

刁秀广, 赵振东, 高慧君, 等. 三次下击暴流雷达回波特征分析[J]. 气象, 2011, 37(5): 522-531.

三次下击暴流雷达回波特征分析^{*}

刁秀广¹ 赵振东² 高慧君¹ 姜 鹏¹

1 山东省气象台, 济南 250031

2 山东省泰山气象站, 泰安 271000

提 要: 利用济南、徐州和临沂多普勒天气雷达资料, 对发生在山东境内的 3 次下击暴流进行了分析。2009 年 6 月 27 日和 2006 年 7 月 25 日强风暴不仅产生了尺度大于 4 km 的宏下击暴流, 而且还产生了冰雹和强降水天气, 风暴最大反射率因子维持在 60 dBz 以上, 单体 VIL 在 45~70 kg·m⁻² 之间。2009 年 7 月 8 日对流风暴只产生了尺度小于 2 km 的微小下击暴流, 风暴最大反射率因子维持在 55~59 dBz, 高度在 10 km 以上, 单体 VIL 在 30~48 kg·m⁻² 之间。结果表明, 三次风暴中层为明显的气旋性旋转上升气流结构, 利于风暴发展和维持, 近地层基本速度产品上表现为纯辐散或反气旋性辐散结构; 反射率因子强核高度或风暴顶高度从高空的快速下降, 使得风暴中层下沉气流加强, 从而引发了地面下击暴流。低层和中层环境风切变及 CAPE 的大小决定风暴下击暴流的强弱, 近地层径向速度极值超过 28 m·s⁻¹, 可在地面产生 25 m·s⁻¹ 以上的瞬时强风。

关键词: 下击暴流, 中层气旋性旋转结构, 反射率因子核下降, 单体顶高下降

Doppler Radar Echo Features of Three Downbursts

DIAO Xiuguang¹ ZHAO Zhendong² GAO Huijun¹ JIANG Peng¹

1 Shandong Provincial Meteorological Observatory, Jinan 250031

2 Taishan Meteorological Station of Shandong Province, Tai'an 271000

Abstract: Three downburst events in Shandong Province were analyzed with Doppler radar data from Jinan, Xuzhou and Linyi. A severe storm with maximum reflectivity between 60–70 dBz, and C-VIL between 41–76 kg·m⁻², and cell-top above 10 km, developed in the northeast part of Shandong Province, and produced downburst beyond 4 km across, accompanied by severe hails and heavy precipitation on 27 June 2009 (0627 storm). A severe storm with maximum reflectivity between 56–64 dBz, and C-VIL between 26–51 kg·m⁻², and cell-top above 8 km, developed in the north part of Shandong Province, and produced downburst beyond 4 km across and hails on 25 July 2006 (0725 storm). A storm with maximum reflectivity between 55–59 dBz, and C-VIL between 30–48 kg·m⁻², and cell-top above 10 km, developed in the south part of Shandong Province, and produced downburst as small as 2 km across on 8 July 2009 (0708 storm). The results show that the signatures of upright airflow in three storms were similar, namely cyclonic rotation at mid-level, this air flow structure was conducive to the development and maintenance of the severe storm. The downbursts have a pattern of pure diverging or a pattern of anti-cyclone diverging Doppler velocities at the surface layer. The dropping markedly of reflectivity factor core or cell top can produce acceleration of downward tilt airflows at middle levels in the storms, this fact can be used to issue downburst warnings. High values of 0–2 km and 0–6 km vertical wind shear, and high CAPE values can produce severe downbursts. The peak average radial velocity above 28 m·s⁻¹ at low levels can lead to strong wind above 25 m·s⁻¹ on the ground.

Key words: downburst, cyclonic rotation at mid-level, descending of reflectivity core, descending of cell top

* 中国气象局预报员专项(CMATG2010Y11), 山东省科技厅科技攻关项目(2007GG20008001 和 2009GG10008001), 山东省气象局开放式基金课题(2008sdqxj01)共同资助

2010 年 5 月 14 日收稿; 2010 年 8 月 8 日收修定稿

第一作者: 刁秀广, 主要从事强对流天气临近预报和雷达产品应用研究工作. Email: radaddxg@126.com

引言

Fujita 等^[1-2]把下击暴流定义为地面上水平风速大于 $17.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、中空气流向下、地面气流为辐散或直线型的灾害性风,并根据外流的灾害性范围大小,又把下击暴流分为宏下击暴流(尺度大于 4 km ,持续时间大于 10 分钟)和微下击暴流(尺度小于 4 km ,持续时间小于 10 分钟)。下击暴流因具有强的下沉气流和强的低空风切变,往往造成大树连根拔起、房屋倒塌、飞机坠毁等恶性事故,造成巨大的生命与财产损失。一些研究成果表明^[3-9],微下击暴流经常是在若干秒内从上升气流阶段演变为破坏性微下击暴流。Fujita^[10]和 Przybylinski 等^[11-12]的研究认为弓状回波是下击暴流事件发生的主要特征之一。Roberts 等^[13]在研究了 31 个发生在美国科罗拉多州的下击暴流及其相应的风暴单体后,得出结论:利用下降的反射率因子核、反射率槽口、雷暴云中径向辐合以及旋转可以预报下击暴流。刘洪恩^[14]利用数值模式模拟指出,下击暴流产生的直接原因是降水的重力拖曳作用引起,其次是冰雹的融化和雨水蒸发的冷却作用。俞小鼎等^[15]利用我国新一代天气雷达资料分析一个孤立的强烈多单体风暴产生的下击暴流事件,指出反射率因子核心的逐渐降低并伴随云底以上的速度辐合的多普勒雷达回波特征,可用来提前数分钟预警下击暴流的发生。毕旭等^[16]、吴芳芳等^[17]对下击暴流事件个例研究也表明,风暴中层径向辐合和反射率因子核下降是下击暴流的雷达回波重要特征。廖晓农等^[18]研究表明,北京地区绝大多数的雷暴大风具有下击暴流特征。钟加杰等^[19]、朱君鉴等^[20]对飊线产生下击暴流事件也进行了细致研究。

由于下击暴流尺度小,生命史短,目前主要靠多普勒雷达观测强风暴的发生发展来推断其发生的可能性,预报难度依然很大。本文利用济南、徐州和临沂新一代天气雷达资料,对三次下击暴流事件进行了分析,为今后类似天气过程的临近预警提供参考。

1 过程概述

1.1 2006 年 7 月 25 日天气形势和灾情实况

受高空槽影响,2006 年 7 月 25 日 16:00—

16:20(北京时,下同),山东济南市济阳县崔寨、太平两镇 20 个村庄遭风雹袭击。风雹历时 20 分钟,冰雹最大直径约 1 cm ,最大风力 8 级。根据现场灾情调查,16:00 左右地面开始出现大风天气,主要造成玉米和小树倒伏,玉米田局部出现扇形倒伏现象,没有大的树木折断。

25 日 08:00 的 500 hPa 和 700 hPa 图上,山东处在槽前西南气流里,850 hPa 存在东北—西南向切变。从 08:00 济南探空和 14:00 济南探空加密资料计算出的环境参数(见表 1),可以看出,对流有效位能(CAPE)明显增加, K 指数达 $31 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,沙氏指数(SI)和抬升指数(LI)明显减小,利于对流天气的形成和发展,但风切变午后反而减小。

1.2 2009 年 7 月 8 日天气形势和灾情实况

受低空切变影响,2009 年 7 月 8 日 16:00—16:10,山东南部的临沂市苍山县尚岩、向城、贾庄等 3 乡镇的部分村庄遭受大风袭击,短时最大风力 11 级。根据现场灾情调查,受灾区域在一条公路的一侧,16:00 左右地面开始出现破坏性大风天气,树木折断或倒伏都是同一方向,玉米倒伏也是同一方向,受灾区域呈带状,宽度不到 100 m ,长度不到 2 km ,持续时间大约 10 分钟。

8 日 08:00 500 hPa 图上,山东处在副高边缘的西南气流里,850 hPa 上有一东西向的切变线位于山东南部和江苏北部的交界处,同时有低空急流存在,是产生暴雨的典型天气形势(图略)。从 08:00 江苏徐州探空和 14 时徐州探空加密资料计算出的环境参数(见表 1)看,CAPE 值明显增加,午后达到 $1481 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, K 指数没有变化,SI 指数增加为正值,LI 指数减小,风切变明显增大,利于山东南部地区的强对流发展。

1.3 2009 年 6 月 27 日天气形势和灾情实况

受高空槽影响,2009 年 6 月 27 日下午山东省东北部的滨州市惠民县遭受强对流天气袭击,冰雹最大直径 20 mm ,最大密度每平方米 500 粒左右,并伴有平均风力 6~7 级、阵风 11 级的偏北大风,局部出现了暴雨。根据现场灾情调查,大量树木折断或倒伏,受灾大部分区域倒伏方向一致,局部有两侧倒伏现象,局部还有相对倒伏现象,破坏性大风持续时间超过了 30 分钟,长度超过了 20 km 。

27 日 08:00 500 hPa 图上,山东西部处在槽线

后部的西北气流里, 850 hPa 上低涡中心处在 46.6°N、114°E 附近, 山东西部为西北气流, 东部为偏南气流(图略)。从 08:00 济南探空资料和 14:00 NCEP 再分析资料计算出的环境参数(见表 1)看, K

指数略有增加, SI 和 LI 指数均减小, $CAPE$ 明显增大, 低层风切变略有减小, 中层风切变明显增大。随着午后气温升高, 不稳定度和不稳定能量迅速增加, 地面弱冷锋触发了局地对流天气的爆发。

表 1 三次风暴环境参数表

Table 1 Environmental parameters of three downbursts

日期	时次	K /°C	SI /°C	$CAPE$ /J·kg ⁻¹	0~6 km 风切变 /m·s ⁻¹	0~2 km 风切变 /m·s ⁻¹	0 °C 层高度 /m	-20 °C 层高度 /m	LI /°C
20060725 (济南)	08	31	-0.74	221	10.8	5.7	3990	5887	-0.91
	14	33	-3.21	471	6.5	2.0	4226	7268	-3.5
20090627 (济南)	08	31	-3.2	0	11.9	13.6	4534	7741	0.5
	14*	32	-4.3	1500	15.1	12.7	4765	8012	-5.1
20090708 (徐州)	08	38	-0.71	850	10.75	6.44	5300	8731	-2.47
	14	38	1.22	1481	18.3	11.4	5514	8955	-3.23

* 为 NCEP 再分析资料计算

2 雷达回波特征分析

2.1 2006 年 7 月 25 日下击暴流分析(0725 风暴)

图 1 是 2006 年 7 月 25 日济南雷达产品, 图 1a 是 16:15 CR 产品, 图 1b 是 15:25—16:21 风暴趋势, 图 1c~1g 分别是 15:19、15:44、15:56、16:08、16:21 时次的 9.9°仰角 V27 号产品, 风暴中心对应的高度约为 5.5 km 左右, 图 1h~1l 分别是 15:50、15:56、16:02、16:08、16:21 时次 0.5°仰角 V27 号产品, 辐散中心对应高度约 0.4 km。

2.1.1 风暴演变特征

CINRAD/SA 雷达系统气象算法中, 有一风暴结构(SS)产品(产品代号为 62)。在 PUP 中该产品中可显示风暴编号、风暴所在位置、底部和顶部高度、基于单体的 C-VIL 值、强中心高度及强度等具体的风暴结构参数值。根据 62 号产品参数值, 可产生风暴结构的派生图形产品, 即风暴趋势图, 如图 1b 所示。

图 1b 中左上白色竖线为单体底部和顶部连线(TOP-BASE), 黄色折线为单体最大反射率因子所在的高度(dBzM HT)即强中心高度, 红色折线为单体质心高度(CENT HT), 横坐标为雷达体扫时间, 纵坐标为高度(km); 左下浅蓝色折线为基于单体的 C-VIL 值(CELL BASED VIL), 横坐标为雷达体扫时间, 纵坐标为 C-VIL 值(kg·m⁻²); 右上白色折线为各种尺寸的冰雹探测概率(POH), 绿色折线为强冰雹探测概率(POSH), 横坐标为雷达体扫时

间, 纵坐标为概率值; 右下黄色折线为最大反射率因子值, 横坐标为雷达体扫时间, 纵坐标为 dBz 值。风暴趋势图像可方便快捷地分析风暴的演变情况, 利用风暴高度、强中心高度、最大反射率因子和单体 VIL 等参数变化进行强对流天气临近预警。

0725 风暴生成于 13:50, 消散于 17:15, 历时约 3 个多小时。该次强对流天气是由风暴单体 E0 造成(图 1a), 风暴成熟期, 强度维持在 60 dBz 以上, 单体 VIL 在 45 kg·m⁻² 之上, 单体高度(30 dBz 高度)基本维持在 8 km 以上, 强中心高度基本维持在 5 km 以上(图 1b)且位于-10 °C 层高度左右(08:00 济南探空 0 °C 层高度为 4.0 km, -20 °C 层高度为 5.9 km), 对冰雹的增长有利。

2.1.2 中层气流结构特征

风暴演变过程中, 风暴向约 170~190°方向移动, 风暴离开雷达移动, 中层为正的径向速度。15:19 单体 E0 在中空(5.5 km)径向速度出现负值(图 1c), 说明单体内部出现明显的旋转上升气流; 之后气旋性旋转强度逐渐加强, 15:44 负的最小径向速度值在 10~14 m·s⁻¹, 正的最大径向速度值在 20~24 m·s⁻¹, 径向速度差值在 30~38 m·s⁻¹(图 1d); 15:56 负的最小径向速度值在 15~19 m·s⁻¹, 正的最大径向速度值在 20~24 m·s⁻¹, 径向速度差值在 35~43 m·s⁻¹(图 1e); 16:02 径向速度差值达到最大, 在 40~48 m·s⁻¹(图略), 16:08 径向速度差值迅速减小, 负的最小径向速度值在 10~14 m·s⁻¹, 正的最大径向速度值在 15~19 m·s⁻¹, 径向速度差值在 25~33 m·s⁻¹(图 1f); 16:21 负的最小径向速度值在 1~4 m·s⁻¹, 正的最

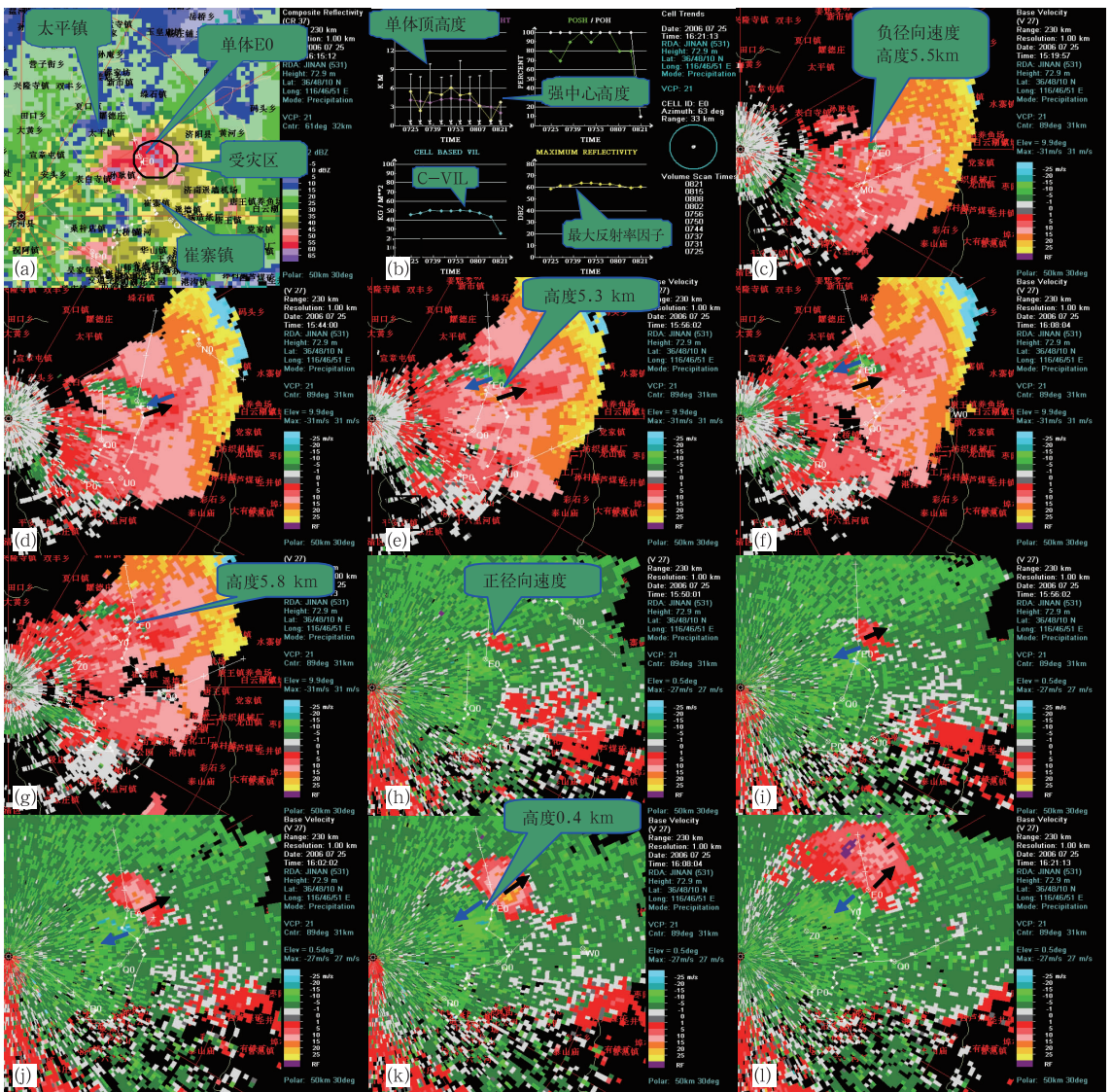


图 1 2006 年 7 月 25 日济南雷达回波产品

(a) 16:15 CR 产品; (b) 15:25—16:21 风暴趋势; (c) 15:19, (d) 15:44, (e) 15:56, (f) 16:08, (g) 16:21 为 9.9°仰角 V27 号产品; (h) 15:50, (i) 15:56, (j) 16:02, (k) 16:08, (l) 16:21 为 0.5°仰角 V27 号产品

Fig. 1 Jinan radar products on 25 July 2006

- (a) composite reflectivity (CR) at 16:15 BT, (b) cell trends during 15:25—16:21 BT, (c) 15:19, (d) 15:44, (e) 15:56, (f) 16:08, (g) 16:21 BT, mean radial velocity on elevation 9.9°, (h) 15:50, (i) 15:56, (j) 16:02, (k) 16:08, (l) 16:21 BT, mean radial velocity on elevation 0.5°

大径向速度值在 $5 \sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 径向速度差值在 $6 \sim 13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1g)。

15:19—16:02 风暴中层出现气旋性环流, 径向速度差值逐渐增加, 说明风暴内部上升气流也逐渐增大, 利于风暴的加强和维持。

2.1.3 低层径向速度特征

图 1h~1l 是风暴 5 个时次 0.5°仰角径向速度产品, 风暴低层对应高度约 0.4 km。可以看出, 低

层为东北风, 15:50 风暴低层出现正的径向速度, 在 $1 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1h), 即底层出现下沉辐散气流, 之后这种辐散气流越来越明显。15:56 正径向速度最大值在 $5 \sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 负径向速度最小值在 $15 \sim 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 两者差值在 $20 \sim 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1i); 16:02 正径向速度最大值在 $15 \sim 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 负径向速度最小值在 $20 \sim 26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 两者差值在 $35 \sim 45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1j); 16:08 正径向速度最大值在 $20 \sim$

$26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 负径向速度最小值在 $15 \sim 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 两者差值在 $35 \sim 45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1k); 16:21 径向速度绝对值迅速减小, 径向速度绝对值都在 $15 \sim 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1l), 之后继续减弱。

与单体趋势对比可以发现, 15:50—15:56 单体强中心高度出现下降趋势, 15:56—16:02 单体高度出现明显下降趋势, 而低层径向速度辐散逐渐加强; 16:02—16:15 强中心高度迅速下降, 低层强辐散一直持续到 16:15。单体强中心高度下降使下沉气流加强, 之后顶高的下降和强中心的下降使得下沉气流进一步加强, 产生了地面下击暴流。根据灾情调查, 大风持续时间超过 10 分钟, 受灾范围超过 4 km, 属于宏下击暴流。

2.2 2009 年 7 月 8 日下击暴流分析(0708 风暴)

图 2 是 2009 年 7 月 8 日 15:36—16:12 期间几个时次的徐州 SA 和临沂 SC 雷达回波产品。图 2a 是 15:42 CR 产品, 图 2b 是 15:06—18:00 风暴单体高度和强中心高度演变趋势, 图 2c~2e 分别为 15:18、15:36、15:42 时次 3.4° 仰角平均径向速度(V, 27 号)和风暴相对平均径向速度(SRM, 56 号)产品, 图 2f~2j 分别为 15:48、15:54、16:00、16:06、16:12 时次的 2.4° 仰角 V27 和 SRM 56 号产品, 图 2k 及 2l 分别为 15:40 和 15:46、16:04 时次的临沂 SC 雷达 0.5° 仰角平均径向速度产品。

2.2.1 风暴演变特征

从图中可以看出, 该次强对流天气是由风暴单体 M0 造成(图 2a), 演变趋势(图 2b)可以看出单体 M0 生成于 15:07, 15:24 单体顶高达到 15 km 以上, 强中心高度约 7 km, 15:24—15:30 单体顶高和强中心高度都出现了迅速下降趋势, 15:42 单体顶高又发展到 15 km 之上, 随后又出现迅速下降。单体旺盛阶段高度基本维持在 10 km 以上, 最大反射率因子维持在 55 dBz 以上, 强中心高度位于 0°C 层高度上下(08:00 徐州探空 0°C 层高度为 5.36 km, -20°C 层高度为 8.76 km), 单体 VIL 在 $40 \sim 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间, 地面没有出现降雹, 16:30 风暴减弱, 16:50 基本消散。

2.2.2 中层气流结构特征

风暴演变过程中, 风暴离开雷达约 230° 方向移动, 中层均为正的径向速度, 15:18 单体 M0 右侧中空(5.5 km)径向速度出现速度模糊(图 2c, 之前时次没有这种现象), 说明单体内部上升速度加强,

15:24 单体顶高达到 15 km 以上, 强中心高度约 7 km; 之后径向速度模糊现象一直维持, 15:36 速度值在 $30 \sim 34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2d), 15:42—15:48 径向速度模糊现象进一步加重, 速度值达到 $35 \sim 39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2e、2f), 15:54—16:12 几个时次速度值有所减小, 基本在 $30 \sim 34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2g~2j), 说明风暴内部强的上升速度也一直维持, 利于风暴的维持。16:18 速度模糊消失, 径向速度明显减小, 风暴开始减弱。从相同时次相同高度的 SRM 产品可以看出, 风暴发展旺盛阶段其内部的相对径向速度出现气旋性旋转气流, 对风暴发展和维持非常有利。

2.2.3 低层径向速度特征

由于徐州雷达距离大风灾害地点较远, 其低层径向速度无法反映近地层速度特征, 因此图 2 中给出了临沂 SC 雷达 3 个时次 0.5° 仰角径向速度产品, 风暴中心对应高度在 0.6 km 左右(图 2k、2l)。可以看出, 15:40 出现明显的径向速度辐散气流, 负的最小径向速度在 $4.5 \sim 8.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 正的最大径向速度在 $8.9 \sim 13.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大径向速度差值在 $13 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 15:46 表现为气旋性辐散气流, 负的最小径向速度在 $22.3 \sim 26.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 正的最大径向速度在 $4.5 \sim 8.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大径向速度差值在 $27 \sim 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 16:04 表现为气旋性辐散气流, 负的最小径向速度在 $22.3 \sim 26.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 正的最大径向速度在 $8.9 \sim 13.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大径向速度差值在 $31 \sim 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 15:46—16:10 一直维持这种状态。

与单体趋势对比可以发现, 15:18 单体内部上升速度加强后, 15:24 单体高度迅速达到 15 km, 之后单体高度基本维持在 10 km 以上。15:24—15:30 单体顶高和强中心高度同时出现了迅速下降, 地面没有大风报告。徐州雷达 15:42—15:48 单体高度出现迅速下降现象(图 2b), 临沂 SC 雷达 15:40—15:46 单体强中心高度出现迅速下降现象(图略, 从 5.3 km 下降到 3.4 km), 在 15:40 时次 0.5° 仰角探测到明显辐散气流, 15:46 为气旋性辐散气流并且切变量增大。根据现场灾情调查, 大风持续时间约 10 分钟, 受灾区域宽度不到 100 m, 长度不到 2 km, 属于微下击暴流。

风暴内部气旋性旋转上升气流加强, 可使风暴迅速发展并维持, 风暴顶高和强中心高度的下降使下沉气流得以加强, 在地面产生了微下击暴流。

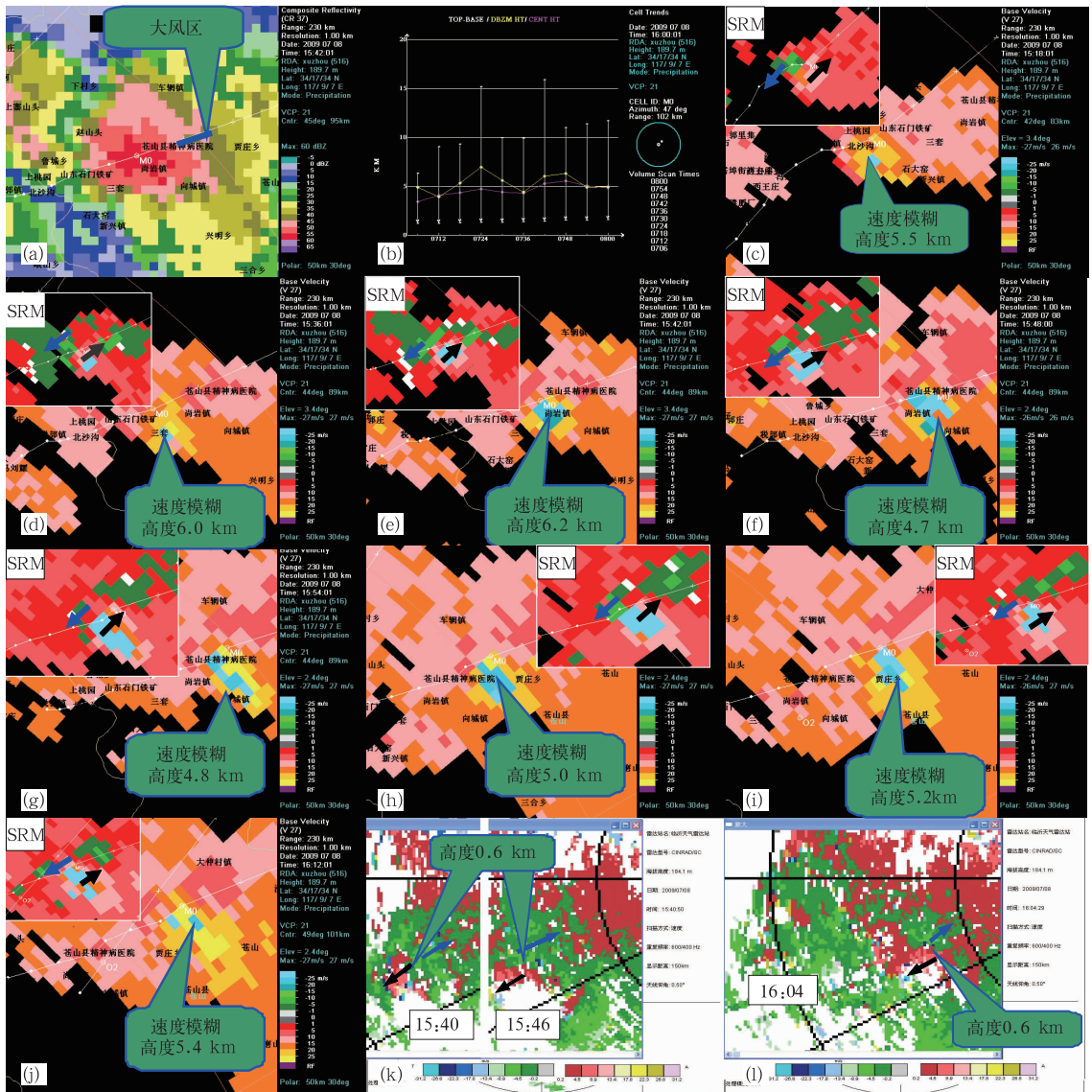


图 2 2009 年 7 月 8 日徐州和临沂雷达回波产品徐州雷达(a) 15:42 CR 产品; (b) 15:06—18:00 风暴单体高度和强中心高度演变; (c) 15:18, (d) 15:36, (e) 15:42 为 3.4°仰角 V27 号产品和 SRM 56 号产品; (f) 15:48, (g) 15:54, (h) 16:00, (i) 16:06, (j) 16:12 为 2.4°仰角 V27 号产品和 SRM 56 号产品; 临沂 SC 雷达(k)15:40 和 15:46; (l) 16:04, 0.5°仰角平均径向速度产品

Fig. 2 Xuzhou and Linyi radar products on 8 July 2009

(a) composite reflectivity at 15:42 BT, (b) cell trends during 15:05—18:00 BT, (c) 15:18, (d) 15:36, (e) 15:42 BT, mean radial velocity and storm relative velocity maps on elevation 3.4°, (f) 15:48, (g) 15:54, (h) 16:00, (i) 16:06, (j) 16:12 BT, mean radial velocity and storm relative velocity maps on elevation 2.4°, (k) 15:40, 15:46, (l) 16:04 BT, mean radial velocity on elevation 0.5°

2.3 2009 年 6 月 27 日下击暴流分析(0627 风暴)

图 3 是 2009 年 6 月 27 日强雹云单体几个时次的济南 SA 雷达回波产品。图 3a 是 16:37SA 雷达 CR 图,图 3b 是 16:00—16:59SA 雷达风暴单体演变趋势图,图 3c~3g 分别为 15:36、16:07、16:25、16:44、17:18 时次 2.4°仰角 V27 号产品,图 3h~3l

分别为 16:31、16:44、16:59、17:12、17:24 时次 0.5°仰角 V27 号产品。

2.3.1 风暴演变特征

造成冰雹大风天气的 0627 风暴生成于 14:50 左右,消散于 17:40 左右,历时约 3 小时。从图中可以看出,该次强对流天气是由强风暴单体 Q2 造成(图 3a),从其演变趋势(图 3b)可以看出,单体 Q2

旺盛阶段单体顶高维持在 10 km 以上,最大反射率因子维持在 60~70 dBz 之间,强中心高度在 4 km 以上,强中心高度位于 0 °C 层高度上下(08:00 济南探空 0 °C 层高度为 4.53 km, -20 °C 层高度为 7.74 km),基于单体的 VIL 值在 70 kg · m⁻² 以上,对冰雹生成和增长有利;16:13—16:19 强中心高度达到了 10 km 以上,之后 16:25—16:31 迅速下降;

16:44—16:53 单体顶高发展到 15 km 之上,随后迅速下降到 10 km 之下。

2.3.2 中层气流结构特征

图 3c~3g 是风暴 5 个时次 2.4° 仰角径向速度产品,对应高度在 4~5 km 之间。从平均径向速度图中可以看出,风暴前期中层为径向辐合结构(图 3c、3d),15:36 负的最小径向速度值在 5~9 m · s⁻¹,正

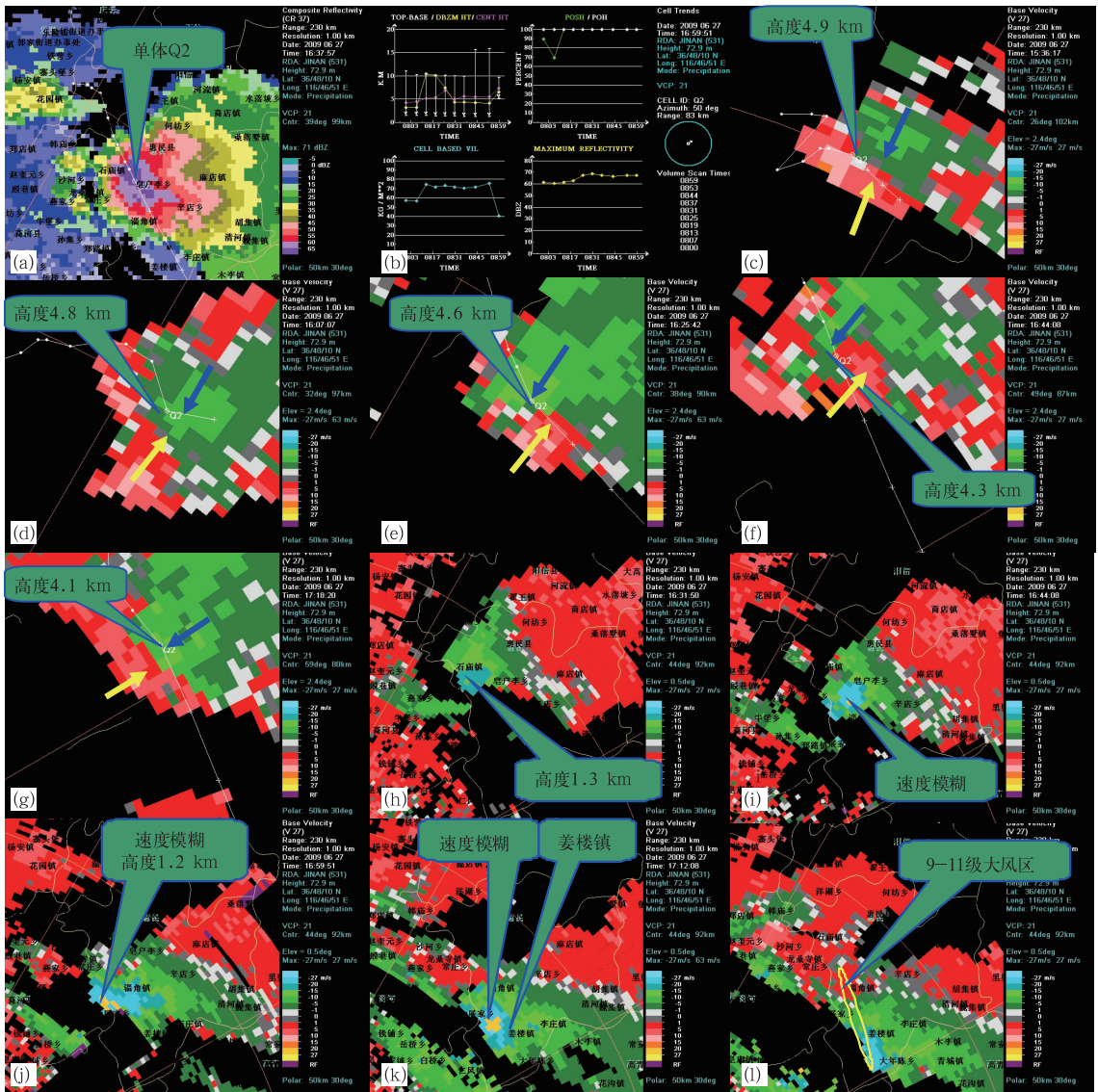


图 3 2009 年 6 月 27 日济南 SA 雷达回波产品
 (a) 16:37,CR 产品, (b) 16:00—16:59 风暴单体演变趋势;(c) 15:36, (d) 16:07, (e) 16:25, (f) 16:44, (g) 17:18 为 2.4° 仰角 V27 号产品; (h) 16:31, (i) 16:44, (j) 16:59, (k) 17:12, (l) 17:24 为 0.5° 仰角 V27 号产品

Fig. 3 Jinan radar products on 27 June 2009

- (a) composite reflectivity (CR) at 16:37 BT, (b) cell trends during 16:00—16:59 BT,
- (c) 15:36, (d) 16:07, (e) 16:25, (f) 16:44, (g) 17:18 BT, mean radial velocity on elevation 2.4°,
- (h) 16:31, (i) 16:44, (j) 16:59, (k) 17:12, (l) 17:24 BT, mean radial velocity on elevation 0.5°

的最大径向速度值在 $10\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 径向速度差值在 $15\sim 23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 16:07 径向速度差值与 15:36 相同。16:13 风暴中层变为气旋性辐合, 说明上升气流加强, 对应的强中心高度也迅速上升到 10 km 以上, 之后气旋性辐合结构(图 3e、3f)一直维持到 17:06, 这种气旋性辐合结构的维持利于风暴的发展和维持, 使得风暴维持在较高的高度和较强的强度; 16:25 负的最小径向速度值在 $10\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 正的最大径向速度值在 $10\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 径向速度差值在 $20\sim 28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 3e), 16:44 径向速度差值在 $25\sim 33\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 3f)。17:06 之后, 气旋性辐合结构又变为径向辐合结构(图 3g), 直至风暴减弱消亡。

2.3.3 低层径向速度特征

图 3h~3l 是风暴 5 个时次 0.5° 仰角径向速度产品, 对应高度在 $1\sim 1.3\text{ km}$ 。16:31 负径向速度在 $15\sim 19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 3h), 16:37 负径向速度在 $20\sim 24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 16:44 负径向速度继续减小并出现了速度模糊(图 3i), 大小在 $28\sim 34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 速度模糊现象一直持续到 17:18, 大小也基本维持在 $28\sim 34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 3j、3k), 17:24 径向速度模糊消失, 负径向速度值在 $20\sim 24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 3l), 之后单体逐渐消亡。

与单体趋势对比可以发现, 16:19—16:31 单体强中心高度迅速下降, 由 10.2 km 下降到 4.4 km(图 3b), 16:31 低层径向速度绝对值迅速增大, 之后低层径向速度绝对值继续增大。16:59 单体顶高也出现迅速下降现象, 使低层大的径向速度绝对值持续维持到 17:18。济南 SA 雷达探测到的高度在 $1.1\sim 1.3\text{ km}$, 而不是地面速度的反映, 地面姜楼镇中尺度观测站在 17:00—17:10 记录的风速极值为 $26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在 17:10—17:20 极值为 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 阵风达到了 10~11 级, 由于中尺度观测站密度问题, 17:00 之前实况记录较小。低层径向速度图上出现 $28\sim 34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间的大值区, 对应地面出现 10~11 级阵风。根据现场灾情调查, 破坏性大风持续时间超过了 30 分钟, 长度超过了 20 km(图 3l), 属于宏下击暴流。从单体强中心高度开始下降(16:25)到低层出现大的径向速度(16:44 经过了 3 个体扫时间, 大约 18 分钟)。

单体中层径向速度辐合结构变为气旋性辐合结构, 使上升气流加强, 利于风暴的发展和维持, 使得风暴维持在较高的高度和较强的强度, 易于产生极

端灾害性天气。风暴强中心高度下降激发了下沉气流, 使风暴低层产生大的径向速度辐散, 风暴顶高的下降使得下沉气流进一步加强, 从而产生极大的破坏性大风天气。

3 对比分析

3.1 环境参数对比

三次风暴造成的灾害天气有明显差别。0725 风暴主要是冰雹灾害, 大风造成了部分庄稼倒伏, 风力弱于其他两次风暴。0627 风暴不仅产生了严重的冰雹灾害, 而且出现了灾害性大风天气, 大量树木被刮断。0708 风暴仅产生了小范围的灾害性大风天气, 树木被刮断。0725 和 0708 风暴产生的大风风力强于 0627 风暴。

从环境参数对比情况看(表 1), 热力稳定度指数如 K 指数, 0708 风暴优于其他两次, SI 和 LI 指数, 0627 风暴最有利, 整体来看 3 次风暴差别不大; 而能量参数如 $CAPE$, 0627 和 0708 风暴最优; 动力参数如风切变, 0627 和 0708 风暴最优, 低层风切变均在 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 中层风切变均在 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 而 0725 风暴明显偏小。由此可见, $CAPE$ 和风切变在下击暴流的强弱程度上起到了决定性作用。0708 风暴 0°C 层和 -20°C 层高度明显高于其他两次, 对冰雹的生成与增长不利。

3.2 风暴参数对比

表 2 给出了三次风暴演变过程中的风暴参数, 其中, 中层最大速度差指的是风暴 3~6 km 高度内正的最大径向速度与负的最小径向速度的差值, 低层最大速度指的是 0.5° 仰角风暴低层径向速度绝对值的最大值。可以看出, 三次风暴的最大反射率因子、基于单体的 $VIL(C-VIL)$ 、风暴顶高、强中心高度和中层径向速度等参数存在较大差异。0708 风暴的最大反射率因子和 $C-VIL$ 最小, 0627 风暴的最大反射率因子和 $C-VIL$ 最大; 0725 风暴的顶高和强中心高度最低, 0627 风暴最高; 0725 风暴的中层最大速度差值最大, 其次是 0708 风暴, 0627 风暴最小。从低层最大速度值看, 0725 风暴最小, 地面大风风力也较小; 0708 风暴低层最大速度值最大, 地面上出现了破坏性大风; 0627 风暴低层最大速度虽然略小于 0708 风暴, 但由于高度在 1.2 km 左右, 实际近地面最大速度可能要大于 1.2 km 高度的最

大速度,再者,从地面树木破坏情况分析,无法判断 0708 和 0627 两个风暴所产生的地面大风的强弱。

从演变情况可以看出,0725 风暴在 $T-1$ 到 T 体扫之间(15:50—15:56),强中心高度从 6.1 km 下降到 5.0 km,低层径向速度由 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在 T 到 $T+1$ 体扫之间(15:56—16:02),单体高度从 10.5 km 下降到 7.9 km,低层径向速度由 $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。0627 风暴在 $T-5$ 到 $T-2$ (16:19—16:37)体扫之间,强中心高度从 10.2 km 下降到 4.4 km,低层径向速度由

$17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在 T 到 $T+1$ 体扫之间(16:53—16:59),单体高度从 16.0 km 下降到 9.7 km,低层径向速度由 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。0708 风暴在 $T-3$ 到 $T-2$ 体扫之间(15:24—15:30),单体顶高从 15.2 km 下降到 10.0 km,低层径向速度由 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在 T 到 $T+1$ 体扫之间(15:42—16:48),单体高度从 15.9 km 下降到 11.0 km,低层径向速度由 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 2 风暴参数表

Table 2 Storm parameters of three downbursts

日期	参数	$T-7$	$T-6$	$T-5$	$T-4$	$T-3$	$T-2$	$T-1$	T^*	$T+1$	$T+2$	$T+3$	$T+4$	$T+5$
0725	最大反射率因子/dBz	58	56	59	62	62	64	64	63	63	62	60	61	
	$C-VIL/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	40	36	46	48	51	50	50	51	50	48	44	26	
	单体顶高/km	7.6	7.9	8.4	7.9	10	7.8	8.0	10.5	7.9	8.0	8.9	3.8	
	强中心高度/km	2.3	5.5	5.6	2.5	5.4	5.1	6.1	5.0	5.2	3.2	0.9	3.8	
	中层最大速度差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	26	28	30	28	35	36	38	44	47	36	24	22	
	低层最大速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	11	11	12	13	13	13	15	21	25	23	25	17	
0627	最大反射率因子/dBz	60	62	63	68	69	68	67	68	68	69	70	67	65
	$C-VIL/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	57	75	72	74	72	71	72	76	41	66	66	70	67
	单体顶高/km	10.2	10.6	10.2	10.2	10.1	9.9	15.7	16.0	9.7	9.1	9.2	10.6	9.4
	强中心高度/km	3.3	10.6	10.2	7.5	4.4	4.4	4.4	4.2	6.7	6.7	5.3	2.6	2.4
	中层最大速度差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	24	29	25	30	26	34	31	29	28	22	23	23	21
	低层最大速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	14	14	17	21	18	23	26	25	28	28	28	28	23
0708	最大反射率因子/dBz	57	56	56	58	59	57	58	57	59	58	57	56	55
	$C-VIL/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	33	30	36	47	48	42	42	51	47	41	40	39	33
	单体顶高/km	6.7	6.3	9.0	9.3	15.2	10.0	9.9	15.9	11.0	11.4	11.7	12.1	12.3
	强中心高度/km	3.8	4.9	4.0	5.3	7.0	5.6	4.4	6.1	6.3	4.9	5.0	3.4	3.6
	中层最大速度差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	25	30	30	34	31	29	27	29	30	25	31	23	21
	低层最大速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	21	23	25	23	25	30	23	25	30	30	27	25	25

* 以风暴顶高最大值体扫时间为当前体扫时间 T ,之前的依次记为 $T-1$ 、 $T-2$ 等,之后的依次记为 $T+1$ 、 $T+2$ 等

就三次风暴而言,低层和中层环境风切变及 CAPE 的大小决定风暴下击暴流的强弱,而风暴内部中层气旋性环流径向速度差值大小不能决定风暴的高度和强度。风暴高度发展越高,且快速下降的高度越低,地面产生的风速越大。

4 结 论

(1) 造成三次下击暴流的风暴都是非超级单体风暴。0627 风暴最强,维持时间也较长,出现了冰雹、强降水和大风天气现象,0708 风暴较弱,只出现了短时间大风天气,0725 风暴介于前两者之间,出现了冰雹和大风天气现象,冰雹直径明显小于 0627 风暴。

(2) 三次下击暴流风暴中层存在明显的气旋性旋转上升气流。风暴中层气旋性旋转上升气流结构,利于风暴发展和维持,对风暴后期下击暴流的突发具有警示意义。

(3) 下击暴流在近地层径向速度产品上表现为强的辐散气流结构或反气旋式辐散气流结构。低层径向速度图上出现 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的大值区,对应地面可能出现破坏性大风天气。

(4) 单体强中心高度或者顶高的快速下降可激发风暴内中层下沉气流的加速,从而触发地面下击暴流。

(5) 风暴趋势和径向速度产品是下击暴流临近预警最重要产品。三次风暴下击暴流出现前在风暴演变趋势、中层或低层平均径向速度图上都有明显

特征。

(6) 低层和高层环境风切变及 *CAPE* 的大小决定风暴下击暴流的强弱,而风暴内部中层气旋性环流径向速度差值大小不能决定风暴的高度和强度。风暴高度发展越高,且快速下降的高度越低,地面产生的风速越大。

参考文献

- [1] Fujita T T, Byers H R. Spearhead echo and downbursts in the crash of an airliner[J]. *Mon Wea Rev*, 1977, 105: 129-146.
- [2] Fujita T T. The Downburst. SMRP Research Paper 210. NTIS PB-148880[R]. Chicago: University of Chicago, 1985: 1-122.
- [3] Wakimoto R M, Bringi V N. Dual-polarization observations of microbursts associated with intense convection: The 20 July storm during the MIST Project[J]. *Mon Wea Rev*, 1988, 116: 1521-1539.
- [4] Srivastava R C. A model of intense downdrafts driven by the melting and evaporation of precipitation[J]. *J Atmos Sci*, 1987, 44: 1752-1773.
- [5] Proctor F H. Numerical simulation of an isolated microburst. Part II: Sensitivity experiments[J]. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 2143-2165.
- [6] Srivastava R C. A simple model of evaporatively driven downdraft: Application to microburst downdraft[J]. *J Atmos Sci*, 1985, 42: 1004-1023.
- [7] Wakimoto R M. Forecasting dry microburst activity over the high plains[J]. *Mon Wea Rev*, 1985, 113: 1131-1143.
- [8] Atkin N T, Wakimo R M. Wet microburst activity over the southeastern United States: Implications for forecasting[J]. *Wea Forecasting*, 1991, 6: 470-482.
- [9] Caracena F, Maier M W. Analysis of a microburst in the FACE meteorological mesonet network in southern Florida[J]. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 969-985.
- [10] Fujita T T. Objectives, operation, and results of Project NIM-ROD[C]. 11th Conference on Severe Local Storms, AMS, 1979: 259-266.
- [11] Przybylinski R, Gery W J. The reliability of the bow echo as an important severe weather signature[C]. 13th Conference on Severe Local Storms, AMS, 1983: 270-273.
- [12] Przybylinski R, DeCaire D M. Radar signatures associated with the derecho, a type of mesoscale convective system[C]. 14th Conference on Severe Local Storms, AMS, 1985: 228-231.
- [13] Roberts R D, Wilson J W. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar[J]. *J Appl Meteor*, 1989, 28: 285-303.
- [14] 刘洪恩. 微下击暴流的特征及其数值模拟[J]. *气象学报*, 2001, 59(2): 183-195.
- [15] 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): 385-393.
- [16] 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): 70-73.
- [17] 吴芳芳, 王慧, 韦莹莹, 等. 一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征[J]. *气象*, 2009, 35(1): 55-64.
- [18] 廖晓农, 于波, 卢丽华. 北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J]. *气象*, 2009, 35(9): 18-28.
- [19] 钟加杰, 李萍, 刘峰. 一次热带气旋外围飏线对广州白云机场的影响[J]. *气象*, 2009, 35(6): 70-76.
- [20] 朱君鉴, 刁秀广, 曲军, 等. 4.28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析[J]. *气象*, 2008, 34(12): 21-26.