

文章编号: 1000-4750(2011)12-0190-09

# 坡面风沙运动的风洞实验及数值模拟

蒋 红, 佟 鼎, \*黄 宁

(西部灾害与环境力学教育部重点实验室(兰州大学), 兰州 730000)

**摘 要:** 目前对近地层风沙流的理论与数值模拟研究都是在理想情况, 如定常风速、平坦沙面等给定条件下对风沙流进行模拟研究, 使得现有的风沙跃移运动理论与数值模型还远未能够达到准确预测野外实际情况下的风沙流运动的程度。该文进行了在坡面地表下风沙运动的风洞实验, 在此基础上建立了坡面地表下的风场-沙粒相互耦合的风沙跃移运动模型, 并对该风场-沙粒相互耦合的风沙跃移运动模型进行了求解。计算时采用有限体积法来求解 Navier-Stokes 方程, 地表形态采用阶梯网格进行逼近, 结果表明数值模拟结果与风洞实验结果吻合良好。该文还详细讨论了坡面地表下沙粒跃移运动特征, 如坡面不同位置处输沙率沿高度的分布、风速沿高度分布等。

**关键词:** 风沙跃移运动; 坡面; 数值模拟; 风洞实验; 耦合作用

**中图分类号:** O359.2 **文献标志码:** A

## THE NUMERICAL SIMULATION AND WIND TUNNEL EXPERIMENT ON WINDBLOWN SAND MOVEMENT OVER THE SLOPE SURFACE

JIANG Hong, TONG Ding, \*HUANG Ning

(Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The existing theory studies and numerical simulations of windblown sand movement have been concentrated in idealized circumstances, such as steady wind velocity, flat bed surface, etc. As a result, current theoretical and numerical models can not predict windblown sand saltating movement accurately. In this paper, wind tunnel experiments were carried out and the dust emission rate over slope surface was measured by using the Particle Image Velocimetry technique. Based on the wind tunnel experiment results, we built up a theoretical model and simulated the windblown sand movement with consideration of the coupling of wind and sand particles. The finite volume method was used to solve the N-S equation, and staircase grids were used to approach the real surface configuration. The results show that the numerical results are fairly consistent with corresponding experimental results. Then windblow sand saltating movement, such as the profiles of sand transport rate and wind speed at different positions over slope surface were discussed in details.

**Key words:** windblown sand saltation; slope surface; numerical simulation; wind tunnel experiment; coupling effects

风沙流是风与其所携带的沙物质组成的气固两相流, 是风沙物理的核心内容, 也是风沙地貌, 沙漠化, 防沙工程的基础理论之一。荒漠化是当今世界具有局地与全球效应的最为严重的环境问题之一, 除南极洲以外的各洲均存在荒漠化土地<sup>[1]</sup>,

我国是世界上受荒漠化最严重的国家之一, 受荒漠化影响总土地面积约为 263.6 万 km<sup>2</sup>, 占国土面积的 27.46%, 主要分布于新疆、内蒙古、西藏、甘肃等 18 个省, 近 4 亿人口受到危害<sup>[2]</sup>。荒漠化已经成为危及国家生态安全的突出问题, 诸如绿洲消失、

收稿日期: 2010-03-23; 修改日期: 2010-06-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2009Cb421304); 国家自然科学基金项目(10772073, 40971009);

国家自然科学基金中法合作研究项目(10811130470)

作者简介: 蒋红(1986—), 女, 甘肃兰州人, 硕士生, 主要从事环境力学研究(E-mail: jianghong2008@lzu.edu.cn);

佟鼎(1982—), 男, 辽宁凌海人, 博士生, 主要从事环境力学研究(E-mail: tongding1234@gamil.com);

\*黄宁(1964—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 博导, 主要从事环境力学研究(E-mail: huangn@lzu.edu.cn).

土壤受吹蚀、草场退化、土壤盐渍化以及生物产量及物种减少等使得土地生产力下降,阻碍经济和社会可持续发展,反映了生态环境的不断恶化。几十年以来,荒漠化引起了国内外地学、力学等很多学科工作者的热切关注并取得了很大的成果。有很多学者建立了定量分析风沙运动的数学模型,如:Owen<sup>[3]</sup>, Ungar 和 Haff<sup>[4]</sup>首先假定粒子运动服从单一简单形状的轨道,建立了风沙运动模型,由此揭示了边界层中沙粒运动的一些基本特性,这一假定与实际情况不完全相符,得到的输沙率与实际情况有较大差别;美国学者 Anderson 和 Haff 在著名期刊《Science》发表了题为“Simulation of Eolian Saltation”的论文<sup>[5]</sup>,该文通过考虑沙粒对风场的反作用力,模拟了风沙跃移运动从起始阶段至风沙流达到自平衡状态的整个过程,他们的这些结果与实验结果能够在定性上相吻合,但在定量上相差较大;之后,McEwan 和 Willetts<sup>[6]</sup>, Shao 和 Li<sup>[7]</sup>也对风沙流发展过程进行了理论模拟;黄宁等<sup>[8]</sup>运用数值反演得到了沙粒初速度分布,建立了稳态风沙跃移云数值模型,计算了输沙率沿高度的分布;兰州大学风沙环境力学小组基于风沙流统计耦合模式,在所预测的风沙流整体行为中定量反映了风场-沙粒运动(含旋转)-风沙电场-热扩散场间的相互耦合作用,并实现了对风沙电场、风沙流自平衡发展过程中的起沙率和输沙率等的理论预测:给出沙粒不同运动形式的风沙电场分布随高度、沙粒荷质比、风速等因素的变化规律<sup>[9]</sup>;给出由于沙粒带电所受到电场力和地表热扩散对风沙跃移运动的发展过程、起沙率、单宽输沙率、单位面积输沙率沿高度分布以及风速廓线的影响<sup>[10]</sup>。这些定量预测结果与 Anderson 等人的理论预测结果相比,不仅在定性上与相关实验结果良好吻合,而且在定量上与实验结果也很吻合。但是现有这些对于风沙流运动的理论与数值模拟研究以及风洞实验都是基于平坦床面的,没有考虑起伏不平的地表对于风沙流的影响<sup>[11-14]</sup>。

事实上,沙漠中最基本的地貌形态如沙丘、沙波纹等,其迎风坡面的坡度对颗粒起动和输沙率影响很大。同时,土壤风蚀区的地表往往并不平坦,各种坡度的地形对气流以及沙尘颗粒产生强烈扰动,进而控制着风沙运动。因此,在研究风沙运动时必须考虑地形坡度的影响。本文在风洞中对具有三角形剖面的坡面上的风沙运动进行了实验研究,并将利用 PIV(Particle Image Velocity)测量得到的坡

面不同位置的起沙率应用于坡面地表下的风沙流数值模拟,建立了坡面地表下风场与沙粒相互耦合作用的风沙跃移模型,并进行了数值模拟。同时,将数值模拟所得输沙率结果与风洞实验输沙率结果进行了对比,并详细分析了在坡面地表情况下输沙率在坡面不同位置变化的规律,探讨了床面形态对于风沙流运输的影响。

## 1 风洞实验

坡面地表下风沙运动的风洞实验是在兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室的多功能环境风洞中进行的。多功能环境风洞是一座直流下吹式低速风洞,实验段长 20m,断面宽 1.3m、高 1.45m,风速 4m/s~40m/s 且连续可调。实验中采用立式集沙仪对坡面不同位置处的输沙率进行测量,使用 TSI 公司的 PIV(粒子图像测速仪)测量风沙流颗粒相的速度并且根据相应的公式求解出起沙率。该 PIV 系统由 CCD 相机、激光器、同步器以及计算机构成。CCD 相机采用的是 PowerView Plus 2MP 的 200 万像素相机,CCD 阵列为 1600×1192,12 位灰度,最大拍摄速度 32 帧/s;激光器采用 New Wave 公司的 MiniLaser Nd: YAG 激光器,双腔双脉冲,单个腔体脉冲重复率为 15Hz,单个脉冲最大能量为 120mJ。计算机为带有图像采集卡的 PC 机。

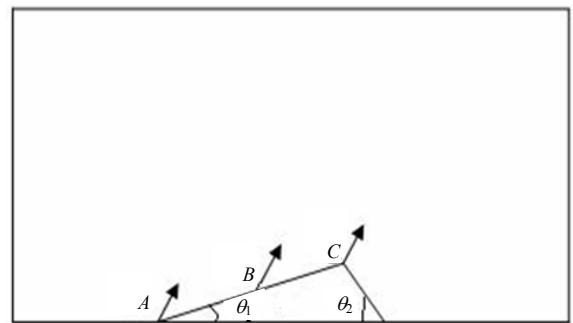


图1 坡面及集沙仪摆放位置示意图

Fig.1 Schematic drawing of the slope surface form

在实验测量中,我们建立坡面形状如图1所示,这是由于自然界复杂多样的沙丘其剖面形状大多是类似于三角形的,故我们选取三角形坡面来描述二维坡面地形。根据实际对于沙丘迎风坡处与背风坡处的相关角度的测量结果,本文选取迎风坡处角 $\theta_1=10^\circ$ ,背风坡处角 $\theta_2=30^\circ$ ,三角形坡面的高度为0.1m,长度为0.74m。且在迎风坡上A、B、C三个位置处进行输沙率与起沙率的测量,A点在坡脚处,B点在坡面中部,C点在坡顶处,他们之间水平距离为0.2835m,垂直距离为0.05m。

实验中所用的自然沙采于腾格里沙漠的西缘。实验时，混合沙粒粒径分布通过粒径分析仪测量得到，测量结果见图 2，为对数正态分布，均值为 0.2519mm。在数值模拟过程中采用沙粒粒径为平均粒径 0.2519mm。

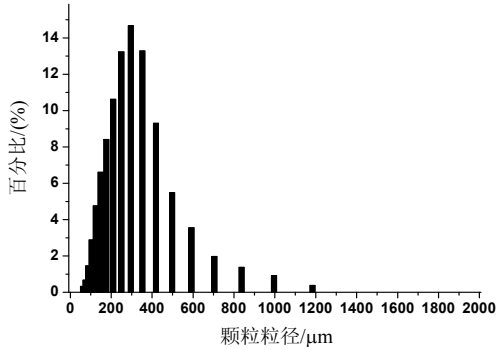


图 2 天然混合沙的粒径分布

Fig.2 Size distribution of the nature sand

为保证风沙流风洞实验与实际风沙流的风速廓线相似，无起沙的近地表干净气流以及起沙后的风沙边界层上部气流中的风速廓线均为对数分布。如图 3 所示。

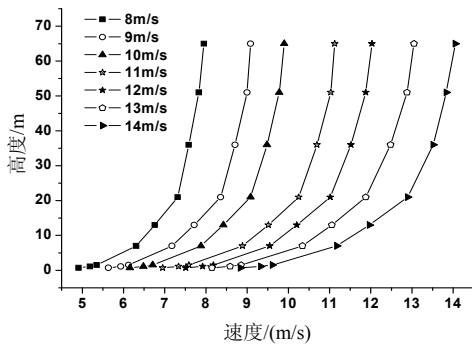


图 3 初始状态的风速廓线

Fig.3 Wind profiles at initial state in the wind tunnel

1.1 床面起沙率的实验测量

对于床面起沙率的测量，采用 PIV 测量技术，风洞实验布置如图 4。

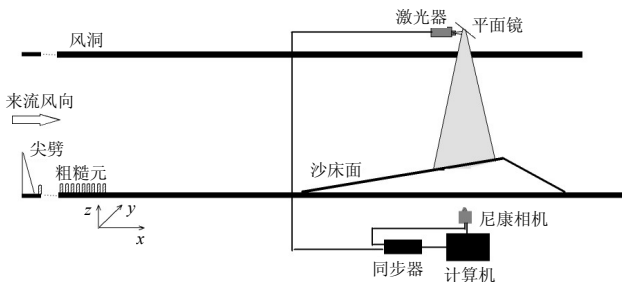


图 4 风洞 PIV 实验布置图

Fig.4 Schematic drawing of the experimental apparatus

利用 PIV 测量技术在风洞中测量床面起沙率，

应用互相关算法计算出颗粒的速度，然后通过两幅图像的时间关系得出位移，从而得到沙面起动的沙粒个数。利用互相关算法对数字图像进行处理，可以得到颗粒运动的一系列特征参数，如颗粒运动的水平速度分量  $u$ 、垂直速度分量  $w$ 、合速度  $V$ 、颗粒在各个方向上的位移等。其中垂直方向速度量可表示为：

$$w = \frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

这里， $w$  为在垂直方向上的速度， $\Delta t$  为拍摄的时间间隔，即可得到颗粒在垂直方向上的速度。

本试验测量沙面的起沙率。通过选定距离沙床面 5mm 处上的一个截面  $\Delta x$ ，测量和计算在这个截面以下的颗粒的垂直向上的速度分量，然后乘以两束激光的间隔时间就可以得到颗粒向上的位移  $y$ 。如果位移  $y > 5\text{mm}$ ，就认为越过了这一截面，这样就可统计出颗粒的数目  $n$ 。激光的宽度  $b$  可用曝光纸测量，于是可以得到床面的起沙率，即单位面积起砂颗粒数  $f$  为：

$$f = \frac{n}{\Delta x b} \quad (2)$$

为了保证减少实验结果的误差，可重复测量 40 次，然后取平均值。如图 5，得到坡面沙粒运动的 PIV 拍摄结果，通过统计得到坡面不同位置处的起沙率，如表 1 所示。

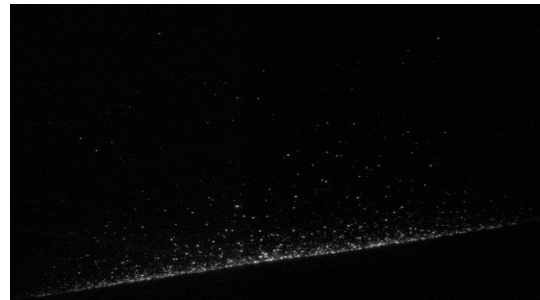


图 5 坡面沙粒运动 PIV 拍摄结果

Fig.5 Experimental photograph of the saltating sand on the slope surface

表 1 坡面不同位置起沙率实验结果

Table 1 The observation of sand grains lifted off sand bed per unit time and unit area at the different position of slope surface

位置	起沙率/(颗/(s·m <sup>2</sup> ))
坡底	2.1521×10 <sup>6</sup>
坡中	3.209×10 <sup>6</sup>
坡顶	6.037×10 <sup>6</sup>

1.2 床面输沙率的实验测量

在坡面不同位置即 A、B、C 三点采用立式集沙仪进行输沙率的测量，通过对收集的沙粒质量和相

应的采集时间进行测量,将每一集沙管收集的沙粒质量除以入口面积和实验持续时间,就可以得到集沙管中心处的单位面积单位时间的平均输沙率。

## 2 基本方程

### 2.1 沙粒跃移运动

本文计算沙粒跃移运动中,考虑了风场对沙粒的拖曳力以及重力对沙粒运动的影响,则沙粒运动微分方程的分量形式为<sup>[5-8]</sup>:

$$m\ddot{x} = -\frac{\rho\pi D^2}{8} \left[ \frac{24\nu}{D\sqrt{(\dot{x}-u)^2 + (\dot{y}-v)^2}} + \frac{6}{1 + \sqrt{\frac{D}{\nu\sqrt{(\dot{x}-u)^2 + (\dot{y}-v)^2}}}} + 0.4 \right] \times (\dot{x}-u)\sqrt{(\dot{x}-u)^2 + (\dot{y}-v)^2} \quad (3)$$

$$m\ddot{y} = -\frac{\rho\pi D^2}{8} \left[ \frac{24\nu}{D\sqrt{(\dot{x}-u)^2 + (\dot{y}-v)^2}} + \frac{6}{1 + \sqrt{\frac{D}{\nu\sqrt{(\dot{x}-u)^2 + (\dot{y}-v)^2}}}} + 0.4 \right] \times (\dot{y}-v)\sqrt{(\dot{x}-u)^2 + (\dot{y}-v)^2} - mg \quad (4)$$

其中:  $m$  为沙粒质量;  $x, y$  为沙粒坐标位置;  $g$  为重力加速度;  $D$  为沙粒直径;  $\rho$  为空气密度;  $\nu$  为空气的动力粘性系数;  $u, v$  分别为  $x$  方向、 $y$  方向的风速;  $\dot{x}, \dot{y}$  分别为沙粒在  $x$  方向、 $y$  方向上的速度分量。

初始条件:

$$t = 0, x = x_0, y = y_0, \dot{x} = u_0, \dot{y} = v_0 \quad (5)$$

其中:  $x_0, y_0$  为沙粒在  $x$  方向、 $y$  方向的起跳位置;  $u_0, v_0$  为沙粒在  $x$  方向、 $y$  方向的起跳初速度。

设在某一时刻,从床面不同  $x$  位置在单位面积沙床上在单位时间内起跳的沙粒数,即床面起沙率,为  $N_x$ ,沙粒的起跳初速度分布函数为  $f(v_0)$ ,则在任意时刻在坡面不同  $x$  位置在离床面某一高度  $[y, y + dy]$  中的沙粒数  $\bar{N}_x$  为<sup>[5-8]</sup>:

$$\bar{N}_x = \int_0^\infty N_x f(v_0) \left( \frac{1}{|\dot{y}_\uparrow(v_0)|} + \frac{1}{|\dot{y}_\downarrow(v_0)|} \right) dy dv_0 \quad (6)$$

其中:“ $\uparrow$ ”和“ $\downarrow$ ”分别表示沙粒处于跃移过程的上升阶段和下降阶段;“ $||$ ”为绝对值符号。则在坡面不同  $x$  位置对处于高度  $y$  处的单位体积风场的阻滞作用  $F_x(y, t)$  为:

$$F_x(y, t) = \int_0^\infty N_x m f(v_0) \left[ \frac{\ddot{x}_\uparrow}{|\dot{y}_\uparrow(v_0)|} + \frac{\ddot{x}_\downarrow}{|\dot{y}_\downarrow(v_0)|} \right] dv_0 \quad (7)$$

### 2.2 初速度分布函数

沙粒起跳的初速度分布函数是将微观研究和宏观研究联系起来的可能途径之一<sup>[15]</sup>。即在风沙运动微观研究的基础上,通过对沙粒起跳的速度分布进行一定的假设后,运用数理统计的方法并建立力学模型,就能得到风沙流中跃移沙粒的宏观特性,如跃移沙粒的浓度、速度和输沙率等沿高度的变化规律,进而获得在沙粒影响下跃移层内气流速度的分布与单宽输沙率等物理量<sup>[16]</sup>。

本文中采用初速度分布函数为黄宁<sup>[8]</sup>中的:

$$p(v) = (-0.247 + 0.366e^{u_* / 0.747})^{-1} \times \exp\left(-\frac{v}{-0.247 + 0.366e^{u_* / 0.747}}\right) \quad (8)$$

其中:  $v$  为沙粒起跳速度;  $u_*$  为摩阻速度,本文中摩阻速度  $u_*$  与轴线风速  $u_{in}$  的关系应用周又和等人<sup>[14]</sup>中的:

$$u_* = (u_{in} - 4.32337) / 11.49557 \quad (9)$$

其中,  $u_{in}$  为入口轴线风速。

### 2.3 风场基本方程

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (10)$$

$x$  动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (11)$$

$y$  动量方程:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (12)$$

边界条件:

- 1) 入口采用服从对数分布的速度边界条件。
- 2) 出口采用充分发展的出流边界条件。
- 3) 计算流域顶部和两侧采用对称边界条件。
- 4) 采用无滑移壁面边界条件。

对风场的计算:

1) 采用有限体积法,对守恒性方程在控制容积上离散得出离散化的方程。

2) 耦合的流速和压力求解采用 SIMPLE 算法。

3) 跃移沙粒对风场的阻滞作用附加到控制方程的广义源项  $S$  中,进行风沙的耦合运算。

4) 本文数值模拟及风洞实验中的摩阻风速为 0.5m/s。

2.4 计算流程

1) 采用有限体积法对守恒性控制方程(10, 11, 12)在控制容积上积分得到离散化方程, 并采用SIMPLE 算法求解耦合的流速和压力, 得到坡面地表下的初始稳态风场在坡面不同位置区域(1, 2, ..., j)的初始风速分布  $u_1^1(y)$  和  $v_1^1(y)$  (或  $u_i^j(y)$  和  $v_i^j(y)$ )。

2) 采用风洞实验得到的坡面对应位置区域(1, 2, ..., j)的床面起沙率  $s^1$  (或  $s^j$ ), 由式(8)计算起跳沙粒的初速度分布函数, 并将结果记为  $p^1(v)$  (或  $p^j(v)$ )。

3) 将  $u_1^1(y)$  和  $v_1^1(y)$  (或  $u_i^j(y)$  和  $v_i^j(y)$ ) 代入式(3)、式(4)计算各沙粒群在坡面对应位置区域的跃移轨道, 并将结果记为  $x_1^1(t)$  和  $y_1^1(t)$  (或  $x_i^j(t)$  和  $y_i^j(t)$ )。

4) 将  $s^1$ 、 $p^1(v)$ 、 $x_1^1(t)$  和  $y_1^1(t)$  (或  $s^j$ 、 $p^j(v)$ 、 $x_i^j(t)$  和  $y_i^j(t)$ ) 代入式(7)计算坡面对应位置区域不同高度沙粒对风的反作用力  $F_x^1(y)_1$  和  $F_y^1(y)_1$  (或  $F_x^i(y)_i$  和  $F_y^i(y)_i$ )。

5) 将  $F_x^1(y)_1$  (或  $F_x^i(y)_i$ ) 后计算受跃移沙粒修正后的风速廓线, 并重复步骤 3)~步骤 5)直到风速分布收敛为止得到  $u_{i+1}^j(y)$ 。

6) 再执行步骤 2)~步骤 5)计算在坡面不同位置区域(1, 2, ..., j)风速分布  $u_{i+1}^j(y)$ 。

3 结果与讨论

3.1 平坦床面以及坡面不同位置处输沙率实验结果

3.1.1 平坦床面及坡面不同位置处单宽输沙率实验结果

表 2 给出了在摩阻风速为 0.5m/s 时风洞试验得到的平坦地表以及坡面地表不同位置的单宽输沙率, 从表 2 中我们比较发现平坦床面上的单宽输沙率小于坡面上的单宽输沙率, 且随着坡面坡点位置的增高逐渐变大, 且变化也随之加快。坡脚处的单宽输沙率是平坦床面的 337%, 坡中的单宽输沙率相对于坡脚处增加了 23.5%, 坡顶的单宽输沙率相对于坡中处增加了 123%, 可以看出随着坡点位置的增高单宽输沙率逐渐变大, 而且变化也越来越快, 而形成这一现象与随着坡面坡点的增高床面起沙率逐渐增大有很大关系。地表影响着单宽输沙

率, 而在一定程度上单宽输沙率反映着风沙运动特性, 实际地表对于风沙运动有着至关重要的作用, 可见, 在研究风沙运动时不能忽略地形因素。

表 2 平坦床面与坡面不同位置单宽输沙率实验结果比较

Table 2 The observation of sand grains number flux at different positions of the slope surface and at the flat surface

位置	单宽输沙率/(kg/(m·s))
平坦床面	$4.7821542 \times 10^{-3}$
坡脚	$1.6116261 \times 10^{-2}$
坡中	$1.9903706 \times 10^{-2}$
坡顶	$4.4402923 \times 10^{-2}$

3.1.2 平坦床面及坡面不同位置处输沙率沿高度分布实验结果

图 6 给出了在摩阻风速为 0.5m/s 时风洞试验得到的平坦地表以及坡面地表不同位置处输沙率沿高度分布, 并且对实验结果进行了拟合, 图 6 中曲线即为拟合结果。从图 6 可以看出平坦床面输沙率在相同高度的值普遍小于坡面地表情况下输沙率, 坡面地表的输沙率将会沿着坡面坡点的增高而逐渐增大, 且变化也随之加快, 这是由于流场在坡面上速度得到了增强, 使得沿坡面坡点的增高起沙率逐渐变大, 起沙率的变大进而又影响了输沙率的变化。同时, 对距离床面 3cm 高度平坦床面上输沙率分布与坡脚位置输沙率分布比较发现坡脚的输沙率是平坦床面的 337%, 对距离床面 3cm 高度坡脚位置输沙率分布与坡中位置输沙率分布比较发现坡中的输沙率是坡脚的 124.2%, 对距离床面 3cm 高度坡中位置输沙率分布与坡顶位置输沙率分布比较发现坡顶的输沙率是坡中的 222.8%。并且, 对于实验测量结果进行曲线拟合发现, 在分布趋势上输沙率沿高度分布都服从指数分布, 但已不是简

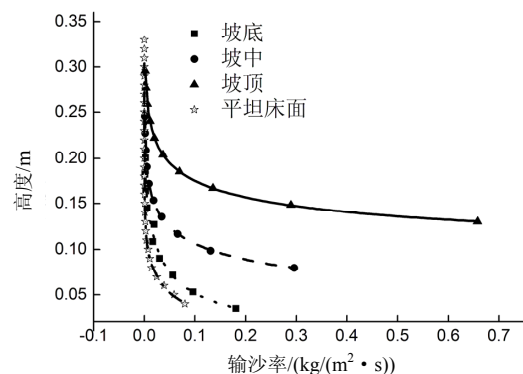


图 6 平坦床面以及坡面不同位置处的输沙率沿高度分布的实验结果

Fig.6 The observations of mass flux profile at different positions of the slope surface and at the flat surface

单指数分布,应用拟合曲线可以得到距离床面更近位置的输沙率结果:对贴近床面 $10^{-5}$  m处平坦床面上输沙率分布与坡脚位置输沙率分布比较发现坡脚的输沙率是平坦床面的313%,对贴近床面 $10^{-5}$  m处坡脚位置输沙率分布与坡中位置输沙率分布比较发现坡中的输沙率是坡脚的142.2%,对贴近床面 $10^{-5}$  m高度坡中位置输沙率分布与坡顶位置输沙率分布比较发现坡顶的输沙率是坡中的229%。

### 3.2 坡面不同位置处输沙率沿高度分布实验结果与数值模拟结果的比较

#### 3.2.1 平坦床面及坡面不同位置处单宽输沙率

##### 数值模拟结果

表3给出了在摩阻风速为0.5m/s时数值模拟得到的平坦地表以及坡面地表不同位置的单宽输沙率,从表3中发现平坦床面上的单宽输沙率小于坡面上的单宽输沙率,且随着坡面坡点位置的增高逐渐变大,且变化也随之加快,这与风洞实验得到的结论吻合,只是与表2中风洞实验结果相比本文数值模拟得到的单宽输沙率加快趋势更为明显。

表3 平坦床面与坡面不同位置单宽输沙率数值模拟结果比较

Table 3 The simulation of sand grain rate of grains number flux at different positions of slope surface and at the flat surface

位置	单宽输沙率/(kg/(m·s))
平坦床面	$6.7109293 \times 10^{-3}$
坡脚	$1.3356630 \times 10^{-2}$
坡中	$1.5278695 \times 10^{-2}$
坡顶	$8.7471098 \times 10^{-2}$

#### 3.2.2 平坦床面与坡面不同位置处输沙率沿高度分布实验结果与数值模拟结果的比较

图7~图9给出了在坡面不同位置处运用数值模拟方法与实验方法所得到的输沙率沿高度的分布的比较,从图7~图9中可以看出,由我们所提出的数值算法得到的坡面底部,中部以及顶部的输沙率沿高度分布与实验结果具有良好的吻合性,可以很好的模拟出坡面上各不同位置的输沙率沿高度分布情况。同时,从图7~图9中可以看出风沙跃移的输运主要集中于靠近床面处,这与在平坦地表情况下跃移运动有着相同的特性,且输沙率沿高度增大逐渐减小,但其分布函数不同。

图10给出了坡面不同位置处输沙率沿高度分布的数值模拟结果,通过图10可以直观的看出数值模拟结果也同样表征出了实验测量中输沙率是随着坡面坡点的增高而逐渐变大的特征,同时,随着坡点位置的增高输沙率沿高度的减小逐渐变快,

可见坡面地表对输沙率的分布有着明显的影响。对贴近床面 $10^{-5}$  m处平坦床面上输沙率分布与坡脚位置输沙率分布比较发现坡脚的输沙率是平坦床面的185.4%,对贴近床面 $10^{-5}$  m处坡脚位置输沙率分布与坡中位置输沙率分布比较发现坡中的

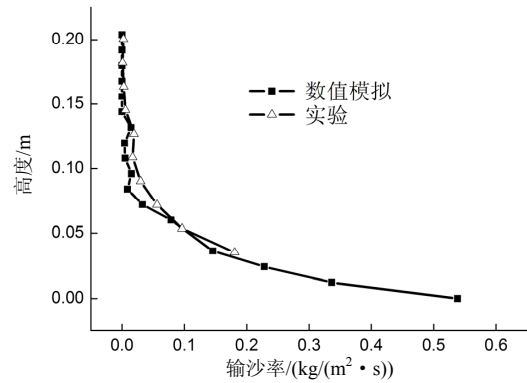


图7 坡脚输沙率数值模拟结果与实验结果的比较

Fig.7 The simulation and observation of the mass flux profile at the toe of the slope

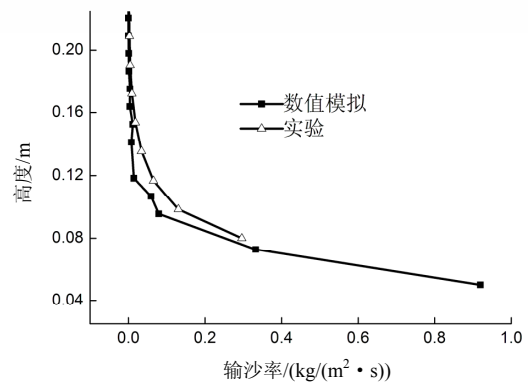


图8 坡中输沙率数值模拟结果与实验结果的比较

Fig.8 The simulation and observation of the mass flux profile at the middle of the slope

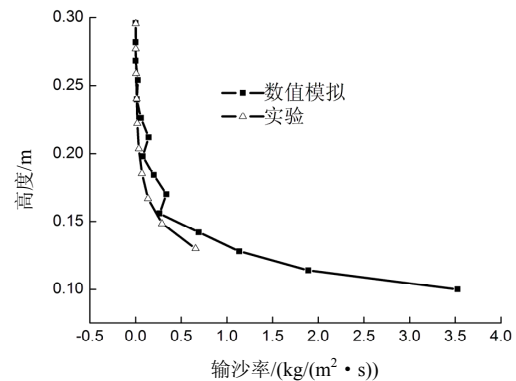


图9 坡顶输沙率数值模拟结果与实验结果的比较

Fig.9 The simulation and observation of the mass flux profile at the top of the slope

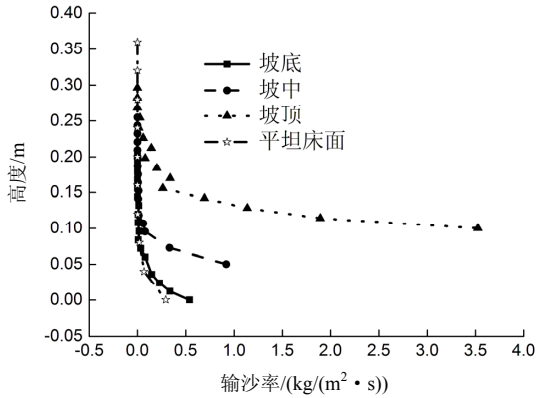


图 10 坡面不同位置处的输沙率数值模拟结果比较  
 Fig.10 The simulation of mass flux profile at different positions of the slope surface and at the flat surface

输沙率是坡脚的 135.4%，对贴近床面  $10^{-5}$  m 高度坡中位置输沙率分布与坡顶位置输沙率分布比较发现坡顶的输沙率是坡中的 434.7%。

对图 6 与图 10 以及表 2 与表 3 的分析比较，发现数值模拟的结果在定性上与实验结果相同，但在定量上仍然存在着一定的差异，由于在风洞实验中，床面形态并不是保持不变的。即使在实验初始时，对坡面沙床面进行相应的铺平，但是随着风沙流的运动，坡面将会有沙波纹产生，在一定程度上影响流场的变化，进而影响到沙粒的运动速度。实验中 PIV 测量起沙率由于在近床面沙粒浓度相对较高所得结果与实际存在误差，而我们在数值模拟过程中应用其作为重要初始参数，所以实验误差会相对影响数值模拟结果。同时集沙仪效率也对输沙率结果有所影响。这对风洞实验与数值模拟结果进行比较有着影响。当中这些都是实际实验当中必然会存在的，不断提高实验仪器的效率是必然的，同时，也希望通过数值模拟能够弥补实验的不足。

3.3 坡面不同位置有无考虑风-沙耦合风速比较

图 11~图 13 给出了在摩阻风速为 0.5m/s 时没有考虑风-沙耦合作用和考虑风-沙耦合作用两种情形下在坡面不同位置处风速沿高度的分布。分析所得结果发现，坡面地表上在不同坡点上风速沿高度分布不同，并且都不再服从平坦床面的对数分布。分析图 11，在坡脚位置距离床面 0.2m 高度处没有考虑风沙耦合时为 12.05m/s，考虑风沙耦合时风速为 8.12m/s，相对于没有考虑风沙耦合减小了 31.86%。分析图 12，在坡面中部位置距离床面 0.2m 高度处没有考虑风沙耦合时为 13.19m/s，比坡脚位置处距离床面相同高度位置的风速大，考虑风沙耦

合时风速为 8.19m/s，相对于没有考虑风沙耦合减小了 37.9%。分析图 13，在坡面中部位置距离床面 0.2m 高度处没有考虑风沙耦合时为 14.47m/s，比坡中位置处距离床面相同高度位置的风速大，考虑风沙耦合时风速为 11.09m/s，相对于没有考虑风沙耦合减小了 23.4%。从图 11~图 13 中可以看出，在风场中，由于坡面地形的作用使得风场得到了加强，并随着坡点位置的增高风场速度逐渐变大。同时，由于风-沙耦合作用使得在同一位置风速比不考虑耦合作用时小很多，在考虑了风沙耦合作用情形下随着坡点位置的增高风场速度也是逐渐变大，这说明风沙流计算模拟过程中风-沙耦合作用是不容忽视的因素，尤其是在复杂地表情况下。

图 14 给出了在没有沙粒运动时平坦床面以及坡面不同位置处风速沿高度的分布，从图 14 中可以看出，由于坡面地表的作用，随着坡点的增高风速逐渐得到加强，说明坡面地表对于风场有很大影响，进而影响了整个风沙流场。平坦床面与坡脚位

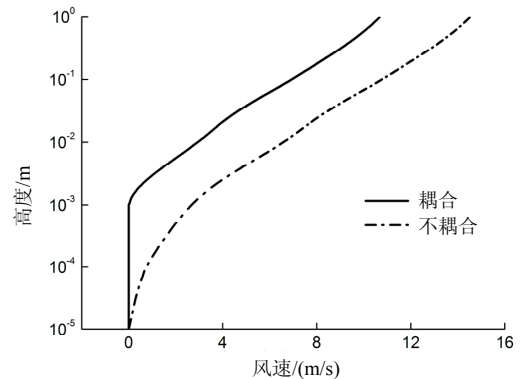


图 11 坡脚处有无考虑风-沙耦合时风速的比较  
 Fig.11 Comparison of the wind profile with and without coupling effects at the toe of the slope

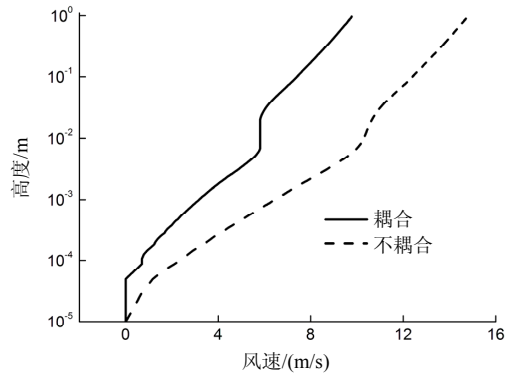


图 12 坡面中部有无考虑风-沙耦合时风速的比较  
 Fig.12 Comparison of the wind profile with and without coupling effects at the middle of the slope

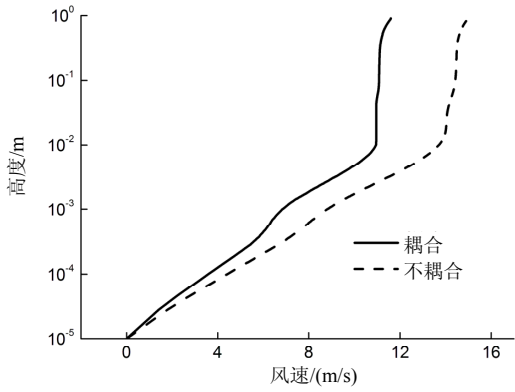


图 13 坡面顶部有无考虑风-沙耦合时风速的比较  
Fig.13 Comparison of the wind profile with and without coupling effects at the top of the slope

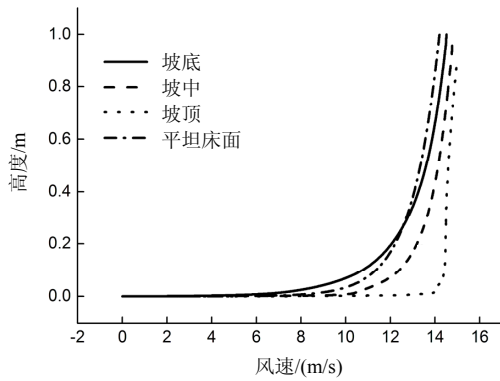


图 14 不考虑风沙耦合时平坦床面与坡面风速的比较  
Fig.14 Comparison of the wind profile without coupling effects at different positions of the slope surface and at the flat surface

置处的速度在距离床面 0.28m 处相同,同时,比较平坦床面以及坡面不同位置处的风速发现在低于距离床面 0.3m 位置以下速度差距相对较大。距离床面 0.1m 高度处平坦床面的速度为 11.36m/s,而同时距离床面相同高度坡脚、坡中、坡顶位置的速度分别为 10.77m/s、12.40m/s、14.42m/s。

图 15 给出了考虑风-沙耦合时平坦床面以及坡面不同位置处风速沿高度的分布,从图 15 中可以看出,在坡面底部、中部以及顶部的风速在有风-沙耦合作用时变化很大。同时,从图 15 中可以看出,在坡面地表上跃移层以上也变化较大,说明在坡面地表情况下风-沙耦合作用不仅对跃移层有所影响而且对跃移层以上也有很大影响。仔细分析发现,平坦床面、坡脚、坡中、坡顶等位置处的速度在距离床面 0.2m 以下依次增大,平坦床面、坡脚、坡中、坡顶等位置在距离床面 0.1m 高度处的速度分别为 6.34m/s、6.93m/s、7.41m/s、11.07m/s,相比于图 14 不考虑风沙耦合作用情况下平坦床面、

坡脚、坡中、坡顶位置在距离床面 0.1m 高度处的速度分别减少了 44.2%、35.7%、40.2%、23.2%,更能直观的体现出风沙耦合作用对于风场有着重要的影响,而在不同床面下其影响力是不同的。坡面地表情况下风沙耦合作用的总体影响相比于平坦床面要小一些,并且在坡面地表不同坡点其影响大小是不同的,这也提示在不同地形情况下沙粒对于风场的影响效应是不同的,坡顶较坡脚、坡中位置处的相对变化较小。

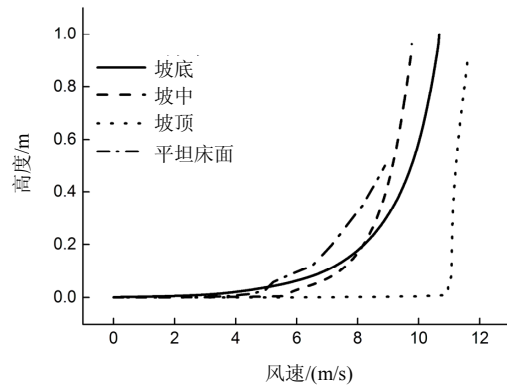


图 15 考虑风-沙耦合时平坦床面与坡面不同位置风速的比较

Fig.15 Comparison of the wind profile with coupling effects at different positions of the slope surface and at the flat surface

## 4 结论

本文建立了坡面地表下的风沙跃移运动模型,进行了在坡面地表下风沙运动的风洞实验,通过实验及数值模拟表明:相比于平坦床面,坡面地表情况下的单宽输沙率、输沙率沿高度分布、风速以及风沙耦合作用对风速的影响都有不同的变化;由于坡面地表的作用,随着坡点的增高,风场风速得到加强,坡点处起沙率及输沙率逐渐变大;在坡面不同坡点位置处风沙耦合作用的影响是不同的,相对于平坦床面风沙耦合作用的影响要小一些。采用我们所提出风沙运动数值模型,能够很好的模拟坡面地表下的风沙运动,得到坡面地表情况下风沙流场的相关特性。

同时,本文的计算结果也揭示出床面形态对于风沙跃移运动的影响,相对于平坦床面风沙流场分析坡面地表情况下风沙流场更能够获取有效真实的流场信息,而对表面流场有效信息的获取对于合理准确的预测野外实际情况下的风沙运动至关重要。因此,对坡面地表情况下的风沙流场的探讨是我们深入研究实际风沙流场发展过程的必经之路。



## 参考文献:

- [1] 张永明, 赵士洞. 全球荒漠化的现状、未来情景及防治对策[J]. 地球科学进展, 2008, 23(3): 306—311.  
Zhang Yongming, Zhao Shidong. Desertification: current state and trends, scenarios and response options [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(3): 306—311. (in Chinese)
- [2] 刘拓. 我国荒漠化防治现状及对策[J]. 发展研究, 2009 (3): 65—68.  
Liu Tuo. Present situation and control way of desertification in China [J]. Development Research, 2009(3): 65—68. (in Chinese)
- [3] Owen P R. Saltation of uniform grains in air [J]. Fluid Mech, 1964, 20: 225—242.
- [4] Ungar J, Haff P K. Steady state saltation in air [J]. Sedimentology, 1987, 34: 289—299.
- [5] Anderson R S, Haff P K. Simulation of eolian saltation [J]. Science, 1988, 241: 820—823.
- [6] McEwan I K, Willetts B B. Adaptation of the near-surface wind to the development of sand transport [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 252: 99—115.
- [7] Shao Y, Li A. Numerical modeling of saltation in atmospheric surface layer [J]. Boundary Layer Meteorology, 1999, 91(2): 199—225.
- [8] Huang N, Zheng X J, Zhou Y H, R S Van Pelt. The simulation of wind-blown sand movement and probability density function of lify-offvelocities of sand particles [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111, D20201, doi:10.1029/2005JD006559.
- [9] Zheng Xiaojing, Huang Ning, Zhou Youhe. The effect of electrostatic force on the evolution of sand saltation cloud [J]. The European Physical Journal E, 2006, 19: 129—138.
- [10] Yue G, Zheng X J. Electric field in wind-blown sand flux with thermal diffusion [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111, doi:10.1029/2005JD006972Iversen J D.
- [11] Bauer B O. Contemporary research in aeolian geomorphology [J]. Geomorphology, 2009, 105: 1—5.
- [12] Kok J F, Renno N O. A comprehensive numerical model of steady-state saltation [J]. Journal of Geophysical research, 2009, 114: D17204.
- [13] Kawamura R. Study on sand movement by wind [R]. TokEyo: Reports of Physical Science Research Institute of Tokyo University, 1951, 5: 95—112.
- [14] Zhou Y H, Guo X, Zheng X J. Experimental measurement of wind-sand flux and sand transport for naturally mixed sands [J]. Physical Review E, 2002, 66: 021305.
- [15] Shao Y, Raupach M R, Leys J F. A model for predicting Aeolian sand drift entrainment on scales from paddock to region [J]. Australian Journal of Soil Research, 1996, 34(3): 309—342.
- [16] 董飞, 刘大有, 贺大良. 风沙运动的研究进展和发展趋势[J]. 力学进展, 1995, 25(3): 368—391.  
Dong Fei, Liu Dayou, He Daliang. Advances and tendency in understanding of wind-blown sand motion [J]. Advances in Mechanics, 1995, 25(3): 368—391. (in Chinese)

(上接第 189 页)

- [7] Logvinovich G V. Hydrodynamics of flows with free boundaries [M]. Translated from the Russian (NASA-TT-T-658), US Department of Commerce, Washington D C, 1972: 103—133.
- [8] Semenenko V N. Artificial supercavitation. physics and calculation. RTO AVT/VKI special course: supercavitating flows, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genese, Belgium, 2001.
- [9] Vasin A D. The principle of independence of the cavity sections expansion (Logvinovich Principle) as the basis for investigation on cavitation flows [C]// Masure I B, Tulin M P. RTO AVT/VKI special course: supercavitating flows, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genese, Belgium, 2001.
- [10] 于开平, 蒋增辉. 超空泡形状计算及相关试验研究[J]. 飞航导弹, 2005(12): 15—22.  
Yu Kaiping, Jiang Zenghui. Supercavity shape computation and experimental research [J]. Winged Missile Journal, 2005(12): 15—22. (in Chinese)
- [11] Vasin A D, Paryshev E V. Immersion of a cylinder in a fluid through a cylindrical free surface [J]. Fluid Dynamics, 2001, 36(2): 169—177.
- [12] 冯光, 颜开. 超空泡航行体水下弹道的数值模拟[J]. 船舶力学, 2005, 9(2): 1—8.  
Feng Guang, Yan Kai. Numerical calculation of underwater trajectory of supercavitating bodies [J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(2): 1—8. (in Chinese)
- [13] Savchenko Yu N. Control of supercavitation flow and stability of supercavitating motion of bodies [C]// Masure I B, Tulin M P. RTO AVT/VKI special course: supercavitating flows, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genese, Belgium, 2001.
- [14] Hassan K Khalil. 非线性系统[M]. 第三版. 朱义胜, 董辉, 李作洲, 等. 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
Hassan K Khalil. Nonlinear systems [M]. 3rd ed. Translated by Zhu Yisheng, Dong Hui, Li Zuo Zhou, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)