

干湿循环作用下易溶盐含量对 伊犁黄土强度的影响

张志伟, 张紫昭, 徐元鹏

(新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: [目的] 分析干湿循环与易溶盐含量耦合作用下黄土强度劣化的宏观及微观机制, 为伊犁地区进行工程建设和地质灾害防治提供依据。[方法] 以伊犁地区典型黄土为研究对象, 通过三轴剪切试验、扫描电子显微镜(SEM)试验与核磁共振(NMR)试验, 分析不同干湿循环次数和不同易溶盐含量对黄土力学特性及微观结构的影响规律。[结果] ①经历10次干湿循环($\eta=0\%$)时, 土壤黏聚力下降17.5%; 易溶盐含量从0%增加到2% ($N=0$)时, 土壤黏聚力下降3.5%; 在干湿循环与易溶盐耦合作用下 ($N=10, \eta=2\%$), 土壤黏聚力下降24.3%, 表现出显著的协同劣化效应。②易溶盐对土壤黏聚力与内摩擦角均具有极显著影响, 而干湿循环对黏聚力具有极显著影响, 对内摩擦角具有显著影响。③在低围压条件下, 黄土破坏模式由脆性转变为塑性破坏; 高围压环境下虽保持较高强度, 但仍持续劣化。④随着干湿循环次数增加和易溶盐含量升高, 裂隙发育, 土壤孔隙分形维数与孔隙面积比逐渐增大; 土壤微孔减少, 中孔与大孔增多, 导致孔隙体系疏松度增加且连通性增强。[结论] 在干湿循环与易溶盐耦合条件下, 干湿循环主导的反复胀缩与盐分溶解—结晶产生的结晶应力协同作用, 共同破坏土体结构, 从而引发伊犁黄土强度衰减与结构劣化。

关键词: 干湿循环; 易溶盐; 伊犁黄土; 强度劣化; 微观结构

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0053-12

中图分类号: P642.3, P642.13

文献参数: 张志伟, 张紫昭, 徐元鹏. 干湿循环作用下易溶盐含量对伊犁黄土强度的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 53-64. Zhang Zhiwei, Zhang Zizhao, Xu Yuanpeng. Influence of soluble salt content on strength of Ili loess under wet-dry cycle conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 53-64.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.015

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.015

Influence of soluble salt content on strength of Ili loess under wet-dry cycle conditions

Zhang Zhiwei, Zhang Zizhao, Xu Yuanpeng

(School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: [Objective] The macroscopic and microscopic mechanisms of loess strength degradation under the coupled effects of wet-dry cycles and soluble salt content were analyzed in order to provide a basis for engineering construction and geologic disaster prevention and control in the Ili region. [Methods] The typical loess from the Ili region was taken as the research object. The influence of different numbers of wet-dry cycles and different soluble salt contents on the mechanical properties and microstructure of loess was analyzed through triaxial shear tests, scanning electron microscope (SEM) tests, and nuclear magnetic resonance (NMR) tests. [Results] ① The cohesion decreased by approximately 17.5% after only 10 wet-dry cycles ($\eta=0\%$). When the soluble salt content increased from 0% to 2% ($N=0$), cohesion decreased by about 3.5%. However, under their coupled effects ($N=10, \eta=2\%$), cohesion decreased by 24.3%, demonstrating a significant synergistic deterioration effect. ② Soluble salts exerted a highly significant influence on both cohesion and internal friction angle, while wet-dry

收稿日期: 2025-10-08

修回日期: 2025-11-21

采用日期: 2025-11-21

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: 张志伟(2001—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为黄土力学性质。Email: 2940464910@qq.com。

通信作者: 张紫昭(1981—), 男(汉族), 山东省威海市人, 博士, 教授, 主要从事地质灾害与矿山地质方面的研究。Email: zhangzizhao@xju.edu.cn。

cycles had a highly significant influence on cohesion and a significant influence on internal friction angle. ③ Under low confining pressures, the failure mode of loess shifted from brittle to plastic failure. Under high confining pressures, although the strength remained relatively high, degradation continued. ④ With increasing numbers of wet-dry cycles and soluble salt content, fracture development occurred, gradually increasing the pore fractal dimension and pore area ratio of loess. A reduction in micropores, along with a sharp expansion of mesopores and macropores, leading to increased porosity and enhanced connectivity within the pore system. [Conclusion] Under the coupled conditions of wet-dry cycles and soluble salts, the synergistic effects of repeated swelling and shrinkage driven by the wet-dry cycles and crystallization stresses generated by salt dissolution and recrystallization jointly disrupt soil structure. This process leads to strength degradation and structural degradation in Ili loess.

Keywords: wet-dry cycle; soluble salt; Ili loess; strength degradation; microstructure

伊犁盆地位于中国西北内陆干旱半干旱气候区,东高西低,呈向西开口的喇叭形,由于西风气流的影响,该地区存在着大面积的黄土堆积,且明显区别于季风区黄土高原的黄土^[1]。当地黄土由于独特的地质成因与气候条件,呈现出较高的易溶盐含量及显著的结构敏感性,试验测定的易溶盐含量最大可达19.2 g/kg,场地最大自重湿陷量为3.52 m^[2],显示出极强的环境敏感性与工程劣化倾向。伊犁黄土在伊犁河、巩乃斯河、特克斯河、喀什河、恰伦河、奇利克河等多条河流沿线梯田中呈现带状分布。在低丘陵地区、山麓斜坡和沙漠边缘地带,伊犁黄土的厚度从几米到近百米不等^[3]。伊犁地区的降水主要集中在4—9月,约占全年降水量的68.5%,同期蒸发量为1 331.2 mm,是降水量的3.2倍左右^[4]。伊犁黄土易受干湿循环作用和盐分溶蚀的影响,导致其工程性质和结构稳定性劣化明显。在自然降雨和蒸发反复作用下,极易引发一系列地质灾害与工程问题,例如,黄土边坡的表层剥落、冲沟发育和浅层滑塌;渠道衬砌的破坏;路基的不均匀沉降和盐胀变形;建筑物地基的湿陷变形。因此,研究干湿循环作用下易溶盐含量对黄土强度及微观结构影响具有重要的工程实践意义,可为伊犁地区及其他相同气候、土壤类型的地区进行工程建设和地质灾害防治提供依据。

已有研究表明,干湿循环作用显著影响黄土的物理力学强度,干湿循环作用使得土体结构松散化,孔隙率增大,抗剪强度降低^[5]。易溶盐的存在则进一步加剧了黄土中微观结构的劣化过程,盐分的反复溶解、结晶作用可产生结晶应力,破坏土颗粒之间的胶结,使土体强度降低,结构趋于复杂化^[6]。

近年来,国内外学者针对黄土干湿循环作用下易溶盐对黄土的影响开展了大量研究,取得了一定成果。赵庆玉等^[7]研究了易溶盐含量对原状黄土强度的影响,发现原状非饱和伊犁黄土的有效黏聚力随基质吸力的增大而增大,随易溶盐含量的增加呈

先增大后减小的趋势;拓文鑫等^[8]通过对不同含盐量的黄土进行湿陷试验,得出了干湿和盐蚀的耦合作用使黄土的湿陷系数增大;沈云霞等^[9]通过直剪试验发现了干湿循环后的土体黏聚力随着盐分含量的增加呈下降趋势;李培月等^[10]发现NaCl溶液的人渗促进了石膏等矿物的溶解作用,导致土体孔隙更加发育,渗透性增强;Zhang Fanyu等^[11]通过不排水剪切试验探究了不同浓度的盐溶液对饱和黄土强度的影响;Hao Zhitao等^[12]发现随着干湿循环和含盐量的增加,土壤质量损失恶化,地表裂纹率增加,土壤黏聚力总体呈下降趋势;许健等^[13]发现干湿循环条件下渗透系数随Na₂SO₄质量分数增加近似呈线性增大特征,渗透系数随围压增大逐渐减小且其衰减幅度逐渐减小;王飞等^[14]利用双线法测量发现干湿作用对黄土湿陷变形的影响十分显著;焦少通等^[15]通过微观结构研究发现,干湿循环作用下黄土颗粒间胶结破坏显著,孔隙明显增大,进一步恶化了黄土结构。

然而综观以上研究,众多学者大多关注于干湿循环作用或易溶盐含量等单一因素对黄土物理力学性质和黄土湿陷性的影响,在干湿循环次数与不同含量盐耦合作用下的强度劣化与微观结构演化规律研究仍较为缺乏,且研究区域多集中于黄土高原,对伊犁地区特有的硫酸盐型黄土的研究仍较缺乏。

本研究以伊犁地区典型黄土为研究对象,通过三轴剪切试验、扫描电子显微镜(SEM)试验与核磁共振(NMR)试验,分析不同干湿循环次数和不同易溶盐含量对黄土力学特性及微观结构的影响规律。通过宏观力学参数与微观结构参数的变化,理解干湿循环作用下易溶盐含量对黄土结构劣化机制,为黄土地区工程实践提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

取样地点位于伊犁地区新源县阿勒玛勒镇附近

的典型黄土区。2025年5月进行野外取样,为避
地表腐化植物等扰动土对试验结果造成影响,确定
取样深度为2.0 m。该区域黄土呈淡黄色,天然含
水量较高。

将完全风干后的伊犁黄土土样过2 mm筛,进行
颗粒分析。采用Microtrac激光粒度分析仪分析黄土
的粒度分布(图1)。伊犁黄土土样风干后碾碎,进行
X射线衍射测试(XRD),测定其矿物成分(表1)。根
据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行基
本物理指标测定,同时测得伊犁黄土的离子成分(表
2和表3)。其中,天然含水率采用烘干法测定,天然
密度通过环刀法测定。制取重塑黄土试样,利用
JDS-2型电动击实仪,测得最优含水率和最大干密
度,利用塑限联合测定法测定液限和塑限,采用浸水
法测定其饱和含水率。

1.2 试样制备

由于伊犁黄土中的主要阴离子为SO₄²⁻,故采用
无水硫酸钠作为易溶盐,硫酸钠含量不小于99.0%,
pH 5.0~8.0。首先将伊犁黄土进行洗土,去除其中
可溶盐,在最后一次清洗后,取少量盐渍土清洗液,
加入BaCl₂溶液,直至溶液不再产生白色沉淀,以此

判断土体中的可溶盐已被完全去除。本研究中,控
制土壤样品的含水率为17.4%,设置5种不同水平
干土质量的硫酸钠含量(γ),即0,0.5%,1%,
1.5%,2%。

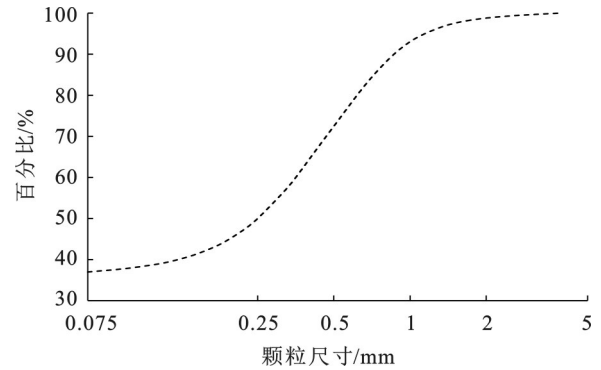


图1 伊犁黄土颗粒级配累计曲线
Fig.1 Cumulative curve of particle size
distribution of Ili loess

表1 伊犁黄土矿物成分分析结果

Table 1 Analysis results of mineral composition of Ili loess

项目	石英	方解石	白云石	绿泥石	钠长石	白云母	金红石
数值	28.1%	21.1%	3.2%	10.5%	19.5%	15.0%	1.5%

表2 土样基本物理指标

Table 2 Basic physical indicators of soil samples

项目	天然含水率	天然密度	天然干密度	饱和含水率	塑限(W_p)	液限(W_L)	最大干密度	最优含水率
数值	20.89%	1.96 g/cm ³	1.64 g/cm ³	24.57%	17.34%	27.09%	1.86 g/cm ³	17.40%

表3 土样初始的可溶盐含量

Table 3 Initial soluble salt content of
soil samples

项目	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻
数值	0.82	0.23	0.04	0.12	8.55	0.46	0	0.13

1.3 试验方案

1.3.1 干湿循环方案

干湿循环次数设置为0,1,3,5,10次。干湿循环
过程以配制含水率(17.40%)作为初始含水率,下限
含水率为5.00%,上限含水率为24.57%(饱和含水
率),最后一次循环后将试样含水率控制在初始含水
率(17.40%)。干湿循环过程中,土体的循环增湿与
减湿会导致土体的破坏、崩解,因此为保证试样的
完整性,对各试验使用的试样进行侧向及轴向限制。
其中三轴剪切试样和核磁共振试样($\Phi 39.1$ mm \times
80.0 mm)采用饱和器进行侧向及轴向束缚;SEM试
样以环刀($\Phi 61.8$ mm \times 20.0 mm)作为侧向约束,以
 $\Phi 61.8$ mm的透水石作为轴向约束。

干湿循环增湿过程采用浸泡法进行。三轴剪切
试样和核磁共振试样放入饱和器后进行干湿循环
时,为防止土样侧壁与饱和器之间粘连导致土样破
坏,在土样放入饱和器之前将土样侧壁用保鲜膜包
裹,轴向不进行包裹,然后整体浸泡于蒸馏水中。
SEM试样将轴向用透水石束缚后,整体包裹保鲜膜
固定,轴向上有透水石的部分将保鲜膜开孔,然后整
体浸泡于纯净水内。干湿循环时增湿过程整体浸泡
12 h后试样水分含量趋近于饱和,即视为试样已达
到饱和状态。试样达到饱和状态后,整体取出置于
保湿皿内12 h,使水分能够在土体中均匀分布,结
束一次增湿过程。

干湿循环减湿过程采用烘干法进行。试样在增
湿结束静置12 h后,将试样外包的保鲜膜去除,去
除透水石,利用滤纸吸除表面浮水,之后测量其质
量,计算含水率。将试样放入烘箱中,温度设置为
50℃,每小时取出样品测量其质量并计算试样的
瞬时含水率,直到瞬时含水率达到预设含水率,含
水率的变化范围控制在 $\pm 0.1\%$ 内。当试样的瞬
时含水率满足要

求时,取出试样,外包保鲜膜静置于保湿皿内,静置时间为 12 h,视为试样内的水分已分布均匀,即完成减湿过程。图 2 为干湿循环过程示意图。

1.3.2 力学强度特性测试

采用 TKA-TTS-1U 型全自动非饱和土应力路径三轴仪进行土壤力学强度测试。此仪器主要包含孔隙水压力控制仪、围压控制仪、体变仪、总控制器、计算机软件以及数据采集系统等部分。由于干湿循环作用多发生在土体表层,土体内部水分一般情况下不会发生排水固结,因此选用不固结不排水三轴剪切试验(UU 试验)。依据土工试验方法标准,剪切应变速率为 0.5 mm/min(0.5%/min~1.0%/min)。在剪切过程中,试样在应力-应变曲线峰值后继续剪切,当峰值后的轴向应变达到 3%~5%时,即可完成试验。如果曲线没有峰值,则应进行到轴向应变 20%

为止。试验围压设置为 100,200,300 kPa(表 4)。该地区多层建筑、路基及小型构筑物等浅基础下的地基附加应力通常处于 80~300 kPa,因此所选三档围压能够较好地反映工程实际受力水平。

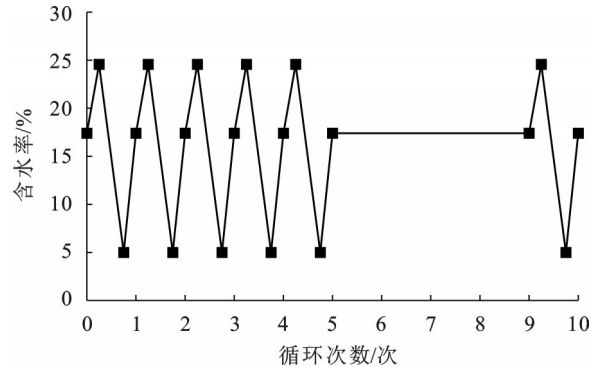


图 2 干湿循环过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of wet-dry cycle process

表 4 三轴剪切试验方案

Table 4 Triaxial shear test scheme

试验类型	易溶盐含量	干湿循环次数/次	剪切速率/(mm·min ⁻¹)	围压/kPa
不固结不排水三轴剪切试验(UU 试验)	0,0.5%,1%,1.5%,2%	0,1,3,5,10	0.5	100,200,300

1.3.3 微观结构观测

采用扫描电子显微镜(SEM)对不同易溶盐含量的黄土试样在经历规定干湿循环次数后的表面形貌变化进行测试分析。扫描电镜试验所使用的仪器为发射扫描电镜 Sigma300。在进行测试前,需先将试样烘干,然后对试样进行切割处理,切割尺寸为 1 cm×1 cm×0.2 cm。随后,使用导电胶将试样固定在试样台上,利用吸耳球仔细清除试样表面的浮土,防止在试验抽真空过程中,表面浮土堵塞真空机。之后,将承载试样的试样台放入喷金仪,进行喷金操作并预抽真空。最后,把试样放入仪器中抽真空使其导电,开展观测。

进行测试的共计 9 个试样,设定放大倍数分别为 200,500,1 000,1 200 倍,在每个放大倍数下拍摄 2 个形貌影像,最终共获取 72 张扫描电子影像。

1.3.4 孔隙结构定量分析

采用核磁共振(NMR)技术进行孔隙结构测定。核磁共振(NMR)技术是基于原子核的磁性与外加磁场之间的相互作用的分析方法,其中氢核(¹H)是最常用的检测对象^[16]。¹H NMR 的原理是测量当样品处于射频磁场中时质子从磁场所吸收的能量,该方法也适用于土中赋水孔隙的量测^[17]。

本研究采用苏州纽迈分析仪器生产的

MacroMR12-150 H-I 型核磁共振仪主要由永磁体、射频发射与接收系统及数据采集与分析模块组成。温控设备采用配套低温冷浴槽,控温范围为 -70℃~30℃,控温精度为 ±0.05℃。通过对 ¹H 质子进行核磁共振测试,测试干湿循环条件下,不同易溶盐含量对黄土土体内部孔隙水的弛豫特征的影响,分析试样内部孔隙结构分布特征和数量。针对与三轴试验相同配比和尺寸的试样,开展饱水 24 h 后的核磁共振测试。首先将试样置于真空饱和装置中,然后对装置内部进行抽真空操作,排出孔隙中的空气。在保持真空状态下向装置内加水至饱和,确保试样中各尺度孔隙被水分最大限度地填充,从而使核磁共振所测得的孔隙流体流动的松弛时间(T_2)谱能够准确反映试样的全孔隙结构。

T_2 可表示为^[18]

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2f}} + \frac{1}{T_{2s}} + \frac{1}{T_{2d}} \quad (1)$$

式中: T_2 是核磁共振的横向弛豫时间(ms); T_{2f} 是容器中孔隙流体的弛豫时间(ms); T_{2s} 和 T_{2d} 分别是由于表面流体弛豫引起的孔隙流体弛豫时间和在磁场梯度下扩散引起的弛豫时间, T_{2s} 的计算公式为

$$\frac{1}{T_{2s}} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right) \quad (2)$$

式中: ρ_2 是与土壤性质有关的松弛强度; S 为孔隙的表面积(μm^2); V 为孔隙的体积(μm^3)。

当只考虑单向饱和和流体流动时,自由松弛可以忽略不计,因为自由松弛远慢于表面弛豫。同时,当磁场均匀且回波时间间隔足够短时,解析扩散弛豫也可以忽略不计。因此,流体的弛豫主要来源于土壤颗粒的表面弛豫,公式(2)可以近似表示为^[18]

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right)_{\text{pore}} \approx \rho_2 \frac{F_s}{R} \quad (3)$$

式中: F_s 为孔隙形状因子(假定黄土孔隙为圆柱形, $F_s=2$); R 为孔隙半径(μm)。

2 结果与分析

2.1 力学强度特性变化

2.1.1 应力-应变关系

通过对不同干湿循环次数、不同易溶盐含量的试样进行不固结不排水三轴试验,结果发现,围压为 200 kPa 和 300 kPa 时,不同干湿循环次数下试样的应力-应变曲线均表现为应变硬化型,200 kPa 和 300 kPa 变化规律相似,且 200 kPa 变化幅度均不及 300 kPa 时明显,故选取围压 100 kPa(图 3)和 300 kPa(图 4)下的应力-应变曲线进行分析。

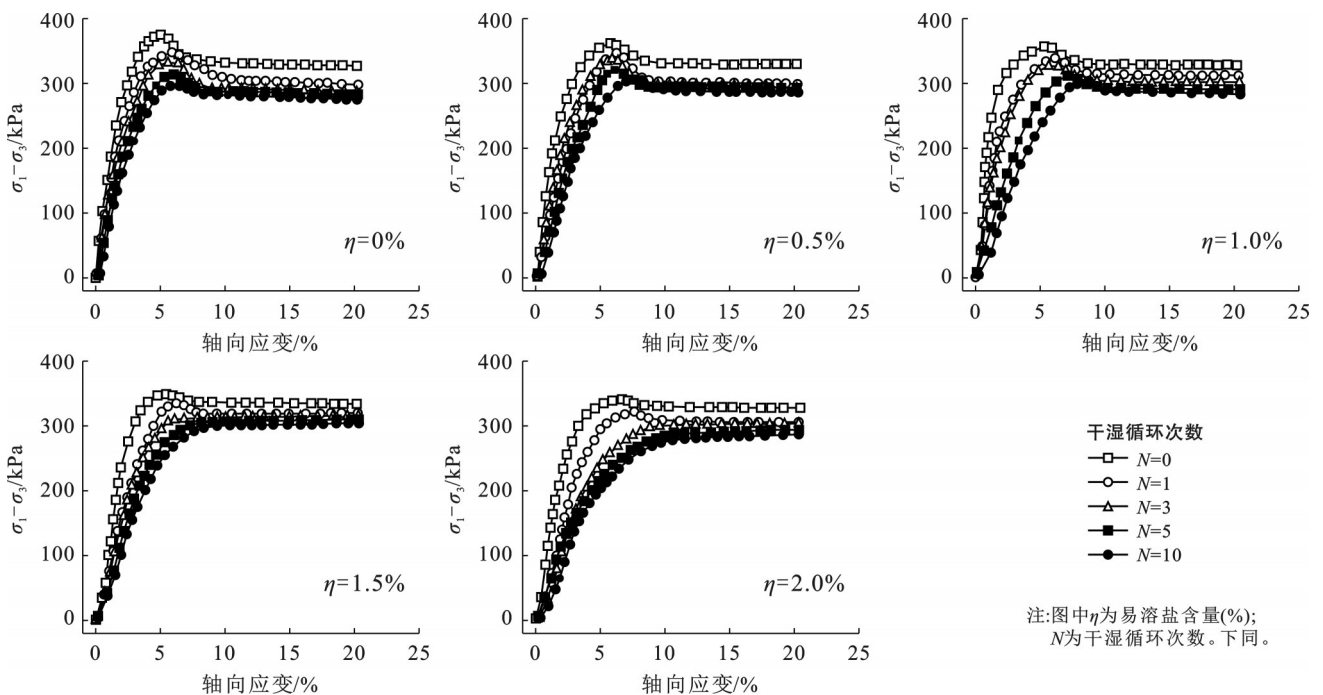


图 3 不同干湿循环次数对黄土应力应变关系的影响(围压 100 kPa)

Fig.3 Influence of different numbers of wet-dry cycles on stress-strain relationship of loess (confining pressure 100 kPa)

研究表明,在围压 100 kPa 下,随着干湿循环次数与易溶盐含量的增加,试样由脆性破坏转变为塑性破坏,应力-应变曲线由应变软化型转变为应变硬化型。围压 300 kPa 下均表现为塑性破坏,应力-应变曲线为应变硬化型^[19]。

应力-应变曲线类型变化的可能原因是试样黄土因其具有初始结构性,在剪切过程中,随着初始结构逐渐损伤破坏,出现结构丧失效应,同时次生结构形成,随着试样密度增大,出现致密效应。当结构丧失效应强于致密效应时,剪胀效应主导,应力应变呈应变软化型;反之,当结构丧失效应弱于致密效应时,剪缩效应主导,应力应变呈应变硬化型^[20]。

由围压 100 kPa 和 300 kPa 的三轴 UU 试验结果

可以看出,随着干湿循环次数的增加,应力表现出明显的劣化。特别是在易溶盐含量较高时,这种强度的劣化效应尤为显著,随着干湿循环次数的增加,土体的峰值应力和最终应力值整体呈现下降趋势,尤其是在干湿循环 10 次时降幅最为明显。表明干湿变化破坏了土体结构,使得土颗粒之间的胶结强度降低,孔隙率增大,从而导致应力值减弱。易溶盐含量的变化对土体强度表现出明显的非线性影响。在干湿循环次数相同时,随着易溶盐含量的增加,应力-应变曲线整体下移,在 $\eta=2.0\%$ 时,土体的强度最低,表现出剪胀性降低与结构脆弱化特征。产生这种现象的主要原因是易溶盐在干湿循环过程中反复溶解、结晶,在孔隙中形成结晶应力,试样内部土

粒间的连接遭到破坏,试样在循环后内部的孔隙率变大,进而使土体结构松散,导致黄土的强度降

低^[21],这一现象可通过应力-应变曲线直观表现出来。

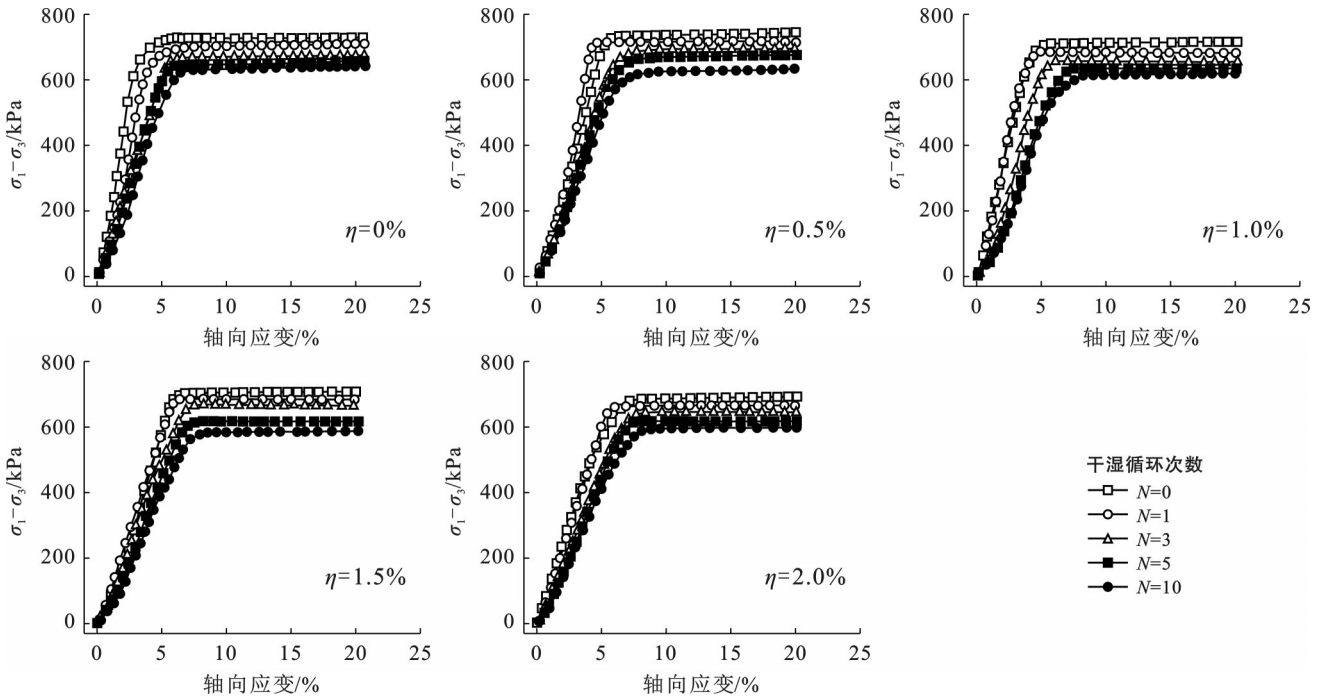


图 4 不同干湿循环次数对黄土应力应变关系的影响(围压 300 kPa)

Fig.4 Influence of different numbers of wet-dry cycles on stress-strain relationship of loess (confining pressure 300 kPa)

对比图 3 和图 4 的结果可以看出,围压升高显著提高了土体的应力水平,整体强度提升较大,表现为曲线峰值与平台段应力值明显上升。在较高的围压下,即使经历多次干湿循环或较高盐含量,土体仍能维持一定的强度,说明较高围压使得黄土试样内部土粒之间发生更为紧密的连结,从而提高了试样的强度^[22]。

2.1.2 抗剪强度参数的变化

由图 5a 可知,黄土的黏聚力在干湿循环后迅速下降,在不同易溶盐含量条件下,下降范围有所不同。从图 5b 可以看出,黄土的黏聚力随盐分含量的升高而逐渐减少。曲线在 N=0 处的斜率较小,而干湿循环后黏聚力的曲线斜率则较高。表明黏聚力受干湿循环作用与盐蚀作用的共同影响。

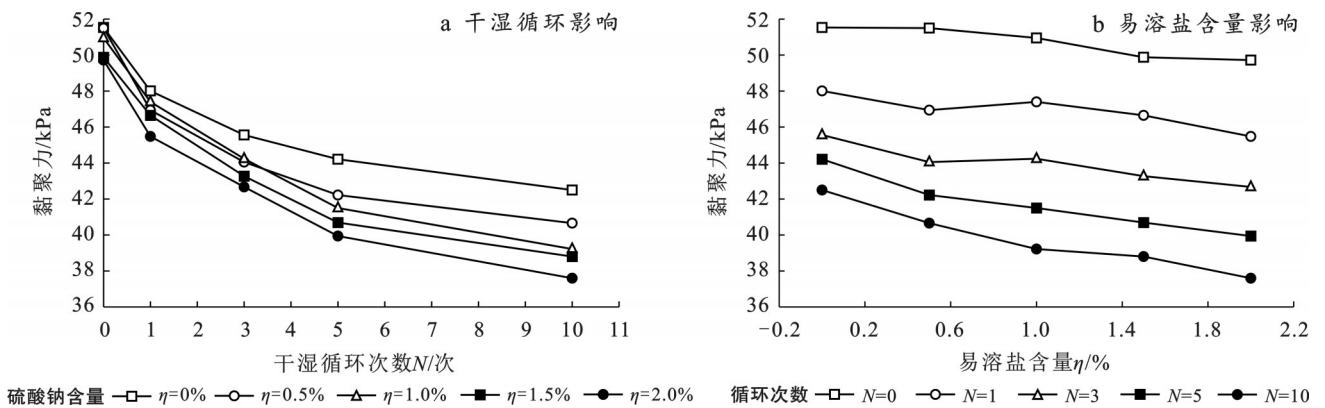


图 5 干湿循环下黄土的黏聚力

Fig.5 Cohesion of loess under wet-dry cycles

黄土的内摩擦角在干湿循环后减小(图 6)。前 5 个循环中显著减小,第 10 次循环后变化不大。内摩擦角随盐含量的变化模式与黏聚力相似,随易溶盐含量的升高而逐渐减少。黏聚力的大小主要取决于

土粒内部的重力和斥力之间的相互作用。内部摩擦角的大小主要取决于土壤颗粒在颗粒间粗糙表面滑动时产生的滑动摩擦以及由于相邻颗粒阻碍相对运动导致的土壤颗粒相互嵌入、互锁和咬合引起的咬

合摩擦。因此,易溶盐含量变化引起的内摩擦角的变化是上述两种效应的综合结果。随着土壤中盐含量的增加,一方面,附着在颗粒表面和颗粒之间的盐增多,从而增强了滑动摩擦,但这种效应较弱。另一方面,由于盐分含量的增加,土壤孔隙中的盐晶也在增多^[23]。在干湿循环过程中,可溶性盐溶解并随后结晶,导致土壤中的盐风化。例如裂缝的形成和土壤孔隙的扩大,引起内摩擦角变化^[24]。

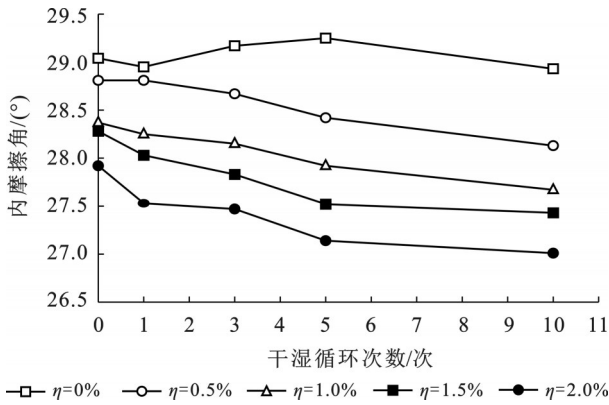


图 6 干湿循环下黄土的内摩擦角

Fig.6 Internal friction angle of loess under wet-dry cycles

表 5 表明,干湿循环次数与易溶盐含量均为影响黏聚力的极显著因素($p < 0.001$)。其中,干湿循环次数的 F 值高达 267.49,其影响力大于易溶盐含量,表明反复的胀缩作用是破坏土颗粒间胶结结构,导致黏聚力丧失的主要原因。易溶盐的存在则通过结晶-溶解循环进一步加剧了这一胶结破坏过程。

表 5 黏聚力方差分析

Table 5 Analysis of variance for cohesion

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
干湿循环次数	374.47	4	93.62	267.49	$< 1.00 \times 10^{-4}$
易溶盐含量	30.94	4	7.73	22.09	$< 1.00 \times 10^{-4}$
误差	5.36	16	0.35		
总和	410.77	24			

易溶盐含量是内摩擦角下降的主要因素,其影响力大于干湿循环次数(表 6)。主要是因为盐分的反复结晶会撑大孔隙、磨圆颗粒,并破坏颗粒间的镶嵌和咬合作用,从而显著削弱土体的滑动摩擦与咬合摩擦。干湿循环则通过产生裂隙为盐分运移和结晶提供通道,起到辅助劣化的作用。

从黏聚力变化曲面图(图 7)可以看出,黄土的黏聚力随着干湿循环次数和易溶盐含量的增加呈现劣化趋势。随着干湿循环次数的增加,黏聚力呈现明显的衰减趋势,当仅经历 10 次干湿循环($\eta=0\%$)时,黏

聚力下降 17.5%,干湿循环过程中土体经历的反复胀缩作用会破坏颗粒间的胶结结构,导致微观孔隙扩展,进而削弱土体的整体强度^[5]。当易溶盐含量从 0% 增加到 2% ($N=0$) 时,黏聚力下降 3.5%。然而,在二者耦合作用下 ($N=10, \eta=2\%$),黏聚力下降幅度达到 24.3%。表明干湿循环与盐分对黏聚力的削弱存在显著的协同效应,二者共同作用时黏聚力的下降幅度明显大于单一因素作用下的下降幅度,这一现象在易溶盐含量较高且干湿循环次数较多时尤为突出。

表 6 内摩擦角方差分析

Table 6 Analysis of variance for internal friction angle

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
干湿循环次数	1.26	4	0.32	10.67	2.11×10^{-4}
易溶盐含量	8.34	4	2.09	69.67	$< 1 \times 10^{-4}$
误差	0.47	16	0.03		
总和	10.07	24			

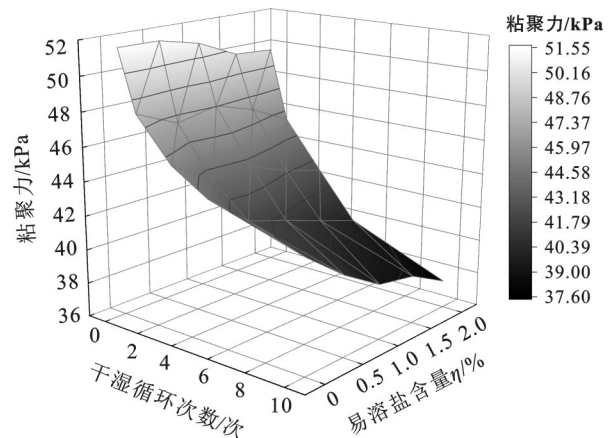


图 7 黏聚力变化曲面图

Fig.7 Curved surface chart of cohesion variation

2.2 SEM 定性分析

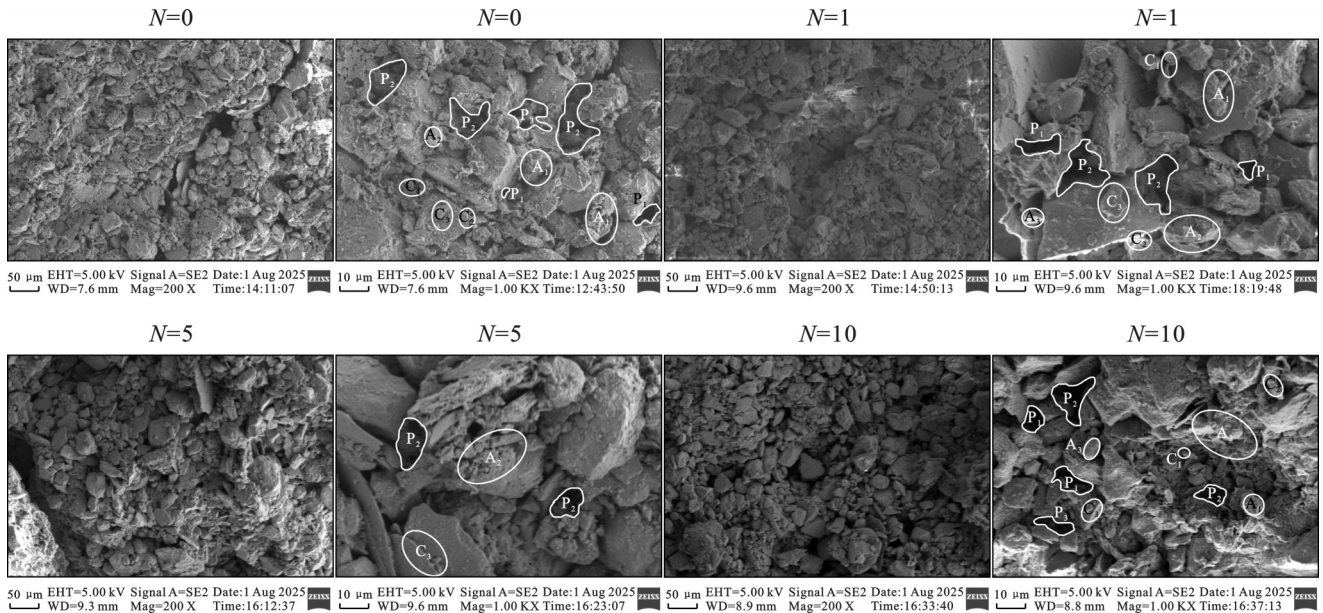
2.2.1 扫描电镜图像分析

图 8 表明,易溶盐含量为 1.5% 的黄土随着干湿循环次数增加,土体微观结构发生显著变化。当 $N=0$ 时,土颗粒排列较为紧密,孔隙相对较少,颗粒间胶结结构完整,土体骨架主要由较大的单体颗粒和通过点面接触的胶结聚集体组成,颗粒间存在孔隙。随着干湿循环次数的增加,部分胶结聚集体溶解,颗粒接触逐渐遭到破坏,孔隙面积显著增大,颗粒排列逐渐趋于疏松,裂隙逐步增多,土体结构明显劣化。在干湿循环作用下,易溶盐的溶解与结晶使土体颗粒孔隙增大,颗粒间胶结作用被改变,随着干湿循环与易溶盐含量的增加,土体的原始结构被破坏,咬合摩擦降低,强度下降^[25]。

由图 9 可知,在 $N=5$ 时,随易溶盐含量的增加,

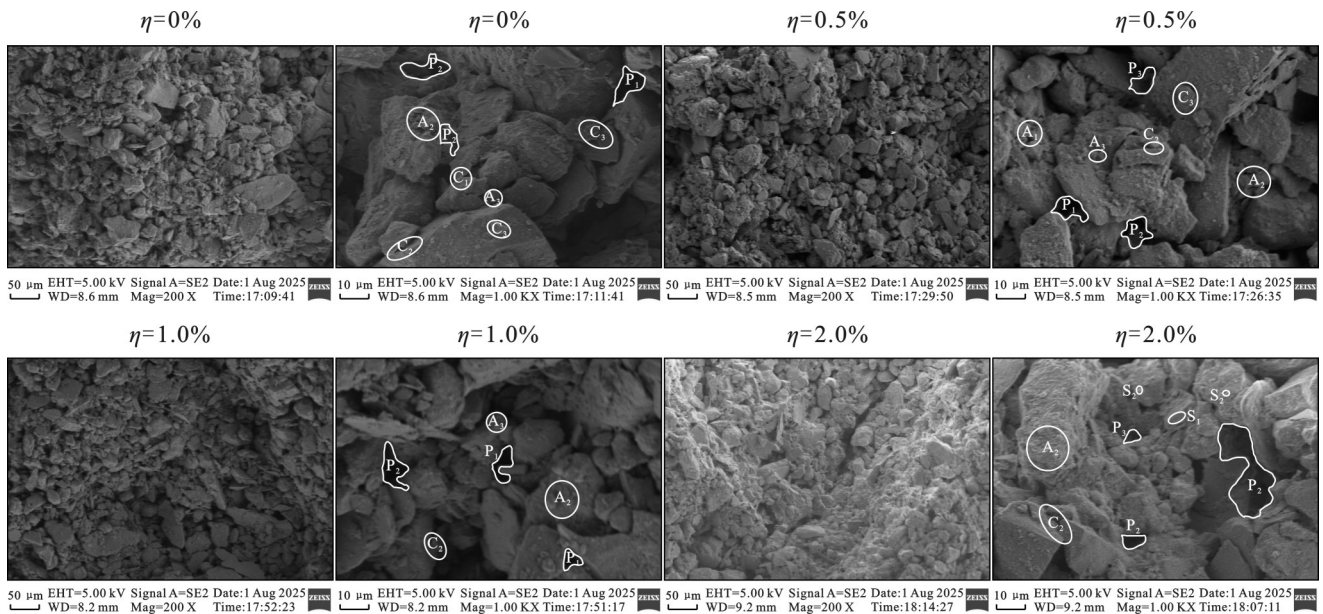
黄土的微观结构劣化逐渐显著。土体骨架颗粒主要由较大的单体颗粒和胶结聚合物组成。随着易溶盐含量的增加,土体微观结构出现明显劣化,表现为颗粒间胶结开始破坏,颗粒间距变大,孔隙面积显著增加,裂隙发育明显,土粒团聚效应逐步减弱^[6]。当易

溶盐含量达到 2.0% 时,可以观察到盐晶体沿着颗粒接触点结晶,微观结构进一步恶化,土壤结构趋于疏松,部分颗粒接触受损,形成更多的孔隙与裂隙。由于结晶产生的十水合硫酸钠体积会增加 3.18 倍,这可能是造成这一现象的主要原因。



注: A₁ 为黏土聚集体, A₂ 为黏土-粉砂聚集体, A₃ 为粉砂颗粒; C₁ 为点点接触, C₂ 为点面接触, C₃ 为面面接触; P₁ 为架空孔隙, P₂ 为镶嵌孔隙, P₃ 为胶结孔隙。

图 8 黄土在 2 个放大倍数下的 SEM 图像 ($\eta=1.5\%$)
Fig.8 SEM images of loess at two magnifications ($\eta=1.5\%$)



注为 A₁ 黏土聚集体, A₂ 为黏土-粉砂聚集体, A₃ 为粉砂颗粒; C₁ 为点点接触, C₂ 为点面接触, C₃ 为面面接触; P₁ 为架空孔隙, P₂ 为镶嵌孔隙, P₃ 为胶结孔隙; S₁ 为盐膜, S₂ 为盐晶。

图 9 黄土在 2 个放大倍数下的 SEM 图像 (N=5)
Fig.9 SEM images of loess at two magnifications (N=5)

2.2.2 扫描电镜微观结构参数分析

易溶盐含量为 1.5% 时,随着干湿循环次数的增加,黄土的孔隙分形维数逐渐增大,从 0 次循环时的

1.297 8 增至 10 次循环后的 1.313 5(表 7)。表明经过反复干湿循环后,反复的湿胀干缩作用引发土体内部孔隙结构复杂化与不均匀化,使孔隙网络更趋多

尺度、多样化发展^[26]。

孔隙面积比随干湿循环次数的增加呈现增大趋势,从初始的40.37%增至43.99%,表明干湿循环作用促使孔隙面积扩大,土体结构劣化现象明显增强。干湿循环作用通过水分的反复进出导致颗粒间连接破坏加剧,宏观上表现为孔隙面积的增加^[15]。

表7 黄土样品在不同干湿循环后微观结构参数
Table 7 Microscopic parameters of loess samples after different numbers of wet-dry cycles

干湿循环次数/次	易溶盐含量/%	孔的分形维数	孔隙面积比/%
0	1.5	1.297 8	40.37
1	1.5	1.301 7	41.25
3	1.5	1.303 2	42.26
5	1.5	1.308 7	43.04
10	1.5	1.313 5	43.99

干湿循环次数为5时,孔隙分形维数随易溶盐含量的增加而增加,从含盐量0%时的1.286 9增至2%时的1.310 8(表8)。这表明易溶盐的存在增强了黄土微观结构复杂性和孔隙形态的多样性,孔隙面积比也随易溶盐含量增加而增加,体现了盐分增加对黄土微观结构劣化的推动作用。Xu Jian等^[6]在其研究中也发现,随着盐分含量的增加,盐分的溶解破坏了孔隙间的颗粒胶结,颗粒胶结弱化,孔隙之间的连接遭到破坏,从而孔隙面积显著增加。

表8 不同易溶盐含量黄土样品的微观结构参数
Table 8 Microscopic parameters of loess samples with different soluble salt contents

干湿循环次数/次	易溶盐含量/%	孔的分形维数	孔隙面积比/%
5	0	1.286 9	35.68
5	0.5	1.298 6	37.94
5	1.0	1.304 5	39.42
5	2.0	1.310 8	45.84

2.3 NMR定量分析

2.3.1 核磁共振 T_2 谱图分布特征

图10显示了黄土样品在不同干湿循环次数及不同易溶盐含量条件下的 T_2 谱曲线特征。曲线的横坐标反映土体的孔径大小,纵坐标(信号幅度)反映孔隙数量。

在干湿循环次数或易溶盐含量较低时, T_2 波谱分布曲线呈三峰形态,随着干湿循环次数或易溶盐含量的增加, T_2 波谱分布曲线由三峰形态转变为双峰形态,小孔隙的占比持续降低,而中、大孔隙的占

比显著增加。这表明连续的干湿循环导致黄土中易溶盐的溶解和再结晶,导致土颗粒团聚效应逐步减弱,随着团聚体中颗粒间小孔隙连接的粗化和渗透,土体中、大孔隙迅速发育,最终影响土体的孔隙结构和颗粒间的连接方式^[27]。

从 T_2 谱分布可以看出,当易溶盐含量为1.5%时,随着干湿循环次数的增加, T_2 谱曲线的峰值逐渐向右移动,峰值信号幅度逐渐增加(图10a)。表明在干湿循环后,一些点接触与面接触被破坏,形成新的孔隙和裂缝。主峰由1.36~2.24 ms转移至2.42~3.29 ms,幅值由8 485.3~8 701.75增至9 780.98~10 449.92。“三峰”随着干湿循环的进行转变为“双峰”,表明干湿循环过程土体经历反复水分迁移,黏团不断被溶解,导致孔隙逐渐增大^[28]。孔隙结构趋于松散化,水分更容易填充于较大孔隙之中,土壤颗粒间的结合力下降。

干湿循环次数为5次时,随着易溶盐含量的增加, T_2 谱的峰值幅度显著增加,峰值对应的 T_2 弛豫时间逐渐增大(图10b)。主峰由1.79~2.14 ms增至1.98~2.66 ms,幅值由8 500.85~8 544.99增至9 926.99~10 028.86。表明易溶盐含量的增加加剧了盐的溶解、结晶对土壤结构的影响,使土壤的孔隙加深,连通形成更大的孔隙。

2.3.2 孔隙变化特征

根据式(3)将图10的核磁共振 T_2 波谱转换为孔隙半径,依据雷祥义^[29]对黄土微观孔隙的分类将黄土孔隙分为4类:微孔隙(孔径 $<1\ \mu\text{m}$)、小孔隙($1\sim 4\ \mu\text{m}$)、中孔隙($4\sim 16\ \mu\text{m}$)、大孔隙($>16\ \mu\text{m}$)。

研究结果(图11a)表明,当易溶盐含量为1.5%时,随着干湿循环次数增加,孔隙体积比曲线的主峰位置与次峰逐渐向右移动,主峰幅度增大,三峰逐渐消失。这种变化与 T_2 谱结果相一致,证实了干湿循环作用显著促进了黄土中、大孔隙的发育,导致土体孔隙结构明显劣化。

干湿循环次数为5次时,随着易溶盐含量的提高,孔径分布主峰与次峰同样呈现向中、大孔径方向移动的趋势(图11b)。当易溶盐含量从0%增至2.0%时,中孔隙与大孔隙的合计孔隙体积占比从74%增至80%,绝对增量达6%。大孔隙的孔隙体积占比从11%增至26%,绝对增量达15%。由此可见,易溶盐反复溶解-结晶过程中,其结晶应力足以破坏颗粒间的胶结,不仅撑大原有的中、小孔隙,更主要的是促使孔隙之间的贯通与合并,从而导致大孔隙数量和大孔隙体积的增加,对黄土中大孔隙的形成和扩张起到了促进作用。

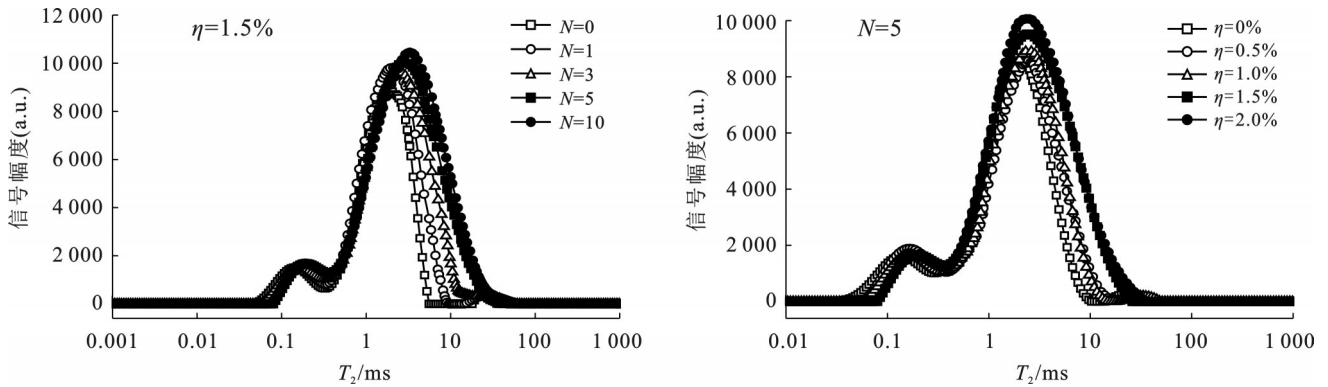


图 10 测量的黄土试样 T_2 时间分布曲线
Fig.10 T_2 distribution curve of loess sample

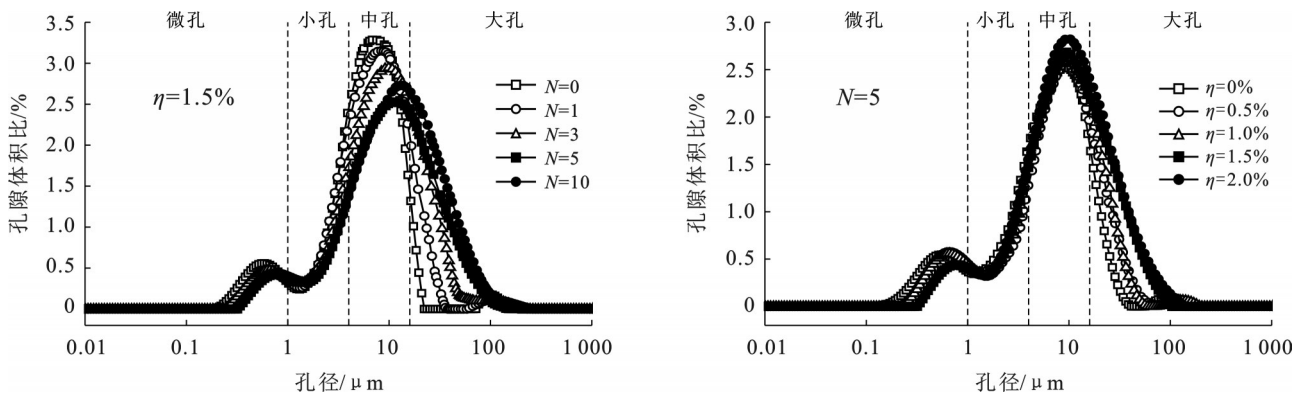


图 11 黄土试样孔径分布曲线
Fig.11 Pore size distribution curve of loess sample

综合上述分析结果可知,随着干湿循环作用的持续进行以及易溶盐含量的增加,黄土的孔径与孔隙体积显著增大,土体结构由致密趋于松散,微观结构稳定性明显下降,表现出结构劣化的趋势。

3 讨论

3.1 干湿循环与易溶盐含量对黄土力学强度的协同劣化机制

干湿循环次数与易溶盐含量对黄土抗剪强度参数的劣化存在显著的协同效应,这一发现深化了对伊犁黄土灾变机理的认识。双因素方差分析表明,干湿循环是黏聚力丧失的主因,易溶盐则通过结晶-溶解循环加剧这一胶结破坏过程。而易溶盐含量是内摩擦角下降的主要因素。当二者共存时,水分的运移不仅引发土体的胀缩应力,更加速了盐分溶解与结晶,这为解释伊犁黄土边坡、路基等工程的快速劣化提供了新的试验依据与理论支撑。

3.2 宏观力学行为与微观结构演化的内在机制

当易溶盐含量从 0 增至 2.0% ($N=5$) 时,大孔隙的体积占比从 11% 增至 26%,绝对增量高达 15%。这一剧烈的孔隙粗化现象,与十水合硫酸钠结晶时高达约 3.18 倍的理论体积膨胀机制高度吻合。而在

SEM 图像(图 9)中观察到盐晶体沿着颗粒接触点结晶的现象,为此提供了直接的形貌学证据。

因此,内摩擦角的劣化机制在于盐分反复结晶的结晶应力→破坏颗粒间的镶嵌和咬合、磨圆颗粒→大孔隙体积显著增加→滑动摩擦与咬合摩擦减弱→内摩擦角下降。对于黏聚力的劣化,方差分析表明干湿循环是首要因素。其劣化机制是干湿循环的胀缩应力、盐分的胶结破坏→颗粒间链接失效、裂隙发育(中、大孔隙增加)→黏聚力下降。

3.3 工程启示与展望

鉴于干湿循环与易溶盐的协同劣化效应十分显著,在伊犁地区进行边坡防护、路基填筑及地基处理时,必须采取“防水”与“治盐”相结合的综合处治策略。可以考虑采用防水土工膜完善排水系统以阻断水分运移;同时采用化学固化或设置隔盐层等方法,从根源上抑制盐分的破坏性结晶。

本研究主要针对以硫酸钠为主的硫酸盐型黄土,其劣化机制与硫酸盐独特的结晶膨胀特性密切相关。对于以氯化钠为主的氯盐渍土,其吸湿性强而结晶膨胀力较弱,可能导致以软化、溶陷为主的差异化劣化模式^[11]。未来可通过比较干湿循环作用下不同盐型的结晶体积效应、渗透行为及其对土体结

构的差异化损伤开展研究,为建立更普适的盐渍土工程性质评价与处治体系提供理论支撑。

4 结论

(1) 随着干湿循环次数与易溶盐含量的增加,伊犁黄土的抗剪强度参数逐渐减小。当仅经历10次干湿循环($\eta=0\%$)时,黏聚力下降约17.5%,当易溶盐含量从0增加到2%($N=0$)时,黏聚力下降3.5%。在二者耦合作用下($N=10, \eta=2\%$),黏聚力下降幅度达到24.3%。干湿循环作用与盐蚀作用存在协同效应,其加速土壤强度损失和结构退化的程度远超单一因素的影响。

(2) 在干湿循环10次与易溶盐含量2%时,干湿循环是黏聚力丧失的主因,而易溶盐则是内摩擦角降低的主要原因。

(3) 随着干湿循环次数和易溶盐含量的增加,土体内部孔隙结构复杂性增加,孔隙尺度增大,颗粒间胶结破坏严重,微孔减少而中孔与大孔急剧扩张,导致孔隙体系疏松度增加且连通性增强。

参考文献(References)

- [1] 宋友桂,史正涛.伊犁盆地黄土分布与组成特征[J].地理科学,2010,30(2):267-272.
Song Yougui, Shi Zhengtao. Distribution and compositions of loess sediments in Yili basin, central Asia [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010,30(2):267-272.
- [2] 张爱军,邢义川,胡新丽,等.伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析[J].岩土工程学报,2016,38(S2):117-122.
Zhang Aijun, Xing Yichuan, Hu Xinli, et al. Analysis of influencing factors of strong self-weight collapsibility of Ili loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016,38(S2):117-122.
- [3] Song Yougui, Chen Xiuling, Qian Linbo, et al. Distribution and composition of loess sediments in the Ili basin, Central Asia [J]. Quaternary International, 2014, 334/335,61-73.
- [4] 阿迪来·乌甫,玉素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,等.伊犁河谷蒸散量时空分布特征及变化趋势[J].地球信息科学学报,2018,20(2):217-227.
Adilai Wufu, Yusufujiang Rusuli, Reyilai Kadeer, et al. Spatiotemporal distribution and variation trend of evapotranspiration in Ili River valley [J]. Journal of Geo-Information Science, 2018,20(2):217-227.
- [5] 潘振兴,杨更社,叶万军,等.干湿循环作用下原状黄土力学性质及微观损伤研究[J].工程地质学报,2020,28(6):1186-1192.
Pan Zhenxing, Yang Gengshe, Ye Wanjun, et al. Study on mechanical properties and microscopic damage of undisturbed loess under dry and wet cycles [J]. Journal of Engineering Geology, 2020,28(6):1186-1192.
- [6] Xu Jian, Li Yanfeng, Ren Chang, et al. Damage of saline intact loess after dry-wet and its interpretation based on SEM and NMR [J]. Soils and Foundations, 2020,60(4):911-928.
- [7] 赵庆玉,张爱军,王毓国,等.易溶盐含量对原状非饱和伊犁黄土强度的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(4):146-154.
Zhao Qingyu, Zhang Aijun, Wang Yuguo, et al. Effects of soluble salt content on strength of original unsaturated Ili loess [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2019,47(4):146-154.
- [8] 拓文鑫,倪万魁,聂永鹏.干湿循环下盐渍压实黄土湿陷性劣化机理研究[J].工程地质学报,2024,32(2):420-429.
Tuo Wenxin, Ni Wankui, Nie Yongpeng. Mechanism of collapsibility degradation of saline compacted loess under wetting and drying cycles [J]. Journal of Engineering Geology, 2024,32(2):420-429.
- [9] 沈云霞,谌文武,杜伟飞,等.干湿循环下含盐量变化对遗址土剪切强度影响的试验研究[J].西北地震学报,2011,33(S1):227-230.
Shen Yunxia, Chen Wenwu, Du Weifei, et al. Experimental study on the influence of salt content change on shear strength of site soil under dry-wet cycle [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2011,33(S1):227-230.
- [10] 李培月,何强,吴健华,等.干湿循环条件下无机盐对原状黄土孔隙结构及渗透性的影响[J/OL].(2025-01-02).地质科技通报,2025:1-12. <https://link.cnki.net/doi/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240711>.
Li Peiyue, He Qiang, Wu Jianhua, et al. Effects of inorganic salts on pore structure and permeability of undisturbed loess under dry and wet cycling conditions [J/OL]. (2025-01-02). Bulletin of Geological Science and Technology, 2025:1-12. <https://link.cnki.net/doi/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240711>.
- [11] Zhang Fanyu, Wang Gonghui, Kamai T, et al. Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of sodium chloride solution [J]. Engineering Geology, 2013,155:69-79.
- [12] Hao Zhitao, Li Xi'an, Gao Rongrong, et al. Study on shear behavior and mechanism based on shear functional unit of loess microstructure [J]. Sustainability, 2023,15(14):11402.
- [13] 许健,任畅,高靖寓,等.干湿循环效应下 Na_2SO_4 盐渍原状黄土渗透特性与微观机制[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(5):1644-1654.
Xu Jian, Ren Chang, Gao Jingyu, et al. Influence of dry-wet cycles on hydraulic conductivity and microstructure of saline undisturbed loess with sodium sulfate [J].

- Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(5): 1644-1654.
- [14] 王飞, 李国玉, 穆彦虎, 等. 干湿循环作用下压实黄土湿陷特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 416-423.
Wang Fei, Li Guoyu, Mu Yanhu, et al. Study on collapse characteristic of compacted loess subjected to cyclic drying and wetting [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2): 416-423.
- [15] 焦少通, 王家鼎, 张登飞, 等. 干湿循环作用下黄土厚度对其裂隙发育的影响[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2024, 54(1): 1-10.
Jiao Shaotong, Wang Jiading, Zhang Dengfei, et al. Study on the effect of thickness of loess on its crack development under the action of dry-wet cycles [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2024, 54(1): 1-10.
- [16] Wang Ying, Lu Yi, Liu Jin, et al. Monitoring and characterization of the polymer-filled pores in sand using nuclear magnetic resonance during air-drying [J]. Construction and Building Materials, 2022, 337: 127568.
- [17] Sui Zhi li, Li Zhao guang, Wang Xu peng, et al. Study on reinforce saturated soft clay foundation with dynamic consolidation by drainage [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 438/439: 1171-1175.
- [18] George Coates, 肖立志, Manfred Prammer 著. 孟繁莹译. 核磁共振测井原理与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
George Coates, Xiao Lizhi, Manfred Prammer. Principles applications of nuclear magnetic resonance logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [19] 邓亚虹, 魏宝华, 王晗, 等. 原状黄土变形与强度特性的加载速率效应[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 22-29.
Deng Yahong, Wei Baohua, Wang Han, et al. Loading rate effect on deformation and strength characteristics of undisturbed loess [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 22-29.
- [20] 李世雄, 张登飞, 张小辉, 等. 饱和和软黄土力学特性的应力路径依存特性及其模拟[J/OL]. [2025-09-17]. 太原理工大学学报, 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/14.1220.N.20241203.1723.006>.
Li Shixiong, Zhang Dengfei, Zhang Xiaohui, et al. Stress path dependence and simulation of mechanical properties in saturated soft loess [J/OL]. [2025-09-17]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/14.1220.N.20241203.1723.006>.
- [21] 肖泽岸, 赖远明, 尤哲敏. 冻融循环作用下含盐量对 Na_2SO_4 土体变形特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 953-960.
Xiao Zean, Lai Yuanming, You Zhemin. Experimental study on impact of salt content on deformation characteristics of sodium sulfate soil under freeze-thaw conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 953-960.
- [22] 李雯霞, 应赛, 文桃, 等. 非饱和黄土特殊力学特性研究[J]. 甘肃科学学报, 2015, 27(4): 101-104.
Li Wenxia, Ying Sai, Wen Tao, et al. Research on special mechanical properties of unsaturated loess [J]. Journal of Gansu Sciences, 2015, 27(4): 101-104.
- [23] 吕擎峰, 谷留杨, 郭连星, 等. 硫酸盐含量对黄土黏粒特性的影响研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 12-20.
Lü Qingfeng, Gu Liuyang, Guo Lianxing, et al. Effect of sulfate content on clay characteristics of loess [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 12-20.
- [24] Duan Zhao, Song Kun, Zhang Ning, et al. Characteristics and mechanisms of soil structure damage under salt weathering [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 238: 106030.
- [25] 张璐, 杨保存, 张勤玲. 寒旱区硫酸盐渍土路基结构损伤破坏机理研究综述[J]. 土木工程, 2022, 11(1): 7-15.
Zhang Lu, Yang Baocun, Zhang Qinling. Summary of damage and failure mechanism of sulfate-soaked soil subgrade structure in cold and arid areas [J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2022, 11(1): 7-15.
- [26] 刘瑾, 车文越, 郝社锋, 等. 基于 CT 技术的黄原胶加固土干湿循环条件下力学性能和微观结构劣化机制研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(5): 1119-1126.
Liu Jin, Che Wenyue, Hao Shefeng, et al. Deterioration mechanism of mechanical properties and microstructure in xanthan gum-reinforced soil under wetting-drying cycles based on CT scanning technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(5): 1119-1126.
- [27] Xu Xutang, Chen Xianglong, Cai Yeqing, et al. Microstructure and macro-mechanical properties of residual soil subjected to repeated hygroscopic cycles [J]. Frontiers in Earth Science, 2025, 13: 1528098.
- [28] 叶万军, 吴云涛, 杨更社, 等. 干湿循环作用下古土壤微观结构及宏观力学性能变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2126-2137.
Ye Wanjun, Wu Yuntao, Yang Gengshe, et al. Study on microstructure and macro-mechanical properties of paleosol under dry-wet cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2126-2137.
- [29] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑), 1987, 17(12): 1309-1318.
Lei Xiangyi. Pore types and collapsibility of loess in China [J]. Science in China (Ser. B), 1987, 17(12): 1309-1318.