

去红衣与超声处理对花生油体提取及其 乳化特性、抗氧化活性的影响

曾广镇^{1,2}, 赵志浩², 周鹏飞², 邓媛元², 魏振承², 张雁²,
唐小俊², 刘光², 李萍², 张名位²

(1. 天津科技大学 食品科学与工程学院, 天津 300457; 2. 广东省农业科学院 蚕业与农产品加工研究所,
农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广州 510610)

摘要: 为了对花生油体的工业化提取和基于油体乳化体系新产品的开发提供参考, 探究了去红衣与超声处理对花生油体提取及其乳化特性、抗氧化活性的影响。不同预处理的花生经水相提取, 得到油体、清液和沉淀三相, 测定了三相中固形物、脂肪、蛋白质的含量和分布, 并分析了油体的乳化特性、总酚与总黄酮含量以及抗氧化活性。结果表明: 去红衣将脂肪在油体中的分布由 63.36% 提高至 65.30%, 与超声联合处理时进一步将其提高至 68.13%; 去红衣处理不利于花生油体的稳定性和抗氧化活性; 与对照组相比, 去红衣组油体乳液平均粒径由 2 510.00 nm 上升至 2 953.67 nm, 动力学稳定性降低; 去红衣组油体总酚、总黄酮含量最低, 分别为 71.01 $\mu\text{g/g}$ 与 47.14 $\mu\text{g/g}$; 超声处理促进了花生油体的溶出, 且提取的油体乳化稳定性和抗氧化活性最高, 其乳液平均粒径为 1 742.00 nm, 乳化活性指数和乳化稳定性指数分别为 114.48 m^2/g 与 1 848.40 min, 动力学稳定性最佳, 总酚、总黄酮含量分别为 101.24 $\mu\text{g/g}$ 与 59.97 $\mu\text{g/g}$ 。综上, 去红衣处理有利于花生油体的提取, 但会降低其稳定性与抗氧化活性, 而超声处理不仅有利于花生油体的提取, 还增强了其乳化稳定性和抗氧化活性。

关键词: 花生; 去红衣; 超声; 油体; 乳液; 抗氧化活性

中图分类号: TS225.1; TS224.8 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2024)01-0022-08

Effects of peanut testa removal and ultrasonic treatment on peanut oil bodies extraction and its emulsification and antioxidant properties

ZENG Guangzhen^{1,2}, ZHAO Zhihao², ZHOU Pengfei², DENG Yuanyuan²,
WEI Zhencheng², ZHANG Yan², TANG Xiaojun², LIU Guang²,
LI Ping², ZHANG Mingwei²

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
2. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Key Laboratory of Functional Foods of
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong
Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In order to provide reference for the industrial extraction of peanut oil bodies and the

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-10-24

基金项目: 广东特支计划项目(2019BT02N112); 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目(2022KJ117); 广东省农业科学院农业优势产业学科团队建设项目(202108TD); 广东省财政厅专项(粤财农[2022]167号); 广东省农业科学院科技创新战略专项资金(高水平农科院建设)(R2020QD-040, R2021YJ-YB2001, R2019PY-JX005)

作者简介: 曾广镇(1998), 男, 在读硕士, 研究方向为食品工程(E-mail) zenggz2022@163.com。

通信作者: 张名位, 研究员, 博士(E-mail) mwzhh@vip.tom.com。

development of new products based on oil body emulsification system, the effects of peanut testa removal and ultrasonic treatment on the extraction of oil body and its emulsification and antioxidant properties were investigated. Different pretreated peanuts were extracted by aqueous phase to obtain oil body, supernatant and precipitation, then the content and distribution of solids, oils and proteins in above three phases were measured,

and the emulsifying properties, total polyphenol contents, total flavonoid contents, and antioxidant properties of the oil body were analyzed. The results showed that the removal of peanut testa increased the distribution of oils in oil body from 63.36% to 65.30%, and the combined treatment of peanut testa removal and ultrasound further increased the distribution of oils in oil body to 68.13%. The peanut testa removal treatment was not conducive to the stability and antioxidant properties of peanut oil body. Compared with the control group, the average particle size of oil body emulsion in the peanut testa removal treatment group increased from 2 510.00 nm to 2 953.67 nm, meanwhile the kinetic stability decreased. In addition, the contents of total polyphenols and total flavonoids in the peanut testa removal treatment group were the lowest, which were 71.01 $\mu\text{g/g}$ and 47.14 $\mu\text{g/g}$, respectively. Ultrasonic treatment promoted the dissolution of oil body in peanut, and oil body possessed optimal emulsion stability and antioxidant properties. The average particle size of the ultrasonic emulsion was 1 742.00 nm, the emulsifying activity index and emulsion stability index were 114.48 m^2/g and 1 848.40 min, respectively, the dynamic stability was the best, and the contents of total polyphenol and total flavonoid were 101.24 $\mu\text{g/g}$ and 59.97 $\mu\text{g/g}$. In general, the removal of peanut testa is beneficial to the extraction of peanut oil body, but reduces the stability and antioxidant properties. Ultrasonic treatment is not only beneficial to the extraction of peanut oil body, but also enhances the emulsion stability and antioxidant properties of oil body.

Key words: peanut; peanut testa removal; ultrasound; oil body; emulsion; antioxidant property

花生(*Arachis hypogaea* Linn.),又称落花生,属豆科蝶形亚目,在热带、亚热带及地中海沿岸等地区广泛栽培。花生仁富含脂肪、蛋白质、膳食纤维、维生素和矿物质等,是食用植物油和植物蛋白的重要来源^[1]。研究表明,花生等油料的脂肪存在于细胞的油体中,油体是由蛋白质、磷脂和三酰基甘油酯(TAG)构成的微球形亚细胞器,其疏水核心部分主要由三酰基甘油酯构成,外围由单层磷脂和镶嵌其上的油体结合蛋白构成的膜结构所包裹^[2]。油体结合蛋白是一类具有两亲性的小分子蛋白质,其疏水基团插入三酰基甘油酯的内部,亲水基团镶嵌在磷脂膜的表面^[3],这种特殊的结构赋予了油体良好的乳化性。近年来研究发现,大量摄入食品工业广泛使用的吐温-80和羧甲基纤维素等合成乳化剂,可能破坏人体肠道微生态,诱发肠道炎症和代谢紊乱等不良后果^[4-5]。因此,基于油体这一天然结构开发新型食品乳化体系具有绿色天然的优势,避免了合成乳化剂带来的潜在安全风险,目前已经成为领域内的研究热点。

水相提取法是提取油料油体的便捷方法,具有安全高效、环境友好等优势。花生红衣即花生的种皮,除富含纤维素、脂肪、蛋白质外,还含有丰富的酚类物质^[6],包括白藜芦醇、原花青素、黄酮等多种活性物质^[7],具有止血^[8]、抗氧化^[9]、抑菌^[10]等多种生物活性。在花生油体提取过程中,含量丰富的花

生红衣多酚可能通过与油体结合蛋白相互作用等方式对花生油体提取率以及乳化特性产生一定影响^[11-12],但相关研究较少。另外,超声处理是近年来研究较多的辅助技术,可加速目标物质的溶出,其可能对花生红衣物质溶出、油体提取及其乳化特性产生一定影响。本文考察了去红衣处理、超声处理以及去红衣-超声联合处理对花生油体水相提取过程中油体提取及乳化特性的影响,以期对花生油体的工业化提取和基于油体乳化体系新产品的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

花生(品种为鲁花11),市售;磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、乙醇,天津市大茂化学试剂厂;盐酸、硫酸,广州化学试剂厂;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH),上海源叶生物科技有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS),德国Bio-froxx公司;总抗氧化能力(FRAP法)试剂盒,碧云天生物技术有限公司。以上试剂无特殊说明均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

SB25-12DTD型超声波清洗机,宁波新芝生物科技股份有限公司;Malvern Zetasizer Nano ZSE型纳米粒度仪,英国Malvern仪器有限公司;Allegra 64 R型离心机,美国Beckman Coulter股份有限公司;

UV-1800可见光-紫外分光光度计,日本岛津仪器有限公司;Synergy H1型酶标仪,美国Biotek仪器有限公司;Turbiscan Lab型多重光散射分析仪,法国Formulation仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 花生油体的制备

1.2.1.1 对照组花生油体

称取100 g花生仁,按料液比1:7加入蒸馏水,在4℃下浸泡10 h,然后打浆2 min,经4层纱布过滤后得花生浆。取50 mL花生浆于离心管中,在8 000 × g下离心20 min,分离三相,得到轻相(油体)、中间相(清液)和重相(沉淀)。

1.2.1.2 去红衣组花生油体

按照对照组花生油体的制备工艺,以人工去红衣的花生仁为原料,得到去红衣组花生油体。

1.2.1.3 超声组花生油体

按照对照组花生油体的制备工艺,在打浆后超声30 min(40 kHz,600 W),得到超声组花生油体。

1.2.1.4 去红衣+超声组花生油体

将1.2.2.2和1.2.2.3工艺结合,得到去红衣+超声组花生油体。

1.2.2 花生油体乳液的制备

将花生油体均匀分散于pH 7.4的10 mmol/L磷酸盐缓冲溶液(PBS)中制得质量分数为5%的花生油体乳液。

1.2.3 基本指标的测定

水分及固形物含量测定,参考GB 5009.3—2016直接干燥法;蛋白质含量测定,参考GB 5009.5—2016凯氏定氮法;脂肪含量测定,参考GB 5009.6—2016索氏抽提法。

1.2.4 Zeta电位及粒径的测定

将乳液稀释1 000倍,在25℃下采用纳米粒度仪测定乳液的Zeta电位及液滴粒径(以体积平均直径 $d_{4,3}$ 表示)。

1.2.5 乳化活性指数(EAI)与乳化稳定性指数(ESI)的测定

EAI和ESI(为静置30 min时的)的测定参考Li等^[13]的方法。

1.2.6 动力学稳定性(TSI)分析

参考Yu等^[14]的方法,采用多重光散射分析仪分析油体乳液的TSI。取20 mL乳液至样品瓶中,确保乳液不产生气泡且不粘壁。将样品瓶平稳地放入检测室,在25℃下持续扫描1 h(每25 s扫描1次),记录检测结果(TSI指数)。TSI指数值越小,表示样品动力学稳定性越高。

1.2.7 总酚、总黄酮含量的测定

1.2.7.1 样品处理

取1 g花生油体,加入2 mL提取溶剂(60%乙醇),于60℃下超声30 min,然后常温下以12 000 r/min离心10 min,取上清液过0.45 μm有机相滤膜,得提取液。

1.2.7.2 总酚含量测定

根据Kashif等^[15]的方法并作适当修改。取125 μL提取液,加入500 μL蒸馏水和125 μL福林酚试剂,混匀后在室温下反应6 min,再加入1.25 mL质量浓度为7 g/100 mL的Na₂CO₃溶液和1 mL蒸馏水,混匀后在室温下避光反应90 min,于760 nm波长下测定吸光值。再根据标准曲线(以没食子酸为标准品绘制),计算样品中总酚含量[以每克油体(干基)中所含没食子酸当量表示]。

1.2.7.3 总黄酮含量测定

参考Scalbert等^[16]的方法并作适当修改。取0.3 mL提取液,依次加入1.5 mL蒸馏水、0.09 mL质量浓度为5 g/100 mL的NaNO₂溶液,混匀,室温下避光反应6 min,再加入0.18 mL质量浓度为10 g/100 mL的AlCl₃·6H₂O溶液,混匀,室温下避光反应5 min,依次加入0.6 mL 1.0 mol/L NaOH溶液、0.33 mL蒸馏水,混匀,于510 nm波长下测定吸光值。再根据标准曲线(以儿茶素为标准品绘制),计算样品中总黄酮含量[以每克油体(干基)中所含儿茶素当量表示]。

1.2.8 抗氧化能力的测定

1.2.8.1 DPPH自由基清除率的测定

参考黄靖等^[17]的方法并稍作改动,测定花生油体的DPPH自由基清除率。以95%乙醇溶解DPPH配制成浓度为0.1 mmol/L的DPPH溶液,避光保存备用。取2 mL DPPH溶液与1 mL不同质量浓度梯度(0、10、20、30、40、50 mg/mL)油体乳液混合,避光反应30 min,以同质量浓度的维生素C溶液作阳性对照,在517 nm波长下测定混合液的吸光值。按下式计算DPPH自由基清除率(Y)。

$$Y = [A_0 - (A_1 - A_2)/A_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_1 为样品组(样品和DPPH溶液)的吸光值; A_2 为样品对照组(样品和95%乙醇)的吸光值; A_0 为对照组(95%乙醇与DPPH溶液)的吸光值。

1.2.8.2 Fe²⁺还原能力的测定

Fe²⁺还原能力(FRAP)采用总抗氧化能力(FRAP法)试剂盒进行测定,表征样品的总抗氧化能力。

1.2.9 数据统计分析

各试验均设置3组平行,结果以“平均值±标准差”表示。所有数据通过SPSS 26进行单因素方差的Duncan事后检验。

2 结果与讨论

2.1 去红衣与超声处理对花生浆离心分离三相中基本成分含量的影响

去红衣与超声处理对花生浆离心分离三相中固形物、脂肪和蛋白质含量的影响如表1所示。

表1 去红衣与超声处理对三相中固形物、脂肪、

项目	组别	蛋白质含量的影响		
		油体	清液	沉淀
固形物	对照	78.76±0.04 ^c	5.11±0.26 ^{ab}	59.64±1.02 ^a
	去红衣	79.12±0.09 ^b	5.61±0.63 ^a	55.91±1.75 ^b
	超声	77.25±0.23 ^d	4.64±0.19 ^b	56.82±0.66 ^b
	去红衣+超声	80.21±0.07 ^a	3.76±0.05 ^c	55.63±1.08 ^b
脂肪	对照	70.75±3.34 ^a	0.47±0.19 ^b	2.90±0.55 ^b
	去红衣	68.77±1.21 ^a	0.61±0.15 ^b	2.10±0.06 ^c
	超声	67.31±0.12 ^a	1.78±0.13 ^a	3.61±0.16 ^a
	去红衣+超声	68.90±0.40 ^a	1.81±0.10 ^a	2.19±0.12 ^c
蛋白质	对照	1.42±0.05 ^b	2.60±0.04 ^a	31.14±0.15 ^b
	去红衣	1.40±0.05 ^b	2.21±0.21 ^b	26.35±2.02 ^c
	超声	1.76±0.08 ^a	1.90±0.11 ^c	25.75±1.83 ^c
	去红衣+超声	1.73±0.06 ^a	2.28±0.06 ^b	45.76±1.68 ^a

注:不同字母表示不同处理组间差异显著($p < 0.05$)。下同

由表1可知,油体中固形物和脂肪含量最高,沉淀次之,清液中最低,而沉淀中蛋白质含量最高,清液次之,油体中最低。与对照组相比,去红衣处理显著提高了油体中的固形物含量($p < 0.05$),显著降低了沉淀中的固形物和脂肪含量以及清液和沉淀中的蛋白质含量($p < 0.05$),超声处理显著提高了清液和沉淀中的脂肪含量以及油体中的蛋白质含量($p < 0.05$),显著降低了油体和沉淀中的固形物含量以及清液和沉淀中的蛋白质含量($p < 0.05$),去红衣和超声联合处理显著提高了油体中固形物含量、清液中脂肪含量以及油体和沉淀中蛋白质含量($p < 0.05$),显著降低了清液和沉淀中固形物含量、沉淀中脂肪含量以及清液中蛋白质含量($p < 0.05$)。刘莹等^[18]制得的花生油体固形物含量为77.68%,脂肪含量为75.10%,蛋白质含量为1.03%;Wei等^[19]制得的花生油体固形物含量为78.57%,脂肪含量为74.02%,蛋白质含量为0.81%;Gao等^[20]在pH 6.8下制得的花生油体固形物含量为81%左右,油脂含量为78%左右,蛋白质含量为1.4%左右;以上研究结果与本文研究结

果接近。Gao等^[20]研究发现,随着提取体系pH升高,油体水分含量和蛋白质含量递减,脂肪含量递增;康波^[21]研究发现,与水相提取法相比,酶法提取的花生油体水分与蛋白质含量增加,脂肪含量则明显降低:这说明花生油体组分组成可能与体系pH、提取工艺等因素相关。本研究中超声处理对固形物、脂肪和蛋白质在三相中的含量影响较去红衣处理更大。由于不同处理组间三相分离物的质量具有一定差距,尤其是沉淀质量相差较大,固形物、脂肪、蛋白质的含量不能反映其在花生仁中的提取率。因此,进一步对固形物、脂肪、蛋白质在三相中的分布进行分析。

2.2 去红衣与超声处理对固形物、脂肪、蛋白质在花生浆离心分离三相中分布的影响

去红衣与超声处理对固形物、脂肪、蛋白质在花生浆离心分离三相中分布的影响如表2所示。

表2 去红衣与超声处理对固形物、脂肪、蛋白质在三相中分布的影响

项目	组别	蛋白质在三相中分布的影响		
		油体	清液	沉淀
固形物	对照	33.34±0.02 ^d	29.53±1.50 ^b	7.29±0.12 ^b
	去红衣	35.51±0.03 ^b	33.86±3.80 ^a	6.03±0.18 ^c
	超声	34.46±0.10 ^c	26.85±1.12 ^b	8.48±0.10 ^a
	去红衣+超声	37.50±0.03 ^a	22.46±0.30 ^c	3.59±0.06 ^d
脂肪	对照	63.36±2.99 ^{bc}	5.80±2.28 ^b	0.79±0.15 ^b
	去红衣	65.30±1.15 ^b	7.73±1.95 ^b	0.48±0.01 ^c
	超声	63.51±0.11 ^c	21.84±2.23 ^a	1.14±0.05 ^a
	去红衣+超声	68.13±0.39 ^a	22.86±1.28 ^a	0.30±0.02 ^d
蛋白质	对照	2.49±0.09 ^b	62.35±0.96 ^a	15.81±0.08 ^a
	去红衣	2.61±0.09 ^b	55.32±5.26 ^{ab}	11.79±0.90 ^b
	超声	3.26±0.15 ^a	45.66±2.64 ^c	15.93±1.04 ^a
	去红衣+超声	3.35±0.12 ^a	56.54±1.49 ^b	12.23±0.49 ^b

由表2可知,固形物和脂肪主要分布在油体中,清液次之,沉淀中最少,而蛋白质主要分布在清液中,沉淀次之,油体中最少。与对照组相比,去红衣处理显著降低了固形物、脂肪和蛋白质在沉淀中的分布($p < 0.05$),显著提高了固形物在油体和清液中的分布($p < 0.05$);超声处理显著提高了脂肪在清液和沉淀中的分布,蛋白质在油体中的分布,以及固形物在油体和沉淀中的分布($p < 0.05$),显著降低了蛋白质在清液中的分布($p < 0.05$);而去红衣和超声联合处理显著提高了脂肪在油体和清液中的分布,蛋白质在油体中的分布,以及固形物在油体中的分布($p < 0.05$),显著降低了脂肪在沉淀中的分布,蛋白质在清液和沉淀中的分布,以及固形物在清液和沉淀中的分布($p < 0.05$)。

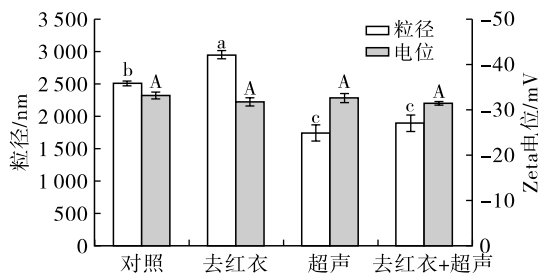
综上所述,去红衣和超声处理均有助于花生油

体的提取,二者相结合的效果更优。花生红衣中大量存在的纤维可能对浆液中的油体产生一定的吸附,使之进入沉淀中,进而降低后续的油体分离得率,因此去红衣有利于油体的提取。超声处理在花生浆液中产生空化现象,即在液体中产生小的真空气泡或空隙,气泡爆破导致的局部高温高压造成细胞壁、细胞膜的破坏,促进细胞内油体、蛋白质等物质溶出^[22]。因此,超声处理也有利于油体的提取,这与 Zderic 等^[23]的研究结果类似。但在本研究中,超声处理和去红衣和超声联合处理释放的油体尚未得到充分的分离,清液中仍然残留超过 20% 的油体。因此,在现有工艺基础上通过提高离心力、离心时间或增加离心次数或许可进一步提高油体提取率。

2.3 去红衣与超声处理对花生油体乳液性质的影响

2.3.1 粒径与 Zeta 电位

去红衣与超声处理对花生油体乳液粒径、Zeta 电位的影响如图 1 所示。



注:不同字母表示同一指标不同处理组间差异显著($p < 0.05$)。下同

图1 去红衣与超声处理对花生油体乳液粒径、Zeta 电位的影响

由图 1 可知,4 种花生油体乳液的 Zeta 电位在 $-33 \sim -31$ mV 之间,无显著差异($p > 0.05$)。油体乳液 Zeta 电位主要由表面的油体结合蛋白决定,本研究结果说明去红衣与超声处理对油体蛋白表面电负性无显著影响。Tzen 等^[3]报道细胞内花生油体平均粒径为 $1.95 \mu\text{m}$,Sun 等^[24]在体系 pH 7.5 的情况下测得花生油体的粒径为 $2.54 \mu\text{m}$,本研究中提取的花生油体粒径在 $1700 \sim 3000$ nm 之间,与上述研究结果接近。影响油体粒径的因素较多,提取过程中的温度、pH、盐离子浓度、热处理、酶等因素都可能导致油体粒径产生变化。本研究中,对照组花生油体乳液的粒径为 2510.00 nm,超声处理使花生油体乳液粒径显著降低(1742.00 nm, $p < 0.05$),其原因可能是超声导致聚集的油体相互碰撞,从而使颗粒分散更加均匀^[25]。但去红衣处理使花生油体

乳液的粒径显著增大(2953.67 nm, $p < 0.05$),这可能与花生红衣中的多酚成分有关,花生红衣中的天然酚类物质在提取过程中溶解到花生浆液中,部分与油体表面蛋白上的肽键形成氢键,有利于油体在水溶液中的分散,减少油体间的聚集,从而使其粒径显著降低^[26]。

2.3.2 EAI 与 ESI

去红衣与超声处理对花生油体乳液 EAI、ESI 的影响如图 2 所示。

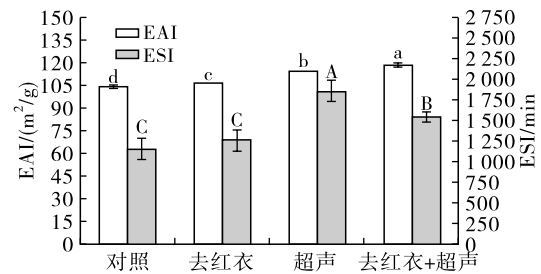


图2 去红衣与超声处理对花生油体乳液 EAI、ESI 的影响

由图 2 可知,与对照组相比,去红衣组和超声组花生油体乳液 EAI 均显著提高($p < 0.05$),但去红衣组提高幅度较小(从 104.23 m²/g 升高至 106.61 m²/g),超声组提高幅度较大(从 104.23 m²/g 提高至 114.48 m²/g,约提升了 10%),去红衣 + 超声组提高幅度更大(从 104.23 m²/g 提高至 118.37 m²/g)。与对照组相比,去红衣组花生油体乳液 ESI 有所提高,但变化不显著,而超声组的 ESI 显著升高($p < 0.05$),由 1149.23 min 升高至 1848.40 min,去红衣 + 超声组的 ESI 高于对照组,但低于超声组,为 1546.88 min。结果说明,超声处理和去红衣处理均有利于提高花生油体乳液 EAI 和 ESI,但去红衣处理的影响较超声处理小。

2.3.3 TSI

去红衣与超声处理对花生油体乳液的 TSI 影响如图 3 所示。

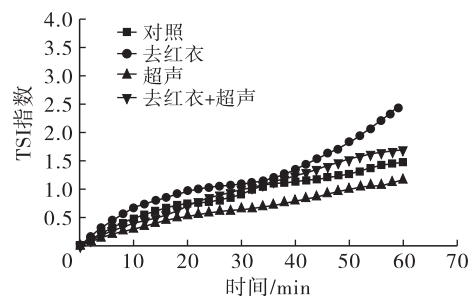


图3 去红衣与超声处理对花生油体乳液 TSI 指数的影响

由图 3 可知:超声组花生油体乳液 TSI 指数上升幅度最小,在 1 h 内上升至 1.2;去红衣组花生油

体乳液 TSI 指数上升幅度最大,在 1 h 内上升至 2.4;去红衣+超声组花生油体乳液在 20 min 前 TSI 指数低于对照组,在 20 min 后则高于对照组;最终各组花生油体乳液的动力学稳定性大小为超声组 > 对照组 > 去红衣+超声组 > 去红衣组。

综上所述,花生油体提取过程中的超声处理可以减小其乳液的粒径,提高其乳液的 EAI、ESI 和 TSI,从而提升其乳液的稳定性。超声波可以将油体聚集破碎成细小颗粒,甚至可以诱导其表面蛋白质层重新排布,使油体表面蛋白质的三级结构展开,暴露蛋白质的巯基和亲水基团,提高其溶解度,有利于乳液的形成和稳定^[27]。超声处理可提高花生油体中的蛋白质含量,这些蛋白质吸附在油水界面上,通过空间位阻等作用促进油体乳液更加稳定^[28]。花生油体提取过程中的去红衣处理则会增大其乳液的粒径,降低其乳液 TSI,从而降低其乳液的稳定性。花生红衣中富含天然酚类物质,在油体提取过程中,部分多酚可以与油体表面蛋白质发生非共价结合,主要包括多酚的羟基和蛋白质侧链氨基间的氢键作用、多酚的苯环与蛋白质脂肪族氨基酸以及芳香族氨基酸之间的疏水作用等^[29-30],可能是因为这些相互作用的降低,使得经过去红衣处理的花生油体表面亲水性降低,乳液稳定性下降。

2.3.4 抗氧化活性

2.3.4.1 总酚与总黄酮含量

去红衣与超声处理对花生油体中总酚含量与总黄酮含量的影响如图 4 所示。

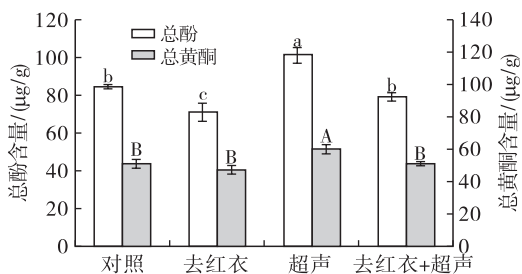


图 4 去红衣与超声处理对花生油体中总酚与总黄酮含量的影响

由图 4 可知,与对照组相比,去红衣处理显著降低了花生油体的总酚含量,超声处理则显著提高了花生油体的总酚含量和总黄酮含量($p < 0.05$)。对照组花生油体的总酚含量为 84.37 $\mu\text{g/g}$,去红衣组花生油体的总酚含量降至 71.01 $\mu\text{g/g}$,超声组花生油体的总酚含量提高至 101.24 $\mu\text{g/g}$,去红衣+超声组花生油体的总酚含量降至 78.97 $\mu\text{g/g}$ (与对照组没有显著差异, $p > 0.05$)。不同处理组花生油体的

总黄酮含量变化趋势与总酚含量的变化趋势类似,超声组的总黄酮含量显著提高,由对照组的 50.97 $\mu\text{g/g}$ 提高至 59.97 $\mu\text{g/g}$,去红衣组和去红衣+超声组的总黄酮含量分别为 47.14 $\mu\text{g/g}$ 和 51.34 $\mu\text{g/g}$,与对照组没有显著差异。结果表明,去红衣处理提取的花生油体总酚含量降低约 15.8%,总黄酮含量降低约 7.5%,而超声处理使花生仁和红衣中的多酚与黄酮更加充分释放,其提取的花生油体总酚含量提高约 20.0%,总黄酮含量上升约 17.7%。

2.3.4.2 抗氧化能力

去红衣与超声处理对花生油体乳液 DPPH 自由基清除能力与铁离子还原能力的影响如图 5 所示。

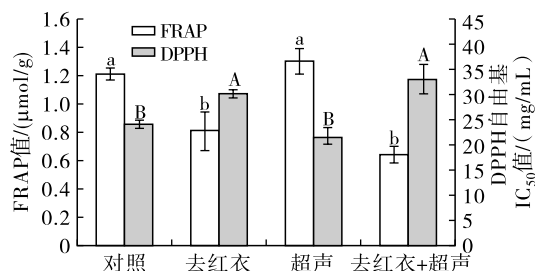


图 5 去红衣与超声处理对花生油体乳液 FRAP 值和 DPPH 自由基 IC₅₀ 值的影响

由图 5 可知,与对照组相比,去红衣处理、去红衣和超声联合处理使花生油体乳液的 DPPH 自由基清除能力显著降低,去红衣组和去红衣+超声组的 DPPH 自由基 IC₅₀ 值由对照组的 24.08 mg/mL 分别提高至 30.08 mg/mL 和 33.11 mg/mL ($p < 0.05$),而超声组花生油体乳液的 DPPH 自由基清除能力与对照组没有显著差异($p < 0.05$)。各组花生油体乳液的 FRAP 值与 DPPH 自由基清除能力的变化趋势类似,超声组花生油体乳液 FRAP 值与对照组没有显著差异($p < 0.05$),为 1.30 $\mu\text{mol/g}$,去红衣处理使乳液 FRAP 值显著降低,去红衣组和去红衣+超声组的 FRAP 值由对照组的 1.21 $\mu\text{mol/g}$ 分别降低至 0.81 $\mu\text{mol/g}$ 和 0.64 $\mu\text{mol/g}$ ($p < 0.05$)。结合 2.3.4.1 可以发现,油体中总酚和总黄酮含量与抗氧化活性趋势类似,存在较强的相关性,其主要原因为花生油体中的多酚和黄酮类物质具有良好的抗氧化活性,此外,去红衣组的总酚、总黄酮含量在低于去红衣+超声组的情况下,其抗氧化活性出现了反超,推测原因可能是超声后的油体乳液物理稳定性较强,影响了抗氧化物质在油水界面、亲水和疏水物质间的分配,导致其抗氧化活性有所降低^[31]。

3 结论

去红衣处理可以显著提高花生中油体的提取率,去红衣处理与超声处理联合应用时,花生油体的提取率更高。但另一方面,去红衣处理会降低花生油体的总酚与总黄酮含量,对油体乳液的稳定性和抗氧化活性产生负面效应。超声处理则促进了花生油体的溶出,有利于花生油体的提取,此外,还显著提高了花生油体中的总酚和总黄酮含量,对花生油体的乳化稳定性和抗氧化活性具有促进作用。因此,在利用水相提取法提取花生油体的过程中,可利用超声处理提高花生油体的提取率,同时提高花生油体的乳化稳定性和抗氧化活性;去红衣处理虽然可以提高花生油体的提取率,但不利于花生油体的稳定性和抗氧化活性,因此有必要根据实际需求选择是否去红衣。

参考文献:

- [1] 张洋, 严茂林, 葛玮玮, 等. 我国食用植物油供给现状分析及未来发展战略研究[J]. 中国油脂, 2022, 47(4): 1-8.
- [2] NIKIFORIDIS C V. Structure and functions of oleosomes (oil bodies) [J/OL]. Adv Colloid Interface Sci, 2019, 274: 102039 [2022-12-30]. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102039>.
- [3] TZEN J T, HUANG A H. Surface structure and properties of plant seed oil bodies[J]. J Cell Biol, 1992, 117(2): 327-335.
- [4] CHASSAING B, VAN DE WIELE T, DE BODT J, et al. Dietary emulsifiers directly alter human microbiota composition and gene expression *ex vivo* potentiating intestinal inflammation[J]. Gut, 2017, 66(8): 1414-1427.
- [5] CHASSAING B, COMPHER C, BONHOMME B, et al. Randomized controlled-feeding study of dietary emulsifier carboxymethylcellulose reveals detrimental impacts on the gut microbiota and metabolome [J]. Gastroenterology, 2022, 162(3): 743-756.
- [6] 童愈元, 何东平. 花生红衣中红色素、原花色素的提取工艺研究[J]. 农业机械, 2011(5): 116-119.
- [7] 刘曼丽, 孙华, 刘丽娜, 等. 花生红衣多酚的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2013, 19(8): 35-38.
- [8] 高雅婷, 包素珍, 张永军. 花生红衣下调 Bax、Bak 表达防治化疗后血小板减少症的研究[J]. 中华中医药杂志, 2018(9): 3883-3886.
- [9] LARRAURI M, ZUNINO M P, ZYGADLO J A, et al. Chemical characterization and antioxidant properties of fractions separated from extract of peanut skin derived from different industrial processes[J]. Ind Crops Prod, 2016, 94: 964-971.
- [10] 赵萍, 林樱姬, 金征宇, 等. 花生红衣中多酚类物质清除 DPPH 自由基能力和抑菌性能的研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(10): 129-132.
- [11] LIU C, CHEN F, XIA Y, et al. Physicochemical and rheological properties of peanut oil body following alkaline pH treatment [J/OL]. LWT - Food Sci Technol, 2022, 154: 112590 [2022-12-30]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112590>.
- [12] 官梦姝, 冯雪, 刘月, 等. 3 种天然酚类物质对大豆油脂体稳定性及体外消化性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(3): 10-18.
- [13] LI C, HUANG X J, PENG Q, et al. Physicochemical properties of peanut protein isolate - glucomannan conjugates prepared by ultrasound treatment [J]. Ultrason Sonochem, 2014, 21(5): 1722-1727.
- [14] YU X, NIE C, ZHAO P, et al. Influences of microwave exposure to flaxseed on the physicochemical stability of oil bodies: Implication of interface remodeling [J/OL]. Food Chem, 2022, 368: 130802 [2022-12-30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130802>.
- [15] KASHIF G, FAHAD A J, MEHMET M Ö, et al. Total phenolics, total carotenoids, individual phenolics and antioxidant activity of ginger (*Zingiber officinale*) rhizome as affected by drying methods [J/OL]. LWT - Food Sci Technol, 2020, 126: 109354 [2022-12-30]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109354>.
- [16] SCALBERT A, MONTIES B, JANIN G. Tannins in wood: Comparison of different estimation methods [J]. J Agric Food Chem, 2002, 37(5): 1324-1329.
- [17] 黄靖, 韩耀濂, 汤昊, 等. 黑果腺肋花楸中花色苷的分离纯化及其抗氧化活性[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(5): 122-128.
- [18] 刘莹, 赵路苹, 杨旭凤, 等. 花生油体对植脂搅打稀奶油性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(12): 113-119.
- [19] WEI S, HUANG J, ZHANG L, et al. Physicochemical properties and stabilities of crude and purified oil bodies extracted from high oleic peanuts [J/OL]. Eur J Lipid Sci Technol, 2020, 122: 2502 [2022-12-30]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201900183>.
- [20] GAO Y, ZHENG Y, YAO F, et al. Effects of pH and temperature on the stability of peanut oil bodies: New insights for embedding active ingredients [J/OL]. Colloid Surface A, 2022, 654: 130110 [2022-12-30]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130110>.
- [21] 康波. 花生油体乳液稳定性及乳液凝胶的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

- SUÁREZ – JIMÉNEZ G M, et al. Effect of ultrasound on physicochemical and foaming properties of a protein concentrate from giant squid (*Dosidicus gigas*) mantle[J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2020, 121: 108954 [2022 – 11 – 04]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108954>.
- [25] GAO H, MA L, LI T, et al. Impact of ultrasonic power on the structure and emulsifying properties of whey protein isolate under various pH conditions [J]. *Process Biochem*, 2019, 81: 113 – 122.
- [26] ROMERO A, BEAUMAL V, DAVID – BRIAND E, et al. Interfacial and emulsifying behaviour of rice protein concentrate[J]. *Food Hydrocolloid*, 2012, 29(1): 1 – 8.
- [27] INTARASIRISAWAT R, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W. Stability of emulsion containing skipjack roe protein hydrolysate modified by oxidised tannic acid [J]. *Food Hydrocolloid*, 2014, 41: 146 – 155.
- [28] LIU F, TANG C H. Emulsifying properties of soy protein nanoparticles: Influence of the protein concentration and/or emulsification process[J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(12): 2644 – 2654.
- [29] TIAN Y, ZHANG Z, ZHANG P, et al. The role of conformational state of pH – shifted β – conglycinin on the oil/water interfacial properties and emulsifying capacities[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 108: 105990 [2022 – 11 – 04]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105990>.
- [30] DJORDJEVIC D, KIM H J, MCCLEMENTS D J, et al. Physical stability of whey protein – stabilized oil – in – water emulsions at pH 3: Potential – 3 fatty acid delivery systems (part A)[J]. *J Food Sci*, 2006, 69(5): C351 – C355.
- [31] MELLEMA M, VAN OPHEUSDEN J H J, VAN VLIET T. Categorization of rheological scaling models for particle gels applied to casein gels[J]. *J Rheol*, 2002, 46(1): 11 – 29.
- [32] CHUNG C, SHER A, ROUSSET P, et al. Impact of oil droplet concentration on the optical, rheological, and stability characteristics of O/W emulsions stabilized with plant – based surfactant: Potential application as non – dairy creamers[J]. *Food Res Int*, 2018, 105: 913 – 919.
- [33] YANG M, LIU F, TANG C H. Properties and microstructure of transglutaminase – set soy protein – stabilized emulsion gels[J]. *Food Res Int*, 2013, 52(1): 409 – 418.
- [34] XI Z, LIU W, MCCLEMENTS D J, et al. Rheological, structural, and microstructural properties of ethanol induced cold – set whey protein emulsion gels: Effect of oil content[J]. *Food Chem*, 2019, 291: 22 – 29.
- [35] ZOU H, ZHAO N, SUN S, et al. High – intensity ultrasonication treatment improved physicochemical and functional properties of mussel sarcoplasmic proteins and enhanced the stability of oil – in – water emulsion[J/OL]. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects*, 2020, 589: 124463 [2022 – 11 – 04]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124463>.
- [36] GUZEY D, MCCLEMENTS D J. Impact of electrostatic interactions on formation and stability of emulsions containing oil droplets coated by β – lactoglobulin – pectin complexes[J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55(2): 475 – 485.
-
- (上接第 28 页)
- [22] SHARMA A, MAZUMDAR B, KESHAV A. Ultrasound assisted extraction of phytochemicals from *Coccinia indica* fruits and its characterization[J]. *J Food Meas Charact*, 2021, 15(1): 466 – 477.
- [23] ZDERIC A, ALMEIDA – RIVERA C, BONGERS P, et al. Product – driven process synthesis for the extraction of oil bodies from soybeans[J]. *J Food Eng*, 2016, 185: 26 – 34.
- [24] SUN F, WANG Q, GAO C, et al. Effect of extraction pH and post – extraction heat treatment on the composition and interfacial properties of peanut oil bodies[J/OL]. *Colloid Surface A*, 2023, 656 (PA): 130351 [2022 – 12 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130351>.
- [25] 高海鸽. 超声波处理对大豆油体乳状液及 MTG 酶促豆腐凝胶的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [26] 杨慧, 曲也直, 高雅然, 等. 植物多酚 – 蛋白质复合物生物活性及应用研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(3): 258 – 266.
- [27] PERDIH T S, ZUPANC M, DULAR M. Revision of the mechanisms behind oil – water (O/W) emulsion preparation by ultrasound and cavitation [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 51: 298 – 304.
- [28] 仪淑敏, 李欢, 陈思, 等. 鱼骨粉对金线鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 1 – 7.
- [29] 朱士臣, 冯媛, 刘书来, 等. 鱼糜凝胶热稳定性的增强技术研究进展[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(7): 384 – 396.
- [30] HAO L, SUN J, PEI M, et al. Impact of non – covalent bound polyphenols on conformational, functional properties and *in vitro* digestibility of pea protein [J/OL]. *Food Chem*, 2022, 383: 132623 [2022 – 12 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132623>.
- [31] ASNAASHARI M, FARHOOSH R, SHARIF A. Antioxidant activity of gallic acid and methyl gallate in triacylglycerols of Kilka fish oil and its oil – in – water emulsion[J]. *Food Chem*, 2014, 159: 439 – 444.