

蒋缠文,董治宝,罗万银,等.基于原位风沙流观测的广冲击角的溅射函数构建[J].中国沙漠,2024,44(5):254-260.

基于原位风沙流观测的广冲击角的溅射函数构建

蒋缠文^{1,2},董治宝²,罗万银³,钱广强³,张正偲²,逯军峰³,王晓艳¹

(1.渭南师范学院 环境与生命科学院/陕西省河流湿地生态与环境重点实验室,陕西 渭南 714000; 2.陕西师范大学 地理科学与旅游学院,陕西 西安 710119; 3.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000)

摘要: 风沙流中沙粒与床面的相互作用机理是风沙物理学研究的关键问题。由于沙粒运动的复杂性,数值模拟的研究结果通常与实际情况存在较大差异,因此,以实验手段得到的击溅函数对于理解粒-床碰撞的物理过程具有重要意义。基于饱和风沙流内气流对碰撞过程的影响可以忽略不计的共识,学者们通过大量的无风碰撞实验进行击溅函数研究。然而,由于测量技术的限制,典型冲击角度(10°)下的粒-床碰撞过程的实测数据很少。鉴于数值模拟和无风碰撞实验都表明击溅函数对冲击角度较为敏感,基于高速摄影技术在风洞内获得了松散沙床表面大量冲击角在 10° 左右的粒-床碰撞过程,并结合前人沙粒离心发射器(冲击角 $20^\circ\sim 50^\circ$)的实验结果,构建了涵盖广泛冲击角度的溅射函数,这些函数能够适用于前人不同实验条件的风洞实验结果,这对未来的风沙物理学研究具有重要意义。

关键词: 击溅函数; 跃移运动; 风洞实验; 粒-床碰撞过程; 高速摄影技术

文章编号: 1000-694X(2024)05-254-07

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00122

中图分类号: X169

文献标志码: A

0 引言

Bagnold^[1]认为跃移是沙粒输运的主要方式。跃移颗粒碰撞床面是颗粒与床面之间的关键相互作用^[1-7]。这些相互作用通常用击溅函数描述碰撞前参数(入射颗粒的速度和角度)与碰撞后参数(溅射颗粒的数量以及溅射和反弹颗粒的速度和角度)之间的关系^[8]。理论模型和实验研究均表明,击溅函数对冲击角度较为敏感。风沙流内,由于床面上方气流的作用,沙粒在平坦表面上的冲击角度约为 10° ^[9-12]。然而,目前为止,涉及此典型冲击角度的粒-床碰撞过程的实测数据很少。主要是由于风沙流内近床面的沙粒浓度较高,在测量技术上存在困难。

由于碰撞过程发生在近地表风沙边界层内,一般认为饱和风沙流内气流对碰撞过程的影响可以忽略不计^[9,13]。许多学者通过使用发射颗粒的装置在无风条件下进行粒-床碰撞实验来构建击溅函数^[14-18]。最典型的发射装置是发射枪和离心发射

器。然而,发射枪只适于发射远大于自然沙粒径的替代材料($d>4\text{ mm}$),当使用该装置发射自然沙粒($d\approx 0.25\text{ mm}$)时,枪管中产生的干扰气流会影响实验结果的准确性^[14-16]。由于击溅函数对材料的密度和杨氏模量(可变形性)非常敏感,替代材料的发射枪实验不能很好地反映自然沙输运的特征。离心发射器可以在不产生干扰气流的情况下发射自然沙粒,但冲击角度很难控制在 20° 以下^[17-18]。由于击溅函数对冲击角度同样敏感,离心发射器实验结果外推得到的沙粒在典型冲击角度(10°)下的击溅函数难以使人信服。

本文针对离心发射器实验的不足,基于高速摄影技术记录了风沙环境风洞内大量冲击角度在 10° 左右的跃移颗粒与松散床面的粒-床碰撞过程。结合Chen等^[17]离心发射器实验结果构建了涵盖广泛冲击角度的溅射函数,这些函数与离心发射器实验结果外推得出的冲击角度为 10° 时的击溅函数存在差异,并且能够适用于前人不同实验条件的风洞实验结果,这对未来的风沙物理学研究具有重要意义。

收稿日期:2024-08-12; 改回日期:2024-09-12

资助项目:国家自然科学基金项目(41901012,41971014,41930640);中国博士后科学基金项目(2019M663615);中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室开放课题(KLDD-2021-005);陕西省教育厅重点实验室项目(22JS017)

作者简介:蒋缠文(1984—),男,宁夏盐池人,副教授,研究方向为风沙物理学。E-mail: jiangchanwen@126.com

1 实验与方法

1.1 风洞实验

本实验在中国科学院西北生态资源环境研究院的总长为 10.5 m、轴线风速为 1.0~35.0 m·s⁻¹ 的直流吹气式风沙环境风洞内进行。在测试段(4 m 长, 0.4 m 高, 0.4 m 宽)铺 1 cm 厚干燥沙样, 并用木尺轻

轻刮平。实验沙样与对应风况如表 1 所列。使用高速摄像机记录碰撞过程, 分辨率为 800 像素×600 像素, 拍摄频率为每秒 5 000 帧, 图像放大率为每像素 75 μm, 相机每次运行能连续记录 5.6 s(约 28 000 张序列图像)。光源为波长 532 nm 的绿色连续激光, 激光通过凹凸透镜转换成片状激光照射在沙面上。每次拍摄前等待 50~60 s 使气流达到稳定。实验布置如图 1 所示。

表 1 实验条件
Table 1 Experiment conditions

| 实验组 | 沙样 | 颗粒粒径 <i>d</i> /mm | 剪切风速 <i>u_τ</i> /(m·s ⁻¹) | 最小临界起动 风速 <i>u_{τi}</i> /(m·s ⁻¹) | <i>u_τ</i> / <i>u_{τi}</i> | <i>N_{s0}</i> | <i>N_{s1}</i> | <i>N_{s2}</i> | <i>N_{s3}</i> | <i>N_{s4}</i> |
|----------------|-----|----------------------|--|--|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| G ₁ | 自然沙 | 0.1~0.12 | 0.25 | 0.14 | 1.84 | 65 | 19 | 1 | 0 | 0 |
| G ₂ | 石英沙 | 0.1~0.2 | 0.26 | 0.16 | 1.63 | 79 | 23 | 7 | 3 | 1 |
| G ₃ | 石英沙 | 0.2~0.3 | 0.28 | 0.20 | 1.40 | 52 | 23 | 3 | 1 | 1 |
| G ₄ | 石英沙 | 0.3~0.4 | 0.31 | 0.24 | 1.29 | 36 | 13 | 1 | 0 | 0 |

注: $u_{\tau i}=0.08(\rho g d)^{0.5}$, ρ 为沙样密度, $\rho \approx 2\,650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, g 为重力加速度, d 为颗粒粒径。 N_{s0} 、 N_{s1} 、 N_{s2} 、 N_{s3} 、 N_{s4} 分别为没有引起溅射粒子, 以及引起 1、2、3、4 个溅射粒子的粒-床碰撞事件数。

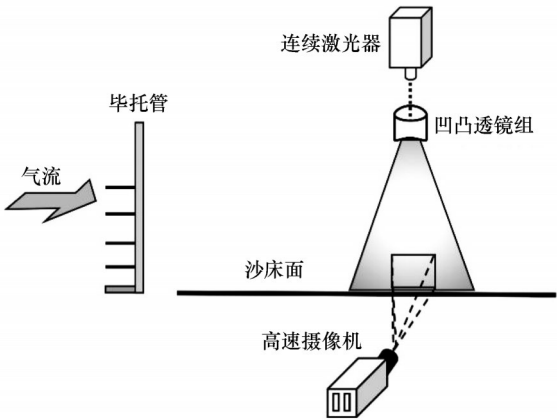
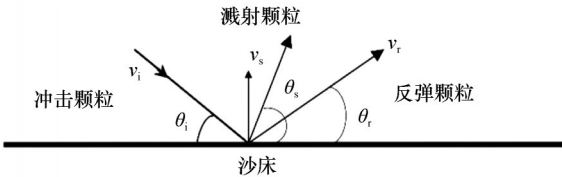


图 1 风洞实验布置
Fig.1 Layout of the wind tunnel experiment

本文的主要目的是在 Chen 等^[17]的 0.15~0.3 mm 自然沙的离心发射器实验结果的基础上构建稳态风沙流冲击角度在 10°左右的击溅函数。我们统计了颗粒粒径在 0.1~0.4 mm 的 4 组沙样共计 328 次粒-床碰撞过程, 其中碰撞过程中没有引起溅射粒子, 以及引起 1、2、3、4 个溅射粒子的碰撞分别共计 232、78、12、4、2 次。实验组 G₁ 的自然沙样采集自腾格里沙漠, 实验组 G₂~G₄ 采用与典型自然沙密度($\rho \approx 2\,650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)相近的磨圆度较好的人造石英沙。4 个实验组的起跳速度数据前期已用于研究稳态风沙流沙粒起跳速度概率分布模型^[19]。

1.2 参数计算

碰撞过程示意图如图 2 所示。对于起跳粒子(反弹和溅射), 我们只重构其部分上升段的数字轨迹。对于冲击粒子, 我们同样只恢复部分下降段的轨迹。因此, 由于侧向运动导致上升段或降落段轨迹在成像上并不完整的粒子, 不影响其起跳或冲击速度的计算。床面的反射光作用使得床面附近粒子与背景之间的对比度较低。为获取床面附近粒子更准确的数字轨迹信息, 原始图像需经过两个处理步骤, 即粒子识别(第一步)和粒子匹配(第二步)。在粒子识别过程中, 我们识别出处于气流中的粒子, 即不属于固定床面的那些粒子。随后, 粒子匹配涉及在不同连续图像中找到特定粒子的对应位置。通过粒子识别和粒子匹配, 我们实现了粒子轨迹的数字化重建。我们之前的研究^[20]对此方法有详细阐述, 这里只对图像处理流程做简要介



注: v_i 和 θ_i 分别是入射速度和入射角度。 v_r 和 θ_r 分别是反弹速度和反弹角度。 v_s 和 θ_s 分别是溅射速度和溅射角度

图 2 粒-床碰撞过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of the particle-bed collision process

绍。①提取描绘完整碰撞过程的所有图像,并为它们分配连续的阿拉伯数字表号。②通过相邻两张图像相减去除固定床面。③从每张图像中提取所有粒子的质心坐标,使用这些坐标构建相应的质心(单个像素)图像,并将这些质心图像叠加形成轨迹图像。④在质心叠加图像中,使用与背景色对比度较大的线条勾勒出每个粒子部分上升段(对于反弹粒子和溅射粒子)或下降段(对于冲击粒子)轨迹,注意各线条不要相交,同时用背景色填充残留部分。⑤参考前面获得的所有质心坐标,获取每条轨迹线中包含的每个质心的坐标和图像编号。然后,使用此信息计算粒子的速度和角度。

沙粒旋转、形状不规则或部分偏离激光照射面等因素造成跃移粒子表面的不规则反射,质心坐标往往与颗粒实际位置有偏差。对于冲击粒子,以最大测量高度处的位置作为坐标原点。相反,对于溅射和反弹粒子,以离开床面时的位置作为坐标原点。因此,我们基于粒子在时间 t 时的水平位移(x)和竖直位移(y),使用多项式拟合来确定粒子沿其轨迹的瞬时速度。

$$x_t = a_1 t^2 + a_2 t \quad (1)$$

$$y_t = b_1 t^2 + b_2 t \quad (2)$$

$$y_t = c_1 x_t^2 + c_2 x_t, \quad c_1 < 0 \quad (3)$$

式中: a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 表示回归系数。随后,冲击颗粒的速度(v_i)和角度(θ_i)以及不同高度处的起跳粒子(反弹和溅射)的起跳速度(v_L)和(θ_L)可以表示为:

$$v_i = \sqrt{(2a_1 t_i + a_2)^2 + (2b_1 t_i + b_2)^2} \quad (4)$$

$$v_L = \sqrt{(2a_1 t_L + a_2)^2 + (2b_1 t_L + b_2)^2} \quad (5)$$

$$\theta_i = \text{atan}(2c_1 x(t_i) + c_2) \quad (6)$$

$$\theta_L = \text{atan}(2c_1 x(t_L) + c_2) \quad (7)$$

式中: $t_i = \frac{\sqrt{b_2^2 + 4b_1(H_{\max} - 0.5d)} - b_2}{2b_1}$,表示冲击粒子从最大测量点移动到床面所需的时间; $t_L = \frac{\sqrt{b_2^2 + 4b_1(H - 0.5d)} - b_2}{2b_1}$,表示起跳粒子的质心从床面移动到床面上方某个测量高度 H 所需的时间;

H_{\max} 表示起跳粒子在床面上方的最大测量高度。在序列图像中,竖直位置随时间下降的粒子被识别为冲击粒子,而竖直位置随时间上升的粒子被识别为起跳粒子。此外,通过肉眼观察碰撞过程,将起跳粒子分为反弹粒子和溅射粒子。判断依据主要基

于以下3点进行综合考虑:①粒子反光特性的微观差异(反弹颗粒的成像特征更接近入射粒子);②一般情况下,反弹粒子的速度明显大于溅射粒子的速度;③反弹粒子的反弹点更接近入射粒子的冲击点。

综上所述,通过对粒-床碰撞过程进行数字化重建,可以获得冲击粒子和起跳粒子在 $H=0.5d$ (起跳点或冲击点)处的速度和角度信息。

2 击溅函数

我们使用高速摄影技术在风沙环境风洞中的松散平坦床面上共获得跃移颗粒(粒径 $0.1 \sim 0.4 \text{ mm}$) 328次粒-床碰撞过程,其中引起溅射的碰撞有96次(表1)。考虑研究结果可比性,使用 \sqrt{gd} 将碰撞过程中涉及到的相关速度参数进行标准化处理(v_i/\sqrt{gd} , v_r/\sqrt{gd} , v_s/\sqrt{gd}),其中 g 为重力加速度, d 为颗粒粒径。将表1中4个不同粒径组的实验结果进行整合,得到本次风洞实验全部328次碰撞过程的冲击角度和速度分布(图3)。分布区间个数 k 由 Sturges 方程($k=1+3.3 \lg n$, n 为样本量)进行估算。

由图3A可知,本实验全部碰撞过程的冲击角度很好地服从正态分布($R^2=0.97$),主要分布区间为 $5^\circ \sim 15^\circ$,均值约为 9.2° ,标准差约为 3.1° 。而图3B表明标准化冲击速度很好地服从对数正态分布($R^2=0.98$),主要分布区间为 $10 \sim 100$,均值约为38,标准差约为24。对于跃移运动,图3A显示的冲击角度变化范围较窄,为了使研究结果具有统计意义,按标准化冲击速度将全部碰撞过程划分为等数量的3个实验组(分别为109、109、110次碰撞),将引起溅射的碰撞过程划分为等数量的2个实验组(每组48次碰撞)。全部碰撞过程分析反弹颗粒特征,以引起溅射的碰撞过程分析溅射颗粒特征(表2、表3)。

一般认为,饱和风沙流内气流对发生于平坦松散床面的粒-床碰撞过程的影响可以忽略不计,而在风沙流内获得大量碰撞过程数据在技术上存在困难。我们的风洞实验结果和Chen等^[17]的离心发射器实验结果可以实现互补。我们的实验结果以较低的冲击角度区间对离心发射器实验结果进行收敛,而离心发射器实验结果又在较高的冲击角度区间对我们的风洞实验结果进行收敛。因此,我们将表2和表3的统计数据与Chen等^[17]研究中的表1和表2的各9组离心发射器统计数据结合,使用Ta-

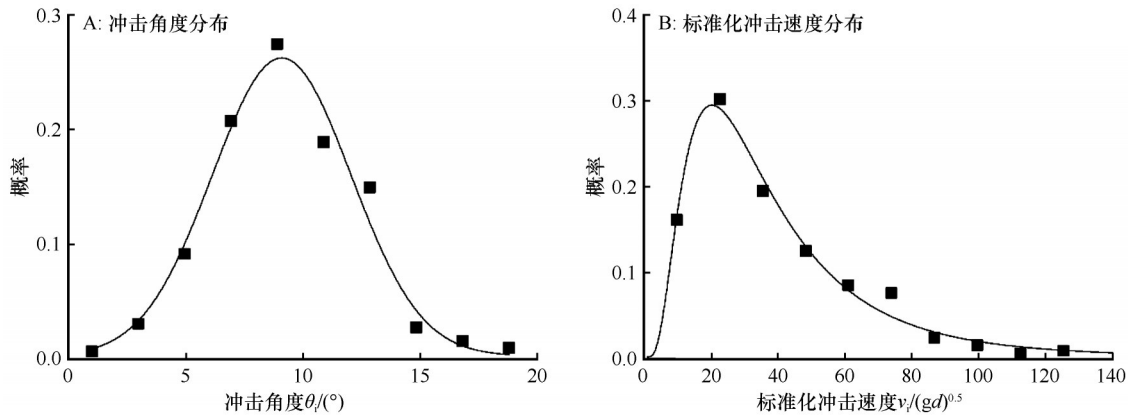


图3 碰撞过程的冲击参数概率分布

Fig.3 Probability distribution of impact parameters in the collision process. A shows distribution of impact angles , and B shows distribution of standardized impact velocities

表 2 全部碰撞过程的碰撞参数统计值

Table 2 Statistical values of collision parameters in all collision processes

| 组号 | 冲击角度/(°) | | 标准化冲击速度 | | 恢复系数 | | 反弹角度/(°) | |
|----|----------|------|---------|-------|------|------|----------|-------|
| | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 |
| 1 | 10.53 | 3.06 | 16.30 | 4.65 | 0.69 | 0.26 | 25.27 | 17.16 |
| 2 | 9.07 | 3.04 | 31.89 | 5.85 | 0.63 | 0.24 | 23.46 | 26.65 |
| 3 | 8.03 | 2.51 | 65.63 | 19.42 | 0.63 | 0.19 | 27.38 | 31.57 |

表 3 引起溅射的碰撞过程的碰撞参数统计

Table 3 Statistical values of collision parameters in collision processes generated splash particles

| 组号 | 冲击角度/(°) | | 标准化冲击速度 | | 标准化溅射速度 | | 溅射角度/(°) | | 溅射颗粒数 | |
|----|----------|------|---------|-------|---------|------|----------|-------|-------|------|
| | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 |
| 1 | 10.09 | 2.41 | 33.28 | 9.26 | 6.55 | 5.31 | 26.75 | 22.66 | 1.08 | 0.35 |
| 2 | 8.63 | 2.49 | 74.56 | 21.41 | 9.59 | 5.57 | 31.28 | 22.19 | 1.46 | 0.80 |

bleCurve3D 软件对恢复系数 $CoR(v_r/v_i)$ 、反弹角度 (θ_r) 、溅射速度 (v_s) 、溅射颗粒数 (N_s) 和溅射角度 (θ_s) 与冲击颗粒的速度和角度 (v_i, θ_i) 的关系进行拟合，得到拟合方程：

$$CoR = 1.1086 - 0.2366 \ln \theta_i + \frac{2.0376}{v_i / \sqrt{gd}} \tag{8}$$
$$R^2 = 0.9773$$

$$\theta_r^{-1} = 0.0556 - 0.0058 \sqrt{\theta_i} + 3.0196 \times 10^{-9} \left(\frac{v_i}{\sqrt{gd}} \right)^3 \tag{9}$$
$$R^2 = 0.9163$$

$$\left(\frac{v_s}{\sqrt{gd}} \right)^{-1} = 0.2359 - \frac{2.0517}{\theta_i^{1.5}} - 0.0007 \left(\frac{v_i}{\sqrt{gd}} \right) \tag{10}$$
$$R^2 = 0.9724$$

$$N_s = 0.7391 - 9671.8238 \cdot \exp(-\theta_i) + 0.0038 \left(\frac{v_i}{\sqrt{gd}} \right)^{1.5} \tag{11}$$
$$R^2 = 0.9144$$

$$\theta_s = 67.5092 - \frac{2502.9124}{\theta_i^2} - 16875.782 \left(\frac{v_i}{\sqrt{gd}} \right)^{-2} \tag{12}$$
$$R^2 = 0.9609$$

由式(8)~(12)可见,较低冲击角度(<20°)的风洞实验和较高冲击角度的离心发射器实验结果(>20°)可以结合起来,共同构建稳态风沙流跃移沙粒涵盖广泛冲击角度的溅射函数。为了说明我们的实验结果对离心发射器实验结果收敛的意义,我们将典型冲击角度(10°)代入式(8)~(12)以及Chen等^[17]研究的拟合式(6)~(9)进行对比,对比图如图4所示。

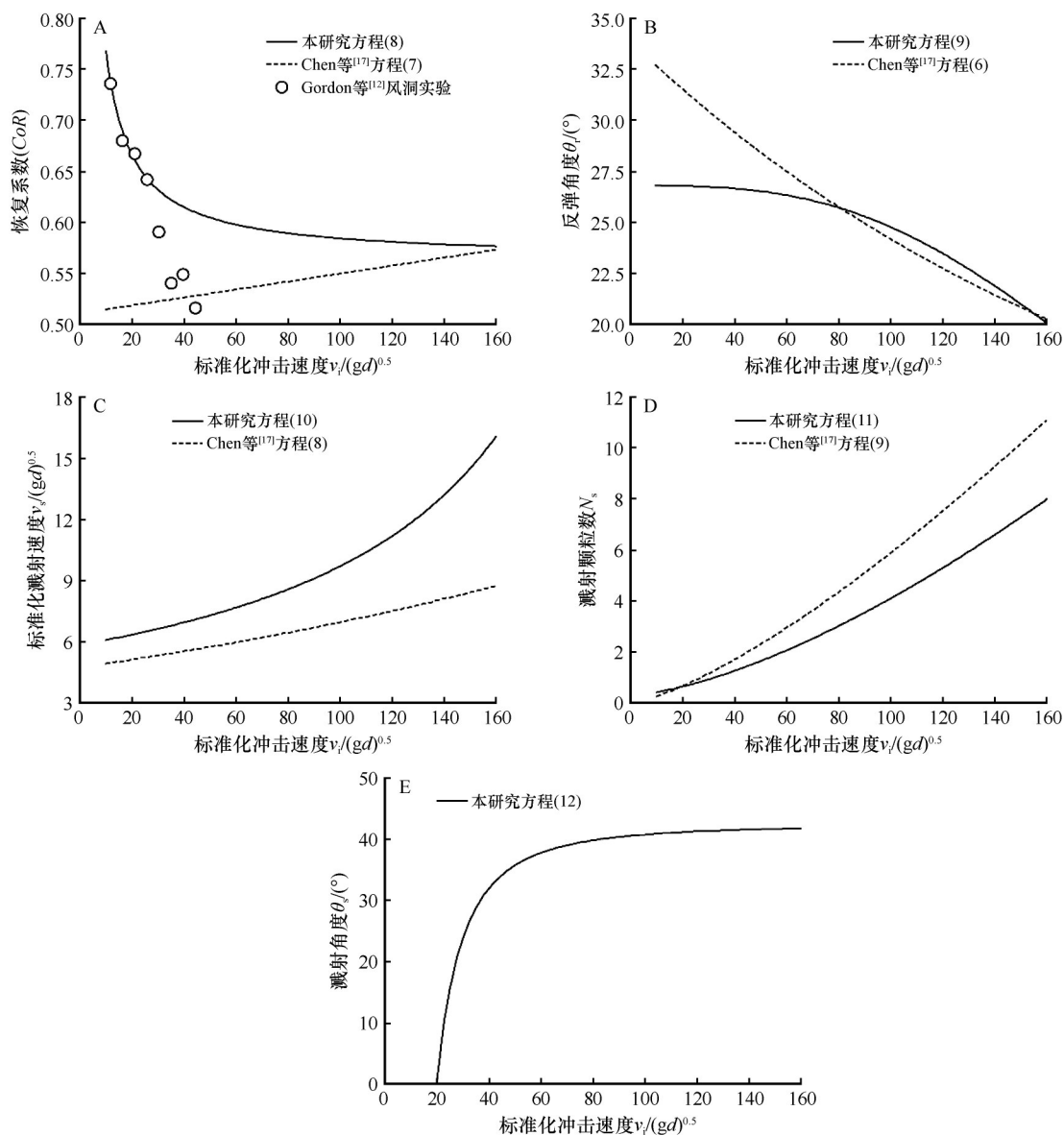


图4 冲击角度为 10° 时本研究得到的击溅函数与Chen等^[17]的击溅函数比较

Fig.4 Comparison of the splash functions obtained in this study with that of Chen *et al.*^[17] when the impact angle is 10°

由图4A~D可知,当冲击角度为典型的风沙流冲击角度时(10°),我们结合离心发射器构建的沙粒涵盖广泛冲击角度的溅射函数与单独使用离心发射器的外推结果存在差异,尤其是作为关键碰撞参数的恢复系数 CoR 差异明显(图4A)。然而我们的 CoR 表达式却可以很好地适用于Gordon等^[12]采用粒径为0.29 mm的自然沙在松散床面的风洞实验结果(平均冲击角度为 9.5°)。Gordon等的结果在标准化冲击速度大于20时与我们的结果出现偏差的主要原因可能是由于随着冲击速度增大,床面颗粒浓度增加,获取粒-床碰撞过程的难度增大,统计量相应减少,造成统计误差。

值得指出的是,Chen等^[17]的离心发射器实验取

得的溅射角度没有建立起拟合方程,但加入我们的风洞实验数据后,溅射角度趋近于 40° ,可以由式(12)进行表示,冲击角度为 10° 时的溅射角度与冲击速度关系如图4E所示。

3 结论

针对自然沙尤其是饱和风沙流内跃移沙粒的粒-床碰撞过程研究的不足,我们基于高速摄影技术通过风洞实验对粒径0.1~0.4 mm自然沙共328次粒-床碰撞过程进行数字化重构。这些碰撞过程的冲击角度很好地服从正态分布,分布区间在 $0^\circ \sim 20^\circ$,均值约为 $9.2^\circ \pm 3.1^\circ$ 。因此,这些数据很好地对Chen等^[17]较大冲击角度($>20^\circ$)的自然沙离心发射

器实验进行补充。

通过将本研究的风洞试验数据与离心发射器实验获得的1 024次碰撞数据进行结合,使用Table-Curve3D软件获得了恢复系数 $CoR(v_r/v_i)$ 、反弹角度 (θ_r) 、溅射速度 (v_s) 、溅射颗粒数 (N_s) 和溅射角度 (θ_s) 与冲击颗粒的速度和角度 (v_i, θ_i) 以及颗粒粒径 d 的关系方程。当冲击角度为典型的风沙流冲击角度时(10°),这些方程与单独使用离心发射器实验的外推结果存在差异,尤其是关键参数 CoR 差异明显。而本研究的 CoR 方程可以适用于前人不同实验条件下的风洞实验结果,表明了本文以低冲击角度($<20^\circ$)的实验结果对离心发射器实验结果进行修正的必要性,这一修正对风沙物理学研究具有重要意义。

需要指出的是,我们构建的击溅关系方程,即式(8)~(12),是以前人的普遍共识为前提,即饱和风沙流内气流对粒-床碰撞过程的影响可以忽略不计。至于风沙流内较大角度的击溅函数是否与离心发射器实验结果相近还需后续研究进行验证。

参考文献:

- [1] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Sand Dunes[M]. New York, USA: William Morrow, 1941.
- [2] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: nature of soil movement by wind[J]. Soil Science, 1945, 60: 305–320.
- [3] Owen P R. Saltation of uniform grains in air[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1964, 20: 225–242.
- [4] Neuman C M, Nickling W G. Momentum extraction with saltation: implications for experimental evaluation of wind profile parameters[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1994, 68: 35–50.
- [5] 张正偲, 潘凯佳, 张焱, 等. 中国西北戈壁区沙尘暴过程中近地层风沙运动特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2): 130–138.
- [6] 张正偲, 潘凯佳, 梁爱民, 等. 戈壁沙尘释放过程与机理研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(9): 891–900.
- [7] 郑晓静, 王萍. 风沙流中沙粒随机运动的数值模拟研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 184–188.
- [8] Ungar J E, Haff P K. Steady state saltation in air[J]. Sedimentology, 1987, 34(2): 289–299.
- [9] Anderson R S, Haff P K. Wind modification and bed response during saltation of sand in air[J]. Acta Mechanica, 1991, 1: 21–51.
- [10] Dong Z B, Liu X P, Li F, et al. Impact-entrainment relationship in a saltating cloud[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27(6): 641–658.
- [11] Cheng H, Zou X Y, Zhang C L. Probability distribution functions for the initial liftoff velocities of saltating sand grains in air[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: D22205.
- [12] Gordon M, Neuman C M. A comparison of collisions of saltating grains with loose and consolidated silt surfaces[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(F4): F04015.
- [13] Anderson R S, Haff P K. Simulation of eolian saltation[J]. Science, 1988, 241(4867): 820–823.
- [14] Rioual F, Valance A, Bideau D. Experimental study of the collision process of a grain on a two-dimensional granular bed[J]. Physical Review E, 2000, 62(2): 2450–2459.
- [15] Rioual F, Valance A, Bideau D. Collision process of a bead on a two-dimensional bead packing: importance of the inter-granular contacts[J]. Europhysics Letters, 2003, 61(2): 194–200.
- [16] Beladjine D, Ammi M, Oger L, et al. Collision process between an incident bead and a three-dimensional granular packing[J]. Physical Review E, 2007, 75(6): 61305.
- [17] Chen Y, Zhang J, Huang N, et al. An experimental study on splash functions of natural sand-bed collision[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 121(14): 7226–7235.
- [18] Zhang C, Huang N, Dun H C. Experimental study on sand/bed collision over the gobi surface[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022, 127: JD035766.
- [19] 蒋缠文, 王晓艳. 稳态风沙流沙粒起跳速度概率分布模型[J]. 干旱区研究, 2023, 40(9): 1382–1390.
- [20] Jiang C W, Parteli E J, Dong Z B, et al. Wind-tunnel experiments of aeolian sand transport reveal a bimodal probability distribution functions for the particle lift-off velocities[J]. Cate-na, 2022, 217: 106496.

Constructing splash functions with a wide impact angle based on in-situ observation of aeolian sand flow

Jiang Chanwen^{1,2}, Dong Zhibao², Luo Wanyin³, Qian Guangqiang³,
Zhang Zhengcai², Lu Junfeng³, Wang Xiaoyan¹

(1.College of Environment and Life Sciences / Shaanxi Key Laboratory of River Wetland Ecology and Environment, Weinan Normal University, Weinan 714000, Shaanxi, China; 2.College of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 3.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The interaction mechanism between sand particles and the bed surface in aeolian sand flow constitutes a key issue in aeolian physics research. Owing to the complexity of sand particle movement, the research results from numerical simulation typically deviate significantly from the actual situation. Consequently, the splash functions obtained through experimental means holds great significance for understanding the physical process of particle-bed collision. Based on the consensus that the influence of airflow in saturated aeolian sand flow on the collision process can be neglected, scholars conduct splash functions research by means of a large number of windless collision experiments. However, due to limitations in measurement technology, there are scarce measured data of the particle-bed collision process under the typical impact angle of 10° . Considering that both numerical simulation and windless collision experiments indicate that the splash functions are sensitive to the impact angle, a large number of particle-bed collision processes with an impact angle around 10° on the surface of a loose sand bed are obtained in a wind tunnel by utilizing high-speed photography technology. Combined with the experimental results of predecessors' sand grain centrifugal launcher (with an impact angle ranging from 20° to 50°), the splash functions covering a wide range of impact angles are constructed. These functions can be applied to the wind tunnel experiment results of predecessors under different experimental conditions, which is of great significance for future research in aeolian physics.

Key words: splash functions; saltation movement; wind tunnel experiment; particle-bed collision process; high-speed photography technology