

# 半互穿网络复合水凝胶微胶囊的制备及其生物防治应用

吴迪, 李豪, 范晓军, 肖瑞琳\*  
(太原理工大学, 山西 晋中 030600)

**摘要:**针对微生物菌剂田间易失活、持效短等问题, 构建了海藻酸钠( ALG)/胞外多糖( EPS)/贝莱斯芽孢杆菌( CT32) 的半互穿网络水凝胶微胶囊体系。经优化, 在质量比 ALG:EPS=7:1 时, 包埋率达 66.5%, 活菌载量为  $2.13 \times 10^8$  CFU/g。电镜表征显示微胶囊表面致密, 内部形成 80~180  $\mu\text{m}$  的均匀多孔结构; 红外光谱证实 EPS 通过氢键与  $\text{Ca}^{2+}$  配位增强了网络稳定性。基于该半互穿网络结构, 微胶囊体系兼具长效缓释与水分响应特性; 在土壤中可持续释放活菌 70 d 以上, 湿润环境下 4 d 内即可启动快速释放。草莓黄萎病模型防治试验表明其能显著促进植株生长, 为提升微生物菌剂田间稳定性和持久性提供了有效支撑。

**关键词:**复合型水凝胶微胶囊; 半互穿网络; 生物防治; 贝莱斯芽孢杆菌

中图分类号: TQ427.26

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S1-0156-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.027

## Preparation of semi-interpenetrating network composite hydrogel microcapsules and their application in biological control

WU Di, LI Hao, FAN Xiao-jun, XIAO Rui-lin\*  
(Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China)

**Abstract:** To address issues such as easy inactivation and short duration of microbial agents in the field, this study constructed a semi-interpenetrating network hydrogel microcapsule system based on sodium alginate (ALG), extracellular polysaccharides (EPS), and *Bacillus velezensis* CT32. After optimization, at a mass ratio of ALG:EPS = 7:1, the encapsulation efficiency reached 66.5%, with a live bacterial loading capacity of  $2.13 \times 10^8$  CFU/g. Electron microscopy characterization revealed a dense surface of the microcapsules and an internal uniform porous structure with pore sizes ranging from 80 to 180  $\mu\text{m}$ . Infrared spectroscopy confirmed that EPS enhanced the network stability through hydrogen bonding and  $\text{Ca}^{2+}$  coordination. Based on this semi-interpenetrating network structure, the microcapsule system exhibited both long-term sustained release and moisture-responsive characteristics; it enabled sustained release of live bacteria in soil for over 70 days, while rapid release could be triggered within 4 days in a moist environment. Control trials on a strawberry *Verticillium* wilt model demonstrated its significant efficacy in promoting plant growth. This study provides effective support for enhancing the field stability and duration of microbial agents.

**Key words:** composite hydrogel microcapsules; semi-interpenetrating network; biological control; *Bacillus velezensis*

贝莱斯芽孢杆菌作为代表性生防菌株, 在抑制病原菌与促进植物生长等方面潜力显著<sup>[1-3]</sup>, 但其实际应用受限于菌体环境抗性差与成分释放可控性低等问题, 制约了田间生物防治效果与规模化推广。水凝胶微胶囊包埋技术通过构建物理屏障, 提升菌体抗逆性并实现活性成分的可控释放<sup>[4-6]</sup>。海藻酸钠(Alginate, ALG)以其优良的生物相容性与成膜性成为常用载体<sup>[7]</sup>, 然而单一 ALG 体系存在机械强度低、环境中易降解、稳定性差等缺陷, 难以满足活性成分的长效维持。

研究发现, 海藻酸钠可与多种高分子多糖复合形成致密的半互穿网络结构(Semi-Interpenetrating Network, semi-IPN)<sup>[8-9]</sup>, 借助不同聚合物链的相互贯穿与物理缠结, 该结构在动态环境中展现出良好的溶胀稳定性与结构完整性, 已广泛应用于菌株包埋等领域的性能优化<sup>[10]</sup>。例如, 海藻酸盐与壳聚糖等复合, 可协同增强凝胶性能, 并赋予其抗菌与靶向控释功能<sup>[8]</sup>。在农业中海藻酸盐/壳聚糖微球可用于调控植物代谢与改善农产品品质, 同时能够负载农药实现缓释, 从而延长药效、减少用量<sup>[11]</sup>。然

收稿日期: 2026-01-26; 修回日期: 2026-03-23

基金项目: 山西省基础研究计划项目(202103021224088); 山西省社科联 2025—2026 年度重点课题项目(SSKLZDKT2025055)

作者简介: 吴迪(1991-), 男, 本科, 研究方向为生物防治, 2023540022@link.tyut.edu.cn; 肖瑞琳(1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为功能生物材料交叉应用, 通讯联系人, xiaoruilin@tyut.edu.cn。

而,现有复合体系在微生物包埋应用中仍面临载体与菌株间界面相容性不足、环境响应机制不完善等局限。值得注意的是,微生物来源的天然胞外多糖(Extracellular Polymeric Substances, EPS)因其良好的成膜性、保水性与结构增强能力,成为构建海藻酸钠复合载体的理想材料<sup>[12]</sup>。EPS不仅能通过分子相互作用稳定凝胶网络,还可为包埋微生物提供营养与微环境支持<sup>[13-15]</sup>,在微生物包埋中展现出显著优势。然而,该复合体系仍面临配方与工艺复杂、载体-菌株-环境之间的高效互作难以实现等问题,且长效缓释性能与环境响应释放行为之间的协调机制仍不明确。

基于此,本研究提出采用胶质芽孢杆菌原位分泌的胞外多糖(EPS)与海藻酸钠(ALG)构建半互穿网络水凝胶微胶囊,用于包埋贝莱斯芽孢杆菌(CT32)。该策略旨在利用EPS与ALG分子间的氢键、离子配位及链缠结等相互作用,在温和条件下构建结构稳定、界面融合的三维网络,以增强载体的结构完整性与降解可控性。同时,借助EPS本身的保水、营养及成膜特性,实现对包埋菌株的物理保护与根际微环境协同调控,从而为提升微生物菌剂在田间的存活率与持久性提供一种兼具结构适配与功能整合的载体新途径。

## 1 材料与试剂

### 1.1 样品

本次选用的草莓为2叶1心的健康草莓幼苗,购自山西省农科院。贝莱斯芽孢杆菌(CT32),购自中国典型培养物保藏中心。大丽轮枝菌、胶质类芽孢杆菌(LT1906)<sup>[14]</sup>,购自中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心。

### 1.2 培养基

贝莱斯芽孢杆菌培养基(牛肉膏3.0 g,蛋白胨10.0 g,NaCl 5 g,蒸馏水1 L,pH=7);PDA培养基(马铃薯洗净去皮,再称取200 g切成小块,加水煮烂,用8层纱布过滤,收集滤液;加入葡萄糖20.0 g,蒸馏水定容至1 L);PKO培养基[Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 5.0 g、葡萄糖10.0 g、NaCl 0.2 g、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5 g、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.1 g、KCl 0.2 g、MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 0.002 g、琼脂20 g、酵母提取物0.5 g、FeSO<sub>4</sub>·8H<sub>2</sub>O 0.002 g、总体积1 L、pH=7.2];固体培养基[蔗糖10 g、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 g、K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.2 g、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.2 g、FeCl<sub>3</sub> 0.005 g、CaCO<sub>3</sub> 0.1 g、琼脂15 g、水1 L、pH=7.2];种子培养基[蔗糖10 g、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 g、

K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.2 g、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.2 g、FeCl<sub>3</sub> 0.005 g],察氏培养基(CaCO<sub>3</sub> 0.1 g,水1 L,pH=7.2,NaNO<sub>3</sub> 3.0 g,K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 1.0 g,MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.5 g,KCl 0.5 g,FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.01 g,蔗糖30.0 g,琼脂15.0 g)。

### 1.3 主要试剂和仪器

蔗糖(天津凯通)、葡萄糖(上海国药)、蛋白胨(生物科技)、牛肉膏(国药集团)、磷酸氢二钾(天津凯通)、氯化铁(天津凯通)、硫酸镁(天津凯通)、琼脂(范德生物)、氯化钠(国药集团)、硫酸铵(天津凯通)、氯化钾(天津凯通)、水合硫酸镁(国药集团)、酵母提取物(国药集团)、硫酸亚铁(国药集团)、利福平(国药集团)、Salkowski试剂(含35% HClO<sub>4</sub>和0.5 mol/L FeCl<sub>3</sub>)、海藻酸钠(ALG,质量分数3%的溶液)、胶质芽孢杆菌胞外多糖(EPS)、氯化钙(CaCl<sub>2</sub>,质量分数2%的交联液)。

实验采用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)、扫描电子显微镜(SEM)表征微胶囊结构,结合pH计、立式压力蒸汽灭菌器、超净工作台、台式恒温振荡器、高速冷冻离心机、电热恒温培养箱、冷冻干燥机常规设备完成材料制备与性能测试,缓释实验通过恒温摇床模拟土壤环境,使用无菌试管、磷酸缓冲液等耗材进行微生物释放曲线测定。

## 2 实验方法

### 2.1 CT32 促生活性检测

通过Salkowski试剂法检测贝莱斯芽孢杆菌CT32的吲哚乙酸(IAA)分泌能力:配制0~25 μg/mL IAA标准液,菌液37℃培养24 h后加50 μL菌悬液+50 μg/mL赖氨酸,72 h后离心取上清,与Salkowski试剂(35% HClO<sub>4</sub>+0.5 mol/L FeCl<sub>3</sub>)显色,于535 nm处测吸光度,溶液显红色即表明菌株分泌IAA,通过IAA标准曲线定量计算分泌量。采用Pikovskaya琼脂平板透明圈法,证实贝莱斯芽孢杆菌CT32具有磷酸盐溶解能力。

### 2.2 CT32 抗真菌活性检测

病原菌在PDA培养基活化5 d,CT32经牛肉膏-蛋白胨液体培养24 h后转接固体培养基活化。将CT32点接于PDA平板边缘2 cm处,病原菌菌丝置于中心,37℃培养5 d后测量抑菌圈直径(3次重复)。

### 2.3 CT32 与胶质类芽孢杆菌 LT1906 相容性检测

验证CT32与LT1906的共生性:对照组(CT32单独培养)、实验组(LT1906涂布后点种CT32),37℃培养48 h后观察菌落生长。

## 2.4 ALG 与 CT32 相容性分析

通过向 LB 培养基中添加 0%~4% (质量体积比, w/v) 的海藻酸钠 (ALG) 及不同比例的 ALG-胞外多糖 (EPS) 复合材料 (A100/A87.5E12.5/A75E25/A50E50), 以添加 3% ALG 的培养基为基础, 接种贝莱斯芽孢杆菌 CT32 (1:100), 37℃ 培养 24 h 后统计菌落数。

## 2.5 ALG-EPS 复合水凝胶制备及 CT32 微胶囊化封装

胶质芽孢杆菌 LT1906 产糖培养: 种子液 (30℃、180 r/min 培养 24 h) 按 1:100 接种至产糖培养基, 30℃、180 r/min 培养 36 h 获 EPS。ALG 微胶囊优化: CT32 菌液 ( $3.2 \times 10^8$  CFU/mL) 与 1%~4% ALG 溶液按 3:5 (体积比, v/v) 混合, 注射入 2% CaCl<sub>2</sub> 固化, 洗涤后计算封装率

通过混合不同比例 ALG 与 EPS (A100-A50E50), 搅拌均匀后与 CT32 菌液交联, 制备复合微胶囊, 清洗后测定封装率, 优化缓释性能。

## 2.6 ALG-EPS 微胶囊化 CT32 表征手段

采用 KBr 压片法对 ALG 微胶囊以及不同比例的 ALG-EPS 微胶囊进行了红外光谱分析, 光谱的范围在 400~4 000 cm<sup>-1</sup> 之间。将样品在 40℃ 下干燥 72 h, 然后, 通过 SEM 观察表征复合微胶囊表面以及截面的形态。

## 2.7 ALG-EPS 微胶囊化 CT32 性能测试

溶胀率通过将湿微胶囊 (ALG-EPS 不同比例样品) 于 40℃ 烘干至恒重 ( $W_1$ ), 再浸没于 0.9% NaCl 溶液中 24 h 后擦干称重 ( $W_2$ ), 按公式 (1) 计算, 反映材料吸水膨胀能力。

$$\text{溶胀率} = [(W_2 - W_1) / W_1] \times 100\% \quad (1)$$

凝胶分数则通过干微胶囊 ( $W_3$ ) 经去离子水萃取 48 h 去除未交联成分后再次烘干 ( $W_4$ ), 按式 (2) 计算, 表征微胶囊交联网络的完整性。

$$\text{凝胶分数} = (W_4 / W_3) \times 100\% \quad (2)$$

含水率以湿微胶囊初始重量 ( $W_5$ ) 与烘干后重量 ( $W_6$ ) 的差值计算, 见式 (3), 体现材料的水分保持特性。

$$\text{含水率} = [(W_5 - W_6) / W_5] \times 100\% \quad (3)$$

三者综合评估 ALG-EPS 复合微胶囊的缓释性能与结构稳定性。

通过诱导 CT32 对利福平耐药性 (200 μg/mL), 将其封装于 ALG-EPS 与 ALG 微胶囊 (含 10<sup>8</sup> CFU/g), 以 10 g 微胶囊/100 g 土壤施用, 同时以 10 mL 游离菌液 (10<sup>8</sup> CFU/mL) 为对照。在 5、10、15…60 d 周期

中, 土壤悬液经稀释涂布于含利福平的 LB 平板 (37℃ 培养 24 h), 统计菌落数, 实验重复 3 次, 评估微胶囊缓释性能。

通过水触发响应实验检测 ALG-EPS 与 ALG 微胶囊的释放特性: 将 2 g 微胶囊置于 20 mL 磷酸缓冲液 (37℃ 摇床) 中, 每隔 2 d 取样, 测定菌悬液中 CT32 的活菌浓度。

## 2.8 草莓植株的生物防治

配制 10 L 察氏培养基高压灭菌, 接入大丽轮枝菌菌丝块, 25℃、130 r/min 振荡培养 10 d, 制备  $1 \times 10^7$  CFU/mL 孢子悬液。选取 2 叶 1 心健康草莓幼苗, 无菌水清洗后移栽至灭菌泥炭土 (2 kg/盆), 14 d 根系稳定后, 通过伤根灌注法接种孢子悬液 (50 mL/株)。设置 5 组处理: T1 阳性对照 (仅接菌)、T2 (CT32 菌液+接菌)、T3 (ALG 微胶囊+接菌)、T4 (ALG-EPS 微胶囊+接菌)、T5 空白对照, 每组 10 盆, 温室条件下每日调控湿度, 60 d 后统计植株茎长 (cm)、叶片长度 (cm)、叶片宽度 (cm)、植株鲜重 (g)、植株干重 (g)。

## 3 结果与分析

### 3.1 CT32 菌株的生防与促生潜力

CT32 菌株对草莓黄萎病原菌——大丽轮枝菌 (*Verticillium dahliae*) 表现出显著的拮抗活性。平板对峙实验结果显示, CT32 产生的抑菌圈直径超过 20 mm (图 1), 表明其能有效抑制病原菌菌丝的生长与扩展。

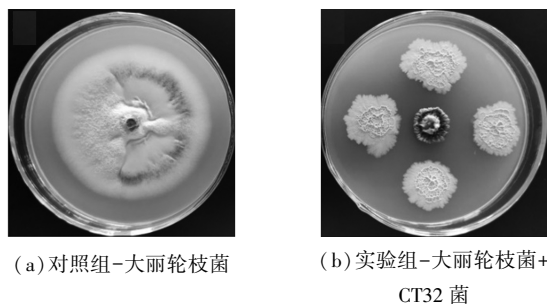
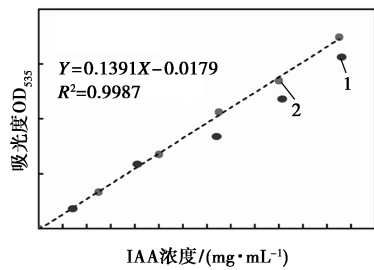
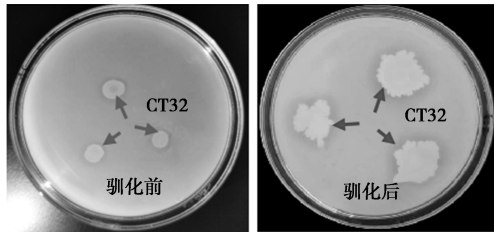


图 1 CT32 菌株与病原菌大丽轮枝菌的平板对峙实验

为了探索该菌株的植物促生潜力, 通过 Salkowski 比色法测定, 其吲哚乙酸 (IAA) 分泌量为  $(18.5 \pm 2.1) \mu\text{g/mL}$  [图 2(a)], 说明 CT32 可通过合成植物生长激素直接促进宿主生长发育; 此外, 在 PKO 培养基上形成的溶磷透明圈直径达 2.5 cm [图 2(b)], 证实其具有溶解难溶性磷酸盐的能力, 有助于提升土壤中磷的有效性, 间接促进植物营养吸收。



1—标准数据;2—实验数据  
(a) CT32 菌株分泌 IAA 比色实验



(b) CT32 驯化前、后溶解磷酸盐能力比较

图 2 CT32 菌株的促生能力

值得注意的是,CT32 与胶质芽孢杆菌 LT1906 在共培养体系中未出现相互抑制现象(图 3),显示

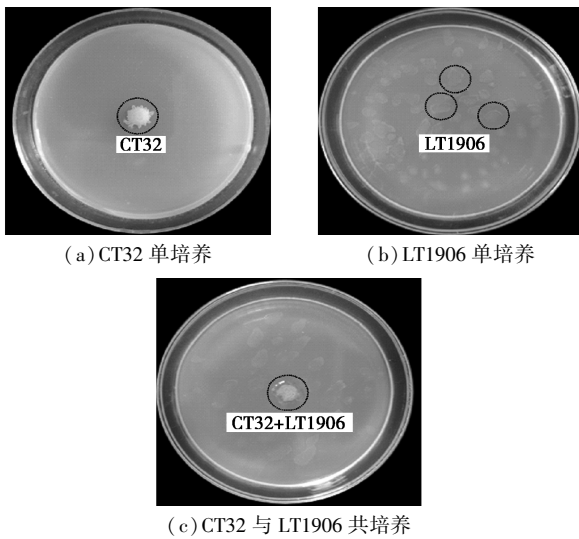


图 3 CT32 菌株与 LT1906 菌株共生实验

表 2 不同比例的 ALG-EPS 复合微胶囊

编号	ALG 占比/%	活细胞数/(10 <sup>8</sup> CFU·g <sup>-1</sup> )	封装率/%	溶胀率/%	凝胶分数/%	湿微胶囊/mm
A100	100.0	1.62±0.016	50.7±0.10	162.6±0.72	80.55±0.47	5.1±0.50
A87.5E12.5	87.5	2.13±0.014	66.5±0.13	173.0±0.67	78.98±0.27	5.3±0.40
A75E25	75.0	1.78±0.028	55.8±0.16	189.4±0.62	76.98±0.28	5.2±0.52
A50E50	50.0	1.18±0.018	36.9±0.14	128.6±0.54	69.76±0.34	4.6±0.48

以 3%海藻酸钠为基础,研究不同 EPS 添加量对 ALG-EPS 复合微胶囊性能的影响。结果显示,随着 EPS 比例增加(0→25%),溶胀率先升后降,在 25%时最高;凝胶分数持续下降,由纯 ALG 的 80.33%降至 A50E50 的 62.84%;含水率则逐渐上

升。两菌株具有良好的生物相容性,这为构建 CT32 与 LT1906(及其胞外多糖 EPS)协同作用的复合微生物制剂奠定了关键的生物学基础<sup>[12-15]</sup>。

### 3.2 ALG-EPS 复合微胶囊的制备及性能优化

为构建高效、稳定的微生物递送系统,本研究以贝莱斯芽孢杆菌 CT32 为主要生防功能菌,以胶质芽孢杆菌 LT1906 及其分泌的胞外多糖(EPS)作为结构增强与功能协同组分,与海藻酸钠(ALG)复合制备了半互穿网络微胶囊。

表 1 不同浓度 ALG 制备微胶囊

ALG 浓度/ %	活细胞数/ (10 <sup>8</sup> CFU·g <sup>-1</sup> )	封装率/ %	尺寸/ mm
1.0	1.09±0.008	34.12±0.06	2.6±0.44
1.5	1.17±0.008	36.43±0.09	3.4±0.40
2.0	1.27±0.012	39.54±0.12	3.8±0.52
2.5	1.40±0.018	43.69±0.12	4.6±0.48
3.0	1.62±0.016	50.70±0.10	5.1±0.50

通过系统优化,用不同浓度的海藻酸钠(ALG)制备微胶囊(表 1),研究表明 3% ALG 浓度下制备的微胶囊性能最优,其内部活细胞数为 1.62×10<sup>8</sup> CFU/g,封装率达 50.7%,粒径为 5.1 mm;高于或低于此浓度均导致封装率下降或无法成球。在此基础上,固定 ALG 浓度为 3%,添加胶质芽孢杆菌胞外多糖(EPS)进行复合。结果表明,当 ALG 与 EPS 比例为 7:1(A87.5E12.5)时,微胶囊封装率最高,达 66.5%,较纯 ALG 微胶囊提升 15.8%,且微胶囊尺寸保持稳定(表 2)。由于 LT1906 菌体及其 EPS 共存于交联网络中,该微胶囊体系实现了 CT32 与 LT1906 的稳定共固定化,为后续的双菌协同作用奠定了基础。

升。这表明 EPS 的高亲水性提升了材料的吸水能力与含水率,但由于 ALG 是唯一发生交联的组分,EPS 的加入稀释了凝胶网络,导致结构完整性随其比例增加而下降。当 EPS 添加过量(如 50%)时,凝胶分数过低,网络结构不完整,亲水性 EPS 在凝胶

过程中流失,反而导致溶胀率下降(图 4)。

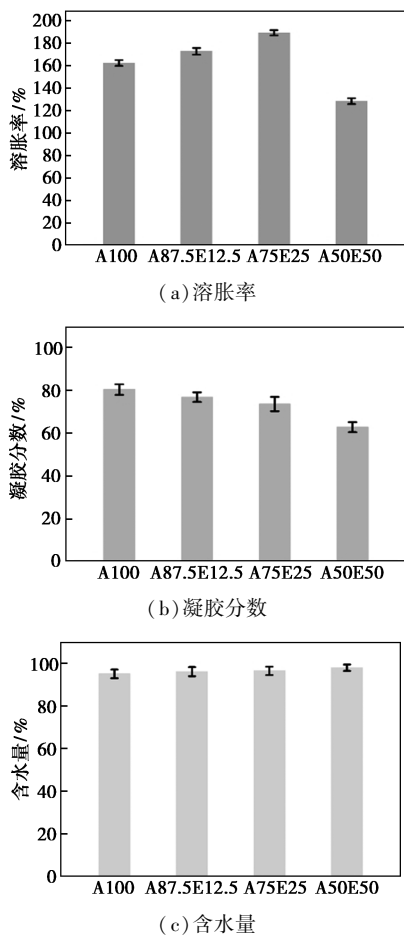
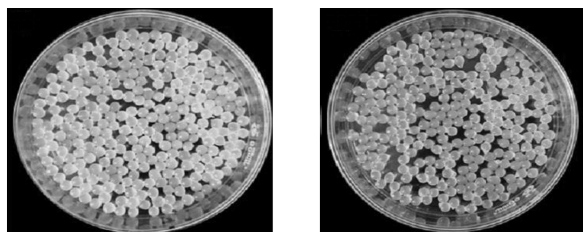


图 4 微胶囊基本性能优化

基于以上优化方案成功制备出最佳比例的 ALG-EPS 复合微胶囊,最佳比例为 A87.5E12.5,与纯海藻酸钠微胶囊相比,ALG-EPS 复合微胶囊显得更加圆润饱满,颜色也由无色透明变为白色(图 5)。



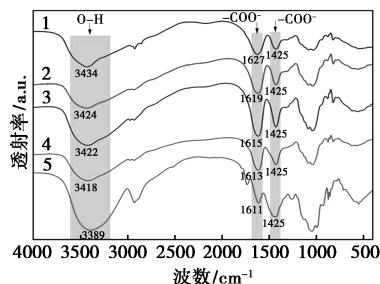
(a) ALG-EPS 微胶囊 (b) ALG 微胶囊

图 5 微胶囊实物图

### 3.3 微胶囊的结构表征与形貌特征

傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 分析表明(图 6),复合微胶囊中 ALG 的特征吸收峰发生偏移( $\text{COO}^-$ 峰由  $1627/1425\text{ cm}^{-1}$ 移至  $1615/1418\text{ cm}^{-1}$ , $-\text{OH}$ 峰由  $3434\text{ cm}^{-1}$ 移至  $3418\text{ cm}^{-1}$ ),证实了 EPS 通过氢键及  $\text{Ca}^{2+}$  配位与 ALG 形成物理交联网络,该网络

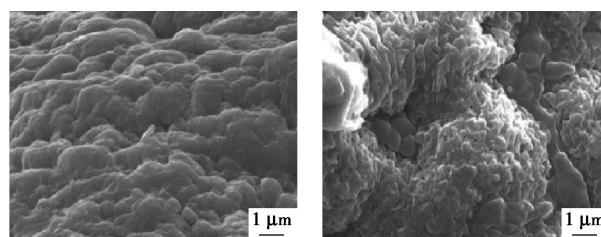
为包埋的 CT32 与 LT1906 提供了稳定的三维环境。



1—A100;2—A87.5E12.5;3—A75E25;4—A50E50;5—E100

图 6 微胶囊的 FT-IR 光谱

SEM 观察显示(图 7),加入 LT1906 EPS 后,微胶囊表面更为光滑致密,内部孔径由纯 ALG 微胶囊的  $200\sim 300\text{ }\mu\text{m}$  减小至  $80\sim 180\text{ }\mu\text{m}$ 。这种结构变化有效减缓了水分与物质的扩散速率,不仅增强了微胶囊的机械稳定性,也为内部包埋的 CT32 与 LT1906 提供了更好的物理保护,降低了菌体在土壤环境中的突发性释放。

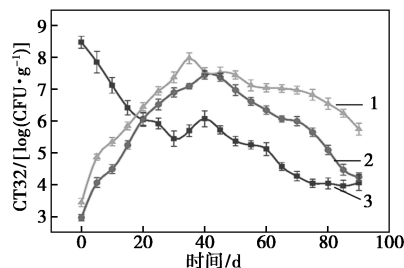


(a) ALG-EPS (b) ALG

图 7 微胶囊表面的形貌特征

### 3.4 ALG-EPS 微胶囊显著延长 CT32 土壤缓释周期

为评估 ALG-EPS 复合微胶囊的缓释性能及其对 CT32 菌株的田间持效能力,土壤缓释实验表明 ALG-EPS 与 ALG 微胶囊均能实现 CT32 的缓释释放。ALG-EPS 微胶囊在 35 d 时释放菌量达峰值 ( $10^8\text{ CFU/g}$ ),70 d 内仍保持有效浓度。ALG 微胶囊释菌周期约为 40 d,而游离菌液处理 15 d 后菌量即显著下降(图 8)。ALG-EPS 微胶囊表现出更快



1—ALG-EPS 微胶囊组;2—ALG 微胶囊组;3—CT32 菌液组

图 8 CT32 菌株的土壤缓释曲线

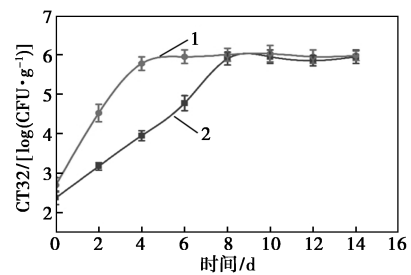
的初期释放与更长的持效期,这源于其半互穿网络结构中 EPS 的快速溶解促进了表层裂解,而内部网络仍维持稳定,从而实现持续释放。

### 3.5 ALG-EPS 微胶囊具备快速水触发释放特性

为明确 ALG-EPS 复合微胶囊在湿润环境下的响应性释放行为,进一步开展了磷酸缓冲液中的释放实验。结果表明,ALG-EPS 微胶囊表现出显著的水分触发释放特性:在浸入缓冲液的最初 4 d 内,CT32 菌体即进入快速释放阶段,并于第 6 d 达到释放平衡。相比之下,纯 ALG 微胶囊的释放过程较为缓慢,直至第 8 d 才趋于稳定(图 9)。该结果证实了 ALG-EPS 微胶囊具备更优的水分响应与快速启动能力,为其在田间湿度变化条件下的智能释放提供了依据<sup>[16-17]</sup>。

### 3.6 ALG-EPS 微胶囊的促生功效

为系统评估 ALG-EPS 复合微胶囊对草莓植株生长的综合促进效应,本研究测定了其处理后的植



1—ALG-EPS 微胶囊组;2—ALG 微胶囊组

图 9 ALG-EPS 微胶囊的水触发响应释放

株形态与生物量指标。结果显示,与空白对照相比,ALG-EPS 处理显著促进了草莓植株的生长发育:叶片长度、叶片宽度、植株鲜重和植株干重分别增加了 8.8%、13.4%、4.5% 和 3.2% (表 3)。这表明 ALG-EPS 微胶囊不仅能通过缓释 CT32 发挥生防功能,还可能通过改善根际微环境、协同提供营养支持等多重机制,实现“病害防控-植物促生”的双重效应<sup>[18-20]</sup>。

表 3 细菌菌株及其微胶囊制剂对草莓植株生长参数的影响

处理方式	茎长/cm	叶片长度/cm	叶片宽度/cm	植株鲜重/g	植株干重/g
大丽轮枝菌	8.27±1.33	3.12±0.76	2.36±0.36	5.12±0.24	1.28±0.06
大丽轮枝菌+CT32 菌液	15.26±1.28	5.43±0.59	3.83±0.29	13.43±0.39	3.35±0.09
大丽轮枝菌+ALG 微胶囊	23.45±1.43	6.54±0.42	4.74±0.22	19.54±0.52	4.90±0.13
大丽轮枝菌+ALG-EPS 微胶囊	27.56±1.48	7.29±0.48	5.01±0.22	22.69±0.42	5.37±0.11
空白对照	32.42±3.27	6.70±0.50	4.40±0.32	21.70±0.27	5.2±0.07

## 4 结论

本研究基于海藻酸钠/胞外多糖构建的半互穿网络水凝胶微胶囊体系,显著提升了微生物菌剂的包埋稳定性与环境响应性。该结构通过离子交联与多糖链物理缠结的协同作用,形成了致密且稳定的三维网络,有效延缓菌体在土壤环境中的释放与失活;其具备的水分响应特性,可在湿润条件下实现菌剂的快速启动释放。该体系不仅能有效抑制病原菌,还可促进植株生长,实现“病害防控—植物促生”双重功能,为微生物农药的功能化载体设计与长效递送提供了可行的材料策略与理论依据。

### 参考文献

- [1] 李启云,路杨,隋丽,等.植物保护与农业绿色发展[J].吉林农业大学学报,2021,43(1):9-15.
- [2] 董玲玲,张建萍,何狄霏,等.长枝木霉菌与贝莱斯芽孢杆菌协同防治甘蔗赤腐病[J].中国生物防治学报,2026,42(1):55-63.
- [3] 李丽程,邱莉童,王婧宇,等.贝莱斯芽孢杆菌 Y426-7 可湿性粉剂研制及其对人参疫病的防治效果[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2026,54(5):155-164.
- [4] 彭启超,张志鹏,黄德龙,等.贝莱斯芽孢杆菌微胶囊制备及其防治番茄枯萎病的应用评价[J].安徽农业科学,2023,51(8):152-155.
- [5] 董羽嘉,何艳慧,武占省.微胶囊化植物根际促生菌剂的研究进展[J].生物加工过程,2021,19(4):404-412.
- [6] 项郑昊,周化岚,张建国.海藻酸钠微胶囊制备及其在微生物包埋中的应用[J].工业微生物,2021,51(1):43-49.
- [7] Bagnolo L M, Almeida F S, Silva K C G, et al. Starch can act differently when combined with alginate or gellan gum to form hydrogels[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 109980.
- [8] Bourd Y, El Mouzahim M, Eddarai E M, et al. Alginate-based encapsulation: From historical evolution to AI-driven optimization for sustainable innovations[J]. Colloid and Polymer Science, 2026, 83: 232.
- [9] Jurić S, Jurić M, Jambrak A R, et al. Tailoring alginate/chitosan microparticles loaded with chemical and biological agents for agricultural application and production of value-added foods[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4061.

(下转第 168 页)