

苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征^{*1}

吴芳芳¹ 俞小鼎² 张志刚¹ 周小刚² 韦莹莹¹

WU Fangfang¹ YU Xiaoding² ZHANG Zhigang¹ ZHOU Xiaogang² WEI Yingying¹

1. 江苏省盐城市气象局,盐城,224005

2. 中国气象局气象干部培训学院,北京,100081

1. *Yancheng Weather Office in Jiangsu Province, Yancheng 224005, China*

2. *CMA Training Center, Beijing 100081, China*

2012-04-24 收稿,2012-07-09 改回.

吴芳芳,俞小鼎,张志刚,周小刚,韦莹莹. 2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征. 气象学报,71(2): 209-227
Wu Fangfang, Yu Xiaoding, Zhang Zhigang, Zhou Xiaogang, Wei Yingying. 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(2): 209-227

Abstract The environmental conditions and radar echo features of the 72 supercell-storms in northern Jiangsu Province are investigated, based on the data from 5 Doppler weather radars, 3 radiosonde stations, and surface weather stations during the 2005–2009. The sounding analyses indicate that high precipitation supercells usually occur with very high CAPE, medium deep layer (0–6 km) vertical wind shear, and high value of low level dewpoint, while classic supercells occur with high CAPE, strong deep layer vertical wind shear, and moderate low level dewpoint. Supercells producing large hailstones and/or strong wind gust occur in the environment with lower height of 0°C and 20°C levels, relatively sharp lapse rate of temperature, strong deep layer vertical wind shear, and moderate surface dewpoints. However, the tornadic supercells occur in the environment with strong lower level (0–1 km) vertical wind shear, lower LCL, less lapse rate of temperature, and high surface dewpoints, frequently accompanied by flash heavy rain. The results of Doppler weather radar echoes analysis shows that there are three types of supercell storms in northern Jiangsu: classical supercells, high precipitation supercells, and high precipitation supercell complexes. A classical supercell is usually isolated, with a mesocyclone at rear-right flank (relative to storm moving direction), a hook echo at low level, and a high reflectivity core above a broad bounded weak echo region (BWER). A high precipitation supercell has a front inflow notch with a mesocyclone, a wide bow-shaped echo next to the inflow notch at low level, and a BWER or WER, with the mesocyclone circulations filled with precipitation. high precipitation supercell complexes have a similar structure to the high precipitation, but with longer life time. The storm cell characteristics analysis displays that, in majority of cases, the strongest echoes of the supercells range from 55 dBz to 76 dBz, the vertical integrated liquid (VIL) from 35 kg/m² to 90 kg/m², the rotation speed of mesocyclones is greater than 15 m/s, and the duration over 40 minutes. High probability of tornados can be expected when a mesocyclone possesses very low base and smaller diameter.

Key words Supercell-storms, Northern Jiangsu, Environmental conditions, Radar echo characteristics, Severe convective weather

摘要 利用江苏3个探空站、5部CINRAD/SA型多普勒天气雷达、地面常规与加密自动站等观测资料,分析2005—2009年苏北地区72个超级单体风暴发生的环境条件和多普勒天气雷达回波特征。探空和地面资料分析表明,苏北地区超级单体

* 资助课题:国家自然科学基金(41175043、40575014)、中国气象局强对流天气研究创新专家团队项目、中国气象局预报员专项(CMAYB2013-025)和南京雷达气象与强天气开放实验室研究基金(BJG201212)。

作者简介:吴芳芳,从事短期和短时临近天气预报与雷达资料分析应用工作。E-mail:wuff102@163.com

风暴可以产生在差别相当大的环境条件下:强降水超级单体通常产生在对流有效位能较高和垂直风切变中等的环境下,经典超级单体更多地产生在对流有效位能较高和垂直风切变较强环境下;产生大冰雹和(或)雷暴大风的超级单体,无论是经典还是强降水型超级单体,其环境特征均为 0°C 层、 -20°C 等温线高度较低,850—500 hPa 温差较大,低层露点不高;产生龙卷特别是 F2 级以上强龙卷超级单体环境特征常常表现为低层(0—1 km)垂直风切变大、850—500 hPa 温差相对较小、抬升凝结高度低、低层露点高,这类超级单体在产生龙卷的同时也常常伴有短时强降水甚至极端短时强降水。多普勒天气雷达资料分析表明,苏北地区超级单体具有持久的中气旋、回波墙和有界弱回波区或弱回波区结构,可以产生大冰雹、龙卷、短时强降水和下击暴流等强对流天气;超级单体的类型主要有经典超级单体、强降水超级单体以及强降水超级单体组成的复合风暴。经典超级单体一般为孤立风暴,中气旋多数情况下位于其右后侧(相对于风暴移动方向),低层有明显的钩状回波和入流缺口,入流缺口之上存在宽大的有界弱回波区,其上有强反射率因子组成的风暴核,最强的反射率因子可达 75 dBz;强降水超级单体前侧有入流缺口和旁边粗胖的凸起部分与中气旋相伴,与经典超级单体的钩状回波在形态上区别明显,同样存在有界弱回波区或弱回波区,中气旋环流中有明显的降水回波;强降水超级单体组成的复合风暴内中气旋一般位于其前侧,主要结构与强降水超级单体相似,生命史较长。超级单体结构属性分析表明,绝大多数情况下,苏北地区超级单体风暴的最大反射率因子为 55—76 dBz,基于单体的垂直累积液态水含量(VIL)为 35—90 kg/m^2 ,垂直累积液态水含量超过 60 kg/m^2 时风暴有可能产生大冰雹,特别是在 4—6 月,冰雹直径随着垂直累积液态水含量的增大而增大,因此,垂直累积液态水含量季节性高值可以用来判别产生大冰雹的超级单体;绝大多数情况下,中气旋旋转速度大于 15 m/s,直径在 3—10 km,持续时间超过 40 min;中气旋的底越低,直径越小,产生龙卷的可能性越大。

关键词 超级单体, 苏北地区, 环境条件, 雷达回波特征, 强对流天气

中图法分类号 P445

1 引言

江苏省位于(30° — 35°N , 116° — 122°E)中国大陆东部(图 1),苏北地区东邻黄海,地处长江、淮河下游,江河湖泊水网交织,地势低洼平坦,具有季风气候特征,介于亚热带和暖温带的气候过渡地带,春夏季节不仅受西风带、副热带天气系统的影响,还经常受低纬度东风带天气系统的影响,特殊的地理环境和复杂多变的气候特征导致气象灾害频繁,其中,由对流风暴产生的强对流天气,常常造成严重的生命财产损失。

冰雹、龙卷、雷暴大风和短时强降水等是苏北暖季主要的灾害性天气,一些极端强对流灾害与中国其他强对流多发地区相比毫不逊色。据统计(江苏省气象局,1988),江苏年平均强对流(冰雹、龙卷、雷暴大风)天气过程日为 25.6 d,具有年际变化小,发生期长的气候特征。1974 年 6 月 2 日下午,盐城 5 个县出现冰雹天气,积雹最深达 20 cm,目击者称最大直径 17 cm 并伴有 8—11 级大风^①;苏北地区为中国龙卷风高发带,1966 年 3 月 3 日 00 时(北京时间,下同)前后,盐城遭受极为罕见的 F4 级(Fujita, 1981)强烈龙卷风袭击,死亡 87 人,伤 1246 人,毁坏房屋 3 万多间,其中,倒塌 1 万多间。苏北地区尤其盐城附近为极端强对流灾害性天气多发区(丁一汇,

2008)。

对流风暴中最为猛烈的一类是超级单体风暴,俞小鼎等(2005,2006a,2012)指出,极端强对流天气往往由超级单体风暴所产生。随着 20 世纪 70 年代多普勒天气雷达在研究中的广泛应用,超级单体风暴的旋转特征被充分揭示,Browning(1978)指出,超级单体最重要的特征是其旋转特征;Doswell 等(1993)将超级单体风暴重新定义为具有深厚持久中气旋的对流风暴,获得雷达气象学界一致认可,成为当今超级单体风暴的标准定义。在多普勒天气雷达观测和 Browning(1964)提出的超级单体风暴概念模型做适当修改的基础上,Lemon 等(1979)提出了一个修正的超级单体概念模型,明确了前侧和后侧下沉气流及其相应的阵风锋、风暴入流区和上升气流区、中气旋相对于低层高反射率因子区的位置,并指出中气旋在初生阶段是一个旋转的上升气流,成熟阶段的中气旋是由旋转的上升气流与下沉气流共同构成的。在观测的基础上,依据降水结构特征,Moller 等(1990,1994)又将超级单体风暴划分为弱降水超级单体(Low Precipitation Supercell, LP)、经典超级单体(Classic Supercell, CL)和强降水超级单体(High Precipitation Supercell, HP)。弱降水超级单体发生频率很低,几乎不产生降水,主要灾害是大冰雹;经典超级单体低层入流常常位于风暴

^①盐城市气象局. 2008. 盐城气象 50 年第 90 页.

移动方向的右后侧,具有明显的钩状回波,积雨云底部降水不明显,主要灾害是强冰雹、龙卷和地面大风,偶尔也会产生暴雨;强降水超级单体低层入流位于风暴移动方向前侧、左前侧或右前侧,中气旋全部或大部分为降水所包裹,积雨云底部有明显降水,主要灾害是强冰雹、地面大风、龙卷和暴雨,这3类超级单体有时相互转化,且每种超级单体回波结构均呈多种形态。

对于超级单体风暴,中国在建立新一代天气雷达业务网之前也进行过零散的研究,王昂生等(1985)利用713型天气雷达研究了发生在山西的超级单体个例。随着探测技术的发展,天气雷达、加密自动站等高时、空分辨率观测网为捕捉中小尺度系统活动提供了可能,尤其是具有多普勒测速功能的新一代天气雷达的布网,强对流风暴的分析研究逐步拓宽和深入,俞小鼎等(2006b)、廖晓农等(2008a)、吴芳芳等(2009)、庄薇等(2010)分析了多单体和飏线,刘治国等(2008)分析了雹云单体最大垂直累积液态水含量的演变特征;郑媛媛等(2004)分析了经典超级单体,吴芳芳等(2010)分析了强降水超级单体,廖玉芳等(2007a)分析了经典超级单体和湖南超级单体风暴特征,刁秀广等(2009)分析了3次超级单体风暴雷达产品特征及气流结构差异,俞小鼎等(2006c,2008a)研究了导致龙卷强降水超级单体风暴的特征。最近一些分析注意到嵌入在中尺度对流系统内的超级单体,潘玉洁等(2008)分析了飏线内强降水超级单体,刘娟等(2009)分析了飏线回波带上超级单体龙卷。郑媛媛等(2004)和俞小鼎等(2008a)首次细致描述并分析研究了中国经典和强降水超级单体风暴的雷达回波结构及演变、降水分布特征、环境背景条件等,为识别对流风暴超级单体的不同类型奠定了基础。

观测和数值模拟研究均表明,对流风暴的类型(形态和组织结构)及风暴强度很大程度上取决于大气静力稳定度、水汽和风的垂直切变这3个关键因子。将静力不稳定和水汽条件结合起来可以构成各种对流参数,其中,物理含义最清晰的对流参数是对流有效位能(CAPE),其是雷暴触发后对流系统内可能达到的最大上升气流强度的一个重要指标(刘建文等,2005);风向、风速随高度的变化,即风的垂直切变有利于风暴发展、加强和维持。常用的两个表达风垂直切变大小的参数是0—6 km和0—1 km风

矢量之差的绝对值,分别代表深层风垂直切变和低层风垂直切变。Johns等(1992)、俞小鼎等(2008b)研究指出,对于中等以上大小,当0—6 km风垂直切变超过15 m/s时才有利于超级单体的出现。超级单体风暴产生的强对流天气类型与环境温度递减率和低层露点密切相关,秦丽等(2006)指出,北京地区雷暴大风发生前中低层环境温度较低、温度直减率较大。850与500 hPa温度差可以在很大程度上表示对流层中低层环境温度垂直递减率,也就是条件静力不稳定度的大小,其差值越大,表示气层越不稳定,有利于对流天气的产生;低层水汽是降水形成的基础,并且,水汽凝结时释放的潜热也是供给深对流发展的能量来源,地面露点或比湿可以代表低层水汽含量。大冰雹和强龙卷常常与超级单体紧密相连,直径5 cm以上的冰雹和F2级以上灾害性龙卷绝大多数是由超级单体产生(Johns, et al, 1992)。苏北地区地理位置和气候特殊,是灾害性龙卷、大冰雹等强对流天气频发区,特殊的环境导致苏北超级单体较多,本文将从环境条件和雷达回波特征两个方面描述和讨论苏北地区超级单体风暴。

2 超级单体环境条件与强对流天气类型

2.1 资料来源及说明

通过多普勒天气雷达资料普查可知,2005—2009年发生在苏北地区的超级单体有72个,如以07时为日界,以中气旋首次形成时计,共产生在35 d中,即发生35次超级单体风暴事件,每次出现1—5个超级单体。苏北地区新一代多普勒天气雷达和探空站分布如图1所示,雷达资料来自图1所示的多部雷达,计算环境参数使用的探空资料按照时间和地点与风暴生成演变时间地点最接近原则进行选择。探空时间为08和20时,由于对流活动多发生在午后,从早上探空至对流系统发生这段时间,大气层结发生了明显变化,地面气温迅速升高导致对流有效位能呈现快速上升趋势。廖晓农等(2008b)认为,利用微波辐射计观测资料获得的雷暴发生前对流有效位能比08时探空所得对流有效位能更加合理。参考该方法,如果超级单体生成时间在02—14时,一般取当日08时探空资料,根据11或14时地面温度对08时探空进行修正,其对流有效位能用于分析午后发生雷暴可能性具有更好的指示性;否则选取当日20时探空资料。风垂直切变探空时间和地点选择距离风暴最近的探空站点,如超级单体发

生在 02—14 时,一般选择当日 08 时探空资料,否则取当日 20 时探空。0—6 km 风矢量差用 500 hPa 与地面风矢量差代替,0—1 km 风矢量差以 850 和 925 hPa 与地面风矢量差内插代替,分别代表深层、低层风垂直切变;以 850—500 hPa 温差 ΔT 表示对流层中低层递减率,以雷暴产生前探空站地面露点代表低层湿度。此外,如果选定的探空站点资料缺失或 20 时观测前没有对流风暴生成发展,则选择下游没有对流产生的探空资料替代。超级单体结构属性来源于风暴单体识别与跟踪算法(SCIT)和中气旋探测算法(MDA)(俞小鼎等,2006a),生成时间为风暴单体开始识别编号时间;生命史是风暴开始编号至结束编号;中气旋算法识别的中气旋有 3 类:(1)非相关切变(UN),为仅在一个仰角上能探测到环流;(2)三维相关切变(3D),为 2 个以上仰角存在环流,但对

称特征少于 2 个;(3)中气旋(M),为至少二个仰角存在环流且是对称的;只有第 3 类才是真正意义上的中气旋。超级单体形成时间以中气旋(包括三维相关切变 3D)首次生成时刻为标准,维持时间为中气旋首次生成时刻至最后出现时刻;有界弱回波区(BWER)、超级单体旺盛阶段中气旋最大旋转速度及直径(中气旋产品径向和切向的平均)、超级单体类型及移向移速由人工判读和计算;超级单体最强时刻最大反射率因子及其高度、基于单体的最大垂直累积液态水含量(Vertically Integrated Liquid, VIL),最高质心高度峰值来源于 SCIT 算法输出的风暴结构属性。强对流天气事件来源于地面气象报表、江苏省气候影响评价以及相关的灾情资料,实况灾情为不完全统计。

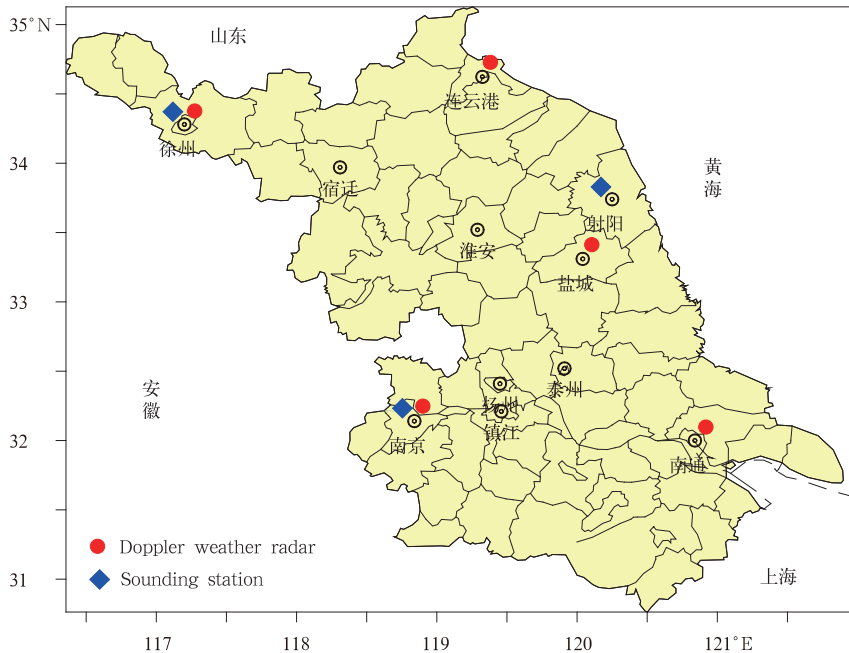


图 1 江苏雷达和探空站分布

Fig. 1 Positional illustration of Doppler weather radars and sounding stations in Jiangsu Province

2.2 超级单体的环境背景特征

环境大气中静力稳定度、水汽和风垂直切变是分析超级单体等对流风暴的重要特征量,常用的静力稳定度参数有高、低空温差或对流层温度直减率,而将静力稳定度与水汽条件结合起来的参数有对流有效位能、抬升指数、沙氏指数、K 指数、总指数等,其中,以对流有效位能的物理意义最清晰;表征风垂直切变大小常用的两个参数是深层垂直风切变(0—6 km)和低层垂直风切变(0—1 km)。表 1 显示苏北

超级单体产生在 4—10 月,地面露点为 12—28°C,环境对流有效位能最高为 5054 J/kg,最低为 161 J/kg,对流有效位能超过 1000 J/kg 的占总数的 80%,中低层 850—500 hPa 温差 ΔT 为 21—35°C,其中, $\Delta T \geq 25^\circ\text{C}$ 占总数的 80%,0—6 km 风矢量差在 8—37 m/s,其中,差值 ≥ 12 m/s 占总数的 83%。通常认为暖季中高纬度地区 0—6 km 风矢量差超过 12 m/s 为中等以上风垂直切变,1000 J/kg 以上为中等以上对流有效位能(Johns, et al, 1992),因此,苏北超

级单体的产生通常需要中等以上的对流有效位能和深层风垂直切变。为了表示超级单体风暴事件与对流有效位能和 0—6 km 深层风垂直切变的关系,首先针对 35 次超级单体事件(图 2 中红色圆圈)所对应的对流有效位能和 0—6 km 风垂直切变,绘制点聚分布(图 2);同时为了表示超级单体风暴产生的天气类型与中下对流层大气温度直减率和低层水汽条件的关系,对于 35 次超级单体事件(图 2 中的三角)同时给出了 850 和 500 hPa 温差及地面露点温

度,并且,用不同的三角标出每次超级单体风暴事件的主要天气现象类别。将 0—6 km 风矢量差 8—16 m/s 定义为中—弱切变,17—24 m/s 为中—强切变,超过 24 m/s 为强切变;而对流有效位能值 < 1000 J/kg 为低能,超过 1000 J/kg 为中高能;红虚线将红圆圈分为 4 个区域,位于左下角低能-中弱切变区有 3 例(红细线圆圈,占总数的 9%);左侧上部中高能-中弱切变有 13 例(红+圆圈,占总数的 37%);上部中右侧为中高能-中高切变 15 例(红实

表 1 2005—2009 年苏北超级单体环境特征及当日强对流天气类型
Table 1 The environmental conditions and the severe weather disasters caused by the supercells in northern Jiangsu Province from 2005 to 2009

雷达站	日期	超级单体编号	探空站	CAPE (J/kg)	S ₆ /S ₁ (m/s)	ΔT/T _d (°C)	LFC/LCL (hPa)	-20°C/0°C 高度 (km)	强对流天气类型
南京、盐城	2005 年 4 月 20 日	5A(1-3)	南京、射阳	582	37/19	28/12	772/884	6.5/3.3	大冰雹、F1-2 龙卷
连云港、盐城	2005 年 4 月 24 日	5B1	徐州、射阳	1505	21/8	33/15	786/922	5.7/3.2	大冰雹
连云港、盐城、南京	2005 年 4 月 25 日	5C(1-4)	南京、射阳	1795	33/16	31/12	713/969	6.2/3.2	雷雨大风、大冰雹
盐城	2005 年 6 月 1 日	5D1	射阳	1232	18/8	30/19	735/837	6.9/4.1	冰雹、雷雨大风
徐州、盐城、南京	2005 年 6 月 14 日	5E(1-5)	徐州	2587	24/6	31/20	726/860	7.3/4.4	大冰雹、雷雨大风
连云港、盐城、徐州	2005 年 6 月 18 日	5F(1-3)	射阳	1510	12/2	30/23	751/971	7.6/4.4	大冰雹、雷雨大风等
徐州	2005 年 6 月 30 日	5G1	徐州	4408	17/13	24/28	867/943	8.3/5.3	强降水、雷雨大风
盐城	2005 年 7 月 15 日	5H1	射阳	2540	8/7	27/27	974/982	8.3/4.8	强降水、雷雨大风
盐城、南京	2005 年 7 月 30 日	5I(1-2)	南京	4593	17/4	26/26	867/875	8.4/5.0	强降水、雷雨大风
盐城	2005 年 7 月 31 日	5J1	南京	2035	17/12	26/25	792/906	8.8/5.2	强降水、雷雨大风
盐城	2005 年 8 月 10 日	5K(1-2)	南京	4278	16/11	28/26	789/975	8.4/5.2	大冰雹、强降水等
盐城	2005 年 8 月 29 日	5L(1-4)	南京、射阳	2563	18/9	21/24	900/992	8.6/5.0	F1 以上龙卷强降水
连云港、盐城	2006 年 4 月 28 日	6A(1-2)	射阳	821	25/13	32/15	761/961	5.6/2.9	冰雹、雷雨大风
南京	2006 年 6 月 8 日	6B1	徐州、南京	1306	18/4	26/18	725/925	7.3/4.0	冰雹、雷雨大风
连云港、盐城	2006 年 6 月 17 日	6C1	徐州、射阳	1417	20/8	29/19	739/815	7.7/4.8	大冰雹
连云港、盐城	2006 年 6 月 27 日	6D(1-2)	射阳	3116	15/5	28/25	782/962	7.6/4.5	大冰雹、强降水等
连云港、盐城	2006 年 7 月 3 日	6E(1-4)	南京、徐州	5054	13/9	27/26	756/972	8.7/5.3	F1-2 龙卷强降水等
盐城	2006 年 8 月 6 日	6F(1-2)	射阳	4185	9/6	24/26	1008/979	8.2/4.8	F2 龙卷强降水
连云港、盐城、南京	2007 年 5 月 5 日	7A(1-3)	南京	1415	10/7	34/16	722/854	6.1/3.6	大冰雹、雷雨大风
盐城、南通	2007 年 6 月 28 日	7B1	射阳	1220	18/8	26/25	1001/972	8.7/4.9	强降水等
南京、盐城	2007 年 7 月 3 日	7C(1-2)	南京	2968	22/13	25/26	838/988	8.8/5.1	F1-3 龙卷强降水
连云港	2007 年 7 月 11 日	7D1	徐州、射阳	3291	16/3	25/24	705/945	8.2/4.7	冰雹、强降水等
盐城、南通	2007 年 7 月 25 日	7E(1-2)	射阳	1734	17/7	30/27	1007/978	8.3/4.9	冰雹、雷雨大风
盐城	2008 年 5 月 12 日	8A1	射阳	762	37/5	32/12	778/968	4.9/2.4	冰雹、雷雨大风
南京、盐城、南通	2008 年 6 月 3 日	8B(1-4)	徐州、南京	838	27/11	25/19	943/973	6.6/3.2	冰雹、雷雨大风
盐城、连云港	2008 年 7 月 4 日	8C(1-3)	射阳	3400	17/14	26/26	1004/961	8.3/4.9	F1 龙卷、强降水等
盐城	2008 年 7 月 22 日	8D(1-2)	南京、射阳	3121	12/9	25/25	991/1003	8.8/5.1	F1 龙卷、强降水等
盐城	2008 年 7 月 30 日	8E1	射阳	2684	8/16	21/27	991/1005	8.8/5.2	F1 龙卷、强降水等
盐城	2008 年 8 月 17 日	8F(1-2)	射阳	1333	16/13	23/25	946/988	8.8/5.1	F2 龙卷、强降水等
南京、盐城	2008 年 9 月 19 日	8G1	南京	2453	16/5	24/25	865/951	8.2/5.0	强降水、雷雨大风
盐城	2008 年 10 月 21 日	8H1	射阳	161	10/5	22/20	862/1012	5.8/3.8	强降水、雷雨大风
徐州	2009 年 6 月 3 日	9A1	徐州	741	9/6	34/15	611/799	6.6/3.9	冰雹、雷雨大风等
南京、徐州、连云港	2009 年 6 月 5 日	9B(1-4)	徐州	3210	27/10	35/16	682/898	6.3/3.8	大冰雹、雷雨大风
徐州、南通、南京	2009 年 6 月 14 日	9C(1-2)	南京	1803	12/18	30/21	697/949	5.8/4.1	大冰雹、雷雨大风
徐州	2009 年 6 月 30 日	9D1	徐州	207	12/7	27/21	649/825	8.2/4.5	冰雹、雷雨大风等

注:CAPE:对流有效位能;S₆/S₁:0—6 km/0—1 km 风矢量差;ΔT/T_d:850 和 500 hPa 温差/地面露点温度;LFC/LCL:自由对流高度/抬升凝结高度

心圆圈,占总数的 43%);右下角为低能-中高切变 4 例(红粗线圆圈,占总数的 11%)。除了左下角低能-中弱切变 3 个例外,其他点代表的超级单体事件表明,对流有效位能和风的垂直切变是两个影响决定超级单体风暴是否会产生的重要因子,超级单体不仅能在典型的对流有效位能和深层风垂直切变都较大的环境中产生,而且,在低能-高切变和高能-中弱切变条件下也能产生。廖玉芳等(2007b)分析的 2004 年 4 月 29 日产生直径 10 cm 冰雹的常德经典超级单体环境条件对流有效位能为 2108 J/kg,0—5.8 km 高度风矢量差为 19 m/s,与本文高能-中高切变类一致;俞小鼎等(2008a)研究的 2005 年 7 月 30 日安徽一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体,环境条件对流有效位能为 1200 J/kg,0—6 km 风矢量差为 16 m/s,吴芳芳等(2010)分析的 2006 年 8 月 6 日盐城一次强降水超级单体对流有效位能为 3076 J/kg,0—6 km 风矢量差为 9 m/s,这 2 例强降水超级单体产生的环境条件与本文高能-中弱切变类一致。图 2 左下角低能-中弱切变区 3 个风暴的环境,一个产生于沿海海面,其局地露点等(没有观测)可能比探空地点大;一个 0—7 km 风矢量差为 22 m/s;一个 ΔT 高达 34°C,温度直减率大。总之,都有可能是探空地点的条件与实际雷暴发生地局地环境差异较大所导致的探空代表性差的缘故。

2.3 超级单体风暴产生的强对流天气类型

表 1 中超级单体产生一种或数种强对流天气类型,观测记录龙卷最强达 F3,冰雹最大直径超过 50 mm(有目击者称超过 12 cm),雨强最大 137 mm/h,下击暴流瞬时极大风速 38.5 m/s,表明苏北超级单体能产生各种极端灾害性天气。图 2 用不同三角代表不同强烈天气,表示大冰雹(直径 ≥ 2 cm)的正三角有 11 个,占总数的 31%,其中,蓝实心、蓝空心、小绿实心、小紫空心分别代表纯粹大冰雹、大冰雹和 F2 级龙卷共存、大冰雹和极端短时强降水共存、大冰雹和极端短时强降水、雷暴大风共存;表示雨强 > 50 mm/h 的极端短时强降水为绿色、紫色三角 15 个,占总数的 43%,其中,绿色实心倒三角代表纯粹极端短时强降水,绿色半空心、小半空心、空心倒三角分别代表极端短时强降水与 F1、F2、F3 级龙卷并存;棕色三角表示瞬时风速 ≥ 30 m/s 极端雷暴大风个例 6 个,占总数的 17%,其中,横三角、半空心正三角分别代表纯粹极端雷暴大

风、大冰雹和极端雷暴大风并存。蓝点划线将代表不同强烈天气及其组合的各类三角分为 2 个区域:左侧极端短时强降水(倒绿三角)12 个,对应对流有效位能均在 1300 J/kg 以上,其中,2000 J/kg 以上占总数的 92%;0—6 km 风矢量差值 8—22 m/s,17 m/s 及以下占总数的 83%;850 和 500 hPa 温差 ΔT 中等偏小(21—27°C),其中, $\Delta T \leq 25^\circ\text{C}$ 占总数的 67%,但地面露点 T_d 为 24—28°C,其中, $T_d \geq 25^\circ\text{C}$ 占总数的 92%,相应自由对流高度(LFC)和抬升凝结高度(LCL)较低,对流抑制能量(CIN)较小,抬升凝结高度均低于 906 hPa,自由对流高度均低于 756 hPa,其中,在 838 hPa 及以下占总数的 83%,0°C 层高度 4.8—5.3 km,其中,75% 的个例在 5 km 高度及以上,-20°C 等温线高度 8.2—8.8 km,暖云层深厚,降水效率高(Davis, 2001),有利于短时强降水和暴雨的产生。强降水超级单体风暴的环境背景通常是在低层具有丰富水汽、较低抬升凝结高度和弱的对流前逆温层顶盖,表明以伴有短时强降水为主要特点的强降水超级单体环境与俞小鼎等(2006a, 2006c, 2008a)总结的强降水超级单体发生的环境背景类似。

图 2 位于蓝点划线右侧代表有大冰雹的正三角 11 个,其对应的 850 和 500 hPa 温差 ΔT 为 28—35°C,其中, $\Delta T \geq 30^\circ\text{C}$ 占总数的 64%;地面露点 T_d 中等偏低,在 21°C 及以下占总数的 73%;0°C 层高度在 4.5 km 及以下占总数的 82%;抬升凝结高度和自由对流高度均分别位于 975 和 789 hPa 以上高度;-20°C 等温线高度在 7.7 km 及以下占总数的 91%,其中,60% 在 6.5 km 及以下;对流有效位能在 1400 J/kg 以上的占总数的 91%;73% 的大冰雹例子对应的 0—6 km 风矢量差值 ≥ 15 m/s,其中,在 20 m/s 及以上的占 75%,表明产生大冰雹的超级单体环境特征主要特点为 0°C 层、-20°C 等温线高度较低,对流有效位能高,风垂直切变较大,850 和 500 hPa 温度递减率大,低层露点低,自由对流高度和抬升凝结高度较高、以及暖云层厚度(抬升凝结高度到 0°C 层之间距离)比较薄。图 2 黑双点划线右侧代表有极端雷雨大风事件的棕色和紫色三角对应的 850—500 hPa 温差 ΔT 很大(均在 30°C 及以上),相应温度直减率大,同时对应的地面露点均在 21°C 及以下,自由对流高度均在 761 hPa 以上高度,67% 的极端雷暴大风例子的 0—6 km 风矢量差 ≥ 24 m/s,

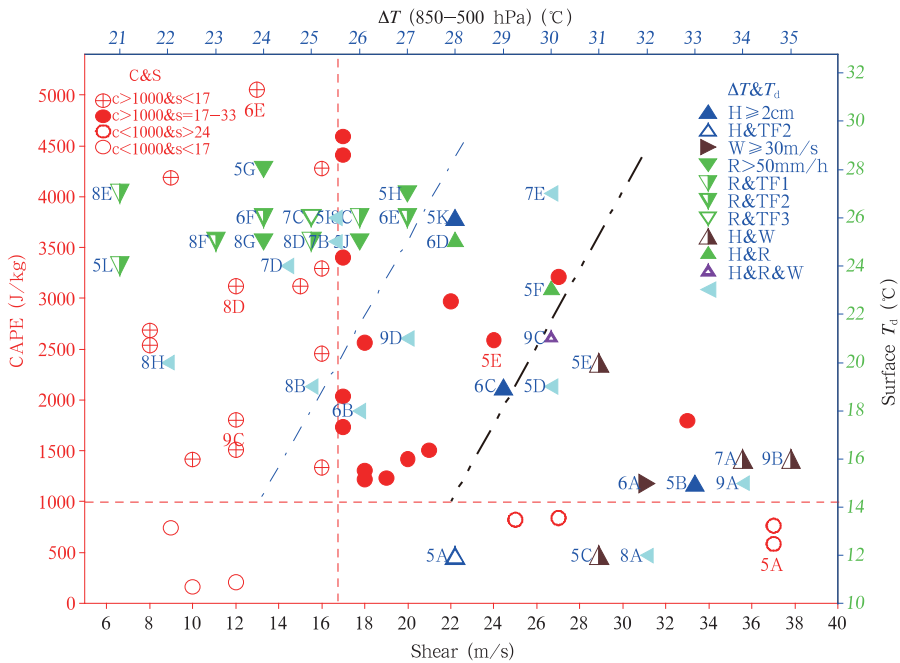


图2 苏北超级单体环境背景对流有效位能与0—6 km风矢量差散点分布

(C&S,红圆圈,红虚线将画面中红圆圈分为4个区域,红+心(左上)、红实心(上中右)、红细线(下左)、红粗线(下右)分别代表C>1000 J/kg与S<17 m/s(中高能-中弱切)、C>1000 J/kg与S在17—33 m/s(中高能-中高切)、C<1000 J/kg与S<17 m/s(低能-中弱切)、C<1000 J/kg与S>24 m/s(低能-高切)及对应超级单体环境背景的850—500 hPa温差(ΔT)和地面露点(T_d)散点分布(ΔT & T_d,三角,蓝字编号,蓝点线将画面中各个三角(正三角表示直径≥2 cm大冰雹,其中,蓝实心、蓝空心、绿小实心、紫小空心分别代表纯粹大冰雹、大冰雹和F2级龙卷、大冰雹和极端短时强降水、大冰雹和极端短时强降水以及极端雷暴大风共存;绿色、紫色三角表示小时雨量>50 mm/h极端短时强降水,其中,绿色实心倒三角代表纯粹极端短时强降水,绿色半空心、小半空心、空心倒三角分别代表极端短时强降水与F1、F2、F3级龙卷相伴;棕色三角表示瞬时风速≥30 m/s极端雷暴大风,其中,横三角、半空心正三角分别代表纯粹极端雷暴大风、大冰雹和极端雷暴大风并存,浅蓝色横三角代表没有观测任何极端对流天气;分为2个区域:左侧高能高露点区对应极端短时强降水,右侧中高切-中低露点区对应大冰雹,其中黑双点线右侧高温差区对应极端雷暴大风)

Fig. 2 Scattergraph for the relationship of the CAPE with the 0—6 km vertical wind shear (red circles)

(each red dot represents a supercell event, and the red dashed lines divide the whole area into 4 parts: high wind shear but low CAPE in the bottom right part, middle to high wind shear and high CAPE in the central part, high CAPE but middle to weak wind shear in the upper left part, and low CAPE and middle to weak wind shear in the bottom left parts) and the scatter diagram for the relationship of the temperature difference between 850—500 hPa and surface dewpoint temperatures (triangles with blue numbers) in northern Jiangsu Province (a blue dotted line re-divides the whole area into 2 parts; flash flooding (green inverted triangles for the precipitation rate >50 mm/h) with high energy and high humidity on the left, large hailstones (upright triangles for ≥2 cm) with high wind shear and middle to weak humidity on right. Downburst winds (brown, purple triangles for >30 m/s) with high temperance difference are on the right side of the black dotted line)

表明产生极端雷雨大风的超级单体环境特征为温度直减率大、垂直风切变大、低层湿度(露点)低和自由对流高度高。

图2中代表有龙卷事件的绿色空心倒三角和蓝色空心正三角9个,其中,89%的龙卷事件对应的对流有效位能>1300 J/kg,78%的龙卷事件对应的对流有效位能>2500 J/kg;所有龙卷事件对应的低层0—1 km风矢量差为6—19 m/s,在9 m/s及以上占总数的89%,其中在12 m/s及以上占63%。俞

小鼎等(2008a)研究指出,低层0—1 km风矢量差12 m/s是一个相对较大的低层垂直风切变;另外,抬升凝结高度在960 hPa以下高度对应龙卷事件总数的89%。Evans等(2002)、Brooks等(2002)研究表明,有利于F2级以上强龙卷产生的有利环境条件是强烈的低层(0—1 km)风垂直切变和低的抬升凝结高度。统计表明苏北产生龙卷特别是F2级以上强龙卷的超级单体通常对应高对流有效位能、低层风垂直切变大、抬升凝结高度低,与俞小鼎等

(2006c, 2008a)研究的两次安徽龙卷过程以及吴芳芳等(2010)分析的苏北龙卷超级单体环境特征一致。图2中9个龙卷事件有8个伴随极端短时强降水(蓝点划线左侧空心倒三角),抬升凝结高度低(意味着低层相对湿度大)、低层风垂直切变大(常常意味着存在低空急流)这两个对龙卷发生有利的条件也同时对短时强降水产生有利,这可能是龙卷和短时强降水常常相伴发生的原因之一。

从图2可以清楚看出,位于蓝点划线左上侧极端短时强降水区,同时对应高的地面露点 T_d 、中弱的850和500 hPa温差 ΔT 、高的对流有效位能和中等风垂直切变,与Moller等(1990, 1994)研究强降水超级单体发生的环境特征一致,代表性风暴有6E1(对流有效位能最高)、8D1(雨量最大);蓝点划线左下侧高对流有效位能、中等 T_d 区代表性风暴有9C2(大冰雹、极端短时强降水、雷暴大风同时出现);蓝点划线右侧 ΔT 大、 T_d 中等偏低,此区域对应大冰雹区,中部高对流有效位能-中高切变区代表性风暴有5E1(典型双高),下部低对流有效位能-高切变区代表性风暴有5A1(风矢量差值最大)。俞小鼎等(2006a)总结经典超级单体的环境经常包括丰富的低层水汽、大的垂直不稳定度和对流前的逆温顶盖,此区域环境特征有利于经典超级单体的产生。苏北产生极端短时强降水与产生大冰雹和/或雷暴大风的超级单体风暴环境特征有明显的区别:产生大冰雹和/或雷暴大风的超级单体环境中温度直减率较大,尤其是产生极端雷暴大风的超级单体对应的环境温度直减率更大;而产生极端短时强降水的超级单体发生前温度直减率较小;大冰雹、雷暴大风发生前低层环境露点中等偏低,而极端短时强降水发生前大气低层的露点较高;大冰雹、雷暴大风产生在较强的风垂直切变环境中;而极端短时强降水产生的环境风垂直切变相对较弱。上述分析表明,利用对流有效位能、0—6 km风矢量差、850和500 hPa温差、低层露点等参量可以判断超级单体风暴产生的可能性及其可能产生强对流天气的类型。

3 超级单体风暴的多普勒天气雷达回波特征分析

3.1 超级单体风暴生命史、回波形态与强对流天气类型

如前所述,2005—2009年江苏5部雷达在苏北

地区共探测到72个超级单体,其中,96%生命史超过1 h,与一般对流单体生命史(20—40 min)相比,具有更长的生命史。生成于11—20时的超级单体占总数的81%,此时段地面温度通常达到最高。梁爱民等(2006)指出,此时段对流有效位能达到最大,而对流抑制能量最小。超级单体生成除受对流有效位能影响外,还受风垂直切变和触发机制等综合影响,可以在一天里任何时间段产生,只是通常在11—20时这个时段对流有效位能达到最大、对流抑制能量最小,因此,生成频率最高。根据降水分布特征,并参考郑媛媛等(2004)、俞小鼎等(2008a)分析研究经典和强降水超级单体以及潘玉洁等(2008)分析飏线内强降水超级单体的雷达回波结构及演变,可以认为,苏北超级单体旺盛阶段主要类型有经典超级单体、强降水超级单体以及由强降水超级单体组成的复合风暴(超级单体嵌入在飏线、弓形回波或多单体雷暴群中),其中,64%的超级单体为相对孤立形态,36%为嵌入在尺度较大的风暴群中,共同特征都具有持久的中气旋,弱回波区(WER)/有界弱回波区(BWER)和回波墙结构,其中具有有界弱回波区的占总数的89%,风暴顶位于有界弱回波区/弱回波区之上。经典超级单体通常为孤立风暴,中气旋多数情况下位于右后侧(相对于风暴移动方向),低层有明显的钩状回波,具有宽大的有界弱回波区,之上有强反射率因子组成的风暴核;强降水超级单体通常为孤立雷暴或小雷暴团,前侧有入流缺口与中气旋相伴,其后低层有粗胖的凸起部分,与经典超级单体的钩状回波在形态上区别明显,中气旋环流中有明显的降水;强降水超级单体复合风暴中气旋一般位于其前侧,主要结构与强降水超级单体相似。经典超级单体多产生大冰雹、龙卷和地面大风,偶尔伴有强降水,环境特征通常为高对流有效位能-高风垂直切变、850和500 hPa温差大、低层露点中到弱;强降水超级单体多产生强降水以及冰雹、龙卷和地面大风,环境特征通常为高对流有效位能-中到弱切变、低层露点较高、850—500 hPa温差中到弱;强降水超级单体复合风暴有时包含多支上升气流,多个有界弱回波区或弱回波区,风暴群体积大生命史长,常常造成更为广泛严重的灾害。

3.2 超级单体风暴雷达回波的其他特征与天气类型

统计苏北超级单体风暴雷达回波特征,包括基于单体的垂直累积液态水含量峰值、最大反射率因

子峰值与高度、质心高度峰值、中气旋持续时间、是否存在有界弱回波区/弱回波区、中气旋最大转速和直径、移动路径相对于风暴承载层平均风矢量的偏角和速度比率等,结果如图3所示。

垂直累积液态水量在某种意义上是雷暴强度的一种度量。图3a中垂直累积液态水量分布范围为22—109 kg/m²,40 kg/m²以上的个例占总数的89%,其中,60 kg/m²以上占75%,表明苏北超级单体旺盛阶段通常具有较高的垂直累积液态水量。苏北超级单体产生大冰雹20例,其中,发生于4—6个月例占总数的95%,表明苏北大冰雹通常发生于4—6月。4—6月大冰雹个例垂直累积液态水含量分布在51—102 kg/m²,其中,垂直累积液态水含量>60 kg/m²的占89%。冰雹直径超过40 mm有7例,垂直累积液态水含量均在62 kg/m²以上,其中5例垂直累积液态水含量>70 kg/m²,垂直累积液态水含量100 kg/m²以上有1例,表明云体内部有不少大粒子存在,对应观测到最大尺寸冰雹和最严重的雹灾。分析表明,苏北地区4—6月垂直累积液

态水含量峰值超过60 kg/m²意味着风暴有可能产生大冰雹,直径随着垂直累积液态水含量的增大而增大,垂直累积液态水含量季节性高值可以用来辨别产生大冰雹的超级单体。图3a显示垂直累积液态水含量在40 kg/m²及以下有8例,均没有产生大冰雹,但观测到短时强降水、F1级以上龙卷和下击暴流导致的10—13级瞬时大风。8例中1例位于雷达40 km以内,可能由于静锥区的存在而导致对垂直累积液态水含量低估,另外7例有3例为嵌入弓形回波顶部或飏线中的小型超级单体,4例有中气旋和有界弱回波区结构,表现出明显的超级单体结构特征,但水平和垂直尺度远小于经典超级单体,类似于Burgess等(1995)所称的“微型超级单体”。例如:图2高能-中弱切变区内6E1风暴就是一个“微型超级单体”,垂直累积液态水含量峰值28 kg/m²,它产生了F2级龙卷。以上分析表明,垂直累积液态水含量较低,如果环境条件有利,仍有可能产生小型或微型超级单体。

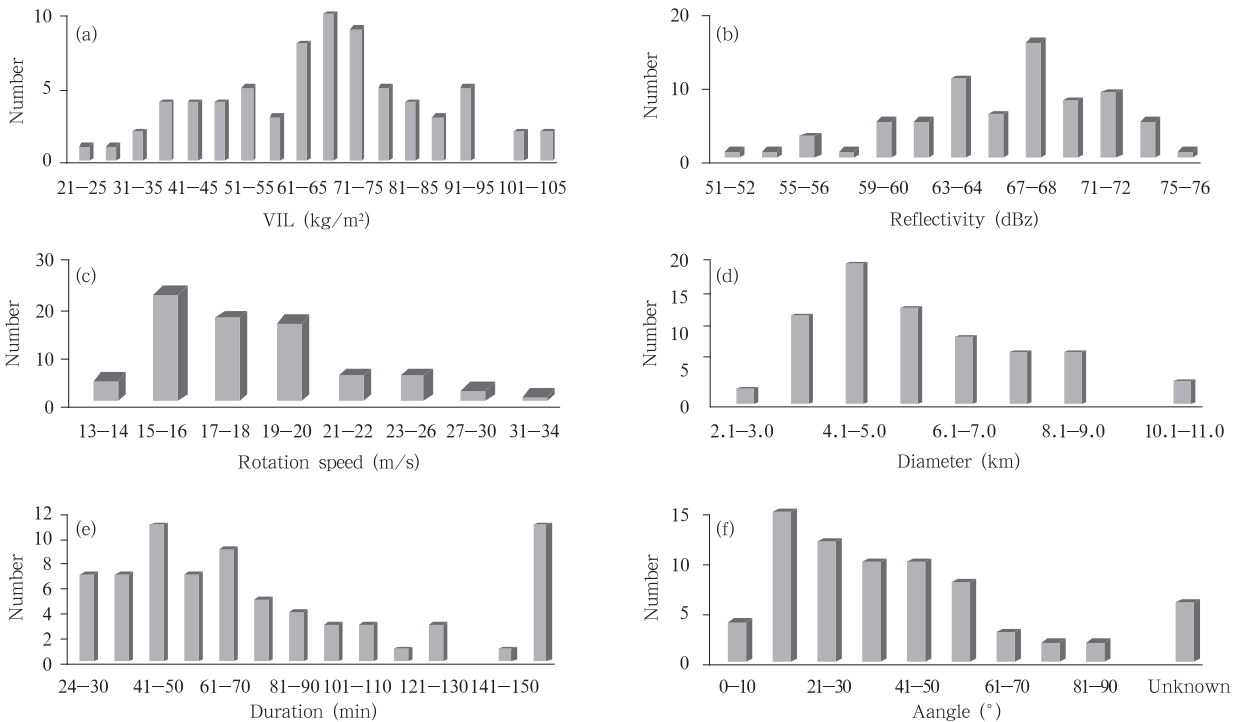


图3 苏北超级单体最大垂直累积液态水含量(VIL)(a)、最大反射率因子(b)、中气旋最大旋转速度(c)、中气旋直径(d)、中气旋持续时间(e)、超级单体移动相对于整层平均风夹角分布(f)

Fig. 3 Maximum VIL (a) and reflectivity (b) of the supercells, the rotation speed (c), diameter (d) and duration (e) of the mesocyclones, the angle between the supercell moving direction and the mean wind direction of the storm-bearing layer (f)

图 3b 为苏北超级单体最大反射率因子分布, 其值在 60 dBz 及以上的占总数的 85%, 表明苏北超级单体通常具有较高的回波强度。最大反射率因子在 70 dBz 及以上共 23 个, 其中, 87% 对应地面观测到冰雹, 最高达 76 dBz, 对应地面观测到最大尺寸的冰雹。苏北超级单体最高质心高度分布在 4.6—12.6 km, 其中, 5 km 以上占总数的 99%, 10 km 以上占总数的 15%。图 2 蓝点划线右侧正三角有 11 个, 对应 20 例超级单体产生大冰雹, 其中, 95% 雹暴最高质心高度上升到 -20°C 等温线高度附近 (± 0.5 km 内) 及之上的区域, 相应 -20°C 等温线高度较低, 对流有效位能较高, 有利于风暴核上升到 -10 — -30°C 冰雹有利增长区域, 因此, 高质心风暴通常更容易产生冰雹。例如图 2 高能-中高风垂直切变区中 5E1 是一个高质心雹暴, 65 dBz 质心最高达 10.1 km 高度, 在 -40°C 等温线附近, -40°C 等温线之下是冰雹增长区, 地面观测到直径 50 mm 大冰雹并伴有强风。图 2 高对流有效位能-中弱风垂直切变区 9C2、低对流有效位能-中风垂直切变区 5A1 风暴质心反射率因子/最高高度分别为 67 dBz/7.5 km, 57 dBz/9.2 km, 均分别位于 5.8 和 6.5 km 的 -20°C 等温线高度之上, 地面均观测到大冰雹。图 2 黑双点划线右侧对应产生 ≥ 30 m/s 雷雨大风的超级单体有 6 例, 最大反射率因子分布在 55—75 dBz, 其中反射率因子核心高度在大风爆发前下降到 3 km 及以下高度的占总数的 83%, 与俞小鼎等(2006b)分析安徽一次系列下击暴流事件、吴芳芳等(2009)分析苏北一次系列下击暴流事件中风暴有高反射率因子核下降特征一致。

图 2 蓝点划线左侧绿色倒三角有 12 个, 对应超级单体产生极端短时强降水 19 例, 最大反射率因子分布在 52—73 dBz, 其中, 峰值在 65 dBz 及以下的占总数的 84%, 最高质心高度分布在 4.6—11.7 km, 其中, 位于 -20°C 等温线高度 (± 0.6 km 内) 附近及以下的占总数的 84%。对应极端短时强降水个例的环境 -20°C 等温线高度较高, 多数情况下风暴核位于 -20°C 等温线高度之下, 不利于大冰雹的产生, 因此低质心风暴通常更容易产生短时强降水。2005—2009 年苏北地区龙卷超级单体有 13 例, 最大反射率因子在 52—66 dBz, 产生了 F1—F3

级龙卷, 其中, F3 级龙卷个例对应的最大反射率因子为 55 dBz, 表明龙卷等级与风暴最大反射率因子相关不大。例如: 图 2 高对流有效位能-中弱风垂直切变区 8D1、6E1 风暴产生 F1、F2 级龙卷和极端短时强降水, 最大反射率因子分别为 52 和 54 dBz, 最高质心高度分别为 6.8 和 5.7 km (0°C 、 -20°C 等温线高度均在 5.3、8.7 km 附近), 这两个导致龙卷和极端短时强降水的风暴为低质心雨暴。超级单体风暴质心偏低, 相应中气旋位置较低, 俞小鼎等(2006a)研究表明中气旋位置越低越有利于龙卷的产生。

上述苏北超级单体风暴属性分析表明, 产生大冰雹的强烈雹暴通常反射率因子峰值很高、风暴质心高, 强反射率因子范围可以扩展到 -20°C 等温线高度之上; 以产生短时强降水为主要特征的超级单体通常反射率因子峰值并不很高、风暴质心低; 产生强雷雨大风的超级单体风暴往往伴随有强反射率因子核心逐渐下降到低层的特征; 产生龙卷的超级单体反射率因子特征与产生极端短时强降水的类似, 并不很高, 强龙卷(F2 以上)可产生在最大反射率因子低于 55 dBz 条件下, 同一个超级单体风暴往往在产生龙卷的同时伴随极端短时强降水, 较强的位于低层的中气旋更容易导致龙卷。

超级单体风暴最本质特征是具有中气旋。图 3e 显示苏北超级单体中气旋生命史长度分布, 生命史在 30 min 及以上的占总数的 96%, 其中生命史超过 1 h 的占 64%; 气旋最大旋转速度分布在 13—32 m/s(图 3c), 其中, 在 15 m/s 及以上的占总数的 94%; 中气旋直径分布在 2.8—11.0 km(图 3d), 其中, 直径在 10 km 以下占总数的 96%, 表明苏北超级单体具有持久和相对较强的中气旋, 直径通常在 10 km 以下。产生龙卷的超级单体明显特征为中气旋直径小, 苏北 13 个龙卷超级单体, 中气旋最小直径分布在 2.0—4.2 km, 其中最小直径小于 3.5 km 的占总数的 92%, 中气旋最低底高范围 0.3—2.6 km, 其中低于 1.0 km 的占总数的 77%, 因此, 低底和尺度小的中气旋有利于龙卷产生。Brown 等(1978)发现, 龙卷涡旋特征(TVS)是比中气旋尺度更小的多普勒雷达速度场涡旋特征, 尺度通常在 2 km 以下; Doswell(2001)指出, 在观测到中气旋的基

础上再探测到龙卷涡旋特征,则龙卷发生概率从15%提高到50%以上。2005—2009年苏北龙卷15例,产生于13个超级单体,其中,14个中气旋伴随龙卷涡旋特征(另外1例因为雷达资料有缺失无法核实),中气旋内含龙卷涡旋特征有10例(另外4例距离雷达站较近,低仰角速度图上龙卷涡旋特征周围有清晰的中气旋环流,可能存在由于受中气旋算法影响没有识别出的低小中气旋),表明中气旋内含龙卷涡旋特征可以作为很好的龙卷预警指标。

超级单体产生后,未来移向移速是关注的重点之一。廖玉芳等(2007a)、刁秀广等(2009)分析超级单体移向移速与风暴承载层平均风的关系,主要问题在于所用的探空资料与风暴生成演变时段环境风场在时空上不对应。对流小单体一般随风暴承载层平均风移动,用超级单体附近的对流小单体移动代表风暴承载层的平均风矢量,这样分析超级单体相对于风暴承载层平均风移向移速可能会更可靠一些。图3f为风暴移动相对于风暴承载层平均风的夹角分布,图中除6例由于移动缓慢、原地打转、间隔紧密的几个单体合并更替路径难以分辨外,其余66例根据风暴路径信息产品分析超级单体某一时段移向移速与风暴承载层平均风的关系,则均属于右移风暴,相对于风暴承载层平均风移动方向右偏 0° — 85° ,其中,右偏 11° — 60° 的占83%,速度为平均风速的0.5—1.0倍;微型或小型超级单体右偏不明显,如8E1移向移速与风暴承载层平均风几乎一致;经典超级单体移动方向相对于平均风方向右偏 12° — 40° ,速度为平均风速的0.6—1.0倍;强降水超级单体移动路径复杂,除少动、打转外,多数情况下向着风暴承载层平均风向的右侧移动并小于平均风速。而强降水超级单体复合风暴具有更大体积并有多数单体,有时其内单体常常相互影响,演变复杂,路径难以分辨。

3.3 超级单体个例

Moller等(1990,1994)研究指出,超级单体有多种雷达回波形态和结构。苏北超级单体雷达回波呈现多种形态,结构复杂,并能以各种各样的方式进行演变。本文在图2右下角低对流有效位能高风垂直切变与低 T_d 、高 ΔT 、左侧上部高对流有效位能中弱风垂直切变与高 T_d 中等偏低 ΔT 、中部高能中高

风垂直切变与高 ΔT 中 T_d 的环境特征组合中各选取3个孤立风暴5A1、8D1和5E1(图2红字),风暴结构分析表明分别为雹暴、产生极端短时强降水的雨暴和质心很高的雹暴;在无能中弱切变,高 T_d 区和中 T_d 区分别选取2个复合风暴6E1、9C2,风暴结构分析表明为质心很低的龙卷雨暴、雹暴复合体。下面详细分析5个风暴的回波结构。

3.3.1 低对流有效位能、强风垂直切变和低露点环境下的孤立经典超级单体

2005年4月20日14时53分,南京雷达在西北方向164 km(安徽境内)探测到一个新生风暴,质心强度58 dBz、高度10.6 km,移向东南,路径相对平均风约右偏 17° ,15时后进入苏北泗洪、盱眙县,生命史超过3 h。图4为15时47分 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.4° 仰角反射率因子、 0.5° 仰角径向速度和反射率因子垂直剖面,图中双箭头指向同一地点。从 0.5° 仰角反射率因子图上可以看出,低层具有明显暖湿气流流入流缺口和位于缺口西侧的钩状回波,超过65 dBz回波核心位于入流缺口的东侧; 0.5° 仰角径向速度图上是一个直径8.5 km中气旋,旋转速度为22 m/s,属于强中气旋。 1.5° 仰角回波图上入流缺口内(3.4 km高度)可以分辨出闭合的有界弱回波区(双箭头所指),65 dBz以上反射率因子仍位于东侧,相应速度图上,中气旋转速为19 m/s,比 0.5° 仰角回波图上稍弱; 2.4° 仰角回波图上与低层入流缺口相对应的闭合的有界弱回波区清晰可见,以双箭头做参考,强反射率因子轮廓相对 0.5° 仰角向南(低层入流方向)扩展,悬垂回波特征明显; 3.4° 仰角回波图上(高度6.6 km)中低层有界弱回波区之上为50—60 dBz强回波所覆盖; 4.3° 仰角回波图上(高度8.1 km)60 dBz回波块移到有界弱回波区前侧(图略),表明风暴强回波区自西北向东南倾斜,即向低层暖湿入流一侧倾斜。以图4双箭头做参考,包含有界弱回波区的中高层悬垂回波出现在低层暖湿空气入流缺口以南区域,展现出超级单体反射率因子自低往高向低层入流一侧倾斜的特征。在沿低层入流方向(图4a中白线)所作反射率因子垂直剖面图(图4f)上,回波墙主要由竖直的60 dBz以上高反射率因子组成,并有高度在5 km以下的有界弱回波区,其上有高度在6—8 km、位于

-20℃等温线高度(6.5 km)之上 60—65 dBz 的风暴核心, Witt 等(1998)的分析表明当有超过 45 dBz 的反射率因子扩展到 -20℃等温线高度之上时,发生强降雹的可能性明显增大,本例超级单体与

Moller 等(1994)、郑媛媛等(2004)研究的经典超级单体主要结构类似并具有降大雹的潜势,对应盱眙气象站有直径 2 cm 的冰雹记录(实际最大冰雹直径可能远大于2 cm,只是没有被观测到)。

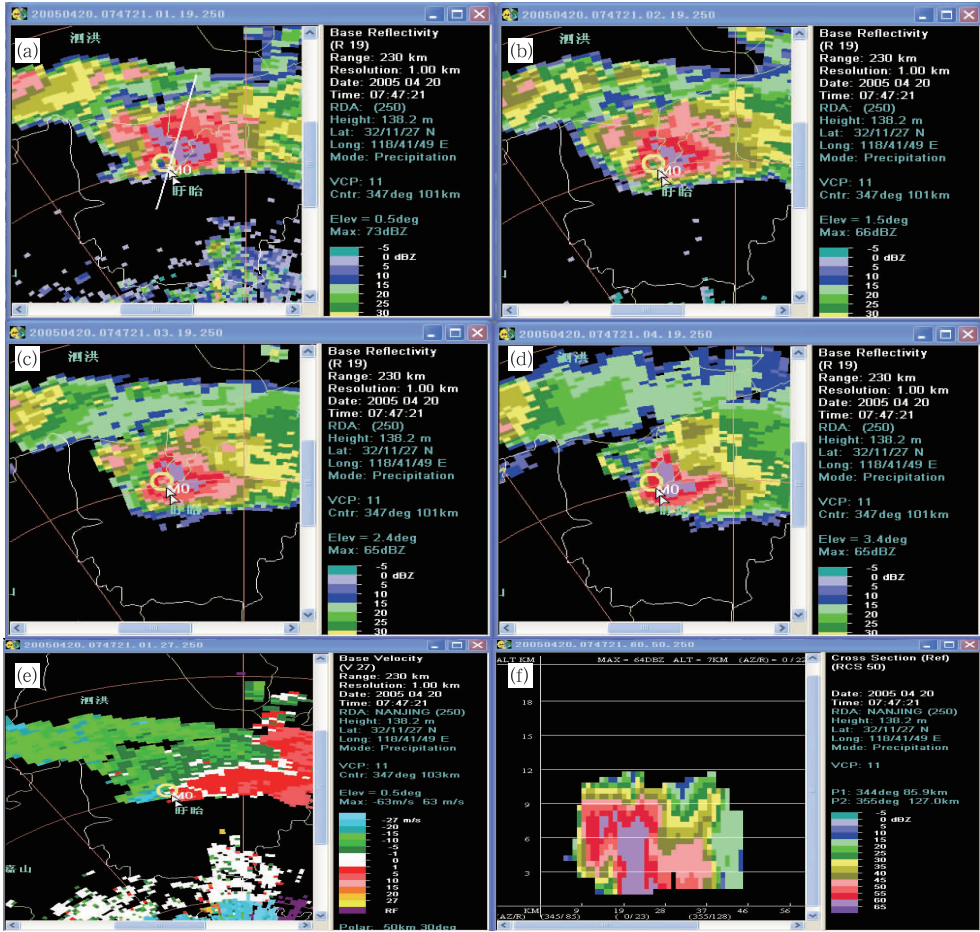


图 4 2005 年 4 月 20 日 15 时 47 分南京雷达(a) 0.5°、(b)1.5°、(c)2.4°、(d)3.4°仰角反射率因子、(e)0.5°仰角径向速度(径向分辨率 1 km,双箭头指向同一地点,黄圆圈为中气旋位置)及 (f)沿图 4a 中白线所作反射率因子垂直剖面(横坐标和纵坐标单位为 km)

Fig. 4 Reflectivities on elevation angles of 0.5° (a), 1.5° (b), 2.4° (c), 3.4° (d) and radial velocity on angles of 0.5° (e) at 15:47 BT 20 April 2005 detected by the Doppler weather radar sited at Nanjing. (f) is the vertical cross section along the white line in (a). Yellow circles mark the location of mesocyclone, double arrows point to the same location

(The radial resolution; 1 km, and the units of abscissa and ordinate in sections; km)

3.3.2 高对流有效位能、中等风垂直切变和高露点环境下的孤立强降水超级单体

2008 年 7 月 22 日 16 时 01 分,盐城雷达在西南方向 37 km(兴化与盐都交界)探测到一个新生风暴,质心很低,最强回波核心 49 dBz,高度为 1.7 km,此后在原地发展壮大,17 时 03 分产生中气

旋,维持到 17 时 51 分并伴有龙卷涡旋特征,加密自动站观测到 137 mm/h 的极端短时强降水并伴有 F1 级龙卷。图 5 为 17 时 15 分风暴 0.5°、2.4°、4.3°、6.0°仰角反射率因子、2.4°仰角径向速度和反射率因子垂直剖面,黄圈(表示算法识别出的中气旋)和双箭头指向同一地点。风暴形态与 Moller 等

(1994)研究的强降水超级单体形态中出现较多的肾形形态相似。0.5°仰角反射率因子图上风暴东侧(0.4 km 高度)出现较大的“凹”型入流缺口,与Moller等(1990)研究指出强降水超级单体风暴东侧具有持续“入流缺口”的重要特征相同,入流缺口后是粗胖的凸起回波(>45 dBz),中气旋位于入流缺口和旁边突出部分交界处附近,缺口内有10 dBz以下的弱回波区以及反射率因子高梯度区;2.4°仰角(1.7 km 高度)反射率因子图上可以分辨出闭合的、中心为10 dBz的有界弱回波区(黄圈北侧),对应2.4°仰角径向速度图上是一个包裹在降水回波中直径3.3 km的中气旋,旋转速度为15 m/s;4.3°仰角反射率因子图上在低层弱回波区之上(3.1 km

高度)覆盖着45—50 dBz高反射率因子,6.0°仰角反射率因子图上在低层弱回波区之上(4.3 km 高度)包含有50 dBz左右高反射率因子,中高层回波相对于0.5°仰角回波图明显向东(低层入流方向)扩展,以图中黄圈(中气旋位置)和双箭头作参考,表现为反射率因子大值区向低层入流一侧倾斜。从沿图5a中黑线所作反射率因子垂直剖面(图5f),可清晰看出,风暴低层存在有界弱回波区,高度在3 km以下,其上风暴50 dBz核心高度约6 km,明显低于8.7 km的-20℃等温线高度,位于5.2 km的0℃线高度附近,不利于大冰雹产生,而利于短时强降水产生。本例强降水超级单体移动缓慢,降雨量很大,17时30分至19时30分2 h降雨量209 mm。

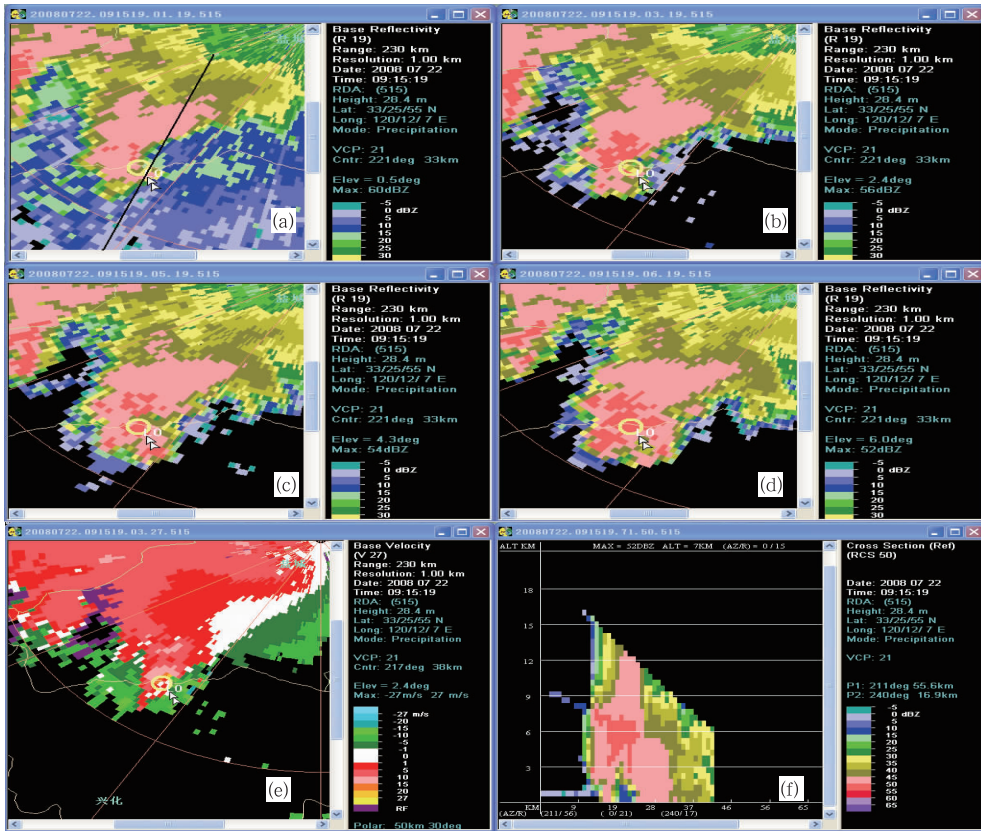


图5 2008年7月22日17时15分盐城雷达(a)0.5°、(b)2.4°、(c)4.3°、(d)6.0°仰角反射率因子、(e)2.4°仰角径向速度(径向分辨率1 km,黄圆圈为中气旋位置,双箭头指向同一地点)及(f)沿图5a中黑线所作的反射率因子垂直剖面(横坐标和纵坐标单位为km)
 Fig. 5 Reflectivities on elevation angles of 0.5° (a), 2.4° (b), 4.3° (c), 6.0° (d) and radial velocity on 2.4° elevation (e) at 17:15 BT 22 July 2008 detected by the Doppler weather radar sited on Yancheng. (f) is the vertical cross section along the black line in (a) (Others are the same as in Fig. 4)

3.3.3 高对流有效位能、强风垂直切变和中等大小露点环境下的经典超级单体

2005年6月14日18时10分,徐州雷达在东

北方向149 km(山东南部)探测到1个新生风暴,质心强度为56 dBz,高度10.4 km,移向东南,路径相对于平均风右偏约40°,18时52分进入江苏东海

县,生命史 4 h 48 min。图 6 为 19 时 17 分 0.5°、1.5°、2.4°、3.4°仰角反射率因子、0.5°仰角风暴相对平均径向速度和反射率因子垂直剖面,图中黄圆圈(代表中气旋位置和大小)和双箭头指向同一地点。在 0.5°仰角反射率因子图上,风暴移动方向右后侧黄圆圈位置显示低层暖湿气流流入流缺口;与入流缺口区相对应, 0.5°仰角风暴相对平均径向速度图(图 6e)上是一个直径 4.6 km 的中气旋,转速为 15

m/s;缺口内向西北方向伸出长约数百千米的窄带回波,为后侧阵风锋(图略);缺口后部存在钩状回波(高度约 2.8 km),由 50—65 dBz 高反射率因子组成,最大位于左后部。与钩状回波和风暴中高反射率因子核心区对应,分别出现旁瓣回波(图 6a 白箭头所指),表明风暴强回波核心区反射率因子很大(达到 72 dBz),风暴中一定存在大冰雹;1.5°仰角黄圆圈附近仍显示入流缺口特征(高度 5.3 km),但不

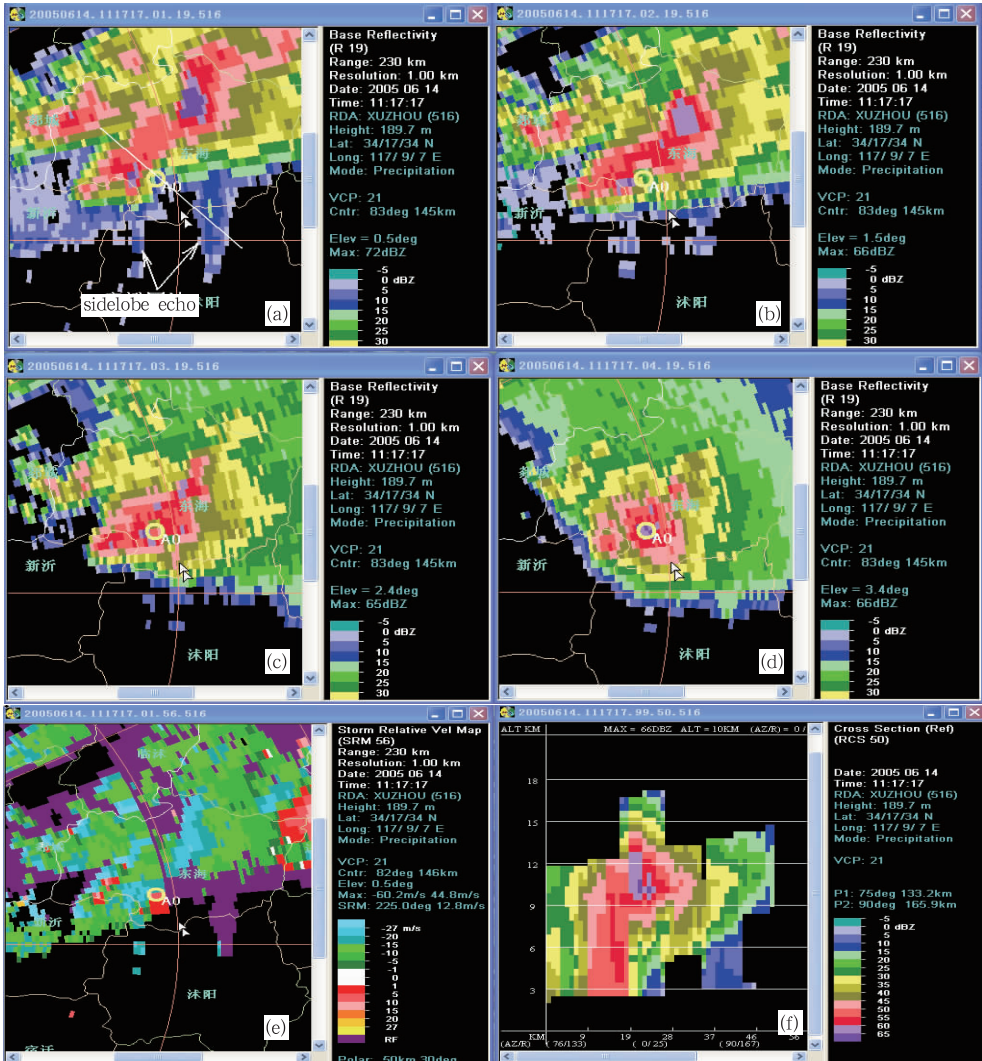


图 6 2005 年 6 月 14 日 19 时 17 分徐州雷达

(a) 0.5°、(b)1.5°、(c)2.4°、(d)3.4°仰角反射率因子、(e)0.5°仰角风暴相对平均径向速度(径向分辨率 1 km,双箭头指向同一地点,黄圆圈为中气旋位置,白箭头所指为旁瓣回波)及(f)沿图 6a 中白线所作的反射率因子垂直剖面(横坐标和纵坐标单位为 km)

Fig.6 Reflectivities on elevation angles of 0.5° (a), 1.5° (b), 2.4° (c), 3.4° (d) and radial velocity on 0.5° (e) at 19:17 BT 14 June 2005 detected by the Doppler weather radar sited at Xuzhou. (f) is the vertical cross section along the white line in (a) (Others are the same as in Fig. 4)

如 0.5° 仰角明显,相应的径向速度图上(图略),中气旋转速仍为 15 m/s ; 2.4° 仰角黄色圆圈(中气旋位置)左、右(高度约为 7.6 km)均显示有界弱回波区,其内反射率因子分别为 35 、 25 dBz ;在 3.4° 仰角(高度 10.2 km)上,有界弱回波区消失,黄圆圈位置为 60 — 65 dBz 以上高反射率因子所占据, 4.3° 仰角(高度 12.5 km)黄圆圈位置覆盖着 50 — 60 dBz 高反射率因子。以图6双箭头做参考,包含双有界弱回波区的中高层悬垂回波出现在低层入流缺口以南宽阔的区域。在沿图6a中白线低层入流方向通过风暴核心所作的垂直剖面(图6f)上,风暴十分高大,竖直的回波墙高达 12 km ,入流一侧有宽大的双有界弱回波区结构,之上有高度在 11 km 、强度超过 65 dBz 高反射率因子核心,双有界弱回波区水平尺度近 10 km ,高度在 8 km 以上,高于位于 7.3 km 的 -20°C 等温线高度,为高质心经典超级单体雹暴。该雹暴自北向南影响苏北5个县并有直径 50 mm 的冰雹和 27 m/s 瞬时大风记录。

3.3.4 高对流有效位能、中等风垂直切变和高露点环境下的小型超级单体

2006年7月3日午后,连云港雷达探测到大片层积混合云降水回波自西北向东南移动,16时反射率因子图上在山东郯城、苏北新沂、宿迁一带由夹杂着零散和有组织对流风暴组成的南北向对流回波带(图略),其中,在新沂西南部探测到一个新生风暴,质心强度 47 dBz ,高度 5.7 km ,顶高 7.5 km ,此后发展迅速,16时18分出现直径为 6.5 km 的中气旋,此时包含该中气旋的小型超级单体内强度为 54 dBz 的质心下降到 3.6 km 高度;16时36分中气旋内出现龙卷涡旋特性,质心强度 54 dBz 高度下降到 1.3 km 。图7为16时36分 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.4° 仰角反射率因子、 0.5° 仰角风暴相对平均径向速度及反射率因子垂直剖面,图中黄色圆圈(中气旋)和双箭头是在同样的位置。 0.5° 仰角反射率因子图上,双箭头位置(2.1 km 高度)是回波相对较弱的低层入流区, 45 — 50 dBz 高反射率因子区位于黄色圆圈左侧(风暴移动方向左侧),相应 0.5° 仰角风暴相对平均径向速度图上是一个包裹在降水回波中的直径为 5.5 km 中气旋,中气旋转速为 19 m/s ,属于强中气旋,其内含龙卷涡旋特征。 1.5° 仰角(3.8 km 高度) 45 — 50 dBz 高反射率因子区与 0.5° 仰角相比,明显南移,相应中气旋转速为 16 m/s ,比 0.5° 仰

角稍弱; 2.4° 仰角(5.4 km 高度)反射率因子图上呈现 40 — 50 dBz 高反射率因子,垂直结构相对于 0.5° 仰角向南(低层入流方向)扩展最为明显,表现为反射率因子大值区向低层入流一侧倾斜,速度图上只能分辨出很弱的中气旋,表明中气旋最大转速位于最低层。 3.4° 仰角(高度 7.0 km)反射率因子图上双箭头位置只有一些弱回波区,表明风暴高度较低。在沿图7a中黑线低层入流方向通过风暴反射率因子核心所作的垂直剖面(图7f)上,显示风暴虽然低小,但具有明显的超级单体结构特征:竖直的 50 dBz 高反射率因子组成的回波墙、低层弱回波区及之上的回波悬垂和风暴顶,较小的、不很明显的有界弱回波区(其内反射率因子 35 dBz)。强降水超级单体风暴的有界弱回波区有时是相对周围较高反射率因子而言较弱的回波区,其内反射率因子有时 $>40\text{ dBz}$,与潘玉洁等(2008)分析有界弱回波区中存在较强降水一致,表明该风暴是嵌入在积层混合云降水中的一个低顶强降水超级单体。从剖面图还可以看到,风暴 50 dBz 的高反射率因子都在 5.3 km 的 0°C 层高度以下,有界弱回波区高度在 2 km 以下,因此该超级单体中气旋最大转速位于最低层。俞小鼎等(2006c)研究指出这种低质心对流系统往往伴随强降水而没有冰雹,江淮梅雨期产生暴雨的对流系统大多数是这种低质心系统,本例超级单体就是江淮梅雨期一个伴有F2级龙卷的低质心雨暴,袭击了新沂县棋盘等镇,造成4人死亡,32人受伤。

3.3.5 高对流有效位能、中等风垂直切变和中等大小露点环境下具有强降水超级单体特征的风暴群

2009年6月14日傍晚,位于南京和南通之间的扬州—镇江一带出现了范围很大的雷暴群,向偏东方向移动,南京和南通两部雷达从不同方位分别探测到两个旋转风暴:南侧A0,北侧B0。图8a、b、c、d、e为南京雷达19时06分 0.5° 、 3.4° 、 4.3° 、 6.0° 仰角反射率因子、 0.5° 仰角径向速度,图中南侧风暴A0位于丹阳到句容,图中黄圆圈(中气旋)和双箭头是在同样的位置。 0.5° 仰角反射率因子图上,风暴移动方向右前侧双箭头位置(1.5 km 高度)是弱回波区,弱回波区左侧有超过 60 dBz 高反射率因子区(双箭头和黄圆圈左侧),与弱回波区相对应, 2.4° 仰角径向速度图上是一个直径 3.5 km 中气旋,转动速度为

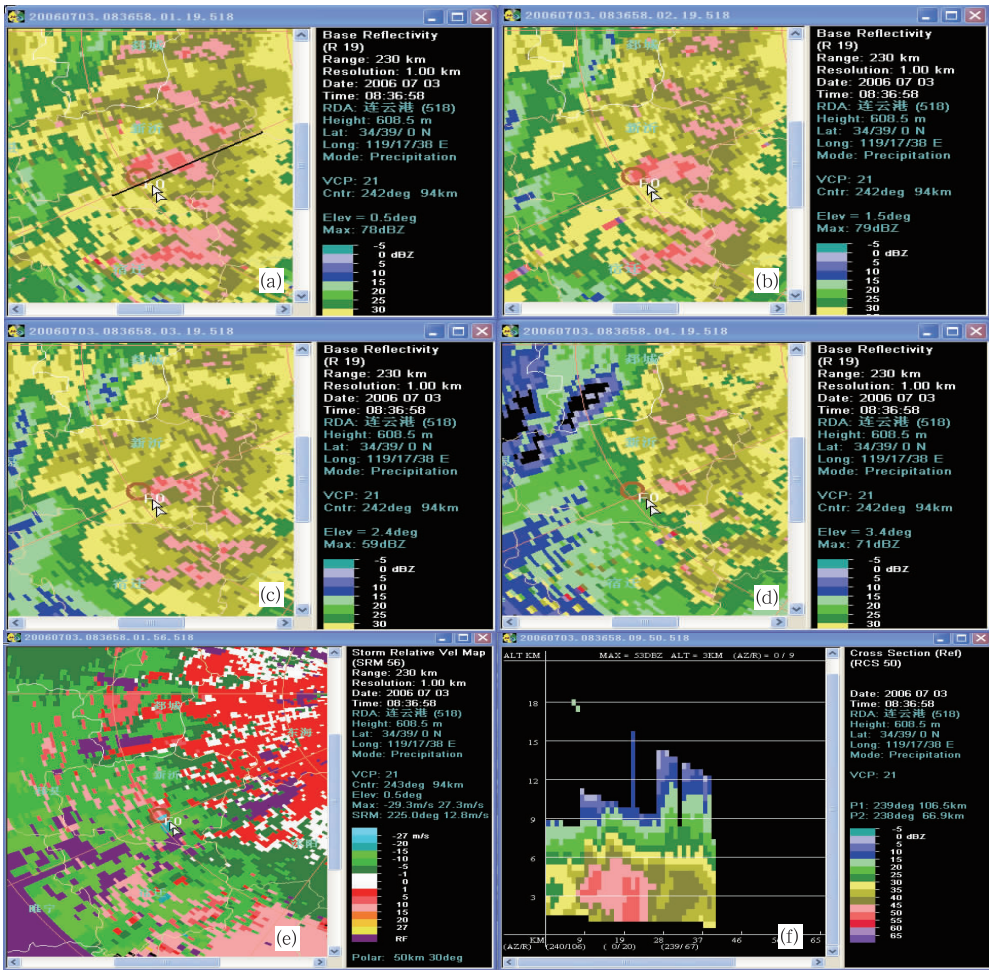


图7 2006年7月3日16时36分连云港雷达(a)0.5°、(b)1.5°、(c)2.4°、(d)3.4°仰角反射率因子、(e)0.5°仰角风暴相对平均径向速度(径向分辨率1 km,黄圆圈为中气旋位置,双箭头指向同一点)及(f)沿图7a中黑线所作的反射率因子垂直剖面(横坐标和纵坐标单位为 km)

Fig. 7 Reflectivities on elevation angles of 0.5° (a), 1.5° (b), 2.4° (c), 3.4° (d) and radial velocity on 0.5° (e) at 16:36 BT 3 July 2006 detected by the Doppler weather radar sited at Lianyungang. (f) is the vertical cross section along the black line in (a) (Others are the same as in Fig. 4)

13 m/s;以双箭头做参考,3.4°仰角(6.0 km高度)60—65 dBz 高反射率因子区与0.5°仰角相比,明显移向东南;4.3°仰角(7.6 km 高度)具有60—65 dBz高反射率因子区,高反射率因子区相对0.5°仰角向东南(低层入流方向)扩展。图8北侧风暴B0位于镇江到扬州,0.5°仰角反射率因子图上,风暴移动方向左前侧黄圆圈东北位置(1.3 km 高度)是弱回波区,55 dBz高反射率因子区位于黄圆圈的右侧,与弱回波区对应,2.4°仰角径向速度图上是一个直径6.4 km 中气旋,转速为15 m/s;以黄圆圈(中气旋)位置做参考,3.4°仰角(5.5 km 高度)55—60 dBz 高反射率因子区与0.5°仰角相应高反射率因子区相比,向东北扩展,4.3°仰角(7.0 km 高度)覆盖着50—60 dBz 高反

射率因子,廓线相对于0.5°仰角向东北(低层入流方向)扩展;6.0°仰角(9.5 km 高度)反射率因子明显减弱。沿图8a中黑线段所示低层入流方向通过风暴反射率因子核垂直剖面(图8f)上,显示了南侧风暴A0明显的低层弱回波区、中层回波悬垂以及不是很明显的有界弱回波区结构和之上的风暴顶,显示了北侧风暴B0低层弱回波区结构。图8g,h为南通雷达同时次0.5°仰角反射率因子和沿低层入流方向(图8g中白线段)所作的反射率因子垂直剖面图,0.5°仰角反射率因子图上双箭头位置南侧为旁瓣回波,表明风暴回波强度很大,存在大冰雹,剖面图中显示了南侧风暴宽大的低层弱回波区、位于-20℃等温线高度(5.8 km)之上的在7 km 高度强度超过65 dBz 的风

暴核、南侧和北侧风暴回波墙低层有高反射率因子特征。该雷暴群尺度很大,具有2个有界弱回波区和弱回波区,均表现为反射率因子大值区向低层入流一侧倾斜,前侧中气旋包裹在降水回波中,这些特征与

Moller 等(1990)研究的强降水复合风暴结构类似,并具备降大雹和雷雨大风的潜势。相应强降水风暴群产生了强冰雹、极端雷暴大风和短时强降水等多种强对流天气(图2 紫正三角)。

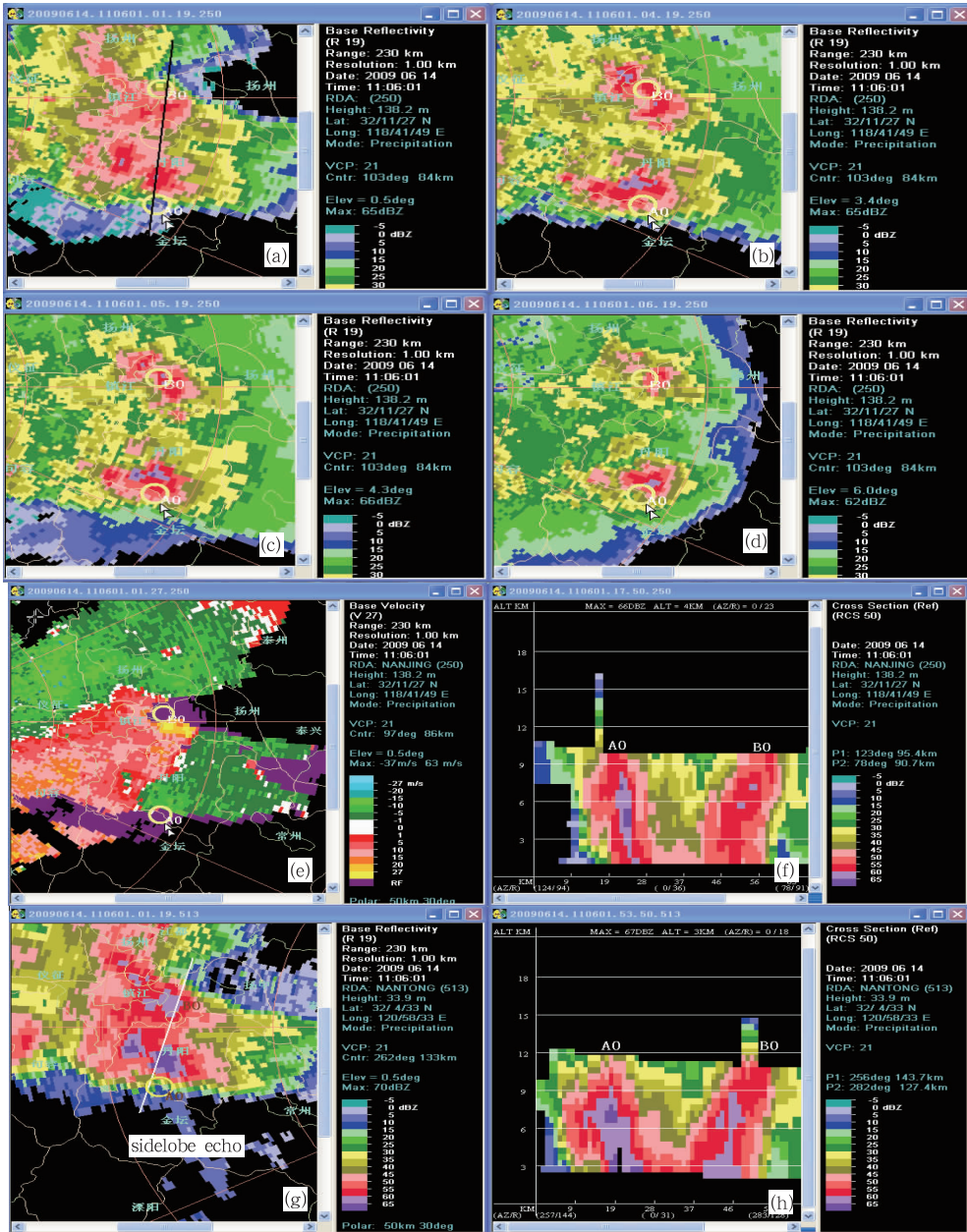


图8 2009年6月14日19时06分南京雷达(a)0.5°、(b)3.4°、(c)4.3°、(d)6.0°仰角反射率因子、(e)0.5°仰角径向速度及(f)沿图8a中黑线所作的反射率因子垂直剖面；(g)南通雷达0.5°仰角反射率因子及(h)沿图8g中白线所作的反射率因子垂直剖面(黄圆圈为中气旋位置,双箭头指向A0风暴,径向分辨率1 km,剖面图横坐标和纵坐标单位为 km)

Fig. 8 Reflectivities on elevation angles of 0.5° (a), 3.4° (b), 4.3° (c), 6.0° (d) and radial velocity on 0.5° elevation (e) at 19:06 BT 14 June 2009 detected by the Doppler weather radar sited at Nanjing. (f) is the vertical cross section along the black line in (a). (g) is the reflectivity on 0.5° elevation detected by the Doppler weather radar sited at Nantong at the same time (a sidelobe echo is near the double arrow) and (h) is the vertical cross section along the white line in (g) (Double arrows point to the storm A0; others are the same as in Fig. 4)

4 结论和总结

本文利用江苏探空与地面观测资料以及 5 部多普勒天气雷达探测资料,对 2005—2009 年苏北地区 72 个超级单体风暴的环境背景和雷达回波特征进行了统计和个例分析,主要结果有以下几点:

(1) 2005—2009 年苏北地区共产生 72 个超级单体,平均每年发生 14.4 个超级单体;这 72 个超级单体出现在 35 个超级单体日内,平均每年苏北地区有 7 个超级单体日,每个超级单体日平均少则出现 1 个超级单体,多则出现 5 个超级单体,平均 1 个超级单体日出现 2 个超级单体。

(2) 苏北超级单体风暴通常既可以出现在对流有效位能和 0—6 km 风垂直切变都较大的环境下,也可以出现在对流有效位能较大(在 1000 J/kg 以上)而 0—6 km 风垂直切变为中等(0—6 km 风矢量差为 12—20 m/s),或对流有效位能较小(低于 1000 J/kg)而 0—6 km 风矢量差较强(高于 20 m/s)的环境下。

(3) 以产生极端短时强降水为主与产生大冰雹和/或雷暴大风为主的超级单体环境特征有明显区别:产生大冰雹和/或雷暴大风的超级单体风暴环境背景有较强的风垂直切变,低层露点中等偏低,对流层中层环境温度较低、对流层中下层(850—500 hPa)温度直减率较大,尤其是极端雷暴大风情况下温度直减率更大;极端短时强降水的环境背景特征表现为风垂直切变相对较弱、低层露点较高,对流层中层温度较高、温度直减率较小。

(4) 苏北地区的超级单体风暴主要包括经典、强降水超级单体和强降水超级单体复合体 3 大类,后两者特征相似,只是第 3 类除了包含强降水超级单体外还包含其他单体。经典和强降水超级单体之间不同特征主要有:经典超级单体具有中气旋和与中气旋紧密联系的入流缺口与钩状回波,具有宽大的有界弱回波区,其上有高反射率因子核心区,多产生大冰雹、龙卷和地面大风,有时有强降水;强降水超级单体具有中气旋和与中气旋相联系的入流缺口与旁边宽阔的凸起结构,具有有界弱回波区或弱回波区,多产生冰雹、龙卷、地面大风和短时强降水,特别是产生短时强降水的频率远高于经典超级单体。

(5) 苏北超级单体中,产生大冰雹的超级单体通常反射率因子高、风暴质心高; -20°C 等温线之上是

否有高反射率因子核对判断风暴能否产生大冰雹有指导意义;以产生短时强降水为主要特征的超级单体风暴质心低;产生极端雷雨大风的超级单体有强反射率因子核心逐渐降低到低层的特征。在龙卷识别和预警中,风暴反射率因子强度与龙卷等级相关不明显, F2 以上龙卷可以产生在最大反射率因子低于 55 dBz 条件下,预警龙卷主要依赖于中气旋和龙卷涡旋特征,特别是中气旋内含龙卷涡旋特征。

(6) 苏北超级单体强盛期通常为右移风暴,移速小于风暴承载层平均风。经典超级单体一般为孤立风暴,移动路径相对清晰;一些强降水超级单体以及由强降水超级单体组成的复合风暴有时有多个单体更替或相互影响,演变复杂,这类风暴移动路径需要进一步深入分析和研究。

(7) 超级单体结构属性分析表明:绝大多数情况下,苏北地区超级单体风暴的最大反射率因子在 55—76 dBz,基于单体的垂直累积液态水含量在 35—90 kg/m^2 ,垂直累积液态水含量超过 60 kg/m^2 时风暴有可能产生大冰雹,特别是在 4—6 月,冰雹直径随着垂直累积液态水含量的增大而增大,因此垂直累积液态水含量季节性高值可以用来辨别产生大冰雹的超级单体;绝大多数情况下,中气旋旋转速度大于 15 m/s,直径在 3—10 km,持续时间超过 40 min;中气旋的底越低,直径越小,产生龙卷的可能性越大。

参考文献

- 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
- 丁一汇. 2008. 中国气象灾害大典: 综合卷. 北京: 气象出版社, 326-346
- 江苏省气象局. 1988. 江苏重要天气分析和预报. 北京: 气象出版社, 105-118
- 梁爱民,张庆红,申红喜等. 2006. 北京地区雷暴大风预报研究. 气象, 32(11): 73-80
- 廖晓农,俞小鼎,于波. 2008a. 北京盛夏一次罕见的大雹事件分析. 气象, 34(2): 10-17
- 廖晓农,俞小鼎,王迎春. 2008b. 北京地区一次罕见的雷暴大风过程特征分析. 高原气象, 27(6): 1350-1362
- 廖玉芳,俞小鼎,唐小新等. 2007a. 基于多普勒天气雷达观测的湖南超级单体风暴特征. 南京气象学院学报, 30(4): 433-443
- 廖玉芳,俞小鼎,唐小新. 2007b. 2004 年 4 月 29 日常德超级单体研究. 南京气象学院学报, 30(5): 579-589
- 刘健文,郭虎,李耀东等. 2005. 天气分析预报物理量计算基础. 北京: 气象出版社, 91-96

- 刘娟, 朱君鉴, 魏德斌等. 2009. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征. 气象, 35(10): 32-39
- 刘治国, 俞小鼎, 陶健红等. 2008. 青藏高原东北侧雹云单体最大垂直累积液态含水量的演变特征及其在降雹定时判断中的应用. 气象学报, 66(4): 609-620
- 秦丽, 李耀东, 高守亭. 2006. 北京地区雷暴大风的天气-气候学特征研究. 气候与环境研究, 11(6): 754-762
- 潘玉洁, 赵坤, 潘益农. 2008. 一次强飚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
- 吴芳芳, 王慧, 韦莹莹等. 2009. 一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征. 气象, 35(1): 55-64
- 吴芳芳, 俞小鼎, 王慧等. 2010. 一次强降水超级单体风暴多普勒天气雷达特征. 大气科学学报, 33(3): 285-298
- 王昂生, 徐乃璋. 1985. 强单体雹暴的研究. 大气科学, 9(3): 260-266
- 俞小鼎, 王迎春, 陈明轩等. 2005. 新一代天气雷达与强对流天气预警. 高原气象, 24(3): 456-464
- 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, 90-231
- 俞小鼎, 张爱民, 郑媛媛等. 2006b. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析. 应用气象学报, 17(4): 385-393
- 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民等. 2006c. 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. 2008a. 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
- 俞小鼎. 2008b. 新一代天气雷达业务应用论文集. 北京: 气象出版社, 1-16
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流天气临近预报技术进展. 气象学报, 70(3): 1-27
- 庄薇, 刘黎平, 薄兆海等. 2010. 新疆一次强飚线过程双多普勒雷达观测的中尺度风场结构分析. 气象学报, 68(2): 224-234
- 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
- Brooks H E, Craven J P. 2002. A database of proximity soundings for significant severe thunderstorms, 1957 - 1993 // Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms. San Antonio: Amer Meteor Soc, 639-642
- Brown R A, Lemon L R, Burgess D W. 1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar. Mon Wea Rev, 106(1): 29-38
- Browning K A. 1964. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. J Atmos Sci, 21: 634-639
- Browning K A. 1978. The structure and mechanisms of hailstorms. Meteor Monogr, 38: 1-36
- Burgess D W, Lee R, Parker S S, et al. 1995. A study of minisupercells observed by WSR-88D radars // Preprints, 27 th Conf. on Radar Meteorology. Vail Co: Amer Meteor Soc, 4-6
- Davis R S. 2001. Flash flood forecast and detection methods. Severe Convective Storms-AMS Meteorol Mon Ser, 28(50): 481-525
- Doswell C A. 2001. Severe convective storms: An overview. Meteor Monogr, 50: 1-26
- Doswell C A, Burgess D W. 1993. Tornadoes and Tornadic Storms-A Review of Conceptual Model // Church C, Burgess D, Doswell C, Davies-Jones R. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards. Geophys Monogr, 79: 161-172
- Evans J S, Doswell C A. 2002. Investigating derecho and supercell proximity soundings // Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms. San Antonio: Amer Meteor Soc, 635-638
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. J Atmos Sci, 38(8): 1511-1534
- Johns H R, Doswell C A. 1992. Severe local storms forecasting. Wea Forecasting, 7: 588-612
- Lemon R L, Doswell C A. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. Mon Wea Rev, 107(9): 1184-1197
- Moller A R, Doswell C A, Przybylinski R. 1990. High-precipitation supercells: A conceptual model and documentation // Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms. Kananaskis Park, AB, Canada: Amer Meteor Soc, 52-57
- 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
- Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al. 1998. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. Wea Forecasting, 13(2): 286-303