

南瓜籽蛋白-改性亚麻籽胶为壁材的南瓜籽油微胶囊制备及其稳定性评价

刘战霞, 吴洪斌

Preparation and Stability Evaluation of Pumpkin Seed Oil Microcapsules Using Pumpkin Seed Protein-Modified Flaxseed Gum as Wall Material

LIU Zhanxia and WU Hongbin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024090146>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

连续相变萃取南瓜籽油的工艺优化及其成分分析

Extract Process Optimization and Component Analysis of Pumpkin Seed Oil by Continuous Phase Transition Extraction

食品工业科技. 2024, 45(17): 163-173 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080184>

南瓜籽蛋白-卡拉胶乳液脂肪替代物对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

Effect of Fat Substitution in Pumpkin Seed Protein-Carrageenan Emulsion on Myofibrillar Protein Gel Properties

食品工业科技. 2024, 45(16): 138-145 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010266>

沙棘籽油微胶囊的制备及氧化稳定性评价

Preparation and Oxidation Stability of Sea Buckthorn Seed Oil Microcapsules

食品工业科技. 2020, 41(20): 169-176 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.20.027>

南瓜籽多糖的分离纯化及其体外降血糖活性研究

Isolation, Purification, and *in Vitro* Hypoglycemic Activity of Pumpkin Seed Polysaccharides

食品工业科技. 2025, 46(9): 352-362 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050172>

沙棘果油微胶囊化制备工艺的优化及其表征

Optimization and Characterization of Microencapsulation Technology for Seabuckthorn Fruit Oil

食品工业科技. 2020, 41(7): 173-177,184 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.029>

米糠蛋白-亚麻籽油乳液体系构建及其稳定性研究

Construction and Stability of Rice Bran Protein-Flaxseed Oil Emulsion System

食品工业科技. 2022, 43(15): 234-243 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110161>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘战霞, 吴洪斌. 南瓜籽蛋白-改性亚麻籽胶为壁材的南瓜籽油微胶囊制备及其稳定性评价 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 173–180. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090146

LIU Zhanxia, WU Hongbin. Preparation and Stability Evaluation of Pumpkin Seed Oil Microcapsules Using Pumpkin Seed Protein-Modified Flaxseed Gum as Wall Material[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 173–180. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090146

· 研究与探讨 ·

南瓜籽蛋白-改性亚麻籽胶为壁材的南瓜籽油微胶囊制备及其稳定性评价

刘战霞, 吴洪斌*

(新疆农垦科学院农产品加工研究所, 新疆石河子 832000)

摘要:以南瓜籽油 (PSO) 为芯材, 以南瓜籽蛋白纳米颗粒 (PSP)、改性亚麻籽胶 (MFG) 为微胶囊的壁材, 通过不同比例的组合复配, 采用冷冻干燥法制备南瓜籽油微胶囊, 探究不同 PSP/MFG 质量比对南瓜籽油微胶囊的界面张力、储存稳定性、稳定性、包埋率、微观结构以及体外消化释放特性的影响。结果显示, 与对照组 (P4) 相比, 不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的微胶囊稳定性均有明显的改变。其中 PSP/MFG 质量比为 4:5 时 (P4F5), 微胶囊尺寸最小 (199.06 μm), 界面张力最低 (22.03 mN/m), 三相接触角为 89.665°, 显示出最佳的表面润湿性和稳定性; PSP/MFG 壁材可有效包埋 PSO, 包埋率达到为 96.5%, 贮藏 30 d 后包埋率最高, 为 88.8%; TSI 值为 0.35, 稳定性最好。PSP/MFG 微胶囊的体外消化释放特性表明 PSP/MFG 稳定的南瓜籽油微胶囊具有控制南瓜籽油释放的功能, 表现为在模拟胃液中释放率较低, 而在模拟肠液中释放率明显增加从而南瓜籽油有效释放。通过评价微胶囊壁材的性能, 表明南瓜籽蛋白-改性亚麻籽胶复合壁材可作为良好的南瓜籽油的稳态输送载体并提高其生物可及性。同时, 为南瓜籽油的深加工及在食品及保健品领域的综合利用提供理论参考。

关键词:微胶囊, 南瓜籽蛋白, 南瓜籽油, 改性亚麻籽胶, 稳定性

中图分类号: TS224.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)17-0173-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090146



本文网刊:

Preparation and Stability Evaluation of Pumpkin Seed Oil Microcapsules Using Pumpkin Seed Protein-Modified Flaxseed Gum as Wall Material

LIU Zhanxia, WU Hongbin*

(Institute of Agricultural Products Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract: Using pumpkin seed oil (PSO) as the core material, pumpkin seed protein nanoparticles (PSP) and modified flaxseed gum (MFG) as the wall materials of microcapsules, pumpkin seed oil microcapsules were prepared by freeze-drying method through different combinations and proportions. The effects of different PSP/MFG mass ratios on the interfacial tension, storage stability, stability, encapsulation efficiency, microstructure, and *in vitro* digestion release characteristics of pumpkin seed oil microcapsules were investigated. The results showed that compared with the control group (P4), the stability of pumpkin seed oil microcapsules with different PSP/MFG mass ratios was significantly changed. Among them, when the PSP/MFG mass ratio was 4:5 (P4F5), the microcapsule size was the smallest (199.06 μm), the interfacial tension was the lowest (22.03 mN/m), and the three-phase contact angle was 89.665°, showing the best surface

收稿日期: 2024-09-12

基金项目: 新疆生产建设兵团第四师可克达拉市科技计划 (2025GG014); 新疆生产建设兵团农业科技创新工程专项 (NCG202301); 新疆生产建设兵团英才青年项目。

作者简介: 刘战霞 (1992-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工及副产物综合利用, E-mail: 806796383@qq.com。

* 通信作者: 吴洪斌 (1980-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬/油料精深加工及副产物综合利用, E-mail: wuhongbin1980@126.com。

wettability and stability. PSP/MFG wall materials could effectively encapsulate PSO, with an encapsulation efficiency of 96.5%, and the highest encapsulation efficiency after storage for 30 days was 88.8%. The TSI value was 0.35, indicating the best stability. The *in vitro* digestion release characteristics of PSP/FG microcapsules showed that the stable pumpkin seed oil microcapsules had the function of controlling the release of pumpkin seed oil, which was characterized by a lower release rate in simulated gastric juice and a significant increase in release rate in simulated intestinal juice, thus effectively releasing pumpkin seed oil. By evaluating the performance of the microcapsule wall materials, it was indicated that the pumpkin seed protein-modified flaxseed gum composite wall material could be used as a good nano-level stable delivery carrier for pumpkin seed oil and improve its bioavailability. At the same time, it provided a theoretical reference for the deep processing of pumpkin seed oil and its comprehensive utilization in the fields of food and health products.

Key words: microcapsule; pumpkin seed protein; pumpkin seed oil; modified flax seed gum; stability

南瓜籽油(PSO)是以南瓜籽果仁为原料提取的可食用油料物质,营养价值高^[1-3]。南瓜籽油中不饱和脂肪酸占 90%,其中油酸含量高达 63%,亚油酸含量 20.2%、亚麻酸含量 6.8%^[4]。南瓜籽油(PSO)还含有多种天然的抗氧化剂成分,如 V_E 、类胡萝卜素、植物甾醇等,可作为食品抗氧化剂,具有降低血脂、改善前列腺疾病、消炎等功能而受到食品工业、医药保健领域的广泛关注^[5-6]。然而,较高的不饱和度也使得南瓜籽油容易氧化,同时因为南瓜籽油具有水溶性差、口服利用率低等缺点,从而限制了其作为功能性油脂在食品加工、药物制备和活性膜制备过程中的应用^[7-8]。通过微胶囊、纳米颗粒、乳液等运载体系包埋可以显著改善其稳定性及水溶性,可有效控制南瓜籽油在胃肠道特定环境下缓慢且持续释放,进而提高南瓜籽油的生物利用度^[9-10]。

亚麻籽胶(Flaxseed gum, FG)是一种酸性杂多糖,其单糖组成主要为葡萄糖、木糖、半乳糖、鼠李糖、阿拉伯糖和岩藻糖,具有降血糖、降胆固醇和调节肠道菌群等生理功能,常作为食品配料添加到乳制品、肉制品和果冻制品等食品中来改善食品品质^[11-12]。研究发现,添加改性亚麻籽胶(Modified flax seed glue, MFG)能够有效地改善蛋白质的乳化性能、溶解度、抗菌和抗氧化作用^[13-14]。南瓜籽中蛋白含量为 30% 左右,南瓜籽蛋白含有人体生命活动所必需的氨基酸,必需氨基酸比例与人体所需氨基酸组成模式相似,具有较好的开发利用前景^[15]。蛋白质与多糖的偶联已被认为是一种很有前景的化学修饰蛋白质方法,多糖与蛋白质结合可以显著增强其特定的物理化学和功能特性^[14,16]。亚麻籽胶与蛋白的复合,使其具有一定的乳化稳定性,代替部分乳化剂应用于食品加工中^[17]。因此,可以尝试利用亚麻籽胶的强负电荷、良好的亲水性和分散性,与南瓜籽蛋白(Pumpkin seed protein, PSP)制备复合壁材以稳定南瓜籽油。目前为止,采用不同 PSP 和 MFG 质量比制备 PSP/MFG 复合壁材的南瓜籽油微胶囊的报道还相对较少。

基于此,本研究通过改变 PSP 和 MFG 的质量比来制备 PSP/MFG 微胶囊,并用其稳定南瓜籽油。研究不同的 PSP/MFG 复合壁材对南瓜籽油微胶囊

物理性能、稳定性以及体外消化释放特性的影响。本研究为开发新型具有乳化性能及乳化稳定性的食品级南瓜籽油微胶囊提供借鉴,提高南瓜籽油的生物利用度,以期为我国南瓜籽加工产业的发展提供相应的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

南瓜籽蛋白粉(纯度 90%) 陕西宇洲生物科技有限公司;南瓜籽 采自第十师北屯市新疆海川三新食品有限公司有机南瓜基地‘塞外明珠’品种籽用南瓜,挑选成熟度良好、个体大小均匀的南瓜籽置于 4 ℃ 冰箱备用;南瓜籽油 采用低温压榨方法制备^[18];南瓜籽烘烤(120 ℃、20 min)破碎后,置于微波炉内,微波真空膨化处理 5 min,低温压榨(温度 ≤ 60 ℃),收集毛油,在 6000 r/min 下离心 10 min 去除沉淀,得南瓜籽油,置于 4 ℃ 冰箱备用;氢氧化钠、盐酸、无水乙醇、氯化钠、柠檬酸、磷酸二氢钾溶液 分析纯,新疆宏道仪器有限公司;壳聚糖 阿拉丁试剂有限公司;亚麻籽胶 新疆利世德生物科技有限公司;胰蛋白酶(1000 U/g)、谷氨酰胺转氨酶(蛋白 $\geq 80\%$,酶活 ≥ 1.5 U/mg protein) 食品级,南宁庞博生物工程有限公司;尼罗红染料 西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;异硫氰酸荧光素酯 FITC 北京索莱宝科技有限公司;非酯化脂肪酸试剂盒 苏州科铭生物技术有限公司;甲醇、正己烷、二氯甲烷等 色谱纯,国药集团化学试剂有限公司。

CIENTZ-30ND 冷冻干燥机、JY92-IIIne 超声波细胞粉碎机、SINDINSDC-100 光学接触角测量装置 宁波新芝生物科技股份有限公司;DF-101S 磁力搅拌器 上海力辰邦西仪器科技有限公司;PHS-3Ce 酸度计 上海仪电科学仪器有限公司;Winner 2005e 激光粒度分析仪 济南微纳颗粒仪器股份有限公司;JS94H 型 Zeta 电位仪 上海中晨数字技术设备有限公司;AXRP 激光共聚焦显微镜 日本 Nikon 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 南瓜籽蛋白纳米颗粒(PSP)的制备 参照文献方法并稍作修改^[19]。向南瓜籽蛋白粉中加入蒸馏水,配制成浓度为 4 g/100 mL 的南瓜籽蛋白溶液,并

用浓度为 1 mol/L 的氢氧化钠溶液将 pH 调至 7; 向制得的南瓜籽蛋白溶液中加入 1% 胰蛋白酶, 搅拌均匀, 在温度为 35 ℃ 的条件下反应 0.5 h, 得第一酶解液; 向第一酶解液中加入谷氨酰胺转氨酶, 搅拌均匀, 在温度为 40 ℃ 的条件下反应 1.5 h, 得第二酶解液; 其中, 谷氨酰胺转氨酶的加入量为所述南瓜籽蛋白粉的质量的 0.4%; 将制得的第二酶解液置于沸水中处理 10 min, 冷却至室温后, 再冷冻干燥(温度为 -40 ℃, 干燥时间为 3 d), 得到南瓜籽蛋白纳米颗粒, 粒径大小为 300~400 μm。

1.2.2 亚麻籽胶(FG)的改性处理 参照禹晓等^[12]的方法略作修改。向亚麻籽胶中加入蒸馏水, 配制成浓度为 5 g/100 mL 的亚麻籽胶溶液, 亚麻籽胶溶液进行等离子体处理, 放电电压为 6 kV, 放电功率为 600 W, 频率为 30 kHz, 处理时间为 60 s; 将辛烯基琥珀酸酐溶于 70 ℃ 的无水乙醇中, 再加入柠檬酸, 搅拌均匀, 得混合液; 其中, 辛烯基琥珀酸酐、无水乙醇、柠檬酸的用量比为 20 mg:800 mL:1 mg; 在搅拌条件下, 将制得的亚麻籽胶溶液缓慢加入 70 ℃ 的混合液中, 并在温度为 30 ℃ 的条件下反应 2 h, 得反应液; 其中, 制得的亚麻籽胶溶液与所述混合液的体积比为 1:25; 将反应液进行冷冻干燥, 得改性后的亚麻籽胶 MFG, 粒径不大于 5 μm。

1.2.3 南瓜籽油微胶囊的制备 将 4.0 g 南瓜籽蛋白纳米颗粒加入 20 mL 蒸馏水中, 在温度为 70 ℃ 的条件下, 搅拌溶解, 得第一溶液; 将亚麻籽胶(3~7 g)和壳聚糖(1 g)加入 50 mL 蒸馏水中, 在温度为 70 ℃ 的条件下, 搅拌溶解, 得第二溶液; 将南瓜籽油加入第一溶液中, 搅拌均匀, 经过高速剪切(8000 r/min, 2 min)和超声细胞破碎(360 W, 开 3 s 停 3 s)处理 2 min 后, 作为油相和内水相(W1)。将 W1 加入第二溶液中, 经过高速剪切(同上)处理后, 作为外水相(W2)。

放于-80 ℃ 冰箱中预冻 12 h, 放入真空冷冻干燥机中干燥 48 h, 真空度控制在 15 Pa 左右, 冻干至水分质量分数低于 5%, 得到南瓜籽油微胶囊。以未添加改性亚麻籽胶的体系作为对照, 记为 P4。将 PSP/MFG 微胶囊质量比为 4:3、4:4、4:5、4:6 和 4:7 的 PSP/MFG 微胶囊分别命名为 P4F3、P4F4、P4F5、P4F6 和 P4F7, 具体制备配方如表 1 所示。

1.2.4 粒径、多分散性指数和 ζ-电势的测定 将制备的南瓜籽油微胶囊在去离子水中稀释 100 倍, 之后逐滴添加到预装超纯水的样品池中。然后, 在 25 ℃ 下, 使用 Winner2005e 激光粒度分析仪测定粒径、多分散性指数(PDI), 使用 Zeta 电位分析仪测定南瓜籽油微胶囊的 Zeta 电位。

1.2.5 表面疏水性测定 参考雷丹丹等^[20]方法进行检测。采用 ANS 荧光探针法, 用 PBS 溶液(pH 为 7.4, 10.0 mmol/L)将待测样品稀释至 0.01~0.05 mg/mL, 取 4.00 mL 待测样品溶液与 20.0 μL ANS

表 1 南瓜籽蛋白-改性亚麻籽胶为壁材的南瓜籽油微胶囊制备配方

Table 1 Preparation formula of pumpkin seed oil microcapsules with pumpkin seed protein-modified flaxseed gum as wall material

组别	质量(g)			
	PSP	MFG	壳聚糖	南瓜籽油(PSO)
1(P4F3)	4	3	1	15
2(P4F4)	4	4	1	15
3(P4F5)	4	5	1	15
4(P4F6)	4	6	1	15
5(P4F7)	4	7	1	15
对照(P4)	4	0	1	15

(8.0 mmol/L)溶液混合均匀, 25 ℃ 反应 2 min 后测定其荧光强度, 设定条件: 激发波长 390 nm, 发射波长 400~700 nm, 表面疏水性以荧光强度和样品浓度的线性回归斜率表示。

1.2.6 接触角测定 参照王然^[21]的方法进行检测。利用接触角测定仪测定南瓜籽油微胶囊样品的界面接触角。利用压片机(设置压强 35 MPa, 压制时间 3 min)将冻干的南瓜籽油微胶囊样品压成平整、致密的圆片(直径 2 cm, 厚度 2 mm), 然后采用液滴法测定微胶囊样品的水相静态接触角。由仪器控制带有毛细针头的微量进样器, 将 2 μL 超纯水滴在样品圆片表面, 待水滴在淀粉圆片表面平衡后进行拍摄, 通过仪器自带软件分析接触角。每个样品至少在圆片表面取 5 个点进行检测, 测定结果取 3 个数值的平均值。

1.2.7 界面张力测定 根据文献^[16]的方法确定南瓜籽油微胶囊的界面张力, 并进行了一些修改。20 μL 南瓜籽油微胶囊加入注射器中, 在 25 ℃ 条件下测定动态界面张力。每个样品的界面张力测定 3 次。

1.2.8 包埋率的测定 将不同比例新鲜制备的微胶囊样品分别密封在 25 ℃ 的恒温箱保存 30 d。测定不同储存时间点下各组南瓜籽油微胶囊的包埋率。包埋率采用公式(1)计算。

$$\text{包埋率}(\%) = \left(1 - \frac{\text{表面油含量}}{\text{载油量}}\right) \times 100$$

式 (1)

1.2.9 微胶囊的稳定性动力学指数(TSI)分析 取约 20 mL 新鲜制备的微胶囊于 Turbiscan 稳定性分析仪专用圆柱形玻璃瓶中, 保持样品瓶外壁洁净, 内壁无样品区域无残留, 液面平整。在设定温度(55 ℃)下每隔 30 min 对样品扫描一次, 共扫描 6 h。利用 Turbisoft 软件计算微胶囊随时间变化的 TSI 值。

1.2.10 体外模拟消化释放 胃肠道模拟消化液的配制参考裴慧敏等^[22]的方法。模拟胃液(SGF)的配制: 称取 2 g NaCl 溶解于 900 mL 蒸馏水中, 用 HCl 调节 pH 至 1.2 后加 3.2 g 胃蛋白酶后定容至

1000 mL。模拟肠液(SIF):称取 6.8 g 磷酸二氢钾溶解于 800 mL 蒸馏水中,用 0.1 mol/L NaOH 调节 pH 至 6.8,用适量蒸馏水将 10 g 胰蛋白酶溶解,与磷酸二氢钾溶液混合后定容至 1000 mL,在 4 ℃ 下保存,防止酶失活。

体外模拟消化实验:5 g 南瓜籽油微胶囊加入到 50 mL 模拟胃液中,37 ℃ 水浴恒温振荡 2 h。pH 调节至 6.8 使胃蛋白酶失活,随后添加 50 mL 模拟肠液,37 ℃ 水浴恒温振荡 2 h。微胶囊释放率的测定:间隔 0.5 h 取混合均匀的消化液,用 1 mol/L NaOH 调节 pH 至 6.8 使胃蛋白酶失活,随后添加 50 mL 肠液,在同一条件下模拟肠消化 4 h。每隔 0.5 h 取混合均匀消化液 10 mL,将酶灭活,消化后的样品转入分液漏斗中,加入 25 mL 石油醚,混合萃取,萃取过程重复 3 次,合并有机相,旋蒸除去石油醚,即可得到消化过程中释放的南瓜籽油含量,释放率按式(2)计算。

$$\text{释放率}(\%) = \frac{\text{消化释放的南瓜籽油释放量}}{\text{微胶囊总南瓜籽油释放量}} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

1.2.11 激光共聚焦显微镜观察 采用激光共聚焦扫描显微镜观察南瓜籽油微胶囊的液滴形态和类型。将南瓜籽油微胶囊用 FITC(0.05 mg/mL)和尼罗红(0.05 mg/mL)对颗粒和油进行染色,涡旋 10 min,静置 40 min。使用激光共聚焦显微镜观察,FITC 激发光为 488 nm,尼罗红激发光为 633 nm。

1.3 数据处理

所有实验至少进行 3 次,数据采用 SPSS 22.0 软件进行处理。采用单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 多重范围检验来分析实验数据和显著性差异($P < 0.05$)。使用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 PSP/FG 微胶囊的粒径、多分散性指数和 ζ -电位

图 1A 显示了南瓜籽油微胶囊和未添加改性亚麻籽胶南瓜籽油微胶囊的平均粒径,P4F5(PSP/MFG 微胶囊质量比为 4:5)的平均粒径最小(241.82 μm)。不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的 PDI 均低于 0.25,说明纳米颗粒分布均匀^[22]。图 1B 为不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的液滴尺寸分布,可以看出所有纳米颗粒均呈单峰分布。P4 的液滴尺寸约为 768.319 μm ,不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的液滴尺寸明显小于 P4 的液滴尺寸,MFG 改变了 PSP 的表面和形状。PSP 与 MFG 的结合,形成了 PSP/MFG 复合壁材更紧凑的结构,多糖与蛋白进行复合形成杂化颗粒,颗粒能够不可逆地吸附在油-水表面形成坚固有序的界面结构,多糖与蛋白复合颗粒之间、乳化油滴之间以及乳化油滴和颗粒之间的相互作用能够显著稳定体系^[23]。不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊,当 MFG 大于

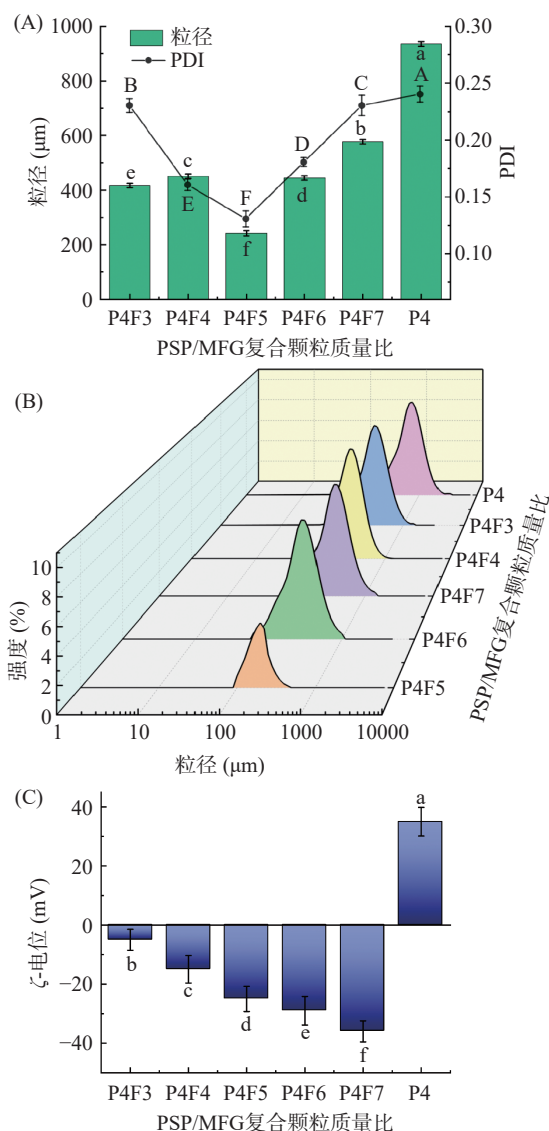


图1 不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的平均粒径和 PDI(A)、液滴尺寸分布(B)、 ζ -电位(C)

Fig.1 Average particle size and PDI (A), droplet size distribution (B), and ζ -potential (C) of pumpkin seed oil microcapsules with different PSP/MFG mass ratios

注:不同字母表示差异显著($P < 0.05$),图 2~图 3 同。

PSP 时(P4F5、P4F6、P4F7),PSP/MFG 的液滴尺寸随 PSP 的减少呈现增大的趋势,当 PSP 小于 MFG 时(P4F3),PSP/MFG 的液滴尺寸随 PSP 的减少呈现减小的趋势。P4F5 的液滴尺寸最小(199.06 μm),其次是 P4F4、P4F6、P4F3、P4F7 分别为 281.17、315.48、333.33、353.98 μm 。PSP/MFG 质量比为 4:5 时,PSP/MFG 颗粒形成最佳的结合覆盖在液滴表面,并在液滴周围形成稳定的结构,有效防止液滴聚集,进一步增强稳定性。不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的 ζ -电位如图 1C 所示。P4 悬浮液显示正电荷,不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊呈现不同电位的负电荷,这表明 PSP 和 MFG 形成了较为稳定的 PSP/MFG 核壳复合壁材。随着 MFG 比例的增加, ζ -电位逐渐从 -5 mV 减小到 -36 mV。PSP/MFG 复合壁材的 ζ -电位绝对值增加,可以提供

颗粒间足够的静电斥力,防止其聚集。因此,最佳的 PSP/MFG 复合壁材质量比为 4:5。

2.2 PSP/FG 微胶囊表面疏水性

PSP 具有最高的表面疏水性,这是由于 PSP 的分子组成中超过 50% 的氨基酸残基为疏水性残基^[24](包括约 20% 的亮氨酸残基、约 10% 的脯氨酸残基、约 10% 的丙氨酸残基等)。相比之下,FG 的表面疏水性较低,这与其分子结构中亲水性基团的高含量有关。然而,当 PSP 与 FG 以不同质量比混合形成微胶囊时,微胶囊的表面疏水性表现出与 PSP 单独存在时不同的特性。如图 2 所示,随着 PSP 在微胶囊壁材中比例的增加,微胶囊的表面疏水性逐渐增强。当 PSP/MFG 质量比达到一定值时,微胶囊表面疏水性达到最大值,这表明 PSP 在微胶囊表面的分布达到最优状态。此外,微胶囊表面疏水性的增强有助于提高其在水性介质中的分散稳定性,从而在食品加工和储存过程中保持其物理和化学稳定性。这种特性对于开发新型功能性食品添加剂具有重要意义。综上表面疏水性结果表明 FG 对 PSP 的表面亲疏水性具有一定调节作用。

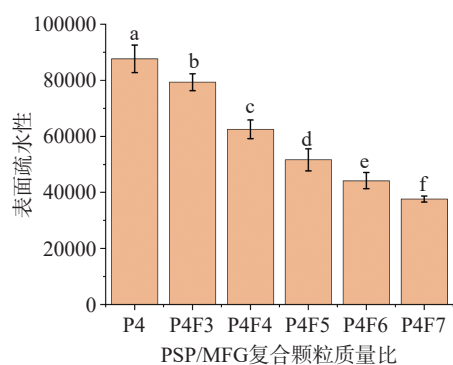


图 2 不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的表面疏水性

Fig.2 Surface hydrophobicity of pumpkin seed oil microcapsules with different PSP/MFG mass ratios

2.3 PSP/FG 微胶囊润湿性分析

颗粒的表面润湿性是影响颗粒稳定微胶囊能力的一个重要指标,不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的三相接触角表现了其表面润湿性,如图 3 所示。据报道,三相接触角 $\theta > 90^\circ$ 的颗粒被称为亲脂性颗粒,接触角 $\theta \leq 90^\circ$ 的颗粒则被称为亲水性颗粒,三相接触角接近 90° 的颗粒具有稳定水油界面的最佳性能,并能稳定地吸附在水油界面上,形成稳定的微胶囊^[14]。如图 3 所示,不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊三相接触角差异较大。P4 的三相接触角为 115.766° ,表明 PSP 具有较强的疏水性,不适合稳定 O/W 乳剂,这是由于在 PSP 中存在大量的疏水氨基酸残基。相比之下,不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的三相接触角不同程度地降低,这是由于 MFG 中存在大量的亲水性基团。因此,通过调整 PSP/MFG 之间的不同比例,可以改变南瓜籽油

微胶囊的表面润湿性。南瓜籽油微胶囊(P4F5)的三相接触角为 89.665° ,表明 PSP/MFG 比为 4:5 时,具有稳定水油界面的最佳性能。

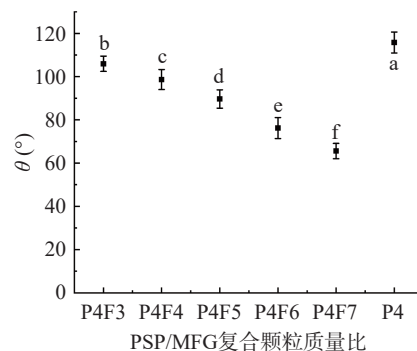


图 3 不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的接触角
Fig.3 Contact angles of pumpkin seed oil microcapsules with different PSP/MFG mass ratios

2.4 PSP/FG 微胶囊的界面张力

界面张力作为表面性能的指标,对乳剂的特性起着至关重要的作用,界面张力值越低,表明其表面活性越高^[25]。图 4 显示了不同微胶囊的界面张力随时间的变化。如图所示,随着时间的推移,PSP/MFG 复合颗粒稳定的微胶囊的界面张力逐渐降低直至逐渐稳定。从图中可以看出,添加 MFG 使不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的界面张力明显下降,随着 MFG 增加,界面张力下降的幅度变小,当 MFG 大于 PSP 时(P4F5、P4F6、P4F7),PSP/MFG 的界面张力随着 PSP 的减少呈现增大的趋势,当 PSP 小于 MFG 时(P4F3),PSP/MFG 的液滴尺寸随 PSP 的减少呈现减小的趋势。当 MFG 添加量达到 5% 时(P4F5),其表面活性最高,吸附平衡时的界面张力最低 (22.03 mN/m)。综上所述,在适当的 PSP/MFG 质量比下,可以形成具有低界面张力值的 PSP/MFG 复合壁材。

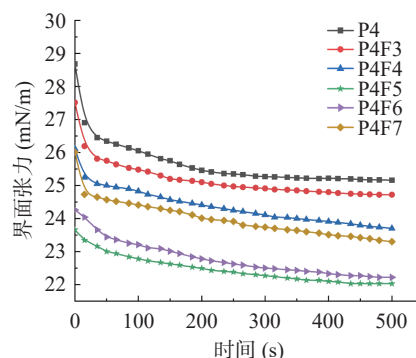


图 4 不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的界面张力
Fig.4 Interfacial tension of pumpkin seed oil microcapsules with different PSP/MFG mass ratios

2.5 PSP/FG 微胶囊的包埋率

PSP/MFG 复合壁材稳定的微胶囊中南瓜籽油的包埋率如图 5 所示。当贮藏 0 d 时,P4 南瓜籽油微胶囊的包埋率为 76.5%,这表明单一 PSP 作为乳

化剂对南瓜籽油也有一定的保护作用。不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的包埋率均不相同,其中 P4F5(PSP/MFG 微胶囊质量比为 4:5)的包埋率最高,达到为 96.5%。其次是 P4F6、P4F7、P4F4、P4F3 分别是 92.5%、91.9%、90.5%、89.5%。可以看出,贮藏 30 d 后,不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的包埋率均呈现下降的趋势,P4 乳液中南瓜籽油贮藏 30 d 后的包埋率下降到 60.6%,而不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的包埋率均超过 78%,均高于 P4 的包埋率。当 MFG>PSP 时(P4F5、P4F6、P4F7),随着 MFG 的增多,包埋率呈现下降的趋势,当 MFG≤PSP 时(P4F3、P4F4),随着 MFG 的增多,包埋率呈现上升的趋势。PSP/MFG 比例为 4:5 时,贮藏 30 d 后包埋率最高(88.8%)。这可能是因为 PSP/MFG 比例为 4:5 时使得更多的 MFG 颗粒覆盖在液滴表面,并在液滴周围形成更为致密的三维网络结构,这些特性有利于防止氧气和一些自然光与内部南瓜籽油接触^[26],增加了南瓜籽油的保留率。与 Babazadeh 等^[27]使用玉米醇溶蛋白和羧甲基纤维素(CMC)复合颗粒包裹紫杉醇的研究结果一致,发现紫杉醇的包埋率与玉米醇溶蛋白/CMC 的质量比有关。

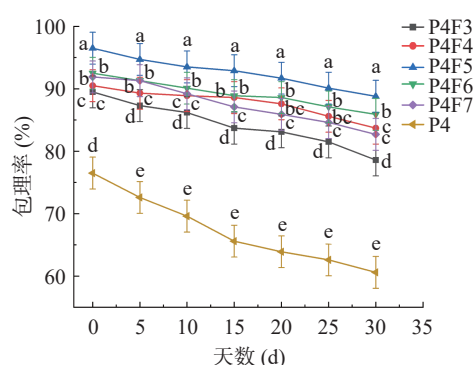


图5 贮藏时间对不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊包埋率的影响

Fig.5 Effect of storage time on capsule rate of pumpkin seed oil microcapsules with different PSP/MFG mass ratios

注:不同字母表示相同时间不同样品间差异显著($P<0.05$),图6~图7同。

2.6 PSP/FG 微胶囊的稳定性

TSI 是用于估计微胶囊乳化体系物理稳定性的重要参数,可方便比较出不同样品间的稳定性差异,曲线的斜率越小表示体系越稳定^[28]。不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊 TSI 随时间的变化如图6所示,TSI 在 0~5000 s 左右时,不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的 TSI 值变化较大,之后变化较平缓。当 MFG>PSP 时(P4F5、P4F6、P4F7),PSP/MFG 的 TSI 随着 PSP 的减少呈现降低的趋势,当 PSP≤MFG 时(P4F3、P4F4),PSP/MFG 的液滴尺寸随 PSP 的减少呈现上升的趋势。P4F5

的微胶囊 TSI 值最小为 0.35(斜率最小),即微胶囊最稳定,TSI 数据表明南瓜籽油微胶囊的稳定性顺序为:P4F5、P4F6、P4F7、P4F4、P4F3。葛艳争等^[29]研究了超声预处理对花生分离蛋白微凝胶颗粒稳定性的影响,发现稳定性动力学指数与花生分离蛋白微凝胶颗粒无法完全包裹所有液滴,导致液滴间形成桥接絮凝状的网络结构相关。因此,PSP/MFG 质量比为 4:5 时的南瓜籽油微胶囊稳定性最好。

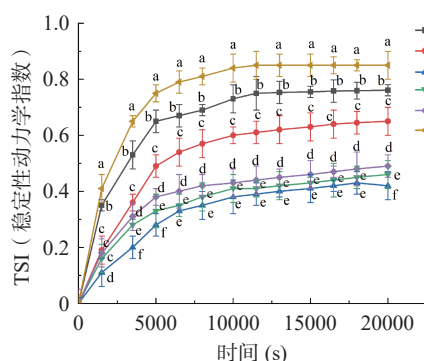


图6 不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊 TSI 随时间的变化曲线

Fig.6 TSI curves of pumpkin seed oil microcapsules over time for different PSP/MFG mass ratios

2.7 PSP/FG 微胶囊的体外消化释放特性

为了让南瓜籽油在食品体系内稳定存在且能够被人体吸收,需要构建的微胶囊运载体既能够在胃液环境下维持完整的结构以保护南瓜籽油,又能够在肠液环境下有效地释放出目标物南瓜籽油,提高其生物利用率^[30-31]。由图7可见,与 P4 相比,不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊在胃液、肠液环境下差异显著($P<0.05$)。P4F5 中南瓜籽油的释放率最低,为 16.90%,其次是 P4F6、P4F4、P4F3、P4F7 分别是 19.1%、19.5%、20.5%、21.5%。经胃消化 2 h,不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊释放率差异不显著($P>0.05$),表明 PSP/MFG 稳定的南瓜籽油微胶囊具有较好的耐酸性,因此在模拟胃液中南瓜籽油的释放量较低^[32]。转入肠液消化 1.5 h 后,南瓜籽油微胶

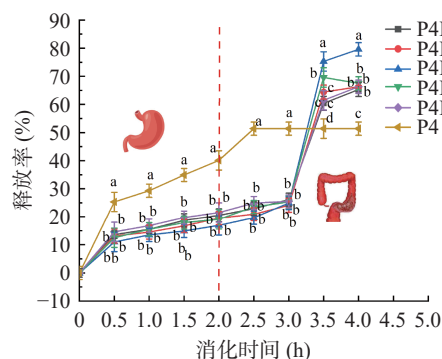


图7 不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊模拟消化过程中累积释放率

Fig.7 Cumulative release rate of pumpkin seed oil microcapsules with different PSP/MFG mass ratios during simulated digestion process

囊被快速水解,消化 3.5 h 后 P4F5 中南瓜籽油的释放率增加至 75.3%,其次是 P4F6、P4F4、P4F7、P4F3 分别为 69.6%、64.4%、61.5%、60.4%。表明 PSP/MFG 稳定的南瓜籽油微胶囊具有控制南瓜籽油释放的功能,表现为在模拟胃液中释放率较低,而在模拟肠液中释放率明显增加从而南瓜籽油有效释放^[33]。

2.8 PSP/FG 微胶囊的微观结构

为观察南瓜籽油微胶囊的微观结构和 PSP/MFG 在油水界面上的吸附行为,对最优条件下制备的南瓜籽油微胶囊(P4F5)在共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)下观察。PSP/MFG 和南瓜籽油分别用 FITC 和尼罗红标记为绿色和红色。如图 8 所示,南瓜籽油微胶囊表现出良好的分散性,PSP/MFG 稳定的乳液也表现出油滴尺寸不均匀的现象,乳液中存在大量直径小于 5 μm 油滴,同时,也存在许多直径超过 10 μm 油滴^[34]。然而 PSP/MFG 紧密地吸附在油滴表面,形成阻隔层,抑制油滴聚结,形成了 O/W 型乳状液,有良好的稳定性。Qin 等^[24]研究玉米醇溶蛋白/羧基化纤维素纳米晶体复合壁材稳定的 Pickering 乳液和姜婷婷等^[35]研究 β -乳球蛋白-多酚纳米颗粒稳定的百香果籽油 Pickering 乳液中也观察到了类似现象。

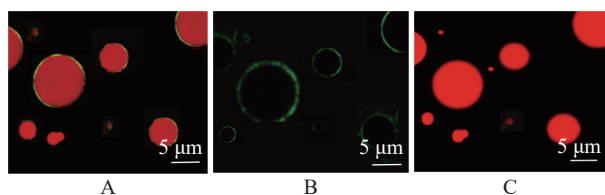


图 8 最优条件下制备的南瓜籽油微胶囊(P4F5)共聚焦显微镜图

Fig.8 Confocal microscope image of pumpkin seed oil microcapsules (P4F5) prepared under optimal conditions

注: A: 合并图像; B: FITC 蛋白染料发射图像; C: 尼罗红发射图像。

3 结论

本实验制备了不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊产品,对不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的界面张力、储存稳定性、稳定性、包埋率、微观结构以及体外消化释放特性进行比较研究。结果表明,与对照组(P4)相比,不同 PSP/MFG 质量比的南瓜籽油微胶囊的微胶囊稳定性均有明显的改变,其中 PSP/MFG 质量比为 4:5 时(P4F5),微胶囊尺寸最小(199.06 μm),界面张力最低(22.03 mN/m),三相接触角为 89.665°,TSI 值为 0.35,表明稳定性最好;PSP/MFG 壁材可有效包埋 PSO,包埋率达到为 96.5%,贮藏 30 d 后包埋率最高,为 88.8%。PSP/FG 微胶囊的体外消化释放特性表明 PSP/MFG 稳定的南瓜籽油微胶囊具有控制南瓜籽油释放的功能,表现为在模拟胃液中释放率较低,而在模拟肠液中释放率明显增加从而南瓜籽油有效释放。综上,通过评价微胶囊壁材的性能,表明南瓜籽蛋白-改性亚麻籽胶复

合壁材可作为良好的南瓜籽油的稳态输送载体并提高其有效释放率。以蛋白/多糖为壁材的微胶囊的形成可有效提高南瓜籽油微胶囊在稳定性并实现南瓜籽油的控制释放,其中以 PSP/MFG 质量比为 4:5 制备的微胶囊稳定性最强。本研究结果有望应用于基于 PSP/MFG 高稳定性南瓜籽油微胶囊的制备及工业化生产中。

© The Author(s) 2025. 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] HU Zicong, HU Chaofan, LI Yanpo, et al. Pumpkin seed oil: A comprehensive review of extraction methods, nutritional constituents and health benefits[J]. J Sci Food Agric, 2023, 104(2): 572–582.
- [2] 刘战霞, 贾文婷, 杨慧, 等. 南瓜子加工利用研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(3): 1–7. [LIU Zhanxia, JIA Wengting, YANG Hui, et al. Research progress of pumpkin seed processing and utilization[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(3): 1–7.]
- [3] BORRIELLO A, MASI P, CAVELLA S. Novel pumpkin seed oil-based oleogels: Development and physical characterization[J]. LWT, 2021, 152: 112165.
- [4] WANG H, CHEN K, CHENG J, et al. Ultrasound-assisted three phase partitioning for simultaneous extraction of oil, protein and polysaccharide from pumpkin seeds[J]. LWT, 2021, 151: 112200.
- [5] 于敏. 原料不同热处理方式对南瓜籽乳理化性质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [YU Min. Effects of different heat treatment methods on physicochemical properties of pumpkin seed milk[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
- [6] NABI N P, HUSSAM W K, RASHID A B, et al. Notable improvement of fuel properties of waste tire pyrolysis oil by blending a novel pumpkin seed oil-biodiesel[J]. Energy Reports, 2022, 8: 112–119.
- [7] 王大为, 任华华, 杨嘉丹, 等. 功能性油脂微胶囊的制备及其稳定性[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 264–269. [WANG Dawei, REN Huahua, YANG Jiadan, et al. Preparation and stability of functional lipid microcapsules[J]. Food Science, 2018, 39(6): 264–269.]
- [8] WU Y, WANG L, DING X, et al. Preparation of high internal phase emulsions based on pumpkin seed oil body and its physicochemical properties[J]. LWT, 2023, 189: 115533.
- [9] 刘战霞, 李斌斌, 赵月, 等. 核桃蛋白/肉苁蓉多糖稳定白藜芦醇 Pickering 乳液的制备及其稳定性[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 28–34. [LIU Zhanxia, LI Binbin, ZHAO Yue, et al. Preparation and stability of resveratrol-loaded Pickering emulsion stabilized by walnut protein/Cistanche deserticola polysaccharide composite nanoparticles[J]. Food Science, 2024, 45(23): 28–34.]
- [10] WANG Y, KRATZER R, MURKOVIC M, et al. Fabrication and characterization of a novel zein/pectin/pumpkin seed oil Pickering emulsion and the effects of myricetin on oxidation stability[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127386.
- [11] XIE Ruiqi, TONG Xiong, XIE Xian, et al. Flaxseed gum as new depressant in the separation of apatite and dolomite and its mechanism[J]. Applied Surface Science, 2022, 593: 153390.
- [12] 禹晓, 聂成镇, 秦晓鹏, 等. 等离子体处理对亚麻籽胶结构和功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 269–277. [YU

- Xiao, NIE Chengzhen, QIN Xiaopeng, et al. Effects of plasma treatment on structure and function of flaxseed gum[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 269–277.]
- [13] MANZOOR A, AHMAD S, YOUSUF B. Development and characterization of edible films based on flaxseed gum incorporated with *Piper betle* extract[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 245: 125562.]
- [14] CHENG N, WANG H, HAO H, et al. Research progress on polysaccharide components of *Cistanche deserticola* as potential pharmaceutical agents[J]. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 2023, 245: 114892.]
- [15] 徐树来, 李柱刚, 李晓娟, 等. 我国南瓜加工现状、存在问题及发展对策[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(13): 434–439. [XU Shulei, LI Zhugang, LI Xiaojuan, et al. Current status, existing problems and development countermeasures of pumpkin processing in China[J]. *Food Industry Technology*, 2023, 44(13): 434–439.]
- [16] WU B, GU L Y, WANG W J, et al. Skin targeting of resveratrol-loaded starch-based Pickering emulsions: Preparation, characterization, and evaluation[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2021, 299: 1383–1395.]
- [17] 杜童中, 刘悦, 马骏骅, 等. 超声预处理对亚麻籽胶-大豆分离蛋白复合凝胶凝胶特性及结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(13): 83–90. [DU Tongshen, LIU Yue, MA Junhua, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the properties and structure of flax seed gum-soybean separated protein composite gels[J]. *Food Industry Technology*, 2024, 45(13): 83–90.]
- [18] 刘战霞, 李文婧, 李斌斌, 等. 贮藏条件对南瓜籽及其油脂品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(11): 3549–3556. [LIU Zhanxia, LI Wenqi, LI Binbin, et al. Effect of storage conditions on the quality of pumpkin seeds and their oils[J]. *Journal of Food Safety and Quality Testing*, 2022, 13(11): 3549–3556.]
- [19] 冯婷婷. 豌豆蛋白-果胶-EGCG 复合物稳定皮克林乳液的机制与风味包埋特性[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [FENG Tingting. Mechanisms and flavor embedding properties of the pea protein-Pectin-EGCG complex[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [20] 雷丹丹, 王立敏, 张文, 等. OSA 淀粉调节玉米醇溶蛋白颗粒的界面性质及其 Pickering 乳液稳定性分析[J]. *食品科学*, 2023, 44(20): 62–70. [LEI Dandan, WANG Liming, ZHANG Wen, et al. Interfacial properties of octenyl succinic anhydride-starch decorated zein particles and stability of Pickering emulsion stabilized with it[J]. *Food Science*, 2023, 44(20): 62–70.]
- [21] 王然. 茶多酚-淀粉纳米颗粒稳定 Pickering 乳液的特性[J]. *食品科学*, 2023, 44(24): 81–87. [WANG Ran. Characterization of the Pickering emulsion stabilized by tea polyphenols-starch nanoparticles[J]. *Food Science*, 2023, 44(24): 81–87.]
- [22] 裴慧敏, 李亚蕾, 曹松敏, 等. 滩羊尾脂共轭亚油酸微胶囊的理化性质及其潜在生物活性评估[J]. *食品科学*, 2024, 45(4): 68–76. [PEI Huimin, LI Yalei, CAO Songmin, et al. Evaluation of physical and chemical properties and potential biological activity of Tan sheep tail fat conjugated linoleic acid microcapsules[J]. *Food Science*, 2024, 45(4): 68–76.]
- [23] WANG R, ZHOU J. Waxy maize starch nanoparticles incorporated tea polyphenols to stabilize Pickering emulsion and inhibit oil oxidation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 296: 119991.]
- [24] QIN W, TANG S, CHEN C, et al. Preparation and characterization of cinnamon essential oil Pickering emulsion stabilized by zein/carboxylated cellulose nanocrystals composite nanoparticles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 147: 109321.]
- [25] 梅钰琪, 高亚轩, 杨韵仪, 等. 蛋黄蛋白肽纳米颗粒对姜黄素的包埋与递送特性[J]. *食品科学*, 2023, 44(21): 14–22. [MEI Yuqi, GAO Yaxuan, YANG Yunyi, et al. Embedding and delivery characteristics of curcumin by yolk protein peptide nanoparticles[J]. *Food Science*, 2023, 44(21): 14–22.]
- [26] ANG T, LI X T, TANG C H. Novel edible pickering high-internal-phase-emulsion gels efficiently stabilized by unique polysaccharide-protein hybrid nanoparticles from Okara[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105285.]
- [27] BABAZADEH A, TABIBIAZAR M, HAMISHEHKAR H, et al. Zein-CMC-PEG multiple nanocolloidal systems as a novel approach for nutra-pharmaceutical applications[J]. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*, 2019, 9(2): 262.]
- [28] XU Tian, JIANG Chengchen, ZHOU Qiwei, et al. Preparation and characterization of octenyl succinic anhydride modified waxy maize starch hydrolyzate/chitosan complexes with enhanced interfacial properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 267: 118228.]
- [29] 葛艳争, 石爱民, 任广跃, 等. 超声预处理对花生分离蛋白微凝胶颗粒结构及其 Pickering 乳液特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(20): 95–101. [GE Yanzheng, SHI Aimin, REN Guangyue, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on the structure of peanut protein isolate nanoparticles and the characteristics of Pickering emulsion stabilized by it[J]. *Food Science*, 2022, 43(20): 95–101.]
- [30] YANG Y, NIU F, CUI S W, et al. Spray-drying microencapsulation of citral with soy protein-soy polysaccharide Maillard reaction products: Stability and release characteristics[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 132: 107842.]
- [31] LI X, SUN P, FU L, et al. Surface modification of cellulose nanocrystals by physically adsorbing lactoferrin as Pickering stabilizers: Emulsion stabilization and *in vitro* lipid digestion[J]. *Food Structure*, 2023, 37: 100331.]
- [32] 陈雨露, 吕沛峰, 袁芳. 新型番茄红素微胶囊的制备及稳定性评价[J]. *食品科学*, 2021, 42(19): 134–140. [CHEN Yulu, LÜ Peifeng, YUAN Fang. Preparation and stability evaluation of the new lycopene microcapsules[J]. *Food Science*, 2021, 42(19): 134–140.]
- [33] 吕思伊, 卢琪, 潘思轶. 包封姜黄素的果胶-核桃蛋白复合物乳液稳定性及体外消化[J]. *食品科学*, 2021, 42(8): 1–9. [LÜ Siyi, LU Qi, PAN Siyi. Eton stability of pectin-walnut protein complex coated with curcumin and *in vitro* digestion[J]. *Food Science*, 2021, 42(8): 1–9.]
- [34] NI Y, GU Q, LI J, et al. Modulating *in vitro* gastrointestinal digestion of nanocellulose-stabilized Pickering emulsions by altering cellulose lengths[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 118: 106738.]
- [35] 姜婷婷, 郑丽丽, 艾斌凌, 等. β -乳球蛋白-多酚纳米颗粒稳定的百香果籽油 Pickering 乳液及其性质[J]. *食品科学*, 2024, 45(10): 80–88. [JIANG Tingting, ZHENG Lili, AI Binling, et al. β -Prolactis-polyphenol nanoparticles-stabilized passion fruit seed oil Pickering emulsion and its properties[J]. *Food Science*, 2024, 45(10): 80–88.]