

高压均质时间对牛骨白汤乳化稳定性的影响

张洁^{1,2}, 李苗云^{1,2}, 朱瑶迪^{1,2*}, 赵莉君^{1,2}, 赵改名^{1,2},
马阳阳^{1,2}, 洪念呈^{1,2}, 高浩源^{1,2}

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 郑州 450002; 2. 河南省肉品加工与安全国际联合实验室, 郑州 450002)

摘要: 目的 研究牛骨白汤在不同高压均质时间(4、8、12、16、20、24 min)的作用下其乳化稳定性的变化。**方法** 以牛骨素、牛骨油为主要原料制备牛骨白汤, 在 25 Mpa 下进行 1 次高压均质, 利用紫外分光光度计、纳米电位仪、粘度计、光学显微镜和拉曼光谱仪测定不同均质时间处理的牛骨白汤的乳化活性、乳化稳定性、粒径、多分散系数、Zeta 电位、黏度、微观结构以及蛋白二级结构。**结果** 均质时间由 4 min 增加到 12 min 可显著提高乳化活性、乳化稳定性、黏度、Zeta 电位、无规卷曲和 β -转角($P < 0.05$), 降低粒径、多分散系数、 α -螺旋和 β -折叠($P < 0.05$), 均质时间为 12 min 时, 乳化效果最佳, 超过 12 min, 乳化效果下降。**结论** 均质时间为 12 min 时对牛骨白汤产生的乳化稳定性最佳, 解决了牛骨白汤均质过程中的技术问题, 为食品工业化生产牛骨白汤等复合调味品提供理论依据和技术支持。

关键词: 均质时间; 牛骨白汤; 乳化稳定性; 拉曼光谱

Effects of high-pressure homogenization time on emulsifying stability of beef bone white soup

ZHANG Jie^{1,2}, LI Miao-Yun^{1,2}, ZHU Yao-Di^{1,2*}, ZHAO Li-Jun^{1,2}, ZHAO Gai-Ming^{1,2},
MA Yang-Yang^{1,2}, HONG Nian-Cheng^{1,2}, GAO Hao-Yuan^{1,2}

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;
2. Henan International Joint Laboratory for Meat Processing and Safety, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT: Objective To study the change of emulsion stability of beef bone white soup under different high-pressure homogenization time (4, 8, 12, 16, 20, 24 min). **Methods** Beef bone white soup was prepared with beef bone extract and beef bone oil as the main raw materials, high-pressure homogenization was performed once at 25 Mpa, the emulsifying activity, emulsion stability, particle size, polydispersity coefficient, Zeta potential, viscosity, microstructure and protein secondary structure of the beef bone white soup treated at different homogenization times were measured by ultraviolet spectrophotometer, nano potentiometer, viscometer, optical microscope and Raman spectrometer. **Results** Increasing the homogenization time from 4 to 12 min could significantly improve the

基金项目: 河南省杰出青年科学基金项目(212300410008)、河南省高等学校重点科研项目(22A550013)、河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(212102110081)

Fund: Supported by the Science Fund for Outstanding Youth of Henan Province (212300410008), the Key Scientific Research Project of Henan Province (22A550013), and the Henan Province Key Research and Development and Promotion Special Project (Science and Technology) (212102110081)

***通信作者:** 朱瑶迪, 副教授, 主要研究方向为畜产品加工与安全无损检测。E-mail: zhu_yaodi@163.com

***Corresponding author:** ZHU Yao-Di, Associate Professor, College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China. E-mail: zhu_yaodi@163.com

emulsifying activity, emulsion stability, viscosity, Zeta potential, random crimp and β -turn ($P < 0.05$), and reduce the particle size, polydispersity coefficient, α -helix and β -sheet ($P < 0.05$), when the homogenization time was 12 min, the emulsifying effect was the best, and when the homogenization time was more than 12 min, the emulsifying effect was decreased. **Conclusion** When the homogenization time is 12 min, the emulsion stability of beef bone white soup is the best, which solves the technical problems in the homogenization process of beef bone white soup and provides theoretical basis and technical support for the industrial production of compound condiments such as beef bone white soup.

KEY WORDS: homogenization time; beef bone white soup; emulsifying stability; Raman spectrometer

0 引言

牛骨素是以牛骨为原料在高温高压下抽提得到的主要含有牛骨胶原蛋白、水、少量牛骨油的半固态混合物^[1]。牛骨白汤是在牛骨素的基础上进一步加工的浓汤类复合调味品^[2], 其原理是牛骨素中胶原蛋白在高压均质作用下与牛骨油乳化作用形成 O/W 型乳液^[3], 因含有丰富的游离氨基酸和挥发性风味物质倍受消费者青睐^[4], 但乳液是热力学不稳定体系^[5], 所以高汤类产品在食品工业化生产中以及销售过程中会因乳化效果差异出现分层、破乳和聚集的现象, 影响产品质量和消费者感官。为解决这一问题, 企业通常会增加高压均质时间来改善乳化效果。

高压均质是一种常见的提高乳液品质的技术, 通过高速剪切、高频振荡、空穴现象和对流撞击对物料产生机械力和相应的热效应, 最终达到均质的效果^[6-8]。有报道高压均质能提高乳液体系的稳定性^[9-11], 崔燕等^[12]通过不同的高压均质压力和均质次数处理水蜜桃汁, 发现高压均质可提高水蜜桃汁的稳定性和营养成分含量。SHARIFFA 等^[13]研究了高压均质对番茄红素纳米分散体的理化性质的影响, 发现均质压力提高到 50 Mpa, 可显著降低粒径和番茄红素浓度, 稳定性良好。关淳博等^[14]报道了高压均质压力和均质次数对脱脂油莎豆乳品的影响, 结果表明均质压力 30 Mpa、均质次数 2 次时乳品的稳定性最好且粒径分布均一。由于物料之间理化性质的差异, 不同的物料选择不同均质参数具有不同的乳化稳定性。目前大多数研究集中在压力、次数这两个协同因素对整个乳液体系的影响, 也有研究表明通过增加均质时间同样能达到相同效果^[15]。考虑到实际工业化生产, 升高均质压力和均质次数会增加企业成本、缩短机器使用寿命, 牛骨白汤的生产一般在特定压力 25 Mpa 下进行 1 次高压均质, 且目前关于在不同高压均质时间的作用下对牛骨白汤乳化稳定性影响的研究鲜有报道。

本研究以牛骨素、牛骨油为主要原料, 以乳化活性指数(emulsifying activity index, EAI)、乳化稳定指数(emulsion stability index, ESI)、多分散系数(polydispersity, PDI)、Zeta

电位、粒径、表观黏度、微观形态和蛋白二级结构等为评价指标, 在 25 Mpa 下进行 1 次高压均质, 研究不同均质时间(4、8、12、16、20、24 min)对牛骨白汤乳化稳定性的影响, 为牛骨白汤标准化、规模化生产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

牛骨素、牛骨油(河南平顶山丰佳生物科技有限公司); 食盐(梅花食品有限公司); 木薯变性淀粉(河南明阳食品有限公司); 十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)(分析纯, 北京索莱宝科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

GYB-40 高压均质机(上海东华高压均质机厂); JZ-II 型高速均质器(天津铁道部电化院四方电器设备厂); UV-2600i 紫外分光光度计(上海市岛津实验器材有限公司); HR Evolution 拉曼光谱仪掘场(中国掘场贸易有限公司); Zetasizer Nano S90 电位仪(上海思百吉仪器系统有限公司); NDJ-8S 数字粘度计(上海精天电子仪器有限公司); BSA423S 电子分析天平(精度 0.001 g, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司); HHS-21-4 水浴锅(上海博讯实业有限公司医疗设备厂); Nikon ECLIPSE BOi 光学显微镜(日本尼康公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 牛骨白汤的制备

表 1 表示牛骨白汤的主要成分及各成分占比。

表 1 牛骨白汤配方表
Table 1 Formula of beef bone white soup

原料	质量分数占比/%
牛骨素	50.0
牛骨油	35.0
蒸馏水	10.5
食盐	4.5
木薯变性淀粉	1.0

操作要点: 将牛骨素、食盐、蒸馏水按照配方称量溶解, 水浴加热至 80℃, 再加入牛骨油直至完全融化, 经高速均质器在 10000 r/min 下均质 2 min 得到混合体系后倒入烧杯中, 在水浴锅中加热至 85℃加入淀粉, 玻璃棒搅拌并恒温 3 min, 经高压均质机在 25 Mpa 下均质 4、8、12、16、20、24 min 得到牛骨白汤静置备用。

1.3.2 EAI、ESI 的测定

牛骨白汤的 EAI 和 ESI 的测定参考 XU 等^[16]的方法稍作修改。制备好的牛骨白汤在 0 min 和第 10 min 分别从容器底部取 20 μL 加入 1 mg/mL SDS 溶液 48 mL, 用涡旋仪振荡 10 s, 以 SDS 溶液为对照, 在 500 nm 处测量吸光度分别记为 A_0 、 A_{10} , 并计算 EAI 和 ESI。

EAI 的计算公式如式(1):

$$EAI/(m^2/g) = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times N}{\varphi \times c \times 10000} \quad (1)$$

其中: N 为稀释倍数, φ 为油相所占百分数(%), c 为蛋白质质量浓度(mg/mL)。

ESI 的计算公式如式(2):

$$ESI/min = \frac{A_0 \times \Delta t}{A_0 - A_{10}} \quad (2)$$

其中: Δt 为时间间隔。

1.3.3 粒径的测定

分别取备用牛骨白汤乳液稀释 400 倍, 使用纳米电位仪以蒸馏水为分散介质测量其液滴粒径分布, 用平均粒径表示大小。

1.3.4 黏度的测定

分别取 50 mL 备用牛骨白汤置于平底玻璃瓶中, 在室温条件下用数字粘度计进行黏度测定, 仪器参数: 4 号转子, 0.6 RPM 转速。

1.3.5 PDI 和 Zeta 电位的测定

将备用牛骨白汤用蒸馏水稀释 100 倍, 用移液枪吸取 1 mL 至电位仪样品池内, 折射光系数为 1.330, 在 25℃下平衡 2 min, 测定其 PDI 和 Zeta 电位。

1.3.6 微观结构的观察

采用光学显微镜观察牛骨白汤的微观结构, 将备用牛骨白汤用蒸馏水稀释 400 倍, 吸取 20 μL 置于载玻片上在 40×10 倍物镜下观察, 用仪器自带软件获取牛骨白汤微观结构图像。

1.3.7 拉曼光谱的采集

采用拉曼光谱仪在 1000~4000 cm^{-1} 范围内获得拉曼数据。使用单晶硅进行光谱矫正, 通过 10 倍长焦透镜将激光聚焦在载玻片上的样品上。在以下条件采集: 2 次扫描、20 s 曝光时间、2 cm^{-1} 分辨率、120 cm^{-1}/min 采样速度, 每 1 cm^{-1} 即采集数据。每个样品重复 3 次实验。

1.3.8 数据处理及分析

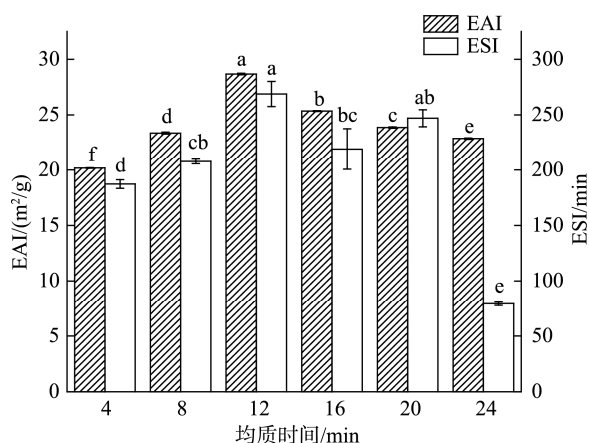
每个实验平行 3 次, 数据以平均值±标准偏差表示,

采用 SPSS 23.0 进行单因素方差分析(显著性水平 $P < 0.05$), 利用 Origin 2018 绘图。

2 结果与分析

2.1 均质时间对牛骨白汤乳化活性及乳化稳定性的影响

EAI 表示蛋白质吸附在乳液中油-水界面的能力, EAI 值越大表示乳液越稳定。如图 1 所示, 在不同高压均质时间下, EAI 在 4~24 min 内呈先增加后下降的趋势, 在均质 12 min 时 EAI 达到最大值 28.28 m^2/g , 这可能是因为高压均质产生的剪切力使蛋白内部的疏水性基团暴露, 表面疏水性增加, 降低表面张力, 蛋白与油脂之间的相互作用增加, 此时蛋白质单位稳定的界面面积最大^[17], 乳化活性最佳, 但均质时间持续增加, 高压均质将产生更多的机械力和热能, 蛋白有聚集的趋势, 影响疏水基团的暴露, 所以 EAI 呈下降趋势。



注: 不同小写字母代表不同组别之间具有显著性差异, $P < 0.05$, 下同。

图 1 均质时间对牛骨白汤乳化稳定性的影响($n=3$)

Fig.1 Effects of homogenization time on emulsion stability of beef bone white soup ($n=3$)

ESI 反映了蛋白质赋予乳液强度抵抗聚集的能力, ESI 值越大表示乳液稳定性越强。ESI 在 4~24 min 内呈先增加后下降的趋势, 在均质时间为 12 min 时达到最大值 268.82 min。随着均质时间的增加, 蛋白粒径变小比表面积增大, 与油-水界面接触的机率变大^[18], 可能是牛骨白汤稳定性增加的原因; 但随着均质时间持续增加, 更多的机械能转换为热能使物料的温度升高, 导致牛骨白汤中液滴运动加剧, 增加了碰撞和聚集的可能性^[19], 是导致牛骨白汤的乳化稳定性下降的原因。

2.2 均质时间对牛骨白汤粒径的影响

粒径是影响乳液稳定性的重要指标之一, 粒径越小, 乳液越细腻稳定, 如图 2 所示, 在高速剪切时间 2 min、转

速 10000 r/min、25 Mpa 高压均质压力下, 随着均质时间增加粒径大小显著降低($P<0.05$), 平均粒径逐渐往左偏移, 粒径分布更窄^[20], 均质 12 和 16 min 后牛骨白汤的平均粒径虽无显著性差异($P>0.05$), 但均质 12 min 的粒径比均质 16 min 的粒径分布更集中; 当均质时间为 24 min 时, 牛骨白汤的粒径最小为 493 nm ($P<0.05$), 均质时间越长平均粒径越小, 但粒径分布不一定更窄, 这是因为高压均质机通过压力产生的空穴效应使牛骨白汤中的液滴颗粒变小, 但压力持续产生会使颗粒间的碰撞次数增加, 因此有使液滴聚集的趋势, 牛骨白汤变得不稳定^[21]。

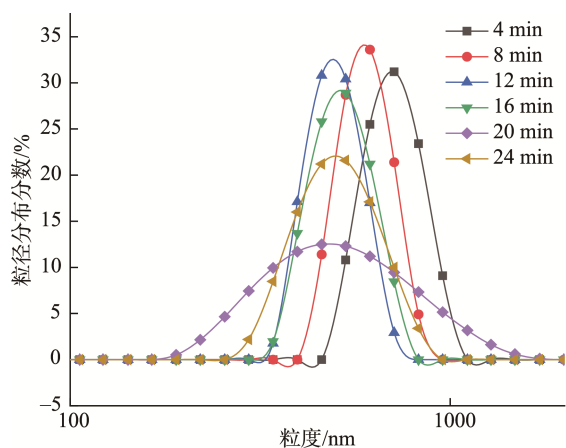


图 2 均质时间对牛骨白汤粒径分布的影响
Fig.2 Effects of homogenization time on particle size distribution of beef bone white soup

2.3 均质时间对牛骨白汤黏度的影响

黏度是反映牛骨白汤中液滴颗粒之间摩擦力的参数, 也是使牛骨白汤表现出非牛顿行为的原因^[22], 黏度越大乳液越稳定, 但黏度超过 160 Pa·s 时会使均质机运行困难, 影响均质效果。如图 3 所示, 不同均质时间下牛骨白汤的黏度存在显著性差异($P<0.05$), 但均质 8 min 和均质 20 min 的黏度不存在显著差异($P>0.05$), 均质 16 min 时牛骨白汤的黏度达到最小值 81.88 Pa·s ($P<0.05$)。均质时间由 4 min 增加到 8 min, 黏度变小, 这是因为高压均质产生的剪切力和空穴效应会破坏蛋白之间的氢键, 牛骨白汤液滴之间的聚集减少, 黏度减小; 均质时间继续增加到 12 min, 粒径减小, 液滴之间的比表面积增加, 摩擦力增加, 黏度增加; 均质时间增加到 16 min, 平均粒径变大, 比表面积减小, 摩擦力减小, 黏度减小; 当均质时间增加到 24 min 时, 均质会使液滴颗粒温度升高, 液滴之间的布朗运动更加剧烈, 液滴颗粒再次发生聚集且黏度变大^[23]。

2.4 均质时间对牛骨白汤 PDI 和 Zeta 电位的影响

乳液液滴所带的表面电荷能产生静电排斥力, 足够强

的排斥力是维持乳液稳定的重要因素, Zeta 电位的绝对值越大表示发生聚集的可能性越小, 乳液越稳定。如图 4 所示, 随着均质时间增加, 牛骨白汤的 Zeta 电位绝对值呈先增加后减小的趋势($P<0.05$), 在均质时间为 12 min 时 Zeta 电位绝对值最大为 27.41 mV, 表明此时牛骨白汤中液滴表面电荷排斥力最大, 乳液最稳定, 因为此时远离蛋白质的等电点, 蛋白质之间产生的静电排斥力可以防止液滴聚集^[24-25]。

PDI 是衡量乳液稳定性的重要指标, PDI 值一般在 0~1 内, 当 PDI 值小于 0.3 时表示乳液的粒径分布较窄, 当 PDI 大于 0.5 时表示乳液的粒径分布较宽^[26], 通常情况下 PDI 值越小代表乳液越稳定^[27]。如图 4 所示, 随着均质时间增加, 牛骨白汤的 PDI 呈先减小后增加的趋势($P<0.05$)且不同均质时间的 $PDI<0.3$, 在均质 12 min 时 PDI 最小为 0.144 ($P<0.05$), 此时乳液最稳定, 与 Zeta 电位实验结果一致。

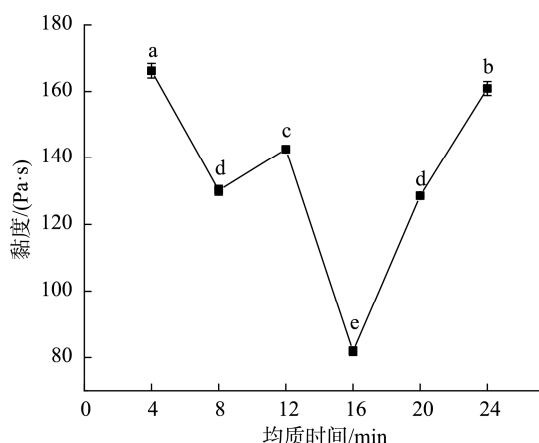


图 3 均质时间对牛骨白汤黏度的影响($n=3$)
Fig.3 Effects of homogenization time on viscosity of beef bone white soup ($n=3$)

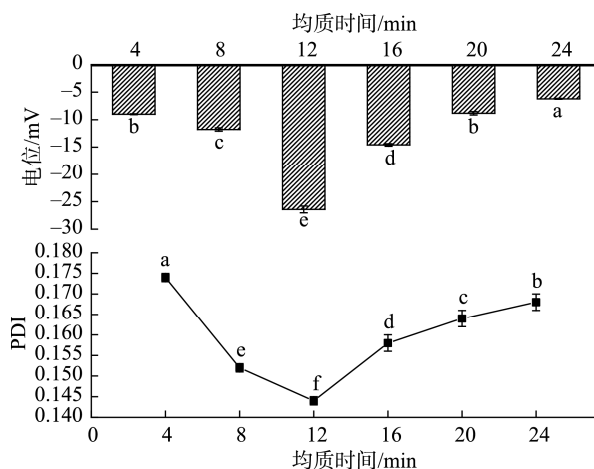
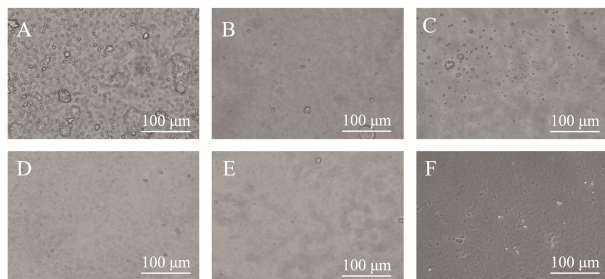


图 4 均质时间对牛骨白汤 PDI 和 Zeta 电位的影响($n=3$)
Fig.4 Effects of homogenization time on PDI and Zeta potential of beef bone white soup ($n=3$)

2.5 均质时间对牛骨白汤微观结构的影响

不同均质时间处理的牛骨白汤微观结构如图5所示,随着均质时间增加,液滴粒径逐渐减小,分布均匀稳定,聚集现象减少;当均质时间为12 min时,牛骨白汤液滴分布最均匀,乳液稳定性最佳,但均质时间继续增加液滴会重新聚集,粒径变大,这与粒径的结果一致,说明适当提高均质时间对牛骨白汤的稳定性在一定范围内有改善效果。



注: A、B、C、D、E、F 分别代表均质时间: 4、8、12、16、20、24 min。

图5 均质时间对牛骨白汤微观结构的影响

Fig.5 Effects of homogenization time on microstructure of beef bone white soup

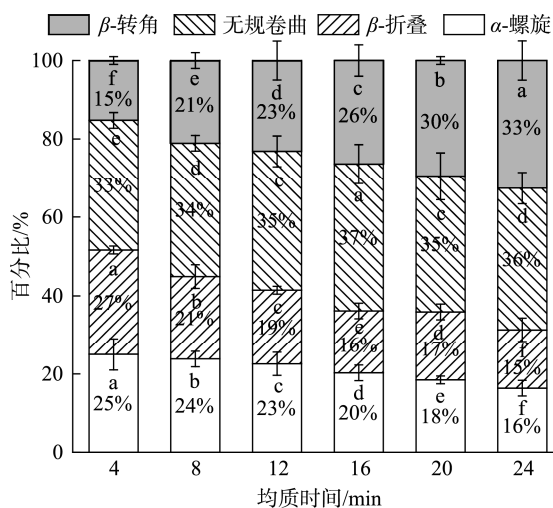
2.6 均质时间牛骨白汤拉曼光谱的影响

根据拉曼光谱的位移和强度能反映牛骨白汤中蛋白质二级结构的变化,1600~1700 cm^{-1} 是酰胺I带,通常用来反映牛骨白汤中 β -折叠(1600~1640 cm^{-1})、无规卷曲(1640~1650 cm^{-1})、 α -螺旋(1650~1660 cm^{-1})、 β -转角(1660~1700 cm^{-1})的变化。如图6所示,随着均质时间的增加, α -螺旋和 β -折叠等有序蛋白质二级结构分别减少了9%和12%,无规卷曲和 β -转角等无序蛋白质结构分别增加了3%和18%,这表明持续的高压均质使牛骨白汤中蛋白向无序结构转化,蛋白质间更易发生聚集,出现分层、破乳的现象,这与刁小琴等^[28]、王喜波等^[29]、郭增旺等^[30]的研究结果一致,但与吕博等^[31]、郭丽等^[32]的研究结果不同,后者的研究表明持续的高压均质会使蛋白质二级结构向有序结构转化, α -螺旋含量增加, β -转角和无规卷曲含量减少,这可能是在较低压力的高压均质条件下蛋白质结构变化不明显导致的。

3 结论

本研究探讨不同高压均质时间对牛骨白汤乳化特性、微观结构、蛋白质二级结构的影响,结果显示,当均质时间从4 min增加至12 min时,牛骨白汤的乳化稳定性、乳化活性、Zeta 电位绝对值均显著增加($P < 0.05$),粒径、黏度、PDI 显著减小($P < 0.05$),但当均质时间由12 min持续增加到24 min时,牛骨白汤的乳化稳定性、乳化活性、

Zeta 电位绝对值均显著减小($P < 0.05$),粒径、黏度、PDI 显著增加($P < 0.05$);这是因为高压均质属于高能乳化技术,在使用一定压力持续均质的情况下,不仅对牛骨蛋白结构产生破坏,还使蛋白内部的疏水基团暴露,二级结构由有序结构转变为无序结构,牛骨蛋白由分散状态变为聚集状态对牛骨白汤的乳化稳定性产生负面影响。综上所述,在其他工艺条件不变的情况下高压均质12 min牛骨白汤的乳化稳定性最佳。但本研究的牛骨白汤乳化体系较为复杂,不仅是胶原蛋白在体系中起乳化作用,还可能是淀粉与蛋白相互作用维持乳化稳定性;再加上均质工艺参数转化为工业参数还存在一定差距,需进行放大实验才能投入实际应用,因此在以后的研究中还需深入探讨。



注: 不同小写字母代表不同组别之间有显著性差异, $P < 0.05$ 。

图6 均质时间对牛骨白汤蛋白质二级结构的影响($n=3$)

Fig.6 Effects of homogenization time on protein secondary structure of beef bone white soup ($n=3$)

参考文献

- 赵永敢, 李超敏, 李岳桦. 高温高压法提取牛骨素工艺研究[J]. 中国调味品, 2015, 40(3): 70-72, 75.
ZHAO YG, LI CM, LI YH. Study on the technology of extracting bovine ostein by high temperature and high pressure [J]. China Cond, 2015, 40(3): 70-72, 75.
- 高浩源, 李苗云, 赵莉君, 等. 不同乳化剂对牛骨白汤稳定性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(2): 290-300.
GAO HY, LI MY, ZHAO LJ, et al. Effect of different emulsifiers on stability of beef bone white soup [J]. J Henan Agric Univ, 2022, 56(2): 290-300.
- 王君文, 韩旭, 李田甜, 等. 乳化剂稳定乳液的机理及应用研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 303-310.
WANG JW, HAN X, LI TT, et al. Research progress on the mechanism

- and application of emulsifiers to stabilize emulsions [J]. *Food Sci*, 2020, 41(21): 303–310.
- [4] 万勇斌. 牛骨高汤制备的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
WAN YB. Study on preparation of beef bone soup [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.
- [5] 黄凯. 低渗透油藏微乳液驱油体系配方优选及性能评价[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
HUANG K. Formulation optimization and performance evaluation of microemulsion flooding system in low permeability reservoirs [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [6] 綦玉曼, 寻崇荣, 车佳玲, 等. 薄荷油纳米乳液的制备及其性质分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(10): 29–35.
QI YM, XUN CR, CHE JL, *et al.* Preparation and property analysis of peppermint oil nano-emulsion [J]. *Food Sci*, 2019, 40(10): 29–35.
- [7] 周新, 唐世英, 杨贺祺, 等. 不溶性膳食纤维的提取、表征及改性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(3): 359–366, 372.
ZHOU X, TANG SY, YANG HQ, *et al.* Research progress in extraction, characterization and modification of insoluble dietary fiber [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(3): 359–366, 372.
- [8] 杜敬河. 甲壳素酶产生菌的筛选及酶法制备甲壳低聚糖的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
DU JH. Screening of chitinase producing bacteria and preparation of chitosan oligosaccharide by enzymatic method [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [9] 马永轩, 张名位, 魏振承, 等. 整蛋白/短肽复合型特膳营养乳的乳化稳定剂配方与均质工艺优化[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(7): 113–120.
MA YX, ZHANG MW, WEI ZC, *et al.* Emulsion stabilizer formulation and homogenization process optimization of whole protein/short peptide compound special dietary milk [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2016, 16(7): 113–120.
- [10] 齐凤敏, 王来忠, 张佳佳, 等. 不同均质方式对红花籽油 O/W 乳液乳化效果的影响[J]. *食品工业*, 2020, 41(12): 8–11.
QI FM, WANG LZ, ZHANG JJ, *et al.* Effects of different homogenization methods on the emulsification effect of safflower seed oil O/W emulsion [J]. *Food Ind*, 2020, 41(12): 8–11.
- [11] 刘竞男, 徐晔晔, 王一贺, 等. 高压均质对大豆分离蛋白乳液流变学特性和氧化稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(1): 80–85.
LIU JN, XU YY, WANG YH, *et al.* Effects of high pressure homogenization on rheological properties and oxidative stability of soybean protein isolate emulsion [J]. *Food Sci*, 2020, 41(1): 80–85.
- [12] 崔燕, 郭加艳, 宣晓婷, 等. 高压均质对 NFC 水蜜桃浊汁稳定性及品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 9: 1–15.
CUI Y, GUO JY, XUAN XT, *et al.* Effects of high pressure homogenization on the stability and quality of NFC peach turbid juice [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 9: 1–15.
- [13] SHARIFFA YN, TAN TB, UTHUMPORN U, *et al.* Producing a lycopene nanodispersion: Formulation development and the effects of high pressure homogenization [J]. *Food Res Int*, 2017, 101: 165–172.
- [14] 关淳博, 刘婷婷, 樊红秀, 等. 高压均质对脱脂油莎豆乳品质及其稳定性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 24: 1–9.
GUAN CB, LIU TT, FAN HX, *et al.* Effects of high pressure homogenization on the quality and stability of defatted sesame soymilk [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 24: 1–9.
- [15] 付婷婷, 木泰华. 高压均质处理对甘薯热变性蛋白 Alcalase 酶解肽乳特性影响研究[J]. *核农学报*, 2013, 27(1): 68–74.
FU TT, MU TH. Effect of high pressure homogenization treatment on the emulsification characteristics of Alcalase enzymolysis peptide of hot denatured protein of sweet potato [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2013, 27(1): 68–74.
- [16] XU YF, WANG C, FU X, *et al.* Effect of pH and ionic strength on the emulsifying properties of two octenylsuccinate starches in comparison with gum Arabic [J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 76: 96–102.
- [17] 孙贺, 于寒松, 范宏亮, 等. α 和 α' 亚基缺失对大豆分离蛋白乳特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(10): 261–268.
SUN H, YU HS, FAN HL, *et al.* Effects of α and α' subunit deletion on emulsifying properties of soy protein isolate [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2020, 36(10): 261–268.
- [18] 龚丽, 车振明. 响应面法优化橄榄油饮液均质条件的研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(24): 302–305.
GONG L, CHE ZM. Study on optimizing homogenization conditions of olive oil drinking liquid by response surface method [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2013, 34(24): 302–305.
- [19] 廖柯熹, 彭浩, 何国玺, 等. 页岩气测试平台波纹板分离器的分离性能研究[J]. *石油机械*, 2020, 48(2): 104–113, 119.
LIAO KX, PENG H, HE GX, *et al.* Study on separation performance of corrugated plate separator for shale gas test platform [J]. *China Petrol Mach*, 2020, 48(2): 104–113, 119.
- [20] 吴婉仪, 李璐, 解新安, 等. 基于响应面法构建虾青素纳米乳液[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(10): 204–210.
WU WY, LI L, XIE XAN, *et al.* Astaxanthin nanoemulsion was constructed based on response surface method [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(10): 204–210.
- [21] 钟俊楨, 刘成梅, 刘伟, 等. 动态高压微射流技术对乳清蛋白性质的影响[J]. *食品科学*, 2009, 30(17): 106–108.
ZHONG JZ, LIU CM, LIU W, *et al.* Effects of dynamic high pressure microfluidic technology on whey protein properties [J]. *Food Sci*, 2009, 30(17): 106–108.
- [22] JIAN OY, YAN M. Quantitative effect of droplet size and emulsion viscosity on the storage stability of asphalt emulsion [J]. *Con Build Mater*, 2022, 342(B): 127994.
- [23] NEGRO G, CARENZA LN, LAMURA A, *et al.* Rheology of active polar emulsions: From linear to unidirectional and univiscid flow, and intermittent viscosity [J]. *Soft Mat*, 2019, 15: 8251–8265.

- [24] HELMICK H, HARTANTO C, BHUNIA A, *et al.* Validation of bioinformatic modeling for the zeta potential of vicilin, legumin, and commercial pea protein isolate [J]. *Food Biophys*, 2021, 16: 474–483.
- [25] HAIDAR I, HARDING IH, BOWATER IC, *et al.* Physical characterisation of halofantrine encapsulated fat nano-emulsions [J]. *J Pharma Sci*, 2019, 108(6): 2153–2161.
- [26] PP A, SI B, US C. Response surface methodology for optimization of cinnamon essential oil nanoemulsion with improved stability and antifungal activity [J]. *Ultra Sonochem*, 2020, 60: 104604.
- [27] FANG S, ZHAO X, LIU Y, *et al.* Fabricating multilayer emulsions by using OSA starch and chitosan suitable for spray drying: Application in the encapsulation of β -carotene [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 93: 102–110.
- [28] 刁小琴, 关海宁, 李杨, 等. 高压均质对肌原纤维蛋白乳化特性及结构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(18): 107–112.
DIAO XQ, GUAN HN, LI Y, *et al.* Effects of high pressure homogenization on emulsifying properties and structure of myofibrin [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(18): 107–112.
- [29] 王喜波, 陈爽, 孙立娜, 等. 不同均质次数 SPI-维生素 D₃ 纳米粒子结构与性质研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 341–347.
WANG XB, CHEN S, SUN LN, *et al.* Study on the structure and properties of Spi-vitamin D₃ nanoparticles with different homogenization times [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2020, 51(12): 341–347.
- [30] 郭增旺, 郭亚男, 李柏良, 等. 高压均质条件下大豆蛋白热聚集体结构和乳化特性研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 351–358, 374.
GUO ZW, GUO YN, LI BL, *et al.* Study on the structure and emulsification properties of soybean protein thermal aggregates under high pressure homogenization [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2021, 52(4): 351–358, 374.
- [31] 吕博, 李明达, 张毅方, 等. 用拉曼光谱分析低压均质处理对大豆分离蛋白结构的影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(10): 58–63, 93.
LV B, LI MD, ZHANG YF, *et al.* Raman spectroscopy was used to analyze the effect of low pressure homogenization on the structure of soybean protein isolate [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2018, 34(10): 58–63, 93.
- [32] 郭丽, 王鹏, 赵东江, 等. 高压均质对大豆 β -伴球蛋白结构及功能特性的影响[J]. *食品科学*, 2011, 32(19): 83–87.
GUO L, WANG P, ZHAO DJ, *et al.* Effects of high pressure homogenization on structure and functional properties of soybean β -globulin [J]. *Food Sci*, 2011, 32(19): 83–87.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

作者简介

张洁, 主要研究方向为畜产品副产品的加工利用。

E-mail: 1434762580@qq.com

朱瑶迪, 副教授, 主要研究方向为畜产品加工与安全无损检测。

E-mail: zhu_yaodi@163.com