

塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过程的大气边界层特征分析

杨兴华^{1,2},何清^{1,2},阿吉古丽·沙依提³,霍文^{1,2}

(1.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002;2.塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站,新疆 塔中 841000;3.新疆气象局编译室,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:利用系留探空、近地层梯度铁塔及地面气象站观测的数据,对塔克拉玛干沙漠腹地一次沙尘暴天气过程前后大气稳定度、混合层高度、地面气象要素及风、温、湿廓线等大气边界层特征量进行了分析。结果表明:沙尘暴发生时大气层结变得不稳定,沙尘天气过程中大气稳定度经历了稳定—不稳定—稳定的转变;沙尘暴的发生抑制了白天混合层高度的发展,维持了夜间混合层的存在,缩小了混合层高度的日变化;沙尘暴天气是一个降温增湿的过程;沙尘暴过境前后大气层结发生了转变,边界层风、温、湿廓线都打破了原有分布规律,影响了大气边界层结构的发展变化。

关键词:边界层;混合层高度;廓线;塔克拉玛干沙漠

中图分类号:P445 **文献标识码:**B **文章编号:**1002-0799(2011)06-0011-05

Character Analysis of Boundary Layer during a Sandstorm in Hinterland of the Taklimakan Desert

YANG Xing-hua^{1,2}, HE Qing^{1,2}, Ajiguli·SHAYITI³, HUO Wen^{1,2}

(1.Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;
2.Desert Atmosphere and Environment Observation Experiment of Taklimakan Station, Tazhong 841000, China;
3. Editorial department of Xinjiang Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: By using the observation data of tethersonde systems, surface layer gradient tower and ground weather station, some boundary layer characteristics, including the atmospheric stability, mixed layer height, surface meteorological elements, and the profiles of wind, temperature and humidity during a sand-storm were analyzed in hinterland of the Taklimakan Desert. Results are as follows: during the sand-storm, the atmospheric stability became unstable because of the weather system, and the atmospheric stability experienced the changes of stable-unstable-stable. The occurrence of sand-storm inhibited the development of the mixed layer height during the day, while it maintained the mixed layer at night, and reduced diurnal variation of the mixed layer height. Over the life-span of the sand-storm event, temperature decreased and humidity increased across the surface layer. The atmospheric stratification changed and destroyed the original distribution of

收稿日期:2011-05-07

基金项目:公益性气象行业专项(GYHY201006012);国家自然科学基金项目(41175017);中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2010014)。

作者简介:杨兴华(1982-),男,助理研究员,主要从事沙漠气象与沙尘暴灾害的研究。E-mail:yxh19820218@163.com

profiles of wind, temperature and humidity in boundary layer, and changed the structure of boundary layer.

Key words: boundary layer; mixed layer height; profiles; Taklimakan Desert

沙尘暴是指强风将地面大量尘沙吹起,使水平能见度小于1 km 的天气现象^[1],它是干旱荒漠地区特有的一种灾害性天气。边界层结构及其参数是影响沙尘暴天气发生、变化及沙尘输送的重要因素。胡隐樵^[2]等分析了强沙尘暴过程的微气象特征,提出了干飑线引起沙尘暴形成和发展的局地触发机制,是国内外研究黑风暴形成的小尺度局地因子取得的重要成果之一。曾庆存等^[3]提出了沙尘进入大气边界层的阵风扬尘机理,阵风三维相干结构可使风沙边界层内的沙尘克服冷锋天气系统的下沉气流,不断上扬到大气边界层的中上层,再由中上层和其上系统的上升气流,将沙尘带到对流层,扩散并向远方输送。姚文清、彭珍等利用北京325 m 气象塔观测的数据,分析了沙尘暴过程大气边界层结构及湍流特征,指出边界层结构的变化是影响沙尘天气触发、发展及衰退的重要因素^[4-5]。由于受到探测技术的影响,沙尘天气过程边界层观测资料的获取存在一定难度。因此,有关这一方面的详细研究尚不多。

塔克拉玛干沙漠位于中国新疆境内的塔里木盆地中,面积为33.76万 km²,地表具有极丰富的流动沙尘物质,其特有的闭塞地理环境,在干燥、炎热的春夏季节,沙漠腹地沙尘暴天气频繁。据分析^[6-9],沙漠腹地沙尘暴年均日数多达60 d以上,年累积持续时间在100 h以上,能见度小于200 m的强沙尘暴天气年均日数在20 d以上,其中能见度小于50 m的特强沙尘暴天气年均日数10 d左右。沙尘暴扬起的粉尘被西风急流带到沙漠外围地区,如黄土高原、北太平洋乃至北极地区,影响全球的气候^[10-11]。

为了进一步了解强沙尘暴天气过程中大气边界层的结构变化,本文利用塔中气象站的常规地面资料、塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站80 m梯度铁塔探测资料及2008年4月18—21日的系留探空观测资料对2008年4月19—20日发生在塔克拉玛干沙漠腹地的一次沙尘暴过程的大气边界层结构特征进行了分析。

1 数据

地面风速、风向、气温、湿度及气压等资料来源于塔中气象站。边界层风速、温度及湿度等资料通

过系留探空试验获取。系留探空应用芬兰 Vaisala 公司生产的 TTS111 型气象探空仪开展。TTS111 型气象探空仪的技术指标如下:

风速:测量范围0~20 m/s,精度±0.1 m/s;

风向:测量范围0~360°,精度±1°;

温度:测量范围-50~+60 °C,精度±0.1 °C;

湿度:测量范围0~100% RH,精度±0.1% RH;

气压:测量范围500~1 080 hPa,精度±0.1 hPa。

观测从2008年18日02:00开始进行,至22日14:00结束,每3 h一次。由于沙尘暴期间风速太大,故而2008年18日14:00—20日20:00未进行系留探空。观测地点位于沙漠公路塔中至民丰县岔路口3 km 处(39°01'N;83°35'E)。同时,还有塔中80 m 观测塔梯度探测系统进行风、温、湿的探测。

2 沙尘暴前后近地层梯度理查森数的变化

Richardson^[12]根据能量收支方程引入了无因次数 R_i ,以表征大气稳定性:

$$R_i = \frac{g}{T} \frac{\frac{\partial \theta}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2}, \quad (1)$$

式中, \bar{T} 为平均环境绝对温度(K), g 为重力加速度(m/s²),由塔中的海拔高度计算得出当地值为9.797 4 m/s², θ 为位温(K), u 为风速(m/s), z 为离地面高度(m)。图1给出了根据边界层气象资料计算的2008年4月18日沙尘暴来临前及沙尘暴结束时塔克拉玛干沙漠腹地32.6 m 高度的梯度里查森数的变化。虚线左边为沙尘暴来临前10 h 的变化,右边为沙尘暴结束10 h 的变化。在沙尘暴来临前的2:00—8:00, R_i 高于0.25的临界值,表明大气层结是稳定的。8:00以后迅速降低到-0.46,远小于0.25的临界值,这表明很强的风切变导致湍流能量明显增加,边界层内湍流交换强烈,上层的动量迅速向下输送。20日23:00 沙尘暴已经结束,但是仍为扬沙天气, R_i 仍然低于0.25,说明大气层还没有稳定下来,沙尘暴导致的湍流交换仍然比较强烈。但是 R_i 随着时间的延续,持续增大,到05:00以后已经高于0.25,说明沙尘暴过境以后,湍流交换逐渐降低,大

气层结逐步稳定下来。

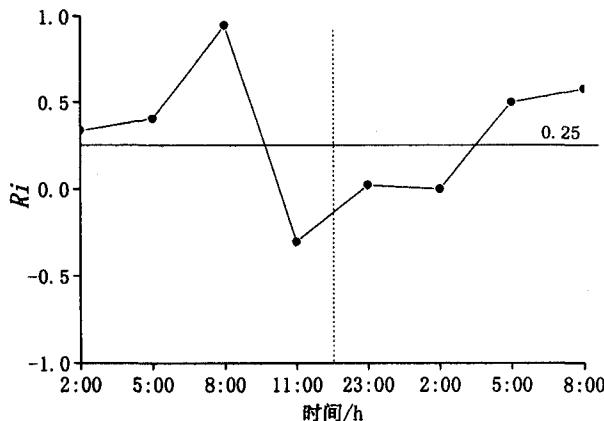


图 1 2008 年塔克拉玛干沙漠腹地 18—21 日
31.6 m 梯度理查森数

3 沙尘暴前后混合层高度的变化

由于地表受热,促使大气增温引起对流,从而使上、下层空气强烈混合,大气层结趋近于绝热递减率,此层大气称为混合层。其高度称混合层厚度(或高度)。混合层厚度不但能反应大气稳定性状况,也是大气边界层结构研究的重要参数。Nozaki 等人在 1973 年认为,混合层是由热力和机械湍流共同作用的结果,且边界层上部大气运动状况与地面气象参数间存在着相互联系和反馈作用。因此,可用地面气象参数来估算混合层厚度。在综合考虑地面温度、大气稳定性、地面风速及地面粗糙度的基础上提出大气混合层厚度的计算公式:

$$H = \frac{121}{6} (6-P)(T-T_d) + \frac{0.169P(u_z+0.257)}{12f\ln(z/Z_0)}, \quad (2)$$

式中, H 为计算的混合层厚度/m; $T-T_d$ 为温度露点差/℃; P 为帕斯奎尔稳定性级别(大气稳定性级别为 A 至 F 时, P 值依次为 1~6); u_z 为 z 高度处所观测的平均风速(m/s); Z_0 为地面粗糙度, 塔中地面粗糙度 Z_0 约为 1.66×10^{-4} m; f 为地转参数(s^{-1})。这种方法的最大优点是计算用的气象资料较易获得。图 2 给出了这次沙尘天气过程中沙漠腹地塔中大气混合层高度的变化情况,两虚线之间的时间为沙尘暴发生时间。由图可以看出,混合层高度具有显著的日变化,白天的厚度大于夜间,一天中最大值出现在 17:00 左右,最小值出现在 07:00 左右。对比沙尘暴发生前与沙尘暴发生日的混合层厚度变化可以发现,总的日变化趋势都一致,只是沙尘暴日白天的混合层高度小于非沙尘暴日的厚度,沙尘暴日混合层最大高度出现在在 17:00 时,约为 2 000 m,而非沙尘暴

日时,其混合层最大高度接近 3 000 m。但是沙尘暴日夜间的混合层高度却大于非沙尘暴日,沙尘暴发生后夜间的混合层厚度持续维持在 1 100 m 左右,非沙尘暴日的夜间混合层高度在 800 m 左右。由此可知沙尘暴天气对大气混合层的厚度影响是显著的。非沙尘暴日,白天太阳辐射的强烈加热,促使地面快速增温,热力湍流越来越强,热量输送更为强烈,上层大气也不断增温,不稳定区愈来愈厚,混合层顶也愈来愈高;夜间地面散热,热力湍流活动变得很弱,大气层混合层高度迅速降低。沙尘暴日,空气中的沙尘粒子可以吸收、反射、散射太阳辐射,消弱到达近地面的辐射能量,弱化近地面的热量输送,从而导致白天混合层高度较低;而夜间时,大量的沙尘粒子又可以阻挡近地面的热量向空气中上传,起到一定的保温作用,从而在一定程度上维持着近地面的热量输送强度,使得夜间混合层高度维持在一个较为稳定的高度。

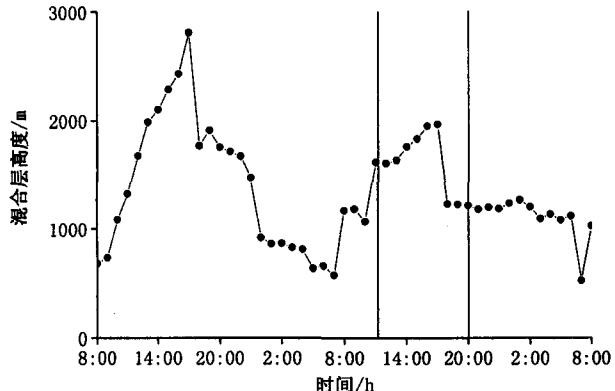


图 2 沙尘暴前后的混合层高度

4 沙尘暴前后边界层气象要素变化特征

4.1 沙尘暴前后地面气象要素变化状况

图 3 为沙尘暴过境前后塔中地面气温、相对湿度、风速、风向和气压随时间的演变情况,双线区间为沙尘暴发生期。从气温时间序列看出,4月 18 日(沙尘暴爆发前)白天气温从 8:00 迅速升高,最高温度达到了 27.3 ℃;夜间大幅降温,达到 10.7 ℃,但在出现沙尘暴天气的前半天,气温不再下降,这是因为大量悬浮在空中的沙尘粒子使得长波辐射减弱;从 19 日 16:00 时起,即沙尘暴天气现象的中后期气温迅速下降,主要是由于在高空冷平流的作用下,加之沙尘天气的减弱,向外空的长波辐射增强,导致近地面气温骤降。由相对湿度时间序列看出,沙尘暴爆发前空气较为潮湿,18 日 8:00 达到 30% 左右,随后迅速降低,在沙尘暴发生前几乎一直维持在 10% 以

下；但沙尘暴爆发初期，随着温度的变化而反向波动，在沙尘暴的中后期变化幅度不大，一直维持在17%左右，并持续到沙尘暴结束后的一段时间。由风速和风向时间序列看出，沙尘暴爆发前地面风速波动很大，但在沙尘暴爆发前的6 h风速一直较小，平均为2.0 m/s左右，风向以西南和西北风为主；随着沙尘暴爆发，风速急剧增大，沙尘暴期间一直持续大风，平均为5.9 m/s，结束后风速迅速下降，沙尘暴期间一直以东风及东风偏南为主。由气压时间序列看出，在沙尘暴发生前地面气压较低，而且有小幅波动，当沙尘暴爆发的时候，地面气压迅速增大，此后气压持续升高。

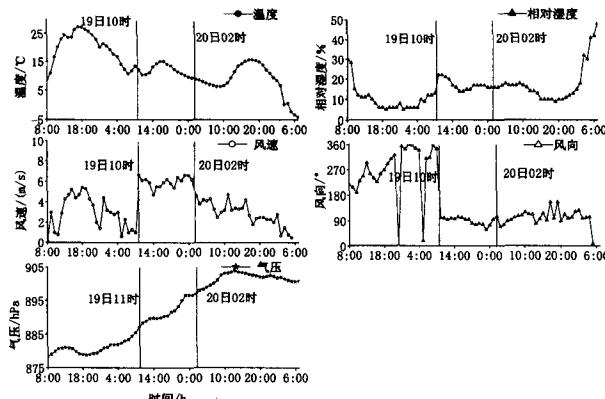


图3 沙尘暴前后地面气象要素随时间的变化

4.2 沙尘暴前后大气边界层廓线特征

4.2.1 边界层温湿廓线

图4给出了沙尘暴发生前18日02:00、05:00、08:00、11:00和沙尘暴过境后20日23:00、21日02:00、05:00、08:00、11:00系留探空所提供的温度(实线)和相对湿度(虚线)廓线。从温度廓线看出，18日02:00、05:00边界层中出现了很明显的贴地逆温，逆温层顶高度分别为170 m和136 m，逆温强度分别为7.4 °C/100 m和7.1 °C/100 m。而到08:00逆温层顶只有75 m，逆温强度为6.4 °C/100 m。11:00在200 m左右只有很微弱的逆温，说明此时边界层中的大气混合比较均匀。沙尘暴过境后的20日23:00、21日02:00没有出现逆温，温度随高度增大而降低，说明沙尘暴虽然已经过境，但风速仍较大，湍流交换仍比较强，边界层大气混合很均匀，只是温度与沙尘暴前相比降低了10 °C左右。21日的05:00、08:00又出现了贴地逆温，逆温层顶都在200 m左右，而且地面温度在0 °C以下，此时风速逐渐减小，湍流交换也相应减弱，大气层结稳定起来。

从相对湿度廓线看出，18日02:00、05:00、08:00

在地面为15%左右，随着高度增加而减小，但在200 m以上，随高度变化不大。而18日11:00、20日23:00相对湿度随高度增加而减小。21日02:00相对湿度几乎为一条直线，变化幅度很小，05:00、08:00相对湿度又随着高度的增加而降低，与温度变化呈很明显的负相关。

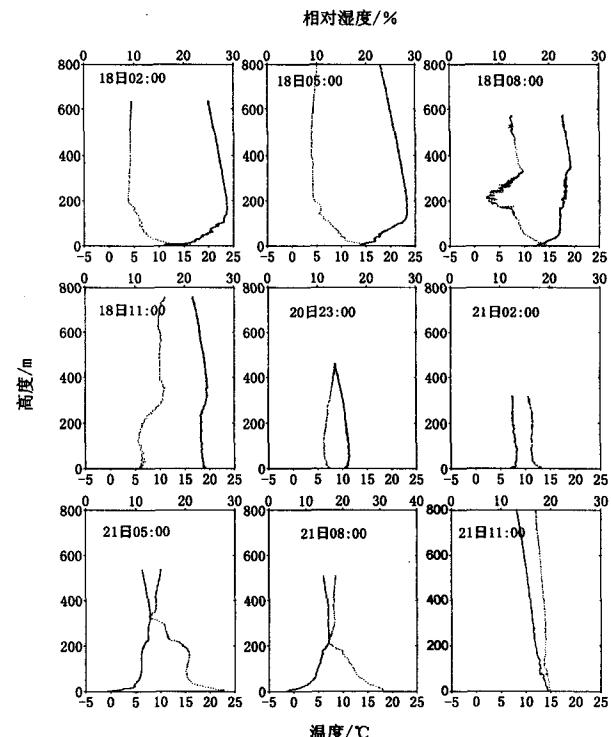


图4 沙尘暴发生前后温度(实线)、湿度(虚线)廓线

4.2.2 边界层风廓线

图5给出了沙尘暴发生前18日02:00、05:00、08:00、11:00和沙尘暴过境后20日23:00、21日02:00、05:00、08:00、11:00系留探空所提供的风速(实线)和风向(虚线)廓线。由风速廓线可以看出，18日02:00、05:00、08:00近地面风速较小，随着高度增加，风速增大，在150~300 m之间风速达到最大值，然后随着高度增加减小，对比图4中的温度廓线，可以发现温度出现转折的高度对应的正是逆温层顶部。18日11时，由于逆温层结被打破，大气混合较为均匀，此时风速也较为稳定，200 m以下风速保持在2.4 m/s左右。沙尘暴过境后的20日23:00、21日02:00，风速随高度增加急剧上升，200 m高度的风速均在10.0 m/s以上，说明沙尘暴虽然已结束，但空气中仍残留了较大能量，大气运动仍较活跃。到21日05:00、08:00风速已逐渐降低下来，变化特征与18日相似。至11:00风速已变大较为稳定。

由风向变化可以看出,沙尘暴发生前,沙漠腹地从地面到高空的风向以西南风为主,随着时间的推移,沙尘天气的临近,风向按顺时针发生偏转,逐渐以西北风为主。沙尘暴过境后,风向转为以东风为主,这一方向多为沙漠腹地沙尘天气系统入侵路径。

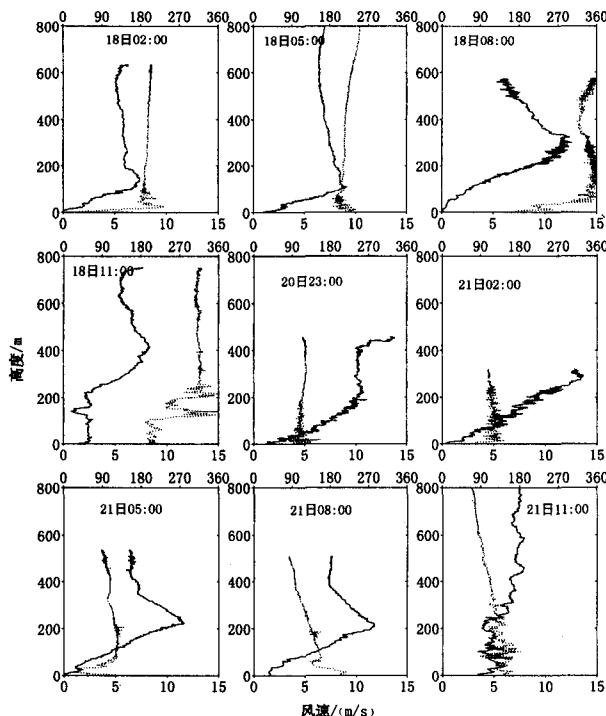


图 5 沙尘暴发生前后风速(实线)、
风向(虚线)廓线

5 结论

本文基于系留探空、80 m 梯度铁塔及地面自动气象站监测的数据,对 2008 年 4 月 19—20 日发生在塔克拉玛干沙漠腹地的一次沙尘暴过程的大气边界层结构特征进行了分析。发现由于受到天气系统的入侵,这次沙尘暴天气过程中沙漠腹地的大气稳定性经历了稳定—不稳定—急剧不稳定—不稳定—稳定的变化历程,沙尘天气系统产生较大能量在空气中消耗,使得大气层结发生改变。沙尘暴的发生对大气混合层产生较大影响,具体表现在混合层高度上即沙尘气溶胶粒子白天削弱地表对太阳辐射能量的吸收,使得白天地表向空气的热量输送减弱,抑

制了混合层高度的发展;夜间沙尘粒子阻隔了地表热量向空气中的快速消散,又维持了混合层的存在,且使得夜间混合层的高度保持在相对较高的高度。沙尘暴发生过程中,地面各气象要素都有显著变化。边界层风、温、湿廓线在沙尘暴发生期间都打破了原有分布规律,沙尘暴过程影响大气边界层结构的发展变化。

参考文献:

- [1] 中央气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社, 1979:21-27.
- [2] 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.
- [3] 曾庆存,胡非,程雪玲.大气边界层阵风生热机理[J].气候与环境研究,2007,12(3):251-255.
- [4] 姚文清.北京城市边界层低层湍流动力学结构及其影响特征[D].中国气象科学研究院与南京信息工程大学联招博士,博士论文,2005.
- [5] 彭珍,刘熙明,洪钟祥等.北京地区一次强沙尘暴过程的大气边界层结构和湍流通量输送特征[J].气候与环境研究,2007,12(3):267-276.
- [6] 何清,沙拉买提.塔里木盆地沙暴的分布特征及危险性评价[J].新疆气象,1996,19(2):23-27.
- [7] He Qing,Zhao Jingfeng,Nagashima Hideki. The Distribution of Sandstorms in Taklimakan Desert [J]. Journal of Arid Land Studies(Japan),1996, 5:185-193.
- [8] 何清,赵景峰.塔里木盆地浮尘时空分布及对环境影响的研究[J].中国沙漠,1997,17(2):119-126.
- [9] 王式功,杨德保,周玉素,等.我国西北地区“94·4”沙尘暴成因探讨[J].中国沙漠,1995,15(4):332-338.
- [10] Fang Xiaomin,Lü Lianqing,Yang Shenli,et al. Loess in Kunlun mountains and its implications on desert development and Tibetan Plateau uplift in West China[J]. Science in China(Series D),2002,45(4): 289-299.
- [11] Fang Xiaomin,Shi Zhentao,Yang Shenli,et al. Loess in the Tianshan and its implications for the development of the Gurbantunggut Desert and drying of northern Xinjiang [J]. Chinese Science Bulletin,2002,47(16):1381-1387.
- [12] Richardson L F. The supply of energy from and to atmospheric eddies [J]. Proc.Roy.Soc. London, Series A, 1920,686(97):354-373.