

区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析^{* 1}

张一平^{1,3} 俞小鼎² 吴 蓁^{1,3} 梁俊平¹ 吕林宜¹

ZHANG Yiping^{1,3} YU Xiaoding² WU Zhen^{1,3} LIANG Junping¹ LV Linyi¹

1. 河南省气象台, 郑州, 450003

2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京, 100081

3. 河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州, 450003

1. *Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003, China*

2. *China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China*

3. *Henan Key Laboratory of Agrometeorological Ensuring and Applied Technique, Zhengzhou 450003, China*

2011-01-31 收稿, 2012-03-09 改回.

Zhang Yiping, Yu Xiaoding, Wu Zhen, Liang Junping, Lv Linyi. 2012. Analysis of the two tornado events during a process of regional torrential rain. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(5): 961-973

Abstract A detailed analysis of the two tornado processes on 17 and 19 July 2010 in Henan was made by using a new generation of Doppler radar data, the conventional observations data, the NECP reanalysis data and other information. The results were as follows: (1) the weather background of the tornado occurrence; the two tornadoes occurred during a process of regional torrential and severe torrential rains in Henan, which were impacted by the southwestern flow in the subtropical high edge, the strong divergence areas north of the Tibetan high ridge and on the right rear of the entrance areas of the upper jet stream with the vortex, shear line and jet stream existing in the middle and lower levels. Tornadoes occurred in the southeast quadrant of meso- β cyclones on the ground, about 50 km from the cyclone center. (2) The environment field characteristics of the tornadoes covered; the convective available potential energy greater than 1000 J/kg, unstable atmospheric stratification, the K index greater than 36°C, the SWEAT index of the occurrence of strong tornadoes being about 400, the vertical wind shear for 0–1.5 km being up to 15 m/s, and a very low lifting condensation level that was from 0 to 300 m. (3) The analyzed results of the radar echo and characteristic parameters; two tornadoes both occurred in the β -meso scale spiral rainbands on the southeast side of the vortex with the intensity of the echo band of about 50 dBz and the top from 9 to 12 km, and the tornado was produced by a mini-supercell that was in the center of the echo, with a significantly weak echo upward flow zone in the vertical profile and the interface zone between the rear flank downdraft and updraft is a key area which is prone to tornadoes. The γ -mesoscale cyclone series experienced a evolution process related to three dimensional correlated shear, mesocyclone, tornado vortex signature as shown in the velocity profiles. The mesocyclone occurred earlier about 0.5–1 h than the tornado, which made sense to estimating and warning tornado. The analyses of the mesocyclones (M) and the parameters of tornado vortex signature (TVS) show that, the height of mesocyclone and the bottom of TVS both were lower than 1 km with the height of the bottom of TVS being the same as or slightly lower than that of mesocyclone; The height of the bottom of the F2 level tornado was < 0.5 km, the height of the top of TVS was generally from 2 to 4 km, the height of the top of mesocyclone was generally from 2 to 3 km; and from the maximum shear value, the maximum shear value of mesocyclone was generally $(1.0 - 4.0) \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, the maximum shear value of TVS was generally $(2.0 - 5.0) \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, the average height of the maximum shear appeared from 0.8 to 0.9 km, and the maximum shear height of the F2 level tornado was generally 0.5 km. On the comparison of the F1 and F2 tornadoes, the height of the characteristic bottom and top of the F2 tornado were both lower than that of the F1 tornado, and the maximum shear value of the F2 tornado

* 资助课题: 国家自然科学基金面上项目(41175043)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2011-029)、河南省科技厅项目(112102310033)和河南省气象局项目(Z201201)。

作者简介: 张一平, 主要从事短时天气预报和强对流天气研究。E-mail: zhangyiping618@yahoo.com.cn

was double than the F1 with the large shear in the lower level able likely to cause severe tornado disasters. According to the characteristics of the mesocyclone and the TVS, the thinking of warning the tornado in the regional torrential rainfall is illustrated. Finally, the reason of the tornadoes occurred during the regional torrential rainfall was discussed.

Key words Meso- β scale spiral rainband, Mesocyclone, Mini-supercell, TVS, Tornado early warning

摘要 利用新一代多普勒雷达资料、常规观测和 NCEP 等资料对 2010 年 7 月 17 和 19 日河南两次龙卷过程进行了详细分析。结果如下:(1)龙卷发生的天气背景是:两次龙卷均发生在副热带高压边缘西南气流影响河南出现区域暴雨和大暴雨过程中,高层为青藏高压脊北侧和高空急流入口区右后侧强辐散区,中低层有低涡、切变线、急流,龙卷发生在地面 β 中低压气旋的东南象限,距气旋中心约 50 km 处。(2)龙卷发生的环境场特征:对流有效位能大于 1000 J/kg,大气层结不稳定,K 指数大于 36 $^{\circ}$ C,发生强龙卷的 SWEAT 指数在 400 左右,0—1.5 km 垂直风矢量切变达 15 m/s,而抬升凝结高度很低(0—300 m)。(3)雷达回波和特征参数分析结果为:两次龙卷均发生在低涡东南侧的 β 中尺度螺旋雨带上,该回波带强度 50 dBz 左右,顶高 9—12 km,龙卷是由该回波带中部的微型超级单体产生,垂直剖面上低层有明显的弱回波上升气流区,螺旋雨带中部向东凸起的强降水下沉气流和上升入流交界处是龙卷易出现的关键区域。速度图上, γ 中尺度气旋系列先后经历了三维相关切变、中气旋、龙卷涡旋特征的演变过程。中气旋提前于龙卷发生前 0.5—1 h 出现,这对估计和预警龙卷很有意义。中气旋和龙卷涡旋特征参数分析结果是:中气旋和龙卷涡旋特征(TVS)底的高度都在 1 km 以下,TVS 底和中气旋底高度相当或略低一些,F2 级龙卷底高 < 0.5 km,TVS 顶的高度一般在 2—4 km,中气旋顶高一般 2—3 km;从最大切变值来看,中气旋最大切变一般在 $(1.0—4.0) \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,TVS 最大切变值一般为 $(2.0—5.0) \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,最大切变高度平均出现在 0.8—0.9 km,F2 级龙卷最大切变高度一般在 0.5 km。就 F1 和 F2 两次龙卷过程比较看,F2 龙卷特征底和顶的高度都低于 F1 龙卷,最大切变值 F2 龙卷比 F1 龙卷大一倍,出现在低层大的切变更容易造成严重的龙卷灾害。根据局限于低层中气旋和 TVS 系列性、移动性、持续性的特点明确了区域暴雨中预警龙卷的思路。最后对区域暴雨过程中出现龙卷的原因进行了探讨。

关键词 β 中尺度螺旋雨带,中气旋,微型超级单体,龙卷涡旋特征,龙卷预警

中图法分类号 P445+1

1 引言

龙卷是一种非常强烈的天气现象,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,强龙卷发生时往往造成重大人员伤亡和财产损失。多普勒天气雷达除了可以测量降水回波强度外,还可以测量降水粒子径向速度,从而可以识别出中小尺度气旋、反气旋、辐合、辐散特征,是探测和预警龙卷强有力的工具。Donaldson(1970)首次利用多普勒天气雷达观测到了超级单体中的“中气旋”(Brook,1949;Fujita,1963)。美国国家强风暴实验室利用多普勒天气雷达资料,发现第一个可能伴随龙卷过程的比中气旋尺度更小的多普勒雷达速度场涡旋——龙卷涡旋特征(TVS)。国际上很多专家对龙卷做过研究(Przybylinski,et al,1990;Rasmussen,et al,1994;Ziegler,et al,2001),由于探测手段的限制,在新一代天气雷达网建立之前,中国气象工作者对龙卷的研究极少(蒋汝康,1997;魏文秀等 1995),随着中国新一代天气雷达布网建设和业务化应用,获取了大量高时空分辨率的雷达资料,捕捉到了多个小尺度龙卷灾害天气过程,中国气象工作者

近几年也做了一些研究。俞小鼎等(2008)对发生在安徽北部的伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴的环境条件进行了分析,认为强降水超级单体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,中等程度的对流有效位能值和大的深层(925 和 500 hPa)垂直风切变有利于超级单体的产生,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。超级单体的演化可以归结为“带状回波-典型强降水超级单体-弓形回波”3 个阶段,龙卷出现在超级单体 S 形回波阶段。俞小鼎等(2006a)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进行了分析,结果表明,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。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。何彩芬等(2006)分析了宁波市一次台风前部龙卷发生发展的环境特征和雷达回波特

征,认为下湿中干、强的垂直风切变及地形条件等有利于局地弱龙卷的产生,并用反射率、剖面产品综合分析了该风暴的三维结构。姚叶青等(2007)对两次强龙卷过程分析认为地面较为暖湿,低层垂直风切变

较大,两次龙卷虽然回波形态、强度和高度各异,但都存在强的中气旋,雷达超前于龙卷发生约 30 min 识别出中气旋。

表 1 两次龙卷受灾情况
Table 1 The condition of the disasters produced by the two tornadoes

地点	时间		受灾范围		伤亡人数		房、树受损		灾情程度
	起始	持续(min)	乡镇	村	死亡	受伤	倒房(间)	树木(万)	
虞城	17日 17:40	约 10	8	100	—	5	191	18	F2 相当大
夏邑	17日 17:50	3	17	—	2	32	1800	—	F2 相当大
长葛	19日 05:30	3	1	2	—	—	197	0.5	F1 中等

2010年7月17—19日河南连续出现了大范围的区域暴雨、大暴雨天气过程。7月17日在河南自南阳至商丘的一条东北—西南向暴雨带的东南侧夏邑县、虞城县 20 个乡镇上百个村庄遭遇龙卷风袭击。这次龙卷是近几年中国出现范围大、持续时间长的一次龙卷过程,因龙卷发生在下午,所幸没有造成很大的人员伤亡,但两县仍有 2 人死亡,32 人受伤,10 余万人受灾。夏邑县歧河乡胡店村几乎找不到一间完好的房子。根据房屋损害、树木折损程度以及重物推移距离和目击者描述,按照 Fujita (1981)龙卷风等级标准,可确定商丘东部龙卷等级至少达到了 F2 级。7月19日在一条自南阳西部经平顶山到豫北地区的一条东北—西南区域暴雨一大

暴雨带的东侧,许昌长葛南席镇出现龙卷,拐子张、张子店两个村受灾,根据房屋、树木受损程度和目击者描述,此龙卷为 F1 级龙卷(表 1)。17日和虞城、夏邑相邻的安徽亳州、砀山也遭受龙卷风袭击。图 1 是两次龙卷发生的时间(北京时,下同)和地点,这两次龙卷是河南新一代天气雷达(主要涉及郑州 SA 和商丘 SB 多普勒天气雷达)业务运行以来首次完整探测到的龙卷过程,区域暴雨过程中河南出现如此强的龙卷实属罕见,因此,很有必要对两次龙卷事件发生的天气形势、雷达等探测到的高时空分辨率资料进行详细分析,以期找出暴雨过程中龙卷风发生的环境场和雷达回波特征以及提前预警的线索,探索龙卷发生的机理。

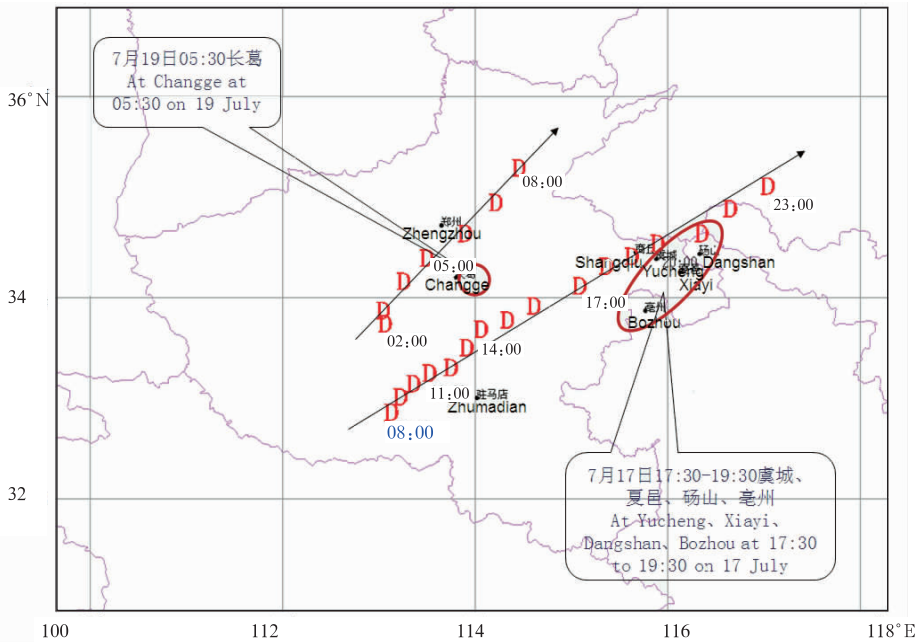


图 1 两次龙卷发生的时间和地点(红圈)(红色 D 表示地面低压中心轨迹)

Fig. 1 Time (BT: Beijing Time) and location (red circle) of the two tornadoes occurrence

2 天气背景

2010年7月17日08时(图2a),河南位于200 hPa青藏高压脊北侧和高空急流入口区右后侧的强辐散区中,500 hPa低槽位于河套地区东部,河南位于副热带高压(副高)和大陆高压之间的低值区,受槽后冷空气及副高西北侧和槽前西南暖湿气流共同影响,东北—西南向的切变线自河南西南部伸向黄河入海口,温度槽和显著降温区位于河套地区。850 hPa商丘附近有一低涡,自商丘伸向青岛有一东西向暖切变线,伸向恩施有一东北—西南向冷式切变

线,河南南部比湿达14 g/kg。700、850 hPa低空急流自两广地区经湖南、湖北伸向河南东部,河南东部位于低空急流出口区左前侧。20时(图略)副高和大陆高压原地少动,强度加强,河套东部低槽加深,低层低涡、切变线和低空急流维持。18日20时(图略),500 hPa副高北进,河套东部低槽收缩,冷槽在河套西部发展,低空急流略向西移动。19日08时(图2b)河南位于200 hPa急流入口区右后侧辐散区,500 hPa山西南部生成一切断低涡,河南受低涡后部冷空气和低涡槽前及副高边缘西南暖湿空气共同影响,低空急流头部伸向许昌附近,中低层低涡、

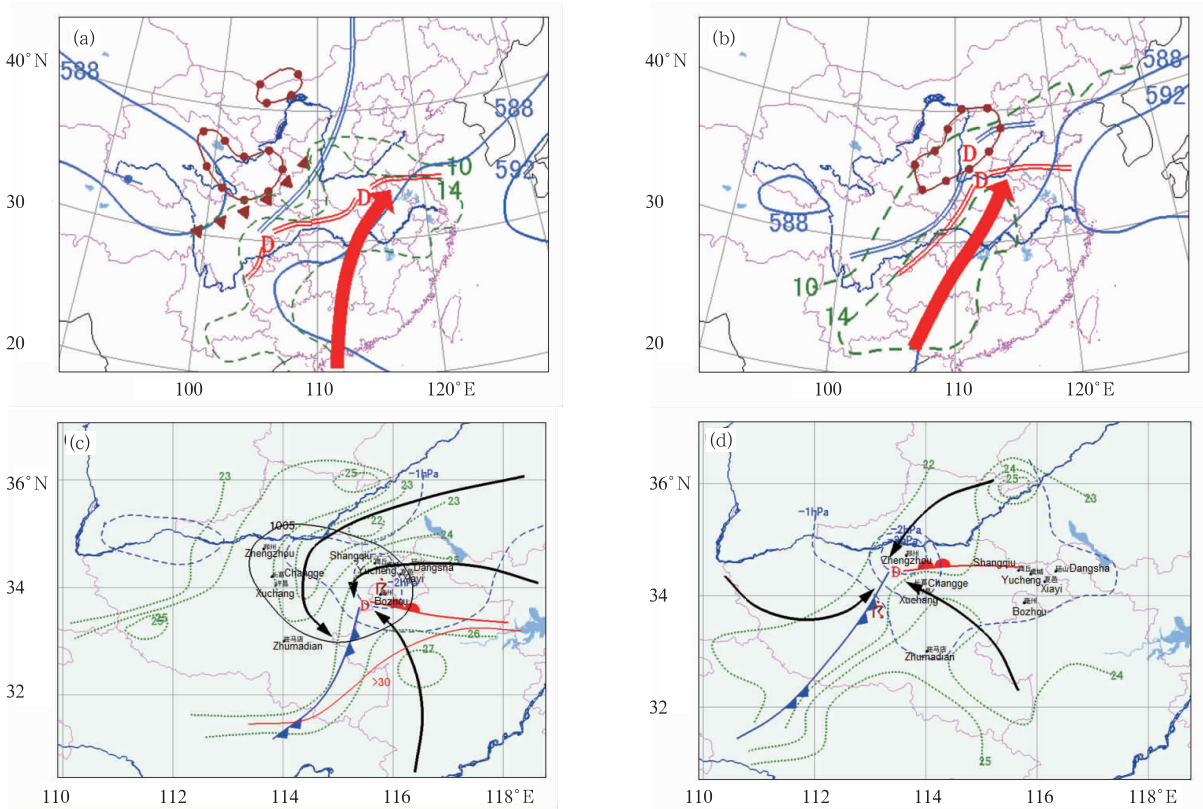


图2 2010年7月17和19日高空地面综合分析图

(a. 17日08时高空, b. 19日08时高空, c. 17日17时地面, d. 19日05时地面;

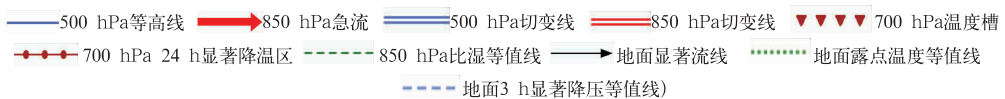
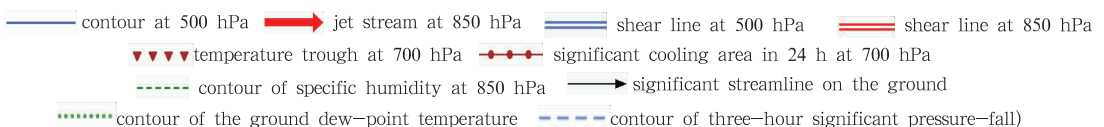


Fig.2 Comprehensive analysis graphs on 17 and 19 July 2010

(a. comprehensive analysis graph for the high-altitude at 08:00 BT 17 July 2010, b. comprehensive analysis graph for the high-altitude at 08:00 BT 19 July 2010, c. comprehensive analysis graph for the ground at 17:00 BT 17 July 2010, d. comprehensive analysis graph for the ground at 05:00 BT 19 July 2010;



切变线位置略向西北方向移动,影响河南中西部、北部等大部分地区。由以上分析可见,17—19日河南处于较稳定的大尺度形势下,高空强辐散,中、低空有低涡、切变线强辐合,低空急流向河南输送大量水汽和不稳定能量。这是河南出现区域暴雨、大暴雨非常有利的形势,实况是河南连续3d出现区域暴雨天气。暴雨带、大暴雨带和图1(红色D为根据逐时地面加密自动站资料风场、气压场确定的地面低压中心位置和移动方向)低压中心位置吻合,呈东北—西南向,分布于低压中心两侧附近,两次龙卷发生前地面图上(图2c、d)均有 β 中尺度低压,龙卷均发生在地面低压中心东南方向约50 km处,地面温度大都在24—27℃,露点高达22—26℃,温度露点差大都在1—2℃,地面空气基本呈饱和状态。

3 加密自动站资料分析

从距龙卷发生地最近的夏邑和许昌自动站资料

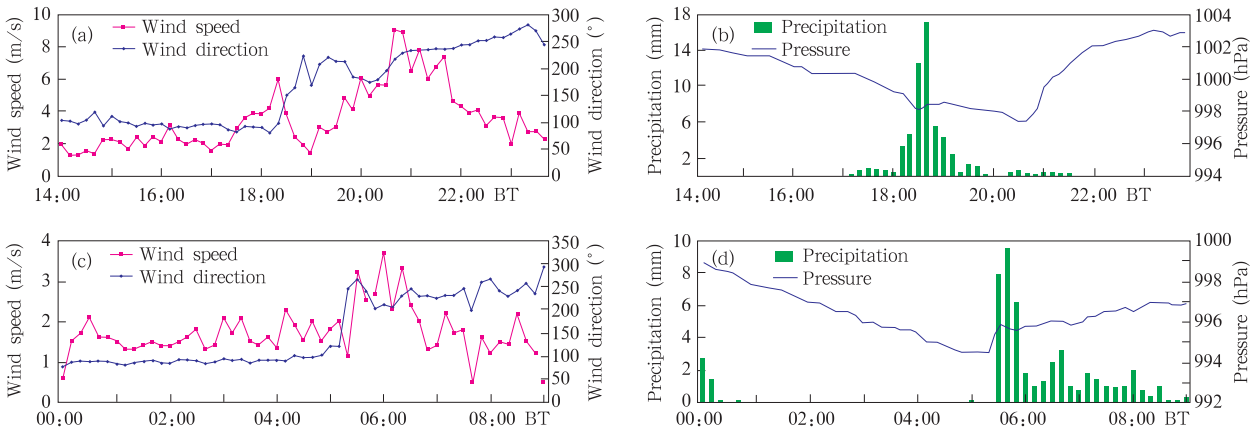


图3 2010年7月17日14—24时夏邑(a)风向、风速和(b)气压、降水, 2010年7月19日00—09时许昌(c)风向、风速和(d)气压、降水

Fig. 3 (a) Temporal variations of the wind direction and speed at the Xiayi station at 14:00 BT to 24:00 BT 17 July 2010, (b) Temporal variations of the pressure and distribution at the Xiayi station at 14:00 BT to 24:00 BT 17 July 2010, (c) Temporal variations of the wind direction and speed at the Xuchang station at 00:00 BT to 09:00 BT 19 July 2010, and (d) Temporal variations of the pressure and distribution at the Xuchang station at 14:00 BT to 20:00 BT 19 July 2010

4 多普勒天气雷达资料分析

7月17日发生在虞城、夏邑的龙卷距商丘雷达站约40—70 km,19日长葛龙卷距郑州雷达站60—70 km。郑州、商丘两部新一代多普勒天气雷达完整地监测到了这两次暴雨和龙卷天气过程,以下着重分析两部新一代多普勒天气雷达对龙卷过程的探

测资料。(间隔10 min,两自动站点未受龙卷风袭击)看,龙卷发生前后夏邑、许昌两站风向、风速、气压、降水均有明显变化,气温没有明显下降。从图3a和c两站风向、风速随时间的变化可以看出,17日18时30分和19日05时30分前后均出现了风速突增和风向突变,从图3b、d气压和降水随时间的变化看,17日20时30分和19日05时30分前后均有气压显著下降,最低分别降至997.4和994.4 hPa,集中降水时段分别出现在17日18时30分和05时50分前后,峰值降水分别为17日18时20—30分降水量17.0 mm,19日05时30—40分降水量9.5 mm。以上说明两次龙卷发生前后龙卷发生地附近观测站存在明显气压下降和强的对流降水。而强飚线过境前后除风向突变、风速突增外,同时伴有气压涌升和气温骤降。从以上精细化资料分析可以看出,区域暴雨过程中龙卷发生前后各气象要素变化和强对流飚线过程有明显区别。

测资料。

4.1 雷达回波演变及特征

从商丘雷达基本反射率因子图上看,16时30分在大片混合降水回波中有清晰可见的低涡螺旋雨带,其东南侧位于柘城、鹿邑到郸城的螺旋回波带强度达48—53 dBz。随着低涡和地面气旋向东北移动,该强回波带也向东北方向移动,先后经过了亳

州、虞城、夏邑,而后经苏皖北部移向山东,螺旋雨带路径之地均出现了暴雨,其中,低涡东南侧的强螺旋雨带在亳州、夏邑、虞城、砀山发展旺盛,实况表明这些地方都出现了雷暴,平均径向速度图上显示螺旋雨带经过的地方出现了多个 γ 中尺度气旋,亳州、虞城、夏邑等地出现龙卷时都伴有中气旋和龙卷涡旋特征(TVS),图4是17日17时50分雷达产品,图4a基本反射率因子图上显示了螺旋雨带特征,其上叠加了中气旋和TVS,图4b为沿图4a中白线做的

垂直剖面,从剖面图上可见48—53 dBz的强回波伸至6 km,顶高9 km以上,并有倾斜悬垂结构,其下面为弱回波区,白色箭头所指处说明强雨带回波东南侧低层有很强的上升气流。图4d平均径向速度图上,有明显的正负速度对,此 γ 中尺度气旋对龙卷的产生有很好的指示意义。图4c为龙卷发生时段的垂直风廓线(地面为东南风2—4 m/s),从地面到1.5 km风速明显加大,1.2—2.1 km有16 m/s的偏南风速层,说明低层有强的垂直风切变。

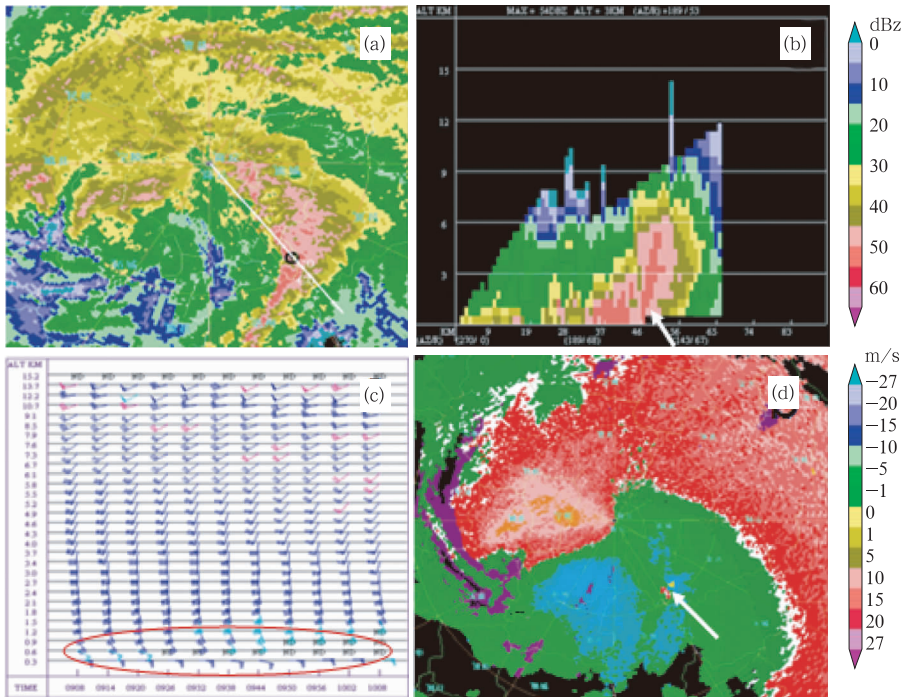


图4 2010年7月17日17时50分商丘雷达产品

(a. 1.5°基本反射率因子R19, b. 反射率因子剖面, c. 垂直风廓线, d. 1.5°平均径向速度V27)

Fig. 4 Radar products from the Shangqiu station at 17:50 BT 17 July 2010

(a. 1.5° reflectivity factor product R19, b. reflectivity profile, c. vertical wind profile, d. 1.5° average radial velocity V27)

从郑州雷达资料看,19日长葛东部龙卷发生时和17日商丘东部出现龙卷雷达回波有很多相似之处。从05时33分雷达产品看(图5),一条东北—西南向螺旋雨带自尉氏经长葛、许昌伸向平顶山(图5a),强度48—53 dBz,垂直剖面显示53 dBz强回波伸至6 km,回波顶高12 km,呈倾斜悬垂结构(图5b),其下面为弱回波区,说明雨带东南侧低层上升气流也很强,垂直风廓线(图5c)05时30分在1.2—2.1 km高度为偏南风12 m/s,0—1.2 km风速明显加大(地面为2—4 m/s东南风),说明低层有较强垂

直风切变。图5d平均径向速度图上,有明显的正负速度对,气旋性涡旋强度达到了中气旋和TVS标准,对出现龙卷有很好的指示意义。

从以上两次龙卷发生时的雷达资料可以看出,基本反射率因子图上都有自涡旋中心以顺时针方向旋转的 β 中尺度螺旋雨带,而螺旋雨带系统随低涡逆时针向低涡中心运动。此雨带长100—150 km,宽20—30 km,雷达回波强度50 dBz左右,龙卷发生在低涡东南支螺旋雨带中部向东凸起的强回波处,该处基本反射率因子剖面显示低层有很强的上

升气流弱回波区和倾斜悬垂结构,50 dBz 强回波高达 6 km,顶高 9—12 km,具有明显的对流云特征。速度图上龙卷发生处有中气旋、TVS。按照具有持

续深厚中气旋的超级单体的定义,两次龙卷都是由螺旋雨带上的微型超级单体(Burgess, et al, 1995)造成的。

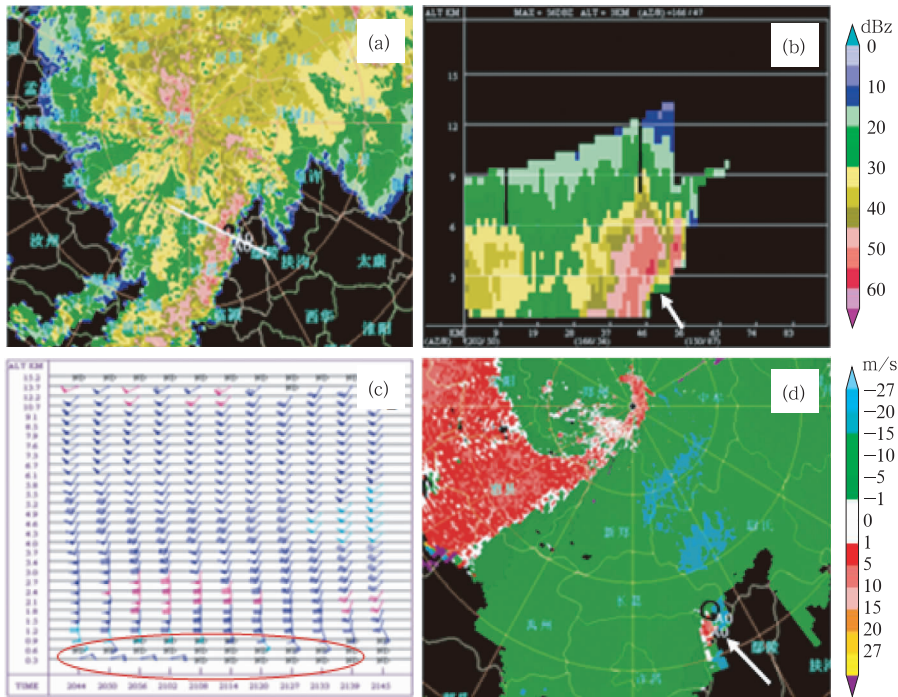


图5 2010年7月19日05时33分郑州雷达产品
(a. 1.5°基本反射率因子 R19, b. 反射率剖面, c. 垂直风廓线, d. 1.5°平均径向速度 V27)

Fig. 5 As in Fig. 4 but for Zhengzhou at 05:33 BT 19 July 2010

4.2 中气旋和龙卷涡旋特征分析

中气旋是超级单体风暴的径向速度场特征,观测到中气旋 90% 以上的情况出现强烈天气,其中只有 20% 的情况出现龙卷,一般情况只要观测到中气旋就可发布强天气警报,只有观测到中等以上强度的中气旋才发布龙卷预警。F2 级以上的强龙卷绝大多数是由超级单体产生,而超级单体与持续深厚的中气旋密切相关(俞小鼎等,2006b)。中气旋匹配参数包括中气旋底高、顶高,中气旋中心所在方位和距离,最强切变及相应高度,切变为负最大速度绝对值与正最大速度绝对值之和除以二者之间的距离。龙卷涡旋特征(TVS)是在雷达径向速度图上识别出的一种与龙卷紧密关联的比中气旋尺度小而旋转快的涡旋,速度图上表现为像素到像素的很大的风切变。TVS 切变是指相邻方位角径向速度的方位切变值,即气流最大内流速度和最大外流速度之差除以二者相隔的距离。本文分析产生龙卷的两次超级单体风暴在基本反射率因子上和经典超级单

体明显不同,但在速度图上都有中气旋和 TVS。

4.2.1 中气旋和龙卷涡旋特征演变

图 6a 和 b 是两次龙卷过程主要时段商丘、郑州雷达探测到的中气旋和 TVS 产品随时间(为清楚见,间隔 12 min)变化的集中显示。16 时 01—32 分鹿邑出现三维相关切变,16 时 26 分开始出现中气旋,中气旋提前于亳州、虞城、夏邑龙卷发生约 1 h 出现,TVS 16 时 56 分最早出现在亳州,17 时 38 分中气旋和 TVS 出现在虞城南部,此时在虞城县黄冢乡王楼集村、徐楼村、刘楼村及界沟镇贾庄村、邢营村受灾严重。17 时 56 分中气旋和 TVS 出现在夏邑南部,伴随中气旋和 TVS 出现,夏邑县马头镇等地相继遭受龙卷风袭击,受灾严重。从图 6a 可以看出,17 日的中气旋和 TVS 有两条路径,一条是 17 时 02 分自亳州、鹿邑交界处经虞城南部 18 时 20 分到达夏邑西部,历时约 1.5 h,另一条是 18 时 38 分夏邑东南部再次出现中气旋和 TVS,随后向东北方向移动。

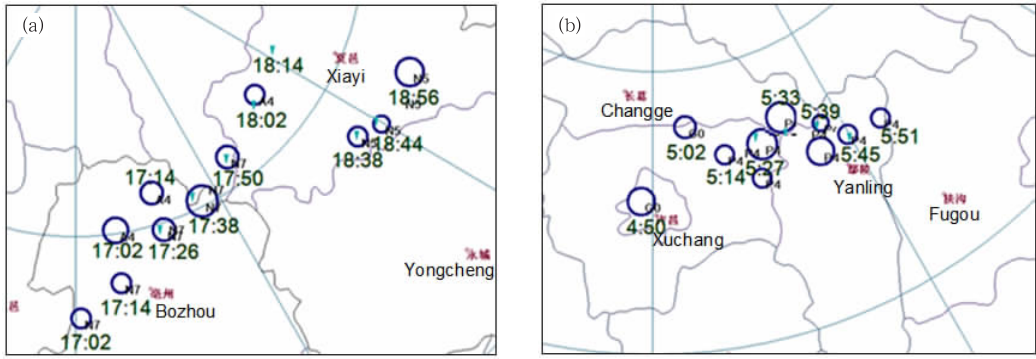


图6 (a) 2010年7月17日17时02分—18时56分商丘和
 (b) 2010年7月19日04时50分—05时51分郑州雷达中气旋(圆圈)和TVS(蓝色倒三角)
 Fig.6 (a) Mesocyclone (circle) and TVS (blue upside down triangle) from the Shangqiu
 radar from 17:02 to 18:56 BT 17 July 2010, and (b) Mesocyclone (circle) and TVS
 (blue upside down triangle) from the Zhengzhou radar from 04:50 to 05:51 BT 19 July 2010

19日04时26分涡旋带状回波上在许昌出现三维相关切变,04时50分—05时51分中气旋持续10个体扫(图6b),04时56分出现了龙卷涡旋特征,05时27—45分在许昌、长葛交界处出现TVS并持续4个体扫,和灾情发生时间地点吻合,目击者称,05时30分前后在长葛东部出现龙卷。

从以上两次龙卷雷达回波分析可知,TVS几乎没有预警龙卷时效(即TVS几乎与龙卷同时出现,很可能是龙卷涡旋在速度图上的一种反映),但中气旋可提前0.5—1.0h出现,这对估计和预警龙卷很有意义。两次暴雨过程中中气旋和TVS均有移动性、持续性、系列性的特点,因此,加强新一代天气雷达产品特别是平均径向速度产品、中气旋、龙卷

涡旋特征的跟踪和监测,并根据其移动和演变外推是延长预警时效的有效途径。

4.2.2 中气旋、龙卷涡旋特征值分析

为了进一步分析两次龙卷中气旋和TVS特征,用中气旋、TVS匹配产品资料(单位已换算)分析了中气旋和TVS的主要特征值(表2、3)。从中气旋和TVS对比来看,中气旋和TVS底的高度一般都在1km以下,TVS底和中气旋底高度相当或略低一些,TVS顶的高度一般在2—4km,中气旋顶高一般2—3km,平均来看,TVS顶高于中气旋顶1km左右,中气旋最大切变一般在 $(1.0—4.0) \times 10^{-2} s^{-1}$,TVS最大切变值一般 $(2.0—5.0) \times 10^{-2} s^{-1}$,TVS平均切变值比中气旋切变值约大一倍,最大切变值

表2 两次龙卷中气旋特征

Table 2 The characteristics of mesocyclone in the two tornadoes

日期	时间	ID	方位/距离(°/km)	径向/切向直径(km)	特征底/顶高度(km)	最强切变/高度($10^{-3} s^{-1}/km$)
7月17	17:32	N7	159 / 52	5.0 / 4.4	0.6 / 3.0	12 / 1.4
	17:38	N7	154 / 49	6.3 / 5.1	0.5 / 2.9	22 / 1.4
	17:44	N7	149 / 48	7.5 / 4.3	0.5 / 2.7	45 / 2.1
	17:50	N7	144 / 45	4.0 / 3.7	0.5 / 2.0	26 / 0.5
	17:56	N7	139 / 46	10.5 / 4.9	0.5 / 2.9	25 / 0.5
	18:02	O0	130 / 40	3.3 / 4.0	0.4 / 2.5	31 / 1.8
	18:08	O0	131 / 49	5.0 / 4.3	0.5 / 2.2	10 / 1.4
	18:38	N5	124 / 59	3.3 / 3.6	0.7 / 2.8	19 / 1.7
	18:44	N5	120 / 61	2.5 / 3.6	0.7 / 1.8	47 / 1.8
			平均		5.2 / 4.2	0.5 / 2.5
7月19	5:27	I4	163 / 66	6.5 / 4.5	0.8 / 4.8	12 / 0.8
	5:33	I4	158 / 62	6.3 / 4.9	1.9 / 2.8	8 / 1.9
	5:39	I4	153 / 66	2.5 / 4.0	2.0 / 4.2	12 / 3.1
	5:45	I4	150 / 71	3.3 / 3.7	0.9 / 2.2	12 / 2.2
			平均		4.7 / 4.3	1.4 / 3.5

表 3 两次龙卷 TVS 特征

Table 3 The characteristics of TVS in the two tornadoes

日期	时间	ID	方位/距离 (°/km)	最大速度差/高度 (m/s/km)	特征深度 (km)	底/顶高度 (km)	最强切变/高度 ($10^{-3} s^{-1}/km$)
7月17日	17:32	N7	160 / 50	31 / 0.5	2.3	<0.5 / 2.9	37 / 0.5
	17:38	N7	155 / 48	30 / 0.5	2.3	<0.5 / 2.8	36 / 0.5
	17:44	N7	149 / 50	36 / 2.1	2.3	<0.5 / 2.8	45 / 2.1
	17:50	N7	145 / 44	48 / 0.5	2.2	<0.5 / 2.6	63 / 0.5
	17:56	N7	140 / 42	37 / 0.5	2.1	<0.4 / 2.6	49 / 0.5
	18:02	O0	133 / 42	47 / 0.5	2.0	<0.5 / 2.5	66 / 0.5
	18:14	O0	119 / 39	40 / 0.4	1.9	<0.4 / 2.3	58 / 0.4
	18:38	N5	125 / 59	33 / 1.7	3.0	<0.7 / 3.7	33 / 1.7
	18:44	N5	121 / 61	51 / 1.7	2.1	<0.7 / 2.8	49 / 1.7
			平均		39 / 0.9	2.2	<0.5 / 3.0
7月19日	5:27	I4	163 / 63	27 / 0.8	3.4	<0.8 / 4.8	24 / 0.8
	5:33	I4	159 / 67	29 / 0.8	3.4	<0.8 / 4.2	26 / 0.8
	5:39	I4	154 / 67	27 / 0.8	4.3	<0.8 / 5.2	24 / 0.8
	5:45	I4	151 / 72	27 / 0.9	2.3	<0.9 / 3.3	22 / 0.9
			平均		27 / 0.8	3.3	<0.8 / 4.3

高度 TVS 比中气旋低,TVS 最大切变值在 1 km 以下,平均 0.8—0.9 km,中气旋最大切变值出现高度在 1 km 以上,平均 1.4—2.0 km。17 日龙卷为 F2 级强龙卷,两次过程无论是中气旋还是 TVS,17 日特征底的高度都比 19 日低,特征顶高度也比 19 日低,最大切变值 17 日比 19 日大一倍,可见出现在低层大的切变更容易造成严重的龙卷灾害。

4.2.3 中气旋和 TVS 剖析

虞城南部龙卷发生地距商丘在 60 km 以内,可以用更高分辨率的径向速度考察中气旋和 TVS 结构,图 7 是 17 时 50 分 0.5—2.4° 仰角高分辨率 (250 m) 的平均径向速度 (V_{25}),其上 γ 中气旋特征

非常清晰,1.5° 仰角速度图上朝向雷达的负速度达到模糊,为 -31 m/s,离开雷达的正速度为 18 m/s,朝向雷达的速度明显大于离开雷达的速度,呈不对称结构。由于多普勒天气雷达只能测量径向速度,所以,沿着雷达径向或者和距离圈相切方向的速度图的垂直剖面才有意义。从沿图 7b 中切向的垂直剖面上看,该中气旋发生在低层 1.5 km 以下, -31 m/s 的负速度模糊和 1.5° 仰角显示一致(图 7d)。对两次过程的其他多个中气旋做剖面分析,旋转最明显的一层总是负速度明显大于正速度,具有明显的不对称结构。其原因在于导致龙卷的微型超级单体以很快的速度大致向着雷达方向移动。

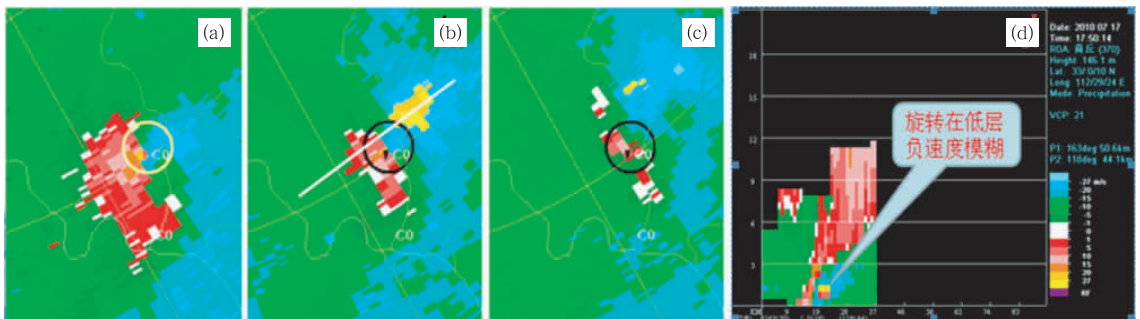


图 7 商丘雷达 17 时 50 分(a)0.5°、(b)1.5°、(c)2.4°仰角平均径向速度 V_{25} 及(d)沿雷达切向(图 b 中白线)剖面

Fig. 7 The average radial velocity V_{25} at (a) 0.5°, (b) 1.5°, (c) 2.4° and (d) the cross section of the velocity along the white line in Fig. 7(b) at 17:50 BT

5 龙卷发生的环境场分析

5.1 龙卷产生的探空物理量分析

对流天气都发生在不稳定的大气层结中,影响对

流产生和组织结构最大的两个环境因素是大气垂直稳定度(浮力)和垂直风切变。对流有效位能指有可能转换为动能的位能,表示在自由对流高度与平衡高度之间,气块可从正浮力做功而获得的能量。K 指数

也是大气层结稳定度参数之一,在暴雨过程中有很好的指示意义。SWEAT 指数由 850 hPa 露点项、500 和 850 hPa 切变项、风速项等组成,在美国发生龙卷的临界值为 400,发生强雷暴的临界值为 300。最近的一些研究结果(Brooks, et al, 2002;Evans, et al, 2002)表明,强的低层垂直风切变和低的抬升凝结高度是非常有利于 F2 级以上强龙卷发生的环境。

表 4 为 17 日商丘东部龙卷相近的两探空站和用 14 时地面温度和露点订正探空资料计算的物理量。可以看出对流有效位能值都在 1000 J/kg 以上,K 指数 $\geq 36^{\circ}\text{C}$,SWEAT 指数在 20 时达到 400 左右,0—2 km 垂直风切变和 0—6 km 相当,超过 15 m/s,切变值达到 $0.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,而抬升凝结高度很低,均在 300 m 以下。以上物理量参数说明豫东、苏皖北部大气环境场非常有利于出现 F2 级以上强龙卷灾害天气。19 日龙卷发生的环境场和 17 日结果一致,19 日抬升凝结高度更低,基本在 150 m,0—6 km 垂直风切变比 17 日大(16—24 m/s),对流有效位能、K 指数、

SWEAT 指数比 17 日小,可见 19 日热力条件比 17 日差,这与 17—18 日河南东部连续出现区域暴雨部分能量释放有关。随着降水天气系统向西推进,19 日动力上升环境持续,不稳定层结再建,使 19 日河南中西部北部出现区域暴雨和局地龙卷。

5.2 水汽条件分析

一般强对流风暴发生在低层暖湿、上层干冷的不稳定层结中。本文分析的两次龙卷发生在区域大范围暴雨过程,湿层深厚,中低层水汽充足,700、850 hPa 分别有比湿大值区。用 NCEP 资料计算的 17 日 14 时 850 hPa 比湿(图 8a),在河南东南部有一水汽大值带,商丘附近有 15.5 g/kg 的大值中心,同样,19 日 02 时 850 hPa 比湿图(图 8b)上,河南许昌附近也有 15.5 g/kg 的大值中心,根据经验,850 hPa 比湿等于 12 g/kg 为河南出现区域暴雨的水汽阈值,这两次伴有龙卷的区域暴雨过程 850 hPa 比湿达到了 15.5 g/kg,说明了两次过程有非常充分的水汽条件。

表 4 2010 年 7 月 17 日 14—20 时阜阳、徐州探空物理量

Table 4 Some parameters calculated based on the soundings at the Fuyang and Xuzhou stations at 14:00 and 20:00 BT 17 July 2010

时间	站名	对流有效位能(J/kg)	K 指数($^{\circ}\text{C}$)	SWEAT 指数	抬升凝结高度(m)	0—2 km 垂直风切变(m/s)	0—6 km 垂直风切变(m/s)
14 时	徐州	1152	37	254	293	5.7	12.5
	阜阳	1085	36	282	289	15.5	4.7
20 时	徐州	1262	39	404	0	16.2	16.8
	阜阳	1667	37	394	281	16.7	18.5

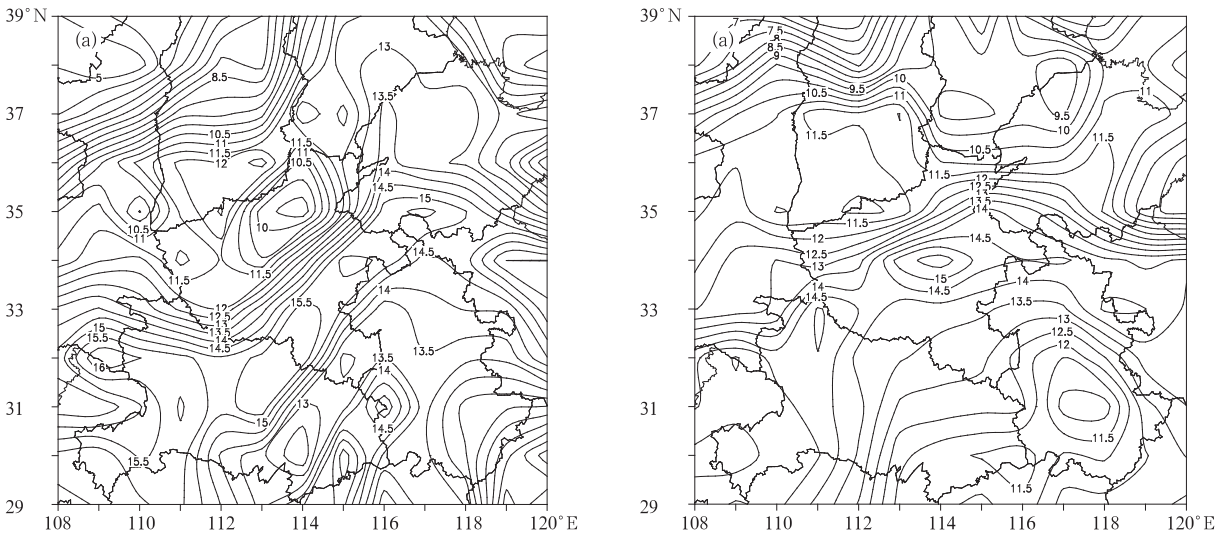


图 8 2010 年 7 月 17 日 14 时(a)和 19 日 02 时(b)850 hPa 比湿(g/kg)

Fig. 8 850 hPa specific humidity at (a) 14:00 BT 17 July and (b) 02:00 BT 19 July 2010 (g/kg)

6 暴雨过程中龙卷诱发原因探析

从简化的垂直涡度方程(略)可知垂直涡度主要由两项组成,一项是在水平分布不均匀的垂直速度场的作用下水平涡度被扭转为垂直涡度,另一项是涡旋在随高度逐渐加强的上升气流中被垂直拉伸而涡旋加快(俞小鼎等, 2008),目前,对于超级单体风暴中产生中气旋比较一致的观点是:环境垂直风切变产生水平涡度,沿着对流单体低层入流方向的水平涡度分量在随着低层入流转变为上升气流中被逐步扭曲为垂直涡度,随后垂直涡度在上升运动的垂直拉伸下进一步加强为中气旋(Davies-Jones, 1984; Rotunno, et al, 1985)。上述分析中 850 hPa 有偏南风低空急流,两次龙卷都发生在低空急流头左前侧,此处除了有较强的曲率和切变垂直涡度外,还有很强的低层水平涡度(地面为 2—4 m/s 的东南风)。垂直风廓线(图 4c、5c)1.5 km 高度偏南风速

在 16—18 m/s,垂直风切变矢量差为 15 m/s,切变值为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,达到了中气旋涡度的量级,水平涡度的方向基本由东指向西,在低层入流(东东南)方向上有很大的分量。本过程从大尺度到中尺度都存在很强的次级环流,中低层较强的正涡度区也是龙卷生成的重要背景条件。低空辐合、高层辐散,中层副高边缘西南气流、低层低涡切变和急流、地面中尺度气旋低压、强的负变压中心($\leq -2.0 \text{ hPa}$)都表明有强的上升运动。当低层入流逐渐转为上升气流时相应的水平涡度被扭转为垂直涡度,随着上升气流拉伸,形成中气旋,在上升气流的进一步拉伸作用下,旋转加强可形成尺度更小的气旋,以上是水平涡度扭转为垂直涡度的可能性分析。另外,两次龙卷均出现在区域暴雨、大暴雨过程中,水汽条件非常充足,抬升凝结高度很低(300 m 以下),表明云底高度非常低,当有强的垂直涡度集中时很容易影响到地面,这也是发生龙卷并出现严重灾害的一个重要原因。

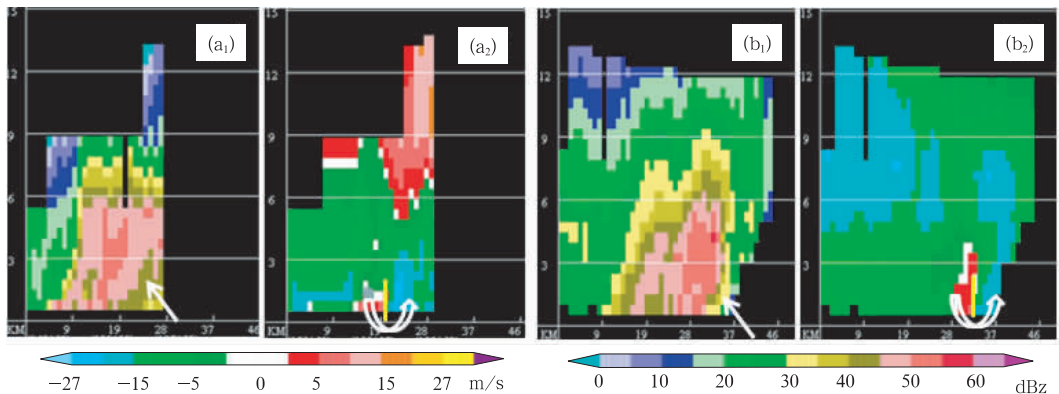


图9 17日17时44分(a_1 、 a_2)和19日05时33分(b_1 、 b_2)沿中气旋正负速度对连线(切向)的基本反射率因子(a_1 、 b_1)、径向速度对应剖面(a_2 、 b_2)

Fig. 9 Cross sections of the radial velocity (a_2 , b_2) and the reflectivity factor (a_1 , b_1) along the connections of the positive and negative pair in the mesocyclone (tangential) at 17:44 BT 17 (a_1 , a_2) and 05:33 BT 19 (b_1 , b_2)

本文分析的两次龙卷都发生在低涡东南侧螺旋雨带上(较高仰角)或雨带东侧(低仰角),对发生龙卷的中气旋和正负速度对连线方向(和径向垂直)做反射率因子和径向速度垂直剖面(图9),可见螺旋带状强降水回波对流特征明显,回波带东侧低层有弱回波区,说明存在强的入流上升气流,径向速度剖面图上黄线左侧的离开雷达的正速度是由强回波带西侧的强降水下曳气流造成的,目击者和乡镇雨量数据表明龙卷发生前西侧均出现了强暴雨,黄线东

侧有朝向雷达的负速度区,负速度区明显大于正速度区,有时甚至达到速度模糊(图7d)。Lemon等(1979)关于龙卷超级单体概念模型中指出,龙卷最容易发生在上升气流和后侧下沉气流交界面附近靠近上升气流一侧,虽然视觉上螺旋雨带上出现龙卷的微型超级单体和经典龙卷超级单体有很大的不同,但发生龙卷的机理有相似之处,强降水下曳气流的作用非常重要。在螺旋雨带的南部降水强度比较弱,下沉拖曳作用也弱;螺旋雨带靠近涡旋中心的部

分降水比较强,但低层不存在通畅的入流,两处上升和下沉气流没有很好配合,而在螺旋雨带中部强降水回波东侧凸起处很容易出现匹配的强上升和强下沉气流,使得雷达径向速度图上出现离开和朝向雷达的速度对(白色双箭头)在上升气流一侧(基本反射率因子剖面白色单箭头处)形成,此处是龙卷容易发生的关键区域,应予以高度关注。另外经典超级单体龙卷的形成一般存在环境垂直涡度的集中、中气旋加强、中气旋集中、中气旋下降的过程,本文区域暴雨中出现的中气旋则只局限于低层(一般2—4 km,底高<0.5 km),并在低层持续移动,这也是二者的显著区别。

7 结论与讨论

通过分析两次龙卷过程的大尺度环流背景、龙卷产生的环境条件和多普勒雷达产品可得出如下结论:

(1)两次龙卷发生的大尺度天气背景是:龙卷过程均发生在副高边缘西南气流影响河南出现区域暴雨和大暴雨过程中,高层为青藏高原脊北侧和高空急流入口区右后侧强辐散区,中低层有低涡、切变线、低空急流,龙卷发生在地面 β 中低压气旋中心东南象限,距气旋中心约50 km处。

(2)F2级龙卷发生的环境场特征:对流有效位能大于1000 J/kg,大气层结不稳定,K指数大于36 $^{\circ}$ C,发生强龙卷的SWEAT指数在400左右,0—1.5 km垂直风矢量切变大,达15 m/s,而抬升凝结高度很低,在0—300 m。

(3)自动站资料分析结果为:龙卷发生前后风速突增,风向突变、气压显著下降并伴有对流性强降水。

(4)从雷达资料看两次龙卷均发生在低涡东南侧的 β 中尺度螺旋雨带上,该回波带强度50 dBz左右,顶高9—12 km,龙卷是由该回波带上的微型超级单体造成的,垂直剖面上低层有明显的弱回波上升气流区,螺旋雨带中部向东凸起的强降水下沉气流和上升入流交界处的上升气流一侧是龙卷易出现的关键区域。 γ 中尺度气旋在速度图上先后经历了三维相关切变、中气旋、龙卷涡旋特征的演变过程,中气旋朝向雷达的速度明显大于离开雷达的速度,具有不对称结构,中气旋提前于龙卷发生0.5—1.0 h出现,这对估计和预警龙卷很有意义。

两次龙卷中气旋和龙卷涡旋特征底的高度都在

1 km以下,TVS底和中气旋底高度相当或略低一些,F2级龙卷底高<0.5 km,TVS顶的高度一般在2—4 km,中气旋顶高一般2—3 km,中气旋最大切变一般在 $(1.0-4.0) \times 10^{-2} s^{-1}$,TVS最大切变值一般在 $(2.0-5.0) \times 10^{-2} s^{-1}$,最大切变高度平均出现在0.8—0.9 km,F2级龙卷最大切变高度一般在0.5 km。就F1和F2两次龙卷过程比较看,F2龙卷特征底和顶的高度都低于F1龙卷,最大切变值F2龙卷比F1龙卷大一倍,出现在低层大的切变更容易造成严重的龙卷灾害。Trapp等(2005)的统计发现,出现中气旋的超级单体风暴产生龙卷的概率是20%左右,但如果中气旋底高在1 km以下,则产生龙卷概率超过40%,底高越低,龙卷概率越大。本文两次龙卷产生前中气旋底高很低,因此产生龙卷概率大,可以以相对大的把握发布龙卷警报。

经典超级单体龙卷一般发生在钩状回波后侧下沉气流和上升气流交界处,本文分析的两次龙卷发生在暴雨螺旋雨带中部强回波向东凸起的强降水下沉气流和上升气流交界处。和经典超级单体龙卷相比,暴雨回波的强度不是特别强,梯度不大,对流发展的高度也没有经典龙卷超级单体旺盛,单从基本反射率因子难以估计和判断发生龙卷。和暴雨相伴的龙卷预警思路和经典超级单体有明显不同,应提前分析发生龙卷的环境场,对可能发生龙卷区域的潜势要有充分估计,考虑螺旋暴雨带上龙卷有可能的系列性、移动性、持续性特点,短期临近预报日常业务工作中应加强新一代雷达产品特别是平均径向速度、中气旋、龙卷涡旋特征的跟踪和监测,根据其演变外推预警可延长预警时效。

参考文献

- 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
- 蒋汝庚. 1997. 龙卷型强风暴——1995年4月19日洪奇沥龙卷风剖析. 应用气象学报, 18(4): 492-497
- 魏文秀,赵亚民. 1995. 中国龙卷风的若干特征. 气象, 21(5): 37-40
- 姚叶青,俞小鼎,郝莹等. 2007. 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, 23(5): 483-490
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民等. 2006a. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. 高原气象, 25(5): 915-924
- 俞小鼎,姚秀萍,熊延南等. 2006b. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京:气象出版社, 120-145
- 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
- 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. 高原气象, 28(3): 617-625
- Brooks E M. 1949. The tornado cyclone. *Weatherwise*, 2(2): 32-33
- Brooks H E, Craven J P. 2002. Database proximity soundings for significant thunderstorms, 1957-1993//Preprints, 21th Conference on Local Severe Storms. AMS, San Antonio, TX, 639-642
- Burgess, D W, Lee R R, Parker S S, et al. 1995. A study of mini supercells observed by WSR-88D radars//Preprints, 27th Conference on Radar Meteorology. Vail, CO, United States, 4-6
- Davies-Jones R. 1984. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. *J Atmos Sci*, 41(20): 2991-3006
- Donaldson R J Jr. 1970. Vortex signature recognition by a Doppler radar. *J Appl Meteor*, 9(4): 661-670
- Evans J S, Doswell C A III. 2002. Investigating derecho and supercell proximity soundings//Preprints, 21th Conference on Local Severe Storms, AMS, San Antonio, TX, 635-638
- Fujita T T. 1963. Analytical mesometeorology: A review. *Severe Local Storms, Meteor Monogr*, 5(27): 77-125
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J Atmos Sci*, 38(8): 1511-1534
- Lemon L R, Doswell C A III. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Mon Wea Rev*, 107(9): 1184-1197
- Przybylinski R W, Runnels S, Soden P, et al. 1990. The Allendale Illinois tornado-January 7, 1989: One type of an HP supercell//Preprints, 16th Conference on Severe Local Storms. Kananaskis Provincial Park, AB, Canada; American Meteorological Society, 516-521
- Rasmussen E N, Straka J M, Davies-Jones R, et al. 1994. Verification of the origins of rotation in tornadoes experiment; VORTEX. *Bull Amer Meteor Soc*, 75(6): 995-1006
- Rotunno R, Klemp J. 1985. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J Atmos Sci*, 42(3): 271-292
- Trapp R J, Stumpf G J, Manross K L. 2005. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones. *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. *Mon Wea Rev*, 129(6): 1339-1368