

一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析*

郑媛媛 俞小鼎

(安徽省气象台, 合肥, 230061) (中国气象局培训中心, 北京, 100081)

方 鲍文中 谢亦峰 周 昆 陆大春 刘 勇

(安徽省气象台, 合肥, 230061)

摘 要

文中利用位于安徽合肥的 S 波段多普勒天气雷达资料, 对 2002 年 5 月 27 日 14~ 20 时发生在皖北地区的一次典型的超级单体风暴过程进行了详细的分析。此次超级单体南边出现两条明显的出流边界, 一条位于钩状回波的西南, 一条位于钩状回波的东南。超级单体左前方的低层反射率因子呈现明显的倒“V”字型结构, 这也是超级单体风暴的典型特征之一。沿入流方向穿过最强回波位置的反射率因子垂直剖面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沿着回波墙的一个竖直的狭长区域, 其值超过 70 dBz。相应的中低层径向速度图呈现一个强烈的中气旋, 旋转速度达到 22 m/s。风暴顶为强烈辐散, 正负速度差值达 63 m/s。相应的垂直累积液态水含量和密度分别超过 70 kg/m²和 5 g/m³。因此, 该风暴具有强烈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的右侧约 30°, 属于右移风暴。

关键词: 超级单体, 有界弱回波区, 中气旋, 大冰雹, 新一代天气雷达。

1 引 言

作为局地对流风暴发展的一种最猛烈的形式, 超级单体一直吸引着众多气象学家的注意。20 世纪 60 和 70 年代, Browning 及其合作者利用天气雷达资料对超级单体风暴的结构进行了一系列开创性的研究^[1~ 8]。Marwitz^[9]以及 Chisholm^[10]正式提出将超级单体作为局地对流风暴的一种类型。Browning 和 Ludlam^[3]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, 一个重要的特征是雷达回波存在一个弱回波区 WER (Weak Echo Region) 或有界弱回波区 (Bounded Weak Echo Region, 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 于 1953 年观测到的^[11]。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, Fujita^[12]给出了常见的超级单体钩状回波的 5 个变种。随着 20 世纪 70 年代多普勒天气雷达在研究中的使用, 超级单体的旋转特性被充分揭示。1970 年 Donaldson^[13]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”^[14], 也就是最早由 Fujita^[15]提出, 现在广泛使用的所谓“中气旋”(mesocyclone)。接下来的一系列多普勒雷达观测^[16~ 18]和数值模拟^[19~ 21]进一步证明超级单体总是与中气旋相伴随。Browning^[22]暗示超级单体可重新定义为具有中气旋的对流单体, 中气旋形成阶段的位置与有界弱回波区的位置大致相同。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^[23]于 1979 年提出了一个新的超级单体概念模型, 至今仍被应用。

中国对于局地强对流包括超级单体风暴也进行了一些研究。葛润生^[24]对 1964 年发生在北京地区

* 初稿时间: 2003 年 8 月 11 日; 修改稿时间: 2003 年 9 月 22 日。
资助课题: 中国气象局课题“安徽省淮河流域梅雨期(雨季)中尺度系统发生、发展及预报方法研究”、安徽省气象局课题“省短时灾害性天气预警系统”和教育部优秀年轻教师研究基金。

的几次降雹过程的雷达回波进行了分析, 其中的一个雹暴的结构与超级单体类似。王昂生和徐乃璋^[25]研究了若干中国的超级单体个例。葛润生等^[26]利用中国气象科学研究院的多普勒天气雷达研究了一次雹暴的反射率因子和流场结构。目前中国新一代雷达的高灵敏度和测速功能为局地强风暴的研究提供了良好的条件。不少站点已观测到一些超级单体和相应的中气旋的例子^[27~30]。

2002 年 5 月 27 日下午, 在安徽北部出现了一系列的强对流风暴, 其中有 1 个超级单体造成严重的灾害, 该风暴历经约 2.5 h, 自西北向东南方向移动了约 90 km, 风暴路径(包括风暴的起始阶段)如图 1 所示。安徽省北部大片地区出现大风、冰雹和强降水天气。其中受灾最严重的蚌埠市 5 月 27 日 16 时 58 分出现 31 m/s 的狂风, 同时伴随着冰雹和大雨。农作物大面积受灾, 倒塌房屋 1374 间, 2 人死亡, 53 人受伤, 蚌埠市直接经济损失 1.92 亿元, 这次灾害总的经济损失约 4.54 亿元。此次超级单体很典型, 本文将应用合肥多普勒雷达的资料对该超级单体的结构及其演变过程进行仔细的分析。

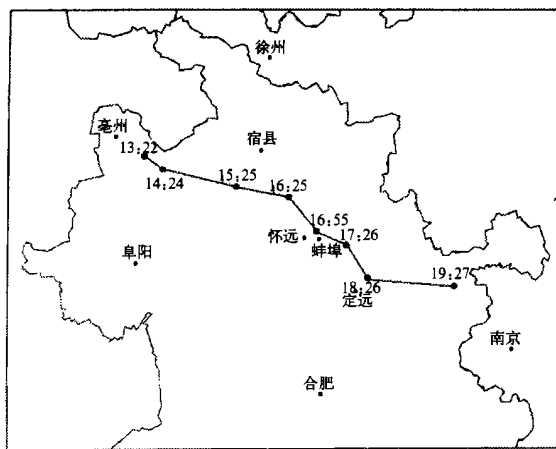


图 1 2002 年 5 月 27 日风暴路径

Fig. 1 Storm track

2 天气背景

2002 年 5 月 27 日 08 时(北京时间) 500 hPa 高空图(图略)上, 安徽省处在沿海槽后的西北气流中, 从巴尔喀什湖至中国东部气流较平, 不断有冷空气从淮北路南下, 皖北为西风偏北气流。从 27 日 08 和 20 时 700 hPa 高空观测图上看到(图略), 在这 12 h 内, 低槽切变线迅速南压经过皖北, 给当地的

强对流天气造成了比较有利的环流条件。850 hPa 图(图略)上, 27 日 08 时皖北为西南气流。在 27 日 08 时的地面图上(图略), 皖北地区都是东南风, 3 h 变压为正, 14 时, 皖北地区出现一个尺度约为 150 km 的气旋式涡旋(图略), 3 h 变压均为负值, 显然与 700 hPa 上低槽切变线的移过直接相关, 为局地强对流的发生提供了很好的中尺度环流背景。对流发生前为晴空少云天气, 地面增温明显。17 时(图略), 超级单体达到最强盛阶段, 此时皖北地面风场特征主要表现为自蚌埠向西的一条气旋式风切变线和蚌埠西侧一条南北向风辐合线, 14 时出现的尺度约为 150 km 的气旋式涡旋已不复存在。

对流风暴经过的区域为阜阳、徐州和南京 3 个探空站构成的三角形区域(图 1)。对流风暴于 27 日 13 时多起始于亳州和涡阳之间的区域, 位于阜阳和徐州两个探空站之间, 经过涡阳、蒙城、蚌埠、定远、来安和天长, 约 21 时进入苏北。图 2(见彩图)给出了 27 日 08 时阜阳和徐州的探空曲线和自地面绝热上升的气块的状态曲线。温度层结曲线和状态曲线在低层的交点处为自由对流高度, 在高层的交点为平衡高度, 位于自由对流高度和平衡高度之间的红色区域的面积大小代表对流有效位能 CAPE 的数值。阜阳站的红色区域面积不大, 因此对流有效位能不大; 而徐州站的对流有效位能接近于零。南京站 27 日 08 时探空的 CAPE 值也接近于 0(图略)。因此, 单从上述探空站 08 时的 CAPE 的分析很难看出下午具有发生强对流的潜势。主要原因在于探空站的时空分辨率太低, 其空间间距约为 200 km, 时间间隔为 12 h, 而大气对流稳定度的时空变化是很大的, 尤其是对大气对流稳定度有很大影响的水汽的时空变率也很大。Weckwerth 等^[31]指出, 在大气边界层内的滚轴状对流的上升和下沉区, 虽然相隔只有 20~30 km, 但由于其湿度相差较大, 相应的 CAPE 值可以相差很远。所以, 根据常规探空资料计算的 CAPE 值对于发生强对流发生潜势的指示性是非常有限的。图 2 的探空图上的低层风速不很清楚, 结合地面, 850, 700 和 500 hPa 天气图可看出: 27 日 08 时皖北地区的地面均为东南风, 850 hPa 为西南风, 700 和 500 hPa 都为西风, 再往上皆为西风, 风速随高度增加。因此, 在大气低层, 风向随高度顺时针旋转, 风速增大, 特别是在地面到 850

hPa 之间风向顺时针旋转的幅度最大, 有利于气旋式右移超级单体风暴的产生^[21]。

3 多普勒雷达资料分析

3.1 风暴的演变

2002 年 5 月 27 日 13 时 20 分左右在皖北的西北部亳州和涡阳之间(相对于雷达的位置为“332°, 235 km”)开始有孤立的多单体生成(图略), 此后雷达回波不断发展加强并向东偏南方向移动, 15 时左右(图 3a), 该风暴系统已发展成由多个对流单体连成一片尺度约为 100 km 的中尺度对流系统(彩图 3)。15 时 31 分(图 3b), 该中尺度对流系统中有 3 个发展比较强盛的对流单体, 其中右边的对流单体最强。15 时 55 分(图 3c), 上述右边的对流单体变得更加强盛, 其前进方向的右后侧出现突出物, 开始显现出超级单体低层回波特征。位于该强风暴东南方向的一个小的孤立对流单体迅速向该风暴靠近。16 时 19 分(图 3d), 风暴呈现出典型的超级单体钩状回波结构, 上述小对流单体已经非常靠近超级单体的南端。相应径向速度图上出现明显的中气旋(彩图 4a)。事实上, 在 16 时 01 分, 沿入流方向穿过最强回波位置的反射率因子垂直剖面(彩图 5)已开始显现出有界弱回波区 BWER 的结构, 表明中气旋在那时可能已经出现, 但由于距离折叠的原因在低层速度图上被遮盖, 但在中高层(8 km)存在尺度约为 20 km 的中尺度气旋环流, 比中气旋判据^[31]规定的尺度(小于 10 km)要大(图略)。16 时 07 分的低层速度图上可见明显的中气旋特征(图略)。据此判断上述强对流风暴在 16 时左右发展成超级单体。16 时 25 分的超级单体反射率因子垂直剖面(图 5)呈现出明显的有界弱回波区结构。16 时 55 分, 超级单体强度达到顶峰(图 3e), 风暴右后侧的典型钩状回波的反射率因子变得更强, 0.5°仰角的最大反射率因子超过 70 dBz。此时蚌埠出现 11 级大风和强冰雹。前面提到的小对流单体已经与超级单体合并, 使超级单体进一步加强。超级单体南边出现两条明显的出流边界, 一条位于钩状回波的西南, 一条位于钩状回波的东南。超级单体左前方的低层反射率因子呈现明显的倒“V”字型结构, 这也是超级单体的典型特征之一。平行于入流方向穿过最强回波位置的反射率因子垂直剖面(图 5d)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 70 dBz。相应的径向速度图(图 4b)呈现一个强烈的中气旋。至 17 时 14 分, 其相应的钩状回波和中气旋特征消失(图略)。超级单体结构特征包括钩状回波、有界弱回波区(穹隆)和中气旋总共持续了约 1 h, 在其间, 整个对流层的平均风向为西风略微偏北, 而超级单体的移动方向在盛行风向的右侧 30°左右, 是典型的右移超级单体风暴。从 17 时 02 分开始, 超级单体左前侧出现新的单体, 超级单体开始向多单体风暴演变。随后, 多单体风暴中的各个对流单体逐渐趋向于线状排列, 到 17 时 44 分(图 3h), 对流风暴呈现出明显的蛇线结构, 相应的速度图上显示蛇线前沿的低层辐合特征(图 4c)。至 18 时 14 分, 蛇线变得很直, 强度大大减弱。随后风暴继续向东移动, 于 21 时左右进入苏北。

大量观测事实表明, 超级单体大多由多单体系统发展而来。也有的超级单体由普通单个单体发展而来。Lemon^[32]提出了对流风暴发展的 3 个阶段反射率因子回波特征模型, 既可以代表由多单体发展为超级单体的过程, 也可以代表由普通单个单体发展为超级单体的过程, 如图 6 彩图所示。对于多单体, 图中的对流单体代表其中发展最强盛的对流单体。每个发展阶段由高中低层反射率因子的平面综合图和沿对流低层入流方向通过回波单体核心的相应垂直剖面来表示。平面图上, 深浅不同的咖啡色阴影表示低层回波, 颜色越深, 反射率因子越大。点划线表示中层回波强度超过 20 dBz 的范围, 黑色小圆点代表风暴顶的位置。橙色箭头代表低层入流和高层出流在平面上的投影。线段 AB 给出相应垂直剖面的位置。从此次分析的 2002 年 5 月 27 日皖北超级单体的发展可以看出, 在 27 日 13 时多单体开始出现时, 处于多单体非强风暴阶段, 高中低层反射率因子垂直相叠, 风暴顶位于低层反射率因子等值线所围区域的中心, 没有弱回波区结构(图略), 类似于图 6a 的结构。后来, 风暴发展为含有多个对流风暴中尺度对流系统(图 3b), 图 3b 右侧的对流单体最后发展为超级单体。初始阶段的结构是多单体, 该对流单体在 15 时 18 分反射率因子由低向高向低层入流一侧倾斜, 开始出现弱回波区和其上的回波悬垂结构, 标志着风暴进入强风暴阶段(图

6b)。15 时 43 分, 该风暴的弱回波区结构变的非常显著(图 5a)。16 时 01 分, 开始出现有界弱回波区(图 5b), 标志着该对流单体进入超级单体阶段(图 6c)。16 时 25 分, 有界弱回波区结构变得非常典型(图 5c), 同时伴有明显的中气旋(图略)。16 时 55 分, 超级单体发展到最强盛阶段。后来, 如前所述, 该超级单体演变为多单体系统并进一步演变为爬线。17 时 50 分(图 5e), 沿爬线中最强的对流单体的垂直剖面显示该对流单体仍具有弱回波区结构, 表明该对流单体仍处于非超级单体强风暴阶段。

3. 超级单体结构分析

如上所述, 此次超级单体风暴在 5 月 27 日 16 时 55 分达到最强。分析一下此时超级单体的结构。图 7 给出了 0.5° 、 1.5° 、 3.4° 和 4.3° 仰角的反射率因子和径向速度。 0.5° 仰角的反射率因子图上显示了带有典型钩状回波的超级单体(相应的高度在此距离处约为 2 km), 最大反射率因子位于钩状回波上(西部), 超过 70 dBZ。钩状回波的西南方沿西南—东北走向有一条 50 余公里长出流边界, 从速度图上看它离开超级单体向雷达方向移动, 它相对于与超级单体后侧下沉气流相对应的出流边界, 也就是阵风锋。低层入流似乎是沿着这条西南—东北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。钩状回波的东南有一条长达 100 多公里的边界层辐合线, 呈西北—东南走向。似乎是与超级单体前侧下沉气流相联系的另一段出流边界(阵风锋), 但其靠近超级单体的部分可能由于距离雷达远的缘故没有显现出来。低层反射率因子图上(0.5°) 超级单体移动方向的左前侧呈现出倒“V”型缺口, 这也是超级单体常见的特征之一。与钩状回波的缺口区相对应, 0.5° 仰角的径向速度图上是—个很强的气旋式切变速度对, 即中气旋。该中气旋的旋转速度为 22 m/s, 按照美国国家强风暴实验室规定的中气旋判据^[33] 属于强中气旋。在 1.5° 仰角(在超级单体距离处高度约 4 km), 反射率因子图上仍显现出钩状回波特征, 但不如 0.5° 仰角明显, 最强回波位于钩状回波北部, 超过 70 dBZ。反射率因子轮廓线相对 0.5° 仰角向南(低层入流方向)扩展。相应的速度图上, 中气旋特征仍很显著, 旋转速度约为 19 m/s, 比 0.5° 仰角稍弱。 2.4° 仰角

(高度约为 6 km) 的中气旋特征依然清晰, 旋转速度为 16 m/s(图略)。在 3.4° 仰角(在超级单体距离处的高度约为 8 km), 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—侧倾斜的特征, 呈现出明显的回波悬垂(echo overhang)。与低层钩状回波的入流缺口相对应的闭合的有界弱回波区清晰可见, 位置相对偏南, 也就是说有界弱回波区也是自低往高向低层入流—侧倾斜的。相应的速度图上呈现出气旋式辐散的结构。在 4.3° 仰角, 反射率因子回波成羽毛状, 强回波中心位于西侧, 位于中低层有界弱回波区之上。相应径向速度图呈现以反射率因子强度核心为中心的强烈辐散, 正负速度差值达 63 m/s。根据成熟中气旋的概念模型^[33], 在靠近地面附近的大气边界层内, 中气旋的径向速度特征为辐合式气旋性旋转, 再上面一些是纯粹的气旋性旋转, 在中上层为气旋式旋转辐散, 上层为纯粹辐散。上述超级单体在 0.5° 和 1.5° 仰角(高度分别为 2 和 4 km) 的径向速度特征基本为纯粹的气旋性旋转(彩图 7), 3.4° 仰角(高度约 8 km) 为气旋性辐散, 4.3° 仰角(约 10 km 高) 以强烈辐散为主, 同时带有旋转特征, 基本符合成熟中气旋的概念模型。接近地面的边界层内的速度特征由于离雷达较远而无法观测到。另外需要指出的是, 此次超级单体不是孤立的, 在其西部和北部还有其他对流单体存在, 共同构成一个中尺度对流系统。就超级单体本身的水平尺度而言, 可以近似看成一个椭圆形, 其超过 30 dBZ 阈值的长短轴的长度分别为 30 和 60 km, 若阈值为 20 dBZ, 则其长短轴分别为 40 和 150 km。

图 8(彩图) 给出了 16 时 55 分超级单体的反射率因子和径向速度垂直剖面。图 8c 为沿低层入流方向通过有界弱回波区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(穹隆) 和其上的强大回波悬垂、以及有界弱回波区左侧回波墙。有界弱回波区的水平尺度约为 8~9 km。强的反射率因子区(大于 65 dBZ) 为沿着 BWER 左侧的一个竖直的狭长区域, 从 10 km 左右高度一直扩展到低层, 其中下部代表冰雹下降的区域。最强的区域位于回波墙上部, 其值超过 70 dBZ。超级单体的回波顶接近 15 km, 沿剖面方向的水平尺度约 40 km。图 8a 和 b 为沿着与通过中气旋中心的与雷达径向

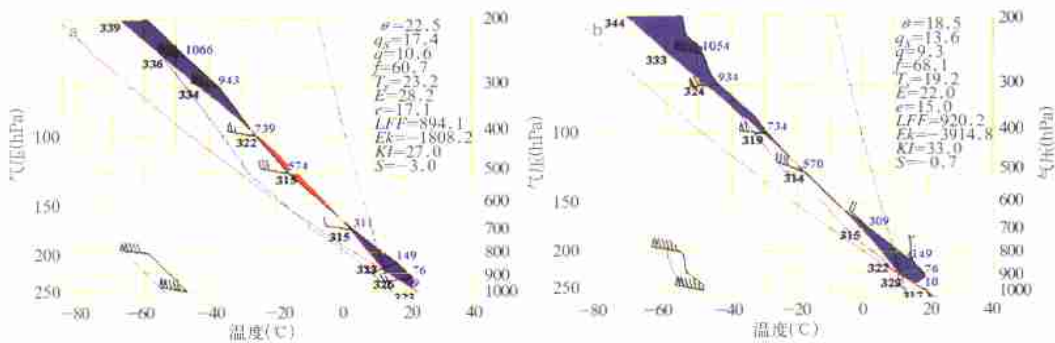


图2 热力稳定度分析
(阜阳(a)和徐州(b)站2002年5月27日08时T-lnP图)

Fig.2 Static stability analysis. (a) and (b):the skew T-lnP diagrams on May 27,2002,at Fuyang and Xuzhou, resectively

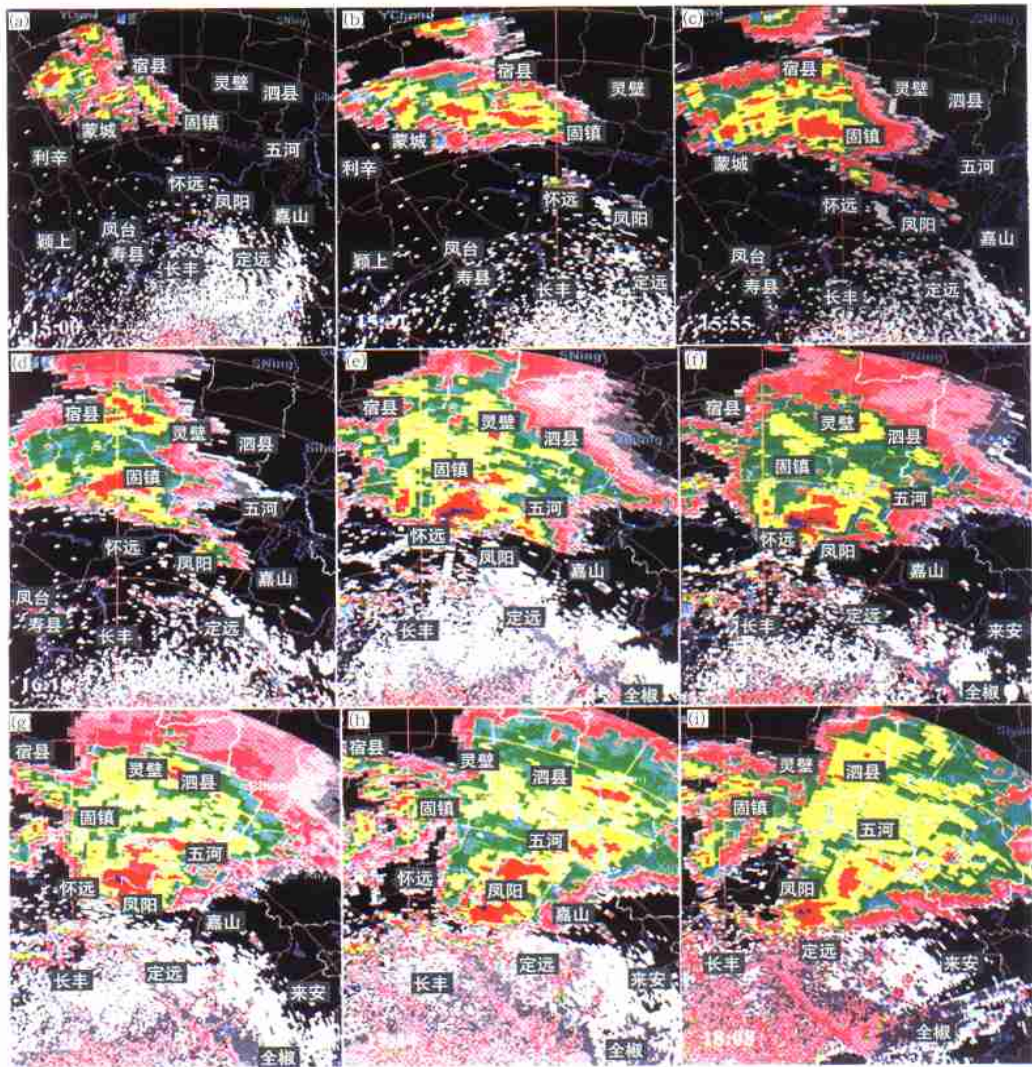


图3 0.5° 仰角反射率因子演变图
(时间分别是5月27日15:00 (a),15:31 (b),15:55 (c),16:19 (d),
16:55 (e),17:08 (f),17:20 (g),17:44 (h)和18:08 (i))

Fig.3 The evolution of the reflectivity on 0.5° elevation. The times are
15:00(a), 15:31(b), 15:55(c), 16:19(d), 16:55(e), 17:08(f), 17:20(g), 17:44(h) and 18:08(i), respectively

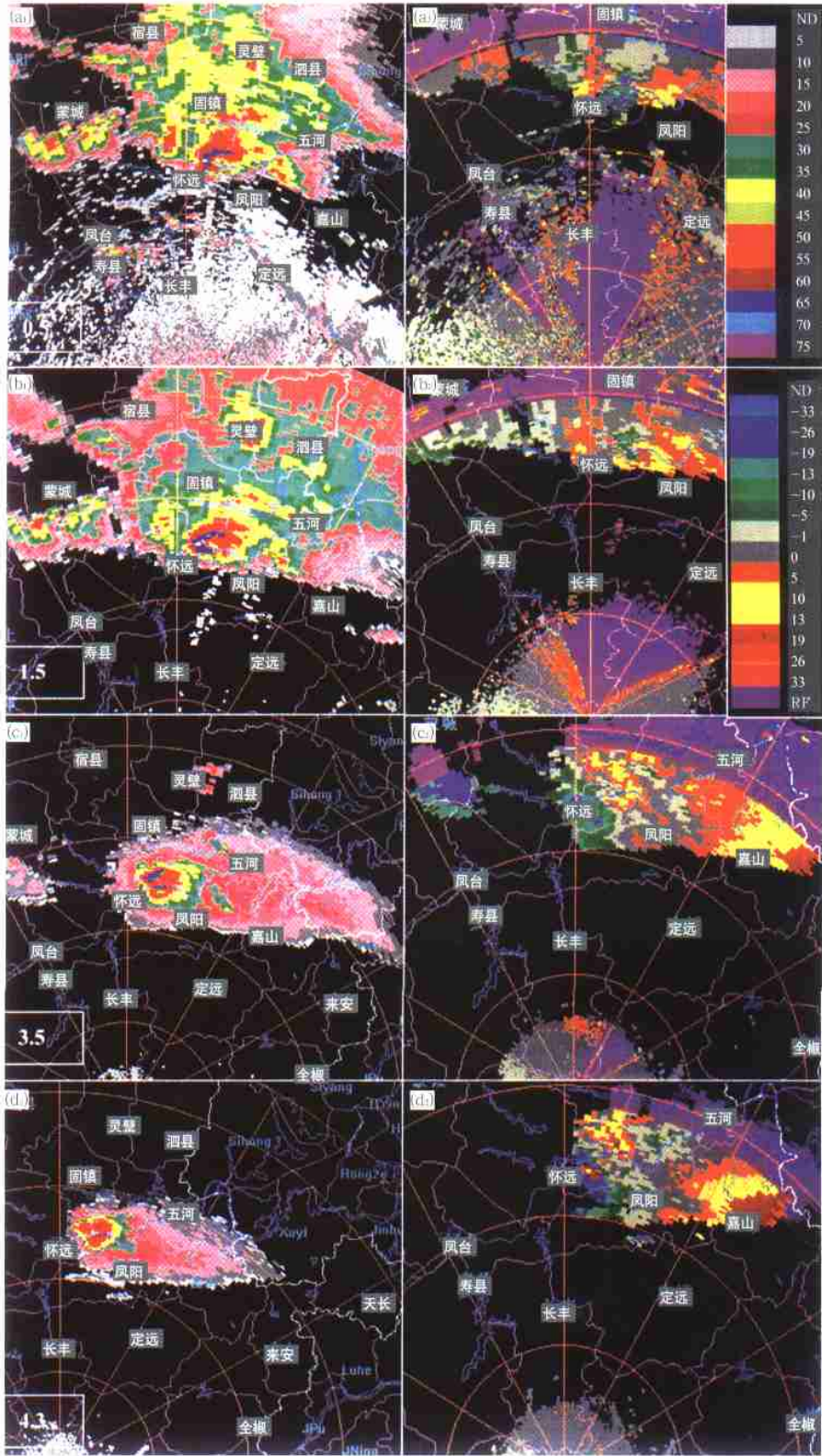


图7 2002年5月27日16时55分0.5°、1.5°、3.4°和4.3°仰角的反射率因子(a₁~d₁)和径向速度(a₂~d₂)分布
Fig.7 The reflectivity and radial velocity maps on 0.5°, 1.5°, 3.4° and 4.3° elevations(a₁~d₁), respectively(a₂~d₂), on May 27, 2002

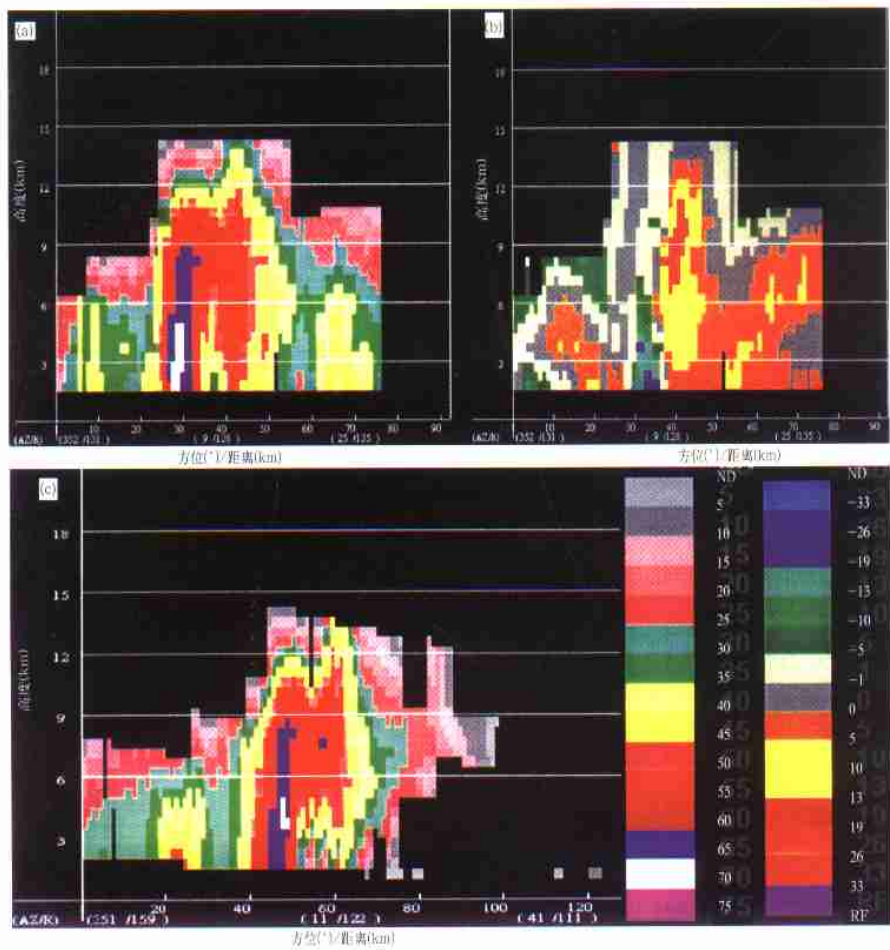


图8 皖北超级单体16时55分时刻的垂直结构

(a, b. 穿过中气旋中心并与穿过中气旋中心的雷达径向垂直的反射率因子和径向速度垂直剖面;
c. 沿风暴低层入流方向并穿过风暴反射率因子核心的反射率因子垂直剖面)

Fig.8 The vertical structure of the supercell at 16:55.

(a, b, the reflectivity and the radial cross sections passing through the mesocyclone and normal to the radial direction;
c, the reflectivity cross-section which is parallel to the low level inflow and pass through the supercell's reflectivity core)

李峰等：近30年夏季亚欧大陆中高纬度阻塞高压的统计特征

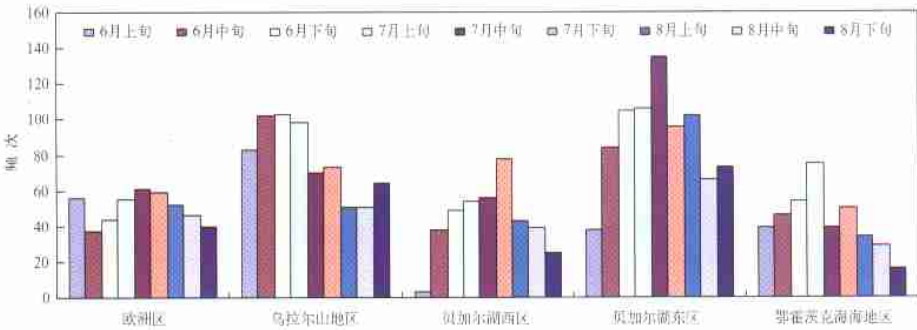


图6 1970~2001年32个夏季亚欧大陆各活跃区阻塞高压中心频次逐旬变化

Fig.6 A intra-seasonal variation of blocking center total that occurred in five active areas for past 32 summers from 1970 to 2001

垂直的直线的反射率因子和径向速度的垂直剖面。反射率因子垂直剖面的结构与文献[8]中的 Fleming 超级单体的结构类似, 如典型的有界弱回波区(穹隆)和其上的强大回波悬垂, 以及有界弱回波区左侧回波墙和狭长的反射率因子高值区。此方向 BWER 的水平尺度略小, 约 7 km。接下来分析相应的径向速度的垂直剖面(图 8b): 暖色代表离开雷达向着画面的速度, 冷色代表离开画面向着雷达的速度。径向速度剖面中最显著一个特征是从底部(2 km)一直向上扩展到 12 km 左右的中气旋。由于距离较远(距雷达约 120 km), 最低仰角(0.5°)到了超级单体距离处已经接近 2 km 高。从图中判断, 中气旋还应向下延伸直到边界层内。

3.3 冰 雹

超级单体是局地对流系统发展的最强烈的形式, 其相应的灾害性天气有冰雹、龙卷、灾害性大风(包括下击暴流)和暴洪。观测表明, 在 16 时 55 分左右, 超级单体正好经过蚌埠市, 蚌埠气象站观测到了降雹, 最大冰雹直径为 11 mm。这样强的超级单体只降了这样小尺寸的冰雹的确出乎预料, 按理应当下大冰雹(大冰雹指直径超过 20 mm 的冰雹)。有两种可能性: 第一种可能是的确没有下大冰雹。支持这一看法的有利论据是王昂生和徐乃璋^[25]也曾观测到强超级单体只下了小而弱的雹块的个例。第二种可能是超级单体下了大冰雹, 但没有被观测到。Browning 和 Foote^[8]根据 1972 年 6 月 21 日发生在美国 Colorado 州东北部的 Fleming 超级单体提出了超级单体中冰雹增长的概念模型。他们给出 Fleming 超级单体沿低层入流方向通过有界弱回波区中心的垂直剖面的结构与此次皖北超级单体的相应垂直剖面(图 8c)非常相似。它们都具有宽大的有界弱回波及其上强大的回波悬垂, 表示风暴具有降大雹的潜势。Fleming 超级单体的 BWER 的水平尺度约为 10 km, 与此次皖北超级单体的 BWER 的水平尺度 8~9 km 大致相当。而 Fleming 风暴降了棒球大小的冰雹, 即直径 70~80 mm 的冰雹。从图 8a, c 可见, 此次皖北超级单体沿回波墙的最强的反射率因子超过 70 dBz, 这样强的回波只有大冰雹才能产生。图 8a 中的大于 70 dBz 的狭长回波区域一直延伸到距地面 2 km 以内(由于高度随距雷达的水平距离的增加而增加, 无法判断究竟延伸到离地

面的精确距离, 但从趋势判断, 似乎会进一步向下延伸), 而此次对流风暴相应的 0℃层的高度大约在距地面 3.5 km, 即大冰雹区已经降到了 0℃层以下至少 1.5 km 的距离, 在接下来降落到地面的不到 2 km 的距离内融化为小冰雹的可能性不大。WSR-88D 新的冰雹算法中判断大冰雹^[34](通常将降落到地面的直径超过 2 cm 的冰雹称为大冰雹)的主要判据是检验 -20℃高度以上有无超过 45 dBz 的反射率因子。此次对流风暴过程对应的 -20℃高度大约为 6.5 km, 从图 8a, c 可见该超级单体 6.5 km 以上的反射率因子强度超过 65 dBz。因此, 该算法也将判断此次超级单体会降大冰雹。判断大冰雹的另一个指标是风暴顶辐散。如上所述, 在 16 时 55 分, 超级单体顶正负速度的差值为 63 m/s, 表明存在很强的风暴顶辐散。根据 Witt 和 Nelson^[35]给出的经验关系, 这样强的风暴顶辐散与高尔夫球大小的降雹相对应, 即冰雹直径为 40~50 mm。另外, 用来判断对流风暴强度的一个十分有用的参量是垂直累积液态水含量, 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。对上式进行垂直积分即可得到垂直累积液态水含量(VIL)。VIL 如果远高于相应季节的对流单体的平均 VIL 值, 则发生大冰雹的可能性很大。根据美国 Oklahoma 州的统计, 5 月份对应于出现大冰雹的垂直累积液态含水量的阈值为 55 kg/m², 6, 7 和 8 月份的相应阈值为 65 kg/m²。在 16 时 55 分, 上述超级单体对应的最大 VIL 值超过 70 kg/m², 这样大的值在 5 月份的江淮一带的对流单体中是不常见的, 因此表明降大冰雹的可能性很大。Amburn 和 Wolf^[36]定义 VIL 与风暴顶高度之比为 VIL 密度。他们的研究表明, 如果 VIL 密度超过 4 g/m³, 则风暴几乎肯定会产生直径超过 2 cm 的大冰雹。对于此次个例, 16 时 55 分, 回波顶高为 14 km, 垂直累积液态水含量超过 70 kg/m², 相应的 VIL 密度超过 5 g/m³。基于上述事实, 本文认为, 尽管气象站只观测到了直径 11 mm 的冰雹, 但实际降下的最大冰雹尺寸要远远超过直径 11 mm, 只是没有降在气象站附近, 因而没有被观测到。

4 总结和讨论

利用位于安徽合肥的 S 波段多普勒天气雷达资料对 2002 年 5 月 27 日 14~20 时发生在皖北地区的一次典型的超级单体过程进行了详细的分析。此次超级单体的天气背景的主要特征是:槽线位置从低往高向前倾斜,700 hPa 小槽在对流风暴发生期间移过皖北地区,下午 14 时的地面图上显示一个尺度约为 150 km 的闭合气旋式环流。风向从低到高顺时针方向旋转。

上述风暴于 27 日 13 点 20 分左右起源于皖北的西北部亳州和涡阳之间的一个孤立的多单体风暴,此后雷达回波不断发展加强并向东偏南方向移动。16 时左右,风暴发展为超级单体并保持超级单体特征达 1 h 之久。整个对流层的平均风向为西风略偏北,而超级单体的移动方向在盛行风向的右侧约 30° ,是典型的右移超级单体。之后,其超级单体特征迅速消失,先是演变为多单体,然后变成一条爬线,于 21 时左右进入苏北。

16 时 55 分,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”字型结构,最大反射率因子超过 70 dBz。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(穹隆),高大强盛的回波悬垂和与竖直的高反射率因子(65 dBz 以上)狭长区域相邻的回波墙,最大的回波强度出现在回波墙上部,超过 70 dBz。径向速度图上出现成熟中气旋的典型特征,中低层为纯粹的气旋式旋转,中高层为辐散式气旋旋转,高层为强烈辐散。超级单

体南边出现两条明显的出流边界,一条位于钩状回波的西南,一条位于钩状回波的东南。另外,相应的垂直累积液态水含量和密度分别超过 70 kg/m^2 和 5 g/m^3 。此时的超级单体呈现出典型的强烈雹暴特征,尽管气象站观测到的最大冰雹直径只有 11 mm,但上述所有特征都表明该超级单体的实际最大降雹尺寸要远远超过这一数值。

在预报发生强对流风暴潜势时,人们往往使用 $T-\ln P$ 图进行热力不稳定分析。此次超级单体风暴发生当日早上 08 时相邻探空站的 $T-\ln P$ 图上并没有显示出很强的对流不稳定。主要原因是探空的时空分辨率太低。由于大气水汽分布的高时空变率,大气对流稳定度的时空变率很大,因此利用早上 08 时探空曲线的 $T-\ln P$ 图的热力稳定度分析来预报午后发生对流风暴的潜势的有效性是十分有限的。可以利用地基 GPS 测量的水汽总量、自动地面站数据和高分辨率数值天气预报数据构造高时空分辨率的大气垂直温湿廓线,从而增加强对流潜势预报的准确性,这是一个需要进一步研究的问题。

此次超级单体风暴的最强盛阶段出现了强中气旋,按照美国天气局的业务规范(中国目前还没有这方面的业务规范),应发布龙卷警报^[33]。而事实上并没有观测到龙卷。观测表明^[37],龙卷超级单体和非龙卷超级单体的钩状回波几乎没有任何区别,而龙卷和非龙卷超级单体在径向速度特征方面的差别即使有,也是很细微的。这给超级单体龙卷的预警带来的很大的挑战。在这方面进行更多的个例研究是很必要的。

参考文献

- 1 Browning K A. Cellular structures of convective storms. *Meteor Mag*, 1962, 91: 341~350
- 2 Browning K A, Ludlam F H. Airflow in convective storms. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1962, 88: 117~135
- 3 Browning K A, Ludlam F H, Macklin W C. The density and structure of hailstones. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1963, 89: 75~84
- 4 Browning K A. The growth of large hail within a steady updraught. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1963, 89: 490~506
- 5 Browning K A, Donaldson R J. Airflow and structure of a tornadic storm. *J Atmos Sci*, 1963, 20: 533~545
- 6 Browning K A. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J Atmos Sci*, 1964, 21: 634~639
- 7 Browning K A. The evolution of tornadic storms. *J Atmos Sci*, 1965, 22: 664~668
- 8 Browning K A, Foote G B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implication for hail suppression. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1976, 102: 499~533
- 9 Marwitz J D. The structure and motion of severe hailstorms. *J Appl Meteor*, 1972, 11: 166~201

- 10 Chisholm A J. Albert hailstorms, Part I: Radar case studies and airflow models. *Meteor Mon*, 1973, 14(36):
- 11 Stout G E, Huff F A. Radar records Illinois tornado genesis. *Bull Amer Meteor Soc*, 1953, 34: 281~ 284
- 12 Fujita T T. Proposed mechanism of tornado formation from rotating thunderstorms. Preprints, Eighth Conf. on Severe Local Storms, Denver, CO, Amer Meteor Soc, 1973, 191~ 196
- 13 Donaldson R J. Vortex signature recognition by a Doppler radar. *J Appl Meteor*, 1970, 9: 661~ 670
- 14 Brooks E M. The tomado cyclone. *Weatherwise*, 1949, 2: 32~ 33
- 15 Fujita T T. Analytical meso meteorology: A review, Severe Local Storms. *Meteor. Monogr.*, 27 1963, AMS, Boston, 77~ 125
- 16 Brown R A, et al. Twin tornado cyclones within a severe thunderstorm: Single Doppler radar observations. *Weatherwise*, 1973, 26, 63~ 71
- 17 Ray P S, et al. Dual Doppler observation of a tomadic storm. *J Appl Meteor*, 1975, 14, 1521~ 1530
- 18 Burgess D W, et al. Evolution of a tomadic thunderstorm. Preprints, 10th Conf. on Severe Local Storms, Omaha, NE, Amer Meteor Soc, 1977, 84~ 89
- 19 Klemp J B, Wilhelmson R B, Ray P S. Observed and numerically simulated structure of a mature supercell thundersorm. *J Atmos Sci*, 1981, 38: 1558~ 1580
- 20 Rotunno R, Klemp J B. The influence of the shear induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon Wea Rev*, 1982, 110: 136~ 151
- 21 Rotunno R, Klemp J B. On the roptation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J Atmos Sci*, 1985, 42: 271~ 292
- 22 Browning K A. The structure and mechanisms of hailstorms. *Amer Meteor Soc Monog*, 1978. 38: 1~ 36
- 23 Lemon R L, Doswell C A. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Mon Wea Rev*, 1979, 107: 1184~ 1197
- 24 葛润生等. 1964 年北京地区降雹过程的雷达分析. *气象学报*, 1966, 36: 213~ 222
- 25 王昂生, 徐乃璋. 强单体雹暴的研究. *大气科学*, 1985, 9: 260~ 266
- 26 葛润生, 姜海燕, 彭红. 北京地区雹暴气流结构研究. *应用气象学报*, 1998, 9: 1~ 7
- 27 刘志澄, 李柏, 翟武全. 新一代天气雷达系统环境及运行管理. 北京: 气象出版社, 2002. 110~ 117
- 28 廖玉芳, 俞小鼎, 郭庆. 一次强对流系列风暴个例的多普勒雷达资料分析. *应用气象学报*, 2003, 14: 656~ 662
- 29 胡玲. 超级单体雹暴的多普勒雷达特征分析. 见: 中国气象局北京城市研究所编. 中美强对流天气临近预报技术国际研讨会文集. 北京: 气象出版社, 2004, 328pp
- 30 王彦, 吴彬贵. 多普勒雷达产品在强对流天气中的分析应用. 见: 中国气象局北京城市研究所编. 中美强对流天气临近预报技术国际研讨会文集. 北京: 气象出版社, 2004, 328pp
- 31 Weckwerth T M, Wilson J W, Wakimoto R M. Thermodynamic variability within the boundary layer due to horizontal convective rolls. *Mon Wea Rev*, 1996, 124: 769~ 784
- 32 Lemon L R. New severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria: A preliminary report. NOAA Tech. Memo. NWS NSSF 1, 1977, 60pp. [NTIS No. PB 273049]
- 33 OTB/OSF/NWS: WSR 88D Operations Course, 1996, 600pp
- 34 Witt A, et al. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Wea and Forecasting*, 1998, 13, 286~ 303
- 35 Witt A, Nelson S. The relationship between upper level divergent outflow magnitude as measured by Doppler radar and hailstorm intensity. Preprints, 22nd Radar Meteorology Conf., AMS, Boston, 1984, 108~ 111
- 36 Amburn S A, Wolf P L. VIL Density as a Hail Indicator. *Wea Forecasting*, 1997, 12, 473~ 478
- 37 Markowski P M, et al. Direct surface thermodynamic observations within the Rear-Flank Downdrafts of nontornadic and tornadic supercells. *Mon Wea Rev*, 2002, 130: 1692~ 1721

ANALYSIS OF A STRONG CLASSIC SUPERCELL STORM WITH DOPPLER WEATHER RADAR DATA

Zheng Yuanyuan

Yu Xiaoding

(*Anhui Weather Forecast Office, Hefei 230061*) (*CMA Training Center, Beijing 100081*)

Fang Chong Bao Wenzhong Xie Yifeng Zhou Kuen Lu Dachun¹ Liu Yong

(*Anhui Weather Forecast Office, Hefei 230061*)

Abstract

In the paper, a detailed analysis is made, by using the Hefei Doppler Weather Radar data on a strong classic supercell storm which occurred on 27 May 2002 in the north of Anhui province. This supercell storm originated from a multicell storm which first appeared at 13:20 on 27 May 2002 between the Haozhou and Woyang county in the northwest of Anhui. The storm moved in southeast-east direction during the following several hours. Around 16:00, the storm evolved into the supercell storm, and remained as a supercell for the following 1 hour. After 17:00, it lost its supercell identity and evolved into a squall line. The squall line moved into north Jiangsu province around 21:00.

At 16:55, the supercell storm attained its maximum strength, located near Bengbu city. The detailed structure of the supercell at this moment is analyzed in the paper. On the low elevation reflectivity maps, a typical hook echo appeared at the right rear flank of the storm and the maximum reflectivity was over 70 dBz. Violent gust wind and severe hail was observed in Bengbu city. There were two outflow associated with the supercell, lying to the southwest and southeast of the storm, respectively. The shape of the front flank of the supercell was an inverted "V", which was also a typical feature of supercell storm. Along the low level inflow and cross the maximum reflectivity core, a vertical cross section of the reflectivity was made, which displayed a large BWER (vault), extensive and strong echo overhang and the echo wall to the left of the BWER. The maximum reflectivity was within a narrow vertical zone along the echo wall, with the value over 70 dBz. The corresponding low to middle elevations radial velocity maps showed a strong mesocyclone, with rotation velocity over 22 m/s. At the top of the supercell storm, strong divergence was existing, with the difference between the positive and negative velocity attaining 63 m/s. Hence, this storm possessed almost all typical features of supercell hail storms. Although only 11 mm diameter hail was observed at the weather station in Bengbu city, the real maximum size of hail must be much larger than 11 mm. Another point needs to not is that although strong mesocyclone appears, no tornado was observed. Further study is needed to distinguish between non-tornado supercell and tornado supercell, especially when a strong mesocyclone is present. The features of supercell such as hook echo, BWER, mesocyclone and storm top divergence lasted one hour. Meanwhile, mean wind of the storm-bearing layer was northwest-west wind, and the supercell moved to 30° right to the mean wind, so it was a right moving supercell storm.

Key words: Supercell Storm, Bounded Weak Echo Region, Mesocyclone, Large hail, China NEXRAD.