干湿循环作用下微生物改良花岗岩残积土劣化规律研究

朱文羲[1, 2]，邓华锋[1, 2]，李建林[1, 2]，马林建[3]，李锦瑞[1, 2]，陈勇琪[1, 2]，陈向阳[1, 2]

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室，湖北 宜昌 443002；2. 三峡大学 土木与建筑学院，湖北 宜昌 443002；
3. 陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室，江苏 南京 210007)

摘要：采用微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP)对岩土体进行改良是当前的研究热点，而针对改良后土体抵抗干湿循环作用能力的研究以及劣化机制的分析鲜有报道。因此，以微生物改良后的花岗岩残积土为研究对象，结合典型环境因素设计干湿循环试验，综合力学试验和微细观检测，系统分析微生物改良后花岗岩残积土在干湿循环作用下力学性能变化及劣化机制。结果表明：(1) 干湿循环作用下，改良土的抗压强度、抗剪强度呈先快后慢的劣化趋势，30 期干湿循环作用后，抗压强度，黏聚力，内摩擦角分别降低 56.73%，38.73%，24.66%，其中，前 12 个周期的劣化速度较快，而后劣化速度明显降低并逐渐趋于稳定。(2) 在干湿循环作用下，由于碳酸钙胶结物和长石矿物的溶解作用影响，改良土的孔隙率、密度、纵波波速呈现与力学参数一致的变化规律。(3) 微细观结构显示，改良后花岗岩残积土的孔隙结构结构明显改善，密实性明显增强，联通的孔隙明显减少，干湿循环作用下，部分联通孔隙处的碳酸钙胶结物和长石矿物发生溶解，导致孔隙率呈一定的增大趋势，但碳酸钙胶结形成封闭孔隙处的碳酸钙依然保持完整的性态，同时，长石溶解生成的高岭石与钙离子反应生成硅铝酸盐沉淀对孔隙通道形成填充和堵塞，进而使得改良体在干湿循环作用下的微细观结构变化和物理力学性能劣化也趋于稳定。相关研究思路和结果可为 MICP 技术在花岗岩残积土改良中的应用提供参考。

关键词：土力学；干湿循环；花岗岩残积土；MICP；劣化机制

中图分类号：TU 43 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2025)02－0482－10

Study on the deterioration law of microbial improved granite residual soil under dry-wet cycle

ZHU Wenxi[1, 2]，DENG Huafeng[1, 2]，LI Jianlin[1, 2]，MA Linjian[3]，
LI Jinrui[1, 2]，CHEN Yongqi[1, 2]，CHEN Xiangyang[1, 2]

(1. *Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area，Ministry of Education，China Three Gorges University，Yichang，Hubei* 443002，*China*；2. *College of Civil Engineering and Architecture，China Three Gorges University，Yichang，Hubei* 443002，*China*；3. *State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact，Army Engineering University of PLA，Nanjing，Jiangsu* 210007，*China*)

Abstract：The application of Microbially Induced Calcite Precipitation(MICP) technology to improve geomaterials

收稿日期：2024－05－31；**修回日期：**2024－08－08

基金项目：国家自然科学基金资助项目(U22A20600，U2034203)；三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金项目(2023KDZ15)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U22A20600 and U2034203) and Open Fund Project of Key Laboratory of Geological Hazards of the Ministry of Education of the Three Gorges Reservoir Area，China Three Gorges University(Grant No. 2023KDZ15)

作者简介：朱文羲(1998－)，男，2020 年毕业于中原工学院土木工程专业，现为博士研究生，主要从事岩土体材料加固及应用等方面的研究工作。E-mail：654673115@qq.com。通讯作者：邓华锋(1979－)，男，博士，现任教授、博士生导师。E-mail：dhf8010@ctgu.edu.cn

DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2024.0412

has become a significant research focus. However，studies on the resistance of treated soils to wet-dry cycles and the analysis of their deterioration mechanisms are still limited. Therefore，this study focuses on granite residual soil treated with microbial improvement and designs wet-dry cycle tests under typical environmental conditions. Comprehensive mechanical tests and microstructural analysis were conducted to systematically analyze the changes in mechanical properties and deterioration mechanisms of the microbially improved granite residual soil under wet-dry cycling. The results indicate that：(1) under the influence of wet-dry cycles，the compressive strength and shear strength of the treated soil exhibit a deterioration trend that is initially rapid but gradually slows down. After 30 cycles，the compressive strength，cohesion，and internal friction angle decrease by 56.73%，38.73%，and 24.66%，respectively. The deterioration is faster during the first 12 cycles，while it significantly slows and stabilizes thereafter. (2) The porosity，density，and P-wave velocity of the treated soil exhibit a change pattern consistent with the mechanical parameters due to the dissolution of calcium carbonate cement and feldspar minerals under wet-dry cycles. (3) Microstructural analysis reveals significant improvements in the pore structure of the treated granite residual soil，with increased compaction and a marked reduction in interconnected pores. During wet-dry cycles，the dissolution of calcium carbonate cement and feldspar minerals in some interconnected pores leads to a slight increase in porosity. However，the calcium carbonate within enclosed pores remains intact，and the kaolinite produced from feldspar dissolution reacts with calcium ions to form aluminosilicate precipitates that fill and block pore channels. Consequently，the microstructural changes and the deterioration of the physical and mechanical properties of the treated soil under wet-dry cycling tend to stabilize. These research findings and insights provide valuable references for the application of MICP technology in improving granite residual soils.

Key words：soil mechanics；dry-wet cycle；granite residual soil；MICP；deterioration mechanism

1 引 言

花岗岩残积土是由花岗岩经风化作用产生的残留碎屑物，在我国南方地区广泛的分布，在公路建设中不可避免地会使用到花岗岩残积土作为路基填筑材料[1-2]。然而，花岗岩残积土因其强烈的吸水性和浸水后易软化崩解的特性，在填筑路基之前，必须对其进行改良处理。目前对花岗岩残积土改良的方法主要有 2 种：(1) 机械压实[3]，(2) 水泥基、化学基材料改良[4-5]。其中，尹 松等[3]通过对不同压实程度下的花岗岩残积土开展路用工程特性试验，得出压实度为 92%时沉降量最低；Y. R. Zhao 等[4]利用水泥对花岗岩残积土进行改良，发现掺入 6%水泥后，残积土的性能可以达到工程要求，为研究水泥改良花岗岩残积土路用性能提供了指导；Y. L. Sun 等[5]对比了水泥、石灰和高岭石 3 种材料对花岗岩残积土的改良效果，发现水泥和石灰主要依靠离子交换反应来改良土体，高岭石则通过自身胶结的可逆性来改良土体。综合来看，这些改良方法较好的指导了花岗岩残积土工程应用，但机械压实的能源耗费比较高，水泥基、化学基改良材料通常会对周围土体环境、地下水造成一定影响。在国家双碳目标下，亟需研发一种绿色环保的花岗岩残积土改良技术。

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术是为一种新兴的岩土体加固技术，因其对环境友好的特点[6-7]，国内外许多研究者已经将该技术应用于土体改良。例如，J. Chu 等[8]通过在砂土表面形成一层碳酸钙胶结层，有效提升了固化体的抗渗性能；尹黎阳等[9]对钙质砂和黏土进行了 MICP 改良，指出无侧限抗压强度 *UCS* 与 $CaCO_3$ 含量呈正相关，表明该技术能显著提高土体的力学性质；N. Tiwari 等[10]则将 MICP 技术应用于膨胀土路基加固，研究发现，土样的液限、塑限、膨胀率及膨胀力都有明显改善，且与矿化过程中形成的碳酸钙含量高度相关。这些研究成果证明了 MICP 技术能够显著改善土体的力学和水理性能。因此，有学者也尝试将 MICP 技术运用于花岗岩残积土改良，朱文羲等[11]试验发现 MICP 技术可以显著提升花岗岩残积土的物理力学性能，其中无侧限抗压强度提升了 41.2%；S. H. Liang 等[12]采用拌合法分析了不同微生物固化剂掺量对剪切性能的影响，并得出当微生物固化剂掺量为 10%时效果最佳；N. Y. Wang 等[13]通过模型试验，发现微生物固化可以有效提升花岗岩残积土边坡的抗侵蚀性。

这些研究为微生物改良花岗岩残积土提供了很好的基础，但我国南方地区通常雨热同季，改良后花岗岩残积土要经历反复自然干燥和降雨入渗的过程，这种干湿循环作用过程很可能对其物理力学性能造成影响，进而影响其长期工作性能[14]。综合目前研究成果来看，干湿循环作用下微生物改良花岗岩残积土的物理力学性能演化规律研究还很少涉及。

基于此，特在微生物改良后的花岗岩残积土基础上，开展干湿循环作用试验，通过宏观力学试验和微细观结构测试，系统分析干湿循环作用下改良土的物理力学性能劣化规律及机制。

2　试验材料及方法

2.1　试验材料

试验所用花岗岩残积土取自宜昌市秭归县某在建公路边坡，如图 1 所示，样品为棕黄色，较湿，有一定塑性，有砂感。



图 1　花岗岩残积土取样点

Fig.1　Granite residual soil sampling site

按照标准[15]确定花岗岩残积土的基本物理特性及成分特性如图 2 和表 1，2 所示。

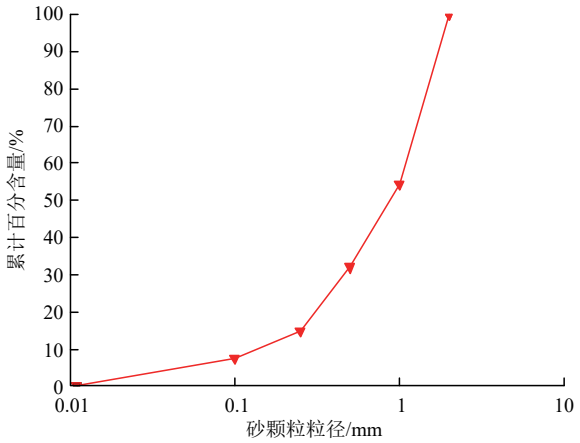


图 2　花岗岩残积土颗粒级配

Fig.2　Granite residual soil particle gradation

表 1　花岗岩残积土物理参数

Table 1　Mechanical parameters of granite residual soil

干密度/(g • cm^{-3})	天然含水率/%	液限/%	塑限/%	最大干密度/(g • cm^{-3})	最优含水率/%
1.68	30.2	52.13	31.25	1.71	15.81

表 2　花岗岩残积土主要矿物成分

Table 2　Mineral composition of granite residual soil

花岗岩类型	成分/%
石英	30.44
长石	30.71
云母	7.50
高岭石	26.16
其他	5.19

试验用细菌为支永艳等[16]提取的高产脲酶细菌：蜡样芽孢杆菌(Bacillus cereus)，具有环境适应性高及成矿能力强的优点。细菌的最佳培养条件为尿素含量 60.6 g/L，接种量 1.0 mL，转速 180 r/min，培养时间为 72 h，培养基配方如表 3 所示。

表 3　液体培养基配方

Table 3　liquid medium formula

成分	含量/(g • L^{-1})
牛肉膏	3.00
蛋白胨	10.00
尿素	60.06
氯化钠	5.00

2.2　试验方法

采用拌合法[17]对花岗岩残积土进行改良，具体流程如下：

(1) 配置试验所需菌液，用分光光度计测定菌液的吸光度，确保培养后的菌液达到试验要求；

(2) 将花岗岩残积土放入搅拌器中，先后加入菌液和胶结液进行搅拌直至充分混合均匀；

(3) 将土样分 5 层加入静压器中进行压实，控制压实系数为 0.95，层与层之间刮毛处理；

(4) 试样压实后脱模，用保鲜膜将其包裹密封室温养护 7 d 后再进行后续相关物理力学试验。

同时，干湿循环过程参考邓华锋等[18]研究经验进行：在 60 ℃的烘箱内干燥 23 h，取出后室温(25 ℃)静置 1 h，随后在水箱内浸水 23 h，取出后静置 1 h，再计算体积和称重。在经过 0，1，3，5，8，12，20 和 30 次干湿循环后测定试样的无侧限抗压强度。试样的制备与试验流程如图 3 所示。



图 3　试样制备与试验流程图

Fig.3　Sample preparation and test flow chart

3　改良土物理力学性能

对微生物改良前后的花岗岩残积土试样按照标准[15]以及规范[19]开展相应的物理力学试验，试验结果如表 4 所示。

表 4　微生物改良后花岗岩残积土物理力学参数

Table 4　Physico-mechanical parameters of granite residual soil after microbial improvement

试验	承载比/%	无侧限抗压强度/MPa	液限/%	塑限/%
改良后	5.37	1.05	46.13	24.67
规范要求	≥3.00	≥0.35	≤50.00	≤26.00

由表 4 可知，微生物改良后的花岗岩残积土整体的物理力学性能均有明显提升，同时均满足规范中对于路基填筑材料无侧限抗压强度 0.35 MPa，液限小于 50%以及塑限小于 26%的要求。由此可知，微生物改良后的花岗岩残积土能够较好的运用于路基填筑中，后文将进一步分析在干湿循环作用下，改良后的花岗岩残积土的性能演化。

4　干湿循环后改良土物理力学性能

4.1　物理性能

为消除试验离散性的影响以便于对比分析，以试样初始状态下的纵波波速、密度为标准，对各周期纵波波速测试、密度测试结果进行归一化处理，典型劣化试样和不同干湿循环周期下试样变化规律分别如图 4，5 所示。



图 4　不同干湿循环周期试样表面侵蚀形态

Fig.4　The surface erosion morphology of the sample under different dry-wet cycles

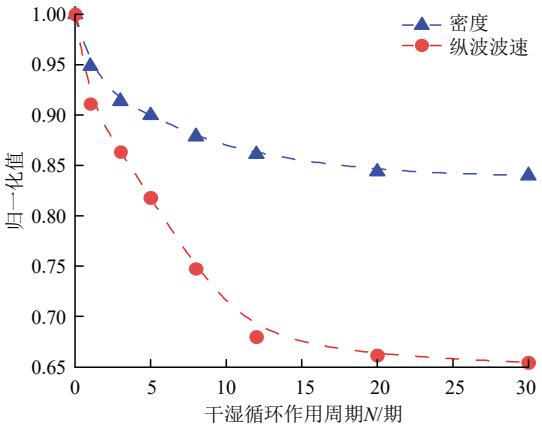


图 5　不同干湿循环周期试样密度、纵波波速变化规律

Fig.5　The variation law of sample density and longitudinal wave velocity in different dry-wet cycle periods

由图 4，5 可知：

经过 30 次干湿循环作用下微生物改良后的花岗岩残积土依然能够保持结构的整体性，仅在边缘处出现了颗粒剥落。同时，对试样的密度和纵波波速分析可知，随着干湿循环作用的进行，改良后的花岗岩残积土试样的纵波波速和密度不断降低，整

体呈“先快后慢”的劣化趋势，在前 12 个周期劣化速度较快，12 个周期后劣化速度减缓并逐渐趋于稳定，纵波波速和密度在前 12 个周期的劣化幅度分别占 30 个周期总劣化幅度的 92.68%，86.81%。

4.2 力学性能

(1) 无侧限抗压强度变化

不同干湿循环周期下微生物改良花岗岩残积土的应力－应变曲线如图 6 所示，试样抗压强度劣化幅度曲线如图 7 所示(图中，D_e 为劣化幅度，n 为干湿循环周期)。

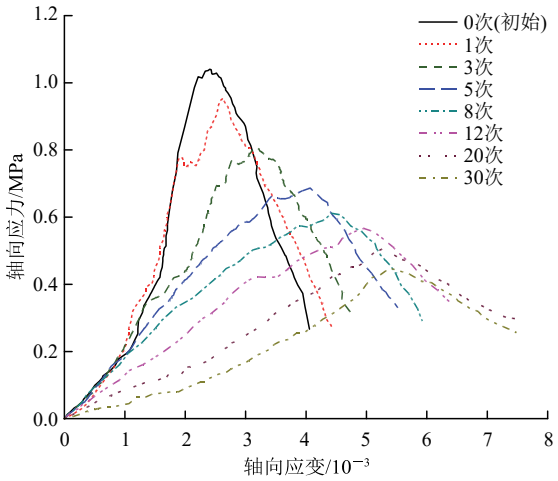


图 6　干湿循环作用下试样无侧限抗压强度应力－应变曲线

Fig.6　Uniaxial compression stress-strain curves of the specimen under dry-wet cycle

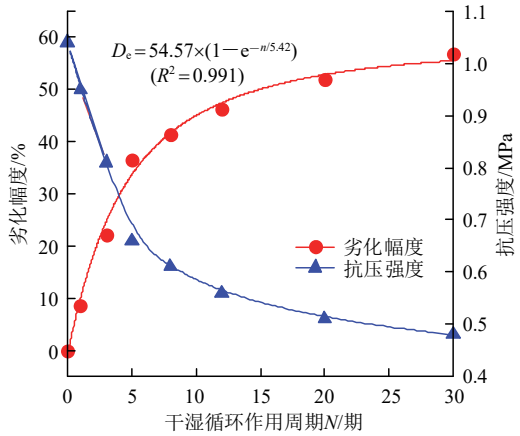


图 7　干湿循环作用下抗压强度劣化幅度曲线

Fig.7　Deterioration amplitude curves of compressive strength under dry-wet cycle

从图 6，7 可以看出：

不同干湿循环周期试样的应力－应变曲线形态总体一致。随着干湿循环周期的增加，应力－应变曲线的初始斜率逐渐降低，压密阶段逐渐变长，弹性阶段逐渐变短，而且斜率逐渐变小，达到峰值强度时的轴向应变逐渐增大，试样的延性逐渐明显。

同时，试样的无侧限抗压强度随着干湿循环作用也在逐渐减小，并在干湿循环 12 期后逐渐趋于稳定。比较而言，在 12 期干湿循环作用后试样的抗压强度劣化了 46.15%，占总劣化幅度的 81.35%。30 次干湿循环作用后，试样抗压强度为 0.48 MPa，满足规范[19]中的要求的 0.35 MPa。

(2) 抗剪性能变化

对干湿循环后的试样开展直剪试验，其中，抗剪强度的变化如图 8 所示，内摩擦角和黏聚力的变化如图 9 所示。

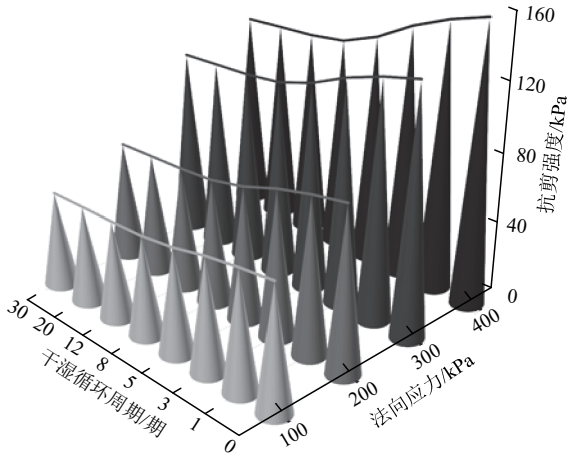


图 8　干湿循环作用下抗剪强度劣化幅度

Fig.8　Deterioration amplitude curves of compressive strength under dry-wet cycle

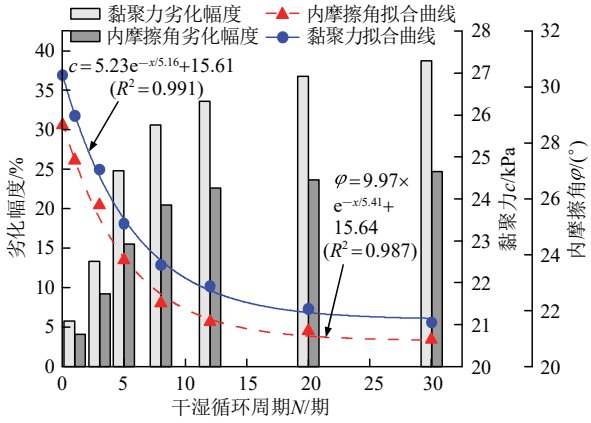


图 9　干湿循环作用下剪切性能劣化幅度

Fig.9　Deterioration amplitude curves of compressive strength under dry-wet cycle

由图 8，9 可知：

随着干湿循环作用的进行，不同法向应力下的抗剪强度劣化幅度呈现先快后慢的趋势。比较而言，前 12 个周期导致的抗剪强度劣化幅度较为明显，抗剪强度分别降低了 23.72%～28.33%，占总劣化幅度的 87.36%～89.99%。同时，在干湿循环作用下，试样的内摩擦角和黏聚力与抗剪强度相似均呈

现“先快后慢”的劣化趋势，在 12 次干湿循环后，黏聚力和内摩擦角分别降低了 33.62%，22.59%；30 次干湿循环后黏聚力和内摩擦角减小 38.73%，24.66%。综上，试样抗剪性能在 12 次干湿循环后趋于稳定。

为进一步对比分析各力学参数的劣化规律，特对其劣化速率进行计算分析。由于，试样浸泡时间、失水烘干的温度均保持不变，参考刘新荣等[20-21]研究经验，对劣化曲线进行积分求出面积作为劣化总量；劣化曲线长度除以干湿循环周期作为劣化速率，计算公式为

$$s=\int_0^a \sqrt{f(x)}\mathrm{d}x \tag{1}$$

$$v=\frac{\int_0^a \sqrt{1+[f'(x)]^2}\mathrm{d}x}{a} \tag{2}$$

式中：s 为劣化总量，v 为劣化速率，a 为干湿循环的次数，$f(x)$为不同参数劣化曲线。具体积分面积如图 10 所示，劣化速率如表 5 所示。

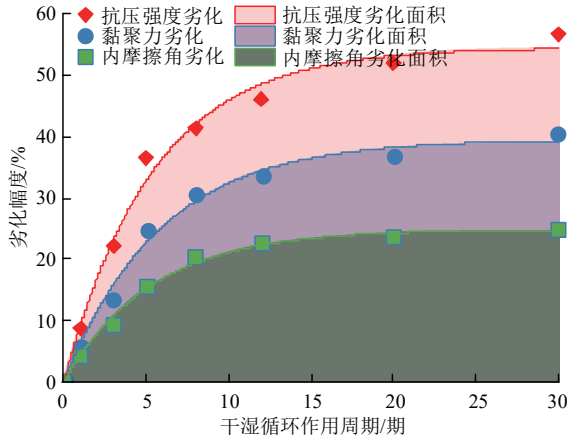


图 10　干湿循环作用下力学性能劣化幅度曲线

Fig.10　Deterioration amplitude curves of mechanical properties under dry-wet cycle

表 5　不同力学性能劣化数据

Table 5　Different mechanical performance deterioration data

参数	曲线长度	劣化速率	劣化面积
抗压强度	70.12	2.34	1 342.50
黏聚力	56.14	1.87	956.17
内摩擦角	44.45	1.48	613.86

由图 10 和表 5 可知，抗压强度的劣化面积最大，达到 1 342.50，劣化速率为 2.34；其次是黏聚力和内摩擦角，劣化面积分别为 956.17 和 613.86，劣化速率分别为 1.87 和 1.48，比较而言，抗压强度的劣化幅度和速率最大。

5　干湿循环作用下改良土微细观结构

5.1　微观形貌特征

干湿循环作用下试样劣化是成分变化导致微观结构变化进而物理力学特性劣化的过程[22-23]。因此，对不同干湿循环周期下的试样进行 SEM 扫描电镜和 XRD 成分分析以明晰劣化机制。不同干湿循环周期下的衍射图谱如图 11 所示、矿物成分相对含量变化如图 12 所示、SEM 照片如图 13 所示。

由图 11～13 可知：

(1) 在微生物改良前，花岗岩残积土的矿物组成以石英、云母、长石和高岭石为主，碳酸钙含量较低。微生物改良后方解石含量由 3.58%提升至 16.43%，表现为显著的碳酸钙沉积。同时，石英、云母因其性质较为稳定在干湿循环作用下衍射峰强

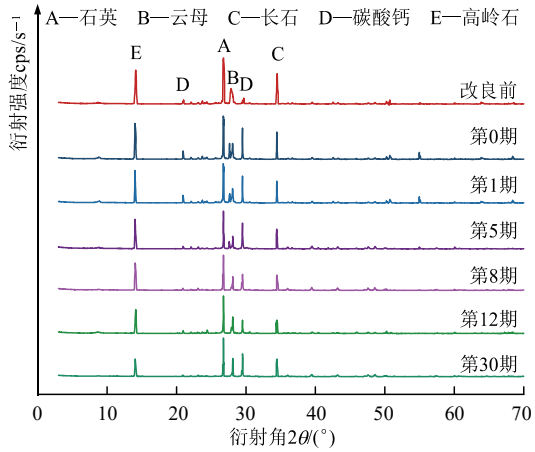


图 11　不同干湿循环周期改良体 XRD 衍射图谱

Fig.11　XRD diffraction patterns of solidified bodies in different dry-wet cycle periods

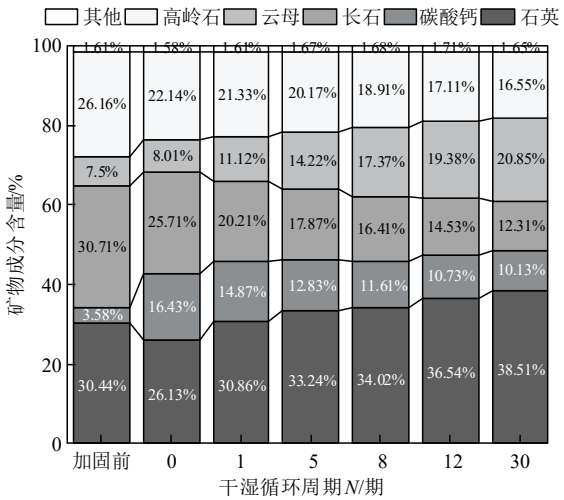
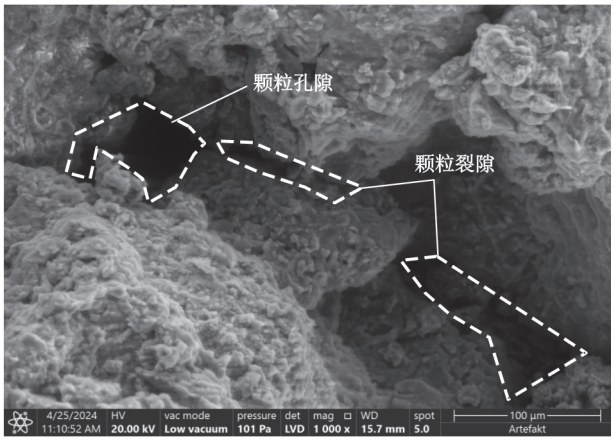
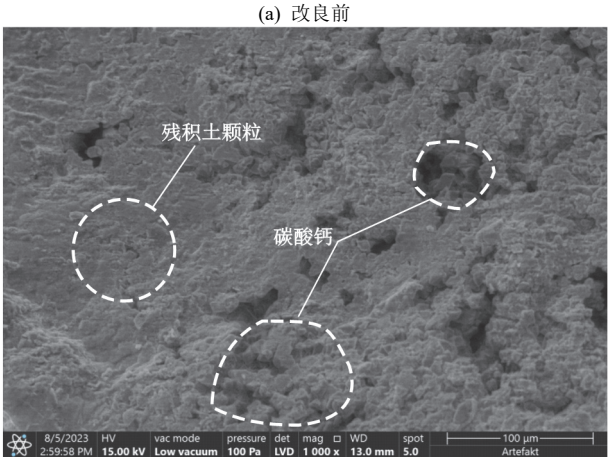


图 12　干湿循环作用下矿物相对含量变化规律

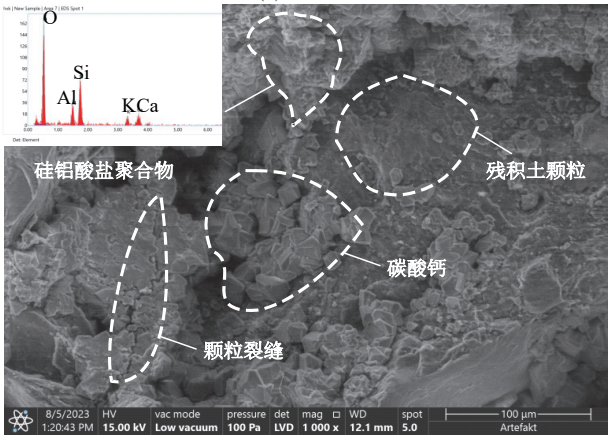
Fig.12　The variation law of particle fractal dimension under dry-wet cycle



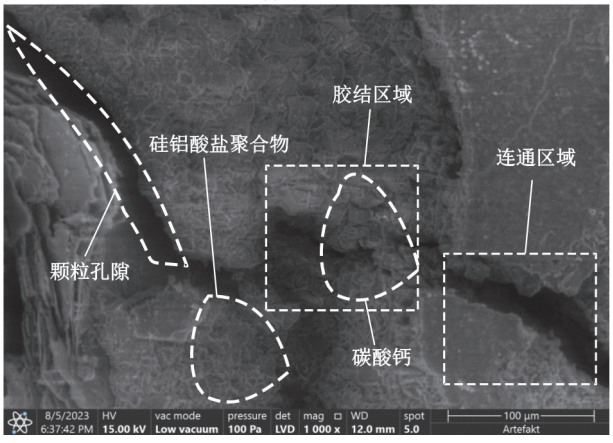
(a) 改良前



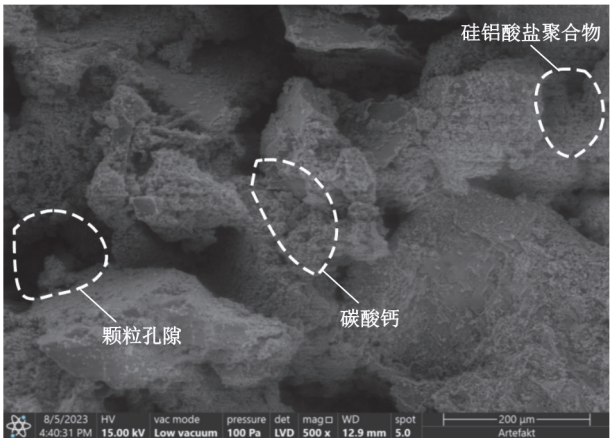
(b) 第 0 期



(c) 第 3 期



(d) 第 12 期



(e) 第 30 期

图 13　干湿循环作用下试样 SEM 照片

Fig.13　SEM photos of samples under dry-wet cycle

度没有发生明显变化，而长石、碳酸钙由于在干湿循环的作用下会发生离子交换和水解作用[24]，衍射峰强度有明显降低。

(2) 微生物改良前，试样结构较为松散且孔洞明显。微生物改良后，矿物颗粒排列相对紧密，微生物诱导生成的碳酸钙对残积土颗粒产生了较好的胶结作用，孔隙的数量、尺寸和联通性明显减少，仅局部区域存在较小孔隙。干湿循环作用至 3 期后，部分联通孔隙区域在干湿循环的作用下因矿物的逐步溶解，产生新的小孔隙；而孔隙未联通区域的碳酸钙胶结物依旧保持的较好的胶结状态，同时，可见部分长石矿物溶解生成的高岭石与钙离子反应生成硅铝酸盐沉淀；12 期干湿循环作用后，孔隙联通区域的碳酸钙胶结物溶解现象有一定增强，但没大部分胶结完好部分的碳酸钙依然保持良好性状；干湿循环作用至 30 期时，联通孔隙处碳酸钙溶解逐渐达到稳定状态，长石溶解生成的高岭石与钙离子反应生成的硅铝酸盐在孔隙通道沉淀，形成了一定的填充和堵塞。

5.2　孔隙结构特征

为进一步分析试样的孔隙结构变化，采用 MacroMR12－110H－1 型核磁共振成像分析系统进行核磁共振扫描，不同干湿循环周期下试样 T_2 谱变化如图 14 所示，孔喉分布如图 15 所示，孔隙率变化如图 16 所示。

由图 14～16 可知：

(1) 改良前后，试样的 T_2 谱峰明显降低且向左侧移动；随着干湿循环周期的增加，T_2 谱峰逐渐回升且向右侧移动，并在 12 期时趋于稳定。但整体 T_2

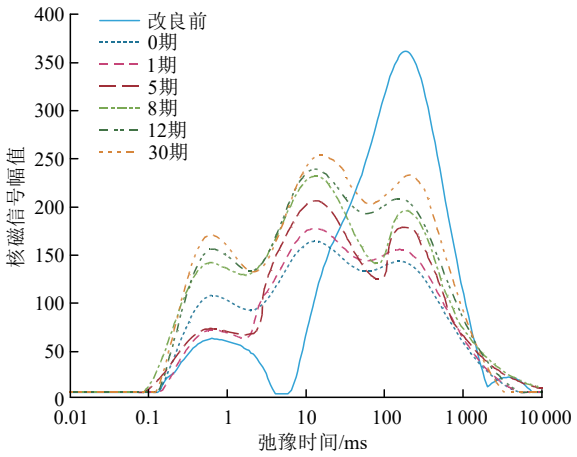


图 14　干湿循环作用下试样 T_2 谱曲线

Fig.14　SEM photos of samples under dry-wet cycle

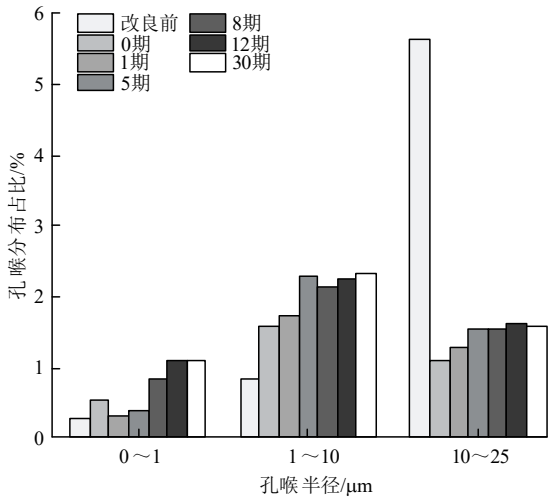


图 15　干湿循环作用下孔喉分布

Fig.15　Pore throat distribution under dry-wet cycle

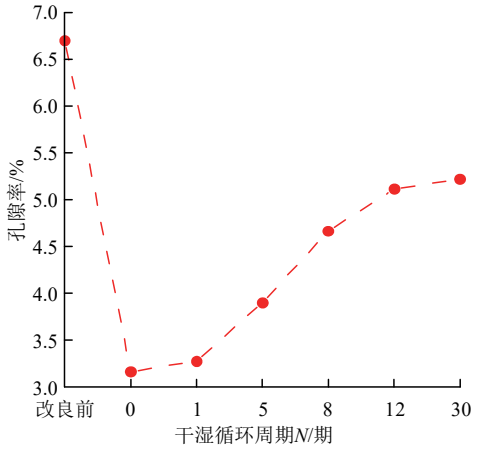


图 16　干湿循环作用下试样孔隙率变化

Fig.16　The porosity changes of the sample under the action of dry-wet cycle

谱峰值低于改良前，这表明微生物改良后试样的孔隙得到了有效填充，随着循环次数增加，部分孔隙逐渐发育，但整体较改良前依然具有较好的改良效果。

(2) 不同孔喉半径的分布呈现了不同的变化规律，随着干湿循环周期的增加，小孔喉的占比先减少后增加，大孔喉半径占比逐渐增加在 12 期后趋稳，中孔喉的占比在增加后呈现动态平衡的状态。表明生成的硅铝酸盐能够较好的对大孔隙胶结，降低大孔隙的增长。

(3) 改良前孔隙率为 6.69%，在微生物改良后降至 3.16%。随着干湿循环增加，孔隙率逐渐增大，1，5，12 和 30 期的孔隙率分别为 3.27%，3.89%，5.11%和 5.21%，但仍明显小于改良前的孔隙率。

6　干湿循环作用下改良土损伤机制

前述试验结果表明，在干湿循环作用的过程中，微生物改良后的花岗岩残积土的物理、力学性能不断劣化，根据前文试验结果经验绘制干湿循环作用下微生物花岗岩残积土的劣化机制如图 17 所示。

由图 17 可知：

(1) 改良前，花岗岩残积土本身结构松散，孔隙率为 6.3%，内部孔喉以大孔喉为主。在微生物改良后，试样内的碳酸钙的含量由 3.58%提升至 16.43%，有效的胶结了残积土颗粒，填充孔隙使孔隙率降低至 3.4%，并优化了试样的孔隙结构，实现了土体结构的改良。

(2) 干湿循环过程中，部分孔隙联通处的碳酸钙和长石会发生水解作用[24]：

$$CaCO_3 = Ca^{2+} + CO_3^{2-}$$

$$MAlSi_3O_8 + 8H_2O = M^+ + Al_2Si_3O_5(OH)_3Ca + 3H_4SiO_4$$

同时，长石溶解后的高岭石会与溶液中的钙离子发生反应形成硅铝酸盐[25]：

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca^{2+} \rightarrow Al_2Si_3O_5(OH)_3Ca + H^+$$

结合以上数据可以看出，干湿循环作用的前 12 期碳酸钙的含量由 16.43%下降至 10.73%，而后下降速度逐渐趋缓。同时，试样中大孔喉半径占比在 12 期后趋于稳定。表明在干湿循环作用到 12 期时，依旧存在大量碳酸钙在颗粒间保持着良好的胶结，并且在硅铝酸盐的胶结作用下，联通孔隙的发育已经趋于稳定。这与抗压强度、抗剪强度等指标在 12 期后趋于稳定且依旧保持较高强度的现象是吻合的。

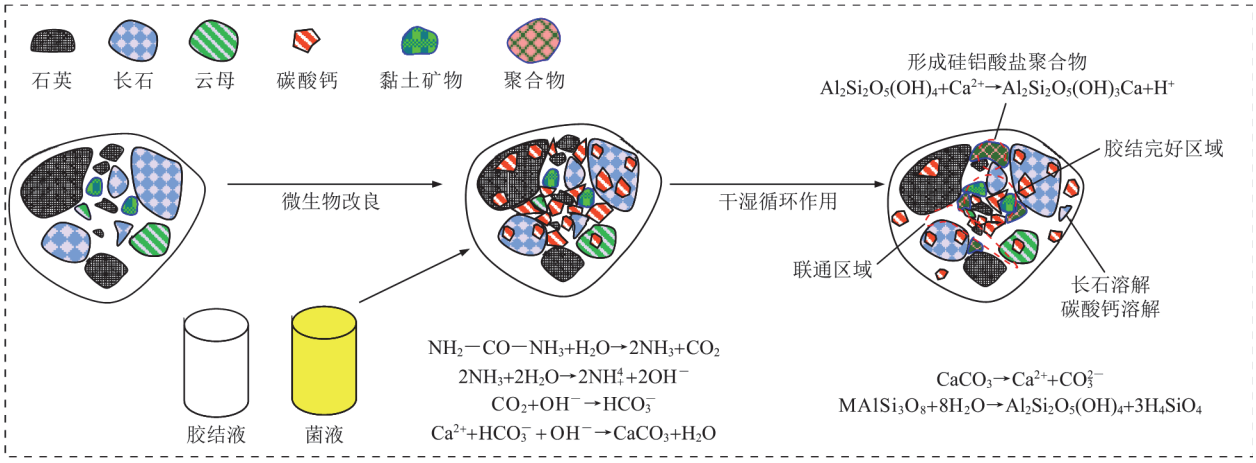


图 17　干湿循环作用下微生物改良花岗岩残积土损伤机制图

Fig.17　Damage mechanism diagram of microbial solidified granite residual soil under dry-wet cycle

7　结　论

本文对微生物改良后的花岗岩残积土开展 30 期的干湿循环试验，通过测定改良后的花岗岩残积土试样在不同干湿循环周期的物理力学性能和微观结构，研究了花岗岩残积土试样的劣化规律和劣化机制，有以下结论：

(1) 随着干湿循环周期的增加，微生物改良的后的花岗岩残积土试样的密度和纵波波速均有不同程度的劣化并在 12 期后趋于稳定，当 30 期干湿循环结束时分别下降了 13.37%和 35.26%。力学性能方面，内摩擦角、黏聚力、无侧限抗压强度分别下降了 24.66%，38.73%，56.73%。试样力学性能在 30 期干湿循环结束后依旧能够满足规范要求。

(2) 微生物改良后，在碳酸钙的作用下颗粒得到了良好的胶结，花岗岩残积土的孔隙结构得到优化，联通孔隙数量明显减少。在干湿循环下，部分联通孔隙的碳酸钙胶结物和长石矿物溶解，孔隙率虽略有增加，但封闭孔隙的碳酸钙保持完整。长石溶解生成的沉淀物填充和堵塞了孔隙，使得改良土体的微观结构和物理力学性能依旧保持良好。

(3) 干湿循环作用下，微生物改良后的花岗岩残积的抗劣化性能主要有 2 个方面原因：① 在非联通孔隙中的碳酸钙在干湿循环作用下依旧保持着较好的胶结维持了试样的整体强度；② 干湿循环过程中长石溶解后的高岭石会与溶液中的钙离子发生反应形成硅铝酸盐，能够较好地对大孔隙形成填充和胶结，控制大孔隙的增长。

参考文献(References)：

[1] SUN Y L，LI Z F，ZHANG X S，et al. Experimental study on tensile strength of granite residual soil during drying and wetting[J]. Geomechanics for Energy and the Environment，2024，37(12)：100523.

[2] 陈志波，安亚洲，谢永宁，等. 循环荷载作用下原状花岗岩残积土动力特性[J]. 铁道工程学报，2020，37(11)：25－30.(CHEN Zhibo，AN Asia，XIE Yongning，et al. Dynamic characteristics of undisturbed granite residual soil under cyclic loading[J]. Journal of Railway Engineering，2020，37(11)：25－30.(in Chinese))

[3] 尹　松，孔令伟，杨爱武，等. 花岗岩残积土填料路用工程特性室内试验研究[J]. 岩土力学，2016，37(增 2)：287－293.(YIN Song，KONG Lingwei，YANG Aiwu，et al. Laboratory experimental study on engineering characteristics of granite residual soil as road filling material[J]. Rock and Soil Mechanics，2016，37(Supp.2)：287－293.(in Chinese))

[4] ZHAO Y R，CHEN X S，WEN T，et al. Experimental investigations of hydraulic and mechanical properties of granite residual soil improved with cement addition[J]. Construction and Building Materials，2022，318(2018)：126016.

[5] SUN Y L，LIU Q X，XU H S，et al. Influences of different modifiers on the disintegration of improved granite residual soil under wet and dry cycles[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2022，32(4)：831－845.

[6] 刘汉龙，赵　常，肖　杨. 微生物矿化反应原理、沉积与破坏机制及理论：研究进展与挑战[J]. 岩土工程学报，2024，46(7)：1 347－1 358.(LIU Hanlong，ZHAO Chang，XIAO Yang. Mechanisms and theories of microbial internalization，sedimentation and destruction：advances and challenges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2024，46(7)：1 347－1 358.(in Chinese))

[7] 李明东，LIN L，张振东，等. 微生物矿化碳酸钙改良土体的进展、展望与工程应用技术设计[J]. 土木工程学报，2016，49(10)：80－87.(LI Mingdong，LIN Li，ZHANG Zhendong，et al. The progress prospect and engineering application technology design of mic robial mineralization of calcium carbonate to improve soil[J]. China Civil Engineering Journal，2016，49(10)：80－87.(in Chinese))

[8] CHU J，IVANOV V，STABNIKOV V，et al. Microbial method for construction of an aquaculture pond in sand[J]. Géotechnique，2013，63(10)：871－875.

[9] 尹黎阳，唐朝生，谢约翰，等. 微生物矿化作用改善岩土材料性能的影响因素[J]. 岩土力学，2019，40(7)：2 525－2 546.(YIN Liyang，TANG Chaosheng，XIE John，et al. Factors affecting the improvement of geotechnical material properties by microbial mineralization[J]. Rock and Soil Mechanics，2019，40(7)：2 525－2 546.(in Chinese))

[10] TIWARI N，SATYAM N，SHARMA M. Micro-mechanical performance evaluation of expansive soil biotreated with indigenous bacteria using MICP method[J]. Scientific Reports，2021，11(1)，https：doi.org/10.1038/s41598－021－89687－2.

[11] 朱文羲，邓华锋，李建林，等. 木质素磺酸钙增强花岗岩残积土微生物固化效果研究[J]. 土木工程学报，2024，57(3)：123－132.(ZHU Wenxi，DENG Huafeng，LI Jianlin，et al. Study on the effect of calcium lignosulfonate on enhancing the microbial solidification of granite residual soil[J]. Journal of Civil Engineering，2024，57(3)：123－132.(in Chinese))

[12] LIANG S H，XIAO X L，FANG C X，et al. Experimental study on the mechanical properties and disintegration resistance of microbially solidified granite residual soil[J]. Crystals，2022，12(2)：132.

[13] WANG Y N，LI S K，LI Z Y，et al. Exploring the application of the MICP technique for the suppression of erosion in granite residual soil in Shantou using a rainfall erosion simulator[J]. Acta Geotechnica，2023，18(6)：3 273－3 285.

[14] 安 然，孔令伟，黎澄生，等. 炎热多雨气候下花岗岩残积土的强度衰减与微结构损伤规律[J]. 岩石力学与工程学报，2020，39(9)：1 902－1 911.(AN Ran，KONG Lingwei，LI Chengsheng，et al. Strength attenuation and microstructure damage law of granite residual soil under hot and rainy climate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2020，39(9)：1 902－1 911.(in Chinese))

[15] 中华人民共和国国家标准. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京：中国计划出版社，2019.(The National Standards Compilation Group of People′s Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for Soil Test Methods[S]. Beijing：China Planning Press，2019.(in Chinese))

[16] 支永艳，邓华锋，肖 瑶，等. 微生物灌浆加固裂隙岩体的渗流特性分析[J]. 岩土力学，2019，40(增 1)：237－244.(ZHI Yongyan，DENG Huafeng，XIAO Yao，et al. Analysis of seepage characteristics of fractured rock mass reinforced by microbial grouting[J]. Rock and Soil Mechanics，2019，40(Supp.1)：237－244.(in Chinese))

[17] 程 雷，邓华锋，肖 瑶，等. 基于最优含水率的红层泥岩微生物改良材料优化研究[J]. 三峡大学学报：自然科学版，2023，45(4)：61－66.(CHENG Lei，DENG Huafeng，XIAO Yao，et al. Optimization of microbial improvement materials for red mudstone based on optimal water content[J]. Journal of Three Gorges University：Natural Science，2023，45(4)：61－66.(in Chinese))

[18] 邓华锋，周美玲，李建林，等. 水－岩作用下红层软岩力学特性劣化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2016，35(增 2)：3 481－3 491.(DENG Huafeng，ZHOU Meiling，LI Jianlin，et al. Study on the deterioration law of mechanical properties of red bed soft rock under the action of water-rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2016，35(Supp.2)：3 481－3 491.(in Chinese))

[19] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D30—2015 公路路基设计规范[S]. 北京：人民交通出版社，2015.(The Professional Standards Compilation Group of People′s Republic of China. JTG D30—2015 Highway subgrade design specification[S]. Beijing：China Communication Press，2015.(in Chinese))

[20] 刘新荣，李栋梁，张 梁，等. 干湿循环对泥质砂岩力学特性及其微细观结构影响研究[J]. 岩土工程学报，2016，38(7)：1 291－1 300.(LIU Xinrong，LI Dongliang，ZHANG Liang，et al. Study on the effect of dry-wet cycle on the mechanical properties and microstructure of argillaceous sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2016，38(7)：1 291－1 300.(in Chinese))

[21] 申林方，董武书，王志良，等. 干湿循环与化学溶蚀作用下玄武岩传质－劣化过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2021，40(增 1)：2 662－2 672.(SHEN Linfang，DONG Wushu，WANG Zhiliang，et al. Experimental study on mass transfer-degradation process of basalt under dry-wet cycle and chemical corrosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2021，40(Supp.1)：2 662－2 672.(in Chinese))

[22] 乔丽苹，刘 建，冯夏庭. 砂岩水物理化学损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(10)：2 117－2 124.(QIAO Liping，LIU Jian，FENG Xiating. Study on the physical and chemical damage mechanism of sandstone water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2007，26(10)：2 117－2 124.(in Chinese))

[23] 李洪亚，马林建，刘 杰，等. 周期性孔隙水压作用下砂岩损伤劣化特性研究[J]. 岩土力学，2024，45(7)：2 000－2 010.(LI Hongya，MA Linjian，LIU Jie，et al. Study on damage and deterioration characteristics of sandstone under periodic pore water pressure[J]. Rock and Soil Mechanics，2024，45(7)：2 000－2 010.(in Chinese))

[24] ZHOU M L，LI J L，LUO Z S，et al. Impact of water-rock interaction on the pore structures of red-bed soft rock[J]. Scientific Reports，2021，11(1)：7 398.

[25] TANG J，CHEN D. Effect of drying-wetting cycle and vibration on strength properties of granite residual soil[J]. Applied Sciences，2024，14(1)：458.