

文章编号: 1000-694X(2007)06-1077-03

# 盐池地区沙尘暴期间风沙运动若干特征研究

王鹏祥<sup>1,2</sup>, 孙兰东<sup>1</sup>, 岳平<sup>1,2</sup>, 牛生杰<sup>2</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省(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)

**摘要:** 通过沙尘暴期间的实际观测资料, 对宁夏盐池地区沙尘暴期间风蚀起沙的几个相关特性进行了研究。结果表明, 当地 10 m 高度的临界起沙速度为  $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 临界摩擦速度为  $0.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 采用凌裕泉提出的“最大可能输沙量”计算方法, 得出盐池地区沙尘暴期间的输沙量为  $12.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ ; 当地沙尘气溶胶粒子传输距离为  $1.4 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^6 \text{ km}$ 。

**关键词:** 沙尘暴; 风蚀; 临界起沙速度; 临界摩擦速度

**中图分类号:** P445.4

**文献标识码:** A

我国北方干旱、半干旱地区通过风蚀作用进入大气中的沙尘气溶胶已经成为国内外学者普遍关注的问题, 粒径较小的沙尘颗粒能够长时间悬浮于空中, 并在大气湍流的作用下向四周扩散。长时间悬浮于大气中尘粒的辐射强迫作用还会影响到区域和全球气候的变化<sup>[1-2]</sup>。因此研究风沙运动的特性是风沙工程中确定合理的防沙方案、措施的主要科学依据, 同时也是加强生态环境保护的有效依据之一。

同时, 地表风蚀过程又是一个非常复杂物理过程。国内外虽然做了大量理论和试验方面的研究, 有的是根据实际观测资料拟合的<sup>[3-4]</sup>、有的是根据风洞实验推导的<sup>[5]</sup>。由于受各自实验条件或观测条件的限制, 所得结论差异较大, 但其共同之处是, 沙流量输送是风速幂函数<sup>[3]</sup>。沈志宝等<sup>[6]</sup>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<sup>[7]</sup>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; 陈渭南等<sup>[8]</sup>对塔克拉玛干沙漠的起沙风速进行了研究, 并给出了不同观测高度、不同时距的流体起沙与冲击起沙风速的相关方程。Gillette 等<sup>[9]</sup>根据地表土壤风蚀起沙的物理机制, 并指出沙尘排放量是风速(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。

本文用牛生杰等人于 1998—1999 年 4—5 月在毛乌素沙地进行的国家自然科学基金项目观测资

料<sup>[9-13]</sup>, 计算了盐池地区 10 m 高度的临界起沙速度、临界摩擦速度、输沙率(量), 并估算了盐池地区沙尘气溶胶的传输距离, 上述问题的探讨可为进一步研究盐池地区以及西北干旱、半干旱地区风蚀起沙机制及数值模拟提供参考依据。

## 1 临界起沙速度的计算

大气边界层的气流在运动过程中, 使地面的沙物质受到风力的作用, 并在风力增大到一定阈值时, 地表颗粒物脱离静止状态而进入运动, 这个阈值风速被定义为临界起沙速度。临界起沙风速是研究风沙运动规律、解决风沙工程问题的关键指标之一, 它与土壤湿度、植被覆盖条件等因素有关, 同时因观测高度、起动性质的变化而不同。文献<sup>[14]</sup>给出了均匀沙的流体临界起沙速度的计算方法如下:

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

式中:  $U_{*c}$  为沙粒启动速度; 常数  $A=0.1$ ;  $\sigma$  为沙粒密度;  $\rho$  空气密度;  $\kappa$  为卡曼常数;  $g$  为重力加速度;  $z$  为计算高度;  $d$  为粒子直径。根据牛生杰等人用美制 APS-3310A 型激光空气动力学粒子谱仪在盐池地区的观测结果<sup>[10]</sup>, 在 1998 年 4 月 23 日 06 时 42 分至 09 时 43 分采集到的 316 个样本, 该时段当地沙尘气溶胶数浓度平均粒径为  $1.77 \mu\text{m}$ 。在风蚀过程中, 粒子要克服了重力和粘性力之后才能脱离地表, 大粒子在此过程中主要受重力作用, 小粒子要脱离地表主要受到粘性力作用, 因此, 中等粒径的粒

收稿日期: 2007-03-12; 改回日期: 2007-05-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-229); 中国气象局多轨道业务项目“区域干旱监测评估业务系统”; 西部开发科技行动重大项目“祁连山空中云水资源开发利用研究”(2004BA901A16)共同资助

作者简介: 王鹏祥(1968—), 男, 甘肃人, 在读博士, 高级工程师, 从事气候变化和沙尘暴监测预警研究。E-mail: wangpxgs@yahoo.com.cn

子往往相对容易脱离地表。由(1)式计算可得出盐池地区 10 m 高度临界起沙风速为  $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 该结果与牛生杰等<sup>[10]</sup>观测得到的贺兰山地区 10 m 高度阈值起沙  $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  一致。关于盐池周边地区临界起沙速度的观测研究比较多, 但是研究结果略有不同。黄福祥等<sup>[15]</sup>的观测结果认为毛乌素沙地 1 m 高度的沙粒起动速度为  $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 虞毅等<sup>[16]</sup>在毛乌素的观测结果为  $4.65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以看出, 本文采用文献给出的计算方法所得结果基本合理。

## 2 临界摩擦速度

在风蚀过程中,  $u_{*c}$  表征的是地表土壤对风蚀起沙的阻碍能力, 其值的大小与粒子直径有关。对于一定尺度的沙粒, 临界摩擦速度与土壤性质、地表植被状况以及土壤的含水量有关, 因此, 临界摩擦速度的准确求解比较复杂。本文采用文献[7]给出的临界摩擦速度计算方法求盐池地区的临界摩擦速度, 具体表达式如下:

$$u_{*c} = \begin{cases} \frac{0.129K}{(1.298B^{0.092} - 1)^{0.5}} & 0.03 < B < 10.0 \\ 0.129K\{1 - 0.858\exp[-0.0617(B - 10)]\} & B \geq 10 \end{cases} \quad (2)$$

$$B = \alpha d_p^x + b \quad (3)$$

$$K = \left( \frac{\sigma g d_p}{\rho} \right)^{0.5} \left( 1 + \frac{0.006}{\sigma g d_p^{2.5}} \right) \quad (4)$$

式中:  $d_p$  为粒子直径;  $\rho$  为空气密度;  $\sigma$  为沙粒密度;  $g$  为重力加速度; 常数  $\alpha = 1331$ ,  $b = 0.38$ ,  $x = 1.5$ 。由此可以得到盐池地区沙尘暴期间的临界摩擦速度为  $0.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 这一结果比申彦波等<sup>[4]</sup>采用 Shao 给出的计算方法, 得到的敦煌戈壁地表土壤的风蚀起沙临界摩擦速度  $0.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  小, 但与敦煌地区农田起沙的临界摩擦速度  $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  接近。

## 3 输沙率(量)

输沙率是显示一定边界条件下风沙流强度的具体指标, 表征的是指单位时间的通过单位宽度的风沙流所携带的沙尘物质数量。由于其在空间分布上具有明显的非均一性和随时间变化的非正常性, 所以对一个地区进行长时间输沙总量的连续测定几乎是不可能的, 因此对于较大区域输沙量大多采用理论输沙率公式进行计算。此外, 输沙量又是风沙物理研究的一个重要方面, 风蚀过程中释放的沙尘气溶胶进入大气之后, 由此产生的辐射强迫、生态环境

及气候效应引起了科学家的高度重视<sup>[1-2, 17-21]</sup>。本文计算中选择凌裕泉提出的“最大可能输沙量”假设下的计算公式<sup>[22]</sup>:

$$q = 7.57 \times 10^{-1} (V - V_c)^{1.9} \quad (5)$$

式中:  $q$  为输沙率单位取  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $V$  为起沙风速;  $V_c$  为临界起沙风速。该公式经过风洞实验验证并且在宁夏沙坡头和敦煌莫高窟两地的输沙量计算中, 试验观测数据与(5)式计算得到的结果吻合的很好<sup>[15, 16]</sup>, 而宁夏盐池地区的下垫面属性与年降水量与上述两个地区非常相近, 因此采用(5)式计算盐池地区的输沙量具有可行性。在确定了输沙率  $q$  的前提下, 风蚀过程中的输沙量  $Q = q \times t$ , 其中  $t$  为相应时间。计算得到盐池站 1998 年 4 月 23 日 06 时 42 分至 09 时 43 分的总输沙量为  $12.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

## 4 盐池地区沙尘输送距离

沙尘气溶胶在上升气流的夹卷作用下, 能够进入高层大气并长时间悬浮在空中, 对本区域的生态环境及气候产生强迫效应, 同时能够诱发人体呼吸道和心血管疾病。此外, 在高空大气环流的作用下, 沙尘气溶胶在向下游地区输送的过程当中, 对沿途传输路径的天气气候产生影响。为了研究上述问题, 必须对沙尘输送距离进行较为准确估算。本文采用冯·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<sup>[12]</sup>:

$$l = \frac{40\epsilon\mu^2 u}{\sigma^2 g^2 d^4} \quad (6)$$

(6)式中  $u$  为高空平均风速;  $\mu$  运动粘性系数;  $\sigma$  为沙粒密度;  $d$  为粒子直径;  $\epsilon$  为湍流交换系数, 在风蚀较为强烈时  $\epsilon = 10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

将盐池地区沙尘暴期间沙尘气溶胶数浓度平均值  $1.77 \mu\text{m}$  代入(3)式, 可以得到当地沙尘气溶胶粒子传输距离为  $1.4 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^6 \text{ km}$ 。而 Malina<sup>[12]</sup>给出的沙尘粒子在风力吹扬下所能到达的距离为  $4.5 \times 10^5 \sim 4.5 \times 10^6 \text{ km}$ , 显然二者在同一个数量级别。可见, 沙尘气溶胶进入平流层之后, 能够参与到全球物质循环当中去, 进而影响大气产生辐射强迫。

## 5 结论

1) 本文通过实际观测资料, 对盐池地区沙尘运动的几个物理特性进行了研究。当地 10 m 高度的临界起沙速度为  $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 临界摩擦速度为  $0.32$

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这一结果对研究西北地区尤其是贺兰山地区风蚀运动特征、建立沙尘暴预警系统及数值模拟具有重要的参考价值。

2) 输沙率是显示一定边界条件下风沙流强度的具体指标, 定量计算某一地区的输沙率(量)对于研究当地的环境生态及其变化状况非常重要。本文采用凌裕泉提出的“最大可能输沙量”计算方法, 定量计算了盐池地区沙尘暴期间的输沙量为  $12.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

3) 沙尘气溶胶在上升气流的夹卷作用下, 能够进入高层大气并长时间悬浮在空中, 对本区域的生态环境及气候产生强迫效应, 同时能够诱发人体呼吸道和心血管疾病。因此研究沙尘气溶胶的输送问题意义重大。本文计算得到的盐池地区沙尘气溶胶粒子传输距离为  $1.4 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^6 \text{ km}$ 。这一结果可为气候模式和研究沙尘气溶胶的传输机制提供参考。

#### 参考文献(References):

- [1] PICC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change [M]. Cambridge University Press, 1996.
- [2] PICC. Climate Change 2001: The Science of Climate Change. Cambridge University Press, 2002.
- [3] 陈渭南, 慎治宝, 杨佐涛, 等. 塔克拉玛干沙漠的起沙风速[J]. 地理学报, 1995, 50(4): 360—367.
- [4] 申彦波, 沈志宝, 杜明远, 等. 敦煌戈壁地表风蚀起沙量的计算[J]. 高原气象, 2004, 23(5): 648—653.
- [5] 凌裕泉. 输沙量(率)水平分布的非均一性[J]. 实验力学, 1994, 9(4): 352—356.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Gillette D A, Ranjit Passi. Modeling dust emission caused by wind erosion[J]. J G Res, 1988, 93: 14234—14242.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 牛生杰. 沙尘气溶胶微结构及其对降水影响的观测和数值模拟[D]. 南京信息工程大学, 2004: 42—44.
- [12] 王鹏祥, 王遂继, 王锡稳. 沙尘暴天气监测预警服务业务系统设计思路及其实现[J]. 甘肃气象, 2003, 21(2): 7—8.
- [13] 王遂继, 王鹏祥, 王志宇. 西北地区沙尘暴天气监测预警服务业务系统[J]. 干旱气象, 2005, 23(4): 83—87.
- [14] 李江风. 沙漠气候[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 28—42.
- [15] 黄富祥, 张新时, 徐永福. 毛乌素沙地气候因素对沙尘暴频率影响作用的模拟研究[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1876—1884.
- [16] 虞毅, 田有昌. 毛乌素沙地防风固沙林效益研究[C]//毛乌素沙地开发整治研究中心研究文集. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1992: 9—16.
- [17] 王式功, 杨得宝, 金炯, 等. 我国西北地区黑风暴的成因和对策[J]. 中国沙漠, 1995, 15(1): 19—20.
- [18] 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.
- [19] 赵红岩, 陈旭辉, 王锡稳, 等. 西北地区春季沙尘暴气候分析及预测方法研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 637—641.
- [20] 辛金元, 张文煜, 袁九毅, 等. 沙尘气溶胶对直接太阳辐射的衰减研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 311—315.
- [21] 姚济敏, 张文煜, 袁九毅, 等. 典型干旱区沙尘气溶胶光学厚度及粒度谱分布的初步分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 77—80.
- [22] 凌裕泉. 最大可能输沙量的工程计算[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 362—368.

## Features of Dust Aerosol Transportation during Sandstorms over Yanchi Area of Ningxia Autonomous Region

WANG Peng-xiang<sup>1, 2</sup>, SUN Lan-dong<sup>1</sup>, YUE Ping<sup>1, 2</sup>, NIU Sheng-jie<sup>2</sup>

(1. Gansu Province & China Meteorological Administration Key Laboratory of Arid Climatic Changes and Reducing Disaster; Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** This paper studied the dust aerosol transporting distance and the relation between wind speed and dust erosion based on the in situ measurement measured by APS-3310A (U. S. A. made) in Yanchi area of Ningxia Autonomous Region during April to May of from 1966 to 1999. Dust transporting distance was calculated according to Kaman empirical formula, and the relation between wind speed and dust erosion were calculated following Bagnold calculation. The results show that the aerosol particle transportation distance is about  $1.4 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^6 \text{ km}$ , and the threshold sand-moving wind speed is  $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  in the study area.

**Keywords:** sandstorm; threshold sand-moving wind speed; threshold friction wind speed