

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.01.014 CSTR:32310.14.stbxb.2025.01.014

李锦荣, 韩兆恩, 唐国栋, 等. 冻结对沙丘土壤抗风蚀能力的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 38-45.

LI Jinrong, HAN Zhaoen, TANG Guodong, et al. Effect of freezing on wind erosion resistance of sand dune soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 38-45.

## 冻结对沙丘土壤抗风蚀能力的影响

李锦荣<sup>1</sup>, 韩兆恩<sup>1</sup>, 唐国栋<sup>1</sup>, 杨旭<sup>2</sup>, 豆春花<sup>3</sup>

(1. 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;  
2. 内蒙古自治区水利事业发展中心, 呼和浩特 010020; 3. 呼和浩特市水质监测中心, 呼和浩特 010020)

**摘要:** [目的]明确冻结作用对沙丘土壤可蚀性及抗蚀性的影响, 可加深黄河乌兰布和沙漠段冬季风沙入黄过程机理的认识, 并为区域入黄沙量建模与估算提供重要科学依据。[方法]通过流动沙丘迎风坡表层干沙、湿沙及冻结土层的沙粒粒径筛分试验和不同水分冻结前后的土壤进行抗剪强度测试, 研究沙丘土壤冻结后抗风蚀能力。[结果]沙丘不同坡位沙粒在水分的黏结作用下粒径增加, 粒径峰值由 0.15~0.2 mm 向 0.3~0.355 mm 集中, 约 35.12% 细砂颗粒黏结在一起形成较大的中砂颗粒。冻结后出现极细砂, 粒径峰值为 0.5~0.6 mm, 沙粒发生黏结粗化, 形成粒径更大的粗砂、极粗砂(52.02%), 沙物质易蚀颗粒质量分数降低至 23%~36%, 较难蚀颗粒质量分数升高至 53%~63%, 难蚀颗粒升高至 2%~17%。随着沙丘土壤水分增加, 冻结后土壤的黏聚力显著增大( $p < 0.05$ ), 沙丘土壤内摩擦角呈波动增加趋势, 差异不显著( $p > 0.1$ ), 抗剪强度和抗蚀性呈极显著增加( $p < 0.01$ )。冻结使得沙丘土壤沙粒黏结发生粗化, 较难蚀和难蚀颗粒升高(占 70%), 抗剪强度提高 0.14%~13.07%, 抗蚀性增大 0.6%~2.2%。冻结可有效提高沙丘土壤抗蚀性, 抑制风蚀。[结论]研究结果可为冻结期沙丘风蚀“裸斑”抗风蚀能力研究提供理论依据。

**关键词:** 冻结; 筛分试验; 抗剪强度; 乌兰布和沙漠

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0038-08

## Effect of Freezing on Wind Erosion Resistance of Sand Dune Soil

LI Jinrong<sup>1</sup>, HAN Zhaoen<sup>1</sup>, TANG Guodong<sup>1</sup>, YANG Xu<sup>2</sup>, DOU Chunhua<sup>3</sup>

(1. Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Water Conservancy Development Center, Hohhot 010018, China; 3. The Water Quality Monitoring Center of Hohhot, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the effect of winter soil freezing on soil erodibility and anti-erodibility in the Yellow River section of the Ulan Buh Desert. [Methods] Particle size screening experiments were conducted on dry, wet, and frozen sand on the windward slope of mobile dunes, along with shear strength tests before and after freezing. [Results] Sand particle sizes at three positions on the dunes increased due to the bonding effect of water. The particle size peak shifted from 0.15—0.2 mm to 0.3—0.355 mm, with approximately 35.12% of fine sand particles bonding to form larger, medium sand particles. After freezing, very coarse sand emerged, and the particle size peak shifted to 0.5—0.6 mm. Sand particles bonded and coarsened, forming coarse and very coarse sand (52.02%). The proportion of highly erodible particles decreased to 23%—36%, while moderately erodible particles increased to 53%—63%, and hard-to-erode particles increased to 2%—17%. As soil moisture in the dunes increased, the cohesion of frozen soil significantly increased ( $p < 0.05$ ), along with shear strength and erosion resistance ( $p < 0.01$ ). Freezing coarsened sand bonds in dune soil, increasing the proportion of moderately and hard-to-erode particles (up to 70%), shear strength by 0.14%—13.07%, and erosion resistance by 0.6%—2.2%. Freezing could effectively

收稿日期: 2024-09-06 修回日期: 2024-10-07 录用日期: 2024-10-18 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-11-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(42071021); 内蒙古自治区防沙治沙科技创新重大示范工程项目(2024JBGS0013)

第一作者: 李锦荣(1980—), 男, 正高级工程师, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: lijnrong918@126.com

通信作者: 李锦荣(1980—), 男, 正高级工程师, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: lijnrong918@126.com

improve the corrosion resistance of sand dune soil and inhibit wind erosion. [Conclusion] The research results can provide a theoretical basis for the wind erosion resistance of dune wind erosion “bare spot” in freezing period.

**Keywords:** freezing; screening experiment; shear strength; Ulan Buh Desert

Received: 2024-09-06

Revised: 2024-10-07

Accepted: 2024-10-18

Online(www.cnki.net): 2024-11-06

土壤风蚀受土壤质地、团聚体体积、水分质量分数、有机质、碳酸钙及结皮等土壤理化性质的影响<sup>[1]</sup>。从风蚀动力学角度出发,根据风蚀影响因素的力学属性和所起作用方式,以上因子可称之为土壤抗蚀性因子<sup>[2]</sup>,是众多风蚀模型中的重要因子。风蚀与土壤表层颗粒组成密切相关<sup>[3]</sup>,风蚀使表层土壤粗化,可蚀性颗粒物减少<sup>[4]</sup>;土壤水分增加时,水分与沙粒之间形成的黏附力<sup>[5]</sup>,从而使得起动风速增大并抑制风沙活动。土壤风蚀的本质是风力对土壤表层的剪切破坏<sup>[6]</sup>,土壤抗蚀性指土壤表层对风蚀的抵抗能力<sup>[7]</sup>,土壤抗剪强度从力学角度出发,定量描述土壤在剪切破坏作用下产生的抵抗力<sup>[8]</sup>,土壤抗剪强度和土壤侵蚀密切相关<sup>[9-10]</sup>。因此,用土壤抗剪强度来表征土壤的抗风蚀能力<sup>[11-12]</sup>。

以我国北方季节性冻融区的乌兰布和沙漠沿黄段为主要研究区域。该地区冬春季降水稀少、大风频繁,黄河两岸的风沙活动尤为强烈,每年向黄河输入大量泥沙。研究区内,流动沙丘表面 5~10 cm 为干沙层,干沙层下为湿沙层,冬季湿沙层进一步冻结形成冻结层。当表层干沙经过风蚀后,冻结层裸露在地表,形成冻结“裸斑”,进一步加剧冻结层对风蚀的直接影响。风洞模拟试验,从土壤含水率角度探究沙丘土壤冻结后风蚀速率随风速和土壤水分的变化规律<sup>[13]</sup>,证明冻结对风蚀的影响。那么此变化是如何引起的,并未进行阐述。由于干沙层和冻结层含水率不同,是否是在水分冻结过程中导致粒径大小发生变化,土壤冻结后抗蚀性增强,导致风蚀量随之减小,犹未可知。

通过筛分试验,对比流动沙丘迎风坡,冬季冻结(1月)、春季(3月)干、湿沙层的粒径级质量分数变化情况,并测定不同水分梯度冻结前后沙丘土壤抗剪强度,进一步从沙丘表层土壤含水率的差异、冻结后的沙粒粒径及土壤抗剪强度发生变化的角度,探究沙丘土壤冻结的抗风蚀能力,研究对于深入理解冬季风沙物质可蚀性与抗蚀性具有重要的意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样地概况

所用土样均采自黄河几字弯区域生态环境变化与综合治理野外科学观测研究站(简称几字弯站)流动沙丘,几字弯站位于乌兰布和沙漠东北缘,地处内蒙古乌海市水利枢纽与巴彦淖尔市磴口县三盛公水利

枢纽之间(图 1)。该区域属于干旱区与半干旱区过渡带<sup>[14]</sup>,气候干燥,雨量稀少,年平均降水量 142.7 mm,主要集中在 7—10 月。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。风沙季节集中在 11 月至翌年 5 月<sup>[15]</sup>,平均风速 4.8 m/s,年平均大风日数 10~32 d,多年平均扬沙日数 75~79 d,并伴有沙尘暴现象,全年风向以西北、西风为主<sup>[16]</sup>。试验场研究区内土壤主要为风沙土,结构松散,有机质质量分数为 5.52 g/kg,碳酸钙质量分数为 0.071 5 g/kg,pH 为 8.87。流动沙丘迎风坡干沙层含水率为 0.1%~0.4%,湿沙层/冻结层含水率为 1.4%~3.7%。周边植被稀疏,盖度为 15%左右,主要以荒漠植被、沙生植被等为主,分布于流动沙丘、丘间低地,常见植物种有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)等。

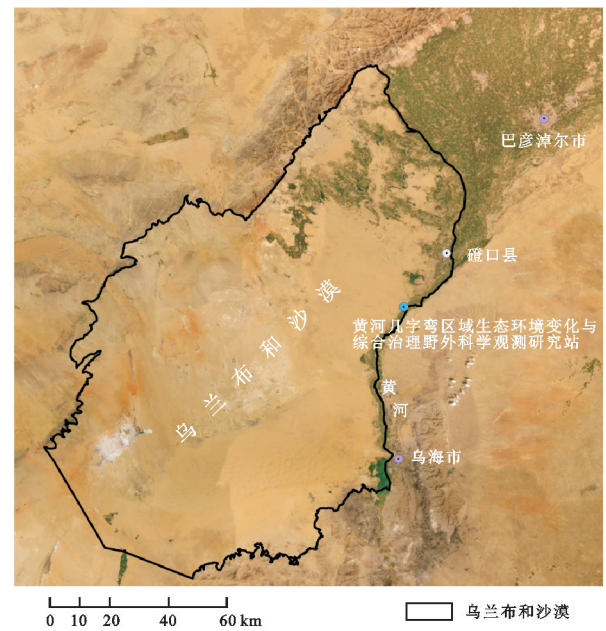


图 1 取样地位置

Fig.1 Map of the sampling site

### 1.2 沙物质筛分试验

2022 年 1 月(冻结期)和 3 月(非冻结期)分别在几字弯站内流动沙丘迎风坡坡底、坡中、坡顶采集冻结层和非冻结(干沙层和湿沙层)土样,现场在试验站室外对各土壤样品使用拍击式标准振筛机分别进行筛分,保证土壤处于当时环境温度(1 月气温为 -10.4 °C,3 月气温 5.3 °C)。每个坡位设 3 个重复

土样,共 27 份。首先,将每层筛子中粒径不同的土样分别称重记录,得出沙丘土壤砂物质颗粒烘干前各层粒径鲜重,接着将每层土样分别烘干,使水分完全蒸发,再次称重,确定砂物质颗粒烘干前各层粒径干重( $g_{1i}$ ),即砂样存在水分时各层粒径的砂物质干重,接着将土样混合在一起,二次过筛并分别称重记录,得到烘干后各粒径不同的砂物质颗粒干重( $g_{2i}$ ),即水分冻结破坏后各层粒径的砂物质干重。考虑到湿砂粒和冻结砂粒的分布范围不明确,研究尽可能详细地将粒径分为 16 个等级进行筛分,土壤粒径等级的分类,按照美国农业部标准,将砂物质颗粒分为石砾、极粗砂粒、粗砂粒等 7 个等级(表 1)。

通过计算每层砂物质颗粒干重的百分比来确定粒径变化,烘干前各层砂物质颗粒占比计算公式为:

$$G_{1i} = \frac{g_{ij}}{\sum_{i=1}^{16} g_{ij}} \times 100\% \quad (1)$$

烘干后各层砂物质颗粒占比计算公式为:

$$G_{2i} = \frac{g_{2i}}{\sum_{i=1}^{16} g_{2i}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $G_{1i}$ 、 $G_{2i}$ 分别为烘干前后各层砂物质颗粒占比,%; $g_{1i}$ 、 $g_{2i}$ 分别为烘干前后各层砂物质颗粒干重,g。

表 1 筛分试验土壤粒径与美国制土壤粒径等级对应表

Table 1 Correspondence between soil particle sizes from sieve analysis and U.S. soil particle size grades

筛分粒径分级/mm	土壤粒径等级
>2.000	石砾
2.000~1.000	极粗砂粒
1.000~0.600	粗砂粒
0.600~0.500	
0.500~0.450	中砂粒
0.450~0.355	
0.355~0.300	
0.300~0.250	
0.250~0.200	细砂粒
0.200~0.150	
0.150~0.125	
0.125~0.100	
0.100~0.075	极细砂粒
0.075~0.054	
0.054~0.030	粉粒
<0.030	

### 1.3 沙丘土壤抗剪强度模拟试验

在流动沙丘迎风坡采集表层干沙带回实验室,进行不同含水率沙丘土壤配置,利用电动式微控四联直剪仪(图 2)分别对自然干沙(CK,含水率分别为 1%、2%、3%、4%、5%、6%)冻结前后土壤进行直剪试验。鉴于前期试验中风沙土在土壤水分 $\geq 3\%$ 、 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、

12 h 可以确保土壤稳定冻结<sup>[13]</sup>,本文设定冻结温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冻结时长为 24 h,保证 5 cm 厚度土壤试样稳定冻结。每组土样分别在 50、100、150、200、250、300、350、400 kPa 的法向应力下进行剪切试验,剪切速度为 0.8 mm/min,得出不同含水率冻结前后沙丘土壤的黏聚力和内摩擦角的变化特征。

### 1.4 数据处理及计算

不同含水率下冻结前后沙丘土壤抗剪强度的计算公式为:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (3)$$

式中: $\tau$ 为土壤抗剪强度,kPa; $\varphi$ 为土壤内摩擦角, $^{\circ}$ ; $\sigma$ 为施加的法向应力,kPa; $c$ 为土壤黏聚力,kPa。

土壤抗剪强度是土壤在外力剪切作用过程中的力学表征,由于 1 组抗剪强度指标为土样在 8 个不同法向应力下进行直剪试验获得。因此,需要对施加不同法向应力所得的土壤抗剪强度进行加权平均处理,最终用加权平均抗剪强度来表示该沙丘土壤抗蚀性<sup>[17]</sup>,其公式为:

$$\tau_f = \frac{\sum_{i=1}^8 \tau_i \sigma_i}{\sum_{i=1}^8 \sigma_i} \quad (4)$$

式中: $\tau_f$ 为土壤的抗蚀性,kPa; $\sigma_i$ 为不同的法向应力,kPa; $\tau_i$ 为不同法向应力对应的土壤抗剪强度,kPa。

### 1.5 数据分析

应用 Origin 2018 和 SPSS 20.0 软件进行数据统计分析与作图。冻结前后粒径变化和土壤力学性质,采用非参数配对样本  $T$  检验法(Wilcoxon 符号秩检验)进行各指标间的显著性检验,土壤水分差异分析采用 ANOVA 方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 冻结对沙物质粒径的影响

沙丘迎风坡不同坡位干沙层水分质量分数为 $(0.28\% \pm 0.13\%) \sim (0.34\% \pm 0.09\%)$ ,各坡位水分无显著差异( $p > 0.05$ )。通过干沙层沙物质颗粒粒径分布(图 2)可知,干沙层沙物质颗粒主要分布在 0.3 mm 以下,其中,坡底 23.21%为中砂粒,74.02%为细砂粒,2.63%为极细砂粒,烘干后,中砂粒占比降至 13.67%,细砂粒占比升至 83.14%,极细砂粒占比升至 3.07%;坡中及坡顶干沙层,中砂粒、细砂粒、极细砂粒占比分别为 1.90%~6.62%、87.90%~95.46%、2.56%~5.06%,烘干后,中砂粒占比降至 2.83%~6.48%,细砂粒占比升至 88.58%~94.24%。各坡位干沙层烘干前后沙物质颗粒粒径峰值均为 0.15~0.2 mm 处,通过非参数配对样本  $T$  检验发现,干沙层烘干前后沙物质颗粒粒径变化未达到显著差异( $p > 0.1$ ),3 个坡位干

沙层沙物质颗粒粒径未达到显著差异 ( $p > 0.1$ )。

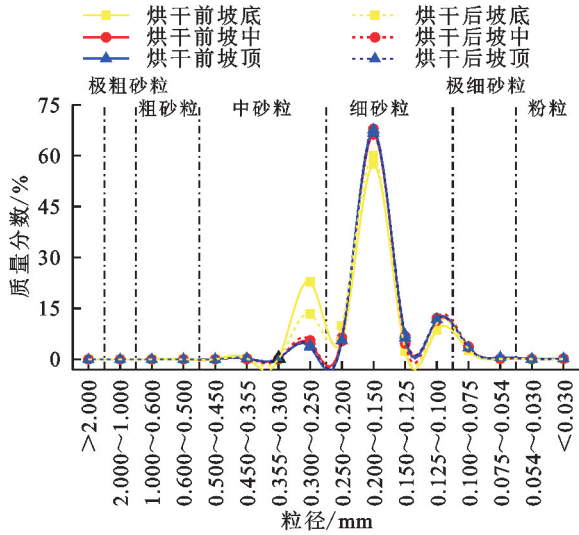


图 2 迎风坡干沙层沙物质颗粒粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of sand material in the dry sand layer of the windward slope of the dune

沙丘迎风坡坡底湿沙层水分质量分数为(0.34%±0.02%),坡中湿沙层水分质量分数为(0.91%±0.03%),坡顶湿沙层水分质量分数在(0.73%±0.03%),坡底、坡中、坡顶湿沙层水分存在显著差异( $p < 0.05$ )。通过湿沙层沙物质颗粒粒径分布(图 3)可以看出,湿沙层沙物质颗粒粒径分布在 0.45 mm 以下,其中,坡底 9.23%为中砂粒,83.28%为细砂粒,7.27%为极细砂粒,烘干后,中砂占比降至 5.65%,细砂占比升至 86.32%;坡中湿沙层中砂粒占比为 65.31%,细砂占比为 31.17%,极细砂粒占比为 3.43%,烘干后,中砂粒占比降至 4.71%,细砂粒与极细砂粒占比分别升至 89.80%和 5.34%。坡顶湿沙层沙物质与坡中相似,中砂粒、细砂粒、极细砂粒占比分别为 51.63%、44.05%、4.23%,烘干后,细砂粒占比升至 90.52%,极细砂粒升至 7.97%,中砂粒降至 1.32%。

3 个坡位中,坡底湿沙层烘干前后沙物质粒径峰值均出现在 0.15~0.2 mm 处,配对样本  $T$  检验发现,粒径变化未达到显著差异( $p > 0.1$ )。坡中湿沙层沙物质粒径峰值为 0.25~0.3 mm 处,坡顶湿沙层沙物质粒径峰值为 0.3~0.355 mm 处,烘干后二者变化相同,均向细砂粒集中,峰值为 0.15~0.2 mm 处,配对样本  $T$  检验发现,二者中砂粒与细砂粒均达到显著差异水平( $p < 0.05$ )。粒径的差异进一步说明水分对沙物质粒径的影响,坡底水分较小,粒径分布与干沙层分布相似,坡中及坡顶水分较大,沙物质粒径较大。

沙丘迎风坡坡底冻结层水分质量分数为(1.48%±0.07%),坡中冻结层水分质量分数为(1.94%±0.06%),坡顶湿沙层水分质量分数为(1.61%±0.34%),坡底与坡中湿沙层水分存在显著差异( $p < 0.05$ )。通过沙丘迎风

坡不同坡位冻结层沙物质颗粒粒径分布(图 4)可以看出,由于水分较大且处于冻结状态,坡底、坡中及坡顶 3 个坡位冻结层均出现极粗砂(>1 mm),占比分别为(1.78%±0.09%)、(11.75%±1.26%)、(15.93%±2.05%)。粗砂粒、中砂粒、细砂粒和极细砂粒占比分别为 37.55%~47.85%、31.74%~55.91%、2.19%~5.93%和 0.16%~1.02%,沙物质颗粒集中在 0.3~0.6 mm,峰值为 0.5~0.6 mm。将水分烘干后,极粗砂颗粒消失,粗砂粒占比降至 0.2%以下,中砂粒占比降至 0.91%~11.40%,细砂粒占比升至 83.33%~94.95%,极细砂粒占比升至 2.17%~5.51%,峰值与干沙层相同,为 0.15~0.2 mm。通过配对样本  $T$  检验发现,冻结层沙物质颗粒烘干前后中砂粒占比呈极显著差异( $p < 0.01$ ),粗砂粒及细砂粒占比呈显著差异( $p < 0.05$ )。

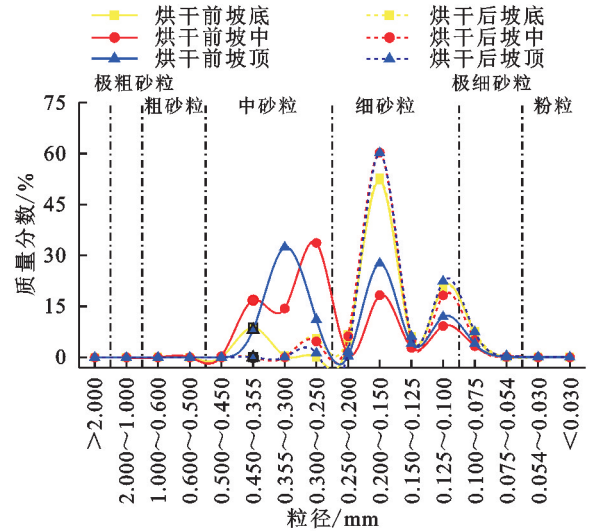


图 3 迎风坡湿沙层沙物质颗粒粒径分布

Fig.3 Particle size distribution of sand material in the wet sand layer of the windward slope of the dune

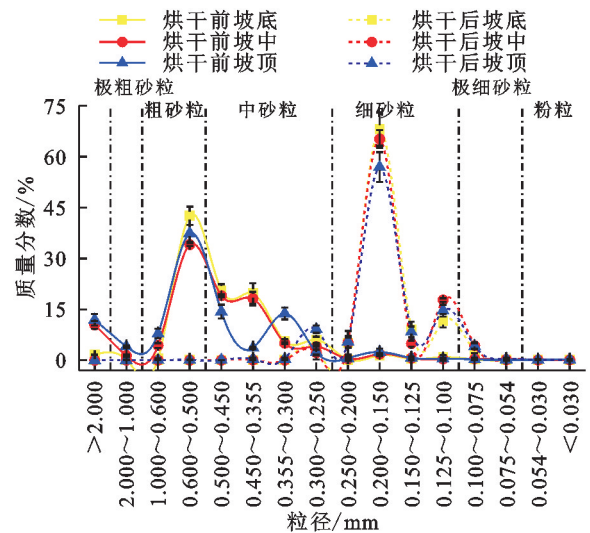


图 4 迎风坡冻结层沙物质颗粒粒径分布

Fig.4 Particle size distribution of sand material in the frozen layer of the windward slope of the dune

通过自然状态下干沙层、湿沙层和冬季沙丘冻结层沙粒径筛分试验可知,沙丘表层干沙、湿沙和冻结沙物质,在烘干后的粒径无显著差异( $p > 0.1$ ),主要以细沙(88.30%)为主。当沙丘土壤湿度增加,水分对沙物质颗粒的黏结作用,约 35.12% 细砂颗粒黏结在一起形成较大的中砂颗粒。土壤发生冻结后,细砂颗粒和极细砂发生粗化,向中砂、粗砂和极粗砂转化,分别占 37.12%、42.20% 和 9.82%,细砂颗粒和极细砂仅剩不足 3.72%。由此可知,冻结作用使得沙物质颗粒之间的黏结作用更强,形成粒径更大的粗砂、极粗砂(52.02%),粒径峰值达到 0.5~0.6 mm,颗粒变得较难蚀和难蚀,对风的抵抗能力进一步加强,需要更大的起沙风速,因而对风蚀有抑制效果。

## 2.2 冻结对沙丘土壤黏聚力及内摩擦角的影响

沙丘土壤冻结前后的抗剪强度测试研究表明,冻结前后沙丘土壤黏聚力均随水分质量分数增加而增大(图 5),自然干沙(CK,水分质量分数 0.13%)黏聚力为 0.70 kPa,冻结前沙丘土壤水分 1%~6% 黏聚力比自然干沙增大 1.9~15.7 倍。冻结后沙丘土壤含水率 1%~6% 黏聚力比自然干沙增大 3.0~24.1 倍。相同水分条件下,冻结后沙丘土壤黏聚力比冻结前沙丘土壤增大 51.60%~82.71%,其中水分 2% 时差异最大,水分每增加 1 个梯度,沙丘土壤黏聚力增加幅度有增大趋势。配对样本  $T$  检验发现,冻结前后沙丘土壤黏聚力呈显著差异水平( $p < 0.05$ )。

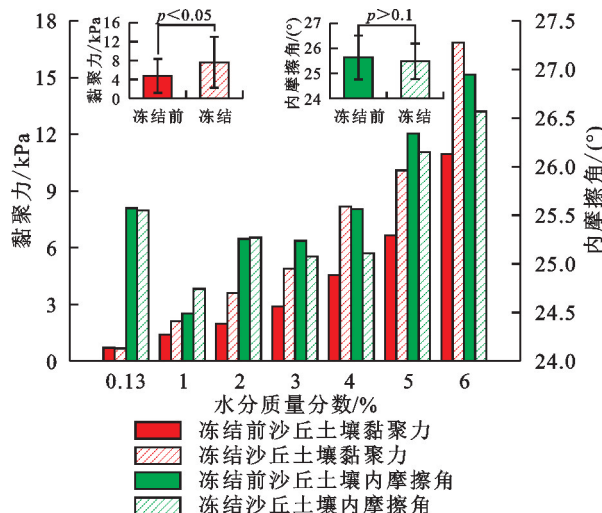


图 5 冻结前后沙丘土壤黏聚力、内摩擦角随水分变化

Fig.5 Changes of the soil cohesion internal friction of sand dunes with water content before and after freezing

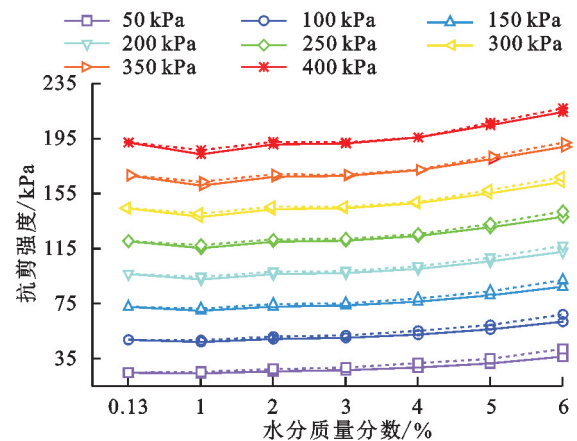
冻结前后沙丘土壤内摩擦角随水分增加呈波动增加趋势(图 5)。自然干沙的内摩擦角为 25.57°,水分质量分数 $\leq 4\%$ 冻结前后沙丘土壤内摩擦角比自然干沙减小 0.04%~4.23%,水分 5%~6%冻结前后沙丘土

壤内摩擦角比自然干沙增大 2.25%~5.38%,水分 $\leq 2\%$ 冻结沙丘土壤内摩擦角比冻结前大 0.05%~1.02%,水分 3%~6%冻结沙丘土壤内摩擦角比冻结前小 0.64%~1.77%。总体来说,内摩擦角变化在 3°以内,幅度较小,冻结前后各水分质量分数沙丘土壤内摩擦角最低点均出现在水分 1%时。配对样本  $T$  检验表明,冻结前后沙丘土壤内摩擦角未达到显著差异水平( $p > 0.1$ )。

可见,冻结对于黏聚力的影响较大,对于内摩擦角的影响较小,分析其原因可能是水与沙粒的黏结没有冰与沙粒的黏结效果强,但黏结沙物质颗粒间摩擦力变化较小。

## 2.3 冻结对沙丘土壤抗剪强度的影响

冻结前后沙丘土壤不同法向应力下抗剪强度均随水分增加呈先减后增趋势(图 6),抗剪强度随着法向应力增加而增大,且不同法向应力下抗剪强度近似于平行状态。冻结前后沙丘土壤抗剪强度在 8 种法向应力下,随着水分质量分数增加的变化幅度为 0.11%~14.03%,随着法向应力增加,变化幅度有减小趋势,各法向应力下沙丘土壤抗剪强度最小值均出现在水分质量分数为 1%时。对比 8 种法向应力下冻结前后沙丘土壤抗剪强度发现,各水分梯度冻结沙丘土壤抗剪强度均比冻结前沙丘土壤高 0.14%~13.07%,水分越大差异越大。总体来说,冻结沙丘土壤抗剪强度大于冻结前,配对样本  $T$  检验表明,各法向应力下,冻结前后沙丘土壤抗剪强度呈极显著差异水平( $p < 0.01$ )。



注:实线为冻结前沙丘土壤抗剪强度;虚线为冻结沙丘土壤抗剪强度。

图 6 冻结前后沙丘土壤抗剪强度

Fig.6 Shear strength of sand dune soil before and after freezing

冻结前后沙丘土壤抗蚀性均随着水分增加呈先减后增趋势(图 7)。水分质量分数 $\leq 2\%$ 冻结前沙丘土壤抗蚀性比自然干沙抗蚀性减小 0.46%~4.28%,水分质量分数 3%~6%冻结前沙丘土壤抗蚀性比自然干沙抗蚀性增大 0.11%~12.08%。冻结后水分质

量分数 1% 时,沙丘土壤抗蚀性比自然干沙抗蚀性减小 2.64%,冻结后水分 2%~6% 沙丘土壤抗蚀性比自然干沙抗蚀性增大 0.77%~14.03%。各水分梯度冻结沙丘土壤抗蚀性比冻结前大 0.62%~2.22%,配对样本  $T$  检验表明,二者抗蚀性呈极显著差异( $p < 0.01$ )。通过上述结果发现,当水分较小时,沙丘土壤稳定性降低,随着沙丘土壤水分增大,沙丘土壤稳定性逐渐升高,发生冻结后土壤抗蚀性增加。

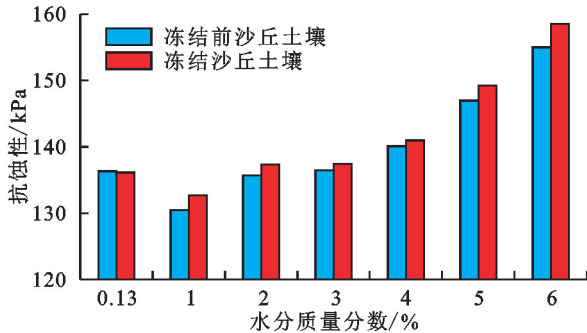


图 7 冻结前后沙丘土壤抗蚀性变化

Fig.7 Changes of sand dune soil anti-erosion ability before and after freezing

### 3 讨论

#### 3.1 冻结沙丘土壤粒径特性

沙丘土壤侵蚀过程中侵蚀力与抗蚀力是关键影响因素,通常采用土壤可蚀性与土壤抗蚀性来表达,土壤可蚀性用来说明土壤对侵蚀营力剥离和搬运的敏感性<sup>[18]</sup>,土壤颗粒大小是影响土壤可蚀性的重要因素<sup>[19-20]</sup>,主要是由于不同颗粒大小的土壤所需的起动风速大小不同,粒径越大,所需起动风速越大。有研究<sup>[3]</sup>表明,风成沙颗粒按可蚀性可以分为难蚀颗粒( $>0.7$  mm,  $<0.05$  mm)、较难蚀颗粒(0.7~0.4 mm, 0.075~0.05 mm)、易蚀颗粒(0.4~0.075 mm)3 种类型,可蚀性颗粒质量分数 $>50\%$ 的土壤具有高度可蚀性。研究<sup>[21]</sup>发现,农田的易蚀颗粒质量分数约 48%,人工林地的易蚀颗粒质量分数约 55%,沙地的易蚀颗粒质量分数约 68%。乌兰布和沙漠流动沙丘易蚀颗粒质量分数均在 99% 以上,潜在风蚀颗粒质量分数高于其他土地利用类型。

本研究中,沙丘干沙层粒径主要分布在 0.3~0.075 mm,以细砂粒为主(0.15~0.2 mm)。湿沙层粒径主要分布在 0.45~0.075 mm,相较于干沙粒径分布范围更为分散,风蚀颗粒以中砂粒组为主(0.25~0.45 mm)。冻结后以较难侵蚀的粗砂粒为主(0.5~0.6 mm),沙物质易蚀颗粒质量分数降低至 23%~36%,较难蚀颗粒质量分数升高至 53%~63%,难蚀颗粒质量分数升高至 2%~17%,沙物质颗粒整体较大,粒径分布分散,

沙粒大小均匀程度较低。可见,沙丘土壤水分增加、土壤冻结使得沙粒黏结,粒径变粗,可蚀性颗粒质量分数明显减少,可蚀性下降,有效增大起沙风速。

#### 3.2 冻结对沙丘土壤抗蚀性的影响

土壤抗蚀性指土壤对外部侵蚀力的分散和搬运的抵抗能力<sup>[22]</sup>,土壤抗蚀性受植被覆盖度、土壤结构与团聚体和有机质质量分数的影响。有研究<sup>[23-24]</sup>表明,草地地表抗蚀性最强,其次为林地与耕地,沙漠地区最弱。在不考虑植被影响下,土壤的抗蚀性与土壤的物理特性最为相关。已有研究<sup>[25-28]</sup>表明,无论是荒漠草原的草地和耕地沙质土壤还是黑土区的黏土,土壤冻结后黏聚力、抗剪强度随水分的增加而增大,内摩擦角随水分的增加先增加后趋于稳定,且抗剪强度显著高于非冻结。由此可见,冻结后土壤抗蚀性增加。本文通过风沙土抗剪强度试验发现,在土壤冻结温度为 $-10$  °C 时,沙漠沙丘土壤黏聚力随水分增加而增大,抗剪强度随着含水率增加呈增加趋势,内摩擦角随水分的增加呈波动增加趋势,且冻结前与冻结后变化趋势一致,且冻结增加土壤抗蚀性。风蚀速率<sup>[13]</sup>与抗蚀性进行 Kendall 和 Spearman 相关分析显示,二者存在显著相关( $p < 0.01, r = 0.9$ )。众多研究<sup>[29-30]</sup>表明,冻融作用破坏土壤内部结构,冻融循环导致黄土抗剪强度逐渐减小,土体的黏聚力呈下降趋势,对于冻融循环条件下沙漠土壤的抗剪强度研究需要进一步探究。

### 4 结论

1) 沙丘迎风坡 3 个坡位,粒径峰值为 0.15~0.2 mm 处,干沙粒径差异不显著( $p > 0.1$ ),土壤水分增加,粒径峰值向 0.3~0.355 mm 集中,但二者易蚀颗粒质量分数均占 99% 以上,(较)难蚀颗粒不足 1%;沙粒发生冻结后,粒径峰值为 0.5~0.6 mm 处,沙粒发生粗化,(较)难蚀性颗粒质量分数占 70%。冻结使得沙粒黏结形成较难蚀和难蚀颗粒,抵抗风蚀能力增强,当沙丘出现冻结“裸斑”后,可有效降低风蚀的发生。

2) 沙丘土壤随着水分升高,黏聚力增加,内摩擦角波动增加,不同法向应力下抗剪强度及抗蚀性变化趋势相似,在水分质量分数 $<1\%$  时呈减小趋势,水分质量分数 $>1\%$  时呈增大趋势。相同水分时,冻结使得沙丘土壤抗剪强度增大 0.14%~13.07%,抗蚀性增大 0.6%~2.2%,当沙丘出现冻结“裸斑”后,冻结层沙物质抗剪强度较干沙层增大 3%~27%,抗蚀性较干沙层增大 4.84%。冻结可有效提高沙丘土壤抗蚀性,抑制风蚀。

#### 参考文献:

[1] 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.
- ZHANG C L, SONG C Q, WANG Z T, et al. Review and prospect of the study on soil wind erosion process [J].Advances in Earth Science,2018,33(1):27-41.
- [2] 李旭.河北坝上土壤抗剪强度与抗风蚀性研究[D].石家庄:河北师范大学,2021.
- LI X. Study on shear strength and wind erosion resistance of soil in Bashang Area, HeBei, China [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2021.
- [3] 董治宝,李振山.风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(4):1-12.
- DONG Z B, LI Z S. Wind erodibility of aeolian sand as influenced by Grain-size parameters[J].Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation,1998,4(4):1-12.
- [4] 张正偲,董治宝.土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(12):86-89.
- ZHANG Z C, DONG Z B. The effect of wind erosion on the surface particle size [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2012,26(12):86-89.
- [5] 董治宝,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.
- DONG Z B, QIAN G Q. A review on effect of soil moisture on wind erosion threshold velocity [J]. Acta Pedologica Sinica,2007,44(5):934-942.
- [6] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
- LI G X. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2004.
- [7] 邹学勇,张春来,程宏,等.土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J].地球科学进展,2014,29(8):875-889.
- ZOU X Y, ZHANG C L, CHENG H, et al. Classification and representation of factors affecting soil wind erosion in a model[J].Advances in Earth Science,2014,29(8):875-889.
- [8] 左小锋,王磊,郑粉莉,等.冻融循环和土壤性质对东北黑土抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):30-35.
- ZUO X F, WANG L, ZHENG F L. Effects of freeze-thaw cycles and soil properties on mollisol shear strength in Chinese Black Soil Region[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(2):30-35.
- [9] 刘瑞娟,李继峰,冯哲,等.风蚀过程中翻耕农田土壤抗剪强度变化[J].水土保持学报,2022,36(4):112-120.
- LIU R J, LI J F, FENG Z. Changes in shear strength of ploughed farml and soil during wind erosion[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(4):112-120.
- [10] 蒲玉琳,谢德体,倪九派,等.紫色土区植物篱模式对坡耕地土壤抗剪强度与抗冲性的影响[J].中国农业科学,2014,47(5):934-945.
- PU Y L, XIE D T, NI J P, et al. Effects of hedgerow patterns on soil shear strength and anti-scourability on slope farmland in purple soil area[J].Scientia Agricultura Sinica,2014,47(5):934-945.
- [11] 吴盈盈,王振亭.河套平原土壤风蚀风险评估[J].干旱区地理,2023,46(3):418-427.
- WU Y Y, WANG Z T. Risk assessment of soil wind erosion in Hetao Plain[J].Arid Land Geography,2023,46(3):418-427.
- [12] 李驰,黄浩,孙兵兵,等.沙漠路基边坡抗风蚀能力现场试验研究[J].土木工程学报,2011,44(增刊2):220-225.
- LI C, HUANG H, SUN B B. Field test study on the anti-wind erosion ability for desert roadbed slope [J]. China Civil Engineering Journal,2011,44(S2):220-225.
- [13] 韩兆恩,崔崑,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.
- HAN Z E, CUI W, LI J R, et al. Effect of soil moisture content on wind erosion rate of frozen aeolian sand [J]. Journal of Desert Research,2024,44(1):228-234.
- [14] 郝玉光.乌兰布和沙漠东北部绿洲化过程生态效应研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- HAO Y G. Study on ecological effects of oasis-making process in the Northeast part of Ulan Buh Desert [D]. Beijing: Beijing Forestry University,2007.
- [15] 李锦荣,郭建英,董智,等.乌兰布和沙漠沿黄段不同治理措施的风沙运移特征及其防护效果[J].干旱区资源与环境,2016,30(8):113-119.
- LI J R, GUO J Y, DONG Z, et al. Sand moving characteristics and the protective effect of governance measures along bank of Yellow River in Ulan Buh Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2016,30(8):113-119.
- [16] 何京丽,张三红,崔崑,等.黄河内蒙古段乌兰布和沙漠入黄风积沙监测研究[J].中国水利,2011(10):46-48.
- He J L, ZANG S H, CUI W, et al. Monitoring and research on Aeolian sand flowed into Yellow River from Ulan Buh desert in Inner Mongolia [J].China Water Resources,2011(10):46-48.
- [17] 刘瑞娟.风蚀过程中土壤抗剪强度与抗蚀性研究[D].石家庄:河北师范大学,2023.
- LIU R J. Study on shear strength and wind erosion resistance of soil [D].Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2023.
- [18] 宋阳,刘连友,严平,等.土壤可蚀性研究述评[J].干旱区地理,2006,29(1):124-131.
- SONG Y, LIU L Y, YAN P, et al. A review of soil erodibility research [J]. Arid Land Geography, 2006, 29(1):124-131.

- [19] 张越,陈思宇,毕鸿儒,等.干旱半干旱区农田土壤风蚀特征及参数化研究进展[J].中国沙漠,2022,42(3):105-117.  
ZHANG Y, CHEN S Y, BI H R, et al. Characteristics and parameterization of farmland soil wind erosion in arid and semi-arid areas of China: Progress and challenges [J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(3): 105-117.
- [20] 冯佳新,王海兵,刘茜雅,等.沙漠化逆转过程中毛乌素沙地土壤风蚀可蚀性影响因子的变化特征[J].水土保持通报,2023,43(6):1-9.  
FENG J X, WANG H B, LIU X Y, et al. Characteristics of changes in factors influencing wind erosion and erodibility of soils in Mu Us sandland during desertification reversal [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 1-9.
- [21] 刘蓉,苏志珠,马义娟,等.晋西北沙化土地粒度特征及其可蚀性研究[J].水土保持通报,2018,38(6):1-8.  
LIU R, SU Z Z, MA Y J, et al. Grain size distributions and erodibility of sandy soils in northwestern Shanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 1-8.
- [22] 丁文峰,李占斌.土壤抗蚀性的研究动态[J].水土保持科技情报,2001(1):36-39.  
DING W F, LI Z B. Development on research for soil anti-erodibility [J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2001(1): 36-39.
- [23] 吕猛.辽西北风沙地不同土地利用方式土壤抗蚀性研究[D].辽宁 阜新:辽宁工程技术大学,2019.  
LU M. Study on soil erosion resistance under different land use patterns in the north wind sandy land of western Liaoning [D]. Fuxin, Liaoning: Liaoning Technical University, 2019.
- [24] 赵云鹤,钟鹏,高晗,等.土地利用类型对典型黑土团聚体稳定性和抗蚀性的影响[J].东北林业大学学报,2023,51(9):112-119.  
ZHAO Y H, ZHONG P, GAO H, et al. Effects of land use types on stability and anti-erodibility of typical black soil aggregates [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(9): 112-119.
- [25] 王晓飞,申向东,李晓丽.干寒区耕作性土壤基本性质及其对土壤抗蚀能力影响的研究[J].农村牧区机械化,2005(1):19-21.  
WANG X F, SHEN X D, LI X L. Study on the basic properties of tillage soil and its effect on soil anti-erodibility in dry cold region [J]. Mechanization of Rural Pastoral Areas, 2005(1): 19-21.
- [26] 刘建宇,黄伟,高博,等.黑龙江东宁地区季冻土抗压抗剪强度试验研究[J].地质与资源,2023,32(5):592-598.  
LIU J Y, HUANG W, GAO B, et al. Experimental study on the compressive and shear strength of seasonal frozen soil in Dongning area, Heilongjiang Province [J]. Geology and Resources, 2023, 32(5): 592-598.
- [27] 徐安花,闫一辉,常丹,等.冻结黏土宏细观力学特性研究[J].冰川冻土,2024,46(1):1-10.  
XU A H, YAN Y H, CHANG D, et al. Study on macroscopic and microscopic mechanical properties of frozen clay [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(1): 1-10.
- [28] 赵杰,巨玉文.冻融循环对永和原状黄土影响的试验研究[J].科学技术与工程,2016,16(28):269-272.  
ZHAO J, JU Y W. Test research on influence of freezing and thawing cycle on undisturbed loess in Yonghe [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(28): 269-272.
- [29] 周有禄,武小鹏,李奋,等.冻融循环和干湿交替对黄土力学性质影响的试验研究[J].铁道建筑,2018,58(4):98-100.  
ZHOU Y L, WU X P, LI F, et al. Experimental study on influence of freeze-thaw cycles and dry-wet alternation on mechanical properties of loess [J]. Railway Engineering, 2018, 58(4): 98-100.
- [30] 李双好,李元勋,高欣亚,等.冻融作用对原状黄土抗剪强度的影响规律[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(1):48-55.  
LI S H, LI Y X, GAO X Y, et al. Effect of freezing and thawing on shear strength of intact loess [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(1): 48-55.