

冻融条件下不同覆盖度土壤物理结皮的风蚀特征

钟志强¹, 郝连安², 马波^{1,3}, 张秀梅¹, 代骋¹

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究冻融条件下物理结皮的风蚀特征变化, 为冻融风蚀相关研究提供理论参考。[方法] 以黄土高原北部风水复合侵蚀区内神木市六道沟小流域的沙黄土为研究对象, 采用室内模拟冻融、风洞试验相结合的方式, 设计不同覆盖度(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)的物理结皮进行风洞吹蚀试验, 探究冻融作用对不同覆盖度结皮的风蚀强度、输沙率和输沙高度以及摩阻风速、空气动力学粗糙度等动力学参数的影响。[结果] ①风蚀强度随风速的增加显著增大($p < 0.05$)、随结皮盖度的增加显著减小($p < 0.05$), 且结皮盖度越高, 风蚀减蚀率越强, 最高可达 96.07%; 冻融后物理结皮的风蚀强度较冻融前均显著增加, 冻融后风蚀强度可增加 0.02~1.27 倍。②物理结皮覆盖显著减小了近地表的输沙率, 且近地表输沙率随结皮覆盖度的增加而减小, 随风速的增加而增加; 冻融后近地表输沙率增加了 0.7~4.3 倍, 输沙高度增加了 2~10 cm。③摩阻风速和空气动力学粗糙度随结皮盖度变化差异不显著, 冻融前摩阻风速介于 0.84~1.35 m/s 之间, 冻融后摩阻风速在 0.80~1.51 m/s 内变化, 冻融后物理结皮摩阻风速有所减小, 但空气动力学粗糙度变化不大。[结论] 黄土高原北部的冻融作用增加了土壤风蚀程度, 削弱了物理结皮对风蚀的抑制作用; 随着结皮盖度增加, 冻融作用后风蚀强度和近地表输沙率明显增大; 物理结皮覆盖度、冻融作用对空气动力学粗糙度的影响不显著。

关键词: 土壤物理结皮; 冻融作用; 风洞试验; 风蚀; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0048-10

中图分类号: 157.1

文献参数: 钟志强, 郝连安, 马波, 等. 冻融条件下不同覆盖度土壤物理结皮的风蚀特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 48-57. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.006; Zhong Zhiqiang, Hao Lianan, Ma Bo, et al. Wind erosion characteristics of soil physical crust with different coverage under freeze-thaw conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 48-57.

Wind Erosion Characteristics of Soil Physical Crust with Different Coverage Under Freeze-Thaw Conditions

Zhong Zhiqiang¹, Hao Lianan², Ma Bo^{1,3}, Zhang Xiumei¹, Dai Cheng¹

(1.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Power China Zhongnan

Engineering Corporation Limited, Changsha, Hunan 410014, China; 3.Institute of Soil and Water

Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The change of wind erosion characteristics of physical crust under freeze-thaw conditions was studied to provide theoretical reference for the study of freeze-thaw wind erosion. [Methods] The study examined sandy loess of the Liudaogou sub-watershed in Shenmu City, Shaanxi Province, situated within the wind and water erosion crisscross region of the northern Loess Plateau. The synergistic approaches of indoor freeze-thaw simulation and wind tunnel testing were used to assess the impact of freeze-thaw cycles on wind erosion intensity, sand transport rate, and kinetic parameters such as friction wind speed and aerodynamic roughness across varying soil physical crust coverage levels (0%, 20%, 40%, 60%, 80% and

收稿日期: 2024-03-26

修回日期: 2024-06-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原北部冻融作用下物理结皮特性变化对风蚀的影响机理”(42277342), “黄土高原冻融对水蚀过程的作用机理研究”(41771311)

第一作者: 钟志强(1999—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: 2366@nwafu.edu.cn.

通信作者: 马波(1982—), 男(回族), 陕西省西乡县, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程与机理方面的研究。Email: soil-crop@163.com.

100%)。[Results] ① Wind erosion intensity was found to increase significantly with increasing wind speed ($p < 0.05$) and decrease with increasing incrust coverage ($p < 0.05$), and the maximum reduction in erosion rate was up to 96.07%. Compared to that under pre-freeze-thaw condition, there was a significant rise in the wind erosion intensity of physical crusts under post-freeze-thaw condition, and the increase ranged from 0.02 to 1.27 times. ② Physical crust coverage significantly reduced the near-surface sand transport, which decreased with increasing crust coverage and increased with increasing wind speeds. After freeze-thaw cycles, the near-surface sand transport rates increased by 0.7 to 4.3 times, and the transport height increased by 2 to 10 cm. ③ Changes in friction wind speed and aerodynamic roughness in response to variations in crust coverage were not statistically significant. The friction wind speed before freeze-thaw was between 0.84 and 1.35 m/s, and post-freeze-thaw varied from 0.80 to 1.51 m/s. Although the friction wind speed was slightly reduced after freeze-thaw, the aerodynamic roughness exhibited minimal variation. [Conclusion] In the northern part of the Loess Plateau, the protective effects of physical crusts against wind erosion reduced and soil wind erosion was intensified by freeze-thaw processes. With increased crust coverage, there was a more noticeable increase in wind erosion intensity and near-surface sand transport following freeze-thaw cycles. The influence of crust coverage and freeze-thaw processes on aerodynamic roughness is negligible.

Keywords: soil physical crust; freeze-thaw action; wind tunnel tests; wind erosion; the Loess Plateau

土壤风蚀是指气流与土壤表面相互作用,土壤颗粒在风力的影响下被分离、迁徙和沉积的一系列综合自然地理过程^[1]。风蚀是中国水土流失面积最广、危害巨大的侵蚀形式。水利部2023年《中国水土保持公报》数据显示,中国风力侵蚀面积高达 $1.56 \times 10^6 \text{ km}^2$,占水土流失总面积的59.22%。另外,风蚀还是造成土地沙化的主要诱因,也是极端的气候条件下导致沙尘暴、扬沙气候灾害的根本因素^[2]。

土壤物理结皮广泛分布于裸露的地表,是自然界普遍存在的土壤表层结构,这种特殊结构可对气流与土壤的相互作用产生影响,从而改变地表风蚀物质的搬运和沉积过程^[3]。大量研究表明,物理结皮可以减小风蚀,左小锋等^[4]认为,物理结皮通过增大地表土壤抗剪强度和土壤紧实度,从而提高土壤结构稳定性,降低土壤风蚀风险;毛旭芮等^[5]发现结皮面积、强度、含水量及土壤质地均对风蚀产生影响,其中结皮覆盖度越大,起动风速越大。物理结皮强度可以反映沙(土)地表面形成的固结层所能承受的压力,抗压强度越大,表征抗风蚀能力越强,对风力的抵抗性越高^[6]。土壤物理结皮的强度不仅受形成条件(如雨强、降雨历时、土壤质地等)的影响^[7],还与外界环境变化密切相关,环境的变化会改变物理结皮强度与风化程度^[8],从而影响其抗风蚀能力。冻融循环作为一种强风化作用,可通过影响土壤理化性质和水分迁移、破坏土体的机械稳定性,从而作用于土壤可蚀性^[9],这种作用在表土层尤为显著,冻融作用对物理结皮的影响作用不可忽视。以往的研究多针对不同形成条件下物理结皮对风蚀的影响,对于冻融而造成土壤物理结皮风化后的风蚀研究相对薄弱;且物理结

皮的抗风蚀能力在相同条件下是否因其覆盖程度不同而对冻融作用的响应不同尚未可知。因此,冻融条件下对不同覆盖度物理结皮的抗风蚀性进行研究具有必要性。

六道沟小流域位于陕西省神木市,地处黄土高原北部的风蚀水蚀交错区,气候类型为典型的干旱半干旱气候,同时也属于中度冻融侵蚀区。该地区水力、冻融与风力侵蚀交错发生,侵蚀形式多样,发生过程复杂:夏季集中的降雨给土壤物理结皮的发育创造了条件;冬春季节大风频繁,则为风蚀的发生提供了动力来源;加之该地区冬季寒冷漫长,土壤会经历相当长时间的冻融循环,而冻融作为一种强风化作用会破坏土壤结构的稳定性,同时对裸露地表下垫面特征造成强烈的影响,加剧土壤侵蚀。因此,本文对冻融条件下土壤物理结皮的抗风蚀性能变化进行研究,以期对黄土高原风沙防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

供试土壤采自陕西省神木市六道沟小流域($110^{\circ}21' - 110^{\circ}23'E, 38^{\circ}46' - 38^{\circ}51'N$),六道沟北依长城,地处毛乌素沙漠边缘,自然条件的过渡性特征十分明显。属中温带的半干旱大陆性季风气候区,旱洪及沙尘暴灾害频繁。年际、年内气候变化剧烈,年平均气温 8.5°C ,年平均降水量 432.4 mm ,无霜期 169 d ,冬季漫长且受极低冷气团影响冬季最低可达 -28.1°C ,土壤最大冻结深度可达 146 cm 。当地主风向为西北,次主风向为东南,东风最弱,年均风速 3.6 m/s ,累年极大风速可达 24.5 m/s ,年均大风日数

13.5 d, 最长达 44 d, 年均沙尘暴日数 11.5 d, 最长达 22 d。植被类型为干旱草原, 天然植被大部分已遭破坏, 生态环境脆弱、沙化与植被退化严重。该地区降雨集中在夏季, 冬季漫长且土壤表面经历强烈的冻融循环作用, 加之冬春季风力强盛, 土壤物理结皮受冻融作用的影响强烈。

研究区物理结皮广泛分布, 供试土壤为典型的沙质黄土, 其黏粒 (<0.002 mm) 含量为 6.76%, 粉粒 ($0.002 \sim 0.05$ mm) 含量为 24.32%, 沙粒 ($0.05 \sim 1$ mm) 含量为 68.92%, 有机质含量为 9.17 mg/kg, 土壤容重为 1.41 g/cm^3 。

1.2 研究方法

(1) 前期准备。本试验于 2023 年 3—4 月进行, 选取研究区内物理结皮覆被的裸地进行采样, 剥离表土后挖取 0—10 cm 的沙黄土作为供试土壤, 风干后剔除小石子等杂质备用。

使用人工模拟降雨的方法制备物理结皮是一种相对成熟的制备方法, 可以通过控制降雨量、雨强、降雨历时等参数制备不同强度的物理结皮^[10-11]。本研究基于人工降雨试验制备土壤物理结皮, 使用尺寸为 1.0 m (长) $\times 0.3 \text{ m}$ (宽) $\times 0.1 \text{ m}$ (高) 的钢槽作为容器, 在钢槽底部布设小孔便于雨水自然下渗, 模拟自然雨水入渗过程 (图 1)。

将供试土壤按照 1.4 g/cm^3 (野外实测容重均值) 容重填充于钢槽内, 土壤填充深度为 10 cm。装填后将结皮样品置于坡度可调的板车上, 调整板车坡度为 2° (防止积水) 后开始人工模拟降雨试验。降雨前根据试验设计将土槽用塑料隔板分区遮挡 (结皮区位于上坡向), 以制备不同覆盖度的物理结皮样品。制备好的结皮样品置于阴凉、干燥处进行自然风干。由于冻融作用受到土壤含水量的显著影响, 曾建辉等^[12]在就含水量对冻融作用的影响研究中表明, 当初始含水量为 8% 时冻融作用最为显著。故本试验在冻融

前需对结皮样品进行水分处理, 将土壤含水量控制在 8% 左右。在水分处理中向土壤喷洒一定量的水, 由于此时物理结皮已经形成, 因此在加水过程中需小心谨慎防止破坏结皮, 且加水后立即裹上保鲜膜, 静置 12 h 使水分均匀扩散。水分处理后将结皮样品置于卧式恒温冰箱中进行冻融处理, 根据研究区气象资料将冻结温度设定为 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, 冻融处理分为冻结和融化两个过程, 冻结、融化各 12 h 为一次冻融。冻融过程中为保证土壤含水率不发生变化, 在冻融时始终用保鲜膜对土槽进行覆盖。

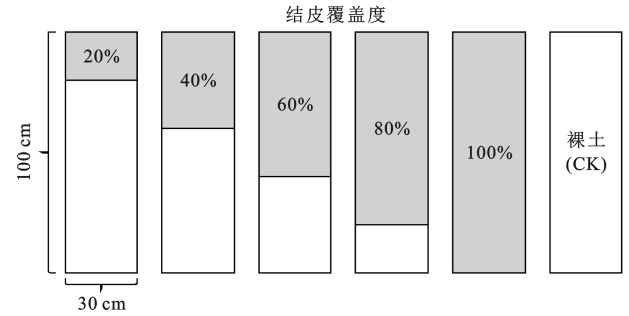


图 1 不同覆盖度物理结皮示意图

Fig.1 Schematic diagram of physical crusts with different coverages

(2) 试验设计。为探究冻融条件下不同覆盖度物理结皮对土壤风蚀的影响, 对冻融前后不同覆盖度物理结皮样品进行风洞试验, 收集有无冻融情况下沙黄土的风蚀特征, 并从冻融前后物理结皮的硬度、厚度、抗剪强度土壤容重等强度特征的变化, 探究分析物理结皮与风蚀之间的定量关系。研究^[13]表明, 土壤受到冻融作用后其物理化学性质会发生改变, 随着冻融次数的增加, 土壤性质变化趋势减小, 在冻融次数达到某一阈值时将达到稳定状态, 土壤性质几乎不再随冻融次数增加而改变。故本试验对无冻融和 13 次冻融循环后的土壤物理结皮覆盖土进行风洞试验, 探究不同结皮覆盖度对土壤风蚀的影响。试验设计详见表 1。

表 1 不同物理结皮覆盖的风洞试验设计

Table 1 Wind tunnel experimental design for wind erosion covered by different physical crusts

风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	吹蚀时间/min	冻融次数	CK	20	40	60	80	100
9	20	0 次	CK	20	40	60	80	100
9	20	13 次	CK	20	40	60	80	100
11	15	0 次	CK	20	40	60	80	100
11	15	13 次	CK	20	40	60	80	100
13	10	0 次	CK	20	40	60	80	100
13	10	13 次	CK	20	40	60	80	100

注: CK 为无结皮覆盖的裸土。

冻融后对物理结皮抗剪强度、硬度、厚度、结皮容重等指标进行测定, 以探究冻融作用对物理结皮强度的影响。

(3) 试验方法。本研究涉及的所有模拟试验均在西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅

进行,人工降雨设备为西北农林科技大学水土保持研究所水保试验设备工厂设计制造的侧喷式降雨机,具有很好的模拟降雨性能,降雨均匀度达 80% 以上,实测降雨能量可达天然降雨的 90% 以上^[14]。冻融试验采用容积为 1 020 L 的卧式低温风冷冰箱,冰箱冷冻温度在 $-25 \sim \pm 5$ °C 可调,温度差可控制在 ± 1 °C。内箱尺寸为长 2 560 mm × 宽 580 mm × 高 770 mm,可同时放置多组样品进行模拟冻融试验。风洞试验在西北农林科技大学水土保持研究所风洞实验室内完成,风洞实验室全长 19 m,分为动力段、调节段、整流段、试验段和集沙段。风洞断面截面 1.0×1.2 m (宽 × 高),通过变频器(0~50 Hz)调节风速,风速在 0~16 m/s 范围内连续可调^[15]。风洞内试验段风速均匀性良好, $\sigma \leq \pm 0.25\%$ (σ 为风速截面任一点气流速度与气流平均速度相对偏差的均方根)。

将冻融后的结皮样品置于风洞实验室中进行风蚀试验,使用带豁口的工程木板将试验段底层孔隙封住,只留一个结皮平面使其与风洞下平面对齐。利用皮托管传感器测定风蚀过程中结皮上方不同高度处的风速,以绘制风速廓线供后续分析,试验中 L 型皮托管分别可以测量 1, 3, 5, 8, 10, 12, 16, 20, 60 cm 等不同高度的风速。在集沙段设置平口式集沙仪(北京市防沙治沙工程技术中心研制),总高度 85 cm,沙尘采集高度 60 cm,采集梯度为 30 个连续的 $2 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 进沙口,采集效率 $> 80\%$ 。将电子秤(量程 200 kg,精度 1 g)放置在试验段基座上,调平后将试验钢槽放在电子秤上,试验开始前,称量钢槽和土样总重 W_1 。风洞密封完全后,设置变频器频率,启动风机,在轴心风速分别为 9, 11, 13 m/s 的风速下分别吹蚀 10, 15, 20 min。每个风速吹蚀过后,称量钢槽和土样总重 W_2 。基于吹蚀前后的重量差计算风蚀量。分层收集平口式集沙仪中风蚀物并进行称重,计算风沙流结构。

1.3 数据处理

(1) 风蚀强度(风蚀模数)。单位面积上单位时间内的风蚀量。计算公式如下:

$$E = \frac{W_1 - W_2}{A \cdot t} \quad (1)$$

式中: E 为风蚀强度(风蚀模数)[$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$]; W_1 为风蚀前钢槽和土样的总重(g); W_2 为风蚀后钢槽和土样的总重(g); A 为结皮样品受风蚀的面积(m^2); t 为吹蚀时间(min)。

(2) 近地表输沙率 Q 。指地表以上不同高度单位时间内的风蚀输沙量[$\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$],使用不同高度集沙仪收集的风沙物质进行计算,计算公式为:

$$Q = \frac{M}{A \cdot t} \quad (2)$$

式中: M 为不同高度集沙仪收集的风沙的质量(g); A 为集沙仪进口的面积(cm^2); t 为吹蚀时间(min)。

(3) 摩阻风速。摩阻风速又可称为临界启动风速,表示的是土壤颗粒脱离地表束缚进入运动所需要的最小风速^[16]。 U_* 是确定地表能否起沙的有力判据,在近地面气层里基本上不随高度发生变化。地表土壤风蚀起沙过程实质上是运动的气流与地表微粒在界面上相互作用的动力过程^[17]。其计算公式为:

$$\frac{U_z}{U_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad (3)$$

式中: U_z 为高度为 Z 时的风速(m/s); Z_0 为地表平均粗糙度(cm); U_* 为摩阻风速; k 为 Vonkarman 常数,取值 0.4。

(4) 空气动力学粗糙度。空气动力学粗糙度是反映下垫面与大气相互作用空气动力学特征的重要参数,表征对风流运动的扰动和摩擦效应^[18],依据风速廓线的拟合方程计算,以风速为 x 轴、高度为 y 轴的风速廓线拟合曲线为指数函数公式($R^2 > 0.9$),其主要公式为^[19]:

$$h = a \cdot e^{b \cdot v} \quad (4)$$

式中: h 为测量高度(cm); v 为风速观测值(m/s); a 和 b 均为常数。当风速为 0 时,所对应的 h 值为该试验处理条件下的空气动力学粗糙度。

基于 SPSS 26 对试验数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA, $\alpha = 0.05$),使用最小显著差异法(LSD)对试验结果进行事后比较,对冻融前后土壤风蚀强度的差异进行独立样本 T 检验。

2 结果与分析

2.1 冻融对不同覆盖度物理结皮风蚀强度的影响

冻融前不同覆盖度物理结皮的土壤风蚀强度如图 2 所示,物理结皮的风蚀强度随风速的增加呈显著增加的趋势($p < 0.05$)。以全覆盖物理结皮为例,其土壤风蚀强度从 9 m/s 的 $15.75 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 增加到 11 m/s 和 13 m/s 的 $22.22, 38.67 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,分别增加了 41.09% 和 145.50%。此外,物理结皮的风蚀强度随结皮覆盖度的增加呈显著减小的趋势($p < 0.05$),当风速为 9 m/s 时,不同覆盖度物理结皮(20%, 40%, 60%, 80%, 100%)的风蚀强度分别为 203.83, 138.92, 80.42, 18.33, 15.75 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,较 CK 分别减小了 37.22%, 57.21%, 75.23%, 94.35% 和 95.14%,可见物理结皮覆盖度越大,对风蚀的减蚀效果越显著,且物理结皮的土壤风蚀强度在风速为 11 和 13 m/s 时的结果与之相似,物理结皮对风蚀的最大减蚀率可达 96.07% 和 95.93%。

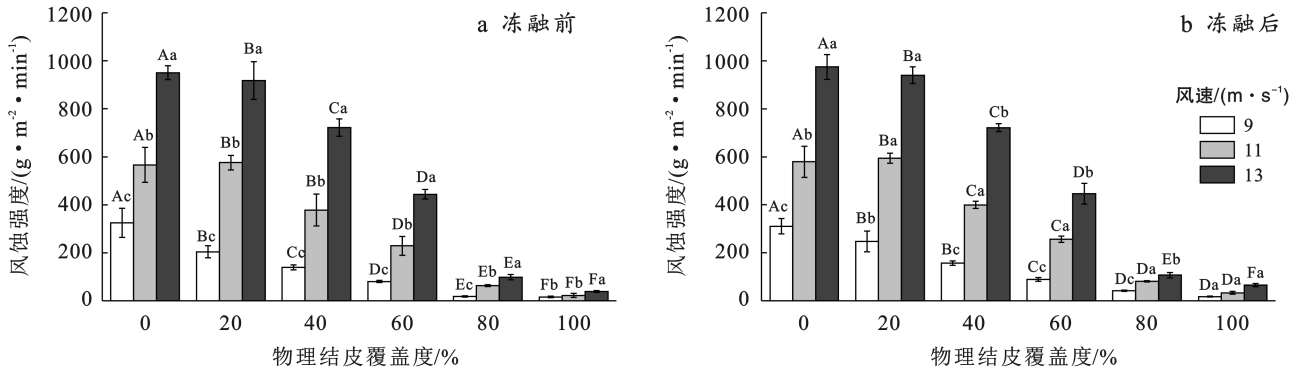


图 2 不同覆盖度物理结皮对土壤风蚀强度的影响

Fig.2 Effect of physical crust on soil wind erosion intensity at different cover levels

表 2 所示为 13 次冻融后不同覆盖度物理结皮对风蚀强度的影响。与冻融前相同的是,冻融后不同覆盖度物理结皮的风蚀强度随着风速的提升而增加,随着结皮覆盖度的增加而降低,冻融后全覆盖物理结皮的风蚀减蚀率仍可达到 94.34%,94.28%和

93.27%。但是,冻融 13 次后物理结皮的土壤风蚀强度较冻融前呈增加的趋势,冻融后土壤风蚀强度较冻融前增加了 0.02~1.27 倍,其中风速为 11 m/s,覆盖度为 0%时增幅最小,而风速 9 m/s,覆盖度 80%时增幅最大。

表 2 冻融前后不同土壤结皮覆盖度的风蚀强度

Table 2 Wind erosion intensity of different soil crust coverage before and after freeze-thaw

物理结皮覆盖度/%	风蚀强度/(g·m ⁻² ·min ⁻¹)					
	9 m/s 风速		11 m/s 风速		13 m/s 风速	
	冻融前	冻融后	冻融前	冻融后	冻融前	冻融后
20	203.83	247.17*	575.67	594.00**	918.00	940.00**
40	138.92	157.42*	378.00	399.44	721.83	721.33
60	80.42	89.33	229.33	257.00	443.83	445.83
80	18.33	41.75	62.89	80.89**	98.50	106.67**
100	15.75	17.58**	22.22	33.11*	38.67	65.50**

注: * 和 ** 分别表示在 $p < 0.05$, $p < 0.01$ 水平下差异显著。

2.2 冻融对不同覆盖度物理结皮输沙率的影响

图 3 为不同覆盖度物理结皮在冻融前后其 0—10 cm 空间内的近地表输沙率的变化。如图 3 所示,近地表输沙率随结皮覆盖度的增大而减小,随风速的增大而增大。在 9 m/s 风速条件下,近地表输沙率从 CK 的 5.90 g/(cm²·min)减小到全结皮覆盖的 0.21

g/(cm²·min);当风速增加到 11 m/s,近地表输沙率从 CK 的 10.28 g/(cm²·min)减小至全结皮覆盖的 0.63 g/(cm²·min);当风速为 13 m/s 时,近地表输沙率从 CK 的 17.87 g/(cm²·min)减小至全结皮覆盖的 0.74 g/(cm²·min),3 种风速条件下分别减小了 96.44%,93.87%和 95.85%。

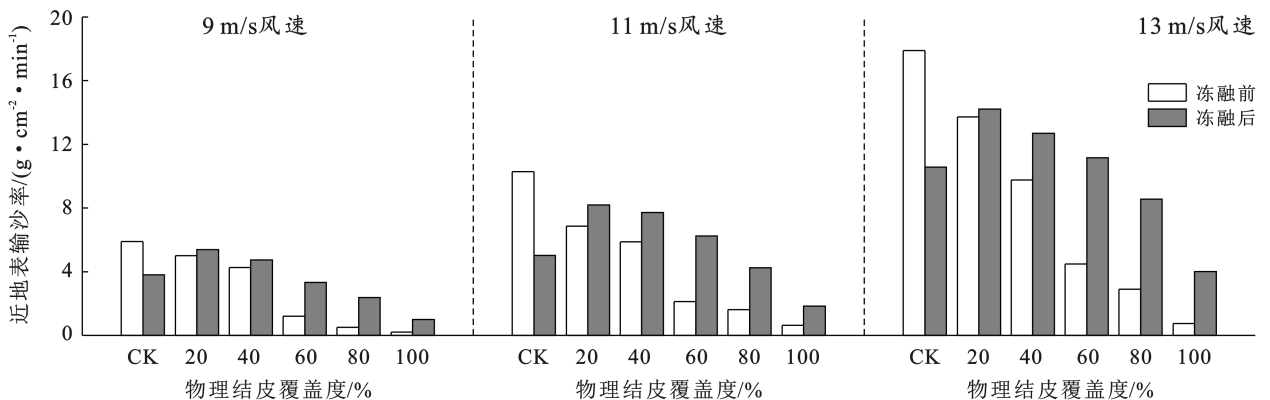


图 3 冻融前后近地表输沙率的变化

Fig.3 Variation of near-surface sand transport before and after freezing and thawing

但是,冻融后物理结皮的近地表输沙率较冻融前呈增加的趋势。除 CK 外其他各覆盖度物理结皮冻融后的近地表输沙率均大于冻融前,增加了 0.7~4.3 倍不等,且结皮覆盖度越高其增幅越大。同时,13 m/s 风速条件下冻融后近地表输沙率的变化幅度最大,11 m/s 次之,9 m/s 变化最小。

此外,不同覆盖度物理结皮冻融前后的输沙率和输沙高度存在差异(见图 4),物理结皮的输沙率随着输沙高度的增加呈指数减小的趋势。CK 在 13 m/s 风速条件下的输沙高度达到 34 cm 的最大值;全覆盖结皮在 9 m/s 风速条件下仅有最小 10 cm 的输沙高度。冻融后不同覆盖度的物理结皮的输沙高度增加了 2~10 cm。

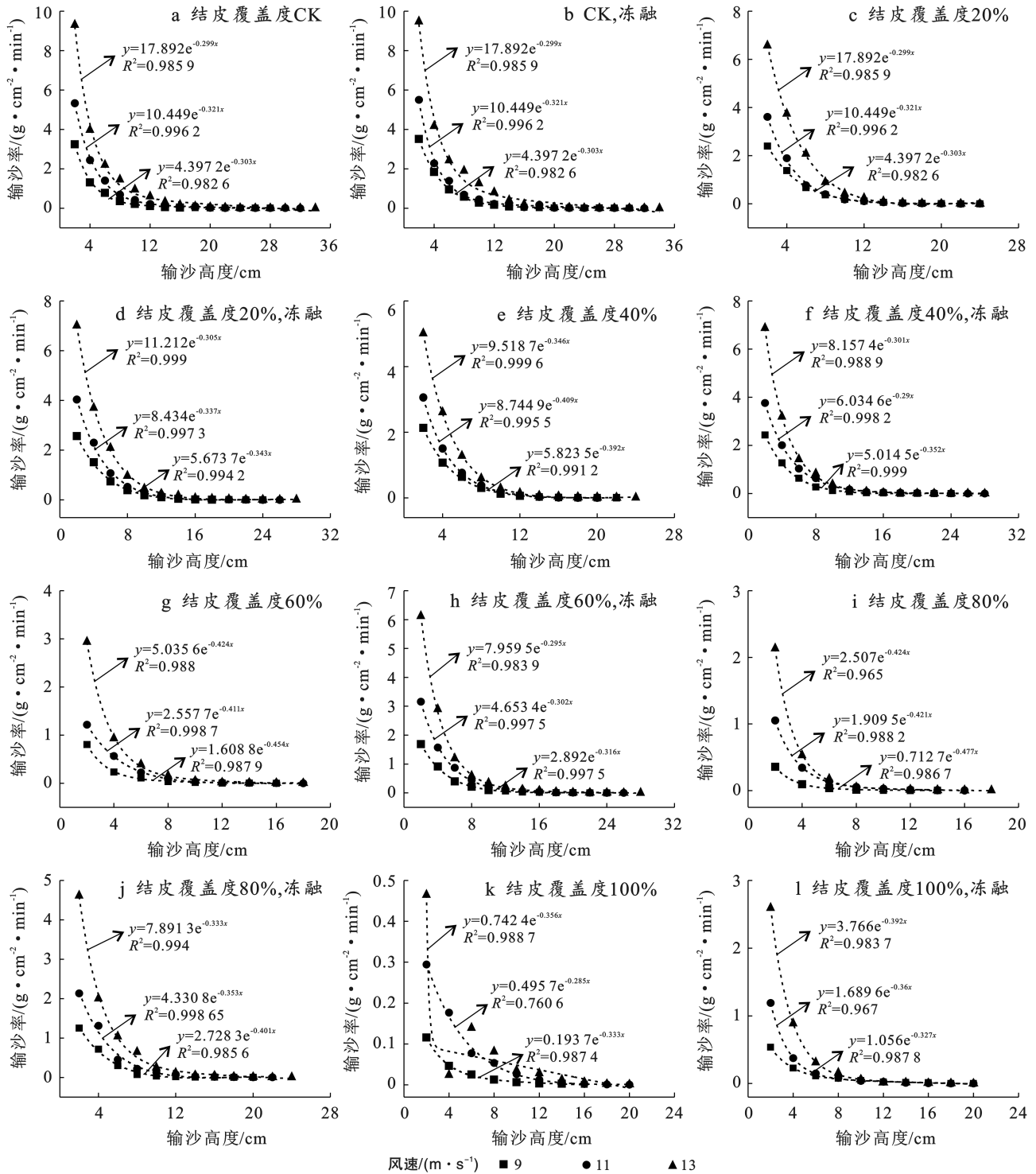


图 4 冻融前后不同覆盖度物理结皮输沙率随输沙高度的变化

Fig.4 Variation of sand transport with sand transport height for different cover of physical crust before and after freezing and thawing

2.3 冻融对不同覆盖度物理结皮摩擦风速和空气动力学粗糙度的影响

图 5 显示的是冻融前后不同结皮覆盖度的摩擦风速,结果表明,冻融前不同盖度摩擦风速存在差异,整体介于 0.84~1.35 m/s 之间,各覆盖度摩擦风速之间并未发现显著性差异($p>0.05$),冻融后结皮摩擦风速介于 0.80~1.51 m/s 之间,平均值为 1.04 m/s 略小于冻融前的平均摩擦风速 1.11 m/s。不同风速下各结皮盖度摩擦风速呈增加的趋势,冻融后风速 9, 11, 13 m/s 时摩擦风速均值分别为 0.99, 1.03,

1.11 m/s,而冻融前 3 个风速下摩擦风速均值分别为 1.01, 1.08, 1.23 m/s。冻融后结皮摩擦风速降低,但未发现显著性差异。图 6 为不同结皮覆盖度下冻融前后空气动力学粗糙度的计算结果, h 最大为 0.086 cm 最小仅为 0.011 cm,试验结果表明冻融前后 h 的值在 10^{-1} mm 级别,细微的地表起伏都会引起 h 的变化,在结皮的制备和处理过程中很容易使表面粗糙度产生误差,导致试验结果具有很大的不确定性,结皮及裸土表面相对平整、地表糙率起伏不大,精度相对较高,难以保证变量的一致性,导致试验结果误差较大。

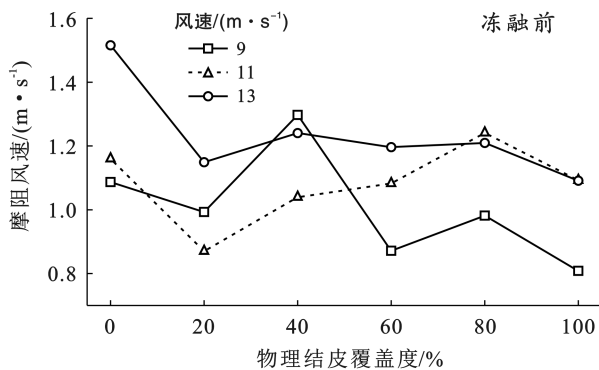


图 5 冻融前后不同覆盖度物理结皮的摩擦风速

Fig.5 Moisture-resistant wind speeds of physical crusts with different coverings before and after freezing and thawing

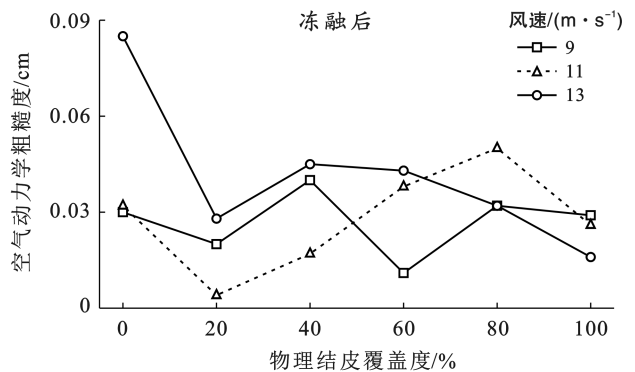
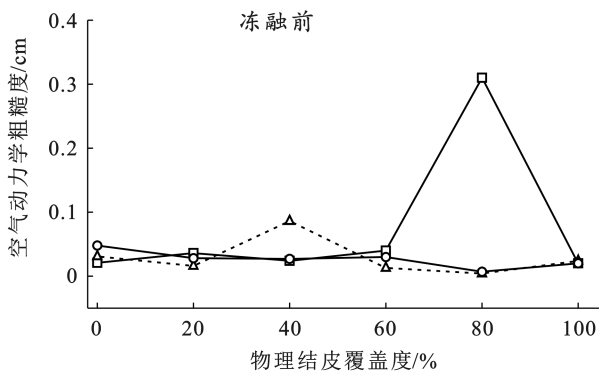
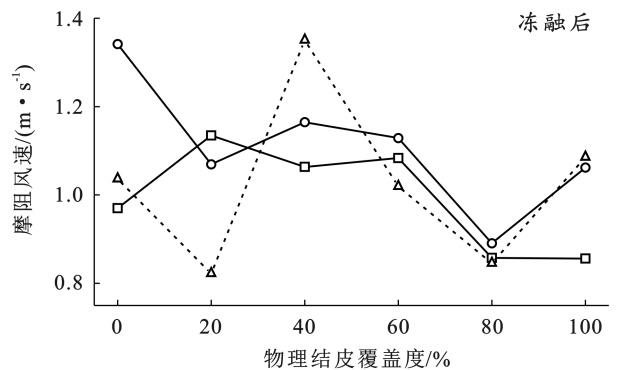


图 6 冻融前后不同覆盖度物理结皮的空气动力学粗糙度

Fig.6 Aerodynamic roughness of physical crusts with different coverings before and after freeze-thawing

3 讨论

冻融作用的本质是土壤水分不断冻结—融化—冻结,水分在相变的过程中体积增大,孔隙水对周围土体进行挤压,使孔隙增大;融化时扩张的土壤孔隙被水分重新填充,更多的水进入孔隙被再次冻结,反复循环下孔隙不断扩张产生裂隙,同时裂隙传递土壤表面,使结皮内部变得松散,结皮强度降低,增加土壤可蚀性^[20-21]。土壤物理结皮作为一种特殊的下垫面,其在土壤风蚀过程中发挥重要的作用,但是受冻融作

用的影响,物理结皮表面变得松散,其抗风蚀能力显著降低。

本研究针对冻融条件下不同覆盖度物理结皮对土壤风蚀的影响进行研究,结果表明,物理结皮覆盖显著降低了土壤风蚀,全覆盖物理结皮减蚀率可达 95% 以上,可以大幅减小风蚀,这与 Yan Yuchun 等^[22]的研究结果相似。而毛旭芮等^[5]通过控制物理结皮盖度和分布,研究物理结皮盖度对风蚀的影响,发现结皮率对风蚀量的影响较为显著,且结皮率的增加有效减小了风蚀量,本研究得出与之相似的结论,

即不同覆盖度物理结皮均对风蚀均产生抑制作用,且覆盖度越大减蚀率越高。物理结皮作为覆被于地表的致密层,本身有着良好的抗风蚀性,其平均减蚀率能达到 90% 以上,结皮的类型和土壤质地差别会影响这个数值^[23]。郭迎春^[24]在针对物理结皮的抗风蚀性研究中指出,物理结皮具有相对致密的结构,相较于一般土壤,结皮有着更大的容重,结皮硬度和抗剪强度均大于无结皮土壤,这些力学特性决定了土壤能否被气流吹蚀。此外,下垫面的粗糙度等形态指标也是影响土壤风蚀的重要因素^[18],本研究对物理结皮摩阻风速和空气动力学粗糙度的研究结果显示,摩阻风速在一定范围内波动,原因可能是试验设计时将结皮区置于上风向位置,风力率先吹蚀结皮,此时风蚀不易发生;当气流到达裸土区时沙粒迅速被吹起,结皮区和非结皮区摩阻风速不一致导致最终计算出来的整体摩阻风速之间误差较大。冻融后结皮土摩阻风速变小,但未发现显著性差异。原因可能是冻融后土壤出现裂隙,结皮表面略微隆起,导致了摩阻风速有所增加,裂隙的出现和结皮抗剪强度的变化二者抵消了摩阻风速的变化。大量研究表明,冻融作用会减小物理结皮强度^[25-27],从而影响风蚀,冻融作用使土壤有机质含量、土壤团聚体稳定性及土壤抗剪强度等与土壤抵抗侵蚀能力有关的指标发生改变,使土壤在外力作用下更容易产生侵蚀,从而增强了后续的风蚀^[26,28]。

对比分析冻融前后不同覆盖度物理结皮的风蚀特征可知,冻融后风蚀强度、输沙率、输沙高度均有所增加,其中 9 m/s 风速时,80% 盖度物理结皮冻融后风蚀强度增加了 127.72%,这与 Wang 等^[29]的研究结果相似。国外学者 Dirk Goossens^[30]在对土壤结皮对风蚀沉积物排放和运输的影响研究中发现,风蚀过程中跃移颗粒不断撞击结皮表面,使其厚度不断减小,在达到阈值前土壤结皮并不会失去对土壤的保护作用,即结皮在受到破坏后仍能保留一部分抗风蚀能力,直至结皮完全消失。本文研究结果与之相似,在冻融后,物理结皮仍具有较高的风蚀减蚀率,冻融后全覆盖物理结皮较 CK 风蚀量仍然减少 93.27%,不同覆盖度物理结皮受冻融作用程度不同,结皮面积越大,其受冻融作用影响越大,冻融后风蚀强度就越大。

黄土高原北部的六道沟流域物理结皮分布广泛,该地集中的降雨为结皮发育提供了良好的条件,物理结皮有效减小当地的土壤风蚀。但是,当进入休耕期后,便会出现大量的裸露耕地,在人类活动以及牲畜踩踏下耕地中的结皮会被破坏,物理结皮被破坏结皮覆盖度降低,增加了风蚀的风险;加之该地季节性冻融作用明显,冻融作用进一步破坏结皮结构,将会导

致晚冬、早春时期土壤风蚀量增加。本研究从冻融后物理结皮风蚀的角度出发,针对冻融后物理结皮的抗风蚀性进行研究,利用风洞试验,探究了不同覆盖度物理结皮在 3 种风速下的风蚀强度、输沙率、输沙高度以及摩阻风速等的变化,阐明了冻融风化后物理结皮的减蚀效应,研究可为物理结皮和风蚀的相关研究提供一定的理论参考。

4 结论

(1) 不同覆盖度(20%, 40%, 60%, 80%)的物理结皮对土壤风蚀均具有显著的抑制作用,可减小 37.22%~96.07% 的风蚀强度。冻融对物理结皮具有破坏作用,冻融后不同覆盖度物理结皮的风蚀强度可增加 0.02~1.27 倍,但全覆盖物理结皮的风蚀减蚀率仍可达到 93% 以上。

(2) 物理结皮的存在显著降低了近地表输沙率,且输沙率随结皮覆盖度的增加而减小,随风速的增大而增加。然而,冻融作用会导致近地表输沙率增加,增幅在 0.7~4.3 倍之间,且覆盖度越高,增幅越大。输沙高度随结皮覆盖度的增加而降低,冻融后输沙高度有所增加,增幅为 2~10 cm。

(3) 物理结皮覆盖度对摩阻风速和空气动力学粗糙度的影响不显著,不同覆盖度条件下物理结皮的摩阻风速介于 0.84~1.35 m/s 之间,空气动力学粗糙度介于 0.011~0.086 cm 之间。冻融后摩阻风速出现增加的趋势,但空气动力学粗糙度变化不显著。

参考文献(References)

- [1] 戚隆溪,王柏懿.土壤侵蚀的流体力学机制(II):风蚀[J].力学进展,1996,26(1):41-55.
Qi Longxi, Wang B Y. Hydraulic mechanism of soil erosion: II: Wind erosion [J]. Advances in Mechanics, 1996, 26(1): 41-55.
- [2] 李晓丽,申向东.结皮土壤的抗风蚀性分析[J].干旱区资源与环境,2006,20(2):203-207.
Li Xiaoli, Shen Xiangdong. The analysis on the mechanism of anti-wind erosion of soil crust [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(2): 203-207.
- [3] 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 Chunlai, Song Changqing, Wang Zhenting, et al. Review and prospect of the study on soil wind erosion process [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(1): 27-41.
- [4] 左小锋,郑粉莉,张加琼,等.典型薄层黑土区前期坡面水蚀对土壤风蚀的影响[J].农业工程学报,2021,37(12):

- 45-53.
- Zuo Xiaofeng, Zheng Fenli, Zhang Jiaqiong, et al. Effect of previous sloping water erosion on soil wind erosion in typical thin layered Mollisol Region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12):45-53.
- [5] 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.
- Mao Xurui, Yang Jianjun, Cao Yue'e, et al. Wind tunnel study of soil crust area and distribution affecting on wind erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3):1-7.
- [6] 夏倩柔, 张波, 伍德彦. 绿洲荒漠交错带风沙土盐结皮抗风蚀特性分析[J]. 新疆环境保护, 2020, 42(2):28-34.
- Xia Qianrou, Zhang Bo, Wu Deyan. Anti-wind erosion characteristics of aeolian sandy soil salt crust in oasis-desert ecotone [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2020, 42(2):28-34.
- [7] 路培, 王林华, 吴发启. 不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8):141-146.
- Lu Pei, Wang Linhua, Wu Faqi. Effect of soil crust strength on erosion under different rainfall intensity [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8):141-146.
- [8] 李鑫浩, 曹文华, 牛勇, 等. 黄泛平原区风沙土物理结皮硬度和厚度特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1):63-68.
- Li Xinhao, Cao Wenhua, Niu Yong, et al. Characteristics and influencing factors of hardness and thickness of aeolian sandy soil crust at sandy area of Yellow River floodplain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1):63-68.
- [9] 高敏, 李艳霞, 张雪莲, 等. 冻融过程对土壤物理化学及生物学性质的影响研究及展望[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12):2269-2274.
- Gao Min, Li Yanxia, Zhang Xuelian, et al. Influence of freeze-thaw process on soil physical, chemical and biological properties: A review [J]. Journal of Agro-environment Science, 2016, 35(12):2269-2274.
- [10] 胡霞, 严平, 李顺江, 等. 人工降雨条件下土壤结皮的形成以及与土壤溅蚀的关系[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2):13-16.
- Hu Xia, Yan Ping, Li Shunjiang, et al. Development of soil crust through rainfall simulating in laboratory and relationship between crust and splash erosion [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(2):13-16.
- [11] 路培. 土壤结皮形成机制及空间分布对侵蚀的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- Lu Pei. Formation of soil crust and its effects of different spatial distributions of physical soil crusts on runoff and erosion [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [12] 曾建辉, 马波, 郭迎香, 等. 冻融条件下生物结皮覆盖对土壤饱和导水率的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(1):348-358.
- Zeng Jianhui, Ma Bo, Guo Yingxiang, et al. Effect of biological crust cover on soil saturated hydraulic conductivity under freeze-thaw conditions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1):348-358.
- [13] 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.
- Sun Baoyang, Li Zhanbin, Xiao Junbo, et al. Research progress on the effects of freeze-thaw on soil physical and chemical properties and wind and water erosion [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(1):337-347.
- [14] 王安, 郝明德, 王英文. 人工降雨条件下秸秆覆盖及留茬的水土保持效应[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2):26-28.
- Wang An, Hao Mingde, Wang Jiawen. Effects of straw mulch and stubble on soil and water conservation under stimulated rainfalls [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2):26-28.
- [15] 李元元, 王占礼. 高分子多肽衍生物防治风蚀的风洞试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5):149-155.
- Li Yuanyuan, Wang Zhanli. Wind tunnel experiment on polypeptide derivatives in controlling wind erosion [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5):149-155.
- [16] 刘欣宇, 张春来, 张慧, 等. 草地近地表风速脉动及其与平均风速、摩阻风速的关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5):60-63.
- Liu Xinyu, Zhang Chunlai, Zhang Hui, et al. Characteristics of wind velocity pulsation and its relation to average wind velocity and friction wind velocity [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5):60-63.
- [17] Li Junran, Okin G S, Herrick J E, et al. A simple method to estimate threshold friction velocity of wind erosion in the field [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(10):L10402.
- [18] 白子怡, 董治宝, 南维鸽, 等. 植被盖度对风沙流结构及输沙率的影响[J]. 中国沙漠, 2024, 44(2):25-34.
- Bai Ziyi, Dong Zhibao, Nan Weige, et al. The influence of vegetation coverage on the wind sand flow structure and sediment transport rate [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(2):25-34.

- [19] 王渝淞. 坝上地区生物结皮防治风蚀扬尘的试验研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
Wang Yulong. Experimental study on prevention and control of wind erosion and dust emission by biological soil crust in Bashang area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [20] 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.
Zhang Zeyu, Ma Bo, Li Zhanbin, et al. Influence of freeze-thaw alternation on the erodibility of three typical soils in the Loess Plateau [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(5): 813-818.
- [21] 肖俊波. 季节性冻融对土壤可蚀性影响的试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
Xiao Junbo. Experimental study on the effects of seasonal freeze-thaw on soil erodibility [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [22] Yan Yuchun, Wu Lianhai, Xin Xiaoping, et al. How rain-formed soil crust affects wind erosion in a semi-arid steppe in Northern China [J]. Geoderma, 2015, 249: 79-86.
- [23] 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.
Hu Wei, Liu Xiaobing, Zhang Xingyi. Soil crust properties and their effects on wind erosion [J]. Soils and Crops, 2023, 12(1): 88-95.
- [24] 郭迎香. 冻融作用下黄土高原北部土壤物理结皮对沙黄土风蚀的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
Guo Yingxiang. Effect of soil physical crust on wind erosion of sandy loess in northern Loess Plateau under freezing and thawing [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [25] 屈永昌. 冻融循环对土壤结皮抗冲击侵蚀能力影响的实验研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2019.
Qu Yongchang. Experimental investigations on the effect from freeze-thaw cycle to the anti-erosion ability of soil crust [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2019.
- [26] 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.
Ni Wankui, Shi Huaqiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 922-927.
- [27] 魏霞, 丁永建, 李勋贵. 冻融侵蚀研究的回顾与展望[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 271-275.
Wei Xia, Ding Yongjian, Li Xungui. Review and prospect of Freeze-thaw-induced erosion research [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(2): 271-275.
- [28] 杨会民, 王静爱, 邹学勇, 等. 风水复合侵蚀研究进展与展望[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 962-971.
Yang Huimin, Wang Jing'ai, Zou Xueyong, et al. Progress and prospect of research on wind-water complex erosion [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 962-971.
- [29] 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.
- [30] Goossens D. Effect of soil crusting on the emission and transport of wind-eroded sediment: Field measurements on loamy sandy soil [J]. Geomorphology, 2004, 58(1/2/3/4): 145-160.

(上接第9页)

- [29] 宋鹏帅, 王健, 陈琳, 等. 干湿交替作用对关中地区塿土临界剪切力的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1731-1740.
Song Pengshuai, Wang Jian, Chen Lin, et al. Effect of dry-wet alternation on critical shear stress of Lou soil in the Guanzhong Area [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1731-1740.
- [30] 张素, 郑学用, 熊东红, 等. 干湿交替对干热河谷冲沟发育区不同土壤崩解性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 111-115.
Zhang Su, Zheng Xueyong, Xiong Donghong, et al. The influence of dry-wet alternation on the disintegration of different types of soil in gully development region of dry-hot valley [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 111-115.