

4.28 临沂强对流灾害性大风多普勒 天气雷达产品分析

朱君鉴^{1,2} 刁秀广^{1,2} 曲 军¹ 黄秀韶¹

(1. 山东省气象台, 济南 250031; 2. 山东省气象科学研究所)

提 要: 分析了2006年4月28日发生在临沂的罕见灾害性大风的多普勒天气雷达产品。分析发现,雷达回波具有典型的弓状回波特征,在弓状回波前沿,对流单体强烈发展,出现有界弱回波区,低层入流缺口等超级单体的典型特征,风暴中出现中气旋,强降水之后风暴回波顶高、风暴质心高度、风暴的最大反射率因子高度迅速下降,灾害性大风出现在这个时段。实地考察表明,灾害性大风的路径与中气旋最大风速圈南缘移过的路径一致。分析认为,弓状回波后部存在较强后部下沉入流,由于强降水的拖曳作用,将中层中气旋的水平动量带到地面,中气旋右侧动量的方向与弓状回波后部的强下沉入流方向一致,两者叠加,使地面风速加大,造成灾害性大风。

关键词: 后部下沉入流 中气旋 超级单体 下击暴流

Study on the Damage Wind with Doppler Radar Products in Linyi, Shandong on 28 April 2006

Zhu Junjian^{1,2} Diao Xiuguang^{1,2} Qu Jun¹ Huang Xiushao¹

(1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031; 2. Henan Meteorological Institute)

Abstract: Doppler radar products of damage wind process in Linyi, Shandong on 28 April 2006 were analyzed. The echo was a typical bow echo, in the front of the bow echo a supercell developed with "V-NOTCH", BWER, then meso-cyclone and heavy rain occurred. After heavy rain, the top of the storm, the height of storm centroid and maximum reflectivity fell rapidly. The damage wind occurred at this time. Investigated data shows that the path of damage wind go along with the path that the right edge of the meso-cyclone passed. It suggests that the horizontal momentum of the meso-cyclone was brought down to the surface by heavy rain. At the right edge of meso-cyclone the momentum and RIF have the same direction, the two airflows overlay together

基金项目: 国家自然科学基金项目(40575012); 山东省气象局科学技术研究项目(2007sdqxz04)共同资助

收稿日期: 2008年5月25日; 修定稿日期: 2008年10月4日

and make the wind increase, so damage wind occurred.

Key Words: RIF mesocyclone super-cell downburst

引 言

飊线是一条活跃的雷暴带,具有特强的雷达反射率因子,飊线中有时包含超级单体风暴,伴有中气旋和钩状回波等特征^[1]。1978年 Fujita^[2]提出了弓状回波的概念模型,指出在发展成熟的弓状回波向前突出的顶部,对应灾害性大风区。其后 Smull 和 Houze^[3]根据观测事实和数值模拟指出,飊线系统中存在 3 支主要气流:主上升气流,飊前低层流向后部的斜升气流和飊后中低层流向前部的下沉入流,后部下沉气流到达地面而产生的直线风造成弓状回波顶部的灾害性大风。Przybylinski^[4]的研究指出强的后部下沉气流会使弓状回波的后侧出现回波缺口,后部下沉气流的左侧,有时会产生弱的龙卷。

国内多普勒天气雷达投入业务应用以来,对一些飊线个例研究表明,飊线回波具有线状分布,移动速度快^[5-8],反射率因子最大值和径向速度最大值长时间相伴^[6],有时伴有中气旋等特点^[9],雷暴大风与弓状回波相联系,弓状回波与地面强风相对应,弓状回波顶部和向前突起部分产生大风更强烈^[7]。

2006 年 4 月 28 日发生在山东境内的飊线过程在临沂造成了严重的灾害性大风,这种灾害性天气常发生在春末夏初不稳定天气条件下,常常可以在前一天预报出山东境内有强对流天气。4 月 28 日的飊线也如此,4 月 27 日预报次日省内有雷雨大风。但这次过程自下午 14:00(北京时,以下同)左右聊城地区生成,一路经过济南、泰安、莱芜,途中造成了不同程度的大风灾害,但都不十分严重,而下午 17:30—18:00 飊线系统移至临沂后,引发了严重的风灾,造成重大经济损失

和人员伤亡。在弓状回波移动的过程中,灾害性大风发生在什么时段? 什么位置? 对于制作灾害性大风的精细预报有实际意义。本文利用 CINRAD 的资料对这次灾害性大风过程的雷达回波产品作一些分析,以期积累这方面的预报经验。

1 天气实况和灾情

2006 年 4 月 28 日下午,山东出现了一次飊线天气。飊线是由 500hPa 西风槽影响产生的,低层增温增湿,高层冷空气南下,低能舌叠加在高能舌之上,导致大气对流性不稳定。850hPa 切变线和地面低压槽中的辐合上升运动触发对流不稳定能量释放,产生对流云团,在热力不稳定和风垂直切变的环境条件下对流云团东移发展,形成飊线^[10]。受其影响,济南、泰安、枣庄、临沂的十二县(市)先后遭受风雹袭击。济南、枣庄、临沂的部分县市瞬时极大风速达到 $26\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,其中临沂的苍山县极大风速达 $28.3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。部分地区出现了冰雹,冰雹最大直径约 20~30mm。其中临沂市苍山县大风灾害最为严重,有 7 个乡镇受灾,据统计,受灾人口 3.2 万余人,因灾全县死亡 8 人,受伤 89 人,重伤 40 人,农作物受灾面积 22420hm^2 ,损坏房屋 25392 间,损坏玻璃 12800m^2 ,刮倒树木 61170 棵,刮翻网箱 14000 只,刮失鸡 56000 只、貂 3200 只,损坏通讯线杆 1720 棵,刮倒建筑塔吊 7 座,全县工商企业全部停电停产。全县直接经济损失 10 亿元以上。

2 典型的弓状回波特征

4 月 28 日的强对流天气下午 3:00 在济

南附近强烈发展后,就形成了弓状回波,之后向东南方向移动,弓状回波移动速度非常快,连云港 CINRAD/SA 雷达测得的 STI 平均速度 17:19 达到 $18\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($64\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)。雷达回波呈典型的弓状回波特征,图 1a(见彩页)是连云港多普勒天气雷达 18:02 0.5° 反射率因子图,图中方位 300° 附近的缺口系地物阻挡造成,发展旺盛的对流单体呈弧状排列在弓状回波的前沿,弓状回波向东偏南(大约 280°)方向移动,移动速度约 $60\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$;图 1b(见彩页)是 0.5° 平均径向速度产品,弓状回波后部有一大片负速度区域,即一较大范围的西偏北风,B 点离雷达 100km,在距离雷达 150km 以西,探测高度在 2.7km 以上,较大范围的平均径向速度大于 $30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,图中 B 处有一黄圆圈,是 CINRAD/SA 雷达的中气旋产品;图 1c(见彩页)是平均径

向速度垂直剖面图,剖面位置对应图 1b 中线段 A—B 的位置,图中可见大于 $30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的下沉气流自 4~5km 高度指向弓状回波前沿,由于距离雷达较远,加之连云港雷达架设较高,因此最低探测高度达约为 1.5km,但综合分析图 1b 和图 1c,存在一较大范围的西偏北方向自中层插向弓状回波前沿地面的强下沉气流。

3 灾害性大风发生在风暴质心快速下降时段

根据苍山县气象局的灾情报告,发生在苍山县的灾害性大风主要发生在 17 时 51 分至 18 时 37 分,图 2 是连云港 CINRAD/SA 雷达测得的灾害性大风发生时(17:57—18:39,北京时间)风暴质心高度等产品图,图

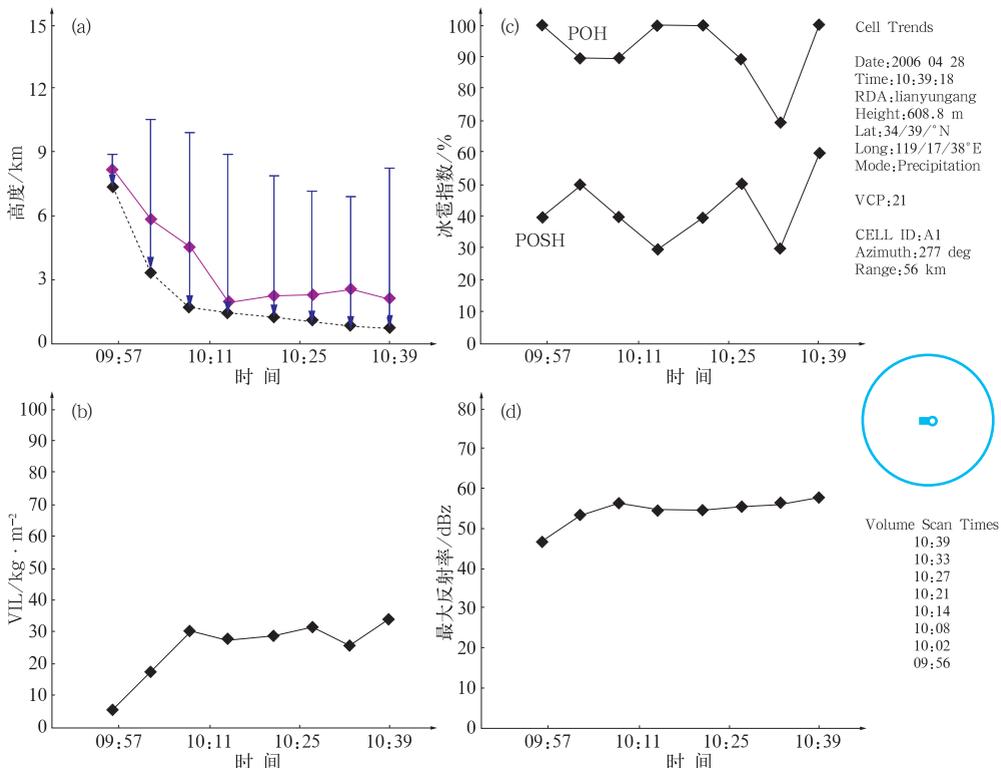


图 2 CINRAD/SA 雷达的风暴质心高度等产品图

图中时间均为世界时

2a 中,竖线表示风暴的底和顶的高度,虚线表示风暴单体中最大反射率因子所在高度,实线表示风暴质心所在高度,由图 2a 可见,17:57—18:39,风暴顶从 11km 降到 7km,风暴质心从 8km 降到 2km,最大反射率因子高度从 7km 降到 1km。与此同时,风暴单体中最大反射率因子大约由 44dBz 增大到 58dBz (图 2d),垂直液态含水量(VIL)从 $10\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 增大到 $35\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 2b),冰雹指数多次达到 90%~100% (图 2c)。这说明尽管风暴顶高度、风暴质心高度、风暴最大反射率因子所在高度在下降,但风暴强度却没有减弱,相反有所增强。

造成风暴顶高度、风暴质心高度、风暴最大反射率因子所在高度快速下降的原因与风暴出现强降水有关,苍山气象站记录当天 18:00—19:00,1 小时降水 17.5mm,由于强降水不一定下在雨量站,因此最大降水量可能更大,当时雷达 1 小时降水量产品达到 44mm。

4 灾害性大风发生在中气旋前进方向的右侧

4.1 实地调查结果

图 3 (见彩页)是实地考察 2006 年 4 月 28 日灾害性大风发生地点和多普勒雷达中气旋产品叠加图,调查时,用 GPS 定位仪对灾害性大风位置进行经纬度实地测定,记录风灾造成树木及其他被破坏物倾倒方向和程度。分析时利用 CINRAD/SA 雷达 PUP 软件的定位功能将风灾发生位置的经纬度标注到雷达产品图上。图中 A、B、C、D、E、F 是实地调查的 6 个点,大风沿图 3 中 C—B—A—D—E—F 的途径自 WNW—EES 方向从苍山县城的南边扫过,C 处的千年银杏树的树冠直径十多厘米的大树枝向东南方向折断,B、A 处 20cm 以上的大树向东偏南方向折断

或倾倒,D 处的大树向东折断或倾倒,E 处 7 个蔬菜交易大棚向东偏北方向倾倒,F 处 5 个蔬菜交易大棚向东偏南方向倾倒。

图 3 中圆圈 AO、HO、CO 分别是连云港多普勒天气雷达 17:50、17:56、18:02 三时次中气旋产品。CINRAD/SA 雷达的中气旋产品以黄色圆表示,圆的中心就是中气旋的中心,圆的直径是中气旋径向直径和切向直径的平均值。

4.2 分析

灾害性大风发生时弓状回波顶部位置的风暴单体强烈发展,出现有界弱回波区,低层入流缺口等超级单体的典型特征,风暴中出现中气旋,单体发展成超级单体。图 4a (见彩页)是 17:50 连云港雷达 0.5° 反射率因子产品,明显的低层入流缺口使回波呈现为钩状,沿 A—B 的垂直剖面上可以看到有界弱回波区(BWER,图 4b,见彩页)。

图 5 (见彩页)是 2006 年 4 月 28 日 17:56 连云港雷达平均径向速度垂直剖面(a、c), 0.5° 平均径向速度产品(b)和 0.5° 反射率因子产品(d)。图中箭头位置为灾害性大风经过的路径。

自 17:56 之后风暴质心迅速下降,中气旋的底降到最低仰角 0.5° ,17:56 之后 3 时次中气旋底部的高度分别为 1.9km、1.8km、1.6km。由于连云港雷达架设较高(608m),大风发生处距雷达较远(约 100km),推测中气旋下降到的高度更低。中气旋的速度分布近似于蓝金模式,CINRAD/SA 雷达的中气旋产品的直径定义为中气旋正负最大速度之间的距离^[11],雷达给出的中气旋符号圆圈的直径是测得中气旋径向直径和切向直径的平均值,从图 5b (见彩页)也可看出在低层中气旋具有较好的对称性,因此中气旋符号圆圈可以近似看成中气旋的最大风速圈。结合对图 3 分析,灾害性大风的移动路径与中气旋最大风速圈南

缘的移动路径有较好的对应关系。

从图 5d(见彩页)可见中气旋位于钩状回波处,图 5a 和 5c 是沿弓状回波前进方向通过中气旋南北边缘 C—D 和 A—B 的平均径向速度垂直剖面(VCS),比较图 5a 和 5c,在低层(1.5km)中气旋南边缘的负速度大于 $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,而北边缘有正速度,正速度旁边的负速度的值也较小。而在弓状回波后部离中气旋较远处是较大范围比较均匀的负速度区(图 5b)。这说明下沉的中气旋的动量叠加在弓状回波后部下沉入流气流上,使得中气旋北缘风速减小,而使其南边缘风速加大造成灾害。

5 讨论

灾害性大风的移动路径与中气旋最大风速圈的南缘的移动路径为什么有较好的对应关系?这与风暴顶、风暴质心高度和最大反射率因子高度下降但风暴强度并不减弱有关。风暴顶、风暴质心高度和最大反射率因子高度下降,将上空的转动动量携带到低层。图 6 是弓状回波后部下沉入流与下沉后的中气旋环流的叠加示意图,中层环流表示中气旋环流最大风速圈,其南缘具有很大的向东方向的动量,风暴出现强下沉气流时,将水平动量带到地面,如图 6 中的低层环流圈所示,环流北侧风向与飑线后部的下沉气流相反,使地面风速减小,环流南侧风向与飑线后部

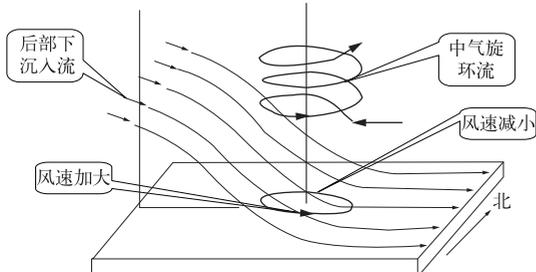


图 6 弓状回波后部下沉入流与下沉后的中气旋环流的叠加示意图

的下沉气流相同,使地面风速加大,造成灾害性大风。

按 Lemon 等^[12]总结的超级单体的概念模型,钩状回波对应超级单体的后部下沉气流位置,下击暴流常发生在该处。图 3 中 E 处 7 个蔬菜交易大棚向东偏北方向倾倒,F 处 5 个蔬菜交易大棚向东偏南方向倾倒,表明该处受到下击暴流的袭击。超级单体中下击暴流的产生,是由于降水拖曳作用所发动,风暴周边环境相对干空气的卷入导致降水粒子的蒸发和升华,冰雹和雪花的融化等因素造成风暴内气块的温度降低形成负浮力使下击暴流加速下降,低层环境大气较大的温度垂直递减率使得以上形成的下击暴流在下降过程中保持其强度,最终以较大速度达到地面附近,形成地面附近的强烈辐散气流^[13]。因为是强下沉气流下冲到地面强烈辐散而形成的,因此地面物体是向四面八方倾倒的,由于风暴的运动,向风暴运动前方倾倒的程度会强一些,但 E、F 处蔬菜交易大棚倾倒的方向与风暴运动方向只有很小的夹角,说明造成这两处大棚倾倒是飑线后较大水平范围的下沉入流上叠加下击暴流引起的。

6 小结

根据以上分析,4.28 临沂灾害性大风是由两支气流造成的,一支是飑线后部下沉入流,另一支是超级单体产生的下击暴流。前者有较大水平范围,风速较大,可以造成灾害,后者在风暴单体发展成超级单体后出现,在风暴前进方向中气旋的右侧两支气流方向一致,叠加后造成严重灾害。以下 2 点对此类灾害性大风的临近预报可作参考。

(1) 强风暴回波顶高度、风暴质心高度、风暴最大反射率因子所在高度快速下降,但风暴最大反射率因子、垂直液态含水量增大

时,地面可能会出现灾害性大风。

(2) 如果飊线前沿对流单体强烈发展,出现中气旋,风暴前进方向中气旋的右侧可能会出现严重灾害性大风。

参考文献

- [1] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 420-425.
- [2] Fujita T T. Manual of Downburst Identification for Project. SMRP Research Paper156, Chicago: University of Chicago, 1978: 12104. [NTIS PB-2860481]
- [3] Smull, Bradley F., R. A. Houze, Jr., Rear Inflow in Squall Lines with Trailing Stratiform Precipitation. Mon. Wea. Rev., 1987,115:2869-2889.
- [4] Przybylinski, R. W. The bow echo. Observations, numerical simulations, and severe weather detection methods. Wea. Forecasting, 1995,10:203-218.
- [5] 王令, 康玉霞, 焦热光, 等. 北京地区强对流天气雷达回波特征[J]. 气象, 2004, 30 (7): 31-35.
- [6] 王雷, 赵海林, 张蔺廉, 等. 2004年7月两次强对流天气过程的对比分析[J]. 气象, 2005, 31(11): 65-69.
- [7] 王彦, 吕江津, 王庆元. 一次雷暴大风的中尺度结构特征分析[J]. 气象, 2006, 32(2): 75-80.
- [8] 伍志方. CINRAD/SA 新一代天气雷达观测夏季热带飊线的特征分析[J]. 气象, 2003, 29(3): 38-48.
- [9] 张芳华, 张涛, 周庆亮, 等. 2004年7月12日上海飊线天气过程分析[J]. 气象, 2005, 31(5): 47-51.
- [10] 杨晓霞, 李春虎, 杨成芳. 山东省2006年4月28日飊线天气过程分析[J]. 气象, 2007, 33(1): 74-80.
- [11] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 207-213.
- [12] Lemon L R, C A Doswell III. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornado genesis[J]. Mon Wea Rev, 1979, 107: 1184-1197.
- [13] 俞小鼎, 张爱民, 郑媛媛. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 914-924.

朱君鉴等: 4.28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析

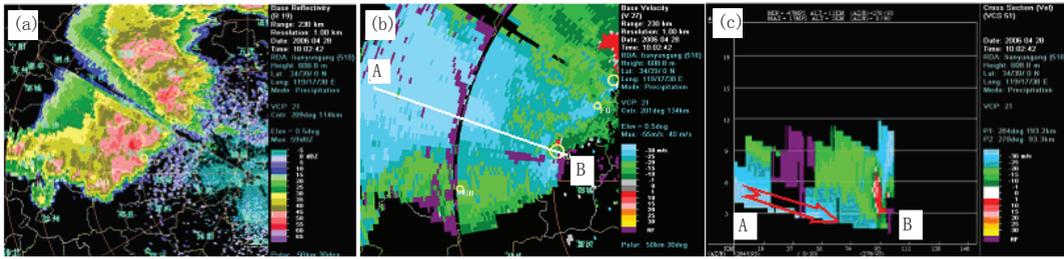


图1 2006年4月28日18:02连云港雷达组合反射率产品

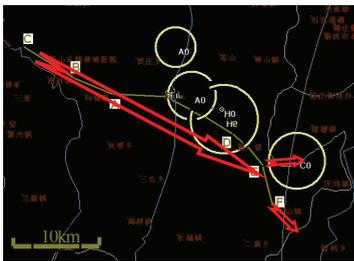


图3 2006年4月28日飊线灾害性大风实地考察情况

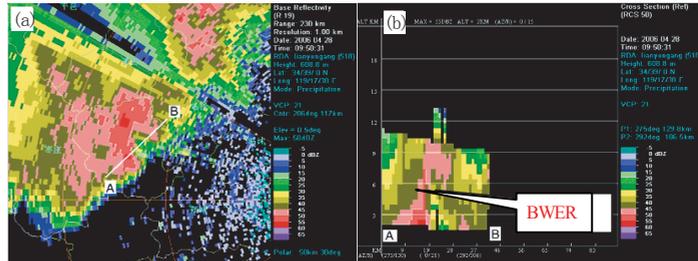


图4 2006年4月28日17:50连云港雷达0.5°反射率因子产品

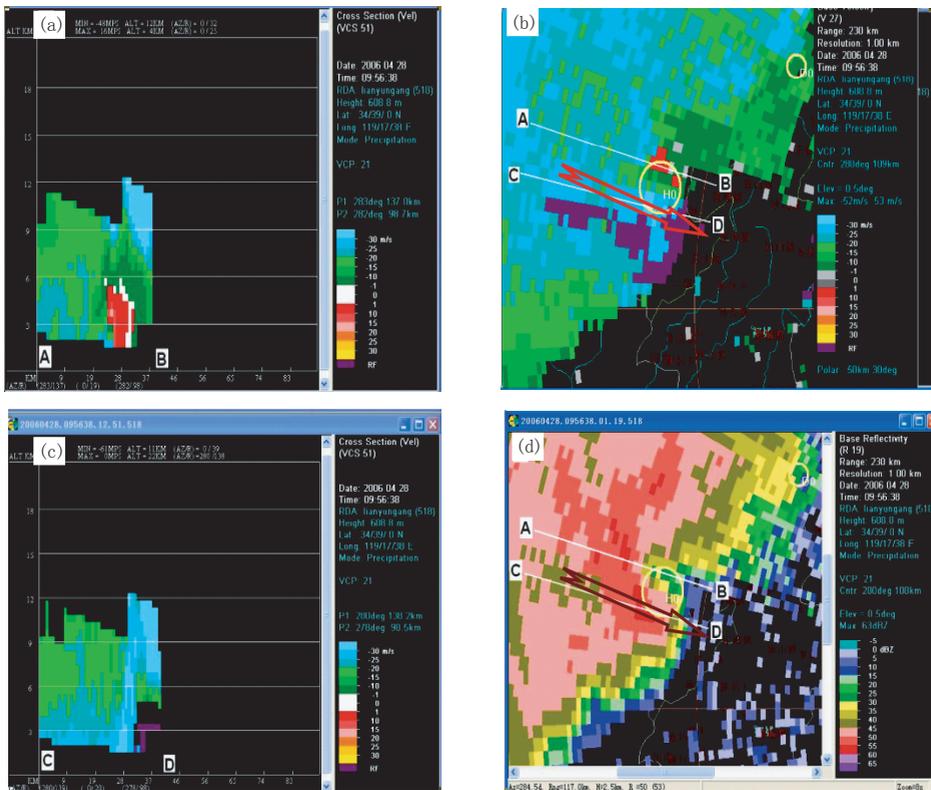


图5 2006年4月28日17:56连云港雷达产品

a、c. 平均径向速度垂直剖面, b. 0.5°平均径向速度产品, d. 0.5°反射率因子产品