DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251119003
引用格式: 殷邦枫, 陈晓乐, 梁淑蕾, 等. 海藻酸钠基姜黄多糖-姜黄素纳米颗粒凝胶珠的制备与结构表征[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 143–151.
YIN BF, CHEN XL, LIANG SL, *et al*. Preparation and structural characterization of sodium alginate-based turmeric polysaccharide-curcumin nanoparticle gel beads [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 143–151. (in Chinese with English abstract).

海藻酸钠基姜黄多糖-姜黄素纳米颗粒凝胶珠的制备与结构表征

殷邦枫[1], 陈晓乐[2], 梁淑蕾[1], 袁玉芹[1], 张 斌[1], 宫建泉[3], 郑振佳[1*]

(1. 山东农业大学食品科学与工程学院, 山东省高等学校食品营养与健康重点实验室, 泰安 271018;
2. 德州市农业科学研究院, 德州 253000; 3. 烟台百脉山生物科技有限公司, 烟台 265200)

摘 要: 目的 构建基于海藻酸钠的凝胶珠包埋体系并进行结构表征。**方法** 采用钙离子交联法制备了海藻酸钠凝胶珠、姜黄多糖-海藻酸钠凝胶珠及纳米颗粒-海藻酸钠凝胶珠, 并对其结构、机械性能、流变特性及体外消化释放行为进行系统表征。**结果** 海藻酸钠、姜黄多糖-海藻酸钠及纳米颗粒-海藻酸钠凝胶珠尺寸分别为 1.19、1.24 和 1.28 mm。扫描电子显微镜仪、红外光谱仪、热重仪及 X-射线衍射仪分析表明, 纳米颗粒凝胶珠内部相互作用更强, 稳定性更高。纳米颗粒凝胶珠硬度、弹性和咀嚼性显著高于海藻酸钠凝胶珠(P<0.05); 其胶着性、内聚性和回复性较海藻酸钠凝胶珠提升 6.23%、6.28%和 4.22%。纳米颗粒凝胶珠在角频率 0.1~100.0 rad/s 范围的储能模量(G': 14521→43390 Pa)与损耗模量(G'': 6528.6→8264.1 Pa)均低于海藻酸钠凝胶珠。3 种凝胶珠的 G'始终大于 G'' (tanδ<1), 3 种凝胶珠以弹性性能为主, 其中, 纳米颗粒凝胶珠 tanδ 最低, 表现出最优的黏弹结构稳定性。体外模拟释放实验表明, 纳米颗粒凝胶珠中姜黄素的释放量由胃阶段的 0.32 μg 增加至肠阶段的 5.37 μg。**结论** 本研究成功构建了结构稳定、性能优异的纳米颗粒-海藻酸钠凝胶珠, 有效实现姜黄素的肠道靶向递送, 为开发基于姜黄多糖和姜黄素的功能性食品凝胶珠提供了理论依据与技术支持。

关键词: 姜黄多糖; 姜黄素; 海藻酸钠; 凝胶珠; 结构表征; 体外消化特性

Preparation and structural characterization of sodium alginate-based turmeric polysaccharide-curcumin nanoparticle gel beads

YIN Bang-Feng[1], CHEN Xiao-Le[2], LIANG Shu-Lei[1], YUAN Yu-Qin[1], ZHANG Bin[1], GONG Jian-Quan[3], ZHENG Zhen-Jia[1*]

(1. *College of Food Science and Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Key Laboratory of Food Nutrition and Healthy in Universities of Shandong*, *Tai'an* 271018, *China*; 2. *Dezhou Academy of Agricultural Sciences*, *Dezhou* 253000, *China*; 3. *Yantai Baimaishan Biotechnology Co.*, *Ltd.*, *Yantai* 265200, *China*)

收稿日期: 2025-11-19
基金项目: 山东省重点研发计划乡村振兴科技创新提振行动计划项目(2024TZXD007); 山东省重点研发计划科技型中小企业创新能力提升工程项目(2025TSGCCZZB0452)

第一作者: 殷邦枫(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为果蔬加工。E-mail: 15063919364@163.com
***通信作者:** 郑振佳(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为果蔬加工。E-mail: zhengzhenjia@sdau.edu.cn

ABSTRACT: Objective To construct a sodium alginate-based gel bead encapsulation system and to conduct its structural characterization. **Methods** Calcium ion cross-linking was used to prepare sodium alginate gel beads, turmeric polysaccharide-sodium alginate gel beads, and nanoparticle-sodium alginate gel beads. Their structure, mechanical properties, rheological characteristics and *in vitro* digestion release behavior were systematically characterized. **Results** The sizes of the sodium alginate, turmeric polysaccharide-sodium alginate and nanoparticle-sodium alginate gel beads were 1.19, 1.24 and 1.28 mm, respectively. Scanning electron microscopy, Fourier transform infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis and X-ray diffraction indicated stronger internal interactions and higher stability in the nanoparticle gel beads. The hardness, elasticity and chewiness of the nanoparticle gel beads were significantly higher than those of the sodium alginate gel beads (P<0.05). Compared to the sodium alginate gel beads, the gumminess, cohesiveness and resilience of the nanoparticle gel beads increased by 6.23%, 6.28% and 4.22%, respectively. Within an angular frequency range of 0.1–100.0 rad/s, the storage modulus (G': 14521→43390 Pa) and loss modulus (G'': 6528.6→8264.1 Pa) of the nanoparticle gel beads were both lower than those of the sodium alginate gel beads. For 3 kinds of gel beads, G' consistently exceeded G'' (tanδ<1), indicating predominantly elastic properties. The nanoparticle gel beads exhibited the lowest tanδ, demonstrating optimal viscoelastic structural stability. *In vitro* simulated digestion experiments showed that the release amount of curcumin from the nanoparticle gel beads increased from 0.32 μg in the gastric phase to 5.37 μg in the intestinal phase. **Conclusion** This study successfully constructs a structurally stable and high performance the nanoparticle-sodium alginate gel beads that effectively enable the targeted intestinal delivery of curcumin, thus providing a theoretical basis and technical support for developing functional food gel beads based on turmeric polysaccharide and curcumin.

KEY WORDS: turmeric polysaccharide; curcumin; sodium alginate; gel beads; structural characterization; *in vitro* digestive properties

0 引 言

姜黄素是从姜黄(*Curcuma longa* L.)根茎中提取出来的一种脂溶性多酚类化合物, 呈橙黄色结晶粉末状, 味稍苦[1], 研究表明姜黄素类化合物具有抗氧化[2]、抗炎[3]、抗菌[4]、抗病毒和免疫调节[5–6]等多种生理功能。虽然姜黄素具有多种生物活性, 但易被氧化, 稳定性低, 且姜黄素因其脂溶性特性具有很弱的水溶性, 在水中的溶解度仅有0.6 μg/mL[7]。姜黄素的水溶性和稳定性差等缺点限制了姜黄素的应用, 进而导致其生物利用率低, 限制了其在食品加工中的应用。姜黄多糖是从姜黄中提取的一类结构复杂的杂多糖, 其主链由多种糖单元构成, 具有抗氧化、抗溃疡、抗肿瘤、肠道菌群调节及免疫激活等多种生物活性[8–11]。同时, 作为一种天然高分子多糖, 具有良好的生物相容性、可降解性、稳定性及其结构上丰富的活性基团, 使其成为生物活性物质递送系统的理性载体, 也可通过多种分子相互作用有效包封和保护活性成分, 实现靶向递送[12]。前期提取纯化的姜黄多糖主要由葡萄糖构成, 并含有鼠李糖、阿拉伯糖等多种单糖, 糖链结构以(1→4)-连接的 *α*-*D*-吡喃葡萄糖残基为主链的高度分支化多糖, MRC-5 细胞实验证实其具有抗衰老活性[13], 并成功构建了一种基于姜黄多糖的纳米递送系统, 该系统能有效包载姜黄素, 增强其抗氧化能力, 并实现肠道靶向缓释[14]。

水凝胶是由物理或化学结合的线性或支链聚合物链组成的三维胶体系统, 因其安全可靠、性质可调节和生物利用度高被广泛应用于食品工业[15–16]。凝胶珠相较于其他凝胶形式具有多方面的优势, 其呈球状且尺寸可控, 便于操作; 内部多孔结构提供较大比表面积, 利于物质交换与扩散, 一定程度可保护内部物质; 柔软坚韧, 机械强度可调, 不易破碎; 制备简单, 成本较低; 生物相容性良好, 无毒且可生物降解; 可定向投放, 如口腔、胃、肠或结肠[17]。制备凝胶珠的常见生物聚合物来源广泛, 其中主要包括多糖基材料(海藻酸盐、淀粉、琼脂、壳聚糖、纤维素和其他多糖等)和蛋白基材料(乳清蛋白、明胶和胶原蛋白)。BU等[18]制备的淀粉基乳液凝胶珠可作为 pH/酶双响应载体, 实现亲水性原花青素与疏水性姜黄素的双重包载, 胃消化阶段凭借致密凝胶网络有效保护活性成分, 肠消化阶段通过淀粉酶水解释放大量活性成分, 具有良好的胃保护与肠靶向释放能力。

海藻酸盐是应用广泛的食品胶体, 已被用于制备凝胶珠。它是一种主要从褐藻中提取的阴离子聚合物。海藻酸盐具有独特的特性, 它可以在阳离子存在的情况下产生

机械稳定和热不可逆的凝胶[19]。海藻酸盐基水凝胶珠可以设计成不同的形式, 如纳米颗粒、微颗粒、固体水凝胶、填充乳液的珠、核壳颗粒、脂质体和气凝胶等[20–21], 其中多种物质, 包括活性化合物、酚类物质、药物、颜色、风味、乳剂和益生菌等可包封在凝胶基质中[22–25]。尹立媛等[26]以海藻酸钠为壁材, 将糊化马铃薯淀粉及其与绿原酸的复合物分别制成凝胶珠, 添加绿原酸后, 增强了凝胶珠机械强度, 改善马铃薯淀粉的消化特性。姜黄素/阿拉伯树胶/明胶的海藻酸钠水凝胶珠, 增加了姜黄素的抗氧化能力, 提高了姜黄素在胃肠道的生物可及性[27]。因此, 基于海藻酸钠作为凝胶载体的优势, 本研究提出同源植物多成分协同整合策略, 利用源自姜黄的姜黄多糖作为结构增强及稳定剂, 将其与非共价结合姜黄素制备的纳米颗粒共同引入海藻酸钠凝胶网络, 旨在构建一种兼具活性多糖与生物活性成分的复合凝胶珠体系。通过多成分间的相互作用提升凝胶网络的致密性与稳定性, 增强海藻酸钠凝胶珠的机械性能, 实现姜黄素的肠道缓释特性, 提高其在食品载体中的功能性应用。

本研究以海藻酸钠为基础, 添加姜黄多糖和姜黄多糖-姜黄素纳米颗粒, 采用钙离子交联法制备复合凝胶珠, 通过傅里叶变换红外光谱仪、X-射线衍射仪、热重仪、扫描电子显微镜对其进行结构表征, 测定其凝胶珠的机械性能、流变性能和体外消化特性, 旨在为改善海藻酸钠凝胶珠的性能, 实现姜黄素的肠道靶向释放提供理论参考, 为在食品凝胶珠的应用方面提供理论参考及技术支持。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

姜黄多糖、姜黄多糖-姜黄素纳米颗粒(由本实验室前期研究制备并提供[13–14]); 海藻酸钠(分析纯, 北京酷来搏科技有限公司); 无水氯化钙(分析纯, 天津金汇太亚化学试剂有限公司); 氢氧化钠、盐酸、无水乙醇(分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司); 姜黄素(纯度≥98%)、人工胃液(中国药典, 无菌, pH 3.0, 胃蛋白酶质量浓度为 10 g/L)、人工小肠液(无菌, pH 6.8, 胰蛋白酶质量浓度为 0.464 g/L)(上海源叶生物科技有限公司)。

1.2　仪器与设备

SECURA224-ICN 电子天平(精度 0.1 mg, 北京赛多利斯仪器有限公司); SHJ-A6 磁力搅拌水浴锅(常州市亿能实验仪器厂); SHA-B 数显恒温振荡器(常州天瑞仪器有限公司); FD-304 冷冻干燥机(济南骏德仪器有限公司); Nicolet iS 10 傅里叶红外光谱分析仪(美国赛默飞世尔科技公司); SU8010 扫描电子显微镜(日本日立公司); TGA/DSC1 热重及同步热分析仪[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; TA.XTC-20 质构仪(上海保圣实业发展有限公司); EMPYREAN 锐影 X 射线衍射仪(荷兰帕纳科公司); SPECTRO star Nano 全波长酶标仪(广州伯齐生物科技有限公司); MCR 102 流变仪(广州华侨仪器有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　海藻酸钠基姜黄多糖-姜黄素纳米颗粒凝胶珠的制备

取 10 mL 1% (*m*/*V*)海藻酸钠溶液, 逐渐加入 50 mg 的姜黄多糖及姜黄多糖-姜黄素纳米颗粒, 并在 30 ℃下持续搅拌 30 min (500 r/min)。用注射器(针口内径: 5.2 mm)吸取 3 mL 上清液滴到 5% (*m*/*V*)氯化钙中, 持续搅拌固化 30 min (500 r/min), 成球[28]。

1.3.2　傅里叶变换红外光谱测定

将冻干的凝胶珠样品与干燥的溴化钾(KBr)按 1:100 的质量比混合, 研磨均匀后压制成透明薄片, 使用 Nicolet iS10 光谱仪进行光谱分析, 扫描范围为 4000~500 cm^{-1}, 扫描次数 32 次, 分辨率为 4 cm^{-1}, 重复 3 次。使用 OMNIC 8.2 软件分析结果[26]。

1.3.3　扫描电子显微镜测定

冻干的凝胶珠喷金处理, 使用扫描电子显微镜观察凝胶珠表面及内部的微观结构, 具体参数为加速电压 5.0 kV。

1.3.4　热重测定

通过热重分析仪分析冻干凝胶珠热特性, 保护气为氮气, 在 30~700 ℃范围内测定, 观察升温速率在 20 ℃/min 条件下的质量变化[14]。

1.3.5　X-射线衍射图谱测定

利用 X-射线衍射分析仪扫描冻干凝胶珠, 加速电压 40 kV, 电流 20 mA, 在 2θ=5~80°范围内, 扫描速度 2°/min 测定样品的 X-射线衍射强度[14]。

1.3.6　机械性能测定

在室温(25 ℃±2 ℃)条件下, 使用质构仪测定冻干前凝胶珠的机械性能。将凝胶珠放置在底板上, 除去表面水分, 本研究采用 P 0.5/R 探头, 设置条件: 测试类型: 下压; 目标模式: 形变; 测前速度 1 mm/s, 测试速度 1 mm/s, 测后速度 1 mm/s, 压缩程度为 30%, 触发力 4 gf, 时间 5 s 得到硬度、弹性、咀嚼性和胶着性等[29]。

1.3.7　流变性能测定

对冻干前凝胶珠进行流变学特性测试。控制温度在 25 ℃±2 ℃, 平行板直径 40 mm, 间隙高度 0.8 mm, 在 0.1%的固定应力下, 频率扫描角频率为 0.1~100.0 rad/s, 记录储能模量(G')和损耗模量(G'')随角频率的变化情况[30]。

1.3.8　体外消化特性测定

参考 BU 等[18]的方法测定冻干纳米颗粒凝胶珠中姜黄素的释放特性。称量 0.07 g 纳米颗粒凝胶珠, 溶解于 10 mL 模拟胃液(pH=2), 将混合物置于 37 ℃ SHA-B 数显恒温振荡器中, 以振荡方式孵育 2 h, 在 30、60、90 和 120 min 时分

别取样 0.5 mL 消化液。胃液消化结束后，将胃糜的 pH 调整至 6.8，加入 20 mL 模拟肠液(pH=6.8)，充分混匀，将混合物置于 37 ℃ SHA-B 数显恒温振荡器中，以振荡方式孵育 4 h，在 30、60、90、120、150、180、210 和 240 min 时分别取样 0.5 mL 消化液。每次取样后，加入 0.5 mL 新鲜胃液或肠液以补偿体积损失。使用无水乙醇提取消化液中的姜黄素，高速离心(5000 r/min, 10 min)后取上清液。在 425 nm 波长下测定吸光度，计算姜黄素的释放量，并观察不同消化时间段凝胶珠的溶胀现象。

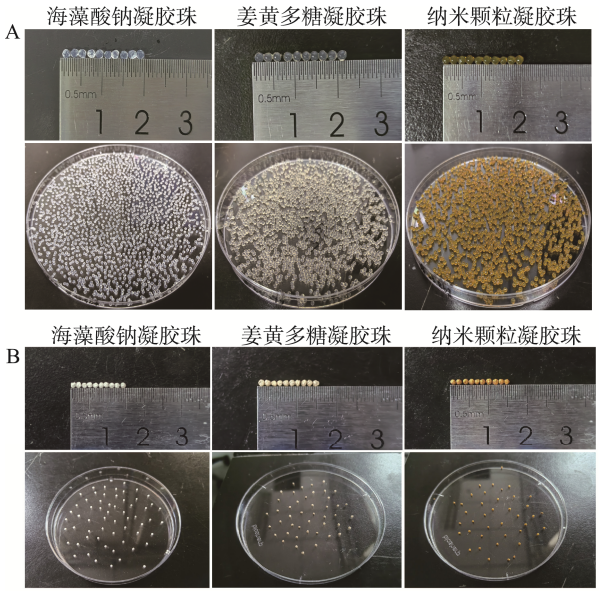
1.4 数据处理

每组实验重复 3 次，采用 Origin 2021、GraphPad Prism 9 软件绘图，数据以平均值±标准偏差的形式表示，通过 SPSS 22.0 软件进行单因素方差数据分析(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 凝胶珠的形态

如图 1A 所示是制备的海藻酸钠凝胶珠、姜黄多糖凝胶珠和纳米颗粒凝胶珠的鲜样，从颜色上可看出有明显差异，姜黄多糖凝胶珠呈现姜黄多糖本身的淡黄色，纳米颗粒凝胶珠呈现姜黄素的深黄色。海藻酸钠凝胶珠尺寸 1.19 mm，姜黄多糖凝胶珠 1.24 mm，纳米颗粒凝胶珠 1.28 mm，在尺寸上并没有明显差异，姜黄多糖和纳米颗粒凝胶珠较海藻酸钠凝胶珠尺寸上有微小增加，推测原因可能是姜黄多糖和纳米颗粒的添加增加了海藻酸钠凝胶珠的尺寸，抑制了海藻酸钠凝胶珠的收缩[31]。图 1B 表现的是凝胶珠的干样，冻干后的凝胶珠外观呈现褶皱现象，可能是冻干导致的水分散失，引起表面形态的改变。



注：A. 冻干前；B. 冻干后。

图 1 凝胶珠冻干前后的形态

Fig.1 Morphology of gel beads before and after freeze-drying

2.2 傅里叶变换红外光谱分析

如图 2 所示，通过红外光谱对凝胶珠的结构进行分析，从图 2 中可以看出，海藻酸钠凝胶珠曲线在 3330 cm^{-1} 处的吸收峰对应 O-H 官能团的伸缩振动。位于 1008 cm^{-1} 处的吸收峰对应 C-O-C 官能团的伸缩振动。1596 cm^{-1} 和 1424 cm^{-1} 处的峰则分别代表-COOH 官能团的不对称和对称伸缩振动[32]。与海藻酸钠凝胶珠相比，姜黄多糖凝胶珠和纳米颗粒凝胶珠在 3330 cm^{-1} 处的吸收峰偏移至 3325 cm^{-1} 和 3310 cm^{-1}，表明姜黄多糖和纳米颗粒与海藻酸钠之间形成了氢键，姜黄多糖和纳米颗粒成功与海藻酸钠结合，形成凝胶珠[33]。

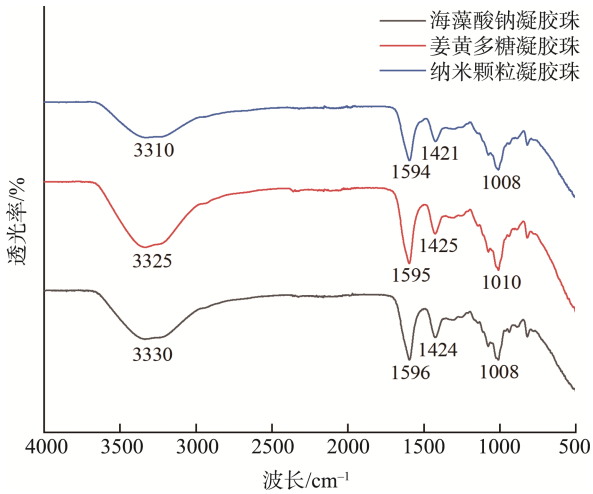


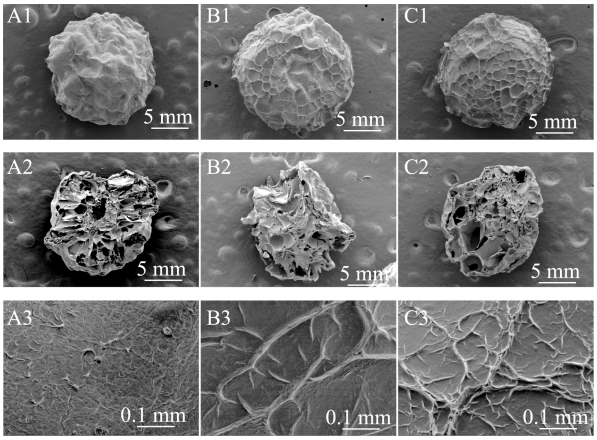
图 2 凝胶珠的傅里叶变换红外吸收图

Fig.2 Fourier transform infrared spectroscopy of gel beads

2.3 微观形貌

图 3 展示了 3 种凝胶珠的表面及切面扫描电镜图。由图 3A1、3B1 和 3C1 可以清晰看到 3 种珠子均为非规则的球形结构。其中，姜黄多糖凝胶珠和纳米颗粒凝胶珠表面呈现出独特的网状结构，推测可能是与姜黄多糖和纳米颗粒本身的网状结构有关。图 3A2、3B2 和 3C2 展示了凝胶珠的切面。其中，海藻酸钠凝胶珠(图 3A2)内部呈现出清晰多孔结构，这源于海藻酸钠与钙离子交联形成的空腔结构，其固有的空腔为载荷活性物质提供了空间，同时也贡献了良好的吸水与保水能力[34]。从切面图 3B2 和 3C2 可以看出，当姜黄多糖及纳米颗粒与海藻酸钠复合后，其内部结构发生变化。与图 3A2 相比，复合凝胶珠的孔隙结构减少，内部更致密，这表明姜黄多糖与海藻酸钠发生了分子间的相互交联，形成了更致密、更稳定的三维网络结构，从而证明了复合凝胶珠的成功制备。此外，图 3A3、3B3 和 3C3 是凝胶珠表面放大 2000 倍的图像，可以更清晰地看到姜黄多糖及其纳米颗粒与海藻酸钠相互作用所导致的网状结构，对比姜黄多糖凝胶珠(图 3B3)，纳米颗粒凝胶珠

(图 3C3)的网状条纹结构更为丰富，这反映了纳米颗粒的掺入进一步改变了凝胶基体的微观形貌，可能归因于纳米颗粒与海藻酸钠网络之间产生了更强的相互作用。综上所述，这些结果表明姜黄多糖和纳米颗粒已被紧密地包封在凝胶珠中[28]。



注: A1. 海藻酸钠凝胶珠(50×); B1. 姜黄多糖凝胶珠(50×); C1. 纳米颗粒凝胶珠(50×); A2. 海藻酸钠凝胶珠切面(50×); B2. 姜黄多糖凝胶珠切面(50×); C2. 纳米颗粒凝胶珠切面(50×); A3. 海藻酸钠凝胶珠(2000×); B3. 姜黄多糖凝胶珠(2000×); C3. 纳米颗粒凝胶珠(2000×)。

图 3　凝胶珠的扫描电子显微镜图

Fig.3　Scanning electron microscopy of gel beads

2.4　热重分析

由图 4 热重曲线可知, 3 种凝胶珠的失重过程共分为 3 个阶段，海藻酸钠凝胶珠、姜黄多糖凝胶珠和纳米颗粒凝胶珠第一阶段分别为 30.00~216.67、30.00~203.33 和 30.00~216.67 ℃，重量损失分别为 13.64%、11.31%和 11.44%，第一阶段重量损失考虑可能是游离水和结合水的损失所致。第二阶段分别为 216.67~503.33、203.22~503.33 和 216.67~503.33 ℃，重量损失分别为 63.02%、48.69%和 48.69%，此阶段质量损失可能归因于多糖主链的热裂解与脱羧反应，进而导致凝胶珠网络骨架的分解[14]。海藻酸钠凝胶珠在此阶段的失重率(63.02%)高于姜黄多糖凝胶珠与纳米颗粒凝胶珠(均为 48.69%)。这一结果直接表明，姜黄多糖和纳米颗粒与海藻酸钠复合后，有效提升了凝胶体系的热稳定性。从整个热重曲线来看，与海藻酸钠凝胶珠相比，姜黄多糖凝胶珠和纳米颗粒凝胶珠热损失分别降低了 19.01%和 27.50%，这表明姜黄多糖和纳米颗粒的加入提高了海藻酸钠凝胶珠的整体热稳定性，这种增强的稳定性归因于姜黄多糖和纳米颗粒与海藻酸钠之间的非共价相互作用。此外，纳米颗粒凝胶珠较姜黄多糖凝胶珠，重量损失减少 7.13%，纳米颗粒凝胶珠表现出更优的热稳定性，这可能是因为姜黄素的掺入进一步巩固了凝胶的三维网络结构[35]。食品加工和储存过程中，热稳定性是确保凝胶珠功能性和活性成分保护的关键因素，这种增强的稳定性对于凝胶珠在食品中的应用尤为重要。

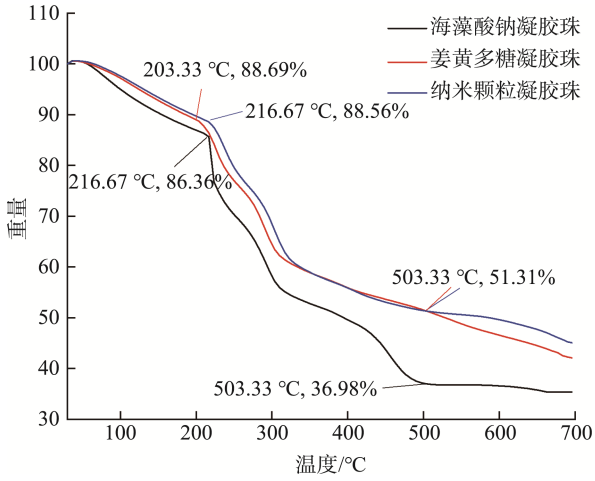


图 4　凝胶珠的热重曲线

Fig.4　Thermogravimetric curves of gel beads

2.5　X-射线衍射图谱分析

如图 5 所示，对 3 种凝胶珠的 X-射线衍射图谱进行了分析，海藻酸钠凝胶珠在 5°~12°有一个强度较高的尖峰，在 15°~30°之间有一个较宽的峰，表明海藻酸钠凝胶珠具有结晶结构和无定形结构[36]。加入姜黄多糖和纳米颗粒之后，在 15°~30°之间的宽峰强度变大，表明加入姜黄多糖和纳米颗粒形成的凝胶珠无定形结构变多，这一发现与步允可[28]研究结果一致。纳米颗粒凝胶珠的结晶强度高于姜黄多糖凝胶珠，推测可能是纳米颗粒中含有的姜黄素提高了结晶强度。综合来看, 3 种凝胶珠的图谱基本类似，表明姜黄多糖和纳米颗粒成功的包封在海藻酸钠凝胶珠中。

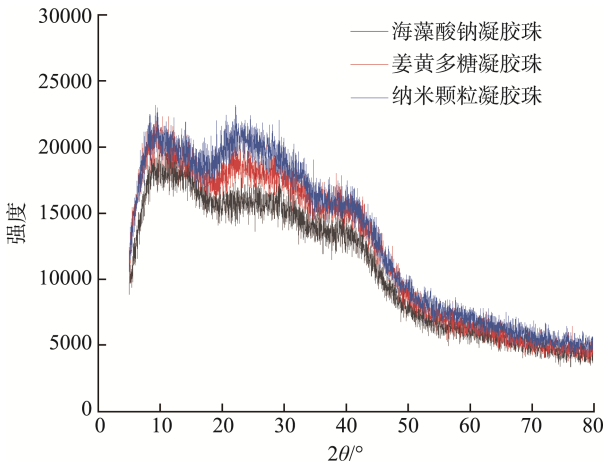


图 5　凝胶珠的 X-射线衍射图谱

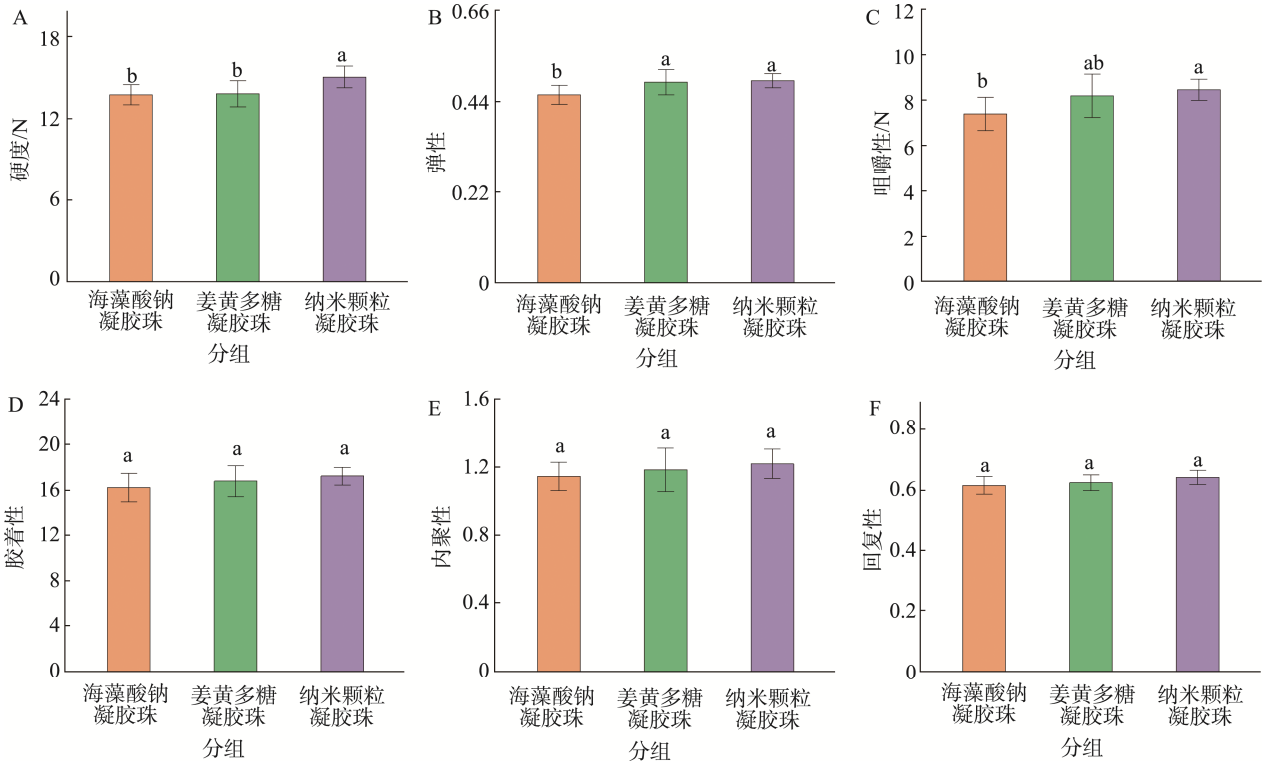
Fig.5　X-ray diffraction pattern of gel beads

2.6 机械性能分析

质构仪通过模拟人类感官评价或实际使用条件，对材料或产品的质地和机械性能进行量化测量，为产品研发、质量控制和工艺优化提供科学依据。对凝胶珠的机械性能测定包括：硬度、弹性、咀嚼性、胶着性、内聚性和回复性[37]。凝胶珠的机械性能如图 6 所示，图 6A 表现 3 种凝胶珠的硬度，与海藻酸钠凝胶珠相比，姜黄多糖凝胶珠和纳米颗粒凝胶珠硬度分别提高了 0.51%和 9.47%，与姜黄多糖凝胶珠相比，纳米颗粒凝胶珠的硬度提高了 8.96%，硬度的提升可以使凝胶珠在受到外力作用时，如挤压和摩擦等，能够保持其形状和结构不被破坏，提高了凝胶珠的稳定性和耐用性。图 6B 表现弹性指标，与海藻酸钠凝胶珠相比，姜黄多糖凝胶珠和纳米颗粒凝胶珠弹性分别提高了 6.79%和 7.54%，与姜黄多糖凝胶珠相比，纳米颗粒凝胶珠的弹性提高了 0.75%，良好的弹性可以使凝胶珠更好地适应形变，可以提高一定的回复能力，具有延长使用寿命的潜力。在图 6C 中可以看出，与海藻酸钠凝胶珠相比，姜黄多糖凝胶珠和纳米颗粒凝胶珠咀嚼性分别提高了 10.69%和 14.22%，与姜黄多糖凝胶珠相比，纳米颗粒凝胶珠的咀嚼性提高了 3.53%。图 6D、6E 和 6F 可以得出，与海藻酸钠凝胶珠相比，纳米颗粒凝胶珠的胶着性、内聚性和回复性均得到不同程度的增加，分别提高了 6.23%、6.28%和 4.22%，胶着性的提高能使活性物质更好地黏附在物体表面，能有效防止负载姜黄素的纳米颗粒凝胶珠泄漏和脱落，内聚性的提高可以提高凝胶珠内部结构更加紧密和均匀[28]。综上所述，姜黄多糖与纳米颗粒共同提升了海藻酸钠凝胶珠的机械性能，姜黄素的掺入额外增强了凝胶网络的结构致密性与综合稳定性，因此，相比海藻酸钠凝胶珠和姜黄多糖凝胶珠，纳米颗粒凝胶珠的机械性能最佳。

2.7 流变性能分析

如图 7A 所示，海藻酸钠、姜黄多糖和纳米颗粒凝胶珠的储能模量(G')和损耗模量(G'')随角频率的变化呈现一定的规律。其中，G'表示材料在受到周期性应力作用时，能够储存并恢复的能量部分，反映了材料的弹性特性；G''表示材料在受到周期性应力作用时，因黏性形变而损耗的能量部分，反映了材料的黏性特性[26]。在角频率介于 0.1~100.0 rad/s 范围内，海藻酸钠凝胶珠的 G'从 18572 Pa 增加至 59229 Pa，G''从 8688.1 Pa 增加至 13533 Pa；姜黄多糖凝胶珠的 G'从 14899 Pa 增加至 43918 Pa，纳米颗粒凝胶珠的 G'从 14521 Pa 增加至 43390 Pa；与此同时，姜黄多糖凝胶珠的 G''由 6566.9 Pa 增加到 8467.8 Pa，纳米颗粒凝胶珠的 G''由 6528.6 Pa 增加到 8264.1 Pa。G'在整个频率扫描过程中都高于 G''，表明 3 种凝胶珠都经历了凝胶化过程[38]。姜黄多糖凝胶珠和纳米颗粒凝胶珠的 G'和 G''在



注：不同字母表示组间具有显著性差异(P<0.05)。

图 6 凝胶珠的机械性能

Fig.6 Mechanical properties of gel beads

0.1~100.0 rad/s 的角频率范围内始终低于海藻酸钠凝胶珠，表明添加姜黄多糖和纳米颗粒后，虽然降低了海藻酸钠的弹性，但制备的凝胶珠具有较高的脆性和较强的固体特性，这一结果与质构测定所反映出的机械性能相吻合，推测其原因可能是由于姜黄多糖和纳米颗粒的加入进一步促进了海藻酸钠的凝胶化，降低了分子之间的斥力，进而提高了凝胶珠的固体稳定性[35]。

图 7B 显示了 tanδ 随角频率的变化情况，tanδ 是 G''与 G'的比值，能直接反映表观黏度和弹性的相对贡献，如果 δ=0°，材料表现出典型的固态性质；δ=90°，说明材料具有液态性质；δ 介于 0~90°之间，表明材料具有一定的黏弹性[39]。本研究中的 3 种凝胶珠的 δ 值在 0~90°之间，说明它们均具有一定的黏弹性。其中，纳米颗粒凝胶珠的 tanδ 值最小，说明该凝胶珠的稳定性更强，推测可能是姜黄素的加入进一步增强了其与姜黄多糖的相互作用，从而提高了与海藻酸钠形成凝胶珠的稳定性，这一结论也得到了 MOSCHAKIS 等[40]的研究支持。

2.8　体外消化特性分析

凝胶珠中的姜黄素在模拟胃/肠环境下的体外释放特性如图 8A 所示，结果表明，姜黄素的释放随消化时间的延长而增加。在胃液消化 2 h 后，姜黄素的体外释放量由(0.32±0.02) μg 增加到(0.72±0.07) μg。这种有限的释放可能归因于凝胶珠在酸性 pH 中具有收缩特性，内部凝胶网络更致密，机械性能增强，使凝胶珠更能抵抗酸性条件的破坏，有效限制了姜黄素的过度释放[29]。因此，纳米颗粒凝胶珠中较多的姜黄素被输送到肠，肠消化 4 h 后姜黄素的体外释放量由(0.72±0.07) μg 增加至(5.37±0.20) μg，在肠道环境中，Ca^{2+}从凝胶珠中解离形成磷酸钙盐，这破坏了凝胶珠的网络结构并增加了凝胶珠的膨胀[41]。随着肠消化时间的延长，凝胶珠逐渐溶胀，凝胶珠内部结构逐渐松弛，姜黄素逐渐被释放出来。

如图 8B 所示，随着消化时间延长，肠液黄色逐渐加深，且凝胶珠发生溶胀，尺寸变大。溶胀程度越高，凝胶珠的内部网络结构越开放，活性成分的释放更容易[42]，这与

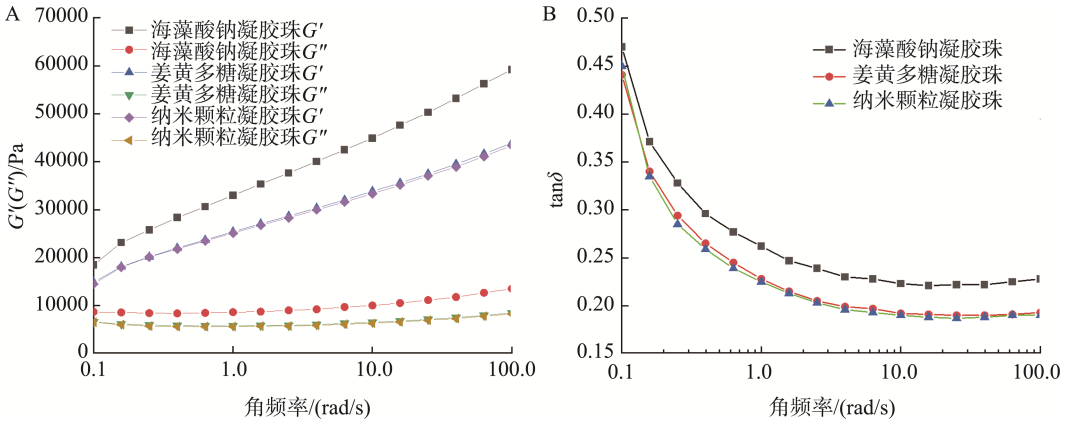
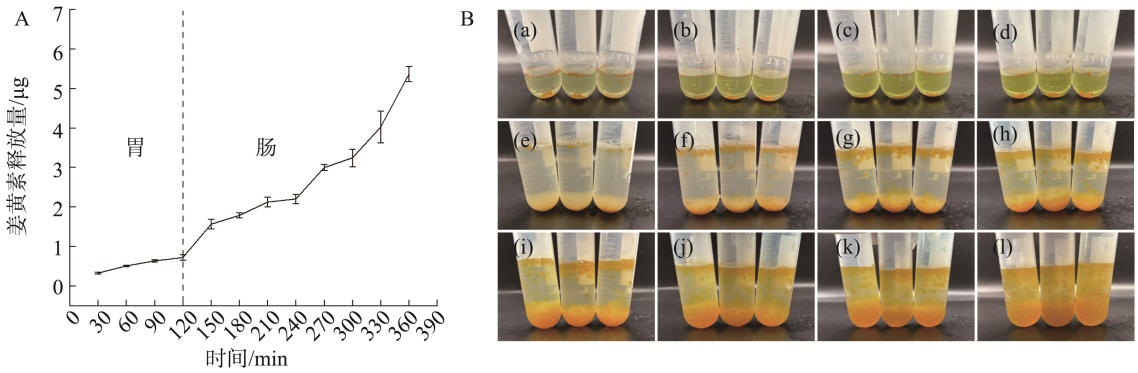


图 7　凝胶珠的流变性能

Fig.7　Rheological properties of gel beads



注：A. 姜黄素在胃肠阶段的释放特性；B. 凝胶珠不同消化时间的照片，(a)~(d)分别为胃消化 30、60、90、120 min；(e)~(l)分别为肠消化 30、60、90、120、150、180、210、240 min。

图 8　纳米颗粒凝胶珠在胃肠阶段消化特性

Fig.8　Digestion characteristics of nanoparticles gel beads in simulated gastric juice and intestinal juic

纳米颗粒凝胶珠在肠液中性环境中姜黄素释放量更多相对应。姜黄素/阿拉伯树胶/明胶的海藻酸钠水凝胶珠, 姜黄素在模拟胃液中的释放速率较低(<0.5%), 在模拟肠液中释放超过 97.2%, 表明制备的凝胶珠可以减轻胃液对凝胶珠的溶解, 有效提高姜黄素在肠道中的释放速率[27]。

3 结 论

本研究通过钙离子交联法成功构建了海藻酸钠凝胶珠、姜黄多糖-海藻酸钠凝胶珠、纳米颗粒-海藻酸钠凝胶珠, 其尺寸分别为 1.19、1.24 和 1.28 mm。钙离子交联的海藻酸钠网络与姜黄多糖及纳米颗粒复合后, 通过非共价作用形成了更致密、更稳定的结构。与海藻酸钠凝胶珠相比, 纳米颗粒凝胶珠硬度、弹性和咀嚼性分别显著提升 9.47%、7.54%和 14.22% (P<0.05), 机械性能增强, 黏弹稳定性提升。体外模拟消化实验表明, 纳米颗粒凝胶珠中的姜黄素呈现肠道靶向释放特性, 姜黄素累积释放量由胃消化阶段的 0.32 μg 缓释到肠消化阶段的 5.37 μg。本研究结果为姜黄多糖和姜黄多糖-姜黄素纳米颗粒在功能食品领域的应用提供了重要的理论依据与技术路径, 展现出开发具有定向功能性和优良口感的新型食品潜力。然而, 研究尚未详细探讨不同交联度、Ca^{2+}浓度或 pH 变化等参数对凝胶珠性能的详细影响规律, 且在体内的稳定性及生物活性功效还需通过后续的细胞及动物实验进一步探究。

参考文献

[1] 徐春明, 刘亚, 陈莹莹, 等. 姜黄素生理活性、代谢以及生物利用度的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2016(9): 203–210.
XU CM, LIU Y, CHEN YY, *et al*. Research progress on physiological activity, metabolism and bioavailability of curcumin [J]. China Food Additives, 2016(9): 203–210.

[2] KUMAR A, SINGH M, SINGH P, *et al*. Antioxidant efficacy and curcumin content of turmeric (*Curcuma-longa* L.) flower [J]. International Journal of Current Pharmaceutical Review and Research, 2016, 7(6): 1–6.

[3] BASNET P, SKALKO-BASNET N. Curcumin: An anti-inflammatory molecule from a curry spice on the path to cancer treatment [J]. Molecules, 2011, 16(6): 4567–4598.

[4] NEGI PS, JAYAPRAKASHA GK, JAGAN MRJ, *et al*. Antibacterial activity of turmeric oil: A byproduct from curcumin manufacture [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(10): 4297–4300.

[5] ABO-ZAID MA, SHAHEEN ES, ISMAIL AH. Immunomodulatory effect of curcumin on hepatic cirrhosis in experimental rats [J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(6): e13219.

[6] YANG C, ZHU KC, YUAN XW, *et al*. Curcumin has immunomodulatory effects on RANKL-stimulated osteoclastogenesis *in vitro* and titanium nanoparticle-induced bone loss *in vivo* [J]. Journal of Cellular and Molecular Medicine, 2020, 24(2): 1553–1567.

[7] KURIEN BT, SINGH A, MATSUMOTO H, *et al*. Improving the solubility and pharmacological efficacy of curcumin by heat treatment [J]. Assay and Drug Development Technologies, 2007, 5(4): 567–576.

[8] ZHU ZP, CHEN J, CHEN Y, *et al*. Extraction, structural characterization and antioxidant activity of turmeric polysaccharides [J]. LWT, 2022, 154: 112805.

[9] HARSHA MR, CHANDRA-PRAKASH SV, DHARMESH SM. Modified pectic polysaccharide from turmeric (*Curcuma longa*): A potent dietary component against gastric ulcer [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 138: 143–155.

[10] LIU Z, GAO WY, MAN SL, *et al*. Synergistic effects of *Rhizoma Paridis* and *Rhizoma curcuma longa* on different animal tumor models [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2014. 38(1): 31–40.

[11] CHOI EH, SON SU, SHIN KS. Tumor inhibitory effect via immunostimulating activities of a rhamnogalacturonan-I-rich polysaccharide isolated from turmeric (*Curcuma longa* L.) [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022. 46(10): e14362.

[12] SHAO P, FENG JR, SUN PL, *et al*. Recent advances in improving stability of food emulsion by plant polysaccharides [J]. Food Research International, 2020. 137, 109376.

[13] YIN BF, QIU ZC, CHI HW, *et al*. Turmeric pomace-derived polysaccharides: Extraction, structural insights, and anti-aging potential [J]. Food Bioscience, 2025, 63: 105717.

[14] YIN BF, LI LH, WANG P, *et al*. Structural characterization and functional properties of turmeric pomace polysaccharides-curcumin nanoparticles [J]. Food Chemistry International, 2025, 1(4): 479–491.

[15] MAITRA J, SHUKLA VK. Cross-linking in hydrogels-a review [J]. American Chemical Science Journal, 2014, 4(2): 226–239.

[16] REDAELLI F, SORBONA M, ROSSI F. 10-Synthesis and processing of hydrogels for medical applications [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.

[17] SAQIB MN, KHALED BM, LIU F, *et al*. Hydrogel beads for designing future foods: Structures, mechanisms, applications, and challenges [J]. Food Hydrocolloids for Health, 2022, 2: 100073.

[18] BU XT, GUAN MH, DAI L, *et al*. Fabrication of starch-based emulsion gel beads by an inverse gelation technique for loading proanthocyanidin and curcumin [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108336.

[19] LEE KY, MOONEY DJ. Alginate: Properties and biomedical applications [J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37(1): 106–126.

[20] HARIYADI DM, ISLAM N. Current status of alginate in drug delivery [J]. Advances in Pharmacological and Pharmaceutical Sciences, 2020, 2020: 8886095.

[21] LI DD, WEI ZH, XUE CH. Alginate-based delivery systems for food bioactive ingredients: An overview of recent advances and future trends [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(6): 5345–5369.

[22] MARTINS E, PONCELET D, RODRIGUES RC, *et al*. Oil encapsulation techniques using alginate as encapsulating agent: Applications and drawbacks [J]. Journal of Microencapsulation, 2017, 34(8): 754–771.

[23] SAQIB MN, AHAMMED S, LIU F, *et al*. Customization of liquid-core sodium alginate beads by molecular engineering [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 284: 119047.

[24] SIMÓ G, FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ E, VILA-CRESPO J, *et al*. Research progress in coating techniques of alginate gel polymer for cell encapsulation [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 170: 1–14.

[25] YIN M, YUAN YK, CHEN MS, *et al*. The dual effect of shellac on

survival of spray-dried *Lactobacillus rhamnosus* GG microcapsules [J]. Food Chemistry, 2022, 389: 132999.

[26] 尹立媛, 刘阳, 赵瑞璇, 等. 糊化马铃薯淀粉凝胶珠的制备与结构表征[J]. 食品工业科技, 2025, 46(20): 100–106.
YIN LY, LIU Y, ZHAO RX, *et al*. Preparation and structural characterization of gelatinized potato starch gel beads [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(20): 100–106.

[27] LIN YH, XU JC, GAO X. Development of antioxidant sodium alginate gel beads encapsulating curcumin/gum Arabic/gelatin microcapsules [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109901.

[28] 步允可. 黄精多糖功能评价及其复合物的制备[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
BU YK. Functional evaluation of polysaccharide from *polygonatum sibiricum* and preparation of its complexes [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024.

[29] LI Y, FENG C, LI J, *et al*. Construction of multilayer alginate hydrogel beads for oral delivery of probiotics cells [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 105: 924–930.

[30] 杨晨, 覃宗玲, 董晓莹, 等. 基于天然多糖复合凝胶珠的制备及其释药性能[J]. 功能高分子学报, 2015, 28(4): 403–409.
YANG C, QIN ZL, DONG XY, *et al*. Preparation and drug release profile of composite gel beads based on natural polysaccharide [J]. Journal of Functional Polymers, 2015, 28(4): 403–409.

[31] CUI CL, JIANG H, GUAN MH, *et al*. Characterization and *in vitro* digestibility of potato starch encapsulated in calcium alginate beads [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 126: 107458.

[32] RHEIN-KNUDSEN N, ALE MT, AJALLOUEIAN F, *et al*. Characterization of alginates from Ghanaian brown seaweeds: *Sargassum* spp. and *Padina* spp [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 71: 236–244.

[33] 王梦迪, 赵亚娜, 李会珍, 等. 以紫苏提取物为稳定剂的硒纳米颗粒结构表征及抗氧化活性评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(20): 296–304.
WANG MD, ZHAO YN, LI HZ, *et al*. Preparation, characterization and antioxidant activity evaluation of selenium nanoparticles stabilized by *Perilla frutescens* extract [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(20): 296–304.

[34] MUTHUMARI B, KUMAR BV, KAVITHA M, *et al*. Optimization of sodium alginate-galactoxyloglucan blended hydrogel beads through ionotropic gelation method [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124630.

[35] LIU SY, WANG YX, HUANG Y, *et al*. Gelatin-nanocellulose stabilized emulsion-filled hydrogel beads loaded with curcumin: Preparation, encapsulation and release behavior [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275: 133551.

[36] THANYACHAROEN T, CHUYSINUAN P, TECHASAKUL S, *et al*. Release characteristic of curcumin (*Zingiberaceae*) from sodium alginate and polyvinyl alcohol-based hydrogel composite: Antioxidant properties [J]. Emergent Materials, 2023, 6(2): 535–542.

[37] 黄峻榕, 李艳芳, 蒲华寅, 等. 质构仪在淀粉及淀粉基食品品质研究中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 390–395.
HUANG JR, LI YF, PU HY, *et al*. Research progress on application of texture analyzer in quality of starch and starch- based food [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(4): 390–395.

[38] HUGHES MH, GENOVESE DB. A novel technique to obtain polysaccharide gels that emulate encapsulation beads with size and shape suitable for rheological, mechanical and other measurements [J]. Food and Bioproducts Processing, 2023, 140: 172–180.

[39] KOO SY, CHA KH, SONG DG, *et al*. Microencapsulation of peppermint oil in an alginate-pectin matrix using a coaxial electrospray system [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(3): 733–739.

[40] MOSCHAKIS T, MURRAY BS, DICKINSON E. Microstructural evolution of viscoelastic emulsions stabilised by sodium caseinate and xanthan gum [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 284(2): 714–728.

[41] WANG N, TIAN J, WANG LL, *et al*. Fabrication, characterization, and antibacterial properties of sodium alginate/chito-oligosaccharide gel beads [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110286.

[42] SANTAMARÍA E, MAESTRO A, CHOWDHURY S, *et al*. Rheological study of pullulan-pectin mixtures to prepare gel beads using the drip method and evaluation as gallic acid release systems [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110747.

(责任编辑: 蔡世佳　韩晓红)