

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.04.025

CSTR:32310.14.stbcbx.2025.04.025

洪晨泽, 朱海丽, 张海龙, 等. 冻融循环对不同退化程度高寒草甸土孔隙结构的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4):215-224.

HONG Chenze, ZHU Haili, ZHANG Hailong, et al. Effects of freeze-thaw cycles on the pore structure of alpine meadow soils with different degrees of degradation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):215-224.

冻融循环对不同退化程度高寒草甸土孔隙结构的影响

洪晨泽¹, 朱海丽^{1,2}, 张海龙¹, 吴悦辰¹, 徐鹏凯¹, 刘亚斌^{1,2}, 李国荣^{1,2}

(1. 青海大学地质工程学院, 西宁 810016; 2. 青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室, 西宁 810016)

摘要: [目的] 冻融循环是高寒地区重要的物理过程, 为明确冻融作用对不同退化程度高寒草甸土体微观结构的影响。[方法] 以青海门源地区不同退化程度高寒草甸土为研究对象, 以不同含根量表征不同退化程度, 对重塑试样进行冻融循环试验和 SEM 电镜扫描, 分析不同冻融次数及冻融条件下不同质量含水率和含根量对草甸土微观结构的影响。[结果] 随冻融次数增加, 高寒草甸土体孔隙分形维数持续增大, 平均直径呈减少趋势, 在 7 次冻融后趋于稳定, 孔隙度增长集中于前 4 次冻融中。草甸土体质量含水率越高, 冻融后孔隙度增长幅度越大。当质量含水率 $>40\%$ 时, 冻融后试样孔隙分形维数大幅增加, 而孔隙平均直径则明显下降。植物根系能够显著抑制冻融对草甸土孔隙的影响, 随试样含根量增加, 冻融后孔隙平均直径下降幅度由 16.19% 减小至 0.16% , 孔隙度增长幅度由 33.22% 减小至 18.17% 。[结论] 高寒草甸退化程度越高, 土体微观结构受冻融影响越强; 植物根系能够显著影响土体结构的稳定性。研究结果可为高寒草甸退化防治及影响因素研究提供理论参考。

关键词: 冻融循环; 土体微观结构; 扫描电镜; 高寒草甸; 不同退化程度

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0215-10

Effects of Freeze-Thaw Cycles on the Pore Structure of Alpine Meadow Soils with Different Degrees of Degradation

HONG Chenze¹, ZHU Haili^{1,2}, ZHANG Hailong¹, WU Yuechen¹, XU Pengkai¹, LIU Yabin^{1,2}, LI Guorong^{1,2}

(1. School of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Key Laboratory of Cenozoic Resources and Environment on the Northern Edge of the Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810016, China)

Abstract: [Objective] Freeze-thaw cycle is an important physical process in alpine regions, the objective of this study was to elucidate the impact of freezing and thawing on the microstructure of alpine meadow soils with varying degrees of degradation. [Methods] Alpine meadow soils with different degradation degrees in Menyuan, Qinghai Province, were used as the research objects, and different root contents were used to characterize different degradation degrees. Freeze-thaw cycle test and scanning electron microscopy were carried out on remolded specimens to analyze the effects of different numbers of freeze-thaw cycles, water contents, and root contents on the microstructure of meadow soils under freeze-thaw conditions. [Results] The pore fractal dimension of alpine meadow soils continued to increase with the increase in the number of freeze-thaw cycles, the average diameter of the pores showed a decreasing trend and stabilized after seven freeze-thaw cycles, the increase in porosity was concentrated in the first four freeze-thaw cycles. The higher the mass water content of the meadow soil, the greater the increase in porosity after freezing and thawing. When the mass water content was $>40\%$, the fractal dimension of the pores of the specimens increased dramatically after freezing and thawing, while the average diameter of the pores decreased significantly. Plant roots significantly inhibited the effect of freezing and thawing on the pore space of alpine meadow soil, and the decrease of the average diameter of the pore space after freezing and thawing decreased from

收稿日期: 2025-02-12

修回日期: 2025-04-06

录用日期: 2025-04-29

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-05-29

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42062019, 40022283); 青海省科技厅项目 (2021-ZJ-927)

第一作者: 洪晨泽 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态工程地质研究。E-mail: 15267342316@163.com

通信作者: 朱海丽 (1977—), 女, 博士, 教授, 主要从事边坡生态防治及河流生态研究。E-mail: qdzhuhaili@163.com

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

16.19% to 0.16%, and the increase of the porosity decreased from 33.22% to 18.17% with the increase of root content of the specimen. [Conclusion] The higher the degradation degree of alpine meadows, the greater the impact of freezing and thawing on the microstructure of the soil. The plant root system can significantly affect the stability of the soil structure. The findings of the study offer a foundation for further theoretical inquiries into the dynamics of degradation control and its influencing factors within alpine meadows.

Keywords: freeze-thaw cycle; soil microstructure; scanning electron microscopy; alpine meadow; degradation degree

Received: 2025-02-12

Revised: 2025-04-06

Accepted: 2025-04-29

Online(www.cnki.net): 2025-05-29

冻融侵蚀是青藏高原土壤侵蚀的主要类型之一^[1],侵蚀面积占全国冻融侵蚀总面积的 82%^[2],而不稳定冻土区域扩大将导致更加广泛和频繁的冻融侵蚀作用。高寒草甸是高寒草地生态系统中面积最大的草地类型^[3],受冻融影响较为强烈,因此,高寒草甸是青藏高原冻融侵蚀研究中不可忽视的一部分。

近几十年来,由于气候变化、超载过牧等因素影响,青藏高原高寒草甸退化面积持续增大^[4]。据相关研究^[5]报道,已有 30% 的高寒草甸发生退化,由此导致高寒草甸水源涵养能力下降,土壤由湿润性转变为干旱性^[6],草甸系统稳定维持能力及生态屏障作用减弱,使其更易遭受冻融作用的影响。在冻融过程中,孔隙水产生的冻胀应力挤压孔隙壁导致草甸土发生破碎。同时,反复的冰水相变和孔隙水的迁移积聚对土壤结构及物理力学性能指标造成不利影响^[7],引起退化高寒草甸地表开裂现象^[8],并加速高寒草甸的退化进程。

过去对于土体冻融的研究聚焦于土体基本物理性质的冻融劣化^[9]及冻融损伤的微观机理^[10]。在微观层面,目前研究的主要关注点是冻融循环下土体的孔隙特征变化^[11]、孔隙分布^[12]和孔隙连通性^[13]。采用的试验手段主要包括 SEM 扫描电镜^[14]和 CT 技术等^[15-16]。已有研究^[17]证实,冻融循环能够改变土体的颗粒排列方式,从而影响土体的孔隙分布与几何特征,且此变化通常在最初的几次冻融循环中较为显著^[18]。目前,针对青藏高原退化高寒草甸冻融作用特征的研究相对欠缺,高寒草甸的退化机理尚不明确,而土体孔隙结构可提供土体物理力学性能和保水能力等重要信息^[19],对于揭示冻融循环对退化高寒草甸的影响机制具有重要意义。

高寒草甸退化过程中,地表植被群落构型^[20]、地下根系及土体质量含水率^[21]变化显著。为此,以高寒草甸土为研究对象,通过设置不同的含根量、冻融次数和含水率梯度,对重塑试样进行室内循环冻融试验,同时,以 SEM 扫描电镜为技术手段,对试样的微观孔隙结构及几何特征进行定量化分析,探讨冻融循环对不同退化程度高寒草甸土体微观结构的影响,为草地退化影响因素研究提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于门源回族自治县皇城蒙古族乡西部(37° 39' 57" ~ 37° 42' 05" N, 101° 10' 10" ~ 101° 16' 00" E)(图 1a),该地区位于中国青海省东北部,为典型的季节性冻土区(图 1b),平均气温为 -0.25 °C,最冷月平均气温为 -14.38 °C,最热月平均气温为 11.39 °C(数据源于青海海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站)。为研究不同退化程度高寒草甸对冻融循环的响应,以《高寒小嵩草草甸退化状态评估》(DB63/T 1413—2015)^[22]为分类标准,在研究区分别选取轻度退化(LD)、中度退化(MD)和重度退化(HD)3 种不同退化状态高寒草甸作为研究样地。3 种样地均属于典型的高山嵩草型高寒草甸,LD 样地植被类型以针茅(*Stipa capillata*)、羊茅(*Festuca ovina*)等禾本科植物及矮嵩草(*Kobresia humilis*)等莎草科植物为优势种;MD 样地禾本科植物较少,以高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、矮嵩草等莎草科植物为主,HD 样地莎草科植物盖度显著降低并呈斑块状分布,局部分布有菊科、豆科植物和杂毒草等。

1.2 试验材料

为测定土体基本性质参数,分别在每个不同退化状态研究样地选取 3 个典型取样点,取样深度为地表以下 0~10 cm,每个取样点取 3 组重复试样并取平均值以降低误差,取样时间为 2023 年 11 月。使用大环刀(100 mm × 63.7 mm)采集土样并通过土工筛分离根系与土体后称取根系质量,土体置于 105 °C 烘箱中烘干 8 h 后称取干土质量并计算含根量,计算公式为:

$$R = \frac{m_r}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为含根量,%; m_r 为根系质量, g; m_s 为干土质量, g。

土体有机质质量分数通过重铬酸钾容量法测定,土体基本物理性质参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[23]进行测定(表 1)。依据《土体工程分类标准》(GB/T 50145—2007)^[24],土体分类均为砂质粉土。

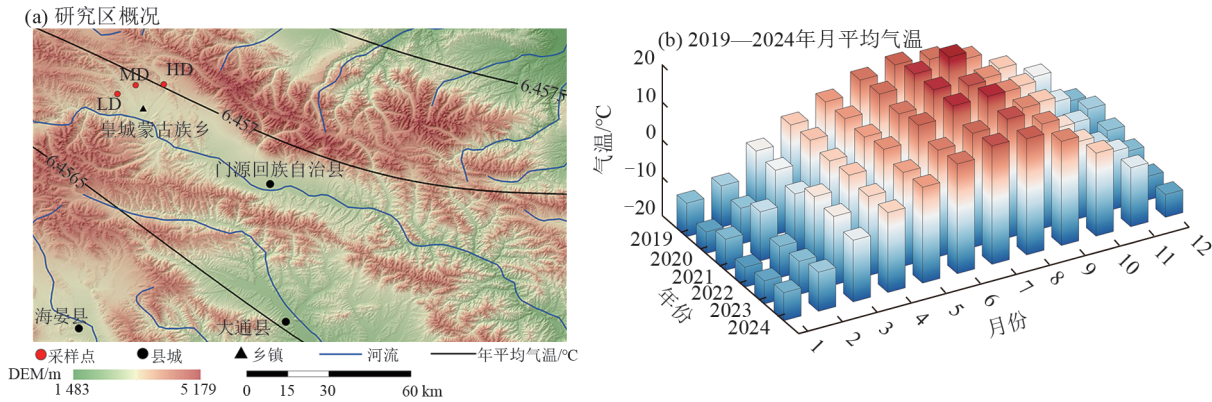


图1 采样地信息

Fig. 1 Basic information of the sampling sites

试验中重塑土体用土取自3种不同退化状态样地地表以下0~10 cm处。根系材料选用优势植物种莎草科和禾本科植物根系,通过现场挖掘花盆大小

的根—土复合体土柱,并在室内浸泡6 h后冲洗分离获得,随后将洗净的根系材料放置于4℃恒温箱中,以保持根系活性。

表1 不同退化程度高寒草甸土体基本特性

Table 1 Basic characteristics of alpine meadow soils with different degrees of degradation

退化程度	有机质/ (g·kg ⁻¹)	质量含水率/ %	干密度/ (g·cm ⁻³)	含根量/%	颗粒组成/%			土体类型
					>0.25 mm	0.25~0.075 mm	<0.075 mm	
LD	209.65	50.29	0.76	4.47	25.29	64.19	10.52	砂质粉土
MD	170.34	37.63	0.79	2.26	33.49	56.17	10.33	砂质粉土
HD	151.50	33.21	0.84	1.19	28.74	58.02	14.24	砂质粉土

1.3 试验设计

本研究分别以冻融循环次数、质量含水率及含根量为考虑影响因素,设置3组试验(编号分别为A、B、C),试验设计见图2a。依据表1中不同退化程度高寒草甸质量含水率与含根量实测值,A组试样含根量与质量含水率控制为2%和40%,冻融次数参考相关研究^[25]设置为0、1、4、7、10次;B组含根量控制为2%,质量含水率设置5个梯度,分别为30%、35%、40%、45%、50%,对各试样进行4次冻融循环试验,并设置1组未冻融试样作为对照;C组质量含水率控制为40%,含根量设置5个不同水平,分别为0、1%、2%、3%、4%,对各含根量试样进行4次冻融试验,并设置1组未冻融试样作为对照。依据近5 a的气温资料,冻融过程中冻结与融化温度分别设置为-15、10℃,首先将试样放入-15℃恒温恒湿箱(ATS-WS-408 T,上海挨提森仪器科技有限公司,温度范围-70~150℃)中冻结12 h,随后将温度调整为10℃融化12 h,以此为1个冻融循环,不进行冻融试样放置在10℃恒温恒湿箱中静置96 h。试样干密度设置为0.8 g/cm³。每组试验设置3组重复。

1.4 试样制备

将取回的不同退化程度高寒草甸土样混合后在室温条件下风干、碾碎并过2 mm筛子,筛分过程需反复进行去除残留根系,随后放入烘箱中,在105℃

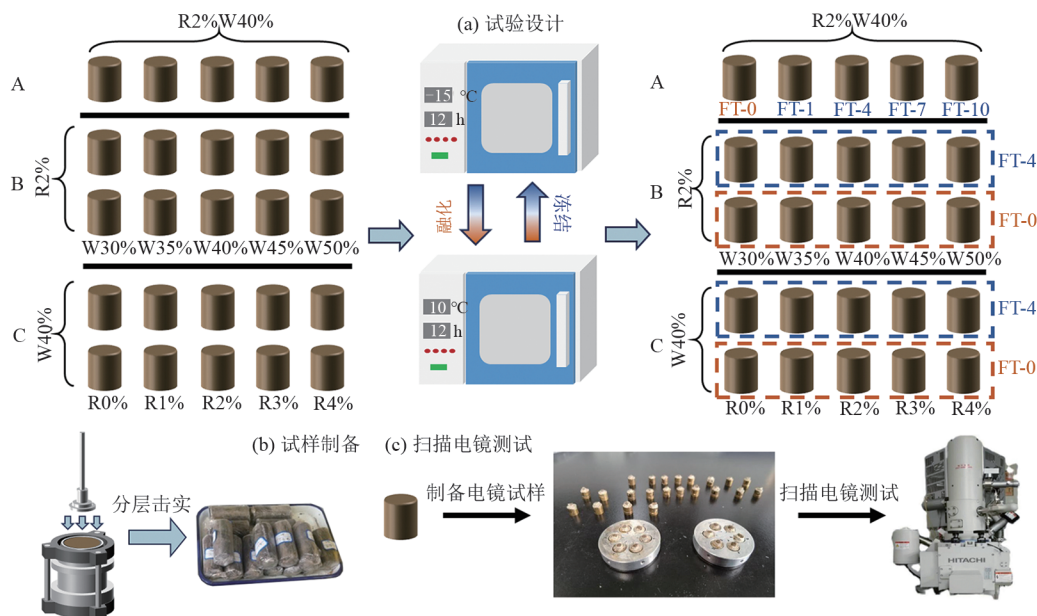
条件下烘干8 h,去除残留水分。重塑试样模具采用内径39.1 mm、高度80 mm的三瓣模。植物根系需修剪至长约30 mm的根段,以适应模具尺寸。待试样材料准备完毕后,按照试验设计的含根量水平及干密度,称取相应质量的根段和干土充分拌合,确保根段在土料中均匀分布,随后按照设计的质量含水率,将相应质量的蒸馏水喷洒至土料上并充分拌匀,盖上保鲜膜后静置12 h,确保水分进一步均匀。试样制备见图2b,待土料充分浸润后,将其均分为3份,利用击实器逐层击实至三瓣模中,直至达到所需干密度。试样制备完成后,使用保鲜膜密封以减少水分流失。

1.5 试验方法

为防止蒸发或升华作用对土体含水率造成影响,制备好的试样保持密封状态放入恒温恒湿箱中进行冻融循环试验。试验结束后对3组重复试样进行电镜扫描分析(图2c),试验使用的电镜扫描仪器型号为JSM-6610LV。将试样取出后在自然条件下风干,沿试样中部位置掰开,每个试样在尽量不破坏结构面的前提下,使用镊子在试样断面切削提取一块结构面新鲜平整的土块(5 mm×5 mm×5 mm)。制备电镜试样时,使用导电胶液将其固定于铜柱上,使用喷金仪对每个试样表面喷涂一层金属薄膜增强信号激发效率,经喷金处理之后将铜柱放入圆台基座,随后将其放入电镜扫描仪,对样品区域进行扫描

电镜测试。拍摄过程中选择具有代表性的区域拍摄放大倍数为 200 倍的 SEM 图片,每个样品拍摄 5 张显

微结构图片,以减少显微数据中出现偶然误差的可能性。



注: W 为质量含水率; R 为含冰量; FT 指冻融循环。

图 2 试验设计及试样制备

Fig. 2 Experimental design and specimen preparation

1.6 图像处理

采用 Image-Pro Plus(IPP)对每组 SEM 图像进行处理。图像处理过程包括空间校准、对比增强和图像阈值分割。首先通过 SEM 图像自带标尺进行空间校准,目的是校正测量尺度并消除误差;对比增强通过调整图像伽马值来增强对比度,使得后期图像分割更为精准;图像阈值分割通过调整图像灰度阈值,分割并提取孔隙结构二元图像,以便分析其几何参数。

1.7 孔隙结构参数计算

为表征冻融条件下土体孔隙结构变化规律,选取孔隙平均直径、孔隙度、孔隙分形维数 3 个参数进行分析。

孔隙平均直径(D)为所有孔隙直径之和与参与计算孔隙数量的比值,而由于孔隙的不规则性,单个孔隙直径(D_i)为以 2° 为间隔测量的通过孔隙形心的直径的平均值,计算公式为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{num_p} D_i}{num_p} \quad (2)$$

$$D_i = \sum_{j=0}^{180} \frac{d_j}{180} \quad (3)$$

式中: d_j 为通过孔隙形心测量的直径, μm ; num_p 为参与计算的总孔隙数量。

孔隙度(P)为孔隙面积与图像总面积的比值,数值为 0~100%,计算公式为:

$$P = \frac{a}{A} \times 100\% \quad (4)$$

式中: a 为测量得到的孔隙面积, μm^2 ; A 为图像总面积, μm^2 。

孔隙分形维数(F)指所有孔隙分形维数的平均值,单个孔隙分形维数用 F_i 来表示孔隙外轮廓的复杂程度与不规则性,IPP 软件采用盒计数法计算分形维数,假设使用一系列大小不同的方格覆盖图像,当方格的边长为 L 时,每个大小的方格所需的数量计为 N_L ,则分形维数可表示为:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{num_p} F_i}{num_p} \quad (5)$$

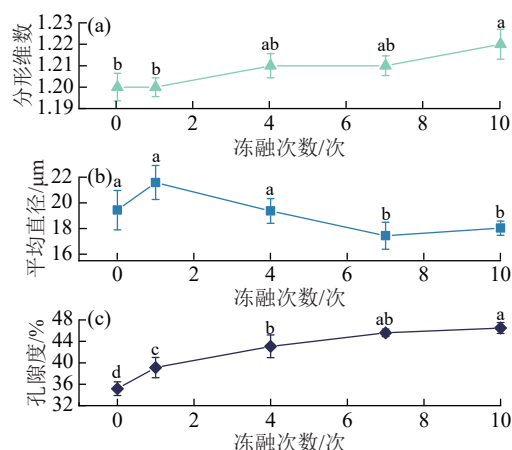
$$F_i = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\ln(N_L)}{\ln(1/L)} \quad (6)$$

分形维数的取值区间选用软件默认值 1~2,数值越大则土壤孔隙结构越不规则,均一化程度越低。

2 结果与分析

2.1 冻融循环次数对试样微观孔隙结构的影响

图 3 为 0、1、4、7、10 次冻融循环作用下,试样孔隙平均直径、分形维数和孔隙度的统计结果。随着冻融次数由 1 次增加至 4、7、10 次,试样孔隙平均分形维数逐渐增大,并在 FT-10 达到最大值,较未冻融试样提高 1.67%。表明冻融作用使得土体孔隙结构轮廓更为粗糙,孔隙结构单元更为复杂。



注:不同小写字母表示不同冻融次数间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图3 不同冻融次数条件下孔隙特征参数变化

Fig. 3 Variations of pore characteristic parameters under different numbers of freeze-thaw cycles

土样孔隙平均直径随着冻融次数增加,并未表现出线性变化特征,其在经过FT-1次冻融循环后达到最大值21.58 μm,而在FT-4和FT-7次冻融循环中,分别下降10.24%和9.96%。FT-10次冻融期间,尽管孔隙平均直径出现回升,但其增长幅度仅为3.38%。意味着首次冻融增大孔隙尺寸,但在后续的4~10次冻融中孔隙尺度总体呈减小趋势。

试样孔隙度随冻融循环次数增加呈增大趋势,且在FT-1和FT-4时,试样孔隙度上升较快,增长率分别为11.2%和10.2%,而FT-7与FT-10次冻融循环中,孔隙度变化趋于平缓,其增长率仅为5.8%与1.9%,且FT-4与FT-7、FT-7与FT-10已不存在显著性差异。杨震等^[26]在对内蒙古季节性冻土区土壤进行重塑冻融的试验中得到类似的结果,其冻融温度分别为-15、15℃,3次冻融后土壤孔隙率 P 的变化幅度占总变化幅度的86%,在冻融4次后基本保持不变。表明土体损伤主要发生在最初的几次冻融循环中,而当冻融达到一定次数后,土体结构对冻融的响应开始减弱。

图4为不同冻融次数下不同孔径孔隙数量分布的统计结果。土样的孔隙尺度与级配条件、土壤结构和有机质相关,不同质地土体的孔隙结构存在显著差异^[27]。由于本研究测得的孔隙平均直径为15~20 μm,因此,将孔隙尺度分为3类,即大孔隙($D \geq 20 \mu\text{m}$)、中孔隙($10 \mu\text{m} \leq D < 20 \mu\text{m}$)和小孔隙($D < 10 \mu\text{m}$),在0~10次冻融循环期间,小孔隙数量占比由31.4%持续增大至36.9%,大孔隙数量占比在首次冻融后增加至24.3%,而在4~7次冻融循环期间持续降低至20.6%。总体来看,冻融作用增多小孔隙数量,而大孔隙在冻融作用下相互连接合并形成团聚体间架空孔隙,从而导致大孔隙在数量上减少而孔隙度持续升高。未冻融试

样小孔隙数量在FT-10后增加5.5%,而大孔隙数量减小幅度为3%,将导致孔隙直径均值降低。

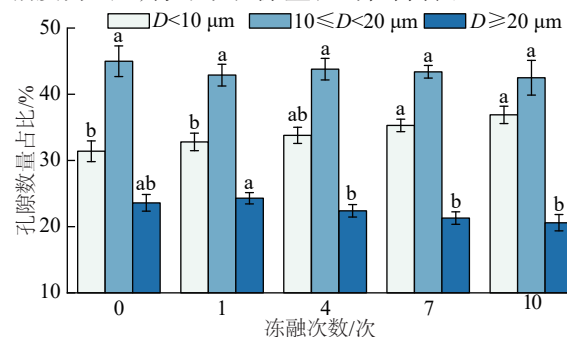


图4 不同冻融次数条件下不同孔径孔隙数量分布

Fig. 4 Distribution of the number of pores with different pore sizes under different numbers of freeze-thaw cycles

2.2 冻融条件下质量含水率变化对试样孔隙结构的影响

图5为质量含水率在30%~50%条件下,土样冻融前后的孔隙特征参数,孔隙平均分形维数随质量含水率的变化趋势见图5a。各组质量含水率试样在FT-4之后,孔隙分形维数均有所上升,但当质量含水率 $< 40\%$ 时,FT-4后孔隙分形维数不存在明显的显著性差异,其增长幅度分别为0.85%、0.85%、0.83%,而当质量含水率为45%、50%时,孔隙分形维数在FT-4后出现显著增长,分别增加1.68%和3.33%,显著性差异较为明显。由此表明,随着试样含水率由30%增加至50%,FT-4后试样孔隙几何复杂度与粗糙度均增加,而40%质量含水率是土样孔隙分形维数在FT-4后显著增加的临界值。

由图5b可知,经过4次冻融循环后,30%~50%质量含水率条件下,试样的平均孔径都有不同程度的减小。质量含水量 $< 40\%$ 的试样在FT-4后平均孔径分别减小3.04%、3.29%、0.31%,显著性差异较小。而质量含水量为45%和50%的试样在FT-4后其平均孔径分别减少14.07%和15.23%,显著性差异较为明显。表明40%质量含水率是FT-4后平均孔径发生显著变化的临界值,与孔隙平均分形维数变化趋势类似,40%质量含水率是研究区土样部分孔隙参数变化的重要临界阈值。

孔隙度数据见图5c。经过FT-4后,质量含水率 $> 40\%$ 的试样孔隙度增长较为显著,而30%、35%质量含水率试样显著性差异较小。表明当土体质量含水率达到40%时,FT-4后孔隙度出现明显变化。

不同质量含水率试样冻融前后不同孔径孔隙数量变化见图5d。表明在30%~50%质量含水率内,随着质量含水率升高,FT-4后小孔隙数量增长幅度与大孔隙数量降低幅度总体呈增大趋势,当质量含水率 $> 40\%$ 时,FT-4后的小孔隙增长较为显著。不

同质量含水率试样冻融前后 SEM 图像(图 6)表明,土体在冻融作用下,团聚体内微小孔隙不断萌生,大

孔隙互相贯通连接后数量减少,且随着质量含水率的增大,该趋势变化明显。

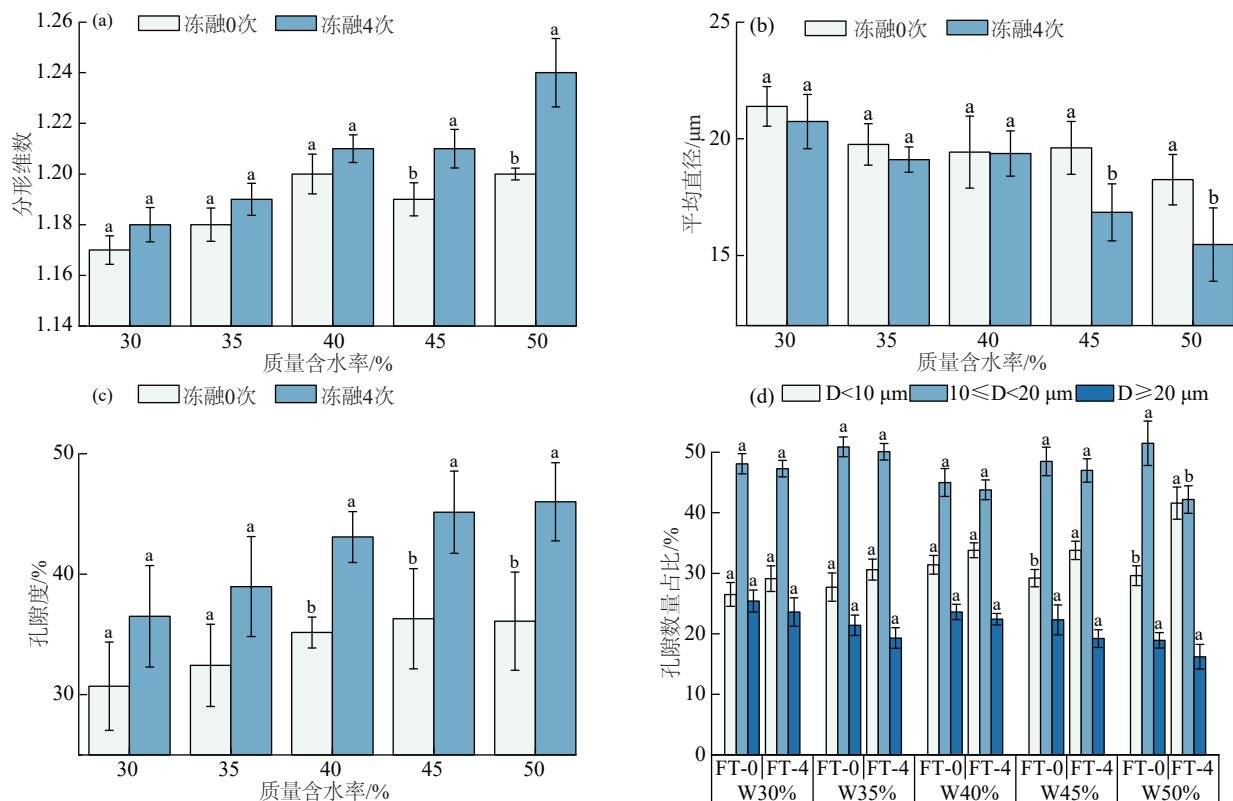


图 5 质量含水率对冻融前后土体孔隙特征参数的影响

Fig. 5 Effects of water content on pore characteristic parameters of soil before and after freezing and thawing

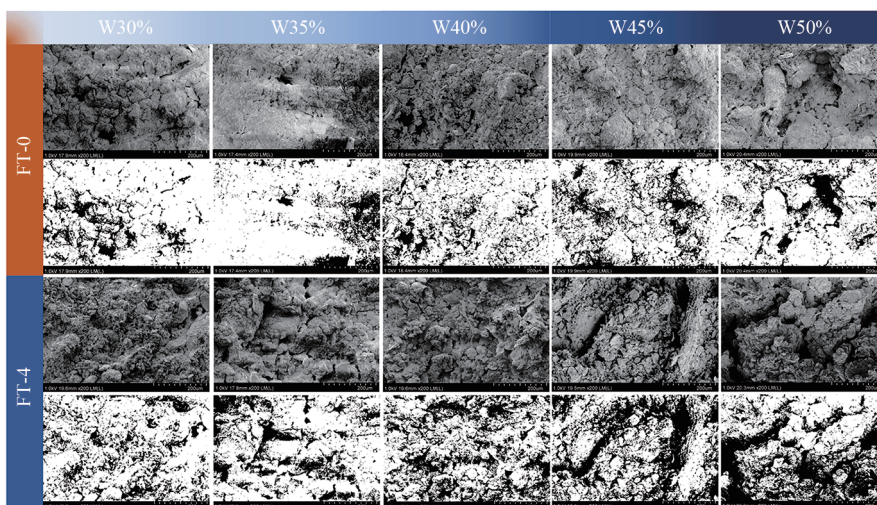


图 6 不同质量含水率试样 SEM 扫描电镜图像及二值化

Fig. 6 Scanning electron microscopy images and binarization of specimens with different water contents

2.3 冻融条件下含根量变化对试样孔隙结构的影响

图 7 为 0、4 次冻融条件下, 0%~4% 含根量试样的微观孔隙结构参数。由 FT-4 后含根土孔隙分形维数与含根量的关系(图 7a)可知, 相较于无根素土试样, 1% 含根量试样在 FT-4 后孔隙分形维数增长率与其相近, 分别为 1.67% 和 1.68%, 而 2%、3%、4% 含根量试样增长率明显降低。表明 2%~4% 的含根量水平

下, 冻融对试样孔隙平均分形维数的影响受到抑制, 较高的根系含量水平对于土体孔隙轮廓结构的稳定性具有一定的增强作用。

由不同含根量试样冻融前后孔隙平均直径变化数据(图 7b)可知, 不含根试样在 FT-4 后平均孔隙直径下降 16.19%, 而根系的加入使其下降幅度呈明显减小趋势, 1%~4% 含根量试样在 FT-4 后, 孔隙平

均直径分别降低 2.82%、0.31%、2.18%、0.16%。表明根系的加入能够抑制冻融作用对土体平均孔隙直径的影响,随着含根量的增加,冻融对孔隙平均直径的影响总体呈逐渐减弱趋势。

孔隙度数据见图 7c。在 0~4% 含根量内,5 组试样孔隙度在 FT-4 均出现增长,但随着含根量的升高,增长幅度持续下降,当含根量 > 40% 时,FT-4 后已无明显显著性差异。表明较高的根系含量能够抑制冻融对土体孔隙度的影响,维持土体结构稳定。

不同含根量试样冻融前后孔隙数量分布情况

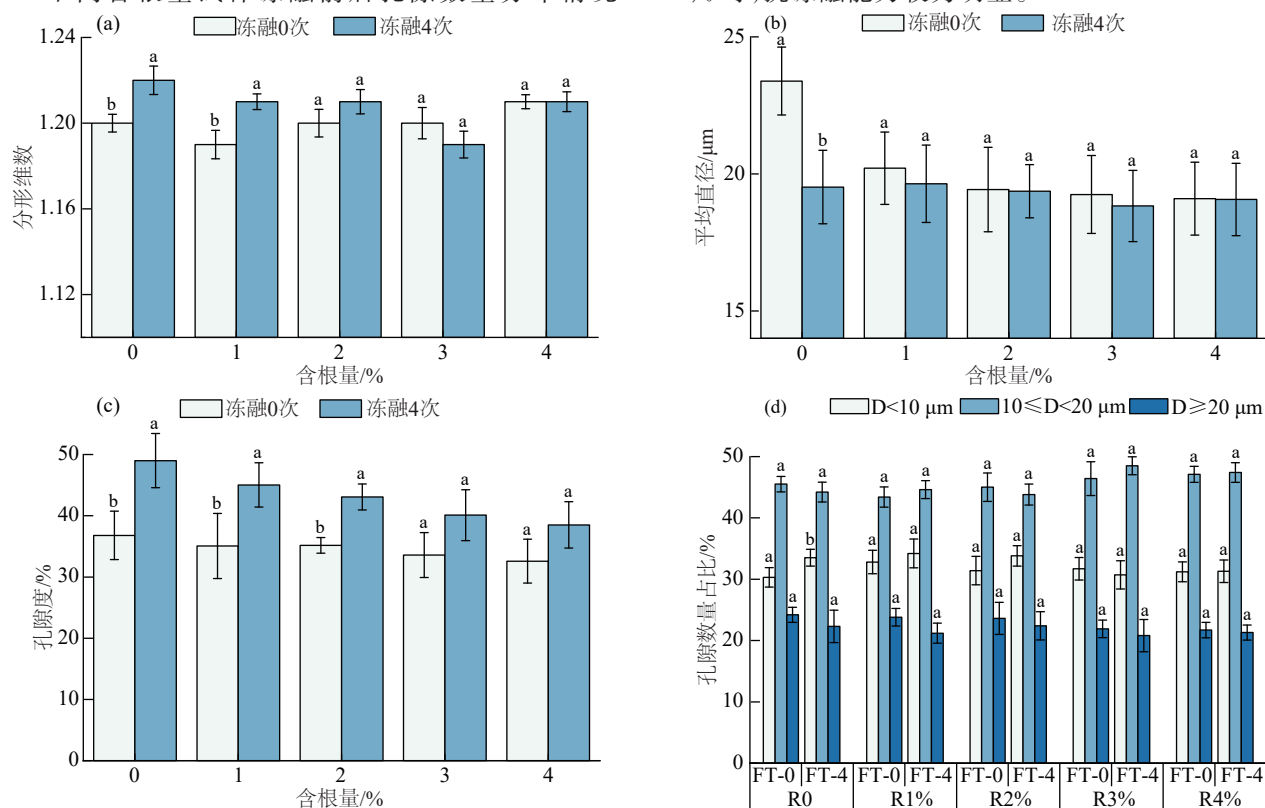


图 7 含根量对冻融前后土体孔隙特征参数的影响

Fig. 7 Effects of root content on pore characteristic parameters of soil before and after freezing and thawing

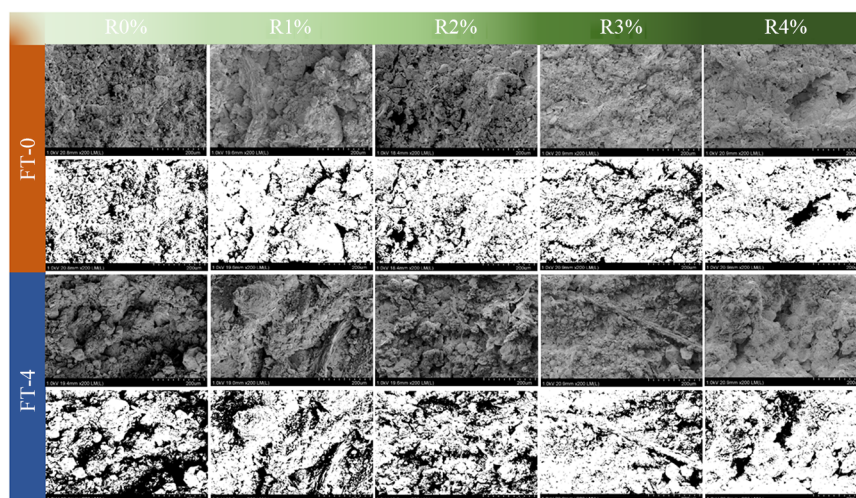


图 8 不同含根量试样 SEM 扫描电镜图像及二值化

Fig. 8 Scanning electron microscopy images and binarization of specimens with different root contents

3 讨论

冻融循环是影响高寒草甸土体结构的重要物理作用,为探究退化高寒草甸对冻融循环的响应,从微观层面依次探讨冻融循环次数、含水率及含根量对土体孔隙结构的影响,研究表明,土体孔隙度随着冻融次数的增多而增大,且在 FT-4 后影响逐渐降低。冻融循环是一个从不平衡状态发展到动态平衡状态的过程,冰晶在土体结构中生长,造成孔隙面积扩大,而由于冻融损伤的不可逆性,在试样融化期间,孔隙面积并不缩小,随着冻融次数的增加,土样黏聚力降低,此时,冻结与融化过程中的变形量基本相当,因而孔隙度变化幅度趋于平缓^[28]。冻融初期阶段,分形维数与平均直径同样发生显著变化,表明土体结构对冻融的响应是一个迅速的过程。高寒草甸常年受季节性冻融交替影响,草甸退化削弱其对冻融作用的适应性,使得冻融循环能够对其造成显著影响,而该影响很可能发生在冻融初期阶段,导致高寒草甸退化加速,同时为高寒草甸退化防治带来困难。

由不同质量含水率试样 FT-4 后的孔隙特征参数可证实,质量含水率高的试样,冻融作用对微观结构的影响更大。冰的体积是同等质量水的体积的 1.1 倍,更多的孔隙水在相变转化为冰晶后,造成更大的体积应变增长,同时,团聚体内原始缺陷处结合水膜中的自由水在相变过程中产生的挤压应力造成局部应力集中,当团聚体内冻胀应力超过黏聚力,团聚体被冰晶穿刺断裂,团聚体间颗粒原始连接遭到破坏,颗粒从相对聚集的状态逐渐离散,形成连续的架空孔隙,造成大孔隙数量占比下降,小孔隙大量产生,小孔隙多数呈分散状态而不相互连接,且其在数量上的增长幅度大于大孔隙数量因相互连通而减少的幅度,进而导致孔隙平均直径降低^[29]。不同质量含水率水平的冻融试验结果发现,冻融对高寒草甸土体分形维数、孔隙平均直径及孔隙度的影响在质量含水率 $>40\%$ 的试样中表现更为明显。

不同含根量冻融试验结果表明,无根素土 FT-4 后土体孔隙分形维数、平均直径及孔隙度均发生显著变化,而根系的加入显著降低冻融对土体微观结构的影响,且随着根系含量的增多,草甸土体抵御冻融的能力越强。在力学层面,根系改变土颗粒的连接模式,并有效传递冻胀应力^[30],确保更均匀的负荷分布避免应力集中。须根增强根土界面摩擦,使其与土体互锁,限制外力引起的位移。在生物层面,根周分泌具有良好胶结作用的有机酸及糖类,增强颗粒间的黏聚力,此作用使得粒间连接断裂的冻胀力

阈值提高,从而加强抗冻融能力。气候变化及过度放牧造成高寒草甸退化,导致活性根系大量死亡,含根量大幅下降。较低的含根量水平使其更易遭受冻融作用影响,在反复冻融作用下孔隙逐渐贯通,成为水分蒸发的优先通道,同时,较大的孔隙度导致土壤吸力下降,储水能力严重受损,导致退化高寒草甸发生干旱,并加速草甸退化进程。因此,在全球变暖、高寒草甸冻融侵蚀强烈的大背景下,加速恢复退化草地,是提高青藏高原地区草地生态系统多样性和水源涵养功能的重要举措。

4 结论

1)在 0~10 次冻融循环作用下,高寒草甸土体孔隙分形维数随冻融次数增多而持续增大。孔隙度首先呈增大趋势,并在 FT-4 后趋于稳定。孔隙平均直径在 FT-1 后增加至 $21.58\ \mu\text{m}$,随后大致呈降低趋势,并在 FT-7 后维持稳定。冻融循环对高寒草甸的主要影响发生在冻融初期阶段。

2)在 $30\%\sim 50\%$ 质量含水率内,随着高寒草甸土体质量含水率的增大,FT-4 后土体孔隙度的增长幅度由 18.89% 增加至 27.42% 。孔隙平均直径 FT-4 后变化率呈减小趋势,且在质量含水率达到 40% 后,降低幅度明显增大。孔隙分形维数冻融前后变化率呈增大趋势,且在质量含水率 $>40\%$ 时增长幅度较为明显。 40% 质量含水率是冻融循环对高寒草甸土体结构造成显著影响的临界阈值。

3)根系的加入提高土体抵抗冻融对其结构影响的能力,在 $0\sim 4\%$ 含根量内,随着含根量增加,FT-4 后土体孔隙增长率由 33.22% 减小至 18.17% ,土体大、小孔隙数量变化幅度呈减小趋势。当含根量 $>1\%$ 时,土体孔隙分形维数和平均直径 FT-4 后变化率显著降低;根系含量较少的重度退化高寒草甸土体结构受冻融影响较强烈,而根系含量较高的轻度退化草甸土体结构对冻融具有一定的抵御能力。

参考文献:

- [1] 黄婷婷,赵辉,赵院,等.三江源国家公园土壤侵蚀及其分布特征[J].水土保持通报,2023,43(5):95-103.
HUANG T T, ZHAO H, ZHAO Y, et al. Soil erosion and its distribution characteristics in Three-River-Source National Park[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 95-103.
- [2] 范昊明,蔡强国.冻融侵蚀研究进展[J].中国水土保持科学,2003,1(4):50-55.
FAN H M, CAI Q G. Review of research progress in freeze-thaw erosion[J]. Science of Soil and Water Conser-

- vation, 2003, 1(4): 50-55.
- [3] 牛钰杰. 青藏高原东缘高寒草地裂缝分布、发生机理及生态学效应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- NIU Y J. The distribution, formation mechanism of soil cracking and its ecological impacts on alpine rangelands in eastern Tibetan Plateau [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.
- [4] 魏卫东, 刘育红, 马辉, 等. 三江源区退化高寒草甸浅层土壤冻融作用特征[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(3): 352-359.
- WEI W D, LIU Y H, MA H, et al. Freeze-thaw action characteristics of shallow soil on degraded alpine meadow in the source region of the Three Rive [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(3): 352-359.
- [5] MIEHE G, SCHLEUSS P M, SEEGER E, et al. The *Kobresia pygmaea* ecosystem of the Tibetan Highlands-Origin, functioning and degradation of the world's largest pastoral alpine ecosystem *Kobresia* pastures of Tibet [J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 754-771.
- [6] 曹广民, 杜岩功, 梁东营, 等. 高寒嵩草草甸的被动与主动退化分异特征及其发生机理[J]. 山地学报, 2007, 25(6): 641-648.
- CAO G M, DU Y G, LIANG D Y, et al. Character of passive-active degradation process and its mechanism in alpine *Kobresia* meadow [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(6): 641-648.
- [7] 周志军, 吕大伟, 宋伟, 等. 基于含水率和温度变化的冻融黄土性能试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 44-49.
- ZHOU Z J, LU D W, SONG W, et al. Experiment on loess characteristics after freeze-thaw circle based on changes of moisture content and temperature [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 44-49.
- [8] 何琦. 不同放牧强度条件下祁连山南麓高寒草甸草毡层特征及其影响因素[D]. 湖北 荆州: 长江大学, 2023.
- HE Q. Felt layer Characteristics and influencing factors of alpine meadow in the southernfoot of Qilian Mountains under different grazing intensity conditions [D]. Jingzhou, Hubei: Yangtze University, 2023.
- [9] XIE S B, QU J J, LAI Y M, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(4): 999-1009.
- [10] LI J F, CHEN H E, GAO X, et al. Cracks evolution and micro mechanism of compacted clay under wet-dry cycles and wet-dry-freeze-thaw cycles [J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 214: e103944.
- [11] GAO Z, HU X, LI X Y, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil macropores and its implications on formation of hummocks in alpine meadows in the Qinghai Lake watershed, northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(1): 245-256.
- [12] ZHAO Y D, HU X, LI X Y, et al. Evaluation of the impact of freeze-thaw cycles on the soil pore structure of alpine meadows using X-ray computed tomography [J]. Soil Science Society of America Journal, 2021, 85(4): 1060-1072.
- [13] ROONEY E C, BAILEY V L, PATEL K F, et al. Soil pore network response to freeze-thaw cycles in permafrost aggregates [J]. Geoderma, 2022, 411: e115674.
- [14] 王文刚, 王彬, 顾汪明, 等. 冻融循环对黑土团聚体稳定性与微结构特征的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 66-73.
- WANG W G, WANG B, GU W M, et al. The effect of freeze-thaw cycle on the stability of black soil and its mechanism [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 66-73.
- [15] 孙泉沁, 余冬立. 生物炭添加对盐渍土 CT 孔隙序列分形特征来源的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 298-304.
- SUN X Q, SHE D L. Effect of biochar addition on the fractality source of CT porosity series in saline soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 298-304.
- [16] 赵云朵, 胡霞. 基于 CT 研究冻融对高寒草甸土壤孔隙结构的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 362-367.
- ZHAO Y D, HU X. Influence of freeze-thaw on CT measured soil pore structure of alpine meadow [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 362-367.
- [17] AKAGAWA S, NISHISATO K. Tensile strength of frozen soil in the temperature range of the frozen fringe [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 57(1): 13-22.
- [18] 于琳琳, 徐学燕, 邱明国, 等. 冻融作用对饱和粉质黏土抗剪性能的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2448-2452.
- YU L L, XU X Y, QIU M G, et al. Influence of freeze-thaw on shear strength properties of saturated silty clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2448-2452.
- [19] ZHAO Y D, HU X. How do freeze-thaw cycles affect the soil pore structure in alpine meadows considering soil aggregate and soil column scales? [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(4): 4207-4216.
- [20] 邢光延, 申紫雁, 刘昌义, 等. 三种影响条件下黄河源区高寒草地土壤物理及力学性质[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 180-189.
- XING G Y, SHEN Z Y, LIU C Y, et al. Soil physical and mechanical properties of alpine grassland in the source region of the Yellow River under three influence conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(16): 180-189.
- [21] 黄倩, 丁明军, 陈利文, 等. 三江源区不同退化程度高寒草甸表土层的土壤水分变化特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 189-195.
- HUANG Q, DING M J, CHEN L W, et al. Variations of moisture in surface soil of alpine meadow with different degrada-

- tion degrees in the three-river source region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 189-195.
- [22] 青海省质量技术监督局. 高寒小嵩草甸退化状态评估: DB63/T 1413—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. Qinghai Bureau of Quality and Technical Supervision. Assessment of the degradation status of alpine small tarra- gon meadows: DB63/T 1413—2015 [S]. Beijing: Stan- dards Press of China, 2015.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [24] 中华人民共和国建设部. 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007. Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of soil: GB/ T 50145—2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [25] 陈诚, 郭伟, 任宇晓. 冻融循环条件下木质素纤维改良土 性质研究及微观分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 135-140. CHEN C, GUO W, REN Y X. Properties and micro- scopic analysis of lignin fiber-reinforced soils under freeze-thaw cycle [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 135-140.
- [26] 杨震, 冀鸿兰, 李超, 等. 冻融作用对岸坡土体宏观特性及 岸坡稳定性影响研究[J]. 水利学报, 2023, 54(6): 706-716. YANG Z, JI H L, LI C, et al. Effects of freezing-thaw- ing action on the macro-micro properties of bank slope soil and bank stability [J]. Journal of Hydraulic Engineer- ing, 2023, 54(6): 706-716.
- [27] TANG C S, CHENG Q, GONG X P, et al. Investigation on microstructure evolution of clayey soils: A review focus- ing on wetting/drying process [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1): 269-284.
- [28] 穆彦虎, 马巍, 李国玉, 等. 冻融作用对压实黄土结构影响的 微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1919-1925. MU Y H, MA W, LI G Y, et al. Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1919-1925.
- [29] ZHU H X, ZHANG Y, LI Z H, et al. Study on crack development and micro-pore mechanism of expansive soil improved by coal gangue under drying-wetting cycles [J]. Materials, 2021, 14(21): e6546.
- [30] JIANG R, WANG J D, XIAO T, et al. Effect of sisal fibers on the disintegration characteristics of sisal fiber- amended loess [J]. Construction and Building Materials, 2024, 453: e139032.
- (上接第 214 页)
- [29] 张缓, 穆兴民, 高鹏. 黄土高原不同立地条件下枯落物蓄 积量及持水特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 45-52. ZHANG H, MU X M, GAO P. Variation of litter accumulation and water holding capacity at different site conditions in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 45-52.
- [30] 魏亚娟, 刘美英, 左小锋, 等. 平茬对吉兰泰盐湖花棒防 护林植被特征和土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学 报, 2023, 37(4): 250-257. WEI Y J, LIU M Y, ZUO X F, et al. Effects of prune measure on vegetation characteristics and soil physical and chemical properties of *Hedysarum scoparium* protection forest in Jilantai salt lake [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 250-257.
- [31] 张小菊, 每杭, 沈艳. 平茬方式对宁夏荒漠草原人工柠条 林土壤物理性质及持水能力的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(4): 73-79. ZHANG X J, MEI H, SHEN Y. Effects of stubble on soil physical properties and water holding capacity of artificial *Caragana* in Ningxia desert steppe [J]. Grassland and Turf, 2020, 40(4): 73-79.