朱立斌, 刘鑫, 牛广财, 等. 沙棘籽油微胶囊喷雾干燥法制备工艺优化及其理化性质与结构表征 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 192−201. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070378

ZHU Libin, LIU Xin, NIU Guangcai, et al. Optimization of the Preparation Process of Sea Buckthorn Seed Oil Microcapsules by Spray Drying and Its Physicochemical Properties and Structural Characterization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 192−201. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070378

·工艺创新与智能制造·

沙棘籽油微胶囊喷雾干燥法制备工艺优化及其理化性质与结构表征

朱立斌[1,2], 刘　鑫[1,3], 牛广财[1,2,*], 朱　丹[4,*], 魏文毅[1,2], 贾　建[1,2], 王森森[1,2]

（1.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;
2.黑龙江省农产品加工工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319;
3.沈阳市食品药品检验所, 辽宁沈阳 110124;
4.黑龙江八一农垦大学生命科学技术学院, 黑龙江大庆 163319）

摘　要: 为开发沙棘籽油新产品，本研究采用喷雾干燥法制备微胶囊化产品，并对其理化性质与结构特性进行分析。通过单因素实验和响应面试验对其制备工艺进行优化，结果表明，其制备的最佳参数为：进风温度 158 ℃、进风量 0.63 m^3/min、进料温度 70 ℃、进料速率 4.80 mL/min，在此条件下微胶囊包埋率为 91.31%。理化特性显示，微胶囊产品的水分含量为 3.47%、休止角为 37.2°、溶解度为 96.52%。热分析结果显示其玻璃态转变温度为 68.3 ℃，具有良好的热稳定性。微观结构测定结果显示，所得微胶囊呈球状或椭球状，粒径分布均匀（1~10 μm），表面光滑致密，结构完整；红外光谱证实了微胶囊包埋成功。储藏稳定性结果显示，微胶囊化处理提高了沙棘籽油的储藏稳定性，延长了其储藏时间。该研究为沙棘籽油功能食品开发提供了有效技术方案。

关键词: 沙棘籽油, 微胶囊, 喷雾干燥, 理化性质, 结构表征
中图分类号: TS225.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0192−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070378
本文网刊:

Optimization of the Preparation Process of Sea Buckthorn Seed Oil Microcapsules by Spray Drying and Its Physicochemical Properties and Structural Characterization

ZHU Libin[1,2], LIU Xin[1,3], NIU Guangcai[1,2,*], ZHU Dan[4,*], WEI Wenyi[1,2], JIA Jian[1,2], WANG Sensen[1,2]

（1.College of Food Science and Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
2.Agri-food Processing and Engineering Technology Research Center of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China;
3.Shenyang Food and Drug Inspection Institute, Shenyang 110124, China;
4.College of Life Science and Biotechnology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China）

Abstract: To develop new products of sea buckthorn seed oil, the microencapsulated products were prepared by spray drying, and their physicochemical properties and structural characteristics were analyzed. The preparation process was optimized by single factor experiment and response surface experiment. The results showed that the optimal preparation parameters were as follows: inlet air temperature was 158 ℃, inlet air volume was 0.63 m^3/min, feed temperature was 70 ℃ and feed rate was 4.80 mL/min. Under these conditions, the embedding rate of microcapsules was 91.31%. The physicochem-

收稿日期: 2025−08−01
基金项目: 黑龙江省“双一流”新一轮建设学科协同创新成果建设项目（LJGXCG2022-109）; 黑龙江省农产品加工协同创新推广体系资助项目（20250513）; 黑龙江省 2025 科技总师项目（黑科联发〔2025〕17 号）。
作者简介: 朱立斌（1997−）, 男, 博士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 1093574150@qq.com。
*** 通信作者:** 牛广财（1971−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程, E-mail: gcniu@126.com。
朱丹（1972−）, 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 植物资源开发利用, E-mail: 623016878@qq.com。

ical properties showed that the moisture content of the microcapsule product was 3.47%, the angle of repose was 37.2°, and the solubility was 96.52%. The results of thermal analysis showed that its glass transition temperature was 68.3 ℃, which indicated that it had good thermal stability. The results of microstructure determination showed that the microcapsules were spherical or ellipsoidal, with uniform particle size distribution (1~10 μm), smooth and dense surface and intact structure. The successful embedding of microcapsules was further confirmed by infrared spectroscopy. The results of storage stability showed that microencapsulation improved the storage stability of sea buckthorn seed oil and prolonged its storage time. This research provides an effective technological solution for the development of functional foods with sea buckthorn seed oil.

Key words: sea buckthorn seed oil; microcapsules; spray drying; physicochemical properties; structural characterization

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)为胡颓子科沙棘属的灌木, 沙棘籽为沙棘加工果汁后的副产物[1]。沙棘籽油具有很高的营养价值与经济价值, 沙棘籽油中具备 74.16%~90.7% 的不饱和脂肪酸, 其中含量最高的为亚麻酸和亚油酸[2−3]。沙棘籽油具有优质的食用与药用潜力, 其具备抗炎、抗氧化、抗癌和修复肌肤等功效[4−7]。但其存在易氧化, 对光、氧以及较高温度环境敏感等因素, 使其贮藏比较困难[8−9]。目前可通过加入天然或人工合成抗氧化剂及制备微胶囊, 通过保护层来延缓油脂的氧化。同时, 开发的油脂微胶囊产品可以更好地应用在食品或者保健食品中[10]。

微胶囊技术的原理是以高分子材料(天然或合成)为壁材, 将原料作为芯材与壁材通过特殊条件包裹而成的, 从而达到保护或者控制芯材释放的技术[11]。该技术能够有效地降低或避免外界条件对芯材效果的影响[9], 同时也能够遮掩芯材的不利风味与色泽对受体的影响。此外微胶囊技术具备更利于运输、储存以及便于应用等优点[12]。微胶囊产品加工中, 通常使用物理方法有喷雾干燥法、挤压法等, 化学方法有复相乳液法、相分离法等, 以及其他新兴技术如微流控技术、超临界流体法、电喷/静电纺丝等方法制备微胶囊[13], 而使用最常见的是喷雾干燥法, 该方法具备成本低、实用性强、效率高的优势, 适于工业化的生产[14−15]。近年来, 很多文献报道了不同油脂喷雾干燥法微胶囊化的工艺研究, 如 Cui 等[16] 以微晶纤维素和 β-环糊精为壁材, 采用喷雾干燥法制备核桃油微胶囊, 研究发现在 25 MPa 条件下均质 2 次, 进风温度 180 ℃, 出风温度 80 ℃ 条件下, 微胶囊包埋率最高为 80.54%, 载油量为 53.87%; 刘成祥[17] 选用阿拉伯胶和 β-环糊精为复合壁材, 牡丹籽油为芯材, 通过对喷雾干燥过程中的工艺优化, 得出在进风温度为 180 ℃, 进料温度为 55 ℃, 进料速度为 20 mL/min 时, 微胶囊包埋率达到 87.21%。

目前有学者采用不同的壁材对沙棘籽油微胶囊的制备进行了研究, 例如梁宗余等[18] 以酪蛋白酸钠-麦芽糊精为壁材, 采用喷雾干燥的方式制备沙棘籽油微胶囊, 确定其最佳工艺为均质压力 34.8 MPa、进风温度 174 ℃、进样速率 17 mL/min, 其平均包埋率为 93.25%。Zhang 等[19] 采用喷雾干燥法制备沙棘籽油微胶囊, 壁材选用大豆分离蛋白-大豆多糖, 当壁材浓度为 15%, 芯材与壁材比例为 1∶3, 进料温度为 160 ℃ 时, 包埋率为 95.30%±2.67%。由于 β-环糊精是一种中空的大分子物质, 内部有良好的疏水性, 可富集不饱和脂肪酸, 在其他油脂微胶囊的制备中使用效果较好, 但它是否也能提高沙棘籽油微胶囊的包埋效果, 尚未见深入研究。因此本研究通过对沙棘籽油喷雾干燥过程中的各影响因素进行单因素实验和响应面试验优化, 并对其理化性质进行测定, 最后通过热稳定性分析、红外光谱、扫描电镜和储藏稳定性分析, 对沙棘籽油微胶囊进行观察, 旨在制备出结构完整、较高包埋率且储藏稳定性好的沙棘籽油微胶囊产品, 为沙棘籽油的进一步开发利用提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

沙棘籽油　采用大果沙棘为原料, 参照刘鑫等[9] 方法制备, 该籽油中亚油酸占 39.60%, 亚麻酸占 32.60%, 总不饱和脂肪酸含量 88.93%; 大豆分离蛋白(SPI)　郑州谷神科技公司; 山嵛酸甘油酯　广州天润药业; β-环糊精(β-CD)　上海蓝季生物; 蔗糖脂肪酸酯(SE)　杭州金鹤来食品添加剂公司; 乙醇　分析纯, 天津大茂化学试剂厂。

ADL311-A 喷雾干燥机　日本 YAMATO 有限公司; HWS24 型电热恒温水浴锅　上海合恒仪器设备公司; SONICS VCX150 型超声波细胞破碎仪　美国 SONICS 公司; DF-1 集热式磁力搅拌器　北京东方化玻科技公司; APV2000 高压均质机　德国 SPX 公司; 101-2AB 电热鼓风干燥箱　上海捷呈实验仪器公司; TENSORII 傅里叶红外光谱　德国布鲁克(北京)科技有限公司; S-3400N 扫描电子显微镜　日本 Hitachi(日立)株式会社; Bettersize 2000 激光粒度分布仪　丹东市百特仪器公司; TGA-2 热重分析仪、DSC3 差示量热扫描仪　瑞士 Mettler Toledo 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　喷雾干燥法制备沙棘籽油微胶囊工艺流程

大豆分离蛋白+β-环糊精→溶解→调配混合→乳化→均质→稳定乳状液→喷雾干燥→沙棘籽油微胶囊产品

1.2.2　操作要点　采用大豆分离蛋白与 β-环糊精(1∶3)作为复合壁材, 壁材与芯材配比 57∶43。水相中添加 1.5% 蔗糖脂肪酸酯(70 ℃ 搅拌 10 min), 油相中加入 2% 无水乙醇和 1.8% 山嵛酸甘油酯(70 ℃

搅拌 10 min)，调整总固形物至 9%~10% 后混合乳化 10 min。初乳液经超声分散和 40 MPa 高压均质 3 次后形成稳定乳状液[20]。通过优化喷雾干燥参数(进风温度、进料速率、进风量等)最终获得沙棘籽油微胶囊产品。

1.2.3 沙棘籽油微胶囊制备的单因素实验

1.2.3.1 不同进风温度对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响 在进料温度为 60 ℃，进料速率为 5.5 mL/min，进风量为 0.65 m^3/min 条件下，考察进风温度分别为 140、150、160、170、180 ℃ 时对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响。

1.2.3.2 不同进风量对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响 在进料温度为 60 ℃，进料速率为 5.5 mL/min，进风温度为 150 ℃ 的条件下，考察进风量分别为 0.5、0.55、0.60、0.65、0.70 m^3/min 时对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响。

1.2.3.3 不同进料温度对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响 固定条件：进风量为 0.65 m^3/min，进风温度为 150 ℃，进料速率为 5.5 mL/min，设定进料温度梯度 55、60、65、70、75 ℃，测定该温度梯度对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响。

1.2.3.4 不同进料速率对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响 在进料温度为 60 ℃，进风量为 0.65 m^3/min，进风温度为 150 ℃ 的条件下，考察进料速率分别为 1.5、3.5、5.5、7.5、9.5 mL/min 时对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响[20]。

1.2.4 沙棘籽油微胶囊制备的响应面优化试验 在单因素实验基础上，以沙棘籽油微胶囊包埋率为响应值，考察因素为 A 进风温度、B 进风量、C 进料温度和 D 进料速率，以 Box-Behnken 设计进行 4 因素 3 水平的响应面优化试验，如表 1 所示。

表 1 响应面试验因素水平设计

Table 1 Factors and levels of response surface experiment

水平	A: 进风温度 (℃)	B: 进风量 (m^3·min^{-1})	C: 进料温度 (℃)	D: 进料速率 (mL·min^{-1})
−1	150	0.55	60	1.5
0	160	0.60	65	3.5
1	170	0.65	70	5.5

1.2.5 沙棘籽油微胶囊包埋率的测定

1.2.5.1 微胶囊表面油测定方法 参考李新等[21]方法，准确称取 m_0 g 样品于洁净锥形瓶中，将 30 mL 正己烷分 3 次加入锥形瓶中，每次轻轻晃动锥形瓶 30 s，将其过滤到质量为 m_1 的旋转蒸发瓶中，80 ℃ 下溶剂浓缩后将旋转蒸发瓶置于 80 ℃ 的烘箱中烘干直到质量恒重为止，剩余油脂与旋转蒸发瓶的重量记为 m_2。表面油含量计算按公式(1)计算。

$$表面油含量(\%)=\frac{m_2-m_1}{m_0}\times 100 \qquad 式（1）$$

式中：m_0 为样品净重，g；m_1 为旋转蒸发瓶质量，g；m_2 为烘干后剩余油脂与旋转蒸发瓶的质量，g。

1.2.5.2 微胶囊总油与包埋率测定方法 参考 Wang 等[22]方法，准确称取 M_0 样品于洁净锥形瓶中，加入 50 mL 正己烷后置于细胞破碎仪中，在超声波功率为 900 W 时作用 25 min 将其微胶囊结构破坏，液体过滤到质量为 M_1 的旋转蒸发瓶中，滤渣中分 3 次加入 30 mL 正己烷，每次轻轻晃动锥形瓶 30 s，滤液合并到旋转蒸发瓶中，80 ℃ 下溶剂浓缩后将旋转蒸发瓶置于 80 ℃ 的烘箱中烘干直到质量恒重为止。剩余油脂与旋转蒸发瓶的重量记为 M_2。其总含油量与包埋率根据公式(2)和公式(3)计算。

$$总含油量(\%)=\frac{M_2-M_1}{M_0}\times 100 \qquad 式（2）$$

$$包埋率(\%)=\left(1-\frac{表面油含量}{总含油量}\right)\times 100 \qquad 式（3）$$

式中：M_0 为样品净重，g；M_1 为旋转蒸发瓶质量，g；M_2 为烘干后剩余油脂与旋转蒸发瓶的质量，g。

1.2.6 沙棘籽油微胶囊理化指标的测定

1.2.6.1 水分含量的测定 精确称取 3 g 微胶囊样品于称量瓶中，105 ℃ 烘箱中放置 3 h，干燥器中冷却后称重，重复操作直至两次样品重量差小于 1 mg[17,23]，水分含量按公式(4)计算。

$$水分含量(\%)=\frac{干燥前质量-干燥后质量}{干燥前质量}\times 100 \qquad 式（4）$$

1.2.6.2 微胶囊堆积密度测定 将一定质量的沙棘籽油微胶囊缓缓注入 10 mL 量筒中，计算单位体积内微胶囊样品的重量[24]。

1.2.6.3 微胶囊流动性测定 漏斗固定于铁架台，称取 10 g 沙棘籽油微胶囊，将样品通过漏斗使其自然下落，测量微胶囊粉堆高度 H 与半径 R[25]。休止角按公式(5)计算。

$$休止角\theta=\arctan(H/R) \qquad 式（5）$$

式中：H 为微胶囊粉堆高度，mm；R 为微胶囊粉堆半径，mm。

1.2.6.4 微胶囊溶解性测定 称取一定质量的沙棘籽油微胶囊样品于烧杯中，加入 38 mL 蒸馏水分次将样品溶解于蒸馏水中，移入离心管后 4000 r/min 离心 10 min，倾去上清液后再加入 38 mL 蒸馏水，振荡混匀后 4000 r/min 离心 10 min，倾去上清液后用少量水将沉淀转移到称量瓶中，105 ℃ 条件下烘 3 h，干燥器中冷却后称重，重复操作直至两次样品重量差小于 1 mg[26]。溶解度按公式(6)计算。

$$溶解度(\%)=\left[1-\frac{W_2-W_1}{(1-B)\times W}\right]\times 100 \qquad 式（6）$$

式中：W 为样品质量，g；W_1 为称量瓶质量，g；W_2 为称量瓶及沉淀物质量，g；B 为单位样品含水量，g。

1.2.6.5　微胶囊粒径分布测定　以蒸馏水为分散剂，将 200 mg 沙棘籽油微胶囊溶于蒸馏水中，通过激光粒度分布仪测定沙棘籽油微胶囊粒径的分布情况[27]，设定遮光比 10%~20%，重复实验 3 次。

1.2.7　沙棘籽油微胶囊热稳定性分析　热重（TG）分析：称取 3 mg 沙棘籽油微胶囊放置于热重分析仪中，设置条件：升温速率 10 ℃/min，氮气流速 20 mL/min，扫描温度范围 0~650 ℃[28]。

DSC 分析：将 5~6 mg 的微胶囊置于铝盒中，设定条件：DSC 升温范围−20~250 ℃，升温速率 10 ℃/min，氮气流速 20 mL/min[29,30]。

1.2.8　沙棘籽油微胶囊微观结构表征

1.2.8.1　沙棘籽油微胶囊傅里叶变换红外光谱分析　精确称取样品 1 mg，按照样品∶溴化钾质量比为 1∶100，在玛瑙研钵中充分研磨后压制成透明薄片，在 400~4000 cm^{-1} 范围内对样品进行红外波谱扫描[17,31]。

1.2.8.2　扫描电子显微镜（SEM）观察　取少量沙棘籽油微胶囊粉末粘在导电胶的样品台上，吸耳球吹去多余粉末，喷金处理后，加速电压调整为 5.00 kV，观察样品微观结构[32,33]。

1.2.9　储藏稳定性分析　采用 Schaal 烘箱法[34]，将沙棘籽油和沙棘籽油微胶囊样品置于 63±1 ℃ 的干燥箱中进行加速氧化实验，通用超声波破壁提油方法提取微胶囊中的沙棘籽油。按照 GB 5009.227-2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》方法，分别用水将 1 g 沙棘籽油和沙棘籽油微胶囊与 0.02 g 木瓜蛋白酶和 0.02 g 淀粉酶混合，50 ℃ 水浴振荡后加入与水等体积的丙酮，混匀。用石油醚进行萃取，将有机相水洗后转入装有无水硫酸钠漏斗进行过滤。将滤液转入棕色旋蒸瓶中除去石油醚，取得待测样品。每 2 d 测定沙棘籽油与沙棘籽油微胶囊的过氧化值（POV）。

1.3　数据处理

每个试验重复 3 次，采用 Microsoft Excel 2013 软件计算平均值和标准差并作图，采用 SPSS 27.0.1 软件分析平均值间差异显著性，采用软件 Design Expert 8.0.6 进行响应面试验结果分析。

2　结果与分析

2.1　喷雾干燥最佳条件分析

2.1.1　进风温度对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响　由图 1 可知，进风温度的高低会直接影响喷雾干燥机的效率，进而影响乳化液干燥的速率。随着进风温度的增加，沙棘籽油微胶囊的包埋率呈现先上升后下降的趋势，在温度达到 160 ℃ 时，包埋率达到最高值 87.69%。推测可能是因为当进风温度低于 150 ℃ 时，乳化液未能干燥完全，造成喷雾干燥过程中的粘壁现象，影响沙棘籽油微胶囊包埋率，收集率较低[35]。但进风温度高于 160 ℃ 时，水分散失速度过快，容易造成壁材的凹陷、空洞及裂缝等现象，致使微胶囊的包埋率降低[20]。因此，进风温度为 160 ℃ 左右时效果较好，此时包埋率达到 87.69%。

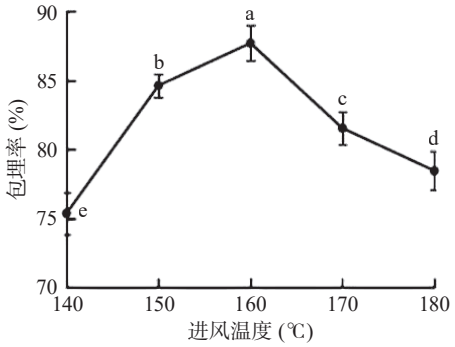


图 1　进风温度对微胶囊包埋率的影响

Fig.1　Effect of inlet air temperature on embedding rate of microcapsules

注：不同字母表示差异性显著（P<0.05），图 2~图 4 同。

2.1.2　进风量对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响　由图 2 可知，风速大小与乳化液干燥速率直接相关，在进风量较小时，微胶囊含水量较大，壁材无法形成致密膜结构，包埋率较低；随着进风量不断增加，乳化液干燥效率增加，沙棘籽油微胶囊包埋率不断增加，能有效包埋油脂；但随着进风量超过 0.65 m^3/min 时，包埋率反而下降，主要原因是壁材失水速率过快造成壁材还未形成膜结构，或者膜结构未稳定时过量失水造成膜结构的破裂，影响了微胶囊的包埋效果[20]。因此，进风量为 0.60 m^3/min 左右时效果较好，包埋率达到 85.21%。

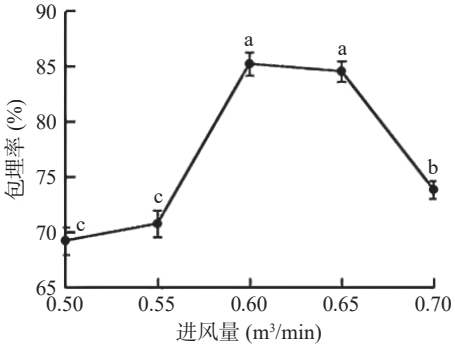


图 2　进风量对微胶囊包埋率的影响

Fig.2　Effect of inlet air volume on embedding rate of microcapsules

2.1.3　进料温度对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响　由图 3 可知，当进料温度低于 65 ℃ 时，微胶囊包埋率较低；这是由于乳化液的温度与其粘度成反比[36]，在进料温度较低时，高粘度的物料易堵塞喷口，亦不利于液滴的雾化。因此，微胶囊包埋率较低。随着进料温度的增加，在进料温度为 65 ℃ 时沙棘籽油微胶囊包埋率达到最高，达到 86.08%。随着进料温度的继续上升，沙棘籽油微胶囊包埋率出现缓慢下降的趋

势, 可能是因为过高的进料温度影响了乳化液的稳定性进而影响了微胶囊的包埋率, 也可能是因为过高的进料温度影响了壁材的性质而影响其膜结构的形成[17,20]。因此, 进料温度为 65 ℃ 左右时包埋率较高。

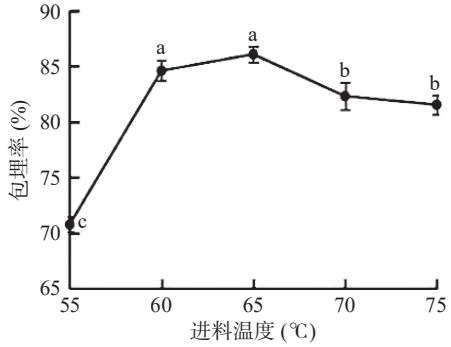


图 3 进料温度对微胶囊包埋率的影响

Fig.3 Effect of feed temperature on embedding rate of microcapsules

2.1.4 进料速率对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响 由图 4 可知, 进料速率在 5.5 mL/min 以下时, 沙棘籽油微胶囊的包埋率呈缓慢上升的趋势。但随着进料速率的进一步增加, 沙棘籽油微胶囊的包埋率急剧下降, 主要原因是进料速率过快, 塔内液滴达不到雾化效果, 乳化液中的水分不能及时蒸发, 造成粘壁现象及不能有效形成微胶囊的膜结构[37]。因此, 进料速率为 5.5 mL/min 左右时包埋率较高, 达到 84.62%。

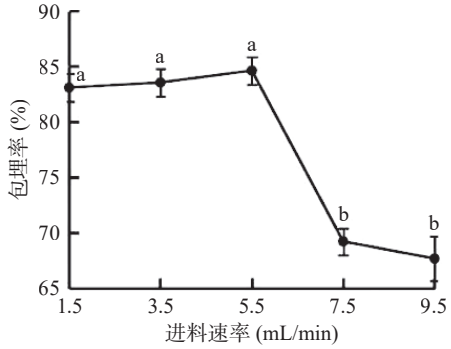


图 4 进料速率对微胶囊包埋率的影响

Fig.4 Effect of feed rate on embedding rate of microcapsules

2.1.5 沙棘籽油微胶囊制备的响应面优化 在单因素的基础上, 采用 Box-Behnken 设计, 优化因素进风温度 A、进风量 B、进料温度 C 以及进料速率 D 对沙棘籽油微胶囊喷雾干燥工艺, 其设计方案及试验结果如表 2 所示。

采用 Design-Expert 8.0.6 软件, 对表 2 中结果进行拟合分析, 得到回归方程的方差分析表(表 3), 以包埋率为目标函数的回归拟合方程为:

$$Y=90.35-0.98A-0.25B+0.78C-0.12D-0.53AB-0.42AC+0.83AD+1.85BC+1.81BD+2.49CD-5.56A^2-1.31B^2-1.44C^2-2.33D^2$$

表 3 显示, 回归模型极显著(P<0.01), 失拟项不显著(P>0.05), 且模型 R^2=0.9683,调整决定系数 R^2_{Adj}=0.9366, 说明该回归模型能很好预测各因素对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响。此外, 由该模型的方

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Design scheme and result of Box-Behnken experiment

实验号	A: 进风温度(℃)	B: 进风量 ($m^3 \cdot min^{-1}$)	C: 进料温度(℃)	D: 进料速率 ($mL \cdot min^{-1}$)	Y: 包埋率 (%)
1	150	0.55	65	3.50	83.55
2	160	0.60	65	3.50	89.72
3	160	0.60	65	3.50	91.21
4	160	0.55	65	1.50	89.29
5	160	0.55	70	3.50	86.68
6	160	0.60	70	1.50	84.91
7	160	0.65	60	3.50	84.14
8	160	0.60	70	5.50	89.98
9	160	0.60	60	1.50	87.96
10	160	0.55	65	5.50	85.84
11	150	0.65	65	3.50	84.76
12	150	0.60	60	3.50	84.54
13	160	0.65	70	3.50	89.55
14	160	0.60	60	5.50	83.07
15	160	0.65	65	5.50	88.65
16	160	0.60	65	3.50	90.87
17	170	0.60	70	3.50	82.21
18	160	0.65	65	1.50	84.86
19	150	0.60	70	3.50	86.42
20	170	0.55	65	3.50	83.06
21	150	0.60	65	5.50	81.29
22	150	0.60	65	1.50	83.94
23	160	0.60	65	3.50	90.24
24	170	0.60	65	1.50	81.29
25	170	0.60	65	5.50	81.97
26	160	0.60	65	3.50	89.72
27	160	0.55	60	3.50	88.69
28	170	0.65	65	3.50	82.17
29	170	0.60	60	3.50	82.01

表 3 回归方程的方差分析表

Table 3 Variance analysis of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	287.71	14	20.55	30.55	<0.0001	**
A: 进风温度	11.58	1	11.58	17.22	0.0010	**
B: 进风量	0.74	1	0.74	1.10	0.3120	
C: 进料温度	7.27	1	7.27	10.81	0.0054	**
D: 进料速率	0.18	1	0.18	0.26	0.6178	
AB	1.10	1	1.10	1.64	0.2213	
AC	0.71	1	0.71	1.05	0.3232	
AD	2.77	1	2.77	4.12	0.0618	
BC	13.76	1	13.76	20.46	0.0005	**
BD	13.10	1	13.10	19.48	0.0006	**
CD	24.80	1	24.80	36.86	<0.0001	**
A^2	200.47	1	200.47	297.97	<0.0001	**
B^2	11.06	1	11.06	16.43	0.0012	**
C^2	13.46	1	13.46	20.01	0.0005	**
D^2	35.19	1	35.19	52.31	<0.0001	**
残差	9.42	14	0.67			
失拟项	7.60	10	0.76	1.67	0.3269	
纯误差	1.82	4	0.45			
总和	297.13	28				

注: *差异显著, P<0.05; **差异极显著P<0.01。

差分析结果可知，模型中 A、C 影响极显著（$P<0.01$）；BC、BD、CD 等交互项的影响极显著（$P<0.01$）；二次项 A^2、B^2、C^2、D^2 的影响极显著（$P<0.01$）。图 5~图 7 为响应面与等高线图，响应曲面图有最大值，等高线呈椭圆形，这说明 BC、BD、CD 的交互作用对响应值的影响显著[20]。

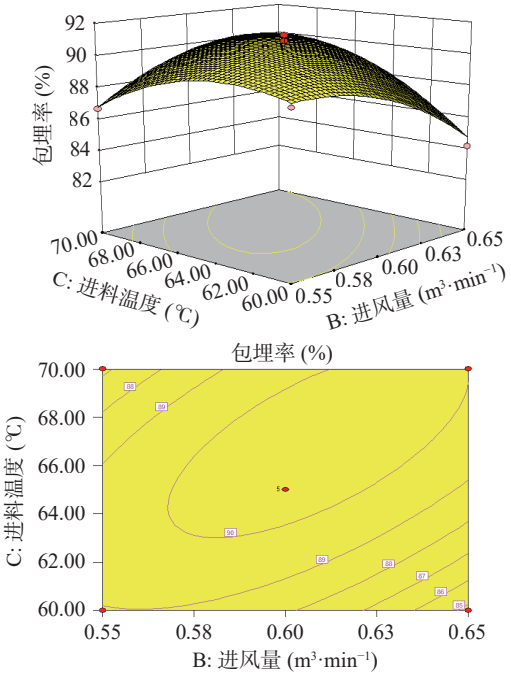


图 5　进风量与进料温度交互作用对沙棘籽油微胶囊包埋率影响的响应曲面和等高线图

Fig.5　Response surface and contour plot of the interaction effect of the air volume and feed temperature on embedding rate of sea buckthorn seed oil microcapsules

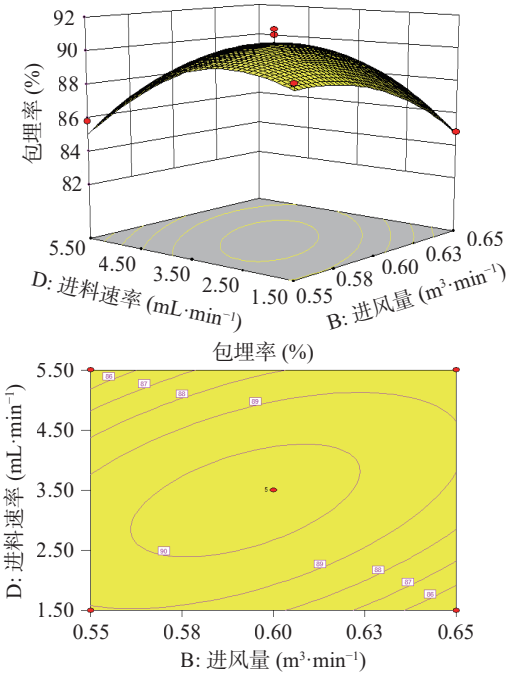


图 6　进风量与进料速率交互作用对沙棘籽油微胶囊包埋率影响的响应曲面和等高线图

Fig.6　Response surface and contour plot of the interaction effect of the air volume and feed rate on embedding rate of sea buckthorn seed oil microcapsules

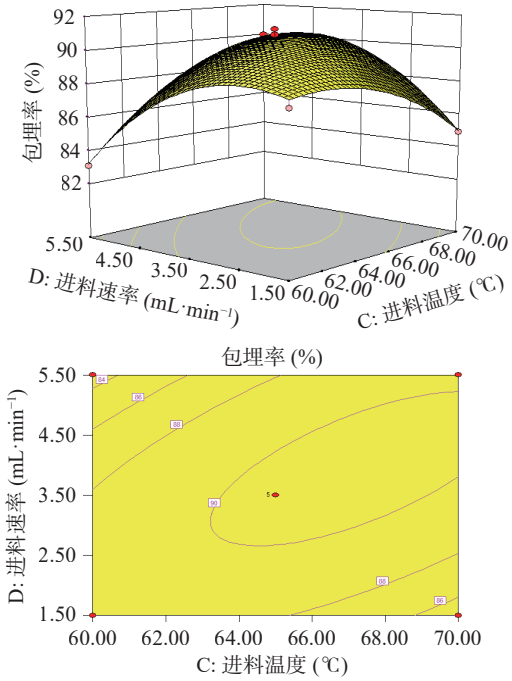


图 7　进料温度与进料速率交互作用对沙棘籽油微胶囊包埋率影响的响应曲面和等高线图

Fig.7　Response surface and contour plot of the interaction effect of the feed temperature and feed rate on embedding rate of sea buckthorn seed oil microcapsules

2.1.6　验证试验　经 Design-Expert 8.0.6 软件分析，得到沙棘籽油微胶囊的最佳工艺的理论预测值为：进风温度为 158.53 ℃，进风量为 0.63 m^3/min，进料温度为 69.56 ℃，进料速率为 4.82 mL/min，此时微胶囊包埋率为 91.44%。结合实际情况，调整喷雾干燥的参数为：进风温度为 158 ℃，进风量为 0.63 m^3/min，进料温度为 70 ℃，进料速率为 4.80 mL/min，经 3 次试验验证，得到沙棘籽油微胶囊的平均包埋率为 91.31%±0.07%。验证试验结果与模型预测值非常接近，说明该模型对喷雾干燥法制备沙棘籽油微胶囊包埋率的预测是非常可行的[20]。

2.2　沙棘籽油微胶囊的理化性质

喷雾干燥法制备的沙棘籽油微胶囊呈淡黄色粉末状，其理化性质如表 4 所示，水分含量为 3.47%，含水量较低。休止角小于 45°，说明其具备良好的流动性能。微胶囊溶解性达到 96.52%，说明其复溶效果良好[20]。

表 4　沙棘籽油微胶囊理化性质

Table 4　Physicochemical properties of sea buckthorn seed oil microcapsules

理化指标	结果
水分含量(%)	3.47
堆积密度(g·mL⁻¹)	0.41
休止角(°)	37.20
溶解性(%)	96.52

2.3　沙棘籽油微胶囊粒径分布

由图 8 和表 5 可知，沙棘籽油微胶囊粒径呈正

态分布，图 8 中峰分布的宽度较小，说明粒径大小分布较为均匀。粒径小于 10 μm 的微胶囊占总量的 93.50%，其中小于 5 μm 的占总量的 69.72%。该结果要小于黄俊恺[2] 制备的沙棘籽油微胶囊平均粒径（31.63 μm），这可能是选用的壁材和微胶囊制备的工艺条件不同所致。

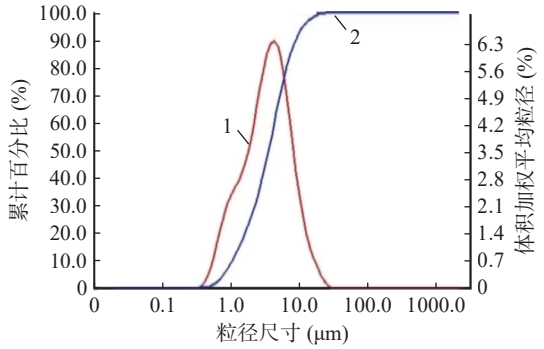


图 8　沙棘籽油微胶囊粒径分布图

Fig.8　Particle size distribution of sea buckthorn seed oil microcapsules

注：1 为粒径累计百分比；2 为体积加权平均粒径。

表 5　沙棘籽油微胶囊粒径分布表

Table 5　Particle size distribution table of sea buckthorn seed oil microcapsules

粒径（μm）	0.100	0.200	0.500	1.000	2.000	5.000	10.000	20.000	45.000	75.000
含量（%）	0.00	0.00	0.68	9.68	27.14	69.72	93.50	99.59	100.00	100.00

2.4　沙棘籽油微胶囊热稳定性分析

2.4.1　TG 分析　热重法是通过测定程序升温过程中样品质量的变化，由样品质量变化与温度变化的关系分析样品的降解过程及热稳定性的方法[38]。由图 9 可知，程序升温由 50 ℃ 开始，样品发生失重，由于微胶囊水分含量较低，样品在 170 ℃ 之前 TG 曲线变化并不明显；在 170 ℃ 出现台阶，结合微胶囊图 10 的 DSC 曲线，此时可能由于微胶囊部分化学键发生断裂造成其热稳定性的变化；程序升温达到 217 ℃，TG 曲线开始缓慢下降，此过程持续到温度接近 320 ℃，此时失重近 20%；温度继续升高，微胶囊结构完全破坏，样品发生大幅度失重，直到温度接近

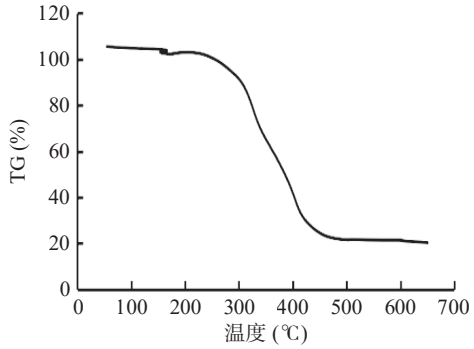


图 9　沙棘籽油微胶囊的 TG 图

Fig.9　TG curves of sea buckthorn seed oil microcapsules

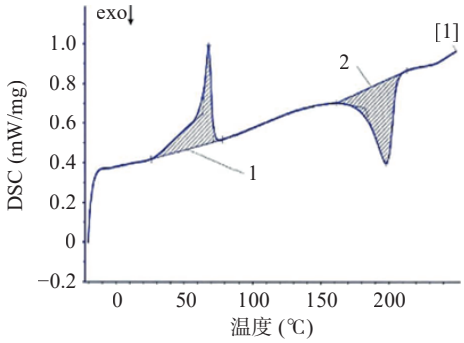


图 10　沙棘籽油微胶囊的 DSC 图

Fig.10　DSC curves of sea buckthorn seed oil microcapsules

注：1 为吸热峰；2 为放热峰。

480 ℃，TG 曲线接近平稳，样品最终失重近 84%。该质量变化趋势与向殷丰等[39] 对沙棘籽油微胶囊的热失重测定结果相似，其原因可能为第一阶段的大幅度失重，可能是由于大豆分离蛋白、β-环糊精热分解产生 H_2O、CO_2、CH_4、SO_2 等气体导致失重，第二阶段大幅度失重可能是由于中间物质的碳化所致[20]。

2.4.2　DSC 分析　升温过程中，微胶囊内部发生脂肪晶体熔融、蛋白质构象转变等结构变化，该类相变需要吸收热量，在 DSC 曲线上表现为向上的吸热峰。如图 10 与表 6 所示，沙棘籽油微胶囊在 63.70~71.70 ℃ 出现吸热峰（峰 1），该吸热峰来源于体系有序晶体结构向无序结构转变，对应微胶囊玻璃化转变温度 68.30 ℃。温度低于 63.70 ℃ 时，微胶囊处于玻璃态，体系自由体积较小，分子扩散阻力大，芯材不易迁移渗漏，样品理化性质稳定，能够满足常规储藏要求。在 182.50~205.40 ℃ 出现放热峰（峰 2），这与刘光宪等[40]的研究结果不同，其原因可能为选择的微胶囊壁材不同所导致的。结合本研究 TG 曲线趋势，微胶囊在温度达到 182.50 ℃ 时，可能是由于壁材中 C-O、S-S、C-C 键的断裂，发生了热分解而导致了放热的现象。在低于 182.50 ℃ 时样品仍处于完整微胶囊的结构，可满足通常的食品热加工处理[20]。

表 6　沙棘籽油微胶囊的热稳定性

Table 6　Thermal stability of microcapsules of sea buckthorn seed oil

项目	起始温度（℃）	峰值温度（℃）	终止温度（℃）	峰面积（J/g）
吸热峰1	63.70	68.30	71.70	35.07
放热峰2	182.50	197.80	205.40	-44.64

2.5　沙棘籽油微胶囊傅里叶变换红外光谱分析

根据傅里叶变换红外光谱特征峰位移、强度及形状的变化判定沙棘籽油微胶囊前后其结构的变化。如图 11 所示，沙棘籽油红外光谱中在 2800~3100 cm^{-1} 有较强吸收峰，这与刘成祥[17] 对牡丹籽油微胶囊的测定结果一致，其原因可能是沙棘籽油中含有丰富的亚麻酸与亚油酸，此处为 C=C 键伸缩振动波峰；沙棘籽油中含有大量的亚麻酸，亚麻酸中=C-

H 键伸缩振动引起的特征峰在 3010 cm^{-1} 处，特征峰在微胶囊产品中均存在，且相应处吸收峰明显减小，由此证明微胶囊结构的形成。沙棘籽油及沙棘籽油微胶囊在 1745、720 cm^{-1} 左右均有 C=O 键及 CH_2 键特征峰存在，微胶囊特征吸收峰相较于沙棘籽油减弱，进一步证明微胶囊结构的形成[20]。图 11 中沙棘籽油微胶囊红外光谱图中吸收峰基本上由沙棘籽油及复合壁材叠加而成。

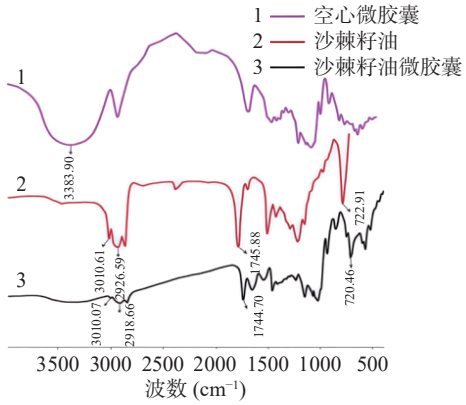


图 11　沙棘籽油微胶囊及其组成成分的红外光谱图

Fig.11　Infrared spectrum of sea buckthorn seed oil microcapsules and its components

2.6　沙棘籽油微胶囊微观结构观察

采用扫描电镜对喷雾干燥法制备的沙棘籽油微胶囊进行结构及包埋效果的观察，结果如图 12 所示，微胶囊在电子显微镜下放大 950 倍后，观察到微胶囊大部分结构为球形或椭球形。微胶囊颗粒大小有一定差异，直径一般在 5~10 μm 之间。部分微胶囊出现褶皱凹陷现象，这一现象与刘光宪等[40] 观测结果一致，其原因可能是由于喷雾干燥壁材固化过程中瞬间的水分蒸发，使得微胶囊内部水分蒸发与外部气流形成压力差，在厚度与硬度较小的部分形成凹陷[41]。微胶囊的个体大小和形状的差异可能由于喷雾干燥机进气量无法达到稳定状态导致[42]。微胶囊在电子显微镜下放大 5000 倍，如图 12 可知，微胶囊表面光滑连续无裂缝，壁材结构完整具有良好的包封性。

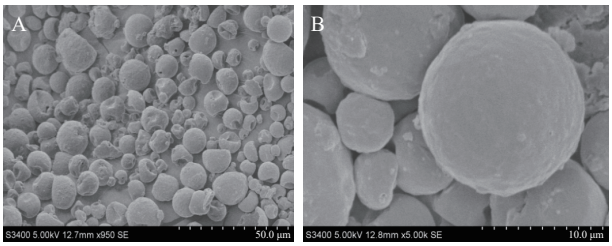


图 12　沙棘籽油微胶囊 SEM 扫描电镜图

Fig.12　Scanning electron microscopy image of sea buckthorn seed oil microcapsules

注：A 放大 950 倍；B 放大 5000 倍。

2.7　沙棘籽油微胶囊储藏稳定性分析

由图 13 可知，在高温加速氧化实验条件下，沙棘籽油与沙棘籽油微胶囊的 POV 值随着储藏时间的增长而不断上升，其中，沙棘籽油的氧化速率明显高于沙棘籽油微胶囊。由此可知，沙棘籽油微胶囊化后可明显延缓其氧化的速率，使得沙棘籽油的稳定性提高。根据 GB 2716-2018《食品安全国家标准 植物油》对植物油 POV 值规定的上限为 0.25 g/100 g，沙棘籽油在加速实验的第 4 d 就已经达到上限值 0.25 g/100 g，而沙棘籽油微胶囊 POV 值在加速实验的第 8 d 才达到上限值 0.25 g/100 g，表明沙棘籽油微胶囊处理确实能有效阻隔外界促氧化因素的影响，提高了沙棘籽油的储藏稳定性。

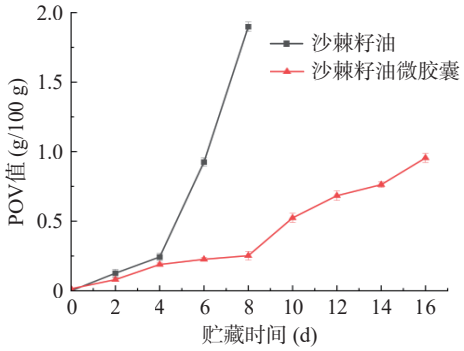


图 13　沙棘籽油及其微胶囊产品储藏期间过氧化值的变化

Fig.13　Changes of POV of sea buckthorn seed oil and its microcapsule products during storage

3　结论

本研究通过响应面优化沙棘籽油微胶囊的喷雾干燥工艺，使其包埋率达到 91.31%，其最佳工艺条件为：进风温度 158 ℃、进风量 0.63 m^3/min、进料温度 70 ℃、进料速率 4.80 mL/min，通过验证证明该方法能够有效平衡干燥效率与微胶囊结构完整性。理化特性结果显示：微胶囊的水分含量为 3.47%、休止角 37.2°、溶解性 96.52%，证明其具有良好的稳定性和流动性。热重分析结果进一步证实其优异的热稳定性，玻璃态转变温度达 68.3 ℃，且在 182.5 ℃ 以下能保持结构完整，能够满足通常食品加工和储存的温度要求。微观结构结果显示：微胶囊呈现规则且均匀的球状或椭球状，粒径均匀分布在 1~10 μm 范围内，且其中 93.50% 的微胶囊均小于 10 μm，微胶囊表面光滑且致密，通过红外光谱结果中的微胶囊特征吸收峰证明微胶囊包埋成功。储藏稳定性的高温加速实验结果显示，沙棘籽油微胶囊化后可提高其储藏稳定性，延长储藏时间。综合扫描电镜、粒度分析、红外测试和储藏稳定性测试等结果，表明大豆分离蛋白与 β-环糊精复合壁材能形成致密保护层，能有效阻隔环境因素对沙棘籽油的影响，扩大沙棘籽油的应用范围。该研究为功能性油脂微胶囊的工业化生产提供了重要参考。

© 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] 于肇麒, 于静文, 国立东, 等. 沙棘在保健食品中的应用研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2025, 61(3): 93−99. [YU Zhaoqi, YU Jingwen, GUO Lidong, et al. Research progress on application of sea buckthorn in Chinese health food[J]. Sichuan Food and Fermentation, 2025, 61(3): 93−99.]

[2] 黄俊恺. 沙棘籽油、果油品质特性及贮藏稳定性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024. [HUANG Junkai. Study on the quality characteristics and storage stability of seabuckthorn seed oil and fruit oil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.]

[3] 田雨, 任广羚, 王淑雅, 等. 沙棘籽油的提取优化及其脂肪酸和甘油三酯组成的分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(24): 129−136. [TIAN Yu, REN Guangling, WANG Shuya, et al. Optimization of sea buckthorn seed oil extraction and analysis of its fatty acid and triacylglycerol composition[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(24): 129−136.]

[4] ŻUCHOWSKI J. Phytochemistry and pharmacology of sea buckthorn (*Elaeagnus rhamnoides*; syn. *Hippophae rhamnoides*): Progress from 2010 to 2021[J]. Phytochemistry Reviews, 2023, 22(1): 3−33.

[5] 谢文玉. 沙棘油化学成分分析与抗氧化活性成分筛选[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2020. [XIE Wenyu. Analysis of chemical constituents of seabuckthorn oil and screening of antioxidant components[D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2020.]

[6] AN Zhonghua, WANG Yifan, LI Xiangbo, et al. Antifatigue effect of sea buckthorn seed oil on swimming fatigue in mice[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(4): 1482−1494.

[7] SANWAL N, MISHRA S, SAHU J K, et al. Effect of ultrasound-assisted extraction on efficiency, antioxidant activity, and physicochemical properties of sea buckthorn (*Hippophae* salicipholia) seed oil[J]. LWT, 2022, 153: 112386.

[8] 杨鹿, 王洪新, 苏建辉, 等. 牡丹籽油优势抗氧化剂研究[J]. 中国油脂, 2015, 40(2): 46−49. [YANG Lu, WANG Hongxin, SU Jianhui, et al. Preponderant antioxidant of peony seed oil[J]. China Oils and Fats, 2015, 40(2): 46−49.]

[9] 刘鑫, 朱丹, 牛广财, 等. 沙棘籽油微胶囊化的乳化工艺[J]. 食品工业, 2020, 41(2): 101−105. [LIU Xin, ZHU Dan, NIU Guangcai, et al. The emulsification technology of microcapsules of sea buckthorn seed oil[J]. The Food Industry, 2020, 41(2): 101−105.]

[10] 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.]

[11] 杨雨彤, 赵彦巧, 王少平, 等. 花色苷微胶囊的制备及其在食品中应用研究进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(11): 395−404. [YANG Yutong, ZHAO Yanqiao, WANG Shaoping, et al. Research progress of preparation and application of anthocyanins microencapsulation in food[J]. Modern Food Science & Technology, 2025, 41(11): 395−404.]

[12] YANG Wenhan, WANG Lei, BAN Zhaojun, et al. Efficient microencapsulation of *Syringa* essential oil; the valuable potential on quality maintenance and storage behavior of peach[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 177−185.

[13] 刘念, 陈倩茜, 谢芳, 等. 淀粉基微胶囊在含硒生物活性物质递送方面的研究进展[J]. 食品科技, 2025, 50(4): 8−15. [LIU Nian, CHEN Qianxi, XIE Fang, et al. Advances on starch-based microcapsules for delivery of selenium-containing bioactives[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(4): 8−15.]

[14] SHI X Q, LEE Y. Encapsulation of tributyrin with whey protein isolate (WPI) by spray-drying with a three-fluid nozzle[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 281: 109992.

[15] JAFARI S, JAFARI S M, EBRAHIMI M, et al. A decade overview and prospect of spray drying encapsulation of bioactives from fruit products: Characterization, food application and *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108068.

[16] CUI Pengfei, ZHOU Junjun, XIAO Xiao, et al. Preparation and properties of walnut oil microcapsules[J]. LWT, 2025, 225: 117853.

[17] 刘成祥. 牡丹籽油微胶囊的制备及其性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016. [LIU Chengxiang. Study on preparation of peony seed oil microcapsule and its properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.]

[18] 梁宗余, 李晓凤, 李尚泽, 等. 响应面法优化沙棘籽油微胶囊制备工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(18): 5910−5916. [LIANG Zongyu, LI Xiaofeng, LI Shangze, et al. Optimization of *Hippophae rhamnoides* Linn. Seed oil microcapsule preparation by response surface methodology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(18): 5910−5916.]

[19] ZHANG Huirong, SONG Guanjie, MA Wenrui, et al. Microencapsulation protects the biological activity of sea buckthorn seed oil[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1043879.

[20] 牛广财, 朱丹, 魏文毅, 等. 一种沙棘籽油微胶囊的制备方法: CN202111002148.5[P]. 2021-11-26. [NIU Guangcai, ZHU Dan, WEI Wenyi, et al. A kind of preparation method of sea buckthorn seed oil microcapsules: CN202111002148.5[P]. 2021-11-26.]

[21] 李新, 信钰, 孙悦, 等. 山核桃分离蛋白为壁材的山核桃油微胶囊制备及其性能分析[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 72−78. [LI Xin, XIN Yu, SUN Yue, et al. Preparation and performance analysis of manchurian walnut oil microcapsules with manchurian walnut protein isolate as wall material[J]. Food Science, 2024, 45(8): 72−78.]

[22] WANG Weichen, QIN Yanbo, CHEN Ke, et al. Lutein encapsulated in curdlan and sodium alginate by emulsification/internal gelation: Construction, characterization and stability of microcapsules[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 318: 145313.

[23] 叶英, 曾波, 宋明发, 等. 微胶囊化对山桐子油理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(6): 136−142. [YE Ying, ZENG Bo, SONG Mingfa, et al. Effect of microencapsulation on the physicochemical properties of *Idesia polycarpa* oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(6): 136−142.]

[24] 潘红芳. 元宝枫叶总黄酮的提取及微胶囊制备工艺研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023. [PAN Hongfang. Study on the extraction and microcapsule preparation of total flavonoids from leaf of Acer truncatum[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.]

[25] 曹莹莹, 包小康, 赵楠, 等. 复凝聚法制备芥末油微胶囊工艺优化及其理化特性分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 154−160. [CAO Yingying, BAO Xiaokang, ZHAO Nan, et al. Process optimization and physicochemical properties analysis of mustard oil microcapsules prepared by complex coacervation[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(13): 154−160.]

［26］ 赵巍. 山葡萄籽油的提取及微胶囊化研究[D]. 哈尔滨：东北林业大学，2008. ［ZHAO Wei. A study on the extraction and microcapsule of the Amur grape seed oil[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2008.］
［27］ 申莉莉. 百里香微胶囊制备及抑菌效果和机理研究[D]. 武汉：华中农业大学，2015. ［SHEN Lili. Preparation of thyme oil microencapsulation and its antibacteria activity and mechanism study[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.］
［28］ 彭晓茹，李雪琴，潘丽. 基于不同熟制方式的发面饼冻藏品质变化机制[J]. 食品科学，2022，43(5)：39−45. ［PENG Xiaoru, LI Xueqin, PAN Li. Mechanism underlying quality changes during frozen storage of leavened pancake cooked by different cooking methods[J]. Food Science, 2022, 43(5): 39−45.］
［29］ YANG Xun, GAO Na, HU Liandong, et al. Development and evaluation of novel microcapsules containing poppy-seed oil using complex coacervation[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 161: 87−93.
［30］ 李萌，张芹，郑舒磊，等. 不同壁材对 ARA 微胶囊理化性质和稳定性的影响[J]. 农业工程学报，2024，40(12)：295−303. ［LI Meng, ZHANG Qin, ZHENG Shulei, et al. Effects of different wall materials on the physicochemical properties and stability of ARA oil microcapsules[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(12): 295−303.］
［31］ YANG Ziming, PENG Zheng, LI Jihua, et al. Development and evaluation of novel flavour microcapsules containing *Vanilla* oil using complex coacervation approach[J]. Food Chemistry, 2014, 145: 272−277.
［32］ 胡珊，黄皓，陈杰连，等. 樟树精油微胶囊的制备、表征及性能[J]. 林产工业，2025，62(5)：39−44. ［HU Shan, HUANG Hao, CHEN Jielian, et al. Preparation, characterization, and properties of Camphora officinarum essential oil microcapsule[J]. China Forest Products Industry, 2025, 62(5): 39−44.］
［33］ 徐玉巧，王金华，熊智，等. 复凝聚法鼠李糖乳杆菌微胶囊工艺优化及储藏稳定性[J]. 食品与发酵工业，2020，46(5)：194−199. ［XU Yuqiao, WANG Jinhua, XIONG Zhi, et al. Optimization of the preparation technology of *Lactobacillus rhamnosus* GG microcapsules by complex coacervation and the storage stability[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(5): 194−199.］
［34］ 刘梁，张煜，方晓璞，等. 不同抗氧化剂对核桃油氧化稳定性和预测货架期的影响[J]. 中国油脂，2023，48(2)：55−57,97. ［LIU Liang, ZHANG Yu, FANG Xiaopu, et al. Effects of different antioxidants on oxidative stability and predicted shelf life of walnut oil[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(2): 55−57,97.］
［35］ 刘安然. 油茶籽油的微胶囊化及其贮藏性、体外缓释动力学研究[D]. 长沙：湖南农业大学，2015. ［LIU Anran. Study on production process optimization for microencapsulated *Camellia seed* oil and its storability and release kinetics *in vitro*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.］
［36］ 时浩. 食品油脂 O/W 乳状液稳定性的研究[D]. 南昌：南昌大学，2010. ［SHI Hao. Study on stability of O/W emulsion of food oil[D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.］
［37］ 王寒，于华忠，罗庆华，等. 大鲵油微胶囊制备工艺优化及其理化性质研究[J]. 中国油脂，2018，43(10)：69−73. ［WANG Han, YU Huazhong, LUO Qinghua, et al. Optimization of preparation process and physicochemical properties of Chinese giant salamander oil microcapsule[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(10): 69−73.］
［38］ SHI Q L, FANG Z X, BHANDARI B. Effect of addition of whey protein isolate on spray-drying behavior of honey with maltodextrin as a carrier material[J]. Drying Technology, 2013, 31(13-14): 1681−1692.
［39］ 向殷丰，刘睿杰，常明，等. 沙棘籽油微胶囊制备及其特性研究[J]. 中国油脂，2020，45(1)：12−16,60. ［XIANG Yinfeng, LIU Ruijie, CHANG Ming, et al. Preparation and characteristics of seabuckthorn seed oil microcapsule[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(1): 12−16,60.］
［40］ 刘光宪，周巾英，祝水兰，等. 沙棘籽油微胶囊的制备及其性质研究[J]. 食品与机械，2017，33(8)：194−197. ［LIU Guangxian, ZHOU Jinying, ZHU Shuilan, et al. Preparation and properties of spray dried sea-buckthorn seed oil microcapsules[J]. Food & Machinery, 2017, 33(8): 194−197.］
［41］ 黄叶. 阿拉伯胶/乳清蛋白为壁材的亚麻籽油微胶囊表面形成机制及对释放影响的研究[D]. 南昌：南昌大学，2018. ［HUANG Ye. Study on the surface formation mechanism of flaxseed oil microencapsulation with *Acacia*/whey protein as wall material and the effects of digestion[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.］
［42］ 王丽，马敏，张明，等. 牡丹籽油微胶囊制备及其特性研究[J]. 中国果菜，2023，43(4)：26−30. ［WANG Li, MA Min, ZHANG Ming, et al. Preparation and property of peony seed oil microcapsule[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(4): 26−30.］