0577-6619/2012/70(4)-0609-27 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

一次罕见飑前强降雹超级单体风暴特征分析*

戴建华[1,2] 陶 岚[2] 丁 杨[2] 王 元[1] 陈 雷[1,2]

DAI Jian-hua[1,2] TAO Lan[2] DING Yang[2] WANG Yuan[1] CHEN Lei[1,2]

1. 南京大学大气科学学院,南京,210093

2. 上海中心气象台,上海,200030

1. *Nanjing University*, *Department of Atmospheric Sciences*, *Nanjing* 210093, *China*

2. *Shanghai Central Meteorological Observatory*, *Shanghai* 200030, *China*

2011-01-11 收稿,2011-02-14 改回.

Dai Jianhua, Tao Lan, Ding Yang, Wang Yuan, Chen Lei. 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(4): 609-627.

Abstract A large hail-producing supercell developed ahead of a severe squall line around Shanghai, China on 5 June 2009. The supercell and its interaction and relationships with the squall line are analyzed using the conventional weather observations, Doppler radar data, wind profiler data, and automatic weather station data. The results show that the supercell initiated and developed in the warm sector ahead of the squall line, in a strong unstable environment which was caused by strong cold advection at high levels over warm advection at low levels. The storm intensified while passing through a surface convergence zone induced jointly by an urban heat-island effect and a sea-breeze front. Some characteristics of a classic supercell were found, such as low level hooks and pendant echoes, the weak echo region, and a meso-scale cyclone, etc. A Three Body Scatter Spike (TBSS) representing large hail in the sky was detected extending downrange behind a reflectivity (above 60 dBz) core. Descending and ascending large hail areas are detected based on the velocity of TBSS. An upper trough of a cold vortex in northeastern China brought strong cold advection and pressed the freezing level to lower. This provided a suitable ambient temperature structure for the hail embryo enhancement. Dual-wind profiler observation comparisons show that the ambient wind field of the supercell could produce more low level vertical wind shear and storm relative helicity. On the other hand, the mesoscale convective system (MCS) might change the ambient wind structure. As a result of the interaction of the MCS and the environment, a positive feedback effect made the MCS into a long-lived system. The supercell's motion implied the motion of the squall line with a leadership mechanism of an "arrow" relative to a "bow" suggested. After arriving at the supercell's cold air pool, some parts of the squall line decayed gradually. Finally, the supercell weakened and its supercell characteristics disappeared as it moved over the East China Sea. The squall line combined eventually with the remains of the supercell storm to become a line echo wave pattern (LEWP), and the bow echo of the LEWP changed its motion direction from the northwesterly to the northerly. A supercell ahead of a squall line might provide some useful operational nowcasting guidance for squall line motion and evolution.

Key words Supercell, Hail, Squall line, Wind profiler, Vertical wind shear, Storm relative helicity

摘 要 2009 年 6 月 5 日,受一个飑线前超级单体雷暴的影响,上海部分地区出现了直径 25—30 mm 的冰雹,随后,飑线尾随该超级单体扫过上海,造成大风、雷电和强降水天气。基于常规天气观测、多普勒天气雷达、风廓线仪和自动气象站等资料分析发现,该超级单体发生在东北冷涡西南侧的高空强冷平流与低空暖平流形成的强不稳定层结背景下,超级单体风暴发生、发展在飑线前的暖区中,经过由"热岛效应"和海陆风锋共同形成的低空辐合线时明显加强发展;该风暴呈现出"指"状、"楔"

* 资助课题:2010 年度公益性行业专项(GYHY201006002)、2009 年度国家科技支撑计划项目(2009BAK43B34)、2009 年度公益性行业专项(GYHY200906003)和中国气象局创新团队"全国强对流预报专家团队"项目。

作者简介:戴建华,主要从事中尺度天气学研究和业务工作。E-mail:djhnn@sina.com

状、弱回波区(WER)等超级单体雷达反射率特征,“指”状回波处出现了中气旋的径向速度特征,具有标志大冰雹的三体散射长钉(TBSS)特征回波,通过三体散射长钉多普勒速度发现了大冰雹的下降区和增长区。分析还表明:东北冷涡西南侧横槽南摆导致中空降温,0℃层和-20℃层高度明显下降,为冰雹的空中增长提供较好的温度环境条件,较低的0℃层也保证冰雹在空中下落中融化较少。双风廓线仪对比观测表明,超级单体发展的低空风场环境中具有较大的垂直风切变和风暴相对螺旋度,中尺度对流系统与环境场的相互作用形成了有利于风暴发展和维持的正反馈机制。飑线前超级单体雷暴与飑线主体关系密切,起到类似“箭”与“弓”的引导作用,飑线主体的一部分进入超级单体所遗留下的“冷”区后明显减弱,东侧入海后也逐渐减弱,其余部分仍在发展加强;最终,强风暴逐渐减弱,超级单体特征也开始消失,飑线与之合并形成新的“人”字型中尺度对流系统,新的“弓”形回波带与原回波带相比移动方向发生右偏,因此,飑前超级单体在飑线主体移动和演变的临近预报中有重要指示意义。

关键词 超级单体,冰雹,飑线,风廓线仪,垂直风切变,风暴相对螺旋度

中图法分类号 P435

1 引 言

超级单体风暴是所有对流风暴中组织化程度最高、发展最为强烈、生命史最长的一种孤立深对流风暴。Browning(1962,1964)指出超级单体具有的雷达反射率因子特征,如钩状回波、中空弱回波区(Weak Echo Region, WER)或有界弱回波区(Bounded Weak Echo Region,BWER)等。随着具有径向速度探测能力的多普勒天气雷达的应用,Donaldson(1970)首次观测到了1968年8月9日发生在美国马萨诸塞州的超级单体中的“龙卷气旋”,印证了Fujita(1963)提出的“中气旋”的概念,揭示了超级单体的旋转特性;随后,Lemon等(1979)提出了经典的龙卷超级单体的概念模型,具有深厚持久中气旋的超级单体被一系列多普勒雷达观测和数值模拟进一步证实(Klemp,et al, 1981;Rotunno,et al, 1982)。Moller等(1994)分析总结了超级单体结构和发生环境的业务识别方法,将超级单体分为经典(标准)型、弱降水型、强降水型,其中,经典型具有低层钩状回波、悬垂回波、有界弱回波区等回波特征及一个强旋转的上升气流。

在超级单体发生发展机制的研究中,关注湿度、不稳定条件和中尺度抬升机制等关键因素的同时,垂直风切变和风暴相对螺旋度常被用作分析、诊断强对流风暴特别是超级单体的工具(Weisman, et al, 1982, 1984, 2000; Davies-Jones, et al, 1990; Ding,et al, 1996)。环境风垂直切变的作用在于引导降水及其下沉气流远离低层的入流上升气流,保证上升气流的持续性,在风暴一侧的辐合加强、维持,从而也延长了风暴的生命史(Weisman,et al, 2000);同时,风暴中上升运动与环境风垂直切变的相互作用可以产生稳定旋转,垂直风切变产生水平涡度,然后沿着风暴入流进入风暴内部,随着入流在风暴内成为垂直上升气流,水平涡度转换成为垂直涡度,从而加强了风暴中的垂直涡度,导致风暴中深厚的中尺度气旋的形成(俞小鼎等,2006),这种旋转的上升气流保证了超级单体的发展和冰雹的增长(徐文俊, 1985)。风暴相对螺旋度则将风暴的移动与环境风结合起来,可用来度量由抬升环境风水平涡度而导致的上升气流的旋转程度(Davies-Jones, 1984;Davies-Jones,et al, 1990),反映了一定气层厚度内环境风场的旋转程度和“卷”入到对流风暴中环境涡度的多少,也可用于估算垂直风切变环境中风暴运动所产生的旋转潜势,即沿流线方向上的涡度进入上升气流并与之相互作用,在风暴中产生深厚、强大、持久的旋转(俞小鼎等,2006)。在对大量个例分析和数值模拟的基础上,Weisman等(2000)用垂直风切变和风暴相对螺旋度研究了超级单体的动力机制,认为风暴相对螺旋度可以用来描述一个移动雷暴中的旋转特征,而垂直风切变与上升气流的相互作用可以用来揭示具有旋转特征的雷暴生成与维持机制。Moller等(1994)采用总体理查森数综合研判对流有效位能和垂直风切变的作用,用0—3 km螺旋度这一重要指标来研判中气旋潜势。

用雷达探测大冰雹时,Wilson等(1986a, 1988)、Zrnić(1987)研究发现了雷达对大冰雹探测时可能会出现虚假回波,Zrnić(1987)认为,该现象是大水相粒子(如大冰雹或湿冰雹等)对雷达波束的非瑞利散射造成的,使得雷达波束在大水相粒子、地面间进行了多次散射和反射,最终返回雷达天线,并在雷达探测大冰雹区远侧的无回波区中出现弱的回波束。Lemon(1998)进一步将此现象定义为“三体

散射长钉"(TBSS,three body scatter spike),通过对一系列大冰雹过程三体散射长钉的研究,Lemon认为,三体散射长钉是判别大冰雹的充分但非必要条件,在冰雹(或伴随的大风)的业务预报中常常有10—30 min的预报提前时间。

从20世纪60年代开始,中国的气象学者也开始了对超级单体风暴的相关研究(葛润生,1966;王昂生等,1985),90年代随着新一代多普勒天气雷达在中国的布网建设,多普勒天气雷达被广泛用于超级单体的分析和研究(郑媛媛等,2004;胡胜等,2006;俞小鼎等,2008;潘玉洁等,2008;刁秀广等,2009),发现了超级单体的典型特征,揭示了超级单体的发展和演变过程与机制。朱敏华等(2006)、廖玉芳等(2007)对中国一些冰雹的三体散射长钉进行了分析和统计。

飑线是一种常发生在中尺度对流系统(MCS)中的强对流天气,为呈线状排列的对流单体族,常由普通单体风暴、超级单体风暴等构成,除了短时强降水、冰雹、雷击外,其主要灾害是飑线上弓形回波后侧的直线大风。由于飑线的生命期长,造成的灾害强,因此,对飑线发生发展、传播机制、组织结构等特征,中外都已开展了大量的研究工作(Bradberry,1981;Heymsfield,et al,1985;Sun,et al,1979;Klimowski,et al,2004;张芳华等,2005;姚建群等,2005)。

在超级单体的发展、演变方面,Bunkers等(2006)对超级单体的生命史进行了研究,发现孤立超级单体不易与其他对流系统合并,故生命史较长,当与其他对流系统合并或转为非超级单体阶段时,超级单体就会减弱,超级单体的演变还受到下垫面热力、动力和水汽条件的影响。另外,一些研究关注到超级单体与飑线的关系和相互作用,研究重点在飑线与超级单体合并后所导致的突然发展和加强。Goodman等(1993)发现一次强飑线和一个强超级单体合并时,飑线阵风锋加强了超级单体的后侧下沉气流,通过抬升低空水平涡管、加强螺旋度和辐合强度,来加强超级单体中的垂直涡旋,导致龙卷明显加强。Wolf(1998)发现弓形回波与其前侧的超级单体合并后,弓形回波的冷堆切断了超级单体的后侧入流,并扩展到超级单体之前的区域,弓形回波明显减弱,由于弓形回波出流与超级单体南部出流合并,使得飑前超级单体演变成一个具有较大中气旋的"逗点"形雷暴,并导致强烈天气如龙卷、强降水的出现。Smith等(2001)认为,在一次超级单体被飑线系统追上的过程中,两者合并和相互作用是导致超级单体降水突增的主要原因。Carey等(2003)发现了飑线南部尾端与一个超级单体合并导致了超级单体强烈发展,合并超前出现F4龙卷灾害约10 min。姚建群等(2005)也发现飑线强单体出流边界对其南侧的强单体有明显的加强作用,并使得单体的路径发生向右的偏移。可见超级单体与飑线碰撞或合并后有很多变化。

2009年6月5日14—17时(北京时,下同),在江苏北部生成的一个中尺度对流系统上的飑线系统(图1)自西北向东南影响上海地区,15时许,在其自西北向东南移动方向的前侧,一个雷暴单体在上海嘉定区产生并发展,具有典型超级单体特征,该超级单体影响了嘉定和中心城区的西部和南部,降下了上海多年罕见的大冰雹,其中,徐家汇冰雹直径25—30 mm(15时35分);随后,尾随的强飑线向东南移动扫过上海全境,造成全市范围的强雷电、雷雨大风和短时强降水天气,大部分地区出现了8级以上大风,局部达10级。图2为13时—16时30分卫星红外云图上中尺度对流系统(标记为m)和超级单体风暴(标记为s)的演变情况。此次强对流天气过程给上海造成了较严重影响:部分路段交通出现拥堵,30余航班受影响,轮渡停航,浦东一塔吊倒塌,多处工棚和两处简陋房屋阳台倒塌,多辆轿车被冰雹砸坏,有市民因冰雹击中受伤。

上海地区强降雹过程并不多见,1956—1990年的年均冰雹日数约3.1 d(束家鑫等,1997),20世纪90年代明显减少为1.3 d,进入21世纪后,冰雹较少发生,中心城区观测到大冰雹更为罕见。从1997年上海WSR-88D多普勒天气雷达开始运行以来,也未观测到伴有大冰雹的典型超级单体风暴。对2009年6月5日强降雹超级单体雷暴的形成、发展机制和结构特点的研究,将有助于提高对长三角地区超级单体的认识。此外,中尺度对流系统或飑线系统上常常伴有一个或多个超级单体,还有一些飑线本身就是由超级单体发展演变而来(Klimowski,et al,2004;俞小鼎等,2008),但类似2009年6月5日先后影响上海的强降雹超级单体及其后侧飑线的系列强对流天气过程并不多见,研究超级单体及其后续飑线系统之间的关系,将有助于探索两者发生

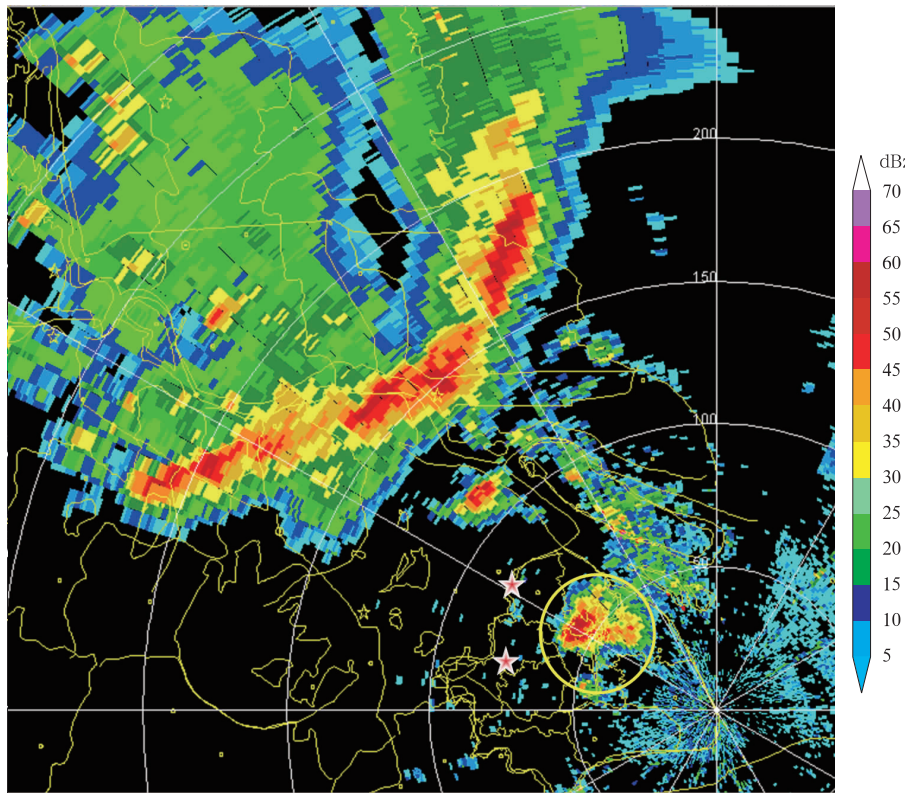


图 1 2009 年 6 月 5 日 15 时 04 分上海 WSR－88D 多普勒雷达 0.5°仰角反射率因子
(粉色五角星分别代表嘉定(北)和青浦(南)的风廓线仪所在位置,黄色圆圈为典型超级单体位置)

Fig. 1 Reflectivity (dBz) from the 0.5° scan of the Shanghai WSR-88D, at 15:04 BT 5 June 2009. The supercell is marked with yellow circle, and the position for the two profilers (Jiading (north) and Qingpu (south)) with pink pentagrams

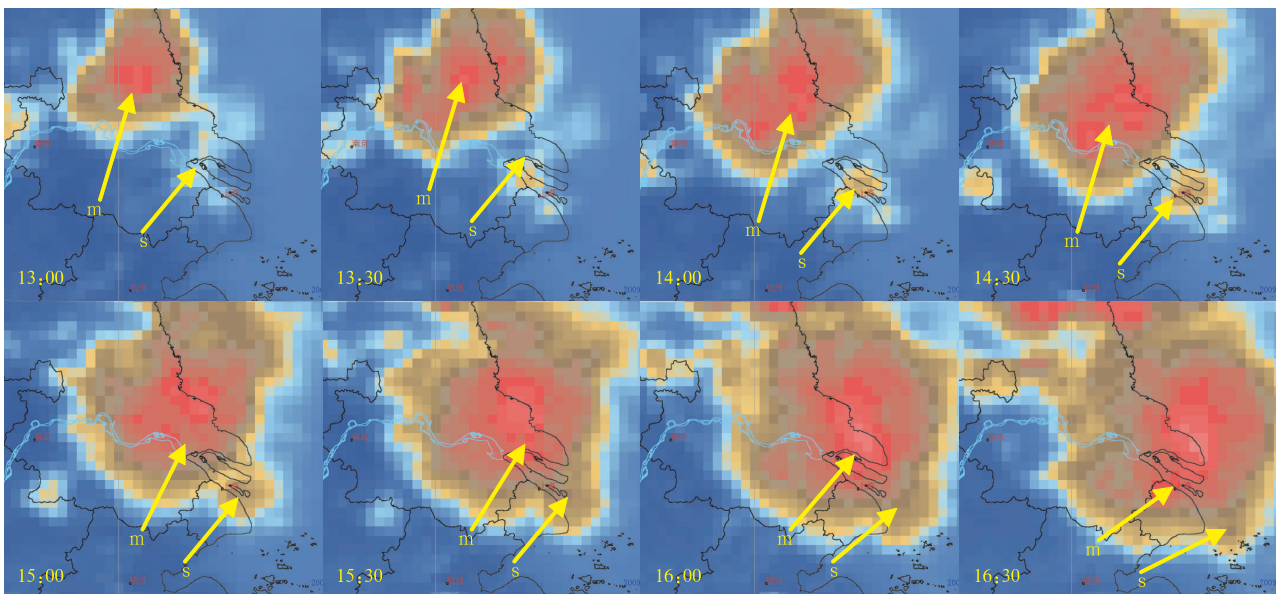


图 2 2009 年 6 月 5 日 13 时—16 时 30 分风云静止卫星红外通道云图

Fig. 2 Infrared cloud images of the FY stationary meteorological satellite for 13:00 to 16:30 BT 5 June 2009

发展的中尺度环境和相互作用,揭示该类中尺度对流系统的发展演变规律。

本文利用常规天气观测、WSR-88D 多普勒天气雷达、风廓线仪、自动气象站等资料,对 2009 年 6 月 5 日的强降雹超级单体进行了分析研究,以揭示强降雹超级单体的结构特征及其发生、发展和演变的环境背景与中尺度条件;通过对超级单体及其与尾随飑线的关系和相互作用的研究,提出针对该类强降雹风暴和后续飑线系统发展演变和移动路径的临近预报思路。

2 天气形势背景

2009 年 6 月 1 日开始,东北地区有一冷性低涡维持,其西南侧不断有冷平流从华北向华东东部输送。分析 6 月 5 日 08 时 500 hPa 形势(图 3)可知,4 日 08 和 20 时的冷涡西南侧冷槽快速南下,5 日 08 时已南压到华东东南沿海地区,山东半岛附近又有一小槽南下,华东北部处在冷涡底部槽底附近,山东半岛为正涡度区,华东其他地区处在槽后西北气流控制下;华东东部自北向南的 24 h 变温(阴影区)为 -2—-6℃,而 850 hPa 温度 24 h 增加了 1℃。

表 1 为 6 月 2 日 08 时—6 月 5 日 20 时上海宝山站(58362)探空 0℃、-10℃、-20℃层高度及 500 和 850 hPa 的温度差 $T_{850\text{-}500}$ 的演变。从 6 月 2 日开始,$T_{850-500}$ 从 18℃(6 月 2 日 20 时)迅速增大到 30℃左右(6 月 4 日 20 时—5 日 08 时),许爱华等(2006)发现 $T_{850-500}\geqslant 27$℃且有天气系统作为触发条件时,江西强对流天气发生的概率达到 85%,可见 6 月 5 日有很强的垂直温度梯度,中层的不稳定层结明显加剧,在东北冷涡西侧冷槽迅速南摆的触发下,有很强的强对流天气潜势。

雷暴中冰雹增长需在 0℃层以上,其中,大冰雹增长区往往达到 -20℃层附近或者更高(Browning, 1977; Nelson, 1983; Miller, et al, 1988)。随着 0℃层高度不断降低,从 3 天前的5.20 km下降到6月5日早晨的3.50km,-10℃和 -20℃层高

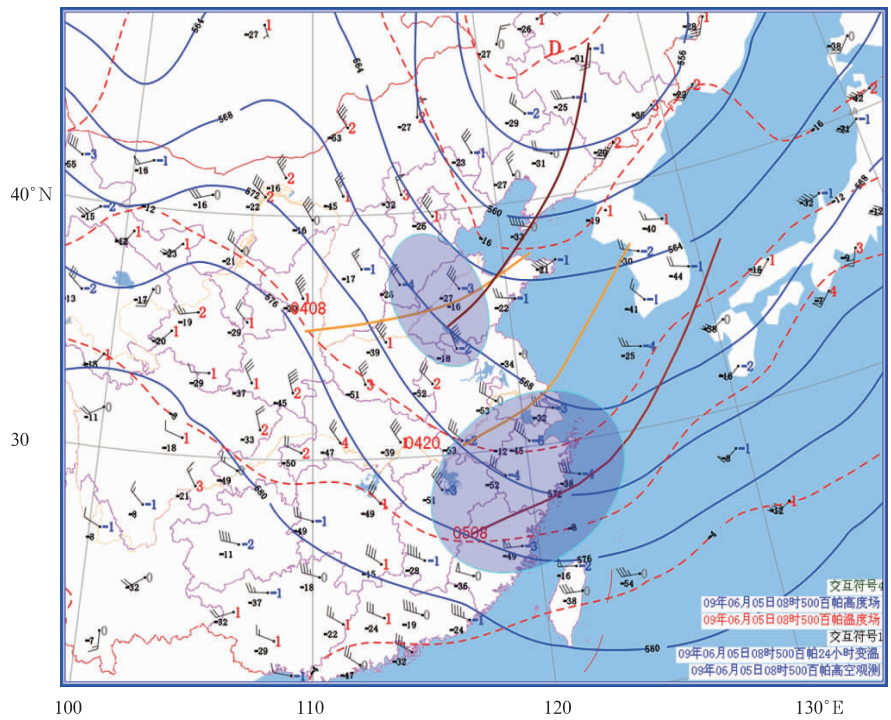


图 3 6 月 5 日 08 时 500 hPa 形势(棕色曲线为槽线,橙色曲线为过去槽线位置,蓝色阴影区为华东地区 24 h 负变温低于 -2℃的区域)

Fig. 3 500 hPa synoptic analysis for 08:00 BT 5 June 2009 (trough is marked with brown, the previous trough with orange, and temperature change in the last 24 h with shaded sky-blue)

表 1 2009 年 6 月 2 日 08 时—5 日 20 时上海宝山温度层结演变分析

Table 1 The air temperature parameters based on the Baoshan sounding data during 08:00 BT 2 to 20:00 BT 5 June 2009

日期(日/时)	02/08	02/20	03/08	03/20	04/08	04/20	05/08	05/20
0℃层高度(km)	5.20	4.80	3.80	3.90	3.90	3.90	3.50	3.60
−10℃高度(km)	6.00	6.20	5.80	5.73	5.72	5.20	4.80	4.80
−20℃高度(km)	7.80	7.70	7.50	7.30	7.20	7.20	7.00	7.10
$T_{850-500}$(℃)	23	18	26	26	26	31	30	29

度也分别从 6.00 和 7.80 km 下降到了 4.80 和 7.00 km,一旦对流发生并到达 7.00 km(−20℃层高度)附近,则十分有利于大冰雹的增长;同时,0℃层高度的明显降低,也使得冰雹融化的空间高度明显降低,确保大冰雹落地。

3 强对流的发生、发展条件分析

3.1 不稳定条件分析

图 4a 为 6 月 5 日 08 时宝山探空资料和一些对流参数,如 K 指数 33.0℃,SI 指数 −1.7℃,为了判定当天最大的对流潜势,用当天徐家汇地面最高温度(31℃)和露点(18℃)对其进行修订和反算,得到了修订后的探空分析(图 4b),对流有效位能达 2178 J/kg,为 08 时(图 4a)原对流有效位能(803 J/kg)的 2.5 倍,在假定中高空层结变化不大,低空加热作用明显加大了对流发展潜势。在当天高空冷涡南摆槽的天气形势下,由于高空还有冷平流快速南下(图略),特别是 300 hPa 以上还有持续降温,中午前后当强对流天气发生时,实际大气环境的对流有效位能比用 08 时探空加上地面实况订正的还要大。另外,低空温度层结表明当地面温度达 31℃时,原对流抑制能量(−225 J/kg)就全部消失,出现了超干绝热现象,低空气团一旦受到扰动,就会加速上升,释放对流有效位能,形成深厚的对流。

最值得注意的是:由于过去几天中层出现持续降温(表 1),0℃和 −20℃层明显下降,冰雹发展区域 −20℃层以上的对流有效位能仍然有 850 J/kg(图 4b),在此高度以上仍有大量的潜在不稳定能量,表明在 −20℃层以上仍有较强的上升运动,一旦有对流发展,该部分的潜在不稳定能量将有利于形成旺盛的垂直对流,对大冰雹在空中的循环增长有强托举作用。

因此,在 6 月 5 日东北冷涡形势下,中高层的明显降温和低层的略有回暖,导致了大气层结强烈的不稳定,类似抽吸作用是这次强对流天气发生的关键机制。

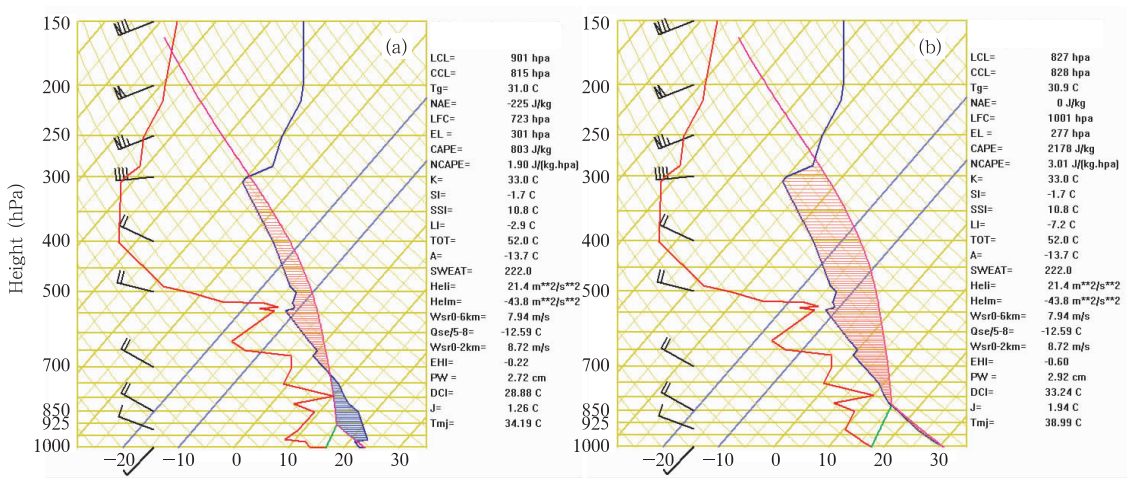


图 4 6 月 5 日 08 时(a)上海宝山探空分析和(b)经地面观测修订后的探空分析

Fig. 4 Skew T-lg$p$ sounding diagrams and convective indices (a) for Baoshan, Shanghai at 08:00 BT 5 June 2009; and (b) as in (a) but with some modification done based on the surface observation

3.2 辐合抬升条件

图 5 为上海自动站网的中尺度观测,其中,图 5a 为 12 时 30 分的温度分布,上海东部沿江沿海地区的温度普遍在 26℃以下,陆地上普遍在 30℃以上,海陆温度差异明显(蓝色曲线为温度锋区位置);图 5b 为 13 时 42 分的风和相对湿度,上海北部宝山和嘉定交界处有偏东风和东南风的切变存在,市区西部有东南风和西北风的辐合带,这是上海城市热岛和海风锋产生的边界线(褐色曲线),在0.5°仰角雷达反射率因子图上均对应有弱窄带状回波(图略)。海陆风锋边界线上的风向辐合和温度锋区为雷暴的触发和加强提供了低空的动力条件,而海陆风锋东侧的海风(东南气流)也为对流系统的发展和持续提供了水汽供应,对当天不足的水汽条件是一个有效的补充。

图 6 用表征雷暴垂直发展强度的雷达产品 VIL(垂直累积液态水含量)与地面辐合线进行了叠加显示。13 时许飑线前激发出的雷暴单体发展后,逐渐增强并向由海陆风锋和地面辐合线(图中黄色线)交汇处的嘉定靠近,13 时 30 分 VIL 最大值达到 35 kg/m^2;14 时许,雷暴单体继续向东南移动,向上海靠近,VIL 最大值仍然维持在 35 kg/m^2 左右,而其后侧(西北方向)位于江苏北部的飑线主体已清晰可见,飑线上雷暴单体的 VIL 最大值达到 60 kg/m^2;14 时 18 分,单体与两条辐合线交汇处发生“碰撞”,低空风场的辐合抬升和锋区不稳定能量的导入,导致随后雷暴单体明显加强(Wilson, et al, 1986b),14 时 30 分 VIL 最大值跃升到 60 kg/m^2 左右,随后该雷暴逐渐呈超级单体特征(见第 4 节),后侧飑线主体上的雷暴带状更加清晰,强雷暴强度继续维持,VIL 最大值 65—70 kg/m^2;15 时许,该飑前强雷暴已经发展出超级单体,飑线主体上的弓形强雷暴带越过长江,向上海靠近。

图 7 为 6 月 5 日 13—16 时超级单体风暴中心最大的 VIL 值及 VIL≥30 kg/m^2 的面积 A_{VIL30} 的演变情况。13 时许,飑线前激发出的雷暴单体开始发展,高度和强度不断增加,VIL 最大值从 15 kg/m^{2}左右加强到 13 时 45 分的 60 kg/m^2,14 时许有所减弱,后又快速加强到 60 kg/m^2 左右并维持到 15 时 30 分,持续约 90 min。然而,从表征强雷暴水平尺度的 A_{VIL30} 的演变来看,在 14 时 15 分该单体接近由海陆风锋和地面辐合线交汇处(黑色空芯箭头所指之处为该单体靠近前期地面边界层辐合线时的时间),随后与辐合线发生“碰撞”,受到低空风场辐合抬升和锋区不稳定能量导入的加强作用,雷暴单体水平尺度明显增大,A_{VIL30} 从之前的 2—5 km^2 跃升到 7—10 km^2,并不断增强,在 15 时达到了 15 km^2,随后该雷暴逐渐表现出超级单体特征。

以上过程表明,雷暴单体的明显加强和超级单体特征的呈现,与前期地面辐合线的激发和加强作用密不可分,发展加强后仍与飑线保持一定的距离,一起向东南方向移动。

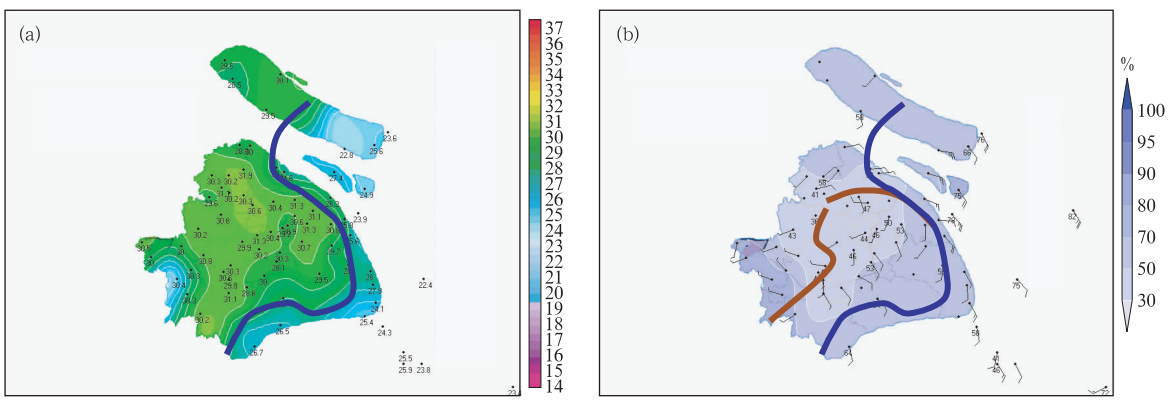


图 5 6 月 5 日(a)12 时 30 分上海自动站温度(℃)观测和(b)13 时 42 分自动站风场和相对湿度观测
(蓝色曲线为 28℃温度线,褐色曲线为地面切变线)

Fig. 5 Automatic weather station observations: temperature (a) and wind with relative humidity (b) (Blue curve depicts the isotherm of 28℃, and brown curve for the shear line at ground)

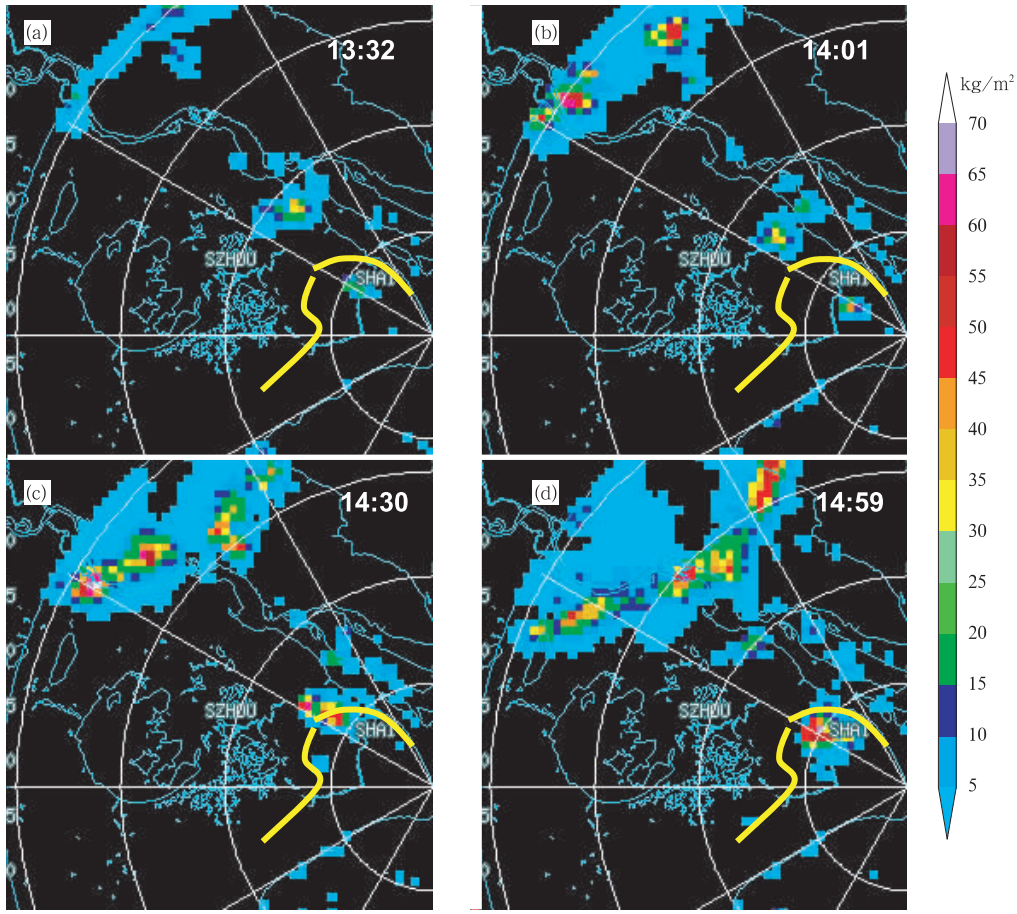


图 6 垂直总含水量(kg/m²)与地面辐合线(黄线)的叠加

(a. 13 时 32 分,b. 14 时 01 分,c. 14 时 30 分, d. 14 时 59 分)

Fig. 6 Four-panel vertically integrated liquid (VIL, unit: kg/m²) for (a) 13:32, (b) 14:02, (c) 14:30, and (d) 14:59 BT 5 June 2009

(Yellow curves depict the convergence lines at ground)

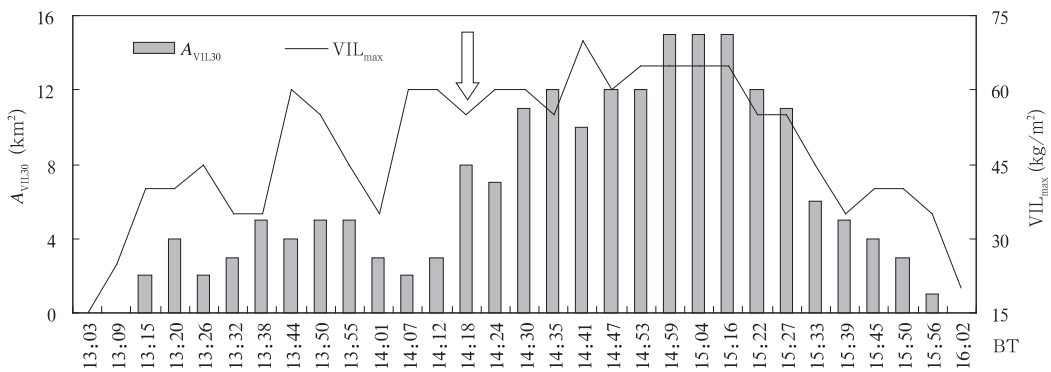


图 7 6 月 5 日超级单体形成前后的单体最大垂直总含水量和垂直总含水量≥30 kg/m² 的面积 A_{VIL30} 的时间序列(空心箭头所指处为超级单体形成时刻)

Fig. 7 Time series of the maximum value of VIL, VIL_{max}, and the area of girds the VIL value ≥ 30 kg/m², A_{VIL30}, of the supercell on 5 June 2009

(The hollow arrow indicates the time when the storm turned to a supercell)

3.3 水汽条件分析

6月5日08时上海宝山探空观测到500 hPa以下总可降水水汽(P_{wv})仅为29.2 mm,低于该季节(4月—6月上旬)雷暴发生发展时的P_{wv}值(35—45 mm)(陈雷等,2007),表明当天整层水汽并不利于持续性的雷暴和降水,而动态P_{wv}监测显示(图略),当天的整层水汽并没有发生明显的变化,维持雷暴发展的水汽可能来自于东海的低空东南气流(图5b)。另外,整层较低的湿度分布为形成雷暴大风提供了较好的层结条件。

3.4 垂直风切变

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,2006)。2009年6月5日08时的探空表明,0—2 km的垂直风切变为8.72 m/s,0—6 km的垂直风切变仅为7.94 m/s,垂直风切变的条件并不利于超级单体或者组织性强的中尺度对流系统的形成和发展。为了揭示超级单体发生前的风场变化,将在第5节用双风廓线仪观测资料进行对比分析。

4 超级单体雷达回波特征

图8为15时04分位于上海西部超级单体不同仰角雷达反射率因子和径向速度。在图8a—d反射率因子图上,超级单体均有标准超级单体的"楔"状特征,东北侧出现V形缺口,仰角1.5°—3.4°反射率因子图上还有指示空中大冰雹区的三体散射长钉特征回波。超级单体西南部在仰角2.4°—3.4°还出现了隐约的"钩"状回波,也表明为风暴入流辐合最强处(俞小鼎等,2006)。灰色十字标记了低层钩状回波的位置,可见在其上空有强回波区(6.0°及以上)发展,形成悬挂回波。三体散射长钉与雷达之间均存在强反射率区,而≥65 dBz的强反射率区均出现在仰角1.5°—3.4°上,对应高度在1.4—3.2 km,处于0℃层(3.5 km)以下,表明冰雹表面开始融化后变成湿冰雹,导致反射率显著增大(张培昌等,1988;Zrnić,1987)。

在径向速度图上(图8g—l),由于多普勒天气雷达的距离模糊限制,最低3个仰角(图8g—i)上超级单体"指"状或"钩"状回波区部分被距离模糊的紫色色块所遮挡,但在仰角3.4°反射率因子图中对应弱的"钩"状回波附近,一个中气旋速度对清晰可见,正速度中心达到18.5 m/s,负速度中心约为-17 m/s,在相距8 km左右的距离上形成了一对正负速度对,速度差达到了35.5 m/s,表明该处有一个较强的中气旋(图8c—d和i—j中的黄色圆环标记)存在,在仰角2.4°上仍然可见组成中气旋速度对的正速度区,其中心值为14—19 m/s,气旋的速度对一直维持到6.0°仰角速度图上(约6 km高度),可见该超级单体存在一个深厚的中尺度涡旋,维持了雷暴的持续发展,也保证了一支强盛的上升气流支撑空中大冰雹的增长。该风暴当时距雷达约50 km,旋转速度达到17.8 m/s,符合中等强度中气旋的标准(俞小鼎等,2006)。上下各层中气旋(黄色圆环)位置并不完全重叠,表明对应的主上升气流存在一定的倾斜;在9.9°仰角雷达反射率图上的强反射率区(大于60 dBz)恰好位于下层(6.0°)的中气旋(蓝色虚线圆环)之上,该强回波区的高度达到9.6 km,环境温度达-40℃,表明受到来自下层强上升气流的托举,十分有利于大冰雹在高空的增长。

图8a—d、h—l中的淡绿色箭头指出了超级单体上在不同仰角雷达反射率和径向速度图上出现的三体散射长钉标记,在低仰角的反射率因子图上(0.5°—1.5°)隐约可见在超级单体远离雷达的一侧出现了回波强度5—10 dBz的三体散射长钉,在2.4°和3.4°上,三体散射长钉长度明显加长,各个层次的三体散射长钉都是出现在反射率强核心的延伸方位,强核心的反射率都超过60 dBz,2.4°—3.4°上超过65 dBz,说明了大冰雹所处高度和大致位置(Lemon,1998;朱敏华等,2006;廖玉芳等,2007),在9.9°仰角雷达反射率因子图(图8f)上60 dBz以上的强回波区外侧也出现了三体散射长钉,也验证了9.6 km、环境温度-40℃的高空中有大冰雹发展。

与反射率因子图上的三体散射长钉相比,径向速度图上的更加清晰、长度更长,这是因为反射率上只显示了5 dBz及以上的信息,而速度信息采集于更弱的信号。在2.4°—9.9°仰角的径向速度图上都出现了较长的三体散射长钉,其中,2.4°仰角径向速度图的三体散射长钉达到31 km,而对应的强回波区高度仅为2.4 km,雷达电磁波在空中冰雹区与地面出现了多次散射,然后返回雷达天线接收机,导致该路径大大延长,长钉长度远长于估计距离,说明在该处冰雹开始融化,散射或反射能力极强(Zrnić,

1987)。

根据 Zrnić (1987)、Lemon(1998)和(Wilson, et al, 1986a, 1988)等研究,发现三体散射长钉上的径向速度是由冰雹区水平移动在雷达波束上的投影与冰雹区垂直运动的合成,正(负)速度值表明冰雹处于上升(下降)过程中。2.4°仰角雷达反射因子图(图 8i)上三体散射长钉径向速度为负值,中部还出现了速度模糊现象,退模糊后的速度值在 -35 m/s 左右,在 3.4°仰角雷达反射因子图(图 8j)上也类似出现强冰雹的下沉,速度值达 -35 m/s 左右;而在 6.0°和 9.9°仰角雷达反射因子图上的三体散射长钉转为正速度值,一般为 19 m/s 左右,9.9°仰角雷达反射因子图上超过 26 m/s;可见,当时在低空大冰雹处于下降阶段,而高空仍有大冰雹处于上升气流

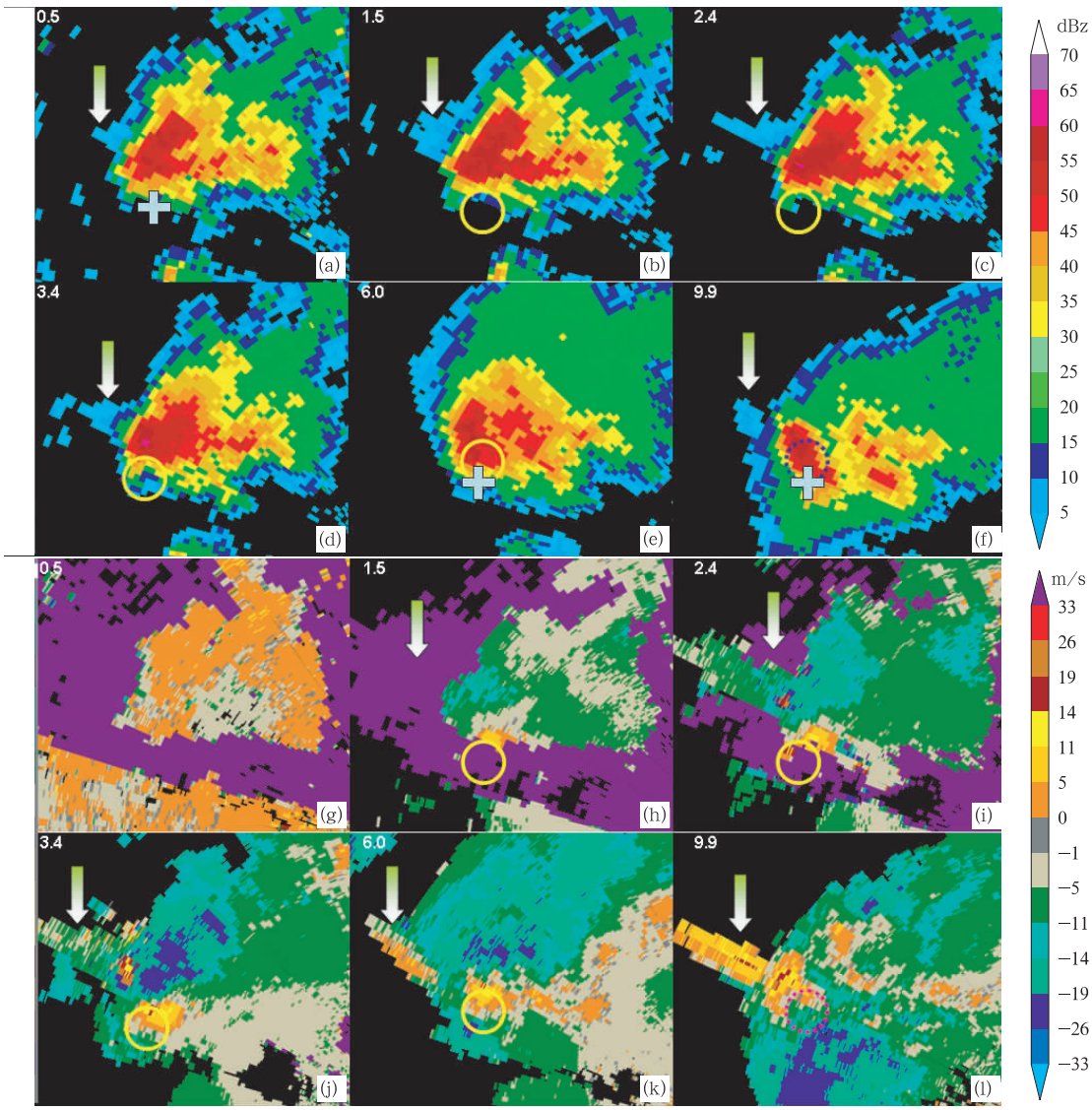


图 8 2009 年 6 月 5 日 15 时 04 分 0.5°(a、g)、1.5°(b、h)、2.4°(c、i)、3.4°(d、j)、6.0°(e、k)和 9.9°(f、l)反射率因子(a—f)和径向速度(g—l)

Fig. 8 Four-panel reflectivity (a－f) and radial velocity (g－l) centered on the supercell at 15:04 BT 5 June 2009 at the elevation angles 0.5° (a,g), 1.5°(b,h), 2.4°(c,i), 3.4°(d,j), 6.0°(e,k), and 9.9°(f,l)

(The radar is located 50 km south-east of the center of each panel)

中。综合分析表明,高层三体散射长钉上正的径向速度和其下部中气旋均揭示了该层仍有强上升气流,配合 9.9°仰角雷达反射率上的悬挂回波,表明当时超级单体上部的大冰雹群仍在发展、增长。

图 9 诸要素与图 8 同,但为 15 时 16 分。仍可见标准超级单体的"楔"状、"钩"状、V 形缺口、三体散射长钉、悬挂回波。相比 12 分钟前,最低 3 个层次的核心反射率强度明显加强,对应的三体散射长钉宽度显著加大,表明低层的大冰雹区范围不断扩大,而在 9.9°仰角雷达反射率因子图上三体散射长钉基本消失,径向速度图上三体散射长钉范围明显缩小,表明虽仍有大冰雹,但冰雹的尺度或分布密度减小,散射作用减弱,三体散射长钉上径向速度值由 26 m/s 减小至 5 m/s 左右,正速度的减小也可推断出此时位于超级单体上部的上升气流明显减弱,大冰雹区开始有向下的趋势。

超级单体反射率因子图上的三体散射长钉从 15 时许开始出现,到徐家汇降落 25—30 mm 直径大冰雹约提前 30 min,与 Lemon(1998)所提及的预报时效相当。根据不同层次上三体散射长钉径向速度值来研判超级单体中大冰雹区及其垂直运动特征,可以揭示降雹区、大冰雹增长区、上升气流分布

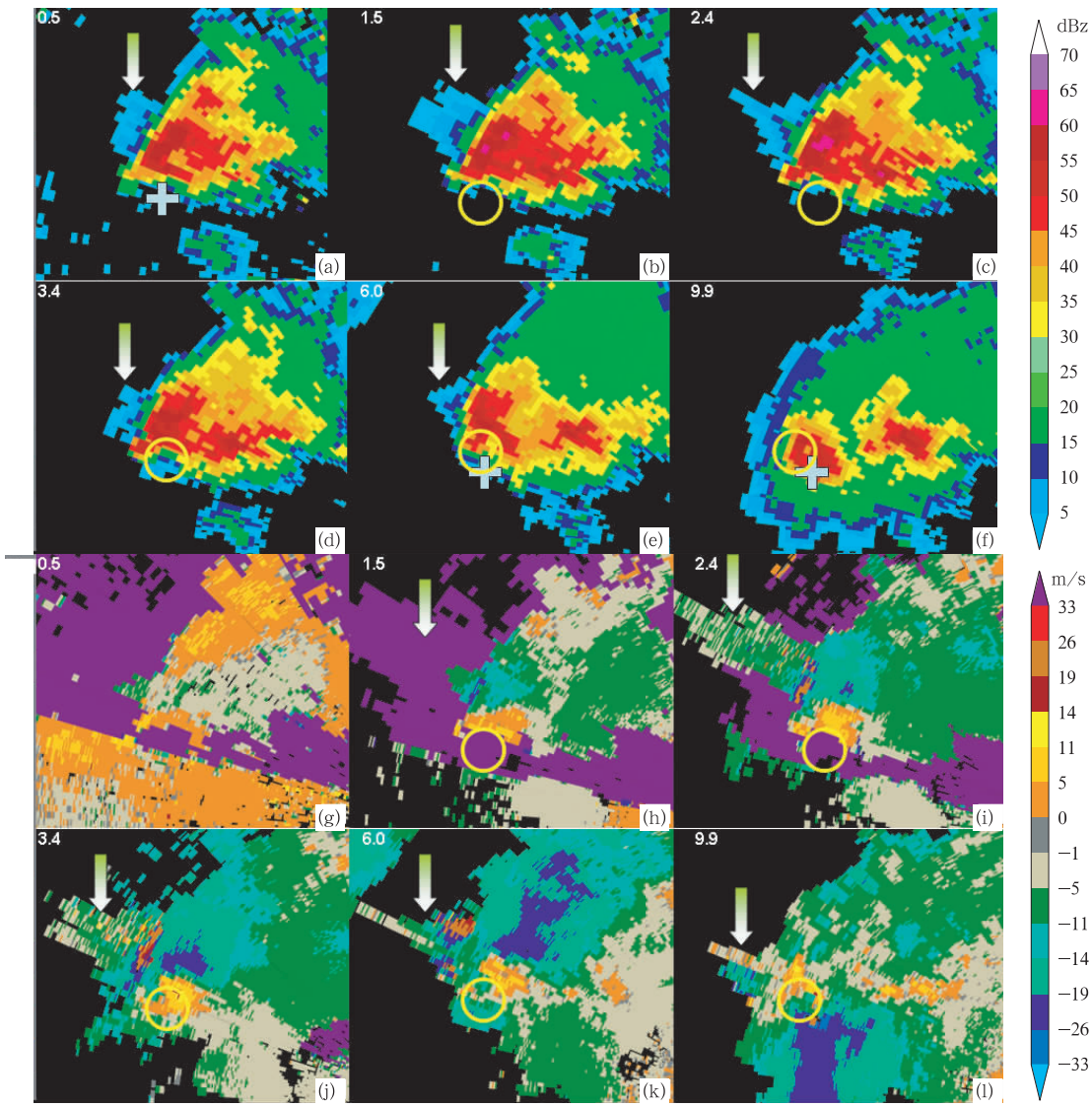


图 9 2009 年 6 月 5 日 15 时 16 分 0.5°(a、g)、1.5°(b、h)、2.4°(c、i)、3.4°(d、j)、6.0°(e、k)和 9.9°(f、l)反射率因子(a—f)和径向速度(g—l)

Fig. 9 As in Fig 8 but for 15:16 BT

和强度等重要信息。中高空三体散射长钉上径向速度的变化则可揭示冰雹区垂直运动的趋势,从而对大冰雹的增长和下落有一定的临近预报意义。

图 10 为 15 时 16 分超级单体的 0.5°仰角反射率因子(图 10a)和过图 10a 中粉色虚线位置的垂直剖面及大气温度为 0℃和 -20℃的高度(图 10b 黄色虚线),由于当时 WSR-88D 多普勒雷达采用 VCP21 降水观测模式,在最高的几个仰角间有观测的盲区,但仍然可见该时刻超级单体雷暴发展较为旺盛,存在明显的悬垂强回波区(50—60 dBz),而且该强回波区处于 8—10 km 高度,远远高于 -20℃温度层,表明在 -20℃层以上有明显的大冰雹增长区,这与美国大冰雹发生时 50 dBz 的高度需超过 8 km (Donavon, et al, 2007)较为一致。悬垂强回波特征从 14 时 53 分开始,一直维持到 15 时 27 分(图略),悬垂强回波不断降低(图略),期间在上海的嘉定和市区的西部、南部等地降了冰雹,15 时 30—35 分悬垂回波及地,在市区西南部降下了直径 25—30 mm的大冰雹。另外,探空显示当天 0℃层高度仅为 3.5 km,使得冰雹下降过程中受热融化距离较短,保证大冰雹的落地。

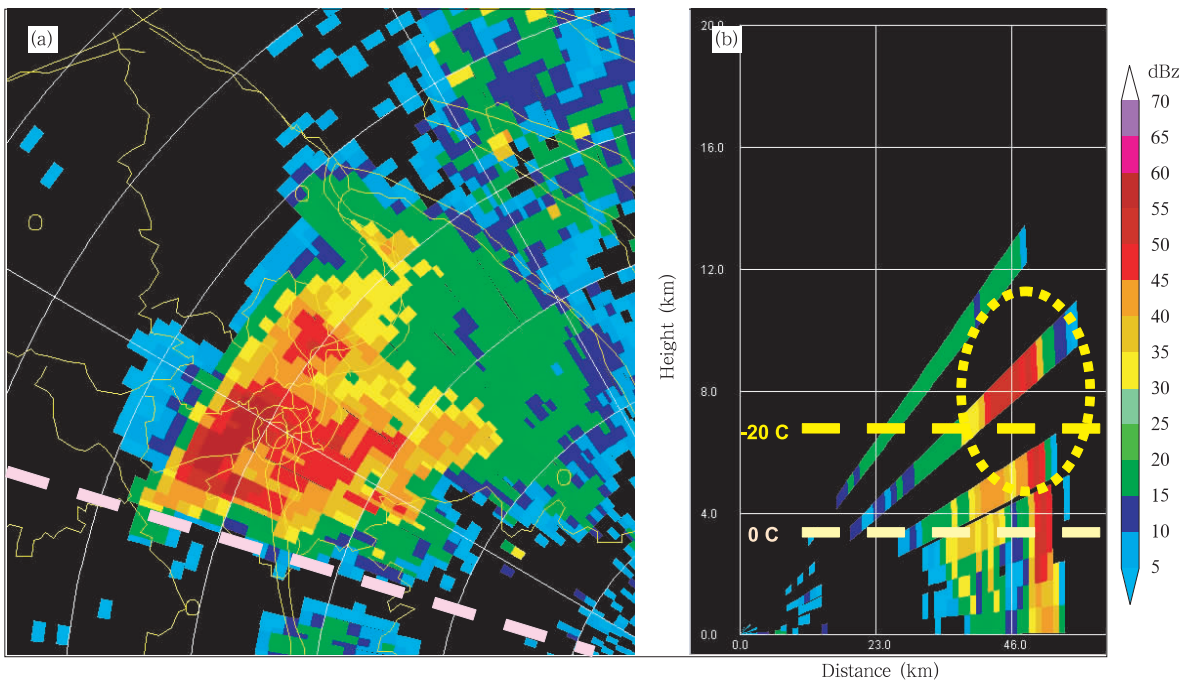


图 10 15 时 16 分仰角 0.5°(a)反射率因子和(b)过图 10a 中粉色点线的反射率因子垂直剖面

Fig. 10 Reflectivity PPI (a) and cross section of the supercell (b) at 15:16 BT 5 June 2009

5 双风廓线资料对比分析

由于探空观测的间隔为 12 h,观测的高度层次也较少,一般很难捕捉到强风暴发生前环境风垂直切变的演变情况,应用观测时间密度较高的风廓线仪资料则能分析超级单体发生前和飑线前侧的环境风场特征。这里选用嘉定(31.36°N,121.11°E)和青浦(31.10°N,121.10°E)的边界层风廓线仪进行了双风廓线观测的对比,并计算相对地面垂直风切变 S_{GRVW} 和风暴相对螺旋度 H_{SRE} (Davies-Jones, et al, 1990)来分析低空风场特征

$$S_{GRVW} = \sqrt{(u_i - u_0)^2 + (v_i - v_0)^2} \quad (1)$$

其中,u_i 和 v_i 分别代表某一高度上环境风分量,u_0 和 v_0 代表地面风分量。

$$H_{SRE} = \int (\boldsymbol{v} - \boldsymbol{c}) \times \boldsymbol{\omega} \cdot \mathrm{d}z \quad (2)$$

其中,$\boldsymbol{v}$ 和 $\boldsymbol{c}$ 分别是环境风和雷暴移动矢量,故 $\boldsymbol{v} - \boldsymbol{c}$ 表示风暴相对风,$\boldsymbol{\omega}$ 为水平涡度矢量

$$\boldsymbol{\omega} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial z}\right) \quad (3)$$

飑线前雷暴单体于14时30分经过嘉定时发展,15时许已成为一个具有中气旋的标准超级单体。嘉定风廓线仪较接近超级单体的路径,最接近时距离小于10 km,能够较好地反映该雷暴向超级单体演变前后的低空风场变化,而青浦风廓线仪距离超级单体约25 km,则用于描述超级单体演变前后的环境场的变化。飑线系统主体分别于15时40分和16时30分到达嘉定和青浦的风廓线仪附近,受到降水下沉速度的影响,风场观测误差加大,后期的资料没有列入分析。故选取6月5日10—16时的S_{GRVW}和H_{SRE}资料(图11)。在计算H_{SRE}时,雷暴移动矢量选取了该超级单体风暴移动矢量:以约50 km/h的速度向东南方向移动。

从低空垂直风切变S_{GRVW}的分布和演变来看,14时前后超级单体接近嘉定并不断加强,垂直风切变变化明显,高度0.4—0.7 km对地风切变增大迅速,由原来小于3 m/s增大到6—7 m/s,高度1.7—3.0 km的风切变也明显加强,由原来的小于8 m/s突然增大到12—17 m/s,可见在超级单体加强阶段,环境低空垂直风切变明显加强,在低空形成较强的水平涡管,经过垂直气流抬升转为垂直涡管,从而加强了风暴中层的旋转气流,有利于在超级单体中形成持续的中尺度气旋。青浦风廓线仪监测到对地的垂直风切变在15时以后也出现了明显的加强,先是在15时25分,1.5—2.5 km高度上S_{GRVW}从5 m/s跳跃到12 m/s左右,15时55分,当飑线主体接近青浦风廓线站时,整层垂直风切变都明显加强,出现了风切变的跳跃,0.5 km高度对地风切变达到8 m/s,并随高度不断增大,高度0—2 km和0—3 km垂直风切变分别达到了17和23 m/s,明显大于08时宝山探空的8.7和10.2 m/s,表明飑线主体靠近时,其前侧的环境低空垂直风切变明显加强,在飑线前侧形成一个水平涡管,与飑线后侧低空直线大风导致垂直风切变所形成的另一个水平涡管相对应,共同组成了一对涡度相反的涡对,在涡对相接处,即地面阵风锋上空,共同形成一支向上的气流,加强了飑线前侧对流风暴的垂直发展,从而维持了飑线主要对流带的生命延续(姚建群等,2005)。

从靠近超级单体风暴的嘉定风廓线计算的风暴相对螺旋度(图11b)分布和演变来看,14时以前,嘉定附近的H_{SRE}均为-50—20 m^2/s^2;14时前后,当单体雷暴接近嘉定时,H_{SRE}开始发生显著变化,2.3—4.0 km高度以上的H_{SRE}的值由前期的小于20 m^2/s^2突然增大到100 m^2/s^2左右,出现了有利于超级单体发展的环境螺旋度,而低层变化不大;14时30分—15时,当强单体到达嘉定并逐渐形成超级单体时,整个4.0 km以下的H_{SRE}都明显增大,低空0.4 km高度上H_{SRE}约为100 m^2/s^2,然后随高度不断增大,2.0—2.5 km高度上达到了最大值190 m^2/s^2,直至4.0 km高度上,H_{SRE}都处于较高的水准(约170 m^2/s^2)。可见环境螺旋度的增加导致水平涡管加强,一旦遇到雷暴中的强盛上升气流后,水平涡管被上升气流抬起、倾斜、逐渐转竖,水平涡管变成垂直涡管,加强了雷暴上升气流附近的水平旋转,反过来,水平涡旋又加强了上升气流,导致在雷暴的中低空形成了一个持续的涡旋,因而雷达上观测到了一个中尺度气旋。雷暴涡旋和上升气流的正反馈机制的维持,也是超级单体风暴维持的主要机制之一。

离超级单体相对较远的青浦风廓线仪观测到的H_{SRE}(图11d)在13时以前都处于较低水平,一般都在50 m^2/s^2以下;13时以后,1.7 km高度以上的H_{SRE}开始呈现出逐渐增大的趋势,在强单体风暴接近嘉定、经过嘉定并向超级单体转化时(14—15时)明显增大,2.6 km高度以上的H_{SRE}都在100 m^2/s^2左右,在超级单体继续向东南移向上海中心城区时,1.0 km以上的H_{SRE}也开始增大;到16时前后,飑线主体南压到青浦附近,在0.4—2.0 km高度上的H_{SRE}也发生明显增大。

嘉定、青浦两个风廓线仪相距约28 km,分别代表了超级单体附近和环境场的低空风场,两处低空风切变和风暴相对螺旋度的时间演变及相互对比表明:超级单体发生前,其环境低空风切变明显加强,主要表现在0.5 km附近和1.5 km以上高度上;当飑线靠近时(青浦15时55分),0.3 km以上的低空风切变明显加强;在雷暴单体加强为超级单体时(15时许),超级单体附近(嘉定)的低空地面到2.5 km的H_{SRE}约为190 m^2/s^2左右,明显强于周边环境(青浦)的H_{SRE}(约120 m^2/s^2),超级单体附近的环境提供了更多的环境涡旋,从而加强风暴的涡旋程度。飑线靠近时,

青浦的垂直风切变增大比 H_{SRE} 的增大更加明显,可见尽管低空垂直风切变明显增大,但是相对于飑线上的风暴而言,进入风暴内部的涡度并不明显。此时,垂直风切变的主要作用在于维持飑线前侧一对势力相当、旋转方向相反的水平涡管,该对涡管的存在使得飑线前侧上升气流不至于发生倾斜,新生对流单体不断在飑线前侧发展,维持了飑线系统的强度和生命史(姚建群等,2005)。

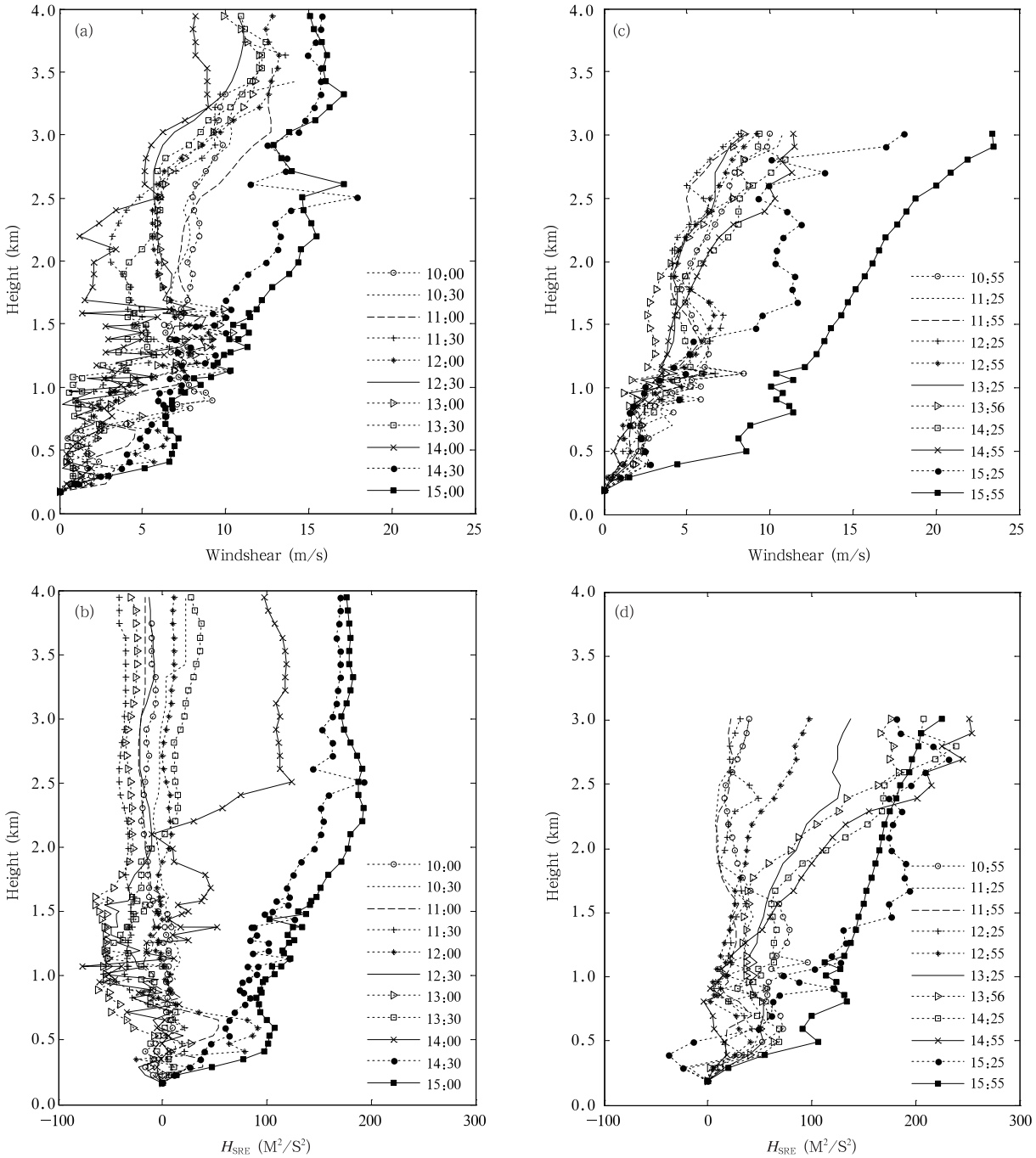


图 11 2009 年 6 月 5 日 10—16 时嘉定(a、b)/青浦(c、d)风廓线仪观测的对地垂直风切变(a、c)、风暴相对螺旋度(b、d)的高度分布

Fig. 11 Vertical distributions of S_{GSVW} (a, c) and H_{SRE} (b, d) derived from the wind profile data of the two wind profilers at Jiading (a, b) and Qingpu (c, d), Shanghai, for the period of 10:00 - 16:00 BT 6 June 2009

上海 WSR-88D 多普勒雷达的风廓线产品显示(图 12),15 时 30 分以前,雷达站附近 0.9 km 高度以下维持弱的南到东南风,0.9—3 km 为弱的西北气流,这与风廓线仪观测的环境背景基本一致,5—8.4 km 层有 15 m/s 左右的西到西南风。从雷暴单体向超级单体演变(15 时许)到超级单体消失(15 时 30 分),9—12 km 高层出现了 25—35 m/s 西北急流,这可能是超级单体顶部强辐散气流到达雷达附近所致,15 时 45 分之后,随着超级单体风暴特征的逐渐消失并向雷达站靠近,该层次及以下层次没有再出现 25 m/s 以上的急流,表明该雷暴顶的辐散强度已随着超级单体特征的消失而明显减弱。14 时—15 时 30 分的高层径向速度图(图略)上也印证了该强辐散区的存在。

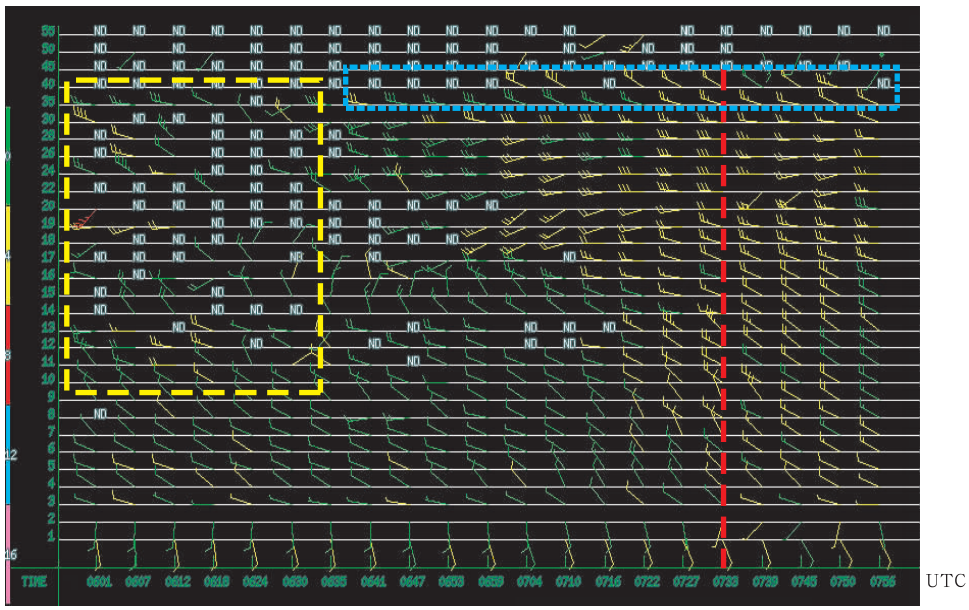


图 12 6 月 5 日 14 时 01 分—15 时 56 分 WSR-88D 的风廓线时间序列
(风标采用一档为 5 m/s,旗帜风为 25 m/s,
风标颜色指示 VAD 反演风的均方根误差,单位:kt)
Fig. 12 Shanghai WSR-88D VWP products during
the period of 14:01 to 14:56 BT 5 June 2009
(height in kft, wind color denoting root mean square, in kt)

6 超级单体结构模型

基于以上分析,构建了该超级单体的一个结构模型空间示意图(图 13),图 13 给出了该超级单体的低层反射率轮廓线、倾斜上升气流、环境水平涡管、中低空中气旋、后侧下沉区、地面冷堆、出流边界等主要特征的空间分布。超级单体低层反射率具有钩状、楔状和"V"形缺口等反射率特征,降雹区位于其运动方向后侧低空强反射率区中,由于强降水/降雹和蒸发冷却作用导致下沉运动,使得超级单体经过路径上形成地面冷堆,前侧形成地面出流边界;主上升气流由超级单体运动方向前侧的低空进入风暴,然后逐渐倾斜上升,同时,该上升气流将低空垂直风切变形成的水平涡管"拉"入超级单体风暴内,随着入流气流由水平转为垂直方向的上升气流,这些来自地面的水平涡管由水平变成倾斜、最终汇入风暴的主上升气流中,形成垂直涡管,加强了风暴中上升气流的旋转程度,形成了速度场上的中气旋特征,成为超级单体结构的主要特征;上升气流继续上升,到达风暴顶附近时形成强烈的辐散气流,这里也是大冰雹增长发展之处。

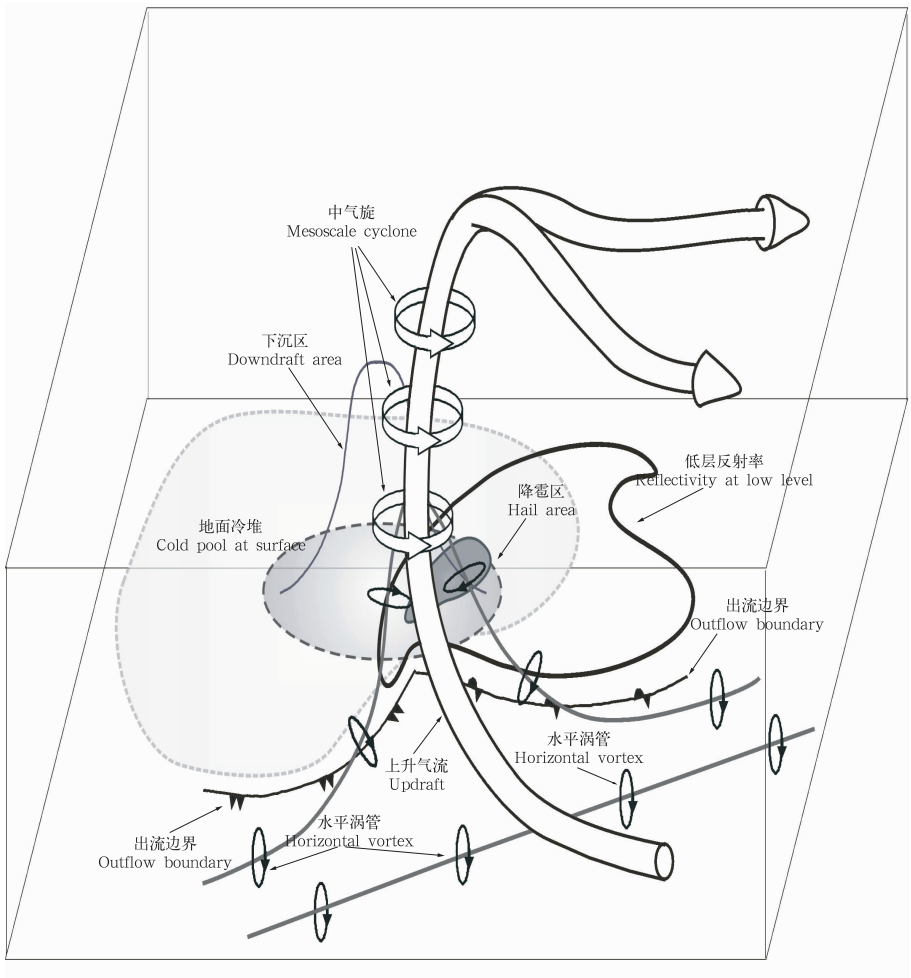


图 13 超级单体空间结构主要特征示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the major structural characteristics of the supercell storm of 5 June 2009

7 超级单体和飑线的相互关系及临近预报思路

2009 年 6 月 5 日飑前超级单体对其后侧的飑线有明显的引领作用,飑线追上超级单体后两者的合并没有促进超级单体的加强,而是由两者组成了新的中尺度对流系统,导致飑线系统的转向。图 14 是该次天气过程中飑前超级单体和飑线主体移动、演变的示意图,两者相互影响和作用,主要有以下一些特点:

(1) 移动引领:超级单体风暴发展、加强于飑线主体弓形回波轴线的前端,在西北气流的引导下,超级单体和飑线都一致向东南方向快速移动,形态上看,两者的关系类似“箭”与“弓”的关系,“弓”前侧顶端的不稳定条件和低空辐合抬升机制激发了“箭”的生成和加强,而“箭”的移动趋势则指引了“弓”移动方向,具有一定的临近预报意义。

(2) 强度变化:超级单体发展、移动后,下沉出流形成了一个中尺度冷池,形成了一个类似低压锋面,并在其路径上形成了一片狭长的“冷区”,地面气温降至 18—20℃(图略),明显低于上海西部和南部地区(30℃左右),该冷区逐渐引导原来位于上海东部的海陆风锋继续西进,使得东部地区的温度下降至 25℃左右,导致“冷区”比周边地区低 5—10℃,当 2 h 后飑线主体的一部分进入该“冷”区后,热力不稳定明显减弱,导致飑线强度明显减弱。另外,飑线东侧部分逐渐移入东海海域后,同样由于下垫面温度的降低,也使得该部分强度减弱。

(3) 合并转向:超级单体风暴减弱后其超级单体特征消失,飑线与之合并形成新的"人"字型中尺度对流系统。在飑线主体的南侧(青浦以南地区),地面温度仍然较高,水汽条件较好,前期的地面辐合线仍然存在,加上飑线前侧垂直风切变的明显加强,激发了飑线前沿新的雷暴单体发展,并且合并入该部分飑线,导致飑线主体的西南部分强烈发展、加强,形成新的"弓"形回波,并逐渐代替了原"弓"形回波,成为飑线新主力。与原"弓"形回波"箭矢"指向东南方向相比,新的"弓"形回波带移动发生明显右偏,"箭矢"指向偏南方向,引导飑线越过杭州湾,影响了浙江地区。

与其他一些研究(Goodman, et al, 1993; Smith, et al, 2001; Carey, et al, 2003; Wolf, 1998)中合并后超级单体加强的个例相比,本次过程中超级单体残余没有再次加强,主要有以下几点原因:(1)超级单体与飑线合并前已经明显减弱,变成一般雷暴,其中尺度涡旋已不存在,飑线追上雷暴单体,其出流无法像 Wolf(1998)描述的那样再次加强前侧的超级单体;(2) 下垫面的作用使得飑线东北部分进入超级单体所经过的冷区和东海后有所减弱,其触发作用也相对较弱;(3) 其他文献中超级单体一般位于飑线系统的中部或者南部,也是低空辐合、水汽条件最好的地方,合并往往容易导致前侧单体的再次发展,而本次超级单体合并处位于飑线系统的东北部分,不利于前侧单体的加强。Wolf(1998)也发现了类似的现象,超级单体与飑线不同部分的合并往往会导致不同的演变结果。所以,2009 年 6 月 5 日飑前超级单体在飑线主体移动和演变的临近预报中有新的重要指示意义。

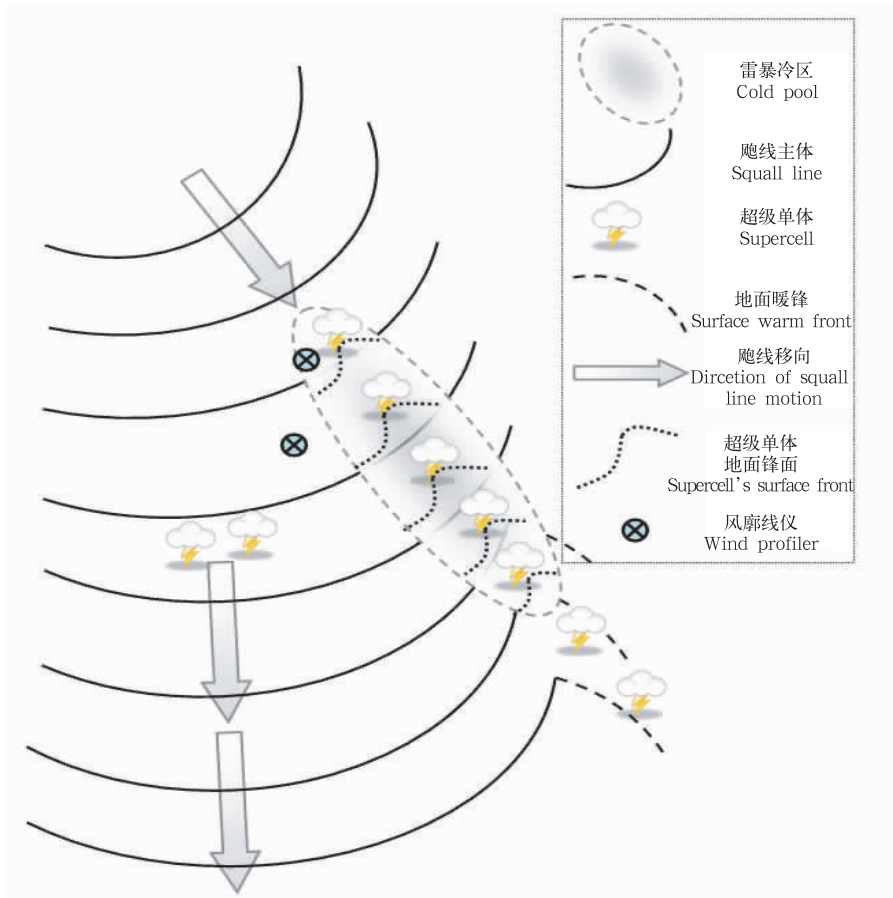


图 14 2009 年 6 月 5 日飑前超级单体与飑线主体移动、演变示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the motion, evolution, and propagation of the 5 June 2009 supercell and the associated squall line, as well as the interaction and relationship between the supercell and the squall line

8 结论与讨论

对2009年6月5日一次发生在飑线前的强降雹超级单体以及该单体与飑线系统的相互关系和作用进行了分析,发现:

(1) 东北冷涡后部的高空强冷平流与低空暖平流形成的强不稳定层结是该次强对流天气发生、发展的主要机制。

(2) 产生大冰雹的雷暴单体发生、发展在飑线前暖区的低层辐合线附近,由"热岛效应"和海陆风锋触发,并呈现出"指"状、楔状、"V"形缺口、弱回波区、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。

(3) 雷暴垂直结构与温度层结对比可以揭示冰雹增长区,对落地冰雹的临近预报具有指导意义。

(4) 强飑线前的单体雷暴与强飑线的发展、移动关系密切,起到类似"箭"与"弓"的引导作用,飑线主体追赶上强单体时发生合并,形成"人"字形中尺度对流系统,超级单体东移南压入海后减弱,而"弓"形回波加强并右偏,导致沿海的强风天气。

用不同位置风廓线仪探测到超级单体附近和较远的环境风场特征,超级单体发生前,其环境低空风切变明显加强,风暴相对螺旋度也强于周边环境;飑线系统到来前,低空风切变明显加强,形成了有利于飑线系统上雷暴新生从而维持中尺度对流系统生命史的环境风场。以上发现也回答了这样一个问题:强对流风暴的环境风场变化的机制是什么?从实况监测来看,飑线系统靠近时,其前侧的环境风场有利于其加强和发展。这次个例分析的意义还在于:在实际预报业务中,不能仅关注探空观测的环境风场,而更应关注风暴与环境风场的相互作用所产生的有利于风暴发展的正反馈机制。

通过对此次强对流天气过程的分析,类似本次过程的东北冷涡天气背景条件下,高空槽的迅速南摆可能导致中高层的流场发生较为迅速的变化,使得强风暴发生、发展的环境条件变得更加有利。因此,对一些天气形势需要加强监测,如增加探空次数、利用非常规监测设备(如风廓线仪)等手段,监测强风暴发生前环境的演变,以探索强风暴发生、发展的关键机制。同时,在关注天气形势背景、对流不稳定条件和水汽条件的同时,应关注低层的辐合区和边界线对雷暴的触发和加强作用;针对飑线前的超级单体雷暴,需要关注雷达捕捉的超级单体特征,对后侧飑线的引领作用,形成冷区对后续飑线演变的影响,超级单体雷暴与飑线合并后形成新的中尺度对流系统的动向和特征等,以提高临近预报预警的准确性和预报时效。

参考文献

陈雷,戴建华. 2007. GPS水汽资料在雷雨预报中的应用. 大气科学研究与应用,(2):38-48

刁秀广,朱君鉴,刘志红. 2009. 三次超级单体风暴雷达产品特征及气流结构差异性分析. 气象学报,67(1):133-146

葛润生. 1966. 1964年北京地区降雹过程的雷达分析. 气象学报,36(2):213-222

胡胜,于华英,胡东明等. 2006. 一次超级单体的多普勒特征和数值模拟特征对比分析. 热带气象学报,22(5):466-472

廖玉芳,俞小鼎,吴林林等. 2007. 强雹暴的雷达三体散射统计与个例分析. 高原气象,26(4):812-820

潘玉洁,赵坤,潘益农. 2008. 一次强飑线内强降水超级单体风暴的单多普勒雷达分析. 气象学报,66(4):621-636

束家鑫,蒋德隆. 1997. 上海气象志. 上海:上海社会科学院出版社,715pp

王昂生,徐乃璋. 1985. 强单体雹暴的研究. 大气科学,9(3):260-266

许爱华,詹丰兴,刘晓辉等. 2006. 强垂直温度梯度条件下强对流天气分析与潜势预报. 气象科技,34(4):376-380

徐文俊. 1985. 论水平旋转气流在超级单体风暴中的动力作用. 气象学报,43(1):106-111

姚建群,戴建华,姚祖庆. 2005. 一次强飑线的成因及维持和加强机制分析. 应用气象学报,16(6):746-754

俞小鼎,姚秀萍,熊廷南等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京:气象出版社,314pp

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

张芳华,张涛,周庆亮等. 2005. 2004年7月12日上海飑线天气过程分析. 气象,31(5):47-52

张培昌,戴铁丕,杜秉玉等. 1988. 雷达气象学. 北京:气象出版社,329pp

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

朱敏华,俞小鼎,夏峰等. 2006. 强烈雹暴三体散射的多普勒天气雷达分析. 应用气象学报,17(2):215-223

Bradberry J S. 1981. Mesoscale structure of an Oklahoma squall line. Mon Wea Rev, 109(5):1110-1117

Browning K A. 1962. Cellular structure of convective storms. Meteor Mag, 91(1085):341-350

Browning K A. 1964. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. J Atmos Sci, 21(6):634-639

Browning K A. 1977. The structure and mechanisms of hailstorms. Hail: A review of hail science and hail suppression. Meteor Monogr, Amer Meteor Soc, 16(38): 1-43

Bunkers M J, Hjelmfelt M R, Smith P L. 2006. An observational examination of long-lived supercells. Part I: Characteristics, evolution, and demise. Wea Forecasting, 21(5): 673-688

Carey L D, Petersen W A, Rutledge S A. 2003. Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998. Mon Wea Rev, 131(8): 1811-1831

Davies-Jones R P. 1984. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. J Atmos Sci, 41(20): 2991-3006

Davies-Jones R P, Burgess D W, Foster M. 1990. Test of helicity as a forecast parameter// Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms. Kananaskis Park, AB, Canada: Amer Meteor Soc, 588-592

Ding J C, Dai J H, Chen Y M, et al. 1996. Helicity as a method for forecasting severe weather events. Adv Atmos Sci, 13(4): 532-538

Donaldson R J Jr. 1970. Vortex signature recognition by a Doppler radar. J Appl Meteor, 9(4): 661-670

Donavon R A, Jungbluth K A. 2007. Evaluation of a technique for radar identification of large hail across the Upper Midwest and Central Plains of the United States. Wea Forecasting, 22(2): 244-254

Fujita T T. 1963. Analytical meso-meteorology: A review, severe local storms. Meteor Monogr, Amer Meteor Soc, 5(27): 77-125

Goodman S J, Knupp K R. 1993. Tornadogenesis via squall line and supercell interaction: The November 15, 1989, Huntsville Alabama, tornado. The tornado, its structure, dynamics, prediction and hazards// Geophysical Monograph Series, 79. Washington, DC: American Geophysical Union, 183-199

Heymsfield G M, Schotz S. 1985. Structure and evolution of a severe squall line over Oklahoma. Mon Wea Rev, 113(9): 1563-1589

Klemp J B, Wilhelmson R B, Ray P S. 1981. Observed and numerically simulated structure of a mature supercell thunderstorm. J Atmos Sci, 38(8): 1558-1580

Klimowski B A, Hjelmfelt M R, Bunkers M J. 2004. Radar observations of the early evolution of bow echoes. Wea Forecasting, 19(4): 727-734

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

Lemon L R. 1998. The radar "three-body scatter spike": An operational large-hail signature. Wea Forecasting, 13(2): 327-340

Miller L J, Tuttle J D, Knight C A. 1988. Airflow and hail growth in a severe northern High Plains supercell. J Atmos Sci, 45(4): 736-762

Moller A R, Doswell C A III, Foster M P, et al. 1994. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. Wea Forecasting, 9(3): 327-347

Nelson S P. 1983. The influence of storm flow structure on hail growth. J Atmos Sci, 40(8): 1965-1983

Rotunno R, Klemp J B. 1982. The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. Mon Wea Rev, 110(2): 136-151

Smith J A, Baeck M L, Zhang Y, et al. 2001. Extreme rainfall and flooding from supercell thunderstorms. J Hydrometeor, 2(5): 469-489

Sun W Y, Ogura Y. 1979. Boundary-layer forcing as a possible trigger to a squall-line formation. J Atmos Sci, 36(2): 235-254

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

Wilson J W, Reum D. 1986a. "The hail spike": Reflectivity and velocity signature// 23d Conf. on Radar Meteorology. Snowmass, CO: Amer Meteor Soc, 62-65

Wilson J W, Schreiber W E. 1986b. Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines. Mon Wea Rev, 114(12): 2516-2536

Wilson J W, Reum D. 1988. The flare echo: Reflectivity and velocity signature. J Atmos Oceanic Technol, 5(2): 197-205

Wolf P L. 1998. WSR-88D radar depiction of supercell-bow echo interaction: unexpected evolution of a large, tornadic, "comma-shaped" supercell over eastern Oklahoma. Wea Forecasting, 13(2): 492-504

Zrnić D S. 1987. Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value. Radio Sci, 22(1): 76-86