



引文格式: 黄翀垚, 蹇永明, 张智勇, 等. 冻融-湿干循环作用下伊犁重塑黄土力学特性劣化及本构模型研究[J]. 西北地质, 2026, 59(2): 72-82. DOI: 10.12401/j.nwg.2025140

Citation: HUANG Zhongyao, JIAN Yongming, ZHANG Zhiyong, et al. Study on the Deterioration of Mechanical Properties and Constitutive Model of Ili Remolded Loess under Freeze Thaw Wetting Drying Cycles[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 72-82. DOI: 10.12401/j.nwg.2025140

冻融-湿干循环作用下伊犁重塑黄土 力学特性劣化及本构模型研究

黄翀垚¹, 蹇永明², 张智勇^{3,*}, 李栓宁³, 段方伟¹, 张冲¹, 岳宗鹏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, 陕西 西安 710064)

摘要: 新疆伊犁地区作为中亚陆路通道核心节点, 其工程地质稳定性对区域发展至关重要。区内广泛分布的第四纪黄土, 其力学性能在季节性冻融、干湿循环、强降水等复杂气候条件及工程活动的持续作用下不断劣化, 从而诱发了频繁的区域性黄土滑坡。因此, 深入研究冻融-湿干循环对伊犁重塑黄土力学特性的影响及非线性劣化规律具有实际意义。笔者基于冻融-湿干循环作用下的固结不排水三轴剪切试验与微观试验, 从宏细观尺度揭示应力-应变响应、强度参数演变及损伤机制。在此基础之上, 假定黄土微元强度服从 Log-logistic 分布函数, 建立了黄土的损伤模型, 并验证其适用性。结果表明, 随循环次数增加, 抗剪强度衰减幅度达 22.9%, 其中黏聚力衰减 (45.2%) 显著高于内摩擦角 (7.27%)。在微观图像中可以看到压实黄土呈现团聚体结构特征。伊犁黄土试样的偏应力应变关系曲线以应变硬化型为主。伊犁黄土的黏聚力随着冻融-湿干循环次数的增加呈显著降低趋势, 内摩擦角则变化较小。将传统 Duncan-Chang 模型与统计损伤理论相结合, 建立了可统一表征不同冻融-湿干循环次数下应变硬化和应变软化特性的本构模型, 求解了模型参数, 模型验证表明其对不同围压和循环次数下的试验结果具有良好的预测性。

关键词: 伊犁黄土; 冻融-湿干循环; 力学特性; Log-logistic 分布; 损伤模型

中图分类号: P642.3; TU43

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)02-0072-11

Study on the Deterioration of Mechanical Properties and Constitutive Model of Ili Remolded Loess under Freeze Thaw Wetting Drying Cycles

HUANG Zhongyao¹, JIAN Yongming², ZHANG Zhiyong^{3,*}, LI Shuanning³,
DUAN Fangwei¹, ZHANG Chong¹, YUE Zongpeng¹

收稿日期: 2025-08-29; 修回日期: 2025-11-03; 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面上项目 (2021JM-180) 联合资助。

作者简介: 黄翀垚 (1980-), 男, 工程师, 主要从事土木工程技术研究。E-mail: 956387118@qq.com。

* 通讯作者: 张智勇 (1996-), 男, 博士, 主要从事岩土工程及滑坡方面研究。E-mail: 2918310659@qq.com。

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

- (1. CCCC-SHEC Sixth Engineering Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. Sinkiang Traffic Construction Management Bureau, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: As the core node of the "belt and road" Central Asia land route, the engineering geological stability of Ili region in Xinjiang is crucial to regional development. The mechanical properties of Quaternary loess, which is widely distributed in the region, are continuously deteriorated under the complex climatic conditions such as seasonal freeze-thaw, dry wet cycle, heavy rainfall and the continuous effect of engineering activities, thus inducing frequent regional loess landslides. Therefore, it is of practical significance to further study the effect of freeze-thaw-wetting-drying (FTWD) cycle on the mechanical properties and nonlinear degradation law of Ili remolded loess. Based on the consolidated undrained triaxial shear test and microscopic test under FTWD cycle, the stress-strain response, strength parameter evolution and damage mechanism were revealed from the macro and micro scale. On this basis, assuming that the micro element strength of loess obeys the Log-logistic distribution function, the damage model of loess is established and its applicability is verified. The results showed that the shear strength decreased by 22.9% with the increase of the number of cycles, and the cohesion attenuation (45.2%) was significantly higher than the internal friction angle (7.27%). In the microscopic image, it can be seen that the compacted loess presents the characteristics of aggregate structure. The deviatoric stress-strain relationship curve of Ili loess sample is mainly strain hardening type. The cohesion of Ili loess decreases significantly with the increase of FTWD cycles, while the internal friction angle changes slightly. Combining the traditional Duncan-Chang model with the statistical damage theory, a constitutive model which can uniformly characterize the strain hardening and strain softening characteristics under different FTWD cycles is established, and the model parameters are solved. The model verification shows that it has good predictability for the test results under different confining pressures and cycles.

Keywords: Ili loess; freeze-thaw-wetting-drying cycle; mechanical properties; log-logistic distribution; damage model

黄土是第四纪的沉积物,属于典型的非饱和土壤,在世界上广泛分布(Song et al., 2014; Li et al., 2018)。在中国,黄土典型类型主要出现在黄土高原和伊犁河谷(Song et al., 2014)。黄土是西北地区最常用的工程建筑材料,广泛应用于地基、路基、土坝等工程中。尽管压实黄土在初始状态下能够满足工程强度要求,但在特定气候区及不良气候因素长期作用下,其稳定性往往面临挑战。在冻融-湿干循环等剧烈环境过程影响下,压实黄土的工程性质易发生劣化,具体表现为抗剪强度下降和压缩性增大,进而可能引发路基不均匀沉降、坡面冲蚀等灾害(陈正汉等, 2014; 彭建兵等, 2014; 金钊等, 2023; 于洋等, 2023)。

在非饱和土力学范畴内,研究焦点进一步集中于揭示基质吸力对土体强度及应力-应变关系的影响机理,并在此基础上学者们建立了弹塑性、损伤等本构模型(樊培培等, 2024)。构建本构模型,阐明各类内外因素对抗剪强度的控制规律至关重要。现有研究普遍从土体的物理状态(如干密度、初始含水率/吸力)与外部荷载条件(如剪切速率、应力路径及循环荷载

特性)两个维度展开系统性探讨。以干密度为例,其通过改变土颗粒间的接触状态与排列方式,从而显著增加剪切强度;因此,在相同含水率下,高干密度土体通常呈现出更高的峰值强度与不同的应变硬化/软化行为。目前,这些力学特性主要通过三轴剪切仪、直剪仪等室内试验进行量化,进而为标定和验证各类本构模型提供关键数据,最终实现对复杂应力状态下土体强度与变形演化的合理预测(常丹等, 2015; 苏振坤等, 2025)。然而在季节冻土区域,冻融循环作用是最为普遍的地质营力之一,显著改变着土体的工程力学特性(常丹等, 2015; 刘宽等, 2021; 李业彤等, 2023)。冻融循环可以引起细粒土的颗粒分布、渗透性、残余强度和抗剪强度发生劣化(Xu et al., 2018; 李业彤等, 2023; 吕倩俐等, 2023; 包卫星等, 2024)。研究表明,天然土样在经历冻融作用后,其内部胶结结构会发生解体,当叠加水分浸润作用时,土体将表现出更显著的形变特征,具体表现为渗透系数呈量级增大(吕倩俐等, 2023)。对于重塑土样,其初始压实状态直接影响冻融响应规律,密实土体会产生孔隙扩张效应,而

松散土体反而出现孔隙压缩现象(Xu et al., 2018)。

降雨蒸发、地下水位变化等会导致土体受到干湿循环的影响,引起土体强度的劣化,从而对岩土体的稳定性、可靠性造成负面影响(Xu et al., 2020; 丁旭升等, 2024; 姜海波等, 2025)。试验研究揭示,土体经历干湿循环过程后,其力学性能呈现显著劣化趋势,土体强度演变呈现两阶段特征:作用初期阶段呈现快速衰减特征,随作用次数累积,强度折减速率逐渐趋缓并最终达到动态稳定(Xu et al., 2020)。干湿循环易使土体产生裂隙,研究表明,干湿循环作用中关键控制变量(如水分变化区间及循环路径)对土体损伤效应具有显著差异性影响(Tang et al., 2012; Xu et al., 2020; 姜海波等, 2025)。然而,季冻区的岩土多经历冻融和干湿耦合作用影响(樊培培等, 2024; 鄧彬等, 2024)。学者们研究了干湿冻融循环对黄土力学指标的劣化规律(鄧彬等, 2024; 张凌凯等, 2025)。细粒土在干湿交替、冻融循环及其复合作用下的力学性能劣化现象,其根本原因源于其内部微观结构的改变。目前,学术界围绕这一现象开展了多尺度研究,涵盖材料强度劣化规律、裂隙网络演化特征以及微观组构参数分析等方向。学者们指出在干湿冻融耦合作用下,土体内部颗粒发生重组,形成更为松散的结构体系,其各向异性程度逐渐减弱,进而引起抗压强度及黏聚力等力学指标的变化。

现有研究在冻融与干湿循环及其耦合作用对土体物理参数与裂隙演化规律方面已取得系列成果,为循环条件下土体强度劣化机制提供了理论支撑。然而,针对黄土在冻融-湿干循环作用下的力学响应及微观损伤机理,研究仍在发展阶段。笔者通过试验与理论建模相结合,系统研究了经历冻融-湿干循环后伊犁重塑黄土的力学性能衰减规律,并建立了损伤本构模型。

1 区域背景

1.1 研究区域概况

伊犁哈萨克自治州位于新疆西北部,地势整体东高西低,西宽东窄,向西开口呈喇叭状(牛丽思等, 2020; 于洋等, 2023)。该地区受气流来向和地形的影响,伊犁地区是新疆降水较为丰富的地区之一,但区内降水分布很不均匀,平原地区年均降水量为 200~500 mm,山区最大可达 800 mm,多年平均蒸发量为 1467.67 mm(于洋等, 2023)。这种气候导致了表层土壤频繁的冻融-湿干循环,这对土体工程性质产生了负面影响。

1.2 伊犁黄土试样

土壤样品从伊犁尼勒克县某公路边坡坡脚处(地理坐标为 E 82°36'49", N 43°48'17") 采集,深度为坡面下 1.0~3.0 m(图 1)。将收集到的黄土风干、研磨,然后通过 2 mm 的筛子去除碎片和砾石。土壤的基本

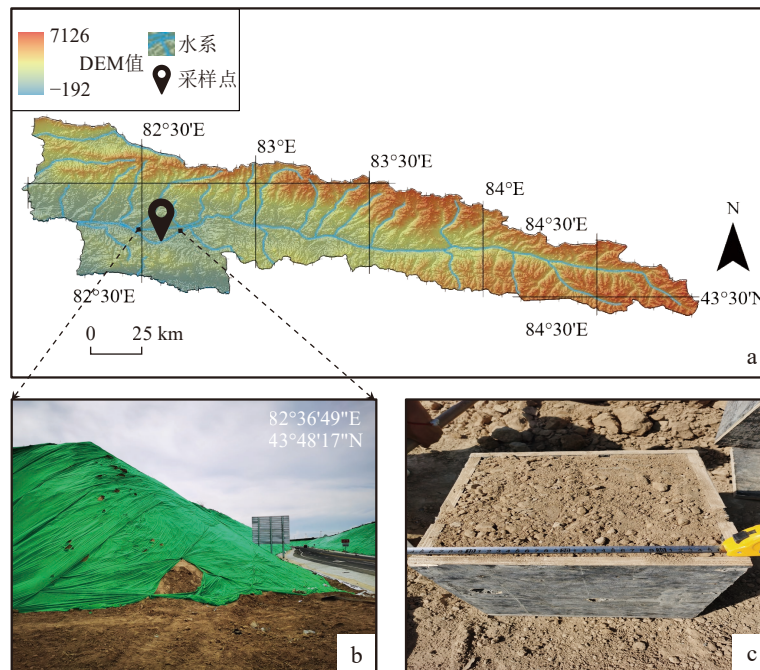


图1 取样点位置及伊犁黄土试样

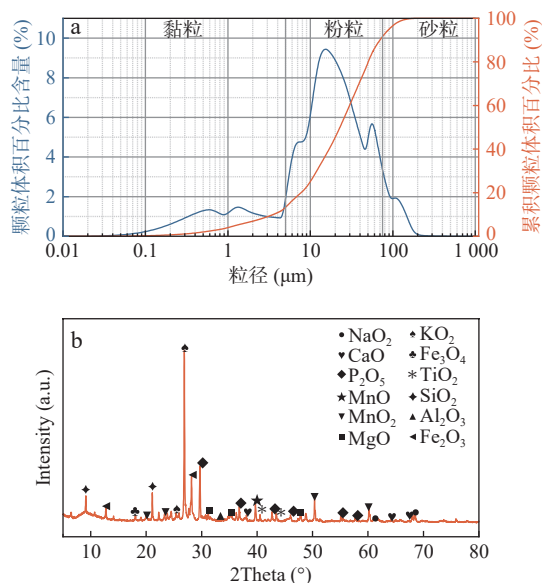
Fig. 1 Sampling point locations and Ili loess samples

属性(表1)。试验黄土试样的液限和塑限分别为28.6%和17.7%。由于塑性指数为10~17,且液限小于50%,该土壤被归类为低液限粉质黏土。土样的粒径分析是用筛分法和密度计法进行测试,粒径小于0.075 mm颗粒的质量约占62.7%,粒径小于0.02 mm颗粒的质量约占5.7%(图2a)。采用X射线衍射测定了伊犁黄土的主要化学成分,样品包含的物相为 MnO_2 、 Fe_3O_4 、 TiO_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等(图2b)。

表1 伊犁黄土的物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of Ili loess

名称	数值
天然干密度 (g/cm^3)	1.42
天然含水率 (%)	18
比重	2.71
塑限 w_p (%)	17.4
液限 w_L (%)	28.2
塑性指数	10.8
饱和渗透系数 (cm/s)	1.92×10^{-5}

图2 伊犁黄土粒度分布图(a)、
伊犁黄土X射线衍射图谱(b)Fig. 2 (a) Grain size distribution of Ili loess,
and (b) X-ray diffraction of Ili loess

2 研究方法

2.1 循环试验方案

笔者采用冻融-湿干循环路径,是将试样先进行冻融循环后再进行湿干循环。具体路径为:冻结-融化-增

湿-减湿(图3)。冻融循环过程,在高低温箱内进行。冻结过程:试样初始含水率为18%,将试样置于 -20°C 环境下,持续12 h,使试样完全冻结;融化过程,随后将环境温度升至 20°C ,同样维持12 h,使试样完全融化。湿干循环的含水率控制为5%~25%。下限设定为5%,是基于对伊犁地区长期高温天气后浅层黄土含水率的实地测量值(约4.8%);上限25%则代表了该地区降雨或融雪后可能的较高含水状态。增湿过程,采用水膜迁移法。将试样放置于精度为0.01 g的电子天平上,用滤纸完全包裹试样以利于水分均匀扩散。随后,使用喷壶将蒸馏水均匀喷洒在滤纸上,通过毛细作用使水分缓慢迁移至土体内部。通过实时监测天平读数,精确控制补水质量,直至达到目标含水率(25%)。减湿过程,在 25°C 下进行烘干,以避免高温对土体结构的破坏。通过定时称重,当土样质量下降至对应含水率5%时,停止烘干。为保证土体内部水分分布均匀,每次增湿或减湿完成后采用保鲜膜包裹土样并放置于保湿缸中养护24 h。冻融-湿干循环的次数分别为0、1、3、5、7($N_{\text{FTWD}}=0, 1, 3, 5, 7$)。

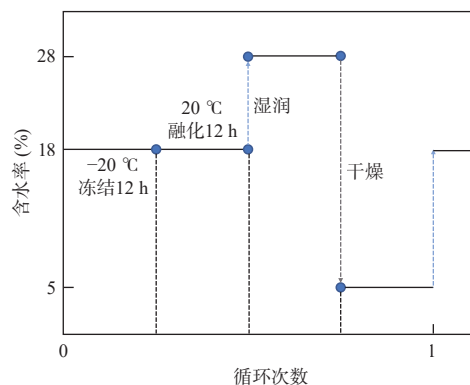


图3 冻融-湿干循环1次路径图

Fig. 3 Path of freeze-thaw wet dry cycle once

2.2 三轴剪切试验方案

笔者采用英国GDS三轴试验系统对经历不同循环次数的试样进行了固结不排水剪切试验(图4)。试验围压设定为50、150和300 kPa,以模拟土体在不同埋深下的应力状态。剪切速率参照规范设定为0.08 mm/min,试验终止条件为试样出现明显剪切破坏或轴向应变达到20%。本研究选择固结不排水试验方法,主要是考虑伊犁地区公路工程沿线土体在路基或者边坡出现剪切破坏的场景,如边坡出现滑塌。其是一种承受快速加载的典型不排水工况。

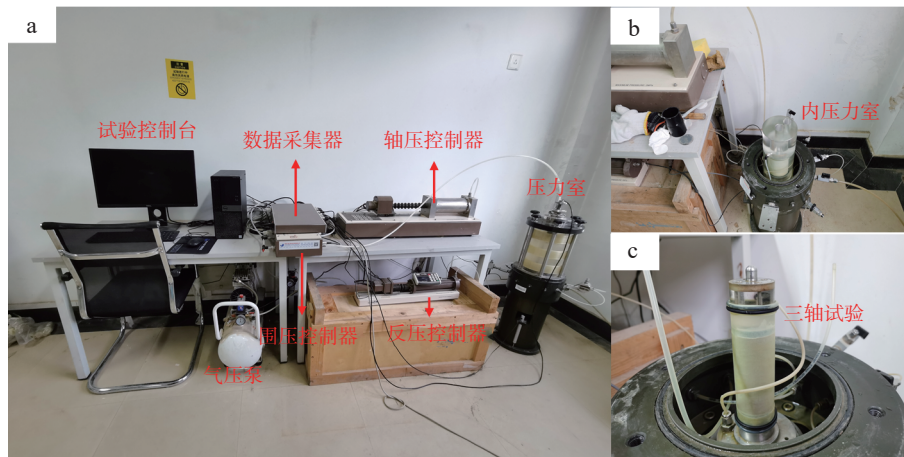


图4 非饱和静三轴试验系统

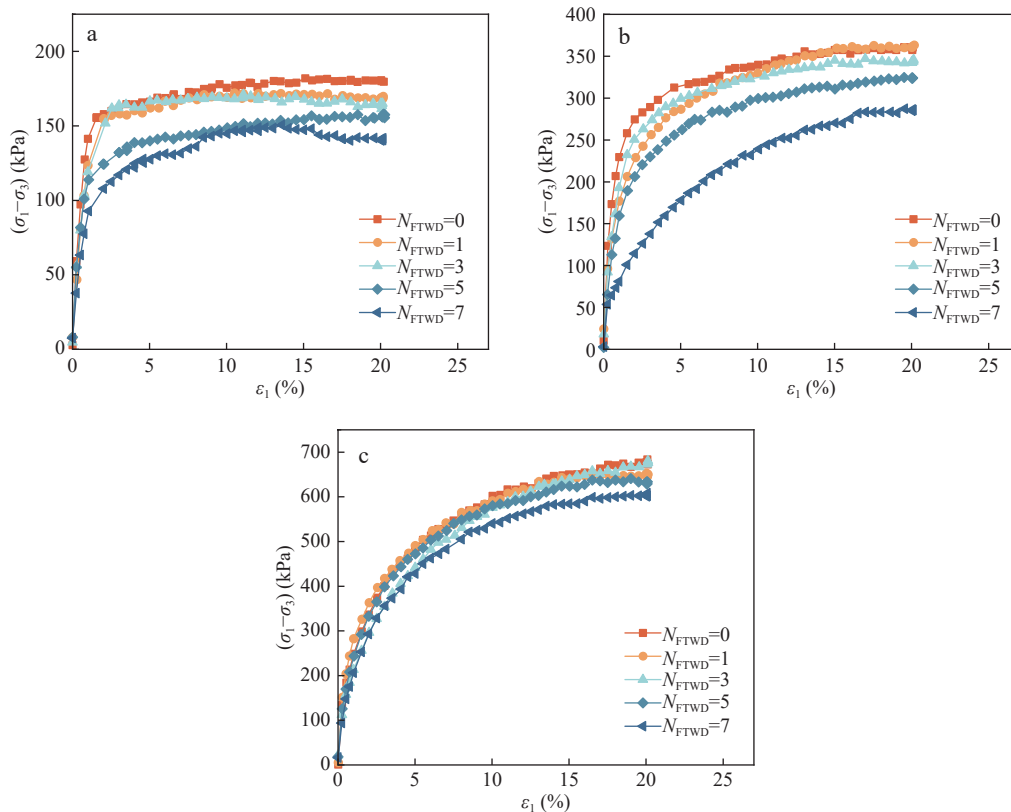
Fig. 4 Unsaturation static triaxial test system

3 研究结果

3.1 黄土试样应力应变特征

由三轴试验得到的试样应力-应变曲线(图 5)。循环次数与围压对试样的力学特性影响显著。随着

循环次数的增加,黄土试样的刚度与强度均呈现劣化趋势,即在相同应变条件下,试样所能承受的应力水平降低;而在相同围压下,达到相同应力水平所需的应变增大,表明其抵抗变形的能力减弱。相反,围压的增加则起到了强化作用,显著提升了试样的峰值强度和初始刚度。试验结果表明,黄土的应力-应变曲



a. 围压 50 kPa; b. 围压 150 kPa; c. 围压 300 kPa

图5 冻融-湿干循环前后黄土试样应力应变曲线图

Fig. 5 Stress-strain curves of loess samples before and after freeze-thaw and wet-dry cycles

线多呈硬化型。破坏阶段通常伴随着土体的强烈变形和结构的破坏,是土体失效和破坏的前兆(包卫星等, 2024; 张凌凯, 2025)。土体会发生显著的变形,可能导致结构的整体失效,最终达到破坏状态。

随着循环次数增加,应力-应变曲线的下降幅度逐渐减小;而在第3至第5次循环后,曲线出现较为显著的降低。随着循环次数增多,土样初始阶段的变形速率与偏应力峰值均逐渐降低。以 50 kPa 围压为例,经 7 次循环后,偏应力峰值由初始的 181.9 kPa 降为 140.2 kPa,降幅达 22.9%。黄土的初始强度主要源于内部团聚体颗粒间的胶结作用及骨架结构的协同承载,因而在剪切初期迅速达到较高偏应力水平。随剪切位移发展,颗粒压缩导致骨架结构逐渐解体,土体损伤持续累积,试样发生压缩变形并逐步破坏。三轴试验前的循环荷载通过微观孔隙重构削弱土体结构强度,其劣化程度与循环次数呈正相关。

3.2 黏聚力和内摩擦角变化

基于莫尔-库伦强度准则,可以量化表征经历循环作用后黄土的抗剪强度参数演化规律(图 6)。该过程通过式(1)和式(2)计算。

$$\sin \phi = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + c \cdot \cot \phi} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \cot \phi} \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2)$$

不同冻融-湿干循环后黄土的内摩擦角和黏聚力变化图(图 6)显示,随着循环次数的增加,土壤的黏聚力和内摩擦角都在下降,但下降幅度不同。当循环 7

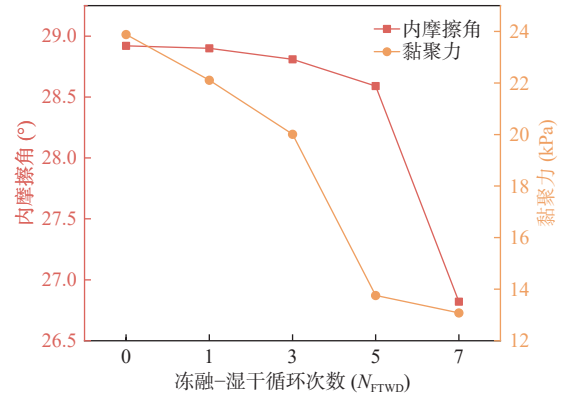


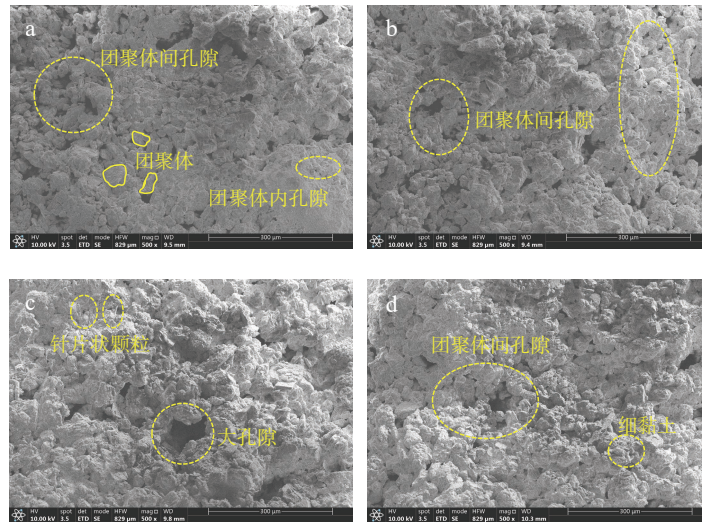
图6 伊犁黄土抗剪强度指标随冻融-湿干循环次数的变化图

Fig. 6 Variation of shear strength index of Ili loess with the number of freeze-thaw-wetting-drying cycles

次后,内摩擦角为 26.8°,仅下降了 2.1°,冻融-湿干循环对内摩擦角的影响不明显。但 7 次循环后黏聚力仅为 13.76 kPa,下降明显,降幅为 45.2%。试验数据与既有研究共同证实,冻融-湿干作用对黏聚力的弱化效应呈显著非线性特征,表现为微观团聚体变化,孔隙重组,结构自稳定的多阶段过程。当冻融-湿干循环累积损伤达到临界值($N \geq 5$ 次循环)时,循环作用对强度参数的弱化效应趋于稳定。

3.3 黄土微观结构变化

在对冻融-湿干循环处理前后的黄土微观颗粒形态进行比较分析时(图 7),可观察到其微观结构发生了变化。未经历循环处理的黄土试样在 500 倍放大倍数下的 SEM 图像,显示压实黄土呈现典型的团聚



a. 未进行冻融-湿干循环; b. 冻融-湿干循环 1 次; c. 冻融-湿干循环 3 次; d. 冻融-湿干循环 7 次

图7 黄土冻融-湿干循环前后 SEM 图

Fig. 7 SEM images of loess before and after FTWD cycles

体结构特征(图 7a)。其中,团聚体间孔隙(大孔)与团聚体内孔隙(微孔)清晰可辨(图 7a、图 7b、图 7c)。

在冻融过程中,孔隙水相变为冰晶,固相冰体充填于孔隙空间,造成不可逆的结构损伤。伴随温度波动引起的反复冻胀应力作用,土体破碎程度逐步加剧。冻融机制的核心在于冰-水相变所引起的体积膨胀(约 9%)及未冻水迁移诱发的冷生构造效应,共同形成非均匀冻胀应力,从而导致微孔隙扩展与颗粒接触界面重构(刘宽等, 2021; 李业彤等, 2023; 吕倩俐等, 2023)。随后的湿干循环进一步改变了黄土的微观结构。在增湿阶段,水分入渗引起土体内可溶盐类溶解及黏粒迁移,造成部分大孔隙塌陷并生成新的小孔隙。在此过程中,水膜增厚引发膨胀作用,促使颗粒发生位移与重组。在干燥阶段,由于毛细收缩力作用及部分溶解物质的流失,中、小孔隙逐渐贯通并扩展为更为发育的大孔隙系统,形成明显的迁移通道与长条状孔隙结构,土体整体结构趋于松散。

经历多轮冻融-湿干循环后,黄土微观结构持续发生劣化,具体表现为孔隙压缩与可溶物溶蚀两种主导机制。初始状态下,黄土在特定干密度条件下具备相对密实的稳定结构,其中粘粒、可溶盐及黏土矿物等团聚体组分分布于粉粒等较大颗粒之间,共同构成团聚体间孔隙与团聚体内孔隙系统。随着循环次数增加,结构损伤逐渐累积,多次循环后土体逐渐达到新的结构稳态,此时冻融-湿干循环对土体宏观力学行为的影响趋于减弱。

4 讨论

4.1 模型推导

通过理论推导,系统研究了冻融-湿干循环过程中黄土强度的劣化演化规律,并构建了相应的损伤本构模型。由应变等价原理可知,受损部分上应力 σ 产生的应变与有效应力 σ' 作用于未受损部分上的应变等价(郅彬等, 2024)。

$$\sigma = E\varepsilon'(1-D) = \sigma'(1-D) \quad (3)$$

式中: E 为材料的弹性模量; D 为损伤变量; ε' 为有效应变。

根据损伤变量相关的定义,可以将损伤程度 D 定义为受损单元个数与单元总数的比值。

$$D = \frac{N_D}{N} \quad (4)$$

式中: N_D 为损伤微元个数, N 为微元总数。

损伤模型的构建关键在于损伤因子 D 的选取。三轴压缩条件下,黄土内部损伤变化趋势(图 8)。

冻融-湿干损伤如公式(5)所示。

$$D_1 = \frac{N_1}{N} \quad (5)$$

由荷载引起的损伤如公式(6)所示。

$$D_2 = \frac{N_2}{N - N_1} \quad (6)$$

总损伤是由冻融-湿干和荷载共同作用造成的。因此,总损伤变量可定义为公式(7)。

$$D_3 = \frac{N_1 + N_2}{N} \quad (7)$$

公式(7)由公式(5)、公式(6)简化为公式(8)。

$$D_3 = D_1 + D_2 - D_1 D_2 \quad (8)$$

D_1 可通过初始弹性模量衰减参数进行定量表征,表示 N 次循环后,在黄土未进行压缩试验前由冻融-湿干循环造成的劣化。该参数表征了循环过程中材料刚度特性的退化规律。

$$D_1 = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (9)$$

(1) 荷载损伤变量:在统计损伤理论中,损伤演化是通过未损伤单元的损伤概率来分析,认为未损伤单元的损伤概率服从随机分布(Duncan et al., 1970; Zou et al., 2024; 郅彬等, 2024)。目前,前人提出了基于 Weibull 分布的损伤本构模型(郅彬等, 2023; Zou et al., 2024)。Log-logistic 分布常用于分析各种寿命试验数据,可以很好地代替 Weibull 分布(Cohen et al., 1965; Khalili et al., 1991)。Log-logistic 分布则可用于模拟复杂(非单调)损伤(失效)概率(Khalili et al., 1991)。

文中用 Log-logistic 分布来描述单元损伤的随机性,其概率密度函数如公式(10)所示。

$$f(x) = \frac{\left(\frac{\beta}{\zeta}\right)\left(\frac{x}{\zeta}\right)^{\beta-1}}{\left[1 + \left(\frac{x}{\zeta}\right)^\beta\right]^2}, \quad \zeta > 0, \quad \beta > 0, \quad x > 0 \quad (10)$$

式中: ζ 为形状参数; β 为尺度参数。

因此,假设黄土微元强度的分布规律服从 log-logistic 函数,其表达式如公式(11)所示。

$$f(F) = \frac{\left(\frac{\beta}{\zeta}\right)\left(\frac{F}{\zeta}\right)^{\beta-1}}{\left[1 + \left(\frac{F}{\zeta}\right)^\beta\right]^2}, \quad \zeta > 0, \quad \beta > 0, \quad x > 0 \quad (11)$$

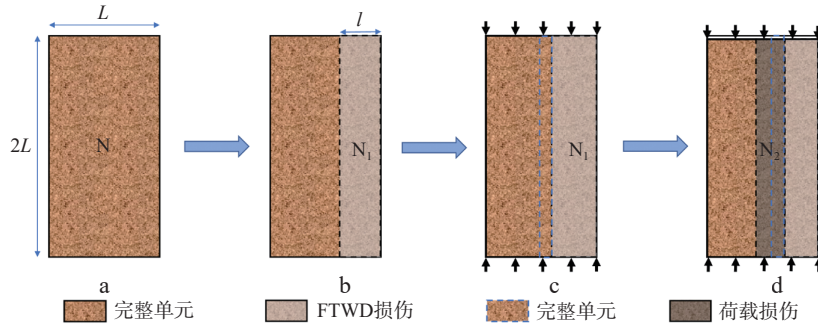


图8 土体损伤模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of soil damage model

式中: $f(F)$ 为黄土微元强度的随机分布函数; F 表达式如公式(12)所示。

$$F(\sigma') = K_0 \quad (12)$$

式中: $F(\sigma')$ 为表征黄土微元的屈服特性, 其数值受应力状态影响; σ' 表示微元破坏时的等效应力值; K_0 为应力相关参数, 其数值取决于黄土的黏聚力及内摩擦角特性, 会随加载条件改变而发生变化。因此, 损伤变量的数学表达式为公式(13)。

$$D_2 = \frac{\int_{-\infty}^F n f(x) dx}{n} = \int_{-\infty}^F f(x) dx \quad (13)$$

把公式(12)代入公式(13)得到公式(14)。

$$D_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{F}{\zeta}\right)^{-\beta}} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{F}{\zeta}\right)^{\beta}} \quad (14)$$

假定微元强度满足最大拉应变屈服准则, 可写成公式(15)。

$$F = f(\varepsilon) = \varepsilon \quad (15)$$

把公式(10)、公式(14)和式(15)代入公式(8), 可得公式(16)。

$$D = 1 - \frac{E_n}{E_0 \left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{\zeta}\right)^{\beta} \right]} \quad (16)$$

由公式(8)和公式(16)可知, 在围压条件下, 当未进行冻融-湿干作用时, E_n 参数取值保持为初始值 E_0 , 此时总损伤演化方程将退化为仅受力学荷载控制的单因素损伤模型。

(2) 损伤基本关系: 试验数据分析表明, 黄土在低围压条件时呈现应变软化特征, 而在高围压工况下则转变为应变硬化。Duncan-Chang 本构模型虽然在模拟应变硬化行为方面具有优势(陈正汉等, 2014), 然而其对应变软化特征的模拟精度有待提升。本研究将统计损伤理论引入 Duncan-Chang 本构模型。

根据公式(4), 可以获得公式(17)。

$$\sigma' = \frac{\sigma}{1-D} \quad (17)$$

偏应力等效方程如公式(18)所示。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(1-D)} \quad (18)$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)'$ 为有效偏应力, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为名义偏应力。Duncan-Chang 双曲线应力应变曲线表达式为公式(19)。

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(1-D)} = \frac{\varepsilon_1}{B_0 + B_1 \varepsilon_1} \quad (19)$$

土体基于 Log-logistic 分布的统计损伤本构方程如公式(20)所示。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{B_0 + B_1 \varepsilon_1} \left(\frac{E_n}{E_0 \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_1}{\zeta}\right)^{\beta} \right]} \right) \quad (20)$$

4.2 模型验证

本构模型研究中, 经历冻融-湿干循环作用后的材料力学参数及其应力应变关系可通过三轴试验进行测定。当曲线为软化型, 存在峰值点, 可以采用峰值点处导数为 0, 进行特征点求解, 若曲线为硬化型, 不存在峰值点, 则需通过数值拟合手段获取统计损伤模型的相关参数。参数 α 和 β 的求解可以通过对进行损伤变量拟合。

根据黄土偏应力应变关系的数学模型: 公式(20), 求解模型参数 B_0 和 B_1 。参数 B_0 、 B_1 计算如公式(21)所示。

$$\frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} \Big|_{\varepsilon_1=0} = \frac{1}{B_0} = E_i \quad (21)$$

B_1 取值采用经验公式(22)。

$$B_1 = \frac{1}{2(\sigma_1 - \sigma_3)_m} \quad (22)$$

将基准状态变为循环后的状态, 使 $D = D_2$, 可获得公式(23)。

$$\sigma' = \frac{\sigma}{1-D_2} \quad (23)$$

则转换为公式(24)。

$$\sigma_i = \sigma_i' (1 - D_2) \tag{24}$$

由广义虎克定律可获得公式(25)。

$$\varepsilon_i' = \frac{1}{E_N} [\sigma_i' - \nu(\sigma_j' + \sigma_k')] \tag{25}$$

一般三轴应力状态下($\sigma_2 = \sigma_3$), 将公式(24)代入式(23), 可推导损伤变量为公式(26)。

$$D_2 = 1 - \frac{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}{E_N\varepsilon_1} \tag{26}$$

根据公式(14)和公式(25), 微元强度如公式(27)所示。

$$\frac{E\varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} = 1 + \left(\frac{\varepsilon_1}{\zeta}\right)^\beta \tag{27}$$

公式(27)化简为公式(28)。

$$\ln\left(\frac{E\varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} - 1\right) = \beta\ln(\varepsilon_1) - \beta\ln(\zeta) \tag{28}$$

采用拟合方法可得到参数 ζ 和 β 。

基于三轴试验数据, 对构建的损伤本构模型开展有效性验证。通过试验数据可以得到出所列的模型参数(表 2)。其中选择不同循环次数的试样数据和同

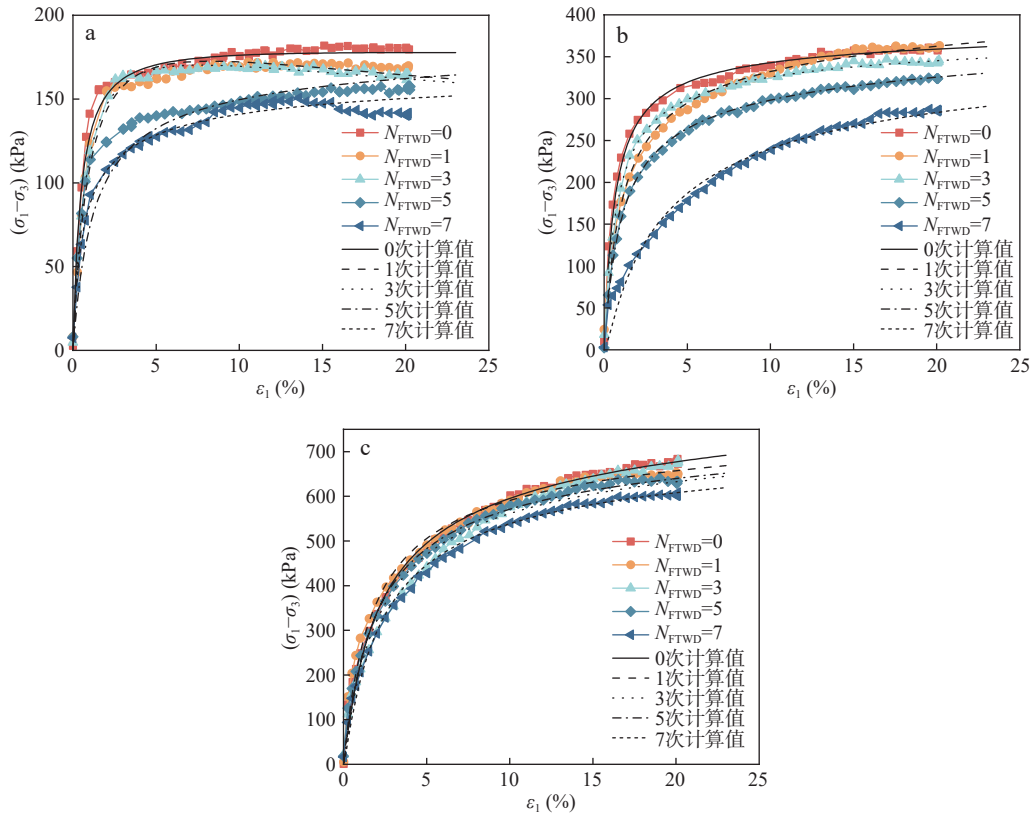
表 2 模型参数

Tab. 2 Model Parameters

围压 (kPa)	循环次数	ζ	β	B_0	B_1
50	0	25.12	0.24	0.003	0.002 8
50	1	38.7	0.37	0.003 7	0.002 9
50	3	64.17	0.36	0.003	0.003
50	5	0.3	-0.15	0.001	0.003 2
50	7	0.6	-0.54	0.000 5	0.003 6
150	0	6.67	-0.06	0.000 76	0.001 4
150	1	3.88	-0.18	0.000 94	0.001 4
150	3	0.67	-0.1	0.000 9	0.001 5
150	5	1.02	-0.24	0.001	0.001 6
150	7	3.58	-0.76	0.001	0.001 7
300	0	11.51	-0.2	0.000 98	0.000 73
300	1	5.71	-0.16	0.000 9	0.000 75
300	3	1.21	-0.2	0.002	0.000 74
300	5	1.07	-0.22	0.001	0.000 78
300	7	0.77	-0.5	0.001	0.000 83

一循环次数下不同围压试验数据进行验证。

将模型参数代入公式(20), 可求得理论计算结果。不同围压与冻融-湿干循环次数条件下理论曲线与试验数据的对比(图 9)。结果表明, 在相同围压条件下,



a. 50 kPa; b. 150 kPa; c. 300 kPa

图9 不同冻融-湿干循环后的试验数据与模型计算曲线的对比图

Fig. 9 Comparison diagram of experimental data and model calculation curves after different freeze-thaw wet-dry cycles

随着循环次数的增加, 峰值偏应力逐渐降低, 理论模型所预测的峰值总体略低于试验测定值。从整体演化规律来看, 理论曲线与试验数据均表现出先快速上升后逐渐衰减的变化趋势, 二者吻合较好。随着围压的提高, 理论模型对试验曲线的模拟精度明显提升。多次循环后, 理论预测值仍与试验结果较为接近, 表明模型具备良好的工程适用性。

5 结论

(1) 伊犁黄土试样的应力应变关系以硬化型为主。试样的抗剪强度随冻融-湿干循环次数的增加呈非线性递减趋势, 减幅达 10.13%~24.36%。围压提升对强度劣化具有抑制作用, 表现为强度衰减率随围压增大呈递减特征。试样黏聚力对冻融-湿干作用敏感度较高, 降幅明显, 而内摩擦角则保持相对稳定。季冻区冻融-湿干循环对黄土微观结构的影响机制, 冻融时, 冰晶膨胀与水力侵蚀引发孔隙扩张及可溶物溶蚀, 导致团聚体破碎重组; 在冻融劣化后, 进湿润和干燥, 通过溶解-收缩效应促使孔隙连通度提升, 形成迁移通道。

(2) 将传统 Duncan-Chang 模型与统计损伤理论相结合, 假设黄土微元强度损伤符合 Log-logistic 分布, 构建了能够反映不同冻融-湿干下应变硬化和应变软化特性的本构模型, 模型验证表明对不同工况下的试验数据均具备较高预测精度。

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):

- 包卫星, 吴倩, 吴谦, 等. 冻融循环作用下伊犁盐渍化黄土力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7): 1775-1787.
- BAO Weixing, WU Qian, WU Qian, et al. Mechanical properties of Ili salinized loess under freeze-thaw conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7): 1775-1787.
- 常丹, 刘建坤, 李旭. 冻融循环下粉砂土应力-应变归一化特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3500-3505+3515.
- CHANG Dan, LIU Jiankun, LI Xu. Normalized stress-strain behavior of silty sand under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3500-3505+3515.
- 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272.
- CHEN Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201-272.
- 丁旭升, 张凌凯, 樊培培. 干湿冻融循环条件下重塑性黄土的强度劣化规律及非线性模型研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(S1): 324-336.
- DING Xusheng, ZHANG Lingkai, FAN Peipei. Strength degradation law and nonlinear model of remolded loess under dry-wet freeze-thaw cycles condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(S1): 324-336.
- 樊培培, 张凌凯, 丁旭升. 干湿-冻融循环条件下湿陷性黄土剪切及压缩特性的劣化规律[J]. 岩土力学, 2024, 45(7): 2050-2060.
- FAN Peipei, ZHANG Lingkai, DING Xusheng. Deterioration law of shear and compression characteristics of collapsible loess under dry-wet-freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(7): 2050-2060.
- 姜海波, 张军, 喻天龙, 等. 湿干冻融下渠基膨胀土裂隙发育与强度衰减规律研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(7): 190-200.
- JIANG Haibo, ZHANG Jun, YU Tianlong, et al. Research on crack development and strength attenuation of expansive soil under wet-dry freeze-thaw effect[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(7): 190-200.
- 金钊, 彭建兵, 庄建琦, 等. 黄土塬沟道侵蚀扩张机理与固沟保塬工程的科学性[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 66(4): 821-839.
- JIN Zhao, PENG Jianbing, ZHUANG Jianqi, et al. Gully erosion and expansion mechanisms in loess tablelands and the scientific basis of gully consolidation and tableland protection[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(4): 821-839.
- 李业彤, 杨更社, 叶万军, 等. 冻融作用下伊犁原状黄土水力特性劣化规律与微观机制[J]. 工程地质学报, 2023, 31(4): 1261-1268.
- LI Yetong, YANG Gengshe, YE Wanjun, et al. 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.
- 刘宽, 叶万军, 景宏君, 等. 季冻区黄土微观损伤识别与宏观力学响应研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 192-197.
- LIU Kuan, YE Wanjun, JING Hongjun, et al. Microscopic damage identification and macroscopic mechanical response of loess in seasonal frozen areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 192-197.
- 吕倩俐, 张艳阳, 张天栋, 等. 不同冻融循环次数及含水率条件

- 下伊犁地区黄土力学强度损伤特性[J]. 工程地质学报, 2023, 31(4): 1269–1281.
- LV Qianli, ZHANG Yanyang, ZHANG Tiandong, et al. Change of mechanical strength of loess in Ili region under different freeze-thaw cycles and moisture contents[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(4): 1269–1281.
- 牛丽思, 张爱军, 王毓国, 等. NaCl 含量对伊犁原状黄土湿陷和溶陷特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 67–71.
- NIU Lisi, ZHANG Aijun, WANG Yuguo, et al. Effects of NaCl content on water collapsibility and salt collapsibility of undisturbed Ili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 67–71.
- 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 Hungchou, 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.
- 苏振坤, 刘平, 张峰华, 等. 卸荷与冻融损伤作用下砂岩力学特性及能量演化分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 240–253.
- SU Zhenkun, LIU Ping, ZHANG Fenghua, et al. Mechanical properties and energy evolution of sandstone under unloading and freeze-thaw damage[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 240–253.
- 于洋, 王根龙, 宋飞, 等. 伊犁地区冻融黄土滑坡形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(4): 1307–1318.
- YU Yang, WANG Genlong, SONG Fei, et al. Mechanism of formation of freeze-thaw loess landslides in Ili region[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(4): 1307–1318.
- 张凌凯, 丁旭升, 樊培培. 新疆北部重塑性黄土的力学特性规律及微观机制试验研究[J]. 材料导报, 2025, 39(3): 107–116.
- ZHANG Lingkai, DING Xusheng, FAN Peipei. Experimental study on mechanical properties and microscopic mechanism of remolded loess in northern Xinjiang[J]. Materials Reports, 2025, 39(3): 107–116.
- 郅彬, 王尚杰. 干湿-冻融循环下黄土力学特性及损伤机制研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(4): 1092–1102.
- ZHI Bin, WANG Shangjie. Mechanical properties and damage mechanism of loess under dry-wet freeze-thaw cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(4): 1092–1102.
- 郅彬, 王成, 王尚杰, 等. 基于 Weibull 分布的高温结构性黄土统计损伤本构模型[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(12): 118–125.
- ZHI Bin, WANG Cheng, WANG Shangjie, et al. Statistical damage constitutive model for structural loess at high temperature based on Weibull distribution[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(12): 118–125.
- Cohen A C. Maximum Likelihood Estimation in the Weibull Distribution Based On Complete and On Censored Samples[J]. Technometrics, 1965, 7(4): 579–588.
- Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5): 1629–1653.
- Khalili A, Kromp K. Statistical properties of Weibull estimators[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(24): 6741–6752.
- Li Y, Song Y, Fitzsimmons K E, et al. New evidence for the provenance and formation of loess deposits in the Ili River Basin, Arid Central Asia[J]. Aeolian Research, 2018, 35: 1–8.
- Song Y G, Chen X L, Qian L B, et al. Distribution and composition of loess sediments in the Ili Basin, Central Asia[J]. Quaternary International, 2014, 334–335: 61–73.
- Tang Chaosheng, Shi Bin, Cui Yujun, et al. Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(9): 1088–1101.
- Xu J, Li Y F, Ren C, 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.
- Xu J, Ren J W, Wang Z Q, et al. Strength behaviors and meso-structural characters of loess after freeze-thaw[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 148: 104–120.
- Zou Z X, Luo Y F, Tao Y, et al. Shear constitutive model for various shear behaviors of landslide slip zone soil[J]. Landslides, 2024, 21(12): 3087–3101.