

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.02.017

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.02.017

赵诗瑞, CHRISTOPHE Mupenzi, 张秀梅, 等. 放牧踩踏破坏土壤物理结皮对风蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 205-213.

ZHAO Shirui, CHRISTOPHE Mupenzi, ZHANG Xiumei, et al. Impact of soil physical crust damage caused by grazing trampling on wind erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 205-213.

放牧踩踏破坏土壤物理结皮对风蚀的影响

赵诗瑞¹, CHRISTOPHE Mupenzi², 张秀梅¹, 帅芳³, 马波¹

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治
全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 卢旺达基加利基督复临大学环境研究学院, 卢旺达 999051;
3. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探究不同放牧踩踏强度对物理结皮的破坏程度及其对风蚀强度与风蚀动力学参数的影响。
[方法] 以黄土高原北部六道沟小流域的盖沙黄土为研究对象, 在120 mm/h模拟降雨强度条件下形成物理结皮后, 设置20%、40%、60%、80%和100% 5种模拟放牧踩踏强度及9、11、13 m/s 3种风速, 开展不同踩踏强度下物理结皮破坏程度对风蚀特征的规律探究。[结果] 1) 踩踏破坏物理结皮显著加剧风蚀, 风蚀模数较未踩踏(CK)增加23.45%~409.79%。同一风速下, 物理结皮抗风蚀能力随踩踏强度增大而减弱。2) 粉尘浓度(PM_{2.5}、PM₁₀、TSP)与放牧踩踏强度呈显著正相关($p < 0.05$), 踩踏强度梯度每增加20%, 粉尘释放量相较于前一踩踏强度梯度提高1.22~7.21倍, 其中, PM_{2.5}浓度增幅最大, PM₁₀和TSP次之。3) 随着踩踏强度增大, 摩阻风速和空气动力学粗糙度均显著增加, 摩阻风速为0.17~0.69 m/s, 空气动力学粗糙度为0.012~0.068 cm。
[结论] 踩踏破坏物理结皮, 显著加剧风蚀。粉尘释放浓度随踩踏强度显著增加, PM_{2.5}释放浓度对踩踏响应最为敏感, 其增幅高于PM₁₀和TSP。研究结果可为黄土高原北部风蚀防治提供理论依据。

关键词: 黄土高原; 物理结皮; 放牧踩踏; 风蚀; 风洞试验

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0205-09

Impact of Soil Physical Crust Damage Caused by Grazing Trampling on Wind Erosion

ZHAO Shirui¹, CHRISTOPHE Mupenzi², ZHANG Xiumei¹, SHUAI Fang³, MA Bo¹

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Faculty of Environmental Studies, University of Lay Adventists of Kigali, Kigali 999051, Rwanda; 3. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To explore the degree of damage to physical crusts caused by different intensities of grazing trampling and their influence on wind erosion intensity and dynamic parameters of wind erosion. [Methods] This study took the sandy loess covering the Liudaogou small watershed in the northern part of the Loess Plateau as the research object. Physical crusts were formed under the simulated rainfall intensity of 120 mm/h, and five simulated grazing trampling intensities of 20%, 40%, 60%, 80%, and 100% and three wind speeds of 9, 11, and 13 m/s were established. The patterns of the degree of physical crust damage under different trampling intensities on wind erosion characteristics were investigated. [Results] 1) Trampling of different intensities significantly damaged the soil physical crust, thereby significantly intensifying wind erosion, with the wind erosion modulus increasing by 23.45% to 409.79% compared with the untrampled control (CK). At the same wind speed, the greater the intensity of trampling, the weaker the wind erosion resistance of the physical crusts. 2) Dust concentrations (PM_{2.5}, PM₁₀, TSP) were significantly positively correlated with grazing trampling intensity ($p < 0.05$). For every

收稿日期: 2025-09-02

修回日期: 2025-10-05

录用日期: 2025-10-12

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-05

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42277342)

第一作者: 赵诗瑞(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 17718701598@163.com

通信作者: 马波(1982—), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: soilcrop@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

20% increase in trampling intensity gradient, dust release increased by 1.22 to 7.21 times compared to the previous level, with $PM_{2.5}$ concentration showing the largest increase, followed by PM_{10} and TSP. 3) As the trampling intensity increased, both friction wind velocity and aerodynamic roughness increased significantly. The friction wind velocity ranged from 0.17 m/s to 0.69 m/s, and the aerodynamic roughness ranged from 0.012 cm to 0.068 cm. **[Conclusion]** Trampling damage to the physical crust significantly exacerbates wind erosion. Dust release increases exponentially with trampling intensity, and $PM_{2.5}$ is the most sensitive to trampling, with an increase higher than that of PM_{10} and TSP. The research findings can provide a theoretical basis for the prevention and control of wind erosion in the northern part of the Loess Plateau.

Keywords: Loess Plateau; physical crust; grazing trampling; wind erosion; wind tunnel testing

Received: 2025-09-02

Revised: 2025-10-05

Accepted: 2025-10-12

Online(www.cnki.net): 2025-12-05

黄土高原北部属典型干旱-半干旱气候区,水蚀与风蚀交替发生,夏季集中降雨促进土壤物理结皮的形成,而冬春季频繁大风则为风蚀提供动力条件^[1]。已有研究^[2]表明,土壤物理结皮对风蚀具有显著抑制作用,其致密结构能够分散风力对地表松散颗粒的直接作用,有效抑制细颗粒跃移;物理结皮覆盖度通过改变地表空气动力学粗糙度,调节摩阻风速,进而影响风沙流结构及风蚀过程^[3]。

黄土高原北部地处农牧交错带,畜牧业与耕作业具有同等重要的地位。放牧过程中,牛、羊等牲畜的行走、进食和休憩等行为对土壤和植被持续施加压力,导致土壤孔隙度降低,透气性与透水能力下降,土壤性状不断恶化^[4-5],同时,造成地表结皮破碎、结构不连续和覆盖度降低,使其更易受到风力侵蚀^[6]。物理结皮本身具有良好的抗风蚀能力,完整结皮可减少90%以上风蚀量,且风蚀量随结皮覆盖度的降低而增加^[7]。白雯宇等^[8]研究证实,物理结皮能显著抑制风蚀扬尘排放。目前,关于踩踏破坏物理结皮的研究^[9-10]多集中于土壤微生物量变化和退化梯度等方面,而对踩踏影响其抗风蚀功能的机制关注不足。相比之下,针对生物结皮受踩踏影响的研究较为系统,有研究^[11-14]表明,放牧踩踏会导致其盖度下降,斑块破碎化,降低生物多样性与丰富度,并影响坡面水分入渗和元素循环过程^[15]。由于生物结皮内部菌丝与胞外聚合物形成的生物黏结结构赋予其一定韧性,可缓冲踩踏压力^[16],因而其抵抗踩踏干扰的能力通常强于物理结皮。正因如此,物理结皮在放牧干扰下可能表现出更高的脆弱性。尽管这2类结皮在形成机制与抗风蚀效应上已有较明确区分,且均具备显著防风蚀功能,但其对踩踏干扰的响应差异及其导致的粉尘释放机制尚不清晰,尤其在风水复合侵蚀区,物理结皮的稳定性既受气候因素调控,也受人为扰动强度的显著影响。在六道

沟小流域,长期放牧踩踏已成为加剧区域风蚀的重要人为因素,通过降低结皮结构稳定性,促使土壤细颗粒迁移与粉尘释放,对生态环境造成危害。当前,关于不同踩踏强度与物理结皮覆盖度之间的定量关系及指标变化如何进一步影响 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和TSP等不同粒径粉尘的释放规律,尚缺乏系统的试验验证与定量分析。因此,本研究采用室内模拟降雨与风洞试验相结合的方法,以不同强度放牧踩踏为切入点,系统测定风蚀模数、粉尘浓度释放量、输沙率、输沙高度、摩阻风速及空气动力学粗糙度等动力学参数,明确放牧踩踏对物理结皮的破坏过程,揭示物理结皮在放牧踩踏条件下对风蚀扬尘的响应规律,以为黄土高原北部的风蚀防治提供数据支撑和理论依据。

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,位于神木市以西14 km($38^{\circ}46' \sim 38^{\circ}51'N$, $110^{\circ}21' \sim 110^{\circ}23'E$),属于盖沙黄土丘陵沟壑地貌,是黄土高原风水复合侵蚀区典型区域^[17]。前期调查发现,该区域放牧踩踏现象十分普遍,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。区域内地表物质组成复杂,盖沙黄土与风积沙分布广泛,其松散质地降雨后易形成物理结皮,同时具有高度的风蚀敏感性,是研究放牧踩踏与风蚀耦合效应的典型区域^[18]。降水年际变化大且年内集中,年平均降水量408.5 mm,年际变化剧烈,最大降水量819.1 mm,最小降水量106.8 mm,其中6—9月降水量占全年降水量的80.9%,夏季集中降雨为物理结皮的形成与发育提供条件。区域内放牧现象较为普遍,尤其在春秋两季,由于气候相对温和、牧草资源相对集中,成为全年中放牧活动最为集中的时段。牲畜踩踏直接导致地表物理结皮大面积破碎,土壤结构遭

到破坏,此过程显著降低地表抗风蚀能力^[19],在冬春大风季节加剧近地表粉尘释放风险,已成为制约当地生态恢复与土地可持续利用的关键因素。

1.2 试验设计

1.2.1 前期准备 在规格为50 cm×100 cm×10 cm的土槽中,按照1.4 g/cm³的土壤体积质量和实测含水量配制供试土壤,并将土壤分层压实至10 cm深度。调节土槽底部坡度至2°,并设置渗水孔。随后以120 mm/h的降雨强度模拟自然入渗,过程期间保持土槽微倾以防止积水。降雨结束后,样品置于自然条件下风干。

1.2.2 模拟踩踏工具 采用自行设计的近似羊蹄形状的实心铁质工具模拟放牧踩踏,该工具由2个相同椭圆在长轴顶点处以固定角度连接而成,通过测量椭圆长轴(a)和短轴(b),利用公式 $s = \pi ab$ 计算单个蹄印面积,根据破坏强度=(踩踏次数×蹄印面积)/土槽表面积,反推出5种不同强度破坏需要的踩踏次数,踩踏次数分别为31、62、93、124、155次^[18],根据结皮破碎指数采用Photo Scan将图像转化为黑白二值

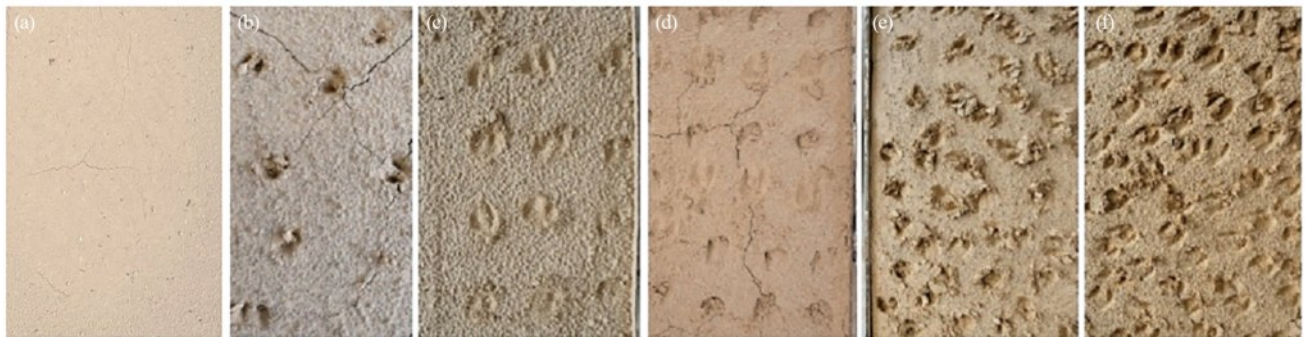
图量化踩踏破坏程度,计算 $CFI = (A_0/A_t) \times 100\%$ 。式中: A_0 为破损区域面积; A_t 为整个图像区域的面积。当100%破坏时, $CFI > 0.9$,认定踩踏强度为100%时为完全破坏。每组处理设置3次重复,以减少试验误差。模拟踩踏工具以6 cm高度自由落体垂直作用土壤,模拟单蹄受力约13.3 kg,压强4.17 kPa,等效于成年羊单蹄踩地实际压强,确保与野外放牧情况相似。

1.2.3 风洞试验 将处理后的试验土样进行风洞试验,风洞试验设在西北农林科技大学水土保持研究所风洞试验室内完成。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 m×1.2 m(宽×高),通过变频器(0~50 Hz)调节风速,风速在0~16 m/s内连续可调^[20]。风洞试验设计参数见表1,不同踩踏强度处理后的物理结皮状况见图1。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)。

表1 不同强度踩踏的风洞试验设计

Table 1 Wind tunnel test design under different trampling intensities

风速/(m·s ⁻¹)	吹蚀时间/min	踩踏强度/%					
9	20	CK	20	40	60	80	100
11	15	CK	20	40	60	80	100
13	10	CK	20	40	60	80	100



注:(a)为未踩踏;(b)~(f)分别为20%、40%、60%、80%、100%踩踏强度。

图1 不同踩踏强度下1/4物理结皮表面状况

Fig. 1 Surface conditions of 1/4 physical crust under different trampling intensities

1.3 测定指标与方法

1.3.1 粉尘总浓度检测 基于室内风洞试验和空气颗粒监测装置,分析不同放牧踩踏强度对土壤物理结皮破坏后的土壤风蚀速率、PM_{2.5}、PM₁₀和TSP等粉尘释放的影响。风蚀后空气中PM_{2.5}、PM₁₀、总悬浮颗粒物(TSP)浓度为待测指标,使用DUST-DETECTOR(cw-76 s)粉尘仪对风蚀模拟试验中的粉尘浓度进行测定。该设备监测的粉尘浓度范围为0.01~150 mg/(m³·s),监测时间间隔1~60 s可调,采样流量3.0 L/min,且具有数据精准、性能稳定及智能监测等特点^[21]。

1.3.2 风蚀模数 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20、15、10 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。计算公式为:

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

式中: E 为风蚀模数,g/(m²·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 。

1.3.3 输沙率(Q) 所集沙粒用精度 0.01 g 的电子秤称重, 获得输沙量数据, 采用公式计算单位时间单位宽度的输沙率。

$$Q = \frac{M}{\Delta t \Delta y} \quad (2)$$

式中: Q 为输沙率, $g/(cm \cdot min)$; M 为集沙量, g ; Δt 为收集时间, min ; Δy 为集沙盒进沙口宽度, cm 。

1.3.4 摩阻风速(U^*)和空气动力学粗糙度(Z_0) 在风洞中进行试验时, 风速廓线计算公式为:

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

式中: U_z 为高度为 Z 时的风速, m/s ; Z_0 为空气动力学粗糙度, cm ; U^* 为摩阻风速, m/s ; k 为冯·卡曼常数, 取值 0.4。空气动力学粗糙度(Z_0)是描述地表对气流阻抗的重要参数, 通过风速廓线拟合计算获得。通过不同试验土槽表面不同高度的风速进行曲线拟合得到风速廓线, 其结果满足对数分布律, 拟合关系式为:

$$U_z = A + B \ln Z \quad (4)$$

式中: A 、 B 为回归系数。

当 $U_z = 0$ 时, 可得到空气动力学粗糙度(Z_0):

$$Z_0 = \exp(-A/B) \quad (5)$$

由公式(4)和公式(5)可得摩阻风速:

$$U^* = kB \quad (6)$$

1.3.5 结皮破损率 为定量评估不同放牧踩踏强度下土壤物理结皮的破坏程度, 采用结皮破损率作为指标, 结合网格法实测的结皮盖度进行计算, 具体公式为:

$$CFI = \frac{A_0}{A_i} \times 100\% \quad (7)$$

式中: A_0 为结皮破损总面积, m^2 ; A_i 为结皮总面积, m^2 。

1.4 数据处理

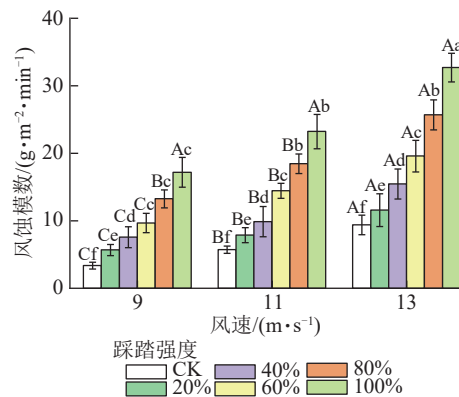
本研究数据均采用 Excel 软件进行整理分析, 并通过 SPSS Statistics 24 软件进行正态分布检验, 利用 Origin 软件进行图表绘制及数据拟合, 使用 AMOS 构建土壤物理结皮覆盖度与风蚀之间的结构方程模型(structural equation modeling, SEM)并分析其关系, 解析影响风蚀的直接和间接路径。

2 结果与分析

2.1 放牧踩踏对风蚀的影响

2.1.1 放牧踩踏破坏物理结皮对风蚀模数的影响 不同踩踏强度下, 受破坏的物理结皮风蚀模数随风速增加显著上升($p < 0.05$) (图 2)。在未踩踏(CK)处理中, 随风速增大, 风蚀模数由 $(3.37 \pm 0.05) g/(m^2 \cdot min)$ 分别增至 (5.72 ± 0.33) 、 $(9.38 \pm 0.15) g/(m^2 \cdot min)$, 增幅分别达 69.73% 和 178.33%; 以 20% 踩踏强度为例, 9 m/s 时风蚀为 $5.68 g/(m^2 \cdot min)$, 11、13 m/s 时分别

上升 38.91% 和 103.87%, 风速增大显著加剧风蚀强度($p < 0.05$)。在 9 m/s 风速下, 不同踩踏强度处理的风蚀模数依次较 CK 提高 68.54%、124.92%、186.94%、293.17% 和 409.79%。高强度踩踏破坏物理结皮结构, 导致松散颗粒含量增加, 从而加剧风蚀($p < 0.05$), 11、13 m/s 风速下规律表现一致。11 m/s 时, 20% 踩踏强度下风蚀模数较 CK 增幅为 23.45%。表明踩踏强度越低, 风蚀抑制效果越显著, 是由于物理结皮的抗风蚀能力与踩踏强度密切相关, 低强度踩踏通过维持较高的结皮覆盖率和结构稳定性, 显著增强土壤抗风蚀能力。物理结皮对风蚀的最大减蚀效果可达 80.38%, 而高强度踩踏破坏物理结皮, 导致其破碎化, 增加地表松散颗粒物含量, 进而显著加剧风蚀过程。



注: 图柱上方不同大写字母表示相同风速不同踩踏强度间差异显著 ($p < 0.05$); 不同小写字母表示不同风速相同踩踏强度间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 2 不同踩踏强度对土壤风蚀模数的影响

Fig. 2 Effects of different trampling intensities on soil wind erosion modulus

2.1.2 放牧踩踏破坏物理结皮对输沙率的影响 由图 3 可知, 不同踩踏强度下, 物理结皮经吹蚀后 0~6 cm 高度内的近地表输沙率的变化特征表现为近地表输沙率随踩踏强度和风速的增大而上升。在 9 m/s 的风速下, 近地表输沙率从 CK 处理的 $0.35 g/(cm \cdot min)$ 上升至 100% 踩踏强度下的 $5.91 g/(cm \cdot min)$; 当风速增至 11 m/s 时, 近地表输沙率从 CK 处理的 $0.45 g/(cm \cdot min)$ 增至 $7.01 g/(cm \cdot min)$; 风速为 13 m/s 时, 近地表输沙率从 CK 处理的 $0.82 g/(cm \cdot min)$ 增至 $8.44 g/(cm \cdot min)$ 。3 种风速条件下, 100% 踩踏破坏下的近地表输沙率相较于 CK 均呈较高增幅。

不同踩踏强度下的物理结皮输沙率与输沙高度存在差异(图 4)。输沙率随踩踏强度增大呈显著正相关; 输沙率随输沙高度的增加呈指数减小趋势, 而输沙高度随风速的增大而升高。在 13 m/s 风速下, CK 处理的输沙高度最大为 10 cm, 踩踏强度为 100% 时, 输沙高度达到最大值 16 cm; 在 9 m/s 风速条件下, 完整结皮的输沙高度最小, 仅为 8 cm; 踩踏后, 不同覆盖度物理结皮的输沙高度增加 2~8 cm。

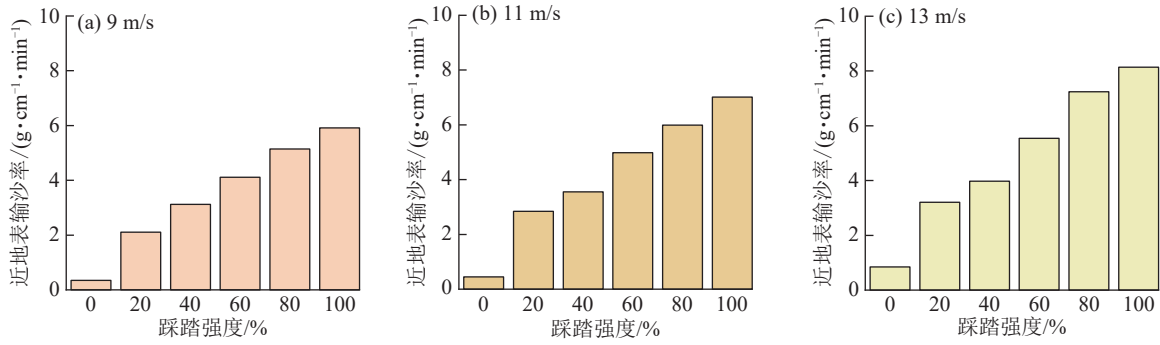


图 3 不同踩踏强度近地表输沙率的变化

Fig. 3 Variations in near-surface sediment transport rates under different trampling intensities

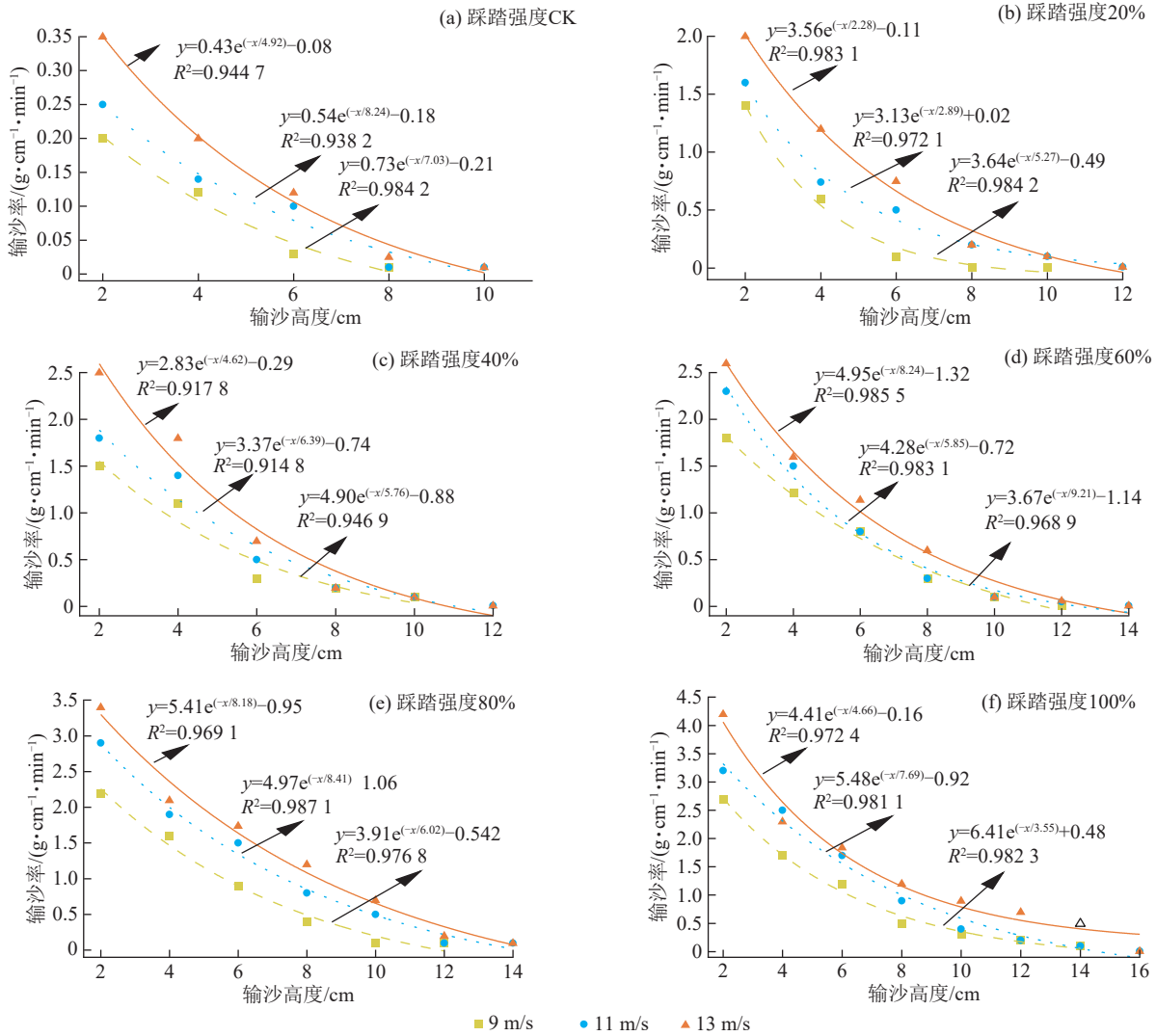


图 4 不同踩踏强度物理结皮输沙率随输沙高度的变化

Fig. 4 Variation of sediment transport rate of physical crust with sediment transport height under different trampling intensities

2.1.3 放牧踩踏破坏物理结皮对摩擦风速和空气动力学粗糙度的影响 不同踩踏强度下的空气动力学粗糙度见图 5。在 9 m/s 风速下,CK 处理的空气动力学粗糙度为 0.012 cm,100% 时为 0.061 cm,增加 4.08 倍;在 11 m/s 风速时,由 CK 处理的 0.016 cm 增加到 100% 的 0.055 cm,增加 2.44 倍;在 13 m/s 风速时,CK 处理下空气动力学粗糙度从 0.018 cm 增加至

100% 踩踏强度下的 0.068 cm,增加 2.78 倍。踩踏强度梯度每增加 20%,都造成地表细微起伏,引起地表高度差的变化,通过破坏近地表结构,改变物理结皮格局,显著增大空气动力学粗糙度。随着踩踏强度增大,地表对气流的摩擦与阻力作用增强,导致空气动力学粗糙度显著升高。在相同踩踏强度下,较高的风速会放大由踩踏形成的微地形效应。

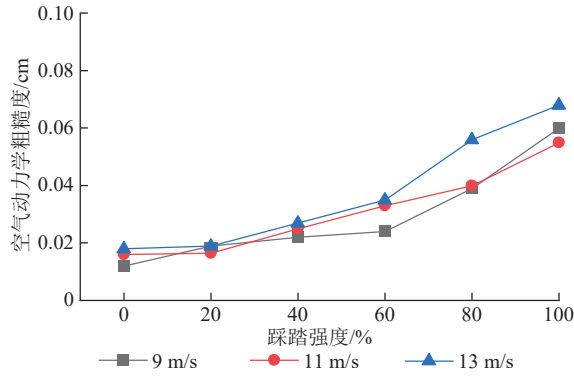
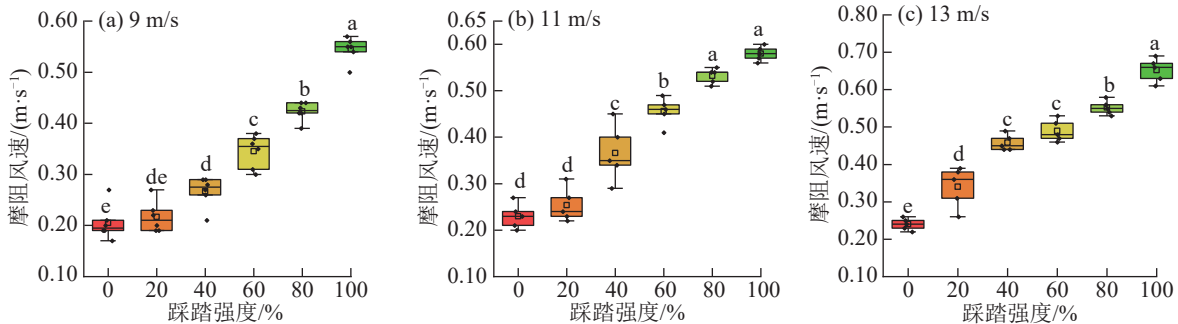


图 5 不同踩踏强度下物理结皮的空气动力学粗糙度

Fig.5 Aerodynamic roughness of physical crust under different trampling intensities

踩踏前后不同结皮覆盖度下的摩阻风速变化趋势见图 6。箱线图的上下两端分别表示各踩踏强度下摩阻风速的最大值与最小值,箱体反映其集中分布范围,整体数值为 0.17~0.69 m/s。3 种风速下的平均摩阻风速分别为 0.33、0.38、0.45 m/s,相较于未踩踏条件下对应风速的平均值(0.19、0.23、0.24 m/s)均有增加趋势。随着踩踏强度的增加,摩阻风速整体呈上升趋势,9 m/s 时,20% 踩踏强度下的摩阻风速与 CK 及 40% 踩踏强度之间的摩阻风速差异不显著,可能是因为 0~40% 破坏程度内,结皮表面相对完整,地表糙度增幅有限。

与 CK 处理相比,13 m/s 风速下,40% 和 60% 踩踏强度的平均摩阻风速虽有上升,但差异不显著,而



注:图柱上方不同小写字母表示不同踩踏强度间差异显著(p<0.05);箱体的上下端分别表示各踩踏强度下摩阻风速的最大值与最小值,箱体反映其集中分布范围,箱体中横线表示中位数,方块表示平均值。

图 6 不同踩踏强度下物理结皮摩阻风速差异

Fig.6 Differences in friction wind velocity of physical crust under different trampling intensities

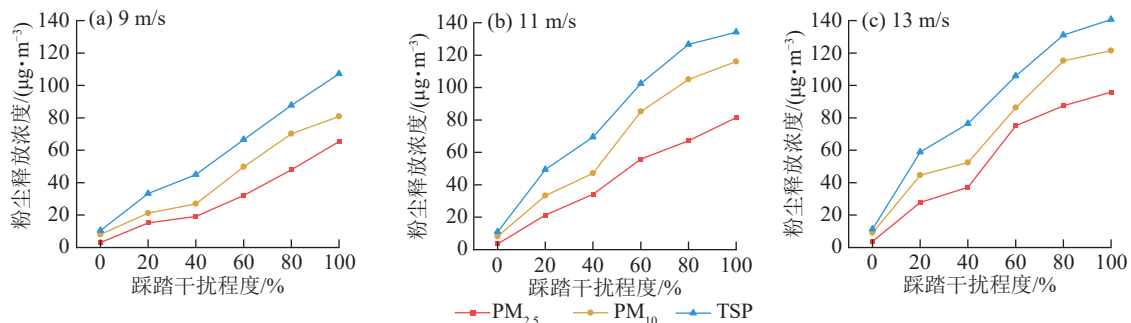


图 7 不同踩踏强度下粉尘释放浓度

Fig.7 Dust emission concentration under different trampling intensities

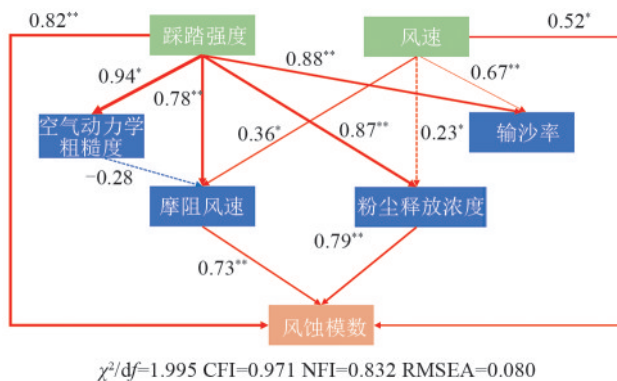
在 80% 和 100% 强度下则显著升高。尽管在部分踩踏区间差异不显著,但总体来看,平均摩阻风速呈现增大趋势。踩踏强度梯度每增加 20%,均引起地表细微起伏。近地层气流湍流强度的增强是摩阻风速增大的主要原因,在相同地表条件下,近地层气流湍流强度随风速的增大而增强,进而导致摩阻风速上升,最终表现为摩阻风速随风速增大而增大的现象。

2.2 放牧踩踏破坏物理结皮对粉尘释放的影响

从图 7 可以看出,未踩踏处理下,PM_{2.5}、PM₁₀和 TSP 的释放量均处于较低水平。整体来看,在 9、11、13 m/s 的条件下,随着踩踏强度的增加,粉尘释放量均显著上升。与 20% 踩踏强度相比,当破坏强度增至 40% 时,3 种粒径的粉尘释放量进一步增加,该趋势在 13 m/s 风速下尤为明显。随着风速增大,相同踩踏强度下的粉尘释放量增幅也随之提高。在相同风速条件下,粉尘浓度随踩踏强度的加剧呈非线性增长。3 种粉尘释放浓度均随踩踏强度增加而上升,表明放牧踩踏强度的加大,促使更多土壤细颗粒被扬起形成粉尘,导致释放浓度显著增加(p<0.05),对环境空气质量危害加重。当模拟羊踩踏强度从 0 增至 100% 时,各粒级粉尘浓度逐渐上升,其中 PM_{2.5} 浓度增幅最大,达到 621.40%;PM₁₀ 和 TSP 浓度增幅分别高达 386.01% 和 415.73%。在相同踩踏强度下,风速与粉尘释放浓度呈正相关,即风速越大,PM_{2.5}、PM₁₀ 和 TSP 的释放浓度越高。

2.3 放牧踩踏对风蚀特性的响应机制

为明确放牧踩踏强度破坏物理结皮对风蚀的影响机制,构建了结构方程模型进行解析,对其中的作用路径进行量化分析且模型拟合优度指标均符合统计学要求,表明模型能够有效揭示变量间的关系。由分析结果(图 8)可知,踩踏强度对风蚀模数的相关系数(r)为 0.82,是影响风蚀的主导因素。其作用通过直接和间接 2 条路径实现,直接路径表现为踩踏对物理结皮的机械破坏,高强度踩踏压碎物理结皮表面,使结皮破损率显著上升,下层松散土壤大量暴露,直接提高风蚀模数;间接路径则通过改变地表微地形,当风力通过土壤表面受到更强的摩擦与阻力作用,从而表现出更大的空气动力学粗糙度($r=0.94$)及摩阻风速而加剧风蚀。踩踏强度与粉尘释放浓度的相关系数(r)为 0.87,表明踩踏强度增大,粉尘释放浓度显著倍增。与踩踏破坏相比,风速的直接效应相对有限,通过定量对比表明,在类似六道沟小流域这样人为活动强烈的风水复合侵蚀区,控制人为干扰对于维持结皮结构稳定性、减轻风蚀危害具有重要意义。模型量化不同路径的相关系数,揭示在黄土高原北部该特定区域背景下,维持物理结皮的相对完整性是防治风蚀最关键的因素。在生态脆弱区需严格控制踩踏强度,为制定差异化的区域风蚀防治策略提供关键的机理依据和数据支撑。



注:*表示影响显著($p < 0.05$);**表示影响极显著($p < 0.01$);红色实线箭头表示显著正效应($p < 0.05$)路径,与箭头相关的值表示路径系数大小,箭头及线条的宽度表示关系的强度; χ^2/df 为卡方与自由度的比值;CFI为比较拟合指数;NFI为规范拟合指数;RMSEA为近似误差均方根。

图 8 踩踏强度影响风蚀的作用途径

Fig. 8 Pathway of wind erosion affected by trampling intensities

3 讨论

黄土高原北部的六道沟小流域物理结皮分布广泛,但人类活动及牲畜踩踏破坏物理结皮,导致覆盖度降低,增加风蚀的风险,踩踏强度通过显著降低物理结皮覆盖度($p < 0.05$),发生地表微起伏变化,进而

增加空气动力学粗糙度、摩阻风速及粉尘浓度释放量,最终加剧风蚀强度^[22]。结皮覆盖度作为关键中介变量,其变化受到踩踏强度的显著影响,并通过调控粉尘释放的途径影响风蚀强度。风速对粉尘释放具有直接促进作用,但结皮覆盖度所形成的地表稳定结构在一定程度上弱化风蚀强度^[23]。随着放牧踩踏强度的增加,物理结皮盖度显著下降,导致粉尘浓度释放量显著上升($p < 0.05$),与王国鹏等^[24]研究结果一致。踩踏的机械破坏作用改变结皮覆盖度大小,导致原本具有覆盖作用的结皮层呈现结构破碎,从而暴露出下层疏松土壤^[25]。结皮盖度的降低不仅削弱地表抗风蚀能力,还减少土壤对细颗粒的胶结作用,显著提高地表粉尘的可释放性^[26]。本研究中物理结皮最大减蚀率达 80.38%,低于毛旭芮等^[27]在黄土丘陵区观测的 90% 减蚀率,二者差异可能源于研究区土壤质地及模拟降雨条件的不同。这些变化共同加速风蚀进程,表明放牧踩踏通过破坏物理结皮覆盖度完整性间接放大风蚀强度。因此,控制踩踏强度对于维持结皮结构稳定性、减轻风蚀危害具有重要意义,保护物理结皮覆盖度是降低风蚀的关键,尤其在六道沟小流域生态脆弱区需严格控制踩踏强度。未来研究可结合长期观测,进一步探究踩踏对结皮物理性质的累积效应,以及不同踩踏强度下的生态恢复阈值,为风蚀防治和生态管理提供更精准的理论依据。

风速增大显著促进粉尘释放,加快土壤颗粒运动并使更多粉尘进入大气环境^[28]。风速越大,这种促进作用越明显,对空气质量和生态环境的负面影响也越大。不同踩踏强度的物理结皮在风蚀过程中释放的粉尘浓度存在差异,表现为 $PM_{2.5}$ 浓度 $< PM_{10}$ 浓度 $< TSP$ 浓度,同钟志强^[29]的研究结果一致。 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 TSP 浓度均随踩踏强度的增加而显著升高($p < 0.05$),与 CK 相比, $PM_{2.5}$ 增幅最大,主要原因是物理结皮的胶结作用对细颗粒的束缚更强,踩踏破坏结皮后,物理结皮胶结作用削弱,细颗粒更易扬起。

不同踩踏强度下的物理结皮摩阻风速及空气动力学粗糙度的研究结果显示,在不同风速下,摩阻风速在一定范围内波动,总体呈增加趋势,随着踩踏强度的增加,地表对气流的阻碍作用也更加显著,使气流在近地表形成更强的剪切作用,从而导致摩阻风速呈现增大趋势。在相同风速下,踩踏强度越大,空气动力学粗糙度越大,踩踏活动增加地表微地形的扰动,从而增加空气动力学粗糙度^[30]。CK 和不同踩踏强度下的物理结皮的空气动力学粗糙度均 < 0.068 cm,与植被覆盖下的空气动力学粗糙度对比来

看,物理结皮对空气动力学粗糙度的作用程度较小。羊群所踩过的物理结皮可能多呈现条带状分布格局,而本试验模拟的均匀踩踏与真实的放牧情况存在一定差异,仍需后续进行更多研究予以验证。

4 结论

1) 在不同踩踏强度(20%、40%、60%、80%、100%)作用下,物理结皮受到破坏,加剧土壤风蚀,相较于未踩踏(CK),踩踏强度梯度从20%提高至100%,土壤风蚀模数增加23.45%~409.79%。在相同风速下,物理结皮抗风蚀性能随踩踏强度增大而减弱,表明人为干扰强度是影响其防风蚀效果的关键因素。

2) 踩踏强度的增大显著提高近地表输沙率;输沙率随结皮覆盖度的降低而增大,随风速的增大而增加;输沙高度随踩踏强度的增大而升高,增幅为2~8 cm;在不同粒径的颗粒物中,PM_{2.5}释放浓度对踩踏响应最敏感,其增幅高于PM₁₀和TSP。

3) 踩踏通过改变地表微地形提升风蚀动力学参数。相同风速下,随着踩踏强度增大,摩阻风速和空气动力学粗糙度与踩踏强度呈显著正相关,摩阻风速为0.17~0.69 m/s,空气动力学粗糙度为0.012~0.068 cm。

参考文献:

- [1] 高学田,唐克丽.风蚀水蚀交错带侵蚀能量特征[J].水土保持通报,1996,16(3):27-31.
GAO X T, TANG K L. Study on erosion energy of wind-water erosion region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, 16(3): 27-31.
- [2] 邓鑫欣,张加琼,杨明义,等.黄土高原水蚀风蚀交错带坡耕地土壤风蚀特征[J].水土保持研究,2019,26(3):1-6.
DENG X X, ZHANG J Q, YANG M Y, et al. Characteristics of soil wind erosion on sloping farmland in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 1-6.
- [3] 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.
ZHONG Z Q, HAO L A, MA B, 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.
- [4] 兰瑞君,郭建英,尹忠东,等.不同放牧强度下土壤侵蚀对典型草原土壤有机碳的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):172-177.
LAN R J, GUO J Y, YIN Z D, et al. Effects of soil erosion on the soil organic carbon of typical steep under different grazing intensities [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 172-177.
- [5] 刘月,赵文武,丁婧祎.草地社会-生态系统研究进展与展望[J].资源科学,2024,46(8):1523-1539.
LIU Y, ZHAO W W, DING J Y. Research progress and prospects on grassland social-ecological systems [J]. Resources Science, 2024, 46(8): 1523-1539.
- [6] 吴楠,张元明,潘惠霞.古尔班通古特沙漠地衣结皮对放牧踩踏干扰的小尺度响应[J].干旱区研究,2012,29(6):1032-1038.
WU N, ZHANG Y M, PAN H X. Response of fungi-algae symbiotic lichen crusts to grazed livestock disturbance in the Gurbantunggut Desert [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 1032-1038.
- [7] 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 W, LIU X B, ZHANG X Y. Soil crust properties and their effects on wind erosion [J]. Soils and Crops, 2023, 12(1): 88-95.
- [8] 白雯宇,李晓芳,张宏彬,等.典型绿洲城市土壤风蚀扬尘排放清单构建及时空分布特征[J].北京大学学报(自然科学版),2025,61(2):217-226.
BAI W Y, LI X F, ZHANG H B, et al. Construction of emission inventory and temporal-spatial distribution of soil fugitive dust in typical oasis cities [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2025, 61(2): 217-226.
- [9] 杨航宇,刘长仲,刘艳梅,等.荒漠区踩踏生物土壤结皮对土壤微生物量的影响[J].中国沙漠,2019,39(2):35-44.
YANG H Y, LIU C Z, LIU Y M, et al. Effects of trampling biocrusts on soil microbial biomass in desert areas [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(2): 35-44.
- [10] 贾子毅.毛乌素沙地定居放牧草场植物群落分类与退化梯度分析[D].北京:中国林业科学研究院,2008.
JIA Z Y. Plant community classification and degradation gradients of settled-grazing pasture in Mu Us Sandy land [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2008.
- [11] 冯伟,叶菁.踩踏干扰下生物结皮的水分入渗与水土保持效应[J].水土保持研究,2016,23(1):34-37.
FENG W, YE J. Effects of biological soil crusts on infiltration and soil and water conservation under trample disturbance [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 34-37.
- [12] 郭雅丽.黄土丘陵区生物结皮对草地侵蚀产沙的影响及机制[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2025.
GUO Y L. Effect and mechanism of biological soil crusts on soil erosion and sediment yield of grassland in the Loess Plateau hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2025.
- [13] 石亚芳,赵允格,李晨辉,等.踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响[J].应用生态学报,2017,28(10):3227-3234.
SHI Y F, ZHAO Y G, LI C H, et al. Effect of trampling disturbance on soil infiltration of biological soil crusts [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(10): 3227-3234.
- [14] 李雯,马昕昕,马宁,等.放牧强度对黄土丘陵区生物结皮土壤化学计量学特征的影响[J].草地学报,2021,29

- (11):2547-2555.
LI W, MA X X, MA N, et al. Effects of grazing intensity on stoichiometry of biological soil crusts in the hilly Loess Plateau region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(11):2547-2555.
- [15] 王闪闪, 赵允格, 石亚芳, 等. 短期放牧干扰对黄土丘陵区生物结皮土壤氮素累积的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(12):3848-3854.
WANG S S, ZHAO Y G, SHI Y F, et al. Impact of short-term grazing disturbance on nitrogen accumulation of biological soil crusts in the hilly Loess Plateau region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(12):3848-3854.
- [16] 石亚芳. 黄土丘陵区踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
SHI Y F. Effect of trampling disturbance on infiltration of biological soil crust in the hilly loess plateau region, China [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [17] 李明辉, 李秧秧, 樊军. 陕北黄土区深剖面不同土地利用方式下土壤水分和温度的分布特征[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(9):2552-2560.
LI M H, LI Y Y, FAN J. Distribution characteristics of soil moisture and temperature under different land use types in the deep profile of loess area in northern Shaanxi, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(9):2552-2560.
- [18] 孙会. 黄土丘陵区退耕草地适度放牧利用研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
SUN H. Study on moderate grazing utilization of returning farmland grassland in loess hilly region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.
- [19] 李永强. 不同载畜率对短花针茅荒漠草原土壤风蚀的影响及作用机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
LI Y Q. Effect of different stocking rates on the characteristic and mechanism of soil wind erosion in a stipa breviflora desert steppe[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.
- [20] 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 Y Y, WANG Z L. Wind tunnel experiment on polypeptide derivatives in controlling wind erosion[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(5):149-155.
- [21] 张强, 秦玉红. 感应式粉尘浓度检测方法[J]. *自动化应用*, 2014(7):104-106.
ZHANG Q, QIN Y H. Research on dust concentration detection method[J]. *Automation Application*, 2014(7):104-106.
- [22] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 耕作土壤表面的空气动力学粗糙度及其对土壤风蚀的影响[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(5):473-475.
ZHANG C L, ZOU X Y, DONG G R, et al. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influence on soil erosion by wind in a wind tunnel [J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(5):473-475.
- [23] 李陇堂, 薛晨浩, 魏红磊. 基于模拟实验沙漠景区沙丘植被对游客踩踏干扰的响应研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(9):113-118.
LI L T, XUE C H, WEI H L. Response of sand dune vegetation to the tourists tramples interference of desert scenic based on the simulation experiment [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(9):113-118.
- [24] 王国鹏, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(10):3050-3056.
WANG G P, XIAO B, LI S L, et al. Surface roughness of biological soil crusts and its influencing factors in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau of China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(10):3050-3056.
- [25] 陈彦珠. 东祁连山醉马草型退化高寒草地植被和土壤对放牧制度和恢复措施的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
CHEN Y Z. Responses of vegetation and soil of achatherum inebrians-type degraded alpine grassland to grazing systems and restoration measures in the eastern Qilian Mountains [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024.
- [26] 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 X L, SHEN X D. 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.
- [27] 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 X R, YANG J J, CAO Y 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.
- [28] 王仁德, 李庆, 常春平, 等. 土壤风蚀中粉尘释放问题的研究进展[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(2):85-103.
WANG R D, LI Q, CHANG C P, et al. Review of dust emission in soil wind erosion [J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(2):85-103.
- [29] 钟志强. 黄土高原北部季节性冻融对土壤物理结皮抗风蚀能力的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
ZHONG Z Q. Effects of seasonal freezing and thawing on the wind erosion resistance of soil physical crusts in the northern Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.
- [30] 陈浩然. 黄土高原生物结皮覆盖对风水交互侵蚀的影响及机制[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
CHEN H R. The influence and mechanisms of biocrusts with different coverage on wind-water interactive erosion in the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2025.