

冻融循环条件下伊犁地区滑坡 黄土湿陷特性及微观机理

白一兵, 张紫昭, 徐元鹏, 张力帆

(新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: [目的] 揭示季节性冻融与初始含水率耦合作用下伊犁黄土湿陷性减弱的机理, 阐明微观结构重塑与宏观湿陷量变化的定量关系, 为季节性冻土区黄土滑坡防治提供理论依据。[方法] 开展不同初始含水率与循环次数的冻融循环试验, 配合室内湿陷试验与扫描电镜(SEM)观测; 基于图像/统计分析定量表征孔径分布、方向频率、孔隙丰度与孔隙分形维数等微观参数, 并与湿陷系数建立关联, 构建宏-微一体的分析框架。[结果] ①随冻融循环次数增加, 各含水率样品的湿陷系数均显著降低, 且低含水率更为敏感; 含水率为 14.2% 的黄土在经过冻融循环 9 次后, 湿陷系数峰值从 0.094 降至 0.084, 下降 10.6%; 含水率为 20.2% 的黄土在经过冻融循环 9 次后, 湿陷系数峰值从 0.079 降至 0.076, 下降 3.8%。②冻融作用削弱了颗粒间的胶结, 改变了颗粒连接与排列, 促使内部结构重组并趋于新的稳定状态; ③孔隙结构发生系统性演化, 大孔隙比例减少, 孔径谱细化与均化, 方向性重排, 孔隙丰度与分形维数随之变化; ④微观统计规律与定性观察及宏观湿陷性演化具有一致性。[结论] 冻融循环通过削弱胶结并重塑孔隙-颗粒结构, 使“大孔隙消减与分形维数变化”成为驱动宏观湿陷性减弱的核心机制, 据此构建了“冻融→微观结构重塑→湿陷性响应”的物理过程模型, 为伊犁地区等季节性冻土区黄土滑坡灾害的监测与防治提供了理论依据。

关键词: 冻融循环; 湿陷特性; 扫描电镜; 微观机制

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0032-11

中图分类号: P642.22

文献参数: 白一兵, 张紫昭, 徐元鹏, 等. 冻融循环条件下伊犁地区滑坡黄土湿陷特性及微观机理[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 32-42. Bai Yibing, Zhang Zizhao, Xu Yuanpeng, et al. Collapsibility characteristics and microscopic mechanisms of loess in Ili region under freeze-thaw cycles [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 32-42.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.001

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.001

Collapsibility characteristics and microscopic mechanisms of loess in Ili region under freeze-thaw cycles

Bai Yibing, Zhang Zizhao, Xu Yuanpeng, Zhang Lifan

(School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830017, China)

Abstract: [Objective] The mechanisms through which seasonal freeze-thaw cycles, coupled with initial water content, attenuate the collapsibility of Ili loess were revealed, and a quantitative relationship between microstructural reconfiguration and macroscopic collapsibility variations was established, in order to provide a theoretical basis for prevention and control of loess landslides in seasonally frozen soil regions. [Methods] Freeze-thaw cycling tests were performed on samples with different initial water contents and cycle numbers, accompanied by laboratory collapsibility tests and scanning electron microscope (SEM) observations. Image and statistics-based analyses were conducted to quantitatively characterize microscopic parameters such as pore size distribution, directional frequency, pore abundance, and pore fractal dimension. Correlations between these

收稿日期: 2025-09-21

修回日期: 2025-11-09

采用日期: 2025-11-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“伊犁谷地冰雪融水叠加降雨入渗黄土滑坡形成机理与预警判据”(42367021); 新疆维吾尔自治区天山英才培养计划“天山北坡矿山开采地质灾害-水文地质-生态环境耦合互馈机制及其工程地质意义”(2023TSYCCX0010)

第一作者: 白一兵(2000—), 男(蒙古族), 辽宁省阜新市人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害。Email: b15104184563@163.com。

通信作者: 张紫昭(1965—), 男(汉族), 山东省威海市人, 博士, 教授, 从事地质灾害与矿山地质环境方面的科研与教学工作。Email: zhangzizhao@xju.edu.cn。

parameters and the collapsibility coefficient were established, forming an integrated macro-micro analytical framework. [Results] ① The collapsibility coefficient decreased significantly with an increase in freeze-thaw cycles for all water contents, and samples with lower water contents were more sensitive. For loess with a water content of 14.2%, the peak collapsibility coefficient decreased from 0.094 to 0.084 after nine cycles, a reduction of approximately 10.6%. For loess with a water content of 20.2%, the peak collapsibility coefficient decreased from 0.079 to 0.076 after nine cycles, a reduction of about 3.8%. ② Freeze-thaw cycles weakened interparticle cementation and altered particle connections and arrangement, thereby driving internal structural reorganization toward a new stable state. ③ The pore system underwent systematic evolution. The proportion of large pores declined, the pore-size spectrum became finer and more uniform, pore directions were re-arranged, and both pore abundance and pore fractal dimension changed accordingly. ④ The microstructural statistical patterns were consistent with qualitative observations and the macroscopic evolution of collapsibility. [Conclusion] Freeze-thaw cycles reduce interparticle bonding and remodel the pore-particle structure. Consequently, the reduction of large pores and changes in fractal dimension constitutes the core mechanisms driving the macroscopic weakening of collapsibility. Based on this, a physical process model of ‘freeze-thaw → microstructural reconfiguration → collapsibility response’ is established, providing theoretical support for the monitoring and prevention of loess landslides in seasonally frozen soil regions such as the Ili area.

Keywords: freeze-thaw cycle; collapsibility characteristics; scanning electron microscope; microscopic mechanisms

黄土是一种兼具多孔隙与弱胶结特性的特殊性沉积物^[1],具有强烈的水敏性和湿陷性。在周期性冻融作用下,黄土经历多次冻结-融化过程,造成土体孔隙中液态水与固态水的周期性相变,进而引发土体颗粒间胶结作用减弱、孔隙结构重塑等,最终导致黄土边坡出现非均匀变形特征,严重影响边坡的安全性,极易引发工程灾害^[2]。同时,冻融循环会破坏黄土的多孔结构,导致融雪、降雨等大量地表水渗入坡体,使土体含水率升高,进而显著增强黄土的湿陷性^[3]。因此,开展黄土在冻融循环条件下湿陷特性的研究对于边坡安全稳定性具有重要的理论和实际意义。

目前,有多名学者针对冻融循环因素研究黄土的湿陷特性,并基于扫描电镜等仪器对黄土微观结构特征进行研究。冻融循环是一种对于土体的强风化作用。郑郢等^[4]、宁俊等^[5]通过试验得出冻融循环极大地改变了土体的湿陷性及微观结构。肖东辉等^[6]研究表明,冻融循环会促使黄土孔隙中的大颗粒逐步分解为小颗粒,不仅改变了黄土的孔隙率,还对其湿陷性产生了间接影响。李国玉等^[7]试验表明,在反复冻融作用下,黄土呈现出干密度减小,孔隙比增大的特征,同时水分会持续增加并向中上区域聚集,这些因素共同导致了湿陷变形量的上升。在湿陷特性方面,早在20世纪30年代,学术界便针对黄土湿陷展开系统性探索,研究重点集中在湿陷假说构建、湿陷系数与起始压力的关联、湿陷变形量测算及湿

陷性评价方法等,这些研究为工程建设的科学规划、地质灾害的风险评估以及相关防治措施的实践应用提供了可靠的理论基础与技术保障,在相关领域实践中发挥了不可替代的关键作用^[8-10]。在理论层面,针对黄土湿陷机制的研究已形成多元体系,从早期的毛管假说、溶盐假说,到后续的胶体不足说、水膜楔入说,再到欠压密理论等,各类学说相互补充,不断完善,共同推动了对黄土湿陷本质认识的深化;江美英等^[11-14]提出水与外力是导致黄土湿陷性的外部因素,而黄土自身独特的架空孔隙结构及物质组成,则是影响其湿陷性的内部因素。杨鑫^[15]对原状黄土的增湿变形特性规律展开分析后发现,随着增湿含水率的升高,其增湿湿陷变形呈现逐渐减小的趋势。高英等^[16]研究了不同增湿含水率条件下微结构特征与湿陷变形的关联,结果表明当上覆压力增大时,强湿陷性黄土湿陷系数的增长斜率更为陡峭,且初始含水率较低的强湿陷性黄土,其变形发展速度更快。Liu Zhen等^[17],Li Ping等^[18],Li Xian等^[19]通过定量分析湿陷过程中颗粒形态、颗粒定向性及孔隙大小、孔隙面积等参数的变化规律,并结合物质成分分析结果,提出了黄土湿陷机理。随着扫描电镜等仪器出现,人们开展了对黄土微结构的研究,土体的微观结构对更好地了解土体性质具有重要意义。学界普遍认为,黄土的湿陷机制可从其自身结构特征切入解释,包括骨架颗粒的形态、接触关系与排列方式、胶结状态的差异以及孔隙的尺寸大小与形态分布等,

这一认知逐步发展,最终形成了阐释黄土湿陷机制的结构学说^[20]。赵鲁庆等^[21]从微观角度出发,研究了土粒形态、连接方式、排列形式及土粒排列、形态、尺度分布等微观结构参数与冻融次数的关系。徐璐等^[22]研究发现,黄土湿陷过程会导致孔隙分形维数升高,同时黄土的孔隙形态也变得更为复杂。陈果等^[23]对比了黄土湿陷前后的微结构特征,结果显示,湿陷作用使黄土骨架颗粒的接触形态产生明显改变。本文以伊犁地区喀拉海依苏滑坡黄土为研究对象,基于其基本物理性质,开展冻融循环下的室内湿陷试验,分析湿陷系数与不同初始含水率以及冻融次数间的关系;结合扫描电镜试验,从定性及定量角度分析土体在不同含水率、不同循环次数条件下湿陷前、后黄土微观结构的变化特征和变化规律,揭示黄土湿陷特性,为滑坡灾害防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆伊犁地区新源县阿热勒托别镇喀拉海依苏村,属典型的温带大陆气候。该区域属

于大型深层黄土滑坡,平均厚度约40 m,滑坡隐患体所处斜坡地貌单元为剥蚀堆积的圆顶低山,形态近似半圆形,其上发育有多级拉张裂缝,裂缝多呈弧形近东西向排列,高程1 276~1 470 m,斜坡体坡向320°,相对高差194 m,纵向长度300.4 m,横向宽度50.4 m,面积 $9.80 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。研究区大面积被第四系所覆盖,按时代由老至新划分为第四系上更新统风积层(Q_3^{sol})、第四系滑坡堆积层(Q_4^{dl})及第四系全新统冲洪积层(Q_4^{apl})。

1.2 区内黄土基本特性

试验土样取自坡顶位置,土样呈黄褐色且质地相对均匀。取样深度为3 m,取样时间为2025年3月。为避免土样在运输环节因外界干扰发生结构破坏,采集后采用保鲜膜与泡沫膜进行多层包裹处理,再转运至实验室。随后,对采集的原状土样依次进行风干、粉碎处理,并通过室内基本物理性质试验测定相关参数,其主要物理指标详见表1。研究区内土种为粉质黄土,其中,粉土占比为79.1%,砂土和黏土占比分别为10.08%和10.82%。土体中主要矿物有石英、白云母及绿泥石等(表2)。

表1 黄土基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators of loess

项目	天然含水率/%	天然干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/%	塑限/%	最优含水率/%	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
数值	21.83	1.61	27.11	17.26	17.2	1.83

表2 黄土矿物组成

Table 2 Mineral composition of loess

成分	石英	方解石	白云母	绿泥石	钠长石	白云石	金红石
含量/%	29.40	1.61	27.11	17.26	17.20	1.83	1.23

1.3 方法

1.3.1 冻融循环试验

试验以粉质黄土最优含水率(17.2%)为基准,设置6组梯度含水率(14.2%, 15.2%, 16.2%, 18.2%, 19.2%, 20.2%),并采用最大干密度(1.83 g/cm^3)的环刀试样。试验于2025年3—5月在新疆大学地质与矿业工程学院国家重点实验室进行。土样先过0.5 mm土工筛,烘干后通过喷壶少量多次补水,经充分搅拌均匀后装入保湿皿密封养护48 h。随后使用轻型击实法制备环刀试样,直径61.8 mm,高度20.00 mm。将成型后的试样置于恒温恒湿试验箱中,进行多次冻融循环测试。为防止土样水分流失,环刀内土样采用保鲜膜密封。设定冻结温度 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$,融化温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。冻结和融化阶段的持续时

间均为12 h,以此还原土壤的冻结与融解过程;此外,温度波动度控制在 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$,温度均匀度控制在 $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度维持在20%~98%,湿度偏差不得超过 $\pm 2.5\%$ 。冻融循环结束后,首先对环刀试样进行质量测定,要求质量误差不超过0.1%,同时含水率变化控制在0.3%以内,符合上述条件后方可进入下一轮冻融。试验共设置9次循环。为探究循环次数对湿陷特性的影响,分别选取0, 1, 3, 5, 7, 9次循环作为典型节点,用于开展后续宏微观试验;每个典型次数均制备3个平行试样,保障数据可靠性与重复性。

1.3.2 湿陷试验

采用十六联固结仪开展湿陷试验(表3)。采用双线法,将冻融循环完成后的试样,一个试样经历冻融循环试验后进行分级加荷,另一个冻融循环试样需要浸水饱和,将2个试样安装在十六联固结仪中,分级加载至 $p=25 \text{ kPa}$, $p=50 \text{ kPa}$, $p=100 \text{ kPa}$, $p=200 \text{ kPa}$, $p=300 \text{ kPa}$, $p=500 \text{ kPa}$, $p=800 \text{ kPa}$, $p=1 000 \text{ kPa}$,待下沉稳定后,2个试样同时加至最后一级压力,下沉稳定变形量标准为 0.01 mm/h 。每间隔1 h读取并记

录试验数据,采用饱和试样在浸水后的总变形量与非饱和试样在浸水前的压缩变形量之差表示湿陷变形。计算公式如下:

$$\delta_s = \frac{\Delta h_p}{h_0} \quad (1)$$

式中: δ_s 为湿陷系数; Δh_p 是在压力 P (kPa)作用下,浸水变形稳定后的土样高度与稳定前高度之差(mm); h_0 为试样在未受压力作用下的原始高度(mm)。浸水变形前后高度差的增量 Δh_p 代表土壤湿陷量。

表3 黄土湿陷试验方案

Table 3 Collapsibility test scheme of loess

项目	冻融循环次数/次	含水率/%	压力/kPa
数值	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9	14.2,15.2,16.2,18.2,19.2,20.2	25,50,100,200,300,500,800,1000

1.3.3 微观SEM试验

对冻融循环、湿陷后的试样进行扫描电镜试验(scanning electron microscope,简称SEM)。选取冻融循环0,1,9次以及含水率为14.2%,20.2%的湿陷前后试样,首先,将湿陷试验前后的试样自然风干,通过控制水分缓慢蒸发,最大限度减少对土体内部结构的扰动,同时确保试样满足扫描电镜试验所需的真空环境要求;随后,在土样的特定部位进行切样操作,并完成喷金处理,用场发射扫描电子显微镜Sigma 300提取相关微观参数。湿陷前后孔径分布、丰度、定向频率、分形维数计算公式见表4。

表4 微观参数及计算公式

Table 4 Microscopic parameters and calculation formulas

微观参数	公式 ^[24-28]
直径 d	$d = \sqrt{4S/\pi}$
定向频率 $F_i(\alpha)$	$F_i(\alpha) = x_a/y$
丰度 C	$C = B/L$
分形维数 D	$\lg N = D/2 \cdot \lg S + c$

注:表中 S 表示面积; x_a 表示孔隙定向角在特定第 n 个方位中的分布数量; y 表示总孔隙定向角度的数量; B 表示短轴长度; L 表示长轴长度; N 表示周长; c 为常数。

2 结果与分析

2.1 冻融循环对压缩特性的影响

由图1可知,在竖向荷载施加初期,土体孔隙体积快速减小,曲线表现出较大的斜率,表明该阶段土粒结构的不稳定性较高,颗粒发生快速重排引起变形。随荷载继续增加,孔隙内的水分与气体逐步被排出,孔隙体积缩小,斜率不断减小,压缩曲线呈现非线性递减趋势。相同冻融循环次数条件下,不同含水率粉土的压缩曲线总体变化趋势类似,表现为孔隙比随荷载增加而逐渐降低,主要是由于外加竖向荷载使土体内部微结构逐渐密实,进而孔隙比不断降低。在相同竖向荷载条件下,高含水率土样的

压缩曲线始终高于低含水率土样,说明其初始孔隙比更大,含水率升高使土体内孔隙水含量增加,颗粒周围水膜增厚,从而削弱了颗粒间的摩擦作用,更易发生相对滑移,最终表现出更大的压缩变形。相反,低含水率土样中孔隙水较少,颗粒间摩擦阻力较大,限制了颗粒的运动,因此压缩变形较小,整体压缩性较低,变形程度也相对有限。

2.2 冻融循环对湿陷特性的影响

研究表明,在经历相同冻融循环次数后,不同含水率黄土的湿陷系数随垂直荷载增大均呈先上升后下降的趋势(图2)。当轴向压力由初始值增加至300 kPa时,湿陷系数迅速增长, δ_s - P 曲线斜率较大,表明该阶段湿陷变形发展显著;在300 kPa时湿陷系数达到峰值,说明试样在此荷载下湿陷性最为明显。随后轴向压力继续增大至1000 kPa,湿陷系数逐渐减小,表明湿陷变形的增长幅度持续减缓, δ_s - P 曲线逐渐趋于平缓。这种变化特征主要是由于水与荷载共同作用下黄土粒间孔隙发生塌陷,随后孔隙结构逐渐向镶嵌型转变,在持续压力作用下土体不断压密、孔隙被压缩,导致湿陷变形逐渐减弱。

由图2可知,垂直荷载在300 kPa时,不同含水率的黄土在冻融循环过程中,湿陷系数峰值的下降幅度有所不同。含水率为14.2%时,在冻融循环9次后的湿陷系数峰值从0.094降至0.084,下降了10.6%;含水率为20.2%时,在冻融循环9次后的湿陷系数峰值从0.079降至0.076,下降了3.8%,表明含水率较低的黄土受冻融循环的影响更为显著,其湿陷性的降低幅度更大。同时,随着初始含水率的增加,黄土的湿陷系数峰值整体上表现出逐渐减小的趋势。在冻融循环为0次的初始状态时,湿陷系数由14.2%含水率下的0.094逐渐降低到20.2%含水率下的0.079(表5),说明随着初始含水率的增加,黄土的初始湿陷性降低。

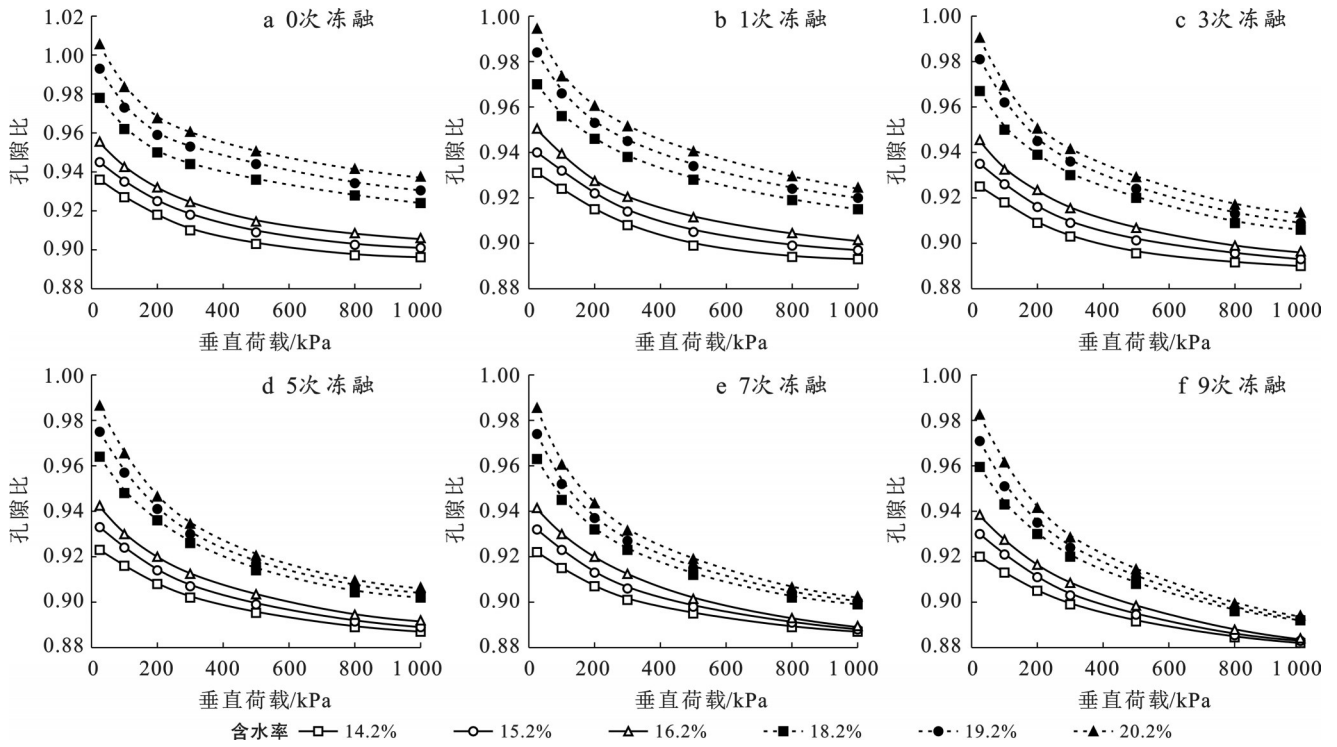


图1 不同含水率下孔隙比随垂直荷载变化曲线

Fig.1 Variation curves of porosity ratio with vertical load under different water contents

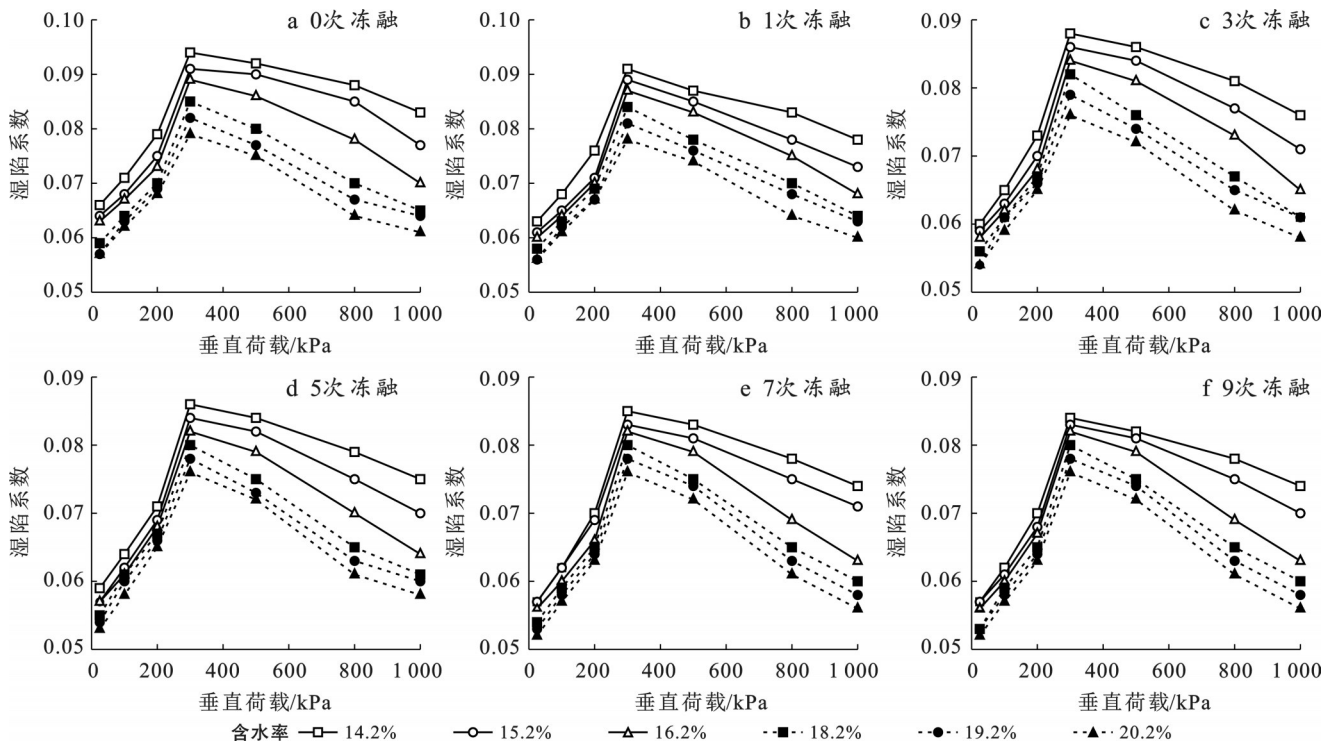


图2 不同含水率下湿陷系数随垂直荷载变化曲线

Fig.2 Variation curves of collapsibility coefficient with vertical load under different water contents

2.3 黄土湿陷微观机制研究

2.3.1 黄土微观图像定性分析

在初始含水量为14.2%的条件下,土样浸水前的SEM图像显示颗粒排列紧密,颗粒边界清晰,孔

隙较小,颗粒间接触方式以紧密接触或少量黏土与胶结物质连接为主,表现出较为稳定的致密结构(图3)。经浸水处理后,该土样颗粒之间的排列明显趋于松散,颗粒间隙显著增大,颗粒边界逐渐模糊,

原有黏土与胶结物质发生软化乃至部分溶解,使得颗粒间原有的紧密连接遭到明显削弱甚至丧失,进

而降低了土体的结构稳定性,表现出明显的膨胀与结构松散特征。

表5 不同冻融循环次数下不同含水率黄土的湿陷系数峰值

Table 5 Peak collapsibility coefficients of loess with different water contents under different numbers of freeze-thaw cycles

黄土含水率/%	冻融循环0次	冻融循环1次	冻融循环3次	冻融循环5次	冻融循环7次	冻融循环9次
14.2	0.094	0.091	0.088	0.086	0.085	0.084
15.2	0.091	0.089	0.086	0.084	0.083	0.083
16.2	0.089	0.087	0.084	0.082	0.082	0.082
18.2	0.085	0.084	0.082	0.080	0.080	0.080
19.2	0.082	0.081	0.079	0.078	0.078	0.078
20.2	0.079	0.078	0.076	0.076	0.076	0.076

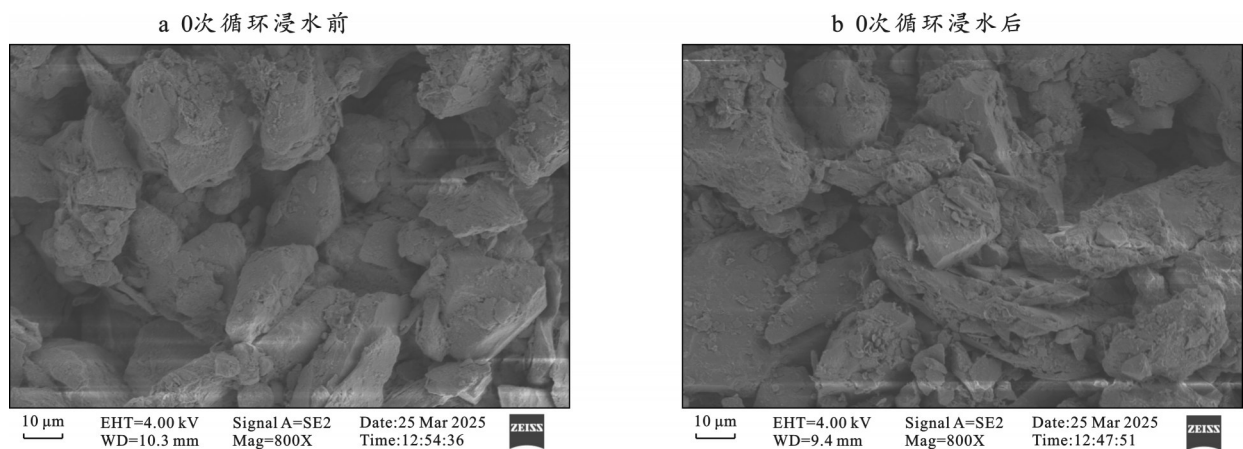


图3 未冻融黄土微观结构

Fig.3 Microstructure of loess before freeze-thaw

随着冻融循环次数的增加,粉质黄土的微观结构发生显著变化。含水率为14.2%的黄土,在冻融1次的样品中,土体中存在较多的大孔隙,骨架由较大的粉黏团粒和颗粒构成,颗粒间接触方式主要为点-点接触,结构松散且不稳定,此时土粒主要表现为较大的团粒状或片状结构,颗粒表面有较少细小碎屑,接触界面简单,易受水的作用而发生明显的湿陷变形(图4a)。当冻融循环增加至9次时,原本的大孔隙已明显转化为中、小孔隙,大粒径的团粒状骨架颗粒受到反复冻胀挤压作用而破碎成中、小粒径颗粒,微观结构中碎屑和片状颗粒的含量显著增多,这些细小碎屑附着在粗骨架颗粒表面,使颗粒表面的粗糙度增加(图4b)。同时,多次冻融循环使颗粒重新排列组合,颗粒接触更多表现为点-点接触或点-边接触,孔隙结构趋于细化,土体内可压缩的空间逐渐减小。这种微观结构的演变导致黄土的湿陷性明显减弱,湿陷系数随着循环次数的增加而逐渐减小。湿陷试验后,粉质黄土的微观结构进一步压密,与试验前进行对比,其骨架结构发生了显著的改变。冻融1

次且经湿陷后的样品中,原先团粒状的骨架颗粒已经被水载破坏得更小,颗粒间的胶结物质被溶蚀或破坏,颗粒表面的碎屑物质增多,片状或次棱角状的粉粒可见,土体结构较未湿陷前更加密实(图4c)。经过9次冻融循环并进行湿陷试验后,土颗粒间的排列更加紧凑,边-边接触数量显著增加,部分棱角较明显的粉粒进一步磨圆为偏圆状,孔隙进一步收缩为细小且分散的形态,虽然仍有少量团聚结构与架空孔隙残留,但颗粒的进一步重组压缩空间已十分有限,整体结构趋于稳定(图4d)。多次冻融循环后,黄土的结构性湿陷特征几乎消失,湿陷系数在反复循环作用下逐渐趋于稳定,不再大幅变化。

2.3.2 黄土微观图像定量分析

(1) 孔径分布。孔径分布能够直接反映土体中不同尺度孔隙的数量与占比,是决定土体压缩性与湿陷潜力的关键结构特征。本研究根据黄土、软土孔径分类标准,将土壤孔隙直径大小分为4个区间:微孔隙(直径 $<2\ \mu\text{m}$),小孔隙(2~5 μm 之间),中等孔隙(5~20 μm 之间),大孔隙(直径 $>20\ \mu\text{m}$)。

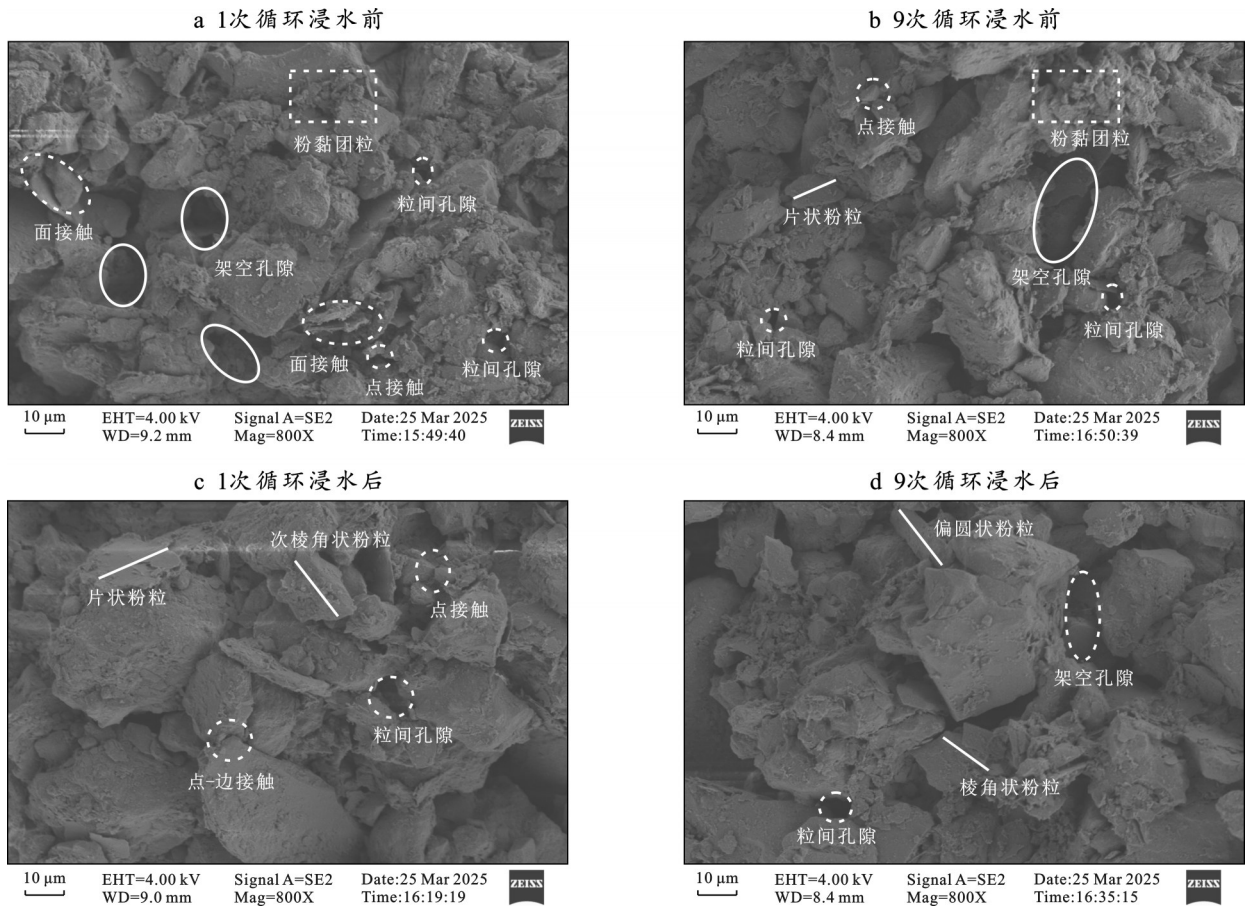


图 4 冻融后黄土微观结构

Fig.4 Microstructure of loess after freeze-thaw

由图 5 可知,在同一含水率不同冻融循环次数条件下,黄土湿陷前后均以小孔隙最为丰富,其次为中孔隙,随着冻融循环次数的增加,黄土中不同孔径类型的孔隙数量占比发生变化。中孔隙数量从冻融循环 1 次湿陷前至冻融循环 9 次湿陷后,降低幅度达 68.3%;大孔隙占比降幅为 25.0%。相反,在经历冻融循环与湿陷作用后,小孔隙数量相对较高,下降幅度为 18.4%。因此,研究区黄土湿陷变形的机理可概括为颗粒间黏粒胶结作用减弱,致使原有架空结构稳定性丧失而发生崩解;随之颗粒重新排列并充填孔隙,细颗粒逐渐进入大孔隙内,导致架空孔隙数量递减,孔隙类型也相应转为以镶嵌孔隙和胶结孔隙为主。

(2) 孔隙方向频率。颗粒或孔隙的长轴与同一平面法线方向的夹角称为方向角,方向频率的定义是在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 的角度区间中,每个 10° 分段内方向角数量的占比^[29]。由图 6 可知,在相同含水率条件下,不同冻融循环次数对研究区黄土的孔隙方向分布与数量产生显著影响。冻融循环 1 次时,湿陷前孔隙主要集中在 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 与 $130^{\circ}\sim 180^{\circ}$,表现出明显的方向性

结构;而湿陷后,孔隙数量整体减少,且在 $0^{\circ}, 90^{\circ}$ 及 180° 减幅最为显著,表明水平方向与垂直方向的孔隙更易在湿陷过程中发生压缩闭合。随着冻融循环次数增加至 9 次,孔隙方向分布趋于均匀,方向性减弱。

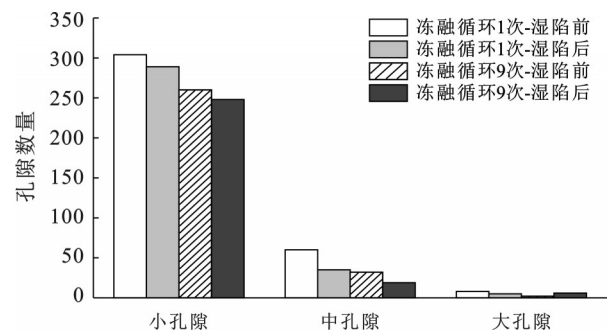


图 5 含水率为 14.2% 时黄土孔隙直径分布
Fig.5 Pore diameter distribution of loess with 14.2% water content

(3) 孔隙丰度。土体孔隙的短轴与长轴的比值即为孔隙丰度,它反映了孔隙形态的几何特征。若孔隙丰度值较小,则孔隙的形状趋于长条形而非圆

形;相反,如果孔隙丰度值较大,则孔隙形态趋向于圆形。

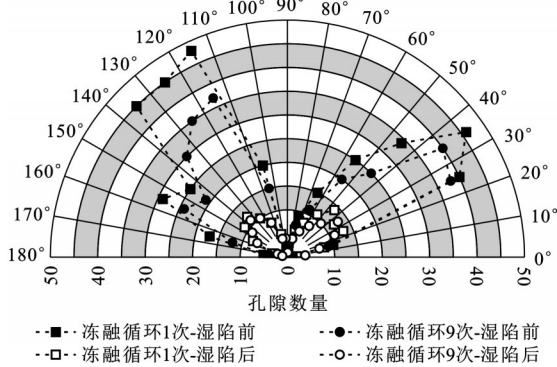


图 6 含水率为 14.2% 时黄土方向频率
Fig.6 Directional frequency of loess with 14.2% water content

图 7 表明,14.2% 含水率条件下,湿陷后孔隙丰度呈现增加趋势,冻融循环 1 次湿陷前后,孔隙丰度增加 28%,冻融循环 9 次湿陷前后,孔隙丰度增加 23%,意味着一部分长条形孔隙可能向圆形状转化,同时也有一小部分孔隙由长条状转为圆形。孔隙丰度增加表明孔隙形状趋向于圆形,形状更加规则。整体拟合曲线呈单调上升趋势,表明随着平均孔隙面积的增加,孔隙的方向丰度亦逐步增强,二者呈显著正相关关系,同时,反映出孔隙分布由无序向有序的方向增强。

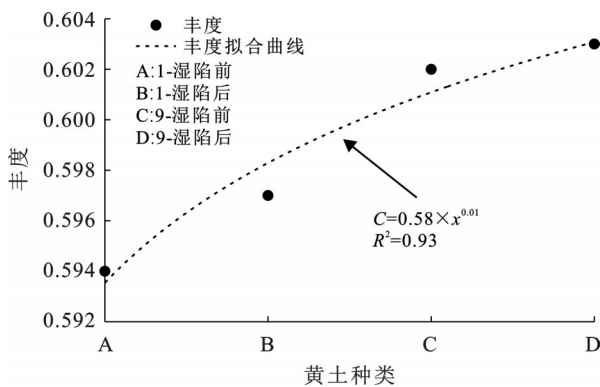


图 7 含水率为 14.2% 时黄土孔隙丰度
Fig.7 Pore abundance of loess with 14.2% water content

(4) 孔隙分形维数。颗粒或孔隙的分形维数能够综合度量孔隙或颗粒边界轮廓的复杂程度,其值越大表明越复杂^[30]。本研究计算了土体中所有孔隙的分形维数,得到了 14.2% 含水率条件下不同冻融循环次数和湿陷前后的平均分形维数值(图 8)。

可以看出,分形维数随着冻融循环次数和湿陷作用的共同作用呈现显著上升趋势。A 点的分形维数最低,表明初始状态下孔隙结构较为简单;B 点相

较 A 点有明显提升,说明 1 次冻融及其后的湿陷使颗粒结构破碎,孔隙分布趋于复杂。继续冻融至 9 次后,C 点的分形维数进一步提高,说明多次冻融循环累积效应强化了孔隙微观扰动与细化趋势;D 点分形维数达到最大值,表明经过反复冻融作用后,土体结构趋于碎化,孔隙形态高度不规则,该趋势表明冻融与湿陷过程在微观上显著改变了孔隙形态及其分布特征。

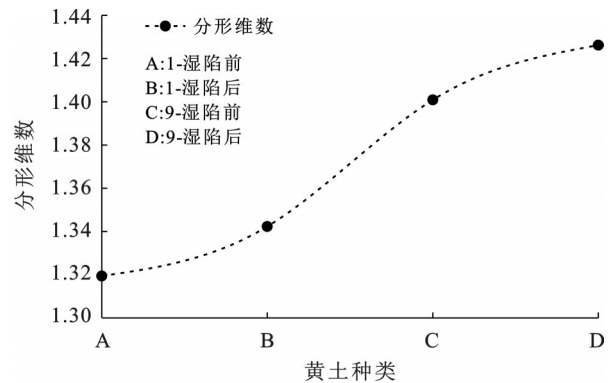


图 8 含水率为 14.2% 时黄土孔隙分形维数
Fig.8 Pore fractal dimension of loess with 14.2% water content

(5) 宏微观参数相关性。研究结果表明,当含水率为 14.2%,冻融循环次数分别为 0,1,9 次时,湿陷系数与分形维数之间存在极强的负相关性(表 6),表明随着冻融循环次数的增加,土体内部颗粒结构趋于复杂化与不规则化,这一微观结构的重塑过程直接导致了宏观湿陷性的显著降低。

表 6 宏微观参数相关性分析
Table 6 Correlation analysis of macroscopic and microscopic parameters

项目	Pearson 相关性分析	
	分形维数	大孔隙占比
湿陷系数	相关系数	-0.998
	p 值	0.005
		0.997
		0.053

湿陷系数与大孔隙占比之间存在极强的正相关性,其 p 值为 0.053,略高于 0.05 的显著性水平,可能是由于样本量有限所致,但也表明了强烈的相关趋势。该结果从定量上支持了经典的湿陷机理,即大孔隙起到了对黄土湿陷变形的主导作用。冻融循环作用通过破坏原有的架空孔隙结构,导致大孔隙数量减少,从而从根本上削弱了土体的湿陷性,使得宏观湿陷系数下降。

上述相关性分析表明,宏微观参数之间存在明确的内在联系,由此构建了冻融循环到微观结构重塑再到宏观湿陷性减弱的完整关联。

2.3.3 黄土微观湿陷机制

(1) 湿陷前微观机理。在含水率为 14.2% 的初始条件下,经过 1 次冻融循环处理的粉质黄土内部具有较多的大孔隙,土体骨架主要由较大的粉黏粒团聚体和颗粒构成。颗粒之间以点-点接触为主,整体结构松散且稳定性较差。此时土粒常呈较大的团粒状或片状,颗粒表面附着的细小碎屑很少,接触界面简单平直。这样的松散结构在遇水时极易发生湿陷变形,即水分渗入后削弱了颗粒间本已有限的胶结作用,导致土体骨架迅速塌陷压缩。与之相比,经过 9 次冻融循环后的粉质黄土微观结构明显趋于密实。反复的冻胀和融化使原本的大孔隙大部分转化为中、小孔隙;原先的大粒径团聚骨架在冻融应力反复挤压下破碎成中、小粒径的颗粒。显微结构中细碎的残片和片状粉粒含量显著增多,这些细小碎屑附着在粗骨架颗粒表面,增大了颗粒表面的粗糙度(图 9a)。多次冻融循环还使颗粒重新排列组合,颗粒间接触方式更多地表现为点接触或点-边接触,孔隙结构明显细化,可压缩的孔隙空间逐渐缩小。宏观上,由于微观结构的这种演变,黄土的湿陷性被显著削弱,随着冻融循环次数的增加,湿陷系数逐渐减小,土体抗湿陷能力提高。

(2) 湿陷后微观机理。在经过湿陷试验后,1 次

冻融循环的样品其微观结构发生了变化。原先团粒状的土骨架在水的冲击和荷载作用下被破坏得更细小,颗粒之间的胶结物质被大量溶蚀或破坏。破坏后的骨架颗粒表面碎屑明显增多,土粒形态上出现片状或次棱角状的粉粒。与湿陷前相比,此时土体结构更为密实紧致,孔隙体积减少,说明湿陷过程使得 1 次冻融后的黄土内部结构受到额外改造,消除了部分残余的大孔隙和不稳定结构。

经历 9 次冻融循环并进行湿陷试验后的样品,其微观结构表现出更强的稳定性和紧密性。湿陷过程使已经重组多次的颗粒进一步挤紧排列,颗粒间的边-边接触数量显著增加,架空孔隙和松散结构几乎被压垮殆尽(图 9b)。一些原本棱角较为锋利的粉粒在反复摩擦中被磨圆,变为偏圆形,从而改善了颗粒的嵌合程度和接触界面。试验后孔隙进一步收缩为细小且分散的形式,尽管仍可见极少量残留的团聚结构或局部架空孔隙,但颗粒进一步重组压缩的空间已非常有限,整体结构趋近稳定。由于多次冻融循环已大幅破坏并重构了土的初始结构,黄土的结构性湿陷特征在反复冻融后几乎消失。宏观上表现为湿陷系数在多次循环作用下趋于稳定,不再出现大的变化,说明土体经过反复冻融与湿陷过程后已达到相对稳定的状态。

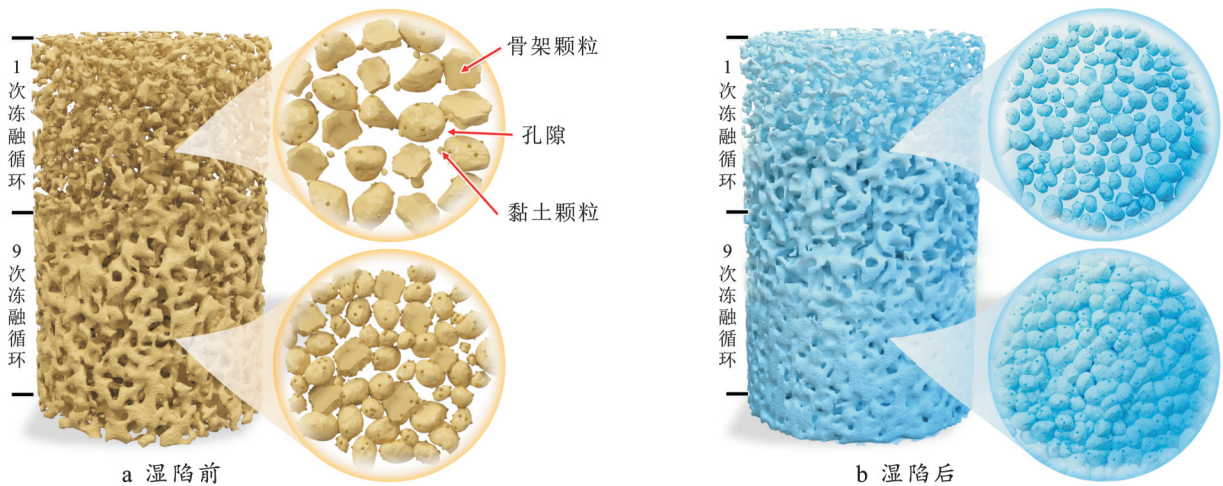


图 9 黄土湿陷前后微观机理

Fig.9 Microscopic mechanisms of loess before and after collapsibility test

3 结论

(1) 冻融循环作用使黄土反复发生冻胀和融沉,随着冻融循环次数的增加,各个区间含水率的黄土孔隙比逐渐降低,土体在荷载作用下结构逐渐紧实。湿陷系数随着垂直荷载的增加,在 300 kPa 的压力下达到峰值。在低含水率的情况下,湿陷系数大

于高含水率黄土,并随着冻融循环次数的增加逐渐减小。

(2) 随着冻融循环次数的增加,黄土的骨架颗粒发生偏转、变形,导致浸水前、后土粒形态大小发生变化,颗粒之间的连接方式由原有的点-点接触逐渐变为边-边接触,颗粒间的架空孔隙逐渐减小;颗粒轮廓从不规则形状逐渐边缘化、圆形化,颗粒从混乱、

无序的分布向具有一定的方向性滑移,孔径的变化规律与定性分析结论一致。

(3) 冻融循环作为一种结构重组作用,通过减少主导湿陷变形的大孔隙空间,并增加结构的几何复杂性,从而驱动土体向更稳定的状态转化,宏观上表现为湿陷性的显著减弱。

(4) 黄土的架空孔隙结构崩塌以及颗粒间的排列方式变化是黄土湿陷变形的本质,为湿陷提供主要空间。随冻融循环次数增加,细碎的残片和片状粉粒含量显著增多,这些细小碎屑附着在粗骨架颗粒表面,增大了颗粒表面的粗糙度,导致了黄土的湿陷变形。

参考文献 (References)

- [1] 彭建兵,林鸿州,王启耀,等.黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J].工程地质学报,2014,22(4):684-691.
Peng Jianbing, Lin Hongzhou, Wang Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2014,22(4):684-691.
- [2] 周昌,黄顺.新疆伊犁黄土工程地质特征及致灾机理研究综述[J].工程地质学报,2023,31(4):1247-1260.
Zhou Chang, Huang Shun. Mechanical properties and disaster-causing mechanism of loess in Ili, Xinjiang, China [J]. Journal of Engineering Geology, 2023,31(4):1247-1260.
- [3] Xu Jian, Li Yanfeng, Ren Chang, et al. Influence of freeze-thaw cycles on microstructure and hydraulic conductivity of saline intact loess [J]. Cold Regions Science and Technology, 2021,181:103183.
- [4] 郑郎,马巍,郝慧.冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法[J].冰川冻土,2015,37(1):132-137.
Zheng Yun, Ma Wei, Bing Hui. Impact of freezing and thawing cycles on the structures of soil and a quantitative approach [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015,37(1):132-137.
- [5] 宁俊,王玉花,张聪敏.初始含水量及冻融循环对黄土微结构的影响[J].科学技术与工程,2018,18(5):285-290.
Ning Jun, Wang Yuhua, Zhang Congmin. Effects of initial water content and freeze-thaw cycles on the microstructure of loess [J]. Science, Technology and Engineering, 2018, 18(5):285-290.
- [6] 肖东辉,冯文杰,张泽.冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律[J].冰川冻土,2014,36(4):907-912.
Xiao Donghui, Feng Wenjie, Zhang Ze. The changing rule of loess' s porosity under freezing-thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4):907-912.
- [7] 李国玉,马巍,穆彦虎,等.季节冻土区压实黄土湿陷特性研究进展与展望[J].冰川冻土,2014,36(4):934-943.
Li Guoyu, Ma Wei, Mu Yanhu, et al. Progress and prospects of the research on collapsibility of compacted loess in seasonally frozen ground regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014,36(4):934-943.
- [8] 林在贯,舒天开.西北黄土湿陷性之初步探讨[J].水文地质工程地质,1958(4):1-7.
Lin Zaiguan, Shu Tiankai. Preliminary discussion on collapsibility of loess in northwest China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1958(4):1-7.
- [9] 郑建国,张苏民.湿陷性黄土在增湿时的强度特性[J].水文地质工程地质,1989,16(2):6-10.
Zheng Jianguo, Zhang Sumin. The strength characteristics of collapsible loess during moistening process [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1989, 16(2):6-10.
- [10] 范文,魏亚妮,于渤,等.黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势[J].水文地质工程地质,2022,49(5):144-156.
Fan Wen, Wei Yani, Yu Bo, et al. Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5):144-156.
- [11] 江美英,李成.浅谈湿陷性黄土的湿陷机理与地基处理[J].科技视界,2017(21):207.
Jiang Meiyang, Li Cheng. Discussion on collapsible mechanism and foundation treatment of collapsible loess [J]. Science & Technology Vision, 2017(21):207.
- [12] 王志良.河南郑州—洛阳地区黄土湿陷机理研究[D].北京:中国地质科学院,2013.
Wang Zhiliang. The study on collapsible mechanism of loess between Zhengzhou with Luoyang of Henan region [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013.
- [13] 苏晓春.浅谈湿陷性黄土湿陷机理及工程处理措施[J].科技信息,2011(23):330.
Su Xiaochun. Discussion on collapsible mechanism of collapsible loess and engineering treatment measures [J]. Science & Technology Information, 2011 (23):330.
- [14] 王延寿.考虑可溶盐对黄土微结构作用效应的湿陷机理研究[D].陕西西安:西北大学,2015.
Wang Yanshou. Study on the collapsible mechanism of loess including soluble salt impacting on microstructures [D]. Xi'an, Shaanxi:Northwest University, 2015.
- [15] 杨鑫.庆阳非饱和黄土湿陷性及其强度变形试验研究[D].甘肃兰州:兰州理工大学,2016.
Yang Xin. The test study on the collapsible and strength

- deformation of unsaturated loess in Qingyang [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [16] 高英,马艳霞,张吾渝,等. 西宁地区黄土增湿变形特性及微观结构分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(4): 803-810.
Gao Ying, Ma Yanxia, Zhang Wuyu, et al. Analysis of humidifying deformation characteristics and microstructure of loess in Xining area [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4): 803-810.
- [17] Liu Zhen, Liu Fengyin, Ma Fuli, et al. Collapsibility, composition, and microstructure of loess in China [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(4): 673-686.
- [18] Li Ping, Xie Wanli, Pak R Y S, et al. Microstructural evolution of loess soils from the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2019, 173: 276-288.
- [19] Li Xian, Li Lincui, Song Yanxun, et al. Characterization of the mechanisms underlying loess collapsibility for land-creation project in Shaanxi Province, China: A study from a micro perspective [J]. Engineering Geology, 2019, 249: 77-88.
- [20] 刘海松,倪万魁,颜斌,等. 黄土结构强度与湿陷性的关系初探[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 722-726.
Liu Haisong, Ni Wankui, Yan Bin, et al. Discussion on relationship between structural strength and collapsibility of loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 722-726.
- [21] 赵鲁庆,杨更社,吴迪,等. 冻融黄土微观结构变化规律及分形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1680-1690.
Zhao Luqing, Yang Gengshe, Wu Di, et al. Micro structure and fractal characteristics loess under freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1680-1690.
- [22] 徐璐,孙永福,刘绍文,等. 基于 GIS 实现湿陷作用对海岸带黄土微结构的影响研究[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(3): 423-434.
Xu Lu, Sun Yongfu, Liu Shaowen, et al. Study on the influence of collapsibility on coastal loess microstructure by GIS [J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(3): 423-434.
- [23] 陈果,张晨招. 基于孔隙特征的黄土微观结构分析[J]. 地下水, 2013, 35(3): 228-229.
Chen Guo, Zhang Chenzhao. Microstructure analysis of loess based on pore characteristics [J]. Ground Water, 2013, 35(3): 228-229.
- [24] 贺波,唐小东,陈峰,等. 冻融作用下改性软黏土微观孔隙结构及分形特征研究[J]. 公路工程, 2024, 49(3): 153-161.
He Bo, Tang Xiaodong, Chen Feng, et al. Study on micro-pore structure and fractal characteristics of modified soft clay under freezing-thawing cycle [J]. Highway Engineering, 2024, 49(3): 153-161.
- [25] 陈鑫,张泽,李东庆. 基于不同分形模型的冻融黄土孔隙特征研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1238-1248.
Chen Xin, Zhang Ze, Li Dongqing. Study on the pore features of freezing-thawing loess based on different fractal models [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1238-1248.
- [26] 刘健鹏,王运敏,李小双,等. 冻融作用下黏性土裂隙演化规律及分形特征研究[J/OL]. (2025-04-09). 工程地质学报, 2025: 1-11. <https://link.cnki.net/doi/10.13544/j.cnki.jeg.2025-0031>.
Liu Jianpeng, Wang Yunmin, Li Xiaoshuang, et al. Crack evolution and fractal characteristics of clayey soils under freeze-thaw effect [J/OL]. (2025-04-09). Journal of Engineering Geology, 2025: 1-11. <https://link.cnki.net/doi/10.13544/j.cnki.jeg.2025-0031>.
- [27] 刘东,何禹衡,张亮亮,等. 不同条件下冻融循环过程对土壤结构的影响研究[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(7): 58-72.
Liu Dong, He Yuheng, Zhang Liangliang, et al. Study on influence of freeze-thaw cycle process on soil structure under different conditions [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(7): 58-72.
- [28] Li Yetong, Yang Gengshe, Ye Wanjun, et al. 2023. Deterioration law and microscopic mechanism of hydraulic characteristics of undisturbed loess in Ili under freeze-thaw action [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(4): 1261-1268.
- [29] Duan Zhao, Li Zhenyan, Wu Yanbin, et al. Mechanical and microscopic properties of soil according to the rate of increase in pore water pressure [J]. Soil and Tillage Research, 2023, 225: 105530.
- [30] 鲁拓,唐亚明,李喜安,等. 马兰黄土孔隙分形特征与渗透性关系[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 8138-8144.
Lu Tuo, Tang Yaming, Li Xi'an, et al. Relationship between fractal characteristics of porosity and permeability of Malan Loess [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 8138-8144.