

沙漠腹地强沙尘暴过境的近地层湍流分析

温雅婷^{1,2} 焦冰² 缪启龙³ 何清¹

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐, 830002; 2. 解放军理工大学气象学院, 南京, 211101;
3. 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京, 210044)

摘要

沙尘暴北非、中东、美国中西部、澳大利亚一些地区、俄罗斯的中亚地区以及我国西北和华北等干旱荒漠地区特有的一种灾害性天气, 直接影响人类的生存环境, 危害极大。沙尘暴和扬沙天气具有显著的地域性, 我国北方干旱、半干旱地区是沙尘暴和扬沙的易发区, 尤其是西北地区为亚洲沙尘暴的多发区之一。研究表明, 塔里木盆地是中国大陆沙尘暴活动最频繁的区域。实验采用的资料来自塔克拉玛干沙漠腹地塔中气象站 2006 年建成的垂直梯度探测系统, 其中的三维超声风速仪和温度仪可实现 24 小时实时监测超声风速和脉动温度变化。对 2006 年 4 月 8 日 - 13 日塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过境期间的实时资料进行分析, 结果表明: 沙尘暴过境期间, 近地层风速经历了逐渐增大, 略有减小, 再次增大直至到达最大值, 随后逐渐减小, 最后稳定变化的过程; 风速变化的同时水平风向则经历了先缓慢跳跃, 随后快速振荡跳跃, 然后达到稳定少变, 最后稳定结构崩溃又回到复杂的振荡跳跃期的过程。沙尘暴爆发过程中, 0.5 米高度 30 分钟平均风速达到 7.34m/s, 瞬时值达到 13.1m/s, 80 米高度 30 分钟平均值为 19.59m/s, 瞬时风速高达 25.7m/s。沙尘暴过境前, 近地面附近为弱稳定的逆温层, 空气处于暖干的状态, 有利于起沙、扬沙, 垂直气流在 10m 高度上表现为系统性的下沉运动, 有利于沙尘的沉降; 随着沙尘暴爆发, 湍流交换增强, 气温快速降低, 日较差最高达到 29.5℃, 相对湿度逐渐上升, 在气温最低时达到最大 55%, 空气进入相对冷湿状态, 地面气压升高 41.2hPa, 气流有上升运动趋势, 但强度不大; 沙尘暴爆发过程中气流并不是各项同性的, 垂直方向的湍流动能总体比较小, 不及水平方向的 1/5, 说明湍流输送仍以水平方向为主, 垂直方向仅有少量输送。沙尘暴过境期间, 近地层 10 米高度动量向下输送, 热量输送只有很小的上传趋势。在沙尘暴过境前, 摩擦速度表现为正常的日变化特征; 沙尘暴过境时, 随着风速的突然增大, 摩擦速度也有一个突变, 迅速增大到 0.8m/s 以上, 最大值可达到 1.2m/s; 沙尘暴过境后, 随着风速的降低摩擦速度也逐渐回落到正常的日变化状态。

关键词: 塔克拉玛干, 沙漠腹地, 沙尘暴, 近地层, 湍流输送。

1 引言

沙尘暴是指强风将地面大量尘沙吹起, 使水平能见度小于 1km 的天气现象^[1], 它是北非、中东、美国中西部、澳大利亚一些地区、俄罗斯的中亚地区以及我国西北和华北等干旱荒漠地区特有的一种灾害性天气, 直接影响人类的生存环境, 危害极大, 近年来已经引起国内外学者的广泛关注^[2-5]。沙尘暴和扬沙天气具有显著的地域性, 我国北方干旱、半干旱地区是沙尘暴和扬沙的易发区, 尤其是西北地区沙漠、戈壁广布, 整个地区年降水量多在 150mm 以下, 植被稀少, 沙尘物质极其丰富, 风蚀强烈, 是亚洲沙尘暴的多发区之一。

* 中国沙漠气象科学研究基金 (Sqj2009008)、国家自然科学基金 (40775019) 资助; 《中国沙漠》录用;

20 世纪 80 年代 Goudie^[6]的研究表明沙尘暴次数最多的地区是年降水量为 100-200mm 的地区,中国的沙尘暴发源于干旱的黄土高原北部,塔里木盆地是中国大陆沙尘暴活动最频繁的地方。20 世纪 90 年代以后,国内许多学者从统计分析、数值模拟、典型个例分析等方面对西北地区的沙尘暴过程进行了大量的研究。赵性存^[7]于 1997 年的统计结果表明塔里木盆地周围地区是西北地区沙尘暴多发区之一。何清^[8]等利用塔克拉玛干沙漠周边 17 个站 1961-1990 年及腹地两个站两年的气候资料,分析了沙漠地区沙尘暴的地理分布和季节变化。王旭^[9]等给出南疆地区沙尘暴的时空分布特征。李生宇^[10]等也对塔中地区沙尘暴的强度、过程、类型和时间变化等特征进行了讨论。胡隐樵等^[11-12]的研究结果表明,大尺度的天气形势(例如冷锋面或高空低压槽过境)、中尺度的干胞线以及局地热力不稳定三方面的相互作用,构成了黑风暴发生的物理机制。王式功等^[13]指出,我国西北地区易产生沙尘暴天气的主要天气系统有冷锋活动、河西走廊地区低空东风急流以及中尺度系统等。胡泽勇等^[14]认为,沙尘暴过境时地面水平风向经历了从稳定到多次调整,再到稳定,最后崩溃的演变;风向调整时,风速减弱,调整之后,风速加大,同时伴有很强的上升气流;沙尘暴过境前,地面空气相对干热,过境后,地面相对湿冷。陈勇航等^[15]对塔中地区 1996 年 7 月发生的 10 场沙尘暴进行了天气学分析,并揭示成因,探讨预报着眼点。何清等^[16]也对沙尘暴过境期间的风速、温度、湿度廓线特征进行了分析研究。

对于南疆塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴的研究,目前大多采用常规气象站观测资料和探空资料等,由于技术条件的限制,使得进一步分析研究有一定的难度。快速响应探测设备的出现,则为深入研究奠定了技术基础。

2 资料来源与处理方法

实验采用的资料来自塔克拉玛干沙漠腹地塔中气象站(39°00'N,83°40'E,海拔 1099.3m)80 米垂直梯度探测系统,该系统于 2006 年 3 月底建成,也是目前世界唯一深入流动沙漠腹地 200km 以上的大气近地层湍流探测系统。80 米垂直梯度探测系统设有 10 层观测平台,分别为 0.5, 1, 2, 4, 10, 20, 32, 47, 63, 80 米,每层均装有风速、风向、温度和湿度传感器,其中 10 米高度处单独安装三维超声风速仪和温度仪,可实现 24 小时连续不间断的实时监测 u 、 v 、 w 超声风速和脉动温度变化。三维超声风速仪为英国 GILL 公司生产,型号为 R3-50,温度仪为芬兰 VAISALA 公司生产的 HMP45D(QMH102)型温度传感器,采用铂电阻作为传感器,具有通风和防辐射措施,采样频率均为 20Hz。

为了解该地区沙尘暴过境期间大气近地层结构和湍流输送过程的完整变化过程,选取 2006 年 4 月 10 日沙尘暴个例进行分析,资料采用 2006 年 4 月 8 日~4 月 13 日期间 80 米气象站的 10 层梯度资料和位于 10 米高度上的三维超声风速、温度脉动资料。

对原始梯度资料进行了如下处理^[17]:

去除野点。对于第 n 个数据,将其前后 5 个数据求平均 $\bar{x}_n = \frac{1}{11} \sum_{j=-5}^5 x'_{n+j}$,再求出该

点的涨落方差 $\sigma_n^2 = \frac{1}{11} \sum_{j=-5}^5 (\bar{x}'_{n+j} - \bar{x}_n)^2$, 对于 $x'_n \in [\bar{x}'_n - 3\sigma_n, \bar{x}'_n + 3\sigma_n]$ 的数据认为是正

确的, 在这个范围以外的数据作为野点去除, 并以第 $n-1$ 个数据代替。

原始数据中风速的水平分量以自东向西为正, 将 X 轴正方向调整为自西向东, 使坐标轴和水平风速正值保持一致。

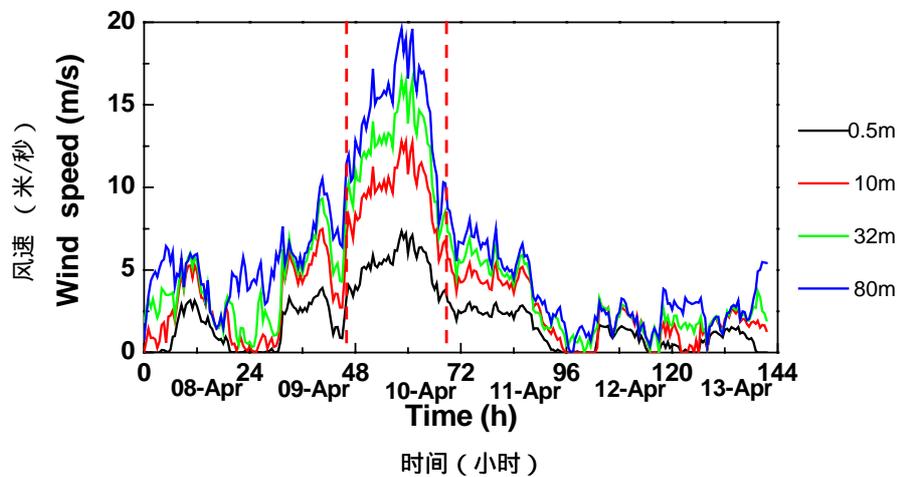
原始资料以北京时间记录, 将北京时间转换为塔中地方时间 (塔中地方时 = 北京时 - 2 小时 25 分 24 秒), 有利于局地性日变化讨论。

样本长度取为 30min, 对该时间长度内的数据求平均。

3 沙尘暴过境前后近地面气象要素变化概况

根据塔中气象站地面气象观测记录, 2006 年 4 月 10 日的沙尘暴过程是自 1996 年 6 月塔中气象站建站以来持续时间和强度最大的一次^[16]。从 4 月 9 日下午 16:15 开始出现扬沙, 随后转为浮尘, 到夜间 22:43 分沙尘暴形成, 之后有间歇的浮尘或扬沙现象, 并伴有短时、多次大风, 直到 4 月 10 日夜间 20:45 分沙尘暴消退转为扬沙天气, 21:21 分以后扬沙转为浮尘, 浮尘天气一直持续数日, 到 4 月 13 日结束。

此次沙尘暴过境前后, 地面风速、温度、湿度和气压变化非常明显。图 1 为根据 80m 梯度探测系统的资料分别给出的 4 月 8 日 ~ 4 月 13 日沙尘暴过境前后风速、风向、温度和相对湿度随时间的演变过程, 其中虚线范围内为此次沙尘暴爆发时段。



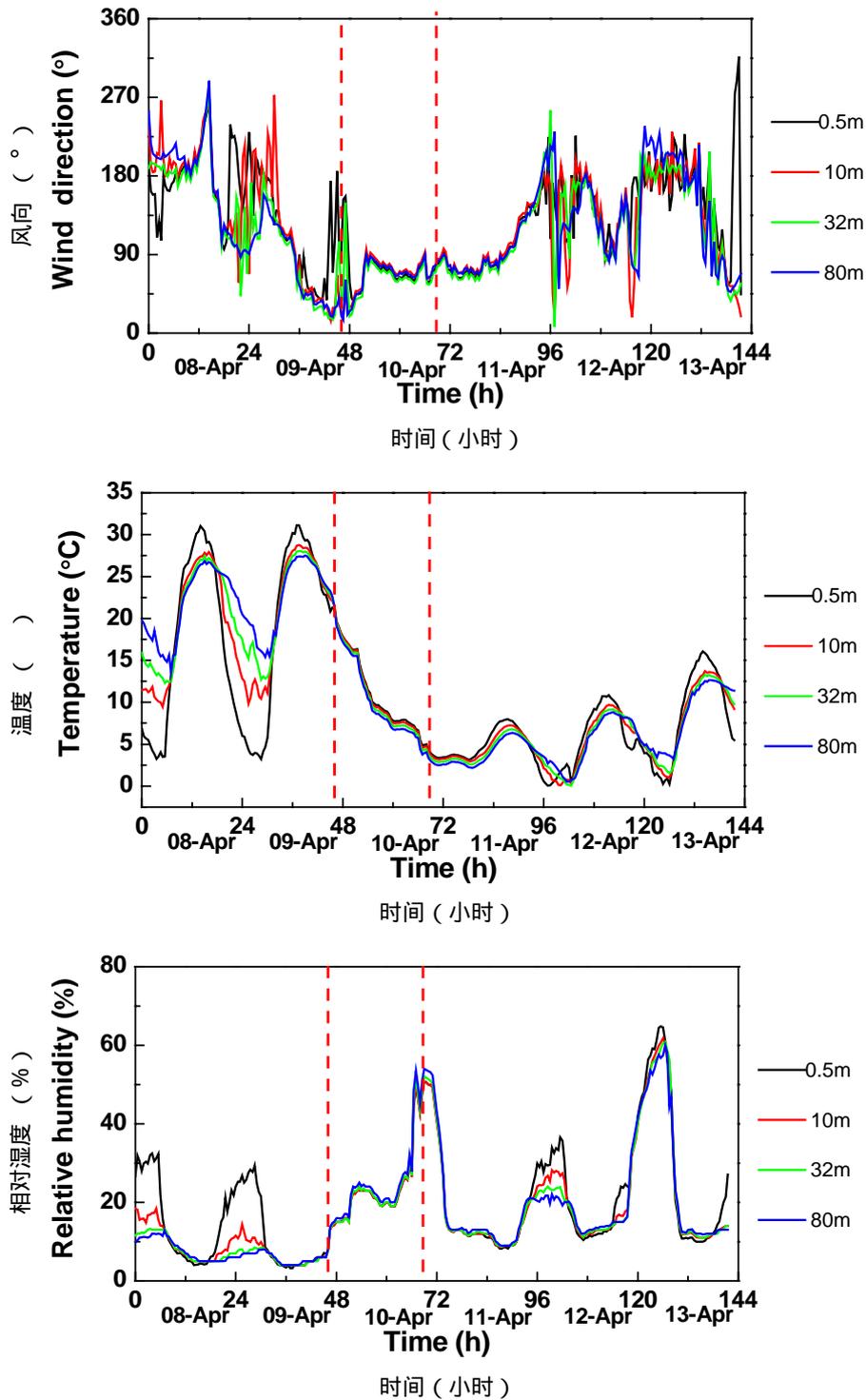


图1 沙尘暴过境期间80m梯度探测塔风速、水平风向、温度、相对湿度时间序列

Fig.1 Time series of wind speed, wind direction, temperature and relative humidity in different height during the sandstorm

从风速、风向的时间序列图上可以看到：4月9日16:00之前，风速逐渐增大，0.5m高度保持在4m/s以内，80m则保持在10m/s以内，水平风向80m高度范围内变化一致属于缓慢跳跃期，先由南风转至北风再转至东北风；16:00之后天空飘起扬沙直至夜间22:43沙尘暴形成前，风速略有减小，0.5m高度大约为1m/s，80m高度减到6m/s左右，风向复杂

多变属于快速振荡跳跃期，贴地层（0.5m 附近）由东北风跳跃至东南偏东、东南偏南，再跃至东北偏东、东南偏东，随后跃为西南偏南，最后转为东南偏东风，中高层由东北风转为东北偏北风，期间振荡较小；22：43 分沙尘暴形成，直至 4 月 10 日 20：45 分沙尘暴消退转为扬沙天气过程中，风速逐渐增大，到 4 月 10 日上午 10：30 左右，80m 观测高度范围内风速均达到了最大值，0.5m 高度 30min 平均风速达到 7.34m/s，瞬时值达到 13.1m/s，80m 高度处 30min 平均为 19.59m/s，瞬时值高达 25.7m/s，该过程期间还伴随有短时、间断性的大风，随后风速一直减小，水平风向在沙尘暴过程中稳定少变，除了低层有一次东南偏东的跳跃后，80m 高度范围内基本稳定在东北偏东风的方向上；4 月 10 日 20：45 分以后天气转为扬沙过程，随后到 21：21 分转为浮尘，该时段内风速缓慢减小，风向基本不变，仍然维持在东北偏东方向上；4 月 10 日 21：21 分以后的天气一直处于浮尘条件下，风速变化范围不大，风向的稳定结构崩溃，又回到了复杂多变的振荡跳跃期。因此，整个沙尘暴期间，风速经历了逐渐增大，略有减小，再次增大直至到达最大值，随后逐渐减小，最后稳定变化的过程，水平风向则经历了先缓慢跳跃，随后快速振荡跳跃，然后达到稳定少变，最后稳定结构崩溃又回到复杂的振荡跳跃期。

从温度和相对湿度的时间序列来看，4 月 9 日 16：00 沙尘暴来临之前，气温变化一直表现为稳定的日变化特征，白天高，夜间低，午后 13：00~14：00 之间达到日最高温度，4 月 8 日和 9 日 0.5m 高度最高温度分别达到了 31.4 和 32.3，凌晨 04：00~05：00 之间为日最低温度，0.5m 处分别降到了 2.7 和 2.8，气温日较差最高达到 29.5，这段时间内 32m 高度以上的相对湿度变化比较小，一直徘徊在 4%~10% 之间，32m 以下的相对湿度则仍有比较明显的日变化，夜间大，白天小，沙尘暴过境之前，相对湿度在 80m 的范围内都只有 4%；16：00 之后一直到 4 月 10 日 21：21 分沙尘暴结束扬沙转为浮尘的过程中，气温持续快速下降，0.5m 处降至 3.8，相对湿度则逐渐增大，在气温最低时达到最大 55%，空气进入相对冷湿状态；之后到 4 月 11 日 08：00 时左右，气温仍然维持在最低状态，相对湿度骤降到 10%，空气转为冷干状态；随后连续的浮尘天气过程中，气温又回到日变化的状态，但最高和最低气温都有明显的下降，11 日午后 0.5m 处的最高气温仅有 8.0，12 日凌晨最低气温降至 -2.7，出现了结冰现象，使得 0.5m 高度的相对湿度上升到 40%，20m 高度以上受地面结冰的影响不大相对湿度仅升至 20% 左右，此后气温逐渐回升，13 日凌晨相对湿度继续增至 68%，随后逐渐趋于正常。至此，此次沙尘暴的气温和相对湿度的响应才算基本结束。

沙尘暴形成前，地面附近受低气压控制，4 月 9 日 16：00 气压降到最低值 864.3hPa，之后，由于沙尘暴发展，气压猛增，到 4 月 11 日 09：00 左右，气压增大趋势基本停止，维持稳定少变，期间最高值升为 905.5hPa，地面受到高压控制，一直持续到 4 月 12 日的 11：00 左右。伴随着此次沙尘暴过境，地面由低气压控制转为高气压控制，气压增大了 41.2hPa。

4 沙尘暴过境前后大气边界层特征

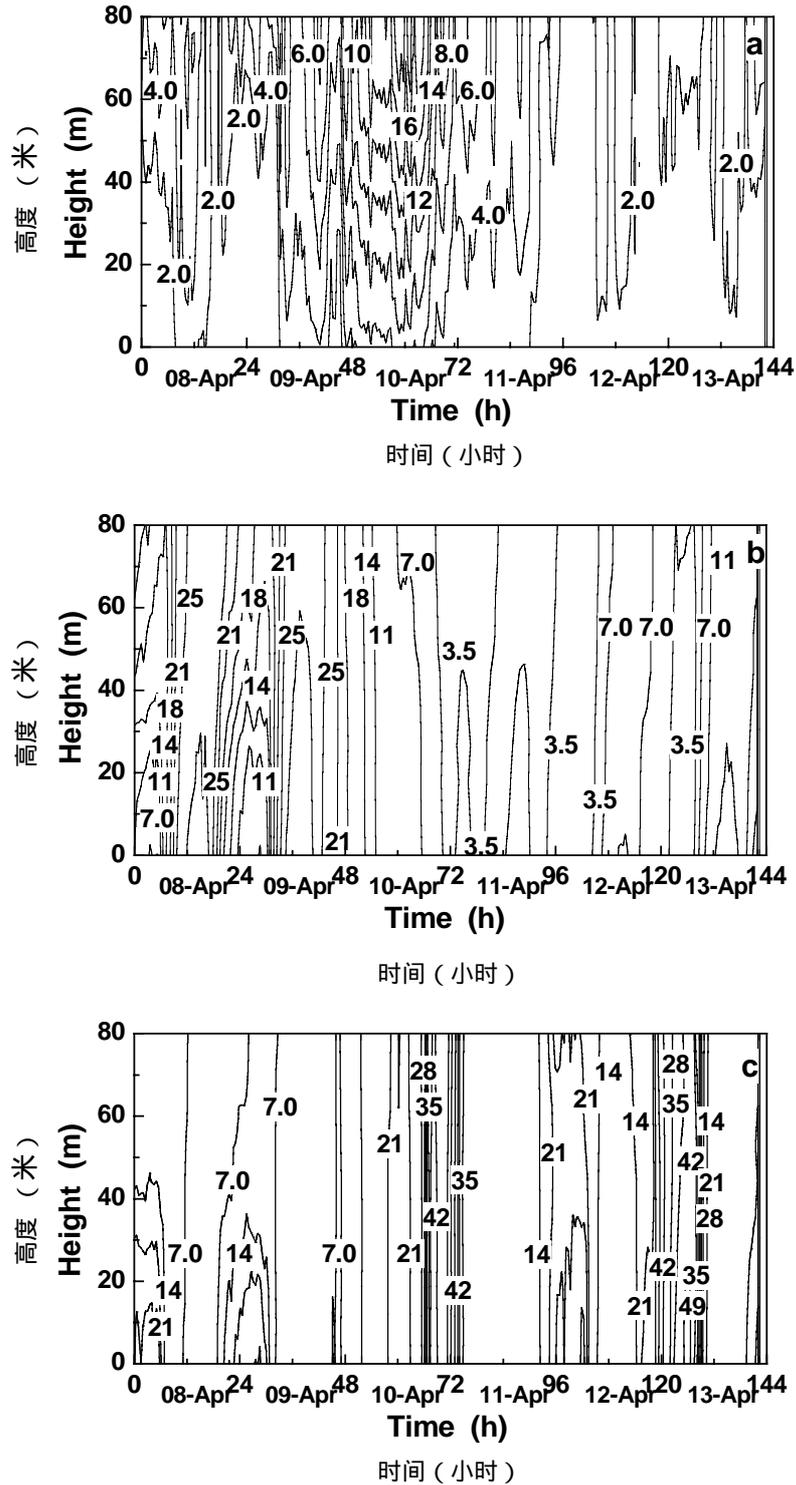


图2 沙尘暴过境前后风速(a)、温度(b)、相对湿度(c)的时间-高度剖面图

Fig.2 Height-time section of wind speed (a), temperature (b) and relative humidity (c) during the sandstorm

图2分别为4月8日到4月13日沙尘暴过境前后风速、温度和湿度随时间变化的剖面图,从图中可以看出,4月9日22:43沙尘暴形成前,近地层大气处于弱稳定的逆温层结,相对湿度比较小,气团属于暖干状态,风速保持在4-6m/s左右,略低于该地的起尘临界值8m/s^[10],对起沙、扬沙极为有利。随着近地层风速迅速增大,很快达到起尘临界值,上下

层之间的湍流交换也显著加强，弱稳定层结状态被破坏，下沉的冷气团使近地层温度迅速下降，沙尘暴爆发后的 24 小时最大降温量达到 16℃，相对湿度增加了 38%，贴地层处于冷湿气团控制。沙尘暴过境后，风速逐渐减小，湍流运动明显减弱，近地面受干冷气团控制。此后由于温度降低，甚至出现结冰现象，使相对湿度再次增加。

5 沙尘暴过境前后湍流输送特征

在沙尘暴形成过程中，近地层湍流输送过程是研究起沙、扬沙、运输、降尘等物理机制必不可少的内容，通过计算沙尘暴过境期间 30min 平均湍流特征量，分析讨论该时段内近地层 10 米高度上的湍流输送情况。

从沙尘暴过境期间的湍能变化来看，过境之前和之后，沙漠腹地近地层 10 米高度上 30min 平均湍能都比较小，具有明显的日变化特征，湍流动能的最大值只有 $2.64\text{m}^2/\text{s}^2$ 。沙尘暴形成时，湍流动能有一个突增，达到 $7.8\text{m}^2/\text{s}^2$ ，这与平均风速的突然增大是一致的，也表明了平均风速最大的时候，就是湍流输送最为强烈的时候。但是值得提出的是，沙尘暴爆发过程中气流并不是各项同性的，垂直方向的湍流动能总体比较小，不及水平方向的 1/5(图略)，说明湍流输送仍以水平方向为主，垂直方向仅有少量输送。

沙尘暴过境前，近地面 10 米高度垂直气流表现为系统性的下沉运动，30min 平均垂直风速达到 -0.17m/s ，瞬时风速可达 -4.4m/s ，这对沙尘的沉降是非常有利的。沙尘暴形成期间，垂直气流有明显的上升运动，但强度不太大，可将一部分沙尘输送到上层，有助于沙尘天气的形成（见图 3）。

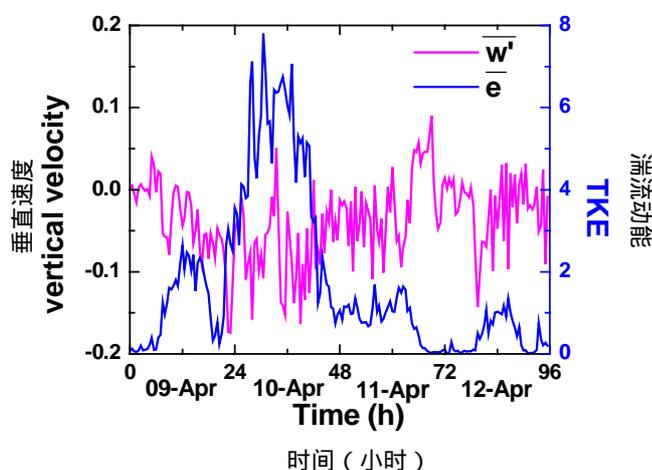


图 3 沙尘暴过境期间垂直速度和湍流动能变化

Fig.3 The mean vertical velocity and turbulent kinetic energy during the sandstorm

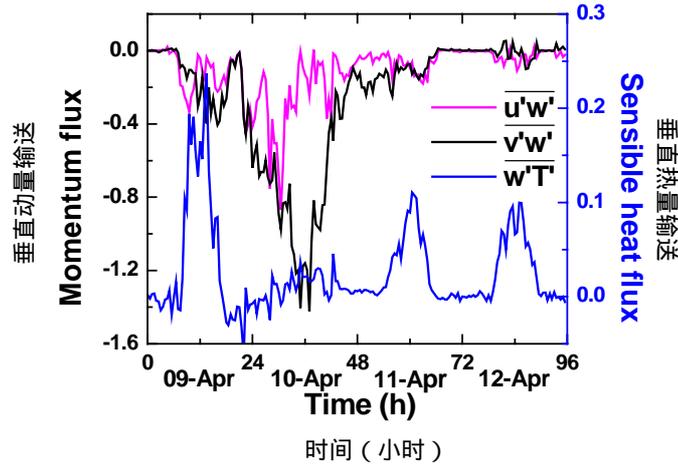


图 4 沙尘暴过境期间垂直方向动量和热量输送

Fig.4 The momentum flux and sensible heat flux during the sandstorm

图 4 分别给出了沙尘暴过境期间的垂直动量输送和垂直热量输送过程，从图中可以看到， $\overline{u'w'}$ 总体表现为向下输送，在沙尘暴形成之前输送量较小，4 月 9 日 22:43 沙尘暴形成之后， $\overline{u'w'}$ 的值迅速下降，这说明沙尘暴形成时 10 米高度的大气有很强的动量下传过程。沙尘暴过境后，向下的动量输送很快减弱， $\overline{u'w'}$ 又回升到零值附近，继续表现为原有的日变化特征。 $\overline{v'w'}$ 在沙尘暴过境期间有着与 $\overline{u'w'}$ 相同的变化特征，且向下输送的动量强度更大，数值甚至达到 $\overline{u'w'}$ 的 2 倍左右。 $\overline{w'T'}$ 受温度影响有较强的日变化特征，也呈现出典型的单峰型日变化，午后最高，夜间和凌晨较低，但沙尘暴过境改变了热量输送的日变化规律，过境前的弱稳定逆温层结使 4 月 9 日白天的垂直感热输送强于平均值，4 月 10 日 $\overline{w'T'}$ 突然减弱，仅有微弱的上升趋势，且维持在零值附近，这与沙尘暴过境时持续的低温以及垂直气流的上升强度弱有关。总体上看，沙尘暴过境期间，近地层 10 米高度的动量输送是向下传递的，热量输送只有很小的上传趋势。

摩擦速度 u_* 表示近地面层雷诺应力大小，也是与近地面层空气运动性质相关的物理量，其表达式为 $u_*^2 = (\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2})^{1/2}$ 。Gillette 通过粒子质量通量（粒子半径小于 $10\mu\text{m}$ ）与地面摩擦速度的测量发现，只有当摩擦速度超过某个临界数值（定义为扬沙起动临界摩擦速度 U_c^* ）时，沙粒才能起动^[18-19]。

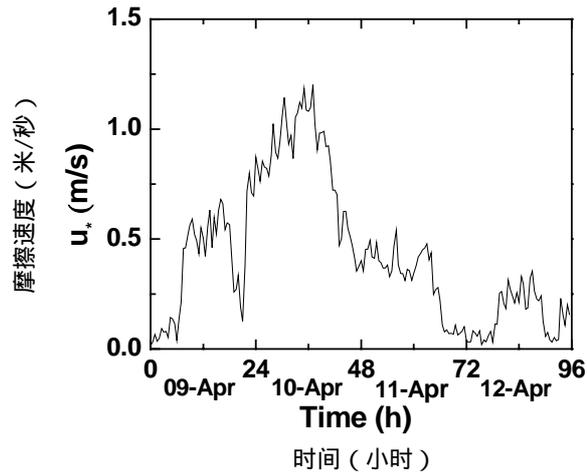


图5 沙尘暴过境期间摩擦速度随时间的变化

Fig.5 The changes of friction velocity during the sandstorm

图5是沙尘暴过境期间摩擦速度的变化情况。与风速的变化相比较,发现两者在该时段内变化规律一致。在沙尘暴过境前,摩擦速度表现为正常的日变化特征;沙尘暴过境时,随着风速的突然增大,摩擦速度也有一个突变,迅速增大到0.8m/s以上,最大值可达到1.2m/s;沙尘暴过境后,随着风速的降低摩擦速度也逐渐回落到正常的日变化状态。对于沙尘暴过境过程中临界摩擦速度的确定,需要对沙尘粒子作更详细研究,有待进一步讨论。

6 结论

(1) 沙尘暴过境期间,近地层风速经历了逐渐增大,略有减小,再次增大直至到达最大值,随后逐渐减小,最后稳定变化的过程;风速变化的同时水平风向则经历了先缓慢跳跃,随后快速振荡跳跃,然后达到稳定少变,最后稳定结构崩溃又回到复杂的振荡跳跃期的过程。沙尘暴过境前,近地面附近为弱稳定的逆温层,空气处于暖干的状态,有利于起沙、扬沙,随着沙尘暴爆发,湍流交换增强,气温快速降低,相对湿度逐渐上升,空气进入相对冷湿状态,地面气压升高。

(2) 沙尘暴过境前,垂直气流在10m高度上表现为系统性的下沉运动,有利于沙尘的沉降,沙尘暴爆发期间,气流有上升运动趋势,但强度不大;且垂直方向的湍流动能明显小于水平方向,仍以水平湍能为主。

(3) 沙尘暴过境期间,近地层10米高度动量向下输送,热量输送只有很小的上传趋势。

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 方宗义,朱福康,江吉喜等. 中国沙尘暴研究[C]. 北京: 气象出版社, 1997, 1-158.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 王涛,陈广庭,钱正安等. 中国北方沙尘暴现状及对策[J]. 中国沙漠, 2001,21(4):322-327.
- 6 Goudie A S. Dust storm in space and time[J]. Process in Physical Geography, 1983,7(4):502-508.
- 7 赵性存. 西北地区是我国沙尘暴的多发区[A].方宗义,朱福康,汪吉喜,等.中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997.27-30.

- 8 Qing He, Zhao Jingfeng, Hideki Nagashima. The distribution of sandstorms in Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land Studies, 1996,5(1):185-193.
- 9 王旭,马禹,陈洪武等. 南疆沙尘暴气候特征分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(2):147-151.
- 10 李生字,雷加强,徐新文等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴特征——以塔中地区为例[J]. 自然灾害学报. 2006(5):4-19.
- 11 胡隐樵,光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制. 大气科学, 1997,21: 581-589.
- 12 胡隐樵,光田宁. 强沙尘暴发展与干飚线——黑风暴形成的一个机理分析. 高原气象, 1996,15(2): 178-185.
- 13 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, 2003,58:193-196.
- 14 胡泽勇,黄荣辉,卫国安等. 2000年6月4日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化. 大气科学, 2002,26(1): 1-8.
- 15 陈勇航,向鸣,吕新生等. 塔克拉玛干沙漠腹地盛夏十场沙尘暴综合分析与预报探讨[J]. 新疆气象, 1999,22(1):9-12.
- 16 何清,魏文寿,李祥余等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过境时近地层风速、温度和湿度廓线特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2008,2(6):6-11.
- 17 缪启龙,温雅婷,何清等. 沙漠腹地春夏季近地层大气湍流特征观测分析[J]. 中国沙漠, 2010,01:167-174.
- 18 Gillette, D. A., Production of dust that may be carried great distances. Spec. Pap. Geol. Soc. Am., 1981, 196: 11-26.
- 19 Gillette, D. A., J. Adams, A. Endo et al. Threshold velocities for input of soil particles into air by desert soils. J. Geophys. Res., 1980,85: 5621-5630.