

文章编号:1000-694X(2008)02-0227-04

浑善达克沙地春季沙尘暴期间 沙尘启动及传输特性研究

岳平^{1,2,3}, 牛生杰², 刘晓云⁴

(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. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 3. 张掖国家气候观象台, 甘肃 张掖 734000; 4. 酒泉市气象局, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: 沙尘暴是一种强烈的风蚀过程, 同时又加剧了荒漠化进程。沙尘气溶胶的生态环境及气候效应已成为国际社会关注的焦点问题。采用“IMGRASS”春季野外实验期间在内蒙古浑善达克沙地东南部的桑根达来观测点得到的沙尘气溶胶的粒谱, 计算了该沙地 10 m 高度的沙粒启动速度, 并估算了该沙地沙尘气溶胶的传输距离。

关键词: 浑善达克沙地; 沙尘暴; 沙粒浓度; 起沙速度

中图分类号: X16

文献标识码: A

每年春季我国北方干旱、半干旱地区, 尤其是四大沙地(浑善达克沙地、科尔沁沙地、毛乌素沙地和呼伦贝尔沙地)是中国东部沙尘暴期间沙尘粒子的主要源地。与我国北方荒漠化地区相似, 在许多发展中国家所处的中纬度干旱、半干旱草原及荒漠地带, 由于人口的迅速增长, 不合理的农业开垦以及过度放牧, 造成草原加速退化和生态的急剧恶化, 从而形成新的沙尘暴源和引发更频繁的沙尘暴灾害^[1]。根据 IPCC 第二次和第三次评估报告, 沙尘气溶胶是影响气候变化的重要因素之一, 它不仅能够散射太阳辐射和吸收地气红外辐射, 而且作为云凝结核对全球或区域降水分布和变率产生影响^[2-3]。最近几年有关沙尘气溶胶的辐射强迫、生态环境及气候效应已经引起了科学家的高度重视, 但是目前还不能准确的对其进行评估, 主要是没有建立气溶胶辐射模型。因此对沙尘源地的粒子浓度的监测, 对于建立沙尘气溶胶辐射模型, 准确估算沙尘气溶胶的长期气候及辐射效应具有重要作用。另外, 通过风蚀作用脱离地表土壤悬浮于空中的沙尘气溶胶微粒, 在大气湍流的作用下向四周扩散, 最后输送到几千公里以外的地方。这些长时间悬浮于大气中的尘粒对区域和全球气候的变化将产生强迫^[2-3]。因此精确计算沙尘源地的气溶胶物理特性, 较为准确的测算地表土壤的沙尘启动速度以及研究沙尘气溶胶的长距离传输对研究其生态环境效应及气候强迫就显得极为重要。

但是, 地表风蚀过程和地表沙粒被风吹起的物理过程非常复杂。国内外虽然做了大量理论和试验方面的研究^[4-8]; Dong 等^[9]通过风洞试验研究了风沙流的通量廓线; 沈志宝等^[10]根据大气中粒子数浓度的观测资料, 分别估算了敦煌地区戈壁地表在沙尘暴和扬沙阶段的沙尘排放率; 成天涛等^[11]利用起沙通量模式和地面起沙半经验方案, 估算了浑善达克沙地春季地表临界起沙风速及沙尘通量。Gillette 等^[7]根据地表土壤风蚀起沙的物理机制, 认为沙尘排放量是风速(或摩擦速度)和地表状况(包括土壤水分和地表植被等)的函数。但国内在该领域的研究往往受到资金等因素的限制, 大多比较零散。目前对我国浑善达克沙地的风沙启动速度方面做了一些研究^[1, 11-12], 但是针对浑善达克沙地春季沙尘暴条件下产生的沙尘气溶胶的长距离输送问题研究较少。

采用“内蒙古干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)”重大基金项目的部分观测资料^[1, 11], 计算了浑善达克沙地春季 10 m 高度的沙粒启动速度, 并估算了该沙地沙尘气溶胶的传输距离。这一结果对定性评估沙尘气溶胶生态环境和气候效应、数值模拟沙尘暴过程风沙启动传输机制和建立沙尘气溶胶辐射模型具有重要意义。

1 资料来源

浑善达克沙地所用资料主要来自 PMS Fssp-

收稿日期: 2007-02-01; 改回日期: 2007-03-17

基金项目: 科技部公益专项资助项目(2005DIB3J108); 国家自然科学基金项目(40765001, 40705005, 40575048)资助

作者简介: 岳平(1974—), 男(汉族), 甘肃静宁人, 工程师, 博士生, 主要从事沙尘天气及沙尘气溶胶研究。E-mail: jquyueping@126.com

100 型激光光谱仪在内蒙古桑根达来的观测结果。PMS 观测系统是一种粒子前向散射分光计,其原理是当粒子通过激光束时,接收其前向散射,经光电转换,其脉冲信号通过脉冲分析器分辨,最终得出粒子大小信息,并自动分档计数,探测范围在 0.5~100 μm 之间。在分析浑善达克沙尘气溶胶时参考了 2006 年 3—4 月在内蒙古朱日和基准气候站(以美国 MSP 公司生产的 1000XP 型 WPS 激光粒度光谱仪)的观测结果。该仪器利用激光前向散射、电子迁移率和颗粒物浓缩原理分析气溶胶颗粒浓度和数目,探测范围在 0.5~100 μm 之间。上述试验的仪器采样高度均在 3~4 m,这一高度能够有效地避免地表土壤颗粒的影响。

2 生态环境概况

浑善达克沙地位于内蒙古自治区锡林郭勒草原中部,处于 42°—45°N,112°—117°E 之间(图 1)。从生态地理区来看,该沙地是一个独特的温带稀树草原区,是风积沙覆盖在高原上的东西伸展的沙地。从东部的草甸草原向西伸展到荒漠草原,东西长约 500 km,南北宽约 50~100 km。沙地内部由于其原始地表的复杂性,存在着风成沙丘与丘间低地,并有大小不等的湖泊^[13]。在春季强大风侵袭下,多沙尘暴天气,是京津地区上空浮尘、扬沙和沙尘暴的主要源地之一。

表 1 浑善达克沙地沙尘气溶胶的数浓度^[19]

Tab. 1 Number concentration of dust particles in sand-dust storm weather in Hunshandake Sand-land					
观测地点	天气现象	平均数浓度/cm ⁻³	数浓度最大值/cm ⁻³	数浓度平均直径/μm	样本数/n
浑善达克沙地	沙尘暴	1 078.9	5 776.2	2.42	136

表 2 浑善达克沙地沙尘气溶胶数浓度随粒径的分布^[15]

Tab. 2 The number concentration of dust aerosols at different grain size in sand-dust storm weather in Hunshandake Sand-land					
观测地点	天气现象	PM10 浓度/cm ⁻³	占总浓度百分比/%	PM2.5 浓度/cm ⁻³	占总浓度百分比/%
浑善达克沙地	沙尘暴	622.8~3 044.6	99.95	535.8~2 183.9	72~84

克沙地,沙尘暴期间沙尘气溶胶数浓度 PM10 在 622.8~3044.6 之间,占样本总浓度的 99.95%;沙尘气溶胶数浓度 PM2.5 在 535.8~2183.9 之间,占样本总浓度的 72%~84%。因此,在浑善达克沙地腹地,如果以 2.5 μm 为基准划分粗细粒子,细粒子占主要方面。

3.2 沙粒启动速度的计算

地表土壤的风力侵蚀过程中沙粒的运动主要有

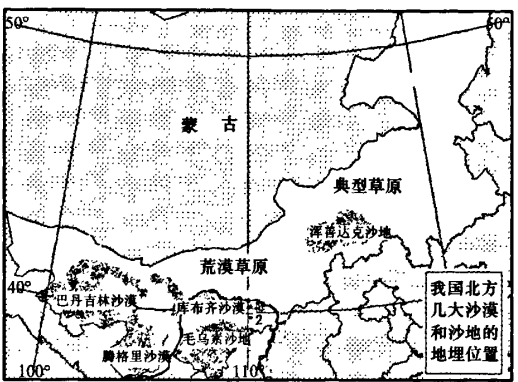


图 1 浑善达克沙地地理环境

Fig. 1 Geographical environment of Hunshandake Sand-land

3 结果分析

3.1 沙尘暴条件下近地面粒子数浓度

沙尘源地直径小于 10 μm 的气溶胶粒子不仅能够进入呼吸系统对沙尘源地人体健康造成危害,而且能够进入高层大气,通过长距离的传输,对下游地区的生态环境产生影响。从浑善达克沙地采集到的沙尘气溶胶样品来看(表 1),沙尘暴条件下当地沙尘浓度要大于宁夏贺兰山地区沙尘暴期间的浓度^[14],数浓度平均直径 2.42 μm 亦比贺兰山地区数浓度平均直径大。另外,从表 2 可以看出,在浑善达

三种形式:跃迁、悬浮和蠕动^[16]。能够进入高层大气远距离输送的沙粒主要是通过悬浮运动来实现的。而地表颗粒物只有在超过阈值风速的大风条件下才可能移动,这个阈值风速被定义为沙粒的启动速度。拜格诺给出了均匀沙的流体启动速度的计算方法^[17]:

$$V_{*c} = 5.75 \times A \sqrt{\frac{\sigma - \rho_g d}{\rho}} \log \frac{z}{\kappa} \quad (1)$$

式中:A 为一常数,均匀沙的实验值 A=0.1;σ 为沙

粒密度; ρ 为空气密度; κ 为卡曼常数, 取 0.38; g 为重力加速度; z 为给定计算高度; d 为粒子直径; V_* , 沙粒启动速度, 可见启动值随沙粒直径的平方根成正比。根据表 3 可知, 沙尘暴期间浑善达克沙地近地面沙尘气溶胶数浓度的平均粒径分别为 $2.42 \mu\text{m}$ 。为在气候模式、沙尘暴预警系统和沙尘气溶胶辐射模型中充分利用国家气象台站积累的大量近地层风的观测资料, 在计算沙粒启动风速时选取了 10 m 高度。

表 3 不同粒径的沙尘气溶胶在风力作用下
所达距离 (平均 $u=15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Tab. 3 The transmission distance of dust
particles in different size

资料来源	粒径 / μm	水平传输距离 / km
浑善达克沙地	2.42	$7.6 \times 10^4 \sim 7.6 \times 10^5$
Malina(1941) ^[16]	1.0	$4.5 \times 10^5 \sim 4.5 \times 10^6$
	10.0	45~450

由(1)式可得出该沙地 10 m 高度沙粒启动风速为 $5.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于观测手段和计算方法的差异, 沙粒启动速度各家所给略有不同。成天涛等^[11]利用起沙通量模式和地面起沙半经验方案对“内蒙古干旱草原土壤-植被-大气相互作用”观测进行了分析, 估算出浑善达克沙地沙粒启动速度在 1 m 高度为 $5.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 比本文计算的 10 m 高度启动风速小 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 牛生杰等^[18]观测得到贺兰山区 10 m 高度起沙阈值为 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 美国环保总局 (US EPA) 推荐的计算地面起沙率的阈值风速为 $5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。所以计算得出的浑善达克沙地沙粒启动比较合理。

3.3 沙粒在风力作用下输送距离的估算

近年来, 比较系统的国际大气气溶胶研究计划是亚洲气溶胶特征试验 (ACE-Asia), 其中沙尘气溶胶作为主要的研究内容之一^[19]。2001 年中国科学院与日本文部科学省签署的“风送沙尘的形成、输送机制及其气候与环境的影响研究 (ADEC)”是系统性的研究亚洲沙尘暴的第一个计划^[20]。沙尘气溶胶在上升气流的作用下进入高层大气之后, 能够长时间在空中停留, 并随高空大气环流向下游地区输送。沙尘气溶胶的长距离输送及其生态环境效应和气候强迫已经成为国际社会关注的焦点问题^[3,12,19]。冯·卡曼给出了沙尘粒子自沙面外移后在空中传输的距离经验公式^[17]:

$$l = \frac{40\epsilon\mu^2 u}{\sigma^2 g^2 d^4} \quad (2)$$

式中: u 为高空平均风速; μ 为运动粘性系数, 一般 $\mu = 0.14 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; ϵ 为湍流交换系数, 在风速较大时 $\epsilon = 10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; σ 为沙粒密度; d 为粒子直径。

如果考虑沙尘暴期期间最强时间段的平均风速 $u = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 将表 3 中的浑善达克沙地沙尘暴期间沙尘气溶胶数浓度平均值 $2.42 \mu\text{m}$ 代入(2)式, 可以得到在上述条件下浑善达克沙地沙尘气溶胶能够传输的距离应当在 $7.6 \times 10^4 \sim 7.6 \times 10^5 \text{ km}$ 范围之间。与 Malina^[17]给出的沙尘粒子在风力吹扬下所能到达的距离进行比较可知(表 3)粒径较小的沙尘气溶胶进入高层大气之后, 不仅造成本区域环境恶化, 而且通过长距离输送, 能够参与到全球大气循环当中。因此, 地球上任何一个地方出现沙尘暴这类强烈风蚀自然灾害天气之后, 输送到高层大气中的沙尘气溶胶对整个人类生存环境都将产生影响; 防止和治理沙漠化, 减少和防御沙尘暴这类强烈的风蚀自然灾害是人类共同面临的科学问题。

4 结论与讨论

1) 鉴于国家气象部门的风速观测高度为 10 m, 而目前我国进行的沙尘启动风速的研究很不统一, 有的观测高度是 1 m, 也有的是 2 m, 并且沙尘粒子的启动风速不同学者往往采用不同的计算方法, 因此, 以往在气候模式及沙尘暴预报系统中对已取得的研究成果的应用尚未和气象部门积累了数十年的风速资料之间建立很好的联系。笔者采用计算了浑善达克沙地春季沙尘暴期间 10 m 高度沙尘启动速度, 这一结果可为数值模拟、沙尘暴预警系统或建立气溶胶辐射模型提供更翔实的参考依据。

2) 沙尘气溶胶的长距离输送问题不仅是环境问题, 而且是重大的国际政治问题, 东亚地区沙尘气溶胶的生态环境和气候效应成为了国际社会关注的焦点问题。根据浑善达克沙地春季沙尘暴期间观测资料, 计算了该沙地沙尘暴过程产生的气溶胶粒子的传输距离为 $7.6 \times 10^4 \sim 7.6 \times 10^5 \text{ km}$, 这一结果可为气候模式和研究沙尘气溶胶辐射强迫作用提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用综合研究[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 571-573.

- [2] PICC. Climate change 1995; The Science of Climate Change [M]. Cambridge University Press, 1996.
- [3] PICC. Climate change 2001; The Science of Climate Change [M]. Cambridge University Press, 2002.
- [4] 贺大良. 输沙量与风速关系的几个问题[J]. 中国沙漠, 1993, 13(2): 14-17.
- [5] 马世威. 风沙流结构的研究[J]. 中国沙漠, 1988, 8(3): 8-22.
- [6] 李振山, 张琦峰. 风沙流的输沙率沿程变化规律[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 189-193.
- [7] Gillette D A, Ranjit Passi. Modeling dust emission caused by wind erosion[J]. J G Res, 1988, 93: 14234-14242.
- [8] 黄宁, 郑晓静. 沙粒跃移云及 Magnus 力对床面有效粗糙度的影响[J]. 中国沙漠, 2003, 23(6): 616-620.
- [9] Dong Z, Liu X, Wang He, et al. The flux profile of a blowing sand cloud: A wind tunnel investigation[J]. Geomorphology, 2002, 49: 219-230.
- [10] 沈志宝, 申彦波, 杜明远, 等. 沙尘暴期间戈壁沙地起沙率的观测结果[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 545-550.
- [11] 成天海, 吕达仁, 徐永福. 浑善达克沙地起沙率和起沙量的估计[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 236-241.
- [12] 刘树林, 王涛, 郭坚. 浑善达克沙地春季风沙活动特征观测研究[J]. 中国沙漠, 2006, 23(3): 356-361.
- [13] 王革丽, 吕达仁, 尤莉. 浑善达克沙地沙尘暴气候特征分析[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(4): 433-439.
- [14] 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.
- [15] 成天海, 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.
- [16] Hua Lu, Yaping Shao. A new model for dust emission by saltation bombardment[J]. J G Res, 1999, 104(D14): 16827-16841.
- [17] 李江风. 沙漠气候[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 28-42.
- [18] 牛生杰, 章澄昌. 贺兰山地区沙尘暴沙尘起动和垂直输送物理因子的综合研究[J]. 气象学报, 2004, 60(2): 194-204.
- [19] Hucbert B J, Bates T, Russell P B, et al. An overview of ACE-Asia; strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts[J]. J G Res, ACE-Asia Special Issue A, 2003.
- [20] Mikami M, Abe O, Du M, et al. The impact of aeolian dust on climate; Sino-Japanese cooperative project ADEC[J]. Journal of Arid Land Studies, 2002, 11: 211-222.

Dust Emission and Transmission during Spring Sand-dust Storm in Hunshandake Sand-land

YUE Ping^{1,2,3}, NIU Sheng-jie², LIU Xiao-yun⁴

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of CMA, Institute of Arid Meteorology, China Meteorology Administration, Lanzhou 730020, China; 2. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. National Meteorological Observatory of Zhangye, Zhangye 734000, Gansu, China; 4. Jiuquan Meteorological Bureau of Gansu Province, Jiuquan 735000, Gansu, China)

Abstract: Sand-dust storm is an intense wind erosion process and it simultaneously exacerbates the land desertification process. The ecological environmental effect and climatic effect of dust aerosol in sand-dust storm have become the focus of attention of the international community of science. In this paper, the dust aerosol number concentration and its transmission characters during spring sand-dust storms were analyzed based on the observation data in Hunshandake sand-land. It was calculated that the dust-emitting wind speed on the sand-land is $5.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 10 m high, and the transmission distance of dust particles in sand-dust storm weather condition is about $7.6 \times 10^4 \sim 7.6 \times 10^5 \text{ km}$.

Keywords: Hunshandake sand-land; sand-dust storm; dust aerosol concentration; dust-emitting wind speed