

# 一次飑线引发的大风强沙尘暴诊断分析

钱 莉<sup>1,2</sup> 杨永龙<sup>2</sup> 殷玉春<sup>2</sup> 王生元<sup>2</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省(中国气象局)干旱气候变化与减灾重点  
(开放)实验室, 兰州 730020; 2. 甘肃省武威市气象局)

**提 要:** 利用常规探测、地面加密观测、T213 数值预报产品和 FY-2c/2d 红外卫星云图资料, 对 2008 年 5 月 2 日河西走廊东部飑线引发的大风强沙尘暴过程进行了天气动力诊断和中尺度分析。结果表明: 飑线引发的强风暴是产生强沙尘暴的根本原因。河西走廊东部处在不稳定大气层结中, 500hPa 阶梯短波槽为飑线提供了大尺度环流背景; 700hPa 变形场是飑线的触发系统; 地面热低压的发展加大了冷锋前后的气压和温度梯度, 为对流发展提供了热力不稳定条件; 高空急流对于飑线的生成、发展具有重要的作用。

**关键词:** 强沙尘暴 飑线 发生机制 物理特征

## Diagnose Analysis on a Gale and Strong Sandstorm Initiated by Squall Line

Qian Li<sup>1,2</sup> Yang Yonglong<sup>2</sup> Yin Yuchun<sup>2</sup> Wang Shengyuan<sup>2</sup>

(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, CMA; Key Laboratory of Arid Climatic  
Change and Reducing Disaster in Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid  
Climate Change and Disaster Reduction, CMA, Lanzhou 730020; 2. Wuwei Meteorological Office)

**Abstract:** Using conventional survey, ground intensive observations, numerical prediction product T213 and FY-2c/2d infrared satellite cloud image, synoptic-dynamical diagnosis and mesoscale analysis are carried on gale and strong sandstorm process initiated by squall line on May 2, 2008 in east of Hexi corridor. The results show that strong storm initiated by squall line produced the strong sandstorm. East of Hexi Corridor is in instable atmosphere stratification. Large scale circulation background is provided by stepped short wave trough of 500 hPa for squall line. Deformation field of 700 hPa is triggering system of squall line. Gradient of pressure and temperature before and after cold front is enlarged by development of ground thermal low pressure, by which

基金项目: 甘肃省气象局 2007 年重点科研项目“数值预报产品在河西精细化预报中的应用”

收稿日期: 2008 年 9 月 10 日; 修定稿日期: 2008 年 12 月 5 日

thermal energy stability condition is provided for convection development. Upper air jet stream has vital role for production and development of squall line.

**Key Words:** strong sandstorm squall line production mechanism physical characteristic

## 引言

沙尘暴是强风从沙漠或沙漠化地面卷起大量沙尘，并使空气能见度急剧恶化的灾害性天气。关于沙尘暴的形成机制，虽然目前还存在不同观点，但一般认为强风、大气热力不稳定和沙源是形成沙尘暴的三大因子<sup>[1]</sup>。许多观测事实表明，只有在天气尺度的冷锋系统中诱发出一系列有组织的中尺度对流体时，才能在沙源地形成强沙尘暴天气<sup>[2]</sup>。飑线天气系统正是一个迭加在天气尺度冷锋系统上的中尺度天气系统，它所表现出的气象要素突变要比冷锋更明显，正是由于飑线组成的阵势强大的对流阵列使得强沙尘暴来势迅猛，破坏性极强。目前，对沙尘暴的气候规律的统计分析较为广泛，针对一些典型特强沙尘暴的天气特征分析已经不少，对沙尘暴的成因和对策研究也逐步开始<sup>[3-5]</sup>。2008年5月2日下午6时许，河西走廊东部发生了一次飑线天气过程，伴随的天气现象有大风、强沙尘暴和雷阵雨，给当地的工农业生产、人民生活带来严重影响。由于常规资料时空分辨率低，难以对一些中小尺度对流系统进行细致的分析。因此，对产生大风强沙尘暴的中尺度对流系统的结构、发生、发展和演变缺乏深入的研究。利用T213数值预报产品、常规资料、FY-2c/2d双星加密红外云图以及加密地面观测资料，从天气学条件、物理量场诊断等方面全方位分析这次飑线引发大风强沙尘暴的活动规律和物理成因，力求加强对该类天气过程的认识，提高其预报准确率。

## 1 飑线卫星云图演变

由许多雷暴单体侧向排列而形成的强对流云带叫做飑线。图1是FY-2c红外云图，记录了产生这次大风强沙尘暴的飑线生成、发展、成熟和消亡的全过程。2008年5月2日15时在河西走廊西部有一条明显的冷锋云带，在冷锋云系前酒泉附近发展起来多个呈弧状排列的中-γ尺度对流云团，云顶红外亮温  $TBB \leq -56^{\circ}\text{C}$ 。16时随着对流云团向东北方向移动和发展，多个中-γ尺度对流云

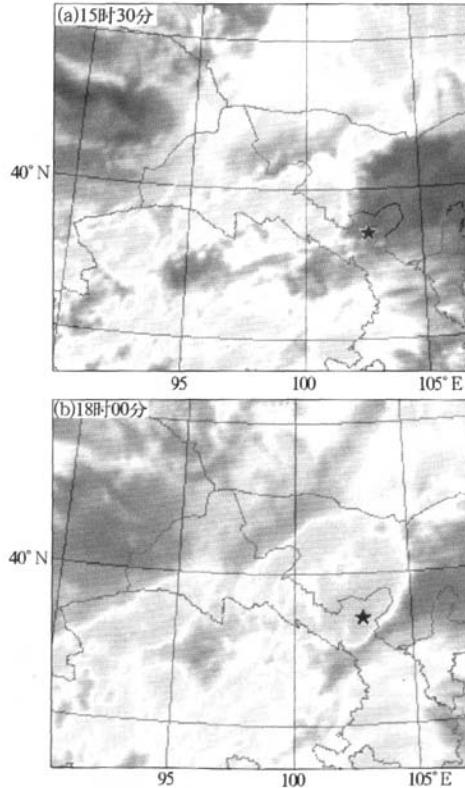


图1 2008年5月2日飑线发展演变的FY-2c/2d红外云图  
★为沙尘暴区域

团发展成中-γ尺度对流云团，云体变宽，其前部边界整齐，反映出对流发展旺盛，云顶红外亮温  $TBB \leq -67^{\circ}\text{C}$ ,  $TBR \leq -53^{\circ}\text{C}$  的冷云区面积达到  $37000\text{km}^2$ ，受对流云团生成、发展影响，河西走廊中部的张掖市、山丹县出现大风、扬沙。17—19时冷锋前的中-γ尺度对流云团东移过程中发展成侧向排列的强对流云带（飑线），云顶亮温  $TBB \leq -73^{\circ}\text{C}$ ,  $TBB \leq -53^{\circ}\text{C}$  的冷云区面积达到  $170000\text{km}^2$ ，对流发展达到鼎盛期，受飑线东移影响，河西走廊东部出现8~10级大风、沙尘暴和雷暴，其中民勤达强沙尘暴。20时对流云体增大，云体结构变松散，云顶亮温升至 $-66^{\circ}\text{C}$ ，飑线进入消亡阶段，河西走廊东部的大风沙尘暴结束，下游只出现扬沙天气。

以上卫星观测事实清楚地表明，这次大风强沙尘暴天气过程具有明显的飑线特征，是一次典型的中尺度飑线过程，飑线从生成到消亡生命史为4个多小时。

## 2 飑线的地面气象要素变化特征

飑线过境时，常常引起局地风向突变，风速剧增、气压涌升、温度骤降，伴随的天气有雷电、大风、冰雹、沙尘暴和龙卷风等灾害性天气。从武威地面自动站每分钟观测资料（图2）可见，气压变化为先缓慢下降，在18时10分降到最低829.0hPa后，开始迅速升高，到21时气压值达843.2hPa，近3个小时气压涌升了14.2hPa；气温的变化与气压相反，气压达到最低时，气温达到一日最大 $27.5^{\circ}\text{C}$ ，随着气压的升高，气温骤降，21时气温降至 $12.5^{\circ}\text{C}$ ，近3个小时气温下降了 $15.0^{\circ}\text{C}$ 。风速从气压涌升开始猛然增大，并爆发强沙尘暴，瞬间最大风力达8~10级，平均最大风力6~7级，区域内有3站出现沙尘暴，其中民勤为强沙尘暴，最小能见度为100m，

永昌、凉州为沙尘暴，最小能见度600m，古浪、乌鞘岭2站出现扬沙，最小能见度2km。这次区域性大风、强沙尘暴过程从地面要素反映具有明显的飑线特征。大风沙尘暴造成武威市21.9万人受灾，日光温室受灾面积4622公顷、拱棚和地膜农作物受灾面积2.5万公顷，大风沙尘暴引发火灾16起，造成2人受伤，164头畜禽烧死，39间房屋被毁，累计经济损失达4250万元。

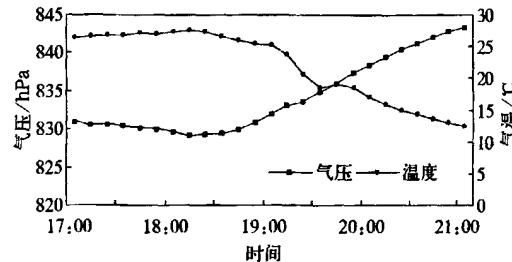


图2 2008年5月2日17—21时凉州地面自动站气压和气温变化曲线

## 3 有利于飑线生成、发展的环流特征

### 3.1 500hPa 短波槽的触发作用

这次飑线出现在高空短波槽前。5月2日08时500hPa图上从欧洲东部到贝加尔湖以东为一个广阔的低压带，并有 $-36^{\circ}\text{C}$ 的冷中心配合，纬向锋区维持在 $40^{\circ}\text{N}$ 以北，西起巴尔喀什湖，东至北太平洋。在欧洲东部( $55^{\circ}\text{N}, 60^{\circ}\text{E}$ 附近)有一横槽，不断分裂冷空气沿西北气流向东传播(见图3)。对本次过程造成影响的系统为新疆乌鲁木齐附近的短波槽，由于不断有新鲜冷空气补充，使槽前锋区不断加强，新疆的哈密与北塔山相距近3个纬距的温差达 $12^{\circ}\text{C}$ 。由于槽前为平直西风气流，短波槽移速快。正是由于500hPa对流层中上部有冷空气不断补充叠加在低层的暖空气中，加剧了层结不稳定，促使强对流发展，从而触发了飑线的生成。

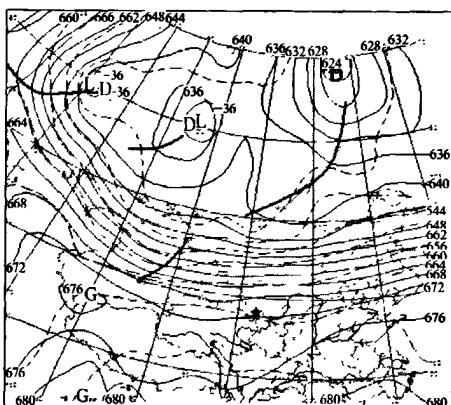


图3 2008年5月2日08时500hPa高空图  
★为沙尘暴区域

### 3.2 高空急流区次级环流的影响

根据地转风方程,在不计粘性项时,有

$$\frac{du}{dt} = f(v - V_g) = fV_a \quad (1)$$

其中, $V$ 为实际风, $V_g$ 为地转风, $V_a$ 为地转偏差风, $f$ 为地转参数。由于在急流入口区,空气质点加速, $du/dt > 0$ ,即有向北的非地转风 $V_a > 0$ ,而且在急流轴上最大,向南北两侧外围减小。结果在急流南侧形成非地转辐散,北侧辐合。由质量连续原理,必然形成入口区急流南侧下层暖空气上升,北侧下层冷空气下沉,导致低层出现与高空相反的辐合、辐散配置和向南的非地转风,从而形成一个直接力管环流(正热力次级环流),低层急流入口区南侧辐合上升有利于地面减压<sup>[6]</sup>。从图4可以看出,在中蒙边界线附近有一支高空西风急流,500hPa急流中心最大风速达 $54m \cdot s^{-1}$ ,河西走廊东部位于高空急流入口区的右侧,受高空急流区次级环流的作用,导致高空辐散,低层辐合。因此,地面冷锋前的上升运动与高空急流入口区次级环流上升气流的叠加,为深对流发展提供了深厚的垂直环流发展条件,是促使飑线发生和沙尘卷起的基本动力。

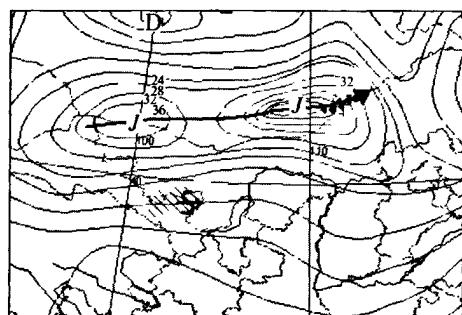


图4 2008年5月2日08时500hPa  
T213 全风速数值预报产品场

### 3.3 700hPa 有利的辐合流场

飑线的生成、发展和维持必须有足够的上升运动,因而需要大气低层具有与之相适应的中尺度辐合区。图5为5月2日08时700hPa高空图,在槽前河西走廊西部一带为一变形场,锋区北部的冷空气借助变形场后部的西北气流从低空向东南方向扩散,使水平温度梯度加大,有利于地面锋生,锋面进入河西走廊后显著增强,冷锋前的抬升作用也相应加强,促使敦煌到酒泉附近形成一明显的中尺度低压,产生较强的气旋性辐合,加剧了上升运动。因此,低层变形场、中尺度低压为飑线形成提供了必要的辐合上升运动条件,也为强沙尘暴的产生和维持提供了必要的动力条件。

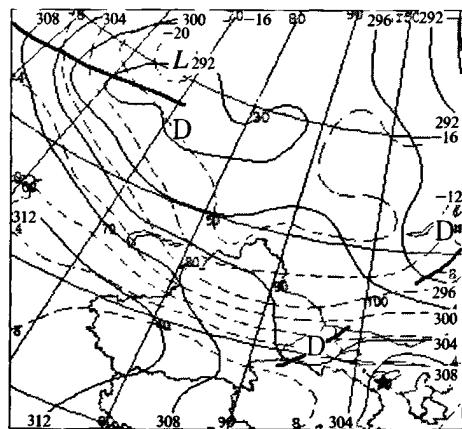


图5 2008年5月2日08时700hPa高空图  
★为沙尘暴区域

### 3.4 地面热低压跃变

图6为2008年5月2日08时地面图,地面冷锋在哈密附近,热低压中心在敦煌附近,由于冷锋进入河西走廊受低空变形场作用产生锋生,使冷锋前地面热低压发生不连续跳跃性移动,11时地面热低压中心从敦煌跳跃到河西走廊东部的凉州附近,跳跃距离达733km,热低压范围扩大,整个河西走廊均为热低压控制,冷锋前后 $\Delta p_3$ 由08时的6.8hPa增大到9.7hPa。11时后由于太阳辐射加强,热低压在原地停滞且加强,冷锋呈准静止状态,热低压中心数值11—17时由1001.5hPa降低到990.8hPa,冷锋前后 $\Delta p_3$ 增大到12.0hPa。热力作用加大了地面冷锋前后的气压梯度和温度梯度,地面冷锋增强。冷锋附近的强力管环流促使上升、下沉垂直运动加强,有利于冷锋前的中尺度飑线产生<sup>[7]</sup>。17时后由于太阳辐射减弱,地面热低压迅速减弱东移,冷锋从河西走廊西部快速跳跃到河西走廊东部一带,河西走廊东部强沙尘暴爆发。因此,地面热低压的不连续跃变,为中尺度飑线产生提供了热力对流条件,也为沙尘暴爆发提供了必要的热力条件。

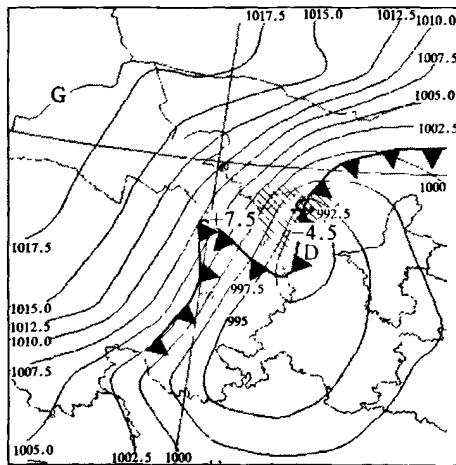


图6 2008年5月2日17时地面图

### 4 环境物理量场特征

时间选取:距沙尘暴出现时间最近的2008年5月2日20时;空间范围:以沙尘暴出现区域河西走廊东部为中心( $40^{\circ}\text{N}$ 、 $104^{\circ}\text{E}$ ),范围选取( $36\sim48^{\circ}\text{N}$ 、 $96\sim112^{\circ}\text{E}$ );分别制作散度、垂直速度垂直剖面图和垂直螺旋度、 $\theta_{se500-700}$ 分布图。

#### 4.1 沙尘暴区低层辐合高层辐散存在强烈的垂直上升运动

散度是衡量速度场辐散、辐合强度的物理量。从图7(a)可以看出,大风沙尘暴区域与低空辐合区、高空辐散区存在非常好的对

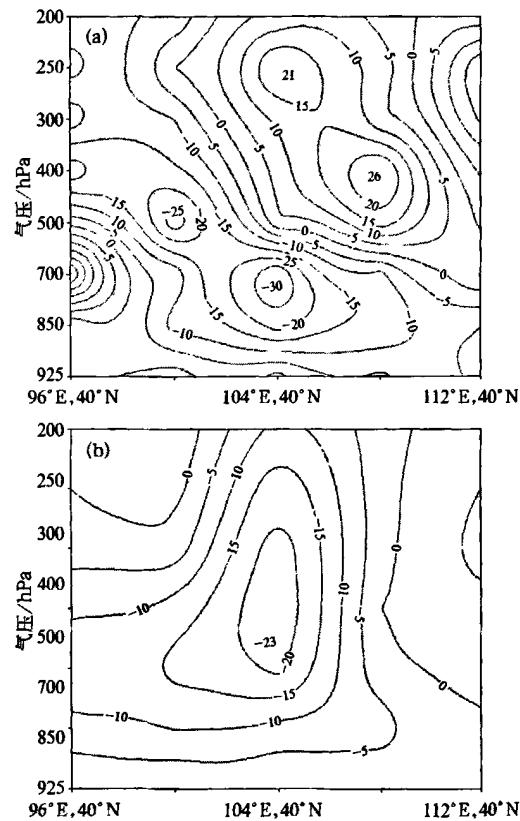


图7 2008年5月2日20时散度(a)

和垂直速度(b)垂直剖面图

散度单位: $10^{-5}\text{s}^{-1}$ , 垂直速度单位: $10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$

应关系。在沙尘暴区中高层有强辐散对应低层有强辐合,最大辐合中心出现在700hPa,强度达到 $-3.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,最大辐散中心出现在400hPa,强度达到 $2.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,无辐散层出现在500hPa,说明在沙尘暴出现区域存在着很强的上升运动。从图中还可以看出,辐合中心与辐散中心的轴线为非对称分布,高层最大辐散中心偏向低层辐合中心的右侧,说明在沙尘暴出现区存在明显的斜压不稳定。

大气垂直运动是天气分析和预报中必须考虑的一个重要物理量,这是由于垂直运动造成的水汽、热量、动量、涡度等物理量的垂直输送对天气系统发展有很大影响;大气层结不稳定能量须在一定的上升运动条件下才能释放出来,从而形成对流性天气<sup>[11-12]</sup>。从图7(b)可以看出,在沙尘暴出现区域存在强而深厚的上升运动,从近地面层850hPa到对流层顶200hPa均为上升运动,最强上升运动出现在500hPa附近,最大值达到 $-23 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这与无辐散层出现在500hPa是对应的。

由此可以看出,低层辐合上升运动到对流层中部便会造成较强的上升运动,有利于低空辐合、高层辐散垂直环流的加强,为飑线形成、发展提供了对流层中部中尺度上升运动所应具有的环境场条件。

## 4.2 垂直螺旋度

螺旋度是表征流体边旋转边沿旋转方向运动的动力特性的物理量。其定义为

$$h_e = \iiint V \cdot (\nabla \times V) d\tau \quad (1)$$

定义垂直螺旋度  $h_z$  为

$$h_z = - \int w \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) dz \quad (2)$$

其中  $h_z$  为垂直螺旋度(单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ),  $w$  为的垂直速度,  $\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  为涡度(单位: $\text{s}^{-1}$ )。

螺旋度的重要性还在于它比涡度包含了更多辐散风效应,更能体现大气的运动状况,其值的正负情况反映了涡度和速度的配合程度。沙尘暴研究表明<sup>[8-10]</sup>,沙尘暴多发生在螺旋度负值区的下游方,负中心值  $\leq -200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ,且螺旋度负值中心越大,对应沙尘暴越强。利用5月2日14时T213数值预报产品400hPa至地面5层流场客观分析格点资料进行计算,发现在沙尘暴出现区域的右上方有一个中心值为 $-200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的螺旋度负值中心存在。

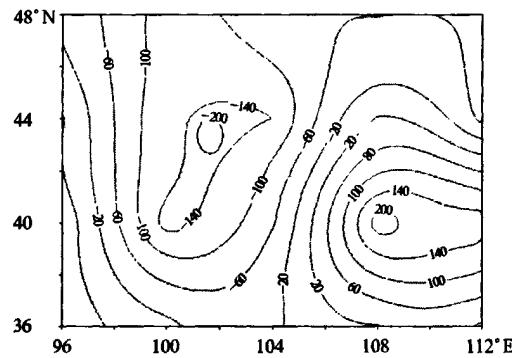


图8 2008年5月2日14时垂直螺旋度  
单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

## 4.3 稳定度指标

要使中尺度对流系统得以发展,必须具备水汽条件、不稳定层结条件和触发机制。

大气的层结稳定度可用 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z}$ 等物理量的大小来表示,用两等压面的 $\theta_{se}$ 差值(即 $\Delta \theta_{se} = \theta_{se,500} - \theta_{se,700}$ )来表示两等压面之间的气层不稳定度,其判据是:

$$\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z} > 0 \quad \text{稳定}$$

$$\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z} = 0 \quad \text{中性}$$

$$\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z} < 0 \quad \text{对流性不稳定}$$

$\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z}$ 负值越大,表示气层越不稳定。从

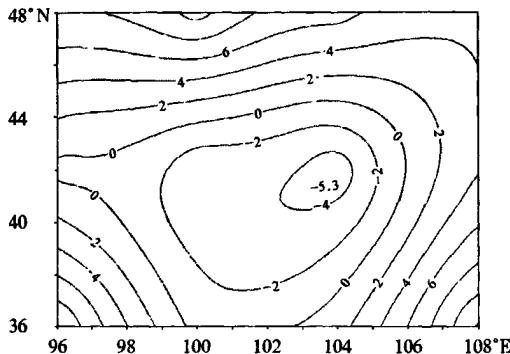


图 9 2008 年 5 月 2 日 08 时  $\theta_{500-700}$   
分布图(单位:  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ )

图 9 可以看出, 沙尘暴出现在  $-5.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$  的不稳定中心附近, 说明中尺度对流云团移到不稳定层结上后非常有利于强对流发展。正是由于存在较强的不稳定层结为对流发展提供了位能转化为动能的基本条件。

## 5 小结

(1) 在这次过程中, 中尺度飑线所伴随的强风暴是产生大风强沙尘暴的根本原因。

(2) 500hPa 阶梯短波槽是中尺度飑线产生的大尺度触发系统, 河西走廊中西部 700hPa 变形场为中尺度飑线发展提供了触发动能。

(3) 地面冷锋前的上升运动与高空急流入口区次级环流上升气流的叠加, 为深对流发展提供了深厚的垂直环流发展条件, 是促使飑线发生和沙尘卷起的基本动力。

(4) 地面热低压的加强和午后气温日变化加大了冷锋前后的温度和气压梯度, 也为对流发展提供了热力不稳定条件。

(5) 大风沙尘暴出现在垂直螺旋度负值中心的下游, 负中心值  $\leq -200\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  将会出现沙尘暴, 且负值中心越大沙尘暴越强。

(6) 中尺度飑线发生在不稳定层结内, 较强的不稳定层结为对流发展提供了位能转化为动能的基本条件。

## 参考文献

- [1] 方宗义, 朱福康, 等. 中国沙尘暴研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1997: 1-10.
- [2] 王式功, 杨得宝, 金炯, 等. 我国西北地区黑风暴的成因和对策 [J]. 中国沙漠, 1995, 15(1): 19-20.
- [3] 张强, 王胜. 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应 [J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 675-681.
- [4] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴发展与干飑线-黑风暴形成机理的分析 [J]. 高原气象, 1996, 15(2): 178-185.
- [5] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制 [J]. 大气科学, 1996, 21(5): 1582-1589.
- [6] 白肇烨, 徐国昌. 中国西北天气 [M]. 北京: 气象出版社, 1986: 438-441.
- [7] 陶建红, 王劲松, 冯建英. 螺旋度在一次强沙尘暴天气分析中的应用 [J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 83-87.
- [8] 王劲松, 李耀辉, 康凤琴, 等. "4·12"沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析 [J]. 高原气象, 2004, 23(1): 89-96.
- [9] 杨晓玲, 丁文魁, 钱莉, 等. 一次区域性大风沙尘暴天气成因分析 [J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 702-705.
- [10] 柳林, 张国胜. 鲁西北中尺度对流复合体环境场特征 [J]. 气象, 2000, 26(11): 40-44.
- [11] 沈武. "99·9·4"突发性局地特大暴雨中尺度分析 [J]. 气象, 2000, 26(11): 34-39.

# 李淑玲等：一次飑线过程多普勒雷达资料分析

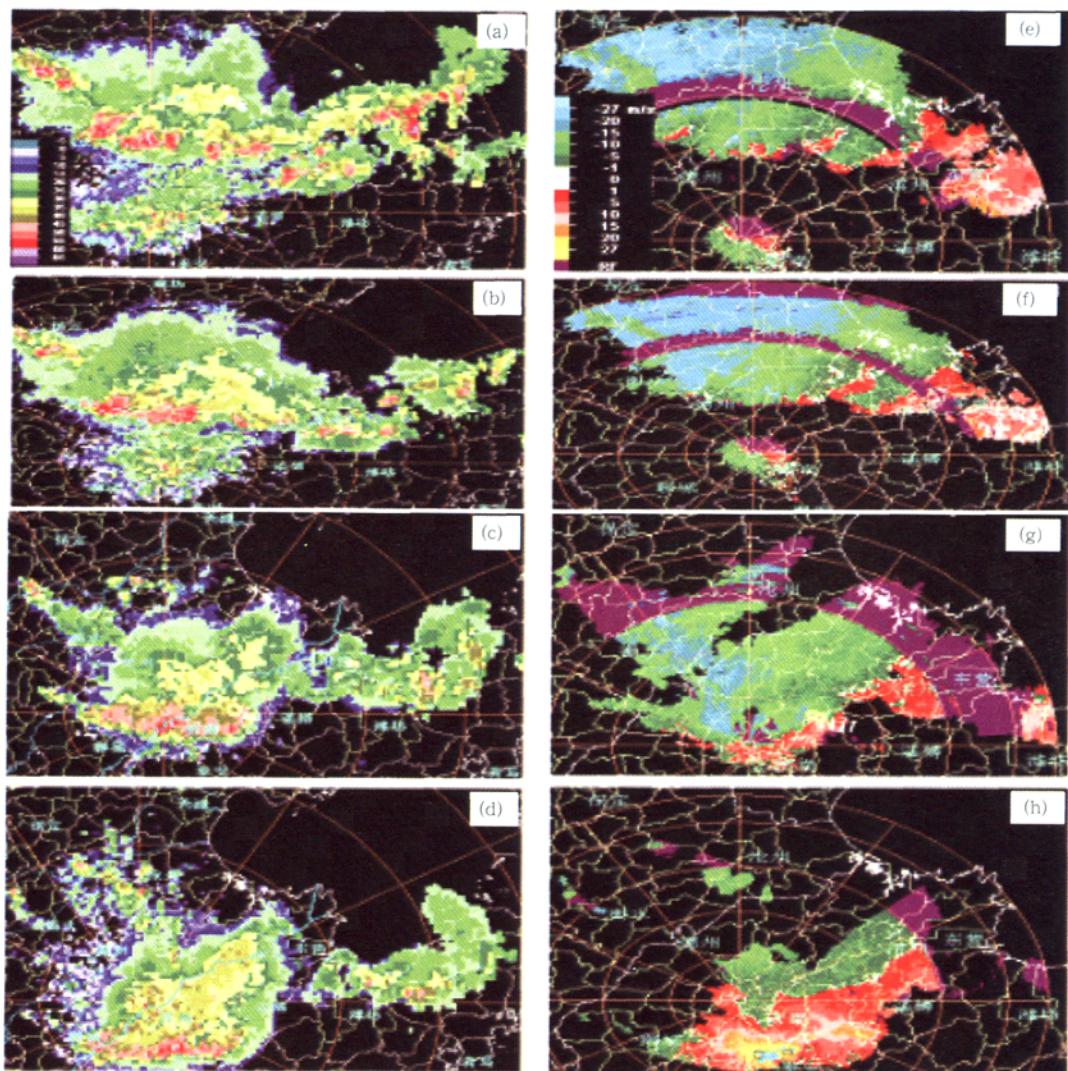


图 4 2006年7月5日飑线最强阶段弓形回波及衰减演变  
(a、b、c、d分别为460km20;51、21;15、22;47、23;35组合反射率因子，单位: dBz；  
e、f、g、h分别为230km的1.5°仰角基本速度，单位: m·s⁻¹)

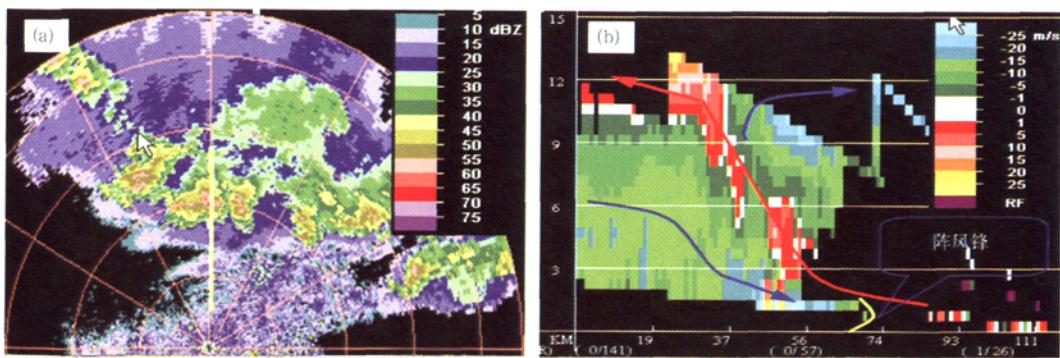


图 5 2006年7月5日20:51反射率因子(a, 单位: dBz)和速度剖面(b, 单位: m·s⁻¹)

# 李淑玲等：一次飑线过程多普勒雷达资料分析

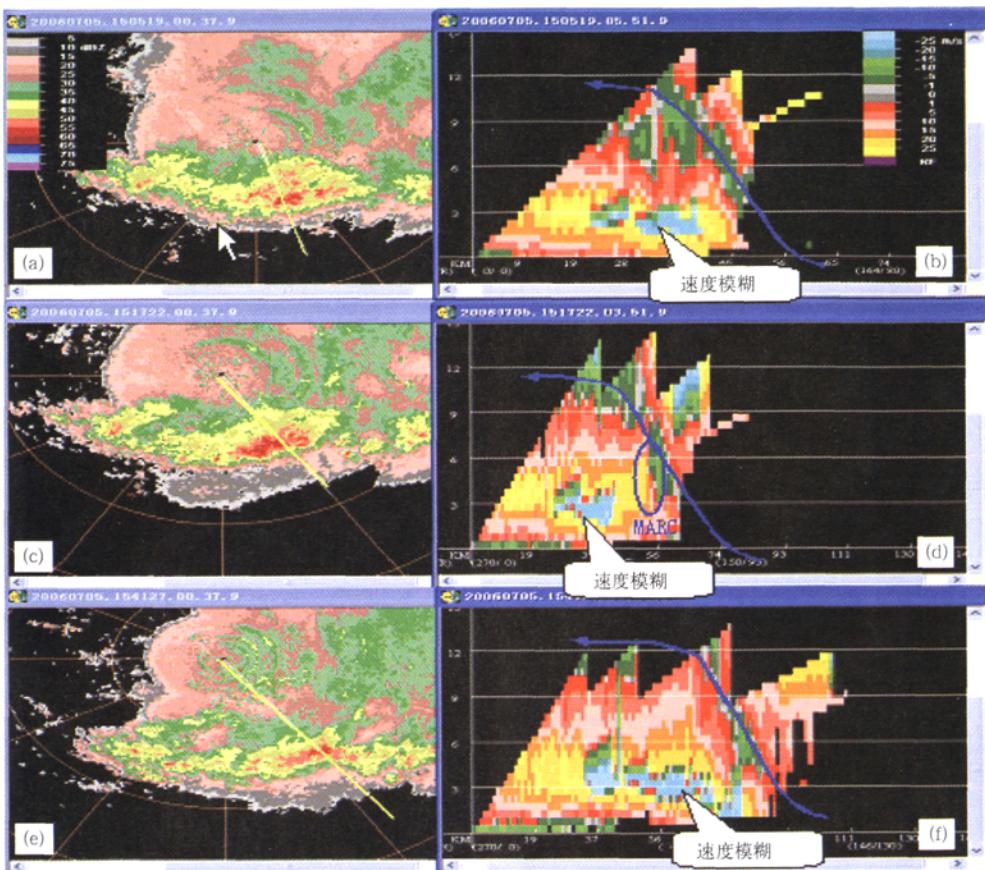


图 6 2006年7月5日飑线消散阶段流场  
(a、c、e分别为23:05、23:17和23:41组合反射率因子,单位:dBz;  
b、d、f分别为23:05、23:17和23:41通过强回波中心速度垂直剖面,单位: $m \cdot s^{-1}$ )

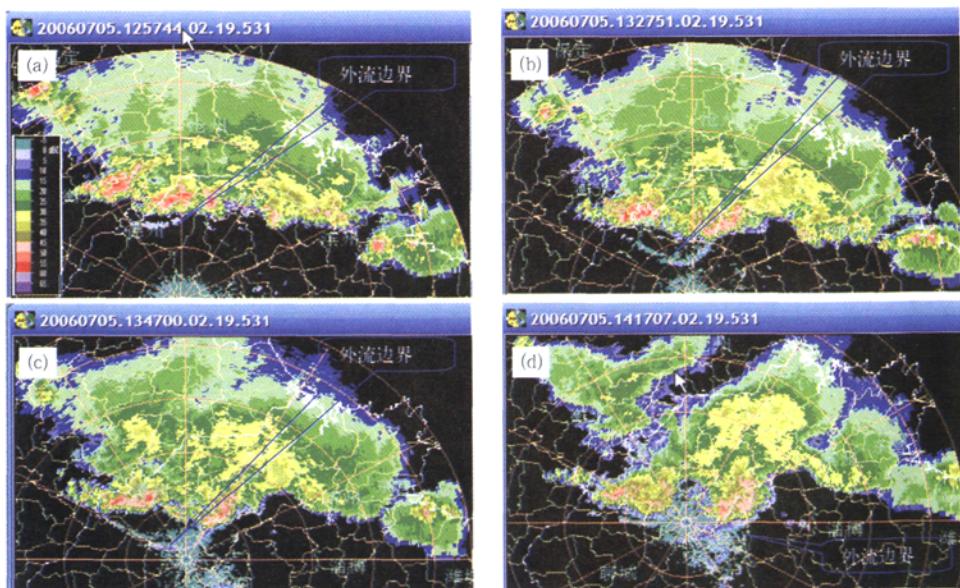


图 7 2006年7月5日飑线过程外流边界图(1.5°仰角基本反射率因子,单位:dBz)