

文章编号 :1001-8166(2006)04-0424-06

有关粉尘释放模型的应力分配模式存在问题的讨论*

梅凡民^{1,2}, 王 涛¹, 张小曳³, 陈 敏²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 西安工程大学环境科学与工程系, 陕西 西安 710048;
3. 中国气象局大气成分观测与服务中心, 北京 100081)

摘要 准确模拟粉尘释放通量对评价粉尘气溶胶的气候效应、沙漠化和沙尘暴防治具有重要意义。敏感性试验、室内和野外风洞实验表明被广泛使用的 DPM(Dust Production Model)粉尘释放模型的 2 个应力分配模式——Marticorena 模式和 Alfaro 模式存在明显问题:由于目前空气动力学粗糙度模式还不能考虑粗糙元间隙率和粗糙元分布状况空气动力学粗糙度的影响, 以空气动力学粗糙度为主要参数的 Marticorena 模式和 Alfaro 模式还不能考虑粗糙元间隙率和粗糙元分布状况对应力分配的影响, 而相关实验表明这些因素对应力分配存在显著影响; Marticorena 模式和 Alfaro 模式预测的应力分配系数和起动摩阻风速存在显著差异, 目前实验结果还不能判断二者正确与否; Marticorena 模式和 Alfaro 模式预测的能够有效控制风蚀的应空气动力学粗糙度与实际观测相矛盾。针对上述问题提出了通过风洞实验改进当前应力分配模式的主要途径。

关键词 应力 应力分配 风蚀 粉尘释放 模型

中图分类号 X169 文献标识码 A

无论是对粉尘气溶胶的气候和环境效应的研究, 还是对沙漠化和沙尘暴防治而言, 模拟全球和区域粉尘释放源区的粉尘释放通量是最重要的基础工作之一^[1~5]。

在野外风蚀观测和室内风洞的实验研究以及相关理论支持下, 近些年来提出了一些半经验的粉尘释放模型, 其中 DPM 粉尘释放模型^[6~8]较好地模拟了地表特征对粉尘释放的影响, 明确地阐述了粉尘释放机制, 是目前相对比较成熟的模型^[9], 最近它被应用到撒哈拉沙漠^[10]和亚洲粉尘释放模拟^[11,12]以及全球大气粉尘循环中^[3~5]。

DPM 粉尘释放模型由 2 部分组成, 跃移通量模式(1)^[6,7]和跃移冲击作用模式(2)^[8]。

$$F_h = E \cdot C \cdot \rho_a / g \cdot U^{*3} \int_{D_p} \left(1 + \frac{\mu_t^*(D_p, Z_{0s}, Z_0)}{U^*} \right)^2 dS_{rel}(D_p) dD_p \quad (1)$$

$$\left(1 - \frac{U_t^*(D_p, Z_{0s}, Z_0)}{U^*} \right) dS_{rel}(D_p) dD_p \quad (1)$$

$$F_{v,i} = \pi \rho_p d_i^3 / 6 \cdot N_i$$

$$N_i = \beta / e_i \int_{D_p=0}^{\infty} p_i(D_p) dF_h(D_p) \quad (2)$$

E 为可蚀性部分与整个风蚀地面的比率, D_p 为土壤可蚀性组分中的颗粒直径($< 2000 \mu\text{m}$), $dS_{rel} = dS(D_p) / S_{total}$ 是粒径为 D_p 的颗粒占整个颗粒表面面积的相对比例, 它取决于土壤可蚀性组分的粒度分布, C 为经验常数取 2.61。 d_i 代表了 3 个对数正态分布群体的粉尘粒子的中值粒径, N_i 直径为 d_i 的个数通量 ρ_p 为土壤颗粒的密度, $\beta = 16300 \text{ cm/s}^2$, e_i 为 3 个对数正态分布群体的粉尘粒子的粘合能, $p_i(D_p)$ 是跃移颗粒的动能在 3 个对数正态分布群体分的粉尘粒子之间分配比例, U^* 为摩阻风速, F_h 是

* 收稿日期 2005-08-29, 修回日期 2005-11-10.

基金项目 国家重点基础研究发展计划项目“沙尘暴形成机制及预报、预警方法”(编号 :G2000048703)和“沙漠化综合防治战略与优化模式”(编号 :G2000048705); 中国博士后科学基金项目(编号 2005037163)资助。

作者简介 梅凡民(1968-), 男, 陕西高陵人, 博士后, 主要从事土壤风蚀和大气环境研究. E-mail: fanmin68@yahoo.com.cn

跃移通量 $F_{v,i}$ 是粉尘释放通量 g 是重力加速度 ρ_a 表示空气密度。

$R = U_{ts}^*(D_p, Z_0, Z_{0s}) / U_t^*$, 是起动摩阻风速之比, 这里作为应力分配系数, 其反映了气流切应力在粗糙元和地表之间分配的比例, U_{ts}^* 是没有粗糙元覆盖的地表的起动摩阻风速, 取决于 D_p 和 Z_{0s} (光滑表面的空气动力学粗糙度), U_t^* 是粗糙元覆盖的地表的起动摩阻风速, 取决于 U_{ts}^* 和 Z_0 (粗糙元的空气动力学粗糙度)。

应力分配系数 R 和起动摩阻风速 U_t^* 是 DPM 模型的关键参数, 直接影响跃移通量和粉尘释放通量, Marticorena^[6,7] 和 Alfaro^[13] 分别提出了 2 个模式来模拟这 2 个参数, 这里它们分别被称为 Marticorena 模式和 Alfaro 模式。根据近年来实验研究^[14~21] 和这 2 个模式敏感性试验的结果, 发现它们存在着明显的问题, 需要通过系统的实验研究来改进, 模式存在问题分析如下:

1 Marticorena 模式和 Alfaro 模式存在的问题

1.1 模式未考虑粗糙元的间隙率(porosity)和粗糙元空间分布不均分布的影响

地表存在粗糙元的情况下, 风应力将会在地表和粗糙元之间分配, 导致地表起动摩阻风速的增加和风蚀效率的降低。为了评价粗糙元对风蚀的控制效应, 先后建立了地表应力分配的半经验模式^[6,7,13,22~25]。从模拟大尺度的风蚀和粉尘释放强度来说, Wooding 模式^[22] 和 Arya 模式^[23] 涉及了过多的参数而影响它们在风蚀模拟研究中的应用。基于模拟大尺度粉尘释放的需要, 在 Arya 模式的基础上, Marticorena 和 Alfaro 分别提出了各自的应力分配模式。

根据 Arya 的应力分配理论^[23]: 气流被地表覆盖的粗糙元分割成 4 个区域, 其中在粗糙元上方和粗糙元之间的一定距离内形成了发育良好内边界层和外边界层, 中性条件下内边层和外边界层的风廓线服从对数法则, 于是可以把应力分配模式表示为(3):

$$R = U_{ts}^* / U_t^* = 1 - \ln(Z_0 / Z_{0s}) / \ln \delta / Z_{0s} \quad (3)$$

Marticorena^[6,7] 根据 Elloit 的研究^[26] 提出起动摩阻风速模式为(4):

$$R = 1 - [\ln(0.35 \cdot (X/Z_{0s})^{0.8})]^{-1} \cdot \ln(Z_0 / Z_{0s}) \quad (4)$$

(Marticorena 建议 $X = 10$ cm) (4)

Alfaro^[13] 所谓 Marticorena(1995) 模式没有考虑

Z_{0s} , 根据风洞实验的结果, 得到简化的应力分配模式(5)^①:

$$R = 1 - \eta \cdot (Z_{0s})^\zeta \cdot \ln(Z_0 / Z_{0s}) \quad (\eta = 1.38, \zeta = 0.8) \quad (5)$$

Marticorena 模式和 Alfaro 模式共同特点是应力分配系数仅被表示为光滑地表的空气动力学粗糙度 Z_{0s} 和粗糙元空气动力学粗糙度 Z_0 的函数, 而相关的模拟研究^[32,33] 和实验研究^[23,26~28] 表明应力分配系数不但与粗糙元密度(直接影响空气动力学粗糙度大小)有关, 也受到粗糙元—地表阻力系数比影响。对天然植被而言^[15,18~20], 由于枝叶之间的间隙率的存在, 它们与形状和大小相似的致密粗糙元(如圆柱体、球体和四面体)的阻力系数显著不同, 前者的阻力系数明显的大于后者, 而且植被的阻力系数随着 Reynolds number 的增加而减少^[18], 这表明在粗糙元密度一定的情况下, 具有一定间隙率的粗糙元(如天然植被)的应力分配系数大于致密的粗糙元。

由于目前所有的空气动力学粗糙度模型还不能够反映粗糙元的间隙率对空气动力学粗糙度的影响^[7,22,27], 对以空气动力学粗糙度来表示应力分配的 Marticorena 模式和 Alfaro 模式而言, 它们也很难反映粗糙元的间隙率对应力分配的影响。最近的风洞实验虽然发现粗糙元间隙率对空气动力学粗糙度存在明显的影响^[28], 但直到目前还没有形成比较成熟的模式以反映粗糙元间隙率对空气动力学粗糙度的影响。

同样地, 由于目前的模型不能反映粗糙元空间分布的不均匀性对空气动力学粗糙度的影响, 以空气动力学粗糙度为参数的 Marticorena 应力分配模式和 Alfaro 应力分配模式也不能反映粗糙元空间分布不均对应力分配的影响。

鉴于 Marticorena 模式和 Alfaro 模式还不能描述粗糙元间隙率和粗糙元空间分布不均对应力分配的影响, 为了准确模拟粗糙元和地表应力分配及表土起动摩阻风速, 需要改进这 2 个模式。模式的改进可以从 2 个途径入手: 一是利用风洞实验通过改进目前的空气动力学粗糙度模型使其能够反映粗糙元间隙率和粗糙元空间分布不均对空气动力学粗糙度的影响, 进而反映粗糙元间隙率和粗糙元空间分布不均对应力分配的影响; 二是利用风洞实验通过调整应力分配模型中的经验常数来反映粗糙元间隙率

① 注和 Alfaro 个人交流 Z_{0s} 的单位是 cm, 文章中单位是 mm.

和粗糙元空间分布不均对应力分配的影响,这个思路最近被 MacKinnon^[21]提到,但 Marticorena 模式和 Alfaro 模式中的经验常数如何变化还有待于实验研究的结果。

1.2 两模式预测的应力分配系数和起动摩阻风速相差甚远

尽管 Marticorena 模式和 Alfaro 模式中具有相同的空气动力学参数和理论基础,但它们预测的应力分配系数相差很大(图 1)。在 Z_{0s} 、 Z_0 相同情况下这 2 个模式预测的应力分配系数差异很大,Marticorena 模式预测的应力分配系数明显地小于 Alfaro 模式的预测值;在 Z_0 相同情况下,Marticorena 模式预测的应力分配系数随着 Z_{0s} 的增大而增大,而 Alfaro 模式呈现完全相反的趋势,从实验结果来看^[13~29],Alfaro 模式比较符合应力分配的机理。由于目前的应力分配实验^[14~21, 29~31]还不能很好地判断 Marticorena 模式和 Alfaro 模式的可靠性,今后开展系统野外和室内风洞实验研究显得非常必要。

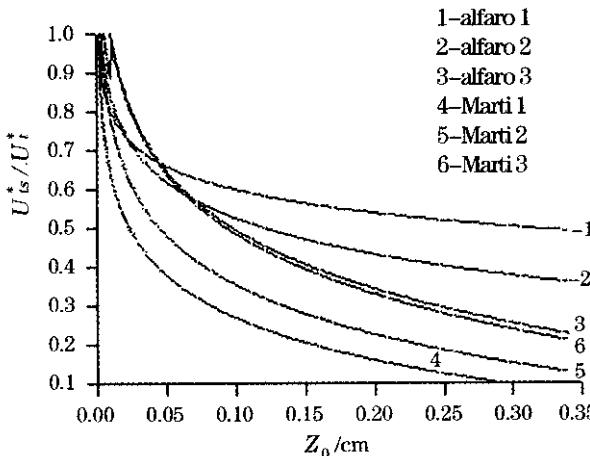


图 1 Marticorena 和 Alfaro 模式预测的应力分配系数

Fig. 1 Alfaro 1 and Marti 1 comparison of drag partition predicted by Alfaro's and Marticorena's equation respectively
Alfaro 1 和 Marti 1 对应的 $Z_{0s} = 0.001 \text{ cm}$, Alfaro 2 和 Marti 2 对应的 $Z_{0s} = 0.002 \text{ cm}$, Alfaro 3 和 Marti 3 对应的 $Z_{0s} = 0.005 \text{ cm}$

alero land Marti Corresponding to $Z_{0s} = 0.001 \text{ cm}$, alfaro 2 and Marti 2 corresponding to $Z_{0s} = 0.002 \text{ cm}$, alfaro 3 and Marti 3 corresponding to $Z_{0s} = 0.005 \text{ cm}$

从 Marticorena 模式和 Alfaro 模式预测的应力分配系数和起动摩阻风速可以看到(表 1),它们预测的起动摩阻风速差别很大,在 $Z_0 = 0.05 \text{ cm}$, Z_{0s} 在 $0.001 \sim 0.005 \text{ cm}$ 之间的情况下,Marticorena 模式预测的起动摩阻风速从 57.68 cm/s 下降到 49.08 cm/s , Alfaro 模式预测的起动摩阻风速从 33.32 cm/s 上升到 43.05 cm/s ,它们不但在相同条件下预测的起动摩阻风速差异明显,而且 Marticorena 模式预测数值随着 Z_{0s} 增大而减小,这不符合应力分配的机制,需要通过实验改进 Marticorena 模式中起动摩阻风速与 Z_{0s} 的关系。

Marticorena 模式和 Alfaro 模式预测结果差异可能与它们包含的经验常数的取值有关。鉴于应力分配过程是非线性过程^①,针对不同数量级的 Z_0 、 Z_{0s} 来选择不同经验常数,这可能更好地反映空气动力学粗糙度对应力分配的影响(Alfaro 模式中的经验常数为实验观测的平均值),也可能会减小这 2 个模式的差异,使它们从不同方面反映应力分配的规律。目前风洞实验还不能解决这个问题,因而有必要开展系统的风洞实验研究。

表 1 敏感性试验—模式预测起动摩阻风速

U_t^* 随 Z_{0s} 的变化($Z_0 = 0.05 \text{ cm}$)

Table 1 Variation of threshold wind friction velocity

U_t^* with Z_{0s} predicted by Alfaro's and Marticorena's equation respectively

$Z_{0s} (1 \times 10^{-3} \text{ cm})$					
	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
$U_t^* (\text{cm/s}, \text{Marti})$	57.68	53.79	51.66	50.20	49.08
$U_t^* (\text{cm/s}, \text{Alfaro})$	33.32	37.70	40.24	41.91	43.05

针对地表同时存在 2 类粗糙元的情况下(植被和砾石共存情况下)Marticorena 提出了双应力分配模式^{[7] (6)}:

$$R = R_1 \cdot R_2$$

$$R_1 = 1 - \ln(Z_{01}/Z_{0s})/\ln(0.35(10/Z_{0s})^{0.8})$$

$$R_2 = 1 - \ln(Z_{02}/Z_{01})/\ln(0.35(X/Z_{01})^{0.8}) \quad (6)$$

公式(6)中的 $x = 3/d_{1-2}$, d_{1-2} 为 2 个粗糙元之间的距离。鉴于(6)结构和(4)相似,双应力分配模式也需要通过实验进行校正。

1.3 两模式与有关实验观测结果存在明显的出入

Marticorena^[32] 和 Alfaro^[8, 33] 都认为当 $Z_0 > 0.1 \text{ cm}$, 起动摩阻风速 $U_t^* > 100 \text{ cm/s}$, 从敏感性试验来看(见图 1),这 2 个模式预测的 Z_0 在 $0.15 \sim 0.35 \text{ cm}$ 之间,可以认为此范围的空气动力学粗糙度能够有效地控制风蚀。来自风洞和野外的风蚀实验结果对这个限制条件提出了质疑:Buckley^[34],凌裕泉^[35]

① Nickling W, Gilles J. The role of shear stress partitioning on dust emission. In: Proceedings the 2nd International Workshop on Miarial Pust 2003, September 10~12, Paris, France.

的风洞实验表明对 10~12 cm 的植物模型,在覆盖率为 37% 左右时,细沙的输沙率才接近为零,而推测这些实验中的 Z_0 约在 0.5~0.6 cm(根据 Marticorena 模式计算),这与董治宝^[36]风洞实验的结果基本一致,砾质戈壁达到空气动力学稳定状态的 Z_0 约在 0.2~0.6 cm,暗示了砾石覆盖的风蚀上限对应的 Z_0 在 0.2~0.6 cm^[37,38],黄富翔^[39]对高度在 0.8~1.2 m 的灌丛植被的沙质地表风蚀率的观测数据显示,植被覆盖率在 40%~50% 才能有效降低风蚀率(Z_0 约在 4~6 cm),这与 Wasson 等^[40]的研究结论相似。Lancaster^[16]野外实验数据的 Z_0 分别为 0.1、0.3、1、1.5 cm,对应的起动摩阻风速 0.42、0.45、0.75、0.80 m/s,最近 Lancaster^[17]野外观测表明应力分配系数 R 在 0.2~0.6 范围内 Z_0 的变化范围在 0.001~5 cm。上述观测实验表明 Marticorena 模式和 Alfaro 模式预测的能够有效控制风蚀的空气动力学粗糙度与实际观测实验存在较大出入,暗示应力分配模式在描述空气动力学粗糙度对应力分配和起动摩阻风速的影响时存在缺陷,需要通过系统实验研究来重新校正,以更好地用于模拟粉尘释放强度。

Lancaster^[17]最近认为 Marticorena 模式可能适合描述粗糙元密度较小情况下的应力分配($\lambda < 0.05$),对预测粗糙元密度 $\lambda > 0.05$ 的应力分配和起动摩阻风速是不合适的;MacKinnon 则提出通过调整 Marticorena 模式中经验常数 X 以反映粗糙元密度较大情形下的应力分配^[29]。前人这些论述对改进 Marticorena 模式和 Alfaro 模式提供了重要的参考价值。

2 改进 Marticorena 模式和 Alfaro 模式的途径与思路

改进 Marticorena 模式和 Alfaro 模式需要通过系统地室内和野外的应力分配实验来完成,由于室内风洞实验条件易于控制,因而模式改进应以室内实验为主,同时辅以野外实验观测。针对这 2 个模式存在的上述问题,建议从以下几个方面开展实验研究工作:

首先需要研究粗糙元间隙率和粗糙元不均匀分布对粗糙元空气动力学粗糙度的影响。利用风洞实验通过分别测定不同粗糙元间隙率和不同粗糙元分布状况(如均匀行状排列、随机排列、丛状排列等)的空气动力学粗糙度来改进 Marticorena 模式中的计算空气动力学粗糙度的公式,并以此来改进 Mar-

ticorena 模式和 Alfaro 模式,使它们能够反映粗糙元间隙率和不同粗糙元分布状况对应力分配的影响。目前看来这方面工作才刚刚起步^[28],今后需要探讨粗糙元的空气动力学粗糙度与粗糙元高度、粗糙元密度、粗糙元间距、粗糙元间隙率和粗糙元分布形式等定量关系,以改进当前的空气动力学粗糙度模型,在此基础上研究粗糙元间隙率和粗糙元分布形式对应力分配和起动摩阻风速的影响。

影响应力分配的因素可能很多^[23],Marticorena 模式和 Alfaro 模式主要考虑了空气动力学粗糙度对应力分配的影响,而模式中的经验常数可能间接地反映了其他因素对应力分配的影响(虽然这些常数的物理意义还不明确),如粗糙元高度既影响了空气动力学粗糙度大小,又直接影响到应力分配的大小,正如有人认为 Z_0/h 比粗糙元密度更能反映粗糙元的空气动力学性质及其对应力分配的影响^[15],因而上述模式中的经验常数可能与粗糙元几何参数有关,利用风洞实验通过调整经验常数改进 Marticorena 模式和 Alfaro 模式,反映这些不确定性因素对影响应力分配的影响。研究不同数量级 Z_0 、 Z_{0s} 的情况下,应力分配模式中经验常数的变化特点和取值范围,调整应力分配模式经验常数也是改进使 Marticorena 模式和 Alfaro 模式途径之一。

3 结语

准确地模拟应力分配和起动摩阻风速对预测大气粉尘释放强度、评价粉尘气溶胶气候意义、沙漠化和沙尘暴防治具有重要的意义。对目前被广泛采用的 DPM 粉尘释放模型中有关起动摩阻风速和应力分配模式而言,模式敏感性试验、室内和野外实验都说明 Marticorena 模式和 Alfaro 模式存在明显的问题。

作为简化的应力分配模式,Marticorena 模式和 Alfaro 模式主要考虑了地表和粗糙元空气动力学粗糙度对应力分配的影响,由于目前的模式不能考虑粗糙元间隙率和粗糙元空间分布状况对空气动力学粗糙度的影响,使 Marticorena 模式和 Alfaro 模式不能反映粗糙元间隙率和粗糙元空间分布状况对应力分配的影响,造成了这 2 个模式预测结果与一些实验结果具有明显的出入,因而改进目前的空气动力学粗糙度模式是改进应力分配模式的重要途径之一。尽管 Marticorena 模式和 Alfaro 模式中经验常数的物理意义还不是很明确,但它们可能反映一些模式还没有考虑到的一些因素对应力分配的影响,可以调整应力分配模式的经验常数来改进使 Mar-

ticorena 模式和 Alfaro 模式。

尽管个别研究人员也发现 Marticorena 模式存在问题^[17-21],但直到目前还没有看到有关模式改进的系统研究,这方面研究工作需要迅速开展起来。

尽管目前开展了很多的应力分配实验,但由于观测方法、实验条件和实验对象的差异,降低了已有数据的可比性,因而开展系统实验研究来改进 Marticorena 模式和 Alfaro 模式显得尤为重要。

参考文献(References):

- [1] Tegen I ,Fung I. Modeling mineral dust in the atmosphere : sources ,transport ,and optical thickness[J]. *Journal of Geophysical Research* ,1994 ,99 (22) 897-22 914.
- [2] Tegen I ,Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol[J]. *Journal of Geophysical Research* ,1996 ,101(D14) :19 237-19 244.
- [3] Claquin T ,Schulz M ,Balkanski Y. Modeling the mineralogy of atmospheric dust sources[J]. *Journal of Geophysical Research* ,1999 ,104 (22) 243-22 256.
- [4] Guelle W ,Balkanski J ,Schulz M ,et al. Modelling the atmospheric distribution of mineral aerosol ,comparison with ground measurements and satellite observations for yearly and synoptic timescales over the North Atlantic[J]. *Journal of Geophysical Research* ,2000 ,105 (1) 997-2 012.
- [5] Ginoux P ,Chin M ,Tegen I ,et al. Sources and distribution of dust aerosols simulated with GOCART mode[J]. *Journal of Geophysical Research* ,2001 ,106(D17) :20 225-20 273.
- [6] Marticorena B ,Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle :1. Design of a soil-derived dust emission scheme[J]. *Journal of Geophysical Research* ,1995 ,100(D8) :16 415-16 430.
- [7] Marticorena B ,Bergametti G ,Amount B ,et al. Modeling the atmospheric dust cycle :2. Simulation of Saharan dust source[J]. *Journal of Geophysical Research* ,1997 ,102(D4) :4 387-4 404.
- [8] Alfaro S C ,Gomes L. Modeling mineral aerosol production by wind erosion :Emission intensities and aerosol size distribution in source areas[J]. *Journal of Geophysical Research* ,2001 ,106 (D16) :18 075-18 084.
- [9] Mei Fanmin ,Zhang Xiaoye ,Lu Huayu ,et al. Review on progress in modeling dust production by wind erosion[J]. *Journal of Desert Research* ,2004 ,24(6) :791-797. [梅凡民 ,张小曳 ,鹿化煜 ,等. 若干粉尘释放模型述评[J]. 中国沙漠 ,2004 ,24(6) 791-797.]
- [10] 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]. *Geodinamica Atca* ,2000 ,13 245-270.
- [11] 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. [方方数据]
- [12] 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]. *Geophysical Research Letters* ,2003 ,30(24),doi :10. 1029/2003GL018206.
- [13] Alfaro S C ,Gomes L. Improving the large-modeling of the saltation fluxes of soils particles in the presence of nonerodible elements[J]. *Journal of Geophysical Research* ,1995 ,100(D8) :16 357-16 366.
- [14] Wolfe S A ,Nickling W G. Shear stress partitioning in sparsely vegetated desert canopies[J]. *Earth Surface Processes and Landforms* ,1996 ,21 :607-620.
- [15] Wyatt V E ,Nickling W G. Drag and shear stress partitioning in sparse desert creosote communities[J]. *Canadian Journal of Earth Science* ,1997 ,34 (1) 486-1 498.
- [16] Lancaster N ,Baas A. Influence of vegetation cover on sand transport by wind :Field studies at Owens Lake ,California[J]. *Earth Surface Processes and Landforms* ,1998 ,23 69-82.
- [17] Lancaster N. Relations between aerodynamic and surface roughness in a hyper-arid cold desert :McMurdo dry valleys ,Antarctica [J]. *Earth Surface Processes and Landforms* ,2004 ,29 853-867.
- [18] Gillies J ,Lancaster N ,Nickling W ,et al. Field determination of drag forces and shear stress partitioning effects for a desert shrub (*Sarcobatus vermiculatus* ,greasewood)[J]. *Journal of Geophysical Research* ,2000 ,105 (D20) :24 871-24 880.
- [19] Gillies J ,Nickling W ,King J. Drag coefficient and plant form-response to wind speed in three plant species :Burning bush (*Euonymus alatus*) ,Colorado blue spruce (*Picea pungens glauca*) and fountain grass (*Pennisetum setaceum*)[J]. *Journal of Geophysical Research* ,2003 ,107 (D 24) :10-1-15-1.
- [20] Crawley D ,Nickling W. Drag partition for regularly arrayed rough surfaces[J]. *Boundary-Layer Meteorol* ,2002 ,107 :445-468.
- [21] MacKinnon J ,Clow D ,Tigges K ,et al. Comparison of aerodynamically and model-derived roughness lengths(z_0) over diverse surfaces ,central Mojave Desert ,California ,USA [J]. *Geomorphology* ,2004 ,63 :103-113.
- [22] Wooding R A ,Bradley E F ,Marshall J K. Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry[J]. *Boundary Layer Meteorology* ,1973 ,5 :285-308.
- [23] Arya S P S. A drag partition theory for determining the large-scale roughness parameter and wind stress on Arctic pack ice [J]. *Journal of Geophysical Research* ,1975 ,80 (3) 347-3 454.
- [24] Raupach M R. Drag and drag partition on rough surfaces[J]. *Boundary-Layer Meteorol* ,1992 ,60 :375-395.
- [25] Raupach M ,Gillette D ,Leys J. The effect of roughness elements on wind erosion threshold[J]. *Journal of Geophysical Research* ,1993 ,98 (3) 023-3 029.
- [26] Elliot W P. The growth of atmospheric internal boundary layer [J]. *EOS Transactions AGU* ,1958 ,39 (1) 048-1 054.
- [27] Lettau H H. Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness element description[J]. *Journal of Applied Meteorology* ,1969 ,8 :828-832.
- [28] Minvielle F ,Marticorena B ,Gillette D A ,et al. Relationship

- between the aerodynamic roughness length and the roughness density in cases of low [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2003, 3 :249-267.
- [29] Gillette D A , Stockton P H . The Effects of nonerodible particles on wind erosion of erodible surfaces [J]. *Journal of Geophysical Research* ,1989 ,94 (D10) 12 885-12 893.
- [30] Marshall J K . Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution [J]. *Agricultural Meteorology* ,1971 ,8 :269-292.
- [31] Stockon P H , Gillette D A . Field measurements of sheltering effect of vegetation on erodible land surface[J]. *Land Degrad Rhabil* ,1990 ,2 :77-85.
- [32] Marticorena B , Bergametti G , Gillette D , et al . Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States [J]. *Journal of Geophysical Research* ,1997 ,102 (D19) 23 277-2 328.
- [33] Alfaro S , Rajot L , Nickling W . Estimation of PM20 emissions by wind erosion :Main sources of uncertainties[J]. *Geomorphology* ,2004 ,59 :63-74.
- [34] Buckley R . The effect of sparse vegetation on the transport of dune sand by wind[J]. *Nature* ,1987 ,325 :426-428.
- [35] Ling Quanyu Qu Jianjun Jin Jiong. Influence of sparse natural vegetation on sand-transporing quantity[J]. *Journal of Desert Research* 2003 ,23(1) 12-17.[凌裕泉,屈建军,金炯. 稀疏天然植被对输沙量的影响 [J]. 中国沙漠 2003 ,23(1) 12-17.]
- [36] Dong Zhibao , Chen Weinan , Dong Guangrong , et al . Influence of vegetation cover on the wind erosion of sandy soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* ,1996 ,19(1) :437-443. [董治宝,陈渭南,董光荣,等. 植被覆盖对风沙土风蚀的影响 [J]. 环境科学学报 1996 ,19(1) :437-443.]
- [37] Dong Z B , Liu X P , Wang X M . Aerodynamic roughness of gravel surfaces[J]. *Geomorphology* 2002 ,43 :17-31.
- [38] Qu Jianjun , Huang Ning , Tuo Wanquan , et al . Structural characteristics of Gobi sand-drift and its significance [J]. *Advances in Earth Science* 2005 ,20(1) 19-23. [屈建军,黄宁,拓万全,等. 戈壁风沙流结构特性及其意义 [J]. 地球科学进展 2005 ,20(1) 19-23.]
- [39] Huang Fuxiang , Niu Haishan , Wang Mingxing , et al . The relationship between vegetation cover and sand transport flux at Mu Us Sandland [J]. *Acta Geographica Sinica* ,2001 ,56(6) :700-711. [黄富祥,牛海山,王明星,等. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系 [J]. 地理学报 ,2001 ,56(6) :700-711.]
- [40] Wasson R J , Nanninga P M . Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces [J]. *Earth Surface Processes and Landforms* ,1986 ,11 :505-514.

Problems of the Shear Stress Partition Sub-models of a Dust Production Model

MEI Fan-min^{1,2} , WANG Tao¹ , ZHANG Xiao-ye³ , CHEN Min²

(1. Key laboratory of Desert and Desertification , Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , CAS Lanzhou 730000 , China ; 2. Department of Environmental Science and Technology , Xi 'an University of Engineering and Technology , Xi 'an 710048 , China 3. Center for Atmosphere Watch and Services , CMA , Beijing 100081 , China)

Abstract : Simulation of dust emission flux is very fundamental for evaluating climatic effects of dust aerosols and controlling desertification process and dust storm. The two shear stress partition models were proposed by Marticorena and Alfaro respectively for evaluating effect of roughness elements on dust production. The existing problems of them are discussed on basis of sensitive tests , previous wind tunnel and field experiments. First , the influence of porosity and spatial heterogeneity of roughness elements on shear stress partition was not taken into account because all equations about roughness length can not involve such factors as porosity and spatial heterogeneity of roughness elements. However , it is proved that these factors cannot be neglected by many experiments. Second , the result from sensitive test of Marticorena's Model is in disagreement with that of Alfaro's Model , implying that the models need to be investigated further by wind tunnel experiment. Third , regarding the roughness length to efficiently suppress wind erosion , the values predicted respectively by the models are questioned by some wind erosion experiment data , therefore the relationship between shear stress partition and roughness length need to be reassessed. In terms of these problems of the models , two approaches are proposed :improving roughness length formula and tuning empirical constants of the models by wind tunnel experiment.

Key words : Shear stress ; Shear stress partition ; Wind erosion ; Dust production.