



张义平,赵紫梦,钱亚睿,等.海藻酸钠-羧甲基木薯淀粉复合凝胶珠制备及其性能评价[J].轻工学报,2026,41(5):37-49.

Zhang Y P,Zhao Z M,Qian Y R,et al. Preparation and performance evaluation of sodium alginate-carboxymethyl cassava starch composite gel beads[J]. Journal of Light Industry,2026,41(5):37-49.

DOI:10.12187/2026.05.004

海藻酸钠-羧甲基木薯淀粉复合凝胶珠制备及其性能评价

张义平^{1,2},赵紫梦^{1,2},钱亚睿^{1,2},曾钰琪^{1,2},赵丽丽^{1,2},陈红^{1,2},姜晓冰^{1,2}

1. 河南师范大学 生命科学学院,河南 新乡 453007;

2. 功能微生物绿色转化技术河南省工程实验室,河南 新乡 453007

摘要:【目的】提高益生菌的 pH 稳定性和口服生物利用率。【方法】以植物乳杆菌 ZP-6 为代表性益生菌,以海藻酸钠(SA)和羧甲基木薯淀粉(CMS)为载体材料,采用复合凝聚法制备包埋植物乳杆菌 ZP-6 的 SA-CMS 复合凝胶珠,通过单因素和正交试验对其制备工艺进行优化,并研究其结构对植物乳杆菌 ZP-6 pH 稳定性及在体外模拟消化液中存活率的影响规律。【结果】相较于 SA 凝胶珠,SA-CMS 复合凝胶珠能显著提高植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率、在不同 pH 值条件下的存活率及自身的抗溶胀性;当 CMS 质量浓度为 25 mg/mL、SA 质量浓度为 20 mg/mL、CaCl₂ 质量浓度为 45 mg/mL 时,该复合凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率最高,达 89.45%;该复合凝胶珠还能显著提高植物乳杆菌 ZP-6 的 pH 稳定性和口服生物利用率,经体外模拟消化后,该复合凝胶珠中植物乳杆菌 ZP-6 的存活率仍在 80% 以上。【结论】SA-CMS 复合凝胶珠可作为益生菌的有效载体以提高其 pH 稳定性和口服生物利用率。

关键词:植物乳杆菌;羧甲基木薯淀粉;海藻酸钠;凝胶珠;pH 稳定性;口服生物利用率

中图分类号:TS201 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)05-0037-13

0 引言

益生菌是一类对人体健康有益的微生物,具有促进肠道微生物菌群成熟、抑制病原体增殖、增强人体免疫力等生理功能^[1]。国际益生菌与益生元科学联合会(International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics,ISAPP)发布的关于益生菌的共识中,突出强调了益生菌的 3 个核心特征为足

够数量、活菌状态及有益健康功能,即只有口服足够数量的活菌,才能对宿主产生有益作用^[2]。然而,温度、pH 值、胆汁盐、消化酶等胃肠道环境及贮藏条件均会影响益生菌活性,导致益生菌的口服生物利用率较低^[3-4]。其中,胃肠道中严苛的 pH 环境及食品体系的 pH 环境均是影响益生菌活性的首要因素。研究^[5]表明,将益生菌封装到具有保护和靶向递送作用的载体中,可增强益生菌对外界不良环

收稿日期:2025-09-22;修回日期:2026-01-15;出版日期:2026-10-15

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(25A550005);河南省自然科学基金青年项目(252300420698)

作者简介:张义平(1989—),女,河南省新乡市人,河南师范大学讲师,博士,主要研究方向为食品加工与安全。E-mail:zhangyiping2021@htu.edu.cn

通信作者:姜晓冰(1984—),女,河南省新乡市人,河南师范大学教授,博士,主要研究方向为食品微生物。E-mail:jxb841001@163.com

境的抵抗力,进而有效提高益生菌的耐加工性、贮藏稳定性及体内存活率^[6]。

淀粉、海藻酸盐、角叉菜胶等天然多糖具有成本低、生物相容性好、生物可降解等优点,在特定条件下会形成多孔聚合物分子凝胶网络结构,可实现对益生菌的有效封装^[7]。此外,天然多糖还可通过与肠道黏膜间的静电相互作用,促进益生菌在肠道中定植^[8]。海藻酸钠(Sodium Alginate, SA)能够在 Ca^{2+} 的诱导下迅速成胶,广泛应用于益生菌包埋领域。然而,单一 SA 凝胶孔隙较大、机械强度差,在溶液中易出现溶胀弱化现象,导致氧、氢离子、胆汁盐和消化酶快速渗透,不利于益生菌包埋系统的稳定及口服控释^[9]。研究^[10]发现,利用不同载体材料之间的相互作用,可显著改善单一多糖凝胶体系的结构和机械强度,进而提高益生菌的存活率。X. D. He 等^[11]利用 SA 与羧甲基纤维素(Carboxymethyl Cellulose, CMC)成功制备了双交联水凝胶,发现 CMC 可显著增强 SA 凝胶的力学性能,并降低其凝胶网络的孔隙。天然或改性淀粉能与 SA 通过静电、氢键等相互作用结合,提高 SA 凝胶的致密性,进而提高 SA 凝胶珠对功能物质的包埋率和缓释性能^[12]。

木薯价廉易得,是被联合国粮食及农业组织(FAO)认证的的安全的重要粮食资源,因直链淀粉含量(17%)较高而具有较强的柔韧性^[13]。与其他淀粉凝胶相比,木薯淀粉凝胶更透明,冻融稳定性和耐热性也更好^[14]。此外,木薯淀粉可显著增加聚合物溶液的黏度,并有助于提高聚合物膜的机械强度和加工性能^[15]。因此,木薯淀粉在载体材料领域具有较大的应用潜力。研究^[14,16]发现,羧甲基化可进一步提高木薯淀粉的凝胶性、增稠性、黏结性、抗酸碱性及抗消化性。利用羧甲基木薯淀粉(Carboxymethyl Cassava Starch, CMS)与 SA 进行复合,有望改善 SA 凝胶的溶胀弱化现象,提高其凝胶稳定性。目前,关于 SA-CMS 复合凝胶在益生菌包埋和控释领域的研究较少,其对益生菌的包埋及性能调控机制尚未可知。

鉴于此,本研究拟以植物乳杆菌 ZP-6(*Lactobacillus plantarum* ZP-6)为代表性益生菌,以 SA 和 CMS 为

载体材料,采用复合凝聚法制备 SA-CMS 复合凝胶珠,并以植物乳杆菌 ZP-6 包埋率、存活率及复合凝胶珠溶胀率为指标,通过单因素和正交试验优化其制备工艺,以期为提高益生菌的 pH 稳定性和口服生物利用率提供新的载体和方法,并为其在食品中的应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

植物乳杆菌 ZP-6,由功能微生物绿色转化技术河南省工程实验室从婴儿粪便中分离获得;SA、 K_2HPO_3 、无水乙酸钠、 MnSO_4 、无水 KH_2PO_4 、无水 K_2HPO_4 、胆盐提取物、吐温 80,上海麦克林生化科技有限公司;浓 HCl,福晨(天津)化学试剂有限公司;NaOH,天津市汇杭化工科技有限公司; CaCl_2 ,天津市北辰方正试剂厂;NaCl,国药集团化学试剂有限公司;胃蛋白酶(3000~3500 NFU/g)、酵母提取物,北京索莱宝科技有限公司;胰酶(8×USP),西格玛奥德里奇(上海)有限公司;CMS(羧甲基取代度 0.45),由功能微生物绿色转化技术河南省工程实验室自制;柠檬酸氢二铵,上海源叶生物科技有限公司; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,生工生物工程股份有限公司;葡萄糖,天津市光复科技发展有限公司;胰蛋白胨、牛肉膏,北京奥博星生物技术有限责任公司;琼脂,白鲨生物科技有限公司。如无特别标注,上述试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

ME204E 型电子天平,梅特勒-托利多仪器有限公司;LDZX-50FBS 型高压蒸汽灭菌锅,上海申安医疗器械厂;TGL-16B 型离心机,上海安亭科学仪器厂;HH-2 型水浴锅,北京市长风仪器仪表公司;LabDancer 型涡旋仪,德国艾卡仪器设备有限公司;SW-CJ-2D 型无菌操作台,苏州净化设备有限公司;LC-SPX-50B 型生化培养箱,上海力辰邦西仪器科技有限公司;PHS-25 型 pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司;Nano-ZS 型激光纳米粒度仪,美国马尔文仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 培养基制备、菌株活化及菌悬液制备 1) 培

培养基制备。MRS 液体培养基(1 L):K₂HPO₃ 2.0 g、柠檬酸氢二铵 2.0 g、无水乙酸钠 5.0 g、MnSO₄ 0.25 g、MgSO₄·7H₂O 0.58 g、葡萄糖 18.2 g、胰蛋白胨 10.0 g、牛肉膏 10.0 g、酵母提取物 5.0 g、吐温 80 1 mL,调节 pH 值为 6.2~6.4;配制 MRS 固体培养基时,在此基础上加入琼脂 20 g。于 115 ℃ 条件下灭菌 30 min,备用。

2) 菌株活化。从-80 ℃ 冰箱中取出冻存的植物乳杆菌 ZP-6,立即置于 37 ℃ 水浴锅中,快速振摇冻存管使冻存液全部融化;用接种环将植物乳杆菌 ZP-6 接种到 MRS 液体培养基中,于 37 ℃ 恒温摇床中培养 24 h。

3) 菌悬液制备。取活化培养液,在 12 000 r/min、4 ℃ 条件下离心 5 min,弃去上清液,用 0.85% 的无菌生理盐水洗涤沉淀物 2 次后,将其重悬于一定体积的无菌生理盐水中,采用菌落计数法对菌悬液进行活细胞计数,使菌悬液中的活菌数保持在 10⁹~10¹⁰ CFU/mL,备用。

1.3.2 SA-CMS 复合凝胶珠制备及工艺优化 取 2 mL 质量浓度为 20 mg/mL 的 SA 溶液,加入 2 mL 菌悬液,混合均匀后,用无菌注射器将该混合体系匀速滴入质量浓度为 20 mg/mL 的 CaCl₂ 溶液中,持续浸泡 30 min 进行固化;过滤,用无菌水洗涤沉淀 3 次,得到包埋植物乳杆菌 ZP-6 的 SA 凝胶珠。将一定质量浓度的 SA 溶液与一定质量浓度的 CMS 溶液按体积比 1:1 混合,并按照上述方法制备包埋植物乳杆菌 ZP-6 的 SA-CMS 复合凝胶珠。

分别改变 CMS 质量浓度(0 mg/mL、10 mg/mL、20 mg/mL、30 mg/mL、40 mg/mL 和 50 mg/mL)、SA 质量浓度(10 mg/mL、20 mg/mL、30 mg/mL、40 mg/mL 和 50 mg/mL)和 CaCl₂ 质量浓度(10 mg/mL、20 mg/mL、30 mg/mL、40 mg/mL 和 50 mg/mL),以植物乳杆菌 ZP-6 包埋率、存活率及 SA-CMS 复合凝胶珠溶胀性为指标,分别研究三因素对 SA-CMS 复合凝胶珠包埋植物乳杆菌 ZP-6 的影响规律,并对该复合凝胶珠的工艺参数进行初步筛选。在此基础上,以植物乳杆菌 ZP-6 包埋率为指标,以 CMS 质量浓度(A)、SA 质量浓度(B)和 CaCl₂ 质量浓度(C)为因素,设计三因素三水平正交试验,对该复合凝胶珠的制备工艺进

行优化,并对各凝胶珠的溶胀性及植物乳杆菌 ZP-6 的存活率进行评价。正交试验因素与水平见表 1。

1.3.3 Zeta-电位测定 将一定质量的 SA 或 CMS 分别溶于不同 pH 值的磷酸盐缓冲液(PBS 缓冲液)中,配制成质量浓度为 1 mg/mL 的溶液;将不同质量的 SA 或 CMS 分别溶于 pH 值为 6.0 的 PBS 缓冲液中,配制成不同质量浓度的 SA 溶液或 CMS 溶液。利用激光纳米粒度仪于 25 ℃ 条件下测定各溶液的 Zeta-电位^[17]。

1.3.4 包埋率测定 称取 1 g 凝胶珠样品,加入 9 mL 质量浓度为 30 mg/mL 的柠檬酸钠溶液中,于 37 ℃ 条件下水浴 30 min,用涡流振荡器振荡 30 s,依次循环 2~3 次,直至凝胶珠样品完全裂解^[2];取 100 μL 裂解液进行梯度稀释后,均匀涂布在 MRS 固体培养基上,于 37 ℃ 条件下培养 48 h,计算植物乳杆菌 ZP-6 的活菌数。根据下式计算植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率(%)^[18]:

$$\text{包埋率} = \frac{N}{N_0} \times 100\%$$

式中,N 为凝胶珠样品中植物乳杆菌 ZP-6 的活菌数/(CFU·mL⁻¹),N₀ 为植物乳杆菌 ZP-6 的初始活菌数/(CFU·mL⁻¹)。

1.3.5 存活率测定 称取 1 g 凝胶珠样品,分别置于 pH 值为 1、3、6、8、10 的 PBS 缓冲液中,于 37 ℃ 条件下浸泡 24 h,捞出后用无菌水洗涤 3 次^[19];按照 1.3.4 的方法将凝胶珠样品裂解后,计算其植物乳杆菌 ZP-6 的活菌数。根据下式计算植物乳杆菌 ZP-6 的存活率(%)^[18]:

$$\text{存活率} = \frac{N_1}{N} \times 100\%$$

式中,N₁ 为凝胶珠样品在不同 pH 值条件下浸泡 24 h 后植物乳杆菌 ZP-6 的活菌数/(CFU·mL⁻¹)。

1.3.6 形貌表征及溶胀率测定 将凝胶珠样品分

表 1 正交试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of the orthogonal test

mg/mL

水平	因素		
	A	B	C
1	25	15	35
2	30	20	40
3	35	25	45

别置于 pH 值为 1、3、6、8、10 的 PBS 缓冲液中,于 37 ℃ 条件下浸泡 24 h,取出控干水分,置于网格纸上的十字中心处测定其直径,并于固定光照条件下拍照,观察其形貌变化^[20]。根据下式计算凝胶珠样品的溶胀率(%)^[21]:

$$\text{溶胀率} = \frac{D - D_0}{D_0} \times 100\%$$

式中, D_0 为凝胶珠样品的初始直径/mm, D 为凝胶珠样品在不同 pH 值条件下浸泡 24 h 后的直径/mm。

1.3.7 体外模拟消化液中植物乳杆菌 ZP-6 存活率测定

1) 体外模拟消化液配制。模拟胃液(Simulated Gastric Fluid, SGF):取 7 mL 浓 HCl 溶于 800 mL 去离子水中,加入 3.2 g 胃蛋白酶、0.2 g NaCl,摇匀后定容至 1000 mL,备用^[22]。

模拟肠液(Simulated Intestinal Fluid, SIF):准确称取 6.8 g KH_2PO_4 ,加入 500 mL 去离子水中,用质量浓度为 4 mg/mL 的 NaOH 溶液调节 pH 值至 6.8;准确称取 10.0 g 胰酶,溶解于 100 mL 缓冲液(pH 值为 6.8,下同)中,搅拌 30 min,于 6266 r/min 条件下离心 20 min;将所得上清液用缓冲液定容至 1000 mL。每 30 mL SIF 中依次加入 4 mL 质量浓度为 46.87 mg/mL 的胆盐提取物、1 mL 质量浓度为 110 mg/mL 的 CaCl_2 溶液,备用^[22]。

模拟结肠液(Simulated Colonic Fluid, SCF):准确称取 3.4 g 无水 KH_2PO_4 和 4.3 g 无水 K_2HPO_4 ,分别定容于 100 mL 去离子水中;合并 2 种溶液并定容至 1000 mL,将其 pH 值调为 7.0,备用^[22]。

2) 植物乳杆菌 ZP-6 存活率测定。分别将 1 g 凝胶珠样品浸泡于 SGF 中孵育 2 h、SIF 中孵育 6 h、SCF 中孵育 24 h,捞出后用无菌水洗涤 3 次^[23]。按照 1.3.4 的方法将凝胶珠样品完全裂解后,计算其植物乳杆菌 ZP-6 的活菌数,以表征凝胶珠样品对植物乳杆菌 ZP-6 口服生物利用率的影响。植物乳杆菌 ZP-6 存活率(%)的计算公式如下:

$$\text{存活率} = \frac{N_2}{N} \times 100\%$$

式中, N_2 为凝胶珠样品在不同模拟消化液中浸泡后的活菌数/(CFU · mL⁻¹)。

1.4 数据处理及分析

采用 SPSS 21.0 和 Origin 8 Pro 软件进行数据

统计和绘图,所有数值均以(平均数±标准差)表示,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 pH 值和质量浓度对 SA 或 CMS Zeta-电位的影响

不同 pH 值和质量浓度下 SA 或 CMS 的 Zeta-电位如图 1 所示,其中不同小写字母表示组内差异显著($P < 0.05$),下同。由图 1 可知,SA 和 CMS 均带大量负电荷,且随着溶液 pH 值升高和质量浓度增加,二者携带的负电荷量均增多。相比之下,随着溶液 pH 值升高,CMS 的 Zeta-电位变化程度较小,表明 CMS 具有较好的 pH 稳定性;而相同 pH 值或质量浓度条件下,SA 携带的负电荷量显著多于 CMS。

2.2 单因素试验结果分析

2.2.1 CMS 质量浓度对 SA-CMS 复合凝胶珠性能的影响

不同 CMS 质量浓度下 SA-CMS 复合凝胶珠的性能如图 2 所示,其中不同大写字母表示组间差异显著($P < 0.05$),下同。由图 2a)可知,纯 SA 凝胶珠(CMS 质量浓度为 0 mg/mL)对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率为 82.02%;添加 CMS 溶液后,SA-CMS 复合凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率显著提高($P < 0.05$),但随着 CMS 质量浓度的增加,该复合凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率会降低。当 CMS 的质量浓度为 30 mg/mL 时,SA-CMS 复合凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率最高,为 88.7%,且此时该复合凝胶珠在不同 pH 值下的溶胀率均较低,植物乳杆菌 ZP-6 的存活率均在 90% 以上。这表明质量浓度为 30 mg/mL 的 CMS 能显著增强 SA-CMS 复合凝胶珠的抗溶胀性能,并有助于提高植物乳杆菌 ZP-6 的 pH 稳定性。在利用 Ca^{2+} 固化 SA 形成凝胶珠的过程中, Ca^{2+} 最先与 SA 液滴的外表面接触并首先与外层 SA 分子发生交联反应,随着 Ca^{2+} 不断向 SA 液滴内部渗透,SA 液滴核心因固化而逐渐减小,最终形成 SA 凝胶珠。研究^[25]表明,羧甲基淀粉与凝胶性多糖之间能产生分子间氢键相互作用^[24],故 CMS 可通过分子间氢键相互作用与 SA 结合;同时,CMS 的功能基团也可有效结合 Ca^{2+} 并发生交联作用,形成致密的网络结构,进而有效填充和支撑 SA

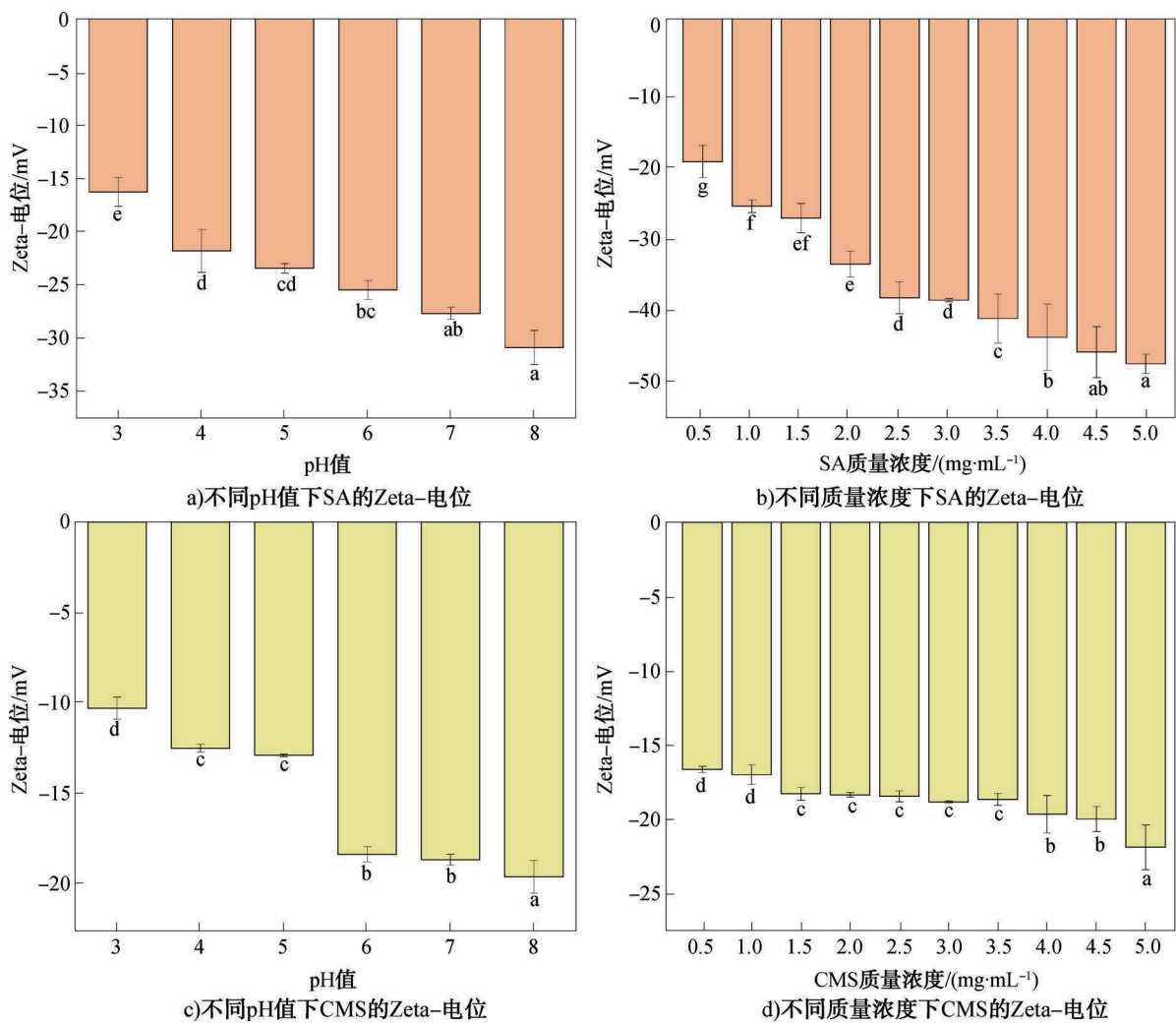


图 1 不同 pH 值和质量浓度下 SA 或 CMS 的 Zeta-电位

Fig. 1 Zeta-potential of SA or CMS under different pH and mass concentrations

凝胶网络结构^[26]。此外,CMS具有较强的吸水性和一定的交联度,可显著增大聚合物溶液的黏度^[15],故CMS溶液的加入会增大SA溶液的黏度,进而降低Ca²⁺向SA-CMS混合液滴内部的渗透速率。当CMS的质量浓度较低时,SA-CMS复合凝胶珠的外层较为疏松,使得Ca²⁺能快速向SA-CMS混合液滴内部渗透;但由于此时的凝胶网络缺乏有效的填充和支撑,其结构较为疏松,不能很好地包埋植物乳杆菌ZP-6。随着CMS质量浓度的增加,CMS对SA-CMS复合凝胶的填充和支撑作用增强,使其对植物乳杆菌ZP-6的包埋率提高。然而,由于SA的—COO⁻及CMS的—CH₂COO⁻均带负电,当CMS的质量浓度持续增加时,其负电性增强(见图1d),CMS与SA之间的静电斥力随之增强,进而阻碍二者结合^[27],使得SA-CMS复合凝胶珠网络结构重新变得

疏松^[28]。同时,高质量浓度的CMS会显著增大SA-CMS复合溶液的黏度,使植物乳杆菌ZP-6的迁移受阻,难以分散到凝胶网络内部^[29],进而降低SA-CMS复合凝胶珠对植物乳杆菌ZP-6的包埋率。

由图2b)和c)可知,随着pH值升高,各凝胶珠的溶胀率均增大。纯SA凝胶珠经PBS溶液浸泡后发生明显溶胀,当pH值为10时,其完全破裂。随着CMS质量浓度的增加,SA-CMS复合凝胶珠的溶胀率呈先增大后减小的趋势,但在不同pH值的PBS溶液中浸泡24h后,其依然保持完整的球形结构,表明CMS可有效改善SA凝胶珠的溶胀弱化问题。这可能与CMS分子间较强的氢键和交联作用有关。低pH值条件下,高浓度的H⁺会使SA和CMS发生质子化,导致水溶性、负电性(见图1a)和c))及二者之间的静电斥力均减弱^[30];同时,大量的H⁺

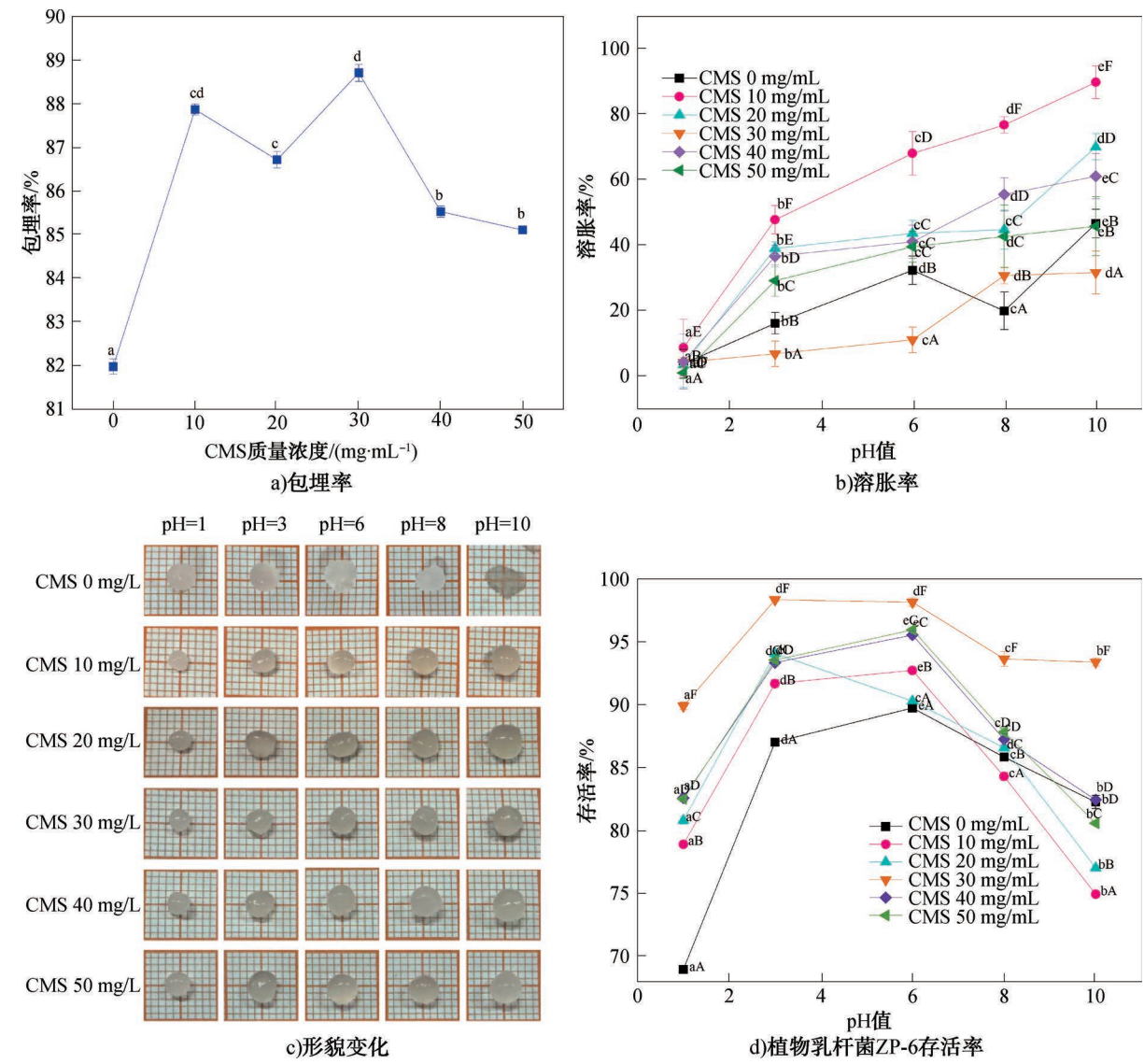


图 2 不同 CMS 质量浓度下 SA-CMS 复合凝胶珠的性能

Fig. 2 Properties of SA-CMS composite gel beads under different CMS mass concentrations

会促使 SA 与 CMS 之间形成较强的氢键相互作用^[31]。因此,SA-CMS 复合凝胶珠在低 pH 值条件下的溶胀性较弱。随着 pH 值升高,SA 和 CMS 去质子化,负电性和水溶性均增强,此时 SA-CMS 复合凝胶珠的溶胀率增大^[32]。碱性条件下,SA 和 CMS 进一步解离,负电荷密度增大,导致二者之间的静电排斥力进一步增强,这一方面有利于 SA 和 CMS 的分子链伸展,另一方面导致二者之间的结合减弱^[33],最终促进复合凝胶珠溶胀。因此,碱性条件下,各凝胶珠的溶胀率均较高,甚至完全破裂。CMS 可填充并支撑 SA 凝胶珠的网络结构,进而降低外部溶液向复合凝胶珠内部的渗透速率,增强其抗溶胀性能。然而,SA-CMS 复合溶液的高黏度

也会延缓 Ca^{2+} 的扩散,形成不均匀的凝胶结构,减少 SA 的有效交联位点,导致凝胶网络结构变得松散^[15];同时,过量的 CMS 还会导致体系内分子间静电斥力增强,故 SA-CMS 复合凝胶珠的溶胀性会因 CMS 溶液质量浓度过高而增强。因此,当 CMS 溶液的质量浓度为 30 mg/mL 时,SA-CMS 复合凝胶珠在不同 pH 值条件下的溶胀率均较低。

由图 2d)可知,经不同 pH 值的 PBS 缓冲液浸泡 24 h 后,各凝胶珠中植物乳杆菌 ZP-6 的存活率均随 pH 值的升高先升高后降低,且均在 pH 值为 6 时出现最高存活率。相较于纯 SA 凝胶珠,相同 pH 值下 SA-CMS 复合凝胶珠中植物乳杆菌 ZP-6 的存活率明显升高,且随着 CMS 质量浓度的增加先升高

后降低,表明 CMS 的加入可有效提高该复合凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的保护作用,且该保护作用受 CMS 质量浓度的影响。研究^[34-35]表明,pH 值为 6 时正处于植物乳杆菌的最适生长 pH 值范围内,较低或较高 pH 值均会破坏植物乳杆菌的结构,导致其存活率降低。CMS 质量浓度的增加可有效改善 SA 凝胶珠的溶胀弱化现象,并增大其内部网络结构密度,降低外部 PBS 缓冲液中离子的渗透速率,有效保护植物乳杆菌 ZP-6 的活性;同时,通过减少 SA-CMS 复合凝胶珠中植物乳杆菌 ZP-6 的泄漏量,进一步提高其活菌数。但当 CMS 质量浓度大于 30 mg/mL 时,随着 CMS 质量浓度的进一步增加,由于 SA 与 CMS 之间静电斥力的增强,以及 Ca^{2+} 向

SA-CMS 复合凝胶珠内部渗透的速率减慢,导致该复合凝胶珠的网络结构变得疏松,此时 PBS 缓冲液中的离子能快速向凝胶珠内部渗透,使植物乳杆菌 ZP-6 的活性降低;同时,凝胶珠溶胀率的增大会释放更多植物乳杆菌 ZP-6,进一步导致凝胶珠内部的活菌数减少。综上,初步选择 CMS 的最佳质量浓度为 30 mg/mL。

2.2.2 SA 质量浓度对 SA-CMS 复合凝胶珠性能的影响 不同 SA 质量浓度下 SA-CMS 复合凝胶珠的性能如图 3 所示。由图 3a)可知,随着 SA 质量浓度的增加,SA-CMS 复合凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率先提高后降低;当 SA 质量浓度为 20 mg/mL 时,该复合凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率最

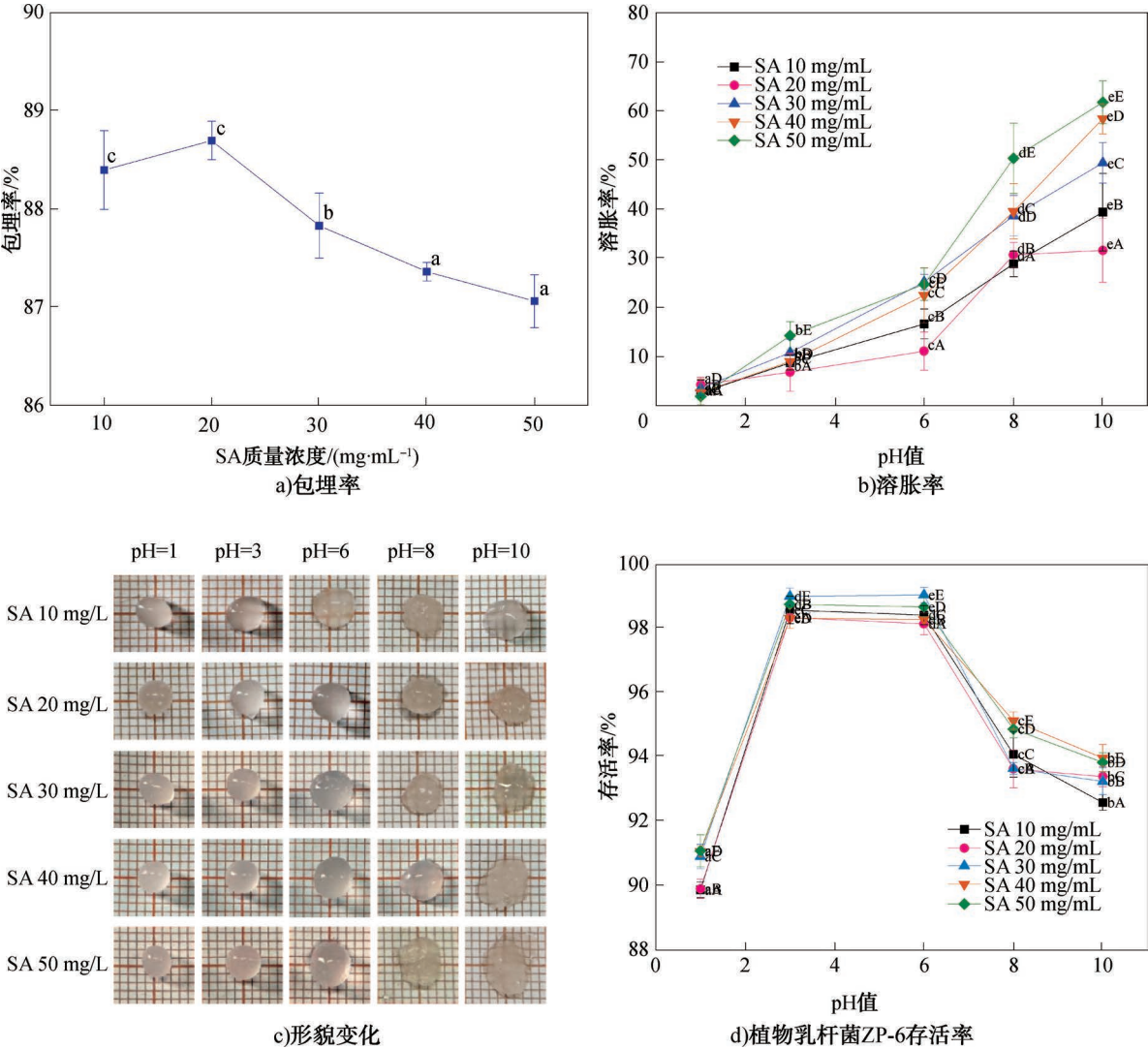


图 3 不同 SA 质量浓度下 SA-CMS 复合凝胶珠的性能

Fig. 3 Properties of SA-CMS composite gel beads under different SA mass concentrations

高,为 88.71%。SA 质量浓度增加可增大 SA-CMS 复合凝胶网络结构密度^[36],但当 SA 质量浓度过大时,由于 SA 和 CMS 均带负电,且 SA 带电荷量会随着 SA 质量浓度的增加显著增多(见图 1b)),导致 SA 与 CMS 之间的静电斥力增大、结合力减弱,最终使得该复合凝胶珠的网络结构变得松散^[37],不利于包埋植物乳杆菌 ZP-6,且外部 PBS 缓冲液可快速向该复合凝胶珠内部渗透,导致其溶胀率增大(见图 3b)和 c)),植物乳杆菌 ZP-6 存活率降低(见图 3d));同时,该复合凝胶珠内部网络结构缺乏有效的填充和支撑,使其易出现溶胀弱化现象(见图 3c)),导致植物乳杆菌 ZP-6 被快速释放。此外,当 SA 质量浓度为 20 mg/mL 时,SA-CMS 复合凝胶珠

内部的交联密度与其传质效率达到平衡,且此时 SA 与 CMS 的协同作用最强^[38],故 SA-CMS 复合凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率最高、溶胀率较小且植物乳杆菌 ZP-6 存活率较高。综上,初步选择 SA 的最佳质量浓度为 20 mg/mL。

2.2.3 CaCl_2 质量浓度对 SA-CMS 复合凝胶珠性能的影响 不同 CaCl_2 质量浓度下 SA-CMS 复合凝胶珠的性能如图 4 所示。由图 4a)可知,随着 CaCl_2 质量浓度的增加,SA-CMS 复合凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率呈先提高后降低的趋势,在 CaCl_2 质量浓度为 40 mg/mL 时达到最高值 89.02%(见图 4a))。高质量浓度的 Ca^{2+} 有助于 SA 与 CMS 形成更紧密的凝胶交联网络结构^[39],降低水分子和离子向

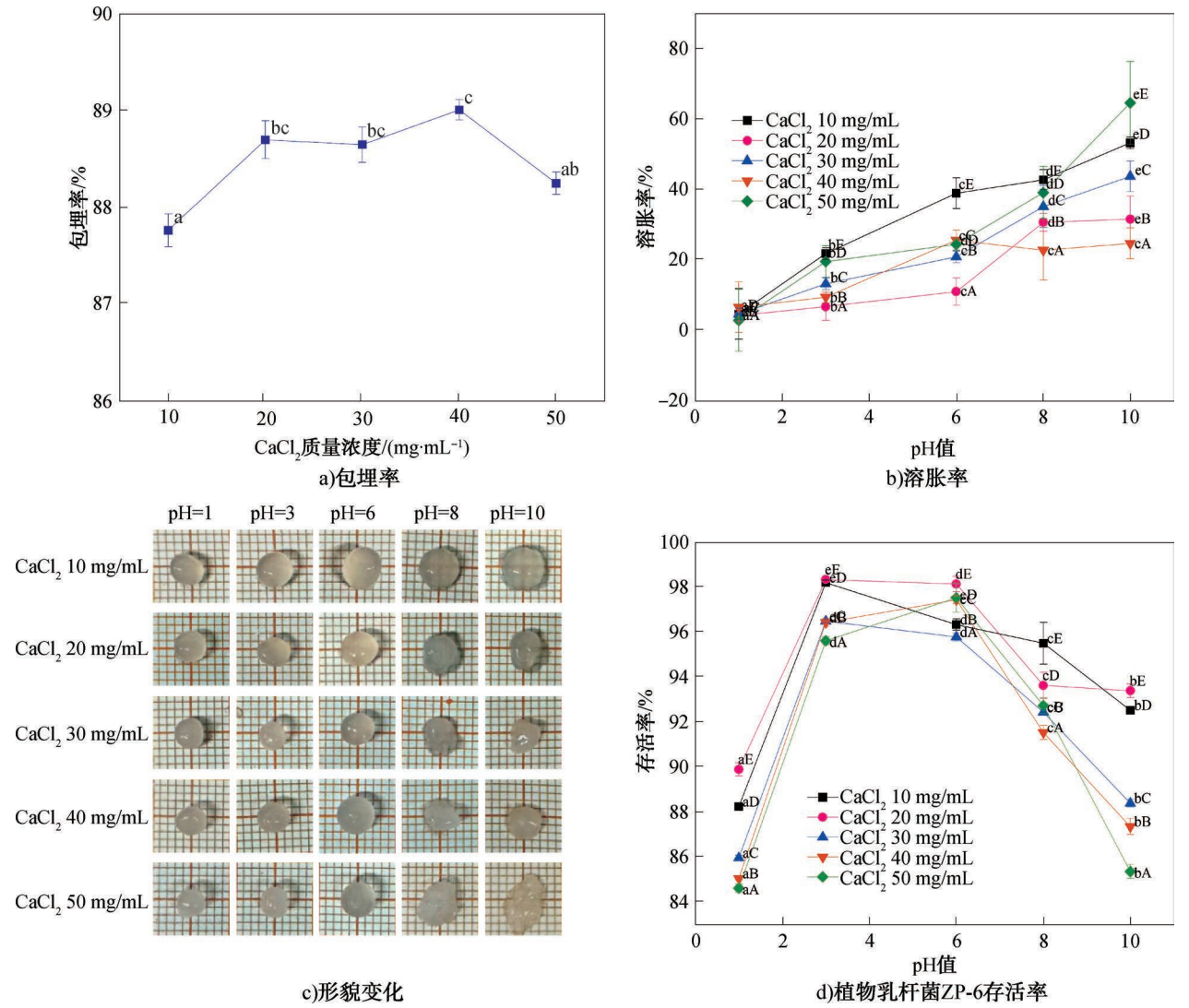


图 4 不同 CaCl_2 质量浓度下 SA-CMS 复合凝胶珠的性能

Fig. 4 Properties of SA-CMS composite gel beads under different CaCl_2 mass concentrations

SA-CMS 复合凝胶珠内部渗透的速率,抑制该复合凝胶珠的溶胀及植物乳杆菌 ZP-6 的失活;同时, CaCl_2 作为电解质,其质量浓度的增加可导致该复合凝胶珠内部离子强度增加而压缩双电层,抑制该复合凝胶珠溶胀^[40],并减少植物乳杆菌 ZP-6 释放,进一步提高其内部植物乳杆菌 ZP-6 的活菌数。但当 CaCl_2 质量浓度过高时,大量 Ca^{2+} 会竞争性争夺 SA 上的结合位点,且多余的 Ca^{2+} 会与带负电的 SA 和 CMS 结合,阻碍二者之间的相互作用^[41],导致 SA-CMS 复合凝胶珠的空间网状结构变得疏松,对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率降低。同时,外部 PBS 缓冲液向凝胶珠内部的快速渗透会导致凝胶珠迅速溶胀且内部 pH 值发生改变,一方面影响凝胶珠内部植物乳杆菌 ZP-6 的活性,另一方面使凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的释放量增加,最终导致凝胶珠内部活菌数减少。综上,初步选择 CaCl_2 的最佳质量浓度为 40 mg/mL。

2.3 正交试验结果分析

SA-CMS 复合凝胶珠制备工艺的正交试验结果见表 2。由表 2 可知,3 个因素的极差(R 值)大小顺序为 $A>B>C$,表明 CMS 质量浓度对 SA-CMS 复合凝胶珠包埋率的影响最大,其次是 SA 质量浓度和 CaCl_2 质量浓度^[42]。 k_1 、 k_2 和 k_3 中的最大值为相应水平下的最佳值^[43],因此 $A_1B_2C_3$ 为制备 SA-CMS 复合凝胶珠的最佳组合,即 CMS 质量浓度为 25 mg/mL,SA 质量浓度为 20 mg/mL, CaCl_2 质量浓度为 45 mg/mL。

对各正交试验组所制备 SA-CMS 复合凝胶珠的溶胀性及植物乳杆菌 ZP-6 存活率进行了测定,结果如图 5 所示。由图 5a)可知,相较于其他复合凝胶珠,试验号 2($A_1B_2C_3$ 组合)制备的复合凝胶珠在各 pH 值条件下的溶胀率均较小,表明其具有较好的抗溶胀性。由图 5b)可知, $A_1B_2C_3$ 组合制备的复合凝胶珠,其植物乳杆菌 ZP-6 的存活率在 pH 值为 1~10 范围内均较高,表明该复合凝胶珠能有效保护植物乳杆菌 ZP-6 的活性。

2.4 体外模拟消化液中植物乳杆菌 ZP-6 的存活率

益生菌的口服生物利用率与其在消化道中的

表 2 正交试验结果
Table 2 Orthogonal test results

试验号	A	B	C	包埋率/%
1	1	1	1	88.72
2	1	2	3	89.45
3	1	3	2	89.06
4	2	1	3	88.64
5	2	2	2	89.02
6	2	3	1	87.59
7	3	1	2	86.13
8	3	2	1	87.93
9	3	3	3	87.00
K_1	267.23	263.49	264.24	
K_2	265.25	266.40	264.21	
K_3	261.06	263.65	265.09	
k_1	89.08	87.83	88.08	
k_2	88.42	88.80	88.07	
k_3	87.02	87.88	88.36	
R	2.06	0.97	0.29	
最佳水平	A_1	B_2	C_3	

存活率密切相关^[44]。不同体外模拟消化液中植物乳杆菌 ZP-6 的存活率如图 6 所示。由图 6 可知,在 SGF、SIF 和 SCF 中分别孵育一段时间后,游离植物乳杆菌 ZP-6(游离 ZP-6)的存活率分别为 62.04%、62.64%和 60.62%,SA-CMS 复合凝胶珠中植物乳杆菌 ZP-6(SA-CMS-ZP-6)的存活率分别为和 87.88%、81.43%和 82.63%,表明该复合凝胶珠能显著提高植物乳杆菌 ZP-6 在模拟消化过程中的存活率,进而提高其口服生物利用率。游离植物乳杆菌的耐受能力较差,强酸性环境可直接破坏其细胞膜结构并抑制胞内酶活性,导致菌体失活;胰蛋白酶、胆盐等物质也会损伤游离植物乳杆菌,降低其活性^[45]。SA-CMS 复合凝胶珠具有良好的 pH 稳定性:在 SGF 强酸性环境下,SA 和 CMS 发生质子化,形成结构致密的凝胶骨架,有效延缓氢离子的向内渗透速率,减轻强酸对包埋菌体的侵蚀^[46];在 SIF 和 SCF 环境下,凝胶基质发生去质子化并出现适度溶胀,依托 SA、CMS 与盐离子的络合作用及自身耐酶解特性^[11,47],凝胶网络仍可保持相对致密的空間结构,有效阻碍盐离子和蛋白酶向内部渗透,保护包埋菌体的活性。因此,SA-CMS 复合凝胶珠能显著提高体外模拟消化过程中植物乳杆菌 ZP-6 的存活率。

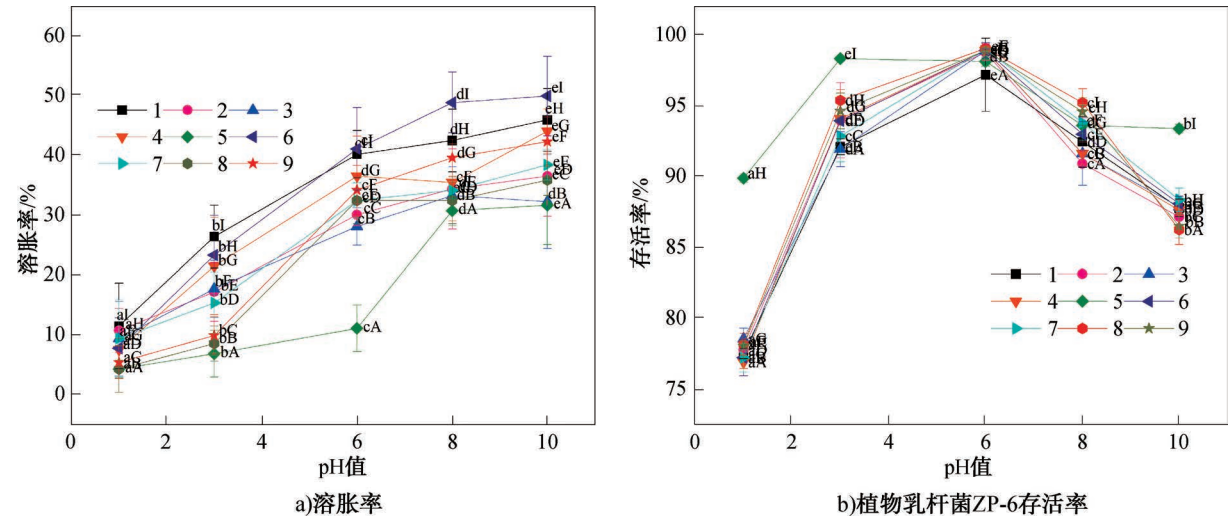


图 5 各正交试验组所制备 SA-CMS 复合凝胶珠的溶胀率及植物乳杆菌 ZP-6 存活率
Fig. 5 Swelling rates of SA-CMS composite gel beads prepared in different orthogonal test groups and survival rates of *L. plantarum* ZP-6 within them

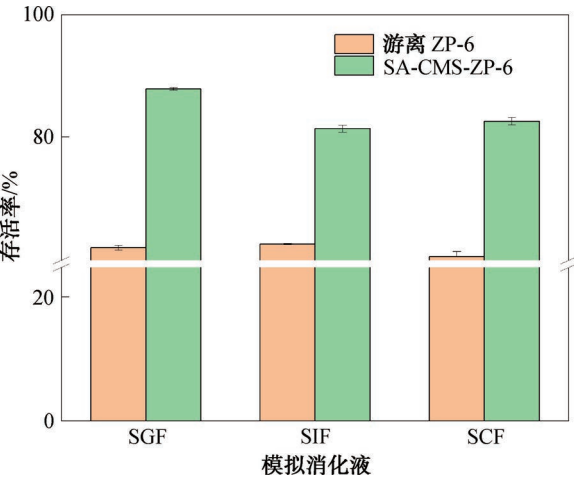


图 6 不同体外模拟消化液中植物乳杆菌 ZP-6 的存活率
Fig. 6 Survival rate of *L. plantarum* ZP-6 in different simulated digestive fluids

3 结论

本文以植物乳杆菌 ZP-6 包埋率为主要指标,并结合凝胶珠的溶胀率和植物乳杆菌 ZP-6 的存活率,采用单因素试验研究了 CMS 质量浓度、SA 质量浓度和 CaCl_2 质量浓度对 SA-CMS 复合凝胶珠性能的影响规律,在此基础上采用正交试验对该复合凝胶珠的制备工艺进行了优化,同时研究了该复合凝胶珠中植物乳杆菌 ZP-6 的 pH 稳定性及在体外模拟消化液中的存活率,得到如下结论:相较于 SA 凝胶珠,SA-CMS 复合凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋

率明显提高,抗溶胀性能更优,同时可显著提高植物乳杆菌 ZP-6 在不同 pH 值环境下的存活率。SA-CMS 复合凝胶珠的最佳制备工艺为 CMS 质量浓度 25 mg/mL、SA 质量浓度 20 mg/mL、 CaCl_2 质量浓度 45 mg/mL,在此条件下,该复合凝胶珠对植物乳杆菌 ZP-6 的包埋率达到峰值 89.45%,兼具良好抗溶胀性与菌体保护能力,且能大幅提高植物乳杆菌 ZP-6 经体外模拟消化后的存活率。本研究建立了调控 SA-CMS 复合凝胶珠性能的可行工艺方案,同时构建了一种新型递送载体,可改善益生菌的 pH 稳定性和口服生物利用率。然而,由于人体消化道的复杂性和多样性,还需进一步研究该复合凝胶珠对益生菌口服生物利用率的影响。

参考文献:

[1] Thinkohkaew K, Jonjaroen V, Niamsiri N, et al. Microencapsulation of probiotics in chitosan-coated alginate/gellan gum: optimization for viability and stability enhancement[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109788.
[2] Thinkohkaew K, Aumphaiphensiri N, Tangamornsiri T, et al. Inulin extracted from burdock root (*Arctium lappa* L.) incorporated alginate/chitosan hydrogel beads for probiotics encapsulation[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 18: 101405.
[3] Mohammad N A, Zaidel D N A, Muhamad I I, et al. Biopolymeric encapsulation of probiotics for improved release properties in the gastrointestinal digestion system

- [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 778(1): 012033.
- [4] Liu H, Gong J, Chabot D, et al. Improved survival of *Lactobacillus zeae* LB1 in a spray dried alginate-protein matrix[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 78: 100–108.
- [5] Huang Y Y, Yao Q B, Jia X Z, et al. Characterization and application in yogurt of genipin-crosslinked chitosan microcapsules encapsulating with *Lactiplantibacillus plantarum* DMDL 9010 [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 248: 125871.
- [6] Hu X X, Liu C Y, Zhang H T, et al. *In vitro* digestion of sodium alginate/pectin co-encapsulated *Lactobacillus bulgaricus* and its application in yogurt bilayer beads[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193(Pt B): 1050–1058.
- [7] Zhong D N, Zhang D X, Chen W, et al. Orally deliverable strategy based on microalgal biomass for intestinal disease treatment[J]. Science Advances, 2021, 7(48): eabi9265.
- [8] Cheng C, Sun M M, Wang L, et al. Zein and soy polysaccharide encapsulation enhances probiotic viability and modulates gut microbiota[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 210: 116827.
- [9] Zheng D W, Li R Q, An J X, et al. Prebiotics-encapsulated probiotic spores regulate gut microbiota and suppress colon cancer[J]. Advanced Materials, 2020, 32(45): 2004529.
- [10] Deng Z Y, Wang S S, Zhou B, et al. Carboxymethylpachymaran-zein coated plant microcapsules-based β -galactosidase encapsulation system for long-term effective delivery[J]. Food Research International, 2020, 128: 108867.
- [11] He X D, Zeng L Y, Cheng X P, et al. Shape memory composite hydrogel based on sodium alginate dual crosslinked network with carboxymethyl cellulose [J]. European Polymer Journal, 2021, 156: 110592.
- [12] Phansroy N, Boonyod S, Mulasake O, et al. Innovative environment-friendly liquid fertilizer bead from sodium alginate coating with IPN membrane derived from natural rubber and cassava starch [J]. Journal of Polymer Research, 2024, 31(3): 67.
- [13] 彭炎熾. 负载咖啡酸@二氧化硅纳米粒子的木薯淀粉/羧甲基纤维素钠可食用膜的制备与表征及其在肉品保鲜中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- Peng S X. Preparation and characterization of cassava starch/sodium carboxymethyl cellulose edible film loaded with caffeic acid@silica nanoparticles and the application in meat preservation [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.
- [14] 梅既强. 木薯淀粉的化学改性及其衍生物的结构、性质和体外消化率的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- Mei J Q. Studies on chemical modification of cassava starch and structure, properties and *in vitro* digestibility of its derivatives [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [15] Tavares K M, De Campos A, Mitsuyuki M C, et al. Corn and cassava starch with carboxymethyl cellulose films and its mechanical and hydrophobic properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 223: 115055.
- [16] 陈渊, 杨家添, 谢秋季, 等. 木薯羧甲基淀粉的机械活化固相化学法制备、表征及其特性[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 45–52.
- Chen Y, Yang J T, Xie Q J, et al. Preparation, structural characterization and properties of carboxymethyl cassava starch by mechanical activation-assisted solid-state reaction [J]. Food Science, 2018, 39(2): 45–52.
- [17] Zhang Y P, Liu K, Chi C D, et al. Preparation, stability and controlled release properties of starch-based micelles for oral delivery of hydrophobic bioactive molecules [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262: 130241.
- [18] Coelho-Rocha N D, De Castro C P, De Jesus L C L, et al. Microencapsulation of lactic acid bacteria improves the gastrointestinal delivery and *in situ* expression of recombinant fluorescent protein [J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 2398.
- [19] Yan D D, Pan Y F, Cai P X, et al. Redox/pH dual-responsive sodium alginate/cassava starch composite hydrogel beads for slow release of insecticides [J]. Reactive and Functional Polymers, 2025, 215: 106389.
- [20] Deng Z Y, Li J, Song R, et al. Carboxymethylpachymaran/alginate gel entrapping of natural pollen capsules for the encapsulation, protection and delivery of probiotics with enhanced viability [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106855.
- [21] Li H. Modeling of stimuli-responsive hydrogels: a transient analysis [M]. // Li H, Silberschmidt V. The mechanics of hydrogels. Cambridge: Woodhead Publishing, 2022: 223–268.
- [22] 焦文娟. 脂肪晶体结构对脂肪结晶乳液消化性能的影响及机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Jiao W J. The effect of fat crystal structure on the digestibility of fat crystalline emulsion and its mechanism [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [23] Yu H, Kong Q, Wang M R, et al. Improved viability of probiotics by encapsulation in chickpea protein matrix during simulated gastrointestinal digestion by succinylated modification [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260: 129614.
- [24] Teobaldi A G, Parra E J C, Barrera G N, et al. Effect of food proteins on wheat starch pasting and thermal properties [J]. Foods, 2025, 14(22): 3865.

- [25] 袁怀波,刘文宏,樊良. 交联羧甲基木薯淀粉吸附 Ca^{2+} 的研究[J]. 食品科学, 2009, 30(5): 96-99.
Yuan H B, Liu W H, Fan L. Study on adsorption of cross-linked carboxymethyl cassava starch to Ca^{2+} from aqueous solution[J]. Food Science, 2009, 30(5): 96-99.
- [26] Tiamwong S, Yukhajon P, Noisong P, et al. Eco-friendly starch composite supramolecular alginate- Ca^{2+} hydrogel as controlled-release P fertilizer with low responsiveness to multiple environmental stimuli [J]. Gels, 2023, 9(3): 204.
- [27] Zheng B D, Yu Y Z, Yuan X L, et al. Sodium alginate/carboxymethyl starch/ κ -carrageenan enteric soft capsule: processing, characterization, and rupture time evaluation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 244: 125427.
- [28] Fang K, Li P, Huang X R, et al. pH/NIR light-responsive carboxymethyl starch/sodium alginate/MXene hydrogel beads for doxorubicin delivery[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 321(Pt 2): 146306.
- [29] Zhang Y L, Xie S M, Huang W J, et al. Fabrication and characterization of complex coacervates utilizing gelatin and carboxymethyl starch[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(6): 3585-3593.
- [30] Blemur L, Le T C, Marcocci L, et al. Carboxymethyl starch/alginate microspheres containing diamine oxidase for intestinal targeting [J]. Biotechnology and Applied Biochemistry, 2016, 63(3): 344-353.
- [31] Poeresmael M, Namazi H. Development of the new pH-driven carrier from alginate/carboxymethyl starch bio-coated co-drugs@ COF-OH for controlled and concomitant colon cancer treatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 239: 124322.
- [32] Li K N, Wang S J, Liu W J, et al. Comparative genomic analysis of 455 *Lactiplantibacillus plantarum* isolates: Habitat-specific genomes shaped by frequent recombination [J]. Food Microbiology, 2022, 104: 103989.
- [33] Hua S B, Ma H Z, Li X, et al. pH-sensitive sodium alginate/poly(vinyl alcohol) hydrogel beads prepared by combined Ca^{2+} crosslinking and freeze-thawing cycles for controlled release of diclofenac sodium[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2010, 46(5): 517-523.
- [34] Liu L H, Gu P, Li C J, et al. Improve the quality of bog bilberry juice by controlling the inoculation pH and timing of *Lactobacillus plantarum*[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9): e15541.
- [35] Xin W G, Jiang Y H, Zhao Y T, et al. Encapsulation of *Lactiplantibacillus plantarum* in a sodium alginate/pectin/tea polyphenol complex: enhancing stability and bioactivity for fermented milk products [J]. Food Chemistry, 2025, 488: 144851.
- [36] Lin Y H, Xu J C, Gao X. Development of antioxidant sodium alginate gel beads encapsulating curcumin/gum Arabic/gelatin microcapsules [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109901.
- [37] Wang M M, Zang Y P, Hong K J, et al. Preparation of pH-sensitive carboxymethyl cellulose/chitosan/alginate hydrogel beads with reticulated shell structure to deliver *Bacillus subtilis* natto[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 192: 684-691.
- [38] Wang W, Liu W, Wu J S, et al. Preparation and characterization of particle-filled microgels by chemical cross-linking based on zein and carboxymethyl starch for delivering the quercetin [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 323: 121375.
- [39] Muthumari B, Kumar B V, Kavitha M, et al. Optimization of sodium alginate-galactoxyloglucan blended hydrogel beads through ionotropic gelation method [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242(Pt 1): 124630.
- [40] Li W, Liu L M, Tian H F, et al. Encapsulation of *Lactobacillus plantarum* in cellulose based microgel with controlled release behavior and increased long-term storage stability [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 223: 115065.
- [41] Jin H N, Wang L, Yang S Y, et al. Producing mixed-soy protein adsorption layers on alginate microgels to controlled-release β -carotene [J]. Food Research International, 2023, 164: 112319.
- [42] Chai W H, An Y L, Wang X L, et al. Optimization of SA-gel hydrogel printing parameters for extrusion-based 3D bioprinting[J]. Gels, 2025, 11(7): 552.
- [43] Ping M K X, Zhi H W, Aziz N S, et al. Optimization of agarose-alginate hydrogel bead components for encapsulation and transportation of stem cells[J]. Journal of Taibah University Medical Sciences, 2023, 18(1): 104-116.
- [44] Li Y H, Liu G W, Liao N, et al. Construction of walnut protein/tea polyphenol/alginate complex for enhancing heat and gastrointestinal tolerance of lactic acid bacteria [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109523.
- [45] Conway P L, Gorbach S L, Goldin B R. Survival of lactic acid bacteria in the human stomach and adhesion to intestinal cells [J]. Journal of Dairy Science, 1987, 70(1): 1-12.
- [46] Rao Y, Deng J, Zhang C Y, et al. Probiotics encapsulated by calcium pectin/chitosan-calcium pectin/sodium alginate-pectin-whey through biofilm-based microencapsulation strategy and their preventive effects on ulcerative colitis [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 158: 110501.
- [47] Fu Y X, Liu L, Zhang J H, et al. Reinforcing alginate matrixes by tea polysaccharide conjugates or their stabilized nanoemulsion for probiotics encapsulation: characterization,

survival after gastrointestinal digestion and ambient storage

2023,253(Pt 3):126828.

[J]. International Journal of Biological Macromolecules,

Preparation and performance evaluation of sodium alginate-carboxymethyl cassava starch composite gel beads

Zhang Yiping^{1,2},Zhao Zimeng^{1,2},Qian Yarui^{1,2},Zeng Yuqi^{1,2},Zhao Lili^{1,2},
Chen Hong^{1,2},Jiang Xiaobing^{1,2}

1. College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China;
2. Henan Engineering Laboratory for Green Transformation Technology of Functional
Microorganisms, Xinxiang 453007, China

Abstract:【Objective】This study aimed to improve the pH stability and oral bioavailability of probiotics. 【Methods】In this study, *Lactobacillus plantarum* ZP-6 (LP ZP-6) was used as a representative probiotic, and sodium alginate (SA) and carboxymethyl cassava starch (CMS) were used as carrier materials to prepare SA-CMS composite gel beads efficiently embedding LP ZP-6 by the complex coacervation method. Single-factor and orthogonal experiments were conducted to optimize the embedding conditions of the SA-CMS composite gel beads, and the effects of the gel bead structure on the pH stability and in vitro survival rate of LP ZP-6 in simulated digestive fluids were investigated. 【Results】Compared with SA gel beads, SA-CMS composite gel beads significantly improved the embedding rate of LP ZP-6, the survival rate of LP ZP-6 under different pH conditions, and the anti-swelling property of the gel beads. The highest embedding rate of LP ZP-6 by the SA-CMS composite gel beads (89.45%) was obtained when the concentrations of CMS, SA, and calcium chloride were 25 mg/mL, 20 mg/mL, and 45 mg/mL, respectively. These gel beads significantly enhanced the pH stability and oral bioavailability of LP ZP-6, with the survival rate of LP ZP-6 remaining above 80% after simulated digestion in vitro. 【Conclusion】The SA-CMS composite gel beads can serve as an effective carrier for probiotics to enhance their pH stability and oral bioavailability.

Key words: *Lactobacillus plantarum*; carboxymethyl cassava starch; sodium alginate; gel bead; pH stability; oral bioavailability

[责任编辑:杨晓娟]