

沙尘暴过程中气象要素响应及输沙分析

胡文峰^{1,2,3}, 何清², 杨兴华^{1,2}

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要:通过野外监测系统获取的试验数据,对拐子湖地区2011年4月一次强沙尘暴过程中贴地层微气象要素和输沙进行分析,得出如下结论:大气高温干燥,地表高温低湿、气压下降,风速增大是沙尘暴来临的前兆;沙尘暴过程中风向和风速相对稳定,气压、水汽压和相对湿度都会明显下降;地温下降速度较慢,土壤湿度略有增大;输沙量主要集中于距地表50 cm以内高度层,在0~20 cm高度层里输沙量呈增大趋势,20 cm以上随着高度升高含沙量逐渐下降;跃移沙粒输沙量的空间分布与风向频率既有相似性,又有差异性;蠕移输沙量的方向分布比较复杂,同风向分布有显著的差异。这些结果对沙尘暴预报和沙源区的防风治沙有指导意义。

关键词:巴丹吉林沙漠;沙尘暴;微气象要素;输沙

中图分类号:P454.4

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2012)03-0034-06

沙尘暴是危害严重的天气现象,其引发的气候学效应对人类生存环境、社会经济活动均能造成一定影响,是不可忽视的大气和生态环境问题之一。20世纪以来,科学工作者开展了有关沙尘暴时空分布、结构以及监测、产生条件、环流形势、分析预报、沙尘粒子的物理化学特征、长距离输送、局地触发机制以及起沙机制的数值模拟等方面的研究^[1-15]。薛建军等^[16]对2002年3月18—22日发生在我国北方地区的一次强沙尘暴过程进行了分析,指出沙尘天气的产生原因包括上游沙尘高空输送沉降、本地热力作用、蒙古气旋和锋面附近大风。张仁健等^[17]研究表明,沙尘暴发生时,近地层风速明显增大,空气相对湿度迅速减少,边界层湍流交换强烈。郑新江等^[18]利用卫星云图及常规气象资料对1998年4月14—15日强沙尘暴进行了分析,指出此次过程是由斜压槽及冷锋触发的。已有研究表明沙尘暴是在特定的地理环境和下垫面条件下,由特定的大尺度环流背景和天气系统所诱发的灾害性天气,有利的下

垫面特征条件在沙尘暴的形成中起到重要的作用,但沙尘暴的产生及沙尘输送与沙源区微气象因素的关系,这方面的研究报道较少,尤其是在沙漠中微气象要素在沙尘暴发生前后的变化研究就更少,研究起沙与微气象条件的关系,是理解沙尘暴形成和输送的基础。

拐子湖地区位于巴丹吉林沙漠北缘,自然环境恶劣,是内蒙古的强沙尘暴多发区之一,同时也是我国沙尘暴北移路径的必经之地^[19]。有研究指出:近30 a拐子湖地区平均年沙尘暴日数有30.6 d,其中每年的4月为最^[20]。本文利用在巴丹吉林沙漠北缘拐子湖地区2011年4月28日沙尘暴过程中的监测资料,分析了沙源区下垫面微气象要素在沙尘暴过程中的变化情况,探讨沙尘暴天气过程输沙与风速等微气象要素的关系,为沙漠地区起沙机制提供一定的理论基础。

1 试验介绍与数据处理

沙尘暴强化观测实验场位于巴丹吉林沙漠北缘的拐子湖气象站南800 m处一平坦的沙地上(41°22'N、102°22'E、海拔为960 m)。在观测场布置了风蚀起沙监测系统一套,其中H11-LIN型风蚀传感器由美国Sensit公司生产,安装高度为5 cm、10 cm;贴地层梯度风速仪安装高度为5、10、20、50、100、

收稿日期:2011-06-15

基金项目:中国干旱气象科学研究基金(IAM201013),国家科技支撑计划课题(2008BAC40B05-01),公益性行业(气象)科研专项(GYHY 201006012),中国沙漠气象科学研究基金(Sq2010007)。

作者简介:胡文峰(1978-),男,硕士研究生,主要从事气候变化和沙漠气象研究。E-mail:hwfeng123@sohu.com

200 cm, 风向仪安装高度为 20 cm、200 cm。200 cm 高度安装有空气温湿度传感器;土壤温、湿度传感器埋藏深度为 2.5 cm、5 cm、10 cm。布设了 5 种积沙仪:梯度积沙仪、方口积沙仪、全方位定点积沙仪、全方位蠕移积沙仪及贴地梯度积沙仪。梯度积沙仪可以收集 5、10、20、50、100、200 cm 六个高度的水平输沙通量,积沙盒进沙口的宽和高分别为 2 cm、5 cm,梯度积沙仪的积沙盒固定在装有轴承的支架上,支架一端为风向板,另一端为积沙盒座,轴承和风向板可使积沙盒自由转动,收集迎风面的沙尘。方口积沙仪可以监测 0~100 cm 的风沙流特征,共 50 个层次,每个积沙盒进沙口的宽和高均为 2 cm,积沙盒的进沙口朝向西北(西北方向为拐子湖地区的主导风向)。全方位定点积沙仪高 40 cm,积沙盒按 16 个方位排列,进沙口 25 层,宽和高分别为 1.5 cm、2 cm,可以收集不同方位的跃移沙粒,测得的数据可与风向资料建立关系。全方位蠕移积沙仪与全方位定点积沙仪相似,可以监测 16 个方位的蠕移输沙量。贴地积沙仪共有 4 层进沙口,高度分别为 0~5 mm、5~15 mm、15~35 mm 及 35~85 mm,可监测沙尘天气过程中 10 cm 以下的输沙通量及风沙流结构。在沙尘天气来临前把积沙盒清理干净,沙尘天气结束后立即取出,装入密封袋,并记录采集时间、沙尘天气持续时间以及风况。所有的数据以小时、分钟、秒三种形式记录。

2 结果分析

2.1 沙尘暴过程前后地面各气象要素的响应

2.1.1 温度、相对湿度、水汽压的变化

在沙尘暴发生前两天温度呈上升趋势,水汽压和相对湿度同温度呈负相关(图 1)。在 28 日 19:10 左右沙尘暴出现,在沙尘暴过程中温度下降明显,沙尘暴过后的 29 日是扬沙天气,温度较沙尘暴前一天低 10.0 °C 左右,且温度日较差不大,在沙尘天气结束后的 30 日温度开始恢复到沙尘暴前的 27 日水平;空气的水汽压和相对湿度在 27 日均出现一个突然增大过程,然后开始波动下降,在 28 日沙尘暴出现前水汽压和相对湿度都维持在一个较低值,伴随着沙尘暴开始,水汽压和相对湿度出现一个明显的上升过程,沙尘暴过程中二者又显现快速下降,一直到 29 日扬沙天气结束,水汽压和相对湿度均低于沙尘暴前。

总的来说,在沙尘暴前,空气处于一个高温干燥的环境,这样的环境有利于大气不稳定性加剧,使大

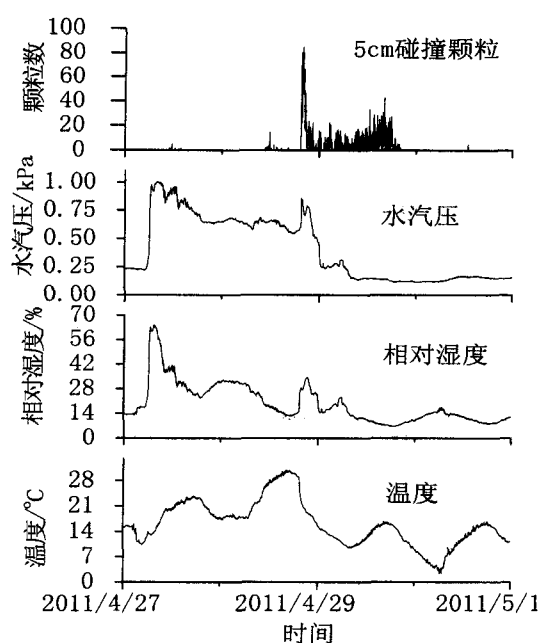


图 1 温度、相对湿度、水汽压的变化

气对流加强,为起沙提供动力条件。

2.1.2 风速和风向的变化

在沙尘暴前一天的 27 日风速和风向均不稳定(图 2),风速从 27—28 日沙尘暴出现前经过一个波动上升过程,风向经过几次调整后稳定为西风,在 28 日 19:10 时风速突然增大,沙尘暴出现,沙尘暴期间风速最大达到 20 m/s,2 m 高度风速维持在 13 m/s 左右,并一直维持到 29 日的 20:00,此后风速快速下

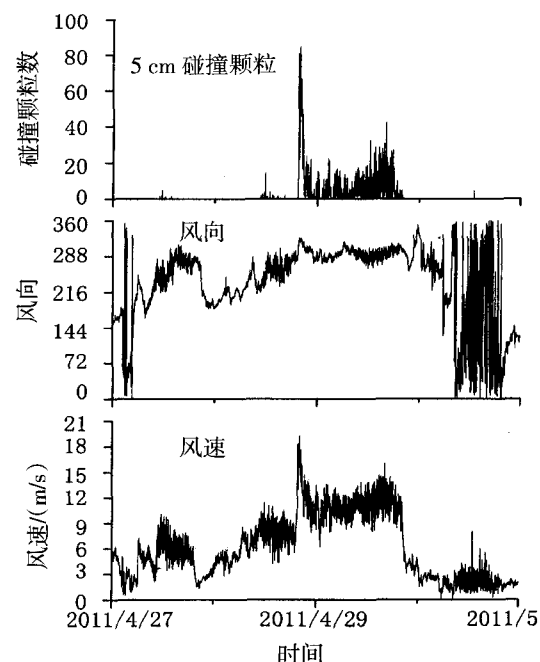


图 2 风速和风向的变化

降,风向不稳定,经过一个大调整过程,沙尘暴和扬沙天气结束。

总的来说,在沙尘暴前风速经过一个波动上升、风向调整过程,在沙尘暴过程中风速和风向相对稳定。由于风是地表起沙的主要动力,当风速达到临界起沙风速时地表开始起沙,起沙风速越大,起沙强度也就越大;当风速降到临界起沙风速以下时,地表起沙强度也就开始变弱、直至停止;输沙的方向主要取决于风向分布。

2.1.3 地温和土壤湿度变化

地温和土壤湿度变化总体上呈正相关(图3)。地温和土壤湿度日夜变化非常明显,地温受太阳辐射影响,日出后地温上升很快,日落后下降也非常迅速。但在沙尘暴发生过程中,地温下降得较为缓慢,且日变化较小,这是由于沙尘过程中空气混浊,到达地面太阳辐射较小,地面逆辐射强,使得地面获得和失去的能量少,从而地温变化幅度较小。土壤湿度在沙尘暴过程中较沙尘暴前有明显的变大,在沙尘暴结束后的30日达到这几天的最大值。

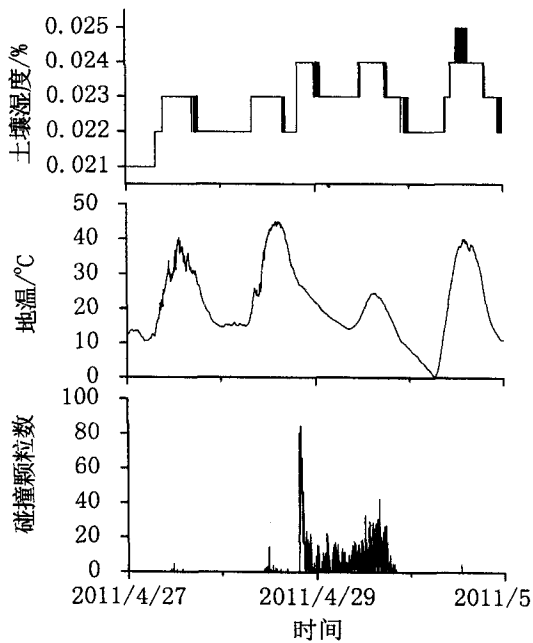


图3 地温和土壤湿度变化

总的来说,在沙尘暴发生前地表处于一个高温低湿状态,在沙尘暴过程中地温下降速度较慢,土壤湿度略有上升。地表高温会破坏大气的稳定层结,使上下层空气易于交换,高空动量下传增强,造成地面的风速加大,有利于地面起沙,而土壤的含水量较低,使沙粒间的粘合力小,更能使地表起沙。沙尘暴过程中地温受风、太阳辐射、大气逆辐射等多重影

响,其具体变化较为复杂,而土壤湿度变化受移动气团干湿性质影响,这有待更进一步研究。

2.1.4 气压变化

在沙尘暴的前一天气压一直呈下降趋势(图4),气压最低时为888.3 hPa,此时也是沙尘暴最强时,随后气压开始上升,沙尘暴强度减小,开始转为扬沙天气,在29日10:00—18:00气压开始下降,地面起沙强度加大,随后气压再一次上升,沙尘天气结束。从图中可以看出起沙时段对应着气压变化最剧烈的过程,这是由于气压变化最剧烈时段风速较大,为起沙提供足够的动力。同时可以看出这次沙尘暴过程主要是由于一次低压过境引起,低压有利于高空能量被带到地表辐散,形成大风,为起沙提供足够的动力。从预报方面来说,在沙漠地区当气压出现大幅度下降时,可能是沙尘天气来临的前兆。

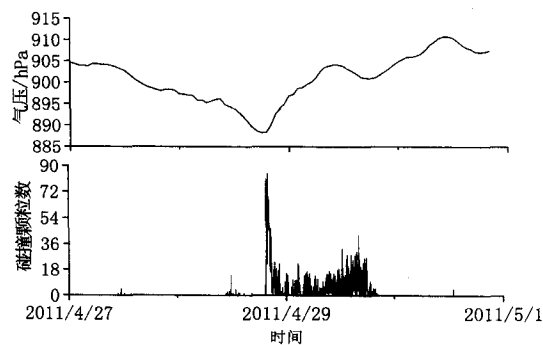


图4 气压的变化

2.2 沙尘暴过程中的输沙分析

2.2.1 输沙量和输沙率百分比随高度的变化

梯度集沙仪中各高度输沙量和方口集沙仪中各高度输沙量百分比随高度变化(图5)。输沙量和输沙百分比总体上同高度成负相关,在梯度集沙仪中20 cm以内的高度层内输沙量有上升趋势,20~50

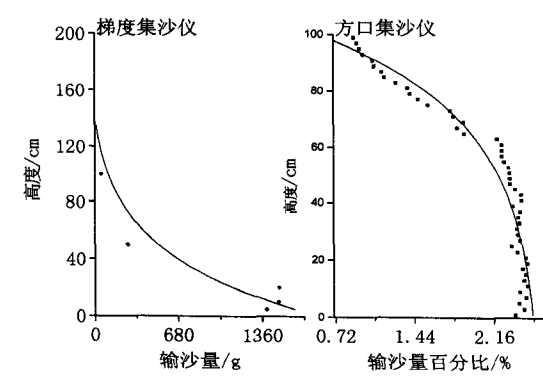


图5 输沙量、输沙率百分比随高度变化
(黑点为实测数据,曲线为拟合线)

cm 高度层输沙量降低最为显著,在 100 cm 高度以上含沙量非常少。在方口集沙仪中,50 cm 高度层以下输沙量百分比随高度变化不明显,且累计百分比占 69%。但是在 20 cm 以下,随高度升高输沙量百分比略有上升趋势,在 50 cm 高度以上输沙量百分比下降很明显。对二者实测数据进行拟合,方程均符合 $y=A \times \exp(-x/t)+y_0$,相关系数都在 0.85 以上。

为了进一步分析 20 cm 以下高度层内输沙量的情况,利用 5 cm 和 10 cm 高度风蚀传感器所记录的每分钟平均碰撞颗粒数进行分析(图 6),可以看出在这次起沙过程中,5 cm 和 10 cm 高度碰撞颗粒数变化完全一致,但是 10 cm 高度碰撞颗粒明显多于 5 cm 高度碰撞颗粒,这说明这两层风沙流中沙粒浓度和输沙率不同,在 10 cm 高度上沙粒浓度和输沙率要高于 5 cm 高度层,也印证了笔者以前的研究,在该地区距离地面较小的高度层内输沙率不是简单地呈对数递减关系,而是有一个线性增加层,这也同武建军^[20]等理论研究一致。了解拐子湖地区这种输沙特征,对该区的防风治沙有重要的指导意义。

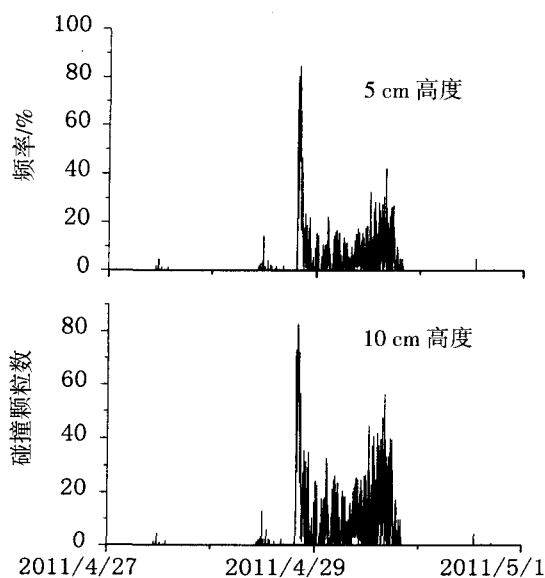


图 6 5 cm 和 10 cm 高度碰撞颗粒数变化

2.2.2 风沙流输沙的方向同风速的关系

风沙流输沙的方位分布也是风沙流研究的重要内容之一。但是在野外实际环境中,由于风速、风向以及地形和下垫面等因素的影响,给野外实际观测风沙流输沙的方位分布造成了很大困难。全方位定点(跃移)和蠕移集沙仪的出现很好地解决了这一难题,为定量研究风沙流输沙的方位特征提供了方便。在这次输沙过程中全方位集沙仪收集的沙样总重为

26 055 g,蠕移集沙仪收集的沙样总重为 1 734.5 g,其各方向的输沙率百分比和 200 cm 高度的风向关系见图 7。从图中可以看出这次风沙过程中风向主要是 WNW 方向,在跃移层中输沙风沙流的跃移方向也主要集中在西方向,但是并不是完全和方向一致,原因可能是沙粒在风力作用下脱离地表进入气流后,从气流中取得动量而加速前进,又在自身的重力作用下以很小的锐角落向地面。由于空气的密度比沙粒的密度要小得多,沙粒在运动过程中受到的阻力较小,降落到沙面时有相当大的动能,因此不但下落的沙粒有可能反弹起来,继续跳跃前进,而且由于它的冲击作用,还能使其降落点周围的一部分沙粒受到撞击而飞溅起来,造成沙粒的连续跳跃式运动。因此沙粒的跃移运动主要包括两部分,一是风力直接吹起来的部分,二是被风吹起后降落到地面上通过反弹又继续跳跃和受降落到沙面上沙粒撞击而飞溅起来的沙粒部分。被风力直接吹起的沙粒的运动方向应该与气流运动的方向一致,而降落到地面上通过反弹又继续跳跃的沙粒的运动方向肯定会有所变化,受撞击而飞溅起来的沙粒的运动方向更是复杂难以确定,所以风沙流中跃移沙粒输沙量的空间分布特征与风向频率既有相似性,又有差异性,而差异的那部分也许正是反弹后又继续跳跃和受撞击而飞溅起来的沙粒的量。

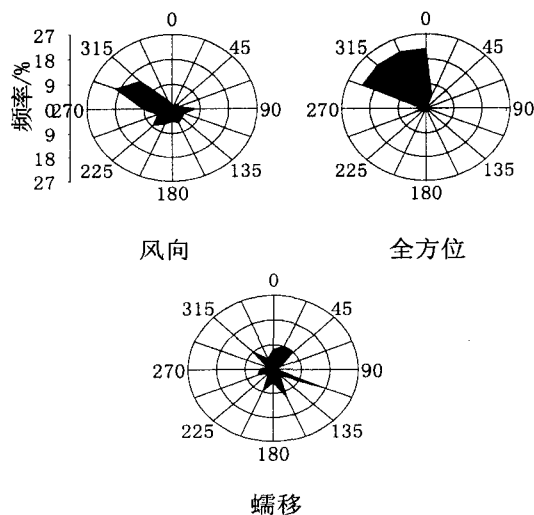


图 7 风沙流输沙的方向同风速的关系

沙粒在地表滑动或滚动称为蠕移。造成沙粒发生蠕移运动的力可以是风的迎面压力,也可以是跃移沙粒的冲击力。已有观测表明,高速运动的沙粒在跃移中通过对沙面的冲击,可以推动相当于自身直径 6 倍、重量 200 倍的粗沙粒。从沙粒的蠕移与

风向之间的关系可以看出：蠕移输沙量的方向分布比较复杂，同风向差异更大。蠕移输沙量百分比最大的方向并不是同风向一致，而是同风向基本成相反方向，造成这种现象可能与风沙流蠕移受力复杂有关，这还有待进一步研究。

3 结论和讨论

本文利用2011年4月28日一次沙尘暴过程的监测数据，分析了这次沙尘暴过程中贴地面微气象要素变化和输沙情况，得出如下结论：

(1)沙源区大气高温干燥，地表高温低湿，气压下降，风向进行大范围调整，风速开始增大，可能是沙尘暴来临的前兆。由于沙尘暴是在特定的地理环境和下垫面条件下，由特定的大尺度环流背景和天气系统所诱发的灾害性天气，同时有利的下垫面特征条件的形成也起到重要的作用，故沙尘暴的预报要结合多方面的因素进行分析。

(2)沙尘暴过程中风速和风向都相对稳定，水汽压和相对湿度都会明显下降，地温下降较慢，土壤湿度略有上升。在起沙过程中，风速起着决定性的作用。

(3)在1 m以下的风沙流中，输沙量主要集中在地面50 cm以内高度层，输沙百分比累计占到69%，在0~20 cm高度层里输沙量呈增大趋势，20 cm以上随着高度升高含沙量逐渐下降。输沙量和输沙量百分比随高度的变化总体遵循方程 $y = A \times \exp(-x/t) + y_0$ ，相关系数都在0.85以上。在20 cm以内的变化规律是不是这个地区的特例，还有待进一步观测与研究。

(4)跃移沙粒输沙量的空间分布与风向频率既有相似性，又有差异性；蠕移输沙量的方向分布比较复杂，同风向分布有显著的差异。这种差异性可能是跃移沙粒与地表碰撞反弹后又继续跳跃和受撞击而飞溅起来的沙粒的量，但是还有待进一步证实。

由于分析的是春季的一次沙尘过程，在其他季节出现的沙尘过程中，微气象要素变化是否也有同样的规律，还有待进一步研究与分析。同时这次沙尘过程强烈，输沙量较大，而布置的各种集沙仪的容量有限，其集沙率是否受到影响，这些都需要进行长时间的观测与分析。

参考文献：

- [1] Han kin EH. On dust raising winds and descending currents[J]. India Met Memoirs.1921, 22, Part VI.
- [2] Idso S B, Ingram R S, Pritchard J M. An American Haboob

[J]. Bull Amer Meteor Soc.1972, 53:930-935.

- [3] Josepl P V, Raipal D K, Deka S N. et al. The convective dust storms of Northwest India [J]. Mausam, 1980, 31:431-442.
- [4] Goutorbe P, Lebel T, Tinga A, et al. HAPEX-Sahel: A large-scale study of land atmospheric interactions in the Semi-Arid Tropics[J]. Ann Geophys, 1994, 12:53-64.
- [5] Westphal D L, Toon O B, Carlson T N. A case study of mobilization and transport of Saharan dust [J]. J Atmos Sci, 1988, 45:2145-2175.
- [6] Liu L Y, Shi P J, Gao S Y, et al. Dustfall in China's western Loess plateau as influenced by dust storm and haze events[J]. Atmos Environ, 2004, 38: 1699-1703.
- [7] Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits [M]. London: Academic Press, 1987:334.
- [8] Chun Y, Boo K, Kim J, et al. Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea [J]. J Geophys Res, 2001, 106(D16):18461-18469.
- [9] In H J, Park S U. Estimation of dust emission amount for a duststorm event occurred in April 1998 in China [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, 148(1-4):201-221.
- [10] 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997:164.
- [11] 朱福康, 江吉喜, 郑新江, 等. 沙尘暴天气研究现状和未来[J]. 气象科技, 1999(4):1-8.
- [12] 牛生杰, 章澄昌. 贺兰山地区沙尘起动和垂直输送物理因子的综合研究[J]. 气象学报, 2002, 60(2):194-204.
- [13] Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(24): 2272, doi: 10.1029/2003GL01826
- [14] Shao Y. A similarity theory for saltation and application to aeolian mass flux [J]. Boundary-Layer Meteor, 2005, 115:319-338.
- [15] 王涛. 中国北方沙漠化过程及防治研究[J]. 中国科学院院刊, 2002(3):204-206.
- [16] 薛建军, 刘月巍, 牛若芸, 等. 2002年3月18—22日强沙尘暴过程分析[J]. 气象, 2004, 30(9):39-44.
- [17] 张仁健, 徐永福, 韩志伟. 北京春季沙尘暴的近地面特征[J]. 气象, 2005, 31(2):8-11.
- [18] 郑新江, 赵亚民, 罗敬宁. 中国沙尘暴天气云图特征[J]. 气象, 1995, 21(2):46-49.
- [19] 刘景涛, 郑明倩. 内蒙古中西部强和特强沙尘暴的气候学特征[J]. 高原气象, 2003(2):54-62.
- [20] 武建军, 何丽红, 郑小静. 跃移层中沙粒浓度分布特征的研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2002, 38(3):15-21.

Analysis of Meteorological Elements Response and Sand Transport in the Process of Sand-dust Storms

HU Wen-feng^{1,2,3}, HE Qing², YANG Xing-hua^{1,2}

(1. Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002, China; 3. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: Based on the field monitor data, the meteorological elements response and sand transport in the process of sand-dust storms at the Guaizi Lake area in April 2011 were analyzed. The following conclusions showed that hot and dry atmosphere, high surface temperature and low humidity, pressure drop and wind speed increase were the precursor to the coming of sand-dust storm. During the period of sandstorm, the pressure, the vapor pressure and relative humidity decrease apparently, with slow decline rate of ground temperature and slight increase of soil moisture. Sand transport mainly concentrated within the height of 50cm from the ground, in the 0-20cm layer sand transport tended to increase, and decreased with increasing height above 20cm. Spatial distribution of sand transport frequency of saltating sand particles was similar to the wind direction. Direction distribution of creeping sand transport was more complex, significantly different from wind direction. The results were instructive to forecasts of sand-dust storms and resistance to wind-sands.

Key words: Badan Jaran Desert; sand-dust storm; micro-meteorological factors; sand transport