

边界层辐合线在局地强风暴 临近预警中的应用

刁秀广 车军辉 李 静 朱君鉴

(山东省气象台, 济南 250031)

提 要: 利用济南 CINRAD/SA 雷达探测到的边界层辐合信息, 结合地面实况和探空资料及 NCEP 资料, 对近年发生在山东中部的典型局地强风暴的生成及对流参数进行了分析。结果表明: 高时空分辨率的雷达能获得近地层辐合线信息, 对流风暴强的出流和近地层环境风的辐合在一定条件下可产生窄带回波; 远离风暴主体的出流边界和顺地面风移动的风速辐合线在热力条件较弱的情况下一般不会产生对流天气; 出流边界的叠加或出流边界与环境风辐合线的叠加在有利的环境条件下可产生局地强风暴, 单纯的近地层辐合线在有利的环境条件下可产生较为孤立的局地风暴, 可作为强对流天气临近预警的关键参考依据; 风暴初始位置、初始时间和风暴类型具有不确定性, 是强对流天气临近预警的难点。

关键词: 边界层辐合 窄带回波 强风暴

Application of Boundary Convergence Line in Nowcasting Warning of Severe Convective Storm

Diao Xiuguang Che Junhui Li Jing Zhu Junjian

(Shandong Province Meteorological Observatory, Jinan 250031)

Abstract: By using the sounding data, surface wind vector, sounding data, NCEP data and the boundary convergence line detected by Jinan Doppler weather radar, severe convective storms happened in Shandong province during 2005—2007 were analyzed. The results show that Doppler weather radar with high spatial and time resolution can obtain the information of boundary convergence zone. Normally, the narrow band echo reflects the existence of thunderstorm outflow and surface wind-field convergence zone. The outflow boundary keeps away from storms or the convergence zone moved in the same direction because the surface wind can't trigger convective storm in a condition of weak thermal instability. The coalescent of two outflow boundary or the coalescent of the outflow boundary and the surface wind convergence zone can trigger local severe

山东省科技厅科技攻关项目(2007GG20008001)和山东省气象局重点课题(2007sdqxz03)共同资助

收稿日期: 2008年5月11日; 修定稿日期: 2008年12月16日

convective storms, whereas the single surface wind convergence zone can produce isolated convective storms. These results can afford a pivotal reference for short range forecasting and convective storm nowcasting. The difficulties in nowcasting convective storms are the incertitude of initial echo location, the formative time of initial echo and the type of convective storms.

Key Words: boundary convergence narrow band echo severe convective storms

引 言

强对流天气包括雷暴大风、下击暴流、冰雹、龙卷和强雷雨等中小尺度天气现象,是伴随对流风暴发生发展的,而对流风暴的发展依赖于大气的热力和动力条件^[1]。边界层辐合线是风暴发生发展的动力条件之一,是强对流风暴发生、发展临近预报的关键。Wilson 等^[2]指出,所谓的边界层辐合线,可以是天气尺度的冷锋或露点锋,也可以是中尺度的海陆风辐合带,包括雷暴的出流边界(阵风锋)和由地表特征如土壤湿度的空间分布不均匀造成的辐合带等。

Wilson 等^[2-5]研究发现,大多数风暴都起源于边界层辐合线附近,在两条边界层辐合线的相交处,如果大气垂直层结有利于对流发展,则几乎肯定会有风暴在那里生成。如果边界层辐合线相交处本来就有风暴,则该风暴会迅速发展。NCAR 开发了一个综合的 0~1 小时临近预报系统 Auto Nowcaster (ANC),其主要特点就是可以监测和识别边界层辐合线的位置,通过边界层辐合线特征与风暴以及云特征信息的相互结合,做出风暴发生、发展、维持和消亡的临近预报。

目前我国布点建设的高灵敏度的多普勒雷达不仅经常能探测到一些强度较弱、宽度较窄的窄带回波(Narrow Band Echo,简称 NBE),而且在平均径向速度图上存在相应的风向风速辐合带或风速辐合带,这些弱窄带回波或辐合带一般对应于边界层的辐合线,或者是对应风暴出流边界^[6-7]。在合适的环境条件下形成的对流风暴,在其生命史的后期,下沉冷空气出流在地面附近向外流出,与较暖较潮湿的环境大气之间的界面,称出

流边界。对弱窄带回波或出流边界或阵风锋的仔细分析有利于及早做出强对流天气的临近预报,漆梁波^[8]、郑媛媛^[9]、李国翠^[10]等在这方面有较细致的研究。

本文利用济南 CINRAD/SA 雷达探测资料,结合地面风和环境参数,对近年雷达探测到的出流边界或局地环境风辐合与典型局地强风暴生成的关系进行了分析。

1 概 述

分析了 6 次边界层辐合线特征,其中有 4 次产生了强对流天气,2 次未产生对流天气。

1.1 天气实况

受高空冷涡影响,2005 年 6 月 20 日山东省鲁中及鲁南部分地区受到强冰雹袭击(简称 0620 风暴)。15:40 至 18:00(北京时,下同)泰安市岱岳区和济宁市泗水县的部分乡镇受到大风、冰雹袭击,泗水县出现了近几十年来最严重的冰雹灾害,全县 6 个乡镇不同程度受灾,个别地方的冰雹大如鸡蛋重达 80 克,有的地方冰雹积厚达 20cm。

受高空冷涡影响,2007 年 7 月 11 日山东省鲁中南部及鲁南部分地区遭受冰雹、大风和强降水袭击(简称 0711 风暴)。15—16 时肥城市降雨量 40mm,风力 9~10 级,局部地区伴有冰雹;新泰市阵风 $28\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大雨量达 50 多毫米。15:20 至 16:30,宁阳、汶上两县多处乡镇遭受风雹袭击,冰雹最大直径 3cm,局部最大风力达 10 级以上。16:33 到 17:05,邹城市香城镇、大束镇遭受风雹袭击(主要是风害,冰雹很小),整个过程持续 30 分钟,期间降雨量 30.5mm,风力 7~8 级。

受高空槽影响,2006 年 7 月 25 日下午济

南市历城区、济阳县、商河县先后遭受冰雹袭击,并伴有雷雨大风(简称 0725 风暴)。15:10,济南历城区遥墙镇遭风雹袭击;16:00,济阳县崔寨、太平两镇 20 个村庄遭风雹袭击,冰雹最大直径约 1cm,最大风力 7 级;16:40,商河县许商、贾庄两镇遭冰雹袭击。

受高空西北气流影响,2005 年 6 月 18 日下午临沂市平邑、蒙阴、费县遭受雷雨大风袭击,个别乡镇出现小冰雹(简称 0618 风暴)。

2005 年 6 月 1 日和 6 月 2 日影响系统都是西北气流,雷达探测到的边界层辐合区域未出现强对流天气。

1.2 大气稳定度条件分析

对 6 次过程中济南章丘 08 时和 14 时探空资料的 K、SI 和对流有效位能(CAPE)分别进行了计算(见表 1)。CAPE 是一种浮力能,常被用于分析预报雹云中上升气流的大小^[11]。

从表 1 中可以看出,4 次强对流天气过程中有 3 次(0620 风暴、0725 风暴和 0618 风暴)是午后 K 和 CAPE 增加,SI 减小,大气不稳定程度增加;1 次(0711 风暴)是午后大气不稳定程度有所减弱。4 次强对流天气过程中 0620 风暴大气不稳定度最有利于强对流产生,而且 CAPE 值较高,有利于产生强的上升气流,实况是产生了严重的雹灾。

表 1 大气稳定度对比

日期	影响系统及实况	时间(北京时间)	K 指数/C	SI 指数/C	CAPE /J · kg ⁻¹
20050601	西北气流	08	21	3.1	1058
	无强对流	14 *	16	5.5	23
20050602	西北气流	08	20	4.9	0
	无强对流	14 *	26	1.9	85
20050618	西北气流	08	32	2.5	351
	强对流	14 *	41	-3.9	960
20050620	高空冷涡	08	31	-0.7	194
	强对流	14 *	43	-3.9	2146
20060725	高空槽	08	23	-1.3	1322
	强对流	14 * *	33	-3.2	382
20070711	高空冷涡	08	31	-2.0	723
	强对流	14 * *	28	-4.3	22

* 是根据 NCEP 资料计算的, ** 是加密探测资料计算的

2005 年 6 月 1 日和 2 日未出现对流天气,其大气稳定度和其他 4 次的有明显差异,K 指数和 CAPE 较小,SI 指数较高,不利于对流产生。

2 产生强风暴的边界层辐合线特征

2.1 超级单体风暴

2005 年 6 月 20 日上午山东东北部的雷暴回波产生的出流边界向西南方向移动,图 1 给出了雷达窄带回波及地面辐合线变化情况。12:04 窄带回波在雷达站约 20km 处(图 1a1,见彩页),平均径向速度图(图 1a2,见彩页)上存在相应的出流边界辐合,同时在雷达站南部存在低层辐合线,在对应时次的地面图上也可以清晰地分析出两条辐合线(图 1a3,见彩页),一条与出流边界相对应,一条是低层环境风辐合线。13:00 地面图上仅能分析出一条辐合线(图 1b3,见彩页),13:11 窄带回波左端单体生成区 1 有对流单体生成(图 1b1、b2,见彩页)。14:17 窄带回波消失,出流边界与先前的低层辐合带叠加,在泰安北部单体生成区 2 不断有单体生成(图 1c1、c2,见彩页),同时单体生成区 1 中的单体发展,造成雷雨天气。15:42 单体生成区 1 中发展起来的单体已消散,而单体生成区 2 的对流单体发展成 2 个超级单体风暴(图 1d1、d2,见彩页),之后南压持续发展,造成了局部的强冰雹和大风天气。

前期回波的出流边界与局地环境风辐合区的叠加,使得近地层辐合加强,为对流发展提供了动力因素,同时大气不稳定和较高的 CAPE(图 1d3,见彩页),造成了对流单体的迅速发展,出现了超级单体风暴。

2.2 强带状回波

2007 年 7 月 11 日上午,山东东北部出现雷暴天气,其出流边界向西南方向移动,12:07(图 2a1,见彩页)反射率因子 PPI 图上存在 2 条窄带回波,窄带回波 1 是前期出流

造成的,在速度图上对应一条明显的风向风速辐合带,窄带回波 2 是较近时次出流造成的,在速度图上对应明显的风速辐合区,窄带回波后部的径向速度明显大于前部的径向速度,同时在对应地面图上也可以分析出 2 条辐合线,并与出流边界相对应。比较图 2a1、b1(见彩页)和图 2a3、b3(见彩页)可以看出窄带回波 2 移动速度较快。13:00 后,窄带回波 1 和窄带回波 2 叠加,产生强的辐合,触发了对流单体,13:31 在辐合带上有对流单体生成,排列与窄带回波一致(图 2c1、c2,见彩页)。在 14:01 回波发展成强的带状回波,然后南移,影响鲁中南部及鲁南部分地区,造成局地冰雹、大风和强降水天气。

两条出流边界叠加,与近地层环境风产生强的辐合,从而触发了对流单体的爆发,产生了强对流天气。

2.3 左移风暴

图 3 给出了 2006 年 7 月 25 日风暴前期雷达回波演变情况。12:00 地面图上存在两条辐合线(图 3e1,见彩页),12:01 平均径向速度图上第一象限存在辐合线(图 3a2,见彩页);13:01 强度图上出现明显的窄带回波与地面图上辐合线 2(图 3e2,见彩页)相对应,该窄带回波是地面辐合产生的,而不是风暴出流产生,同时 13:01 在辐合线北端出现对流单体 1(图 3b1,见彩页);13:13 在窄带回波左端出现对流单体 2,13:19 在东部辐合区南端出现对流单体 3,13:25 对流单体 1、2、3 表现的比较明显(图 3c1、c2,见彩页),单体 1 大约持续了 1 小时 20 分,未产生强天气,单体 2 持续了不到 1 小时,也未产生强天气,只有单体 3 持续发展(图 3d1、d2,见彩页),向约 200° 方向移动并产生冰雹、大风强天气。08 时章丘探空资料计算的风暴承载层平均风向为 245° ,14 时章丘探空资料计算的风暴承载层平均风向为 235° ,风暴成熟阶段移动方向约为 200° (图 3d1 红色箭头所示,见彩页),偏左约 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 方向移动。

地面图上分析济南处于辐合区的中心,

雷达产品也反映出低层西北、东北和偏南气流的汇合中心在济南地区,使得近地层辐合加强,同时午后大气不稳定程度增加,激发上升运动,产生强对流天气。

2.4 右移分裂风暴

2005 年 6 月 18 日上午地面图上,在鲁中存在长度约 200km 的辐合带,中午辐合更加明显,且稳定少动(图 4a3、b3、c3,见彩页)。平均径向速度图上雷达站南部 60km 处存在明显的辐合区(图 4a2、b2、c2,见彩页),13:30 在泰山北部出现对流单体并发展,13:57 单体强度达到 55dBz(图 4b1,见彩页),14:57 可以看出风暴出现了左右几乎对称的分裂,15:57 可以看出左侧对流单体逐渐减弱,风暴向右侧发展并向约 340° 方向移动,导致平邑、蒙阴、费县遭受雷雨大风和冰雹天气。08 时章丘探空资料计算的风暴承载层平均风向为 310° ,风暴成熟阶段移动方向约为 340° ,偏右约 30° 方向移动。

近地层存在长时间的辐合上升运动,同时午后大气不稳定程度迅速增加,激发了对流风暴。

比较 4 次强对流天气可知,0620 和 0711 风暴强度较强,影响范围也较大,灾害较为严重,而 0618 和 0725 风暴相对较弱。从大气不稳定度因素对比分析,6 月 20 日最有利,7 月 11 日的 K 值和 CAPE 值反而较差,因而单从热力因子上很难判断风暴的强弱。从动力因子对比分析,0620 和 0711 风暴都是出流边界与环境风的辐合产生,而其他 2 次都是地面环境风局地辐合产生。因此,出流边界在强风暴临近预警中显得尤为重要。

3 未出现对流天气的边界层辐合线特征

3.1 顺地面风移动的出流边界

受西北气流影响,2005 年 6 月 1 日午后鲁西北东部地区出现了雷雨大风天气。在 16:00 前后济南雷达探测到对流风暴所产生的出流边界,出流边界远离风暴主体向西南方

向快速移动,18:30前后经过雷达测站。图5中a1~a6(见彩页)给出了出流边界演变情况,a1、a3、a5(见彩页)为 0.5° 仰角19号产品,a2、a4、a6为与强度图相对应的 0.5° 仰角27号产品平均径向速度图,a7为17:00地面风,地面图上的辐合线表现为风速的辐合和风向的改变,与雷达探测到的窄带回波相对应。

远离风暴主体的出流边界基本上是顺着地面风移动,虽然存在风速辐合但辐合较弱,再者由于热力条件不足,不能激发对流单体的形成。

3.2 顺地面风移动的窄带回波

图5b1~b6(见彩页)是2006年6月2日窄带回波演变情况,b1、b3、b5为 0.5° 仰角19号产品强度PPI,b2、b4、b6为与强度图相对应的 0.5° 仰角27号产品平均径向速度图。图b7为18:00地面风,地面图上的辐合线仅表现为风向的转变,与雷达探测到的窄带回波相对应。前期没有出现雷暴天气,窄带回波是由于近地层环境变化所产生的辐合现象引起的。窄带回波移动方向基本与地面风向相同。午后大气不稳定程度虽然有所增加,但辐合较弱,不足以激发对流单体。

4 结语

(1) 雷达所探测到的窄带回波表现为一条细线状或弧状弱而窄的带状回波,既可以是对流风暴强的出流造成,也可以是近地层环境风的辐合造成。窄带回波对应近地层存在辐合现象。

(2) 出流边界的叠加,或者出流边界与环境辐合带的叠加可促使边界层辐合上升运动加强,在不稳定大气状态下激发强风暴的形成并维持其发展,产生较为剧烈的强天气。局地环境风的辐合在不稳定大气状态下产生的对流天气强度弱于前者。

(3) 出流边界或窄带回波或近地层辐合

带不一定都能产生对流天气,在实际应用中需要根据窄带回波的走向和环境物理量进行具体分析。

(4) 高时空分辨率的多普勒雷达能获得近地层辐合线信息,为强对流天气临近预警提供了关键性的判断依据,但不是所有边界层辐合线在雷达产品上都有表现,风暴初始位置、初始时间和风暴类型具有不确定性,是强对流天气短时临近预警的难点。

参考文献

- [1] 陆汉成,杨国祥. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京:气象出版社,2000:251-288.
- [2] Wilson J W, Schreiber W E. Initiation of convective storms by radar observed boundary layer convergence lines[J]. Mon Wea Rev, 1986, 114: 2516-2536.
- [3] Wilson J W, Foote GB, Fankhauser J C, et al. The role of boundary layer convergence zones and horizontal rolls in the initiation of thunderstorms: a case study[J]. Mon Wea Rev, 1992, 120: 1758-1815.
- [4] Wilson J W, Mueller C K. Nowcast of thunderstorm initiation and evolution[J]. Weather and Forecasting, 1993, 8: 113-131.
- [5] Wilson J W, Megenhardt D L. Thunderstorm initiation, organization and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines[J]. Mon Wea Rev, 1997, 125: 1507-1525.
- [6] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2001:401-409.
- [7] 俞小鼎,熊延南,周小刚,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:138-142.
- [8] 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): 112-119.
- [9] 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.
- [10] 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): 36-41.
- [11] 廖晓农,俞小鼎,于波. 北京盛夏一次罕见的大冰雹事件分析[J]. 气象, 2008, 34(2): 10-17.

刁秀广等：边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用

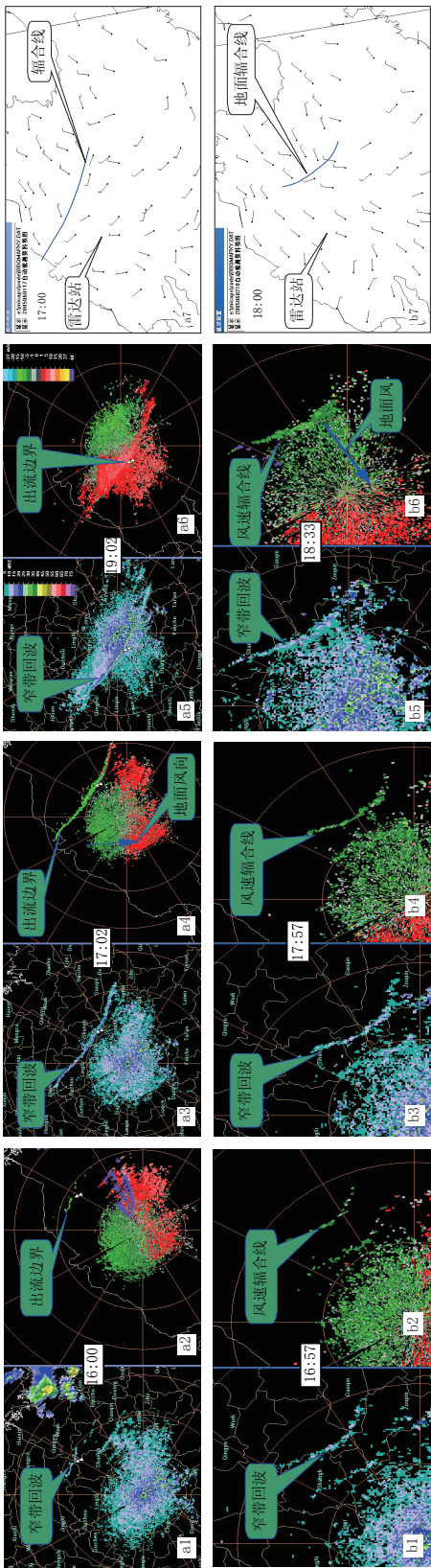


图 5 未产生对流天气的窄带回波和地面风矢图 a1-a6是2005年6月1日窄带回波演变情况，对应时间分别为16:00、17:02、17:57、18:33、19:02，a7是当日17时地面风，b1-b6是2005年6月2日窄带回波演变情况，对应时间分别为16:57、17:57、18:33、b7是当日18时地面风

刁秀广等：边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用

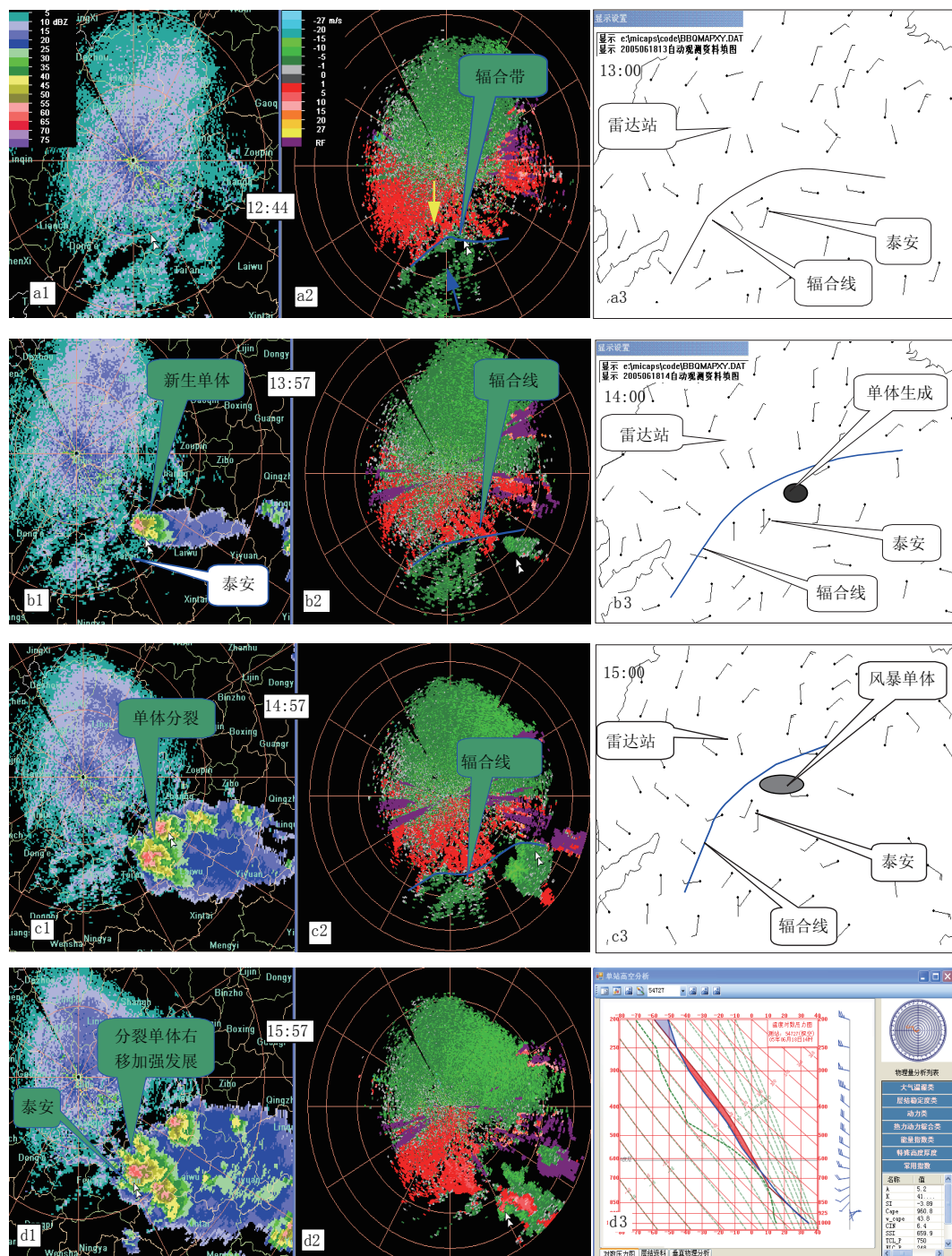


图 4 2005年6月18日组合反射率及平均径向速度和地面风矢图
a1、b1、c1、d1为CR产品，a2、b2、c2、d2为与CR产品对应的0.5°平均径向速度26号产品，
a3、b3、c3为对应的地面图，d3为14时NCEP资料算出的t-logp图

刁秀广等: 边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用

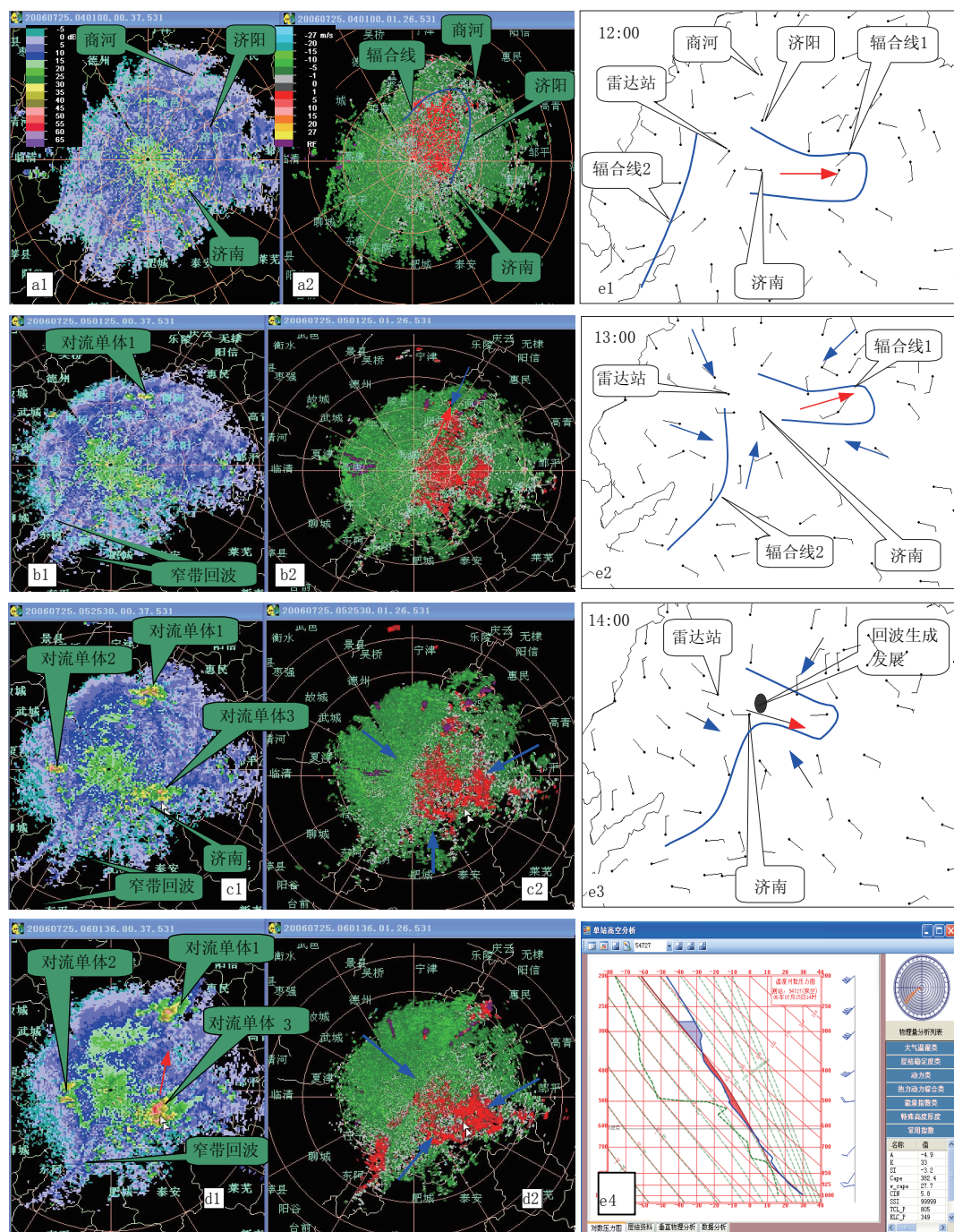


图 3 2006年7月25日组合反射率及平均径向速度和地面风矢图

a1、b1、c1、d1为CR产品, a2、b2、c2、d2为与CR产品对应的0.5°平均径向速度26号产品, 时间分别为12:01、13:01、13:25、14:01。e1、e2、e3为对应的地面风, e4为14时章丘加密探空t-logp图

刁秀广等：边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用

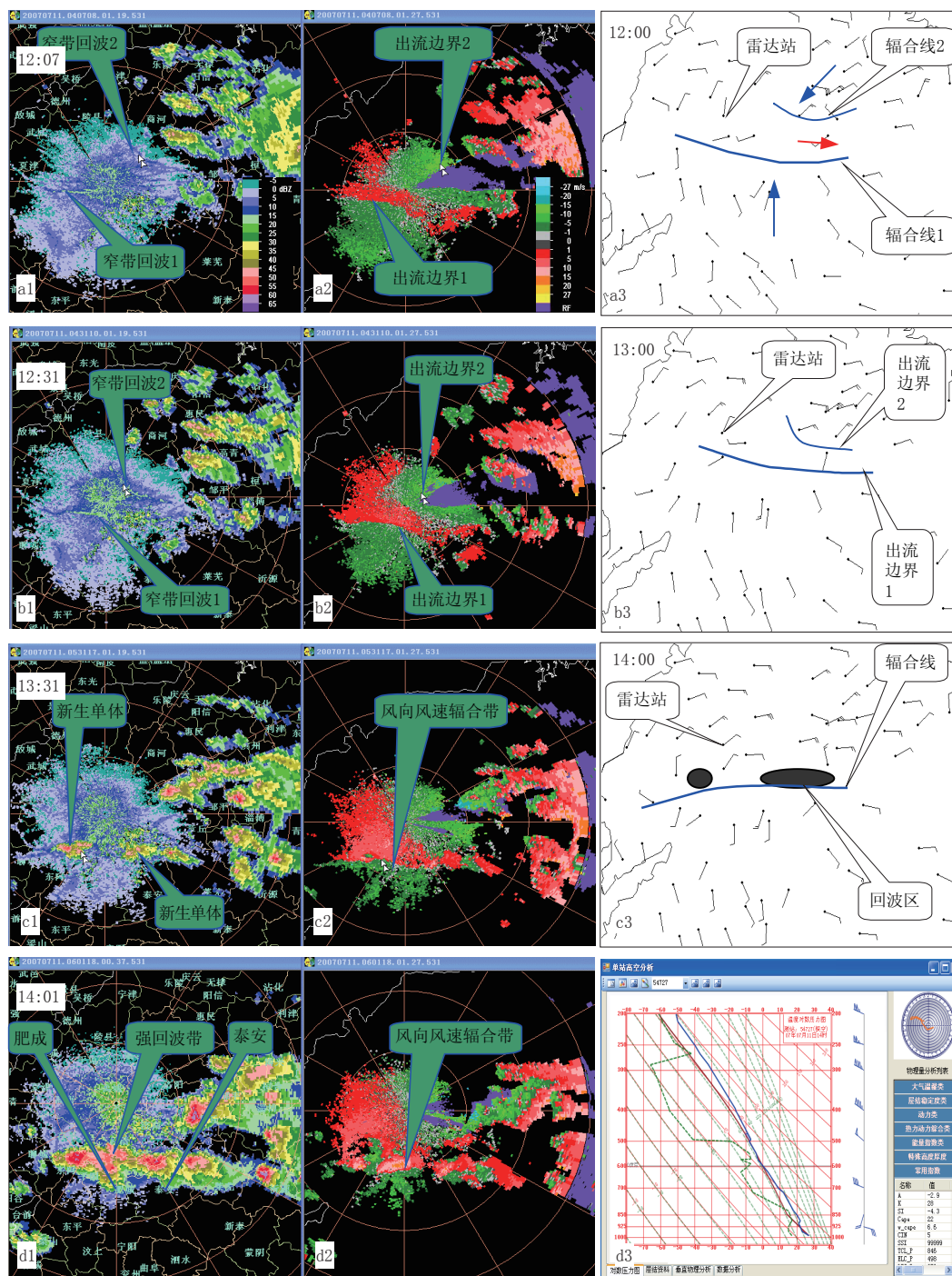


图 2 2007年7月11日窄带回波及平均径向速度和地面风矢图
a1、b1和c1为反射率因子19号产品，d1为37号产品，a2、b2、c2和d2分别为与强度产品相对应的0.5°仰角平均径向速度27号产品，时间分别为12:07、12:31、13:31、14:01，a3、b3、c3为对应的地面风，d3为14时章丘加密探空t-logp图

刁秀广等：边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用

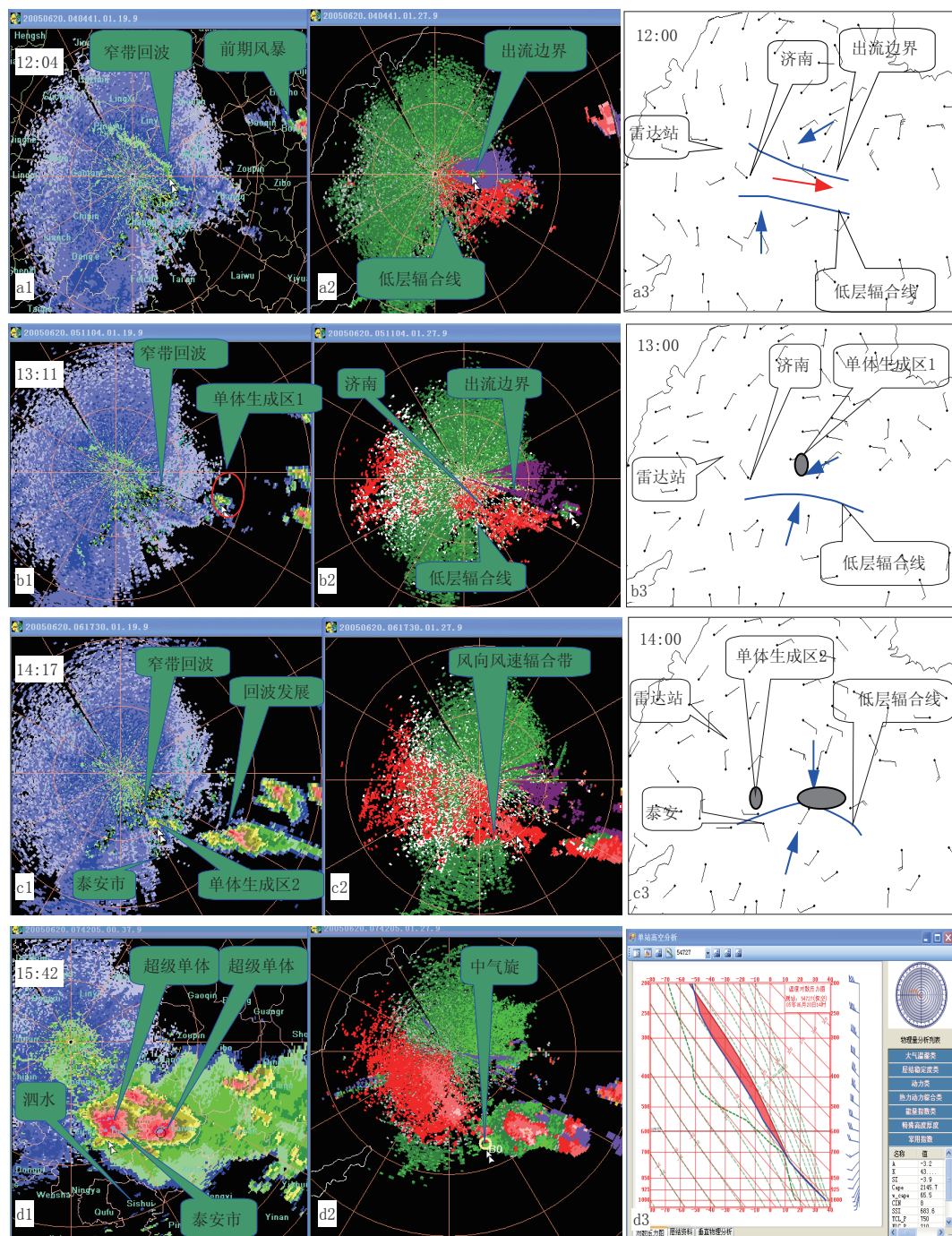


图 1 2005年6月20日窄带回波及平均径向速度和地面图

a1、b1和c1为反射率因子19号产品，d1为反射率因子37号产品，a2、b2、c2和d2分别为与强度产品相对应的0.5°仰角平均径向速度27号产品，时间分别为12:04、13:11、14:17、15:42。a3、b3、c3为对应的地面风，d3为14时NCEP资料算出的t-logp图