

山东一次飚线过程的中尺度分析

盛日锋¹ 王 俊¹ 龚佃利¹ 王 庆¹ 朱君鉴²

(1. 山东省人工影响天气办公室, 济南 250031; 2. 山东省气象台)

提 要: 2005年7月12日山东中西部地区发生了一次飚线天气过程。利用自动气象站、多普勒雷达及NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的逐6小时资料,从天气形势、垂直结构、地面中尺度场等角度分析了该飚线过程。结果表明:低涡后部的横槽转竖是这次飚线发生的大尺度环流背景,横槽转竖过程中引导高空冷空气下泻,形成上干下暖的不稳定层结,不稳定层结主要是通过高低空的温度差动效应来实现。与飚线相对应的是一支强盛的上升气流,飚线后部是下沉气流,具有较高动量的高空气流下沉至地面向外辐散,使得飚线后部地面辐散区中的风场大大加强。地面辐合带的走向和摆动对飚线移动有明显影响,辐合强度不断增强和范围不断扩大之后,天气也就愈激烈。地面低压区的移近、合并,有利于形成强对流发展的环境场。

关键词: 飚线 中尺度分析 辐合带

Mesoscale Analysis of a Squall Line Affecting Shandong Province

Sheng Rifeng¹ Wang Jun¹ Gong Dianli¹ Wang Qing¹ Zhu Junjian²

(1. Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031; 2. Shandong Meteorological Observatory)

Abstract: Based on the automatic meteorological station, Doppler radar and NCEP reanalysis data of $1^\circ \times 1^\circ$ with 6 h interval, a squall line weather event on July 12, 2005 was analyzed. This severe convection occurred under the background of traverse trough developing into vertical trough. When a traverse trough turned into vertical trough, the cold air pours from high altitudes, thus an instable stratification with upper-layer dry and lower-layer wet was formed, which was carried out by high-low differential effects of temperature. There was a strong upward airflow before squall line and a falling airflow with large momentum behind it. The surface wind behind squall line strengthened by relatively strong momentum transmitted from high to low. When squall line promulgated, old convergence line split or united, so

基金项目: 山东省自然科学基金项目(Y2006E08), 山东省科技攻关项目(2006GG2208002), 国家自然科学基金项目(40575012), 国家科技支撑计划课题(2006BAC12B02), 山东省气象局重点课题(2008sdqxzl5)

收稿日期: 2008年11月27日; 修定稿日期: 2009年4月3日

new convergence line came into being consequently. When surface convergence intensity became stronger, convective weather became more severe. Severe weather was located behind disturbed convergence center. The convergence center was situated behind disturbed low pressure band and the high pressure stood before divergence center. There was a low pressure dangled after high pressure, and mesoscale high or low pressure indicated a foreboding of convective weather.

Key Words: squall line mesoscale analysis convergence line

引 言

飚线是一种带(线)状的中尺度深厚对流系统,是非锋面的或狭窄的活跃雷暴带,其水平尺度通常为几百千米,典型生命史约 6~12 小时^[1]。镶嵌在飚线中的强雷暴常常引起局地暴雨、冰雹、大风等灾害天气。多年来,利用常规气象、多普勒雷达和卫星资料对飚线的激发机制和所导致的强对流天气特征开展了不少研究^[2-6]。山东也是飚线灾害性天气频繁发生地区,2005 年 7 月 12 日,受东北低涡横槽转竖的影响,山东省中西部出现了一次以雷雨大风和冰雹为主的飚线过程。自 11 时(北京时,下同)左右开始至 15 时,高唐、禹城、齐河、济南、莱芜、博山、沂源等地先后出现了雷雨大风或冰雹。阵风风力都在 8 级以上,其中沂源站风力最大达到了 11 级(瞬时最大风速 $29.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。莱芜市辛庄镇的冰雹直径达到了 25mm,地面积雹最多处达 30~40mm。这次过程给受灾地区带来了巨大的经济损失,仅沂源县的直接经济损失就达 1.5 亿元。

本文以自动站观测资料为主,结合 NCEP/NCAR($1^\circ \times 1^\circ$)再分析资料和雷达监测资料,分析了这次较长生命史飚线过程的大尺度天气背景及中小尺度特征,着重讨论满足大尺度物理条件下的地面中尺度物理场变化与飚线的发生发展的关系。

1 天气背景

2005 年 7 月 8—11 日,东北地区一直维

持一个低涡,在该低涡后部,西风带高压脊逐渐加强并向东北方向发展,低涡中心南移且减弱,低涡中心西部有横槽生成。12 日 08 时,低涡中心减弱消失,山东 500hPa(图 1a)和 700hPa 处于西北偏西气流控制之下,850hPa(图 1b)及以下对流层低层,在河北、河南与山东交界处有一气旋式的风向切变线,山东的中西部地区为弱的西南风。14 时,山东 500 和 700hPa 基本被西北气流控制,850hPa 及以下层次为西南风。因此,低

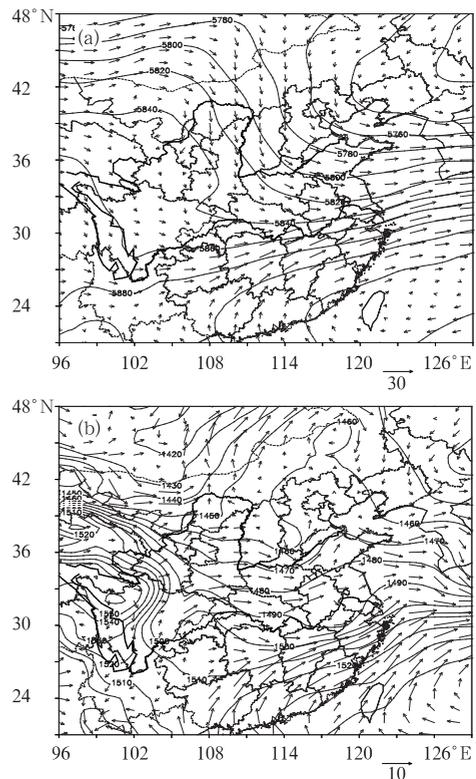


图 1 2005 年 7 月 12 日 08 时 500hPa(a)和 850hPa(b)形势图

涡西部横槽旋转南下,形成东北—西南向的低槽,山东位于槽区。受旋转横槽影响,山东中西部产生强对流天气。本次飊线过程就是在横槽转竖的天气背景下发生的。飊线发生前没有形成低空急流,这和以往一些研究结果不太一致^[7-10]。

分析变温场发现,强对流天气出现前期,章丘探空站 12 日 08 时 850hPa 24 小时变温为 +2℃, 500 和 700hPa 为负变温(-1℃),表明对流层低层增温明显,对流层中高层有冷空气扩散侵入。同时,500hPa 较强的西北气流与 850hPa 弱的西南气流形成了较强的垂直风切变。这种低层升温、高层降温的温度场结构和高低空风的垂直切变所造成的温度差动效应有利于强对流天气的雏形。

2 飊线概况

本次飊线过程自西向东影响山东中西部地区,飊线出现当日,泰安(36.10°N、117.06°E)、莱芜(36.15°N、117.39°E)和沂源(36.11°N、118.09°E)等站都出现了气压陡升、风速剧增及气温陡降的不连续变化。以莱芜站为代表分析这次过程中各要素的变化情况。图 2a 和 2b 是 2005 年 7 月 12 日 06—20 时莱芜站(气)温、(气)压、风及雨量的变化,对比分析飊线过境前后要素的变化情况发现:飊线过境时,气温、气压和风速的变化都超前于强降水,温度在强降水前开始降低,由 28.6℃(13 时)降到 24℃(14 时),15 时温度降到最低(18.9℃);气压在强降水前开始升高,强降水发生时气压涌升到最高(1007.6hPa),之后气压迅速下降,形成了明显的“雷暴鼻或气压鼻”;风速的增大也超前于强降水,由 2 m·s⁻¹(13 时)的东南偏南风转为 8.6 m·s⁻¹(14 时)西北风。这也证明了该飊线的前冲冷流与强降水是有一定间隔的。这与漆梁波等^[11]的研究结果相似。

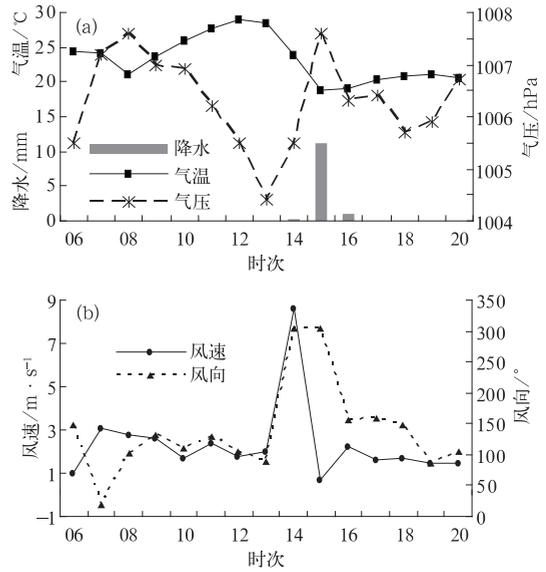


图 2 2005 年 7 月 12 日 06—20 时莱芜站气象要素变化图
(a) 气温、气压和降水; (b) 风向、风速

3 飊线的垂直结构

分析 12 日 08 时 $w, v-w$ 与 θ_w 沿 118°E 的垂直剖面图(图略)发现, 35.5°~38°N 之间有弱上升气流,并且随高度向北倾斜,和 330K 的高能舌基本重合,上升中心位于 750~800hPa 之间,中心强度为 0.05 m·s⁻¹。700hPa 以上层为一致的北风,北风在 35°N 附近下沉和弱上升气流形成一垂直环流圈。

图 3 是 14 时三要素沿 118°E 的垂直剖面图,可以看出,低层 850hPa 以下有一支较强的偏南气流在飊线前部倾斜上升,偏南风随高度有风速切变,在 36°~38°N 之间形成了强盛的上升气流,中心位于地面 37°N 附近对流层 300~500hPa 之间,中心值为 0.75 m·s⁻¹,高能舌较前一时刻伸展高度增强。因此,上升气流携带低层高湿能的空气输向对流层。飊线前部,部分上升气流在 450~500hPa 之间向南辐散,在 32°N 附近倾斜下沉,构成一垂直环流圈。分析 12 日 08

时, (36°N 、 117°E) 格点的纬向风垂直变化 (图 3b) 发现, 200hPa (约 12km) 处有 $44.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强西风, 这样强的纬向风垂直切变有利于动量下传和扰动发展, 飑线后部的垂直环流也反映了这一点, 从图 3a 可以发现自 250hPa 到地面为一致的倾斜下沉气流, 将高层动量传到对流层低层, 并且在上升运动中心下部, 距离地面上升区北部约 100km 处, 自 900hPa 至地面形成 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下沉运动中心区, 下沉气流在 $40^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$ 之间激发出新的弱上升气流, 和下沉运动形成一弱的闭合环流圈。

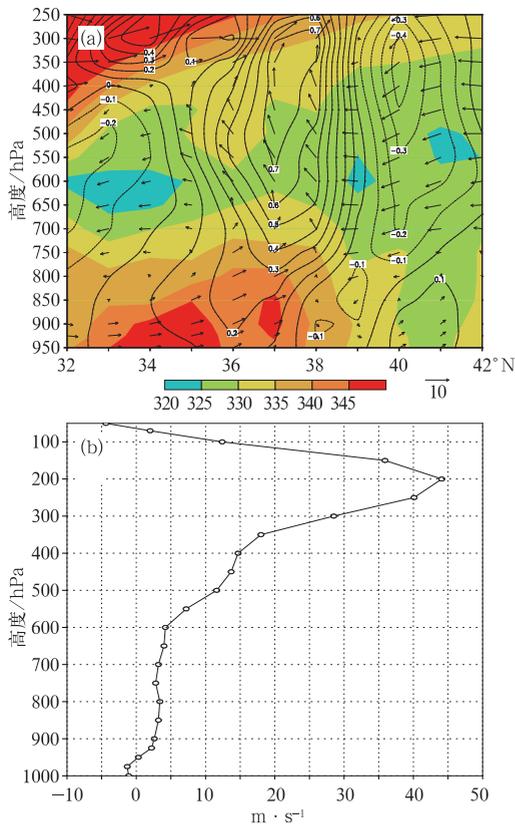


图 3 2005 年 7 月 12 日 14 时 $\omega(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$, $v-w$ 与 θ_e 沿 118°E 的垂直剖面图 (a) (ω : 等值线; θ_e : 阴影区); (36°N 、 117°E) 点纬向风的垂直变化 (b)

根据地面报告显示, 辛庄镇 (莱芜东 14km 左右) 在 13 时 30 分和 14 时 16 分之间

出现了冰雹和雷雨大风等灾害性天气, 极大风速 $22.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。它的形成可以解释为在飑线后部的降水区中, 由于湿绝热下沉运动的发展、质点的蒸发冷却和融化, 边界层出现剧烈降温 (图 2a), 从而产生了一个相对冷的空气堆, 冷堆中的空气在垂直方向气压梯度及风暴中下沉气流的驱动下冲向地面, 向南的冷流出快速嵌入暖入流的下部, 导致两者之间的密度锋区抬升并加速了入流, 触发和加强上升气流。这样具有较高动量的空气下沉至地面向外辐散, 及冷暖流之间密度锋区的抬升, 使得上升气流及飑线后部地面辐散区中的风场大大加强, 从而导致地面强风和冰雹的形成。

4 飑线的传播特征

4.1 雷达资料分析

利用济南齐河多普勒雷达 (经纬度为 36.81°N 、 116.78°E , 海拔高度 72.9m, 探测范围 230km) 探测资料, 分析中尺度系统发生演变的活动规律。从组合反射率 (CR) 因子演变可知, 12 日 08—09 时, 对流云团不断地从河北南部移入山东, 在移动过程中伴有对流云团的生消。10 时 13 分, 在雷达站西偏北 80km 处有新的短对流云带 A 产生, 150km 处有一片对流回波 B。到 11 时 02 分, 回波 A 发展加强并基本呈东西向, 回波 B 生消发展得很快, 演变成一强对流风暴。11 时 32 分, 回波 B 的南面有新生回波生成。12 时 02 分, A、B 两回波连在一起 (图 4a, 见彩页), 回波 B 减弱, 回波 A 继续加强并且其西端出现弯曲的强中心, 回波中心强度达 68dBz, 弓状回波开始发展。同时, 在回波 A 和回波 B 南面新生回波的后部形成明显的出流边界, 出流边界的后侧不断有对流回波产生。12 时 32 分 (图 4b, 见彩页), B 回波继续减弱, 新生的对流单体和 A 回波形成一半

圆弧形的不连续强回波带。13 时 21 分(图 4c, 见彩页), 弧形回波带连成一片, 其南部即东西向的回波移动缓慢, 回波带的北部迅速转为南北向, 后侧出现入流槽口, 成为典型的弓状回波, 最大回波强度达 70dBz。13 时 57 分, 弓状回波北部逐渐减弱, 回波强度降低, 中心强度达 63dBz。14 时 03 分至 14 时 21 分, 弓状回波演变成逗点云系。此后, 逗点云系的头部回波强度逐渐减弱, 整个回波带呈东北—西南向(图 4d, 见彩页), 并向山东东南方向移动。

4.2 飊线的传播

飊线发展过程中, 地面流场上始终有一条明显的 β 中尺度的地面辐合线随之东南向移动, 是飊线在边界层的表现。11 时(图略)东北—西南向弱辐合线(A)位于聊城到河北与河南交界处, 12 时(图略)演变成近似东西向, 长度约 150km, 与雷达站西侧东西向强回波带相对应, 此时在淄川—临淄—莱州湾沿岸生成另一条地面辐合线(B), 对应着雷达站东侧南北向的回波带, 地面上有雷阵雨天气出现。13 时(图 5a) A 辐合线东西向继续加强东延到肥城南部, 东西长度约 220km, B 辐合线在青州、寿光附近断开, 北段(C)主要在莱州湾附近, 南端(D)位于淄川南部到莱芜, 呈东北西南向。A、D 辐合线之间(莱芜—泰安)有一气旋性弯曲。从散度场来看, 地面辐合中心略超前于地面辐合线, 说明系统未来继续加强, 辐合中心位于菏泽北部, 强度为 $-8.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。14 时(图 5b) A、D 辐合线合并成一弧形的辐合线(邹平—新泰—东平), 地面气流在莱芜、沂源、新泰之间(13 时气旋性弯曲东侧)汇合。研究散度场发现, 地面辐合中心位于东平东部, 强度为 $-2.19 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 较前一时刻增强了 1 个量级, 并略滞后地面辐合带。值得注意的是 13 和 14 时的辐合中心和地面强天气区并不重

合, 辐合中心位于飊线的尾部。此后, 降水拖曳和雷暴小高压形成的流出边界推动弧形辐合线继续东移, 15 时(图略)地面辐合线断裂, 一段位于蒙阴的东侧(E), 一段位于平邑—邹县—济宁一带(F), 辐合强度较前一时刻减弱, 中心值为 $-1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。16 时(图略)F 辐合线南移过程中西段减弱消失, 东段和 E 合并, 造成莒南、临沂、苍山一带的雷雨大风。之后, 辐合线继续减弱向东南方向移动, 造成鲁东南和鲁南南部的一般性雷雨天气。

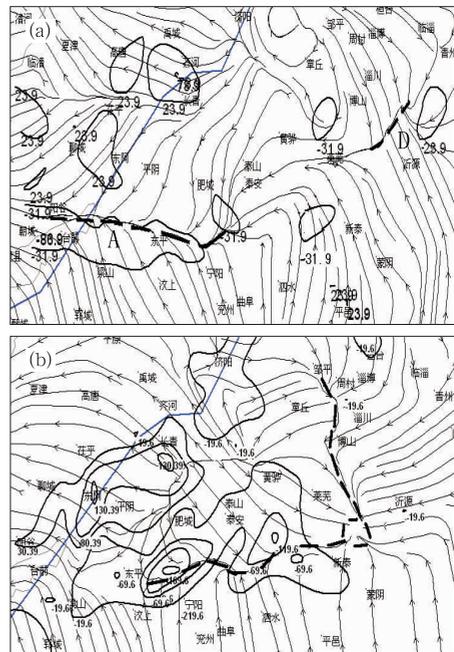


图 5 2005 年 7 月 12 日 13 时(a)和 14 时 (b)地面流场和散度场(10^{-6} s^{-1})分布图 (粗实线: 散度; 粗虚线: 地面辐合线)

地面流场变化表明, 当飊线发展并向前传播时, 旧辐合线的移动、分裂或合并, 触发新辐合线的生成, 而且分析地面散度场发现, 飊线传播过程中散度场呈现一系列正负相间的结构特征, 从而表现出一定的波动特征^[12], 这种波动特征在飊线经过站点及其附

近站点地面 1 小时变压扰动场(图略)上表现最为明显,与文献[13]中提到的爬线传播过程中伴随有重力惯性波发展相似。

4.3 地面中尺度特征

分析地面气压场发现,12 日 11 时以前,聊城附近开始有倒槽发展,禹城北侧和泰安附近有雷暴小高压生成,中心强度为 1007.5 hPa。12 时,倒槽南移并发展加强,在泰安附近雷暴小高压阻挡下,倒槽分叉成两部分,其主体从菏泽延伸到济南的长清;另一部分位于济宁到博山一带,禹城附近雷暴小高压南移到高唐南部,中心强度为 1006.5 hPa,其后部尾随着一强度为 1005 hPa 的中尺度低压。13 时(图 6a),地面倒槽合并加强,从鲁西南到莱芜为狭长低压带,低压带在泰安东南部有气旋性凹陷,其顶端位于博山、章丘附近,中心位于梁山和汶上之间,强度为 1003.5 hPa。泰安和高唐的雷暴高压合并,中心东移到济南长清的东部,强度为 1007.7 hPa,其后部紧随着强度为 1004.5 hPa 的中尺度低压,雷暴高压和前后低压间的气压差达 3.2~4.2 hPa,较前一时刻增强。14 时雷暴高压南移过程中由近似圆形变为东西向椭圆形(图 6b),中心位于肥城附近,中心值为 1007.9 hPa,强度较上一时刻加强 0.2 hPa,莱芜附近为东伸高压坝(13 时低压带气旋性凹陷附近),高压坝顶端对着沂源方向,高、低压间的气压差达 2.7~4.4 hPa,低压带在高压坝作用下断开。15 时高压前的低压带减弱,低压中心强度为 1004 hPa,高压中心位于新泰附近,数值为 1007.5 hPa,高低压之间的水平气压梯度较前一时刻减弱。16 时,低压带减弱为地面倒槽,位于临沂东南部,雷暴高压南移过程中分裂形成两个中心。

分析地面 1 小时时间间隔的自动站观测雨量发现,11 时,地面降水主要分布在鲁西地区,以雷雨或阵雨为主,量级一般低于 5 mm,且

降水区分布在地面气压的高值区。12 时雨强增强,中心强度达 $22 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,落后于高压中心约 37 km 左右。13 时地面降水范围扩大,降水中心移到长清附近,为 $17 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,滞后地面中尺度高压中心约 56 km。14 时降水范围继续扩大且强度达到最强,中心位于泰安附近,强度达 $40.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,此时降水中心略超前于气压中心,且位于中尺度高压的东部靠近高压坝的方向。根据地面降水和地面气压场的配置情况来看,爬线的前冲冷流与强降水是有一定间隔的,再次验证了第一部分的分析结果。15 时,降水范围继续东移,中心位于沂源附近,雨强为 $22 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。16 时,降水强度减弱,为一般性的雷阵雨,降水区分布在地面气压的高值区。

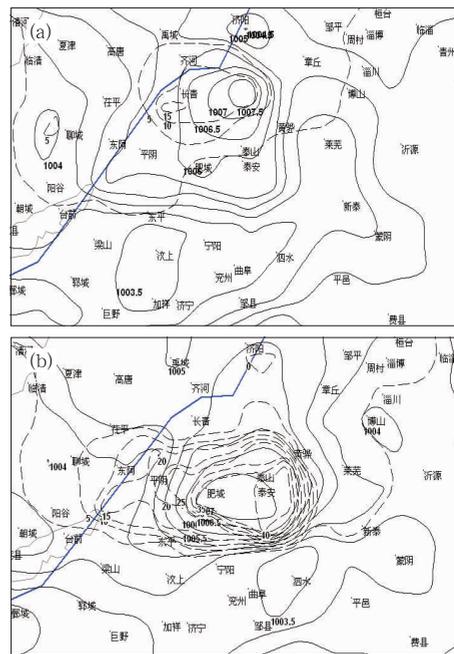


图 6 2005 年 7 月 12 日海平面气压场(实线)和地面雨量场(虚线)
(a) 13 时; (b) 14 时

5 结论

(1) 本次爬线过程是在横槽旋转南下的

天气背景下发生的。高低层的变温及温度的差动效应有利于强对流天气的产生。

(2) 飊线的垂直运动表明,飊线前部对着一支强盛的上升气流,飊线后部是下沉气流,下沉气流将高层高动量的空气携带到低层,下沉至地面向外辐散,使得飊线后部地面辐散区中的风场大大加强。

(3) 飊线发展并向前传播时,旧辐合线的移动、分裂或合并,触发新辐合线的生成。地面辐合带的走向和摆动与回波带位置基本一致,在辐合带合并,辐合强度不断增强和范围不断扩大之后,天气也就愈激烈。飊线传播过程中散度场和1小时变压场呈现重力波性质的波动特征。

(4) 飊线发展时期,地面辐合中心超前于地面辐合线,相反,地面辐合中心落后于地面辐合线,地面辐合线前部常伴有扰动气压小于 -1hPa 的中低压。强天气处在扰动辐合中心后部,而辐合中心则位于扰动低压带后,中高压主要出现在辐散中心前,有时还可以看到中高压后部的尾随低压。中尺度高、低压的发生发展与散度场和天气密切相关,有时由高、低压也能较好地反映出强天气的先兆。

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,2001:420-426.
- [2] 罗建英,廖胜石,梁岱云,等. 2005年3月22日华南飊线的综合分析[J]. 气象,2006,32(10):70-75.
- [3] 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.
- [4] 谢梦莉,黄京平,俞炳. 一次罕见的飊线天气过程分析[J]. 气象,2002,28(7):51-54.
- [5] 洪毅,李玉柱,陈智源,等. 2006年6月10日浙江飊线FY-2C卫星云图特征[J]. 气象,2007,33(9):47-51.
- [6] 李江波,闫巨盛,马凤莲. 河北平原一次春季强对流天气分析[J]. 气象,2007,33(9):74-82.
- [7] 丁一汇,李鸿洲,章名立,等. 我国飊线发生条件的研究[J]. 大气科学,1982,16(1):18-27.
- [8] 赵思雄,周晓平,张可苏,等. 中尺度低压系统形成和维持的数值实验[J]. 大气科学,1982,16(2):109-117.
- [9] 林新彬,刘哀鸣,冯晋勤. 福建省中南部一次强飊线过程分析[J]. 气象科技,2006,34(5):574-577.
- [10] 谢健标,林良勋,颜文胜,等. 广东2005年“3.22”强飊线天气过程分析[J]. 应用气象学报,2007,18(3):321-329.
- [11] 漆梁波,陈永林. 一次长江三角洲飊线的综合分析[J]. 应用气象学报,2004,15(2):162-173.
- [12] 陆汉城,吕梅,何齐强. 一次冷锋后飊线的大振幅重力波特性分析[J]. 应用气象学报,1992,3(2):136-144.
- [13] 吴洪,林锦瑞. 垂直切变和地形影响下惯性重力波的发展[J]. 气象学报,1997,55(4):499-505.
- [1] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气

盛日锋等:山东一次飊线过程的中尺度分析

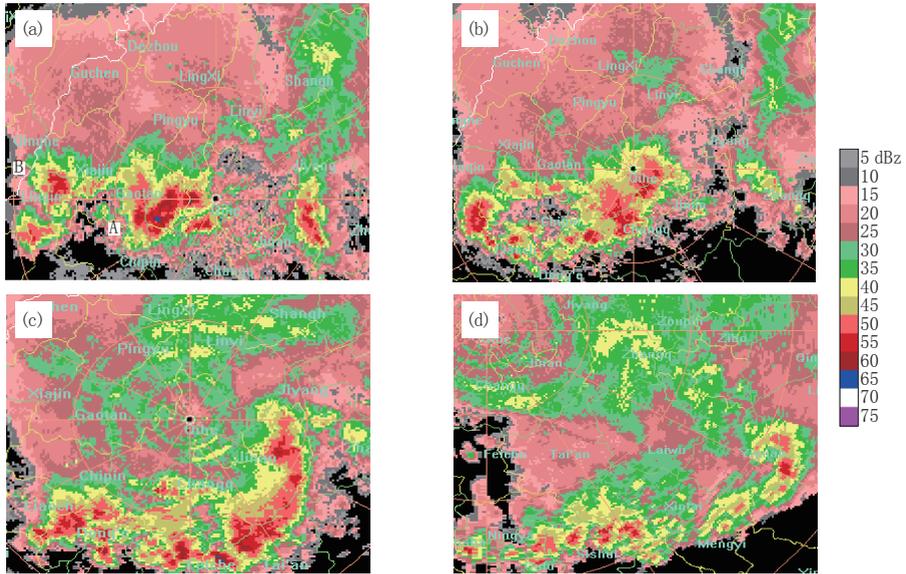


图 4 2005年7月12日飊线天气过程演变的组合反射率图
(a) 12时02分; (b) 12时32分; (c) 13时21分; (d) 15时04分