

罗来庆, 高恩奎, 周干, 等. 超声辅助处理对滑炒鸡丁品质与蛋白氧化的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 141-148. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040255

LUO Laiqing, GAO Enkui, ZHOU Gan, et al. Effects of Ultrasonic-assisted Treatment on the Quality and Protein Oxidation of Stir-fried Chicken Dices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 141-148. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040255

· 研究与探讨 ·

超声辅助处理对滑炒鸡丁品质与蛋白氧化的影响

罗来庆¹, 高恩奎², 周干¹, 陆雨¹, 王良云^{3,*}
(1. 江苏食品药品职业技术学院, 江苏淮安 223003;
2. 江苏省宿豫中等专业学校, 江苏宿迁 223800;
3. 四川旅游学院, 四川成都 610100)

摘要:为探究超声辅助腌制对滑炒鸡丁品质特性及蛋白氧化的影响机制, 本研究在超声功率 120 W、频率 40 kHz 条件下, 采用不同超声辅助时间 (0、30、60、90、120、150 min) 腌制鸡丁, 系统分析了其理化特性、质构特性、感官品质、氧化指标的变化规律及蛋白质消化率。结果表明, 超声辅助腌制显著提高了滑炒鸡丁的水分含量 ($P < 0.05$), 改善了色泽参数, 其中 90 min 处理组的 L^* 值和 a^* 值达到最优 (60.83 和 7.44); 质构分析显示超声处理显著降低了鸡肉硬度 (从 3474.99 g 降至 2673.61 g) 和咀嚼性, 有效改善了嫩度; 蛋白质氧化分析表明, 超声处理加速了肌原纤维蛋白氧化进程, 表现为总巯基含量下降和羰基含量上升, 但 SDS-PAGE 结果证实未引起蛋白质明显降解; 随着超声处理时间的延长, 蛋白质体外消化率从对照组的 40.3% 显著提升至 150 min 组的 86.4%, 其中 90 min 处理组的消化率为 72.3%, 感官评价总分显著提高。当超声处理时间超过 90 min 时, 出现蛋白质过度氧化现象, 导致品质劣化。综合分析确定 90 min 为最佳超声辅助腌制时间, 此条件下滑炒鸡丁呈现最佳的质构特性、感官品质和营养价值。

关键词: 滑炒鸡丁品质, 腌制时间, 肌原纤维蛋白, 蛋白氧化

中图分类号: TS251.5⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2026)09-0141-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040255



本文网刊:

Effects of Ultrasonic-assisted Treatment on the Quality and Protein Oxidation of Stir-fried Chicken Dices

LUO Laiqing¹, GAO Enkui², ZHOU Gan¹, LU Yu¹, WANG Liangyun^{3,*}
(1. Jiangsu Food and Pharmaceutical Science College, Huai'an 223003, China;
2. Jiangsu Suyu Trade School, Suqian 223800, China;
3. Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

Abstract: To investigate the impact of ultrasound-assisted curing on the quality attributes and protein oxidation of stir-fried chicken dices and its underlying mechanism, chicken dices were cured under ultrasound conditions (120 W, 40 kHz) for varying durations (0, 30, 60, 90, 120, 150 min). Changes in physicochemical properties, texture characteristics, sensory quality, oxidation indicators, and protein digestibility were systematically analyzed. The results demonstrated that ultrasound-assisted curing significantly increased the moisture content of stir-fried chicken dices ($P < 0.05$) and improved color parameters, with the 90-min treatment group exhibiting optimal L^* and a^* values (60.83 and 7.44, respectively). Texture profile analysis revealed that ultrasound treatment significantly reduced hardness (from 3474.99 g to 2673.61 g) and chewiness, effectively enhancing tenderness. Protein oxidation analysis indicated that ultrasound accelerated the

收稿日期: 2025-04-20

基金项目: 四川省教育厅研究中心项目 (CC18Z23)。

作者简介: 罗来庆 (1984-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 烹饪工艺与营养、食品检测与分析, E-mail: 584495848@qq.com。

* 通信作者: 王良云 (1982-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 餐饮管理、食品营养与卫生, E-mail: 172546795@qq.com。

oxidation process of myofibrillar protein, characterized by a decrease in total sulfhydryl group content and an increase in carbonyl group content. However, SDS-PAGE results confirmed no significant protein degradation occurred. With the extension of ultrasound time, the *in vitro* digestibility of protein significantly increased from 40.3% in the control group to 86.4% in the 150-minute group, while the digestibility of the 90-minute treatment group was 72.3%, and the overall sensory score significantly improved. When the ultrasound treatment duration exceeded 90 min, excessive protein oxidation occurred, leading to quality deterioration. Comprehensive analysis identified 90 min as the optimal ultrasound-assisted curing time. Under these conditions, stir-fried chicken dices exhibited the best texture characteristics, sensory quality, and nutritional value.

Key words: stir-fried chicken dices quality; curing time; myofibrillar protein; protein oxidation

滑炒鸡丁作为滑炒类的代表菜品,是家庭与烹饪教学中最必不可少的一部分。其主要原料鸡胸肉作为高蛋白、低脂肪的健康肉类产品,深受消费者喜爱^[1]。如今随着时代的发展,科技的日新月异,现代科技加工与传统烹饪工艺进行有机融合,有助于改善传统菜肴的感官品质并推动食品加工研究。在滑炒鸡丁的制作工艺中,腌制是极其重要的一个环节,直接影响菜肴口感。然而,传统腌制工艺存在腌制速率慢、易被微生物污染、出品率不稳定等问题,难以满足现代消费者对食品品质的高标准需求。

超声技术被视为是一种利用高频声波的新型物理非热加工技术,具备处理效率高、可控性好、非侵入性、分辨率高等多项优势^[2]。通过产生机械振动和热量影响食品的内部结构和质量。且在肉类腌制过程中,超声处理增强了盐分的渗透性,有望实现更加均匀的腌制效果,改善肉质的口感和风味^[3]。王引兰等^[4]研究表明,低频超声处理提升了腌制鸭胸肉的品质。赵青青等^[5]研究表明超声腌制卤鸭制品品质优于传统腌制,显著改善卤鸭制品的品质。此外,李南等^[6]探讨了加工对肉类蛋白质氧化及肉品品质的影响,发现蛋白质氧化是影响肉品品质的重要因素,包括质地和颜色变化,且蛋白质过度氧化可能降低其营养价值和影响质地。

本研究旨在探究不同超声预处理时间对滑炒鸡丁品质和蛋白氧化的影响,包括水分含量、pH、色泽、质构特性、感官评价、蛋白质消化率和氧化指标(表面疏水性、总巯基、羰基含量及 SDS-PAGE 分析)。通过确定最佳超声腌制时间,为超声波技术优化滑炒鸡丁的腌制工艺提供科学依据,同时为滑炒鸡丁的工业化生产提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冷冻鸡胸肉、食用盐、玉米淀粉、食用油、味精、青椒 均购于淮安大润发(公园店);氯化钠、三氯乙酸、溴酚蓝、盐酸胍、乙酸乙酯、多聚甲醛、盐酸、氢氧化钠、 β -巯基乙醇、尿素、5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)、2,4-二硝基苯肼(DNPH)、三羟甲基氨基甲烷(Tris)、乙二醇双(2-氨基乙醚)四乙酸(EGTA) 均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;BCA 蛋白浓度测定试剂盒、胃蛋白酶(猪源,酶比活力 ≥ 250 U/mg)、胰蛋白酶(猪源,酶比活力 \geq

250 U/mg) 北京索莱宝科技有限公司。

LG 超声波清洗器 川新科技有限公司;
PR224ZH/E 电子分析天平 奥豪斯仪器(常州)有限公司;BIO-RAD 型伯乐电泳仪 北京赛百奥科技有限公司;HH-4A 数显恒温水浴锅 江苏金坛市环宇科学仪器厂;VORTEX 1 型涡旋混匀仪 艾卡(广州)仪器设备有限公司;TGL-16M 高速冷冻离心机 湖南湘仪离心机有限公司;P1 紫外分光光度计 上海美普达仪器有限公司;BCD-346 型海尔冰箱 青岛海尔有限公司;FJ 2000S 数显高速均质机 上海力辰邦西仪器科技有限公司;磁力搅拌器 山东博纳科技有限公司;CR-400 色彩肉色仪 柯尼卡美能达(中国)投资有限公司;TMS-Pro/Touch 物性分析仪 北京盈盛泰科技有限责任公司。

1.2 实验方法

1.2.1 滑炒鸡丁的工艺流程 工艺流程:冷冻鸡胸肉 \rightarrow 解冻、预处理 \rightarrow 超声辅助腌制(30、60、90、120、150 min) \rightarrow 沥水 \rightarrow 上浆 \rightarrow 勾芡烹调 \rightarrow 冷却 \rightarrow 包装 \rightarrow 指标检测。

参照瞿丞等^[7]的方法略作修改。将冷冻鸡胸肉置于 4 °C 恒温解冻 12 h,擦干表面水分后剔除脂肪、筋膜后切成 2 cm \times 2 cm \times 2 cm 的肉块并随机分成 6 个处理组,配制 4% 质量浓度的盐溶液,将鸡肉与腌制液按 1:3(m/m)的比例混合浸入盐溶液中,参考王引兰等^[4]样品超声处理方法并略作修改,超声功率:120 W,超声频率:40 kHz,温度:4 °C,分别超声辅助腌制不同时间(30、60、90、120、150 min),空白对照组为不超声腌制。腌制完成后,将各组样品沥干表面液体,每组取 100 g 鸡胸肉丁,加入 8 g 玉米淀粉均匀裹附。将锅预热 60 s 后,加入 15 g 玉米油,放入上浆的鸡丁,以统一的翻炒频率和火力强度炒制 60 s。随后加入 30 g 青椒片,倒入调味碗汁(由 1.5 g 食盐、1 g 味精、2 g 淀粉和 15 g 水组成)迅速翻炒均匀后出锅。将烹饪好的滑炒鸡丁自然冷却至室温,进行真空包装后用于后续品质指标测定。

1.2.2 水分含量和盐分的测定 水分含量参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行测定。盐分参照 GB 5009.44-2016《食品安全国家标准 食品中氯化物的测定》中福尔哈德法测定。

1.2.3 pH 测定 pH 测定参照 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准食品 pH 值的测定》。

1.2.4 色差测定 参照茹浩东等^[8]的方法测定鸡丁的切面色泽。先测表面色泽,再切成 1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm 的立方体用于测定切面色泽。在室温条件下用白色标准板进行色差仪校正,测定色泽的参数为亮度值 L^* 、红绿值 a^* 和黄蓝值 b^* 。

1.2.5 质构测定 参照 Du 等^[9]方法并略作修改。将鸡丁修整成 2 cm×2 cm×2 cm 的立方体,测定其硬度、弹性、内聚性、咀嚼性、恢复性,每个样品重复 6 次,取平均值。质构测定参数:采用 TMS-Pro/Touch 物质测试仪, P/S6R 型探头,压缩模式(texture profile analysis, TPA),测试前速率 2.0 mm/s,测试速率 1.0 mm/s,测试后速率 2.0 mm/s,出发点力 5 g,压缩程度 40%,两次压缩间隔时间为 5 s。

1.2.6 感官评价 参照王林等^[10]的方法并稍作修改。感官评价小组由烹饪工艺与营养专业的学生组成(男女生各五位),并参照表 1 中各指标及评分标准进行打分,感官评分为取 10 名学生打分的平均值。

1.2.7 肌原纤维蛋白的提取 参照高子武等^[11]的方法并略作修改。将经过不同超声处理腌制组的滑炒鸡丁取 4 g 切碎加入 16 mL 的 0.02 mol·L⁻¹(pH7.2) 预冷的磷酸盐缓冲液。在 12000 r/min,冰浴条件下均质 30 s/次,均质 2 次,中间间隔 5 s,挑出残留的筋膜,冰浴条件下均质 2 次,次间暂停 5 s,挑出残留筋膜后,将均质液于 4 °C, 5000×g 离心 15 min,弃上清液,上述操作重复两次。取沉淀再加入 16 mL 体积的 0.1 mol/L NaCl 混匀,重复上述冰浴均质和离心操作步骤 2 次,弃去上清液所得沉淀,即为鸡肉肌原纤维蛋白,48 h 内使用。

1.2.8 蛋白表面疏水性 参照孟嘉珺等^[12]的方法并稍作修改,将肌原纤维蛋白样品溶液调至 5 mg/mL,置于 4 °C 的冰水中,用磁力搅拌器进行搅拌,取 1 mL 浓度为 5 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液加入 200 μL 1 mg/mL 的溴酚蓝溶液,空白对照组为 1 mL 磷酸缓冲溶液加入 200 μL 1 mg/mL 溴酚蓝溶液。所有样品与空白对照振荡 10 min 后离心(4 °C, 5000×g, 10 min),取上清液稀释 10 倍后于 595 nm 波长处测定吸光度值。计算如式(1)所示:

$$\text{表面疏水性}(\mu\text{g}) = 200 \times (\text{OD}_{\text{空白}} - \text{OD}_{\text{MP}}) / \text{OD}_{\text{空白}} \quad \text{式(1)}$$

式中: $\text{OD}_{\text{空白}}$ 为空白对照的吸光度值; OD_{MP} 为蛋白样品的吸光度值。

1.2.9 总巯基测定 参照张桓等^[13]的方法并略作修改。将肌原纤维蛋白浓度调整到 2 mg/mL,取 1 mL 蛋白溶液溶解于 9 mL 的 50 mmol/L 磷酸盐缓冲液溶液中,取 4 mL 上述溶液加入 0.4 mL 0.1% DTNB, 40 °C 水浴 25 min, 412 nm 下读取其吸光值。总巯基含量计算如式(2)所示:

$$\text{总巯基含量}(\text{nmol}/\text{mg}) = \frac{A \times D \times 10^6}{e \times c} \quad \text{式(2)}$$

式中: A 为 412 nm 下吸光值; D 为稀释倍数; e 为分子吸光系数(13600 L/mol·cm); C 为蛋白质浓度, mg/mL。

1.2.10 羰基的测定 参照 Wang 等^[14]的方法并略作修改。用磷酸盐缓冲液将提取的肌原纤维蛋白样品质量浓度调至 5 mg/mL 并取 1 mL,加入 1 mL 2,4-二硝基苯肼(DNPH)(2 mol/L 盐酸, 0.2% DNPH) 室温孵育 30 min,加入三氯乙酸(0.4 g/mL)沉淀,以 2 mol/L HCl 溶液处理记为空白组,随后加入乙醇-乙酸乙酯混合液(1:1, V/V)在 5000×g 离心 5 min,多次离心洗涤沉淀。重复 3 次后加入磷酸盐缓冲液溶解沉淀。放置过夜后,在 370 nm 波长处测定吸光度,蛋白质羰基含量根据摩尔消光系数(22000 L/(mol·cm))计算求得。

1.2.11 SDS-PAGE 聚丙烯酰胺凝胶电泳 参考吕威等^[15]方法适当修改,将提取的肌原纤维蛋白配制为 4 mg/mL 的蛋白液与 5×buffer 缓冲液混匀,在 100 °C 下水浴 10 min。上样前混匀取上清液。采用质量分数为 12% 的分离胶和 5% 的浓缩胶,恒压 110 V, 1 h 直至结束。电泳结束后,取出胶片进行染色和脱色处理。

1.2.12 体外模拟消化实验 参照张泽^[16]的方法并稍作修改。将熟制的滑炒鸡丁样品去除杂质,称取 2 g 样品搅碎备用,加入磷酸盐缓冲液,均质 4 次(12000 r/min, 30 s/次)。用 2 mol/L HCl 将鸡丁混合液的 pH 调至 2.0。加入胃蛋白酶溶液(浓度 4%),恒温 37 °C 水浴酶解 2 h。胃期酶解结束后,用 2 mol/L NaOH 溶液将混合液 pH 调至 7.4,加入 2 mL 浓度为 4% 的胰蛋白酶溶液,在 37 °C 水浴酶解 2 h,反应结束后,置于 80 °C 水浴中充分加热 10 min,使胰蛋

表 1 超声处理的滑炒鸡丁感官评分标准

Table 1 Criteria for sensory evaluation of stir-fried chicken dices with ultrasonic treatment

指标	评分标准		
	10~7分	6~4分	3~1分
色泽	色泽呈白色,有光泽	色泽呈红白色,较有光泽	色泽呈浅黄色,光泽度较弱
滋味	具有鸡肉特有的香气,无异味;咸淡适中	鸡肉香气较淡,有轻微的异味;偏咸/偏淡	无鸡肉香气,有较重的异味;咸味很咸/很淡
组织状态	肉质柔软,富有弹性	肉质较柔软/紧实,弹性较差	肉质松散,弹性极差
口感	肉质细嫩,汁液充盈	肉质较细嫩,汁液较少	肉质柴硬,无汁液
总体可接受程度	最喜欢	较喜欢	不喜欢

白酶失活,取出消化混合液,加入无水乙醇,在4℃静置12h后均质离心(10000×g,20min)并在50℃下烘干至恒重,用BCA试剂盒测定消化前后滑炒鸡丁中蛋白质含量。消化率计算如公式(3)所示:

$$\text{蛋白质消化率}(\%) = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中: m_0 为消化前样品中蛋白质含量,g; m_1 为消化后样品中蛋白质含量,g。

1.3 数据处理

本次实验重复3次,使用SPSS 24.0软件进行数据统计分析,对数据进行描述性统计(用平均值±标准差表示)以及单因素差异性分析,使用GraphPad Prism 8软件绘制图表,差异显著水平 P 为0.05。

2 结果与分析

2.1 超声处理对滑炒鸡丁品质的影响

2.1.1 超声处理对滑炒鸡丁水分含量、pH和盐分的影响 如表2所示,超声腌制处理后对滑炒鸡丁的水分含量有显著影响($P<0.05$),随着超声腌制处理时间增长,鸡丁水分含量显著增加($P<0.05$),呈现上升趋势。超声腌制处理时间150min达到最大值77.05%,这可能是由于超声腌制的空化效应使鸡肉肌纤维间隙增大,肌细胞更易吸水,自由水增多,促使蛋白质水结合能力增强,超声处理加速了盐溶性蛋白的溶出与部分变性,这些蛋白质在肌纤维表面及间隙中形成更具保水性的凝胶网络,从而显著提升了鸡肉的持水能力^[12]。

pH是对肉的新鲜程度进行判断的指标之一。由表2可知,超声腌制处理对滑炒鸡丁的pH有显著影响($P<0.05$),鸡丁pH随着超声腌制处理时间增长先升高后降低,在0~90min的超声腌制处理条件下,超声处理产生的空化效应导致蛋白水解酶与脱氨基酶的释放,蛋白质结构的初步松散使部分碱性氨基酸残基暴露,表现为鸡丁的pH升高^[17]。在120、150min的超声腌制处理条件下,pH下降可能由于超声空化作用会趋于饱和,此时会导致肌肉中蛋白质发生变性,从而破坏其组织结构,蛋白质内部的酸性基团暴露,导致pH下降^[18]。而盐分含量随着超声处理时间的增加成正比增加。

2.1.2 超声处理对滑炒鸡丁色差的影响 如表3所示,色差是衡量鸡肉品质的重要指标之一,通常以 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值三个指标来衡量。随着超声辅助处

理时间的增加, L^* 值和 a^* 值呈现先上升后下降趋势,在90min及其之前处理组 L^* 值的升高可能是由于超声波的空化效应和机械效应使肌肉水分含量增加,提高肉质亮度,从而增大 L^* 值^[19]; a^* 值在超声辅助处理90min达到最大,可能通过超声的空化效应大量鲜红色的氧合肌红蛋白形成,使得 a^* 值升高,然而经过长时间超声处理后,氧合肌红蛋白进一步氧化成高铁肌红蛋白,滑炒鸡丁的 a^* 值降低^[20]。周唯伊等^[21]研究发现短期的超声处理会提高卤鸡制品的 a^* 值,长期的超声处理会导致卤鸡制品 a^* 值下降。超声处理组的 b^* 值均显著高于对照组($P<0.05$),但处理组之间无显著差异,这表明超声处理增强了鸡丁的黄色度。

表3 超声处理对滑炒鸡丁切面色差的影响

Table 3 Effect of ultrasonic treatment on the color difference of stir-fried chicken dices

超声辅助处理时间 (min)	L^*	a^*	b^*
0	58.13±1.07 ^{cd}	5.52±0.46 ^b	14.23±0.48 ^b
30	59.32±0.85 ^{bc}	6.62±0.92 ^a	14.89±0.26 ^a
60	59.87±1.14 ^{ab}	7.40±0.14 ^a	14.42±0.92 ^a
90	60.83±0.52 ^a	7.44±0.41 ^a	14.48±0.58 ^a
120	57.93±0.68 ^d	7.02±0.51 ^a	15.26±1.85 ^a
150	58.42±0.34 ^{cd}	6.93±0.43 ^a	14.87±1.86 ^a

注:同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$),表4同。

2.1.3 超声处理时间对滑炒鸡丁质构的影响 鸡肉的质构是决定口感的关键因素,也是影响消费者选择的关键因素^[5]。如表4所示,不同时间超声腌制的鸡丁其硬度、弹性、内聚性、恢复性以及咀嚼性具有显著性差异($P<0.05$)。对比超声辅助处理0min,超声处理后的鸡丁硬度、内聚性显著降低($P<0.05$),其中超声辅助处理90min硬度最低(2673.61g),由于超声辅助处理改变肌肉纤维结构,使肉质松散硬度下降。内聚性反映了肉类内部结构的紧密程度,随着超声辅助处理时间的延长,内聚性从0.54(0min)逐渐下降至0.50(150min),呈现显著降低趋势($P<0.05$)。这种下降可能是由于超声波的空化效应破坏了肌原纤维蛋白之间的交联结构,使得肌肉组织内部的结合力减弱,但适度的内聚性降低有助于改善肉质的嫩度和咀嚼性,这与硬度和咀嚼性降低的结果相互印证。弹性反映内部网状结构抵抗外力大小,弹性值小咀嚼口感好,因此其中超声辅助处理90min的硬度最低、弹性较低、恢复性较高,咀嚼口感好^[22]。

表2 超声处理对滑炒鸡丁水分含量、pH和盐分的影响

Table 2 Effect of ultrasonic treatment on moisture content, pH and salt content of stir-fried chicken dices

理化指标	超声辅助处理时间(min)					
	0	30	60	90	120	150
水分含量(%)	70.53±0.56 ^c	73.31±0.23 ^b	74.42±0.98 ^b	76.44±0.41 ^a	76.91±0.75 ^a	77.05±0.10 ^a
pH	5.61±0.01 ^c	5.68±0.01 ^{bc}	6.00±0.03 ^a	6.00±0.03 ^a	5.78±0.02 ^b	5.74±0.04 ^b
盐分(%)	0.01±0.01 ^f	0.42±0.02 ^c	0.61±0.01 ^d	0.98±0.03 ^c	1.43±0.02 ^b	1.86±0.02 ^a

注:同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 4 超声处理对滑炒鸡丁质构的影响
Table 4 Effect of ultrasonic treatment on the texture of stir-fried chicken dices

超声辅助处理时间(min)	硬度(g)	弹性(cm)	内聚性	咀嚼性(mJ)	恢复性
0	3474.99±51.87 ^a	0.68±0.02 ^c	0.54±0.01 ^a	68.65±0.61 ^a	0.33±0.01 ^a
30	3184.42±121.42 ^b	0.72±0.21 ^b	0.52±0.01 ^a	65.99±0.89 ^b	0.31±0.02 ^b
60	2675.53±53.73 ^d	0.77±0.32 ^a	0.52±0.01 ^a	63.72±0.36 ^c	0.27±0.02 ^c
90	2673.61±51.22 ^d	0.71±0.36 ^b	0.51±0.06 ^b	60.56±0.7 ^d	0.3±0.01 ^b
120	2698.43±44.71 ^d	0.78±0.13 ^a	0.51±0.02 ^b	58.24±0.5 ^e	0.25±0.01 ^c
150	2813.24±49.73 ^c	0.75±0.03 ^b	0.50±0.02 ^b	56.46±0.91 ^f	0.25±0.01 ^c

2.1.4 超声处理对滑炒鸡丁感官评价的影响 通过图 1 可知, 不同超声预腌制时间对滑炒鸡丁的感官品质影响显著($P<0.05$)。随着超声处理时间的延长, 鸡丁的色泽、滋气味、组织状态、口感得分呈现先升高后降低的趋势, 超声辅助处理组的感官评分显著优于空白对照组($P<0.05$)。空白对照组因传统腌制上浆工艺缺陷, 表现出色泽泛红、光泽度不足、轻微异味、肉质紧实及汁液流失等问题^[23], 而超声处理组通过超声处理显著改善肉质细嫩度和汁液充盈度。超声处理 90 min 组鸡丁感官属性最优, 其色泽洁白诱人、滋气味协调、肉质柔软多汁、咸淡适口, 完全符合滑炒鸡丁品质要求, 而超声处理时间过长则导致光泽减弱、滋气味劣化及口感下降。这与质构特性的改善、蛋白质氧化以及蛋白消化率的结果相互印证。

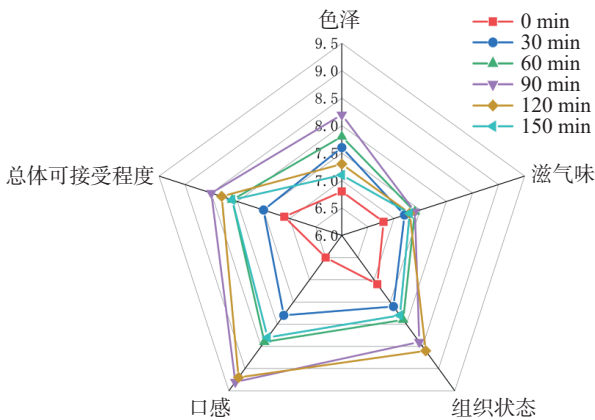


图 1 超声处理对滑炒鸡丁感官评价对比

Fig.1 Comparison of sensory evaluation of stir-fried chicken dices by ultrasound treatment

2.2 超声处理对滑炒鸡丁蛋白氧化的影响

2.2.1 超声处理对滑炒鸡丁表面疏水性的影响 表面疏水性是维持蛋白质构象的指标之一。如图 2 所示, 超声辅助处理 0 min 样品蛋白表面疏水性显著低于其余组的表面疏水性($P<0.05$), 当超声辅助处理时间 120 min 时, 其值达到 72.68 μg , 说明超声辅助处理产生的机械效应使蛋白质结构展开, 改变其空间结构, 使得疏水基团暴露, 表面疏水性增加。但随着超声辅助处理时间的增加, 鸡肉肌原纤维蛋白可能出现过度改性的现象, 从而加速蛋白内部分子交联形成聚合物, 减少疏水基团暴露^[12], 因此超声辅助处理 150 min 疏水性下降。

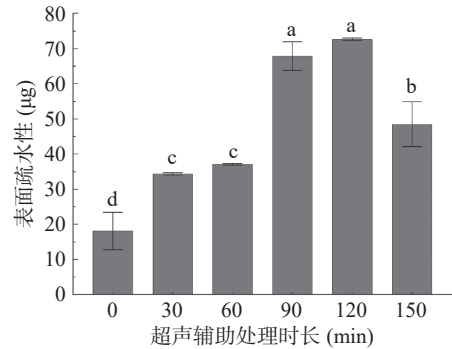


图 2 超声处理对滑炒鸡丁表面疏水性的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic treatment on the hydrophobicity of the surface of stir-fried chicken dices

注: 同一指标不同小写字母代表不同处理组间存在显著性差异($P<0.05$); 图 3~图 4、图 6 同。

2.2.2 超声处理对滑炒鸡丁总巯基含量的影响

总巯基含量是衡量蛋白质氧化程度的关键指标, 总巯基含量越低, 表明其氧化程度越严重^[24]。如图 3 所示, 随着超声辅助时间的增加, 总巯基含量从 83.24 nmol/mg(0 min)降低至 68.47 nmol/mg(150 min), 呈现显著下降趋势($P<0.05$)。这一结果表明超声处理显著促进了鸡肉肌原纤维蛋白的氧化进程。在超声波的作用下, 空化效应产生的局部高温高压环境以及机械剪切力共同作用, 导致蛋白质三级结构展开, 原本埋藏在分子内部的巯基暴露于蛋白表面^[25]。暴露的巯基在氧化条件下极易被氧化形成二硫键^[17], 从而导致总巯基含量的持续下降。这种蛋白质氧化过程与表面疏水性增加(图 2)的结果相互印证, 共同反映了超声处理对蛋白质结构的改性作用。

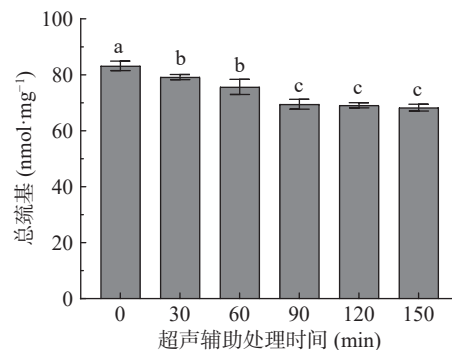


图 3 超声处理对滑炒鸡丁总巯基含量的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic treatment on the total mercapto content of stir-fried chicken dices

在超声处理 90 min 时,虽然总巯基含量有所下降(75.32 nmol/mg),但蛋白质氧化程度仍处于适度范围内,这种适度的氧化有利于形成合适的蛋白质网络结构,从而改善肉质的保水性和质构特性,这与质构分析中 90 min 处理组表现出最佳嫩度的结果一致。

2.2.3 超声处理对滑炒鸡丁羰基含量的影响 羰基含量是反映蛋白质氧化程度的指标之一,如图 4 所示,随着腌制时间的增长,羰基含量呈现显著上升趋势($P<0.05$),当超声辅助处理时间为 150 min 时,肌原纤维蛋白的羰基含量达到最大值为 27.63 nmol/mg,可能是由于超声波辅助腌制一定程度上改变了肌原纤维蛋白的空间构象,盐溶液促进肌原纤维蛋白氧化^[14],脂质氧化产物与肌原纤维蛋白结合形成羰基,导致羰基含量增多^[10]。且有研究发现适度的蛋白质氧化对肉制品的质地有一定的改善^[26],这与质构分析结果一致,90 min 处理组的硬度最低(2673.61 g)、弹性适中(0.71 cm)、咀嚼性较好(60.56 mJ),表现出最佳的嫩度。这种适度的氧化可能通过促进蛋白质分子间适当的交联,形成了理想的凝胶网络结构,从而改善了肉质的持水性和质构特性。

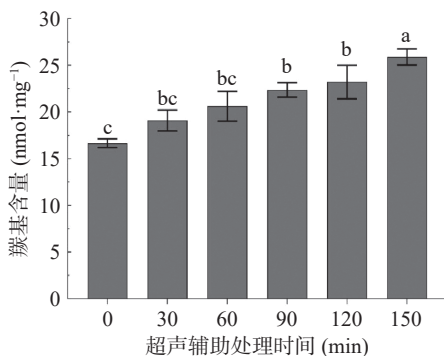


图 4 超声处理对滑炒鸡丁羰基含量的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic treatment on the carbonyl content of stir-fried chicken dices

2.2.4 超声处理对滑炒鸡丁肌原纤维蛋白 SDS-PAGE 的影响 肌原纤维蛋白是肌肉蛋白中的主要蛋白,在

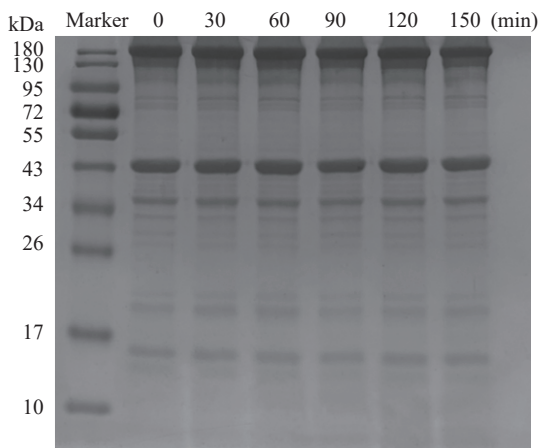


图 5 超声处理对滑炒鸡丁肌原纤维蛋白 SDS-PAGE 的影响

Fig.5 Effect of ultrasonic treatment on SDS-PAGE of myofibrillar proteins in stir-fried chicken dices

改善肌肉理化性质方面起着重要作用^[27]。如图 5 所示,SDS-PAGE 电泳图谱显示了不同超声处理时间下滑炒鸡丁肌原纤维蛋白的分子量分布情况。从电泳结果可以观察到,主要的蛋白条带包括肌球蛋白重链相关组分(约 180 kDa)、肌动蛋白(43 kDa)以及其他肌原纤维蛋白组分,这些条带在不同超声处理时间下的位置和强度均未发生显著变化。特别是作为标志性蛋白的肌动蛋白(43 kDa),其条带的清晰度和分辨率在各处理组间保持一致,表明超声处理并未引起蛋白质的明显降解或断裂。超声引起的蛋白质氧化主要发生在氨基酸侧链水平,巯基氧化形成二硫键、羰基化等,这些变化并不足以导致肽链的断裂。这与 Saleem 等^[28]报道的结论一致,SDS-PAGE 未观察到肌动球蛋白的断裂。

2.2.5 超声处理对滑炒鸡丁蛋白质消化率的影响 蛋白质消化率是评价肉制品营养价值的关键指标,直接反映了蛋白质在胃肠道中的可利用程度^[29]。如图 6 所示,随着超声辅助腌制时间的延长,滑炒鸡丁的蛋白质消化率呈现显著上升趋势($P<0.05$),从对照组(0 min)的 40.3% 逐步提升至 150 min 处理组的 86.4%。这种消化率的提升与超声处理引起的蛋白质结构改变密切相关。超声波的空化效应和机械作用破坏了肌原纤维的致密结构,使得原本紧密排列的蛋白质分子变得松散,为消化酶的作用提供了更多的接触位点^[30]。

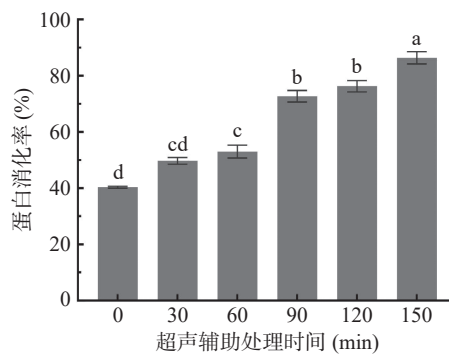


图 6 超声处理对滑炒鸡丁蛋白质消化的影响

Fig.6 Effect of ultrasonic treatment on protein digestion of stir-fried chicken dices

3 结论

本研究系统探究了超声辅助腌制对滑炒鸡丁品质与蛋白质氧化的影响机制,结果表明超声处理通过空化效应和机械作用显著改善了鸡丁的理化特性和感官品质。90 min 超声辅助腌制为最佳处理条件,在此条件下鸡丁水分含量达到 76.44%,硬度降至最低值 2673.61 g,咀嚼性和嫩度显著改善,色泽亮度值 L^* 和 a^* 均达到最优,感官评价得分最高,蛋白质消化率提升至 72.3%。蛋白氧化分析显示,适度的超声处理(≤ 90 min)引起的蛋白质氧化程度温和可控,表现为总巯基含量适度下降至 75.32 nmol/mg 和羰基含量适量增加至 22.1 nmol/mg,这种适度氧化有利于

形成理想的蛋白质网络结构,改善持水性和质构特性。SDS-PAGE 分析证实超声处理未引起肌原纤维蛋白的明显降解,表明超声诱导的氧化主要发生在氨基酸侧链层面。本研究揭示了超声-蛋白氧化-品质改善的作用机制,为超声技术在传统菜肴滑炒鸡丁工业化生产中的应用提供了最佳工艺参数。未来应重点开发适用于不同肉类产品的超声辅助加工技术体系。

© 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] 孙啸. 木质鸡胸肉肉质分析及无损检测方法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017. [SUN Xiao. Meat quality and nondestructive detection methods of broiler breast fillets with woody breast myopathy[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.]
- [2] 罗楚文, 孔超颖, 汤朝晖. 超声化学在生物医学中应用的研究进展[J]. 化学学报, 2023, 81(7): 836-842. [LUO C W, KONG C Y, TANG Z H. Research progress on the application of sonochemistry in biomedicine[J]. Acta Chimica Sinica, 2023, 81(7): 836-842.]
- [3] 冷雪娇. 超高压处理对鸡胸肉腌制效果的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013. [LENG Xuejiao. Study on curing effect of ultra-high pressure treatment on chicken breast[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.]
- [4] 王引兰, 王恒鹏, 孟祥忍. 低频超声辅助静态腌制对鸭肉水分分布及品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(2): 234-241. [WANG Yinlan, WANG Hengpeng, MENG Xiangren. Effect of low-frequency ultrasound-assisted static curing on water distribution and quality characteristics of duck meat[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(2): 234-241.]
- [5] 赵青青, 满子意, 谷馨馨, 等. 超声辅助腌制对卤鸭制品品质的影响及工艺优化[J]. 农产品加工, 2021(13): 34-39, 45. [ZHAO Qingqing, MAN Ziyi, GU Hexin, et al. Effect of ultrasonic-assisted curing on stewed duck products quality and process optimization[J]. Farm Products Processing, 2021(13): 34-39, 45.]
- [6] 李南, 李蛟龙, 李鹏鹏, 等. 加工对肉类蛋白质氧化及肉品质影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 392-399. [LI Nan, LI Jiaolong, LI Pengpeng, et al. Research progress on the effects of processing conditions on the meat protein oxidation and meat quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 392-399.]
- [7] 瞿丞, 贺雅非, 王兆明, 等. 不同食盐添加量腌制对鸡肉脂质氧化、蛋白质氧化及食用品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 77-85. [QU Cheng, HE Zhifei, WANG Zhaoming, et al. Effects of different salt concentrations on lipid oxidation, protein oxidation and eating quality of cured chicken meat[J]. Food Science, 2020, 41(16): 77-85.]
- [8] 茹浩东, 刘崇歆, 邓紫馨, 等. 超声波辅助脉冲真空腌制对驴肉品质的影响[J]. 美食研究, 2023, 40(1): 73-79. [RU Haodong, LIU Chongxin, DENG Zixin, et al. Effect of ultrasonication-assisted pulsed vacuum curing on quality of donkey meat[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2023, 40(1): 73-79.]
- [9] DU Lei, ZHOU Guanghong, XU Xinglian, et al. Study on kinetics of mass transfer in water-boiled salted duck during wet-curing[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(4): 578-584.
- [10] 王林, 詹珂, 周世中. 不同腌制方式对猪肉食用品质的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(4): 96-102. [WANG Lin, ZHAN Ke, ZHOU Shizhong. Effect of rolling marinade on the quality of pork products[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(4): 96-102.]
- [11] 高子武, 吴丹璇, 王恒鹏, 等. 腌制方式对牛肉肌原纤维蛋白特性及水分分布的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 179-186. [GAO Ziwu, WU Danxuan, WANG Hengpeng, et al. Effects of curing process on myofibrillar protein characteristics and water distribution of beef[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(24): 179-186.]
- [12] 孟嘉璐, 许树荣, 邓莎, 等. 食盐腌制对鸡肉品质、肌原纤维蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 45-53. [MENG Jiajun, XU Shurong, DENG Sha, et al. Effects of salt marinating on chicken quality and structure characteristics, function characteristics of chicken myofibrin protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 45-53.]
- [13] 张桓, 许志诚, 张兆丽, 等. 不同腌制方式对盐水鹅生坯保水性及蛋白质氧化的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 87-92. [ZHANG Huan, XU Zhicheng, ZHANG Zhaoli, et al. Effects of different pickling methods on the water retention and protein oxidation of salted goose raw material[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 87-92.]
- [14] WANG Zhaoming, HE Zhifei, GAN Xiao, et al. Effect of peroxy radicals on the structure and gel properties of isolated rabbit meat myofibrillar proteins[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(12): 2687-2696.
- [15] 吕威, 冯媛媛, 管雯, 等. 不同腌制方式对腊番鸭品质的影响[J]. 美食研究, 2022, 39(3): 51-59. [LÜ Wei, FENG Yuanyuan, GUAN Wen, et al. Effects of marinating methods on quality of dry-cured duck[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2022, 39(3): 51-59.]
- [16] 张泽. 低温慢煮对红烧肉食用品质及蛋白消化率的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2020. [ZHANG Ze. Effects of sous-vide on the eating quality and protein digestibility of braised pork[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.]
- [17] 董智铭, 姜菽婉, 蒋泽临, 等. 超声时间对牛肉干品质及其肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 36-42. [DONG Zhiming, JIANG Qiuwan, JIANG Zelin, et al. Effect of ultrasonic time on quality characteristics and myofibrillar protein structure of beef jerky[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 36-42.]
- [18] 李心悦, 曹涓泉, 徐静, 等. 超声波辅助腌制对猪肉糜食用品质及凝胶性能的影响[J]. 肉类研究, 2022, 36(8): 21-28. [LI Xinyue, CAO Juanquan, XU Jing, et al. Effects of ultrasonic-assisted curing on eating quality and gel properties of minced pork[J]. Meat Research, 2022, 36(8): 21-28.]
- [19] 吴梦迪, 马海乐, 刘会敏. 不同模式超声波辅助低温腌制对牛肉品质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(9): 177-182, 233. [WU Mengdi, MA Haile, LIU Huimin. Effects of different modes of ultrasonic assisted low-temperature curing on beef quality[J]. Food & Machinery, 2023, 39(9): 177-182, 233.]
- [20] ZOU Yunhe, KANG Dacheng, LIU Rui, et al. Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 46: 36-45.
- [21] 周唯伊, 陆欣怡, 戴嘉宁, 等. 超声波辅助卤制雪山鸡的品质和风味分析[J]. 肉类研究, 2021, 35(10): 33-40. [ZHOU Weiyi, LU Xinyi, DAI Jianing, et al. Effects of ultrasonic-assisted stewing on the quality and flavor of marinated Xueshan chicken[J]. Meat

Research, 2021, 35(10): 33-40.]

[22] 康大成. 超声波辅助腌制对牛肉品质的影响及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017. [KANG Dacheng. Effects and mechanism of ultrasound-assisted curing on the quality of beef[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.]

[23] 付丽, 郑宝亮, 高雪琴, 等. 牛肉的超声波快速腌制与嫩化工艺优化[J]. 肉类研究, 2017, 31(12): 23-29. [FU Li, ZHENG Baoliang, GAO Xueqin, et al. Optimization of rapid ultrasonic-assisted curing and tenderization of beef[J]. Meat Research, 2017, 31(12): 23-29.]

[24] 刁小琴, 孙薇婷, 徐筱君, 等. 高压处理大豆分离蛋白水解物对羊肉凝胶特性及贮藏期氧化稳定性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(5): 160-170. [DIAO Xiaoqin, SUN Weiting, XU Xiaojun, et al. Effects of soy protein isolate hydrolysate obtained by high pressure processing on gelation properties and oxidation stability of mutton batters during storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(5): 160-170.]

[25] HU H, LI-CHAN E C Y, WAN L, et al. The effect of high intensity ultrasonic pre-treatment on the properties of soybean protein isolate gel induced by calcium sulfate[J]. Food Hydrocolloids, 2013,

32(2): 303-311.

[26] 胡春林, 谢晶. 蛋白质氧化对肉食品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 275-281. [HU Chunlin, XIE Jing. Progress in understanding the effect of protein oxidation on the eating quality of meat[J]. Food Science, 2021, 42(17): 275-281.]

[27] CHANDRAPALA J, ZISU B, KENTISH S, et al. The effects of high-intensity ultrasound on the structural and functional properties of α -lactalbumin, β -lactoglobulin and their mixtures[J]. Food Research International, 2012, 48(2): 940-943.

[28] SALEEM R, AHMAD R. Effect of low frequency ultrasonication on biochemical and structural properties of chicken actomyosin[J]. Food Chemistry, 2016, 205: 43-51.

[29] XIE Yunting, CAI Linlin, ZHAO Di, et al. Real meat and plant-based meat analogues have different *in vitro* protein digestibility properties[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132917.

[30] 谢昌芯. 超声波辅助低盐风干鱼腌制工艺及其品质形成机理研究[D]. 黄石: 湖北师范大学, 2024. [XIE Changxin. Research on pickling process and quality formation mechanism of ultrasound-assisted pickling low salt dry fish[D]. Huangshi: Hubei Normal University, 2024.]