

梅凡民,王姗,唐丽萱,等.一个基于粗糙元方向比率和空气动力学粗糙度的起动摩阻风速模式[J].中国沙漠,2020,40(6): 98-104.

一个基于粗糙元方向比率和空气动力学粗糙度的起动摩阻风速模式

梅凡民^a,王 姗^a,唐丽萱^a,苏 进^b

(西安工程大学 a.环境与化学工程学院, b.理学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 粉尘释放模型对风蚀粉尘气候、生态效应的评价和沙尘天气的预报有重要意义。条件试验表明,MB模式和SL模式存在高估或低估起动摩阻风速的情形,但未得到观测数据的支持。鉴于此,利用风洞实验测量了不同密度(0.0072~0.51)、方向比率(4~25)、孔隙率(0.15~0.75)的粗糙元覆盖的中粗沙床面的起动摩阻风速。结果表明:当空气动力学粗糙度大于1 mm时,MB模式存在高估(相对误差率80%~100%)起动摩阻风速而失效的情形,SL模式存在低估(相对误差率-50%~-20%)起动摩阻风速的情形。基于观测数据本文提出了一个基于粗糙元方向比率、粗糙和光滑床面空气动力学粗糙度比值及裸沙起动摩阻风速的新模式,可以模拟低、中、高密度的粗糙元覆盖床面的起动摩阻风速,模拟的误差在 $\pm 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内。

关键词: 粉尘释放; 起动摩阻风速; 方向比率; 空气动力学粗糙度; 风洞实验

文章编号: 1000-694X(2020)06-098-07

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00080

中图分类号: X169

文献标志码: A

0 引言

作为气溶胶主要组分之一,风蚀粉尘在全球气候变化中扮演着重要的角色:它的辐射强迫效应影响大气热量的收支^[1];作为凝结核它影响大气的水文过程如液滴和冰晶的形成并进一步影响降水过程和大气热量收支状况^[2];作为海洋生态系统的主要营养来源,它的沉降提高了海洋生态系统的生产力并成为影响全球气候变化的重要因素^[3]。风蚀粉尘释放、输送和沉降产生的环境问题也影响到人类的可持续发展。

粉尘释放模拟是粉尘气候效应评价和沙尘天气预报的基础。作为一种常用的粉尘释放模式,DPM模式^[4]已经被用于模拟中国北方及亚洲地区沙尘天气^[5-7],并取得了较好的预报效果,但该模式在预报蒙古高原的戈壁及戈壁草原区域沙尘天气时^[7],出现了漏报沙尘天气的现象。针对此类问题,前人通过优化地表的参数化方案如更新区域沙漠分布面积等数据来减小漏报的概率^[7]。但应该看

到,沙尘天气预报的效果除与地表参数化方案及可靠性有关外,还与DPM模式的精度有关,其中起动摩阻风速模式是影响模拟精度的重要方面。

DPM模式推荐了两个用来模拟粗糙床面的起动摩阻风速 U_t^* 的模式,分别是MB模式^[8-9]和SL模式^[10]。条件试验表明,前者对粗糙床面空气动力学粗糙度 Z_0 非常敏感,仅适合模拟 $Z_0 \leq 1 \text{ mm}$ 的粗糙床面的 U_t^* ;后者预测的 U_t^* 会随着 Z_0 的增加而缓慢地增加,似乎可模拟更大的 Z_0 情形下的 U_t^* ^[11]。二者的模拟结果存在明显的差异,但由于缺乏实测数据的支持,目前还难以评价它们的可靠性。

在边界层湍流和粗糙床面相互作用的过程中,湍流总动量将在粗糙元和可蚀性地表之间分配,这被称为湍流切应力分解机理^[12]。目前模拟湍流切应力分解的方案可分为Raupach模式^[13-14]、MB模式^[8-9]和SL模式^[10]等。Raupach模式把起动摩阻风速比率($e_{ff} = \frac{U_{ts}^*}{U_t^*}$, U_{ts}^* 和 U_t^* 分别代表光滑和粗糙床

收稿日期:2020-06-12; 改回日期:2020-07-22

资助项目:兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室开放基金项目;国家自然科学基金项目(41340043, 11601411)

作者简介:梅凡民(1968—),男,陕西高陵人,博士,教授,主要从事风沙多相流力学与大气环境研究。E-mail: meifanmin@xpu.edu.cn

面的起动摩阻风速)表征为粗糙元密度、方向比率 AR (粗糙元高度与直径的比值)、切应力空间分布系数和阻力系数的函数^[13-14],其被相关的风洞实验和野外实验不断地验证和修正^[15-19]。MB模式^[8-9]和SL模式^[10]基于粗糙床面的双边界层假定:粗糙元高度以上为代表整个床面气流特征的外边界层而粗糙元高度以下为代表粗糙元之间光滑床面气流特征的内边界层,且内外边界层风廓线皆服从对数廓线。双边界层成立需要满足低的粗糙元密度(常以小于0.1为界^[8-9])和较大的粗糙元间距(常以间距与高度的比值大于3^[10]),而前人研究数据则暗示风蚀床面的粗糙元密度及 Z_0 常常会超过上述条件^[11,20-25],这意味着MB模式和SL模式可能不适合预测更高的 Z_0 情形下的 U_i^* ,但缺乏直接观测数据的支持。

从Raupach模式相关研究来看,粗糙元的方向比率 AR 和孔隙度 P 等因素对 U_i^* 有显著的影响^[15]。对MB模式和SL模式而言,是否要把 AR 和 P 的因素整合到模式中还需要进一步的研究。

为了评价MB模式和SL模式的可靠性,拓展模式的适用范围,进一步理解粗糙元的方向比率和孔隙度对起动摩阻风速的影响,本文利用风洞实验来研究粗糙和光滑床面的空气动力学粗糙度、方向比率和孔隙度等因素对起动摩阻风速的影响,建立基于粗糙元结构参数和空气动力学粗糙度的新模式。

1 研究方法

风洞实验在中国科学院寒区旱区环境工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室的野外风洞中完成,该风洞几何尺寸和空气动力学性质见文献[21]。

布置了39组粗糙床面:25组细高、密实的粗糙元覆盖的床面,对应的方向比率分别为4、8、12、16、20,5组低矮的密实粗糙元,对应方向比率分别为0.25、0.5、0.75、1.0、1.25,9组孔隙粗糙元覆盖的床面(也是丛状分布的粗糙元),对应的孔隙度分别为0.15、0.55、0.75。具体的粗糙元结构参数定义及数值见文献[26](未测量粗糙元高度为40 mm,个数密度为1 025床面的 U_i^* ,实际共有38组床面的 U_i^* 数据),孔隙度的定义为公式(1), n_s, h_s, d_s 是围成一个孔隙粗糙元的单个粗糙元的个数、高度、直径,在床面设计中令 $h_s = H$ (图1)。

$$P = \frac{HD - n_s h_s d_s}{HD} \quad (1)$$

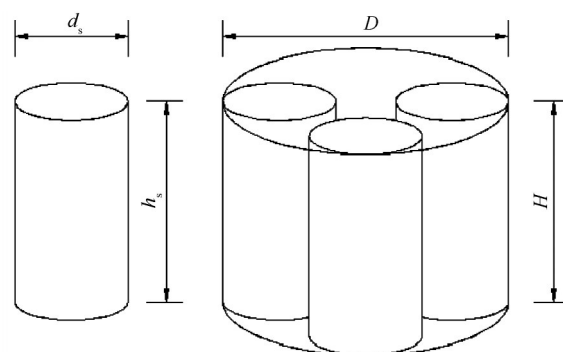


图1 孔隙粗糙元的结构示意图

Fig. 1 The sketch of an individual porous element

起动摩阻风速测试所用的沙样来自腾格里沙漠的沙漠沙,粒径100~450 μm ,粒径分布符合双峰对数正态分布模式,可用两个中值粒径分别为170 μm 和320 μm 对数正态分布群体构成,后者占比为84%(表1)。

表1 对数正态分布模式模拟的沙样统计参数

Table 1 Statistical parameters of sand samples simulated by log-normal distribution model

统计参数	对数正态分布群体1	对数正态分布群体2
组合比例/%	16	84
中值粒径/ μm	168	317
标准偏差	1.15	1.11

粗糙床面跃移起动的观测方法是在粗糙床面上均匀撒播约1 mm厚的沙粒,采用摄像头监测下风向沙粒起动(图2)。缓慢增加风机频率,当观测到胶带粘贴到5~10粒沙粒时,用风速廓线仪记录风速廓线数据。为了减小实验的误差,每种床面做5次平行实验,取平均值作为起动摩阻风速。这种判断沙粒起动的方法已被证明是有效的^[15]。裸露沙面的跃移起动观测方法与粗糙床面相同。

用风速廓线仪测定沙粒起动时的风廓线。风廓线仪由高度分别为3.0、6.0、10.0、15.0、30.0、60.0、120、200、350、500 mm的10个精细毕托管组成,使用前用标准毕托管标定。风速采集时长60 s,采样频率为1 Hz,用于分析的是60 s内采集的平均风速。

光滑床面的空气动力学粗糙度 Z_{0s} 用中性层结下的对数风廓线方程(公式2)拟合计算,其中 k 为卡门常数,取0.4, U^* 为摩阻风速, Z_{0s} 为空气动力学粗糙度, U_z 为高度为 Z 处的平均风速。利用风廓线仪分别测定自由风速为6、8、10、12、14、16、18、20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 情况下的风廓线,利用公式(2)拟合可得到

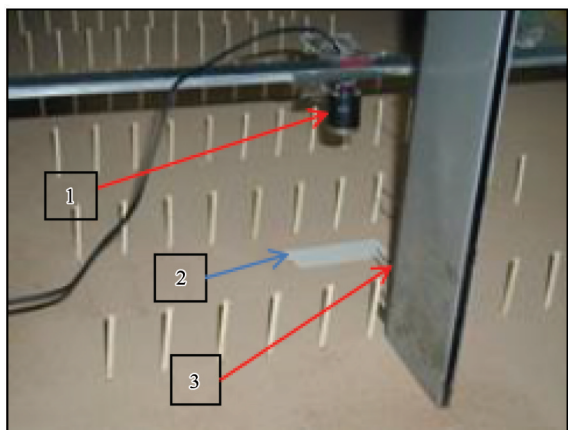


图2 风洞跃移起动观测实景(1-摄像头, 2-胶带纸, 3-皮托管)

Fig.2 A picture of observation on saltation threshold
(1- small camera, 2- sticky tape, 3- Pitot tubes)

Z_{0s} 并取平均值。同样的,粗糙床面的空气动力学粗糙度 Z_0 也是对公式(2)拟合并取平均值。起动摩阻风速 U_i^* 也是根据对数风廓线公式(2)拟合并取平均值^[21]:

$$U_z = \frac{U^*}{k} \ln \left(\frac{Z_{0s}}{Z} \right) \quad (2)$$

评估MB模式^[8-9]和SL模式^[10]的相对误差率 E_r , 采用公式(3)来表述,其中 U_m^* 为模拟的起动摩阻风速, U_{n0}^* 为风洞实验观测的起动摩阻风速。

$$E_r = \frac{U_m^* - U_{n0}^*}{U_{n0}^*} \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 粗糙元的方向比率及空气动力学粗糙度对起动摩阻风速的影响

当 Z_0 从 0.02 mm 增加到 26.5 mm 时, U_i^* 约从

$0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以对数函数形式增加到 $1.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3), 但 U_i^* 明显的分散性意味着床面的某些结构参数可能对其有着重要的影响。鉴于粗糙元密度、高度对气流的阻滞效应可以通过 Z_0 来表征^[21], 而粗糙元间距与起动摩阻风速成负相关关系, 则意味着方向比率可能是造成摩阻风速数据分散性的主要原因。

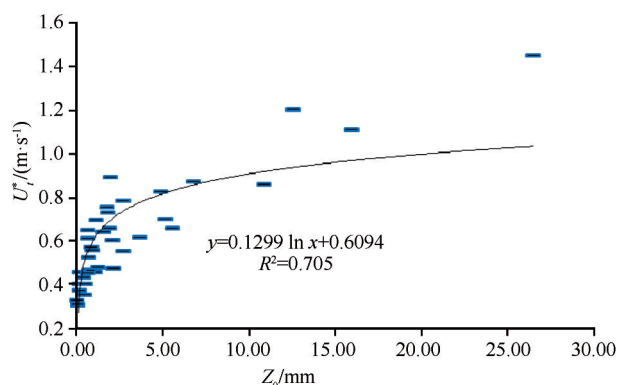


图3 风洞实验测量的粗糙床面的空气动力学粗糙度 Z_0 和起动摩阻风速 U_i^*

Fig.3 The observed relationship between wind friction threshold velocity and aerodynamic roughness length in the wind tunnel experiment

在相近的或相同的 AR 情况下, U_i^* 与 Z_0 具有更高的相关系数, 则意味着方向比率对起动摩阻风速有重要的影响(图4)。当 AR 从 0.25 增加到 8 时, U_i^* 均随着 Z_0 以对数函数 $U_i^* = a \ln Z_0 + b$ 增加, 且经验系数 a, b 因 AR 的不同而有轻微的变化(图4A)。

当 AR 从 12 增加到 25 时, U_i^* 随着 Z_0 以对数函数 $U_i^* = a \ln Z_0 + b$ 增加, 且对应的经验系数 a, b 则随着方向比率具有明显的线性增加趋势(图4B)。

本文用丛状分布的粗糙元来模拟孔隙粗糙元对 U_i^* 的影响。当孔隙粗糙元对应的 Z_0 与密实粗糙

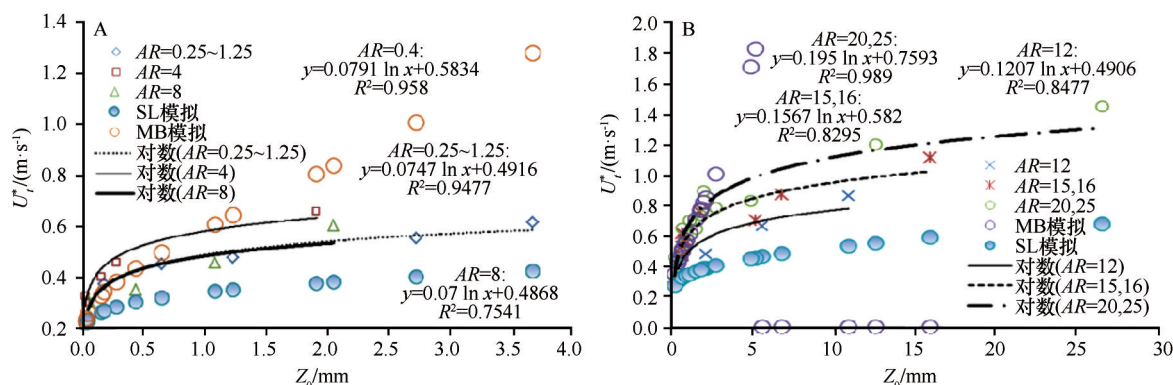


图4 不同方向比率 AR 下起动摩阻风速 U_i^* 与空气动力学粗糙度 Z_0 的关系

Fig.4 The relationship between wind friction threshold velocity and aerodynamic roughness length under different aspect ratios compared to outputs from the MB model and the SL model

元相近,且在 AR 相近的情况下,丛状分布的孔隙粗糙元($AR=15, 20, 25$)与密实粗糙元($AR=16, 20$)服从同一对数函数(图4B),这表明孔隙率对跃移起动的影响可归结为 Z_0 的影响。

2.2 MB和SL模式的绝对误差及相对误差率的分布

MB模式预测的 U_i^* 分别呈现出与风洞实验结果相对一致、大于实验结果 $0.2\sim 1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及预测失效出现零值等3种情形(图4),分别对应 $Z_0 \leq 1\text{ mm}$ 、 $1 < Z_0 \leq 5\text{ mm}$ 、 $5 < Z_0 < 30\text{ mm}$,这表明MB模式仅适合预测 $Z_0 \leq 1\text{ mm}$ 的风蚀床面的起动摩阻风速。前人对蒙古高原戈壁草原地区沙尘天气的漏报^[7],与所用的MB模式对 U_i^* 的过高估计有关。

当 Z_0 从 0.01 mm 增加到 26.5 mm 时,SL模式预测的 U_i^* 从 $0.30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $0.68\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图4),明显低于风洞实验观测结果,特别是在 $Z_0 > 1\text{ mm}$ 的情形下,这种低估效应更为显著。

图5表明,当 $Z_0 \leq 2\text{ mm}$ 时,MB模式的相对误差率 $-20\%\sim 40\%$;当 $Z_0 > 2\text{ mm}$ 时,MB模式的相对误差率 $80\%\sim 100\%$ 或出现零值(图5中出现 -100 的情形),这意味MB模式在此情形下失效。SL模式的相对误差率 $-50\%\sim -20\%$,相对误差率对 Z_0 的变化不敏感,这表明该模式在不同 Z_0 情形下均会显著地低估起动摩阻风速。

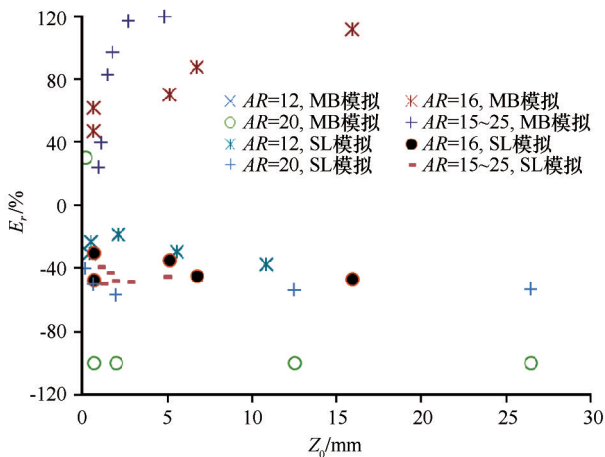


图5 MB模式和SL模式的相对误差率 E_i

Fig.5 The relative errors of MB model and SL model

MB模式对 U_i^* 的高估、失效及SL模式对 U_i^* 的低估与双边界层的假定有关,而双边界层的成立需要满足粗糙元密度不超过 0.1 ^[8-9]、粗糙元的流向间距与粗糙元高度比值在3以上的床面等条件^[10],本文约有34%的数据不满足此条件^[26],因而导致MB

模式高估、失效及SL模式的低估或失效。

另外,SL模式对 U_i^* 的低估也与它所依据的风洞实验数据有关^[10]。该风洞实验的 Z_0 约为 $0.04\sim 1.37\text{ mm}$,对应的阻力分解系数集中于 $0.5\sim 1.0$,缺乏更大 Z_0 情形下 U_i^* 的数据,因而当 $Z_0 > 2\text{ mm}$ 时,该模式会出现低估 U_i^* 的情形。

2.3 基于方向比率、光滑与粗糙床面的空气动力学粗糙度的起动摩阻风速模式

为了说明粗糙床面湍流切应力的分配趋势,这里引入起动摩阻风速比率 e_{ff} ,它为裸露沙面的起动摩阻风速 U_{fs}^* 和粗糙床面的起动摩阻风速 U_i^* 的比值,其中实验测量的 U_{fs}^* 为 $0.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,裸露沙面的空气动力学粗糙度 Z_{0s} 为 0.05 mm 。

图6表明,在 $AR(0.25\sim 25)$ 相近或相同的情形下, e_{ff} 均随着 $\ln\left(\frac{Z_0}{Z_{0s}}\right)$ 增加而减小,且 e_{ff} 数据与拟合函数的差值均在 $\pm 0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内,这意味着把方向比率整合于起动摩阻风速模式之中,就可以使模拟的误差在 $\pm 0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内。

另外,在粗糙元丛状分布的情形下(即对应着孔隙率 $0.15, 0.55, 0.75$ 的粗糙床面),这类粗糙床面的 e_{ff} 数值与相近 AR 情形下密实粗糙元接近(图6),这表明丛状分布或孔隙度对 U_i^* 的影响可用 Z_0 表征。

e_{ff} 可以表示为公式(4),其中 a' 和 b' 为经验参数:

$$e_{ff} = a' \ln\left(\frac{Z_0}{Z_{0s}}\right) + b' \quad (4)$$

图7表明 a' 和 b' 分别是 AR 的一次函数和二次函数。公式(4)综合地反映了方向比率、 Z_0 与 Z_{0s} 的比值对 e_{ff} 的影响。由公式(3)可得到 U_i^* 的函数,它是 AR 、 Z_0 与 Z_{0s} 的比值以及裸露沙面的 U_{fs}^* 的函数(图6)。

与SL模式相比,公式(4)的 e_{ff} 所涵盖的范围为 $0.15\sim 0.85$,其可以更好地模拟低、中、高粗糙元密度情况下的起动摩阻风速,在模拟沙化的戈壁草原地区的跃移起动和粉尘释放强度有更好的潜力。

需要说明的是,为了反映沙化风蚀的草原中不同群落类型的空气动力学粗糙度,梅凡民^[27]曾采用数字化群落类型图中建群种平均的高度、覆盖度和单个建群种的方向比率等参数来计算空气动力学粗糙度。同样地,可采用公式(4)来预测此群落类型的起动摩阻风速,此工作将会在另外的论文

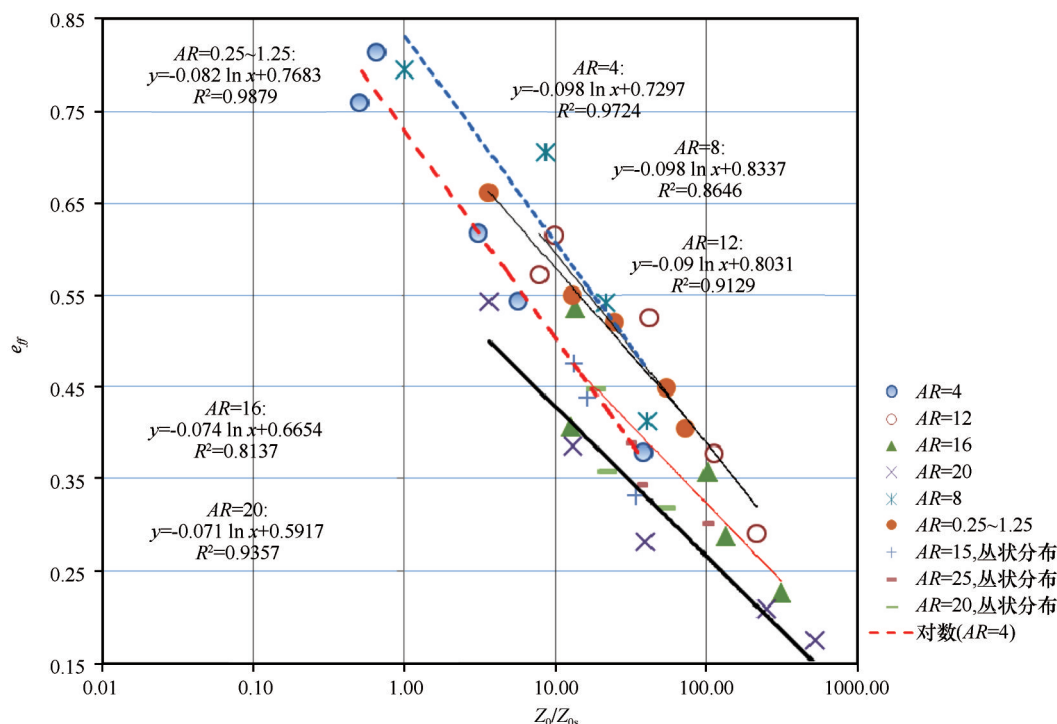


图6 不同方向比率下起动摩阻风速比值与空气动力学粗糙度比值的关系

Fig. 6 The relationship between wind friction threshold velocity ratio and aerodynamic roughness length ratio under different aspect ratios

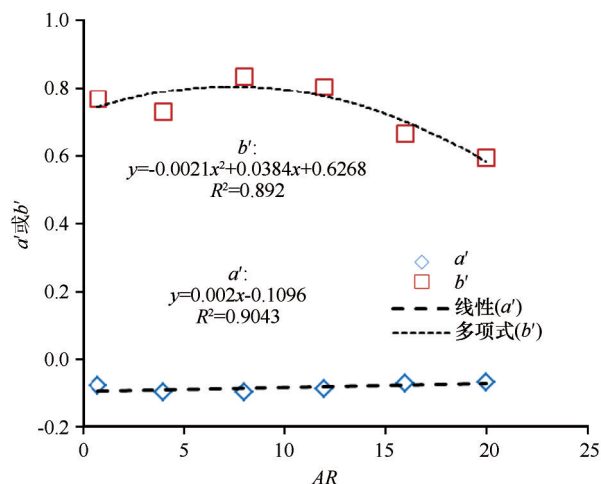


图7 公式(3)中经验系数 a' 和 b' 随方向比率 AR 的变化

Fig. 7 The variations of a' and b' of the formula (3) with the aspect ratios

中讨论。

3 结论

风洞实验表明,在中、高密度情形下,MB模式会高估(相对误差率80%~100%)起动摩阻风速而失效,SL模式会低估起动摩阻风速(-50%~-20%);

粗糙元的方向比率对起动摩阻风速有显著的影响,而粗糙元的孔隙率对起动摩阻风速的影响可

归结为其对应的空气动力学粗糙度效应,故起动摩阻风速的模式可不考虑孔隙度的影响。

本文建立的基于粗糙元的方向比率、粗糙床面与光滑床面的空气动力学粗糙度比值及裸沙起动摩阻风速的经验模式可更好地预测低、中、高密度的粗糙元覆盖条件下的起动摩阻风速,误差在 $\pm 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内。

参考文献:

- [1] Tegen I, Laci A A, Fung I. The influence on climate forcing of mineral aerosol from disturbed soils [J]. Nature, 1996, 380: 419-422.
- [2] Yin Y, Wurzel S, Levin Z, et al. Interactions of mineral dust particles and clouds: effects on precipitation and cloud optical properties [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107 (D23): 4724.
- [3] Mahowald N M, Baker A R, Bergametti G, et al. Atmospheric global dust cycle and iron input to ocean [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19: GB4025.
- [4] 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): 18075-18084.
- [5] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. Characterization of soil dust distributions in China and its transport during ACE-ASIA

2. Model simulation and validation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D9): 4262.
- [6] Zhou C H, Gong S L, Zhang X Y, et al. Development and evaluation of an operational SDS forecasting system for East Asia: CUACE/Dust [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(4): 787–798.
- [7] Zhou C H, Gui H L, Hu J K, et al. Detection of new dust sources in Central/East Asia and their impact on simulations of severe sand and dust storm [J]. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, 2019, 124(1): JD030753.
- [8] Marticorena B, Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle. Part 1: design of a soil-derived dust emission scheme [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D8): 16:415–416.
- [9] Marticorena B, Bergametti G, Aumont B, et al. Modeling the atmospheric dust cycle 2. Simulation of Saharan dust sources [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D4): 4387–404.
- [10] Alfaro S C, Gomes L. Improving the large-modeling of the saltation fluxes of soils particles in the presence of nonerrodible elements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D8): 16357–16366.
- [11] 梅凡民, 王涛, 张小曳, 等. 有关粉尘释放模型的应力分配模式存在问题的讨论 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(4): 424–429.
- [12] Marshall J K. Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution [J]. *Agricultural Meteorology*, 1971, 8: 269–292.
- [13] Raupach M R. Drag and drag partition on rough surfaces [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 60: 375–395.
- [14] Raupach M, Gillette D, Leys J. The effect of roughness elements on wind erosion threshold [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 3023–3029.
- [15] Musick H, Trujillo S, Truman C. Wind tunnel modeling of the influence of vegetation structure on saltation threshold [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 589–605.
- [16] Wolfe S A, Nickling W G. Shear stress partitioning in sparsely vegetated desert canopies [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 607–620.
- [17] Wyatt V E, Nickling W G. Drag and shear stress partitioning in sparse desert creosote communities [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1997, 34: 1486–1498.
- [18] Crawley D, Nickling W. Drag partition for regularly arrayed rough surfaces [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 107: 445–468.
- [19] King J, Nickling W G. Representation of vegetation and other nonerrodible elements in aeolian shear stress partitioning models for predicting transport threshold [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: F04015.
- [20] 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.
- [21] Dong Z B, Liu X P, Wang X M. Aerodynamic roughness of gravel surfaces [J]. *Geomorphology*, 2002, 43: 17–31.
- [22] 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.
- [23] Wasson R J, Nanninga P M. Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11: 505–514.
- [24] 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.
- [25] 亢力强, 杨智成, 张军杰, 等. 两种柔性植株地表风速廓线特征比较的风洞模拟 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 43–49.
- [26] 梅凡民, 张宁宁, 席媛, 等. 粗糙床面风廓线统一对数区的空气动力学粗糙度及其空间变异特征 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 445–453.
- [27] 梅凡民. 中国北方粉尘释放通量的模拟与观测: 以巴丹吉林沙漠、阴山北部干草原农垦区和草原牧区为例 [D]. 西安: 中国科学院地球环境研究所, 2004.

An improved scheme for modeling wind friction threshold velocity dependent on the aspect ratio of individual element and aerodynamic roughness length

Mei Fanmin^a, Wang Shan^a, Tang Lixuan^a, Su Jin^b

(a. School of Environmental and Chemical Engineering, b. School of Sciences, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Improvement in modeling dust emission is very important for predictions of sand-dust storms and climatic and ecological effects of soil-derived dust events. It has not been validated since overestimation from one classical scheme for modeling saltation threshold over roughness surfaces and underestimation from another scheme were found in terms of condition analysis. As a result, wind friction threshold velocities over fine-medium sand surfaces with roughness elements with various aspect ratios (0.25–25), densities (0.0072–0.51), and porosities (0.15–0.75) were measured in a wind tunnel. It indicates that overestimation (the relative error around 80%–100%) and incorrectness from one scheme and underestimation (the relative error from –50% to –20%) from another scheme will occur as roughness length more than 1 mm. An improved scheme for modeling saltation threshold is proposed here, dependent on aspect ratio of individual element, the ratio of overall aerodynamic roughness to erodible roughness. The new scheme can be applied to predicate wind friction velocity over beds with sparse, medium and dense roughness elements, having very low relative error around $\pm 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Key words: dust emission; wind friction threshold velocity; aspect ratio; aerodynamic roughness length; wind tunnel experiment