孙钰博,张泓欣,王正师,等.基于离散元法的沙粒冲击沙尘混合表面的动力学过程研究[J].中国沙漠,2026,46(5):314-324.

基于离散元法的沙粒冲击沙尘混合表面的动力学过程研究

孙钰博[ab],张泓欣[ab],王正师[ab],贾淑明[bc]

(西北农林科技大学 a.资源环境学院,b.水土保持与荒漠化整治全国重点实验室,c.水土保持科学与工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:粒-床碰撞(击溅)过程是连接微观沙粒运动与宏观风沙运动的关键桥梁,现有的纯沙粒击溅函数能否直接应用于沙漠-黄土过渡带的沙尘混合物击溅过程有待进一步研究。本文采用离散元法构建了三维沙尘混合床面离散动力学模型,模拟再现了沙粒冲击混合床面的动力学过程,定量分析了含沙量(70%~100%)对击溅特征的影响规律,并探究了溅起沙粒及其占比的演变规律。结果显示:(1)溅起沙粒占比随含沙量的增长呈线性增长,存在含沙量为80%的临界值,超过该值时溅起沙粒占比大于50%;(2)相比纯沙粒,沙尘混合物的反弹角度明显增大,增大幅度可达56%,同时溅起角度亦有一定程度的增大,可达19%;(3)在已有纯沙粒击溅函数模型基础上,基于本模拟研究结果构建了考虑含沙量的改进击溅函数。

关键词:沙尘混合物;击溅过程;离散元法;含沙量;改进击溅函数

文章编号:1000-694X(2026)05-314-11 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00014

中图分类号:P467 **文献标志码**:A

0 引言

黄土高原受独特的丘陵沟壑地貌及强烈的人类活动的共同影响,成为全球土壤侵蚀的严重区域[1-4]。自西北沙漠向东南方向过渡,地表沉积物中沙粒含量逐渐降低,粉尘比例相应上升,形成典型的沙漠-黄土过渡带。该过渡带不仅是生态脆弱区,也是沙漠化与土壤侵蚀交叉存在的典型区域[5-7]。目前对该区域的研究集中于宏观风蚀特征[8-9],而对沙尘混合物表面的风沙运动过程、特别是沙粒跃移中的粒-床碰撞机制研究较少。这一关键过程包括流体起动、颗粒轨迹、粒-床碰撞及风场反馈4个阶段[10],其中粒-床碰撞(击溅过程)指跃移沙粒由于重力作用下落而冲击床面、导致自身反弹并溅起沙床表面其他颗粒的过程,涉及沙粒反弹、能量传递及床面颗粒溅射等复杂动力学行为,是连接微观颗粒运动与宏观风沙流的关键桥梁[11]。

众多学者通过实验、理论建模和数值模拟对击溅过程进行深入研究,并将击溅过程的参数统计结果作为风沙流模拟的输入参数,实现了从颗粒尺度到风沙流尺度的跨尺度模拟。实验研究方面,目前主要通过风洞实验及无风条件下的碰撞实验,采用非自然沙颗粒与自然沙进行对比。然而,由于风沙流中跃移层沙粒浓度较高,现有技术较难以精确观测床面沙粒的运动信息;同时替代材料的发射枪实验难以准确反映自然沙输运的特征,且自然床面的复杂地形在实验中难以完全复现[12-19]。在理论建模方面,学者们提出的粒-床碰撞模型将这一复杂过程简化为3个圆盘之间的碰撞互动,从理论上推导出颗粒的反弹、起跳速度分布的解析表达式[20-21]。然而,此类模型在表征颗粒间复杂接触力学行为方面存在局限,其预测精度受简化假设与实际环境空间异质性的制约,因而理论建模难以描述接近真实接触状态的粒-床碰撞过程。为更精确地模拟并理解粒-床碰撞过程中涉及的多颗粒间的相互作用及能量传递机制,学者们引入离散元法(Direct Ele-

收稿日期:2025-09-24; **改回日期**:2026-01-30

资助项目:国家自然科学基金项目(11902341,12102364);中国博士后科学基金项目(2023M742852,2021M702679)

作者简介:孙钰博(2001—),女,河北邢台人,硕士研究生,主要研究风沙物理过程。E-mail:yubo@nwafu.edu.cn

通信作者:贾淑明(E-mail:jiashm2020@nwafu.edu.cn)

ment Method，DEM）这一直接精确模拟方法，该方法假定碰撞为弹性碰撞，能够有效模拟多颗粒相互接触的多体碰撞特征，并在定量层面更为准确地获取沙粒的反弹速度、溅射速度及其分布规律[10,16,22-29]。

现有基于离散元法对于击溅过程的研究主要针对纯沙粒地表（如沙漠环境）[16,25,30-32]及戈壁地表[33-34]。然而，在长期风沙运移作用下形成的沙漠-黄土过渡带，其地表物质通常呈现沙尘混合状态。目前，关于此类混合物的击溅行为研究较为匮乏，现有研究难以表征其在击溅过程中的动力学特征（如溅射颗粒分布、能量耗散机制等），亦未能建立适用于混合沙尘地表的击溅函数（对粒-床碰撞过程进行参数化后得到的函数关系式）。此外，沙粒与尘粒在粒径、密度及动力学特性上存在显著差异，适用于纯沙地表的击溅规律能否直接推广至沙尘混合体系，目前尚不明确。因此，精确模拟沙尘混合物的击溅过程，对于深入理解过渡带的风沙输运机制及粉尘释放效应至关重要。需特别指出的是，沙漠-黄土过渡带地表常形成几厘米至几毫米的土壤结皮，根据是否有生物参与土壤的结皮过程，常划分为生物结皮或物理结皮，其地表特性较为复杂[35-36]，其在防治风蚀、稳定沙面、成土过程和土壤水文等方面中发挥着重要作用[37-38]。本研究旨在首先厘清颗粒组分（沙/尘比例）本身对击溅过程的核心影响机制，聚焦于松散、无黏性的理想沙尘混合床面，暂未考虑结皮带来的黏结力影响。

本研究基于DEM构建了反映真实沙尘混合床面颗粒间接触力学状态的三维离散动力学模型，模拟再现了沙粒冲击不同含沙量的混合沙尘床面的动力学过程；与纯沙粒状态的击溅过程及其特征进行对比分析，定量揭示了击溅特征随冲击速度和含沙量的演变规律；在此基础上，构建了一个考虑含沙量影响的、适用于沙尘混合地表的击溅函数。

1　模型与方法

1.1　颗粒运动离散元模型

本研究采用DEM作为数值模拟方法，其在风沙运动研究、尤其是击溅过程模拟中已被证实具有良好的适用性[28,34,39]。该方法基于牛顿第二定律更新颗粒的速度和位置。

$$m_p\frac{\mathrm{d}\vec{v_p}}{\mathrm{d}t}=\vec{F_C}+\vec{G} \tag{1}$$

$$I\frac{\mathrm{d}\vec{\omega_p}}{\mathrm{d}t}=\vec{R_p} \tag{2}$$

式中：$\vec{v_p}$和$\vec{\omega_p}$分别是粒子的平动速度和角速度；t是时间；$\vec{G}=m\vec{g}$是重力加速度为g的重力；$m_p=\rho_pV_p$代表颗粒的质量；ρ_p和$V_p=\pi d_p^3/6$分别是粒子的密度和体积；d_p是粒子的直径；$\vec{F_C}=\sum^n\vec{F_i}$是$n$个接触力构成的合力（$\vec{F_i}$是第$i$个接触点的接触力）；$I=m_pd_p^2/10$是转动惯量；$\vec{R_p}$是作用在粒子上的力矩。

本研究运用线性弹簧-阻尼模型来模拟颗粒间的接触，该模型在风沙运动数值模拟中表现出良好的接触行为表征能力[14,22,30,40-41]，颗粒i、j碰撞过程中的法向接触力$\vec{F}_{n,ij}$和切向接触力$\vec{F}_{s,ij}$可表示为：

$$\vec{F}_{n,ij}=\begin{cases}-k_n\delta_{ij}\vec{n}-\beta_n\vec{v}_n & \delta_{n,ij}\geqslant 0\\ 0 & \delta_{n,ij}<0\end{cases} \tag{3}$$

$$\vec{F}_{s,ij}=\begin{cases}-\mu\left|\vec{F}_{n,ij}\right|t & \left|\vec{F}_{s,ij}\right|\geqslant\mu\left|\vec{F}_{n,ij}\right|\\ k_sr_{s,ij}-\beta_s\dot{r}_{ext,ij} & \left|\vec{F}_{s,ij}\right|\leqslant\mu\left|\vec{F}_{n,ij}\right|\delta_{s,ij}\geqslant 0\\ 0 & \delta_{s,ij}<0\end{cases} \tag{4}$$

式中：δ_{ij}为两颗粒碰撞时的重叠量；k_n和k_s为法向和切向弹簧刚度系数；β_n和β_s为法向和切向阻尼系数，常数β_n与恢复系数ε有关；$\vec{n}$为接触点处的法向单位矢量；$\vec{v_n}$为碰撞过程的法向相对速度。β_n与$\vec{v_n}$的乘积表示颗粒在碰撞过程中的阻尼力，负号表示阻尼力和相对运动方向相反，阻尼力和接触的非弹性部分相关。$r_{s,ij}$是接触点处的切向矢量，可以根据接触点处的切向相对速度得到，$\dot{r}_{ext,ij}$是颗粒接触点处切向的相对变形速率。

1.2　模拟设置与步骤

本文数值模拟区域为$L_x\times L_y\times L_z=40d_p\times 20d_p\times 130d_p$（$d_p$为沙颗粒的粒径）。边界条件设置如下：沿流向（$x$）和展向（$y$）采用周期性边界，沿垂向（$z$）底部设为固壁边界，顶部设为开放边界（图1，以含沙量90%工况为例）。

本研究的关键模拟参数，包括沙尘含量比值与尘粒粒径，均严格依据沙漠-黄土过渡带地表沉积物的实测资料设定。沙尘含量比值（70%~100%）的选取基于对沙漠-黄土过渡带地表质地的调研数据[5]，旨在系统表征地表物质从沙粒绝对主导向尘粒显著影响的典型过渡谱系，本文选取范围完整覆

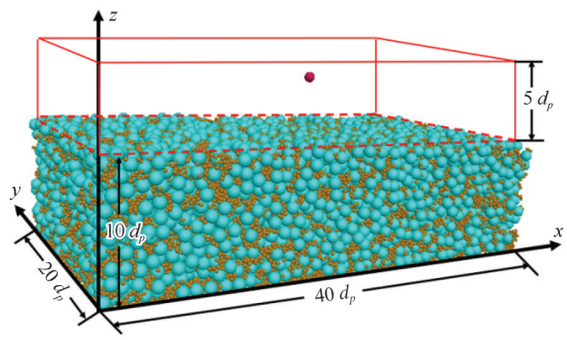


图1 DEM模拟的计算域和初始位置(蓝色颗粒为沙颗粒,棕色颗粒为尘颗粒,红色颗粒为冲击粒子)

Fig.1 Computational domain and initial configuration in DEM simulations (blue particles: sand grains; brown particles: soil particles; red particle: impact particle)

盖了由沙漠前缘至典型过渡带的实际沙粒含量(80%~90%)。尘粒粒径取为60 μm,该取值具有明确的物理机制与实地观测依据:风蚀物理学理论表明,该粒径范围的颗粒是跃移沙粒击溅进入气流的主要粗粉尘组分[42];同时,针对沙漠-黄土过渡带的南北样带研究及中国西北部巴丹吉林沙漠等重要尘源区的粒度分析证实,沙丘沉积物中普遍存在此量级的细颗粒,构成实际粉尘释放的物质基础[43-44]。上述参数的协同设定,确保了本研究对沙尘混合物击溅行为的模拟兼具区域代表性与物理合理性。

计算流程如图2所示。

床面构建:首先根据不同质量比(95%~70%,以5%为一个梯度)计算12 000个沙颗粒对应的尘颗粒数,沙尘颗粒在计算域内随机生成,颗粒在重力作用下自由沉降、随机排列成沉积床面,当所有颗粒的最大速度满足 $V_{p\max} \leqslant 1.0 \times 10^{-4}$ m·s^{-1}(无量纲速度 $V_{p\max}/\sqrt{gd_p}$ 为 2.3×10^{-3},$g = 9.8$ m·s^{-2})时,判定该床面达到稳定状态。

床面平整:由于颗粒自由沉降的随机性,初始生成的床面具有不平整特征。获得平整床面,将垂向位置高于10倍粒径的颗粒予以移除,该步骤重复执行至少两次,以确保生成平坦的沉积床面。床面生成后,相关参数设置与已有文献一致,如表1所示。

方案设计:在床面上方高于5个粒径范围内($L_z < h \leqslant 5d_p$)随机生成冲击颗粒(图1虚线框内),然后设置不同的冲击速度来进行击溅过程模拟,具体方案如表2所示。

判据设定:冲击完成后,通过追踪每个粒子的

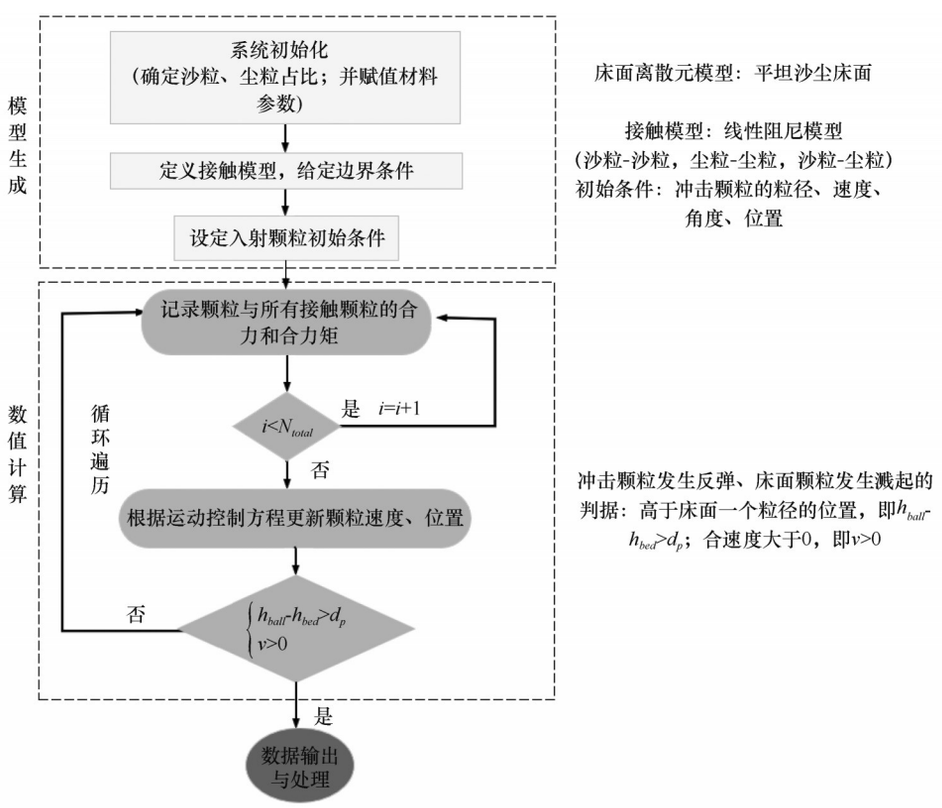


图2 计算流程

Fig.2 Flow chart of the simulation

表 1　DEM 模拟粒–床碰撞的参数[28,45]

Table 1　Parameters of particle-bed collision applied in DEM simulation[28,45]

参数	描述	沙粒	尘粒
η/%	含沙量	70/75/80/85/90/95	
d/μm	颗粒粒径	200	60
g/(m·s^{-2})	重力加速度	9.8	
ρ_p/(kg·m^{-3})	颗粒密度	2650	2 000
ρ_f/(kg·m^{-3})	空气密度	1.225	
k^*	法向与切向刚度比	3	2
κ	卡门常数	0.4	
μ	摩擦系数	0.3	0.5
E/(N· m^{-2})	杨氏模量	1.0×10^6	1.0×10^4

表 2　模拟方案设计

Table 2　Design of simulation scheme

	沙粒占比	冲击速度 /(m·s^{-1})	冲击角度 /(°)
纯沙	100%	1~8	11.5
沙土混合物	70%/75%/80%/85%/90%/95%		

运动轨迹，以沙/尘粒运动轨迹最高点是否高于床面一个沙粒粒径作为判断颗粒是否离开床面的判据[46]。

数据追踪：对轨迹最高点高于床面一个沙粒粒径的颗粒进行统计，并记录反弹颗粒与溅起颗粒的相关信息（为降低冲击位置及冲击次数随机性对结果的影响，每个速度工况均重复模拟 10 次），直至无颗粒起跳，模拟结束。

2　结果

2.1　模型验证

为了验证本研究所采用模拟程序的可靠性，本文参考 Haff 等[47]在应用离散元法时所设定的参数，该套参数已被后续多位学者[18,23,26,31,48]的研究沿用。在平坦地表下，模拟入射角为 11.5°时纯沙粒床面的击溅过程，并对击溅过程中运动特征随冲击速度的变化趋势与已有研究结果进行对比（每种工况均重复模拟 10 次，结果取平均值）。

图 3 中的粒–床碰撞物理量的模拟结果与已有研究[23,25-26,31,48]在定性上一致。定量模拟结果略低于已有研究结果，但更接近实验观测值。溅起角度介于 Anderson 等[23]和 Zhou[31]的结果，与陈有兴[26]的模拟结果更接近。值得注意的是，所有模拟结果均高于实验观测值，并与 Rice 等[48]的实验数据吻合度较高。平均溅起颗粒数与学者 Zhou[31]的模拟结果更接近。尽管在定量上与文献存在一定差异，但这些差异均在合理范围内，并与部分已有模拟结果吻合良好。上述定量差异主要源于床面颗粒的粒径、溅射统计的标准不同以及床面排列的差异。综上，本文所建立的模型在模拟颗粒击溅过程方面表现出良好的可靠性与有效性，为后续开展沙尘混合床面击溅过程的研究奠定了可信的基础。

2.2　沙尘混合物击溅过程的溅起颗粒数特性分布

为探究尘粒的加入对颗粒击溅过程中平均溅起颗粒数的影响，本节针对冲击角度 11.5°、含沙量为 70%~100%（以 5% 为一个梯度）的床面进行分析，给出了在不同冲击速度 v_{im}、含沙量 η 下的平均溅起颗粒数 $\overline{N}_{ej}$、溅起沙粒占比 $N_{ej-sand}/N_{ej}$ 的演变规律，分别如图 4、5 所示。

图 4 展示了平均溅起颗粒数 $\overline{N}_{ej}$ 随冲击速度 v_{im}、含沙量 η 的分布关系（溅起颗粒在 1 m·s^{-1} 时表现为不溅起颗粒，故从 2 m·s^{-1} 开始展开分析）。溅起颗粒数随冲击速度的增长呈线性增长趋势；而含沙量较低（≤75%）时，溅起颗粒数量显著增加，与较高含沙量（75%~95%）相比增幅超过 50%。低速（2~3 m·s^{-1}）时，沙尘混合物与纯沙粒的平均溅起颗粒数均较少；高速（4~8 m·s^{-1}）时，则明显上升，在含沙量为 75% 时增幅可达 170%。此外，溅起颗粒数量与含沙量呈现明显的负相关趋势，即随着含沙量的降低，平均溅起颗粒数整体呈近似单调递增趋势，并于含沙量为 75% 时达到最大值。基于上述分析，本文提出平均溅起颗粒数 $\overline{N}_{ej}$ 随冲击速度 v_{im} 的击溅函数表达式（以含沙量 95% 为例）：

$$\overline{N}_{ej} = \xi v_{im} + b \tag{5}$$

常数 ξ 随含沙量 η 的函数表达式为 $\xi = A\eta + B$，其中 A=−0.02，B=2.3，b=0.03。

图 5 展示了溅起沙粒占比 $N_{ej-sand}/N_{ej}$ 随含沙量 η 的分布关系。不同含沙量对击溅过程中溅起沙粒占比变化显著。溅起沙粒占比与含沙量呈线性正相关，且当含沙量超过临界值 80% 时，溅起颗粒中沙粒占比高于 50%。此外，溅起沙粒占比随冲击速度增大而逐渐降低。基于上述分析，本文提出溅起

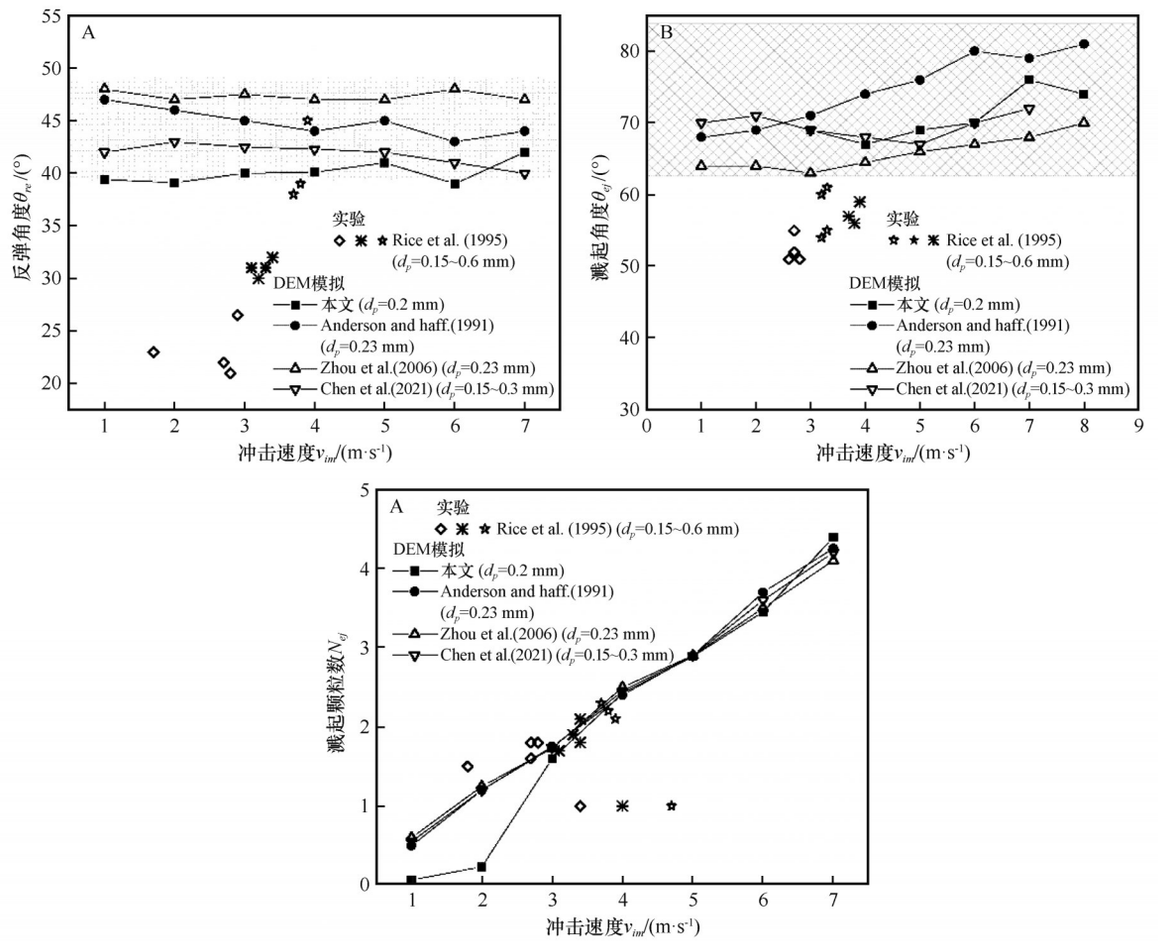


图3 冲击角度为11.5°时，粒-床碰撞物理量反弹角度θ_{re}、溅起角度θ_{ej}、平均溅起颗粒数$\overline{N}_{ej}$随冲击速度的本文结果与已有实验[48]和模拟[23,25-26,31]结果的对比

Fig.3 Comparison of the present results with previous experimental[48] and numerical[23,25-26,31] results for rebound angle θ_{re}, ejection angle θ_{ej}, mean number of ejected particles $\overline{N}_{ej}$ as a function of impact velocity at an impact angle of 11.5°

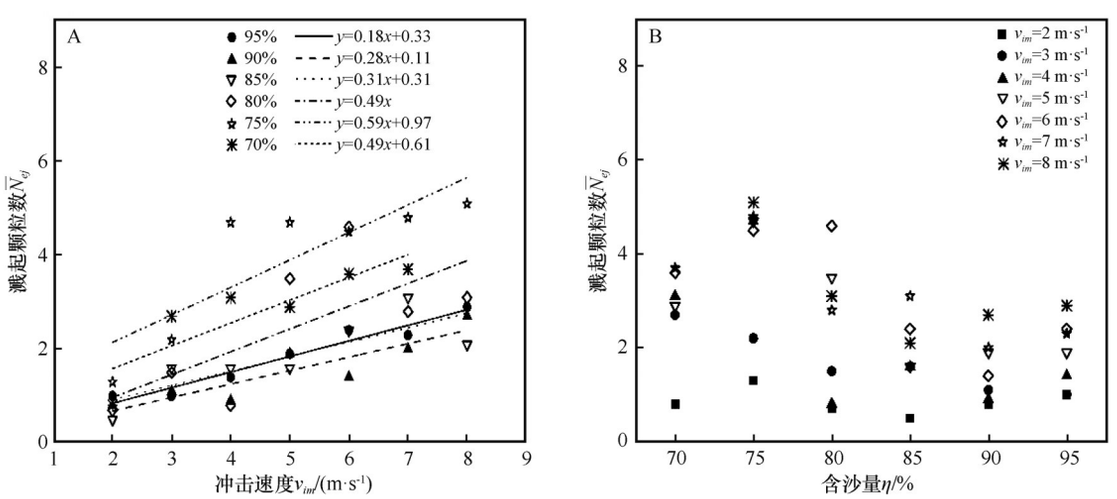


图4 平均溅起颗粒数随$\overline{N}_{ej}$冲击速度v_{im}的分布；含沙量η的分布

Fig.4 Distribution of the average number of ejected particles $\overline{N}_{ej}$ with impact velocity v_{im} and sand content η

沙粒占比$N_{ej-sand}/N_{ej}$随含沙量η的击溅函数表达式（以冲击速度5 m·s^{-1}为例）：

$$N_{ej-sand}/N_{ej} = \xi_1\eta + b_1 \quad (6)$$

常数ξ_1随冲击速度v_{im}的函数表达式为ξ_1 =

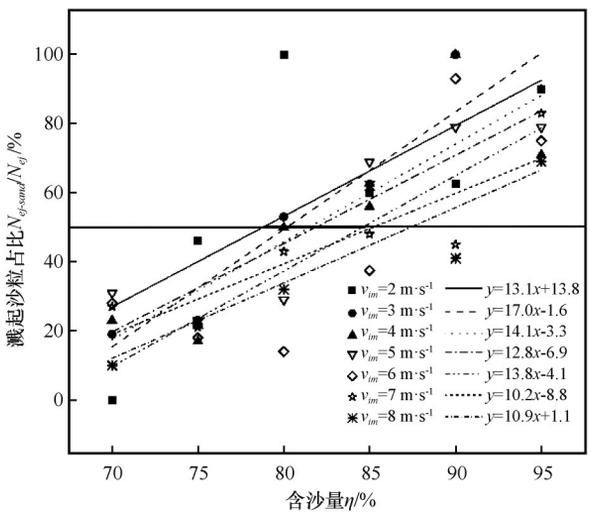


图 5　溅起沙粒占比$N_{ej-sand}/N_{ej}$随含沙量η的变化

Fig.5　Variation of the proportion of ejected sand particles $N_{ej-sand}/N_{ej}$ with sand contentη

$A_1v_{im}^3 + B_1v_{im}^2 + C_1v_{im} + D_1$，其中$A_1$=0.1，$B_1$=−2.2，$C_1$=10.3，$D_1$=0.8，$b_1$=6.9。

2.3　沙尘混合物击溅过程的速度分布

为了探究反弹颗粒、溅起颗粒在不同含沙量床面与纯沙床面的运动状态（速度）的不同，本节给出了在不同冲击速度v_{im}、含沙量η下的反弹速度v_{re}、溅起速度v_{ej}的演变规律（图 6、7）。

沙尘混合物与纯沙粒的v_{re}均随v_{im}的增长呈线性增长趋势；其中当含沙量为 95% 时，反弹速度最小，相比纯沙状态降低幅度可达 28%；当含沙量（90%~70%）降低时，反弹速度显著增大，幅度可达 70%。值得注意的是，不同含沙量对颗粒反弹速度的影响具有明显的速度依赖性：当冲击速度为 1~4 m·s^{-1}时，不同的含沙量对颗粒的反弹速度影响较为

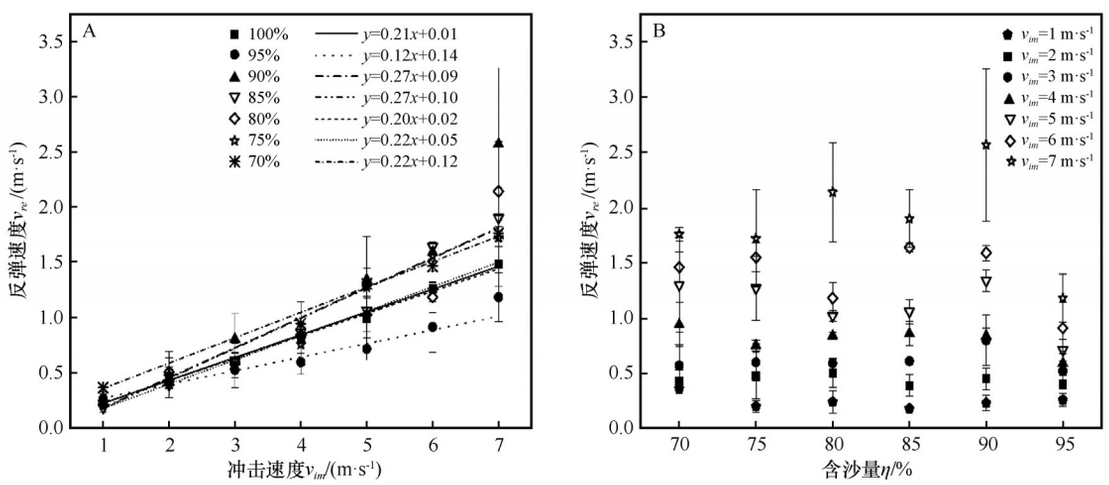


图 6　反弹颗粒的平均反弹速度v_{re}随冲击速度v_{im}和随含沙量η的变化

Fig.6　Variation of the mean rebound velocity v_{re} of rebounding particles with impact velocity v_{im} and sand content η

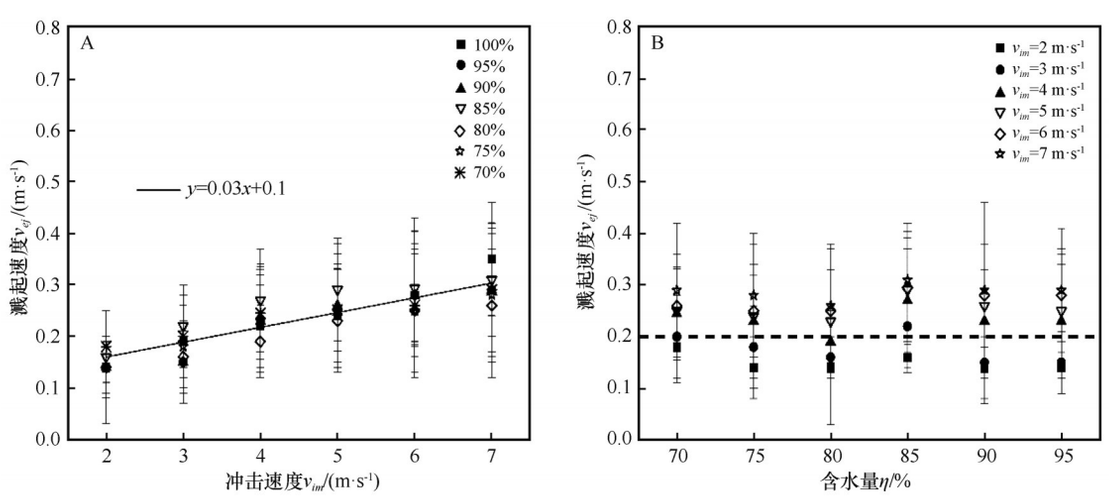


图 7　溅起颗粒的平均溅起速度v_{ej}随冲击速度v_{im}和随含沙量η的变化

Fig.7　Variation of the mean ejection velocity of ejected particles v_{ej} with impact velocity v_{im} and sand content η

有限；而当冲击速度提升至5~7 m·s^{-1}时，沙尘混合物的反弹速度明显增加。当冲击速度为1~6 m·s^{-1}时，含沙量从70%逐渐增加到95%时，颗粒的反弹速度差异在5%以内；当冲击速度大于6 m·s^{-1}时，各个含沙量状态的反弹速度均显著上升，且在含沙量为90%时达到峰值，最大增幅可达60%。基于上述分析，本文提出沙尘混合物的反弹速度随冲击速度的击溅函数表达式（以含沙量为95%为例）：

$$v_{re} = \xi_2 v_{im} + b_2 \tag{7}$$

常数ξ_2=0.12，b_2=0.14。

图7展示了平均溅起速度v_{ej}随冲击速度v_{im}、含沙量η的分布关系。纯沙粒与沙尘混合物的颗粒溅起速度均随冲击速度呈线性增长。沙尘混合物与纯沙粒平均溅起速度差异在含沙量为85%时最大，为23%。当含沙量较低（70%~80%）时，沙尘混合物的溅起速度随含沙量的增加基本保持恒定（0.2 m·s^{-1}），受冲击速度的影响较小，不同含沙量模拟结果之间无明显差异；随着含沙量逐渐增大，沙尘混合物（85%~95%）的溅起速度略有增大。综上，在70%~95%的含沙量范围内，颗粒的溅起速度未表现出随含沙量变化的明显趋势。基于上述分析，本文提出溅起速度v_{ej}随冲击速度v_{im}的击溅函数表达式为：

$$v_{ej} = a_3 v_{im} + b_3 \tag{8}$$

式中：a_3=0.03，b_3=0.1。

2.4 沙尘混合物击溅过程的角度分布

不同床面构成除了对颗粒速度有影响外，对颗粒的运动角度也是有影响的，接下来给出了在不同冲击速度下的反弹角度θ_{re}、溅起角度θ_{ej}的演变规律（图8、9）。

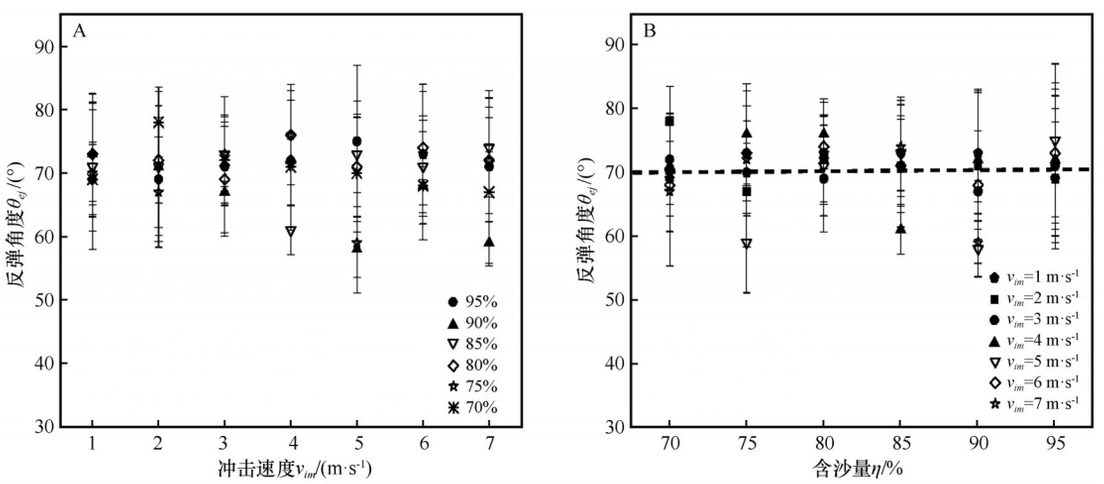


图8 反弹颗粒的平均反弹角度θ_{re}随冲击速度v_{im}和随含沙量η的变化

Fig.8 Variation of the mean rebound angle of rebounding particles θ_{re} with impact velocity v_{im} and sand content η

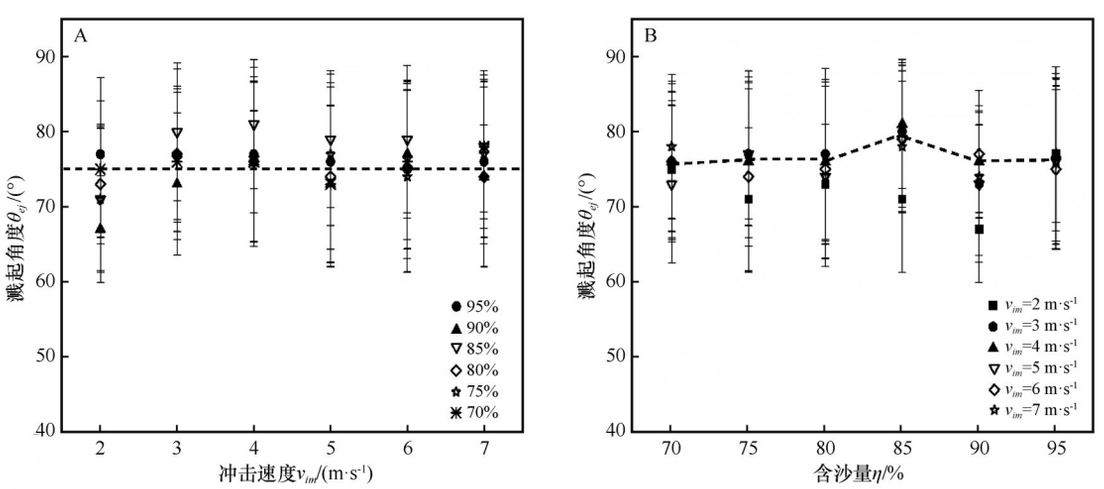


图9 溅起颗粒的平均溅起角度θ_{ej}随冲击速度v_{im}和随含沙量η的变化

Fig.9 Variation of the mean ejection angle of ejected particles θ_{ej} with impact velocity v_{im} and sand content η

不同含沙量下的平均反弹角度随冲击速度增大均基本保持稳定。纯沙粒的反弹角度在45°[26]左右，而沙尘混合物的模拟结果则围绕某一恒定值（约70°）小幅波动，增大幅度可达56%。随着含沙量的增大，沙尘混合物的反弹角度未表现出明显的变化趋势。综上，沙尘混合物（含沙量70%~95%）颗粒的反弹角度表现为一稳定特征量，基本不受冲击速度与含沙量变化的影响。

图9展示了平均溅起角度θ_{ej}随冲击速度v_{im}、含沙量η的分布情况。在相同冲击速度下，不同含沙量对应的溅起角度差异较小；随冲击速度增大，溅起角度总体稳定在约75°，而纯沙粒的溅起角度则在65°左右[26]，两者差异最大可达19%。当冲击速度较小（2 m·s^{-1}）时，沙尘混合物的溅起角度相对偏小；当冲击速度较大（3~7 m·s^{-1}）时，溅起角度增大幅度最大可达14%，并于含沙量为85%时达到峰值。此外，在70%~95%的含沙量，溅起角度未呈现出随含沙量或冲击速度变化的显著系统性趋势。综上，沙尘混合物（含沙量70%~95%）的颗粒溅起角度基本不受冲击速度与含沙量变化的影响。

3　讨论

3.1　沙尘含量的动力学机制

本研究系统揭示了含沙量作为关键控制因素，通过调制床面结构与能量分配路径，对击溅过程中各物理量演变机制所产生的重要影响。

含沙量是调控碰撞能量分配的核心因素，决定入射能量在反弹颗粒与溅起颗粒之间的分配比例。反弹速度在含沙量90%时达到峰值（图6），表明该比例下沙尘混合物的刚度匹配可能达到最优，从而使床面具备高效的能量返还效率。与之相对应，溅起颗粒数在含沙量75%时达到最大值（图4），这对应于沙尘混合物的最优堆积状态。在该状态下，尘粒充分填充沙粒间隙，不仅扩大了能量传递的范围，同时保持了较高的能量传递效率，从而最大程度地促进了床面颗粒的溅起。

溅起颗粒的组分呈现明显的速度依赖性。溅起沙粒占比与冲击速度呈负相关（图5），揭示了基于颗粒惯性的选择性溅起机制。由于沙粒与尘粒在密度、弹性模量等物理性质上存在显著差异，在碰撞能量分配过程中，质量较小的尘粒在能量获取方面具有天然优势，尤其在高速冲击下，系统能量升高，该筛选效应更为显著，导致溅起颗粒中沙粒占比相对降低。这一机制对于理解沙漠–黄土过渡带潜在的粉尘释放过程具有重要意义。

尘粒的引入显著改变了颗粒的弹跳轨迹。沙尘混合物的反弹与溅起角度均显著高于纯沙床面，且在不同条件下保持相对稳定（图8、9）。这一现象源于尘粒填充所引起的床面润滑效应，该效应降低了切向动量耗散，使更多法向动能得以保留，进而导致反弹速度的法向分量占比相对提高，反弹轨迹更趋向于垂直方向，宏观上表现为反弹角度显著增大并稳定于较高值。这种稳定效应表明，影响反弹角度的关键因素并非沙尘组分的精确比例，而是尘粒存在所引起的床面切向摩擦状态的本质改变。溅起角度在含沙量85%时出现峰值，则表明该比例下床面可能形成最佳的沙尘配比结构，从而最有利于将能量转化为垂直方向的动量，实现溅起角度的最大化。

3.2　适用于沙尘混合表面的改进击溅函数

风沙流输运过程中，跃移沙粒与不同含沙量的沙尘混合表面的击溅函数是描述击溅过程的主要组成部分[33]，本研究的模拟结果与分析表明，含沙量对击溅过程各物理量具有显著影响。基于此，本研究综合以上结果，提出了一个适用于沙尘混合表面的改进击溅函数方案（表3），该方案包含了反弹颗粒与溅起颗粒的速度、角度随含沙量与冲击速度变化的函数表达式，能够较为精确地刻画不同含沙量条件下击溅过程的动力学特征及其内在机制。

3.3　模型的适用性与局限性

本研究主要适用于松散、无黏性的沙尘混合床面。研究结果对于理解沙漠–黄土过渡带中尚未形成地表结皮或结皮因外力遭到破坏区域的风沙起动与击溅过程具有直接参考价值。在上述典型场景下，地表物质处于松散状态，本文所揭示的含沙量对能量传递与颗粒溅起的关键控制作用得以充分体现，从而为定量评估该类区域的风沙输运潜力提供了可靠的微观力学依据。

同时，本研究也存在一定的局限性，并可为未来研究指明方向。首先，当前模型未考虑颗粒间的黏结力，而实际环境中因外力作用或生物参与等形成的物理或生物结皮会显著改变床面力学性质，可

表3 基于含沙量η、冲击速度v_{im}的改进击溅函数

Table 3 Modified splash function based on sand content$\eta$and impact velocityv_{im}

参数	描述	函数	表达式
v_{re}	反弹速度	线性函数	$v_{re} = 0.12v_{im} + 0.14$
v_{ej}	溅起速度	线性函数	$v_{ej} = 0.03v_{im} + 0.1$
θ_{re}	反弹角度	常数	70°
θ_{ej}	溅起角度	常数	75°
$\overline{N}_{ej}$	溅起颗粒数	线性函数	$\overline{N}_{ej} = \xi v_{im} + 0.03, \xi = -0.02\eta + 2.3$
$N_{ej\ -\ sand}/N_{ej}$	溅起沙粒占比	线性函数	$N_{ej\ -\ sand}/N_{ej} = \xi_1\eta + 6.9, \xi_1 = 0.1v_{im}^3 - 2.2v_{im}^2 + 10.3v_{im} + 0.8$

能显著抑制击溅效率。其次，模型采用了单一的沙粒与尘粒粒径，未能反映自然界沉积物连续粒度分布的复杂影响。因此，将本研究结论外推至存在结皮或具有复杂级配的自然地表时需格外审慎。未来的研究将致力于发展能够耦合黏结力并考虑连续粒径的离散元模型，并通过与风洞实验数据的对比验证，以构建一个更为完善与普适的风沙击溅理论框架。

4 结论

本研究基于离散元方法，系统模拟了三维风沙流输运过程中不同含沙量条件下沙尘混合物的击溅过程。结果表明，含沙量的变化对击溅过程具有显著影响。

在反弹特性方面，无论纯沙粒体系还是沙尘混合体系，颗粒反弹速度均随冲击速度线性增加，但沙尘混合物在含沙量为95%时反弹速度降至最低，降幅达28%。其主要机制在于尘颗粒充分填充沙粒间隙，增强了体系内摩擦作用，从而抑制反弹行为。随着含沙量由90%降至70%，体系刚度下降，更多碰撞能量转化为动能，导致反弹速度显著回升。此外，沙尘混合物的反弹角度较纯沙粒体系最大增加56%，这可能是由于更多法向动能被储存并转化为法向速度分量所致。

在溅起特性方面，平均溅起颗粒数随冲击速度线性增长，并在含沙量为75%时达到峰值，表明该条件下床层能量传递效率最优。溅起颗粒中沙粒占比随含沙量线性上升，当含沙量超过80%时，该占比突破50%，说明含沙量的增加显著增强了击溅过程中的颗粒溅起效应。对比纯沙粒与沙尘混合物体系，溅起速度均呈线性增长趋势，二者定量差异最高达23%；溅起角度因表面形态变化，差异最大为19%。

最后，根据与自然风沙过程相关的击溅模式，本研究构建了一种适应沙漠–黄土过渡带的考虑含沙量的改进击溅函数。这不仅深化了对沙尘混合物颗粒–床面相互作用机制的理解，也提高了击溅过程的定量预测精度，进而能够为相关风沙防治措施的制定提供了可靠途径和理论依据。

参考文献：

[1] 邵明安，王云强，贾小旭．黄土高原生态建设与土壤干燥化[J]．土壤与生态环境，2015，30(Z1)：433–440

[2] Zhao Y G, Ji J Y, Zhang W T, et al. Characteristics of spatial and temporal variability in the distribution of biological soil crusts on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3): 739–748.

[3] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 113–122.

[4] 李彩霞，任涛，李永恒．典型黄土高原沟壑区生态敏感性分析：以甘肃省庆阳市为例[J]．中国沙漠，2025，45(6)：1–10.

[5] Chen L, Xue Y, Wang N, et al. Soil properties influence the distribution and diversity of plant communities in the desert-loess transition zone[J]. Catena, 2025, 254: 108976.

[6] Yang X, Shao M A, Li T C, et al. Distribution of soil nutrients under typical artificial vegetation in the desert-loess transition zone[J]. Catena, 2021, 200: 105165.

[7] 赵宣，韩霁昌，王欢元，等．毛乌素沙漠–黄土高原过渡带土壤养分空间异质性[J]．生态学报，2016，36(22)：7446–7452.

[8] Nottebaum V, Lehmkuhl F, Stauch G, et al. Regional grain size variations in aeolian sediments along the transition between Tibetan highlands and north-western Chinese deserts-the influence of geomorphological settings on aeolian transport pathways [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39 (14): 1960–1978.

[9] Yang X R, Peng J, Liu B, et al. Multi-scale analysis of grain size in the component structures of sediments accumulated along the desert-loess transition zone of the Tengger Desert and implications for sources and aeolian dust transportation [J]. Atmosphere, 2024, 15(2): 239.

［10］ Anderson R S，Haff P K.Simulation of eolian saltation［J］.Science，1988，241（4867）：820-823.

［11］ 殷欣.非平坦床面粒—床击溅过程数值模拟研究［D］.兰州：兰州大学，2016.

［12］ Rice M A，Willetts B B，McEwan I K.Observations of collisions of saltating grains with a granular bed from high-speed cine-film［J］.Sedimentology，1996，43（1）：21-31.

［13］ Oger L，Ammi M，Valance A，et al.Study of the collision of one rapid sphere on 3D packings：experimental and numerical results［J］.Computers & Mathematics with Applications，2008，55（2）：132-148.

［14］ Ammi M，Oger L，Beladjine D，et al.Three-dimensional analysis of the collision process of a bead on a granular packing［J］.Physical Review E，2009，79（2）：021305.

［15］ Sun W H，Huang N.Influence of slope gradient on the behavior of saltating sand particles in a wind tunnel［J］.Catena，2017，148：145-152.

［16］ Chen Y X，Zhang J，Huang N，et al.An experimental study on splash functions of natural sand-bed collision［J］.Journal of Geophysical Research-Atmospheres，2019，124（13）：7226-7235.

［17］ Yin X，Huang N，Jiang C，et al.Splash function for the collision of sand-sized particles onto an inclined granular bed，based on discrete-element-simulations［J］.Powder Technology，2021，378：348-358.

［18］ Jiang C W，Zhang Z C，Wang X Y，et al.A wind tunnel experiment study on splash functions during sand saltation［J］.Journal of Geophysical Research-Earth Surface，2024，129（10）：007863.

［19］ 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.

［20］ Zheng X J，Cheng N，Xie L.A three-dimensional analysis on lift-off velocities of sand grains in wind-blown sand flux［J］.Earth Surface Processes and Landforms，2008，33（12）：1824-1838.

［21］ Comola F，Gaume J，Kok J F，et al.Cohesion-induced enhancement of aeolian saltation［J］.Geophysical Research Letters，2019，46（10）：5566-5574.

［22］ Werner B T，Haff P K.The impact process in aeolian saltation：two-dimensional simulations［J］.Sedimentology，1988，35：189-196.

［23］ Anderson R S，Haff P K.Wind modification and bed response during saltation of sand in air［M］//Anderson R S，Haff P K.Aeolian Grain Transport.Vienna，Austria：Springer，1991：21-51.

［24］ Lämmel M，Dzikowski K，Kroy K，et al.Grain-scale modeling and splash parametrization for aeolian sand transport［J］.Physical Review E，2017，95（2）：022902.

［25］ Yin X，Huang N，Wang Z.A numerical investigation into sand grain/slope bed collision［J］.Powder Technology，2017，314：28-38.

［26］ 陈有兴.风沙运动中粒-床碰撞和蠕移运动的实验与数值模拟研究［D］.兰州：兰州大学，2021.

［27］ Jia S M，Wang Z S.Simulation of aerodynamic entrainment with interparticle cohesions based on discrete element method［J］.Earth Surface Processes and Landforms，2021，46（7）：1410-1418.

［28］ Jia S M，Wang Z S.A new ejection model for aeolian splash［J］.Catena，2022，213（5）：106191.

［29］ Wang Z S，Li Z，Jia S M.Rheological sand bed generates non-rebounding particles［J］.Sedimentology，2024，72（1）：34-44.

［30］ Oger L，Ammi M，Valance A，et al.Discrete Element Method studies of the collision of one rapid sphere on 2D and 3D packings［J］.European Physical Journal E，2005，17（4）：467-476.

［31］ Zhou Y H，Li W Q，Zheng X J.Particle dynamics method simulations of stochastic collisions of sandy grain bed with mixed size in aeolian sand saltation［J］.Journal of Geophysical Research-Atmospheres，2006，111：D15108.

［32］ 肖锋军，董治宝，郭烈锦，等.风沙流中跃移沙粒冲击速度和角度联合概率分布风洞实验［J］.中国沙漠，2020，40（3）：127-134.

［33］ 张潮.戈壁风沙流粒-床碰撞和输沙特性研究［D］.兰州：兰州大学，2023.

［34］ Zhang C，Wang Y，Huang N，et al.Numerical insights into gobi wind-blown sand：deriving a saltation flux scheme［J］.Journal of Geophysical Research：Atmospheres，2024，129（20）：041398.

［35］ 胡伟，刘晓冰，张兴义.土壤结皮特性对风力侵蚀的影响［J］.土壤与作物，2023，12（1）：88-95.

［36］ Weber B，Belnap J，Budel B，et al.What is a biocrust？ A refined，contemporary definition for a broadening research community［J］.Biological Reviews，2022，97（5）：1768-1785.

［37］ 赵洋，连煜超，赵燕翘，等.生物土壤结皮在防沙治沙中的应用综述［J］.中国沙漠，2025，45（3）：31-38.

［38］ 张冠华，胡甲均.生物结皮土壤-水文-侵蚀效应研究进展［J］.水土保持学报，2019，33（1）：1-8.

［39］ Campmans G H P，Wijnberg K M.Modelling the vertical grain size sorting process in aeolian sediment transport using the discrete element method［J］.Aeolian Research，2022，57：100817.

［40］ Willetts B B，Rice M A.Collisions in aeolian saltation［J］.Acta Mechanica，1986，63（1）：255-265.

［41］ Carneiro M V，Pähtz T，Herrmann H J.Jump at the onset of saltation［J］.Physical Review Letters，2011，107（9）：098001.

［42］ Shao Y P.Physics and Modelling of Wind Erosion［M］.Berlin，Germany：Springer，2008.

［43］ Shao T J，Zhao J B，Dong Z B Grain-size distribution of the aeolian sediment and its effect on the formation and growth of mega-dunes in the Badain Jaran Desert，north-west China［J］.Zeitschrift für Geomorphologie，2015，59（3）：273-286.

［44］ 杨岩岩，刘连友，曹恒武，等.沙漠-黄土南北样带土壤物理性质区域分异特征［J］.中国沙漠，2013，33（1）：146-152.

［45］ 张杰，聂如松，李列列，等.基于柔性边界的非饱和土三轴试验及离散元分析［J］.应用基础与工程科学学报，2024，32（1）：

208-222.

[46] 段绍臻.风沙流中近地表沙粒运动的实验以及理论预测[D].兰州:兰州大学,2013.

[47] Haff P K, Anderson R S.Grain scale simulations of loose sedimentary beds-the example of grain-bed impacts in aeolian saltation[J].Sedimentology,1993,40(2):175-198.

[48] Rice M A, Willetts B B, McEwan I K.An experimental-study of multiple grain-size ejecta produced by collisions of saltating grains with a flat bed [J]. Sedimentology, 1995, 42 (4): 695-706.

Investigation of the dynamic process of sand particle impacting the sand-dust mixed bed based on the Discrete Element Method

Sun Yubo[ab], Zhang Hongxin[ab], Wang Zhengshi[ab], Jia Shuming[bc]

(a.*College of Natural Resources and Environment* / b. *State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control* / c.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: The particle-bed collision (splash) process is regarded as a critical bridge connecting microscopic grain-scale dynamics to macroscopic aeolian sand transport. Whether existing pure-sand splash functions can be directly applied to sand-dust mixtures in desert-loess transition zones remains unclear. In this study, a three-dimensional discrete dynamic model of mixed sand-dust beds was developed using the Discrete ElementMethod (DEM), and the dynamic process of particle impact on mixed beds was simulated. The effects of sand content (70%-100%) on splash characteristics were quantitatively analyzed, and the number of ejected particles and their proportional distribution were quantified. Key findings include: (1) The proportion of ejected particles was observed to increase linearly with sand content, with a critical threshold identified at 80%. Beyond this value, the proportion consistently exceeded 50%; (2) Compared to pure sand, the rebound angle of the sand-dust mixture was significantly increased by up to 56%, with the ejection angle also increasing by up to 19%; (3) An improved sand-content-dependent splash function was developed based on existing pure-sand models and the simulation results of this study.

Key words: sand-dust mixture; splash process; Discrete Element Method (DEM); sand content; modified splash function