

文章编号: 1000-0534(2009) 03-0617-09

强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究

郑媛媛¹, 朱红芳¹, 方翔², 张雪晨¹,
方翀¹, 姚晨¹, 郝莹¹

(1. 安徽省气象台, 安徽 合肥 230031; 2. 中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 利用多普勒雷达资料, 对发生在安徽的 3 次强烈龙卷过程进行了分析。重点研究了导致 F2~F3 级强龙卷的 3 次超级单体风暴多普勒雷达回波特征及其与强冰雹超级单体风暴的差异。另外, 利用安徽省、市、县气象报表、历年气候评价灾情资料(部分来自民政部门的灾情报告), 对 1960 年至今的龙卷天气的时空分布及变化趋势、产生龙卷的环流形势特征进行了分析, 结果表明: (1) 龙卷主要出现在淮东部和江淮之间东部地势平坦地区, 7 月份出现龙卷的概率最高。(2) 超级单体龙卷产生在中等大小的对流有效性能和强垂直风切变条件下, 同时抬升凝结高度较低。(3) 3 次 F2~F3 级龙卷在发生前、发生时在多普勒雷达上都探测到强中气旋和龙卷涡旋特征 TVS。与非龙卷超级单体风暴相比, 导致强龙卷的中气旋底高明显偏低, 基本在 1 km 以下。同时风暴结构也有所不同, 造成龙卷天气的超级单体风暴最大反射率因子与风暴质心高度接近, 基本在 3 km 左右, 反射率因子在 50~60 dBz。造成强冰雹的超级单体风暴在冰雹产生前, 风暴最大反射率因子高于风暴质心的高度; 当风暴开始降雹时, 最大反射率因子高度开始降低, 而风暴质心的高度变化不大, 高于最大反射率因子高度, 基本保持在 5 km 左右, 反射率因子在 60~70 dBz。

关键词: 龙卷; 超级单体; 中气旋; 龙卷涡旋特征; 风暴结构; 龙卷预警

中图分类号: P445⁺.1 **文献标识码:** A

1 引言

龙卷是最猛烈的对流天气现象, 可造成重大的人员伤亡和财产损失。强烈的龙卷大多数是由超级单体产生的, 超级单体风暴一词是由 Browning^[1] 于 1962 年首先提出的。20 世纪 70 年代初, Marwitz^[2] 正式提出将超级单体风暴作为局地对流风暴的一种类型, 超级单体一词开始被广泛使用。Browning^[1] 指出超级单体一个重要的雷达回波特征是存在一个弱回波区(WER)或有界弱回波区(BWER), 并发现超级单体风暴的另一个雷达回波特征是低层存在钩状回波, 但并不是所有超级单体都有典型的钩状回波。Donaldson^[3] 利用多普勒雷达首次观测到超级单体中的“龙卷气旋”^[4], 也就是最早由 Fujita^[5] 提出, 现在广泛使用的“中气旋”(mesocyclone)。随后的雷达观测进一步证明超级

单体风暴总是与中气旋相伴随, 以后雷达气象界以具有深厚持久的中气旋作为超级单体风暴的定义。1978 年, Brown 等^[6] 利用国家强风暴实验室的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多普勒雷达速度场涡旋特征, 它们被称为龙卷涡旋特征 TVS(Tornadic Vortex Signature)。根据美国统计结果, 产生龙卷的中气旋占总数 20% 左右^[7]。龙卷警报往往基于探测到强中气旋。在探测到强中气旋的同时探测到龙卷涡旋特征(TVS), 则发生龙卷的概率提高到 50% 以上^[7]。最近的研究表明^[8], 如果探测到中等强度以上的中气旋其底到地面的距离 < 1 km, 龙卷产生的概率可达 40% 以上。

在新一代天气雷达布网之前, 我国对龙卷的研究很少。魏文秀等^[9] 研究了我国和华北地区龙卷发生的时空分布和天气气候条件。在新一代天气雷达

收稿日期: 2008-06-10; 改回日期: 2009-02-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划“多源卫星资料强对流监测与追踪方法研究”(2006AA12Z106); 国家自然科学基金项目(40575014); 中国气象局新技术推广项目(CMATG2007M35); 安徽省十一五科技攻关项目(06013140B); 2008 年业务建设项目“灾害性天气短时临近预报预警业务系统建设与改进”共同资助

作者简介: 郑媛媛(1963-), 女, 辽宁大连人, 正研级高工, 主要从事雷达气象及天气预报研究。E-mail: zhengyy63@sina.com

开始布网之后,对龙卷的研究逐渐增多^[10-14]。何彩芬等^[15]对发生在台风前部龙卷过程的多普勒雷达回波特征进行了个例分析。从近年发生在安徽的强烈龙卷(F2~F3级)与美国强烈龙卷(F4~F5级)相比还是强度偏弱。本文利用多普勒雷达资料,对发生在安徽的3次强烈龙卷过程进行了分析,重点研究了导致F2~F3级龙卷的3次超级单体风暴的多普勒雷达回波特征及其与强冰雹超级单体风暴的差异。另外,利用安徽省、市、县气象报表、历年气候评价灾情资料(部分来自民政部门的灾情报告),对1960年至今的龙卷天气的时空分布及变化趋势、产生龙卷的环流形势特征进行了分析。

2 龙卷的时空分布特征

2.1 龙卷的空间分布特征

根据全国龙卷分布的初步统计结果^[9],龙卷主要发生在我国东部地区,龙卷风高发区在苏北平原、黄淮海平原和长江三角洲地区。由图1可见,安徽省龙卷主要发生区域在淮北东部和江淮之间东部地势平坦的地区,在大别山区和皖南山区基本没有发生过龙卷天气。

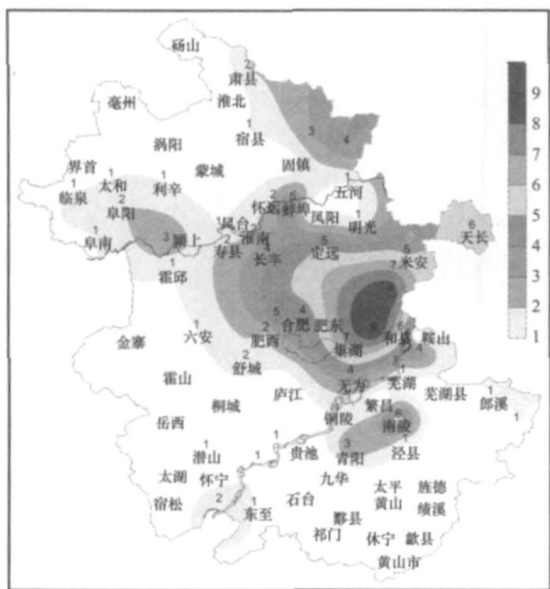


图1 安徽省各台站建站以来出现龙卷的次数分布
Fig. 1 The distribution of tornado occurrences of each observatory in Anhui

2.2 龙卷的时间分布

一般来说,龙卷风出现的时间和大气中对流旺盛的时间相一致,由图2可见,安徽发生龙卷的时间主要在6~9月,其中7月份出现的次数最多。

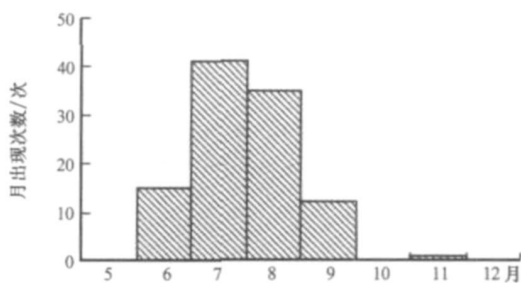


图2 安徽省龙卷月平均出现次数
Fig. 2 The monthly mean tornado occurrences in Anhui

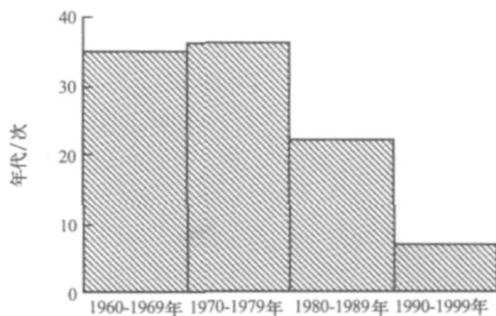


图3 安徽省龙卷各年代频数分布
Fig. 3 The decadal tornado occurrences in Anhui

安徽省2000—2007年发生的5次龙卷过程,其中有4次出现在7月,而且都出现在农村地势相对平坦的地区。由图3可见,20世纪60年代和70年代龙卷出现的次数相差不多,80年代有所减少,90年代进一步减少。安徽合肥至今出现5次龙卷,时间在50~60年代,初步分析龙卷在90年代锐减的原因与城市化进程加快有一定关系,高楼大厦增多在一定程度上不利于龙卷风在城市形成,其他原因有待进一步分析。

龙卷发生时间(图略)主要在11:00~18:00。龙卷持续时间通常很短。统计结果表明:其中5min以内占总数的46%,10min以内占总数的76%,超过30min的仅占总数的3%。与美国龙卷相比,安徽龙卷的持续时间要短一些。

3 天气背景

龙卷风出现的气象条件包括:(1)热力不稳定:热力不稳定是影响风暴强度和类型的主要因子,通常用对流有效位能来衡量热力不稳定的大小,从统计结果来看,安徽龙卷出现时CAPE平均在 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。(2)垂直风切变:垂直风切变对对流性风暴组织和特征的影响最大,垂直风切变的增强

将导致风暴的进一步发展, 对于龙卷来说, 0~ 1 km 高度的风切变值与龙卷产生的关系更为密切。
 (3) 水汽条件: 大气低层为暖湿空气, 根据统计, 超级单体风暴形成要求比普通雷暴具有更大的低层水汽含量, 安徽历史上出现龙卷过程统计结果, 70% F2 级以上强度的龙卷发生时伴有强降水。
 (4) 抬升条件: 在对流不稳定条件下, 需要一定的抬升条件对流才能发展, 像飊线、高空低槽、切变线、锋面、低压等。龙卷风可以在各种天气系统中出现, 而飊线过程出现的龙卷强度最大。

2003—2007年安徽出现的3次F2~ F3级龙卷是由超级单体产生的, 时间分别是2003年7月8日、2005年7月30日和2007年7月3日, 这3次强龙卷过程共造成38人死亡, 数百人受伤, 损失十分惨重。从地面影响系统分析, 龙卷都发生在地面

暖低压区中, 在龙卷发生前和发生时地面都存在中尺度辐合线, 同时中低层有西南急流存在, 并且中层与低层风速最大值位置接近, 相应高层有短波槽东移, 垂直切变风矢量随高度为顺时针变化。

对流参数计算结果显示: 3次龙卷天气最靠近探空站的对流有效位能CAPE值均> 1000 J·kg⁻¹, 0~ 1 km 风切变值分别为13×10⁻³ s⁻¹、6×10⁻³ s⁻¹、14×10⁻³ s⁻¹, 表明低空风切变与龙卷产生有密切的关系, 对流层中层(3~ 6 km)垂直风切变强度, 对龙卷风暴的发展也有重要作用。除了通过风暴间接影响风暴入流强度外, 由于相对风暴气流的增强, 使降水移出上升气流, 以及通过风暴上升气流与垂直风切变的相互作用, 所产生的垂直扰动气压梯度, 加强上升气流的强度。Davies等^[16]指出, 在他们的研究中, 几乎所有龙卷个例, 3~ 6

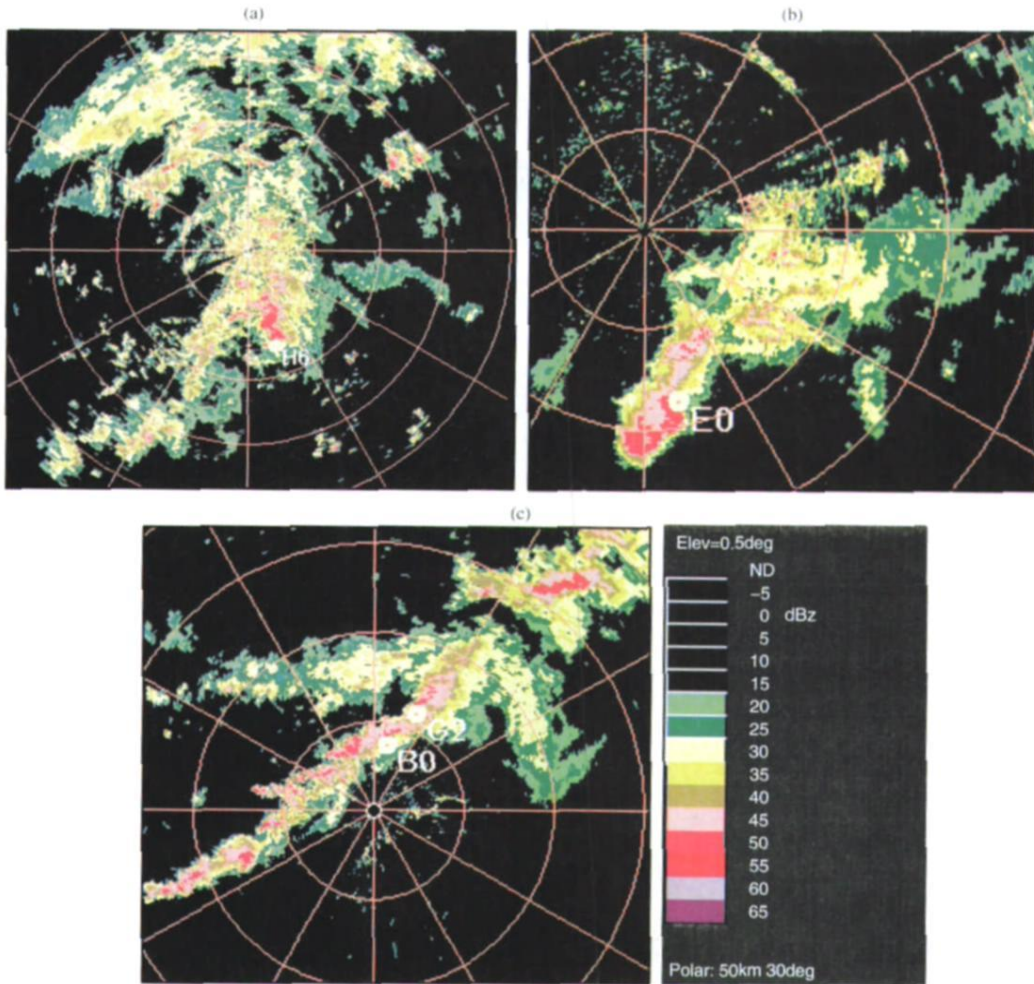


图4 安徽3次龙卷过程的多普勒雷达反射率因子

(a) 2003年7月8日22:55合肥, (b) 2005年7月30日11:08徐州, (c) 2007年7月3日16:30南京

Fig. 4 The Doppler radar reflectivity of three tornado processes in Anhui. (a) at 22:55 on 8 July 2003, Hefei, (b) at 11:08 on 30 July 2005, Xuzhou, (c) at 16:30 on 3 July 2007, Nanjing

km 的中层平均风速都超过 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，而安徽 3 次强龙卷的中层平均风也都超过 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从最靠近龙卷发生时间的多普勒天气雷达的 VAD 风廓线产品的显示(图略)可以看出，最强垂直风切变出现在 0.3~ 1.8 km 之间，其中 2003 年 7 月 8 日 23: 18 合肥(距离龙卷发生地 70 km)上空，由 0.3 km 高度 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风顺转为 1.8 km 高度 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南风，相应的垂直风切变值为 $13.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。2007 年 7 月 3 日 16: 30 南京(距离龙卷发生地 60 km)上空，由 0.3 km 高度 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风顺转为 1.8 km 高度 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏西风，相应的垂直风切变值为 $12.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。2005 年 7 月 30 日(距离龙卷发生地 90 km)由 0.3 km 高度 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风顺转为 1.8 km 高度 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏西风，相应的垂直风切变值为 $6.76 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

最靠近龙卷发生时间和地点的探空站抬升凝结高度分别为 537, 545 和 142 m，相对都比较低。最近的研究和分析发现，抬升凝结高度 > 1200 m 会大大降低龙卷产生的概率，由于较低的边界层湿度

导致蒸发冷却，下沉出流加强，低层中气旋会被切断。

4 多普勒雷达特征分析

4.1 反射率因子场特征分析

超级单体龙卷与超级单体相联系，通常经典超级单体其反射率因子回波的主要特征是低层钩状回波，但是分析安徽出现的 3 次强龙卷过程，反射率因子场并没有探测到典型的钩状回波，3 次过程的共同特点是：造成龙卷的超级单体风暴反射率因子都在 50~ 60 dBz，回波强度梯度不大。另一个共同特点是：龙卷都产生在静止锋回波带南侧发展起来的东北西南向的对流回波带上(图 4)。

分析对流带上多个对流风暴，从回波强度和雷达回波特征来看，往往没有明显的差异，很难识别出产生龙卷的回波。但从对流回波的移动方向可以看到，产生龙卷的对流风暴其移动方向明显偏向引导气流的右侧，属于右移风暴，也就是说其移动方向位于风暴承载层平均风的右侧。超级单体的右移

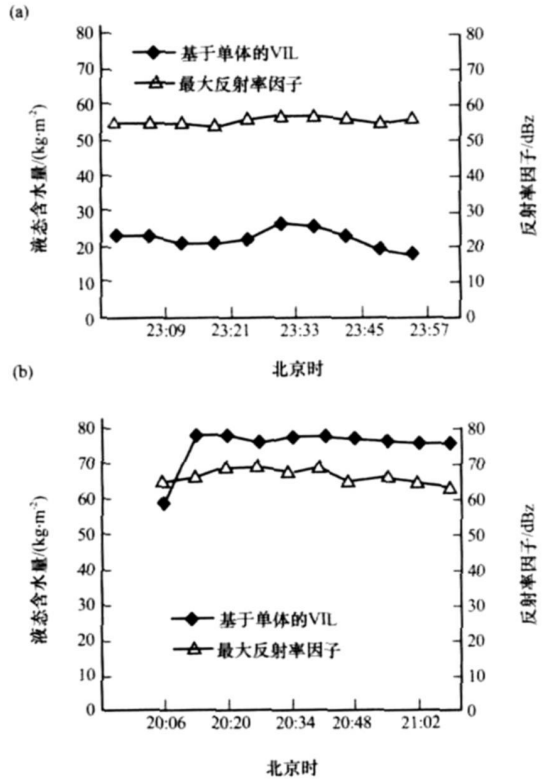
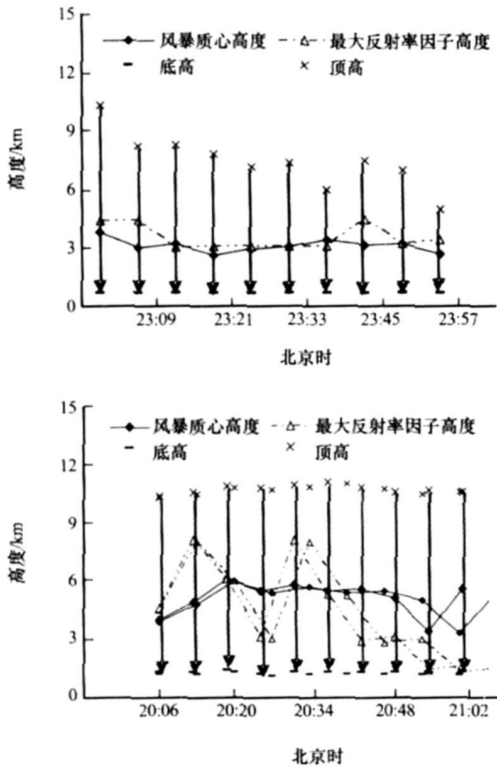


图 5 2003 年 7 月 8 日和 2004 年 7 月 8 日的超级单体风暴结构对比分析

(a) 2003 年 7 月 8 日龙卷过程, (b) 2004 年 7 月 8 日强冰雹过程

Fig. 5 The comparison between the two supercell storm structures on July 8, 2003 and July 8, 2004.

(a) tornado process on July 8, 2003, (b) hail process on July 8, 2004

涉及到风暴内上升气流及其相联系的涡旋与环境垂直风切变的复杂相互作用。Rotunno 等^[17]研究表明: 当垂直切变风矢量随高度顺时针变化时, 在各层切变矢量方向上, 形成穿过上升气流的水平气压梯度。水平气压梯度加强了风暴右侧的上升运动, 使风暴得以进一步发展。而在其左侧上升气流减弱, 导致风暴内最强上升气流区向右传播, 也就是风暴的向右传播。

风暴单体识别与跟踪算法是 CINRAD-SA 雷达中最重要的一个算法。一个风暴单体就是一个在三维空间中能分辨的密实的反射率因子个体。而风暴质心定义为三维风暴中心的位置。分析 2003 年 7 月 8 日造成庐江、无为龙卷天气的超级单体风暴结构(图 5a), 风暴的顶高随龙卷发展加强逐渐降低, 同时风暴最大反射率因子高度与风暴质心高度接近, 基本在 3 km 左右, 反射率因子在 50~ 60

dBz。对比分析 2004 年 7 月 8 日产生强冰雹的超级单体风暴结构(图 5b), 在超级单体风暴产生冰雹之前, 风暴最大反射率因子在高于风暴质心的高度, 当风暴开始降雹时, 最大反射率因子高度开始降低, 而风暴质心的高度变化不大, 高于最大反射率因子高度, 基本保持在 5~ 6 km, 风暴质心高度偏高, 反射率因子在 60~ 70 dBz, 基于单体的垂直积分液态含水量高达 60~ 70 kg · m⁻², 明显超过造成龙卷的对流风暴。分析其差异主要是大冰雹的产生需要强回波区扩展到 - 20℃等温线高度之上时, 对强降雹贡献最大。安徽一般平均在 50~ 55 dBz。而垂直积分液态含水量表示反射率因子数据转换成等价的液态水值, 并且假设所有反射率因子是完全由液态水反射得到的。由于冰雹的存在会导致液态水混合比不可靠的高值。于是所有 > 55 dBz 的反射率因子被截断为 55 dBz。本文分析的 3 次

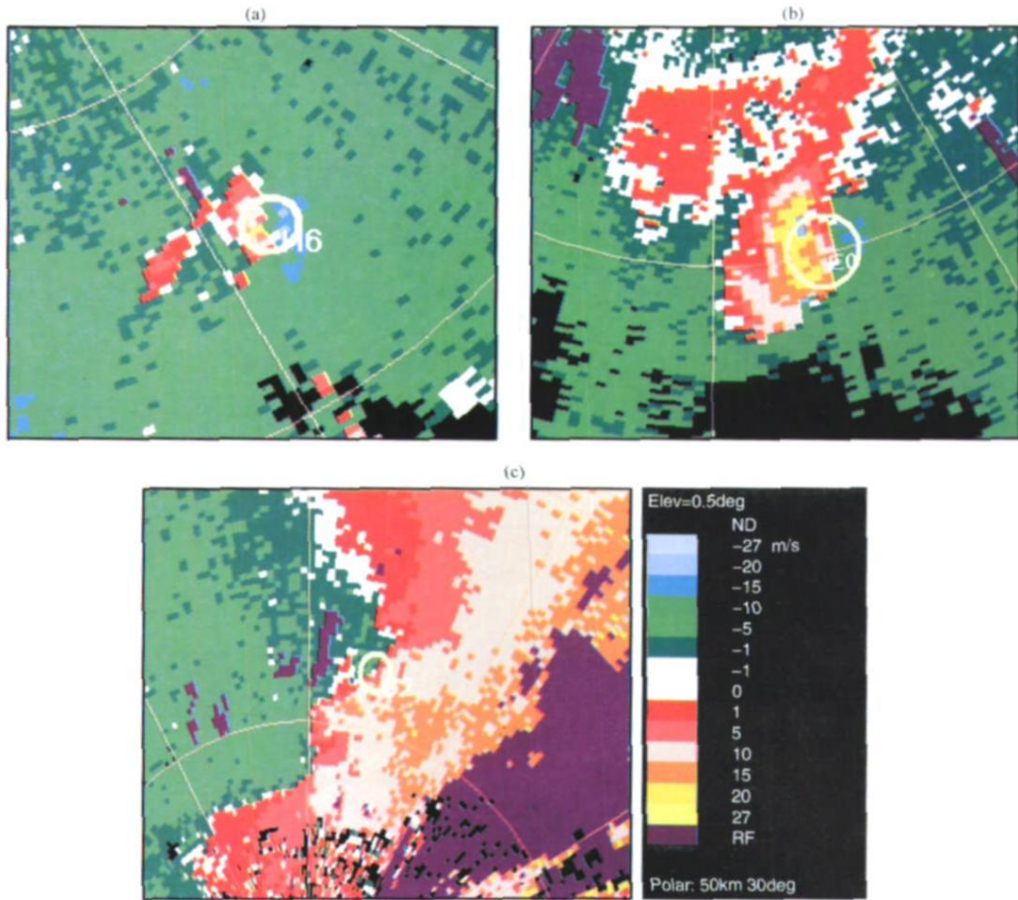


图 6 安徽 3 次龙卷过程的雷达径向速度

黄色圆圈指示中气旋位置, 其余说明同图 4

Fig. 6 The Doppler radial velocity of three tornado processes in Anhui.

Yellow circle shows meso-cyclone. Others are the same as Fig. 4

强龙卷过程都发生在高温高湿环境中,且对流发展高度不高,所以其垂直积分液态含水量相对较小。

4.2 径向速度特征分析

F2 级以上的强龙卷绝大多数是由超级单体产生的,而超级单体龙卷与持续深厚的中气旋密切相关。中气旋产品输出的参数包括:中气旋底高、顶高、中气旋中心所在方位和距离、最强切变高度和

最强切变。切变的定义为负最大速度的绝对值与正的最大速度绝对值之和除以两者之间的距离。

在 3 次强龙卷的径向速度图上(图 6),在龙卷发展和进行过程中分别探测到强中气旋,3 次龙卷过程中气旋平均切变值为 $20 \times 10^{-3} s^{-1}$,明显偏强。其中 2003 年 7 月 8 日中气旋持续时间最长,8 日 22:49 生成,持续到 9 日凌晨 00:38,共维持了 1 h 49 min。在中气旋生成阶段角动量较大,而切变较

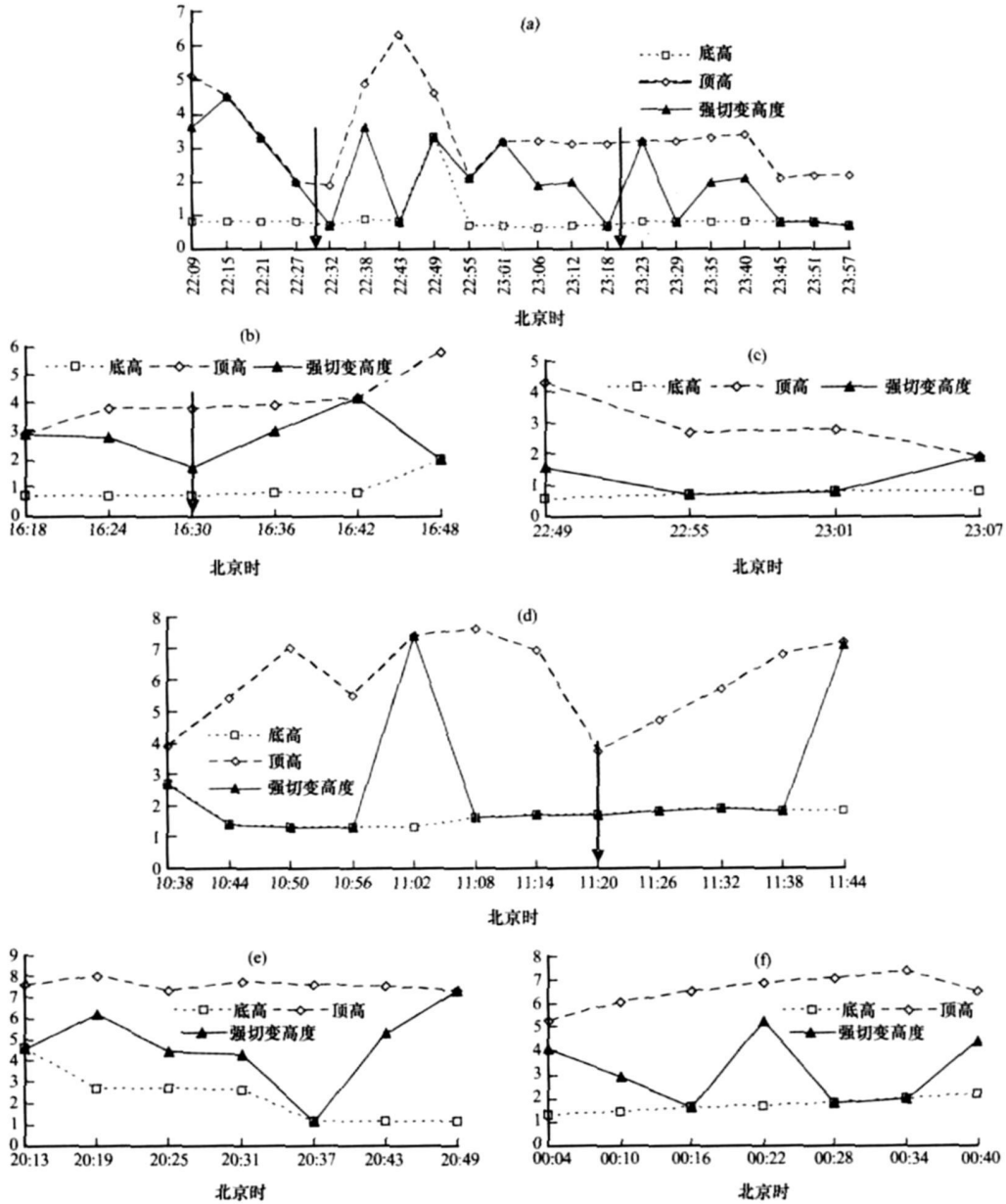


图 7 4 次龙卷过程和 2 次强冰雹过程的中气旋特征量

(a) 2003 年 7 月 8 日无为龙卷, (b) 2007 年 7 月 3 日天长龙卷, (c) 2007 年 8 月 18 日苍南龙卷, (d) 2005 年 7 月 30 日灵璧龙卷, (e) 2004 年 7 月 8 日强冰雹, (f) 2005 年 6 月 15 日强冰雹, (a, b, d) 图中箭头指示的是龙卷出现时间

Fig. 7 The characteristics of meso-cyclone between four tornado processes and two hail processes. The arrows in (a, b, d) show tornado occurring time

小, 当中气旋发展成熟时速度切变最大(旋转速度加大, 半径减小) 且中气旋延伸到最低层, 龙卷爆发。大量观测表明, 除了中层中气旋外, 超级单体龙卷的生成还需要边界层内存在低层中气旋^[18]。分析两次距离合肥雷达站 60 km 附近的龙卷过程发现(图 7a, b): 中气旋底高基本维持在 0.8 km, 顶高平均为 3.4 km。另外, 分析了 2007 年 8 月 18 日发生在浙江境内(距离雷达站 50~ 60 km) 的 F3 级龙卷的中气旋特征(图 7c), 其底高平均只有 0.7 km, 顶高平均为 3.8 km, 中气旋底高也在 1 km 以下, 很显然, 超级单体龙卷的出现和低层中气旋(1 km 以下) 的发展密切相关。

2005 年 7 月 30 日龙卷发生在距离雷达站 90 km 处, 由于雷达在此位置最低探测高度已超过 1.8 km, 因此无法探测到低层中气旋。

龙卷在垂直方向伸展的差别很大, 2005 年 7 月 30 日灵璧龙卷中气旋从 0.5° 仰角一直扩展到 6.0° 仰角, 即从 1.8 km 伸展到 8 km, 是一个非常深厚的强烈中气旋。而 2003 年 7 月 8 日无为龙卷中气旋、2007 年 7 月 3 日天长龙卷中气旋、2007 年 8 月 18 日浙江苍南龙卷中气旋基本局限于 4 km 以下, 直径大约在 4~ 5 km。

2003 年 7 月 8 日(图 7a) 和 2005 年 7 月 30 日

(图 7d) 龙卷过程, 中气旋的顶高在龙卷及地时有明显下降的特点。在安徽省 2004 年 7 月 8 日和 2005 年 6 月 15 日两次强冰雹过程中也探测到强中气旋(图 7e, f), 强冰雹过程中气旋顶高基本不变, 且顶高平均在 6.5 km 以上, 明显偏高。

在安徽 3 次强龙卷发展和进行过程中, 在强中气旋中都包裹着更小尺度的龙卷涡旋特征 TVS(图 8)。其中 2003 年 7 月 8 日和 2005 年 7 月 30 日龙卷过程其龙卷涡旋特征 TVS 在龙卷及地前就已探测到, 而 2007 年 7 月 3 日在龙卷及地后才探测到龙卷涡旋特征 TVS。

4.3 超级单体龙卷的雷达预警

产生龙卷和不产生龙卷的超级单体之间在视觉特征和雷达回波特征上并没有明显的不同。如前所述, 超级单体风暴都具有一个中层中气旋, 而龙卷往往是伴随着低层中气旋(1 km 以下) 的出现才产生的。从龙卷预警的角度来看, 特别要关注 1 km 以下中气旋的发展。由于低层中气旋只有在离雷达较近的距离内才探测得到, 所以龙卷的预警通常是建立在雷达探测到中层中气旋的基础上。一般来说, 中层中气旋越强, 出现龙卷的概率越大。在出现中气旋的风暴(即超级单体风暴) 中, 只有 20% 左右的情况下会出现龙卷^[18]。安徽 3 次强龙卷过程

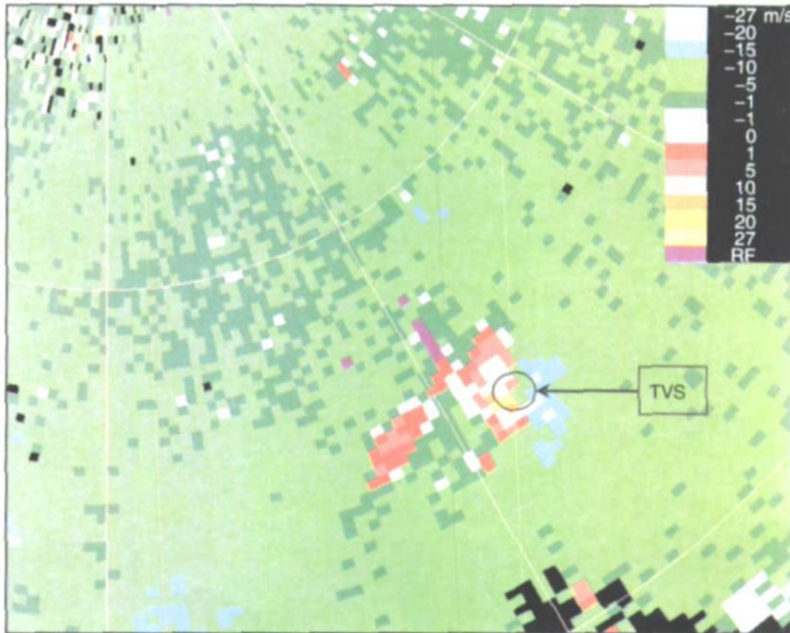


图 8 2003 年 7 月 8 日 23: 29 合肥雷达 0.5° 仰角径向速度
黑色圆圈指示 TVS 位置

Fig. 8 The Doppler radial velocity with 0.5° elevation at 23: 29 on July 8, 2003. Black circle shows TVS

的中气旋切变值平均在 $20 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 均达到强中气旋标准, 因此, 预报员一般只有在雷达探测到强烈中气旋的情况下才发布龙卷警报, 此时龙卷出现的概率大约为 40%。在天气条件有利于龙卷生成, 例如非常低的抬升凝结高度和非常大的 0~1 km 之间的垂直风切变, 而且在龙卷多发地区探测到中气旋生成时, 则雷达探测到中等强度的中层中气旋也可以发布龙卷警报。

从表 1 中可见, 与强龙卷相联系的中气旋的特征可能在龙卷发生前 10~30 min 出现。业务上通常应考虑如果速度切变最大的中气旋延伸到最低层的话, 通常将会发生严重的龙卷; 如果中气旋的切变不断加强并且/或者明显的旋转向下发展的话, 那么表明这是一个或正在成为一个更加危险的中气旋。对于距离雷达不太远的超级单体龙卷, 有可能在龙卷着地前 10~20 min 发出警报。

表 1 3 次龙卷过程、中气旋、龙卷涡旋特征出现时间

Table 1 The occurring time of three tornado processes, meso-cyclone and TVS

日期 (年-月-日)	龙卷出 现时间	中气旋		龙卷涡旋特征	
		出现时间	预警时间	出现时间	预警时间
2003-07-08	22:30	22:09	21	22:21	9
	23:20	22:49	31	23:01	19
2005-07-30	11:20	10:38	42	10:56	24
2007-07-03	16:30	16:18	12	16:42	-12

NSSL TDA, 利用 WSR-88D 数据, 确定与龙卷相联系的强烈小尺度涡旋。它对原有算法进行了一定的改进, 但是在 100 km 以外, 龙卷涡旋特征难以分辨, 这是由于波束展宽和随后发生在取样体积中求平均, 以及雷达波束从 TVS 靠近地面的部分上面穿过。只有强大的龙卷或靠近雷达站的龙卷才能探测到 TVS。在 3 次强龙卷过程中都探测到 TVS, 但出现时间与龙卷出现的时间非常接近, 预警时间十分有限, 所以一旦探测到 TVS 应该立即发布龙卷警报。另外, 从近几年的业务使用情况来看, 改进的 TVS 算法虽然提高了龙卷探测命中率, 同时误警率也有所提高, 尤其在距离雷达 20 km 之内 TVS 空报率较高, 在业务预报中应结合径向速度和反射率因子进行综合分析。

5 结论

通过对安徽 3 次 F2 级以上强龙卷的环流背景场、大气对流参数和雷达回波特征及其与非龙卷超

级单体风暴的差异分析和对 1960 年至今的龙卷天气的时空分布及变化趋势分析, 得到以下结论:

(1) 龙卷主要出现在淮北东部和江淮之间东部地势平坦地区, 7 月份出现龙卷的概率最高。3 次龙卷过程天气形势的共同特点是: 高空有低槽, 中层存在西南风急流, 平均风速超过 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 地面为暖低压, 龙卷发生前和发生时有中尺度辐合线存在。

(2) 超级单体龙卷产生在中等大小的对流有效位能和强垂直风切变条件下, 同时抬升凝结高度较低。3 次龙卷发生时大气抬升凝结高度都较低, 低层风切变都较大, 对流有效位能基本在 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。

(3) 3 次 F2~F3 级龙卷在发生前、发生时在多普勒雷达上都探测到强中气旋和龙卷涡旋特征 TVS。与强冰雹超级单体风暴相比, 导致强龙卷的中气旋底高明显偏低, 基本在 1 km 以下。

(4) 风暴结构分析结果, 造成龙卷天气的超级单体风暴最大反射率因子与风暴质心高度接近, 基本在 3 km 左右, 反射率因子在 50~60 dBz。而强冰雹超级单体风暴结构在超级单体风暴产生冰雹之前, 风暴最大反射率因子在高于风暴质心的高度, 当风暴开始降雹时, 最大反射率因子高度开始降低, 而风暴质心的高度变化不大, 高于最大反射率因子高度, 基本保持在 5 km 左右, 反射率因子在 60~70 dBz。

(5) 从龙卷预警的角度来看, 特别要关注 1 km 以下中气旋的发展。由于低层中气旋只有在离雷达较近的距离内才探测得到, 所以龙卷的预警通常是建立在雷达探测到强中气旋的基础上。在天气条件有利于龙卷生成, 而且在龙卷多发地区探测到中气旋生成时, 则雷达探测到中等强度的中层中气旋也可以发布龙卷警报。

参考文献

- [1] Browning K A. Cellular structures of convective storms[J]. Meteor Mag, 1962, 91: 341-350
- [2] Marwitz J D. The structure and motion of severe hailstorms. Part I, II, III[J]. J Appl Meteor, 1972, 11: 166-201
- [3] Donaldson R J Jr. Vortex signature recognition by a Doppler radar[J]. J Appl Meteor Mag, 1970, 9: 661-670
- [4] Brooks E M. The tornado cyclone[J]. Weatherwise, 1949, 2: 32-33
- [5] Fujita T T. Analytical mesometeorology: A review. Severe LOCAL Storms[J]. Meteor, Monogr, 1963, 5(27): 77-125
- [6] Brown R A, L R Lemon, D W Burgess. Tornado detection by

- pulsed Doppler radar[J]. *Mon Wea Rev*, 1978, 106: 29– 38
- [7] Doswell C A. Severe convective storms: An overview[J]. *Meteor Monogr*, 2001, 50: 1– 26
- [8] Trapp R J. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones[J]. *Wea Forecasting*, 2005, 20: 680– 687
- [9] 魏文秀, 赵亚民. 中国龙卷风的若干特征[J]. *气象*, 1995, 21(5): 37– 40
- [10] 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
- [11] 俞小鼎, 王迎春, 陈明轩, 等. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. *高原气象*, 2005, 24(3): 456– 464
- [12] 廖玉芳, 俞小鼎, 吴林林, 等. 强雹暴的雷达三体散射统计与个案分析[J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 317– 326
- [13] 伍志方, 张春良, 张沛源. 一次强对流天气的多普勒特征分析[J]. *高原气象*, 2001, 20(2): 202– 207
- [14] 张腾飞, 段旭, 鲁亚斌, 等. 云南一次强对流冰雹过程的环流及雷达回波特征分析[J]. *高原气象*, 2006, 25(3): 234– 242
- [15] 何彩芬, 姚秀萍, 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
- [16] Davies J M, R H Johns. Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes, Part I: Wind and helicity[C]. *proc. Tornado Symposium III*, C. Church Amer. Geophys. Union, 1993
- [17] Rotunno R, J B Klemp. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms[J]. *J Atmos Sci*, 1985, 42: 271– 292
- [18] 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, 2005: 130– 180

Characteristic Analysis and Early-Warning of Tornado Supercell Storm

ZHEN Yuan-yuan¹, ZHU Hong-fang¹, FANG Xiang², ZHANG Xue-cheng¹,
FANG Chong¹, YAO Cheng¹, HAO Ying¹

(1. *Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031, China;*

2. *National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

Abstract: Using the Doppler radar data, three severe tornado processes occurred in Anhui were analyzed. The characteristics of Doppler base reflectivity in these F2~ F3 tornados caused by supercell storm and the difference between tornado and hail supercell storms were mainly studied. In addition, the meteorologic data of 80 observations in Anhui and the disaster data of climate evaluation in past years, partly from the disaster reports of civil administration, were used. Based on these data, not only the space-time distributions and its variation trend of tornado processes, but also the circulation situation forming tornados from 1960 up to now were researched. The results show that: (1) Tornados mainly occurred in plain places from east of Huaibei to east of Jianghuai region. The highest probability of tornados taking place were in July. (2) The supercell tornado occurred under the condition of middle CAPE and severe vertical wind shear. At the same time its lifting condensation level was lower. (3) The three F2~ F3 tornados all detected evere meso-cyclone and TVS(Tornadic Vortex Signature)at radar before and during occurrence. Comparing with non-tornado supercell storm, the bottom height of meso-cyclone causing severe tornados were obvious lower, mostly lower than 1 km. At the same time the storm structure also had difference. The maximum reflectivity of supercell storm causing tornado is near to storm centroid at height, basically at 3 km or so, and the reflectivity was within 50~ 60 dBz. But for severe hail supercell storm, the maximum reflectivity was higher than the storm centroid at height before the storm disaster. When hailing, the height of maximum reflectivity became lower, but the height of storm centroid had no change which was higher than the maximum reflectivity, keeping at 5 km or so and the reflectivity within 60~ 70 dBz.

Key words: Tornado; Supercell; Meso-cyclone; TVS; Storm structure; Early-warning of tornado