

# 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究

俞小鼎<sup>1</sup> 郑媛媛<sup>2</sup> 廖玉芳<sup>3</sup> 姚叶青<sup>2</sup> 方翀<sup>2</sup>

1 中国气象局培训中心, 北京 100081

2 安徽省气象台, 合肥 230026

3 湖南省气象局, 长沙 410007

**摘要** 利用徐州多普勒天气雷达、常规观测和地面加密观测资料, 对 2005 年 7 月 30 日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的环境条件和回波结构演变特征进行了详细分析。主要结果如下: (1) 该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。上述中等程度的对流有效位能值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。(2) 该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”三个阶段。在带状回波阶段, 该超级单体的发展从一条狭长对流雨带的变短变粗开始, 雨带中间的对流单体内首先有中气旋发展, 从 4 km 左右高度首先出现, 然后同时向上和向下发展, 前侧入流缺口变得明显, 接着雨带南端的单体中也有中气旋发展。在典型强降水超级单体阶段, 雨带南端单体逐渐与中间单体合并, 构成一个庞大深厚的强降水超级单体和被包裹在其中的直径 12 km 左右、深厚强烈的中气旋, 然后由于后侧入流的开始出现, 低层回波形态层演变为“S”形, 而中层回波呈现为螺旋型。(3) 龙卷出现在“S”形回波阶段, 在龙卷出现前, 有一个龙卷涡旋特征 TVS (Tornadic Vortex Signature) 出现在中气旋的中心, 其对应的垂直涡度值估计为  $6.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。龙卷地点上空有很强风暴顶辐散, 散度值约为  $0.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。弓形回波阶段的开始由在弓形回波北部逗点回波的中心的一个中气旋形成为标志, 原有的中气旋位于弓形回波顶点附近, 随后弓形回波的北宽南窄的不对称结构逐渐明显, 原有的位于弓形回波顶点附近的中气旋消失, 并出现地面直线型风害。另外, 还对此次过程中气旋产生和超级单体形态的演变的可能机制进行了探讨。

**关键词** 强降水超级单体 强烈龙卷 “S”型回波 弓形回波 多普勒天气雷达

**文章编号** 1006-9895 (2008) 03-0508-15

**中图分类号** P445

**文献标识码** A

## Observational Investigation of a Tornadic Heavy Precipitation Supercell Storm

YU Xiao-Ding<sup>1</sup>, ZHENG Yuan-Yuan<sup>2</sup>, LIAO Yu-Fang<sup>3</sup>, YAO Ye-Qing<sup>2</sup>, and FANG Chong<sup>2</sup>

1 *China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081*

2 *Anhui Weather Office, Hefei 230026*

3 *Hunan Meteorological Bureau, Changsha 410007*

**Abstract** A detailed analysis of a tornadic heavy precipitation (HP) supercell's environmental conditions, structure and evolution is made based on the Doppler weather radar data, routine upper-air and surface observation, and intense automatic weather station observation. The main results are as follows:

(1) This HP supercell occurs in the moderate convective available potential energy (CAPE) and significant ver-

**收稿日期** 2006-11-14, 2007-02-13 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40575014

**作者简介** 俞小鼎, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 主要研究方向为强对流天气的多普勒天气雷达探测与预警, 强对流天气学, 临近天气预报。E-mail: xdyu1962@126.com

tical wind shear environment, with high value of low level vertical wind shear and low lifting condensation level (LCL) at the same time. The moderate CAPE and significant vertical wind shear favor the generation of supercell, while the high value of low level vertical wind shear and low LCL favor the occurrence of strong tornadoes.

(2) This HP supercell begins to develop when the pre-existing long convective rainbelt widens and shortens, the mesocyclone first appears in the middle cell of the rainbelt, beginning at 4-km height and then developing upward and downward. Soon, the mesocyclone also develops in the southern cell of the rainbelt, and gradually the southern cell merges with the middle cell, forming a strong HP supercell, with a 12-km diameter and 9-km height mesocyclone embedded. The vertical vorticity associated with the mesocyclone is  $1.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . The radar echo of this supercell successively displays kidney bean, spiral, "S" shapes, and finally evolves into bow echo, lasting more than 2 hours.

(3) The F3 tornado occurs during the "S" shape period. Before tornado touches down, a tornado vortex signature (TVS) appears in the central part of the large mesocyclone, corresponding to a vertical vorticity value of  $6.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . When the tornado is underway, strong divergence occurs at the storm top above the tornado, with a divergent value of  $0.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . The mesocyclone that leads to the tornado lasts 2 hours and 13 minutes.

The mechanisms for mesocyclone generation and HP echo revolution are discussed in details.

**Key words** heavy precipitation supercell, strong tornado, "S" shape echo, bow echo, Doppler weather radar

## 1 引言

作为局地对流风暴的一种最猛烈的形式, 超级单体风暴一直吸引着众多气象学家的注意。对超级单体风暴的研究从 20 世纪 50 年代一直持续至今。“超级单体 (supercell)” 一词是 Browning<sup>[1]</sup> 于 1962 年在研究发生在英国一次强对流风暴时提出的, 代表该风暴在其最强盛期间的准稳定状态。20 世纪 60 年代, Browning 和他的合作者利用天气雷达资料对超级单体风暴的结构进行了一系列开创性的研究<sup>[1~4]</sup>。20 世纪 70 年代初, Marwitz<sup>[5]</sup> 正式提出将超级单体作为局地对流风暴的一种类型, 超级单体一词作为一种风暴类型的代表才被广泛使用。Browning 和 Ludlam<sup>[3]</sup> 指出, 超级单体风暴作为一个强烈发展的对流单体的特征除了其准稳定状态外, 一个重要的雷达回波特征是存在一个弱回波区 (Weak Echo Region, 简称 WER) 或有界弱回波区 (Bounded Weak Echo Region, 简称 BWER)。Browning 早先将“有界弱回波区”称为“穹隆 (Vault)”。弱回波区的一部分或有界弱回波区代表上升气流区, 由于上升气流强烈以至大的降水粒子无法进入其中造成弱回波。后来的观测发现, 大多数不含超级单体的强烈多单体风暴也会出现弱回波区甚至有界弱回波区, 其与超级单体中 BWER 的区别在于其持续时间相对较短。Browning 和他的同事研究的超级单体风暴的另一个雷达回波特征

是低层的钩状回波<sup>[2~4]</sup>。并非所有的超级单体都呈现出典型的钩状回波, 大多数情况下都是由风暴主体向着低层入流方向伸出的一个突出物。随着 20 世纪 70 年代多普勒天气雷达在研究中的使用, 超级单体风暴的旋转特性被充分揭示出来。1970 年, Donaldson<sup>[6]</sup> 首次利用多普勒天气雷达观测到了超级单体中的“龙卷气旋”<sup>[7]</sup>, 也就是最早由 Fujita<sup>[8]</sup> 提出, 现在广泛使用的所谓“中气旋 (mesocyclone)”。随后的一系列多普勒雷达观测<sup>[9~11]</sup> 和数值模拟<sup>[12~14]</sup> 进一步证明超级单体风暴总是与中气旋相伴随。1978 年, Browning<sup>[15]</sup> 在一篇综述文章中建议, 重新定义超级单体为具有中气旋的对流单体。从此以后, 雷达气象学界一直以具有深厚持久的中气旋作为超级单体风暴的定义<sup>[16, 17]</sup>。

随着观测个例的增多, 美国科学家发现不少超级单体风暴并不具有 Browning 所描述的钩状回波特征, 进而在观测的基础上将超级单体风暴划分为弱降水超级单体 (Low Precipitation Supercell)、经典超级单体 (Classic Supercell) 和强降水超级单体风暴 (High Precipitation Supercell)<sup>[17]</sup>。弱降水 (LP) 超级单体风暴<sup>[17, 18]</sup> 几乎毫无例外地发生在干线附近 (见文献<sup>[17]</sup> 中的图 1), 几乎不产生降水, 主要灾害是大冰雹, 其反射率因子通常较低, 尺寸也较小, 从雷达回波图上不容易识别 (往往根据视觉特征确定), 发生频率较经典和强降水超级单体风暴要低得多。经典 (CL) 超级

单体<sup>[17]</sup>与 Browning 等<sup>[2~4]</sup>描述的超级单体反射率因子特征是一致的:低层具有明显的钩状回波,低层入流位于超级单体移动方向的右后侧,积雨云云的底部基本没有降水或有很少降水,主要的灾害性天气是强冰雹、龙卷和地面大风,偶尔也会产生暴洪(见文献<sup>[17]</sup>中的图2)。强降水(HP)超级单体<sup>[17, 19]</sup>最重要的特征是中气旋全部或大部分为降水所包裹,积雨云云底有明显的降水,回波形态有很多种,其中“肾形”形态相对多见一些(见文献<sup>[17]</sup>中的图3),低层入流方向位于回波移动方向的前侧、左前侧或右前侧,不像经典超级单体的低层入流通常位于右后侧。强降水超级单体风暴产生的主要灾害包括强冰雹、地面大风、龙卷和暴洪。下面是有关强降水超级单体风暴的一些可能特征<sup>[17, 19~22]</sup>:(1) HP 超级单体经常沿着一条预先存在的热力边界发展和移动,该热力边界通常是旧的雷暴外流边界(阵风锋)或静止锋;(2) HP 超级单体通常比经典超级单体更大;(3) 大范围的降水沿着风暴的右后侧;(4) 中气旋通常被包裹在降水中,通常位于风暴的右前侧;(5) HP 超级单体的雷达回波特征包括肾形、螺旋形、逗点形、“S”形和特别大的钩状;(6) HP 超级单体有时呈现出多单体特征,例如多个强反射率因子核心、多个中气旋和多个有界弱回波区;(7) 龙卷发展在中气旋内或者沿着阵风锋前沿,如果 HP 超级单体演变为弓形回波,龙卷有时出现在弓形回波北部逗点部位;(8) HP 超级单体经常与广泛分布的灾害性冰雹和大风事件相伴随,灾害路径相对较长较宽,某些强烈的大范围飚线中间时常包含 HP 超级单体。

在新一代天气雷达开始布网之前,我国对于超级单体风暴的研究很少。王昂生和徐乃璋<sup>[23]</sup>研究了若干中国的超级单体风暴,由于当时条件的限制,对于超级单体风暴和回波演变的描述是比较粗略的。在新一代天气雷达开始布网之后,对于超级单体的研究逐渐增多。廖玉芳等<sup>[24]</sup>和朱君鉴等<sup>[25]</sup>对发生在湖南和山东的两次超级单体风暴过程的多普勒天气雷达回波特征进行了描述。郑媛媛等<sup>[26]</sup>利用合肥多普勒天气雷达数据,对发生在安徽的一次非常典型的经典超级单体风暴的结构和演变过程进行了详细的分析。以上工作所研究的发生在我国的超级单体风暴都是经典超级单体风暴。在本文

中,我们利用距离本次强对流风暴最近的徐州 CINRAD-SA 多普勒天气雷达数据和和其它观测数据,对 2005 年 7 月 30 日发生在安徽北部的一次强降水超级单体风暴的结构和演变进行详细的分析。该超级单体风暴在 2005 年 7 月 30 日上午 11 点 30 分(北京时,下同)左右在安徽灵璧县韦集乡产生了强烈龙卷,造成 15 人死亡,46 人受伤。根据房屋倒塌和损坏情况以及目击者关于漏斗云的描述,按照 Fujita<sup>[27]</sup>提出的龙卷分级标准,我们判断此次龙卷的强度为 F3 级。除了强烈龙卷,此次 HP 超级单体还产生了强降水和地面直线型风害。在 30 日上午 11~12 时一个小时内,龙卷发生的韦集乡雨量计测到的累积雨量为 52 mm,位于韦集乡西北方 25 km 的娄庄和其北方 20 km 的灵璧的雨量为 15 mm 和 11 mm,也就是说此次超级单体龙卷与短时暴雨相伴随。

在第 2 节中,将给出此次强对流过程的天气背景和条件的描述;在第 3 节中将详细描述此次强降水超级单体风暴的演变过程和结构的多普勒天气雷达回波特征;有关此次超级单体中气旋的生成机制和雷达回波演变机制将在第 4 节中讨论;最后一节给出结论和小结。

## 2 天气背景

从 2005 年 7 月 29 日 20 时到 30 日 08 时,安徽省位于副热带高压西北部边缘,在 500 hPa 图上位于 5880 m 和 5840 m 等高线之间(图略),从 850 hPa 到 500 hPa 安徽全省上空为西南风和西南偏西风。29 日 20 时,500 hPa 在安徽上游沿着陕西和山西交界的黄河上空有一条浅薄的短波槽。30 日 08 时,上述 500 hPa 浅槽移到河北南部和河南中部一代,700 hPa 槽线位置比 500 hPa 槽线偏西,形成前倾槽结构(图略)。整层大气没有明显的冷空气南侵,只是对流层中下层槽后空气比槽前空气略为干燥。安徽北部在 925 hPa 以下低层为东南风。由于前倾槽结构,500 hPa 槽后相对干的空气位于 700 hPa 槽前相对湿的空气之上,这种上干下湿的结构使对流不稳定加剧。图 1 给出了 30 日 11 时安徽和周边地区的地面加密观测图,图上标明了 10 时和 11 时地面中尺度冷锋的位置,该冷锋在高空图上没有任何迹象,很可能是由雷暴的下沉气流形成的浅薄冷堆(外流边界)所导致的。

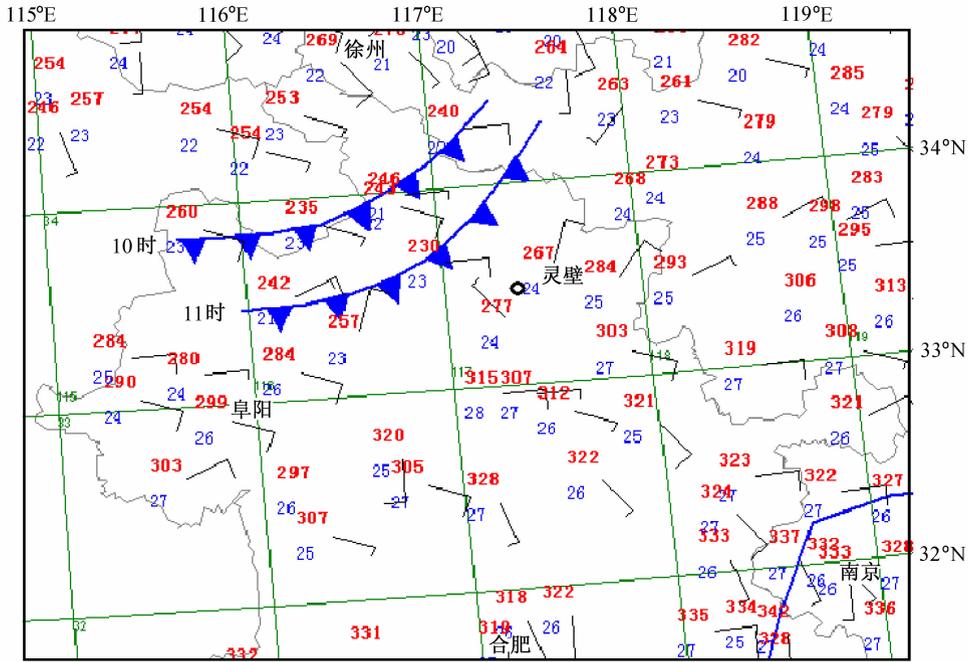


图1 2005年7月30日11时安徽及周边地区地面加密观测图。图中给出了10时和11时的冷锋位置，黑色小圆环指示强龙卷发生的地点  
 Fig.1 Enhanced surface observation in Anhui Province and the surrounding area at 1100 LST 30 Jul 2005. The cold fronts at 1000 and 1100 LST are drawn, the small black circle indicates the tornado location

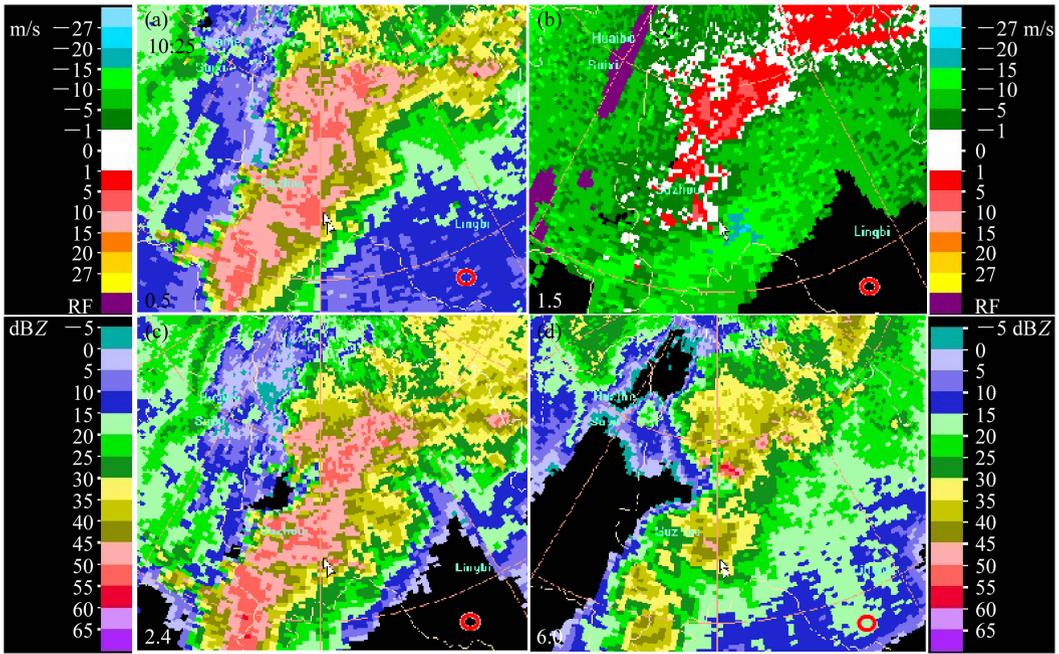


图2 2005年7月30日10:25徐州CINRAD-SA雷达0.5°仰角反射率因子(a)、1.5°仰角径向速度(b)及2.4°(c)和6.0°(d)仰角反射率因子。红色小圆圈代表龙卷发生的位置  
 Fig.2 The 0.5° elevation reflectivity (a), 1.5° elevation radial velocity (b), 2.4° (c) and 6.0° (d) elevation reflectivity at 1025 LST 30 Jul 2005 from Xuzhou CINRAD-SA radar. The small red circle represents the tornado position

判断强对流潜势的两个重要对流参数分别是对流有效位能(简称CAPE)和水平风的垂直切变。

29日20时,灵璧周边的三个探空站徐州、阜阳、南京的CAPE分别为1727、2434、3662 J/kg。30

日凌晨,有雷暴在河南、山东、江苏和安徽四省的交界区域发展。由于雷暴的发展,30日08时徐州站的CAPE降为零,而阜阳和南京的CAPE分别为1275和3600 J/kg,可以估计灵璧的CAPE在1200 J/kg左右。在30日08时,徐州站500 hPa为16 m/s的西南偏西风,925 hPa为8 m/s的东南风,两个等压面之间的风矢量差的数值为21 m/s,厚度约为5 km,对应的垂直风切变值为 $4.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。从徐州多普勒天气雷达的VAD(Velocity Azimuth Display)风廓线产品<sup>[22]</sup>的显示可以看出,徐州(距灵璧90 km)上空30日11时左右最强垂直风切变出现在0.3~4 km之间,由0.3 km处8 m/s的东南风转为4 km处16 m/s的西风,对应的风矢量差值为22 m/s,相应垂直风切变的值为 $6.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,呈现出较大的深层垂直风切变。因此,当时的对流有效位能和垂直风切变的条件有利于超级单体风暴生成<sup>[17, 22]</sup>。

有研究表明<sup>[28, 29]</sup>,有利于F2级以上强龙卷生成的两个有利条件分别是低的抬升凝结高度和较大的低层(0~1 km)垂直风切变。30日08时,徐州、阜阳和南京三个探空站的抬升凝结高度分别为545、274和272 m,表明整个皖北地区抬升凝结高度普遍很低。VAD风廓线显示在30日11时左右徐州上空0.3~1.2 km的风矢量差值为12 m/s,对应的垂直风切变值为 $1.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,是一个相对比较低的低层垂直风切变值。因此,环境条件也是有利于F2级以上强龙卷的产生的。需要指出的是,徐州雷达站和探空站距离此次强降水超级单体形成和发展的地点有80~100 km的距离,并不能完全代表超级单体发生地的天气条件,但有很大的参考价值。

### 3 超级单体演变的雷达回波分析

2005年7月30日早晨07时,在徐州雷达站的西面有大片降水云系发展(图略),该降水云系回波西北端自河南兰考,东北端达江苏沛县,南至安徽界首,中心位于河南商丘附近,形态为大片的层状降水回波包裹着零散的团状对流雨团。在雷达站东边的山东南部地区和江苏北部地区也有大片的层状云和积云混合降水回波。位于徐州雷达站南部的安徽涡阳、宿州、灵璧至苏北睢宁一带有超折射地物回波存在(图略),表明这一带存在低空逆温层。随

后,徐州西侧的大片降水区中有数条南北走向的雨带形成,并向位于东边的雷达方向移动,移动过程中,各个雨带南部逐渐消散,雨带变短,同时雷达周围逐渐为对流降水区域所覆盖,雷达南边的超折射地物回波也逐渐消失,对流冲破逆温在雷达南边开始发展。

08:30,自雷达向南有一条强度超过45 dBZ、长度为50 km左右的较强回波带,其东边不远处是另一条自上述大片回波区伸出的强度超过50 dBZ、长度也是50 km左右的强回波带。该强回波带随后追上自雷达南伸的回波带,并且向南发展,在09:30形成一条西南南-东北北方向的长约150 km的回波带(图略)。在该长回波带与其西边的大片降水区之间,有一条狭长的沿着回波带西侧的弱回波区(图略),表明有干空气沿着该弱回波通道侵入。接着该回波带向中间收缩并增宽,10:25,呈现为一条西南南-东北北走向的长约120 km、宽约30 km强回波带(图2)。该强回波带由三块较强的回波区构成,中间那块回波区有一个直径10 km涡旋在发展(图2b),旋转速度(正负速度对绝对值的平均)为13 m/s,属于弱中气旋<sup>[22]</sup>,表明一个中气旋已经生成,中间的雷暴单体是一个正在形成的超级单体。在强回波带的西侧是一条与回波带平行的弱回波(低层)或无回波(中高层)带,对应上述干空气的入侵。值得一提的是,2003年7月8日无为强烈龙卷<sup>[30]</sup>中也是先形成一条狭长对流回波带,回波带收缩增宽,然后在增宽的回波带南端有中气旋发展,最终导致龙卷。这种狭长回波带的收缩增宽的机制以及与中气旋产生之间有无某种联系引起我们的好奇,但从现有资料无从进行更深入的分析,这里将问题提出有待进一步的研究。

事实上,早在10:13,涡旋就在 $2.4^\circ$ 仰角上首次出现(图略),对应的高度为5 km左右,位于安徽宿州市上空,然后向上和向下发展。在10:25,最大垂直涡度出现在 $4.3^\circ$ 仰角(7 km)。假定中气旋结构为轴对称的,可以估计其最大垂直涡度值为 $0.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。25分钟之后的10:50(图3),构成强回波带的三块强回波北边的那块回波减弱,中间和南边的两块回波加强。与中间那块强回波对应的中气旋加强,旋转速度达到21 m/s,接近强中气旋的标准<sup>[22]</sup>,涡旋尺度仍然为10 km左右,此时最大垂直涡度位于 $1.5^\circ$ 仰角,相应高度为3.0 km,其垂

直涡度值为  $1.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。在中低层强回波带南端的单体和中间的单体已经合并在一起(图 3a), 其移动方向(东)前沿的东北、东、东南和南侧对应明显的辐合区(图 3b), 我们推断该辐合区是由沿着回波前沿的上升气流和回波带西侧干空气夹卷进入降水区蒸发冷却形成的下沉气流之间的辐合形成的。中间的单体已经发展成一个强降水超级单体风暴, 如果孤立地检验中间的单体, 其低层的回波形态(图 3a)类似于文献[17]图 3 中的强降水超级单体示意图, 具有一个宽大的前侧入流缺口(箭头所指), 对应最强的低层入流区。比较图 3a、c、d 代表的  $0.5^\circ$ 、 $2.4^\circ$ 、 $6.0^\circ$  仰角反射率因子, 注意到白色双箭头是在同一个地点, 可以判断出入流缺口之上具有明显的回波悬垂结构。值得注意的是, 对应于南端的强对流单体出现一个新的直径为 4 km 左右, 旋转速度为 12 m/s 的弱中气旋。表明南端的雷暴单体也正在发展为一个强降水超级单体, 其低层前沿也有一个前侧入流缺口(图 3a)。

随后, 中间和南端的两个超级单体趋向于合并。11:20(图 4), 尽管在高层仍能分辨出两个回波顶(图 4d), 在中低层两个单体已经合并为一体(图 4a 和图 4c)。 $0.5^\circ$  仰角反射率因子回波仍然展现了明显的前侧低层入流缺口(图 4a)。而  $2.4^\circ$  仰角反射率因子回波上(图 4c)除了可以看出前侧入流缺口外, 呈现出明显的螺旋状结构, 这种螺旋状的反射率因子结构也是强降水超级单体的主要形态之一。此时中气旋的旋转速度达到 27 m/s, 属于强中气旋<sup>[22]</sup>, 中气旋直径增大为 12 km 左右, 最大垂直涡度仍然在  $1.5^\circ$  仰角(3.5 km 高度), 其值仍为  $1.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  左右, 不同的是中气旋中心出现龙卷式涡旋特征(Tornadic Vertex Signature, 简称 TVS)<sup>[22, 31]</sup>, 对应的垂直涡度为  $4.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。两个超级单体和相应中气旋的合并是导致合并后中气旋中心(TVS)旋转加强的主要原因之一。与低层入流缺口对应的主要入流区构成中气旋负速度极值区, 其中的一部分为降水所覆盖(比较图 4b 和图 4c), 而中气旋的正速度极值区则完全位于降水主体内部。因此, 整个中气旋的大部分为降水所包裹。此刻, 中气旋从  $0.5^\circ$  仰角一直扩展到  $6.0^\circ$  仰角, 也就是从 1.8 km 扩展到 11 km(1.8 km 以下由于地球曲率无法探测到), 是一个非常深厚的水平尺度较大的强烈中气旋。而产生 2003 年 7 月 8

日无为强烈龙卷<sup>[30]</sup>的中气旋一直局限于 4 km 以下, 直径约 4~5 km, 与产生本次龙卷的大而深厚中气旋形成鲜明对照。

图 5a 给出穿过入流缺口和强回波区的反射率因子垂直剖面(位置如图 4a 中粗实线所示), 显示了非常明显的与低层入流对应的弱回波区和位于其上的回波悬垂, 表明在这个区域具有很强的上升气流<sup>[32]</sup>。强的上升气流有利于冰雹的形成, 冰雹的有利生长区大致位于  $-10^\circ\text{C}$  和  $-30^\circ\text{C}$  等温线之间的区域。根据文献[33], 如果 50 dBZ 以上的强回波扩展到  $-20^\circ\text{C}$  等温线以上, 表明强上升气流达到大冰雹的有利生长区, 强冰雹形成的可能性很大。在本次过程中, 探空显示  $0^\circ\text{C}$  层和  $-20^\circ\text{C}$  层的高度分别为 4.8 km 和 8.4 km, 图 5a 显示 50 dBZ 的回波一直扩展到 9 km 高度, 表现为高质心的雹暴结构, 与产生无为龙卷的超级单体呈现出的低质心非雹暴结构<sup>[30]</sup>形成对照。再考虑到中低层的弱回波区和中高层的回波悬垂结构, 我们判断较大冰雹形成的可能性很大。然而, 并没有与该超级单体风暴相联系的降雹的目击报告。可能的原因在于  $0^\circ\text{C}$  层的高度较高, 冰雹在下落过程中穿过  $0^\circ\text{C}$  层时开始融化, 掉到地面时已经很小或完全融化。我国长江中下游地区的冰雹在 5~6 月份最多见, 7 月和 8 月相对少, 一个主要原因就是 7~8 月  $0^\circ\text{C}$  层的高度相对较高。所以, 对于此次超级单体风暴, 我们判断有较大尺寸的冰雹在强烈上升气流的环境中生成, 但由于较高的  $0^\circ\text{C}$  层, 冰雹在下落过程中融化掉了。图 5b 展示了沿着超级单体风暴东南前沿穿过回波主体的反射率因子垂直剖面(如图 4a 中细实线所示), 该剖面也显示了低层的弱回波区和中层的回波悬垂结构, 但远没有图 5a 中的特征明显, 表明此强降水超级单体的主要低层入流和相应的上升气流区应位于前侧入流缺口及其上方, 而沿着超级单体的东南和南侧前沿也存在低层入流和相应的上升气流。超级单体回波主体的降水和干空气夹卷引入降水的蒸发冷却导致回波主体区域的带有向东南和南方向水平动量的下沉气流。因此, 在超级单体中低层前沿, 是带有东南和南风分量的上升气流和带有西北和北风分量的下沉气流之间的辐合区(图 4b)。

龙卷发生的确切时间并不十分清楚, 只知道是在 11:26~11:32 分之间。在 11:30 左右, 在韦集

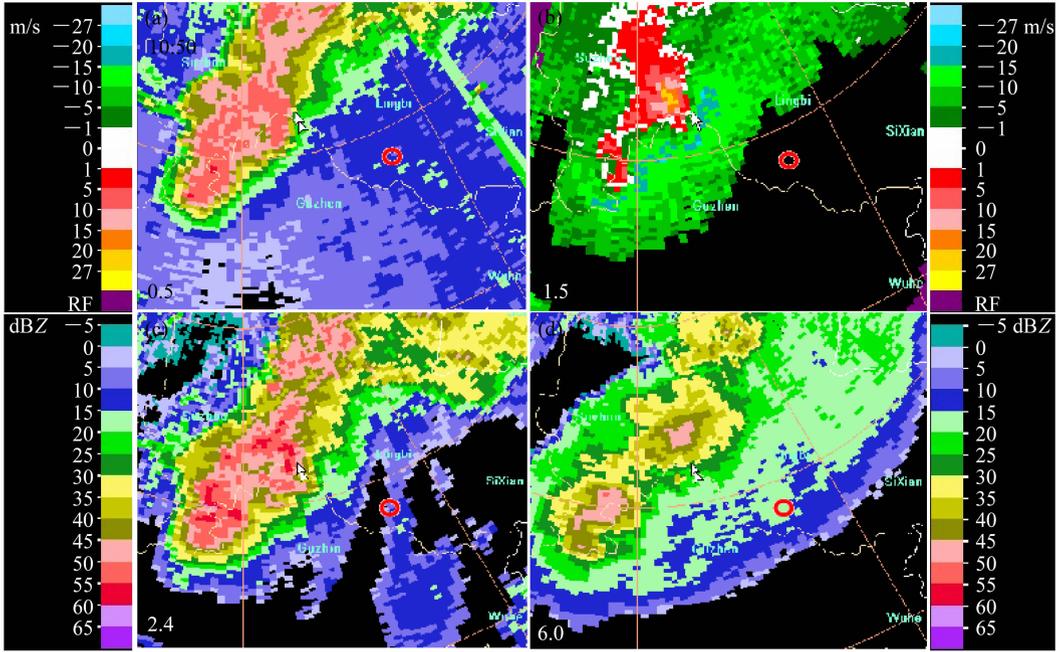


图3 同图2, 但为7月30日10:50

Fig. 3 Same as Fig. 2, but at 1050 LST 30 Jul

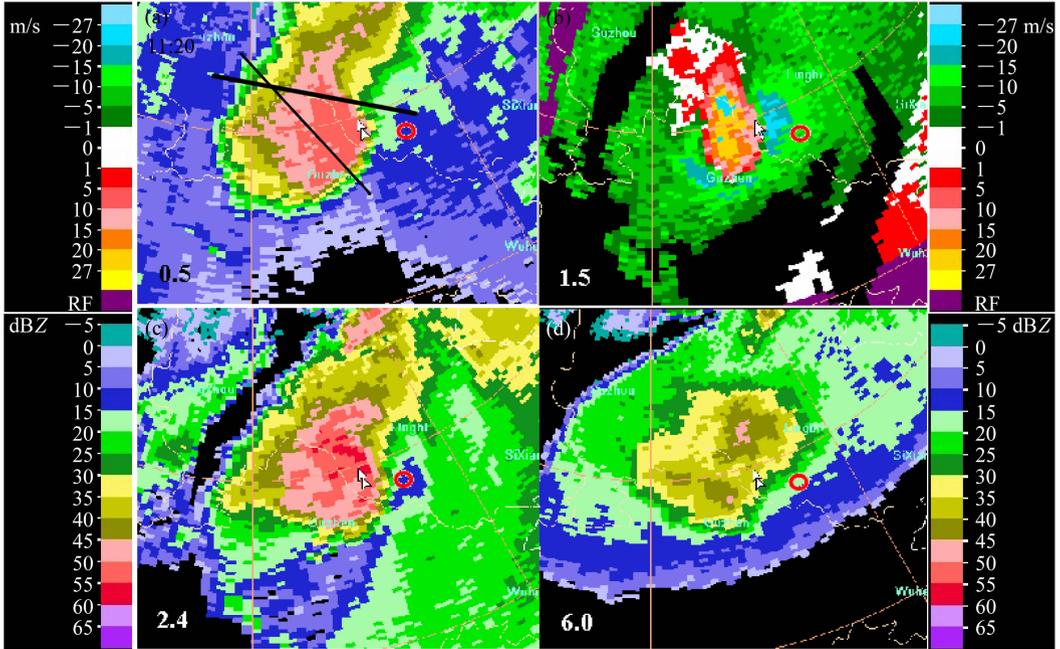


图4 同图2, 但为7月30日11:20

Fig. 4 Same as Fig. 2, but at 1120 LST 30 Jul

乡有目击者看到龙卷的漏斗云。在11:26, 前侧入流缺口 (FIN) 依然非常显著, 同时出现明显的后侧入流缺口 (RIN), 表明后侧下沉气流已经迅速加强 (图略)。1.5°仰角径向速度呈现为一个12 km 直

径的中气旋, 其中心有一个直径小于2 km 的龙卷式涡旋特征 TVS<sup>[31]</sup>, 其位置与龙卷实际发生位置重合, 如图6所示, 其相应的垂直涡度为  $6.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  (注意左边离开雷达的最大径向速度值出现速度模糊,

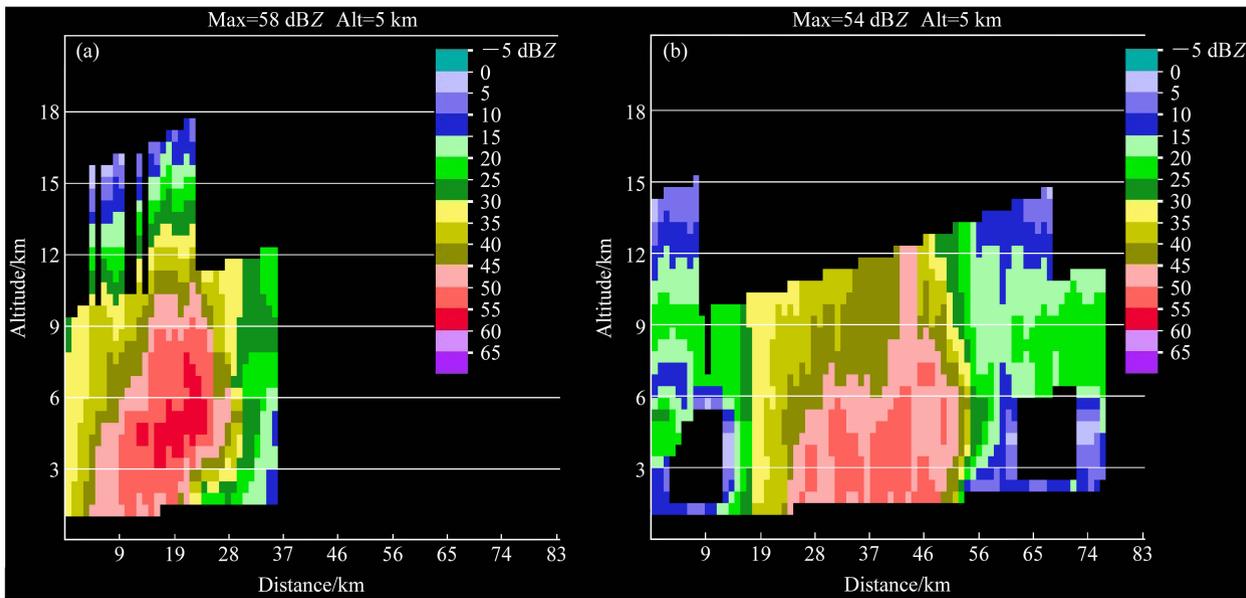


图5 图4a中粗实线(a)和细实线(b)所示的反射率因子垂直剖面

Fig.5 Vertical cross sections of reflectivity along the thick (a) and thin (b) solid lines in Fig. 4a, respectively

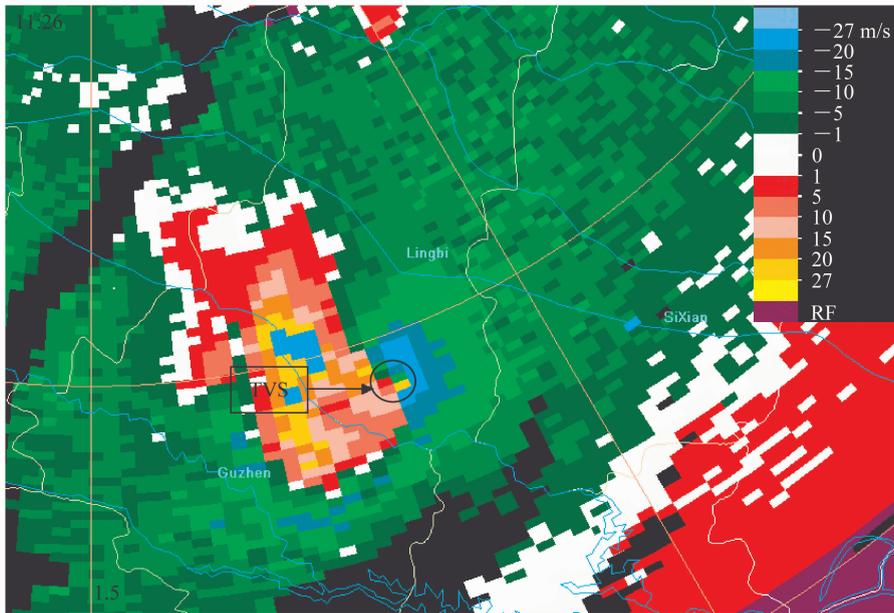


图6 2005年7月30日11:26徐州CINRAD-SA雷达1.5°仰角径向速度图。黑色小圆圈指示TVS位置,同时也是龙卷实际发生位置

Fig.6 1.5° elevation radial velocity map at 1126 LST 30 Jul 2005 from Xuzhou CINRAD-SA radar. The small black circle indicates the position of TVS, and is also the position of tornado

其实际值为+30 m/s, 同样最大向着雷达速度也出现速度模糊, 其实际最大值为-30 m/s)。从此时TVS位置与龙卷实际位置重合这个事实判断龙卷很可能从此时(11:26)开始。

在一个体扫后的11:32, 上述前侧入流缺口和后侧入流缺口更加显著, 超级单体的反射率因子

呈现出明显的“S”型(图7), 这也是强降水超级单体的经常出现的一种形态。龙卷位于“S”型回波凸出部分的顶点位置, 对应于中气旋的中心附近。中气旋和其中心的TVS比一个提扫前略微减弱, 仍然属于强中气旋。在风暴顶(6.0°仰角), 辐散中心正好位于地面龙卷的上方(图7d), 正负速度极

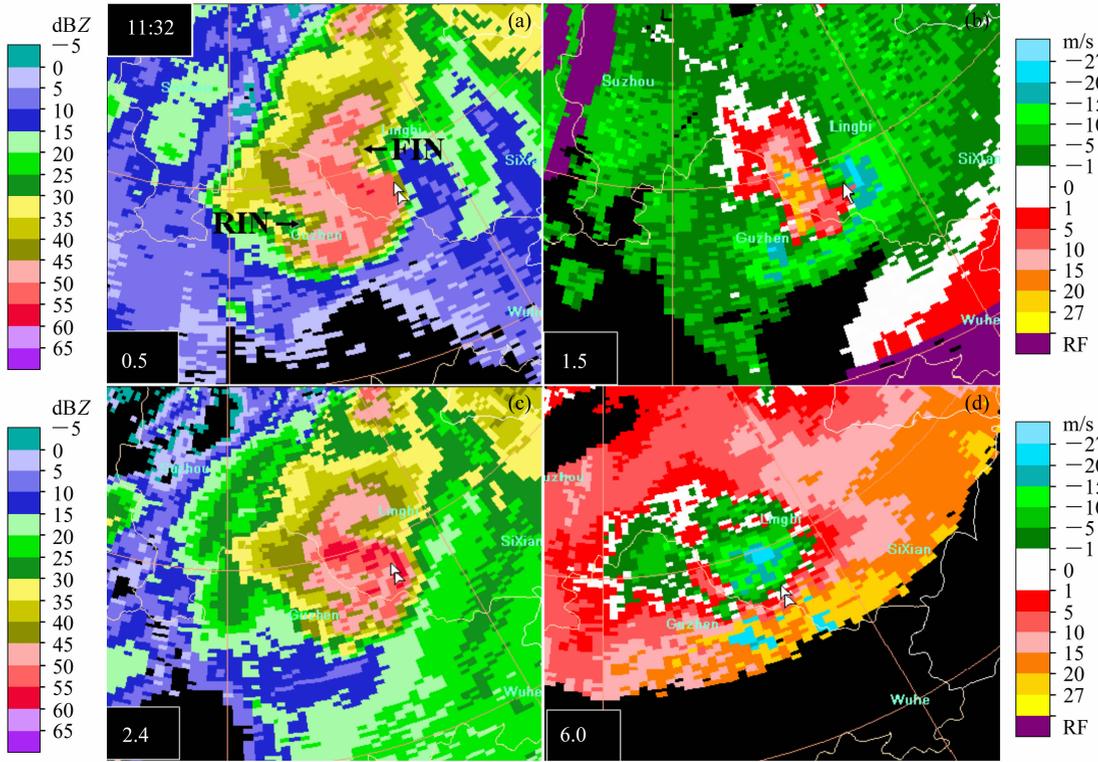


图7 2005年7月30日11:32徐州CINRAD-SA雷达0.5°(a)和2.4°(c)仰角反射率因子、1.5°(b)和6.0°(d)仰角径向速度。箭头位置代表龙卷发生地点

Fig. 7 The 0.5° (a) and 2.4° (b) elevation reflectivity, 1.5° (c) and 6.0° (d) elevation radial velocity at 1132 LST 30 Jul 2005 from Xuzhou CINRAD-SA radar. The arrows represent the tornado positions

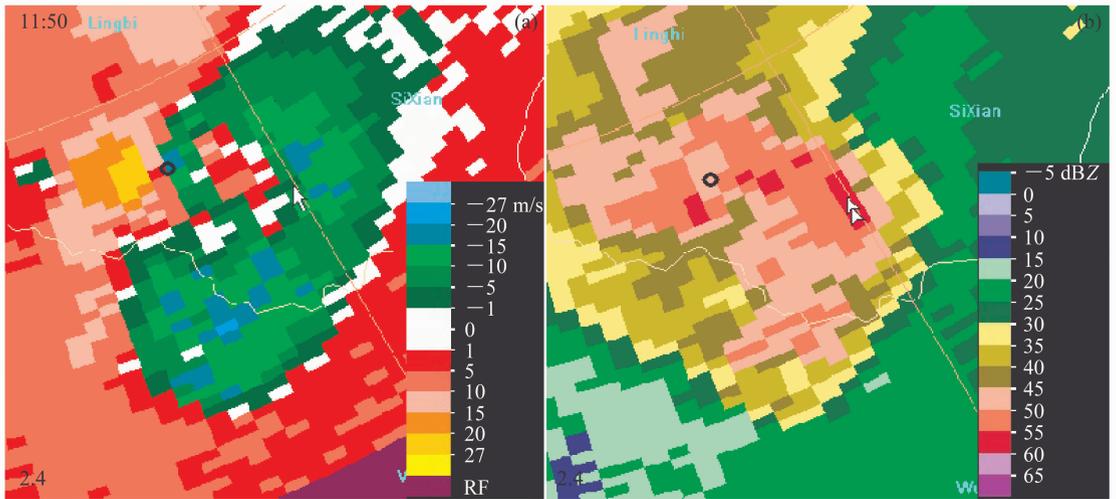


图8 2005年7月30日11:50徐州CINRAD-SA雷达2.4°仰角径向速度(a)和反射率因子(b)。箭头指示原有中气旋位置,黑色小圆圈代表新生中气旋位置

Fig. 8 The 2.4° elevation radial velocity (a) and reflectivity (b) at 1150 LST 30 Jul 2005 from Xuzhou CINRAD-SA radar. The arrows represent the original mesocyclone positions, the small black circle indicates the new mesocyclone position

值差值达到 52 m/s, 之间距离 13 km, 表明龙卷上方有较强的风暴顶辐散, 其散度值大约为  $0.8 \times$

$10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

在随后的发展中, 超级单体的前侧入流缺口逐

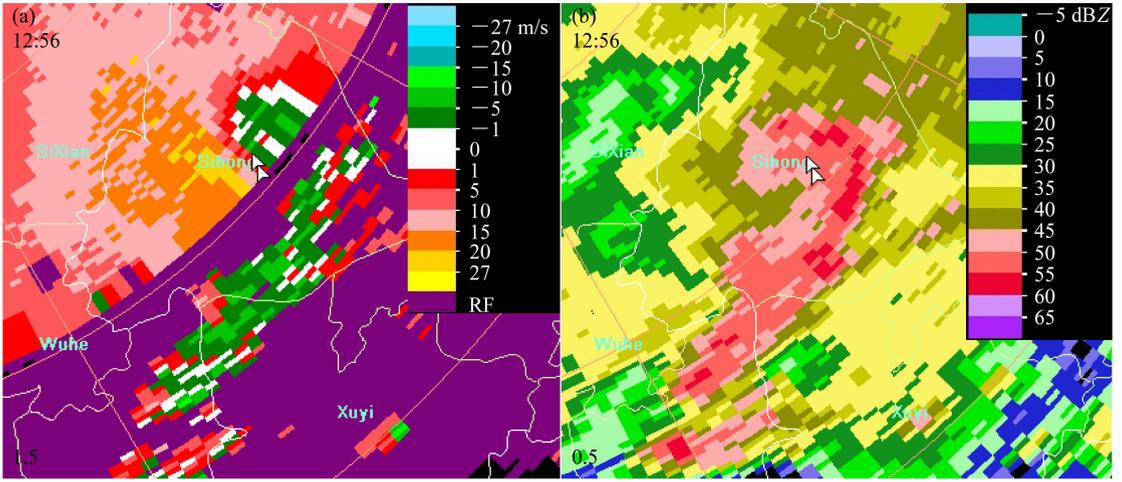


图9 2005年7月30日12:56徐州CINRAD-SA雷达1.5°仰角径向速度(a)和0.5°仰角反射率因子(b)。箭头指示为与弓形回波逗号头相联系的中气旋位置

Fig. 9 The 1.5° elevation radial velocity (a) and 0.5° elevation reflectivity (b) at 1256 LST 30 Jul 2005 from Xuzhou CINRAD-SA radar. The double arrows represent the positions of the mesocyclone associated with comma head of the bow echo

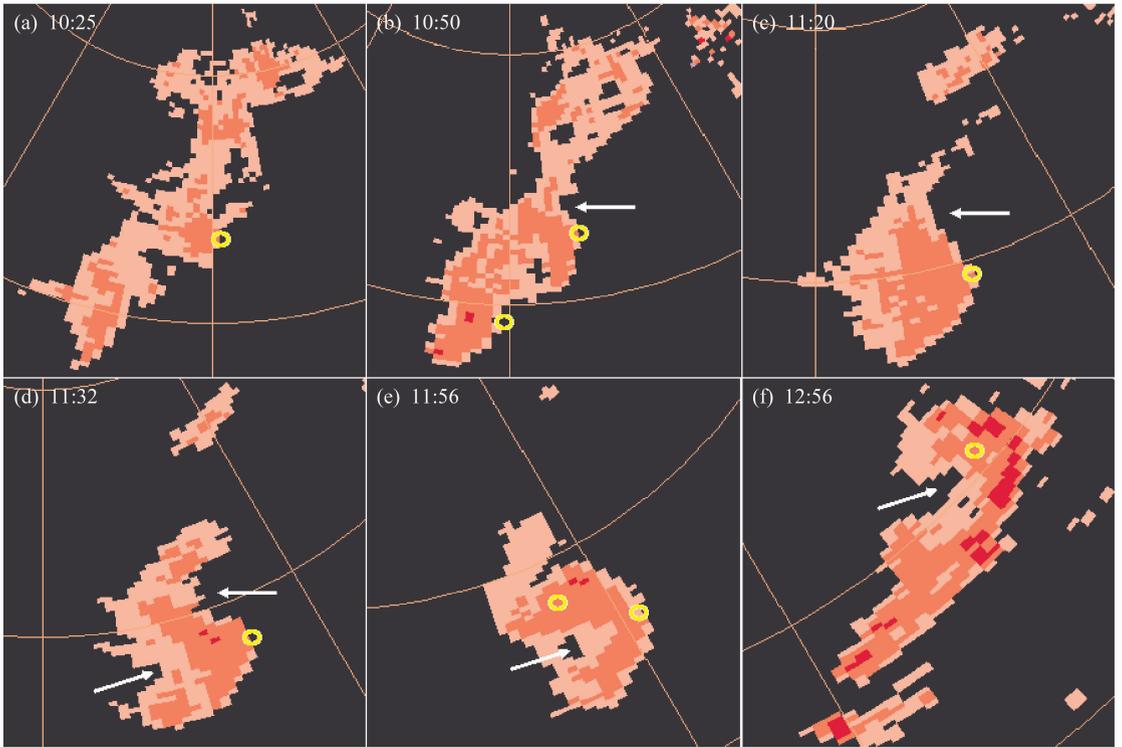


图10 2005年7月30日皖北强降水超级单体风暴0.5°仰角高于45 dBZ的反射率因子演变情况。黄色小圆圈标明中气旋位置，箭头标明前侧或后侧入流

Fig. 10 The evolution of 0.5° elevation reflectivity greater than 45 dBZ for the heavy precipitation supercell occurring on 30 Jul 2005 in northern Anhui Province. The small yellow circles represent mesocyclones, the arrow indicates the front-flank or rear-flank inflow

渐填塞，在11:50左右从“S”形回波转变为弓形回波(图8)。除了原有的中气旋位于弓形回波的顶点

附近，在弓形回波的北部有一个新的中气旋形成后。弓形回波形态一直持续到13:00左右(图9)，

那时弓形回波北部的中气旋仍然十分明显,但顶点附近的原有中气旋消失。随后的 1 小时弓形回波逐渐与其东南方的其它强对流回波合并,在江苏产生了雷雨大风等强对流天气。

上述超级单体的演化,可以总结为“带状回波-典型强降水超级单体-弓形回波”三个阶段(图 10)。带状回波阶段包括图 10a、b:该超级单体的发展从一条狭长对流雨带的变短变粗开始(图 10a),雨带中间的对流单体内首先有中气旋发展,从 4 km 左右高度首先出现,然后同时向上和向下发展,前侧入流缺口变得明显(图 10b),接着雨带南端的单体中也有中气旋发展。典型强降水超级单体阶段包括图 10c、d:雨带南端单体逐渐与中间单体合并,构成一个庞大深厚的强降水超级单体和被包裹在其中的直径 12 km 左右、深厚强烈的中气旋(图 10c),然后由于后侧入流的开始出现,低层回波形态演变为“S”形(图 10d),而中层回波呈现为螺旋型。龙卷出现在“S”形回波阶段,在龙卷出现前,有一个龙卷涡旋特征 TVS 出现在中气旋的中心,其对应的垂直涡度值估计为  $6.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。龙卷地点上空有很强的风暴顶辐散,散度值约为  $0.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。产生强烈龙卷的中气旋形成于 10:13,消亡于 12:26,持续了 2 小时 13 分。弓形回波阶段包括图 10e、f:弓形回波阶段的开始由在弓形回波北部逗点回波的中心的一个中气旋形成为标志,原有的中气旋位于弓形回波顶点附近(图 10e),随后弓形回波的北宽南窄的不对称结构逐渐明显,原有的位于弓形回波顶点附近的中气旋消失,并出现地面直线型风害(图 10f)。

上述超级单体风暴所呈现出的明显的前侧入流槽口、位于风暴右后侧(相对于其前进方向)的大片雨区,被降水包裹的中气旋、螺旋形回波、“S”形回波、弓形回波,以及多个中气旋的结构都是强降水超级单体风暴的一些典型回波特征。值得指出的一点是,此次强降水超级单体风暴在其演变过程中从来没有出现过超级单体风暴中经常见到的有界弱回波区(穹窿)结构。文献[19]中的图 1 总结了发生在美国的强降水超级单体风暴演变的两种典型情况,其中一种是“经典超级单体-典型强降水超级单体-弓形回波”演变方式,而上述例子是“带状回波-典型强降水超级单体-弓形回波”演变方式,即与文献[19]中的强降水超级单体演变概念模型的

前半部分不同,后半部分非常类似。

## 4 讨论

上节对 2005 年 7 月 30 日发生在安徽灵璧县的一次产生强烈龙卷和暴雨的强降水超级单体风暴的多普勒天气雷达的回波特征的演变进行详细的描述,揭示出一些高度组织的强对流降水系统的中小尺度结构及其演变特征。接下来,我们尝试着对此次 HP 超级单体的中气旋的起源、超级单体回波形态的演变机理进行探讨。

### 4.1 中气旋的起源

为了便于讨论,给出垂直方向的涡度方程(忽略湍流摩擦作用):

$$\frac{D\zeta}{Dt} = \boldsymbol{\omega}_h \cdot \nabla_h \boldsymbol{\omega} + \zeta \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial z}, \quad (1)$$

其中,  $\zeta$  为垂直涡度,  $\boldsymbol{\omega}$  是三维涡度,下角 h 表示水平分量。(1) 式右边第一项代表水平涡度扭曲为垂直涡度,第二项为垂直涡度拉伸。(1) 式表示垂直涡度的来源主要是两项,第一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曲为垂直涡度,第二是涡旋在随高度逐渐加强的上升气流中被垂直拉伸而旋转加快。

对于超级单体风暴中中气旋的产生,目前比较一致的观点是: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过程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<sup>[34, 35]</sup>。30 日 11:00 左右,从徐州多普勒天气雷达的 VAD 风廓线产品<sup>[22]</sup>的显示可以看出,徐州(距灵璧 90 km)上空最强垂直风切变出现在 0.3~4 km 之间,由 0.3 km 处的 8 m/s 的东南风转为 4 km 处 16 m/s 的西风,对应的风矢量差的值为 22 m/s,相应垂直风切变的值为  $0.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。相应水平涡度方向大致为从南指向北,而此次超级单体风暴低层入流的主要部分来自东南方向,水平涡度在低层入流方向有很大的分量。因此,当低层入流逐渐变为上升气流时,相应的水平涡度被扭曲为垂直涡度,该垂直涡度在上升气流的进一步拉伸作用下旋转加强而形成中气旋(上述超级单体中气旋刚形成时的垂直涡度的约为  $0.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )。从上述公式可以看出,只要垂直速度是随高度增加的,则垂直拉伸项就是使涡度增加的。

也就是说在垂直速度极大值以下的高度, 由水平涡度扭曲形成的垂直涡度都会在垂直拉伸的作用下进一步增强。中气旋在生成后的增强与水平涡度向垂直涡度的转换、垂直涡度在上升气流的拉伸作用下加大和在湍流和地面摩擦作用下耗损之间的平衡直接相关。在超级单体发展阶段, 上升气流不断加强, 上升气流最大值所在高度增加, 导致垂直涡度在不断加大的垂直拉伸作用下增强。根据 Klemm<sup>[36]</sup> 的分析, 超级单体中上升气流的加强与垂直涡度通过与环境垂直风切变之间的动力相互作用产生的向上的扰动气压梯度力直接相关, 这种上升气流的动力增强机制使得本次超级单体风暴能够出现在 CAPE 值不是很大的环境下。Finley 等<sup>[37]</sup> 在对一次产生龙卷的强降水超级单体的数值模拟中发现, 该强降水超级单体中气旋的加强与维持在很大程度上是由于位于其右后侧的侧翼线 (flanking line) 上不断有垂直涡度产生并被平流到中气旋内。对于此次强降水超级单体, 在最早形成的位于雨带中部的强降水超级单体的右侧 (南部) 存在另一个弱一些的强降水超级单体和相应中气旋, 该弱中气旋与主中气旋合并, 导致主中气旋加强, 与上述数值模拟结果有类似的地方, 只是以更加强烈和爆发性的中气旋合并的方式表现出来。龙卷产生后中气旋的逐渐减弱与低层暖湿气流入流的减弱和干空气后侧入流的加强有关。中气旋逐渐为下沉气流所包围, 无法继续获得带有很强水平涡度的低层暖湿入流以维持垂直涡度, 最终在地面摩擦和周围空气湍流夹卷的作用下消散。上面提到的垂直涡度与环境垂直风切变相互作用导致向上扰动气压梯度力的机制<sup>[35]</sup> 是超级单体风暴产生极端对流天气的原因之一。超级单体风暴中强的上升气流不完全都是由对流有效位能转换而来的, 还可以通过上述动力过程产生附加的上升运动, 其最大上升气流速度可以超过根据对流有效位能 CAPE 全部转换为上升运动动能得到的上升气流速度极限值。

关于龙卷的产生, 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<sup>[38~40]</sup>。本个例中龙卷产生地点距离雷达 80 km, 雷达最低仰角只能观测到龙卷发生地上空 1.8 km 以上高度, 因此无法探测到低层中气旋。推测存在这样的可能: 由阵风锋强迫的垂直环流产生以东北-西南方向为轴线的垂直环流, 形成东北-

西南方向的水平涡度<sup>[41]</sup>。由于低层的阵风锋通常比较浅薄, 阵风锋垂直环流构成的水平涡度轴线的位置很低。超级单体风暴在 11:30 左右移到灵璧县附近, 地面东北风构成了沿着阵风锋前沿的来自东北方向的风暴入流, 进入到与中层中气旋紧密联系的上升气流中, 低层的水平涡度被扭曲为低层的垂直涡度, 形成低层中气旋。低层中气旋在中层中气旋中心涡度加强导致的低层上升气流的加强和超级单体后侧下沉气流导致的低层中气旋地面附近辐合加强的共同作用下, 涡度迅速加大而形成龙卷。

#### 4.2 强降水超级单体回波的演变机理

在 30 日 10:50 (图 3a), 明显的低层前侧入流缺口的出现与大气中较大的垂直风切变和中气旋的发展密切相关。从大气低层到对流层中层之间较大的垂直风切变使得雷暴低层前沿出现较大的相对风暴入流。此外, 中气旋在 10:15 首先在 4 km 左右高度出现后, 同时向下和向上发展。中气旋向下发展使得低层入流更强, 一方面由于较大的相对风暴入流和中气旋的旋转作用, 另一方面由于上升气流的变强和降水例子在风暴顶的辐散, 使低层出现了明显的前侧入流缺口而其上方中高层有明显的回波悬垂。随着南端的弱中气旋与中间的主中气旋合并, 到 11:20, 整个中气旋的大部分为较强的降水回波所包裹, 中气旋带有的强烈垂直涡度使得包裹中气旋的降水回波呈现出螺旋形的回波结构 (图 4c)。在 11:20 的 1.5° 仰角径向速度图上 (图 4b), 除了明显的中气旋特征外, 位于其西南还有一个 15 km 左右直径的反气旋, 该反气旋的发展有助于超级单体西侧的干空气侵蚀超级单体的内部, 使得在 11:32 超级单体后部出现了后侧入流缺口, 与前侧入流缺口一道构成了“S”形回波 (图 7a 和 c)。在接下来的 20 分钟, 前侧入流逐渐减弱, 前侧入流缺口逐渐填塞, 后侧入流保持其强度不变, 回波形态逐渐变成“弓形” (图 8b)。此时 (11:50) 的弓形回波几乎南北对称, 弓形回波北部有一个新的中气旋产生。随着时间的推移, 到 12:56, 弓形回波北部变大, 呈现为一个旋转的逗点, 与一个小时前生成的中气旋对应, 而南部变窄 (图 9b)。弓形回波由开始时的南北对称结构演变为北宽南窄的不对称结构是一个相当普遍的现象<sup>[42, 43]</sup>。Weisman 和 Davis<sup>[43]</sup> 通过添加或去掉科里奥利力的数值模拟试验表明, 这种弓形回波由对称变为北宽

南窄的原因在于科里奥利力的作用。事实上,弓形回波前沿的上升气流和弓形回波后部的下沉气流在沿着弓形回波的中层区域形成辐合区,根据动力气象学中的相对环流定理,科里奥利力在辐合区将产生气旋式环流,因而使得弓形回波北端的气旋式涡旋加强,位于弓形回波南端的反气旋涡旋减弱,逐渐形成上述非对称结构。

本文中的超级单体风暴属于右移风暴,也就是说其移动方向位于风暴承载层平均风的右侧。从 10:30 到 11:30,风暴承载层的平均风方向为  $260^\circ$  (西风略微偏南),大小为  $13\text{ m/s}$ 。而此期间超级单体平均的移动方向为  $300^\circ$  (西北偏西),速度为  $10\text{ m/s}$ 。也就是说,该超级单体在风暴承载层平均风向右侧  $40^\circ$  方向移动,移动速度为承载层平均速度的  $75\%$  左右。超级单体的右移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 和 Klemp<sup>[14]</sup> 结合一个模拟的理想的气旋式超级单体的右移现象进行了详细的分析和解释,他们指出,对于气旋式旋转的超级单体,由于涡旋和环境垂直风切变的相互作用,在其前进方向右侧会产生一个向上的扰动气压梯度力,而在其前进方向左侧会产生一个向下的扰动气压梯度力,从而使得其右侧上升气流加强,左侧上升气流减弱,导致风暴内最强上升气流区的向右传播,也就是风暴的向右传播。在本个例中,除了上述传播机制外,强回波带南端的稍弱一些的超级单体与中间强超级单体的合并也对中间强超级单体的右移有很大贡献。

## 5 结论与总结

本文对一次强降水超级单体风暴的背景天气条件和雷达回波演变特征进行了详细的分析。2005 年 7 月 30 日发生在安徽北部的该强降水超级单体风暴,于上午 11:30 左右在安徽灵璧县韦集乡产生了 F3 级强烈龙卷并伴随暴雨,导致 15 人死亡,46 人受伤。通过对本次强降水超级单体风暴的分析,得到主要结果如下:

(1) 超级单体产生前后的 08 时,附近整层大气没有冷空气入侵,但具有前倾槽结构。 $500\text{ hPa}$  槽后相对干(但不冷)空气位于  $700\text{ hPa}$  槽前相对湿空气之上,有利于不稳定大气层结的建立。此时灵璧站对应的对流不稳定能量在  $1200\text{ J/kg}$  左

右,属于中等大小。抬升凝结高度在  $500\text{ m}$  左右。 $500\text{ hPa}$  和  $925\text{ hPa}$  之间的风矢量差为  $21\text{ m/s}$ ,对应的深层垂直风切变值为  $4.2 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ,超过美国南部平原地区产生超级单体所要求的  $3.3 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$  的深层垂直风切变阈值。上午 11 时,根据徐州多普勒天气雷达 VAD 风廓线得到  $1.2\text{ km}$  和  $0.3\text{ km}$  之间的风矢量差为  $12\text{ m/s}$ ,对应的低层垂直风切变值为  $1.3 \times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。雷暴的下沉气流在地面形成一条西南西—东北东走向阵风锋,上午 11 时位于灵璧西北  $30\text{ km}$  左右。上述中等程度的 CAPE 值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。

(2) 本文中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”三个阶段。在带状回波阶段,该超级单体的发展从一条狭长对流雨带的变短变粗开始,雨带中间的对流单体内首先有中气旋发展,从  $4\text{ km}$  左右高度首先出现,然后同时向上和向下发展,前侧入流缺口变得明显,接着雨带南端的单体中也有中气旋发展。在典型强降水超级单体阶段,雨带南端单体逐渐与中间单体合并,构成一个庞大深厚的强降水超级单体和被包裹在其中的直径为  $12\text{ km}$  左右、深厚强烈的中气旋,然后由于后侧入流的开始出现,低层回波形态层演变为“S”形,而中层回波呈现为螺旋型。龙卷出现在“S”形回波阶段,在龙卷出现前,有一个龙卷涡旋特征 TVS 出现在中气旋的中心,其对应的垂直涡度值估计为  $6.0 \times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。龙卷地点上空有很强的风暴顶辐散,散度值约为  $0.8 \times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。产生强烈龙卷的中气旋形成于 10:13,消亡于 12:26,持续了 2 小时 13 分。弓形回波阶段的开始以在弓形回波北部逗点回波的中心有另一个中气旋形成为标志,原有的中气旋位于弓形回波顶点附近,随后弓形回波的北宽南窄的不对称结构逐渐明显,原有的位于弓形回波顶点附近的中气旋消失,并出现地面直线型风害。与美国常见的“经典超级单体-典型强降水超级单体-弓形回波”演变方式相比,本例子是“带状回波-典型强降水超级单体-弓形回波”演变方式,前半部分不同,后半部分非常类似。

(3) 在该强降水超级单体风暴到达最强盛时通

过其前侧入流槽口和最强回波中心所做的垂直剖面显示出非常明显的与低层入流对应的弱回波区和位于其上的强回波悬垂,回波悬垂之内 50 dBZ 的回波扩展到 9 km 以上,呈现出类似于典型雹暴的高质心回波结构。

(4) 与本次过程相应的深层垂直风切变产生较大的从南指向北的水平涡度,而此次超级单体风暴低层入流的主要部分来自东南方向,水平涡度在低层入流方向有很大的分量,沿着雷暴暖湿空气入流的水平涡度在入流逐渐转变为上升气流的过程中被扭曲为垂直涡度,该垂直涡度在上升气流的进一步拉伸作用下形成中层中气旋,标志着超级单体的诞生。该超级单体的气旋式涡旋与环境垂直风切变的相互作用在超级单体位于风暴承载层平均风右侧部分产生向上的扰动气压梯度力,左侧部分产生向下的扰动气压梯度力,导致超级单体向风暴承载层右侧移动。从上午 10:13 超级单体生成到 12:26 超级单体失去超级单体特征的两个多小时期间,该超级单体在风暴承载层平均风向右侧  $40^\circ$  方向移动,速度值为平均速度的 75% 左右。

### 参考文献 (References)

- [1] Browning K A. Cellular structures of convective storms. *Meteor. Mag.*, 1962, **91**: 341~350
- [2] Browning K A, Ludlam F H. Airflow in convective storms. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1962, **88**: 117~135
- [3] Browning K A, Donaldson R J. Airflow and structure of a tornadic storm. *J. Atmos. Sci.*, 1963, **20**: 533~545
- [4] Browning K A. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Sci.*, 1964, **21**: 634~639
- [5] Marwitz J D. The structure and motion of severe hailstorms. Part I, II, III. *J. Appl. Meteor.*, 1972, **11**: 166~201
- [6] Donaldson R J Jr. Vortex signature recognition by a Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, 1970, **9**: 661~670
- [7] Brooks E M. The tornado cyclone. *Weatherwise*, 1949, **2**: 32~33
- [8] Fujita T T. Analytical mesometeorology: A review. *Severe Local Storms, Meteor. Monogr.*, 1963, **5** (27): 77~125
- [9] Brown R A, Burgess D W, Crawford K C. Twin tornado cyclones within a severe thunderstorm: Single-Doppler radar observations. *Weatherwise*, 1973, **26**: 63~71
- [10] Ray P S, Doviak R J, Walker G B, et al. Dual-Doppler observation of a tornadic storm. *J. Appl. Meteor.*, 1975, **14**: 1521~1530
- [11] Burgess D W, Brown R A, Lemon L R, et al. Evolution of a tornadic thunderstorm. Preprints, 10th Conf. on Severe Local Storms, 1977, Omaha, NE, Amer. Meteor. Soc., 84~89
- [12] Klemp J B, Wilhelmson R B, Ray P S. Observed and numerically simulated structure of a mature supercell thunderstorm. *J. Atmos. Sci.*, 1981, **38**: 1558~1580
- [13] Rotunno R, Klemp J B. The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 136~151
- [14] Rotunno R, Klemp J B. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **42**: 271~292
- [15] Browning K A. The structure and mechanisms of hailstorms. *Meteor. Monogr.*, 1978, No. 38: 1~36
- [16] Doswell C A III. Severe convective storms. *Meteor. Monogr.*, 2001, No. 69: 1~26
- [17] Moller A R, Doswell C A III, Foster M P, et al. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. *Wea. Forecasting*, 1994, **9**: 327~347
- [18] Bluestein H B, Parks C R. A synoptic and photographic climatology of low-precipitation severe thunderstorms in the Southern Plains. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**: 2034~2046
- [19] Moller A R, Doswell C A, Przybylinski R. High-precipitation supercells: A conceptual model and documentation. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB, Canada, 1990, AMS, 52~57
- [20] Przybylinski R, Runnels S, Spoden P, et al. The Allendale Illinois tornado - January 7, 1989: One type of an HP supercell. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc., 1990, 516~521
- [21] Przybylinski R W, Snow J T, Agee E M, et al. The use of volumetric radar data to identify supercells: A case study of June 2, 1990. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards. *Geophys. Monogr.*, 1993, No. 79, Amer. Geophys. Union, 241~250
- [22] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用.北京:气象出版社,2006.314pp  
Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Tingnan, et al. *Principles and Operational Application of Doppler Weather Radar* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2006. 314pp
- [23] 王昂生,徐乃璋.强单体雹暴的研究.大气科学,1985,9:260~267  
Wang Angsheng, Xu Naizhang. The study of strongcell hailstorms. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1985, **9**: 260~267
- [24] 廖玉芳,俞小鼎,郭庆.一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析.应用气象学报,2003,14:656~662  
Liao Yufang, Yu Xiaoding, Guo Qing. Case study of a series

- of severe convective storms based on China new generation (Doppler) weather radar data. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2003, **14**: 656~662
- [25] 朱君鉴, 刁秀广, 黄秀韶. 一次冰雹风暴的 CINRAD/SA 产品分析. 应用气象学报, 2004, **15**: 579~589  
Zhu Junjian, Diao Xiuguang, Huang Xiushao. Study of CINRAD/SA products for a hail storms. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2004, **15**: 579~589
- [26] 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报, 2004, **62**: 317~328  
Zheng Yuanyuan, Yu Xiaoding, Fang Chong, et al. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62**: 317~328
- [27] Fujita T T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J. Atmos. Sci.*, 1981, **38**: 1511~1534
- [28] Brooks H E, Craven J P. Database proximity soundings for significant thunderstorms, 1957 - 1993. Preprints, 21th Conf. on Local Severe Storms, 2002, AMS, San Antonio, TX, 639~642
- [29] Evans J S, Doswell C A. Investigating derecho and supercell proximity soundings. Preprints, 21th Conf. on Local Severe Storms, 2002, AMS, San Antonio, TX, 635~638
- [30] 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等. 2003年7月8日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析. 气象, 2004, **30**: 38~45  
Zheng Yuanyuan, Yu Xiaoding, Fang Chong, et al. Analysis of a series of tornado evens during 8 July 2003 in Anhui Province with new generation weather radar data. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2004, **30**: 38~45
- [31] Brown R A, Lemon L R, Burgess D W. Tornado detection by pulsed Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, 1978, **106**: 29~38
- [32] Lemon L R. Severe thunderstorms radar identification techniques and warnings criteria. NOAA Tech. Memo., NWS NSSFC-3, Kansa City, National Severe Strom Center, 1980, 60pp
- [33] Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Wea. Forecasting*, 1998, **13**: 286~303
- [34] Davies-Jones R. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 2991~3006
- [35] Rotunno R, Klemp J. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **42**: 271~292
- [36] Klemp J B. Dynamics of tornadic thunderstorms. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1987, **19**: 369~402
- [37] Finley C A, Cotton W R, Pielke R A Sr. Numerical simulation of tornadogenesis in a high-precipitation supercell. Part I: Storm evolution and transition into a bow echo. *J. Atmos. Sci.*, 2001, **58**: 1597~1629
- [38] Rasmussen E N, Straka J M, Davies-Jones R, et al. Verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: VORTEX. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1994, **75**: 995~1006
- [39] Wakimoto R M, Liu C, Cai H. The Garden City, Kansas, storm during VORTEX 95. Part I: Overview of the storm's life cycle and mesocyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, **126**: 372~392
- [40] Ziegler C L, Rasmussen E N, Shepherd T R, et al. The evolution of the low-level rotation in the 29 May 1994 Newcastle-Graham, Texas, storm complex during VORTEX. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129**: 1339~1368
- [41] Markowski P M, Rasmussen E N, Straka J M. The occurrence of tornadoes in supercells interacting with boundaries during VORTEX-95. *Wea. Forecasting*, 1998, **13**: 852~859
- [42] Houze R A Jr, Biggerstaff M I, Rutledge S A, et al. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1989, **70**: 608~619
- [43] Weisman M L, Davis C A. Mechanisms for the generation of mososcale vortices within quasi-linear convective systems. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**: 2603~2622