

一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征

吴芳芳¹ 王 慧² 韦莹莹¹ 王 群¹

(1. 江苏省盐城市气象局, 224005; 2. 上海中心气象台)

提 要: 利用江苏盐城多普勒天气雷达资料结合自动气象站和常规观测资料对2007年7月25日苏北兴化等地的一次雷雨大风过程进行了分析。结果表明: 风灾是由两种不同类型的雷暴大风产生的。一种是阵风锋, 产生于风暴前沿, 影响时地面产生7~9级大风。另一种是下击暴流, 产生于多单体风暴中, 其反射率因子核初始高度高于-20℃等温线高度, 有中层径向辐合和反射率因子核下降的特征。影响时风暴内部下沉气流在地面强烈辐散, 产生10级以上的大风。阵风锋上空有新生单体合并进原风暴, 风暴发展加强; 当下击暴流产生、风暴减弱后, 阵风锋上又有新生单体补充进原风暴, 导致下击暴流连续产生, 阵风锋持续影响。

关键词: 多普勒天气雷达 多单体风暴 阵风锋 下击暴流

Analysis of a Strong Gust Front and Downburst with Doppler Weather Radar Data

Wu Fangfang¹ Wang Hui² Wei Yingying¹ Wang Qun¹

(1. Yancheng Weather Office, Jiangsu Province 224005; 2. Shanghai Meteorological Center)

Abstract: A strong rainstorm is analysis which occurred in Xinghua located the north of Jiangsu province on 25 July 2007. Results show that wind disaster originated from two kinds of rainstorm. One kind was the gust front which occurred at the front of the storm. Strong wind of grade 7-9 was attained when it happened. Another kind was the downburst arose in the multi-cell storm. The original height of reflectivity core was higher than -20℃ isotherm. It had the characteristics of convergence on the mid level and descending of reflectivity core. The strong wind above grade 10 was attained, when the descending airflow diverged strongly on the ground. A new cell was combined with the former storm above the gust front, thus the storm enhanced. When the downburst happened, the storm weakened,

and another new cell was combined with the former storm. The downburst happened continuously, and the impact of gust front persisted.

Key Words: Doppler weather radar multi-cell storm gust front downburst

引 言

自新一代天气雷达布网以来,中国气象工作者利用新一代天气雷达数据对强对流灾害性天气进行了一些研究,包括冰雹、龙卷、灾害性大风和暴洪。在对流风暴产生的强烈天气现象中,由风暴的下沉气流导致的地面大风是出现频率最高的^[1-2]。雷暴中下沉气流到达地面并向水平方向扩散形成水平出流,雷暴前沿的出流辐合线达到一定的强度,就可称为阵风锋^[3]。对流风暴的下沉气流空间分布是极不均匀的,往往在大片的下沉气流中,会有一股或几股较强的下沉气流,Fujita 将它们定义为下击暴流^[4-5]。Fujita 进一步将下击暴流划分为微下击暴流(尺度小于 4km,持续时间小于 10 分钟)和宏下击暴流(尺度大于 10km,持续时间大于 10 分钟)^[5]。微下击暴流可导致很大的水平风切变,对飞机起飞和降落威胁很大。宏下击暴流强烈时可造成与龙卷类似的风害。地面大风作为对流风暴中最为常见的天气现象,阵风锋与下击暴流的研究已成为短时临近预报关注的重点^[6-9]。阵风锋、下击暴流可以产生严重的风灾,尤其是下击暴流造成的危害最为严重,因此,利用新一代多普勒天气雷达分析阵风锋与下击暴流,对预报员提高灾害性天气预警能力有重要意义。

2007 年 7 月 25 日下午,江苏苏北地区高邮、兴化、大丰(图 1a 实线附近)出现冰雹、雷雨大风等强对流天气,自动气象站观测到瞬时极大风速 $37.8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (13 级),造成重

大人员伤亡和严重的财产损失。其中大约在 14 时 30 分至 16 时 30 分(北京时,下同),兴化市 21 个乡镇遭受雷雨强风冰雹袭击,瞬时极大风速 $29.1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (11 级),因灾受伤 58 人,其中重伤 8 人,死亡 5 人。倒塌房屋 2538 间,树木倒断 42360 株,11 万伏铁塔倒塌 5 座。本文利用盐城多普勒天气雷达产品、自动站观测资料初步分析了兴化等地产生风灾的风暴特征。

1 天气背景特征

2007 年 7 月 25 日 08 时 500hPa 图上,东亚中高纬环流形势为一槽一脊,冷涡位于华北西部,低槽位于延安—安康—重庆一线并东移南下,沿淮一带中空有干冷空气活动。与此同时,副热带高压加强北上,588 线从 24 日 08 时沿江一带北跳到 25 日 08 时沿淮一带。在低槽前副热带高压西北侧西南风明显增大,500hPa、700hPa、850hPa 沿淮一带都出现了西南风急流轴,最大风速达 $20\sim 22\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。淮河以南转受副热带高压控制,持续 36 天梅雨结束,江苏中南部出现 $35\sim 38^\circ\text{C}$ 的高温。7 月 25 日 13 时 40 分江苏地面自动站风场资料显示,江苏苏北高邮、兴化、大丰出现中尺度切变线,低压中心位于兴化安丰一带(图 1a 实线)。从盐城射阳探空资料分析,08 时 K 指数为 34,SI 指数为 -3.1°C , 0°C 层高度在 5km 附近, -20°C 层高度在 8.5km 附近。从温度曲线和露点曲线的差值可以看出(图 2),700hPa 到 300hPa 差值比较大,最大出现在 500hPa,表明中层有干冷

空气。850hPa 以下为暖湿空气,低层高温高湿空气与中空的干冷空气叠加,加之地面有

切变辐合抬升,有利于强风暴的产生和发展。

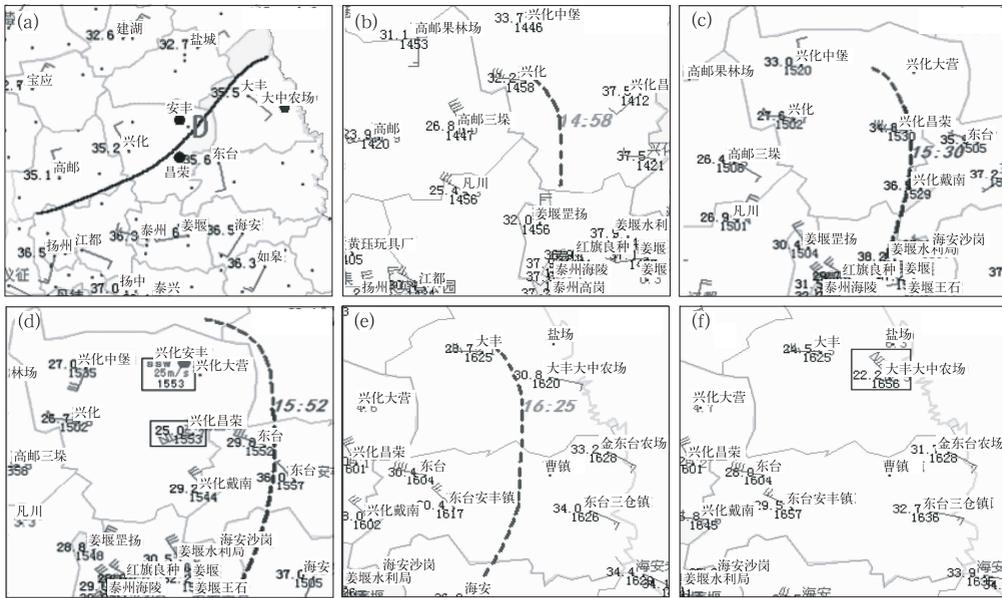


图 1 2007 年 7 月 25 日下午自动站地面极大风(整点后出现的最大瞬时风向风速)风场和气温
 实线为地面切变线,a、b、c、d、e、f 为 13:40、15:00、15:30、16:00、16:30 和 17:00,
 风矢量数字为气温(上)和极大风速出现时间,浅色数字为雨量,虚线表示为阵风锋,
 旁边斜体数字为出现时间,细线框内为自动站观测到下击暴流区的极大风

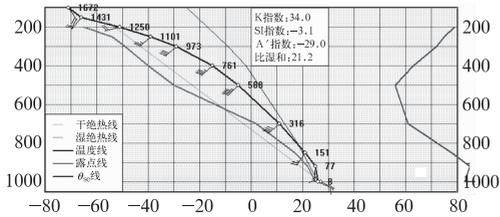


图 2 2007 年 7 月 25 日 08 时温度对
 数压力图—58150 站
 (120. 25°E、33. 77°N、7. 0m)

2 地面自动站资料分析

2007 年 07 月 25 日 15 时前后,兴化测站出现气压涌升(气压在 10 分钟内上升了 0.7hPa)、气温骤降(气温在 10 分钟下降了 7.4℃)、风向陡转(西北风转为西风)、风力陡增(14 时 58 分出现瞬时 14.8m·s⁻¹的大

风,15 时 02 分出现瞬时风力 19.6m·s⁻¹的大风),15 时 08 分出现雷阵雨。从这些气象要素的变化可以看出,15 时前后,有阵风锋经过兴化测站(图 1b,虚线)。从 7 月 25 日下午兴化市昌荣加密自动气象站要素变化看(表 1),15 时 30 分风向陡转(南南东转为西风)、风力陡增(15 时 30 分出现瞬时 13.7m·s⁻¹的大风),气温骤降(气温在 10 分钟下降了 6.1℃),阵风锋过境时间为 15 时 30 分(图 1c,虚线),降水产生在 15 时 50 分后。15 时 52 分,阵风锋东移到盐城东台测站附近(图 1d,虚线),弱西风转为偏西风、风力陡增到 13.8m·s⁻¹,气压在 10 分钟内涌升 0.6hPa、气温骤降 5.3℃,无降水。16 时 25 分,阵风锋移到盐城大丰测站附近(图 1e,虚线),东北风陡转为西风、风力陡增到 13.9m·s⁻¹,气压在 10min 内涌升 2.2hPa、

气温骤降 6.6°C , 16 时 29 分出现雷阵雨。从阵风锋自西向东经过以上 4 站前后气象要素的变化分析, 阵风锋过境时风向都转为偏西

风, 风速在 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (7 级) 左右, 气温骤降 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$, 无降水, 从中可以看出, 阵风锋产生在风暴前沿, 是有统一组织的中尺度环流系统。

表 1 2007 年 7 月 25 日江苏省兴化昌荣、大丰大中农场加密自动气象站要素变化表

时间/时.分	站点	温度/ $^{\circ}\text{C}$	降水量/mm, 10min^{-1}	极大风向/方位	极大风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	极大风出现时间/时.分
15 时 20 分	昌荣	36.0		SSE	1.3	15 时 03 分
15 时 30 分	昌荣	34.8		W	13.7	15 时 30 分
15 时 40 分	昌荣	29.9		SW	16.6	15 时 39 分
15 时 50 分	昌荣	28.6		WSW	18.0	15 时 41 分
16 时 00 分	昌荣	25.0	5.7	WSW	29.1	15 时 53 分
16 时 10 分	昌荣	25.8	0.4	NNW	11.6	16 时 01 分
16 时 40 分	大中农场	30.5	0.9	ESE	4.7	16 时 20 分
16 时 50 分	大中农场	24.6	1.9	NNW	21.3	16 时 42 分
17 时 00 分	大中农场	22.2	9.7	NW	37.8	16 时 56 分
17 时 10 分	大中农场	22.5	4.4	NNE	17.5	17 时 00 分
17 时 20 分	大中农场	22.7	0.1	NNE	17.5	17 时 00 分

下击暴流是一股很强的从风暴云下方向下冲出, 到近地面附近呈直线向下辐散的气流。事后有关人员灾情进行了调查, 从树木损坏的形态看, 直径几十厘米的大树大多数呈现被拦腰折断形状。根据实地灾情照片分析, 被大风拦腰折断的树木由中心倒向两侧, 倒伏方向相反, 呈辐散状, 与下击暴流在近地面处向外爆发的强下沉气流流向一致。从 7 月 25 日下午兴化市昌荣加密站分析(表 1), 阵风锋影响 20 分钟后降水产生。在 15 时 50 分到 16 时 00 分时段内, 降水量 5.7mm , 温度陡降 3.6°C , 15 时 53 分出现瞬时风力 $29.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (11 级) 的西南西大风(图 1d)。在 16 时 00—10 分时段内, 降水量 0.4mm , 16 时 01 分出现瞬时风力 $11.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的北北西大风。从气象要素前后变化看: 降水产生, 风力剧增, 温度陡降; 降水停止, 风力减小。15 时 53 分出现的 $29.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 极大风是伴随降水而产生的下击暴流, 是阵风锋后部风暴内降水物的拖曳下沉气流在近地面辐散引起的。从周边加密站看, 位于昌荣站偏北方向约 17km 的安丰站, 15 时 53 分也出现瞬时风力 $25.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (10 级) 的南南西大风(图 1d)。从表 1 大丰市大中农场自动站分析, 16 时 40 分之前, 产生弱对流性降水

0.9mm , 其它要素变化不大。16 时 40—50 分时段内, 降水量 1.9mm , 温度陡降 5.9°C , 16 时 42 分出现瞬时风力 $21.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的北北西大风。在 16 时 50 分到 17 时 00 分时段内, 降水量 9.7mm , 温度再降 2.4°C , 16 时 56 分出现瞬时风力 $37.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北大风(13 级)(图 1f)。在 17 时 00 分到 17 时 10 分时段内, 降水量 4.4mm , 17 时 00 分出现瞬时风力 $17.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的北北东大风, 在 17 时 10—20 分时段内, 降水量 0.1mm , 风力减小。从气象要素前后变化看, 与兴化昌荣站产生下击暴流是一致的, 大丰市大中农场观测到 13 级的大风也是由风暴内降水物的拖曳下沉气流在近地面辐散而产生的下击暴流。

3 多普勒天气雷达资料分析

2007 年 7 月 25 日下午 13 时 30 分后安徽天长有对流风暴生成东移到达江苏高邮, 14 时 44 分风暴前沿阵风锋进入泰州兴化市, 15 时 02 分风暴进入兴化市并移向东北。在此后风暴沿低层入流方向通过回波单体核心的垂直剖面图(图 3a、c、e、f 和 i, 见彩页)以及风暴高中低层反射率因子的平面综合图(图略)可以看出, 中低层回波强度(反射率因

子)梯度在低层入流一侧最大,风暴顶偏向低层高反射率因子梯度区一侧。中层(8km 高度左右)大于 20dBz 回波廓线向低层入流一侧伸展,悬垂于低层弱回波区之上,形成弱回波区(WER)和中高层回波悬垂的分布特征^[1,10],风暴持续出现的弱回波区和其上的回波悬垂结构,表明兴化境内的对流风暴为多单体强风暴。

3.1 多单体强风暴前沿阵风锋

3.1.1 阵风锋和风暴演变

7月25日下午14时44分,随着高邮境内多单体风暴移向东北,可以发现从北端风暴前沿伸出的、距风暴带5~10km、与弧状排列的多单体风暴带近平行的10~20dBz细长带状回波,高度在1.0~1.5km,为阵风锋回波。14时56分阵风锋东移到兴化测站附近,14时58分测站风向陡转为西风,出现瞬时 $14.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风。15时02分,风暴带形成弓形回波,顶部位于兴化测站以西,测站15时02分出现瞬时风力 $19.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风,持续时间约1分钟。此外,在盐城东部沿海有一条10~20dBz、近南北向的海陆锋,缓慢西行(图4a大红色箭头a所指为阵风锋,粉色箭头b所指为海陆锋,见彩页)。15时08分,阵风锋北端中空有新小单体生成,核心48dBz,高度位于6km(图4g红箭头所指,见彩页),15时14分,新生单体并入弓状回波顶部,弓状回波顶部迅速发展并断裂分成南北两块,北侧风暴并入新生单体后剧烈发展,风暴核心高度上升到9~11km,强度63dBz(图4h,见彩页),同时风暴向下发展,0.5km高度上出现33dBz回波(图4b红圈处,见彩页),阵风锋北端消失,中段到南段仍维持。15时26分,合并后北侧风暴核心下降,63dBz回波核下降到3~6km(图略)。阵风锋北端又从合并后风暴前沿伸出(图4c,见彩页),阵风锋中段逐渐靠近兴化市昌荣加密站。15时30分昌荣站风向陡转出现瞬时 $13.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北大风。15时32—38分,

阵风锋继续移向东北(图4d,见彩页),风暴带中北端风暴减弱,南端风暴变化不大。15时50分,南北两风暴同时减弱,阵风锋向西北延伸,北段上空又有新小单体生成,核心33dBz,高度位于6.5km(图略)。15时56分前后,阵风锋到达盐城境内东台测站附近,15时52分东台测站风向陡转为偏西风,出现瞬时 $13.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风。同时新生单体发展壮大并与北侧原风暴开始合并(图4i红箭头所指,见彩页)。16时02分,风暴合并后剧烈发展,风暴核心高度位于6km附近,强度增大到68dBz(图4j,见彩页)。阵风锋移出兴化市,并与海陆锋在大丰境内相遇(图4e,见彩页)。合并后的阵风锋继续东移,16时20分,接近大丰测站(图4f,见彩页),16时25分大丰测站风向陡转为西风,出现瞬时 $13.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风。与此同时,阵风锋前侧(原海陆锋东侧)也有新生单体发展(图4f紫圈处,见彩页),此后与东移的北侧风暴合并,北侧风暴进一步发展壮大形成飚线(图略),继续影响大丰等地。

从阵风锋演变分析,14时56分至16时26分,以平均 $45\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右的速度横扫兴化等地,所到之处,地面产生7~9级大风。从风暴和阵风锋演变分析,阵风锋上空有新单体生成合并进入原风暴,导致合并风暴剧烈发展,核心高度上升。当风暴核心高度下降,风暴减弱后,阵风锋上又有新生单体补充进原风暴,风暴得以发展加强,阵风锋继续维持。

3.1.2 阵风锋风场结构

阵风锋与海陆锋16时02分合并后,辐合明显加强。16时08分,随着阵风锋进一步靠近盐城雷达站,在 1.5° 反射率因子图上可以看到清晰的长弧状阵风锋回波带,强度为5~15dBz(图5a,见彩页)。 1.5° 速度图上,沿雷达径向与阵风锋垂直、0.5km高度辐合线处,离开雷达正速度一般在 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,风暴前沿较冷的在水平方向扩散形成的流向雷达的负速度一般在 $-3\sim-7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。辐

合线附近的径向速度梯度明显加大,负速度最大出现在距辐合线 3km 处,达 $-17\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,正速度最大出现在距辐合线 2km,一般为 $7\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5b,见彩页)。4.3°速度图上,可以看到细弧状的零速度线,为径向切变线(图 5c,见彩页)。最明显的辐合线出现在 6.0°速度图上,2~5km 高度正速度一般在 $3\sim 7\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大达 $13\sim 17\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。负速度一般在 $-3\sim -7\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大达 $-13\sim -17\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5d,见彩页),由低到高,正速度一侧暖空气向负速度一侧冷空气倾斜。

16 时 08 分,在流出速度最大处、沿径向作反射率因子垂直剖面图,可以看出,靠近雷达一侧悬垂结构明显,反射率因子核位于 6~9km,强度在 58~63dBz,在入流一侧有弱回波区 WER(图 5e,见彩页)。对应的径向速度垂直剖面图上,辐合特征明显,在弱回波区 WER 一侧有呈阶梯式离开雷达的正速度,辐合线处 1km 高度以下正速度 $3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,负速度 $-13\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。辐合线 1.5~3km 附近径向速度梯度明显加大,最大正速度达 $13\sim 17\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,有些像素点上离开雷达的径向速度已经达到了 $24\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5f 黄箭头所指,见彩页),最大负速度 $-7\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。辐合线处 6km 高度正速度达到 $7\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大负速度 $-13\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从地面到 4km,正速度区由前部向后部负速度区倾斜,4~8km 逐渐呈垂直形态。

3.2 多单体强风暴产生冰雹和下击暴流

3.2.1 反射率因子和速度图

15 时 32 分,北侧风暴 0.5°径向速度图上 0.6km 高度开始出现下击暴流辐散风场(图略)。15 时 38 分,在 0.5°反射率因子图上,北侧风暴内出现 58dBz 的核心区,对应着 0.5°径向速度图中一股下击暴流辐散气流的中心(图 6a、b 中双箭头所指,见彩页),北部为强烈负速度大风核心,最大负速度中出现了最小正速度 $24\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,根据速度退模糊算法,最大入流 $30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,南部为小的正速度

区,最大出流达 $3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大正负速度中心间的距离为 7~8km,构成一个不对称的低层辐散场,尺度大约在 12km 左右。南侧风暴 0.5°径向速度图上 0.9km 高度也出现较弱的辐散风场(图 6a、b 中黑箭头所指,见彩页)。15 时 44 分,在 0.5°反射率因子图上,南侧风暴出现 58dBz 的核心区,0.5°径向速度图出现辐散场,北部最大入流 $24\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,南部最大出流达 $13\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6c、d 中黑箭头所指,见彩页),尺度大约在 12km 左右;北侧风暴径向速度图上,辐散速度减小(图 6c、d 中双箭头所指,见彩页)。15 时 50 分,南侧风暴低层辐散场中,北部最大负速度 $12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,南部最大正速度 $7\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6e、f 中黑箭头所指,见彩页);北侧风暴低层形成强烈的辐散场,北部出现强烈负速度大风核心,0.5km 高度最大辐散速度达到 $30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,南部最大正速度 $12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6e、f 中双箭头所指,见彩页)。15 时 56 分,南侧风暴辐散场中,北部最大入流 $12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,南部最大出流达 $12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6g、h 中黑箭头所指,见彩页),相应靠近南侧风暴的兴化市昌荣加密站 15 时 53 分出现瞬时风力的 $29.1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风;北侧风暴辐散场中,北部最大入流 $24\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,南部最大出流达 $12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6g、h 中双箭头所指,见彩页),对应靠近北侧风暴的兴化市安丰加密站 15 时 53 分只出现瞬时风力 $25.1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风。16 时 02 分,南侧风暴减弱北移;北侧风暴低层辐散场中,北部最大入流 $24\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,南部最大出流达 $7\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6i、j 中双箭头所指,见彩页),正负速度中心间距减小到 5km 左右,尺度增大到 18km 左右,呈近对称形,表明下沉气流触地后向四面扩散尺度逐渐增大。此后,低层辐散减弱,下击暴流在兴化长达半个多小时的影响结束。北侧风暴移出兴化后,继续发展东移,在大丰等地又产生一系列严重的下击暴流。

对比分析 15 时 50—56 分南北两个风暴低层辐散场,北侧风暴明显强于南侧风暴,相

应北侧风暴产生的下击暴流强度应大于南侧,而自动站观测到的瞬时风力南大北小,是由于自动站距离风暴辐散中心远近不同导致的。从兴化产生的一系列下击暴流分析,尺度均大于 10km,持续时间超过 30 分钟,为宏下击暴流^[5]。宏下击暴流强烈时可造成与龙卷类似的风害^[1]。从兴化灾情资料分析,宏下击暴流产生的灾情严重程度与龙卷相似。

3.2.2 风暴的垂直结构分析

15 时 14 分,北侧风暴并入新生单体后剧烈发展加强,风暴核心高度上升到 9~11km,强度 63dBz,最大反射率因子已达 68dBz,高度 11km(图 3a)。而 0℃层高度大约 5km,-20℃等温线高度大约 8.5km,当强回波区扩展到-20℃等温线之上时,对强降雨的潜势贡献最大(Witt 等,1998)^[11]。风暴 63dBz 以上核心位于-20℃等温线之上,入流一侧具有弱回波区悬垂结构,为强雹暴结构。沿径向作速度垂直剖面图,可以看出,在弱回波区前侧 3~4km 有离开雷达的 $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 正速度,后侧为负速度,大值区位于 4~6km,一般为 $-17\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大 $-24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,中低层辐合特征明显,高层 12km 以上为辐散速度区,从低层到高层,辐合中心向风暴移动方向倾斜(图 3b,见彩页)。15 时 20 分,风暴核心面积扩大,同时向下发展,最大 63dBz 回波出现在 5~6km 高度,风暴云顶向上延伸到近 18km(图 3c,见彩页)。速度垂直剖面图上,前侧 3km 高度附近正速度 $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 面积增大,低层辐合加大,高层 12km 以上出流速度 $13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,入流速度 $-24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,高层辐散增大(图 3d,见彩页)。15 时 32 分,风暴核心下降,位于 1~7km 高度,下击暴流产生(图 3e,见彩页)。15 时 38—50 分,风暴核心高度呈阶梯式下降,风暴前沿入流一侧核心高度较高,有悬垂结构特征,后侧核心下降(图 3f、g、h 和图 4i、j,见彩页)。

15 时 26 分,对南侧风暴沿风暴移动方向作反射率因子和速度垂直剖面图,风暴核

心高度 6~8km,强度 63dBz(图 3i,见彩页)。入流一侧有弱回波区 WER。径向速度垂直剖面图上,3km 高度辐合明显,在弱回波区前侧有正速度 $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,后侧为负速度,一般为 $-17\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大 $-24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,高层 12km 以上为辐散速度区(图 3j,见彩页)。15 时 44 分,沿 0.5°反射率因子图上南侧风暴核心作剖面,反射率因子核下降到 3km 以下(图 3k,见彩页)。15 时 50 分,沿南北两风暴低层核心作剖面,南侧风暴减弱明显,3km 以下 58dBz 回波面积较小(图 3l 紫色箭头所指,见彩页);北侧风暴 3km 以下 58dBz 回波面积较大。

15 时 14—20 分,北侧风暴中低层出现辐合,15 时 20—26 分风暴内反射率因子核持续下降,15 时 32 分开始,下击暴流持续产生;15 时 26 分,南侧风暴中低层出现辐合,此后风暴内反射率因子核持续下降,下击暴流产生。观测事实表明,在下击暴流到达地面之前,可以观察到反射率因子核心的持续下降,并伴随着云底以上向着反射率因子的辐合特征,这为下击暴流预警提供了非常重要的线索^[2]。因此,中低层出现辐合特征、反射率因子核持续下降可用于下击暴流的临近预报。

3.2.3 冰雹分析

新的冰雹指数产品可以在识别的风暴单体属性表中给出相应单体降冰雹的概率、降大冰雹的概率和预期的最大冰雹尺寸,并以相应的图形形式显示出来^[10]。分析盐城多普勒天气雷达冰雹指数(HI)产品,15 时 14 分开始,HI 产品显示南、北两风暴均有 2cm 以上直径的大冰雹(通常将降落到地面的直径超过 2cm 的冰雹称为大冰雹),图形显示最大可能冰雹尺寸 MEHS 为 2,超过了 50% 大冰雹概率 POSH 填充阈值,其中南侧风暴 15 时 14—32 分持续显示有 2cm 以上直径的大冰雹;北侧风暴 15 时 14—26 分持续显示有 2cm 以上直径的大冰雹,15 时 38 分、44 分、50 分分别显示 MEHS 为 2、3、2 的大冰

雹。对应实况,受南、北两风暴影响的乡镇均降雹,不少棉花的叶茎被砸断。根据 14 时许风暴影响高邮时,HI 产品显示有 MEHS 为 2 的降雹,实况产生蚕豆大小的冰雹,估计兴化冰雹直径大约为 1~2cm,与 HI 产品提供的南、北两风暴 2cm 以上直径大冰雹尺寸比较,直径偏小。融化效应是另一个决定地面观测到的冰雹大小的因素。冻结层的高度是影响融化效应的因素之一。冻结层距地面越高,则融化过程越长,地面观测到大冰雹的可能性越小^[12]。由于 0℃ 层高度大约 5km,加之中低层环境温度高(7 月 25 日 20 时射阳探空 700hPa 10℃,850hPa 26℃),冰雹在降落到地面的过程中,融化效应导致直径变小。因此,这次过程中 HI 产品对冰雹发生的概率和落区的预报与实况一致,尺寸也比较对应。此外,由于通过探空获得并输入给冰雹指数算法的 0℃ 和 -20℃ 层高度通常是 08 时附近探空站的资料,冰雹等强对流天气一般发生在午后到上半夜,时空不对应降低了 HI 产品性能,给冰雹预警带来难度。通过总结本地更多的冰雹个例,修正 0℃ 和 -20℃ 等温线的高度值,可以提高 HI 产品性能,增加冰雹预警可用性。

3.3 VIL 和最大反射率因子核高度分析

垂直累积液态含水量 VIL 是反映降水云体中,在某一确定的底面积(4km×4km)的垂直气柱体内液态水总量分布的图形产品,显示范围 230km,分辨率 4km×4km,它是用来判断对流风暴强度的一个十分有用的参量,其定义为液态水混合比的垂直积分。液态水混合比是通过雷达测量的反射率因子和雨滴之间的经验关系: $M=3.44 \times 10^{-3} Z^{4/7}$ 进行计算的,这里 M = 液态水含量($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), Z = 雷达反射率因子($\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$)。从每个 4km×4km 网格中导出值 M ,然后再垂直积分得到 VIL,VIL 值的单位是 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[10]。

图 7(见彩页)第一、二行为 VIL 值分布

图叠加风暴追踪信息 STI,15 时 20 分,兴化境内有南北两个多单体风暴,北侧风暴 VIL 最大值大于 $70 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,面积有 $4.4 \text{km} \times 4 \text{km}$,南侧多单体风暴 VIL 最大值大于 $70 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,面积有 $2.4 \text{km} \times 4 \text{km}$ (图 7a,见彩页),北侧风暴 15 时 32 分产生下击暴流,南侧风暴 15 时 44 分产生下击暴流。15 时 50 分,南侧风暴 VIL 最大值大于 $30 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,面积有 $2.4 \text{km} \times 4 \text{km}$ (图 7b,见彩页),减弱明显,下一体扫南侧风暴消失。北侧多单体风暴 VIL 最大值大于 $65 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,面积有 $2.4 \text{km} \times 4 \text{km}$ (图 7b,见彩页),北侧风暴仍然发展旺盛。此阶段南北风暴均产生下击暴流,15 时 53 分,北侧风暴附近安丰自动站观测到 $25.3 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风,南侧风暴附近昌荣自动站观测到 $29.1 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风。16 时 02 分,北侧风暴产生下击暴流,VIL 最大值大于 $45 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,面积有 $2.4 \text{km} \times 4 \text{km}$ (图 7c,见彩页),这是北侧风暴出现最小的 VIL 最大值,此后 VIL 最大值回升。对照分析风暴追踪信息 STI,VIL 最大值出现在 STI 未来预报路径上,下击暴流辐散中心出现在 STI 当前位置,STI 路径位于切变线附近。16 时 56 分,北侧风暴面积增长迅速(图 7d,见彩页),包含多个风暴质心,其中一个风暴质心 VIL 最大值大于 $70 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,面积有 $1.4 \text{km} \times 4 \text{km}$,位于大丰大中农场附近(图 7d 深蓝方框内,见彩页),此阶段大中农场连续产生下击暴流(表 1),16 时 56 分观测到 $37.8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风。风暴出现 VIL 最大值大于 $70 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 与下击暴流产生相对应。

图 7e(见彩页)中蓝色、红色柱形图分别表示南、北两风暴 6 分钟最大 VIL 值时间序列。南侧风暴下击暴流产生前,15 时 02—38 分,VIL 值维持在 $55 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,15 时 44 分,VIL 最大值突然下降,下击暴流产生,此时 VIL 最大值为 $40 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,15 时 50 分,VIL 值下降到 $30 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,15 时 56 分,VIL 值下降到 $15 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,此阶段连续产生下击暴流,南侧风暴是孤立风暴,VIL 值快速下

降伴随下击暴流连续产生特征表现最为明显。北侧风暴下击暴流产生前,15时02—26分,VIL最大值维持在 $70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,15时32—38分,VIL最大值突然下降到 $65\sim 55\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,下击暴流产生,15时44分,VIL最大值又跃增到 $70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,此后三个体扫连续下降,从 $65\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 下降到 $45\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,此阶段连续产生下击暴流。此后,16时26分、38分、44分、56分,VIL最大值均大于 $70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,风暴连续出现VIL最大值大于 $70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,表明北侧多单体风暴不断发展,维持长生命史强风暴结构,导致下击暴流连续产生。

图7f(见彩页)中两柱形图分别表示南、北两风暴6分钟最大反射率因子核高度时间序列,湖蓝线表示 0°C 层高度。深蓝线表示 -20°C 层高度。风暴中最大反射率因子核值维持 $55\sim 67\text{dBz}$,从图中可以看出,在下击暴流产生前,15时02分南侧风暴最大反射率因子核高度为 9.1km ,15时14分北侧风暴最大反射率因子核高度为 10.4km ,均位于 -20°C 层高度之上,产生下击暴流的反射率因子核往往开始出现在比其它雷暴单体核更高的高度^[1]。因此风暴中初始最大反射率因子核高度高,表明下击暴流产生的可能性大。15时32分,北侧风暴最大反射率因子核高度下降到 2.4km ,下击暴流开始产生。15时38—50分,由于阵风锋上有新生单体补充进原风暴,北侧风暴最大反射率因子核高度又上升到 $7\sim 8\text{km}$,同时产生下击暴流。此后,北侧风暴频繁出现最大反射率因子核高度下降和上升,伴随产生一系列下击暴流。15时38分,南侧风暴最大反射率因子核高度下降到 3.0km ,对应低层速度图上开始出现弱辐散场。此后,连续产生下击暴流,最大反射率因子核高度持续下降,15时56分下降到 1.6km ,南侧风暴减弱消失。

从15时02分到16时02分南、北两风暴6分钟最大反射率因子核高度分析,初始高度高于 -20°C 等温线高度,产生下击暴流

的风暴比其它雷暴单体核具有更高的高度。从15时20分到17时08分,北侧风暴VIL最大值演变中可以看出,风暴循环更替出现VIL最大值大于 $70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,表明多单体风暴不断发展,从而维持长生命史强风暴结构,导致下击暴流连续产生。从自动站观测到的一系列下击暴流看,都是风暴在沿切变线附近东移路径上产生的。南侧风暴是孤立风暴,孤立风暴VIL值快速下降伴随下击暴流产生特征最为明显。

4 小结

通过运用多普勒天气雷达探测结果对2007年7月25日江苏兴化强雷暴阵风锋和下击暴流、冰雹天气过程进行分析,得到以下结果:

(1) 下击暴流产生的主要天气背景是副热带高压北跳出梅形势,低层高温高湿、中层有干冷空气,地面有切变线。产生的下击暴流为宏下击暴流,影响程度与龙卷灾情类似。

(2) 阵风锋在低层反射率因子图上表现为弧状细长窄带回波。阵风锋移动方向与多单体强风暴移动方向一致,因此阵风锋对预报雷暴大风具有较好的指示意义。

(3) 阵风锋与多单体风暴有正反馈关系。阵风锋上空有新单体生成合并进入原风暴,导致合并风暴剧烈发展、核心高度上升;当核心高度下降、下击暴流产生、风暴减弱后,阵风锋上又有新生单体补充进原风暴,风暴继续发展加强,进而导致下击暴流连续产生,阵风锋持续影响。

(4) 多单体风暴出现高悬强反射率因子核、中低层出现辐合特征、反射率因子核持续下降可用于下击暴流的临近预报。

(5) 多单体风暴前沿循环更替出现VIL值大于 $70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,表明多单体风暴前沿不断发展,后部减弱消亡,从而维持长生命史强风暴结构。

(6) 产生下击暴流的多单体风暴,其反

射率因子核初始高度高于 -20°C 等温线高度,比其他雷暴单体核具有更高的高度。

致谢:对中国气象局培训中心俞小鼎教授的指导和帮助,表示诚挚的感谢。

参考文献

- [1] 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象,2005,24(3):456-464.
- [2] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报,2006,17(4):385-393.
- [3] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕编著. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2001:280-341.
- [4] Fujita T T, Byers H R. Spearhead echo and downbursts in the crash of an airliner[J]. Mon Wea Rev, 1977, 105:129-146.
- [5] Fujita T T. The Downburst[R]. SMRP Research Paper 210. Chicago: University of Chicago, 1985: 1-122. [NTIS PB-148880]
- [6] 李国翠,郭卫红,王丽荣,等. 阵风锋在短时大风预报中的应用[J]. 气象,2006,32(8):36-41.
- [7] 刘娟,宋子忠,项阳,等. 淮北地区一次强风暴的弓形回波分析[J]. 气象,2007,33(5):62-68.
- [8] 王彦,吕江津,王庆元,等. 一次雷暴大风的中尺度结构特征分析[J]. 气象,2006,32(2):75-80.
- [9] 毕旭,刘勇,刘子林. 陕西中部一次下击暴流的多普勒雷达回波特征[J]. 气象,2007,33(11):54-61.
- [10] 俞小鼎,姚秀平,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:105,197,185.
- [11] Witt A and Co-authors. 1998. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. Wea. Forecasting, 13:286-303.
- [12] 廖晓农,俞小鼎,于波. 北京盛夏一次罕见的大雹事件分析[J]. 气象,2008,34(2):10-17.

吴芳芳等：一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征

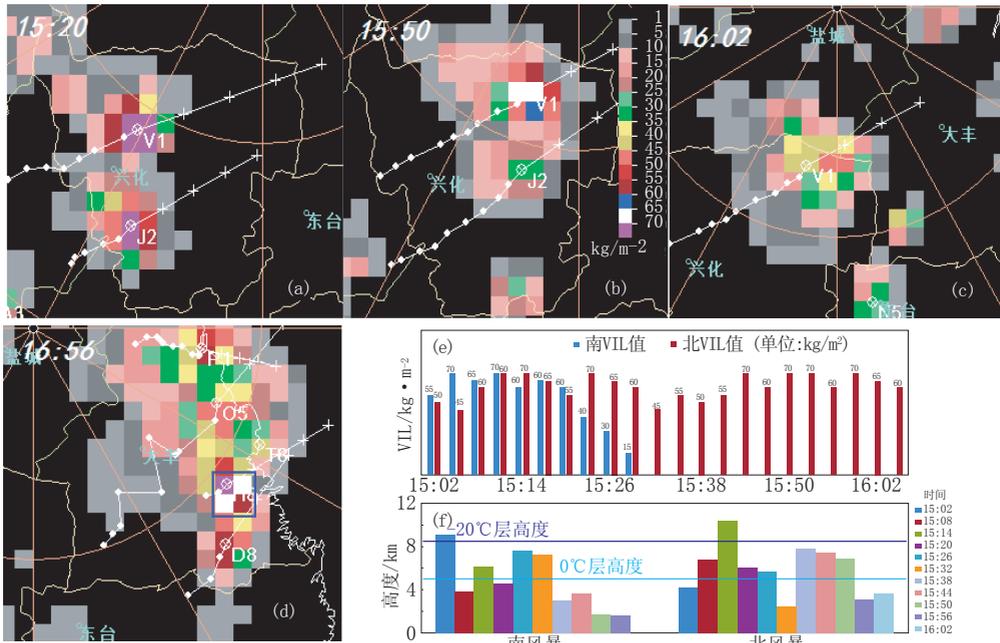


图7 2007年7月25日15:20和15:50南(a和b)、(c和d)北风暴盐城雷达VIL分布图
 e为6分钟最大VIL时间序列(红色柱表示北风暴,蓝色柱表示南风暴),
 (f)为兴化境内南、北风暴中6分钟最大反射率因子核心高度时间序列

吴芳芳等：一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征

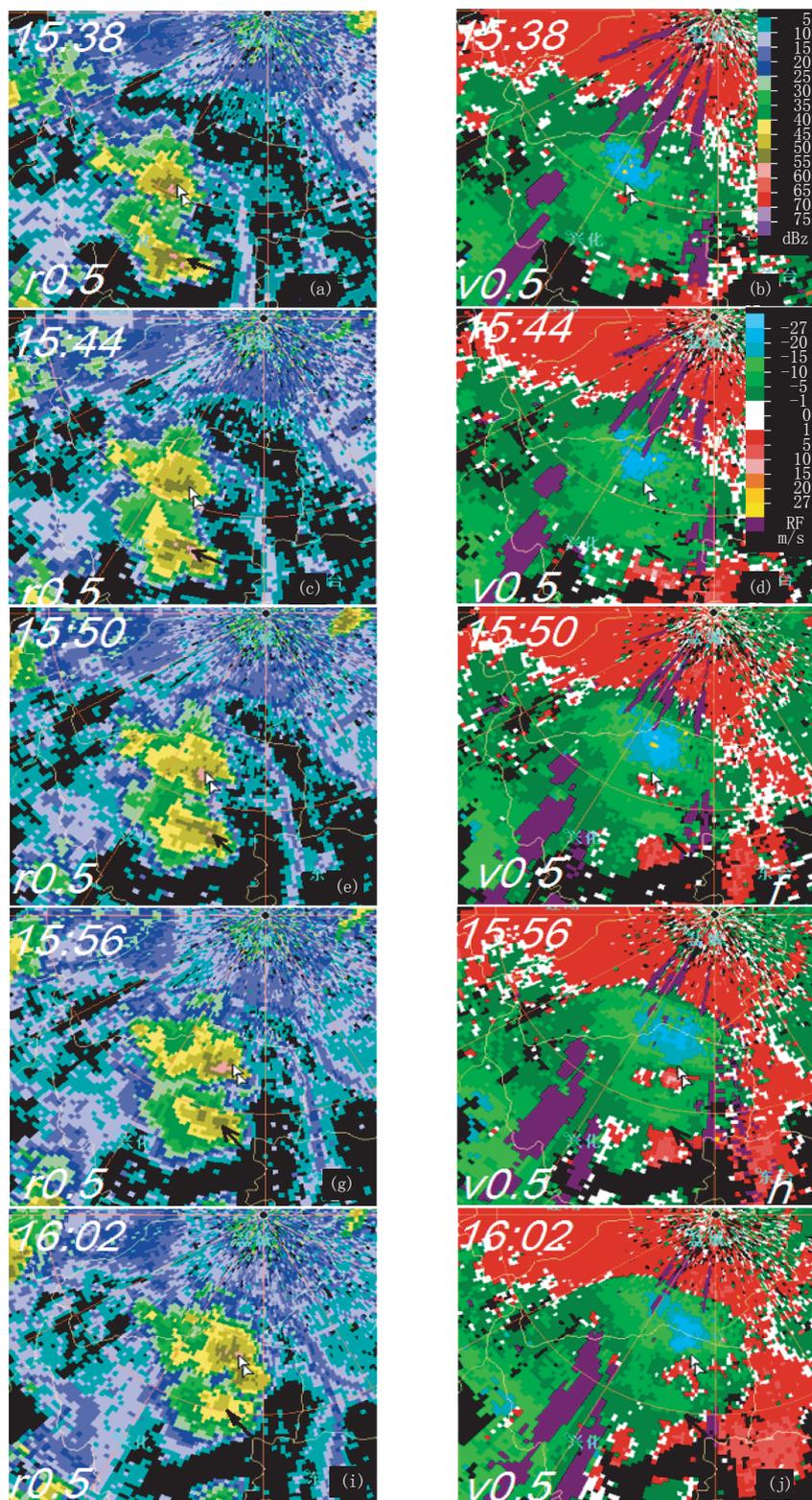


图6 2007年7月25日15:38—16:02盐城雷达0.5° 反射率因子图和径向速度图(径向分辨率1 km)

吴芳芳等：一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征

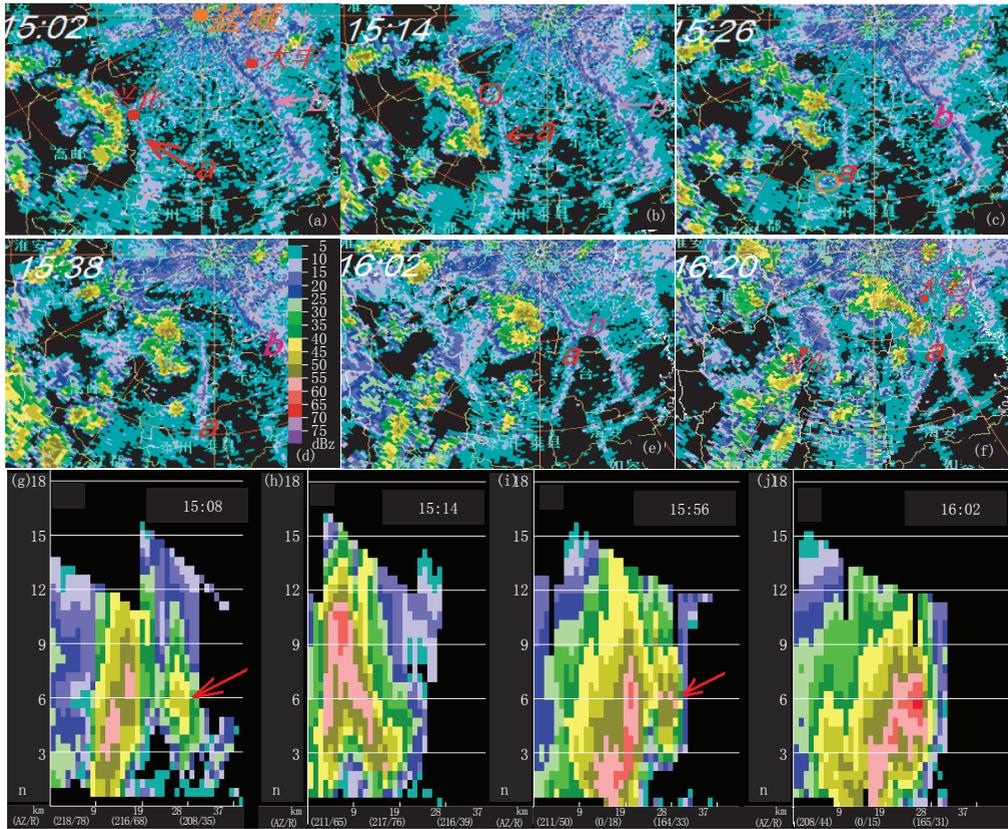


图4 2007年7月25日15:02—16:20盐城多普勒天气雷达0.5°反射率因子图(a~f, 径向分辨率1 km)和15:08—15:56反射率因子沿风暴移动方向的垂直剖面图(g~j) 图中横坐标和纵坐标的单位为km

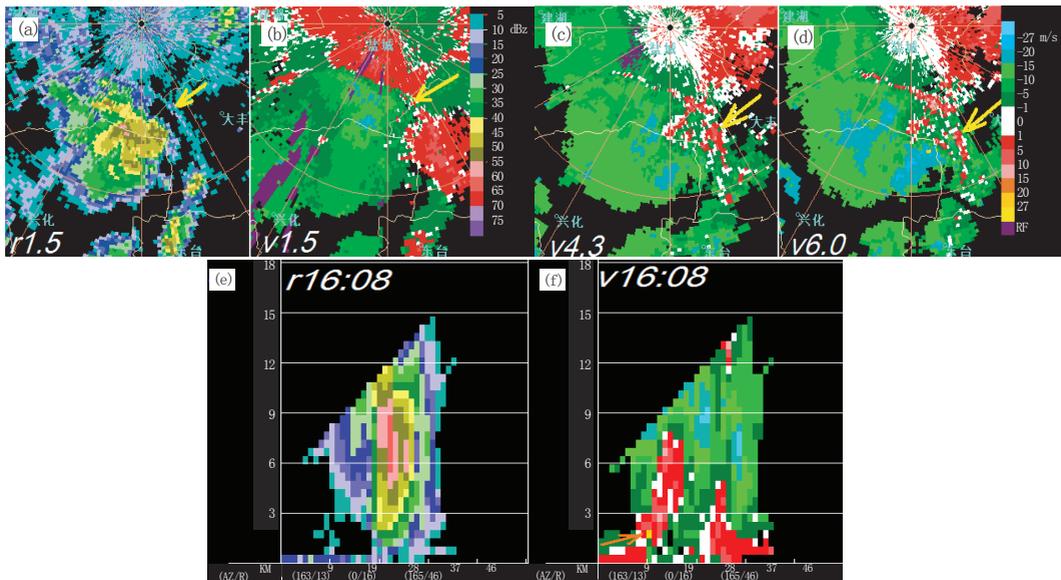


图5 2007年7月25日16:08盐城多普勒天气雷达回波图 (a) 1.5°反射率因子图, (b) 1.5°径向速度图, (c) 4.3°反射率因子图, (d) 6.0°径向速度图, 径向分辨率1km。(e) (f) 分别为沿出流速度最大处作径向反射率因子垂直剖面图和速度垂直剖面图, 图中横坐标和纵坐标的单位为km

吴芳芳等：一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征

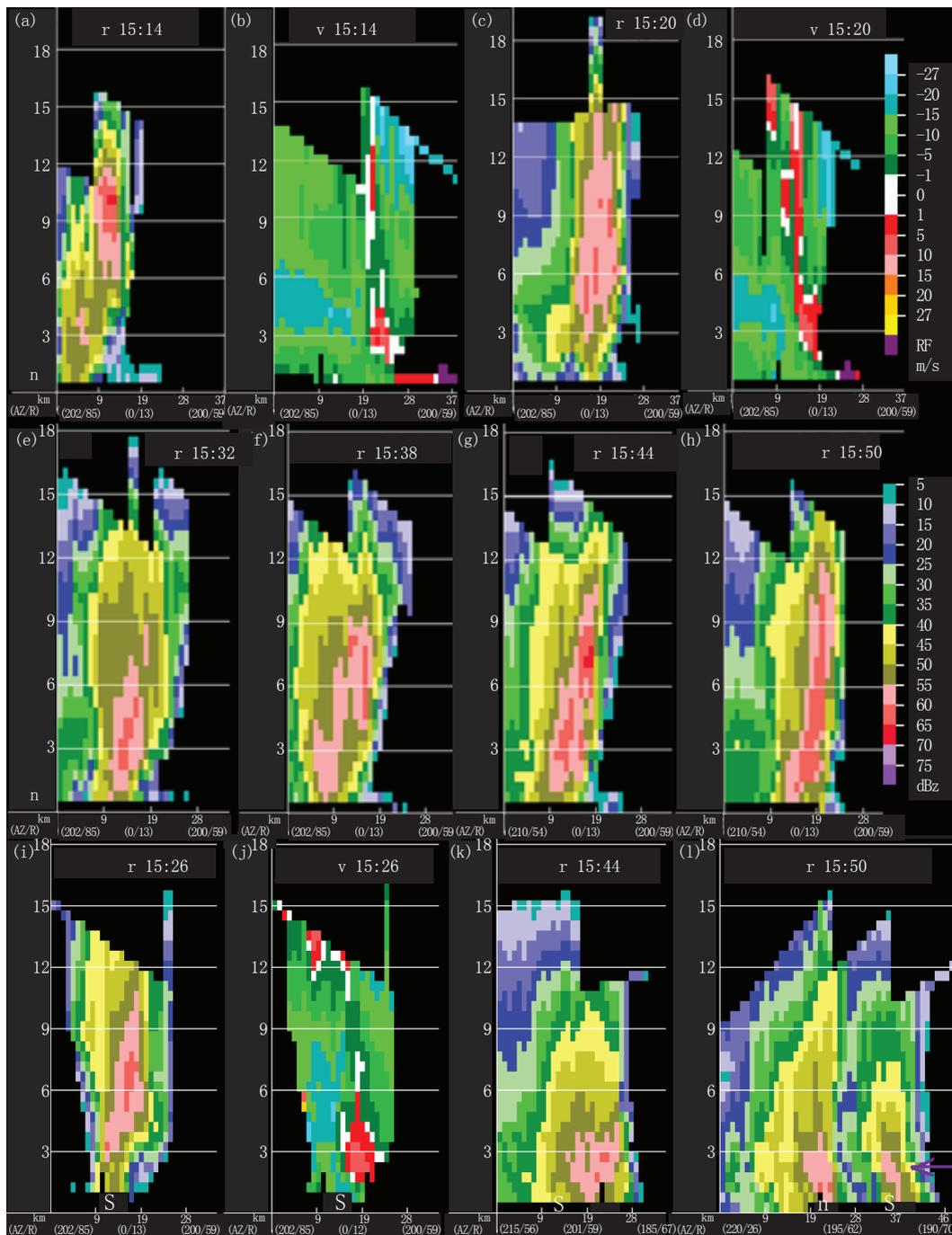


图3 2007年7月25日盐城雷达反射率因子垂直剖面图和速度垂直剖面图
a~h为北风暴, i、j、k为南风暴, l为南、北两风暴。图中横坐标和纵坐标的单位为km