微生物促进矿物相变及其改良膨胀土胀缩特性试验研究

李珍玉，单世杰，林 坤，朱 航
(中南林业科技大学 土木工程学院，湖南 长沙 410004)

摘要：为了研究微生物改良膨胀土胀缩特性的效果，采用元素微量分析、X 射线衍射、傅里叶红外光谱和土的胀缩性试验，探讨微生物作用下膨胀土矿物成分、含量和结构的变化规律，研究微生物促进矿物相变作用对膨胀土胀缩特性的影响。试验结果表明，菌－土反应液中阳离子 Si^{4+}，Al^{3+}，K^{+}和 Mg^{2+}随时间的推移不断溶出，其中，K^{+}浓度呈现先增加后减少的趋势，在 14 d 时达到峰值，蒙脱石晶体中的 Si-O 键、Al-O 键和-OH 键均受到了影响，表明微生物作用下，K^{+}进入蒙脱石晶体层间，晶体结构受到了破坏。经过 14 d 的微生物作用，膨胀土试样在 $2\theta=9.882°$ 处出现了伊－蒙混层峰，28 d 后在 $2\theta=48.07°$ 处出现了伊利石峰值。K 值法计算结果表明，蒙脱石含量减少，而伊利石含量增加。膨胀土的自由膨胀率和有荷膨胀率的降幅率分别为 69.01%和 24.04%；线缩率和体缩率的降幅率分别为 32.9%和 30.98%。研究表明，胶质芽孢杆菌能够有效促进蒙脱石向伊利石的转化，降低膨胀土的胀缩性，为膨胀土的微生物改良提供新的技术途径。

关键词：土力学；膨胀土；蒙脱石；胶质芽孢杆菌；相变；胀缩特性
中图分类号：TU 43 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2025)01－0209－12

Experimental study on microbial-induced mineral phase transformation and its improvement of swell-shrink properties of expansive soil

LI Zhenyu，SHAN Shijie，LIN Kun，ZHU Hang
(*School of Civil Engineering*，*Central South University of Forestry and Technology*，*Changsha*，*Hunan* 410004，*China*)

Abstract：This study evaluates the effects of microbial processes in improving the swelling and shrinking properties of expansive soil. Elemental microanalysis，X-ray diffraction，Fourier-transform infrared spectroscopy and soil swelling-shrinkage tests were conducted to explore the changes in composition，content and structure of the mineral aggregate of expansive soil in bio-mediated treatment process，as well as the effects of microbial-induced mineral phase transformations on the swelling and shrinking characteristics of the soil. The experimental results indicate that cations Si^{4+}，Al^{3+}，K^{+}，and Mg^{2+} in the microbial-soil reaction liquid continuously leached out over time. Notably，the concentration of K^{+} exhibited an initial increase followed by a decrease，reaching a peak at 14 days. The Si-O，Al-O and -OH bonds within montmorillonite crystals were also affected. It was suggested that K^{+} ions entered the interlayers of montmorillonite crystals，disrupting their structures. After 14 days of microbial activity，an illite-smectite mixed-layer peak appeared at $2\theta=9.882°$ in the expansive soil samples，and an illite peak was observed at $2\theta=48.07°$ after 28 days. Calculations using the K-value method proved a decrease in montmorillonite content and an increase in illite content. The free swelling rate and load swelling rate of the expansive soil decreased by 69.01% and 24.04%，respectively；the linear shrinkage rate and volumetric shrinkage rate decreased by 32.9% and

收稿日期：2024－06－06；**修回日期：**2024－08－11
基金项目：湖南省自然科学基金项目(2023JJ31008)；国家自然科学基金资助项目(51608545)
Supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province，China(Grant No. 2023JJ31008) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51608545)
作者简介：李珍玉(1978－)，女，博士，2000 年毕业于湖南城市学院公路与城市道路专业，现任副教授、硕士生导师，主要从事特殊土地基处理与边坡生态防护方面的研究工作。E-mail：hdlizhenyu@163.com
DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2024.0437

30.98%，respectively. The study reveals that *Paenibacillus mucilaginosus* effectively promotes the transformation of montmorillonite to illite and improves the swelling and shrinking properties of expansive soil，which provides a novel approach towards modifying some engineering properties of soils.

Key words：soil mechanics；expansive soil；montmorillonite；*Paenibacillus mucilaginosus*；phase transition；swell-shrink properties

1　引　言

膨胀土是一种高塑性黏土，因其显著的胀缩特性，在工程应用中常常引发严重问题，如道路裂缝、建筑物基础不稳定等[1]。膨胀土的胀缩性主要源于其内部的蒙脱石和伊－蒙混层(I/S)等矿物。蒙脱石的 2∶1 层状结构赋予了其强烈的阳离子交换能力和水分子吸附能力[2-6]，从而显著影响膨胀土的胀缩效应[7]。相较于蒙脱石，伊利石和高岭石等矿物因晶格层间结合力较强，表现出较低的胀缩性，其亲水性仅为蒙脱石的 1/10～1/60[8]。因此，蒙脱石的含量在膨胀土的胀缩性中起着决定性的作用[9]，通过降低蒙脱石的含量，可以显著减少或消除膨胀土的胀缩性。

为了应对膨胀土的特殊性质，国内外研究者已经采取了多种措施，包括物理改良、化学改良和生物改良等。然而，这些传统方法往往面临高成本、显著的环境影响以及效果不持久等问题。微生物岩土技术作为一种新兴的生态友好型技术，因其较好的经济效益和较强的生命力而受到广泛关注[10-12]。微生物岩土技术通常分为两大类。第一类是微生物在生长和代谢过程中诱导生成碳酸盐、磷酸盐等沉淀的微生物成矿作用，这种方法通过人为调控微生物矿物反应，显著提高了岩土的胶结强度[13-14]。目前微生物诱导碳酸盐沉淀技术(MICP)已在岩土体加固[15-16]、抗渗物处理[17]及污染物治理[18]等领域得到广泛应用。第二类是微生物通过代谢物的溶蚀作用、物理穿插和释放矿物阳离子等方式，导致矿物原本结构的变化，从而促进矿物风化。现有研究多集中于微生物诱导的碳酸钙沉积对土体力学性质的改善，而对微生物如何改变矿物结构以促进风化的研究相对较少。蒙脱石向伊利石的相变能够显著降低膨胀土的胀缩性，然而自然风化过程缓慢，难以满足工程需求。微生物的介入为加速这一过程提供了可行的途径。近期的研究表明，一些特定微生物能够通过代谢活动产生的有机酸、胞外聚合物等物质影响蒙脱石的结构，促进其向伊利石的转化。例如，一些细菌和真菌能够利用蒙脱石层间的铁、镁等阳离子，通过还原作用加快结构转化。J. Kim 等[19]研究发现，铁还原菌与蒙脱石交互作用，可以在室温和常压下通过还原结构 Fe^{3+}来促进蒙脱石的溶解及其向伊利石的转化。G. Zhang 等[20]利用半胱氨酸和甲苯作为模型有机分子，成功嵌入富铁蒙脱石，并通过腐败希瓦氏菌还原 Fe^{3+}，结果显示半胱氨酸作为电子穿梭体，较甲苯更有效地促进了这一转化。朱　云等[21]研究了硅酸盐细菌与蒙脱石交互作用，发现细菌产生的酸性代谢物使蒙脱石化学成分及晶体结构发生改变。代群威等[22]的研究则揭示微生物代谢产物能渗透至矿物层间，改变矿物分子环境。微生物的生长和代谢与矿物相互依存，矿物为微生物提供营养和能量，而微生物产生的代谢物促进了矿物的风化。这些研究表明，相较于自然风化过程，微生物能够显著加速蒙脱石的风化速度，并改变其矿物成分。

微生物能够利用其特殊的生物特性促进蒙脱石等矿物的风化，从而引发其结构相变。膨胀土中富含丰富的蒙脱石矿物，若能有效利用微生物加速蒙脱石矿物的风化并转化为非膨胀性矿物，将显著降低膨胀土的胀缩性。目前，针对微生物促进矿物风化以改善膨胀土胀缩性方面的研究尚显不足。本研究旨在通过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)、X 射线衍射(XRD)和傅里叶红外光谱(FTIR)等先进技术，深入探讨胶质芽孢杆菌对膨胀土中蒙脱石矿物相变的影响。通过矿物学和微生物学的微观视角，分析胶质芽孢杆菌对膨胀土中矿物的物相、含量和晶体化学键的影响，研究反应溶液中离子浓度和 pH 值等的变化对膨胀土胀缩潜势的作用。本研究结果可为膨胀土的微生物改良提供理论依据，并为岩土工程领域中膨胀土胀缩性问题的有效解决开辟新的技术路径。

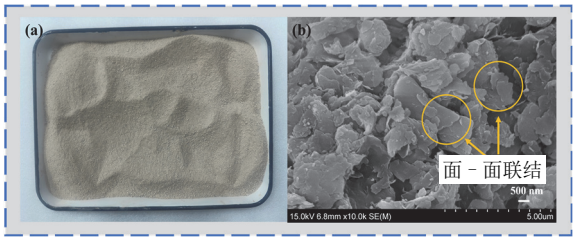
2　试验材料与方法

2.1　试验材料

(1) 土样的基本性质

试验所用的土样采自广西南宁某工程，并掺入

少量钙基膨润土，呈现灰黄褐色，如图 1 所示。



(a) 土样自然状态　　(b) 土样 SEM 微观形貌

图 1　试验所用膨胀土

Fig.1　Expansive soil used in the test

扫描电子显微镜(SEM)分析表明，膨胀土的矿物结构形式为絮状，主要由单片状黏土颗粒组成，这些颗粒一般呈现为平片状，并形成面－面连接的叠聚体。根据《公路土工试验规范》(JTG 3430—2020)测得土样基本物理指标，如表 1 所示。

表 1　膨胀土基本物理性质指标

Table 1　Basic physical properties index of expansive soil

自然密度/(g • cm^{-3})	最大干密度/(g • cm^{-3})	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	标准吸湿含水率/%	自由膨胀率/%	有荷膨胀率/%
1.88	1.75	25.2	58.1	22.8	35.3	5.84	171	5.99

由表 1 可知，土样自由膨胀率为 171%，有荷膨胀率是 5.99%，为强膨胀土。液限为 58.1%，塑性指数为 35.3%，为高液限黏土。

(2) 微生物培养

菌种：试验所用微生物菌种为胶质芽孢杆菌(CICC21698)，采购于北京生物保藏中心。如图 2 所示，该胶质芽孢杆菌呈杆状，白色鞭毛，芽胞椭圆形，菌液透明黏稠，为兼性厌氧菌。

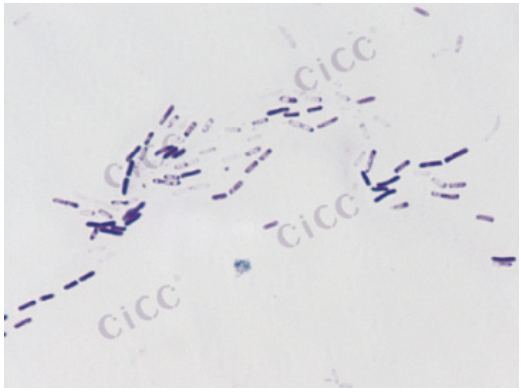


图 2　电子显微镜下胶质芽孢杆菌成像

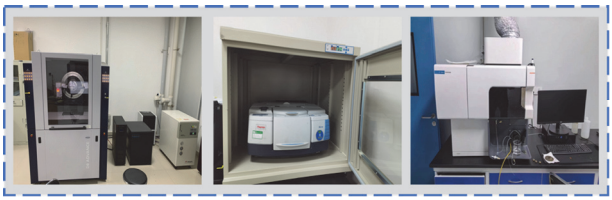
Fig.2　Imaging of *Paenibacillus mucilaginosus* under electron microscope

培养基：试验采用培养基为无氮培养基，按照成分参考标准，包含：蔗糖，10 g •L^{-1}；$CaCO_3$ •$2H_2O$，0.1 g • L^{-1}；K_2HPO_4，0.2 g • L^{-1}；$CaCO_3$，5.0 g • L^{-1}；$MgSO_4$ • $7H_2O$，0.2 g • L^{-1}；NaCl，0.2 g • L^{-1}，用稀盐酸调节 pH 值至 7.0 左右。

菌液：取出冷藏在 4 ℃冰箱中的斜面培养种子液，放入单人双面净化工作台中。挑取斜面培养基上的菌落接种于 100 mL 液体培养基中。接种完成后，将锥形瓶用封口膜封好。于温度为 30 ℃、转速为 150 r/min 摇床中培养 36 h，菌液活性浓度 OD_{600} 值为 1.82，pH 为 7.1 左右。

2.2　试验仪器及方法

试验的主要仪器有：德国 Bruker D8 AdvanceX 射线衍射仪(XRD)，用于测定试样物相的变化，如图 3(a)所示；美国 Thermo Scientific Nicolet Is50 显微红外光谱仪(FTIR)，用来测试试样中矿物结构与主要基团受到的影响，如图 3(b)所示；Agilent 5110 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)，用于测定试样上清液阳离子浓度，如图 3(c)所示。



(a) X 射线衍射仪　　(b) FTIR 测试仪　　(c) ICP-OES 测试仪

图 3　试验所用的主要仪器

Fig.3　Main instruments used in the test

(1) 试样制备

取一定量膨胀土烘干、碾压后，过 0.5 mm 筛，置于装有 100 mL 培养基的三角瓶中，在温度为 120 ℃条件下进行 20 min 灭菌处理。试验分为 2 组：试验组，编号为 J－7，J－14，J－28 和 J－42；空白对照组，编号为 JM－7，JM－14，JM－28 和 JM－42，每组各设 1 个重复试样，共 16 个试样，试样方案如表 2 所示。

表 2　试样设计方案

Table 2　Sample design schemes

试样编号	培养基/mL	菌液/mL	作用天数/d	试样个数	试样编号	培养基/mL	菌液/mL	作用天数/d	试样个数
J－7	100	5	7	2	JM－7	100	－	7	2
J－14	100	5	14	2	JM－14	100	－	14	2
J－28	100	5	28	2	JM－28	100	－	28	2
J－42	100	5	42	2	JM－42	100	－	42	2

将有菌组试样高温灭菌处理后，在无菌操作台上接入事先准备好的细菌悬液 5 mL，用透气封口膜

密封放入智能精密摇床，在温度为 30 ℃、振荡速度为 150 r/min 条件下振荡 7，14，28 和 42 d；无菌组放入恒温箱保存，如图 4 所示。

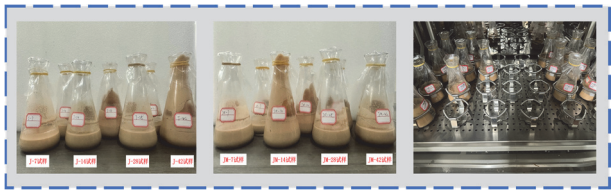


图 4　胶质芽孢杆菌与膨胀土相互作用

Fig.4　Interaction between *Paenibacillus mucilaginous* and expansive soil

取出作用至相应时间的锥形瓶试样，在 10 000 r/min 的条件下离心 15 min 取上清液，冷藏于 4 ℃冰箱。固体土样烘干后，用研钵研磨，作为待测试样，如图 5 所示。

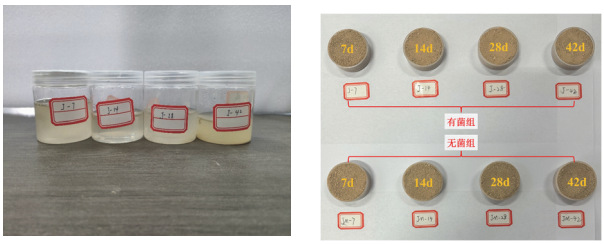


图 5　上清液和研磨后的固体土样

Fig.5　Supernatant and ground solid soil samples

(2) 元素微量分析试验

利用电感耦合等离子体发射光谱仪测得上清液中 Si^{4+}，Al^{3+}，Mg^{2+}和 K^{+}的离子浓度。通过分析上清液中 4 种阳离子溶出量的变化，间接反映胶质芽孢杆菌对蒙脱石晶体结构中金属元素的影响。

(3) FTIR 试验

采用红外分析试验方法，以探讨微生物作用下膨胀土中蒙脱石矿物晶格内所有原子的振动行为及其对基团或化学键的影响。待测粉末土样通过显微红外光谱仪进行测试，设置光谱范围为 600～4 000 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}。

(4) X 射线衍射试验

将研磨后的固体土样过 200 目筛，在粉晶 X 射线衍射仪上进行 XRD 试验，辐射源为 CuKα1 ($\lambda=0.154$ nm)，步宽为 0.02°。试验过程中采用广角 X 射线衍射，扫描范围 5°～70°，扫描速度 5°/min。通过 jade 9.0 软件进行物相定性分析，并用 K 值法[23-25]计算样品中黏土矿物的百分含量，再乘以样品干重，得到各黏土矿物的绝对含量。K 值法的基本公式如下：

$$I_j/I_s = K_s^j X_j/X_s \tag{1}$$

当 X_j=$X_s=0.5$ 时，有

$$K_s^j = I_j/I_s \tag{2}$$

式中：I_j 为待测相 j 的衍射峰强度，I_s 为参比物质的衍射峰强度，X_j 为待测相 j 在被测物质中的百分含量，X_s 为参比物质 s 对被测物质 j 的百分含量，K_s^j 为待测物质 j 对参比物质 s 的参比强度。

(5) 膨胀土胀缩性试验

为研究微生物对膨胀土胀缩潜势的影响，采用菌－土拌合的方法，对胶质芽孢杆菌作用于膨胀土的不同时间(0，7，14，28 和 42 d)进行了 50 kPa 荷载下的侧限有荷膨胀率试验和收缩率试验。将胶质芽孢杆菌与培养基按照一定的比例与膨胀土均匀拌合，使达到试验所用膨胀土最优含水率，拌合完毕后放入 35 ℃恒温生化培养箱。与锥形瓶试验同步进行至相应的天数后，制备成环刀试样，试样编号为 blank，JC－7，JC－14，JC－28 和 JC－42，每个试样各设一个平行试样，共 10 个，如图 6 所示。同时，自由膨胀率试验使用通过离心法获得的固体待测土样。



图 6　有荷膨胀率和收缩率试验试样

Fig.6　Loaded swell rate and shrink rate test samples

根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)，测定微生物作用下膨胀土自由膨胀率和有荷膨胀率。胀缩性试验过程如图 7 所示。



图 7　胀缩性试验过程

Fig.7　Swell-shrink test process

3　试验结果及分析

3.1　溶液离子浓度变化

由于 Si，Al，K 和 Mg 是膨胀土中蒙脱石的最主要金属元素，本研究采用上清液中这些阳离子的溶出量作为间接指标，以探求胶质芽孢杆菌对蒙脱石晶体结构内金属元素的动态影响。本研究测试了在胶质芽孢杆菌作用下，上清液中 Si^{4+}，Al^{3+}，K^{+}，Mg^{2+}的离子浓度随时间的变化，如图 8 所示。

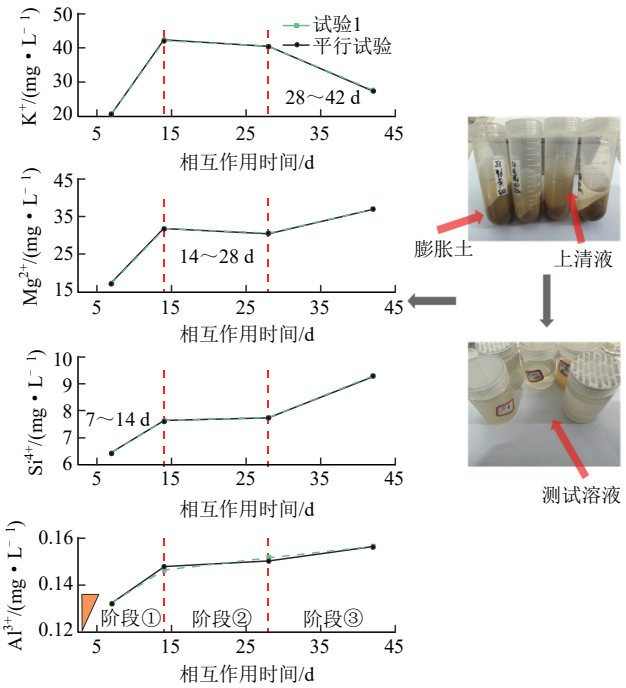


图 8　离子浓度随时间的变化

Fig.8　The changes of ion concentration with time

分析图 8 可知，离子溶出过程可分为 3 个阶段。阶段①(7～14 d)，快速溶出阶段。在此期间，胶质芽孢杆菌的代谢活动显著增强，从而加速了试样中金属离子的释放。阶段②(14～28 d)，减速溶出阶段。在此阶段，大量离子发生了交换，例如 Mg^{2+}替代了八面体层间的 Al^{3+}，导致上清液离子溶出量相对不显著。阶段③(28～42 d)，缓慢溶出阶段。在此阶段，阳离子交换能力已逐渐降低，推测蒙脱石矿物已经开始风化。随着微生物和黏土矿物作用时间的延长，上清液中 Si^{4+}，Al^{3+}，K^{+}和 Mg^{2+}的离子浓度均高于初始值，且 Al^{3+}和 Si^{4+}的离子浓度随时间持续增大。这一现象表明，胶质芽孢杆菌促进了 Si^{4+}和 Al^{3+}的释放，导致了原矿物晶格构造的改变。K^{+}的观察结果显示，14 d 时离子浓度达到了峰值 41.9 mg • L^{-1}，随后浓度逐渐下降，并在 42 d 时降至 27.5 mg • L^{-1}。这一现象指示 K^{+}可能进入了蒙脱石矿物的层间，导致上清液中的离子浓度降低，并促进部分蒙脱石向伊利石转化。

为了系统研究胶质芽胞杆菌对土样中阳离子的影响，本研究对 7～42 d 时上清液中不同阳离子的溶出效率和最大溶出量进行了比较，结果如图 9 所示。

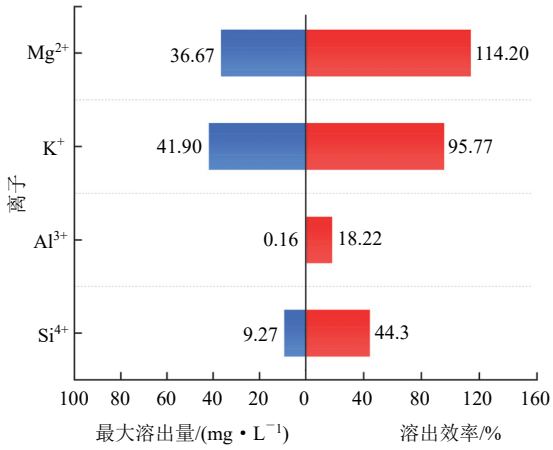


图 9　离子的溶出效率和最大溶出量

Fig.9　The ion dissolution efficiency and the maximum dissolution amount

由图 9 可知，胶质芽孢杆菌对膨胀土中 4 种离子溶出的影响程度为 Mg^{2+}＞K^{+}＞Si^{4+}＞Al^{3+}。在微生物作用后，Al^{3+}的溶出量最低，溶出效率仅为 18.22%，而 Si^{4+}的溶出较强，溶出效率达到了 44.3%。这表胶质芽孢杆菌对黏土矿物四面体片层 Si-O 键的破坏作用显著强于八面体片层的 Al-O 键。同时，Mg^{2+}和 K^{+}的溶出量和溶出效率在各个时间点均高于 Si^{4+}和 Al^{3+}，具体而言，Mg^{2+}的溶出效率为 114.2%，K^{+}溶出效率为 95.77%。这表明，胶质芽孢杆菌通过释放 K^{+}，显著提高了土中 K^{+}的浓度，从而导致上清液中 K^{+}的溶出量超过其他阳离子。这些金属离子的溶出现象将引起膨胀土中矿物结构中原有元素含量的变化，导致矿物结构发生破坏。

3.2　上清液 pH 值变化

接入胶质芽孢杆菌后，试样上清液的 pH 值由 7 逐渐上升至约 8.45，如图 10 所示。相比而言，未接入菌种的空白对照试样的 pH 值始终保持在中性水平。这表明，试验过程中，蒙脱石的酸溶作用可以忽略不计。

尽管胶质芽孢杆菌在与矿物作用过程中产生的大量有机酸，并释放 Si，Al 等金属离子导致溶液的 pH 值下降，但该过程也促使蒙脱石矿物向伊利石矿物转变，这一转变消耗酸，因此上清液的 pH 值呈现增加趋势。同时，胶质芽孢杆菌分泌的碳酸酐通

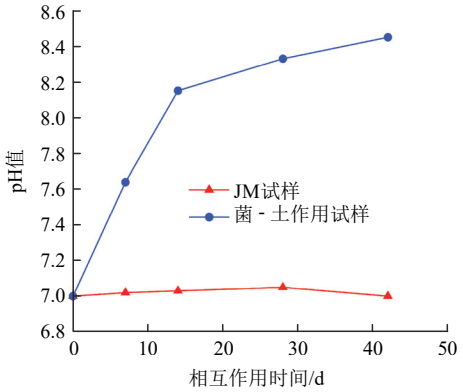


图 10　pH 值随时间的变化

Fig.10　The changes of pH value with time

过固定 CO_2 形成碳酸氢根离子，碳酸氢根离子的水解反应所导致的 pH 值上升，超过了因电离作用引起的 pH 值下降，最终使溶液呈现出弱碱性。这种弱碱性环境有利于 Si，Al 等金属元素以离子形态存在。此外，黏土矿物表面的羟基化作用增强了这些离子的溶出速率，进一步促进了矿物结构的变化。上清液中阳离子浓度与 pH 值之间的关系如图 11 所示。

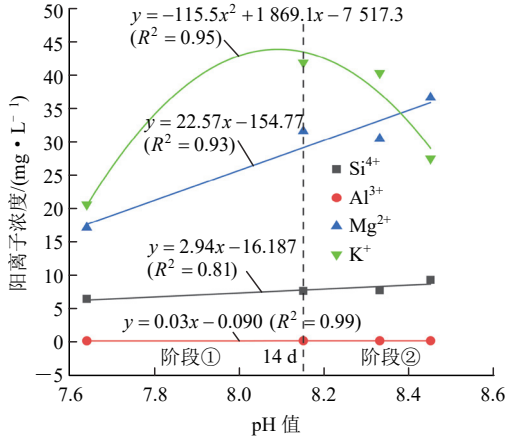


图 11　pH 值与阳离子浓度的关系

Fig.11　The relationships between pH value and cation concentration

根据图 11 的结果，Si^{4+}，Al^{3+}和 Mg^{2+}的溶出与 pH 之间呈现显著的线性正相关关系，而 K^+的溶出则表现出非线性相关特征。胶质芽孢杆菌与膨胀土相互作用过程可大致分为 2 个阶段。阶段①(0～14d)中，胶质芽孢杆菌在其代谢过程中分泌碳酸酐酶(CA)，该酶催化 CO_2，从而产生碳酸氢根离子。碳酸氢根离子不仅参与了胶质芽孢杆菌细胞膜的合成，还增强了细胞膜的流动性，为细胞吸收离子创造了有利条件，导致膨胀土中某些矿物中 Mg^{2+}和 K^+的释放，如图 12 所示。

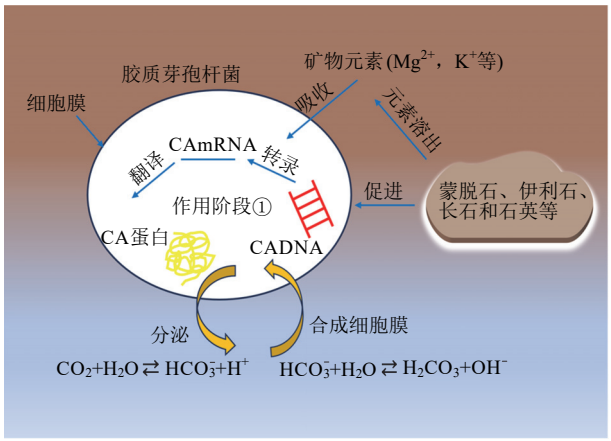


图 12　碳酸酐酶与矿物作用过程

Fig.12　Interaction process between carbonic anhydrase with minerals

根据朱婷婷等[26]研究可知，1 mol 的蒙脱石转化为伊利石的过程中，将消耗 0.5 mol 的质子(H^+)和 0.45 mol 的钾离子(K^+)。如图 11 所示，在 14 d 后，K^+浓度随着 pH 值的升高而呈现下降趋势，这表明在碱性条件下，阳离子的溶出及置换过程在一定程度上促进了膨胀土中蒙脱石的相变，具体表现为伊蒙混层(I/S)矿物向伊利石的转化。这一过程导致膨胀土中原有蒙脱石的含量减少，如图 11 所示的阶段②(14～42 d)。

3.3　膨胀土试样 FTIR 分析

对试样 J－42 与空白试样 JM－42 进行了红外光谱分析，结果如图 13 所示。

图 13 显示，位于 3 620 cm^{-1}附近的吸收峰的出现归因于蒙脱石中铝氧氢(Al-O-H)键的伸缩振动；而 3 400 cm^{-1}处的吸收峰则与蒙脱石层间水分子(H-O-H)的伸缩振动有关。中红外区域的 1 037 cm^{-1}吸收峰揭示了蒙脱石及少量长石和石英中存在的硅氧硅(Si-O-Si)键的反对称伸缩振动。此外，位于 1 635 cm^{-1} 处的吸收峰是层间水分子(H-O-H)弯曲振动所引起的，而 795 cm^{-1}处的吸收峰则显示了硅氧硅(Si-O-Si)键的振动行为。918 cm^{-1}处的吸收峰被认为与蒙脱石中的铝氧氢(Al-O-H)键密切相关，其强度和波数位置受八面体层中 Mg^{2+}和 Al^{3+}含量变化的显著影响。当 Mg^{2+}含量增加时，该吸收峰向高波数区移动，而当 Al^{3+}含量减少时，则表现出强度降低。

通过对比试验组(J－42)和空白组(JM－42)的红外光谱，可以观察到在 1 640，795，694 和 468 cm^{-1}处吸收峰保持一致。这表明水分子中的-OH 键以及铝镁氢(Al-Mg-OH)键的弯曲振动，而石英和 SiO_2 中的 Si-O 键则呈现伸缩振动。此外，1 034 cm^{-1}处的吸收峰对应于四面体结构中 Si-O-Si 的伸

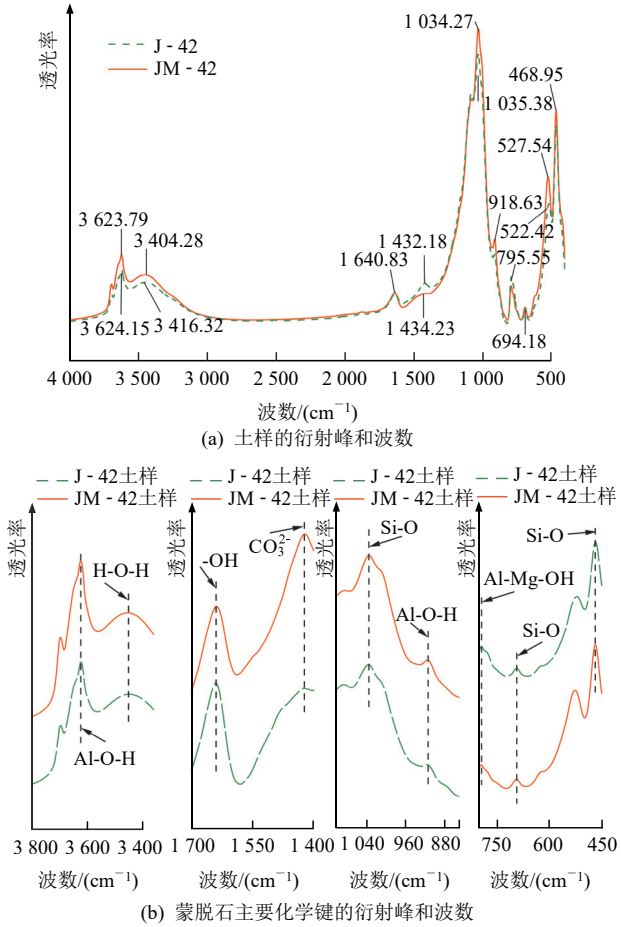


图 13　试验组与空白组的红外光谱

Fig.13　Infrared spectra of the experimental group and the blank group

缩振动。值得注意的是，J－42 试样中，该峰向高波数段移至 1 035 cm^{-1} 处，暗示胶质芽孢杆菌可能对蒙脱石矿物的四面体片层中 Si-O 键产生了潜在的影响，这与前述试验中 Si^{4+}强烈溶出相呼应，进而导致黏土矿物四面体片层 Si-O 键的破坏。对比 JM－42 试样在 3 623 cm^{-1} 处的羟基(-OH)伸缩振动吸收峰可以发现，J－42 试样的该峰向高波数段移至 3 624 cm^{-1}。同时，JM－42 试样在 1 434 cm^{-1} 处的吸收峰，在 J－42 试样中则迁移至低波数段 1 432 cm^{-1}，此变化与试样中碳酸盐矿物的 CO_3^{2-} 的振动相关。由于胶质芽孢杆菌在其代谢过程中产生了碳酸酐酶，从而诱导 CO_2 与溶液中的金属阳离子产生的碳酸盐沉淀，可能包括 $MgCO_3$ 和 $CaCO_3$ 等。在 3 404 与 3 623 cm^{-1} 附近，J－42 试样的吸收峰不仅发生了位移，强度也相较于 JM－42 试样有所减弱，这表明层间水的氢键发生了变化。这进一步表明膨胀土中蒙脱石层间的阳离子组成发生了变化。相较于空白组，试验组在 918 cm^{-1} 处吸收峰强度的减弱则指示蒙脱石矿物中的 Al^{3+}含量减少，这与 ICP-OES 测试结果中显示的胶质芽孢杆菌作用后膨胀土试样上清液中 Al^{3+}的溶出趋势相符。综上所述，胶质芽孢杆菌在作用一定的时间后，对膨胀土中蒙脱石矿物的晶体结构造成了一定程度的破坏，表明膨胀土中蒙脱石含量已经发生变化。

3.4　膨胀土试样 XRD 分析

为探讨胶质芽孢杆菌对膨胀土中黏土矿物的物相和含量的影响，本文分析了不同阶段膨胀土试样 X 射线衍射(XRD)图谱，如图 14 所示。

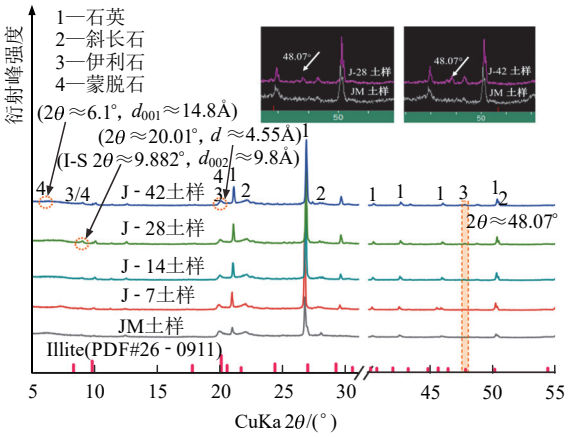


图 14　XRD 衍射图谱

Fig.14　XRD diffraction patterns

对比试验组(J 组)和空白对照组(JM 组)的衍射图谱可以观察到，空白试样主要物相包括石英、斜长石、伊利石和蒙脱石。而经过菌种作用的膨胀土试样的衍射图谱与空白组的图谱基本一致。通过参考标准图谱(PDF#26－0911)，可以发现 J－28 和 J－42 试样在 $2\theta=48.07°$ 附近产生了微弱的衍射峰，这一峰值对应于伊利石的特征信号。值得注意的是，J－7 和 J－14 试样处于从蒙脱石向伊利石演变的过渡阶段。此外，5°～20° 的衍射峰区域亦发现存在差异，如图 14 所示。

从图 15(a)～(c)可看出，在 2θ 约为 6.1°处，晶面间距 d 约为 14.8 Å 的蒙脱石主衍射峰呈现出较为扩散的特征。此外，相较于空白组，经过处理的样品组中蒙脱石主衍射峰的强度明显减弱。这一现象可能归因于膨胀土中的黏土矿物大多数以混层矿物的形式存在。胶质芽孢杆菌的作用可能促使亲水矿物蒙脱石向伊利石转变。进一步分析图 15(d)可知，在 2θ 为 9.882°附近，J－14，J－28 和 J－42 试样相较于空白组 JM 试样出现了新的衍射峰。对应的特征谱线 d 值约为 10 Å，这一数值与伊利石的典型衍射峰位置相符，同时也接近蒙脱石的 002 晶面指数。因此，可以推测该峰反映了伊利石/蒙脱石混层矿物(I/S 矿物)的出现，表明蒙脱石经微生物改性，发生了向伊利石过渡的现象。

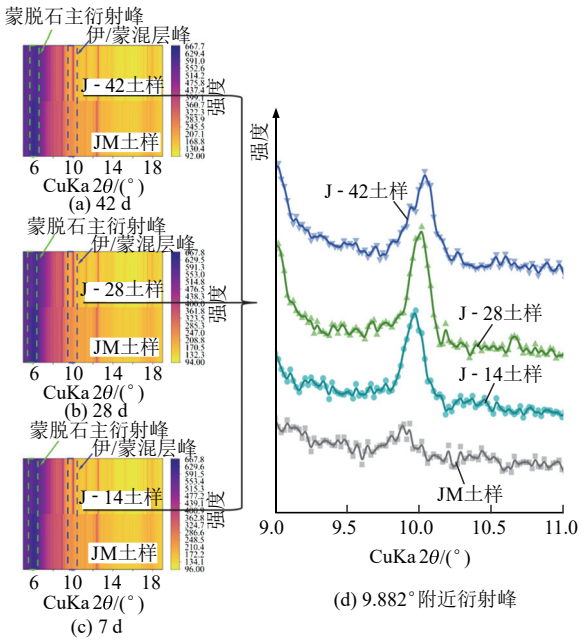


图 15　不同阶段土样 5°～20°衍射峰值强度

Fig.15　Intensity of XRD peak at 5° – 20° for soil samples at different stages

3.5　膨胀土中矿物组分含量分析

采用 K 值法对 XRD 结果进行定量分析，获得不同作用时间段不同黏土矿物含量的相关数据，如表 3 和图 16 所示。

表 3　不同时间段土样中黏土矿物的绝对含量

Table 3　The absolute contents of clay minerals in soil samples at different periods

试样	作用时间/d	黏土矿物绝对含量/g			
		M	I	K	C
JM	空白试样	0.284 3	0.042 8	0.030 8	–
J – 7(1)	7	0.252 8	0.043 5	0.032 3	–
J – 7(2)	7	0.272 1	0.043 3	0.030 6	–
J – 14(1)	14	0.226 5	0.046 5	0.019 5	–
J – 14(2)	14	0.212 6	0.045 2	0.021 2	–
J – 28(1)	28	0.196 3	0.051 1	0.013 8	–
J – 28(2)	28	0.197 2	0.050 2	0.015 2	–
J – 42(1)	42	0.181 9	0.080 3	0.021 4	–
J – 42(2)	42	0.184 2	0.074 3	0.019 1	–

注：M—蒙脱石，I—伊利石，K—高岭石，C—绿泥石。

由表 3 可知，在胶质芽胞杆菌作用下黏土矿物中蒙脱石含量随时间逐渐减少，至 42 d 后，蒙脱石含量降至 0.181 9 g，较空白试样下降了 36.02%；而伊利石的含量在 7 d 时较空白试样变化不大，之后伊利石的含量开始逐渐增加，42 d 时的伊利石含量

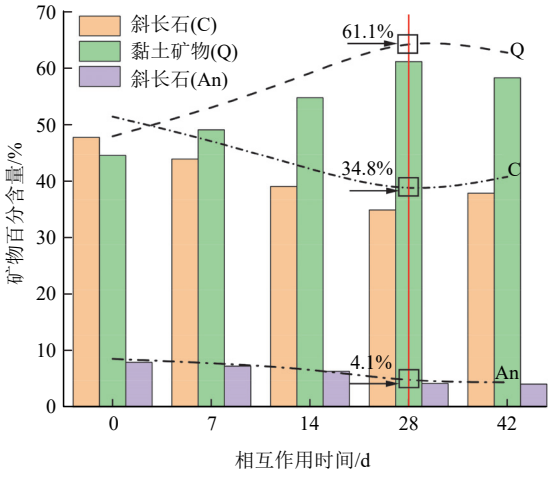


图 16　不同阶段试样中矿物百分含量的变化

Fig.16　Variation of mineral percentage in samples at different stages

较空白试样增加了 87.6%。在此阶段，蒙脱石的含量持续减少，这表明部分蒙脱石转化为伊利石，并且伊利石的产生是蒙脱石和混层矿物(I/S)共同转化的结果。此外，42 d 时 $2\theta = 48.07°$ 处产生了伊利石衍射峰，这与前述试验结果一致。这一现象与节 3.3 中蒙脱石层间阳离子发生变化相吻合，其中 J – 42 试样在 3 404 与 3 623 cm^{-1} 附近吸收峰出现了移动和减弱。

通过对图 16 的分析可明确微生物与膨胀土中黏土矿物的相互作用随时间而发生变化，黏土矿物的百分含量呈现先减少后增加的趋势。在 28 d 达到最低值，为 34.8%，较空白试样百分含量减少了 9.9%。这一现象表明，微生物的风化作用导致总的黏土矿物含量减少，但在 28 d 后，随着新黏土矿物的生成，黏土矿物的含量开始回升。与此同时，膨胀土试样中石英的百分含量总体呈现上升趋势。28 d 时，石英百分含量达到峰值，为 61.1%。出现这一现象的原因在于，蒙脱石矿物在风化过程中形成了 I/S 矿物，同时伴随高岭石(或叶腊石)和石英的生成。需要注意的是，J – 42 试样较 J – 28 试样石英的百分含量下降了 2.9%，而斜长石含量较空白试样下降了 3.9%，这表明，胶质芽胞杆菌对斜长石和石英等较稳定的硅酸盐矿物也产生了一定程度的风化作用。

胶质芽孢杆菌作用下膨胀土试样中各矿物含量随时间的变化，如图 17 所示。从图 17 可以看出，斜长石的含量呈持续减少的趋势，而高岭石的含量变化相对稳定。相较于 J – 28 试样，J – 42 试样中，高岭石的含量略有增加，这可能是由于部分斜长石

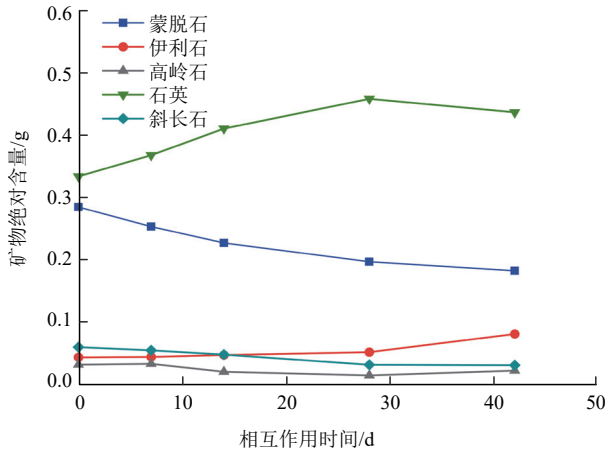


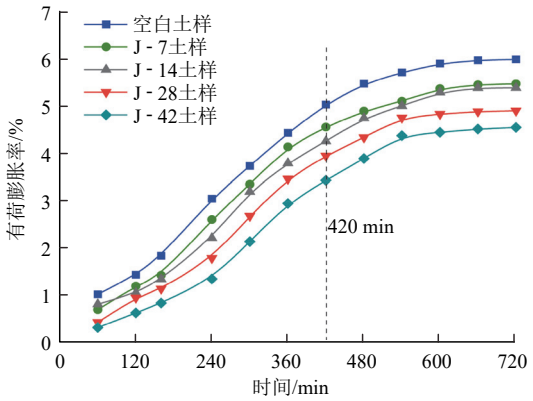
图 17　试样矿物绝对含量的时程变化

Fig.17　Temporal variation of the absolute mineral content in samples

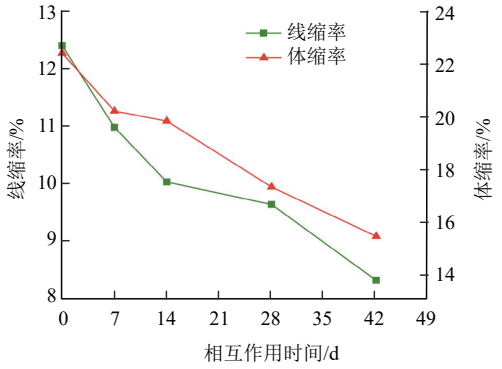
风化所致。通过对比不同阶段的矿物含量，可以明显观察到蒙脱石、伊利石以及石英受到胶质芽孢杆菌作用的影响更为显著。综合以上分析发现，在胶质芽孢杆菌作用下，膨胀土中层状结构的蒙脱石矿物比具有架状结构的斜长石矿物更容易受到菌种的风化作用。蒙脱石矿物的风化演变顺序可描述为：蒙脱石矿物→无序 I/S 矿物→伊利石矿物。

3.6　膨胀土胀缩特性分析

通过对不同阶段菌种作用的膨胀土试样进行胀缩性试验，研究了蒙脱石矿物含量的变化对膨胀土胀缩潜势的影响。试验中，膨胀土试样在 50 kPa 荷载作用下收缩变形稳定后开始注水，注水后的 420 min 内处于快速膨胀阶段，随后膨胀率逐渐减缓并趋于稳定，整体膨胀时程曲线呈现“S”型，如图 18(a)所示。试验发现，有菌种作用的膨胀土试样，有荷膨胀率随着菌种作用时间的增加而降低。在与胶质芽孢杆菌相互作用 42 d 后，试样的有荷膨胀率由初始的 5.99%降低至 4.55%，降幅率达到了



(a) 有荷膨胀率的时程变化



(b) 收缩率的变化

图 18　胀缩率随微生物作用时间的变化

Fig.18　Variation of swell and shrink rate with microbial action time

24.04%。图 18(b)为膨胀土线缩率和体缩率的变化曲线。结果表明，经菌种作用后，膨胀土试样的收缩变形量显著降低，其中，42 d 试样的线缩率的降幅率达 32.9%，体缩率达 30.98%。以上变化归因于胶质芽孢杆菌作用导致部分蒙脱石转化为伊利石，从而减少蒙脱石矿物的含量，降低了膨胀土的胀缩潜势。

胶质芽孢杆菌促进蒙脱石向伊利石转化可以通过利用一级动力学方程来描述，其方程的积分形式为

$$\ln\frac{a}{a-x}=kt \tag{3}$$

式中：a 为膨胀土中蒙脱石的初始百分含量，x 为第 i 天后生成伊利石的蒙脱石含量，k 为转化速率常数，t 为转化时间。根据试验结果，微生物作用 42 d 后，由式(3)计算得到转化效率与时间的关系曲线，如图 19 所示。

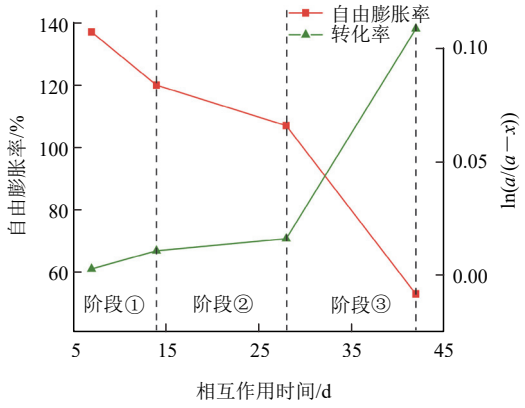


图 19　自由膨胀率和转化率随时间的变化

Fig.19　Variation of free swell rate and conversion ratio with time

结合对各阶段膨胀土自由膨胀率的分析可知，

菌种作用的不同阶段可以划分为 3 个主要转化阶段：(1) 缓慢转化阶段(7～14 d)。在此阶段，自由膨胀率的下降主要受蒙脱石晶体阳离子交换作用的影响，导致蒙脱石向无序的伊－蒙混层矿物转化。(2) 减速转化阶段(14～28 d)。此时，部分伊利石已初步生成，大多数黏土矿物以伊－蒙混层矿物的形式存在，自由膨胀率下降速度相对较缓慢。(3) 加速转化阶段(28～42 d)。在这一阶段，蒙脱石含量显著下降，大量 K^+进入蒙脱石层间，通过阳离子置换作用，加速了伊－蒙混层矿物向伊利石的转化，自由膨胀率迅速下降。最终自由膨胀率由最初的 171%下降至 42 d 后的 53%，降幅率达 69.01%。因此，微生物胶质芽孢杆菌的作用改善了膨胀土试样胀缩潜势。

4　讨　论

膨胀土的胀缩特性主要归因于其高亲水性的蒙脱石矿物含量。已有研究表明，通过微生物诱导产生的方解石沉积可控制膨胀土的胀缩性[11, 15]。笔者所在课题组的早期研究选用了巨大芽孢杆菌和巴氏芽孢杆菌，这 2 种微生物通过新陈代谢产生脲酶，进行促使尿素分解生成碳酸根离子[27]。该碳酸根离子与钙离子结合后，生成碳酸钙沉淀。碳酸钙的生成有助于土颗粒间的黏结，从而提高土体的抗拉强度，并在膨胀土吸水和失水过程中有效改善了胀缩性。然而，需注意的是，微生物诱导生成的方解石属于易风化矿物，随着时间推移，容易受自然环境的风化影响。因此，单靠矿化原理并不能从根本上消除膨胀土存在的胀缩潜势，而通过减少膨胀土中蒙脱石的含量以降低其胀缩性，是一个值得进一步探索的研究方向。

在 300 ℃～500 ℃温度和 100 MPa 压力作用下，或者长时间的自然风化的条件下，层状结构的硅酸盐矿物蒙脱石容易发生向伊利石的转化[28-29]。然而，J. Kim 等[19-20]研究表明，微生物的作用可以克服这一过程所需的高温、高压和漫长时间的限制，使得蒙脱石中的 Fe^{3+}还原成为 Fe^{2+}，从而破坏其层状结构，促使蒙脱石向伊利石的转化。因此，矿物中主要离子的变化被认为是驱动矿物结构演化的关键因素。本研究通过一系列试验发现，微生物在室温和一个大气压下能加速蒙脱石的结构发生变化，并促进其逐渐向伊利石相的演变。笔者所在课题组采用具有释磷释钾能力的微生物硅酸盐细菌[30]——胶质芽孢杆菌对膨胀土进行处理，观察到 Si^{4+}，Al^{3+}，K^+和 Mg^{2+}相继溶出。根据图 8 的结果可知，微生物作用后，仅 K^+浓度呈现先增大后变小的变化趋势，表明胶质芽孢杆菌有效释放了土体中的 K^+。由于矿物晶层间化学键的作用，部分 K^+被固定在矿物的层间。由表 3 可知，微生物作用下，蒙脱石含量逐渐减少，而伊利石含量逐渐增加，进一步证明了一部分蒙脱石经历了离子重组，导致伊－蒙矿物间结构的转变，作用过程简图如图 20 所示。

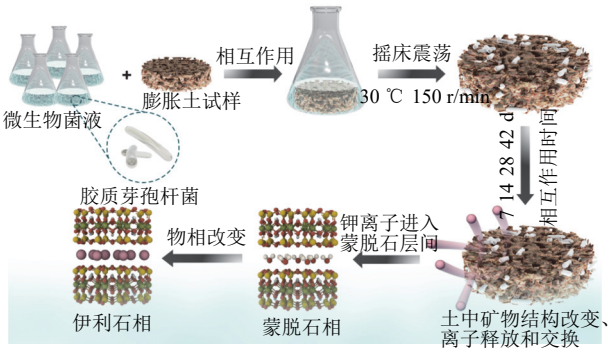


图 20　胶质芽孢杆菌与膨胀土试样的作用过程

Fig.20　Interaction process between *Paenibacillus mucilaginosus* and expansive soil samples

研究表明，胶质芽孢杆菌对蒙脱石矿物的风化作用路径呈现出从矿物表面向内部逐步渗透的特征，并在矿物表层留下微生物活动的明显痕迹，这在图 9 中得到了直观展示，反映了微生物作用后矿物元素的溶出差异。现有研究普遍认为，胶质芽孢杆菌通过分泌细胞外聚合物、有机酸等活性物质，与矿物发生交互反应，产生酸性环境以改变纯蒙脱石矿粉的矿物结构[21]。本研究的试验结果(见图 10)显示，随着微生物作用时间的延长，试样上清液的 pH 值逐渐上升，最终呈现出弱碱性。这一现象可归因于微生物与纯蒙脱石矿粉和与膨胀土之间相互作用时生长环境的差异。膨胀土中孔隙结构更有利于微生物与外界环境之间的物质交换。此外，胶质芽孢杆菌在代谢过程中产生的碳酸酐酶(CA)能够固定大气中 CO_2，从而维持微生物与土体的交互在弱碱性环境中进行。朱婷婷等[26, 31-32]研究表明，弱碱性条件更有利于蒙脱石矿物向伊利石转化。

研究结果表明，胶质芽孢杆菌能够促进亲水矿物——蒙脱石风化相变，降低膨胀土中蒙脱石的含量，从而有效控制膨胀土的胀缩潜势，根本性地解决岩土工程领域因膨胀土的胀缩特性所引发的工程问题。为进一步推动微生物促进矿物相变技术在膨胀土改良中的应用和发展，需聚焦以下研究方向：

首先，应加强对在野外条件下有效实施灌浆技术，以扩大规模改良膨胀土的研究，包括灌浆工艺的优化和长期监测等；其次，需优化改良条件，研究不同环境因素(如温度、湿度、pH 值及营养条件)对微生物促进矿物相变的影响，以确定最佳的改良条件组合。

5　结　论

(1) 通过 ICP-OES 分析，观察到胶质芽孢杆菌作用的膨胀土中 Si^{4+}，Al^{3+}，K^{+}和 Mg^{2+}不断溶出，溶出率 $Mg^{2+}>K^{+}>Si^{4+}>Al^{3+}$。其中，$K^{+}$的溶出量在 14 d 后达到峰值，为 41.9 mg/L，随后逐渐减少，表明 K^{+}可能进入了蒙脱石层间。

(2) 通过分析微生物作用不同时间膨胀土试样的红外光谱图，发现微生物作用下蒙脱石结构中 Al^{3+}含量降低。同时，蒙脱石晶体结构中的 Si-O 键、Al-O 键和-OH 键以及主要的阳离子均受到了影响，蒙脱石的晶体结构被破坏。

(3) 通过对微生物处理前、后的膨胀土进行 XRD 试验，发现胶质芽孢杆菌作用的膨胀土在 2θ 角为 9.882°出现了伊－蒙混层峰，菌种作用 28 和 42 d 试样在 2θ 角为 48.07°处出现了微弱伊利石峰值。相较于微生物作用前，蒙脱石的含量下降了 37.9%，伊利石含量增加了 87.6%，证实了蒙脱石向伊利石转化的过程。

(4) 通过对不同时间点的膨胀土试样进行胀缩性分析，发现胶质芽孢杆菌作用 42 d 后的膨胀土试样有荷膨胀率和自由膨胀率显著降低，降幅分别达到 24.04%和 69.01%，线缩率和体缩率也分别降低了 32.9%和 30.09%，这表明微生物作用显著降低了膨胀土的胀缩潜势。

参考文献(References)：

[1] 郑健龙. 公路膨胀土工程理论与技术[M]. 北京：人民交通出版社，2013：32－38.(ZHENG Jianlong. Theory and technology for highway expansive soil engineering[M]. Beijing：China Communication Press，2013：32－38.(in Chinese))

[2] IKEAGWUANI C C，NWONU D C. Emerging trends in expansive soil stabilisation：A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2019，11(2)：423－440.

[3] 李　勤，陆现彩，张立虎，等. 蒙脱石层间阳离子交换的分子模拟[J]. 南京大学学报：自然科学，2019，55(6)：879－887.(LI Qin，LU Xiancai，ZHANG Lihu，et al. Molecular simulation of interlayer cation exchange of montmorillonite[J]. Journal of Nanjing University：Natural Science，2019，55(6)：879－887.(in Chinese))

[4] 于海文，马田田，韦昌富，等. 阳离子交换量和盐溶液浓度对膨润土膨胀变形的影响[J]. 岩土力学，2023，44(9)：2 603－2 610.(YU Haiwen，MA Tiantian，WEI Changfu，et al. Effects of cation exchange capacity and salt solution concentration on swelling deformation of bentonite[J]. Rock and Soil Mechanics，2023，44(9)：2 603－2 610.(in Chinese))

[5] 刘　宽，叶万军，高海军，等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报，2020，39(10)：2 148－2 159.(LIU Kuan，YE Wanjun，GAO Haijun，et al. Multi-scale effects of mechanical property degradation of expansive soils under drying-wetting environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2020，39(10)：2 148－2 159.(in Chinese))

[6] CHEN L，ZHAO Y，BAI H，et al. Role of montmorillonite，kaolinite，or illite in pyrite flotation：Differences inclay behavior-based on their structures[J]. Langmuir，2020，36(36)：10 860－10 867.

[7] 谭罗荣，孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京：科学出版社，2006：75－78.(TAN Luorong，KONG Lingwei. Soil science of special geotechnical engineering[M]. Beijing：Science Press，2006：75－78.(in Chinese))

[8] 马俊杰，秦立涛，杨雨佳，等. 改性膨胀土胀缩变形的研究进展[J]. 土木工程，2023，(2)：185－194.(MA Junjie，QIN Litao，YANG Yujia，et al. Research progress on swelling shrinkage deformation of modified expansive soil[J]. Hans Journal of Civil Engineering，2023，(2)：185－194.(in Chinese))

[9] KHOURY H N. Review of clays and clay minerals in Jordan[J]. Arabian Journal of Geosciences，2019，12(23)：706.

[10] JIANG N J，WANG Y J，CHU J，et al. Bio-mediated soil improvement：An introspection into processes，materials，characterization and applications[J]. Soil Use and Management，2022，38(1)：68－93.

[11] 喻成成，卢　正，姚海林，等. 微生物诱导碳酸钙沉淀改性膨胀土试验研究[J]. 岩土力学，2022，43(增 1)：157－163.(YU Chengcheng，LU Zheng，YAO Hailin，et al. Experimental study of modifying expansive soils using microbial induced calcite precipitation[J]. Rock and Soil Mechanics，2022，43(Supp.1)：157－163.(in Chinese))

[12] 斯日古楞，李　驰，周团结. 基于 MICP 技术的生物岩土材料强度性能及碳酸钙结晶过程优化[J]. 应用基础与工程科学学报，2021，29(6)：1 403－1 417.(BAI Siriguleng，LI Chi，ZHOU Tuanjie. Study on strength properties of bio-geomaterial and optimization of crystallization process based on MICP technology[J]. Journal of Basic Science and Engineering，2021，29(6)：1 403－1 417.(in Chinese))

[13] 刘汉龙，张　宇，郭　伟，等. 微生物加固钙质砂动孔压模型研究[J]. 岩石力学与工程学报，2021，40(4)：790－801.(LIU Hanlong，ZHANG Yu，GUO Wei，et al. A prediction model of dynamic pore water pressure for MICP-treated calcareous sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2021，40(4)：790－801.(in Chinese))

[14] 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.(LIUHanlong，ZHAO Chang，XIAO Yang. Reaction principle，deposition and failure mechanisms and theory of biomineralization：progress and challenges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2024，46(7)：1 347－1 358.(in Chinese))

[15] 魏　然，张丽雅，肖智睿，等. 基于 MICP 技术的膨胀土变形控制机制研究[J]. 岩土工程学报，2023，45(增 1)：92－96.(WEI Ran，ZHANG Liya，XIAO Zhirui，et al. Deformation and control mechanismof MICP-treated expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2023，45(Supp.1)：92－96.(in Chinese))

[16] STOCK-FISHER S，GALINAT J K，BANG S S. Microbiological precipitation of $CaCO_3$[J]. Soil Biology and Biochemistry，1999，31(11)：1 563－1 571.

[17] SEKI，MIYAZAKI，NAKANO. Effects of microorganisms on hydraulic conductivity decrease in infiltration[J]. European Journal of Soil Science，1998，49(2)：231－236.

[18] WU R，YAO F，LI X，et al. Manganese pollution and its remediation：a review of biological removal and promising combination strategies[J]. Microorganisms，2022，10(12)：2 411.

[19] KIM J，DONG H，YANG K，et al. Naturally occurring，microbially induced smectite-to-illite reaction[J]. Geology，2019，47(6)：535－539.

[20] ZHANG G，KIM J，DONG H，et al. Microbial effects in promoting the smectite to illite reaction：Role of organic matter intercalated in the interlayer[J]. American Mineralogist，2007，92(8/9)：1 401－1 410.

[21] 朱　云，鲁安怀，李　艳，等. 硅酸盐细菌作用对蒙脱石结构影响初探[J]. 矿物学报，2010，30(增 1)：224－225.(ZHU Yun，LU Anhuai，LI Yan，et al. Effect of silicatebacteria on the structure of montmorillonite[J]. Acta Mineralogica Sinica，2010，30(Supp.1)：224－225.(in Chinese))

[22] 代群威，王维富，赵玉连，等. 蒙脱石－碳酸盐矿化菌对 Sr^{2+}的联合去除作用研究[J]. 原子能科学技术，2023，57(3)：485－492.(DAI Qunwei，，WANG Weifu，ZHAO Yulian，et al. Combined removal of Sr^{2+} by montmorillonite-carbonate mineralizing bacteria[J]. Atomic Energy Science and Technology，2023，57(3)：485－492.(in Chinese))

[23] SOUTHAM G. Bacterial surface-mediated mineral formation[J]. Environmental Microbe-metal Interactions，2000：257－276.

[24] 张艳. 蒙脱石定量分析中 0.448 nm 特征峰的应用研究[J]. 中国非金属矿工业导刊，2021，(4)：67－70.(ZHANG Yan. Study on the Application of 0.448nm characteristic peak in quantitative analysis of montmorillonite[J]. China Non-metallic Minerals Industry，2021，(4)：67－70.(in Chinese))

[25] 姚艳红，阚玉和，王思宏，等. X-射线 K 值法测定硅铁中硅的含量[J]. 分析化学，2002，(5)：639.(YAO Yanhong，KAN Yuhe，WANG Sihong，et al. Determination of silicon content in ferrosilicon by X-ray K value method[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry，2002，(5)：639.(in Chinese))

[26] 朱婷婷，范　健，陆现彩，等. 门多萨假单胞菌－蒙脱石相互作用的实验研究[J]. 矿物岩石地球化学通报，2011，30(3)：304－310.(ZHU Tingting，FAN Jian，LU Xiancai，et al. Experimental study on the interaction between *Pseudomonas Mendocina* and Montmorillonite[J]. Bulletin of Mineralogy，Petrology and Geochemistry，2011，30(3)：304－310.(in Chinese))

[27] SU H，XIAO H，LI Z，et al. Experimental study on microstructure evolution and fractal features of expansive soil improved by MICP method[J]. Frontiers in Materials，2022，9：842887.

[28] EBERL D，VELDE B，Mccormick T. Synthesis of illite-smectite fromsmectite at earth surface temperatures and high pH[J]. Clay Minerals，1993，28(1)：49－60.

[29] EBERL D，HOWER J. Kinetics of illite formation[J]. Geological Society of America Bulletin，1976，87(9)：1 326－1 330.

[30] 田　稼，吴小杰，孙　超，等. 胶质芽孢杆菌 (*Bacillus mucilaginosus*) 的研究进展[J]. 中国土壤与肥料，2017，(6)：15－22.(TIAN Jia，WU Xiaojie，SUN Chao，et al. Research progress on *Bacillus mucilaginosus*[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2017，(6)：15－22.(in Chinese))

[31] BOLES J R，FRANKS S G. Clay diagenesis in Wilcox sandstones of Southwest Texas；implications of smectite diagenesis on sandstone cementation[J]. Journal of Sedimentary Research，1979，49(1)：55－70.

[32] HUANG W L，LONGO J M，PEVEAR D R. An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer[J]. Clays and Clay Minerals，1993，41(2)：162－177.