

山东省 2006 年 4 月 28 日飏线天气过程分析

杨晓霞¹ 李春虎² 杨成芳³ 邰庆国⁴ 陈优宽³ 周雪松³

(1. 山东省气象科学研究所, 济南 250031; 2. 山东省气象局;
3. 山东省气象台; 4. 山东省临沂市气象局)

提 要: 对 2006 年 4 月 28 日山东省一次飏线天气过程进行诊断分析, 应用湿位涡守恒理论研究了飏线的发展机制。结果表明: 飏线是由 500hPa 西风槽影响产生的, 为低层增温增湿, 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, 产生中尺度对流云团, 在热力不稳定和风垂直切变的环境下对流云团东移发展, 形成飏线。低层大气湿斜压性增强, 破坏了地转平衡, 倾斜涡度发展, 上升运动增强, 对流发展; 高空高位势涡度下传使得中低层位势涡度增大, 导致其垂直涡度增大, 有利于对流层低层中尺度涡旋发展, 对流增强。较强的上升运动与风垂直切变相互作用, 促使对流系统发展形成飏线, 产生雷雨大风。

关键词: 热力不稳定 辐合上升 风垂直切变 倾斜涡度发展 飏线 雷雨大风

Analysis of a Squall Line Event on 28 April 2006 in Shandong Province

Yang Xiaoxia¹ Li Chunhu² Yang Chengfang³ Tai Qingguo⁴
Chen Youkuan³ Zhou Xuesong³

(1. Shandong Meteorological Institute, Jinan 250031; 2. Shandong Meteorological Bureau;
3. Shandong Meteorological Observatory; 4. Linyi Meteorological Office, Shandong Province)

Abstract: A squall line event on 28 April 2006 in Shandong Province was diagnosed. The developing mechanism of the squall line was studied with the moist potential vorticity conservation theory. The results show that the squall line was caused by 500hPa trough. The low-level temperature and humidity increasing, the cold air behind upper trough moving toward east and south and the low energy tongue located above high energy tongue caused atmospheric convective instability.

资助项目: 山东省气象局科研项目“引发山洪和地质灾害的气象预报预警方法研究”、“山东中尺度对流系统的时空分布特征”和“雷电灾害短时和临近预报预警术研究”资助

收稿日期: 2006 年 9 月 26 日; 修定稿日期: 2006 年 12 月 5 日

The air convergence and rising motion produced by shear line at 850hPa and the low pressure trough on the ground triggered convective instable energy release so as to produce convective cloud cell which moved east and developed under the environment conditions of atmospheric thermal instability and strong vertical wind shear, thus forming a squall line. The low-level atmospheric moist baroclinity increasing destroyed geostrophic wind balance and resulted in slant vorticity developing, rising motion increased and convection came into being. High-level high potential vorticity transporting downwards caused the low-level potential vorticity to increase, and to bring about vertical vorticity to increase. All the above factors are propitious to low-level mesoscale vorticity to develop so that convection increased. The interaction between strong rising movement and strong vertical wind shear accelerated convection to develop and form squall line, and cause thunderstorms and gales.

Key Words: thermal instability convergence rising motion vertical wind shear slant vorticity squall line thunderstorm

引 言

飊线是造成强对流天气的一种主要中尺度天气系统,常伴有沙尘暴、冰雹、雷雨大风和强降水等剧烈天气。近年来随着卫星云图和多普勒雷达产品的应用,对飊线结构及强对流天气的识别和发展演变分析研究越来越多^[1-7],提高了对中尺度强对流天气特征的认识,但对造成强对流天气的飊线系统的形成机制研究还不够深入。山东省春季是强对流天气的多发季节,以前对冰雹天气研究的较多^[8-11],研究了冰雹天气的气候特征、环流形势及影响系统,通过大量的诊断分析,建立了客观预报方法和冰雹预报逐级指导业务系统,但对造成冰雹和雷雨大风天气的中尺度飊线系统的研究较少。近年来,雷雨大风天气带来的灾害越来越多,也越来越重。2006年4月28日14—20时,飊线系统影响山东省的聊城、济南、泰安、济宁、枣庄、临沂六市,造成8~9级的雷雨大风,济南和临沂两市的局部地区风力达10级($28\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),局部地区出现冰雹。为了对飊线的发生、发展和演变过程有较深入的认识,进一步研究飊线的形成机制,本文对飊线的卫星云图和雷达回波特征进

行了分析,应用T213数值预报产品,对飊线的生成环境进行了诊断分析,应用湿位涡守恒理论^[12]研究了飊线的形成机制。

1 卫星云图和雷达回波特征

1.1 卫星云图特征

从FY-2C的红外云图中(图略)可以看出,2006年4月28日10时(北京时)在 37.5°N 、 114.0°E 附近,也就是河北的赞皇与山西的昔阳之间生成中尺度对流云团,迅速发展东移,12时东移到河北南部,边缘整齐近于圆形,云顶TBB在 -33°C 以下,13时30分左右影响山东西部,云顶TBB下降到 -43°C 以下。受影响的地区风向突变,由南风转为西北风,风力猛增至7~8级,阵风9~10级,同时出现雷雨,局部地区出现冰雹。云团继续发展,向东南方向移动,14时云顶TBB降至 -51°C 。同时在东北部莱州湾的沿海地区也有对流云发展。15时两个云团发展,范围迅速扩大,在鲁中的北部相衔接,云顶TBB在 -53°C 以下的两个强中心分别位于济南南部和潍坊北部地区。17时南部强中心向东南移到临沂的西北部地区,北部

的强中心移到半岛的西部。17—19 时两个强中心的 TBB 都发展到 -57°C 。南部中心移动较快,在 20 时移出山东到达苏北。南部强中心沿途造成了破坏性的雷雨大风。

1.2 雷达回波的演变特征

在济南和临沂雷达站的雷达回波中,出现了典型的弓状回波,在弓状回波的中部风速最大,阵风风速达到 $28\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,弓状回波的平均移动速度在 $50\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右。在济南雷达站综合反射率(CR)(图 1a,见彩页)中,28 日 11:58 时在河北境内出现对流性回波,迅速东移,14 时左右强回波移到鲁西的聊城地区,最大回波强度 49dBz ,15:00 回波在济南的南部发展成弓状回波,最大回波强度加强到 56dBz ,弓状回波继续发展且向东南方向移动,16:03 开始弓状回波南部加强,北部减弱。从仰角为 0.5° (图 1b,见彩页)和 1.5° 的径向速度中可以看出,在弓状回波内出现多个中尺度气旋性环流和辐合区,风暴的平均移动速度达到 $46.8\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。17:00 在临沂雷达站观测到,弓状回波中的回波强度超过 50dBz ,移速明显加快,达到 $50\sim 60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,回波带南部回波单体强度超过 55dBz ,高度达 12km ,18:00 飑线经过临沂雷达站(图 1c,见彩页)。在仰角为 0.5° 的径向速度图中,17:32 弓状回波后部的强入流区的最大负径向速度大于 $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,17:59 弓状回波经过临沂雷达站时(图 1d),回波后部

(即雷达站的西北部),负径向速度区内出现速度模糊,最大负径向速度大于 $33\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,风暴发展异常强盛。19:00 弓状回波移到雷达站的东南部,强度仍未减弱。在弓状回波经过的地区,出现雷雨大风和小冰雹。

2 环流特征和影响系统

从 27 日 08 时开始,青藏高原上空的暖高压加强,高层 500hPa 以上高压前部的冷空气沿西北气流从河套地区南下,西北气流大于 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随着冷空气的东移,等高线的气旋性弯曲愈来愈大,28 日 08 时 $500\sim 700\text{hPa}$ 在黄河下游形成低槽,与冷槽同位相(图 2a)。在 850hPa 以下为大于 12°C 的暖中心(图 2b), 925hPa 上暖中心为 19°C 。高层冷槽叠加在低层暖中心之上,上冷下暖造成大气层结不稳定。在 $925\sim 850\text{hPa}$,河套东部在 38°N 附近生成西北风与西南风的切变线,切变线辐合区正好与大气层结不稳定区相重合。低层的切变线辐合有利于产生上升运动,触发不稳定能量释放,产生对流。地面上在切变线的下部为低压槽区,低压槽区的辐合上升与低层切变线附近的辐合上升相叠加,增强了触发对流的动力。辐合上升运动触发对流不稳定能量释放,产生中尺度对流云团,对流云团在高空西北气流引导下东移发展,在高空槽的辐合区发展成弓状回波,产生破坏性雷雨大风。

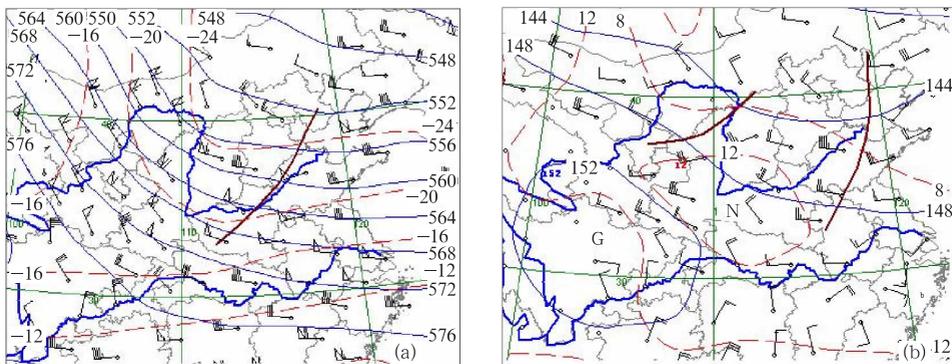


图 2 2006 年 4 月 28 日 08 时 500hPa (a)和 850hPa (b)形势场
(实线:等高线,虚线:等温线,粗实线:槽线)

3 形成机制分析

3.1 探空站上空温、湿、风的垂直分布

分析强对流活动区探空站上空的温、湿、风的特征,28日08时在对流云团的发源地附近,太原的沙氏指数为 -1.0°C ,大气层结不稳定,邢台的沙氏指数为 0.2°C ,近于中性层结。在对流云团的发展区济南上空沙氏指数为 2.6°C ,大气层结稳定。但是3站上空850与500hPa的温差都在 30°C 以上,邢台达到了 37°C ,大气上冷下暖的结构非常明显,在济南上空700~400hPa温度露点差在 $2.4\sim 4.3^{\circ}\text{C}$,说明大气中高层较湿,有利于对流发展。3个探空站在近地面层都有逆温层,邢台上空的逆温层最强,988~954hPa温度从 17°C 上升到 21°C 。说明近地面层有较高的能量储存。3站上空都有较强的风垂直切变,风速随高度迅速增大,850hPa以下,风速都小于 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,500hPa风速增大到 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,在250hPa风速最大,为 $40\sim 50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在近地面层都为西南风,低层风向随高度都是顺时针旋转,中高层都是逆时针旋转。太原和邢台700hPa都顺转为 300° 的西北风,700~400hPa风向随高度逆时针旋转。济南站在850hPa以下由西南风顺转为偏西风,850~500hPa由偏西风逆转为西南风。说明在低层都有暖平流,在中高层都有冷平流,冷平流叠置在暖平流之上,大气向不稳定层结发展。在以后几小时内,由于白天地面迅速加热和暖平流的作用,使得低层大气迅速增暖,向有利于对流的不稳定层结发展。根据观测和数值研究^[13],在一定的热力不稳定条件下,较强的风垂直切变有利于相对风暴的发展。三个探空站的温湿特征和较强的风垂直切变都十分有利于对流风暴的产生。

3.2 大气能量的分布特征

θ_{se} 反映大气中的温湿状况,应用 θ_{se} 的水

平和垂直分布来分析大气中的能量分布和垂直稳定度特征。27日20时至28日14时1000~850hPa在山东西部为一狭长的从南向北伸的 $\theta_{se}>308\text{K}$ 的高能舌区(图3a),中心值在316~324K,在舌区东部为偏南风,有利于高能舌继续加强北伸,高能舌的西北部为西北气流,说明有冷空气南下。 θ_{se} 高值舌的南北向轴线随高度向东倾斜, θ_{se} 随高度减小。500hPa以上为从北向南伸的 θ_{se} 低值舌(图3b),低值舌随高度加强,舌区为西北气流,低值舌将进一步加强南伸。高层西北风输送的干冷平流与低层南风输送的暖湿平流在山东西部叠加,大气层结不稳定加剧。沿 36°N 和 117°E 作 θ_{se} 的垂直剖面可见,在对流发生前和对流发生期间,700hPa附近为 θ_{se} 的低值区,850~700hPa对流不稳定最强(图3b),28日14时山东西部700hPa与850hPa的 θ_{se} 之差达到 -10°C (图3c,d)。飊线产生在 θ_{se} 的高空低值舌与低层高值舌相叠加、大气强烈对流不稳定的区域。

3.3 动力机制分析

3.3.1 低层辐合上升运动触发对流不稳定能量释放,较强的风垂直切变加强了对流的发展

分析散度、涡度和垂直速度场的发展演变可见,28日08时,在山东西部850hPa切变线附近($36\sim 38^{\circ}\text{N}$ 、 $113\sim 115^{\circ}\text{E}$)生成 $-10\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的辐合中心,位于正涡度中心的前部正涡度平流区,在此有上升运动发展,触发对流不稳定能量释放,产生强对流。28日10时在此区生成对流云团,在高空西北气流引导下东移。14时在500hPa以下发展成强盛的辐合、正涡度平流、上升运动相配合的中心,移到山东西部,与低层的 θ_{se} 的高值舌相重合,十分有利于强对流的发展。在500hPa以上的高层为高空槽前的辐散区,300hPa附近的强辐散对低层产生抽吸作用,加强了低

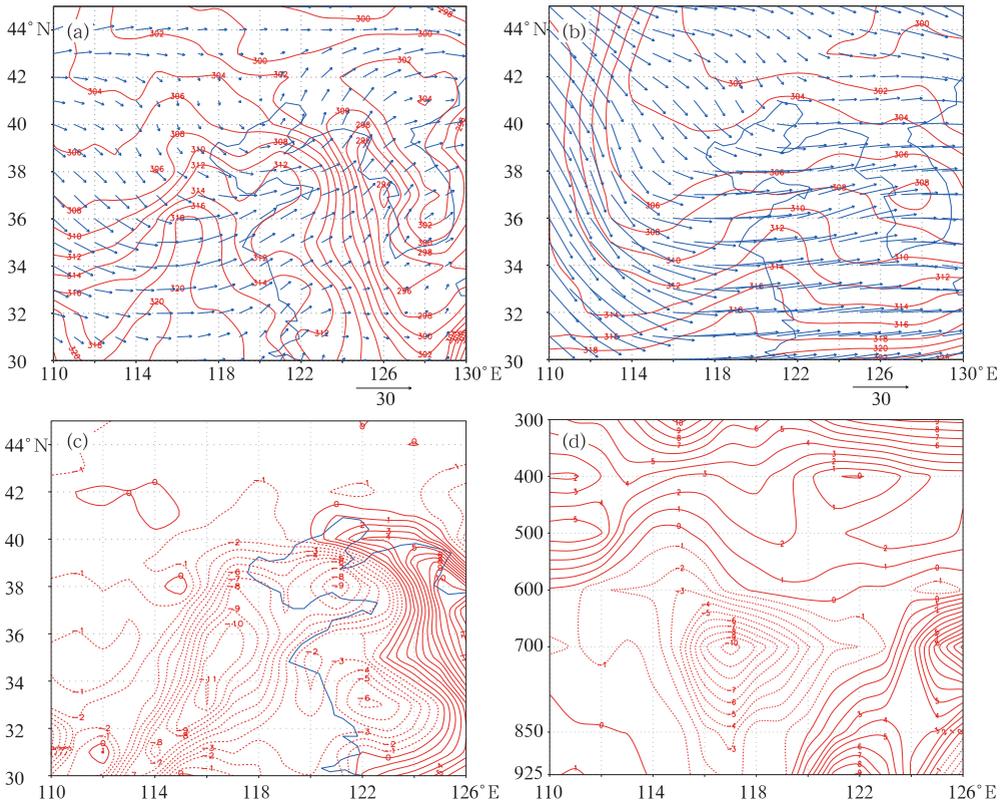


图 3 2006 年 4 月 28 日 14 时物理量场分布

a. 850hPa 风场和 θ_{se} 的分布, b. 500hPa 风场和 θ_{se} 的分布 c. 700hPa 与 850hPa θ_{se} 之差, d. 沿 36°N 上下层 θ_{se} 之差的垂直分布

层的辐合上升。从 28 日 14 时对流区的垂直剖面图(图 4a)中可以看出,环境场的风随高度增大,有较强的风垂直切变,对流区上空的斜升运动强烈发展。上升气流和垂直风切变相互作用,使得水平涡管向垂直方向倾斜,垂直涡度增大,有利于形成有组织的对流风暴。较强的风垂直切变能够使上升气流倾斜,使上升气流中形成的降水质点向前脱离上升气流,而不会因拖带作用减弱上升气流的浮力;增强中层干冷空气的侵入,加强风暴中的下沉气流和低层冷空气外流,再通过强迫抬升使得入流的暖湿气流更强烈地上升,从而加强对流^[13]。28 日 14 时,对流云团东移到山东西部的低层辐合高层辐散的上升运动区和对流不稳定区时,范围迅速扩大、强度增强,发展成东北—西南向的中尺度对流系统,生成两个强中心,南部中心发展成飑线系统。

地面飑线中大风区的移动路径与低层 850hPa 辐合中心、500hPa 正涡度中心、上升运动中心的移动路径非常一致。由此可见,低层辐合上升触发对流发展,高层正涡度平流辐散加强了低层的辐合上升,风垂直切变和上升运动相互作用,使得对流进一步加强,形成有组织的飑线系统,产生弓状回波。在飑线后期(图 4b),高层出现一股较强的中尺度的倾斜下沉气流,直达地面,使得飑线附近的地面风力加大,造成破坏性的雷雨大风。

3.3.2 倾斜涡度发展导致对流增强

分析低层湿位涡(MPV)的变化可见,强对流发生前 27 日 08 时至 28 日 08 时,在 500hPa 以下的低层,山东西部至河北境内,MPV1 的负值和 MPV2 的正值猛烈增大,850hPa 增强的最明显,28 日 08 时在山东西部形成较强的 MPV1 的负值中心和 MPV2

的正值中心(图 5a, b, c)。说明大气中的对

流不稳定加剧。由于 850hPa 附近的偏南风

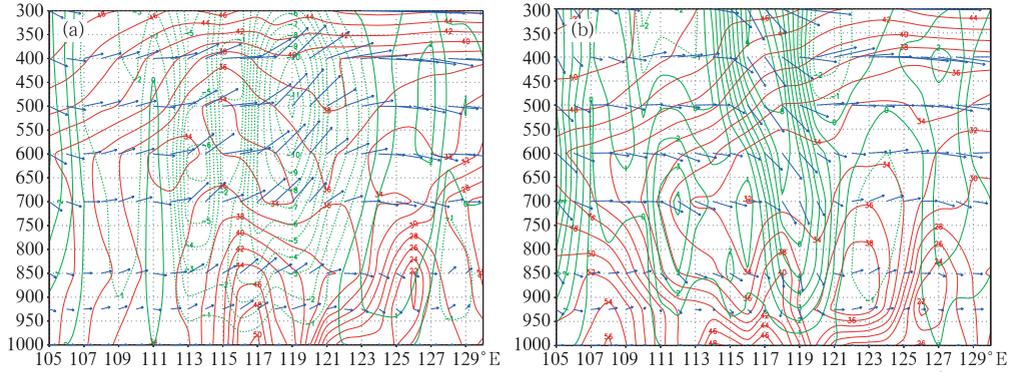


图 4 2006 年 4 月 28 日 14 时(a)和 20 时(b)沿 36°N 的垂直剖面图
虚线为垂直速度(单位:10³hPa · s⁻¹),实线为 θ_{se}(单位:K),箭头为(u, -2ω)

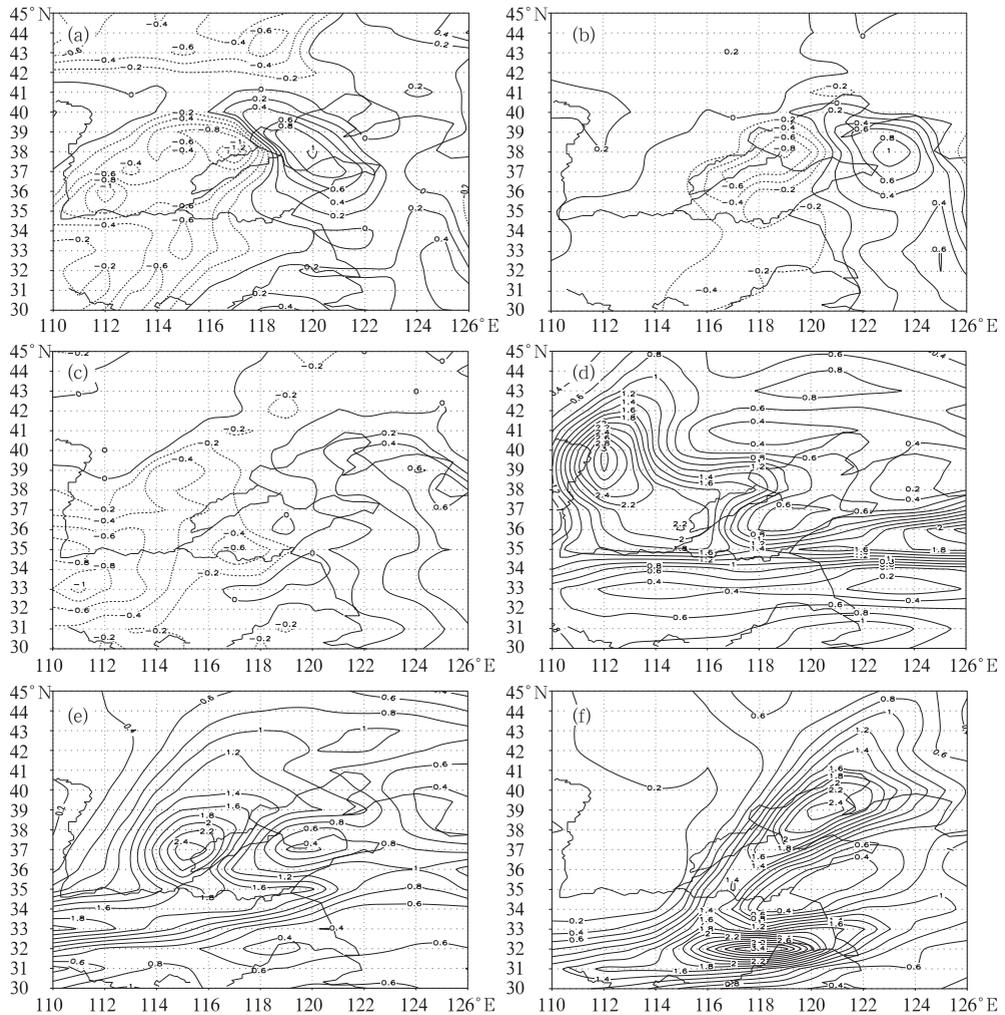


图 5 2006 年 4 月 28 日 MPV1
a. 08 时 850hPa, b. 14 时 850hPa, c. 20 时 850hPa, d. 08 时 300hPa, e. 14 时 300hPa, f. 20 时 300hPa

增大,使得 850hPa 以下的水平风的垂直切变增大和大气湿斜压性增强,从而破坏了地转平衡,根据湿位涡守恒理论^[13],有利于垂直涡度发展,上升运动增强,对流发展。28 日 10 时,在低层 $MPV1 < 0$ 和 $MPV2 > 0$ 的中心附近对流云团发展。28 日 14 时 $MPV1 < 0$ 的中心东移到黄河下游地区,飏线在 $MPV1$ 的负值中心的东部强烈发展,28 日 20 时山东上空 $MPV1$ 的负值明显减小,说明对流不稳定能量已释放。

高空 500hPa 以上湿位涡(MPV)的变化与低层明显不同,对流发展前,山东上空 300hPa 为 $MPV1$ 的正值区和 $MPV2$ 的负值区。28 日 08 时在 $39 \sim 40^\circ\text{N}$ 、 112°E 附近形成 $MPV1$ 的正值中心,中心值达 3.0PVU,高值舌东伸到山东西部,说明在高空具有高位势涡度的干冷空气东移南下。28 日 14 时 $MPV1$ 的正值中心到达 37°N 、 115°E ,28 日 20 时发展成为东北—西南向的带状区,横穿山东中部(图 5d,e,f),与 300hPa 槽区相对应,飏线在 $MPV1$ 高值区的前部边缘发展。说明在高层 300hPa 附近携带高湿位涡值的冷空气东移南下,高位势涡度扰动发展和下传。根据倾斜涡度发展理论^[13],当具有高湿位涡的冷空气沿等熵面下滑时,将要经过稳定性逐渐减弱的环境大气,导致其绝对涡度增大,有利于在对流层低层中尺度涡旋发展。由此可以推断,高层高湿位涡的发展使对流系统增强,有利于飏线的形成。

4 总 结

(1) 飏线产生在低层对流性不稳定大气中,低层暖湿,高层干冷,低层增温、增湿,冷空气从高层东移南下,是这次强对流发展的主要原因。

(2) 低层切变线和地面低压槽区的辐合上升运动触发对流不稳定能量释放,产生中尺度强对流云团,在高层西北气流引导下东移南下,在山东上空 500hPa 低槽区强烈发展。

(3) 飏线发生前,低层大气增温、增湿,大气对流性不稳定和湿斜压性增强,地转平衡被破坏,倾斜涡度发展,上升运动增强,触发对流不稳定能量释放产生强对流。高层强冷空气东移南下,一方面造成大气层结不稳定,另一方面使得高位势涡度下传,促使低层的位势涡度增大,垂直涡度增强,有利于中尺度涡旋发展,对流系统增强。

(4) 环境风较强的风垂直切变与上升运动相互作用,促使对流系统增强,发展成飏线。

(5) 飏线系统在高空西北气流引导下快速移动,在对流成熟阶段,高空的干冷空气下冲到地面,两方面因素相结合,地面风力加大,造成破坏性雷雨大风。

参考文献

- [1] 韩经纬,孟雪峰,宋桂英.一次伴随强沙尘暴天气飏线的多普勒雷达回波特征[J].气象,2006,32(10):57-63.
- [2] 王莉萍,崔晓东,常英,等.一次飏线天气的非正规气象资料特征分析[J].气象,2006,32(10):88-93.
- [3] 伍志芳. CINRAD/SA 新一代天气雷达观测夏季热带飏线的特征分析[J].气象,2003,29(3):38-40.
- [4] 李云川,王福侠,裴宇杰,等.用 CINRAD-SA 雷达产品识别冰雹、大风和强降水[J].气象,2006,32(10):64-69.
- [5] 郭艳,应冬梅,刘冬梅.江西“4.12”降雹过程的多普勒雷达资料分析[J].气象,2005,31(11):47-51.
- [6] 朱君鉴,王令,黄秀韶,等. CINRAD/SA 中气旋产品与强对流天气[J].气象,2005,31(2):38-42.
- [7] 王令,康玉霞,焦热光,等.北京地区强对流雷达回波特征[J].气象,2004,30(7):31-35.
- [8] 杨晓霞,张爱华,贺业坤.连续冰雹天气的物理量场特征分析[J].气象,2000,26(4):50-54.
- [9] 杨晓霞,张爱华,贺业坤,等.山东省冰雹客观分县预报系统[J].气象,2002,28(10):41-44.
- [10] 杨晓霞,李玉华,李昌义,等.山东省天气预报逐级技术指导技术研究[J].气象,2003,29(11):3-7.
- [11] 杨晓霞,杨贵名,董旭光,等.测站降雹和区域降雹气候特征对比分析[J].气象,2005,31(5):55-58.
- [12] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁.湿位涡和倾斜涡度发展[J].气象学报,1995,53(4):387-404.
- [13] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.新一代天气雷达原理与应用讲义[R].中国气象局培训中心,2004. 101-185.

杨晓霞等：山东省2006年4月28日飊线天气过程分析

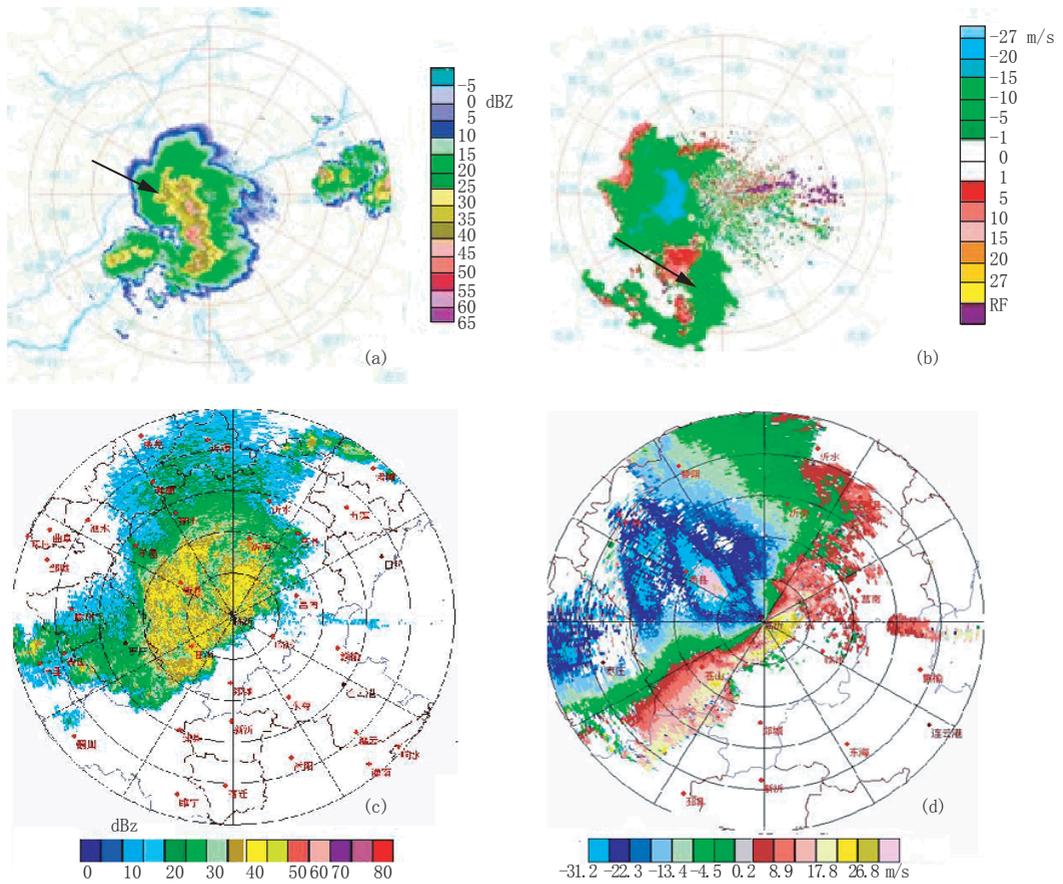


图1 2006年4月28日雷达回波演变

- a 济南雷达站15:01 综合反射率(CR37, 探测范围230km, 分辨率1.0km), b 济南雷达站14:55 径向速度(仰角 0.5°, 探测范围115km, 分辨率 0.5km), c 临沂雷达站17:59基本反射率(仰角 1.5°, 探测范围150km), d 临沂雷达站17:59径向速度(仰角 0.5°, 探测范围100km), 粗箭头为移动方向。