

一次强风暴三维结构的观测分析

殷占福 郑国光

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要: 2003年6月28日山东德州发生了一次降雹持续时间长、危害严重的强降雹天气过程。利用 MICAPS、探空、NCEP 资料, 分析了降雹前的天气形势、能量场特征、含水量场。根据两部多普勒天气雷达资料, 分析了雹云的演变过程及流场结构。研究表明, 降雹前在降雹区上空西边低层存在高能舌, 在中高层西边存在负能量平流或负能量平流中心。此次超级单体风暴过程由单个单体发展而来, 具有强超级单体风暴的典型特征。该超级单体的移动方向在盛行风向右侧约 20° 左右, 属于右移风暴。

关键词: 多普勒雷达 冰雹云 右移风暴

Analysis of Three-Dimensional Structure of a Severe Hailstorm

Yin Zhanfu Zheng Guoguang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: A severe hailstorm occurred near Dezhou, Shandong province on 28 June 2003. The synoptic situation, energy field and water vapor content field before the hailfall are analyzed by using the data of MICAPS, Rawinsonde observation and grid-point field from NCEP. The evolution process and the structure of the hail cloud are also analyzed on the basis of two Doppler weather radars. The results show that before hailfall, there is a tongue of high energy at the low level, and negative energy advection or a center of negative energy advection in the mid- and upper-level over the west of the hailfall area. The observation of Doppler radar showed that the supercell storm developed from a singlecell storm with the

资助项目: 国家自然科学基金项目《我国雹云结构和防雹机理的研究》(40275001) 的资助。

收稿日期: 2005年12月15日; 修定稿日期: 2006年2月10日

typical features of the supercell storm. Meanwhile, the moving direction of the supercell storm was about 20° in the right of its dominating wind direction, so it belongs to a right moving supercell storm.

Key Words: Doppler radar hailstorm right moving storm

引言

冰雹云是一种发展十分强盛的积雨云,是中小尺度强对流云的产物,它与人们的日常生活及工农业生产的联系极大,一场成灾冰雹往往给工农业生产造成巨大的损失。20世纪60年代初, Browning^[1]指出,超级单体作为一个强烈发展的对流单体的特征除了其准稳定状态外,一个重要特征就是雷达回波存在一个弱回波区 WER (Weak Echo Region) 或有界弱回波区 BWER。超级单体的另一个雷达回波特征是低层的钩状回波,第一个钩状回波是由 Stout 和 Huff^[2]观测到的。并非所有的超级单体都呈现出典型的钩状回波,大多数情况下都是由风暴主体向着低层入流方向伸出的一个突出物。前苏联科学家 Sulakvelidze 等^[3]提出了冰雹形成的累积区理论。20世纪70年代开展的加拿大艾伯塔冰雹研究计划,对超级单体、传播式多单体、强切变风暴和飚线等类型冰雹云进行了雷达探测和探空资料分析,并发现强切变风暴中存在有界弱回波区,持续时间可达 1.5h,最长 3h。Donaldson^[4]首次利用多普勒天气雷达观测到了超级单体中的“龙卷气旋”,也就是最早由 Fujita^[5]提出,现在广泛使用的所谓“中气旋”(mesocyclone)。近些年来,多普勒天气雷达的迅速发展,极大地提高了对强风暴的三维动力结构的认识,使得对冰雹的研究有了很大的发展。Kropfli 等^[6]对一个双多普勒雷达探测到的强雷暴资料进行了三维风场的反演和分析,在 6km 高度上,云层的右和右下侧有强

烈入流,与云后部的气流汇合形成南部的逆时针涡旋和北部的顺时针涡旋;在云体移动前方有一股比较强烈的上升气流,该垂直上升气流在云体中上部达到最大,从高空流出。在根据多普勒天气雷达观测和对 Browning 于 1964 年提出的超级单体风暴概念模型进行适当修改的基础上, Lemon 和 Doswell^[7]提出了一个新的超级单体概念模型,至今仍被应用。Chong 等^[8]使用双多普勒雷达对飚线的研究表明,热带飚线在其前缘存在对流上曳气流和下曳气流,而且尾部有广阔的云砧。Kessinger 等^[9]使用多部多普勒雷达资料对中纬度飚线系统进行了研究,发现中纬度飚线系统在对流区高层辐散,对流上曳气流在低层向西倾斜,但在对流顶附近向东倾斜,环境风切变在低层弱,在中层较强。Houze 等^[10]研究了 1985 年 5—6 月风暴前期试验的两个中纬度中尺度对流系统的三维动力特征,揭示了一些重要流场特征,例如相对于风暴高空的前部向后运动的气流,中低空来自后部的下沉气流,以及与比较强烈中尺度下沉相联系的低空辐散气流等。

我国利用多普勒雷达资料研究冰雹云起步相对比较晚。葛润生等^[11]应用单多普勒雷达观测资料、天气实况和卫星云图对北京地区的冰雹天气过程作了分析。从单多普勒雷达资料及反演出的水平流场和垂直气流结构可以得出,冰雹云过程沿着辐合带发生,垂直剖面上的气流有良好的组织,表现出强烈的旋转和上升。朱君鉴等^[12]利用雷达研究表明,风暴中存在中尺度气旋,中尺度气旋低层气旋性辐合、中低层纯气旋性旋转、

中上层气旋性辐散、高层辐散。在中高层气旋的右后侧紧挨着有一个反中气旋伴随。中气旋与反中气旋形成了一个“8”型流场和“S”型的强回波区。李文娟^[13]通过对山东几次冰雹过程的数值模拟分析发现,冰雹在云中的增长机制和早期提出的冰雹循环增长机制有相似之处。小冰雹粒子主要分布在主上升气流两侧的次上升气流上方,云中的云水和雨水主要分布在主上升气流中较广的范围内,对于冰雹的碰并增长提供了较好的水分来源,认为冰雹主要是在靠近主上升气流两侧的次上升气流中获得增长的。

本文通过2003年6月28日德州一次强降雹过程的天气背景场、能量场、高空风场以及多普勒雷达观测的分析,研究了冰雹增长的动力和微物理过程。

1 2003年6月28日山东德州降雹过程分析

1.1 天气背景分析

受高空冷性低槽的东移南压,配合中尺度场地面存在低压系统,2003年6月28日凌晨,山东德州市平原、禹城、齐河和临邑四县市遭受风暴灾害袭击。冰雹最大直径达3~4cm,小的有0.5cm,受灾面积 $5.76 \times 10^4 \text{ km}^2$,成灾面积 $4.31 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中绝产面积 $1.86 \times 10^4 \text{ km}^2$,并造成部分人畜受伤、房屋倒塌和电力、通讯设施受损。平原、禹城、齐河3县市直接经济损失近5亿元。观测发现,这次雹云在天气雷达回波上表现出超级单体的特征:在中低层4.5km处,雷达回波强度大于45dBz的水平尺度可以达到30多km,维持时间也很长,从生成到消散持续了两个多小时,天气现象比其他类型风暴严重得多,观测发现有大风、局地强降雨、冰雹和下击暴流。

山东雹云主要产生在蒙古低涡、西北气流、阶梯横槽和华北低涡四种天气系统中,其中蒙古低涡和西北气流型造成的冰雹灾害最为严重。而此次降雹过程就是由西北气流型造成的。

从6月27日20时的500hPa图(略)可以看出,此次雹云过程主要产生于西北气流型天气系统中,在中高纬度地区存在大范围较平直西风带,在华北一带存在一个浅槽,德州位于槽线附近的偏西气流中,且温度槽落后于高度槽,在德州附近存在有冷平流。在850hPa高空图(略)上,山西境内存在一条低空切变线,对应西北风和偏南风的切变,德州位于切变线之前的西南气流中。而在中尺度地面存在强盛的低压系统,并且与高空的辐散区相叠加,有利于触发强烈的上升运动。

1.2 能量场分析

大气能量的变化是引起天气变化的重要原因,天气过程是有效能量的存储、累积和释放的过程。一次强烈的天气过程,在其发生前肯定有明显的能量累积过程。根据许晨海等^[14-16]的研究表明,湿-比有效能量不仅能区分未来是出现雷雨天气还是致灾冰雹天气,而且还可以作为一项指标来识别雹云天气。

从37°N湿-比有效能量垂直剖面图(图1a)可以看到,德州市上空1000~850hPa有一个向上凸起的高能区,正值能量层从地面伸展到850hPa,在预报区以西(111.5°E)上空500~400hPa之间存在一个 $50 \times 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 负的低能中心。从500hPa湿-比有效能量形势图(图1b)中可以看出,在预报区西边有强烈的负有效能量平流。根据当日500hPa高空风图(图略)显示,在预报区西边吹西风,而降雹是在次日的凌晨2时以后,中间间隔有6h。

850hPa 湿-比有效能量形势图(图 1d)中可以看出,在预报区西南部(34.5°N 、 113°E)存在一个正湿-比有效能量中心,中心值达 $50 \times 10^{-4} \text{J} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在预报区的西南有高能舌向北伸展,在预报区西北方向有低能区,两者之间存在着较强的梯度(东北西南向的能量锋区),而且当时 850hPa 高空吹西南风,低层的高能舌向降雹区移动,为 28 日凌晨的降雹提供了充足的能量。梯度图中(图 1c)所示,850~400hPa 高度

之间,在预报区西南方存在一个正的能量梯度中心,表明该处能量随高度的递减很快,低层为能量大值区,是典型的不稳定层结。

通过分析可知,降雹前,在降雹区上空西边低层存在有高能舌,而在中高层西边存在有负能量平流或负能量平流中心,为雹暴的发生发展累积了充足的不稳定能量;在降雹区西部有高空急流,而且存在有有很大的高空风垂直切变,也有利于雹暴发生发展。

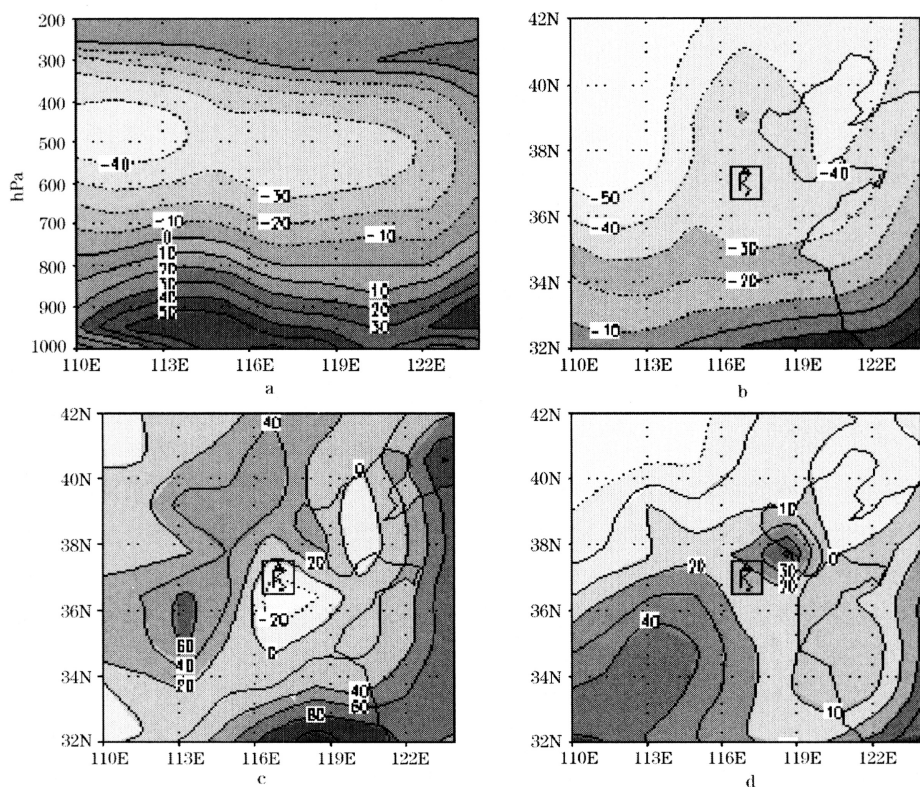


图 1 2003 年 6 月 27 日 20 时湿-比有效能量图

- a. 37°N 湿-比有效能量垂直剖面图 b. 500hPa 湿-比有效能量形势图
c. 850~400hPa 湿-比有效能量梯度图 d. 850hPa 湿-比有效能量形势图

1.3 水汽场分析

水汽输送的辐合辐散直接与降水有关,充足的水汽输送是雹暴发生发展的必要条件。利用 NCEP 格点分析场资料分析 6 月

27 日 20 时的水汽通量(图 2)发现,925hPa 是水汽输送的主要通道,相对湿度约在 60%,850hPa 水汽输送相对减少,而在中层 500hPa 水汽输送很少(图略),相对湿度约在 30%左右,水汽输送主要集中在

在 925hPa 到 850hPa。分析 27 日 20 时风矢量图 (图 2b), 德州西北方向低层 925hPa 存在明显的辐合, 在德州附近高层存在弱的辐散, 这样的配置有利于上升运动的产生。强风暴的发生通常在低层存在强的气旋性辐合, 而在高层存在强的辐散, 并和低层的辐合相对应, 低层充沛的水汽输送为冰雹的生长提供了必要条件。

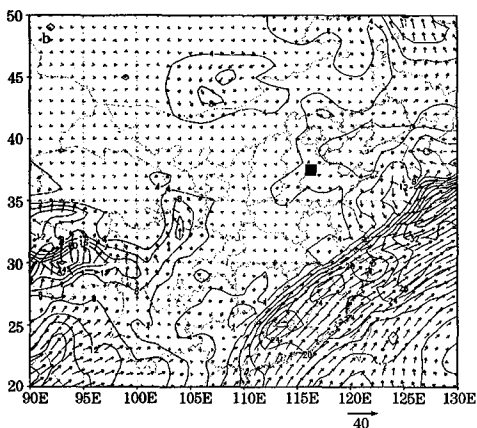
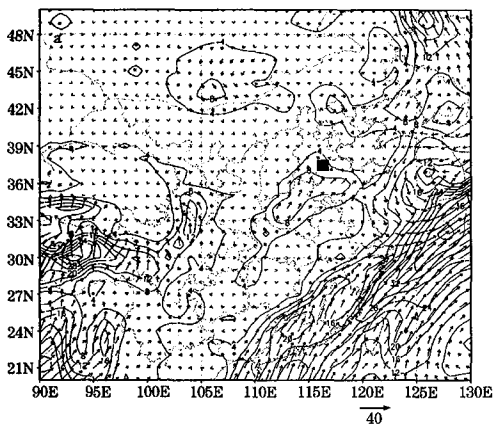


图 2 2003 年 6 月 27 日 20 时 850hPa (a) 和 925hPa (b) 水汽通量及风矢量 (图中■代表德州 (116.3°E、37.5°N) 所在位置)

2 雷达回波特征分析

山东滨州雷达 CINRAD/SC 和济南雷达 CINRAD/SA 观测发现, 此次雹云在河

北南宫市上空生成, 沿西北—东南方向发展, 在山东潍坊市附近消亡。降雹始于 6 月 28 日 02:07, 一直持续到 02:47。最强回波强度达 70dBz, 回波顶高达 12.1km (见表 1)。

表 1 2003 年 6 月 28 日滨州雷达回波特征量随时间的演变情况

时间	C-VIL /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	回波强度 /dBz	回波顶高 /km
1:06	59	61	10.0
1:57	63	63	10.6
2:07	62	66	11.8
2:17	61	68	11.0
2:27	68	70	10.4
2:37	65	69	10.0
2:47	62	68	12.1
2:57	54	62	11.4
3:07	44	62	9.7

2.1 演变过程

6 月 28 日 00:34 左右, 在河北南宫市 (相对于济南雷达的位置为 “303°, 118km”) 开始有孤立的单个单体生成 (图 3a, 见彩页), 风暴主单体中心回波强度为 30dBz, 此后雷达回波不断发展加强向东南偏东方向移动。在 00:58, 该风暴主单体前方的几个小单体开始消散, 单体的回波范围扩大, 中心强度已达 55dBz (图 3b, 见彩页), 这次风暴系统是由一个普通单体发展而来。01:22, 回波单体范围持续增大, 中心回波强度达 60dBz, 此时冰雹指数 $HI=74$, 在雷达图上显示为空心三角 (图 3c, 见彩页), 表示有可能出现降雹。01:58, 该对流单体变得更加强盛, 风暴呈现出超级单体钩状回波结构 (图 3d, 见彩页), 在移动方向的右侧出现中气旋 (图 3d 中的黄色圆圈是 CINRAD/SA 的中气旋产品符号, 是由 PUP 软件将中气旋算法生成的中气旋产品分别叠加在反射率产品上而形成的)。在

相应的速度图上也可以明显观测到中气旋,在低层回波径向速度图上可以看见入流区,在入流区偏右观测到中气旋,入流区的正径向速度区的范围随高度的增加而减弱,但是速度的数值有所减小,而且中气旋的位置也随着入流移向回波中心。在相应的沿入流方向穿过强回波中心的径向速度剖面(图4b,见彩页)可以明显看出低层的入流,在回波墙的下方有流出,似乎是与超级单体后侧的下沉气流相联系。事实上,在01:58,沿入流方向穿过强回波中心的反射率因子剖面(图4a,见彩页)已开始显现出有界弱回波区BWER的结构,表明中气旋在那时已经出现。02:07降雹开始,在02:16低层雷达回波强度图上(图3f,见彩页)可以发现风暴右后侧的典型钩状回波的反射率因子变得更强,最大反射率因子超过65dBz。沿入流方向穿过中气旋中心和强回波中心的反射率因子剖面(图4d,见彩页)呈现出典型的有界弱回波区(穹隆),强大的回波悬垂和有界弱回波区左侧的回波墙,最大的回波强度出现在回波墙上部,超过70dBz。相应的径向速度图上(图4f,见彩页)呈现一个强烈的中气旋。至02:53,其相应的钩状回波和中气旋消失(图3h,见彩页)。超级单体结构特征包括钩状回波、有界弱回波区和中气旋总共持续了约40分钟。

观测事实表明,超级单体大多由多单体系统发展而来,但这次超级单体过程是由普通单个单体发展而来,而且在这次风暴过程中,整个对流层的平均风向为西风略为偏南,而超级单体的移动方向在盛行风向的右侧20°左右,是典型的右移超级单体风暴。

2.2 结构分析

如上所述,此次超级单体风暴在6月28日02:16达到最强。分析一下此时超级单体的结构。图5给出了0.5°,3.4°,6.0°

的反射率因子和径向速度。0.5°仰角的反射率因子图上(图5a,见彩页)显示了带有典型钩状回波的超级单体,最大反射率因子位于钩状回波上,超过65dBz,在超级单体移动方向的右侧呈现出倒“V”型缺口,这也是超级单体常见的特征之一。在钩状回波的西南方有一条西东走向的长出流边界。在相应速度图上(图5d,见彩页)可以看出它靠近超级单体向雷达方向移动,低层入流似乎是沿着这条西东走向的阵风锋的前沿向超级单体钩状回波缺口附近运动,接近钩状回波缺口时由东南方向进入超级单体有界弱回波区成为上升气流,形成倒“V”型结构。在3.4°仰角反射率因子图上(图5b,见彩页)仍显现出钩状回波特征,而且比0.5°仰角明显,最强回波位于钩状回波东北部,超过70dBz,倒“V”型特征更加明显,缺口方向相对0.5°仰角向南偏转。相应的速度图(图5e,见彩页)上,中气旋特征仍很明显,在入流区有很明显的正径向速度区,而且数值相对于0.5°仰角和6.0°仰角都大。在6.0°仰角反射率因子图上(图5c,见彩页),反射率因子的轮廓进一步向南扩展,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,呈现出明显的回波悬垂。与低层钩状回波的入流缺口相对应的闭合弱回波区清晰可见,位置也相对偏南。云砧的范围相对于0.5°仰角和3.4°仰角更大。相应的径向速度图上(图5f,见彩页),入流区的正径向速度区的范围变大,愈靠近入流缺口径向速度数值变小,说明在该处水平的入流已经开始上升。

图4给出了02:16超级单体的反射率因子和径向速度垂直剖面。图4d为沿入流方向穿过中气旋中心和强回波中心的反射率因子垂直剖面,可以看到典型的有界弱回波区和其上的强大的悬垂回波,以及有界弱回波区左侧的回波墙。强的反射率因子区(大

于 65dBz) 为沿着 BWER 左侧的一个竖直的狭长区域, 从地面一直延伸到 9km 高度处, 在接近地面时开始向左偏。最强的区域位于回波墙上部, 回波强度值超过 70dBz, 回波顶高接近 12km。图 4f 为沿入流方向穿过中气旋中心和强回波中心的径向速度垂直剖面, 其中暖色代表离开雷达向着画面的方向, 冷色代表离开画面向着雷达的方向, 该图最显著的一个特征是从 3km 处一直向上扩展到 9km 左右的中气旋。在径向速度图上对应回波墙的右侧有一狭长范围的负径向速度区, 在接近地面时水平范围扩大, 推测这是由于下沉气流引起的冷堆。图 4e 为垂直方向穿过强回波的反射率因子垂直剖面, 对应图 4d 中的回波墙仍可以看见, 在回波墙的右侧还有一类似于回波墙结构的回波区, 中间为一狭长的弱回波区, 推测就是由向着画面的入流和上升气流造成的, 强回波中心在该区域上方, 回波强度超过 70dBz, 高度为 6km 左右。

3 降雹发生发展的机理分析

通过分析雹暴发生前的天气形势发现, 大尺度影响系统是冷性低槽的东移南压, 对流层中低层存在切变线, 切变线的东移使高空冷空气下传, 而低层的西南气流为降雹区带来暖湿气流, 这种配置使得在对流层中低层形成了大范围上冷下暖的不稳定层结。在降雹区上空西侧低层存在高能舌, 而在中高层存在负能量平流或负能量平流中心, 为降雹的发生发展累积了充足的不稳定能量。

西北气流和不稳定能量为雹云的发生提供了动力支持和初始扰动能量, 但是要使雹云中的雹胚长大到冰雹粒子尺度, 这就需要雹云自身特殊的结构及自维持机制。通过对多普勒雷达资料的分析表明, 该超级单体风暴是于 28 日 00:34 在河北南宫市生成, 是

由单个单体发展而来, 此后雷达回波不断加强并向东偏南方向移动。01:58, 风暴发展为超级单体并保持超级单体特征长达 40 分钟。之后, 其超级单体特征迅速消失。01:58, 上述超级单体强度达到顶峰, 0.5° 仰角的反射率因子图的右后侧呈现出典型的钩状回波特征, 左前方呈现明显的倒“V”型结构, 最大反射率因子超过 70dBz。相应反射率因子垂直剖面图上呈现出宽大的有界弱回波区, 高大强盛的悬垂回波和狭长的回波墙, 最大的回波强度出现在回波墙上方, 超过 70dBz。径向速度图上出现成熟中气旋的典型特征。另外, 相应的垂直累积液态水含量和密度分别超过 $70\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。此时的超级单体呈现出典型的强烈雹暴特征, 气象站观测到的最大冰雹直径达 5cm。

4 结 语

(1) 降雹前, 在降雹区上空西边低层存在高能舌, 而在中高层西边存在负能量平流或负能量平流中心, 为雹暴的发生发展累积了充足的不稳定能量; 在降雹区西部有高空急流, 而且存在很大的高空风垂直切变, 也有利于雹暴发生发展。

(2) 强风暴的发生通常在低层存在强的气旋性辐合, 而在高层存在强的辐散, 并和低层的辐合相对应, 低层充沛的水汽输送为冰雹的生长提供了必要条件。

(3) 观测表明, 超级单体大多由多单体系统发展而来, 但本次超级单体风暴是由单个普通单体发展而来。整个风暴过程长达两小时, 其中降雹持续了半小时, 具有典型的有界弱回波区(穹隆), 强大的回波悬垂和有界弱回波区左侧的回波墙, 最大的回波强度出现在回波墙上部, 超过 70dBz。相应的径向速度图上呈现一个强烈的中气旋。

(4) 此次超级单体风暴成熟阶段在雷达不同仰角的反射率因子图上都可以观测到钩状回波, 随着仰角的增大钩状回波更为明显, 在接近钩状回波缺口时由东南方向的气流进入超级单体有界弱回波区成为上升气流, 形成倒“V”型结构。钩状回波随仰角的增大进一步向南扩展, 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, 呈现出明显的回波悬垂。

致谢: 本文所用的多普勒天气雷达资料由朱君鉴正研级高级工程师和吴书君高级工程师提供, 探空资料由许晨海高级工程师提供, 在此表示感谢!

参考文献

- Browning, K. A., Ludlam, F. H., Macklin, W. C., The density and structure of hailstones. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1962, 88: 117-135.
- Stout, G. E., Huff, F. A., Radar records Illinois tornado genesis [J]. *Bull. Amer. Soc.*, 1953, 34: 281-284.
- Sulakvelidze, G. K., Bibilashvei, N. S., and Lapcheva, V. F., Formation of Precipitation and Modification of Hail Processes [J]. *Isr. Program Sci. Transl.*, 1967, Jerusalem.
- Donaldson, R. J., Vortex signature recognition by a Doppler radar [J], *J. Appl. Meteor.*, 1970, 9: 661-670.
- Fujita, T. T., Analytical meso-meteorology: A review, *Severe Local Storm* [J]. *Meteor. Monogr.*, 27 1963, AMS, Boston, 77-125.
- Kropfli, R. A., Miller L. J., Kinematic structure and flux quantities in a convective storm from dual Doppler radar observations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1976, 33 (3): 520-529.
- Lemon, R. L., Doswell, C. A., Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornado genesis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1979, 107: 1184-1197.
- Chong, M., Tesud, J., Roux, E., Three dimension wind field analysis from dual Doppler radar data [J]. *J. Climate, App. Meteor.*, 1983, 22 (7): 1204-1215.
- Kessinger, C. J., Ray, P. S., Hane, C. E., The Oklahoma squall line of 19 May 1977 Part: A multiple Doppler analysis of convective and stratiform structure [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1987, 44 (19): 2840-2864.
- Houze, R. A., Rutledge, S. A., Biggerstaff, M. L., et al. Interpretation of Doppler weather radar display of midlatitude mesoscale convective system [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1989, 70 (6): 608-619.
- 葛润生, 姜海燕. 北京地区雹暴气流结构的研究 [J]. *应用气象学报*, 1998, 9 (1): 1-7.
- 朱君鉴, 郑国光, 王令等. 冰雹风暴中的流场结构及大冰雹生成区 [J]. *南京气象学院学报*, 2004, 27 (6): 735-742.
- 李文娟. 山东省冰雹云宏微观特征观测及数值模拟研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士论文, 2005.
- 许晨海, 张纪淮. 降雹前大气层结稳定情况下的环境场特征 [J]. *气象*, 1999, 25 (12): 17-20.
- 许晨海, 张纪淮, 朱福康等. 用能量分析方法识别冰雹云 [J]. *气象*, 2001, 27 (7): 35-40.
- 许晨海, 孔燕燕, 张纪淮. 中高层湿-比有效能量与雹云发生发展 [J]. *应用气象学报*, 2002, 13 (1): 122-124.

殷占福等：一次强风暴三维结构的观测分析

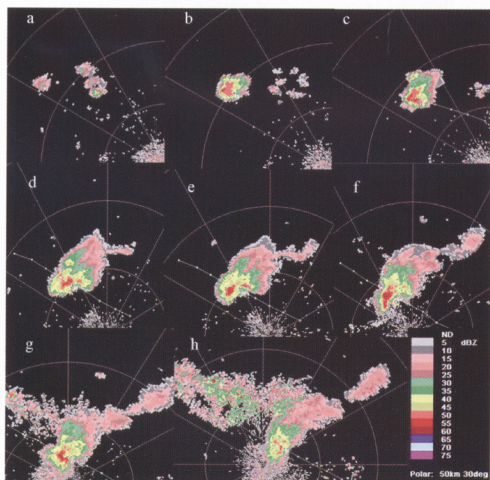


图3 2003年6月28日济南雷达观测的 0.5° 仰角反射率因子演变图
时间分别是0:34 (a), 0:58 (b), 1:16 (c), 1:58 (d), 2:04 (e), 2:16 (f), 2:34 (g), 2:53 (h)

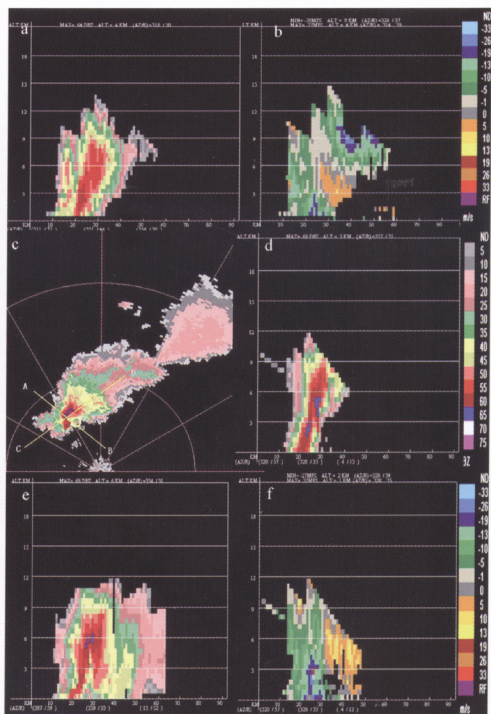


图4 2003年6月28日济南雷达观测的超级单体的垂直结构

a, b: 1:58沿入流方向穿过强回波中心的反射率因子和径向速度垂直剖面; c: 2:16仰角为 2.4° 的反射率因子; d, f: 2:16沿AB方向的反射率因子和径向速度垂直剖面; e: 2:16沿CD方向的反射率因子垂直剖面

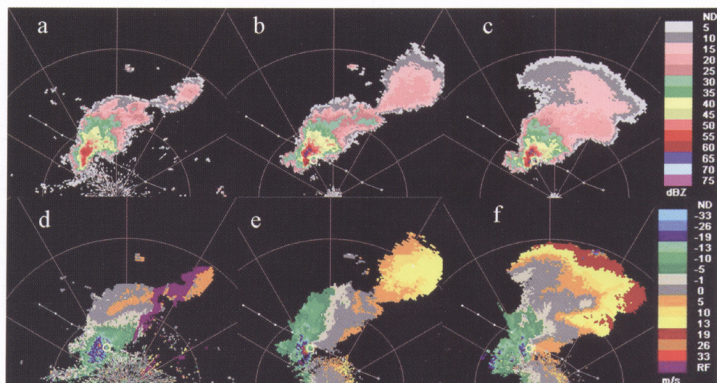


图5 2003年6月28日2:16济南雷达观测的不同仰角 (a、d: 0.5° , b、e: 3.4° , c、f: 6.0°) 反射率因子和径向速度图