



引文格式: 凌松耀, 蹇永明, 秦川, 等. 冻融作用下硫酸盐渍土土水特性及微观机理研究[J]. 西北地质, 2026, 59(2): 83–90. DOI: 10.12401/j.nwg.2025114

Citation: LING Songyao, JIAN Yongming, QIN Chuan, et al. Study on Soil-Water Characteristics and Micro-Mechanism of Sulfate Saline Soil under Freeze-Thaw Action[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 83–90. DOI: 10.12401/j.nwg.2025114

冻融作用下硫酸盐渍土土水特性及微观机理研究

凌松耀¹, 蹇永明², 秦川³, 吴倩^{3,*}, 张轰¹, 曹胜杰¹, 王位¹

(1. 中交二公局第六工程有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 新疆交通建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830049;
3. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为研究硫酸盐盐渍土在冻融作用下的土水特性及微观机理, 测试了不同含盐量下盐渍土的土水特征曲线, 用 Gardner 模型、van-Genuchten 模型和 Fredlund-Xing 模型进行拟合, 并分析冻融作用下硫酸盐渍土的微观结构及孔隙分布特征。研究表明: 硫酸盐渍土体积含水率均随基质吸力的增加而减小, 其曲线均呈单峰反“S”型, 相同体积含水率下, 含盐量越高基质吸力越大; 冻融循环作用可促进土体的微观结构崩解, 导致大孔隙体积及孔隙率增加, 冻融循环后土样基质吸力和体积含水率降低, 土水特征曲线随冻融循环次数增加整体向左偏移。G 模型、V-G 模型和 F-X 模型与盐渍土试验结果对比显示, F-X 模型拟合相关系数较低, V-G 模型在高吸力和低吸力阶段的拟合度较差, G 模型整体拟合效果良好。冻融作用下, 土样微观结构发生变异是引起土样持水特性降低的关键因素, 在冻融和盐分作用下试样中孔隙和裂隙逐渐发育对水分平衡迁移起到促进作用。

关键词: 冻融循环; 盐渍土; 滤纸法; 微观结构; 土水特性

中图分类号: P642.3; TU416.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)02-0083-08

Study on Soil-Water Characteristics and Micro-Mechanism of Sulfate Saline Soil under Freeze-Thaw Action

LING Songyao¹, JIAN Yongming², QIN Chuan³, WU Qian^{3,*}, ZHANG Hong¹, CAO Shengjie¹, WANG Wei¹

(1. CCCC Second Public Bureau Sixth Engineering Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. Xinjiang Transportation Construction Administration, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the soil-water characteristics and micro-mechanism of sulfate saline soil under freeze-thaw-salt coupling, the soil-water characteristic curves of saline soil with different salt content were tested and fitted with Gardner model, van-Genuchten model, and Fredlund-Xing model, and the microstructure and pore distribution characteristics of sulfate saline soil under freeze-thaw-salt coupling were analyzed. The results

收稿日期: 2025-04-17; 修回日期: 2025-08-29; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中交第二公路工程局有限公司重点科技项目(2020X-1-20), 陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JM-180)联合资助。

作者简介: 凌松耀(1980-), 男, 高级工程师, 研究方向为土木工程技术。E-mail: 38446939@qq.com。

* 通讯作者: 吴倩(2000-), 女, 博士, 研究方向为盐渍土灾变机理。E-mail: wuqian6038@163.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

indicate that the volumetric water content of sulfate-salted soil decreases as matrix suction increases, with the resulting curves exhibiting a single-peak inverse 'S' shape. Notably, for a given volumetric water content, higher salt concentrations correspond to increased matrix suction. Freeze-thaw cycles promote the microstructural disintegration of the soil, leading to an increase in large pore volume and overall porosity. Following these cycles, both the matrix suction and volumetric water content of the soil samples decreased, causing the soil-water characteristic curve to shift leftward with an increasing number of freeze-thaw cycles. To evaluate the test results of saline soil, the G model, V-G model, and F-X model were employed. The F-X model exhibited a low fitting correlation coefficient, while the V-G model demonstrated poor fitting in both high and low suction phases. In contrast, the G model provided an overall good fitting performance. The microstructural changes in soil samples resulting from freeze-thaw actions are critical factors contributing to the reduction of the soil's water-holding capacity. The progressive development of pores and fissures in the samples, influenced by freezing, thawing, and salinity, facilitates the migration of water equilibrium.

Keywords: freeze-thaw cycle; saline soil; filter paper method; microstructure; soil-water characteristics

非饱和土是由固相、液相和气相三相组成的土体,广泛分布于干旱、半干旱地区及地下水位以上区域,是自然界中土体的主要存在形式。近年来,非饱和土的研究逐渐深入,涵盖强度特性、渗流行为及土水特征曲线等多个方面。其中,土水特征曲线(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)是描述非饱和土中基质吸力随体积含水率变化关系的重要指标,是揭示其水力行为的基础性参数,在理论研究与工程应用中均具有不可替代的地位。

在土样脱湿过程中,土水特征曲线一般可划分为边界效应段、过渡段和残余阶段 3 个区域(宋达等, 2019)。已有研究表明,土体含盐量对基质吸力具有显著影响,随着含盐率的增加,基质吸力显著上升(张爱军等, 2019)。此外,重塑土的孔隙结构对其持水特性同样具有重要影响。孔隙比的增大有利于试样排水,体积含水率下降速率加快,进而使基质吸力增强(张玉伟等, 2019),而干密度的提高使颗粒排列更加紧密,孔隙连通性降低,也导致基质吸力增大(贾宝新等, 2020)。通过扫描电镜(SEM)及土水特性试验可观察到,在高含水率和低干密度条件下,土体内部易形成架空结构,饱和含水率和失水速率相应增加(蔡国庆等, 2020)。

研究表明,盐分类型和含量均会对土体吸力产生显著影响。硫酸钠对土体基质吸力、渗透吸力和总吸力均有一定影响,尤其在低含水率条件下,盐分对基质吸力的影响更为显著,而在高含水率条件下,则主要通过改变渗透吸力进而影响总吸力(毛雪松等,

2019; 张宏等, 2020)。对于氯盐渍土,含盐率的增加对基质吸力的影响相对较小,但在高含水率区间对总吸力的影响较大(张悦等, 2019)。但氯盐渍土中总吸力与基质吸力之间的差值会随着盐溶液浓度的升高而增加,该差值显著大于相同浓度纯盐溶液的理论渗透吸力(孙德安等, 2013),表明土体结构对盐分效应具有放大作用。

冻融循环对土体基质吸力的影响同样不可忽视。在冻融作用下,由于孔隙水反复发生结晶与融化,试样的有效孔隙半径逐渐增大,SWCC 整体向左下方偏移(王也等, 2019),土体饱和度呈下降趋势,减湿速率先升高后降低(崔宏环等, 2020)。随着冻融次数的增加,土体基质吸力逐渐降低,首次冻融对吸力的削弱作用最为显著(王雪冬等, 2019)。微观层面上,冻融过程中水分在颗粒间结冰膨胀,导致试样表面和内部形成微裂隙,结构发生破坏,增强了土体的分散性(师智勇等, 2023)。对比冻融前后的试样可发现,冰水相变与水分迁移削弱了颗粒间的胶结作用,黄土孔隙率明显增大(张小辉等, 2024),颗粒形态及接触方式亦发生改变,整体结构趋于松散。在冻融过程中形成的“冷生组织”对颗粒骨架产生挤压,孔隙和裂缝数量显著增加,结构整体遭受弱化(穆彦虎等, 2011),表明冻融作用会削弱颗粒间胶结力,改变颗粒形态与排列方式,最终形成新的结构体系(赵鲁庆等, 2019),这也是季冻区黄土路基运营期出现病害的重要诱因。

通过以上文献梳理发现,目前对盐渍土的土水特性的研究主要考虑了氯盐渍土在不同含盐量下基质

吸力的变化,而对硫酸钠盐渍土持水特性的研究较少,对冻融作用的研究也鲜有报道,为此笔者以硫酸钠盐渍土为研究对象,研究冻融作用下硫酸钠盐渍土持水特性的变化规律,并结合扫描电镜试验研究微观结构演化机制,旨在为非饱和状态下硫酸盐渍土的工程特性分析提供理论支持和试验依据。

1 试验材料与试验方案

1.1 工程背景

土样取自新疆伊犁地区 G578 项目,项目起始于新疆伊犁州伊宁县墩麻扎镇,终点止于尼勒克县科浩特尔乡。线路沿线穿越了河谷区、河流冲积平原、山前冲洪积平原和低山丘陵区 4 个地貌单元,地势起伏较大,地表水系主要由天山融雪水和降雨补给。该地区属于季节性冻土区,夏季炎热干旱,月平均气温为 20.6℃;冬季寒冷干燥,月平均气温为-19.4℃,年降雨量远小于年蒸发量,在该特殊气候环境下,土体内部自由水携带无机盐离子向上迁移,地下水携带盐分向上迁移,导致地表次生盐渍化现象严重(图 1)。

伊犁盐渍土的含盐量平均值为 4.48 g/kg,最大易溶盐含量可达 19.2 g/kg,天然含水率约为 8.7%。该地区盐渍土具有天然干密度小、含盐量高的特点,颗粒之间的接触形式以点接触和架空结构为主,孔隙结构较大,具有明显的融陷和盐胀特性。土体在周期性冻融作用下,造成盐渍土持水特性不断劣化。



图1 地表次生盐渍化

Fig. 1 Secondary salinisation of the surface

1.2 试验材料

试样取土深度距离地表 0~2 m,根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)测得土样基本物理力学指标(表 1)。由筛分试验得出土体粒径分布特征: < 0.030 mm(30.15%)、0.030~0.075 mm(30.51%)、0.075~0.25 mm(33.10%)、0.25~0.5 mm(3.8%)、0.5~1 mm(1.72%)、1~2 mm(1.50%)、>2 mm(1.26%)。粒径大多小于 0.075 mm,属于级配不良土。

通过易溶盐试验,测定土样总含盐量及离子含量。按照 1:5 的土水比例配置土壤溶液,在振荡机上振荡 3 min,用真空泵抽滤制取澄清的浸出液,移液管取定量浸出液到瓷蒸发皿中,恒温水浴蒸干至恒重测出总易溶盐含量; CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 含量由甲基橙、酚酞双指示剂测定, Cl^- 含量由硝酸银滴定, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 依据 EDTA 法测定,利用火焰光度计中标准吸收曲线测定 Na^+ 和 K^+ 含量,离子测试结果(表 2)。易溶盐以硫酸钠为主,试样初始含盐量达到 0.67%,属于硫酸钠-中盐渍土。

表 1 土样基本物理指标

Tab. 1 Basic physical indexes of soil samples

天然含水率(%)	最优含水率(%)	最大干密度(g/cm^3)	液限(%)	塑限(%)	塑性指数	初始含盐量(%)
5.4~6.5	14	1.8	27.2	15.3	11.9	0.67

表 2 土体易溶盐成分

Tab. 2 Soil soluble salt composition

离子种类	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
离子含量(%)	0	0.004 5	0.010 8	0.444 16	0.02	0.006 1	0.185 9	0

1.3 试验方案

土水特征曲线的测定方法主要有滤纸法、压力板仪法、张力计法和露点水势仪等。笔者采用滤纸法测定硫酸盐渍土的土水特征曲线(图 2)。滤纸法测定土

水特征曲线所需要的试验仪器:环刀制样器、环刀、whatman 滤纸、普通滤纸、烘箱、万分秤、铝箔纸、电工胶带、保鲜膜和密封盒等。采用静压法制作 20 mm×61.8 mm 的环刀试样。

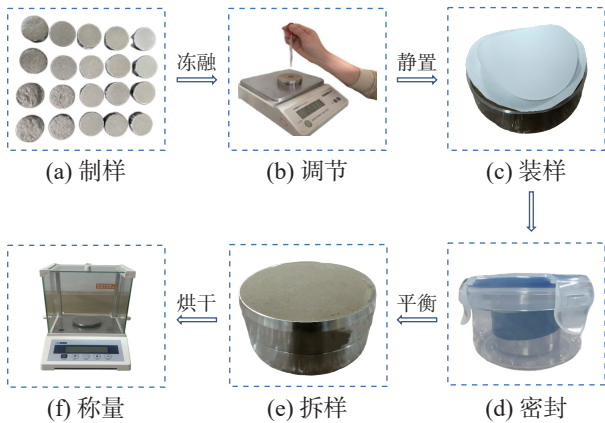


图2 土水特征曲线试验流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of soil-water characteristic curve test process

结合工程修筑的实际情况,制样时采用重塑土。试样的含水率控制为最优含水率 14%,干密度为 1.8 g/cm^3 ,设置 0.67% 和 1.67% 两个硫酸钠含盐量。冻融循环次数为 0、3、6 次,冻融方案采用封闭式冻融, -20°C 下冻结 12 h, 20°C 下融化 12 h,完成一次冻融循环。试样完成冻融循环试验后,对其含水率进行调节,低含水率的采用自然风干,高含水率的试样采用胶头滴管沿着试样表面缓慢滴加,设置含水率梯度为: 1%、3%、5%、7%、9%、11%、14%、18%、22% 和 26%,等试样达到目标含水率后用保鲜膜包裹好,在恒温恒湿箱中静止 24 h 以上,使得含水率在试样内部均匀分布。装样时,取两个相同含水率的试样上下叠放,在环刀试样中间依次放入普通滤纸、whatman 滤纸和普通滤纸,用电工胶布将上下环刀对接处封闭起来,并用保鲜膜包裹防止水分散失,再用铝箔纸将试样包裹,使其处于密闭环境,最后将试样放在密闭盒中,避光存放 15 天以上等待平衡。达到平衡时间后,取出中间的 whatman 滤纸将其烘干,计算滤纸的质量含水率,将含水率代入公式(1)计算其基质吸力。

$$\begin{cases} \lg s = -0.067 3w_f + 4.945, & w_f \leq 47\% \\ \lg s = -0.022 9w_f + 2.909, & w_f > 47\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 表示土样的基质吸力,单位为 kPa ; w_f 表示滤纸的质量含水率,单位为 %。

试验结束后,取 14% 含水率下不同冻融循环次数和不同含盐量的试样进行扫描电镜(SEM)试验,研究试样微观结构的变化特征。

2 试验结果分析

2.1 模型拟合

为了便于对试验结果进行分析,采用 Gardner 模型、van-Genuchten 模型以及 Fredlund-Xing 模型进行数据拟合分析,模型表达式分别为公式(2)~公式(4)。

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + a_1 \psi^{b_1}} + \theta_r \quad (2)$$

式中: θ 为土样体积含水率; θ_s 为土样饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; ψ 为基质吸力; a_1 是与进气值有关的参数(kPa); b_1 是与土样脱水速率有关的参数。

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a_1 \psi)^{b_1}]^{c_1}} + \theta_r \quad (3)$$

式中: θ 为土样体积含水率; θ_s 为土样饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; ψ 为基质吸力; a_1 是与土的进气状态有关的参数; b_1 是与土的孔隙分布有关的参数; c_1 是与土体特征曲线的对称性有关。

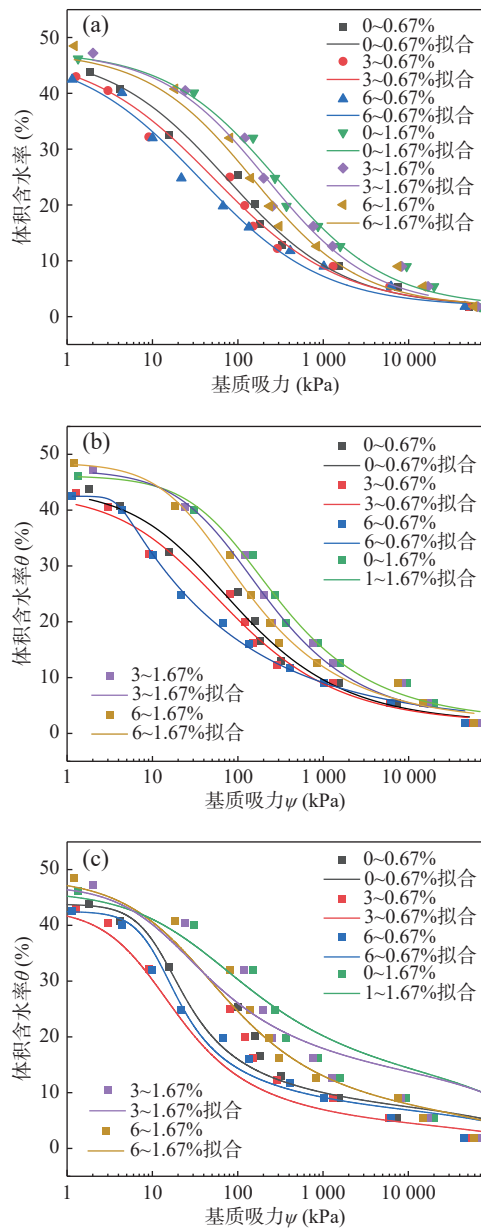
$$\theta = \frac{\theta_s C(\psi)}{\{\ln[e + (\psi/a_1)^{b_1}]\}^{c_1}} \quad (4)$$

式中: θ 为土样体积含水率; θ_s 为土样饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; ψ 为基质吸力; a_1 是与土的进气状态有关的参数; b_1 是与土的孔隙分布有关的参数; c_1 是与特征曲线的斜率变化有关, c_1 越小曲线在高吸力范围越陡。

对于干密度为 1.8 g/cm^3 的硫酸盐渍土试样按照 Gardner、van-Genuchten 以及 Fredlund-Xing 模型的拟合结果(图 3,表 3~表 5)。对比拟合结果发现, Fredlund-Xing 模型的相关系数偏低,拟合效果不理想, Gardner 模型和 van-Genuchten 模型的拟合效果均较高,相关系数均大于 0.95 以上,但 V-G 模型在高吸力和低吸力阶段的拟合度较差。因此,文中后续选用 Gardner 模型研究冻融作用下硫酸盐渍土的持水特性。

2.2 含盐量对土样持水特性的影响

通过 Gardner 模型分别拟合得到 0.67% 和 1.67% 含盐量下的土水特征曲线(图 4)。基质吸力随体积含水率的变化规律曲线呈现反“S”型,基质吸力随着体积含水率的增大不断减小,且相同体积含水率下,含盐量越高基质吸力越大,即硫酸钠的含量会改变盐渍土的持水特性。从曲线形态可知,基质吸力的变化



a. Gardner 模型拟合曲线; b. van-Genuchten 模型拟合曲线;
c. Fredlund-Xing 模型拟合曲线

图3 模型拟合曲线

Fig. 3 Model fitting curve

随着试样含水率的增加逐渐降低,基质吸力的衰减率先降低后趋于稳定,在曲线前半段急剧降低,而后半段逐渐趋于平稳。大量研究表明,非饱和土的基质吸力与孔隙水毛细作用、表面吸附和孔隙水溶液浓度有关。常温下(25℃)硫酸钠在水中的溶解度为 28 g/100 g。通过计算发现含水率为 14%,含盐量为 0.67% 时,土中的 1 g 硫酸钠可以完全溶解于 14.93 g 水中,而当含水率为 5%,含盐量为 1.67% 时,土中 3.32 g 盐不能完全溶解于 7.46 g 水中。因此在试验过程中,随着含水率的降低,含盐量的增加,试样中会有盐分析出,从而对基质吸力产生较大的影响。硫酸钠恰好完全溶解于足量的孔隙水,此时孔隙水浓度最高,试样的渗透吸力最大,但此时不会改变试样的孔隙结构,而随着含盐量的提高和含水率的降低,孔隙中的硫酸钠溶液达到饱和状态,会伴随有部分硫酸钠晶体析出充斥在试样的孔隙中,起到改变孔隙结构和减小孔隙尺寸的作用,试样中毛细水难以发生迁移,从而导致基质吸力增大。

2.3 冻融循环对土样持水特性的影响

通过 Gardner 模型拟合 0.67% 和 1.67% 盐渍土土水特征曲线(图 5)。冻融循环对盐渍土持水特性的影响较为明显,相同含盐量下的试样随着冻融次数的增加,试样基质吸力逐渐减小,减湿速率逐渐增大。0.67% 和 1.67% 含盐量下,试样的饱和含水率和残余含水率均随冻融循环次数的增大而逐渐降低。其原因是,冻结时孔隙水结冰,孔隙溶液中的硫酸钠以晶体形式析出,填充于孔隙内,改变了土体的孔隙结构和大小;融化时冰晶和硫酸钠晶体溶解,溶液重新充满孔隙。反复冻融作用下,冻胀和盐胀使土体孔隙率增加,基质吸力减小。同时,土样中大颗粒破碎为小颗粒,水分迁移时携带小颗粒填充孔隙,形成更密实的结构,导致试样饱和含水率降低。

表 3 Gardner 模型拟合参数

Tab. 3 Gardner model fitting parameters

模型名称	含盐量 T (%)	冻融循环次数 N (n)	饱和和体积含水率 θ_s (%)	残余体积含水率 θ_r (%)	拟合参数			相关系数 R^2
					a_1	b_1	c_1	
Gardner	0.67	0	43.8	1.80	0.071	0.617	—	0.98
		3	43.0	1.75	0.098	0.586	—	0.97
		6	42.5	1.78	0.109	0.615	—	0.97
	1.67	0	46.2	2.15	0.022	0.670	—	0.98
		3	47.2	2.01	0.021	0.712	—	0.97
		6	48.5	1.95	0.026	0.727	—	0.98

表 4 van-Genuchten 模型拟合参数

Tab. 4 Parameters of van-Genuchten model fit

模型名称	含盐量 T (%)	冻融循环次数 N (n)	饱和体积含水率 θ_s (%)	残余体积含水率 θ_r (%)	拟合参数			相关系数
					a_1	b_1	c_1	R^2
van-Genuchte	0.67	0	43.8	1.80	0.028	0.841	0.590	0.98
		3	43.0	1.75	0.033	0.786	0.622	0.97
		6	42.5	1.78	0.258	5.609	0.055	0.97
	1.67	0	46.2	2.15	0.012	1.089	0.442	0.98
		3	47.2	2.01	0.014	1.039	0.500	0.96
		6	48.5	1.95	0.032	1.203	0.369	0.98

表 5 Fredlund-Xing 模型拟合参数

Tab. 5 Fredlund-Xing model fitting parameters

模型名称	含盐量 T (%)	冻融循环次数 N (n)	饱和体积含水率 θ_s (%)	残余体积含水率 θ_r (%)	拟合参数			相关系数
					a_1	b_1	c_1	R^2
Fredlund-Xing	0.67	0	43.8	—	10.807	2.044	-0.662	0.85
		3	43.0	—	7.678	1.199	1.030	0.90
		6	42.5	—	9.951	2.290	-0.650	0.92
	1.67	0	46.2	—	22.15	0.800	0.715	0.88
		3	47.2	—	10.140	1.084	0.60	0.90
		6	48.5	—	20.554	0.856	1.068	0.96

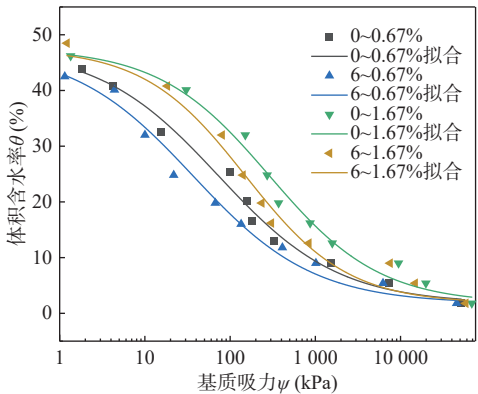


图4 不同含盐量下硫酸盐渍土土水特征曲线

Fig. 4 Characteristic curves of soil water in sulfate saline soil under different salt content

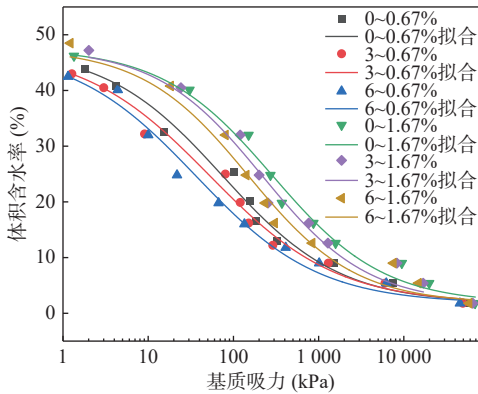


图5 冻融作用下硫酸盐渍土土水特征曲线

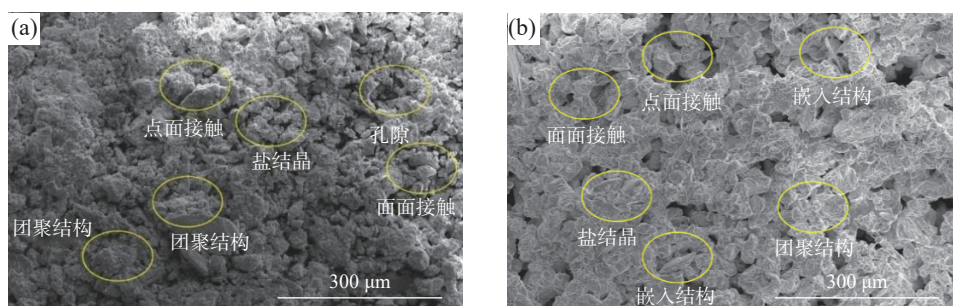
Fig. 5 Curve of soil water characteristics of sulfate saline soil under freeze-thaw action

3 冻融作用对土样微观结构的影响

为揭示冻融作用对盐渍土持水特性的微观结构影响,选取 14% 含水率试样进行扫描电镜试验(图 6、图 7)。未冻融时土样结构较为密实,孔隙较小,土颗粒之间多以团聚结构、点面接触和面面接触的形式存在。冻融次数增加至 6 次,颗粒之间出现破碎结构和架空结构土样中贯通裂隙数量增多,孔隙进一步发育,土体整体结构极为松散呈蜂窝状。分析其原因,土颗粒骨架在反复冻融拉压应力作用下逐渐破碎,孔隙结

构发育,大小孔隙逐渐贯通形成裂隙,为土样水分平衡迁移提供了通道,促进水分迁移,土样的持水特性发生劣化,土水特征曲线表现出向左下方移动。

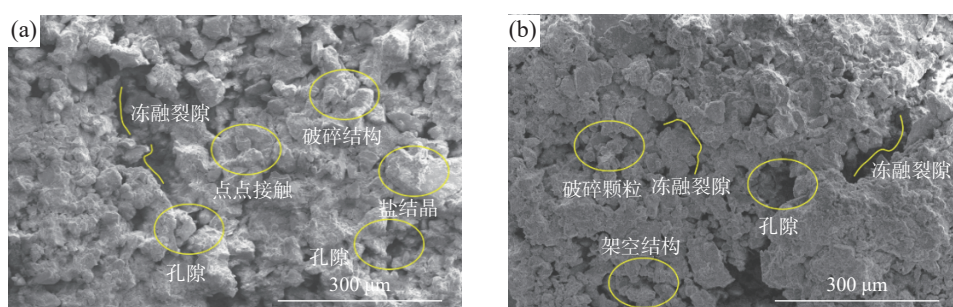
5 000 倍下含盐量 1.67% 试样冻融前后盐分形态变化图(图 8)显示,未冻融试样盐分颗粒形态较为平坦和规则,整体表面较为光滑,含有较少的尖锐边缘和突起,盐分与土颗粒紧密接触;而冻融循环导致硫酸钠晶体反复析出和结晶,盐分结晶形态的变化为明显的针状结构,形成了较多的微孔和宏孔,孔隙的分布较为复杂,因冻融作用导致的结构损伤和盐分重分布,水分更容易流失,土体的水分保持能力降低,基质



a. 0.67% 含盐量; b. 1.67% 含盐量

图6 0次冻融下硫酸盐渍土微观结构变化

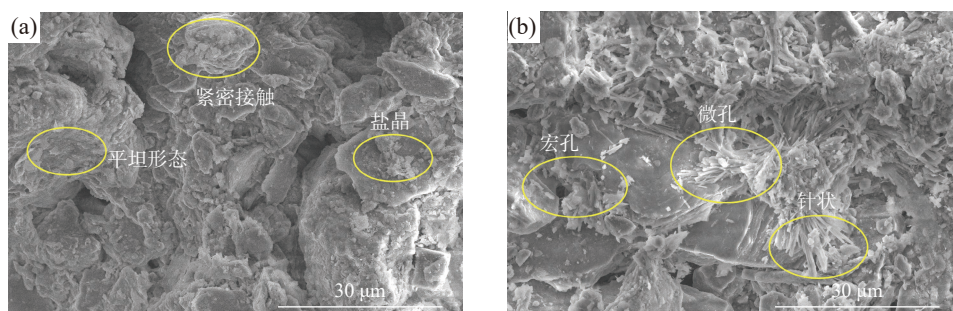
Fig. 6 Microstructural changes of sulfate salted soil under 0 freeze-thaw cycles



a. 0.67% 含盐量; b. 1.67% 含盐量

图7 6次冻融下硫酸盐渍土微观结构变化

Fig. 7 Microstructural changes of sulfate-salted soil under 6 freeze-thaw cycles



a. 0次冻融; b. 6次冻融

图8 1.67% 含盐量试样冻融前后盐分形态

Fig. 8 Salt morphology before and after freeze-thaw action

吸力也随之下降。

4 结论

(1) 盐渍土试验拟合对比结果显示, G模型和 V-G模型的拟合效果均较高, 但 V-G模型在高吸力和低吸力阶段的拟合度较差, G模型整体拟合效果良好。

(2) 基质吸力随体积含水率的变化规律曲线呈现反“S”型, 相同体积含水率下, 含盐量越高基质吸力越大, 总体上含盐量小的试样曲线始终处于含盐量大

的试样曲线下方。

(3) 冻融循环对硫酸钠盐渍土持水特性的影响较为明显, 相同含盐量下的试样随着冻融次数的增加, 试样基质吸力逐渐减小, 减湿速率逐渐增大, 冻融循环次数增加导致其土水特征曲线整体向左偏移。

(4) 冻融作用下土体微观结构的变异是引起土样持水特性降低的重要因素, 随着含盐量提高试样持水特性提高, 随着冻融循环次数的增加试样持水特性降低。在冻融作用下, 土样颗粒之间接触形式发生改变, 使得微、小孔隙贯通, 大孔隙发育、延伸, 将原本较紧

密盐渍土结构分割, 土体微观结构破碎, 进而改变土水特征曲线。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 蔡国庆, 韩博文, 杨雨, 等. 砂质黄土土-水特征曲线的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S1): 11-15.
- CAI Guoqing, HAN Bowen, YANG Yu, et al. Experimental study on soil-water characteristic curves of sandy loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S1): 11-15.
- 崔宏环, 秦晓鹏, 王文涛, 等. 冻融循环对非饱和粉质粘土 SW-CC 及强度的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1722-1728+1745.
- CUI Honghuan, QIN Xiaopeng, WANG Wentao, et al. Effect of Freeze-thaw Cycle on SWCC and Strength of Unsaturated Silty Clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1722-1728+1745.
- 贾宝新, 李志永, 陈扬, 等. 非饱和黏性粉土的土水特征曲线试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 396-402.
- JIA Baoxin, LI Zhiyong, CHEN Yang, et al. Experimental study on soil-water characteristic curve of unsaturated clayey soil[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2020, 39(5): 396-402.
- 毛雪松, 张腾达, 刘飞飞, 等. 基于土水特征曲线硫酸盐渍土渗透吸力试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(1): 27-31.
- MAO Xuesong, ZHANG Tengda, LIU Feifei, et al. Experimental study of osmotic suction of sulphate saline soil based on soil-water characteristic curve[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2019, 51(1): 27-31.
- 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 Yanhu, MA Wei, LI Guoyu, 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.
- 师智勇, 陈慧娥, 苑晓青, 等. 冻融循环对土体分散性的影响及微观机理分析[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 51-59.
- SHI Zhiyong, CHEN Huie, YUAN Xiaoqing, et al. Effect of freezing-thawing cycle on soil dispersion and analysis of microscopic mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 51-59.
- 宋达, 岳建伟, 徐安全, 等. 黄泛区非饱和砂质粉土的土-水特征曲线试验研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(1): 159-164, 260.
- SONG Da, YUE Jianwei, XU Anquan, et al. Experimental study on the soil-water characteristic curve of unsaturated sandy silt in the yellow river flood area[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(1): 159-164, 260.
- 孙德安, 张谨绎, 宋国森. 氯盐渍土土-水特征曲线的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 955-960.
- SUN Dean, ZHANG Jinyi, SONG Guoseng. Experimental study of soil-water characteristic curve of chlorine saline soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 955-960.
- 王雪冬, 李世宇, 孙延峰, 等. 冻融循环作用对露天矿排土场土料土水特征的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 138-143.
- WANG Xuedong, LI Shiyu, SUN Yanfeng, et al. Influence of the freezing-thawing cycles on soil-water characteristics of soil in open-pit mine dumping sites[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5): 138-143.
- 王也, 王建磊, 鲁洋, 等. 南阳膨胀土冻融循环后的土水特征试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 91-96.
- WANG Ye, WANG Jianlei, LU Yang, et al. Experimental Research on Soil-Water Characteristics of Nanyang Expansive Soil Subjected to Freeze-Thaw Cycles[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(2): 91-96.
- 张爱军, 王毓国, 邢义川, 等. 伊犁黄土总吸力和基质吸力土水特征曲线拟合模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1040-1049.
- ZHANG Aijun, WANG Yuguo, XING Yichuan, et al. Fitting models for soil-water characteristic curve of total and matrix suctions of Yili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1040-1049.
- 张宏, 刘海洋. 含硫酸钠风积沙路基土土-水特征曲线试验研究与模型修正[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 85-93.
- ZHANG Hong, LIU Haiyang. Experimental Study and Model Correction of Soil-water Characteristic Curve of Aeolian Sand Subgrade Containing Sodium Sulfate[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 85-93.
- 张小辉, 乔斯嘉, 张登飞, 等. 冻融循环对原状黄土的持水特性影响[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2024, 54(1): 11-17.
- ZHANG Xiaohui, QIAO Sijia, ZHANG Dengfei, et al. Water retention behaviours of intact loess exposed to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2024, 54(1): 11-17.
- 张玉伟, 宋战平, 翁效林. Q3 原状黄土与重塑黄土的土水特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 224-229.
- ZHANG Yuwei, SONG Zhanping, WENG Xiaolin. Study on soil water characteristic curve of Q3 intact and remolded loess[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(3): 224-229.
- 张悦, 叶为民, 王琼, 等. 含盐遗址重塑土的吸力测定及土水特征曲线拟合[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1661-1669.
- ZHANG Yue, YE Weimin, WANG Qiong, et al. Suction measurement and SWRC modelling for reconstituted salt-laden soils in earthen heritages[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1661-1669.
- 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.