郑秀雯, 丁晓伟, 程延玲, 等. 超声对高油酸花生乳、油体和蛋白的理化性质影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 44−53. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025110205

ZHENG Xiuwen, DING Xiaowei, CHENG Yanling, et al. Effects of Ultrasonic on the Physicochemical Properties of High-oleic Peanut Milk, Oil Bodies, and Proteins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 44−53. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025110205

·特邀主编专栏—植物基食品原料基础研究、前沿技术创新及其健康绿色产品开发（客座主编：于寒松、张健、李健）·

超声对高油酸花生乳、油体和蛋白的理化性质影响

郑秀雯, 丁晓伟, 程延玲, 闫书悦, 王文涛, 赵路苹*

（山东农业大学食品科学与工程学院, 山东 泰安 271018）

摘　要: 高油酸花生乳契合消费者对健康饮品的需求，然而花生乳稳定性亟需改善。本研究以高油酸花生为原料，探究超声功率（30~270 W）对高油酸花生乳、油体及蛋白的理化性质的影响。结果表明，超声对不同体系的影响呈现功率依赖性效应。在 210 W 超声功率下，高油酸花生乳颜色最白、亮度最高，分散稳定性和热稳定性最好。随着超声功率增加，高油酸花生油体电位先降低后增加（90 W 时油体电位最低为−17.73 mV），而油体粒径逐渐降低（210 W 和 270 W 时，油体粒径最小为 2.6~2.7 μm）。随着超声功率的增加，花生蛋白组成没有明显变化，但蛋白结构逐渐松散（α-螺旋、β-折叠减少，β-转角、无规则卷曲增加；内源荧光降低）；210 W 超声时蛋白溶解度（95.20%）、表面疏水性（溴酚蓝结合量为 68.90 μg）和乳化性（乳化活性指数为 9.70 m^2/g、乳化稳定性指数为 61.40%）最高。本研究说明超声可以改善花生乳分散稳定性和热稳定性，这与超声对油体和蛋白的影响有密切关系，这将为高油酸花生乳饮料的无添加加工提供理论支撑与技术参数。

关键词: 高油酸花生, 超声, 花生乳, 油体, 蛋白, 性质

中图分类号: TS201.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0044−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025110205　　本文网刊:

Effects of Ultrasonic on the Physicochemical Properties of High-oleic Peanut Milk, Oil Bodies, and Proteins

ZHENG Xiuwen, DING Xiaowei, CHENG Yanling, YAN Shuyue, WANG Wentao, ZHAO Luping*

（College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China）

Abstract: High-oleic peanut milk meets consumer demand for healthy beverages; however, its stability urgently requires improvement. High-oleic peanuts were used as raw materials to investigate the effects of ultrasonic power (30~270 W) on the physicochemical properties of high-oleic peanut milk, oil bodies, and proteins in this study. The results showed that the influence of ultrasonic on different systems presented a power-dependent effect. As ultrasonic power was 210 W, the high-oleic peanut milk was the whitest, had the highest brightness and the best dispersion stability and thermal stability. The Zeta potential of high-oleic peanut oil bodies decreased and then increased (the lowest Zeta potential of oil body was −17.73 mV at 90 W), while the particle size of oil bodies gradually decreased (the smallest particle sizes of oil bodies were 2.6~2.7 μm at 210 W and 270 W) as the ultrasonic power increased. With increasing the ultrasonic power, the composition of peanut proteins did not change (P>0.05), however, the protein structure gradually became looser (α-helix and β-sheet decreased, β-turn and random coil increased, intrinsic fluorescence decreased). In addition, the protein solubility (95.20%), surface hydrophobicity (bromophenol blue bound was 68.90 μg) and emulsifying properties (emulsifying activity index was

收稿日期: 2025−11−20

基金项目: 山东省重点研发计划重大科技创新工程（2023CXGC010707）。

作者简介: 郑秀雯（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: zhengxiuwen9911@163.com。

*** 通信作者:** 赵路苹（1987−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: zhaolp0126@126.com。

9.70 m^2/g, emulsion stability index was 61.40%) were the highest at 210 W ultrasonic. This study indicated that ultrasonic treatment could improve the dispersion and thermal stability of peanut milk, which was closely related to the effects of ultrasonic on oil bodies and proteins. This provides theoretical support and technical parameters for the additive-free processing of high oleic peanut milk beverages.

Key words: high oleic peanut; ultrasound; peanut milk; oil body; protein; properties

植物蛋白饮料是以果仁、果肉、籽粒为原料，经过破碎、调配、均质等处理得到的乳状饮料[1]，是一种热力学不稳定体系。近年来，在改善植物蛋白乳饮料稳定性方面开展了有益探究，原料组成、乳化剂种类、物理场处理等是影响植物蛋白乳饮料稳定的重要因素[2−3]。高油酸花生因油酸含量高（≥75%）具有更好的氧化稳定性和更长的货架期，已成为植物基乳饮料的优质原料[4]。花生乳是以花生仁为原料，经浸泡、磨浆、调配、均质及杀菌等现代食品加工工艺制成的一种具有风味物质的饮品[5]。尽管单甘酯、多糖（如黄原胶）和蛋白等成分对改善花生乳稳定性取得了一定的效果[6−7]，但花生乳仍然面临体系不稳定的问题。随着乳饮料胶体体系的研究深入，发现花生乳的稳定性主要取决于其核心组分——油体和蛋白。油体作为储油的细胞器，其内部是甘油三酯，外层是由磷脂和油体蛋白构成的膜结构[8]，花生蛋白主要由花生球蛋白（约占 70%~80%）和伴花生球蛋白（约占 20%~30%）组成，其中花生球蛋白由酸性亚基（40.5 和 37.5 kDa）与碱性亚基（23.5 和 19.5 kDa 的）组成，而伴花生球蛋白包括 61.0 kDa 的组分及其 15.6 kDa 的 2S 蛋白，这些蛋白的组成和理化性质决定了花生蛋白的功能特性[9]。

超声技术作为一种绿色非热加工手段，其空化效应可产生局部变化，剪切效应能细化颗粒粒径，已被证实可调控食品胶体的界面结构（如促进蛋白在油-水界面吸附）。Wang 等[10]、曾广镇等[11] 报道了超声有利于提取花生油体，超声的空化效应能够改变油体界面结构，增强花生油体的乳化稳定性和抗氧化活性。王震霄等[12] 分析了超声对大豆油体制备的油体复合乳液的稳定性，考察了超声对包埋 β-胡萝卜素的效果，实现了脂溶性生物活性物质的高效利用。李滢溪等[13] 证明了超声影响蛋白的功能特性，通过破碎生物大分子自聚集体、改善粒径分布情况，促进蛋白质的竞争吸附稳定乳液，显著提高了花生分离蛋白-果胶复合乳液的长期稳定性。目前，国内外研究多集中于超声对蛋白或油体的组成和性质影响，从植物乳稳定性角度切入分析花生乳体系中重要组分的研究相对不足。为提升高油酸花生乳稳定性，解析花生乳主要组成——油体和蛋白的变化规律是亟需解决的问题。

因此，本研究分析超声功率对高油酸花生乳稳定性的影响，并表征超声功率对高油酸花生油体组成性质和高油酸花生蛋白的结构、性质的变化，为解析花生乳稳定性提供理论支撑。本研究不仅为高油酸花生乳的工业化生产探索提供了理论依据，也为植物蛋白饮料加工技术的创新提供了新思路。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

‘花育 963’高油酸花生仁　山东鲁花农业科技推广有限公司；山梨酸钾　宁波王龙科技股份有限公司；一级大豆油　益海嘉里金龙鱼食品集团股份有限公司；牛血清白蛋白标准品　北京索莱宝科技有限公司；巯基乙醇　优级纯，北京百灵威科技有限公司；溴化钾　光谱纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；正己烷　分析纯，山东科源生化有限公司；冰乙酸、考马斯亮蓝（G250）、溴酚蓝、甘油　分析纯，国药集团化学试剂有限公司；尼罗红、尼罗蓝　分析纯，美国 Sigma-Aldrich公司；石油醚　分析纯，天津凯通化学试剂有限公司。

SM2-522H 电烤炉　新麦机械（中国）股份有限公司；JYL-C16D/C16V 研磨机　九阳股份有限公司；FS-300N 超声波处理器　上海生析超声仪器有限公司；JW2019-HR 台式高速冷冻离心机　安徽嘉文仪器装备有限公司；MK-578 研磨机　永康市金味来电器有限公司；T25-D-D25 高速分散机　德国 IKA；D01-10NA0084 冷冻干燥机　宁波新芝生物科技股份有限公司；APV-2000 型高压均质机　德国 SPX 仪器公司；NS-90Z 纳米粒度及电位分析仪　珠海欧美克仪器有限公司；HL3100 激光粒度分析仪　北京海鑫瑞科技有限公司；Nicolet iS50 傅里叶红外光谱仪、LF-1701009 荧光分光光度计　赛默飞世尔科技（中国）有限公司；CS-200 色差计　CHN Spec 杭州彩谱科技有限公司；LSM880 激光共聚焦显微镜　德国蔡司公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品的制备

1.2.1.1　不同超声功率下高油酸花生油体及油体乳液的制备　参考 Wu 等[14] 的方法制备油体，并略有改动。60 g 生高油酸花生仁经烘烤（150 ℃，20 min）、去红衣、去离子水浸泡（4 ℃，12 h）。吸胀的花生仁按照料液比 1∶8（w/v）加入去离子水，打浆、过滤得到花生乳。花生乳于冰水浴下进行不同超声功率（30、90、150、210、270 W，20 min）处理，以未处理作为对照组。混合液以 4000×g 离心 30 min（4 ℃），收集上层膏体，并分散于去离子水中，相同条件下离心。收集上层膏体即为不同超声功率处理后的高油酸花生油体。将 1.0 g 高油酸花生油体均匀分散到 10 mL

水中, 得到 10%(w/w)的油体乳液。

1.2.1.2 不同超声功率下高油酸花生蛋白及蛋白溶液的制备 称取 100 g 烘烤、去红衣的高油酸花生仁, 研磨机破碎、过 10 目筛, 加正己烷 1∶5(w/v)脱脂, 匀速搅拌 2 h, 抽滤混合液, 收集残渣, 三次脱脂至滤液无色透明, 收集残渣, 通风橱挥干溶剂, 得到高油酸花生分离蛋白脱脂粉。将脱脂粉与去离子水 1∶10(w/v)混合, 1.0 mol/L NaOH 调 pH 至 8.0, 搅拌 2 h, 25 ℃ 4000×g 离心 20 min, 收集上清液, 用 1.0 mol/L HCl 调 pH 至 4.5, 再次离心, 水洗沉淀 2 次, 收集沉淀。沉淀与去离子水 1∶5(w/v)溶解, 高速剪切(6000 r/min, 1 min), 用 1.0 mol/L NaOH 调 pH 至 7.0, 用透析袋(截留分子量 3500 Da)4 ℃ 透析 36 h, 冷冻干燥 48 h, 4 ℃ 保存。将上述高油酸花生蛋白冻干粉取 1.0 g均匀分散到 100 mL 水中, 得到花生蛋白溶液 1%(w/w), 于冰水浴下进行不同超声功率处理(30~270 W, 20 min), 以未处理作为对照组。

1.2.1.3 不同超声功率处理高油酸花生乳的制备 参考于敏[15] 的方法制备, 并略有改动。称取 100 g 烘烤、去红衣的高油酸花生仁, 去离子水浸泡(4 ℃, 12 h)后, 加入去离子水以料液比 1∶8(w/v)混合、打浆, 四层脱脂纱布过滤, 得高油酸花生乳。上述高油酸花生乳于冰水浴下进行不同超声功率处理(30~270 W, 20 min)处理, 再用高压均质机均质(25 ℃, 60 MPa), 以未处理作为对照组。

1.2.2 白度测定 参考吴传江[16] 的方法测定, 并略有改动。使用色差计测定花生乳的颜色。将花生乳装入透明玻璃容器。标准板用于仪器校准, 再将容器贴近光源放置以检测颜色值 L^*、a^*和 b^*, 计算白度值 W_H。

$$W_H = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$$

式中, L^*表示明度; a^*表示红色度; b^*表示黄色度。

1.2.3 Zeta 电位、粒径测定

1.2.3.1 Zeta 电位测定 参考 Ma 等[17] 方法测定, 并略有改动。花生乳、花生蛋白溶液(1%, w/w)和花生油体乳液(10%, w/w)用纳米粒度及电位分析仪测 Zeta 电位。样品测定条件设置为: 折射率 1.450, 溶剂折射率 1.331, 吸光度 0.001。

1.2.3.2 粒径测定 将花生蛋白溶液(1%, w/w)用 0.01 mol/L 的 PBS 缓冲液(pH7.0)适当稀释, 用纳米粒度及电位分析仪测定粒径, 样品测定条件设置为: 折射率 1.467, 溶剂折射率 1.330, 吸光度 0.01; 花生乳和 10%(w/w)花生油体乳液用激光粒度分析仪测定粒径, 样品测定条件设置为: 折射率 1.450, 溶剂折射率 1.331, 吸光度 0.001。

1.2.4 离心沉淀率测定 取空离心管称质量记为 M, 称取 10 g 花生乳, 称取乳与离心管总重量, 离心(7000 r/min, 10 min, 25 ℃), 弃去上清液保留沉淀, 称取离心管与沉淀的总质量, 计算离心沉淀率。

$$离心沉淀率(\%) = \frac{M_2 - M}{M_1 - M} \times 100$$

式中, M 表示空离心管质量, g; M_1 表示离心管与花生乳的总质量, g; M_2 表示离心管与沉淀的总质量, g;

1.2.5 热稳定性测定 将花生乳、花生油体乳液(10%, w/w)分别加入玻璃瓶, 于 100 ℃ 的沸水浴中加热 15 min, 观察加热前后花生乳的外观变化, 测定加热后花生乳的电位和粒径。

1.2.6 基本成分测定 花生油体的水分含量测定: 直接干燥法, 参照 GB/T 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》; 花生油体、花生分离蛋白的蛋白质含量测定: 凯氏定氮法, 参照 GB/T 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》, 花生转换系数为 5.46; 花生油体的脂肪含量测定: 索氏抽提法, 参照 GB/T 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》。

1.2.7 十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)分析 参考 Laemmli[18] 方法测定, 并略有改动。油体样品的蛋白浓度为 2 mg/mL, 加入含 2% 巯基乙醇的样品溶解液(40% 甘油、0.02% 溴酚蓝、0.25 mol/L Tris-HCl(pH6.8)和 1% SDS), 在 4% 浓缩胶(恒定电压 40 V)和 16% 分离胶(恒定电压 100 V)中进行分离; 花生蛋白样品的蛋白浓度为 1.5 mg/mL, 在 5% 浓缩胶和 12.5% 分离胶条件下恒定电流 10 mA 进行分离。溴酚蓝到达距前沿约 0.5 cm 时停止电泳, 经过固定、染色、脱色后, 用凝胶成像仪拍照, Image Lab 软件分析蛋白条带的强度。

1.2.8 激光扫描共聚焦显微镜测定 为表征油体的微观结构, 取 10% 花生油体乳液与尼罗红染料和尼罗蓝染料避光混合 10 min 以染色油和蛋白。取 10 μL 染色后样品置于载玻片上, 加盖玻片固定。使用共聚焦激光扫描显微镜, 以 488 nm 激光激发, 于 560~620 nm 通道收集发射荧光。采用 10 倍镜观察, 并通过 Z-Stack 模式获取三维图像, 分析油体的尺寸分布及聚集状态。

1.2.9 傅里叶红外光谱测定 参考 Liu 等[19] 方法测定, 并略有改动。将花生蛋白与溴化钾 1∶100 混合, 用玛瑙研钵研磨至粉末, 压片至透明薄片, 放入傅里叶红外光谱仪测试槽中扫描。扫描范围 4000~400 cm^{-1}, 扫描次数 32 次, 分辨率 4 cm^{-1}。

1.2.10 内源荧光光谱测定 参考张玉茹等[20] 的方法测定, 并略有改动。将花生蛋白溶于 0.01 mol/L 的 PBS 缓冲液(pH7.0), 得到 0.01 mg/mL 溶液, 室温下使用荧光分光光度计分析内源荧光光谱。激发波长设置为 280 nm, 发射波长设置为 300~500 nm, 扫描速度设置为 1200 nm/min, 狭缝宽度均为 2.5 nm。

1.2.11 溶解度测定 花生蛋白溶液 1%(w/w)通过

考马斯亮蓝 G250 测定离心前蛋白溶液和离心后上清液中蛋白质含量（4000×g, 20 min），计算溶解度（Nitrogen Solubility Index, NSI）。

$$NSI(\%) = \frac{M_1}{M_2} \times 100$$

式中，M_1 表示上清液蛋白含量，mg/mL；M_2 表示蛋白质含量，mg/mL。

1.2.12　表面疏水性测定　参考 Zhang 等[21] 方法测定，并略有改动。将 5 mL 浓度为 4 mg/mL 花生蛋白与 1.5 mL 浓度为 1 mg/mL 的溴酚蓝溶液混合，室温下放置 1 h。混合物以 5000 r/min 离心 15 min，去离子水作为空白对照。适当稀释，在 595 nm 波长处测量上清液吸光度。以溴酚蓝（Bromophenol Blue, BPB）结合量表示表面疏水性大小。

$$BPB结合量(\mu g) = 300 \times \frac{Ac - As}{Ac}$$

式中，A_C 为空白对照在 595 nm 处的吸光度；A_S 为高油酸花生蛋白在 595 nm 处的吸光度。

1.2.13　乳化性测定　参考张玉茹等[20] 的方法测定，并略有改动。1% 花生蛋白溶液，加入 5 mL 大豆油，高速剪切（10000 r/min, 1 min）后，室温下静置 30 min，从底部分别吸取未放置和放置 30 min 的乳液 50 μL，加入 5 mL 0.1% SDS 溶液，于 500 nm 波长处测量吸光度，以 SDS 为空白对照，测定乳化活性指数（Emulsifying Activity Index, EAI）、乳化稳定性指数（Emulsifying Stability Index, ESI）。

$$EAI(m^2/g) = \frac{2 \times 2.303 \times A_0}{0.25 \times M}$$

$$ESI(\%) = \frac{30 \times A_0}{A_0 - A_{30}}$$

式中，A_0 表示未放置样品在 500 nm 处吸光度；M, 表示花生蛋白质量，g；A_{30} 表示放置 30 min 的样品在 500 nm 处吸光度。

1.3　数据处理

本研究所有实验均设置三次独立重复。采用 SPSS 26.0 统计软件对数据进行单因素方差分析（One-way ANOVA），首先进行方差齐性检验，对满足方差齐性要求的数据采用 Tukey 多重比较方法进行显著性分析，置信水平设置为 95%。实验结果以平均值±标准差表示，图表中不同小写字母表示在 P<0.05 水平上差异显著，相同字母表示差异不显著。使用 Origin 2022 软件进行图表绘制和数据处理。

2　结果与分析

2.1　超声功率对高油酸花生乳组成和性质的影响

2.1.1　超声功率对高油酸花生乳白度的影响　色泽是影响植物乳饮料市场接受度的重要感官指标。亮度 L^*、红绿值 a^*和黄蓝值 b^*变化受体系中颗粒光学特性、细胞内含物释放以及发生化学反应的共同结果影响。由表 1 可知，与未超声相比，随着超声功率的增加，在 30~150 W 功率时，L^*值持续下降，亮度变暗，在超声 210 W 时，L^*值上升，亮度增加且达到最大值（83.33），在 270 W 时亮度值下降，显著低于未超声组（P<0.05）。210 W 时亮度值最大可能是由于散射的光线增加导致花生乳中油体更白，Zaaboul 等[22] 研究中报道了经过烘烤和高压均质处理后，花生乳的亮度值也增加。所有花生乳样品的 a^*值均为负值，表示花生乳在超声处理前后整体偏绿，a^*的绝对值越大，表示样品颜色越饱和，在超声 210 W 时绿色饱和度最低（−1.78）；b^*值在超声 30~270 W 时均显著高于未超声的花生乳（P<0.05）。超声对花生乳的白度值（W_H）有显著影响（P<0.05），且超声 210 W 时花生乳的 W_H 最大（82.54），150 W 时花生乳 W_H 最小（76.42），这可能是超声产生的温和空化效应将花生乳中大油体与较大蛋白聚集体分散为更细小且均一的颗粒，进而增加花生乳白度[23]。因此，超声对花生乳颜色有很大影响，210 W 处理的高油酸花生乳颜色最白、亮度最高。

2.1.2　超声功率对高油酸花生乳分散稳定性的影响　花生乳体系的电位、粒径和离心沉淀率是影响花生乳分散稳定性的重要指标。如图 1A，与未超声相比，随超声功率的增加，花生乳的负电荷呈现先增后减的总体趋势，在 90 W、210 W 时带负电荷最多。花生乳粒径随超声功率的增加出现波动（图 1B），在超声 90 W 时粒径最小（330.43 nm），超声 270 W 时粒径最大（393.57 nm）。图 1C 可知，花生乳经过不同超声功率处理，离心沉淀率变化明显，超声 90 W、210 W 时花生乳的离心沉淀率显著（P<0.05）降低，分别为 5.20%、5.60%，比未处理减少了 2.58%、1.18%。根据斯托克斯定律，颗粒的沉降速度与粒径直径的平方成正比，粒径越大，沉降速度越快[23]。当功率 270 W 时，花生乳的电位负电荷减少，粒径增加且离心沉淀率增加，说明 270 W 不利于花生乳稳定。与未超声相比，30~270 W 超声对花生乳的电位、粒径和离心

表 1　超声功率对高油酸花生乳白度的影响

Table 1　Effect of ultrasonic power on the whiteness of high-oleic peanut milk

指标	未处理	30 W	90 W	150 W	210 W	270 W
L^*	81.60±0.03^{b}	79.03±0.25^{c}	78.46±0.59^{cd}	77.20±0.63^{e}	83.33±0.01^{a}	77.54±0.78^{de}
a^*	−2.75±0.01^{b}	−3.46±0.10^{cd}	−3.14±0.21^{c}	−3.47±0.06^{cd}	−1.78±0.17^{a}	−3.65±0.15^{d}
b^*	4.06±0.02^{d}	4.93±0.04^{a}	4.81±0.03^{b}	4.91±0.19^{a}	4.85±0.28^{b}	4.25±0.20^{c}
W_H	80.96±0.03^{b}	76.45±0.28^{d}	77.71±0.59^{c}	76.42±0.66^{d}	82.54±0.06^{a}	77.34±0.13^{cd}

注：试验结果以平均值±标准偏差表示，同行小写字母不同表示差异显著（P<0.05）。

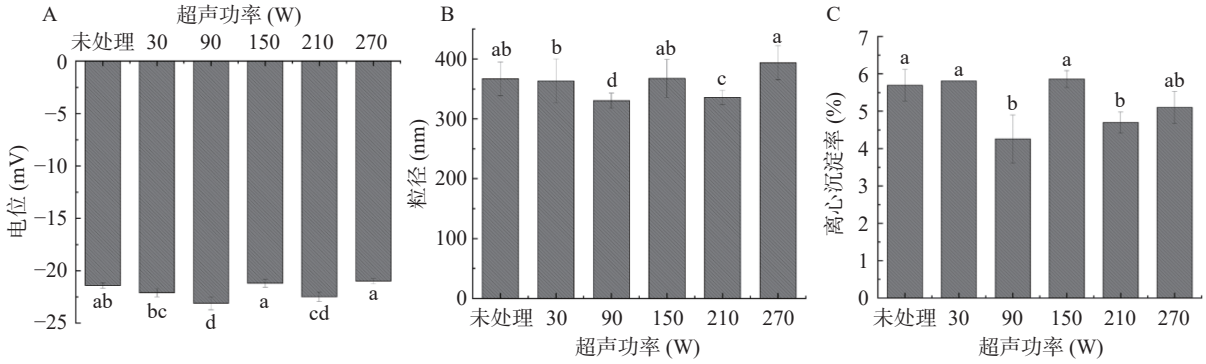


图 1 超声功率处理对高油酸花生乳 Zeta 电位(A)、粒径(B)及离心沉淀率(C)的影响

Fig.1 Effects of ultrasonic power on Zeta potential (A), particle size (B) and centrifugal sedimentation rate (C) of high-oleic peanut milk

注: 不同小写字母表示数据差异显著, $P<0.05$; 图 2~图 6、图 8 同。

沉淀率产生不同影响, 这可能与超声影响花生乳中花生蛋白和油体有关。Jiao 等[24]、Huang 等[25] 报道, 超声强度影响花生蛋白的二级和三级结构, 改变了花生蛋白的荧光强度、表面疏水性; Wang 等[10] 报道, 超声显著改变了花生油体的粒径, 使其分解成更均匀的状态。综上, 超声功率 90 W 有利于花生乳稳定性提高。

2.1.3 超声功率对高油酸花生乳热稳定性的影响 花生乳加热后的电位、粒径和外观是影响花生乳热稳定性的重要影响因素。由图 2A 可知, 与未超声相比, 除 210 W 外, 不同超声功率处理花生乳 Zeta 电位值绝对值均增大, 粒径值均增加(图 2B)。然而, 随着超声功率的增加, 加热后花生乳的粒径先增加后减小再增加; 其中, 在 90 W 时, 花生乳的粒径最大(416.17 nm), 210 W 时花生乳粒径最小(361.2 nm)。图 2C 显示, 花生乳在加热前后均未出现分层现象, 说明花生乳具有较好的热稳定性。因此, 超声功率 210 W 对花生乳稳定性产生有利影响。

花生乳的主要成分是油体和蛋白质, 为了探究超声对花生乳稳定性影响的机理, 本文将提取花生蛋白和油体, 并分别研究超声功率对花生蛋白和油体的性质, 以阐明超声功率影响花生乳稳定性的内在联系。

2.2 超声功率对高油酸花生油体的组成、结构和性质的影响

2.2.1 超声功率对高油酸花生油体基本成分和蛋白质组成的影响 图 3 为超声功率对高油酸花生油体

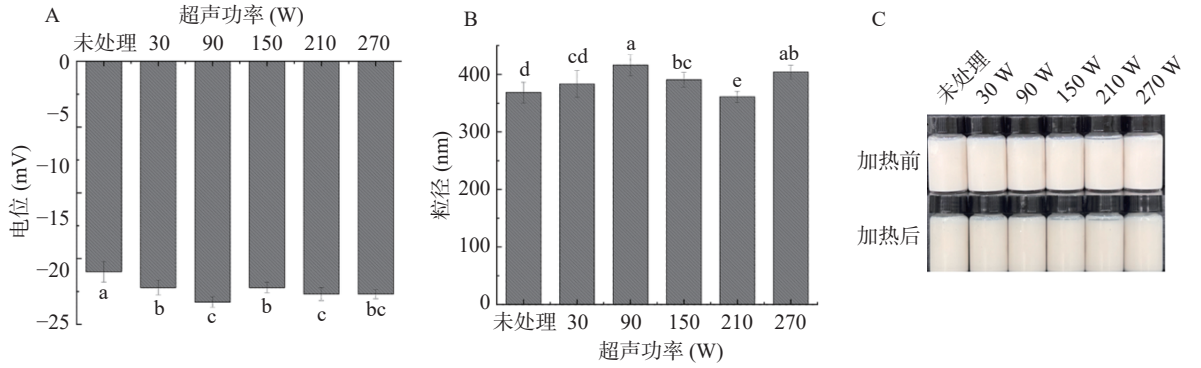


图 2 超声功率对高油酸花生乳热稳定性的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic power on thermal stability of high-oleic peanut milk

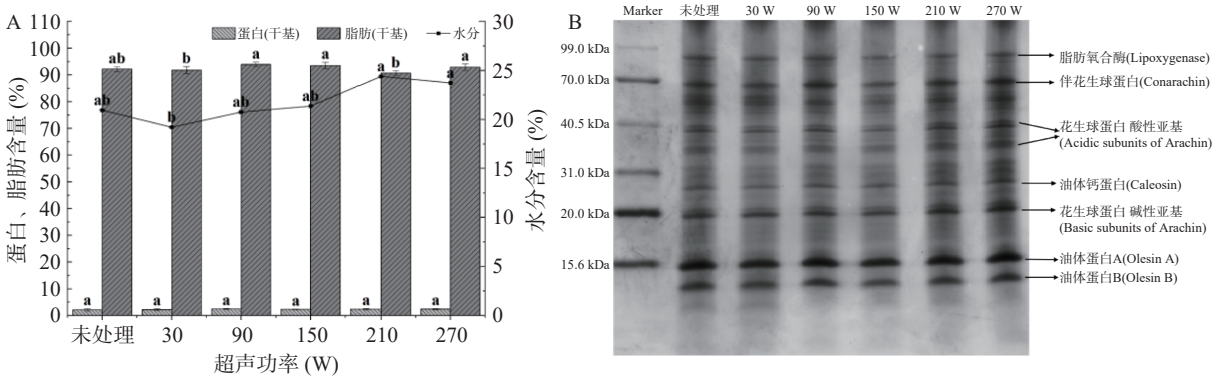


图 3 超声功率对高油酸花生油体基本成分(A)、蛋白质组成(B)的影响

Fig.3 Effects of ultrasonic power on the basic composition (A) and protein composition (B) of high-oleic peanut oil body

的基本成分和蛋白质组成的影响。随着超声功率的升高，花生油体的水分含量呈现先减少后增加的趋势，与未超声相比，30 W 超声功率下制备的花生油体水分最低（19.21%）；在 210、270 W 时油体的水分含量分别为 24.40%、23.73%；原因可能是不同超声功率改变了吸附在油体界面的蛋白结构，进而改变油体与水的结合能力[26]。随着超声功率的增加，花生油体的脂肪含量也呈现出先增加后减少的趋势，超声 90 W 处理时油体脂肪含量显著增加至 93.92%，原因可能是超声的空化效应使花生浆液中聚集的油体分散，有利于油体上浮。然而，不同超声处理下，花生油体的蛋白含量（图 3A）和蛋白组成（图 3B）均没有产生明显变化，花生油体蛋白含量在 2.14%~2.37%。由图 3B 可知，花生油体的结构蛋白主要由油体蛋白 A 15.6 kDa、油体蛋白 B13.0 kDa 和油体钙蛋白 24 kDa 组成，它们对维持油体稳定性起到关键作用[27−28]；外源蛋白主要是花生球蛋白和伴花生球蛋白组成；这表明 30~270 W 未引起油体结构蛋白和外源蛋白的变化。因此，不同超声功率处理显著影响花生油体脂肪和水分含量，且超声 90 W使花生油体有较低的水分含量和较高的脂肪含量。

2.2.2　超声功率对高油酸花生油体电位、粒径和微观结构的影响　由图 4A 可知，花生油体 Zeta 电位绝对值呈先增后减的趋势，超声 90 W 时花生油体带负电荷最多（−17.73 mV），在超声 150~270 W 时电荷量持续减小。由于液滴所带负电荷越多，液滴之间的静电斥力越大，液滴不易聚集[29]，说明 90 W 时油体乳液越稳定。图 4B 显示，随着超声功率的增加，油体粒径不断减小；210 W 和 270 W 时，油体粒径最小（2.6~2.7 μm）；这可能是因为超声空化效应使油体均匀分散。图 4C显示，未处理和超声 30 W 时，油体粒度分布均呈现双峰分布，且峰值在 6~8 μm 逐渐左移；在超声 90~270 W 时粒度分布变成单峰。图 4D 为花生油体的 CLSM 图像，油脂（红色）被蛋白质（蓝色）荧光层包裹，在超声 210 W 和 270 W 时油体表现出均匀的较小液滴，这与图 2C 油体粒度分布的结果相一致。因此，90、210 W 超声条件下，花生油体带的负电荷最多，而 210 W 和 270 W 时油体尺寸更小。

2.2.3　超声功率处理对高油酸花生油体热稳定性的影响　图 5A 显示，在相同热处理条件下，随着超声功率的增加，油体 Zeta 电位绝对值呈现先增加后降低的趋势，在超声 90~210 W 时油体带负电荷较多，分别为 16.07、15.17、14.90 mV；与未加热油体相比，加热后油体（270 W 除外）所带负电荷量均减少；图 5B 可知，所有样品未出现明显的絮凝及分层现象，说明油体的热稳定性较好；由图 5C 可知，30 W 和 90 W 超声功率时，加热后花生油体 $D_{[4,3]}$>4 μm，150~270 W 时，加热后的花生油体 $D_{[4,3]}$ 在 3.26 μm~3.08 μm 范围；在 30~90 W 超声功率时，加热后的

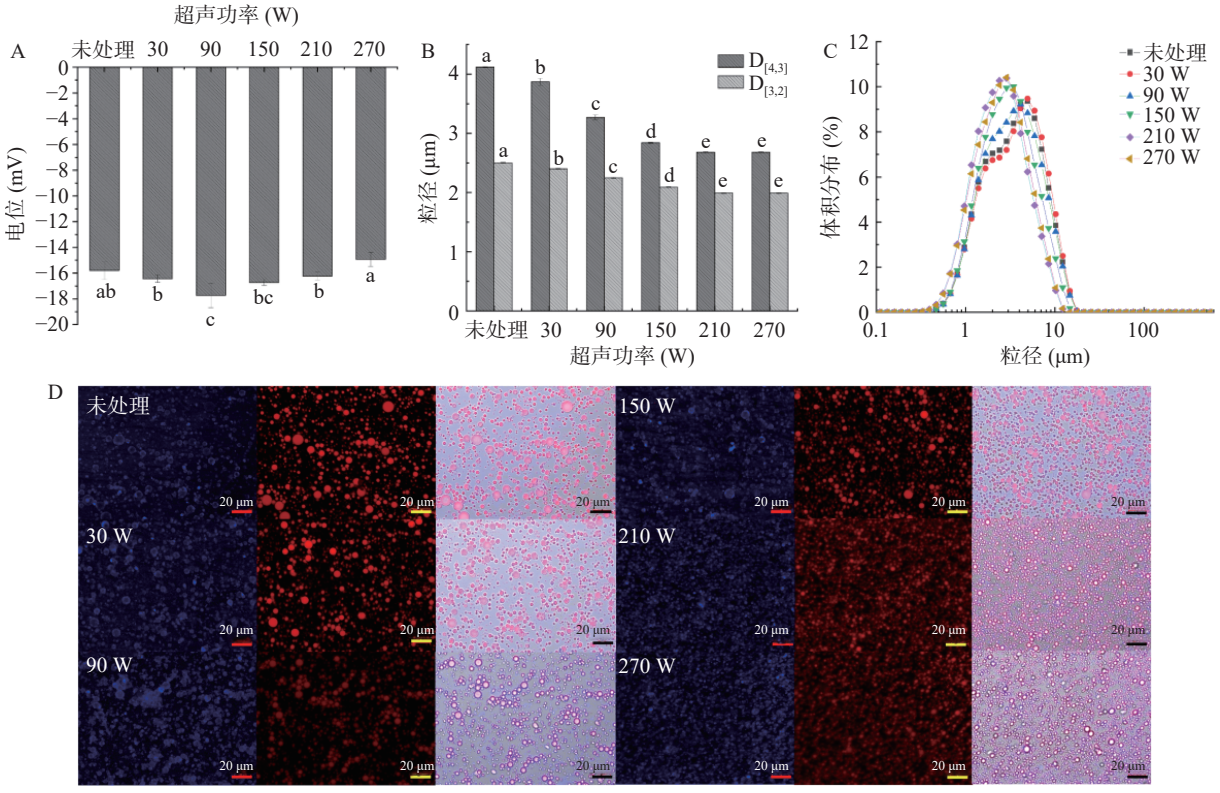


图 4　超声功率对高油酸花生油体电位（A）、粒径（B）、粒度分布（C）及微观结构的影响

Fig.4　Effects of ultrasonic power on the potential (A), particle size (B), particle size distribution (C), and microstructure (D) of high-oleic peanut oil body

注：图 D 中蓝色代表蛋白，红色代表油，粉色代表蛋白和油的叠加区。

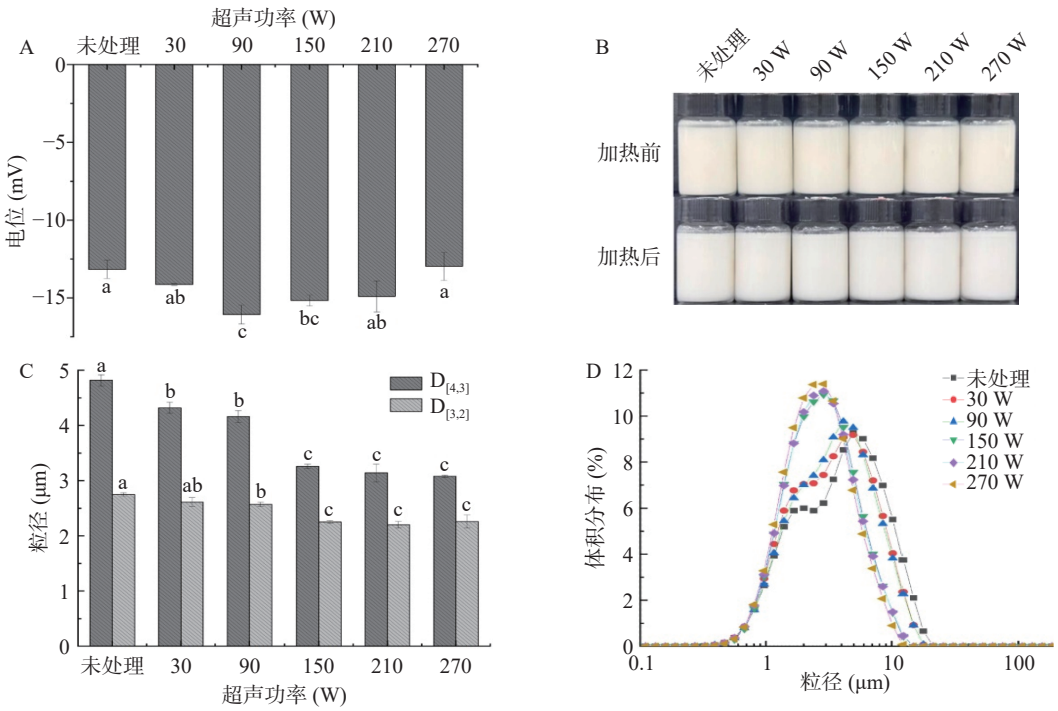


图 5　超声功率对加热的高油酸花生油体电位(A)、外观(B)、粒径(C)、粒度分布(D)的影响

Fig.5　Effects of ultrasonic power on Zeta potential (A), appearance (B), particle size (C), and particle size distribution (D) of heated high-oleic peanut oil body

花生油体 $D_{[3,2]}$>2.50 μm, 150~270 W 时, 加热后的花生油体 $D_{[3,2]}$ 2.25~2.26 μm, 因此, 150~270 W 显著降低了花生油体的粒径; 粒度分布进一步显示(图 5D), 未处理、超声 30 W 和 90 W 的花生油体粒度分布均是双峰分布, 超声 90~270 W 花生油体呈现单峰分布。因此, 加热使得油体分散稳定性都降低。

综上, 超声功率不改变花生油体的蛋白组成, 但对油体分散稳定性和热稳定性有明显影响。总体来看, 90~210 W 超声使花生油体具有更好热稳定性。

2.3　超声功率对高油酸花生蛋白结构及功能性质的影响

2.3.1　超声功率处理对高油酸花生蛋白组成、Zeta 电位及粒径的影响　图 6A 显示, 高油酸花生蛋白是由伴花生球蛋白 I(15 kDa)、花生球蛋白碱性亚基(20 kDa)、花生球蛋白酸性亚基(43 kDa)、伴花生球蛋白 II(70 kDa)组成, 且在不同超声功率下, 花生蛋白均未产生明显的蛋白条带变化; 这说明超声功率对花生蛋白的组成未产生影响, 此结果与张文等[28]报道一致。花生分离蛋白的电位(图 6B)结果显示, 随着超声功率增加, 蛋白的电位绝对值呈现先减小后增大再减小的趋势, 超声 210 W 带负电荷最多。这可能与超声导致的蛋白结构变化、改变带电基团的分布有关。由图 6C 可知, 未处理、270 W 时蛋白的粒径最大(129.33 nm、130.23 nm), 超声 90 W 时粒径最小(103.00 nm), 210 W 次之(115.90 nm)(P<0.05); 此外, 超声 90、210 W 时花生分离蛋白的粒径分布左移最明显, 说明此超声条件下花生分离蛋白的粒径变小(图 6D)。综上, 超声功率对花生分离蛋白的粒径、电位有显著影响, 且超声 90、210 W 时最显著。

2.3.2　超声功率对高油酸花生蛋白结构的影响　在傅里叶红外光谱中, 酰胺 A 带的光谱区间在 3200~3550 cm^{-1}, 由 O-H 的拉伸振动产生。蛋白的酰胺 I 带的光谱区间为 1600~1700 cm^{-1} 与多肽链中 C=O 的伸缩振动有关, 酰胺 II 带光谱区间为 1530~1550 cm^{-1} 与 N-H 的弯曲振动和 C-N 键的伸缩振动有关, 对花生蛋白二级结构的研究具有重要作用[17]。如图 7A 可知, 在酰胺 I 带的 1652.5~1657.8 cm^{-1} 处有一个最强的吸收峰, 由 C=O 的伸缩振动产生; 在酰胺 II 的 1537.0~1542.2 cm^{-1} 和 1395.2~1397.8 cm^{-1} 的吸收峰, 由 N-H 的弯曲振动产生; 在酰胺 A 带的 3291.0~3295.0 cm^{-1} 处也有吸收峰, 由 O-H 的拉伸振动产生, 且均发生不同程度的位移。其中, 酰胺 II 带中, 与未处理相比, 吸收峰在 30~270 W 均发生轻微蓝移; 在酰胺 A 带中, 与超声 30 W 相比, 吸收峰在超声 150~210 W 时蓝移最明显。结果表明, 高油酸花生蛋白经过不同超声功率处理后可能产生了氢键, 存在静电相互作用, 这种静电相互作用可能来自于花生蛋白的 C-N 键。进一步分析花生蛋白二级结构, 由表 2 可知, 与未处理相比, 超声使蛋白结构部分展开; 其中超声 210~270 W 时, α-螺旋、β-折叠降低程度最显著(P<0.05), β-转角含量、无规则卷曲含量增加, 说明超声在 30~210 W 破坏了花生蛋白 β-折叠, 促使其多肽链反转 180°形成了 β-转角[29], 蛋白发生适度的展开, 由有序变得无序, 改变了蛋白的二级结构[30]。

蛋白的内源荧光变化反映蛋白的三级结构的变

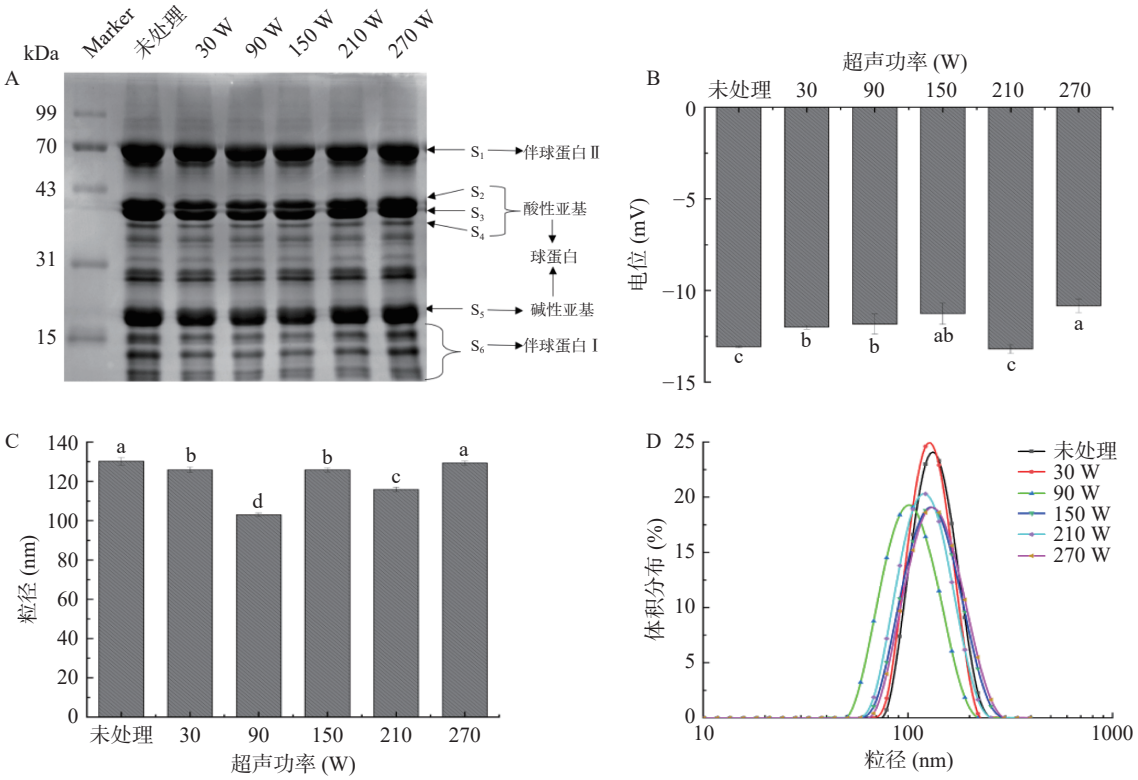


图 6　超声功率对高油酸花生蛋白组成(A)、电位(B)、粒径(C)及粒度分布(D)的影响

Fig.6　Effects of ultrasonic power on composition (A), Zeta potential (B), particle size (C) and particle size distribution (D) of high-oleic peanut protein

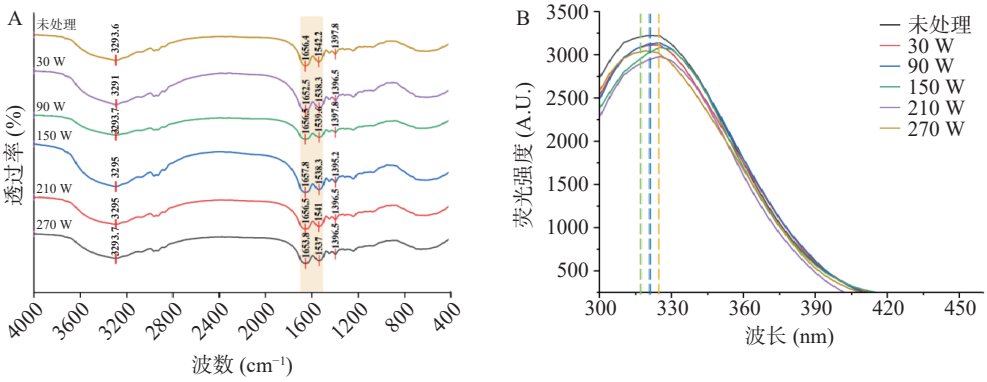


图 7　超声功率对高油酸花生蛋白傅里叶红外光谱(A)、内源荧光光谱的影响(B)

Fig.7　Effect of ultrasonic power on fourier infrared spectra (A) and endogenous fluorescence spectra (B) of high-oleic peanut protein

表 2　超声功率对高油酸花生蛋白二级结构的影响

Table 2　Effect of ultrasonic power on the secondary structure of high-oleic peanut protein

超声功率(W)	α-螺旋(%)	β-折叠(%)	β-转角(%)	无规则卷曲(%)
未处理	18.42±0.04^{a}	32.23±0.22^{a}	33.55±0.42^{b}	13.63±0.35^{bc}
30	18.41±0.09^{a}	30.04±3.62^{ab}	36.39±0.36^{a}	13.05±0.46^{c}
90	18.40±0.23^{a}	29.90±2.73^{bc}	36.76±0.46^{a}	13.06±3.22^{bc}
150	17.99±0.28^{a}	28.54±3.39^{cd}	36.48±0.26^{a}	15.75±1.05^{ab}
210	14.44±0.27^{b}	26.49±0.47^{d}	37.00±0.22^{a}	17.66±0.41^{a}
270	15.46±1.70^{b}	26.86±0.79^{d}	33.43±0.62^{b}	17.57±0.36^{a}

注：同列小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

化，蛋白质内源荧光主要是在 280 nm 激发波长下，由色氨酸(Trp)和酪氨酸(Tyr)残基引起[31−32]。图 7B 可知，与未处理相比，超声使花生蛋白的荧光强度下降，在超声 30~210 W 最大发射波长均发生红移(图 7B 蓝线向黄线偏移)，270 W 最大发射波长蓝移(图 7B 蓝线向绿线偏移)。其中，超声 210 W 时荧光强度降至最低，这可能是因为超声空化效应破坏了花生蛋白的三级结构，使原本包埋的色氨酸、酪氨酸等疏水氨基酸残基暴露[33]。因此，210 W 超声对二级结构的破坏和对三级结构的展开效应最为明显。

2.3.3　超声功率对高油酸花生蛋白功能性质的影响

溶解性指的是蛋白中的肽键或侧链基团与水分子之间发生相互作用时，可溶性蛋白的占比。如图 8A，随着超声功率的升高，花生蛋白溶解度呈现先增后减趋势，并在超声 210 W 达到最大值 95.20%，比未处理增加了 7.17%；这可能归因于空化效应产生的气泡能够破碎花生蛋白小聚集体，降低蛋白粒径(图 6C)，

增加其与水的接触面积和相互作用。超声 270 W 时溶解度降低，可能是由于较高功率超声处理会引起暴露的活性基团的相互作用，导致蛋白质分子的重新聚集和粒径的增加，从而降低花生蛋白的溶解度。花生蛋白的表面疏水性呈现先增后减再增的趋势(图 8B)，其在超声 210 W 时最大(BPB 结合量 68.90 μg)，可能是由于超声使分子间的斥力增强，花生蛋白结构展开，使分子内部的疏水性基团暴露量增多(图 7B)，导致表面疏水性增加。超声 270 W 时表面疏水性最低，可能是由于超声加速蛋白聚集并将其转化为大分子颗粒(图 6C)，从而隐藏了内部的疏水性基团[34]。蛋白的乳化特性通过 EAI 乳化活性和 ESI 乳化稳定性进行评估。如图 8C 可知，随着超声功率升高，花生蛋白的 EAI 和 ESI 值均呈现增加趋势，分别在 210 W 时最高(9.70 m^2/g、61.40%)，这可能是因为超声处理改变了蛋白结构，暴露了疏水基团，蛋白在油水界面展开形成稳定的网络结构和界面膜，使乳化性提高，这不仅改善了蛋白质的亲水与疏水平衡，也促进了花生蛋白乳化活性增强。因此，根据蛋白表征结果总体来看，超声 150~210 W 时能显著改善花生蛋白的功能性质。

根据 2.3 结果，超声功率对花生蛋白的组成影响不大，但是对蛋白的二级结构、三级结构和溶解度、表面疏水性和乳化性有显著影响。210 W 超声时显著提高花生蛋白的溶解度，这是相同功率下显著提高花生乳稳定性的另一重要原因。

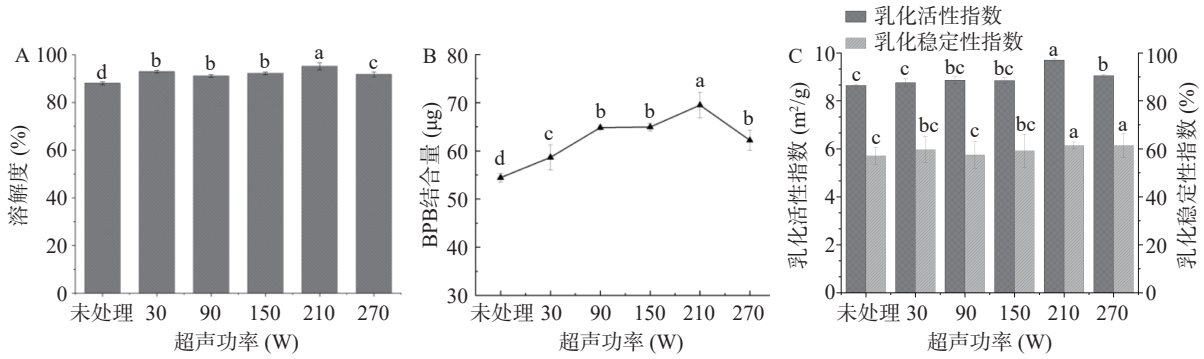


图 8 超声功率对高油酸花生蛋白功能性质的影响

Fig.8 Effect of ultrasonic power on functional properties of high-oleic peanut protein

注：A：溶解度；B：表面疏水性；C：乳化性。

3 结论

不同超声功率对高油酸花生乳的色泽、组成、分散稳定性和热稳定性有重要影响。210 W 处理的高油酸花生乳颜色最白、亮度最高；在 90、210 W 时花生乳中液滴带负电荷最多、粒径较小、离心沉淀率较低，表明花生乳分散稳定性好；210 W 处理花生乳的热稳定性较好。超声功率对高油酸花生乳中的油体和蛋白也有显著影响。90、210 W 超声下花生油体的分散稳定性和热稳定性较好。210 W 导致蛋白具有最多的负电荷、较小的粒径、有序二级结构最大程度破坏和三级结构展开最明显；210 W 超声时蛋白的溶解性、表面疏水性和乳化性最高。本研究发现，尽管超声功率对花生乳、油体和蛋白的影响规律不完全相同，但整体上，210 W 超声改善花生乳色泽、分散稳定效果和热稳定性的原因，可以归为 210 W 显著改变花生油体性质和花生蛋白结构、性质。然而，本研究尚未探究超声时间对花生乳组成和性质的影响，其他物理场对花生油体和蛋白的影响也有深入研究的价值。本研究为改善高油酸花生乳饮料的稳定性提供了理论依据，为解析植物乳饮料稳定机理提供新视角。

© 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] 高红芳, 樊晓博, 谢兰心. 欧李仁植物蛋白饮料的研制及其营养特性分析[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(4): 37−42. [GAO Hongfang, FAN Xiaobo, XIE Lanxin. Development and nutritional characteristics analysis of cerasus humilis kernel plant-based protein beverage[J]. Storage and Process, 2024, 24(4): 37−42.]

[2] TRIPATHI A, RAJBONGSHI B, NICKHIL C, et al. Plant-based protein beverages and fermented products[M]. Plant-Based Proteins Processing. Elsevier, 2026: 325−342.

[3] 闫宗伟. 植物蛋白饮料稳定性影响因素及常用测定方法研究[J]. 食品安全导刊, 2021(25): 191−192. [YAN Zongwei. Study on factors influencing the stability of plant-based protein beverages and common detection methods[J]. Food Safety Guide, 2021(25): 191−192.]

[4] 王君能, 王博颖, 许李昱, 等. 大豆低聚肽花生乳的工艺优化[J]. 中国果菜, 2025, 45(2): 45−50. [WANG Junneng, WANG Boying, XU Liyu, et al. Process optimisation of soybean oligopeptide peanut milk[J]. Chinese Horticultural Science, 2025, 45(2): 45−50.]

[5] DIARRA K, NONG Z G, JIE C. Peanut milk and peanut milk based products production: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2005, 45(5): 405−423.

[6] SEIFU Y, BIRHANU T, ABERA B, et al. Peanut, oat, and chickpea composite plant-based milk alternatives: Formulation, optimization, and evaluation of nutritional, microbial, and shelf-life characteristics[J]. Applied Food Research, 2025, 5(1): 101035.

[7] SALVE A R, PEGU K, ARYA S S. Comparative assessment of high-intensity ultrasound and hydrodynamic cavitation processing on physico-chemical properties and microbial inactivation of peanut milk[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 59: 104728.

［8］ 胡琪, 郭诗文, 吕莹, 等. 油脂体组成、结构及油脂体蛋白研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(11): 230−235. ［HU Qi, GUO Shiwen, LÜ Ying, et al. Advances in research on lipid body composition, structure and lipid body proteins[J]. Food Science, 2015, 36(11): 230−235.］
［9］ WANG Y Y, CHEN F S, LÜ D Y, et al. Modulating the interfacial structure of peanut oil body emulsions through different extraction methods: Implications for curcumin delivery[J]. LWT, 2025, 231: 118389.
［10］ WANG L, LIU L, PANG N, et al. Effect of ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction on the interfacial properties of high-oleic peanut oil bodies[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2025, 8(2): 100−108.
［11］ 曾广镇, 赵志浩, 周鹏飞, 等. 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[J]. 中国油脂, 2024, 49(1): 22−28,42. ［ZENG Guangzhen, ZHAO Zhihao, ZHOU Pengfei, et al. Effects of dehulling and ultrasonic treatment on the extraction, emulsification properties, and antioxidant activity of peanut oil[J]. China Oil and Fat, 2024, 49(1): 22−28,42.］
［12］ 王震霄, 廖一, 于佳晔, 等. 超声处理制备大豆油体复合乳液及运载 β-胡萝卜素研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 45−53. ［WANG Zhenxiao, LIAO Yi, YU Jiaye, et al. Study on the preparation of soybean oil body composite emulsions via ultrasonic treatment and their application as carriers for β-carotene[J]. Food Industry Science and Technology, 2024, 45(21): 45−53.］
［13］ 李滢溪, 陈复生, 张丽芬, 等. 超声构建花生分离蛋白-果胶复合乳液及其稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 191−198. ［LI Yingxi, CHEN Fusheng, ZHANG Lifeng, et al. Ultrasonic preparation of peanut isolate protein composite emulsions and investigation of their stability[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(11): 191−198.］
［14］ WU Y, WANG L, DING X, et al. Preparation of high internal phase emulsions based on pumpkin seed oil body and its physicochemical properties[J]. LWT, 2023, 189: 115533.
［15］ 于敏. 原料不同热处理方式对南瓜籽乳理化性质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2023. ［YU Min. Effects of different heat treatment methods on the physicochemical properties of pumpkin seed milk[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.］
［16］ 吴传江. 超声预处理辅助酶解改善核桃—亚麻籽复合植物乳食用品质研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2025. ［WU Chuanjiang. Research on improving the quality of walnut-flaxseed composite plant-based dairy products through ultrasonic pretreatment-assisted enzymatic hydrolysis[D]. Wuhan: Wuhan Light Industry University, 2025.］
［17］ MA Y, XU M, WANG W, et al. Ultrasound assisted complexation of soybean peptide aggregates and soluble soybean polysaccharide: pH optimization, structure characterization, and emulsifying behavior[J]. Food Research International, 2025, 201: 115546.
［18］ LAEMMLI U K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4[J]. Nature, 1970, 227: 680−685.
［19］ LIU C, CHEN F, XIA Y, et al. Physicochemical and rheological properties of peanut oil body following alkaline pH treatment [J]. LWT, 2022, 154: 112590.
［20］ 张玉茹, 朱秀灵, 戴清源, 等. 超声辅助美拉德反应制备玉米醇溶蛋白-葡聚糖接枝物的特性[J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 144−156. ［ZHANG Yuru, ZHU Xiuling, DAI Qingyuan, et al. Characterisation of corn alcohol-soluble protein-glucan graft copolymers prepared via ultrasonic-assisted Maillard reaction[J]. Food Industry Science and Technology, 2026, 47(2): 144−156.］
［21］ ZHANG X, YAN D, QIU W, et al. Effects of ultrasound combined with pH shift modification on functional and structural properties of peanut proteins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283: 137874.
［22］ ZAABOUL F, RAZA H, CAO C, et al. The impact of roasting, high pressure homogenization and sterilization on peanut milk and its oil bodies[J]. Food Chemistry, 2019, 280: 270−277.
［23］ 吴金鋆. 复合全豆植物蛋白饮料的稳定性及流变特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. ［WU Jinyun. Study on the stability and rheological properties of composite whole bean plant protein beverages[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.］
［24］ JIAO Z, FENG Z, ZHAO S, et al. Synergistic effects of ultrasound and ph-shifting on the solubility and emulsification properties of peanut protein[J]. Foods, 2025, 14(5): 853.
［25］ HUANG Y, XU J, CHEN K, et al. The effects of ultrasound-assisted glycation on the allergenicity and functional properties of peanut proteins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282: 136664.
［26］ 王琳琳. 提取条件和阿拉伯胶对葵花籽油体高内相乳液性质的影响及其在新型植物基蛋黄酱中的应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024. ［WANG Linlin. Effects of extraction conditions and gum arabic on the properties of high-phase emulsions in sunflower seed oil and their application in novel plant-based mayonnaise[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2024.］
［27］ MATSUYAMA S, KAZUHIRO M, NAKAUMA M, et al. Stabilization of whey protein isolate-based emulsions via complexation with xanthan gum under acidic conditions[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106365.
［28］ 张文, 张丽芬, 陈复生, 等. 超声波处理对花生蛋白分子结构的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(9): 6−10. ［ZHANG Wen, ZHANG Lifeng, CHEN Fusheng, et al. Effects of ultrasonic treatment on the molecular structure of peanut protein[J]. Food Research and Development, 2018, 39(9): 6−10.］
［29］ DAMODARAN S, PARKIN K L. Fennema's food chemistry [M]. Florida: CRC Press, 2016: 267.
［30］ ZHANG X, CHEN Y, HU Y, et al. Transglutaminase mediated cross-linking of peanut and buckwheat proteins under dual-frequency ultrasound field: Functional attributes study[J]. Food Physics, 2024, 1: 100019.
［31］ 董月婕, 章绍兵, 杨雨轩. 碱性 pH 偏移结合超声处理对花生蛋白结构与功能性质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2025, 46(4): 19−27. ［DONG Yuejie, ZHANG Shaobing, YANG Yuxuan. Effects of alkaline ph shift combined with ultrasonic treatment on the structural and functional properties of peanut protein[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2025, 46(4): 19−27.］
［32］ WU Y, YIN Z, QIE X, et al. Interaction of soy protein isolate hydrolysates with cyanidin-3-O-glucoside and its effect on the in vitro antioxidant capacity of the complexes under neutral condition[J]. Molecules, 2021, 26(6): 1721.
［33］ 许雨晗, 孔宇, 杨本旭, 等. 亚麻籽水溶蛋白与红曲黄色素相互作用及其对色素稳定性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(4): 86−100. ［XU Yuhan, KONG Yu, YANG Benxu, et al. Interaction between flaxseed hydrolysable protein and monascus pigment and its effect on pigment stability[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(4): 86−100.］
［34］ CHEN L, ZHANG S B. Structural and functional properties of self-assembled peanut protein nanoparticles prepared by ultrasonic treatment: Effects of ultrasound intensity and protein concentration[J]. Food Chemistry, 2023, 413: 135626.