

# 一次雷暴冷出流中新生强脉冲风暴的分析

陶 岚<sup>1</sup> 戴建华<sup>1,2</sup> 陈 雷<sup>1,2</sup> 王 强<sup>3</sup> 顾宇丹<sup>3</sup>

(1. 上海中心气象台, 200030; 2. 南京大学大气科学系,  
中尺度灾害性天气教育部重点实验室; 3. 上海市防雷中心)

**提 要:** 利用常规天气资料、多普勒天气雷达产品、SAFIR3000 总闪电定位资料、加密探空资料和自动气象站资料,对 2007 年 8 月 3 日造成上海嘉定 F1 国际赛车场 6 号弯 D2-D5 号 4 个临时看台被吹翻的一次强对流天气过程进行了分析。结果表明:坡度较大的低压槽、较高的对流不稳定能量和较弱的垂直风切变条件下,地面风场辐合、海陆风锋和雷暴冷出流等的相互作用,导致了上海地区出现了多个强局地脉冲雷暴;F1 国际赛车场致灾脉冲雷暴发生在前期雷暴的冷出流中,冷出流锋区与原边界层辐合线的碰撞是其触发的动力机制,较高的不稳定能量、充足的水汽和中低空的辐合上升导致该风暴强烈发展,造成了 F1 赛车场出现了 13 级大风和短时强降水;雷暴过程的总闪电活动分析表明:闪电活动的突然增强预示了该雷暴的爆发并开始进入减弱阶段。

**关键词:** 边界层辐合线 海陆风锋 脉冲风暴 出流边界 总闪电

## Case Analysis of a Severe Pulse Thunderstorm Triggered in the Outflow of the Previous Thunderstorms

Tao Lan<sup>1</sup> Dai Jianhua<sup>1,2</sup> Chen Lei<sup>1,2</sup> Wang Qiang<sup>3</sup> Gu Yudan<sup>3</sup>

(1. Shanghai Meteorological Center, 200030; 2. Department of Atmospheric Sciences, Key Laboratory of Mesoscale  
Severe Weather of the Ministry of Education, Nanjing University; 3. Shanghai Lightning Protection Center)

**Abstract:** Using the conventional weather data, WSR-88D Doppler weather radar data, SAFIR 3000 total lightning data, intensified sounding and automatic surface weather observations, a severe pulse thunderstorm which caused four grandstands destroyed and one blew away about 20 meters in the Shanghai F1 Circuit on August 3, 2007 is analyzed. The case analysis shows the interaction of boundary layer convergence lines, sea breezing front, and

中国气象局 2006 年气象新技术推广面上项目 CMATG2006M16、中国气象局 2007 年多轨道业务建设项目“上海雷电预警  
预报业务系统的建立”课题和世博项目(国家科技部 2005BA908B15 和上海市科委项目 05dz05815)共同资助

收稿日期: 2008 年 7 月 8 日; 修定稿日期: 2009 年 1 月 7 日

the cold outflow of previous thunderstorms triggered the initiation of some pulse storms in local area. The pulse storm which caused the wind disaster in F1 Circuit was triggered by the collision between the cold outflow of previous thunderstorms and the earlier boundary layer convergence lines. Due to the high atmospheric instability energy, sufficient ambient moisture, and convergence in the low and middle levels, the pulse storm intensified significantly in the cool pool of the previous thunderstorms and resulted in a damaging wind gust of 40.6 m/s and heavy rainfall in F1 Circuit. Furthermore, the sudden increase of total lightning flash rate of the storm indicated the eruption of the storm with a strong downdraft and the beginning of its declining phase.

**Key Words:** boundary layer convergence lines sea breezing front pulse storm outflow boundary total lightning

## 引 言

脉冲风暴是发展迅速的强对流风暴,它产生于弱的垂直风切变环境中,同时环境具有较厚的低层湿层和较高的垂直不稳定性, Lemon<sup>[1]</sup>和 Cerniglia<sup>[2]</sup>对脉冲风暴的探测和预警进行了研究。而对流风暴的触发条件,根据 James Wilson<sup>[3]</sup>的统计,1984 年 5—8 月科罗拉多州山区的 653 个对流风暴中有 79%是由雷达观测到的边界层辐合线触发的,在 71%的个例中,辐合线的相交激发了新生风暴或加强了已经生成的风暴。Fankhauser<sup>[4]</sup>、Wilson<sup>[5]</sup>等对边界层辐合线、对流风暴的触发、组织和生命史等开展了相关的实验和研究, Tompkin<sup>[6]</sup>的研究表明,对流风暴的冷出流对边界层水汽条件的影响,使其对新生对流的组织起到了重要作用。我国气象工作者对边界层辐合线对对流风暴的触发也开展了相关的研究<sup>[7-14]</sup>。

2007 年 8 月 3 日 16 时 07 分(北京时,下同)左右,一个脉冲风暴在前期雷暴的强冷出流与原边界层辐合线的碰撞触发下新生,并强烈发展,16 时 40 分左右致使上海国际赛车场 6 号弯 D2、D3、D4、D5 号 4 个临时看台与上万个座椅被连根拔起后吹到 20 米外的 F1 赛道上,D 区没有被吹倒的看台 D1

也有一定损坏,出现 10 厘米左右的整体位移(根据事后灾情调查报道)。设置在 F1 赛场的自动气象站观测显示:16 时 37 分和 38 分的风速分别达到了  $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $22.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,16 时 37 分出现了  $40.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的强阵风。

针对这次造成严重灾害的强对流风暴,本文利用常规天气资料、上海 WSR-88D 天气雷达结合闪电定位、自动气象站等资料,对此次雷暴的冷出流和地面风场辐合共同作用下的脉冲风暴过程进行详细的分析,以发现该风暴的形成和加强机制,以及造成地面大风和短时强降水天气的原因,提出针对该类局地强风暴的临近预报思路。

## 1 天气形势背景

2007 年 8 月 3 日 08 时 500hPa 高空图上,0705 号台风天兔向北移动至日本海南部,且强度明显减弱。副热带高压较前日西伸加强,长江三角洲地区处在副高边缘以西到西南风为主,低压槽位于  $110^{\circ}\text{E}$  附近。700hPa 和 850hPa 上,江淮地区有明显切变线发展,上海地区处在切变线南侧西南气流中,有较强的水汽输送。500hPa 低压槽和中低空切变线位置相距很近,且风速都不大,地面到 6km 的垂直风切变为  $6.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,处于

较低水平。08 时 700hPa、925hPa 和 1000hPa 24 小时变温场显示,中低空有冷空气从北方方向长三角地区扩散。

地面图上,静止锋位于华东中部长江沿线附近,锋后从朝鲜半岛经山东半岛至湖北一线为一条东北—西南向的云带。上海处在静止锋南侧的暖区内,中午以前天空状况较好,午后气温迅速上升超过  $35^{\circ}\text{C}$ ,14 时上海宝山站(58362)探空图显示整层大气湿度较大,能量也很高,但风的垂直切变不大。

在这样的大尺度天气条件下,有利于对流风暴在上海和其周边地区生成。当天 15—19 时,上海大部分地区出现阵雨或雷雨,局部地区暴雨并伴有大风天气。其中,上海 F1 赛车场地出现了  $40.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的阵风,其它地区也出现了有  $17\sim 24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  不等的大风。此外,共有 8 个自动站的降水记录超过 50mm,其中金山防汛办降水量达到 92.0 mm,宝山为 90.1mm,松江九亭为 79.1mm。

## 2 强对流发生、发展的条件分析

### 2.1 不稳定能量特征

8 月 3 日 08 时的 K 指数分布显示,上海及周边地区都处于高能区中,当天发生强对流天气的可能性都较大,其中江西境内有 K 指数高值区(中心值高达  $44^{\circ}\text{C}$ ),而上海宝山的 K 指数也高达  $39^{\circ}\text{C}$ ,14 时加密探空表明 K 指数已迅速上升到  $42^{\circ}\text{C}$ 。08 时位于上海周边地区的 CAPE 值均在  $2000\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$  左右,而上海宝山 CAPE 值已达到  $2319\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,表明这些地区已具备有利的对流发展条件,14 时上海的 CAPE 值高达  $4152\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有非常高的对流潜在能量。

### 2.2 水汽条件

14 时的加密探空图显示,整层大气的水汽非常充沛,此时环境中不存在逆温,已没有

对流抑制存在,自由对流高度(LFC)较低,大约在 1500m 左右,一旦地面有触发机制,对流就很容易形成。对上海宝山站的 GPS/Pwv 资料监测表明,从上午 9 时开始,GPS/Pwv 已经达到 50mm 以上,处于较高的降水阈值,15—16 时有一个急剧增加的过程,16 时 30 分开始突降。

### 2.3 辐合抬升条件

上海自动站网的中尺度分析表明,在 10 时 30 分左右,上海北部宝山和嘉定交界处有东北风和东南风的切变存在,这是上海城市热岛和海风锋产生的边界线,由于热岛加热的增强,海风锋略有西进、南压;14 时 24 分开始,青浦和闵行交界处也有明显的辐合区存在;15 时 06 分开始,金山与青浦交界附近有东北偏北—西南偏南向切变存在(图1)。

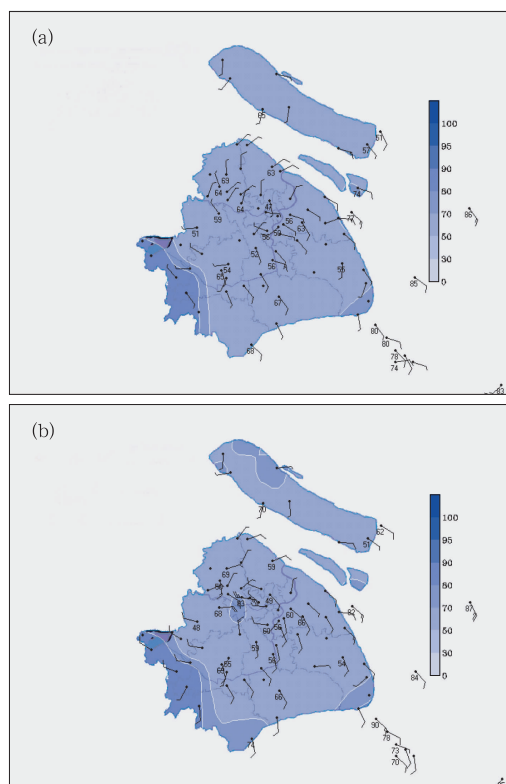


图1 2007年8月3日15时18分(a)和16时16分(b)自动站风场和相对湿度分布图

雷达监测也发现这些边界线的存在,在0.5度仰角反射率因子图均对应有弱窄带回波显示,且北部海风锋略有西进、南压后与辐合区回波碰撞、相连。

因此,在当天有利的大尺度天气背景条件下,存在高的对流潜在能量和丰富的水汽条件,在辐合抬升条件(如低层的辐合或切变)较好的地区容易出现对流。由于较弱的环境风垂直切变(地面到6km的垂直风切变为 $6.02\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),使得当天的对流风暴以脉冲风暴为主。但在一些系统性较强的中小尺度切变或辐合线维持的区域,沿切变或辐合线形成的对流风暴也呈现出有组织化的特征。

### 3 雷达回波特征和闪电资料分析

#### 3.1 多个雷暴全过程雷达回波特征分析

15时10分,雷达反射率因子图上显示青浦的西北部(即地面辐合区)有对流单体A首先从中空开始发展;15时15分,上海北部的切变线南压与青浦附近的辐合线相交处,对流单体B从中空开始迅速发展(图2,见彩页),由于处于两条边界线的交汇处,单体B后期的发展比A更加强盛,15时27分,对流单体A、B合并形成多单体风暴C。

15时44分,0.5度仰角(图3,见彩页)单体风暴A、B外围呈现较为清晰的弧状弱回波线,回波强度在 $5\sim 15\text{dBz}$ 左右,分别对其作垂直剖面分析,发现A、B的强反射率因子核心均已达到地面,且对应地面有风速的明显增大和温度的降低,表明由单体A、B合并形成的风暴C中有冷性下沉气流在低层扩散。此外,由于地面切变和风场辐合形成的弱窄带回波一直存在,清晰的弧状弱回波为风暴的出流和地面辐合共同形成。

15时56分,单体B在4.3度和6.0度仰角反射率因子图上(图4,见彩页)均出现三体散射(Three Body Scatter Spike,简称

TBSS)。16时02分,在6.0度(图4)仰角反射率因子图上TBSS更加明显。这些三体散射现象表明:此时C处于发展成熟阶段,风暴中存在大冰雹。0.5度仰角的反射率因子图上,清晰的椭圆形出流边界表明中低层有冷性下沉气流在扩散。同时由于C单体南侧地面风场的切变一直存在,出流边界和弱辐合在0.5度仰角反射率因子图上形成了“Y”型的弱窄带回波。

16时07分,在嘉定西北部,单体C的椭圆状冷出流锋区与原边界层辐合线的碰撞使单体D从中空开始发展(图2),而正是该单体造成了F1赛车场的特大风灾和短时强降水,我们将在3.2中对其进行详细的分析。

16时25分(图3)开始,出流边界开始向外伸展,“Y”型弱回波线的南半部分对应的窄带弱回波带上不断有单体新生,并最终连成一线,基本呈东北西南向排列,由于移速较为缓慢,大约在 $20\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右,造成了上海金山和松江地区的短时强降水,其中金山防汛办降水量为92.0mm,宝山为90.1mm,松江九亭为79.1mm。16时36分(图3,见彩页),多单体风暴C继续向东北偏东方向移动,同时出流边界继续向外伸展,并逐渐远离。16时54分,多单体风暴C的右侧出流边界上又观测到新生单体E发展,并于17时05分合并入多单体风暴C;至17时11分,出流边界已模糊不清。此后,该多单体风暴在移动过程中逐渐减弱消散。

弱的垂直风切变通常表示弱的环境气流,并且常常引起风暴移动缓慢。此次灾害性天气过程中,由于整层大气水汽含量充沛,地面辐合和出流边界的长时间存在,导致风暴的不断新生,是此次强对流过程持续时间长达数小时的原因。由于风暴平均承载层的风速较小,平均气流方向为西南偏西方向,移速大约在 $20\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右,又因没有右侧新生单体的传播作用,导致多单体风暴的移动

方向为东北偏东方向,也造成了上海大部分地区的强降水天气。

### 3.2 F1 赛车场致灾脉冲风暴

#### 3.2.1 雷暴冷出流与原边界层辐合线的碰撞触发脉冲风暴新生

16时07分,根据WSR-88D多普勒天气雷达风暴跟踪算法(STI)的雷暴结构信息(表1),单体B的最强反射率因子核心的高度(HgtMR)由上一时刻的6.7km下降到此时刻的4.8km,配合地面自动站的观测记录以及单体B的垂直剖面图来看,多单体风暴C中的单体B中有强冷出流及地,该出流与原边界层辐合线在嘉定附近的碰撞造成了局

地的强抬升促使单体D从中空新生,初始回波高度在3.5~5km左右;16时13分,随着单体D的发展,其回波向上向下同时增长;16时19分,0.5度仰角反射率因子图显示单体的回波强度为25dBz左右,且向东北偏东方向移动;同时,随着上升气流的加强单体的快速发展,垂直累积液态水(VIL)快速升高;16时24分开始,单体中开始出现闪电现象,平均闪电的高度约为11.6km,与STI(表1)提供的12km回波顶高(ET)即强度大于等于18.3dBz的回波所在最高仰角的高度信息较为一致。综合上述要素可以判定单体风暴D是一个在多单体风暴C的冷出流锋区与原边界层辐合线的碰撞中发展和加强的脉冲风暴。

表1 脉冲风暴D的结构信息及其对应的闪电数据

时间	AZ/RAN(deg/km)	BASE/ET(km)	VIL(kg·m <sup>-2</sup> )	MRef(dBz)	HgtMR(km)	NLtg(/6min)
16:25	301/70.4	3.1/12.2	42	64	7.9	26
16:31	302/72.2	3.3/13.0	52	63	5.8	65
16:36	303/72.2	3.3/13.0	47	60	3.3	88
16:42	303/72.2	3.4/12.7	39	57	5.8	127
16:48	303/72.2	3.4/12.6	30	57	4.6	127
16:54	303/72.2	<0.9/12.5	30	58	3.4	140
16:59	304/72.2	<0.9/7.7	17	54	2.1	124
17:05	306/70.4	<0.9/2.0	5	48	2.0	48
17:11	307/68.5	<0.9/2.0	3	47	0.9	20

#### 3.2.2 脉冲风暴的发展和爆发导致F1赛车场灾情的出现

16时25分,1.5度仰角反射率因子图上显示单体D合并入多单体风暴C,由于较高的环境不稳定条件和中低空的辐合导致该风暴强烈发展,根据图6中箭头所指的位置,0.5度、2.4度和6.0度三层反射率因子图可以明显判断出脉冲风暴D存在回波悬垂结构。3.4度和4.3度仰角反射率因子图(图5,见彩页)出现了明显的TBSS,最大反射率因子(MRef)为64dBz,HgtMR的高度为7.9km,处于-20℃等温线高度附近,回波底高(Base)即强度大于或等于18.3dBz的回波所在最低仰角的高度约为3.1km左右,ET约

为12.2km,VIL为42kg·m<sup>-2</sup>,TBSS大约是沿着雷达径向302°~303°的方向。经计算,在6.0度仰角上,反射率因子大于60dBz的区域沿雷达径向到雷达的距离大约是71.5~75km,离地面的高度大约是7.5~7.9km左右,而TBSS沿雷达径向到雷达的距离大约是82~88km,因此可断定此TBSS是由单体D产生的。16时25分到16时36分,单体风暴D出现了HgtMR的显著下降(图7),6分钟总闪电数(NLtg)有了明显的加强,这两个特征的出现预示着雷暴即将崩溃进入减弱消亡阶段<sup>[15]</sup>。由于单体D位于F1赛场的偏东位置,其强出流导致F1赛车场16时37分出现了40.6m·s<sup>-1</sup>的强偏东阵

风,16时37分、38分的瞬时风速也分别达到了  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $22.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 风向偏东,16时41—45分,瞬时风速都在  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,而此时原椭圆状的出流边界已逐渐远离了多单体风暴C。尽管处于强的出流中,低层的水汽输送被切断,但是中低空切变使得水汽和动量辐合仍然维持,风暴D仍强烈发展,其强下沉气流造成了F1赛车场的13级强风。

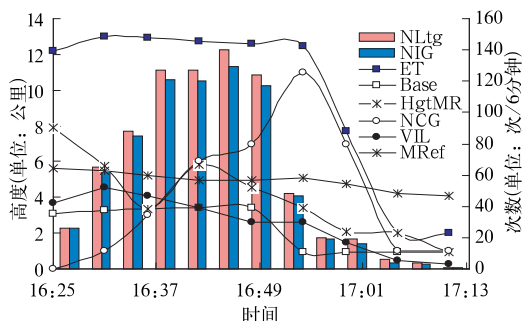


图7 2007年8月3日脉冲风暴D的结构和闪电活动的时间序列

正如 Lemon<sup>[16]</sup>指出的, TBSS 的出现是空中大冰雹存在的充分条件和非必要条件, TBSS 首次出现后的 10~30 分钟往往会产生最大的地面降雹和大风。大风的观测事实与 lemon 的结论一致,但本次过程并没有冰雹的地面报告,我们认为存在两种可能,一是产生 TBSS 的雷达回波高度较高,离地面大约 7.5~7.9 km,而盛夏季节地面和低空的气温很高,冰雹在还未及地就可能融化为水滴,只出现了强降水天气;另一种可能是由于嘉定是位于上海西北面的郊区,可能出现的冰雹没有被观测到。

16时42—59分, NLtg 在 100 次以上,闪电的高峰区比 VIL 的高峰期约晚了 2 个体扫左右的时间,且 NLtg 在雷暴达到最强前一直是缓步增强,到了雷暴最强阶段的 1 到 3 个体扫描后才达到了最高值,与 2004—2006 年上海地区的近 200 个雷暴的分类信

息统计结果基本一致<sup>[15]</sup>。

### 3.2.3 脉冲风暴的减弱消亡

随着雷暴的降水开始破坏上升气流以及下沉气流的拖曳作用,16时54分, Base 下降到 1 km 以下, HgtMR 也开始下降,高度为 3.4 km 左右,在此时段内 VIL 一直维持在  $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上;16时59分,单体进一步减弱, ET 降低到 7.7 km 左右, HgtMR 的高度约为 2 km, VIL 也开始下降,为  $17 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 观测实况表明该单体的主要降水时段集中在 17 时以前。从有降水开始到 17 时, F1 赛场的降水量也达到了 39.8 mm; 17 时 05 分, ET 迅速下降到 2 km 左右, NLtg 也迅速减小,单体已经处于减弱消亡阶段,17 时 11 分为 STI 定义的单体消亡的时间。

这个生命史约为 60 分钟的强脉冲风暴主要造成了嘉定 F1 赛场的  $40.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的大风和 44.5 mm 的短时强降水。

## 4 结语与讨论

本文利用上海 WSR-88D 多普勒天气雷达资料、SAFIR3000 总闪电定位资料以及自动气象站等中尺度观测资料对 2007 年 8 月 3 日发生在上海的一次强对流事件进行了详细的分析,发现这次造成 F1 赛车场风灾的雷暴过程有以下特点:

(1) 此次强对流事件以坡度较大的低压槽为背景,有较高的对流不稳定能量和充足的水汽,有利于对流风暴的发展;地面风场辐合、边界层辐合线及其与雷暴冷出流的碰撞是风暴不断新生的触发机制;弱垂直风切变的环境下,使得过程中雷暴都具有脉冲风暴特征,多个雷暴出现了三体散射现象。

(2) 在弱垂直风切变环境下,前期脉冲风暴的强冷出流与原边界层辐合线的交汇碰撞造成了局地的强抬升,导致嘉定西北部强脉冲单体的发展和加强;尽管处于前期雷暴

的强冷出流中,低层的水汽输送被切断,但是中低空切变使得水汽和动量辐合仍然维持,强的不稳定条件使得该风暴强烈发展,其爆发产生的强下沉气流造成了 F1 赛车场的 13 级强风。

(3) 总闪电资料分析表明闪电与雷达回波的移动配合较好,闪电活动的突增预示了雷暴的爆发并开始进入减弱阶段。

通过此次雷暴过程的分析,针对处于弱垂直风切变中的脉冲雷暴,在关注大的天气形势、对流不稳定条件和水汽条件的同时,还应关注低层的辐合区和边界线,以及它们与雷暴强出流的相互作用,采用多普勒天气雷达的近距离、多仰角观测模式 VCP11<sup>[17]</sup>,对雷暴发生、发展落区加强监测,提高临近预报预警的准确性和预报时效。

## 参考文献

- [1] Burgess, D. W., Lemon, L. R., Severe Thunderstorm Detection by Radar[R]. Atlas. ed. Radar in Meteorology. American. Meterol. Society, Boston. 1990.
- [2] Cerniglia, C. S., and Snyder, W. R., Development of warning criteria for severe pulse thunderstorms in the northeastern United States using the WSR-88D[J]. Eastern Region Technical Attachment, 2002(03):14.
- [3] Wilson, James. W., Schreiber, Wendy. E., Initiation of Convective Storms at Radar-Observed Boundary-Layer Convergences Lines[J]. Mon Wea Rev. 1998, 126:1812-1836.
- [4] Fankhauser, J. C., Crook, N. A., Tuttle, J. Initiation of Deep Convection along Boundary Layer Convergence Lines in a Semetropical Environment[J]. Mon Wea Rev. 1995, 123:291-313.
- [5] Wilson, James. W., Megenhardt, Daniel. L., Thunderstorm Initiation, Organization, and Lifetime Associated with Florida Boundary Layer Convergence Lines[J]. Mon Wea Rev. 1997, 125:1507-1525.
- [6] Adrian, M. Tompkins., Organization of Tropical Convection in Low Vertical Wind Shears: The Role of Water Vapor[J]. Journal of the Atmospheric Science. 2001, 58(6):529-544.
- [7] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报, 2004, 62(3): 317-328.
- [8] 姚建群,戴建华,姚祖庆. 一次强飑线的成因及维持和加强机制分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(6): 746-754.
- [9] 漆梁波,陈春红,刘强军. 弱窄带回波在分析和预报强对流天气中的应用[J]. 气象学报, 2006, 64(1): 112-120.
- [10] 张一平,牛淑贞,席世平,等. 雷暴外流边界与郑州强对流天气[J]. 气象, 2005, 31(8): 54-56.
- [11] 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):36-42.
- [12] 殷占福,郑国光. 一次强风暴三维结构的观测分析[J]. 气象, 2006, 32(9):11-16.
- [13] 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): 385-392.
- [14] 毕旭,罗慧,刘勇. 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(1):70-75.
- [15] 戴建华,王元,陈雷,等. 用雷达和总闪电资料分析和评估雷暴的生命演变[C]. 第 6 届中国国际防雷论坛, 2007, 中国, 广州, 176-177.
- [16] Lemon, L. R., The radar 'three body scatter spike': An operational large-hail signature [J]. Wea. Forecasting, 1998, 13:327-340.
- [17] 戴建华, WSR-88D 常规产品集(RPS)的设置[J]. 气象, 1999, 25(5):23-27.



# 陶岚等：一次雷暴冷出流中新生强脉冲风暴的分析

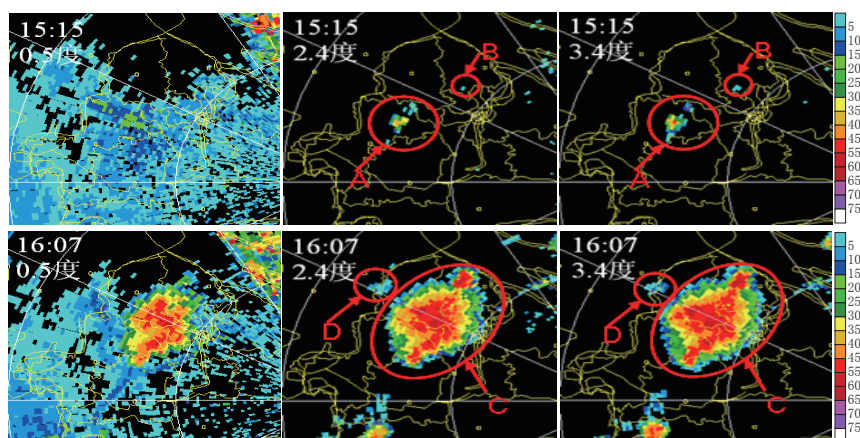


图 2 2007年8月3日15时15分和16时07分0.5、2.4和3.4度反射率因子图

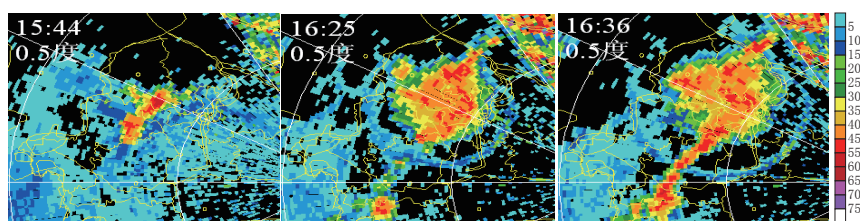


图 3 2007年8月3日15时44分, 16时25分和16时36分0.5度反射率因子图

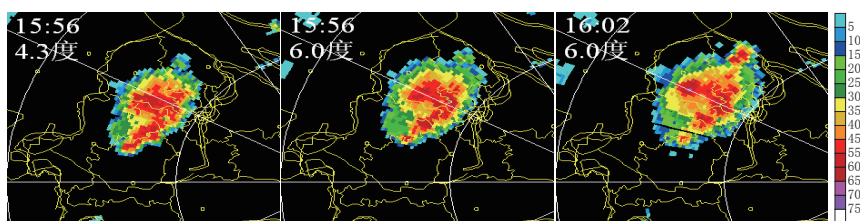


图 4 2007年8月3日15时56分4.3度、6.0度和16时02分6.0度反射率因子图

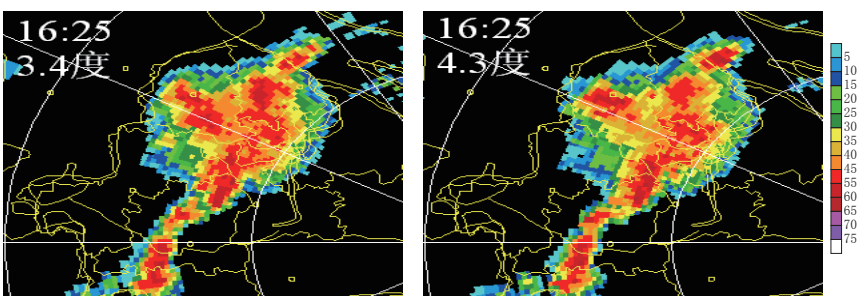


图 5 2007年8月3日16时25分3.4度、4.3度仰角反射率因子图

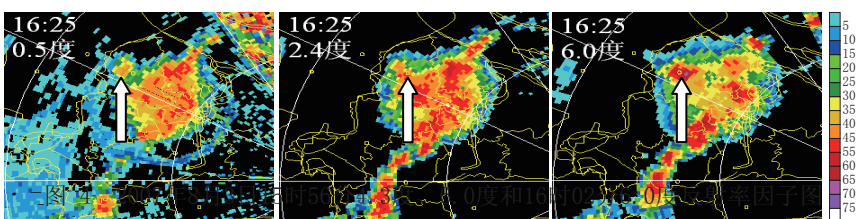


图 6 2007年8月3日16时25分0.5、2.4和6.0度仰角反射率因子图