

韩兆恩,崔巍,李锦荣,等.土壤含水率对冻结风沙土风蚀速率的影响[J].中国沙漠,2024,44(1):228-234.

土壤含水率对冻结风沙土风蚀速率的影响

韩兆恩^{1,2},崔巍²,李锦荣²,唐国栋²,张俊³

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院,内蒙古 呼和浩特 010018; 2.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站,北京 100038; 3.磴口县水利局,内蒙古 磴口 015200)

摘要: 乌兰布和沙漠冬季土壤冻结,流动沙丘表层干沙风蚀后出现冻结裸斑,风沙输移环境发生改变。为研究冻结裸斑对风蚀的影响,探讨不同含水率冻结风沙土风蚀的差异,根据野外实际情况,试验设置5、7、8.5、10、12 m·s⁻¹风速梯度,设置土壤含水率(1%~6%)6个梯度,以自然状态下干沙(含水率0.13%)作为对照,开展冻结风沙土风蚀模拟风洞试验。结果表明:发生冻结时,含水率≤2%风沙土2 h内即可产生稳定冻结,而含水率>3%风沙土则5~12 h产生稳定冻结。风沙土含水率相同时,冻结风沙土风蚀速率随着风速升高而增大,风蚀速率 Q 与风速 V 符合指数函数 $Q=ae^{bV}$ 。风速相同时,随着土壤含水率升高,冻结风沙土风蚀速率减小;风蚀速率与冻结风沙土含水率 w 符合指数函数 $Q=ce^{dw}$ 。三者关系式符合 $Q=0.367e^{0.849V-0.677w}$ ($R^2=0.994$),冻结风沙土风蚀速率较自然干沙风蚀速率减小40%~98%,冻结风沙土含水率>3%时,可以有效抑制风蚀。风速、含水率是影响冻结风沙土风蚀速率的主要因素。当未来气候趋向于暖化,可能导致乌兰布和沙漠冬季风蚀增强。

关键词: 风蚀速率; 冻结; 土壤含水率; 风洞试验

文章编号: 1000-694X(2024)01-228-07

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00120

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

风沙输移是沙漠地区的重要地表运动^[1],主要通过风蚀、扬沙对周围环境产生作用。土壤风蚀指在风的影响下,土体和其母质被剥蚀、分选、搬运的过程^[2]。风蚀导致水土流失、土地生产力降低,进而对农业、林业、畜牧业构成严重威胁^[3];同时强烈风蚀造成的沙尘暴对人体健康乃至全球气候和生态环境造成了极大的威胁^[4]。表层土壤水分是影响风蚀的重要因素^[5],当水分增加时,土壤表层的沙粒与水分子间形成的黏附力会增强,沙粒与沙粒形成团聚体,导致起动风速增大^[6],抑制风沙活动。湿沙形成冻结土后,会进一步降低风蚀速率,但当土壤水分到达某一临界含水率时,土壤水分冻结对风蚀速率的影响基本消失,目前野外测定的临界含水率在4%左右,而风洞测定的临界含水率在2%左右^[7-8],并且经过冻融循环后的风沙土风蚀强度比湿沙增加一倍以上^[9],可见冻结会暂时抑制风蚀,但当冻土融化后风蚀反而会更强烈。

乌兰布和沙漠地处季节冻融区,风沙活动较为活跃,风沙流会进入黄河^[10],该地区地形地貌独特,风沙输移条件复杂,冬季流动沙丘风沙活动仍然活跃^[11]。该地区流动沙丘表面5~10 cm为干沙层,干沙层下为湿沙层,冬季湿沙层形成冻结层,表层干沙风蚀后,冻结层裸露,形成地表“裸斑”,进而冻结层直接受到风蚀。另外,随着全球气候变暖,地表风沙活动有进一步加剧可能^[12-14],一方面是因为空气温度升高,风速有增加趋势;另一方面是季节性冻土区冻结期温度升高,土壤水分含量降低,这些都使得沙层表面更易受到风蚀。为此,本文对不同含水率冻结风沙土的风蚀状况进行探讨,考虑风速和含水率单因子及双因子对冻结风沙土风蚀速率的影响,完善冻结条件下风沙运动的研究。

1 材料与方法

1.1 采样区概况

本试验所用土样采集地为刘拐沙头试验场

收稿日期:2023-06-16; 改回日期:2023-09-01

资助项目:国家自然科学基金面上项目(42071021)

作者简介:韩兆恩(1999—),男,内蒙古巴彦淖尔人,硕士研究生,研究方向为荒漠化防治。E-mail: 3366833934@qq.com

通信作者:李锦荣(E-mail: lijnrong918@126.com)

(40°10'02"N、106°50'45"E), 该地区属于典型的中温带大陆性干旱季风气候^[15], 空气干燥, 雨量稀少, 年降水量 142.7 mm, 主要在 7—10 月^[16], 年蒸发量 2 258.8 mm, 年平均气温 8.0 °C, 冬季最低气温 -20.47 °C, 低于 0 °C 天数达 100 d, 冬季平均相对湿度 53.16%^[17]。土壤主要为风沙土, 结构松散, 砂粒(>0.05 mm)占 98.9%, 粉粒(0.05~0.002 mm)1.1%, 黏粒(<0.002 mm)可以忽略, 有机碳含量 0.8 g·kg⁻¹。12 月至次年 2 月土壤发生冻结, 持续时间 100 d 左右(图 1)。冻结层最深可达 81 cm^[18], 冻结层下方为未冻结湿沙层, 上方覆有流动干沙层, 厚 8~20 cm。冻结期昼夜温度湿度变化对土壤表层凝结水的形成产生影响, 凝结水含量即表层土壤水分含量 0.15%~0.35%^[19], 地下 0~100 cm 土层土壤水分含量 1.5%~4.6%。研究区风沙活动频繁, 地表风蚀强烈, 大风多发于 3—5 月, 多年起沙风向为西风及西南风^[20], 春季主要为西北风; 夏季主要为南风、东南风; 秋季主要为西风; 冬季主要是西风、西北风^[21], 年平均风速 3.7 m·s⁻¹, 临界起沙风速为 5 m·s⁻¹, 最大风速 12 m·s⁻¹, 扬沙天气一年四季均有出现^[22], 多年平均大风日数 10—32 d, 多年平均扬沙日数 75~79 d, 沙尘暴日数 19~22 d, 起沙风中风速 5~6 m·s⁻¹占 50.26%, 6~10 m·s⁻¹占 47.12%, 大于 10 m·s⁻¹占比低于 3%^[23]。

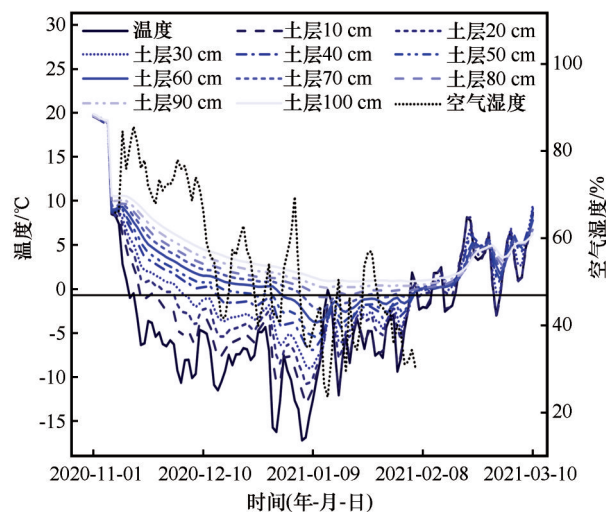


图1 采样区 2020—2021 年冻结期空气温湿度及各土层温度

Fig.1 Air temperature and humidity and temperature of each soil layer in the freezing period of 2020–2021 in the sampling area

1.2 试验设计

1.2.1 风洞参数

风洞试验在内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站的风洞实验室开展。风洞总长 29 m, 风机叶轮直径 1.8 m, 叶片角度 350°, 风

机轴转速 720 r·min⁻¹, 最大输出功率 185 kW, 洞体分为进风喇叭口、风机段、渐变段、转角段、稳定段、收缩段、试验段及扩散段, 试验段长 12.6 m、宽 2.5 m、高 1.8 m, 为直流正压吹气式风洞, 风速范围 2~30 m·s⁻¹连续可调。洞体试验段内安装二维风速仪 6 台和三维风速仪 1 台, 位置可调, 数据通过无线网络传输至观测室电脑。

1.2.2 试验设计

试验在 2023 年 2 月进行, 试验前进行风速测定, 通过粗糙元将风洞试验过程中的风速廓线调整到与野外风速廓线相似。前期调查取样发现冻结期流动沙丘土壤含水率为 1.5%~4%, 故土壤含水率设置 1%、2%、3%、4%、5%、6% 等 6 个梯度, 以自然风干的风沙土作为对照(CK, 含水率 0.13%)。根据已知沙量计算出所需水量, 搅拌均匀后装填到样品盘, 样品盘长 35 cm、宽 35 cm、高 7 cm, 盘中埋设 HOBO 小型温度计, 观测冻结时段内的土壤温度。为保证各沙盘装填完的紧实度一致, 将沙盘提到固定的高度然后自然放到地上, 如此重复一定次数, 然后用保鲜膜进行包装, 避免水分损失。

通过预试验发现, 冻结时间在 8 h 时沙盘>4% 含水率风沙土未完成冻结, 故设置冻结时长为 16 h, 保证不同水分梯度土壤处于稳定冻结状态。试验前后分别用铝盒在沙盘表层 3 cm 范围内取土样烘干, 测定吹蚀前后土壤含水率损失。每个含水率梯度冻结沙盘分别在风洞实验室以 5(起沙风速)、7、8.5(平均风速)、10、12 m·s⁻¹(最大风速)风速吹蚀, 为了使风蚀速率差异性明显, 吹蚀时间设置为 30 min, 吹蚀时将沙盘放入风洞中的沙盘口中, 四周用铁板固定密封(图 2~3), 分别称量吹蚀前后的沙盘重量。



图2 风洞布设

Fig.2 Picture of wind tunnel layout

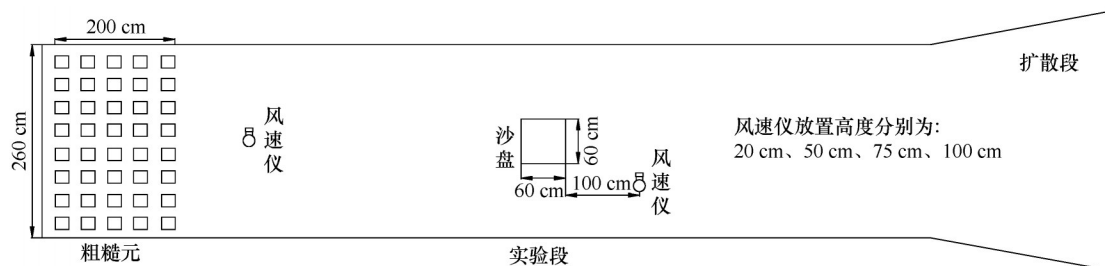


图3 风洞布设平面图

Fig.3 Top view of wind tunnel layout

由于利用自然温度冻结,为排除由于温度改变而造成的影响,将本试验分为两部分,第一部分为在相同温度下配置不同含水率梯度沙盘,在冻结后以相同风速吹蚀,每组7个沙盘(CK、1%、2%、3%、4%、5%、6%)。第二部分为在相同温度下配置相同含水率梯度沙盘,每组5个沙盘,冻结后以不同风速梯度吹蚀。通过对两部分沙盘风蚀速率进行方差分析,排除由于冻结温度差异而导致沙盘风蚀速率差异。

1.3 数据处理及计算

考虑到风蚀过程中可能存在土壤含水率自然损失,用公式(1)计算发生冻结风沙土含水率损失时的风蚀速率:

$$Q = \frac{M_1(1 - K_1) - M_2(1 - K_2)}{E \cdot t} \quad (1)$$

如果风蚀前后冻结风沙土含水率没有发生变化,可选用公式(2)计算:

$$Q = \frac{M_1 - M_2}{E \cdot t} \quad (2)$$

式中: Q 为风蚀速率, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; M_1 、 M_2 分别为沙盘吹蚀前后的质量, g ; K_1 、 K_2 分别为试验前后沙盘含水率,%; E 为沙样受吹蚀面积, m^2 ; t 为吹蚀时间, h 。

2 结果与分析

2.1 风沙土冻结温度及含水率变化

随着冻结的发生,风沙土温度逐渐下降,直到逐渐与空气温度变化趋于平行状态,产生稳定冻结(图4)。CK及含水率1%、2%风沙土冻结时间段内,土壤温度在2 h内下降到比空气温度高1~2℃,之后变化与空气温度变化保持平行状态;含水率3%~6%风沙土冻结时间段内,土壤温度先缓慢降低,初步冻结后快速下降到比空气温度高3~5℃,形

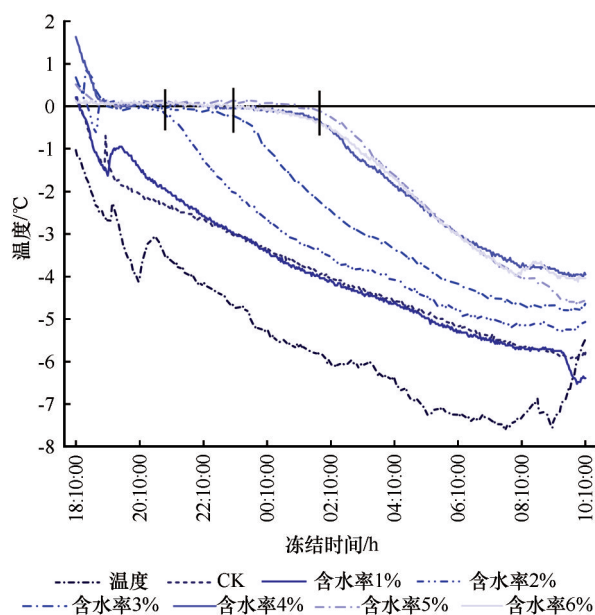


图4 不同含水率风沙土冻结温度

Fig.4 Changes of freezing temperature of aeolian soil with different moisture content

成稳定冻结,冻结时长5~12 h。可见,随着风沙土含水率增大,冻结所需时间延长。

考虑到在风洞试验过程中,风速会影响土壤含水率变化。对吹蚀前后含水率进行方差分析,发现冻结风沙土风蚀前和风蚀后含水率不存在差异性($P>0.05$),即冻结风沙土吹蚀前后的含水率损失可以忽略,计算风蚀速率时选用公式(2)。本文设置的两组试验中,由于采用自然温度冻结,所以风沙土冻结温度无法保证一致。将两组试验结果进行方差分析,发现两组冻结风沙土风蚀速率未产生显著差异($P>0.05$),将土壤温度作为因子和冻结风沙土风蚀速率进行相关分析,发现冻结风沙土风蚀速率随土壤温度变化不显著($P>0.05$),推测当风沙土产生稳定冻结后,温度继续降低对风蚀速率的影响可以忽略不计。

2.2 冻结风沙土风蚀单因素影响

各冻结风沙土相同含水率下,风蚀速率 Q 随风速 V 的变化均符合指数型关系式 $Q=ae^{bV}$,即风蚀速率均随着风速的增大而增大(图5A),为直观体现拟合函数曲线变化,将图像纵坐标设置为常用对数形

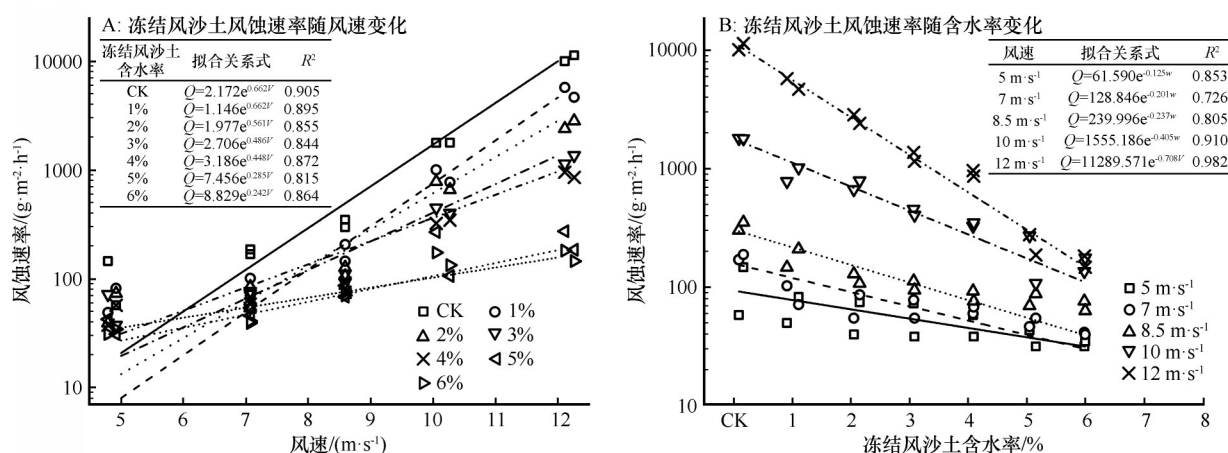


图5 冻结风沙土风蚀速率随含水率及风速的变化

Fig.5 Changes of wind erosion rate of frozen aeolian soil with moisture content and wind speed

各风速条件下,冻结沙盘风蚀速率 Q 随风沙土含水率 w 的变化均符合指数 $Q=ce^{dw}$ 递减(图5B),式中 $c>0$ 、 $d<0$, d 反映水分对风蚀量的影响程度。随风速增加,各指数关系式 c 和 d 的绝对值均呈现增加趋势,即起沙的初始特征增大、风蚀速率降低幅度(风蚀速率变化率)增大。整体而言,8.5 m·s⁻¹风速风蚀曲线为分界线,当风速 ≤ 8.5 m·s⁻¹时,各含水率冻结风沙土风蚀速率均比CK风蚀速率减小40%~78%;当风速 > 8.5 m·s⁻¹时,各含水率冻结风沙土风蚀速率均比CK风蚀速率减小43%~98%。不同风速下,各含水率冻结风沙土风蚀速率均比CK风蚀速率减小40%~98%。

冻结风沙土各含水率拟合线,CK斜率最大,风速 ≥ 5 m·s⁻¹风蚀速率稳步增加。方差分析表明:当风速 ≤ 7 m·s⁻¹时,含水率 $> 1\%$ 冻结风沙土风蚀速率差异不显著($P>0.05$);当风速为8.5 m·s⁻¹时,含水率 $> 2\%$ 的冻结风沙土风蚀速率差异不显著($P>0.05$),风速 ≥ 10 m·s⁻¹时,含水率 $> 3\%$ 的冻结风沙土风蚀速率差异不显著($P>0.05$)。该含水率可以认定为冻结土壤在对应风速状况下的稳定风蚀的临界值,且随风速的增大临界值增加。由此可知,当冻结风沙土含水率 $> 3\%$ 时,可以有效抑制风蚀。

式坐标。关系式中 $a>0$ 、 $b>0$, a 反映起沙的初始特征, b 为比率,反映风速对风蚀量的影响程度。从图5A不同含水率曲线变化趋势可知,各指数型关系式中 a (初始值)呈现波动增加趋势,关系式的 b (比率)值减小,即随着含水率的增大,风速对风蚀速率影响程度在减小。

2.3 冻结风沙土风蚀多因素影响

风蚀速率与风速和土壤含水率之间极显著相关($P<0.01$),与冻结温度相关性不显著($P>0.05$);根据上文单因素拟合的结果,对风速 V 及冻结风沙土含水率 w 与风蚀速率 Q 的关系进行非线性曲面拟合,自定义函数的基础公式为指数型关系式 $Q=ae^{bV-cw}$,筛选出拟合函数到达收敛且 R^2 最高的关系式为 $Q=0.367e^{0.849V-0.677w}$ ($R^2=0.994$),可以较好地拟合出冻结风沙土不同风速、不同冻结含水率下的风蚀速率变化。方差分析表明风速、含水率分别解释风蚀速率($\ln Q$)变异的56.25%和20.88%,风速和土壤含水率是影响风蚀速率的主要因素,其中风速为土壤风蚀提供动力,含水率则是抑制土壤风蚀;而冻结温度的解释率仅为0.7%。这进一步表明:当风沙土稳定冻结后,冻结温度对风蚀速率的影响极小。

3 讨论

3.1 影响土壤风蚀的关键因素

风沙土风蚀主要受下垫面地形、风速、植被、土壤及人为活动等诸多因素的影响^[24-26],各地的季节性变化会导致植被和土壤属性随之变化,使得风蚀

呈现出动态特征^[27-28]。目前有关土壤含水率对风蚀抑制作用方面的研究较多,一般认为土壤含水率增加,风蚀模数会大大减小,土壤水分增加可以提高地表抗风蚀能力^[29]。

风洞试验研究表明,在风速为 $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,含水率 4% 的细砂壤土可以有效抑制侵蚀;风速达到 $12.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,细砂壤土含水率增大到 7.9% 才可有效抑制侵蚀^[30]。本研究发现,不同风速条件下,冻结风沙土风蚀速率存在不同水分阈值。可见含水率阈值是相对风速而言,即不同的风速条件下,抑制土壤风蚀的水分阈值也不同。此外,众多研究围绕农田土壤发生冻融循环后抗蚀性的变化,发现冻融循环后风蚀强度比循环前高 20% 以上^[30],土壤冻融循环后,大团聚体颗粒发生破碎、易吹蚀颗粒增加,导致土壤抗蚀性减小^[31]。同时,冻融循环次数对土壤抗蚀性的影响存在临界作用,当冻融循环次数达到 6 次以后,其变化逐渐趋于稳定状态^[32]。

目前关于秋末、春初土壤“夜冻昼融”现象对于风蚀速率影响的研究较多^[33-35],但对于冻结期内风沙土壤对风蚀速率影响的研究不足。有研究表明:当风速为 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,含水率 2.34% 是冻结黄土抵御风蚀的阈值^[36];而本研究表明,当风速 $\geq 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,含水率 3% 冻结风沙土可有效抑制风蚀。二者结论存在一定差异,分析发现土壤质地差异性较大,本研究土壤来自沙漠流动沙丘风沙土,属于砂土(砂粒 98.9%,粉粒 1.1%,黏粒可以忽略,土壤有机碳 $0.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),前者则为黄土高原的土壤,根据粒径分布来看属于砂质壤土(砂粒 65.57%,粉粒 31.24%,黏粒 3.19%,土壤有机碳 $1.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),二者有机碳和土壤质地差异较大,进一步证明了土壤风蚀受土壤的有机碳含量和土壤质地影响^[37]。

3.2 风蚀模型函数形式

风蚀速率随风速变化的函数模型与下垫面有关,研究表明,农田土壤风蚀速率函数为指数函数^[38-41];煤矿土风蚀速率变化为二次多项式^[42-44];风沙土风蚀速率符合幂函数^[45-47]。但本文发现冻结风沙土风蚀速率 Q 无论是随风速 V 还是随含水率 w 的单因子变化均可以用指数函数 $Q=ae^{bw}$ 或 $Q=ce^{dV}$ 较好地描述。冻结条件下的风沙土风蚀速率变化规律与农田土壤风蚀速率变化有相似性。

拟合风速 V 及冻结风沙土含水率 w 与风蚀速率 Q 的双因子关系式时,由于单因子时关系式为指数

型,故将自定义的关系式设为指数型关系式;考虑到冻结风沙土风蚀速率随含水率变化为递减关系,尝试将含水率倒数带入关系式计算,拟合未收敛。分别尝试双因子相乘、相加,发现含水率与风速相乘,拟合不收敛,最终以 R^2 和拟合收敛性,确定关系式类型为 $Q=ae^{bV+cw}$ ($b>0, c<0$)。

4 结论

随着冻结的发生,风沙土温度逐渐下降,直到逐渐与空气温度变化趋于平行状态,产生稳定冻结。含水率 $\leq 2\%$ 风沙土内 2 h 达到稳定冻结;而含水率 $\geq 3\%$ 风沙土 5~12 h 后达到稳定冻结。风沙土含水率越大,冻结所需时间越长。当风沙土产生稳定冻结后,冻结风沙土风蚀速率随土壤温度变化不显著。

冻结风沙土的水分阈值随风速的增大而增加。当风速 $\leq 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,抑制风蚀速率的水分阈值为 1%;当风速为 $8.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,水分阈值为 2%;当风速 $\geq 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,水分阈值为 3%。冻结风沙土含水率 $> 3\%$ 时,可以有效抑制风蚀。

总体上,冻结风沙土风蚀速率较自然干沙风蚀速率减小 40%~98%,冻结风沙土风蚀速率 Q 与风速 V 、含水率 w 单因子均可以用指数函数描述,三者之间符合指数型关系式: $Q=0.367e^{0.849V-0.677w}$ ($R^2=0.994$)。风速、含水率、温度的变异解释率分别为 56.25%、20.88% 和 0.7%,风速、含水率是影响冻结风沙土风蚀速率的主要因素,风沙土稳定冻结后,冻结温度对风蚀速率的影响极小。

参考文献:

- [1] 任小玢. 腾格里沙漠东南缘风沙流特征[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.
- [2] 张春来, 宋长青, 王振亭, 等. 土壤风蚀过程研究回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 27-41.
- [3] Nordstrom K F, Hotta S. Wind erosion from cropland in the USA: a review of problems, solutions and prospects[J]. Geoderma, 2004, 121(3): 157-167.
- [4] Zender C S, Miller R L R L, Tegen I. Quantifying mineral dust mass budgets: terminology, constraints, and current estimates[J]. EOS, 2004, 85(48): 509-512.
- [5] 董宝宝, 钱广强. 关于土壤水分对风蚀起动风速影响研究的现状与问题[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 934-942.
- [6] 雷金银, 吴发启, 马璠, 等. 毛乌素沙地土壤风蚀的气候因子分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 104-105.
- [7] 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): 13–30.
- [8] Sherman D J, Jackson D W T, Namikas S L, et al. Wind-blown sand on beaches: an evaluation of models[J]. Geomorphology, 1998, 22(2): 113–133.
 - [9] 桑琦明. 典型厚层黑土区冻融-风力-水力叠加驱动的坡面侵蚀过程及其机理[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
 - [10] 何京丽, 郭建英, 邢恩德, 等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸风沙流结构与沙丘移动规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 71–77.
 - [11] 陈新闯, 董智, 李锦荣, 等. 乌兰布和沙漠不同下垫面冬季沙尘通量[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1527–1532.
 - [12] 林年丰, 汤洁. 第四纪环境演变与中国北方的荒漠化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(2): 183–191.
 - [13] 吴循, 周青. 气候变暖对陆地生态系统的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 223–228.
 - [14] 姚俊强, 杨青, 陈亚宁, 等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1283–1291.
 - [15] 贾旭, 高永, 李锦荣, 等. 近40 a 黄河乌兰布和沙漠段河道演变特征[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 905–911.
 - [16] 李锦荣, 郭建英, 董智, 等. 黄河乌兰布和沙漠段凌汛期河岸动态变化及影响因素[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 117–122.
 - [17] 王露. 乌兰布和沙漠典型单株灌木防风阻沙效益研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
 - [18] 赵纳祺. 乌兰布和沙漠沿黄段冻结对沙丘坡面积沙运移特征影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
 - [19] 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.
 - [20] 李锦荣, 郭建英, 赵纳祺, 等. 乌兰布和沙漠流动沙丘风蚀空间分布规律及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 928–935.
 - [21] 李锦荣, 王健, 王茹, 等. 基于无人机技术黄河沿岸沙丘移动速度监测及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 57–64.
 - [22] 田世民, 姚文艺, 郭建英, 等. 乌兰布和沙漠风沙入黄影响因子变化特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1701–1707.
 - [23] 阿比亚斯, 李锦荣, 赵纳祺, 等. 冻结对不同土壤湿度风沙土风蚀影响研究[J]. 内蒙古林业科技, 2022, 48(2): 7–12.
 - [24] Ravi S, Zobeck T M, Over T M, et al. On the effect of moisture bonding forces in air-dry soils on threshold friction velocity of wind erosion[J]. Sedimentology, 2006, 53(3): 597–609.
 - [25] 申彦波, 沈志宝, 杜明远, 等. 风蚀起沙的影响因子及其变化特征[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 611–616.
 - [26] 贺晶, 吴新宏, 杨婷婷, 等. 基于临界起沙风速的草地防风固沙功能研究[J]. 中国草地学报, 2013, 35(5): 103–107.
 - [27] Chepil W S. Seasonal fluctuations in soil structure and erodibility of soil by wind[J]. Soil Science Society of America Journal, 1954, 18(1): 13–16.
 - [28] Bajracharya R M, Lal R, Hall G F. Temporal variation in properties of an uncropped, ploughed Miamian soil in relation to seasonal erodibility[J]. Hydrological Processes, 1998, 12(7): 1021–1030.
 - [29] 陈渭南. 蒙陕接壤地区土壤母质的风蚀实验研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(1): 33–40.
 - [30] 王一菲, 郑粉莉, 张加琮, 等. 冻融作用对典型黑土土壤风蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 34–41.
 - [31] 赵恒策, 魏霞, 贺燕, 等. 冻融对土壤团聚体特征以及可蚀性K值的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 1–6.
 - [32] 肖俊波, 孙宝洋, 李占斌, 等. 冻融循环对风沙土物理性质及抗冲性的影响试验[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 67–71.
 - [33] 张泽宇, 马波, 李占斌, 等. 冻融交替作用对黄土高原三种典型土壤可蚀性影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 813–818.
 - [34] 王陇. 乌兰布和沙漠风沙土风蚀可蚀性特征及其量化模型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
 - [35] 倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 922–927.
 - [36] Wang L, Shi Z H, Wu G L, et al. Freeze/thaw and soil moisture effects on wind erosion[J]. Geomorphology, 2014, 207: 141–148.
 - [37] 麻虹宇, 李保国, 蔡斌, 等. 干旱半干旱区地表覆盖对土壤风蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 29–35.
 - [38] 王仁德, 肖登攀, 常春平, 等. 农田风蚀量随风速的变化[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1120–1127.
 - [39] 王仁德, 邹学勇, 赵婧妍. 半湿润区农田土壤风蚀的风洞模拟研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 640–646.
 - [40] 荣姣凤, 张海涛, 毛宁. 土壤风蚀量随风速的变化规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 149–153.
 - [41] 杨秀春, 严平, 刘连友, 等. 农牧交错带不同农田耕作模式土壤风蚀的风洞实验研究[J]. 土壤学报, 2005(5): 35–41.
 - [42] 杨小亮, 靳正忠, 丁刚, 等. 结皮量与含水率对尾矿风蚀影响的风洞模拟研究[J]. 土壤, 2022, 54(5): 1085–1092.
 - [43] 毛旭芮, 杨建军, 曹月娥, 等. 土壤结皮面积与结皮分布对风蚀影响的风洞模拟研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 1–7.
 - [44] 杨建军, 汤东. 露天煤矿区不同粒径土壤组分风蚀的风洞实验[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2021, 38(2): 213–219.
 - [45] 王训明, 董治宝, 陈广庭. 塔克拉玛干沙漠中部部分地区风沙环境特征[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 56–61.
 - [46] 张胜邦, 董旭, 刘玉璋, 等. 柴达木盆地东南部土壤风蚀研究[J]. 中国沙漠, 1999, 19(3): 293–295.
 - [47] 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(2): 21305.

Effect of soil moisture content on wind erosion rate of frozen aeolian sand

Han Zhaoen^{1,2}, Cui Wei², Li Jinrong², Tang Guodong², Zhang Jun³

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Yinshanbeilu National Field Research Station of Steppe Eco-hydrological System, China Institute of Water Resources and

Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Water Bureau of Dengkou, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: The soil in Wulanbuhe Desert area freezes in winter, and the dry sand on the surface of the flowing sand dunes exposes and is frozen after wind erosion, so the wind and sand movement environment changes. In this paper, the influence of freezing on the wind erosion process is analyzed, and the influence of freezing on the wind erosion process under different moisture conditions is explored. The wind speed gradients of 5, 7, 8.5, 10, 12 m·s⁻¹ were set up, and 6 gradients of soil moisture content (1%–6%) were set, and non-frozen soil with low moisture content (CK, 0.13%) as the control. It is found that a stable frozen layer can be formed within 2 hours on aeolian sand foundation with a water content of $\leq 2\%$, while a stable frozen layer can be formed in 5–12 hours on a aeolian sand foundation with a water content of $\geq 3\%$. Under the same water content condition, the erosion rate of aeolian sand after freezing increases with the increase of speed, and the wind erosion rate Q and wind speed V conforms to the index $Q=ae^{bV}$. Under the same wind speed, the wind erosion rate of frozen aeolian sand decreases with the increase of soil moisture, and the wind erosion rate and the moisture content w of frozen aeolian sand soil correspond to the exponential function $Q=ce^{dw}$. In general, the wind erosion rate of frozen aeolian sand soil is reduced by more than 40% compared with that of dry sand, and the relationship between wind erosion rate of frozen aeolian sand soil and wind speed and moisture content is consistent with $Q=0.367e^{0.849V-0.677w}$ ($R^2=0.994$). The wind erosion rate of frozen aeolian sand is reduced by 40%–98% compared with that of CK, and the water content of frozen aeolian sand is more than 3%, which can effectively inhibit wind erosion. Wind speed and moisture content are the main factors affecting the erosion rate of frozen aeolian sand. In the case of future warming and drying, wind erosion in Wulanbuhe Desert may increase.

Key words: wind erosion rate; freeze; soil moisture; wind tunnel test