

一次雷暴大风的中尺度结构特征分析

王 彦^{1,2,3} 吕江津³ 王庆元³ 吴丹朱³ 贾惠珍³

(1. 兰州大学大气科学学院, 730000;
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室; 3. 天津市气象台)

提 要: 应用天津新一代天气雷达产品和 255m 气象铁塔资料等, 分析了 2004 年 6 月 22 日 20:00~21:40 时 (北京时) 出现在天津地区的一次雷暴大风天气过程。分析证实: 不仅具有弓状回波的对流系统能够产生雷暴大风, 而且阵风锋也能够产生雷暴大风; 只是弓状回波顶部和向前突起部分产生的大风更强烈。另外还探讨了雷暴大风的中尺度结构特征。

关键词: 雷暴大风 弓状回波 阵风锋 强度回波产品

Analysis of Meso-scale Structure of a Thunderstorm

Wang Yan^{1,2,3} Lü Jiangjin³ Wang Qingyuan³ Wu Danzhu³ Jia Huizhen³

(1. College of Atmosphere Science, Lanzhou University, 730000;
2. Chinese Academy of Meteorological Sciences; 3. Tianjin Meteorological Observatory)

Abstract: Based on the single-Doppler weather radar observations and 255m meteorological tower data, the thunderstorm occurred from 20:00 to 21:40, June 22, 2004 in Tianjin area is analyzed. It is proved that thunderstorm can be caused by convective system with bow echo, and strong wind can bring on outflow boundary, and further proved the top and the middle of the bow echo can generate severe storm. In addition, the airflow structure of thunderstorm is discussed also.

Key Words: thunderstorm bow echo reflectivity

引 言

华北地区是强对流天气频繁发生的地区之一,夏季容易产生暴雨、冰雹、雷暴大风等突发性强对流天气。气象学者已经做过很多研究^[1~6],其中刘黎平等^[1]应用双多普勒天气雷达产品研究了暴雨过程风场的中尺度结构特征。葛润生^[3]等应用多普勒天气雷达产品研究了北京地区的雹暴气流结构。赵德山和洪钟祥^[5]应用 325m 气象铁塔资料对北京地区一次雷暴密度流的风场结构进行研究。这些主要是应用多普勒雷达产品针对暴雨、冰雹的结构和落区进行的相关研究,以及应用气象铁塔资料对雷暴的边界层气象要素特征进行分析应用,但对于雷暴大风天气的中尺度系统精细结构近期研究不多。

雷暴大风是指雷暴与大风相伴的天气现象,曾有许多专家做过大量研究,并取得一定进展。其中廖晓农^[7]等应用 NCEP 再分析资料对北京地区相当位温 θ_e 的平均廓线进行研究,给出有价值的结论。龚强^[8]等应用 MM5 模式对大风进行数值模拟。但是国内目前还没有应用新一代天气雷达产品结合气象铁塔资料分析雷暴大风的天气个例。

2004 年 6 月 22 日 20:00~21:40 时(北京时,下同),天津 5 个区县先后遭受雷暴大风的袭击,使得电线杆被风吹倒在地,直径达 30cm 的大树连根拔起,风灾造成的损失惨重。本文主要应用新一代天气雷达产品和气象铁塔资料对这次雷暴大风天气过程的回波特征和结构进行分析,提取有价值的临近预报指标,并给出雷暴大风的中尺度系统精细结构。

1 天气背景和实况

1.1 天气背景

东北冷涡是华北地区 6 月份出现强对流

天气的主要天气尺度影响系统之一。2004 年 6 月 22 日天津地区出现雷暴大风天气也是受东北冷涡影响,22 日 08 时 500hPa 高空图上,东北冷涡中心位于 48°N 、 123°E (图略),涡后不断输送干冷空气,850hPa 与 500hPa 温度差为 30°C ;同时配合地面资料有轻雾出现,据经验总结,这种形势非常有利于强对流天气的发展。

1.2 实况特点

2004 年 6 月 22 日天津地区出现的雷暴大风自西向东先后袭击了武清、宝坻、北辰等地。

气象要素梯度大。根据武清气象要素自记记录,风速在 4 分钟内由 $2.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速加大至 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;气温在 10 分钟内由 27°C 下降至 18°C 。

持续时间短。影响时间从 20 时至 21 时 40 分,共 100 分钟。

水平尺度范围小。据灾情照片显示(图略),街道一侧电线杆被风吹倒,而另一侧的小草却无恙。

直线性风灾严重。据灾情照片显示(图略),大片的玉米向同一方向倒伏,表明为直线性大风。风灾最严重的是武清大良乡、宝坻牛家牌镇,有数棵直径达 30cm 的大树连根拔起。

这些特征表明此次雷暴大风是受中尺度天气系统的影响。

2 应用新一代天气雷达产品分析雷暴大风特征

新一代天气雷达对 6 月 22 日雷暴大风天气过程进行全程跟踪观测,获取较完整的资料。探测时采取降水模式 VCP21,每隔 6 分钟获取 0.5° 、 1.5° 、 3.4° 等 9 个不同仰角的 PPI 回波产品,为进一步监测雷暴大风天气的强度及落区起到很大的作用。

2.1 水平结构特征

应用连续演变的回波强度产品分析雷暴大风的结构演变特征(图1所示)。在 0.5° 仰角PPI产品上,早在18:26时探测西北方向大约150km处有强度为30 dBz弱回波形成,在向东移动过程中逐渐加强,至19:51时发展到最强回波为55 dBz的块状回波单体A(图1a);至20:03时发展为弓状回波A(图1b),弓状回波前部边界光滑,回波梯度强,5km距离内回波从30增至

50dBz,顶部和中间向前突起部分最强均达55dBz,位于武清(图1b中的A);至20:27时弓状回波右前侧分离出阵风锋B(图1c),阵风锋强度很弱,只有15dBz,高度约为1.3km,宽度约5km,长度为50km,它与弓状回波保持一定距离向前移动;至20:39时弓状回波与阵风锋距离逐渐增大(图1d),强度也逐渐减弱;至20:57时(图1e),弓状主体减弱消散,阵风锋也已探测不到了。

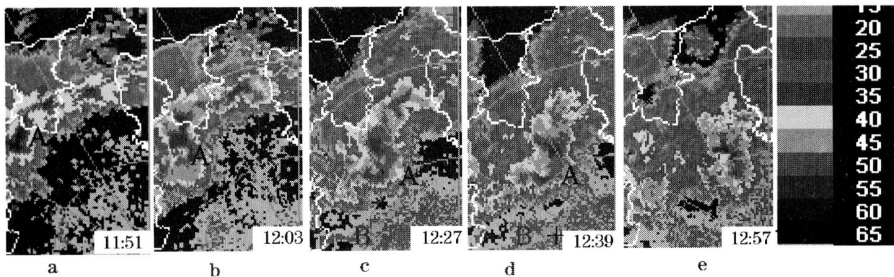


图1 0.5° 仰角PPI强度产品中弓状回波演变图(每圈为50km)
(时间为世界时,下同)

20:00~21:40前后地面自西向东陆续有大风报告,其中20:00~20:40时大风最为强烈,与弓状回波维持时间基本相近。严重受灾的武清大良乡、宝坻牛家牌镇与弓状回波东移过程中顶部和向前突起部分基本吻合。随着回波主体东移,除弓状主体产生大风外,阵风锋所到之处,也出现了短时大风,如:天津市区(图1d中+)受阵风锋的影响,在20:35分前后刮起大风。

通过分析上述强度产品证实:这次雷暴大风由弓状回波产生,弓状回波与地面强风相对应,其中弓状顶部和向前突起的地方产生大风更强烈;同时它也能够分离出与主体接近平行的阵风锋,阵风锋同样能够带来短时大风天气,并且阵风锋与弓状主体距离较近时,爆发强烈,造成的风灾更严重;它与主体距离增大表明系统已处于衰亡阶段。

图2为 1.5° 基本速度PPI连续监测演变产品显示。由图可知,19:00时北京通县有两对速度为 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的弱涡旋形成;至19:51时这两对涡旋东移、合并加强为后部入流急流区域C(图2a),入流速度明显增大同时入流区域也明显增加,并出现速度模糊,速度模糊位于方位 310° ,距离80km处,在向东移动过程中辐合不断加强;至20:03时负速度继续维持速度模糊,正速度最大值为 $13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,此时,抬高仰角,已发展为中尺度气旋C、D(图2b),至20:39时,共探测到3次中尺度气旋;至20:57时辐合区明显减弱,中气旋也已消失(图2e)。

同时结合基本强度产品分析:中尺度气旋位置与弓状向前突起部分基本重合,低仰角速度模糊区位于中尺度气旋后部。

由上可知,中尺度气旋一般与强对流天气相对应,并且低仰角速度模糊区对应于地

面的强风,速度模糊区域范围与实况大风范围基本一致。

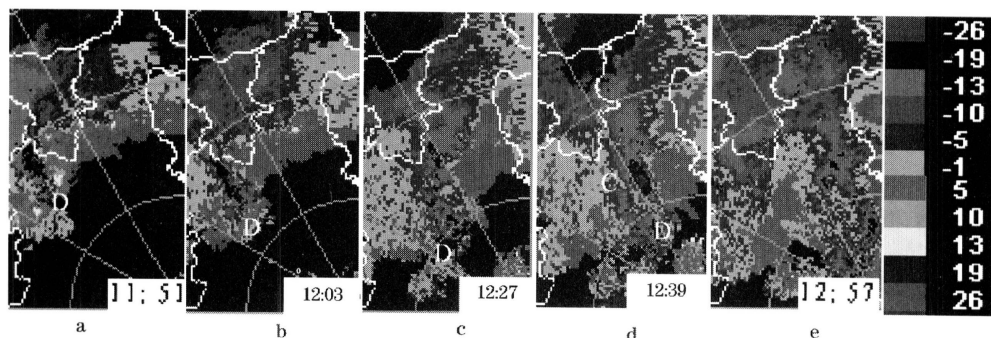


图 2 1.5°仰角 PPI 基本速度产品中弓状回波演变图 (每圈为 50km)

2.2 垂直结构特征

取 20:27 时这一时刻 0.5°、2.4°、6.0°、9.9°四个不同仰角分析雷暴的整体结构 (图略)。

基本强度产品上,低层约 3km 回波呈弓状,最大强度达 55dBZ,前侧有阵风锋与弓状保持一定距离。中层,40dBZ 的回波变为椭圆状,其宽度约为 25km,回波最大为 55dBZ,最强回波出现在 3~4km 高度,阵风锋已不存在。高层,回波面积范围扩大,下风方向扩展有明显的云砧现象。沿弓状主体剖面发现:回波顶高度为 12km,回波宽度约为 25km。

基本速度产品上,此时入流速度明显增大并出现速度模糊 E (图 3a,仰角 0.5°),高度约为 1.5km、方位在 310°/80km;仰角 1.5°产品同一位置约 3.0km 高度处,入流速度也已出现速度模糊,出流速度为 $13\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,同时模式识别有中气旋 E、F 形成 (图 3b);仰角 2.4°产品同样是强烈辐合,只是与 3km 高度比较位置略偏后,既 3km 至 5km 高度处,风暴向后略有倾斜 (图 3c);仰角 3.4°产品约 7km 高度是零速度区和弱辐合区,仰角 6.0°产品约 9km 高度上出现 $5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $-10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐散区域

(图 3d)。这是风暴主体成熟阶段不同高度的气流结构。之后回波持续 40 分钟后逐渐减弱。

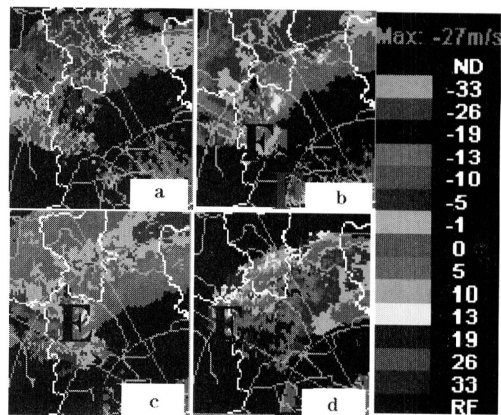


图 3 2004 年 6 月 22 日 12:27 基本速度中不同仰角产品图

3 应用气象铁塔资料分析雷暴大风近地层特征

天津市 255m 高的气象探测铁塔 (位于图 1d 中的+),它能够获取 250m 以下的低层温度和水平风资料,弥补了雷达波束随距离增加而增高以至于探测不到远处低层信息这一不足。它探测到 6 月 22 日阵风锋 B

(图1d中)经过市区时的低层温度、风场结构特征。

3.1 风场结构特征

图4表明：在20:30~20:40时10分钟内出现3个风速大值区域，其中第一次风速大值区域出现在20:32~20:34，为西北风，风速最大为 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区域的高度位于90m；第二次大值区域出现在20:34~20:38时，也为西北风，风速最大也为 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区域的高度位于60m，与前一次 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区域的高度相比降低了30m；第三次大值区域出现在20:39时，还是西北风，风速最大为 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，与前两次相比风速最大值也在减弱。可见阵风锋是一股股从上至下入侵大气边界层最后影响地面的大风过程，并具有间歇性特点，整个演变过程是前两次最为强烈，以后呈逐渐减弱趋势。另外图4还表明：在50m高度以下，风速迅速降低，最大值仅有 $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，并且取与铁塔同一位置处的地面自记纸记录信息分析，测得地面最大风速为 $4.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，气温下降 2.4°C 。这可能与城市建筑及地面摩擦作用有关，留待以后进一步的研究。

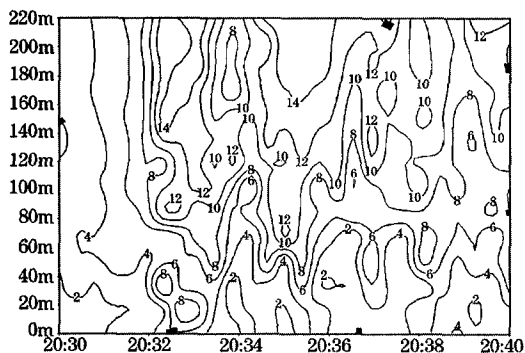


图4 2004年6月22日20:30~20:40
风速等值线图(单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

阵风锋是干冷空气与暖湿空气的交界

(图略)，也是地面大风的前沿，阵风锋经过后气象铁塔探测到的风向从250m至地面由西北风替代东南风，这与新一代天气雷达强度产品中表现的窄带弱回波是一致的。

3.2 温度场结构特征

20:32~20:33时1分钟内气温迅速下降，第一股冷空气下来时，气温变化最快， 25°C 冷空气几乎是直线下降；另外一个特点是在170~220m呈温度脊分布(图略)。

4 垂直风切变对雷暴大风天气的加强和维持作用

吴国雄等^[9]从运动方程出发，证明了垂直风切变或湿斜压度的增长都可引起气旋性涡度的增加，从而为强对流天气起到加强和维持作用。

新一代天气雷达风廓线连续演变产品表明(图5)，19时开始0.3km以下是一致的东南风，风速为 $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；0.6~7km是西南风，到7~9km高度则为偏西风，再向上为西北风，这种结构持续约2小时，到21:30时，低层风速转为一致的西北风，过程结束。这种由低层东南风到中高层西北风的垂直切变，为雷暴大风提供动力，因此探测雷暴大风发展加强，分析每隔6分钟一组风廓线产品进一步证实这个结论的正确性。

5 小结

(1) 雷暴大风天气是大尺度环流背景下中尺度系统作用的结果。

(2) 雷暴大风与弓状回波相联系，弓状回波与地面强风相对应，其中弓状回波顶部和向前突起部分产生大风更强烈，同时弓状回波分离出的阵风锋也能够带来短时大风天气。这种阵风锋与弓状主体之间的相对距离表明系统的强弱，当它与主体距离较近时，

