

文章编号：1001-4675(2008)05-0700-05

强沙尘暴过程高空温湿风结构和大气稳定度分析

田庆明^{1,2,3}, 马廷德², 刘晓云², 岳平^{1,3}

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 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. 酒泉市气象局, 甘肃 酒泉 735000; 3. 张掖国家气候观象台, 甘肃 张掖 734000)

摘要：利用2004年5月23~24日沙尘暴过程中民勤站观测资料, 分析了湿饱和位温、比湿和风速垂直廓线分布特征及沙尘暴期间沙尘暴强度、地面气象要素和螺旋度之间的对应关系。结果显示: 在沙尘暴爆发前, 大气层结处于不稳定状态, 大气温、湿风垂直结构有利于沙尘暴的发生发展; 沙尘暴期间, 大气稳定度逐渐增大, 出现了稳定与不稳定相间的情况, 不利于对流的进一步发展; 特别是在沙尘暴生命史后期阶段, 大气层结调整到稳定状态, 抑制了干对流的发展。在沙尘暴过程中, 螺旋度与地面气象要素及沙尘暴强度之间存在很好的对应关系。

关键词：沙尘暴; 气象要素; 稳定度; 民勤

中图分类号：P425.5⁵ **文献标识码：**A

干旱半干旱和荒漠化地区春季发生的沙尘暴现象引起了科学家们的高度重视^[1~6], 尤其是最近20年来, 在我国北方发生过数次破坏性极强的沙尘暴天气, 给人民生命和财产造成的损失绝不亚于台风及特大暴雨等自然灾害^[7]。由于沙尘暴的形成和发展具有相当的复杂性, 目前还没有一致的观点^[8], 特别是对沙尘暴形成机理的认识还不够深入。但是, 作为边界层内发生的天气现象, 在沙尘暴暴发前期, 大气层结及气象要素的分布以及稳定度等方面, 必定会朝着有利于沙尘暴天气现象发生的方向发展; 与之相对应, 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。

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^[1~2]、气候统计^[3,9~10]、数值模拟与远程传输^[11~12]、遥感监测^[13~15]、沙尘暴期间地面要素微气象特征的变化^[16~17]、沙尘粒子的物理化学特性^[18~20]、沙尘气溶胶的环境和气候效应以及辐射强迫^[21~23]等领域。受观测资料的限制, 对沙尘暴内部气象要素特征, 以及沙尘暴天气过程中大气稳定度变化分析较少。民勤县位于甘肃省河西走廊东部, 西北与巴丹吉林沙漠相连, 东侧与腾格里沙漠接壤, 是位于两大沙漠之间的绿色屏障, 境内存在沙丘和沙丘链。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。近年来, 民勤严重恶化的生态问题引起了政府的高度关注。本文根据2004年5月23~24日甘肃省民勤县沙尘暴天气过程中L波段探空雷达获得的资料, 分析了沙尘暴发生前夕(2004-05-23T19:15)、发生期间(2004-05-23T23:02和2004-05-24T02:02)以及沙尘暴天气现象结束降水天气发生前(2004-05-24T07:16)饱和湿位温、比湿和风速垂直分布廓线特征。

1 天气实况

受北方冷空气入侵的影响, 2004-05-23T20:40~2004-05-24T04:15出现了强沙尘暴天气, 平均风力12 m/s以上的大风持续时间长达5 h, 导致水平能见度仅为200 m。之后, 水平气压梯度减小, 地面风速逐渐减弱, 水平能见度慢慢转好, 并于2004-05-24T04:15~2004-05-24T05:20沙尘强度减弱为扬沙天气。此外, 地面冷锋过境后, 从07:43开始, 民勤站出现小雨天气。

1.1 湿饱和位温变化特征

图1为沙尘暴前后及期间4个时段获得的大气层位湿饱和温分布廓线。2004-05-23T19:15近

收稿日期: 2007-03-06; 修订日期: 2007-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40765005); 中国气象局干旱气象基金(AM200817)共同资助

作者简介: 田庆明(1974-), 男, 甘肃酒泉人, 工程师, 主要从事短期气象预报及气象灾害研究. E-mail: jqyp533@163.com

地层气温较高,从地面至500 hPa为不稳定层结;2004-05-23T 23:02温度廓线表明,在沙尘暴发生的前期,地面到600 hPa范围出现了不稳定与稳定相间的情况,不利于对流的发展;2004-05-24T 02:02在600 hPa高度以下,层结处于绝对稳定状态。

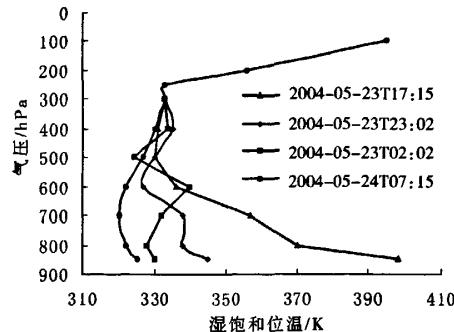


图1 沙尘暴过程中湿饱和位温垂直廓线
Fig. 1 Vertical Profiles of saturation potential temperature during a sandstorm

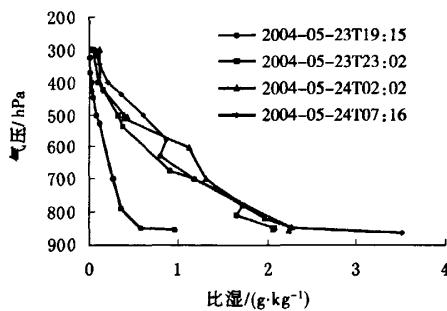


图2 沙尘暴过程中比湿垂直廓线
Fig. 2 Vertical Profiles of specific humidity during a sandstorm

1.2 湿度演变特征

从图2可以看出,在沙尘暴发生前期,整层大气比较干燥,近地层的比湿仅为0.9 g/kg。在高空冷槽及地面冷锋逐渐逼近测站的过程中,整层大气的湿度不断增加。2004-05-23T 23:02 和 2004-05-24T 02:02 的探空结果表明,600 hPa以下整层大气湿度增加了2倍,尤其是2004-05-24T 02:02 600~650 hPa出现了明显的逆湿现象。截至2004-05-24T 07:16,600~650 hPa的湿度在增大的同时,近地层湿度达到了3.5 g/kg,比第1次探空时湿度增大了近4.5倍,比第2和第3次探空时湿度增加了近2倍。

1.3 风速演变特征

图3表明,在近地层,地面冷锋系统过境前夕,地面风速从弱风(2 m/s)增加到了14 m/s,但在冷锋过境后,地面风速逐渐减小,这个过程主要是由于冷锋过境前后地面气压梯度的急剧变化造成的。同时,从4次高空风廓线可以看出,200 hPa附近高空风速很大。另外,从图3可以看出:2004-05-23T 19:15,200 hPa风速为30 m/s,中低层风速尤其是500 hPa等压面以下的高空风极小,在200~400 hPa范围内风廓线梯度较大。沙尘暴发生前夕(2004-05-23T 19:15)垂直风廓线显示出动力不稳定性,它是触发沙尘暴的重要物理原因之一。2004-05-23T 23:02的风廓线显示,当高空冷槽接近测站上空时,200 hPa等压面风速增加到了38 m/s,比19:15的风速增加了8 m/s。上层动量下传使500 hPa等压面以下的风速显著增大,同时地面冷锋逼近造成地面气压梯度加大,近地层风速进一步增加,为起沙过程提供了必要的动力条件。02:02,即沙尘暴后期阶段,200 hPa等压面风速与23:02的风速相比,变化不明显,高空动量下传作用仍然存在。但是强锋区过境后地面处在高压的控制之下,气压梯度很小,地面风速明显减小,气沙的动力条件减弱,沙尘暴天气逐渐消失。

2 相对风暴螺旋度

螺旋度是表征流体沿旋转方向运动特征的物理量,在大气现象研究中,通常相对风暴螺旋度 $H(C)$ 计算公式为^[24]:

$$H(C) = RSH = \int_0^h k \cdot \left[(V - C) \wedge \frac{\partial V}{\partial z} \right] dz \quad (1)$$

将式(1)用静力学方程转化到 p 坐标系后可以得到:

$$H(C) = RSH = \int_{p_0}^{p_h} (V_h - C) \cdot \xi_h dp \quad (2)$$

式中:螺旋度的单位是 m^2/s^2 ; C 为风暴移速; h 为风暴入流厚度; ξ_h 为 h 高度的水平涡度; V 为风速; z 为垂直高度。由式(2)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运动的强度。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,是表征对流发展程度的一个重要指标^[25-26]。

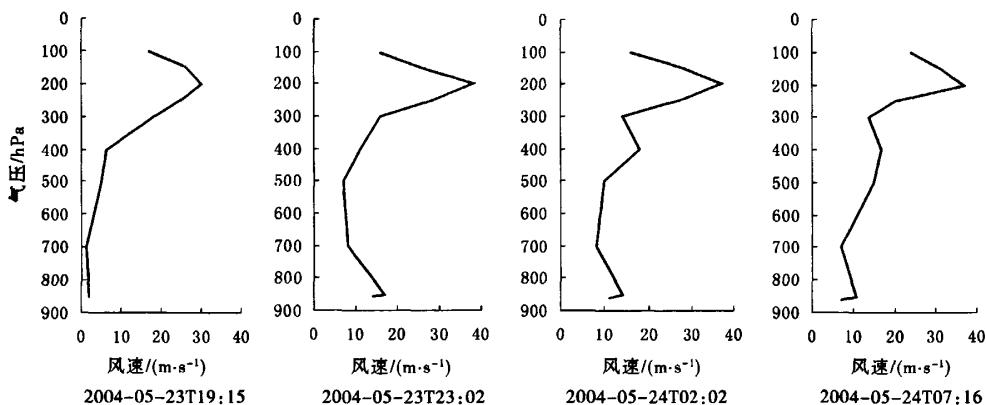


图3 沙尘暴过程中风速垂直廓线

Fig. 3 Vertical Profiles of wind speed during a sandstorm

本文 $H = 3000$ m, 利用单站探空资料把式(2)转换为:

$$H(C) = \sum_{n=0}^{N-1} [(u_{n+1} - C_x)(v_n - C_y) - (u_n - C_x)(v_{n+1} - C_y)] \quad (3)$$

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° 作为风暴来向。由于沙尘暴天气的对流高度一般在 2~3 km 以内^[7], 考虑到甘肃省河西走廊的海拔高度在 1500 m 左右, 为了使积分求和厚度能够达到 3000 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。

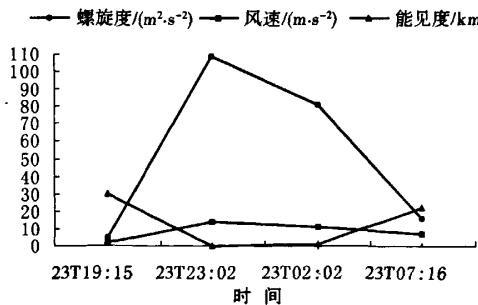


图4 民勤站沙尘暴过程中相对风暴螺旋度及对应地面水平风速和能见度变化

Fig. 4 RSH values and corresponding horizontal wind speed and visibility at Minqin Meteorological Station

图4给出了由 2004-05-23T19:15~24T07:16 四次探空的相对风暴螺旋度、邻近探空时刻的地

面整点观测水平风速和水平能见度。可以发现, 沙尘暴前后螺旋度变化非常大。前 2 次的时间间隔仅为 3 h 47 min, 但螺旋度值增加了 104 m²/s²; 到了 24T 02:02, 螺旋度减小到了 81 m²/s²; 在沙尘暴结束后, 24T 07:16 螺旋度值仅为 16 m²/s²。图 4 明显地反映出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, 23T 23:02 前后是地面水平风速最大、水平能见度最低的时段, 同时是相对螺旋度最大时间。

3 小结

(1) 在沙尘暴发生前, 地面气温较高, 整层大气湿度较小, 大气层结处不稳定状态; 在沙尘暴生命的前期, 受高空冷槽和地面冷锋过境影响, 在高空动量下传和地面水平气压梯度的共同作用下产生强风, 形成沙尘暴天气现象。沙尘暴的中后期增湿现象最为明显, 温度层结出现了稳定与不稳定相间的情况, 大气温、湿风垂直结构不利于沙尘暴的发展和维持。当地面冷锋过境后, 低层气压梯度减小, 高空动量下传作用逐渐减弱, 起沙的动力条件难以满足, 沙尘暴天气结束。

(2) 沙尘暴是发生在对流层中低层的干对流现象, 强沙尘暴的形成在具备丰富沙源的前提下, 通常需要具备动力和热力不稳定条件, 而螺旋度恰好能够反映大气动力和热力不稳定因素的物理量。虽然强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, 但在时间上仍然与地面气象要素及

沙尘暴的强度之间有良好的对应关系。

参考文献(References):

- [1] 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.[Ye Duzheng, Chou Jifan, Liu Jiyan, et al. Cause of sand-stormy weather in northern China and control measure [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 513-521.]
- [2] 周秀骥,徐祥德,颜鹏,等.2000年春季沙尘暴动力学特征[J].中国科学:D辑,2002,32(4):327-334.[Zhou Xiiji, Xu Xiangde, Yan Peng, et al. Sandstorm dynamical characters in the spring of 2000 [J]. *Science China: Series D*, 2002, 32(4): 327-334.]
- [3] 钱正安,宋敏红,李万元.近50年来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.[Qian Zhengan, Song Minghong, Li Wanyuan. Analysis on distributive variation and forecast of sandstorms in recent 50 years in north China [J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(2): 106-111.]
- [4] 石广玉,赵思雄.沙尘暴研究中的若干科学问题[J].大气科学,2003,27(4):591-606.[Shi Guangyu, Zhao Sixiong. Several scientific issues of studies on sand storms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4): 591-606.]
- [5] Husar R B, Tratt D M, Schichetel B A, et al. Asian dust events of April of 1998 [J]. *Journal Geographical Research*, 2001, 106(D16):317-330.
- [6] Tratt D M, Frouin R J, Westphal D L. April 1998 Asian dust event: a southern California perspective [J]. *Journal Geographical Research*, 2001, 106(D16):18 371-18 379.
- [7] 胡隐樵,光田宁.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.[Hu Yingqiao, Mitsuta Y. Development of the strong dust storm and dry squall line—A mechanism analysis on generating black storm [J]. *Plateau Meteorology*, 1996, 15(2): 178-185.]
- [8] 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.[Zhang Qiang, Wang Sheng. On physical characteristic of heavy dust storm and its climate effect [J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(5): 675-681.]
- [9] 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.[Li Dongliang, Zhong Hailing, Wei Li, et al. Climatic characteristics of annual sand-dust storms days in northern China and its response to surface sensible heat in spring of Qihai-Xizang plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(4): 337-345.]
- [10] 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.[Zhou Zijiang, Wang Xiwen. Construction and analysis of severe group dust-storms in the eastern part of Northwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(4): 437-442.]
- [11] 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):385-395.[Cheng Lingsheng, Ma Yan. The developing structure of a black storm and its numerical experiment of different model resolution [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, 7(4): 385-395.]
- [12] 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(6):905-912.[Liu Yi, Ren Lixin, Zhou Leyi. Numerical analysis of a duststorm and dust transportation [J]. *Scientia Atmospheric Sciences*, 1998, 22(2): 905-912.]
- [13] 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):343-353.[Xiao Hui. A modeling evaluation of the impact of mineral aerosols on the particulate sulfate formation in east Asia [J]. *Scientia Atmospheric Sinica*, 1998, 22(3): 343-353.]
- [14] 张杰,郭锐.春季沙尘暴的NOAA-14气象卫星监测研究[J].遥感技术与应用,2002,17(6):289-292.[Zhang Jie, Guo Ni. Study and monitor sandstorm in spring by using NOAA-14 satellite data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2002, 17(6): 289-292.]
- [15] 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.[Fang Zongyi, Zhang Yungang, Zheng Xinjiang, et al. The method for monitoring dust devil using satellite and preliminary results [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(1): 48-55.]
- [16] 郭锐,倾祖. 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.[Guo Ni, Qing Jizu. Spectrum characteristics analysis of duststorm and dust identified [J]. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(5): 643-647.]
- [17] 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,1997,21(5):581-589.[Hu Yingqiao, Mitsuta Y. Micrometeorological characteristics and logical triggering mechanism of strong dust storm [J]. *Scientia Atmospheric Sinica*, 1997, 21(5): 581-589.]
- [18] 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的变化[J].大气科学,2002,26(1):1-8.[Hu Zeyong, Huang Ronghui, Wei Gu'an, et al. Variations of surface atmospheric variable and energy budget during a sandstorm passing Dunhuang on June 4 of 2000 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2002, 26(1): 1-8.]
- [19] 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.[Cheng Tiantao, Lv Daren, Chen Hongbing, et al. The size distribution of dust aerosol particles in Onqin Daga sandland [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2005, 29(1): 147-153.]
- [20] 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.[Niu Shengjie,

- Zhang Chengchang, Sun Jiming. Observational studies on sandstorm in Helan Mountainous area [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2001, 59(2): 196–205.]
- [21] 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. [Niu Shengjie, Zhang Chengchang, Sun Jiming. Observational researches on the size distribution of sand aerosol particles in the Helan Mountain area [J]. *Chinese Journal Atmospheric Science*, 2001, 25(2): 243–252.]
- [22] 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. [Shen Zhibao, Wei Li. Radiative effects of atmospheric dust aerosol in northwest China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(4): 541–548.]
- [23] 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. [Hu Rongming, Shi Guangyu. The radiative forcing and climate effect due to anthropogenic sulfate aerosols over China [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(6): 919–925.]
- [24] Tudur E, Ramis C. The environments of significant convective events in the western mediterranean [J]. *Weather Forecasting*, 1997, 12: 294–306.
- [25] 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. [Tao Jianhong, Wang Jinsong, Feng Jianying. Applying of helicity in analysis of a severe sandstorm [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(1): 83–87.]
- [26] Davies Jones R P, Burgess D W, Foeter M. Test of helicity as a forecast parameter [C]//Preprint, 16th Conference on Severe Local Storm, kisKananas Park, AB, Canada: American Meteorological Sciences, 1990: 588–592.

Analysis on the Upper-air Temperature, Humidity, Wind Speed and Heat Stability during a Sandstorm

TIAN Qing-ming^{1,2,3}, MA Ting-de², LIU Xiao-yun², YUE Ping^{1,3}

- (1. *Gansu Province Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Disaster Reduction; Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction & Institute of Arid Meteorology, China Meteorology Administration, Lanzhou 730020, China;*
 2. *Jiuquan Meteorological Bureau, Jiuquan 735000, Gansu Province, China;*
 3. *Zhangye State Climate Observatory, Zhangye 734000, Gansu Province, China*)

Abstract: Affected by severe invasion of cold air current, a severe sandstorm occurred in Minqin County located in the Hexi Corridor of Gansu Province during the period from May 23 to 24, 2004, the duration of strong wind with wind speed $\geq 12 \text{ m/s}$ was as long as 5 hours, and the minimum horizontal visibility was 200 m only. In this paper, the vertical profiles of saturation potential temperature, specific humidity and the wind speed during the sandstorm are analyzed using the radar-sounding data measured by Minqin Meteorological Station during the sandstorm. Moreover, the correlations between the sandstorm intensity and the meteorological factors and RSH values are also analyzed. The results show that the atmosphere stratification was unstable and the vertical structure of air temperature, humidity and wind speed was advantageous for the occurrence and development of the sandstorm before the sandstorm occurred. During the sandstorm, the atmospheric stability was gradually increased, and the atmospheric stability and instability occurred alternately, which was disadvantageous for the further development of sandstorm. Especially, the development of dry convection was restricted after the atmospheric structure became stable at the end of the sandstorm. The study results reveal that there are some good correlations between the sandstorm intensity and the meteorological factors and RSH values.

Key words: sandstorm; meteorological factor; stability.