区,最强的能量锋区位于漯河到周口。在由自动站资料计算的散度和涡度

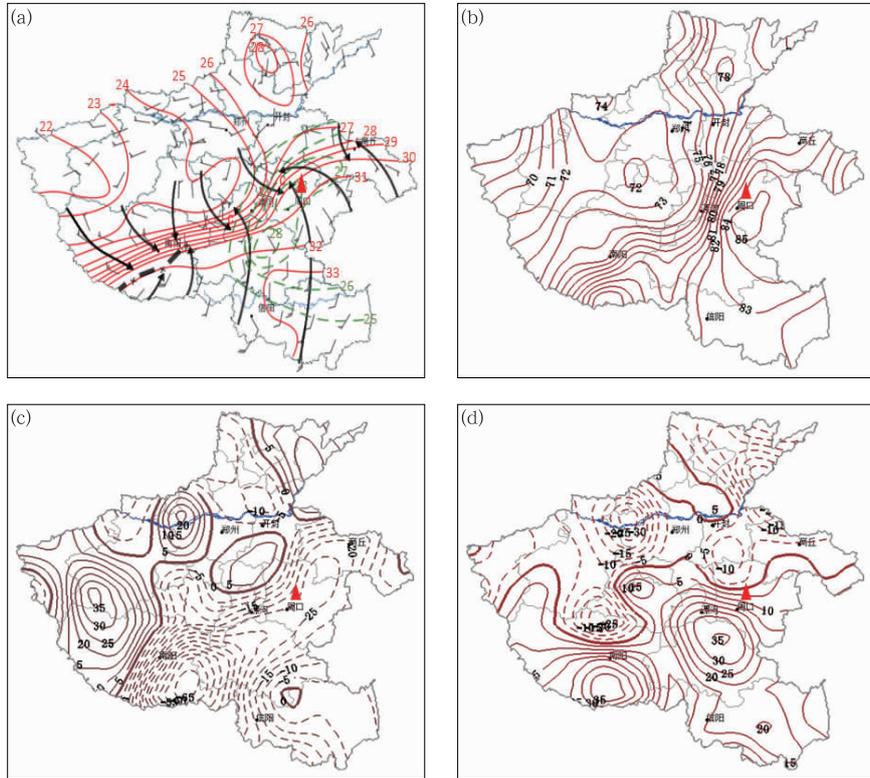


图 7 2017 年 7 月 6 日 16 时地面加密自动站资料

(a) 2 min 平均风向、风速和地面中尺度分析(黑色箭头线:地面流线,红色实线:等温线,绿色虚线:等露点线), (b) 总温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), (c) 散度(单位: 10^{-6} s^{-1}), (d) 涡度(单位: 10^{-6} s^{-1}) (红色三角:龙卷发生地)

Fig. 7 AWS data at 16:00 BT 6 July 2017

(a) mean wind direction, wind speed and surface mesoscale analysis (black arrow line: surface streamline, red line: isothermal line, green line: dew point line), (b) total temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$), (c) divergence (unit: 10^{-6} s^{-1}), and (d) vorticity (unit: 10^{-6} s^{-1}) (red triangle: the place where the tornado occurred)

图上(图 7c、7d),驻马店为 $-25 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的散度大值带和 $35 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的涡度中心,周口位于该辐合区左侧和正涡度中心的北部,地面中尺度辐合区和正涡度区为局地龙卷的发生提供了气旋性涡度流场。

西华站是距离龙卷发生地最近的自动观测站,从 6 日 14—20 时西华地面 5 min 加密自动站海平面气压和温度随时间变化看(图 8),16:05—16:20,温度从 28.6°C 下降到 25.2°C ,14:00—16:10,气压从 995.4 hPa 下降到 993.4 hPa 。之后随着降水的开始和持续,温度一直维持在 25°C ,气压维持在 995 hPa 上下。大范围暴雨过程中的局地龙卷尺度很小,距其最近的自动观测站仍难以有效地监测到龙卷过境时温度、气压的真实变化情况,但从气象要素变化可以看出,龙卷过境前,位于龙卷上游附近的西华站(距龙卷发生地约 $17 \sim 18 \text{ km}$)海平面气压出现了

993.4 hPa 低值,说明本站有中小尺度的低压经过,该低压东移发展过程中有诱发龙卷涡旋产生的可能性,这为局地龙卷的估计也提供了值得关注的线索。



图 8 2017 年 7 月 6 日 14—20 时

西华站气压和温度随时间变化

Fig. 8 Variation of surface pressure and temperature of Xihua Station from 14:00 BT to 20:00 BT 6 July 2017

由加密自动站资料分析可见,其上游附近观测站气压骤降预示中小尺度低压的形成,暴雨过程中的局地龙卷风暴由强降水冷流出流(Markowski and Richardson,2014;郑永光等,2017)和东部暖湿环境之间形成辐合线上的气旋性辐合诱发产生,高时空分辨率的地面自动站温度、露点和能量梯度大值带偏暖湿的正涡度辐合中心附近对龙卷发生区域的估计可提供帮助。

3.2 卫星云图分析

从图 9 FY-2G 卫星云图及客观产品看,红外云图上河南黄淮之间有明显对流云发展(图 9a),可见光云图上云顶起伏明显,可以清楚地看出西华、淮阳上空对流云发展旺盛,云顶伸展至对流层顶后平衍成圆盘状(图 9b),水汽云图上(图略),大范围下沉气流暗区位于山西到陕西,河南位于大尺度暖区云带中,从图 9c 云顶亮温可以看出河南大部为 -32°C 的对流云, -62°C 东北—西南向的深对流云带主要

位于豫东地区,周口附近云顶亮温低至 -72°C ,对流发展非常旺盛。该对流云的发展一方面说明上升运动强、降水强度大,另一方面说明强降水将带来较强的下沉拖曳气流和雷暴冷流出流,从而可导致地面灾害大风甚至局地龙卷风。

3.3 闪电资料分析

根据逐时闪电监测(图 10),15 时地闪密集区位于平顶山附近,之后向东移动、发展,16 时西华、淮阳西侧附近闪电密度非常大。从 14—20 时累积闪电看,闪电密集区主要位于商丘、周口、漯河、驻马店和南阳一带,河南省共发生地闪 803 次,其中正地闪 201 次,负地闪 593 次(占 73.8%),表现为以强降水为主的强对流天气特征。从以上闪电分析可以看出此次暴雨和局地龙卷对流天气非常剧烈。结合龙卷卷实况,可以看出龙卷发生在闪电密度最大区域的右后侧,逐时闪电密集区前侧附近,这为今后同类形势下推测龙卷可能发生区域提供了参考信息。

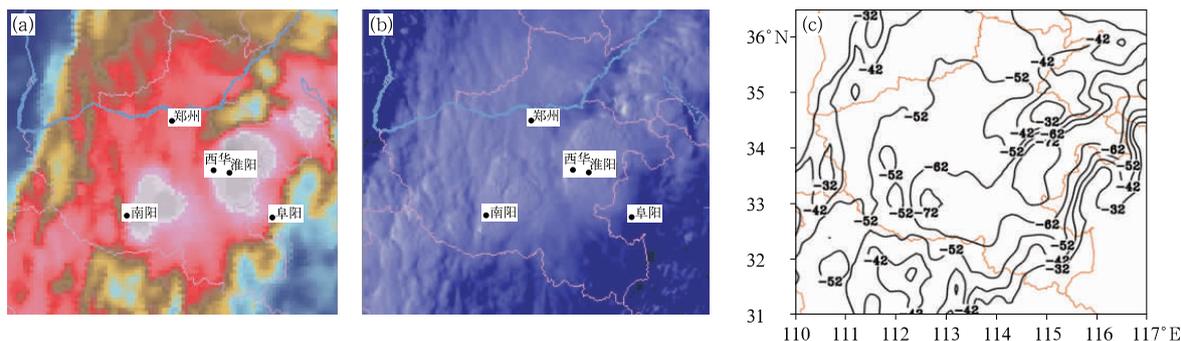


图 9 2017 年 7 月 6 日 16:30(a)红外和(b)可见光云图,(c)16 时 TBB(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 9 (a) Infrared cloud image and (b) visible cloud image at 16:30 BT, (c) TBB (unit: $^{\circ}\text{C}$) at 16:00 BT 6 July 2017

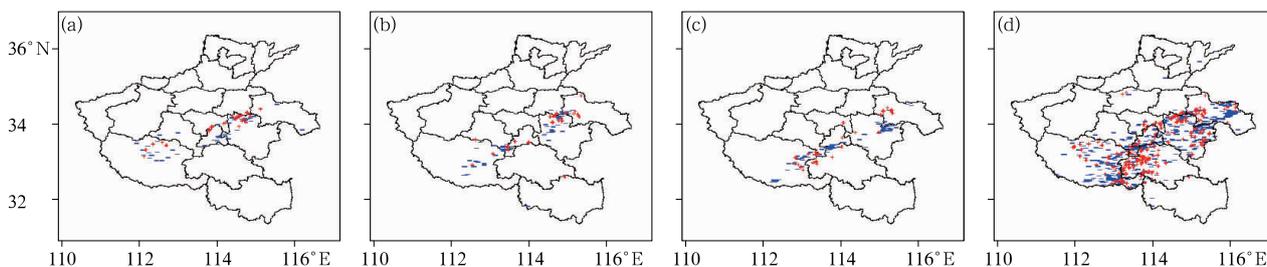


图 10 2017 年 7 月 6 日(a)15 时,(b)16 时,(c)17 时逐时和 14—20 时(d)累积闪电 (“+”代表正地闪,“-”代表负地闪)

Fig. 10 Hourly distribution of lightning at 15:00 BT (a), 16:00 BT (b), 17:00 BT (c) and accumulated distribution of lightning from 14:00 BT to 20:00 BT 6 July 2017 (“+”: positive cloud to ground lightning, “-”: negative cloud to ground lightning)

3.4 新一代天气雷达监测和预警性探讨

新一代多普勒天气雷达能够获取降水和云体中较准确的径向风场数据,从径向速度分布图中可以看出气流的辐合、辐散和旋转特征,结合一定的算法还能够探测到小尺度的三维涡旋,从而能尽早识别龙卷、下击暴流等造成风害的灾害性天气并预测其演变,业务中主要参考雷达探测到中气旋(M)和龙卷涡旋特征(TVS)并结合其他产品进行龙卷预警。以下通过雷达产品分析,探讨局地龙卷的可预警性。

3.4.1 雷达组网拼图

从河南 7 部新一代天气雷达组网拼图(各雷达的等射束高度进行拼接得到等射束高度拼图,其中在各雷达重叠覆盖区,取最小的等射束高度,即混合扫描仰角反射率因子拼图)看,7 月 6 日 15:30—17:30,东北—西南向的降水回波带位于开封到南阳,其东南侧有 50 dBz 的强对流性降水回波,该回波带自西向东移动,其前侧块状对流回波自西南向东北方向移动,部分块状回波强度达 50~55 dBz (图 11),结合图 7 可知龙卷正发生在暴雨回波带前沿的短带状强回波和东部暖湿气流交界处,17:30 后前沿强回波进一步东移影响商丘,部分县(市)(图 10c 闪电密集区前侧附近)也出现了局地龙卷。在今后同类天气环境条件下,混合降水回波前方强对流回波前侧附近是龙卷可能发生、值得关注的警戒区,至于能否出现龙卷还要结合强回波邻近的单站多普勒天气雷达速度图像产品进一步分析判断,特别要注意是否有小尺度涡旋(中气旋和龙卷涡旋特征)的出现。

3.4.2 单站雷达监测及龙卷预警线索

从驻马店雷达监测产品看,暴雨回波带前沿强

回波处对应的回波顶高多在 12 km 以上,在 16 时基本反射率因子图上,西华西侧回波强度达 50 dBz,强回波前侧有底层入流弱回波 WER 特征(图 12a),表明有非常强的上升运动。回波顶局部在 16~18 km,最高达 19 km(图 12c),超过了对流层顶,从 VWP 风廓线(图略)可以看出,10 km 以下基本为一致的西南风,1 km 上下西南风速达到 $12\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,有利于底层强水平涡度的产生并随强上升运动扭转为垂直涡度。对应平均径向速度图上(图 12b)可以看出明显的中气旋超级单体特征,朝向雷达的速度为 $-12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,离开雷达的速度为 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,10 km 内速度差达到 $36\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 12d 为分别沿图 12a 和 12b 白线所示的基本反射率因子和平均径向速度剖面,可以看出 50 dBz 的强回波伸向 6 km 以上,强回波前侧 4 km 以下有弱回波入流区,高层强回波位于低层弱回波之上,呈现出明显的倾斜结构。和图 12b 中气旋对应,平均径向速度剖面可以看出明显的离开和朝向雷达的速度对,该中气旋主要位于 4 km 以下。随后,该暴雨回波带前侧的微型超级单体继续东移,在西华和淮阳交界处产生了局地龙卷灾害天气。

为了更深入地了解局地龙卷的结构,利用驻马店雷达基数据对 6 日周口龙卷风暴进行了三维剖面立体显示(图 13),图 13a 方框中超级单体特征更加清晰,对应速度图上有明显的朝向和离开雷达的速度对,图 13b 中 45~50 dBz 回波高度达 7 km 以上,强回波向东南方向倾斜,和中气旋对应,底层(白色箭头处)有明显入流,具有明显龙卷风暴特征,该对流回波无冰雹,其主要原因是 0°C 和 -20°C 层高度及湿球 0°C 层高度均较高(见 2.2 节),冰相降水粒子在下降过程中被融化以至于很难降落到地面。



图 11 2017 年 7 月 6 日(a)15:30,(b)16:30 和(c)17:30 基本反射率因子雷达拼图

Fig. 11 Radar mosaic of base reflectivity from radars at (a) 15:30 BT, (b) 16:30 BT, (c) 17:30 BT 6 July 2017

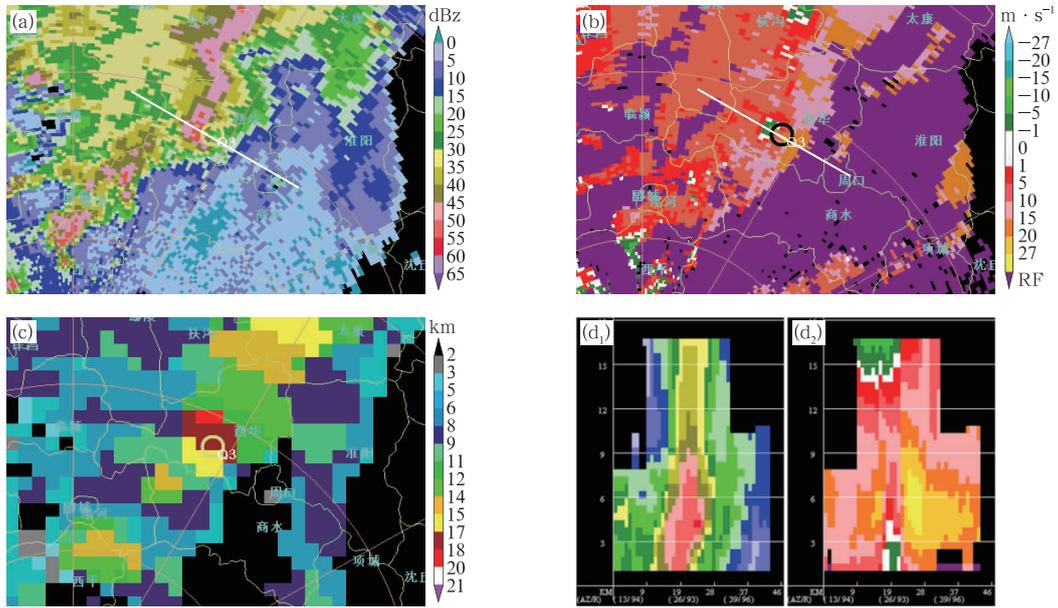


图 12 2017 年 7 月 6 日 16 时驻马店雷达产品

(a)0.5°基本反射率因子,(b)0.5°平均径向速度,(c)回波顶高,分别沿图 12a 和 12b 白色实线所示基本反射率因子(d₁)和平均径向速度(d₂)剖面(色标同图 12a 和 12b)

Fig. 12 Radar products of Zhumadian Station at 16:00 BT 6 July 2017

(a) base reflectivity at 0.5° elevation, (b) mean radial velocity at 0.5° elevation, (c) echo top, base reflectivity and mean radial velocity cross-section along the white line in Fig. 12a (d₁) and Fig. 12b (d₂), respectively (Colorbars are same as Figs. 12a and 12b)

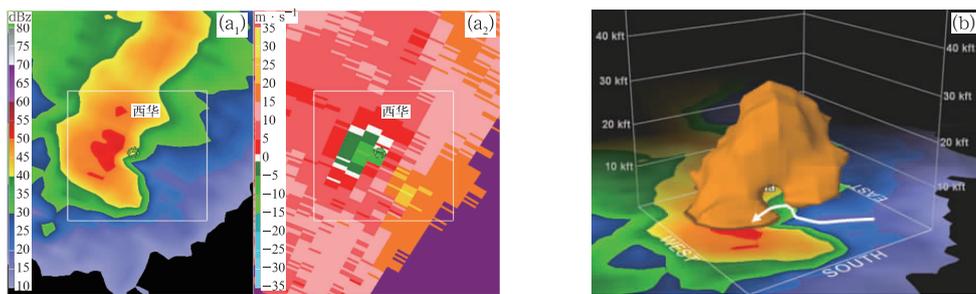


图 13 2017 年 7 月 6 日 16 时驻马店产品

(a)0.5°仰角基本反射率因子(a₁)和平均径向速度(a₂),(b)三维剖面 (方框处和白色箭头表示中气旋)

Fig. 13 Radar products of Zhumadian Station at 16:00 BT 6 July 2017

(a) base reflectivity at 0.5° elevation (a₁) and mean radial velocity (a₂), (b) 3D cross-section

(The box and white arrow represent a mesocyclone)

西华、淮阳两站相距很近且基本位于驻马店和商丘两部多普勒雷达之间的中点位置,分别距驻马店雷达站 100、110 km,距商丘雷达站为 120、100 km,两站均处于或略超过新一代天气雷达对龙卷有效监测的上限(俞小鼎等,2012)。尽管如此,两

部雷达还是监测到了对两处龙卷有很好指示意义的中气旋(M)和龙卷涡旋特征(TVS),图 14 是 6 日 15:42—17:06 驻马店雷达监测情况。影响周口的局地龙卷 15:42 在商水西北部首次探测到三维切变,随后 6 min 一次的观测中,M 或三维切变涡旋一

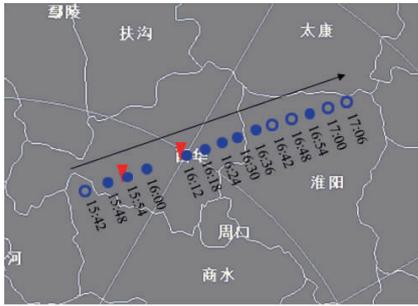


图 14 2017 年 7 月 6 日 15:42—17:06 驻马店雷达监测的中气旋等产品
(蓝色实心圆:中气旋,虚线圆:三维切变,红色倒三角:TVS;16:06 资料缺)

Fig. 14 Mesocyclone product of Zhumadian Radar monitoring at 15:42—17:06 BT 6 July 2017
(blue solid cylinder: mesocyclone, cycle: 3D shear, red inverted triangular: TVS; the data at 16:06 BT: not available)

直维持到 17:06,其中 15:54 和 16:12 在西华境内还出现了 TVS,两时次像素间最大速度差分别为 28、30 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,底高分别 $<1.2 \text{ km}$ 和 $<1.4 \text{ km}$,最大切变值均为 $18 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。商丘雷达 16:24—17:00 在西华和淮阳也监测到 M,其中 16:36 在西华也有 TVS(图略)。在美国,M 已经成为龙卷的重要预警指标,Davies-Jones et al(2001)指出,当监测到 M 并伴随有 TVS,则龙卷发生概率从 15% 上升到 50% 以上。我国很多研究也表明,龙卷发生时伴随有 M,且中气旋底高很低(郑媛媛等,2009;张一平等,2012;吴芳芳等,2013)。在距离雷达站 100~120 km 处出现 M 和 TVS,结合前面分析有利于龙卷的环境条件,可以有较大的把握判断出发生局地龙卷的可能性非常大,对于龙卷致灾强对流天气来说,即便是虚警也比漏预警服务效果好。因此,在环境条件有利的条件下,M 和 TVS 的出现可以作为预警龙卷的可靠线索。

图 15 给出了驻马店雷达监测的 M 和 TVS 产品特征参数表(为了数据连续,16:06 特征值用前后 6 min 数据内插代替),可以看出,龙卷发生前,M 和 TVS 切变值较小,基本在 $10 \times 10^{-3} \sim 12 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,16:30 龙卷发生时,切变值明显增大至 $15 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,由于 M 距雷达站较远,受雷达波束随探测距离增大展宽和波束中心高度随探测距离增加而增高的局限,本次监测到 M 和 TVS 底基本在 $<1 \text{ km} \sim <2 \text{ km}$,其真实高度不能很好地被监测。从参数

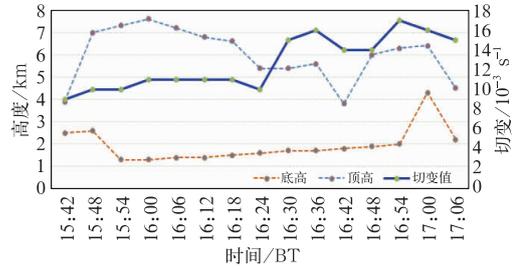


图 15 2017 年 7 月 6 日驻马店雷达监测的中尺度涡旋产品参数
Fig. 15 Parameters of mesoscale vortex product of Zhumadian Radar monitoring on 6 July 2017

值看,M 和 TVS 顶的高度较高,龙卷发生前 M 顶高在 7 km 上下,龙卷发生时顶高降低,而旋转速度迅速加强,预示龙卷将影响到地面,龙卷实况和以上 M 和 TVS 参数特征相吻合。

对于周口龙卷来说,从 15:48 首次出现 M 到龙卷发生有一定时间的提前量,和 1.1 节龙卷实况比较来看,M 的出现较龙卷发生大约有 30 min 的提前量,这为龙卷预警提供了很好的参考,根据持续移动的 M 和 TVS 可提前对龙卷风暴进行预警。尽管利用新一代雷达监测到 M 和 TVS 预警龙卷会存在虚警,但对于局地龙卷高影响致灾天气,在有利的环境条件下,特别是有低空急流和超低空急流同时抬升凝结高度较低的情况下,强回波处对应的雷达速度图上一旦出现 M 和 TVS,建议还是要尽快提前发布高级别的雷暴大风预警信号,并根据 M 和 TVS 特征底和切变等参数及其变化特征,有可能的情况下可适当提及局地可能出现龙卷灾害。

4 结论与讨论

2017 年 7 月 6 日,周口出现了局地龙卷致灾强对流天气,地面龙卷灾害主要出现在西华和淮阳两县交界处长约 4.5~5 km、宽约 100~150 m 的地带,雷达监测和现场灾情具有显著 γ 中尺度涡旋特征。通过人工现场调查、拍摄视频、媒体图片并结合新一代天气雷达观测等综合分析,确定周口局地龙卷整体为 EF1 级,最强达到 EF2 级。本文从预报预警局地龙卷灾害天气的实际业务出发,利用常规高空地面、区域加密自动站、新一代天气雷达以及 FY-2G 等实时观测资料,综合分析了周口局地龙卷的环

境条件和可预警性。得出如下结论：

(1) 本次龙卷发生在中纬度低槽东移和副热带高压边缘西南暖湿气流共同影响的环流形势下,高空分流辐散和低空急流发展的形势配置为暴雨、局地龙卷提供了有利的天气尺度动力条件,龙卷风暴由强降水冷出流和东部暖湿环境之间形成的辐合线上的气旋性辐合诱发产生,地面自动站温度、露点和能量梯度大值带偏暖湿的正涡度中心附近是龙卷可能发生的区域。

(2) 7月6日08时阜阳探空站资料分析大气处于较强的条件不稳定状态,对流有效位能为 $1712 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (14时温度、露点订正后为 $3182 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), K指数为 43°C , SWEAT指数为312, SI为 -4.5°C ; 大气可降水量为67 mm; 抬升凝结高度很低, 位于959.2 hPa处; $0\sim 1 \text{ km}$ 垂直风切变在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或以上。大的热力不稳定和低层垂直风切变及低的抬升凝结高度为小尺度龙卷的发生提供了有利的环境条件。

(3) 在卫星云图上, 龙卷发生在大尺度暖区云带前部, 云顶亮温低至 -72°C , 对流发展非常旺盛。闪电监测龙卷位于闪电密集区东侧附近。

(4) 在雷达回波图上, 龙卷发生在东北—西南向暴雨回波带前沿的块状强回波处, 由暴雨回波带前侧的微型超级单体产生。中气旋和龙卷涡旋特征为预警龙卷提供了可靠的线索, 根据中气旋、龙卷涡旋特征的持续、移动特点可对局地龙卷提前预警, 旋转速度迅速加强、高度下降预示龙卷将影响到地面。

这次龙卷出现在大范围暴雨过程中, 由于龙卷尺度非常小, 利用目前稠密的观测网很难监测到。距龙卷发生地最近的西华县气象观测站测到当天的最大风速仅为 $16.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 难以监测到龙卷风的实际风速。实时业务中预报员更多地关注暴雨和雷电预警, 发布预警时多将雷暴大风和其他预警信号合并发布, 联防服务和预警信号的发布缺乏针对性。对于局地突发性中小尺度灾害天气, 要强化基层台站预报员的灾害风险意识和气象服务的敏感性, 注重市、县级预报员新一代天气雷达分类强对流天气监测预警指标业务应用的技术培训, 加强气象信息员的反馈机制, 在灾情发生的第一时间及时为气象部门提供可靠的气象信息。在有利的天气形势下, 各级预报员应加强监测, 结合SWAN等临近预报系统的监测产品, 综合多源气象信息及时判断强对流天气类型, 提高防范龙卷灾害天气的针对性, 为防灾

减灾赢得主动。

致谢: 中国气象局干部培训学院俞小鼎和国家气象中心毛冬艳对本文进行技术指导, 国家强天气中心朱文剑提供了龙卷三维剖面图, 西华县气象局梦浩民提供了视频资料。在此一并表示感谢!

参考文献

- 范雯杰, 俞小鼎, 2015. 中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象, 41(7): 793-805. Fan W J, Yu X D, 2015. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China[J]. Meteor Mon, 41(7): 793-805(in Chinese).
- 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等, 2018. 广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比[J]. 应用气象学报, 29(1): 70-83. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2018. Contrastive analysis of two intense typhoon-tornado cases with synoptic and Doppler weather radar data in Guangdong[J]. J Appl Meteor Sci, 29(1): 70-83(in Chinese).
- 蒋汝庚, 1997. 龙卷型强风暴——1995年4月19日洪奇沥龙卷风剖析[J]. 应用气象学报, 8(4): 492-497. Jiang R G, 1997. A tornado type severe storm—report of detailed analysis on Hongqili Tornado on 19 April 1995[J]. Quart J Appl Meteor, 8(4): 492-497(in Chinese).
- 钱维宏, 梁卓轩, 金荣花, 等, 2017. 扰动变量在强对流天气分析和模式评估中的应用——以苏北里下河地区引发龙卷的扰动系统为例[J]. 气象, 43(2): 166-180. Qian W H, Liang Z X, Jin R H, et al, 2017. Application of anomalous variables to severe convective system analyses and model evaluation: a case study on tornado producing anomalous systems near Lixia River, Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 43(2): 166-180(in Chinese).
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 2015. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析[J]. 气象学报, 73(3): 425-441. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2015. Study of Northeast China torandoes: the environmental characteristics[J]. Acta Meteor Sin, 73(3): 425-441(in Chinese).
- 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[J]. 气象, 38(12): 1473-1481. Wang Y, Zheng Y Y, Zhang X M, et al, 2012. The contrastive research on environmental conditions for tornadic and non-tornadic severe convective weather under ahead of trough pattern during summer in Anhui Province[J]. Meteor Mon, 38(12): 1473-1481(in Chinese).
- 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚, 等, 2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. 气象学报, 71(2): 209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin, 71(2): 209-227(in Chinese).
- 俞小鼎, 2014. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象, 40(6): 649-654. Yu X D, 2014. A note on the melting level of hail[J]. Meteor Mon, 40(6): 649-654(in Chinese).

- 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[J].大气科学,32(3):508-522. Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F, et al, 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm[J]. Chin J Atmos Sci, 32(3):508-522(in Chinese).
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等,2006.安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J].高原气象,25(5):914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al, 2006. The detection of a severe tornado event in Anhui with China New Generation Weather Radar[J]. Plateau Meteor, 25(5):914-924(in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):311-337(in Chinese).
- 张小玲,杨波,朱文剑,等,2016.2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析[J].气象,42(11):1304-1314. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al, 2016. Analysis of the EF4 Tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016[J]. Meteor Mon, 42(11):1304-1314(in Chinese).
- 张一平,俞小鼎,吴蓁,等,2012.区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析[J].气象学报,70(5):961-973. Zhang Y P, Yu X D, Wu Z, et al, 2012. Analysis of the two tornado events during a process of regional torrential rain[J]. Acta Meteor Sin, 70(5):961-973(in Chinese).
- 郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017.强对流天气预报的一些基本问题[J].气象,43(6):641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6):641-652(in Chinese).
- 郑永光,田付友,孟智勇,等,2016a.“东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J].气象,42(1):1-13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al, 2016a. Survey and multi scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship “Dongfangzhixing”[J]. Meteor Mon, 42(1):1-13(in Chinese).
- 郑永光,朱文剑,姚聃,等,2016b.风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计[J].气象,42(11):1289-1303. Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al, 2016b. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County, Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 42(11):1289-1303(in Chinese).
- 郑媛媛,张备,王啸华,等,2015.台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J].气象,41(8):942-952. Zheng Y Y, Zhang B, Wang X H, et al, 2015. Analysis of typhoon tornado weather background and radar echo structure[J]. Meteor Mon, 41(8):942-952(in Chinese).
- 郑媛媛,朱红芳,方翔,等,2009.强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究[J].高原气象,28(3):617-625. Zheng Y Y, Zhu H F, Fang X, et al, 2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm[J]. Plateau Meteor, 28(3):617-625(in Chinese).
- 朱文剑,盛杰,郑永光,等,2016.1522号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析[J].暴雨灾害,35(5):403-414. Zhu W J, Sheng J, Zheng Y G, et al, 2016. Damage survey and mesoscale features analysis on tornado in outer rain-band of Typhoon “Mujigae” on 4 October 2015[J]. Torrent Rain Dis, 35(5):403-414(in Chinese).
- Davies-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B, 2001. Tornadoes and tornadic storms[M]//Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society:167-221.
- Doswell III C A, 2001. Severe convective Storms[M]. Boston: American Meteorological Society:1-525.
- Doswell III C A, 2003. A guide to F-scale damage assessment[R]. Silver Spring: National Weather Service.
- Doswell III C A, Brooks H E, Dotzek N, 2009. On the implementation of the enhanced Fujita scale in the USA[J]. Atmos Res, 93(1/2/3):554-563.
- Evans J S, Doswell III C A, 2002. Investigating derecho and supercell proximity soundings[C]//Preprints, 21th Conference on Local Severe Storms. San Antonio: AMS:635-638.
- Markowski P M, Richardson Y P, 2014. The influence of environmental low-level shear and cold pools on tornadogenesis: insights from idealized simulations[J]. J Atmos Sci, 71(1):243-275.
- Meng Z Y, Yao D, 2014. 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, 29(3):702-724.
- Meng Z Y, Yao D, Bai L Q, et al, 2016. Wind estimation around the shipwreck of Oriental Star based on field damage surveys and radar observations[J]. Sci Bull, 61(4):330-337.
- Trapp R J, Stumpf G J, Manross K L, 2005. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones[J]. Wea Forecasting, 20(4):680-687.
- Ziegler C L, Rasmussen E N, Shepherd T R, et al, 2001. The evolution of low-level rotation in the 29 May 1994 Newcastle-Graham, Texas, storm complex during VORTEX[J]. Mon Wea Rev, 129(6):1339-1368.