

070703 天长超级单体龙卷的 多普勒雷达典型特征

刘 娟¹ 朱君鉴² 魏德斌³ 宋子忠¹ 卢 海¹ 周红根⁴

(1. 安徽省阜阳气象局, 236001; 2. 山东省气象局;
3. 安徽省滁州气象局; 4. 江苏省气象局)

提 要: 主要使用南京多普勒天气雷达资料, 分析了 2007 年 7 月 3 日发生在安徽天长和江苏高邮的龙卷风天气, 着重分析了中气旋和龙卷涡旋特征(TVS)等产品的典型特征。龙卷发生在飑线回波带的北端强烈发展的超级风暴单体中, 回波带前沿存在强烈的水平风切变, 使得回波带上不断有中气旋生成。对产生龙卷的超级风暴单体, 龙卷发生 30min 前, 雷达给出了中气旋(M)产品, 该中气旋持续了 7 个体扫的时间(42min), 在中气旋出现后第 5 个体扫, 雷达给出龙卷涡旋特征(TVS)产品, 龙卷涡旋特征持续了 3 个体扫, 综合切变产品也给出了显著的提醒。实地调查结果, 龙卷风和第 2 个 TVS 同时发生, 龙卷风位置与 TVS 位置对应, 但位于 TVS 的南侧, 位于中气旋最大风速圈的南缘。虽然 CINRAD/SA 雷达的 TVS 产品有虚警的情况, 但结合反射率因子、平均径向速度、中气旋、综合切变等产品的分析, 对于龙卷监测和预警会很有帮助的。

关键词: 龙卷 TVS 中气旋 综合切变

Doppler Weather Radar Typical Characteristics of the 3 July 2007 Tianchang Supercell Tornado

Liu Juan¹ Zhu Junjian² Wei Debin³ Song Zizhong¹ Lu Hai¹ Zhou Honggen⁴

(1. Fuyang Meteorological Office of Anhui Province, Fuyang 236001; 2. Shandong Province Meteorological Bureau;
3. Chuzhou Meteorological Office of Anhui Province; 4. Jiangsu Province Meteorological Bureau)

Abstract: Using the data of Nanjing Doppler weather radar (WSR-98D), the tornado occurring in Tianchang of Anhui Province and Gaoyou of Jiangsu Province on July 3, 2007 was analyzed. The characteristics such as mesocyclone (M) and tornadic vortex signature (TVS) were found.

基金项目: 本文由国家自然科学基金项目(编号 40575012), 安徽省气象局预报员专项(编号 KY200708)共同资助

收稿日期: 2008 年 9 月 22 日; 修定稿日期: 2009 年 8 月 4 日

The tornado occurred in the strong development supercell located on the north of line echo wave pattern (LEWP), the strong shear of wind direction existed in the front of echo line, and it makes the mesocyclone continuously generated along the echo line. In the cell tornado, mesocyclone (M) products can be worked out 30 min before tornado occurrence, the M lasts for 7 volume scan time lengths (42 minutes), thus TVS products can be worked out at the 5th volume scan of M product appearance, it lasts 3 volume scans, and the combined shear products have also given out notable prompting. According to the field survey, the tornado occurred at the time that the 2nd TVS occurred, it is located on the south side of the TVS, and consistent with the southern fringe of mesocyclone. Although the TVS products may be false at time, but with the checking of reflectivity, the base radial velocity, mesocyclone, combined shear products etc., it is useful for making tornado warning.

Key Words: tornado tornadic vortex signature (TVS) mesocyclone (M) combined shear

引 言

龙卷是破坏性极强的灾害性天气,可造成重大的人员伤亡和财产损失。多普勒天气雷达是对龙卷进行探测和预警的最有效的工具,多普勒天气雷达不但可以测量气象目标物的反射率因子强度,还可以测量粒子沿着雷达径向的速度,进而可以识别出中小尺度的涡旋、辐合和辐散特征。1978 年, Brown 等^[1]利用多普勒天气雷达资料,发现了一个可能伴随龙卷过程的比中气旋尺度更小的速度场涡旋特征,称为龙卷涡旋特征(Tornadic Vortex Signature,简称 TVS)。在径向速度图上,TVS 表现为沿方位角方向两个相邻像素之间的强烈速度切变,尺度通常在 2km 以下。在全美国布网天气雷达 WSR-88D 上有专门算法,为预报人员提供 TVS 产品。龙卷涡旋经常与中气旋相联系,20 世纪 70 年代多普勒天气雷达出现不久,人们认为在探测到中气旋的情况下,90%会出现龙卷^[2]。随着观测资料的逐渐增多,特别是美国多普勒天气雷达 WSR-88D 在 90 年代完成全国布网后,这一比例一直在下降,最终稳定在 20%左右^[2]。龙卷警报往往基于观测到强中

气旋,此时发生龙卷的平均概率为 40%^[1]。在观测到中气旋的基础上再探测到 TVS(龙卷涡旋特征),则发生龙卷的概率提高到 50%以上^[2]。最近的研究表明,如果探测到中等以上强度的中气旋其底到地面的距离 < 1km 者,龙卷产生的概率也可达 40%以上。

我国在全国布网建设的 CINRAD/SA 新一代天气雷达,具有多普勒测速功能,雷达系统有较高的稳定性,能提供准确可信的产品。郑媛媛等^[3]分析过 2003 年 7 月 8 日深夜发生在安徽庐江、无为的龙卷风过程,该龙卷由发生在大范围暴雨环境中的超级风暴单体形成,存在强中气旋和龙卷涡旋特征 TVS;俞小鼎等^[4]研究了 2005 年 7 月 30 日发生在安徽灵璧的龙卷风过程,该龙卷由一个尺度很大的强降水超级单体形成;本文作者注意到 2005 年 7 月 30 日灵璧强龙卷个例中对流单体不断合并、中气旋连续出现的特点^[5]。2007 年 7 月 3 日在安徽天长和江苏高邮等地发生了强烈龙卷天气,曹志强等^[9]对此过程进行了初步分析,指出龙卷风发生在两条中尺度对流云带的相交处。朱君鉴等^[10]详细分析了 2006 年 4 月 28 日临沂强对流灾害性大风的多普勒天气雷达产品,认为风暴前进方向中气旋的右侧可能会出现严

重灾害性大风。唐小新等^[11]对湖南省永州市 2006 年 4 月 10 日龙卷的分析表明,该龙卷由具有钩状回波特征的超级单体形成。吴芳芳等^[12]对 2007 年 7 月 25 日苏北的一次强雷暴阵风锋和下击暴流做了多普勒雷达特征分析。总之,多普勒天气雷达的使用极大地改善了对各种形式的风灾的监测和预警能力。

本文使用南京多普勒天气雷达资料,重点分析了 2007 年 7 月 3 日龙卷过程中的中气旋(M)和龙卷涡旋特征(TVS)等产品,和实地灾情调查测得的龙卷风位置作了对照,以期进一步认识龙卷涡旋的三维结构特征,提炼出对龙卷临近预报有价值的信息。

1 灾情调查实况和天气背景

1.1 灾情报道和实地调查

据扬子晚报 7 月 4 日报道,2007 年 7 月 3 日下午 4 时 47 分左右,安徽天长市遭受该市有气象记录以来最大的龙卷风袭击,该市秦栏镇、仁和集镇受灾最为严重,大片房屋倒塌,造成 7 名群众死亡,71 人重伤住院、轻伤者 27 人,1 万群众生活受到影响。龙卷风的大致运行路线是,仁和镇七柳村—新华村—观庵村—牧马村—江苏高邮的天山镇。整个龙卷风持续大约 20 分钟。

笔者携带 GPS 定位仪实地考察了天长龙卷风灾情现场,测量了天长市仁和镇七柳村、桃园村和秦栏镇新华村的经纬度,查看了房屋倒塌、树木折断或被拔起的程度和方向,听取受灾农民的讲述。其中桃园村已经变成一片废墟,房屋全部毁坏。受灾农民说家里的立柜、桌子、电视机、衣被等物品被抛出很远。从灾情实况判断,此龙卷可能达到 Fujita 龙卷等级的 F3 级或更强,为强烈龙卷。

1.2 天气背景和大气层结

2007 年 7 月 3 日是典型的暴雨天气形势。安徽省位于西太平洋副热带高压西北部边缘,08 时 500hPa 等压面上安徽中北部为高空浅槽区,850hPa 和 700hPa 江淮地区都存在西南急流。随着副热带高压南退,高空槽向东南方向移动,14 时地面图上冷锋位于江淮之间,已经出现 6 小时降水量 50mm 以上的站点。当冷锋 16—17 时之间移过安徽省天长市和江苏省高邮市时,在上述地区伴随着降水出现了龙卷风天气。

2007 年 7 月 3 日 08 时(即龙卷发生前 8 小时)南京(距离龙卷发生地 60~70km)探空资料分析结果(图 1)表明,对流有效位能 $CAPE=1646J \cdot kg^{-1}$, K 指数 $=42^{\circ}C$, $SI=-2.3$, $\Delta\theta_{*}(500-850)=-11.92$,这些指标都显示大气层结强烈不稳定;整层湿,典型的暴雨大气层结,抬升凝结高度 983hPa,很低;低层风切变包括风向和风速的切变,500hPa 及其以下为一致的西南气流,不存在明显风向切变,风暴相对螺旋度仅为 $155m^2 \cdot s^{-2}$;400hPa 及其以上逐渐转为西北气流,整层风向顺转 90° ;850 和 700hPa 风速 $14 \sim 16m \cdot s^{-1}$,达到低空急流标准,导致 0~2km 气层、0~6km 气层的水平风垂直切变很强,都是 $15m \cdot s^{-1}$,这指示大气中低层存在旋转潜势;强天气威胁指数 $SWEAT=306$,能量螺旋度 $EHI=1.6$ 。这些指标都表明大气层结非常有利于强对流性天气的发生。值得注意的是,即使在龙卷发生后,20 时南京探空资料分析结果仍然非常有利于强对流性天气的发生,低空急流比 08 时更强,中低层风切变更强,CAPE 仍有 $1321J \cdot kg^{-1}$,风暴相对螺旋度为 $105m^2 \cdot s^{-2}$, $SWEAT=356$, $EHI=0.87$ 。

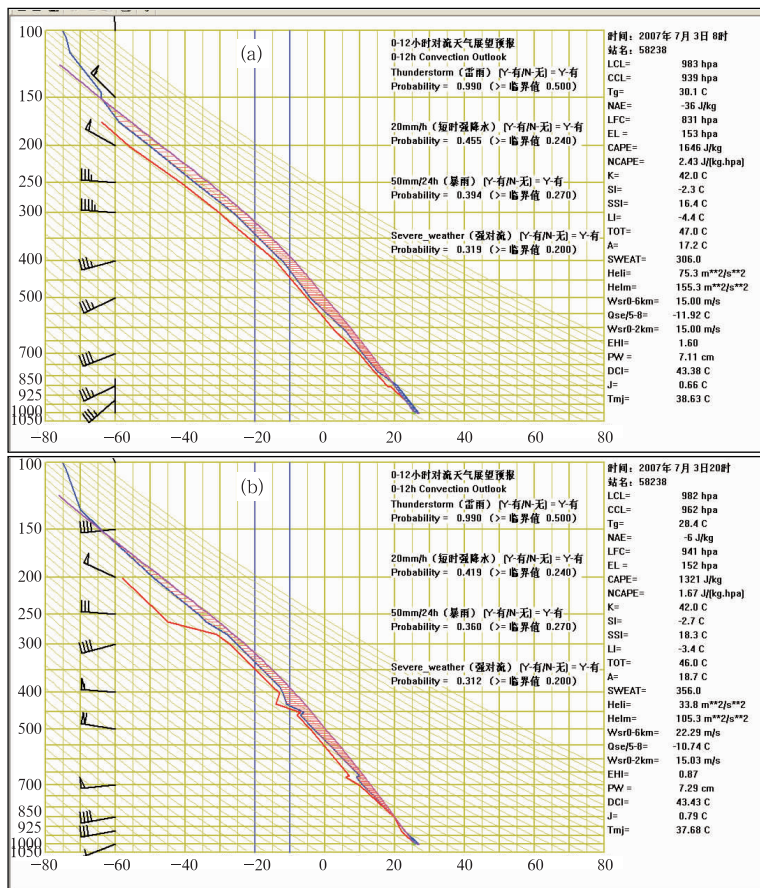


图 1 2007 年 7 月 3 日 08 时(a)和 20 时(b)南京探空资料分析

2 雷达资料分析

2.1 反射率因子分析

2007 年 7 月 3 日上午安徽和江苏的北部有成片的中等强度降水区,13:00(北京时,下同)开始,在大片的雷达回波中,与地面冷锋对应,宿迁、泗县、蚌埠一线有一条较强的对流回波带生成并向东南移动,回波带为东北—西南向,在其西南端不断有新生对流单体合并到该回波带中,形成一条长达 400km 的飚线回波带,强度迅速增强,强回波带分成 3 段。15:30 以后强回波带的中心反射率因子达到 50dBz 以上,最大反射率因子达到 60dBz。回波带中风暴单体快速向东移动,

雷达给出的风暴单体的平均移动速度达到 $19\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($68\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)。图 2(见彩页)是 2007 年 7 月 3 日 16:54 南京雷达组合反射率因子图,图中红箭头指处叠加了雷达给出的中气旋和龙卷涡旋特征产品,也就是龙卷天气发生地。飚线回波带表明影响系统是很强的对流风暴系统,在回波带上发展出超级风暴单体,由超级风暴单体产生龙卷风天气。反射率因子场上没有明显的钩状结构。

16:18 回波带的北端的单体发展成超级单体,雷达连续 7 个体扫描识别追踪了风暴单体 L9。图 3 是 2007 年 7 月 3 日 16:54 雷达给出的风暴单体 L9 的风暴趋势产品图。图 3a 中,竖线表示出风暴的底和顶的高度,实线表示风暴单体中最大反射率因子所在高度,虚线表

示风暴质心所在高度,可见16:42—16:54,风暴顶从13km降到8km,风暴质心从6km降到3.5km,最大反射率因子高度从4km降到2km。在此期间,风暴单体中最大反射率因子稍有下降,但始终维持在50dBz以上(图3d),垂直液态含水量(VIL)从 $41\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 降

到 $12\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图3c),冰雹指数连续3个体扫达到100%(图3b)。龙卷风天气发生之前,风暴在16:24之后强烈发展,各项指标都激增;16:42后回波顶高度、风暴质心高度、风暴最大反射率因子所在高度都下降,龙卷风天气发生。

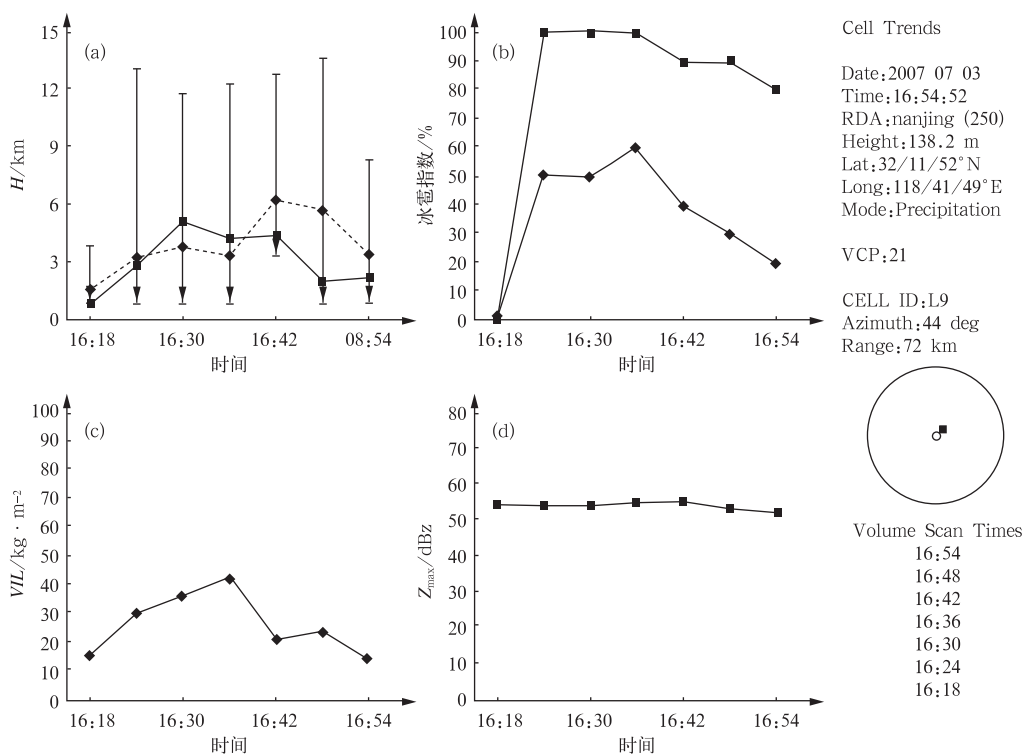


图3 2007年7月3日16:54南京雷达风暴趋势产品图

2.2 平均径向速度特征

图4(见彩页)是2007年7月3日16:00南京雷达 0.5° 反射率因子和平均径向速度图。对比分析可见,飚线回波带与地面冷锋位置相对应,回波带的后部为西偏北风,前部西南风,形成强烈的切变,使得回波带上多处出现中气旋。涡度沿着回波带自西南向东北输送,使得位于东北端的单体涡度强烈发展,单体发展成超级单体,在中气旋中生成了龙卷涡旋。15:23强对流回波带形成后,雷达

开始探测到有中气旋生成,16:00回波带上有4个中气旋,16:42在天长附近的回波带上,在大约25km距离内有3个中气旋呈东北—西南向排列着(参看图8),频繁出现的中气旋说明回波带上旋转气流发展强盛。

2.3 中气旋和龙卷涡旋特征分析

2.3.1 中气旋和龙卷涡旋特征演变

图5(见彩页)是2007年7月3日16:18—17:00南京雷达 0.5° 平均径向速度合成图。图上叠加了中气旋和TVS。造成

天长龙卷风灾害的是超级风暴单体 L9,它具备了深厚持久的 γ 中尺度涡旋特征。16:18 雷达首次探测到单体 L9 的中气旋,之后 7 个体扫中持续出现中气旋。在中气旋出现后第 5 个体扫时,雷达给出了龙卷涡旋特征 TVS 报警,TVS 在 16:42、16:48、16:54 持续的 3 个体扫中出现。虽然 17:00 雷达给出新的单体编号 R0,但很可能仍是同一个单体,风暴中仍有中气旋存在,该中气旋在江苏省高邮市天山镇神居山村继续产生龙卷,造

成重大人员伤亡和财产损失。

此中气旋不仅时间上连续,而且在空间结构上也连续,表现为在多个仰角都存在的深厚的涡旋特征(图 6,见彩页)。如 16:48 的径向速度 26 号产品较低的 3 个仰角都存在典型的正负速度对,2.4°仰角(图 6b)上可人工判读出相邻方位角存在 +27/−12 的速度对,切变值为 $39\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3.2 中气旋和龙卷涡旋 TVS 参数分析

由雷达给出的相关文字产品得到表 1。

表 1 2007 年 7 月 3 日天长龙卷的 TVS 参数

体扫时间	方位/距离	平均旋转速度 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	低层旋转速度 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	最大旋转速度/高度 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}/\text{km}$	底/顶 km	最大切变/高度 $10^{-3}\text{s}^{-1}/\text{km}$
16:42	34°/64km	20	28	34/1.9	<0.8/3.0	30/1.9
16:48	38°/67km	29	36	47/3.2	<0.8/4.3	40/3.2
16:54	42°/71km	25	48	48/0.9	<0.9/3.4	39/0.9

从表 1 可见,TVS 出现在离开雷达 64~71km 处,雷达用最低仰角 0.5°探测时,此处的波束离地面高度为 1.0~1.1km,可见 TVS 的底部已经到达雷达最低可测高度。3 个体扫的演变是低层旋转速度和最大旋转速

度都是递增,达到 $48\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;最大切变达到 $40 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$;同时最大旋转速度和最大切变所在高度都是下降。产生龙卷涡旋的中气旋的参数见表 2。

表 2 2007 年 7 月 3 日天长龙卷的中气旋参数

体扫时间	方位/距离/波束高度 °/km/km	底/顶 km/km	沿径向/切向的直径(km) rad/an	最大切变/高度 $10^{-3}\text{s}^{-1}/\text{km}$
16:18	13/60/0.8	0.7/2.9	7.0/5.5	8/2.9
16:24	18/58/0.8	0.7/3.8	4.3/4.5	12/2.8
16:30	24/59/0.8	0.7/3.8	5.8/4.7	14/1.7
16:36	29/61/0.8	0.8/5.1	5.8/4.7	12/1.8
16:42	35/65/0.9	0.8/4.2	7.0/5.3	17/1.9
16:48	38/69/1.0	0.8/4.4	7.3/6.1	38/3.2
16:54	42/71/1.0	0.8/4.8	3.8/4.5	40/0.9

从表 2 可见,中气旋出现在离开雷达 58~71km 处,雷达用最低仰角 0.5°探测时此处的波束离地面高度为 0.8~1.0km,中气旋的底部已经到达雷达最低可测高度。在第 5 个体扫时切变增大到 $17 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$,开始出现 TVS,之后的 2 个体扫切变值继续增大,在 16:48—16:54 之间中气旋尺度收缩,最大切变所在高度下降,估计龙卷漏斗此时已经

到达地面。根据中气旋的旋转速度和中气旋离开雷达的距离,查图表^[7]可知,16:42 达到中等强度中气旋标准,16:48 和 16:54 达到中等强度中气旋的上限。

2.3.3 龙卷风和中气旋、龙卷涡旋特征位置关系

实地调查结果(见图 7),图中 A、B、C 为龙卷袭击的 3 个自然村,A 为仁和镇七柳村

($32^{\circ}38'59''\text{N}$ 、 $119^{\circ}07'22''\text{E}$), B 为仁和镇桃园村($32^{\circ}39'15''\text{N}$ 、 $119^{\circ}08'25''\text{E}$), C 为秦栏镇新华村($32^{\circ}39'42''\text{N}$ 、 $119^{\circ}10'17''\text{E}$)。图中通过 3 时次 TVS 的箭头线是雷达风暴追踪产品给出的风暴质心轨迹, A、B、C 三处距离这一轨迹线逐渐靠近。实地调查结果, B 处灾情最重。龙卷风和第 2 个 TVS 同时发生, 龙卷风位置与 TVS 位置对应, 但位于 TVS 的南侧, 中气旋最大风速圈的南缘, 此处中气旋的旋转方向和风暴单体移动方向同向, 速度叠加使得风速最大。同时注意到和 16:48 的 TVS 对应的中气旋的尺度也最大, 直径达到 7km。

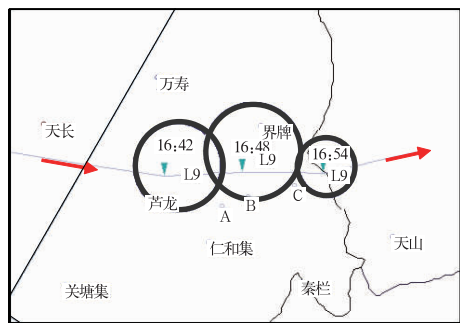


图 7 2007 年 7 月 3 日天长龙卷风实测位置和雷达中气旋、龙卷涡旋特征

2.3.4 综合切变产品和中气旋、龙卷涡旋

从南京雷达的综合切变产品(图 8, 见彩页, 87 号产品、 1.5° 仰角)可见, 综合切变值达到了 $150 \times 10^{-4} \sim 200 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 这个综合切变高值区和中气旋、TVS 位置很接近, 说明龙卷天气临近时此处低层存在着强烈的水平风切变, 有利于形成强烈的旋转气流。

3 结语

(1) 此龙卷天气在暴雨天气形势下发生, 低空西南急流对于龙卷天气扮演了动力和热力的重要角色, 它使强的低层垂直风切

变和低的凝结高度两个条件容易得到满足。低空西南急流增强了 $0 \sim 2 \text{ km}$ 和 $0 \sim 6 \text{ km}$ 气层风速大小的差异, 形成强的中低层水平风垂直切变, 为龙卷天气提供了旋转潜势; 低空西南急流还增加了水汽, 有利于很低的凝结高度, 使风暴具备很低的云底。这可能是龙卷往往和暴雨天气相伴发生的原因之一。同时中低层高温高湿的大气层结, 有利于对流有效位能增大, 为气块提供了潜在的上升能量。

(2) 此龙卷天气发生在飚线回波带的北端, 回波带前后强烈的风切变, 使得回波带上不断有中气旋生成。龙卷涡旋发生在强烈发展、底部很低的中气旋中。在地面龙卷出现之前 30min 飚线回波带中出现中气旋, 6min 之前出现 TVS, 可见 CINRAD/SA 的中气旋和 TVS 产品对龙卷的监测是有效的, 并可以对下游地区的预警提供有用信息。中气旋 M 和龙卷涡旋特征 TVS 嵌套出现并且持续多个体扫, 在径向速度场上存在明显的正负速度对与之配合, 综合切变值很大, 是此龙卷过程的典型雷达特征。

(3) 龙卷出现之前, 强风暴回波顶高度、风暴质心高度、最大反射率因子所在高度都激增, 而它们的快速下降和龙卷风几乎同时发生, 因此当它们激增时就要引起预报员的警觉, 如果等到它们下降就不能给预警留出提前时间。

(4) 尽管在出现中气旋的风暴中只有 20% 左右会出现龙卷^[6], TVS 有时也会出现虚警, 但是如果 TVS 出现在离雷达站合适的距离上, 并且和反射率因子场上强对流回波系统相联系, 和径向速度场上正负速度对相配合, 那么就有充分的理由判断此 TVS 的真实性, 应不失时机地发布龙卷预报。

(5) 因为雷达只在离开雷达站 $20 \sim 100 \text{ km}$ 的范围内才给出 TVS 报警, 而中气旋的报警范围更大, 当雷达监测到连续出现

的底部很低的强中气旋时,即使没有 TVS 的报警也应警惕龙卷天气发生的可能性。

参考文献

- [1] Brown R A, Lemon L R, Burgess D W. Tornado detection by pulsed Doppler radar[J]. Mon Wea Rev, 1978, 106: 29-38.
- [2] Doswell C A. Severe convective storms: An overview. Severe convective storms [J]. Meteor Monogr, 2001, 50: 1-26.
- [3] 郑媛媛, 俞小鼎, 方肿, 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): 38-45.
- [4] 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.
- [5] 宋子忠, 刘娟, 张健, 等. 灵璧强龙卷个例的多普勒天气雷达分析[J]. 气象科学, 2006, 26: 689-695.
- [6] 曹志强, 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.
- [7] 朱君鉴, 刁秀广, 曲军, 等. 4. 28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析[J]. 气象, 2008, 34(12): 21-26.
- [8] 唐小新, 廖玉芳. 湖南省永州市 2006 年 4 月 10 日龙卷分析[J]. 气象, 2008, 33(8): 23-28.
- [9] 吴芳芳, 王慧, 韦莹莹, 等. 一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征[J]. 气象, 2009, 35(1): 55-64.
- [10] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 135.

刘娟等:070703天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征

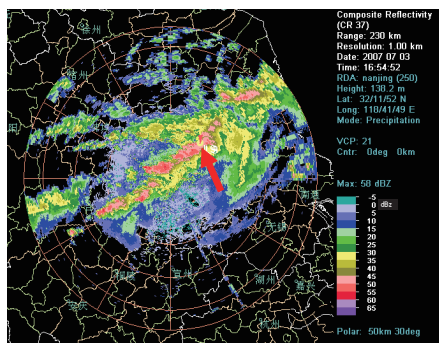


图 2 2007年7月3日16:54(北京时,下同)南京雷达组合反射率因子图

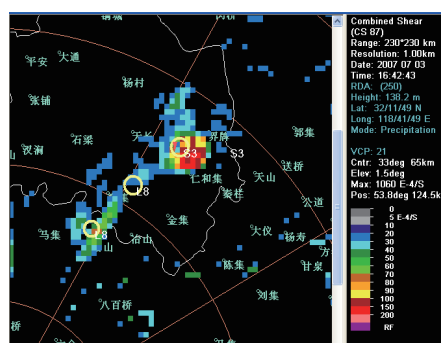


图 8 2007年7月3日16:42南京雷达综合切变与中气旋、TVS相叠加

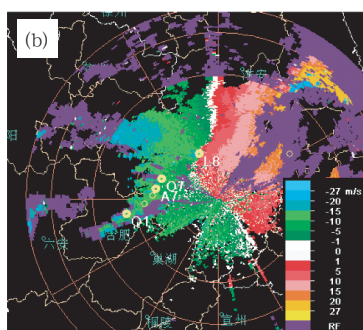
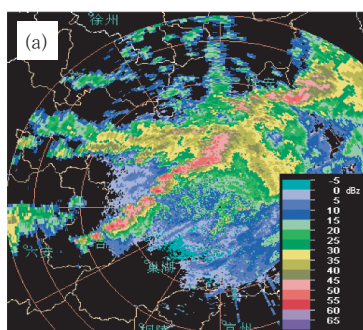


图 4 2007年7月3日16:00南京雷达0.5°反射率因子(a)和平均径向速度(b)图

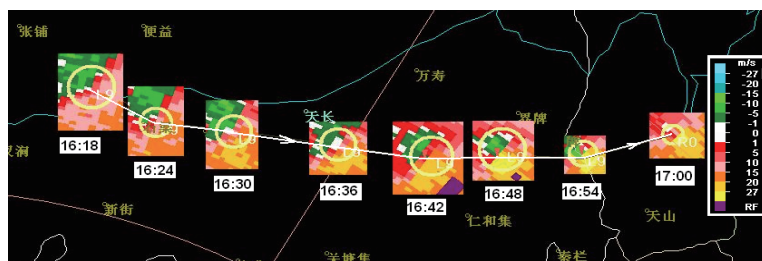


图 5 2007年7月3日16:18–17:00南京雷达0.5°平均径向速度合成图

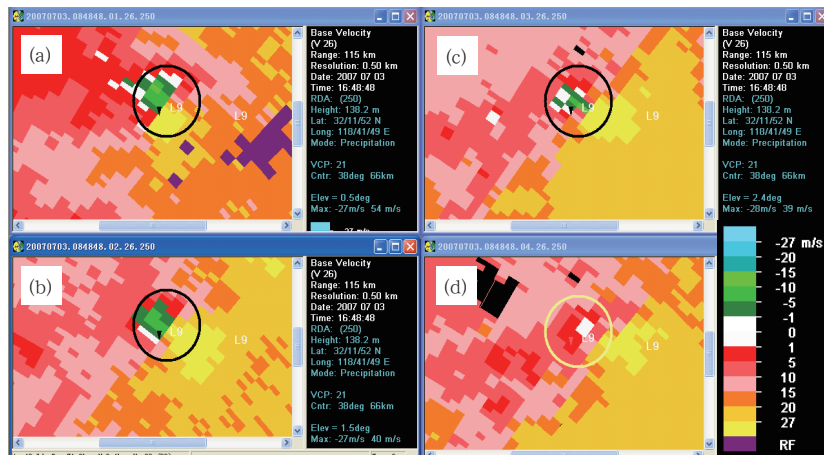


图 6 2007年7月3日16:48南京雷达0.5°(a)、1.5°(b)、2.4°(c)、3.4°(d)仰角径向速度(26号产品)