超声处理对鹰嘴豆蛋白功能特性的影响

谭云霞[1,2]，赵世达[3]，柴丽雯[1]，车旭东[1]，白冰瑶[1]，陆健康[1]，王伟华[1]，马上超[1]，张春兰[1,2*]

（1.塔里木大学食品科学与工程学院，新疆阿拉尔 843300）（2.南疆特色农产品深加工兵团重点实验室，新疆阿拉尔 843300）（3.陕西科技大学轻工科学与工程学院，陕西西安 710021）

摘要：为了改善鹰嘴豆蛋白（Chickpea Protein, CP）溶解度低、乳化性及起泡性较差等功能缺陷，提升其在食品中的应用价值，本研究采用不同功率（200~800 W）的超声处理 CP（超声时间 10 min），分析超声对 CP 功能特性的改善效果及在不同环境下的稳定性。结果表明，600 W 超声处理可显著改善 CP 功能特性：较未处理组，溶解度由 42.01% 提高至 74.79%，乳化活性与乳化稳定性分别达 75.98 $m^2 \cdot g^{-1}$ 和 66.68%，起泡性及泡沫稳定性分别提升至 80.56% 和 63.44%；结构上，粒径减小至 159.07 nm，ζ-电位绝对值增加至 30.13 mV，游离巯基含量和表面疏水性分别提高 1.49 倍和 1.51 倍，说明超声引起了蛋白质解聚与功能基团的暴露。环境稳定性方面，温度和 pH 值对超声处理后 CP 的粒径和电位影响显著，而盐浓度影响较小；尤其 600 W 处理组在高温条件下能够抑制过度聚集，并在不同 pH 值条件下均保持优良的体系稳定性。该研究显示超声处理可有效改善鹰嘴豆蛋白的结构、功能特性及环境适应性，为其在食品工业中的推广应用提供了理论基础。

关键词：鹰嘴豆蛋白；超声处理；功能特性；环境稳定性

文章编号：1673-9078(2026)10-208-216 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1189

Effects of Ultrasonic Treatment on Functional Properties of Chickpea Protein

TAN Yunxia[1,2], ZHAO Shida[3], CHAI Liwen[1], CHE Xudong[1], BAI Bingyao[1], LU Jiankang[1], WANG Weihua[1], MA Shangchao[1], ZHANG Chunlan[1,2*]

(1.College of Food Science and Engineering, Tarim University, Alar 843300, China) (2.Production Construction Group Key Laboratory of Special Agricultural Products Further Processing in Southern Xinjiang, Alar 843300, China) (3.College of Bioresources Chemical and Materials Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: To address the functional defects of chickpea protein (CP), including low solubility, poor emulsifying capacity, and foaming capacity, and thereby enhance its application value in food products, CP was subjected to ultrasonic treatment at different power levels (200~800 W) for a fixed duration of 10 min, and the improvement effect of ultrasonic treatment on the functional properties of CP and its stability under different environments were analyzed. The results showed that ultrasonic treatment at 600 W exhibited the optimal effect: compared with the untreated group, the solubility of CP increased from 42.01% to 74.79%; the emulsifying capacity and emulsion stability reached 75.98 $m^2 \cdot g^{-1}$ and 66.68%, respectively; the foaming capacity and foam stability increased to 80.56% and 63.44%, respectively. In terms of structure, the particle size of CP was reduced to 159.07 nm, the absolute value of ζ-potential was increased to 30.13 mV, and the contents of free sulfhydryl groups and surface hydrophobicity (H_0) were increased by 1.49- and 1.51-fold, respectively. This indicates that ultrasonic treatment induced the protein depolymerization and the exposure of functional groups. In terms of environmental stability, temperature and pH had significant effects on the particle size and potential of CP after ultrasonic treatment, while the effect of salt concentration was relatively minor. In particular, treatment with 600 W ultrasonic treatment inhibited excessive aggregation at high temperatures and maintained excellent system stability across different pH conditions. This study demonstrated that ultrasonic treatment could effectively improve the structure, functional properties, and environmental adaptability of CP, thus providing a theoretical foundation for its popularization and application in the food industry.

Key words: chickpea protein; ultrasonic treatment; functional properties; environmental stability

收稿日期：2025-08-18；修回日期：2025-10-22；接受日期：2025-11-04

作者简介：谭云霞（1998-），女，硕士研究生，研究方向：粮食、油脂与植物蛋白工程，E-mail：1061460538@qq.com

通讯作者：张春兰（1979-），女，博士，教授，研究方向：食品科学与天然产物，E-mail：zcl790225@163.com

引文格式：
谭云霞,赵世达,柴丽雯,等.超声处理对鹰嘴豆蛋白功能特性的影响[J].现代食品科技,2026,42(10):208-216.
TAN Yunxia, ZHAO Shida, CHAI Liwen, et al. Effects of ultrasonic treatment on functional properties of chickpea protein [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 208-216.

鹰嘴豆（*Cicer arietinum* L.）是一种一年生冷季型豆科作物，作为世界主要豆类作物之一，其名称源于种子外形酷似鹰头并带有喙状突起，又名鸡豌豆、桃豆[1]。在我国，鹰嘴豆主要种植于西部地区，其中新疆木垒县的栽培面积达 7.6 万亩，占全国鹰嘴豆总种植面积的 83%。该作物具有较强的耐旱和耐贫瘠能力，具备较大的市场开发潜力[2]。鹰嘴豆富含蛋白质、淀粉、膳食纤维及维生素等多种营养成分，且其营养物质具有生物可利用性高、生物价值高等特点，对人体健康具有重要益处[3-5]。其中，鹰嘴豆蛋白（Chickpea Protein, CP）因其优异的营养价值和良好的生物利用率，在食品工业中展现出广阔的应用前景，被认为是一种极具潜力的食品原料。与大豆、豌豆蛋白相比，鹰嘴豆蛋白的氨基酸组成更为平衡，能够为人体提供全面且高效的营养支持。然而，研究发现鹰嘴豆分离蛋白存在诸多功能特性缺陷[6]，例如溶解度和乳化性不足等问题，这些缺陷制约了其在食品工业中的应用拓展。

超声处理作为一种非热物理改性技术，因其绿色、高效及可控性强等特点，在食品蛋白质功能改性领域展现出显著优势[7]。其作用机制主要依赖于空化效应和机械振动效应，这些效应能够破坏蛋白质的高级结构，诱导分子解聚或重排，进而改善其功能特性[8]。近年研究表明，适当的超声处理可有效提高蛋白质的溶解度、乳化性及凝胶性等关键功能指标，为其在食品工业中的应用提供新的技术路径[9]。然而，目前关于超声处理对 CP 功能特性的影响尚未系统研究，尤其是不同环境因素对超声改性后 CP 稳定性的影响仍需深入探讨。本研究旨在系统探究不同超声功率对鹰嘴豆蛋白功能特性（溶解度、乳化性、起泡性等）的影响，并深入分析环境条件（pH 值、温度、离子强度）对改性后 CP 稳定性的调控机制。相较于已有研究多聚焦于单一功能或环境因素的局部优化，本研究首次从多尺度结构（粒径、ζ-电位、三级结构等）与多功能特性（溶解性、乳化性、起泡性）的协同调控视角出发，全面揭示了超声功率对 CP 结构与功能的作用规律，并综合评估了其在多环境因素（温度、pH 值、盐浓度）下的稳定性表现。研究成果将为鹰嘴豆蛋白在食品工业中的高效利用提供坚实的理论依据与技术支撑，推动植物蛋白资源的精细化开发和价值提升。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鹰嘴豆：市售；大豆油：益海嘉里食品营销公司；磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、十二烷基硫酸钠、无水乙醇、考马斯亮蓝等均为国产分析纯。

200T 不锈钢粉碎机：武义海纳电器有限公司；JY92-DN 超声细胞粉碎仪：宁波新芝生物科技有限公司；EMS-20 数显恒温磁力搅拌水浴锅：金坛市科顺仪器厂；T18D 高速分散机：上海土森视觉科技有限公司；Lumina 荧光光谱仪：上海君翼仪器设备有限公司；ZEN 3700 纳米粒度及 ZETA 电位分析仪：英国马尔文仪器有限公司；J6 紫外可见分光光度计：上海菁华科技仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 鹰嘴豆蛋白的提取

根据 Ghribi 等[10]的方法并稍作修改。将鹰嘴豆破碎成粉，过 100 目筛。将鹰嘴豆粉和石油醚（沸程 60~90 ℃）按 1:5（*m/V*）混合，用索氏提取法 70 ℃脱脂 24 h，挥干试剂得到脱脂粉。采用碱溶酸沉法进行蛋白的提取：简言之，脱脂粉和水按照 1:10（*m/V*）的比例混合，用 1 mol·L^{-1} 的 NaOH 调混合液的 pH 值 8.3，磁力搅拌 1 h，6 000 r·min^{-1} 离心 15 min，收集上清液；再用 1 mol·L^{-1} HCl 溶液调 pH 值至等电点（pH 值 4.5），静置 30 min，离心，收集沉淀用去离子水反复洗涤至中性，进行冷冻干燥，得鹰嘴豆蛋白（CP，蛋白含量为 85.16%）。

1.2.2 超声处理鹰嘴豆蛋白（CP）

用磷酸盐缓冲液（0.01 mol·L^{-1}、pH 值 7.0）制备质量浓度为 10 mg·mL^{-1} 的 CP 溶液，运用超声细胞粉碎机在不同的超声功率（200、400、600、800 W）下进行超声处理，超声探头直径 0.5 cm，采用超声工作 5 s、间歇 5 s 的循环模式，总超声处理时间为 10 min，得超声改性后的样液，以原始蛋白为对照，置于 4 ℃下保存用于后续实验。分别将对照组和不同功率处理的样品命名为 CP、CP-U200、CP-U400、CP-U600、CP-U800。

1.2.3 粒径、电位测定

将样品稀释 100 倍，采用马尔文粒度仪测量[11]，设置参数为温度 25 ℃，平衡时间 120 s，分散介质折射率 1.33，蛋白质样品的折射率为 1.45，分别选择 Zeta Potential 模式和 Size 模式，ζ-电位分析每组进行 20 次，粒度分析每组进行 11 次。

1.2.4 游离巯基含量测定

取 1 mL 样液与 5 mL 三羟甲基氨基甲烷－甘氨酸（Tris（hydroxymethyl）aminomethane-Glycine，Tris-Gly）缓冲液混匀，再加入 0.1 mL 的 Ellman 试剂，涡旋混合后静置 15 min，在波长为 412 nm 的条件下测定其吸光度[12]。巯基含量计算公式如下所示。

$$Q=\frac{73.53\times A_{412}}{C} \quad (1)$$

式中：

Q——游离巯基含量，μmol·g^{-1}；

73.53——10^6/13 600，其中 13 600 为 Ellman 试剂的摩尔消光系数；

A_{412}——样品在 412 nm 处的吸光度；

C——蛋白样品溶液的质量浓度，mg·mL^{-1}。

1.2.5 三级结构的测定

参考 Zhao 等[13]的方法并稍作修改。将样液稀释 100 倍，得 0.1 mg·mL^{-1} 的蛋白溶液，用荧光分光光度计在特定参数下测其荧光光谱，设置参数为狭缝宽 0.1 nm，扫描速度 1 200 nm·min^{-1}，激发波长 290 nm，扫描范围 300~400 nm，扫描间隔 20 ms，反应时间 0.1 s，电压为 500 mV 条件下每组样品扫描 3 次，取峰值变化最稳定的一组图谱。

1.2.6 溶解度的测定

将样液稀释至 1 mg·mL^{-1}，用考马斯亮蓝法测定蛋白质质量浓度，以原蛋白为对照，在 595 nm 处测定其吸光值。以牛血清白蛋白做标准溶液，所得标准曲线方程为：y=4.017 4x+0.071 6，其中 R=0.998 8，溶解度公式如下：

$$C=\frac{C_1}{C_2}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

C——溶解度，%；

C_1——考马斯亮蓝测定其上清液中的质量浓度，mg·mL^{-1}；

C_2——蛋白质的理论质量浓度，mg·mL^{-1}。

1.2.7 表面疏水性（H_0）的测定

采用 ANS 荧光探针法测定样品溶液的 H_0[14]。将样液依次稀释成 0.05~0.25 mg·mL^{-1}。取 2 mL 稀释液，加入 10 μL（8 mmol·L^{-1}）ANS，经振荡混匀、避光静置 15 min 后，使用荧光分光光度计在特定参数下测其荧光光谱，用荧光强度和样品浓度的初始斜率计算 H_0。设定参数为激发波长 390 nm，发射波长 470 nm，狭缝宽度 0.1 nm，平行扫描 3 次。

1.2.8 乳化性的测定

乳化性的测定通过测量乳化活性指数（EAI）和乳化稳定性指数（ESI）两个指数来决定。将样液稀释至 2 mg·mL^{-1}，取 15 mL 稀释液与 5 mL 大豆油混合，高速分散机 10 000 r·min^{-1} 均质 2 min，快速从底部吸取 25 μL 乳液与 5 mL 十二烷基硫酸钠（0.1%，m/V）混合均匀。使用分光光度计在 500 nm 处测定其吸光度（A_0）。静置 10 min 后，重复上述操作，测其吸光度（A_{10}），公式如下所示：

$$E=\frac{2\times 2.303\times A_0\times N}{C\times\theta\times 10000} \quad (3)$$

$$F=\frac{A_0}{A_0-A_{10}} \quad (4)$$

式中：

E——乳化活性指数，EAI，m^2·g^{-1}；

F——乳化稳定性指数，ESI，%；

2——固定计算系数；

2.303——单位转换系数；

N——稀释倍数，即 200；

C——上清液蛋白的质量浓度，0.002 g·mL^{-1}；

θ——大豆油所占的体积分数，即 0.25；

10000——单位换算系数。

1.2.9 起泡性（FA）和起泡稳定性（FS）的测定

取 15 mL 样液，用高速分散机 10 000 r·min^{-1} 均质 2 min，倒入 50 mL 量筒，记录溶液和泡沫总体积，静置 30 min 后再次记录量筒中的总体积。计算公式如下：

$$G=\frac{V_0-15}{15}\times 100\% \quad (5)$$

$$S=\frac{V_1-15}{V_0-15}\times 100\% \quad (6)$$

式中：

G——起泡性，FA，%；

S——起泡稳定性，FS，%；

15——样液初始体积；

V_0——0 min 时溶液和泡沫总体积；

V_1——30 min 时溶液和泡沫总体积。

1.2.10 不同环境条件对超声处理鹰嘴豆蛋白稳定性的影响

（1）不同温度对超声处理鹰嘴豆蛋白粒径和电位的影响

取适量蛋白溶液，放入恒温水浴锅中加热，温度分别设置为 50、60、70、80、90 ℃加热 30 min，冰浴冷却，稀释 100 倍，使用马尔文粒度仪测定其粒径和电位。

（2）不同盐浓度对超声处理鹰嘴豆蛋白粒径和电位的影响

取适量样液分别与 NaCl 溶液混合，使 NaCl 终浓度为 0.05、0.1、0.15、0.2、0.25 mol·L^{-1}，稀释 100 倍，用马尔文粒度仪测定其粒径和电位。

（3）不同 pH 值对超声处理鹰嘴豆蛋白粒径和电位的影响

取适量不同超声处理的 CP 溶液，稀释 100 倍，再分别调节样液的 pH 值为 3、4、5、6、7，最后使用马尔文粒度仪开展对粒径和电位的测定。

1.3 数据处理

所有试验重复 3 次，数据结果以平均值 ± 标准差表示，并采用 SPSS Statistics 27 进行显著性分析（P＜0.05），Origin 2024 作图。

2 结果与分析

2.1 超声功率对鹰嘴豆蛋白粒径的影响

粒径大小是影响溶解度、乳化性和起泡性的重要指标。如图 1a 所示，随着超声功率的增加，鹰嘴豆蛋白溶液的粒径呈现先减小后增加的趋势。与原始蛋白相比，当功率达到 600 W 时，粒径减小至 159.07 nm，说明此时超声对蛋白颗粒的破碎效果最佳。该现象可归因于超声波产生的空穴效应影响，使 CP 液滴被破碎成细小颗粒，导致平均粒径减小。Gao 等[8]也发现 150 W 超声 30 min 可以使鹰嘴豆蛋白粒径下降 205.18%，使体系更稳定。而在高功率（800 W）条件下，粒径回升至 309.43 nm，这主要归因于过高的超声能量输入导致蛋白质发生过度变性和展开，分子内部大量疏水区域暴露，同时，ζ-电位的降低（图 1b）表明静电排斥力减弱，二者共同促进了蛋白质分子间通过疏水相互作用发生不可逆的聚集，从而形成更大的颗粒，导致粒径回升。

2.2 超声功率对鹰嘴豆蛋白ζ-电位的影响

ζ-电位反映了溶液中带电颗粒剪切面的电势，其绝对值越大，蛋白质颗粒间的静电排斥作用越强，分散稳定性越高[15]。如图 1b 所示，随着超声功率的增大，蛋白溶液的 ζ-电位绝对值呈现先升高后降低的趋势。与未处理组（−14.73 mV）相比，超声处理显著提高了蛋白溶液的 ζ-电位绝对值，说明超声处理能够有效增强蛋白质颗粒的分散稳定性。其中 600 W 处理效果最佳（−30.13 mV）。这一变化可能与超声空化作用促使蛋白聚集体解离，形成更小的颗粒，从而暴露出更多的带电基团（如羧基和氨基）。同时，颗粒比表面积的增加进一步提高了表面有效电荷密度，增强了分子间的静电排斥作用，最终改善蛋白溶液的分散稳定性。Zhang 等[16]研究发现，在不同的超声功率（200~600 W）下，超声处理能增加豌豆蛋白的 ζ-电位，并且随着超声波功率的增加，ζ-电位绝对值从 12.2 mV 增加至 29.8 mV。

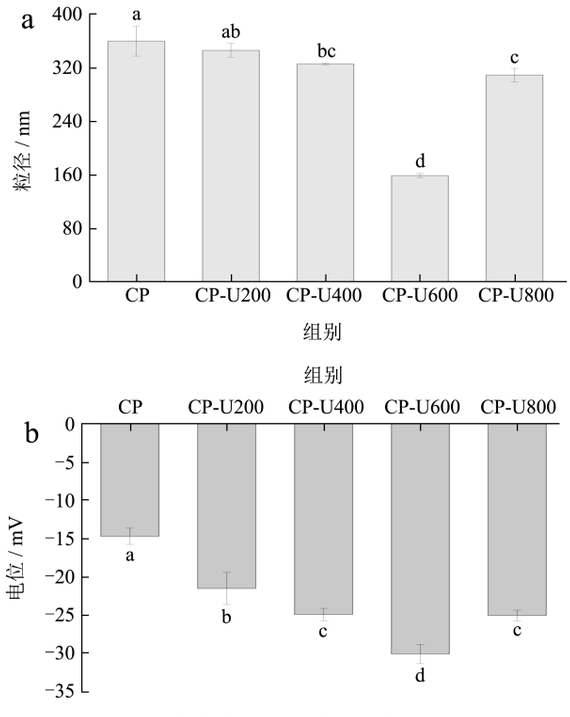


图 1 不同超声功率对 CP 粒径和电位的影响

Fig.1 Effects of ultrasonic power on particle size and ζ-potential of chickpea protein (CP)

注：图中不同字母表示处理间差异显著（P＜0.05）。下图同。

2.3 超声功率对鹰嘴豆蛋白游离巯基的影响

从蛋白质化学角度，巯基（-SH）可通过氧化形成二硫键（S-S），而二硫键对维持蛋白质高级结构至关重要。如图 2 所示，未经处理的鹰嘴豆蛋白（CP）游离巯基含量为 6.94 μmol·g^{-1}，而 600 W 超声处理使其显著提升至 10.32 μmol·g^{-1}。然而，当功率增至 800 W 时，游离巯基含量下降。该现象可归因于：超声诱导蛋白质结构展开，使内部包埋的巯基暴露[17]；超声处理会破坏分子间二硫键，释放游离巯基，从而增加其含量；而功率过高（如 800 W）时，超声空化产生的活性氧（如 H_2O_2）会氧化游离巯基，导致其含量降低。因此，超声功率需优化以平衡巯基暴露与氧化反应的影响。

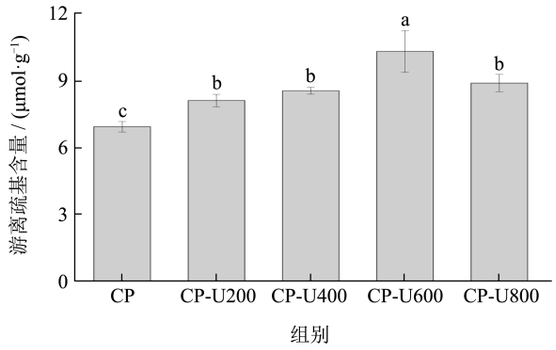


图 2 不同超声功率对 CP 游离巯基含量的影响

Fig.2 Effects of ultrasonic power on free sulfhydryl content of CP

2.4 超声功率对鹰嘴豆蛋白三级结构的影响

蛋白质内源荧光光谱可有效表征其三级结构变化，其中色氨酸（Trp）、酪氨酸（Tyr）和苯丙氨酸（Phe）残基的荧光特性对环境极其敏感。如图 3 所示，所有样品最大发射波长均发生轻微红移，表明蛋白质构象发生改变，Trp 等发色团所处环境的极性增强，提示蛋白分子可能发生了一定程度的去折叠。更为显著的是，超声处理组的荧光强度普遍降低，尤其在 600 W 时达到最低。该现象可归因于适度超声空化效应产生的机械剪切力促使蛋白质三级结构展开，原本包埋于分子内部的疏水区域（包括 Trp 残基）暴露于亲水溶剂中，发生荧光猝灭效应，从而直接证实了超声处理诱导 CP 发生可控的结构舒展。而在高功率（800 W）荧光强度回升，是因为蛋白分子间疏水相互作用增强，促使发色团（色氨酸等）重新包埋于聚集态结构中[18]。该结果表明超声处理会改变鹰嘴豆蛋白的三级结构。

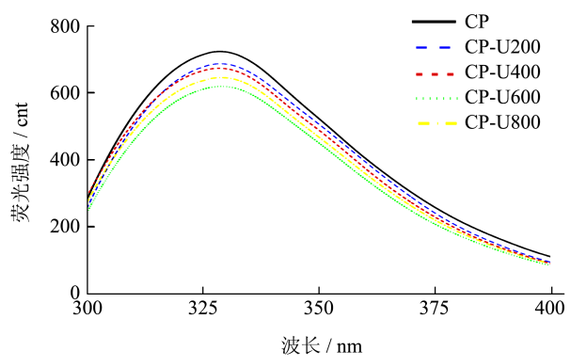


图 3 不同超声功率对 CP 三级结构的影响

Fig.3 Effects of ultrasonic power on tertiary structure of CP

2.5 超声功率对鹰嘴豆蛋白溶解度的影响

鹰嘴豆蛋白（CP）因其优异的营养价值受到广泛关注，但其较差的溶解度（原始状态 42.01%）限制了应用。本研究采用超声处理改善 CP 溶解度，如图 4a 所示，发现超声功率为 600 W 时溶解度显著提升至 74.79%。该现象可归因于超声处理通过空化效应和机械剪切力协同作用，促使大粒径蛋白聚集体解离为小颗粒，从而显著增加比表面积；超声引起的机械效应使蛋白质分子发生适度展开，原本包埋于分子内部的极性氨基酸残基（如羟基、羧基、氨基等）暴露至分子表面，增强了蛋白质与水分子的相互作用，从而提高溶解度[19]。然而，过高功率（800 W）会导致蛋白过度变性，破坏其天然构象，使得原本处于分子内部的疏水区域大量暴露，蛋白质分子间通过疏水相互作用形成不可逆的大分子聚集体，导致溶解度下降。与王进英等[20]研究结果对比，两项研究均表明适度超声处理可有效提高植物蛋白的溶解度。该研究报道，经 480 W 超声处理 20 min 后，菜籽和亚麻分离蛋白的溶解度分别提升至 89.35% 和 91.15%，验证了超声处理在改善蛋白溶解度方面的有效性。

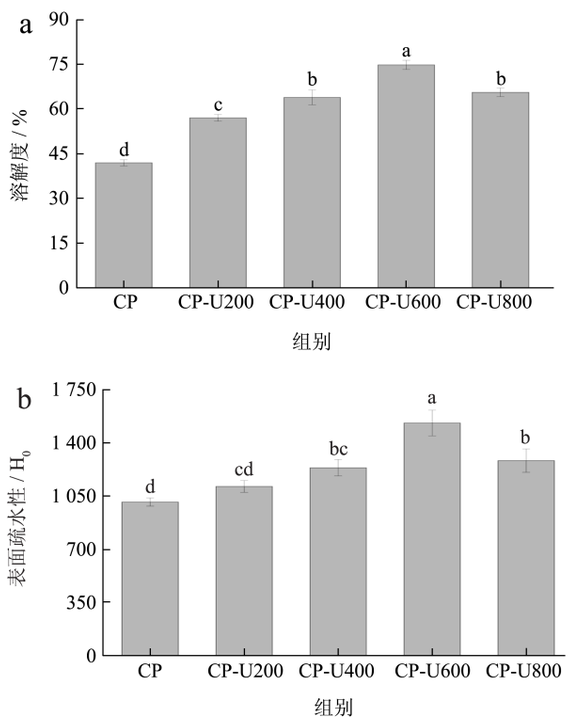


图 4 不同超声功率对 CP 溶解度和表面疏水性的影响

Fig.4 Effects of ultrasonic power on solubility and surface hydrophobicity of CP

2.6 超声功率对鹰嘴豆蛋白表面疏水性的影响

研究结果表明，超声处理显著改变了鹰嘴豆分离蛋白的表面疏水性（H_0）。如图 4b 所示，在固定处理时间（10 min）条件下，随着超声功率的增加，CP 的表面疏水性呈现先升高后降低的趋势。当功率为 600 W 时，H_0 值从对照组的 1 013.8 显著提升至 1 535.27。这一现象可归因于：适度超声促使蛋白分子解折叠，使原本包埋的疏水性氨基酸残基（如色氨酸、苯丙氨酸

等）暴露；然而过高功率导致蛋白质剧烈变性和过度展开，暴露出大量的疏水区域，进而引发分子间通过疏水相互作用发生不可逆的聚集。在此过程中，疏水基团在形成聚集体时被相互掩埋和包裹，导致其与荧光探针的有效接触面积减少，因此表面疏水性降低。Bi 等[21]研究也发现，在 60~300 W 超声可以提高鹰嘴豆蛋白表面疏水性 1.47~2.04 倍。值得注意的是，表面疏水性的变化趋势与蛋白质三级结构和溶解度的测定结果相互印证，共同证实了超声功率通过调控蛋白质构象变化而影响其功能特性。

2.7 超声功率对鹰嘴豆蛋白乳化性的影响

如图 5 所示，超声处理显著改善了鹰嘴豆蛋白的乳化性能。与未处理组（乳化性 50.59 $m^2 \cdot g^{-1}$，乳化稳定性 45.31%）相比，600 W 超声处理使 CP 的乳化性和乳化稳定性分别提高至 75.98 $m^2 \cdot g^{-1}$ 和 66.68%。原因是超声处理提高了蛋白溶解度，使更多可溶性蛋白分子能够有效吸附在油水界面[22]；适度的超声处理使蛋白分子适度展开，暴露出更多的疏水区域，增强了界面吸附能力，与表面疏水性结果一致。然而，当功率过高时，过度超声降低了界面活性，致使乳化性能下降。与包中宇[23]针对大豆分离蛋白的研究相比，两者在变化趋势上高度一致：200~800 W 超声处理时均呈现先升后降的趋势，尤其是在 600 W、60 min 时乳化性和乳化稳定性分别可达 77.51 $m^2 \cdot g^{-1}$ 和 40.27%，这一结果证实了超声处理对植物蛋白乳化特性改善的普适性。

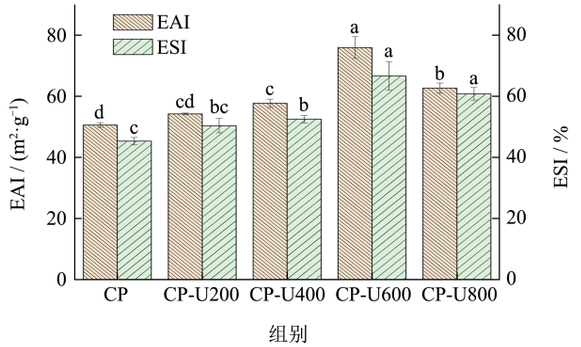


图 5 不同超声功率对 CP 乳化性和乳化稳定性的影响

Fig.5 Effects of ultrasonic power on emulsifying activity and stability of CP

2.8 超声功率对鹰嘴豆蛋白起泡性和起泡稳定性的影响

本研究考察了超声处理对鹰嘴豆蛋白（CP）起泡性能的影响。结果如图 6 所示，与未处理组相比，鹰嘴豆蛋白经 600 W 超声处理后其 FA 和 FS 显著提升至 80.56% 和 63.44%。可能是因为超声诱导的蛋白质结构展开增强了其表面活性，促进气液界面吸附；其次，溶解度提高增加了可用于稳定泡沫的蛋白质浓度。泡沫稳定性变化与界面膜稳定性密切相关，适度的超声处理（600 W）可延缓气泡聚结和歧化过程。Xiong 等[24]研究也支持上述结论，该研究发现超声处理可显著提升卵清蛋白的乳化活性及起泡能力；赵飞[25]研究发现超声处理可显著提高大豆分离蛋白（SPI）的起泡性能，在超声功率为 600 W，时间 30 min 的发泡能力是未处理的 1.55 倍，发泡能力达到最大。表明超声处理对不同蛋白质的界面功能具有普遍改善效果。

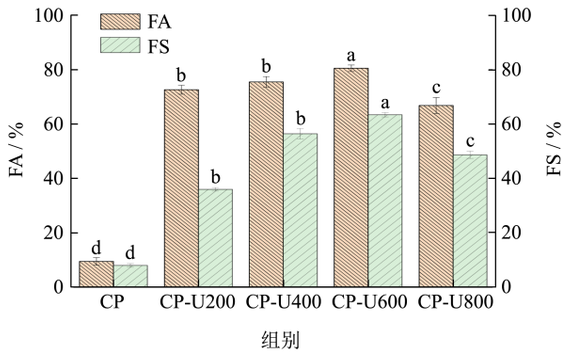


图 6 不同超声功率对 CP 起泡性和起泡稳定性的影响

Fig.6 Effects of ultrasonic power on foaming activity and stability of CP

2.9 不同环境条件对超声处理鹰嘴豆蛋白稳定性的影响

2.9.1 温度对超声处理鹰嘴豆蛋白粒径、电位的影响

如图 7 所示，鹰嘴豆蛋白粒径随温度升高呈显著增长趋势，50~70 ℃范围内各处理组粒径增幅小于 15%，而 80 ℃时未处理对照组粒径突增至 2 495 nm，这主要归因于高温诱导的蛋白质变性导致分子聚集[26]。值得注意的是，CP-U600 W 在 80 ℃时粒径增幅较对照组降低 42%，其作用机制在于超声预处理使大分子聚集体解离为亚基，形成更有序的聚集态，同时优化了表面疏水基团分布。电位测定表明，CP-U600 W 在 80 ℃时 ζ-电位绝对值达到峰值 20.5 mV（较 50 ℃提升 37.2%），这反映了超声处理促进内部带电残基暴露，在热诱导中维持体系稳定并优化表面电荷分布的作用，而 90 ℃时的电位回落则提示过度变性导致电荷分布紊乱。特别值得注意的是，80 ℃被确定为鹰嘴豆蛋白胶体性质变化的关键临界点，此时粒径和 ζ-电位同时达到极值，600 W 处理组展现出最优的调控效果，其协同作用机制表现为蛋白分子结构发生适度展开，暴露出更多亲水基团，从而增强其热稳定性并改变热变性

行为；同时，热能促进超声引起的空化效应和机械剪切作用，使蛋白质分散更均匀，二者互为促进。当温度超过 80 ℃这一临界点时，蛋白结构发生不可逆的过度变性与聚集，形成大型不溶性聚集体并从溶液中析出，导致分子聚集占主导、表面特性恶化。

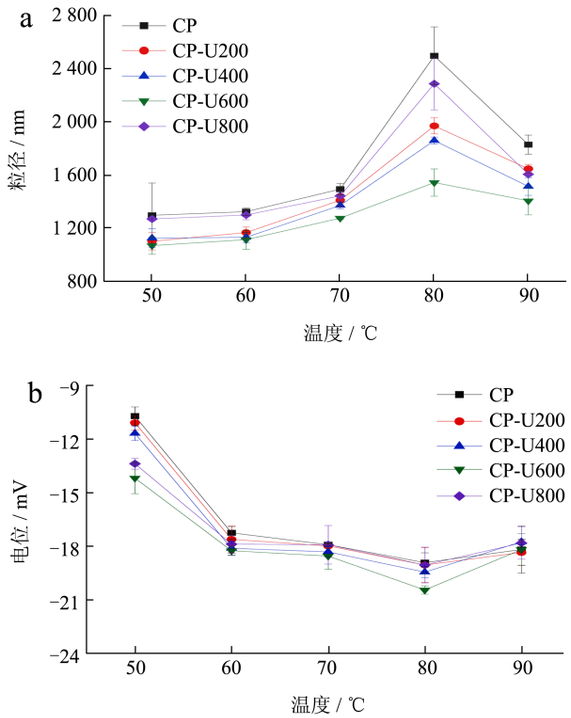


图 7 不同温度对超声处理鹰嘴豆蛋白稳定性的影响

Fig.7 Temperature effects on stability of ultrasonically treated chickpea protein

2.9.2 盐浓度对超声处理鹰嘴豆蛋白粒径、电位的影响

从图 8 中可看出，盐离子对超声处理鹰嘴豆蛋白的粒径和电位影响较小。在低盐浓度区域（≤0.1 mol·L^{-1}），各功率处理组的粒径差异较小，而电位值则呈现较大离散性，这源于盐离子的双重作用：静电屏蔽效应降低表面电位[27]，而离子交联作用则促进分子聚集[28]。值得注意的是，在 0.15~0.2 mol·L^{-1} 关键浓度区间，系统表现出独特的响应特征：CP-U600 的粒径在盐浓度为 0.15 mol·L^{-1} 最小（310.2 nm），而 CP-U600 的 ζ-电位绝对值在盐浓度为 0.2 mol·L^{-1} 最高达 17.4 mV。这种协同效应可归因于：特定盐浓度下离子强度的阈值效应；超声处理通过改变蛋白质构象影响其与盐离子的相互作用，形成稳定的“盐桥－蛋白质”复合结构，进而优化蛋白质表面特性，这既抑制了过度聚集（控制粒径增长），又维持了较高的表面电荷密度（保持电位稳定）。当盐浓度过高时，盐离子的脱水效应占主导，破坏了由超声处理建立的“盐桥－蛋白质”平衡稳定结构，导致所有处理组的平均粒径增大，ζ-电位绝对值下降，表明体系稳定性降低。

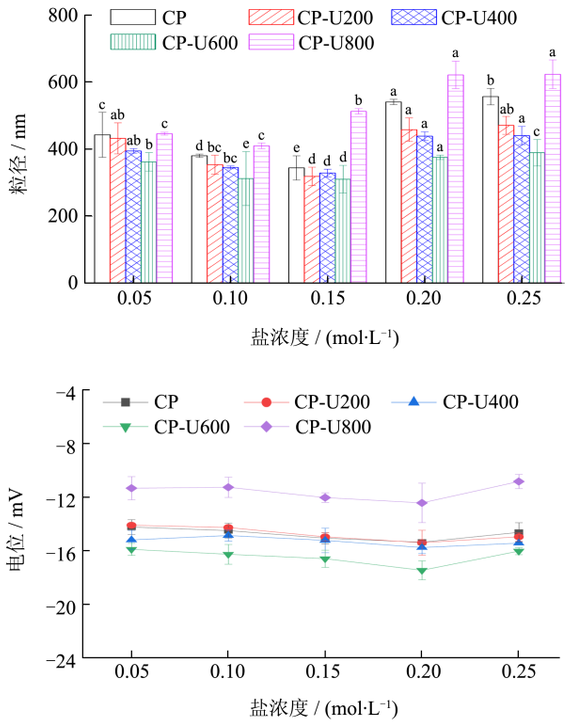


图 8 不同盐浓度对超声处理鹰嘴豆蛋白稳定性的影响

Fig.8 Effects of salt concentration on stability of ultrasonically treated chickpea protein

2.9.3 pH值对超声处理鹰嘴豆蛋白粒径、电位的影响

如图 9 所示，蛋白质的粒径和电位特性呈现显著的 pH 值依赖性。在等电点附近（pH 值 4）时，各处理组均表现出最大粒径和接近 0 mV 的 ζ-电位值，其中未处理组粒径达到 2 672 nm，原因是蛋白质在等电点时发生静电屏蔽作用，净电荷最小，与水分子相互作用减弱导致聚集沉淀。当 pH 值偏离等电点至中性范围时，所有超声处理组的粒径均显著减小[29]，表明超声处理能有效增强蛋白质在非等电点条件下的解聚效果。电位分析显示，随着 pH 值向中性范围移动，电位绝对值逐渐降低并趋于稳定，其中在 pH 值为 7 时，CP-U600 的粒径从 pH 值 4 的 2 281.33 nm 降至 159.07 nm 和 ζ-电位绝对值从 2.73 mV 升至 30.13 mV。可能是超声处理改善了蛋白质表面电荷分布；在远离等电点的 pH 值条件下，蛋白质电离状态与超声处理产生协同效应。与高晓莉等[30]对燕麦蛋白的研究趋势高度一致，蛋白的 ζ-电位变化与其等电点行为高度吻合：在靠近等电点时电位趋近于零，随 pH 偏离而绝对

值上升。研究表明，600 W 超声处理能显著提升鹰嘴豆蛋白的 pH 值适应性，在较宽 pH 值范围内维持稳定的体系，这一发现为开发具有 pH 值适应性的植物蛋白产品提供了重要的理论依据和技术支持。

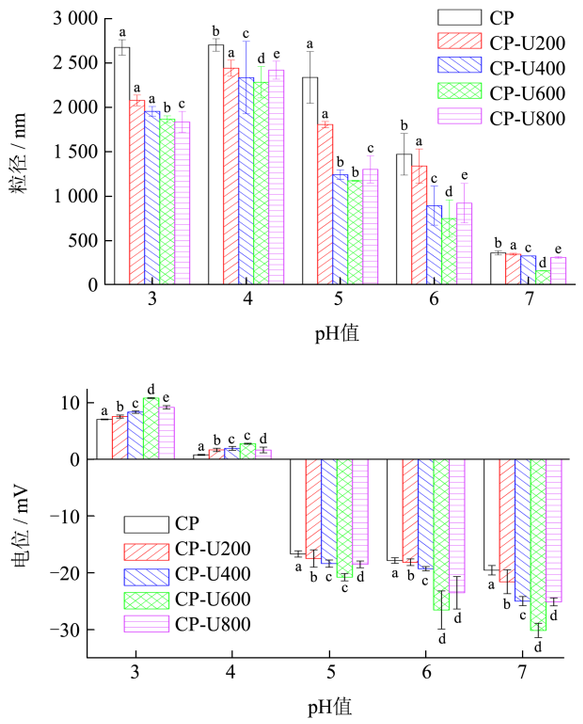


图 9 不同 pH 值对超声处理鹰嘴豆蛋白稳定性的影响

Fig.9 Effects of pH on stability of ultrasonically treated chickpea protein

3 结论

本研究系统探讨了不同功率超声处理（200~800 W，10 min）对鹰嘴豆蛋白结构与功能特性的调控作用。结果表明，600 W 为最优处理参数，可有效改善 CP 的功能性能：溶解度由 42.01% 提高至 74.79%，乳化活性与乳化稳定性分别提升至 75.98 $m^2 \cdot g^{-1}$ 和 66.68%，起泡性及泡沫稳定性分别达到 80.56% 和 63.44%。结构表征显示，该处理使蛋白粒径减小至 159.07 nm，ζ-电位绝对值升高至 30.13 mV，游离巯基含量和表面疏水性分别增加 1.49 倍和 1.51 倍，荧光强度分析进一步表明蛋白构象发生适度展开，说明超声处理促进了蛋白质解聚与功能基团暴露。环境（温度、盐浓度、pH 值）稳定性研究显示，温度和 pH 值对 CP 的稳定性影响最为显著，而盐浓度影响相对有限；600 W 处理能够在高温和不同 pH 条件下有效抑制蛋白聚集，维持体系稳定。需要指出的是，本研究主要通过粒径、ζ-电位等关键参数的变化从机理层面评价蛋白稳定性，未能开展实际储存条件下的长期稳定性实验，是本研究的一个局限性。未来研究可在此基础上，进一步考察改性鹰嘴豆蛋白在模拟真实食品体系中的长期储存稳定性和加工适应性。综上所述，600 W 超声处理通过调控蛋白构象变化，实现了鹰嘴豆蛋白功能特性与胶体稳定性的同步优化，为其作为功能性配料在食品工业中的应用提供了理论支持。

参考文献

[1] DODDAMANI D, KATTA M A, KHAN A W, et al. CicArMiSatDB: the chickpea microsatellite database [J]. BMC Bioinformatics, 2014, 15(1): 212.

[2] 郑雁,林江涛,岳清华.鹰嘴豆和鹰嘴豆蛋白的特性及应用研究进展[J].中国油脂,2024,49(4):20-27.

[3] WANG J Y, LI Y H, LI A, et al. Nutritional constituent and health benefits of chickpea (*Cicer arietinum* L.): A review [J]. Food Research International, 2021, 150(PA): 110790.

[4] MIAO M, ZHANG T, JIANG B. Characterisations of kabuli and desi chickpea starches cultivated in China [J]. Food Chemistry, 2009, 113(4): 1025-1032.

[5] DIDA B D, URGA K,YILDIZ F . Study on the effect of traditional processing methods on nutritional composition and anti nutritional factors in chickpea (*Cicer arietinum*) [J]. Cogent Food & Agriculture, 2018, 4(1): 1422370.

[6] BOYE J I, AKSAY S, ROUFIK S, et al. Comparison of the functional properties of pea, chickpea and lentil protein concentrates processed using ultrafiltration and isoelectric precipitation techniques [J]. Food Research International, 2010, 43(2): 537-546.

[7] 张怡雪,贾尚羲,崔冰冰,等.超声波处理鹰嘴豆分离蛋白乳化液对低脂猪肉糜品质及其冻融稳定性的影响[J].食品工业科技,2025,46(8):111-121.

[8] GAO Y, HAO X Y, HU Y C, et al. Modification of the functional properties of chickpea proteins by ultrasonication treatment and alleviation of malnutrition in rat [J]. Food & Function, 2023, 14(3): 1773-1784.

[9] 皮桂泉,胡义泽,乔佳琦,等.超声处理对蛋白结构和特性的影响[J].粮食与食品工业,2020,27(5):36-37.

[10] GHRIBI M A, GAFSI M I, SILA A, et al. Effects of enzymatic hydrolysis on conformational and functional properties of chickpea protein isolate [J]. Food Chemistry, 2015, 187: 322-330.

[11] ELENA K, PERRINE G, VALERIE B, et al. Pea and lupin protein ingredients: New insights into endogenous lipids and the key effect of high-pressure homogenization on their aqueous suspensions [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 141: 109001.

[12] KANG Z L, BAI R, LU F, et al. Effects of high pressure homogenization on the solubility, foaming, and gel properties of soy 11S globulin [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124(PA):107261.

[13] ZHAO S L, HUANG Y, JULIAN D M, et al. Improving pea protein functionality by combining high-pressure homogenization with an ultrasound-assisted Maillard reaction [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 126: 107441.

[14] ZHANG M, FAN L P, LIU Y F, et al. Effects of alkali treatment on structural and functional properties of chickpea protein isolate and

its interaction with gallic acid: To improve the physicochemical stability of water-in-oil emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 140: 108601.

[15] VARGAS S A, DELGADO-MACUIL R J, RUIZ-ESPINOSA H, et al. High-intensity ultrasound pretreatment influence on whey protein isolate and its use on complexcoacervation with kappa carrageenan: Evaluation of selected functional properties [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 436-444.

[16] ZHANG J N, LIU Q, CHEN Q, et al. Synergistic modification of pea protein structure using high-intensity ultrasound and pH-shifting technology to improve solubility and emulsification [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 88: 106099.

[17] 王跃猛,郭宜鑫,焦涵,等.蛋清蛋白起泡性改性手段及作用机制研究进展[J].食品科技,2023,48(1):197-204.

[18] 刘斌,马海乐,李树君,等.超声波处理对脱脂麦胚分离蛋白结构的变化研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(8):2220-2225.

[19] 易建华,曹灿,朱振宝.核桃分离蛋白溶解性、乳化性影响因素研究[J].陕西科技大学学报,2017,35(5):128-132,138.

[20] 王进英,冶梓芩,马金鸽,等.超声改性对菜籽分离蛋白和亚麻分离蛋白品质特性的影响[J].食品与发酵工业,2025,51(19):199-206.

[21] BI C H, CHI S Y, ZHOU T, et al. Effect of low-frequency high-intensity ultrasound (HIU) on the physicochemical properties of chickpea protein [J]. Food Research International, 2022, 159: 111474.

[22] ZHU Z B, ZHU W D, YI J H, et al. Effects of sonication on the physicochemical and functional properties of walnut protein isolate [J]. Food Research International, 2018, 106: 853-861.

[23] 包中宇.超声波技术对大豆分离蛋白功能性质、结构及凝胶特性的影响[D].南昌:南昌大学,2015.

[24] XIONG W F, WANG Y T, ZHANG C L, et al. High intensity ultrasound modified ovalbumin: Structure, interface and gelation properties [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2016, 31: 302-309.

[25] 赵飞.物理预处理对大豆分离蛋白结构和理化性质的影响机制[D].泰安:山东农业大学,2019.

[26] 朱颖,黄雨洋,刘琳琳,等.热处理对大豆分离蛋白-姜黄素互作机理及消化特性的影响[J].食品工业科技,2023,44(9):53-59.

[27] 余焱,王杰,郝梦,等.热处理与离子强度对肌原纤维蛋白溶液与乳液稳定性的比较[J].现代食品科技,2025,41(5):222-229.

[28] 赵颖颖,李三影,田金凤,等.超声波对不同盐浓度下肌原纤维蛋白溶解性的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(7):197-202.

[29] CHEN E, WU S, MCCLEMENTS J D, et al. Influence of pH and cinnamaldehyde on the physical stability and lipolysis of whey protein isolate-stabilized emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 103-110.

[30] 高晓莉,王丽丽,刘丽娅,等.pH值和温度对燕麦蛋白溶解与聚集特性的影响[J].核农学报,2020,34(11):2492-2498.