

淮北地区一次强风暴的弓形回波分析

刘 娟 宋子忠 项 阳 卢 海

(安徽省阜阳市气象局, 236001)

提 要: 2005年7月16日淮北地区发生了一次强风暴天气过程。主要使用新建成的阜阳 CINRAD-SA 多普勒天气雷达观测资料,辅以天气图、本站高空观测、地面观测资料,对此过程进行了综合分析。结果表明:这是一次以灾害性大风为主、有雨暴相伴随、局部还有冰雹发生的强对流天气过程。影响系统是一条中- β 尺度的弓形飑线回波带。弓形回波带是由更早些时间出现的弧形的阵风锋触发而成的。中层干冷空气的侵入加强了对流云体中的下沉气流和低层出流,形成阵风锋。在如何综合应用如此丰富的雷达产品做好临近预报方面作了初步的尝试。

关键词: 强风暴 弓形回波 阵风锋

Analysis of the Bow Echo of a Severe Storm in Northern Part of Huaihe River

Liu Juan Song Zizhong Xiang Yang Lu Hai

(Fuyang Meteorological Office, Anhui Province, 236001)

Abstract: Using CINRAD-SA Doppler radar data in Fuyang, as well as weather chart, and the observation data at upper-air and surface, a severe storm weather process occurring in the northern region of Huaihe River on July 16, 2005 is analyzed. The results show that this is a severe convective weather process with catastrophic gale, rainstorm and local hailstone, and it was caused by a bow meso- β scale squall line echo belt, which was triggered by arc gust front in the earlier time. Further, the dry cold air into the cloud region at the middle-level intensify the downdraft and the lower-level outflow, and then the gust front was formed. On the other hand, an initial attempt to do nowcasting was made in terms of the synthetical application of various radar products.

Key Words: severe storm bow echo gust front

由国家自然科学基金项目(编号:40575012)资助。

收稿日期:2006年10月10日; 修定稿日期:2007年4月9日

引言

我国新一代天气雷达系统的业务应用,使得对与灾害性大风相联系的强对流天气的监测和预警有了长足的进展,这得益于从雷达回波中提取的径向速度信息、雷达接收机很高的灵敏度、较高的图像分辨率和连续的体扫观测模式。这方面一个突出的表现就是对弓形回波系统的认识普遍提高了。从华南到华北都探测到了弓形回波,如对2005年3月22日影响华南地区的飚线过程,广西南宁714SD雷达^[1]和福建龙岩SA雷达^[2]先后都探测到了典型的弓形回波系统,龙岩SA雷达探测到了 $33\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的较大范围的弓形回波后侧入流急流;河北新乐雷达探测到了2004年6月7日的虽尺度较小但带来大风的弓形回波^[3]。

弓形回波带来灾害性大风的观测事实,传统的非多普勒天气雷达观测就能做到^[4-5]。应用了新一代天气雷达的多普勒功能之后,如何综合分析回波的强度、径向速度、速度谱信息,争取在成熟的弓形回波出现之前预见到将要形成弓形回波,在哪些区域形成,如果能做到这些,对于提高预报预警的时效、准确预报出灾害性大风的落区有重要意义,服务的效果就会更好。本文通过对2005年7月16日淮北地区一次强风暴天气过程的综合分析,在这方面做了初步的探讨,得到了一些有益的启示。

1 强风暴天气实况和灾情

2005年7月16日安徽省淮北地区自西向东出现了一次强风暴天气过程。共有9个观测站、12个站次报告了大风(其中有3个站报了2次),风力从 $17\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 到 $23\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 不等,风向都含有西风分量,伴有短时强降水和冰雹,有13个站出现了1小时10mm以上的降水(以下简称为雨暴)。强风暴造成的主

要是风灾。颍上有5个乡镇受灾,风力超过8级,当地民政部门报告称为龙卷风,树木、电线干被刮断,造成大面积停电,死亡1人;冰雹砸落了农作物的叶子,高杆农作物被刮倒,大风毁坏了一个养鸡场大棚,阜南县3个乡镇受灾,刮倒刮断树木1860棵,毁坏房屋538间。天气的强烈程度可见一斑。

这次灾害性大风天气是一次有雨暴、冰雹相伴的强对流过程,大风等时线和雨暴等时线以及各个时次的地面辐合线(图略)的走向、移向均相同,和弓形回波系统的走向、移向也一致;大风超前于雨暴而发生,说明地面辐散是显著的。

2 强风暴发生的天气背景分析

2.1 天气图分析

这次强风暴是发生在副热带高压西北部的不稳定区中。2005年7月16日08时500、700和850hPa等压面上,本站都是处在西南气流中,等高线经向度大,本站附近沿着西南气流这三层都有风速辐合,因此天气尺度的抬升条件是具备的;本站500hPa高度为591dgpm;500hPa 24小时变温郑州、南阳均为 -2°C ;阜阳、徐州为 -1°C ,说明这一气层有冷空气活动。08时地面形势东高西低,本站处在均压区中,东南风 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。前期主汛期特大暴雨刚刚过去,7月15日淮北地区仍有雷阵雨,大气下垫面很湿。

2.2 本站高空探测资料分析

2.2.1 稳定度分析

本站16日08时探空资料(见表1)表明,整层大气都很湿, $T-\ln p$ 图上可见,不具有上干下湿的大气层结,仅仅中层相对干一些;和15日08时对应等压面温度比较,600hPa以下气层皆为增温,500hPa降了 1°C ,400到250hPa又是增温;本站08时 $T-$

ln*p* 图(图 1b)表明大气层结存在强的热力不稳定,抬升凝结高度和自由对流高度都较低,对流上限很高,达到 250hPa 以上。沙氏指数为 -6.7°C ,是强雷暴指标; K 指数为 41,是成片雷雨指标^[6]。需要指出的是,象这种潜在不稳定,在副热带高压西北部几乎是天天都存在的。15 日 08 时的 T -ln*p* 图(图 1a)表明不稳定能量比 16 日 08 时的还要大。为什么 16 日出现了强风暴,而 15 日只是一般雷阵雨呢? 下面还将进行讨论。

2.2.2 风切变分析

表 1 中的测风资料表明,16 日 08 时 400hPa 及其以下气层随高度增加风向由东南转西南,300hPa 及其以上的风向为西北,风向的配置有利于不稳定加强。

16 日 08 时整层风向随高度增加而强烈顺转。从 300m 到 16km(云顶高度)强烈顺转达到 251° 。且风速由低层的 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速增大到 $16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,垂直风切变的增强有利于上升气流和下沉气流在相当长的时间内共

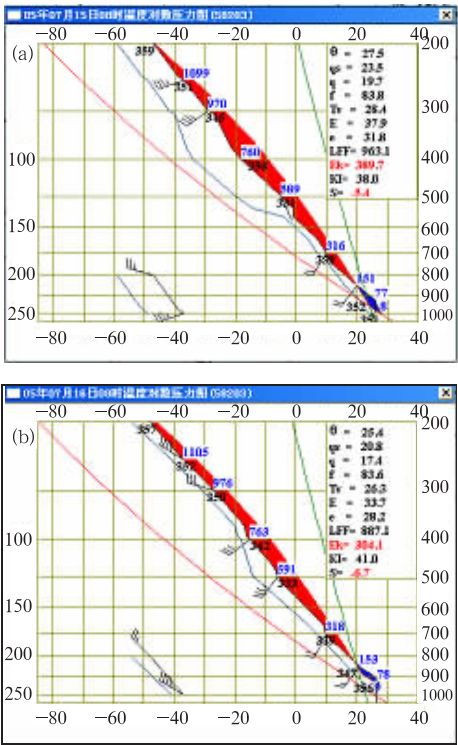


图 1 2005 年 7 月 15 日 08 时(a)16 日 08 时(b)阜州站 T -ln*p* 图

表 1 2005 年 7 月 16 日规定等压面(hPa)的温度($^{\circ}\text{C}$)、露点($^{\circ}\text{C}$)、风向($^{\circ}$)/风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

气压	T_{08}	T_{20}	T_{D08}	T_{D20}	V_{08}	V_{20}
1000	26.0	24.9	22.7	22.6	c/0	c/0
925	26.9	28.4	21.6	23.3	183/4	142/11
850	21.3	21.5	16.9	18.9	217/5	185/13
700	9.9	8.4	7.0	3.8	206/7	237/14
600	3.9	-0.1	-0.1	-2.6	212/9	236/14
500	-5.4	-7.0	-13.4	-10.3	217/13	249/13
400	-15.2	-13.9	-17.7	-17.7	228/11	249/14
300	-27.0	-23.8	-31.1	-27.2	284/12	
250	-36.9		-40.9		298/16	
200	-48.2		-53.7		313/9	
150	-61.7				332/6	
100	-71.4				44/8	
70	-70.6				64/17	
50	-60.2				87/13	

存^[7]。由风暴相对螺旋度理论可知,这种垂直风切变环境非常有利于强风暴的发生、发展和维持。而 15 日 08 时从低层直到 250hPa 整层都是西南风。这或许就是产生

不同天气的原因之一。

2.3 卫星云图分析

15、16 日两天,副热带高压西北部的不

稳定区中一直存在着大尺度的强对流云带,西南—东北走向的云带贯穿 $15\sim 40^{\circ}\text{N}$,云带上有一系列的强对流云团此生彼消、不断更新。16日影响淮北地区的强风暴正是这条云带上最强的对流云团造成的。

图2(见彩页)是强风暴最强盛时的卫星云图,14时已经发展成椭圆形的中尺度对流云团,云团尺度大,边缘清晰,说明亮温梯度很大。

3 强风暴雷达回波系统的整体演变

从回波整体的演变来看,强风暴回波系统是从涡旋状演变成南北向回波区,在回波区的前沿发展成一条由多单体组成的飚线回波带,带的前沿是高回波反射率因子梯度区。回波系统自西向东影响了淮北和沿淮地区。阜阳雷达站对此过程进行了跟踪观测和短时、临近预报服务,获取了完整的雷达资料。

分析这次过程的整体回波演变(图3,见彩页)可见,7月16日04:08在河南省的汝南附近开始有弱的层积混合回波新生,最强的对流回波强度中心有 40dBz ,向东偏北方向移动,06:08在汝南的东部形成带状回波,强度有所增强。06:51回波迅速发展,范围扩大,同时在其西南方的桐柏山区东部又有大量层积混合回波新生,并快速移动,06:57与前面的回波连成一片,强度达到 60dBz 左右。08时回波的主体还都在河南省境内,其前沿刚刚进入安徽省。直到11时,本站西部一直存在大片降水回波,呈涡旋状分布,演变趋势是发展加强的,向东北移动。11时前后回波区东部、南部靠前沿处新生出许多强回波单体,达到 55dBz 以上,云顶 $13\sim 14\text{km}$,这些强单体嵌在大片的回波区中,有些排列成短带。回波系统在移动过程中继续发展加强。1小时后,呈现出南北向的回波区,南北向长约 300km ,东西宽约 200km 。

至13:00在回波区的前沿(也就是东部边缘,是入流一侧)上,强回波单体密集排列成飚线回波带,回波反射率因子梯度很大,这时影响本站,回波中心这时达到 65dBz 以上,云顶高度 15km 。回波系统进一步发展的结果是在回波区的前沿呈现出尺度较大的弓形飚线回波带,南北方向长约 300 多公里,带的宽度约有 30km 。带上各部分曲率基本相同,南北两部分很对称,飚线回波带就像是给回波区镶了一道边。这种完整的弓形结构一直持续到16:00,以后南段逐渐减弱,北段、中段依然强盛。随着回波的东移,离开雷达越来越远,只能探测到云体的中部,直到移出探测范围,回波系统都没有减弱,估计还会影响到苏北地区。

强回波系统强盛阶段从11:00到16:00,持续时间长达5小时之多,强度 65dBz 以上,顶高 $15\sim 16\text{km}$,前沿飚线回波带的回波强度梯度大,弓形结构保持时间长,这是它在反射率因子图像的主要特征。

回波移动特征是:回波单体沿着云体承载层平均风向往东北平移,新生单体在回波带前沿处向东传播,这两种运动的合成使回波系统整体向东北偏东移动。弓形回波带形成之前移速为 $30\sim 40\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,形成之后移速加快到 $50\sim 60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

4 和大风相对应的回波特征

4.1 弓形回波和地面大风的关系

根据地面观测的报告时间和测站的经纬度,在PUP上找出对应时间、对应经纬度的雷达回波,一一查对了大风和回波的关系。结果这12个站的大风除了寿县大风是由阵风锋^[8]产生的以外,其余的11个站次的大风都发生在弓形回波的前沿部位,都有 55dBz 以上的强回波与之对应。14:25和14:31的 0.5° 仰角R19产品上有一段阵风锋清晰可见

(图略),它造成寿县大风,寿县并没有降水。

4.2 中气旋、龙卷涡旋特征与地面大风的关系

中气旋产品是用来显示与 3 种方位切变类型的探测有关的信息,其中可能有误报的。在分析时应将它与风暴相对经向速度和基本反射率因子产品配合,尤其是仅仅在一个体扫中出现的中气旋,更要认真分析其真伪。这次强风暴过程中,雷达识别出了很多中气旋,也识别出了多个龙卷涡旋特征,有 8 个站次大风伴有中气旋。这些测站离雷达的距离都在 120km 之内;除寿县以外,有 3 个站次的大风没有伴随中气旋,这些站距雷达 150~180km 之间。其他的中气旋由于不在测站附近,不能一一反查它们带来何种天气。

雷达在 11:35 识别出第 1 个中气旋 W8,最强切变为 $6 \times 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$,但它在下一个体扫就没有了。从 12:05 到 14:25 时间内,连续 24 个体扫内都有中气旋出现,其中还有 6 个体扫中同时出现了龙卷涡旋特征。从地面观测和实况、灾情得知都是大风,没有龙卷。因为 7 月 30 日安徽灵璧县出现龙卷^[9]时,中气旋持续了 5 个体扫。在连续 24 个体扫中,能持续 3 个体扫以上的中气旋有 4 个,分别为 W8、T4、Y8 和 V4,而 Y8、V4 同时还被识别为龙卷涡旋特征。所有中气旋里,最强切变的最大值为 $24 \times 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ (W8);而龙卷涡旋特征中,最强切变的最大值为 $35 \times 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ (Y8),它们都在地面出现了大风。

分析中气旋和反射率因子的关系,可知:中气旋位于弓形回波带前部的强度梯度最大处,回波带从低层到高层有明显的前倾结构(图 4 中的双箭头处,见彩页),且前侧有清晰的入流槽口(图 4,见彩页)。而中气旋在风暴相对平均径向速度图上各层都有一个 $-20 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 $5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度对相对应(图略)。龙卷涡旋特征 V4 就位于中气旋 V4

上。这些龙卷涡旋特征虽然没有形成及地的陆龙卷,但对于预报大风是有指示作用的。

4.3 地面流场与地面大风的关系

分析淮北地区逐时地面流场可知,09 时在太和西部的地面辐合线,10 时已移过太和、阜阳,且从 10 时至 11 时一直维持在阜阳、阜南与涡阳、利辛之间(图略)。这种流场为东移回波的发展提供了有利条件,即当西部大片的降水回波移到辐合区后,得到了迅速发展加强。

5 回波系统的中低层结构特征

在 4.2 的分析中已知,强风暴的垂直方向上具有明显的前倾结构。图 5(见彩页)给出强风暴强盛阶段的中低层回波结构。在回波区后部确实有一个弱回波区,弓形回波带后有南、北两个大风中心,与之相对应两处都出现了中气旋和龙卷涡旋特征。从西南方向出现一些弱回波,逐渐变为无回波,无回波范围逐渐扩大,使回波区南段逐渐变窄,整个回波形态像个逗点。这里的弱回波是从西南方向切入的。

从垂直于回波带的方向、经过中气旋、龙卷涡旋中心的剖面可见云体前部回波稍有悬垂,不如强雹暴回波悬垂显著。另外还出现了文献[10]和其他个例^[11]所描述的旁瓣假回波。在基本速度剖面上前部有边界清楚的一 $13 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 入流,向上伸展到 5km 高度;后部有 $+23 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的径向速度大值区,和 PPI 图像的径向速度大值区相对应,这说明存在后侧入流急流,带来下沉的干冷空气,使后部的回波减弱消散。

6 回波带演变为弓形回波的机制

在图 6(见彩页)中,请注意箭头所指的

那一段速度零线。在这段速度零线的北侧是离开雷达的正速度区,南侧是指向雷达的负速度区,因此零线上是辐合的。这段速度零线就是阵风锋的南段,它是本站附近300m以下气层西北风和环境场东南风之间的辐合线,这里有利于对流单体新生发展。而阵风锋的北段表现为大片正速度区中的几小块负速度区,即逆风区,在逆风区的辐合一侧有利于对流单体新生发展。自北向南连接这几块逆风区和箭头所指的那一段速度零线,正是弧形的阵风锋的所在。阵风锋的位置和地面辐合线(图略)对应较好,比回波前沿超前许多。由于阵风锋锋区的强烈辐合促使对流单体爆发性地发展,其后不到1小时弓形回波带随即形成。图6(见彩页)中同一时刻的仰角 0.5° 组合反射率因子图上,由于飚线回波带的前方存在一片弱回波区,使得阵风锋窄带不能分辨出来。基本速度剖面垂直于箭头所指的阵风锋,可见3km以下已经被低层出

流占据,抬高了这里的入流。

7 中层冷空气侵入的分析

阵风锋的形成和下沉气流的强弱有关,干冷空气侵入云体有利于下沉气流的加强。在这次强风暴中是否有干冷空气侵入云体呢?从连续的雷达风廓线产品图(图7)可以看出:在高层基本没有出现西北气流,这和08时高空测风不同。12:54到14:00的风廓线产品在低层有如下变化:从6时多开始一直到11:41近地面风向都是东南偏南风,其后的5个体扫0.3km上测不出风,到12:18开始转为西北风,偏北风持续到15:13以后又转为东南偏东风。这和本站地面观测的风记录相一致。0.3km风向的变化和图5(见彩页)回波后部弱回波区的演变在时间上是吻合的。这说明云中下沉气流造成的近地面辐散气流很强,强到足以改变环境风场。

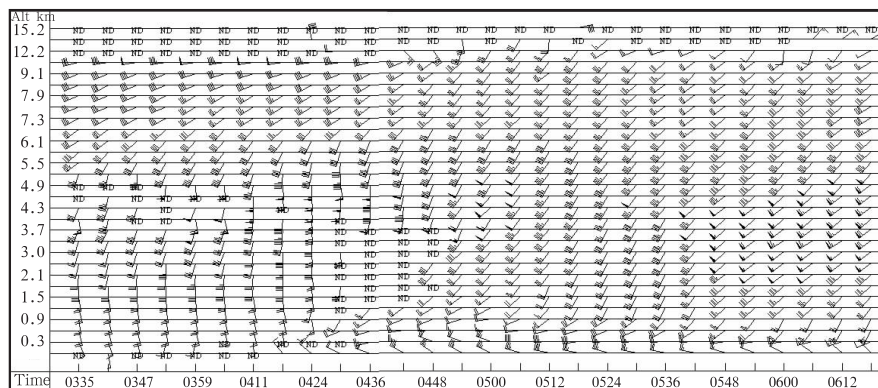


图7 2005年7月16日11:41开始的风廓线产品图(图中时间为世界时)

分析16日08时和20时本站高空观测资料(见表1)表明,700、600、500hPa等压面12小时变温分别为 -1.5°C , -4.8°C , -1.6°C ,都是下降的,600hPa12小时降温 4.8°C ,这个降温幅度在盛夏季节里是比较强烈的; 0°C 高度也是明显下降的,08时为5024m,20时为

3998m,下降1000多米,这些都说明冷空气侵入是显著的。干空气侵入就没有那么显著了,分析08时和20时的温度露点差(见表1),结果两个时次的都比较湿,天气发生前后没有多大变化,只是08时在472~500hPa存在有 $T - T_d \geq 8.0^\circ\text{C}$ 的相对干区。由于飚线经过本站

时对探空站造成雷击,使20时探测高度较低,但还是可以看出西北气流没有向下发展。从现有资料分析至少可以说明这次过程冷空气侵入是存在的,对形成地面大风和阵风锋可能起了关键作用。

8 结 论

(1) 这是一次发生在西太平洋副热带高压西北部不稳定区中的强风暴过程。本站500hPa高度为591dgpm,位于588线之内。在如此接近高压中心的形势下发生这样高强度的对流性风暴,不能不说是2005年汛期的一大特点。

(2) 这是一次发生在强垂直风切变环境中的多单体强风暴。300hPa及其以上气层的西北气流提供了这次风暴活动的冷空气,从天气发生前后的整层大气温度变化可知,中层大气的显著降温是高层冷空气下传的结果。强垂直风切变有利于中层干冷空气侵入对流云体,加强了云体中的下沉气流和低层出流。400hPa及其以下气层的西南气流为这次风暴提供了丰富的对流有效位能和充沛的水汽。

(3) 这次强风暴的雷达回波系统表现为一个中- β 尺度的弓形飚线回波带。回波带的前沿处是高的反射率因子梯度区,回波带的后侧有入流急流和弱回波通道相配合。前部入流一侧的弱回波区和悬垂结构不是十分显著,带的两端不存在气旋式和反气旋式的旋转。

(4) 这次强风暴形成了一条弧形的阵风

锋,它在回波强度图上不易识别,但在径向速度图上反映得比较清楚,阵风锋相对于雷达的不同部位呈现出不同的表现形式。阵风锋是云体中层受干冷空气侵入的结果。阵风锋对弓形飚线回波带形成、维持起了关键作用。阵风锋超前于弓形回波1小时出现,对于提前预见弓形回波形成有指示意义。

(5) 本文讨论了和大风相对应的回波特征,结果表明大风发生在反射率因子高梯度区附近,发生在龙卷涡旋、中气旋所在的区域,这对大风预报的落区有所帮助。

参考文献

- [1] 罗建英,廖胜石,梁岱云,等. 2005年3月22日华南飚线的综合分析[J]. 气象,2006,32(10):70.
- [2] 冯晋勤,童以长,林河富,等. 一次强飚线过程的中小尺度特征分析[J]. 气象,2006,32(12):72.
- [3] 王莉萍,崔晓东,常英,等. 一次飚线天气的非常规气象资料特征分析[J]. 气象,2006,32(10):88.
- [4] 谢梦莉,黄京平,俞炳. 一次罕见的飚线天气过程分析[J]. 气象,2002,28(7):51.
- [5] 王军,周官辉,杜滨鹤,等. 豫北一次飚线过程分析[J]. 气象,2002,28(11):37.
- [6] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,1992:441.
- [7] 俞小鼎,姚秀萍,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,2006:93.
- [8] 刘娟,宋子忠. 一次强雹暴系统及其阵风锋的雷达回波研究[J]. 气象,1996,22(1):13.
- [9] 宋子忠,刘娟. 20050730 灵璧强龙卷天气的多普勒雷达比较分析[J]. 气象科学,2006,26(6):
- [10] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2001:313.
- [11] 吴涛,黄锐,舒国防,等. “2003.6.2”十堰强对流天气雷达回波和数值模拟分析[J]. 气象科学,2005,25(6):629

刘 娟等：淮北地区一次强风暴的弓形回波分析

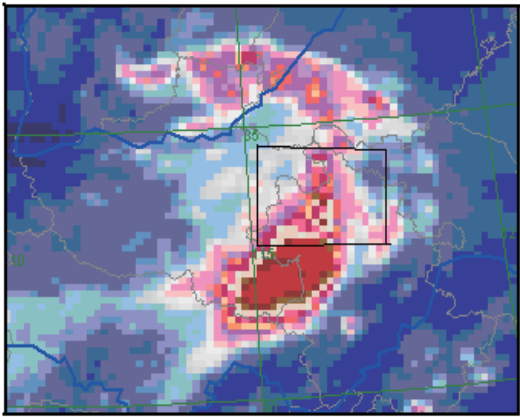


图2 2005年7月16日14:00(北京时)
红外云图
图中长方形区域为分析的区域

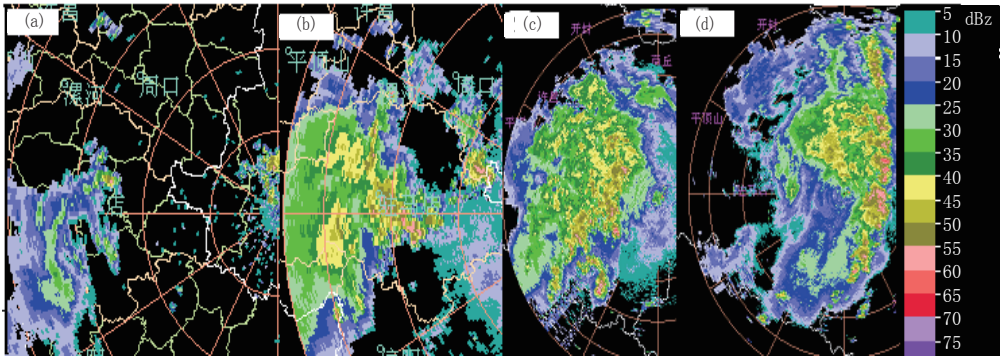


图3 2005年7月16日阜阳雷达站（下同）反射率回波图（仰角0.5°）
a. 04:08, b. 06:51, c. 11:00, d. 14:00

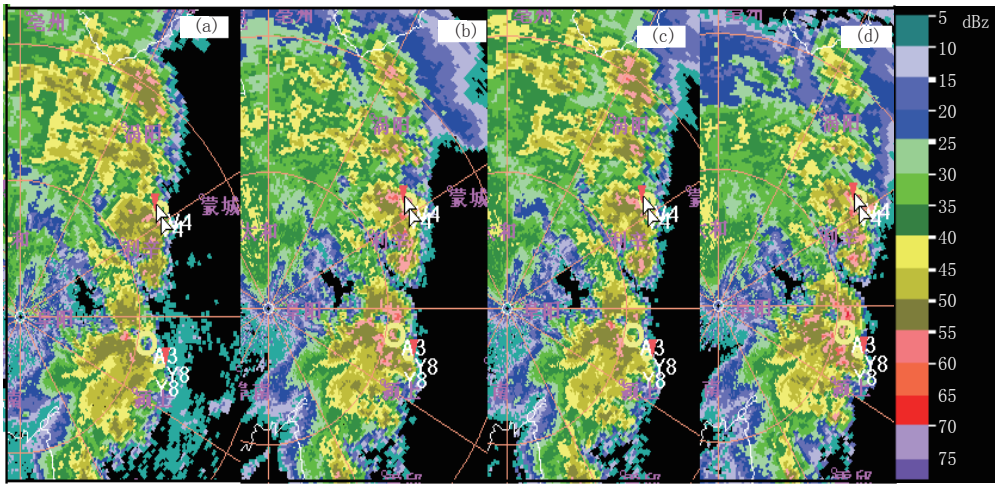


图4 2005年7月16日13:54四幅同屏的反射率因子剪贴图
a. 0.5° , b. 1.5° , c. 2.4° , d. 3.4°

刘 娟等：淮北地区一次强风暴的弓形回波分析

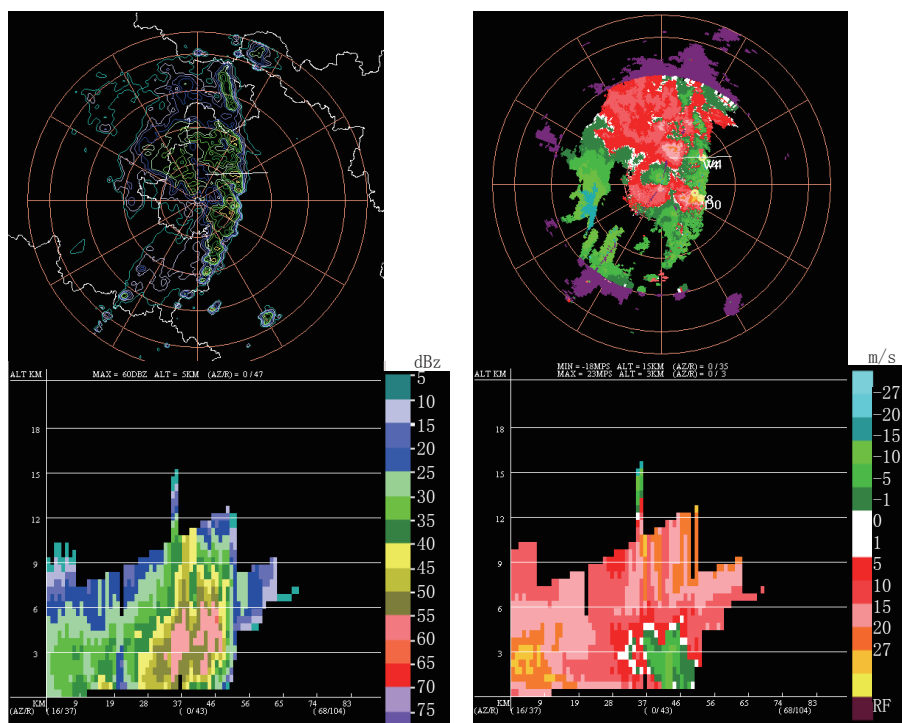


图5 2005年7月16日13:48的组合反射率因子等值线和强度剖面

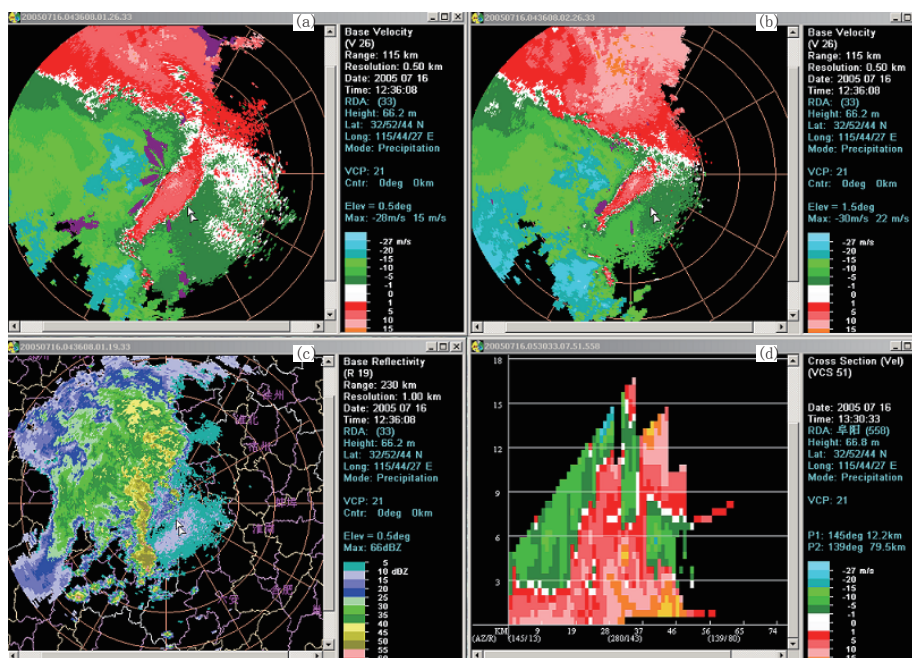


图6 2005年7月16日12:36为仰角0.5° (a)、1.5° (b) 基本速度图、0.5° (c) 回波强度图及基本速度剖面 (d)