

# 拐子湖地区沙尘天气风蚀起沙量的估算

何清<sup>1</sup>, 胡文峰<sup>1,2</sup>, 杨兴华<sup>1</sup>, 艾力·买买提明<sup>1</sup>, 赵聪敏<sup>1,2</sup>

(1. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

**摘要:**为研究沙尘暴中心在沙尘天气下风蚀起沙量和一些参数的具体情况,以巴丹吉林沙漠拐子湖地区一次沙尘天气过程为例,通过经验公式与野外仪器观测对比分析,对拐子湖地区风蚀起沙过程的一些参数进行了分析。结果表明:摩擦速度与风速成正相关,并影响着风蚀起沙量变化;临界摩擦速度为 0.36 m/s;估算了平均顺风向沙尘通量和垂直沙通量分别为  $1.7\text{E}-02 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$  和  $1.38\text{E}-07 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,顺风向沙尘通量要远大于垂直沙通量。这些参数的得出对防风治沙有着重要的意义。

**关键词:**拐子湖地区; 风蚀; 沙通量

中图分类号:P445<sup>+</sup>.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)01-0006-05

## Estimation of Dust Generation by Wind Erosion in Guaizihu Lake

HE Qing<sup>1</sup>, HU Wen-feng<sup>1,2</sup>, YANG Xing-hua<sup>1</sup>, ALI · Mamtimin<sup>1</sup>, ZHAO Cong-min<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002, China;

2. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

**Abstract:** In order to study the dust generation by wind erosion and some parameters of the center of dust storm, a process of dust storm was monitored at Guaizihu Lake of Badan Jaran Desert. Some parameters of the process of sand wind erosion were analyzed by empirical formula and observation of field instruments. The results were that: Friction velocity was positively relationed to the wind speed, and the friction velocity affected the change of sand flux; the critical friction velocity was 0.36 m/s, the average horizontal sand flux and wind vertical sand flux were estimated as  $1.7\text{E}-02 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$  and  $1.38\text{E}-07 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , respectively. The horizontal sand flux was much larger than the vertical one. The obtained parameters have great significance to wind prevention and sand control.

**Key words:** Guaizihu Lake; wind erosion; sand flux

沙尘天气是一种严重破坏生态环境的灾害性天气。频繁的沙尘天气可以造成源区土壤和养分的过度流失,加剧土地的沙漠化,更能对广大下游地区造成严重的环境污染,给工农业生产、交通运输和人民的日常生活都带来极大危害<sup>[1-4]</sup>,同时会影响到辐射能的收支平衡,导致中尺度到大尺度的气候调整<sup>[5-7]</sup>。中国的沙尘天气主要分布在西北和华北地区,北方的广大地区都是其主要影响区,但沙尘的影响并不限于此,对中国沿海地区乃至东亚及太平洋地区都受到一定影响<sup>[8-11]</sup>。近年来中国北方地区频繁发生强沙尘暴灾害,影响范围大、影响程度剧烈<sup>[12-13]</sup>,严重恶化了空气质量,给人类身体健康带来危害,产生了深刻的气候、环境、社会和经济效应。为此,要求能准确地

估算沙尘暴过程中沙尘粒子的释放量,已有的沙尘释放量的各种估算,结果差异比较大。Tegen 等<sup>[13]</sup>估计全球每年约有 1 000~5 000 Tg 的沙尘粒子从地面释放到大气中,而 Duce<sup>[14]</sup>估算的结果是 1 000~2 000 Tg/a。Zhang 等<sup>[15]</sup>用中国 12 个沙漠站矿物尘的元素浓度(Al, Fe, Mg, Si),估算每年注入大气的中国沙尘约为 800 Tg,约占全球地面年沙尘释放量的一半。

拐子湖地区位于巴丹吉林沙漠北缘,自然环境非常恶劣,年平均 8 级以上的大风近百天,年平均沙尘暴 30 d,历史最大风速为 38 m/s,冬季极端最低气温 -30.7℃,夏季极端最高气温 44.8℃,沙漠温度可达 80℃,历年平均降水量 41 mm,历年平均蒸发量为

收稿日期:2011-06-19

修回日期:2011-07-27

资助项目:国家自然科学基金项目(41175017);国家科技支撑计划课题 2008BAC40B05-01;公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006012);中国干旱气象科学研究基金(IAM201013);中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2010007)

作者简介:何清(1965—),男,四川成都人,博士,研究员,主要从事沙漠气象研究。E-mail:qinghe@idm.cn

4 217.9 mm,干燥、少雨、炎热、大风多是这里的气候特征。刘景涛、郑明倩<sup>[16]</sup>的研究指出阿盟的拐子湖地区是内蒙古的强和特强沙尘暴主要多发区之一,同时也是我国沙尘暴北移路径的必经之地。蔡雪鹏<sup>[17]</sup>研究指出近 30 a 来拐子湖地区平均年沙尘暴日数有 30.6 d,其中每年的 4 月份最多。作为我国沙源地的重要组成部分,目前对该地区释放到大气中沙尘量的研究甚少。本文利用中国气象局沙漠气象研究所在巴丹吉林沙漠北缘拐子湖地区布置的风沙观测场,用 2010 年 3 月份开始的沙尘暴加强观测实验资料,选取一次风沙过程,利用经验公式,并结合拐子湖地区的观测资料,对该次沙尘天气过程中风蚀起沙量进行对比计算,同时与实测的沙尘排放量进行比较分析。

## 1 研究方法

### 1.1 实验设备及资料的获取与处理

沙尘暴加强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,北纬 41°22',东经 102°22',海拔为 960 m。在观测场布置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,可测量沙尘天气过程的沙尘撞击颗粒数、撞击动能及沙粒运动速度,结合贴地层风速梯度仪,可求出沙尘天气过程的起沙临界摩擦速度。对于贴地层梯度风速、风向仪,风速安装高度为 5,10,20,50,100,200 cm,风向安装高度为 20,200 cm,在 200 cm 高度安装有空气温湿度传感器,可监测沙尘天气过程中贴地层风速廓线特征。BNSE 型梯度积沙仪安装高度为 5,10,20,50,100,200 cm,可获取沙尘天气过程不同高度截面上的沙通量及 2 m 高度的风沙流结构。方口积沙仪高度 100 cm,共 50 个层次,每 2 cm 一个采样口,可监测单方向 0—100 cm 输沙通量及风沙流特征。实验观测为 24 h 连续,自动观测记录,所有的数据以小时、分钟、秒三种形式记录。沙样的粒度分析在中国气象局沙漠气象研究所树木年轮实验室用 MS2000 激光粒度仪分析。并以 Excel 和 SPSS 软件进行统计处理。

### 1.2 风蚀起沙的物理机制及计算方案

地表土壤的风蚀起沙过程是运动的空气流与地表上的粒子在界面上相互作用的一种动力过程。风沙物理学中根据地表土壤微粒的尺度(直径  $d$ )和所受的合力大小,将其运动划分为三种形式<sup>[18]</sup>:尺度较大( $d > 1\ 000\ \mu\text{m}$ )微粒的蠕移运动、沙粒( $60\ \mu\text{m} < d < 1\ 000\ \mu\text{m}$ )跳跃碰撞运动和尘粒( $d < 60\ \mu\text{m}$ )的悬

浮运动。沙粒在一定的空气动力作用下,可以被抬升到离地表几十厘米的地方,但当空气动力不足以超过重力时,它们又落回到地表面并与地表发生碰撞,这种碰撞很容易使尘粒克服内部粘性力的束缚,脱离地表进入到大气中。尘粒一旦进大气,内部粘性力的束缚作用完全消失,由于其重力远小于空气动力,从而导致尘粒悬浮大气中并在湍流的作用下扩散到很远的地方。由此,对于一定类型的地表土壤,其能否因风蚀而引起尘粒的排放,决定于地表的沙粒能否进行跳跃碰撞运动,从宏观上而言,也就是决定于实际的摩擦速度  $u_*$  (即空气动力)和沙粒脱离地表的临界摩擦速度  $u_{*t}$  (即临界空气动力)。当  $u_* > u_{*t}$  时,空气动力大于沙粒的重力和内部粘性力的合力,跳跃运动发生,地面会因此而起尘;当  $u_* < u_{*t}$  时,空气动力小于或等于微粒的重力和内部粘性力的合力,跳跃运动不能发生,地面也不会因此而起尘。

通常情况下,尘粒不仅直接存在于地表土壤中,而且还覆盖于较大粒子(沙粒等)的表面,形成一个集合体。研究表明<sup>[19]</sup>,沙粒的跳跃运动,一方面可以直接存在于地表土壤中的尘粒因碰撞而悬浮于空中;另一方面,在碰撞的过程中,集合体受撞击而破裂,覆盖在其表面的尘粒也会被剥落而悬浮于空中。因此,沙粒的跳跃运动就成为地面风蚀起沙关键的运动形式,尘粒的排放量取决于能够进行跳跃运动的沙粒的量。

沙尘通量可以分为顺风向沙尘通量即输沙率与垂直沙尘通量,分别用  $Q$  与  $F$  表示,其物理意义分别是单位时间内单位宽度从地表到积分高度处所形成的平面(与水平风向垂直)内通过的沙粒的质量和单位时间内某一高度处与地表面平行的单位面积内地表向大气中排放的尘粒的质量。半个多世纪以来,许多学者对气流与沙粒间相互作用的机理进行了研究,通过野外观测试验或者风洞模拟试验,提出了各自的顺风向沙尘通量计算模型(表 1)。

关于垂直沙尘通量, Lu 等<sup>[20]</sup>、Marticorena 等<sup>[21]</sup>、Shao<sup>[22]</sup>、Gillette 等<sup>[23]</sup>都进行了研究,并建立了计算模型。虽然 Lu、Marticorena 和 Shao 的沙尘排放模式理论较为完善,但是模式形式比较复杂,计算中需要的参数较多且有的参数很难确定,实际运用中有很大的难度。Gillette 等的计算方案在形式上非常简单,只需要  $u_*$  和  $u_{*t}$  两个参数,比较适合简单或近似的估算,其公式具体如下:

$$F = \begin{cases} C_2 u_*^4 (1 - \frac{u_{*t}}{u_*}) & u_* > u_{*t} \\ 0 & u_* \leq u_{*t} \end{cases} \quad (1)$$

表 1 各家代表性的输沙率公式

作者	公式	参数说明
Bagnold(1941)	$Q=C_1\sqrt{\frac{d}{D}}\frac{\rho}{g}u_*^3$	式中:Q——顺风向沙尘通量;d——沙粒粒径;D——标准粒径,取 250 μm;ρ——空气密度;ρ <sub>s</sub> ——沙粒密度;g——重力加速度;u <sub>*</sub> ,u <sub>*t</sub> ——气流摩擦速度和临界气流摩擦速度;P——某种正态概率;b,N——指数;C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ,⋯,C <sub>7</sub> ——系数,分别取 1.8,2.78,0.83,0.25,0.025,4.2,0.000 4。
Kawamura(1951)	$Q=C_2\frac{\rho}{g}(u_*-u_{*t})(u_*+u_{*t})^2$	
Zingg(1953)	$Q=C_3(\frac{d}{D})^{0.75}\frac{\rho}{g}u_*^3$	
Owen(1964)	$Q=C_4\frac{\rho u_*^4}{g}[1-(\frac{u_{*t}}{u_*})^2]$	
Kadib(1965)	$Q=C_5\rho_s[\frac{P}{(1-P)}][\frac{(\rho_s-\rho)gd^3}{\rho}]^{0.5}$	
Lettau(1978)	$Q=C_6(\frac{d}{D})^N(\frac{\rho}{g})(u_*-u_{*t})u_*^2$	
Sorensen(1991)	$Q=C_7\rho u_*(u_*-u_{*t})(u_*+7.6u_{*t}+205)$	

1.3 参数的确定

由表 1 可以看出,所有的沙尘通量计算公式都以摩擦速度  $u_*$  与临界摩擦速度  $u_{*t}$  为关键的计算参数,为此先确定沙尘天气过程中的摩擦速度与临界摩擦速度。

1.3.1 摩擦速度  $u_*$  摩擦速度是确定地表能否起沙的有力判据,在近地面气层里大体上不随高度变化,常用  $u_*$  表示。地表土壤风蚀起沙过程实质上是运动的气流与地表微粒在界面上相互作用的动力过程。对单个土壤微粒来讲,它能否脱离地表决定于所受空气动力和阻力(包括重力和内部粘性力等)的合力。风沙物理学中,摩擦速度  $u_*$  被用来反映微粒所受空气动力的大小,已有的风蚀起沙观测和试验结果指出,当  $u_*$  超过某一阈值(临界摩擦速度)时,粒子便会脱离地面而进入空中。关于  $u_*$  的计算,拜格诺与冯·卡曼都给出了表达式:

$$u=5.75u_*\ln\frac{z}{z_0}\tag{2}$$

就利用两层风速来确定。由公式(2)可以求得:

$$u_*=\frac{u_2-u_1}{5.75(\ln z_2-\ln z_1)}\tag{3}$$

选取 2011 年 4 月 5 日一天沙尘过程,利用两层风速进行计算,利用公式(4)计算得出:摩擦速度  $u_*$  的变化范围在 0.003 17~0.777 042 m/s 内变化,平均摩擦速度  $u_*$  为 0.372 m/s,如图 1 所示,从图中可以看出摩擦速度和 2 m 高度风速变化完全一致。在地表其它条件相同时,摩擦速度  $u_*$  受风速影响,随风速变化而变化,当风速增大时,摩擦速度也变大。

1.3.2 临界摩擦速度  $u_{*t}$  临界摩擦速度  $u_{*t}$  是摩擦速度能否引起地表风蚀起沙的临界值,它表征的是地表对风蚀起沙的阻碍能力。由于地表特征包含了机械和矿物组成、植被和其它粗糙元的覆盖、水分和

盐分的含量、地形和坡度的走向以及人工的管理和利用等诸多因素,对风蚀起沙的影响非常复杂,不同条件下的地表其  $u_{*t}$  也有很大差异。对于一定粒径的沙粒,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。目前 Shao<sup>[24]</sup> 的计算公式被认为是理论上最为完善的,其表达式为:

$$u_{*t}=H_{(\omega)}R_{(\lambda)}\sqrt{A_N(\frac{\sigma gd}{\rho}+\frac{\epsilon}{\rho d})}\tag{4}$$

式中: $A_N,\epsilon$ ——经验常数,分别取 0.0123,300 kg/s<sup>2</sup>;σ——沙粒密度(2 650 kg/m<sup>3</sup>);ρ——空气密度(1.23 kg/m<sup>3</sup>);g——重力加速度,近似地为 9.797 5 m/s<sup>2</sup>;d——沙粒的粒径(μm);拐子湖地区平均粒径为 480 μm; $H_{(\omega)},R_{(\lambda)}$ ——表征地表土壤水分与植被覆盖对风蚀起沙的阻碍作用,详细计算见文献[25]。拐子湖地区没有植被,并且地表含水量小于 0.3%,即  $H_{(\omega)}$  和  $R_{(\lambda)}$  值可以视为 1。计算得 0.361 765 394 m/s。

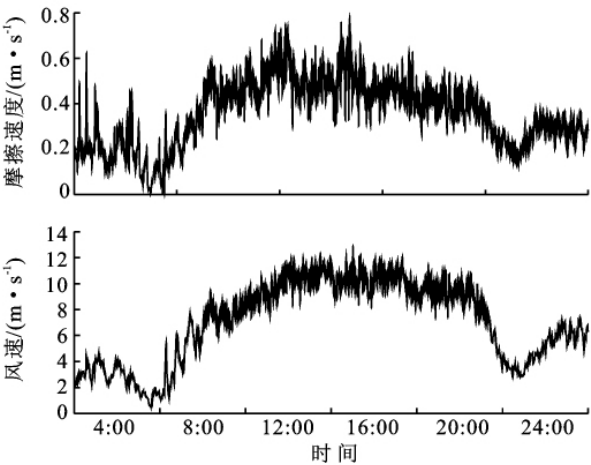


图 1 摩擦速度  $u_*$  和 2 m 高度风速的关系

由于公式估算具有一定的经验性与区域限制性,为了更加精确地求得拐子湖地区的临界摩擦速度,同

时进行了仪器测定。图2是H11B型风蚀传感器所测得沙粒撞击数与摩擦速度的关系,从图中可以看出在摩擦速度大于0.30 m/s时沙粒开始跳动,在0.4 m/s时沙尘跳动速度加快,撞击颗粒数增加。由此可以确定拐子湖地区的临界摩擦速度的取值区间为0.30~0.40 m/s,也佐证了公式计算结果临界摩擦速度为0.36 m/s是合理的。

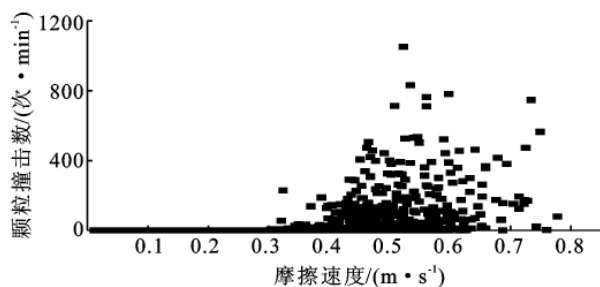


图2 风蚀传感器所测的颗粒撞击数与摩擦速度关系

## 2 结果与分析

2011年4月5日拐子湖地区是典型的扬沙天气,15:36出现大风,利用该天的起沙监测数据,分别用Bagnlod、Kawnural、Zingg、Owen四种顺风沙通量计算公式进行计算,而垂直沙通量采用Gillette计算方案。将上文所求的参数代入各计算公式,结果见图3。从图中可以看出各种方案计算的结果变化趋势几乎一致。在0:00—6:00时间段里,风速波动变大,但这个过程顺风方向沙通量较小且不稳定,其输沙曲线表现为不连续;在6:00—20:00时间段里风速稳定,顺风方向沙通量较大且稳定,各方案计算结果的输沙曲线都表现为连续的曲线;在20:00以后由于风速变小,顺风方向沙通量也变小至为零。

虽然各计算结果变化趋势几乎一致,但数值差异较大,由于Bagnlod、Zingg两种计算方案主要考虑的是以沙粒粒径为影响沙尘通量的主要参数,但是总体上Bagnlod的结果要比Zingg公式计算出来的结果大,这主要是因为Zingg在确定沙尘通量时是根据跃移沙粒质量在垂线上的分布延伸到床面以后进行积分得到的,实际上没有包括蠕移的沙粒在内,所以得到的沙尘通量结果比Bagnlod偏小。Kawamura和Owen的公式是在考虑摩擦速度和临界摩擦速度的基础上得来的,其中Owen主要考虑适应于均匀沙表面,Kawamura公式中当 $u_* \leq u_{*c}$ 时沙通量为零,从理论上来讲也相对较为完善。Gillette的垂直沙通量方案计算结果变化趋势也和各顺风沙通量计算结果变化趋势一致,但数值要小3~4各数量级,说明在起沙过程中输量沙主要是以顺风方向上为主。

这次沙尘过程中Bagnlod、Kawnural、Zingg和Owen四种计算公式计算的平均顺风向沙尘通量分

别为 $2.2\text{E}-02$ ,  $1.7\text{E}-02$ ,  $1.2\text{E}-02$ ,  $1\text{E}-04$   $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。Bagnlod公式结果最大,Owen公式结果最小,相差两个数量级,所以取前三种平均值 $1.7\text{E}-02$   $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 作为本次沙尘过程顺风方向沙通量。Gillette的垂直沙通量方案平均计算结果为 $1.38\text{E}-07$   $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

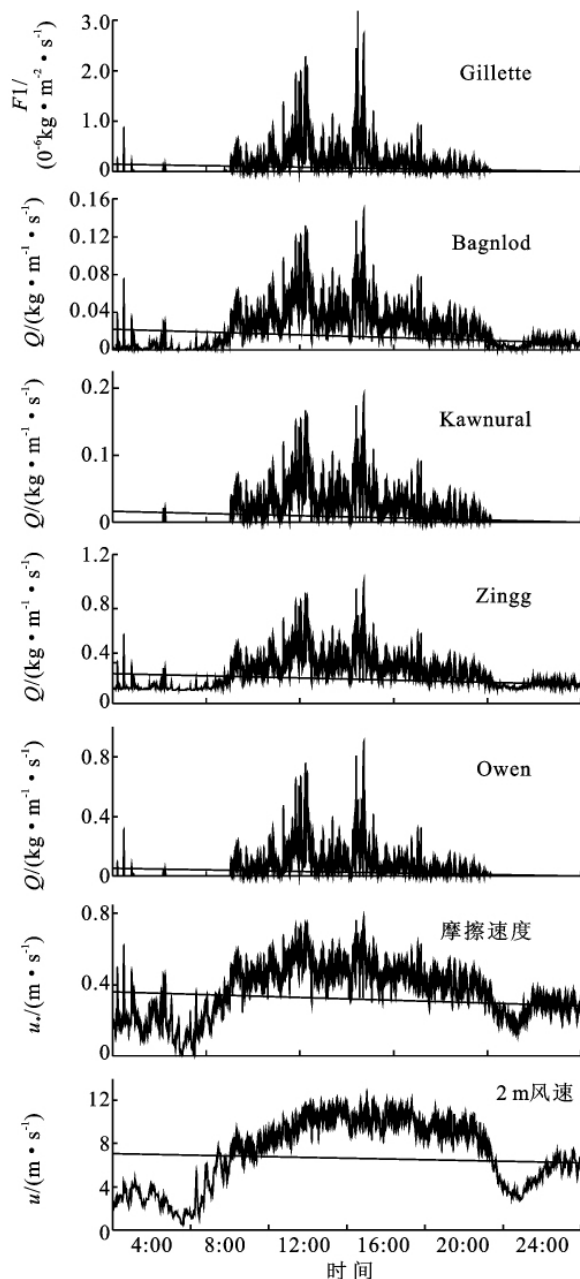


图3 地表的顺风向和垂直沙尘通量的时间变化

## 3 结论

(1) 摩擦速度与风速呈正相关,同时摩擦速度影响着风蚀起沙量的变化。

(2) 根据公式估算和仪器测量,在综合考虑拐子湖地区下垫面状况、地表以及空气湿度等因素的基础上,得到拐子湖地区的临界摩擦速度为0.36 m/s。

(3) 分别用不同的计算公式估算了平均顺风向沙尘通量和垂直沙通量,得出这次沙尘过程的顺风沙通量和垂直沙通量分别为  $1.7E-02 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$  和  $1.38E-07 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

由于各经验公式在使用过程中都有各自的条件,而风蚀起沙受下垫地面的湿度、粒径、土壤粘合力等多方面的影响,在本文对这些公式的应用只能是对本区的一个估算,其对本区的适用性还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Goudie A, Middleton N J. The changing frequency of dust stormsthrough time[J]. Climatic Change, 1992, 20:197-225.
- [2] 王式功,杨民,祁斌,等. 甘肃河西沙尘暴对兰州市空气污染的影响[J]. 中国沙漠,1999,19(4):354-358.
- [3] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,关于中国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报,2000,55(5):513-521.
- [4] 高庆先,苏福庆,任阵海. 北京地区沙尘天气及其影响[J]. 中国环境科学,2002,22(5):468-471.
- [5] Idso S, Brazel A. Planetary radiation balance as a function of atmospheric dust: Climatological consequences[J]. Science,1977,198:731-733.
- [6] Littmann T. Dust storm frequency in Asia: climate control and variability[J]. Inter. J. Climatology,1991,11:393-412.
- [7] 沈志宝,魏丽. 中国西北大气沙尘对地气系统和大气辐射加热的影响[J]. 高原气象,1999,18(3):425-435.
- [8] Shaw G E. Transport of Asian desert to the Hawian islands[J]. Jappl. Meteor,1980,19:1254-1259.
- [9] 周自江. 近45年中国扬沙和沙尘暴天气[J]. 第四纪研究,2001,21(1):9-17.
- [10] 邱新法,曾燕,缪启龙. 中国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J]. 地理学报,2001,56(3):316-322.
- [11] 庄国顺,郭敬华,袁蕙,等. 2000年中国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J]. 科学通报,2001,46(3):191-197.
- [12] 张晓龙. 近年来中国沙尘暴发生特点、成因及其防治对策[J]. 干旱区资源与环境,2001,15(3):31-36.
- [13] Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere:sources transport and optical thickness[J]. Geophys. Res.,1994,99:22897-22914.
- [14] Duce R A. Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical Nort-Pacific temporal variability[J]. Science,1980,209:1522-1524.
- [15] Zhang X Y, Arimotor R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation[J]. Journal of Geophysical Research, 1997,102 (D23):28041-28047.
- [16] 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,2003,22(2):54-62.
- [17] 蔡学鹏. 内蒙古中西部地区沙尘暴气候特征及其与下垫面因子的关系研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2008.
- [18] Shao Y, Raupach M R, Leys J F. A model for predicting Aeolian sand drift entrainment on scales from paddock to region[J]. J. Soil Res.,1996,34:309-342.
- [19] Shao Y. A model for mineral dust emission[J]. J. Geophys Res.,2001,106:20239-20254.
- [20] Lu H, ShaoY. A new model for dust emission by saltation bombardment[J]. Geophys. Res., 1999,104:16827-16841.
- [21] Marticoreaa B, Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle. I: Design of a soil derived dust emission scheme[J]. Geophys. Res.,1995,100:16415-16430.
- [22] Shao Y, Raupach M R, Leys J F. A model for predicting aeolian sand drift entrainment on scales from paddock to region[J]. Soil Res.,1996,34(2):309-420.
- [23] Gillete D A, Passi R. Modeling dust emission caused by wind erosion[J]. Geophys. Res.,1988,93:14234-14242.
- [24] Shao Y, Lu H. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity[J]. J. Geophys Res., 2000,105:22437-22443.
- [25] 申彦波,沈志宝,杜明远,等. 风蚀起沙的影响因子及其变化特征[J]. 高原气象,2005,24(4):613-616.