林华伟, 沈径羽, 宋欣姊, 等. 海藻酸钙凝胶技术应用于花生休闲食品开发的工艺优化及益生菌包埋稳定性分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 24−30. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030350

LIN Huawei, SHEN Jingyu, SONG Xinzi, et al. Optimization of Calcium Alginate Gel Technology in Peanut Snack Production and Stability Evaluation of Probiotic Encapsulation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 24−30. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030350

·特邀主编专栏—植物基食品原料基础研究、前沿技术创新及其健康绿色产品开发（客座主编：于寒松、张健、李健）·

海藻酸钙凝胶技术应用于花生休闲食品开发的工艺优化及益生菌包埋稳定性分析

林华伟[1], 沈径羽[1,+], 宋欣姊[1], 孙庆杰[1,2], 杨　洁[1,2,*]

（1.青岛农业大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266109;
2.青岛特种食品研究院, 山东青岛 266109）

摘　要: 为解决传统花生休闲食品脂肪含量高、生产加工过程中益生菌稳定性低的问题，本研究将海藻酸钙凝胶技术应用于低脂高蛋白花生及益生菌花生的制备。以质构特性和感官评分作为评定指标，研究发现海藻酸钙凝胶花生最佳工艺条件为在浓度为 2% 的海藻酸钠溶液中加入花生蛋白粉（浓度 26%），滴入直径为 1 cm 的球形模具中，加入 3 粒大小一致的花生碎（约 0.04 g），置于−20 ℃ 冷冻 1 h 后脱模。放入乳酸钙溶液（浓度 2%）中，样品静置 2 h 后取出，用去离子水清洗干净，随后在 45 ℃ 低温下烘干 2 h，最后在 150 ℃ 高温下烘烤 12 min。制备的海藻酸钙凝胶花生的脂肪含量为 24.0%±0.9%，蛋白质含量为 37.4%±1.3%。基于以上工艺，在海藻酸钠溶液中加入益生菌粉，与乳酸钙交联后，用去离子水冲洗，于 25 ℃ 放置 12 h 后备用，不经过烘烤，制作包埋益生菌的海藻酸钙凝胶花生，发现加入益生菌后包埋率达 82.3%±1.6%，并具有良好的消化稳定性、贮藏稳定性、热稳定性和发酵特性。

关键词: 花生, 海藻酸钙凝胶, 低脂高蛋白特性, 益生菌, 稳定性

中图分类号: TS201.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0024−07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030350　　本文网刊:

Optimization of Calcium Alginate Gel Technology in Peanut Snack Production and Stability Evaluation of Probiotic Encapsulation

LIN Huawei[1], SHEN Jingyu[1,+], SONG Xinzi[1], SUN Qingjie[1,2], YANG Jie[1,2,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;
2.Qingdao Special Food Research Institute, Qingdao 266109, China）

Abstract: To address the issues of high fat content in traditional peanut snacks and the low stability of probiotics during production and processing, this study applied calcium alginate gel technology to the preparation of low-fat, high-protein peanuts and probiotic peanuts. Using texture characteristics and sensory scores as evaluation indicators, the optimal process conditions for calcium alginate gel peanuts were determined as follows: peanut protein powder (26%) was added to a 2% sodium alginate solution, dripped into a spherical mold with a diameter of 1 cm, and mixed with three evenly sized peanut fragments (approximately 0.04 g). The mixture was frozen at −20 ℃ for 1 h, demold, and then cross-linked in a 2% calcium lactate solution for 2 h. This was followed by rinsing with deionized water, drying at 45 ℃ for 2 h, and final baking at 150 ℃ for 12 min. The resulting calcium alginate gel peanuts had a fat content of 24.0%±0.9% and a protein content of

收稿日期: 2025−03−28　　+并列第一作者

基金项目: 山东省花生产业技术体系项目（SDAIT-04-09）; 青岛市科技惠民示范专项（24-1-8-xdny-15-Nsh）。

作者简介: 林华伟（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品微生物, E-mail: 17806298828@163.com。
沈径羽（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮油精深加工, E-mail: sjy510s@163.com。

*** 通信作者:** 杨洁（1991−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品微生物, E-mail: yangjie199102@qau.edu.cn。

37.4%±1.3%. Based on the above process, probiotic powder was added to the sodium alginate solution. After cross-linking with calcium lactate, the mixture was rinsed with deionized water and stored at 25 ℃ for 12 h without baking to produce calcium alginate gel peanuts encapsulating probiotics. The encapsulation efficiency of the probiotics reached 82.3%±1.6%, and the product demonstrated excellent digestive stability, storage stability, thermal stability, and fermentation characteristics.

Key words: peanut; calcium alginate gel; low-fat and high-protein; probiotics; stability

随着人们健康意识的提升，消费者对低脂高蛋白食品及益生菌食品需求不断增加。我国是世界上最大的花生生产国，花生休闲食品的市场规模庞大。传统花生休闲产品如裹衣花生、油炸花生脂肪含量较高，长期食用容易引发肥胖、心血管疾病等健康问题[1]。益生菌可改善肠道功能[2]，预防和缓解多种肠道疾病[3]，增强机体的免疫力[4]，但是生产加工过程、胃肠道环境会影响益生菌的活性[5]。海藻酸钙凝胶技术为解决以上问题提供了新思路。

海藻酸钙凝胶技术是基于海藻酸钠和钙离子的离子交联反应[6−7]，形成稳定的三维网络凝胶结构[8]。通过调整海藻酸钠浓度、钙离子浓度和交联时间[9]，可以精确控制凝胶的强度、孔隙率和溶胀性，具有高度的可调控性[9]。在食品工业中，海藻酸钙凝胶可用作增稠剂、稳定剂和凝胶剂，常用于酸奶、奶油等奶制品，肉丸、香肠等肉制品，酱油等调味品以及果冻、布丁的制作[10]。以花生为主要原料，利用海藻酸钙凝胶技术，开发低脂高蛋白花生休闲食品，符合现代饮食趋势，具有重要的健康价值和市场潜力。将益生菌包裹在海藻酸钙凝胶中，可为益生菌提供物理保护[11]，减少外界因素对菌体的损伤，提高益生菌的稳定性、存活率[12−13]，同时，多孔的凝胶结构可实现益生菌的持续释放[14−15]。目前未见海藻酸钙凝胶技术在花生休闲食品中的应用。

本研究利用海藻酸钙凝胶技术，优化海藻酸钠浓度、乳酸钙浓度、花生蛋白粉浓度、花生碎添加量、烘烤条件等工艺因素，制备低脂高蛋白花生休闲食品和益生菌花生休闲食品，并测定益生菌花生休闲食品的消化稳定性、贮藏稳定性、热稳定性及发酵特性。本研究开发兼具低脂高蛋白特性和益生菌特性的新型花生休闲食品，满足健康饮食趋势，为开发功能性坚果休闲食品提供了新的思路。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

益生菌菌种：凝结魏茨曼氏菌（*Weizmannia coagulans*）　购于陕西丹乃斯生物科技有限公司，产品批号为 DNS20240924；花生碎、花生蛋白粉、市售花生休闲食品　青岛宝泉花生制品有限公司；MRS 培养基　青岛海博生物技术有限公司；海藻酸钠（食品级）　青岛明月海藻集团有限公司；乳酸钙（食品级）　青岛九泰生物科技有限公司；氯化钾、硫氰酸钾、十二水合磷酸氢二钠、无水硫酸钠、氯化钠　国药集团化学试剂有限公司；α-淀粉酶（150 U/mL）、胃蛋白酶（2000 U/mL）、胰蛋白酶（100 U/mL）　上海源叶生物科技有限公司。

球形模具（直径 1 cm）　Forestcabin 烘焙坊；DHG-9070A 电热鼓风干燥箱　上海一恒科学仪器有限公司；K35FK609 电烤箱　绍兴泊尔家居用品有限公司；TA.XTC-18 质构仪　上海保圣实业发展有限公司；G154DS 灭菌锅　厦门致微仪器有限公司；IS-RDD3 恒温振荡培养箱　苏州捷美电子有限公司；SW-CJ-1FD 型单人单面净化工作台　苏州净化设备有限公司；LRF-250F 恒温生化培养箱　上海一恒科学仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　主要溶液的配制　海藻酸钠溶液的配制方法：将定量海藻酸钠粉末加入去离子水中，经充分搅拌并完全溶解，分别配制成浓度为 1%、1.5%、2% 和 2.5% 的海藻酸钠溶液。

乳酸钙溶液的配制方法：将定量乳酸钙粉末加入去离子水中，经充分搅拌并完全溶解，分别配制成浓度为 1%、2%、3% 和 4% 的乳酸钙溶液。

模拟唾液的配制方法[16]：首先，依次称取 89.6 mg KCl、20 mg KSCN、102.2 mg $NaH_2PO_4·12H_2O$、57 mg Na_2SO_4、29.8 mg NaCl 加入 100 mL 去离子水中，持续搅拌 30 min 进行溶解，配制成无机盐缓冲液。随后，将 3.0 mg 的 α-淀粉酶溶于上述缓冲液中，将 pH 调节至 6.8，最后进行过滤除菌。

模拟胃液的配制方法[17]：首先，取 1.64 mL 的 0.05 mol/L 的 HCl 加入 90 mL 无菌蒸馏水中，调节 pH 为 2.0，随后取 1.0 g 猪胃蛋白酶加入其中，充分溶解后定容至 100 mL，过滤除菌。

模拟肠液的配制方法[18]：称取 1.0 g 猪胰蛋白酶粉末，将其溶于 0.1 mol/L、pH 为 7.0 的磷酸盐缓冲液中，充分溶解后定容至 100 mL，过滤除菌。

1.2.2　海藻酸钙凝胶花生的制备工艺优化　在浓度为 2% 的海藻酸钠溶液中加入浓度为 26% 的花生蛋白粉，搅拌至完全溶解，用胶头滴管吸取并滴入直径为 1 cm 的球形模具中，加入 3 粒大小一致的花生碎（0.4 cm×0.4 cm×0.4 cm，约 0.04 g），置于−20 ℃ 冷冻 1 h 后脱模。放入浓度为 2% 的乳酸钙溶液中，样品静置 2 h 后，用去离子水冲洗 2~3 次，随后在 45 ℃ 烘干 2 h，最后置于 150 ℃ 高温烘烤 12 min。

单因素实验中其它因素的固定条件同上。通过预实验，设定优化因素的取值范围分别是海藻酸钠浓度（1%、1.5%、2%、2.5%）、乳酸钙浓度（1%、

2%、3%、4%)、花生蛋白粉浓度(13%、19%、26%、33%)、花生碎用量(0.04、0.08、0.12、0.16 g)、低温烘干时长(1、1.5、2、2.5 h),分别进行感官评价,并检测其质构特性。

1.2.3 益生菌海藻酸钙凝胶花生的制备 基于上述海藻酸钙凝胶花生工艺优化的结果,略作修改。在 50 mL 浓度为 2% 的海藻酸钠溶液中加入 13 g 花生蛋白粉和益生菌粉,充分混合后,滴入直径为 1 cm 的球形模具中,加入大小一致的花生碎(0.4 cm×0.4 cm×0.4 cm, 3 粒,共 0.12 g)。将球形模具置于−20 ℃ 冷冻 1 h 后脱模,随后将样品浸入 2% 浓度的乳酸钙溶液中静置 2 h,取出后用去离子水冲洗 2~3 次,最后在 25 ℃ 下晾干 12 h 备用。

海藻酸钙凝胶花生和益生菌海藻酸钙凝胶花生的制备工艺流程图见图 1。

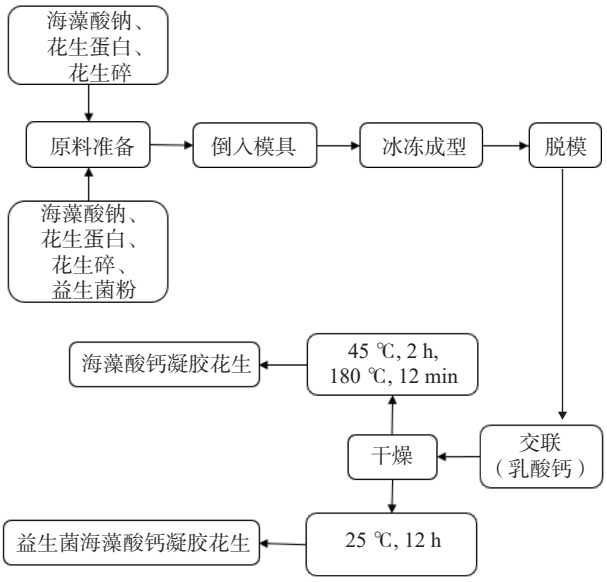


图 1 工艺流程图

Fig.1 Process flow diagram

1.2.4 感官评价 由 10 名拥有一定品评经验的专业人员组成评定小组,分别从色泽、口味、形态、组织四项指标对产品进行打分,采用十分制打分[19]。评分的具体细则如表 1 所示。

表 1 感官评价评分标准

Table 1 Sensory evaluation scoring criteria

评定项目	评分标准	分值
色泽(3分)	颜色分布均匀一致,呈现出烘烤后的色泽,无明显焦色或杂色。	2.1~3.0
	颜色分布均匀一致,呈现出烘烤后的色泽,略带焦色和杂色。	1.1~2.0
	颜色较为暗淡,呈现出明显的焦色和杂色。	0~1.0
口味(3分)	无任何异味,香味、滋味与气味纯正,口感松脆。	2.1~3.0
	少许异味,具有醇香。	1.1~2.0
	不具有醇香,味道偏苦。	0~1.0
形态(2分)	颗粒形态充实饱满,无明显异常颗粒。	1.5~2.0
	颗粒形态较为饱满,表面无裂痕。	0.9~1.4
	果粒形态不饱满,表面出现裂痕。	0~0.8
组织(2分)	皮酥脆,芯酥,内仁无不熟或过火。	1.5~2.0
	皮和芯均熟,内仁几乎无不熟或过火。	0.9~1.4
	皮和芯不熟,内仁有不熟或过火。	0~0.8

1.2.5 质构特性检测 在尚佳硕等[20]和赵赓九等[21]的方法基础上略作修改,采用质构仪对花生产品的质构特性进行分析。待测样品均在室温下平衡 30 min 后,使用 TA-36 柱形探头(直径 36 mm)和“TPA”模式进行检测,具体参数设置为:压缩 2 次,测试前、中、后压缩速率均设置为 1.0 mm/s,间隔时间为 1 s,触发力为 5 gf,目标形变数值量为 40%。硬度通过样品下压过程中的断裂力表示,脆度则以样品达到最大承受力时的变形距离表示。

1.2.6 蛋白质和脂肪含量的测定 采用食品安全国家标准 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的第二法(酸水解),测定产品的脂肪含量。同时,依据 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的第一法(凯氏定氮),测定产品的蛋白质含量。

1.2.7 益生菌海藻酸钙凝胶花生稳定性研究

1.2.7.1 益生菌包埋率的测定 称取 5.0 g 制备好的益生菌海藻酸钙凝胶花生,搅碎后加入 45 mL 生理盐水中,充分摇匀。根据食品安全国家标准 GB 4789.35-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》平板计数法,测定益生菌活菌数计为 N1。包埋率[22]的计算见下式,起始添加的活菌数计为 N0。

$$包埋率(\%) = N1/N0 \times 100$$

1.2.7.2 消化稳定性的测定 参照王道滇等[23]的方法,略作修改。将 1 g 益生菌海藻酸钙凝胶花生加入 5 mL 模拟唾液中,充分混匀后,置于 37 ℃、180 r/min 摇床中振荡 15 min,随后取样,采用平板计数法测定活菌数。经过模拟唾液处理后的样品在 4000 r/min 下离心 5 min,去掉上清液,在沉淀物中加入 9 mL 的模拟胃液充分混匀,在 37 ℃ 温和搅拌 0.5 h 后取样,以平板计数法测定活菌数。将经过人工模拟胃液处理后的样品在 4000 r/min 下离心 5 min,去掉上清液,在沉淀物中加入 30 mL 的模拟肠液充分混匀,在 37 ℃ 温和搅拌 1 h 后取样,采用平板计数法测定活菌数。对照组用未被包埋的益生菌菌粉进行上述相同实验操作,并按相同方法测定不同消化时间段的菌落总数。

1.2.7.3 贮藏稳定性的测定 参照周莉等[24]的方法,稍作修改。将制备好的益生菌海藻酸钙凝胶花生于 4 ℃ 和 25 ℃ 贮存 28 d,每隔 7 d 进行取样,将 5 g 益生菌海藻酸钙花生磨碎后置于 45 mL 生理盐水中,采用微生物平板计数法测定产品的菌落总数。对照组用未被包埋的益生菌菌粉进行上述相同实验。

1.2.7.4 热稳定性的测定 参照王道滇等[23]的实验方法,稍作修改。将制备好的益生菌海藻酸钙凝胶花生分别置于 40、50、60 ℃ 处理 30 min,每隔 10 min

进行取样，将产品磨碎后放入生理盐水中进行溶解，采用微生物平板计数法测定样品的菌落总数。

1.2.7.5　发酵稳定性的测定　参照周莉等[24]的实验方法，稍作修改。将 5 g 益生菌海藻酸钙凝胶花生加入 45 mL 液体 MRS 培养基（葡萄糖 20.0 g/L、蛋白胨 10.0 g/L、牛肉浸粉 8.0 g/L、乙酸钠 5.0 g/L、酵母浸粉 4.0 g/L、磷酸氢二钾 2.0 g/L、柠檬酸氢二铵 2.0 g/L、硫酸镁 0.2 g/L、硫酸锰 0.04 g/L）中，在 37 ℃ 恒温振荡培养箱中培养，每间隔 2 h 取样，测定 pH 及菌落总数，以探究其发酵特性。

1.3　数据处理

各实验分别做 3 次平行，结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS25.0 软件对数据进行差异显著性分析，$P<0.05$ 表示有显著性差异，用 Origin 2018 64Bit 软件作图。

2　结果与分析

2.1　海藻酸钙凝胶花生的制备工艺优化

如图 2A、B 所示，海藻酸钠与乳酸钙的最适添加浓度均为 2%，在此条件下产品可获得最优的感官评分。当海藻酸钠或乳酸钙浓度低于 2% 时，由于凝胶网络结构强度不足[25]，导致产品在烘烤过程中出现结构塌陷，表现为花生碎外露、受热不均等问题，具体表现为外部焦化而内部未完全酥脆，产品形态欠饱满，脆性品质下降。当海藻酸钠浓度超过 2% 时，一方面由于其固有的腥味物质增加，导致产品出现轻微苦味；另一方面，高浓度海藻酸钠溶解性降低，在体系中分布不均匀，影响产品质构的均一性。此外，当乳酸钙浓度超过 2% 时，过量的钙离子会导致产品产生轻微咸味，从而影响整体口感品质。

如图 2C 所示，花生蛋白粉的最适添加浓度为 26%，此时产品可获得最优的感官评分。当花生蛋白粉浓度低于 26% 时，由于花生特征性醇香味物质含量不足，难以有效掩盖海藻酸钠的固有腥味；同时，较低的蛋白浓度导致凝胶网络结构疏松，在烘烤过程中形成多孔结构[26]，致使产品脆性品质较低。当花生蛋白粉浓度超过 26% 时，过量的花生蛋白粉与海藻酸钙竞争性结合钙离子[27]，破坏凝胶网络的完整性，降低交联密度，影响凝胶脆性结构生成，适口性降低。

由图 2D 所示，花生碎的最适添加量为 3 粒（0.12 g）。当添加量低于此值时，由于花生特征性风味物质含量不足，产品整体风味强度减弱；同时，花生碎作为填充颗粒对凝胶网络的增强作用不足，导致产品酥脆度下降。当添加量超过 3 粒（0.12 g）时，过量花生碎在凝胶基质中呈现不均匀分布，在热加工过程中迁移至产品表面，导致局部过热焦化；此外，过多花生碎会破坏凝胶网络的连续性，影响产品形态的完整性和质构的均一性。

如图 2E 所示，经优化实验确定最佳低温烘干时长为 2 h。当低温烘干时间不足 2 h 时，由于热量传递不充分，导致产品呈现外干内湿的质构特征，酥脆性显著降低（$P<0.05$）。当烘干时间超过 2 h 时，过度的热处理会加速美拉德反应进程，产生大量苦味物质如吡嗪类和呋喃类化合物[28]；同时，蛋白质过度变性导致分子间交联密度增加，引起产品质地硬化、体积收缩等品质劣变现象。

图 2F 展示了烘烤前后产品的表观特征变化。烘烤前，产品呈现典型的凝胶态特征，具有光滑表面和柔软质地，呈均匀的白色球状形态，平均直径为 1.00 cm。经烘烤处理后，在美拉德反应和焦糖化反应的协同作用下[29]，产品表面形成特征性的焦黄色

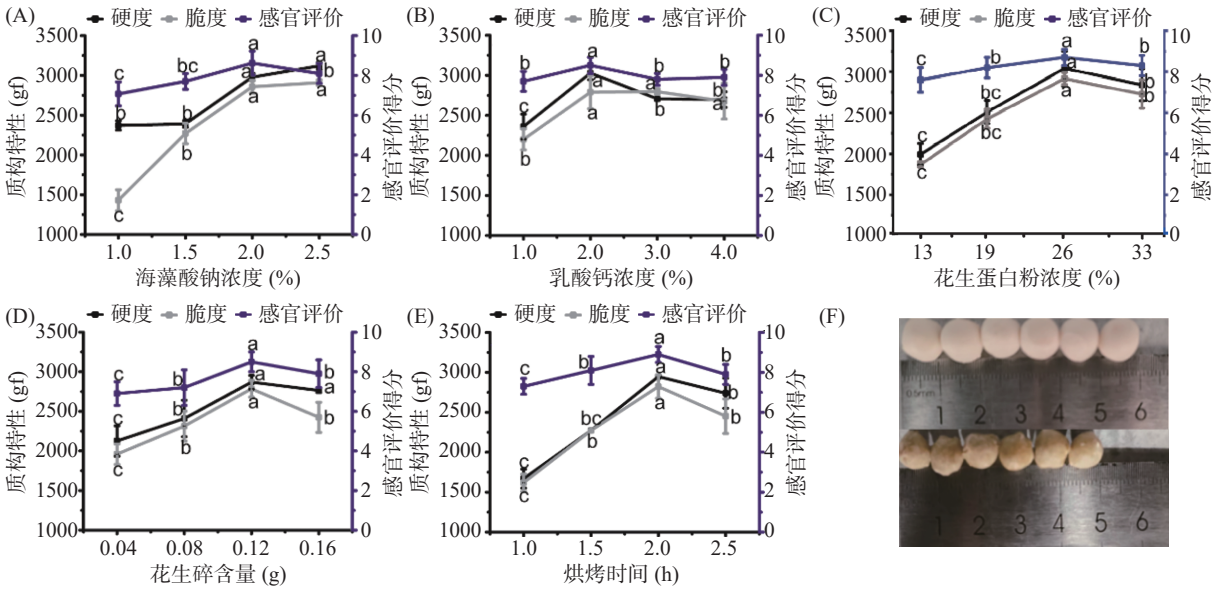


图 2　海藻酸钙凝胶花生的制备工艺优化

Fig.2　Optimization of preparation process for calcium alginate gel-embedded peanuts

注：(A)海藻酸钠浓度；(B)乳酸钙浓度；(C)花生蛋白粉浓度；(D)花生碎含量；(E)烘烤时间对产品质构特性及感官评分的影响；(F)海藻酸钙凝胶花生烘烤前后产品外观和平均直径。不同小写字母表示存在显著性差异（$P<0.05$），图 3 同。

泽; 同时, 由于水分蒸发和凝胶网络收缩, 产品体积发生显著皱缩[8], 平均直径减小至 0.80 cm。这一形态变化证实了热处理过程中发生了显著的水分迁移和凝胶网络重组[8]。

2.2 海藻酸钙凝胶花生与市售花生休闲食品的品质对比分析

将制备的海藻酸钙凝胶花生与市售花生休闲食品(油炸花生和裹衣花生)进行品质对比分析(表 2)。感官评价结果表明, 海藻酸钙凝胶花生的感官评分与油炸花生和裹衣花生相当。质构分析显示, 海藻酸钙凝胶花生的硬度和脆度与裹衣花生相近, 硬度显著低于油炸花生(P<0.05), 脆度则显著高于油炸花生(P<0.05)。在营养成分方面, 海藻酸钙凝胶花生展现出显著优势: 其脂肪含量(24.0%±0.9%)显著低于油炸花生(49.7%±2.2%)(P<0.05); 蛋白质含量(37.4%±1.3%)显著高于油炸花生(24.6%±1.1%)和裹衣花生(13.9%±0.7%)(P<0.05), 更符合现代消费者对健康休闲食品的需求。

表 2 海藻酸钙凝胶花生与市售花生休闲食品的品质特性对比

Table 2 Comparative analysis of quality characteristics between calcium alginate gel-embedded peanuts and commercial peanut snack products

指标	海藻酸钙凝胶花生产品	油炸花生	裹衣花生
色泽	2.60±0.10^a	2.30±0.40^a	2.40±0.20^a
口味	2.50±0.20^a	2.60±0.30^a	2.40±0.10^a
形态	1.80±0.10^a	1.80±0.2^a	1.60±0.10^a
组织	1.70±0.10^a	1.70±0.2^a	1.50±0.20^a
感官评分	8.60±0.50^a	8.40±1.10^a	8.10±0.60^a
硬度(gf)	3080.75±113.35^b	7518.43±1076.25^a	2955.30±171.85^b
脆度(gf)	2897.48±62.53^a	2570.36±1072.43^b	2955.42±171.11^a
脂肪含量(%)	24.00±0.90^b	49.70±2.20^a	19.70±0.90^b
蛋白含量(%)	37.40±1.30^a	24.60±1.10^b	13.90±0.70^c

注: 同行数据上标不同字母表示差异显著(P<0.05)。

2.3 益生菌海藻酸钙凝胶花生的包埋率分析

通过平板计数法测定产品中的益生菌存活率, 实验结果如图 3 所示, 所添加的益生菌菌粉的活菌数为 1.87×10^8 CFU/g, 经加工制备后, 益生菌海藻酸钙凝胶花生中的活菌数降至 1.55×10^8 CFU/g, 益生菌在海藻酸钙凝胶体系中的包埋率为 82.3%±1.6%。

2.4 益生菌海藻酸钙凝胶花生的消化稳定性评估

采用体外模拟消化模型评估益生菌海藻酸钙凝胶花生的消化稳定性。如图 4 所示, 未包埋的益生菌菌粉在模拟消化液(唾液、胃液、肠液)中活菌数均显著下降(P<0.05), 而海藻酸钙凝胶包埋组经唾液处理后活菌数稳定, 胃液和肠液处理后降至 1.23×10^8 CFU/g 与 1.00×10^8 CFU/g, 降幅显著低于未包埋组(P<0.05), 证实海藻酸钙凝胶包埋技术有效提高了益生菌在胃肠道环境中的稳定性, 为其在功能性食品中的应用提供了支持。

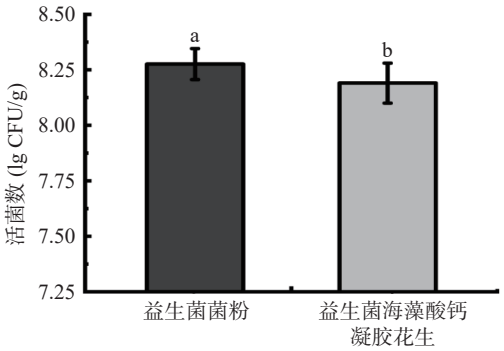


图 3 益生菌在海藻酸钙凝胶花生中的包埋率

Fig.3 Encapsulation efficiency of probiotics in calcium alginate gel-embedded peanuts

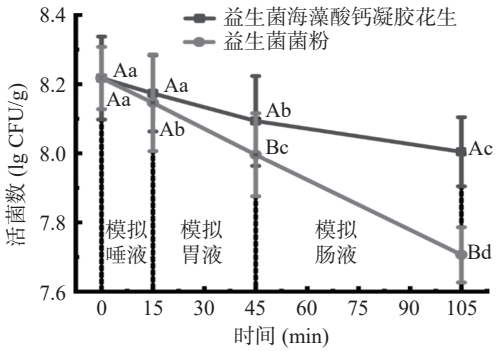


图 4 益生菌海藻酸钙凝胶花生在连续体外模拟消化道中的活菌数

Fig.4 Viable counts of probiotics in calcium alginate gel-embedded peanuts in continuous *in vitro* simulated digestive tract

注: 不同大写字母表示同一时间的不同样品间存在显著性差异(P<0.05); 不同小写字母表示同一样品在不同时间存在显著性差异(P<0.05), 图 5~图 7 同。

2.5 益生菌海藻酸钙凝胶花生的贮藏稳定性评估

如图 5 所示, 在 4 ℃ 和 25 ℃, 随贮藏时间延长, 未经包埋的益生菌粉中的活菌数呈显著下降趋势(P<0.05), 28 d 后分别降至 7.76×10^7 CFU/g 和 6.46×10^7 CFU/g。这一变化规律与文献报道结果一致[23], 活菌数下降可归因于代谢产物积累和环境温度的双重影响。益生菌海藻酸钙凝胶花生中的活菌数在

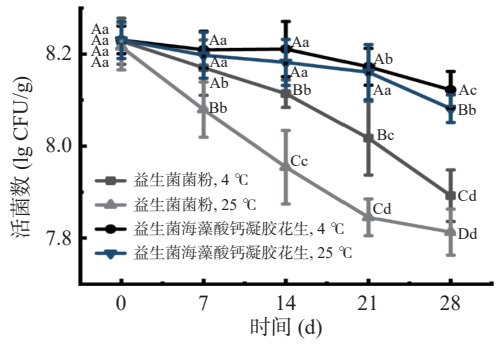


图 5 益生菌海藻酸钙凝胶花生在不同贮藏条件下的活菌数

Fig.5 Viable counts of probiotic calcium alginate gel-embedded peanuts under different storage conditions

4 ℃ 和 25 ℃ 贮藏过程中变化幅度较小，28 d 后分别为 1.32×10^8 CFU/g 和 1.20×10^8 CFU/g，体现了优异的贮藏稳定性。海藻酸钙凝胶网络结构为益生菌提供了有效的物理屏障，降低了环境因素（如温度波动、氧气渗透）对菌体的不利影响[12−13]；另外，包埋体系中添加的花生蛋白粉为益生菌提供必要的生长因子，其含有的抗氧化成分还能减轻氧化应激对菌体的损伤。

2.6　益生菌海藻酸钙凝胶花生热稳定性评估

采用温度梯度实验评估益生菌海藻酸钙凝胶花生的热稳定性。如图 6 所示，在 40 ℃ 处理 20 min，益生菌海藻酸钙凝胶花生的活菌数保持稳定，维持在 1.74×10^8 CFU/g；在 50 ℃ 处理 10 min，益生菌海藻酸钙凝胶花生的活菌数保持稳定，维持在 1.64×10^8 CFU/g，10 min 之后，显著下降（$P<0.05$）；当温度升高至 60 ℃ 时，活菌数不能保持稳定。温度梯度实验表明，益生菌海藻酸钙凝胶花生在 40 ℃ 和 50 ℃ 下分别能保持 20 min 和 10 min 的活菌数的稳定，但在 60 ℃ 时活菌数显著下降，为益生菌制品的生产工艺优化提供了一定的参考。

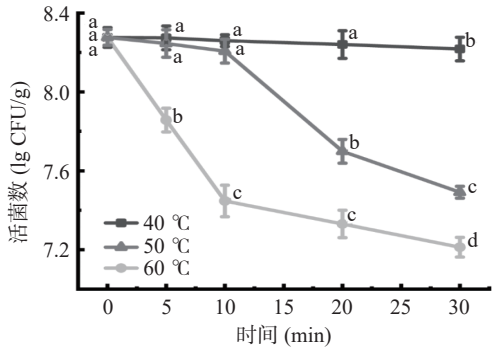


图 6　不同温度下益生菌海藻酸钙凝胶花生的活菌数

Fig.6　Viable count of probiotic calcium alginate gel-embedded peanuts under different temperatures

2.7　益生菌海藻酸钙凝胶花生的发酵特性分析

通过监测发酵过程中益生菌活菌数和 pH 的变化评估益生菌海藻酸钙凝胶花生的发酵特性。如图 7 所示，随发酵时间延长，在 MRS 培养基中益生菌海藻酸钙凝胶花生和益生菌菌粉的活菌数呈现显著上升趋势，培养基的 pH 均呈现显著下降趋势（$P<0.05$）。培养 8 h 后，益生菌海藻酸钙凝胶花生的活菌数（1.48×10^{10} CFU/g）显著高于益生菌菌粉组（1.12×10^{10} CFU/g）（$P<0.05$），pH（5.67±0.06）显著低于未包埋的益生菌菌粉组（6.38±0.04）（$P<0.05$）。这种差异主要归因于以下机制：首先，海藻酸钙凝胶花生体系中富含的花生蛋白粉为益生菌提供了丰富的氮源和生长因子[8]；其次，三维凝胶网络结构有利于营养物质的传递和代谢产物的扩散[30]，形成了有利于益生菌生长的微环境；此外，花生中的天然生长因子（如多酚类物质）可能促进了益生菌的增殖和代谢活性。以上结果表明，海藻酸钙凝胶体系不仅能够有效维持益生菌活性，还可显著提高其发酵性能，为开发新型发酵型益生菌制品提供了理论依据和技术支持。

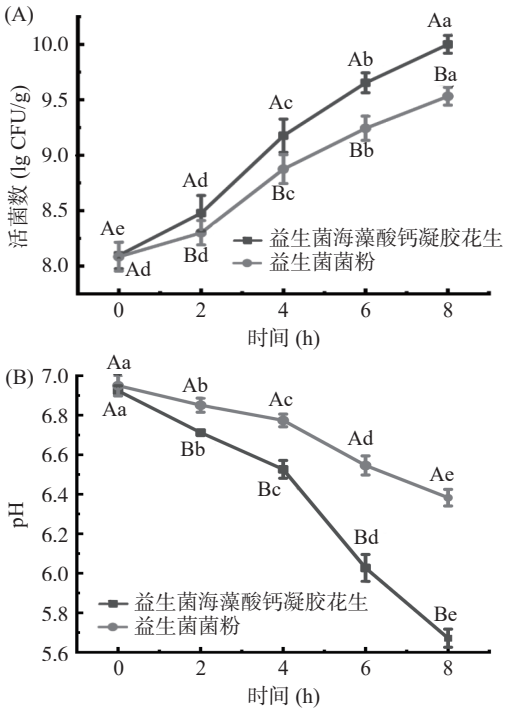


图 7　益生菌海藻酸钙凝胶花生在 MRS 培养基中的活菌数变化（A）和 pH 变化（B）

Fig.7　Viable counts (A) and pH (B) of probiotic sodium alginate gel-embedded peanuts in MRS medium

3　结论

本研究成功将海藻酸钙凝胶技术应用于功能性花生休闲食品的开发，解决了传统花生食品高脂肪含量及益生菌加工稳定性低的问题。通过优化工艺，确定了低脂高蛋白海藻酸钙凝胶花生的最佳制备条件：在 2% 海藻酸钠溶液中加入 26% 花生蛋白粉和 0.12 g 花生碎，经冷冻、乳酸钙交联、烘干和烘烤，最终产品脂肪含量为 24.0%±0.9%，蛋白质含量达 37.4%±1.3%，显著优于市售油炸花生。在此基础上，通过调整工艺（省略高温烘烤），成功包埋凝结魏茨曼氏菌，包埋率达 82.3%±1.6%，并验证了其优异的消化稳定性（唾液、胃液、肠液处理后活菌数显著高于未包埋组）、贮藏稳定性（4 ℃ 和 25 ℃ 下 28 d 活菌数保持在 1.0×10^8 CFU/g 以上）、热稳定性（40 ℃ 下 20 min 活菌数无显著下降）及发酵特性（活菌数显著上升，pH 显著下降（$P<0.05$））。研究不仅为开发兼具低脂高蛋白与益生菌功能的花生休闲食品提供了创新方法，也为功能性食品的工艺设计和技术应用奠定了理论和实践基础。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ BONKU R, YU J M. Health aspects of peanuts as an outcome

of its chemical composition[J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(1): 21−30.
[2] XU Yi, WU Xiahui, LI Yan, et al. Probiotics and the role of dietary substrates in maintaining the gut health: Use of live microbes and their products for anticancer effects against colorectal cancer[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2024, 34(10): 1933−1946.
[3] MILNER E, STEVENS B, AN M, et al. Utilizing probiotics for the prevention and treatment of gastrointestinal diseases[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 689958.
[4] WANG Xinzhou, ZHANG Peng, ZHANG Xin. Probiotics regulate gut microbiota: An effective method to improve immunity[J]. Molecules, 2021, 26(19): 6076.
[5] TRIPATHI M K, GIRI S K. Probiotic functional foods: Survival of probiotics during processing and storage[J]. Journal of Functional Foods, 2014, 9: 225−241.
[6] AHMAD RAUS R, WAN NAWAWI W M F, NASARUDDIN R R. Alginate and alginate composites for biomedical applications[J]. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 2021, 16(3): 280−306.
[7] 郭雨宁, 黄文灿, 毛相朝. pH 值响应性羧甲基琼脂糖-聚多巴胺水凝胶制备及缓释性能[J]. 食品科学, 2022, 43(10): 59−65. [GUO Yuning, HUANG Wencan, MAO Xiangzhao. Preparation and release properties of pH responsive carboxymethyl agarose-polydopamine hydrogel[J]. Food Science, 2022, 43(10): 59−65.]
[8] VORWALD C E, GONZALEZ-FERNANDEZ T, JOSHEE S, et al. Tunable fibrin-alginate interpenetrating network hydrogels to support cell spreading and network formation[J]. Acta Biomaterialia, 2020, 108: 142−152.
[9] LEE K Y, MOONEY D J. Alginate: Properties and biomedical applications[J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37(1): 106−126.
[10] HU Chuhuan, LU Wei, MATA A, et al. Ions-induced gelation of alginate: Mechanisms and applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 177: 578−588.
[11] NEZAMDOOST-SANI N, KHALEDABAD M A, AMIRI S, et al. Alginate and derivatives hydrogels in encapsulation of probiotic bacteria: An updated review[J]. Food Bioscience, 2023, 52: 102433.
[12] 朱荻, 陈莎男, 梅晓宏, 等. 提高益生菌耐加工贮藏稳定性和体内存活率的递送系统研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 1−13. [ZHU Di, CHEN Shanan, MEI Xiaohong, et al. Advances in the delivery systems for improving the processing stability, storage stability and *in vivo* survival rate of probiotics[J]. Food Science, 2023, 44(21): 1−13.]
[13] MATHEWS S. Microencapsulation of probiotics by calcium alginate and gelatin and evaluation of its survival in simulated human gastro-intestinal condition[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2017, 6(4): 2080−2087.
[14] ZOU Zuhao, ZHANG Bijun, NIE Xiaoqin, et al. A sodium alginate-based sustained-release IPN hydrogel and its applications[J]. RSC Advances, 2020, 10(65): 39722−39730.
[15] EGBEYEMI O I, HATEM W A, KOBER U A, et al. Transforming the stability, encapsulation, and sustained release properties of calcium alginate beads through gel-confined coacervation[J]. Langmuir, 2024, 40(23): 11947−11958.
[16] WANG Yihui, SUN Yujing, LI Man, et al. The formation of a protein corona and the interaction with *α*-amylase by chitin nanowhiskers in simulated saliva fluid[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105615.
[17] WANG Yihui, ZHOU Liyang, SUN Yujing, et al. Formation of protein corona on interaction of pepsin with chitin nanowhiskers in simulated gastric fluid[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132393.
[18] WANG Yihui, SUN Yujing, YANG Jie, et al. Interactions of surface-functionalized starch nanoparticles with pepsin and trypsin in simulated gastrointestinal fluids[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(37): 10174−10183.
[19] 赵健鑫, 殷祥贞, 姜骁, 等. 不同花生品种烤仁加工特性分析[J]. 花生学报, 2024, 53(2): 91−97. [ZHAO Jianxin, YIN Xiangzhen, JIANG Xiao, et al. Processing characteristics of roasted kernel of different peanut varieties[J]. Journal of Peanut Science, 2024, 53(2): 91−97.]
[20] 尚佳硕, 周倩, 赵泽军, 等. 花生芽苗菜贮藏品质变化及货架期预测模型[J]. 包装工程, 2024, 45(23): 197−206. [SHANG Jiashuo, ZHOU Qian, ZHAO Zejun, et al. Storage quality change and shelf life prediction model of peanut sprouts[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(23): 197−206.]
[21] 赵赓九, 向飞, 徐绍文, 等. 不同花生品种水煮加工适宜性评价方法与指标[J]. 中国食品学报, 2024, 24(8): 422−434. [ZHAO Gengjiu, XIANG Fei, XU Shaowen, et al. Evaluation methods and indices of the suitability of different peanut varieties for boiling[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(8): 422−434.]
[22] WANG Kuiyou, NI Jialu, LI Hongliang, et al. Survivability of probiotics encapsulated in kelp nanocellulose/alginate microcapsules on microfluidic device[J]. Food Research International, 2022, 160: 111723.
[23] 王道滇, 马月星, 魏光强, 等. 海藻酸钠-乳铁蛋白复合益生菌微胶囊的制备及性能研究[J]. 中国奶牛, 2023(2): 43−51. [WANG Daodian, MA Yuexing, WEI Guangqiang, et al. Preparation and performance study of sodium alginate-lactoferrin composite probiotic microcapsules[J]. China Dairy Cattle, 2023(2): 43−51.]
[24] 周莉, 王晓瑞, 谭静, 等. 海藻酸钠-乳清蛋白复合益生菌微胶囊的构建及性能评价[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(4): 108−113. [ZHOU Li, WANG Xiaorui, TAN Jing, et al. Construction and performance evaluation of sodium alginate whey protein composite probiotics microcapsules[J]. China Food Additives, 2020, 31(4): 108−113.]
[25] ESSIFI K, BRAHMI M, BERRAAOUAN D, et al. Influence of sodium alginate concentration on microcapsules properties foreseeing the protection and controlled release of bioactive substances[J]. Journal of Chemistry, 2021, 2021(1): 5531479.
[26] MA Yunhao, SHEN Ruixi, WANG Yang, et al. Mechanical properties of myofibrillar protein-cellulose nanofibril composite gels: Role of protein concentration and network structure[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 166: 111311.
[27] YE Xinnan, WEI Lai, SUN Luyao, et al. Fabrication of food polysaccharide, protein, and polysaccharide-protein composite gels *via* calcium ion inducement: Gelation mechanisms, conditional factors, and applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279: 135397.
[28] SHI Xiaolei, DEAN Lisa o, DAVIS J P, et al. The effects of different dry roast parameters on peanut quality using an industrial belt-type roaster simulator[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 974−979.
[29] MARIN S, DEISY A D, ELIANE C. Probiotic functional yogurt: Challenges and opportunities[J]. Food Science and Food Safety, 2023, 10(1): 6.
[30] ZHANG Ying, ZHU Weichao, JIN Yuanbao, et al. Effect of boiling and roasting treatments on the nutrients, lipid quality, and flavor of peanuts[J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12(11): 9314−9324.