



南京工业大学

NANJING TECH
UNIVERSITY

生物菌丝复合土体基本性质初探

完 成 人：高洪梅 张鑫磊 王志华 刘汉龙

单 位：南京工业大学



内容提要

Contents

第一部分

研究背景

第二部分

菌丝复合土水力特性

第三部分

菌丝复合土强度特性

第四部分

菌丝体应用场景与展望

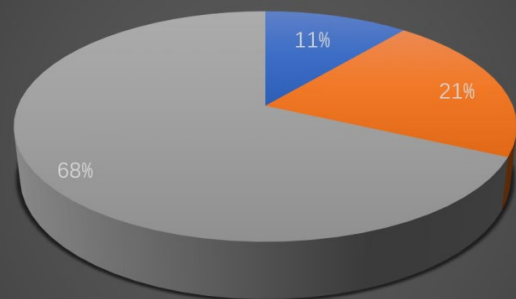
第五部分

结论

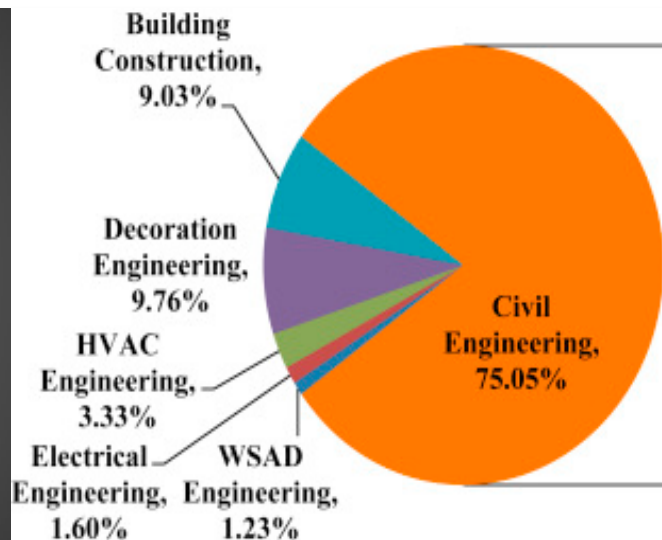
1. 研究背景-建筑行业的可持续发展

- 联合国环境署发布《建筑与气候变化：决策者摘要》指出，全球能源消耗，建筑业约占**40%**，全球温室气体排放**30%**以上与建筑业相关。如何实现“双碳”目标？
- “混凝土森林”成为第一大无法降解物质，加剧了全球变暖、土壤和水资源污染。如何促进土木工程建造与自然生态间的**平衡**，是未来工程建造亟待解决的**关键课题**。

中国建筑能耗（2020）



■ 建筑建造 ■ 建筑运行 ■ 其他



建筑垃圾体量巨大



碳达峰 碳中和

某一个时刻，二氧化碳排放量达到历史最高值，之后逐步回落。

通过植树造林、节能减排等形式，抵消自身产生的二氧化碳或温室气体排放量，实现正负抵消，达到相对“零排放”。

碳排放量

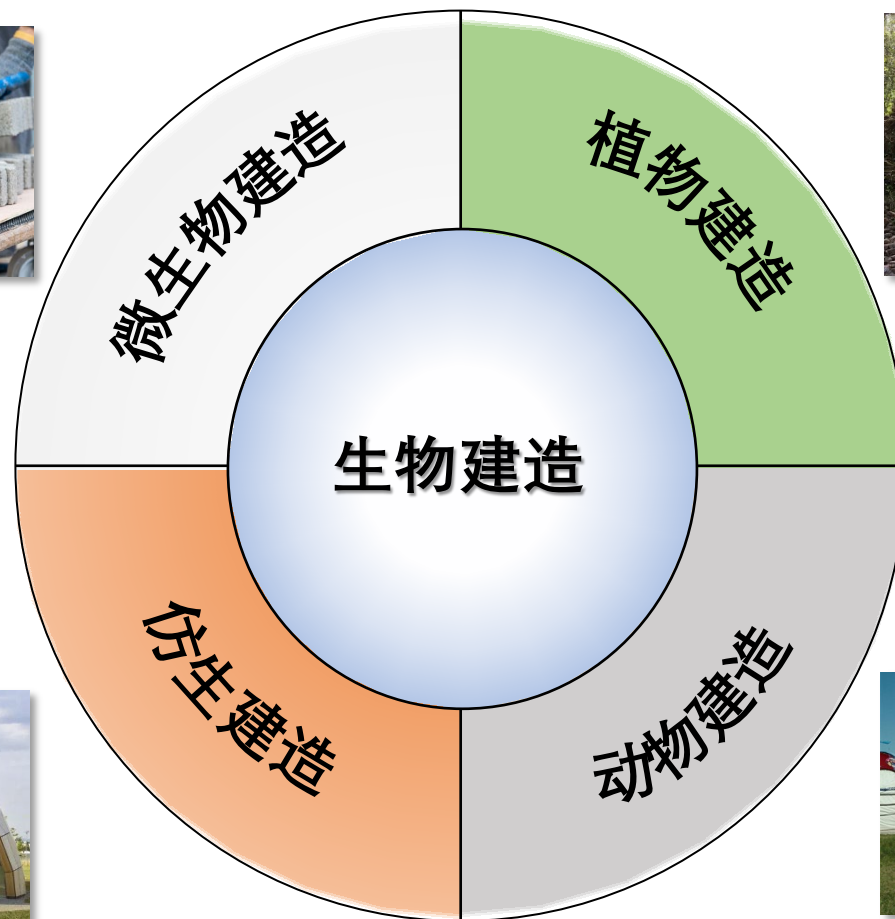
2021 2030 碳达峰

排放 = 吸收

建筑行业的高能耗、高排放

1. 研究背景-生物建造体系

□ **生物建造**是一种以生物为载体实施工程建设，或基于生物机理研发新材料、装备与工艺的新型建造模式，包括**微生物建造**、**植物建造**、**动物建造**以及**仿生建造**，具有**绿色**、**低碳**和与自然融合的典型特征。



1. 研究背景-生物基材料发展前景

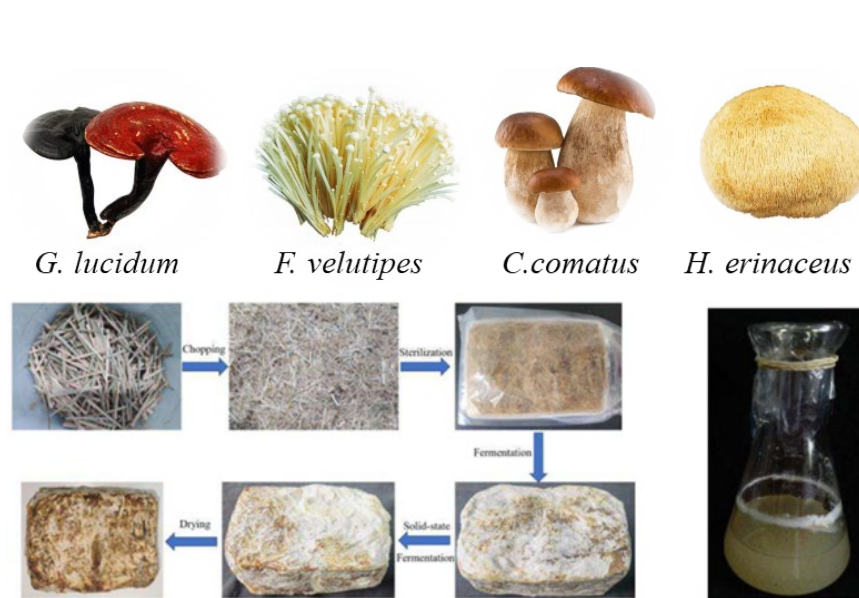
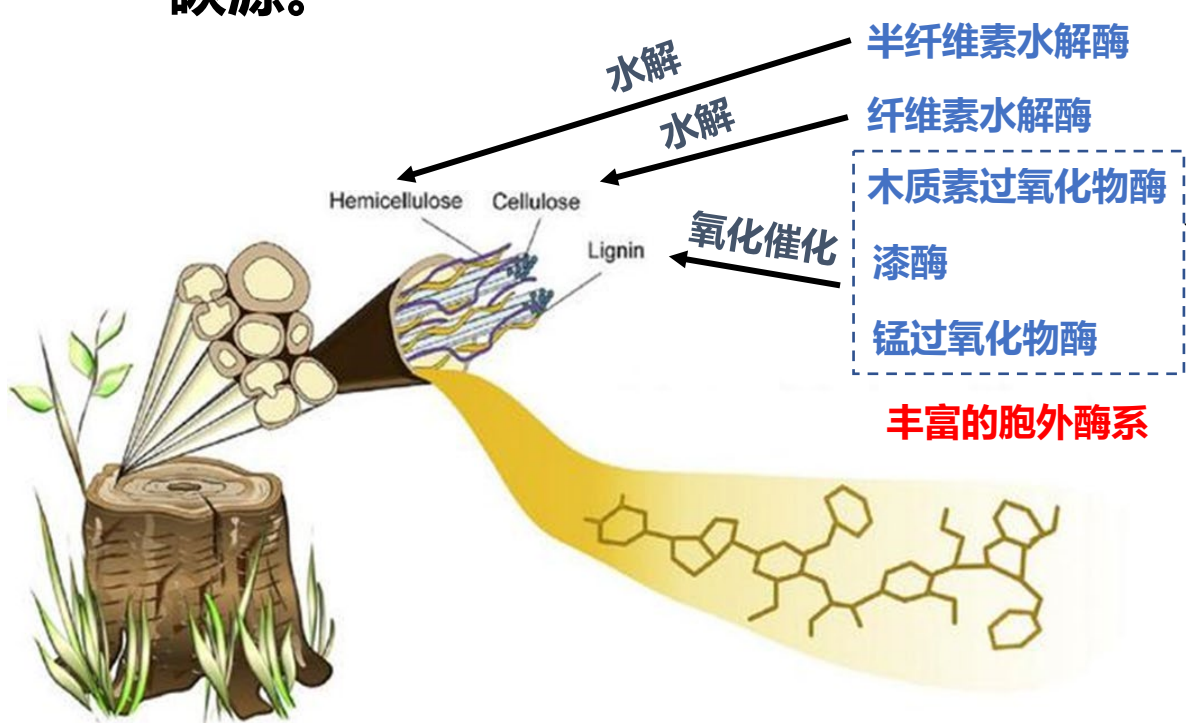
- 生物建造将大规模变革社会物质制造的方式，为人类生活提供更加高质量的物质基础和生存环境，**促进建筑往绿色、高效、低成本方向发展**；
- 营养物质：农业固废富含纤维素及木质素等大分子，非常**适用于生物转化**。



变废为宝，一举两得

1. 研究背景-食用菌的特点

- 食用菌为高等真菌，通常生长在朽木、枯枝落叶及草地上，**非常契合农林废弃物生物转化**；
- 食用菌生长释放孢子，这些孢子定殖于浅层土壤有机质上，形成菌丝体；
- 真菌分泌**胞外水解酶**实现对木质素、半纤维素及纤维素的水解，形成菌丝体生长所需要的碳源。



菌丝体复合材料符合双碳战略

生长变建造，排碳变固碳

1. 研究背景-菌丝体复合材料

✍ 菌丝体复合材料及应用

- 菌丝体复合材料：真菌菌丝体与天然或人工材料结合而成的复合材料，**具有较强的机械强度和韧性**
- 菌丝皮革：美国MycoWorks公司建成万吨级菌丝体皮革工厂；上海农科院研发的菌丝皮革，抗拉强度可达牛皮革的85%；作为传统皮革的替代品，已被爱马仕、阿迪达斯、LV及奔驰等品牌应用；
- 此外，一次性菌丝餐具、菌丝包装盒可替代塑料制品；菌丝家具碳足迹仅为木材的1/20。



(a) 菌丝皮革



(b) 菌丝餐具



(c) 菌丝包装盒



(d) 菌丝家具

[1]Augusta Pownall. Pavilion grown from mycelium acts as pop-up performance space at Dutch Design Week (2021)

[2]Heisel F. Design of a loadbearing mycelium structure through informed structural. Cambridge, UK (2017)

[3]Salifu E. Fungal-induced water repellency in sand. Géotechnique. (2021)

1. 研究背景-菌丝体复合材料

菌丝体复合材料及应用

- 菌丝体复合材料：真菌菌丝体与天然或人工材料结合而成的复合材料，具有较强的机械强度和韧性
- 建筑外墙材料^[1]：荷兰设计周展出的成长馆，较好韧性及强度，良好隔音与保温性能；
- 承重结构^[2]：优化配比，形成致密菌丝体，较好的抗压及耗能性能；
- 防水材料^[3]：较好的疏水性。



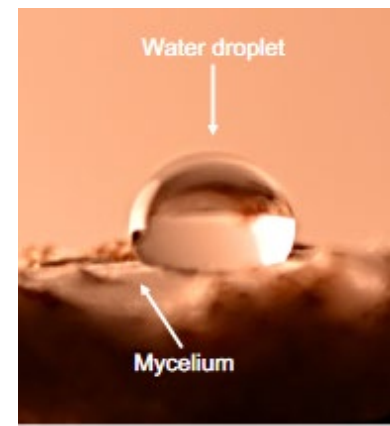
(a) 成长馆



(b) MycoTree 菌丝体支撑结构



(c) 美国Hy-Fi 塔



(d) 菌丝疏水性

[1]Augusta Pownall. Pavilion grown from mycelium acts as pop-up performance space at Dutch Design Week (2021)

[2]Heisel F. Design of a loadbearing mycelium structure through informed structural. Cambridge, UK (2017)

[3]Salifu E. Fungal-induced water repellency in sand. Géotechnique. (2021)

用于建筑领域，有效实现碳减排，助力行业可持续发展



内容提要

Contents

第一部分

研究背景

第二部分

菌丝复合土水力特性

第三部分

菌丝复合土强度特性

第四部分

菌丝体应用场景与展望

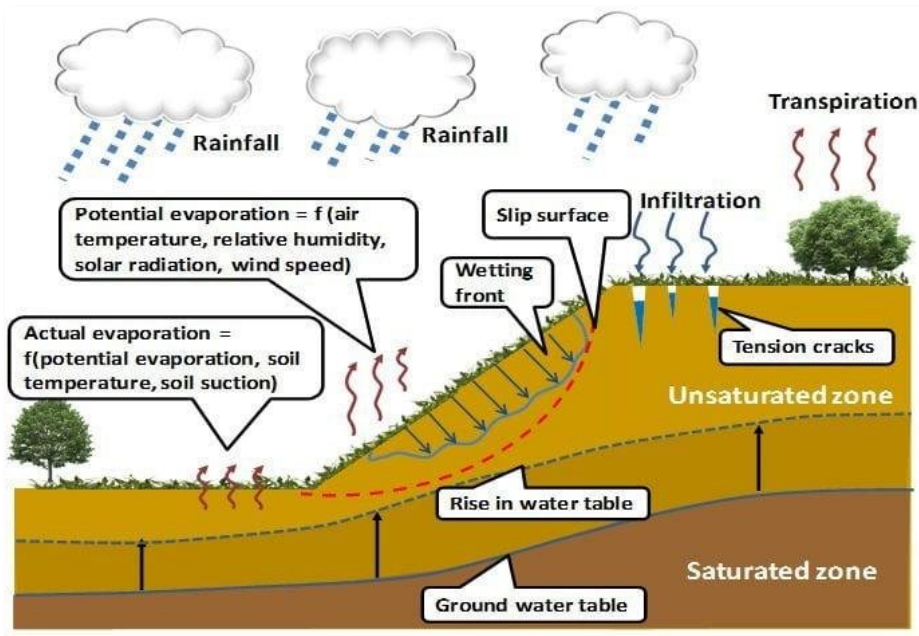
第五部分

结论

2. 菌丝复合土水力特性

2.1 研究背景

- 降雨及地下水入渗引发孔压升高与抗剪强度降低是滑坡及挡土结构失效的重要诱因；
- 疏水材料能延缓水分入渗、抑制毛细上升并减少蒸发，在边坡减渗及垃圾填埋场覆盖等工程中得到应用。

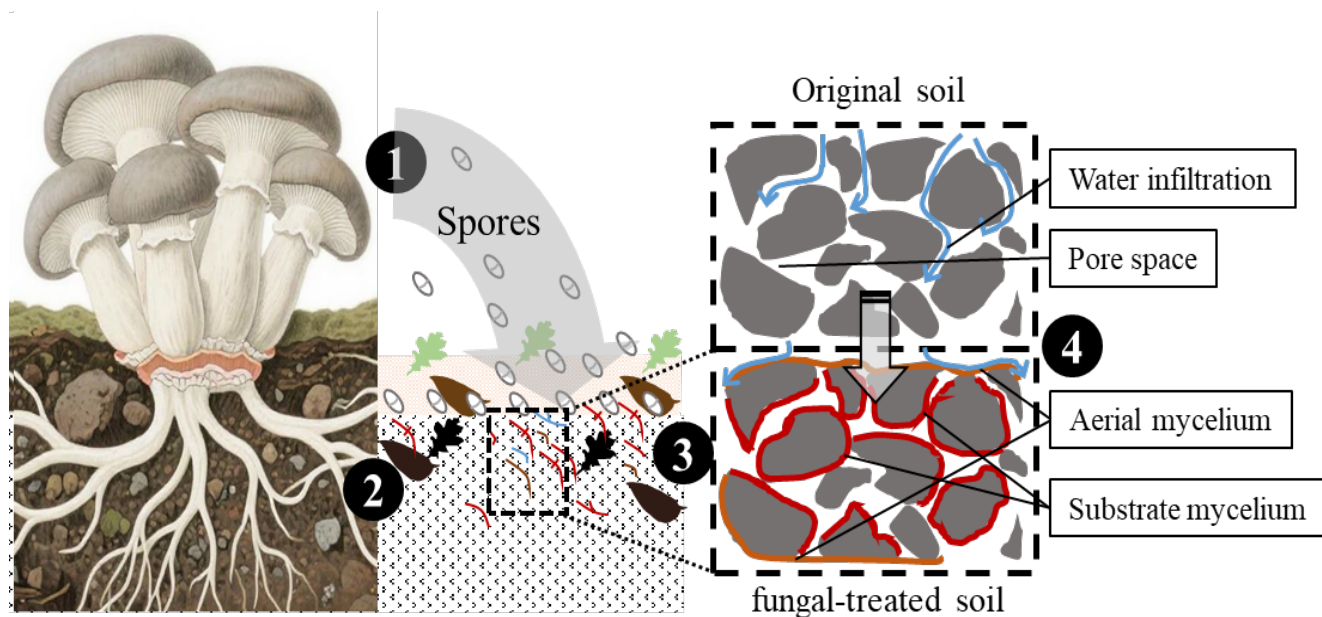


降雨入渗引发边坡失稳

2. 菌丝复合土水力特性

2.1 研究背景

□ 菌丝体在土壤中的定殖衍生过程是否会改变局部水力特性?



菌丝定殖生长过程示意图

使用真菌:

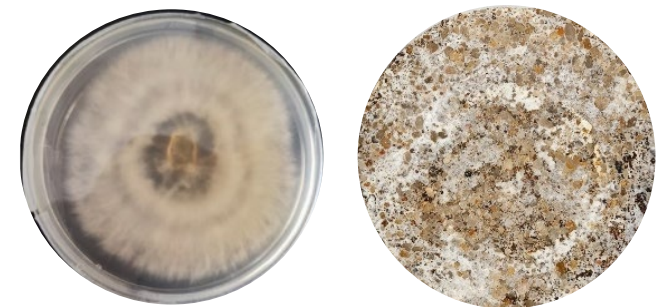
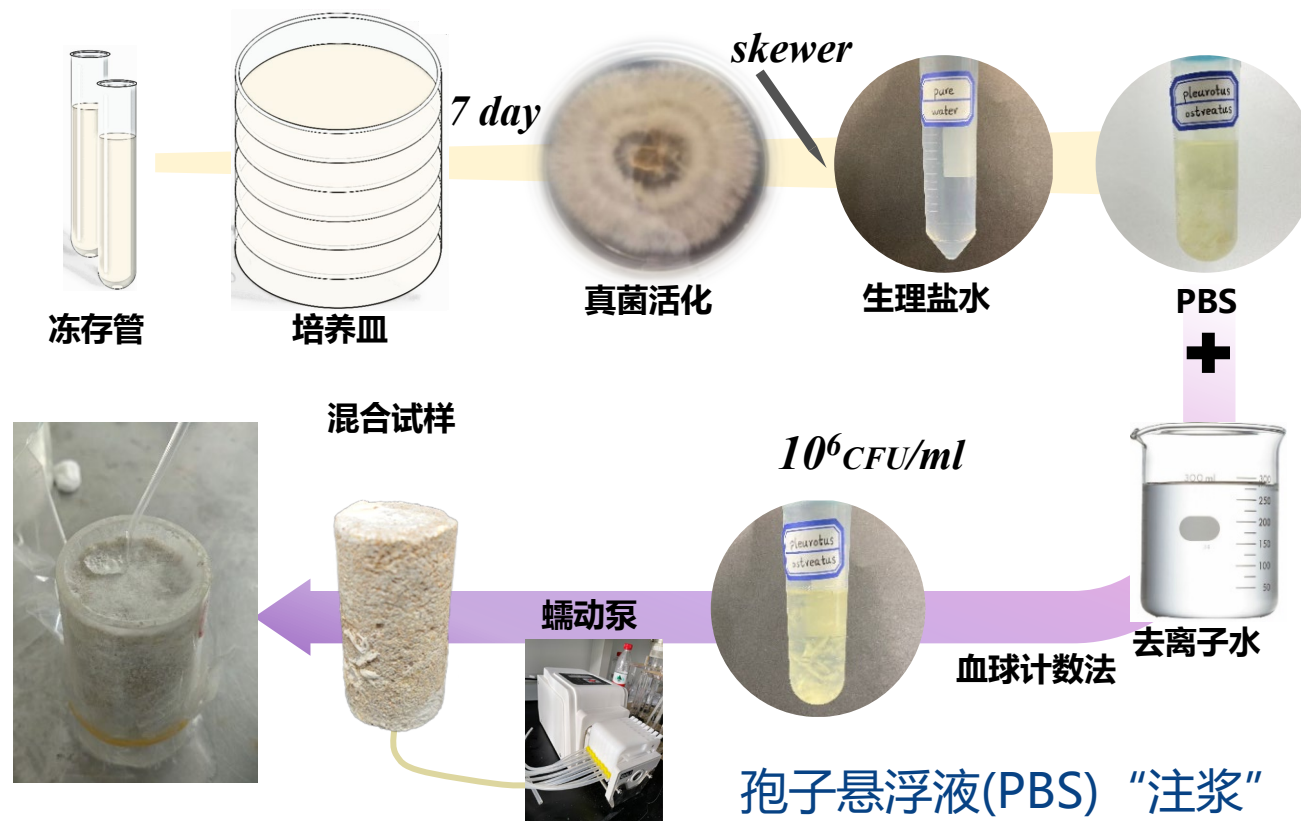


2. 菌丝复合土水力特性

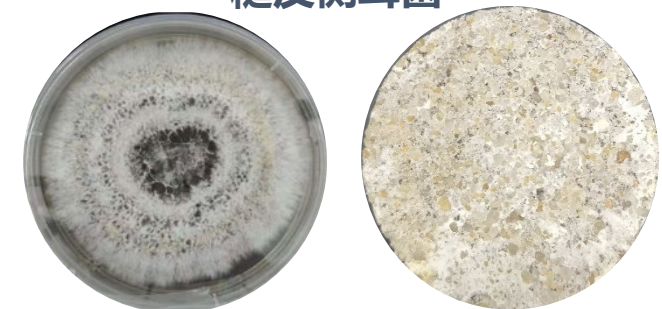


2.2 成样方法

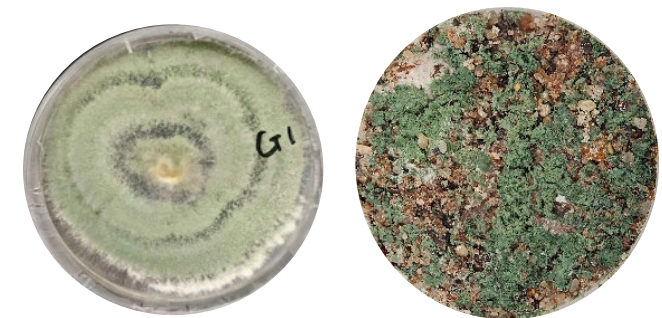
- 通过固体培养基培养，恢复其生长活力并扩大繁殖，活化2-3次复壮以**优化菌种性能**；培养基与标准砂的质量比为1：4；
- 孢子悬浮液的浓度调节为 $10^6 CFU/ml$ ，并在冰箱 $4^{\circ}C$ 下保存备用。



糙皮侧耳菌



金顶侧耳菌



木霉菌

2. 菌丝复合土水力特性

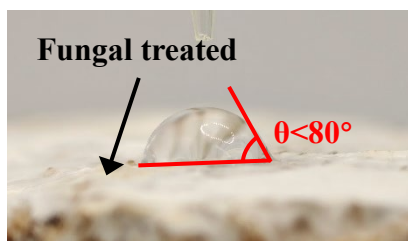
2.3 菌丝复合土疏水性

- 接触角CA; 水滴渗透时间WDPT
- 纯砂亲水, 木霉菌轻度斥水, 侧耳菌**极度斥水**

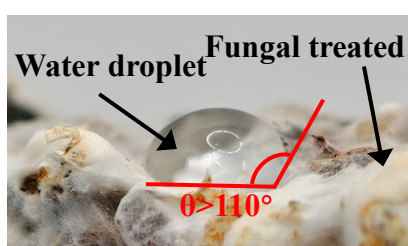
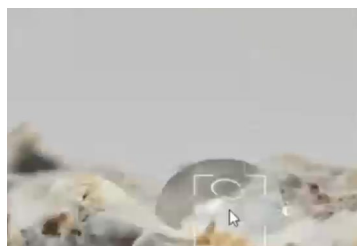
木霉菌



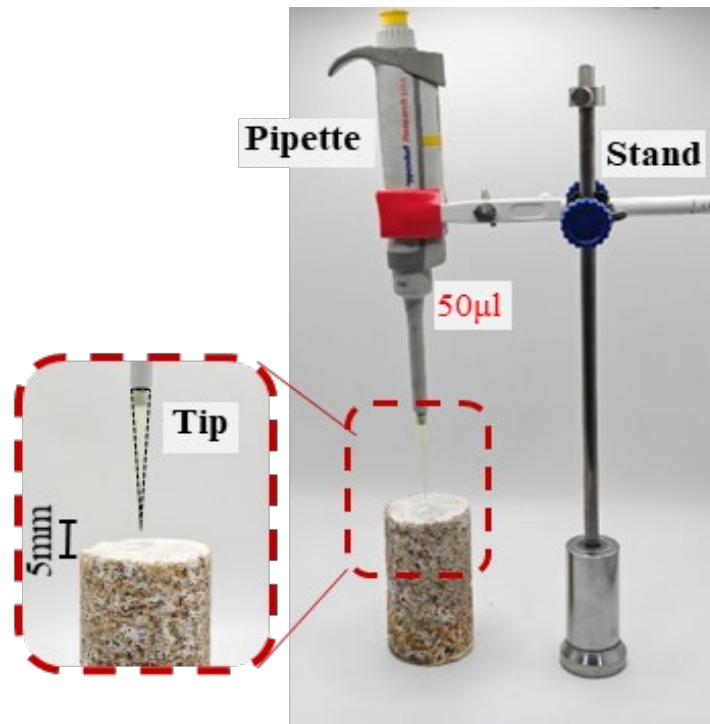
糙皮侧耳菌



金顶侧耳菌

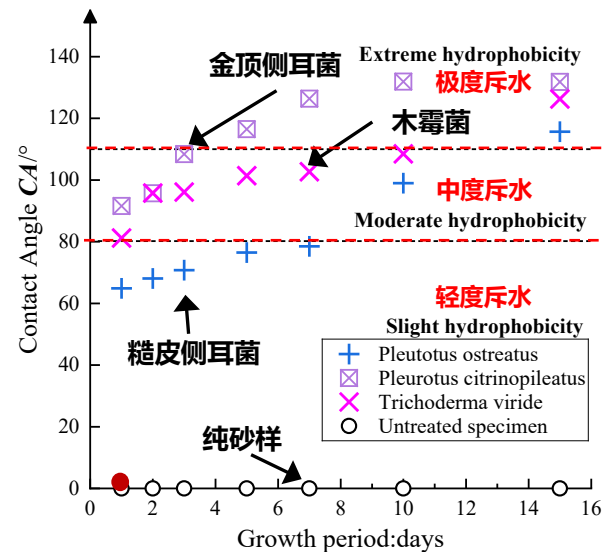


接触角测试

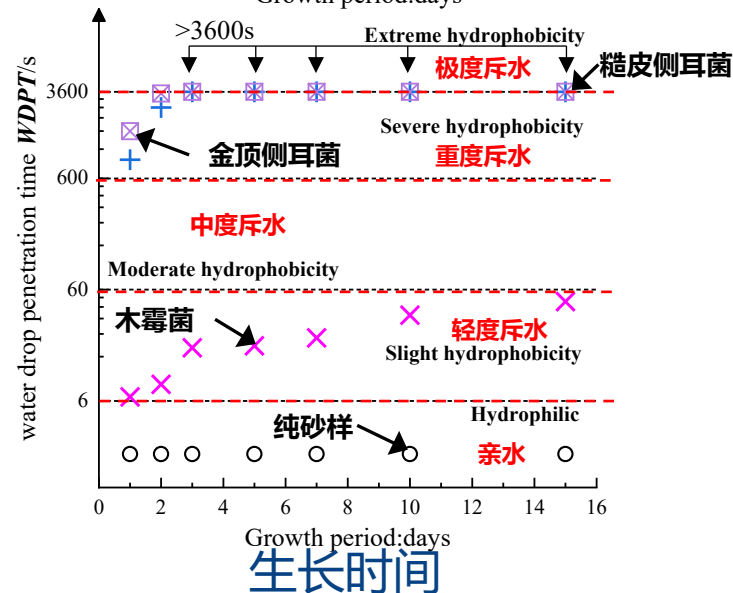


WDPT试验

接触角



水滴渗透时间



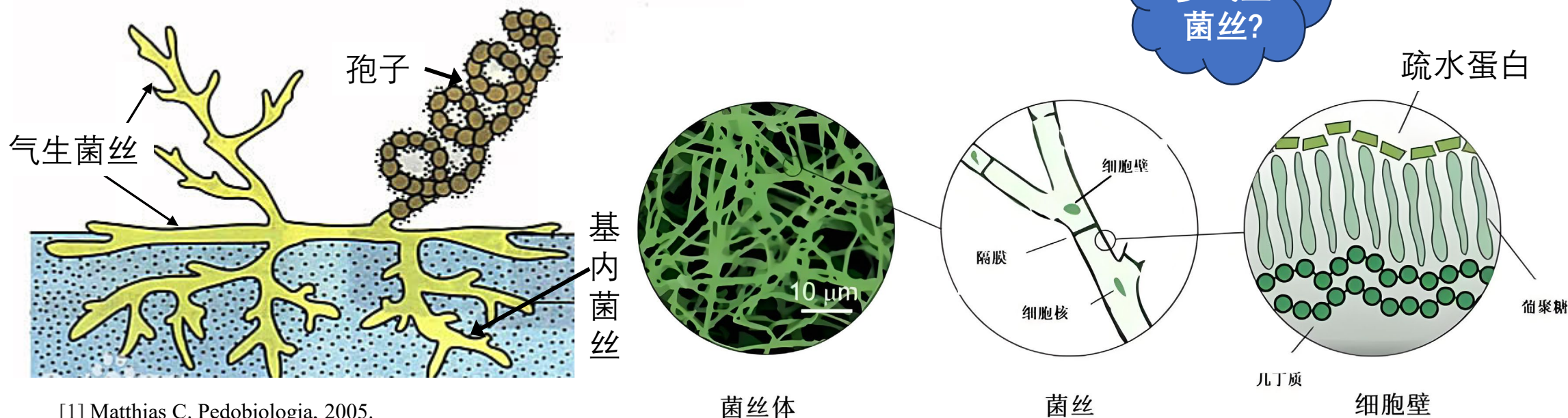
菌丝体使得土体表现出疏水性, 延长水滴渗透时间

2. 菌丝复合土水力特性

2.3 菌丝复合土疏水性

- **基内菌丝**：基内菌丝生长于营养基质表面或伸向内部，类似植物的根。
- **气生菌丝**：气生菌丝是基内菌丝长出培养基外并伸向空间的菌丝，颜色较深，菌丝较粗。
- 气生菌丝分泌疏水蛋白^[1,2]，在砂颗粒表面形成**纳米级疏水膜**。

生成更多气生菌丝？



[1] Matthias C. Pedobiologia, 2005.
[2] 马爱民菌物学报,2007.

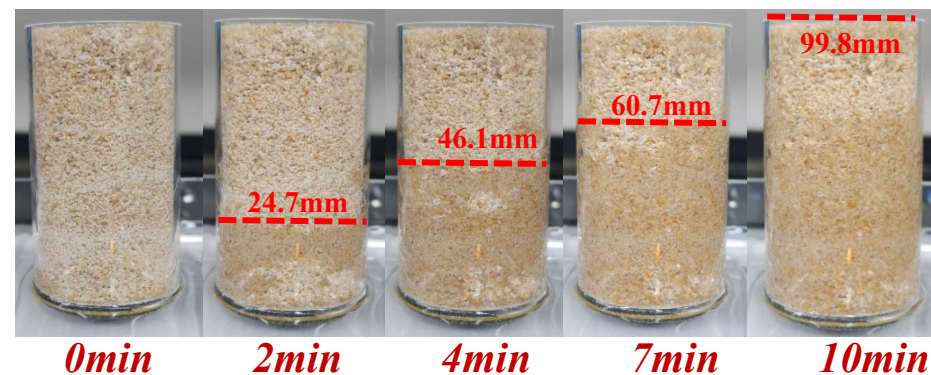
侧耳菌气生菌丝分泌疏水蛋白，提高土体疏水性

2. 菌丝复合土水力特性

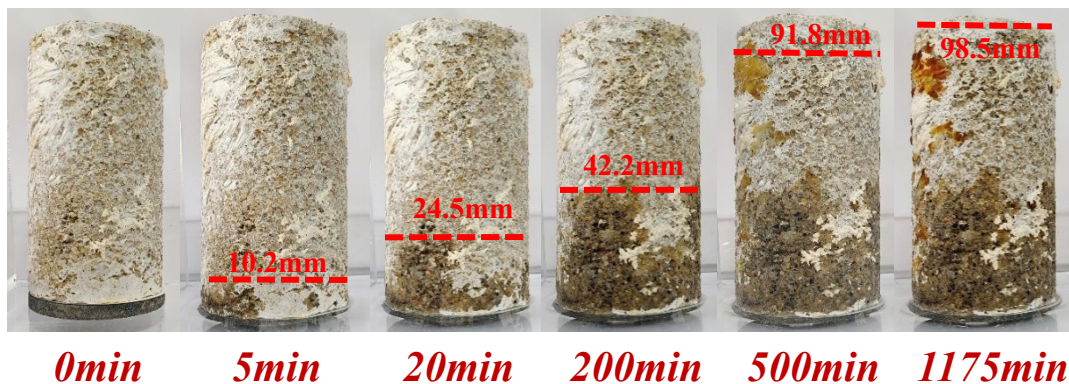
2.4 菌丝复合土吸水性

- 纯砂样毛细吸水时间为10min;
- 糙皮侧耳菌毛细吸水时间为1175min;
- 金顶侧耳菌20h未发现明显的毛细吸水现象。

Untreated specimen (纯砂)



Pleutotus ostreatus (糙皮侧耳菌)



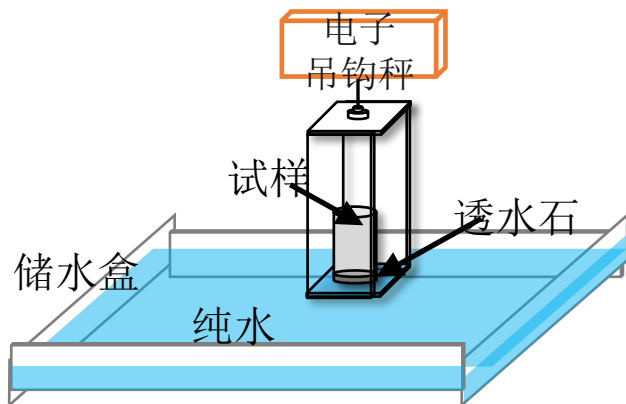
Pleurotus citrinopileatus (金顶侧耳菌)



菌丝体抑制水分迁移

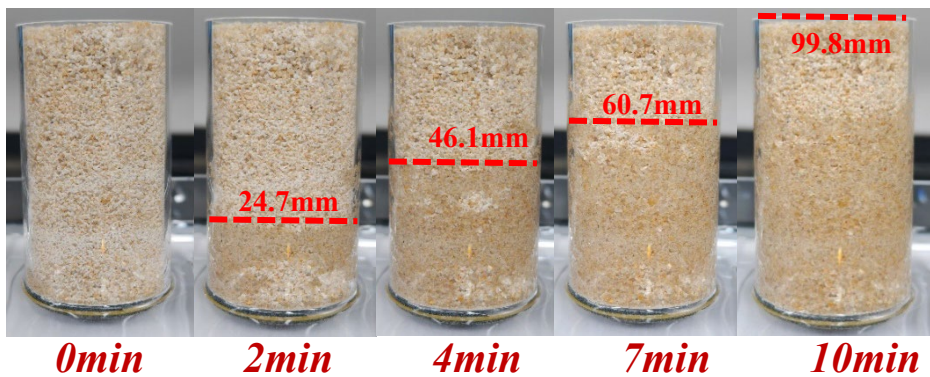
2. 菌丝复合土水力特性

2.4 菌丝复合土吸水性



毛细吸水测量装置

Untreated specimen (纯砂)

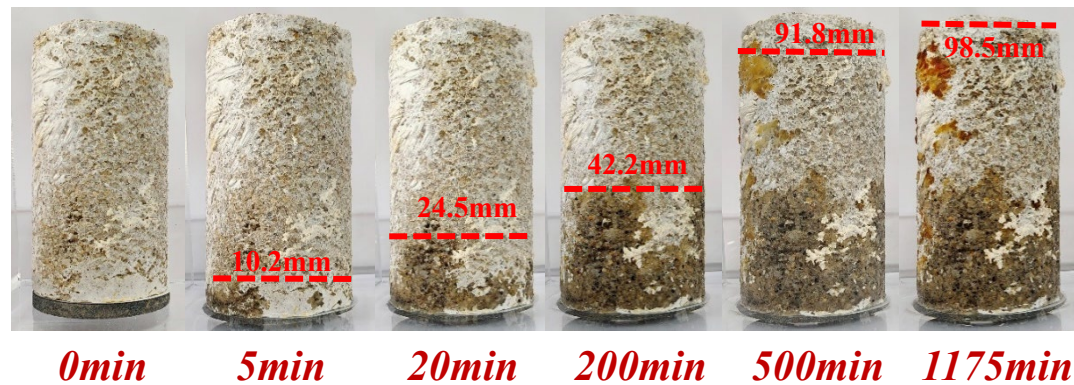


Pleurotus citrinopileatus (金顶侧耳菌)



未见明显毛细现象

Pleutotus ostreatus (糙皮侧耳菌)

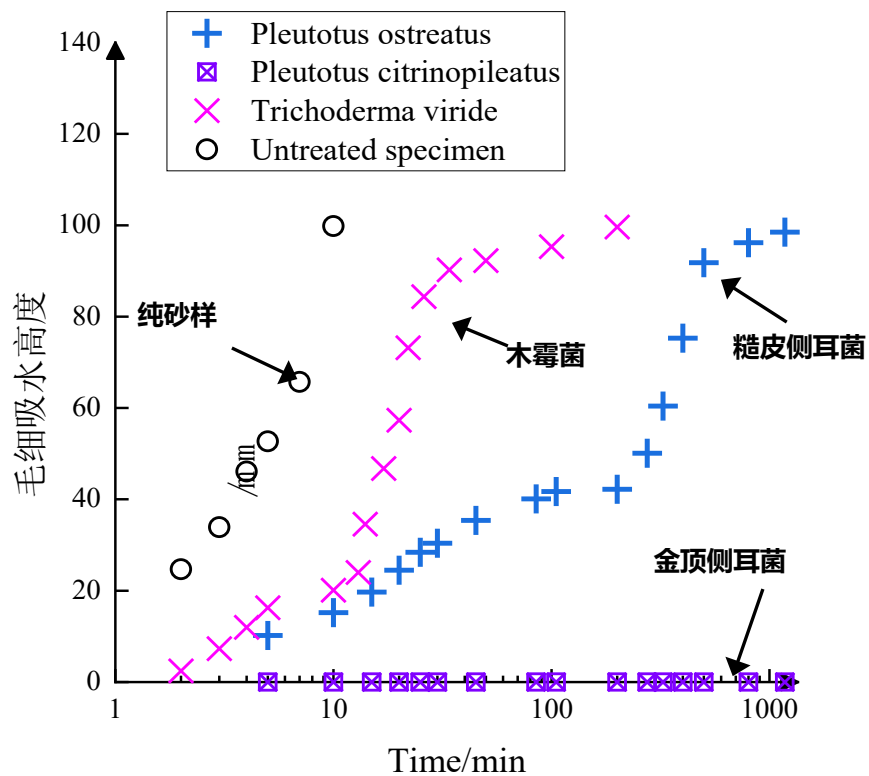


菌丝体抑制水分迁移

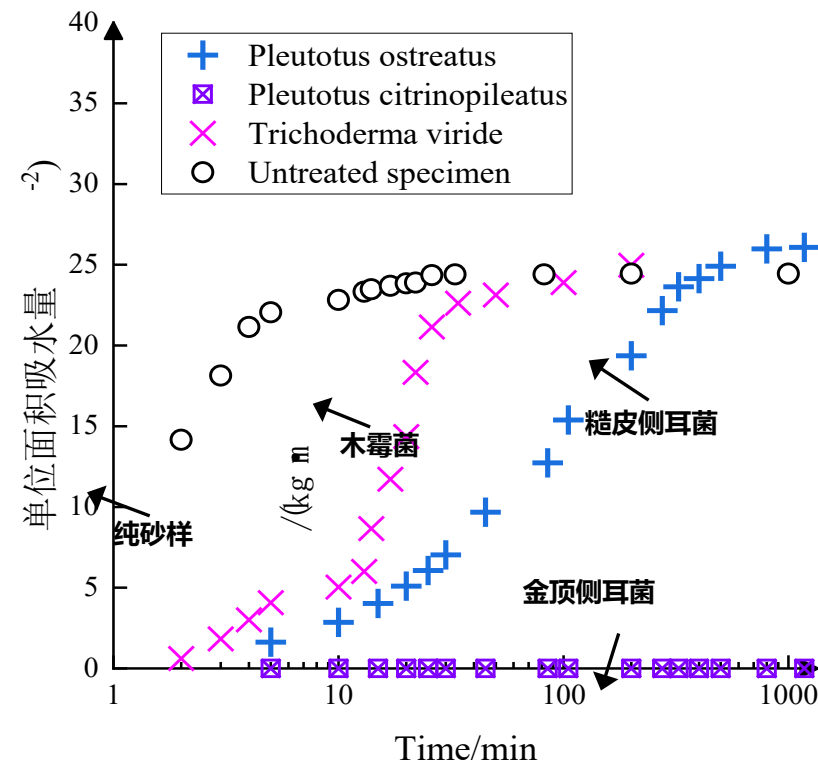
2. 菌丝复合土水力特性

2.4 菌丝复合土吸水性

- 因菌丝复合土表面气生菌丝绵密且疏水，初始试样毛细吸水速度较缓，试样处于**缓慢吸水阶段**；
- 待水分渗透到基生菌丝后，毛细吸水速率提高，**此时进入快速吸水阶段**；
- 最终，菌丝复合土吸水达到**稳定阶段**。



毛细吸水高度-时间



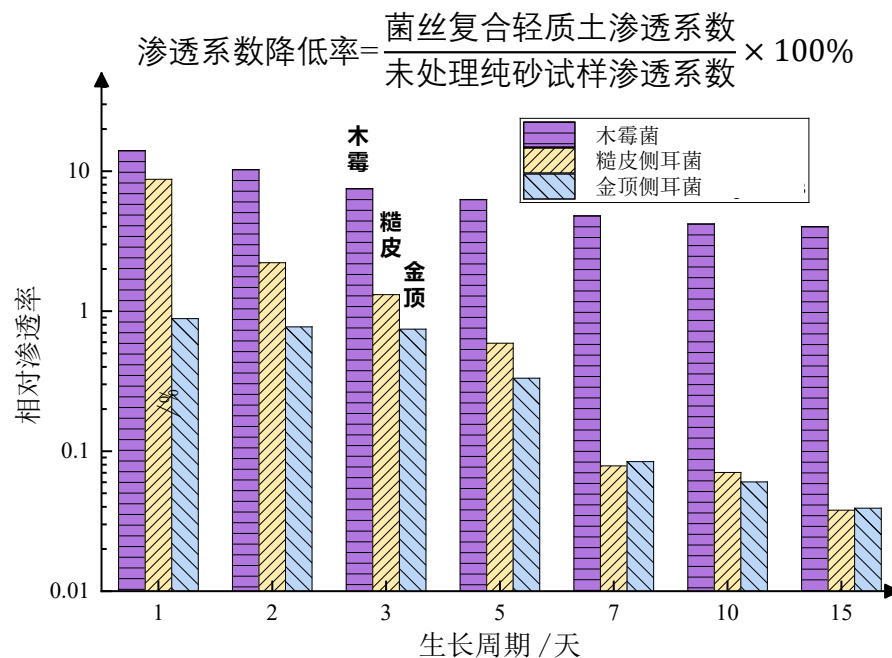
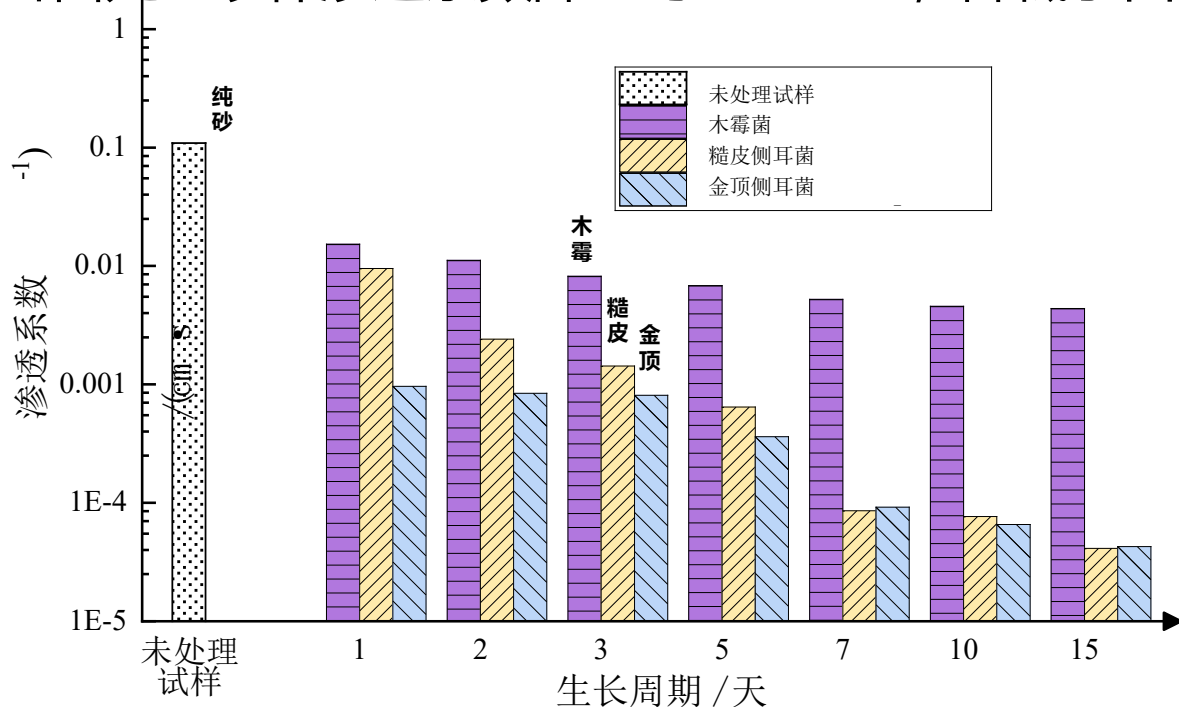
单位面积吸水量-时间

菌丝体抑制水分迁移

2. 菌丝复合土水力特性

2.5 菌丝复合土渗透特性

- 常水头法：未处理纯砂试样；变水头法：菌丝复合土；
- 纯砂渗透系数 0.109 cm/s ，木霉菌处理砂样降至 0.01 cm/s 以下，降低约一个数量级；
- 侧耳菌处理砂样渗透系数降至约 10^{-5} cm/s ，降低了四个数量级。

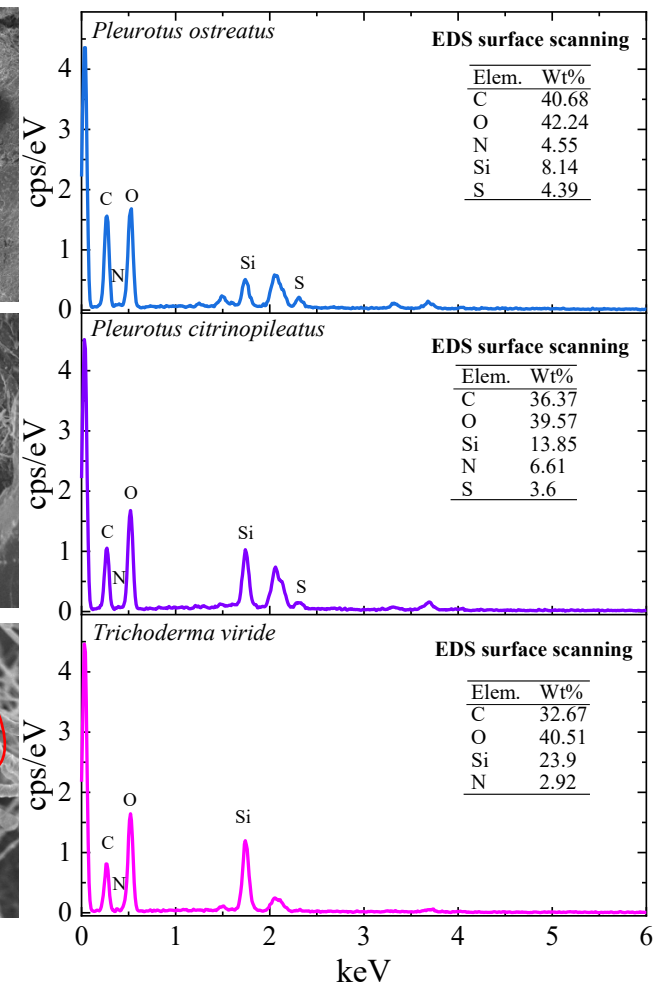
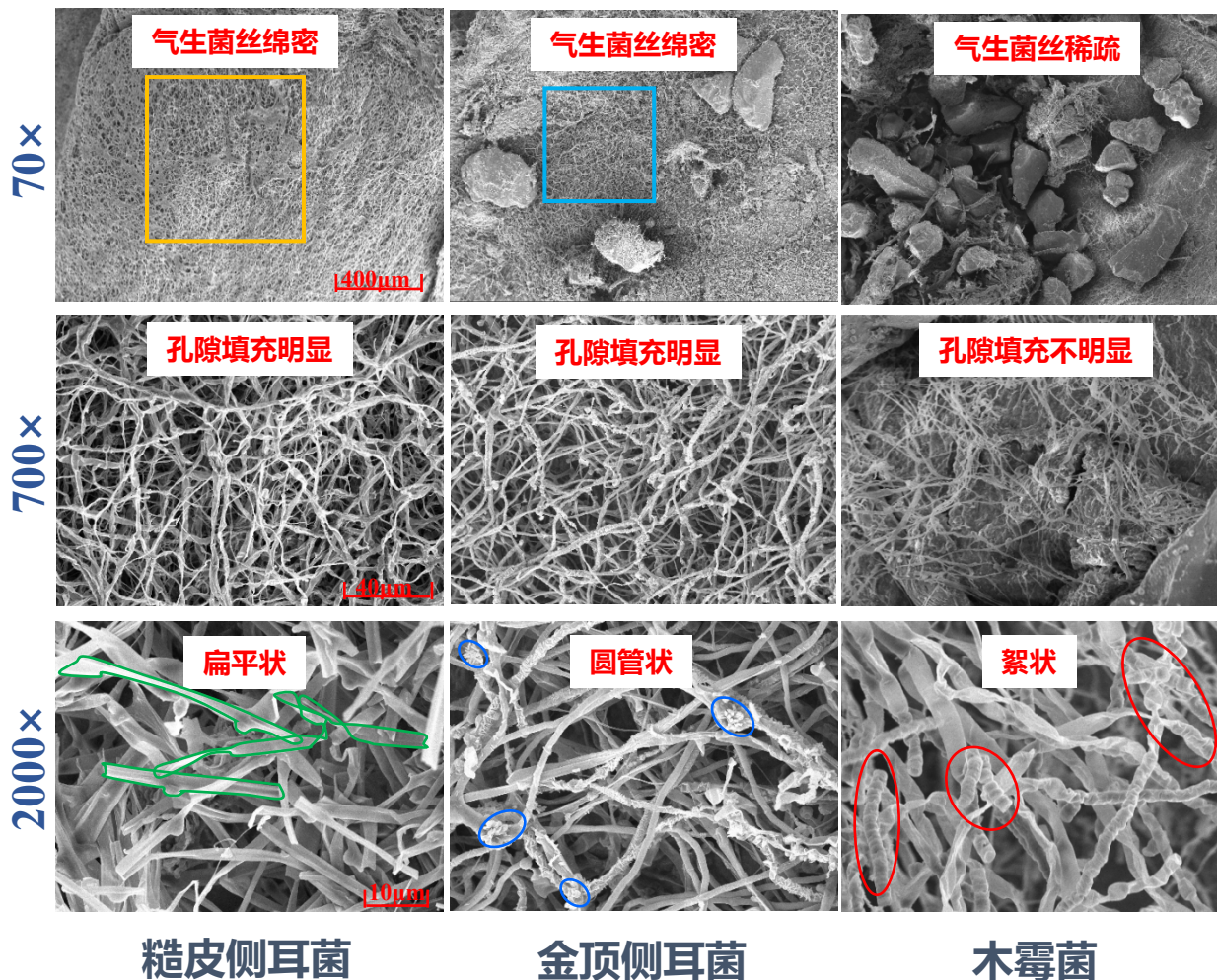


菌丝体可大大降低土体渗透性

2. 菌丝复合土水力特性

2.6 菌丝复合土水力调控机理

- 采用侧耳菌的菌丝复合土**表面气生菌丝绵密**，阻碍水分渗入；
- 基内菌丝包裹及填充作用**减少**土体内部连通**孔隙体积**，孔隙水难流通；
- 菌丝体分泌的胞外疏水蛋白使得复合土**疏水性**强。



致密菌丝体及其分泌的疏水蛋白填充包裹砂颗粒



内容提要

Contents

第一部分

研究背景

第二部分

菌丝复合土水力特性

第三部分

菌丝复合土强度特性

第四部分

菌丝体应用场景与展望

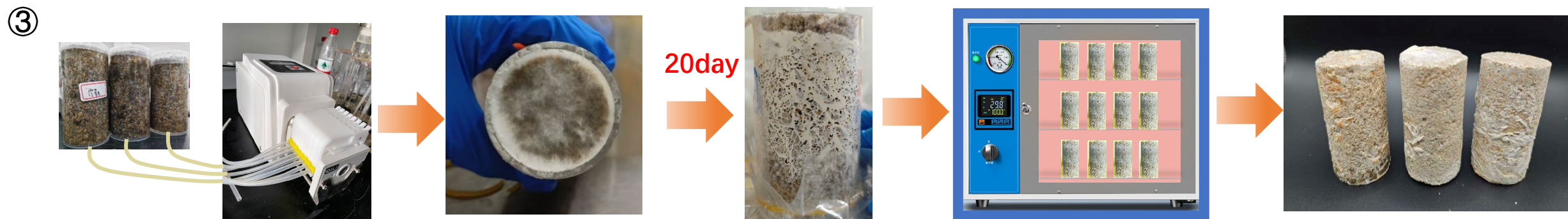
第五部分

结论

3. 菌丝复合土强度特性

3.1 菌丝复合土制备工艺

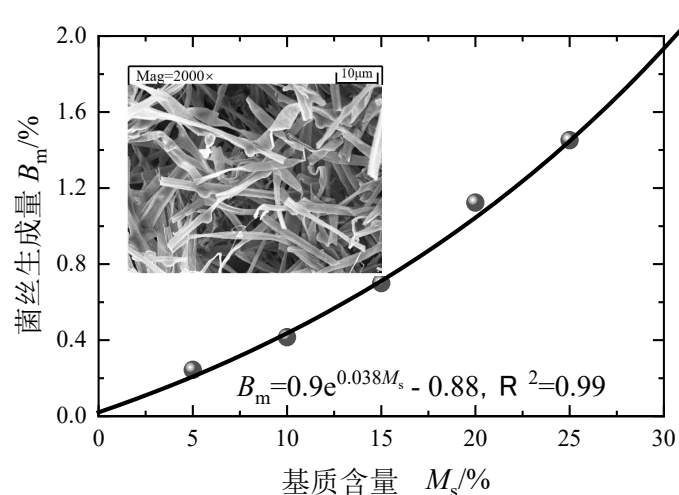
- ① 首先将冻存管中真菌活化2-3次;
- ② 混合材料后搅拌5min, 并将混合物倒入模具内进行高温灭菌;
- ③ **温度25 °C, 湿度60%, 时间20d**; 脱模后常温风干。



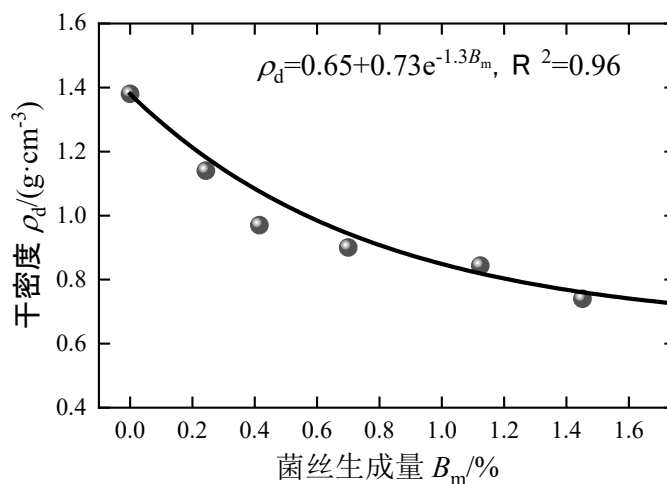
3. 菌丝复合土强度特性

3.2 菌丝复合土基本物理特性

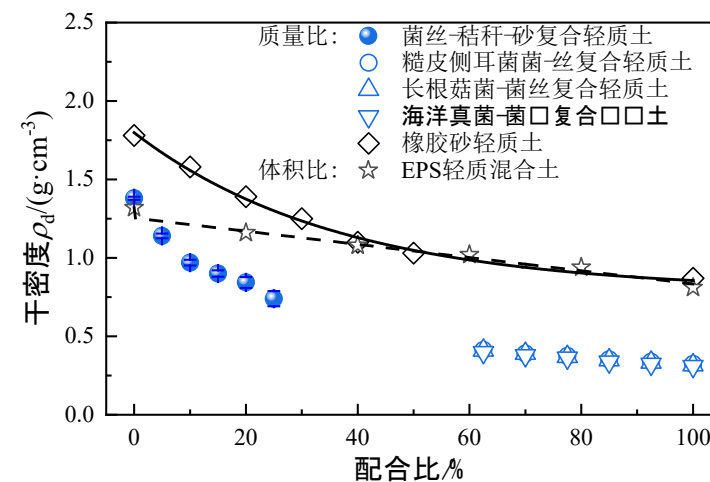
- 生成的菌丝量越大，菌丝复合土的**干密度越小**；当培养基含量为25%，菌丝复合土干密度低至**0.74g/cm³**。
- 菌丝体具有独特的**中空结构**。



菌丝生成量与基质含量



干密度与菌丝生成量



菌丝复合土干密度

菌丝复合土呈现低密性

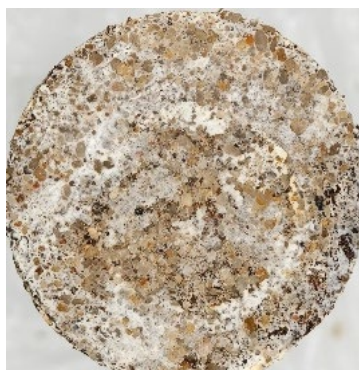
3. 菌丝复合土强度特性

3.3 菌丝复合土的剪切特性

菌丝复合土试样剪应力-剪应变曲线均高于对照组，呈典型的**应变硬化**特征

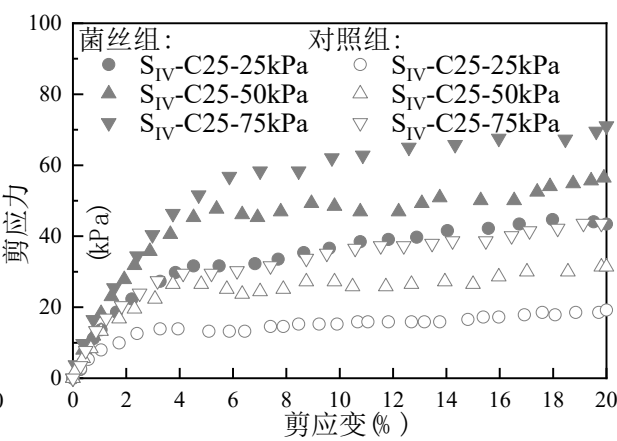
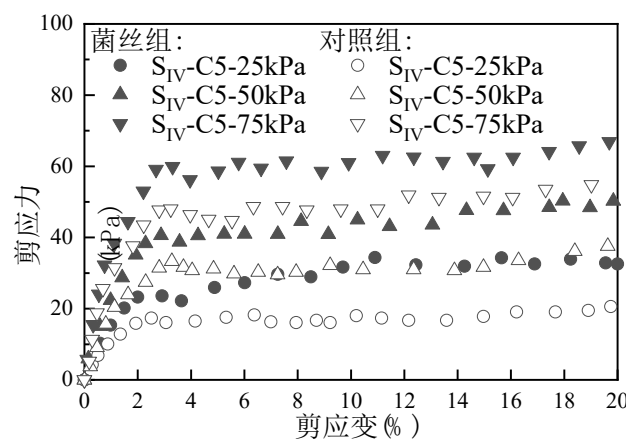
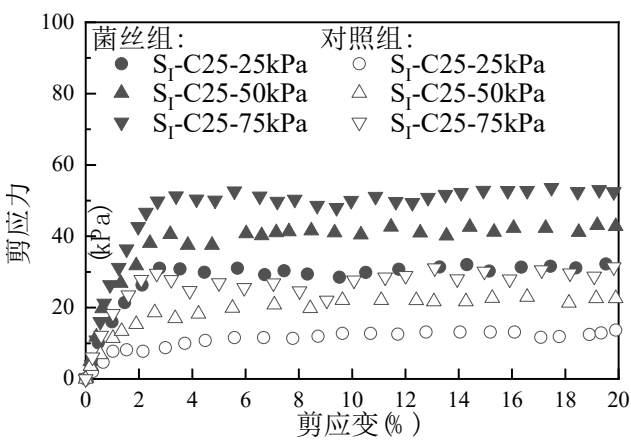
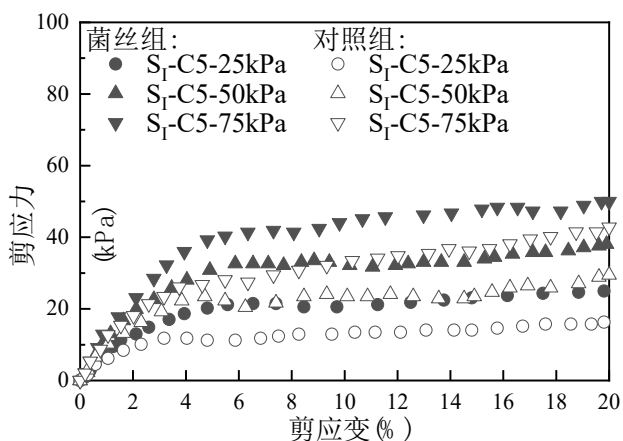


KTL-电控单剪仪



试样

编号	颗粒粒径/mm	基质含量 $C_{str}/\%$	竖向应力 σ_n /kPa	剪切速率
1	0.1-0.25	5%、10%、 15%、20%、 25%	25kPa、 50kPa、 75kPa	1mm/min
2	0.25-0.5			
3	0.5-1			
4	1-2			

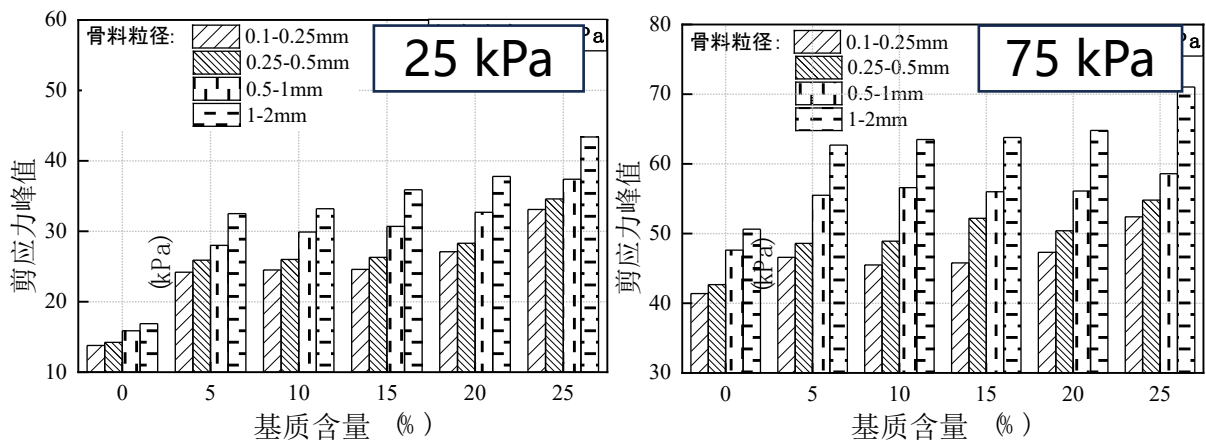


菌丝体显著提升了复合土的抗剪强度

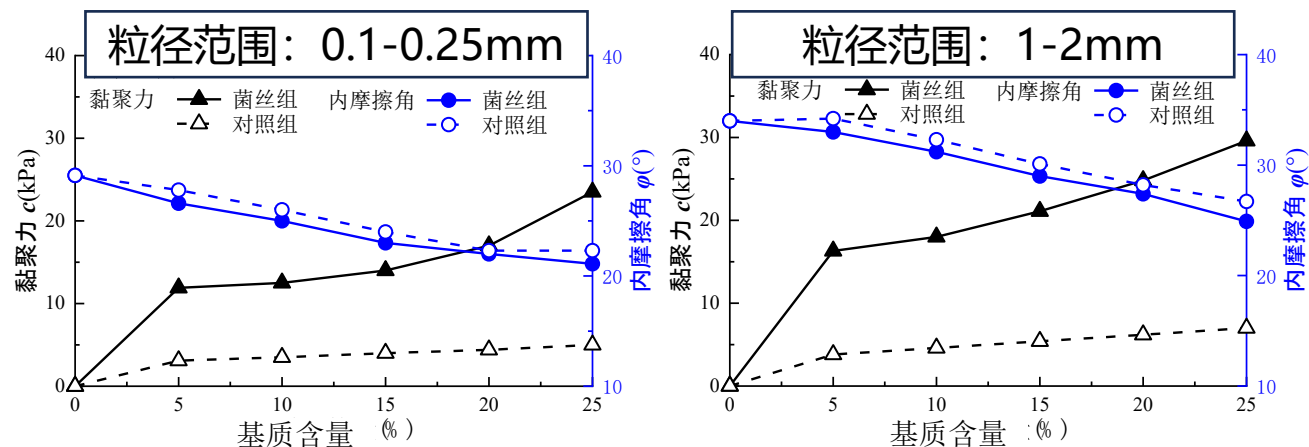
3. 菌丝复合土强度特性

3.3 菌丝复合土的剪切特性

- 随着基质掺量增加，不同骨料粒径试样的剪应力峰值均有所提高；
- 菌丝体包裹、桥接及填充作用提高了菌丝复合土的黏聚力，且黏聚力随基质掺量增加而提升；
- 颗粒表面生成的菌丝体，弱化了颗粒间的直接摩擦与嵌锁效应，导致菌丝复合土内摩擦角降低。



菌丝复合材料的峰值剪应力



基质含量对粘聚力和内摩擦角的影响

菌丝体显著提升砂土的黏聚力

3. 菌丝复合土强度特性

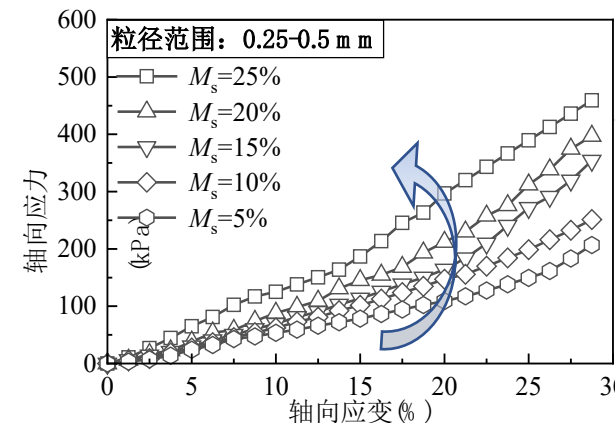
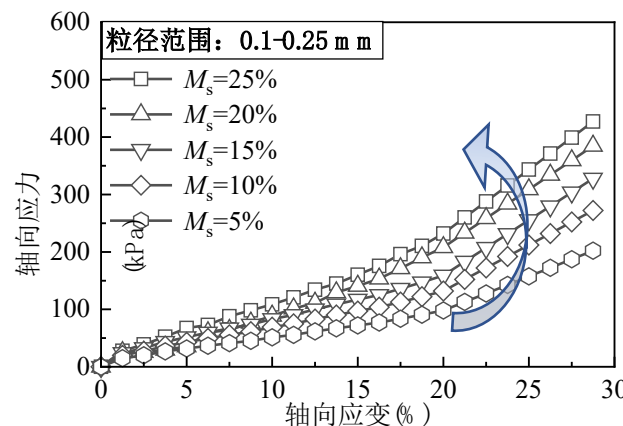
3.4 菌丝复合土无侧限抗压强度及破坏模式

颗粒粒径 /mm	基质含量 $C_{str}/\%$
0.1-0.25	5%
0.25-0.5	10%
0.5-1	15%
1-2	20%
	25%

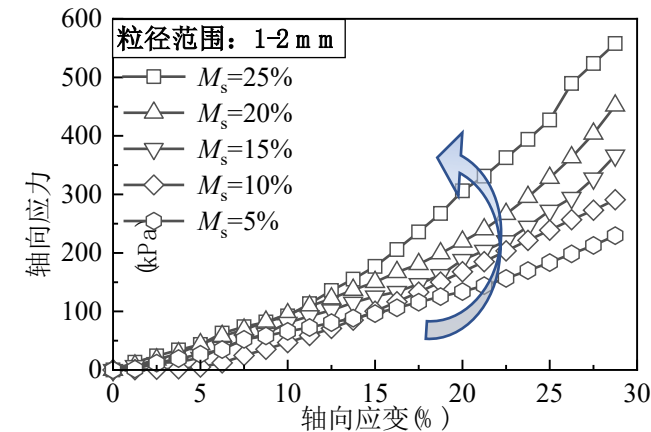
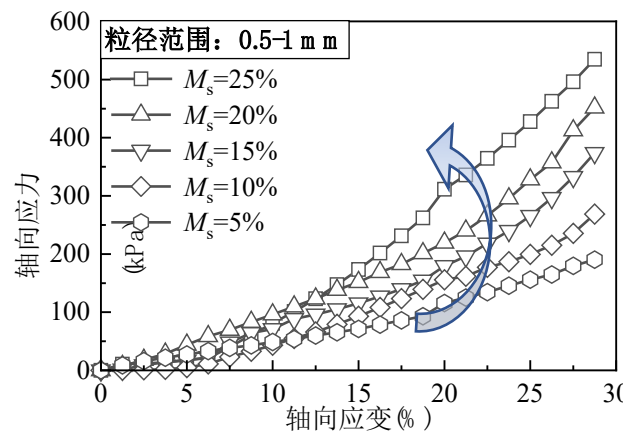
试验工况



试样破坏特征



↑
基质含量增大



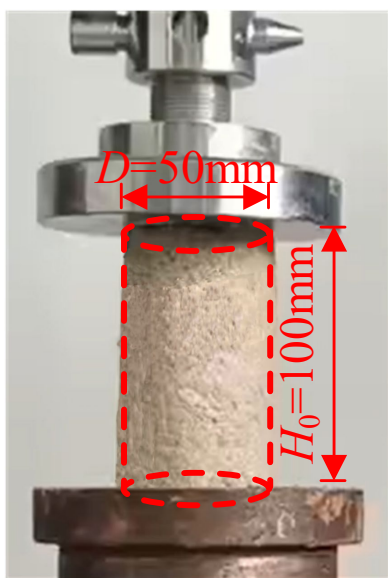
不同基质含量应力应变曲线

菌丝复合土试样呈延性破坏特征，无明显脆性剪切带

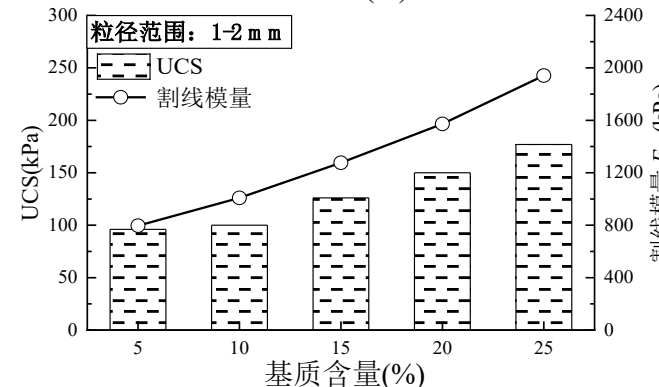
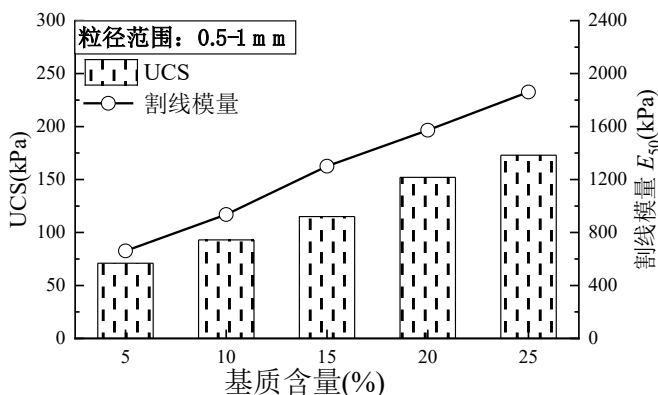
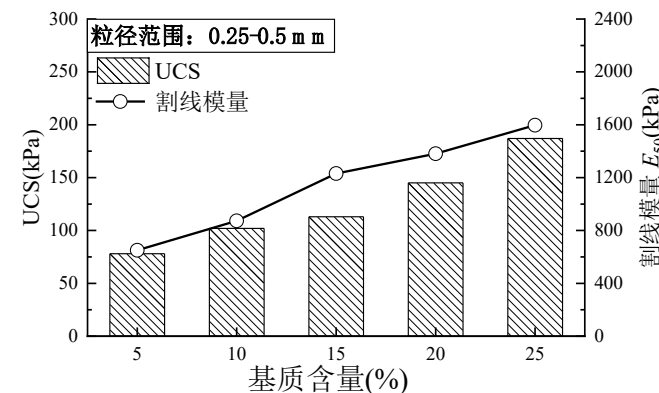
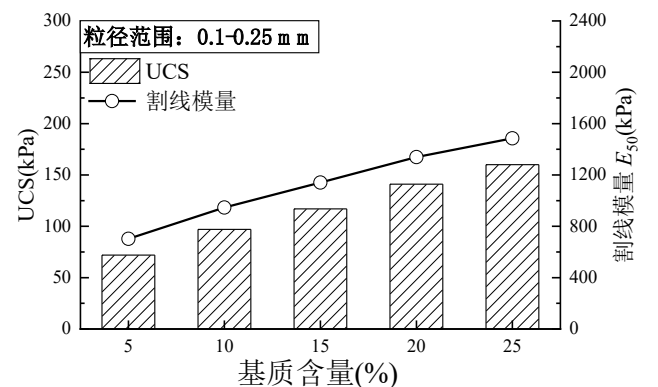
3. 菌丝复合土强度特性

3.4 菌丝复合土无侧限抗压强度及破坏模式

- 菌丝复合土的UCS与 E_{50} 均随基质掺量的增加而显著提高。
- 0.1-0.25mm粒径骨料中营养基掺量由5%增加至25%时，其UCS从72kPa增长至160kPa，增幅达**122.2%**，相应的割线模量也从703kPa提升至**1485kPa**。



无侧限抗压试验

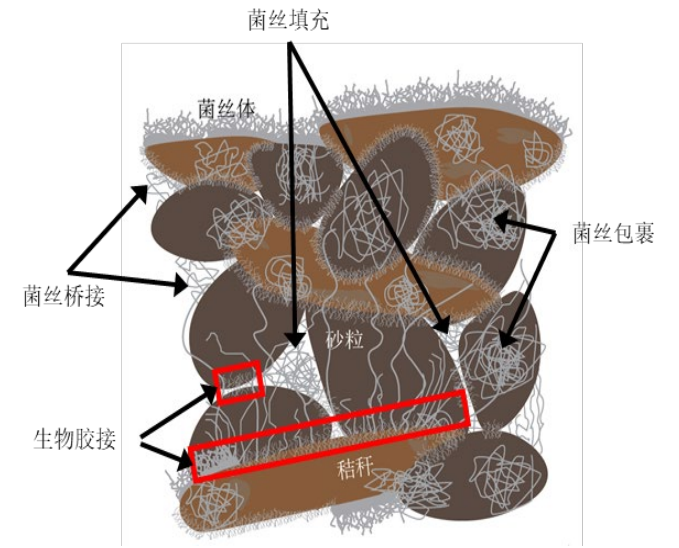
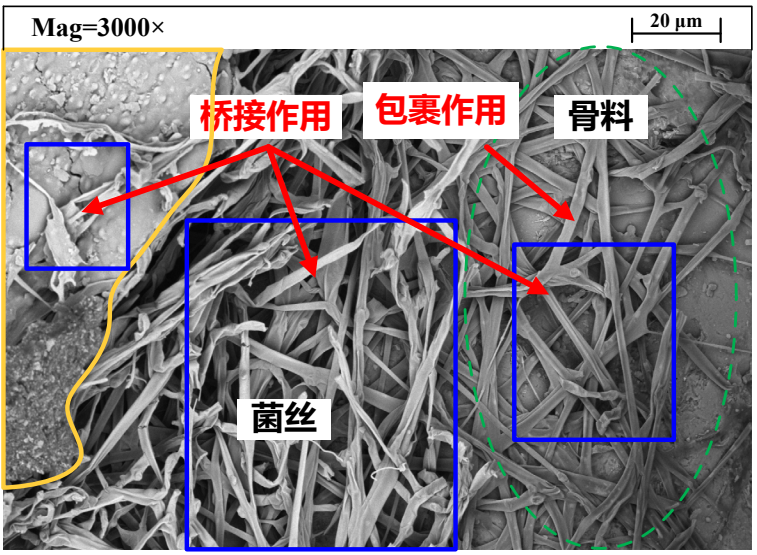
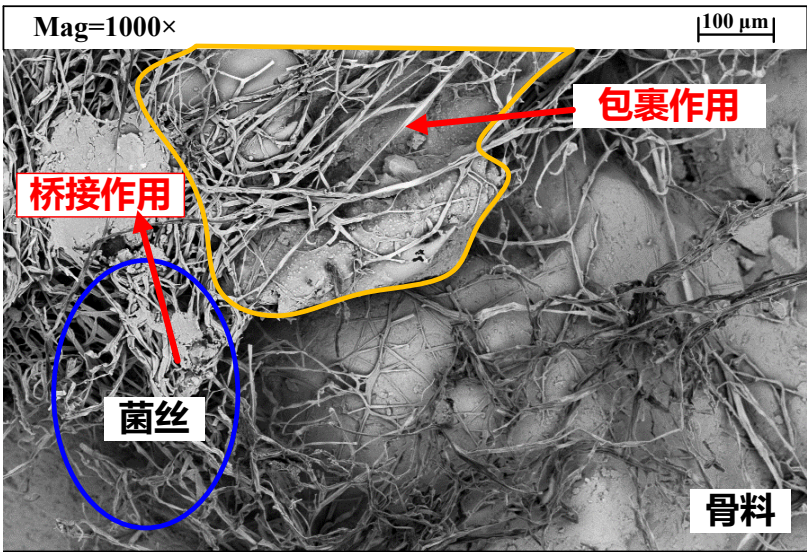


无侧限抗压强度与割线模量

3. 菌丝复合土强度特性

3.5 菌丝复合土微观特征

- 菌丝体加固作用主要来自于**菌丝包裹、缠绕桥接砂粒以及填充砂颗粒间的孔隙。**
- 菌丝网状结构包裹完整砂粒并约束砂粒相对运动，无侧限抗压强度试验结果证明**试样的强度与菌丝定殖的程度呈正相关。**



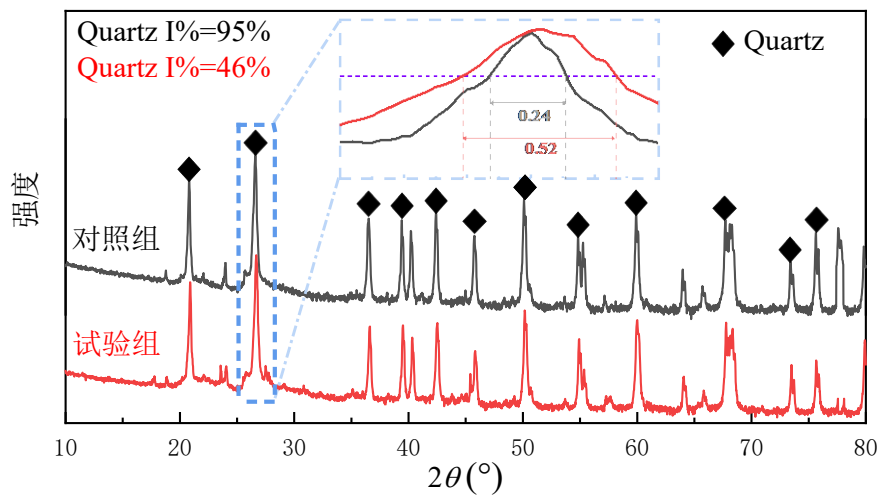
菌丝混合土SEM图像 (颗粒粒径: 0.5-1mm, 基质含量为15%)

菌丝体加固机理：包裹、缠绕桥接砂粒，填充颗粒间孔隙

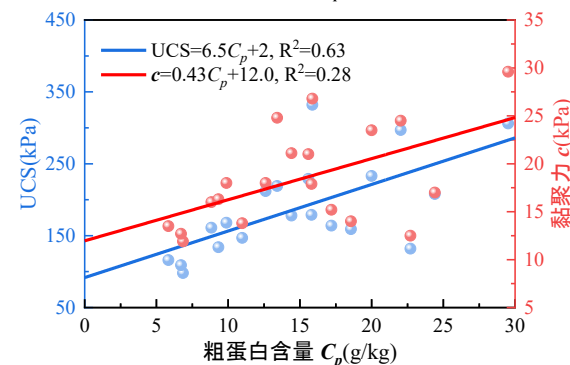
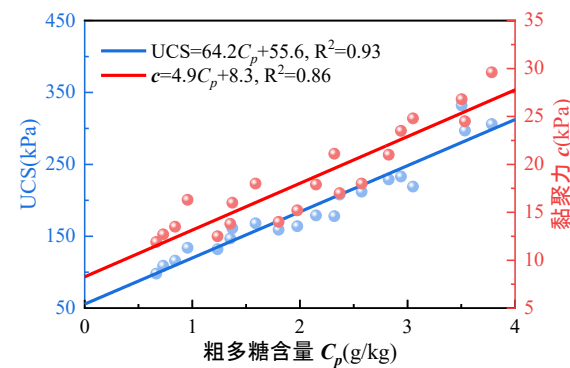
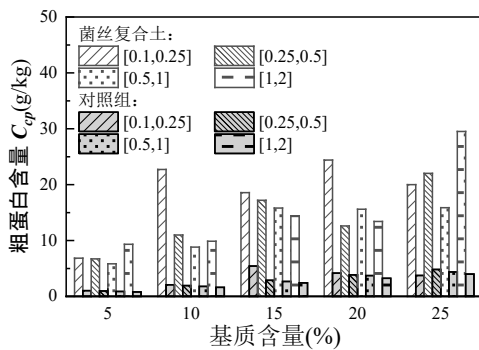
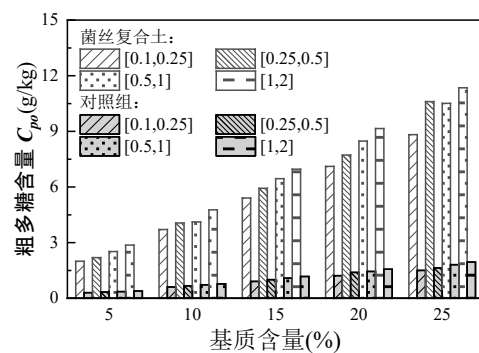
3. 菌丝复合土强度特性

3.6 菌丝复合土的强度形成机理

- 菌丝组SiO₂峰形宽化 (1%降低) : 菌丝体生物膜覆盖于石英表面, 证明了菌丝存在包裹作用。
- 抗剪强度与菌丝体分泌的胞外聚合物有关, 与粗多糖生成量正相关、与粗蛋白含量相关度较低。



X射线衍射图谱



凯氏定氮仪

粗多糖: NY/T 1676—2008 《食用菌中粗多糖含量的测定》

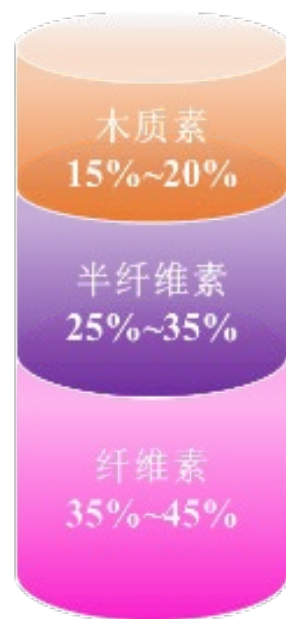
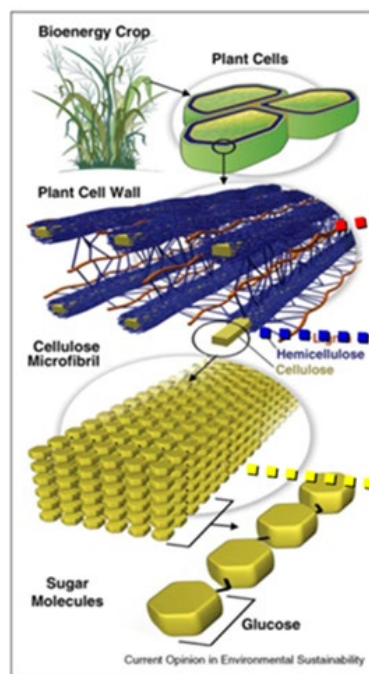
粗蛋白: 凯氏定氮法(GB/T 6432—2018)

菌丝体分泌的胞外聚合物是强度形成的核心粘结物质

3. 菌丝复合土强度特性

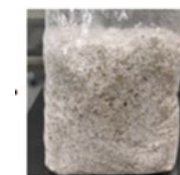
3.6 菌丝复合土的强度形成机理

- **物理缠绕**：菌丝体填充孔隙，包裹及桥接砂颗粒。
- **生物胶结**：菌丝分泌的代谢产物（多糖、蛋白质）产生胶结。



经菌丝体酶解后交联，作为胶黏剂，提高材料内部结合强度。

提供丰富碳源作为菌丝体生长营养物质。



形成类似“钢筋混凝土”的复合结构



内容提要

Contents

第一部分

研究背景

第二部分

菌丝复合土水力特性

第三部分

菌丝复合土强度特性

第四部分

菌丝体应用场景与展望

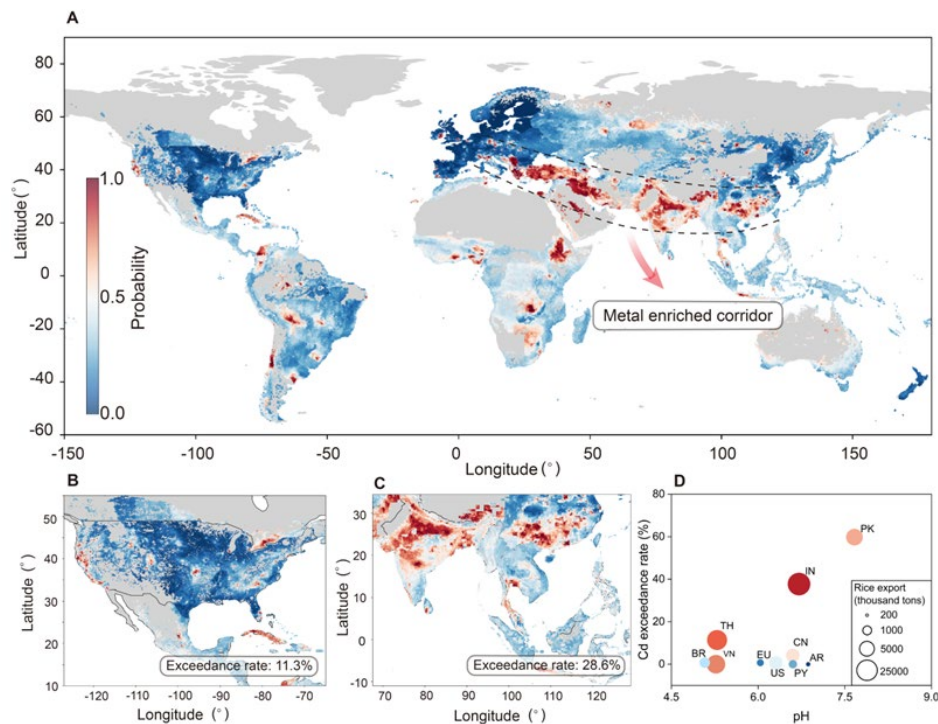
第五部分

结论

4. 应用场景及展望—菌丝修复重金属污染土

4.1 土壤重金属污染

- 土壤重金属污染存在**持久性与高毒性**，传统修复方法成本高、易破坏生态；
- 菌丝比表面积大、官能团丰富，通过**离子交换、络合和沉淀**等机制固定重金属离子。



全球土壤重金属农田超标概率空间分布^[1]

单位: mg/kg

序号	污染物项目 ^{a, b}		风险筛选值			
			pH ≤ 5.5	5.5 < pH ≤ 6.5	6.5 < pH ≤ 7.5	pH > 7.5
1	镉	水田	0.3	0.4	0.6	0.8
		其他	0.3	0.3	0.3	0.6
2	汞	水田	0.5	0.5	0.6	1.0
		其他	1.3	1.8	2.4	3.4
3	砷	水田	30	30	25	20
		其他	40	40	30	25
4	铅	水田	80	100	140	240
		其他	70	90	120	170
5	铬	水田	250	250	300	350
		其他	150	150	200	250
6	铜	果园	150	150	200	200
		其他	50	50	100	100
7	镍		60	70	100	190
8	锌		200	200	250	300

农用地土壤污染风险筛选值

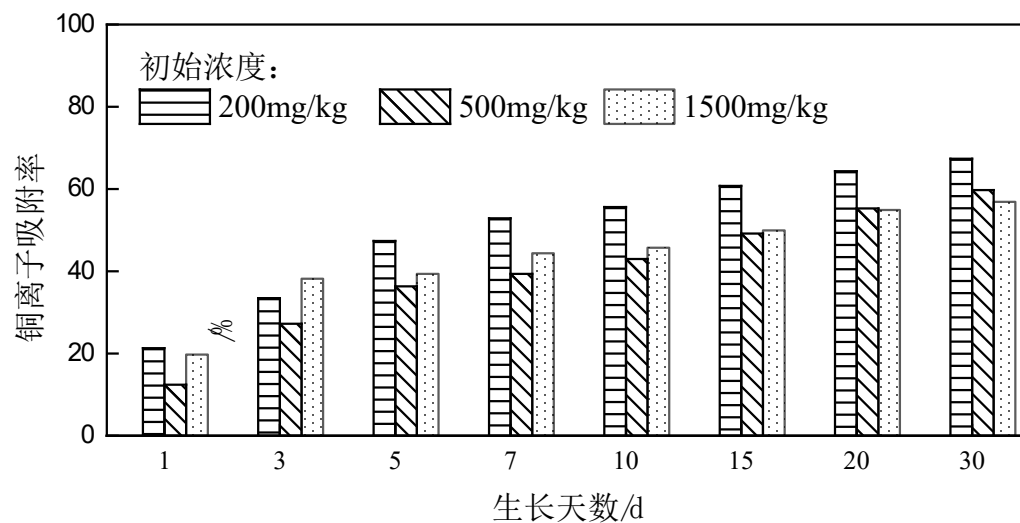
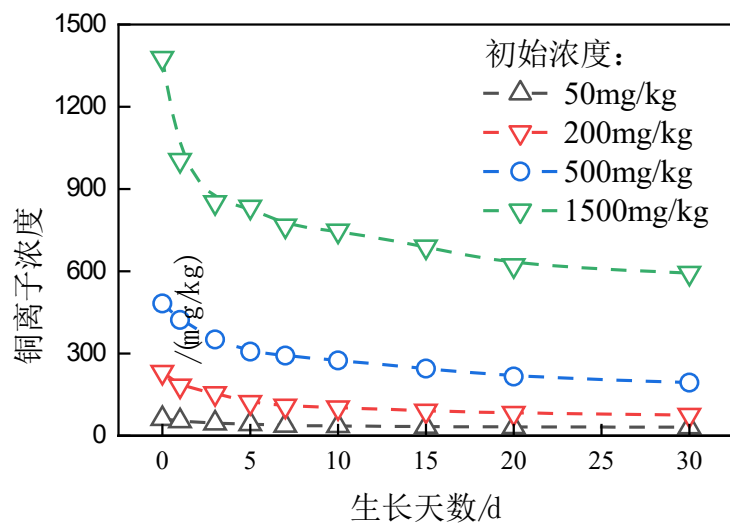
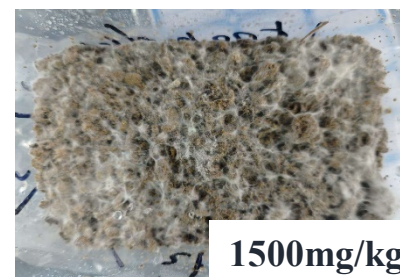
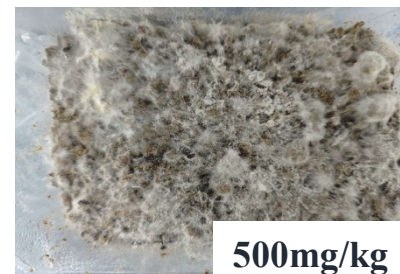
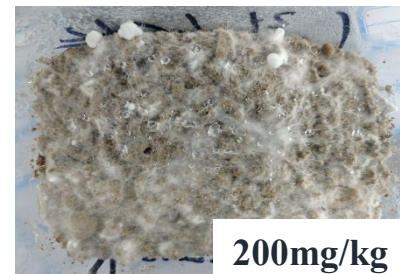
[1] DEYI HOU et al. Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science*.2025.

4. 应用场景及展望—菌丝修复重金属污染土

4.2 菌丝对Cu²⁺吸附效果-糙皮侧耳菌

检测方法：火焰原子吸收分光光度法 (FAAs)

- 铜离子浓度随菌丝生长繁殖逐渐降低，**菌丝生成量越多，吸附重金属量越多**；
- 200 mg/kg浓度，30天吸附效率达**67%**；1500 mg/kg浓度，降至**57%**；
- 过高浓度铜离子会抑制菌丝生长，并降低吸附率。



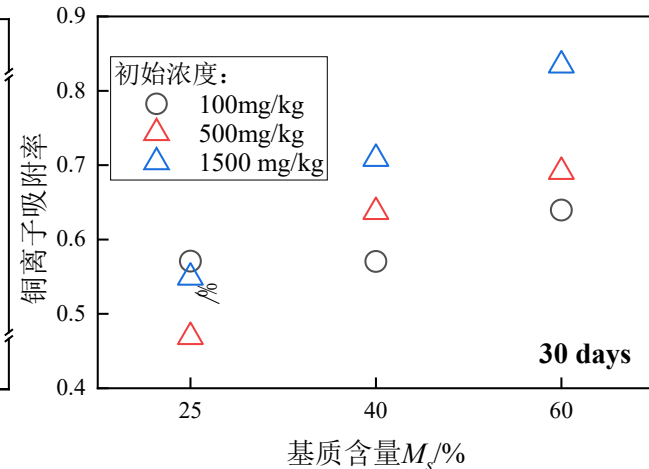
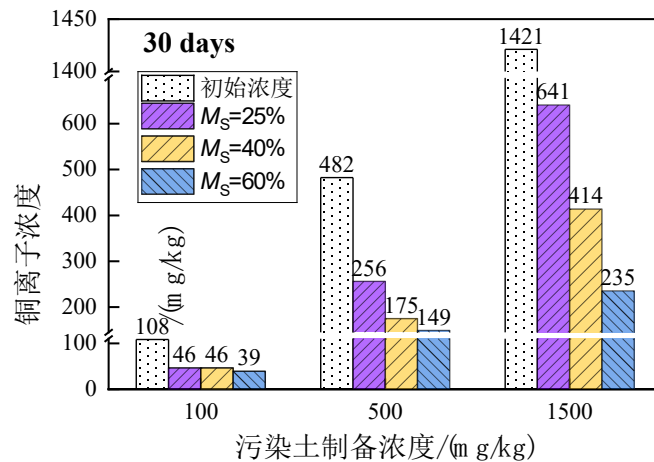
Cu²⁺污染土吸附效果

糙皮侧耳菌对Cu²⁺吸附效果较好

4. 应用场景及展望—菌丝修复重金属污染土

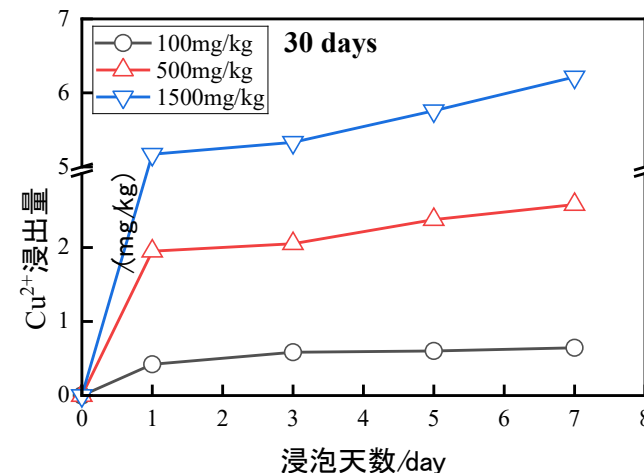
4.3 基质含量对Cu²⁺吸附效果影响

- 基质含量越多，菌丝吸附重金属量**越多**，重金属浓度对菌丝吸附抑制作用**越小**；
- 基质含量为60%，重金属初始浓度为1500 mg/kg工况，菌丝生长30天吸附率达**83%**。



4.4 菌丝吸附金属离子的稳定性

- 菌丝修复污染土铜离子浸出量随浸泡时间增长而增加，最终**趋于稳定**；
- 浸泡7天后，菌丝治理污染土Cu²⁺**析出量小于1%**，表明菌丝修复后污染土的稳定性较好。



基质含量越多Cu²⁺吸附率越高；菌丝修复污染土稳定性较好

4. 应用场景及展望——菌丝加固岸坡抗侵蚀

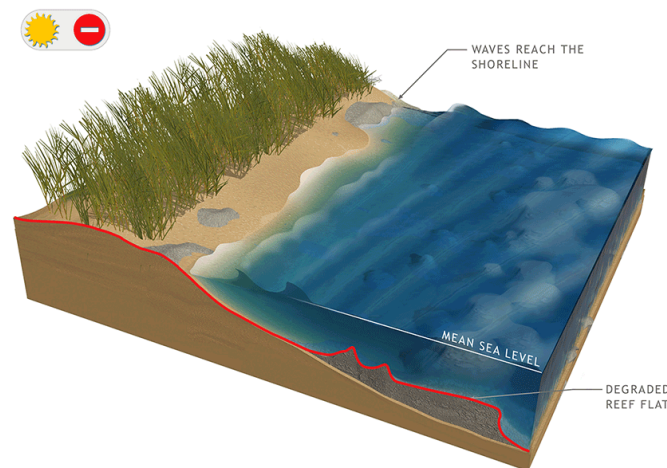


4.4 波浪冲刷岸线受侵蚀

- 在热带与亚热带海域，海浪冲刷作用易引发**水土流失、岸线侵蚀**。
- 能否应用于整治受损岸段，实现**筑牢生态护岛屏障**？



海岛沙洲侵蚀



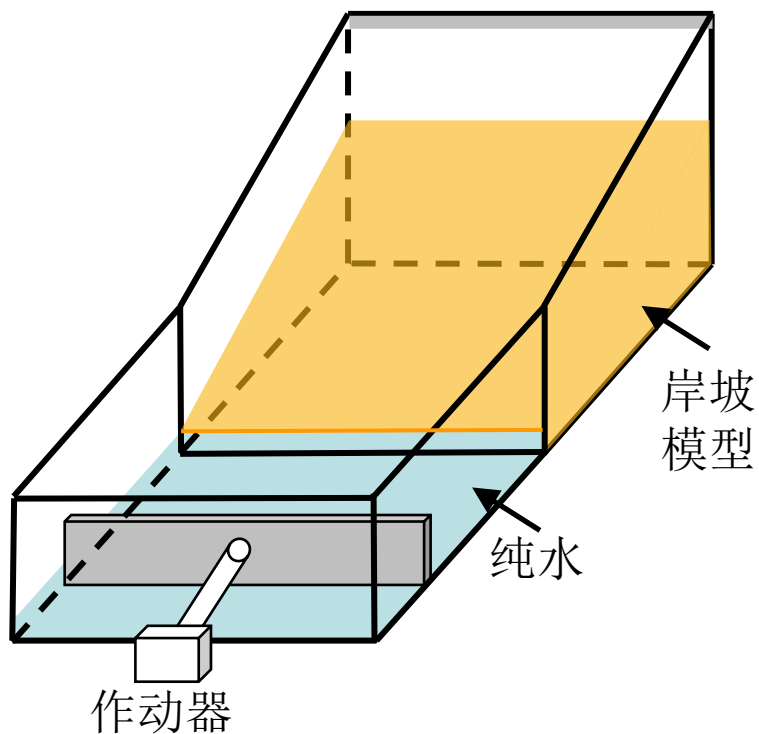
岸线侵蚀

4. 应用场景及展望——菌丝加固岸坡抗侵蚀

4.4 菌丝定殖抗冲刷试验 (正在进行)

□ 选用Fr相似比保证重力及惯性力比例关系一致 ($\lambda_L=1:100$) ;

□ 定殖厚度为2/100m=2cm; 造波高度为2/100=0.02m。



菌丝定殖抗冲刷试验装置

物理量	符号	相似比 (原型 p /模型 m)
长度	L	$\lambda_L=L_p/L_m$
面积	A	$\lambda_A=\lambda_L^2$
体积	V	$\lambda_V=\lambda_L^3$
流速	v	$\lambda_v=\sqrt{\lambda_L}$
加速度	a	$\lambda_a=\lambda_v/\lambda_t=\lambda_g$
时间	t	$\lambda_t=\lambda_L/\lambda_v=\lambda_L$
流量	Q	$\lambda_Q=\lambda_v \cdot \lambda_A=\lambda_L^{5/2}$
力	F	$\lambda_F=\lambda_\rho \cdot \lambda_v^2 \cdot \lambda_L^2=\lambda_\rho \cdot \lambda_L^3$
压强	p	$\lambda_p=\lambda_\rho \cdot \lambda_v^2=\lambda_\rho \cdot \lambda_L$
密度	ρ	λ_ρ
粘度	μ	λ_μ

Fr相似比关系



贯入速率: 5mm/min

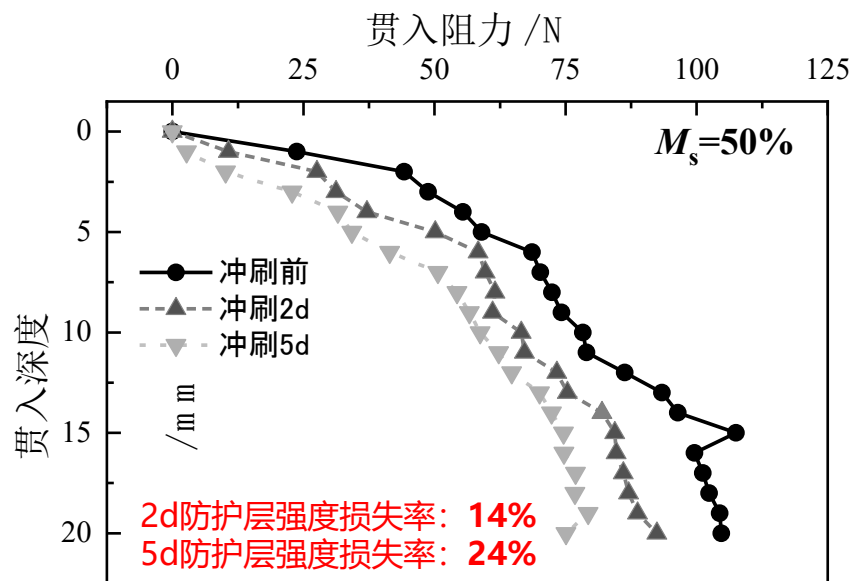


抗冲刷试验

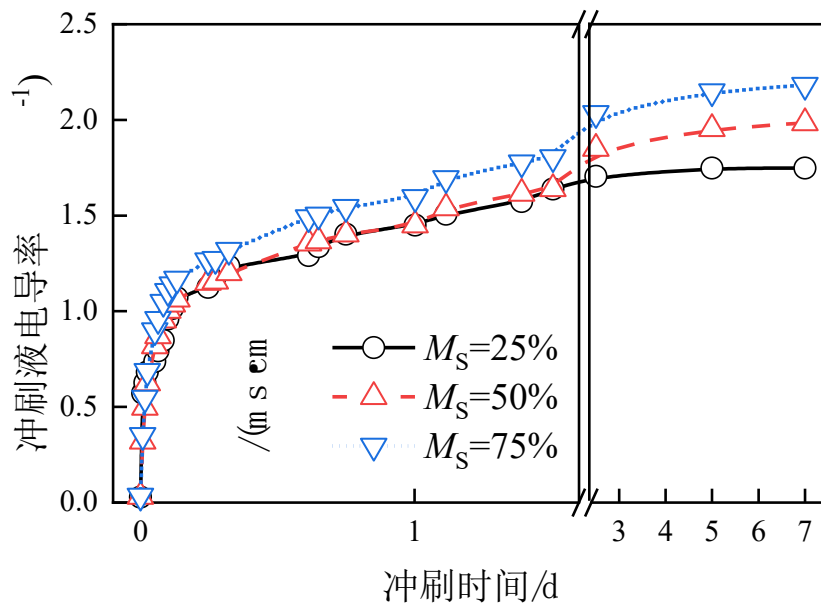
4. 应用场景及展望—菌丝加固岸坡抗侵蚀

4.4 菌丝定殖抗冲刷试验 (正在进行)

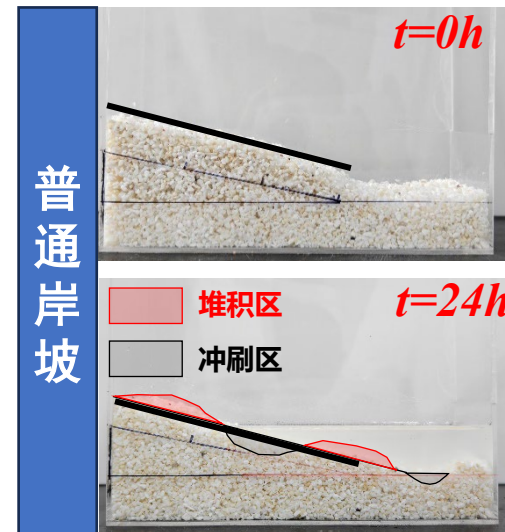
- 波浪冲刷会导致菌丝防护层强度损失;
- 连续冲刷7天, 菌丝加固模型表面无明显冲蚀沟及裂缝, **整体性较好**;
- 菌丝加固工况溶液电导率小幅增加, 部分真菌析出。



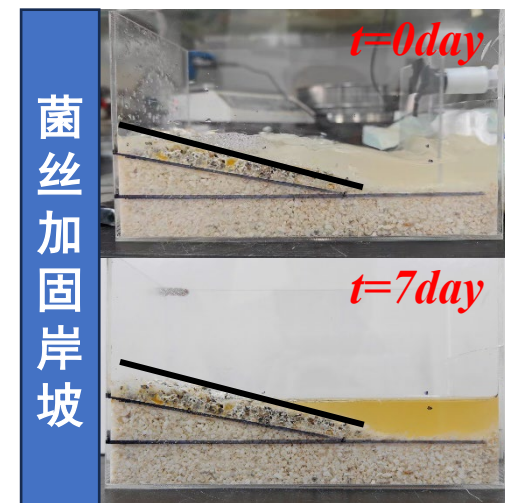
冲刷侵蚀下防护层贯入阻力损失



菌丝加固工况溶液电导率



冲刷明显



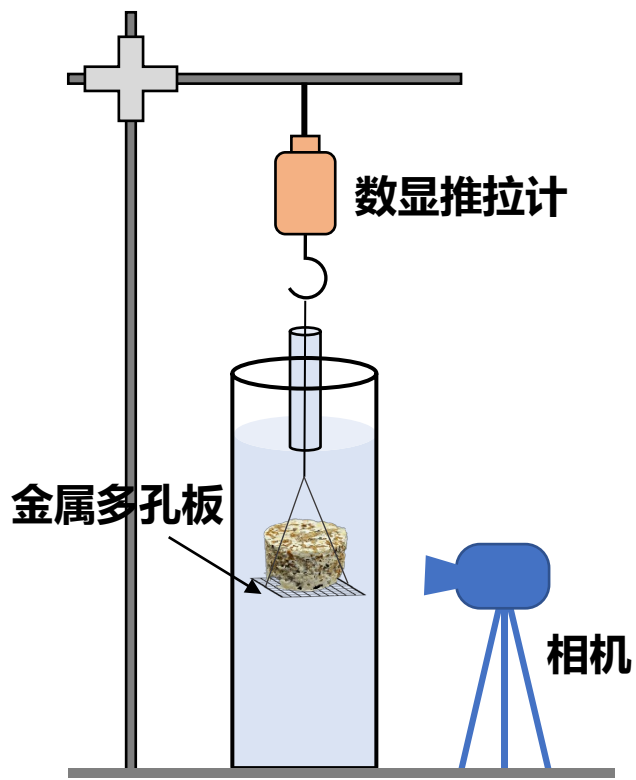
无明显冲刷



4. 应用场景及展望——菌丝加固岸坡抗侵蚀

4.5 菌丝复合土崩解试验

□ 菌丝复合土水中浸泡5天未观察到明显的崩解现象。



崩解试验装置

未处理试样



t=0s



t=1s



t=2s

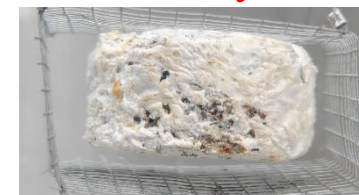


t=5s

菌丝加固试样
($M_s=50\%$)



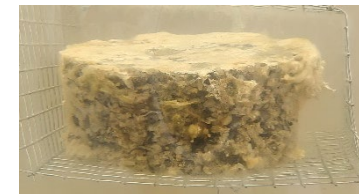
t=0day



t=1days



t=2days



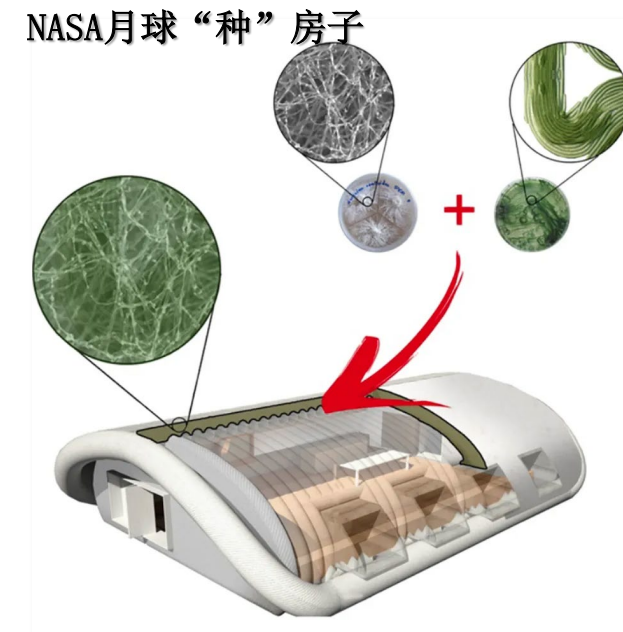
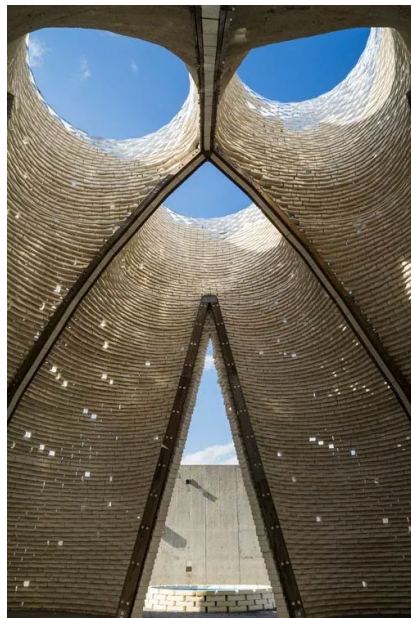
t=5days

试验现象

4. 应用场景及展望



4.6 展望



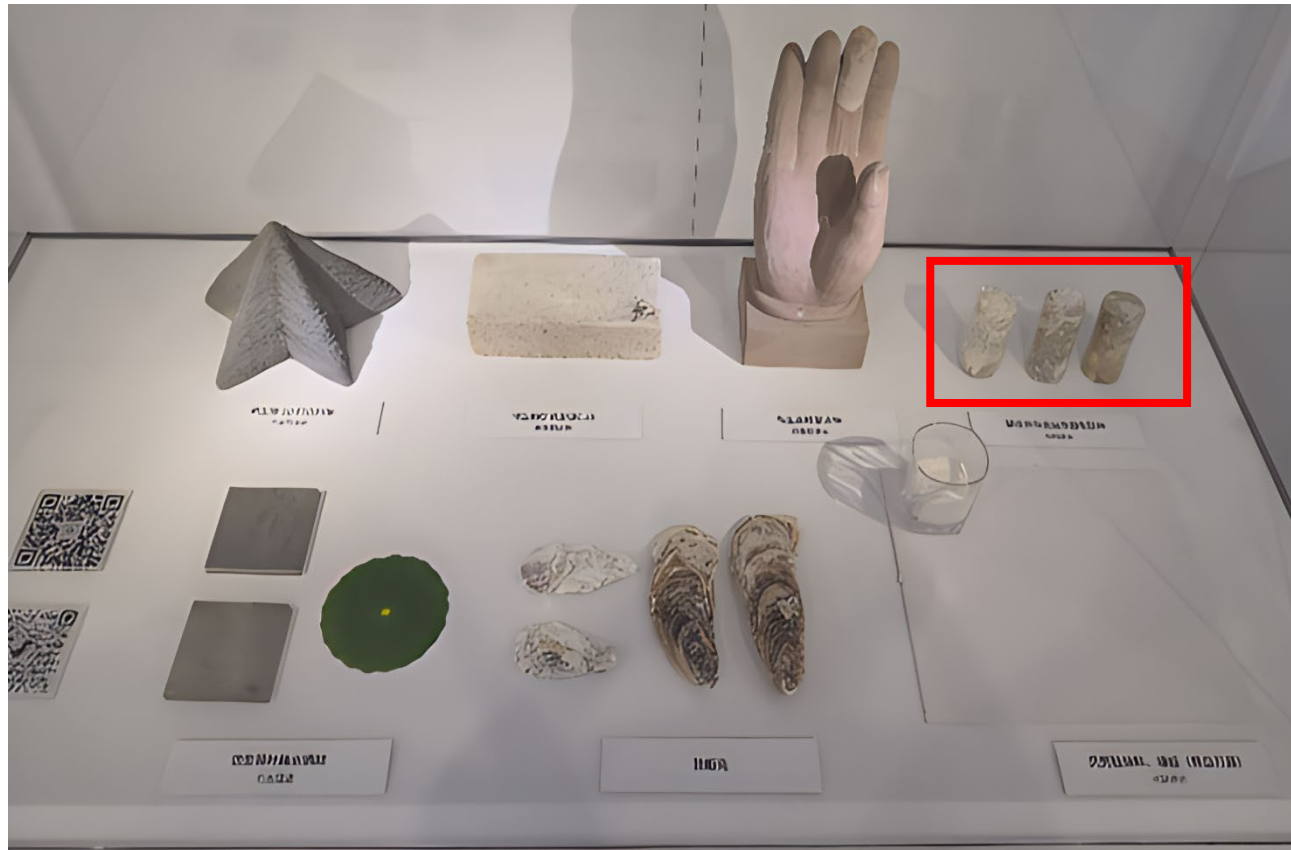
用蘑菇建房子？

自然生长，实现“负碳”“零废墟”建筑！

4. 应用场景及展望



4.6 展望



与科技产业代表展开前瞻性对话。

其中，刘汉龙院士团队长期致力于生物建造领域的探索与创新，此次带来了一系列该领域前沿水平的最新科技展品。例如在微生物建造方向，展示了微生物3D打印土壤技术；植物建造方向上，带来的糙皮侧耳菌丝体固化砂柱展示了大自然与建筑科技的奇妙结合；动物建造方向上，带来了以海洋生物贝壳为原料研发贝壳粉涂料及墙板等系列生态壁材。

2025上海城市空间艺术季展出

中国城市网报道



内容提要

Contents

第一部分

研究背景

第二部分

菌丝复合土水力特性

第三部分

菌丝复合土强度特性

第四部分

菌丝体应用场景与展望

第五部分

结论

5. 结 论



- ◆ 生物菌丝复合土是一种通过真菌新陈代谢生成的菌丝对土颗粒进行**缠绕、包裹与黏结**，从而形成具有一定强度的轻质疏水复合材料；
- ◆ 菌丝复合土表面致密的菌丝及其分泌的疏水蛋白可改善土体**疏水性**，延长毛细吸水及水滴入渗时长，减小土体渗透系数，有利于**提升土体保水性并有效阻碍水分入渗**；
- ◆ 菌丝可大幅提高土体抗剪强度，菌丝复合土试样呈现**延性破坏特征**，无明显脆性剪切带，其分泌的胞外聚合物是核心粘结物质；
- ◆ 菌丝对 Cu^{2+} **吸附效果较好**，基质掺量越高，菌丝生成量越多，吸附效果越好，且重金属浓度对菌液吸附抑制作用越小；菌丝修复污染土**水稳性良好**；
- ◆ 波浪冲刷会导致菌丝防护层强度损失，但仍能保持较好的整体性，岸坡表面**无明显冲蚀沟及裂缝**。