

半干旱农田地区 DPM 模型适用性初步研究

赖志强, 张承中, 高建华, 刘立忠

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: DPM 模型是根据粉尘释放通量与粉尘跃移通量及跃移颗粒的动能通量成正比的原理, 由土壤微团粒跃移模块以及粉尘粒子释放模块构成的。为验证 DPM 模型在半干旱地区农田的适用性, 选取了半干旱地区陕西中北部 4 种典型土壤类型农田进行野外观测研究, 计算分析了各观测区的地表空气动力学粗糙度、表土微团粒粒度、摩擦风速和起动摩擦风速, 对比分析了不同土壤类型、不同季节 DPM 模型模拟的准确性。结果表明, DPM 模型可以用于模拟预测我国半干旱区农田不同土壤类型粉尘释放通量, 可以较好地用于模拟预测半干旱农田夏冬两季节的粉尘释放通量。

关键词: 半干旱区; 农田; DPM 模型; 粉尘释放

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2011)03-0126-05

中图分类号: X833

Applicability of DPM Model to Farmland in Semi-arid Area

LAI Zhi-qiang, ZHANG Cheng-zhong, GAO Jian-hua, LIU Li-zhong

(School of Environmental and Municipal Engineering,

Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: DPM model, built on the principles that the dust emission flux is proportional to the dust saltation flux and the kinetic energy flux of saltating particles, is composed of two components: the saltation flux of soil microaggregates and dust particle emission. To validate the applicability of DPM to semi-arid areas, we selected four typical types of farmlands(soils) in the semi-arid north-central Shaanxi Province, measured and calculated the surface aerodynamic roughness, microaggregate distribution of surface soils, friction velocity, and threshold friction velocity on each study area, and comparatively analyzed the DPM model simulation accuracy between the different soil types and between different seasons. The results showed that DPM model can be used to simulate dust emission flux of the different soil types in the semi-arid farmlands, and can better simulate dust emission flux for the summer and winter seasons in the semi-arid farmlands.

Keywords: semi-arid areas; farmland; DPM model; dust emission

大气颗粒物是影响中国北方城市空气质量的首要污染物, 干旱半干旱地区干旱多风的气候条件, 干燥疏松的地表以及缺乏有效的覆盖保护是导致北方土地荒漠化及农田土壤风蚀的原因^[1-2]。L. Gomes 等^[3]的研究表明, 大约 50% 的大气颗粒物发源于扰动土, 如农田地表, 森林开伐, 土壤风蚀。为了更有效控制大气颗粒物污染, 国内外专家不同程度的对土壤风蚀的粉尘释放机制开展了研究, 国外粉尘释放模型也已相对成熟^[4]。国内的研究主要集中在沙漠地表的野外观测以及输沙率方面的研究, 而粉尘释放通量的大小和粒度分布对利用模型模拟沙尘粒子的输送

和沙尘粒子产生的气候效应都起着至关重要的作用^[5]。

目前, DPM 模型是国际上公认比较成熟的粉尘释放模型, 是 Alfaro 等^[6-7]在 Marticorena 等^[8-9]的地表粉尘释放模型基础上改进而形成的^[8-9]。近年来, DPM 模型在国内外得到了广泛应用, 最初 Alfaro 等在尼日尔和西班牙的砂质土和壤质土农田进行了初步模拟研究, 后来, 被应用到撒哈拉沙漠和亚洲粉尘的释放^[3, 11-13]。国内梅凡民等^[14]在毛乌素沙地进行了野外实验验证, 得出 DPM 模型能够用来模拟中国裸露沙质地表的粉尘释放通量, 车慧正等^[5]模拟计算

收稿日期: 2010-10-11

修回日期: 2010-11-18

资助项目: 陕西省自然科学基金“西安城市地表粉尘释放通量的观测与模拟”(2007D20); 陕西省教育厅专项科研基金“西安市地表粉尘释放通量数值模拟研究”(06JK268)

作者简介: 赖志强(1987—), 男(汉族), 江西省萍乡县人, 研究方向为大气污染控制技术。E-mail: lailai88110@163.com。

通信作者: 张承中(1947—), 男(汉族), 浙江省宁波市人, 教授, 主要从事大气污染控制与环境管理方面的研究。E-mail: zhang chengzhong4711@sina.com。

得出 DPM 模型是一个适合模拟中国沙漠地区不同的地表状况下粉尘释放通量的物理模型。

研究发现,目前国内外 DPM 模型的应用主要集中在沙漠荒漠地区或者沙质土壤等大尺度地区, DPM 模型在我国干旱半干旱地区农田各类土壤的相关应用研究鲜有报道。本研究选取半干旱地区陕西中北部 4 种典型质地类型农田进行野外观测试验研究,旨在尝试验证 DPM 模型模拟半干旱地区农田粉尘释放通量的适用性,研究将有助于加深对我国农田地表粉尘释放机理的理解,为控制土壤风蚀提供一定依据,对 DPM 模型在国内的进一步推广应用也具有一定意义。

1 研究方法

1.1 观测区域与方法

实验点选择陕西中北部 4 个大气粉尘污染较重的城市,观测区域为陕西中北部 4 种主要的土壤类型:榆林佳县裸露沙化农田、延安安塞苗圃地、铜川小麦地和西安长安小麦地。各观测区农田面积均超过 $3.0 \times 10^5 \text{ m}^2$,地势开阔平坦,西安实验点南侧有一小移栽树林,延安实验点东侧有条河流,榆林实验点西北面为平房,地表特征详见参考文献[15]。榆林、延安观测区降水较少,光照充足,地表干燥,土质疏松,作物收割后地表有大量裸露时间较易发生风蚀。

在各观测点 1.5, 3, 和 4.5 m 高处分别记录风向、风速和空气温度,并观测计算出各个高度每个阶段 1 h 的平均风速和温度。2 台 XP-100 型 PM₁₀ 采样器分别置于 1.5 和 4.5 m 处采集粉尘样品,采样泵的流量设置为 100 L/min,每组样品的采集时间设置为 1 h。

1.2 DPM 模型原理介绍

DPM (dust production model) 粉尘释放模型^[16]包含跃移通量模式和跃移冲击作用模式 2 个组成部分,把粉尘释放的过程简化为可蚀性土壤微团粒在风力作用下发生跃移,跃移过程中颗粒发生碰撞,并根据颗粒自身动能大小的不同释放出不同的粉尘粒子。该模型输入参数较少,且比较好确定,并全面考虑了地表特征和跃移冲击过程对地表粉尘释放的影响,具有明确的物理机制。DPM 模型是根据粉尘释放通量与粉尘跃移通量及跃移颗粒的动能通量成正比的原理,由土壤微团粒跃移模块以及粉尘粒子释放模块构成的,所包含的主要关系式为:

粉尘跃移通用方程:

$$F_h = C \cdot \rho_a \cdot g \cdot U_*^3 \int_{D_p} (1+R)(1-R^2) dS_{rel}(D_p) dD_p \quad (1)$$

粉尘释放通量方程:

$$F_{dust,i} = \pi \rho_a d_i^3 / 6 \cdot N_i \quad (2)$$

$$N_i = \beta / e_i \int_{D_p=0}^{\infty} p_i(D_p) dF_h(D_p) \quad (3)$$

$$R = U_*^* (D_p, Z_0, Z_{0s}) / U_* \quad (4)$$

式中: F_h ——粒径大小为 D_p 的可蚀性土壤的水平跃移通量 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; C ——经验常数,反映地表对风蚀输沙量的限制情况,不同的土壤类型对应不同的数值; ρ_a ——空气密度(取 $0.00129 \text{ g}/\text{cm}^3$); U_* ——摩阻风速; D_p ——土壤可蚀性组分中的颗粒直径($< 2000 \mu\text{m}$)。 R ——起动摩阻风速与摩阻风速的比值; $S_{rel}(D_p)$ ——粒径为 D_p 的颗粒占整个颗粒表面面积的相对比例,它取决于可蚀性组分的粒度分布; $F_{dust,i}$ ——第 i 种粉尘粒子的释放通量 $[\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$; ρ ——土壤微团粒的平均密度($2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$); d_i ——第 i 种对数正态分布群体的粉尘颗粒的质量中值粒径(μm); N_i ——风蚀过程中产生的第 i 种粉尘粒子的总数; β ——比例系数(取 $16300 \text{ cm}/\text{s}^2$); e_i ——第 i 个对数正态分布群体的粉尘粒子的结合能 $[(\text{g} \cdot \text{cm}^2)/\text{s}^2]$; $p_i(D_p)$ ——中值粒径为 D_p 的跃移颗粒的动能在 3 个对数正态分布群体的粉尘粒子之间的比例; U_*^* ——起动摩阻风速; Z_0 ——地表粗糙度(cm); Z_{0s} ——光滑地表粗糙度(cm)。

1.3 粉尘释放通量的观测计算

本文中计算粉尘释放通量,采用的是 Gillette^[17]利用湍流动量输送的原理提出的根据观测粉尘浓度梯度和湍流强度来计算粉尘释放通量的方法。具体关系式如下:

$$F_v = U_* (C_1 - C_2) / \ln(Z_2 - Z_1) \quad (5)$$

式中: F_v ——观测粉尘释放通量 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; U_* ——摩阻风速(m/s); Z_1, Z_2 ——观测高度, $Z_1 = 1.5 \text{ m}$, $Z_2 = 4.5 \text{ m}$; C_1, C_2 ——观测高度 Z_1 和 Z_2 上的 PM₁₀ 的浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)。

2 DPM 模型适用性研究

2.1 DPM 模型输入参数的确定

DPM 模型的主要输入参数包括地表空气动力学粗糙长度、地表面的摩阻风速、土壤可蚀性土壤颗粒的粒度分布特征等主要输入参数^[16]。

2.1.1 表土微团粒粒度测定和计算 本研究将各实验区划分为 8 个部分,分别取 0—5 cm 的表土约 200 g,共计 8 个样品;根据风洞实验的结果^[20],剔除微团粒粒径 $> 2000 \mu\text{m}$ 的表土组分,用干筛筛析法对样品进行测定,并用对数正态分布模型对实验数据进行处理,得到各观测区的表土微团粒粒度分布参数,模拟得到的结果包括土壤微团粒的质量中值粒径(μm),几何标准偏差和每个群体的百分含量(见表 1)。

表 1 观测区域表土微团粒粒度分布

观测区	粉砂/细砂群体			细砂/粗砂群体			粗砂群体		
	中值粒径/ μm	标准 偏差	比例/ %	中值粒径/ μm	标准 偏差	比例/ %	中值粒径/ μm	标准 偏差	比例/ %
西安小麦地	—	—	—	193	1. 40	19	619	1. 25	81
铜川小麦地	63	1. 30	19	275	1. 73	28	679	1. 27	53
延安果树苗地	—	—	—	210	1. 40	35	736	1. 35	65
榆林沙化农田	48	1. 20	65	350	2. 04	35	—	—	—

2.1.2 地表空气动力学粗糙度观测和计算 地表空气粗糙度主要受地表物质组成和起伏状况影响,是表征地表削弱风的切应力作用大小的物理量,是影响地表粉尘释放的重要因子。本文采用的是最常用的计算地表粗糙度的方法^[18],即对数廓线方程的最小二乘逼近实测风速廓线法^[19]。计算结果详见参考文献[15],其中地表空气动力学粗糙度日均值分别为:榆林观测区 $0.002\ 6\ \text{m} \leq Z_0 \leq 0.019\ 1\ \text{m}$;延安观测区 $0.047\ 9\ \text{m} \leq Z_0 \leq 0.089\ 9\ \text{m}$;铜川观测区 $0.066\ 1\ \text{m} \leq Z_0 \leq 0.103\ 0\ \text{m}$;西安观测区 $0.062\ 7\ \text{m} \leq Z_0 \leq 0.131\ 9\ \text{m}$ 。

2.1.3 摩阻风速和起动摩阻风速参数 摩阻风速是表征风对地表切应力的的大小的物理量,是跃移颗粒克

服粉尘颗粒粘结力的动能来源。起动摩阻风速是土壤微团粒发生水平跃移的临界风速,临界风速的大小与可蚀性表土颗粒的直径大小(D_p),地表粗糙度(Z_0)和光滑地表的粗糙度(Z_{0s})有关。随着地表粗糙度的增加,各种不同的表土微团粒开始发生跃移的临界风速逐渐增大。本文摩阻风速和起动摩阻风速计算式^[20]详见参考文献[20],计算结果见表2—3。从表3可以看出,榆林观测区地表粉尘起动摩阻风速最低,其次延安观测区、铜川观测区和西安观测区。若该观测区某时间段内的摩阻风速不能高于这个值,理论上不会有粉尘释放现象的发生,说明榆林观测区最容易发生粉尘释放。

表 2 各观测区摩阻风速日均值

观测 区域	观测 时间	摩阻风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测 区域	观测 时间	摩阻风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测 区域	观测 时间	摩阻风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测 区域	观测 时间	摩阻风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
西 安 观 测 区	20070805	0.305 5	铜 川 观 测 区	20100119	0.417 5	延 安 观 测 区	20081009	0.276 1	榆 林 观 测 区	20080817	0.351 5
	20070806	0.311 0		20100120	0.416 9		20081010	0.251 9		20080818	0.335 9
	20070807	0.301 1		20100121	0.425 4		20081011	0.258 3		20080819	0.325 1
	20070808	0.310 9		20100122	0.434 1		20081012	0.304 5		20080820	0.347 3
	20070809	0.304 4		20100123	0.418 2		20081013	0.281 7		20080821	0.319 1
	20091117	0.447 0		20100628	0.267 8		20100324	0.262 4		20100327	0.498 6
	20091118	0.448 4		20100629	0.248 0		20100325	0.300 4		20100328	0.504 4
	20091119	0.441 4		20100630	0.263 8		20100326	0.300 9			
	20091120	0.442 8		20100701	0.245 6						
	20091121	0.445 0		20100702	0.301 1						

表 3 不同观测区地表的起动摩阻风速

观测地点	起动摩阻风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测地点	起动摩阻风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
西安观测区	0.290 5	延安观测区	0.260 1
铜川观测区	0.283 7	榆林观测区	0.073 9

2.2 不同土壤类型模拟分析

通过以上各式计算得到4个观测区不同土壤类型的DPM模拟值与观测计算值(见图1)。从图1中可以看出,各观测区野外实验值和DPM模型预测值均具有较好的一致性,呈一定的规律。但各个观测区

一致性并不一样,榆林观测区 $R^2=0.910\ 3$,延安观测区 $R^2=0.903\ 7$,铜川观测区 $R^2=0.771\ 9$ 以及西安观测区 $R^2=0.798\ 5$ 。榆林观测区和延安观测区一致性明显好于铜川观测区和西安观测区。这一方面可能是DPM模型^[17]本是在沙漠等大尺度下沙质土壤下得出,而榆林观测区和延安观测区土壤比较接近沙质土壤。另外榆林观测区地表土壤较松散,可蚀性组分比例较大也可能有一定的影响。总体来说,DPM模型可以较好地模拟计算出陕西中北部4种主要土壤类型地表的粉尘释放通量。

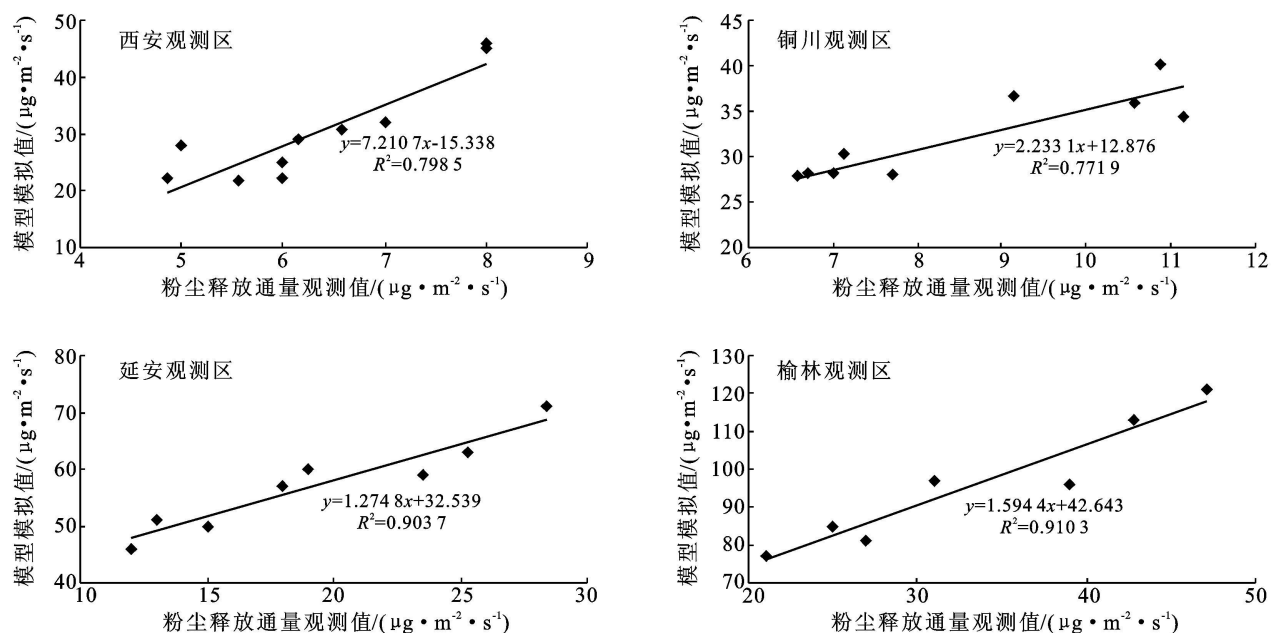


图 1 各观测区 DPM 模拟值和观测值的比较

2.3 不同季节模拟分析

地表粉尘释放机制复杂,影响因素也较多,在不同的季节各影响因子不一样,本文将 1 a 中温度较低时计作冬季,温度偏高时计作夏季。将各参数输入 DPM 模型计算式得模拟值与野外实验观测值对比如图 2。从图 2 可以看出,各季节模拟值与观测值一致性均较好,其中夏季 $R^2 = 0.916$,冬季 $R^2 = 0.9749$ 。出现冬季一致性较好于夏季,可能原因是我国半干旱

地区冬季和春季较夏季风大,地表干燥,这与 DPM 模型^[16]在沙漠等大尺度下得出的原始地表特征较相似有关。同时也可以看出虽冬季与夏季粉尘释放通量变化较大,DPM 模型模拟值与野外观测值仍有着较好的一致性,说明粉尘释放通量差别较大时 DPM 模型仍可以用来模拟预测。综合上述,DPM 模型可以较好地模拟预测不同季节的粉尘释放通量。

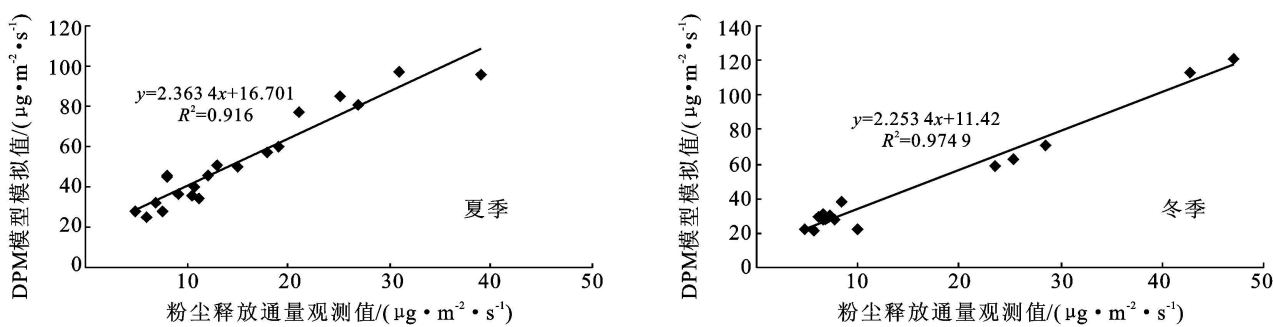


图 2 不同季节粉尘释放通量模拟值与观测值的比较

3 结论

为较好地模拟预测我国半干旱农田地区粉尘释放通量,本文对 DPM 模型做了初步的适应性研究。通过野外实验获取了各输入参数,计算得出 DPM 模型模拟值与野外观测值进行对比分析,结果发现。

(1) 各观测区地表空气动力学粗糙度日均值分别为:榆林观测区 $0.0026 \text{ m} \leq Z_0 \leq 0.0191 \text{ m}$;延安观测区 $0.0479 \text{ m} \leq Z_0 \leq 0.0899 \text{ m}$;铜川观测区 $0.0661 \text{ m} \leq Z_0 \leq 0.1030 \text{ m}$;西安观测区 0.0627 m

$\leq Z_0 \leq 0.1319 \text{ m}$ 。地表起动摩擦阻风速各观测区分别为:榆林观测区为 0.0739 m/s ,延安观测区 0.2601 m/s ,铜川观测区 0.2837 m/s 以及西安观测区 0.2905 m/s 。

(2) 各观测区 DPM 模型预测值与野外观测值均具有较好的一致性。榆林观测区一致性最好,其次分别是延安观测区,西安观测区和铜川观测区。总体来看,DPM 模型可以较好地用于模拟预测我国半干旱区农田粉尘释放通量。

(3) 各季节模拟值与观测值一致性均较好,冬季

一致性要好于夏季。由于地表粉尘释放受多方面的影响,造成各季节的一致性不一样,但各季节的一致都保持在 $R^2 = 0.916$ 以上,这说明 DPM 模型可以较好地用于模拟预测不同季节的粉尘释放通量。

由于实验条件限制,目前对该地区粉尘释放机制了解不完全,本文仅对 DPM 模型在我国半干旱农地区的适用性做了初步研究。地表粉尘的释放机制复杂,影响因素繁多,农田与沙化农田土壤差别较大,日后的研究工作需做更进一步的研究。如在 DPM 模型中没有考虑地表土壤含水率,农田土壤含水率相对要高多了,且容易形成表土结皮^[21]。农田土壤植被覆盖对粉尘释放的抑制作用明显^[22],DPM 模型在各种植被覆盖度下的适用性仍有待深入研究。由于缺乏详细野外观测资料,影响因子也存在很大的不确定性,下一步的工作是找出影响我国半干旱地区农田地表粉尘释放的主要因素,对 DPM 模型进行修正,使其更好地适用于模拟预测。

综上所述,DPM 模型是一个基本适合模拟预测我国半干旱农田区地表状况下粉尘释放通量的物理模型。

[参 考 文 献]

- [1] 董治宝,钱广强.关于土壤水分对风蚀启动风速影响研究的现状与问题[J].土壤学报,2007,44(5):934-942.
- [2] 张华,李锋瑞,张铜会,等.春季裸露沙质农田土壤风蚀量动态与变异特征[J].水土保持学报,2002,16(1):29-32.
- [3] Gomes L, Arrite J L, López M V, et al. Wind erosion in a semiarid agricultural area of Spain: the WELSONS project[J]. Catena, 2003, 52(3/4): 235-256.
- [4] Shao Y, Dong C H. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring[J]. Global and Planetary Change, 2006, 52: 1-22.
- [5] 车慧正,张小曳,李杨,等.PM 模型计算中国北方沙漠地区粉尘释放通量[J].干旱区资源与环境,2005,19(5):49-55.
- [6] Alfaro S C, Gaudichet A, Gomes L, et al. Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sandblasting[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(10): 11239-11249.
- [7] Alfaro S C, Gaudichet A, Gomes L, et al. Mineral aerosol production by wind erosion: Aerosol particle size and binding energies[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(7): 991-994.
- [8] Marticorena B, Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil derived dust emission scheme [J]. Geophys Res., 1995, 100(8): 16415-16430.
- [9] Marticorena B, Bergametti G, Aumont B, et al. Modeling the atmospheric dust cycle: 2. simulation of Saharan dust sources [J]. Geophys Res., 1997, 102(4): 4387-4404.
- [10] Gomes L, Rajot J L, Alfaro S C, et al. Validation of a dust production model from measurements performed in semi-arid agricultural areas of Spain and Niger[J]. Catena, 2003, 52(1): 257-271.
- [11] Rajot J L, Alfaro S C, Gomes L, et al. Soil crusting on sandy soils and its influence on wind erosion[J]. Catena, 2003, 53(1): 1-16.
- [12] Callot Y, Marticorena B, Bergametti G. Geomorphologic approach for modeling the surface features of arid environments in a model of dust emissions: Application to the Saharan desert [J]. Geodin Acta, 2000, 13: 245-270.
- [13] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. Characterization of soil dust and its transport and distribution during 2001 ACE-Asian: 2. Model simulation and validation [J]. Journal of Geophysical Research, 2003: 108(D9) doi: 10.1029/2002JD002633.
- [14] 梅凡民, Rajot J, Alfaro S, 等.毛乌素沙地的粉尘释放通量观测及 DPM 模型的野外验证[J].科学通报, 2006, 51(11): 1326-1332.
- [15] 高建华,张承中,赖志强,等.半干旱地区农田地表粉尘释放的试验研究[J].安全与环境学报,2010,10(6): 110-112.
- [16] Alfaro S C, Gomes L. Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distribution in source areas[J]. Geophys Res., 2001, 106(D16): 18075-18084.
- [17] Gillette D A, Passi R. Modeling dust emission caused by wind erosion [J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(D11): 12645-12662.
- [18] 刘连友,王建华,李小雁,等.耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定[J].科学通报,1998,43(15): 1663-1666.
- [19] 刘小平,董治宝.空气动力学粗糙度的物理意义与实践意义[J].中国沙漠,2003,23(4): 337-346.
- [20] 王颖钊,张承中,高建华,等.不同类型农田地表粉尘启动摩擦风速的野外观测[J].安徽农业科学,2009,37(2): 710-712.
- [21] Goossens D. Effect of soil crusting on the emission and transport of wind-eroded sediment: field measurements on loamy sandy soil [J]. Geomorphology, 2004, 58: 145-160.
- [22] 梅凡民,张小曳,曹军骥,等.定量评价中国北方粉尘源区地表覆盖类型对表土风蚀强度的影响[J].海洋地质与第四纪地质,2004(1): 119-124.