

王彬,韩庆杰,刘冰,等.湿沙表面风蚀的动力过程与风干效应[J].中国沙漠,2024,44(5):225-235.

# 湿沙表面风蚀的动力过程与风干效应

王彬<sup>1abc,2</sup>, 韩庆杰<sup>1ab</sup>, 刘冰<sup>1ac</sup>, 孙向波<sup>3</sup>,  
赵星莹<sup>3</sup>, 刘燕<sup>3</sup>, 王永军<sup>3</sup>

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 a.干旱区生态安全与可持续发展重点实验室, b.敦煌戈壁荒漠生态与环境  
研究站, c.临泽内陆河流域研究站, 甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.宁夏沙坡头国家级  
自然保护区管理局, 宁夏 中卫 755000)

**摘要:** 风干效应是影响湿沙表面风蚀传输过程的重要因素。为探究湿沙表面风蚀动力过程的作用机制,利用风洞装置模拟了低风速下湿沙表面风干过程。结果表明:(1)高湿度(>10%)湿沙表面的风干过程呈现三项式分布的“S”形变化特征,即定风速下表面湿度的下降速度呈现出前快中慢后快的特点,并且变化的转折点湿度为5.12%,证明了高湿度沙面风干过程开始加速与风蚀发生几乎同步。(2)低湿度下(<5.12%)风干速度及风蚀显著同步加快的湿度阈值(0.829%)接近于 $M_{1.5}$ ,湿沙表面风蚀可能与颗粒间水分存在形式相关。由此推断,湿沙表面的风干效应与风蚀过程存在互馈关系,即湿度降低至一定阈值,风蚀就会发生,同时风蚀过程会加速风干,此阶段的风干效应则呈线性变化特征。在实验获得的风干效应模型基础之上,建立了湿沙表面起动摩阻风速、风蚀模数随湿度变化的方程,这有助于了解湿沙表面风干过程中风蚀参数的变化特征。

**关键词:** 风干效应; 湿沙; 风蚀动力过程; 起动摩阻风速; 风蚀模数

文章编号: 1000-694X(2024)05-225-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00120

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

## 0 引言

风对地表物质的吹蚀、搬运和堆积过程形成了风沙地貌<sup>[1]</sup>。风蚀现象不仅广泛发生于干旱半干旱内陆地区和大陆冰缘区,也会出现在湿润地区的沙质海岸、湖岸和河岸。由于自然条件迥异,湿润海岸与干旱内陆风沙地貌发育与演化规律存在明显差异,因此海岸风蚀地貌研究的复杂性也备受关注<sup>[2-3]</sup>。中国拥有着漫长的海岸带,频繁的人类活动在很大程度上改变了沿岸生态环境及地表特征,引发海岸侵蚀过程,同时由于独特的季风气候,沙质海岸湿沙的风蚀过程具有一定的区域代表性<sup>[2,4-5]</sup>。

沙粒起动风速公式对于干沙风蚀过程进行了明确量化,但忽略了湿沙表面湿度变化会导致沙粒间内聚力的变化,进而影响沙粒起动;水分的冻融及凝结作用,也会显著改变土壤表层结构<sup>[6-10]</sup>。Ishizu-

ka等<sup>[11]</sup>通过野外观测发现,表面存在积雪的湿沙起动摩阻风速比于干沙提高了1.27倍。刘小平等<sup>[12]</sup>的风洞实验结果表明,湿沙起动摩阻风速比干沙增加了1.01~3.68倍,同时对粒径处在0.1~0.25 mm的沙漠沙来讲,含水量达到4%后,风蚀就很难发生了。陈银萍等<sup>[13]</sup>则发现,流动沙丘上沙粒的平均跃移高度会随着含水率的增加而增加。Chen等<sup>[14]</sup>认为,当土壤水分超过临界含量,其存在形式就会发生转化,土壤内聚力增大,颗粒起动变得困难;湿度较小时,风蚀量与湿度之间呈负指数相关,随后,当湿度为4%~6%或更高时,水分含量的增加将导致零风蚀。韩庆杰等<sup>[15-17]</sup>利用华南热带海岸的海滩沙,针对湿润沙面起动风速、风蚀模数,以及风沙传输特征进行了系列研究,建立了相关的参数模型,并认为高湿度下颗粒间水膜产生的黏滞力足以抑制大风条件下风蚀的发生。

收稿日期:2024-08-14; 改回日期:2024-09-07

资助项目:国家自然科学基金项目(41771010,42071048);宁夏沙坡头规模化防沙治沙试点项目生态监测工程(宁沙管合字[2021]08号);兰州铁道设计院有限公司技术开发项目(兰院科13-04-01);甘肃省科技重大专项国际合作项目(22ZD6WA036)

作者简介:王彬(1994—),男,甘肃兰州人,博士研究生,主要从事风沙物理方面的研究。E-mail: wangbin202@mails.ucas.ac.cn

通信作者:韩庆杰(E-mail: hqjecology@163.com)

同类研究中,Neuman等<sup>[18-19]</sup>认为,在自然风条件下,含水量为1%~2%的沙丘沙是无法起动的,所以即使在含水量较低,水分仍然对沙粒的起动存在着很强的限制作用。这与大量的野外实际观测结果相悖。Sarre<sup>[20]</sup>与Wiggs等<sup>[21]</sup>发现海滩沙含水量超过5%时,仍然会发生大规模的迁移。李斌鹏等<sup>[22]</sup>针对内蒙古荒漠草原地表的研究也表明,含水量通过与风速的交互作用起到降低风蚀的作用,但影响程度较低,当风速超过 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,土壤含水量对于风蚀率的影响不明显。之后Neuman等<sup>[23]</sup>利用数字摄影测量技术确定沙面的水分含量,利用风洞实验研究了水分含量对风蚀沙粒的影响,发现湿沙表面的颗粒会被迅速吹干,然后发生跃移,但在跃移过程中,这些颗粒又会被再次黏附在湿沙表面,导致跃移过程中断,因此湿沙风蚀过程中影响作用更大的是湿沙的面积比例。Song等<sup>[24]</sup>对湿沙表面蒸发过程的相关模型进行了验证,发现表层含水率达到4%时蒸发加快。因此,虽然研究区域及方法各有不同,但研究者们都认为湿沙表面湿度存在一个阈值,这个阈值直接决定湿沙表面风蚀发生与否。

然而,上述研究仍然只是将湿度作为一个静态参数来考虑,忽视了自然条件下湿度会在水、气循环作用下随时变化。对此,Kiyoshi等<sup>[25]</sup>在海滩上模拟了湿沙的风干过程,并发现野外风干速率高于室内,原因是太阳辐射导致了地表水分的快速蒸发,同时表层沉积物中的湿度下降速率高于底部,但其研究也只是定性分析了气温、湿度、太阳辐射与风蚀过程的关系,并没有对这种关联做出定量解释。Jackson等<sup>[26]</sup>也记录了自然状态下不同时间段的表层湿度变化,但该过程同样受到了太阳辐射、潮汐、降雨等多种自然因素的影响。Wiggs等<sup>[27]</sup>通过实时观测降雨前后湿沙表面的湿度变化,发现湿度变化会引起湿沙传输过程主导因素的转换,即湿度较小时,风速是控制沙粒跃移传输的主导因素,而随着湿度上升,控制沙粒跃移的主导因素便由风速转换成了湿度。这种转换对当时的湿度条件非常敏感,并在几分钟到几小时内发生,且临界湿度阈值为4%~6%,高于风洞实验得出的1%~4%。此外,接近2%的湿度(其中水分附着在跃移颗粒上)对输沙率没有影响。

因此,上述研究深入阐明了湿度在湿沙表面风

蚀过程中的作用,系统量化了湿沙表面风蚀过程中的相关参数,证实了表面湿度变化会导致湿沙传输过程主导因子的转变。但受制于自然条件随机因素的干扰,没有精确量化表面湿度在时间尺度上的均匀变化。因此在接近于自然风速下,排除太阳辐射及降雨等自然因素的影响,量化湿沙表层质量湿度随时间的变化特征、建立相关模型显得必要。并需要在此基础上,进一步量化湿沙风蚀过程中的风干效应对湿沙表面起动摩擦风速、风蚀模数的影响。这不仅是对湿沙风蚀过程研究的补充与完善,也可以为海岸风沙防护工作提供一定科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 沙样采集及预处理

实验沙样采集自广东省汕尾市陆丰市甲子镇半日潮海岸(图1),平均粒径 $0.175\text{ mm}$ 。由于盐分会显著影响湿沙的风蚀过程<sup>[28]</sup>,因此为了除去可溶性盐和有机质,沙样被烘烤并经清水洗净<sup>[16]</sup>。将沙样放入 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中 $24\text{ h}$ ,至水分完全烘干,然后用瓶装蒸馏水配置湿度为10%的沙样,存放于塑料袋中密封作为预制湿沙样本,并放置 $24\text{ h}$ 以上,以达到水分和沙粒的均匀混合。

### 1.2 风洞实验

2022年10月于中国科学院西北生态环境资源研究院敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站开展风洞实验,期间室外气温 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。风洞为野外移动式风洞,该风洞实验段长度为 $10\text{ m}$ ,横断面为 $0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ ,为直流闭口吹气式风洞,风速可实现 $0\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 多段可调<sup>[29]</sup>。

将配置好的湿沙平均分配并放置于实验段末端的3个沙盘中(沙盘尺寸为 $56\text{ cm}\times 36.5\text{ cm}\times 4.5\text{ cm}$ ),用钢尺刮平沙盘表面,使其与风洞底面保持齐平(图2)。在实验段入口 $30\text{ cm}$ 高度处,用单根皮托管测定风速,每吹蚀一定时间后风洞停机,并迅速使用表层沉积物取样器取样(取样器尺寸为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 1\text{ mm}$ ),取样顺序和位置由沙盘末端逐次向前,这样可保证每次取样,均不会干扰到前端沙面和下次取样。3个沙盘共计取样45次(图3~图5)。其中,前30次取样对应的吹蚀时间为 $8\text{ min}$ ,后15次取样对应的吹蚀时间为 $3\text{ min}$ ,将采集到的沙样迅速称重



图 1 广东省陆丰市甲子镇的半日潮海岸

Fig.1 The coast of semi diurnal tide in Jiayi Town, Lufeng City, Guangdong Province

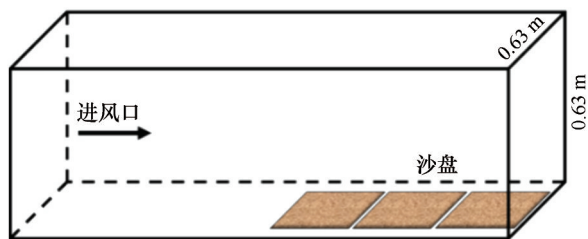


图 2 风洞实验布设

Fig.2 Wind tunnel experiment layout

(精度 0.001 g),并记录数据  $m_1$ ;然后,风洞再次开机,继续吹蚀、取样、称重的重复操作,共取样 45 次;最后,将 45 个沙样烘干后再次称重分别得到  $m_2$ ,用  $m_1$  和  $m_2$  计算出每组沙样在吹蚀中期的实时平均湿度值,便可得到沙面湿度随时间的变化特征。

实验中应该注意以下 3 个问题:

首先是风速设置。由于沙面的风干效应是微

量的,且干沙斑块的出现时空分布上也是随机和变化的,大风会在很大程度上影响风干效应的测量结果。因此,选择了  $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的匀风吹蚀湿润沙盘,该风速低于干燥沙面的起动风速,所以避免了沙面风蚀作用对结果的影响,基本可以保证吹蚀过程中湿润沙面上被带走的仅仅是水分。

其次是风蚀期间湿度值的确定。一般研究中,沙面在暴露到风中之前,其水分含量就已决定,正如 Bisal 等<sup>[30]</sup>认为的,在侵蚀发生之前,风干可能在很大程度上减小沙面的水分含量,当侵蚀发生之后,沙面湿度会有明显变化。因此在侵蚀前、后,分别测量沙面湿度,所获得的侵蚀中期的沙面平均湿度是较为准确的。依据上述观点,将相邻两次侵蚀结束后测得的湿度平均值,作为风蚀期间的湿度值,这样结果将更准确。

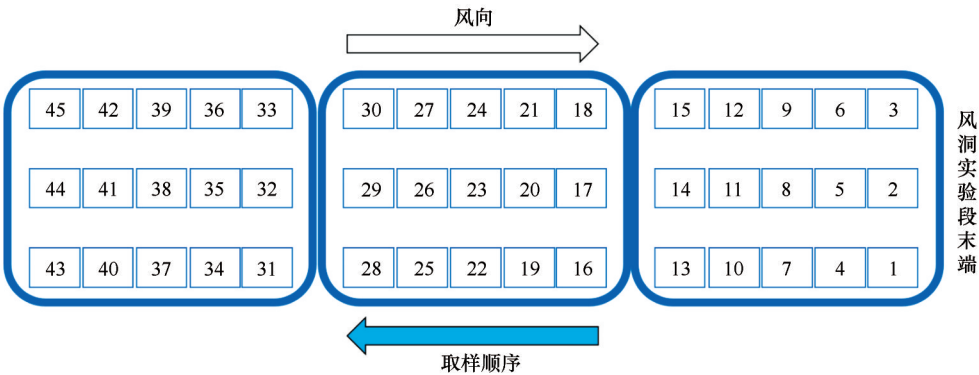


图 3 取样顺序示意图

Fig.3 Sampling principle

最后是取样间隔期间沙面的保湿方法。沙面暴露在气流中的时间为 3~8 min,为防止在吹蚀前湿沙表面已风干成较低的湿度值,在相邻两次吹蚀的间隔期,沙盘均用不锈钢盘覆盖,当风速达到

$6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,去掉不锈钢盘。另外,风洞达到实验风速和稳定状态最多需要 30 s,也在一定程度上抑制了实验间隙沙面的风干过程,保证了湿度数据的相对准确,风洞布设如图 2 所示。



质量湿度的计算公式为:

$$M = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \quad (1)$$

式中:  $M$  为质量湿度(%);  $m_1$  为风蚀后取样时的湿沙质量(g);  $m_2$  为烘干后的干沙质量(g)。

在湿沙表面风干效应研究中,使用自制的表层沙取样器来采集表面沙样(图4)。取样器由连接收集槽的方形不锈钢框架、可滑动刮片两部分构成,其中刮片的下边沿凸出框架底面 1 mm<sup>[16]</sup>。框架尺寸为 100 mm×100 mm×30 mm,可采集的沙样水平面积为 100 mm×100 mm。取样时将该取样器平放在沙面,沿方形框架边缘水平拖拉刮片,框架内(100 mm×100 mm)的表层沙样就会被收集在簸箕形的收集槽内。该表层沉积物取样器可以快速可靠地采集面积 100 mm×100 mm、深度 1 mm 的沙样<sup>[15]</sup>。一般将沙面表层定义为几个至十几个颗粒的粒径厚度,大部分沙漠和海岸天然沙,表层厚度 1~2 mm,因此该取样器适用于大部分沙漠和海岸地表沙表层取样工作。



图4 表层沉积物取样器  
Fig.4 Topsoil sampler

风洞实验结束后,通过固定风速下沙面湿度随时间的变化情况,定量分析湿沙表面的风干效应,湿度随时间变化的数据通过计算机软件 Origin2020 进行拟合。最后将拟合方程代入已有的风蚀参数模型,建立湿沙表面风干过程中典型风蚀参数随时间变化的新模型。

前期研究中,使用同样的海滩沙,利用风洞方法,已分别建立了湿沙表面的风蚀起动摩阻风速与风蚀模数的参数模型<sup>[15-17]</sup>:



图5 湿沙表面风干效应实验过程

Fig.5 Experimental process of wind desiccation effect on wet sand surface

起动摩阻风速

$$U_{*tm} = A \left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho_a} \right) g d \right]^{1/2} [B + C \ln(100M)] \quad (2)$$

式中:  $g$  为重力加速度( $m \cdot s^{-2}$ );  $d$  为颗粒的粒径(mm);  $\rho_s$  与  $\rho_a$  为沙子及空气的密度( $kg \cdot m^{-3}$ );  $A$  为干沙状态下与颗粒摩阻雷诺数相关的比例系数;  $B$ 、 $C$  为不同粒径湿沙相对应的起动摩阻风速方程中的参数(对应参数详见文献[16]表2、表3)。

实验中天然沙的平均粒径为 0.18 mm,因此本研究选取了已有方程中 0.175 mm 粒径所对应的的相关参数,来进行模型的融合,代入参数后方程为:

$$U_{*tm} = 0.202 \left[ 0.175 \left( \frac{\rho_s}{\rho_a} \right) g \right]^{1/2} [1.938 + 0.633 \ln(100M)] \quad (3)$$

风蚀模数。根据前序所做湿沙风蚀模数的研究,使用的实验沙样与本次研究的沙样为同一批采集,平均粒径 0.19 mm,与本次沙样 0.18 mm 的平均粒径较为接近,因此可代入其研究总结的风蚀模数模型:

$$E = aM^b \quad (4)$$

式中:  $E$  为风蚀模数( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ );  $M$  为质量湿度(%);  $a$ 、 $b$  参数由风速确定(参数对应表详见文献[17])。

2 结果与分析

2.1 湿度随风干时间的变化特征

湿沙表面湿度随时间的总体变化呈三次多项式分布。

$$M=at^3+bt^2+ct+d \tag{5}$$

式中： $M$ 为湿沙表层 1 mm 厚度的质量湿度(%)； $t$ 为风干时间(min)； $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 为相关拟合参数，分别为  $-1.871\times10^{-6}$ 、 $6.218\times10^{-4}$ 、 $-0.073$ 、 $10.302$ ， $R^2$  为 0.957。

湿沙表面在  $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的净风作用下，表面质量湿度随时间的变化趋势类似“S”形曲线(图 6)。湿润沙面初始湿度为 10.28%，经过 92 min 的风干作用，表面质量湿度迅速降低至 6.68%；然后风干作用开始变缓，又经过 136 min 的风干作用，湿度才缓慢降至 5.12%；继续风干过程，仅仅经过 27 min 后表面质量湿度就下降至 1.21%。

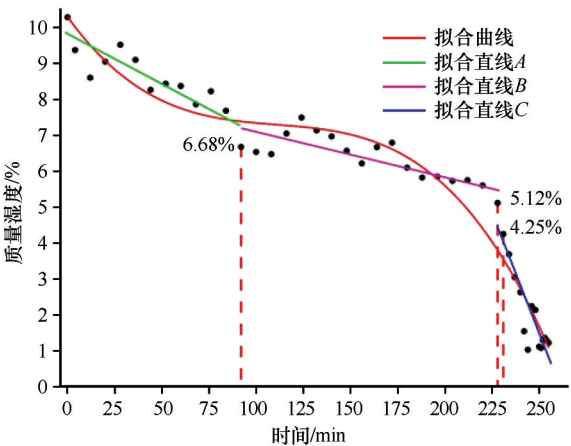


图 6 表面湿度随时间变化关系的拟合  
Fig.6 Fitting the relationship between surface humidity and time

所以，湿沙风干过程中，表面质量湿度下降的趋势呈现前快中慢后快的三段式变化，两个风干速度变化转折点对应的湿度值分别为 6.68%、5.12%。

由于湿沙表面湿度随时间的变化速度并不是均匀线性的，根据曲线(图 6)转折点，又对湿度随时间变化的数据进行了分段线性拟合，分别得到拟合直线 A、B、C，线性方程形式如下所示：

$$M=at+b \tag{6}$$

式中： $M$ 为湿沙表层 1 mm 厚度的质量湿度(%)； $t$ 为风干时间(min)； $a$ 、 $b$ 为线性拟合系数(表 1)。

表 1 表面湿度随时间变化关系的拟合参数

Table 1 Fitting parameters of the relationship between surface humidity and time

三段	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<i>A</i>	−0.027	9.748	0.777
<i>B</i>	−0.012	7.169	0.644
<i>C</i>	−0.135	4.411	0.831

2.2 风干效应对风蚀动力过程的影响

由于湿沙表面的风蚀，只有在其表面湿度降低至 4% 左右时才会发生，因此使用了图 6 与表 1 中线性拟合直线 C 段(即湿度低于 5.12% 后风干过程的相应数据)，将时间  $t$  单位转换为 s，方程形式变为：

$$M=-0.00225t+4.411 \tag{7}$$

式中： $t$ 为时间(s)； $M$ 为湿沙表面 1 mm 表层沙的质量湿度(%)。

起动摩阻风速。将式(7)代入已有湿沙表面起动摩阻风速参数模型式(2)中，便可获得起动摩阻风速随时间的变化方程式：

$$U_{*m}=A\left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_a}\right)gd\right]^{1/2}\left[B+C\ln(-0.225t+441.1)\right] \tag{8}$$

式中： $U_{*m}$ 代表起动摩阻风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )； $\rho_s$ 与  $\rho_a$ 为沙子及空气的密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )； $g$ 为重力加速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )； $d$ 为颗粒的粒径(mm)； $t$ 为时间(s)； $A$ 为干沙状态下与颗粒摩阻雷诺数相关的比例系数； $B$ 、 $C$ 为不同粒径湿沙相对应的起动摩阻风速经验方程中的参数，参见文献[16]。最后将  $\rho_s$  沙子密度( $2.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )、 $\rho_a$  标准状态( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，1 个标准大气压)空气的密度( $1.29\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )、 $g$  重力加速度( $9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ )、 $d$  粒径( $0.175\text{ mm}$ )、参数  $A$  (0.202)、 $B$  (1.938)、 $C$  (0.633)代入式(8)中。

由于自然状态下，湿沙风干过程中，表面湿度不可能完全降低至 0；同时若沙子完全干燥，式(2)所示湿沙表面起动摩阻风速的模型便不再适用。本次实验所用的沙样自然风干后的质量湿度为 0.143%<sup>[15]</sup>，因此在式(8)输入  $t$  时间(0~1 897 s，由式(7)计算可得，湿度由 4.411% 降低至 0.143%，需要 1 897 s)，得到湿度由 4.411% 降低至 0.143% 的过程中湿沙表面起动摩阻风速随时间的变化趋势(图 7)。

图 7 只能阐明表面湿度自 4.411% 降低至 0.143% (自然风干湿度)过程中，起动摩阻风速随时间的变化规律。

湿沙表面起动摩阻风速会随着时间增加(表面湿度的降低)而降低，在 0~1 592 s，起动摩阻风速由

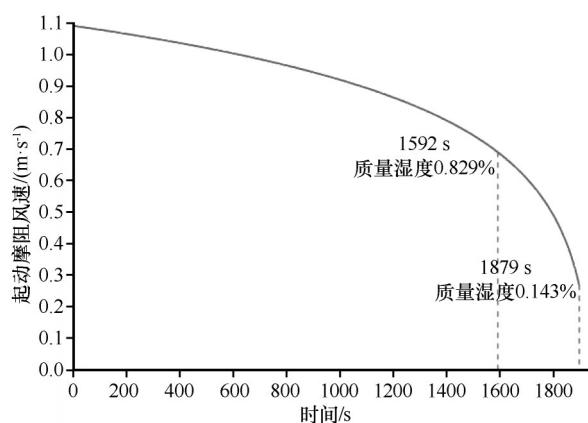


图7 湿沙表面沙粒起动摩擦风速随时间的变化特征

Fig.7 Trend of threshold friction velocities on wet sand surface with time

$1.091 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低至  $0.690 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 起动摩擦风速随时间的变化缓慢; 在  $1592\sim 1879 \text{ s}$ , 起动摩擦风速减小的速率加快,  $305 \text{ s}$  内起动摩擦风速就降低至  $0.268 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。所以  $1592 \text{ s}$  附近可视为变化转折点, 对应的表面质量湿度为  $0.829\%$ , 对应了起动摩擦风速急速降低的转折点。

风蚀模数。将式(7)代入已有湿沙表面风蚀模数参数模型式(2)中, 便可获得风蚀模数随时间的变化方程式:

$$E=a(-0.00225t+4.411)^b \quad (9)$$

式中:  $E$  为风蚀模数 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $t$  为时间 ( $\text{s}$ )。

将不同风速下对应的参数  $a$ 、 $b$  值代入式(9), 与式(8)相同, 输入  $t$  时间 ( $0\sim 1897 \text{ s}$ ), 得出湿度由  $4.411\%$  降低至  $0.143\%$  的过程中湿沙表面风蚀模数随时间的变化特征(图8)。

初始时间  $0 \text{ s}$ , 湿度为  $4.411\%$  时, 湿沙表面存在极少量的风蚀 ( $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速下也仅有  $0.001 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 而在很长一段时间内 ( $0\sim 1592 \text{ s}$ ), 风蚀模数极低, 且风蚀模数随时间的变化趋势非常平缓; 在  $1592 \text{ s}$  时, 对应的表面质量湿度为  $0.829\%$ , 在较高风速下 ( $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 的风蚀模数也仅有  $0.020 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 而在较低风速下 ( $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 的风蚀模数仅为  $0.009 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 但在 ( $1592\sim 1897 \text{ s}$ ) 内, 风蚀模数随时间增加的速度明显加快,  $1879 \text{ s}$  时质量湿度为  $0.143\%$  (自然风干湿度), 经过  $305 \text{ s}$  的风干过程, 此时较高

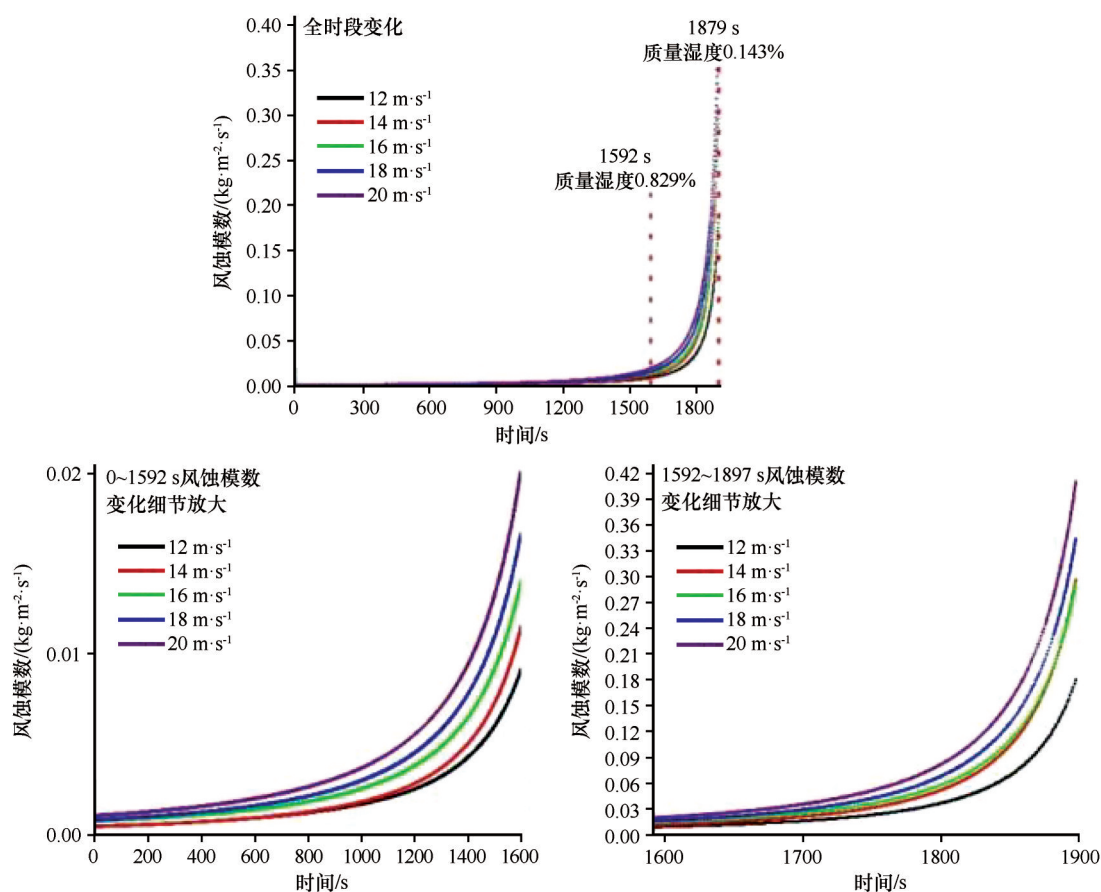


图8 不同风速下湿沙表面风蚀模数随时间的变化特征

Fig.8 Trend of wind erosion modulus of wet sand surface with time under different wind speeds



风速下( $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )风蚀模数为  $0.413 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 较低风速下的风蚀模数也有  $0.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

综合湿沙表面起动摩阻风速与风蚀模数的变化趋势(图7、图8), 在1 592 s的时间转折点上, 风蚀模数与起动摩阻风速的变化速度表现出很好的一致性。即在风干过程中, 当表面湿度低于0.829%后, 起动摩阻风速明显降低, 对应的风蚀模数显著增加。

### 3 讨论

#### 3.1 风干过程中湿沙表面湿度变化特征

本次风洞实验中的风速低于干沙的起动风速, 因此湿沙表面只发生了风干过程, 并没有风蚀发生。相比于已有的同类研究, 本次实验可以排除太阳辐射、降雨、潮汐等自然因素对风干过程的干扰, 而风干效应数据仅仅是由风速控制的, 并准确界定了定风速下表层湿度随时间的动态变化特征。

研究表明, 高湿度沙面在时间上的风干过程并不是线性的, 而呈现三项式分布的“S”形曲线变化特征(图6)。定风速下高湿度湿沙表面风干速率遵循前快中慢后快的三段式变化规律, 即表面湿度快速降低至6.18%后, 风干速率趋于平缓, 而当湿沙表层1 mm的质量湿度降低至5.12%时, 风干效应会再次明显加快。湿沙的起动不仅需要风速达到一个较高的阈值, 其表面湿度也存在一个阈值<sup>[31-33]</sup>, 只要湿沙表面湿度超过此阈值, 风速就不再是影响风蚀过程的主导因素了<sup>[12-14]</sup>, 即当沙面表层湿度升高到4%左右, 风蚀基本停止。该湿度阈值非常接近本研究发现的风干效应曲线的转折点湿度值。

而对于高湿度沙面风干作用前半程的速度变化趋势, 目前并不能对该转折点(92 min, 质量湿度6.68%)的出现做出合理解释, 需要对该“S”形曲线开展进一步研究, 例如通过电镜扫描拍照, 分析水分的存在形式是否在这一转折点发生了变化。

#### 3.2 风干效应曲线中转折点湿度值的意义

当沙面湿度降低的过程中, 5.12%左右的湿度值是一个转折点, 可以认为, 研究中风干过程的加速, 与湿沙表面风蚀发生的临界湿度有联系。临界湿度以下沙面才会发生风蚀, 这可能与该临界值之下, 沙粒间水分的存在形式发生了某种转折有关。

在此基础上, 选取湿度低于5.12%的数据进行线性拟合, 将拟合出的线性方程代入已有的风蚀参

数(起动摩阻风速、风蚀模数)随湿度变化的模型当中, 由此得到了湿润沙面风蚀过程中, 一定风速下各个风蚀参数随时间的变化规律。结果显示, 在初始湿度为4.411%的沙面上, 湿沙表面起动摩阻风速(图7)与风蚀模数(图8)随时间的变化过程中, 同样存在转折点, 1 592 s(对应的表面湿度为0.829%)对应了起动摩阻风速快速降低的转折点, 也对应了风蚀模数出现急速增加的转折点, 起动摩阻风速与风蚀模数在时间上的变化规律, 呈现出很好的一致性。陈银萍等<sup>[13]</sup>的研究也证实, 含水量升高会显著降低输沙量, 但输沙量下降速度随含水量变化呈现三段式, 其中含水率0.79%~1.01%时, 输沙量随含水量变化剧烈。该结论与本研究中拟合所得起动摩阻风速快速降低以及风蚀模数快速增加所对应的转折点湿度阈值(0.829%)高度重合。

#### 3.3 风干条件下风蚀过程湿沙表面水分存在形式的变化

在分析湿沙表面起动摩阻风速及风蚀模数变化随时间的变化规律时(图7), 仅选取了0~1 897 s期间的数据(1 897 s时质量湿度0.143%, 为自然风干湿度)。在此期间, 湿沙表面起动摩阻风速与风蚀模数随时间的变化过程中, 同样存在转折点, 1 592 s(对应的表面湿度为0.829%)对应了起动摩阻风速快速降低的转折点, 也对应了风蚀模数出现快速增加的转折点, 起动摩阻风速与风蚀模数在时间上的变化规律, 呈现出非常好的一致性。

颗粒间的吸附水通常被认为是弱吸收水, 范围从接近0到-1.5 MPa下的湿度( $M_{1.5}$ )。Baver<sup>[34]</sup>认为, -1.5 MPa下, 永久性萎蔫发生, 水分以包裹在颗粒周围的水膜形式存在, 至少颗粒连接处的楔入水分非常少, 只在蒸发时沉积物内部的水分才会发生运动, 此时, 毛细管无传导作用。当 $M > M_{1.5}$ 时, 实验风速下的湿沙表面风蚀作用基本为零<sup>[35]</sup>。此时沙粒之间开始出现液体桥, 沙面几乎不会发生风蚀, 不同风速对风蚀模数的影响基本可以忽略<sup>[17]</sup>。

而在本实验中, 标志风蚀量缓慢增加的转折点湿度值0.829%几乎等于 $M_{1.5}$ ( $M_{1.5}=0.83\%$ )。湿沙表面风蚀模数研究表明, 当质量湿度 $M < 0.802\%$ (接近于 $M_{1.5}=0.83\%$ ,  $M_{1.5}$ 为-1.5 MPa下的质量湿度)时, 风速是风蚀过程的主要控制因子<sup>[17]</sup>; 而当质量湿度 $M > M_{1.5}$ 时, 湿沙表面风蚀模数极小且风速的影响较小, 湿度成为风蚀模数的主控因子。这一结论与国

外相关研究的结果<sup>[27,35]</sup>吻合,湿度变化会改变湿沙风蚀过程中的主导因素。所以,当湿度升高接近 $M_{1.5}=0.83\%$ ,无须颗粒间液体桥的存在,仅颗粒间水膜所产生的黏滞力,就足以抑制风蚀发生<sup>[36-38]</sup>。

因此,湿度随时间变化的“S”形曲线,以及曲线转折点与湿沙表面风蚀发生的临界湿度值4%之间的重合关系,未来均需要进一步量化分析,特别是在微观尺度上确定在该转折点前后,沙粒间水分的存在形式是否发生了转折,因为以往研究已经明确

了液体桥相比于水膜有更大的黏滞力<sup>[13,39]</sup>。

### 3.4 显微镜下不同湿度沙面沙粒分布特征

为进一步验证水分对沙表面分布特征及风蚀过程的影响,对不同湿度条件下的沙粒表面进行了补充观测。本次实验的沙样平均粒径为0.18 mm,因此选取同批筛分后的沙样(0.15 mm、0.2 mm),利用Digital Microscope 8 WI-Fi显微镜对不同湿度沙面进行了实时观察(图9,图10)。

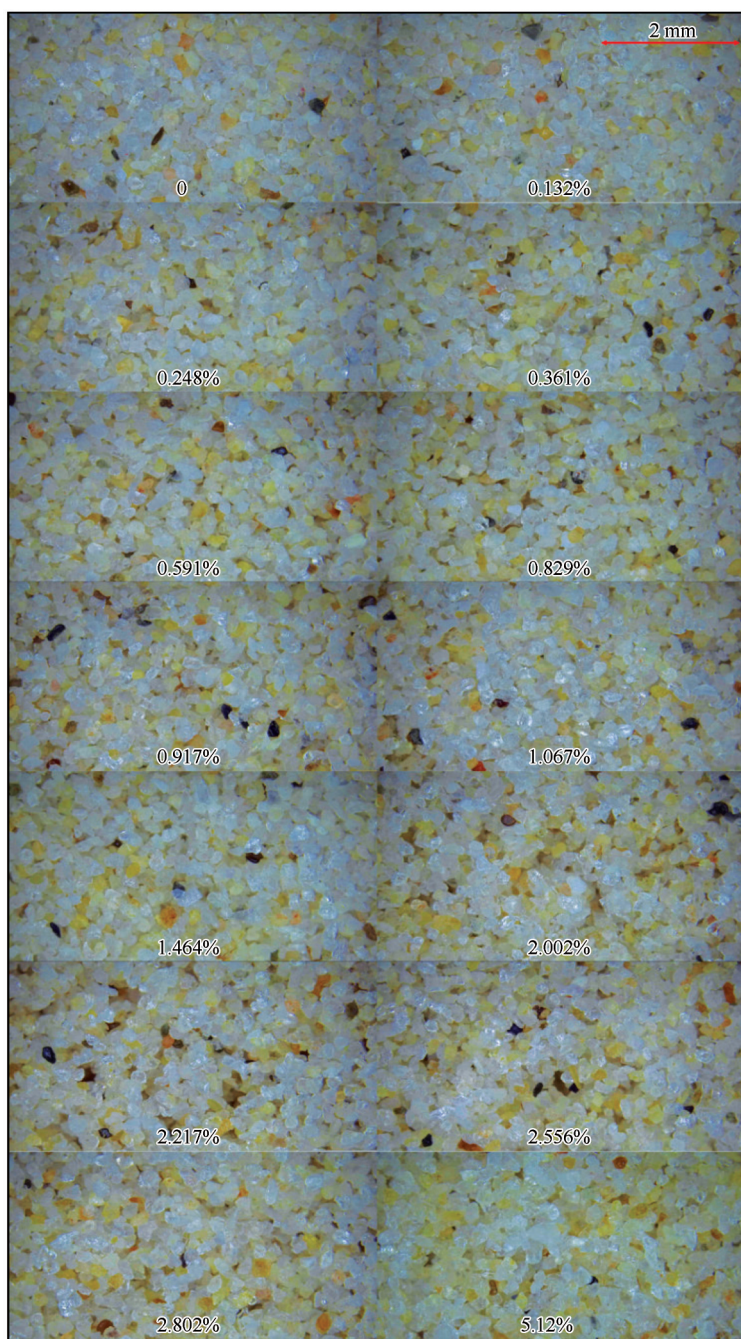


图9 不同湿度下0.15 mm湿沙表面沙粒分布特征

Fig.9 Surface particle distribution characteristics of sand at 0.15 mm under different humidity



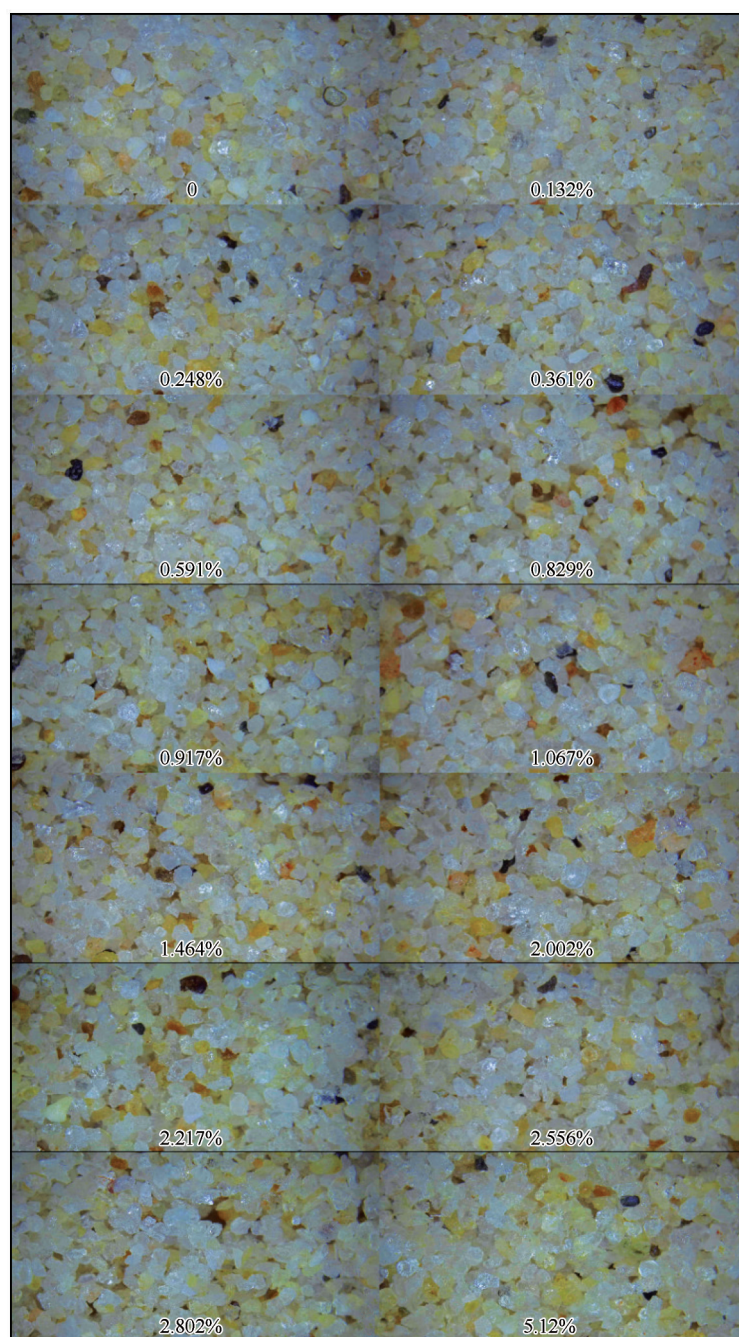


图10 不同湿度下0.2 mm湿沙表面沙粒分布特征

Fig.10 Surface particle distribution characteristics of sand at 0.2 mm under different humidity

由于硬件条件限制,无法实时观测到沙粒之间膜状水向毛细水转化的具体现象。但可以观察到,当湿度较小时(0.132%~0.591%),沙粒分布较为松散均匀;当湿度达到0.829%时,部分沙粒开始黏结;进一步提高含水量(0.917%~2.802%),观察到沙粒黏结现象加剧;当湿度达到5.12%时,显微镜下可以明显观察到沙粒之间充盈着明亮的水,更多的沙粒黏结在一起形成团聚体。

因此,虽然不能直接观察到水分存在形式的转

化对湿沙表面风蚀过程具有决定性作用,但仍然可以证明,当湿度达到0.829%( $M_{1.5}=0.83\%$ )时,沙粒可以通过水分黏结成团聚体,进而显著抑制风蚀。

## 4 结论

高湿度沙面在时间上的风干过程并不是线性的,而呈现三项式分布的“S”形曲线变化特征。当湿度降低至5.12%以下时,风干速度会明显加快。这与大量研究认为的湿沙起动阈值4%~5%极为接近。

湿沙表面风干过程加速与风蚀现象发生接近同步。由此推测,湿沙的风干效应与风蚀过程之间具有一定的耦合效应,即湿度降低至一定阈值后,风蚀就会发生,同时风蚀过程也会进一步加快风干的速度,使湿度极速降低。

水分是控制湿沙表面风蚀现象的主要因素,当表面湿度 $M > M_{1.5}$ 时,水分可以促使原本干燥松散的沙粒黏结在一起,形成大小不一的团聚体,进而抑制风蚀。此时风速对风蚀量的影响很小,颗粒间水膜产生的黏滞力就足以抑制沙粒的起动与传输。

### 参考文献:

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 董玉祥, 张青年, 黄德全. 海岸风蚀地貌研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2019, 34(1): 1-10.
- [3] 何岩雨, 刘建辉, 蔡锋, 等. 潮汐作用下的海滩风沙运动若干特征研究: 以福建平潭岛远垵澳海滩为例[J]. 海洋学报, 2018, 40(9): 90-102.
- [4] 董玉祥. 中国海岸风沙地貌的类型及其分布规律[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006(4): 99-104.
- [5] 杨林. 海岸沙丘形态对季风/台风的协同响应研究现状与展望[J]. 中国沙漠, 2022, 22(1): 1-6.
- [6] 司前程, 李锦荣, 崔万新, 等. 冬季沙漠沙丘土壤凝结特征及来源分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(6): 44-51.
- [7] 殷代英, 屈建军, 韩庆杰, 等. 青藏铁路错那湖段风沙活动强度特征分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 9-15.
- [8] 李秋艳, 蔡强国, 方海燕. 风水复合侵蚀与生态恢复研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 65-72.
- [9] 孙宝洋, 李占斌, 肖俊波, 等. 冻融作用对土壤理化性质及风水蚀影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 337-347.
- [10] Xie S, Qu J, Xu X, et al. Interactions between freeze-thaw actions, wind erosion desertification, and permafrost in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Natural Hazards, 2017, 85(2): 829-850.
- [11] Ishizuka M, Mikami M, Yamada Y, et al. An observational study of soil moisture effects on wind erosion at a gobi site in the Taklimakan Desert[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2005, 110(D18): D004709.
- [12] 刘小平, 董治宝. 湿沙的风蚀起动风速实验研究[J]. 水土保持通报, 2002(2): 1-4.
- [13] 陈银萍, 曹雯婕, 余沛东, 等. 土壤含水率对风沙流结构及风蚀量的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 173-180.
- [14] Chen W N, Dong Z B, Li Z S, et al. Wind tunnel test of the influence of moisture on the erodibility of loessial sandy loam soils by wind[J]. Journal of Arid Environments, 1996, 34(4): 391-402.
- [15] 韩庆杰, 屈建军, 廖空太, 等. 海岸湿沙表面风沙传输特征的风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1512-1521.
- [16] 韩庆杰, 屈建军, 张克存, 等. 海滩湿润沙面起动摩擦阻风速的风洞实验[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1373-1379.
- [17] 韩庆杰, 屈建军, 张克存, 等. 华南热带湿润海滩风蚀模数的风洞研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 37-40.
- [18] Neuman C M, Nickling W G. A theoretical and wind-tunnel investigation of the effect of capillary water on the entrainment of sediment by wind[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1989, 69(1): 79-96.
- [19] Neuman C M. Effects of temperature and humidity upon the entrainment of sedimentary particles by wind[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2003, 108(1): 61-89.
- [20] Sarre R D. Aeolian sand drift from the intertidal zone on a temperate beach: potential and actual rates[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1989, 14(3): 247-258.
- [21] Wiggs G F S, Atherton R J, Baird A J. Thresholds of aeolian sand transport: establishing suitable values[J]. Sedimentology, 2004, 51(1): 95-108.
- [22] 李斌鹏, 陈新闯, 董智, 等. 不同土壤水分条件对内蒙古荒漠草原地表风蚀影响的风洞模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(9): 126-132.
- [23] Neuman C M, Langston G. Measurement of water content as a control of particle entrainment by wind[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, 31(3): 303-317.
- [24] Song W K, Cui Y J, Ye W M. Modelling of water evaporation from bare sand[J]. Engineering Geology, 2018, 233: 281-289.
- [25] Kiyoshi H, Shintaro H, Susumu K. Experimental study of blown sand on a wetted sand surface[J]. Coastal Engineering in Japan, 1982, 25(1): 177-195.
- [26] Jackson N L, Nordstrom K F. Effects of time-dependent moisture content of surface sediments on aeolian transport rates across a beach, Wildwood, New Jersey, USA[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 22(7): 611-621.
- [27] Wiggs G F S, Baird A J, Atherton R J. The dynamic effects of moisture on the entrainment and transport of sand by wind[J]. Geomorphology, 2004, 59(1/4): 13-30.
- [28] Li C, Dong Z B, Yin S, et al. Influence of salinity and moisture on the threshold shear velocity of saline sand in the Qarhan Desert, Qaidam Basin of China: a wind tunnel experiment[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(5): 674-684.
- [29] 谢胜波, 屈建军, 韩庆杰. 青藏高原冻融风蚀形成机理的实验研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 64-68.
- [30] Bisal F, Hsieh J. Influence of moisture on erodibility of soil by wind[J]. Soil Science, 1966, 102(3): 143-146.
- [31] Cornelis W, Gabriels D. The effect of surface moisture on the entrainment of dune sand by wind: an evaluation of selected models[J]. Sedimentology, 2003, 50(4): 771-790.
- [32] Davidson-Arnott R G, Macquarrie K, Aagaard T. The effect of wind gusts, moisture content and fetch length on sand transport on a beach[J]. Geomorphology, 2005, 68(1/2): 115-129.
- [33] Nourzadeh M, Bahrami H A, Goossens D, et al. Determining soil erosion and threshold friction velocity at different soil moisture conditions using a portable wind tunnel[J]. Zeitschrift

- Für Geomorphologie, 2013, 57(1): 97–109.
- [34] Baver L D. Soil Physics [M]. New York, USA: Wiley, 1972: 337.
- [35] Chepil W S. Influence of moisture on erodibility of soil by wind [J]. Soil Science Society America Proceedings, 1956, 20(2): 288–292.
- [36] Han Q J, Qu J J, Zhang K C, et al. Wind tunnel investigation of the influence of surface moisture content on the entrainment and erosion of beach sand by wind using sands from tropical humid coastal southern China [J]. Geomorphology, 2009, 104(3/4): 230–237.
- [37] Han Q J, Qu J J, Zhang K C, et al. Wind tunnel experiment of the threshold friction wind velocity on wet beach sand surface [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1373–1379.
- [38] Han Q J, Qu J J, Zhang K C, et al. A wind tunnel study of the parameters for aeolian sand transport above a wetted sand surface using sands from a tropical humid coastal region of southern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(1): 243–250.
- [39] Wang Z T. Influence of moisture on the entrainment of sand by wind [J]. Powder Technology, 2006, 164(2): 89–93.

## Wind desiccation effect and dynamic process of wind erosion on wet sand surface

Wang Bin<sup>1abc,2</sup>, Han Qingjie<sup>1ab</sup>, Liu Bing<sup>1ac</sup>, Sun Xiangbo<sup>3</sup>, Zhao Xingying<sup>3</sup>, Liu Yan<sup>3</sup>, Wang Yongjun<sup>3</sup>

(1. a. Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands / b. Dunhuang Gobi and Desert Ecology and Environment Research Station / c. Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Ningxia Shapotou National Nature Reserve Administration, Zhongwei 755000, Ningxia, China)

**Abstract:** Wind drying is a crucial factor influencing the wind erosion and transport processes on wet sand surfaces. To explore the mechanisms of wind erosion dynamics on wet sand surfaces, a wind tunnel device was used to simulate the wind drying process on wet sand surfaces at low wind speeds. The experimental results indicate that: (1) The wind drying process on wet sand surfaces with high humidity (above 10%) exhibits an "S" shaped change characteristic with a triexponential distribution. Under constant wind speed, the rate of surface humidity decrease shows a fast-slow-fast pattern, with a turning point humidity value of 5.12%. This value is very close to the threshold humidity value of 4%–5% for wet sand initiation found in existing studies, fully demonstrating that the acceleration of the wind drying process on high-humidity sand surfaces is almost synchronous with the occurrence of wind erosion. (2) Under low humidity (below 5.12%), the wind drying speed and wind erosion significantly accelerate synchronously at a humidity threshold of 0.829%, which is close to  $M_{1.5}$ . Therefore, wind erosion on wet sand surfaces may be closely related to the form of water presence between particles. Thus, it is inferred that there is a feedback relationship between the wind drying effect and the wind erosion process on wet sand surfaces. When the humidity drops to a certain threshold, wind erosion occurs, and the wind erosion process accelerates wind drying. The wind drying effect at this stage shows a linear change characteristic. Based on the wind drying effect model obtained from the experiment, equations were established for the threshold friction wind speed and wind erosion modulus of wet sand surfaces as functions of humidity. This helps researchers understand the changing characteristics of wind erosion parameters during the wind drying process on wet sand surfaces and improves the related research on the wind erosion dynamics of wet sand surfaces.

**Key words:** wind desiccation effect; wet sand; wind erosion dynamic process; threshold friction velocity; wind erosion modulus