

蛋黄脂质粉末油脂制备工艺优化及性质研究

蔡芸丹^{1,2}, 饶胜其³, 顾璐萍^{1,2}, 常翠华^{1,2}, 李俊华^{1,2}, 杨严俊^{1,2}, 苏宇杰^{1,2}

(1. 江南大学 食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122; 3. 扬州大学 食品科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要:为解决蛋黄脂质容易氧化的问题,采用微胶囊技术制备蛋黄脂质粉末油脂,通过单因素实验研究壁材种类、壁芯比、蔗糖脂肪酸酯添加量、均质压力和均质次数对乳液乳化稳定性和蛋黄脂质粉末油脂包埋率的影响,确定蛋黄脂质粉末油脂的最佳制备工艺,并探究蛋黄脂质制取方法(乙醇萃取、超临界 CO₂ 萃取、超临界 CO₂ 萃取-脱胆固醇)对粉末油脂理化性质的影响。结果表明:以超临界 CO₂ 萃取法制取的蛋黄脂质为芯材,麦芽糊精、玉米变性淀粉和乳清蛋白为壁材,蛋黄脂质粉末油脂的最佳制备工艺为麦芽糊精与玉米变性淀粉质量比 5:1、乳清蛋白添加量(以壁材质量计) 5%、壁芯质量比 4:1、蔗糖脂肪酸酯添加量(以壁材质量计) 3%、均质压力 40 MPa、均质次数 3 次,在此条件下乳液乳化稳定性达到 85.88%,蛋黄脂质粉末油脂包埋率达到 93.70%。在最佳条件下制备 3 种蛋黄脂质粉末油脂,其中超临界 CO₂ 萃取法制取的蛋黄脂质的粉末油脂水分含量较低、流动性好,颗粒呈完整的球形结构,多不饱和脂肪酸含量较高,且其储藏稳定性明显优于乙醇萃取法的。综上,超临界 CO₂ 萃取法制取的蛋黄脂质的粉末油脂具有较高的包埋率和良好的稳定性,更适合作为粉末油脂的脂质原料。

关键词:蛋黄脂质;粉末油脂;理化指标;储藏稳定性;氧化稳定性

中图分类号:TS222+.2;TS224.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2025)05-0034-10

Optimization of preparation process and properties of egg yolk lipids powdered oil

CAI Yundan^{1,2}, RAO Shengqi³, GU Luping^{1,2}, CHANG Cuihua^{1,2},
LI Junhua^{1,2}, YANG Yanjun^{1,2}, SU Yujie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;
2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;
3. School of Food Science and Engineering, Yangzhou University,
Yangzhou 225127, Jiangsu, China)

Abstract: In order to solve the problem of easy oxidation of egg yolk lipids, egg yolk lipids powdered oil was prepared by microencapsulation technology, the effects of parameters such as wall material type, wall-core mass ratio, sucrose fatty acid esters dosage, homogenization pressure and homogenization times on the emulsion stability and embedding rate of egg yolk lipids powdered oil were investigated by single factor experiments to determine the optimal preparation process of the powdered oil, and the effects of different ways of egg yolk lipids preparation (ethanol extraction, supercritical CO₂ extraction, supercritical CO₂ extraction-cholesterol removal) on the physicochemical indexes of the powdered oil were explored. The results showed that egg yolk lipids extracted by supercritical CO₂ extraction were used as the core material, and maltodextrin, modified corn starch and whey protein were used as the wall material, the

optimal preparation process of egg yolk lipids powdered oil was determined as follows: mass ratio of maltodextrin to modified corn starch 5:1, whey protein dosage (in terms of wall material amount) 5%, wall-core mass ratio 4:1, sucrose

收稿日期:2024-03-01;修回日期:2025-02-19

作者简介:蔡芸丹(1998),女,硕士研究生,研究方向为蛋黄脂质的制取和应用(E-mail)1123668122@qq.com。

通信作者:苏宇杰,副教授,博士(E-mail)suyujie@jiangnan.edu.cn。

fatty acid esters dosage (in terms of wall material amount) 3%, homogenization pressure 40 MPa, and homogenization times 3. Under these conditions, the stability of the emulsion reached 85.88%, and the embedding rate of the powdered oil reached 93.70%. Three kinds of egg yolk lipids powdered oil were prepared under the optimal preparation conditions, in which the powdered oil of egg yolk lipids extracted by supercritical CO₂ extraction had lower moisture content, good fluidity, intact spherical structure of the particles, high content of polyunsaturated fatty acids and higher storage stability than that of the ethanol extraction method. In conclusion, the powdered oil of egg yolk lipids obtained by supercritical CO₂ extraction has a high embedding rate and good stability, which is more suitable as the lipid feedstock of powdered oil.

Key words: egg yolk lipids; powdered oil; physicochemical index; storage stability; oxidative stability

蛋黄脂质是从蛋黄中分离得到的液态混合物,主要成分为甘油三酯、磷脂和胆固醇等。许多研究已经证实,蛋黄脂质具有抗炎^[1]、促进伤口愈合^[2]、抗氧化、抗癌^[3]等功效。蛋黄脂质中含有约 40% 的油酸、30% 的棕榈酸和 13% 的亚油酸^[4]以及少量的花生四烯酸(AA)和二十二碳六烯酸(DHA)^[5],不饱和脂肪酸含量较高,这使蛋黄脂质存在易氧化的问题,从而使其工业化应用受到了一定限制。

粉末油脂,也称微胶囊化油脂,是以食用油脂、碳水化合物、蛋白质和乳化剂等为原料通过微胶囊包埋技术加工而成的油脂制品^[6]。微胶囊包埋技术包括喷雾干燥法、复凝聚法等,其中喷雾干燥法应用较广泛。微胶囊包埋技术具有许多优良性能^[7],如可以保护芯材免受外界环境的影响,提高产品的氧化稳定性,延长产品的储存期等^[7-8]。此外,通过微胶囊包埋技术能够将脂质从液态转化为固态粉末,克服了液体脂质的局限性并拓宽了油脂的使用范围。国内外已经对粉末油脂开展了较为广泛的研究,但是以蛋黄脂质为芯材制备粉末油脂的研究较少。田笑^[9]以麦芽糊精、 β -环糊精以及大豆分离蛋白为壁材制备了相对稳定的蛋黄脂质粉末油脂产品,但是并未筛选合适的壁材、乳化剂等。此外,由于蛋黄脂质成分复杂,不同的制取方式会得到含有不同组分的蛋黄脂质,这一差异可能会影响蛋黄脂质粉末油脂的性质。目前,还缺乏蛋黄脂质制取方法对其粉末油脂性质的影响规律的系统研究。

本文采用喷雾干燥法制备蛋黄脂质粉末油脂,通过探究壁材种类、壁芯比、乳化剂添加量、均质压力和均质次数对粉末油脂包埋率及乳液乳化稳定性的影响,确定蛋黄脂质粉末油脂的适宜制备工艺,并对蛋黄脂质组成对制得的粉末油脂的理化指标与储藏稳定性的影响规律进行初步探索,以期为拓宽蛋黄脂质的实际应用范围提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

食品级蛋黄粉,江苏康德蛋业有限公司;麦芽糊精、壳聚糖、阿拉伯胶、玉米变性淀粉、酪蛋白、蔗糖脂肪酸酯(食品级),山东众友生物科技有限公司;大豆蛋白(食品级),山东禹王生态食业有限公司;乳清蛋白(食品级),武汉鑫润宝生物科技有限公司;正庚烷(色谱级)、乙醇(分析纯)、盐酸(分析纯)、石油醚(分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

AB204-N 电子天平、T25 剪切机,梅特勒-托利多科技(中国)有限公司;TG16.5 高速离心机,上海卢湘仪离心机仪器有限公司;DF-401S 集热式磁力搅拌器,江苏金怡仪器科技有限公司;HB10 旋转蒸发仪,德国艾卡公司;超临界 CO₂ 萃取设备,南通华达制药设备科技有限公司;CBE-5L 亚临界设备,河南省亚临界生物技术有限公司;AH-BASIC 30 高压均质机,安拓思纳米技术(苏州)有限公司;B-290 喷雾干燥仪,瑞士步琪公司;纳米粒度及 Zeta 电位仪,英国马尔文公司;IS10 傅里叶红外光谱仪,美国 Nicolet 公司;GC-2030AF 气相色谱仪,日本岛津公司;SY8100 冷场发射扫描电子显微镜,日本株式会社日立高新技术公司;UH5300 紫外分光光度计,日立科学仪器(北京)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 蛋黄脂质的制取

1.2.1.1 乙醇萃取法

按照 Xin 等^[10]的方法并稍作修改。将蛋黄粉和无水乙醇按固液比 1:10 加入锥形瓶中,在 65℃ 下搅拌 4 h 后抽滤,将有机相在 50℃ 下真空旋转蒸发除去溶剂,得到乙醇萃取的蛋黄脂质(EPL-TCP)。

1.2.1.2 超临界 CO₂ 萃取法

将 100.0 g 蛋黄粉加入萃取釜中,在萃取温度 55 ℃、CO₂ 流速 28 L/h、萃取压力 45 MPa 的条件下萃取 2.5 h,得到超临界 CO₂ 流体萃取的蛋黄脂质 (EYL-TC)。

1.2.1.3 超临界 CO₂ 萃取-脱胆固醇处理

将 EYL-TC 与 β-环糊精以物质的量比 1:3 进行混合,以水油体积比 4:1 加入去离子水。在 65 ℃ 下搅拌 30 min,得到均匀的混合溶液。然后在 4 ℃、4 000 r/min 条件下离心 10 min,取上层蛋黄脂质,水洗离心 3 次后,得到脱胆固醇蛋黄脂质 (EYL-T)。

1.2.2 蛋黄脂质的成分分析

参照 GB 5009.128—2016《食品安全国家标准 食品中胆固醇的测定》测定蛋黄脂质的胆固醇含量;参照 GB 5009.87—2016《食品安全国家标准 食品中磷的测定》测定蛋黄脂质的磷脂含量。

1.2.3 蛋黄脂质粉末油脂的制备

准确称取一定质量的壁材,加入一定量的蔗糖脂肪酸酯(以壁材质量计),并按照壁材与去离子水质量比 1:4 加入去离子水,55 ℃ 下搅拌至溶解,加入一定量蛋黄脂质,充分搅拌后,在 10 000 r/min 条件下剪切 5 min,在一定均质压力下均质一定次数后得到乳液,在进风温度 180 ℃、出风温度 90 ℃ 下,乳液经过喷雾干燥后制得蛋黄脂质粉末油脂。

1.2.4 乳液乳化稳定性的测定

采用王豪^[11]的分层体积法并稍作修改测定 1.2.3 中乳液乳化稳定性。将乳液在 5 000 r/min 的条件下离心 10 min,观察乳液的分层情况,按公式(1)计算乳液的乳化稳定性(Y)。

$$Y = (1 - H_1/H_2) \times 100\% \quad (1)$$

式中: H_1 为上层有机相高度,cm; H_2 为乳液总高度,cm。

1.2.5 粉末油脂包埋率的计算

表面油含量:根据 Wang 等^[12]的方法并稍作修改测定蛋黄脂质粉末油脂表面油含量。精确称取 2 g 样品于干燥的锥形瓶中,将 30 mL 石油醚分 3 次加入,每次均轻轻搅拌 30 s,过滤至烘干的平底烧瓶。在 50 ℃ 水浴中旋蒸除去溶剂,60 ℃ 烘干至恒重,称质量。按公式(2)计算样品表面油含量(C_1)。

$$C_1 = (m_1 - m_0)/m \times 100\% \quad (2)$$

式中: m 为样品质量,g; m_0 为恒重的平底烧瓶质量,g; m_1 为恒重的油脂和平底烧瓶的质量,g。

总油含量:参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的酸水解法测定粉末

油脂总油含量(C_2)。

按公式(3)计算蛋黄脂质粉末油脂的包埋率(X)。

$$X = (C_2 - C_1)/C_2 \times 100\% \quad (3)$$

1.2.6 粉末油脂理化性质的测定

1.2.6.1 理化指标

1.2.6.1.1 水分含量

参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》对粉末油脂的水分含量进行测定。

1.2.6.1.2 流动性

根据 Tontul 等^[13]的方法并稍作修改测定样品流动性。准确称取 2.00 g 样品于 25 mL 量筒中,记录初始样品体积(V_1),在 10 cm 处用手轻敲 80 次后,记录敲打后样品体积(V_2),按照公式(4)计算初始堆积密度(d_B)和敲打后堆积密度(d_T)。

$$d = m/V \quad (4)$$

式中: m 为样品质量,g; V 为样品体积,cm³。

采用卡尔指数(CI)和豪斯纳比值(HR)评价粉末油脂的流动性,其计算公式分别见公式(5)和公式(6)。

$$C_I = (d_T - d_B)/d_T \times 100\% \quad (5)$$

$$H_R = d_T/d_B \times 100\% \quad (6)$$

式中: C_I 为 CI; H_R 为 HR。

1.2.6.1.3 粒径和 Zeta 电位

参考 Wang 等^[14]的方法并稍加修改测定样品粒径和 Zeta 电位。将 0.3 g 粉末油脂溶于 10 mL 去离子水中,制成乳液样品,使用 0.067 mol/L 的磷酸缓冲液(pH 7.0)将乳液稀释 100 倍,在 25 ℃ 下使用纳米粒度及 Zeta 电位仪测定粒径和 Zeta 电位。

1.2.6.2 脂肪酸组成

参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》测定粉末油脂的脂肪酸组成。

1.2.6.3 微观形态

参考 Foerster 等^[15]的方法并稍作修改观察样品微观形态。将粉末油脂涂抹在导电胶上,用洗耳球吹去表面粉末后进行喷金处理,然后采用 3 kV 电子束的冷场发射扫描电子显微镜对粉末油脂的微观形态进行观察。

1.2.6.4 储藏稳定性

将蛋黄脂质粉末油脂与蛋黄脂质(EYL-TC)分别于 25 ℃ 和 60 ℃ 储藏 31 d,期间取样测定其过氧化值和粉末油脂包埋率。其中粉末油脂参考 Partanen 等^[16]的方法提取其中油脂,再参考 Escalona-García 等^[17]的方法采用分光光度法测定过氧化值(POV),而液态蛋黄脂质的 POV 直接采用

分光光度法测定^[17]。

1.2.7 数据处理与分析

每次实验至少重复 3 次,结果以“平均值 ± 标准偏差”的形式表示,用 SPSS 20 和 Origin 2021 对实验数据进行分析并作图,并对数据进行显著性分析, $p < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 不同制取方法所得蛋黄脂质的组成

不同制取方法所得蛋黄脂质的组成如表 1 所示。

表 1 不同制取方法所得蛋黄脂质的组成

Table 1 Composition of egg yolk lipids obtained by different preparation methods

蛋黄脂质	胆固醇	磷脂
mg/g		
EYL-TC	59.89 ± 0.23a	—
EYL-T	0.81 ± 0.02c	—
EPL-TCP	25.01 ± 0.37b	3.29 ± 0.31

注:—表示未检测到;同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同

Note:—. Not detected; Different letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

由表 1 可知,不同制取方法所得蛋黄脂质具有不同的组成。由于 CO₂是非极性溶剂,超临界 CO₂

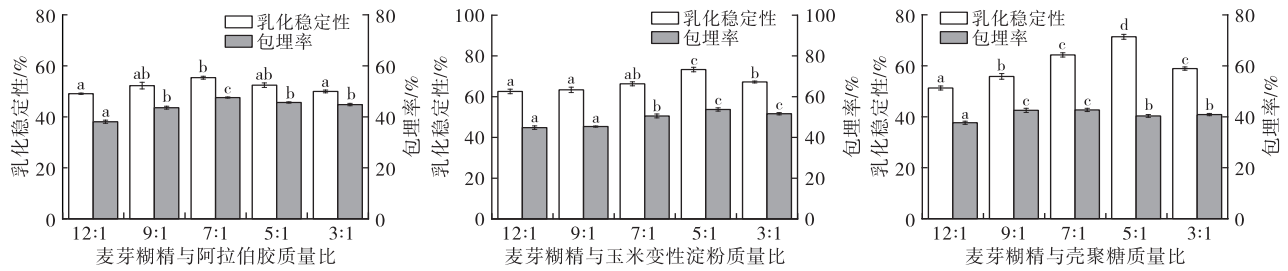
萃取无法萃取出极性脂质磷脂,所以 EYL-TC 主要成分为甘油三酯和胆固醇。EYL-TC 经过 β -环糊精包合法处理可有效去除胆固醇,所以 EYL-T 主要成分仅为甘油三酯。乙醇是一种极性溶剂,对磷脂具有较好的萃取能力,所以 EPL-TCP 主要成分为甘油三酯、磷脂和胆固醇。

2.2 蛋黄脂质粉末油脂制备工艺的优化

2.2.1 壁材的确定

2.2.1.1 碳水化合物壁材的确定

粉末油脂制备中常用的壁材包括碳水化合物和蛋白质等类型。麦芽糊精具有水溶性强、价格低、无不良风味、可以最大限度还原芯材^[18]且可使粉末油脂产品具有良好的氧化稳定性^[19]等优点,是最常用的碳水化合物壁材。但是当麦芽糊精作为单一壁材制备粉末油脂时,往往包埋率较低。因此,本文以麦芽糊精为主要壁材,分别与其他几种常用碳水化合物(阿拉伯胶、玉米变性淀粉、壳聚糖)进行复配作为壁材。在以 EYL-TC 为芯材、壁芯比 4:1(质量比)、蔗糖脂脂肪酸酯添加量 3%、均质压力 30 MPa、均质次数 2 次的条件下,按 1.2.3 方法制备蛋黄脂质粉末油脂,考察碳水化合物壁材复配比例对乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率的影响,结果如图 1 所示。



注:同一指标不同字母表示具有显著差异($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters for the same indicator indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

图 1 碳水化合物壁材复配比例对乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率的影响

Fig.1 Effects of the compounding ratio of carbohydrate wall material on emulsion stability and embedding rate of powdered oil

由图 1 可知:相同复配比例下,麦芽糊精与阿拉伯胶复配作为壁材时粉末油脂包埋率和乳液乳化稳定性均较低;麦芽糊精与壳聚糖复配作为壁材虽然可以显著提高乳液的乳化稳定性,但粉末油脂包埋率仍然较低(约 40%);而麦芽糊精与玉米变性淀粉复配作为壁材时粉末油脂包埋率和乳液乳化稳定性均较高,且麦芽糊精与玉米变性淀粉质量比为 5:1 时,粉末油脂的包埋率最高(53.71%),此时乳液乳化稳定性也最高(73.32%)。因此,确定质量比为 5:1 的麦芽糊精与玉米变性淀粉为碳水化合物壁材。

2.2.1.2 蛋白质壁材的确定

当壁材完全由碳水化合物原料组成时,粉末油脂的包埋率较低,包埋效果未达到预期。蛋白质也是制备粉末油脂常用的壁材原料之一,其分散性强,可以在水相和油相之间形成良好的界面膜,可有效促进包埋过程。因此,可将碳水化合物壁材与蛋白质壁材进行复配,以弥补单一壁材的缺陷,提高包埋效果。Yuan 等^[20]发现使用大豆分离蛋白与壳聚糖复配制得的微胶囊化藻油比使用单一壁材的微胶囊化藻油具有更好的包埋率和氧化稳定性。大豆蛋白、乳清蛋白、酪蛋白是常用的蛋白质类壁材。因此,将

大豆蛋白、乳清蛋白、酪蛋白分别与 2.2.1.1 中所确定的碳水化合物壁材进行复配。在以 EYL-TC 为芯材、壁芯比 4:1、蔗糖脂肪酸酯添加量 3%、均质压力

30 MPa、均质次数 2 次的条件下,考察蛋白质壁材添加量(以壁材质量计)对乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率的影响,结果如图 2 所示。

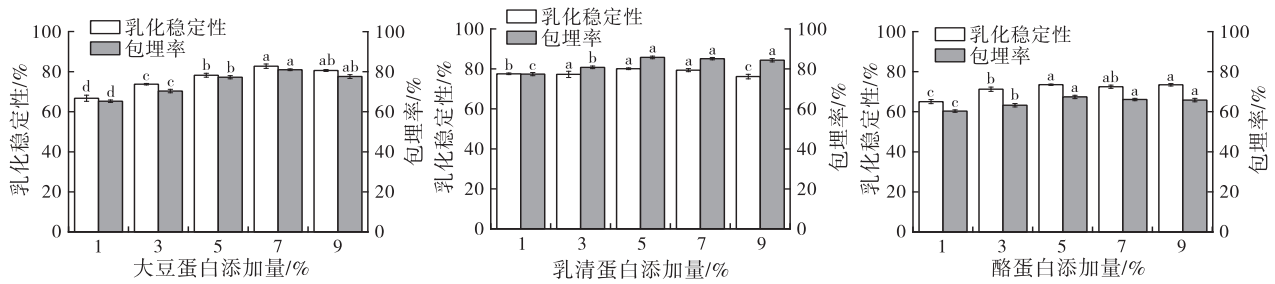


图 2 蛋白质壁材添加量对乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率的影响

Fig. 2 Effects of different dosage of protein in wall material on emulsion stability and embedding rate of powdered oil

由图 2 可知,与单一碳水化合物壁材相比,采用大豆蛋白、乳清蛋白和酪蛋白这 3 种常用蛋白质类壁材与碳水化合物壁材复配时,乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率均得到明显提高。随蛋白质壁材添加量增大,乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率总体先增大后趋于稳定。相同添加量下,3 种蛋白质类壁材中乳清蛋白的乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率最高,且当乳清蛋白添加量为 5% 时,粉末油脂的包埋率达到最高(85.81%),此时乳液乳化稳定性也较高(80.14%)。因此,确定向碳水化合物壁材中添加 5% 的乳清蛋白进行复配。

2.2.2 壁芯比的确定

壁芯比对粉末油脂的包埋率有一定的影响。秘英静等^[21]在制备元宝枫籽油微胶囊时发现,在相同壁材浓度下,元宝枫籽油含量过高或过低都会使包埋率下降。因此,选择合适的壁芯比能够有效提高粉末油脂的包埋率。在以 ETL-TC 为芯材、麦芽糊精与玉米变性淀粉质量比 5:1、乳清蛋白添加量 5%、蔗糖脂肪酸酯添加量 3%、均质压力 30 MPa、均质次数 2 次的条件下,考察壁芯比(质量比)对乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率的影响,结果如图 3 所示。

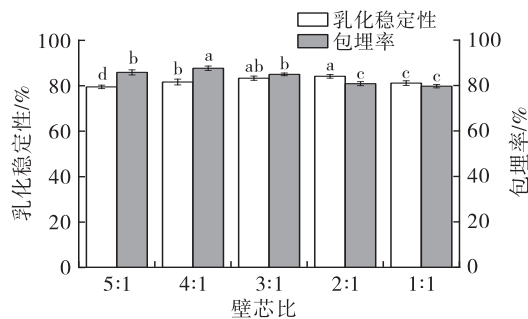


图 3 壁芯比对乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率的影响

Fig. 3 Effect of wall-core mass ratio on emulsion stability and embedding rate of powdered oil

由图 3 可知,不同壁芯比所得乳液乳化稳定性

均在 80% 左右。随壁材比例增加,粉末油脂包埋率先增大后减小,当壁芯比为 4:1 时,粉末油脂包埋率达到最大(87.64%),这是因为增大脂质添加量会使壁材相对浓度下降,壁材对脂质的包埋程度下降,表面油含量增加。因此,选择壁芯比为 4:1。

2.2.3 乳化剂添加量的确定

食品加工中经常出现由于均质不完全,油和水没有充分混合,从而在储藏过程中出现油水分层的现象,影响产品品质^[22]。适当添加乳化剂可以提高乳液稳定性、延长储存时间、改善粉末油脂品质、避免结块等。在以 EYL-TC 为芯材、麦芽糊精与玉米变性淀粉质量比 5:1、乳清蛋白添加量 5%、壁芯比 4:1、均质压力 30 MPa、均质次数 2 次的条件下,考察乳化剂(蔗糖脂肪酸酯)添加量对乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率的影响,结果如图 4 所示。

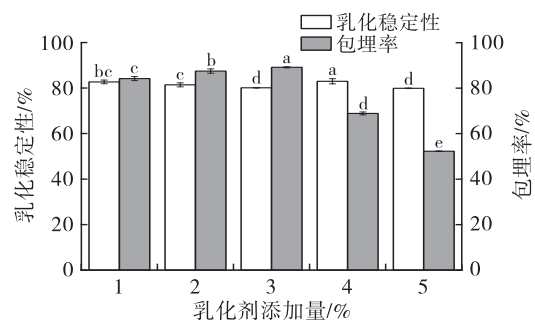


图 4 乳化剂添加量对乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率的影响

Fig. 4 Effect of emulsifier dosage on emulsion stability and embedding rate of powdered oil

由图 4 可知,不同乳化剂添加量下,乳液乳化稳定性都在 80% 以上。随乳化剂添加量增加,粉末油脂包埋率增大,在乳化剂添加量为 3% 时包埋率达到最高(89.29%),进一步增大乳化剂添加量,粉末油脂包埋率迅速下降,这可能是因为过量的乳化剂

会增加乳液的黏度,使分子发生聚集,从而影响包埋率^[11]。因此,最终确定乳化剂添加量为 3%。

2.2.4 均质压力及均质次数的确定

粉末油脂制备工艺中的均质方式主要有高压均质、超声破碎和空化射流等方式^[23],其中高压均质是目前应用最广泛的均质方式。提高均质压力,可以使乳液液滴更小、更均匀,从而提高乳液稳定性,但均质压力过大时,芯材的质量会受到影响,粉末油脂的稳定性会下降^[24],所以需要选择合适的均

质压力及均质次数。在以 EYL – TC 为芯材、麦芽糊精与玉米变性淀粉质量比 5:1、乳清蛋白添加量 5%、壁芯比 4:1、蔗糖脂肪酸酯添加量 3%、均质次数 2 次的条件下,考察均质压力对乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率的影响,然后其他条件不变,在最优的均质压力条件下,考察均质次数对乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率的影响,其结果如图 5 所示。

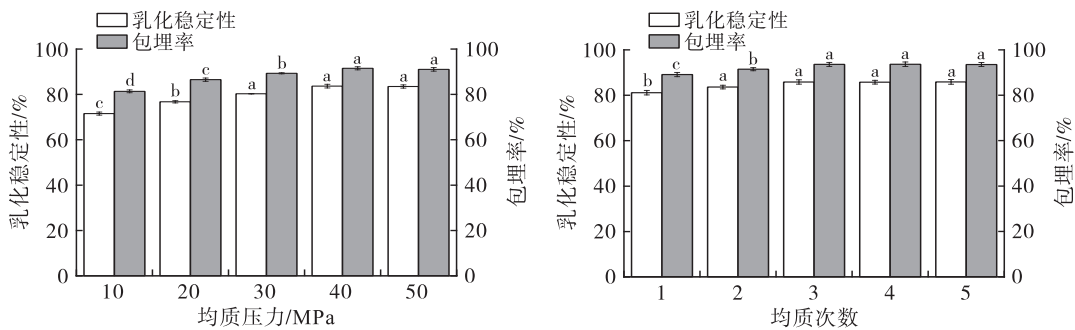


图 5 均质压力和均质次数对乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率的影响

Fig.5 Effect of homogenization pressure and homogenization times on emulsion stability and embedding rate of powdered oil

从图 5 可以看出,随均质压力的升高和均质次数的增加,乳液乳化稳定性和粉末油脂包埋率先增大,分别在均质压力 40 MPa 和均质次数 3 次时,粉末油脂包埋率达到最高,为 93.70%,此时,乳液的乳化稳定性为 85.88%,再继续提高均质压力或者增加均质次数两者均变化不大。因此,选择均质压力为 40 MPa,均质次数为 3 次。

综上,蛋黄脂质粉末油脂的最佳制备工艺为麦芽糊精与玉米变性淀粉质量比 5:1、乳清蛋白添加量 5%、壁芯比 4:1、蔗糖脂肪酸酯添加量 3%、均质压力 40 MPa、均质次数 3 次,在此工艺条件下,粉末

油脂的包埋率达到 93.70%,乳液的乳化稳定性达到 85.88%。

2.3 蛋黄脂质制取方法对粉末油脂理化性质的影响

2.3.1 对理化指标的影响

按照上述最佳制备工艺,分别以 EYL – TC、EYL – T 和 EPL – TCP 为芯材制备蛋黄脂质粉末油脂,分别命名为 PO – TC、PO – T 和 PO – TCP。不同制取方法蛋黄脂质粉末油脂的理化指标见表 2。

表 2 不同制取方法蛋黄脂质粉末油脂的理化指标

Table 2 Physicochemical indexes of powdered oils of egg yolk lipids prepared by different methods

粉末油脂	水分含量/%	CI	HR	粒径/nm	Zeta 电位/mV
PO – TC	3.56 ± 0.10a	0.09 ± 0.02c	1.09 ± 0.05c	238.33 ± 1.43c	– 10.97 ± 1.33b
PO – T	3.47 ± 0.12a	0.13 ± 0.01b	1.14 ± 0.08b	278.27 ± 1.82a	– 15.23 ± 1.13c
PO – TCP	2.57 ± 0.10b	0.20 ± 0.01a	1.23 ± 0.13a	259.12 ± 1.67b	– 8.56 ± 0.91a

粉末油脂的理化特性与其质量及稳定性有着密切关系。由表 2 可知,3 种粉末油脂的水分含量在 2.57% ~ 3.56% 之间,均较低,说明产品质量较好。CI 和 HR 是常用来评价粉末流动性的指标,CI 和 HR 越小,粉末的流动性就越好^[25]。3 种粉末油脂 CI 与 HR 从小到大依次为 PO – TC、PO – T、PO – TCP,说明 PO – TC 的流动性最好,PO – T 次之,PO – TCP 最差。这可能与粉末油脂的表面油含量有关,

表面油含量高会提高颗粒间相互粘黏的可能性,导致粉末油脂流动特性降低^[26]。

粉末油脂的粒径对其质量、外观、流动性等特性具有重要影响。Zeta 电位可反映体系中液滴的带电性质以表征乳液的稳定性,Zeta 电位绝对值越高,液滴间静电斥力越大,乳液更稳定^[27]。从表 2 可以看出,乳液粒径从大到小依次为 PO – T、PO – TCP、PO – TC,Zeta 电位绝对值从大到小依次为 PO – T、PO –

TC、PO - TCP,这与 Adamczak 等^[28]的研究结果一致,其发现,加入胆固醇会使乳液液滴变小,而含有卵磷脂的乳液其 Zeta 电位绝对值小于不含卵磷脂乳液的,这是因为优先吸附在油水界面的卵磷脂表

面负电荷比脂肪酸低。

2.3.2 对脂肪酸组成的影响

3 种蛋黄脂质及其粉末油脂的脂肪酸组成及含量如表 3 所示。

表 3 3 种蛋黄脂质及其粉末油脂的脂肪酸组成及含量

脂肪酸	EYL - TC	PO - TC	EYL - T	PO - T	EPL - TCP	PO - TCP	%
C12:0	0.01c	0.05b	0.01c	0.05b	0.01c	0.07a	
C14:0	0.37c	0.45a	0.39b	0.44a	0.30c	0.43a	
C14:1	0.08a	0.07b	0.01e	0.07b	0.06c	0.05d	
C15:0	0.05b	0.06a	0.05b	0.05b	0.05b	0.06a	
C16:0	24.37e	27.47b	24.68e	27.00c	25.31d	32.48a	
C16:1	3.48b	3.69a	3.54b	3.80a	3.11c	2.95d	
C17:0	0.14a	0.13b	0.14a	0.13b	0.13b	0.14a	
C17:1	0.13a	0.12b	0.13a	0.11c	0.11c	0.08d	
C18:0	5.66d	8.57b	5.68d	8.60b	8.21c	13.68a	
C18:1	47.07a	41.98d	46.68a	42.79c	43.81b	33.34e	
C18:2	17.02a	14.32c	17.12a	15.21b	15.41b	9.95d	
C18:3 _n -3	0.68a	0.63b	0.10e	0.69a	0.46c	0.29d	
C18:3 _n -6	0.10b	0.09b	0.69a	0.08b	0.09b	0.08c	
C20:0	0.02d	0.11b	0.01e	0.08c	0.02d	0.16a	
C20:1	0.19d	1.60b	0.19d	0.24c	0.19d	3.74a	
C20:2	0.13b	0.11c	0.13b	0.11c	0.17a	0.10d	
C20:3	-	0.30c	0.35c	0.30c	1.84a	1.61b	
C20:5	0.01c	0.06b	0.01c	0.01c	0.01c	0.24a	
C22:6	0.10c	0.08d	0.09d	0.07e	0.73a	0.47b	
SFA	30.62d	36.84b	30.96d	36.35b	34.01c	47.02a	
MUFA	50.95a	47.46b	50.55a	47.01c	47.28c	40.16d	
PUFA	18.04b	15.59d	18.49ab	16.47c	18.71a	12.74e	

注:同行不同字母表示差异显著($p < 0.05$)
Note: Different letters in the same row indicate significant differences ($p < 0.05$)

由表 3 可知,3 种粉末油脂的饱和脂肪酸(SFA)含量均高于其蛋黄脂质原料的,单不饱和脂肪酸(MUFA)、多不饱和脂肪酸(PUFA)含量均低于其蛋黄脂质原料的,这说明在制备过程中部分不饱和脂肪酸发生了氧化。EYL - TC 与 EYL - T 的 MUFA 含量较高,分别为 50.95% 和 50.55%,EPL - TCP 的 MUFA 含量较低(47.28%),PO - TC、PO - T 和 PO - TCP 的 MUFA 含量与其蛋黄脂质原料相比分别下降 6.85%、7.00% 和 15.06%;EYL - TC、EYL - T 和 EPL - TCP 的 PUFA 含量均在 18% 左右,三者粉末油脂的 PUFA 含量相比其分别下降 13.58%、10.92% 和 31.91%,可以看出 PO - TC、PO - T 氧化程度较低,而 PO - TCP 的氧化程度较高,这可能是因为 EPL - TCP 中的磷脂受到喷雾干燥高温的影响,更易发生氧化^[29]。

2.3.3 对微观形态的影响

不同制取方法蛋黄脂质粉末油脂的微观形态如图 6 所示。

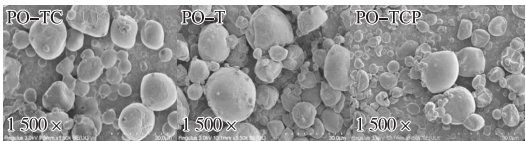


图 6 不同制取方法蛋黄脂质粉末油脂微观形态
Fig.6 Microscopic morphology of powdered oil of egg yolk lipids obtained by different methods

由图 6 可知,PO - TC 和 PO - T 呈现出形态良好、结构完整的球形结构,但是部分颗粒的表面出现了凹陷或者褶皱现象,这可能是喷雾干燥过程温度较高,粉末油脂颗粒内部失水迅速,产生了不均匀皱

缩,或者电镜前的喷金处理、高真空的压力所致^[30]。而 PO - TCP 中破碎、开裂和皱缩的颗粒明显多于 PO - TC 和 PO - T 的,这说明 PO - TC 和 PO - T 的包埋效果较好,PO - TCP 的包埋效果较差。这可能是因为 EPL - TCP 中的磷脂对脂质的包埋效果造成

影响,经过喷雾干燥后造成颗粒的收缩和膨胀,从而形成了较多的破碎颗粒^[29]。

2.3.4 对储藏稳定性的影响

25 ℃ 和 60 ℃ 储藏条件下,不同制取方法蛋黄脂质粉末油脂的包埋率和 POV 变化如图 7 所示。

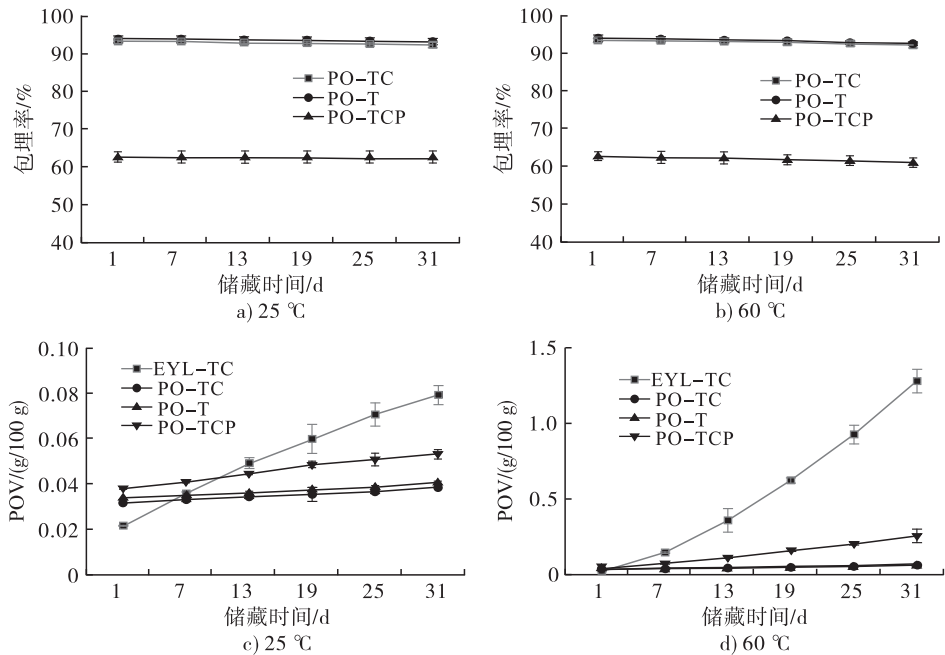


图 7 25 ℃ 和 60 ℃ 储藏条件下不同制取方法蛋黄脂质粉末油脂的包埋率和 POV 变化
Fig. 7 Changes of the embedding rate and POV of powdered oils of egg yolk lipids obtained by different methods stored at 25 °C and 60 °C

包埋率可以影响粉末油脂的形状和表面形态,且包埋率越高,粉末油脂的氧化稳定性越好^[31]。从图 7a、图 7b 可以看出,PO - TC 和 PO - T 的包埋率高且二者非常接近,说明脱胆固醇处理不会影响蛋黄脂质粉末油脂的包埋率,PO - TCP 的包埋率较低,这可能与其蛋黄脂质原料中含有一定量磷脂有关^[32],上述结果说明,与 EYL - TC 和 EYL - T 相比,EPL - TCP 不适合作为粉末油脂的原料。3 种粉末油脂在 25 ℃ 和 60 ℃ 条件下储藏 31 d 内,其包埋率均变化不大,说明粉末油脂的包埋效果稳定。

储藏期间,油脂在光、热及氧气的作用下会发生氧化,产生游离脂肪酸及醛、酮等物质,并产生不良气味^[33]。从图 7c、图 7d 可以看出,在 25 ℃ 和 60 ℃ 下储藏 31 d,EYL - TC 的 POV 随储藏时间延长上升明显,尤其是在 60 ℃ 储藏 31 d 时 EYL - TC 的 POV 达到 1.28 g/100 g,说明蛋黄脂质容易氧化。而 3 种粉末油脂的 POV 随储藏时间延长上升均缓慢,其中 PO - TC 和 PO - T 由于包埋率高,蛋黄脂质与外界环境隔绝,故其 POV 上升更缓慢。PO - TCP 的包埋率低,但是 POV 上升也较缓慢,这可能是因为

在喷雾干燥过程中,由于磷脂具有两亲性,形成了脂质体,包裹住了其他的脂肪酸分子,但是磷脂分子结构中存在不饱和酰基,很容易发生氧化反应,稳定性较差^[33],因而在储藏过程中,PO - TCP 的 POV 上升较液态脂质缓慢但快于 PO - TC 和 PO - T。综上,由乙醇萃取的含有磷脂的蛋黄脂质制备的粉末油脂包埋效果、氧化稳定性和储藏稳定性相对较差,而由超临界 CO₂ 萃取的不含磷脂的蛋黄脂质制备的粉末油脂具有优良的包埋效果、氧化稳定性和储藏稳定性。

3 结 论

本文通过单因素实验优化了以蛋黄脂质为芯材的粉末油脂的制备工艺,并探究了蛋黄脂质的制取方法对粉末油脂的理化性质的影响。结果表明:以 EYL - TC 为芯材,粉末油脂的最佳制备工艺为麦芽糊精与玉米变性淀粉质量比 5 : 1、乳清蛋白添加量 5 %、壁芯比 4 : 1、蔗糖脂肪酸酯添加量 3 %、均质压力 40 MPa、均质次数 3 次,在此工艺条件下,蛋黄脂质粉末油脂的包埋率达到 93.70 %。同时,进一步研究发现,在本文所采用的脂质制取工艺条件下,胆固醇组分不会影响蛋黄脂质粉末油脂的理化指标、

微观形态和储藏稳定性等,而磷脂组分会使所制备的粉末油脂包埋率低、流动性较差、颗粒破碎多、氧化稳定性较差。超临界 CO₂ 萃取的不含磷脂的蛋黄脂质是最适合制备蛋黄脂质粉末油脂的原料,所制备的蛋黄脂质粉末油脂具有良好的氧化稳定性和储藏稳定性,解决了蛋黄脂质容易氧化的问题,研究结果可为拓宽蛋黄脂质的实际应用提供理论指导。

参考文献:

- [1] MAHMOUDI M, EBRAHIMZADEH M A, POURMORAD F, et al. Anti-inflammatory and analgesic effects of egg yolk: A comparison between organic and machine made[J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2013, 17(4): 472-476.
- [2] YENILMEZ E, BAŞARAN E, ARSLAN R, et al. Chitosan gel formulations containing egg yolk oil and epidermal growth factor for dermal burn treatment[J]. Pharmazie, 2015, 70(2): 67-73.
- [3] XIAO N, ZHAO Y, YAO Y, et al. Biological activities of egg yolk lipids: A review[J]. J Agric Food Chem, 2020, 68(7): 1948-1957.
- [4] GOLZAR ADABI S H, AHBAB M, FANI A R, et al. Egg yolk fatty acid profile of avian species: Influence on human nutrition[J]. J Anim Physiol Anim Nutr, 2013, 97(1): 27-38.
- [5] KASSIS N M, GIGLIOTTI J C, BEAMER S K, et al. Characterization of lipids and antioxidant capacity of novel nutraceutical egg products developed with *omega*-3-rich oils[J]. J Sci Food Agric, 2012, 92(1): 66-73.
- [6] 夏蕴实, 刘畅, 赵丽娟, 等. 动物油脂粉末化技术研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(9): 223-227.
- [7] 白雪, 田忠华, 赵悦琳, 等. 以高粱醇溶蛋白和酪蛋白酸钠为壁材制备粉末油脂的工艺优化[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(2): 33-37.
- [8] LIU Y, LIU M, ZHAO J, et al. Microencapsulation of *Osmanthus* essential oil by interfacial polymerization: Optimization, characterization, release kinetics, and storage stability of essential oil from microcapsules[J]. J Food Sci, 2021, 86(12): 5397-5408.
- [9] 田笑. 蛋黄油组分分离及其对小鼠消化性胃溃疡愈合作用[D]. 北京:北京农学院, 2023.
- [10] XIN D D, LU K Y, WANG S, et al. Optimization of extraction of egg yolk oil by ethanol extraction method using response surface methodology[J]. Int J Food Sci Technol, 2019, 44(10): 261-268.
- [11] 王豪. 羊油粉末油脂的制备及其在油茶面中的应用[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2020.
- [12] WANG X, GU L, SU Y, et al. Microwave technology as a new strategy to induce structural transition and foaming properties improvement of egg white powder [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2020, 101: 105530 [2024-03-01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105530>.
- [13] TONTUL I, TOPUZ A. Influence of emulsion composition and ultrasonication time on flaxseed oil powder properties [J]. Powder Technol, 2014, 264: 54-60.
- [14] WANG S, ZHANG Z S, ZHANG T F, et al. Extraction and characterization of flaxseed oil obtained with subcritical *n*-butane [J]. J Oleo Sci, 2020, 69(9): 1011-1020.
- [15] FOERSTER M, GENGENBACH T, WOO M W, et al. The impact of atomization on the surface composition of spray-dried milk droplets [J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2016, 140: 460-471.
- [16] PARTANEN R, RAULA J, SEPPÄNEN R, et al. Effect of relative humidity on oxidation of flaxseed oil in spray dried whey protein emulsions[J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(14): 5717-5722.
- [17] ESCALONA-GARCÍA L A, PEDROZA-ISLAS R, NATIVIDAD R, et al. Oxidation kinetics and thermodynamic analysis of chia oil microencapsulated in a whey protein concentrate-polysaccharide matrix[J]. J Food Eng, 2016, 175: 93-103.
- [18] MINEMOTO Y, HAKAMATA K, ADACHI S, et al. Oxidation of linoleic acid encapsulated with gum arabic or maltodextrin by spray-drying [J]. J Microencapsul, 2002, 19(2): 181-189.
- [19] BAIK M Y, SUHENDRO E L, NAWAR W W, et al. Effects of antioxidants and humidity on the oxidative stability of microencapsulated fish oil [J]. J Am Oil Chem Soc, 2004, 81(4): 355-360.
- [20] YUAN Y, KONG Z Y, SUN Y E, et al. Complex coacervation of soy protein with chitosan: Constructing antioxidant microcapsule for algal oil delivery[J]. LWT - Food Sci Technol, 2017, 75: 171-179.
- [21] 秘英静, 姚澜, 汪旭, 等. 元宝枫油脂微胶囊加工技术参数的研究[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(2): 9-11, 16.
- [22] 袁彬. 芝麻香油粉末油脂的生产工艺研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2017.
- [23] 吴超, 刘哲, 田艳杰, 等. 粉末油脂组成与制备及其在食品中的应用[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 435-445.
- [24] 梁井瑞, 杜健, 高秀华, 等. DHA 乳状液制备工艺优化及氧化稳定性的研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(7): 97-103.

(下转第 62 页)

涂抹和使用。由图 5 可知,搅打温度越高,人造奶油的打发性越好,更多的空气被混入了人造奶油中使体积增加。人造奶油的硬度和打发性随温度的变化,使其能够适应不同的储存、运输和使用条件。在低温下保持稳定,在室温下易于使用,在高温下保持一定的轻盈度。通过控制温度和搅打条件,可以调整人造奶油的质地和口感,满足不同消费者的需求。

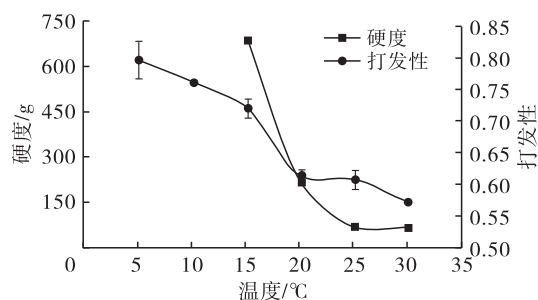


图 5 人造奶油的硬度和打发性

Fig. 5 Hardness and whipping property of margarine

3 结论

本研究以樟树籽油和棕榈油硬脂为基料油,分别通过酶法和化学法 2 种酯交换技术制备结构脂,通过对结构脂甘油三酯组成、sn-2 位脂肪酸组成、热力学性质、流变学特性及晶型的分析,选择以质量比为 3:7 的樟树籽油和棕榈油硬脂为原料,采用酶法催化酯交换技术制备结构脂,以此为原料制备的人造奶油基本理化指标符合相关标准要求,并具有良好的打发性和硬度。综上,通过酶催化酯交换技术开发的基于樟树籽油和棕榈油硬脂的结构脂,可作为健康型人造奶油的原料。未来可进一步探究不同原料比例和酯交换条件对结构脂性质的影响,并探索这些结构脂在各种食品系统中的应用效果。

参考文献:

[1] 李兴艳,刘爽,尚永彪.中碳链脂肪酸甘油三酯的研究进展[J].食品工业科技,2013,34(12):366-370.

(上接第 42 页)

[25] FUCHS M, TURCHIULI C, BOHIN M, et al. Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidised bed agglomeration[J]. J Food Eng, 2006, 75(1): 27-35.

[26] 殷琦,郑志,姜绍通,等.维生素 E-大豆蛋白微胶囊的制备及特性研究[J/OL].中国油脂,1-11[2024-03-21].<https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230083>.

[27] 柳新荣,王炜清,刘元法,等.奶茶粉末油脂乳化液性能分析[J].食品与生物技术学报,2022,41(3):96-102.

[28] ADAMCZAK M, PARA G, SIMON C, et al. Natural oil nanoemulsions as cores for layer-by-layer encapsulation[J]. J Microencapsul, 2013, 30(5): 479-489.

[2] 杨金堂.中链脂肪酸对高温环境下猪饲养和疾病防治的应用与机理研究[D].南京:南京农业大学,2015.

[3] 张月红,刘英华,王觐,等.中长链脂肪酸食用油降低超重高甘油三酯患者血脂和低密度脂蛋白胆固醇水平的研究[J].中国食品学报,2010,10(2):20-27.

[4] DEVKOTA S, WANG Y, MUSCH M W, et al. Dietary fat-induced taurocholic acid production promotes pathobiont and colitis in IL-10^{-/-} mice[J]. Gastroenterology, 2012, 142: 104-108.

[5] 冯绍贵,李彦宸,董春怡,等.樟树籽仁油的结构和特性分析[J].中国油脂,2020,45(1):22-26.

[6] DA SILVA R C, SOARES D F, LOURENÇO M B, et al. Structured lipids obtained by chemical interesterification of olive oil and palm stearin[J]. LWT - Food Sci Technol, 2010, 43(5): 752-758.

[7] BOLINI H M A, MEDEIROS A C, PEREIRA C T M, et al. Consumer acceptance studies of margarine to guide product development in the food industry[J/OL]. Foods, 2023, 13(1): 116[2025-02-23].<https://doi.org/10.3390/foods13010116>.

[8] 魏翠平,王瑛瑶,栾霞.人造奶油研究现状及其制备技术[J].中国食物与营养,2011,17(6):32-35.

[9] 李君,崔怀田,刘瑞琦,等.脂肪替代物在低脂人造黄油中的应用研究进展[J].中国粮油学报,2021,36(6):173-180,189.

[10] 丁双,杨江科,闫云君.酶法改良大豆油制备质构脂质的研究[J].食品科学,2008,29(1):173-176.

[11] PUNVICHAI T, WACHIRATREEYAKUL T, CHANASRIPHUM A, et al. Developing a soft margarine with modified fatty acid profile having low trans fatty acids[J]. Int J Food Sci Technol, 2023, 58(11): 5896-5903.

[12] 艾洪增.Sn-2 位棕榈酸结构甘油三酯酶法制备及其理化与消化吸收特性研究[D].广州:暨南大学,2023.

[13] 石叹叹,张虹,毕艳兰,等.老化时间对搅打植脂奶油品质的影响[J].中国油脂,2018,43(5):58-62.

[29] 刘启航.奶粉乳清蛋白类型对乳液/微胶囊形成及营养素吸收特性的影响[D].武汉:华中农业大学,2023.

[30] 金旭冉.姜精微胶囊的制备工艺、特性及应用研究[D].山东泰安:山东农业大学,2024.

[31] JIANG L, WANG Z, WANG Z, et al. Process optimization and physicochemical properties of fish oil microcapsules prepared by jet cavitation[J]. Chinese Soc Agric Eng, 2019, 35(15): 312-320.

[32] 赵品贞,陶冠军,刘睿杰,等.亲水作用色谱串联质谱结合反相色谱串联质谱的油料磷脂轮廓分析[J].中国油脂,2020,45(9):85-91.

[33] 李飞雨,袁兴铃,邹涵,等.复凝聚法制备鱼油微胶囊工艺研究[J].中国油脂,2019,44(2):46-50.