

文章编号:1000-694X(2007)04-0668-04

# 民勤一次沙尘暴天气过程的稳定度分析

岳平<sup>1,2,3</sup>, 牛生杰<sup>2</sup>, 张强<sup>1</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, 甘肃 兰州, 730020;  
2. 南京信息工程大学气象灾害国家重点实验室培育点, 江苏 南京 210044; 3. 张掖国家气候观象台, 甘肃 张掖 734000)

**摘 要:** 用 2004 年 5 月 23—24 日民勤基准气象站发生的一次沙尘暴天气过程加密探测, 对大气热力参数“3 $\theta$ ”和动力参数“相对风暴螺旋度”进行了计算和分析。结果表明: 沙尘暴来临前到沙尘暴过境的前半期, 大气温湿结构的分布有利于沙尘暴的发生、发展; 沙尘暴过境的后期, 大气层结调整到稳定状态, 抑制了干对流的发展; 沙尘暴天气结束后整层大气湿度增大, 并出现了小雨天气。沙尘暴期间相对风暴螺旋度值小于雷暴等强烈湿对流的临界值, 但仍然与沙尘暴的强度有很好的对应关系。

**关键词:** 沙尘暴; 稳定度; 相对风暴螺旋度; 大气层结  
**中图分类号:** P458 **文献标识码:** A

关于沙尘暴的形成机制, 虽然目前还存在不同观点, 但是, 钱正安<sup>[1]</sup>提出的沙尘暴发生的三个必要条件: 强风、不稳定的大气层结和沙源, 已为大多数人所接受<sup>[2-3]</sup>。虽然沙尘暴的形成和发展具有一定的复杂性, 但不论其形成机制多么复杂, 如果要发生沙尘暴天气, 大气层结及气象要素的分布以及稳定度等方面必定会朝有利于沙尘暴天气现象发生的方向发展; 与之相应, 在天气现象结束前, 大气层结及高空气象要素必然会调整到不利于地面沙尘粒子进入大气层的状态。我国学者以往针对沙尘暴的研究主要集中在: 沙尘暴形成的动力特征<sup>[1-2,4-6]</sup>、气候特征和变化趋势<sup>[7-12]</sup>、数值模拟与远程传输<sup>[13-15]</sup>、遥感监测<sup>[16-18]</sup>、沙尘暴期间地面要素微气象特征的变化<sup>[19-20]</sup>、沙尘粒子的物理化学特性<sup>[21-25]</sup>、沙尘气溶胶的生态环境和气候效应以及辐射强迫<sup>[25-27]</sup>等领域。由于受观测资料的限制, 目前很少对沙尘暴期间大气稳定度及其变化进行系统分析。

笔者利用民勤基准气象站 L 波段探空雷达对 2004 年 5 月 23—24 日发生在当地的一次沙尘暴天气过程进行了探空观测, 得到了沙尘暴发生前夕(23 日 19 时 15 分)、沙尘暴发生期间(23 日 23 时 02 分和 24 日 02 时 02 分)以及沙尘暴天气现象结束降水天气发生前(24 日 07 时 16 分)共 4 次的探空资料。并对 4 个时段的大气热力参数“3 $\theta$ ”的垂直分布及变化特征进行了研究, 同时计算了表示动力特征的一个物理参

数——相对风暴螺旋度, 目的在于揭示沙尘暴天气过程气象要素的演变以及大气稳定度的变化特征。

## 1 天气实况

民勤县位于甘肃省河西走廊中部, 西北与巴丹吉林沙漠相连, 东侧与腾格里沙漠接壤, 境内多沙丘和沙丘链; 长年降水稀少, 气候干燥, 是我国沙漠化比较严重的地区之一, 也是春季我国西北地区强沙尘暴的多发中心之一。受到北方冷空气入侵的影响, 2004 年 5 月 23 日 20 时 40 分至 24 日 04 时 15 分出现了强沙尘暴天气, 平均风力 12 m·s<sup>-1</sup> 以上的大风持续时间长达 5 h, 导致水平能见度极度恶化, 最小能见度仅为 200 m。之后, 随着地面风速逐渐减弱, 水平能见度慢慢转好; 于 24 日 04 时 15 分至 05 时 20 分沙尘强度减弱为扬沙天气。此外, 地面冷锋过境后, 从 07 时 43 分开始, 民勤站出现小雨天气。

## 2 沙尘天气过程中大气稳定度分析

### 2.1 热力学参数

大气层结稳定度是用位温( $\theta$ )、假相当位温( $\theta_{se}$ )与饱和假相当位温( $\theta_s$ )的垂直分布表征的。它们分别可以根据公式<sup>[28]</sup>:

$$\theta = T(1000/p)^{R/c_p} \quad (1)$$

$$\theta_{se} = \theta \exp\left(\frac{L}{C_p} \frac{q}{T_1}\right) \quad (2)$$

收稿日期: 2006-03-09; 改回日期: 2006-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40365002, 40175004); 干旱气象科学研究基金项目(IAM200414); 甘肃省气象局业务处科技项目共同资助

作者简介: 岳平(1974—), 男(汉族), 甘肃静宁人, 工程师, 博士生, 主要从事天气气候及沙尘气溶胶研究。

E-mail: jqyueping@126.com 或 yueping@nuist.edu.cn

$$\theta_e = \theta \exp\left(\frac{L}{C_p} \frac{q_s}{T_1}\right) \quad (3)$$

计算得到。图1是民勤基准站2004年5月23日19时15分、23日23时02分、24日02时02分和24日07时16分的4次探空资料进行计算得到的 $\theta$ 、 $\theta_{se}$ 和 $\theta_e$ 垂直分布廓线。

根据图1a可知,23日19时15分民勤站的地面温度非常高,饱和假相当位温达到400 K,同时 $\theta_e$ 随气压降迅速减小表明垂直方向的温度递减率非常大; $\theta$ 和 $\theta_{se}$ 线在500 hPa高度层以下距离接近, $\theta_{se}$ 和 $\theta_e$ 之间

距离非常大,表明低层大气极为干燥;500 hPa等压面高度层以下 $\theta$ 及 $\theta_{se}$ 线几乎垂直于横坐标轴,表明大气层结非常接近绝热状态,并且不稳定层结到达500 hPa等压面高度。图中反映出潜在不稳定能量接近于0,因此,温度层结对此此次沙尘暴的贡献首先在于不妨碍动量垂直交换;其次,这种热力状态的大气边界层在天气尺度气流的作用下所产生巨大的温度梯度,不仅能使水平方向风力显著加大,还能够在垂直方向激发强对流体,从而诱发强沙尘暴天气现象。

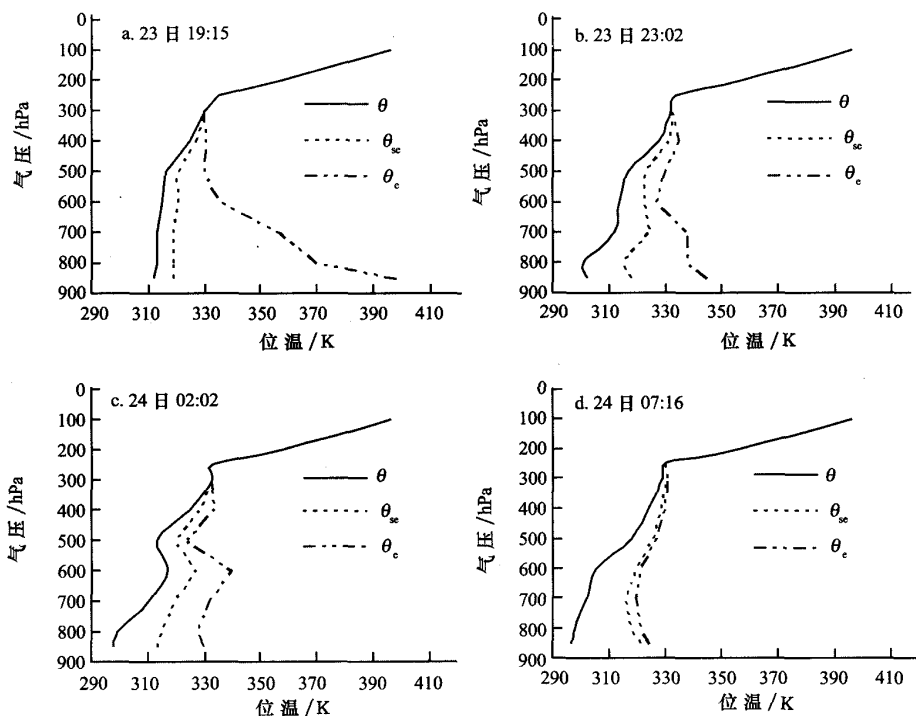


图1 2004年5月23—24日民勤站的位温( $\theta$ ),假相当位温( $\theta_{se}$ )及饱和假相当位温( $\theta_e$ )的垂直廓线

Fig. 1 Profiles of potential temperature, potential equivalent temperature and saturation potential equivalent temperature at Minqin station on May 23—24, 2004

图1b中,从700—500 hPa高度层内, $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ 且 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z} < 0$ ,大气层结为条件不稳定。沙尘暴的后期阶段(图1c), $\theta$ 、 $\theta_{se}$ 和 $\theta_e$ 的调整向着不利于沙尘暴维持的方向发展,即对流减弱,同时 $\theta_{se}$ 和 $\theta_e$ 两条线之间的距离在不断接近,表明随着时间的推移,大气中的水汽在不断的增加。图1c当中,从地面到600 hPa, $\frac{\partial \theta_e}{\partial z} > 0$ ,表明该层大气处于绝对稳定状态。

图1d是沙尘天气结束后的 $\theta$ 、 $\theta_{se}$ 和 $\theta_e$ 的垂直廓线。可以发现 $\theta_{se}$ 和 $\theta_e$ 的距离非常接近,表明沙尘暴

结束后,整层大气的湿度有了很大增加,尤其是在650 hPa等压面以上两条曲线几乎重合,表明中高层大气接近饱和状态。从07时43分开始,民勤站出现小雨天气。

## 2.2 相对风暴螺旋度计算及分析

作为强对流天气的一个重要指标,螺旋度这个物理量最近几年在沙尘暴的研究中初步得到了重视<sup>[29-31]</sup>。螺旋度严格定义为:

$$H = \iiint V \cdot (\nabla \wedge V) d\tau \quad (4)$$

在大气现象研究中,通常按照相对气流选取参

照物的不同,可将螺旋度分为两类<sup>[32]</sup>:

$$H(C) = \int_0^h k \cdot [(V - C) \wedge \frac{\partial V}{\partial z}] dz \quad (5)$$

$$H(0) = \int_0^h k \cdot (V \wedge \frac{\partial V}{\partial z}) dz \quad (6)$$

其中,  $H(C)$  和  $H(0)$  分别称为相对风暴螺旋度(RSH)和相对地面螺旋度。如果将式(5)用静力学方程转化到  $p$  坐标系后可以得到:

$$H(C) = \int_{p_0}^{p_h} (V - C) \cdot \xi_h dp \quad (7)$$

螺旋度的单位是  $m^2 \cdot s^{-2}$ ; 上述式子中其余符号表示:  $k$  为垂直单位矢量;  $C$  为风暴移速,  $h$  为风暴入流厚度,  $\xi_h$  为  $h$  高度的水平涡度;  $V$  为风速,  $z$  为垂直高度。

即相对风暴螺旋度是指:在一定厚度层的大气中,风暴相对气流与环境水平涡度的点积,并将  $H(C) = 150 m^2 \cdot s^{-2}$  作为强对流风暴发展的临界值<sup>[33]</sup>。由式(7)可以看出:相对风暴螺旋度反映的是风暴相对入流强度、环境场的旋转程度以及沿旋转轴方向(这里指沿垂直方向)运动的强弱程度。其值越大,表示风暴旋转性越大,风暴强度越大,越有利于垂直方向气流的上升运动,从而促进对流的发展,是表征对流发展程度的一个重要指标。

取  $h = 3\ 000\ m$ , 利用单站探空资料把式(5)转换为:

$$H(C) = \sum_{n=0}^{N-1} [(u_{n+1} - C_x)(v_n - C_y) - (u_n - C_x)(v_{n+1} - C_y)] \quad (8)$$

$C$  以  $850-400\ hPa$  气层中的平均风为依据,取该风速的 75% 为风暴速度,方向向右偏转  $40^\circ$  作为风暴来向。由于沙尘暴是对流层低层发生的一种干对流<sup>[10]</sup>, 所以很难比较深厚,沙尘暴天气的对流高度一般在  $2-3\ km$  以内<sup>[7]</sup>。考虑到甘肃省河西走廊的海拔高度在  $1\ 500\ m$  左右,为了使积分求和厚度能够达到  $3\ 000\ m$ ,在求相对风暴螺旋度时选取地面到  $600\ hPa$  风资料进行计算。 $600\ hPa$  的风是根据  $700\ hPa$  和  $500\ hPa$  的风进行线性内插所得。

表 1 中给出了由 2004 年 5 月 23 日 19 时 15 分到 24 日 07 时 16 分 4 次探空资料计算得到的相对风暴螺旋度、与探空邻近时刻的地面观测水平风速和水平能见度。可以发现,螺旋度是一个极容易发生变化的参数。前 2 次探空之间的时间间隔仅为  $3\ h\ 47\ min$ ,但螺旋度值增加了  $104\ m^2 \cdot s^{-2}$ 。截止 24 日 02 时 02 分,螺旋度减小到了  $81\ m^2 \cdot s^{-2}$ ;在沙尘暴结束以后,根据 24 日 07 时 16 分探空资料计算得到的螺旋度值仅为  $16\ m^2 \cdot s^{-2}$ 。从表 1 还可

以发现,螺旋度与沙尘暴的强度在时间上依然具有很好的对应关系。另据地面实时观测资料可知,23 日 23 时 02 分前后是地面水平风速最大、水平能见度最低的时段。

表 1 民勤 4 次探空资料计算的不同时间的相对风暴螺旋度及对应地面水平风速和能见度

Tab. 1 Relative storm helicity values computed by four times detection and corresponding horizontal wind speed and visibility in Minqin station

参数	23 日 19:15	23 日 23:02	24 日 02:02	24 日 07:16
螺旋度值/( $m^2 \cdot s^{-2}$ )	5	109	81	16
水平风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	214	11	7	
能见度/m	30 000	300	700	22 000

### 3 结论与讨论

1) 2004 年 5 月 23—24 日沙尘暴及其前后,在河西走廊中部的民勤基准气象站的 4 次探空,得到了沙尘暴前后以及沙尘暴过境时其内部的温、湿和水平风资料。通过分析“ $3\theta$ ”变化发现,沙尘暴来临前,  $500\ hPa$  等压面高度层以下  $\theta$  及  $\theta_{se}$  线几乎垂直于横坐标轴,表明大气层结非常接近绝热状态,并且不稳定层结到达  $500\ hPa$  等压面高度。这种热力状态的大气边界层在天气尺度气流的作用下所产生巨大的温度梯度,不仅能使水平方向风力显著加大,还能够在垂直方向激发强对流体,从而诱发强沙尘暴天气现象。在这次沙尘暴期间,23 时 02 分的“ $3\theta$ ”表明,大气层结为条件不稳定。沙尘暴的后期阶段,24 日 02 时 02 分的结果显示,大气层结已经属于绝对稳定状态。沙尘天气结束后,  $\theta_{se}$  和  $\theta_e$  两条曲线非常接近,说明整层大气的湿度有了很大增加。

2) 由于沙尘暴是发生在对流层中低层的干对流现象,水汽相变释放的潜热作用在此过程中相当小,因此,沙尘暴期间相对风暴螺旋度值小于雷暴等强烈湿对流的临界值,但在时间上仍然与沙尘暴的强度有很好的对应关系。

### 参考文献(References):

- [1] 钱正安,胡隐樵,龚乃虎,等.“93.5.5”特强沙尘暴的调查报告及其分析[C]//方宗义.中国沙尘暴研究.北京:气象出版社,1997:37—43.
- [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] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北地区沙尘天气的成因与治理对策[J].地理学报,2000,55(5):513—521.
- [5] 胡隐樵,光田宁.沙尘暴发展与干飚线-黑风暴形成机理的分

- 析[J]. 高原气象, 1996, 15(2): 178—185.
- [6] 徐国昌, 陈敏莲, 吴国雄. 甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37(4): 26—35.
- [7] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近50年中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 106—111.
- [8] 牛生杰, 孙继明, 桑建人. 贺兰山地区沙尘暴发生次数的变化趋势[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 55—58.
- [9] 丁瑞强, 王式功, 尚可政, 等. 近45a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(3): 306—310.
- [10] 王训明, 董治宝, 陈广庭. 塔克拉玛干沙漠中部部分地区风沙环境特征[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 56—61.
- [11] 李栋梁, 钟海玲, 魏丽, 等. 中国北方沙尘暴日数的气候特征及对春季高原地面感热的响应[J]. 高原气象, 2003, 22(4): 337—345.
- [12] 周自江, 王锡稳. 西北地区东部群发性沙尘暴序列的建立与分析[J]. 地理学报, 2002, 57(4): 437—442.
- [13] 程麟生, 马艳. “93.5”黑风暴发展结构和不同模式分辨率的数值试验[J]. 应用气象学报, 1996, 7(4): 386—395.
- [14] 刘毅, 任立新, 周乐义. 一次黄沙输送过程的数值模拟研究[J]. 大气科学, 1998, 22(2): 905—912.
- [15] 肖辉. 东亚地区沙尘气溶胶影响硫酸盐形成的模式评估[J]. 大气科学, 1998, 22(3): 333—353.
- [16] 郑新江, 陆文杰, 罗敬宁. 春季沙尘暴的 NOAA—14 气象卫星监测研究[J]. 遥感技术与应用, 2002(5): 300—305.
- [17] 方宗义, 张运刚, 郑新江, 等. 用气象卫星遥感监测沙尘的方法和初步结果[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 48—55.
- [18] 郭妮, 倾继祖. NOAA 卫星沙尘暴光谱特征分析及信息提取研究[J]. 高原气象, 2004, 23(5): 643—647.
- [19] 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.
- [20] 胡泽勇, 黄荣辉, 卫国安, 等. 2000年6月4日沙尘暴过程过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征变化[J]. 大气科学, 2002, 26(1): 1—8.
- [21] 成天涛, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的粒谱特征[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 147—153.
- [22] 张仁健, 王明星, 浦一芬, 等. 2000年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 259—266.
- [23] 牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 贺兰山地区沙尘暴若干问题的观测研究[J]. 气象学报, 2001, 59(2): 196—205.
- [24] 牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究[J]. 大气科学, 2001, 25(2): 243—252.
- [25] 庄国顺, 郭敬华, 袁惠, 等. 2000年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J]. 科学通报, 2001, 46(3): 191—197.
- [26] 沈志宝, 魏丽. 我国西部大气沙尘气溶胶的辐射效应[J]. 大气科学, 2000, 24(4): 541—548.
- [27] 胡荣明, 石广玉. 中国地区气溶胶的辐射强迫及其气候响应实验[J]. 大气科学, 1998, 22(6): 919—925.
- [28] 雷雨顺. 能量天气学[M]. 北京: 气象出版社, 1986: 13—17.
- [29] 王劲松, 李耀辉, 康风琴, 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.
- [30] 陶健红, 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.
- [31] 郑广芬, 赵光平, 李艳春, 等. 宁夏中北部地区沙尘暴天气发生过程中的不稳定条件分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 701—705.
- [32] Tudurf E, Ramis C. The environments of significant convective events in the Western Mediterranean[J]. Wea Forecasting, 1997, 12: 294—306.
- [33] Jones D R P, Burgess D W, Foeter M. Test of helicity as a forecast parameter[R]. Preprint, 16<sup>th</sup> Conference on Severe Local Storm, kisKanas Park, AB, Canada, Amer Metero Soc, 1990: 588—592.

## Analysis on Stability of A Sand-dust Storm Weather in Minqin Station

YUE Ping<sup>1,2,3</sup>, NIU Sheng-jie<sup>2</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>

(1. Gansu Province & China Meteorological Administration Key Laboratory of Arid Climatic Changes and Disaster Reduction; Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. National Climate Observatory of Zhangye, Zhangye 734000, Gansu, China)

**Abstract:** Based on the high detective data on May 23 to 24 of 2004 over Minqin base station in Hexi corridor of Gansu province, the atmospheric thermal parameter “ $3\theta$ ” and the dynamic parameter “relative storm helicity” were analyzed. The results showed that the atmospheric stratification was hot and dry before the sand-dust storm, which was advantageous to the forming and development of sand-dust storm; the atmospheric stratification was cold and wet at the end of sand-dust storm, which limited the development of dry convection; after the sand-dust storm weather, the atmospheric humidity remarkably increased and even rained slightly. The value of relative storm helicity during sand-dust storm period was smaller than that during thunderstorm and others the intense wet convection weather systems, but it still has close corresponding relation with the sand-dust storm intensity.

**Keywords:** sand-dust storm; stability; relative storm helicity; atmospheric stratification