

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

张怡雪, 贾尚羲, 崔冰冰, 韩雪, 马武超, 王昱, 白艳红, 李可

Effects of Ultrasound Treatment of Chickpea Protein Isolate Emulsion on the Quality and Freeze-thaw Stability of Low-fat Pork Meat Batter

ZHANG Yixue, JIA Shangxi, CUI Bingbing, HAN Xue, MA Wuchao, WANG Yu, BAI Yanhong, and LI Ke

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050268>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

皮克林乳液冻融稳定性研究进展

Progress of Freeze-thaw Stability of Pickering Emulsion

食品工业科技. 2022, 43(2): 420-426 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120041>

鹰嘴豆分离蛋白对黄河鲤鱼鱼丸凝胶品质的影响

Effect of Chickpea Protein Isolate on the Gel Quality of Yellow River Carp (*Cyprinus carpio*) Fish Balls

食品工业科技. 2020, 41(22): 8-13 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050154>

冻融次数对藏羊肉品质特性的影响

Effect of Freezing-Thawing Times on Quality Characteristics of Tibetan Mutton

食品工业科技. 2022, 43(11): 342-349 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080348>

鹰嘴豆粉对面条品质及血糖生成指数的影响

Effect of Chickpea Flour on Noodle Quality and Glycemic Index

食品工业科技. 2022, 43(24): 363-368 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022020167>

反复冻融对泰州芋头淀粉品质特性的影响

Effect of Freezing and Thawing Treatment on the Quality Characteristics of Taizhou Taro Starch

食品工业科技. 2020, 41(13): 9-13,21 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.13.002>

鹰嘴豆分离蛋白对减盐辽宁庄河大骨鸡鸡肉丸凝胶品质的影响

Effect of Chickpea Protein Isolate on Gel Quality of Salt-reduced Liaoning Zhuanghe Big Bone Chicken Meatball

食品工业科技. 2025, 46(1): 138-143 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010210>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050268

ZHANG Yixue, JIA Shangxi, CUI Bingbing, et al. Effects of Ultrasound Treatment of Chickpea Protein Isolate Emulsion on the Quality and Freeze-thaw Stability of Low-fat Pork Meat Batter[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 111–121. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050268

· 研究与探讨 ·

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

张怡雪¹, 贾尚羲¹, 崔冰冰¹, 韩 雪², 马武超¹, 王 昱¹, 白艳红¹, 李 可^{1,*}

(1. 郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 冷链食品加工与安全控制教育部重点实验室,

肉品精准加工与质量安全控制校企研发中心, 河南郑州 450001;

2. 漯河市食品安全事务服务中心, 河南漯河 462300)

摘要:近年来乳化型肉制品颇受欢迎, 但在实际生产及贮藏过程中易出现乳化稳定性差、品质劣变等现象, 因此改善低脂乳化肉制品品质问题尤为关键。本研究通过超声波 (频率 20 kHz, 功率 450 W, 时间 12 min) 处理鹰嘴豆分离蛋白 (chickpea protein isolate, CPI) 作为乳化剂制备 O/W 乳化液代替部分脂肪制备低脂猪肉糜, 测定乳化稳定性、水分分布规律、流变学特性、微观结构及经冻融循环后肉糜的质构、脂肪氧化以及微观结构的变化, 探究超声波处理的 CPI 乳化液对低脂猪肉糜品质特性的影响。结果表明: 超声波处理 CPI 乳化液乳液的添加使得低脂猪肉糜的水分含量上升至 66.67%, 脂肪含量下降至 14.77%, 蒸煮损失也随着超声波处理乳化液的加入降低约 6%, 同时肉糜的蛋白质含量、pH、 L^* 值和 b^* 值得到显著提升 ($P<0.05$), 脂肪分布更加均匀。随着冻融次数的增加, 添加超声波处理的 CPI 乳液代替脂肪的肉糜的持水能力及质构特性显著增强 ($P<0.05$), 且结构更加光滑、均匀和致密, 5 次冻融循环后的 TBARS 值及羰基含量增加减缓, 与未处理组相比, 分别减小 21.6% 和 18.7%。综上, 超声波处理 CPI 乳液替代部分脂肪有效改善了猪肉糜的品质特性及冻融稳定性, 为进一步将超声波 CPI 乳液作为脂肪替代品生产低脂肉糜提供一定的理论参考。

关键词:超声波, 鹰嘴豆, 肉糜, 品质特性, 冻融稳定性

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)08-0111-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050268



本文网刊:

Effects of Ultrasound Treatment of Chickpea Protein Isolate Emulsion on the Quality and Freeze-thaw Stability of Low-fat Pork Meat Batter

ZHANG Yixue¹, JIA Shangxi¹, CUI Bingbing¹, HAN Xue², MA Wuchao¹, WANG Yu¹, BAI Yanhong¹, LI Ke^{1,*}

(1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Key Laboratory of Cold Chain Food Processing and Safety Control, Ministry of Education, Meat Targeted Processing and Quality and Safety

Control of the School R & D Center, Zhengzhou 450001, China;

2. Luohe Food Safety Affairs Service Center, Luohe 462300, China)

Abstract: In recent years, the emulsion-type meat products was gained considerable popularity. However, the production and storage processes could cause poor emulsification stability and quality deterioration. It was especially acritical need to enhance the quality of low-fat emulsion-type meat products. In this study, O/W emulsion was prepared by ultrasound (frequency 20 kHz, power 450 W, time 12 min) teated chickpea protein isolate (CPI) as an emulsifier to replace part of the fat in the preparation of low-fat pork batter, and the emulsion stability, moisture distribution pattern, rheological properties,

收稿日期: 2024-05-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32072243); 河南省留学人员科研择优资助项目 (2022038); 河南省市场监督管理局科技计划项目 (HNSCJGK202473)。

作者简介: 张怡雪 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工与质量安全控制, E-mail: ZhangYX2022@163.com。

* 通信作者: 李可 (1986-) (ORCID: 0000-0001-8572-1103), 男, 博士, 教授, 研究方向: 肉品加工与质量安全控制, E-mail: like@zzuli.edu.cn。

microstructure and texture, fat oxidation, and microstructure of minced pork were determined after freeze-thaw cycle. To investigate the effect of ultrasonically treated CPI emulsions on the quality characteristics of low-fat pork mince. The results showed that with the addition of ultrasound treated-CPI emulsion, the water content of the low-fat pork batter increased to 66.67%, while the fat content decreased to 14.77%. The boiling loss also decreased by about 6% with the addition of ultrasound-treated CPI. Meanwhile, the protein content, pH, L^* value, and b^* value of pork batter were significantly improved ($P<0.05$), and the fat distribution was more even. With an increase in freeze-thaw cycles following the addition of ultrasound treated CPI emulsion instead of fat replacement in pork batter preparation, its water-holding capacity and textural properties were significantly enhanced ($P<0.05$). In addition, the structure of pork batter became smoother, denser, and more uniform. Compared with the untreated group, the TBARS value and carbonyl content increased slowed down after five freeze-thaw cycles, reducing by 21.6% and 18.7%, respectively. In conclusion, ultrasound treatment of CPI emulsion as a fat substitute effectively improve the quality characteristics and freeze-thaw stability of pork mince, which provides some theoretical references for the further use of ultrasound CPI emulsion as a fat substitute in the production of low-fat minced pork.

Key words: ultrasound; chickpea; meat batter; quality characteristics; freeze-thaw stability

肉与肉制品富含优质蛋白质、维生素、矿物质,是人类饮食中重要的营养来源^[1],其中由蛋白质、脂肪颗粒、水等原料组分经斩拌、加热通过乳化形成的乳化型肉糜制品因其口感鲜嫩、营养成分高等优点深受消费者欢迎^[2]。脂肪在乳化肉糜制品的品质中起着重要作用,但是摄入过多脂肪会导致心血管疾病、糖尿病、肥胖的发生^[3]。因此,随着人们对健康的日益关注,消费者对脂肪含量较低的乳化肉糜制品的需求量越来越大。

蛋白质具有生物相容性、生物降解性、良好的两亲性等功能特性,能够在油水界面强烈吸附有利于乳化液的形成^[4],在食品中通常用作稳定 O/W 乳化液的乳化剂。鹰嘴豆分离蛋白(chickpea protein isolate, CPI)因其营养价值高、成本低,将其作为乳剂应用于水包油(O/W)乳化液体系已经成为当下的热门研究方向^[5]。采用水包油(O/W)作为混合原料替代乳化肉制品中的动物脂肪,可以提高油脂的结合力和改善肉蛋白基质的稳定性,从而保证肉质品质特性^[6]。Li 等^[7]利用改性豌豆蛋白乳化液替代乳化香肠中的脂肪,结果表明,在香肠中加入豌豆蛋白乳化液增强了香肠的质构特性以及微观形态的均匀性和致密性,并抑制了蒸煮损失和硫代巴比妥酸(TBARS)含量,提高了肉糜乳化体系稳定性。在乳化过程中,蛋白质结合在脂肪球表面,形成界面蛋白膜,将脂肪液滴嵌入凝胶基质中,防止水和油的流失^[8],并在热凝胶过程中抑制脂肪氧化或稳定液滴作用^[9]。因此,利用良好双亲性以及较强抗氧化能力的蛋白制备植物油预乳化液替乳化肉制品中部分脂肪成为改善乳化肉制品品质的新途径^[10]。

超声波作为一种绿色可持续发展的物理加工技术,通过空化效应、动态振动、剪切应力等作用改变蛋白质的功能特性,而且超声波制备的乳化液更加稳定^[11]。李可等^[12]研究表明低钠条件下应用超声波(20 kHz, 450 W)处理鸡肉肌原纤维蛋白乳液,其乳化特性及乳化稳定性均得到显著改善。本课题组前

期研究表明超声 450 W 处理 12 min 的 CPI 乳化液能够显著提高乳状液贮藏期间的物理稳定性,但是其在真实乳化肉糜中替代动物脂肪的效果未知,且考虑到在实际肉糜冷冻保存过程中不可避免地会发生反复的冻融循环,因冻融循环会加剧对肉糜的脂质氧化从而影响肉制品感官品质和营养价值^[13]。因此,本实验将 CPI 作为乳化剂制备超声波乳化液,将其(未超声,超声 12 min)以 25% 的比例替代猪脂肪加入到乳化肉糜中,研究超声波 CPI 乳化液替代部分脂肪对猪肉糜的理化、水分分布和流变特性的影响,评估冻融循环中添加超声波 CPI 乳化液代替部分脂肪的猪肉糜质构、水分含量、脂肪氧化以及微观结构的变化,以期超声波植物油乳化液替代部分脂肪在低脂乳化肉糜加工中应用及贮藏提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

卡布里鹰嘴豆 购于宁夏回族自治区固原市(蛋白质 14.1%,脂肪 2.7%,淀粉 48.1%,膳食纤维 17.6%);猪后腿肉和猪背膘 购于郑州某超市;金龙鱼大豆油 益海嘉里金龙鱼粮油食品有限公司;蛋白质羰基含量检测试剂盒 北京索莱宝生物有限公司;盐硫代巴比妥酸、硼氢化钠、硼酸盐、三氯甲烷、正己烷、三氯乙酸 上海麦克林生化科技股份有限公司;其他试剂均为分析纯。

SZ-22A 绞肉机 广州旭众食品机械有限公司;Ultra T25 高速匀浆机 德国 IKA 公司;SCIENTZ-IIID 超声波破碎仪 宁波新芝生物科技股份有限公司;PHS-3C 型 pH 计 上海雷磁仪器厂;AvantiJ-26S XPI 大容量高速冷冻离心机 美国 Beckman Coulter 公司;Lab-1-50 冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司;HR-1 型 Discovery 流变仪 美国 TA 仪器公司;TA-XT Plus 质构分析仪 英国 Stable Micro System 公司;HH-42 水浴锅 常州国华电器有限公司;BX53M 偏光显微镜 奥林巴斯株式会社;NM120 低场核磁共振成像分析仪 上海纽迈电

子科技有限公司;Regulus 8100 高分辨场发射扫描电子显微镜 日本日立公司。

1.2 实验方法

1.2.1 乳化液制备 参考李可等^[14]的方法提取 CPI。利用去离子水配制 10 mg/mL 的 CPI 溶液, 25 ℃ 磁力搅拌 45 min, 加入油相体积分数为 15% 的大豆油, 10000 r/min 转速下均质 2 min, 得到新鲜的 CPI 乳化液。将超声波探头浸入距乳化液上表面 1.5 cm 处进行超声(20 kHz, 450 W, 12 min, 18 ℃)处理, 工作模式: 工作 2 s, 间歇 4 s。处理后样品于 4 ℃ 下保存。

1.2.2 低脂猪肉糜制备 参考 Liu 等^[15]的方法, 并稍作修改。将冷冻的猪后腿肉置于 4 ℃ 解冻 12 h, 将 60 g 解冻后的猪后腿肉与 10 g 冰水混合, 使用绞肉机 1500 r/min 斩拌 30 s, 按表 1 所示混合加入食盐、复合磷酸盐、冰水, 1500 r/min 条件下斩拌 30 s, 之后加入猪背膘、CPI 乳化液及剩余冰水混合 1500 r/min 斩拌 30 s, 最后 3000 r/min 混合斩拌 1 min。将得到的肉糜转移到 50 mL 离心管中, 1500×g 离心 5 min 以消除气泡。直接添加脂肪的肉糜样品为对照组(T0), 未超声处理 CPI 乳化液代替 25% 脂肪的肉糜样品为(T1), 超声波处理 CPI 乳化液代替 25% 脂肪的肉糜样品为(T2)。各组样品均在 4 ℃ 下保存。

表 1 CPI 乳化液替代脂肪制作低脂肉糜的配方
Table 1 CPI emulsion replaces fat to produce a recipe for low fat pork meat batter

组成	T0	T1	T2
猪肉(g)	60	60	60
猪背膘(g)	20	15	15
CPI 乳化液(g)	0	33.3	33.3
冰水(g)	30	1.7	1.7
盐(g)	1.7	1.7	1.7
磷酸盐(g)	0.3	0.3	0.3
总重(g)	112	112	112

1.2.3 化学成分组成 按照国家标准测定猪肉糜的水分(GB 5009.3-2010《食品安全国家标准 食品中水分的测定》)、灰分(GB 5009.4-2010《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》)、蛋白质(GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》)和脂肪(GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》)含量。取 3 次平行样的平均值为样品含量数据。

1.2.4 乳化稳定性 根据仪淑敏等^[16]的方法并稍作修改。称取 W₁ 的肉糜置于 50 mL 离心管(W₀)中, 低速离心 3 min, 驱除肉糜中气泡后 80 ℃ 恒温水浴 30 min, 取出离心管, 倒置于已经称重的培养皿(W₂)上, 静置后称量离心管和肉糜总重量(W₃), 收集汁液, 将收集到的液体 103 ℃ 条件下加热 16 h, 测定加

热后总重量 W₄。每组 3 个重复, 计算水油流失百分比。

总汁液流失(TEF)=(W₀+W₁)-W₃ 式 (1)

总汁液流失率(%)= $\frac{TEF}{W_1} \times 100$ 式 (2)

水分流失率(%)= $\frac{W_0 + W_1 - W_3 - W_4}{W_1} \times 100$ 式 (3)

总水分流失率(%)= $\frac{W_4 - W_2}{TEF} \times 100$ 式 (4)

脂肪损失率(%)= $\frac{W_0 + W_1 + W_2 - W_3 - W_4}{W_1} \times 100$ 式 (5)

1.2.5 低场核磁测定 参考 Kang 等^[17]的方法并略加修改。称取 1.5 g 生肉糜放入离心管中蒸煮 30 min, 处理后的样品放入直径为 15 mm 的核磁管中进行核磁分析(22.8 MHz, 32 ℃, Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)序列)。通过仪器自带的分析软件进行反演得到 T₂ 值。

使用 MRI 系统测量肉糜中的氢质子密度成像(32 ℃, FOV Read 为 256 mm, 相位 192 mm, 平均值 4 个, TR 为 500 ms, TE 为 20 ms)。使用 Osiris 软件进行伪彩图像处理。

1.2.6 动态流变测定 参考 Kang 等^[18]的方法, 选择 40 mm 平板夹具, 使用甲基硅油密封防止水分蒸发, 30 ℃ 保温 5 min, 将样品以 2 ℃/min 的速率从 20 ℃ 连续加热至 80 ℃ 的最终温度。在加热过程中, 以 0.1 Hz 的固定频率连续振荡剪切试样, 测量升温过程中储能模量(G′)的变化。参数设置: 上下板间隙 1500 μm, 测量板间距 1000 μm。

1.2.7 微观结构分析 参考 Zhang 等^[19]的方法并略作修改。选择不同组别的样品, 将肉糜(1×1×0.5 cm³)包埋在 OCT 胶中, 使用冷冻切片机在 -20 ℃ 的条件下将冷冻样品切成约 10 μm 的薄片并放置于载玻片上, 用 75% 的乙醇连续脱洗(每次稀释 1 min), 伊红染料染色 1 min, 置于偏光显微镜下放大 50×观察脂肪分布。

参考 Rather 等^[20]的方法, 将冷冻干燥后的肉糜放在冷场扫描电镜专用样品盘中, 用液氮固定形态, 升华时间 10 min, 10 mA 下溅射 60 s, 在 3 kV 的加速电压下观察肉糜结构, 放大倍数 1000 倍。

1.2.8 冻融循环肉糜制备 将冷冻的猪后腿肉置于 4 ℃ 解冻 12 h。两种不同的配方由表 2 所示: 空白对照肉糜为对照组, 超声波乳化液代替 15% 猪脂肪重新配制的改性肉糜为超声组。同 1.2.2 方法制备肉糜。将得到的肉糜样品在 -20 ℃ 下完全冷冻 20 h, 4 ℃ 解冻, 直到核心温度达到 0~2 ℃ 之间, 构成一个单一冻融循环。然后在 0、1、3、5 次此类循环后评估肉糜在冻融条件下的稳定性, 并遵循前面概述的程序。

表 2 CPI 乳化液替代脂肪制作低脂肉糜探究冻融稳定性配方

Table 2 CPI emulsion replaces fat in low-fat ground meat to probe freeze-thaw stability formulations

组成	对照组	超声组
猪肉(g)	60	60
猪背膘(g)	20	15
CPI乳化液(g)	0	33.3
冰水(g)	30	1.7
盐(g)	1.7	1.7
磷酸盐(g)	0.3	0.3
总重(g)	112	112

1.2.9 蒸煮损失测定 将不同冻融循环周期的肉糜解冻,称取重量为 W_1 的生肉糜置于 50 mL 离心管(W_0),低速离心 3 min 以去除肉糜中较大气泡,加盖密封于 80 ℃ 恒温水浴 30 min,取出离心管倒置于培养皿上并擦干水分,静置后称量离心管和肉糜总重量(W_2),按如下公式(6)计算蒸煮损失率。

$$\text{蒸煮损失(\%)} = \frac{W_0 + W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad \text{式(6)}$$

1.2.10 质构特性 将不同冻融循环周期的肉糜煮熟并从离心管取出,用模具切成直径为 2.52 cm,高为 0.84 cm 的圆柱体,室温下使用 P/50 探头进行质构剖面分析(TPA)。测前速度、测试速度、测试后速度分别为 2.0、1.0、1.0 mm/s;压缩比 50%;触发类型自动;触发力 5 g 用于 TPA 测量。

1.2.11 色差分析 参考 Yang 等^[21]的方法并稍作修改。经不同冻融循环周期的肉糜煮熟后,将每个熟肉糜样品均匀切成直径 30 mm 的圆柱,用色差仪测量并记录其 L^* 、 a^* 和 b^* 的值。每个参数测量都经过三次独立的重复。

1.2.12 硫代巴比妥酸值(TBARS)测定 参考 Gao 等^[22]的方法并稍作修改。称取各组生肉糜 5 g 绞碎,加入 25 mL 7.5% 三氯乙酸均质后静置 30 min,取上清液 5 mL 加入相同体积的 2-硫代巴比妥酸溶液(0.02 mol/L),沸水浴加热 30 min,取出冷却至室温,3000 r/min 条件下离心 10 min,将得到的上清液中加入 5 mL 氯仿,静置分层,使用紫外分光光度计在 532 nm 和 600 nm 处测量吸光度。TBARS 值的计算公式如式(7)。

$$\text{TBARS(mg/kg)} = \frac{A_{532} - A_{600}}{155} \times \frac{1}{10} \times 72.6 \times 1000 \quad \text{式(7)}$$

式中, A_{532} 为 532 nm 处测得的吸光度数值, A_{600} 为 600 nm 处测得的吸光度数值。

1.2.13 羰基含量测定 采用羰基试剂盒进行检测。

1.2.14 肉饼微观结构分析 参考 Xiong 等^[23]的方法,将不同周期解冻的熟肉糜样品固定在专用样品盘中,置于-210 ℃ 过冷液氮溶液固定形态。升华时间

10 min, 10 mA 下溅射 60 s 后使用高分辨率冷场发射扫描电子显微镜观察肉糜的微观结构。

1.3 数据处理

各实验重复 3 次,结果表示为平均值±标准差。通过 SPSS 软件进行单因素方差分析, Duncan's 多重比较方法用于检验不同超声处理间的差异显著性($P<0.05$),采用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 肉糜化学成分分析

低脂猪肉糜的化学成分如表 3 所示,由表 3 可知,添加 CPI 替代部分脂肪后制备得到肉糜的化学成分和脂肪含量发生显著变化($P<0.05$)。与未添加 CPI 乳化液处理组 T0 相比, T1 和 T2 组的灰分及脂肪含量均有不同程度的降低,蛋白质及水分含量均得到显著提升。具体来说,添加 CPI 乳化液肉糜中蛋白质含量增加,添加经超声处理后的 CPI 乳化液可使制备肉糜中蛋白质含量增加至 16.70%,表明超声处理的 CPI 乳化液可作为好的非肉类蛋白来源提升肉糜的总蛋白质含量,也进一步表明其制备的肉糜的营养特性有所改善^[24]。同时肉糜中脂肪含量显著降低($P<0.05$),添加经超声处理 CPI 制备的肉糜的脂肪含量降低至 14.77%,表明超声波乳化液替代猪肉糜中的猪背膘具有良好的降脂的效果。Burcu 等^[25]应用乳清蛋白预乳液代替部分牛肉制备乳化肠,发现添加乳化液制备得到的乳化肠蛋白质含量增加,脂肪含量降低,与该研究结果一致。此外,对照组水分含量显著低于 T1、T2 组($P<0.05$),这可能是由于 CPI 乳液中的水分含量高,进一步影响肉糜的水分含量。

表 3 CPI 乳化液替代脂肪的低脂肉糜化学组成
Table 3 Chemical composition of low-fat meat batter meat with fat-substituted CPI emulsion substitution

组别	灰分(%)	脂肪(%)	蛋白质(%)	水分(%)
T0	2.83±0.34 ^a	15.21±0.92 ^a	16.45±0.23 ^b	65.54±0.65 ^b
T1	2.66±0.77 ^b	14.86±0.83 ^b	16.66±0.16 ^a	66.23±0.17 ^a
T2	2.69±0.63 ^b	14.77±0.24 ^b	16.70±0.14 ^a	66.67±0.24 ^a

注: 同列不同小写字母代表差异显著($P<0.05$), 表4同。

2.2 乳化稳定性

烹饪过程中固体猪脂肪(熔点 37 ℃)低于肉蛋白的糊化温度(>40 ℃)时会变成液体,以液体脂肪形式流出产品^[26],导致部分重量损失。肉糜的蒸煮损失一定程度上代表对汁液的保持能力,进一步导致产品经咀嚼时汁液释放情况差异^[27]。添加 CPI 乳化液代替脂肪制备肉糜的蒸煮损失结果由图 1 所示,由图可知,超声波处理 CPI 乳化液的添加显著影响肉糜的蒸煮特性($P<0.05$)。与对照组 T0 相比,添加超声波 CPI 乳化液的肉糜的蒸煮损失率、水分损失率和脂肪损失率显著降低($P<0.05$),其中蒸煮损失率降低约 6%。这主要是因为 CPI 和肌原纤维蛋白在加入大豆油后经超声波作用产生大量的水包油滴,油滴之

间的排斥力增强,有效抑制乳化液的聚结和相分离,从而减少脂肪流失。同时经超声波处理后的 CPI 乳化液具有更好的水结合能力,水分流失减少,从而改变油滴与蛋白质之间的表面相互作用^[28]。Liu 等^[29]研究表明乳化油可形成致密的吸附层,将肉糊的水-油混合物包裹在内部,防止乳化肉制品加工过程中水和油的损失。López 等^[30]将橄榄油水乳化液代替低盐和低脂牛肉饼中的猪背膘,结果表明其蒸煮损失显著降低。Kang 等^[26]利用预乳化红花油加磁场改性大豆 11S 球蛋白代替猪肉糜凝胶中的猪背膘以提高肉糜凝胶的蒸煮得率。

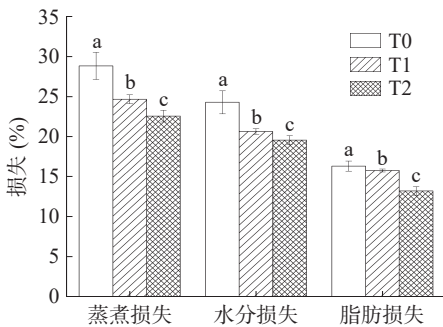


图 1 CPI 乳化液替代脂肪的低脂肉糜乳化稳定性
Fig.1 Emulsification stability of low-fat meat batter with fat-substituted CPI emulsion
注: 不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

2.3 低场核磁分析

肉糜在加热时会影响凝胶形成中水和脂肪分子的流动性,最终影响产品的品质^[31]。可通过 LF-NMR 检测肉制品中不同种类水分含量和流动性。图 2 和表 4 显示了 CPI 乳化液替代脂肪制备肉糜的弛豫时间和峰面积比例。经拟合后水分分布呈现

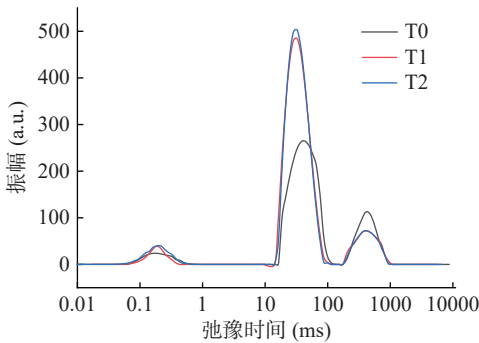


图 2 CPI 乳化液替代脂肪的低脂肉糜的 T_2 弛豫特性的影响
Fig.2 Effect of T_2 relaxation properties of low-fat meat batter with fat-substituted CPI emulsion

3 个峰,按弛豫时间由低到高依次为 T_{2b} (0~10 ms)、 T_{21} (10~100 ms)和 T_{22} (100~1000 ms), T_{2b} 为肉糜中与大分子结合紧密的结合水以及部分不宜流动水, T_{21} 代表不易流动水, T_{22} 为存在于肉糜凝胶结构外的自由水^[32]。由表 4 可知,与 T0 相比,T1、T2 组加热后肉糜的 T_{21} 朝着结合更加紧密的方向迁移,这可能是由于加热过程中添加 CPI 乳化液制备的肉糜形成的蛋白质网状结构更为紧密,从而影响弛豫时间变化。此外,T1、T2 组的峰面积比 pT_{21} 显著高于 T0($P<0.05$),表明 CPI 乳化液的加入使肉糜的含水量增加,这可能是由于超声波处理 CPI 乳化液的粒径减小,乳化液与肌原纤维蛋白相结合形成了更加致密的网状结构,内在空隙减小,增加对凝胶中的结合水和自由水的束缚力,因此肉糜的保水性显著增强^[33]。

CPI 乳化液替代脂肪制备肉糜的伪彩图如图 3 所示。红色代表高质子密度,表明样品中的水分含量高,蓝色代表低质子密度,表明样品中水分含量低^[34]。由图可知超声波 CPI 乳化液代替部分脂肪的肉糜的水分含量最高,表明超声波处理 CPI 乳化液在做到了减少脂肪含量的同时提高了保水能力,肉糜的保水性最好。

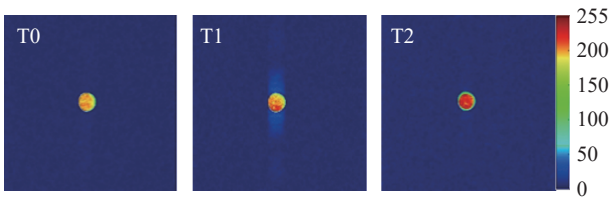


图 3 CPI 乳化液替代脂肪制作低脂肉糜的伪彩图
Fig.3 Pseudo-color chart for making low-fat meat batter with CPI emulsion as a substitute for fat

2.4 动态流变学特性分析

图 4 为 CPI 乳化液替代部分脂肪制备肉糜的储能模量(G')变化曲线。由图可知,所有样品处理组在 75 ℃ 以下都显示出相似的热流变曲线,但超声波处理 CPI 乳化液代替部分脂肪的肉糜曲线比其他处理组平坦。第一阶段随着温度从 44 ℃ 增加到 48 ℃, G' 有轻微的增加,这可能是由于蛋白质变性影响蛋白质-蛋白质相互作用从而使肉糜凝胶化^[18]。第二阶段由于蛋白的变性导致流动性的急剧变化和肉蛋白网络的破坏, G' 相比于第一阶段略有下降^[35]。各组肉糜的 G' 急剧增加的转变温度从 58 ℃ 开始,随后随温

表 4 CPI 乳化液替代脂肪的低脂肉糜的 T_2 弛豫时间和 T_2 弛豫峰面积百分数

Table 4 T_2 Relaxation time and percentage of T_2 relaxation peak area of low-fat meat batter with fat-substituted CPI emulsion

组别	T_2 弛豫时间			T_2 弛豫时间对应峰面积比例		
	T_{2b}	T_{21}	T_{22}	pT_{2b}	pT_{21}	pT_{22}
T0	0.79±0.03 ^a	96.25±1.99 ^a	871.61±42.13 ^a	8.77±0.21 ^b	62.044±1.74 ^c	27.791±1.22 ^a
T1	0.69±0.12 ^b	83.73±1.5 ^b	731.68±38.07 ^b	9.88±0.32 ^a	74.165±1.53 ^b	13.861±0.98 ^b
T2	0.57±0.06 ^c	83.71±1.23 ^c	731.68±38.05 ^b	9.93±0.11 ^a	77.452±1.32 ^a	11.223±0.68 ^c

度的升高而迅速增加,这是因为温度进一步升高导致蛋白质大量变性,蛋白质的空间结构被破坏,增加了蛋白质凝胶的交联度,大量变性蛋白质沉降聚集,形成结构稳固的凝胶网络;72 ℃ 时, G' 逐渐趋于稳定状态,即蛋白质凝胶网络结构最终形成,肉糜从松散的网状结构转变为更有序的凝胶结构。随着温度增加,超声 CPI 乳化液代替脂肪的肉糜的 G' 最大,表明超声 CPI 乳化液使油滴更加紧密,加热后肉糜凝胶结构最好。

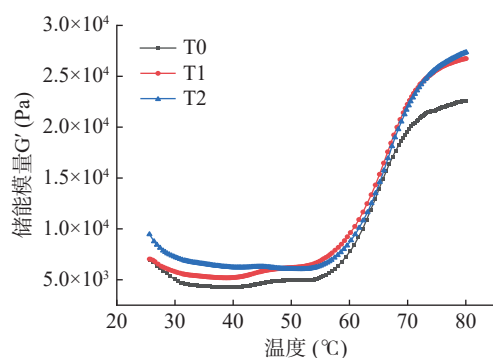


图4 鹰嘴豆乳化液替代脂肪的低脂肉糜的储能模量(G')的变化曲线

Fig.4 Curves of energy storage modulus (G') of low-fat meat batter with fat replacement by chickpea emulsion

2.5 微观结构分析

使用偏光显微镜观察低脂生肉糜脂肪分布图像如图5所示,由图可知,对照组 T0 的脂肪分布不均匀且脂肪体积最大,添加 CPI 乳化液代替部分脂肪后,肉糜的脂肪体积变小,致密性增强,油滴在网络状结构中的分布更加均匀,添加超声波处理 CPI 乳液制备肉糜 T2 的脂肪体积最小,分布最均匀。这表明超声波处理可提高油相对 CPI 的吸附,增加乳化液的油水界面膜,防止油滴絮凝和聚集,使脂肪分布均匀,肉糜加热后更加稳定^[36]。

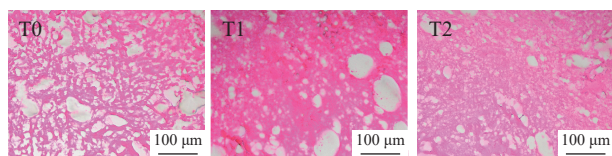


图5 CPI 乳化液替代脂肪的低脂生肉糜的光学显微镜图(50×)

Fig.5 Optical microscopy of low-fat meat batter with fat-substituted CPI emulsion (50×)

用冷场扫描电镜观察加热后的肉糜如图6所示,可明显看到熟肉凝胶出现大而不规则的空腔,这是由于加热导致脂肪球嵌入聚集的肉蛋白基质中,从而产生海绵状结构^[37]。与 T0 相比,经超声处理的 T2 结构则变得更加连续和紧凑。这表明超声波处理通过其产生超声空化效应和机械效应可减小孔径来提高与水的结合能力,CPI 可能与蛋白质基质形成刚性网络并交联,有助于捕获更多的脂肪滴并形成更均

匀的结构,从而降低了肉糜凝胶的蒸煮损失,获得更好的质地特性。Barretto 等^[38]研究表明在低脂肉糜中加入燕麦蛋白有助于增强肉糜的稳定性。

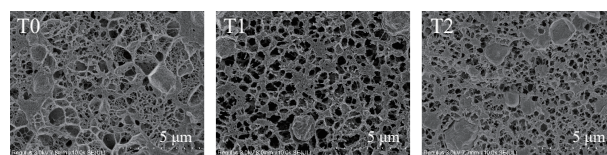


图6 CPI 乳化液替代脂肪的低脂熟肉糜的冷场电镜图(10000×)

Fig.6 Cold-field electron micrographs of low-fat meat batter with fat-substituted CPI emulsion (10000×)

2.6 蒸煮损失率

肉糜的蒸煮损失可反映肉糜保水性的强弱。如图7所示,对照组与添加超声波 CPI 乳化液肉糜的蒸煮损失率随着冻融次数的增加显著上升($P<0.05$)。对照组未经过冻融蒸煮损失为 18.93%,而经过一次冻融之后显著上升至 21.17%。经过 5 次冻融后猪肉糜的蒸煮损失相比未冻融的上升了 12.74%。未经过冻融的超声波 CPI 乳化液猪肉糜的蒸煮损失最小为 8.68%,而经过一次冻融之后即显著上升至 13.81%。经过 5 次冻融后猪肉糜的蒸煮损失相比未冻融的上升了 17.95%。由此可见添加 CPI 乳化液的肉糜要比对照组的保水性要好。随着冻融次数的增加缓慢地降低,肉糜持水能力变弱。

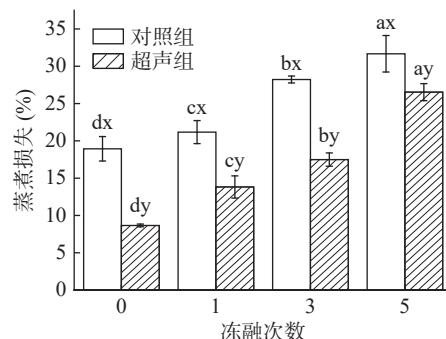


图7 冻融循环下添加超声波 CPI 乳化液的猪肉糜的蒸煮损失率的变化

Fig.7 Changes in cooking loss rate of minced pork spiked with ultrasonic CPI emulsion under freeze-thaw cycle

注: a~d 字母不同代表同组样品不同冻融循环次数存在的显著差异($P<0.05$), x~y 字母不同代表相同冻融循环不同组样品存在的显著差异($P<0.05$),表5~表6、图8~图9同。

未经冻融猪肉糜中的肌原纤维蛋白保持天然的构象,加热时蛋白与蛋白之间能更好的聚集,从而形成均匀致密的凝胶网络结构,肉糜的水分束缚在网状结构从而在蒸煮过程中不易流失,更好的保留猪肉糜中的水分^[39]。经过冻融之后的猪肉糜,由于蛋白存在冷冻和氧化变性,蛋白质结构发生聚集,导致形成的凝胶结构无序粗糙,持水能力下降^[40]。同时,冻融过程中脂肪氧化产生丙二醛,与肌原纤维蛋白相互作用形成复合物,使蛋白变性,降低蛋白的溶解性^[41],从而使加热后肉糜持水能力下降。与对照组相比,加入超

声波 CPI 乳化液代替脂肪的肉糜中蒸煮损失降低, 这主要是由于 CPI 具有许多亲水性基团, 且经超声处理后 CPI 乳液呈现出更均匀分布的液滴和聚集体^[42]。热稳定性及冻融稳定性得到增强, 致使其在蒸煮过程中不至于引起破乳造成汁液流失, 经过反复冻融并加热后, 添加超声波 CPI 乳化液的肉糜保水性能力更强^[43]。

2.7 质构特性分析

硬度和内聚性是乳化肉制品成形能力的重要评价标准, 与产品的最终质量密切相关。冻融循环下添加超声 CPI 乳化液代替部分脂肪的肉糜的硬度、咀嚼性、弹性、内聚性和回弹性参数的影响见表 5。随着冻融循环次数的增加, 猪肉糜的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性在冻融循环期间均显著降低($P<0.05$)。这是由于冰晶的生长打破了肌原纤维原有结构, 导致水向细胞外迁移, 从而使肉糜蒸煮损失增加, 硬度下降。此外细胞内的冰晶可能导致蛋白质变性, 从而导致内聚性下降。Xia 等^[44]研究表明冻融循环降低肉糜的凝胶性质和乳化能力, 并且随着冻融循环次数增多, 下降越明显, 本文研究结果与之一致。然而, 每组添加超声 CPI 乳化液的肉糜的质构特性明显高于空白对照组($P<0.05$), 对照组的质构特性下降最为明显, 这是由于冰晶形成导致结构蛋白的水解、肌原纤维和脂肪细胞膜组分的破坏, 随着冻融循环次数增加, 各组的特性逐渐下降。特别是在第 3 和第 5 次

冻融循环后, 对照组的硬度下降速度最快, 但添加超声 CPI 乳化液的下降速度显著减缓, 这主要是由于超声波处理有效减小乳液液滴大小, 使其更好与脂质结合, 使脂质之间形成了保护, 促进了蛋白质的交联, 获得了更高的水结合能力, 有助于使样品的网络结构更加紧凑。同时, 超声 CPI 乳化液代替脂肪的肉糜有更好的冻融稳定性, 这是因为加入超声 CPI 乳化液促进了蛋白质分子与填充油滴之间的相互吸引, 从而进一步增强了空间位点阻力。Zhang 等^[45]研究发现用水凝胶皮克林乳液代替猪肉背脂可以提高猪肉香肠的冻融稳定性。

2.8 色差分析

颜色直接影响消费者对肉糜产品的接受程度, L^* 、 a^* 、 b^* 是肉糜产品颜色的重要参考指标, 较高的 L^* 值对应于更好的新鲜度。冻融循环可引起肉类中蛋白质和脂质的水解和氧化, 改变其颜色和外观^[46]。添加超声 CPI 乳化液代替部分脂肪的肉糜在冻融循环 0、1、3、5 次后 L^* 、 a^* 和 b^* 值的变化如表 6 所示。经过不同冻融循环周期后, 对照组和超声组的 L^* 和 b^* 值下降, a^* 上升, 这是因为反复冷冻和解冻循环使得肉糜产品中的水分扩散到表面^[47]。然而所有超声组的 L^* 值均大于对照组, 这表明加入超声波 CPI 乳化液使凝胶内部产生的较小冰晶对肉糜的破坏相对较弱, 延迟了肌原纤维蛋白氧化, 从而为凝胶表面产生了更高的光反射, 导致肉糜的值更高。然而

表 5 冻融循环下添加超声波 CPI 乳化液的猪肉糜的质构特性变化

质构参数		冻融次数			
		0	1	3	5
硬度(g)	对照组	5811.30±157.80 ^{ay}	3967.18±224.74 ^{by}	1822.81±102.94 ^{cy}	1483.54±164.57 ^{dy}
	超声组	6771.90±614.53 ^{ax}	4723.95±319.65 ^{bx}	2236.76±184.34 ^{cx}	2016.65±72.31 ^{dx}
咀嚼性(g)	对照组	3734.64±137.6 ^{ay}	2165.30±135.66 ^{by}	973.83±72.724 ^{cy}	775.249±77.57 ^{dy}
	超声组	4652.11±508.9 ^{ax}	2822.23±55.06 ^{bx}	1421.55±150.056 ^{cx}	1210.48±70.47 ^{dx}
弹性	对照组	0.85±0.02 ^{ay}	0.84±0.01 ^{ay}	0.82±0.01 ^{bx}	0.81±0.02 ^{by}
	超声组	0.92±0.02 ^{ax}	0.86±0.02 ^{bx}	0.83±0.02 ^{bx}	0.85±0.02 ^{bx}
内聚性	对照组	0.75±0.01 ^{ay}	0.71±0.01 ^{by}	0.68±0.02 ^{cy}	0.70±0.01 ^{cx}
	超声组	0.77±0.01 ^{ax}	0.73±0.02 ^{bx}	0.71±0.01 ^{cx}	0.70±0.02 ^{cx}
回复性	对照组	0.35±0.01 ^{ay}	0.35±0.01 ^{ax}	0.33±0.01 ^{ax}	0.32±0.02 ^{ax}
	超声组	0.39±0.01 ^{ax}	0.35±0.01 ^{bx}	0.34±0.02 ^{bx}	0.32±0.01 ^{cx}

表 6 冻融循环下添加超声 CPI 乳化液的猪肉糜色泽变化

色泽参数		冻融次数			
		0	1	3	5
L^*	对照组	74.15±0.54 ^{ay}	73.06±0.34 ^{ay}	72.16±0.38 ^{by}	67.78±0.76 ^{cy}
	超声组	76.99±0.22 ^{ax}	74.80±0.51 ^{bx}	73.94±0.79 ^{cx}	71.62±0.52 ^{dx}
a^*	对照组	7.84±0.66 ^{dx}	8.84±0.42 ^{bx}	9.84±0.57 ^{bx}	10.84±0.83 ^{ax}
	超声组	7.49±0.25 ^{cy}	7.24±0.29 ^{cy}	7.79±0.84 ^{by}	8.78±0.31 ^{ay}
b^*	对照组	11.57±0.45 ^{ay}	11.95±0.31 ^{ay}	11.42±0.52 ^{ay}	10.91±0.63 ^{by}
	超声组	12.51±0.38 ^{ax}	12.24±0.40 ^{bx}	12.33±0.09 ^{bx}	11.67±0.23 ^{cx}

随着冻融循环次数增加,各组处理样品的 L^* 值呈降低趋势,说明超声波 CPI 乳化液加入在冻藏前期对肉糜的色泽具有一定的保护的作用,但是随着冻融次数的增加肉糜的色泽仍会发生显著的劣变。Pan 等^[48]研究了冻融周期对速冻猪肉肉饼质量的影响,结果表明,当发生色泽变化时,肉糜的硬度和持水性也会受到相应的影响,本研究结果与之一致。

2.9 TBARS 分析

TBARS 值用于确定脂肪氧化程度,是检测肉类新鲜度的重要生物标志物^[49]。由图 8 可知,不同组肉糜样品在冻融周期内的 TBARS 值随着冻融循环次数的增加而迅速增加。在 5 次冻融循环后,空白对照组 TBARS 值从 0.25 mg/kg 升高到了 0.48 mg/kg,超声组从 0.12 mg/kg 升高到了 0.30 mg/kg ($P < 0.05$)。随着冻融循环次数的增加,猪肉肉糜中冰晶的形成和再结晶可能会不可逆转地破坏肌肉细胞和组织的结构。因此,肌肉细胞完整性破坏引起的促氧化剂的释放加速了脂质氧化反应,诱导丙二醛的形成^[50]。此外,冰晶对细胞膜的损伤导致促氧化剂的释放,这也增加了脂质氧化的程度。

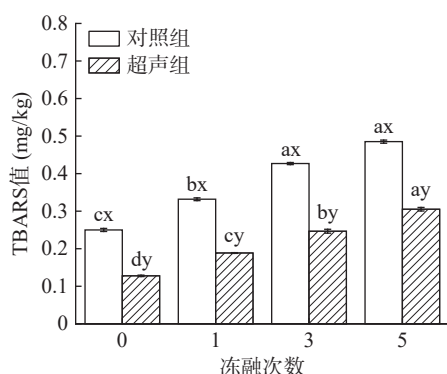


图 8 冻融循环下添加超声波 CPI 乳化液的猪肉糜的 TBARS 的变化

Fig.8 Changes in TBARS of pork meat batter with ultrasound CPI emulsion under freeze-thaw cycles

冻结过程中冰的生长具有各向异性和不同的生长速率,从而导致肌肉结构的不规则损伤。CPI 乳化液与肉糜结合通过自由基清除或金属螯合来防止水包油乳化液中脂质氧化使减少肌肉结构损伤^[51]。肌肉结构损伤的减少可能会减少氧化物质的释放,抑制因温度波动而引起的脂质氧化程度的加剧,使得肉糜具有更好的脂质特性。其次 CPI 乳化液中使用的大豆油中亚硝酸盐、磷酸盐或抗坏血酸等物质的固化混合物成分的存在可以作为抗氧化剂,加之超声空化作用通过减小 CPI 乳化液粒径增强 CPI 乳化液与油相结合,减小肉糜中脂质氧化速率,因此添加超声波 CPI 乳化液的肉糜通过 5 次冻融循环抗脂肪氧化能力较为突出。

2.10 羰基含量分析

蛋白质中多种氨基酸侧链基团容易转化为肉蛋

白的羰基衍生物。羰基含量越高表明氧化程度越大。乳化液较高的表面积有利于增加活性,最大限度地减少生物活性成分的损失和氧化^[52],与脂质氧化程度密切相关。通过图 9 可知,肉糜的羰基值随着冻融次数的增加,两组肉糜的羰基含量逐渐增大,但添加超声处理 CPI 乳化液的羰基值显著低于对照组 ($P < 0.05$)。与动物脂肪相比,植物油含有更多的不饱和脂肪酸,更易发生氧化,氧化程度过高则会导致肉制品一系列安全问题^[53]。但是超声波 CPI 乳化液使水相仍能有效将油相包埋在内,吸附在油水界面的颗粒通过增强空间排斥力形成稳定的抗氧化屏障,有效解决植物脂肪易氧化的问题^[54]。加入超声波 CPI 乳化液代替动物脂肪的肉糜可以有效地减少肉制品中的脂肪氧化。

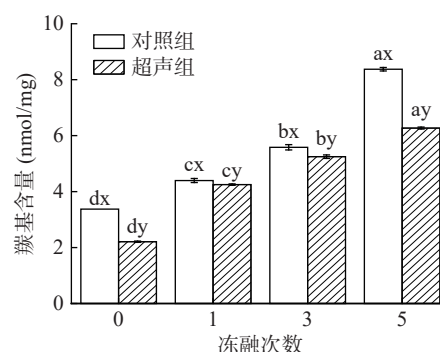


图 9 冻融循环下添加超声波 CPI 乳化液的猪肉糜的羰基变化

Fig.9 Carbonyl changes in minced pork spiked with ultrasound CPI emulsion under freeze-thaw cycle

2.11 微观结构分析

肉糜中脂肪颗粒的形状、大小以及蛋白质聚集体的分布状态可通过冷场扫描电镜显微镜以图像形式展示,从而对微观结构进行分析。图 10 为冻融循环下添加超声波 CPI 乳化液的猪肉糜的微观变化,可明显观察到对照组中有大量空腔形成,产生了海绵状外观的结构,具有熟凝胶/乳状体系的特征^[45]。超声波 CPI 乳化液代替部分脂肪的肉糜基于连续蛋白质基质和脂肪的特性的影响,基质变得杂乱无章,部分海绵状外观减少,并且由于凝胶网络结构空腔中的间隙填充效应,肉糜微观形态呈现出更连续和致密的结构,分布均匀且细腻^[55]。随着冻融次数的增加,肉糜的结构变得粗糙,凹凸不平,出现了大小不一的孔洞孔径变大,并且出现大分子聚集的现象,相比较于对照组,超声组的肉糜微观结构逐渐变得光滑、均匀和致密。这是由于超声波 CPI 乳化液的粒径较小,与动物脂肪相比分布更均匀,更容易融入蛋白质中,其与肉糜混合进一步促进了油相的分散,较小的脂肪滴能够更均匀地包埋在蛋白质基质中。并且具有大量小空泡的致密凝胶网络结构可以限制水分流失并改善凝胶性能,从而超声波 CPI 乳化液的肉糜的保水性要好。通过微观结构的观察进一步证明超声波处

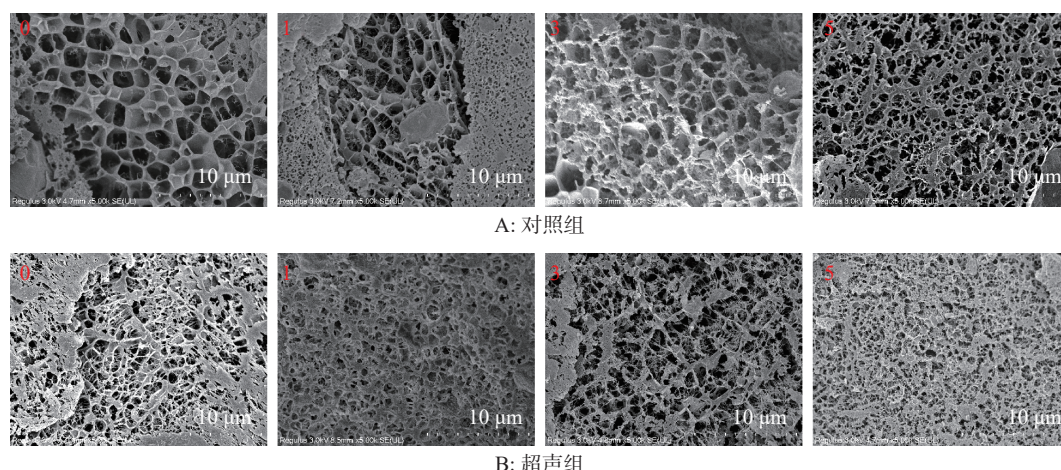


图 10 冻融循环下添加超声波 CPI 乳化液的猪肉糜的微观变化

Fig.10 Microscopic changes in pork meat batter with ultrasound CPI emulsion under freeze-thaw cycle

注: 0、1、3、5 代表冻融次数, A 为对照组, B 为超声组, 放大倍数为 5000×。

理使 CPI 乳化液的冻融稳定性增加, 相比于对照组, 添加超声波 CPI 乳化液的肉糜的冻融稳定性更好。

3 结论

本研究分析了超声波处理 CPI 乳化液代替部分脂肪对低脂猪肉糜品质及经过冻融循环后其品质及脂肪氧化性质的影响。结果表明超声波处理的 CPI 乳化液替代脂肪制备的肉糜的脂肪含量显著降低($P<0.05$), 蛋白质含量及水分含量增加; 肉糜的保水保油性得到显著提升; 扫描电镜结果显示微观结构更为细腻均匀, 说明超声波处理 CPI 乳化液的加入有效改善了肉糜的品质特性。添加超声波 CPI 乳化液的肉糜经过反复冻融后仍保有较好的持水性; 有效减缓 TBARS 值及羰基含量的增加, 延缓肉糜的脂肪氧化及蛋白氧化; 硬度、咀嚼性、内聚性等质构特性的降低速度显著减缓, 对肉糜的质构特性和白度有较好的保护作用。以上结果说明超声波处理的 CPI 乳化液代替部分脂肪有效改善了低脂猪肉糜的品质, 可有效应用于低脂肉糜的生产, 为减脂乳化肉糜提供良好的应用前景。

© The Author(s) 2025. 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] GODFRAY H C J, AVEYARD P, GARNETT T, et al. Meat consumption, health, and the environment[J]. *Science*, 2018, 361(6399): eaam5324.
- [2] BADAR I H, LIU H, CHEN Q, et al. Future trends of processed meat products concerning perceived healthiness: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(5): 4739–4778.
- [3] SCHWINGSHACKL L, HESEKER H, KIESSWETTER E, et al. Dietary fat and fatty foods in the prevention of non-communicable diseases: A review of the evidence[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 128: 173–184.
- [4] GRIGORIEV D O, MILLER R. Mono- and multilayer cov-

ered drops as carriers[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2009, 14(1): 48–59.

[5] XU W, MCCIELEMENTS D J, XU Z, et al. Optimization of emulsion properties of chickpea protein and its application in food[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2024.

[6] PIETRASIK Z, WANG H, JANZ J. Effect of canola oil emulsion injection on processing characteristics and consumer acceptability of three muscles from mature beef[J]. *Meat Science*, 2013, 93(2): 322–328.

[7] LI C, XIE W, ZHANG X, et al. Pickering emulsion stabilized by modified pea protein-chitosan composite particles as a new fat substitute improves the quality of pork sausages[J]. *Meat Science*, 2023, 197: 109086.

[8] HERRERO A M, RUIZ-CAPILLAS C. Novel lipid materials based on gelling procedures as fat analogues in the development of healthier meat products[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 39: 1–6.

[9] LEE E J, HONG G P. Effect of the double heating cycle on the thermal gelling properties of vicilin fractions from soy, mung bean, red bean and their mixture with soy glycinin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 137: 108370.

[10] ALEJANDRE M, POYATO C, ANSORENA D, et al. Linseed oil gelled emulsion: A successful fat replacer in dry fermented sausages[J]. *Meat Science*, 2016, 121: 107–113.

[11] DE S P C, DE F F G, HONORIO A R, et al. Functional emulsion gels as pork back fat replacers in Bologna sausage[J]. *Food Structure*, 2019, 20: 100105.

[12] 李可, 王艳秋, 张怡雪, 等. 低钠条件下超声处理对鸡肉肌原纤维蛋白乳液稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(9): 58–65.

[13] LI K, WANG Y Q, ZHANG Y X, et al. Effect of ultrasound treatment on the emulsion stability of chicken myofibrillar protein under low NaCl condition[J]. *Food Science*, 2023, 44(9): 58–65.

[14] 程天赋, 俞龙浩, 蒋奕, 等. 基于低场核磁共振探究解冻过程中肌原纤维水对鸡肉食用品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(9): 16–22. [CHENG T F, YU L H, JIANG Y, et al. Effect of myofibrillar water on chicken quality during thawing as studied by low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Food Science*, 2019, 40(9): 16–22.]

[15] 李可, 田金凤, 郑思雨, 等. 等离子体对鹰嘴豆分离蛋白溶解性和乳化特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 31–39.

- [LI K, TIAN J F, ZHENG S Y, et al. Effects of plasma on solubility and emulsifying properties of chickpea protein isolates[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(4): 31–39.]
- [15] LIU S, LU J, ZHANG J, et al. Emulsion gels prepared with chia mucilage and olive oil as a new animal fat replacer in beef patties[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(11): e16972.
- [16] 仪淑敏, 李强, 张畅, 等. 油脂对鱼糜及畜禽肉糜制品的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(11): 359–367. [YI S M, LI Q, ZHANG C, et al. The effect of oil on surimi and minced meat products of livestock and poultry[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(11): 359–367.]
- [17] KANG Z L, ZHANG X H, LI K, et al. Effects of sodium bicarbonate on the gel properties, water distribution and mobility of low-salt pork batters[J]. *LWT*, 2021, 139: 110567.
- [18] KANG Z L, ZOU X L, MENG L, et al. Effects of NaCl and soy protein isolate on the physicochemical, water distribution, and mobility in frankfurters[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 56(12): 6572–6579.
- [19] ZHANG M, HAILI N, CHEN Q, et al. Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles[J]. *Meat Science*, 2018, 136: 1–8.
- [20] RATHER S A, MASOODI F, AKHTER R, et al. Application of guar–xanthan gum mixture as a partial fat replacer in meat emulsions[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53: 2876–2886.
- [21] YANG Z, YE G, YANG D, et al. Observation on the ice crystal formation process of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) and the effect of multiple cryoprotectants pre-soaking treatments on frozen quality[J]. *Cryobiology*, 2023, 113: 104580.
- [22] GAO Y, QIU Y, NAN H, et al. Ultra-high pressure-assisted preparation of cowhide gelatin as a promising fat substitute: Improve the nutrition ratio and antioxidant capacity of beef patties[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111260.
- [23] XIONG G, HAN M, KANG Z, et al. Evaluation of protein structural changes and water mobility in chicken liver paste batters prepared with plant oil substituting pork back-fat combined with pre-emulsification[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 388–395.
- [24] PINTADO T, MUÑOZ-GONZÁLEZ I, SALVADOR, et al. Phenolic compounds in emulsion gel-based delivery systems applied as animal fat replacers in frankfurters: Physico-chemical, structural and microbiological approach[J]. *Food Chemistry*, 2021, 340: 128095.
- [25] BURCU O K, MUGE U O, MELTEM S, et al. Chemical, technological, instrumental, microstructural, oxidative and sensory properties of emulsified sausages formulated with microparticulated whey protein to substitute animal fat[J]. *Meat Science*, 2022, 184: 108672.
- [26] KANG Z L, XIE J J, LI Y P, et al. Effects of pre-emulsified safflower oil with magnetic field modified soy 11S globulin on the gel, rheological, and sensory properties of reduced-animal fat pork batter[J]. *Meat Science*, 2023, 198: 109087.
- [27] ZHUANG X, HAN M, KANG Z L, et al. Effects of the sugarcane dietary fiber and pre-emulsified sesame oil on low-fat meat batter physicochemical property, texture, and microstructure[J]. *Meat Science*, 2016, 113: 107–115.
- [28] 李恩泽, 吴静雯, 贾心悦, 等. 油凝胶替代脂肪的研究及在植物肉饼中的应用[J]. *食品科学*, 2024, 45(8): 45–54. [LI E Z, WU J W, JIA X Y, et al. Study of oleogel as fat substitute and its application in plant-based meatloaf[J]. *Food Science*, 2024, 45(8): 45–54.]
- [29] LIU X, JI L, ZHANG T, et al. Effects of pre-emulsification by three food-grade emulsifiers on the properties of emulsified surimi sausage[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 247: 30–37.
- [30] LÓPEZ I, COFRADES S, YAKAN A, et al. Frozen storage characteristics of low-salt and low-fat beef patties as affected by Wakame addition and replacing pork backfat with olive oil-in-water emulsion[J]. *Food Research International*, 2010, 43(5): 1244–1254.
- [31] SUN J, LI X, XU X, et al. Influence of various levels of flaxseed gum addition on the water – holding capacities of heat-induced porcine myofibrillar protein[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(3): C472–C478.
- [32] 望运滔, 王莎莎, 秦春艳, 等. 壳寡糖对高温条件下鸡胸肉糜凝胶品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(22): 49–54. [WANG Y T, WANG S S, QIN C Y, et al. Effect of chitooligosaccharide on the gel quality of ground chicken breast under high temperature conditions[J]. *Food Science*, 2023, 44(22): 49–54.]
- [33] 赵颖颖, 邹玉峰, 王鹏, 等. 预乳化液超声处理对低脂法兰克福香肠品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(13): 2634–2642. [ZHAO Y Y, ZOU Y F, WANG P, et al. Effect of pre-emulsified emulsion treated with ultrasound on qualities of low-fat frankfurter-style sausages[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(13): 2634–2642.]
- [34] 梁瑞, 林松毅, 刁华玉, 等. 南美白对虾烤制过程中水分迁移及品质变化规律[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(11): 204–213. [LIANG R, LIN S Y, DIAO H Y, et al. Moisture migration and quality changes of *Penaeus vannamei* during baking[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(11): 204–213.]
- [35] TOMBERG E. Effects of heat on meat proteins—Implications on structure and quality of meat products[J]. *Meat Science*, 2005, 70(3): 493–508.
- [36] MA Y, YE F, CHEN J, et al. The microstructure and gel properties of linseed oil and soy protein isolate based-oleogel constructed with highland barley β -glucan and its application in luncheon meat[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 140: 108666.
- [37] WANG Y, WANG W, JIA H, et al. Using cellulose nanofibers and its palm oil pickering emulsion as fat substitutes in emulsified sausage[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(6): 1740–1747.
- [38] BARRETTO A C D S, PACHECO M T B, POLLONIO M A R. Effect of the addition of wheat fiber and partial pork back fat on the chemical composition, texture and sensory property of low-fat bologna sausage containing inulin and oat fiber[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 35: 100–107.
- [39] 吴兴阁, 曾茂茂, 何志勇, 等. 冻融对肌原纤维蛋白溶出猪肉糜体系蛋白质变性及品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(19): 101–110. [WU X G, ZENG M M, HE Z Y, et al. Effect of freeze-thaw cycles on myofibril dissolution system protein denaturation and quality of minced pork[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(19): 101–110.]
- [40] SAEED S, FAWTHROP S A, HOWELL N K. Electron spin resonance (ESR) study on free radical transfer in fish lipid–protein interaction[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1999, 79(13): 1809–1816.
- [41] 余小领. 冷冻和解冻工艺对猪肉保水性和组织结构的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007. [YU X L. Study on effects

of freezing and thawing on water holding capacity and structure of pork[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.]

[42] SHA L, KOOSIS A O, WANG Q, et al. Interfacial dilatational and emulsifying properties of ultrasound-treated pea protein[J]. *Food Chemistry*, 2021, 350: 129271.

[43] KIM Y J, LEE M H, KIM S M, et al. Improvement of structural, physicochemical, and rheological properties of porcine myofibrillar proteins by high-intensity ultrasound treatment for application as Pickering stabilizers[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 92: 106263.

[44] XIA X, KONG B, XIONG Y, et al. Decreased gelling and emulsifying properties of myofibrillar protein from repeatedly frozen-thawed porcine longissimus muscle are due to protein denaturation and susceptibility to aggregation[J]. *Meat Science*, 2010, 85(3): 481–486.

[45] ZHANG Z, WANG H, SHU Y, et al. Improving the freeze-thaw stability of pork sausage with oleogel-in-water Pickering emulsion used for pork backfat substitution[J]. *LWT*, 2023, 180: 114698.

[46] KING D, SHACKELFORD S, KUEHN L, et al. Contribution of genetic influences to animal-to-animal variation in myoglobin content and beef lean color stability[J]. *Journal of Animal Science*, 2010, 88(3): 1160–1167.

[47] DING J, ZHAO X, LI X, et al. Effects of different recovered sarcoplasmic proteins on the gel performance, water distribution and network structure of silver carp surimi[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 131: 107835.

[48] PAN N, DONG C, DU X, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the quality of quick-frozen pork patty with different fat content by consumer assessment and instrument-based detection[J]. *Meat*

Science, 2021, 172: 108313.

[49] XIE Z, WANG X, YU S, et al. Antioxidant and functional properties of cowhide collagen peptides[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(5): 1802–1818.

[50] LEYGONIE C, BRITZ T J, HOFFMAN L C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat[J]. *Meat Science*, 2012, 91(2): 93–98.

[51] JIMÉNEZ-COLMENERO F. Healthier lipid formulation approaches in meat-based functional foods. Technological options for replacement of meat fats by non-meat fats[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2007, 18(11): 567–578.

[52] DONSI F, ANNUNZIATA M, VINCENSI M, et al. Design of nanoemulsion-based delivery systems of natural antimicrobials: effect of the emulsifier[J]. *Journal of Biotechnology*, 2012, 159(4): 342–350.

[53] 刘树萍, 彭秀文, 张佳美, 等. 大豆分离蛋白与茶多酚稳定的高内相 Pickering 乳液替代脂肪对肉丸品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(6): 59–66. [LIU S P, PENG X W, ZHANG J M, et al. Effect of soybean protein isolate and tea polyphenol stabilized high interior phase pickering emulsion replacing fat on meatball quality[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(6): 59–66.]

[54] CICHOSKI A J, SILVA M S, LEÃES Y S V, et al. Ultrasound: A promising technology to improve the technological quality of meat emulsions[J]. *Meat Science*, 2019, 148: 150–155.

[55] JIMÉNEZ-COLMENERO F, COFRADES S, LÓPEZ-LÓPEZ I, et al. Technological and sensory characteristics of reduced/low-fat, low-salt frankfurters as affected by the addition of konjac and seaweed[J]. *Meat Science*, 2010, 84(3): 356–363.