

4.13 “黑风”对流-对称不稳定分析

王伏村^{1,2} 付有智² 刘秀兰³

(1. 兰州大学大气科学学院 甘肃 兰州 730000, 2. 甘肃省张掖市气象局 甘肃 张掖, 734000, 3. 甘肃省临泽县气象局)

摘要: 2007年4月13日在河西走廊中西部发生了特强沙尘暴, 极大风速 25m/s, 最小能见度 50m。本文使用风云 2 号卫星红外云图对下沉急流云头进行跟踪, 并用 NCEP1X1 度 6 小时再分析数据对高速下沉急流到达冷锋云带前后的静力不稳定、条件不稳定、条件对称不稳定等进行了诊断分析, 结果表明: 这次强沙尘暴有高速下沉急流的引起, 急流云头触发了锋区附近强对流发生; 凝结潜热释放先在对流层中层发生, 然后向下发展, 使对流层中下部转为条件不稳定层, 在 700hpa 附近的条件不稳定能量释放使边界层对流环流迅速增强, 引发了这次特强沙尘暴。

关键词: 特强沙尘暴 下沉急流 条件对称不稳定 条件不稳定

引言:

强天气过程总是和大气不稳定能量释放有关。Schultz, D. M 等 (1999)^[1]对条件对称不稳定的关键问题 and 应用进行了回顾和总结。Dixon, R. S. 等 (2002)^[2]在气旋云头快速发展研究中, 把对流有效位能 (CAPE)、倾斜对流有效位能 (SCAPE) 和湿对称不稳定 (MSI) 进行了对比分析, 指出了湿对称不稳定 (MSI) 能量释放在气旋云头快速发展中的作用。Browning, K. A. (2004)^[3]在研究 1987 年 10 月横扫欧洲的一次强风暴气旋云头结构中发现: 云头钩状部分有多个倾斜对流环流组成, 其尖部有高速下沉急流—“尾端刺”(The sting at the end of the tail), “尾端刺”在地面产生强风, 并认为云头多级倾斜对流环流由条件对称不稳定引起。Clark, P. A. 等 (2005)^[4]使用数值模式对 SJ (the Sting Jet) 进行了进一步的诊断分析, 认为 SJ 是由蒸发冷却形成, 是云头倾斜对流环流的下沉支气流, 并绘制了 CJ (the Cold-conveyor-belt Jet)、WJ (the Warm-conveyor-belt Jet) 和 SJ 配置的概念模型图。程艳红等 (2006)^[5]在一次典型梅雨锋暴雨过程和敏感性实验中分析了对流对称不稳定的发展演变和环流特征, 认为条件对称不稳定是大气稳定状态和条件不稳定状态的中间纽带, 大气由稳定向不稳定或者由不稳定向稳定的演变均通过条件对称不稳定来实现。本文使用等熵面气流运动轨迹和每小时风云 2 号卫星红外云图说明了这次“黑风”过程中对流层中低层槽后有高速下沉急流的存在, 并用 NCEP1X1 度 6 小时数据对这次“黑风”过程中高速下沉急流到达冷锋云带前后的静力不稳定、条件不稳定、条件对称不稳定等演变进行了诊断分析。

1 天气实况概述

2007 年河西走廊未出现大规模区域性特强沙尘暴, 但小区域对流天气引发的特强沙尘暴也时有发生。4 月 13 日 14: 30 后发生在酒泉和张掖交接处的“黑风”是由锋后高速下沉急流触发对流不稳定能量释放引发, 酒泉、金塔、鼎新、高台各站风速超过 20m/s, 能见度在 200m 以下, 其中鼎新站极大风速 25m/s, 能见度 50m, 达到了“黑风”标准。

2 高速下沉急流的时空演变

2.1 高速下沉急流在云图上的时间演变

从图 1 风云 2 号红外云图上可以看出, 08 时 (图 1a) 高空槽前鋒面云系到达酒泉西部, 鋒后东经 90°E 西侧有急流条文状云生成。10 时 (图 1b) 高空槽前鋒面云系到达酒泉中西部, 鋒后急流条文状云明显发展, 急流条文理云带长度在 800km 以上, 并且东南移到敦煌西北侧。12 时 (图 1c) 高空槽前鋒面云系到达酒泉中部, 鋒后急流云带头部在敦煌、安西一线, 距鋒面云系 100-200km, 并且云头有对流云团产生, 轮廓清晰。13: 30 分 (图 1d) 鋒后急流

云带头部到达玉门附近,云头对流云团进一步发展,云团下部有雷暴大风和阵雨产生,并且与云头邻近的锋面对流云团也异常发展。15:00分(图1e)锋后急流云带头部到达酒泉、鼎新一线,云头对流云团和锋面对流云团相接并激烈发展,酒泉、金塔、鼎新地面风速超过20m/s,能见度在200m以下,特强沙尘暴形成。17:00分(图1f)锋后急流云头和锋面对流云团相接成一片,雷暴大风减弱到20m/s以下,并有阵雨产生,能见度好转。从以上急流云带演变过程可以看出,急流云带从生成到强盛阶段时间用了7小时,水平移动跨越10个经度,急流云头速度在44m/s,远快于锋面系统移速和对流层中低层环境风速。

2.2 高空急流在等熵面上的位势高度演变

从图2a-c等熵面上全风速矢量和高度演变图可以看出,08时40-42°N,95-100°E范围内等熵面上等高度线稀疏,等熵面坡度小,大于15m/s的风速矢量在4000gpm以上,急流高度较高,在对流层中低部;14时40-42°N,95-100°E范围内等熵面上等高度线加密,等熵面坡度陡立,大于15m/s的风速矢量在2000gpm以下,急流高度下降到边界层底层;20时40-42°N,95-100°E范围内等熵面上等高度线变稀,等熵面坡度减小,大于15m/s的风速矢量在4000gpm以上,急流高度回复到对流层中部。以上等熵面上风速矢量演变说明,沙尘暴发生前,急流高度是由对流层中部向边界层下沉的过程;沙尘暴减弱消失后,急流高度是由边界层底层向对流层中部抬升的过程。等熵面坡度是由缓到陡,再由陡变缓的过程。

3 大气不稳定时空演变

3.1 静力稳定度演变

一个气块受到扰动后产生垂直位移,若气块加速离开其初始位置,则称为静力不稳定。

静力不稳定可以用 $\frac{\partial \theta}{\partial p} > 0$ 判别。从40°N $\frac{\partial \theta}{\partial p}$ 的垂直剖面图(图2d, e, f)可以看出,08时整

层为静力稳定,且800hpa以下稳定度较大, $\frac{\partial \theta}{\partial p} < -4 \times 10^{-3} \text{K/hpa}$ 。14时在沙尘暴出现前,700hpa

以下稳定度减小,且在90°E-102°E出现小范围正值区域,对流层低层出现静力不稳定。20时在沙尘暴结束后,整层转为静力稳定。

3.2 对流有效位能演变

对流有效位能CAPE在热力学图解上是自由对流高度(LFC)到平衡高度(EL)间的层结曲线与状态曲线所围成的面积,与LFC到EL间正浮力产生的动能大小成正比。CAPE值越大,对流不稳定越强。定义如下式:

$$CAPE = g \int_{Z_{LFC}}^{Z_{EL}} \left(\frac{T_{vp} - T_{ve}}{T_{ve}} \right) dz$$

其中 T_v 是虚温, e, p 分别表示与环境和气块有关的物理量; Z_{LFC} —自由对流高度,是 $T_{vp}-T_{ve}$ 由负值转正值的高度; Z_{EL} —平衡高度,是 $T_{vp}-T_{ve}$ 由正值转负值的高度。

从13日CAPE的演变图(图3a, b, c)可以看出,08时整个河西走廊无CAPE值大于0的不稳定区域。14时在沙尘暴出现前,在河西走廊西部和北部出现两个CAPE中心值>80J/Kg的区域,大气层结出现对流不稳定。20时在沙尘暴结束后,CAPE正值区域在河西走廊中西部消失,只有在武威有CAPE中心值>40J/Kg的小范围区域,此范围没出现强沙尘暴。

3.3 惯性稳定度演变

水平面上处于地转平衡的基本气流受到横向扰动时,若扰动被加速,称为惯性不稳定。由其定义可得如下判别公式^{[1][2]}:

$$\zeta_{ug} = f + \frac{\partial v_g}{\partial x} - \frac{\partial u_g}{\partial y}$$

其中 ζ_{ag} 为绝对地转涡度, f 为科氏参数。 $\zeta_{ag} > 0$ 惯性稳定, $\zeta_{ag} < 0$ 惯性不稳定。

从 13 日惯性稳定度在 40°N 垂直剖面图 (图略) 可以看出, 08 时-20 时整层大气都是惯性稳定的, $\zeta_{ag} > 0$; 14 时河西走廊中西部 750hpa 以上 ζ_{ag} 值减小了约 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 惯性稳定性减小, 增加了气块倾斜上升水平位移方向加速的可能性; 20 时河西走廊中西部上空 ζ_{ag} 值增大了约 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 惯性稳定性增大。

3. 4 条件对称不稳定演变

当等温面的斜率大于等 \overline{M} 面的斜率时称为对称不稳定, 对于干空气为对称稳定, 对于湿饱和大气, 由于潜热释放, 使大气变为对称不稳定, 称为条件对称不稳定。条件对称不稳定可以用湿地转位涡 MPV_g 来判定^[2], 其表达式为:

$$MPV_g = -g(f + \zeta_g) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} - g \left(\frac{\partial u_g}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} - \frac{\partial v_g}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} \right)$$

$MPV_g < 0$ 为条件对称不稳定, $MPV_g > 0$ 为条件对称稳定。

从 40°N 的 MPV_g 垂直剖面图 (图 3d, e, f) 可以看出, 08 时在 95-99°E, 700hpa 以下为条件对称稳定层, 700hpa-400hpa 为条件对称不稳定层, MPV_g 负值中心为 $-0.12 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中心位置在 600hpa 附近; 14 时在沙尘暴出现前, 负值区域中心值减小到 $-0.21 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并向下、向东扩展, $< -0.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域到达近地面层, 450hpa 以下整层出现条件对称不稳定层; 20 时在沙尘暴结束后, 在 97-98°E 上空, 850-600hpa 之间出现了正值区域, 中心最大值为 $0.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中心位置在 700hpa 附近, 也就是说在这个区域, 由条件对称不稳定转为条件对称稳定, 条件对称不稳定能量转化为条件不稳定能量^[5]。

从上述分析看, 条件对称不稳定先在对流层中部出现, 由于对称不稳定产生的斜升运动先生成云, 进而凝结潜热释放增大, 使得对流层中部产生对流不稳定, 垂直对流增强并向下伸展, 对流层下层也出现凝结潜热释放, 继而产生对称不稳定和对流不稳定, 中尺度云团强烈发展。

3. 5 条件不稳定演变

当大气中包含水汽, 由于气块绝热上升凝结潜热释放使气块所受的浮力增大, 从而变得不稳定称为条件不稳定。条件不稳定可以用 $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$ 判别。从 40°N 的 $\frac{\partial \theta_e}{\partial p}$ 垂直剖面图 (图

4a, b, c) 可以看出, 08 时在 95-99°E, 700hpa 以下为条件稳定层, 700hpa-500hpa 为条件不稳定层, 正值中心为 $3.1 \times 10^{-1} \text{ K/hpa}$, 中心位置在 600hpa 附近; 14 时在沙尘暴出现前, 正值区域中心值增大到 $5.4 \times 10^{-1} \text{ K/hpa}$, 并向下、向东扩展, $> 2 \times 10^{-1} \text{ K/hpa}$ 的区域到达近地面层, 500hpa 以下整层出现条件不稳定层; 20 时在沙尘暴结束后, 正值中心位置下降到 650hpa 附近, 但在 96-98°E 从 850hpa 到 600hpa 之间出现了负值区域, 中心最小值为 $-2.3 \times 10^{-1} \text{ K/hpa}$, 中心位置在 700hpa 附近, 也就是说在这个区域, 条件不稳定能量释放, 有条件不稳定转为条件稳定。对应垂直速度剖面图 (图 4d, e, f), 08 时在 95-98°E, 800hpa 以下为下沉气流,

垂直环流的下沉支和上升支均在 800hpa 以上；14 时在 94-97°E 从 850hpa 到 500hpa 为上升气流，上升气流的中心在 850hpa 附近，最大上升速度 $-5.6 \times 10^{-1} \text{hpa} \cdot \text{s}^{-1}$ ，同时下沉支中心也下降到 700hpa 附近，最大下沉速度 $3.4 \times 10^{-1} \text{hpa} \cdot \text{s}^{-1}$ ；20 时下沉支气流在 96-98°E 已将低层上升中心抬升东推，低层完全被下沉气流控制。

由上面分析可以看出，这次特强沙尘暴过程不是干过程，凝结潜热释放先在对流层中层发生，然后向下发展，使对流层中下部转为条件不稳定层，在 700hpa 附近的条件不稳定能量释放在这次特强沙尘暴过程中的作用比较显著。

4 小结

1) 这次沙尘暴过程中对流层中低层槽后有高速下沉急流的存在，从急流云带演变过程看出，急流云带从生成到强盛阶段时间用了 7 小时，水平移动跨越 10 个经度，急流云头速度在 44m/s，远快于锋面系统移速和对流层中低层环境风速。

2) 等熵面上风速矢量演变说明，沙尘暴发生前，急流高度是由对流层中部向边界层底层下沉的过程；沙尘暴减弱消失后，急流高度是由边界层底层向对流层中部抬升的过程。等熵面坡度是由缓到陡，再由陡变缓的过程。

3) 从沙尘暴发生前后的条件不稳定、条件对称不稳定等演变分析表明，这次强沙尘暴不是干过程，凝结潜热释放先在对流层中层发生，然后向下发展，使对流层中下部转为条件不稳定层，在 700hpa 附近的条件不稳定能量释放在这次特强沙尘暴过程中起到重要作用。

4) 这次沙尘暴过程中，条件对称不稳定和条件不稳定共存，条件对称不稳定产生的斜升运动先生成云，进而凝结潜热释放增大，对流不稳定增强，继而对流不稳定能量释放，产生强烈对流。

参考文献：

[1] Schultz, D. M. and Schumacher, P. N., The use and misuse of conditional symmetric instability. *Mon. Weather Rev.*, 1999, 121, pp. 1821-1833.

[2] Dixon, R. S., Browning, K. A. and Shutts, G. J., The relation of moist symmetric instability and upper-level potential-vorticity anomalies to the observed evolution of cloud heads. *Quart J Roy Meteor Soc.*, 2002, 128, pp. 839-859.

[3] Browning, K. A., The sting at the end of the tail: Damaging winds associated with extratropical cyclones. *Quart J Roy Meteor Soc.*, 2004, 130, pp. 375-399.

[4] Clark, P. A., Browning, K. A. and C. Wang, The sting at the end of the tail: Model diagnostics of fine-scale three-dimensional structure of the cloud head. *Quart J Roy Meteor Soc.*, 2005, 131, pp. 2263-2292.

[5] 程艳红, 陆汉城. 对流对称不稳定的演变和环流特征, *热带气象学报*, 2006, 22(3): 253-258.

Instability Analysis of Heavy Dust Storm on 13 April 2007

Wang fucun^{1,2} Fu youzhi² Llu xiulan³

(1. School of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Zhangye Meteorological Bureau; Gansu Zhangye 734000; 3. Linze Meteorological Bureau; Gansu Linze.)

Abstract: A heavy dust storm occurred on 13 April 2007 in the HeXi Corridor, Gan Su, China. Over its lifetime, the maximum wind speed is 25m/s and the minimum visibility is 50m. The cloud head of the descending jet is tracked, with the FY-2 infrared images and by using the reanalysis data of NCEP 1X1°, the gravitational instability, conditional symmetric instability and conditional instability are analyzed. The results show that a high speed descending jet plays an important role

in this heavy dust storm and this jet triggered strong convection in frontal region. Conditional instability happened in middle part of troposphere first, then developed downwards. The release of conditional instability about 700hpa leads to rapid development of convective circulation in boundary and brings on this heavy dust storm.

Key words: Heavy Dust Storm Descending Jet Conditional Symmetric Instability Conditional Instability

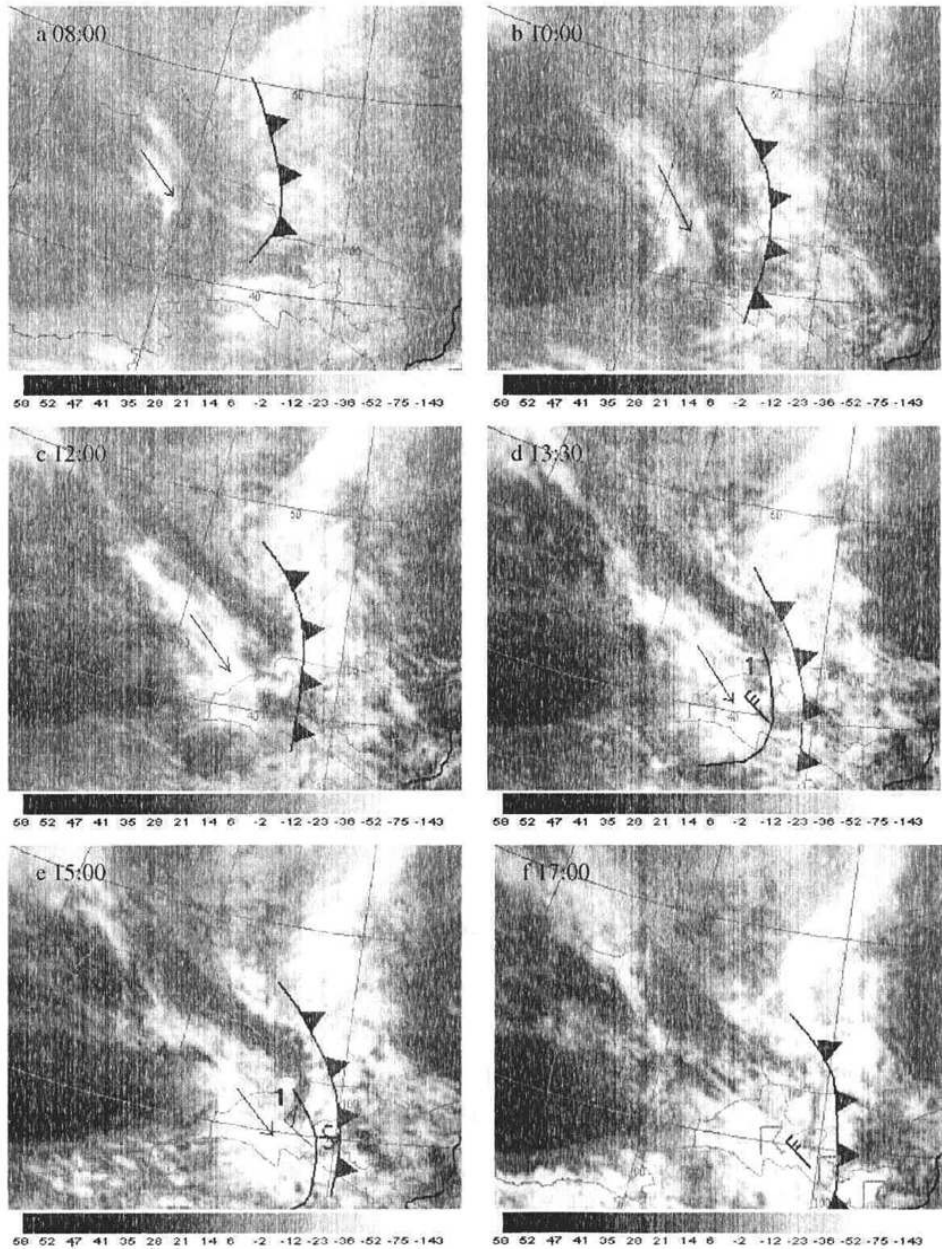


图1 2007年4月13日风云2号卫星红外云图(箭头为下沉急流方向, 细实线为急流云头轮廓)

Fig. 1 The FY-2 infrared images on 13 April 2007 (the long arrowhead represents the descending jet direction, the thin line represents the jet cloud head outline)

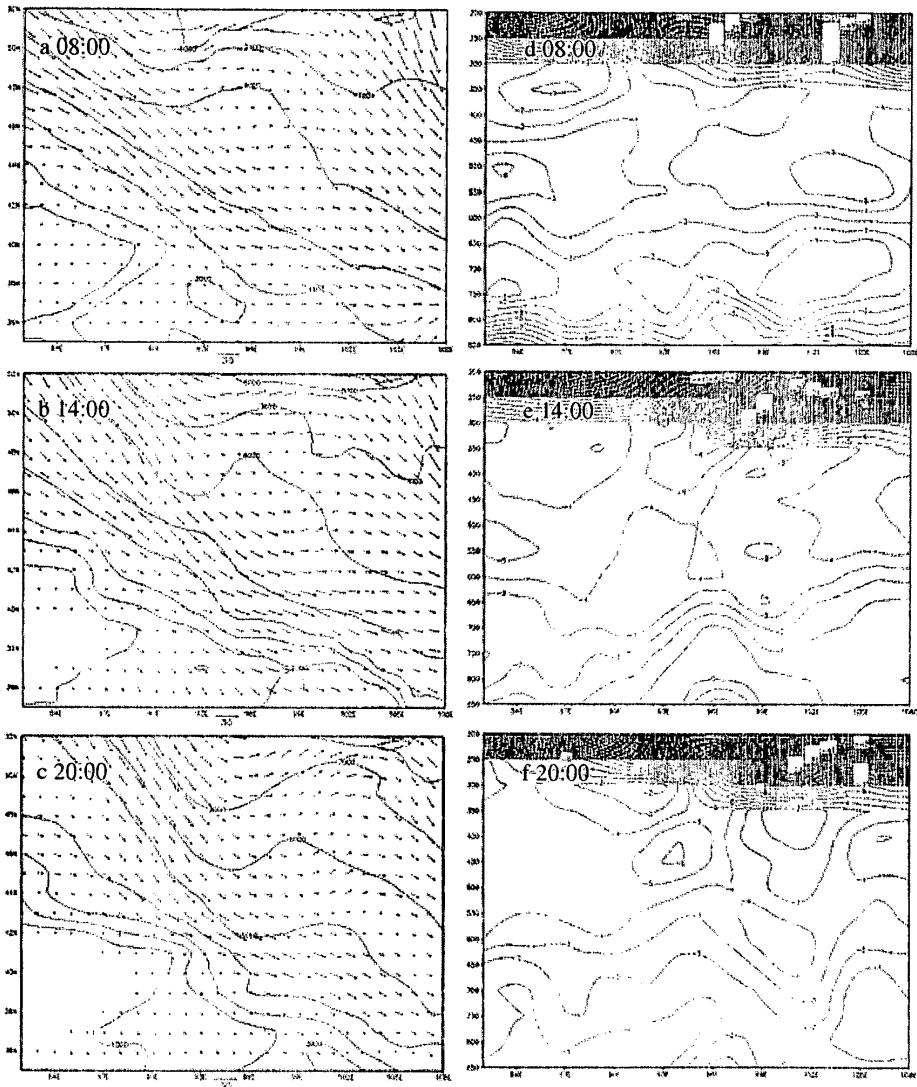


图2 2007年4月13日高空急流在等熵面(305K)上的高度变化(a, b, c)和静力稳定度沿40°N的垂直剖面(d, e, f)

Fig. 2 The upper jet on the 305K isentropic surface (a, b, c) and vertical cross sections (d, e, f) of the gravitational stability along 40°N on 13 April 2007

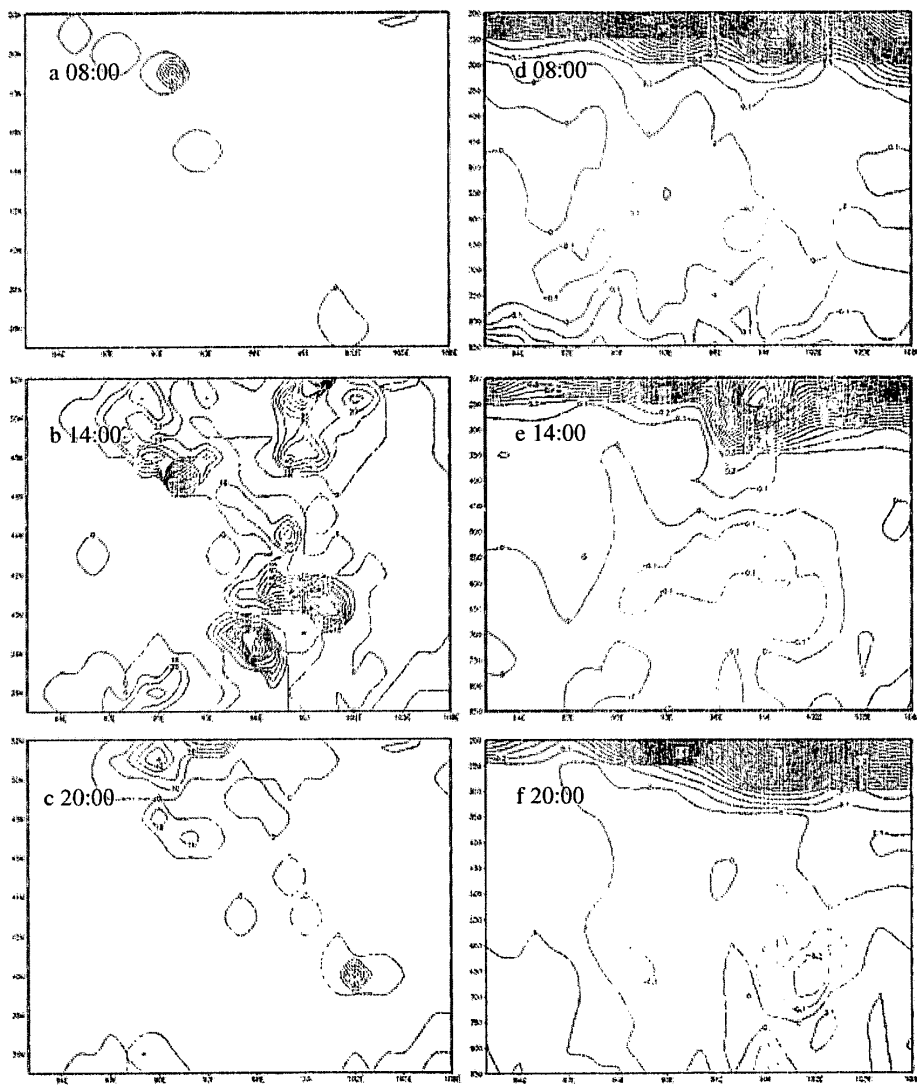


图3 2007年4月13日对流有效位能CAPE(a, b, c)和条件对称不稳定沿40°N的垂直剖面(d, e, f)
 Fig.3 The convective available potential energy(a, b, c) and vertical cross sections(d, e, f)
 of the conditional symmetric instability along 40°N on 13 April 2007

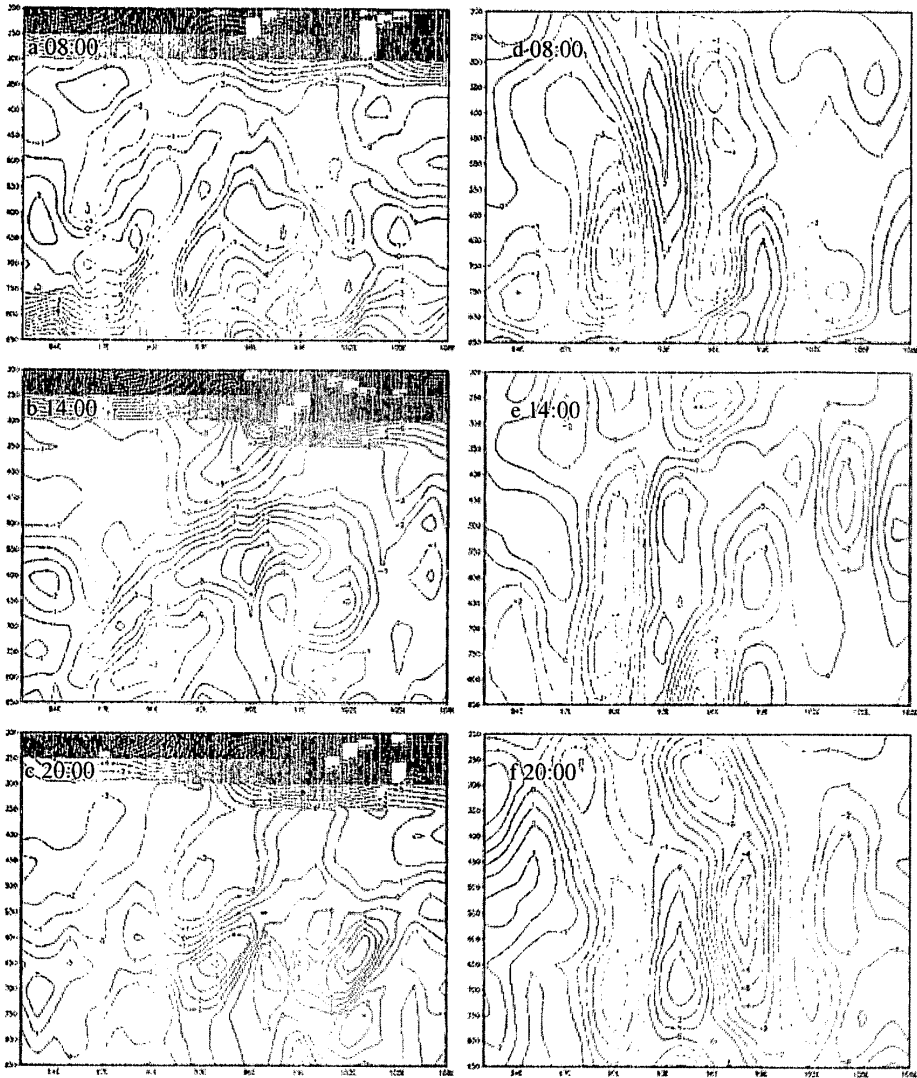


图4 2007年4月13日条件不稳定沿40°N的垂直剖面(a, b, c)和垂直速度沿40°N的垂直剖面(d, e, f)
 Fig.4 The vertical cross sections(a, b, c) of the conditional instability and the vertical cross sections(d, e, f) of vertical velocity along 40°N on 13 April 2007