袁翔宇, 徐敏, 张瑾莉, 等. 基于卵白蛋白与低聚果糖为壁材的香榧籽油微胶囊制备及其稳定性分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 172−181. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070018

YUAN Xiangyu, XU Min, ZHANG Jinli, et al. Preparation and Stability Analysis of *Torreya grandis* Seed Oil Microcapsules Using Ovalbumin and Fructooligosaccharide as Wall Materials[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 172−181. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070018

· 工艺创新与智能制造 ·

基于卵白蛋白与低聚果糖为壁材的香榧籽油微胶囊制备及其稳定性分析

袁翔宇[1,2], 徐　敏[1], 张瑾莉[1], 李述刚[2,*]

（1.安徽粮食工程职业学院, 安徽合肥 230011;
2.合肥工业大学食品与生物工程学院, 安徽合肥 230601）

摘　要: 为拓宽香榧籽油在食品工业中的功能化应用，本实验以卵白蛋白（ovalbumin，OVA）和低聚果糖（fructooligosaccharide，FOS）为复合壁材，经喷雾干燥，制备香榧籽油微胶囊。通过粒径、ζ-电位、微观形态及贮藏稳定性对乳液进行表征，分析微胶囊粉末的理化性质、微观形貌、氧化稳定性、热稳定性及体外模拟消化特性，并研究不同比例 FOS-OVA 复合壁材组合得到的微胶囊性能。结果显示，以 OVA-FOS 为壁材、香榧籽油为芯材能形成稳定的水包油型乳液，其中，2%（w/w）OVA 和 18%（w/w）FOS 的壁材比例能实现 20%（w/w）香榧籽油负载量的微胶囊制备。所形成的微胶囊结构致密，对香榧籽油的包埋率达 71.96%，兼具良好的溶解度（61.78%）、流动性（休止角 36.83°）与贮藏性（水分含量 3.72%）。加速氧化实验证实，微胶囊能有效保护香榧籽油，过氧化值和硫代巴比妥酸值较未包埋油脂分别降低了 53.30% 和 66.06%，氧化稳定性显著提升。热重分析表明，微胶囊在 200 ℃ 以下具有良好的稳定性，能满足食品热加工需要。同时，微胶囊化香榧籽油在体外模拟消化过程中具有较好的缓释特性。本研究可为香榧籽油微胶囊产品的开发及功能性油脂的有效保护提供理论方法参考，同时为开发功能性油脂食品提供新思路。

关键词: 香榧籽油, 微胶囊, 卵白蛋白, 低聚果糖, 稳定性

中图分类号: TS221　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0172−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070018

本文网刊:

Preparation and Stability Analysis of *Torreya grandis* Seed Oil Microcapsules Using Ovalbumin and Fructooligosaccharide as Wall Materials

YUAN Xiangyu[1,2], XU Min[1], ZHANG Jinli[1], LI Shugang[2,*]

（1.Anhui Vocational College of Grain Engineering, Hefei 230011, China;
2.College of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China）

Abstract: To broaden the functional applications of *Torreya grandis* seed oil in the food industry, mixtures of ovalbumin (OVA) and fructooligosaccharides (FOS) in varying proportions were employed as wall materials to prepare microcapsules of *Torreya grandis* seed oil via spray drying. The emulsions were characterized in terms of particle size, ζ-potential, micromorphology, and storage stability. The physicochemical properties, micromorphology, oxidative stability, thermal stability, and *in vitro* simulated digestion behavior of the microcapsule powders were also analyzed. The results indicated that stable oil-in-water (O/W) emulsions could be formed using OVA-FOS as wall materials with *Torreya grandis* seed oil as the core.

收稿日期: 2025−07−04

基金项目: 安徽省高校自然科学研究项目（2023AH053273）; 安徽省教育厅中青年教师培养行动项目（JNFX2023189）; 安徽省高校省级质量工程项目（2023jyxm1716）; 安徽省职成教学会规划课题（AZCJ2024116）。

作者简介: 袁翔宇（1992−）, 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 油脂质量安全, Email: ahxiangyu90@126.com。

*** 通信作者:** 李述刚（1979−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 健康食品与配料创新, Email: lishugang2010@163.com。

Notably, a wall material ratio of 2 % (w/w) OVA and 18 % (w/w) FOS enabled the successful encapsulation of 20 % (w/w) *Torreya grandis* seed oil. An encapsulation efficiency of 71.96 % was achieved with a dense structure of *Torreya grandis* seed oil microcapsules, along with excellent solubility (61.78%), flowability (angle of repose of 36.83°) and storage stability (moisture content 3.72%). Accelerated oxidation tests confirmed that the microcapsules effectively protected *Torreya grandis* seed oil. The peroxide value and thiobarbituric acid value were reduced by 53.30% and 66.06%, respectively, compared with the unencapsulated oil, indicating a significant improvement in oxidative stability. Thermogravimetric analysis demonstrated that the microcapsules exhibited excellent stability below 200 ℃, meeting the thermal processing requirements for food applications. Furthermore, the microencapsulated *Torreya grandis* seed oil showed superior slow-release characteristics during simulated *in vitro* digestion. This study provides a theoretical reference for the development of microencapsulated *Torreya grandis* seed oil products and the effective protection of functional oils, offering new perspectives for the development of functional oil-based foods.

Key words: *Torreya grandis* seed oil; microcapsules; ovalbumin; fructooligosaccharide; stability

香榧（*Torreya grandis*），又名榧子、细榧等，属于红豆杉科榧树属常绿乔木，是我国特有的多用途珍稀经济树种[1]，兼具果用、药用、材用、油用及观赏价值，主要分布于浙江、安徽、江苏等省份[2]。作为国家卫生部首批收录的药食同源食品[3]，其籽仁的含油率高达 42.6%~61.5%，油脂中的不饱和脂肪酸占总脂肪酸含量的 76.1%~94.3%，以油酸和亚油酸为主[4]，同时还含有一种特征脂肪酸—金松酸（二十碳三烯酸，C20:3），其含量约 10%[5]。此外，香榧籽油中富含多种脂质伴随物，包括酚类化合物、生育酚、植物甾醇及角鲨烯等功能性成分[6]。研究表明，这些活性物质赋予香榧籽油显著的降血糖、调血脂、抗高血压、预防心脑血管疾病及抗氧化、抗衰老等生理功能，使其具有重要的药用价值与经济开发潜力[7]。然而，香榧籽油中富含的不饱和脂肪酸，极易受氧气、光照及水分等环境因素影响而发生氧化酸败，进而导致保质期缩短、感官品质劣变及食用安全风险，限制了其在食品工业中的应用[8]。因此，探究提高香榧籽油稳定性、拓展其应用范围的方法，对延缓其氧化变质进程、延长货架期及保障产品品质具有重要的理论与实际意义。

微胶囊技术是通过在芯材颗粒表面构建连续的壁材膜层，形成物理隔离屏障，从而能够有效保护对环境敏感的活性成分[9]，在食品工业中广泛应用于提升芯材稳定性、增强功能特性及延长货架期[10]。近年来，功能性油脂微胶囊化技术研究已经取得了一定进展。例如，Chen 等[11] 以鹰嘴豆蛋白与高甲氧基果胶为复合壁材包埋元宝槭油，达到 80.22% 的包埋率，同时显著提升其氧化稳定性与热稳定性。Song 等[12] 利用乳清蛋白与辛烯基琥珀酸淀粉钠作为壁材包埋油茶籽油，经冷冻干燥后得到的微胶囊包封率可达 95.19%。这些研究表明，优化壁材配方与工艺可提升功能性油脂微胶囊的包埋效率与功能特性。然而，作为我国特有的功能性油脂，香榧籽油的微胶囊化研究尚未广泛开展。

在微胶囊技术的应用中，蛋白质-碳水化合物的复合壁材常被广泛用作微胶囊壁材。其中，卵白蛋白（ovalbumin，OVA）作为蛋清蛋白的主要成分，兼具疏水基团和亲水基团，可快速吸附在油滴表面并稳定乳液，在食品和医药领域常用于包封生物活性物质及药物等[13]。已有研究证实，OVA 可与菊糖作为复合壁材有效包封石榴籽油，并提高乳液的理化性质和氧化稳定性[14]；还可与果胶、海藻酸钠包埋维生素 D_3，包封率达 96.6%[15]。这些为本研究选择 OVA 提供了理论依据。低聚果糖（fructooligosaccharide，FOS）作为益生元型碳水化合物，不仅具有良好的水溶性与热稳定性[16]，还能弥补单一 OVA 作为壁材在微胶囊制备中的性能缺陷。OVA 单独作为壁材时，微胶囊喷雾干燥的制备过程中易因蛋白变性而导致囊壁开裂[17]，FOS 的加入可通过氢键与 OVA 形成稳定复合物，减少囊壁收缩与裂缝[18]。目前，FOS 可与海藻酸钙联用包埋副干酪乳杆菌[19]，与乳清蛋白复合包埋黑豆皮花青素[20]。同时，FOS 的益生元特性赋予微胶囊额外的功能价值，符合功能性食品在营养与功能方面的开发需求。

本研究以香榧籽油微胶囊化为目标，以卵白蛋白-低聚果糖为复合壁材包埋香榧籽油，通过喷雾干燥法制备微胶囊。以包埋率、氧化稳定性、热稳定性及体外模拟消化油脂释放率为核心评价指标，分析对比未包埋香榧籽油与微胶囊化后产品的差异，以期扩大香榧籽油在食品工业中的应用范围，同时为功能性油脂的微胶囊化工艺开发提供理论依据与技术参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

香榧籽油（食品级，纯度≥99%）　购于安徽黄山巧明贡榧有限公司；卵白蛋白（纯度≥80%）、低聚果糖（纯度≥95%）、胆盐、胃蛋白酶（30 U/mg）、胰蛋白酶（250 U/mg）　上海源叶生物科技有限公司；石油醚、冰醋酸、三氯甲烷、正己烷、丙酮、无水硫酸钠、无水乙醚、氢氧化钠、盐酸、氯化钠、氯化钾、氯化钙、磷酸二氢钾、磷酸氢钠　分析纯，国药集团化学试剂有限公司；尼罗红、尼罗蓝、可溶性淀粉、木瓜蛋白酶（2000 U/mg）、淀粉酶（8000 U/g）、碘化钾、氢氧化钾（优级纯）、37 种脂肪酸甲酯混标　上海阿拉丁生化股份有限公司；硫代硫酸钠标准滴定溶液　广

州和为医药科技有限公司; KBr(纯度≥99%)、甲醇(色谱纯)、正己烷(色谱纯)、14% 三氟化硼-甲醇溶液　上海麦克林生化科技股份有限公司; 丙二醛试剂盒　南京建成生物工程研究所。

GY-XXGZJ 小型喷雾干燥机　上海归永电子有限公司; Y30D 高速剪切乳化机　上海约迪机械设备有限公司; GZX-9146MBE 电热鼓风干燥箱、BSC-150 恒温恒湿箱　上海博讯有限公司; A16K-R 台式高速冷冻离心机　湖南安君研仪器有限公司; 84-1A 磁力搅拌器　上海司乐仪器有限公司; N-1300 旋转蒸发仪　上海爱朗仪器有限公司; BSA224S-CW 分析天平　德国赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; HH 数显恒温水浴锅　常州国宇仪器制造有限公司; FE28 pH 计　瑞士 METILER TOLEDO 公司; TSC SP8 双光子共聚焦显微镜　德国 Leica 公司; Malvern NanoZS 激光粒度仪　英国 Malvern 公司; SU8600 扫描电子显微镜　日本 HITACHI 公司; STA449F3 同步热分析仪　德国 Netzsch 公司; Nicolet IS50 傅里叶红外光谱仪　美国 Thermo Fisher 公司; 8890-7000D 气相色谱三重四极杆质谱联用(GC-MS)　美国 Agilent 公司; T6 新世纪紫外可见分光光度计　北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2　实验方法

1.2.1　脂肪酸组成测定　脂肪酸甲酯化: 参考熊远夷等[21]方法, 略作修改。称取 50 mg 香榧籽油, 加入 2 mL 1 mol/L KOH-CH_3OH 溶液, 60 ℃ 水浴下皂化 30 min。冷却至室温, 加入 2 mL 14%(w/v)BF_3-CH_3OH 溶液, 60 ℃ 水浴下甲酯化 30 min。冷却至室温后, 加入 3 mL 正己烷(色谱纯), 涡旋振荡 2 min, 静置分层, 经无水 Na_2SO_4 干燥后取上层有机相, 过 0.22 μm 有机相滤膜后, 采用 GC-MS 分析测定。

GC 条件: 色谱柱为 DB-WAX 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm), 进样口温度 250 ℃, 分流比 10∶1, 进样量 1.0 μL, 载气为氦气, 流速 0.8 mL/min, 升温程序: 85 ℃ 保持 2 min, 以 20 ℃/min 升至 140 ℃, 保持 1 min, 以 5 ℃/min 升至 170 ℃, 保持 5 min, 以 2 ℃/min 升至 250 ℃ 保持 1 min。

MS 条件: EI 离子源, 温度 230 ℃, 扫描方式为全扫描, 质量扫描范围 m/z 10~500。检索 NIST 20 质谱库, 结合脂肪酸甲酯混标的保留时间对脂肪酸进行定性, 面积归一化法定量。

1.2.2　香榧籽油微胶囊制备工艺流程　参考 Akhtar 等[22]、Barroso 等[23]制备方法, 略作修改, 工艺流程见图 1。

1.2.3　水包油乳液制备　参考 Lin 等[24]方法, 略作修改。称取一定质量的卵白蛋白加入超纯水中, 配制成 2%(w/w)的蛋白溶液, 调节溶液 pH 为 9.0。以壁芯比为 1∶1, 载油量为 10%、15%、20%及 25%, 分别对应加入 8%、13%、18% 及 23% 的低聚果糖, 于室温下以 400 r/min 搅拌 12 h 至完全溶解。调节溶液

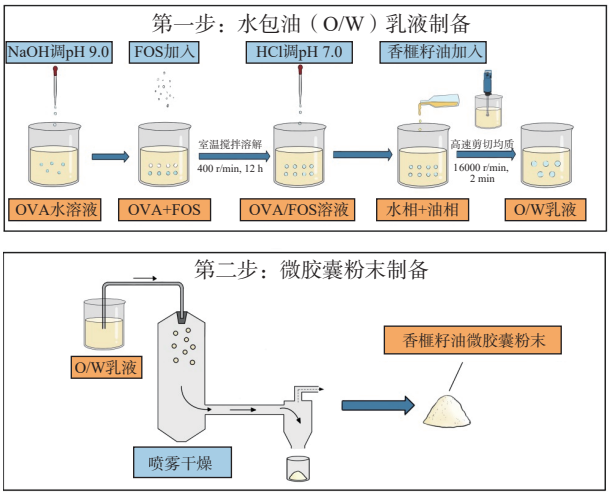


图 1　香榧籽油微胶囊工艺制备流程

Fig.1　Microencapsulation process of *Torreya grandis* seed oil

pH 至 7.0 后, 将香榧籽油逐步加入水相中, 采用 16000 r/min 高速剪切乳化均质 2 min, 制备得到四种不同载油量的水包油乳液。

1.2.4　乳液性质测定

1.2.4.1　乳液粒径及 ζ-电位　制备好的乳液加入一定量超纯水稀释至 1000 倍, 使用激光粒度仪测定乳液的平均粒径及 ζ-电位, 样品折射率为 1.46, 水相为 1.33。

1.2.4.2　乳液微观结构表征　使用激光共聚焦显微镜(CLSM)观察乳液的微观结构。参考 Comunian 等[25]方法, 略作修改。取 1 mL 乳液, 加入 10 μL 尼罗红和 10 μL 尼罗蓝染色液(浓度均为 0.02%, w/v)。在黑暗条件下避光染色 30 min。染色完成后, 取 15 μL 乳液滴在载玻片上, 盖上盖玻片, 在共聚焦显微镜 63 倍油镜下观察。激发波长为 488 nm(尼罗红)及 638 nm(尼罗蓝), 扫描频率为 100 Hz。

1.2.4.3　乳液贮藏稳定性　取 20 mL 不同载油量的水包油乳液, 置于 30 mL 玻璃瓶中, 于 4 ℃ 下放置 7 d, 每天观察记录乳液的相分离情况。

1.2.5　微胶囊粉末理化性质表征

1.2.5.1　香榧籽油微胶囊的制备　采用喷雾干燥技术制备香榧籽油微胶囊粉末。喷雾干燥工艺条件: 入口温度为 180 ℃, 出口温度 120 ℃, 进料速度 0.4 L/h。所得到的微胶囊粉末于 4 ℃ 干燥、避光保存备用。

1.2.5.2　微胶囊粒径测定　参考王金华等[26]方法: 称取 0.05 g 微胶囊粉末, 加入 50 mL 超纯水中, 搅拌使其充分溶解。采用激光粒度分析仪测定微胶囊粉末粒径大小。

1.2.5.3　微胶囊水分含量测定　参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》第一法直接干燥法, 测定微胶囊中的水分含量。

1.2.5.4　溶解度测定　参考 Hu 等[27]方法, 略作修改。称取 1.0 g(精确到 0.0001 g)微胶囊粉末, 加入 50 mL 超纯水, 于室温下搅拌 30 min, 然后在 5000 r/min 转

速下离心 5 min。收集全部上清液，并在 105 ℃ 下干燥至恒重。根据公式(1)计算溶解度。

$$溶解度(\%)=\frac{m_2}{m_1}\times 100 \quad 式（1）$$

式中：m_1 为溶液中微胶囊粉末的总质量，g；m_2 为上清液中微胶囊粉末的质量，g。

1.2.5.5　堆积密度测定　参考 Bai 等[28] 方法，略作修改。称取 2.0 g 微胶囊粉末倒入 10 mL 量筒中。根据公式(2)计算堆积密度 ρ。

$$\rho=\frac{m}{V} \quad 式（2）$$

式中：m 为质量，g；V 为堆积体积，mL。

1.2.5.6　休止角测定　参考马明月等[29] 方法：称取 5.0 g 微胶囊粉末，将其从高 10 cm 处的漏斗中自然落下，形成锥体，测定形成锥体的高度(h)和半径(r)。根据公式(3)计算休止角 θ。

$$\theta=\arctan\frac{h}{r} \quad 式（3）$$

式中：h 为微胶囊形成锥体的堆积高度，mm；r 为锥体半径，mm。

1.2.5.7　表面含油率测定　参考 Wang 等[30] 方法，略作修改。称取 2.0 g(精确到 0.0001 g)微胶囊粉末于锥形瓶中，其质量记为 m_0。加入 20 mL 正己烷，于室温下缓慢振荡 1 min 后过滤，并用 10 mL 正己烷洗涤锥形瓶两次，合并滤液与洗涤液，加入已恒重的圆底烧瓶中(质量记为 m_1)，旋转蒸发至近干，后置于 105 ℃ 的烘箱中干燥至恒重，冷却至室温后再称量其质量 m_2。根据公式(4)计算表面含油率。

$$表面含油率(\%)=\frac{m_2-m_1}{m_0}\times 100 \quad 式（4）$$

式中：m_0 为微胶囊粉末质量，g；m_1 为圆底烧瓶质量，g；m_2 为干燥至恒重后圆底烧瓶总质量，g。

1.2.5.8　包埋率测定　参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》第一法 索氏抽提法，并作修改测定总油含量。称取 2.0 g(精确到 0.0001 g)微胶囊粉末于烧杯中，加入 20 mL 无水乙醚，搅拌 10 min，过滤得滤液。重复用 20 mL 无水乙醚溶解提取 2 次，合并滤液，于 50 ℃ 水浴中旋转蒸发除去溶剂，并在 105 ℃ 干燥至恒重。根据公式(5)计算包埋率。

$$包埋率(\%)=\frac{总油含量-表面油含量}{总油含量}\times 100 \quad 式（5）$$

1.2.6　傅里叶变换红外光谱(FTIR)　参考 Yu 等[31] 方法。将 OVA、FOS 及微胶囊粉末以 1∶100 的质量比与 KBr 混合，均匀研磨后压成 1~2 mm 的薄片。FTIR 以分辨率为 4 cm^{-1} 在 4000~400 cm^{-1} 全波段下扫描 64 次。

1.2.7　扫描电子显微镜(SEM)观察微胶囊表面结构　取少量微胶囊粉末，使其均匀分散到导电胶上，并对样品进行喷金，在 3.0 kV 加速电压模式下进行扫描，观察样品的微观形态及表征。

1.2.8　微胶囊氧化稳定性测定　取微胶囊粉末与香榧籽油各 15 g 置于 50 mL 离心管中，在 60 ℃、50% 湿度下，加速氧化 15 d，每隔 3 d 取出，分别测定微胶囊粉末和香榧籽油的过氧化值(POV)和硫代巴比妥酸值(TBARs，以丙二醛含量计)。其中，POV 依据 GB 5009.227-2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》第一法 指示剂滴定法测定。TBARs 采用南京建成生物工程研究所研制的试剂盒法，该方法基于丙二醛(MDA)与硫代巴比妥酸(TBA)缩合生成的红色产物在 532 nm 处具有最大吸收峰，比色后定量 MDA，具体操作如下：取 10 mL 离心管分别配制空白管、标准管及测定管溶液，涡旋混匀后，在离心管盖上扎一小孔，95 ℃ 水浴 80 min，取出冷水冷却，分别加入 0.1 mL 氯仿，涡旋振荡 1~3 min，在 4000 r/min 转速下离心 10 min，取上清液，于 532 nm 波长下，以蒸馏水调零，测定各管的吸光度 A。根据公式(6)计算 MDA 含量。

$$MDA含量=\frac{测定A-空白A}{标准A-空白A}\times\frac{10\times 72.06}{1000} \quad 式（6）$$

式中：MDA 含量，mg/kg；10 为标准品浓度，nmol/L；72.06 为 MDA 摩尔质量，g/mol；1000 为单位换算系数。

1.2.9　热重分析(TG)　参考 Mu 等[32] 方法，略作修改。称取 5 mg 微胶囊粉末，在氮气流中以流速 40 mL/min，在 25~600 ℃ 温度范围内加热，升温速率为 10 ℃/min，测定 TG 曲线。

1.2.10　体外模拟消化　参考 Yang 等[33] 方法配制体外消化液及模拟消化，略作修改，具体方法如下。

1.2.10.1　模拟胃液及肠液制备　模拟胃液：称取 2.0 g NaCl、0.5 g KCl 及 0.01 g $CaCl_2$，溶解于约 950 mL 蒸馏水中，加入 10.0 g 胃蛋白酶，定容至 1000 mL，用 1.0 moL/L HCl 溶液调节 pH 至 2.0。

模拟肠液：称取 8.0 g NaCl、0.2 g KCl、0.1 g $CaCl_2$、0.24 g KH_2PO_4、1.15 g $NaHPO_4$，溶解于 900 mL 蒸馏水中，加入 3.0 g 胆盐、10.0 g 胰蛋白酶，定容至 1000 mL，用 1.0 mol/L NaOH 溶液调节 pH 至 6.8。

1.2.10.2　模拟消化　称取 5.0 g 20% 载油量的微胶囊，加入 50 mL 模拟胃液，于 37 ℃ 下恒温振荡 2 h，模拟胃消化。胃消化结束后，调节 pH 至 6.8 使胃蛋白酶失活。后加入等体积的模拟肠液，同样在 37 ℃ 下恒温振荡 2 h。期间每隔 30 min 取出消化液 10 mL，并调节 pH 至 3.0 使胰蛋白酶失活。将灭酶后的溶液与 25 mL 正己烷一同转移至分液漏斗中，振荡提取，得正己烷提取液。重复提取 3 次，合并提取液至旋转蒸发器中除去正己烷，得消化后的表面油。根据公式(7)计算微胶囊在模拟体外消化过程中油脂的释放率。

$$油脂释放率(\%)=\frac{消化后表面油含量}{微胶囊总油含量}\times 100 \quad 式（7）$$

1.3 数据处理

每个实验重复 3 次，得到的数据采用 SPSS 21.0 软件进行数据处理及单因素方差分析（ANOVA），选择 $P<0.05$ 的显著性水平验证。结果以平均值±标准差表示，并用 Origin 2024 作图。

2 结果与分析

2.1 香榧籽油脂肪酸组成

GC-MS 测定的香榧籽油主要脂肪酸组成及含量如表 1 所示。香榧籽油的主要脂肪酸为棕榈酸（C16:0）、硬脂酸（C18:0）、油酸（C18:1）、亚油酸（C18:2）、亚麻酸(C18:3)、花生二烯酸(C20:2)、金松酸(C20:3)，不饱和脂肪酸总含量为 82.54%，其中多不饱和脂肪酸含量达 50% 以上。因此，香榧籽油自然状态下很容易受到温度、光照、氧气、水分等因素影响而发生氧化酸败，可采用微胶囊包埋技术以提升其稳定性。

2.2 乳液性质

2.2.1 乳液粒径与 ζ-电位 乳液粒径是影响乳液稳定性、包埋效率及微胶囊粉体性能的关键参数。不同载油量乳液的平均粒径如图 2A 所示。结果显示，乳液的平均粒径随低聚果糖（FOS）比例的增加呈先减小后增大的趋势，这可能是因为 FOS 的加入，降低了 OVA-FOS 复合物表面的张力，而过高浓度的低聚果糖则提升了水相黏度，降低了均质破碎效率，Hu 等[14] 以菊粉糖化卵白蛋白包埋石榴籽油的研究与此类似。已有研究证实，乳液粒径越小，乳液的稳定性越高。乳液液滴大小取决于乳液的黏度比（分散相/连续相），黏度比越低，液滴就越小[23]。本实验中，随着 FOS 的加入，乳液黏度增加[34]，使得乳液的黏度比下降，从而减小了乳液的粒径。

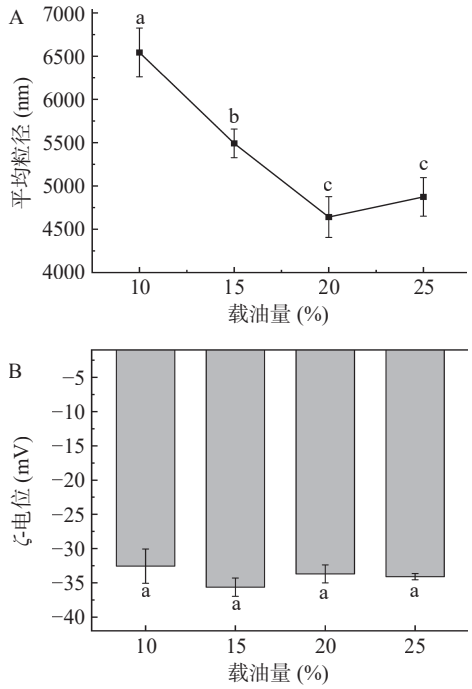


图 2 不同载油量乳液粒径大小（A）与 ζ-电位（B）

Fig.2 Particle size (A) and ζ-potential (B) of emulsion with different oil loading capacities

注：不同字母表示结果存在显著性差异（$P<0.05$）。

ζ-电位是表征乳液液滴表面电荷的参数，能够反映液滴之间静电斥力与乳液稳定性的内在关联。OVA 是复合壁材中主要的带电组分，乳液 pH 为 7.0，高于 OVA 的等电点，因此乳液呈负 ζ-电位。通常，乳液电位绝对值越大，液滴之间静电斥力越强，从而阻止了乳液液滴相互靠近形成聚集体，乳液稳定性也越强[35]。如图 2B 所示，不同载油量乳液的 ζ-电位没有显著性差异（$P>0.05$），表明 FOS 的加入不影响乳液电位，乳液电位主要由 OVA 决定。

2.2.2 乳液微观形态及贮藏性 激光共聚焦显微镜（CLSM）可以用来表征乳液微观结构与相分布。如图 3A 结果显示，采用荧光染料尼罗红与尼罗蓝对乳液进行双染色，叠加图像（图 3A-c）清晰显示出四种载油量乳液均呈现典型的水包油（O/W）型结构，其中绿色荧光区域（油滴）均匀分散于红色荧光连续相（蛋白质）中。新鲜制备的乳液液滴总体分布均匀，乳液平均粒径逐渐减小，与其他文献中所报道的 O/W 型乳液微观结构形态一致[36]。乳液贮藏稳定性实验结果如图 3B 所示。初始状态下，四组乳液均呈现均匀

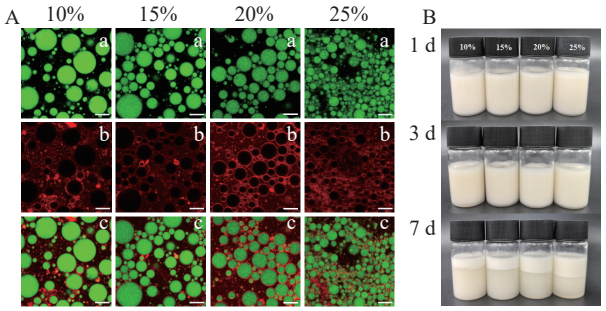


图 3 OVA-FOS 复合乳液激光共聚焦显微镜图像（A）和贮藏乳液外观（B）

Fig.3 CLSM images of OVA-FOS complex stabilized emulsions (A) and appearance of stored emulsions (B)

注：a：单独尼罗红荧光图；b：单独尼罗蓝荧光图；c：尼罗红和尼罗蓝双通道叠加图；放大倍数 63 倍，标尺 10 μm

表 1 香榧籽油脂肪酸组成及含量（%，n=2）

Table 1 Fatty acid compositions and contents of *Torreya grandis* seed oil (%, n=2)

棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	花生二烯酸	金松酸	多不饱脂肪酸
9.05±0.43	5.58±0.45	30.44±0.85	35.12±0.17	0.81±0.03	3.56±0.19	12.61±2.08	52.10

注：数据以“平均值±极差”表示。

乳白色乳状液。贮藏 3 d 后，乳液基本没有变化，表明所制备的乳液具有一定的稳定性。而贮藏 7 d 后，四组乳液均出现较为明显的分层现象，形成顶部乳脂层与底部水相层，此时乳液稳定性在下降。Zou 等[37]同样观察到在乳清蛋白中复配高浓度的低聚木糖时，由于乳液絮凝作用减弱，而导致乳液稳定性下降。

2.3　微胶囊理化性质

不同载油量微胶囊的理化指标测定结果如表 2 所示。水分含量是影响微胶囊粉末贮藏性的关键指标之一。低水分含量的微胶囊粉末能够有效抑制微生物生长和粉体结块，从而具有良好的贮藏稳定性。由表 2 可知，四种载油量的香榧籽油微胶囊水分含量在 2.77%~4.75% 之间，能够满足微胶囊粉末的贮藏稳定性要求[38]。

表 2　不同载油量微胶囊的理化指标

Table 2　Physicochemical properties of microcapsules with different oil loading capacities

理化指标	10%	15%	20%	25%
水分含量(%)	4.75±0.04^{a}	4.08±0.07^{b}	3.72±0.07^{c}	2.77±0.08^{d}
溶解度(%)	55.16±0.40^{d}	56.99±0.87^{c}	61.78±0.46^{a}	58.97±0.65^{b}
堆积密度(g/cm^{3})	0.29±0.02^{c}	0.37±0.02^{b}	0.41±0.02^{a}	0.38±0.01^{ab}
休止角θ(°)	40.88±0.26^{a}	39.46±0.17^{b}	36.83±0.34^{c}	41.60±0.64^{a}
粒径(μm)	93.12±6.67^{d}	116.34±8.78^{c}	138.41±8.56^{b}	166.95±7.38^{a}
表面含油率(%)	9.89±0.47^{a}	8.99±0.31^{ab}	7.35±0.44^{c}	8.62±0.69^{b}
包埋率(%)	62.07±0.72^{d}	65.10±0.40^{c}	71.96±0.75^{a}	68.37±0.89^{b}

注：表中数据以“平均值±标准差”表示(n=3)。同一行后标注不同小写英文字母，表示不同处理条件下微胶囊该指标数值存在显著性差异(P<0.05)。

溶解度是评价粉末颗粒水溶性的重要指标。如表 2 所示，四种微胶囊粉末在水中的溶解度为 55.16%~61.78%，表明其均具有良好的复溶性。该溶解度范围能够满足冲调食品基料的应用要求，为香榧籽油在功能性饮料中的应用提供了可行性理论参考。堆积密度作为表征粉体紧实程度的重要指标，反映了粉末颗粒与空气接触面积。本实验中，微胶囊粉末的堆积密度在 0.29~0.41 g/cm^{3} 之间，其中 20% 载油量的微胶囊堆积密度最大。较高的堆积密度表明微胶囊粉末紧实，空气较难渗透，表现出良好的贮藏性[39]。休止角是衡量粉体流动性的经典参数。一般来说，休止角≤45°时，粉体表现出良好的流动性[40]。实验结果显示，四组微胶囊粉末休止角均小于 45°，表明在常规加工条件下，微胶囊粉末易形成均匀流态，不易出现团聚结块，后续可应用于开发营养与功能性食品[41]。

微胶囊经加水复溶后，粒径分布在 93.12~166.95 μm 之间，较原乳液粒径明显增大，这种变化可能是由于在喷雾干燥过程中，因为温度升高及水分蒸发，黏度较大的球型乳液发生凝聚，形成了较大的微胶囊颗粒[42]。Shamaei 等[43]观察到核桃油微胶囊粉末在较高喷雾干燥温度下也具有类似的结果。

研究显示，乳液粒径越小、乳液稳定性更高，包埋率更好[44]。本实验数据表明，当载油量为 20% 时，微胶囊表面含油率降至最低，而包埋率达到最大(71.96%)，显示出良好的包埋性。然而，当载油量再增大至 25% 时，包埋率呈现下降趋势。这可能是由于 FOS 比例增加时，体系中亲水性成分占比升高，导致油相与水相间的界面张力增大，油滴难以稳定分散在水相中，而发生聚集或分层，导致包埋率下降。

2.4　傅里叶变换红外光谱（FTIR）

利用 FTIR 光谱可分析不同组分的分子结构和化学键，明确芯材与壁材分子内相互作用特性[45]。图 4 为 OVA、FOS 及四种载油量微胶囊粉末的 FTIR 光谱图。对于 OVA，在 1646 和 1536 cm^{-1} 处的特征峰分别为酰胺Ⅰ带的 C=O 伸缩振动和酰胺Ⅱ带的 N-H 弯曲，波数 2929 cm^{-1} 处的特征峰为饱和 C-H 拉伸振动产生[46]。对于 FOS，在 1039 cm^{-1} 处出现的宽峰带，被认为是糖苷键(C-O-C)的拉伸振动。OVA-FOS 形成的壁材复合物在 3000~3600 cm^{-1} 左右均出现增强的宽吸收带，表明 OVA 与 FOS 发生氢键相互作用。这与 OVA 与壳聚糖之间的相互作用一致[47]。此外，四种微胶囊粉末的酰胺Ⅰ带和酰胺Ⅱ带吸收峰向高波段位移，且峰强度减弱，表明 OVA 与香榧籽油分子之间存在氢键和疏水相互作用[48]。四种微胶囊粉末在 1748 cm^{-1} 处都出现了新的吸收峰，这是由于香榧籽油中脂肪酸酯基的 C=O 伸缩振动，证实了香榧籽油的成功包埋，这与 Du 等[49]对核桃油的研究结果类似。

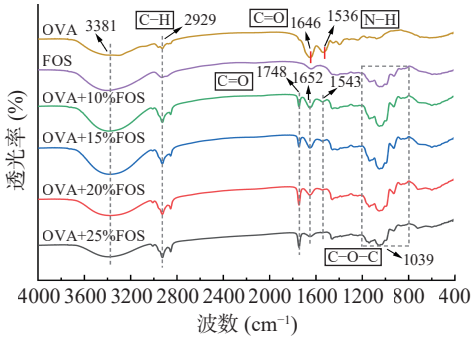


图 4　卵白蛋白、低聚果糖和香榧籽油微胶囊傅里叶变换红外光谱

Fig.4　FTIR spectrum of ovalbumin, fructooligosaccharide and *Torreya grandis* seed oil microcapsules

2.5　扫描电子显微镜（SEM）

SEM 观察微胶囊粉末微观结构如图 5 所示。观察显示，不同载油量的香榧籽油微胶囊粉末呈现典型的喷雾干燥颗粒特征，即整体呈规则球形，部分囊壁表面可见收缩裂缝、褶皱及凹陷。这种微观结构主要是因为喷雾干燥过程中，水分快速蒸发，导致颗粒在干燥和冷却过程中收缩不均匀[50]。其中，20% 载油量的微胶囊，大多呈规则球形，表面较光滑圆润，无明显凹陷、褶皱。此壁材比例下，卵白蛋白与低聚果糖通过氢键相互作用，共同构建了连续致密的壁材结构，能有效包埋香榧籽油。

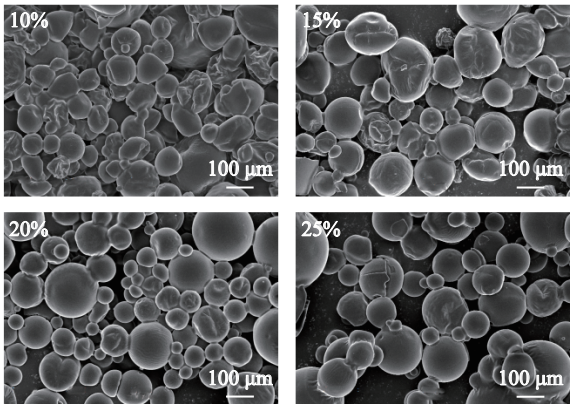


图 5　不同载油量微胶囊扫描电子显微镜图像(5000×)

Fig.5　SEM of different oil loading microcapsules (5000×)

2.6　微胶囊的氧化稳定性

油脂氧化是一系列反应，会引起油脂感官品质和营养价值降低，特别是多不饱和脂肪酸含量高的油脂。氧化开始后，首先会产生不稳定的初级氧化产物—氢过氧化物。氢过氧化物进一步分解成醛类、酮类和酸类等次级氧化产物。次级氧化产物中，丙二醛(MDA)是油脂氧化最重要的终产物[51]。因此，为了评估 OVA-FOS 包埋香榧籽油微胶囊的氧化稳定性，选取过氧化值(POV)和硫代巴比妥酸值(TBARs)表征其氧化稳定性，15 d 加速氧化实验的 POV 和 TBARs 结果如图 6A~图 6B 所示。初始氧化阶段，微胶囊 POV 和 TBARs 略高于未包埋油脂。这可能是因为乳液乳化过程中直接接触空气，以及喷雾干燥过程中高温加热，加速了乳液中油相的氧化[52]。15 d 后，20% 载油量微胶囊较未包埋香榧籽油的 POV 和 TBARs 分别降低了 53.30% 和 66.06%。结果表明，微胶囊化香榧籽油氧化稳定性显著提升，这正是由于 OVA-FOS 复合壁材可形成连续致密的膜结构，阻隔氧气渗透，从而有效降低氧化速率。Liu 等[53] 对亚麻籽油微胶囊氧化稳定性的研究也观察到相似的结果。

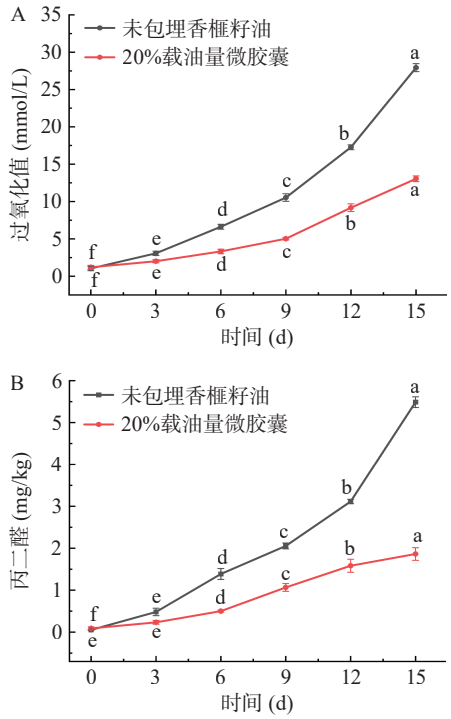


图 6　加速氧化实验中香榧籽油和微胶囊的 POV(A)及 TBARs(B)变化曲线

Fig.6　Variation curves POV (A) and TBARs (B) of *Torreya grandis* seed oil and its microcapsules during accelerated oxidation tests

注：不同字母表示结果存在显著性差异(P<0.05)。

2.7　热重分析（TG）

TG 曲线能够反映微胶囊的热稳定性特征。对香榧籽油、复合壁材及 20% 载油量微胶囊产品进行 TG 分析，结果如图 7 所示。未包埋的香榧籽油在温度升至 350 ℃ 时，开始出现明显的质量损失，至 450 ℃ 时质量损失近 100%。微胶囊热分解过程可分为三个阶段。第一阶段(温度≤200 ℃)，微胶囊对热稳定，失重率<5%。这一阶段主要是微胶囊表面水分及结合水蒸发，以及挥发性物质和小分子物质逸出[54]。第二阶段(温度在 200~480 ℃)，该阶段为主要热解区间，微胶囊质量损失明显加快，失重率近 80%。在这个阶段，由于微胶囊壁材结构严重被破坏，OVA-FOS 之间的氢键可能断裂，OVA 脱水和分解，FOS 降解，释放出香榧籽油[55]。Hu 等[56] 以豌豆蛋白和麦芽糊精为壁材制备的茶籽油微胶囊也得到了相同的趋势。第三阶段(温度在 480~600 ℃)，此时微胶囊失重趋于平稳，壁材已全部分解，部分油脂也开始出现氧化。综合分析表明，微胶囊粉末在≤200 ℃ 条件下具有良好的热稳定性，可进一步用于食品加工。

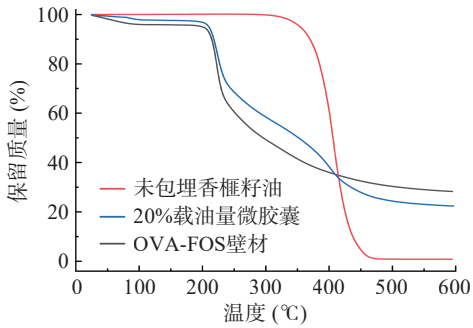


图 7　香榧籽油、20% 载油量微胶囊和 OVA-FOS 复合壁材的热重曲线

Fig.7　Thermogravimetry diagram of *Torreya grandis* seed oil, 20% oil-loaded microcapsules and OVA-FOS composite wall materials

2.8　微胶囊的体外模拟消化特性

微胶囊的体外消化特性可以通过油脂释放率随时间的变化曲线来表征。如图 8 所示。在模拟胃液环境消化 2 h 后，20% 载油量微胶囊的油脂累积释放率仅为 21.05%。这表明，以 OVA-FOS 为壁材的微胶囊，能够抵抗胃液的强酸性环境而不被破坏，对香榧籽油起到了很好的保护作用。当微胶囊进入模拟肠液环境后，胰蛋白酶能够分解微胶囊壁材，油脂的

累积释放率迅速增长，2 h 后达 70.72%。未能 100% 释放，这可能是因为模拟胃液及肠液对微胶囊的消化能力有限，同时酶的添加量不足，而蛋白-糖复合物构建的微胶囊壁材具有致密结构，肠液也无法完全消化[57]。体外模拟消化表明，微胶囊化香榧籽油具有“胃酸抵抗，肠液缓释”特性，这与功能性油脂的靶向递送需求高度契合，有利于人体对香榧籽油中功能性成分的吸收。

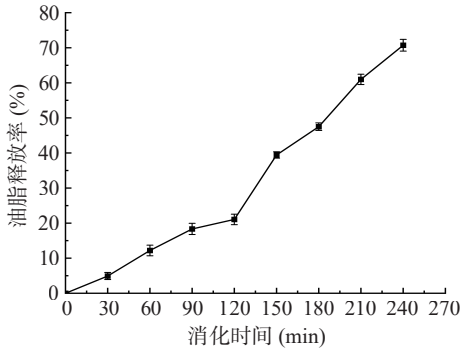


图 8　20% 载油量微胶囊在模拟体外消化中香榧籽油的释放率

Fig.8　Release rate of 20% oil-loaded microcapsules during simulated *in vitro* digestion of *Torreya grandis* seed oil

3　结论

本研究构建 OVA-FOS 复合壁材体系，通过喷雾干燥技术实现香榧籽油的微胶囊化制备。所制备的微胶囊粉末能够满足微胶囊的贮藏条件、工业化生产，不仅实现较高的包埋率、氧化稳定性、热稳定性及体外模拟消化缓释特性，还兼具蛋白质和益生元的双重功能，更符合功能性油脂微胶囊化的应用研究，为香榧籽油在食品工业中的功能化应用提供了技术支撑。所制备的微胶囊可作为功能性食品或配料，应用于乳制品、焙烤食品或功能性饮料等产品中，具有广阔的发展前景与应用价值。然而，本研究依然存在一些问题，如部分微胶囊表面存在褶皱与凹陷、体外模拟消化验证不足以及长期贮藏数据欠缺等，今后可通过优化喷雾干燥参数、完善体外模拟消化的生物利用度评估以及开展货架期研究等方式，进一步改进相关技术，助力香榧籽油微胶囊的产业化应用。

© 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］ 王宇安. 功能油脂-EGCG 纳米乳液的制备及应用[D]. 杭州：浙江农林大学, 2024. ［WANG Yu’an. Preparation and application of functional oil-EGCG nanoemulsion[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2024.］

［2］ 杨蕾, 赵荻, 胡渊渊, 等. 不同加工方式香榧香气物质和油脂品质的比较分析[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 22−31. ［YANG Lei, ZHAO Di, HU Yuanyuan, et al. Comparative analysis of aroma components and oil quality of *Torreya grandis* ‘Merrillii’ nuts with different processing techniques[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2022, 39(1): 22−31.］

［3］ 孟祥河, 杨奇波, 肖丹, 等. 香榧籽油金松酸的分离及其 1, 3-甘油二酯的制备研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(7): 72−78. ［MENG Xianghe, YANG Qibo, XIAO Dan, et al. Separation of sciadonic acid from *Torreya grandis* seed oil and preparation research of 1, 3-diacylglycerols[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(7): 72−78.］

［4］ HE Zhiyong, ZHU Haidong, LI Wangling, et al. Chemical components of cold pressed kernel oils from different *Torreya grandis* cultivars[J]. Food Chemistry, 2016, 209: 196−202.

［5］ 许晓君. 热处理香榧籽对香榧油酚类物质及其抗氧化性的影响规律研究[D]. 长沙：中南林业科技大学, 2023. ［XU Xiaojun. Effects of heat treatmen of Torreya seed oil and their antionidant capacities[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2023.］

［6］ ZONGO A W, JIN C Y, HAO G J, et al. Functional compounds of *Torreya grandis* nuts and their processing byproducts: Extraction process, health benefits, and food applications–A comprehensive review[J]. Food Research International, 2024, 197: 115232.

［7］ YANG Ruinan, ZHANG Liangxiao, LI Peiwu, et al. A review of chemical composition and nutritional properties of minor vegetable oils in China[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 74: 26−32.

［8］ 孙情情, 谭文, 魏长庆, 等. 功能性植物油脂微胶囊制备及其在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(24): 220−229. ［SUN Qingqing, TAN Wen, WEI Changqing, et al. Preparation of functional vegetable oil microcapsules and their application in food industry[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(24): 220−229.］

［9］ SUN Qingqing, TAN Wen, LIU Wenyu, et al. Inhibited the walnut oil oxidation through the microcapsules that consisted of (-)-epigallocatechin gallate and sodium caseinate[J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104601.

［10］ ZHANG Y, AMIN K, ZHANG Q, et al. The application of dietary fibre as microcapsule wall material in food processing[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141195.

［11］ CHEN Mo, ZHANG Bo, WANG Min, et al. Microencapsulation of *Acer truncatum* seed oil using chickpea protein isolate–low/high-methoxy *Citrus* pectin complex coacervates: Preparation, stability analysis, and application in milk[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 166: 111368.

［12］ SONG Fei, LI Yannan, WANG Bo, et al. Effect of drying method and wall material composition on the characteristics of *Camellia seed* oil microcapsule powder[J]. Journal of the American Oil Chemists’ Society, 2022, 99(4): 353−364.

［13］ ROSTAMABADI H, CHAUDHARY V, CHHIKARA N, et al. Ovalbumin, an outstanding food hydrocolloid: Applications, technofunctional attributes, and nutritional facts, A systematic review[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108514.

［14］ HU Bing, WANG Kangping, HAN Lingyu, et al. Pomegranate seed oil stabilized with ovalbumin glycated by inulin: Physicochemical stability and oxidative stability[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105602.

［15］ GAO Jian, LIU Chengzhi, SHI Jieyu, et al. The regulation of sodium alginate on the stability of ovalbumin-pectin complexes for VD3 encapsulation and *in vitro* simulated gastrointestinal digestion study[J]. Food Research International, 2021, 140: 110011.

［16］ 潘佳慧. 菊粉低聚果糖的结构分析及活性研究[D]. 天津：

天津科技大学, 2020. [PAN Jiahui. Structure analysis and activity study of inulin fructooligosaccharides[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020.]
[17] JANSEN-ALVES C, VICTORIA F N, BORGES C D, et al. Encapsulation of *Propolis* extract in ovalbumin protein particles: Characterization and *in vitro* digestion[J]. Natural Product Research, 2024, 38(10): 1766−1770.
[18] URANGO A C M, ARRUDA H S, PASTORE G M, et al. Maillard conjugates of whey protein and prebiotic dietary fibers: Emulsion properties, encapsulation efficiency and chemical stability after *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 703: 135193.
[19] DA CONCEIÇÃO R C N, BATISTA R D, DOS ANJOS LEAL ZIMMER F M, et al. Effect of co-encapsulation using a calcium alginate matrix and fructooligosaccharides with gelatin coating on the survival of *Lactobacillus paracasei* cells[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2021, 52(3): 1503−1512.
[20] LI Xusheng, WANG Yuxin, JIANG Yan, et al. Microencapsulation with fructooligosaccharides and whey protein enhances the antioxidant activity of anthocyanins and their ability to modulate gut microbiota *in vitro*[J]. Food Research International, 2024, 181: 114082.
[21] 熊远夷, 吕亚萍, 郝明飞, 等. 不同加工方式高油酸花生油品质及其氧化特性研究[J/OL]. 中国油脂, 1−11[2026-07-13]. https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240644. [XIONG Y Y, LÜ Y P, HAO M F, et al. Quality and oxidation characteristicsof the high oleic peanut oil prepared by different processing technologies[J/OL]. China Oils and Fats, 1−11[2026-07-13]. https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240644.]
[22] AKHTAR G, MASOODI F A, MUZAFFAR S. Fabrication of ultrafine Himalayan walnut oil Pickering emulsions by ultrasonic emulsification: Techno-functional properties of emulsions and microcapsules[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107081.
[23] BARROSO A K M, PIERUCCI A P T R, FREITAS S P, et al. Oxidative stability and sensory evaluation of microencapsulated flaxseed oil[J]. Journal of Microencapsulation, 2014, 31(2): 193−201.
[24] LIN Derong, XIAO Lijuan, LI Suqing, et al. Effects of fructooligosaccharide and soybean protein isolate in the microencapsulation of walnut oil[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 177: 114431.
[25] COMUNIAN T A, FREITAS D, DROUIN G, et al. Microencapsulation of flaxseed oil in pea protein-gum Arabic complex coacervates delays lipid digestion in liquid yoghurt[J]. Food Research International, 2024, 187: 114307.
[26] 王金华, 杨金香, 平洪睿, 等. 不同干燥方式对山桐子油微胶囊理化性质及消化性的影响[J]. 中国油脂, 2025, 50(11): 59−65,76. [WANG Jinhua, YANG Jinxiang, PING Hongrui, et al. Effect of drying methods on the physicochemical properties and digestibility of microcapsules of *Idesia polycarpa* Maxim oil[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(11): 59−65,76.]
[27] HU Xiao, LIU Lu, ZHONG Jinfeng, et al. Improved physicochemical properties and *in vitro* digestion of walnut oil microcapsules with soy protein isolate and highly oxidized konjac glucomannan as wall materials[J]. Food Chemistry, 2024, 444: 138640.
[28] BAI Ge, ZHAO Man, CHEN Xiaowei, et al. Fabrication, characterization and simulated gastrointestinal digestion of sea buckthorn pulp oil microcapsule: Effect of wall material and interfacial bilayer stabilization[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(3): 1737−1744.
[29] 马明月, 姜宏宇, 张华. 紫苏油微胶囊的性质与体外模拟消化研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(5): 102−108. [MA Mingyue, JIANG Hongyu, ZHANG Hua. Properties of *Perilla* oil microcapsules and simulated digestion *in vitro*[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(5): 102−108.]
[30] WANG Tong, CHEN Kuiren, ZHANG Xingzhen, et al. Effect of ultrasound on the preparation of soy protein isolate-maltodextrin embedded hemp seed oil microcapsules and the establishment of oxidation kinetics models[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 77: 105700.
[31] YU Hui, KONG Qing, WANG Mengru, et al. Improved viability of probiotics by encapsulation in chickpea protein matrix during simulated gastrointestinal digestion by succinylated modification[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260: 129614.
[32] MU Jingyi, HU Rongsuo, TANG Yumei, et al. Microencapsulation of green coffee oil by complex coacervation of soy protein isolate, sodium casinate and polysaccharides: Physicochemical properties, structural characterisation, and oxidation stability[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 256: 128064.
[33] YANG Siqi, ZHANG Guofang, QI Xiaoxi, et al. Improved protective and controlled releasing effect of flaxseed oil microcapsules with glycosylated casein as wall materials[J]. LWT, 2024, 191: 115687.
[34] CAMPELO-FELIX P H, SOUZA H J B, de ABREU FIGUEIREDO J, et al. Prebiotic carbohydrates: Effect on reconstitution, storage, release, and antioxidant properties of lime essential oil microparticles[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(2): 445−453.
[35] 周范琳, 罗惠, 陈楷文, 等. 鱼油-姜黄素微胶囊粉末的制备、高效包埋及稳定化作用[J]. 食品科学, 2025, 46(9): 109−120. [ZHOU Fanlin, LUO Hui, CHEN Kaiwen, et al. Preparation and stability evaluation of fish oil-curcumin microcapsules with high efficiency encapsulation[J]. Food Science, 2025, 46(9): 109−120.]
[36] YU Mengjie, FENG Ran, LONG Shen, et al. Stabilizing emulsions by ultrasound-treated pea protein isolate - tannic acid complexes: Impact of ultrasonic power and concentration of complexes on emulsion characteristics[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141266.
[37] ZOU Xiaoqiang, PAN Yuechao, HU Jijie, et al. Effects of different soluble dietary fibers on oil encapsulation: Comparison of emulsion and microcapsule properties[J]. Food Chemistry, 2025, 479: 143842.
[38] ZHANG Xingzhong, WANG Dan, LIU Lin, et al. Microencapsulation of *Zanthoxylum schinifolium* essential oil through emulsification followed by spray drying: Microcapsule characterization and functional evaluation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 687: 133484.
[39] 贺禧, 赵涛, 雷激, 等. 紫薯粗提物微胶囊的制备、表征及其生物活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(21): 286−297. [HE Xi, ZHAO Tao, LEI Ji, et al. Preparation, characterization and biological activity study of purple sweet potato crude extract microcapsules[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(21): 286−297.]
[40] 李红光, 马佳华, 毕聪慧, 等. 多糖基质虾青素酯微胶囊制备及其稳定性和消化吸收特性[J]. 食品科学, 2025, 46(16): 100−106. [LI Hongguang, MA Jiahua, BI Conghui, et al. Preparation of polysaccharide-based microcapsules loaded with astaxanthin

ester and their stability and digestive absorption characteristics[J]. Food Science, 2025, 46(16): 100−106.]

[41] RODRÍGUEZ-CORTINA A, HERNÁNDEZ-CARRIÓN M. Microcapsules of *Sacha* Inchi seed oil (*Plukenetia volubilis* L.) obtained by spray drying as a potential ingredient to formulate functional foods[J]. Food Research International, 2023, 170: 113014.

[42] HU Shihong, DING Zhuang, ZHANG Gang, et al. Fabrication and spray-drying microencapsulation of vitamin C-loaded W1/O/W2 emulsions: Influence of gel polymers in the internal water phase on encapsulation efficiency, reconstituted stability, and controlled release properties[J]. LWT, 2022, 170: 114113.

[43] SHAMAEI S, SEIIEDLOU S S, AGHBASHLO M, et al. Microencapsulation of walnut oil by spray drying: Effects of wall material and drying conditions on physicochemical properties of microcapsules[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 39: 101−112.

[44] JAMSHIDI A, SHABANPOUR B, POURASHOURI P, et al. Using WPC-inulin-fucoidan complexes for encapsulation of fish protein hydrolysate and fish oil in W1/O/W2 emulsion: Characterization and nutritional quality[J]. Food Research International, 2018, 114: 240−250.

[45] WANG Mingming, MU Hongyu, PENG Lei, et al. Effect and application of spray drying and freeze drying on characterization of walnut oil microcapsules[J]. Journal of Food Engineering, 2024, 376: 112083.

[46] WANG Yuxiao, TAO Haiteng, WANG Kunli, et al. Nanocapsules formed by interactions between chondroitin sulfate and egg white protein for encapsulating hydrophilic ingredients[J]. Green Chemistry, 2021, 23(19): 7566−7575.

[47] GU Chunye, SHAO Jiaqi, LIU Xueling, et al. Spray drying the Pickering emulsions stabilized by chitosan/ovalbumin polyelectrolyte complexes for the production of oxidation stable tuna oil microcapsules[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 273: 133139.

[48] QU Wenjuan, FENG Yuhang, XIONG Ting, et al. Preparation, structural and functional characterization of corn peptide-chelated calcium microcapsules using synchronous dual frequency ultrasound[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 102: 106732.

[49] DU Chenxing, HU Hanwen, ZHU Ge, et al. Microencapsulation of Pickering nanoemulsions containing walnut oil stabilized using soy protein–curcumin composite nanoparticles: Fabrication and evaluation of a novel plant-based milk substitute[J]. Food Chemistry, 2025, 470: 142654.

[50] GULZAR S, NILSUWAN K, RAJU N, et al. Whole wheat crackers fortified with mixed shrimp oil and tea seed oil microcapsules prepared from mung bean protein isolate and sodium alginate[J]. Foods, 2022, 11(2): 202.

[51] MA Lukai, LIU Guoqin, LIU Xinqi. Amounts of malondialdehyde do not accurately represent the real oxidative level of all vegetable oils: A kinetic study of malondialdehyde formation[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(2): 412−423.

[52] HOYOS-LEYVA J D, BELLO-PEREZ L A, AGAMA-ACEVEDO J E, et al. Characterization of spray drying microencapsulation of almond oil into taro starch spherical aggregates[J]. LWT, 2019, 101: 526−533.

[53] LIU Y K, MCCLEMENTS D J, CHEN X, et al. Plant-based flaxseed oil microcapsules fabricated from coacervation of gluten at oil droplet surface: Microstructure, oxidation stability, and oil digestion control[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(12): 8454−8470.

[54] ZHOU Dan, PAN Yun, YE Jing, et al. Preparation of walnut oil microcapsules employing soybean protein isolate and maltodextrin with enhanced oxidation stability of walnut oil[J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 83: 292−297.

[55] CHEN Xiuxiu, FENG Yan, LUAN Xinyu, et al. Gelatin/peach gum complex coacervated microcapsules loaded with cinnamon essential oil: Preparation, characterization, antibacterial properties and its application in mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. Food Control, 2025, 171: 111129.

[56] HU Yuxi, TU Jia, LI Changzhu, et al. Microencapsulation of camellia seed oil by spray drying with pea protein and maltodextrin[J]. LWT, 2024, 203: 116348.

[57] CHEN W, TIAN F, XU Y J, et al. Pea isolate protein/*β*-cyclodextrin/CQDs microcapsules improve stability and *in vitro* sustained release of fish oil[J]. Food Bioscience, 2025, 69: 106984.