

刁秀广. 阵风锋、海风锋和冷锋等触发局地强对流风暴实例分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 45-57.

Diao Xiuguang. Case study on severe local convective storms triggered by gust fronts, sea breeze fronts, and cold fronts[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(4): 45-57. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.006. (in Chinese)

阵风锋、海风锋和冷锋等触发局地强对流风暴实例分析

刁秀广

(山东省气象台, 山东 济南 250031)

摘要: 利用 CINRAD/SA 雷达探测资料, 结合地面实况和探空资料, 对 7 次典型中尺度辐合线触发强对流风暴的特征进行了分析。结果表明: 阵风锋、海风锋和冷锋等边界层辐合线在一定条件下雷达低层反射率因子产品上表现为清晰的窄带回波, 某些辐合线在反射率因子产品上不能得到任何有用信息, 但在低层径向速度上可识别出线性径向速度辐合; 识别出窄带回波或清晰的径向辐合线约 1 h 后, 是雷暴首次触发的主要时间段; 对于干型强对流风暴产生的阵风锋, 其右侧往往是雷暴触发的主要区域, 导致风暴右向传播; 湿型强对流风暴产生的阵风锋, 激发雷暴的方向与雷暴平均移动方向基本相反, 导致风暴呈后向传播特征; 海风锋向内陆推进速度快的区域是雷暴触发的主要区域, 后继雷暴具有两侧传播特征; 单纯的线性低层径向速度辐合在合适的环境条件下触发强对流, 主要特征是对流风暴移动缓慢, 可造成局地灾害性强降雨天气。

关键词: 边界层辐合线; 窄带回波; 雷暴触发; 海风锋

中图分类号: P458.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)04-0045-13

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.006

Case study on severe local convective storms triggered by gust fronts, sea breeze fronts, and cold fronts

DIAO Xiuguang

(Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract Based on the observation data from CINRAD/SA radar combined with ground observation and sounding data, 7 severe convective storms triggered by mesoscale convergence lines are analyzed. The results are as follows. 1) Boundary layer convergence lines such as gust fronts, sea breeze fronts and cold fronts are manifested as distinct narrow-band echoes on radar reflectivity products under certain environmental conditions. Some of the mesoscale convergence lines cannot get any useful information from radar reflectivity products, but can identify linear convergence zones of radial velocity for low-level radial velocity. 2) The first convective thunderstorm principally appears about an hour after narrow-band echoes or distinct radial convergence lines are identified by the radar. 3) For the gust front generated by dry-type severe convective storms, its right side is usually the main area of triggering new convection cells, leading to the rightward propagation of new storms. 4) For wet-type severe convective storms, the direction of new convection cells triggered by the gust front tends to be opposite to the average moving direction of thunderstorms, leading to the back-propagation of new storms. 5) The main area of triggering new

收稿日期: 2018-03-17; 修订日期: 2018-05-28

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2016DM20); 环渤海区域科技协同创新基金项目 (QYXM201614); 山东省气象局科研项目 (2012sdqx05, 2016sdqx01)

作者简介: 刁秀广, 男, 研究员级高级工程师, 主要从事多普勒天气雷达产品应用研究和短临预报工作, radardxg@126.com。

convection cells lies where the sea breeze front is advancing rapidly inland, and the subsequent thunderstorms have the characteristics of bilateral propagation. 6) The low-level linear radial velocity convergence line in appropriate environmental conditions can trigger convection cells and the convective storm moves slowly, which can cause local disastrous heavy rainfall events.

Key words boundary layer convergence line; narrow-band echo; storm triggering; sea breeze front

引言

雷暴的生成需要垂直不稳定、水汽和触发抬升三个基本条件。触发抬升机制与中尺度边界层辐合线密切相关。Wilson and Schreiber^[1]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,以及雷暴的出流边界(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等。Wilson et al.^[2]和多人研究^[3-5]表明,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 h 临近预报系统 Auto Nowcaster (ANC),它的一个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。

许多国内学者对阵风锋、海风锋等中尺度辐合线进行了相关研究,探讨了该类边界的空间结构、类型、形成机制及其对流触发作用^[6-20]。某些中尺度辐合线在雷达反射率因子产品上通常表现为窄带回波(narrow band echo, NBE)。席宝珠等^[21]对我国阵风锋类型与产生机制分析指出,阵风锋的影响范围和生命史与雷暴母体强度和冷性出流的补偿有关,阵风锋与其他边界层辐合线交汇更易触发对流。王彦等^[22]对渤海湾海风锋触发雷暴的模拟分析表明,海风锋前端是东南风和东北风交汇的辐合带,在850 hPa 以下向内陆推进过程中呈气温降低和湿度增加的特点,并逐渐形成增厚的热内边界层,海风锋前端为温度和湿度等值线的密集区,海风锋背后为冷湿气团。中尺度辐合线可以触发雷暴,但究竟在哪一部分触发雷暴,什么时间能触发雷暴,目前还难以具体判断,需要今后大量的深入持续研究。

利用 CINRAD/SA 雷达探测资料,结合地面实况和环境参数,对7次典型的中尺度辐合线触发强

对流风暴的特征进行了分析,在雷达反射率因子或径向速度产品上可分析出明显的触发先兆特征,对强对流风暴的临近预警有指导意义。

1 强对流过程实况与环境参数

山东强对流天气主要分为2大类,即干型强对流天气和湿型强对流天气。干型强对流天气以雷暴大风为主,局部伴有冰雹和短时强降水;湿型强对流天气以强降雨为主,局部伴有冰雹和对流性雷暴大风^[23]。7次过程有3次干型强对流,4次湿型强对流。

2009年6月29日下午,半岛地区遭受冰雹、雷暴大风等强对流天气袭击,最大冰雹直径约30 mm,烟台市芝罘、莱山、莱阳、栖霞等4区(市)直接经济损失5 730万元,青岛市即墨、莱西、平度、胶州等市15个镇(街道)、294个村灾情较重,直接经济损失6 200万元。

2012年7月26日08:00—27日08:00,山东北部和河北南部出现大暴雨天气。4个国家气象观测站(山东3个)出现大暴雨,最大176.7 mm,出现在庆云站;15个国家气象观测站(山东6个站)出现暴雨。山东聊城、德州、滨州、东营和济南等市有54个区域气象观测站(以下简称“区域站”)出现暴雨,12个区域站出现大暴雨,最大121.4 mm,出现在陵县义渡口区域站。个别站出现大风天气,没有冰雹报告。

2014年7月2日18:00前后,济南市市中区七贤庄附近暴雨如注,造成局部严重积水。位于七贤庄附近的济南大学区域站降水量达100.1 mm,17:00—18:00降水量为88.3 mm,没有监测到大风,属于典型短时强降水,尺度小、强度大、时间短。

2014年7月14日15:30左右,栖霞观里镇、杨础镇、寺口镇、蛇窝泊镇出现了强冰雹天气,冰雹最大有鸡蛋大小,降雹时间持续约半小时,造成严重经济损失。

2015年7月14日13:00—20:00,德州、聊城、济南、泰安、菏泽、济宁等地出现雷暴大风和短时强降水等强对流天气,局部出现冰雹。16个国家气象

象观测站和 127 个区域站出现 $17.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上大风天气, 10 级或以上大风 14 站(3 个国家级气象观测站), 最大 $30.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 出现在阳谷县郭屯区域站。2 个国家级气象观测站和 15 个区域站出现 50 mm 以上强降水, 最大 79.0 mm, 出现在东平县接山区域站。

2015 年 7 月 30 日 13:00 开始, 潍坊市昌邑、寒亭、坊子、昌乐、临朐五县市区部分乡镇先后出现冰雹(最大直径 30 mm)、大风、暴雨天气过程。至 19:00, 18 个区域站出现 50 mm 以上降水, 其中 4 个站出现 100 mm 以上降水, 分别是昌乐的乔官(143.8 mm)和红河(108.1 mm)、昌邑的朱里(140.1 mm)和宋庄(138.0 mm), 15:00—16:00 朱里降水量达 100.4 mm。有 7 个区域站出现 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上大风天气, 最大 $25.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 出现在昌邑宋庄区域站。

2016 年 6 月 21 日 16:00, 济南东北部局地发生强降水天气, 同时伴有冰雹, 没有监测到大风。降雨强度大、范围小, 造成局部马路严重积水。根据水文数据, 义和庄区域 2 h 降雨量达 144 mm。

7 次强对流实例的环境参数见表 1。 $CAPE^*$ 是订正到 14:00 强对流天气发生地的 $CAPE$ 值。可以看出, 7 次过程午后或者是雷暴发生前后, $CAPE$ 具有较大值。20160621、20150730、20140702 和 20120726 四次过程具有较大 K 值和小的 ΔT (850 hPa 与 500 hPa 温差), 主要以强降水天气为主。20150714、20140714 和 20090629 三次过程具有较大 ΔT 值, 中层较干冷, 主要以雷暴大风天气或者冰雹天气为主。20090629 范围较大的强对流过程 0~6 km 高度具有强垂直风切变特征, 20120726、20140702 和 20150714 三次过程垂直风切变较弱, 其他 3 次过程具有中等强度垂直风切变。

表 1 环境物理量

Table 1 Environmental physical parameters

| 日期 | 时次(站点) | $K(\Delta T)/^\circ\text{C}$ | $SI(LI)/^\circ\text{C}$ | $T_g(TT)/^\circ\text{C}$ | $CAPE(CAPE^*)/(J \cdot \text{kg}^{-1})$ | $CIN/(J \cdot \text{kg}^{-1})$ | $W_{sr}(0\sim 6)/(m \cdot \text{s}^{-1})$ |
|----------|----------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|---|--------------------------------|---|
| 20160621 | 08 (章丘) | 37(25) | 0.5(-3.7) | 33(44) | 1 610(2 950) | 86 | 10.4 |
| 20150730 | 08 (章丘) | 43(28) | -4.1(-5.3) | 37(51) | 1 564(3 350) | 157 | 14.4 |
| 20150714 | 08 (章丘) | 25(30) | -5.1(-4.0) | 39(54) | 914(4 130) | 310 | 3.2 |
| 20150714 | 08 (邢台) | 41(33) | -5.3(-1.3) | 40(56) | 171(4 640) | 703 | 5.9 |
| 20140714 | 08 (荣成) | 25(29) | 4.8(-4.7) | 22(41) | 1 465(1 274) | 0 | 9.6 |
| 20140702 | 08 (章丘) | 33(26) | 0.6(-3.3) | 26(46) | 483(980) | 38 | 7.4 |
| 20120726 | 08 (章丘) | 38(26) | 0.3(-1.9) | 37(44) | 415(5 448) | 226 | 3.1 |
| 20090629 | 08 (成山头) | -4(31) | 8.1(1.7) | 18(34) | 0(2 220) | 0 | 20.7 |

2 阵风锋触发实例

对流风暴成熟阶段的冷性下沉气流, 在近地层向外扩散, 与周边环境低层暖湿空气交汇而形成的边界, 称为阵风锋。较强雷暴的出流边界, 在一定距离范围内的雷达反射率因子上常表现为窄带回波, 不仅伴有阵性大风, 而且也可能触发新的对流, 使得风暴持续较长时间, 产生持续性的灾害性天气。

2.1 干型强对流触发实例

2015 年 7 月 14 日雷暴大风为主的干型强对流具有新生对流单体右向传播为主的演变特征, 阵风锋触发的雷暴首先出现在弧状窄带回波顶点的右侧(阵风锋来向), 并逐渐向阵风锋右端延伸, 风暴主体先后影响聊城、济南西部、泰安西部及菏泽、济宁一带。

图 1 是 2015 年 7 月 14 日济南和濮阳雷达反射

率因子产品。11:38 在河北南部枣强至武邑一带有对流回波生成并快速发展, 12:01 发展成西南—东北向、长度约 80 km 的回波带, 向东南方向移动。12:13, 0.5° 仰角反射率因子出现弧状窄带回波即阵风锋(图 1a, 1.5° 仰角反射率因子没有窄带回波), 影响到德州市区及武城一带, 窄带回波所处高度约 1.2~1.8 km, 此时区域站监测到的极大风速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。之后阵风锋东南方向移动, 反射率因子强度也明显增大, 13:17 阵风锋反射率因子达到 20~25 dBz(图 1b), 同时组合反射率因子产品显示, 在弧状窄带回波顶点的右侧(阵风锋来向)出现新的对流单体(图 1c)并迅速发展, 至 13:29 新生对流单体发展旺盛, 同时在其右侧又出现新对流单体(图 1d)。14:04 在阵风锋最右端及顶点前方有新的对流云团出现(图 1e), 14:28 阵风锋右侧又激发出新的对流(图 1f)。14:57 济南雷达 0.5° 仰角反射

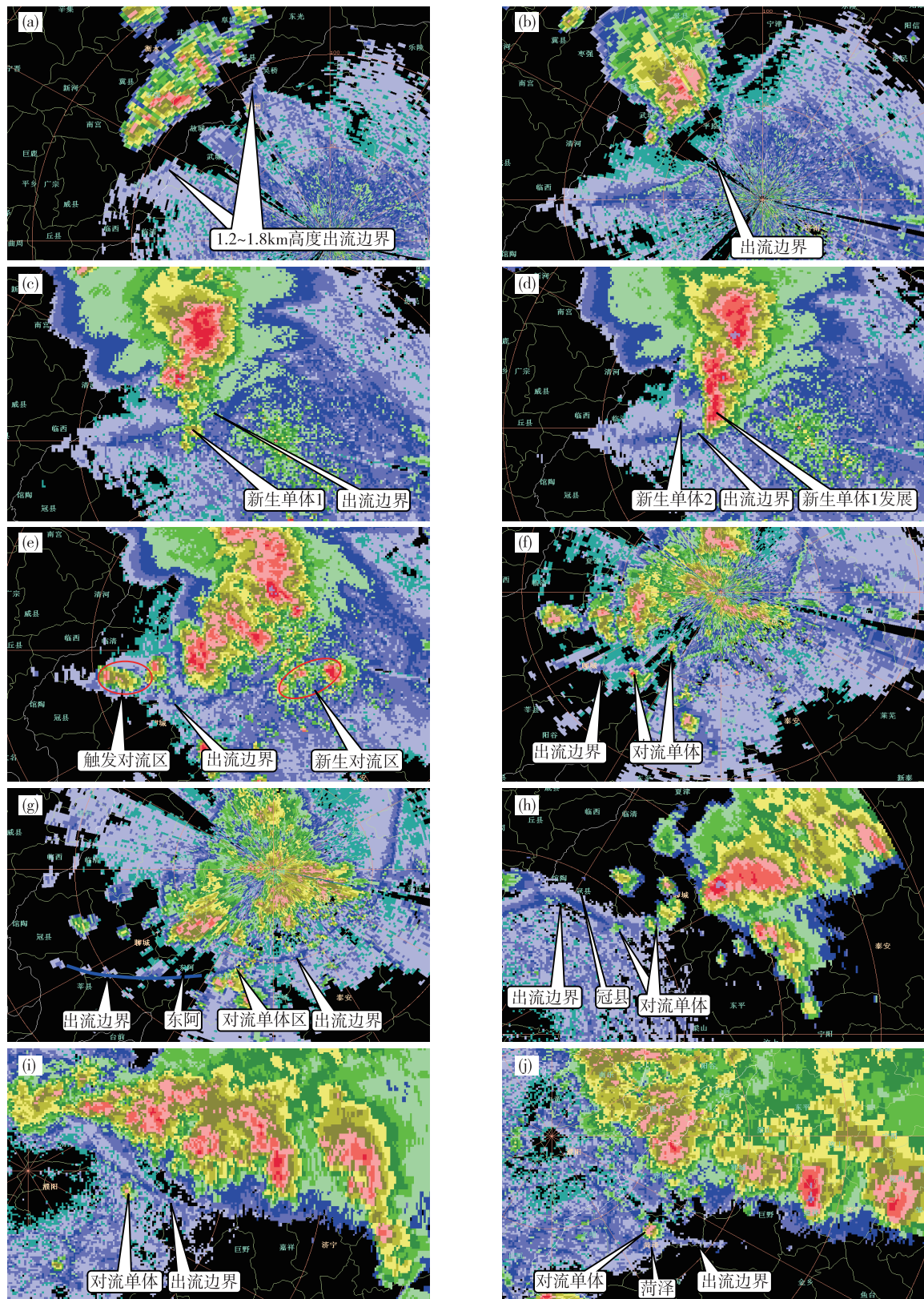


图1 2015年7月14日济南雷达反射率因子产品(a. 12:13, b. 13:17, f. 14:28, g. 14:57; 0.5°仰角, R19)和组合反射率产品(c. 13:17, d. 13:29, e. 14:04; CR37)以及濮阳雷达组合反射率产品(h. 14:58, i. 16:48, j. 17:31; CR37)

Fig.1 Radar reflectivity factors (R19) at 0.5° elevation angle at 12:13 (a), 13:17 (b), 14:28 (f), and 14:57 (g) and composite reflectivity products (CR37) at 13:17 (c), 13:29 (d), and 14:04 (e) from Jinan radar & composite reflectivity products (CR37) at 14:58 (h), 16:48 (i), and 17:31 (j) from Puyang radar on 14 July 2015

率因子上识别出的阵风锋的右端在东阿附近(图1g),14:58 濮阳雷达反射率因子产品显示阵风锋位置可延伸到冠县西部区域(图1h),同时在莘县—东阿一带分布多个新生对流单体,阵风锋的右端向西南方向移动,16:48和17:31 两个时段阵风锋上都有对流单体生成,影响鲁西南一带。

该次过程首次识别出阵风锋约1 h后,阵风锋触发出新的对流单体。

2.2 湿型强对流触发实例

2012年7月26日短时强降雨为主的湿型强对流具有新生对流单体后向传播为主的演变特征。前期强降水风暴产生的阵风锋西南方向移动过程中不断触发雷暴,并演变成具有“列车效应”的强降雨带,导致局地大的累积降水量。

图2是2012年7月26日济南雷达反射率因子产品。强降雨开始前期,雷达低层反射率因子上出现明显的近乎南北向的窄带回波(图2a、b),即所谓云街,是由大气低层的对流卷构成的一条条积云线^[24]。13:37最清晰(反射率因子最强)的云街窄带回波北端出现对流雷暴,同时早期形成的雷暴东北方向移动过程中逐渐发展,形成刚能识别的出流边界(图2b)。14:25出流边界较为清晰,在出流边界与最清晰的云街窄带回波北端交界区域有新的对流触发(图2c),触发的对流东北方向移动、发展,逐渐演变成带状回波,形成“列车效应”,14:00—15:00庆云站出现53.0 mm、乐陵站出现46.9 mm的短时强降雨(图2d)。在风暴演变过程中,出流边界上出现多次雷暴触发,使得雷暴向西南方向传播,形成后向传播特征(图2d、e、f、g、h),15:00—16:00陵县义渡口出现46.0 mm强降水。这种后向传播特征不仅导致强降水区向西南方向延伸,同时风暴发展演变成带状回波,形成“列车效应”,在带状回波东北端产生后继的累积降水,14:00—16:00庆云累积降水量为104.4 mm。18:05在西北方150 km处有中尺度对流系统快速东南方向移动,移动过程中与前侧的后向传播雷暴带合并发展,并向东南方向移动,在陵县、平原一带产生强降水(图2i、j)。

这次强降雨过程从雷达上识别,有2个触发因素,首先是云街,其次是阵风锋。反射率因子最强云街的北端有对流触发,同时云街与阵风锋交汇区域有对流触发,后期云街消失,阵风锋持续触发对流,使得对流降水持续较长时间。

3 冷锋触发实例

冷锋南压过程中,在一定条件下,雷达低层反射率因子上有时呈现窄带回波,并触发对流风暴。就山东而言,多见于渤海西部及南部沿岸地区。

图3是2009年6月29日烟台雷达反射率因子和平均径向速度产品。12:30前后,0.5°仰角反射率因子出现冷锋形成的两条窄带回波(图3a),一条位于海上,距离雷达较近(40 km左右),径向速度上对应区域零速度线具有明显折角,呈典型冷锋特征。另一条位于龙口海岸附近,径向速度上看不出辐合现象(图3b)。位于海上的弱回波带或者窄带回波逐渐向雷达靠近,陆上的弱回波带逐渐向内陆移动(图3c),14:40前后基本呈一条东西向的弱回波带(图3d)并经过雷达站点,低层径向速度上呈现锋面经过雷达站的典型特征(图3e)。14:04组合反射率产品显示,雷达西偏南150 km处出现第一个对流单体(图3f),对比14:00地面风场资料,新生对流单体位于地面锋面上,也就是对流单体由冷锋触发,由于距离较远,雷达无法探测到远处的窄带回波。第一个对流单体迅速发展成强风暴,17:23消散,历时3 h 20 min,该长寿命孤立风暴主要影响青岛地区,旺盛阶段长时间出现旁瓣回波(图3g、h),地面出现大冰雹。同时,首次触发雷暴的左侧(窄带回波来向为参考)窄带回波上相继出现多个对流单体并迅速发展,产生冰雹、雷暴大风等强对流天气(图3g、h),主要影响烟台地区。

2009年6月29日半岛强对流天气由冷锋触发,对流首先出现在东西向窄带回波的右端(窄带回波的来向),后继的雷暴在其左侧不断激发,形成对流回波带。识别出冷锋约1 h 30 min后激发出第一个对流风暴。

4 海风锋触发实例

海风锋是指由海面向内陆推进的海风的前沿,实际上是来自海上的湿冷气团与内陆的暖干气团之间形成的类似锋面性质的气团交界面^[22]。在雷达反射率因子产品上常表现为一条细长、几乎平行于海岸线的弱回波带,并逐渐向内陆推进。

图4是2014年7月14日烟台雷达反射率因子和平均径向速度产品。10:11雷达0.5°仰角反射率因子产品显示,在海岸线附近出现弱回波带(图4a),10:47雷达站西侧弱回波带更加清晰(图4b),沿着海岸线形成的弱回波带逐渐向内陆推进

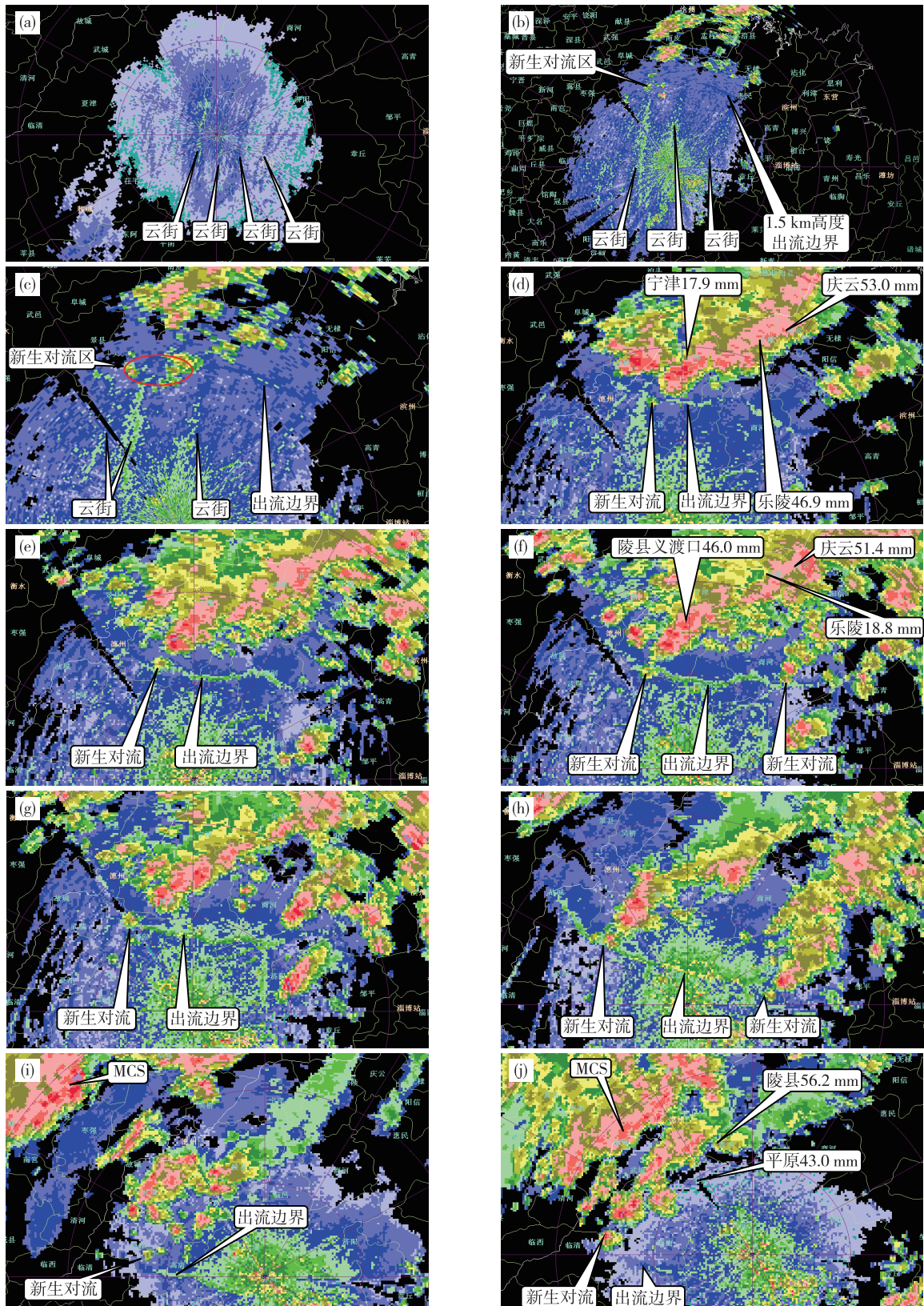


图2 2012年7月26日济南雷达反射率因子产品(a. 10:32, b. 12:37, c. 13:25; 0.5°仰角, R19)和组合反射率产品(d. 14:36, e. 15:12, f. 15:30, g. 15:48, h. 16:36, i. 18:05, j. 18:47; CR37)

Fig.2 Radar reflectivity factors (R19) at 0.5° elevation angle at 10:32 (a), 12:37 (b), and 13:25 (c) & composite reflectivity products (CR37) at 14:36 (d), 15:12 (e), 15:30 (f), 15:48 (g), 16:36 (h), 18:05 (i), and 18:47 (j) from Jinan radar on 26 July 2012

(图 4c), 12:34 前后在弱回波带的西侧距离雷达站约 45 km 处出现首个对流云团 1 (图 4d)。之后, 海风锋窄带回波上对流云团 1 初始位置左侧、右侧相继出现对流单体 (图 4e、f), 持续向两侧传播、发展。影响栖霞的强风暴强盛阶段最大反射率因子在 62 dBz 以上, 最大 69 dBz, 有持续的明显三体散射 (TBSS) 特征 (图 4g、h)。海风锋对应的径向速度图

上并没有辐合现象 (图 4i、j), 与窄带回波的位置或雷达探测方向有关。对流单体首先出现在海风锋向内陆推进速度较快的区域, 说明该区域的辐合强度或者海风锋强度较强, 利于风暴的触发, 同时后继触发雷暴向左右两侧传播。识别出海风锋约 1 h 15 min 后开始激发对流风暴。

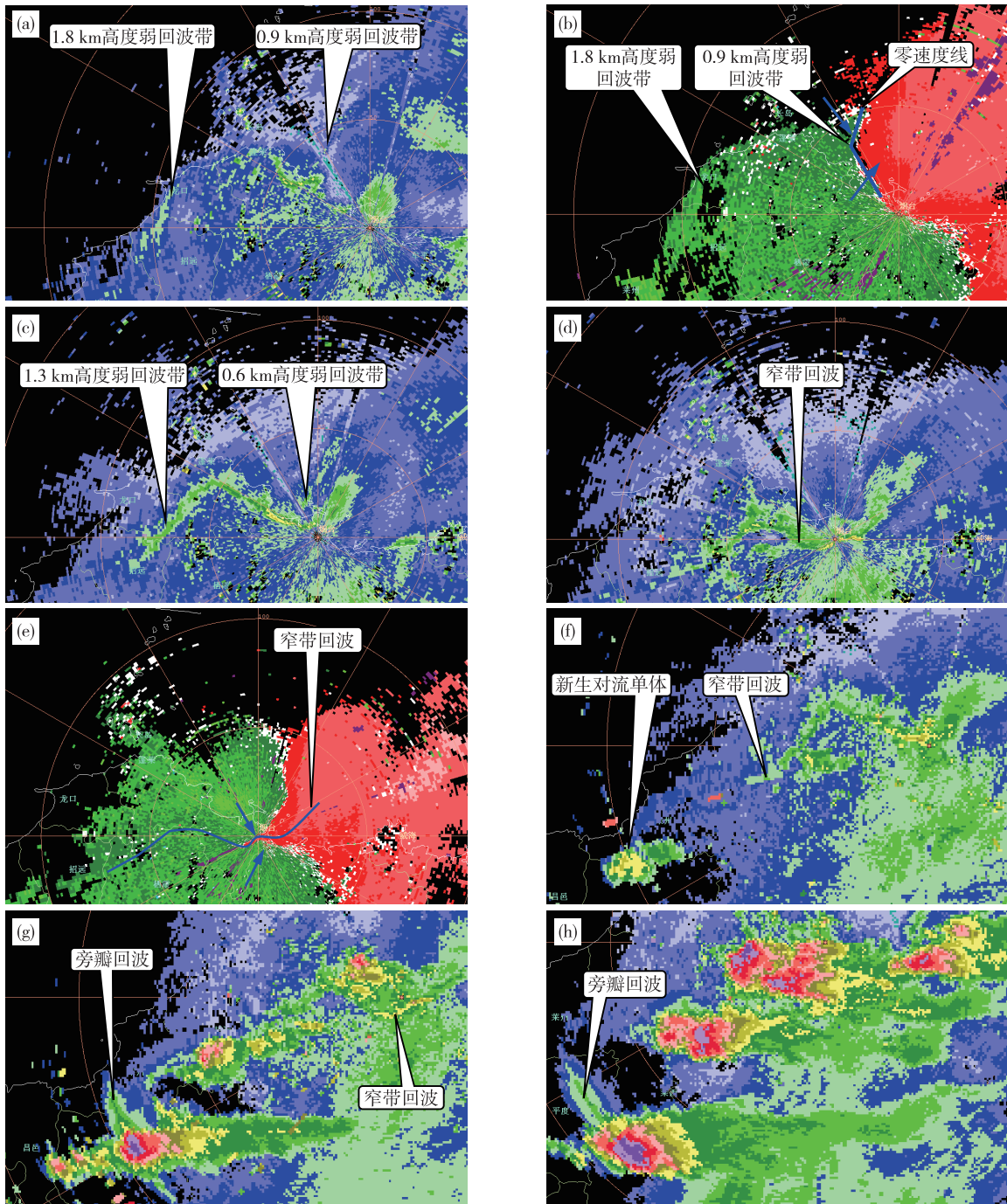


图 3 2009 年 6 月 29 日烟台雷达反射率因子 (a. 12:32, c. 13:39, d. 14:40; 0.5° 仰角, R19) 和平均径向速度产品 (b. 12:32, e. 14:40; 0.5° 仰角, V27; 蓝色实线: 辐合线) 以及组合反射率产品 (f. 14:04, g. 14:52, h. 15:59; CR37)

Fig.3 Radar reflectivity factors (R19) at 0.5° elevation angle at 12:32 (a), 13:39 (c), and 14:40 (d) & mean radial velocity products (V27; convergence line in blue solid line) at 0.5° elevation angle at 12:32 (b) and 14:40 (e) & composite reflectivity products (CR37) at 14:04 (f), 14:52 (g), and 15:59 (h) from Yantai radar on 29 June 2009

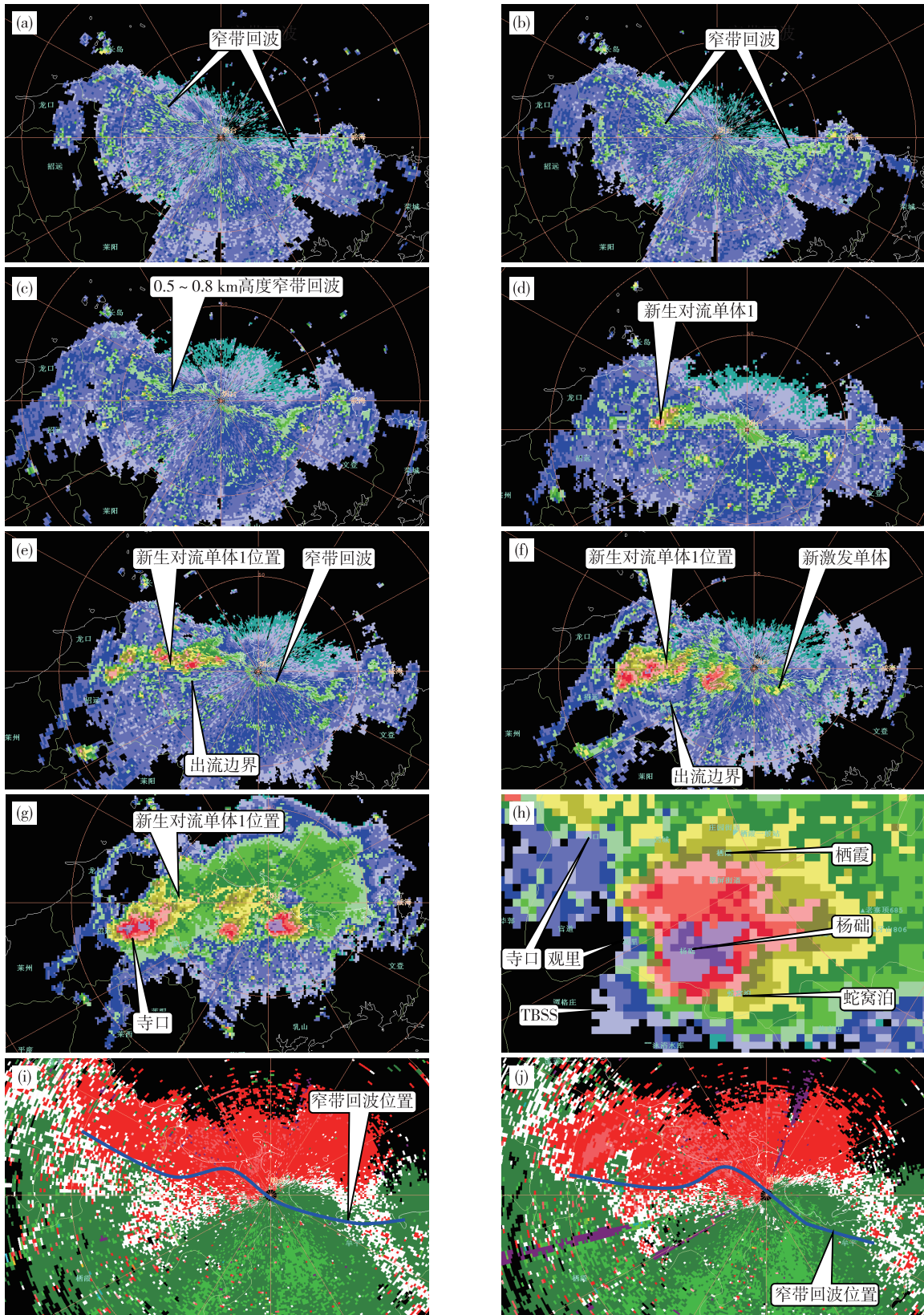


图4 2014年7月14日烟台雷达反射率因子(a. 10:11, b. 10:47, c. 12:04, e. 13:22, f. 14:21, 0.5°仰角, R19)和组合反射率产品(d. 12:34, g. 14:45, h. 15:42; CR37)以及平均径向速度产品(i. 12:04, j. 12:52; 0.5°仰角, V26; 蓝色实线: 辐合线)
 Fig.4 Radar reflectivity factors (R19) at 0.5° elevation angle at 10:11 (a), 10:47 (b), 12:04 (c), 13:22 (e), and 14:21 (f) & composite reflectivity products (CR37) at 12:34 (d), 14:45 (g), and 15:42 (h) & mean radial velocity products (V26; convergence line in blue solid line) at 12:04 (i) and 12:52 (j) from Yantai radar on 14 July 2014

5 多种不同性质窄带回波相互作用实例

冷锋、海风锋和出流边界在同一次强对流过程中均出现,并相互作用,触发系列对流风暴,产生范围较大的对流天气。

图5是2015年7月30日潍坊雷达反射率因子和平均径向速度产品。11:36雷达0.5°仰角反射率因子产品显示,其北部识别出近似东西向的弱回波带(图5a)并逐渐南压,该弱回波带由冷锋形成,12:50前后在弱回波带的中间区域首次出现对流风暴(图5b),对应的径向速度上可分析出辐合现象(图5c),同时在雷达站东南方向约100 km处存在另一条弱回波带,是由海风锋所致。13:52,首次激发对流单体的左侧(窄带回波来向为参考)相继出现多个雷暴,同时冷锋弱回波带和雷暴出流边界基本合为一体,海风锋弱回波带右端(海风锋来向为参考)与冷锋弱回波带左端逐渐靠近,同时海风锋在平度东侧触发对流单体(图5d)。14:10,海风锋与弱冷锋在平度西部交汇,14:39激发对流单体。14:39、15:05、15:44、16:15和16:50几个时次可明显看出,出流边界和海风锋在平度西南部交汇,约30 min后,交汇区域有对流激发,新生对流单体向西南方向传播,而对流风暴移动方向基本是东北向,两种边界的合并,使得新生雷暴沿合并区向西南方向传播,具有后向传播特征(图5e、f、g、h、i)。同时,还可以明显看出,冷锋触发的对流风暴加强发展,形成雷暴带并逐渐南压,在昌乐—昌邑一带产生冰雹、大暴雨和雷暴大风天气,强风暴下沉气流也形成清晰的出流边界,但出流边界并没有产生地面大风。16:15径向速度上阵风锋辐合明显(图5j),同时激发新的对流单体,向西偏南方向传播,形成后向传播演变特征,影响潍坊西南部及淄博、临沂一带。

该次强对流过程首先由南移冷锋激发对流,且在首次激发对流单体的左侧不断有新生对流相继触发,产生冰雹和短时强降雨。半岛南部海风锋北移过程中,首先与冷锋弱回波带交汇,约30 min后激发对流,之后又与阵风锋边界交汇,30 min之后又激发对流,形成具有后向传播特征的对流云带。雷暴出流边界南压过程中与冷锋弱回波带合为一体,先与海风锋交汇激发对流,之后阵风锋西南方向移动过程中,又激发新一轮具有后向传播特征的强降雨带。识别出冷锋窄带回波约1 h 20 min后开始出现对流单体。

6 低层线性径向速度辐合触发强对流实例

低层中尺度环境风场辐合,在合适的环境条件下,在雷达低层径向速度上表现为清晰的线性径向速度的辐合,尺度在20~50 km之间,这种单纯的线性径向辐合也可激发强对流风暴。最典型的是济南市区的两次局地强降雨天气,即2014年7月2日和2016年6月21日,线性径向辐合长时间维持并移动缓慢,导致强降雨风暴也具有移动缓慢特征。

2014年7月2日济南局地强降雨由移动缓慢的孤立强降雨风暴造成。15:30前后,1.5°仰角径向速度上可以识别出清晰的辐合线(图6a),之后辐合线基本在原地维持(图6b),16:24在辐合线东侧有对流生成发展,但维持时间较短,40 min后消亡。七贤镇北侧的辐合现象逐渐加强(图6c),16:43观测到对流单体(图6e)。强降水风暴维持期间,其低层辐合也一直存在(图6d),风暴强度基本在55~58 dBz之间(图6f),基于单体的垂直积分液态含水量(C-VIL)在25~30 kg·m⁻²之间,济南大学区域站17:00—18:00降水量为88.3 mm,10 min(17:30—17:40)最大降水量达30 mm。识别出清晰线性径向辐合约1 h 10 min后开始出现对流单体。

2016年6月21日济南局地强降雨也是由移动缓慢的孤立强降雨风暴造成。14:00前后,1.5°仰角径向速度上强降雨区的南部可以识别出50 km左右的辐合线(图7a),之后辐合线缓慢向西北方向移动(图7b、c)且辐合更加明显。15:07在辐合线后有对流单体2生成(图7e),单体1是14:38生成的弱单体的减弱阶段,之后,单体2逐渐发展,16:17最大反射率因子达53 dBz,至17:44一直维持在50 dBz以上,16:40—16:57达到最强阶段,最大反射率因子在65~66 dBz之间(图7f)。强降水风暴维持期间,其低层辐合存在气旋性辐合(图7d),强降水期间风暴强度基本在55~66 dBz之间,基于单体的垂直积分液态含水量(C-VIL)在30~60 kg·m⁻²之间。识别出清晰线性径向辐合约1 h后开始出现对流单体。

7 结论

1) 阵风锋、海风锋和冷锋等边界层辐合线在雷达低层反射率因子产品上能反映出的主要特征是窄带回波,在低层平均径向速度产品上表现特征各不相同。某些尺度较小的辐合线在反射率因子产品上不能得到任何有用信息,但在低层径向速度上

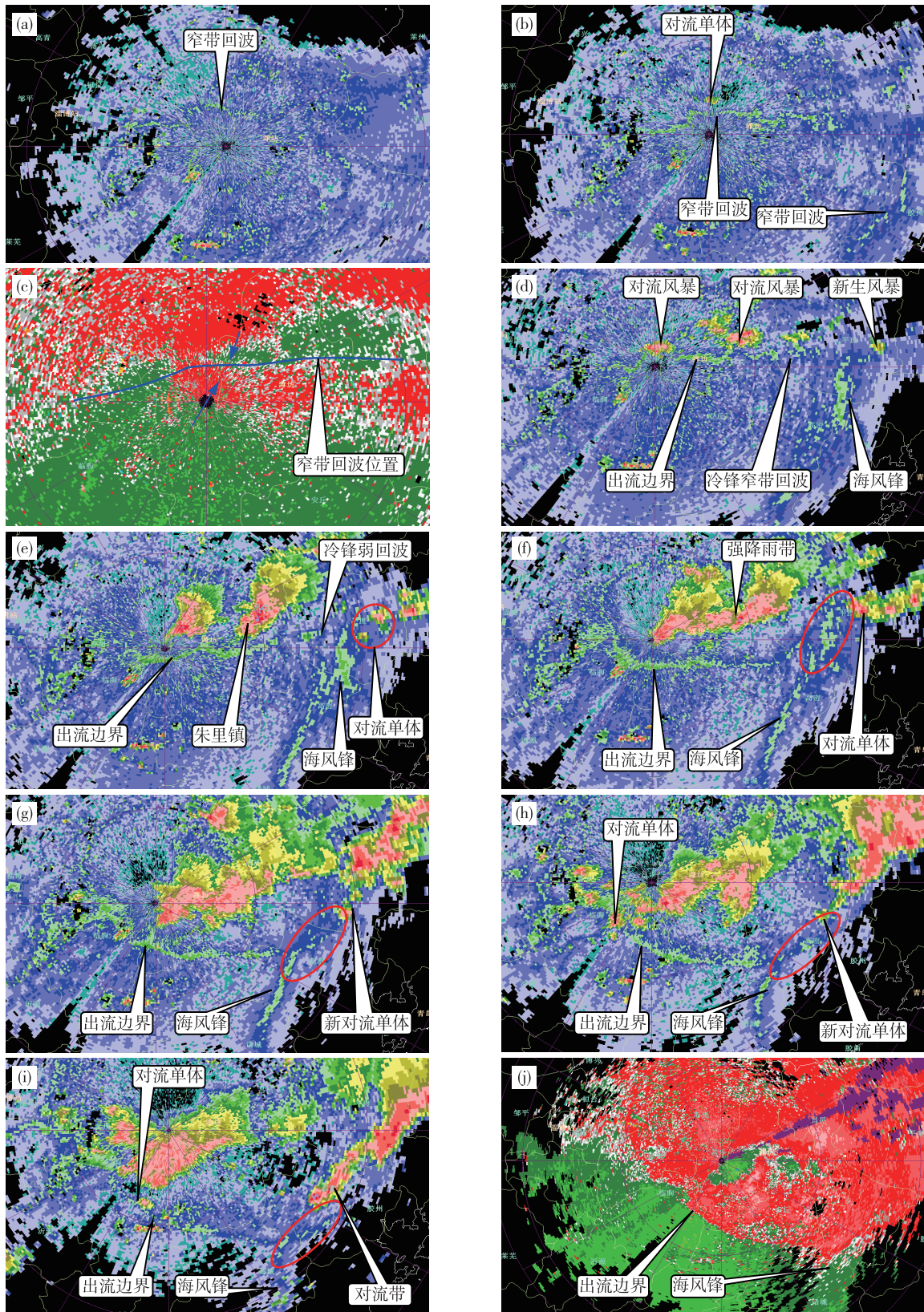


图5 2015年7月30日潍坊雷达反射率因子(a. 11:36, b. 12:59, d. 13:52, e. 14:39, f. 15:05, g. 15:44, h. 16:15, i. 16:50; 0.5°仰角, R19)和平均径向速度产品(c. 12:59, j. 16:15; 0.5°仰角, V26; 蓝色实线: 辐合线)

Fig.5 Radar reflectivity factors (R19) at 0.5° elevation angle at 11:36 (a), 12:59 (b), 13:52 (d), 14:39 (e), 15:05 (f), 15:44 (g), 16:15 (h), and 16:50 (i) & mean radial velocity products (V26; convergence line in blue solid line) at 0.5° elevation angle at 12:59 (c) and 16:15 (j) from Weifang radar on 30 July 2015

可识别出线性径向速度辐合。低层窄带回波或者线性径向速度辐合在有利环境参数条件配合下会激发对流雷暴,产生大冰雹、强雷暴大风或者致灾性短时强降雨天气。

2)7次实例分析中,有5次在雷达低层反射率产品上出现阵风锋、海风锋或冷锋窄带回波,2次径向速度产品上出现清晰的晴空低层径向辐合线,基本都是在分析出辐合线约1h后首次触发雷暴,1h是单独辐合线触发雷暴的主要时间点。辐合线合并,首次触发时间明显提前,30min前后是雷暴触发的关键时间点。

3)对于干型强对流风暴产生的阵风锋,其右侧往往是雷暴触发的主要区域,导致风暴向右传播。湿型强对流风暴产生的阵风锋,激发雷暴的方向与

雷暴平均移动方向基本相反,导致风暴呈后向传播特征。海风锋向内陆推进速度快的区域是雷暴触发主要区域,后继雷暴具有两侧传播特征。单纯的线性低层径向速度辐合在合适的环境条件下触发强对流,主要特征是对流风暴移动缓慢,可造成局地灾害性强降雨天气。

冷锋、阵风锋等边界层辐合线在不同雷达观测数据上所表现出的边界区域、边界特征出现的时间及强弱会有不同,因此,在整个中尺度边界辐合线上何时、何地触发,及触发后如何传播,需要大量个例分析研究。上述实例分析,为今后单部雷达业务应用仅提供一种参考。同时,多数情况下,雷暴触发信息在雷达探测数据中表现不明显,尤其是远距离情况下,无法获取低层信息,实际业务中需多加注意。

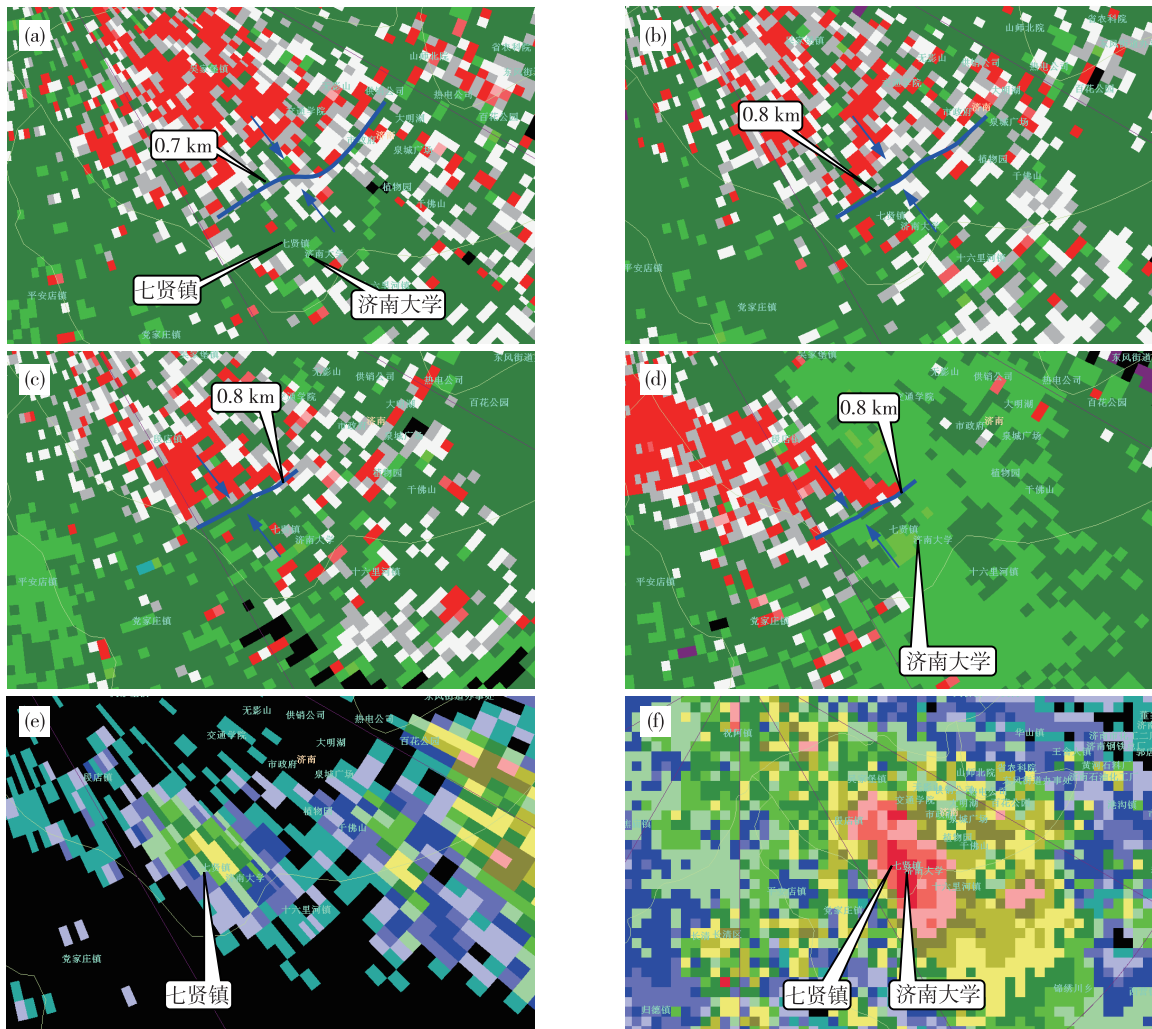


图6 2014年7月2日济南雷达平均径向速度(a. 15:30, b. 15:54, c. 16:37, d. 17:19; 1.5°仰角, V26; 蓝色实线: 辐合线)和反射率因子产品(e. 16:43; 3.4°仰角, R19)以及组合反射率产品(f. 17:31; CR37)

Fig.6 Mean radial velocity (V26; convergence line in blue solid line) at 0.5° elevation angle at 15:30 (a), 15:54 (b), 16:37 (c), and 17:19 (d) & radar reflectivity factors (R19) at 3.4° elevation angle at 16:43 (e) & composite reflectivity products (CR37) at 17:31 (f) from Jinan radar on 2 July 2014

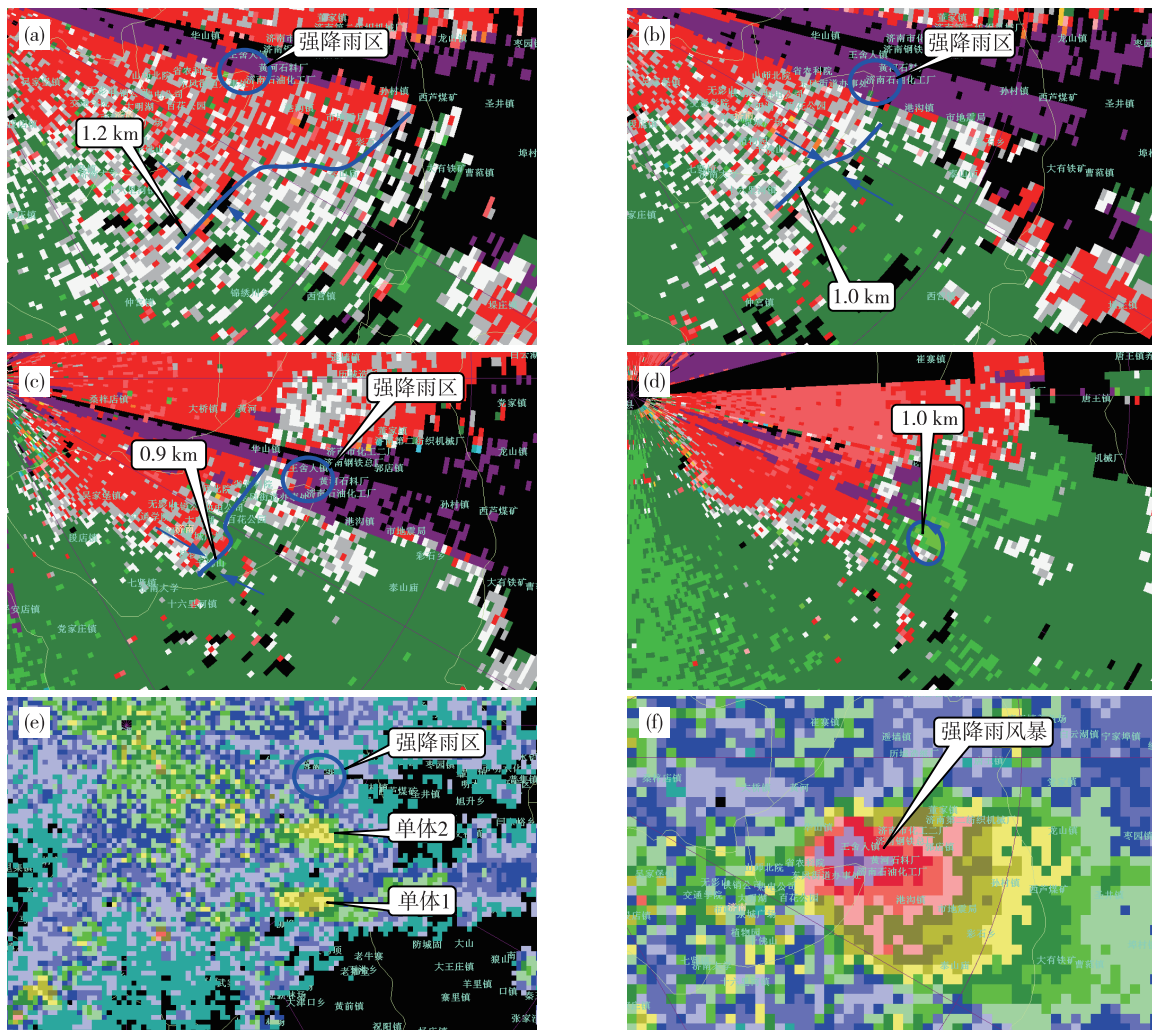


图7 2016年6月21日济南雷达平均径向速度(a. 14:03, b. 14:56, c. 15:59, d. 16:52; 1.5°仰角, V26; 蓝色实线: 辐合线)和组合反射率产品(e. 15:07, f. 16:46; CR37)

Fig.7 Mean radial velocity (V26; convergence line in blue solid line) at 1.5° elevation angle at 14:03 (a), 14:56 (b), 15:59 (c) and 16:52 (d) & composite reflectivity products (CR37) at 15:07 (e) and 16:46 (f) from Jinan radar on 21 June 2016

参考文献:

- [1] Wilson J W, Schreiber W E. Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines [J]. *Mon Wea Rev*, 1986, 114(12): 2516-2536.
- [2] Wilson J W, Foote G B, Crook N A, 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(9): 1785-1815.
- [3] Wilson J W, Mueller C K. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution [J]. *Wea Forecasting*, 1993, 8(1): 113-131.
- [4] Fankhauser J C, Crook N A, Tuttle J, et al. Initiation of deep convection along boundary layer convergence lines in a semitropical environment [J]. *Mon Wea Rev*, 1995, 123(2): 291-313.
- [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(7): 1507-1525.
- [6] 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): 112-120.
- [7] 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.
- [8] 卢焕珍, 赵玉洁, 俞小鼎, 等. 雷达观测的渤海湾海陆风辐合线与自动站资料的对比分析 [J]. *气象*, 2008, 34(9): 57-64.
- [9] 刁秀广, 车军辉, 李静, 等. 边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用 [J]. *气象*, 2009, 35(2): 29-33.

- [10] 陶岚,戴建华,陈雷,等.一次雷暴冷流出流中新生强脉冲风暴的分析[J].气象,2009,35(3):29-35.
- [11] 赵金霞,徐灵芝,卢焕珍,等.盛夏渤海湾大气边界层辐合线触发对流风暴对比分析[J].气象,2012,38(3):336-343.
- [12] 席宝珠.吉林省中部地区出流边界连续触发雷暴的对比分析[M]//中国气象局预报与网络司.天气预报技术文集(2011).北京:气象出版社,2011:210-215.
- [13] 姚超,马嫣.鲁西南至鲁中一次暴雨过程成因分析[J].山东气象,2014,34(3):17-21.
- [14] 陶岚,戴建华,李佰平,等.上海地区移动型雷暴阵风锋特征统计分析[J].气象,2016,42(10):1197-1212.
- [15] 易笑园,刘一玮,孙密娜,等.海风辐合线对雷暴系统触发、合并的动热力过程[J].气象,2014,40(12):1539-1548.
- [16] 刁秀广,孟宪贵,万明波.一次 MCC 红外云图演变特征及成因分析[J].山东气象,2015,35(2):1-7.
- [17] 陈善炳,陈叶婷,李红梅.“9.21”山东半岛南部沿海强降水的中尺度分析[J].山东气象,2015,35(2):15-20.
- [18] 高帆,张永婧,李瑞,等.2015年8月3日山东西北部暴雨过程的中尺度特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):96-101.
- [19] 万夫敬,江敦双,赵传湖.2017年8月6日山东罕见雷暴大风成因分析[J].海洋气象学报,2018,38(2):60-66.
- [20] 高晓梅,王世杰,王文波,等.2016年山东一次阵风锋触发的强对流天气分析[J].海洋气象学报,2018,38(2):67-75.
- [21] 席宝珠,俞小鼎,孙力,等.我国阵风锋类型与产生机制分析及其主观识别方法[J].气象,2015,41(2):133-142.
- [22] 王彦,高守亭,梁钊明.渤海湾海风锋触发雷暴的观测和模拟分析[J].高原气象,2014,33(3):848-854.
- [23] 阎丽凤,杨成芳.山东省灾害性天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2014:110-111.
- [24] 俞小鼎,周小刚,王秀明.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,2012,70(3):311-337.