

DOI:10.20174/j.juse.2026.02.17

盐污染-干湿耦合下黄土强度演变的试验研究

马世雄^{1,2}, 王述红², 赵春瑶³, 刘智¹, 王宇¹

(1. 宁夏理工学院 建筑与环境学院, 石嘴山 753000; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819;
3. 宁夏公路勘察设计院有限责任公司, 银川 750000)

摘要:西北黄土灌溉地区土壤经历了干湿循环作用和盐污染双重作用的影响,导致该地区黄土特性产生明显的劣化。以 Na_2SO_4 污染 Q_3 黄土为研究对象,采用直剪试验、电子显微镜扫描试验(SEM),分析其经过次数不同干湿循环作用后的力学性质和微观结构特征变化。结果表明:干湿循环和盐污染双重作用下,黄土强度劣化程度增大,微观结构变化显著;期中,黏聚力产生明显劣化,下降率可达38.24%~51.4%;随盐污染和干湿循环次数的增加,黄土体的单体颗粒比例显著增加,团聚体开始解体; Na_2SO_4 随着干湿循环反复结晶和溶解,从而对土体产生了盐胀与盐蚀共同作用;二者作用中,干湿循环对土体结构的破坏作用大于盐污染作用。研究结果可为黄土地区的工程活动和防污治理提供有效参考。

关键词:污染黄土;干湿循环;分形维数;概率熵

中图分类号:TU444

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2026)02-0556-09

Experimental Study on the Evolution of Loess Strength under Salt Pollution-Dry and Wet Coupling

Ma Shixiong^{1,2}, Wang Shuhong², Zhao Chunyao³, Liu Zhi¹, Wang Yu¹

(1. School of Architecture and Environment, Ningxia Institute of Science and Technology, Shizuishan, Ningxia 753000, P. R. China;
2. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China;
3. Ningxia Highway Survey and Design Institute Limited Liability Company, Yinchuan, Ningxia 750000, P. R. China)

Abstract: The soil in the northwest loess irrigation area has been affected by the dual effects of dry-wet cycling and salt pollution, leading to significant deterioration of the loess properties in this region. Taking Q_3 loess contaminated by Na_2SO_4 as the research object, direct shear tests and scanning electron microscopy (SEM) are used to analyse the changes in mechanical properties and microstructure characteristics after different numbers of dry-wet cycles. The results show that: Under the dual effects of dry-wet cycling and salt pollution, the strength of the loess deteriorates significantly, and the microstructure changes significantly. Among them, the cohesion shows obvious deterioration, with a decline rate of up to 38.24% to 51.4%. With the increase of salt pollution and dry-wet cycling times, the proportion of individual particles in the loess body increases significantly, and the aggregates begin to disintegrate; Na_2SO_4 repeatedly crystallizes and dissolves during dry-wet cycling, thereby exerting a combined effect of salt swelling and salt erosion on the soil; among the two effects, the destructive effect of dry-wet cycling on the soil structure is greater than that of salt pollution. The research results provide an effective reference for engineering activities and pollution control in loess areas.

Keywords: polluted loess; dry and wet cycle; fractal dimension; probabilistic entropy

收稿日期:2025-06-10(修改稿)

作者简介:马世雄(1987—),男,宁夏固原人,博士生,讲师,主要从事黄土特性、滑坡灾害等方面的研究工作。

E-mail:shxma1987@163.com

通讯作者:王述红(1969—),男,江苏泰州人,博士,教授、博士生导师,岩土工程、地下工程等领域的教学与科研工作。E-mail:shwangneu@126.com

基金项目:宁夏回族自治区教育厅高等学校科学研究项目(CBSC-PA202403070029);宁夏自然科学基金(2024AAC03333)

0 引言

黄土是一种具有复杂成分(钙盐和黏土矿物)的天然风成沉积物^[1],广泛分布于中国西北部的黄土高原,总面积约 63.5 万 km²^[2]。宁夏地处西北典型干旱-半干旱地区,干旱少雨,蒸发强烈。灌溉不仅给土壤输送了水分,也带来了盐分,粗放式的大水漫灌,致使局部潜水位埋深变浅,加之降水稀少,蒸发强烈等因素叠加,土壤中的可溶盐成分产生大的变动。更重要的是,灌溉-蒸发无形中导致土壤经受干湿循环的作用,而干湿循环不仅可以为可溶性盐迁移到土壤表面提供驱动力^[3],还可以导致可溶性盐的溶解和结晶,从而对土壤的结构强度产生负面影响^[4],这一过程被称作为盐化学污染,即盐污染^[5]。

众所周知,黄土的宏观力学性能与其微观结构密切相关^[6-7]。干湿循环改变了土壤的微观结构,如土壤颗粒的大小、形状和排列^[8-9]、孔隙结构的类型和颗粒间结合的强度^[10-11],从而以不同的方式影响土壤的物理和力学性质。大量研究证明,黄土的强度在干湿循环下会发生不可逆的劣化^[12]。Travis 等^[13]研究了受不同浓度氯化钠(NaCl)溶液污染的风化泥岩的残余抗剪强度变化,得出盐污染后泥岩残余抗剪强度增加的原因是孔隙水中高浓度的盐离子导致黏土颗粒的扩散双电层(DDL)显著变薄。Solanki^[13]通过环剪试验,报告了滑动带中土壤的残余抗剪强度在被不同 pH 水平的硫酸盐(H₂SO₄)、氢氧化钠(NaOH)和 NaCl 溶液污染后降低,并提出这与土壤塑性指数的降低有关。

以上研究表明,对干湿循环作用或化学污染的单因素影响下的黄土研究已经相当广泛,但对干湿循环与盐污染双重影响下的黄土研究仍较少见。因此,本次研究采用不同浓度 H₂SO₄ 溶液模拟灌溉水,通过“加湿-干燥”制备试验黄土土样。利用中和滴定法、离子色谱法和电镜扫描(SEM)测试,分析盐污染黄土的微观结构特征变化,借助 PCAS 孔隙图像识别与分析系统^[15],运用分形几何学相关理论对土体孔隙细观结构进行定量分析,得到孔隙尺度、排列、形态和类型等细观结构特征,对比分析黄土孔隙细观特征的差异性。揭示盐污染和干湿循环双重作用导致黄土微观结构恶化的机制及其与宏观力学性能的变化,为黄土高原地区的工程建设和盐污染土地复垦提供科学依据。

1 试验材料制备

1.1 试验材料

研究黄土土样取自宁夏彭阳县当地灌溉田间地头,地表约 3.5 m 深处的 Q₃ 黄土(图 1)。依据《土工试验方法标准》^[16],测定其基本物理指标(见表 1),以及 Q₃ 黄土的粒径分布(图 2)。通过 X 射线荧光(XRF)分析确定了 Q₃ 黄土的主要氧化物成分(见表 2)。采用中和滴定法和离子色谱法测定了研究区灌溉水源(店子洼水库)中主要可溶盐离子含量(见表 3),结果显示,该水库水中的阳离子主要是 Na⁺,阴离子主要是 SO₄²⁻。由此可以推断,灌溉过程中,对黄土产生影响的可溶盐的主要成分为 Na₂SO₄,基于此,在本次试样制样时以 Na₂SO₄ 可溶盐为研究对象,制作研究样本。

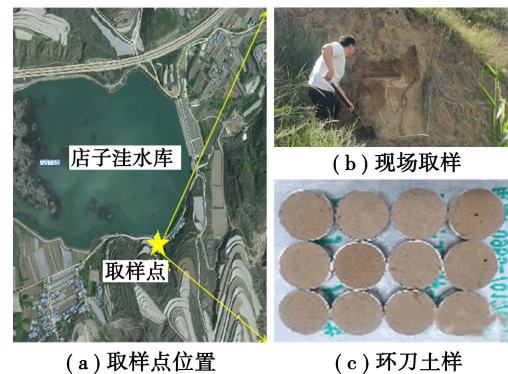


图 1 取样点位置及现场取样

Fig. 1 Sampling point location and field sampling

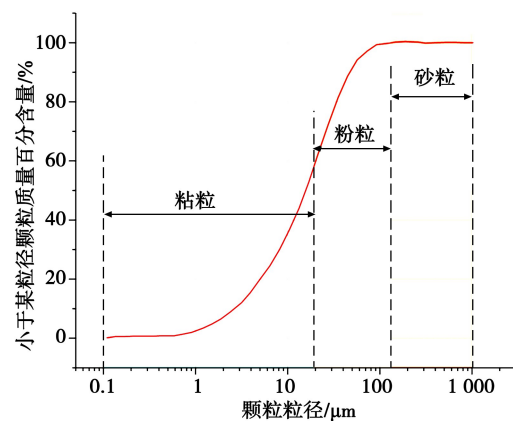


图 2 Q₃ 黄土颗粒粒径分布

Fig. 2 Particle diameter distribution of Q₃ loess

表 1 土壤物质基本物理指标

Table 1 Physical indices of the soil materials

物理指标	数值	物理指标	数值
干密度/(g·cm ⁻³)	1.34	液限/%	28.93
含水率/%	13.57	塑限/%	16.71
比重	2.72	塑性指数/%	12.22

表 2 研究区店子洼水库主要盐离子含量(单位:mg·kg⁻¹)

Table 2 Main salt ion content of Dianziwa Reservoir in the study area (unit: mg·kg⁻¹)

类型	均值	类型	均值
Ca ²⁺	31.2	K ⁺	12.0
Mg ²⁺	87.0	HCO ₃ ⁻	333.2
Na ⁺	344.0	SO ₄ ²⁻	431.9
Cl ⁻	333.2		

表 3 Q₃ 黄土中的主要化学氧化物成分

Table 3 Main chemical oxide components in Q₃ loess

氧化物	均值/%	氧化物	均值/%
SiO ₂	50.52	MgO	3.91
CaO	18.23	K ₂ O	2.42
Al ₂ O ₃	14.03	Na ₂ O	1.82
Fe ₂ O ₃	9.07		

1.2 盐污染黄土制备

本研究分析干湿循环和盐污染耦合作用对重塑黄土力学和微观结构的影响。根据研究区黄土的实际含水量和压实条件,将试样的含水量和干密度分别设定为 15% 和 1.34 g/cm³。

本次试验根据研究区灌溉水源的含盐特性,在 25 °C 的恒定室温下,通过将相应质量的固体纯 Na₂SO₄ 分别溶解在去离子水中来配制 4 种浓度(0、3.0、6.0 和 10 g/kg)的 Na₂SO₄ 溶液。

首先将收集的黄土碾碎,通过 2 mm 的筛孔筛分,然后在 105 °C 下脱水 24 h 以蒸发残余水。参考 Hu 等^[17] 的受污染土样制备方法,使用抽吸驱动的制备装置将污染物尽可能彻底地渗透到样本中(图 3)。最后,将制备好的黄土采用静压法制取小环刀样本(即直径 61.8 mm、高度 20 mm),得到 4 组 Na₂SO₄ 污染黄土样品(以下标记为 SL)。

1.3 干湿循环过程

在本研究中,根据图 4 所示的流程对黄土样品进行干湿循环。通过在 65 °C 的恒温鼓风干燥箱实现干燥,而加湿过程基于水膜转移法,使用滴定管以每阶段约 5% 的湿度向黄土中加设置浓度的 Na₂SO₄ 溶液至饱和^[14]。干湿循环的上限含水量为 28%,下限含水量为 1%,分别对应于加湿和干燥至恒定样品的湿度,并且用干湿循环处理的所有样品的最终含水量为 15%。根据已有文献可知^[15],黄土干湿循环的最佳最大次数在 11 次以内,因此,在本文以 0、2、4、6、8、10 次的干湿循环次数为研究对象。

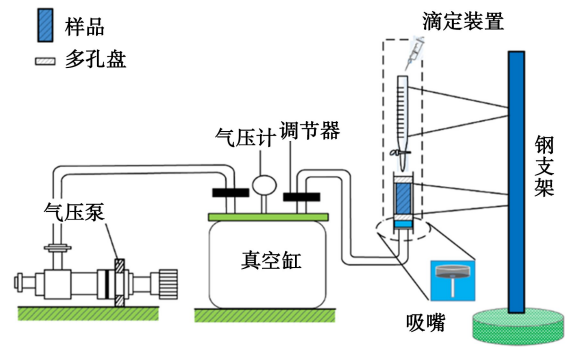


图 3 抽吸驱动的污染样品制备装置^[17]

Fig. 3 Suction-driven contaminated specimen preparation apparatus^[17]

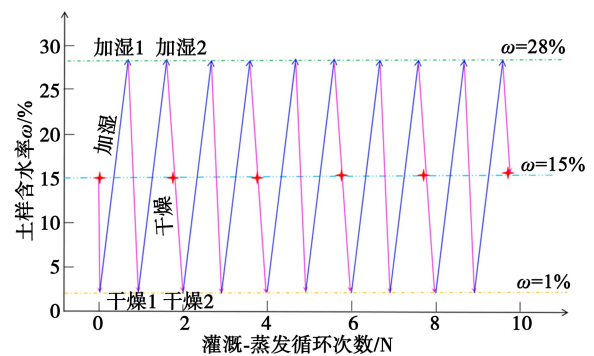


图 4 干湿循环途径

Fig. 4 Dry-wet cycling path

2 试验方法

2.1 剪切试验

采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 应变式直剪仪,在 0.8 mm/min 的剪切速率下对不同浓度 Na₂SO₄ 污染黄土试样(土样直径 61.8 mm、高度 20 mm)进行剪切。每 4 个土样为一组,分别设置 4 种浓度(0、3.0、6.0 和 10 g/kg)的 Na₂SO₄ 污染土样,共计 4 组;每组 4 个土样分别在 100、200、300 和 400 kPa 的垂直荷载作用下进行直接剪切试验,共计 4 组 16 个剪切土样。

2.2 微观结构试验

为了制备 SEM 测试样品,在干湿循环之后,将土样的中心部分小心地切成 20 mm × 20 mm × 10 mm(长×宽×高)的立方体,进行脱水干燥。然后将立方体折断,露出新的部分,并使用 Hitachi Mc1000 离子溅射器涂布器将样品涂金处理。最后,选取具有代表性的 4 个区域获取放大 1 000 倍微观图像,采用 MLA 650F 型扫描电镜观察土的微观结构。应用南京大学开发的 PCAS 软件系统进一步量化黄土微观结构,包括 SEM 图像预处理、分割、识别和微观参数提取^[18],二值化分

割增强图像效果,白色为颗粒,黑色为孔隙。

3 试验结果及分析

3.1 抗剪强度特征

以 200 kPa 垂直压力为代表分析 SL 土样的应力-应变曲线变化(图 5),其中用 γ 表示应变,即剪切位移与试样直径(61.8 mm)的比值^[17]。通过对比,可知干湿循环下的应力-应变曲线均表现出应变硬化特征。这种行为的特征是在较低的剪切应变下剪切应力迅速增加,然后随着应变量的增加趋于稳定。在 100 kPa、300 kPa 和 400 kPa 3 种压力下,SL 土样的应力-应变关系都出现了类似的变化,表明干湿循环对 SL 土样应力-应变关系的影响不显著。此外,不同浓度 Na_2SO_4 水平下的应力-应变曲线也呈现出应变硬化特征,表明干湿循环下盐污染物对应力-应变曲线形态的影响不明显。

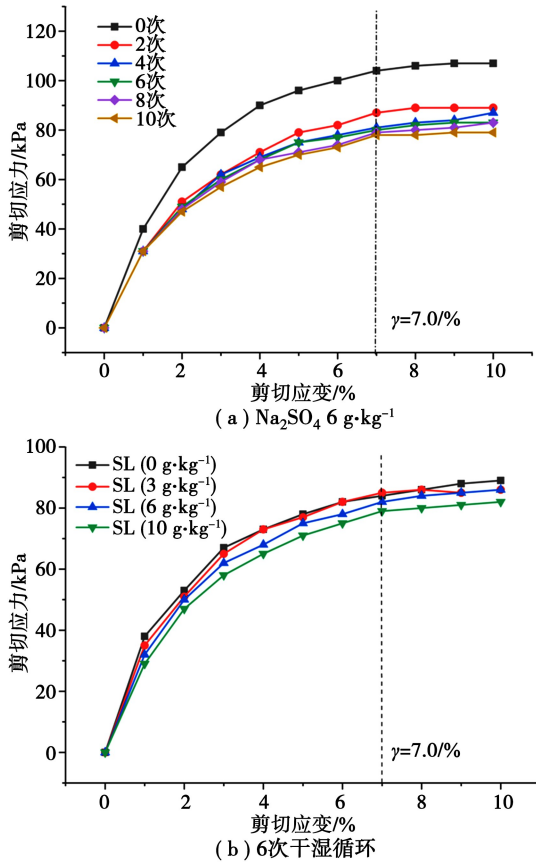


图 5 SL 土样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of SL soil samples

由于应力-应变曲线均显示屈服而非损伤,由图 5 可以看出,当应变 $\gamma = 7.0\%$ 时,试样的剪切强度变化率趋于稳定状态,因此本文取应变 $\gamma = 7.0\%$ 来确定土样的剪切强度。以 200 kPa 载荷为例,剪切强度在前 6 次循环中显著降低,随后趋于稳定,这意味着干湿循环导致劣化率降低,如图 6 所示。

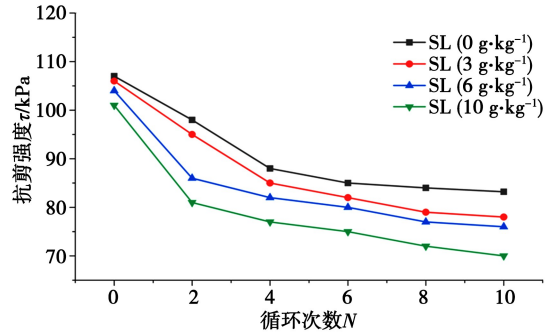
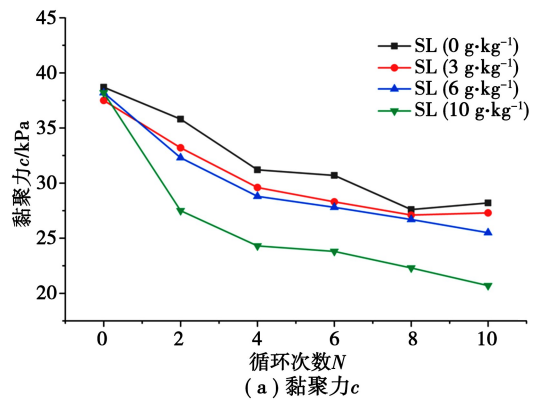
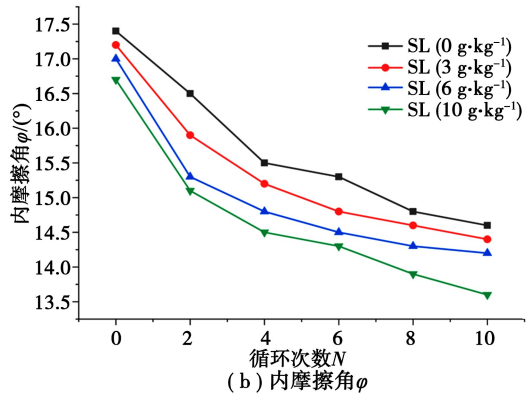


图 6 不同浓度条件下 SL 黄土的抗剪强度变化曲线

Fig. 6 Shear strength variation curves of SL loess under different concentrations



(a) 黏聚力 c



(b) 内摩擦角 ϕ

图 7 不同浓度条件下的 SL 黄土抗剪强度参数的变化

Fig. 7 Changes of shear strength parameters of SL loess under different concentrations

干湿循环后,黄土的抗剪强度随 Na_2SO_4 浓度的增加而不同程度地降低。图 7 表明,在干湿循环过程中,SL 黄土的黏聚力 c 表现出典型的减速退化,这与上述抗剪强度特征非常一致。SL 黄土的黏聚力 c 随 Na_2SO_4 浓度和循环次数的增加呈线性下降趋势。同一浓度下,随循环次数从零增加到 10 次时,黏聚力下降在 35.3%~49.8%;同一循环次数下,随着 Na_2SO_4 浓度从 0 g/kg 增加到 10 g/kg 时,黏聚力下降在 5.5%~26.6%;而在二者耦合作用下,下降率在 38.24%~51.4%。此外,SL 黄土的摩擦角 ϕ 的变化不如黏聚力明显,但也在发生下降,

下降率在 16.09% ~ 18.56% 范围内,最大下降了 3.8°。

3.2 干湿循环和污染导致的劣化比较

如上所述,Na₂SO₄ 污染加剧了黄土在干湿循环下的宏观劣化。从图 8(a) 不难发现,样本表面裂纹的长度、宽度和数量随着干湿循环而显著增加。此外,随着 Na₂SO₄ 浓度的增加,表面裂纹的发展比无污染时更明显(图 8(b))。

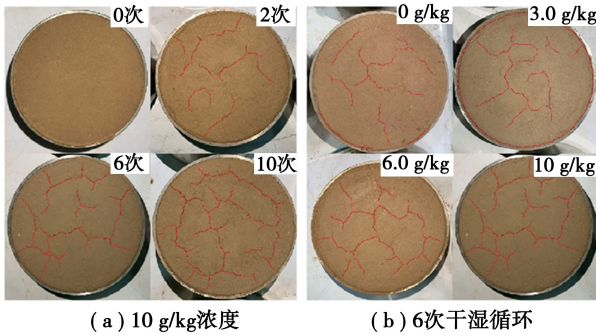


图 8 SL 土样的外观形态
Fig. 8 Appearance of SL soil samples

然而,由于土-水相互作用,量化由单个因素引起的退化程度是一个挑战。因此,将盐污染和干湿循环各自引起的劣化率从总量中分离出来(图 9),以量化各因素引起的劣化比例。

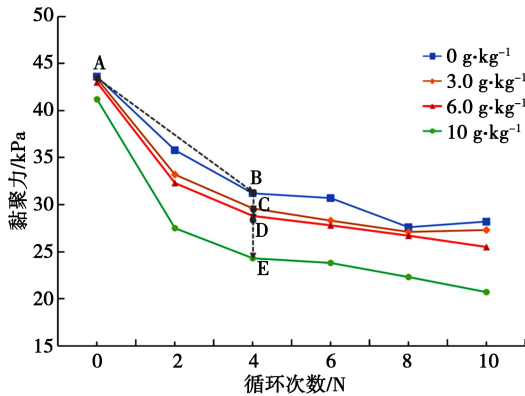


图 9 黄土的干湿循环作用和盐污染作用黏聚力劣化分解
Fig. 9 Dry and wet cycling effect and salt pollution effect of loess cohesion degradation and decomposition

为此,基于黏聚力 c 的劣化系数 K_c (K'_c) 定义如下:

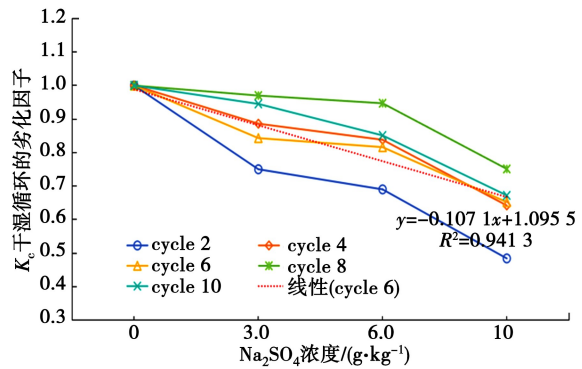
$$K_c = \frac{c_0 - c_{n0}}{c_0 - c_{ns}} \quad (1)$$

$$K'_c = \frac{c_{n0} - c_{ns}}{c_0 - c_{ns}} \quad (2)$$

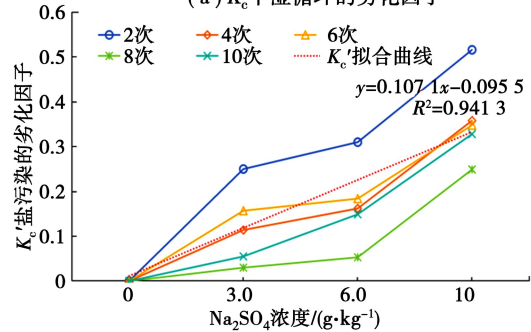
式中: K_c 代表干湿循环的劣化因子; K'_c 代表盐污染的劣化因子;其中, $K_c + K'_c = 1$ 。 c_0 代表干湿循环前未污染黄土的黏聚力; n 和 s 分别代表循环次数

和污染物浓度;例如: c_{23} 表示浓度为 3 g/kg 的 SL 黄土试样 2 次干湿循环后的黏聚力。

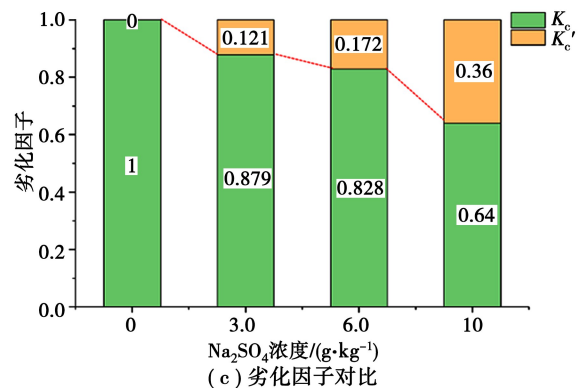
图 10 显示了 SL 黄土在测试条件下的劣化因子,在前 6 次循环中,干湿因子表现出相当大的变化,随着循环次数的增加而下降, K_c 劣化率下降最大至 35.8%,这对应于黄土中的实质性结构损伤。尽管在随后的循环中,由于该因素造成的损坏仍在继续,但劣化逐渐减小。而随着盐污染浓度的增加, K'_c 劣化率不断的增大,在 10 g/kg Na₂SO₄ 浓度下,最大升高至 35.8%,这表明由于盐污染损害的比例增加。



(a) K_c 干湿循环的劣化因子



(b) K'_c 盐污染的劣化因子



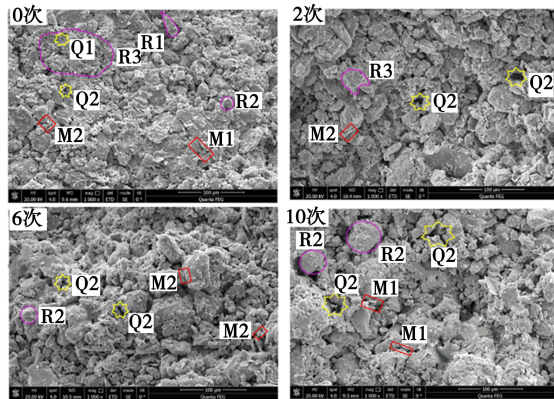
(c) 劣化因子对比

图 10 污染黄土的劣化因子变化

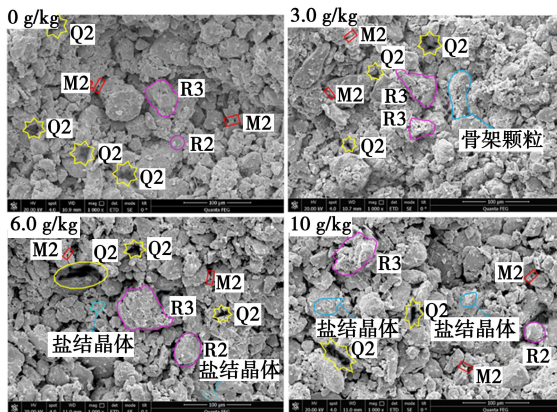
Fig. 10 Changes of degradation factors in polluted loess

充填胶结材料和面接触为主的分散接触。类似地,黄土中的顶部孔隙形成在架空触点中的颗粒之间;镶嵌孔隙和聚集体内孔隙则是由后两种接触方式形成的,即镶嵌接触和分散接触。

图 11 显示了不同污染条件下黄土样品放大 1 000 倍的 SEM 图像。干湿循环前的土壤骨架主要由粗砂、粉粒和胶结团聚体组成,胶结团聚体通过面或点连接。土壤中镶嵌孔隙和骨料内孔隙共存。



(a) 未污染土样($\times 1\,000$ 倍)



(b) 10次循环后SL土样($\times 1\,000$ 倍)

注: R1-角状颗粒, R2-圆形颗粒, R3-胶结骨料; M1-面接触, M2-点接触; Q1-骨料内孔隙, Q2-骨料间孔隙

图 11 黄土样品的微观结构形态

Fig. 11 Microstructural morphology of loess samples

(2) 孔隙面积比

将上述 SEM 图像二值化处理(图 12),并使用孔隙和裂纹分析系统进行孔隙鉴定^[19]。

根据孔隙半径将黄土孔隙分为 4 种类型^[20]:微孔($0\sim 1\ \mu\text{m}$)、小孔($1\sim 4\ \mu\text{m}$)、中孔($4\sim 16\ \mu\text{m}$)和大孔($>16\ \mu\text{m}$)。图 13 显示了上述孔隙类型的面积分布变化,其中直方图表示黄土孔隙面积占 SEM 图像面积的百分比,饼图表示各种孔隙占总孔隙的面积百分比。具体地,在干湿循环之前未污染土的总孔面积比为 13.6%,6 次循环后为 18.04%,并且该值随着 Na_2SO_4 浓度的增加而增加,当 Na_2SO_4 浓度为 $10\ \text{g/kg}$ 经历 6 次循环后其值为 31.94%,增加了 18.34%,说明在干湿和盐污染耦合作用下黄土微观结构产生了明显的改变。此外,黄土土样在未干湿循环前,土体内主要以小

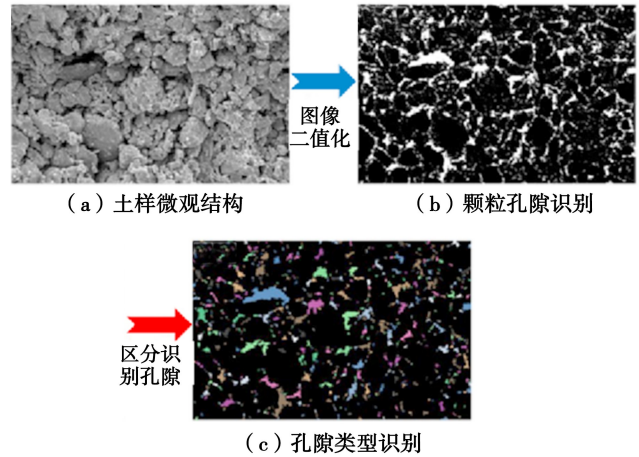


图 12 扫描电镜图像的二值化与孔隙识别($\times 1\,000$)

Fig. 12 Binarization and pore identification of SEM image($\times 1\,000$)

孔为主,中孔次之,微孔最少;当经历 6 次干湿循环后,土体内出现大孔,所有样品的总孔隙面积百分比均随着循环次数和盐浓度的增加而增加(图 13)。另外,同样经历 6 次循环时,未污染内的大孔占比为 0.68%,而加入 $10\ \text{g/kg Na}_2\text{SO}_4$ 后其值变为 3.11%,增加了 2.43%,说明盐污染对黄土土体内部结构的影响较明显;而微孔的面积比在上述过程中略有下降,但与其他 3 种孔隙类型的变化相比几乎可以忽略不计。

(3) 孔隙形态

黄土样品中孔隙形态的分布如图 14 所示。值得注意的是,中孔和大孔主要为长条状或不规则孔。随着 Na_2SO_4 污染物的加入,这两种孔隙的形态演化可分为两类,分为“圆形”演化和“长条形”演化,这也反映在孔隙面积的变化上不同类型的百分比。在第 6 次循环后(图 14(b)),所有样品中孔和大孔中圆形孔面积的比例均有不同程度的增加,在 $10\ \text{g/kg}$ 污染物浓度下,SL 土样有显著的增加,为 20.1%。这也可以解释与未污染黄土相比,在干湿循环后 SL 土体的强度和刚度的更大退化。由于圆形孔隙比细长孔隙为黄土颗粒提供了更多的滑动空间^[21],导致黄土在外部荷载作用下产生更大的压缩和剪切变形。

分形维数 D_f 通常用于表征孔隙形态的复杂性,其值越小,孔隙结构越简单,孔隙的空间形貌特征离光滑表面的程度越近^[22]。从表 4 可以看出,干湿循环前污染土的 D_f 值在 1.181 6~1.186 9 之间,均低于未污染土的 1.191 7。未污染土循环前的 D_f 值为 1.191 7,6 次循环后降低为 1.180 2,减小了 0.96%;而加入 $10\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 SL 黄土未循环前值为 1.181 6,与未污染土相比降低了 0.84%,劣化

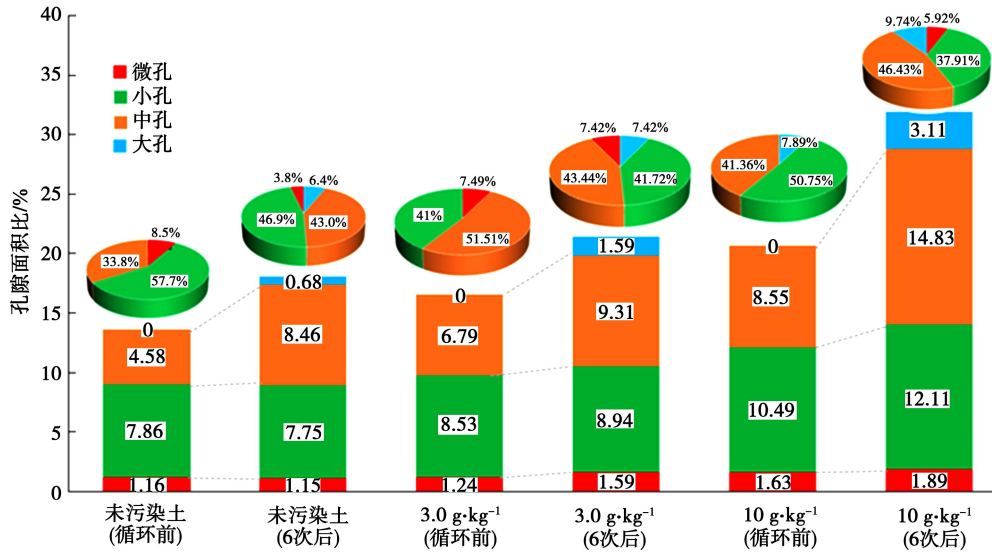


图 13 循环前后黄土中四种孔隙类型的面积变化

Fig. 13 Area changes of four types of pores in loess before and after cycling

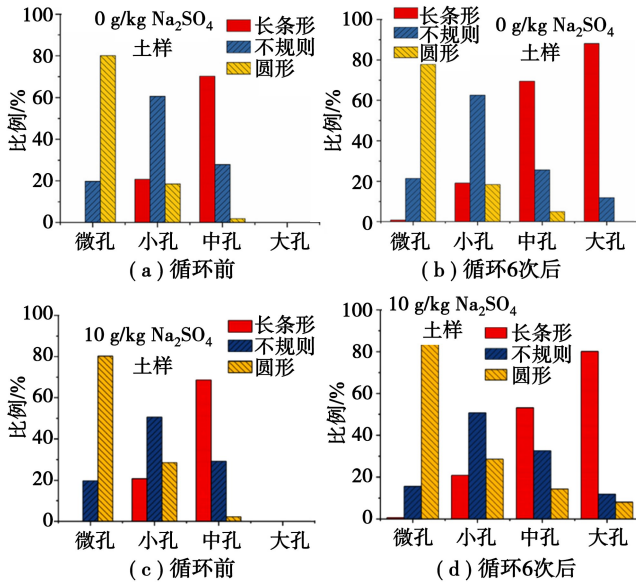


图 14 黄土样品孔隙形态分布

Fig. 14 Distribution of pore morphology in loess samples

表 4 黄土孔隙的分形维数

Table 4 Fractal dimension of the pores for loess samples

土样类型	Na ₂ SO ₄ 浓度 / (g · kg ⁻¹)	分形维数 D _f	
		循环前	循环后
未污染土样	0	1.191 7	1.180 2
	3.0	1.186 9	1.160 8
SL 土样	10	1.181 6	1.152 3

率提高了 0.12%; 当在污染和循环 6 次双重作用后, 其值降低为 1.152 3, 减小了 3.31%, 劣化率相对于单一的干湿循环和盐污染影响分别提高了

2.35% 和 2.47%。这表明黄土孔隙形态有简化的趋势, 即在盐渍环境下受干湿循环的影响, 颗粒与孔隙的接触边界趋于平滑, 这与污染土孔隙圆度的增加相一致。

(4) 孔隙方向

图 15 为黄土样品的孔隙玫瑰图, 表明干湿循环前未污染土的孔隙角度在 60° ~ 70° 分布最广, 120° ~ 130° 和 170° ~ 180° 占总孔隙面积的 0.265。另外, SL 土的孔隙相对集中在 40° ~ 50°, 孔面积比为 0.101。

本文采用概率熵 (H_m) 来表征黄土孔隙分布的方向性^[23], 其中 H_m 的值越小, 孔隙排列约规则, 其有序性和定向性越强, 结构越稳定^[24]。表 5 显示, 干湿循环前黄土样品的 H_m 随 Na₂SO₄ 浓度的增加而降低, 说明盐污染致使土体孔隙产生定向性。这种现象在 6 次循环后也出现了, 在浓度为 10 g · kg⁻¹ 时, H_m 值 0.992 8 减小为 0.968 8, 减小了 2.42%。随着 H_m 值的变小, 黄土孔隙排列约规则, 其有序性和定向性增强, 结构趋于稳定。结合孔隙面积分布特征, 发现干湿循环后的 SL 土样中, 中孔和大孔对总孔隙的贡献较大, 增加了孔隙在某一方

表 5 黄土孔隙方向概率熵

Table 5 Directional probability entropy of loess pores

土样类型	Na ₂ SO ₄ 浓度 / (g · kg ⁻¹)	方向概率熵 H_m	
		循环前	循环后
未污染土样	0	0.992 8	0.976 3
	0.3	0.990 5	0.972 6
SL 土样	1.0	0.989 1	0.968 8

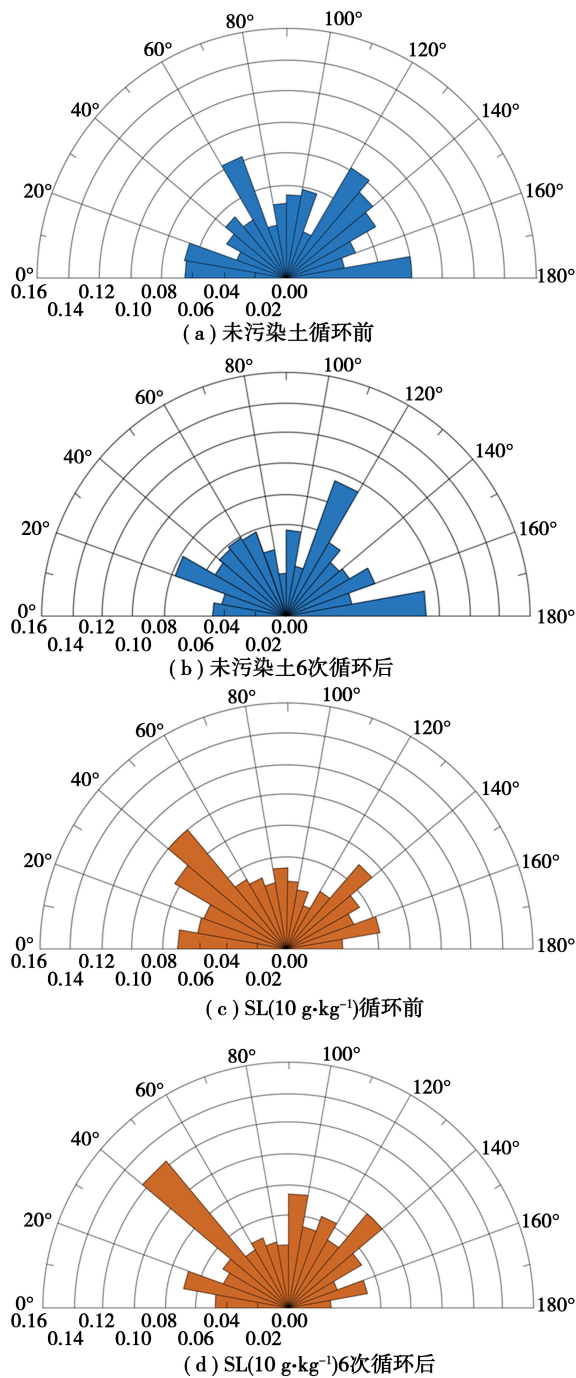


图 15 黄土土样孔隙方向分布

Fig. 15 The pore directional distribution of loess samples

向上的排列,也可以解释随着干湿和盐污染耦合作用的持续发展,土样抗剪强度下降变缓这一现象。

综合以上微观结构的定性和定量分析,可以得出,中孔和大孔的膨胀是导致黄土力学性能变化的主要原因。孔隙连通性的增加和粒间连接的减弱为剪切过程中土体骨架颗粒的运动和周转提供了必要的空间,使土体更容易变形甚至破坏。 Na_2SO_4 在污染土中反复结晶和溶解所引起的盐胀

与盐蚀效应共同作用^[17],在干湿循环的作用下,对土壤结构的破坏作用更大。更重要的是,硫酸盐可持续相变,从而改变黄土颗粒之间的原始相对位置,加剧中孔和大孔的分布,这是干湿处理后污染土中观察到的力学性质恶化的关键因素。

4 结论

(1) 干湿循环对盐污染黄土的应力-应变曲线均表现出应变硬化特征,黄土的抗剪强度随双重作用的增加而降低;黏聚力表现出明显的劣化特性,下降率在 38.24% ~ 51.4%;内摩擦角退化幅度较小。

(2) 土样表面裂纹随 Na_2SO_4 浓度增加而更加明显;在 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度污染物环境下,盐污染劣化因子提高至 35.8%,表明盐污染对黄土的损害比例增大。

(3) 随着循环次数的增加,污染黄土中单体颗粒比例显著增加,团聚体开始解体;经历 6 次循环后,污染黄土孔隙总孔隙面积比增加了 18.46%,盐污染作用下大孔隙占比增加了 2.43%。

(4) 伴随盐污染浓度增加,孔隙分形维数减小,表明黄土孔隙形态有简化的趋势;并且概率熵随着污染浓度增加而降低;干湿循环过程中, Na_2SO_4 反复结晶和溶解,从而诱发土壤产生的盐胀与盐蚀作用;干湿循环作用对土壤结构的破坏作用比盐污染更大。

参考文献 (References)

- [1] 张林,李同录,李纪恒,等. 不同吸力和应力路径下 Q_3 原状黄土的力学特性[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (4): 1125-1133. (Zhang Lin, Li Tonglin, Li Jiheng, et al. Mechanical properties of Q_3 intact loess under different suction and stress paths [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19 (4): 1125-1133. (in Chinese))
- [2] 王铁行,赵翊豪,金鑫. 喷射秸秆加筋黄土的强度特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20 (3): 800-811. (Wang Tiehang, Zhao Yihao, Jin Xin. Study on strength characteristics of reinforced loess with shotcrete straw [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20 (3): 800-811. (in Chinese))
- [3] 赵宽耀,许强,陈婉琳,等. 黄土塬边漫灌区土体水入渗过程研究[J]. 岩土力学, 2024, 45 (9): 2754-2764. (Zhao Kuanyao, Xu Qiang, Chen Wanlin, et al. Study on soil water infiltration process in flood irrigation area on the edge of Loess Plateau [J]. Rock

- and Soil Mechanics, 2024, 45(9): 2754-2764. (in Chinese))
- [4] Xu L, Coop M R. Influence of structure on the behavior of a saturated clayey loess[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53: 1026-1037.
- [5] Ietto F, Perri F, Cella F, et al. Weathering characterization for landslides modeling in granitoid rock masses of the Capo Vaticano promontory (Calabria, Italy)[J]. Landslides, 2018, 15: 43-62.
- [6] Wang L, Shao S, She F, et al. A new method for evaluating loess collapsibility and its application[J]. Engineering Geology, 2019, 264: 105376.
- [7] Ni W K, Yuan K Z, Lv X F, et al. Comparison and quantitative analysis of microstructure parameters between original loess and remoulded loess under different wetting-drying cycles[J]. Scientific Report, 2020, 45: 443-456.
- [8] Pires F L, Auler C A, Roque L W, et al. X-ray microtomography analysis of soil pore structure dynamics under wetting and drying cycles[J]. Geoderma, 2020, 362: 1103.
- [9] AbediKoupai J, Fatahizadeh M, Mosaddeghi M R. Effect of pore water pH on mechanical properties of clay soil [J]. Bulltin of Engineering Geology and Environment, 2020, 79, (3): 1461-1469.
- [10] 刘汉龙,朱春鹏,张晓璐. 酸碱污染土基本物理性质的室内测试研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1213-1217. (Liu Hanlong, Zhu Chunpeng, Zhang Xiaolu. Laboratory testing of basic physical properties of acid-alkali contaminated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1213-1217. (in Chinese))
- [11] Liu H L, Zhu C P, Zhang X L. Fundamental physical properties of soil polluted by acid and alkali in laboratory [J]. Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1213-1217.
- [12] Travis M J, Wiel-Shafran A, Weisbrod, et al. Greywater reuse for irrigation: Effect on soil properties [J]. Science of The Total Environment, 2010, 408(12): 2501-2508.
- [13] Solanki P, Zaman M. Effect of wet-dry cycling on the mechanical properties of stabilized subgrade soils [A]// 2014 Congress on Geo-Characterization and Modeling for Sustainability[C]. 2014:3625-3634.
- [14] Jing J, Hou J M, Sun W, et al. Study on influencing factors of unsaturated loess slope stability under dry-wet cycle conditions[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128187.
- [15] Liu C, Shi B, Zhou J. Quantification and characterization of microporosity by image processing, Geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials[J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1): 97-106.
- [16] 中华人民共和国水利部. 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 Water Resources of the People's Republic of China. Geotechnical test method standard (GB/T 50123-20) 19 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [17] Hu W L, Cheng W, Wen S J, et al. Effects of chemical contamination on microscale structural characteristics of intact loess and resultant macroscale mechanical properties [J]. Catena, 2021, 203: 105361.
- [18] Nie Y P, Ni W K, Lü X F, et al. Macroscopic mechanical behavior and microstructural evolution of compacted loess in the Chinese Loess Plateau [J]. Soil Tillage Research, 2023, 232: 105767.
- [19] Lei H Y, Lei W, Zhang W D, et al. Impact of environmental acidity on the geomechanical and mineralogical behavior of marine clay [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81, (1): 1-12.
- [20] 张凌科,崔志勇. 干湿作用下膨胀土的压缩与渗透特性冻结融化周期[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 728-740. (Zhang Linke, Cui Zhiyong. Compression and permeability characteristics of expansive soil under drying-wetting-freezing-thawing cycles [J]. Rock Soil Mechanics, 2023, 44(3): 728-740. (in Chinese))
- [21] Cui S L, Wang L X, Wang J D, et al. Engineering properties of collapsible loess stabilized by cement kilndust [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2019, 56: 328-335.
- [22] Yuan K Z, Li Q X, Ni W K, et al. Analysis of the structural and environmental impacts of hydrophilic ZSM-5 molecular sieve on loess [J]. Construction and Building Materials, 2023, 366: 130248.
- [23] Yuan K Z, Li Q X, Ni W K, et al. Graphene stabilized loess: Mechanical properties, microstructural evolution and life cycle assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 389: 136081.
- [24] Jiang Y L, Chen H E, Leng G J. Dynamic elastic modulus of Xianyang loess based on microscopic analysis: a qualitative evaluation [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2022, 26(8): 3331-3356.