

DOI: 10.11779/CJGE202107017

靶向激活产脲酶微生物加固钙质砂试验研究

董博文¹, 刘士雨^{1, 2}, 俞 缙¹, 蔡燕燕¹, 涂兵雄¹

(1. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 华侨大学福建省智慧基础设施与监测重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对产脲酶微生物设计了6种不同的靶向激活方案, 进行钙质砂的生物矿化加固试验。通过无侧限抗压测试、碳酸钙生成量测定、SEM和XRD试验分析, 评价钙质砂的加固效果, 得出最佳靶向激活方案, 最后通过高通量测序的分析结果分析激活前后的钙质砂中微生物群落的变化情况。结果表明: ①靶向激活方案中YE和NH₄Cl的浓度会显著影响激活的效果, 其中0.2 g/L的YE、100 mmol/L的NH₄Cl、初始pH值为9.0的激活方案效果最好; ②钙质砂中新生成的方解石含量越多、分布越均匀, 则钙质砂的加固效果越好, 在最佳的激活方案下矿化加固后砂柱的平均UCS值可提高至350 kPa; ③靶向激活改变了微生物的群落组成, 使产脲酶微生物成为优势物种。

关键词: 靶向激活; 钙质砂; 生物矿化; 方解石; 微生物群落

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)07-1315-07

作者简介: 董博文(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事微生物岩土材料与工程方面的研究工作。E-mail: hqudbw@stu.hqu.edu.cn。

Experimental study on reinforcement of calcareous sand by targeting activation of microbes producing urease

DONG Bo-wen¹, LIU Shi-yu^{1, 2}, YU Jin¹, CAI Yan-yan¹, TU Bing-xiong¹

(1. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Key Laboratory for Intelligent Infrastructure and Monitoring of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Six different targeted activation schemes for urea-producing microorganisms are designed for the biomineralization and reinforcement of calcareous sand. Through unconfined compression tests, calcium carbonate production measurements, SEM and XRD test analysis, the reinforcement effects of calcareous sand are evaluated, and the best targeted activation scheme is obtained. Finally, the changes of microbial community in the calcareous sand before and after activation are analyzed by high-throughput sequencing analysis results. The results show that: (1) the concentration of YE and NH₄Cl in the targeted activation plan will significantly affect the activation effects, among which the activation plan with 0.2g/L YE, 100 mmol/L NH₄Cl and initial pH value of 9.0 has the best effects. (2) The more calcite content and distribution of the calcareous sand is newly generated, the better the reinforcement effects of calcareous sand will be. Under the optimal activation scheme, the average UCS value of sand columns after mineralization reinforcement can be increased to 350 kPa. (3) The targeted activation changes the microbial community composition, making urea-producing microorganisms the dominant species.

Key words: biostimulation; calcareous sand; biocementation; calcite; microbial community

0 引言

近年来生物矿化技术应用于岩土工程领域进行岩土介质改良或土壤环境修复的研究受到了越来越多的关注。外源引入和靶向激活产脲酶微生物是生物矿化技术的两种途径, 其最大不同在于脲酶的来源。不同于外源引入, 靶向激活通过选择活化和种群富集, 为原位土壤中固有的产脲酶微生物建立生长竞争优势, 从而产生大量脲酶。很多研究资料表明, 引入外源产脲酶微生物进行生物矿化对岩土材料改良加固具有良好的效果^[1-4]; 而 Hammes 等^[5]、Gomez 等^[6-7]的研究

发现, 靶向激活原位产脲酶微生物诱导矿化的方法相比之下可能具有更多优势, 如: 无生物入侵风险、环境友好、容易控制成本等。靶向激活诱导生物矿化的方式是对传统微生物矿化技术在实际工程应用的一项适应性改进。

在室内试验和大规模的现场试验中发现, 以方解

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978292); 福建省自然科学基金项目(2019J01048)

收稿日期: 2020-07-17

*通信作者 (E-mail: scholarrain@163.com)

石作为矿化产物，靶向激活诱导的生物矿化可以大大提高普通陆源砂的力学强度，降低渗透性，降低可压缩性，提高抗液化能力^[8]。但目前利用靶向激活方法对海洋和海岸环境中的钙质砂（主要成分为碳酸钙）进行改良加固的研究资料很少，仅有部分学者基于传统 MICP 方法进行了相关矿化研究^[9-10]。事实上，钙质砂与方解石等矿化产物的相容性良好，且所处环境条件更适于使用靶向激活的方式进行矿化处理。如 Wang 等^[11]使用几种商业微生物培养基对夏威夷海滩钙质砂中的产脲酶微生物进行富集刺激，认为过量的营养成分和铵有利于钙质砂中的生物富集。但从实际出发，开发出成本更低且更适于钙质砂原位靶向激活的最优激活方案才是能将该技术应用于工程实际的关键。

本文针对所述问题开展试验研究，重点研究靶向激活方案中激活成分的选择、最佳浓度配比问题，并采用多种方法评价钙质砂的加固效果，得出靶向激活产脲酶微生物诱导矿化加固钙质砂的最优方案和相关建议。

1 试验材料和试验方案

1.1 试验材料

试验所选用的土壤材料为钙质砂，产自中国南海西沙群岛的永兴岛。根据《土工试验规程》^[12]对该土壤样本进行各项参数的测定，其粒径主要集中在0.5~1.0 mm，含水率约为0.088%，不均匀系数为2.61，级配不良。

1.2 试验装置及模具

钙质砂注浆加固试验的装置如图1所示。制样前，对模具和部分装置进行灭菌处理。试验所用的砂柱模具是由长8.0 cm，内径3.5 cm的透明PVC管和两个内径4.0 cm的PVC管帽拼接而成。在管中分3层装填均匀化后的钙质砂并振捣压实，每个砂柱的装砂质量控制在110±1 g。砂柱端部放置有尼龙滤网和硅胶垫片，防止砂颗粒流失和注浆液渗漏。装填完毕后使用硅胶管封闭直通接头的两端直至开始注浆处理，最大程度减少杂菌的影响。

1.3 靶向激活与生物矿化方案

钙质砂的靶向激活方案、具体的组分和配比如表1所示。靶向激活方案中，分别设置了3种酵母提取物（YE）质量浓度、氯化铵浓度和初始pH的环境条件，探究其对靶向激活效果的影响。除此之外，激活溶液中还含有40 mmol/L的乙酸钠、333 mmol/L的尿素和0.01 mmol/L的氯化镍。在靶向激活阶段，首次激活处理时注入120 mL激活溶液，在砂柱中停留48

h，激活富集砂柱中的产脲酶微生物，之后每次注浆间隔24 h，注入等量的激活溶液。

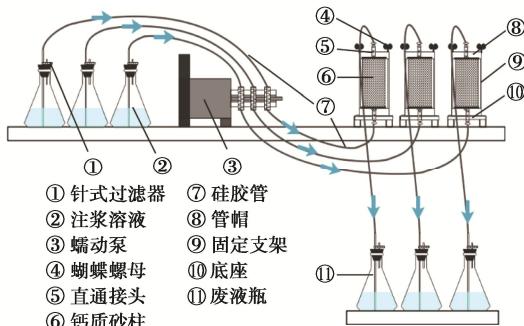


图1 蠕动泵注浆加固钙质砂示意图

Fig. 1 Schematic diagram of peristaltic pump grouting to strengthen calcareous sand

表1 靶向激活方案

Table 1 Targeted activation solutions

方案名称	YE/(g·L ⁻¹)	氯化铵/(mmol·L ⁻¹)	pH
方案1	1.0	12.5	7.0
方案2	0.2	12.5	7.0
方案3	0.2	12.5	9.0
方案4	0.2	200.0	9.0
方案5	0.1	12.5	7.0
方案6	0.2	100.0	9.0
对照组	0.2	100.0	9.0

参考 Gomez^[7]试验方法进行了预试验，发现在钙质砂砂柱内每日尿素的分解量达到50%时，可以实现钙质砂的生物矿化。因此，在激活阶段监测到所有砂柱内的尿素分解量达到50%后，开始进行生物矿化阶段的处理。

生物矿化阶段处理额外引入了钙离子以诱导沉淀，在相应的激活溶液中添加200 mmol/L的氯化钙。根据预试验的结果，注入矿化溶液7 d以后，由于注浆端口钙化产物积聚堵塞，很难注入新的矿化溶液，故设置矿化时间为7 d。

试验组共分为6组，每组设置3个平行试样；另设置一组对照组，对照组的钙质砂在180℃下干热灭菌，其靶向激活方案和矿化方案与方案6相同。

1.4 生物化学监测

为了研究在激活阶段砂柱内的生物化学变化，在48 h的静置富集后，在每天注浆开始之前，从砂柱底端注浆口无菌取样（样品的体积不少于2.5 mL），进行生物化学参数测试。分别测试样本的OD₆₀₀值、pH值和尿素浓度值反映砂柱内微生物数量以及环境参数的变化。

1.5 钙质砂柱生物矿化效果评价

在激活、矿化阶段结束以后，通过钙质砂砂柱的UCS测试、碳酸钙生成量测定、矿化产物的SEM和XRD试验分析来评价钙质砂加固效果。

1.6 基于高通量测序的微生物群落分析

使用 OMEGA 公司的 E.Z.N.A.TM Mag-Bind Soil DNA Kit 作为 DNA 提取试剂盒, 从原状钙质砂和处理后的钙质砂中分别提取总 DNA 并进行 PCR 扩增和测序。测序的最终过程根据上海 Sangon 生物技术公司的 Illumina16S ROD 数据库测序文库制备指南进行。并根据结果评估样本中靶向激活处理前后微生物群落的丰度和多样性。

2 结果和讨论

2.1 生物化学监测结果

激活阶段内反应体系中的微生物数量变化、pH 变化和尿素浓度变化情况在图 2 中给出。除了经过灭菌处理的对照组, 其余试验组在 120 h 的靶向激活周期内的 OD₆₀₀ 值和环境 pH 都有了较大的提高, 与之相应的尿素浓度有不同程度的降低, 这充分说明了本试验成功地激活了钙质砂中的微生物生长繁殖并产生脲酶、分解尿素。

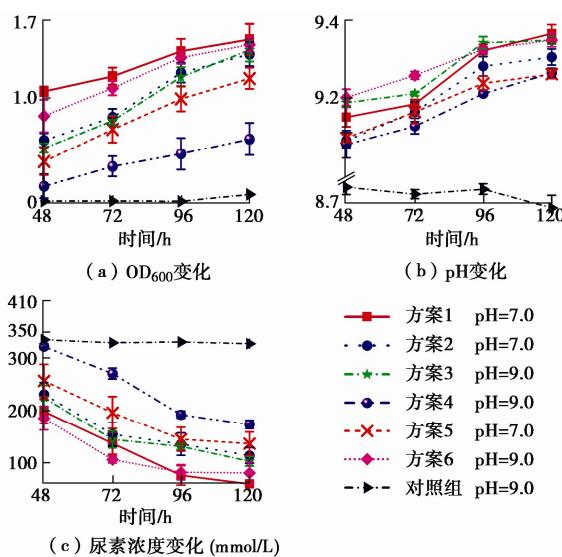


图 2 钙质砂砂柱内生物化学变化情况

Fig. 2 Biochemical changes in calcareous sand columns

综合来看, 方案 6 的激活效果最好, 方案 1 次之, 方案 4 效果最差。对比方案 3, 4, 6, 在 12.5~200 mmol/L 的浓度范围内, 适量的 NH₄Cl 浓度有利于提高激活效果, 浓度过高时反而具有抑制作用。不同产脲酶微生物对 NH₄⁺的耐受性不同^[13], 因此 NH₄Cl 浓度对刺激效果影响显著; 同时, 方案 1, 2, 5 的试验结果表明, 在 0~1.0 g/L 的范围内, YE 浓度的提高有利于增强靶向激活效果。YE 作为一种高效的营养物质, 可迅速提高被激活的产脲酶微生物的数量, 产生大量脲酶, 从而增强激活效果; 靶向激活阶段内的 pH 经过处理后均提高至 9.0 以上, 说明这些砂柱中的尿

素都有了不同程度的分解, 产生了氢氧根离子使 pH 升高。较高的 pH 值有利于产脲酶微生物建立生长竞争优势, 同时为之后的生物矿化阶段生成方解石沉淀提供必要条件; 尿素浓度随时间的变化情况直接反映了反应体系内的脲酶活性, 在反应进行到 120 h 后, 所有试验组的尿素浓度均低于 50%, 这已经达到了可以产生有效生物矿化的条件, 进入生物矿化阶段。

2.2 钙质砂柱生物矿化效果评价

在矿化过程结束后, 对砂柱进行了冲洗、烘干和脱模。部分激活和矿化方案组处理的砂柱未成型或者部分薄弱截面发生断裂, 无法进行力学强度测试, 故只对胶结良好的砂柱进行 UCS 试验。将各组砂柱中的钙质砂收集称重, 根据处理前后质量的变化表示碳酸钙的生成量。记处理前钙质砂砂柱质量为 M₁, 处理后砂柱质量为 M₂, 则碳酸钙含量 (记为 Ω) 为

$$\Omega = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100\% \quad (1)$$

UCS 值与碳酸钙含量的关系在图 3 中给出。可以发现, 二者变化具有高度相关性, 对于方案 2, 3, 6, UCS 值随碳酸钙含量的升高而增加。对于所有成型且具有一定强度的砂柱来说, 其平均碳酸钙含量在 10%~15% 范围内, 整体呈现碳酸钙含量越高、UCS 值越高的趋势。这与何稼等^[14]、刘汉龙等^[15]基于大量研究结果总结的碳酸钙含量和 UCS 值关系的结论相一致, 当生物矿化胶结产生的碳酸钙含量在 10% 以上时, 可形成有效胶结强度。

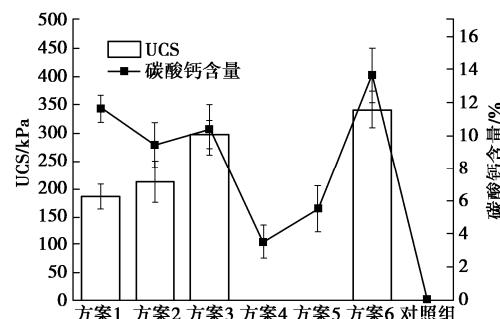


图 3 不同试验组 UCS 值和碳酸钙含量的关系

Fig. 3 The relationship between UCS value and calcium carbonate content in different test groups

虽然方案 1 中砂柱的碳酸钙含量很高, UCS 值却较低, 进行强度测试时发现其与方案 6 中的砂柱具有明显不同的破坏形式, 在图 4 中可以观察到: 方案 1 处理的砂柱在破坏时主要是局部 (上中) 剪切破坏, 方案 6 的砂柱为整体剪切破坏。原因在于方案 1 中的砂柱矿化不均匀, 局部 (中上部) 胶结效果差, 受力之后很容易破坏, 而下部砂柱仍完好; 方案 6 的砂柱整体矿化均匀, 胶结良好, 发生整体剪切破坏。

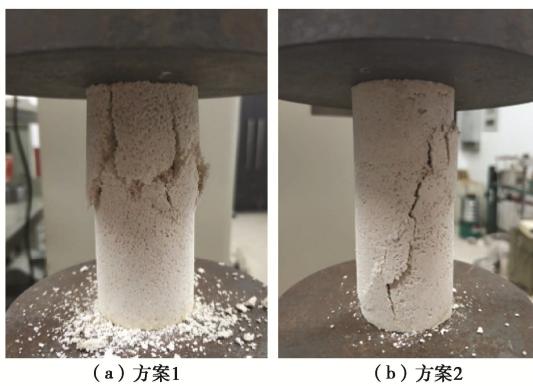


图 4 方案 1 与方案 6 两种砂柱破坏照片

Fig. 4 Photographs of destruction of two sand columns in Scheme 1 and Scheme 6

方案 1 由于营养充分, 先接触激活溶液的砂柱底端的钙质砂区域内微生物生长活跃, 脲酶分解尿素产生的大量碳酸根离子主要集中于砂柱底部, 矿化阶段下部的砂柱内先发生碳酸钙沉淀, 堵塞内部孔隙, 使得中上部的胶结效果较差, 矿化不均匀性较大, 整体强度较低。对比而言方案 6 砂柱中生成的碳酸钙分布较为均匀, 所以其最终的整体强度更高。

因此, 为了提高矿化效果, 针向激活和矿化方案的设置应该兼顾针向激活效果和矿化均匀性两个重要参数, 这样才能提高整体的加固强度, 这可能要求激活过程中所提供的营养物质不能过分充足, 避免局部区域的生物矿化过于迅速。

2.3 扫描电子显微镜(SEM)试验

图 5 为不同放大倍数下部分砂柱样品的 SEM 照片, 图 5 (a), (b) 中可以看到钙质砂颗粒的表面被完全包裹, 碳酸钙在颗粒间胶结生长, 胶结为整体。图 5 (c), (d) 中可以更为清楚地看到碳酸钙的存在形式, 初步判断矿化产物碳酸钙是以方解石的晶体形式存在。单个方解石晶体的直径最大可以达到 $18 \mu\text{m}$ 左右, 方解石晶体在砂颗粒表面堆积生长, 成为大片的不规则晶体簇, 包裹了钙质砂颗粒。在一些方解石晶体的表面可以看到棒状的黑色孔洞, 长度约为 $1\sim 3 \mu\text{m}$, 这可能是一些被方解石晶体包裹的可产脲酶分解尿素的细菌, 因为矿化过程中方解石晶体可能先在微生物如细菌的胞外结合物上生成, 然后以单个微生物作为晶核生长为更大的晶体^[16-17]。

2.4 X 射线衍射 (XRD) 分析

XRD 试验可以分析出物质存在的晶型, 碳酸钙的堆积晶型主要包括球霰石、方解石和文石, 其中方解石的存在晶型最为稳定。将处理后的钙质砂砂柱与未经处理的钙质砂样品进行 XRD 试验对比, 在图 6 中给出。由图 6 (a) 可以发现在未经处理的钙质砂中,

碳酸钙的主要存在形式为文石, 另检测到少量的硅灰石和铝酸三钙; 由图 6 (b) 可以看出, 而处理之后的测试样品中出现了方解石的高吸收峰, 这进一步证明了在矿化过程中, 生成的碳酸钙的最终沉淀形式为方解石, 方解石的产生是砂柱强度提高的直接原因。

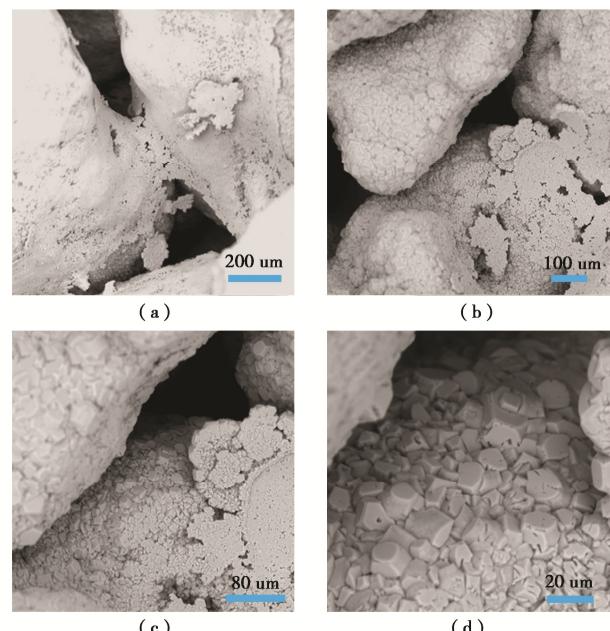


图 5 不同放大倍数下的钙质砂内部 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of calcareous sand under different magnifications

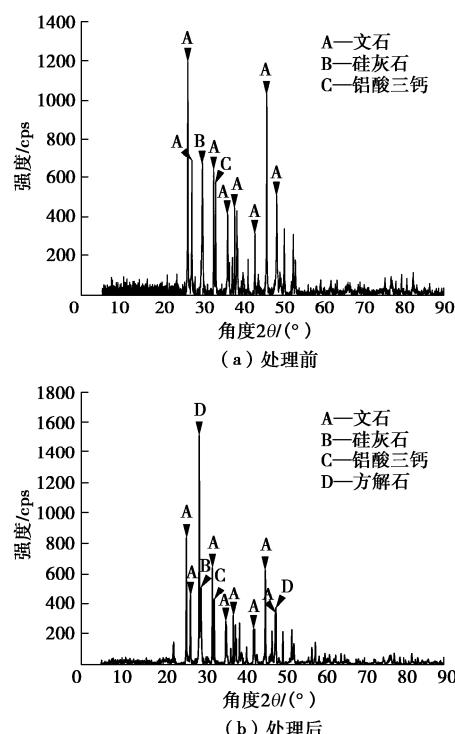


图 6 处理前和处理后的钙质砂 XRD 分析

Fig. 6 XRD analysis of calcareous sand before treatment and after treatment

2.5 基于高通量测序的微生物群落分析

为了研究靶向激活产生的微生物群落变化, 对方案6处理的砂柱样品进行高通量测序分析, 对比原状钙质砂样品的测序结果, 分析了靶向激活方案在微生物群落变化尺度上的影响。在表2中给出了基于OTU的Alpha多样性的分析结果。

表2 激活前后钙质砂群落的Alpha多样性分析

Table 2 Alpha diversity analysis of calcareous sand community

before and after activation

试样	OTUs	Shannon	Chao	Simpson	Coverage
CSN1	900	5.12	900.04	0.02	0.99
CSN2	170	2.03	252.83	0.27	0.99

处理前钙质砂(CSN1)的Chao数值、Shannon指数远远大于处理后钙质砂(CSN2), 且CSN1的Simpson指数远小于CSN2, 表明原状钙质砂中微生物群落的丰度更大, 而处理后的钙质砂中微生物群落丰度锐减, 说明靶向激活针对性的选择环境仅使得部分微生物获得竞争优势, 限制了其群落丰度水平增长。证明靶向激活后钙质砂的微生物群落多样性降低并使得部分微生物获得生长竞争优势。

图7为钙质砂激活前后在属水平下优势物种相对丰度的柱状图。图中以不同颜色标注类别, 图形面积表示丰度占比。

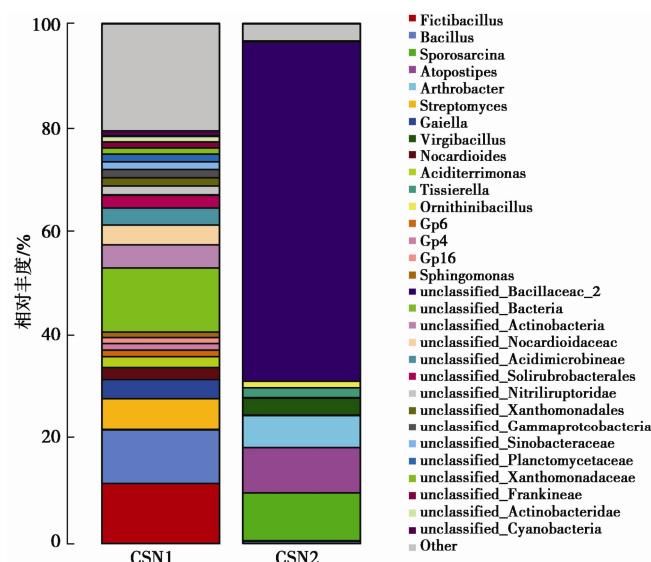


图7 激活前后钙质砂属水平的相对丰度变化

Fig. 7 Changes of relative abundance of calcareous sand at genus level before and after activation

通过Blastn分析不同层级上显示的样本, 比较钙质砂靶向激活处理前后的微生物群落丰度变化情况。在CSN1的样本中, 放线菌(Actinobacteria, 38.63%)和厚壁细菌(Firmicutes, 23.83%)在钙质砂的微生物种群中占绝对数量优势, 放线菌在脲酶的产生和方解

石沉淀中具有重要的作用^[18]; 厚壁细菌中的费氏杆菌(Fictibacillus, 11%)和芽孢杆菌(Bacillus, 10%)均是分解尿素的优势菌属; 此外, CSN1中还存在链霉菌(Streptomyces, 6.13%)和诺卡氏菌(Nocardioidaceae, 3.8%), 这两种菌属包含的一些细菌在分解尿素、生成方解石方面也具有重要作用^[19-20]。群落分析表明, 钙质砂中存在大量可产脲酶分解尿素促进生物矿化的细菌。

靶向激活矿化处理后的CSN2样本中, 微生物的群落丰度和组成有了很大的变化。厚壁细菌中的芽孢杆菌(Bacillaceae, 65.31%)成为微生物组成的绝对优势物种, 孢子菌属(Sporosarcina, 9.12%)、节杆菌属(Arthrobacter, 6.27%)等细菌也占有一定比例, 而这些细菌中的绝大多数均能分解尿素进而诱导生物矿化。

图8给出了属水平下钙质砂处理前后微生物群落丰度的热图。对比来看, CSN1和CSN2中细菌群落数量的变化非常明显, 在选择性环境中能够生存并分解尿素促成矿化的微生物成为物种组成的主体, 而无关微生物种群几近消亡, 充分体现了靶向激活的特点: 产脲酶分解尿素的芽孢杆菌成为绝对优势细菌。从微生物群落变化的角度分析, 靶向激活直接作用于原位微生物环境, 使原位产脲酶微生物获得生长竞争优势, 从而完成生物矿化处理过程。

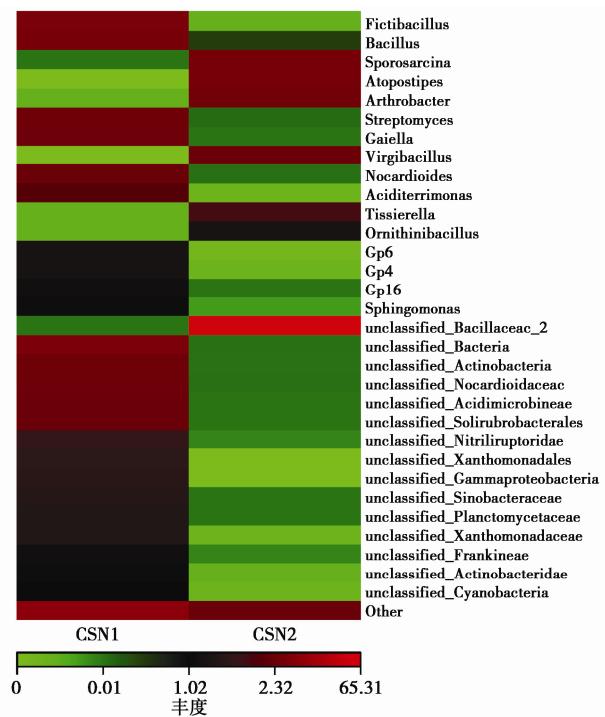


图8 激活前后钙质砂属水平上的微生物丰度热图

Fig. 8 Heatmap of microbial abundance at calcareous genus level before and after activation

3 结 论

本文进行了靶向激活钙质砂中的产脲酶微生物加固钙质砂的试验研究, 得出以下 4 点结论。

(1) 靶向激活产脲酶微生物诱导矿化加固钙质砂可行, 激活方案中 YE 的含量越高, 激活效果越好; NH_4Cl 浓度在 0~100 mmol/L 时, 浓度越高, 激活效果越好。当浓度达到或超过 200 mmol/L 时, 会对钙质砂中产脲酶微生物的激活产生不利影响; 最佳激活方案为添加了 0.2 g/L 的酵母提取物、100 mmol/L 的 NH_4Cl , 初始 pH 值为 9.0 的方案 6。

(2) 营养成分过于充分不利于均匀矿化, 适当的营养物质浓度可以提高整体的加固效果。

(3) 对于激活矿化后的钙质砂砂柱, 其 UCS 强度可提高至 350 kPa, XRD 试验显示矿化产物为稳定性较好的方解石。钙质砂的加固效果受到方解石生成量和分布均匀性的影响。方解石生成量越多, 且分布越均匀, 钙质砂的加固效果越好。受矿化均匀性的影响, 钙质砂砂柱的破坏有整体剪切破坏和局部(上中)剪切破坏两种。

(4) 基于高通量测序的微生物群落分析表明, 靶向激活改变了钙质砂中的优势微生物的种类, 使能产生脲酶并分解尿素、促进生物矿化的芽孢杆菌等取代其他微生物成为了优势物种, 这为靶向激活产脲酶微生物加固钙质砂提供了微生物群落变化层面的理论依据。

本试验采用的靶向激活和生物矿化方案成功的实现了钙质砂的矿化加固, 鉴于现有的试验条件, 靶向激活方案还可以进一步优化, 实际应用效果还需进一步检验。

参 考 文 献:

- [1] 刘汉龙, 肖 鹏, 肖 杨, 等. MICP 胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 38~45. (LIU Han-long, XIAO Peng, XIAO Yang, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 38~45. (in Chinese))
- [2] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, et al. Bio-mediated soil improvement[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 197~210.
- [3] BANG S, MIN S H, BANG S S. Application of microbiologically induced soil stabilization technique for dust suppression[J]. International Journal of Geoengineering, 2011, 3(2): 27~37.
- [4] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R, et al. Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(4): 587~598.
- [5] HAMMES F, BOON N, DE VILLIERS J, et al. Strain-specific ureolytic microbial calcium carbonate precipitation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(8): 4901~4909.
- [6] GOMEZ M G, ANDERSON C M, GRADDY C M R, et al. Large-scale comparison of bioaugmentation and biostimulation approaches for biocementation of sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(5): 04016124.
- [7] GOMEZ M G, GRADDY C M R, DEJONG J T, et al. Stimulation of native microorganisms for biocementation in samples recovered from field-scale treatment depths[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(1): 04017098.
- [8] BURBANK M B, WEAVER T J, GREEN T L, et al. Precipitation of calcite by indigenous microorganisms to strengthen liquefiable soils[J]. Geomicrobiology Journal, 2011, 28(4): 301~312.
- [9] 张鑫磊, 陈育民, 张 喆, 等. 微生物灌浆加固可液化钙质砂地基的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1023~1031. (ZHANG Xin-lei, CHEN Yu-min, ZHANG Zhe, et al. Performance evaluation of liquefaction resistance of a MICP-treated calcareous sandy foundation using shake table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1023~1031. (in Chinese))
- [10] 李 昊, 唐朝生, 刘 博, 等. 模拟海水环境下 MICP 固化钙质砂的力学特性[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1931~1939 (LI Hao, TANG Chao-Sheng, LIU Bo, et al. Mechanical behavior of MICP-cemented calcareous sand in simulated seawater environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (10): 1931~1939. (in Chinese))
- [11] WANG Y J, HAN X L, JIANG N J, et al. The Effect of enrichment media on the stimulation of native ureolytic bacteria in calcareous sand[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020, 17(3): 1795~1808.
- [12] 土工试验规程: SL237—1999 [S]. 1999. (Specification of Soil Test: SL237—1999[S]. 1999. (in Chinese))

- [13] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 Precipitation for the Production of Biocement[D]. Western Australia: Murdoch University, 2004.
- [14] 何稼, 楚剑, 刘汉龙, 等. 微生物岩土技术的研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 643–653. (HE Jia, CHU Jian, LIU Han-long, et al. Research advances in biogeotechnologies[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 643–653. (in Chinese))
- [15] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 1–14. (LIU Han-long, XIAO Peng, XIAO Yang, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 1–14. (in Chinese))
- [16] ZHANG W C, JU Y, ZONG Y W, et al. In situ real-time study on dynamics of microbially induced calcium carbonate precipitation at a single-cell level[J]. Environmental Science and Technology, 2018, 52(16): 9266–9276.
- [17] 何想, 马国梁, 汪杨, 等. 基于微流控芯片技术的微生物加固可视化研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1005–1012. (HE Xiang, MA Guo-liang, WANG Yang, et al. Visualization investigation of bio-cementation process based on microfluidics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1005–1012. (in Chinese))
- [18] BAI Y H, CHANG Y Y, LIANG J S, et al. Treatment of groundwater containing Mn(II), Fe(II), As(III) and Sb(III) by bioaugmented quartz-sand filters[J]. Water Research, 2016, 106: 126–134.
- [19] PARK S C, BAIK K S, KIM M S, et al. Nocardoides dokdonensis sp. nov., an actinomycete isolated from sand sediment[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2008, 58(11): 2619–2263.
- [20] HAVERBURG G, KLOESS G, SCHMITZ W, et al. "Ni-struvite": a new biominerals formed by a nickel resistant Streptomyces acidiscabies[J]. Chemosphere, 2008, 72(3): 517–523.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于1979年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要的项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4开, 双栏排版, 192页, 每月中旬出版, 每期定价40元, 全年定价480元。

本刊国际标准刊号ISSN 1000-4548, 国内统一刊号CN 32-1124/TU, 国内发行代号28-62, 国外发行代号MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关34号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)