刘永辰, 张佳敏, 刘璇, 等. 山桐子不同部位油脂体的理化特性及稳定性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 159−168. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050175

LIU Yongchen, ZHANG Jiamin, LIU Xuan, et al. Physicochemical Properties and Stability of Oil Body in Different Parts of *Idesia polycarpa* Maxim[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 159−168. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050175

· 研究与探讨 ·

山桐子不同部位油脂体的理化特性及稳定性研究

刘永辰[1,2,3], 张佳敏[1], 刘　璇[1], 张　静[1], 朱婉仪[1], 姜瞻梅[1], 冯红霞[2,3], 宋明发[2,3], 侯俊财[1,2,3,*], 常云鹤[2,3,*]

（1.东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030;
2.国家林业草原山桐子加工与综合利用工程技术研究中心, 贵州贵阳 550005;
3.贵阳学院食品科学与工程学院, 贵州贵阳 550005）

摘　要: 本文以山桐子不同部位（整果、果皮、种子）为原料，探究通过水萃取法制得的整果油脂体（Whole fruit oil body，WOB）、果皮油脂体（Peel oil body，POB）、种子油脂体（Seed oil body，SOB）的理化特性、物理及氧化稳定性。研究发现，SOB 的总糖、蛋白质、必需氨基酸和总氨基酸含量分别为 49.58±0.30 g/kg、12.00%±0.37%、41.99±0.23 mg/100 g protein、103.25±0.38 mg/100 g protein，均显著高于 WOB 和 POB（P<0.05）。而 WOB 的总酚含量为 2.59±0.02 mg/g，显著高于 POB（P<0.05）。POB 的脂质含量为 92.88%±1.70%，显著高于 WOB 和 SOB（P<0.05）。此外，三种 OB 的表观黏度都随着剪切速率的增大而减小，表现出了剪切变稀行为，在相同剪切速率下，SOB 的表观黏度、G'和 G"高于 WOB 和 POB。SOB 的粒径、脂质氢过氧化物（Lipid hydroperoxides，LPO）、硫代巴比妥酸反应物质（Thiobarbituric acid reactive substance，TBARS）值均显著低于 WOB 和 POB（P<0.05），但其 ζ-电位绝对值、界面蛋白吸附率显著高于 WOB 和 POB（P<0.05）。主成分分析的结果也显示出 SOB 的综合得分最高。综上，以山桐子种子为原料提取得到的 SOB 有着更优异的理化特性和稳定性。本文的研究可以为山桐子油脂体加工与利用提供基本的技术支撑。

关键词: 不同部位, 山桐子, 油脂体, 理化特性, 物理稳定性, 氧化稳定性

中图分类号: TS252.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0159−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050175

本文网刊:

Physicochemical Properties and Stability of Oil Body in Different Parts of *Idesia polycarpa* Maxim

LIU Yongchen[1,2,3], ZHANG Jiamin[1], LIU Xuan[1], ZHANG Jing[1], ZHU Wanyi[1], JIANG Zhanmei[1], FENG Hongxia[2,3], SONG Mingfa[2,3], HOU Juncai[1,2,3,*], CHANG Yunhe[2,3,*]

（1.College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
2.Engineering Technology Research Center for Processing and Comprehensive Utilization of Idesia polycarpa Maxim of National Forestry and Grassland Administration, Guiyang 550005, China;
3.School of Food Science and Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China）

Abstract: The physicochemical properties, physical and oxidative stability of whole fruit oil body (WOB), peel oil body (POB), and seed oil body (SOB) via water extraction were investigated in this study. The results showed that SOB had significantly higher contents of total sugar (49.58±0.30 g/kg), protein (12.00%±0.37%), essential amino acids (41.99±0.23 mg/100 g protein), and total amino acids (103.25±0.38 mg/100 g protein) than WOB and POB (P<0.05). In contrast,

收稿日期: 2025−05−21

基金项目: 贵州省科技重大专项项目（黔科合重大专项字 [2024]025）; 贵州省基础研究（自然科学）（黔科合基础-ZK[2023]）一般 017。

作者简介: 刘永辰（2000−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 乳品加工, E-mail: 18103666237@163.com。

*** 通信作者:** 侯俊财（1975−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 乳品加工, E-mail: houjuncai88@126.com。

常云鹤（1986−）, 男, 博士, 高级实验师, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: changyunhe1102@sina.com。

WOB exhibited the highest total phenol content (2.59±0.02 mg/g), compared with POB (P<0.05). POB had the highest lipid content (92.88%±1.70%), and significantly higher than WOB and SOB (P<0.05). Additionally, the apparent viscosity of three oil body emulsions decreased with the increase of shear rate and showed the shear-thinning behavior. At the same shear rate, SOB had higher apparent viscosity, storage modulus (G'), and loss modulus (G") than WOB and POB. SOB also had significantly lower particle size, lipid hydroperoxide (LPO), and thiobarbituric acid reactive substance (TBARS) values than WOB and POB, whereas SOB exhibited higher absolute zeta-potential and interfacial protein adsorption rate than WOB and POB (P<0.05). Principal component analysis confirmed that SOB had the highest comprehensive score. Therefore, SOB extracted from *Idesia polycarpa* Maxim seed, demonstrated the superior physicochemical properties and stability. The research would provide the essential technical support for the processing and utilization of *Idesia polycarpa* Maxim oil body.

Key words: different parts; *Idesia polycarpa* Maxim; oil body; physicochemical properties; physical stability; oxidation stability

油脂体(Oil body, OB),是一种贮存在种子细胞中的亚细胞器,广泛存在于大豆、芝麻、油菜籽、亚麻籽和花生等富含油脂的植物种子中。在内质网中经过蛋白质与磷脂对产生的甘油三酯(Triglycerides, TG)进行逐渐包裹而形成 OB,所以 OB 负责 TG 的储存[1]。OB 的微观结构通常为球形,外层是一层单分子磷脂层,三种内源性蛋白,分别是油质蛋白、油体钙蛋白、甾醇蛋白[2]。OB 富含维生素 E 和植物甾醇等微量营养素,根据提取方法和原料品种的不同,其浓度也不同[3]。OB 乳液为水包油结构,具有天然预乳化性,是一种安全且良好的乳化剂,可以代替化学合成的乳化剂[4],进而在食品加工、医药行业、化妆品中得到广泛的应用。

OB 乳液的稳定性在其提取与加工应用中至关重要。影响 OB 稳定性的因素主要有不同来源、热处理、pH、盐离子、表面活性剂等。Hou 等[5] 探究了对不同原料来源的 OB 的理化性质及稳定性差异,证实了大豆油脂体的乳化稳定性、热稳定性、电位绝对值均显著高于花生油脂体和向日葵油脂体。此外,Chen 等[6] 证实大豆 OB 乳液经热处理(90 ℃,30 min)后,可显著改善其储存稳定性,这可归因于内源性酶如脂肪酶和脂氧合酶的失活。Zaaboul 等[7] 研究发现,随着 pH 从 6.8 增加至 11.0,花生粗 OB 的外源蛋白含量、脂质氧化程度降低,使花生 OB 乳液的物理和氧化稳定性增强。进一步研究表明,盐离子会降低 OB 的稳定性,例如,氯化钠和氯化钙会诱导核桃仁 OB 的粒径变大和低密度聚集体到达管的顶部,并在宏观水平上观察到形成富含 OB 的奶油层[8]。Sukhotu 等[9] 的结果表明阴离子表面活性剂 SDS 可以减少玉米胚芽 OB 液滴之间的聚集。然而,针对由相同原料不同部位提取得到的 OB 的理化性质及稳定性差异性的研究未见报道。

山桐子具有适应性强、产量高、含油率高等特点,是一种优良的木本油料树种[10]。山桐子中含有较多的不饱和脂肪酸,例如亚油酸、棕榈油酸、油酸等,不饱和脂肪酸相对含量约占 70% 左右,亚油酸相对含量约占 60% 左右,具有“树上油库”的美称[11]。目前,关于山桐子的研究主要聚焦在山桐子油加工、山桐子油工艺条件优化、提高山桐子油的氧化稳定性等方面[12−13],山桐子的研究和加工还处于初级阶段。此外,山桐子具有较高的营养价值[14],国家卫生健康委员会将油葡萄(山桐子)油列入普通食品管理[15]。由此可见,山桐子是提取油脂体新的原料来源。因此,本文以山桐子不同部位为原料,探究山桐子不同部位提取 OB 的理化性质及其稳定性,不仅可以充分探究山桐子 OB 各部位的性质,还可以推动山桐子精细化加工产业的前进,解决目前山桐子产品单一、加工技术落后的问题。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

山桐子 贵州省仁怀市新华丰农业发展有限公司;蔗糖 天津市天力化学试剂有限公司;PC900 抑菌剂 北京兰杰柯科技有限公司;总蛋白定量测定试剂盒(BCA 法) 南京建成生物工程研究所;其他一般化学试剂均为分析纯,所有试验所用水均为去离子水或超纯水。

H1750R 离心机 湖南湘仪离心机仪器有限公司;T18 高速分散器 IKA 公司;UV-6100 紫外-可见光分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;SYNC 激光粒度仪 济南微纳颗粒仪器股份有限公司;HH-8 恒温水浴锅 常州朗越仪器制造有限公司;BSA224S 分析天平 Sartorius 公司;Malvern 纳米粒度及 Zeta 电位分析仪 Malvern 公司;LA8080 氨基酸分析仪 日本日立公司;rapid max n exceed 杜马斯定氮仪 德国元素公司;MARS40 旋转流变仪 赛默飞公司;P1 破壁百谷料理机 九阳公司;SP8 激光扫描共聚焦显微镜 德国徕卡公司;BPG-9106A 精密鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;LGJ-18 真空冷冻干燥机 北京松源华兴科技发展有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 山桐子 OB 提取 根据 Zhou 等[16] 的方法并稍加修改,分别称取 300 g 经过人工分离得到的整果、果皮、种子,加入去离子水,以料液比为 1∶6 的方

式在 4 ℃ 下冷藏浸泡 20 h，然后将样品取出，加入搅拌机中搅拌 3 min，用三层纱布过滤，将得到的山桐子浆加入 20wt% 的蔗糖，用 NaOH 溶液和 HCl 溶液调 pH 至 7，在 4 ℃ 下、以 10000 r/min 离心 30 min，取上层乳膏，溶解于 20wt% 蔗糖溶液中，调 pH 至 7，在 4 ℃ 下、以 10000 r/min 离心 30 min。从加入 20wt% 蔗糖溶液步骤开始，一直到离心步骤，重复 3 次，最后一次洗涤介质由 20wt% 的蔗糖溶液替换成去离子水。最后配成 10% 的 OB 乳液，在 90 ℃ 条件下进行杀菌灭酶 20 min，然后用流水冷却，冷却后调 pH 至 7，加入 0.04% 的抑菌剂（PC900），放入 4 ℃ 冰箱冷藏待测。贮藏条件为黑暗下 4 ℃ 贮藏 14 d，取样时间为 0、3、7、14 d。其中由整果、果皮、种子提取出来的 OB 样品分别命名为整果油脂体（Whole fruit oil body, WOB）、果皮油脂体（Peel oil body, POB）、种子油脂体（Seed oil body, SOB）。OB 蛋白质、总糖、总酚、氨基酸分析等测定需要将样品进行冻干操作，具体为：将样品在−80 ℃ 下进行 48 h 预冻处理，然后使用真空冷冻干燥机进行冻干，得到的样品即为冻干样品。

1.2.2　原料（整果、果皮、种子）的基本成分测定

1.2.2.1　原料中水分含量的测定　采用 GB 5009.3-2016 中的干燥法[17]。

1.2.2.2　原料中脂肪含量的测定　采用 GB 5009.6-2016 中的索氏抽提法[18]。

1.2.2.3　原料中灰分含量的测定　采用 GB 5009.4-2016 测定原料灰分[19]。

1.2.2.4　原料中蛋白质含量的测定　使用杜马斯定氮仪测定[20]。

1.2.3　OB 的基本成分测定

1.2.3.1　OB 的蛋白质测定　根据 Ding 等[21] 的方法。将冻干后的 OB 分散到 4% 的十二烷基硫酸钠（SDS）（w/v）溶液中，振荡涡旋 1 min，在 4 ℃，12000 r/min 条件下离心 40 min，收集上清液，使用 BCA 法测定 OB 中蛋白质。

1.2.3.2　OB 脂肪含量的测定　采用 GB 5009.6-2016 中的索氏抽提法[18]。

1.2.3.3　总糖含量测定　使用苯酚-硫酸法测定 OB 中总糖，根据 Dubois 等[22] 的方法并稍加修改。称取 1 g 冻干后的 OB，加入到 250 mL 的容量瓶中，加入 25 mL 去离子水，10 mL 盐酸，振荡摇匀至形成均匀的悬浊液，装上冷凝回流装置，在沸水浴中水解 1 h，冷却后过滤，并洗涤滤渣，合并滤液及洗液，最后定容至 250 mL，摇匀备用。取 1 mL 的待测液，加入 1 mL 苯酚溶液（50 g/L），缓慢加入 5 mL 浓硫酸，反应静置 10 min，涡旋摇匀，冷却至室温，在 490 nm 处读取吸光值。以不同浓度葡萄糖标准溶液制作标准曲线（y=9.0367x−0.0178，R^2=0.997），根据标准曲线计算总糖含量。

1.2.3.4　总酚含量测定　根据 Fisk 等[23] 描述的方法并稍加修改。将 2 g 冻干的 OB，加入 10 mL 甲醇，在冰水浴的辅助下超声 15 min，然后在 4 ℃，8000 r/min 的条件下离心 15 min，收集上清液，该提取过程进行两次，合并两次提取液。取 1 mL 总酚提取物，加入 5 mL 水与 0.5 mL 福林酚试剂，充分混合。5 min 后，加入 1 mL 饱和碳酸钠溶液，然后在黑暗中孵育 1 h，将孵育后的样品，在 4 ℃，10000 r/min 的条件下，离心 10 min，取上清液，在 760 nm 处读取吸光值。以不同浓度的没食子酸标准品制作标准曲线（y=0.1667x−0.0018，R^2=0.9994），根据标准曲线计算总酚含量。

1.2.4　OB 提取率测定　根据 Ntone 等[24] 的方法计算山桐子油脂体的提取率，根据以下公式计算出油脂体提取率：

$$\text{油脂体提取率}(\%)=\frac{\text{每克山桐子油脂体中的脂质含量}}{\text{每克山桐子中的脂质含量}}\times 100$$

1.2.5　氨基酸组成分析　根据 Tang 等[25] 描述的方法并加以修改。称取含蛋白质含量约 20~30 mg 的冻干油体样品，放入水解管中，加入 10 mL 6 mol/L 的盐酸，氮吹 30 min，小心移出水解管，旋紧瓶盖，置于耐高温试管架上，放入高温烘箱 110 ℃，水解 20 h，水解完毕后，取出水解管，冷却至室温，倒入 50 mL 容量瓶中，用超纯水定容至 50 mL，吸取 5~10 mL 水解液，过滤到 10 mL 离心管中，从上述 10 mL 的离心管中吸取 1 mL 水解液，氮吹干燥，将干燥后的氨基酸用 0.02 mol/L 的盐酸复溶，再用 0.22 μm 的滤膜过滤到进样瓶中待测。使用氨基酸分析仪上机检测。

1.2.6　粒径、电位的测定　取 OB 乳液，加入磷酸盐缓冲溶液，稀释至 100 倍，使用激光粒度仪进行粒径分析。取 OB 乳液，加入磷酸盐缓冲溶液，稀释至 500 倍，使用纳米粒度及 Zeta 电位分析仪测定电位。

1.2.7　界面蛋白吸附率测定　根据 Gong 等[26] 的方法，将 5 mL OB 乳液置于离心管中，在 25 ℃，10000×g 条件下离心 45 min，取下清液使用 0.45 μm 滤膜进行过滤。使用 BCA 法测定蛋白质含量，界面蛋白吸附率（Ar）计算公式为：

$$\text{Ar}(\%)=\frac{(C_0-C_S)\times 100}{C_0}$$

式中：C_0 为蛋白质分散液的初始含量（mg/mL），C_S 为下清液中的蛋白质含量（mg/mL）。

1.2.8　脂质氢过氧化物的测定（Lipid hydroperoxides, LPO）　根据 Yu 等[27] 的方法，取 1.5 mL 的 OB 乳液加入 7.5 mL 的异辛烷/异丙醇溶液（2/1, v/v），涡旋 1 min，在 3000 r/min 的条件下离心 5 min，收集上清 0.5 mL 加入 3 mL 甲醇/正丁醇溶液（2/1, v/v），随后加入 15 μL 的 3.94 mol/L 硫氰酸铵溶液和 15 μL 的 0.072 mol/L 硫酸亚铁溶液，混匀溶液黑暗条件下孵育 30 min，读取在 510 nm 下的吸光值。使用过氧

化氢异丙苯标准溶液制作标准曲线(y=0.2174x−0.0076, R^2=0.9995),根据标准曲线计算出 LPO 值。

1.2.9 硫代巴比妥酸反应物(Thiobarbituric acid reactive substance, TBARS)的测定 根据 Zhao 等[28]的方法,将 1.5 mL 的 OB 乳液加入 2 mL 的三氯乙酸溶液(10%, w/v),与 5 mL 硫代巴比妥酸(1%, w/v)溶液混合,随后煮沸 20 min,流水冷却至室温,冷却的混合物与 1 mL 氯仿混合,混合物在 4000 r/min 的条件下离心 15 min,取上清液,在 532 nm 处测定吸光值。根据摩尔消光系数 152000 L·mol^{-1}·cm^{-1} 计算 TBARS 值。公式如下:

$$C = \frac{A}{\varepsilon \times L}$$

式中:C 为 TBARS 浓度(mmol/kg),A 为吸光度,ε 为摩尔消光系数(152000 L·mol^{-1}·cm^{-1}),L 为光程(1 cm)。

1.2.10 流变学性质 根据 Liao 等[29]描述的方法进行流变学测试。使用模块化旋转流变仪测定新鲜 OB 的黏度和粘弹性,存储模量(G')和损耗模量(G")通过 0.1~10 Hz 范围内的频率扫描测定,应变为 0.1%。

1.2.11 激光扫描共聚焦显微镜(Confocal laser scanning microscope, CLSM) 通过激光扫描共聚焦显微镜观察分析山桐子 OB 乳液的微观结构,根据 de Chirico 等[30]描述的方法并稍加修改。用 10 mmol/L 的磷酸盐缓冲溶液将 OB 乳液稀释 10 倍,取 1 mL 稀释后的乳液加入尼罗蓝和尼罗红染液,来对 OB 中的蛋白质和脂肪进行染色。染色 10 min 后,取染色后的 OB 乳液制片,用指甲油封边过夜,使用 60×油镜在 488 nm 和 633 nm 的选择性激发波长下记录显微镜像。

1.3 数据处理

所有实验至少进行 3 次独立重复。实验结果以平均值±标准差的形式表示,使用 SPSS 25 软件进行数据的统计分析。数据采用单因素方差分析(ANOVA)进行分析,用 Duncan 方法分析比较变量间的差异。P<0.05 表示显著性差异有统计学意义,并对实验数据进行主成分分析。所有图表均使用 Origin 2021 绘制。

2 结果与分析

2.1 基本成分分析

2.1.1 山桐子原料基本成分分析 图 1 中展示了山桐子整果、果皮和种子中脂质、蛋白质、水分和灰分的含量。山桐子果皮脂质含量显著高于整果、种子,整果的脂质含量显著高于种子(P<0.05)。山桐子种子蛋白质含量显著高于整果、果皮(P<0.05),含量为 9.82%±0.07%,整果次之,含量为 8.07%±0.05%,果皮最低,含量为 6.55%±0.15%。种子富含蛋白质,为其萌发和早期生长提供物质和能量基础,这与山桐子的原料特性相符合[31]。闻乐嫣等[32]的研究结果也证实了山桐子果皮中的脂质含量高于整果和种子,而种子中的蛋白质含量高于整果和果皮。水分含量从高到低的顺序为种子>整果>果皮。灰分含量从高到低的顺序为果皮>整果>种子,较高的灰分含量可能与矿物质积累有关,对维持果皮结构和功能有重要意义[31]。不同部位成分含量差异显著,这与各部位功能密切相关。

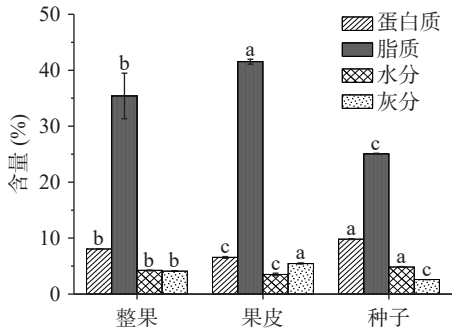


图 1 山桐子基本成分分析

Fig.1 Analysis of the basic components of *Idesia polycarpa* Maxim

注:不同小写字母表示不同部位样品间差异显著(P<0.05),图 2、图 3、图 6 同。

2.1.2 山桐子 OB 基本成分分析 图 2A 为 WOB、POB、SOB 的蛋白质和脂质含量。其中脂质含量为 87.94%~92.88%(干基),WOB、SOB 中的脂质含量显著低于 POB(P<0.05)。三种 OB 蛋白质含量为 5.71%~12.00%(干基),其中 SOB 提取得到的蛋白质含量为 12.00%±0.37%(干基),显著高于 WOB 和 POB(P<0.05)。总的来说,蛋白质含量方面,SOB>WOB>POB。脂质含量方面,WOB、SOB 无显著差

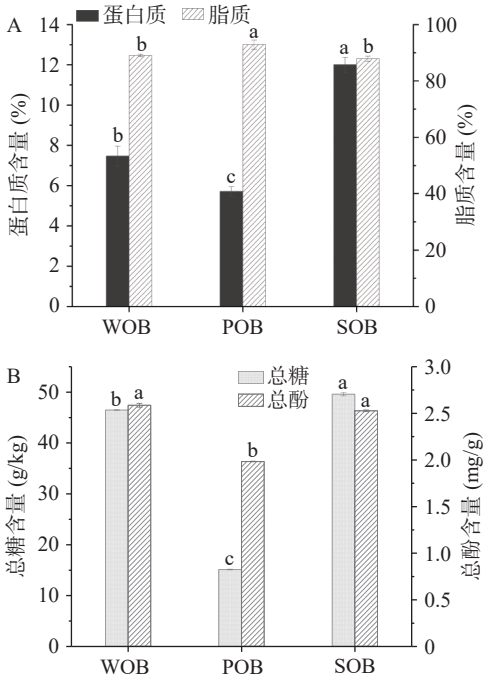


图 2 山桐子 OB 中蛋白质和脂质(A)、总糖和总酚含量(B)

Fig.2 Protein and lipid (A), total sugars and total phenols (B) content of *Idesia polycarpa* Maxim oil body

异（P>0.05），二者的脂质含量显著低于 POB（P<0.05）。这可能是由在原料中，三种部位所含蛋白质、脂质等含量不同所导致的[31]。

三种 OB 的总糖、总酚含量见图 2B，SOB 的总糖显著高于 WOB 和 POB（P<0.05），为 49.58±0.30 g/kg，POB 的总糖含量最低，这可能与原料的总糖含量呈正相关[33]。三种山桐子 OB 的总酚含量为 2.00~2.59 mg/g，WOB、SOB 中的总酚含量显著高于 POB（P<0.05），其中 WOB 的总酚含量为 2.59±0.02 mg/g，这可能是由山桐子整果、种子中的总酚含量较高引起的。

2.2　油脂体提取率

以山桐子不同部位为原料，通过水提法得到的三种 OB，如图 3 所示。三种不同部位山桐子提取得到的 OB 提取率为 22.39%~34.08%，其中 WOB 的提取率最高，为 34.08±3.88%，WOB 与 SOB 的提取率显著高于 POB（P<0.05）。其原因可能是山桐子整果的蛋白质与脂质比例较为平衡，因此 WOB 的提取率最高，而山桐子果皮中的脂质含量高，蛋白质含量低，脂质与蛋白质不平衡，因此 POB 提取率最低。

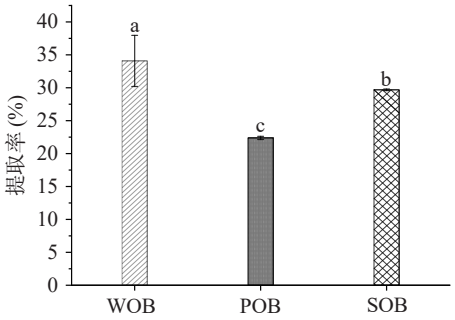


图 3　油脂体提取率

Fig.3　Extraction rate of oil body

2.3　氨基酸组成分析

如表 1 所示，三种 OB 的氨基酸有 16 种，色氨酸在酸水解过程中被水解[34]，所以未在结果中显示。WOB 和 SOB 中，谷氨酸的含量最高，分别为 10.73±0.56 mg/100 g 和 15.65±0.66 mg/100 g；POB 中，天冬氨酸是含量最高的氨基酸，为 5.63±0.23 mg/100 g。谷氨酸为三种 OB 的主要氨基酸（4.35±0.36~15.65±0.66 mg/100 g），其次是天冬氨酸（5.63±0.23~9.47±0.65 mg/100 g），亮氨酸（4.13±0.25~10.63±0.53 mg/100 g），缬氨酸（3.46±0.36~7.75±0.46 mg/100 g）。三种通过水提法得到的 OB 中，POB 中的亲水性氨基酸、疏水性氨基酸、必需氨基酸总含量与总氨基酸含量最低，分别为 23.34±0.43、18.46±0.33、18.08±0.27、41.80±0.36 mg/100 g。而 SOB 中的亲水性氨基酸、疏水性氨基酸、必需氨基酸总含量和总氨基酸含量最高，分别为 59.34±0.33、43.91±0.22、41.99±0.23、103.25±0.38 mg/100 g，这可能与 SOB 的蛋白质含量（干基）最高有关（图 2A）。SOB 的必需氨基酸与总氨基酸含量最高，说明其具有较高的营养价值。

表 1　油脂体氨基酸组成（mg/100 g protein）

Table 1　Amino acid composition of oil body (mg/100 g protein)

氨基酸	WOB	POB	SOB
天冬氨酸	8.08±0.95^{b}	5.63±0.23^{c}	9.47±0.65^{a}
苏氨酸*	4.13±0.23^{b}	2.78±0.66^{c}	6.14±0.32^{a}
丝氨酸	4.92±0.86^{b}	3.13±0.21^{c}	6.19±0.41^{a}
谷氨酸	10.73±0.56^{b}	4.35±0.36^{c}	15.65±0.66^{a}
甘氨酸	4.47±0.23^{b}	2.77±0.15^{c}	6.94±0.16^{a}
丙氨酸	3.96±0.56^{b}	2.64±0.22^{c}	6.31±0.33^{a}
半胱氨酸	0.40±0.27^{b}	0.26±0.11^{b}	1.80±0.26^{a}
缬氨酸*	4.97±1.29^{b}	3.46±0.36^{c}	7.75±0.46^{a}
甲硫氨酸*	0.84±0.15^{b}	0.34±0.19^{c}	1.26±0.13^{a}
异亮氨酸*	3.43±0.45^{b}	2.62±0.38^{c}	5.42±0.29^{a}
亮氨酸*	6.37±0.77^{b}	4.13±0.25^{c}	10.63±0.53^{a}
酪氨酸	2.09±0.82^{b}	1.99±0.38^{b}	4.32±0.26^{a}
苯丙氨酸*	3.72±0.53^{b}	2.50±1.26^{c}	5.60±0.17^{a}
赖氨酸*	3.37±0.26^{b}	2.25±0.36^{c}	5.19±0.63^{a}
组氨酸	1.41±0.66^{b}	0.63±0.16^{c}	2.48±0.49^{a}
精氨酸	5.00±0.87^{b}	2.32±0.57^{c}	8.10±0.37^{a}
TEAA	26.83±0.51^{b}	18.08±0.27^{c}	41.99±0.23^{a}
TAA	59.81±0.73^{b}	41.80±0.36^{c}	103.25±0.38^{a}
亲水性氨基酸	32.05±0.31^{b}	23.34±0.43^{c}	59.34±0.33^{a}
疏水性氨基酸	27.76±0.23^{b}	18.46±0.33^{c}	43.91±0.22^{a}

注：*：必需氨基酸；TEAA：必需氨基酸总含量；TAA：总氨基酸含量；亲水性氨基酸：丝氨酸、苏氨酸、半胱氨酸、酪氨酸、赖氨酸、精氨酸、组氨酸、天冬氨酸、谷氨酸；疏水性氨基酸：丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、甲硫氨酸；同行不同小写字母表示具有显著性差异，P<0.05。

2.4　OB 乳液稳定性分析

2.4.1　OB 乳液粒径　粒径变化见图 4，三种 OB 乳液的粒径均随贮藏时间延长呈现增长趋势。在贮藏期间内，SOB 乳液的粒径始终显著低于 WOB 和 POB 乳液（P<0.05），这可能与 SOB 的蛋白质含量较高有关（图 2A）。Roberts 等[35] 的研究表明，蛋白质分子吸附在 OB 表面形成保护膜。当蛋白质含量较高时，更多蛋白质分子间相互的空间位阻使 OB 难以靠近融合，从而保持较小粒径。此外，周鑫等[36] 的研究也发现蛋白质含量高，OB 表面吸附的蛋白质增

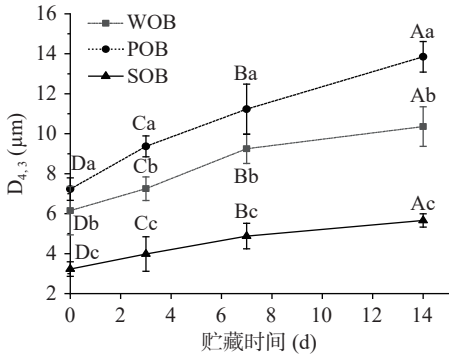


图 4　油脂体乳液在贮藏期内粒径变化

Fig.4　Particle size changes of oil body during storage

注：不同小写字母表示不同部位样品间差异显著（P<0.05），不同大写字母表示同一样品不同贮藏时间差异显著（P<0.05），图 5、图 7 同。

多, 使 OB 表面电荷增多, 静电排斥作用增强, 阻止 OB 聚集和粒径增大。POB 乳液的粒径始终显著高于 WOB 和 SOB 乳液(P<0.05), 这可能是因为 POB 乳液中含有更多的脂质(图 2A), 脂质在油水界面更容易发生氧化作用, 使得 POB 的结构被破坏, 发生更大程度的絮凝[37]。

2.4.2 OB 乳液 ζ-电位 如图 5 为 WOB、POB、SOB 乳液在贮藏期内的 ζ-电位变化趋势。三种 OB 乳液在贮藏期内 ζ-电位绝对值逐渐降低, 说明三种 OB 乳液在贮藏过程中体系逐渐趋于不稳定。在贮藏期间内, SOB 乳液的 ζ-电位绝对值始终显著高于 WOB 和 POB 乳液(P<0.05)。这可能是因为 SOB 的蛋白质含量高(图 2A), 这意味着 OB 表面有更多的带电氨基酸残基暴露, 形成了较强的静电斥力, 可有效抑制 OB 乳液液滴聚集[38]。有研究发现大豆 OB 中蛋白质含量显著高于花生 OB 和葵花籽 OB, 导致其 ζ-电位绝对值也显著增大[36]。POB 乳液的电位绝对值下降幅度相对较大, 可能是乳液内部的脂质含量较多, 非常容易发生氧化反应, 导致静电斥力减弱, 稳定性有所降低[37]。

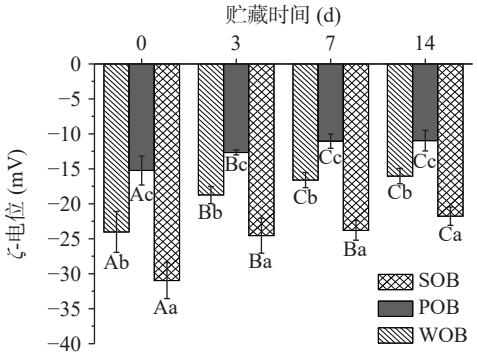


图 5 油脂体乳液在贮藏期内电位变化

Fig.5 Changes in the potential of the oil body during storage

2.4.3 OB 乳液界面蛋白吸附率 图 6 显示了三种 OB 乳液的界面蛋白吸附率, SOB 乳液的界面蛋白吸附率显著高于 WOB 和 POB 乳液(P<0.05), SOB 乳液所形成的界面膜更稳定, 聚结力更强, 这证实了 SOB 乳液的稳定性最强。这可能与 SOB 乳液中的蛋白质含量相对较高有关。Chen 等[39] 的研究表明, 当蛋白质含量较高时意味着体系中可用于吸附的蛋白质分子数量增多。根据吸附动力学原理, 蛋白质分子与 OB 界面的碰撞频率增加, 从而提高了蛋白质吸附至 OB 表面的可能性。

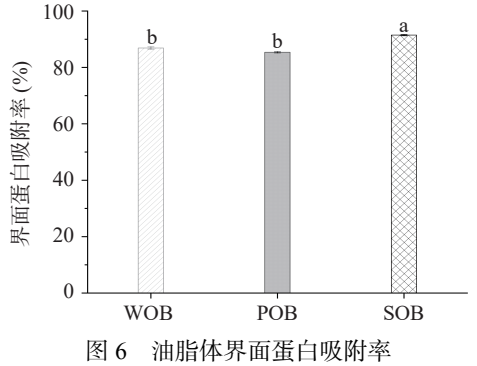


图 6 油脂体界面蛋白吸附率

Fig.6 Interface protein adsorption rate of oil body

2.4.4 OB 乳液脂质氢过氧化物(LPO)、硫代巴比妥酸反应物(TBARS) 通过测定 OB 乳液在贮藏期间的脂质氢过氧化物(LPO)和硫代巴比妥酸反应物(TBARS)来评价 OB 乳液的氧化稳定性。如图 7A、B 所示, 经过水提法提取的三种 OB 乳液的 LPO、TBARS 值都随着贮藏时间的增加而显著增加(P<0.05)。但是与 POB 乳液相比, WOB 乳液和 SOB 乳液的 LPO、TBARS 值的累积明显存在一个滞后期, WOB 乳液和 SOB 乳液的氧化稳定性显著高于 POB 乳液。这可能与山桐子整果和山桐子种子中含有较多酚类物质有关, 或者是与 OB 中含有的磷脂有关[40]。已经有报道指出, 磷脂酰乙醇胺和磷脂酰丝氨酸通过与生育酚醌反应再次生成生育酚, 通过增加生育酚含量来增强生育酚的氧化稳定性能力[41]。

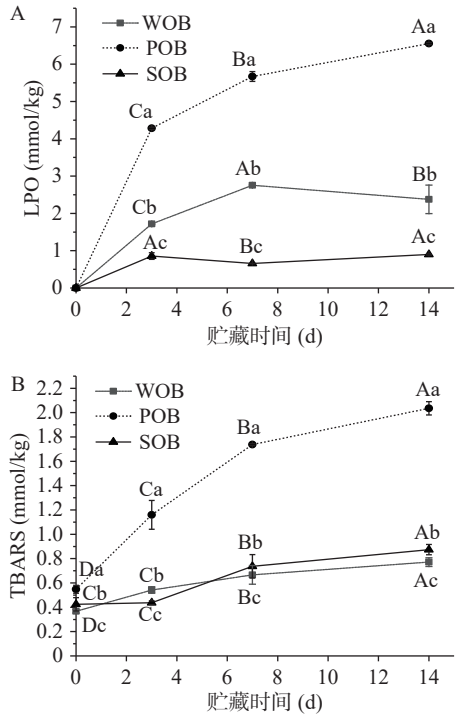


图 7 油脂体乳液在贮藏期间 LPO(A)、TBARS(B)变化

Fig.7 Changes in LPO (A) and TBARS (B) of oil body during storage

2.5 OB 流变性能

在食品加工生产中, 大多数的食品都呈现出非牛顿流体特性, 即其剪切力与剪切应变率之间不是线性关系的流体。本研究中的山桐子 OB 也表现出类似的流变特性。如图 8A 所示, WOB、POB、SOB 的表观黏度都随着剪切速率的增大而减小, 表现出剪切变稀行为, 这可能是因为随着剪切速率的增加, 稳定 OB 的磷脂与膜蛋白受到剪切, 导致絮凝体的分子间交联被破坏, 从而使得黏度降低[42]。SOB 的表观黏

度始终处于较高的状态，这可能是因为其含有更多的外源蛋白。根据 Nikiforidis 等[43] 的报道，含有较多外源蛋白的玉米胚芽 OB 乳液的表观黏度高于含有较少外源蛋白的乳液。

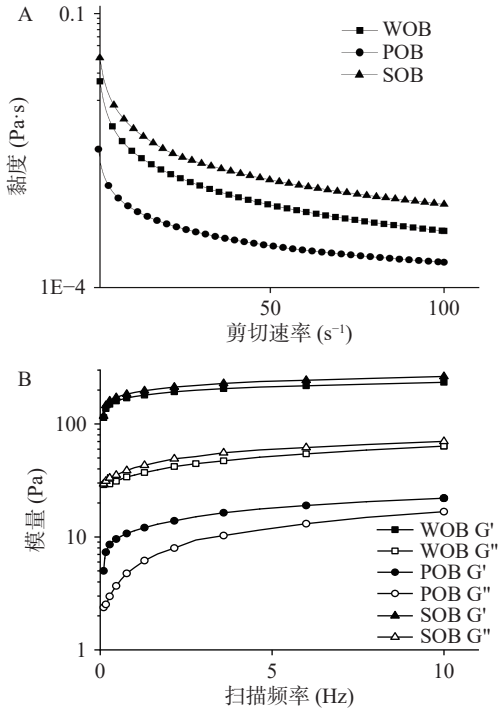


图 8　油脂体的表观黏度变化（A）和频率扫描图（B）

Fig.8　Apparent viscosity change of oil body (A) and frequency scan plot (B)

如图 8B 为 WOB、POB、SOB 新鲜状态下的动态频率扫描图，三种 OB 的存储模量（G'）及损耗模量（G"）随频率变化趋势如图所示。在扫描频率范围内，G'始终大于 G"。SOB 的 G'和 G"高于 WOB 和 POB，可能的原因是其含有更多的蛋白质，其中油质蛋白可以提供更多的氢键供体与受体，OB 分子间会通过氢键形成相对稳定的缔合结构[44]。在受力时，这些氢键网络能有效抵抗变形，使 OB 的 G'和 G"升高。由图 8B 还可见，三种 OB 在低频扫描时表现出类似于液体的流变行为，在高频扫描时表现出类似于固体的流变行为，这是典型的弱凝胶流变特性[45]。这与 Mason 等[46] 的研究相似，他们报告了菜籽 OB 乳液在 pH3.1 下的流变行为，也具有相似的弱凝胶流变特性，其研究结果与本研究在数值上略有不同，可能的原因是样品中的含油量不同和所含有的蛋白质种类等不同[45]，但是所表现出的流变学行为是相似的。

2.6　OB 乳液微观结构

图 9 为三种山桐子 OB 乳液的激光扫描共聚焦显微镜图。从图中可以看出，WOB 乳液的荧光信号与其他两种 OB 乳液相比较为微弱，SOB 乳液则具有更加规则的圆球形结构，且蛋白信号更加明显，进一步证实了 SOB 乳液蛋白质含量较高。并且与 POB 乳液相比，SOB 乳液聚集程度较小，这与前面的粒径结果保持一致，更加证实了 SOB 乳液的较高稳定性。POB 乳液出现絮凝聚结的现象可能是因为正如前文所述，其含有较多的脂质含量，脂滴的粒径变大，并且容易发生氧化反应，进而导致 POB 乳液脂滴出现聚集现象。

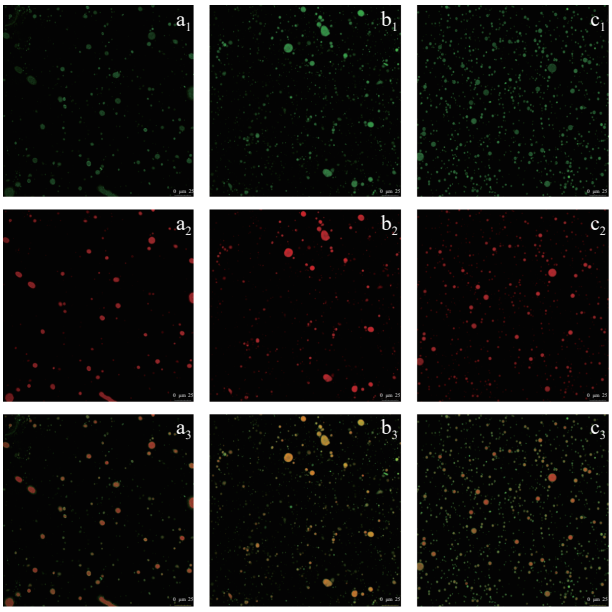


图 9　油脂体乳液激光扫描共聚焦显微镜图

Fig.9　Confocal laser scanning microscope images of oil body

2.7　OB 主成分分析

主成分分析也称主分量分析，是一种实用的多元分析方法，通过将原始数据降维，尤其是多个样品、多个指标，揭示样品之间可能存在的统计学差异[47]。使用主成分分析法对通过水提法得到的 WOB、POB、SOB 的组成成分、物理稳定性、氧化稳定性等指标进行分析。由表 2 载荷矩阵可知，三个主成分贡献率分别为 59.841%、32.804%、7.216%，

表 2　油脂体特征指标 PCA 载荷矩阵

Table 2　PCA load matrix of oil body characteristic indicators

特征指标	载荷系数		
	PC1	PC2	PC3
蛋白质(X_1)	0.370	0.156	−0.020
脂质(X_2)	0.002	0.271	0.962
总糖(X_3)	0.121	−0.496	0.146
总酚(X_4)	0.330	−0.277	0.088
必需氨基酸(X_5)	0.345	0.243	−0.076
总氨基酸(X_6)	0.365	0.181	−0.059
亲水性氨基酸(X_7)	0.358	0.205	−0.065
疏水性氨基酸(X_8)	0.347	0.238	−0.074
LPO(X_9)	−0.381	0.108	−0.027
TBARS(X_{10})	−0.270	0.376	−0.102
粒径(X_{11})	−0.144	0.486	−0.123
特征值	6.583	3.608	0.794
贡献率(%)	59.841	32.804	7.216
累积贡献率(%)	59.841	92.645	99.861

三个主成分累积贡献率为 99.861%，可以最大程度地解释样本的信息。主成分 1(PC1)的主要评价指标为蛋白质、总酚、必需氨基酸、总氨基酸、亲水性氨基酸、疏水性氨基酸、LPO，主成分 2(PC2)的主要评价指标为总糖、TBARS、粒径，主成分 3(PC3)的主要评价指标为脂质。

将原有的 11 个指标通过新的三个线性关系进行重新表示。以载荷系数与特征值 1/2 次方的比值作为相应主成分的得分系数[48]：$F_1=0.144X_1+0.047X_3+0.127X_4+0.134X_5+0.142X_6+0.140X_7+0.135X_8-0.148X_9-0.105X_{10}-0.056X_{11}$；$F_2=0.082X_1+0.143X_2-0.261X_3-0.146X_4+0.128X_5+0.095X_6+0.108X_7+0.125X_8+0.057X_9+0.198X_{10}+0.256X_{11}$；$F_3=-0.022X_1+1.079X_2+0.164X_3+0.099X_4-0.085X_5-0.066X_6-0.073X_7-0.083X_8-0.030X_9-0.114X_{10}-0.138X_{11}$。由各主成分得分和贡献率加权求和得到综合评价函数，山桐子 OB 综合评价函数表达式为 $F=0.599F_1+0.328F_2+0.072F_3$。OB 综合得分越高，则表明其综合性质越好。三种 OB 的主成分得分及综合得分见表 3。由表 3 可知，三种山桐子 OB 中，SOB 的综合得分最高，WOB 次之，得分最低的是 POB。

表 3 油脂体主成分得分及综合得分

Table 3 Principal component score and composite score of oil body

样品名称	F_1	F_2	F_3	综合得分	排名
WOB	0.07	−1.32	0.18	−0.38	2
POB	−1.19	0.60	−0.078	−0.52	3
SOB	1.19	0.72	−0.108	0.90	1

图 10 为油脂体的二维主成分分析图，从图中可以看出，SOB 位于第一象限，POB 位于第二象限，WOB 位于第四象限。WOB 在 PC1 得分为正值，在 PC2 中的得分为负值，POB 在 PC1 得分为负值，在 PC2 得分上为正值，SOB 在 PC1、PC2 上均为正值，这说明了 WOB、POB、SOB 在理化性质方面具有差异性，从图 10 中也可以看出 SOB 的得分最高。

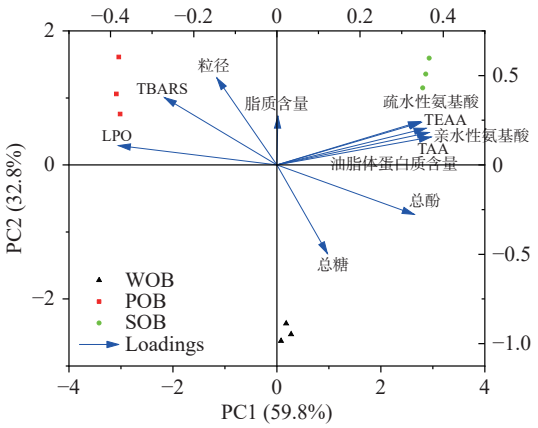


图 10 油脂体的二维主成分分析图

Fig.10 Two-dimensional principal component analysis of oil body

3 结论

通过测定从山桐子不同部位提取 WOB、POB、SOB 的理化性质、物理稳定性、氧化稳定性、微观结构、主成分分析等。结果表明，SOB 基本组成成分中的总糖、蛋白质含量、必需氨基酸含量和总氨基酸含量较高，这表明 SOB 具有更高的营养价值，更有利于人体摄入。SOB 的 G'和 G"高于 WOB 和 POB，表明其内部网络结构更为致密，能够有效抵抗外力形变，可以此为基础开发凝胶类产品。在稳定性方面，SOB 展现出了优异的物理稳定性和氧化稳定性，这表明 SOB 在贮藏期内有着更加稳定的性质。CLSM 也进一步显示出了 SOB 乳液具有更小的粒径和较高浓度的蛋白质。主成分分析图和综合得分也进一步证实，SOB 在多维度指标下综合得分最高，具有优于 WOB 与 SOB 的优势。综上所述，以山桐子种子为原料提取制得的 SOB 在食品领域具有较高的应用价值，有望为功能性山桐子食品开发提供新的选择。

© 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] SHIMADA T L, HAYASHI M, HARA-NISHIMURA I. Membrane dynamics and multiple functions of oil bodies in seeds and leaves[J]. Plant Physiology, 2018, 176(1): 199−207.

[2] WEISS J, ZHANG H. Recent advances in the composition, extraction and food applications of plant-derived oleosomes[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 106: 322−332.

[3] CHEN Y, CAO Y, ZHAO L P, et al. Macronutrients and micronutrients of soybean oil bodies extracted at different pH[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(7): C1285−C1291.

[4] ŞEN A, ACEVEDO-FANI A, DAVE A, et al. Plant oil bodies and their membrane components: New natural materials for food applications[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(2): 256−279.

[5] HOU J C, FENG X, JIANG M T J M T, et al. Effect of NaCl on oxidative stability and protein properties of oil bodies from different oil crops[J]. LWT, 2019, 113: 1082632019.

[6] CHEN B, MCCLEMENTS D J, GRAY D A, et al. Physical and oxidative stability of pre-emulsified oil bodies extracted from soybeans[J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1514−1520.

[7] ZAABOUL F, MATABARO E, RAZA H, et al. Validation of a simple extraction method for oil bodies isolated from peanuts[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2018, 120(2): 1700363.

[8] LOPEZ C, RABESONA H, NOVALES B, et al. Walnut (*Juglans regia* L.) kernel oil bodies recovered by aqueous extraction for utilization as ingredient in food emulsions: Exploration of their microstructure, composition and the effects of homogenization, pH, and salt ions on their physical stability[J]. Food Research International, 2023, 173: 113197.

[9] SUKHOTU R, SHI X, HU Q, et al. Aggregation behaviour and stability of maize germ oil body suspension[J]. Food Chemistry, 2014, 164: 1−6.

［10］ 李大伟. 山桐子主要性状变异及优株选择研究[D]. 北京：中国林业科学研究院, 2010. ［LI D W. Study on the variation of main traits and the selection of superior plants in *Idesia polycarpa* Maxim[D]. BeiJing: Chinese Academy of Forestry, 2010.］
［11］ 范睿深. 山桐子油脂合成相关基因的克隆及功能分析[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2021. ［FAN R S. Cloning and functional analysis of genes related to oil synthesis in *Idesia polycarpa* Maxim[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.］
［12］ 陈小静, 闻乐嫣, 向旭雯, 等. 水酶法提取毛叶山桐子油的工艺优化及其品质分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(12): 1−6. ［CHEN X J, WEN L Y, XIANG X W, et al. Process optimization and quality analysis of hydro-enzymatic extraction of *Idesia polycarpa* Maxim oil[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(12): 1−6.］
［13］ 冯红霞, 叶英, 彭芳芳, 等. 山桐子油微胶囊的制备及其氧化稳定性分析[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(4): 60−64. ［FENG H X, YE Y, PENG F F, et al. Preparation of microcapsules and oxidation stability analysis of *Idesia polycarpa* Maxim oil[J]. Grains and Oils, 2025, 38(4): 60−64.］
［14］ 张晨, 孙晓娜. 山桐子鲜果中油脂的提取工艺优化及品质分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(3): 16−20. ［ZHANG C, SUN X N. Optimization of extraction process and quality analysis of oil from fresh fruit of *T. japonica*[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(3): 16−20.］
［15］ 艾前进, 艾佳, 王利. 油葡萄(山桐子)油被国家列入普通食品管理[J]. 中国林业产业, 2020(10): 40−41. ［AI Q J, AI J, WANG L. China Forestry Industry, 2020(10): 40−41.］
［16］ ZHOU X, ZHAO J L, ZHAO X, et al. Oil bodies extracted from high-oil soybeans (*Glycine max*) exhibited higher oxidative and physical stability than oil bodies from high-protein soybeans[J]. Food & Function, 2022, 13(6): 3271−3282.
［17］ 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京：中国标准出版社, 2016. ［National Health and Family Planning Commission. GB 5009.3-2016 National food safety standard Determination of moisture in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.］
［18］ 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S]. 北京：中国标准出版社, 2016. ［State Food and Drug Administration, National Health and Family Planning Commission. GB 5009.6-2016 National food safety standard Determination of fats in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.］
［19］ 国家卫生和计划生育委员会 GB 5009.4-2016 食品安全国家标准 食品中灰分的测定[S]. 北京：中国标准出版社, 2016. ［National Health and Family Planning Commission GB 5009.4-2016 National food safety standard Determination of ash in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.］
［20］ CHANG S K C, ZHANG Y. Protein analysis[J]. Food analysis, 2017: 315−331.
［21］ DING J, XU Z J, QI B K, et al. Thermally treated soya bean oleosomes: the changes in their stability and associated proteins[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 55(1): 229−238.
［22］ DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. Analytical chemistry, 1956, 28(3): 350−356.
［23］ FISK I D, GRAY D A. Soybean (*Glycine max*) oil bodies and their associated phytochemicals[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(9): C1349−C1354.
［24］ NTONE E, BiTTER J H, NIKIFORIDIS C V. Not sequentially but simultaneously: Facile extraction of proteins and oleosomes from oilseeds[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105598.
［25］ TANG X, SHEN Y T, ZHANG Y Q, et al. Parallel comparison of functional and physicochemical properties of common pulse proteins[J]. Lwt, 2021, 146: 111594.
［26］ GONG T, SONG Z C, ZHANG S, et al. Young apple polyphenols confer excellent physical and oxidative stabilities to soy protein emulsions for effective *β*-carotene encapsulation and delivery[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275: 133607.
［27］ YU X, NIE C Z, ZHAO P, et al. Influences of microwave exposure to flaxseed on the physicochemical stability of oil bodies: Implication of interface remodeling[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130802.
［28］ ZHAO L P, CHEN Y M, YAN Z H, et al. Physicochemical and rheological properties and oxidative stability of oil bodies recovered from soybean aqueous extract at different pHs[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61: 685−694.
［29］ LIAO Y, SUN Y F, WANG Z X, et al. Structure, rheology, and functionality of emulsion-filled gels: Effect of various oil body concentrations and interfacial compositions[J]. Food Chemistry: X, 2022, 16: 100509.
［30］ DE CHIRICO S, DI BARI V, GUZMAN M J R, et al. Assessment of rapeseed oil body (oleosome) lipolytic activity as an effective predictor of emulsion purity and stability[J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126355.
［31］ 邹康, 常云鹤, 宋明发, 等. 不同产地山桐子果实成分及脂肪酸组成分析与评价[J/OL]. 中国油脂, 1−8[2024-08-12]. https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230342. ［ZOU K, CHANG Y H, SONG M F, et al. Analysis and evaluation of fruit composition and f atty acid composition of *Idesia polycarpa* Maxim from different origins[J/OL]. China Oil and Oil, 1−8[2024-08-12]. https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230342.］
［32］ 闻乐嫣, 毛建梅, 安小凤, 等. 毛叶山桐子果实化学成分及脂肪酸动态分析与评价[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 198−207. ［WEN L Y, MAO J M, AN X F, et al. Analysis and evaluation of chemical composition and f atty acid dynamics of *Idesia polycarpa* Maxim fruit[J]. Food Science, 2022, 43(4): 198−207.］
［33］ 陈子茜, 陈耀兵, 黄秀芳, 等. 采收期对“鄂选 2 号”山桐子果实成分及脂肪酸组成变化影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(2): 96−103. ［CHEN Z Q, CHEN Y B, HUANG X F, et al. Effect of harvest date on *Idesia polycarpa* Maxim fruit composition and fatty acid composition of "Exuan 2"[J]. Journal of Cereals and Oils of China, 2023, 38(2): 96−103.］
［34］ SUN H, SUN J L, DOU N X, et al. Characterization and comparison of structure, thermal and functional characteristics of various commercial pea proteins[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102740.
［35］ ROBERTS M A, OLZMANN J A. Protein quality control and lipid droplet metabolism[J]. Annual Review of Cell and Developmental Biology, 2020, 36(1): 115−139.
［36］ 周鑫, 韩宛君, 李东飞, 等. 不同 OB 结构及性质的差异[J]. 食品科学, 2018, 39(16): 133−139. ［ZHOU X, HAN W J, LI D F, et al. Differences in structure and properties of different oil body (OB)[J]. Food Science, 2018, 39(16): 133−139.］
［37］ YANG J, XIONG Y L. Inhibition of lipid oxidation in oil-in-water emulsions by interface-adsorbed myofibrillar protein[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(40): 8896−8904.
［38］ WANG W, CUI C L, WANG Q L, et al. Effect of pH on

physicochemical properties of oil bodies from different oil crops[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56: 49−58.
[39] CHEN M S, XU F F, NSOR-ATINDANA J, et al. High protein and high oil emulsions: Phase diagram, stability and interfacial adsorption[J]. LWT, 2022, 153: 112464.
[40] ZHANG R Y, LIU A B, LIU C, et al. Effects of different extraction methods on the physicochemical properties and storage stability of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) oil[J]. LWT, 2023, 173: 114259.
[41] SAMDANI G K, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Impact of phospholipids and tocopherols on the oxidative stability of soybean oil-in-water emulsions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(15): 3939−3948.
[42] NIU R H, CHEN F S, LIU C, et al. Composition and rheological properties of peanut oil bodies from aqueous enzymatic extraction[J]. Journal of Oleo Science, 2021, 70(3): 375−383.
[43] NIKIFORIDIS C V, BILIADERIS C G, KIOSSEOGLOU V. Rheological characteristics and physicochemical stability of dressing-type emulsions made of oil bodies-egg yolk blends[J]. Food Chemistry, 2012, 134(1): 64−73.
[44] LIU C, CHEN F S, XIA Y M, et al. Physicochemical and rheological properties of peanut oil body following alkaline pH treatment[J]. LWT, 2022, 154: 112590.
[45] WHITE D A, FISK I D, MITCHELL J R, et al. Sunflowerseed oil body emulsions: Rheology and stability assessment of a natural emulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(7): 1224−1232.
[46] MASON S, FRIIS A. Rheology of an emulsion of oil bodies[C]//Papers presented at the Nordic Rheology Conference 2001, Trondheim, June 14-16, 2001: General Papers and Papers from the Special Session on Mixed Systems, also Featuring Papers from the Nordic Rheology Conference, June 2000, Helsinki. Nordic Rheology Society, 2001: 65-68. .
[47] PARK M K, KIM Y S. Comparative metabolic expressions of fermented soybeans according to different microbial starters[J]. Food Chemistry, 2020, 305: 125461.
[48] 邹康, 常云鹤, 宋明发, 等. 不同产地山桐子品质分析及综合评价[J]. 中国油脂, 2025, 50(1): 129−134,152. [ZOU K, CHANG Y H, SONG M F, et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of *Idesia polycarpa* from different producing areas[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(1): 129−134,152.]