

曲书锋,张国明,刘连友,等.干涸尾间湖盆区泥漠地表磨蚀释尘特征[J].中国沙漠,2022,42(4):81-88.

## 干涸尾间湖盆区泥漠地表磨蚀释尘特征

曲书锋<sup>1abcd</sup>, 张国明<sup>1ace,2</sup>, 刘连友<sup>1abcd</sup>, 李力<sup>3</sup>, 肖雨婷<sup>1abcd</sup>,  
向明珠<sup>1abcd</sup>, 孙煦然<sup>1abcd</sup>, 韩旭娇<sup>1ad</sup>

(1.北京师范大学 a.环境演变与自然灾害教育部重点实验室, b.应急管理部教育部减灾与应急管理研究院, c.防沙治沙教育部工程研究中心, d.地理科学学部, e.国家安全与应急管理学院,北京 100875; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室,甘肃 兰州 730000; 3.长江水利委员会长江科学院,湖北 武汉 430010)

**摘要:**沙粒的表面磨蚀效应是地表产生、释尘的重要机制,针对干湖盆泥漠地开展磨蚀释尘实验研究,对理解干湖盆地表风蚀过程及盐碱尘暴形成机理具有重要意义。对采自西居延海干涸湖盆泥漠地表土样进行室内磨蚀模拟实验,研究了不同粒级(细、中、粗)沙粒不同落沙角度(30°,45°,60°)的磨蚀效应。结果表明:(1)泥漠地表磨蚀实验中能够产生明显释尘效应的沙粒粒级阈值为中沙(0.25 mm< $M_d$ <0.50 mm);(2)磨蚀粒径粒级相同时,磨蚀角度会对泥漠地表磨蚀释尘速率产生影响,磨蚀量的角度排序为60°>30°>45°,但同一粒级3种角度下的磨蚀释尘率差异不显著。(3)磨蚀角度为45°时,计算了泥漠地表的质量磨蚀率与能量磨蚀率,其中中沙为0.04 g·kg<sup>-1</sup>、0.43 g·J<sup>-1</sup>,粗沙为0.08 g·kg<sup>-1</sup>、0.74 g·J<sup>-1</sup>,极粗沙为0.26 g·kg<sup>-1</sup>、2.54 g·J<sup>-1</sup>;在磨蚀沙粒粒级倍增而磨蚀角度不变情况下,泥漠地表磨蚀释尘率与能量磨蚀率未发生正比例线性增长变化。

**关键词:**干涸尾间湖盆;沙粒粒级;泥漠地表;磨蚀释尘

**文章编号:** 1000-694X(2022)04-081-08

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00224

**中图分类号:** P931.3

**文献标志码:** A

## 0 引言

全球干旱区湖泊萎缩形成的大面积干涸湖床具有较高潜在释尘风险<sup>[1]</sup>,严重威胁着生态环境与人类健康<sup>[2]</sup>。全球比较典型萎缩湖泊有中亚咸海、伊朗乌尔米耶湖、美国索尔顿湖、中国新疆艾比湖及内蒙古西居延海等<sup>[3-6]</sup>。尾间湖泊干涸裸露地表以泥漠、盐漠为主<sup>[7-8]</sup>。泥漠组成以黏土为主,分布于蒸发强烈的干旱、半干旱区,在地下水位较高和盐分较多的泥漠地带,易形成以湖相松散沉积物为主的盐漠。干湖盆区地表对风蚀作用十分敏感,形成的盐碱尘暴作为一种新型生态风险已经引起环境、生态、灾害管理部门高度关注<sup>[9-11]</sup>。

风蚀是风力作用下地表遭受侵蚀而发生的物

质运移过程,主要由吹蚀和磨蚀过程组成。风沙流紧贴地面迁移时,沙粒对地面物质的冲击、摩擦作用,为磨蚀过程<sup>[12]</sup>。风沙流中跃移颗粒对地表产生轰击磨蚀作用是粉尘产生的重要机制<sup>[13]</sup>。Whalley等<sup>[14]</sup>使用350—500、250—500、400—2 000 μm的沙粒,通过微型风洞进行颗粒间磨蚀测试,发现在实验中使用单一粗颗粒会产生比自然混合沉积物预期更多的粉尘。Kuenen<sup>[15]</sup>设计建造了专用于风成磨蚀观测的微型电流式风成磨蚀室,发现风沙作用下磨蚀过程所产生的细粒粉尘(<125 μm)是通过细粒的剥落、颗粒破碎和颗粒表面涂层磨蚀而产生的。Bullard等<sup>[16]</sup>通过室内风成磨蚀实验对澳大利亚的沙丘沙进行了磨蚀测试,发现风成磨蚀产生的粉尘主要来自颗粒表面黏土涂层,这一过程通过破

收稿日期:2021-11-11; 改回日期:2021-12-22

资助项目:国家自然科学基金面上项目(41971120);中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室开放课题(KLDD-2020-002);国家自然科学基金金重点项目(41730639)

作者简介:曲书锋(1998—),男,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为干旱区风蚀过程与地表粉尘排放。

E-mail: 202121051171@mail.bnu.edu.cn

通信作者:张国明(E-mail: zgm@bnu.edu.cn)

坏或破碎聚集物,将其分解成大量碎片,从而产生粉尘气溶胶。Lu等<sup>[17]</sup>通过模型验证发现含沙气流与岩石和土壤表面的磨蚀率与冲击颗粒的动能和磨蚀表面的黏结强度密切相关,沙粒在沙床上跳跃时会穿透地表,并使地表发生塑性变形,从而产生与碰撞沙粒曲率半径相似的坑面。Ta<sup>[18]</sup>利用自制的落沙磨蚀测试器进行了磨蚀实验,定量揭示了磨蚀作用下脆性断裂模式的粉尘产生和排放过程,得出磨蚀率与冲击动能及速度的平方存在近似呈正比的关系。

尽管目前对于风成磨蚀的研究实验已经取得一定进展,但对有关风成磨蚀的机理问题仍未得出满意的答案<sup>[19-20]</sup>。先前研究表明:①由跃移过程中发生的沙粒轰击引起的风成磨蚀是粉尘产生的重要机制,这为设置模拟以跃移为主的沙粒运动过程的磨蚀实验提供了理论依据;②从研究变量上看,过去风成磨蚀实验设置大多为单一粒径沙粒,变量相对单一,而忽视了倾斜角度、磨蚀沙粒粒径等多变量参数对磨蚀地表释尘的影响;③从研究对象上看,过去磨蚀实验多针对释尘严重的植被退化地区,对干涸湖床为代表的粉尘释放研究相对不足;基于此,本研究选取西居延海干涸湖盆泥漠地表为研究对象,基于现有风成磨蚀理论,从磨蚀实验的定量分析角度设置实验,探究不同粒径沙粒在不同跃移轰击角度下地表磨蚀释尘情况,为理解和量化干涸湖盆粉尘释放提供科学依据。

## 1 研究区概况

西居延海(噶顺淖尔,42°21′—42°32′N,100°25′—101°03′E)为封闭内流盆地,位于内蒙古阿拉善高原西部、黑河下游的额济纳旗盆地,北抵中蒙边界,东南与达来呼布镇相接,接受源自祁连山的弱水(木林河)补给。该湖盆地处内陆腹地,远离海洋,属典型温带大陆性气候,夏季炎热,冬季寒冷,气温日较差、年较差均较大,终年降水稀少且蒸发强烈,多年平均降水不足40 mm,多年平均蒸发量3 700—4 000 mm,是降雨量的100多倍<sup>[21]</sup>;全年平均风速4.4 m·s<sup>-1</sup>左右,以西北风居多,全年8级以上大风天数达52 d<sup>[22]</sup>。自然条件严酷,生态环境脆弱,是中国的极端干旱区<sup>[23]</sup>。20世纪50年代,西居延海面积最大可达267.0 km<sup>2</sup>,湖面海拔820 m;随后受气候变化和人类活动影响,湖泊面积逐年减少,直至1961年完全干涸。2003年黑河水首次进入干涸40年之久

的西居延海后,区域内一度出现短期水面,但随后因无法持续提供水源补给,在强蒸发和强渗漏影响下,西居延海仍处于干涸<sup>[24]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 地表采样及实验沙粒准备

结合卫星影像图采集西居延海干涸湖盆泥漠地表样品,利用手持GPS仪记录采样点坐标,后期在卫星影像上对采样点进行标记。利用铁铲对泥漠地表深度5 cm以内的样品进行采集,单次采集量约10 kg,采样点位于西居延海东部,靠近湖泊入水口端(图1),采集时间为2021年4月2日。同时在西居延海东部泥漠地表样品采集点的下风向的湖滨堤岸处采集地表沙粒,采集量约20 kg。野外采集沙粒粒径较大,为实验所用极粗沙,后期购置筛选细沙(0.125—0.250 mm)及中沙(0.3—0.5 mm)各10 kg。

### 2.2 磨蚀样品制备

西居延海干涸湖盆泥漠地表多以黏土为主,粒径<0.01 mm颗粒占比达60%<sup>[25]</sup>,利用采集地表土样加水后自然沉降风干模拟原状地表。实验前,使用直径30 cm的18目(1 mm)圆形不锈钢过筛网和研磨锤对野外采集泥漠样品进行研磨过筛处理。参考Wentworth<sup>[26]</sup>提出的沙粒粒径标准,按照极粗沙、粗沙、中沙、细沙对沙粒样品进行分选处理,使用直径30 cm的10目(2 mm)、18目(1 mm)、35目(0.5 mm)、65目(0.25 mm)和120目(0.125 mm)圆形不锈钢过筛网对野外采集与购置的沙粒进行清洗、风干、分选过筛,得到细沙(0.125—0.250 mm)、中沙(0.25—0.5 mm)、粗沙(0.5—1.0 mm)和极粗沙(1—2 mm)。使用分度值0.5 g、最大量程200 kg的Sartorius Combics 1电子天平完成质量称量,泥漠实验地表与不同粒径沙粒具体参数见表1。

采取土水混合后沉降+自然风干的方式制备实验泥漠地表样,磨蚀表面采用直径87 mm、高1.5 mm的圆形塑料培养皿制备,取35个培养皿按5×7的排列方式等间距平置于规格为60 cm×40 cm×18 cm的方型塑料盆槽中,取5 kg地表样品均匀铺洒于该方形塑料盆槽中,按照水土比1:1的比例注水,利用玻璃棒混合均匀后静置一段时间,待沉降完全后,利用口径10 mm、体积150 mm的针筒型注射器抽取上层多余水体,将其余样品置于室外自然风干168 h直

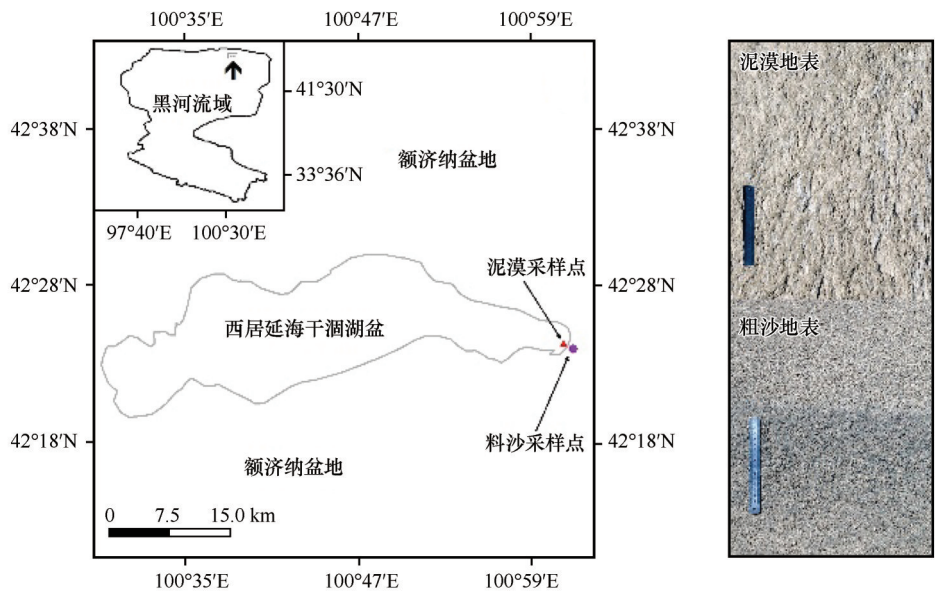


图 1 研究区范围与采样点图

Fig.1 Study area scope and sampling point diagram

表 1 泥漠地表与不同粒级沙粒参数

Table 1 Dry lakebed surface and different grain size sand collection parameters

沙粒种类	粒径/mm	源地	过筛后质量/kg
细沙	0.125—0.25	库布齐沙漠	7.4915
中沙	0.3—0.5	日照海沙	9.4635
粗沙	0.5—1.0	西居延海	3.7960
极粗沙	1.0—2.0	西居延海	8.5800
泥漠	黏土	西居延海	19.0085

至样品完全干燥。对干燥后的培养皿样品标号后选择表面龟裂较轻泥漠样品进行落沙磨蚀实验。

2.3 落沙磨蚀实验

落沙磨蚀器的设计参考 Ta<sup>[18]</sup> 与 Falling Sand Abrasion Tester(落沙磨蚀测试器)<sup>[27]</sup>,仪器包含落沙容器、流量控制阀门、落沙管道、可调节支架、磨蚀槽、磨蚀床面,照明灯与底座等部件,仪器的设计图纸与具体参数见图 2。落沙磨蚀器的磨蚀床面可进行多坡度调节,自由下落沙粒以不同角度作用于样品表面;流量控制阀门采用塑料球型阀门,对落沙下落速度进行调节,经预实验调试,落沙流量最大可达 25 g·s<sup>-1</sup>;铁质磨蚀槽正面设置为可拆卸玻璃面,便于实验过程中磨蚀释尘情况观察,下端设计为漏斗型,便于落沙收集;支架与落沙管道间使用活性螺丝扣连接,可实现落沙高度调整。

利用准备好的不同粒径沙粒(细沙、中沙、粗沙、极粗沙)对泥漠地表进行落沙磨蚀实验。将不同粒径沙粒装入 1.5 m 高度处落沙容器,内部焊接有磨蚀床面的磨蚀槽固定于距地表 0.5 m 高处,落沙管道出沙口位于磨蚀床面上方 2—3 mm 处,沙粒下落高度 1 m。

将待磨蚀的干涸湖床地表样品置于磨蚀床面,设置倾斜度 30°、45°和 60°。落沙容器与落沙管道通过流量控制阀门相连,落沙管道落沙口直径为 1 cm,最大稳定沙粒流速为 25 g·s<sup>-1</sup>。

为定量描述土样磨蚀过程,参考 Ta<sup>[18]</sup>提出的定义标准,设计土壤质量磨蚀率(Soli mass abrasion rate, MAR, g·kg<sup>-1</sup>)和能量磨蚀率(Energy abrasion rate, EAR, g·J<sup>-1</sup>):

MAR = \frac{M\_1}{m} \tag{1}

EAR = \frac{M\_1}{e} \tag{2}

式中: M<sub>1</sub>为地表样品磨蚀释尘质量(g); m 为磨蚀沙粒质量(g); e 为磨蚀沙粒能量(J)。

落沙磨蚀实验前利用气筒对干涸湖床地表样品进行表面松散颗粒去除,去除后称量样品质量。每个干涸湖床地表样品单次磨蚀落沙质量设计为 500 g,每次磨蚀实验结束后用气筒轻吹土样,去除附着表面的沙粒与粉尘,然后称重,记录磨蚀损失量,每个地表样品进行 10 次落沙磨蚀实验,单次磨



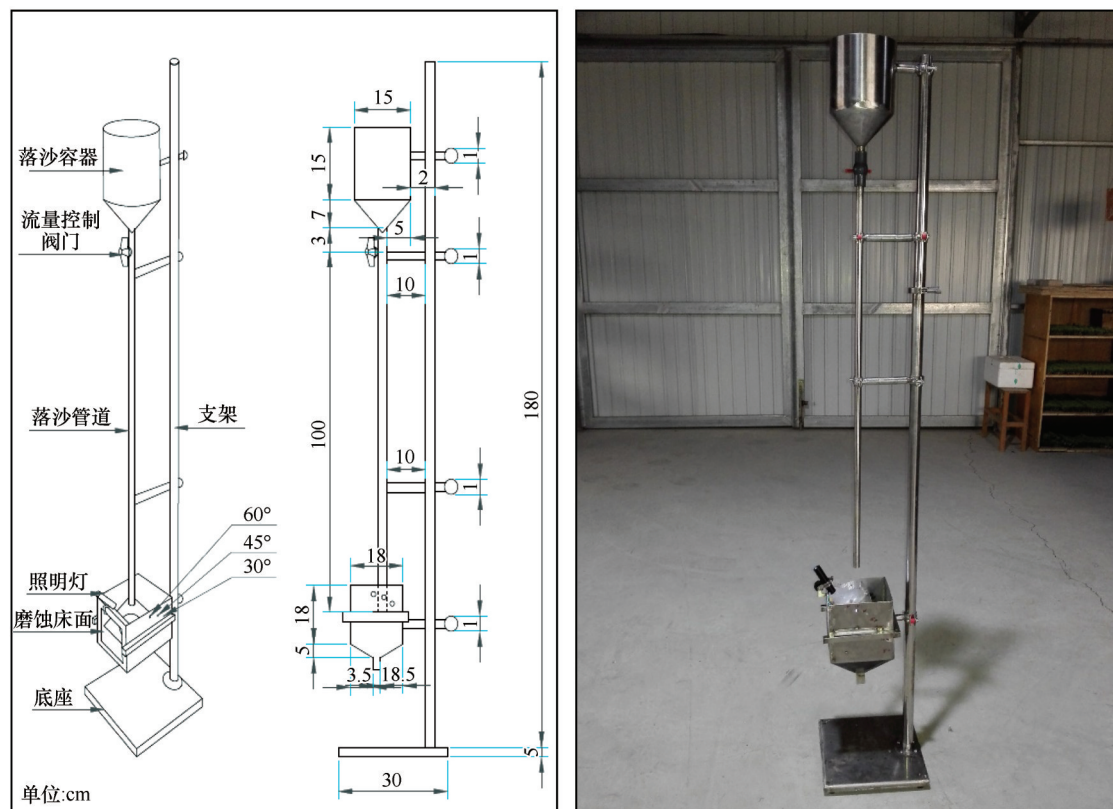


图2 落沙磨蚀器结构、平面图与实物图

Fig.2 Structure, plan and physical drawing of the falling sand abrasive

蚀时间30 s左右,累积落沙质量为5 kg,以保证磨蚀量足够大,使用分度值0.01 g、最大量程2 kg的高精度天平称量落沙与地表样品质量。对每种荒漠地表样品重复至少3次实验后再进行下一粒级沙粒磨蚀实验,实验共36组。

### 3 结果与分析

#### 3.1 西居延海干湖盆荒漠地表的磨蚀释尘

对荒漠地表磨蚀实验的每组样品进行磨蚀前后的拍摄,选取成像清晰样品进行磨蚀前后比对,以倾斜角度45°实验组为例,荒漠地表每组样品落沙磨蚀前后样品比对图如图3所示,对每组实验3轮实验磨蚀量变化结果进行平均值处理,得到磨蚀实验结果见表2。

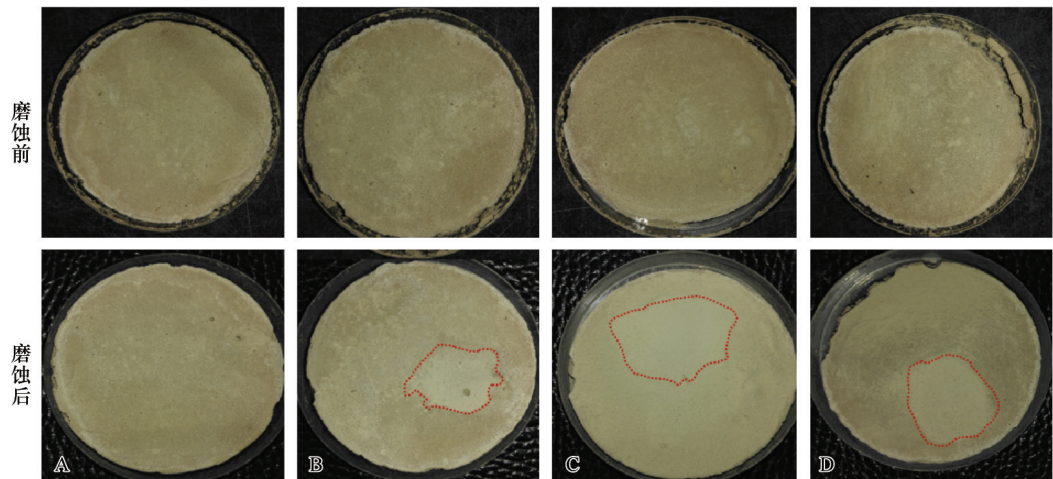
倾斜角度45°的磨蚀实验中,4种粒级沙粒落沙磨蚀作用下磨蚀释尘量出现较大差异。细沙磨蚀前后磨蚀释尘变化量未有明显变化,观察样品磨蚀前后地表形态,表面完整;中沙磨蚀释尘量与地表形态变化不显著,而粗沙和极粗沙样品前后的表面磨蚀区域则发生明显变化,地表粗糙度降低,均形

成具有一定磨蚀规律的释尘量。倾斜角度45°的磨蚀实验结果表明,细沙、中沙的磨蚀释尘量结果并不明显,故而在倾斜角度30°和60°的磨蚀实验结果只分析粗沙与极粗沙的磨蚀释尘结果。实验结果表明,干湖盆荒漠地表磨蚀释尘磨蚀释尘的沙粒粒径阈值为中沙;荒漠地表释尘量与磨蚀沙粒的粒级存在一定相关关系。

#### 3.2 西居延海干涸湖床荒漠地表质量磨蚀率与能量磨蚀率

由于单次磨蚀后的释尘变化量均匀增加,设置线性函数拟合的截距值为0,尝试利用Origin2017拟合自变量为不同粒级沙粒质量和荒漠地表磨蚀释尘量的线性函数关系。线性拟合结果见表3和图4。

在线性函数拟合过程中,本研究中4个拟合的线性函数的皮尔逊相关性指数均在 $P < 0.05$ 水平显著,拟合结果可信度较高。从判定系数 $R^2$ 上看,7项拟合结果判定系数 $R^2$ 均在0.95以上,表明两变量线性函数关系曲线拟合结果良好,具备一定量化参考意义。在拟合的线性函数关系式中,斜率值可等效



磨蚀前后样品影像对比:虚线范围内为样品明显磨蚀范围;其中,A为细沙磨蚀,B为中沙磨蚀,C为粗沙磨蚀,D为极粗沙磨蚀

图3 泥漠地表不同粒级沙粒磨蚀(45°)前后表面对比

Fig.3 Comparison diagram of samples before and after abrasive (45°) of different grain sizes on mud desert surface

表 2 不同粒级沙粒不同磨蚀角度下干涸湖床泥漠地表磨蚀过程释尘变化量(g)

Table 2 The variation of dust release during the erosion process of dry lake-bed mud desert surface under different sand sizes and different abrasion angles (g)

粒径	角度	单次 500 g 磨蚀后磨蚀量 $\Delta M_x$									
		$\Delta M_1$	$\Delta M_2$	$\Delta M_3$	$\Delta M_4$	$\Delta M_5$	$\Delta M_6$	$\Delta M_7$	$\Delta M_8$	$\Delta M_9$	$\Delta M_{10}$
细沙	45°	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0
中沙	45°	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
粗沙	45°	-0.05	0.02	-0.03	-0.05	-0.03	-0.06	-0.02	-0.04	-0.03	-0.05
极粗沙	45°	-0.19	-0.15	-0.14	-0.15	-0.12	-0.14	-0.12	-0.12	-0.13	-0.14
粗沙	30°	-0.15	-0.06	-0.06	-0.05	-0.03	-0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02
极粗沙	30°	-0.20	-0.13	-0.14	-0.14	-0.10	-0.14	-0.17	-0.12	-0.12	-0.11
粗沙	60°	-0.12	-0.12	-0.06	-0.05	-0.05	-0.06	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
极粗沙	60°	-0.21	-0.13	-0.20	-0.13	-0.13	-0.13	-0.12	-0.13	-0.11	-0.11

正值代表磨蚀后质量增加,负值代表磨蚀后质量减少。

表 3 泥漠地表不同粒级沙粒不同磨蚀角度下线性拟合曲线统计参数

Table 3 Statistical parameters of linear curve fitting of sand grains with different sizes on the surface of mud desert

磨蚀类型	截距值	斜率		皮尔逊相关性 指数	判定系数 ( $R^2$ )
		值	标准差		
45°中沙	0	$4.42\times10^{-5}$	$4.85\times10^{-7}$	0.9994	0.99867
45°粗沙	0	$7.53\times10^{-5}$	$8.02\times10^{-7}$	0.99943	0.99876
45°极粗沙	0	$2.59\times10^{-4}$	$1.37\times10^{-6}$	0.99986	0.99969
30°粗沙	0	$1.12\times10^{-4}$	$7.37\times10^{-6}$	0.97911	0.95451
30°极粗沙	0	$2.79\times10^{-4}$	$3.45\times10^{-6}$	0.99924	0.99833
60°粗沙	0	$1.42\times10^{-4}$	$6.54\times10^{-6}$	0.98951	0.97704
60°极粗沙	0	$2.98\times10^{-4}$	$6.09\times10^{-6}$	0.99792	0.99543

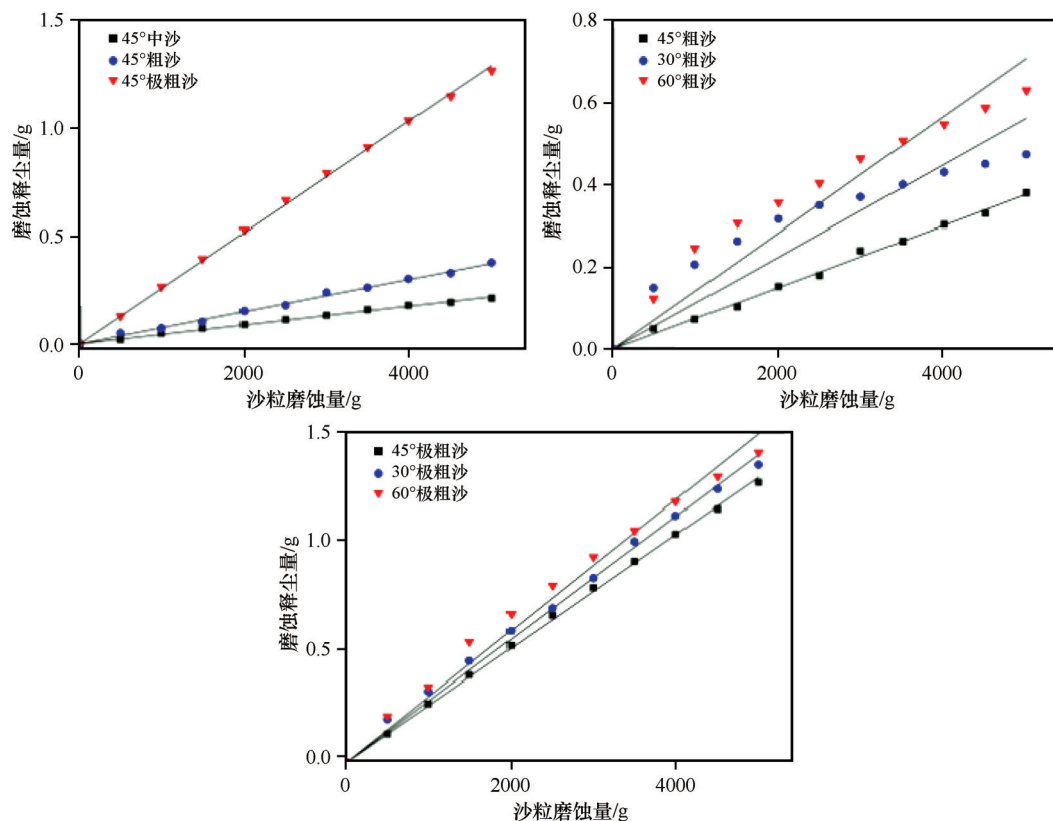


图4 泥漠地表不同粒径沙粒不同倾斜角度下质量磨蚀率拟合曲线

Fig.4 Fitting curves of mass abrasion rate of sand grains with different grain sizes and different inclinations on mud desert surface

为本研究得到的泥漠地表质量磨蚀率。

实验每组磨蚀控制的沙粒磨蚀总量为5 kg, 落实高度为1 m, 由  $E=mgh$ , 可知沙粒磨蚀总能量(J), 结合线性拟合的结果, 得到的西居延海干涸湖床泥漠与盐漠地表的质量磨蚀率与能量磨蚀率如表4所示。

中沙、粗沙和极粗沙在不同倾斜磨蚀角度下对泥漠地表的质量磨蚀率与能量磨蚀率如表4所示。在磨蚀沙粒粒级倍增情况下, 泥漠地表的磨蚀释尘率与能量磨蚀率并未发生正比增长变化; 泥漠地表在相同倾斜角度磨蚀情况下, 磨蚀释尘量呈现随磨蚀沙粒粒级增大而增加趋势。同种粒级沙粒不同角度磨蚀作用于泥漠地表时磨蚀率差异性较大, 表现为  $60^\circ > 30^\circ > 45^\circ$ 。造成这一结果的原因可能为  $60^\circ$  和  $30^\circ$  的倾斜磨蚀角度下, 磨蚀沙粒可拥有更完整的磨蚀接触面, 进而产生更多的粉尘。

#### 4 结论

干湖盆泥漠地表磨蚀实验能够产生明显释尘效应的沙粒粒级阈值为中沙(0.25—0.50 mm)。

表4 不同粒级沙粒不同磨蚀角度磨蚀下干涸湖床泥漠地表的质量磨蚀率( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )与能量磨蚀率( $\text{g}\cdot\text{J}^{-1}$ )

Table 4 Mass erosion rate ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and energy erosion rate ( $\text{g}\cdot\text{J}^{-1}$ ) of mud desert surface in dry lake bed under different sand size and different abrasion angles

磨蚀倾斜 角度	磨蚀沙粒 粒级/mm	质量磨蚀率 $/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	能量磨蚀率 $/(\text{g}\cdot\text{J}^{-1})$
45°	中沙 0.3—0.5	0.04	0.43
	粗沙 0.5—1.0	0.08	0.74
	极粗沙 1.0—2.0	0.26	2.54
30°	粗沙 0.5—1.0	0.11	1.10
	极粗沙 1.0—2.0	0.28	2.74
60°	粗沙 0.5—1.0	0.14	1.39
	极粗沙 1.0—2.0	0.30	2.92

泥漠地表在不同磨蚀角度下, 不同粒级沙粒的磨蚀质量间存在线性关系: 撞击角为  $45^\circ$  时, 中沙、粗沙和极粗沙对泥漠地表的质量磨蚀率与能量磨蚀率分别为  $0.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.43 \text{ g}\cdot\text{J}^{-1}$ ,  $0.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.74 \text{ g}\cdot\text{J}^{-1}$  和  $0.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.54 \text{ g}\cdot\text{J}^{-1}$ 。在磨蚀沙粒粒

级倍增且磨蚀角度不变情况下,泥漠地表磨蚀释尘率与能量磨蚀率未发生正比的线性增长变化。

磨蚀粒径粒级相同情况下,磨蚀角度会对泥漠地表磨蚀释尘速率产生影响,表现为 $60^{\circ}>30^{\circ}>45^{\circ}$ ,但同一粒级3种角度下的磨蚀释尘率差异不大。

#### 参考文献:

- [1] 葛拥晓,吉力力·阿不都外力,马龙,等.新疆艾比湖干涸湖底不同景观单元蒸发盐分布与变化特征[J].湖泊科学,2014,26(4):616-624.
- [2] Wayne A W, Craig M, Sarah E N, et al. Decline of the world's saline lakes[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(11): 816-821.
- [3] Hossein M A, Khaghani A, MacDonald A B, et al. The Lake Urmia environmental disaster in Iran: a look at aerosol pollution[J]. The Science of the Total Environment, 2018, 633: 42.
- [4] 吉力力·阿不都外力.干旱区湖泊与盐尘暴[M].北京:中国环境科学出版社,2012:121-149.
- [5] 吉力力·阿不都外力,徐俊荣,穆桂金,等.艾比湖盐尘对周边地区土壤盐分及景观变化的影响[J].冰川冻土,2007(6): 928-939.
- [6] 周长海,雷加强.艾比湖地区风沙危害趋势及对欧亚大陆桥的影响[J].干旱区地理,2005(1):98-102.
- [7] 黄宗理,张良弼.地球科学大辞典[M].北京:地质出版社,2005:1022.
- [8] 于海云,张正偲,王志军.阿拉善高原东南部干涸湖盆沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2021,41(4):177-184.
- [9] Ahmady-Birgani H, Agahi E, Ahmadi S J, et al. Sediment source fingerprinting of the Lake Urmia sand dunes[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 1-15.
- [10] 洪畅,韩旭娇,戴佳栋,等.毛乌素沙地布寨淖尔下风向沙化湖滨地表沉积物理化特性[J].中国沙漠,2020,40(2):86-93.
- [11] 潘凯佳,张正偲,梁爱民,等.基于倾斜摄影技术的戈壁灌丛沙丘形态反演及其对粉尘释放研究的意义[J].中国沙漠,2020,40(2):24-32.
- [12] 王伯恭,等.中国百科大辞典[M].北京:中国大百科全书出版社,2002:811.
- [13] Bullard J E, McTainsh G H, Pudmenzky C. Aeolian abrasion and modes of fine particle production from natural red dune sands: an experimental study[J]. Sedimentology, 2004, 51(5): 1103-1125.
- [14] Whalley W B, Marshall J R, Smith B J. Origin of desert loess from some experimental observations[J]. Nature, 1982, 300(5891): 433-435.
- [15] Kuenen P H. Experimental abrasion 4: eolian action[J]. The Journal of Geology, 1960, 68: 427-449.
- [16] Bullard J E, McTainsh G H, Pudmenzky C. Factors affecting the nature and rate of dust production from natural dune sands[J]. Sedimentology, 2007, 54(1): 169-182.
- [17] Lu H, Shao Y. A new model for dust emission by saltation bombardment[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D14): 16827-16842.
- [18] Ta W. Study of the energy abrasion rates of five soil types subject to oblique impacts[J]. Geoderma, 2007, 140(1/2): 97-105.
- [19] Suzuki T, Takahashi K. An experimental study of wind abrasion[J]. The Journal of Geology, 1981, 89(4): 504.
- [20] Swet N, Kok J F, Huang Y, et al. Low dust generation potential from active sand grains by wind abrasion[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2020, 125(7): 125.
- [21] 赵楠,王尚涛,朱高峰,等.额济纳旗怪柳林土壤水分动态变化特征研究[J].干旱区资源与环境,2020,34(5):189-195.
- [22] 龚家栋,程国栋,张小由,等.黑河下游额济纳地区的环境演变[J].地球科学进展,2002(4):491-496.
- [23] 苏永红,冯起,吕世华,等.额济纳生态环境退化及成因分析[J].高原气象,2004(2):264-270.
- [24] 廖杰,王涛,薛娴.黑河调水以来额济纳盆地湖泊蒸发量[J].中国沙漠,2015,35(1):228-232.
- [25] 岳乐平,杨利荣,李智佩,等.阿拉善高原干涸湖床沉积物与华北地区沙尘暴[J].第四纪研究,2004(3):311-317.
- [26] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. The Journal of Geology, 1922, 30(5): 377-392.
- [27] Polizos G, Jang G G, Smith D B, et al. Transparent superhydrophobic surfaces using a spray coating process[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017: 405-410.



## The surface abrasion and dust emission of mud desert in dry rump lake basin

Qu Shufeng<sup>labcd</sup>, Zhang Guoming<sup>lace,2</sup>, Liu Lianyou<sup>labcd</sup>, Li Li<sup>3</sup>, Xiao Yuting<sup>labcd</sup>,  
Xiang Mingzhu<sup>labcd</sup>, Sun Xuran<sup>labcd</sup>, Han Xujiao<sup>lad</sup>

(1. a.MOE Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster / b.Academy of Disaster Reduction and Emergency Management / c.Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control / d.Faculty of Geographical Science / e.College of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3.Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The bombardment effect of saltating sand particles on the erodible surface is an important mechanism of dust release. It is of great significance to study the aeolian abrasion process and dust release mechanism on the surface of dry lake bed to mitigate the hazards of saline-alkali dust storm. In this paper, samples from mud desert surface of dry lakebed in the West Juyan Lake were collected to conduct laboratory abrasion experiments to study the abrasion effect of sand grains at different impacting angles (30°, 45°, 60°). The results show that: (1) The threshold sand size of erosion and dust release on mud desert surface is medium ( $0.25\text{ mm} < M_d < 0.50\text{ mm}$ ). (2) When the abrasive particle size is the same, the impacting angle exerts effects on the dust release rate of mud desert surface, and the ranking order from higher dust release rate is  $60^\circ > 30^\circ > 45^\circ$ , but the difference of the dust release rate is not significant under such conditions. (3) When the impacting angle is 45°, the mass erosion rate and energy erosion rate of medium sand, coarse sand and extremely coarse sand on mud desert surface are  $0.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  and  $0.43\text{ g}\cdot\text{J}^{-1}$ ,  $0.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  and  $0.74\text{ g}\cdot\text{J}^{-1}$ ,  $0.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  and  $2.54\text{ g}\cdot\text{J}^{-1}$ , respectively. When the grain size of sand abrader double increases while remaining the impacting angle, there is no proportional linear change in growth between the dust release rate and energy abrasion rate.

**Key words:** dry rump lake basin; sand particle size; mud desert surface; dust emission by abrasion