倪春蕾, 李卓修, 彭芳, 等. 以聚合乳清蛋白为壁材的槲皮素微胶囊制备及其性质研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 166−175. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080264

NI Chunlei, LI Zhuoxiu, PENG Fang, et al. Optimization of Quercetin Microencapsulation Process Using Polymerized Whey Protein as Wall Material and Its Properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 166−175. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080264

· 研究与探讨 ·

以聚合乳清蛋白为壁材的槲皮素微胶囊制备及其性质研究

倪春蕾[1,2,*], 李卓修[2], 彭　芳[2], 杨腾孝[2], 毕秀芳[2], 黄梅桂[2]

（1.东北农业大学动物医学学院, 黑龙江哈尔滨 150006;
2.西南民族大学药学与食品学院, 四川成都 610225）

摘　要: 为探究以聚合乳清蛋白为单一壁材，槲皮素为芯材的微胶囊制备工艺，得到包埋率较高、品质优良且较稳定的槲皮素微胶囊，该研究采用锐孔-凝固浴法，以包埋率为指标，通过单因素与 $L_9(3^4)$ 正交试验设计确定最佳工艺，并通过扫描电镜（Scanning Electron Microscope，SEM）、粒径与 Zeta 电位测定、傅里叶红外光谱（Fourier Transform Infrared Spectrometer，FT-IR）、X 射线衍射（X Ray Diffraction，XRD）、差示扫描量热（Differential Scanning Calorimetry，DSC）、拉曼光谱（Raman Spectrometer，RAM）、体外消化实验对最佳工艺微胶囊的性质进行探究，结果表明：制备微胶囊的最佳工艺参数为芯壁比 1∶7、槲皮素浓度 1 mg/mL、$CaCl_2$ 溶液浓度 1.6%、搅拌时间 50 min，在此条件下制得的微胶囊包埋率达到 95.665%；扫描电镜与粒径测定结果表明微胶囊具有良好的成型性且粒径分布均一；FT-IR 与 RAM 表明芯材成功被壁材包裹且无化学反应发生；DSC 与 XRD 图谱表明微胶囊具有良好热稳定性；模拟胃肠液实验表明壁材具有良好缓释性。该研究可为微胶囊制备工艺的优化及其在食品领域的实际应用提供相应的理论支撑。

关键词: 槲皮素, 乳清蛋白, 微胶囊, 理化特性, 体外消化

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0166−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080264　　本文网刊:

Optimization of Quercetin Microencapsulation Process Using Polymerized Whey Protein as Wall Material and Its Properties

NI Chunlei[1,2,*], LI Zhuoxiu[2], PENG Fang[2], YANG Tengxiao[2], BI Xiufang[2], HUANG Meigui[2]

（1.College of Veterinary Medicine, Northeast Agricultural University, Harbin 150006, China;
2.College of Pharmacy and Food, Southwest Minzu University, Chengdu 610225, China）

Abstract: This study investigated the preparation of microcapsules comprising polymerized whey protein and quercetin as the sole wall and core materials, respectively, and produced quercetin microcapsules with high encapsulation efficiency, quality, and stability. The microcapsules were prepared using the orifice-coagulation bath method, and the encapsulation efficiency was adopted as the assessment indicator in determining the optimal process conditions via single-factor experiments and an $L_9(3^4)$ orthogonal array experimental design. The properties of the microcapsules prepared under the optimal process conditions were analyzed using scanning electron microscopy, particle size and Zeta potential measurements, Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction, differential scanning calorimetry, Raman spectroscopy, and an *in vitro* digestion study. The optimal process parameters for microcapsule preparation were as follows: core:wall ratio: 1∶7, quercetin concentration: 1 mg/mL, $CaCl_2$ solution concentration: 1.6%, stirring time: 50 min. The microcapsules prepared under these conditions exhibited an encapsulation efficiency of 95.665% and a uniform particle size distribution. The spec-

收稿日期: 2025−08−27

作者简介/通信作者*: 倪春蕾（1992−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品加工, E-mail: nichunlei0225@163.com。

troscopic measurements and results of the *in vitro* digestion study indicated that the prepared microcapsules also displayed high levels of formability and stability and the wall material exhibited good sustained-release properties. This study can serve as a theoretical basis for the optimization of microcapsule preparation and the practical application of microcapsules in the food industry.

Key words: quercetin; whey protein; microcapsule; physicochemical properties; *in vitro* digestion

槲皮素（Quercetin, QR）是天然存在的黄酮类化合物之一，近年来受到国内外学者的广泛关注。槲皮素在可食用植物中分布广泛，不仅存在于洋葱、苹果、蓝莓、西兰花等常见新鲜蔬果中，也存在于荞麦、茶叶、银杏叶等药食同源植物原料中，且其在不同植物中的含量会因品种、生长环境及采摘部位的不同而存在差异[1]。槲皮素凭借其独特的化学结构与分子特性展现出丰富多样的生物活性，例如抗氧化活性、调节脂质代谢、抑制炎症因子释放、改善胰岛素敏感性等。这些功能特性使得槲皮素在慢性疾病防控、开发功能性食品及天然药物方面发挥出重要的应用价值[2−4]。然而，槲皮素存在亲水性不足的缺陷，在酸性与中性环境中易发生氧化降解，且对光照、高温及氧气表现出较强的敏感性，导致其生物利用率偏低，进而在一定程度上制约了其在食品工业中的实际应用[5]。

微胶囊化是一种使用薄层聚合物基质分离微小颗粒的技术，该聚合物基质用于保护颗粒免受外部环境的影响，并允许受控释放以提高其有效性[6]。微胶囊包埋技术可有效减少食品功能因子在加工与贮藏过程中的损耗，保护其免受肠道不良环境的破坏，同时促使芯材对靶细胞形成良好的靶向递送效果，进而显著提升功能因子的生物利用率[7]。微胶囊制备方法的选择对微胶囊的成效起到了重要作用。基于微粒形成机制，微胶囊的制备方法可分为物理法、化学法与物理化学法三大类[8]。锐孔-凝固浴法是化学法中最常见、使用最多的一种方法，其原理为借助注射器等锐孔类装置，将芯材与壁材的混合溶液逐滴注入固化液中；壁材分子接触固化液后迅速沉淀析出，芯材物质随壁材的析出过程同步沉淀并固化成型。当混合液滴与阳离子接触时，体系中的聚合物会迅速包裹核心物质，通过交联反应形成较为稳定的三维晶格结构，经干燥处理后，即可获得目标产品微胶囊[9−10]。张生生等[10] 以海藻酸钠为壁材，利用锐孔-凝固浴法制备表面活性肽微胶囊，包埋率为 87% 左右，制备出的微胶囊具有良好的稳定性；彭梦侠等[11] 以壳聚糖与海藻酸钠为壁材，通过锐孔-凝固浴法制备橙子油微胶囊，包埋率高达 89.3%，且微胶囊缓释性能良好。锐孔-凝固浴法与其他微胶囊制备方法相比操作简便、成本低廉、制备条件较温和，是一种环境友好技术[12]。

微胶囊壁材的选择同样是决定微胶囊最终成效的关键因素之一。天然多糖型壁材如海藻酸钠、壳聚糖等因它们具有成本低廉、无毒性等优势，是当前常用的壁材选择[13−18]。然而，这类壁材在胃肠道环境中因接触高浓度的酸和胆汁易发生裂解，无法有效保护芯材。乳清蛋白作为一种天然优质蛋白，主要来源于干酪生产过程中产生的乳清[19−20]，乳清蛋白所具备的特定功能性质是其作为食品功能性成分得到广泛应用的重要基础，将乳清蛋白的成膜性与凝胶性联合应用时，可实现对某些特定物质的包埋处理[21]。聚合乳清蛋白（Polymerized Whey Protein, PWP）是指将乳清蛋白溶液加热至 70 ℃ 以上温度后，蛋白质分子发生聚集形成的可溶性聚集体，又称热改性乳清蛋白[22]。PWP 在 Ca^{2+}的加持下有效屏蔽蛋白质分子间的静电相互作用，减少分子间的排斥力，此外 Ca^{2+}与蛋白质分子中的极性基团结合形成盐桥，增强分子间的交联程度[23]。田木[24] 采用聚合乳清蛋白作为壁材包裹大豆异黄酮，制备的大豆异黄酮纳米颗粒具有较强的离子强度稳定性，且通过体外模拟消化实验显示，聚合乳清蛋白能够有效保护大豆异黄酮纳米颗粒，使其顺利运输到肠道并实现靶向释放。目前以利用 $CaCl_2$ 作为凝固浴，PWP 作为唯一壁材对活性物质进行包埋的相关研究数量较少；而针对 PWP 应用于黄酮类化合物微胶囊化的具体报道，则更为匮乏。

本研究以槲皮素为芯材、聚合乳清蛋白为壁材制备微胶囊，并选取槲皮素浓度、芯壁比、$CaCl_2$ 溶液浓度和搅拌时间四个因素进行单因素和正交试验，以包埋率为指标，确定最佳工艺条件，并对最优条件下制备的微胶囊进行性质测定，考察 PWP 作为微胶囊唯一壁材的可能性，旨在探究一种微胶囊化的新型壁材并为槲皮素微胶囊的研究和开发提供一定的理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

槲皮素　纯度≥98%，购买自四川省维克奇生物科技有限公司；乳清蛋白　购买自恒天然合作社集团有限公司；胃蛋白酶（酶活力>3000 U/mg，来源于猪胃粘膜）、胰蛋白酶（酶活力≥2500 U/mg，来源于牛胰腺）　购买自上海麦克林生化科技股份有限公司；所有用于制备微胶囊及理化性质、体外消化探究实验的试剂均为国产分析纯。

UV-1800PC 紫外分光光度计　上海美谱达仪器有限公司；Spectrum Two 傅里叶变换红外光谱赛默飞世尔科技公司；NETZSCH 3500 差示扫描量热仪　德国耐驰仪器有限公司；in Via Qontor 拉曼光谱仪　英国雷尼绍有限公司；X' Pert3Powder X 射

线衍射仪　马尔文帕纳科公司; sigma 300 扫描电镜　卡尔蔡司光学有限公司; BeNano 90 Zeta 纳米粒度及 Zeta 电位分析仪　丹东百特仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　槲皮素标准曲线的绘制　参考李欣等[25] 的方法并加以改进, 配制 9 组浓度为 0~80 μg/mL(每个梯度间隔 10 μg/mL)的槲皮素标准溶液, 并于 374 nm 下测定吸光度。样品溶液吸光度对槲皮素浓度的回归方程为 y=0.0071x−0.0041, R^2=0.9978。

1.2.2　聚合乳清蛋白凝胶的制备　根据孙亚利[26] 的方法进行改进, 配制 10% 的乳清蛋白溶液置于 4 ℃ 冰箱内冷藏 12 h 后取出, 静置恢复至室温, 调节 pH 为 7.0, 85 ℃ 磁力搅拌 20 min 后迅速转移至冰水浴中冷却至室温, 随后 4 ℃ 冷藏 24 h, 最终获得具有流动性的 PWP 凝胶。

1.2.3　槲皮素微胶囊包埋条件的优化

1.2.3.1　槲皮素微胶囊制备工艺　根据孙亚利等[27] 的方法进行改进, 配制 $CaCl_2$ 凝固浴, 4 ℃ 冷藏备用。按照一定的芯壁比准确称取 PWP 凝胶与槲皮素置于锥形瓶中, 750 r/min 磁力搅拌后将混合液移至配针规格为 0.6×25TWLB 的 5 mL 一次性注射器中, 快速均匀滴入至配制好的 $CaCl_2$ 凝固浴中形成微胶囊, 4 ℃ 下固化 30 min 后充分洗涤并过滤, 预冻 48 h 后真空冷冻干燥 24 h 得到槲皮素微胶囊, 计算包埋率。

1.2.3.2　单因素实验设计　将芯壁比、$CaCl_2$ 浓度及搅拌时间分别固定在 1∶9、1.4%、50 min, 考察槲皮素浓度(1、2、3、4 和 5 mg/mL)对微胶囊包埋率的影响。

将槲皮素浓度、$CaCl_2$ 浓度及搅拌时间分别固定在 1 mg/mL、1.4%、50 min, 考察芯壁比(1∶6、1∶7、1∶8、1∶9 和 1∶10 g/g)对微胶囊包埋率的影响。

将槲皮素浓度、芯壁比及搅拌时间分别固定在 1 mg/mL、1∶9、50 min, 考察 $CaCl_2$ 浓度(1.0%、1.2%、1.4%、1.6% 和 1.8%)对微胶囊包埋率的影响。

将槲皮素浓度、芯壁比及 $CaCl_2$ 浓度分别固定在 1 mg/mL、1∶9、1.4%, 考察搅拌时间(20、30、40、50、60 和 70 min)对微胶囊包埋率的影响。

1.2.3.3　正交试验设计　在单因素实验基础上, 以微胶囊的包埋率为指标, 通过 $L_9(3^4)$正交试验确定各因素之间的最佳组合(表 1), 从而优化微胶囊的包埋工艺。

表 1　正交试验因素与水平

Table 1　Orthogonal experimental factors and levels

水平	A槲皮素浓度 (mg/mL)	B $CaCl_2$浓度 (%)	C芯壁比 (g/g)	D 搅拌时间 (min)
1	1	1.2	1∶6	50
2	2	1.4	1∶7	60
3	3	1.6	1∶8	70

1.2.4　槲皮素微胶囊包埋率的测定　参照佟思漫[28] 的方法并适当改动, 微胶囊中槲皮素总含量测定: 精确称取 0.01 g 微胶囊, 充分研磨后加入无水乙醇溶解, 随后以 8000 r/min 离心 10 min, 在 374 nm 波长下测定上清液吸光度。微胶囊表面槲皮素含量测定: 称取 0.01 g 槲皮素微胶囊, 加入无水乙醇溶解后, 同样以 8000 r/min 离心 10 min, 于 374 nm 波长处测定上清液吸光度。依据 1.2.1 标准曲线, 通过公式(1)计算包埋率, 每组实验均设置 3 次平行。

$$EE(\%) = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100 \qquad 式(1)$$

式中: A_1 为微胶囊表面槲皮素含量; A_0 为微胶囊槲皮素总量; EE 为槲皮素微胶囊包埋率, %。

1.2.5　槲皮素微胶囊的表征

1.2.5.1　微胶囊形态观察分析　用药匙取适量微胶囊轻柔放置于粘贴有导电双面胶带的样品台上, 经喷金处理后, 利用扫描电镜选取适宜视野完成对微胶囊的拍摄与观察。

1.2.5.2　微胶囊粒径、Zeta 电位及电泳迁移率测定　根据田木[24] 的方法并加以修改, 采用粒度仪测定槲皮素微胶囊的三个指标, 具体操作如下: 取样品溶液, 用去离子水稀释至蛋白质浓度为 0.1%(w/v), 每个样品设置 3 次平行实验, 最终记录测定结果。

1.2.5.3　微胶囊装载能力(LC)分析　根据 Mohammadian 等[29] 的方法加以修改, 将制备完成的样品在 8000 r/min 转速下离心 10 min, 在 374 nm 波长处测定上清液的吸光度, 依据 1.2.1 标准曲线计算槲皮素的实际含量, 按照式(2)计算得出微胶囊装载能力。

$$LC(\%) = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_0}\right) \times 100 \qquad 式(2)$$

式中: m_1 为微胶囊槲皮素总质量, g; m_2 为微胶囊表面槲皮素质量, g; m_0 为微胶囊总质量, g。

1.2.5.4　傅里叶变换红外光谱(FT-IR)测定分析　采用傅里叶红外光谱仪分别对槲皮素及微胶囊的红外吸收光谱进行测定, 具体操作如下: 取 1 mg 研磨后冻干样品, 放入 KBr 粉末在红外干燥灯上混匀并压片, 在 4000~400 cm^{-1} 波数范围内进行扫描分析, 每个样品均重复测定三次。

1.2.5.5　差示扫描量热(DSC)分析　参考 Wei 等[30] 的方法并加以改进, 称取 20 mg 微胶囊样品研磨粉碎后将粉末置于铝盘中, 随后在以 50 mL/min 速率的氮气吹扫环境下, 以 10 ℃/min 的升温速率将铝盘从 25 ℃ 加热至 260 ℃。

1.2.5.6　拉曼光谱(RAM)测定　参考吴长玲等[31] 的方法并加以改进, 称取 10 mg 微胶囊样品研磨粉碎后, 设定拉曼光谱分析测试条件如下: 激光功率为 80 mW, 激发光波长为 785 nm, 单次扫描时长 60 s, 积分次数 10 次, 扫描范围为 400~2000 cm^{-1} 的波数

谱段，通过四次扫描结果累加获得最终谱图。实验以苯丙氨酸（1003±1 cm^{-1}）作为归一化参照因子，谱图的基线校正及谱峰归属分析均采用 ACD Labs V12 软件完成。

1.2.5.7　X 射线衍射（XRD）测定　精确称取 30 mg 样品，将其均匀平铺于载玻片上，再将载玻片放置在 X 射线衍射仪的样品台上进行检测。检测条件设定为：衍射角 5°，X 射线管工作电压 40 kV、电流 40 mA，在 10°~80°（2θ）范围内扫描，在此条件下获取样品的衍射图谱。

1.2.6　槲皮素微胶囊的体外消化探究　参考佟思漫[28] 的方法适当改进。模拟胃液（SGF）的配制过程如下：量取 1.64 mL 浓度为 2.81 mol/L 的浓盐酸，稀释至 100 mL 得到溶液 A；称取 400 mg 胃蛋白酶溶解于 A 中，pH 调节至 2.0 可得 SGF。模拟肠液（SIF）的配制方法为：将 1 g 胰蛋白酶溶于 0.1 mol/L 的 NaH_2PO_3 溶液中，调节体系 pH 至 8.0 可得 SIF。胃液标准曲线为 y=0.2095x−0.0939，R^2=0.9904；肠液标准曲线为 y=0.2702x−0.0639，R^2=0.9902，胃肠液标准曲线的线性关系良好。

精确称取 50 mg 冻干微胶囊样品，置于 50 mL SGF/SIF 中，在 37 ℃、110 r/min 的摇床中充分进行相互作用；每隔 1 h 取出 1 mL 溶液，使用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后，定容至 10 mL，在 374 nm 波长处测定其吸光度，随后向体系中补充等量的新鲜 SGF/SIF。依据 1.2.1 节的方法计算 SGF/SIF 中槲皮素的实际含量，通过公式（3）计算累积释放量 R。

$$R(\%)=\left(\frac{A}{m\times EE}\right)\times 100 \qquad 式（3）$$

式中：A 为 SGF/SIF 中微胶囊释放槲皮素的含量；m 为槲皮素微胶囊质量，g；EE 为微胶囊的包埋率。

另取 50 mg 的冻干微胶囊样品于 50 mL SGF 中，在 37 ℃、110 r/min 的摇床中振荡处理 2 h 后，4000 r/min、20 min 离心，小心倒出上清液，加入 50 mL SIF，继续于 37 ℃、110 r/min 摇床振荡处理 2 h。此间，每隔 30 min 吸取 1 mL 消化液，测定其中槲皮素的实际含量，同时补充相应体积的消化液，保持离心管中溶液体积不变，依据 1.2.1 节的方法计算 SGF/SIF 中槲皮素的实际含量，通过公式（3）计算累积释放量 R。

1.3　数据处理

每组实验平均测定三次，结果表示为平均值±标准偏差。运用 Origin 2022 软件进行绘图；采用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行单因素 ANOVA 检验显著性分析以及正交试验三因素三水平极差分析，显著性检验在 0.05 水平上进行。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果

2.1.1　槲皮素浓度的影响　由图 1 可知，当槲皮素的浓度为 1~2 mg/mL 时，包埋率上升较快；在浓度为 2 mg/mL 时，包埋率最高，达到 96.25%。当浓度为 3~4 mg/mL 时包埋率迅速下降，这是由于微胶囊体系中芯材过剩，会使芯材分子在体系中分布较为稀疏，与壁材接触并被包裹的机会相对较少所导致，与张汉辉等[32] 通过锐孔-凝固浴法结合复合凝聚法制备以海藻酸钠与壳聚糖为壁材，荔枝多酚为芯材的微胶囊所得结果一致，当荔枝多酚质量分数超过 0.8% 时包埋率显著下降。然而，当槲皮素浓度达到 5 mg/mL 时微胶囊包埋率虽然有所提升，达到 85% 左右，但考虑槲皮素浓度过高会导致体系内槲皮素过剩，包埋率并没有浓度为 2 mg/mL 槲皮素的包埋效果好，且 2 mg/mL 的实验结果与其他四组实验相比差异显著（P<0.05），因此不宜选用 5 mg/mL 及后面的浓度进行后续的正交试验。综上所述，选择槲皮素浓度为 1、2、3 mg/mL 三个参数来进行正交试验。

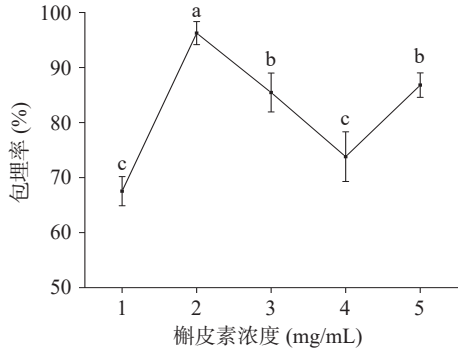


图 1　槲皮素浓度对包埋率的影响

Fig.1　Influence of quercetin concentration on embedding rate

注：不同小写字母代表存在显著性差异（P<0.05）；图 2~图 4 同。

2.1.2　芯壁比的影响　如图 2 所示，当芯壁比为 1∶6 时，由于壁材含量较低并不能达到最佳的包埋效果。芯壁比为 1∶7 时，包埋率最高，达到 94.83%。在微胶囊的形成过程中壁材与芯材形成包合物的过程是一种动态平衡，当壁材的含量适宜时能够为芯材提供更多的空腔，促使达到最理想的包埋效果[33]。继续加大 PWP 的含量会使芯材的含量超过饱和状态，多余的槲皮素无法被 PWP 有效包埋，便会释放到

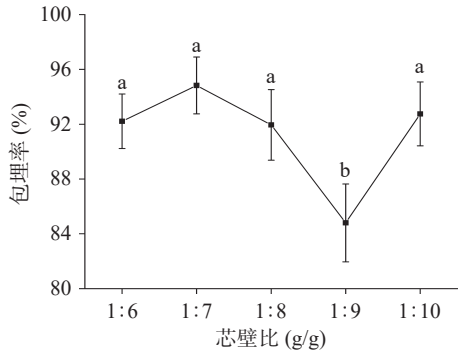


图 2　芯壁比对包埋率的影响

Fig.2　Influence of core wall ratio on embedding rate

$CaCl_2$ 溶液中，造成包埋率降低进而影响微胶囊产品的质量与性能，当芯壁比为 1∶9 时，PWP 含量过多会导致混合物的黏度过高从而使得造粒困难，微胶囊出现较为严重的粘连和拖尾。当芯壁比为 1∶10 时包埋率相较芯壁比为 1∶9 上升了 8% 左右，包埋率上升的原因可能是 1∶10 的微胶囊中壁材为芯材提供的空腔略大于芯壁比 1∶9 的微胶囊，但在制珠成型的过程中仍出现较严重的拖尾现象，因此不宜选用芯壁比为 1∶10 及后面的浓度进行后续的正交试验。芯壁比无论是过低还是过高，均会使包埋率降低。综上所述，选择芯壁比为 1∶6、1∶7、1∶8 三个参数来进行正交试验。

2.1.3 $CaCl_2$ 浓度的影响 由图 3 可知，当 $CaCl_2$ 浓度为 1.0%~1.2% 时，包埋率迅速上升；在 1.2%~1.4% 包埋率上升变慢，在 1.4% 时包埋率达到最大，为 97.07%；当浓度大于 1.4% 时，包埋率降低。当 $CaCl_2$ 浓度为 1.0% 时，PWP 滴在 $CaCl_2$ 溶液中时不能快速成形且容易粘连，导致形成的微胶囊形态软薄且易损，无法完全包裹住芯材，导致微胶囊的包埋率较低；当 $CaCl_2$ 浓度为 1.2%~1.4% 时，随着浓度的增加，Ca^{2+}与 PWP 负离子的结合量增多，得到的微胶囊形状完整，软硬适中，在 1.4% 达到最佳状态；当 $CaCl_2$ 浓度增加到 1.8% 时，得到的微胶囊变得非常坚硬，且微胶囊真空干燥成形后其溶解性较差进而使得芯材槲皮素无法正常释放，微胶囊包埋率较低。由此可知，选择浓度为 1.2%、1.4%、1.6% 的 $CaCl_2$ 浓度来进行槲皮素微胶囊工艺优化正交试验。

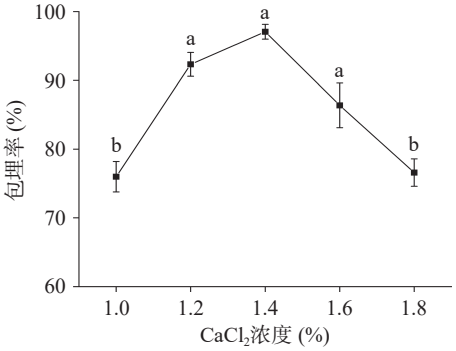


图 3 $CaCl_2$ 浓度对包埋率的影响

Fig.3 Influence of $CaCl_2$ concentration on embedding rate

2.1.4 搅拌时间的影响 搅拌过程是利用外力对体系做功，促使芯材与壁材分子间充分接触、相互扩散，进而实现两者高效融合。搅拌时间是决定产品质量的关键要素。由图 4 可知，在 20~60 min 时，微胶囊包埋率随着时间的延长逐渐提高。当搅拌时间超过 60 min 时，在制珠成型的过程中 PWP 凝胶与槲皮素形成的糊状物泡沫量增加，溶液黏度增大，导致注射器针孔堵塞和滴加困难，从而影响微胶囊的制备效果，这是由于搅拌时间过长会导致主客体之间的结合力（疏水作用力及范德华力）减弱，甚至分离[33]。当搅拌时间为 60 min 时微胶囊包埋率相较于其他组别（70 min 除外）差异显著（$P<0.05$），因此，选择搅拌时间为 50、60、70 min 范围进行槲皮素微胶囊工艺优化正交试验。

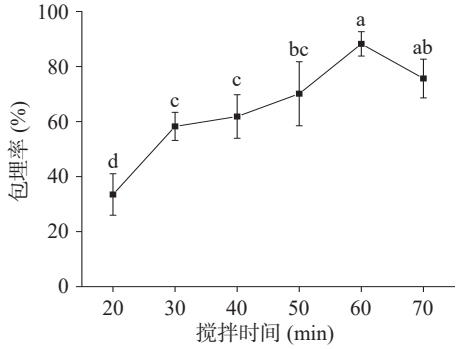


图 4 搅拌时间对包埋率的影响

Fig.4 Influence of stirring time on embedding rate

2.2 正交试验结果

用 $L_9(3^4)$正交试验设计对包埋工艺进行优化，结果如表 2 所示。R 值越大，说明该因素对试验结果包埋率的影响越大。各因素对包埋率的影响程度由大到小依次为：D>C>A>B，最佳工艺组合为 $A_1B_3C_2D_1$，即槲皮素浓度 1 mg/mL，$CaCl_2$ 浓度 1.6%，芯壁比 1∶7，搅拌时间 50 min，利用最佳工艺制得的微胶囊包埋率最高为 96.72%。

表 2 正交试验方案及结果

Table 2 Orthogonal experiment scheme and results

试验号	A槲皮素浓度（mg/mL）	B $CaCl_2$浓度（%）	C芯壁比（g/g）	D搅拌时间（min）	包埋率（%）
1	3	1.6	1∶7	50	96.46
2	3	1.2	1∶8	60	86.73
3	2	1.6	1∶6	60	90.85
4	2	1.4	1∶8	50	93.32
5	2	1.2	1∶7	70	94.8
6	1	1.6	1∶8	70	94.42
7	1	1.2	1∶6	50	95.67
8	3	1.4	1∶6	70	92.1
9	1	1.4	1∶7	60	94.13
K_1	94.74	92.4	92.87	95.15	
K_2	92.99	93.18	95.13	90.57	
K_3	91.76	93.91	91.49	93.77	
R	2.98	1.51	3.64	4.58	

分别对最佳包埋工艺组合 $A_1B_3C_2D_1$ 以及正交表中最优组别 $A_3B_3C_2D_1$、$A_1B_1C_1D_1$（第 1 组与第 7 组）进行验证，每组做 6 次验证实验，实验结果由表 3 所示。三组验证实验中对最佳包埋工艺组合的验证实验得出的平均包埋率为 95.665%，高于对正交表中两组最优组别的平均包埋率，以上验证实验证明了制备槲皮素微胶囊的最佳工艺组合为槲皮素浓度 1 mg/mL，$CaCl_2$ 浓度 1.6%，芯壁比 1∶7，搅拌时间 50 min，且该工艺可用于微胶囊的包埋。

2.3 槲皮素微胶囊的表征

2.3.1 微胶囊形貌与微观结构分析 微胶囊形貌图如图 5 所示，QR 微胶囊色泽较为均匀、呈现淡黄

表 3　验证实验结果

Table 3　Validation of test results

实验编号	对最佳包埋工艺组合$A_1B_3C_2D_1$的验证实验						对正交表中工艺组合$A_3B_3C_2D_1$的验证实验						对正交表中工艺组合$A_1B_1C_1D_1$的验证实验					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
包埋率(%)	95.88	96.72	94.37	96.36	95.74	94.92	92.78	94.27	96.63	94.37	95.47	93.23	93.18	94.21	92.53	95.21	95.06	93.69
平均值(%)			95.665						94.458						93.980			
标准偏差			0.883						1.374						0.983			
RSD(%)			0.923						1.455						1.046			

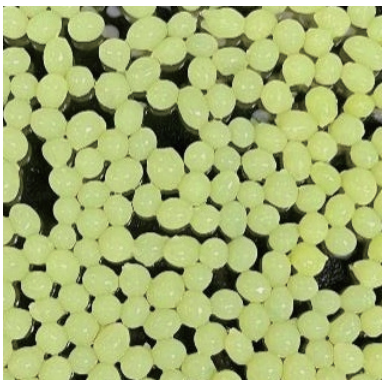


图 5　槲皮素微胶囊样品外观图

Fig.5　Appearance diagram of quercetin microcapsule samples

色。微胶囊颗粒饱满、形态近似椭球状，个体较为圆润。这是因为 QR 本身具有较深的颜色，被 PWP 包裹住，颜色变浅。通过扫描电镜(SEM)观察到的槲皮素微胶囊表面形貌如图 6 所示。结合图 5 和图 6，可清晰观察到微胶囊的整体形态，其呈现椭圆形外观，表面体积分布均匀且凹凸不平。这一现象可能源于游离槲皮素与 PWP 溶液混合后，PWP 在冷冻干燥过程中因水分均匀挥发而形成细小孔洞；此外，较高的 PWP 浓度也可能是促成孔洞形成的因素之一[34]。在 200×放大倍数下，微胶囊表面虽表现出凹凸不平的状态，但整体结构紧致且无破损，这一特征表明其成型效果良好，包埋率较高。

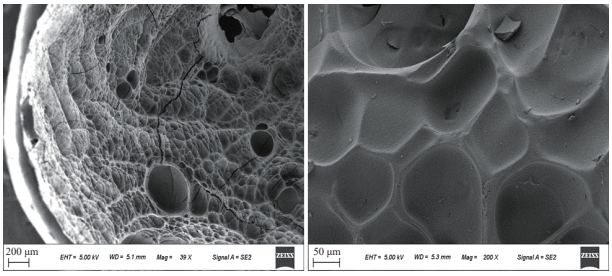


图 6　槲皮素微胶囊 SEM 图

Fig.6　SEM image of quercetin microcapsules

2.3.2　槲皮素微胶囊的粒径与 Zeta 电位分析　图 7 与图 8 分别为槲皮素微胶囊粒径的光强分布统计图、Zeta 电位均值统计图，每种颜色表示每一个样本平行对照组。经粒度仪分析后可知最佳制备工艺下制备的微胶囊的粒径为 232.82±16.58 nm，PDI 为 0.360±0.010；Zeta 电位为−17.45±1.72 mV，电泳迁移率为−1.36±0.13 μm·cm/(V·s)。说明所制备微胶囊为纳米级且粒径均一。

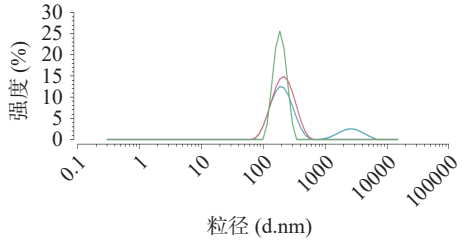


图 7　槲皮素微胶囊粒径分布图

Fig.7　Particle size distribution diagram of quercetin microcapsules

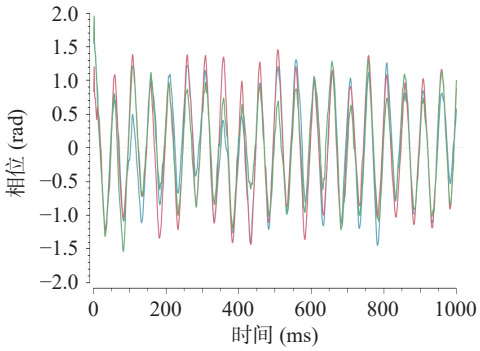


图 8　槲皮素微胶囊 Zeta 电位分布图

Fig.8　Zeta potential distribution diagram of quercetin microcapsules

2.3.3　槲皮素微胶囊包埋率(EE)和装载能力(LC)分析　如图 9 所示，槲皮素与 PWP 复合体系的不同配比，对活性成分的包封特性具有明显影响。当槲皮素与 PWP 的质量浓度比为 1∶90 和 1∶100 时，PWP 对槲皮素的包埋率都达到 90% 以上。随着质量浓度比从 1∶100 逐渐减小至 1∶60，EE 从 94% 逐步下降到 62%，而 LC 从 0.8% 上升至 4.5%。这些结果表明随

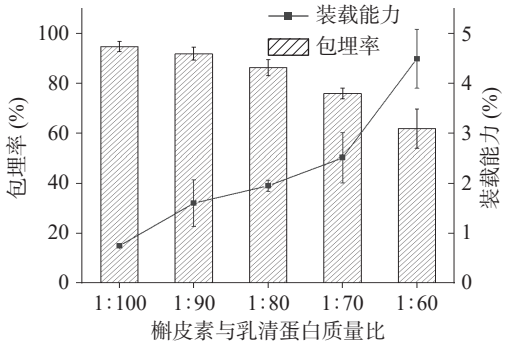


图 9　蛋白的质量比对微胶囊的 EE 和 LC 的影响

Fig.9　Effect of EE and LC in microcapsules by mass comparison with protein

着体系中槲皮素含量的逐步增加，PWP 的负载能力趋于饱和。在此过程中，游离的槲皮素分子在离心后形成沉淀，这一现象直接导致了纳米复合体系 EE 的下降。Shen 等[35] 的研究结果证实，采用 PWP 作为包埋基质时，可显著提高虾青素等活性成分的包封效率，与本研究所得结果一致，进一步验证了 PWP 作为功能性载体材料的有效性。

2.3.4 槲皮素微胶囊 FT-IR 图谱分析 槲皮素、乳清蛋白与槲皮素微胶囊的 FT-IR 图如图 10 所示，酚类化合物的羟基 O-H 的伸缩振动在 3200~3550 cm^{-1} 之间[36]，酚的 O-H 比醇的 O-H 伸缩振动频率低一些，所以谱带较窄，由于空间位阻的原因，在此处槲皮素微胶囊的壁材不易与芯材形成氢键，故槲皮素在 3413 cm^{-1} 处的峰更加尖锐。槲皮素微胶囊在 3454 cm^{-1} 处呈现出由缔合作用形成的宽且强度较高的特征峰。此外，在 2925 cm^{-1} 与 1385 cm^{-1} 处，能够观察到较为明显的-CH_2 和-CH_3 伸缩振动。说明槲皮素微胶囊分子内的氢键键强有所增强[26]，因此微胶囊分子承受环境干扰的能力提高，如高温、酸碱环境。苯环骨架的振动作用导致在 1614 cm^{-1} 和 1514 cm^{-1} 处出现了相应的特征峰，807 cm^{-1} 处的吸收峰，则表征着苯环中的取代模式为对位取代[28]。对比微胶囊与槲皮素、乳清蛋白的红外图谱可知，三者的主要吸收峰均在图谱中呈现，但各特征峰的位置发生了明显偏移，强度也有所变化。这一现象表明，在微胶囊化过程中，槲皮素与 PWP 可能形成了新的分子间作用力[26]。上述结果充分表明，槲皮素被完全包裹于 PWP 中。此外，在微胶囊化的制备过程中，被包埋的芯材槲皮素其化学组成未发生改变。

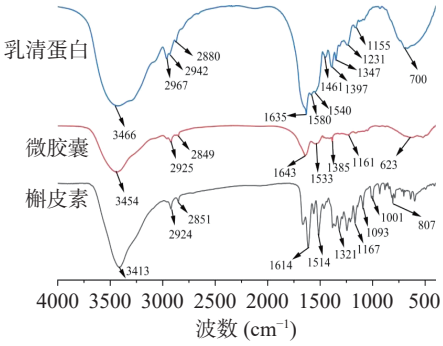


图 10 傅里叶红外光谱图

Fig.10 Fourier infrared spectrum

2.3.5 槲皮素微胶囊 DSC 图谱分析 图 11 为 PWP、微胶囊以及游离槲皮素的 DSC 热谱图，从图中能够看出槲皮素在 126.71 ℃ 时呈现出显著的放热尖峰。槲皮素微胶囊在 108.32 ℃ 有明显的放热宽峰，PWP 在 111.44 ℃ 有一个放热宽峰。当槲皮素与 PWP 相互作用并形成微胶囊后，在微胶囊的热谱图中，没有发现槲皮素原本的吸热峰。此现象意味着槲皮素已被成功包埋于纳米颗粒内部，其原本的晶体结构发生转变，成为无定型态。Wang 等[37] 研究报道，在利用大豆多糖水凝胶对大豆异黄酮进行包埋的实验中，出现了大豆异黄酮吸热峰消失的现象。这一现象恰好证实了大豆异黄酮已被水凝胶成功包埋。此外，槲皮素与 PWP 的结合使得 PWP 的热稳定性下降。PWP 的峰值变性温度从最初的 111.44 ℃ 降至 108.32 ℃，这一变化说明热处理促使乳清蛋白的结构发生变化，进而使其热稳定性降低。

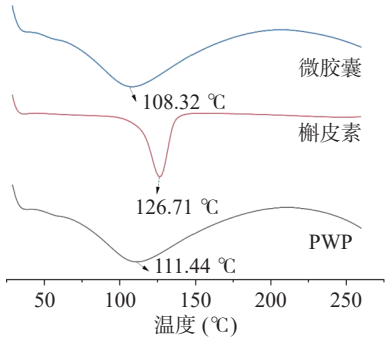


图 11 差示扫描量热图谱

Fig.11 Differential scanning calorimetry map

2.3.6 槲皮素微胶囊 RAM 图谱分析 利用 RAM 分析 PWP 与槲皮素相互作用后蛋白质二级结构变化，此外，拉曼图谱中的频率与强度信息，可反映出槲皮素微胶囊体系所处环境以及其构象变化。图 12 展示了 PWP 和槲皮素微胶囊的 RAM 图谱，色氨酸谱带常被用作表征蛋白质微环境极性特征及氢键相互作用变化的重要指标。国内外大量研究表明，加热会使蛋白结构改变、Trp 残基暴露、谱带强度降低[36,38−40]，而 PWP 包埋槲皮素时也出现该现象，促使槲皮素与更多疏水性残基通过疏水作用结合。

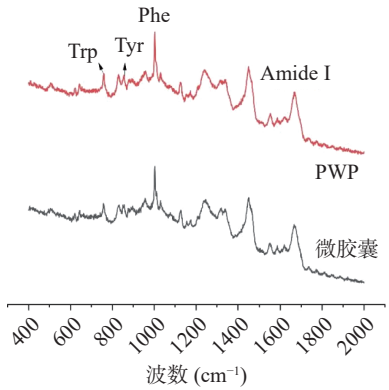


图 12 拉曼光谱图

Fig.12 Raman spectra

拉曼光谱中 I_{850}/I_{830} 比值主要用于表征蛋白质中 Tyr 残基的微环境及其氢键状态，当比值处于 1~2.5 之间时，表明 Tyr 残基暴露于溶液中参与中等或弱的氢键组成，而当比值较低时说明 Tyr 残基处于疏水环境中，作为强氢键的供体[41]。如表 4 所示，槲皮素微胶囊的 I_{850}/I_{830} 比值大于 1，说明 PWP 的 Tyr 残基暴露在了极性疏水的环境中充当了中性强氢键的供体或者受体。此外研究进一步发现，当

PWP 与槲皮素发生相互作用后，位于 1450 cm^{-1} 处的脂肪族氨基酸拉曼特征谱线强度出现下降趋势，这或许与 PWP 二级结构的变化相关[38]。

表 4　槲皮素对蛋白质侧链基团谱带强度影响

Table 4　Effects of quercetin on the intensity of protein side chain group spectral bands

样品名	Trp(I_{760}/I_{1003} cm^{-1})	Tyr(I_{850}/I_{830} cm^{-1})	C-H(I_{1450}/I_{1003} cm^{-1})
PWP	0.709±0.012^a	0.983±0.025^a	0.742±0.013^b
微胶囊	0.601±0.253^a	1.025±0.002^a	1.133±0.024^a

注：表中同一列不同字母表示有显著性差异（P<0.05），表5同。

如表 5 所示，PWP 的结构组成包含 19.31% 的 α-螺旋结构、12.62% 的 β-折叠结构、60.47% 的 β-转角结构以及 7.59% 的无规卷曲结构。当 PWP 与槲皮素相互作用后，蛋白质中 α-螺旋结构和 β-转角结构的含量降低，意味着蛋白质构象发生变化，更倾向于向 β-折叠和无规则卷曲结构转变，这充分说明 PWP 与槲皮素相互作用促使蛋白质的有序结构向无序结构转化。

表 5　槲皮素对蛋白二级结构组分含量影响

Table 5　Effects of quercetin on the content of protein secondary structure components

制备方式	α-螺旋（%）	β-折叠（%）	β-转角（%）	无规卷曲（%）
PWP	19.31±0.06^a	12.62±0.01^b	60.47±0.04^a	7.59±0.03^a
微胶囊	10.94±0.01^b	28.60±0.02^a	52.06±0.02^b	8.25±0.01^a

2.3.7　槲皮素微胶囊 XRD 图谱分析　XRD 常被用于晶体物质的分析，图 13 展示了槲皮素、PWP 以及槲皮素微胶囊在 2θ 角度范围从 10°至 80°范围内的衍射实验结果。图中槲皮素在 2θ=10.76°、12.42°、14.06°、15.78°、17.18°、17.25°、19.78°、23.84°、27.34°、28.14°、36.34°和 38.65°处出现特征衍射峰，表明该槲皮素样品具有较高的结晶性。在微胶囊的 X 射线衍射图谱中，观察到部分特征峰消失，且峰强度有所减弱，这一现象说明槲皮素在微胶囊体系内仅有部分仍保持结晶状态，证明槲皮素已被有效地包裹于微胶囊之中，该结论与 DSC 图谱的分析结果相互印证。

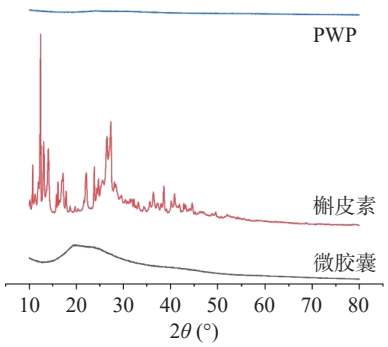


图 13　X-射线衍射图

Fig.13　X-ray diffraction pattern

2.4　微胶囊在模拟胃肠液中的释放

由图 14 可知，在体外模拟胃肠液消化过程中，微胶囊的释放量随时间延长呈逐渐缓慢上升趋势。最终在胃液中的释放率仅为 20.12%，释放量相对较低，这可能是由于槲皮素与蛋白质间的相互作用可在一定程度上保护蛋白质免受胃蛋白酶的消化作用，进而产生延迟消化效应[42]。当槲皮素微胶囊处于体外模拟小肠液环境中时，释放速度显著加快，消化 6 h 后实现大幅度高效释放，在肠液中的累计释放量达 60.13%。其原因在于槲皮素微胶囊蛋白质外壳中疏水性氨基酸间的肽键被胰蛋白酶水解，使蛋白质结构遭到破坏，进而加速槲皮素的释放[43]。在对茶多酚的包埋研究中，Sanna 等[44] 得到了与本研究类似的结果。综上所述，PWP 对槲皮素微胶囊具有较好的缓释效果，展现出良好的保护性能，能够维持槲皮素的生物活性，有效提升了槲皮素的稳定性与生物可及性，对保健食品的开发具有一定的应用价值。

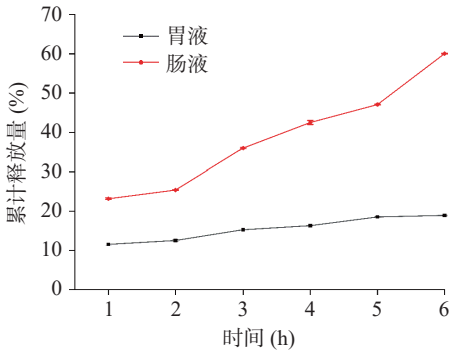


图 14　微胶囊分别在模拟胃肠液中消化的释放曲线

Fig.14　Release curve of microcapsules digested in simulated gastrointestinal fluid

图 15 展示了微胶囊在模拟胃肠道环境中消化缓释的释放曲线，在模拟胃液消化的 2 h 中槲皮素的释放量较为缓慢，最终在胃液的释放率仅为 12.83%，释放较少。当微胶囊处于模拟肠液时槲皮素得以快速释放，在 2 h 内消化率增加了 20% 左右，在消化 4 h 后槲皮素释放率达到了 47.97%。孙亚利[26] 对苦荞黄酮微胶囊的包埋得出了相似的效果。以上结果

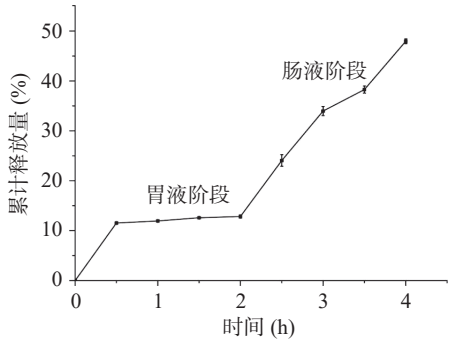


图 15　微胶囊在模拟胃肠道中消化释放曲线

Fig.15　Release curve of microcapsules in simulated gastrointestinal digestion

注：0~2 h 胃液阶段，2~4 h 肠液阶段。

表明在整个胃肠道的消化过程中，当消化 2 h 时微胶囊的囊壁发生逐渐降解，槲皮素向外释放的速率增大，最终在小肠内实现高效率释放。综上所述，PWP 作为槲皮素微胶囊的壁材有效保护了槲皮素的生物活性，大大提高了槲皮素的生物利用率，制备的微胶囊具有良好的缓释性能。

3 结论

该研究通过锐孔-凝固浴法成功制备出了以槲皮素为芯材、聚合乳清蛋白为壁材的微胶囊。以包埋率为指标，通过单因素实验与正交实验得出最佳制备工艺为槲皮素浓度 1 mg/mL，$CaCl_2$ 浓度 1.6%，芯壁比 1∶7，搅拌时间 50 min，在此最佳工艺下包埋率达到 95.665%。通过扫描电镜与粒径测定可知制备出的微胶囊整体为球形，表面疏松多孔，凹凸不平，成型性较好，粒径为纳米级且均一；傅里叶红外光谱与拉曼光谱结果显示槲皮素成功包埋于 PWP 中，且芯材与壁材之间无化学反应发生，可保证槲皮素的完整性与稳定性；DSC 与 XRD 图谱可知微胶囊体系具有良好的热稳定性，槲皮素在微胶囊体系内仍维持着结晶状态；体外消化实验表明 PWP 有效保护了槲皮素的生物活性，制备的微胶囊具有良好的缓释性能，有助于提高人体对于黄酮的利用率。该研究为微胶囊的工艺优化及在食品中的应用提供理论依据。

© 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] HOU S, DU W, HAO Y, et al. Elucidation of the regulatory network of flavonoid biosynthesis by profiling the metabolome and transcriptome in Tartary buckwheat[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(25): 7218−29.

[2] SUZUKI T, KUROKOH R, MURAKAMI S, et al. Rutin concentration and characterization of rutinosidase in perennial buckwheat (*Fagopyrum cymosum*) and its application in foods[J]. Foods, 2023, 12(7): 1417.

[3] ZOU L, WU D, REN G, et al. Bioactive compounds, health benefits, and industrial applications of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*)[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(5): 657−673.

[4] MALEKI S J, CRESPO J F, CABANILLAS B. Anti-inflammatory effects of flavonoids[J]. Food Chemistry, 2019, 299: 125124.

[5] 廖霞, 杨小兰, 李瑶, 等. 响应面试验优化复凝聚法制备槲皮素微胶囊工艺及其理化性质[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 20−27. [LIAO X, YANG X L, LI Y, et al. Response surface optimization of preparation of microencapsulated quercetin using complex coacervation and its physicochemical properties[J]. Food Science, 2016, 37(22): 20−27.]

[6] VIVEK K, MISHRA S, PRADHAN R C, et al. A comprehensive review on microencapsulation of probiotics: technology, carriers and current trends[J]. Applied Food Research, 2023, 3(1): 100248.

[7] 廖霞, 杨小兰, 李瑶, 等. 槲皮素微胶囊的贮藏稳定性及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 60−66. [LIAO X, YANG X L, LI Y, et al. Storage stability and antioxidant activity of quercetin microcapsules[J]. Food Science, 2017, 38(1): 60−66.]

[8] 孙建明, 刘梦蕊, 柳磊, 等. 植物精油微胶囊的制备方法及其在果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(10): 146−156. [SUN J M, LIU M R, LIU L, et al. Advances in the preparation of plant essential oil microcapsules and their application in the preservation of fruits and vegetables[J]. Storage and Process, 2025, 25(10): 146−156.]

[9] HUANG K, YUAN Y, BAOJUN X. A critical review on the microencapsulation of bioactive compounds and their application[J]. Food Reviews International, 2023, 39(5): 2594−2634.

[10] 张生生, 闫静芳, 陆兆新, 等. 锐孔凝固浴法制备表面活性肽微胶囊[J]. 食品工业科技, 2015, 36(12): 221−225,230. [ZHANG S S, YAN J F, LU Z X, et al. The preparation of surfactin microcapsules by the method of piercing-solidifying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(12): 221−225, 230.]

[11] 彭梦侠, 陈梓云. 锐孔-凝固浴法制备橙子油微胶囊的工艺研究[J]. 化工技术与开发, 2015, 44(5): 16−21. [PENG M X, CHEN Z Y. Preparation and characterization of fast-responsive porous poly (NIPA-co-MAA) hydrogels[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2015, 44(5): 16−21.]

[12] 卢钏燚. 桑葚微胶囊的制备及其在酸奶中的应用[D]. 成都: 西华大学, 2024. [LU C Y. Preparation of mulberry microcapsules and its application in yogurt[D]. Chendu: Xihua University, 2024.]

[13] ZHANG H, CHENG J, AO Q. Preparation of alginate-based biomaterials and their applications in biomedicine[J]. Marine Drugs, 2021, 19(5): 264.

[14] LI T, TENG D, MAO R, et al. Recent progress in preparation and agricultural application of microcapsules[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2019, 107(10): 2371−2385.

[15] ELDIN M M, HASHEM A, TAMER T, et al. Development of cross linked chitosan/alginate polyelectrolyte proton exchanger membranes for fuel cell applications[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2017, 12(5): 3840−3858.

[16] HU Z H, OMER A M, OUYANG X K, et al. Fabrication of carboxylated cellulose nanocrystal/sodium alginate hydrogel beads for adsorption of Pb (II) from aqueous solution[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 108: 149−157.

[17] TAMER T, ABOU-TALEB W, ROSTON G, et al. Formation of zinc oxide nanoparticles using alginate as a template for purification of wastewater[J]. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2018, 10: 112−121.

[18] de SOUSA VICTOR R, MARCELO DA CUNHA SANTOS A, VIANA DE SOUSA B, et al. A review on Chitosan's uses as biomaterial: tissue engineering, drug delivery systems and cancer treatment[J]. Materials, 2020, 13(21): 4995.

[19] 王睦. 聚合乳清蛋白基微胶囊技术及其在功能性食品中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2017. [WANG M. Polymerized whey protein based microencapsulation technology and its applications in functional foods[D]. Changchun: Jilin University, 2017.]

[20] YUN X, TALHA A, TARUN B, et al. A review on protein based nanocarriers for polyphenols: interaction and stabilization mechanisms[J]. Food Innovation and Advances, 2023, 2(3): 193−202.

[21] SINGH H, YE A. Interactions and functionality of milk proteins in food emulsions[M]. Milk Proteins, 2020: 467−497.

［22］ 李召英, 李云龙. 聚合乳清蛋白对牛酸乳贮藏品质的影响[J]. 中国乳业, 2024(11): 163−166,175. ［LI Z Y, LI Y L. Effect of polymerized whey protein on storage quality of bovine yogurt[J]. China Dairy, 2024(11): 163−166,175.］
［23］ WANG M, WANG C N, GAO F, et al. Effects of polymerized whey protein-based microencapsulation on survivability of *Lactobacillus acidophilus* LA-5 and physiochemical properties of yoghurt[J]. Journal of Microencapsulation, 2018, 35(5): 504−512.
［24］ 田木. 山羊奶乳清蛋白的制备及其包埋大豆异黄酮体系研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021. ［TIAN M. Goat milk whey protein preparation and its application in whey protein-soy isoflavones delivery system[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.］
［25］ 李欣, 王步军. 两种苦荞黄酮提取方法的优化及含量测定[J]. 食品科学, 2010, 31(6): 80−85. ［LI X, WANG B J. Optimization of two extraction techniques of total flavonoids from Tartary buckwheat and HPLC determination based on the two extraction techniques of total flavonoids in Tartary buckwheat[J]. Food Science, 2010, 31(6): 80−85.］
［26］ 孙亚利. 苦荞黄酮微胶囊的制备及应用[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019. ［SUN Y L. Preparation and application of Tartary buckwheat flavonoid microcapsule[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.］
［27］ 孙亚利, 周文美, 黄永光, 等. 以聚合乳清蛋白为壁材的苦荞黄酮微胶囊化及其品质分析[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 259−266. ［SUN Y L, ZHOU W M, HUANG Y G, et al. Microencapsulation and quality analysis of Tartary buckwheat flavonoids using polymerized whey protein as wall material[J]. Food Science, 2020, 41(12): 259−266.］
［28］ 佟思漫. 刺玫果黄酮对黄嘌呤氧化酶抑制及槲皮素微胶囊制备表征[D]. 长春: 吉林大学, 2023. ［TONG S M. Inhibition of xanthine oxidase by flavone from rose hip, preparation and characterization of quercetin microcapsules[D]. Changchun: Jilin University, 2023.］
［29］ MOHAMMADIAN M, SALAMI M, MOMEN S, et al. Fabrication of curcumin-loaded whey protein microgels: Structural properties, antioxidant activity, and *in vitro* release behavior[J]. LWT, 2019, 103: 94−100.
［30］ WEI Y, SUN C, DAI L, et al. Structure, physicochemical stability and *in vitro* simulated gastrointestinal digestion properties of *β*-carotene loaded zein-propylene glycol alginate composite nanoparticles fabricated by emulsification-evaporation method[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 149−158.
［31］ 吴长玲, 寻崇荣, 刘宝华, 等. 低温超微粉碎对生物酶法制油豆渣蛋白结构影响的拉曼光谱分析[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 33−39. ［WU C L, XUN C R, LIU B H, et al. Raman spectral analysis of the structure of soybean meal protein from aqueous enzymatic extraction of soybean oil as affected by ultrafine grinding at low temperature[J]. Food Science, 2019, 40(7): 33−39.］
［32］ 张汉辉, 程杏安, 李俊杰, 等. 荔枝多酚微胶囊的制备工艺优化及其特性分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 201−208. ［ZHANG H H, CHENG X A, LI J J, et al. Optimization of preparation process of lichi polyphenols microcapsules and its characteristic analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 201−208.］
［33］ 吴琼, 樊小芬, 钱静, 等. 响应面优化百里香酚微胶囊的制备工艺及其性能研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(15): 217−225. ［WU Q, FAN X F, QIAN J, et al. Preparation process and performance of thymol microcapsules with optimized response surface[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(15): 217−225.］
［34］ LEE S, ROSENBERG M. Preparation and properties of glutaraldehyde cross-linked whey protein-based microcapsules containing theophylline[J]. Journal of Controlled Release, 1999, 61(1−2): 123−136.
［35］ SHEN X, ZHAO C, LU J, et al. Physicochemical properties of whey-protein-stabilized astaxanthin nanodispersion and its transport via a Caco-2 monolayer[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(6): 1472−1478.
［36］ FERRER E G, GÓMEZ A V, AñóN M C, et al. Structural changes in gluten protein structure after addition of emulsifier. A Raman spectroscopy study[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2011, 79(1): 278−281.
［37］ WANG Q, PAN M H, CHIOU Y S, et al. Insights from alpha-lactoalbumin and beta-lactoglobulin into mechanisms of nanoliposome-whey protein interactions[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125: 107436.
［38］ XU X L, HAN M Y, FEI Y, et al. Raman spectroscopic study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with textural characteristic[J]. Meat Science, 2011, 87(3): 159−164.
［39］ HERRERO A M. Raman spectroscopy for monitoring protein structure in muscle food systems[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2008, 48(6): 512−523.
［40］ NGARIZE S, ADAMS A, HOWELL N K. Studies on egg albumen and whey protein interactions by FT-Raman spectroscopy and rheology[J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(1): 49−59.
［41］ 江连洲, 张潇元, 朱一方, 等. 物理处理对大豆蛋白-磷脂酰胆碱结构影响的拉曼分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 345−350. ［JIANG L Z, ZHANG X Y, ZHU Y F, et al. Raman analysis of influence of physical treatment on structure and interaction of soybean protein-phosphatidylcholine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 345−350.］
［42］ SHAHBAZIZADEH S, NAJI-TABASI S, SHAHIDI-NOGHABI M. Entrapment of curcumin in isolated soy protein-alginate nanogels: Antioxidant stability and *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(6): 4754−4770.
［43］ XU Y Y, HUO Y F, XU L, et al. Resveratrol-loaded ovalbumin/*Porphyra haitanensis* polysaccharide composite nanoparticles: fabrication, characterization and antitumor activity[J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2021, 66: 102811.
［44］ SANNA V, LUBINU G, MADAU P, et al. Polymeric nanoparticles encapsulating white tea extract for nutraceutical application[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(7): 2026−2032.