

陶岚,戴建华,孙敏. 2016. 一次雷暴单体相互作用与中气旋的演变过程分析. 气象, 42(1):14-25.

# 一次雷暴单体相互作用与中气旋的演变过程分析<sup>\*1</sup>

陶 岚 戴建华 孙 敏

上海中心气象台, 上海 200030

**提 要:** 2013年8月1日, 上海位于副热带高压边缘弱垂直风切变的不稳定层结下, 午后开始, 不断有雷暴新生。在此次强雷暴过程中, 生成了三个中气旋; 特别是在第二个中气旋生成过程中, 雷暴合并后呈现出钩状回波、回波悬垂、中气旋等超级单体的雷达回波特征, 还具有标志大冰雹的三体散射长钉特征回波。本文通过分析常规天气观测、双多普勒天气雷达、自动气象站和风廓线雷达等资料发现, 前两个中气旋的生成机制为: (1) 前期雷暴出流的交汇形成了气旋性环流, 加强了低层水平辐合, 阵风锋类似锋面的作用促使低层的暖湿空气抬升; (2) 在弱垂直风切变的天气背景下, 由出流阵风锋导致环境垂直风切变有所增大, 改变了雷暴发展的环境, 形成了经典中气旋生成的有利环境。此外, 超级单体中气旋(第二个)形成过程中, 雷暴的合并使得上升运动加强, 对流不断发展, 增强了雷暴内的旋转程度, 从而有利于中气旋的形成。在第三个中气旋形成过程中, 由于雷暴中的弱出流被相邻雷暴爆发的下沉气流抬升, 在中低层形成出流和入流间的旋转, 因而被雷达探测为中气旋。

**关键词:** 中气旋, 阵风锋, 雷暴合并, 超级单体, 双多普勒雷达反演风场

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2016. 01. 002

## Analysis on Interaction of Thunderstorms and Evolution of Mesocyclones

TAO Lan DAI Jianhua SUN Min

Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

**Abstract:** Thunderstorms were generated in a weak vertical wind shear and strong unstable environment beginning from noon 1 August 2013 in Shanghai. During the developing process of the thunderstorms, three mesocyclones were detected, and especially during the formation of the second mesocyclone, characteristics of a classic supercell were found after the merging of two storms, such as low-level hook, pendant echoes, mesocyclone and TBSS (three-body scatter spike). Using conventional weather observations, dual Doppler radar data, automatic weather station data and wind profile radar data, the main formation mechanisms of the first two mesocyclone's were found to be as follows: (1) the join of the previous thunderstorms' outflow strengthens the environmental convergence and intensifies the lift of warm and moist air. (2) The outflow of thunderstorms strengthens the low-level vertical wind shear which is favorable for the formation of mesocyclone. In addition, due to the merging of the two thunderstorms, the intensified up-draft and the strengthened rotation of the storm play important roles in the formation of the supercell mesocyclone. Then, during the formation of the third mesocyclone, the outflow of the storm was lifted by the downdraft of the adjacent storm, thus the rotation of the outflow and inflow in the mid and low-level was detected as the mesocyclone.

**Key words:** mesocyclone, gust front, storm merging, supercell, dual Doppler radar wind field retrieval

\* 国家自然科学基金项目(41175050)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006002)共同资助

2015年2月9日收稿; 2015年11月3日收修定稿

第一作者: 陶岚, 主要从事中尺度天气研究. Email: fairylan1123@126.com

## 引 言

超级单体风暴是对流风暴中组织程度最高、产生天气最强烈的一种形态。超级单体风暴与其他强风暴的本质区别在于前者含有一个持久深厚的中气旋(Browning, 1978; Doswell et al, 1993)。对于包含中气旋的超级单体,国内学者对其开展了很多的分析研究,重点关注了超级单体和中气旋的特征分析(郑媛媛等, 2004; 2015; 俞小鼎等, 2006b; 2008; 郭媚媚等, 2006; 朱君鉴等, 2008; 金巍等, 2009; 吴芳芳等, 2012; 陈秋萍等, 2015; 方翀等, 2015; 朱江山等, 2015)。对于中气旋生成的机制,依照风暴类型和中气旋的生成特征,国外学者将其分成两类。一类是 Lemon 等(1979)提出的超级单体的中气旋。其典型的环境特征是大的垂直风切变和对流不稳定性,生成机制是上升运动将中低层垂直风切变引起的水平涡管抬升,使得水平涡管倾斜为垂直涡管,从而加强了雷暴主体内水平旋转程度,中气旋一般先在中层形成,随后向下发展。数值模式(Weisman et al, 1982; 1984)和理论研究(Davies-Jones, 1986; Rotunno et al, 1985)表明不稳定环境中的中低层垂直风切变是中层中气旋的涡度来源。另一类是 Wakimoto 等(1989)提出的非超级单体微气旋。这类微气旋通常在辐合边界层的切变不稳定环境下生成,主要机制是通过积云的上升运动对由水平切变造成的环境垂直涡度拉升。微气旋通常先在低层生成随后向上发展,并与较弱的龙卷生成关系紧密。国内目前对中气旋的生成机制的研究相对较少,赵坤等(2008)对在台湾北部海面中尺度对流雨带中有一钩状回波并伴随中气旋的天气过程分析发现,中气旋发展过程和结构同其他地区观测的非超级单体微气旋非常相似。

20 世纪 70 年代开始,随着雷达探测技术的发展,关于雷暴合并的统计研究开始展开(Houze et al, 1977; López, 1976; 1978; Simpson, 1980; Kogan et al, 1996; Wiggert et al, 1981)。雷暴单体的合并往往使得风暴强度发生明显变化,并对单体的尺度、维持和降水等有明显的影响(Lemon, 1976; Changnon, 1976; Lee et al, 2006)。如 Lemon (1976)发现一个超级单体的弱回波区与另外一个边

界线上的单体合并后,超级单体的旋转和上升运动明显加强;Changnon (1976)发现合并后的雷暴往往比没有合并的雷暴发展得更高,生命史更长;Kogan 等(1996)的数值模拟研究表明无垂直风切变环境下合并后单体的上升运动要强于原单体;Lee 等(2006)研究认为美国伊利诺斯州 1996 年 4 月强对流和龙卷爆发期间,单体的合并在对流的发展方面起到了非常重要的作用。在 26 次合并中,有 54% 的龙卷出现在合并前后的 15 min 内;在 4 种类型的合并中,有 3 种合并类型表明合并可使新的雷暴发展或者使得合并后的主要雷暴的反射率因子增大,即上升气流加强、单位体积内粒子数量增多;同时还增强了雷暴内的旋转程度。

2013 年 8 月 1 日,上海位于副热带高压(以下简称副高)边缘,08 时(北京时,下同)宝山探空和 12 时嘉定 F1 赛车场的风廓线显示垂直风切变属于较弱水平。中午开始,上海及周边地区不断有雷暴新生;雷暴的发生、发展过程中,出现了三次中气旋过程,其中一次雷暴合并生成了一个超级单体。此次强对流过程造成了嘉定 F1 赛场出现  $22.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的最大阵风,20 多个自动站出现了 7 级以上的大风,最大小时降水为新虹桥花园的  $90.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,共有 9 个自动站出现超过  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的短时强降水。本文利用常规天气资料,结合上海青浦、南汇多普勒雷达、自动气象站和风廓线雷达等资料,对此次雷暴相互作用与中气旋的演变过程进行了分析,并对中气旋的生成机制进行了重点分析。

## 1 天气形势背景分析

2013 年 8 月 1 日 08 时(图略),500 hPa 中高纬为两槽两脊形式,副高主体位于海上,副高脊线位于  $29^{\circ}\text{N}$  附近,上海处于副高西北边缘的偏南气流控制下,中纬度低槽位于内蒙古中部到山西中部、陕西南部一线;700 和 850 hPa 上的切变位于  $110^{\circ}\text{E}$  附近;925 hPa 高度场上,冀鲁豫三省交界地区有一低涡,其暖切从低涡中心向东南方向延伸至江苏东南部一线;925~700 hPa 有低空西南急流从贵州中部、湖南西北向东北延伸至安徽南部、江苏西南部一线;地面图上,上海位于海上高压后侧,气压梯度较小,地面以南到西南风为主,随着白天升温,有利于在地形

和日变化作用下形成中尺度辐合线(漆梁波等, 2006)。

2 强对流发生、发展的环境条件分析

2.1 不稳定条件分析

2013 年 8 月 1 日 08 时宝山站(58362)探空图显示(图 1),一些对流指标如  $K$  指数( $43.0^{\circ}\text{C}$ )和  $SI$  指数( $-2.9^{\circ}\text{C}$ )都有利于对流的发生,CAPE 达到

$898\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,若采用宝山最高温度  $37.2^{\circ}\text{C}$  和对应的露点温度  $22.5^{\circ}\text{C}$ ,修正后的 CAPE 值达到  $1977\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,低空加热作用明显加大了对流发展潜势。500 hPa 以上有明显干层,有利于降水蒸发而导致地面大风;对流层低层(925~800 hPa)温度廓线基本上与干绝热线平行,经过订正后的层结特征表现为典型的向下开口的倒“V”型结构(寿绍文,1981),有利于雷暴大风的形成(DCAPE 为  $557.95\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。 $0^{\circ}\text{C}$  层高度和  $-20^{\circ}\text{C}$  层高度分别在 5 和 8 km 左右。

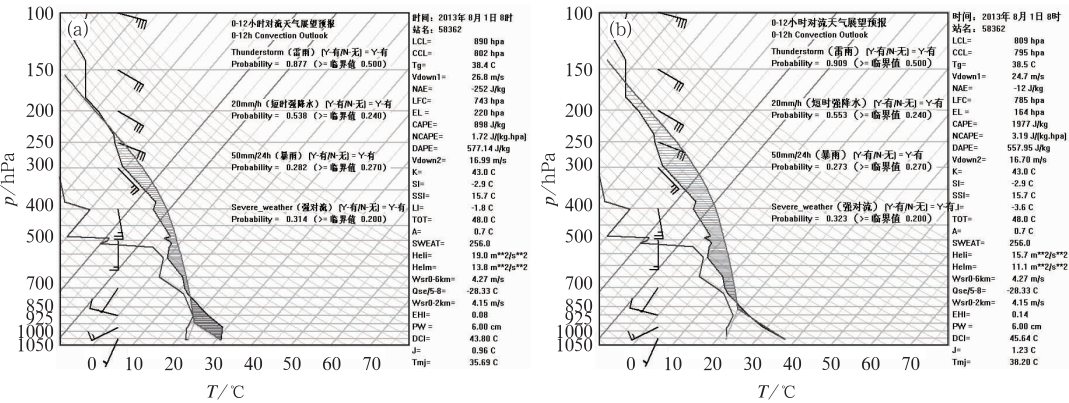


图 1 2013 年 8 月 1 日 08 时上海宝山(站号 58362)探空分析(a)和经地面观测修订后的探空分析(b)

Fig. 1 T-log  $p$  sounding diagrams and convective indices (a) for Baoshan, Shanghai, at 08:00 BT 1 August 2013, (b) the same as (a) but using the daily high temperature and corresponding dew point as surface observations

2.2 辐合抬升条件

图 2 为 12:05 上海自动站网的中尺度观测图,图 2a 显示上海沿江沿海地区的温度在  $33\sim 35^{\circ}\text{C}$  左右,陆地最高温度已达  $38^{\circ}\text{C}$ ,海陆温差最大为  $5^{\circ}\text{C}$ ;图 2b 显示上海中北部有偏北风和西南风的切变,中南部地区有偏南风 and 偏西风的切变,这是上海城市热岛和海风锋产生的边界线,为雷暴的触发提供了低空的动力条件。

2.3 垂直风切变条件分析

垂直风切变是强雷暴发展和维持的重要因素,在超级单体和中尺度对流系统加强、组织化和维持上起到关键作用(Weisman et al,1982;1984;2000;俞小鼎等,2006a)。2013 年 8 月 1 日 08 时宝山站(58362)探空图(图 1a)显示,500 hPa 以下风场较弱,以南到西南风为主, $0\sim 2$  和  $0\sim 6\text{ km}$  的垂直风切变分别为  $4.15$  和  $4.27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,处于较弱水平。1 日 08 时的垂

直风切变并不利于强雷暴的发展和维持。

3 伴随三个中气旋的雷暴过程特征分析

2013 年 8 月 1 日 12:00 和 12:36,江苏苏州附近和上海浦东北部和市区交界处分别有雷暴开始新生、发展,13:18 左右,先后在南汇雷达  $0.5^{\circ}$  仰角反射率因子图上观测到两个雷暴阵风锋的弱窄带回波,强度在  $20\sim 25\text{ dBz}$ (图略);相应的径向速度图上也可观测到低层辐散(图略);两个阵风锋向外扩散,分别向东南和西南相向而行,移动过程中与环境风场形成的切变为上海中北部地区雷暴的新生提供了有利的触发条件。

3.1 第一个产生中气旋的雷暴特征分析

14:30,浦东北部和市区交界处新生雷暴的阵风锋东侧,有雷暴 A 从中空开始新生,强度在  $20\text{ dBz}$

左右(图略),此时雷暴 A 北侧已有发展中的雷暴 B 缓慢向南移动。雷暴 A 发展很快,14:48,最强反射率因子达到 45 dBz(图 3a),回波顶高达 15 km 左右。14:54,在青浦雷达 0.5°仰角反射率因子图上观测到雷暴 A 北侧相连的雷暴 B 的弱窄带回波(阵风锋,图略)和径向速度图上的低层辐散(图略),雷暴 B 的出流造成了嘉定毛桥 13.6 m · s<sup>-1</sup> 的偏北风

(14:53)和嘉定浏河 11.4 m · s<sup>-1</sup> 的西北风(14:57)。此时雷暴 A 位于低层三个阵风锋交汇处(图 7a),特别是雷暴 B 的强出流的路径上,雷暴 B 的出流加强了低层的暖湿空气抬升,雷暴 A 出现了强烈的发展;15:00,最强反射率因子发展到 65 dBz(3.4°和 4.3°仰角,图略),径向速度图上观测到结构对称的中气旋(图 5a),各个仰角的转动速度(Brown et al, 1983)

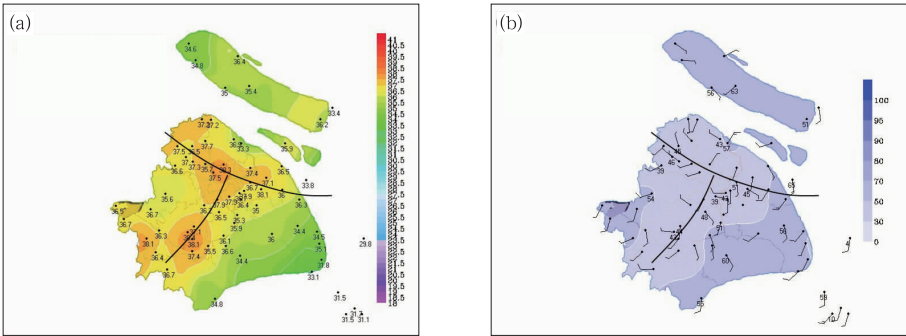


图 2 2013 年 8 月 1 日 12:05 上海自动站网观测温度(a)、地面风和相对湿度(b)  
(黑色实线为地面辐合线)

Fig. 2 Automatic weather station observations at 12:05 BT 1 August, 2013  
(a) temperature, (b) wind with relative humidity  
(Black curves depict boundary convergence line)

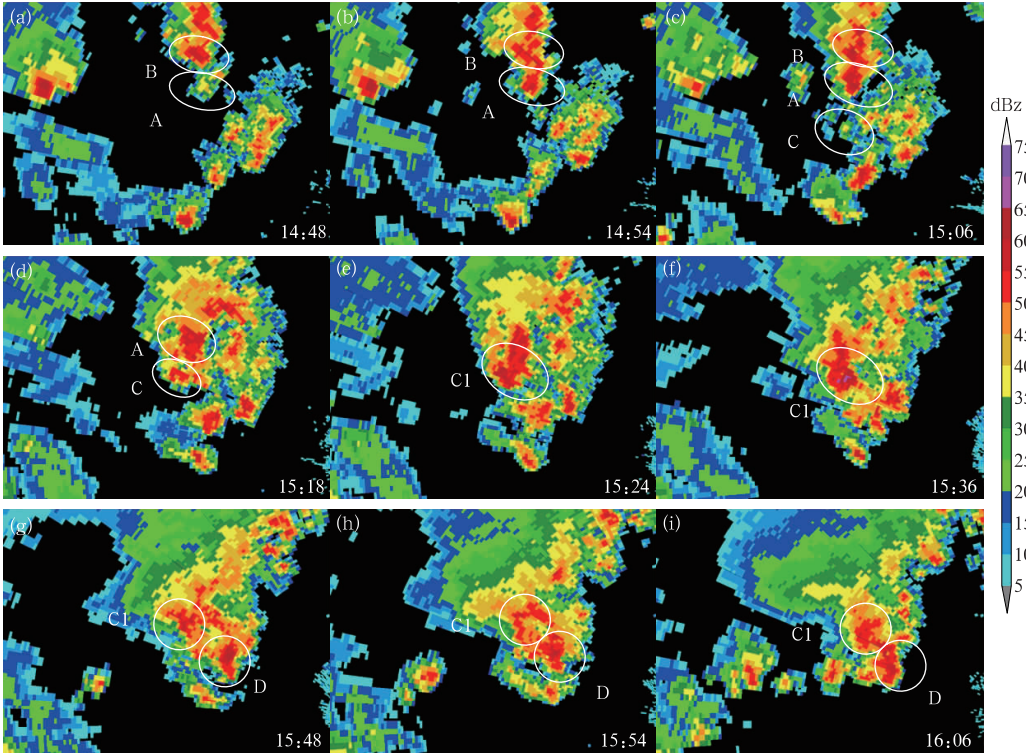


图 3 2013 年 8 月 1 日 14:48—16:06(a~i)3.4°仰角反射率因子图(单位: dBz)  
(白色圆环为雷暴位置)

Fig. 3 Base reflectivity (unit: dBz) during 14:48–16:06 BT (a–i), 1 August 2013 at 3.4° elevation of WSR-88D  
(White rings depict thunderstorms)



见表 1,底高和顶高分别在 3.27 和 6 km 左右(表 2); $2.4^{\circ}\sim 4.3^{\circ}$ 仰角反射率因子图和径向速度图上均观测到三体散射(three-body scatler spike, TBSS),垂直积分液态含水量(vertically integrated liquid, VIL)有明显的增加,从前一时次的  $60\text{ kg}\cdot\text{m}^2$  增加到  $70\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ,雷暴出现了明显的回波悬垂结构(图 4b),并且强回波中心伸展到 10 km 的高度( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上)。中气旋的出现,加强了雷暴主体内气流的水平旋转程度,旋转的上升运动使得雷暴强度不断发展。15:06,雷暴发展的高度和强度维持,

仅在  $1.5^{\circ}$ 仰角反射率因子观测到 TBSS,说明此时冰雹粒子已下降到低层。15:12,TBSS 已观测不到,地面上并没有观测到冰雹的报告,说明冰雹在下降的过程中可能已经融化。由于低层垂直风切变的加强和低层辐合气流的抬升仅是短时间的作用,该中气旋持续了三个时次,之后迅速减弱消失。按照中气旋识别判据(Andra,1997),该中气旋为弱中气旋,中气旋出现时雷暴出现了强烈发展,该中气旋是雷暴走向成熟阶段的标志之一。

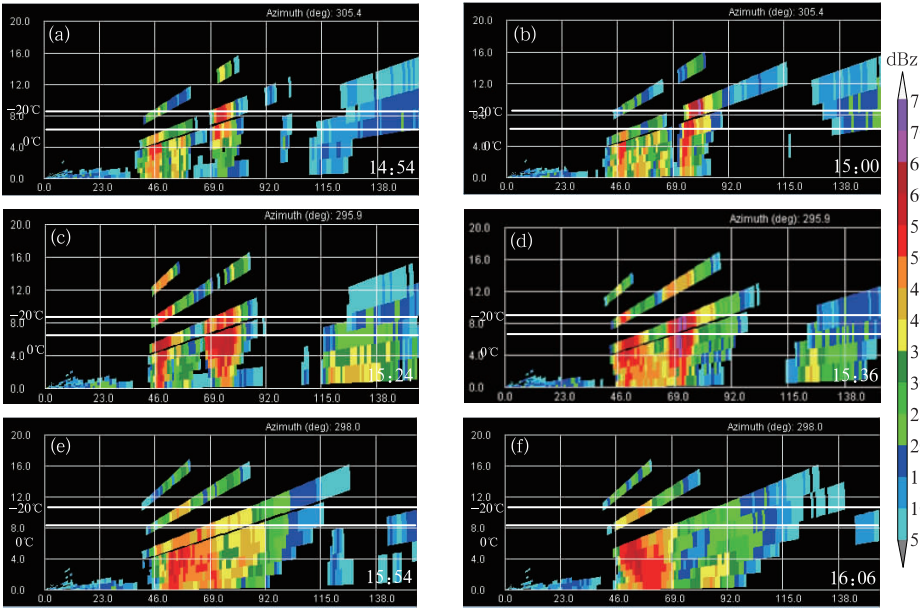


图 4 2013 年 8 月 1 日 14:54—16:06(a~f)反射率因子垂直剖面图(单位: dBZ)  
Fig. 4 Cross section of reflectivity (unit: dBz) during 14:54—16:06 BT  
(a~f) 1 August 2013 of WSR-88D

表 1 三次中气旋过程各仰角( $1.5^{\circ}\sim 4.3^{\circ}$ )的转动速度(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Table 1 Rotational velocity (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) of each mesocyclone at $1.5^{\circ}\sim 4.3^{\circ}$				
时间(编号)	仰角			
	$1.5^{\circ}$	$2.4^{\circ}$	$3.4^{\circ}$	$4.3^{\circ}$
15:00(M1)	/	12.0	12.0	12.0
15:06(M1)	/	12.0	12.0	12.0
15:12(M1)	/	12.0	12.0	15.0
15:30(M2)	11.0	11.0	8.0	11.0
15:36(M2)	12.0	18.5	15.5	12.0
15:42(M2)	9.5	12.0	12.0	12.0
16:06(M3)	12.5	12.5	15.0	12.5
16:12(M3)	11.0	16.5	14.0	14.0
16:18(M3)	8.0	12.5	14.0	12.0

表 2 三次中气旋的底高和顶高

Table 2 Base height and top height of each mesocyclone		
时间(编号)	底高/km	顶高/km
15:00(M1)	3.27	5.94
15:06(M1)	3.27	5.94
15:12(M1)	3.28	6.13
15:30(M2)	1.83	5.36
15:36(M2)	1.85	5.41
15:42(M2)	1.85	5.43
16:06(M3)	1.60	4.74
16:12(M3)	1.62	4.74
16:18(M3)	1.65	4.51

3.2 超级单体的特征分析

2013 年 8 月 1 日 15:06,雷暴 A 的低层已观测

到阵风锋,在雷暴 A 和其东西侧雷暴低层阵风锋的交汇处,雷暴 C 从中空发展(图 3c)。此时,雷暴 C 东西两侧的阵风锋处于减弱阶段,而 A 正处于强烈的发展阶段。雷暴 C 发展迅速,15:18,4.3°和 6.0°仰角径向速度图(图略)上观测到雷暴 C 具有正的径向速度( $11\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )的三体散射,雷暴的强核心也伸展到冰雹融化层的高度以上,说明此时雷暴 C 中的上升气流已经很强,空中已有冰雹处于上升气流中(Zrnić,1987;Lemon,1998;Wilson et al,1986;戴建华等,2012)。

15:24,单体 C 与仍处于发展中的雷暴 A 发生合并,合并后的雷暴为 C1(图 3e),4.3°仰角的正的径向速度的 TBSS 表明高空有冰雹粒子处于上升气流中,并且比 15:18 的 TBSS 长度明显增长,2.4°和

3.4°仰角的径向速度图开始观测到具有负的径向速度( $-14\sim -11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )的 TBSS,可见有冰雹粒子开始处于下降阶段;由于速度信息采集于更弱的信号,此时,反射率因子图上的 TBSS 仍不明显。

15:30,径向速度图上清楚地呈现出一对由向着雷达速度极大值(冷色)和离开雷达速度极大值(暖色)构成的中气旋(图 5d),高度从 1.83 km(1.5°)伸展到 5.36 km(4.3°)。高层的反射率因子强度明显增加,4.3°和 6.0°仰角最强反射率因子分别从前一时刻 60 dBz 增强到 65 dBz 和 70 dBz,并均观测到了沿着反射率因子核心的 TBSS。径向速度图上的 TBSS 已下降到 1.5°仰角。反射率因子图上,低层 0.5°仰角钩状回波(图略)特征明显,6.0°仰角最强反射率因子达到 70 dBz(图略)。

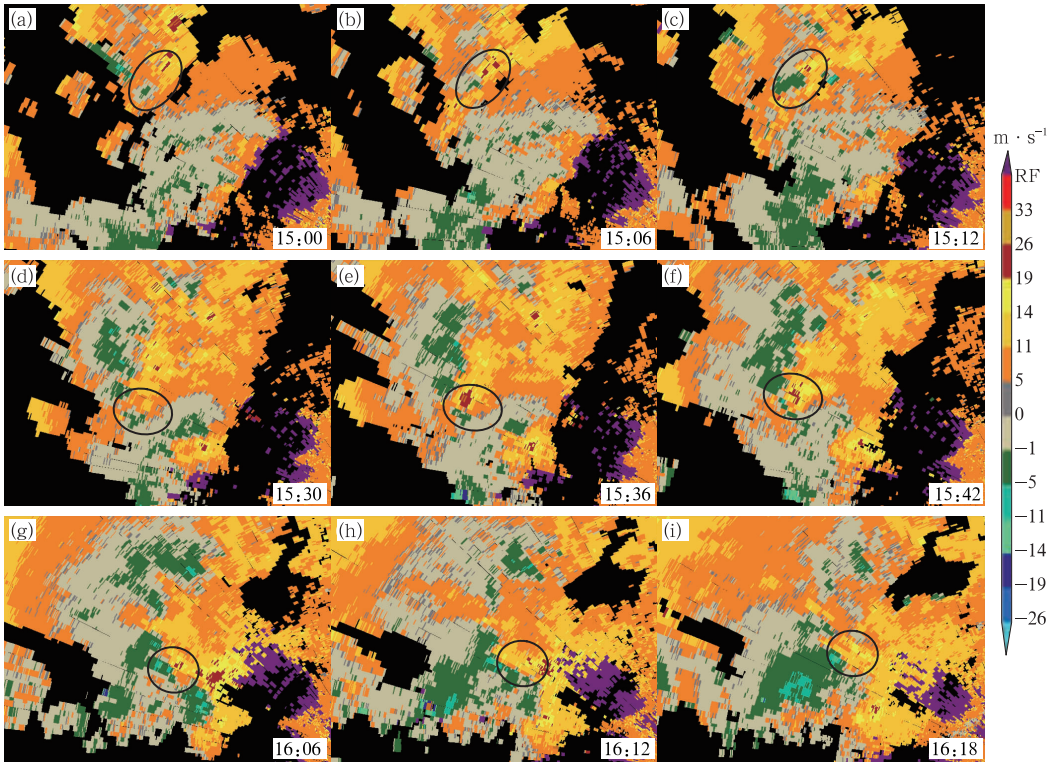


图 5 2013 年 8 月 1 日 15:00—16:18(a~i)3.4°径向速度图(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
(黑色圆环为中气旋位置)

Fig. 5 Base radial velocity (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 15:00—16:18 BT (a~i),  
1 August 2013 at 3.4° elevation of WSR-88D  
(Black rings depict mesocyclone)

15:36,反射率因子强度在 1.5°~3.4°仰角(图 6b~6d)达到了 65 dBz,4.3°~6.0°仰角(图 6e~6f)达到 70dBz,雷暴发展到最强阶段。0.5°仰角钩状回波(黑色箭头处,图 6a)特征明显;高层反射率因

子的高值区位于低层反射率因子的弱回波区上空,形成回波悬垂;VIL 出现了明显的增加,从 15:30 的  $55\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  增加到  $70\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。径向速度图(图 5e)上中气旋中速度极大值的强度比前一个时



次明显增加,最大转动速度达到  $18.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,范围也有所加大,中气旋结构更加对称。中气旋使得上升运动再次加强,将强反射率因子核心抬高,垂直剖面图上(图 4d)可见明显的高悬的强反射率因子,强反射率因子发展到  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,为典型的出现冰雹的雷暴回波结构。 $0.5^{\circ}\sim 2.4^{\circ}$  仰角的反射率因子图上隐约可见出现了回波强度  $5\sim 10\text{ dBz}$  的三体散射(TBSS,图 6a~6c 紫色箭头所指处),在  $3.4^{\circ}\sim 6.0^{\circ}$  仰角上(图 6d~6f 紫色箭头所指处)TBSS 长度明显加长。相比于反射率因子图, $1.5^{\circ}\sim 6.0^{\circ}$  仰角径向速度图上(图 6g~6l 紫色箭头所指处)的 TBSS 更加清晰、长度更长。其中, $1.5^{\circ}$  和  $2.4^{\circ}$  仰角径向速

度图的 TBSS 分别达到  $10$  和  $15\text{ km}$ ,而对应的强回波区高度仅为  $1$  和  $1.6\text{ km}$ ,长钉长度远远长于估计距离,说明雷达电磁波在空中冰雹区与地面之间出现了多次散射,冰雹开始融化,散射或反射能力极强(Zrnic, 1987)。由于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层的高度较高(约为  $5\text{ km}$ ), $925\text{ hPa}$  的温度为  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 1),冰雹在下降过程中可能由于环境温度较高融化较快,且位于嘉定的郊区,因此该时次并没有人工观测到冰雹的报告。 $15:30\sim 15:42$ ,中气旋特征持续了三个时次,中气旋导致的雷暴发展增强给嘉定地区带来了 7 级大风和短时强降水的天气。

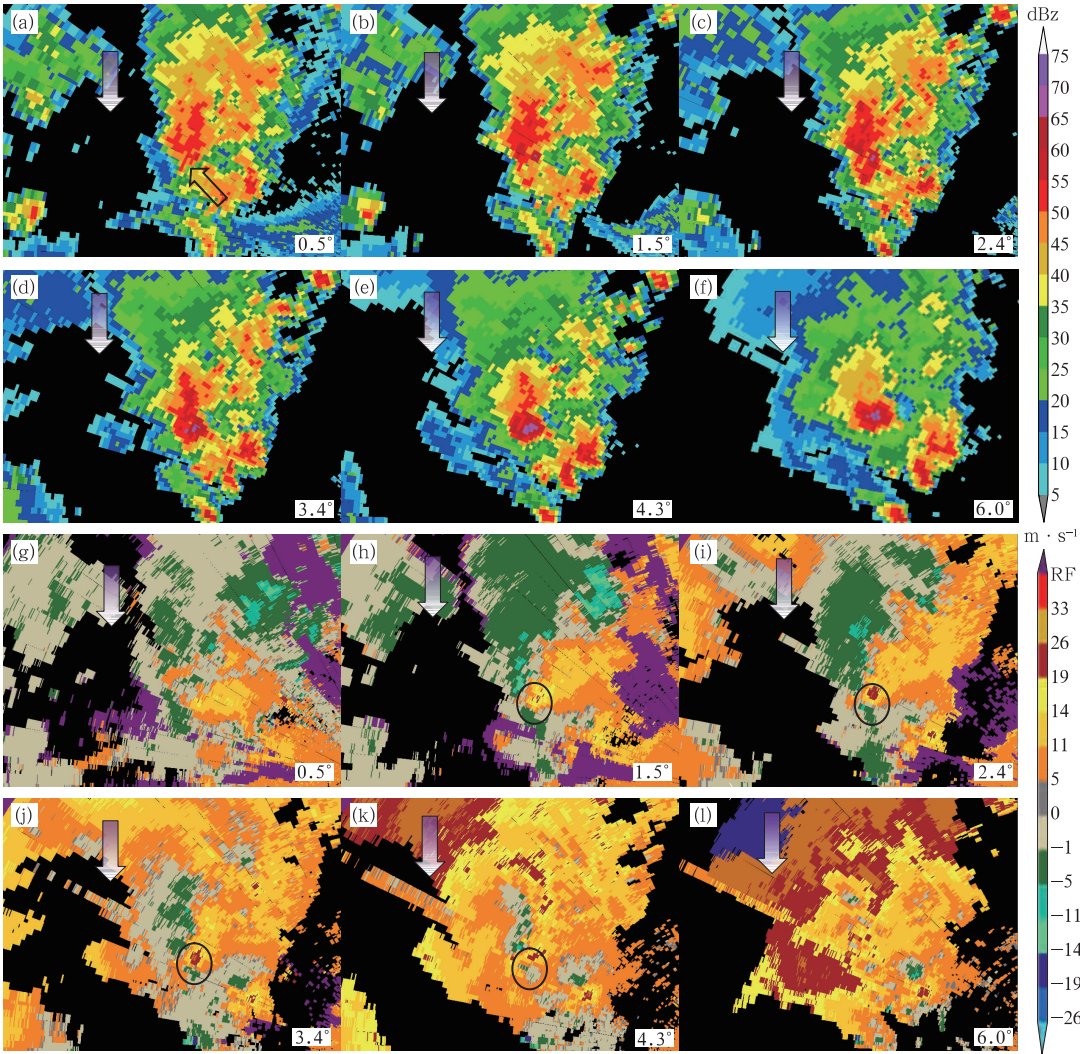


图 6 2013 年 8 月 1 日 15:36  $0.5^{\circ}\sim 6.0^{\circ}$  仰角反射率因子图(a~f, 单位: dBZ)和径向速度图(g~l, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
(紫色箭头指向三体散射, 黑色圆环为中气旋位置)

Fig. 6 Base reflectivity (a~f, unit: dBZ) and base radial velocity (g~l, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) centered on supercell at 15:36 BT, 1 August 2013 at  $0.5^{\circ}\sim 6.0^{\circ}$  elevation of WSR-88D  
(Purple arrows point to TBSS, black rings depict mesocyclone)

3.3 第三个产生中气旋的雷暴特征分析

2013 年 8 月 1 日 15:54,合并后的雷暴 C1 有所减弱并略有南落(图 3h),16:06 雷暴 C1 第二次出现了中气旋特征(图 5g),最大转动速度为  $15.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (表 1),高度从  $1.60\text{ km}(1.5^{\circ})$  伸展到  $4.74\text{ km}(4.3^{\circ})$ (表 2),为中等强度(Andra,1997)。此时,雷暴 C1 的最强反射率因子强度没有发生明显的变化,但是从垂直剖面看(图 4e 和 4f),65 dBz 的强反射率因子有明显增加,VIL 从  $50\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  增加到  $55\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。16:06—16:18,中气旋特征持续了三个时次,给嘉定地区造成了  $22.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的雷暴大风和短时强降水天气。

4 中气旋成因分析

2013 年 8 月 1 日 14:54,雷暴 A 处于开始发展阶段,雷暴 B 已处于成熟阶段,雷暴 A 位于雷暴 B 的南侧,青浦雷达(由于南汇雷达距离较远,观测不到低层辐散特征,此时采用青浦雷达)  $0.5^{\circ}$  仰角的反射率因子图上观测到了雷暴 B 和雷暴 A、B 两侧雷暴的出流阵风锋(图 7a)。径向速度图上,雷暴 B 自身和其东西两侧雷暴的低层辐散的速度差最大分别达到  $22$ 、 $25$  和  $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,三个雷暴的弧状出流边

界线逐渐靠近并交汇于嘉定地区,雷暴 B 阵风锋后侧的偏北风,东侧雷暴阵风锋后侧的偏东风和西侧雷暴阵风锋后侧的西北风,形成了一个气旋性的环流(图 8),加强了地面的辐合;图 9 是嘉定毛桥自动站 14—16 时的气象要素图,14:50 左右,毛桥的风向开始受雷暴 B 的出流阵风锋的影响,转为偏北风,同时气温开始降低,雷暴 B 的强下沉气流造成了嘉定毛桥最大  $13.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的偏北风(14:53)和嘉定浏河最大  $11.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的西北风(14:57),由于雷暴 A 正好位于雷暴 B 强出流的路径上,雷暴的出流一方面可能加强了低层的暖湿空气抬升,促使雷暴 A 出现了强烈的发展;同时由于阵风锋具有一定的厚度(Klinglet al,1987),阵风锋的扩散使得低层环境风场发生了一定的改变,利用嘉定毛桥两分钟平均风速(14:58,  $11.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $243^{\circ}$ )和 08 时探空计算得到  $0\sim3\text{ km}$  的垂直风切变为  $13.16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,可见雷暴的冷出流增大了雷暴近环境的低层垂直风切变,是促使中气旋生成的原因之一(Davies-Jones et al,1990;Rotunno et al,1985)。

雷暴 C 的初生和发展均位于三个雷暴低层阵风锋的交汇处(图 7e),雷暴 A 阵风锋后侧较强的东北风、东侧雷暴阵风锋后侧的偏东风和西侧雷暴阵风锋后侧的西北风加强了地面的辐合(图 8),为中气旋的生成提供了有利的条件。图 9 是嘉定 F1 赛

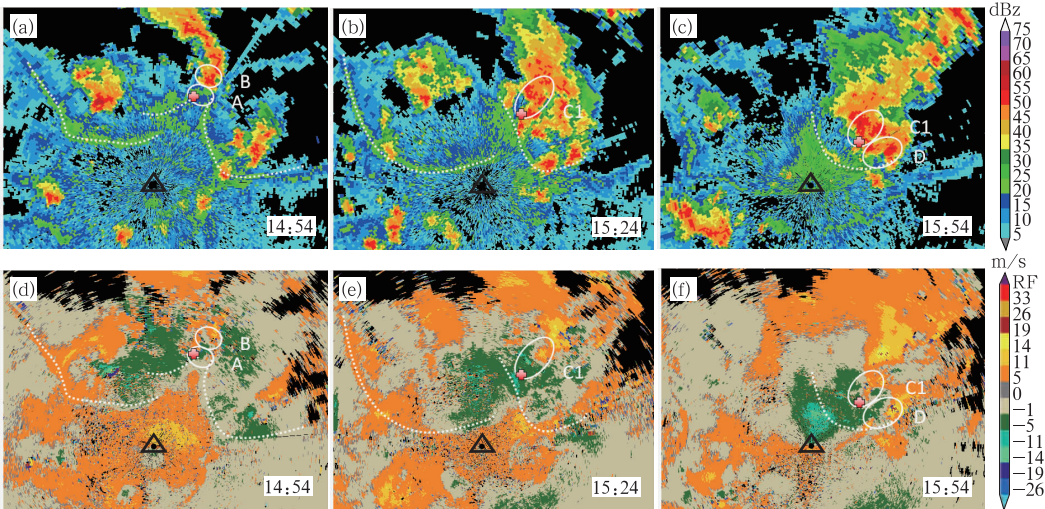


图 7 2013 年 8 月 1 日 14:54、15:24 和 15:54  $0.5^{\circ}$  仰角反射率因子图(a~c,单位: dBZ)和径向速度图(d~f, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
(黑色三角形为青浦雷达位置,白色虚线为阵风锋,白色椭圆为低层辐散区,红色十字为新生中气旋位置)  
Fig. 7 Base reflectivity (a~c,unit: dBZ) and base radial velocity (d~f, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) respectively at 14:54,15:24 and 15:54 BT 1 August 2013 at  $0.5^{\circ}$  elevation of Qingpu  
(Black triangle represents QP-98D, white dotted lines depict gust front, white ellipses depict divergent area, red cross depicts the position of mesocyclone)



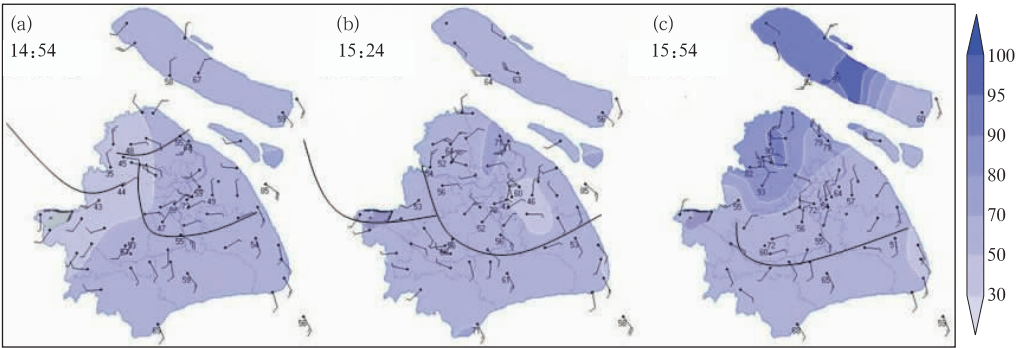


图 8 2013 年 8 月 1 日 14:54(a)、15:24(b)和 15:54(c)上海自动站网观测地面风和相对湿度  
(黑色实线为阵风锋位置)

Fig. 8 Automatic weather station observations of wind with relative humidity respectively at 14:54 (a), 15:24 (b) and 15:54 (c) BT 1 August 2013  
(Black curves depict gust front)

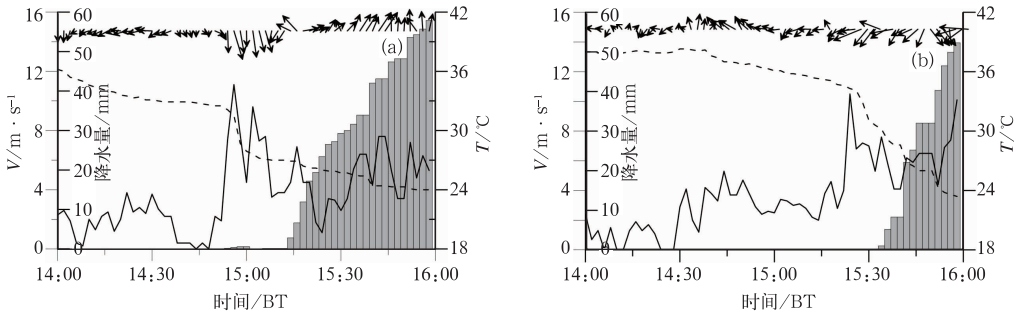


图 9 2013 年 8 月 1 日毛桥(a)和 F1 赛场(b)14—16 时自动站温度(黑色虚线,单位:℃)、降水(灰色柱状,单位:mm)和 2 min 平均风速(黑色实线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、风向图(黑色箭头)

Fig. 9 Temperature (black dotted line), rainfall (grey histogram, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ), wind speed (2 min average, black line, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and wind direction (2 min during average, black arrow, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of AWS at Maoqiao (a) and F1 Venue (b) 14:00—16:00 BT 1 August 2013

场自动站的 14—16 时的气象要素图。15:10 左右,东北侧雷暴 A 的阵风锋向南扩散到 F1 赛场,风向转为东到东北风;15:24,  $0.5^{\circ}$  仰角径向速度图上的雷暴 A 的辐散速度差为  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , F1 赛场 2 min 平均风速最大为  $10.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 风向东北(缺最大阵风资料),气温开始陡降,说明此时雷暴中有强冷气流下沉辐散。F1 赛场的风廓线雷达显示,15:10 左右,受雷暴 A 的阵风锋扩散影响, F1 赛场 1.6 km 以下转为东到东北风, 1.6—3 km 仍然以西南风为主(图 10)。经计算,低层环境累积切变(cumulative wind shear) (Rasmussen et al, 1983) 最大达到  $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,即由雷暴 A 的冷出流形成的阵风锋导致了环境垂直风切变的增大,改变了雷暴发展的环境,形成了经典中气旋生成的有利环境。

图 11 是利用上海南汇 WSR-88D 和青浦 QP-

98D 双多普勒雷达资料的风场反演分析,原理参考 Ray 等(1978)。15:18,合并前的两个雷暴 A 和 C 都处于发展中,雷暴 A 中上升气流和下沉气流共存,而雷暴 C 中以上升气流为主,强上升气流的高度都达到了 12km 左右(图 11b);15:24,两雷暴合

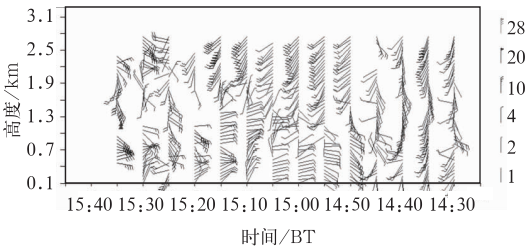


图 10 2013 年 8 月 1 日 14:30—15:40 F1 风廓线雷达风场随高度分布

Fig. 10 Wind profile at F1 Venue during 14:30—15:40 BT 1 August 2013

并,上升运动明显增强,高度达到了 14 km(图 11d),明显强于上一时次两个单体的上升运动。因此,在由两个单体的合并导致的加强的上升运动作用下,对流不断发展,增强了雷暴内的旋转程度,形成的超级单体中气旋比第一个非超级单体中气旋的厚度明显增加。

图 7f 是 15:54 青浦雷达 0.5°仰角的径向速度图,此时雷暴 C1 的低层辐散范围明显增大,同时雷

暴 D 的低层辐散的速度差有明显增大,最大正速度增大到  $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,说明雷暴中有强下沉气流在低层辐散开来,雷暴 D 处于爆发期,此时两辐散区距离相近。双多普勒雷达资料进行的风场反演分析表明,此时两雷暴中上升气流和下沉气流共存,雷暴 C1 的弱出流被雷暴 D 爆发的下沉气流抬升,在中低层形成出流和入流间的旋转(图 11f 黑色圆圈处),而被雷达所探测识别为中气旋。

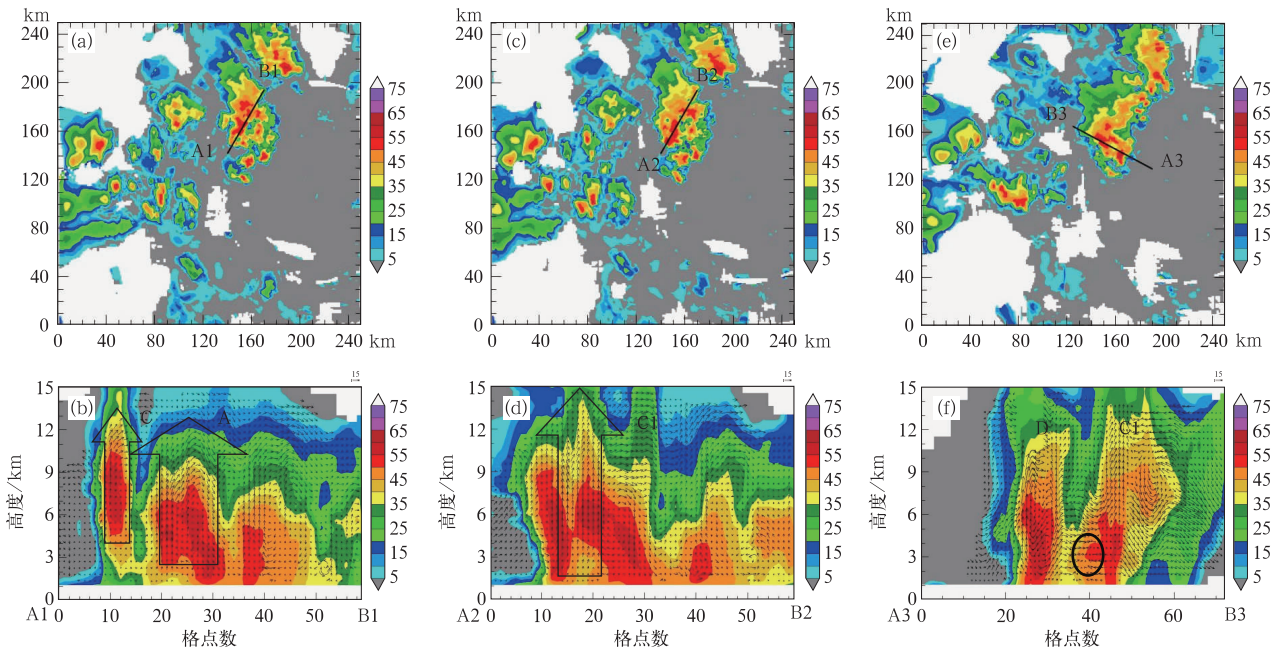


图 11 2013 年 8 月 1 日 15:18、15:24 和 15:54 3 km 反射率因子图(a,c,e, 单位:dBz)和沿黑色实线的反射率因子垂直剖面(单位:dBz)及叠加双多普勒雷达(青浦、南汇)的风场反演(b,d,f, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 11 Base reflectivity (a,c,e, unit: dBz) and cross section (unit: dBz) with wind retrieved from WSR-88D and QP-98D (b,d,f, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) respectively at 15:18 (a,b), 15:24 (c,d) and 15:54 (e,f) BT, 1 August 2013

基于以上分析,构建了超级单体中气旋形成的示意图(图 12)。图 12 中显示了雷暴 C 周边有三个雷暴,三个雷暴的低层都有冷出流形成的阵风锋和相应的辐散冷区。雷暴 A 阵风锋后侧较强的东北风、东侧雷暴阵风锋后侧的偏东风以及西侧雷暴阵风锋后侧的西北风,加强了地面的辐合;雷暴 A 和雷暴 C 合并,雷暴 A 的下沉气流将雷暴 C 的上升运动抬升,上升运动明显增强。因此,(1)雷暴的出流的交汇,形成气旋性的环流,加强了低层水平辐合,阵风锋类似锋面的作用促使低层的暖湿空气抬升;(2)雷暴 A 的出流阵风锋导致环境垂直风切变有所增大,改变了雷暴发展的环境,形成了经典中气旋生成的有利环境;(3)两个单体的合并加强了上升运动,对流不断发展,增强了雷暴内的旋转程度,形成

了超级单体中气旋。

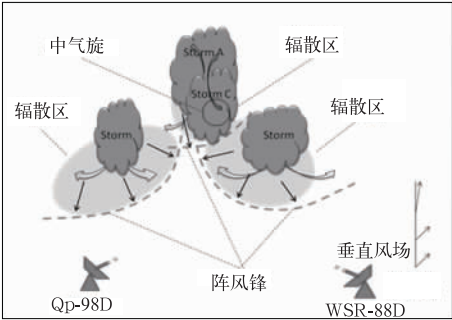


图 12 2013 年 8 月 1 日超级单体中气旋(第二个)生成发展示意图

Fig. 12 Illustration of structure conceptual model of a supercell mesocyclone on 1 August, 2013

## 5 结论和讨论

对 2013 年 8 月 1 日一次发生在副高边缘弱垂直切变的不稳定层结背景下的雷暴单体相互作用与中气旋的演变的天气过程分析发现:

(1)上海位于副高边缘弱垂直风切变的不稳定层结下,由于白天升温明显,为雷暴的新生、发展提供了较好的热力条件;此外,上海城市热岛和海风锋产生的边界线,为雷暴的触发提供了低空的动力条件。

(2)此次雷暴过程中出现了三个中气旋,特别是第二个中气旋生成过程中,雷暴合并后强度明显增强,呈现出钩状回波、回波悬垂、中气旋等超级单体的雷达回波特征,还具有标志大冰雹的三体散射长钉特征回波,反射率因子核心的高度伸展到  $-20^{\circ}\text{C}$  以上,为典型的产生冰雹的回波结构。在  $1.5^{\circ}$  和  $2.4^{\circ}$  仰角径向速度图上长钉长度远远长于估计距离,说明雷达电磁波在空中冰雹区与地面之间出现了多次散射,冰雹在近地面开始融化,可能由于冰雹融化较快或者强雷暴位于嘉定的郊区,并没有人工观测到冰雹的报告。

(3)三个中气旋的生成的主要机制为:前两个中气旋形成于雷暴的发展成熟阶段,前期雷暴的出流的交汇和抬升作用以及由阵风锋导致的低层环境垂直风切变的增大是中气旋形成的主要原因;此外,单体的合并导致上升气流增强是超级单体中气旋(第二个)形成的又一个重要原因。第三个中气旋形成过程中,由于雷暴中的弱出流被相邻雷暴爆发的下沉气流抬升,在中低层形成出流和入流间的旋转,因而被雷达所探测为中气旋。由于低层出流的增强以及直接导致的低层垂直风切变的加强和低层辐合气流的抬升仅是短时间的作用,三个中气旋的持续时间均较短。

中气旋的形成和演变是非常复杂的问题,除了环境因素外(垂直风切变等)、雷暴的发展和雷暴的相互作用导致的雷暴近环境的改变,对其生成也有一定的影响。本文对一次副高边缘的强对流天气过程中形成的三个中气旋的机制进行了分析,但是对于雷暴发展过程中涡度收支的定量计算以及中气旋生成的具体过程等还需数值模拟以及更多个例的积累进行进一步的研究。对于预报员来说,应结合雷

暴的发展特征,分析和预报中气旋带来的强烈天气,以提高临近预报预警的准确性和预报时效。

## 参考文献

- 陈秋萍,陈齐川,冯晋勤,等. 2015. “2012. 4. 11”两个强降雹超级单体特征分析. 气象, 41(1): 25-33.
- 方翀,俞小鼎,朱文剑,等. 2015. 2013 年 3 月 20 日湖南和广东雷暴大风过程的特征分析. 气象, 41(11): 1305-1314.
- 戴建华,陶岚,丁杨,等. 2012. 一次罕见飑前强降雹超级单体风暴特征分析. 气象学报, 70(4): 609-627.
- 郭媚媚,麦冠华,胡胜,等. 2006. 肇庆市一次超级单体的多普勒雷达资料分析. 气象, 32(6): 97-101.
- 金巍,曲岩,安来友. 2009. 超级单体引发的龙卷天气过程分析. 气象, 35(3): 36-41.
- 漆梁波,陈春红,刘强军. 2006. 弱窄带回波在分析和预报强对流天气中的应用. 气象学报, 64(1): 112-120.
- 寿绍文. 1981. 强对流天气前期的层结特征. 南京气象学院学报, 1: 1-6.
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等. 2012. 对流风暴内中气旋特征与强烈天气. 气象, 38(11): 1330-1338.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 2006a. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社.
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等. 2006b. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达研究. 高原气象, 25(5): 914-924.
- 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,俞小鼎,方翀,等. 2004. 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, 62(3): 317-328.
- 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. 气象, 41(8): 942-952.
- 赵坤,周仲岛,潘玉洁,等. 2008. 台湾海峡中气旋结构特征的单多普勒雷达分析. 气象学报, 66(4): 637-651.
- 朱江山,刘娟,边智,等. 2015. 一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究. 气象, 41(2): 182-191.
- 朱君鉴,刁秀广,曲军,等. 2008. 4. 28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析. 气象, 34(12): 21-26.
- Andra D L. 1997 The origin and evolution of the WSR-88D mesocyclone recognition nomogram. Preprints. 28th conf on radar meteorology. Austin TX, Amer Meteor Soc, 364-365.
- Brown R A, Wood V T. 1983. Improved severe storm warning using Doppler radar. Natl Wea Dig, 8(3): 19-27.
- Browning K A. 1978. The structure and mechanism of hailstorms. Meteor Monogr, 38: 1-36.
- Changnon S A. 1976. Effects of urban areas and echo merging on radar echo behavior. J Appl Meteor, 15: 561-570.
- Davies-Jones R P. 1986. Tornado dynamics // Thunderstorm Morphology and Dynamics, 2d ed. Kessler E, Ed. Norman: University of Oklahoma Press, 197-236.
- Davies-Jones R P, Burgess D W, Foster M. 1990. Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprints, 16th Conf on Severe



- Local Storms. Kananaskis Park, AB, Canada, Amer Meteor Soc, 588-592.
- Doswell C A, Burgess D W. 1993. Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models. *Geophysical Monograph*, 79: 161-172.
- Houze R A, Cheng C P. 1977. Radar characteristics of tropical convection observed during GATE: Mean properties and trends over the summer season. *Mon Wea Rev*, 105:964-980.
- Klinge D L, Smith D R, Wolfson M M. 1987. Gust front characteristics as detected by Doppler radar. *Mon Wea Rev*, 115:905-918.
- Kogan Y L, Shapiro A. 1996. The simulation of a convective cloud in a 3D model with explicit microphysics. Part II: Dynamical and microphysical aspects of cloud merger. *J Atmos Sci*, 53: 2525-2545.
- Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R B. 2006. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: Cell mergers and associated tornado incidence. *Wea Forecasting*, 21(4):449-464.
- Lemon L R. 1976. The flanking line, a severe thunderstorm intensification source. *J Atmos Sci*, 33:686-694.
- Lemon L R. 1998. The radar "three-body scatter spike": An operational large-hail signature. *Wea Forecasting*, 13:327-340.
- 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.
- López R E. 1976. Radar characteristics of the cloud populations of tropical disturbances in the northwest Atlantic. *Mon Wea Rev*, 104:268-283.
- López R E. 1978. Internal structure and development processes of C-Scale aggregates of cumulus clouds. *Mon Wea Rev*, 106: 1488-1494.
- Ray P S, Wagner K K, Johnson K W, et al. 1978. Triple-Doppler Observations of a Convective Storm. *J Appl Meteor*, 17:1201-1212.
- Rasmussen E N, Wilhelmson R B. 1983. Relationships between storm characteristics and 1200 GMT hodographs. low level shear, and stability. Preprints, 13th Conf on Severe Local Storms, Tulsa, OK, Amer Meteor Soc, J5-J8.
- Rotunno R, Klemp J P. 1985. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J Atmos Sci*, 42:271-292.
- Simpson J. 1980. Downdrafts as linkages in dynamic cumulus seeding effects. *J Appl Meteor*, 19:477-487.
- Wakimoto R M, Wilson J W. 1989. Non-supercell tornadoes. *Mon Wea Rev*, 117:1113-1140.
- Weisman M L, Klemp J B. 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon Wea Rev*, 110(6):504-520.
- Weisman M L, Klemp J B. 1984. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. *Mon Wea Rev*, 112(12):2479-2498.
- Weisman M L, Rotunno R. 2000. The use of vertical wind shear versus helicity in interpreting supercell dynamics. *J Atmos Sci*, 57(9):1452-1472.
- Wiggert V G, Lockett J, Ostlund S S. 1981. Rainshower growth histories and variations with wind speed, echo motion, location and merger status. *Mon Wea Rev*, 109:1467-1494.
- Wilson J W, Reum D. 1986. "The hail spike": Reflectivity and velocity signature. Preprints, 23d Conf on Radar Meteorology, Snowmass, CO, Amer Meteor Soc, 62-65.
- Zrnić D S. 1987. Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value. *Radio Sci*, 22:76-86.