

## 甘肃中西部近年沙尘天气气候特征及典型个例诊断分析

任余龙<sup>1,2,3</sup>, 寿绍文<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 临夏州气象局, 甘肃 临夏 731100;  
3. 中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:**从极涡位置、土壤湿度、地温等探讨了甘肃中西部地区沙尘日差别的原因, 指出冷空气是产生沙尘天气的首要因素, 高温少雨、土壤干层厚是发生沙尘天气的有利气候背景, 并用合成分析法得出西北路径型和偏西路径型两种类型沙尘天气的平均流场; “20010408”强沙尘暴过程实况资料对条件对称不稳定度(CSI)和锋面次级环流进行诊断分析, 结果表明: 强沙尘暴发生前存在深厚的条件对称不稳定, 锋面次级环流和沙尘暴有较好的时空对应关系。

**关键词:**沙尘路径; 合成分析; 强沙尘暴; CSI; 锋面次级环流

**中图分类号:** P445.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2007)02-0266-08

## Climatological Characteristics of Sand Dust Storm in Recent Years and Diagnosis of a Severe Dust Storms in the Middle and West Region of Gansu Province

REN Yu-long<sup>1,2,3</sup>, SHOU Shao-wen<sup>1</sup>

(1. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China; 2. Meteorological Bureau of Linxia, Linxia 731100, China;  
3. Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** In the years 2002 and 2003, the frequency of the sandstorm in the middle and west region of Gansu decreased and the intensity weakened. In order to find the Climatological reason for the change, the arctic vortex, temperature and the moisture of surface layer soil were analyzed. According to the source of sanddust, the transfer paths of sanddust can be divided into two type: the northwest and west path. The composite analysis is used to find their mean circulation, and in order to find the relation between severe sanddust storm and physical quantities, such as  $Q$ -vector, CSI(Conditional Symmetric Instability) and frontal secondary circulation, a severe sandstorm “20010408” was diagnosed based on the NECP data. And the result show that conditional symmetric instability layer was very thick before the happening of the sand storm and the frontal secondary circulation had a close relation with the sand storm.

**Key words:** sandstorm transfer path; composite synthetic analysis; serve sandstorm; conditional symmetric instability; frontal secondary circulation

## 0 引言

甘肃周围沙源丰富, 气候干旱少雨, 冬春换季时冷空气活动频繁, 是我国沙尘天气多发区之一。当前对沙尘天气的研究主要集中在对其气候特征及发生发展的机制上, 如王式功等<sup>[1]</sup>研究了1993年“5·5”黑风暴, 指出冷锋是造成大范围沙尘天气的

主要天气系统, 冷锋过境产生的强变压风是产生沙尘暴区域瞬时大风的主要因素; 王式功等<sup>[2]</sup>研究了我国西北地区几次大范围强或特强沙尘暴天气过程, 指出易产生沙尘暴的主要环流形势和天气系统有: 经纬环流调整, 冷锋活动, 低空东风急流, 中尺度系统等; 王式功等<sup>[3]</sup>还统计分析了我国北方几个沙尘暴多发区, 指出北方区20世纪50年代沙尘暴发

收稿日期: 2005-12-21; 改回日期: 2006-06-26

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40405009; 4057022; 40205008); 江苏省气象局科技开发项目(200406); 江苏省气象灾害重点实验室资助项目(KLME050201); 国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418301); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2005141)

**作者简介:** 任余龙(1976-), 男, 甘肃秦安人, 硕士, 研究方向: 中尺度和灾害性天气, yulongren731100@126.com.

生日数最多,60年代末略有增加,80年代又呈下降趋势,这揭示了沙尘天气的变化特征;张高英等<sup>[4]</sup>对中国北方近年的沙尘暴进行了气候特征分析,指出蒙古气旋是造成沙尘天气的主要天气系统;翟盘茂等<sup>[5]</sup>对中国北方的沙尘条件进行了研究,指出大风、降水量少等条件是产生沙尘天气的必要条件;张平等<sup>[6]</sup>对2002年春季沙尘暴进行了诊断分析,结果表明风是影响沙尘天气发生的最主要的气象要素,它与浮尘的出现有一定关系,但不是决定因素,而扬沙和沙尘暴的发生,风是先决条件;国内还有其他一些对沙尘暴的相关研究<sup>[7-13]</sup>;近年来一些沙尘暴数值模式发展和建立,推动沙尘天气研究向新的方向发展,如李耀辉等<sup>[14]</sup>将沙尘暴模式耦合到GRAPES数值预报模式中,建立了西北GRAPES-SDM沙尘暴数值预报模式,取得了较好的效果;Wang等<sup>[15]</sup>采用天气类型、摩擦速度和土壤湿度3个控制因子设计了东亚地区起沙机制,通过分析蒙古和我国北部气象站的观测资料,获得这些因子临界域值,并以此为基础发展了沙尘数值预报模式。此外,国外也有许多关于沙尘暴数值模式方面的研究<sup>[16-21]</sup>。

沙尘天气能否发生,决定于冷空气、降水、温度等气象条件和是否具有充分的沙尘物质,但各个因素在不同情况下的重要性如何?近年来条件对称不稳定性、锋面次级环流、 $Q$ 矢量等在暴雨诊断分析中有很好的应用,那么它们能否被应用到沙尘天气的诊断和分析中,为沙尘天气预测提供依据?本文试图阐明不同情况下沙尘天气的发生频率与气象要素(冷空气、降水和气温等)之间的关系,为沙尘天气的预测提供一定的依据;同时通过对条件对称不稳定性、锋面次级环流、 $Q$ 矢量等在一次强沙尘暴诊断分析中的应用,为强沙尘暴研究探索一条新途径,这具有一定的理论意义和应用价值。

## 1 研究对象、所用资料及统计方法

本文以2000—2003年发生在甘肃中西部酒泉(52533)、民勤(52618)和兰州(52889)的沙尘天气为研究对象;资料来源于2000—2003年中国气象局下发的1日8次实况报文资料和NCEP1日4次再分析资料;沙尘日的定义按照文献<sup>[17]</sup>所提供的方法;沙尘路径划分为3类:(1)西北路径类,沙尘天气起源于蒙古国或我国内蒙古西部;(2)偏西路径类,沙尘天气起源于蒙古国、我国内蒙古西部或新疆南部;(3)局地型,局部地区有沙尘天气出现,但沙尘主体没有明显的移动。

## 2 沙尘天气气候特征分析

统计结果表明,在4a中,甘肃中部兰州市共有31个沙尘日,其中浮尘天气26d;出现了两次强沙尘暴过程(2001年4月8日和2002年3月19日);年际变化大,沙尘日最多为2001年,共有14d,2002年次之,共9d;2000年最少,为3d,2003年为5d;从影响系统分析,主要受蒙古气旋和冷锋的影响,占所有影响系统的22/31;两次强的沙尘暴都是在蒙古气旋和冷锋的共同作用下发生的,说明蒙古气旋是产生沙尘天气的主要天气系统;沙尘的移动路径以西北路径为主,占24/31,偏西路径占6/31;沙尘天气主要发生在春季,3—4月份的沙尘为26d,占总沙尘日的26/31;沙尘天气主要出现在下午到傍晚,表明其与稳定度有较大的关系。

4a中,甘肃西部的酒泉共有18个沙尘日,其中沙尘暴8次(强沙尘暴2次),浮尘和扬沙共10次;2001年沙尘天气最多,发生9次,沙尘暴(包括两次强沙尘暴:2000年4月19日和2001年4月28日)都发生在2000年和2001年;2002年和2003年沙尘天气发生频率降低,强度减弱,无沙尘暴;西北路径是沙尘天气的主要路径,共发生10次(包括两次强沙尘暴天气),其他路径8次;沙尘天气仍是4月最多(11/18);主要影响天气系统是蒙古气旋和冷锋。而位于甘肃中北部的民勤县,4a的21个沙尘日中,沙尘暴20次,其中强沙尘暴6次;最多为2001年,发生7次,其次为2000年,发生5次,2002年和2003年发生频率虽然变化不大,但沙尘暴强度明显减弱;沙尘暴发生以4月最多(11/21),3月次之(7/21);西北路径仍占大部分比重(13/21);主要影响天气系统仍然是蒙古气旋和冷锋。

### 2.1 气候背景分析

由于甘肃中西部沙尘天气发生频率有明显年际变化,本文分别从极涡位置、降水、地温、土壤湿度等气候背景探究其发生原因。

#### 2.1.1 极涡类型、中心位置与沙尘天气

对2000—2003年逐年3—4月北半球500hPa极涡平均位置分析表明:2000年极涡属单极型,中心在西半球一侧格陵兰岛附近(图1a),在这种环流形势下,强冷空气不易到达甘肃中部,因此沙尘天气主要发生在新疆南部、宁夏北部以及甘肃西部及中北部,表现为甘肃中部兰州沙尘天气发生频率为4a最低,而酒泉和民勤发生多次沙尘暴;与此不同的是,到了2001年(图1b),最明显的特征是极涡中心

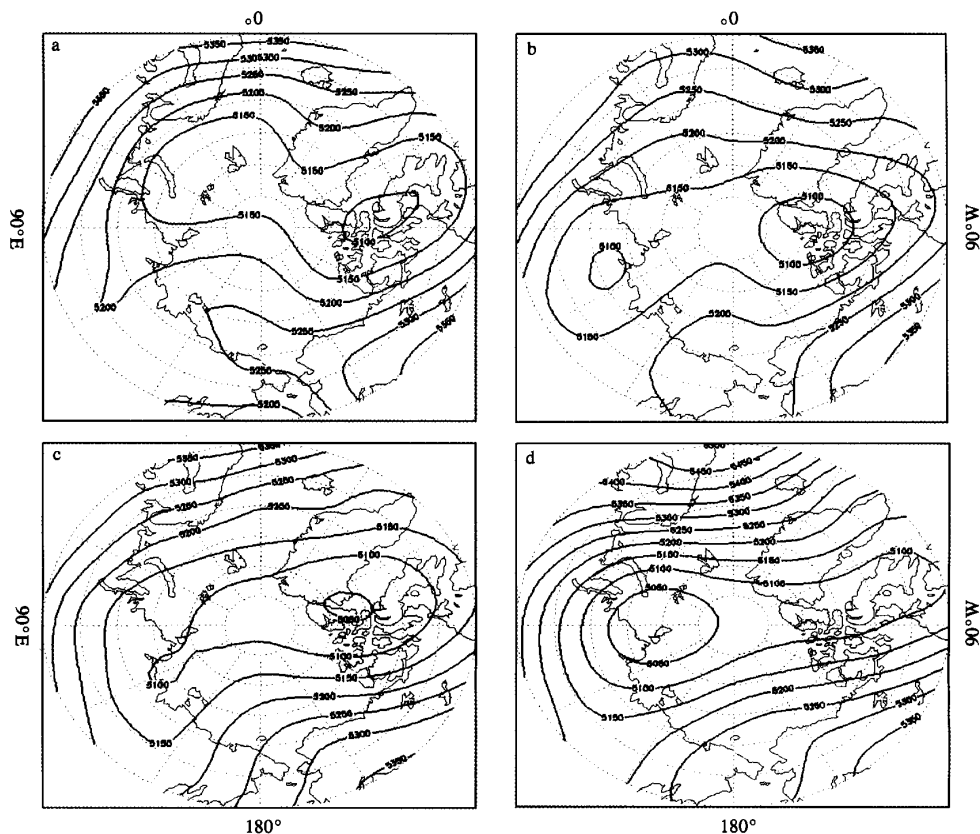


图 1 2000—2003 年北半球 500 hPa 平均环流(单位:gpm)

a. 2000 年;b. 2001 年;c. 2002 年;d. 2003 年

Fig. 1 Mean circulations of arctic vortex at 500 hPa from 2000 to 2003(units:gpm)

a. 2000;b. 2001;c. 2002;d. 2003

分裂成双极型,东半球低涡中心在太梅尔半岛,亚洲大陆环流经向度明显加大,东亚大槽加深,在这种环流形势下,冷空气主力极易到达甘肃中部,加之 1—3 月降水少、升温较快,因此甘肃中部沙尘天气频率为 4 a 最高,而酒泉和民勤发生强沙尘暴的比重也明显增大;2002 年极涡为单极型(图 1c),但涡区东端伸向亚洲大陆,因此虽然影响甘肃中部的冷空气较弱,沙尘天气发生频率减少,但对酒泉和民勤仍有较大影响;2003 年极涡特征(图 1d)虽与 2001 年相似,但该年春季降水增加,甘肃中西部沙尘天气频率也减少,强度减弱。由以上分析可以看出,沙尘天气频率和极涡类型、极涡中心位置有很好的相关性,当极涡中心偏向于亚欧大陆时,发生沙尘天气的机率大大增加。

## 2.1.2 浅层土壤湿度、地温与沙尘天气频率的关系

比较 4 a 间 1—4 月 0~10 cm 土壤湿度距平

(图略)发现,2000 和 2001 年甘肃中西部(101~120°E,30~39°N)位于负距平区域,浅层土壤比常年干燥,但 2000 年影响甘肃中西部的冷空气较弱,沙尘天气频率低;2001 年北半球极涡分裂,南下冷空气活动频繁,势力较强,综合作用下,4 a 中 2001 年沙尘天气频率最高;2002—2003 年期间,甘肃中西部为正距平区湿区,因此沙尘日数减少。

2000—2003 年 1—4 月 10~200 cm 地温的特征是:在 2000 年中国西部地区全部为负距平低温区,冻土层较往年厚,春季升温较快,降水少,土壤解冻后出现较厚的干土层,极有利于沙尘天气的发生,但该年到达甘肃中西部的冷空气较常年弱,沙尘天气频率反为 4 a 中最低;2001 年降水量少,温度升高导致干土层增加,且冷空气强活动频繁,所以沙尘天气的发生的频率最高;2002—2003 年,甘肃中西部在正值中心,由于春季降水量增加,使沙尘天气频率降低,强度减弱。

可见,在影响沙尘天气的因子中,冷空气是动力因子,气候背景是必要条件,只有在两者同时具备时,才可能发生沙尘天气,而发生强沙尘暴天气,还必须要丰富的沙尘作为物质条件。

2.2 不同路径类型环流特征

用合成分析方法,得到西北路径类(2000年4月13日、19日;2001年1月31日、3月6日、4月8日、11日、19日、29日;2002年3月17日、4月14日;共10次沙尘天气过程合成)和偏西路径类(2000年12月31

日;2001年4月5日;2003年2月20日、4月17、18日;共5次沙尘天气过程合成)沙尘天气500 hPa平均流场。西北路径类极涡和中国区域环流特点是:极涡基本上对称分布,属双极型,新疆为高压脊,甘肃中西部受高压脊控制,沙尘沿高压脊前西北气流输送到甘肃中西部(图2a-2b);偏西类特点是:极涡为单极型,极涡中心在西半球,新疆为低压槽区,甘肃中西部受槽前偏西气流影响,沙尘主要沿西风气流输送(图2c-2d)。

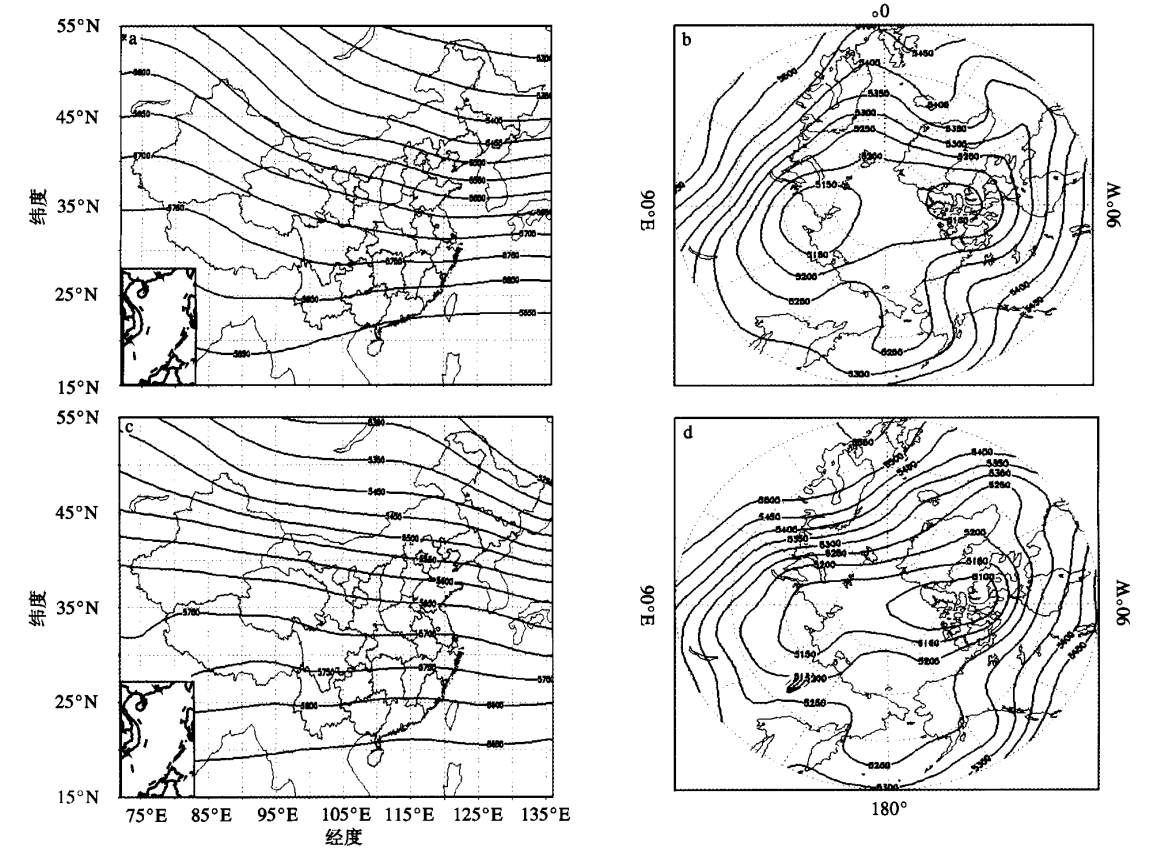


图2 西北(a,b)、偏西(c,d)路径沙尘天气中国区域(a,c)和北半球(b,d)500 hPa平均环流  
Fig. 2 500 hPa mean circulations for the sand-dust storms of (a,b)NW and (c,d)W paths  
in (a,c) China and (b,d) Northern Hemisphere

3 “20010408”强沙尘暴过程分析

2001年4月8日甘肃中西部发生了一次强沙尘暴、霜冻天气,此次强沙尘暴天气过程主要是蒙古气旋和南下的地面冷锋共同造成的,沙尘沿西北路径传播。根据地面观测资料,兰州市最小能见度为400 m,达到强沙尘暴标准,民勤县能见度也下降到800 m以内,酒泉出现沙尘暴和较大降雪天气,伴随

强沙尘暴天气的到来,出现了强霜冻,给当地的农业生产带来了巨大的危害。这次强沙尘暴的发生,是在有利的气候背景和强冷空气作用下共同发生的,它从另一方面说明了强冷空气和有利的天气条件是形成强沙尘暴必不可少的条件,关于这两个方面,前面已有讨论,因此下面仅从稳定性和锋面次级环流对这次强沙尘暴进行诊断分析,试图找出强沙尘暴发生发展的机制。

3.1 CSI 稳定度分析

强沙尘暴发生前,一般都有不稳定层结存在,它为强沙尘暴的发生发展积蓄了能量,当有大尺度系统的触发作用时,引发不稳定能量释放,激发强对流,产生强上升运动,将边界层的沙粒输送到高空,形成强沙尘暴。本文用 NCEP(2.5°×2.5°)1 日 4 次再分析资料,用三次样条插值方法插值到细网格(大约 1°×1°)后,计算兰州 2001 年 4 月 8 日 00—18 时(世界时,下同),900 hPa 到 400 hPa 对流稳定度  $\frac{\partial \theta_e}{\partial p}$ (图 3a)。结果表明:从 4 月 8 日 00 时开始,900 hPa 以下出现弱的对流不稳定,到 4 月 8 日 06 时对流不稳定层结厚度达最大,但不稳定程度仍比

较小;从 06 时开始,不稳定层结的厚度急剧变薄,而对流层中 850~500 hPa 稳定度增大,稳定层结的厚度增加,但稳定性仍比较弱,到 18 时,从 750 hPa 一直到 400 hPa 层结都是稳定的。

此次产生强沙尘暴天气的系统是蒙古气旋和强冷锋,则在锋面附近必然伴随有倾斜的上升和下沉运动,因此,可能存在条件对称不稳定的层结。湿位涡可以有效诊断条件对称不稳定,湿位涡的定义为:

$$\xi_{MPV} = -g\eta \cdot \nabla \theta_e. \tag{1}$$

式中: $g$  是重力加速度; $\eta$  是三维( $x, y, p$ )地转绝对涡度矢量; $\nabla$  是三维梯度算子; $\theta_e$  是相当位温。 $\xi_{MPV}$  在等压面上展开得:

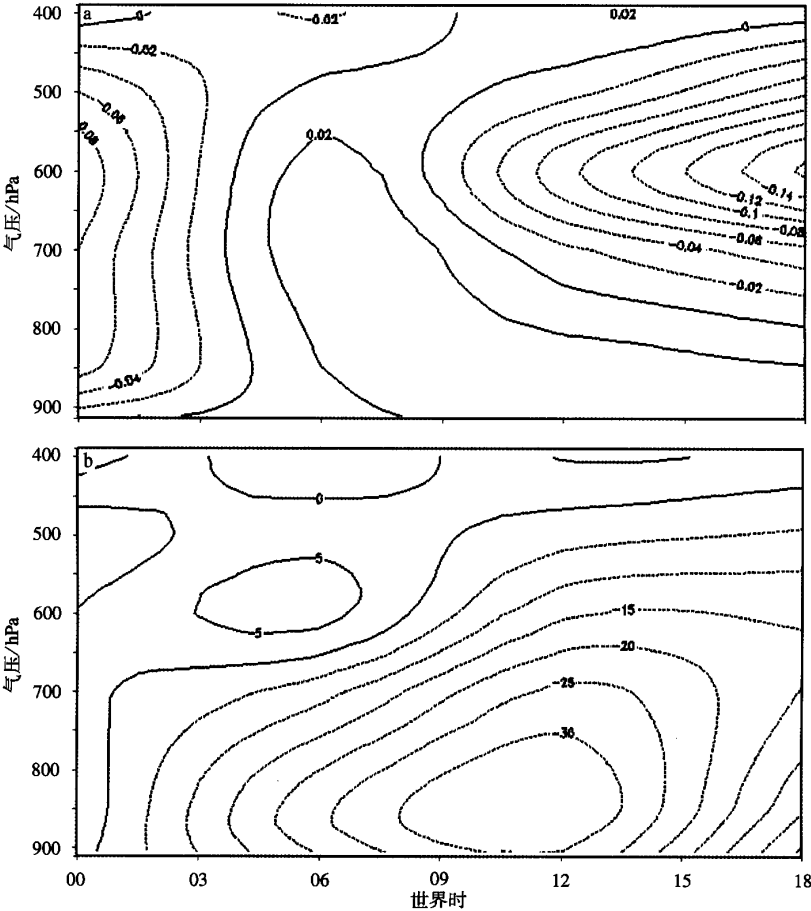


图 3 2001 年 4 月 8 日 00 时到 18 时稳定度变化

a. 对流稳定度(单位:K · hPa<sup>-1</sup>);b. 条件对称稳定度(CSI)(单位:10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup> · K · s<sup>-1</sup> · kg<sup>-1</sup>)

Fig. 3 Temporal variations of (a) the convective stability(K · hPa<sup>-1</sup>) and

(b) conditional symmetric instability(10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup> · K · s<sup>-1</sup> · kg<sup>-1</sup>) of 900~400 hPa from 0000 UTC to 1800 UTC 8 April 2001

$$\xi_{\text{MPV}} = g \left[ \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \frac{\partial v_g}{\partial p} - \frac{\partial \theta_c}{\partial y} \frac{\partial u_g}{\partial p} - \xi \frac{\partial \theta_c}{\partial p} \right]. \quad (2)$$

式中: $\xi$ 是绝对涡度。方程前两项代表斜升对流,第3项为垂直对流项。当对流稳定度 $\frac{\partial \theta_c}{\partial p}$ 较小, $\xi_{\text{MPV}} < 0$ 时对应为条件对称不稳定, $\xi_{\text{MPV}} > 0$ 时为条件对称稳定。以兰州为例,计算2001年4月8日00—18时,900~400 hPa的条件对称稳定度表明(图3b),从00时开始,低层开始出现条件对称不稳层结,以后层结厚度逐渐增加,在12时增加到极大值,并在对流层下层900~750 hPa出现极值,深厚的CSI气层为斜升对流积蓄了能量,由于蒙古气旋和锋面过境,低层气旋中的上升运动引起不稳定能量的释放,从而引发强的倾斜对流,倾斜上升的气流不断把地面的沙粒带到高空,形成强沙尘暴;12时兰州发生强沙尘暴,最小能见度400 m;到18时低层900 hPa以下开始出现正值,CSI逐渐减弱,层结转向稳定,沙尘暴天气也趋于结束。分析酒泉和民勤的对流稳定度和CSI,也有类似的变化特征。可见强沙尘暴的发生发展与气层的CSI发展变化有较好的对应关系,在强沙尘暴的预测预报研究中具有一定的指示意义。

### 3.3 锋面次级环流

近年来发现锋面是一个倾斜的过渡区,锋的两侧存在垂直次级环流,由于锋面次级环流的存在,在锋面两侧出现了强度不同的雨带和强对流天气区<sup>[23]</sup>。本文利用 $Q$ 矢量来诊断锋面次级环流和沙尘暴的关系,选用NCEP( $1^\circ \times 1^\circ$ )1日4次再分析资料, $Q$ 矢量与锋面次级环流的关系为: $Q_x < 0$ 区域,对应西部上升,东部下沉,高层向东,低层向西的纬向垂直环流, $Q_x > 0$ 区域则相反; $Q_y > 0$ 区域,对应南部下沉,北部上升,高层向南,低层向北的经圈垂直环流;当时的天气实况:马鬃山首先出现沙尘暴天气,能见度为600 m;4月7日15时敦煌也出现沙尘暴天气;18时敦煌、玉门镇能见度分别为800 m和700 m;21时,酒泉出现沙尘暴;金昌沙尘暴大约出现在23时,最大风速达 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,能见度为50 m;此时永昌最大风速达 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风向西北,能见度为20 m,此时的金昌能见度也小于50 m;4月8日06时乌鞘岭、白银出现沙尘暴;09时景泰、靖远、兰州、环县出现沙尘暴,其中兰州最小能见度为400 m,达到强沙尘暴标准;4月9日凌晨沙尘暴的天气过程基本结束。

图4a-4h显示了低层850 hPa从2001年4月8

日00—18时 $Q_x$ 和 $Q_y$ 演变情况,它们的演变准确反映了锋面次级环流的发展变化。图4a-4d显示了纬向锋面次级环流的演变情况。由图中可以看出,4月8日00时在甘肃河西有一 $Q_x$ 负值区,对应在该区有气旋式的纬向次级环流发展(图4a),到06时达最强,中心达 $-12 \times 10^{-5} \text{ J} \cdot \text{kg} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (图4b),此时酒泉发生强烈的沙尘暴,12时 $Q_x$ 负值区代表的纬向次级环流进入甘肃中部,兰州出现沙尘天气(图4c),到18时基本移出甘肃中部(图4d); $Q_y$ 代表了经向次级环流的演变情况(图4e-4h),在4月8日00时(图4e)在甘肃河西西部有一很强的气旋式经向垂直环流,中心超过 $-8 \times 10^{-5} \text{ J} \cdot \text{kg} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,到06时(图4f),甘肃中部已经在其控制之下,能见度开始下降,到12时(图4g),兰州位于经向环流的上升气流支,此时兰州沙尘暴天气达到最强时刻;18时, $Q_y$ 负值区域移出甘肃中部,沙尘天气也趋于结束。

从 $Q_x$ 和 $Q_y$ 的演变过程和甘肃西部到中部各地发生沙尘暴天气的时间和强度分析,锋面次级环流与强沙尘暴的发生有比较好的时空对应关系,这对强沙尘暴预报具有一定的理论意义和应用价值。

## 4 结论

(1) 极涡类型、极涡中心位置对甘肃中西部沙尘天气频率影响最为显著。极涡分布形式决定了入侵甘肃中西部冷空气的强弱,当有较强冷空气入侵时,发生强沙尘天气的机率大大增加,因此,冷空气是诊断和预测沙尘天气需要首先考虑的因素。

(2) 土壤表层的干湿、地温的高低和前期降水的多寡是沙尘天气发生的必要条件,一般情况下,冷空气越强,降水越少,前期温度越高,地面干层厚度越深,越容易发生强沙尘暴天气;而在气候条件和沙尘物质具备的情况下,能否发生强沙尘暴,主要取决于是否有较强的冷空气。

(3) 强沙尘暴能否发生,稳定度等天气条件起关键作用,除一般存在对流不稳定外,还存在条件对称不稳定,并且条件对称不稳定出现最大时刻,往往就是强沙尘暴发生的时刻,这点对于预测沙尘暴有一定的指示意义。

(4) 锋面次级环流在强沙尘暴发生发展过程中起重要作用,次级环流中的垂直上升运动使不稳定能量得以释放,使上升运动大大加强,将近地面层的沙尘粒子输送到高空,在天气系统的输送下,导致强沙尘暴的发生。

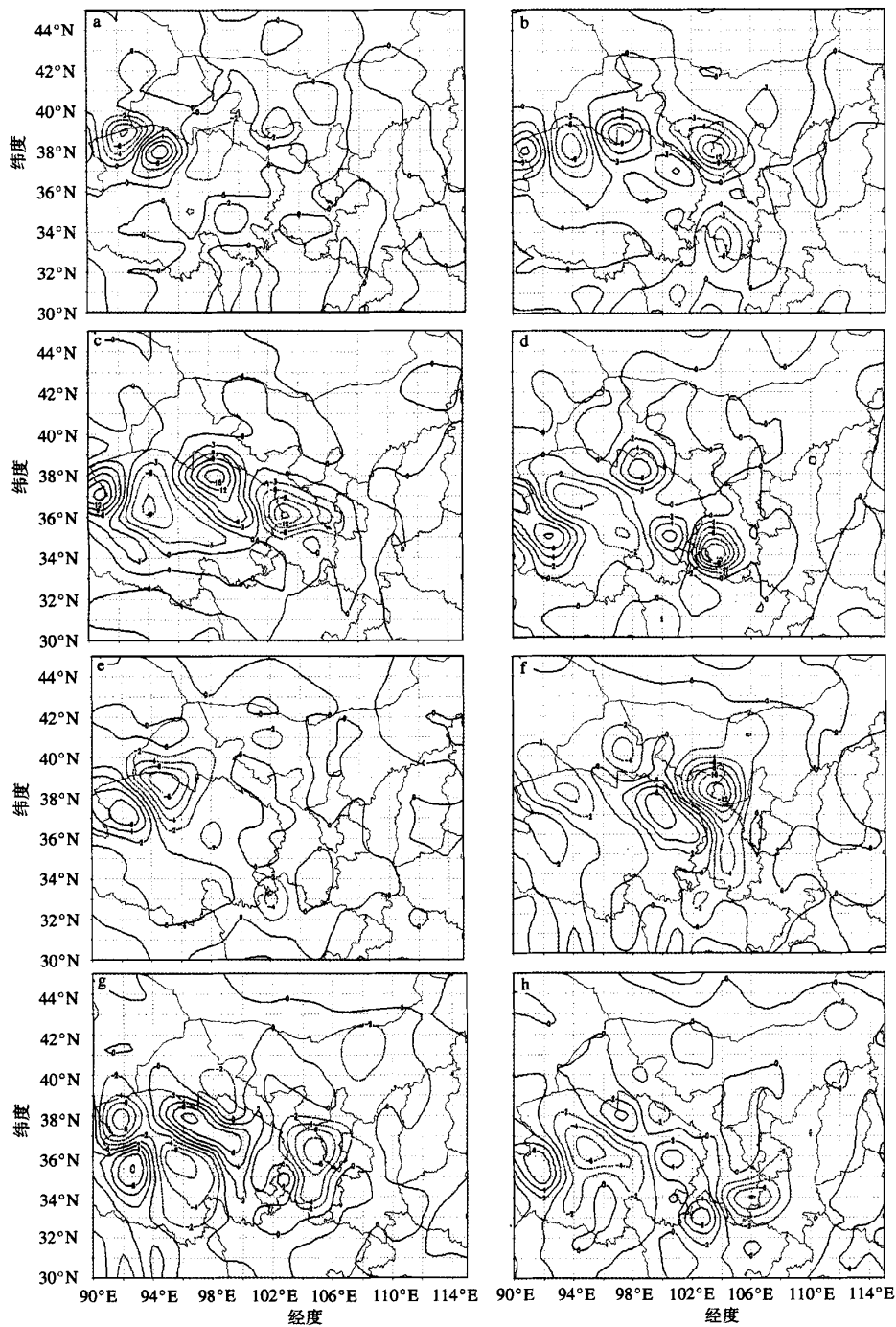


图 4 2001 年 4 月 8 日 850 hPa  $Q_x$ (a-d) 和  $Q_y$ (e-h) (单位:  $10^{-5} \text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
a, e. 00 时; b, f. 06 时; c, g. 12 时; d, h. 18 时

Fig. 4 850 hPa  $Q_x$ (a-d) and  $Q_y$ (e-h) ( $10^{-5} \text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) on 8th April 2001  
a, e. 0000 UTC; b, f. 0600 UTC; c, g. 1200 UTC; d, h. 1800 UTC

## 参考文献:

- [1] 王式功,杨德保,孟梅芝,等. 甘肃河西“5·5”黑风天气系统结构特征及其成因分析[M]//中国沙尘暴研究. 北京:气象出版社,1997:62-64.
- [2] 王式功,董光荣,陈惠忠,等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠,2000,20(4):349-356.
- [3] 王式功,董光荣,杨德保,等. 中国北方地区沙尘暴变化趋势初探[J]. 自然灾害学报,1996,5(2):86-94.
- [4] 张高英,赵思雄,孙建华,等. 近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究[J]. 气候与环境研究,2004,9(1):1-3.
- [5] 翟盘茂,李晓燕. 中国北方沙尘天气的气候条件[J]. 地理学报,2003,58(1):1-2.
- [6] 张平,杨德保,尚可政,等. 2002年春季中国沙尘天气与物理量场的相关分析[J]. 中国沙漠,2003,23(6):675-680.
- [7] 尚可政,孙黎辉,王式功,等. 甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中、东太平洋之间的遥相关分析[J]. 中国沙漠,1998,18(3):239-243.
- [8] 丁瑞强,王式功,尚可政,等. 近45年我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析[J]. 中国沙漠,2003,23(1):306-310.
- [9] 王式功,王金艳,周自江,等. 中国沙尘天气的区域特征[J]. 地理学报,2002,58(2):193-200.
- [10] 林良根,寿绍文,沈之林. 一次强沙尘暴过程中干空气侵入的数值模拟和诊断分析[J]. 南京气象学院学报,2006,29(3):85-92.
- [11] 刘毅,张华,周明煜. 一次沙尘暴天气及沙尘输送过程的数值模拟[J]. 南京气象学院学报,1997,20(4):95-101.
- [12] 胡文东,纪晓玲,李艳春,等. 2001年4月8日宁夏强沙尘暴天气中尺度系统分析[J]. 南京气象学院学报,2004,27(6):74-82.
- [13] 牛若芸,薛建军,周自江. 2002年我国沙尘暴天气特征分析[J]. 南京气象学院学报,2004,27(2):37-43.
- [14] 李耀辉,赵建华,薛纪善,等. 基于GRAPES的西北地区沙尘暴数值预报模式及其应用研究[J]. 地球科学进展,2005,20(9):999-1011.
- [15] Wang Z, Ueda H, Huang M. A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia[J]. J Geophys Res, 2000,105(D22):26947-26960.
- [16] Shao Y, Yang Y, Wang J, et al. Northeast Asian dust storms: Real-time numerical prediction and validation[J]. J Geophys Res, 2003,108:4691-4718.
- [17] Gong S L, Barrie L A, Blanchet J-P. Modeling sea-salt aerosols in the atmosphere: 1. Model development[J]. J Geophys Res, 1997,102:3805-3818.
- [18] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L. Model simulation and validation[J]. J Geophys Res, 2003,108(D9):4262-4273.
- [19] Shao Y, Jung E J, Leslie L M, et al. Numerical prediction of northeast Asian dust storms using an integrated wind erosion modeling system[J]. J Geophys Res, 2002,107:4814-4836.
- [20] Marticorena B, Bergametti G, Aumont B. Modeling the atmospheric dust cycle: 2. Simulation of Saharan dust sources[J]. J Geophys Res, 1997,102:4387-4404.
- [21] Lettau K, Lettau H. Experimental and micro-meteorological field studies of dune migration[C]// Lettau K, Lettau H. Exploring the world's driest climate. Madison: University of Wisconsin Press, 1977:110-147.
- [22] 国家气象中心. 沙尘天气年鉴2000—2003[M]. 北京:气象出版社,2004.
- [23] 寿绍文,励申申,姚秀萍,等. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社,2003:280-281.