



# 冻融与水盐耦合作用下土遗址浅表层劣化特征

齐博嘉<sup>1</sup>, 张景科<sup>1,2,3</sup>, 崔庆飞<sup>1</sup>, 赵欣儿<sup>1</sup>, 李威昊<sup>1</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 王彦武<sup>4</sup>

1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 兰州大学 环境考古与文物科学中心, 甘肃 兰州 730000;

4. 敦煌研究院 国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心, 甘肃 敦煌 736200

**摘要** 中国西北高寒地区保存大量土遗址, 在冻融与水盐耦合作用下, 土遗址浅表层经历多次冻融循环, 诱发多种病害。为探究冻融与水盐耦合作用下土遗址浅表层病害发育特征, 开展室内冻融模拟试验, 基于重塑试样的外观形貌、表面温度场、声波波速、表面硬度、微观结构和颗粒粒径6个指标, 揭示冻融-水盐运移耦合作用下土遗址浅表层的劣化特征。试验发现, 在冻融过程中易溶盐向试样中部迁移并结晶, 从而诱发酥碱破坏, 形成水平向劣化层。盐含量与冻融损伤呈正相关, 且 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 含量越高, 冻融损伤越严重, 冻融循环作用显著降低声波波速和表面硬度, 破坏颗粒团聚体结构, 但土体粒径级配特征保持稳定。冻融-水盐耦合作用引发盐分积聚和结晶, 破坏土体颗粒胶结状态, 导致土体结构疏松是土遗址浅表层劣化的主要因素, 相关成果可为土遗址浅表层病害防治提供参考。

**关键词** 土遗址; 浅表层; 冻融; 水盐运移; 劣化特征

中图分类号: TU448 DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbr.2026-02-002

## The deterioration characteristics of the shallow surface layer of earthen heritage sites under freeze-thaw and water-salt coupling effects

QI Bojia<sup>1</sup>, ZHANG Jingke<sup>1,2,3</sup>, CUI Qingfei<sup>1</sup>, ZHAO Xin'er<sup>1</sup>,  
LI Weihao<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, WANG Yanwu<sup>4</sup>

1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. Center for Excellence in Archaeological Science and Cultural Heritage, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

4. National Research Center for Conservation of Ancient Wall Paintings and Earthen Sites, Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China

**Abstract** A large number of earthen heritage sites are preserved in the alpine regions of northwestern China. Under the coupled action of freeze-thaw cycles and water-salt effects, the shallow surface layer of these sites

收稿日期: 2025-12-18 修回日期: 2026-02-03

基金项目: 国家重点研发计划(2025YFE0211600, 2023YFF0905900); 甘肃省创新平台计划(26JDWF001)。

第一作者: 齐博嘉, 男, 硕士研究生, 从事岩土质不可移动文物保护研究, qibj2023@lzu.edu.cn。

通信作者: 张景科, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土遗址与石窟寺保护研究, zhangjink@lzu.edu.cn。

undergoes repeated freezing and thawing, which induces various forms of deterioration. To investigate the deterioration characteristics of the near-surface layer of earthen heritage sites under the coupled action of freeze-thaw cycles and water-salt effects, laboratory freeze-thaw simulation tests were conducted. Based on six indicators-apparent morphology, surface temperature field, sonic wave velocity, surface hardness, microstructure, and particle size distribution of remolded samples-the deterioration characteristics of the shallow surface layer under the coupled influence of freeze-thaw cycles and salt migration were revealed. The experiments found that during freeze-thaw processes, soluble salts migrate towards the center of the samples and crystallize, thereby inducing salt weathering and forming a horizontal deterioration layer. Salt content shows a positive correlation with freeze-thaw damage, and higher  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  content leads to more severe damage. Freeze-thaw cycles significantly reduce sonic wave velocity and surface hardness, and disrupt the aggregated structure of soil particles, although the particle size gradation characteristics of the soil remain stable. The primary factor in the deterioration of the shallow surface layer of earthen sites is the coupled action of freeze-thaw cycles and water-salt effects, which causes salt accumulation and crystallization, damages the cementation state of soil particles, and leads to a loosened soil structure. The relevant findings can provide a reference for the prevention and mitigation of deterioration in the shallow surface layer of earthen heritage sites.

**Keywords** earthen sites; shallow surface layers; freeze-thaw; water-salt migration; deterioration characteristics

中国是世界文明古国之一,在悠久的历史中保留下大量土遗址,从石器时代绵延至近代,它们是中华文化的载体,也是文明古国的实物例证<sup>[1]</sup>。土遗址病害的发育与土遗址赋存环境以及遗址土的结构、含盐量等基本性质密切相关<sup>[2]</sup>。我国约有 67% 的土遗址分布地区存在冻融现象,并遭受严重的冻融破坏<sup>[3]</sup>。在冻融-水盐运移耦合作用下,土遗址易出现片状剥离、酥碱等病害<sup>[4-5]</sup>,严重威胁土遗址的保存。

现有对土遗址冻融破坏特征研究多以室内模拟试验的方式开展,采用的表征指标以力学性质、宏微观结构以及土颗粒粒径等为主。研究发现,土体冻融破坏是由于冻结区水-冰-水的相变过程改变了土中水的分布,破坏土体结构<sup>[6]</sup>。如黄土在经历多次冻融循环后,颗粒间胶结物质破坏,导致土体黏聚力和强度下降<sup>[7-8]</sup>;粉质黏土多次冻融后,土体大孔隙的数量增加,土颗粒排列发生变化,形状趋向不规则<sup>[9]</sup>。土遗址原状试样随着冻融循环次数的增加,微结构出现损伤,强度减小,而重塑样在冻融循环初期由于“陈化”作用,其强度有所增大,但随着冻融进行,土体的微结构损伤不断增大,耐久性降低<sup>[10]</sup>。

中国西北地区土遗址中易溶盐类型以氯盐和硫酸盐为主<sup>[11]</sup>,盐分在水盐迁移作用下,向土遗址浅表层富集、结晶与溶解,从而引发孔隙体积变化,土颗粒受力状态改变,导致土体结构疏松、破

坏<sup>[12]</sup>。在水盐运移和冻融耦合作用下,当土体中含盐量较高时,盐胀作用是土体变形的主要因素,而含盐量较低时,冻胀作用是土体变形的主要因素<sup>[13]</sup>。冻融条件不变时,随着含盐量的增加,冻融循环作用对土体结构的破坏程度随之增加<sup>[14]</sup>。

目前对于土遗址冻融破坏的研究多以单因素为主,多因素耦合作用处于以定性研究为主的探索阶段<sup>[4]</sup>。针对土遗址冻融-水盐耦合劣化特征研究不足的问题,本文采用土遗址坍塌土样制备不同含盐量的立方体重塑样,采用多种表征指标,研究冻融与水盐运移耦合作用下土遗址的劣化特征,为冻融诱发土遗址浅表层病害的防治提供参考。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 区域概况和试验材料

天祝藏族自治县位于青藏高原、黄土高原和内蒙古高原的交汇地带,境内地势西北高、东南低,海拔在 2 040 ~ 4 874 m 之间,以山地为主。由天祝藏族自治县 2014—2024 年气象数据可知(见图 1),年均降水量为 370.5 mm,月平均最大降水量为 85 mm,月平均最小降水量为 1.7 mm。气温日较差显著,最低温在 1 月,1 月日极端低温为  $-22.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,日极端高温为  $6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。月平均气温最高为  $16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,月平均气温最低为  $-18.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,其

中1月、2月、11月和12月的月平均气温均低于0℃(见图1)。

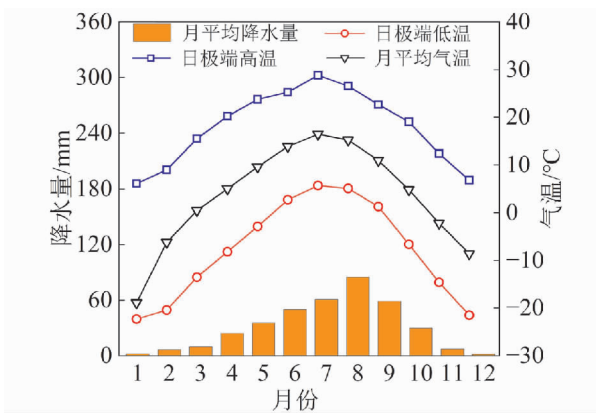


图1 天祝藏族自治县2014—2024年气象数据

Fig.1 Meteorological data of Tianzhu Tibetan Autonomous County (2014—2024)

试验用土采用长城遗址坍塌样,依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行土工试

验<sup>[15]</sup>,其基本性质如图2和表1所示。依据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)<sup>[16]</sup>,遗址土样为级配良好的粉质黏土。采用离子色谱法进行土样易溶盐含量测定,测定结果如表2所示。

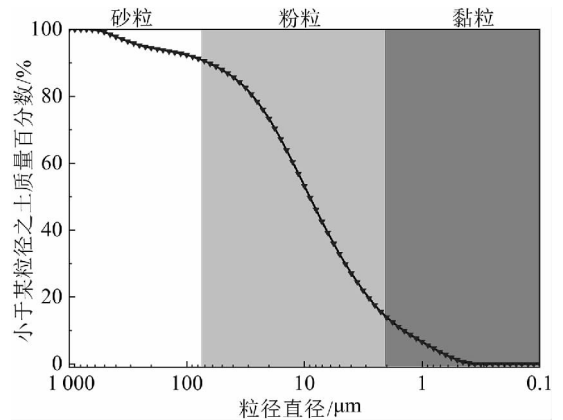


图2 遗址土粒径组分

Fig.2 Particle size distribution of earthen site soil

表1 遗址土样基本物理性质

Tab.1 Basic properties of earthen samples

最大干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	最优含 水率/%	砂粒含量 /%	粉粒含量 /%	黏粒含量 /%	不均匀 系数	曲率系数	液限/%	塑限/%	塑性指数
1.77	14.7	9.5	77.5	13	8	0.99	20.52	16.08	15.90

表2 遗址土样易溶盐含量

Tab.2 Soluble salt content in earthen samples

单位:mg·kg<sup>-1</sup>

Cl <sup>-</sup> 含量	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 含量	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 含量	Na <sup>+</sup> 含量	K <sup>+</sup> 含量	Mg <sup>2+</sup> 含量	Ca <sup>2+</sup> 含量	其他离子含量
235.1	330.0	77.2	339.5	25.9	83.0	180.7	/

## 1.2 试样制备

由表2可知,试验用土的Cl<sup>-</sup>含量为0.023 51%,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量为0.033 0%,试验用土易溶盐含量极低。陈雨等对遗址土经多次脱盐处理后,残留含盐量仍高于本试验土样的实测值<sup>[17]</sup>,表明本试验土样的易溶盐含量已满足试验对盐含量的要求,故不进行额外脱盐处理;湛文武等现场调查表明,西北地区土遗址易溶盐种类多以NaCl和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>为主<sup>[11]</sup>,易溶盐含量多数分布在0~1.0%范围内;杨善龙等研究发现,当总含盐量超过0.2%时,土遗址开始出现盐害<sup>[18]</sup>,盐害严重部位含盐量超过1%。因此试验设置5组盐浓度梯度(0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%),覆盖盐害“发生临界点-严重”区间。每个浓度组中的Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>与NaCl质量比分别为1:1、2:1、6:1(见表3),每组包含3个平行试样,其中1个平行样用来无损测试,其余2个平行样进行取样测试。

其中,质量比2:1的试样对应实际情况下盐害严重土遗址中的Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>与NaCl质量比<sup>[18]</sup>,质量比1:1对应盐种类均衡分布,质量比6:1反映硫酸盐富集特征,全面探究Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>与NaCl质量占比对土遗址的影响。由击实试验结果可知(见表1),试验用土最优含水率为14.7%,最大干密度为1.77 g/cm<sup>3</sup>。依照《土遗址保护试验技术规范》(WW/T 0039—2012)<sup>[19]</sup>,将长城遗址坍塌样碾碎,过2 mm筛,进行含水率的测定。依据试样含盐总量和过筛土的含水率,计算试样所需盐和水的质量,然后将Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和NaCl按相应比例溶解在去离子水中,以14.7%含水率进行土样的拌湿处理,拌湿后的土样密封静置24 h。计算试样最大干密度时所用土的质量,将拌湿后的土放入立方体模具,通过人工击实的方法制备为边长7.07 cm,干密度为1.77 g/cm<sup>3</sup>的立方体试样,试样制备完成后,在室内自然风干而后进行试验。

表 3 试样分组表  
Tab.3 Setting of test groups

组别	含盐总量 /%	试样编号	$m(\text{Na}_2\text{SO}_4) : m(\text{NaCl})$
A	0.2	A-1	1
		A-2	2
		A-3	6
B	0.4	B-1	1
		B-2	2
		B-3	6
C	0.6	C-1	1
		C-2	2
		C-3	6
D	0.8	D-1	1
		D-2	2
		D-3	6
E	1.0	E-1	1
		E-2	2
		E-3	6

### 1.3 冻融循环试验方案

冬季积雪融化产生的水分入渗土遗址浅表层,引发强烈的冻融循环破坏。本次室内冻融试验模拟了土遗址浅表层积雪融水入渗条件下的冻融循环。参考天祝藏族自治县近 10 年日极端气温,1 月、2 月和 12 月的日极端低温均在  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  以下,对应日极端高温分布范围为  $0\sim 10\text{ }^\circ\text{C}$  之间,因此,设置冻结温度为  $-25\text{ }^\circ\text{C}$ ,融化温度为  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ,24 h 为 1 个冻融周期,冻结时长与融化时长均为 12 h。

谌文武等试验所得,7.07 cm 立方体试样顶部 5.5 cm 厚积雪质量为  $125\text{ g}$ <sup>[20]</sup>。因此,本试验中试样在室内自然风干后,用针管向其顶部累计滴水共 124.8 g,模拟土遗址表面覆盖 5.5 cm 积雪融水入渗(见图 3)。第 1、第 2 和第 3 冻融周期开始时,每个周期向试样顶部滴入 41.6 g 水。叶万军等研究发现,黄土试样经 10 个冻融循环后物理力学性质趋于稳定<sup>[21]</sup>。本试验前 3 个循环进行了水分补充,含水率变化导致试样物理力学性质波动,冻融累积劣化效应未充分体现。因此,设置 16 个冻融循环周期,既覆盖前期冻融波动阶段,又确保循环后期试样物理力学性质稳定。

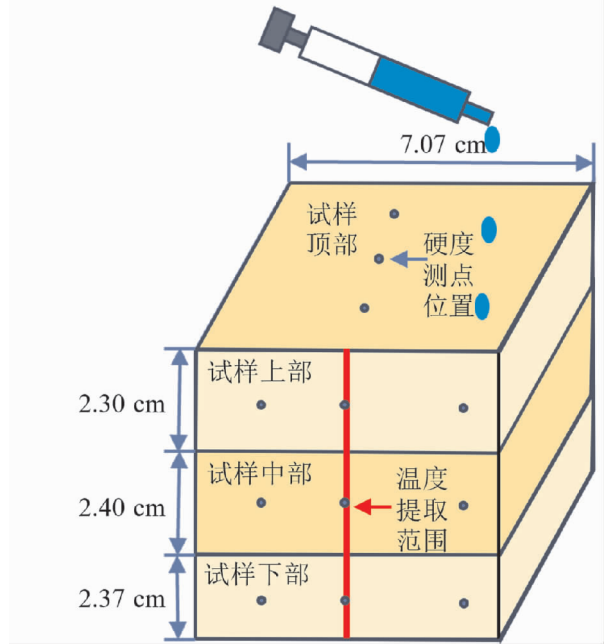


图 3 试样区域划分及测点位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of zone division and measurement point of the samples

### 1.4 仪器和方法

使用 DW-40 型号低温试验箱进行试样的冻融循环。每个冻融周期结束,使用佳能 D700 数码相机对试样进行拍照记录;FLIR T660 红外线热成像仪温度测试范围为  $-40\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ , $25\text{ }^\circ\text{C}$  标称环境温度条件下,仪器测试精度为  $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  或读数的 2%,取二者中较大值。试样冻结 12 h 后,迅速拿出低温试验箱,室内监测获取试样表面温度场数据;使用型号为 UM039 的  $500\times$  数码显微镜,选用放大倍数为 140 倍,每个冻融周期结束,对试样发生破坏的区域进行拍摄记录;超声波检测仪为瑞士 PUNDIT PL-200 超声波检测仪,采用圆柱形 54 kHz 探头,探头直径 50 mm。每个冻融周期结束,测试试样垂直方向的超声波波速,测试 3 次计算平均值,确保测试结果的可靠性;试样表面硬度测试选用邵氏硬度计,型号为数显 A 型,在试样表面不同区域,测试 3 次计算平均值,确保测试结果的可靠性;扫描电子显微镜为 Apreo S SEM 扫描电子显微镜,16 个冻融循环结束,取试样中部和顶部区域样品,放大 2 000 倍进行扫描和 EDS 元素测定;激光粒度分析仪型号为 Mastersizer2000,第 3、第 8 和第 16 冻融周期结束,取试样上部和下部样品进行测试。试样区域划分及测点位置示意图如图 3 所示。

## 2 试验结果

### 2.1 外观形貌特征

试样含盐量相同时,冻融循环过程中试样外观形貌特征相似,故只给出不同含盐量试样外观形貌。图 4 展示了不同含盐量试样外观形貌变化和酥碱区域的微观结构变化。随着冻融循环次数的增加,所有试样顶部表面均出现微小裂隙。0.2% 含盐量试样侧壁未发生明显破坏,而 0.4%、0.6%、0.8%、1.0% 含盐量试样侧壁中部

水平方向均出现盐结晶并形成团聚体,出现酥碱,其中 E-2、E-3 试样在盐分聚集区域发生开裂破坏。当含盐总量大于等于 0.4% 时,试样出现酥碱,由显微照片可知,试样含盐量越高,酥碱区域团聚体数量越多,体积越小,土体结构越疏松,试样破坏越严重。含盐总量相同的试样,Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 含量越高,酥碱破坏越严重。如图 5 所示,冻结阶段结束,试样侧壁有盐结晶析出,融化阶段试样侧壁并未发生明显变化,说明冻融循环过程中,盐结晶对试样破坏主要发生在冻结阶段。

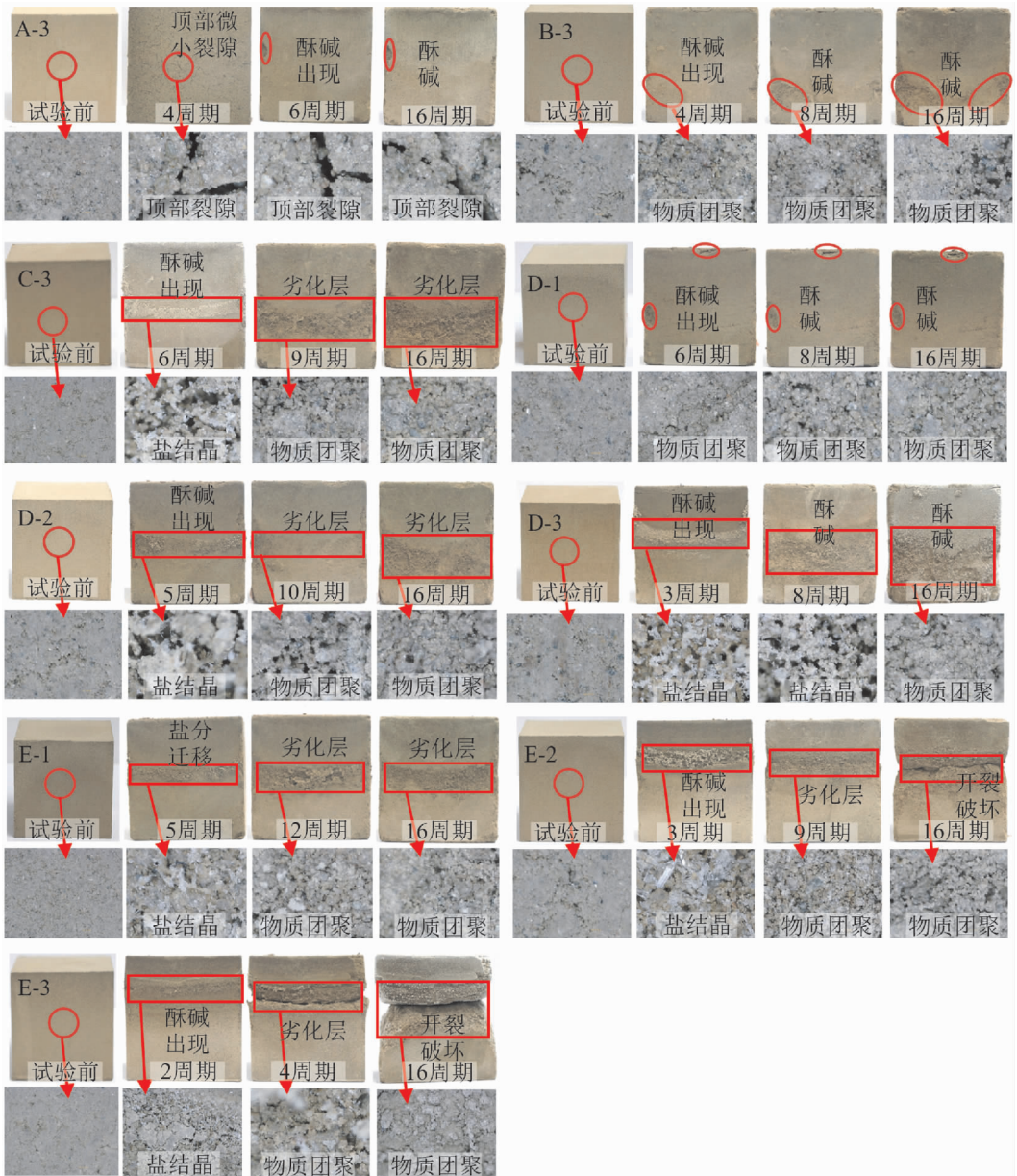


图 4 试样外观特征

Fig. 4 Sample appearance characteristics

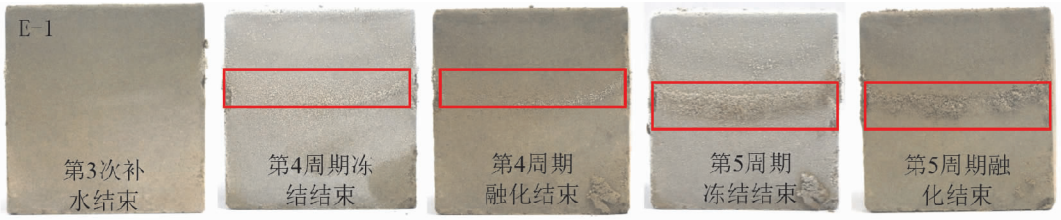


图 5 E-1 试样冻融第 4、5 周期劣化特征

Fig. 5 Deterioration characteristics of Sample E-1 during the 4th and 5th freeze-thaw cycles

### 2.2 表面温度分布特征

红外热像技术可以获取被测对象温度场的变化规律,进行物体表面形态和结构变化的监测<sup>[22]</sup>。在冻融循环过程中,不同条件下试样表面温度场分布特征相似,故本文只给出含盐总量为 0.8% 的试样表面温度场测试结果(见图 6)。由于室内温度显著高于冻融试验箱内的温度,试样离开冻融箱后吸收外界热量,其表面温度迅速上升,这一升温过程在试样表面形成了明显的温度梯度,即靠近试样表面温度由边缘区域向试样中心区域递减,但试样中部酥碱劣化区域的温度明

显高于其他区域,且劣化程度越严重,对应区域的温度越高。试样劣化程度与温度变化之间有直接联系,劣化过程伴随着试样热学性质的改变,从而加速了劣化区域热量的积聚<sup>[23]</sup>。随着冻融周期的增加,试样表面的温度梯度变化愈发显著,这表明多次的冻融循环加剧了试样内部结构的损伤,进而影响了其热传导性能。当试样中  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的含量比例增加时,也观察到了试样表面温度梯度变化的增大, $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的存在加剧了试样的劣化,进而影响了其温度分布特征。

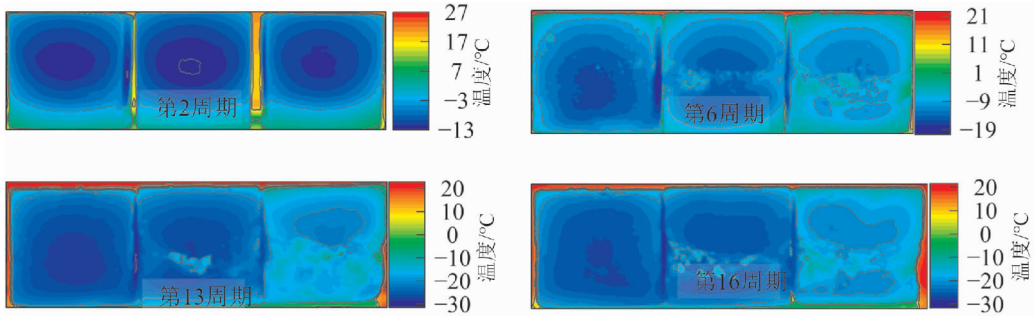


图 6 总含盐量 0.8% 试样表面等温线图

Fig. 6 Isotherm diagram of sample surface with 0.8% total salinity

提取试样表面垂直方向温度数据,结果如图 7 所示,沿 D-1 试样侧壁中心垂直轴线,自顶端向底端进行观测,其表面温度先下降后上升,且试样顶部和底部的温度最高。随冻融循环进行,顶部和底部温度趋于一致。沿 D-2、D-3 试样侧壁中心垂直轴线,自顶端向底端进行观测,试样表面温度

随冻融循环呈现“单峰”特征,即距离试样底部 3 ~ 5 cm 部位处温度出现了峰值,且峰值小幅度向试样中间部位移动。第 2 冻融循环周期结束时,温度峰值出现区域在距离试样顶部 5 cm 附近,而第 6、13、16 周期冻融循环结束后,温度峰值出现区域在距离试样顶部 3.5 ~ 4.5 cm 附近。

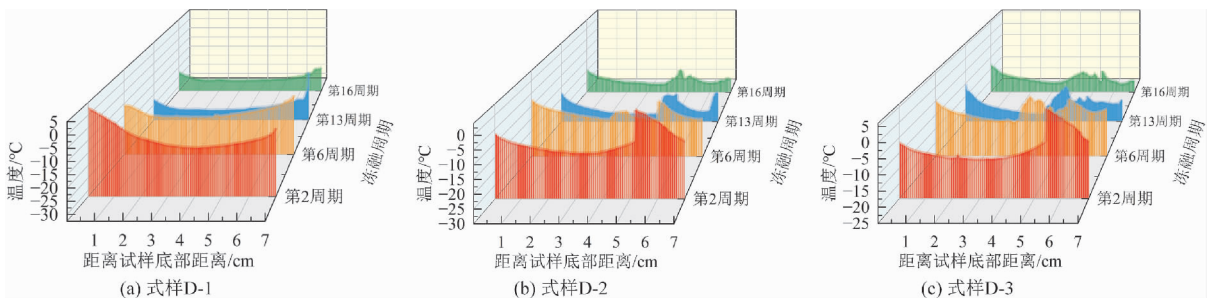


图 7 总含盐量 0.8% 试样温度变化图

Fig. 7 Temperature variation profile of sample with 0.8% total salinity

### 2.3 声波波速变化

声波波速大小受试样的致密性和连续性影响,在一定程度上反映了试样强度特征<sup>[24-25]</sup>,因此,采用声波波速变化表征试样劣化程度。声波波速探头与试样表面紧密贴合,确保测试结果的可靠性,对试样进行垂直方向波速参数测试。测试结果如图 8 所示,前 3 个冻融周期内试样顶部有水入渗,试样垂直方向波速快速下降。第 3 个冻融周期结束后,试样土颗粒间水膜厚度最大,试样垂直方向波速由最初 1 100 ~ 1 200 m/s 下降至 400 ~ 500 m/s,此阶段试样的劣化主要为水的冻

胀作用主导。从第 4 个冻融周期起,试样含水率逐渐下降,垂直方向波速上升,经历 6 ~ 9 个冻融循环周期之后,垂直方向波速小范围波动,逐渐趋于稳定。 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  与  $\text{NaCl}$  质量比为 6:1 的配比条件下,试样内部结构遭受的盐结晶侵蚀破坏效应最为显著,与相同含盐量试样相比,声波波速数值最小。由此可知,试样在失水过程中,声波波速会有一定回升,试样含盐总量越高,声波波速回升数值越小,且含盐总量相同时,不同比例  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaCl}$  试样声波波速回升数值差异较大。

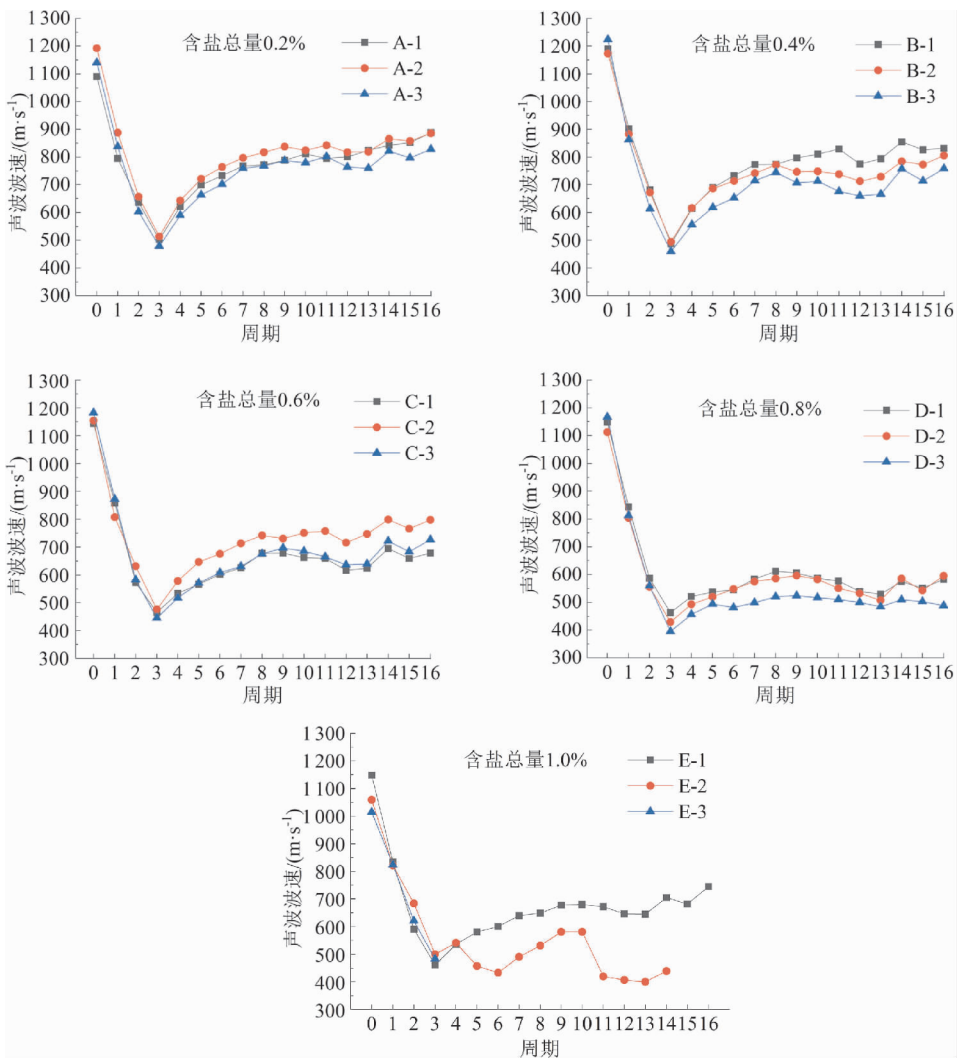


图 8 试样声波波速变化

Fig. 8 P-wave velocity variation profile of sample

### 2.4 表面硬度变化

硬度值可反映材料的强度特性<sup>[26]</sup>。试样测点位置如图 3 所示,测试结果如图 9 所示。所有试样初始硬度分布范围为 85 ~ 95 HA,前 3 个冻融循环周期内,试样表面硬度快速下降。前 3 个

冻融循环周期结束时,试样顶部的表面硬度降为 0,这是由于试样表面含水率过高。除 E-2、E-3 试样,其余试样第 4 冻融周期结束,试样表面硬度相比第 3 冻融循环周期有所回升,但回升后的表面硬度多数在 50 HA 以下。所有冻融循环周期内,

A组、B组、C组、D试样不同部位硬度值的大小规律为:顶部 < 上部 < 中部 < 下部。随着冻融循环周期的进行,试样表面不同部位硬度值逐渐下降且数值趋于一致,最终分布在 15 ~ 40 HA。在第4冻融循环周期结束后,E-2、E-3试样中部酥碱现象明显,表面硬度呈现中部 < 顶部 < 上部 <

下部的分布特征。与初始值相比,试样表面硬度值下降了 57% ~ 84%。表面硬度值的下降反映了在冻融-水盐运移耦合作用下试样表面整体的劣化情况,由于硬度值受含水率影响较大,因此在低含水率条件下,硬度值能较好地反映试样表面的劣化程度。

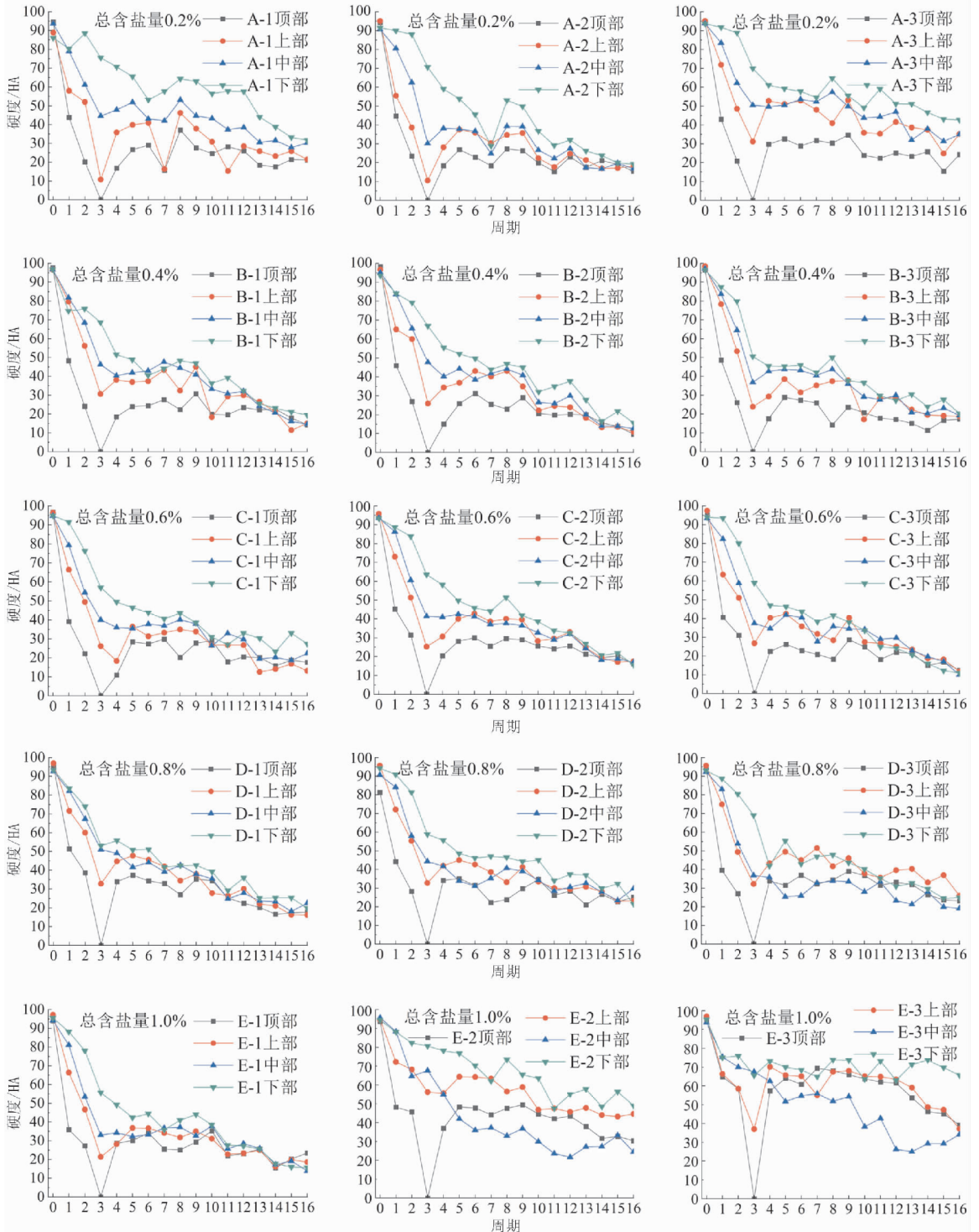


图9 试样表面硬度变化

Fig. 9 Surface hardness variation profile of the samples

### 2.5 微观结构

试验结束后,选取 B-2、D-2、E-2 试样,能谱分析结果放大 2 000 倍电镜图如图 10 所示,所有试样顶部土颗粒多以团聚体形式存在,仅含盐量为 1.0% 的试样表面出现少量盐结晶,其余试样均无盐结晶。所测试样顶部土体微观结构相似。所测试样中部出现针状、表面粗糙不规则的小颗粒状固

体,以氯、硫和钠元素为主,主要为 NaCl 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的晶体。随着含盐量增加,盐结晶颗粒数量增加、体积减小、形状趋于不规则。在盐分迁移积聚和结晶压力的作用下,相比于试样顶部,试样中部团聚体破坏严重,孔隙数量增多,颗粒间联结弱,土体结构疏松,试样中部发生严重酥碱。

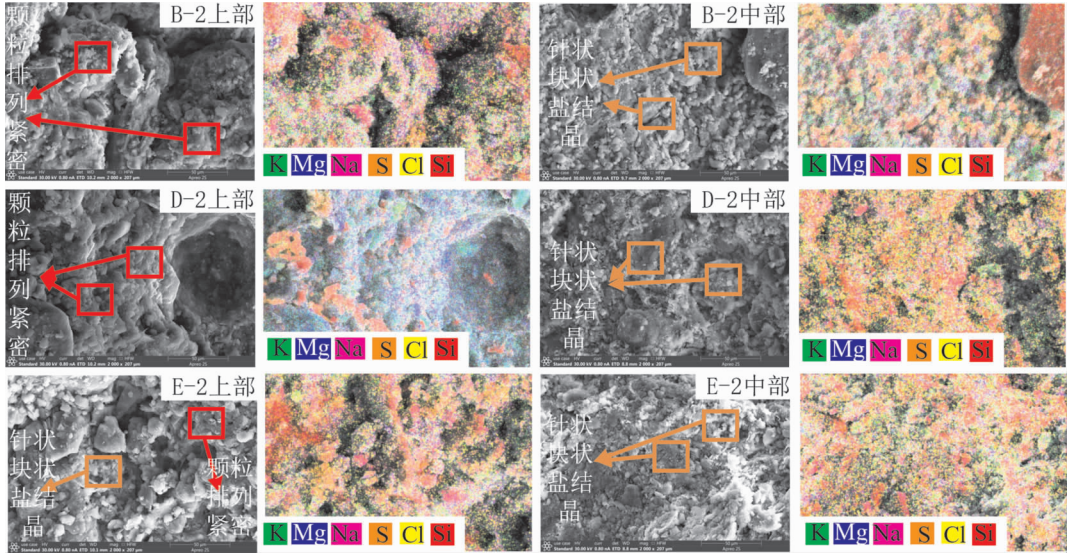


图 10 扫描电镜结果图

Fig. 10 SEM result image

### 2.6 颗粒粒径变化

第 3、第 8 和第 16 冻融循环结束后,取 C-2、D-3 试样,使用激光粒度仪进行颗粒粒径测试(见

图 11),测试结果表明,C-2 和 D-3 试样的颗粒粒径变化不大,16 个冻融循环对试样的颗粒粒径大小产生影响极小。

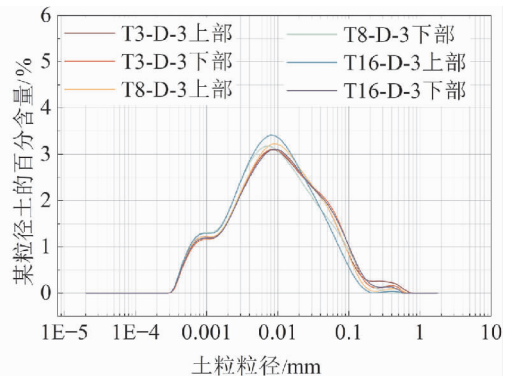
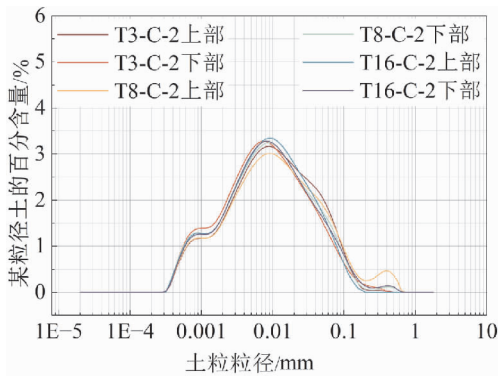


图 11 试样颗分曲线图

Fig. 11 Sample gradation curve

## 3 讨论

### 3.1 试样酥碱破坏与盐含量关系

试验表明,盐含量是冻融条件下酥碱破坏的关键因素,当试样总含盐量 ≥ 0.4% 时,冻融循环中开始出现水平向酥碱劣化层;含盐量为 0.2%

的试样则无明显酥碱现象。试样酥碱破坏程度与盐含量呈正相关。如图 12 所示,冻融循环周期内,试样声波波速损失率和酥碱部位硬度损失率随着盐含量增加显著上升。相同含盐量时,Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 占比越高,波速和硬度损失率越大。如图 4 和图 10 所示,相比于含盐量为 0.2%、0.8% 组试样,含盐量为 1.0% 组试样的酥碱区域团聚体

完全破坏。含盐量越高, 结晶驱动力越强, 酥碱破坏越显著。盐种类比例显著影响破坏强度, 在相同总含盐量下,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  占比增加(尤其是  $\text{Na}_2\text{SO}_4:\text{NaCl}=6:1$  时), 酥碱区域团聚体数量更多、体积更小、结构更疏松。

冻融-水盐耦合作用是酥碱破坏发生的主要因素, 盐含量(尤其是  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  占比)通过调控盐分迁移量、结晶压力强度及晶体形态, 控制酥碱的空间位置与破坏程度。试样 0.4% 的含盐量条件下, 出现酥碱, 且破坏程度随着盐含量提升呈显著增长。

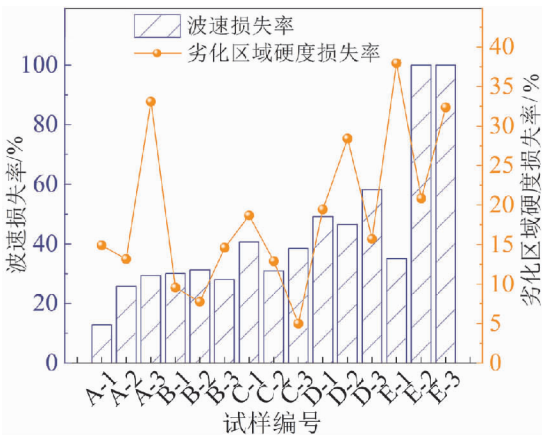


图 12 冻融循环周期波速硬度损失率图

Fig. 12 P-wave velocity and hardness loss ratio during freeze-thaw cycling

### 3.2 冻融-水盐耦合劣化机制探讨

冻融循环初期, 试样顶部水分入渗导致上部的盐分向中下部迁移, 盐分在试样中下部初步富集。冻结过程中, 冻结锋面由表及里向试样中部迁移, 水分携带盐分向冻结锋面附近迁移, 随着水分冻结, 盐溶液浓度升高至过饱和, 盐分在孔隙中结晶, 产生结晶压力<sup>[27]</sup>, 破坏土颗粒间胶结结构, 形成疏松多孔的酥碱劣化层。含盐量  $\geq 0.8\%$  试样中, 盐结晶首先发生于试样的中上部, 导致局部结构疏松, 后续盐分持续向该区域迁移结晶。含盐量  $\leq 0.6\%$  的试样中, 补水阶段含水率升高使冻结锋面移向试样中部。含盐量越高, 劣化层位置越靠近中上部<sup>[28]</sup>。SEM 结果和显微照片表明盐结晶破坏颗粒间胶结, 团聚体崩解为小颗粒, 土体孔隙数量增多、连通性增强。颗粒粒径分析结果表明, 在试样冻融过程中, 颗粒粒径级配保持稳定, 试样酥碱劣化源于结构破坏而非颗粒破碎。高盐含量抑制波速的回升幅度, 说明盐结晶对结构损伤的不可逆性<sup>[29]</sup>。水分重分布驱动盐分迁

移, 冻结锋面诱导盐分富集, 盐结晶压力破坏土体结构, 多次冻融循环加剧盐分定向积聚与结构损伤, 最终形成水平向酥碱劣化层。该机制揭示了冻融条件下, 盐分迁移-结晶的多次循环是土遗址浅表层病害的核心成因。

### 3.3 试样补水方式对试验结果的影响

本文冻融模拟试验采用试样顶部滴水方式模拟融雪入渗过程, 前 3 个冻融循环周期内, 每个周期试样顶部共滴水 41.6 g, 单次滴水 5 g, 待水分充分入渗后进行下 1 次滴水, 该补水方案能够较好地模拟融雪缓慢入渗的过程。相较于滴水补水, 土遗址顶部积雪突融会加速土体的软化, 在冻融循环作用下, 遗址土体破坏显著, 其劣化速率快<sup>[30]</sup>。本文试验所采用的滴水补水方案, 其结果更适用于模拟融雪缓慢入渗的场景, 对于降雪突融条件下, 融雪入渗下的劣化特征反映不够充分。

## 4 结论

1) 试样酥碱劣化程度与总含盐量及  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  含量呈正相关, 含盐量  $\geq 0.4\%$  时, 试样发生酥碱破坏。试样冻融破坏主要发生在试样冻结过程中, 含盐量  $\leq 0.6\%$  时, 酥碱劣化区域位于中部, 盐量  $\geq 0.8\%$  时, 酥碱劣化区域位于中上部。

2) 试样补水周期内, 声波波速和表面硬度快速下降, 停止补水后, 随冻融循环次数逐渐增加, 试样声波波速呈现“上升-下降-波动稳定”三阶段变化规律, 表面硬度同步响应。微观结构测试及颗粒粒径分析表明试样冻融破坏源于团聚体结构破坏而非土颗粒破碎。

3) 冻融-水盐耦合作用通过水分迁移驱动盐分重分布, 在冻结锋面处诱导盐分富集结晶。前期冻胀与后期盐结晶分阶段主导劣化, 多次冻融循环加剧盐分定向积聚与土体不可逆的结构损伤。该机制揭示了盐分迁移-结晶循环是高寒地区土遗址浅表层病害发生的重要原因, 为土遗址浅表层病害治理提供了一定的理论参考。

## 参考文献

[1] 孙满利, 王旭东, 李最雄. 土遗址保护初论[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 2-3.  
 [2] 孙满利, 张景科. 文物保护学的理论探讨[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 192-198.  
 SUN M L, ZHANG J K. Theoretical discussion on

- conservation of cultural heritages[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(2): 192-198.
- [3] 刘炜,王力丹,孙满利. 冻融破坏对汉长安城遗址土的结构影响研究[J]. *敦煌研究*, 2011(6): 85-90.
- LIU W, WANG L D, SUN M L. A study on the impact of freeze-thaw action on the soil structure of Changan city in the Han Dynasty[J]. *Dunhuang Research*, 2011(6): 85-90.
- [4] 孙满利,陈彦榕,沈云霞. 土遗址病害研究新进展与展望[J]. *敦煌研究*, 2022(2): 136-148.
- SUN M L, CHEN Y R, SHEN Y X. New progress and prospects in research on earthen site deterioration[J]. *Dunhuang Research*, 2022(2): 136-148.
- [5] SHAO M S, LI L, WANG S J, et al. Deterioration mechanisms of building materials of Jiaohe ruins in China[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2013, 14(1): 38-44.
- [6] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 218-220.
- [7] 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 W K, SHI H Q. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 922-927.
- [8] 李丽,张坤,张青龙,等. 干湿和冻融循环作用下黄土强度劣化特性试验研究[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(4): 1142-1149.
- LI L, ZHANG K, ZHANG Q L, et al. Experimental study on the loess strength degradation characteristics under the action of dry-wet and freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(4): 1142-1149.
- [9] 齐吉琳,张建明,朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(S2): 2690-2694.
- QI J L, ZHANG J M, ZHU Y L. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2003, 22(S2): 2690-2694.
- [10] 严耿升,张虎元,王晓东,等. 干旱区土建筑遗址冻融耐久性研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(8): 2267-2273.
- YAN G S, ZHANG H Y, WANG X D, et al. Durability of earthen architecture ruins under cyclic freezing and thawing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(8): 2267-2273.
- [11] 谌文武,贾博博,蔡韬,等. 融雪与降雨入渗下含盐土遗址的冻融劣化研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(2): 334-342.
- CHEN W W, JIA B B, CAI T, et al. Freeze-thaw deterioration of saline earthen sites under snowmelt or rainfall infiltration[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(2): 334-342.
- [12] 张虎元,刘平,王锦芳,等. 土建筑遗址表面结皮形成与剥离机制研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(7): 1883-1891.
- ZHANG H Y, LIU P, WANG J F, et al. Generation and detachment of surface crust on ancient earthen architectures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 1883-1891.
- [13] 王旭东,石玉成,刘琨. 夯土长城墙体掏蚀失稳机理研究[J]. *西北地震学报*, 2011, 33(S1): 381-385.
- WANG X D, SHI Y C, LIU K. Research on sapping instability mechanism for rammed wall[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, 33(S1): 381-385.
- [14] LI T G, KONG L W, GUO A G. The deformation and microstructure characteristics of expansive soil under freeze-thaw cycles with loads[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 192, 103393.
- [15] 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.
- [16] 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, 2008.
- [17] 陈雨,王旭东,杨善龙,等. 冻融循环作用下不同含盐土体微细结构变化初步研究[J]. *敦煌研究*, 2013(1): 98-107.
- CHEN Y, WANG X D, YANG S L, et al. A preliminary study of the freeze-thaw cycle on the structure of earthen sites with different salts[J]. *Dunhuang Research*, 2013(1): 98-107.
- [18] 杨善龙,王旭东,郭青林,等. 中国西北地区土遗址盐害阈值试验研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 1-8.
- YANG S L, WANG X D, GUO Q L, et al. Experimental research on salt threshold of earthen sites in northwest of China [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2018, 54(1): 1-8.
- [19] 国家文物局. 土遗址保护试验技术规范: WW/T 0039—2012[S]. 北京: 文物出版社, 2012.
- [20] 谌文武,魏大川,雷宏,等. 积雪覆盖下遗址土的强度劣化特征试验研究[J]. *兰州大学学报(自然*

- 科学版), 2019, 55(5): 655-660.
- CHEN W W, WEI D C, LEI H, et al. Experimental study on strength deterioration characteristics of earthen sites covered by snow[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2019, 55(5): 655-660.
- [21] 叶万军, 杨更社, 彭建兵, 等. 冻融循环导致洛川黄土边坡剥落病害产生机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 199-205.
- YE W J, YANG G S, PENG J B, et al. Test research on mechanism of freezing and thawing cycle resulting in loess slope spalling hazards in Luochuan[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, 31(1): 199-205.
- [22] MEOLA C, CARLOMAGNO G M, GIORLEO L. The use of infrared thermography for materials characterization[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155: 1132-1137.
- [23] 张虎元, 张学超, 陈晓宁. 不同遗址土的热物理参数研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S1): 57-62.
- ZHANG H Y, ZHANG X C, CHEN X N. Research on thermal parameters of different earthen monument soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S1): 57-62.
- [24] 谌文武, 刘建, 崔凯, 等. 土遗址裂隙注浆材料 PS-(C+F)与 SH-(C+F)性能对比研究[J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(5): 70-76.
- CHEN W W, LIU J, CUI K, et al. The comparative study to performance of the earthen sites fissure grouting material PS-(C+F) and SH-(C+F) [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2017, 29(5): 70-76.
- [25] 曾俊琴, 陈鹏飞, 张景科, 等. 潮湿环境模拟考古土遗址夯筑支顶加固效果评估[J]. 文物保护与考古科学, 2016, 28(2): 78-84.
- ZENG J Q, CHEN P F, ZHANG J K, et al. Evaluation of the effects of reinforcement on rammed earth in a damp environment in a model archaeological site [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2016, 28(2): 78-84.
- [26] 张金凤. 硬度测量在土遗址保护中的应用问题[J]. 中国文物科学研究, 2012(4): 66-70.
- ZHANG J F. The application of hardness test on consolidation of earthen sites[J]. China Cultural Heritage Science, 2012(4): 66-70.
- [27] SCHERER G W. Stress from crystallization of salt[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(9): 1613-1624.
- [28] 邴慧, 何平. 不同冻结方式下盐渍土水盐重分布规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2307-2312.
- BING H. HE P. Experimental study of water and salt redistributions of saline soil with different freezing modes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2307-2312.
- [29] 肖泽岸, 赖远明. 冻融和干湿循环下盐渍土水盐迁移规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3738-3746.
- XIAO Z A, LAI Y M. Study on water and salt transfer mechanism in saline soil under freezing-thawing and dry-wet conditions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 37(S1): 3738-3746.
- [30] 白玉书, 裴强强, 张博, 等. 积雪突融环境下夯土遗址顶缘关键水热过程与侵蚀破坏特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(11): 3127-3138.
- BAI Y S, PEI Q Q, ZHANG B, et al. Key hydrothermal processes and top-edge erosional failure characteristics of under sudden snowmelt conditions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 44(11): 3127-3138.

(编辑 李波)