

微生物工程地质

唐朝生

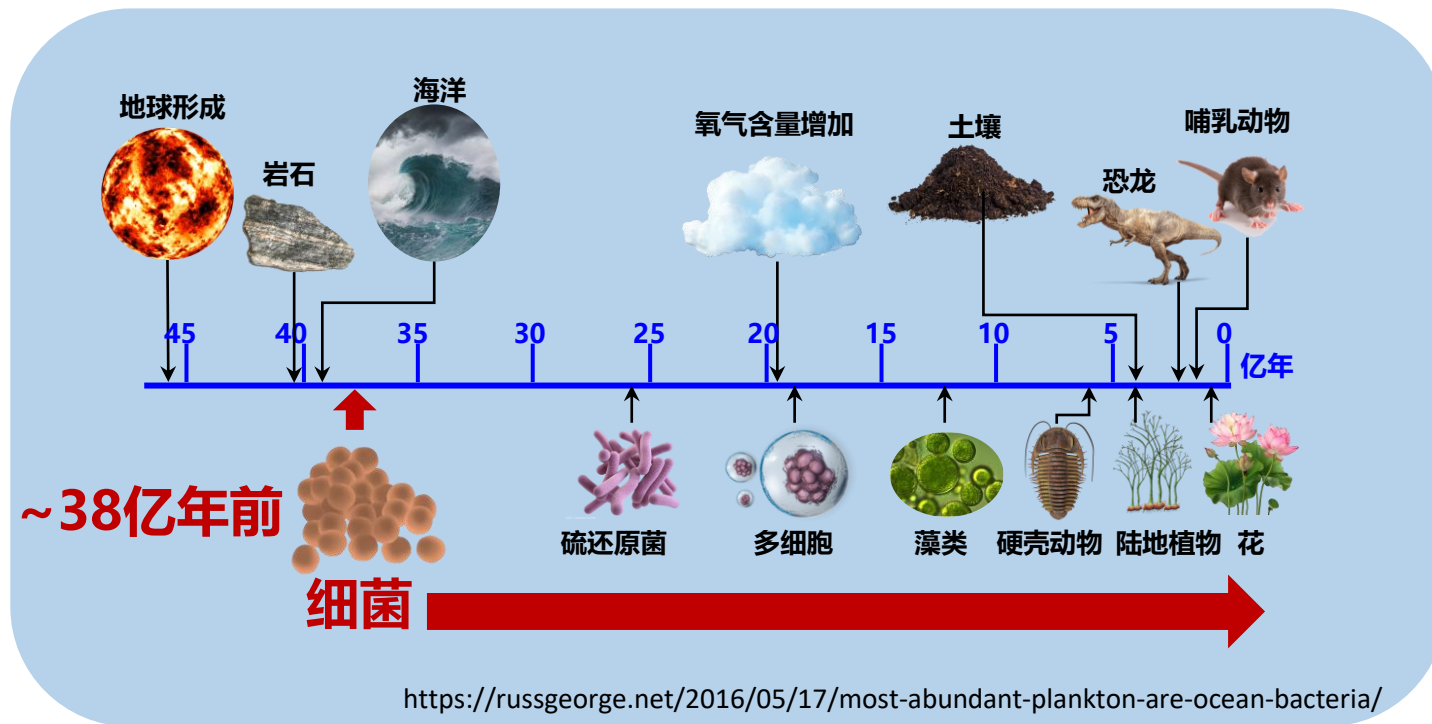
南京大学 地球科学与工程学院

提纲

- 地球微生物
- 极端气候地质灾害
- 微生物基缓冲层构建
 - 土体
 - 岩土
- 总结

地球微生物

□地球是**微生物**的地球，**微生物**是地球的**元老**



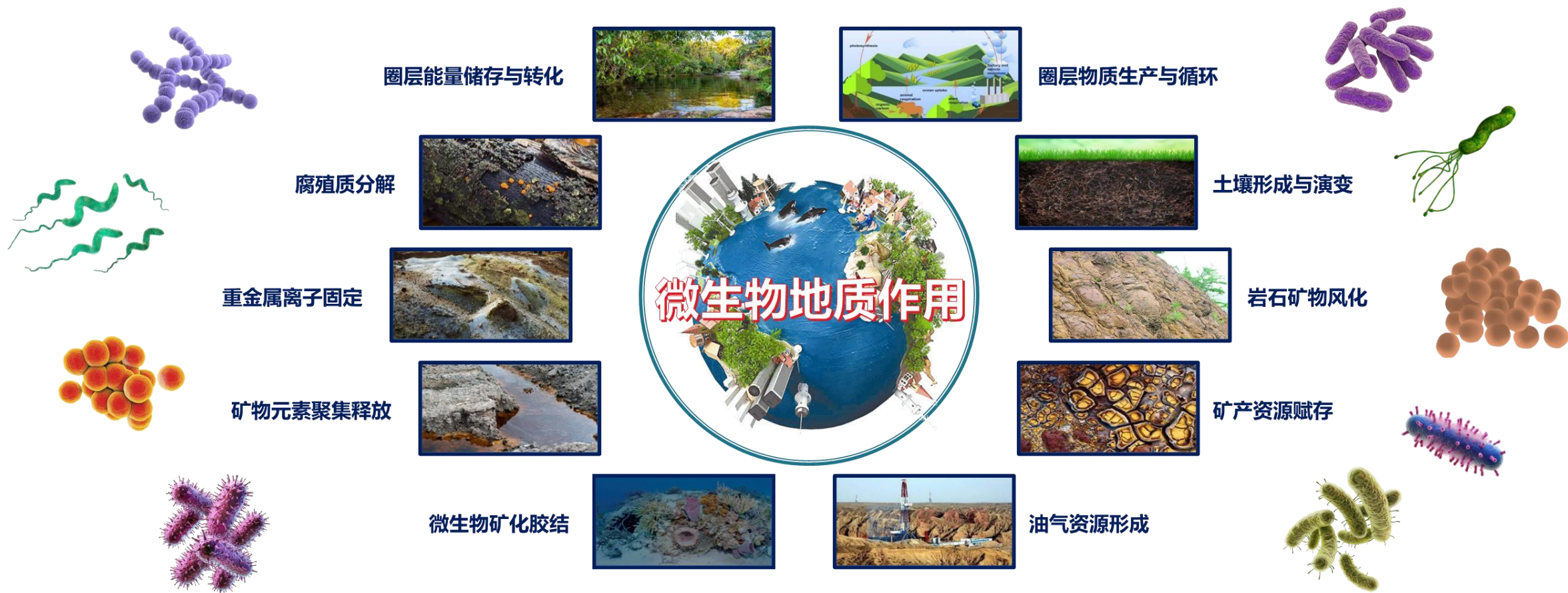
- **时间维度：**在地球生命历史的80%阶段占主导地位
- **空间维度：**在所有地表、深地、深海等生境中存在

微生物地质作用

微生物活动时刻影响地球的各种地质过程

地球的真正“主人”

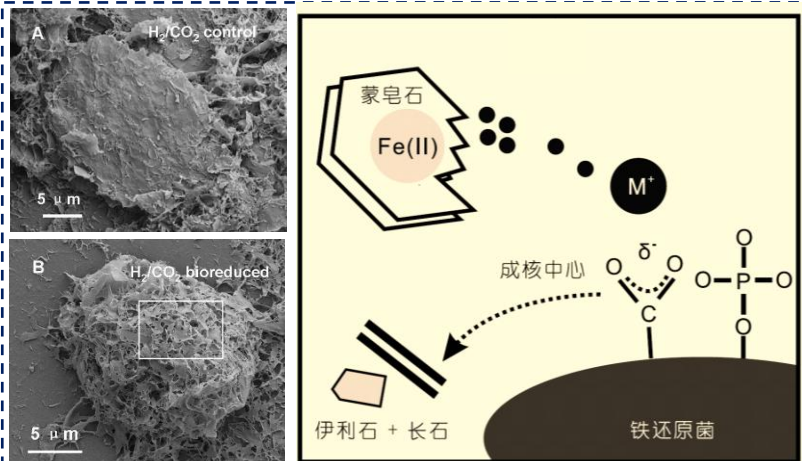
- 微生物种类繁多（超过1万亿种）、功能丰富
- 微生物时刻参与地球圈层各种物质形成与循环过程
- 微生物群落具有很强的自修复与环境响应能力



微生物地质作用

典型微生物地质作用：矿物相变、沉积成岩、风化作用……

微生物促进蒙脱石向伊利石/长石转变



谢树成, 等 2011, 中国科学: 地球科学

微生物影响碳酸盐岩沉积



微生物形成的席状纹理

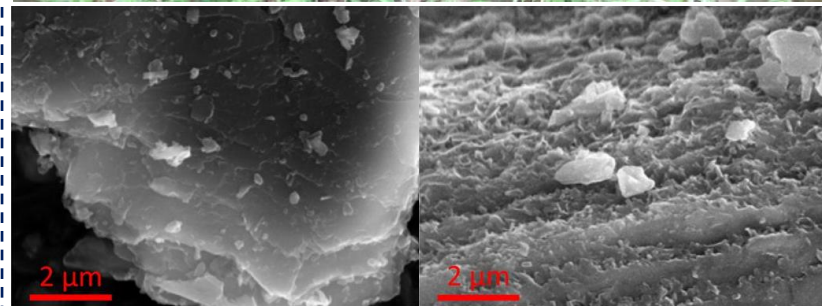
微生物促进岩石风化成土



微生物影响泥沙细粒运动和沉积



澳大利亚鲨鱼湾叠层石

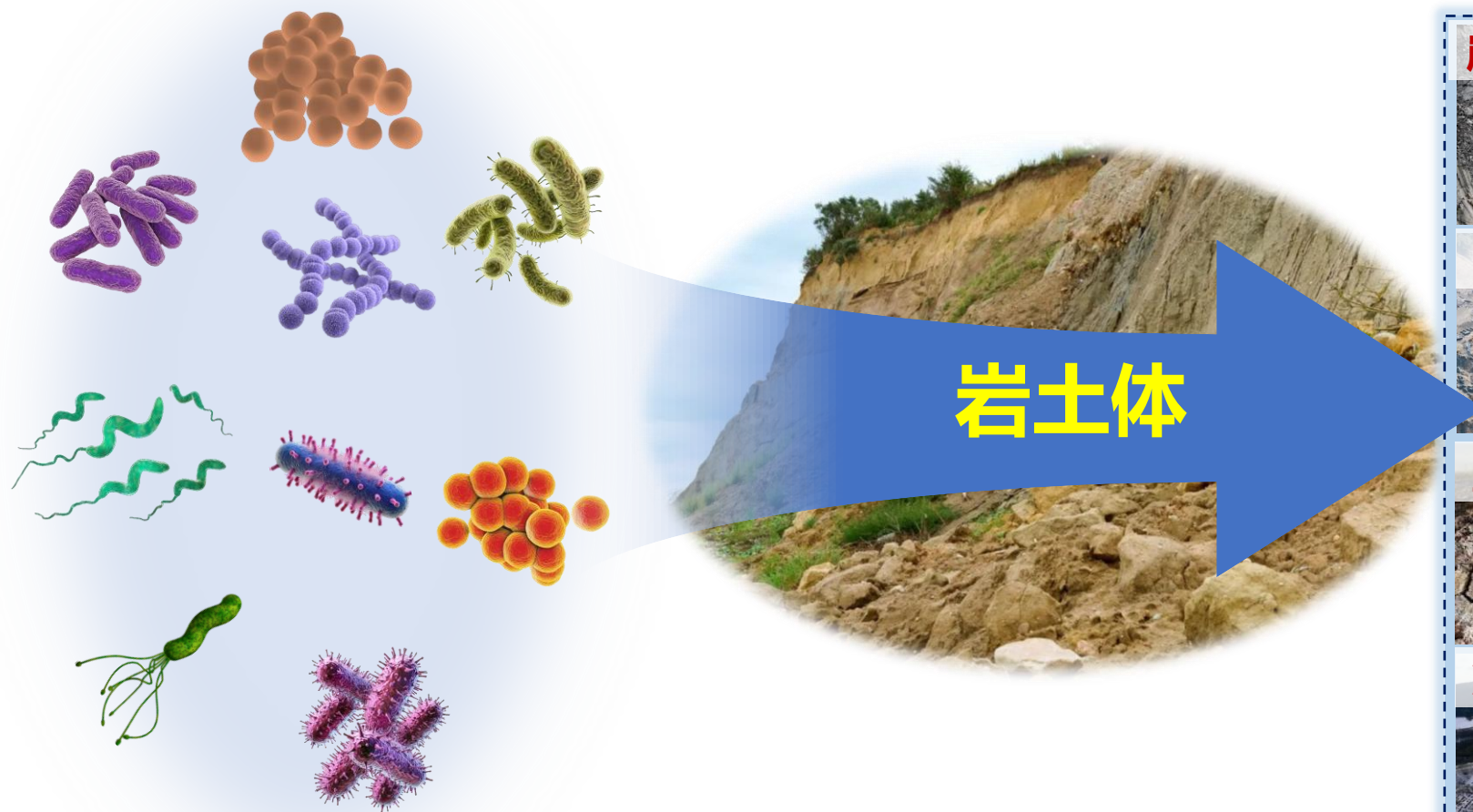


Napieralski et al. 2020, PANS

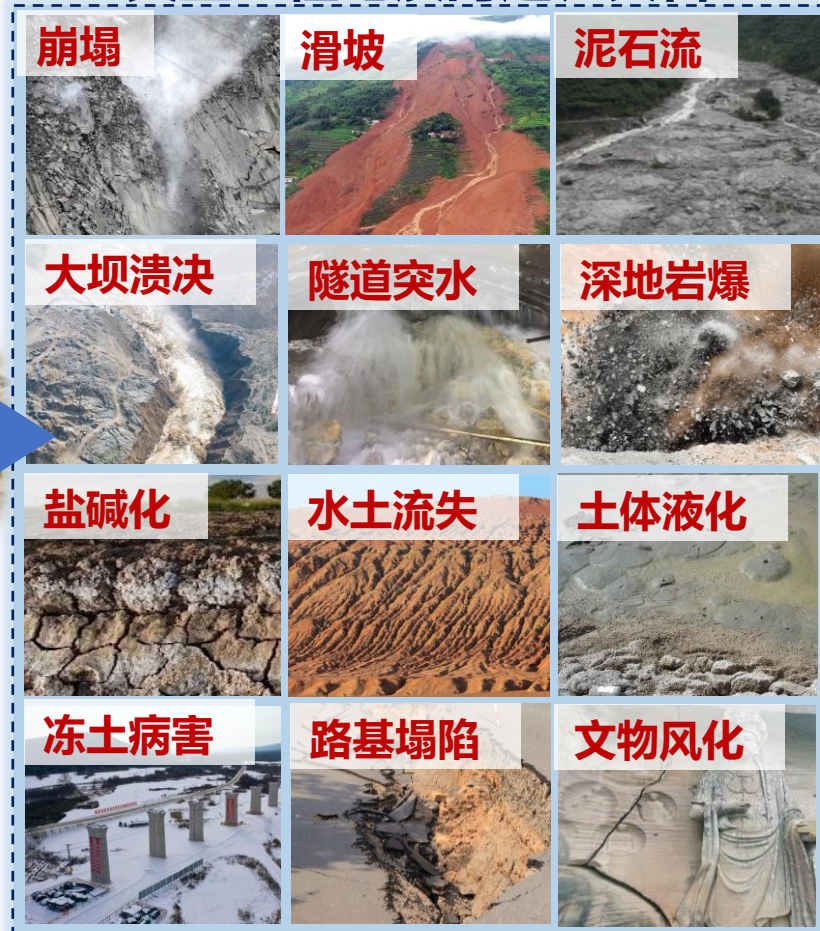
微生物改变地质环境的能力巨大

微生物地质作用

微生物地质作用与典型工程地质问题、灾害



典型工程地质问题、灾害



能否利用微生物活动调控岩土体工程地质性质?

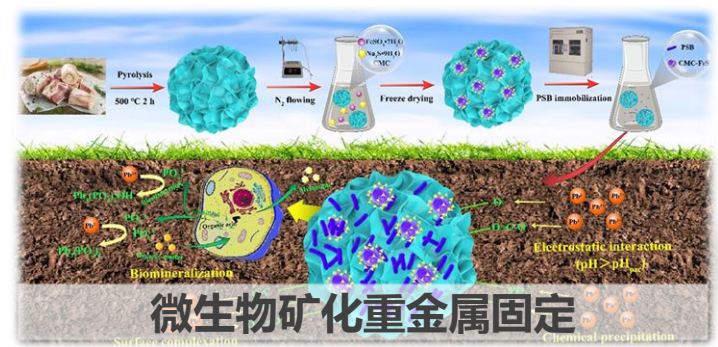
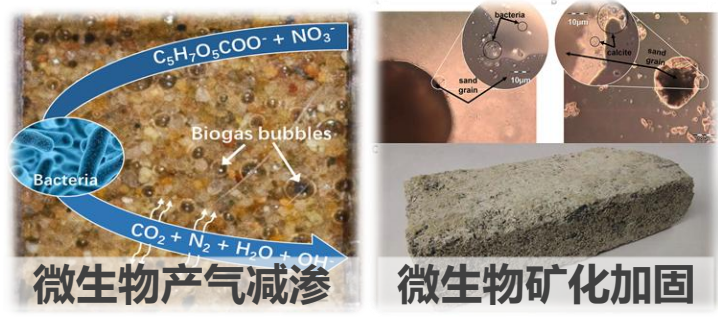
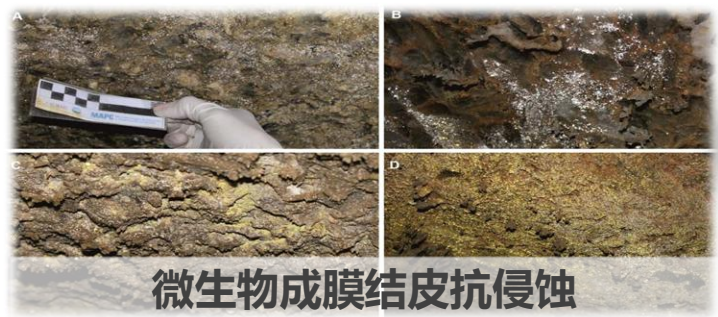
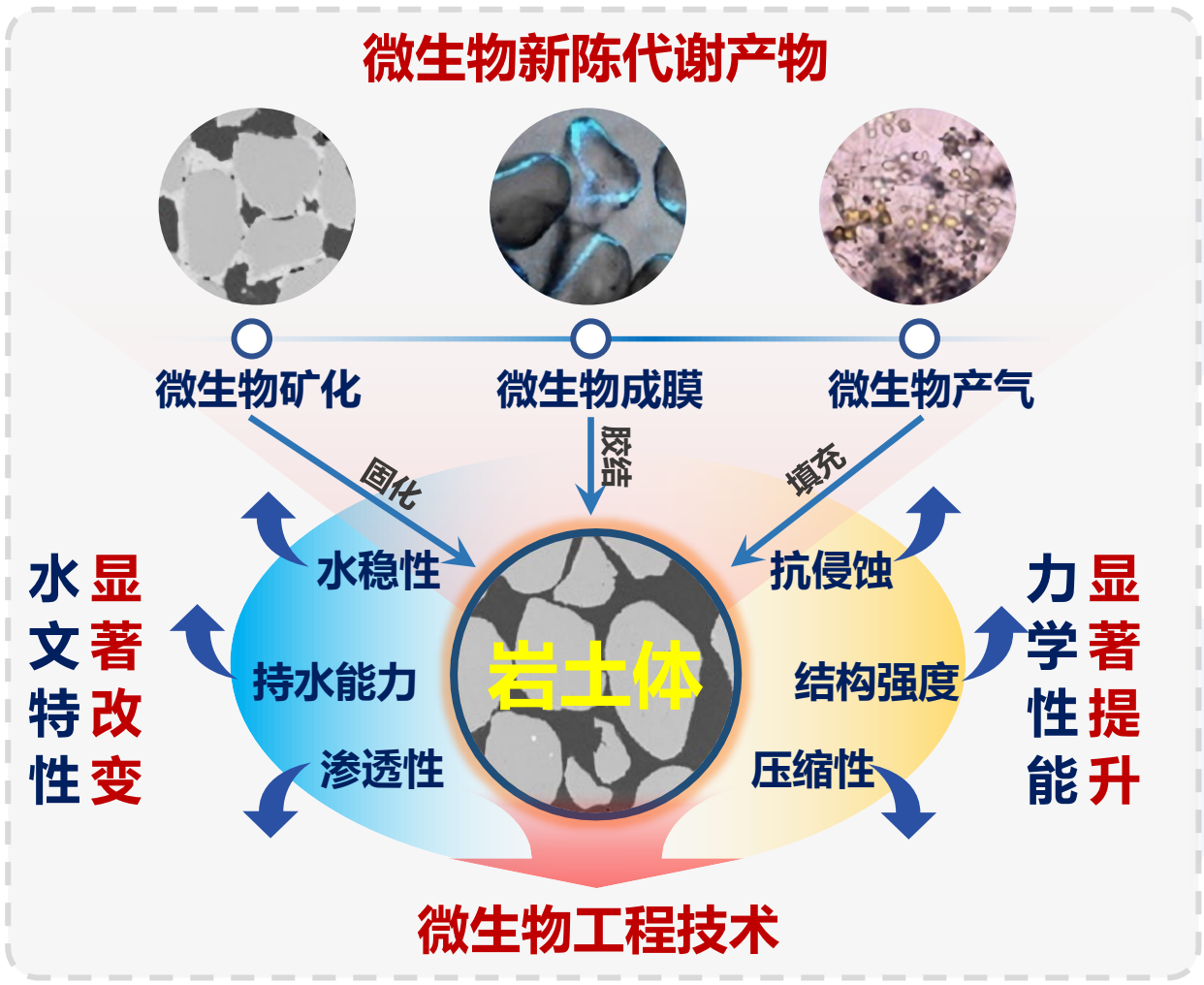
微生物工程地质

基于微生物作用来解决工程地质问题，是现代工程地质研究的重要发展方向

绿色

自然

可持续



低碳

韧性

自修复

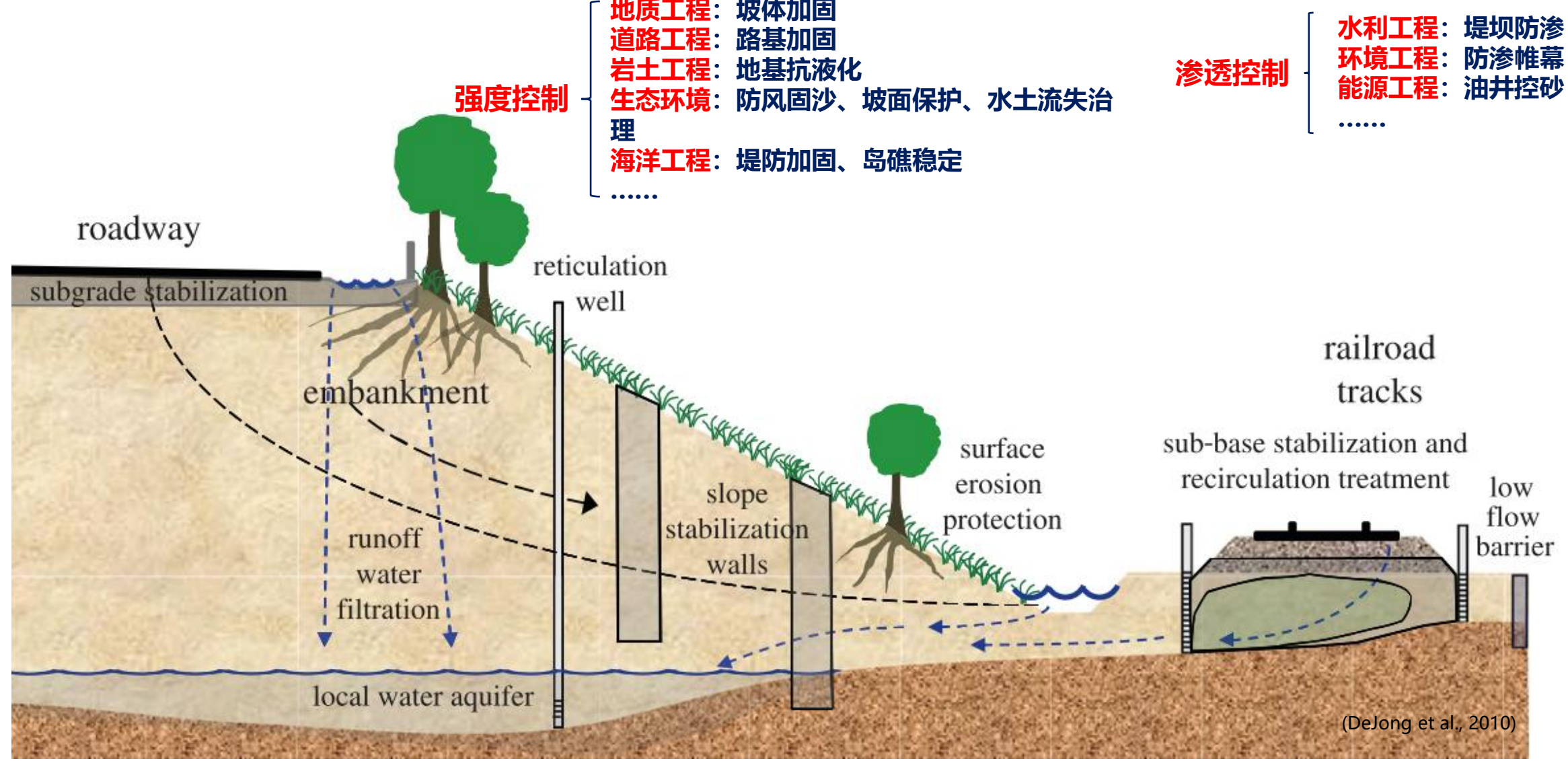
美国国家科学研究委员会 (NRC) 将微生物介导的工程技术确立为21世纪重要的前沿研究方向

微生物工程地质

具有广阔的应用前景

- 强度控制**
- 地质工程: 坡体加固
 - 道路工程: 路基加固
 - 岩土工程: 地基抗液化
 - 生态环境: 防风固沙、坡面保护、水土流失治理
 - 海洋工程: 堤防加固、岛礁稳定
 -

- 渗透控制**
- 水利工程: 堤坝防渗
 - 环境工程: 防渗帷幕
 - 能源工程: 油井控砂
 -



(DeJong et al., 2010)



典型极端气候事件

极端气候事件发生的频率和概率呈显著增加趋势

超强台风、极端干旱、超强暴雨、高温热浪、冰冻.....



重大工程地质问题与灾害

一系列重大工程地质灾害、环境工程地质问题，给当前工程地质研究带来许多新的挑战

超大泥石流、超大滑坡、冰崩、荒漠化、冻土路基融沉、海水入侵、地面沉降.....

工程地质条件恶化
地质作用和过程加剧
岩土体性质显著劣化
地下水位大幅变化
地貌演化过程加速

如何应对极端气候地质灾害问题？

极端气候地质灾害特点

浅表性



防控挑战：生态性

周期性



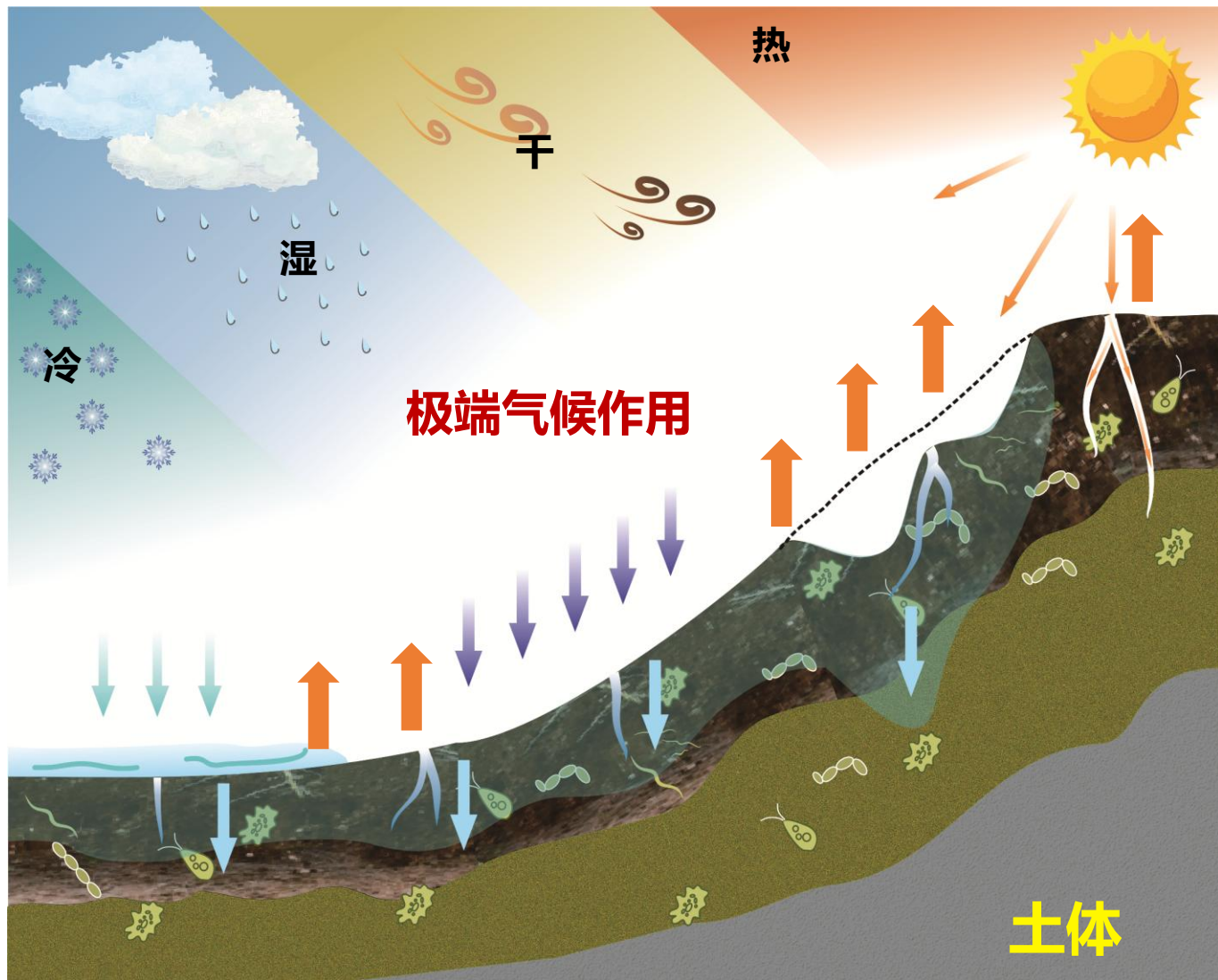
防控挑战：自适应

长期性



防控挑战：耐久性

极端气候地质灾害



极端气候



大气-地质体强烈水/热交换

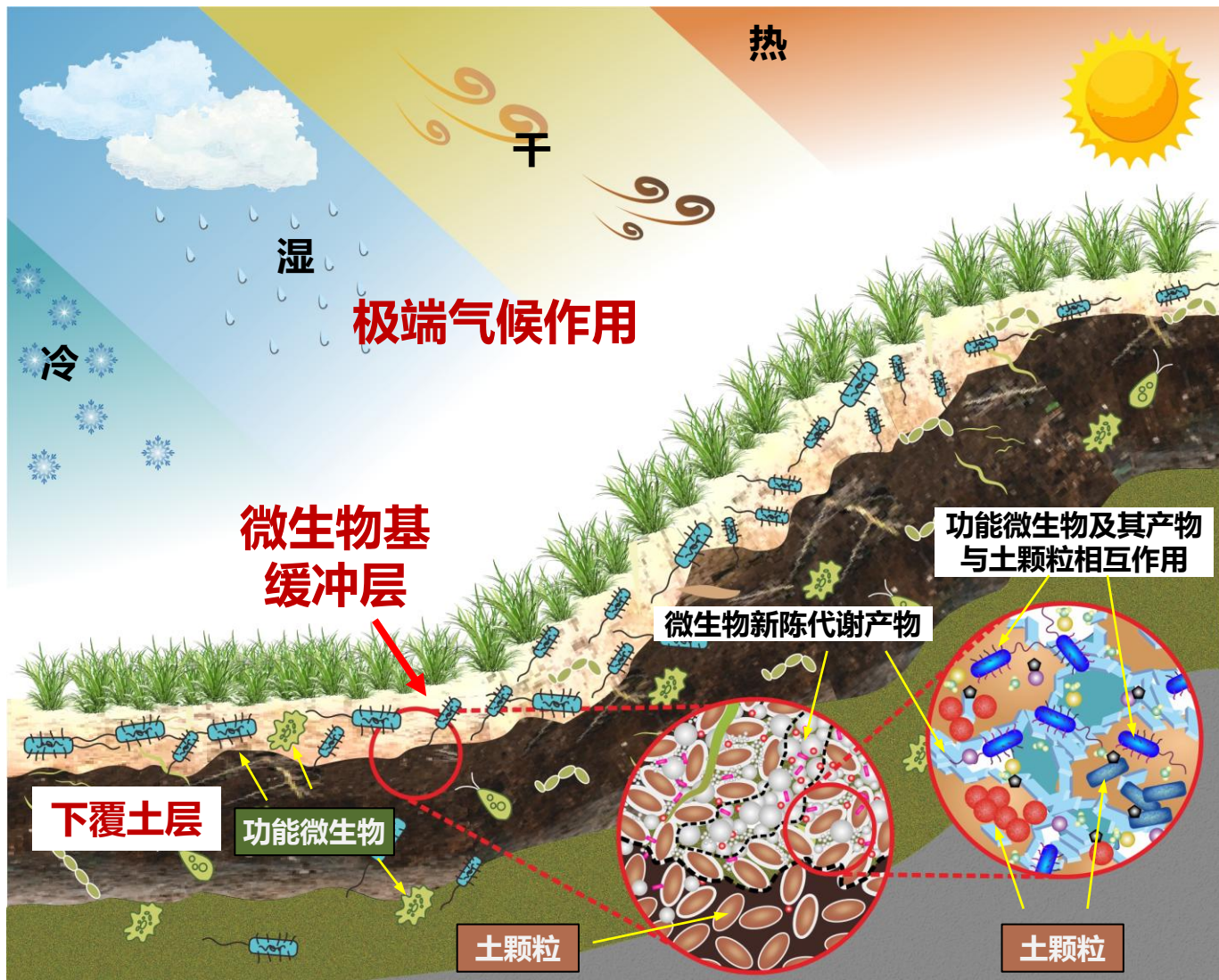


导致地质体灾变

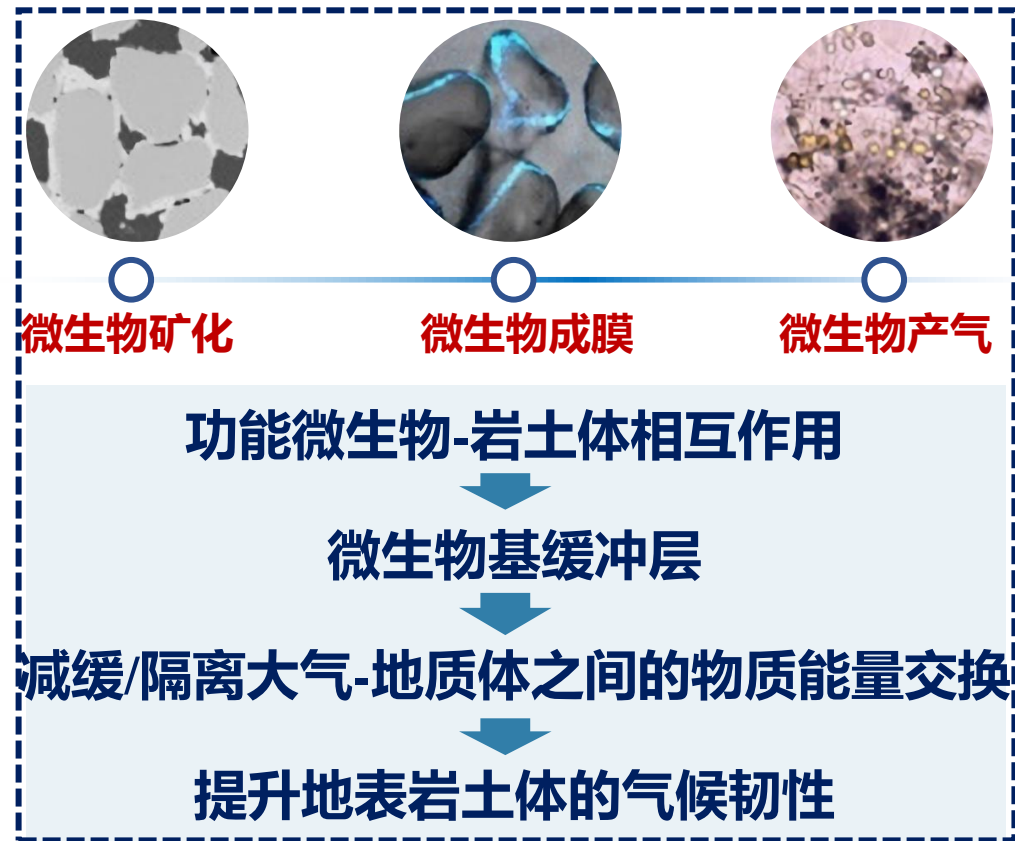
有什么样的方法能**主动适应**气候变化实现**韧性防控**呢?

创新性构想：微生物基缓冲层构建

Bio-Barrier



大气-微生物基缓冲层-地质体



赋予地表岩土体新“生命”
实现自我更新迭代升级

始于2015~

- 在国际上率先开展**微生物工程地质**研究，已有**10年**的研究积累，并建立了国内首个微生物地质工程实验室



Kenichi Soga



剑桥大学工程系



Jason DeJong - UC Davis

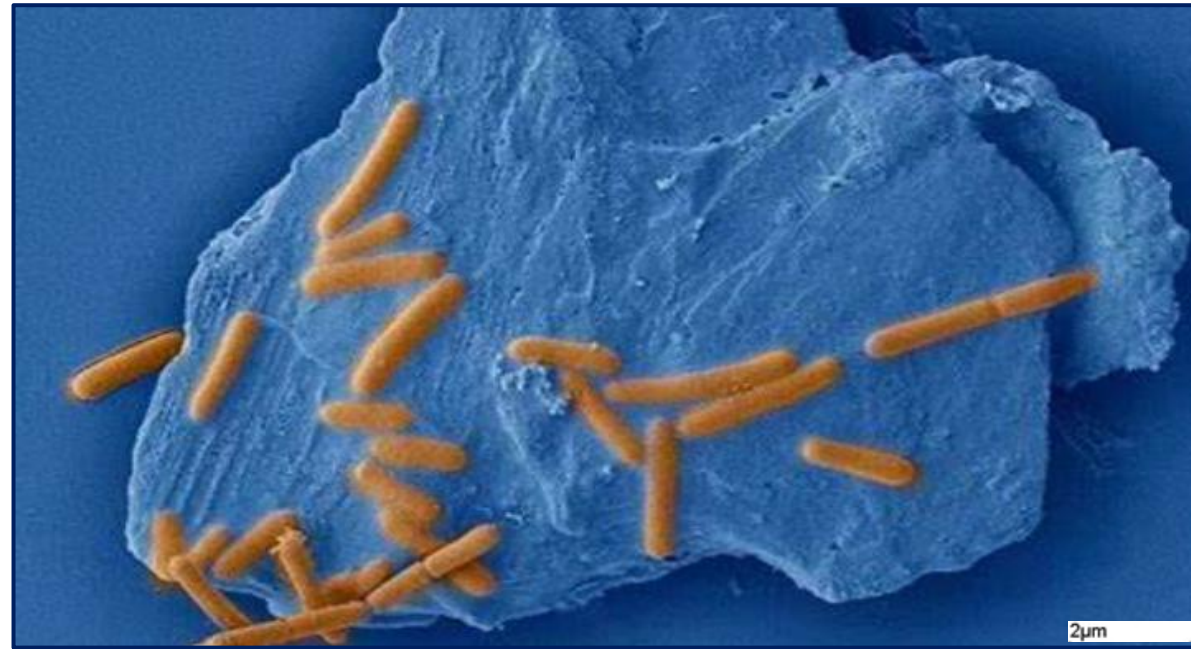
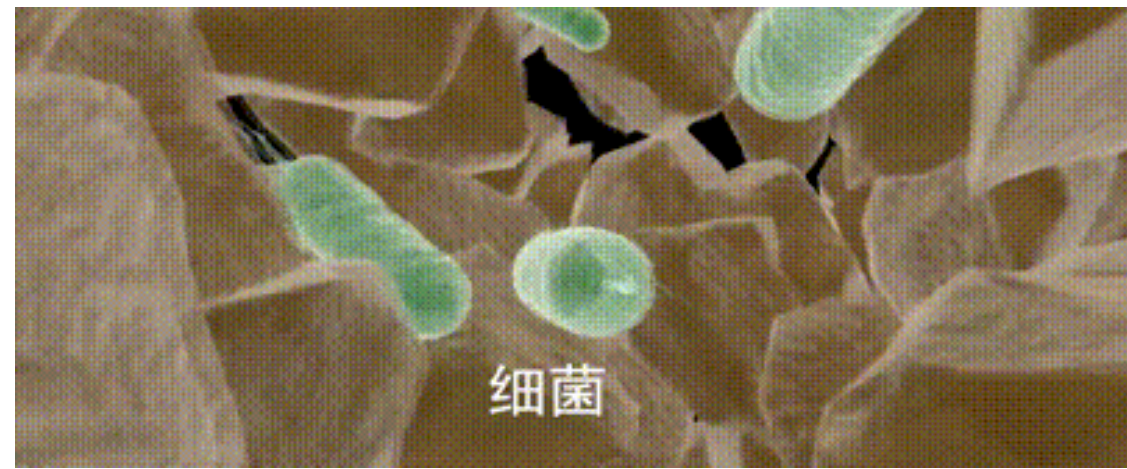
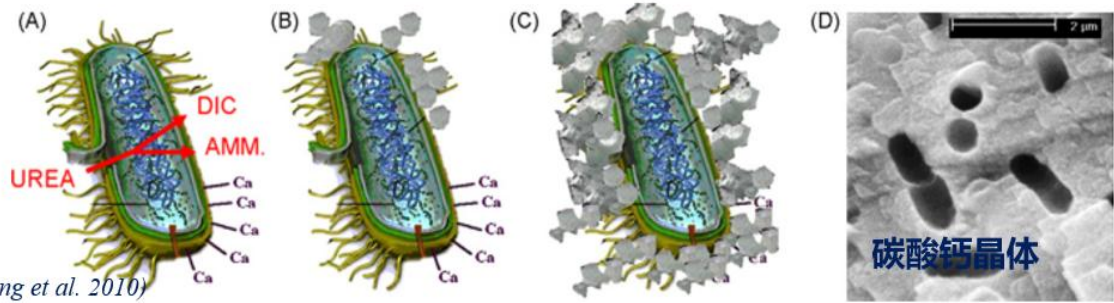


剑桥大学微生物岩土工程试验室



微生物地质工程实验室

微生物矿化技术 (Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP)



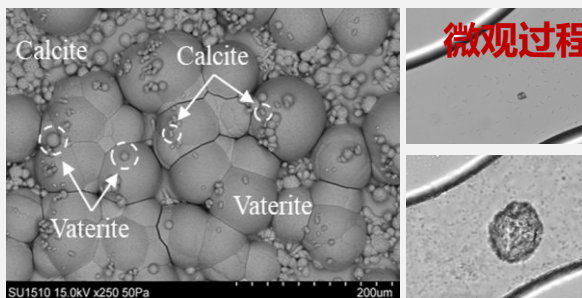
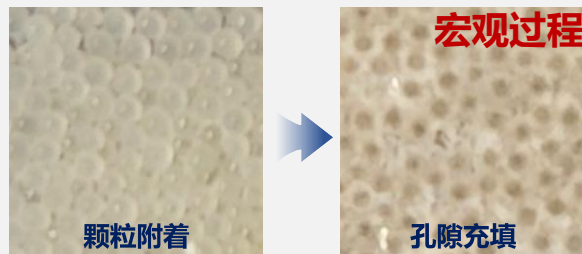
Bio-Barrier研究进展

复杂场景



挑战：高效处理

宏-微观过程



挑战：连续表征

原位效果



挑战：准确评价

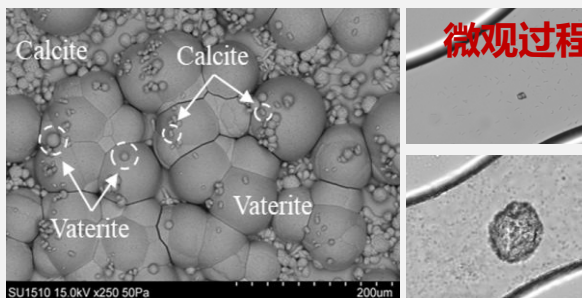
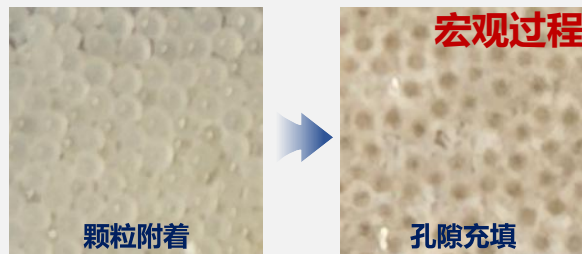
Bio-Barrier研究进展

复杂场景



挑战：高效处理

宏-微观过程



挑战：连续表征

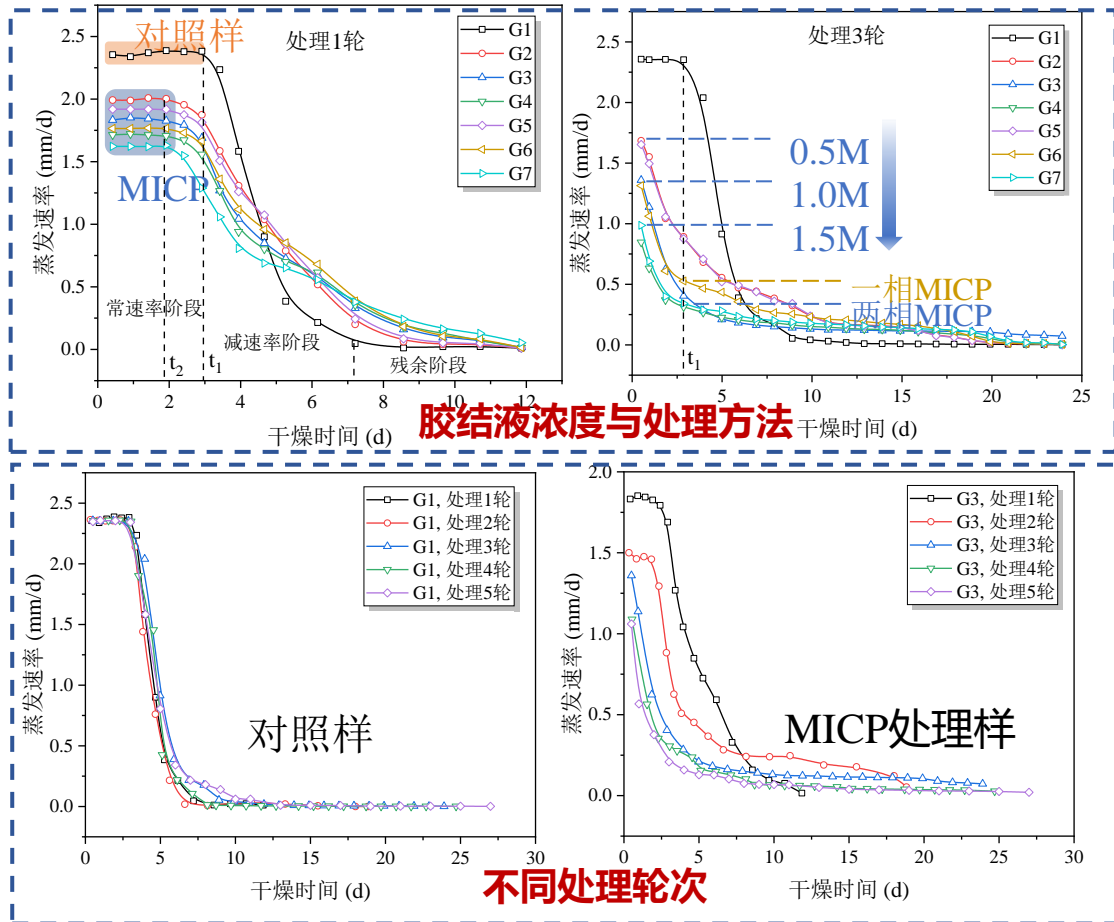
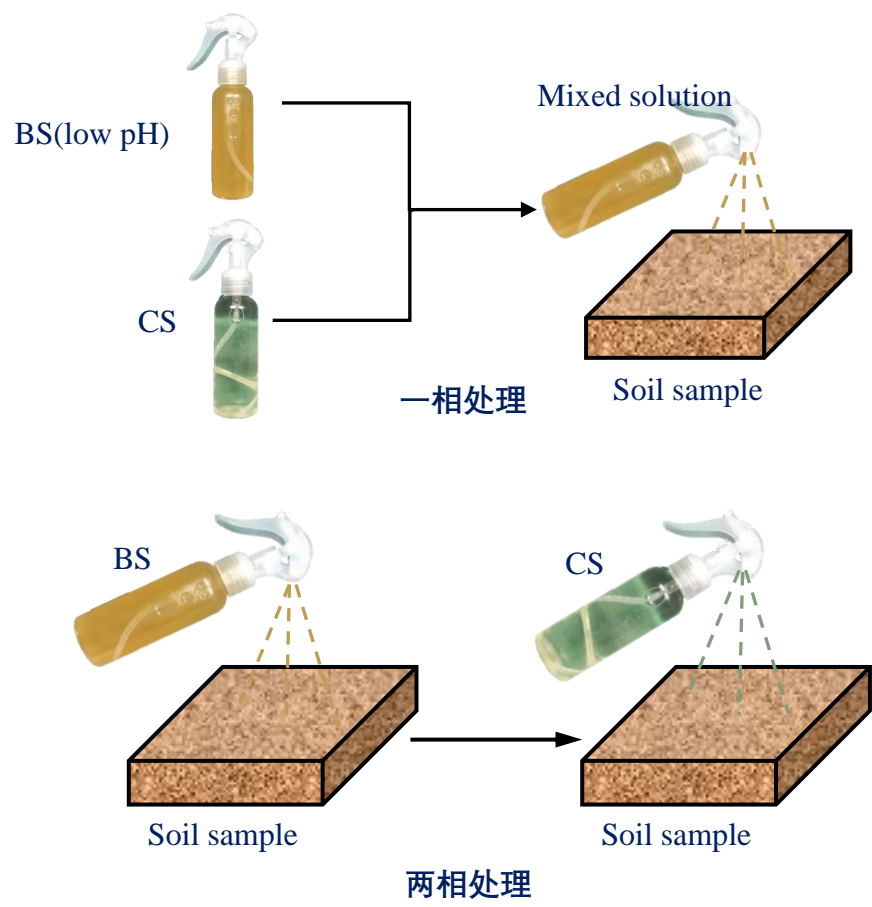
原位效果



挑战：准确评价

土体Bio-Barrier: 缓解干旱

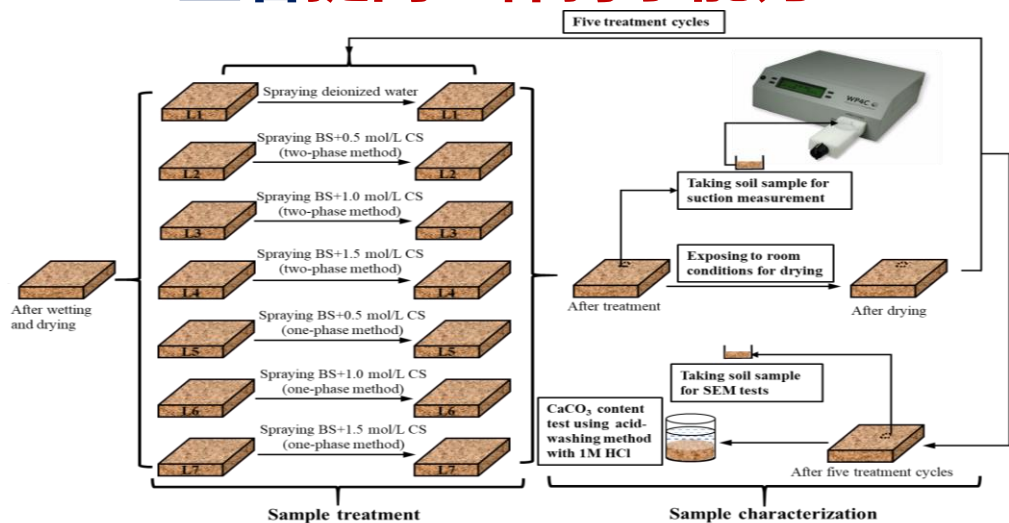
□ MICP显著抑制土体蒸发速度，为土体保水抗旱提供了策略与依据



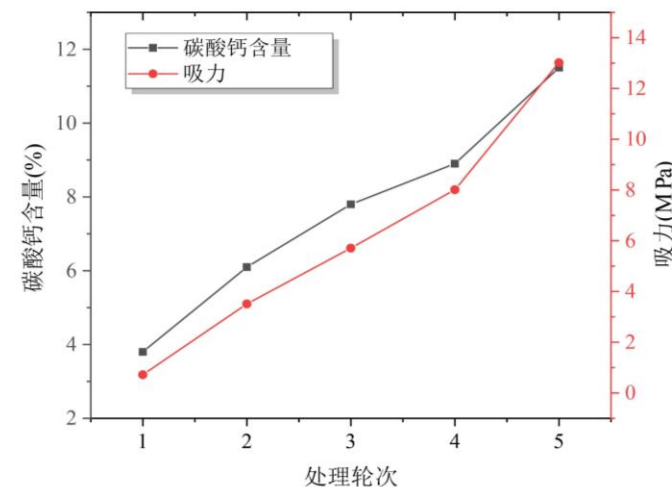
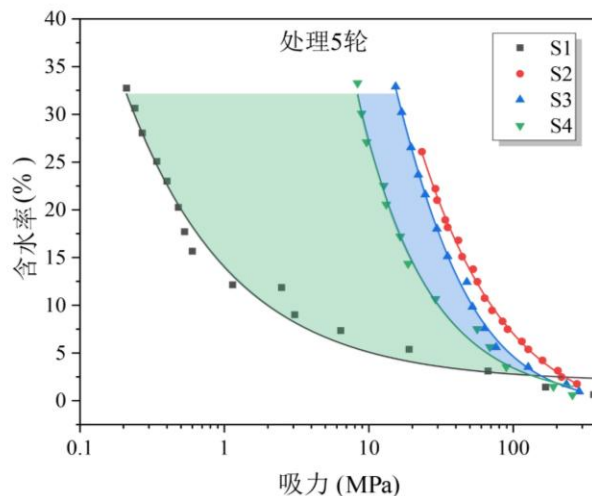
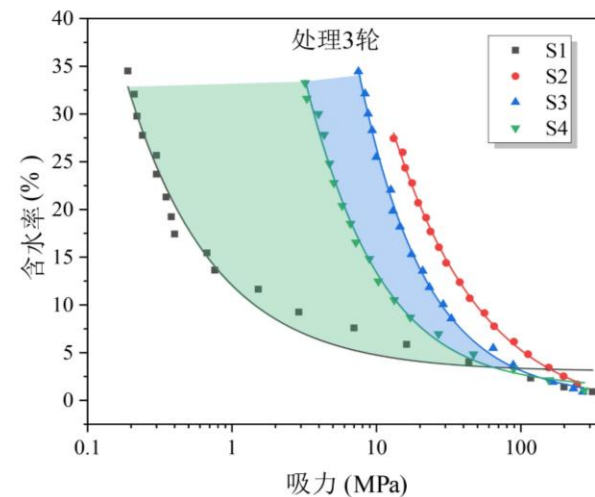
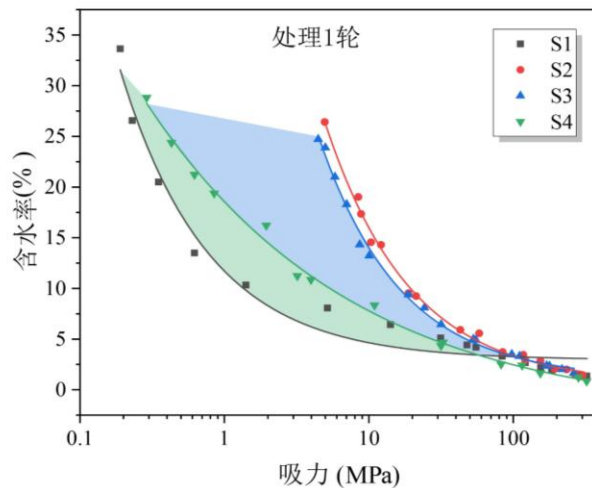
- MICP处理降低土体蒸发速率减小4倍！增加处理轮次和胶结液浓度能进一步降低土样的蒸发速率
- 两相法比一相法处理试样在抑制蒸发方面呈现更好的效果

土体Bio-Barrier: 缓解干旱

MICP显著提高土体持水能力



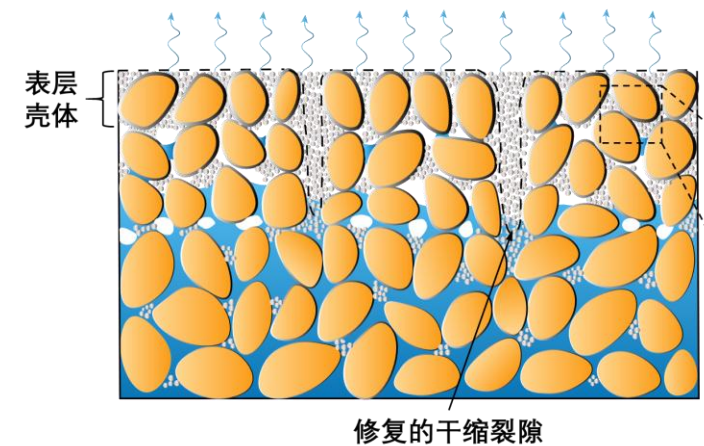
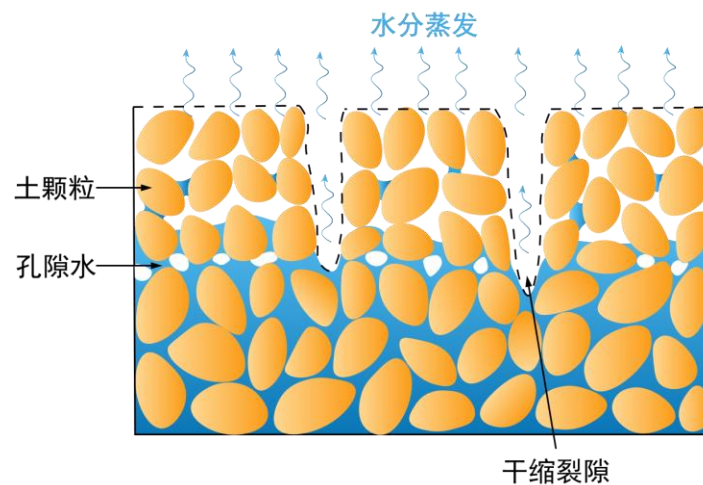
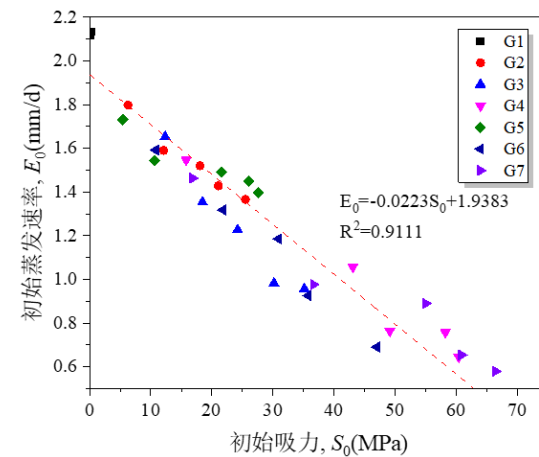
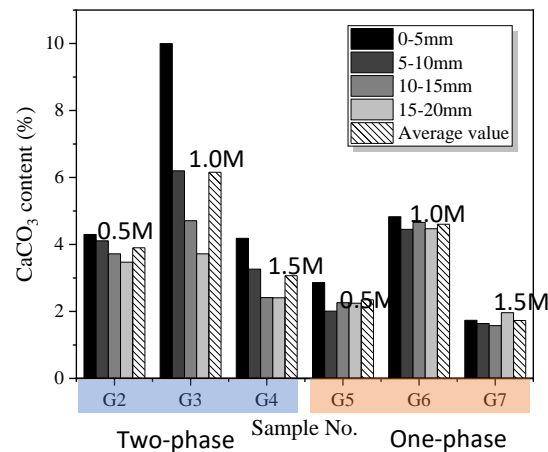
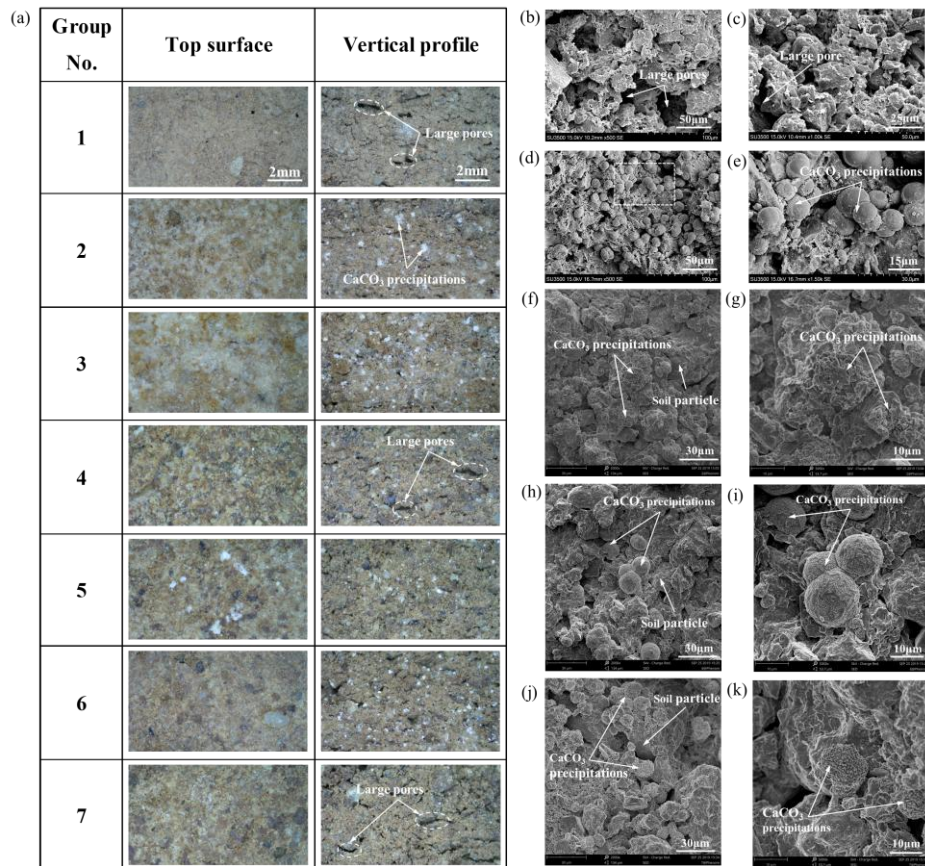
No.	Treatment methods
S1	Spraying deionized water
S2	Spraying inactivated BS and CS
S3	Two-phase MICP method
S4	Two-phase MICP method (water washing to remove soluble salts after treatment)



➤ MICP能提升土体的持水能力, 持水能力随碳酸钙含量的增加而增强

土体Bio-Barrier: 缓解干旱

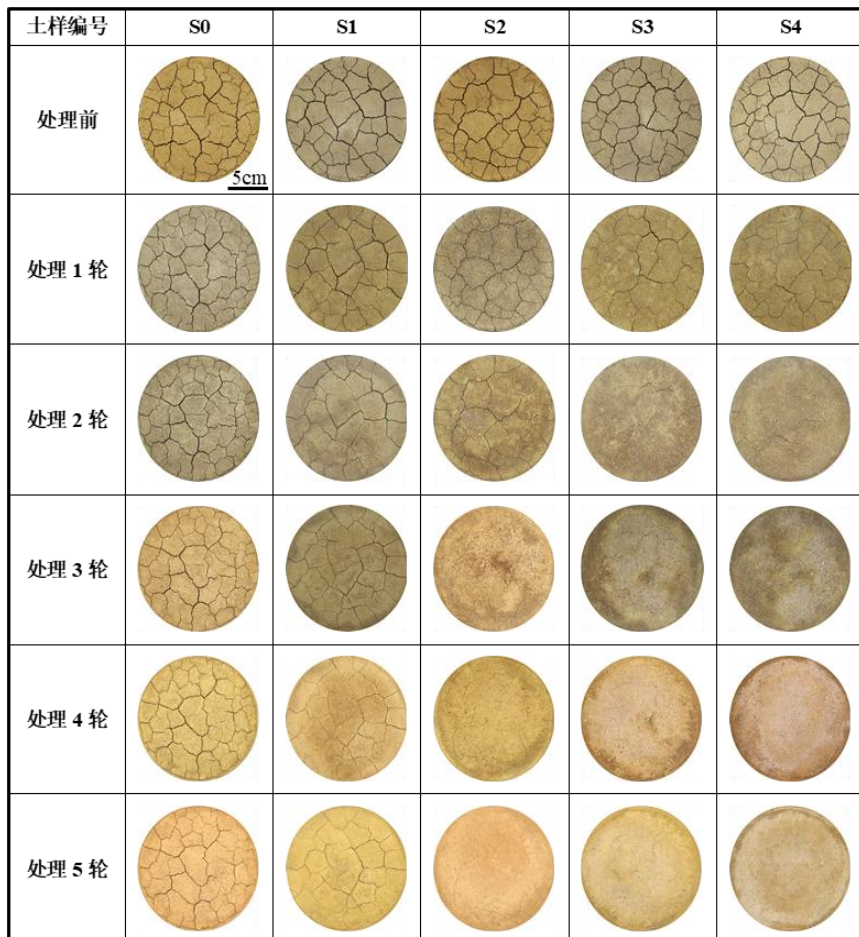
□ MICP抑制土体蒸发的机制



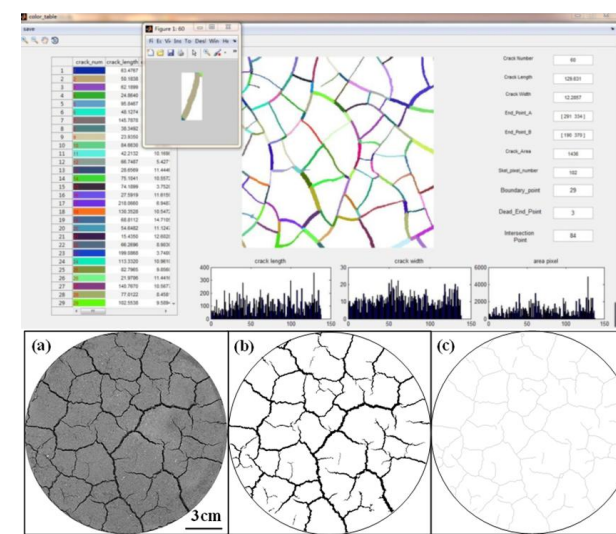
- 微生物矿化在土体表面构建一层**阻滞结构**，限制水蒸气向大气迁移扩散，提高**蒸发阻力**
- **碳酸钙**填充孔隙，提高土样持水能力；浆液中的**可溶盐**，提高土样的**渗透吸力**

土体Bio-Barrier: 缓解干旱

MICP抑制土体裂隙发育



采用课题组自主研发的CIAS图像处理系统对表面裂隙形态进行**定量化表征**



构建龟裂网络量度指标体系

共11个基本量度指标

- 裂隙指标 6个**
 - 表面裂隙率 R_{sc}
 - 裂隙节点个数 N_n
 - 裂隙宽度 W
 - 裂隙条数 N
 - 裂隙长度 L
 - 裂隙夹角 A_c
- 土块指标 3个**
 - 土块个数 N_s
 - 土块面积 S
 - 土块形状系数 S_c
- 几何形态 2个**
 - 分形维数 D
 - 概率密度函数 $f(x)$

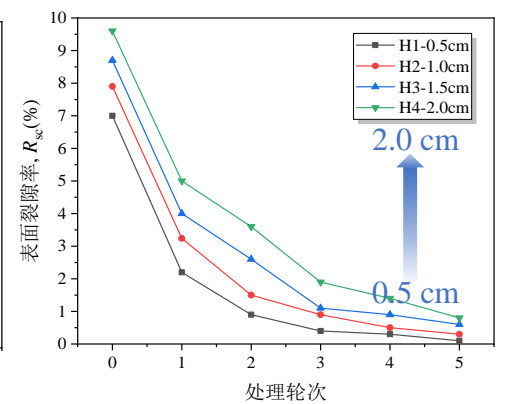
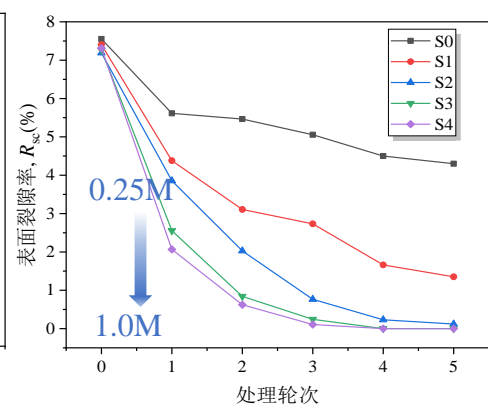
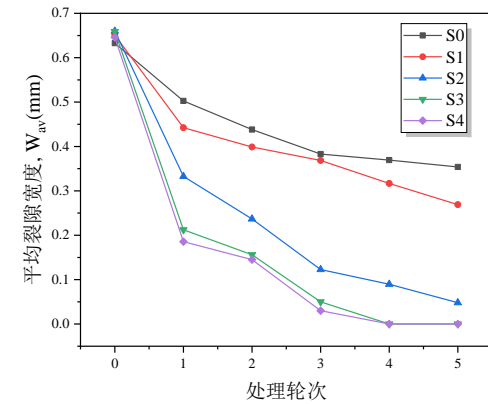
节点: 交点+端点
单条裂隙
夹角
土块

表面裂隙率 R_{sc} : 定义为裂隙面积与总面积之比, 从总体上反映了土体的干燥开裂程度

分形维数 D : 描述裂隙网络的复杂程度, 采用“数格子”法计算

概率密度函数 $f(x)$: 从统计学的角度对相关量度指标的分布特征进行分析, 使裂隙网络量化结果更加科学和可靠

Free available: https://es.nju.edu.cn/climatengeo_en/main.htm

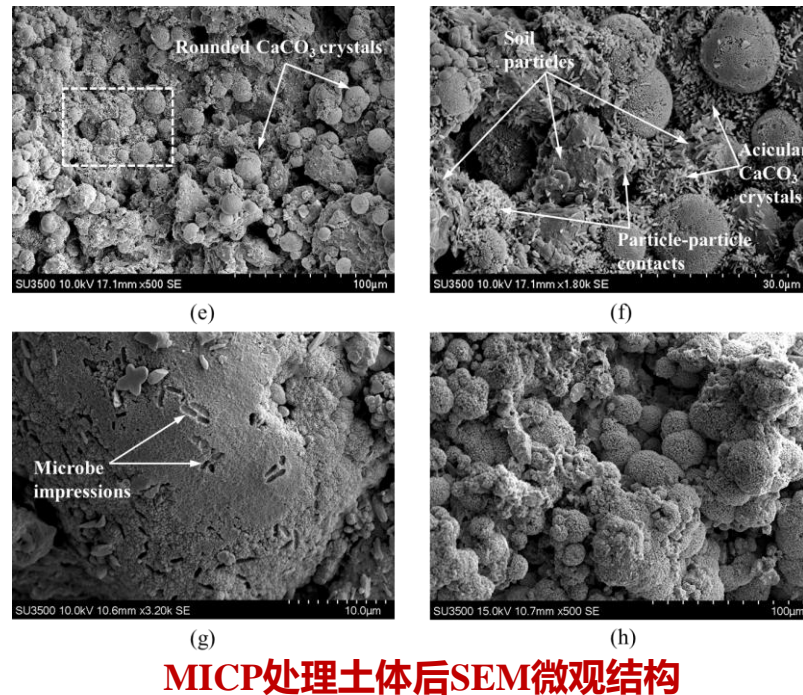
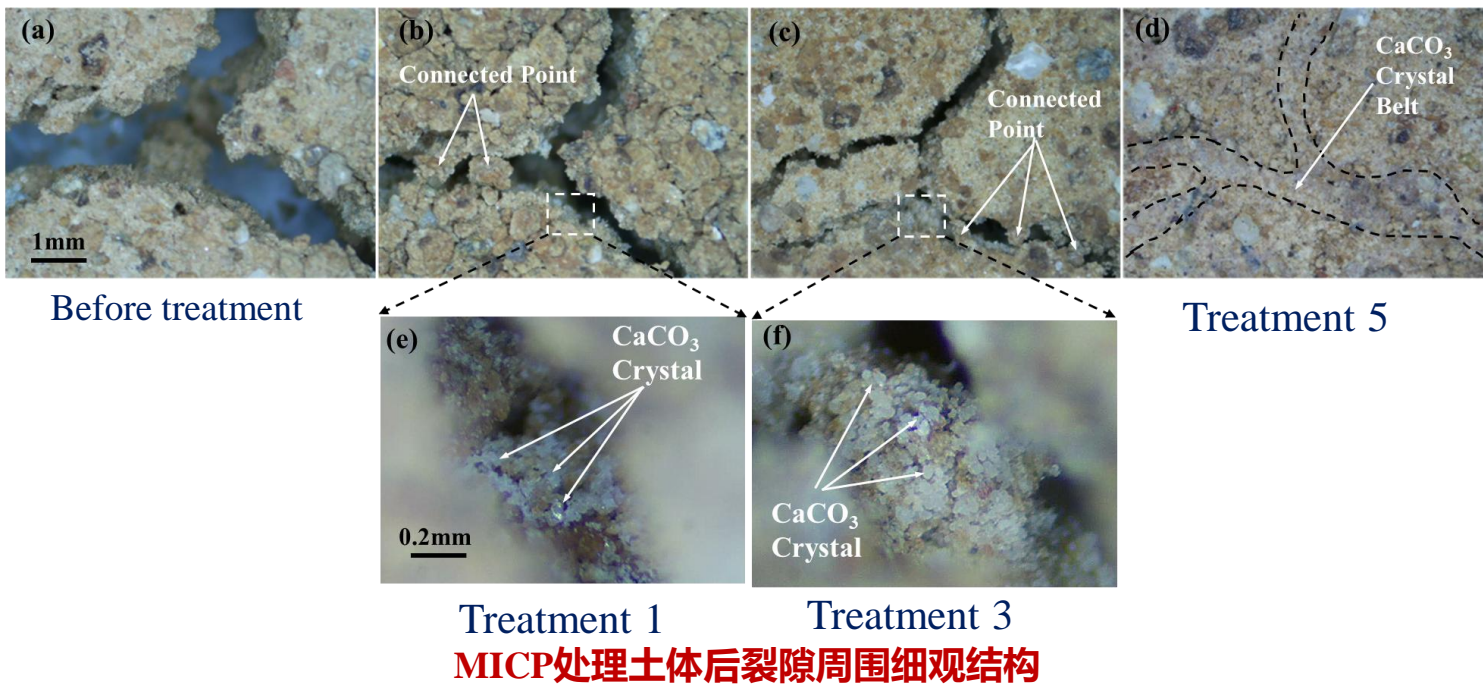


➤ MICP处理土样**表面裂隙率**、**平均裂隙宽度**和**裂隙总长度**均显著减小, 经过5轮处理, 裂隙可以**减少90%**

➤ 增大**胶结液浓度**可增强裂隙修复效果, **越厚的土样**需要更多的MICP处理轮次才能取得较好的修复效果

土体Bio-Barrier: 缓解干旱

□ MICP抑制土体龟裂机理



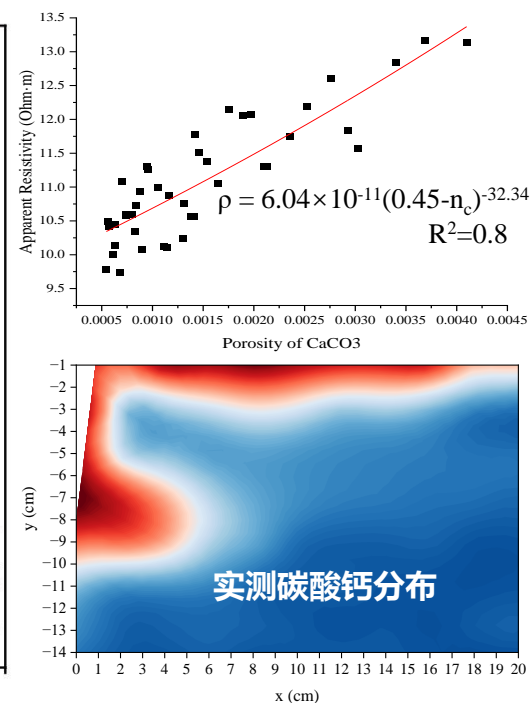
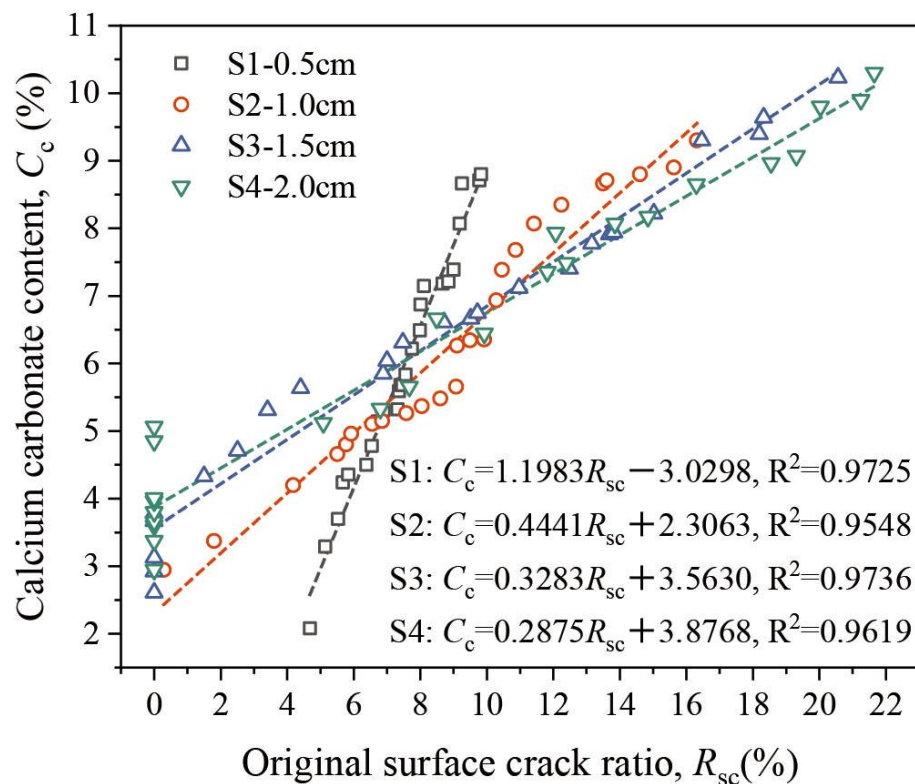
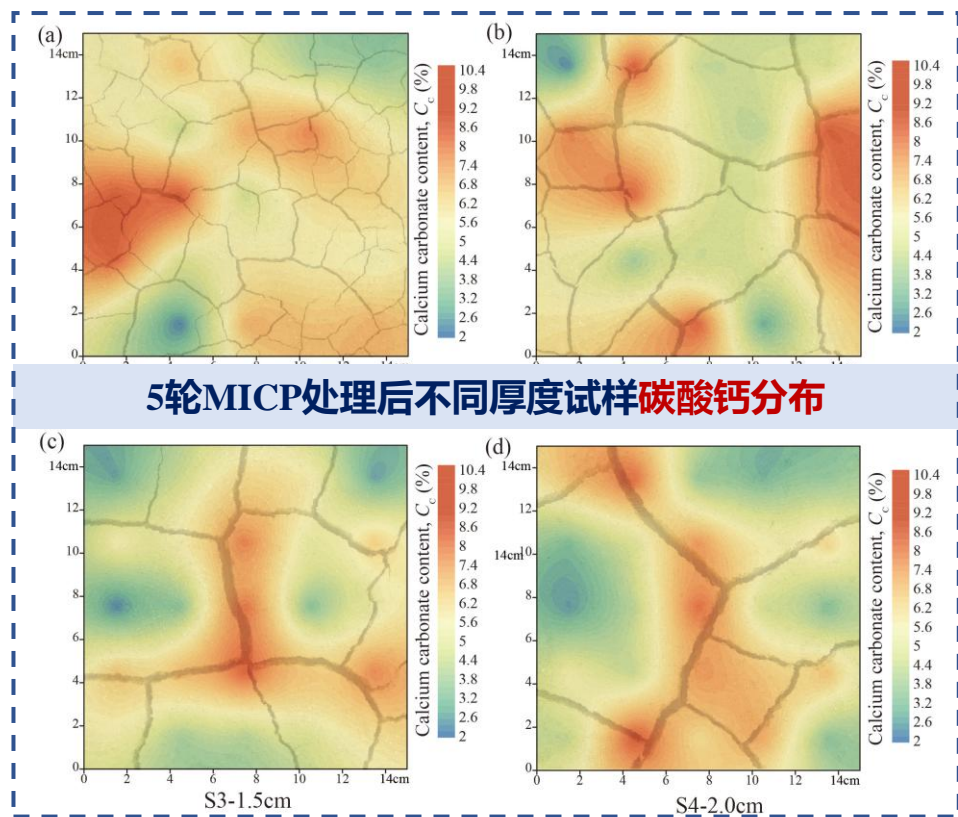
➤ **填充效应**Filling effects: 碳酸钙晶体对裂隙进行填充

➤ **胶结效应**Bonding effects: 碳酸钙晶体胶结土颗粒, 提高土样的抗裂能力

➤ **减缩作用**Reduced shrinkage: MICP处理抑制蒸发, 改性黏土矿物, 降低土样的干缩潜力

土体Bio-Barrier: 缓解干旱

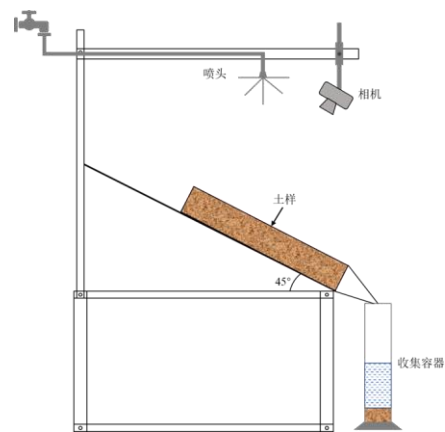
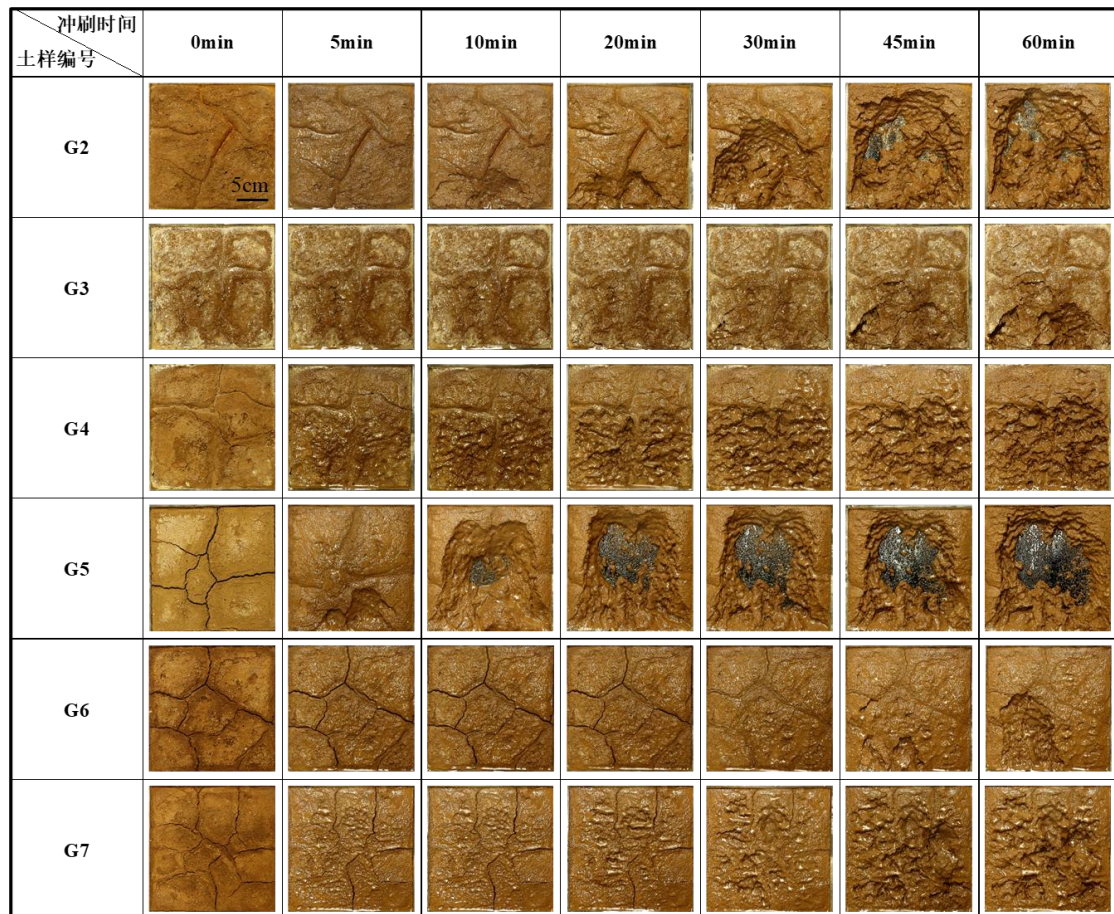
裂隙对MICP处理效果的正向反馈



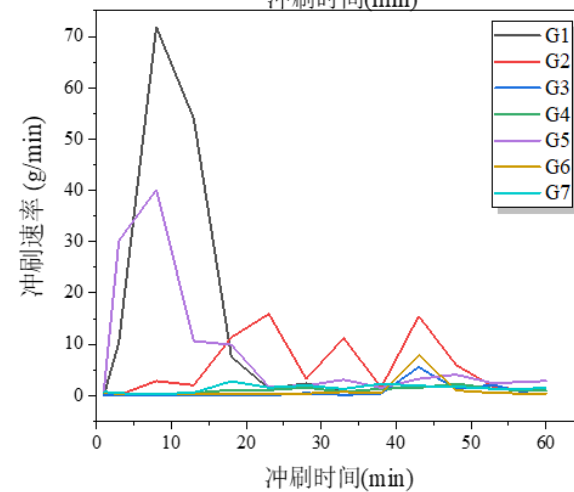
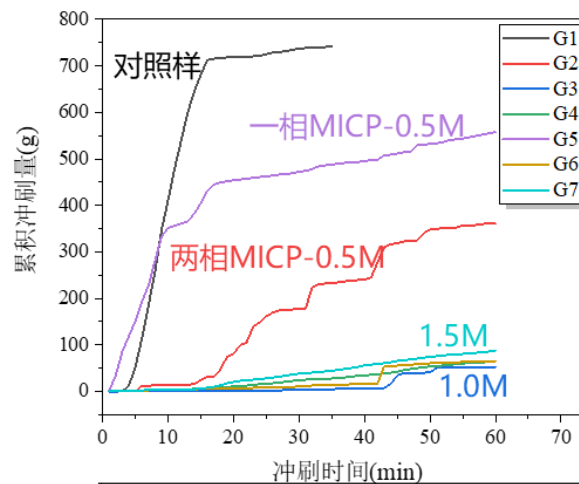
- 碳酸钙含量与分布跟表面裂隙发育状态有关，高碳酸钙含量与高裂隙发育率区域对应
- 裂隙可提高MICP有效处理深度，提高深部土体中碳酸钙含量

土体Bio-Barrier: 抵抗降雨

MICP提高土体抗侵蚀能力



模拟极端暴雨条件
(1000 mm/d)

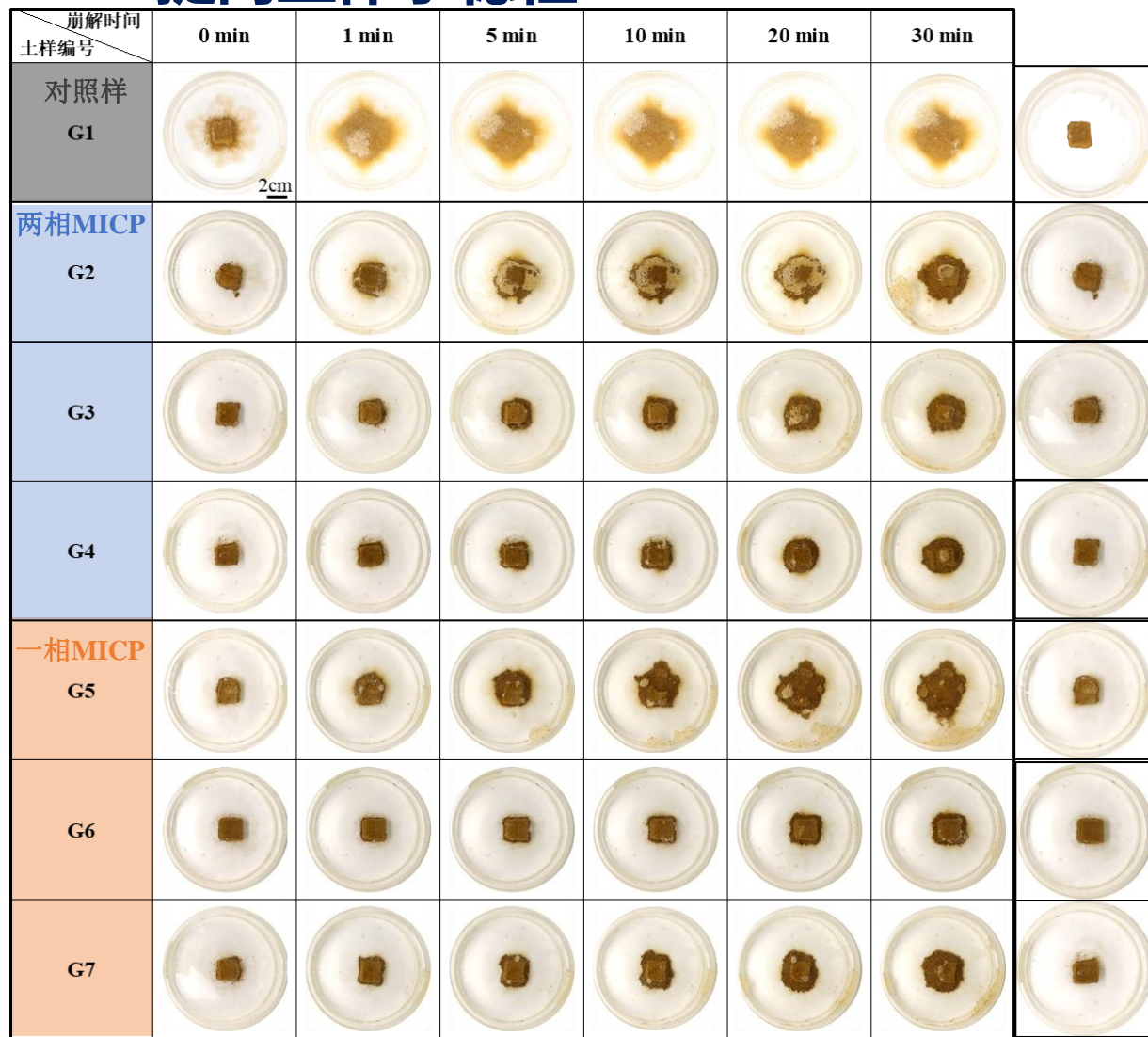


➤ 经MICP改性后土样的**抗侵蚀能力**显著提升, **土体流失量**和**侵蚀速率**均得到较好的控制

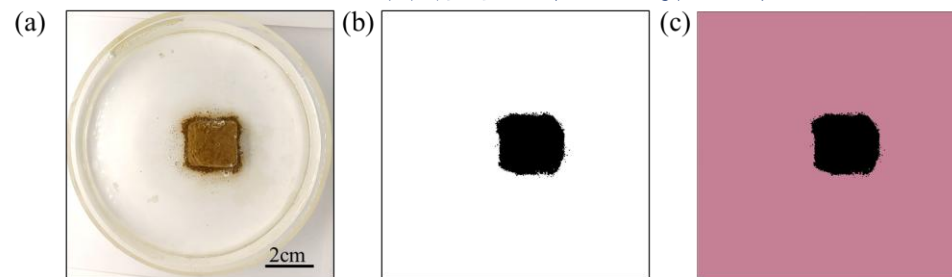
➤ 采用**1.0 M胶结液**处理的土样获得最好的侵蚀控制效果, 土体流失量减少了93%

土体Bio-Barrier: 抵抗降雨

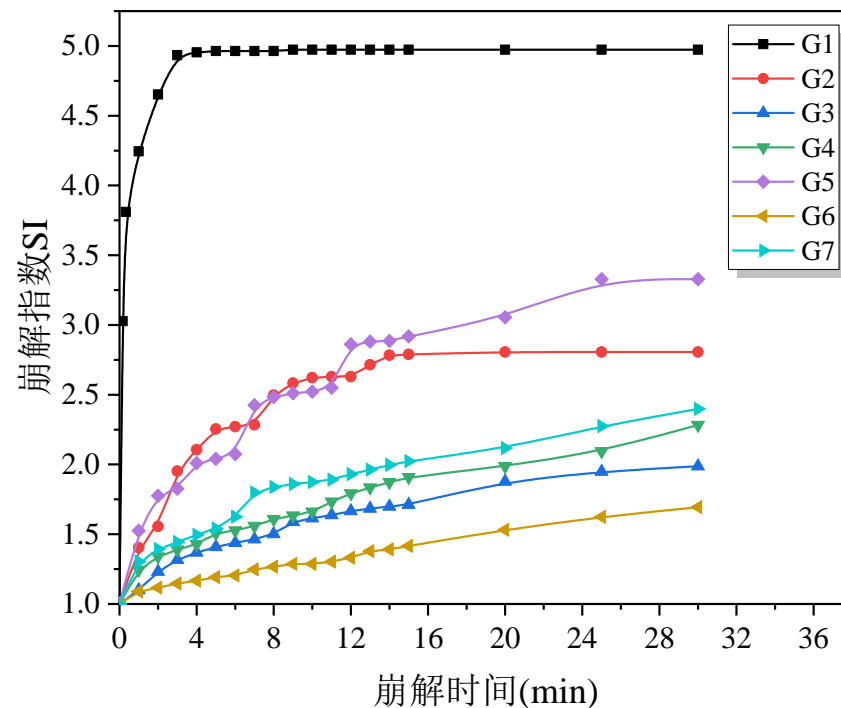
MICP提高土体水稳性



土体崩解指数测试方法



土块崩解图像处理过程: (a)原始图片; (b)二值化图片; (c)区块图

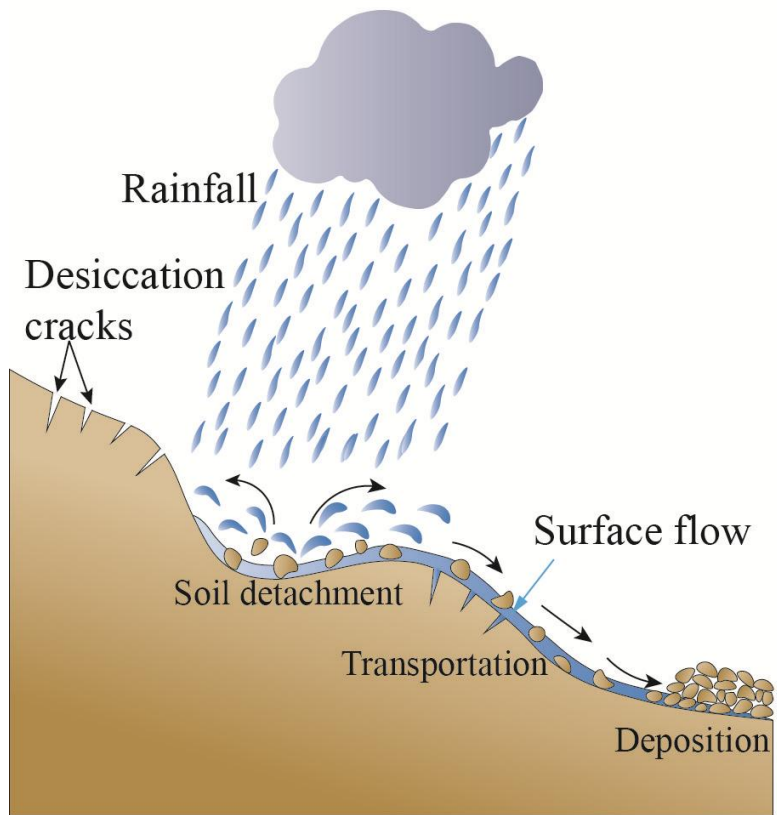


➤ 经MICP处理后土体的崩解指数减小约80%! 1.0 M 胶结液浓度处理效果最好, 一相法效果优于两相法

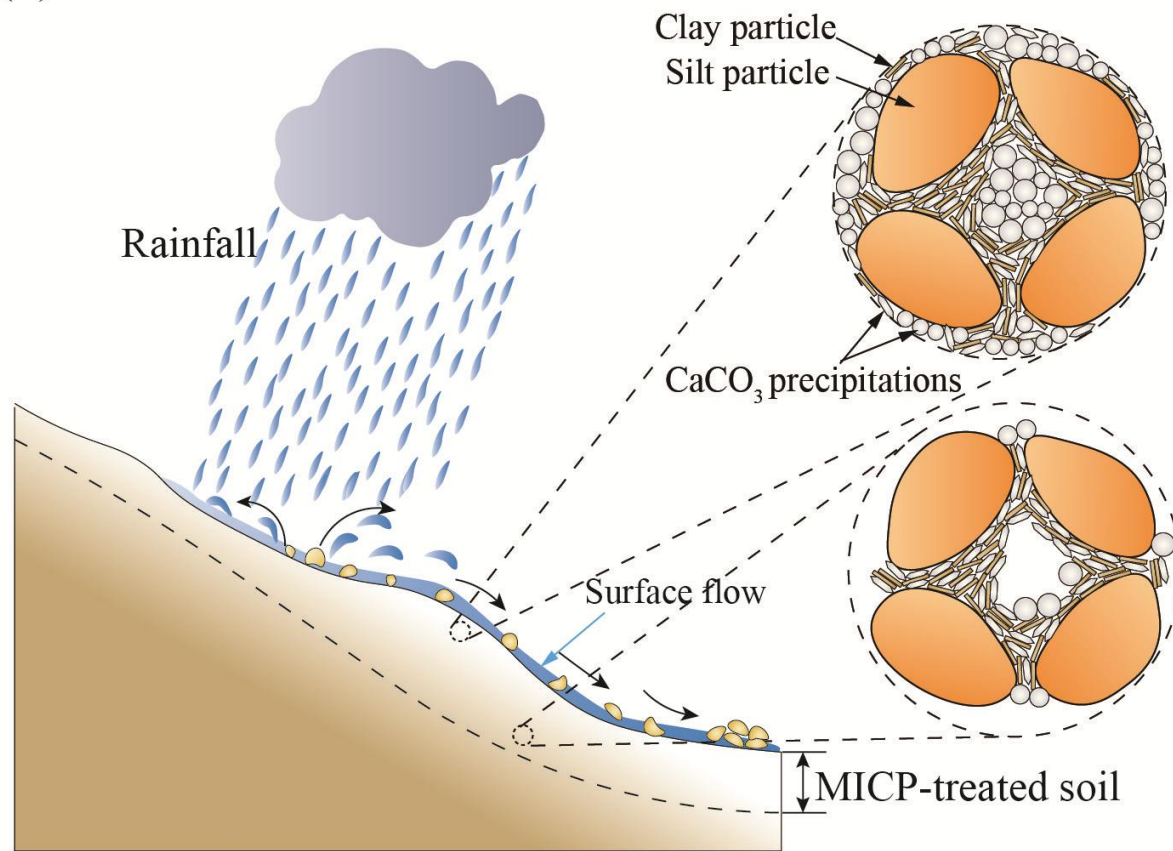
土体Bio-Barrier: 抵抗降雨

□ MICP土体抗侵蚀机制

(a)



(b)

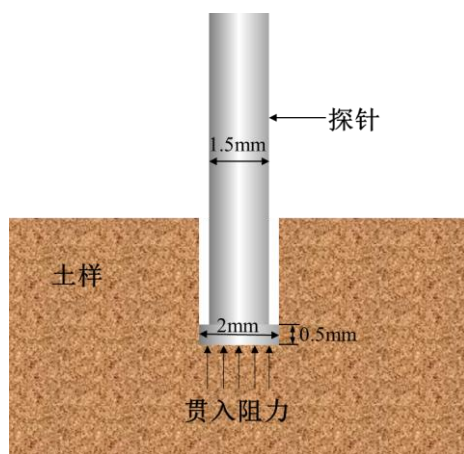
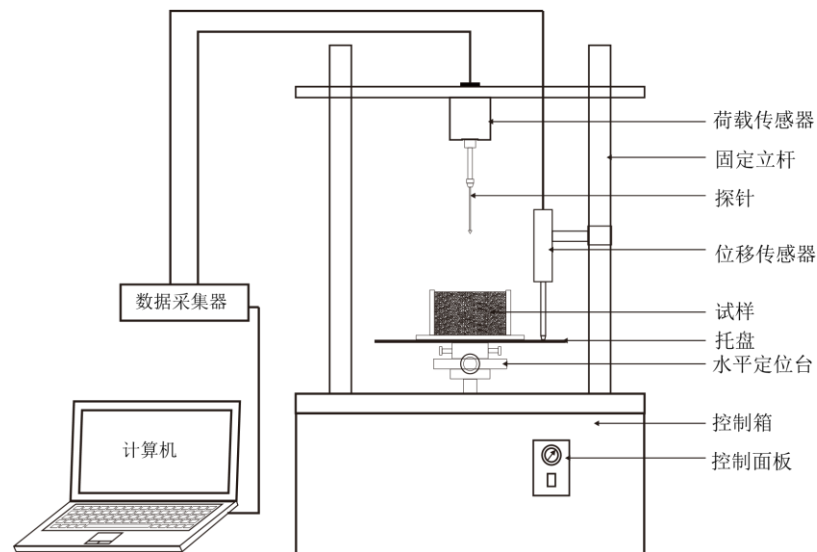


➤ **表面保护:** 在土体表面形成壳层, 抵抗雨滴和表面径流的侵蚀作用, 削弱雨水下渗

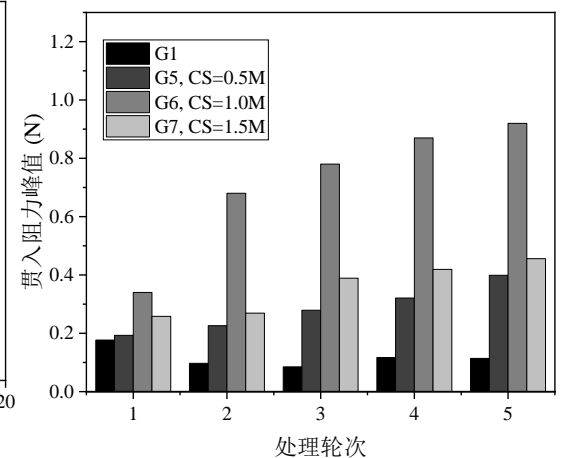
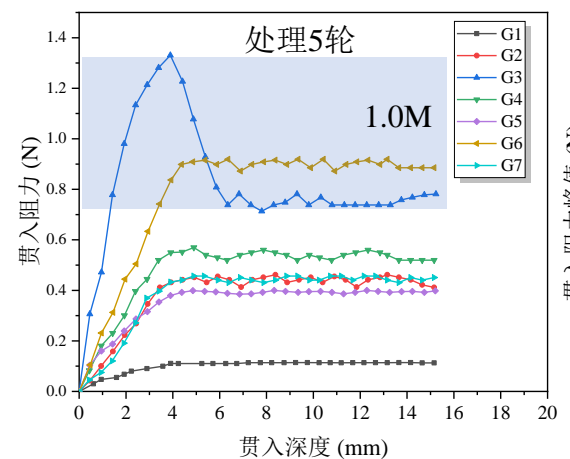
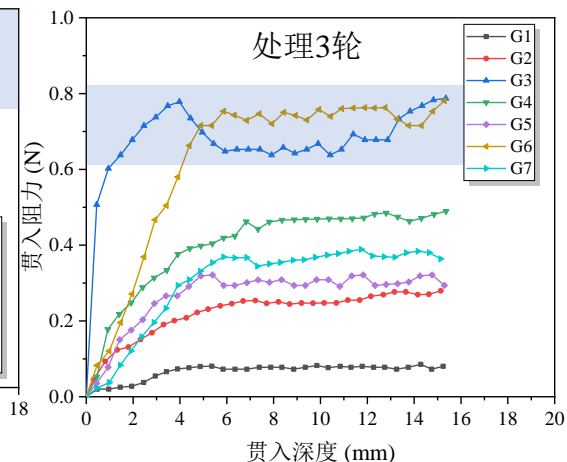
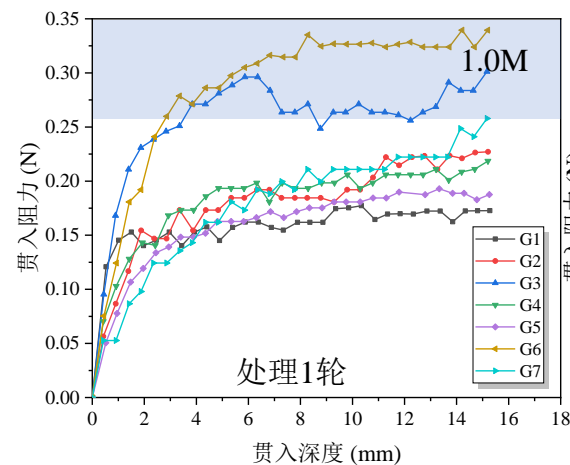
➤ **浅层增强:** 碳酸钙晶体胶结土颗粒, 填充孔隙, 有效提高土体水稳性及强度, 从而提高土体的抗侵蚀能力

土体Bio-Barrier: 提升强度

MICP提高土体强度



试验装置-超微型贯入仪示意图

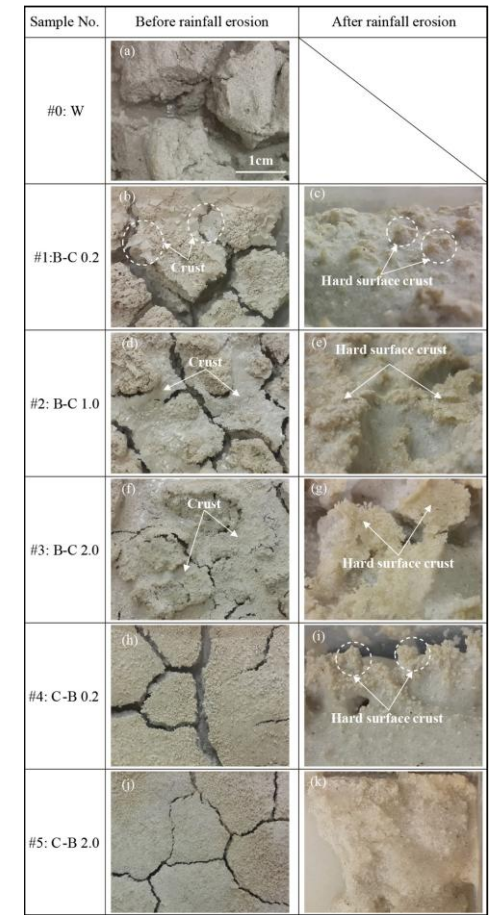
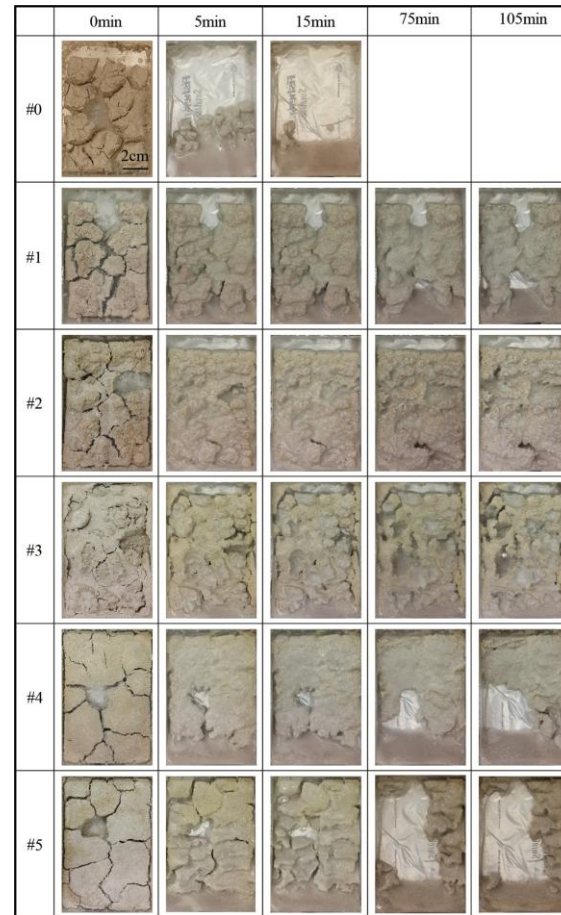
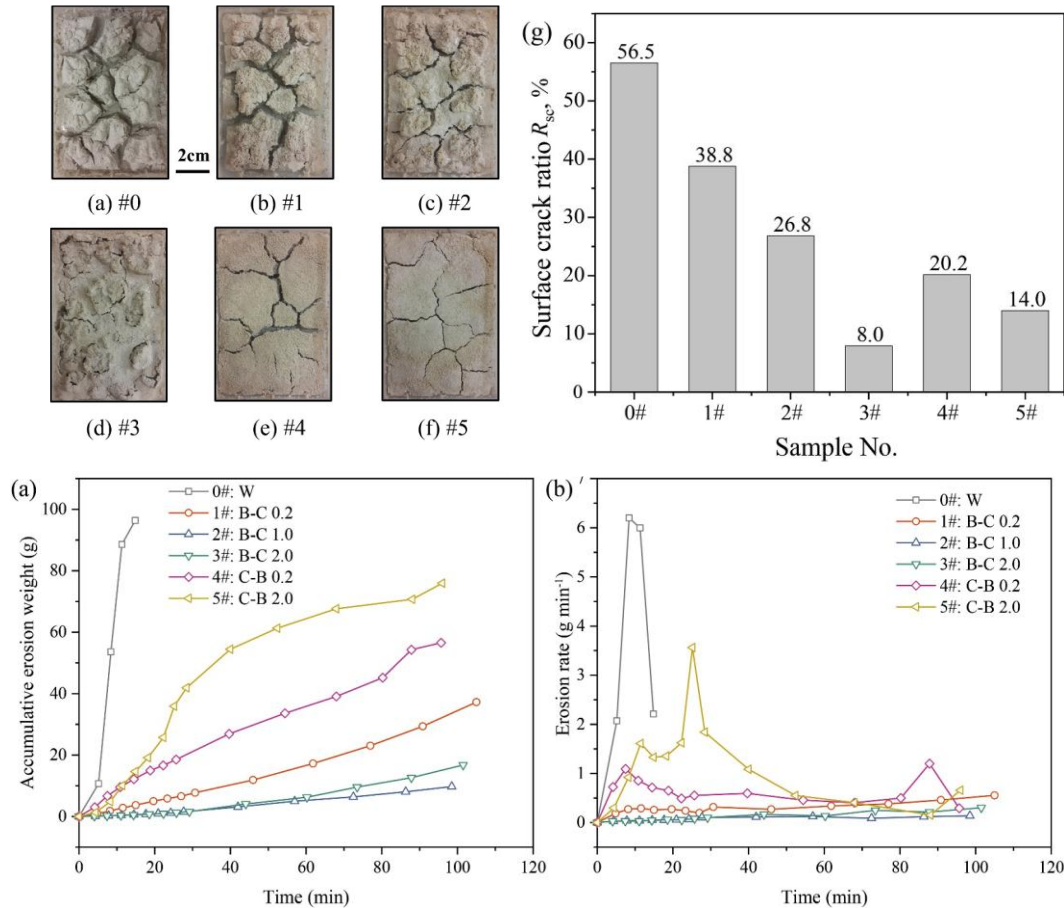


➤ 贯入强度随MICP处理轮次的增加而提高，1.0 M 胶结液浓度处理土样的贯入强度最大

➤ 两相法能在土样表面获得相对较高的贯入强度，而一相法处理的土样力学性质在深度方向更均匀

土体Bio-Barrier: 干湿循环

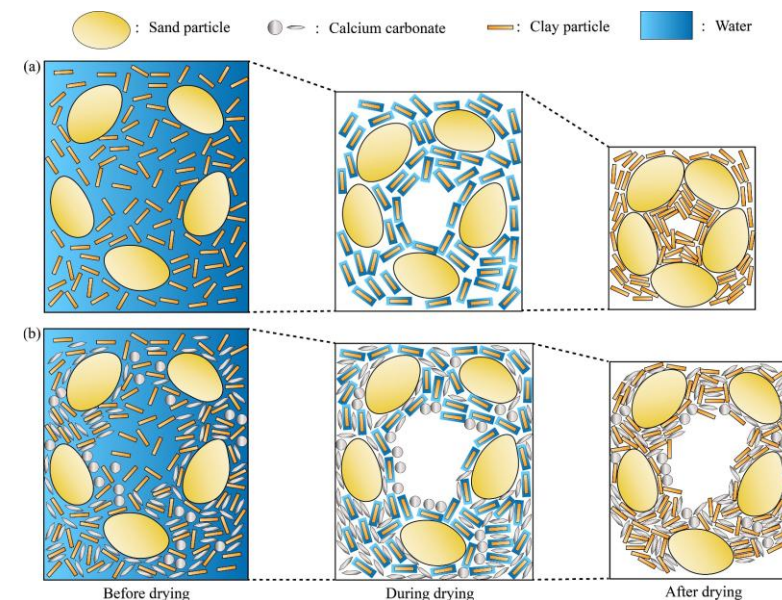
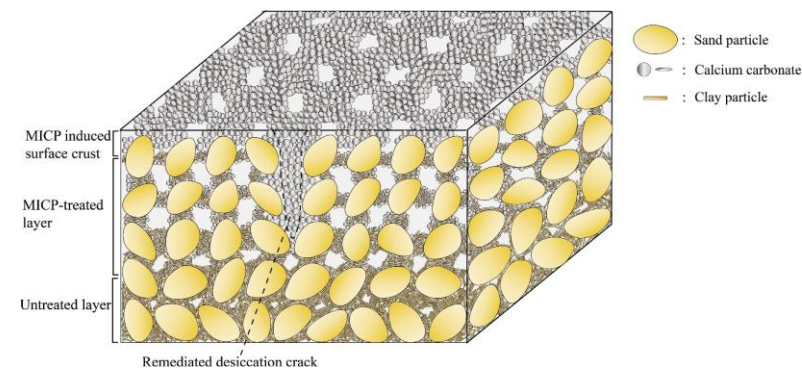
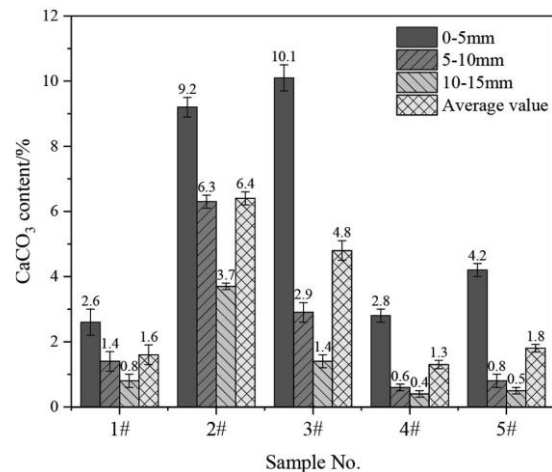
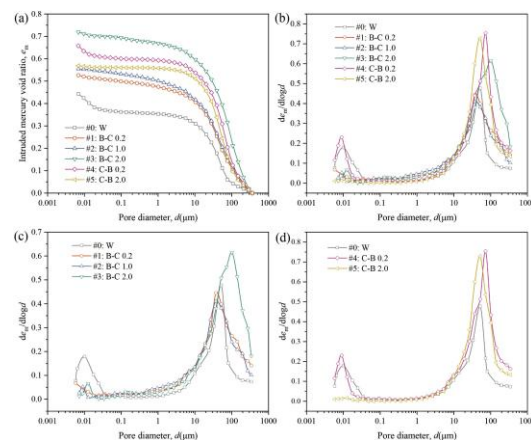
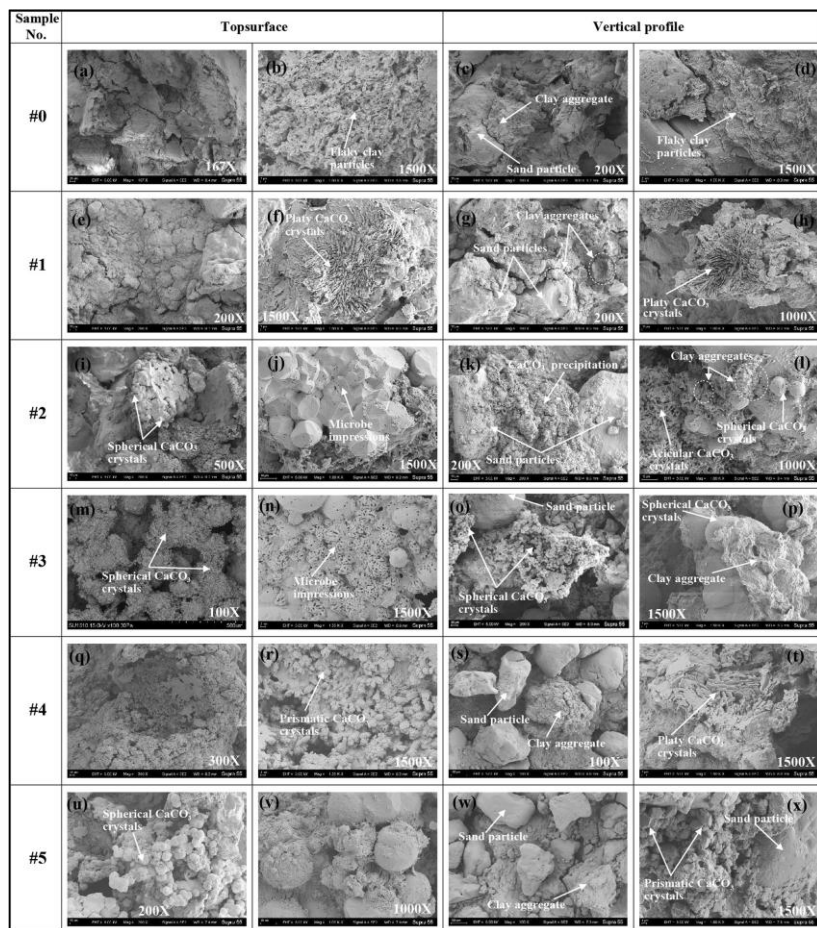
MICP土体提升干湿气候韧性



- MICP处理后，蒸发速率、表面裂隙率以及土体流失量分别降低了多达 32%、85%和 90%。
- MICP 处理顺序：先喷洒胶结液在提高土体保水能力上更有效，先喷洒菌液在降低开裂和侵蚀效果上更显著

土体Bio-Barrier: 干湿循环

MICP土体提升干湿气候韧性机制

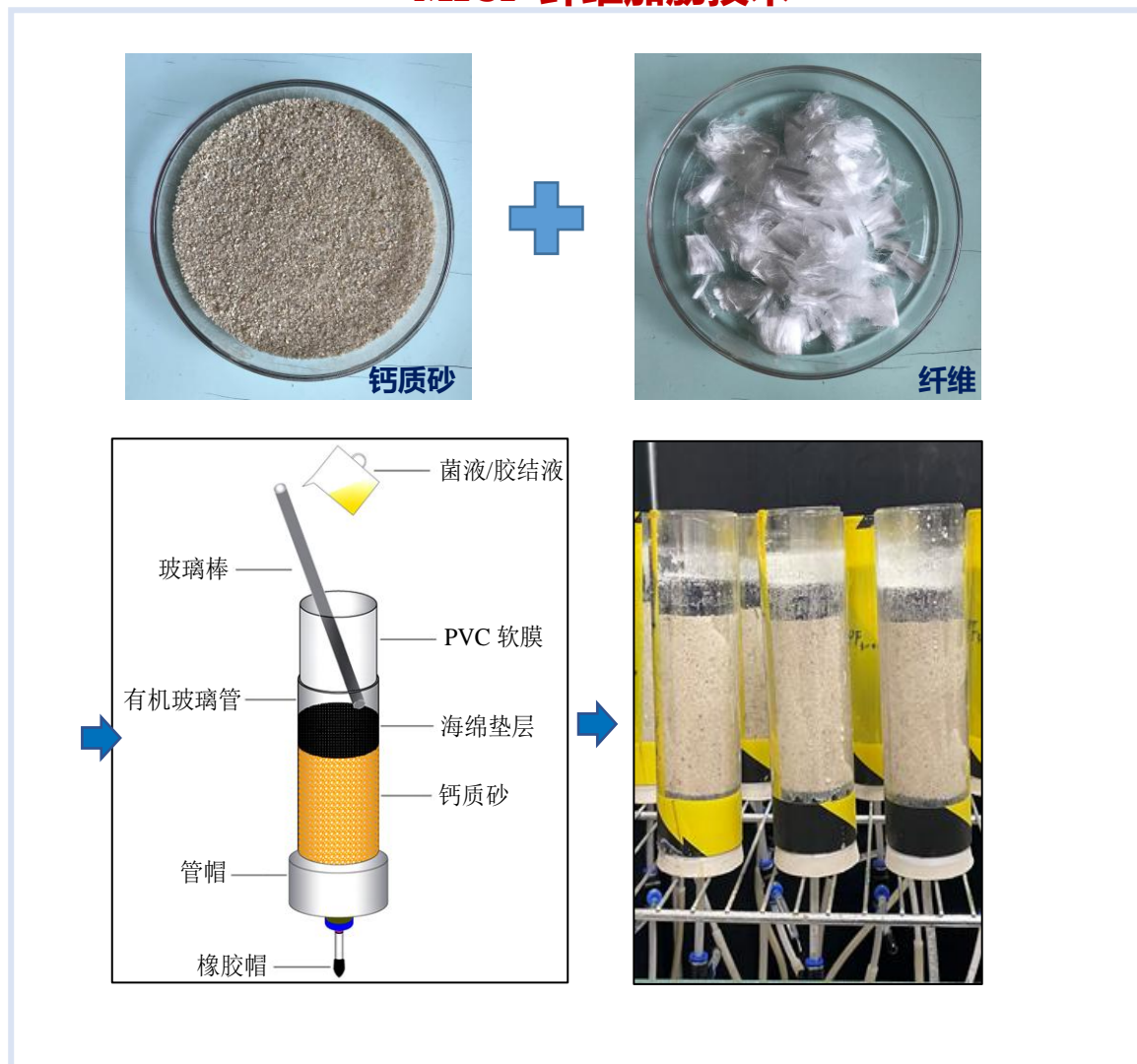


- **碳酸钙含量和分布**是影响MICP胶结效果的主要因素，MICP形成的**缓冲层**和**骨架结构**是**提高土体韧性**的主要机制
- 在**干旱气候**下通过抑制水气扩散来降低土体蒸发速率，在**降雨气候**下拦截雨滴和径流来增强土壤抗侵蚀能力

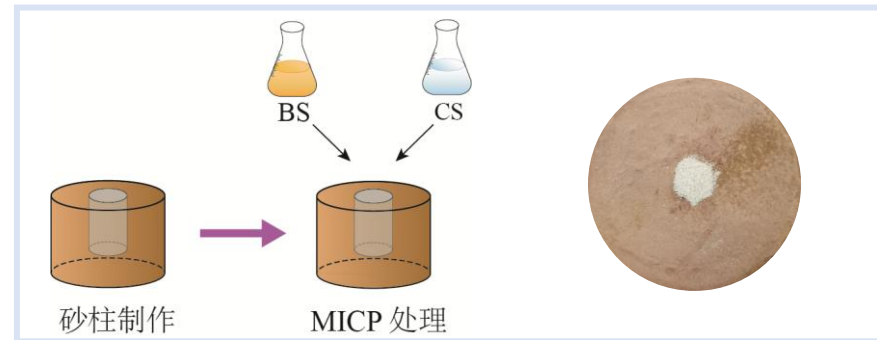
土体Bio-Barrier: 优化提升

□ MICP-纤维加筋与砂柱/砂格构策略

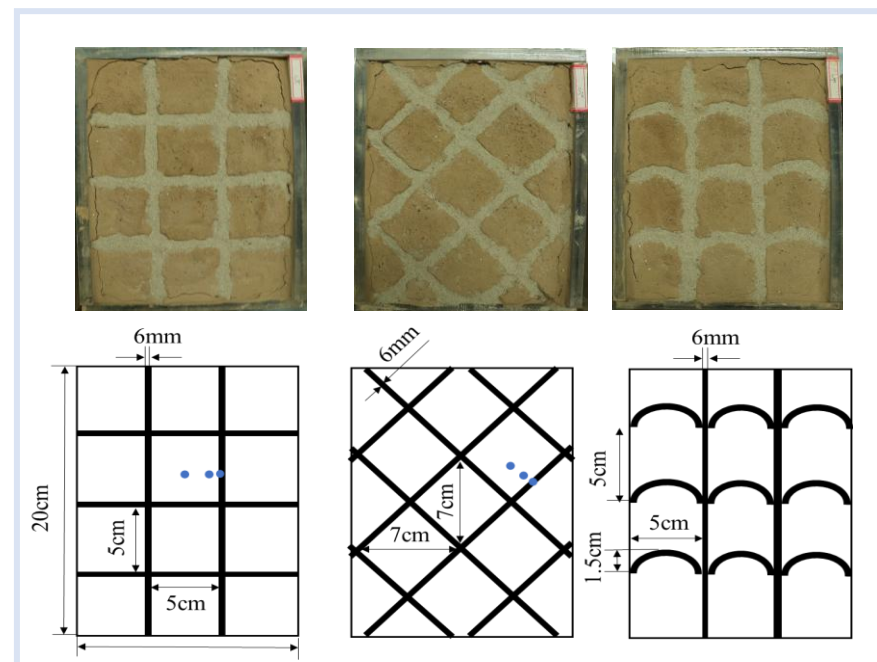
MICP-纤维加筋技术



MICP-砂柱工艺

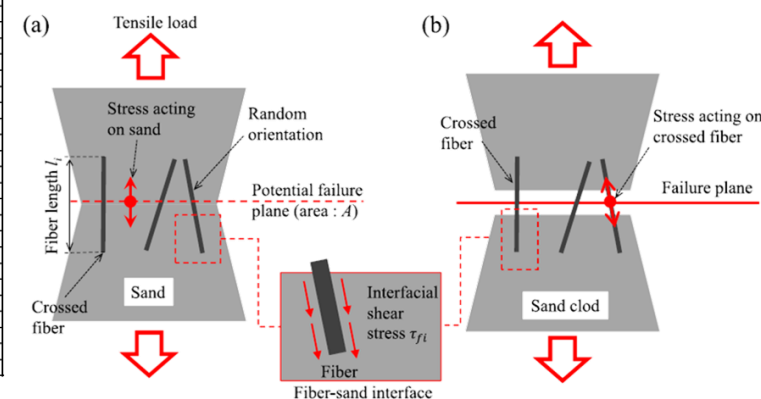
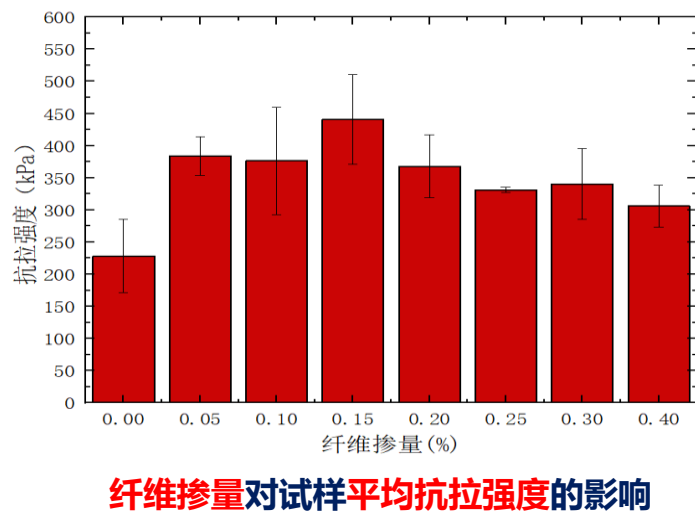
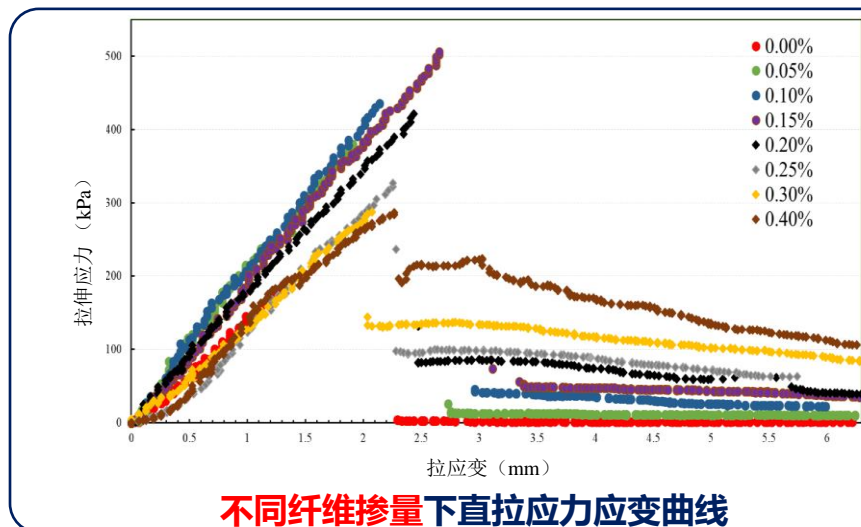
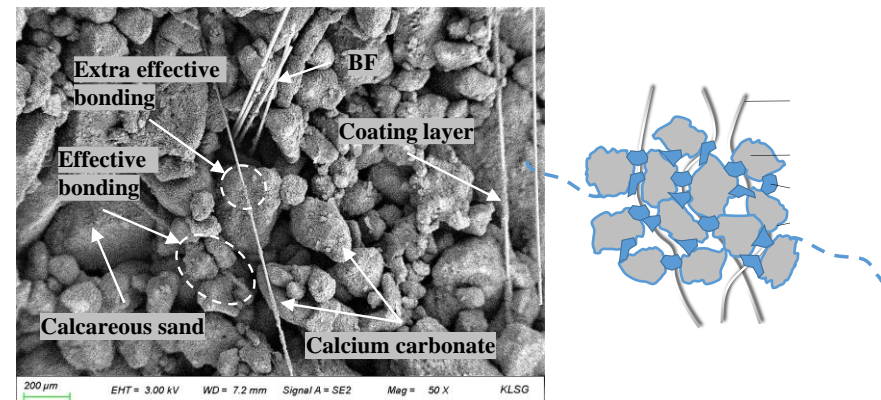
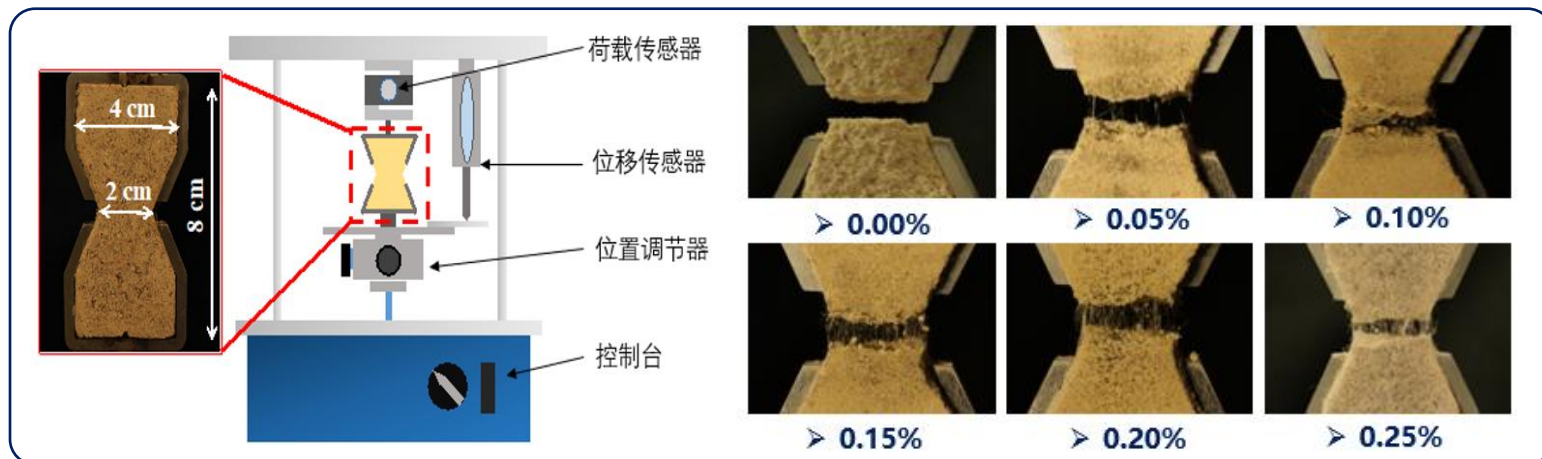


MICP-砂格构工艺



土体Bio-Barrier: 优化提升

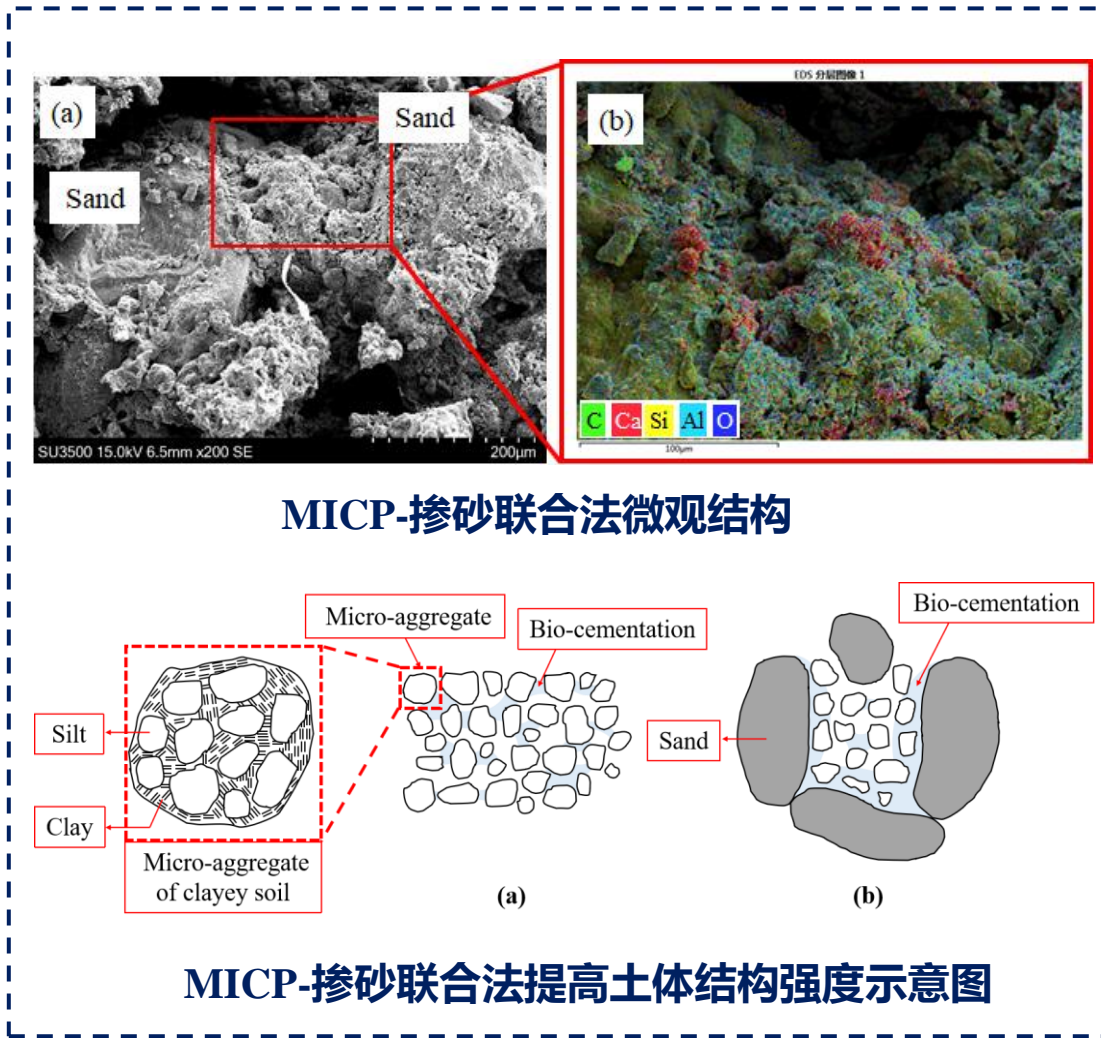
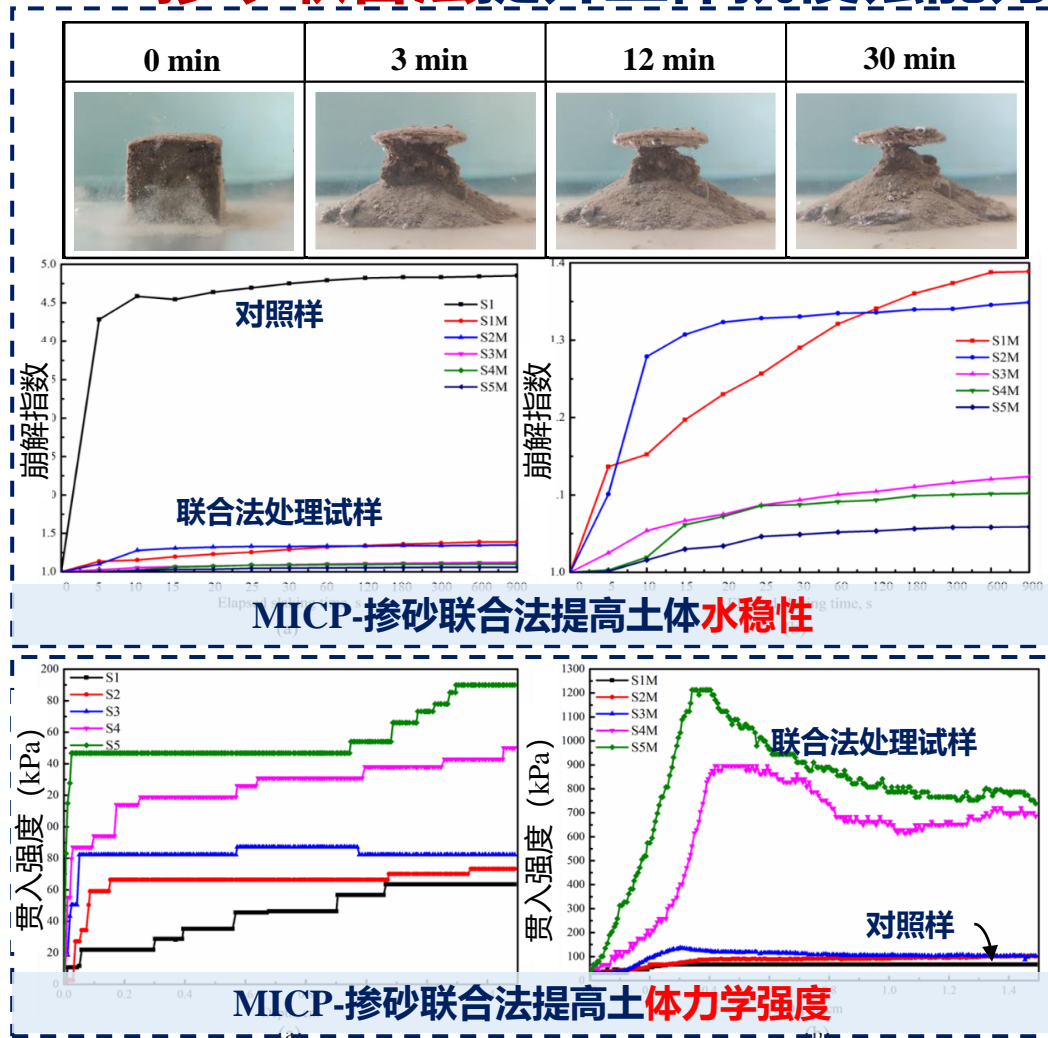
□ MICP-纤维加筋提高土体抗拉强度, 增强土体韧性



- 纤维的掺入能够显著增强MICP改性效果, 提高土体抗拉强度, 改善土体韧性
- 纤维有利于微生物定植, 纤维掺量增大, 试样中碳酸钙含量呈增大趋势

土体Bio-Barrier: 优化提升

MICP-掺砂联合法提升土体抗侵蚀能力

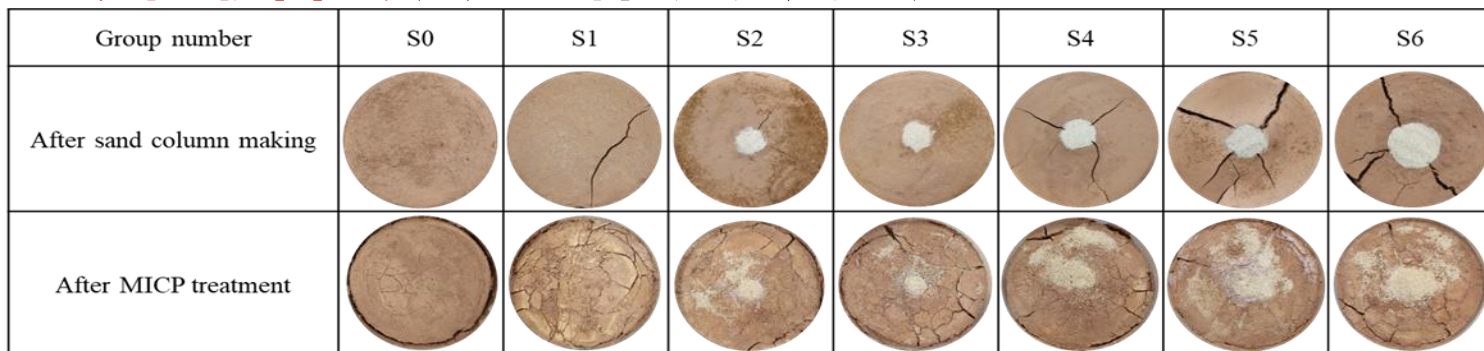
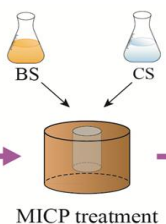


MICP-掺砂联合法进一步提高土体的水力学性质；砂颗粒形成骨架结构，提高结构强度，并促进MICP浆液入渗，提高MICP处理的有效深度

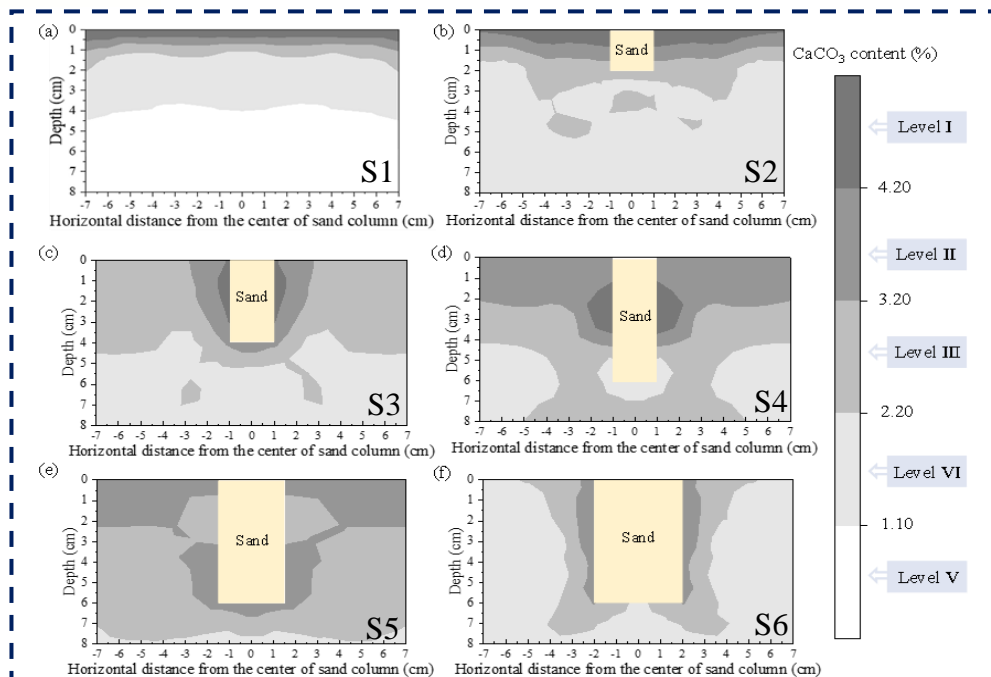
土体Bio-Barrier: 优化提升

MICP-砂柱联合法提升土体抗侵蚀能力

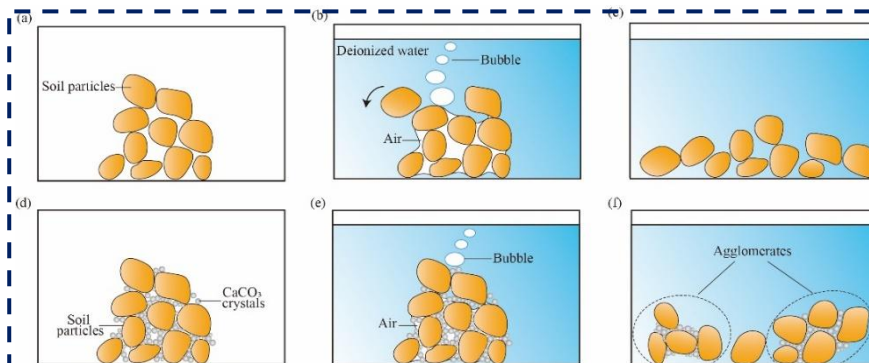
两步喷洒法



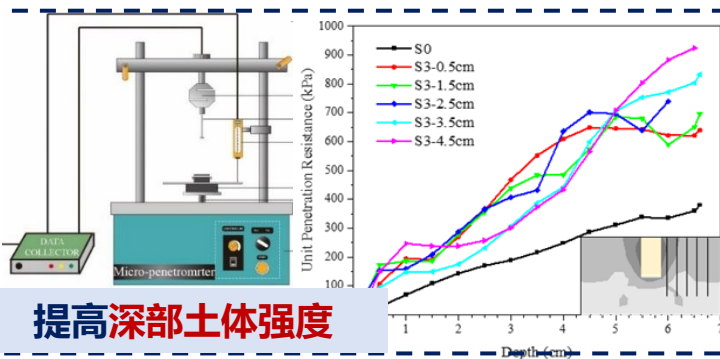
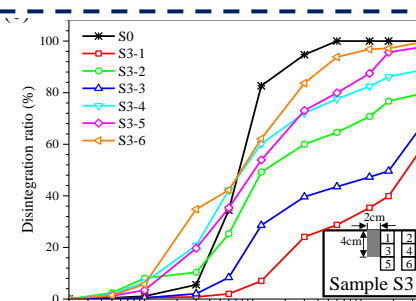
试样编号	砂柱直径(cm)	砂柱高度(cm)	处理方法
S0	/	/	去离子水
S1	/	/	3轮 MICP
S2	2	2	3轮 MICP
S3	2	4	3轮 MICP
S4	2	6	3轮 MICP
S5	3	6	3轮 MICP
S6	4	6	3轮 MICP



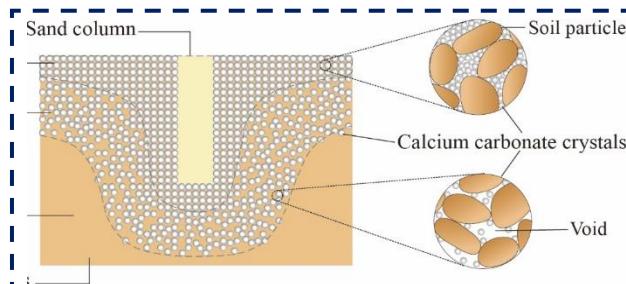
砂柱提高深部土体中的**碳酸钙含量**



提高深部土体的**水稳性**



提高深部土体**强度**



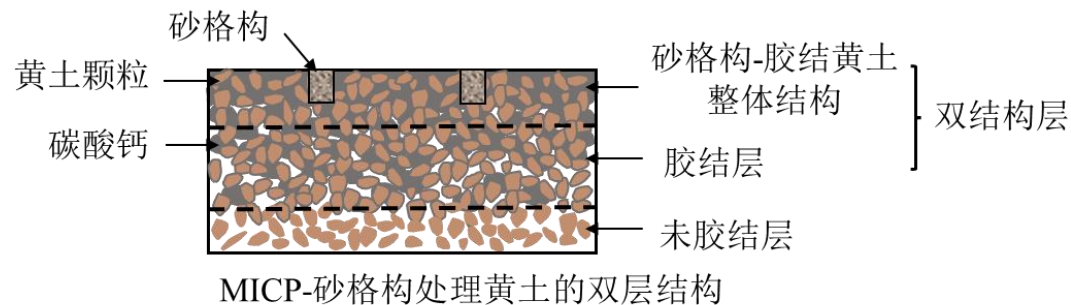
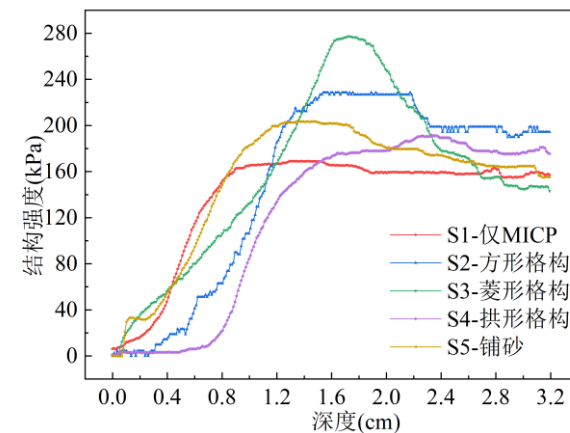
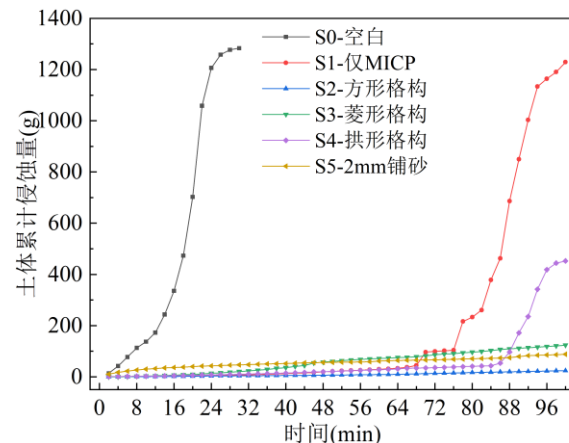
形成**U形三层胶结层**

砂柱进一步提高MICP处理的**有效深度**, 显著提高深部土体的**水力学性质**

土体Bio-Barrier: 优化提升

MICP-砂格构联合法提升土体抗侵蚀能力

处理方式	S0-空白	S1-仅MICP	S2-MICP+ 方形格构	S3-MICP+ 菱形格构	S4-MICP+ 拱形格构	S5-MICP+ 2mm铺砂
5轮干湿循环处理						
3轮去离子水/ MICP处理						
降雨冲刷处理						

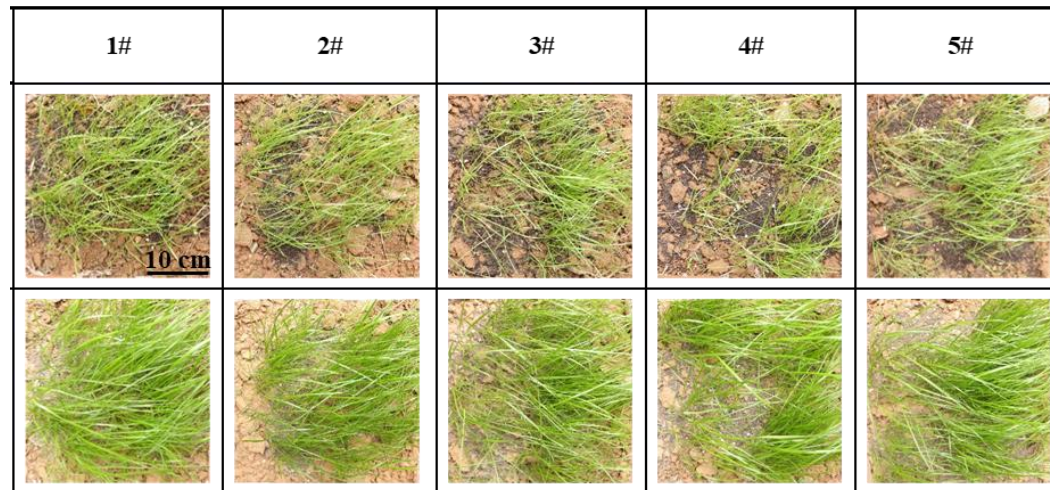
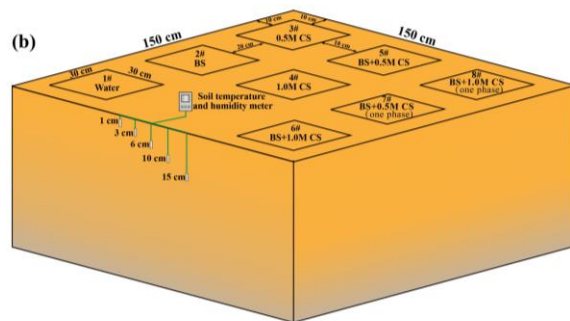
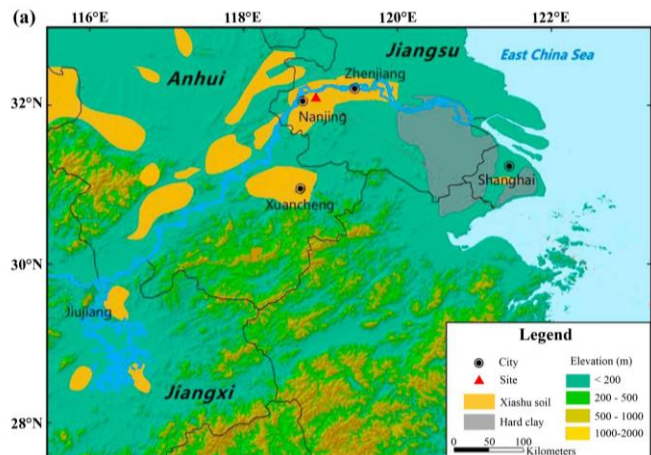


➤ MICP+砂格构处理试样土体抗侵蚀性显著增强

➤ 联合改性效果受砂层形状影响：方形砂格构>铺砂>菱形砂格构>拱形砂格构

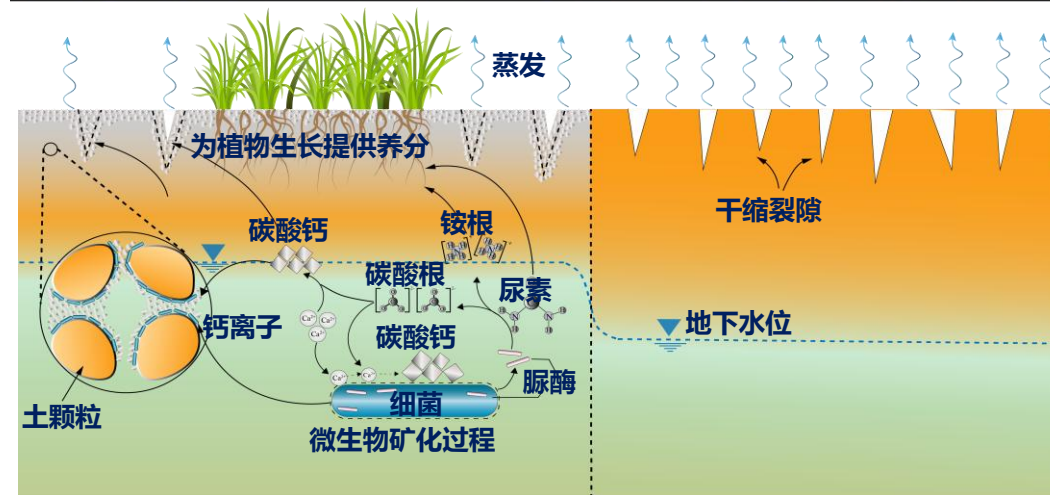
土体Bio-Barrier: 原位应用1

南京地区典型黏性土边坡龟裂抑制



	Control	BS	0.5M CS	1.0M CS	Two-phase MICP	One-phase MICP		
Field No.	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
W-D cycles								
1								
2								
3								
5								

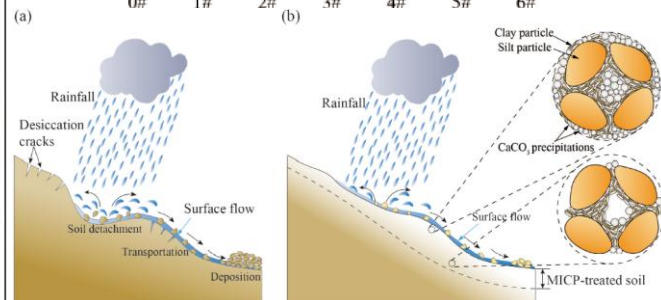
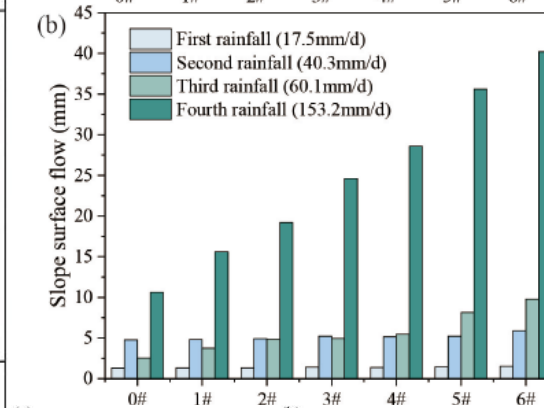
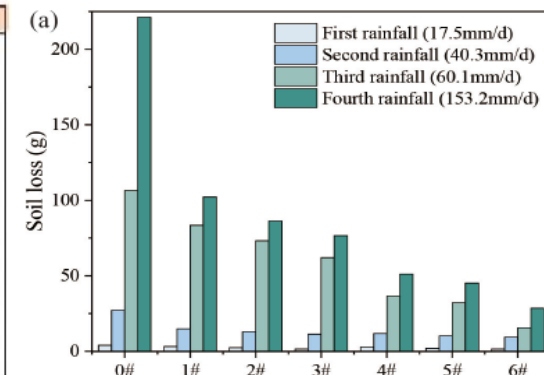
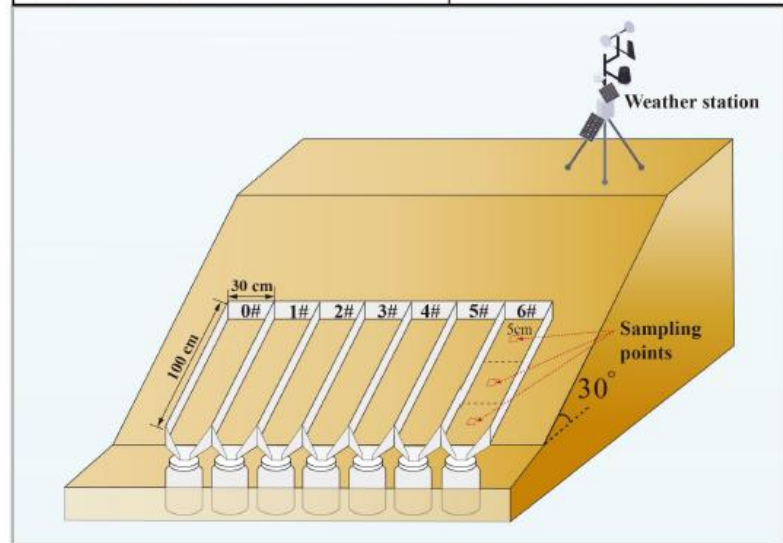
干湿循环后裂隙率略有升高，MICP仍保持较好抑裂效果



- 经历多次干湿循环作用后，裂隙修复效果无明显变化，呈现较好的耐久性
- 生态效益：MICP对植物生长有一定促进作用-提供有机养分，提高土体持水能力

土体Bio-Barrier: 原位应用2

南京地区典型土质边坡降雨侵蚀防控



MICP大大降低边坡土体侵蚀量，具有很好的侵蚀防控效果

土体Bio-Barrier: 原位应用3

厦门隧道工程创面扬尘长效抑制

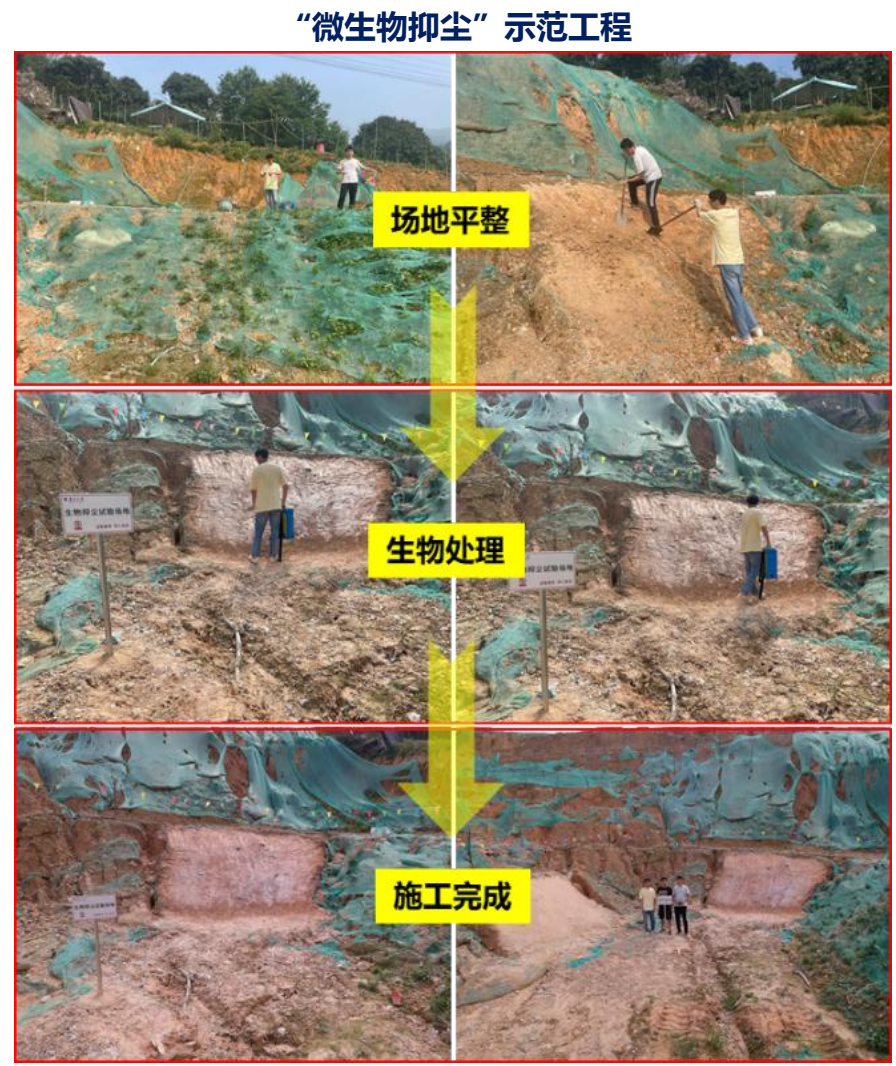


表1 场地扬尘监测及MICP抑尘效果评价

参数指标	场地自然环境	场地1	场地2
PM2.5	25	160	50
PM10	36	203	87
IAQI _{PM2.5}	35.71	210	68.8
IAQI _{PM10}	36	126.5	68.5
AQI	36	210	68.8
空气质量指数级别	一级	五级	二级
空气质量指数类别	优	重度污染	良



效果评价

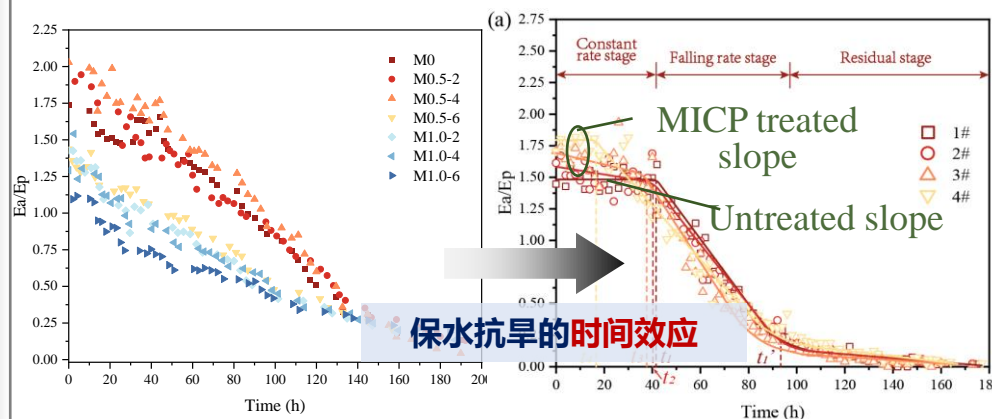
MICP对扬尘抑制具有显著效果，有效改善施工场地环境

土体Bio-Barrier: 原位应用4

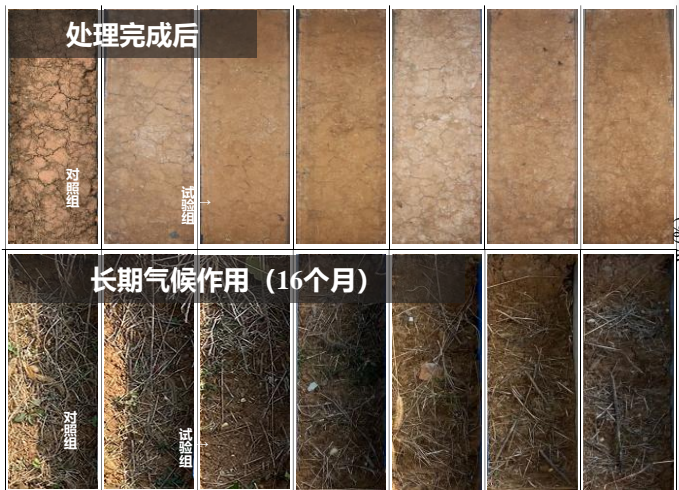
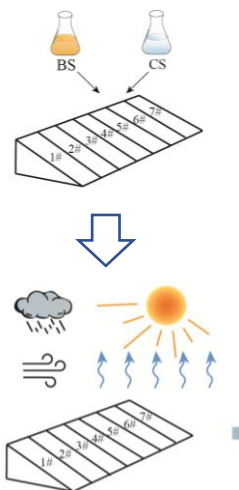
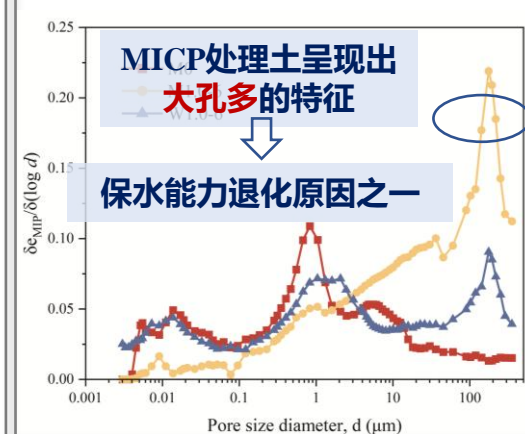
长期气候承载力



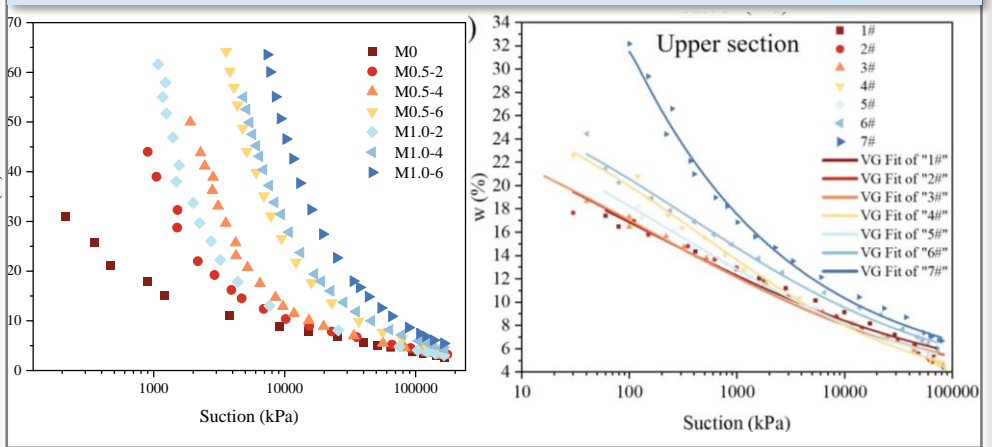
蒸发速度变化



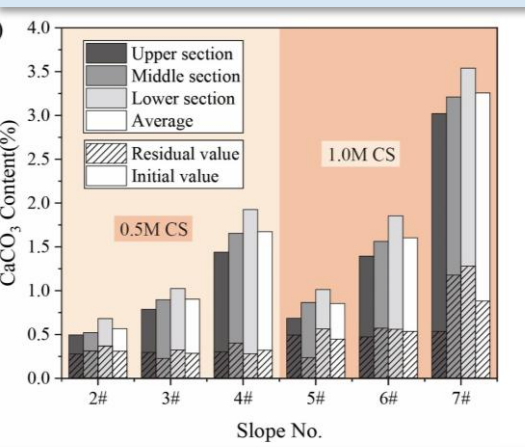
微观孔隙特征



保水能力变化



碳酸钙含量与分布



MICP有效减缓土体蒸发速度，其作用具有一定的时间效应

复杂场景高效处理

问题与难点

- 环境敏感性导致细菌活性下降、**尿素水解受阻**
- 低渗结构限制溶液渗流，**MICP处理深度受限**
- **细菌培养与运输成本高**，制约规模化应用

研究思路

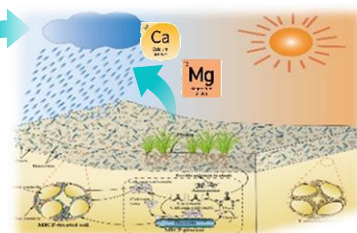
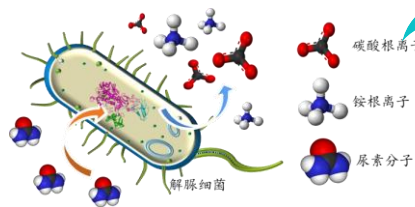
1. 优化尿素水解环境，提高尿素水解利用率

- ✔ pH环境
- ✔ 生存空间
- ✔ 营养物质
- ✔ 氧气获取

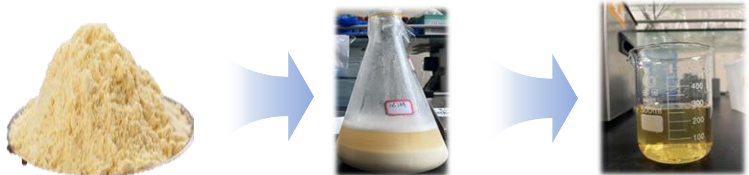
促进尿素水解程度
充分发挥细菌活性



2. 评估缓冲效能需求，研发不同缓冲层构建技术

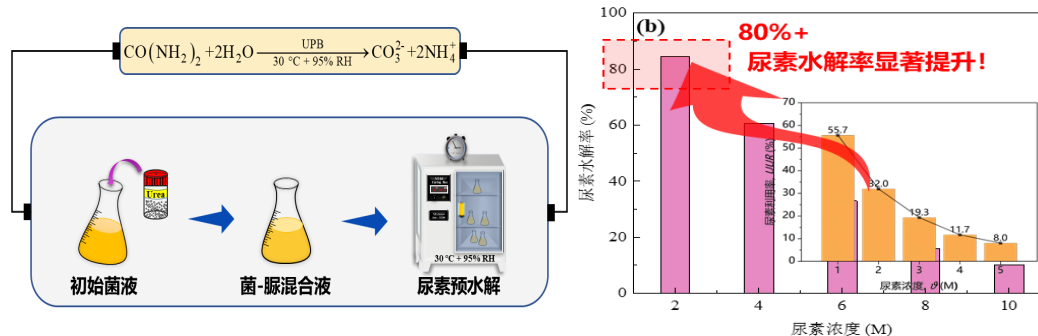


3. 以“酶”代“菌”，采用低成本脲酶来源

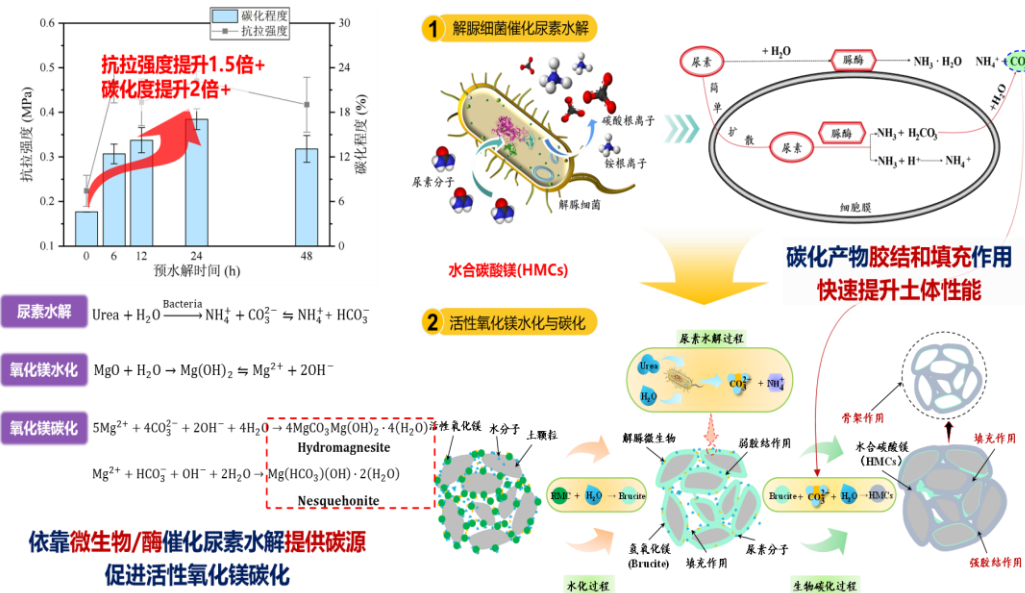


创新技术

■ 提出了**尿素预水解技术**，尿素水解率可提升至**80%+**



■ 开发了**微生物/酶诱导氧化镁碳化(MIMC/EIMC)缓冲层构建技术**，固化性能提升**1.5倍+**



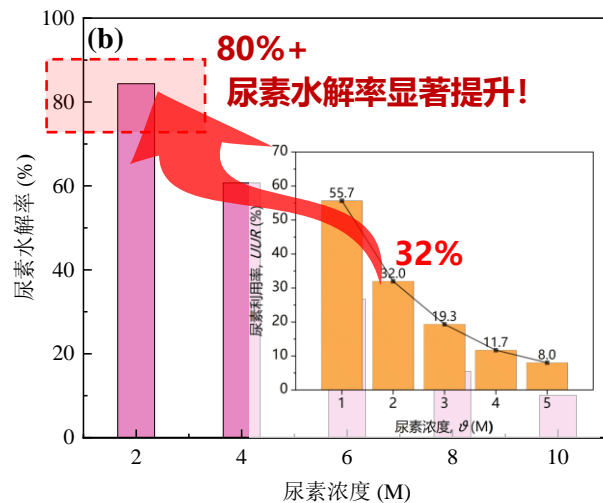
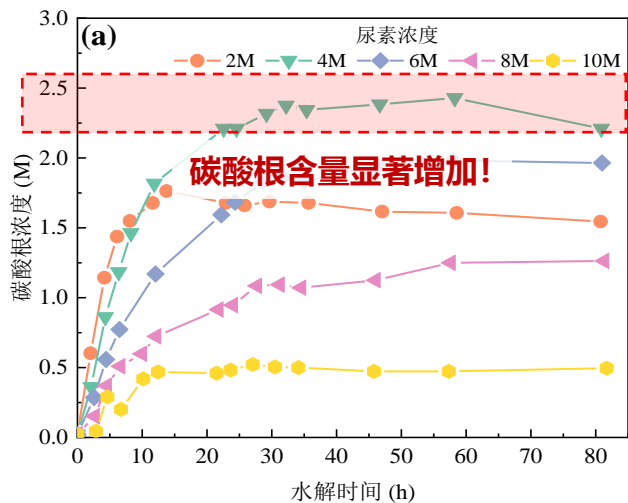
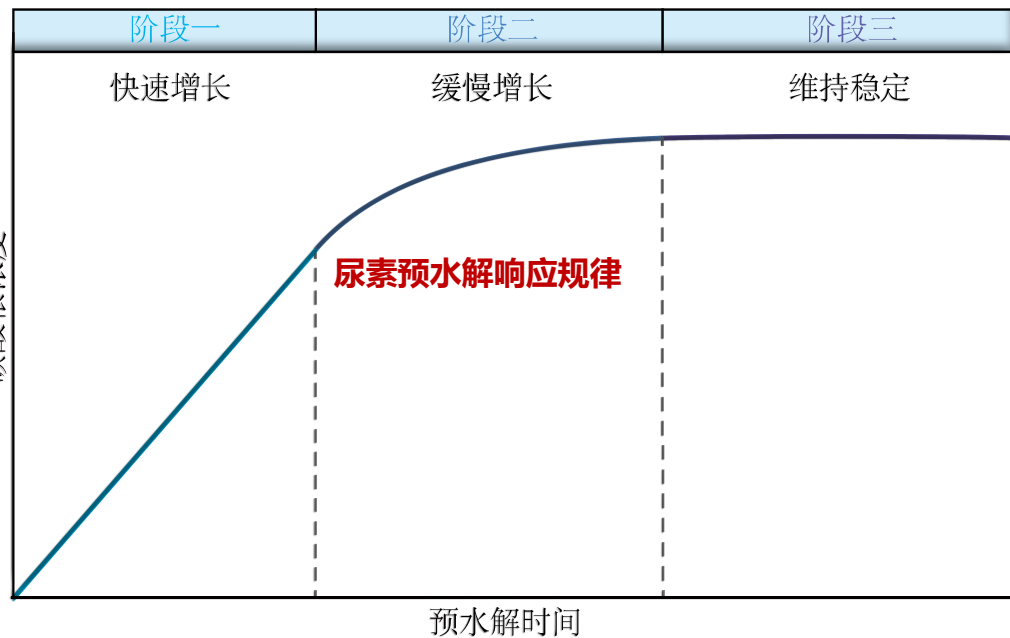
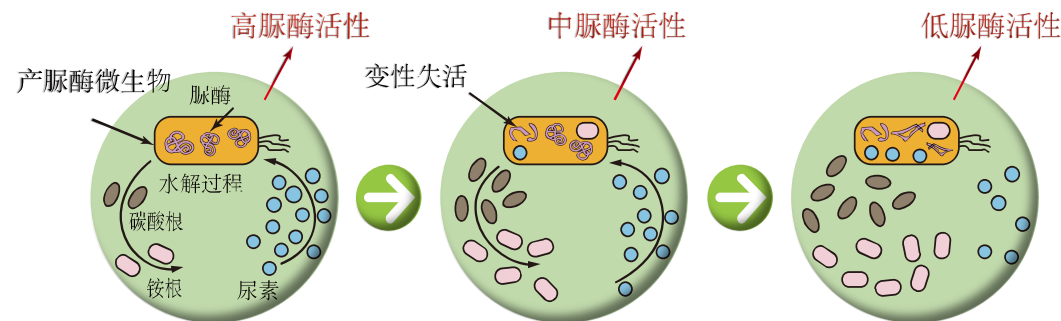
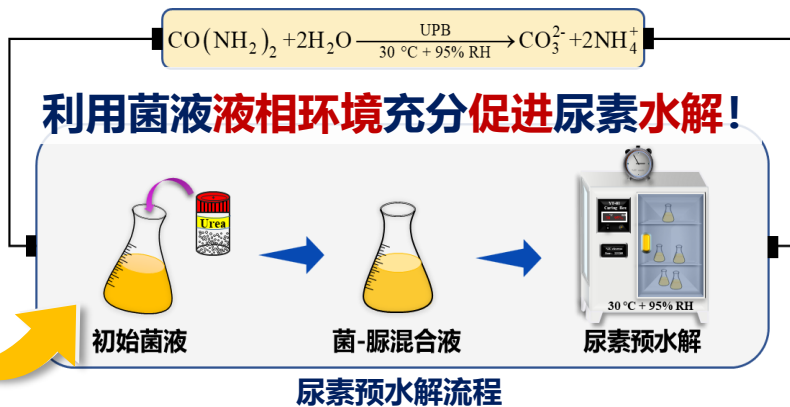
尿素预水解技术

提出了尿素预水解技术，阐明了尿素预水解过程响应规律

营养物质 氧气 pH
生存空间 ...
温度 环境适应性

降低细菌活性

严重影响尿素水解效率



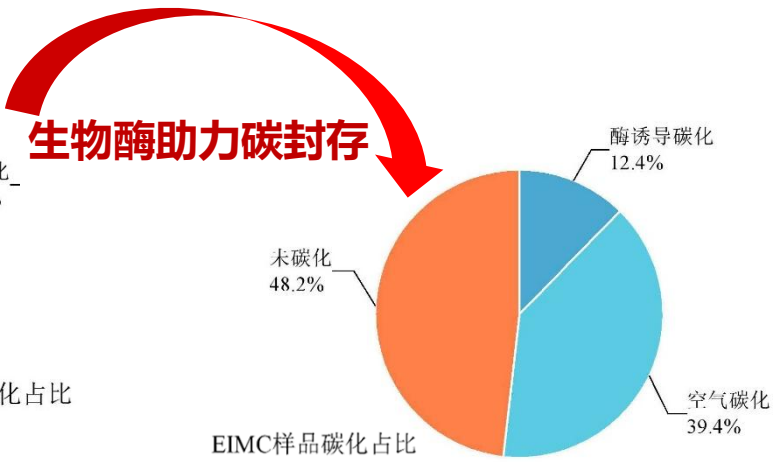
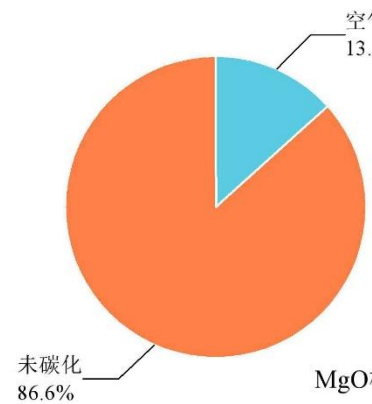
尿素预水解策略显著提高碳源供应效率，为生物屏障构建提供基础保障

酶诱导氧化镁碳化(EIMC)技术

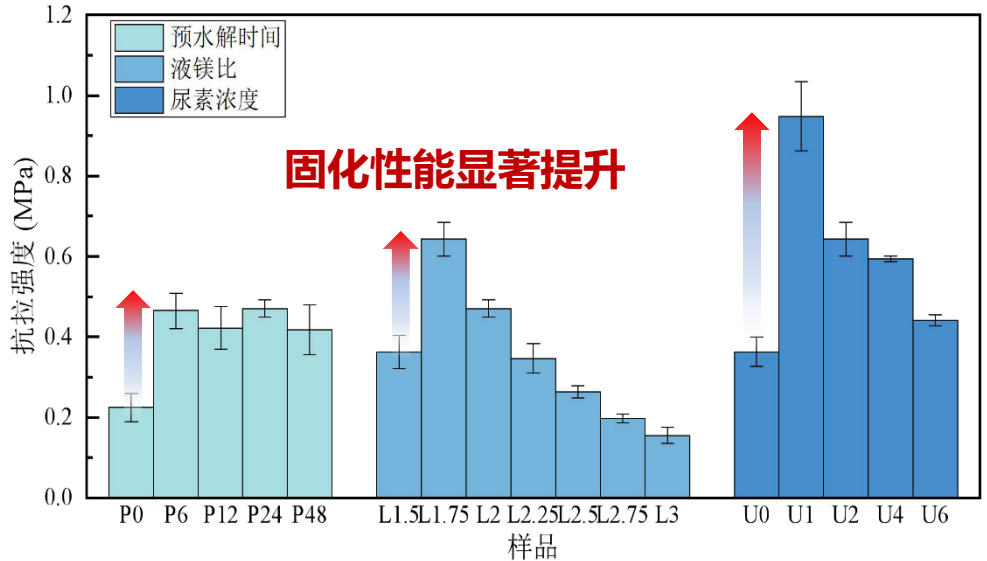
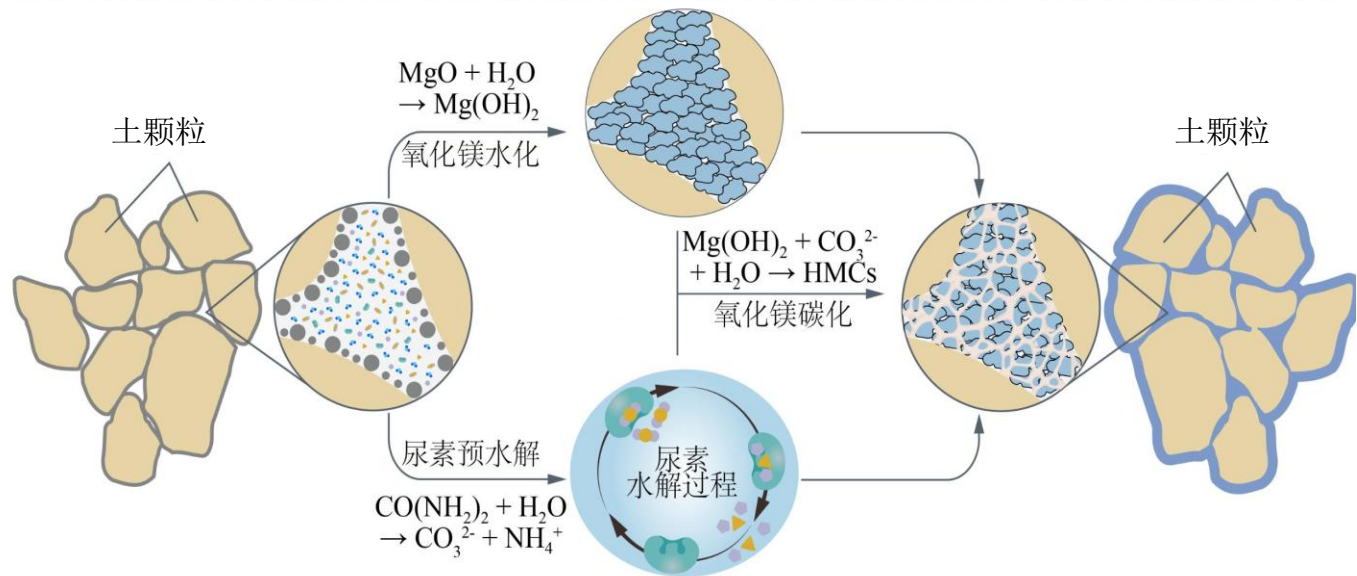
开发了基于尿素预水解的EIMC缓冲层构建技术，揭示了EIMC的碳封存效应



菌液 大豆脲酶溶液
以“酶”代“菌”，实现降本增效



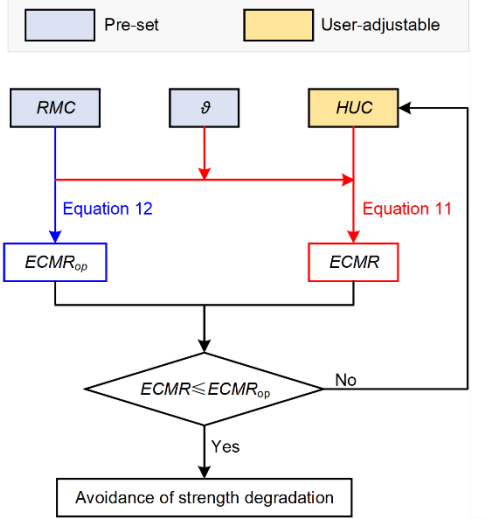
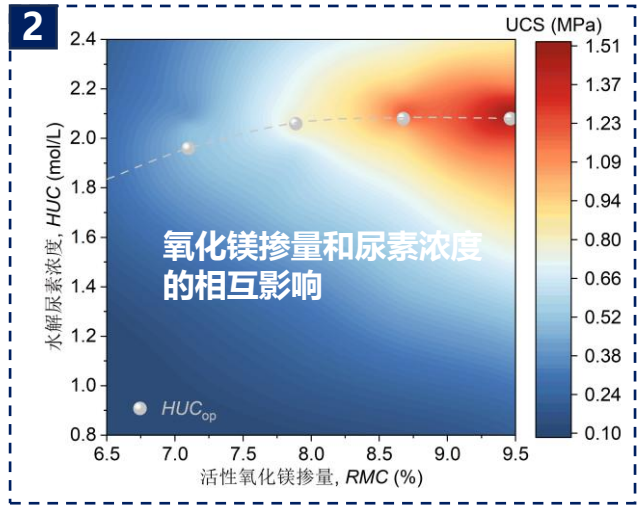
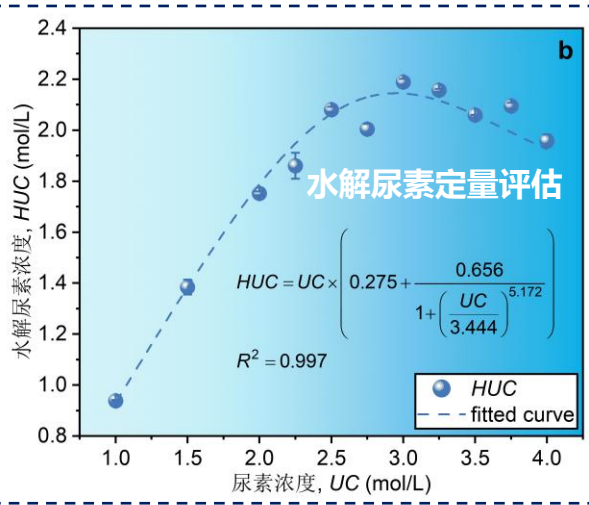
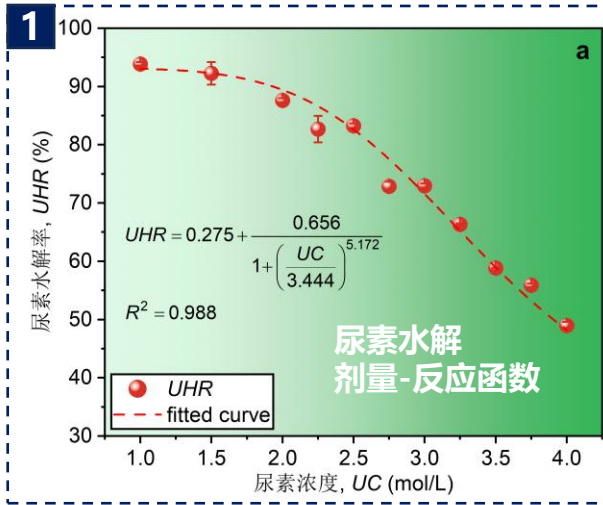
- 水
- 尿素
- CO₃²⁻
- NH₄⁺
- 脲酶
- 氧化镁
- 氢氧化镁
- 水合碳酸镁



EIMC技术构建镁基生物屏障，降本增效，实现高效碳封存潜能

微生物加速碳化性能控制与预测

阐明了关键因子对固化性能的互馈影响，提出有效碳镁比实现缓冲性能可调控



建立尿素水解反应函数

揭示关键因子的相互作用关系

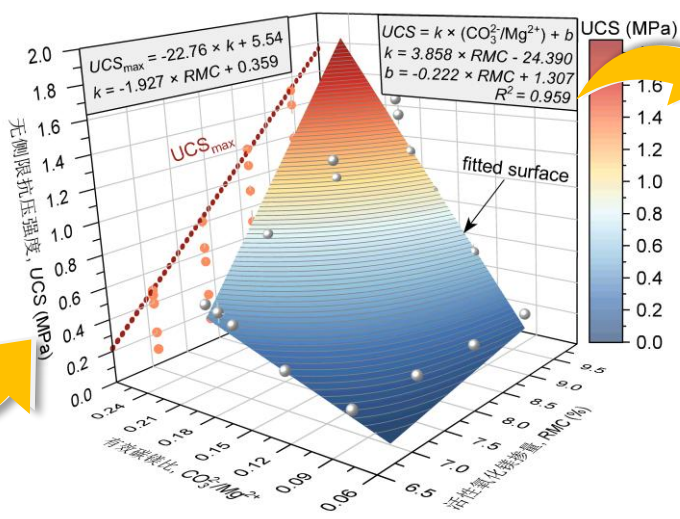
有效碳镁比

可利用碳酸根

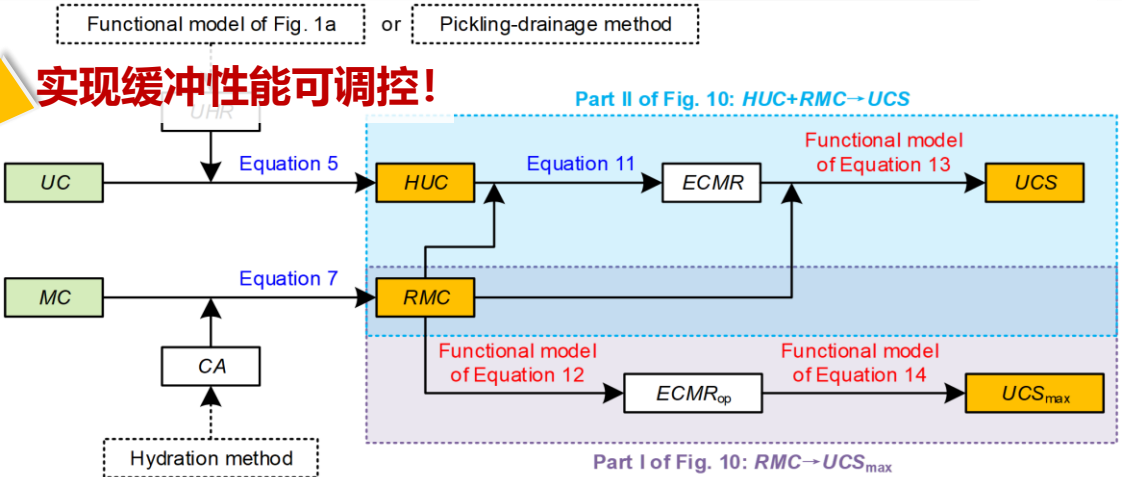
有效镁

$$ECMR = \frac{n_{CO_3^{2-}}}{n_{Mg^{2+}}}$$

性能控制与预测模型



实现缓冲性能可调控!



基于“有效碳镁比(ECMR)”的强度控制与预测模型框架

通过建立尿素水解反应模型，探明氧化镁掺量-尿素浓度相互作用，实现固化性能的控制与预测

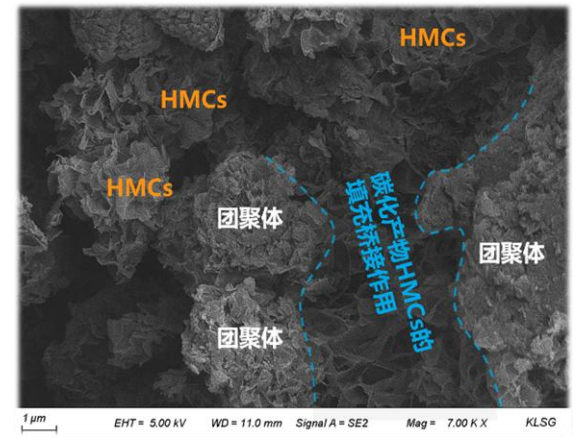
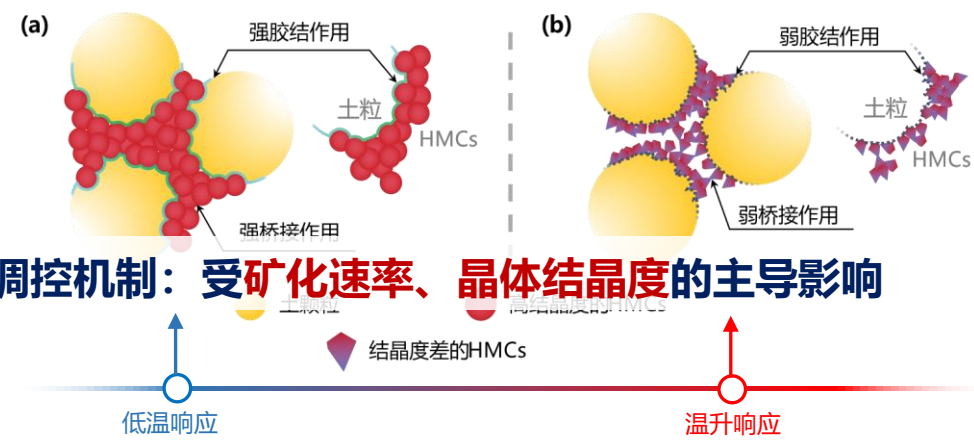
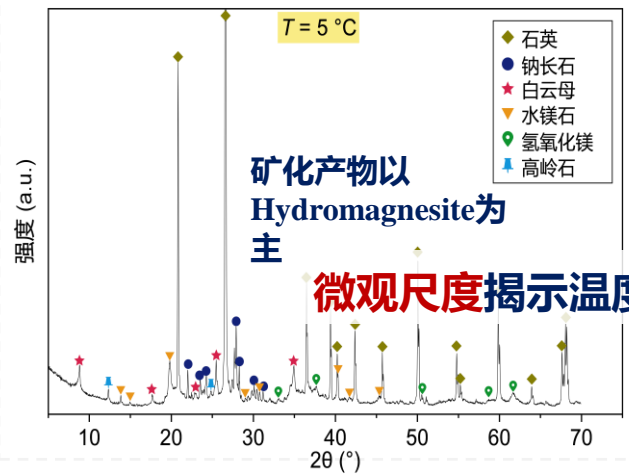
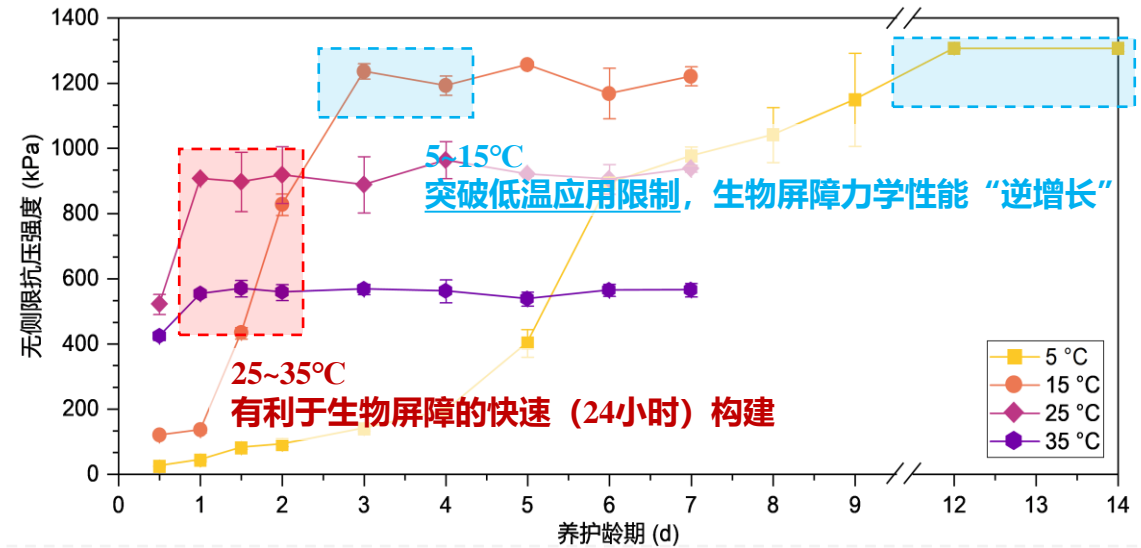
镁基Bio-Barrier 气候响应: 温度

揭示了镁基生物屏障在不同温度气候下的性能响应



寒区和季节性寒区在我国广泛分布

MIMC能否适应不同气候?

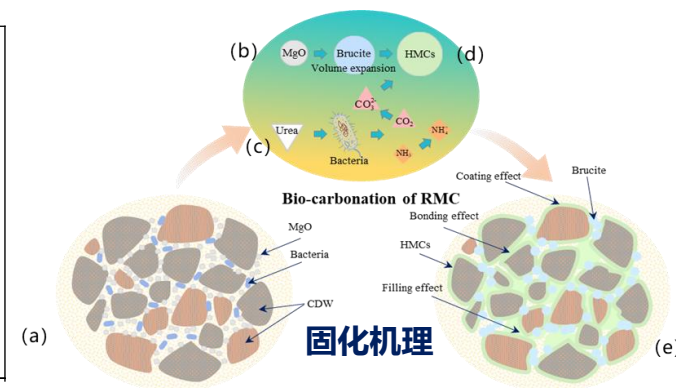
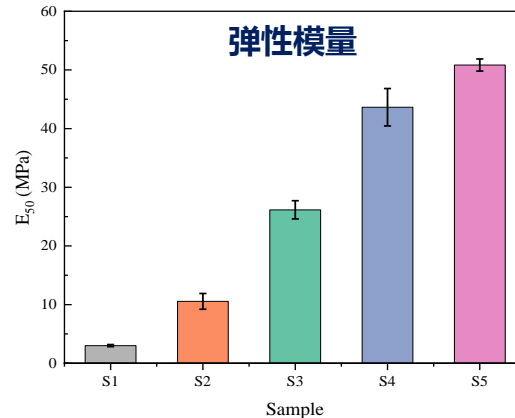
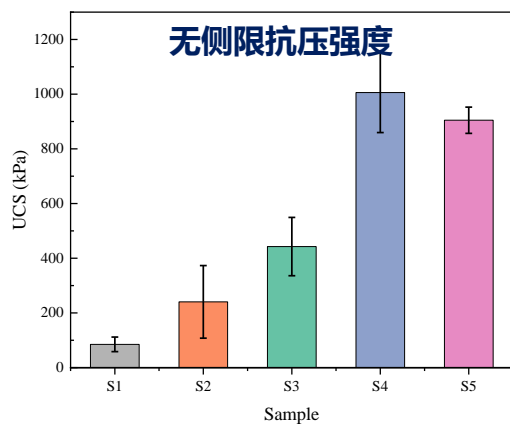
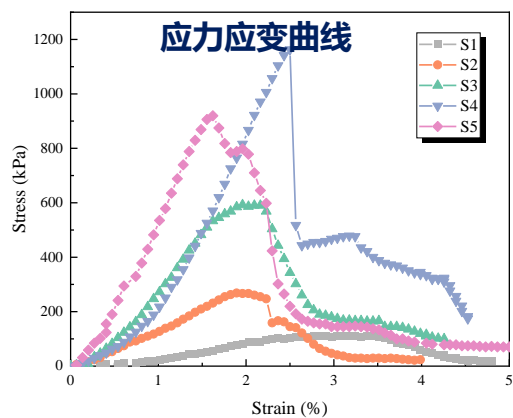


微观尺度揭示温度调控机制: 受矿化速率、晶体结晶度的主导影响

低温有利于改善胶结物产量和成矿晶型, 提高固化性能; 升温有利于实现快速固化

镁基Bio-Barrier 工程应用-南京尾矿库资源化利用

固废资源化利用



实现了建筑垃圾、尾矿渣土、废弃钢渣等固体废物的资源化利用，助力生态文明建设

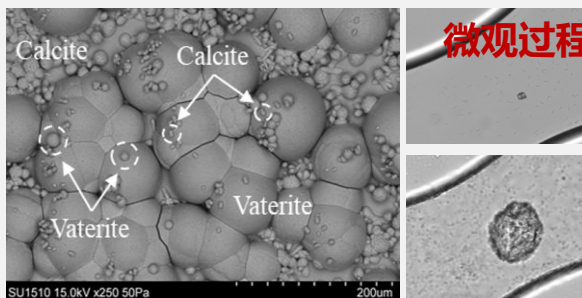
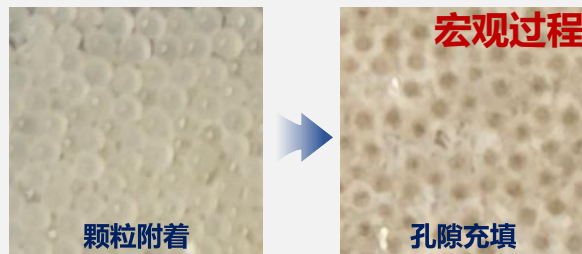
Bio-Barrier研究进展

复杂场景



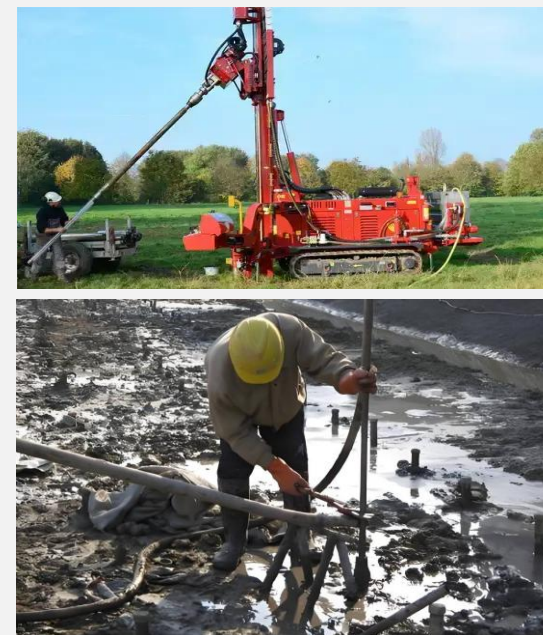
挑战：高效处理

宏-微观过程



挑战：连续表征

原位效果



挑战：精准评价

岩体Bio-Barrier

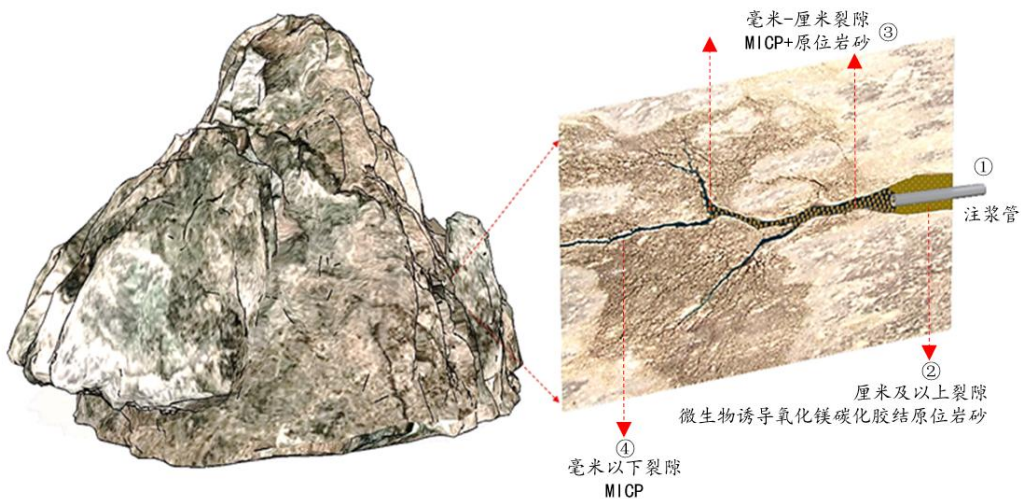
问题与难点

岩石裂隙多尺度性 自然界中存在的裂隙多为由大开度逐渐过渡到小开度的多尺度裂隙

- 传统修复技术可以对**单一尺度**的裂隙达到较好的修复效果，但往往难以同时对所有裂隙达到**高桥接、高力学强度、高利用率**

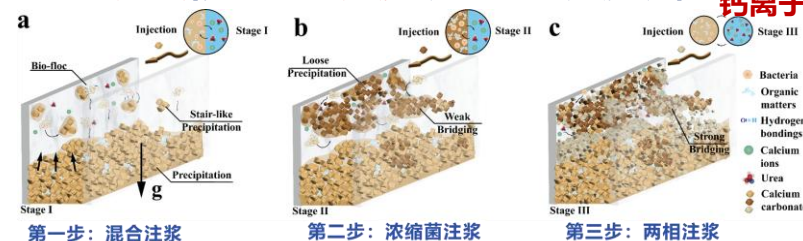
研究思路

- 针对不同开度，采取不同的微生物矿化方法，提出基于微生物矿化作用的**岩石多尺度裂隙修复方法**



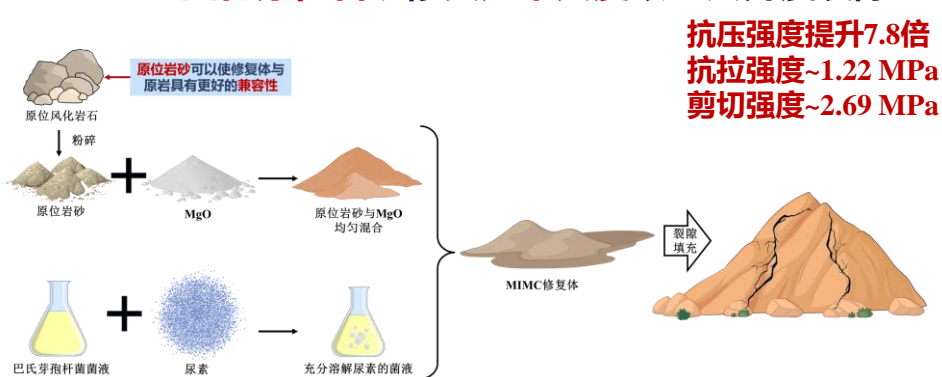
创新技术

- 三步法修复毫米尺度以下微小开度裂隙**



桥接率提高8.9倍
胶结强度提升7.4倍
钙离子利用率提升6.3倍

- MIMC固化原位岩砂修复厘米尺度以上大开度裂隙**



抗压强度提升7.8倍
抗拉强度~1.22 MPa
剪切强度~2.69 MPa

实现了多尺度风化裂隙岩层的缓冲层构建

岩体Bio-Barrier: 三步法 (≤毫米级裂隙)

针对风化裂隙岩层缓冲层构建提出三步法注浆策略

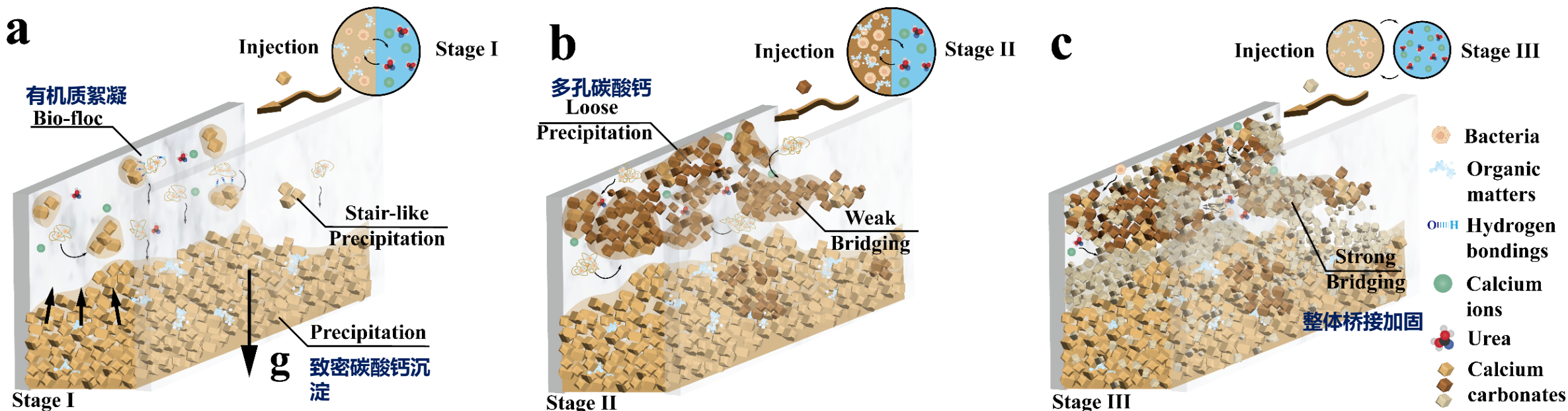
注浆策略

- Stage I 普通菌($OD_{600}=1.0$)和胶结液(1M)混合注入
- Stage II 浓缩菌(5X)和胶结液(1M)混合注入
- Stage III 普通菌($OD_{600}=1.0$)和胶结液两相注入

注浆步骤

目的:

- Stage I 利用重力作用下的**有机质絮凝**，在裂隙底部形成**致密的碳酸钙沉淀**
- Stage II 借助浓缩菌形成**大量体积的多孔碳酸钙**，高效填充裂隙的中上部分。
- Stage III 两相注入的**低粘稠度浆液**填充碳酸钙内部孔隙，起到**整体桥接加固**作用



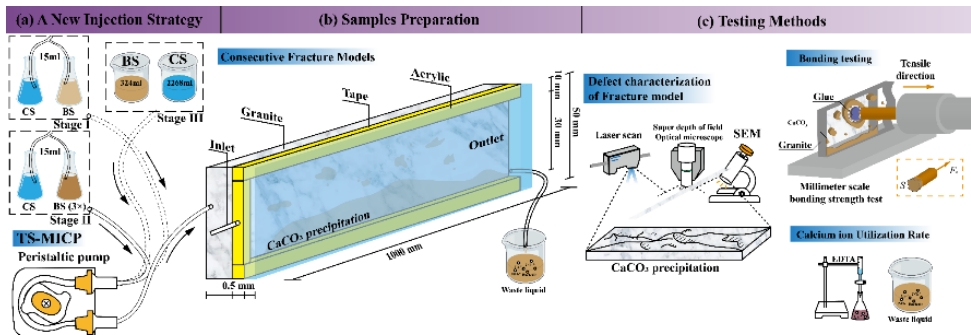
第一步：混合注浆
(菌液和胶结液一相混合)

第二步：浓缩菌注浆
(浓缩菌液和胶结液一相混合)

第三步：两相注浆
(菌液和胶结液两相分别注入)

岩体Bio-Barrier: 桥接率、力学强度、利用率

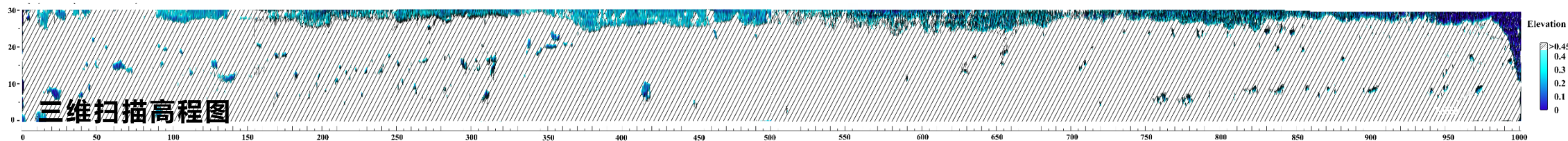
成功将三步法应用于米级长裂隙模型，并相较于传统注浆材料显著提升桥接率、力学强度和利用率



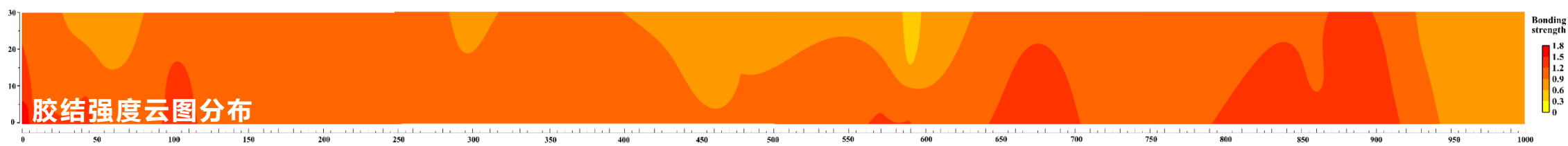
- 提高裂隙封堵的桥接率8.9倍 (10%至89%)
- 提高碳酸钙分布均匀性3.3倍 (变异系数降低334.4%)
- 提高碳酸钙胶结强度7.4倍 (从0.138 MPa达到1.023 MPa)
- 提高钙离子利用率6.3倍 (12.3%至90%)
- 提高碳酸钙分布均匀性5.67倍 (0.40至0.06)



↑ 8.9倍



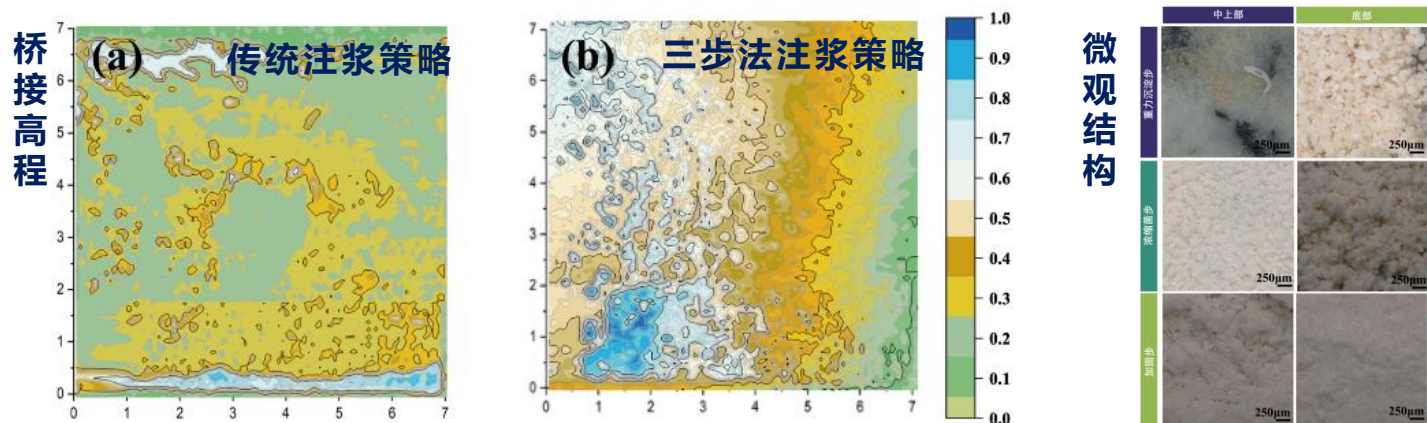
↑ 3.3倍



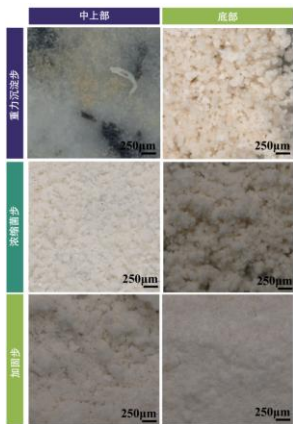
↑ 7.4倍

岩体Bio-Barrier: 桥接率、力学强度、利用率

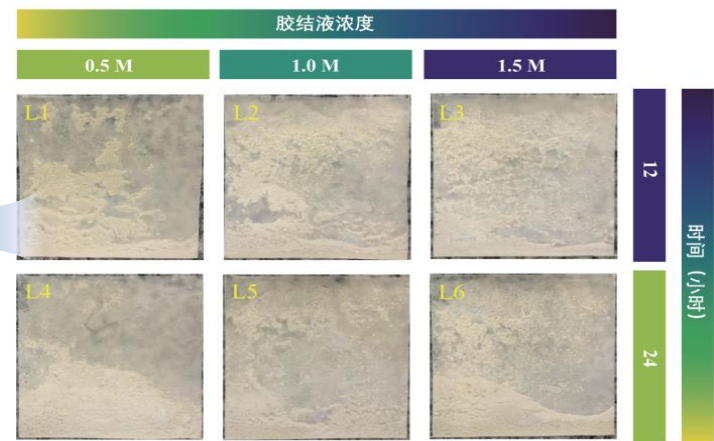
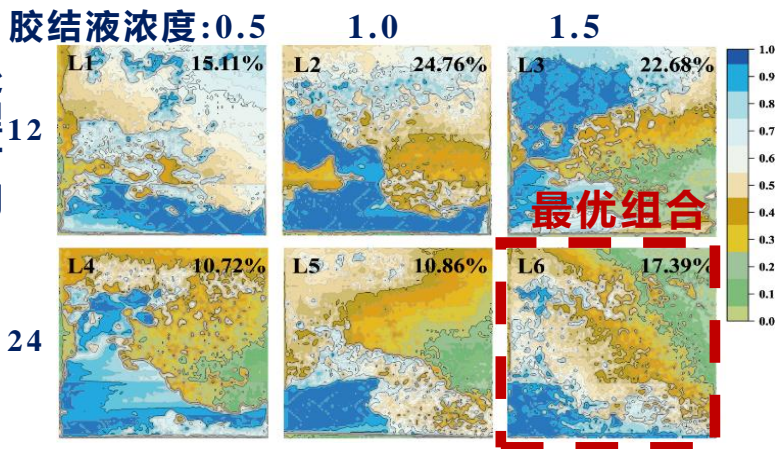
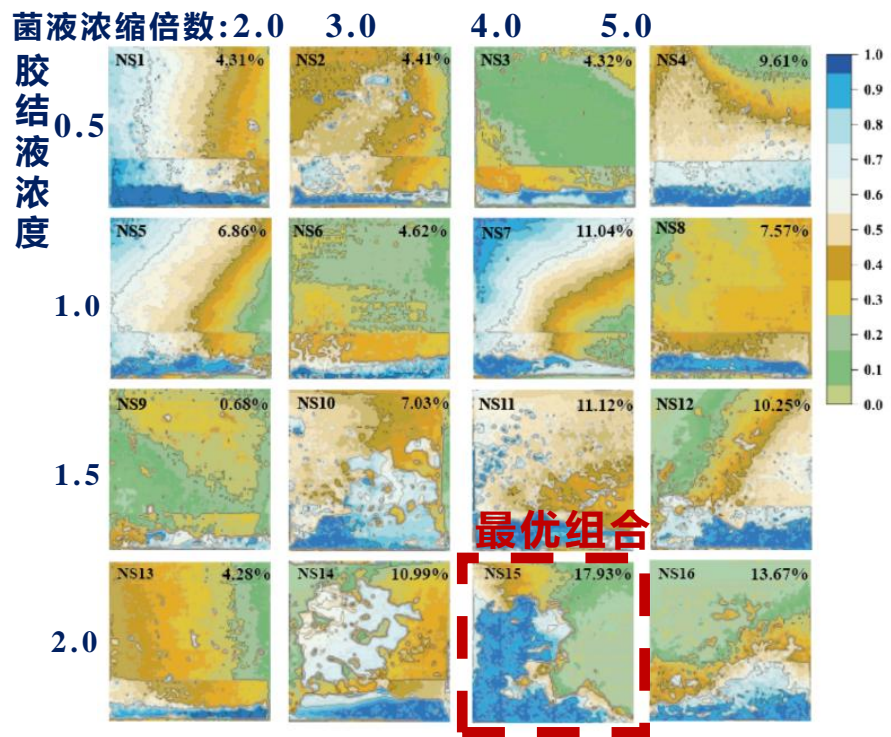
在非贯通裂隙中进一步优化各步骤最优组合方案, 实现桥接率、力学强度的大幅提高



微观结构



- 三步法注浆策略在非贯通裂隙中同样有效
- 相比传统MICP, 三步法提升非贯通岩石裂隙的桥接率9.67倍 (2.56%至24.76%), 力学强度从0 kPa提升至254.2 kPa

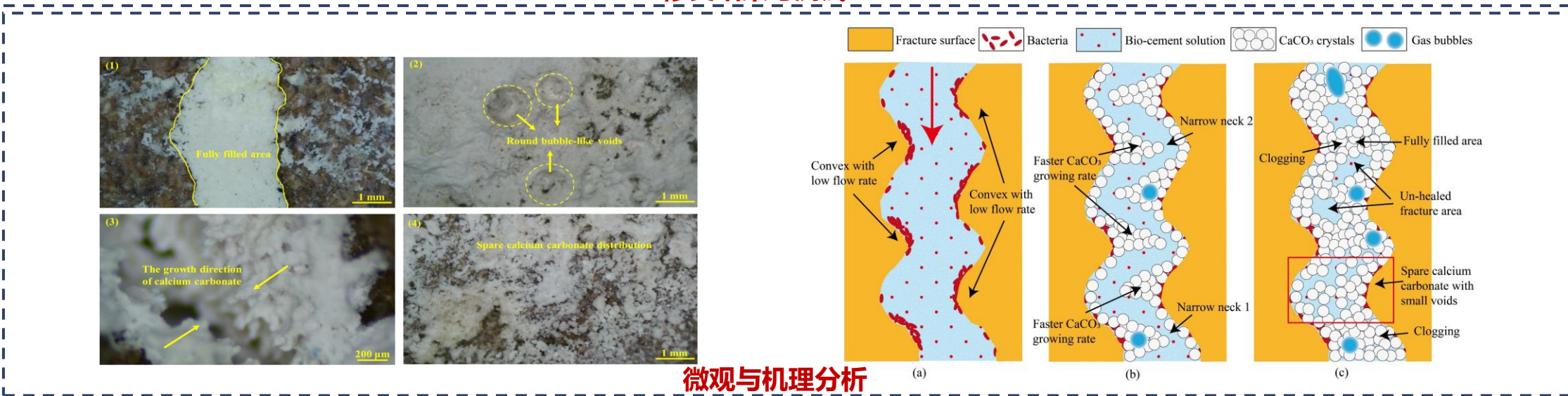
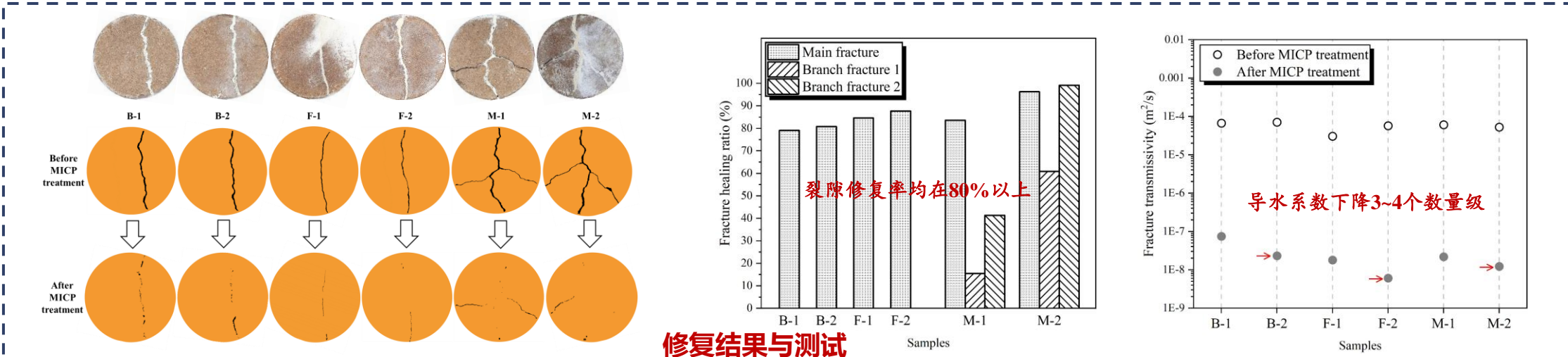


确定了各处理步骤关键影响因素的最优组合方案:

- 第一步: 胶结液浓度2.0 M, 菌液胶结液体积比为2: 1, 静置处理时间为24小时;
- 第二步: 胶结液浓度2.0 M, 浓缩菌液倍数为4.0, 处理时间为24小时;
- 第三步: 胶结液浓度为1.0 M, 处理时间为12小时

岩体Bio-Barrier: 裂隙形态的影响

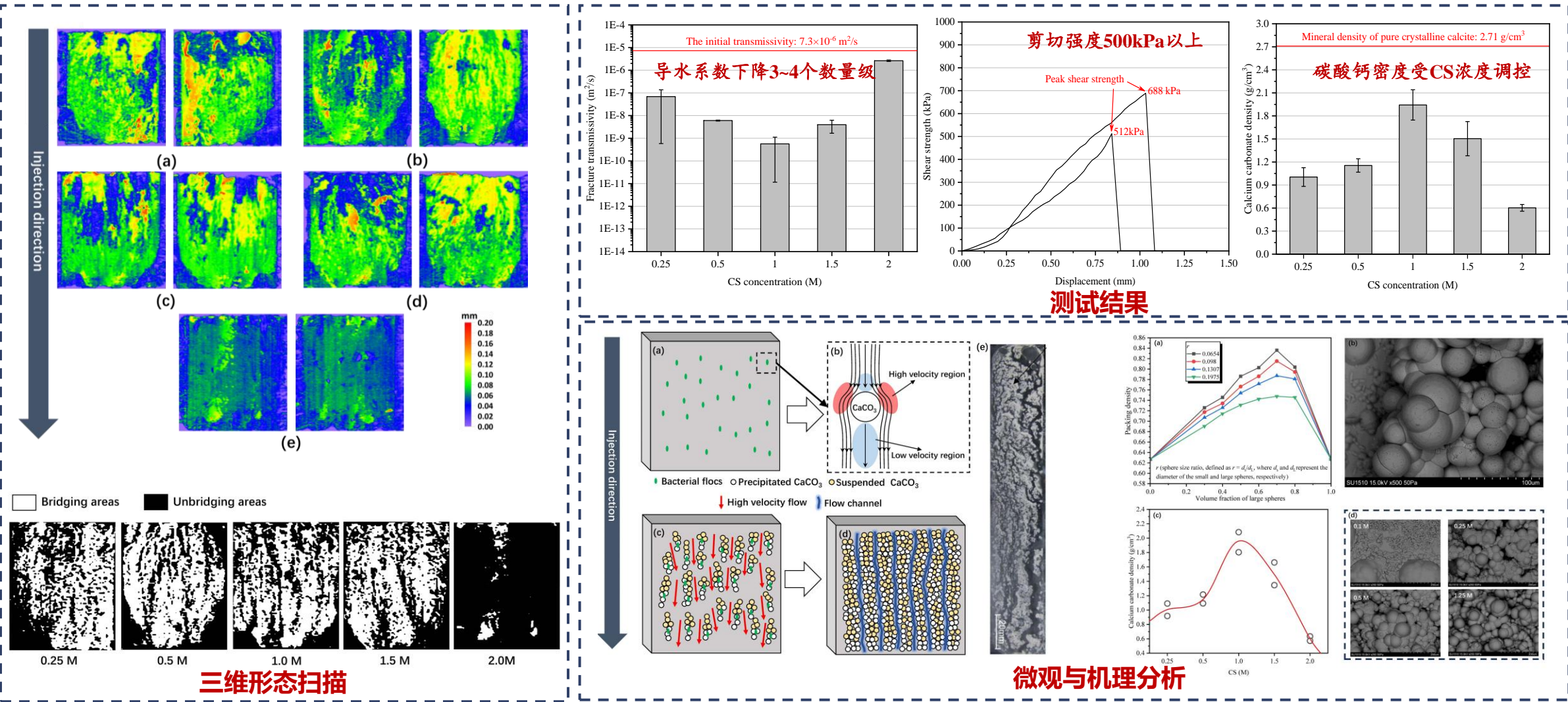
模拟自然风化裂隙的不同形态和性质 (分支、贯通、非贯通)



MICP修复机理: MICP更容易优先修复贯通裂隙面的凸起处, 微生物活动会影响碳酸钙的分布和形态

岩体Bio-Barrier: 钙离子浓度调控作用

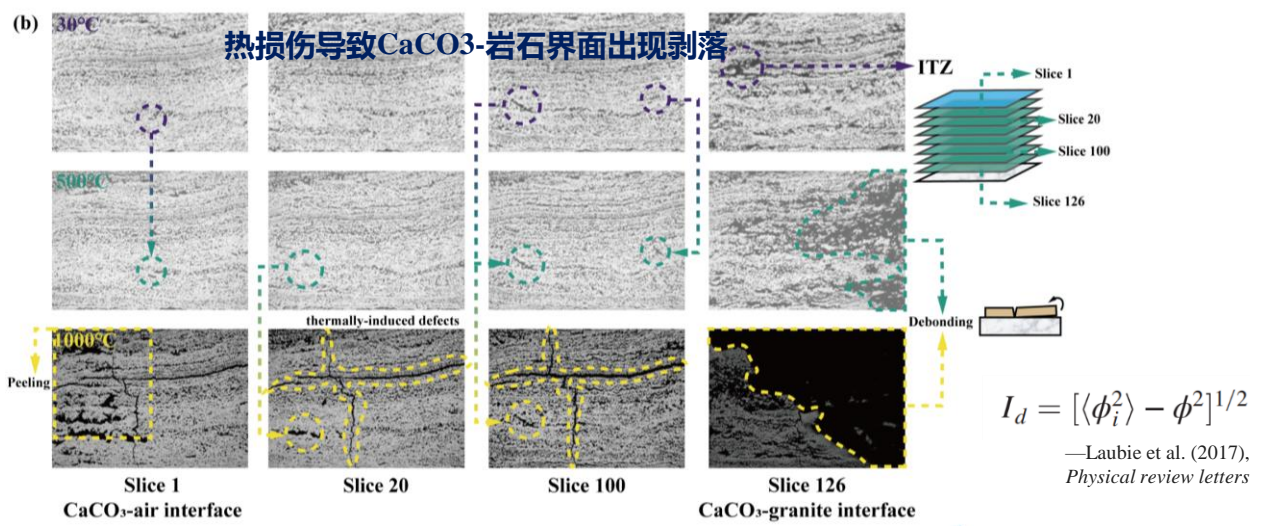
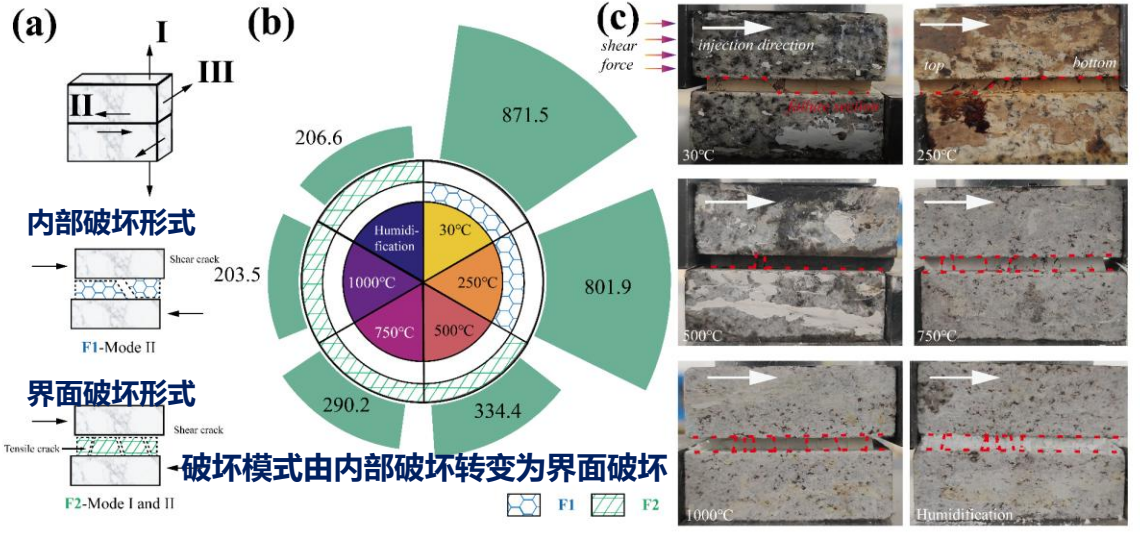
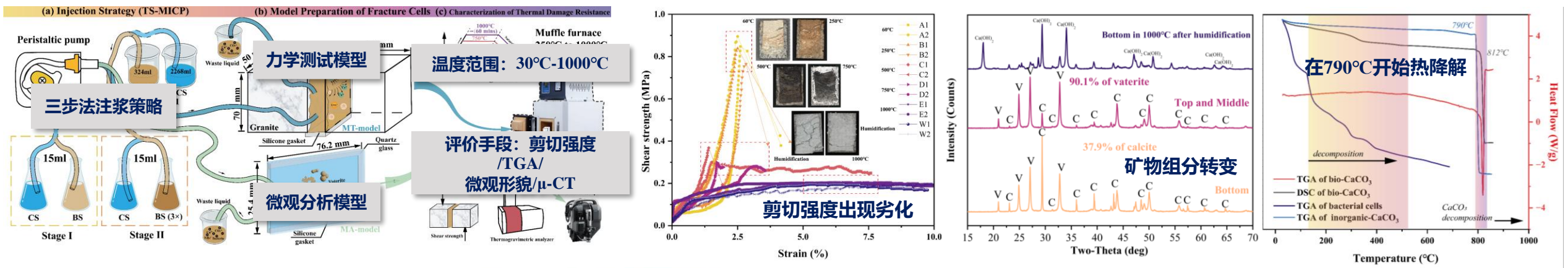
基于反应时间和钙离子浓度揭示MICP修复裂隙的抗渗加固机制



MICP修复裂隙抗渗加固机制: 钙离子浓度通过调控碳酸钙密度控制MICP修复岩石裂隙的抗渗加固效果

岩体Bio-Barrier: 温度热冲击效应

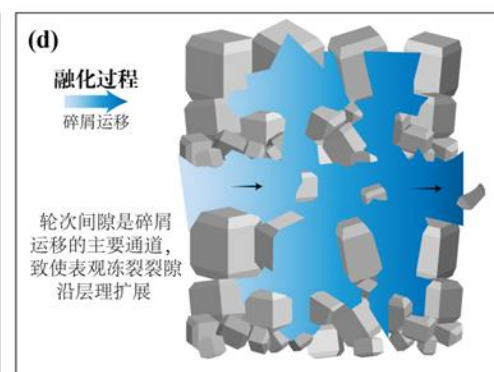
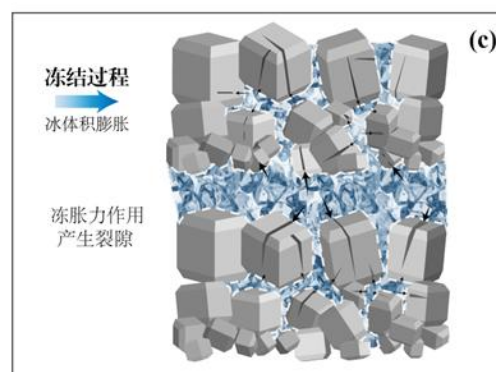
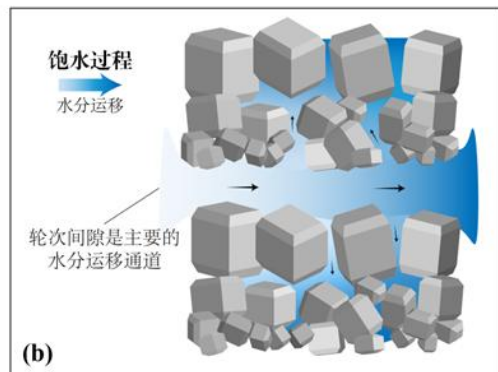
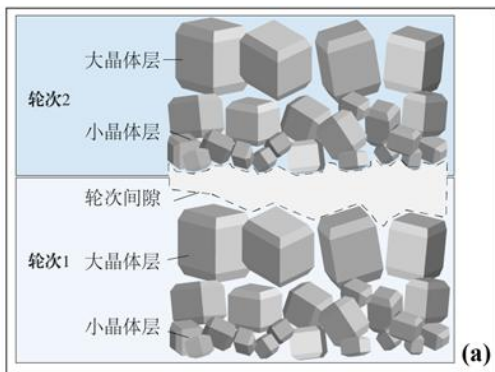
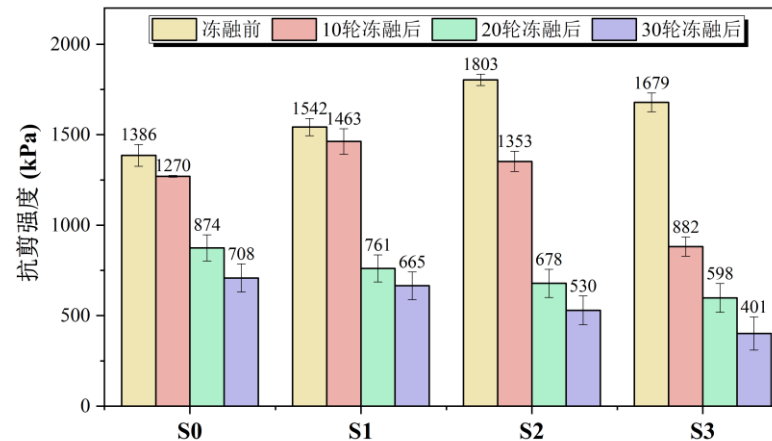
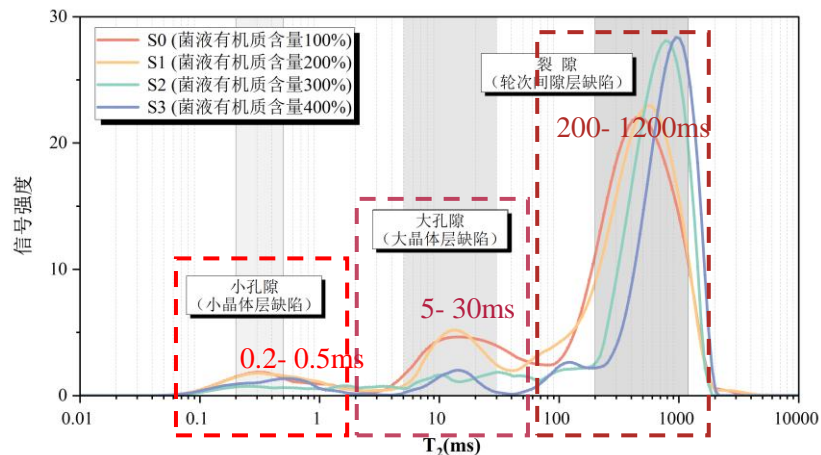
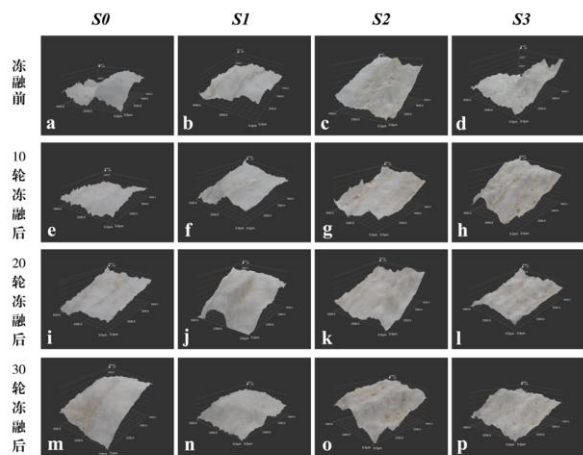
探究三步法注浆修复裂隙后的热损伤性能，定量确定了热损伤劣化和结构演化过程



引入基于 μ -CT扫描结果的混沌指数 (I_d) 来可以很好的表征缺陷分布的均匀性; 在有机物作用下形成的氢键在550°C时完全断裂, 导致力学强度的降低和破坏模式的改变; 生物矿化形成的碳酸钙在812°C分解为CaO, 比无机碳酸钙具有更高的热稳定性 (22°C)

岩体Bio-Barrier: 温度冻融效应

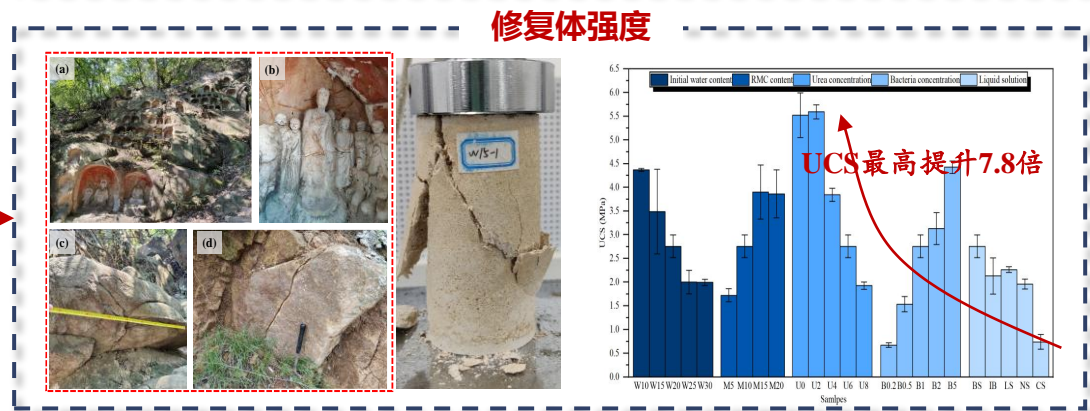
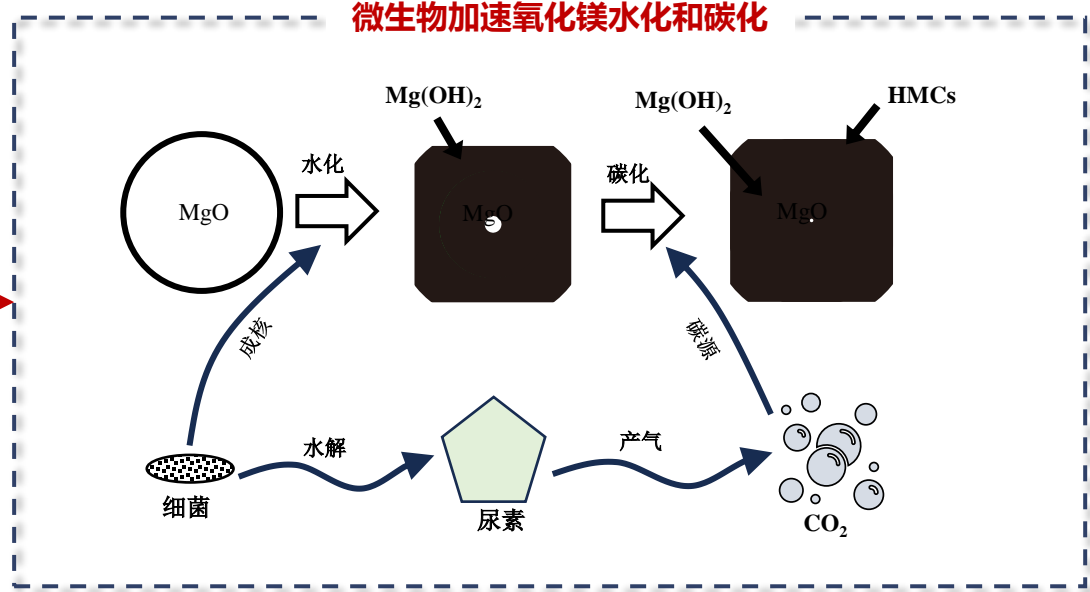
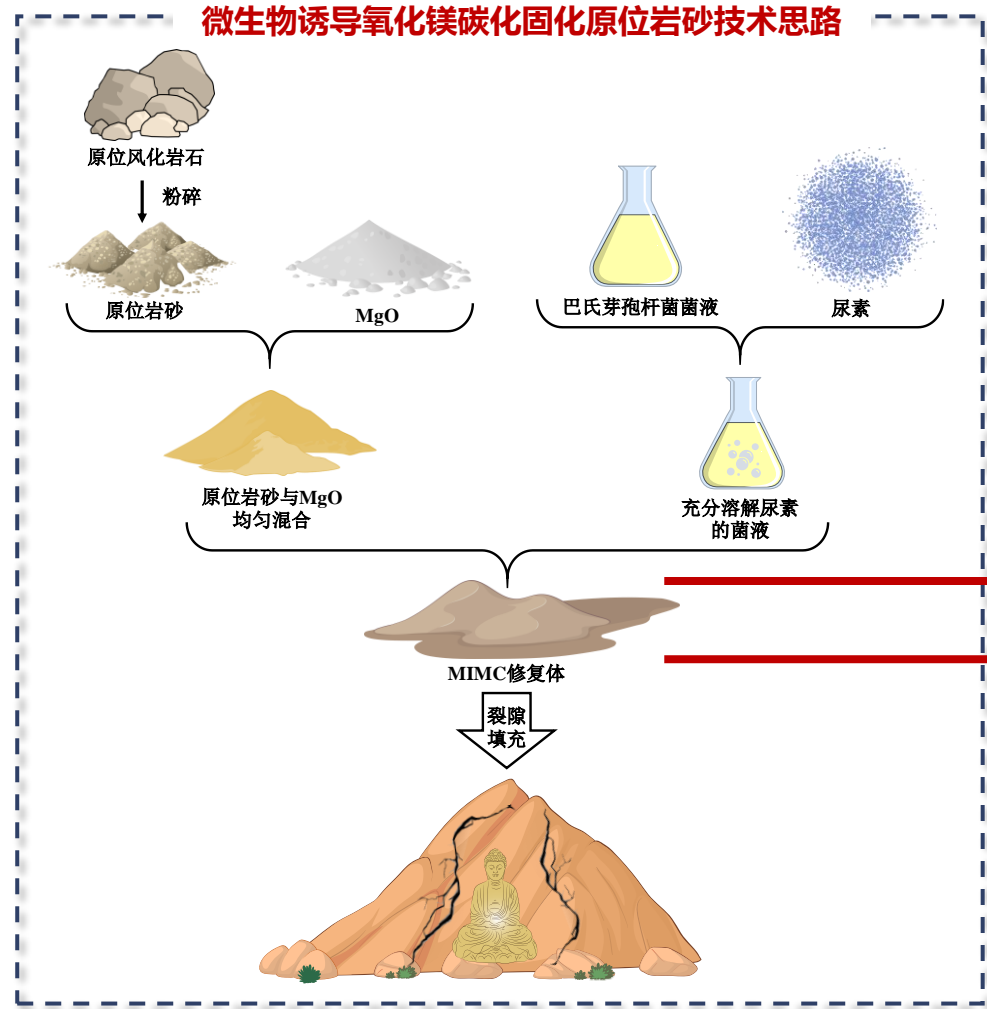
阐明了三步法注浆修复裂隙后的冻融演化特性，定量确定了剪切强度和孔隙结构演化过程



- 在30次冻融循环后，抗剪强度降幅最高达到76%
- 冻融作用通过改变MICP胶结体的孔隙结构影响其物理力学特性和冻融响应特性
- 纳米压痕测试揭示胶结体的抗剪强度与晶体强度存在着一定的关联性

岩体Bio-Barrier: MIMC固化原位岩砂技术 (≥厘米级裂隙)

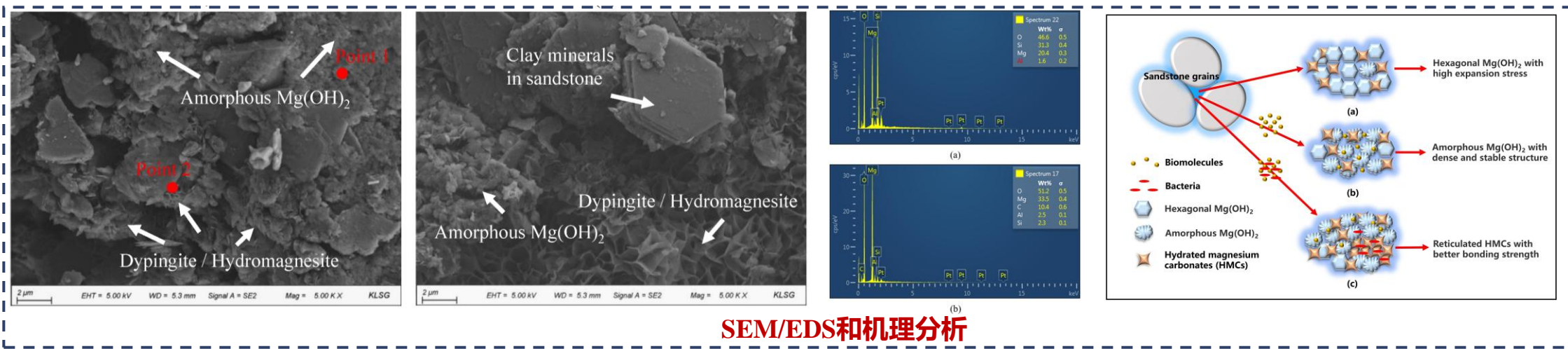
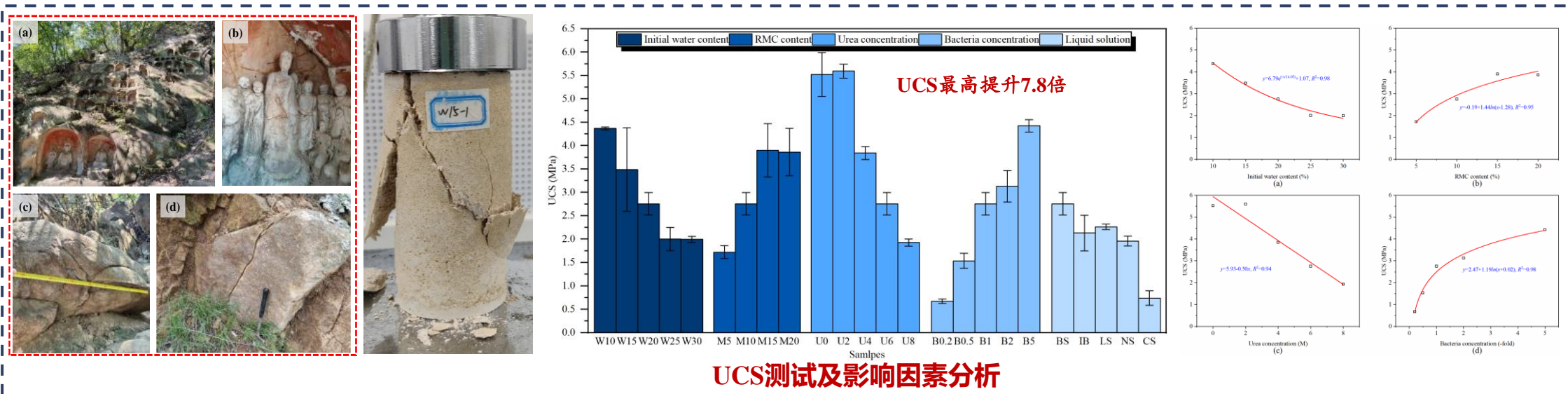
微生物诱导氧化镁碳化 (MIMC) 固化原位岩砂修复厘米以上大开度风化裂隙



利用微生物作用加速氧化镁水化和碳化，联合原位岩砂使修复体与原岩具有更好的兼容性，单次处理即可修复大开度裂隙，修复体强度可提升7.8倍，达到5 MPa以上

岩体Bio-Barrier: MIMC固化机理

基于UCS测试揭示了MIMC固化原位岩砂机理

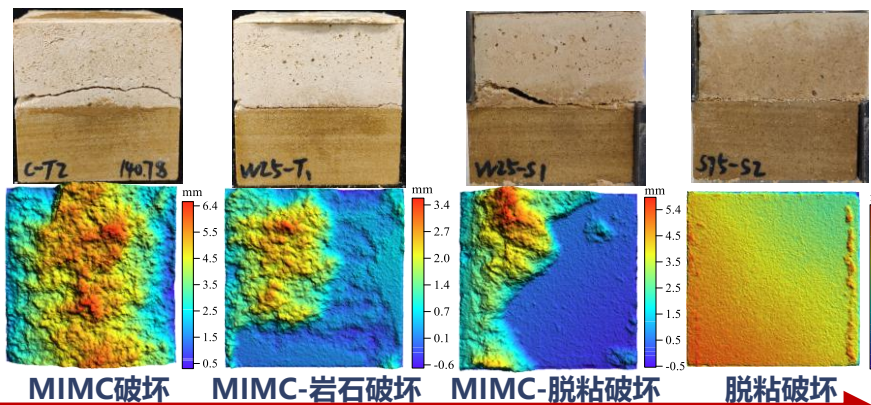


细菌与生物分子的联合矿化作用是MIMC固化栖霞山原位岩砂具有良好强度的主要原因

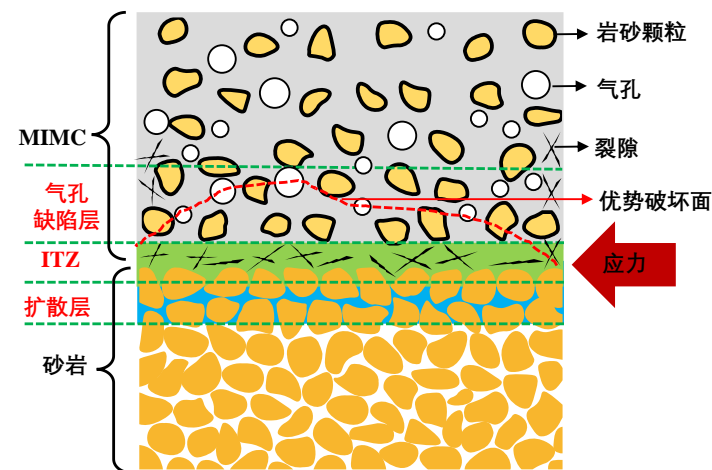
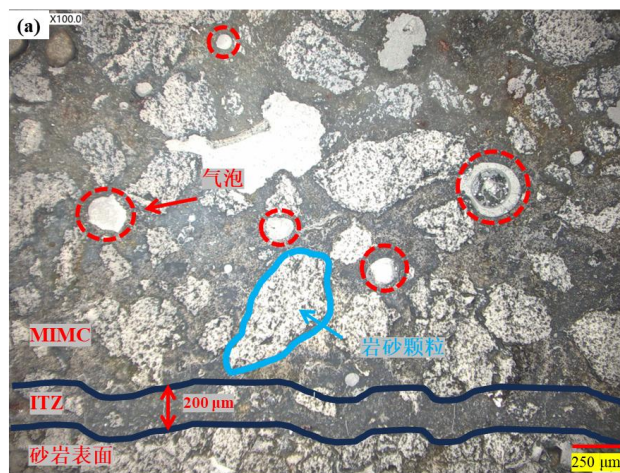
岩体Bio-Barrier: 界面强度

□ MIMC固化原位岩砂修复裂隙具有优异的界面力学强度

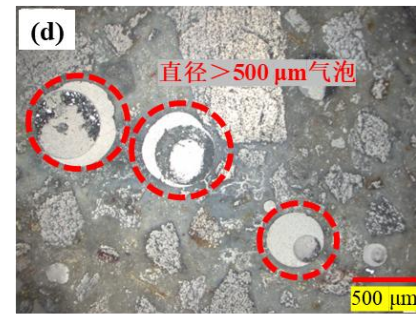
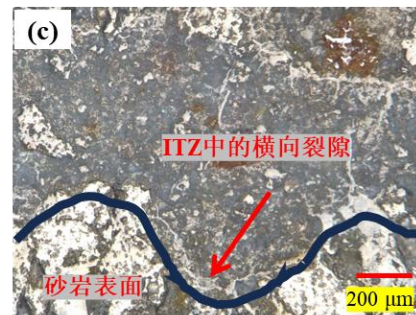
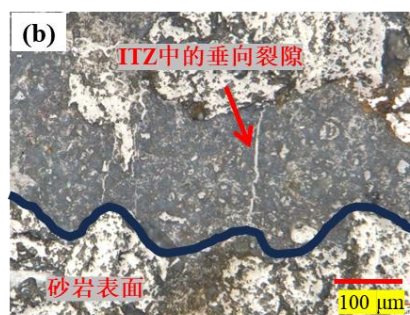
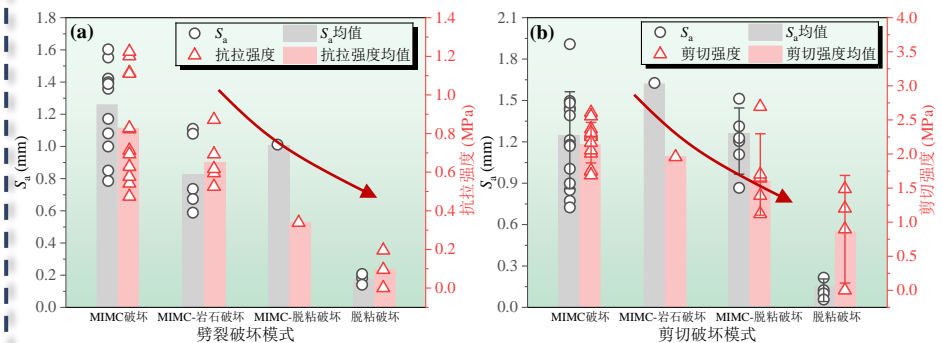
界面破坏模式



界面微观结构



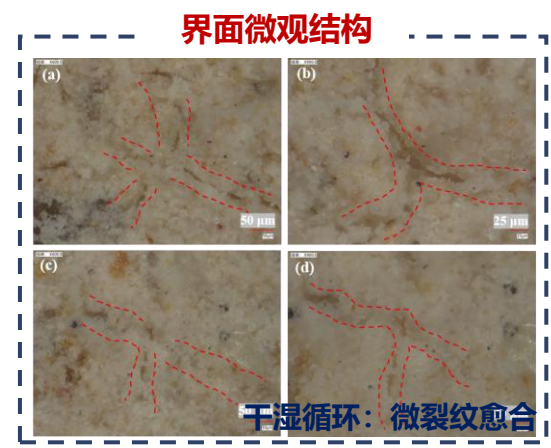
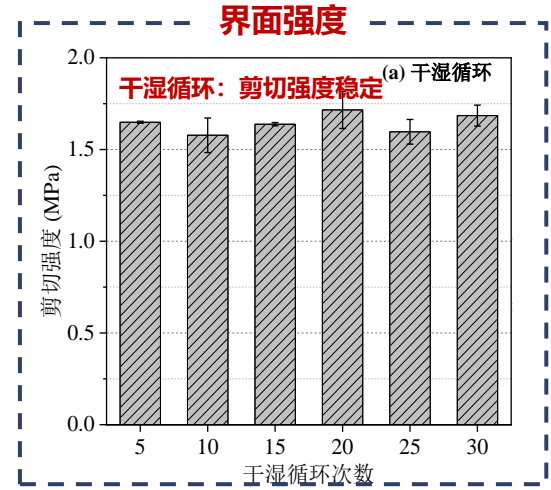
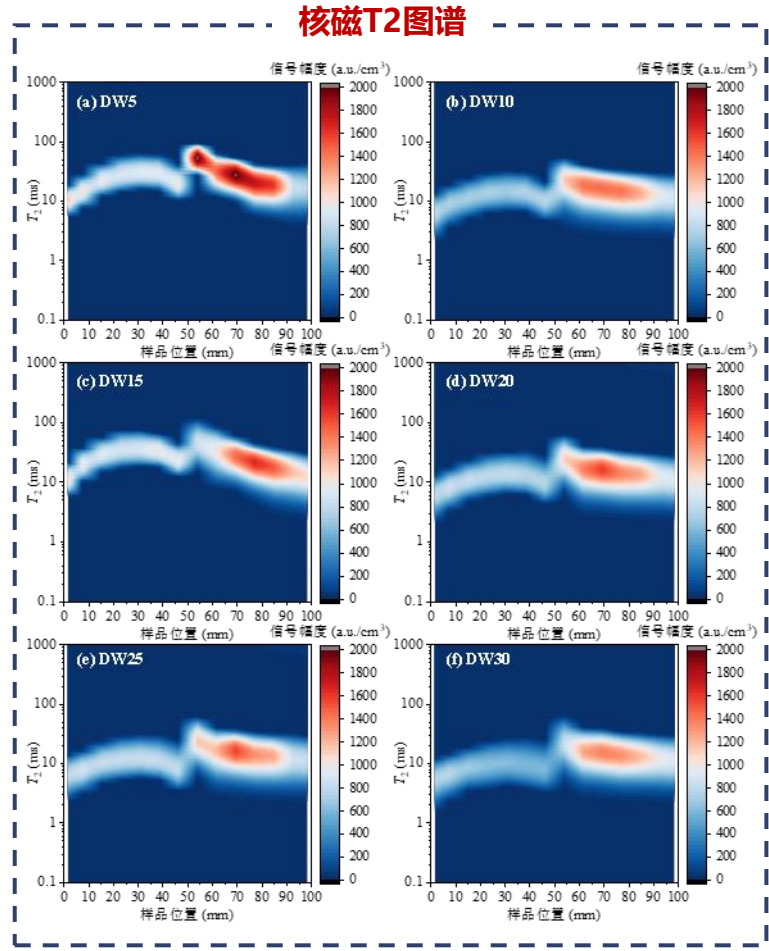
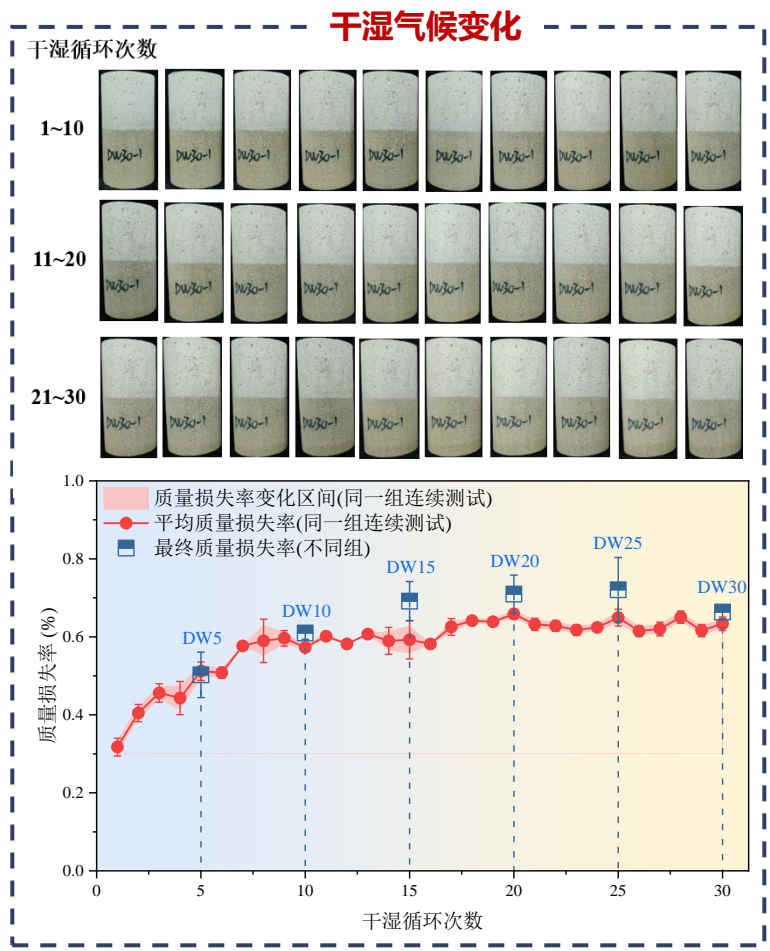
界面强度与界面破坏模式密切相关



微生物诱导氧化镁碳化固化原位岩砂修复裂隙界面强度优异, 抗拉强度~1.22 MPa, 剪切强度~2.69 MPa, 揭示了界面强度由界面扩散层、界面过渡区ITZ、气孔缺陷层三层结构控制的机制

岩体Bio-Barrier: 界面干/湿气候韧性

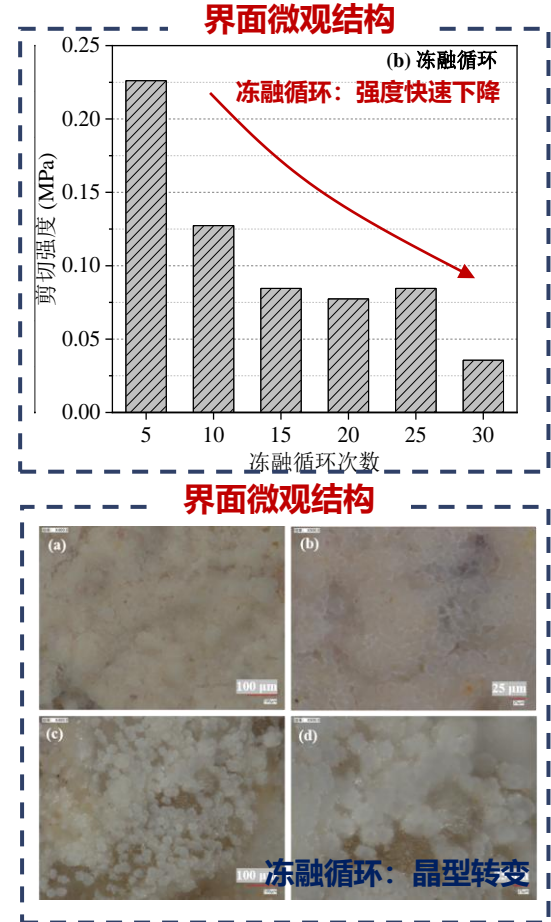
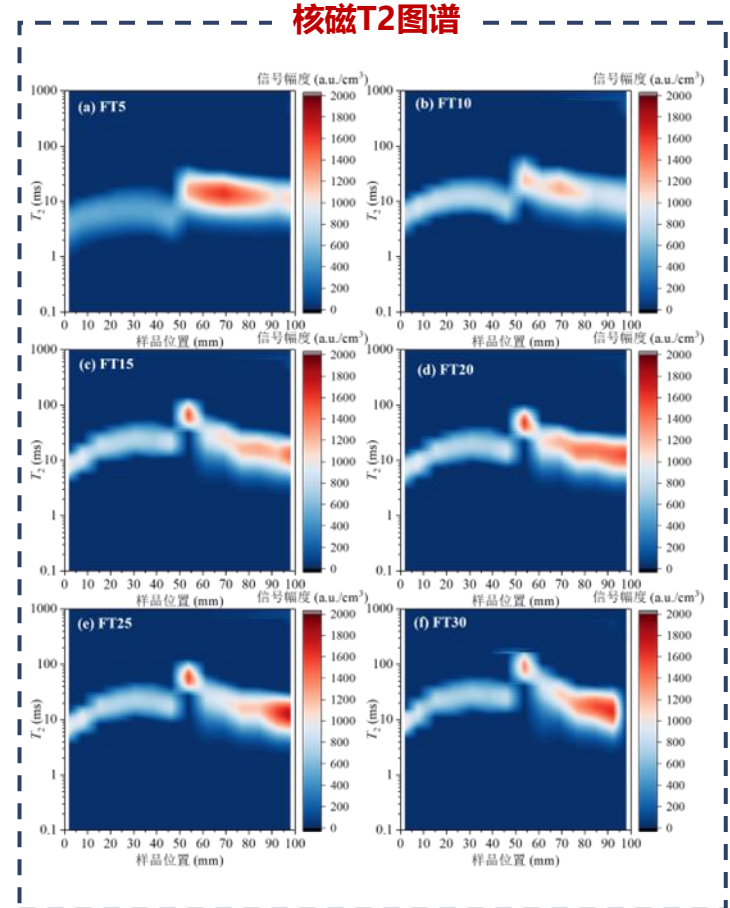
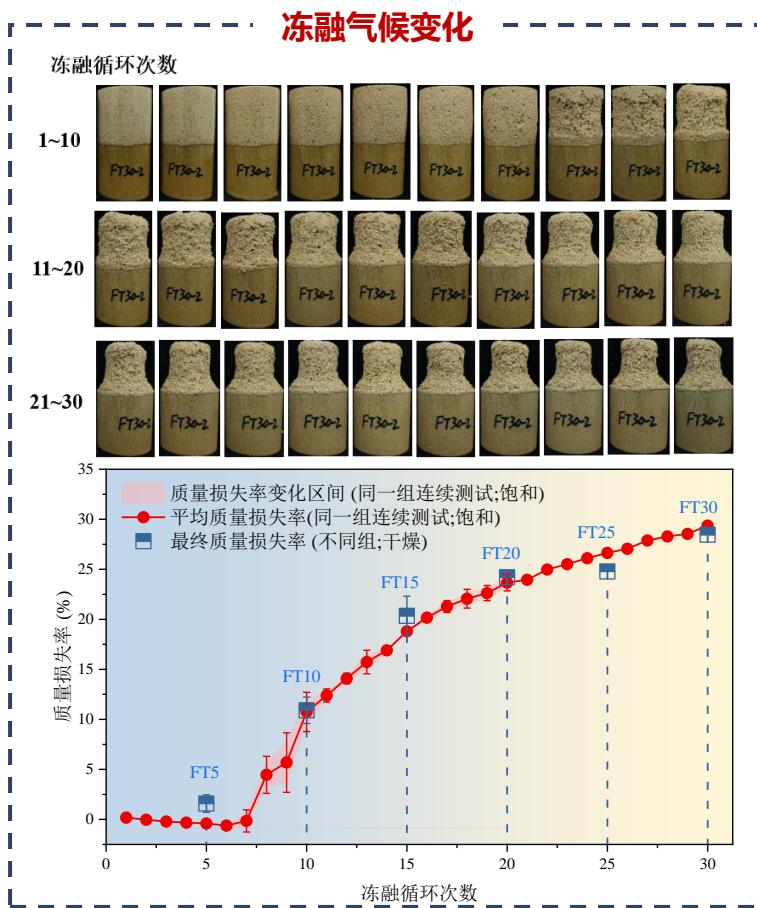
□ MIMC提升风化裂隙界面干湿气候韧性



耐干湿优异: 干湿气候下, 界面强度在30次干湿循环后仍保持稳定, 孔径随干湿循环减小, 微裂纹愈合

岩体Bio-Barrier: 界面冻/融气候韧性

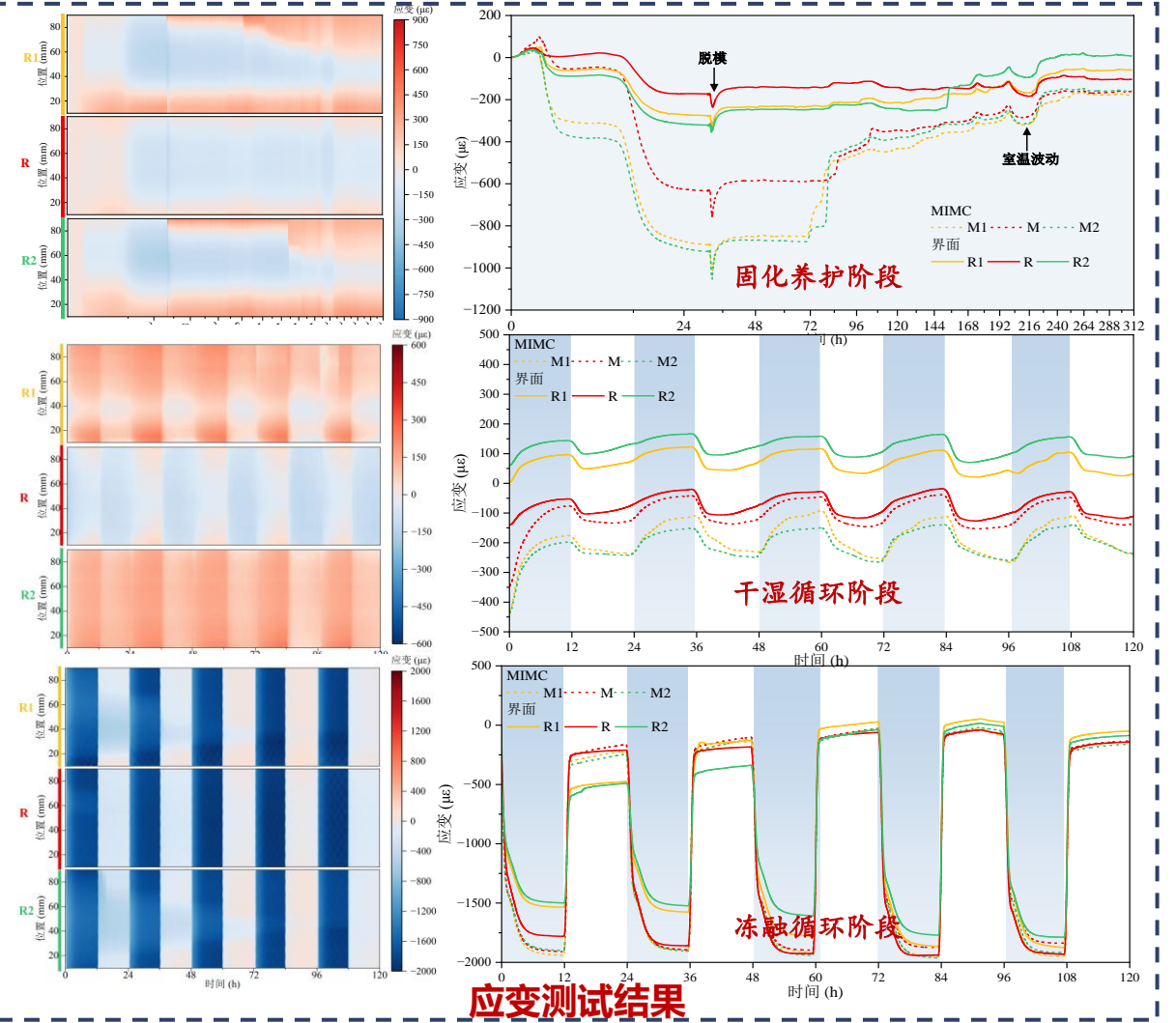
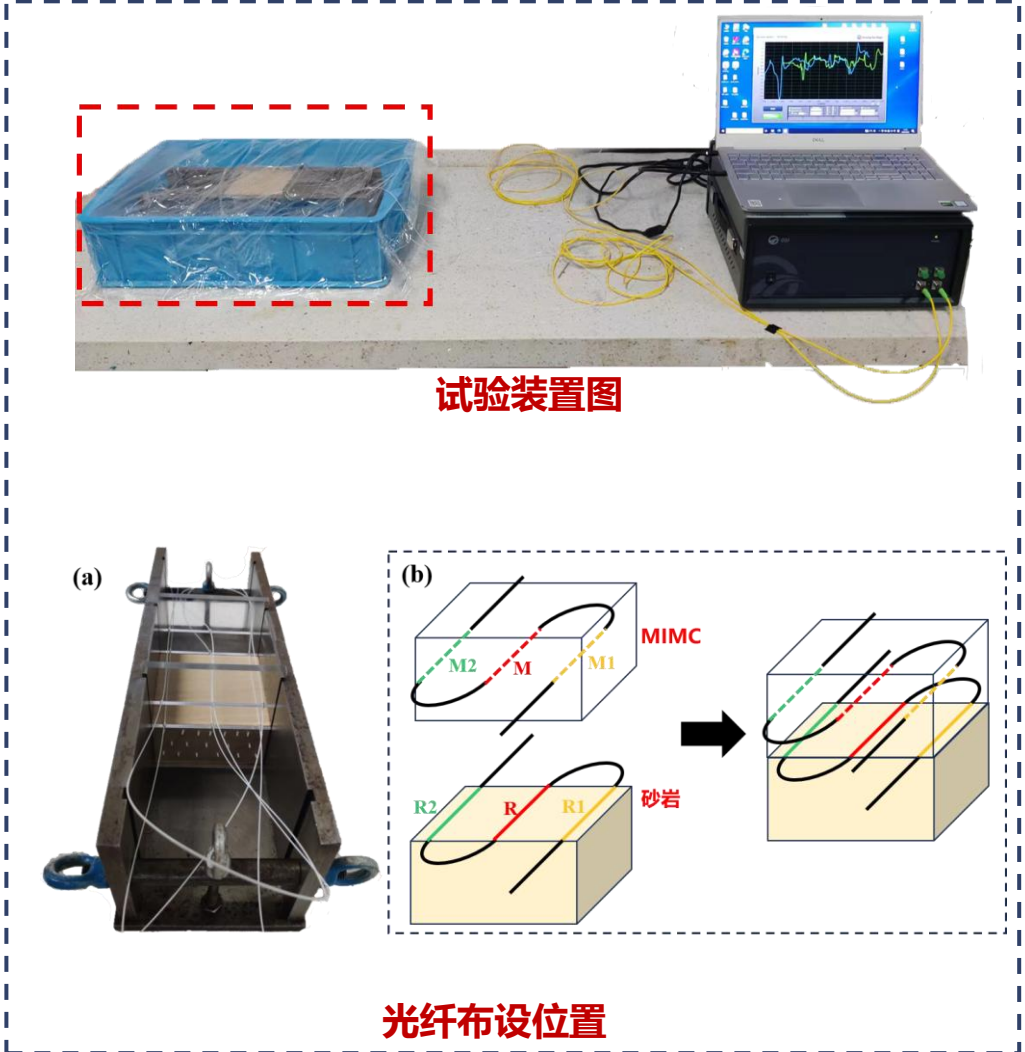
□ MIMC提升风化裂隙界面冻融气候韧性



冻融有待提升: 冻融气候下, 界面强度随冻融循环快速降低, 孔径增大, 晶体形貌增大, 具有抗冻融潜力

岩体Bio-Barrier: 界面气候韧性评价

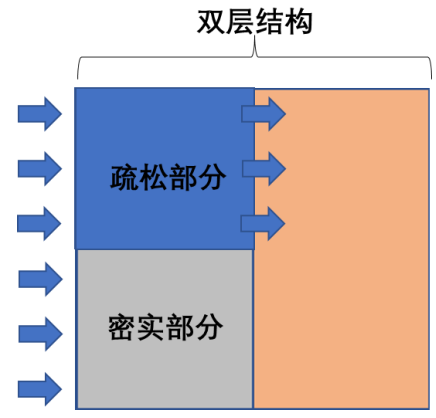
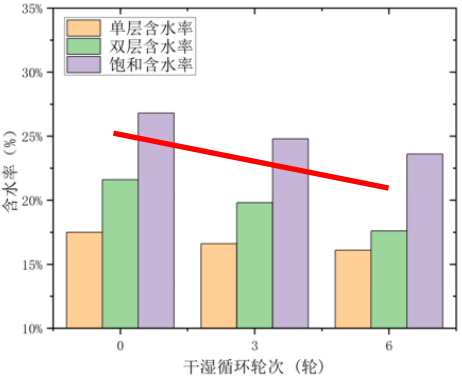
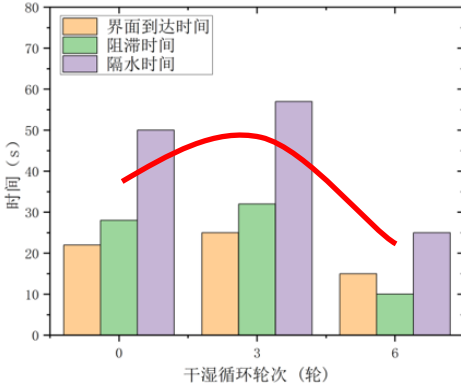
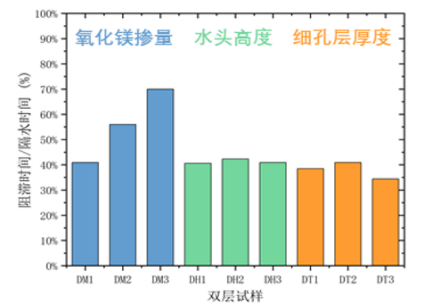
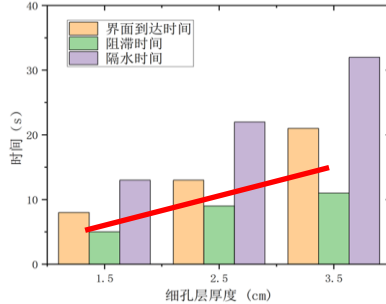
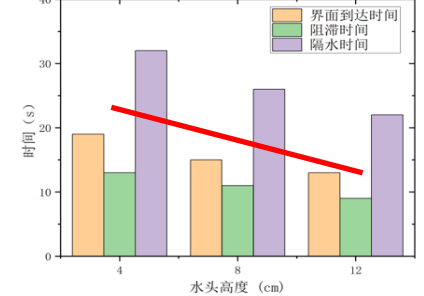
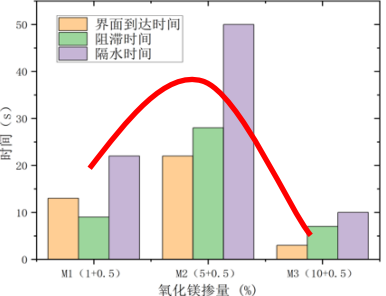
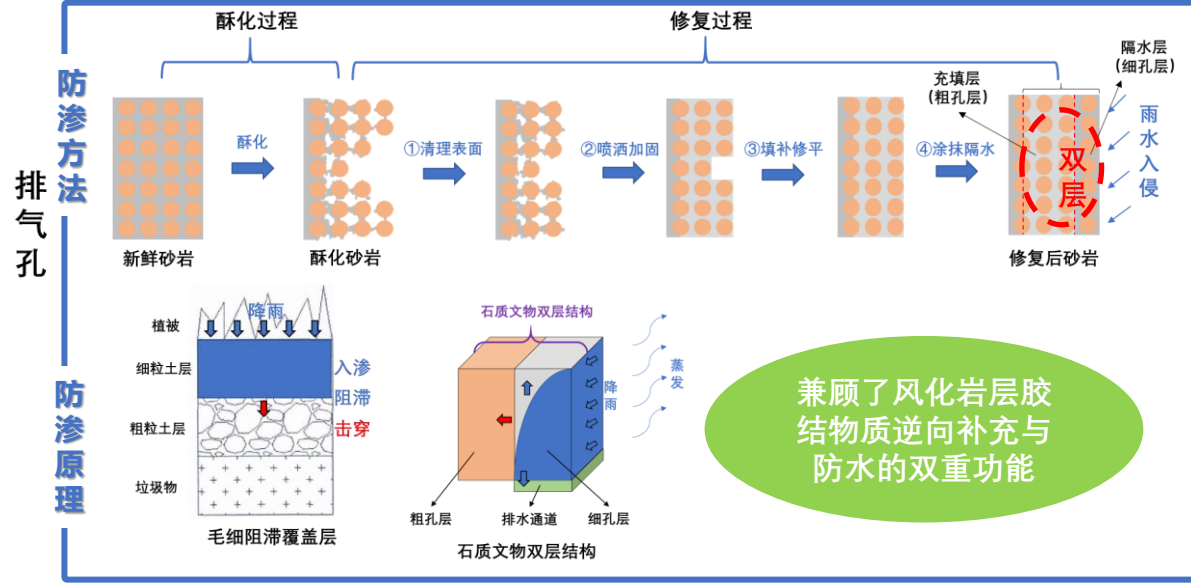
借助OFDR光纤感测技术测试了界面修复体在修复、养护以及干湿/冻融循环下的应变变形



应变变化与反应阶段、干湿冻融阶段具有很好的对应关系, 实现了界面气候韧性实时精细感测

岩体Bio-Barrier: 双层毛细阻滞结构

基于氧化镁-醇分散体系提出了基于生物仿生碳化双层结构的风化岩层物理防渗方法



- 双层毛细阻滞结构兼具胶结补强与防水功能，其中细孔层厚度主导水分运移路径
- 防渗性能随干湿循环轮次呈先增强后衰退趋势，初期孔隙致密化提升毛细阻滞

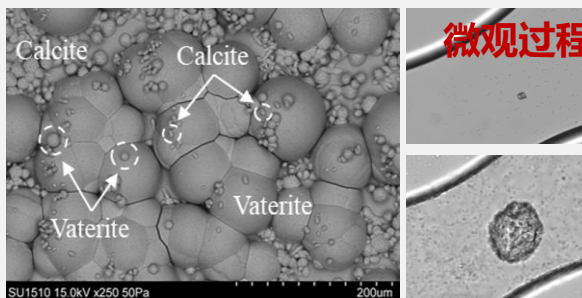
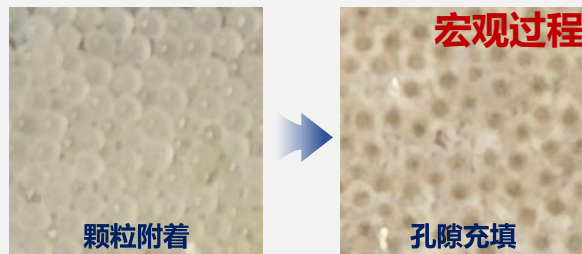
Bio-Barrier研究进展

复杂场景



挑战：高效处理

宏-微观过程



挑战：连续表征

原位效果



挑战：精准评价

宏-微观过程连续表征-宏观过程连续表征

问题与难点

- 微生物矿化涉及**多类别变化**：物理、化学、生物
- 微生物矿化涵盖**多相态过程**：固相-矿物沉淀、液相-溶质浓度、气相-氨气释放
- 微生物矿化在**岩土体内部**发生，反应快，分布广，迫切需要一种**无损且时空连续**的宏观表征方案！

研究思路

1. 基于处理液的高电导率特点和溶质浓度变化，**表征处理液的迁移与分布**
2. 基于碳酸钙胶结对孔隙连通性的阻塞作用，**表征碳酸钙沉淀的时空分布**

饱和多孔介质电阻率公式 (Archie Law)

$$\rho = \rho_w \phi^{-m}$$

式中:

ρ_w —— 孔隙水电阻率

ϕ —— 介质孔隙率

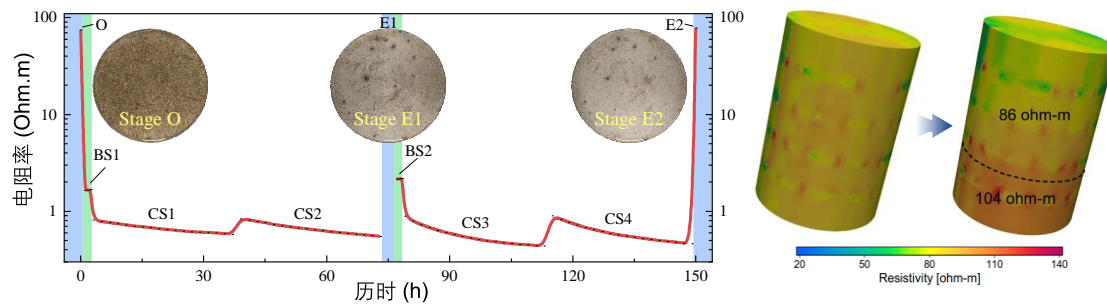
m —— 颗粒胶结指数

1. 浆液浓度

2. 碳酸钙含量

创新技术

应用高密度电阻率成像，监测微生物矿化改性砂土全过程



基于碳酸钙胶结对孔隙结构的双重影响优化Archie公式

$$\rho = \rho_w (A - \lambda_c)^{-(1.3+B*\lambda_c)}$$

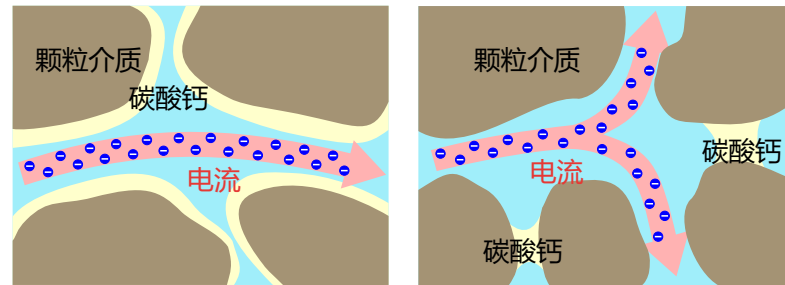
公式中:

ρ_w —— 孔隙流体电阻率 ($\Omega\cdot m$)

λ_c —— 碳酸钙含量 (%)

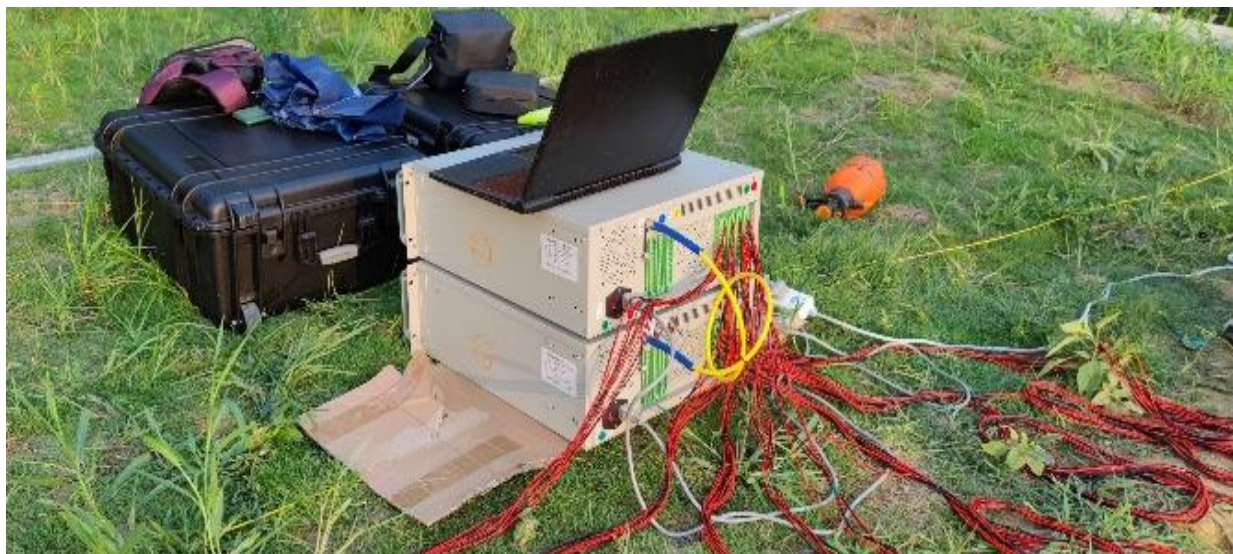
A —— 经验参数

B —— 经验参数

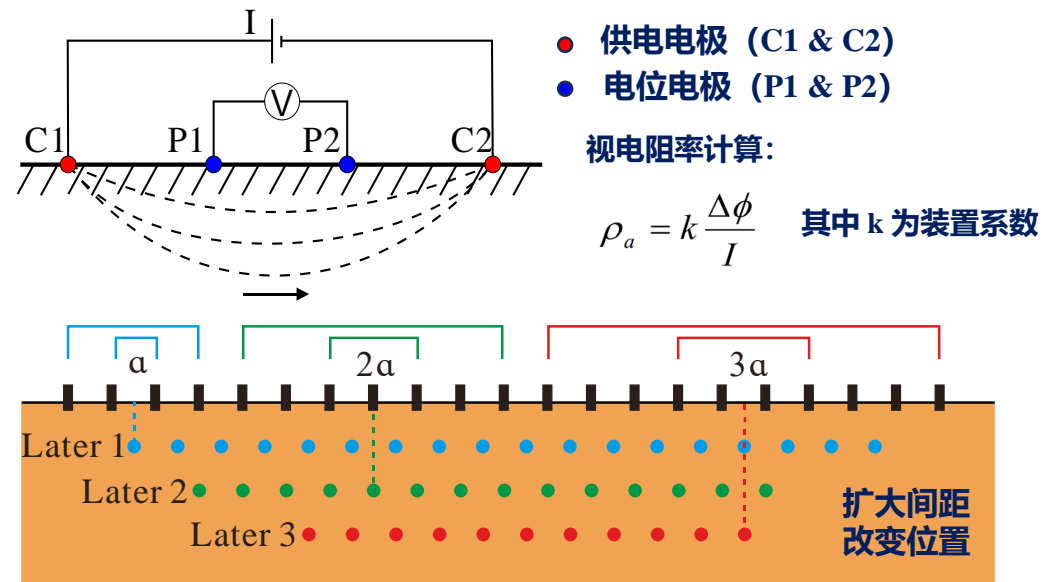
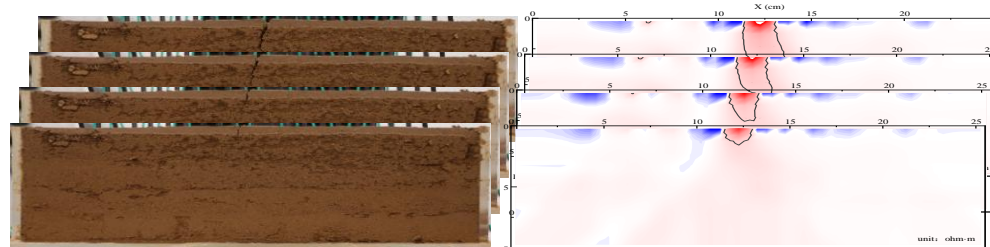
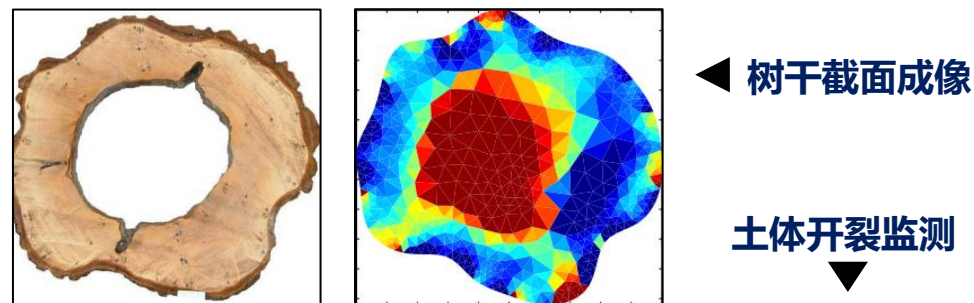


宏观过程连续表征-电阻率层析成像ERT技术

电阻率法 最常用的地球物理方法之一



ERT21高密度电阻率测试系统



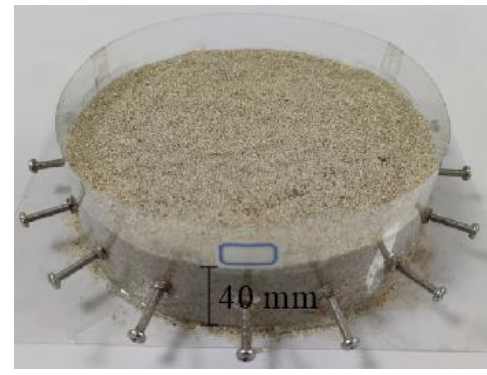
电阻率剖面法测试图解

宏观过程连续表征-MICP关键过程的电阻率响应

高密度电阻测定系统 (ERT21系统)

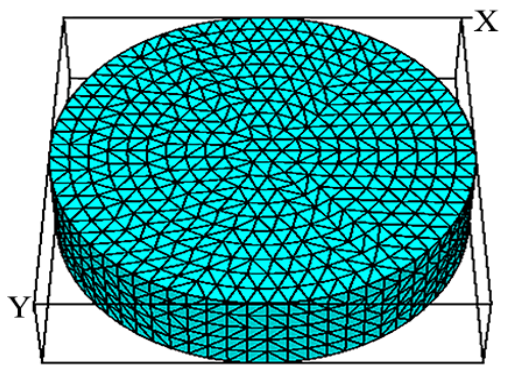


砂土土柱样品



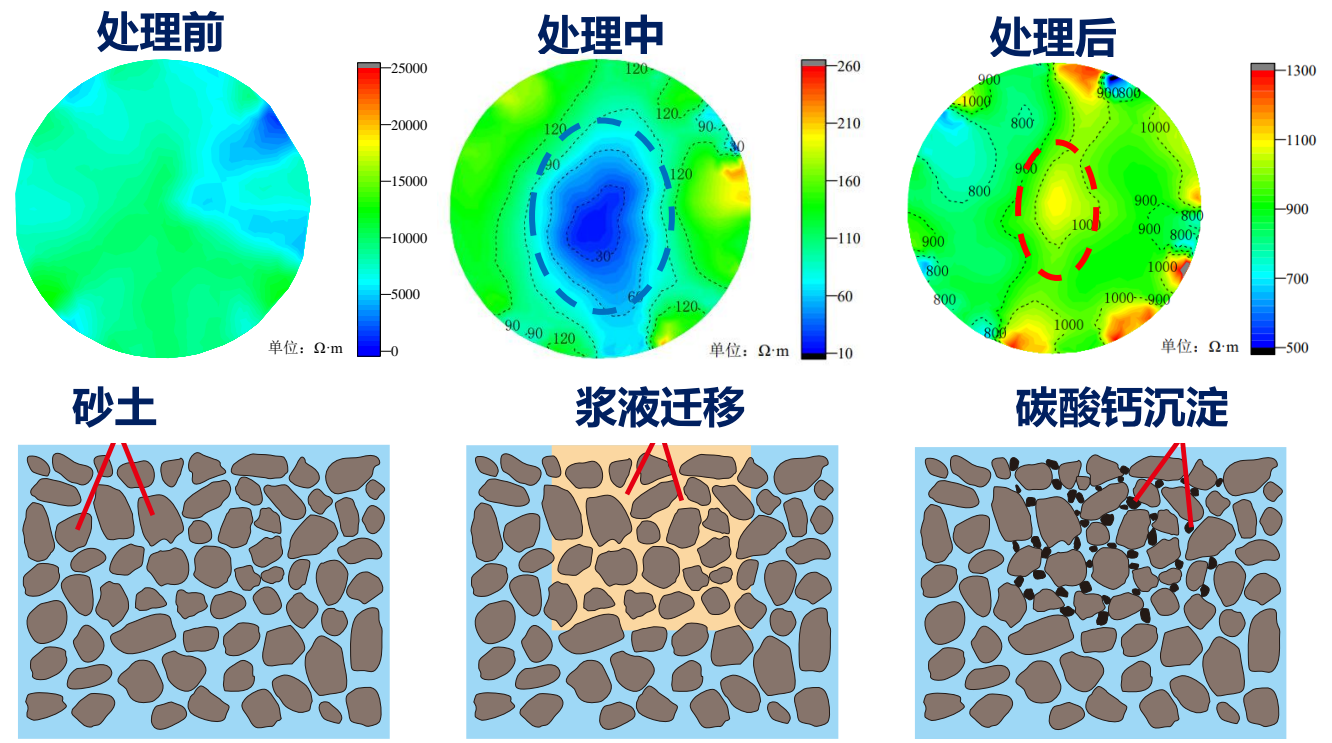
D = 176 mm H = 40 mm
电极: 16个

电阻率模型反演网格



节点: 2496
微元: 11415

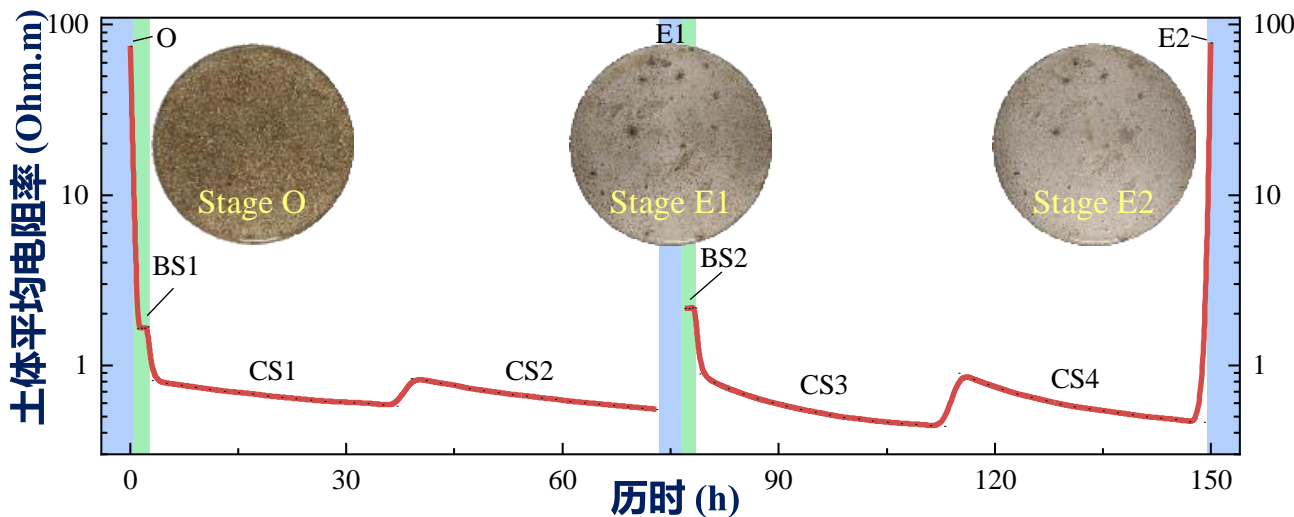
● 结果: 电阻率分布



- 1. 电阻率法对MICP的两个关键过程 (浆液迁移、碳酸钙沉淀) 均具备检测能力
- 2. 浆液扩散减小土体电阻率, 碳酸钙沉淀增大土体电阻率

宏观过程连续表征-MICP全过程的电阻率演变表征及机理

● 研究结果



MICP处理砂土全过程电阻率演变特征

● 机理分析

1. 细菌液或胶结液注入: 土体电阻率**显著降低**
2. MICP处理前后对比: 土体电阻率**略微升高**
3. MICP静置处理过程中: 土体电阻率**缓慢降低**



● 规律总结

阶段	处理步骤	电阻率/Ohm.m
NaCl溶液	清洗、饱和	初值 (75.4)
细菌液	注入	降低
	静置	不明显
胶结液1	注入	降低
	静置 (第1次)	降低
胶结液2	静置 (第2次)	降低
	...	
NaCl溶液	清洗、饱和	升高 (78.3)

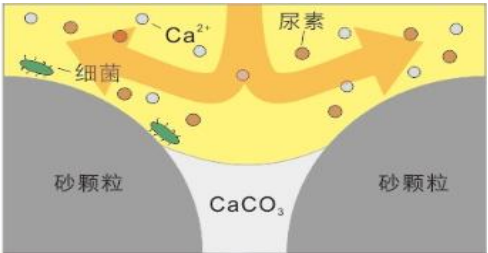
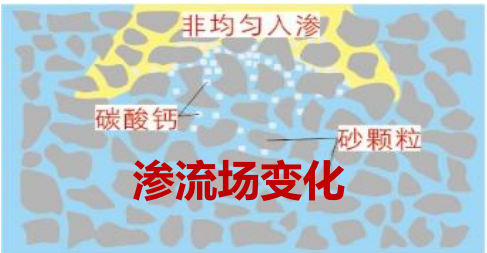
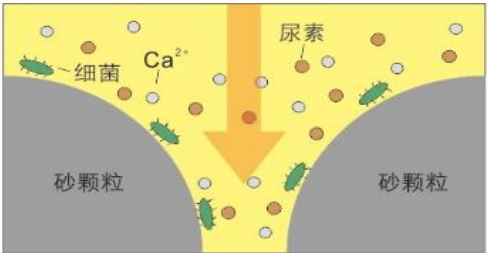
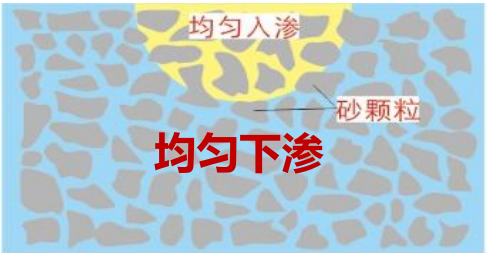
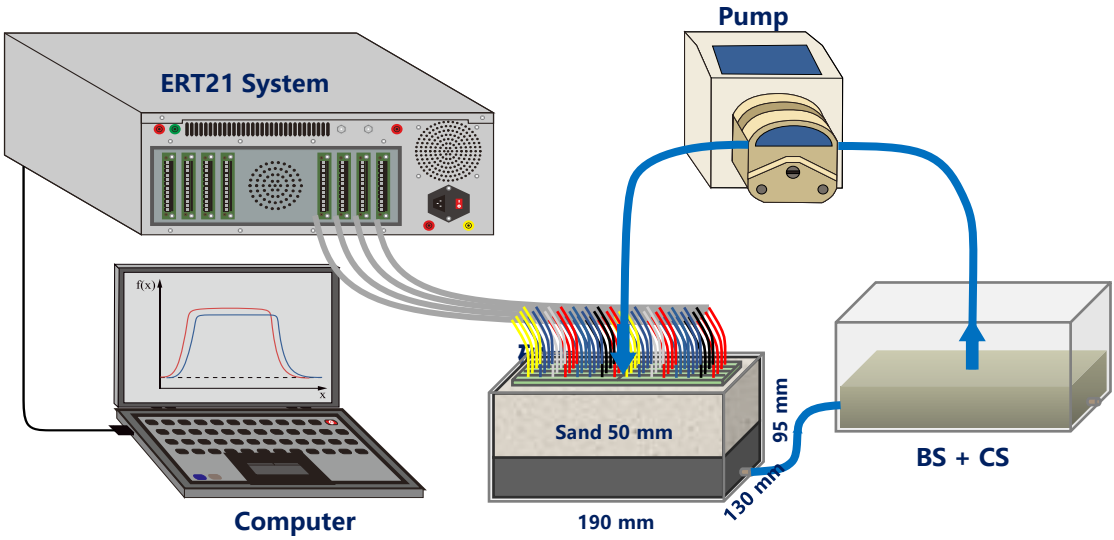
仅有孔隙液影响, 土体电阻率**显著降低**

仅有孔隙结构影响, 土体电阻率**略微升高**

孔隙液+孔隙结构共同影响, 孔隙液影响作用占主导

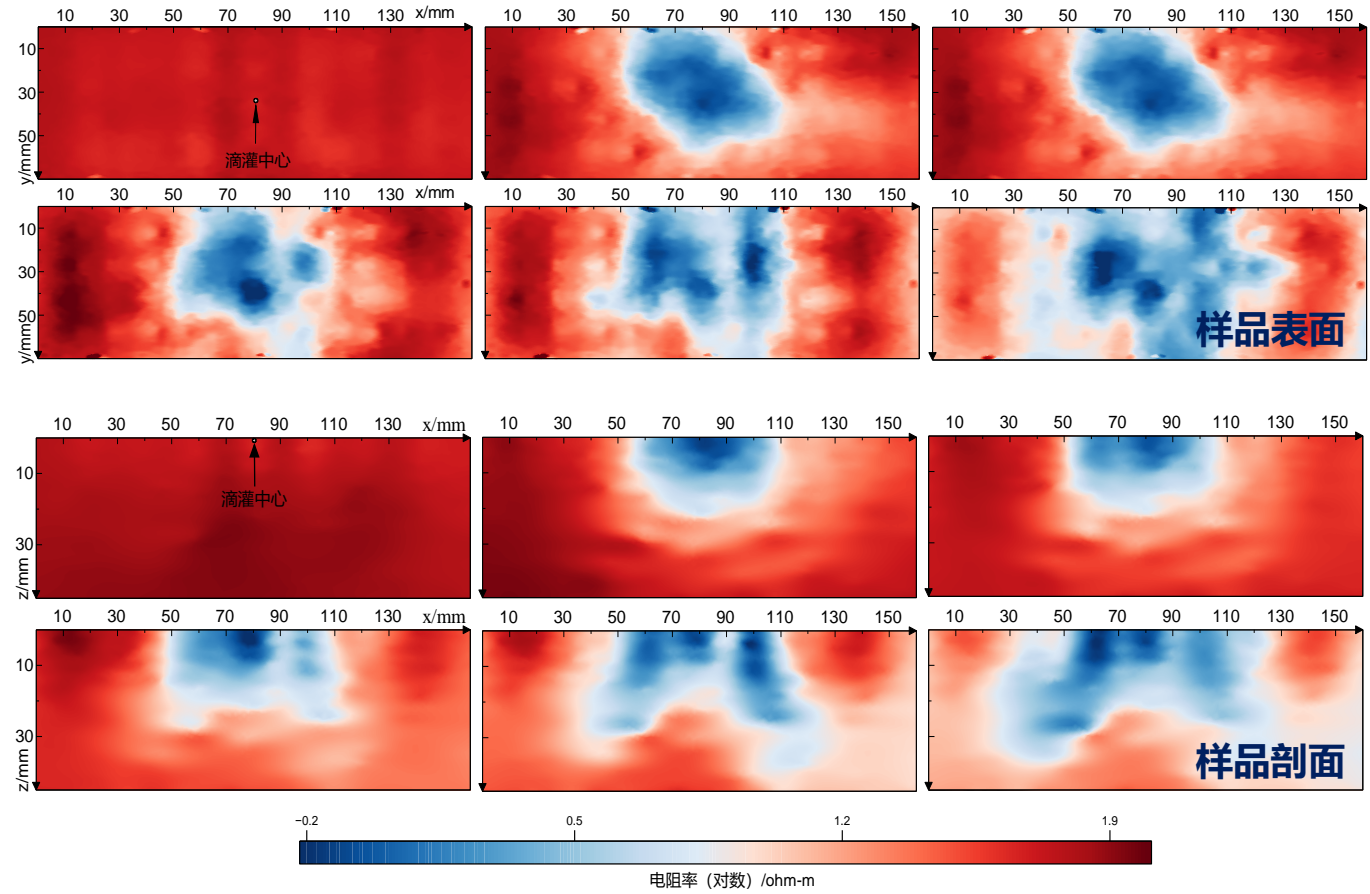
宏观过程连续表征-碳酸钙沉淀对浆液迁移的动态影响

连续注浆过程的三维电阻率层析成像



沉淀碳酸钙影响后续浆液迁移的机理

低电阻率响应反映MICP处理液分布



1. 浆液迁移分布控制碳酸钙沉淀分布
2. 碳酸钙沉淀改变渗透率，影响后续浆液迁移分布

宏观过程连续表征-MICP改性土的电阻率模型

多孔介质电阻率模型 (Archie定律)

$$\rho = \rho_w \phi^{-m}$$

式中:

- ρ_w — 孔隙流体电阻率 ($\Omega \cdot m$)
- ϕ — 砂土孔隙率 (因模式一而减小)
- m — 颗粒胶结指数 (因模式二而增大)

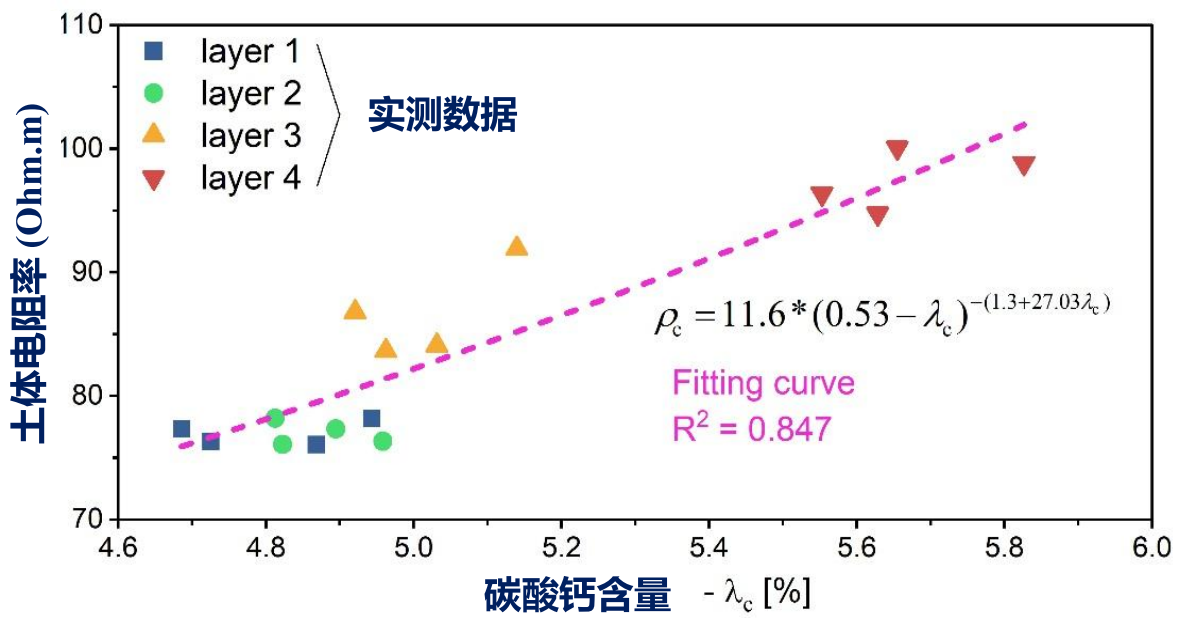
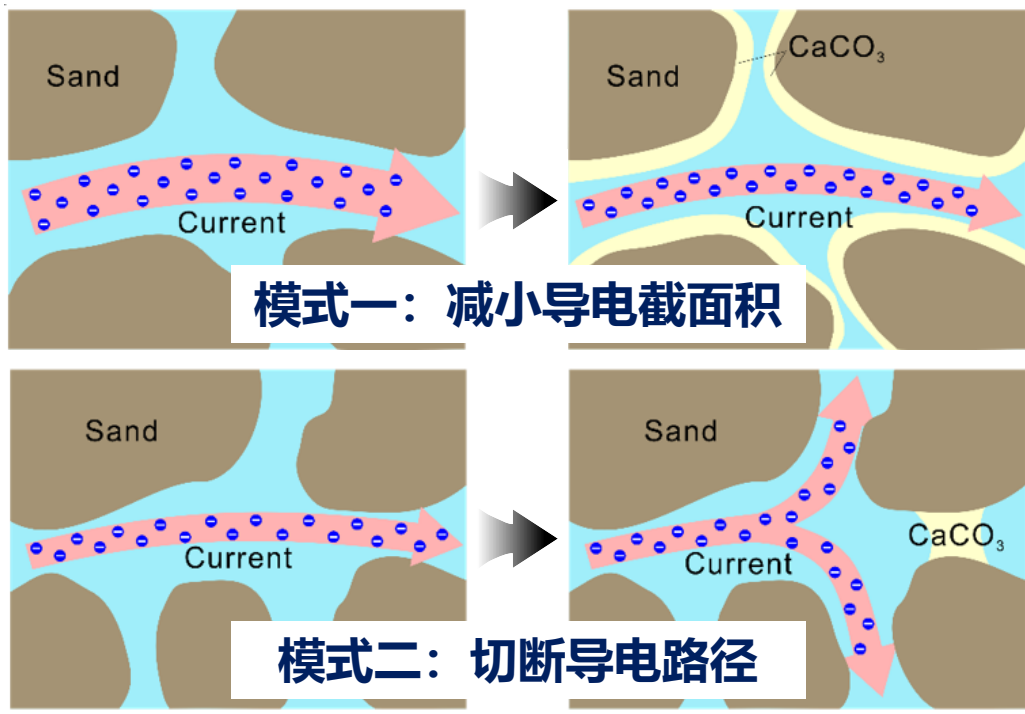
改进 \rightarrow

碳酸钙含量与土体电阻率的关系

$$\rho = \rho_w (A - \lambda_c)^{-(1.3+B*\lambda_c)}$$

式中:

- ρ_w — 孔隙流体电阻率 ($\Omega \cdot m$)
- λ_c — 碳酸钙含量 (%)
- A — 拟合系数
- B — 拟合系数



MICP生成碳酸钙通过改变砂土的孔隙率与胶结指数影响其电阻率

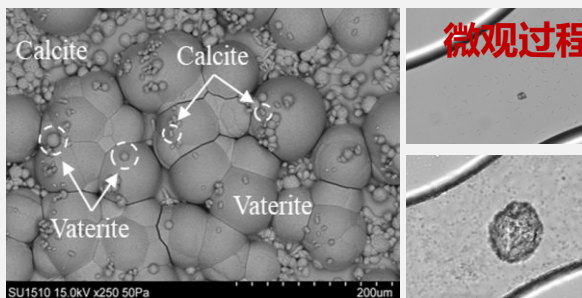
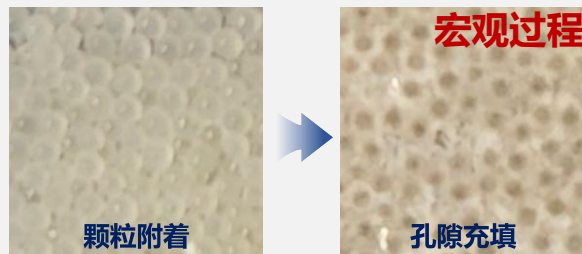
Bio-Barrier研究进展

复杂场景



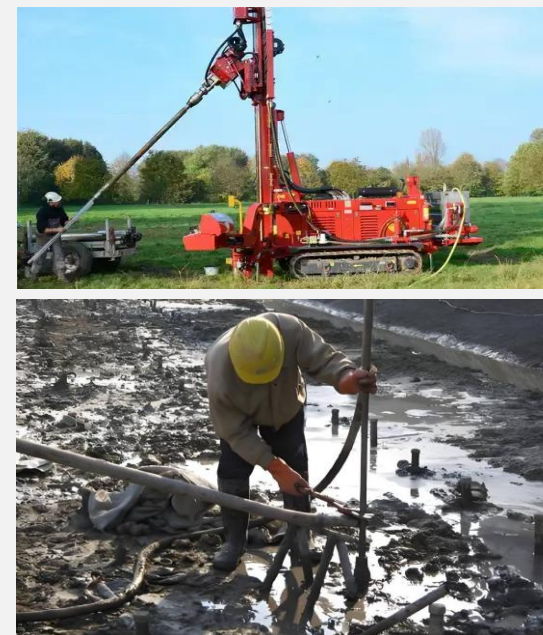
挑战：高效处理

宏-微观过程



挑战：连续表征

原位效果

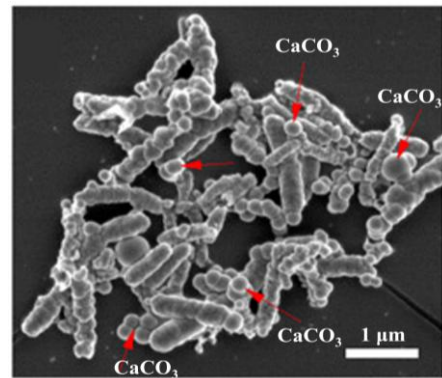


挑战：精准评价

宏-微观过程连续表征-微观过程连续表征

问题与难点

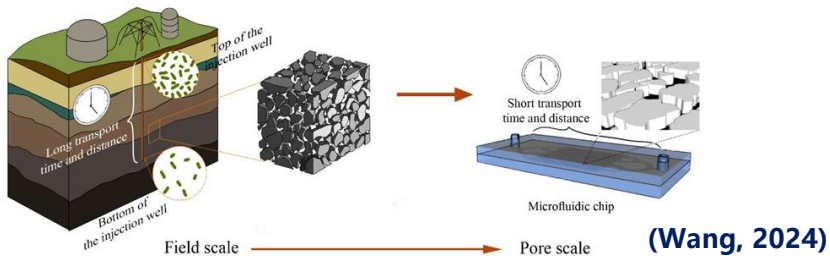
- 传统研究方法难以实现对微生物矿化反应过程的**实时动态监测**
- 微生物矿化过程的**微观机理复杂**，缺乏精细化研究手段
- 微生物矿化过程**空间分布不均匀**，缺少可控化调节手段



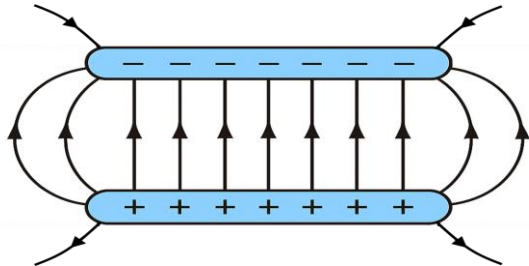
(Zhang, 2024)

研究思路

1. 构建与天然孔隙尺度匹配的微流道，实现细菌与碳酸钙沉淀的微观实时观测

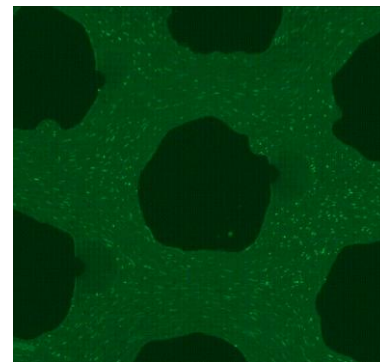
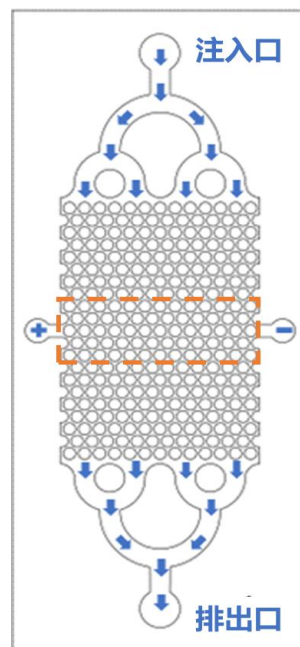


2. 利用电场实现碳酸钙沉淀空间分布的精细调控

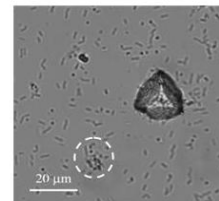
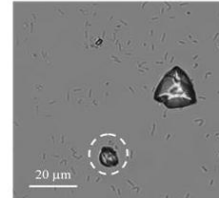
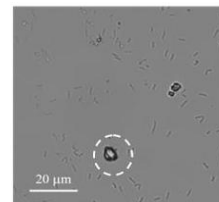


创新技术

■ 构建了耦合电场的微流控芯片系统



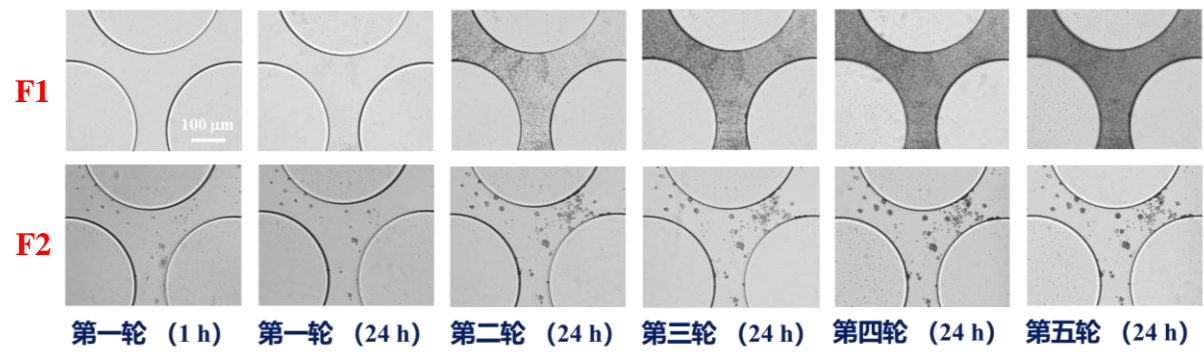
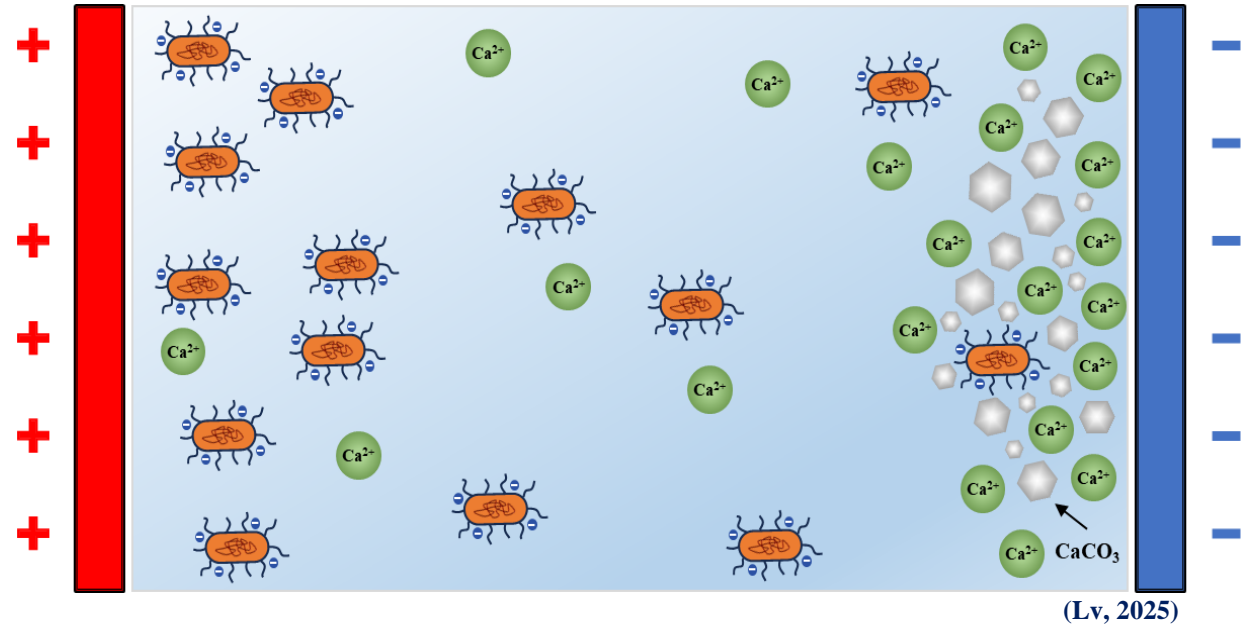
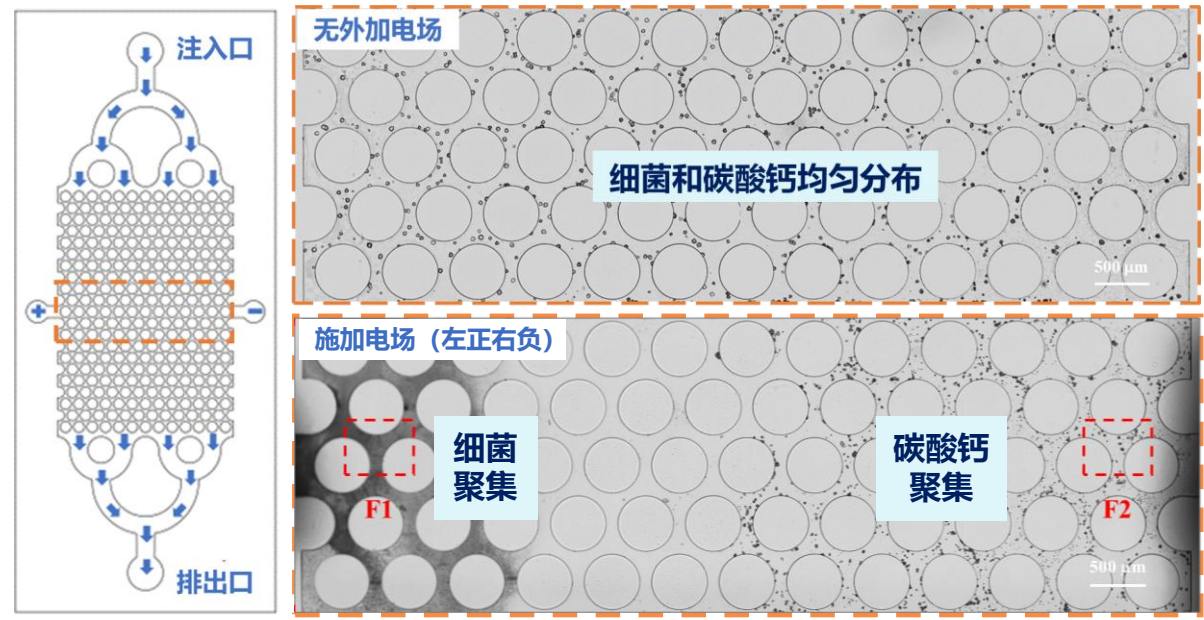
细菌运移



晶体的生长发育

微观过程连续表征-耦合电场的微流控芯片系统

揭示了电场对 MICP 反应过程的作用机制，实现了碳酸钙空间分布的靶向调控

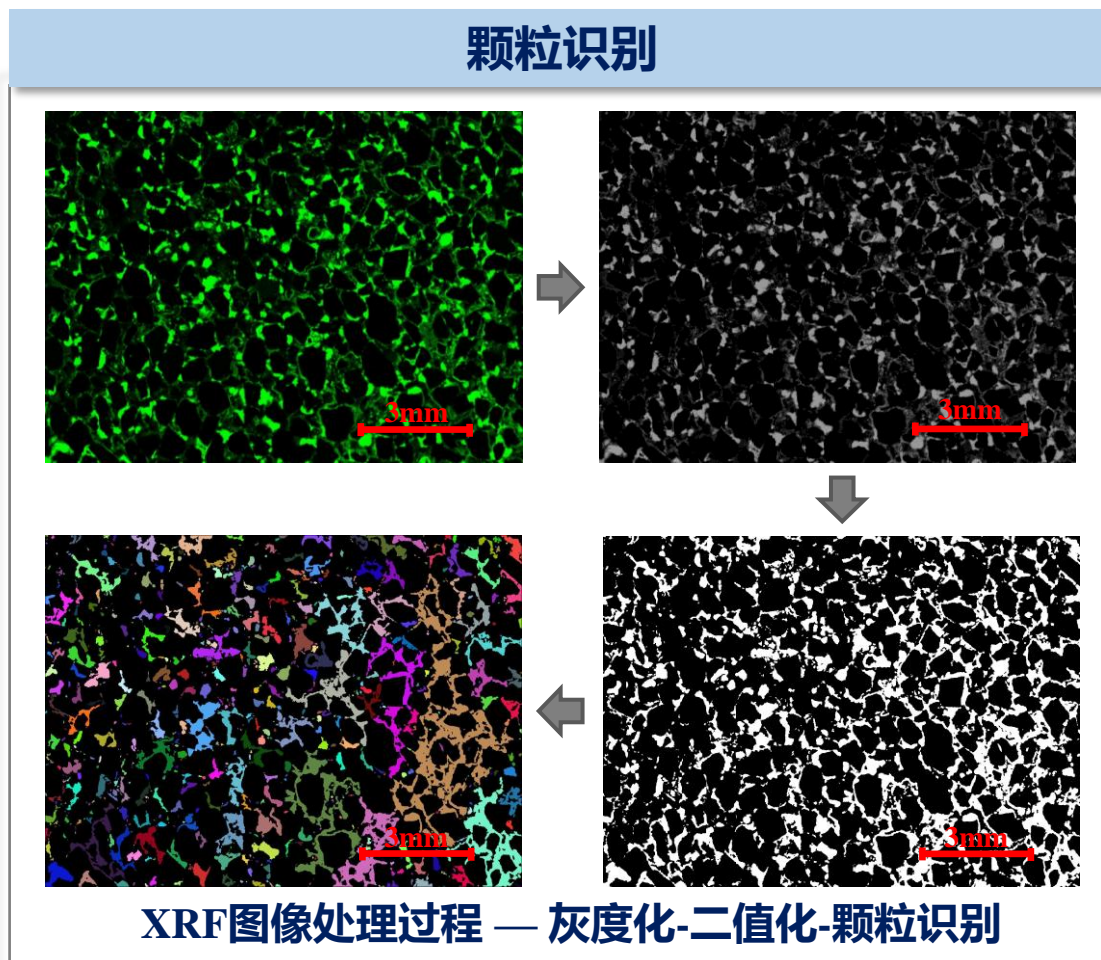
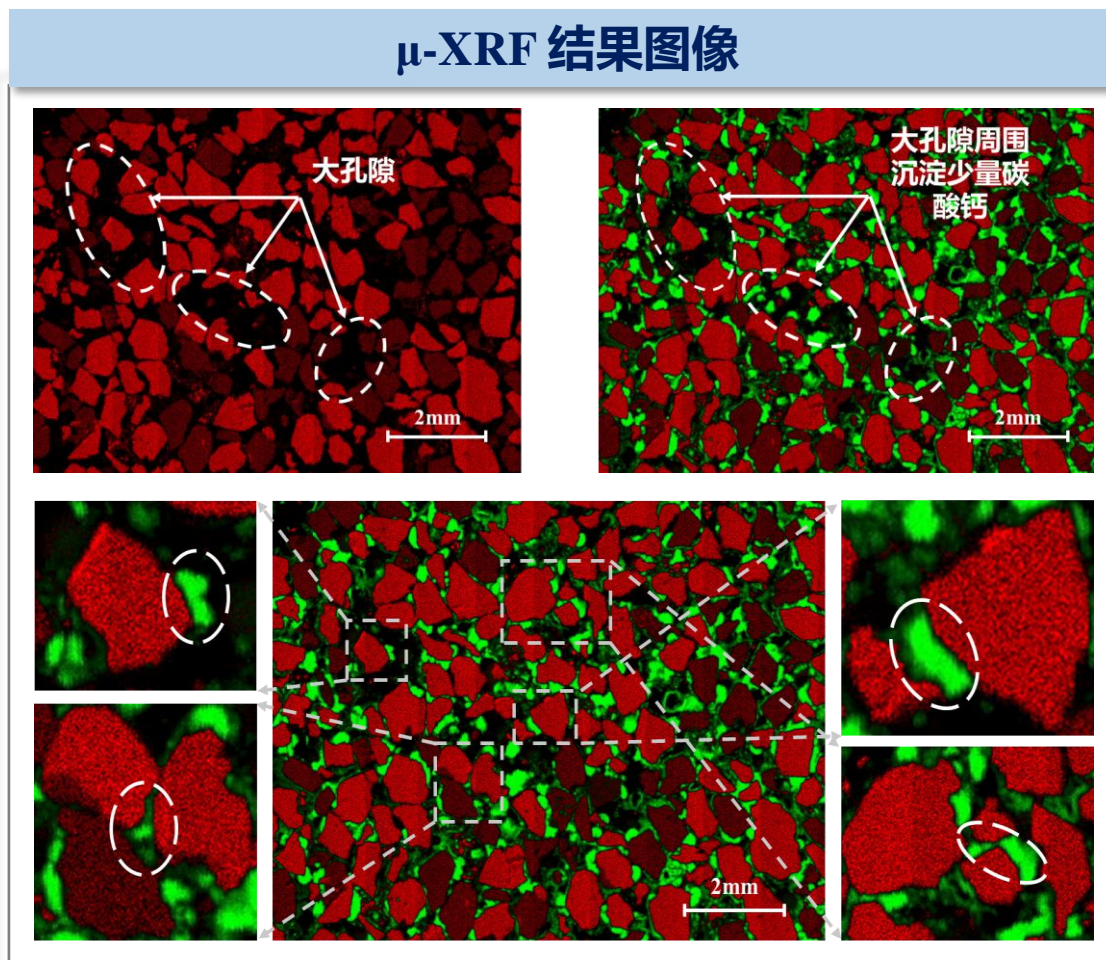


施加电场会导致细菌（表面带负电）向阳极迁移，钙离子（带正电）向阴极迁移，引起体系中过饱和度的区域差异，最终导致阴极附近沉淀更多且尺寸更大的碳酸钙晶体

无/有电场下微流控芯片中碳酸钙沉淀分布

微观过程连续表征-碳酸钙二维分布精细表征

□ 基于 μ -XRF图像处理方法对MICP处理土中碳酸钙二维分布特征实现了精确表征



MICP处理显著降低了土体孔隙率，碳酸钙优先沉积于砂粒表面及粒间接触处，增强颗粒胶结，但对1~2mm大孔隙的填充作用相对有限

微观过程连续表征-碳酸钙三维分布精细表征

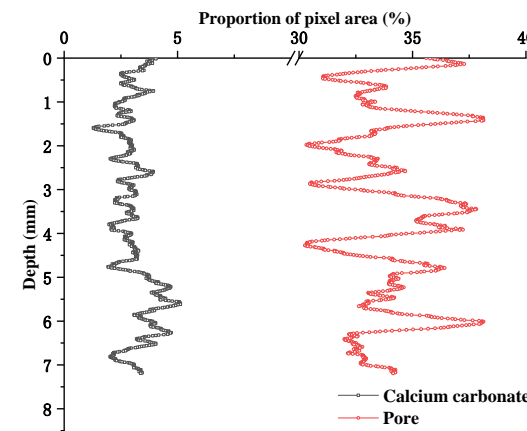
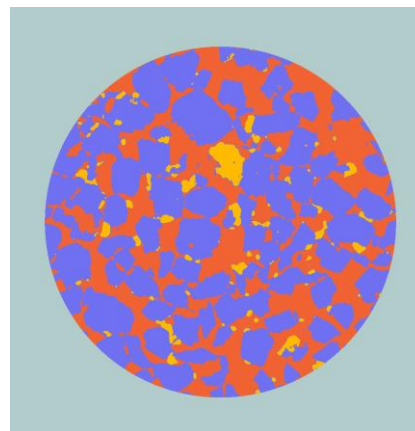
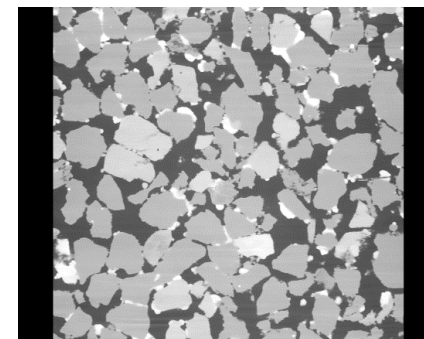
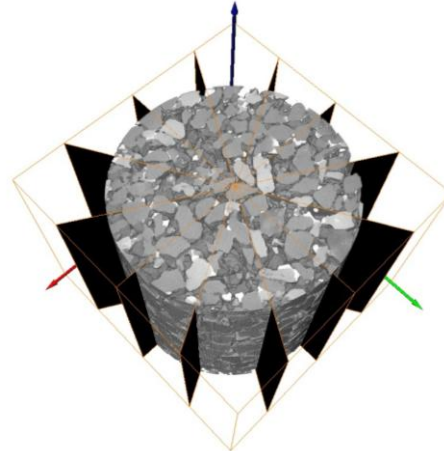
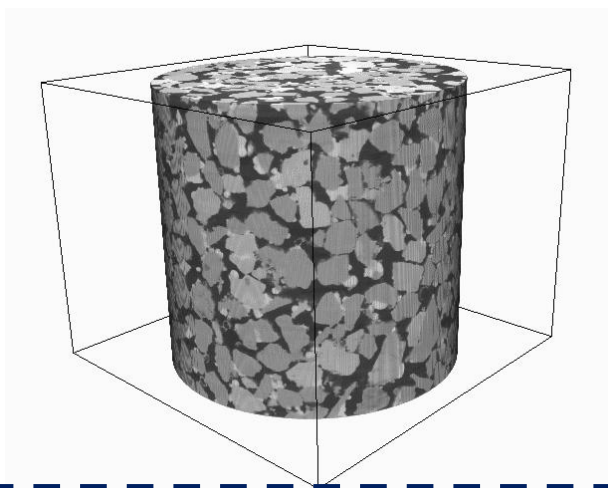
□ 利用 μ -CT 对 MICP 处理土中碳酸钙的三维空间分布实现了高精度定量表征



MICP改性砂土



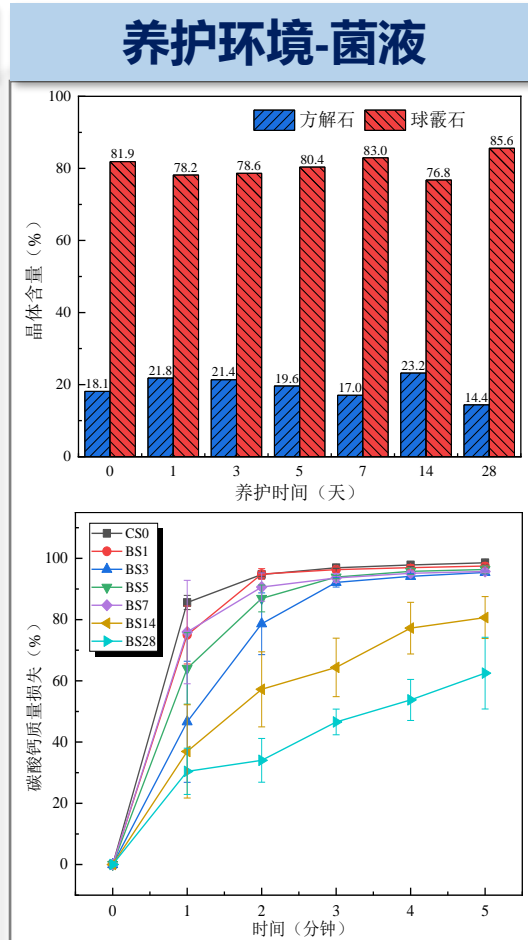
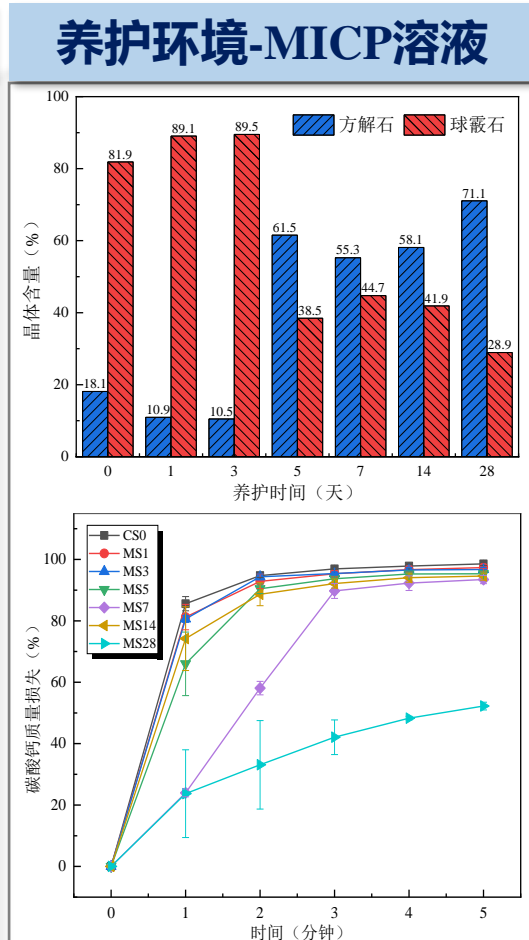
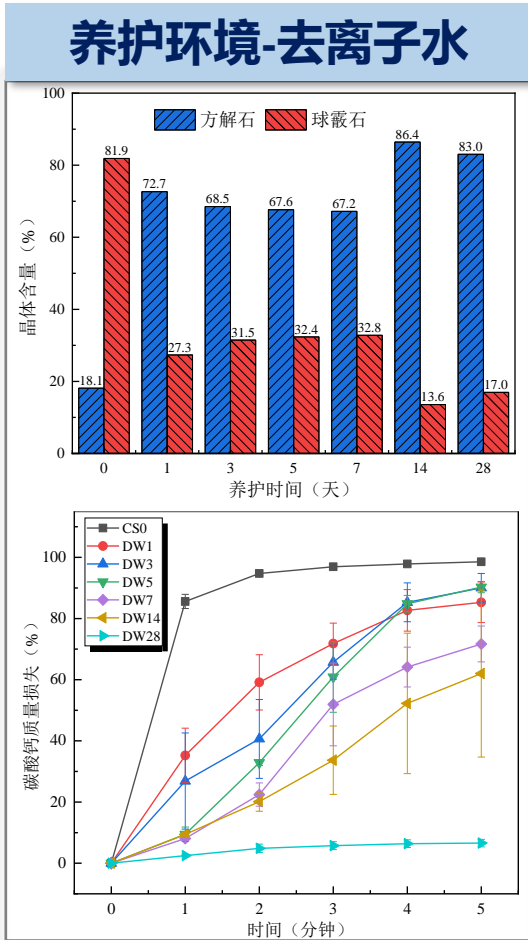
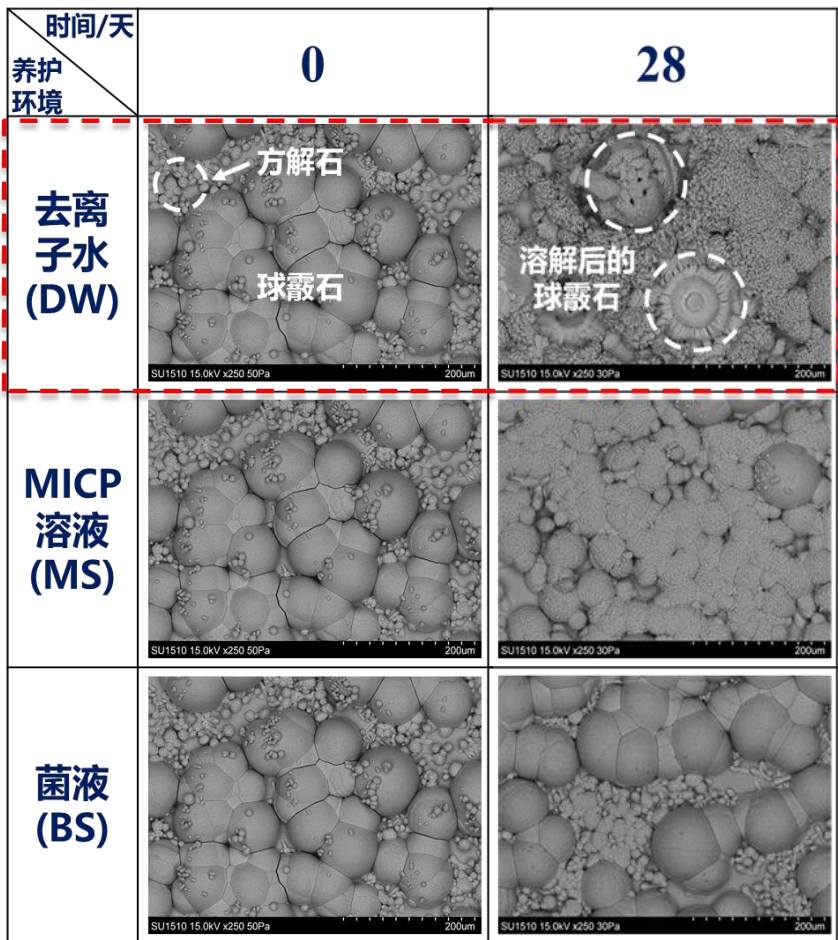
CT扫描



MICP改性土中 CaCO_3 主要在**颗粒接触点**和**局部孔喉处**富集沉积，形成粒间桥联胶结并部分填充孔隙

微生物矿化微观机制：溶解-重结晶作用

揭示了不同养护过程中矿物的溶解-重结晶规律，定量阐明了晶型与强度演化特征

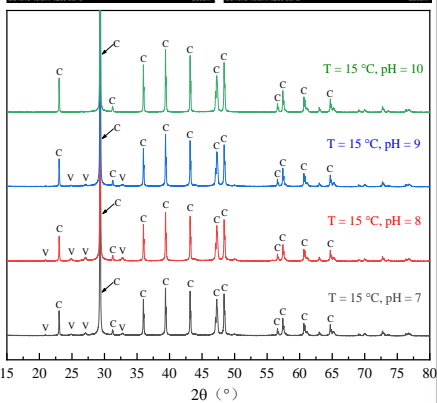
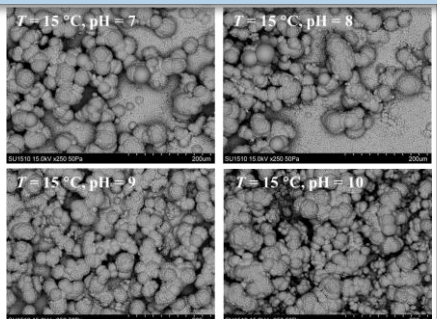


受奥斯特瓦尔德熟化作用驱动，去离子水和MICP溶液中养护的球霏石逐渐溶解并转化为方解石；而在菌液中，由于有机质嵌入形成稳定结构，球霏石未明显转化；碳酸钙胶结强度随养护时间延长而提高

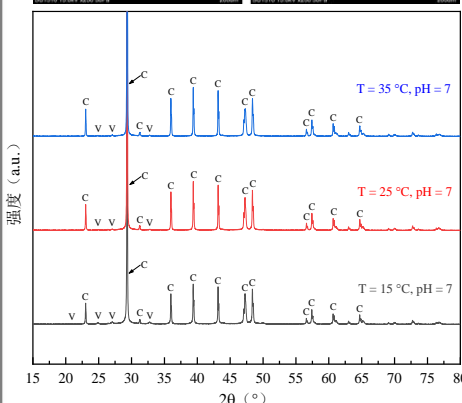
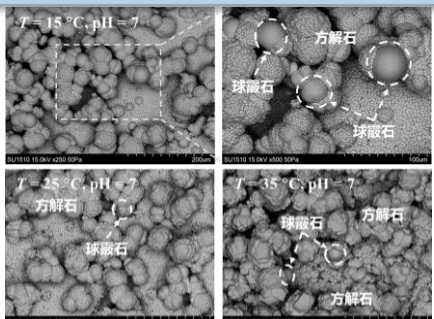
微生物矿化微观机制：环境胁迫调控规律及机制

阐明了不同影响因素对矿物晶型演化的调控规律及作用机制

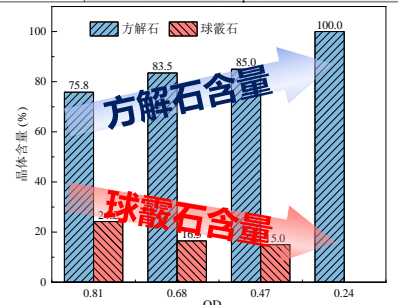
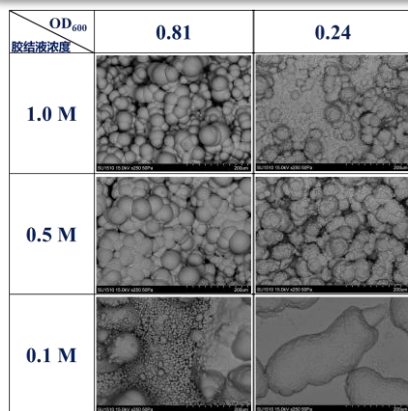
溶液pH值



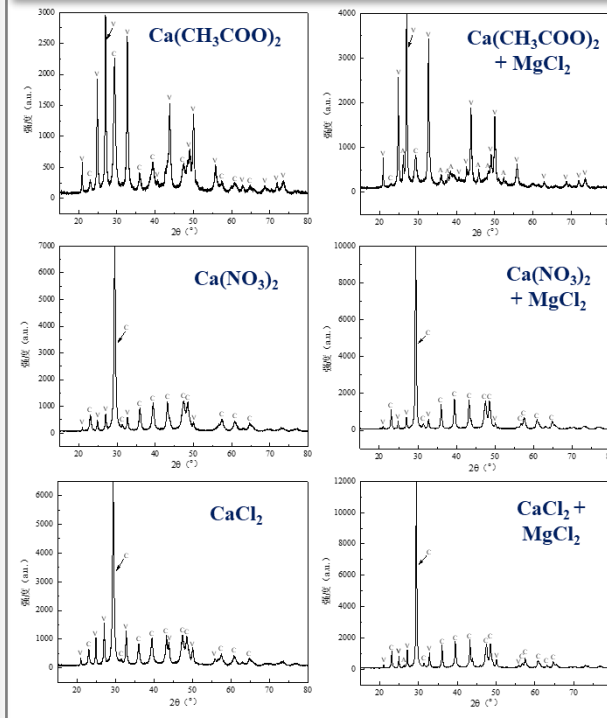
温度



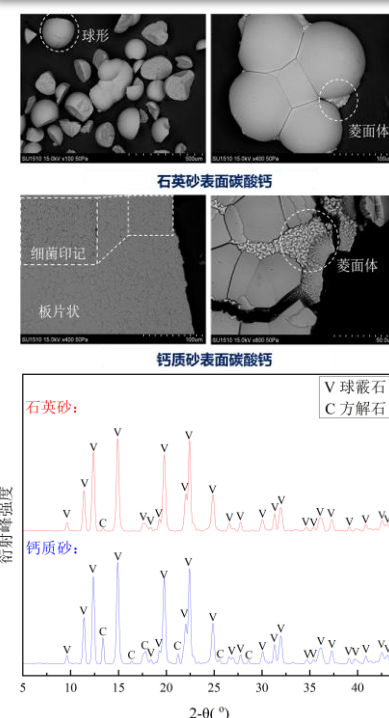
菌液和胶结液浓度



胶结液成份



基底成分

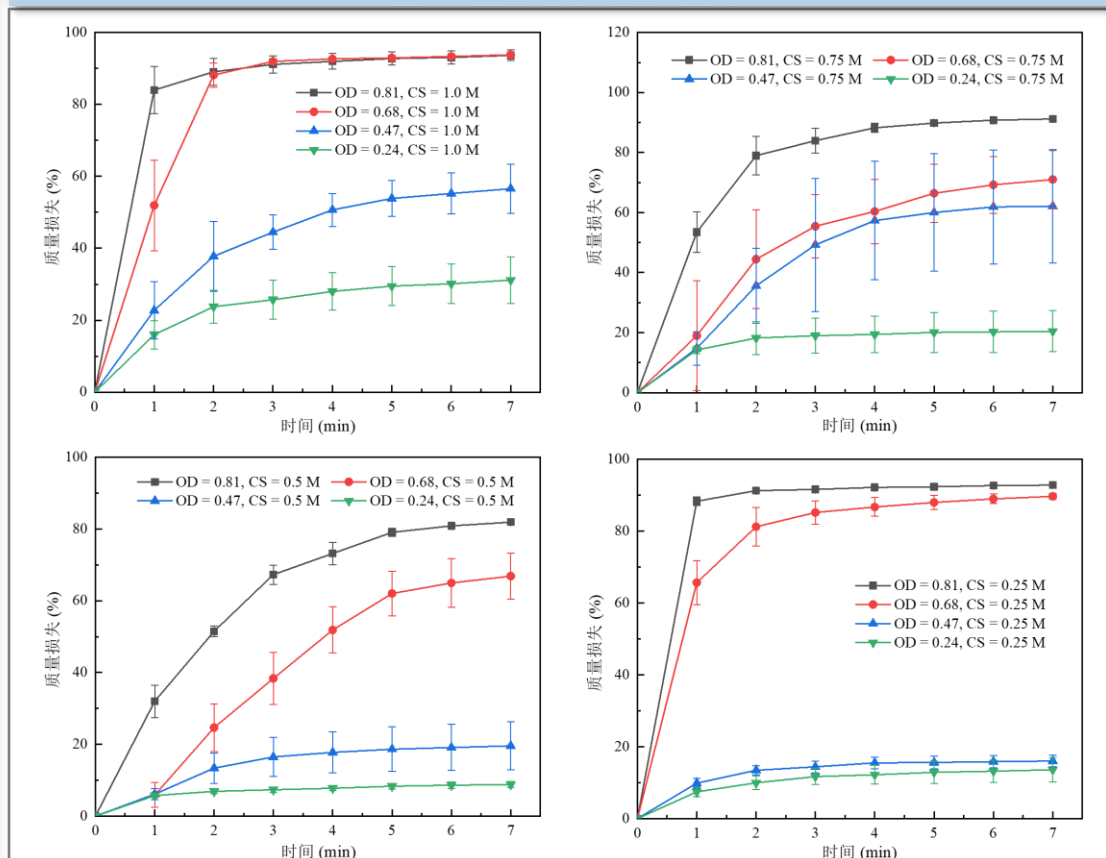


微生物诱导碳酸钙主要生成方解石和球霏石；不同环境因素通过调节溶液过饱和度影响其晶型选择与晶体尺寸；镁离子因高水合焓可促成文石和低镁方解石；基底界面能差异亦会导致晶型与晶貌的改变

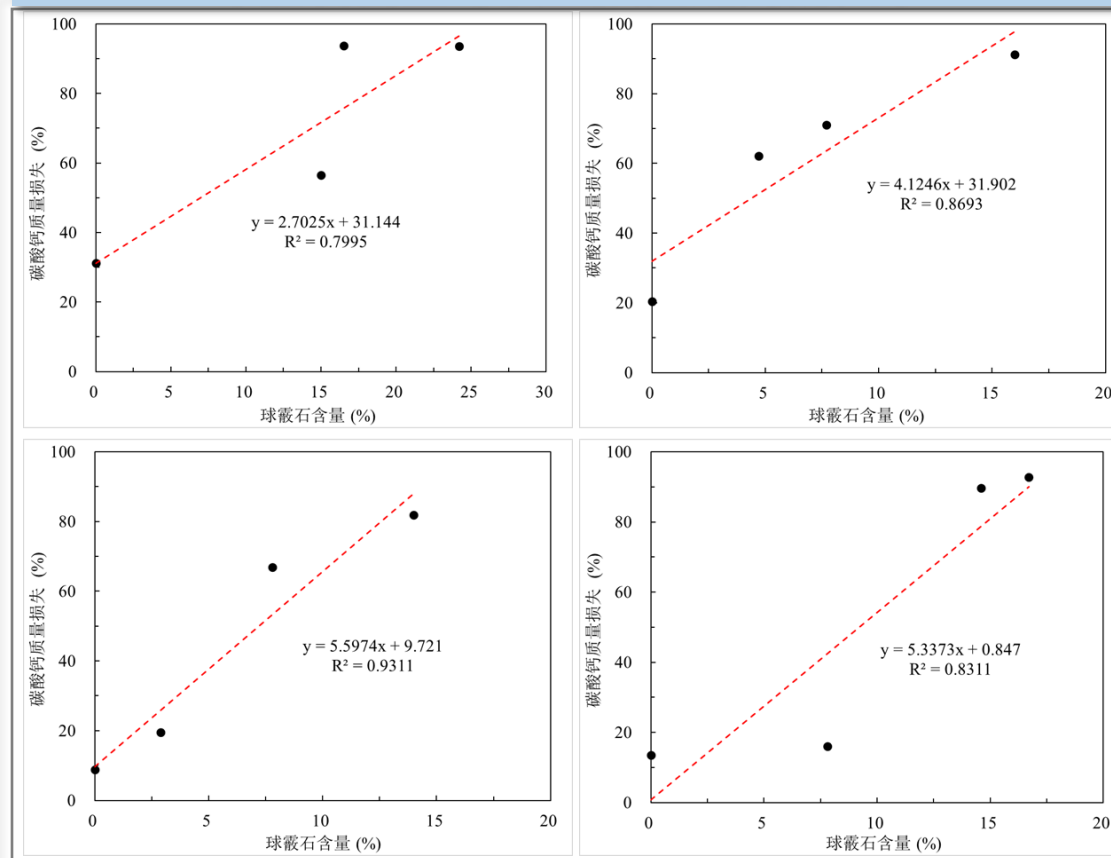
微生物矿化微观机制：矿物晶型与宏观力学强度

揭示了矿物晶型与宏观力学强度之间的内在关联

超声振荡实验结果



球霏石含量与质量损失之间的关系

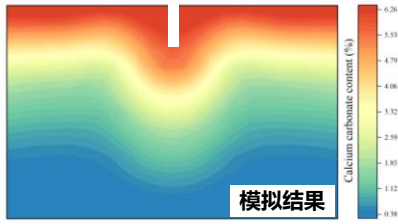
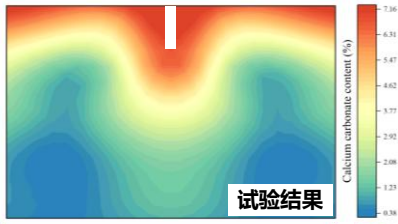
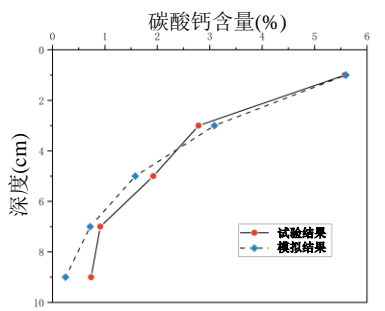
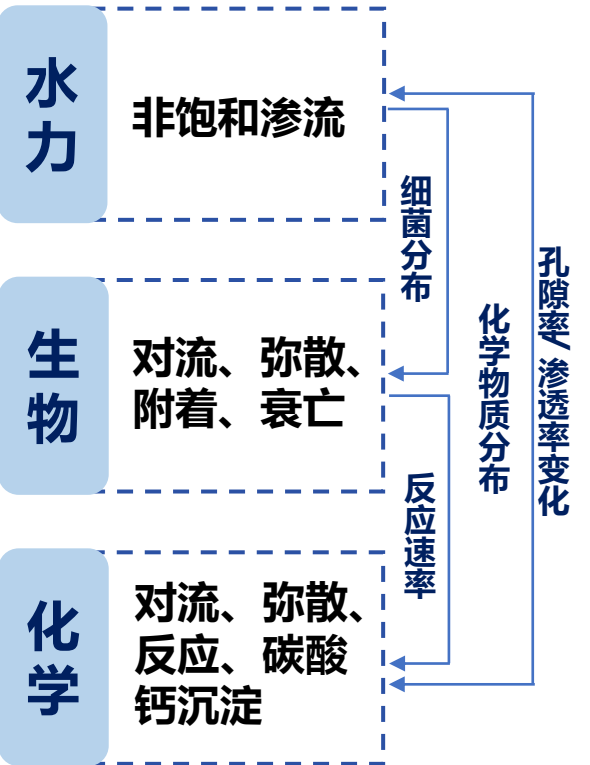


球霏石含量与碳酸钙质量损失之间呈现出明显的正比例关系，这表明球霏石含量降低（方解石含量增加），有助于提升碳酸钙的胶结性能

微生物矿化过程：多相物质运移-反应耦合模型

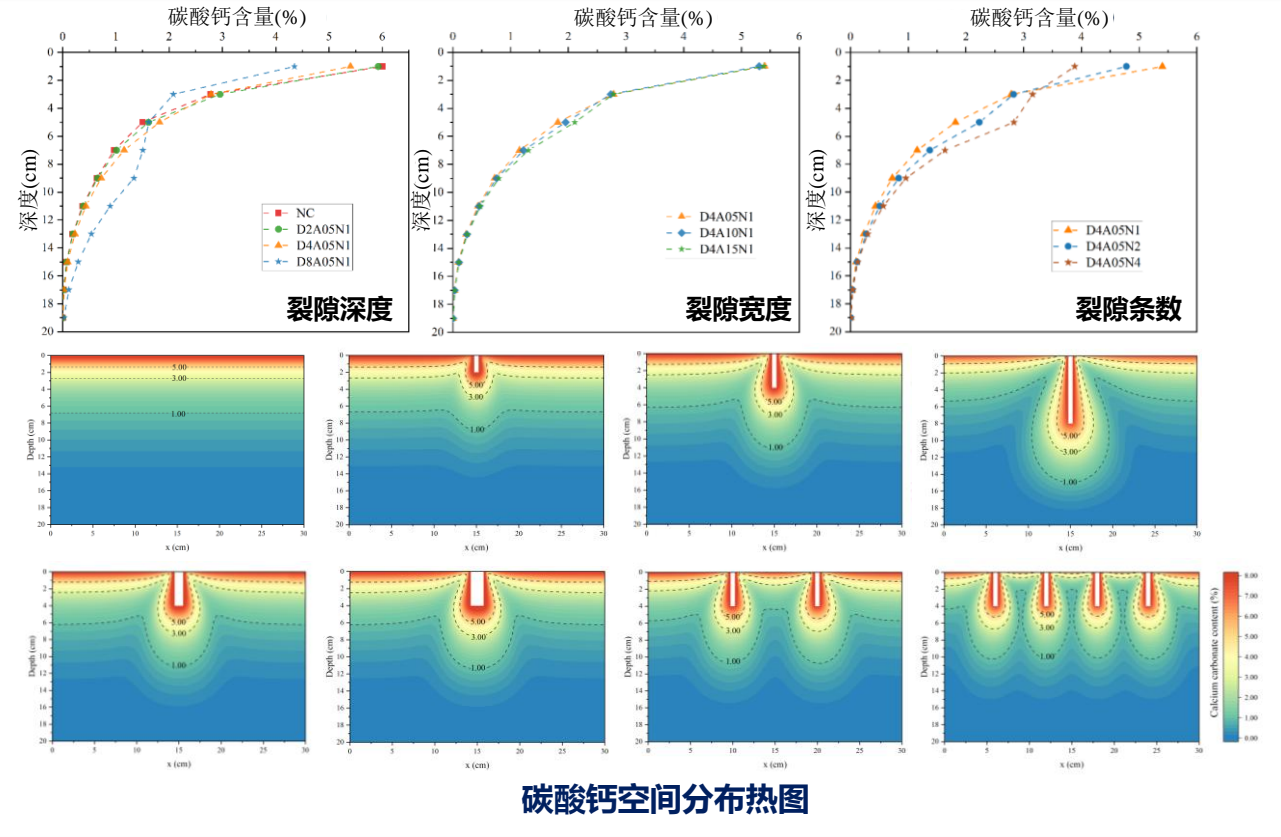
构建了微生物矿化多相物质运移-反应耦合模型，实现了对裂隙土中微生物基缓冲层处理效果的定量预测

模型构建



模型验证

研究结果

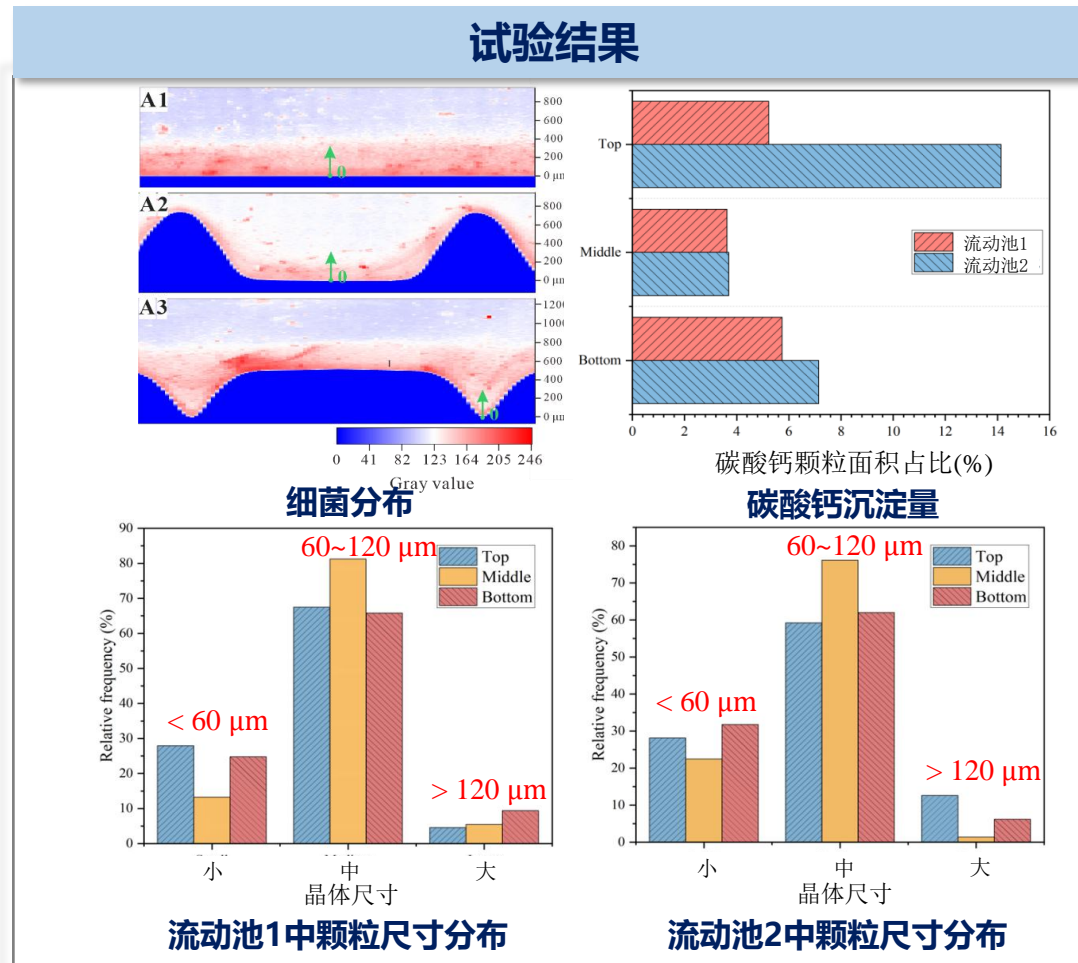
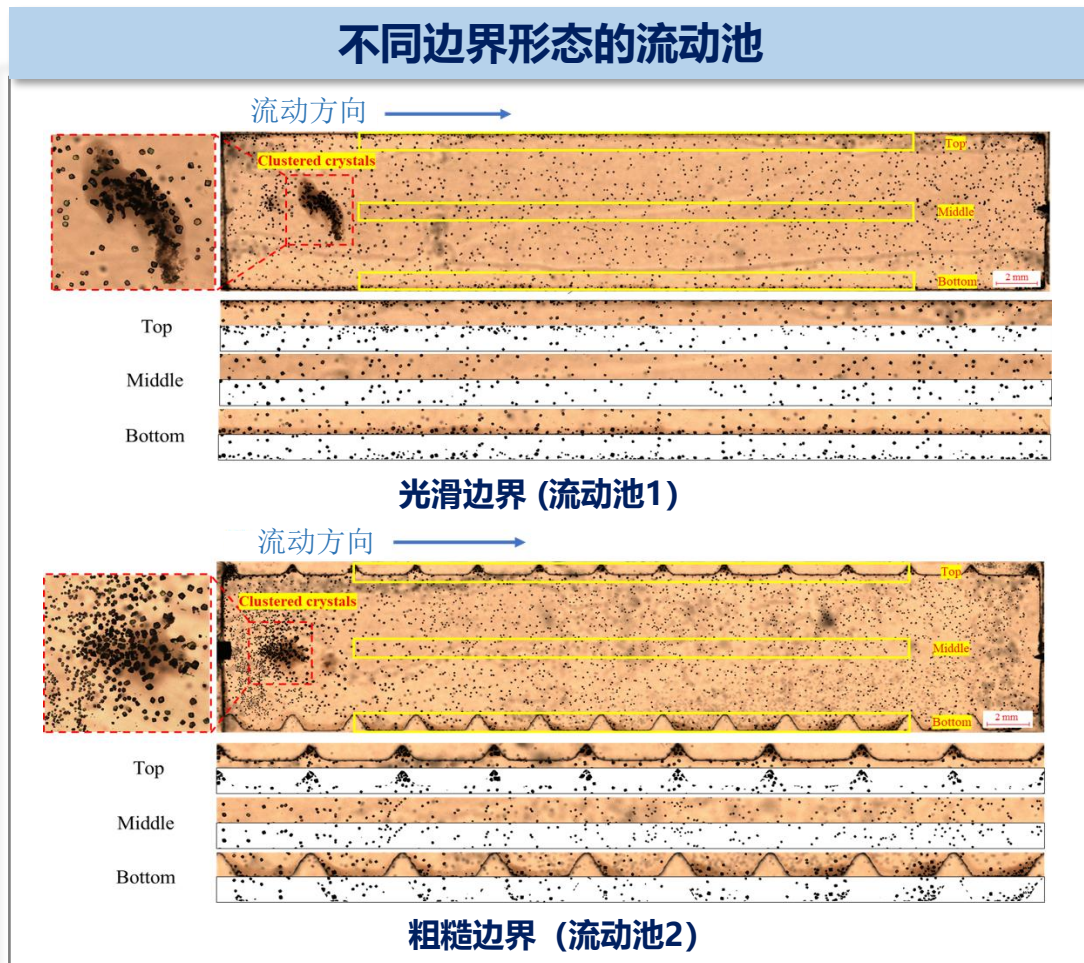


碳酸钙空间分布热图

裂隙的存在可形成优势流通道，有效促进菌液和胶结液向深部土体入渗，从而提高MICP的处理深度

微生物矿化过程：颗粒边界形态影响

探明了颗粒边界形态对MICP反应过程的影响规律和作用机制



细菌易在低流速区富集，粗糙界面因拥有更大的低速区而增强细菌吸附，从而促进更多且更大尺寸的碳酸钙晶体沉淀

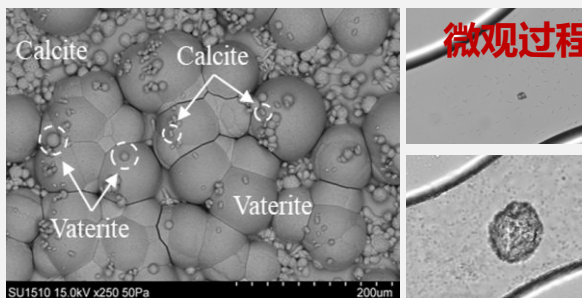
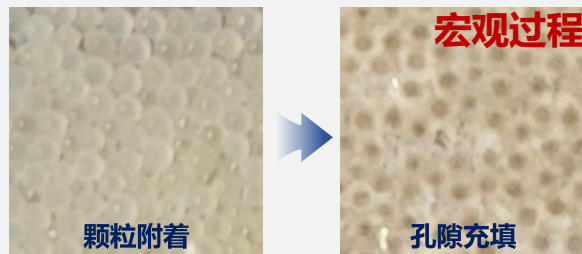
Bio-Barrier研究进展

复杂场景



挑战：高效处理

宏-微观过程



挑战：连续表征

原位效果



挑战：精准评价

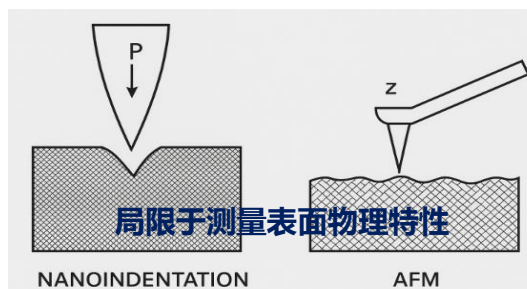
原位效果精准评价-基于微观力学测试的原位力学评价

问题与难点

- 原位力学评价效果往往局限于宏观 (m) - 细观 (mm) 尺度
- 缺乏微观矿物尺度 (μm) 力学评价方法
- 现有原位力学评价方法对材料损伤较大
- 缺少基于无损技术的原位强度评价方法



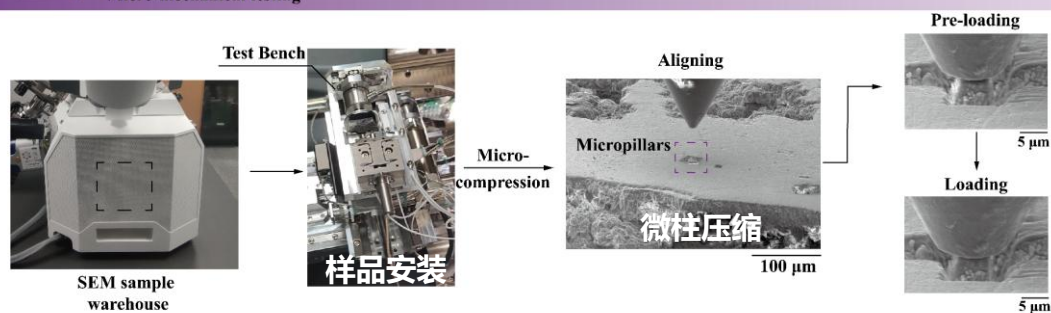
如何无损获取真实力学强度?



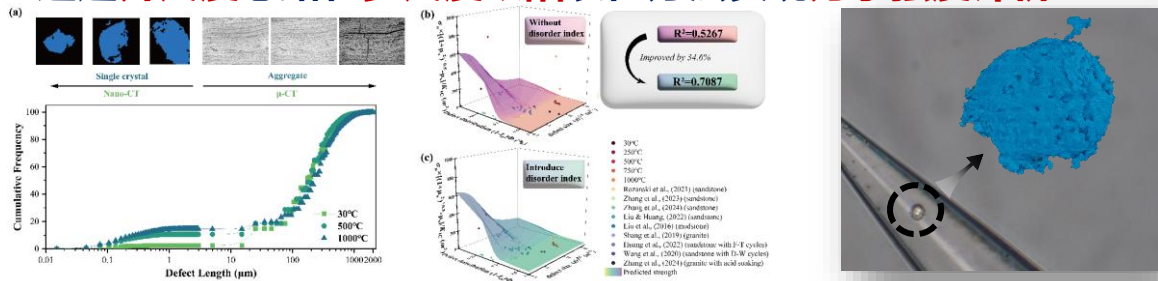
研究思路

建立微观尺度力学强度制备流程及测试方法

Micro-mechanical testing

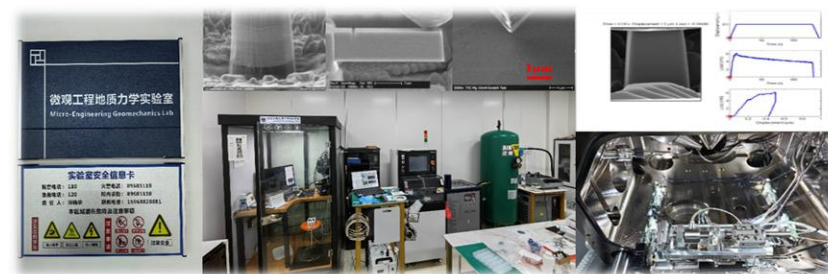


通过升尺度思路和多尺度缺陷表征方法实现力学强度评价

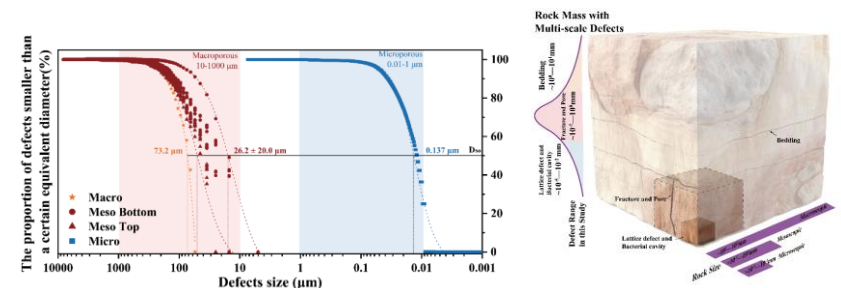


创新技术

微观力学测试系统



升尺度力学强度评价方法



建立基于微观力学的矿化胶结物升尺度力学强度评价方法

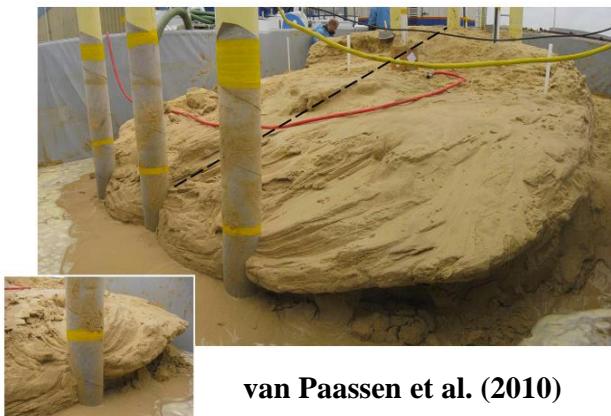
原位效果精准评价-微观力学测试技术

缺乏微观尺度表征技术

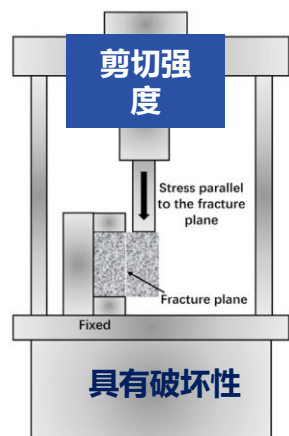
宏观尺度 (~m) 表征技术

细观 (~mm - ~cm) 尺度表征技术

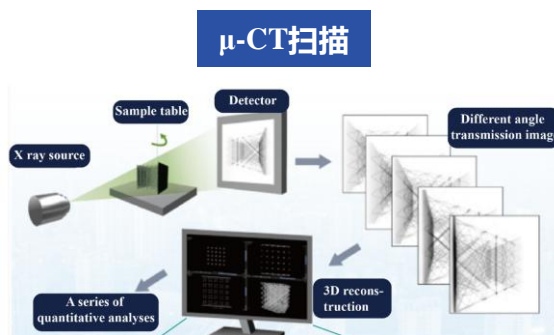
微观尺度表征技术



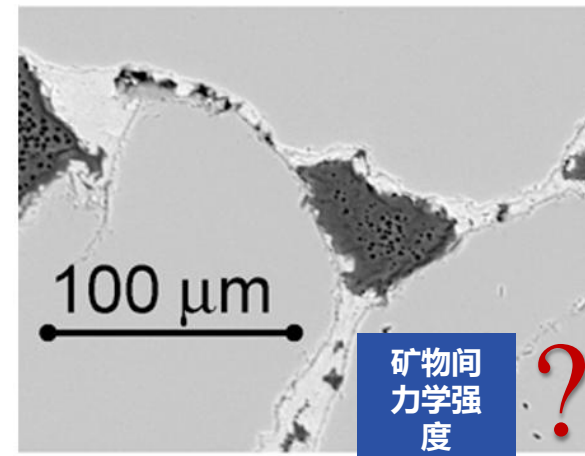
van Paassen et al. (2010)



Dong et al. (2024)

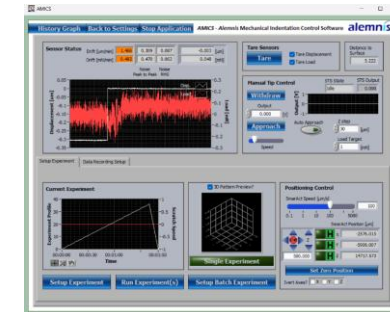
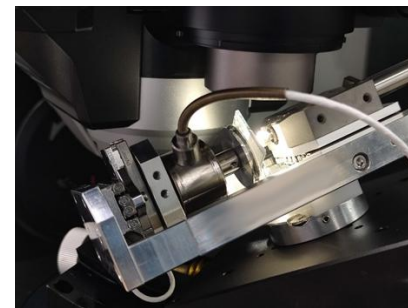
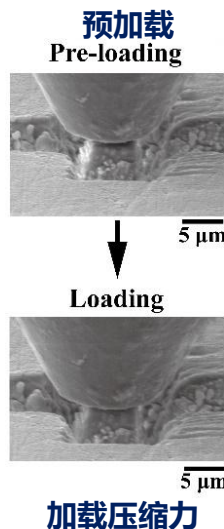
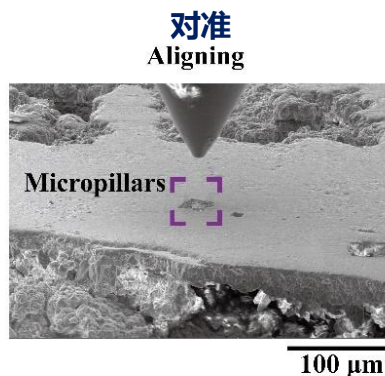
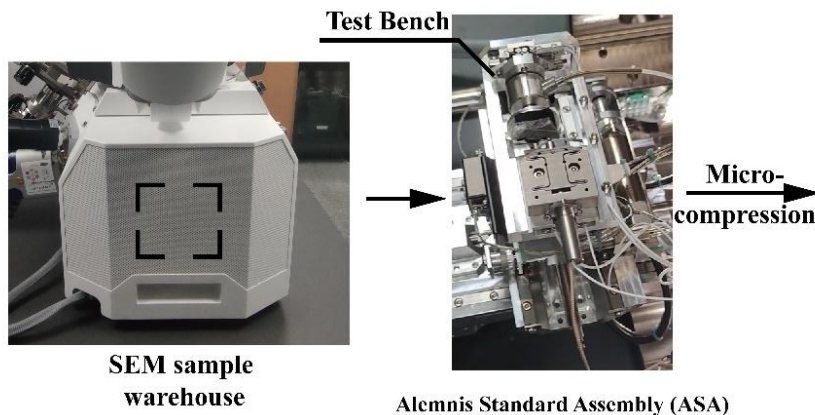


Wang et al. (2024)



建立微观力学表征技术 (碳酸钙矿物尺度真实力学强度)

微观力学测试系统

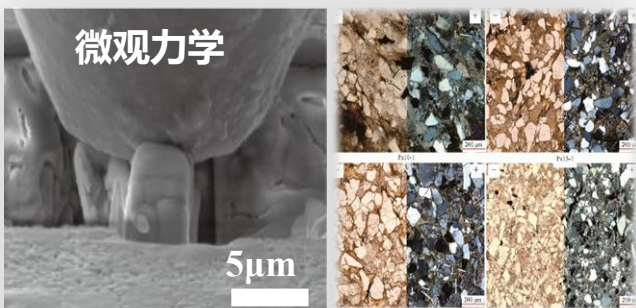


- 样品尺寸 < 5 μm
- 最小精度达 1nN
- 最大量程达 2.5N
- 真空/含水环境

原位效果精准评价-基于缺陷特征力学强度预测模型

□ 以小见大：利用微观矿物及矿物界面强度和多尺度缺陷特征，提出由微观强度无损预测宏-细观力学强度方法

微观 (Micro-scale)

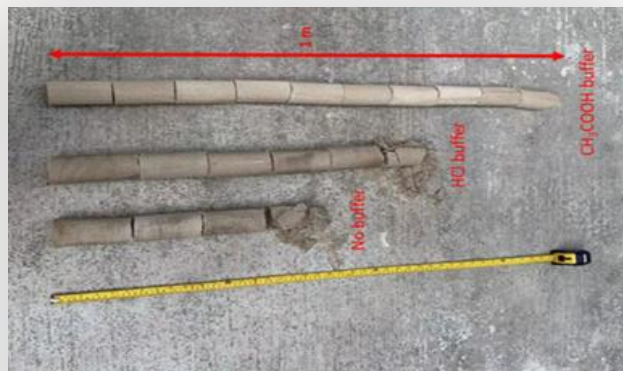


($10^{-5}\text{m}-10^{-2}\text{m}$)

矿物/矿物界面尺度

A: 矿物和矿物界面缺陷

细观 (Meso-scale)



Yang et al., (2022)

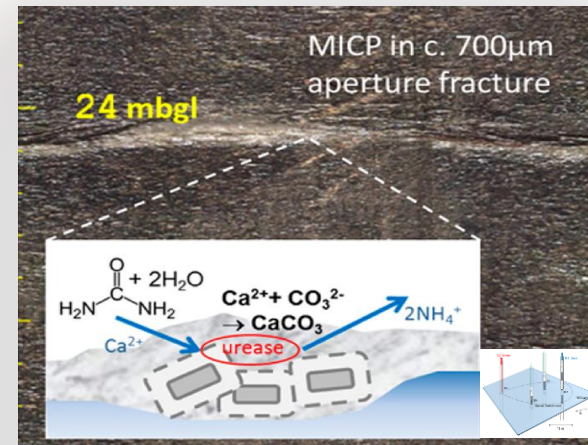
($10^{-2}\text{m}-10^0\text{m}$)

室内试验尺度

(难以大量取样进行测试)

A+ B: 孔隙、裂隙等细观尺度缺陷

宏观 (Macro-scale)



Cuthbert, et al., (2013)

($10^0\text{m}-10^3\text{m}$)

工程尺度

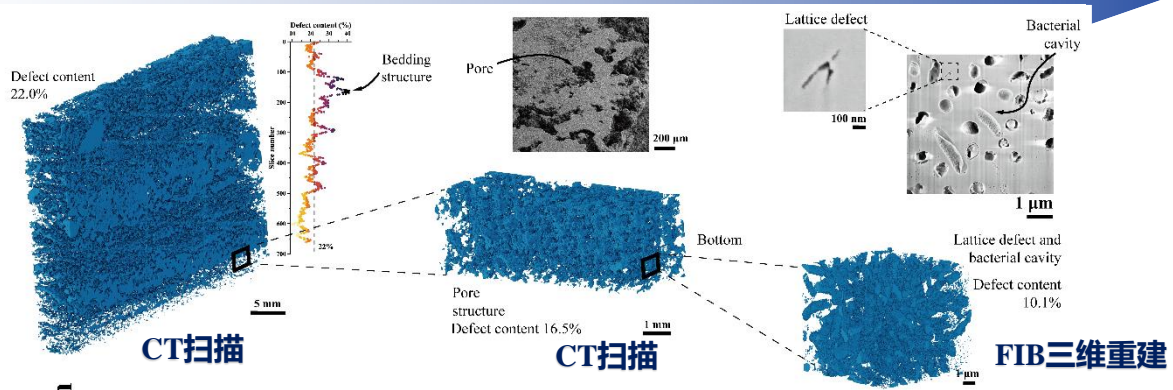
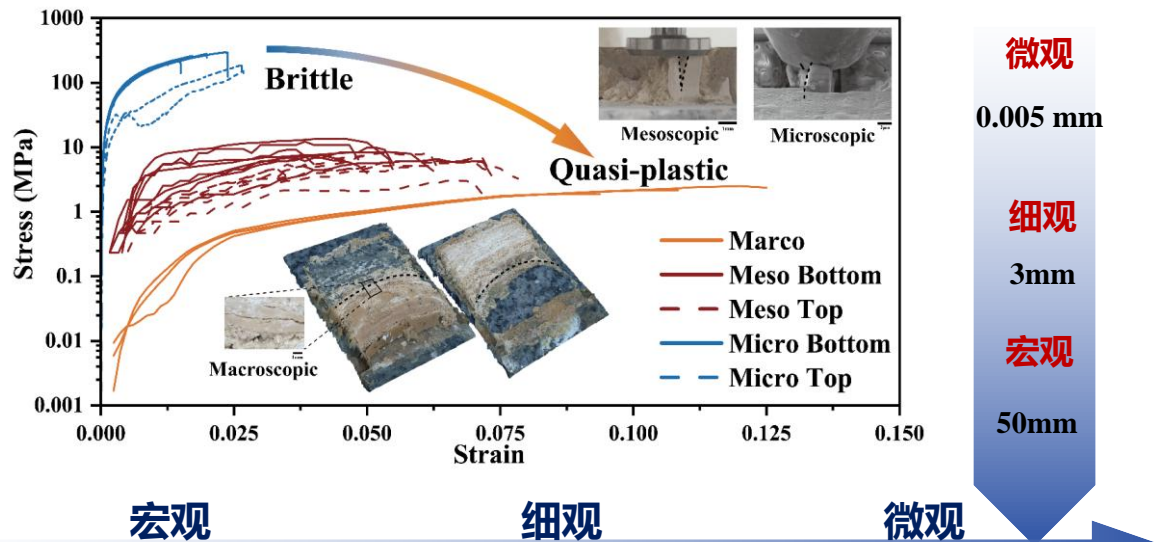
(难以进行宏观原位力学测试)

A+B+C: 层理、断层等大尺度地质结构面

岩土体物理力学性质具有多尺度性，宏-细观工程岩土体物理力学性质受控于多尺度缺陷结构特征。因此，基于微观力学测试方法得到的数据可以对宏-细观力学强度进行无损原位预测

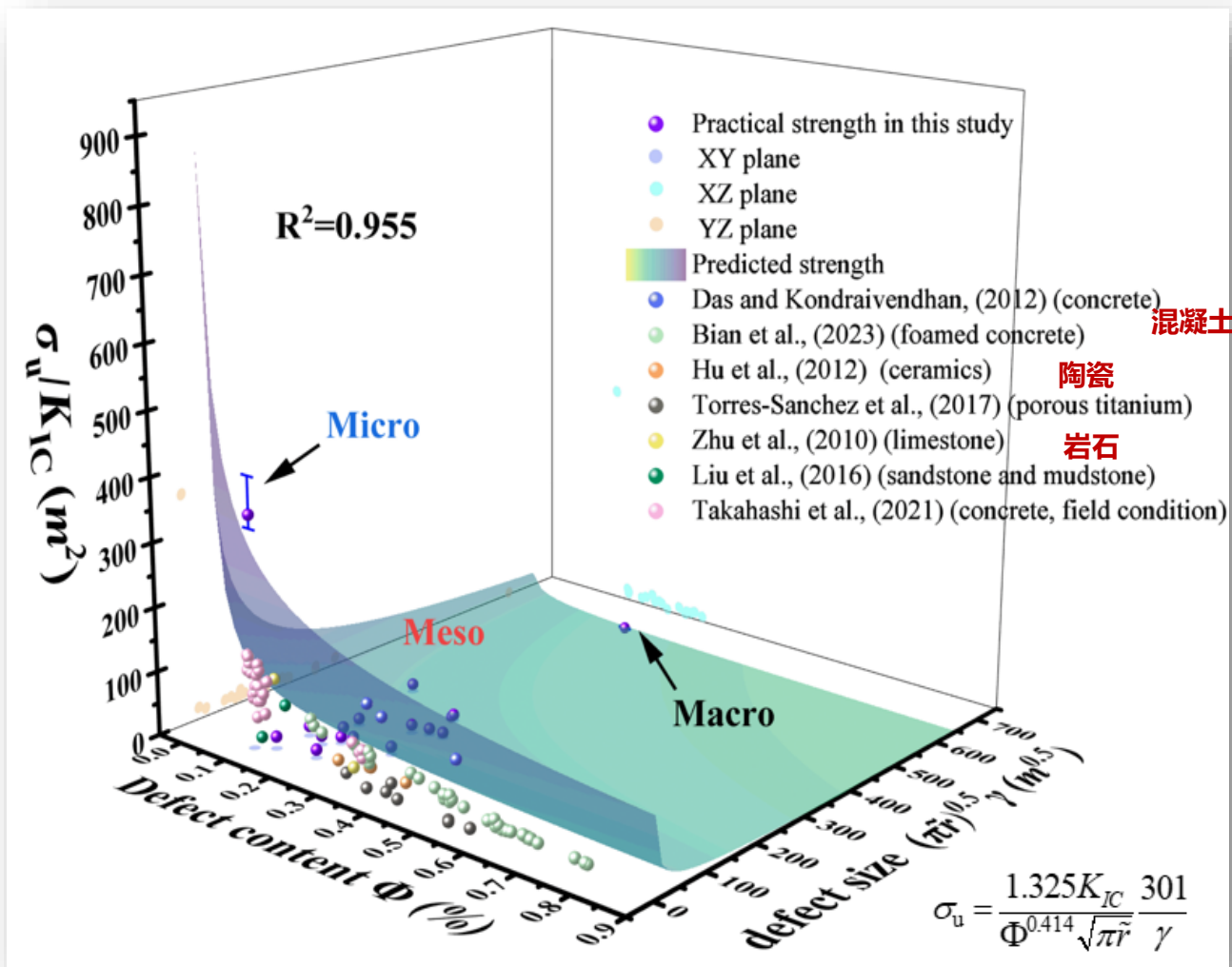
原位效果精准评价-基于缺陷特征力学强度预测模型

设置多尺度微观力学试验和缺陷结构重建



层理空隙~0.1mm 2.19 MPa±0.31 MPa	晶间孔隙~10μm 9.32 MPa± 4.26 MPa	晶内缺陷~100nm 264.3 MPa± 48.1 MPa
---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------

建立基于缺陷特征力学强度预测模型



$$\sigma_u = \frac{1.325 K_{IC}}{\Phi^{0.414} \sqrt{\pi r}} \frac{301}{\gamma}$$

结果表明：利用无损方法得到的缺陷特征是控制力学强度的关键因素；对于大范围的缺陷尺寸（范围从10nm到0.5mm），预测模型仍然保证较好的拟合结果 $R_2=0.955$ ，其他类岩石脆性材料（包括岩石、混凝土、陶瓷和钛金属）也可以在公式中获得良好的拟合结果

创新构想

微生物韧性
调控策略



极端气候
地质灾害

JGR-Earth Surface 期刊主编

Ann Rowan 教授高度评价申

请人的研究工作: 开拓了微
生物工程地质研究方向

(make a nice addition to...)



Check for updates

AGU
ADVANCING
EARTH AND
SPACE SCIENCES

JGR Earth Surface 2024

RESEARCH ARTICLE
10.1029/2023JF007573

Enhancing Soil Resilience to Climatic Wetting-Drying Cycles Through a Bio-Mediated Approach

Chao-Sheng Tang¹, Bo Liu¹, Farshid Vahedifard², Ning-Jun Jiang³, Cheng Zhu⁴, Zheng-Tao Shen¹, Xiao-Hua Pan¹, Qing Cheng¹, and Bin Shi¹

Key Points:

- A sustainable bio-mediated approach using microbially induced calcite precipitation (MICP) was applied to enhance soil resilience to climatic wetting-drying cycles
- MICP significantly improves water retention, desiccation and erosion resistance of surface soil
- This study provides new insights into the fundamental mechanisms of the interaction between climate and MICP-treated soil

Supporting Information:

Supporting Information may be found in the online version of this article.

Correspondence to:

C.-S. Tang and B. Liu,
tangchaosheng@nju.edu.cn;
liubo@mail.nju.edu.cn

Citation:

Tang, C.-S., Liu, B., Vahedifard, F., Jiang, N.-J., Zhu, C., Shen, Z.-T., et al. (2024). Enhancing soil resilience to climatic wetting-drying cycles through a bio-mediated approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 129, e2023JF007573. <https://doi.org/10.1029/2023JF007573>

Received 2 DEC 2023
Accepted 2 MAY 2024

¹School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, China, ²Department of Civil and Environmental Engineering, Tufts University, Medford, MA, USA, ³Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, China, ⁴Department of Civil and Environmental Engineering, Rowan University, Glassboro, NJ, USA

Abstract Climatic wetting-drying cycles exacerbated by climate change can trigger several weakening mechanisms in surface soils, potentially leading to instability and failure of slopes and earthen structures. This study proposes a bio-mediated approach based on microbially induced calcite precipitation (MICP) to increase soil resilience to wetting-drying cycles. To explore its viability and the underlying mechanisms, we conducted a series of laboratory tests on clayey soil that underwent six wetting-drying cycles. The tests were conducted with different treatment methods to investigate the effect of treatment sequence and cementation solution concentration. After MICP treatment, the initial evaporation rate, surface crack ratio during drying, and total soil weight loss during rainfall erosion were reduced by up to 32%, 85%, and 90%, respectively. Spraying the cementation solution first in the MICP treatment sequence proves more effective in improving soil water retention capacity. On the other hand, initiating the sequence with the bacterial solution demonstrates a more pronounced effect in reducing soil desiccation cracks and erosion. Microstructure analysis reveals that the content and distribution of CaCO₃ precipitation are the major factors controlling the effectiveness of MICP for the cementation of clayey soil. Employing MICP can minimize the carbon footprint and contribute to developing environmentally friendly solutions for soil improvement in regions affected by climatic wetting-drying cycles.

Plain Language Summary The rising frequency and intensity of climatic wetting-drying cycles driven by climate change pose a threat to surface soil stability, consequently increasing the risk of land degradation, soil erosion, landslide, and other forms of ground instabilities and failures. This study presents a bio-mediated approach using microbially induced calcite precipitation to enhance soil resilience to wetting-drying cycles. Experimental results show that MICP is capable of improving soil properties related to water retention, desiccation resistance, and erosion control. The microstructure analysis further elucidates the role of MICP-induced CaCO₃ precipitation in cementing clayey soil and demonstrates that the bio-created buffer barrier significantly mitigates the adverse effect of climatic wetting-drying cycles on surface soil. This study is expected to offer an environmentally friendly and sustainable soil improvement solution in regions impacted by cascading climatic extremes.

代表性论文

- **Chao-Sheng Tang***, Bo Liu*, Farshid Vahedifard, Ning-Jun Jiang, Cheng Zhu, Zheng-Tao Shen, Xiao-Hua Pan, Qing Cheng, Bin Shi. Enhancing soil resilience to climatic wetting-drying cycles through a biomediated approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 129, e2023JF007573.
- Dian-Long Wang, Xiao-Hua Pan*, **Chao-Sheng Tang**, et al. . On enhancing the mechanical behaviors of bio-carbonation of reactive magnesia cement solidified construction and demolition wastes via fiber reinforcement. *Acta Geotechnica*, 2025.
- Yu-Jia Liu, Xiao-Hua Pan*, **Chao-Sheng Tang***, et al.. Bacterial organic matter-based control method for freeze–thaw resistance improvement of MICP bio-cement. *Acta Geotechnica*, 2025.
- Rui Wang, **Chao-Sheng Tang***, Xiao-Hua Pan, et al. Mechanical Behavior of Biocarbonizing Reactive Magnesia–Stabilized Soft Soil: Strength Control and Prediction Framework Based on Effective Carbonate-to-Magnesia Ratio. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2025, 151(11), 04025135.
- Chao LV, **Chaosheng Tang***, Junzheng ZHANG et al. Study on the electrokinetic effect of the microbially induced calcium carbonate precipitation process using integrated electric-microfluidics. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, 2025, 68(4), 1420703:1–1420703:13.
- Chao Lv, **Chao-Sheng Tang***, Jun-Zheng Zhang, et al. Dissolution and recrystallization behavior of microbially induced calcium carbonate: influencing factors, kinetics and cementation effect. *Canadian Geotechnical Journal*, 2025, 62: 1-13.
- Zhihao Dong, Xiaohua Pan*, **Chao-Sheng Tang***, et al. An adjustable bio-sealing method for rock fracture leakage mitigation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2025, 17(1): 220-232.
- Zhi-Hao Dong, Xiao-Hua Pan*, **Chao-Sheng Tang***, et al. A Microbially Induced Magnesia Carbonation (MIMC) Method with Potential Application for Crack Healing of Sandstone Cultural Relics: Improving Interfacial Bonding Strength. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2025, 58(1):557-573.
- Bo Liu, **Chao-Sheng Tang***, Xiao-Hua Pan, et al. Mitigating rainfall induced soil erosion through bio-approach: From laboratory test to field trail. *Engineering Geology*, 2025, 344, 107842.
- Dian-Long Wang, **Chao-Sheng Tang***, Xiao-Hua Pan, et al. Construction and Demolition Waste Stabilization through Biocarbonation of Reactive Magnesia Cement: Effect of Urea Concentration. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2024, 37(1), 04024450.
- Dian-Long Wang, **Chao-Sheng Tang***, Xiao-Hua Pan, et al. A novel bio-carbonation method of reactive magnesia with urea pre-hydrolysis for geomaterial stabilization. *Géotechnique*, 2024, 74(13): 1634–1648.
- Rui Wang, **Chao-Sheng Tang***, Xiao-Hua Pan*, et al. An efficient bio-stabilization technology with bio-carbonation of reactive magnesia for soil improvement in cold regions. *Engineering Geology*, 2024, 343, 107779.
- Bo Liu, **Chao-Sheng Tang***, Xiao-Hua Pan, et al. Influence of layer thickness on bioremediation of drought-induced soil desiccation cracks using microbially induced calcite precipitation. *Acta Geotechnica*, 2024, 19: 4399–4414.
- Chao Lv, **Chao-Sheng Tang***, Jun-Zheng Zhang, et al. Regulating the Process of Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation through Applied Electric Fields: Evidence and Insights Using Microfluidics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2024, 150 (10), 04024087.
- Xin-Lun Ji, **Chao-Sheng Tang***, Xiao-Hua Pan*, et al. Enhancing biocementation performance in low permeability clayey soil through sand column strategy. *CATENA*, 2024, 245, 108301.
- Xin-Lun Ji, **Chao-Sheng Tang***, Xiao-Hua Pan*, et al. Longterm performance on drought mitigation of soil slope through bio-approach of MICP: Evidence and Insight from Both Field and Laboratory Tests. *Water Resources Research*, 2024, 60, e2024WR037486.
- Rui Wang, **Chao-Sheng Tang***, Xiaohua Pan *, et al. A biotechnological approach for suspended solids removal in biogas slurry via microbially induced calcite precipitation (MICP). *Journal of Cleaner Production*, 2024, 459, 142537.
- Bo Liu, **Chao-Sheng Tang***, Xiao-Hua Pan, et al. Suppressing Drought-Induced Soil Desiccation Cracking Using MICP: Field Demonstration and Insights. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2024, 150(3), 04024006.
- Jun-Zheng Zhang, **Chao-Sheng Tang***, Chao Lv, et al. Monitoring and Characterizing the Whole Process of Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation Using Electrical Resistivity Tomography. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2024, 150(1), 04023132.
- Chao Lv, Wei-Qiang Li, **Chao-Sheng Tang***, et al.. Characterization and quantification of calcite distribution in MICPtreated sand using 1-XRF image processing technique. *Acta Geotechnica*.
- Hui-Chong Hu, **Chao-Sheng Tang***, Zhengtao Shen*, et al. Enhancing lead immobilization by biochar: creation of “surface barrier” via bio-treatment. *Chemosphere*, 2023, 327, 138477.
-

科学意义与价值

□ 响应国家防灾减灾战略需求，推动绿色技术革新

- **对接国家安全需求**：直接服务于《国家适应气候变化战略2035》、《国家综合防灾减灾规划》，提升气候变化背景下我国地质灾害防治科技水平
- **替代传统工程弊端**：通过微生物作用替代传统水泥灌浆等高能耗工程手段，减少碳排放推动地质灾害防治向绿色可持续模式转型

□ 突破学科边界，引领工程地质-微生物交叉创新

- **开辟工程地质-微生物耦合新方向**：融合生物学、工程地质、岩土工程、大气科学等，催生“微生物工程地质学”新兴交叉学科
- **引领学科气候适应研究**：通过微生物技术增强地表系统气候韧性，为极端气候地质灾害防控贡献“基于自然解决方案（NBS）”的中国案例

□ 创新极端气候地质灾害防控理论，重构气候-微生物-地质体相互作用认知

- **揭示微生物“缓冲层”效应**：阐明微生物-土体相互作用机制，提出“微生物屏障缓冲气候应力”新理论
- **发展动态适应性防控理念**：突破传统静态防控思维，通过微生物群落的自我修复与环境响应能力，实现灾害防控体系的动态优化，为气候变化背景下的韧性防灾提供理论支撑

请批评指正

tangchaosheng@nju.edu.cn

https://www.researchgate.net/profile/Chao-Sheng_Tang

<https://scholar.google.com/citations?user=Vfr1qWIAAAAJ&hl=en>

<https://es.nju.edu.cn/tcs/list.htm>