刘亚娟, 明亮, 达立朝, 等. 超声波协同木瓜蛋白酶嫩化驼肉的工艺优化及其对肉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 233−241. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030250

LIU Yajuan, MING Liang, DA Lichao, et al. Optimization of the Ultrasonic-papain Combined Tenderization Process for Camel Meat and Its Impact on Quality Attributes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 233−241. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030250

· 工艺技术 ·

超声波协同木瓜蛋白酶嫩化驼肉的工艺优化及其对肉品质的影响

刘亚娟[1], 明　亮[1], 达立朝[2], 李昱奇[2], 吉日木图[1,3,*]

（1.内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古呼和浩特 010018;
2.阿拉善右旗骆驼产业发展中心, 内蒙古阿拉善 737300;
3.内蒙古中哈骆驼研究院, 内蒙古阿拉善 737300）

摘　要: 驼肉是人类优质蛋白质的良好来源，然而，驼肉中结缔组织的含量较高，导致肉品坚韧，难以咀嚼，降低了消费者的接受度。本研究探讨了超声波和木瓜蛋白酶处理对驼肉嫩度及肉品质的影响，对超声波时间、超声波功率和木瓜蛋白酶浓度进行单因素实验，并结合响应面分析试验筛选出驼肉的最佳嫩化工艺，进一步分析了超声波协同木瓜蛋白酶处理对驼肉品质的影响。结果表明：驼肉经嫩化处理后嫩度均有所提高，其最佳嫩化工艺为木瓜蛋白酶浓度 120 U/mL，超声波时间 50 min，超声波功率 180 W。在最佳嫩化条件下，与未处理组相比协同处理组驼肉剪切力和亮度值（L^*）显著降低（P<0.05），蒸煮损失下降了 8.64%，而质构特性显著升高（P<0.05），驼肉嫩度得到了很好的改善；电泳结果显示，220 和 100 kDa 处电泳条带颜色变浅，肌球蛋白重链降解，肌原纤维蛋白分解；肌原纤维蛋白 α-螺旋的含量由 46.21% 降低至 29.40%，β-转角的含量由 25.11% 降低至 13.08%，而 β-折叠和无规卷曲的含量则有所增加。

关键词: 驼肉, 超声波, 木瓜蛋白酶, 嫩化, 工艺优化, 品质

中图分类号: TS201.1　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0233−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030250　　本文网刊:

Optimization of the Ultrasonic-papain Combined Tenderization Process for Camel Meat and Its Impact on Quality Attributes

LIU Yajuan[1], MING Liang[1], DA Lichao[2], LI Yuqi[2], JI Rimutu[1,3,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;
2.Alashan Right Banner Camel Industry Development Center, Alxa 737300, China;
3.Inner Mongolia Zhongha Camel Research Institute, Alxa 737300, China）

Abstract: Camel meat serves as an excellent source of high-quality protein for human consumption. However, its relatively high connective tissue content renders the meat tough and challenging to chew, diminishing consumer acceptance. This study investigated the effects of ultrasonic and papain treatment on enhancing the tenderness and overall quality of camel meat. Univariate experiments were conducted to evaluate ultrasonic time, ultrasonic power, and papain concentration, and the response surface methodology (RSM) was employed to screen for the optimal tenderization process. Furthermore, the synergistic effect of ultrasonic treatment combined with papain on camel meat quality was analyzed in this paper. The findings demonstrated that tenderness of camel meat was significantly improved (P<0.05). Specifically, the optimal tenderization conditions were as follows: A papain concentration of 120 U/mL, an ultrasound duration of 50 minutes, and an ultrasound power of 180 W. Under these optimal conditions, compared to untreated meat, the shear force and lightness

收稿日期: 2025−03−18

基金项目: 阿拉善盟科技计划项目（AMKJ2024-06）。

作者简介: 刘亚娟（2000−）, 女, 硕士, 研究方向: 肉品工程, E-mail: yajuan929@163.com。

*** 通信作者:** 吉日木图（1965−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 骆驼基因组与相关产品的开发利用, E-mail: yeluotuo1999@vip.163.com。

(L^*) in the co-treatment group were significantly reduced (P<0.05), cooking loss decreased by 8.64%, while texture profile analysis showed significant improvements (P<0.05). Therefore, the above data indicate that the treatment significantly improved the tenderness of camel meat. Additionally, the electrophoresis results showed lighter bands at 220 and 100 kDa, indicating degradation of the myosin heavy chain and decomposition of myofibrillar proteins. And the α-helix content of myofibrillar proteins decreased from 46.21% to 29.40%, while the β-turn content decreased from 25.11% to 13.08%. Conversely, the contents of β-sheet and random coils increased.

Key words: camel meat; ultrasonic; papain; tenderization; process optimization; quality

骆驼是沙漠中的“生命之舟”，也是世界上许多沙漠国家国民经济和粮食安全最基本的支柱之一[1]。驼肉是一种高蛋白质、低脂肪、低胆固醇，富含多种多不饱和脂肪酸及氨基酸的瘦肉型肉类[2]。因其卓越的营养成分和健康益处，正在成为食品科学与营养领域中备受瞩目的新兴肉类资源，是人类良好的食用肉选择之一。然而，由于驼肉中的肌纤维较多且粗，导致驼肉硬度较大，嫩度较差，不易咀嚼，使骆驼肉的消费受限[3]。这在很大程度上限制了其在肉制品加工中的应用。

肉嫩度是影响消费者喜好的最重要因素，通过评估肉的嫩度来判断肉制品的质量[4−5]。肉的肌节长度、肌原纤维以及结缔组织的完整性都会影响其嫩度[6]。现有嫩化技术中，物理法虽能机械破坏肌纤维结构但成本高昂，化学法存在安全风险，而生物酶解法因木瓜蛋白酶等植物源酶的特异性降解作用展现出独特优势。值得注意的是，单一酶处理常面临使用过量的问题；当木瓜蛋白酶浓度超过 120 U/mL 时，过度水解反而导致肌纤维间隙扩大，使肌肉蒸煮损失率增加，这促使研究者转向物理-生物协同策略。超声波是一种非热食品加工方法，因其对食品的营养和感官特性影响较小而受到人们广泛关注[7]。该技术可以在肉组织中通过破坏肌肉细胞的完整性和促进酶促反应使得肉的嫩度得到改善[8]。Liu 等[9] 通过研究超声波辅助低钠盐熟化对牛肉品质的影响发现，超声波的空化作用可以破坏肌纤维结构，改善牛肉嫩度。杨裕如等[10] 在研究中指出超声波可以改善羊肉嫩度，通过破坏肌纤维结构完整性，提高肌原纤维碎裂程度，达到嫩化效果。袁佳艺等[11] 指出，超声波处理可提高鸭腿的保水性和嫩度，有利于提升酱卤鸭腿的食用品质。

最新研究表明，超声波与木瓜蛋白酶的协同作用在肉类嫩化领域展现出了巨大的潜力。这种协同作用不仅能够显著减少酶的使用量，从而降低生产成本，还能够有效避免因过量使用植物蛋白酶而导致的一系列问题。王清波等[12] 的研究表明，采用超声波辅助木瓜蛋白酶对牛肉进行嫩化处理，在减少酶用量的同时，依然能够确保良好的嫩化效果。此外，超声波处理还能够在一定程度上激活木瓜蛋白酶，使其催化反应更加顺畅，从而进一步提升嫩化效果[13]。从分子层面来看，超声波处理能够使木瓜蛋白酶的活性中心与肌原纤维蛋白更加紧密地结合，从而提高酶的催化效率[14]。目前，在驼肉嫩化处理的实践中，木瓜蛋白酶是主要的应用手段。然而，对于超声波与木瓜蛋白酶协同处理在改善驼肉嫩度方面的研究却相对匮乏，尤其是在国内，尚未有关于使用超声波协同木瓜蛋白酶对驼肉嫩度影响的相关研究报道。

基于此，本研究采用超声波协同木瓜蛋白酶对驼肉进行嫩化处理，以剪切力为指标，进行单因素实验并结合响应面分析试验筛选出嫩化的最佳工艺；进一步，以未处理的驼肉为对照组，系统研究协同处理对驼肉剪切力、蒸煮损失、色泽、质地、蛋白质组成以及肌原纤维蛋白二级结构的影响，旨在为开发低酶耗、高效率的驼肉加工技术提供理论依据，推动驼肉在食品工业中的应用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

6 岁戈壁红驼新鲜后腿肉　巴彦淖尔市绿野食品有限公司；木瓜蛋白酶（800 U/mg）　北京索莱宝科技有限公司；氯化钾　分析纯，天津新技术产业园区科茂化学试剂有限公司；磷酸氢二钾、氯化镁　分析纯，福晨（天津）化学试剂有限公司；三羟甲基氨基盐酸盐、甘氨酸、十二烷基硫酸钠、双缩脲测定蛋白浓度试剂盒、SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳制胶试剂盒、广谱蛋白质 Marker（11~245 kDa）、5×蛋白上样缓冲液　北京索莱宝科技有限公司。

LM3B 肌肉嫩度仪　上海精密科学仪器有限公司；TA.XTC-18 质构仪　保圣实业发展有限公司；HH-4 水浴锅　上海福玛实验设备有限公司；XHF-D 高速分散器　宁波新芝生物科技股份有限公司；TGL-16M 台式高速冷冻离心机　湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；JJ-A 电子天平　成都特思特仪器设备有限公司；BS200S-WEI 分析天平　上海毕胜仪器设备有限公司；BIO-RAD 电泳仪　伯乐生命医学产品（上海）有限公司；CR-10 分光测色仪　广东三恩时智能科技有限公司；KQ-300DE 超声波　昆山舒美超声仪器有限公司；Milli-Q 超纯水净化仪　美国 Millipore 公司；IRSpirit-T 傅立叶红外光谱仪　日本岛津制造所；Pilot2-4LD 真空冷冻干燥机　博医康（北京）仪器有限公司；Tecan Infinite 200 pro M Nano 微孔板检测仪　内蒙古煜朗科技有限公司；THZ-98C 恒温振荡器　上海一恒科学仪器有限公司；FM200A 弗鲁克匀浆机　上海弗鲁克科技发展有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　驼肉样品嫩化处理　驼肉样本去除可见脂肪及筋膜，切成长方体肉块（6 cm×3 cm×2 cm），每块约 50 g，驼肉嫩化流程如图 1 所示。先溶解适量木瓜蛋白酶并预热，将处理好的驼肉放入 25 ℃ 木瓜蛋白酶溶液的烧杯中，处理 20 min；进一步，取出驼肉样本转移至密封袋中进行真空包装，并置于超声波仪器中嫩化。以未处理组作为对照组。

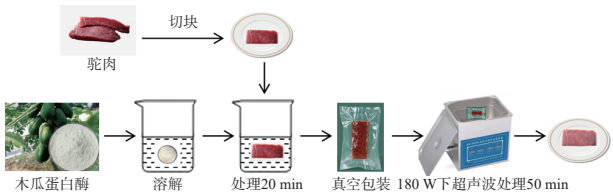


图 1　超声波协同木瓜蛋白酶对驼肉嫩化的流程图

Fig.1　Flow chart of ultrasonic-coordinated papain to tenderize camel meat

1.2.2　单因素实验

1.2.2.1　不同木瓜蛋白酶浓度处理驼肉　配制木瓜蛋白酶浓度分别为 40、80、120、160、200 U/mL 的溶液，设置超声波时间为 50 min，超声波功率为 180 W 对驼肉进行嫩化处理。

1.2.2.2　不同超声波时间处理驼肉　固定木瓜蛋白酶浓度为 120 U/mL，设置超声波功率为 180 W，超声波时间分别为 30、40、50、60、70 min 对驼肉进行嫩化处理。

1.2.2.3　不同超声波功率处理驼肉　固定木瓜蛋白酶浓度为 120 U/mL，设置超声波时间为 50 min，超声波功率分别为 120、150、180、210、240 W 对驼肉进行嫩化处理。

1.2.3　响应面试验设计　在单因素实验的基础上，根据 Box-Behnken 设计原理，以最大剪切力为响应指标，选取木瓜蛋白酶浓度（40~200 U/mL）、超声波时间（30~70 min）和超声波功率（120~240 W）为响应因子，进行三因素三水平响应面试验设计，确定驼肉嫩化的最佳工艺条件，试验设计见表 1，实验重复 3 次。

表 1　响应面试验因素水平设计

Table 1　Factors and levels of response surface experiment

水平	因素		
	A木瓜蛋白酶浓度（U/mL）	B超声波时间（min）	C超声波功率（W）
1	40	30	120
0	120	50	180
-1	200	70	240

1.2.4　剪切力的测定　参照 NY/T1180-200 肉嫩度剪切测定仪的测定方法[15]，略有修改。将肉切成长×宽×高不少于 6 cm×3 cm×2 cm 的整块肉样，置于蒸煮袋中恒温水浴加热，当肉样中心温度达到 70 ℃ 时，取出冷却，用滤纸吸干样品表面液体，将肉置于嫩度仪上测定。

1.2.5　蒸煮损失的测定　用滤纸吸取肉样表面水分后，对其称重并记录为 w_1。之后将样品在 80 ℃ 的恒温水浴锅中加热至中心温度 70 ℃，用滤纸吸干表面水分后称重，记录为 w_2。计算公式如下：

$$蒸煮损失(\%) = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100$$

式中：w_1 为蒸煮前样品重量，g；w_2 为蒸煮后样品重量，g。

1.2.6　色泽的测定　在室温下将肉糜铺平，不留缝隙，采用色差仪对驼肉进行色差测定，测定前对色差仪进行黑筒、白板矫正，测定肉样的 L^*（亮度）值、a^*（红度）值和 b^*（黄度）值。

1.2.7　质构的测定　通过全质构测定法对驼肉质构特性进行检测。将驼肉切成长×宽×高为 2 cm×2 cm×2 cm 的块状，选用 T36 探头，测前速度为 2.0 mm/s，测试过程中速度为 1.0 mm/s，测试后速度为 1.0 mm/s，目标参数为变形量 50%，触发力 8 gf 进行检测。

1.2.8　十二烷基聚丙烯酰胺凝胶电泳分析（Sodium Dodecyl Sulfate Polyacrylamide Gel Electrophoresis，SDS-PAGE）　取 3.5 g 肉样，加入 35 mL 裂解液（50 mmol/L Tris-HCl，150 mmol/L NaCl，1% Triton X-100，1 mmol/L EDTA，100 μg/mL PMSF，pH7.4），冰上使用高速匀浆机匀浆至肉样完全破碎（30 s/次，共 3 次），并在 4 ℃ 下搅拌 2 h 后，以 10000 r/min 高速离心 10 min，取上清液。以牛血清白蛋白（BSA）作为标准蛋白，在 562 nm 处测量蛋白样品的吸光值，绘制出标准曲线，并使用该曲线计算出试验用蛋白样品的蛋白浓度。

参照 Li 等[16] 的方法并稍加修改。将蛋白浓度调整至 2 mg/mL，制备电泳上样缓冲液，并取 200 μL 样品，按 4∶1 比例与等量上样缓冲液混合，100 ℃ 下加热 5 min，待冷却后取上清液待用。在每条电泳泳道上加入电泳上样液 7~8 μL。分别采用浓缩胶电压 80 V，分离胶电压 120 V 进行电泳。电泳结束后，使用考马斯亮蓝 R-250 对胶片进行染色，并用乙醇-乙酸脱色液进行脱色，最后观察分析染色结果。

1.2.9　肌原纤维蛋白二级结构变化　参考 Cheng 等[17] 的方法并稍作修改，对驼肉中肌原纤维蛋白进行提取。驼肉样品（3.5 g）中加入 35 mL 萃取液（0.1 mol/L KCl，18 mmol/L K_2HPO_4，7 mmol/L KH_2PO_4，1 mmol/L 乙二胺四乙酸二钠，1 mmol/L $MgCl_2$，pH7.0，4 ℃），冰上均质 1 min，在 6913×g 下离心 15 min，收集沉淀。上述均质和离心过程重复 3 次。最终沉淀悬浮于 15 mL 提取液中，用双层纱布过滤。所得滤液即为肌原纤维蛋白。

参考常海军等[18] 的方法，将提取的肌原纤维蛋白放入冻干机中进行冻干处理，并对冻干粉进行研磨、过筛等，以确保其细腻度和均匀性。打开傅里叶红外光谱仪预热 10~20 min。取溴化钾粉末于玛瑙

研钵中研细至颗粒直径小于 2 μm, 用不锈钢匙药匙取一定量于压片模具内, 在压片机上压成透明薄片。将薄片放入红外光谱仪中作为背景进行扫描。取试样 2~3 mg 样品与 200~300 mg 干燥的粉末在玛瑙研体中混匀, 充分研细至颗粒直径小于 2 μm, 用不锈钢药匙取 70~90 mg 放入压片模具内, 在压片机上压成透明薄片, 将制成的薄片放入红外光谱仪中, 进行样品扫描, 将数据导出。分辨率为 4 cm^{-1}, 范围为 4000~400 cm^{-1}, 波数精度 0.01 cm^{-1}, 扫描次数为 64 次。使用 Peakfit Version 4.12 拟合 FT-IR 检测所得波谱图, 进行基线校正、傅里叶去卷积和二阶导数峰拟合, 通过各峰相对面积计算出各种构象的相对含量。

1.3 数据处理

本实验中所有数据均测定三次, 结果以平均值±标准差表示。利用 SPSS 27.0.1 软件进行单因素实验以及差异显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著; 采用 Origin 9.0 和 Design-Expert 13 对试验数据进行统计分析及图像绘制。

2 结果与分析

2.1 驼肉嫩化处理单因素实验结果

2.1.1 木瓜蛋白酶浓度对驼肉嫩化效果的影响 不同木瓜蛋白酶浓度对驼肉剪切力的影响结果见图 2。随着木瓜蛋白酶浓度的增加, 驼肉的剪切力先降低后升高。未处理组驼肉的剪切力值为 23.03 kg, 经木瓜蛋白酶处理后驼肉剪切力显著降低($P<0.05$)。当木瓜蛋白酶浓度为 120 U/mL 时, 驼肉的剪切力最低, 与未处理组相比降低了 33.3%。木瓜蛋白酶的处理降解了驼肉中肌原纤维蛋白或结缔组织蛋白质, 引起肌原纤维蛋白和结缔组织断裂, 从而使驼肉剪切力降低, 改善了驼肉嫩度。然而, 由于过量的木瓜蛋白酶浓度, 使驼肉组织中的蛋白质结构和结缔组织降解严重, 导致肌肉组织的超微网状结构被破坏, 驼肉剪切力反而上升。孙树远等[3] 研究发现, 使用 120 U/mL 的木瓜蛋白酶处理驼肉, 其剪切力最低, 为 15.35 kg。本研究结论与之基本一致, 说明木瓜蛋白酶可以改善驼肉嫩度, 对降低驼肉的剪切力有明显作用。因此, 本试验最佳的酶添加量为 120 U/mL。

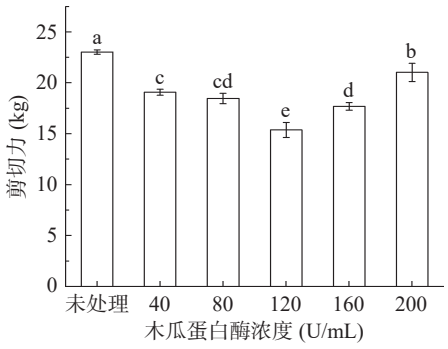


图 2 木瓜蛋白酶浓度对驼肉剪切力的影响

Fig.2 Effect of papain concentration on the shearing force of camel meat

注: 不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$), 图 3~图 4、图 6~图 7 同。

2.1.2 超声波时间对驼肉嫩化效果的影响 随着超声波时间的增加, 驼肉的剪切力先降低后升高(图 3)。未处理组驼肉的剪切力值为 23.03 kg, 经不同超声波时间处理, 驼肉剪切力显著降低($P<0.05$)。当超声波时间为 50 min 时, 驼肉的剪切力最低, 与未处理组相比降低了 31.1%。超声波处理会促进骆驼肌肉组织的软化和肌原纤维的断裂, 因此适当时间的超声波对驼肉嫩度有很好的改善作用。王文艳等[19] 研究发现, 适宜的超声波时间可以使肌肉组织结构变得松散, 从而降低剪切力, 使其变得更加柔软。然而, 超声波时间的延长会使温度升高, 导致肌原纤维蛋白变性和肌纤维收缩[20], 从而使剪切力升高。因此, 本试验最佳的超声波时间为 50 min。

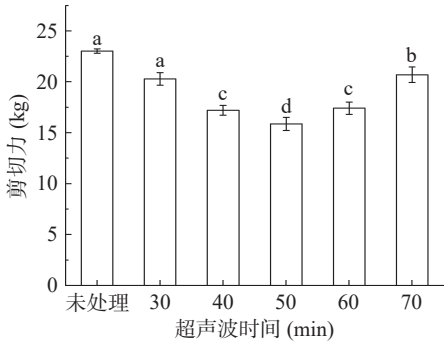


图 3 超声波时间对驼肉剪切力的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic time on the shearing force of camel meat

2.1.3 超声波功率对驼肉嫩化效果的影响 如图 4 可知, 超声波功率大小对驼肉剪切力具有显著影响($P<0.05$)。超声波功率在 0~180 W 内, 驼肉剪切力不断降低, 当超声波功率为 180 W 时, 驼肉的剪切力最低, 为 15.23 kg。这是由于超声波产生的机械振动能够使骆驼肌肉中的肌原纤维发生断裂, 导致肌纤维间隙增大, 降低结缔组织的机械强度, 使其变得更加柔软。吴平等[21] 用不同的超声波功率处理鸡胸肉, 随着超声波功率增大, 鸡胸肉的剪切力逐渐下降, 在 240 W 时达到最低值 12.68 N, 此时肉质嫩度因超声空化效应导致的肌原纤维结构被破坏而减小。然而,

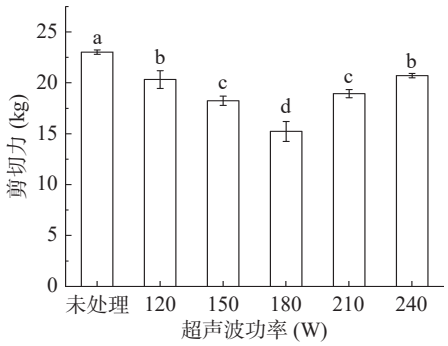


图 4 超声波功率对驼肉剪切力的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic power on the shearing force of camel meat

由于超声波功率过大(大于 240 W)，组织中的蛋白结构被过度裂解且结缔组织过分降解，导致肌肉组织的超微网状结构被破坏，使剪切力上升。因此，选择超声波功率 180 W 作为驼肉的最佳嫩化条件。

2.2　响应面试验设计

超声波协同木瓜蛋白酶对驼肉嫩化的工艺优化根据 Box-Behnken 试验设计了 17 组试验，5 组为中心点重复试验，结果见表 2。本试验以剪切力作为响应值，利用 Design-Expert 13 软件对剪切力值 Y 进行多元回归拟合。得到二次多项式拟合方程为：$Y=15.76+0.1638A+0.1625B-0.2762C+0.7325AB+0.0200AC-0.1025BC+1.92A^2+2.77B^2+2.53C^2$。

表 2　Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2　Design and results of the response surface experiments

实验号	木瓜蛋白酶浓度（A）	超声波时间（B）	超声波功率（C）	剪切力（kg）
1	1	−1	0	19.62
2	−1	0	−1	19.97
3	−1	0	1	20.59
4	1	0	−1	19.79
5	0	0	0	15.86
6	−1	1	0	19.82
7	1	0	1	20.49
8	0	10	−1	20.78
9	0	0	0	15.98
10	0	−1	1	21.56
11	0	0	0	15.68
12	−1	−1	0	21.60
13	1	1	0	20.77
14	0	0	0	15.84
15	0	−1	−1	20.91
16	0	1	1	21.02
17	0	0	0	15.45

回归模型的显著性检验和方差分析见表 3。由表 3 可知，该模型的 F 值为 258.17($P<0.01$)，表明模型显著。失拟项的 F 值为 0.7463，$P=0.5783$，$P>0.05$，故失拟项不显著，模型合适。回归模型系数 $R^2=0.9970$，矫正决定系数 $R^2_{Adj}=0.9931$，说明回归方程可以较好地描述各因素与响应值之间的真实关系，可以通过该回归方程确定超声波协同木瓜蛋白酶对驼肉嫩化的最佳工艺条件。

方差分析结果表明，木瓜蛋白酶浓度和超声波时间对驼肉嫩度的影响显著($P<0.05$)，超声波功率对驼肉嫩度的影响极显著($P<0.01$)，根据 F 值的大小，可以看出驼肉嫩度的各因素按影响大小排序依次为超声波功率(C)>木瓜蛋白酶浓度(A)>超声波时间(B)。

交互项中 AB(木瓜蛋白酶浓度和超声时间)项影响极显著($P<0.01$)，平方项 A^2、B^2、C^2 影响极显著($P<0.01$)。各交互项之间的影响大小为：AB>BC>AC，二次项影响大小为 $B^2>C^2>A^2$。根据回归方程做出等高线图及三维曲面图，如图 5 所示。

在响应曲面图上可以根据图的坡度来反映各嫩化处理因素对剪切力值的影响大小。三维曲面的倾斜程度越大说明该因素对指标的影响越显著，反之倾斜度越小则说明对指标的影响越不显著[22]。由图 5 可以看出，较木瓜蛋白酶浓度和超声波时间因素而言，超声波功率的坡度较陡，说明超声波功率对剪切力值的影响较大，而木瓜蛋白酶浓度和超声波时间对剪切力值的影响较小，这与前面的回归方程结果相吻合；图中剪切力由等高线的中心区域向边缘区域逐渐增大，中心区域剪切力最小，等高线越密集且呈椭圆形，表示影响越显著。

表 3　回归模型方差分析表

Table 3　Analysis of variance for the fitted quadratic response surface regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	86.60	9	9.62	258.17	<0.0001	**
A	0.2145	1	0.2145	5.76	0.0475	*
B	0.2113	1	0.2113	5.67	0.0488	*
C	0.6105	1	0.6105	16.38	0.0049	**
AB	2.15	1	2.15	57.58	0.0001	**
AC	0.0016	1	0.0016	0.0429	0.8418	不显著
BC	0.0420	1	0.0420	1.13	0.3236	不显著
A^2	15.47	1	15.47	414.93	<0.0001	**
B^2	32.40	1	32.40	869.29	<0.0001	**
C^2	26.98	1	26.98	723.95	<0.0001	**
残差	0.2609	7	0.0373			
失拟项	0.0936	3	0.0312	0.7463	0.5783	不显著
纯误差	0.1673	4	0.0418			
总和	86.87	16				
R^2	0.9970					
R^2_{Adj}	0.9931					

注：*为差异显著($P<0.05$)；**为差异极显著($P<0.01$)。

2.3　验证试验

通过 Design-Expert 13 软件分析，得到最佳优化条件后，将调整后的嫩化参数木瓜蛋白酶浓度 117 U/mL、超声波时间 50 min 和超声波功率 183 W 应用到验证试验中，得到驼肉剪切力平均值为 15.71 ± 0.51 kg。与模型预测值(15.76 kg)非常接近，表明该模型准确，证明优化后的实验工艺条件可靠合理。

2.4　超声波协同木瓜蛋白酶处理对驼肉品质的影响

2.4.1　剪切力及蒸煮损失　由图 6A 可知，未处理组的驼肉剪切力最大，为 22.37 kg；而协同处理组的剪切力最低，为 14.20 kg。由此可知超声波协同木瓜蛋白酶处理对驼肉嫩化效果显著，剪切力明显降低($P<0.05$)。超声波和木瓜蛋白酶协同处理过程中，超声波的机械力和空化作用促使驼肉组织蛋白酶释放，促进钙激活因子的扩散，同时也削弱了肌节的连接力，进而产生了嫩化作用[23]。相较于协同处理组，单一的酶处理组和超声波处理组的剪切力更高，说明单独使用一种处理的嫩化效果不及协同处理。

由图 6B 可知，蒸煮损失由大到小排序为未处理>协同处理>超声波处理≈酶处理；协同处理组的蒸煮损失为 43.23%±3.44%，与未处理组相比降低了 8.64%。超声波协同木瓜蛋白酶处理导致驼肉蛋白

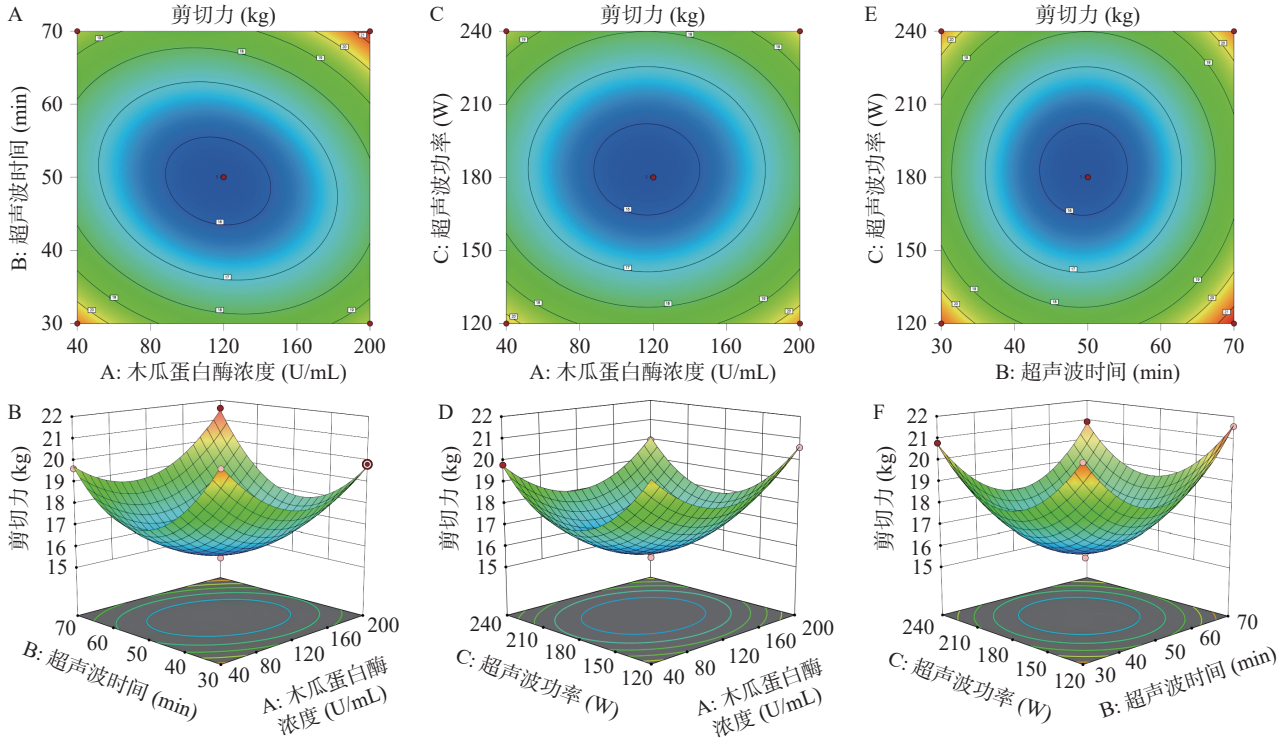


图 5　各因素交互效应对剪切力的等高线图和响应面图

Fig.5　Contour diagram and response surface diagram of the interaction effect of each factor on the shear force

质网络结构中的水分增加，并且木瓜蛋白酶水解导致持水能力增加，进而蒸煮损失降低。未处理组蒸煮损失（47.32%）显著高于超声波和酶处理组（P<0.05），说明超声波和酶处理对于改善驼肉的蒸煮损失有着重要的作用，超声波产生的空化效应增加了肌纤维之间的间隙，有助于肌肉纤维中水分的保持[24]；而超声波又会促进木瓜蛋白酶作用，降低蒸煮损失。

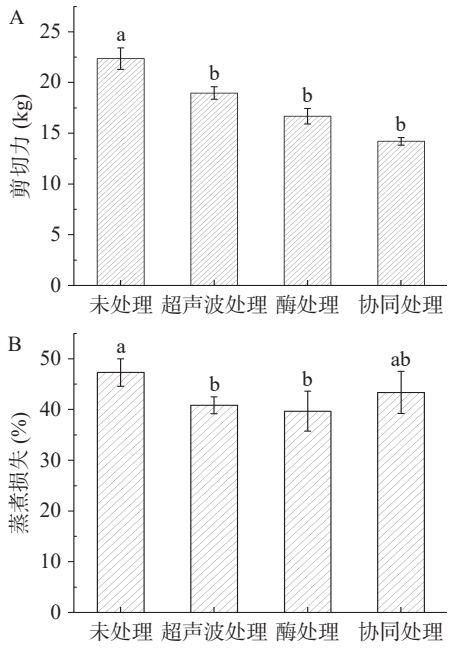


图 6　超声波协同木瓜蛋白酶处理对驼肉剪切力及蒸煮损失的影响

Fig.6　Effect of ultrasonic and papain treatment on shearing force and cooking loss of camel meat

2.4.2　色差　由图 7 色差结果可知，与未处理相比，协同处理对驼肉 L^*值影响显著（P<0.05）。超声波通过空化作用物理破坏肌纤维膜，释放内源性钙蛋白酶，增强嫩化，同时促进木瓜蛋白酶渗透。这一过程可能加速肌红蛋白释放至细胞外，氧化为高铁肌红蛋白（导致 L^*值下降），肌原纤维结构的破坏促进了驼肉的嫩化。超声波处理可以促进蛋白酶的作用，使得肌纤维束缚住大量不易流动水，导致水分子产生自由基，加深肌红蛋白的氧化，从而产生褐色的高铁肌红蛋白，使驼肉颜色变暗，L^*值减小。超声波处理对驼肉 a^*值影响较为明显（P<0.05），而酶处理对驼肉 b^*值影响较为明显。驼肉经过超声波处理会形成羟基自由基等，将驼肉肌红蛋白氧化成氧合肌红蛋白，导致 a^*值增加；木瓜蛋白酶处理驼肉的过程中，肉类暴露在空气中，肌红蛋白更容易被氧化为高铁肌红蛋白，导致肉色变暗，b^*值增加。

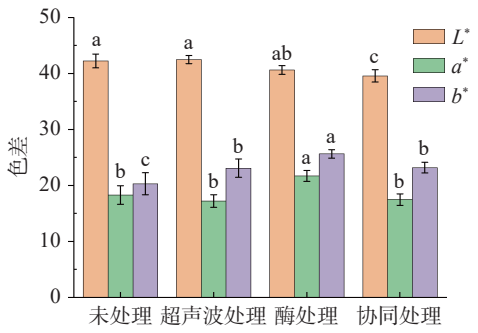


图 7　超声波协同木瓜蛋白酶处理对驼肉色差的影响

Fig.7　Effect of ultrasonic and papain treatment on color difference of camel meat

2.4.3　质构特性　表 4 为超声波协同木瓜蛋白酶处理对驼肉质构指标的影响。经协同处理后驼肉的硬度、内聚性、咀嚼性显著降低（$P<0.05$），弹性有所增加，说明木瓜蛋白酶嫩化处理后驼肉的肉质变得柔嫩，且抵抗受损，保持自身完整性的能力有所提高。张新斌[25] 也发现使用超声波辅助蛋白酶处理牛肉干其硬度、内聚性、咀嚼性降低，弹性有所增加，牛肉干品质得到改善。

表 4　超声波协同木瓜蛋白酶处理对驼肉质构的影响
Table 4　Effect of ultrasonic and papain treatment on texture of camel meat

质构	未处理	超声波处理	酶处理	协同处理
硬度（g）	8424.54±158.33^{a}	4222.82±260.80^{b}	4026.05±139.32^{b}	3386.57±297.92^{c}
弹性	0.42±0.04^{c}	0.53±0.03^{b}	0.52±0.05^{b}	0.68±0.08^{a}
咀嚼度（g）	2569.77±240.31^{a}	1340.58±88.46^{b}	1468.35±110.00^{b}	669.77±66.64^{c}
内聚性	0.58±0.06^{a}	0.47±0.03^{b}	0.49±0.02^{b}	0.40±0.02^{c}

注：同行不同小写字母表示具有显著性差异（$P<0.05$）。

2.5　超声波协同木瓜蛋白酶处理对驼肉蛋白质的影响

2.5.1　SDS-PAGE 分析　由图 8 可知，与未处理组（泳道 1）相比，协同处理组（泳道 2）在 220 kDa 和 100 kDa 处谱带颜色变浅，表明木瓜蛋白酶将驼肉中的大分子蛋白（肌球蛋白重链和 C 蛋白）水解，超声波促进木瓜蛋白酶水解使得蛋白明显降解，条带颜色变浅；20 kDa 以下的条带更清晰，检测到一些低分子量肽或片段，可能是蛋白水解降解的产物。单一处理组与未处理组相比，促进蛋白质解离，木瓜蛋白酶对蛋白质水解作用较为明显。协同处理组与单一处理组相比，在 100 kDa 处条带薄且颜色浅，肌球蛋白重链强度略有降低，未观察到肌动蛋白（45 kDa）降解/水解。因此，观察到的肌球蛋白重链的减少归因于

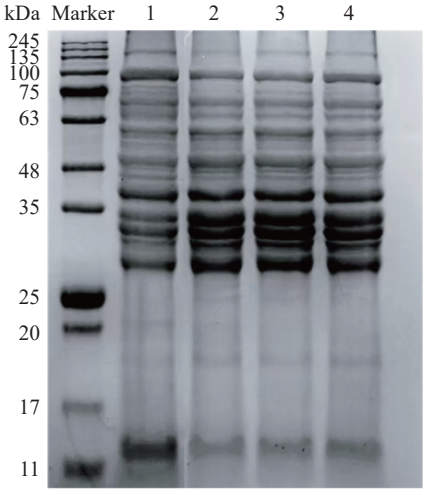


图 8　超声波协同木瓜蛋白酶处理对驼肉蛋白质组成变化的影响

Fig.8　Effect of ultrasonic and papain treatment on protein composition of camel meat

注：1.未处理组；2.协同处理组；3.超声波处理组；4.酶处理组。

木瓜蛋白酶的水解，同时超声波处理促进木瓜蛋白酶水解，协同处理组可以更好地促进蛋白质解离，改善驼肉嫩度。

2.5.2　肌原纤维蛋白二级结构的变化　本试验采用傅里叶红外光谱对不同处理组的蛋白质二级结构进行分析，其中酰胺 I 带（1600~1700 cm^{-1}）是蛋白二级结构的特殊表征[26]。由图 9A 可知，不同处理组驼肉肌原纤维蛋白的酰胺 I 带有明显的变化，峰形有所差异，且发生偏移，说明超声波处理、酶处理以及协同处理都可以改变驼肉肌原纤维蛋白的二级结构。

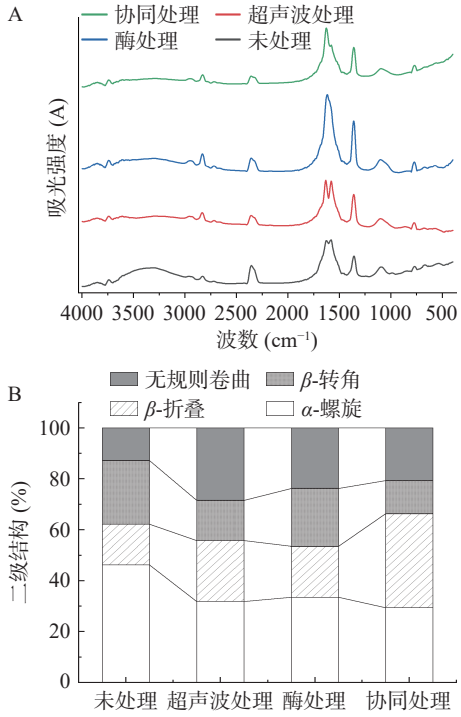


图 9　超声波协同木瓜蛋白酶处理对驼肉肌原纤维蛋白二级结构的影响

Fig.9　Effect of ultrasonic and papain treatment on secondary structure of myofibrillar protein of camel meat

图 9B 表示，与未处理组相比，经过协同处理后，α-螺旋的含量由 46.21% 降低至 29.40%，β-转角的含量由 25.11% 降低至 13.08%，而 β-折叠和无规卷曲的含量则有所增加。表明 α-螺旋等有序结构向 β-折叠、无规则卷曲等无序结构的转变，有序结构减少，维持蛋白质结构稳定的氢键等作用力减弱，蛋白稳定性降低。这一结果与张梦琪[27] 的研究结果基本一致。

3　结论

本研究将超声波与木瓜蛋白酶处理相结合应用于驼肉的嫩化过程，探究超声波协同木瓜蛋白酶处理对驼肉嫩度以及肉品质的影响。研究发现，在木瓜蛋白酶浓度为 120 U/mL、超声波时间 50 min 和超声波功率 180 W 处理条件下，驼肉嫩化效果最佳。协同处理通过超声波空化效应和木瓜蛋白酶的水解作用，降解了骆驼肌肉中的肌原纤维蛋白和结缔组织蛋白质。与未处理组相比，电泳结果显示在 220 kDa

和 100 kDa 处谱带颜色变浅，20 kDa 以下的条带更清晰，证实了肌球蛋白重链和 C 蛋白的降解，这与剪切力（下降 36.52%）、硬度（下降 59.80%）及蒸煮损失（减少 8.64%）的显著降低直接相关（$P<0.05$）。此外，肌原纤维蛋白二级结构从 α-螺旋向 β-折叠和无规卷曲的转变，表明蛋白质有序性破坏和稳定性降低，进一步促进了酶解效率。这些结构变化同时导致肌纤维间持水性改变，表现为 L^* 值显著降低及质构特性的整体改善。本研究为驼肉的嫩化加工提供了科学依据和优化工艺参数，具有重要的应用价值。

© 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] 孙树远. 驼肉复合嫩化技术及汉堡肉饼的开发研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022. [SUN Shuyuan. Research on tenderization technology of camel meat and development of burger patties[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.]

[2] 斯仁达来, 何静, 明亮, 等. 不同年龄驼肉蛋白组成的差异分析[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 218−228. [SRENDALAI, HE Jing, MING Liang, et al. Analysis of the differences in protein composition of camel meat among different ages[J]. Food Science, 2024, 45(2): 218−228.]

[3] 孙树远, 陈琪, 何静, 等. 木瓜蛋白酶与超高压技术嫩化驼肉的研究[J]. 中国食品学报, 2023, 23(4): 239−250. [SUN Shuyuan, CHEN Qi, HE Jing, et al. Study on the tenderization of camel meat by papain and ultra-high pressure technology[J]. Journal of Chinese Food Science, 2023, 23(4): 239−250.]

[4] DEMIR H, CELIK S, SEZER Y C. Effect of ultrasonication and vacuum impregnation pretreatments on the quality of beef marinated in onion juice a natural meat tenderizer[J]. Food Science Technology International, 2022, 28(4): 340−352.

[5] WANG L L, HAN L, MA X L, et al. Effect of mitochondrial apoptotic activation through the mitochondrial membrane permeability transition pore on yak meat tenderness during postmortem aging[J]. Food Chemistry, 2017, 234: 323−331.

[6] CHEN Q H, HE G Q, JIAO Y C, et al. Effects of elastase from a Bacillus strain on the tenderization of beef meat[J]. Food Chemistry, 2006, 98(4): 624−629.

[7] PENA-GONZALEZ E, ALARCON-ROJO D A, GARCIA-GALICIA I, et al. Ultrasound as a potential process to tenderize beef: Sensory and technological parameters[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 53: 53134−53141.

[8] BOISTIET-MARQUIS E, LAGSIR-OULAHAL N, CALLARD M. Applications des ultrasons de puissance en industries alimentaires[J]. Industries Alimentaires et Agricoles, 1999, 116(3): 23−31.

[9] LIU L, NIU F N, XIONG Y T, et al. Ultrasound-assisted low-sodium salt curing to modify the quality characteristics of beef for aging[J]. Ultrason Sonochemistry, 2024, 111: 107134.

[10] 杨裕如, 潘德胤, 马金明, 等. 超声处理修饰羊肌肉蛋白结构改善嫩度的研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 45−53. [YANG Yuru, PAN Deyin, MA Jinming, et al. Research on improving tenderness by modifying sheep muscle protein structure with ultrasonic treatment[J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(21): 45−53.]

[11] 袁佳艺, 蒋飞燕, 郝晨铭, 等. 超声波辅助滚揉腌制对鸭腿肉品质的影响研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(12): 100−106. [YUAN Jiayi, JIANG Feiyan, HAO Chenming, et al. Study on the effect of ultrasonic assisted rolling and salting on the quality of duck leg meat[J]. Food and Fermentation Industry, 2025, 51(12): 100−106.]

[12] 王清波, 张憨, 杨朝晖. 响应面法优化超声波辅助木瓜蛋白酶嫩化牛肉[J]. 山东农业科学, 2018, 50(5): 136−142. [WANG Qingbo, ZHANG Min, YANG Zhaohui. Optimization of beef tenderization by ultrasonic-assisted papain using response surface methodology[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(5): 136−142.]

[13] 潘治利, 李航天, 雷萌萌, 等. 超声波联合木瓜蛋白酶处理对鸡胸肉嫩度的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 162−167. [PAN Zhili, LI Hangtian, LEI Mengmeng, et al. The effect of ultrasonic combined with papain treatment on the tenderness of chicken breast meat[J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(11): 162−167.]

[14] 代雯, 黄业传, 韩佳钰, 等. 不同 pH 值对木瓜蛋白酶活性的影响及分子机制[J]. 肉类研究, 2024, 38(10): 9−14. [DAI Wen, HUANG Yechuan, HAN Jiayu, et al. The effect of different pH values on papain activity and its molecular mechanism[J]. Meat Research, 2024, 38(10): 9−14.]

[15] 中华人民共和国农业部. 肉嫩度的测定剪切力测定法: NY/T 1180-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1−4. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Shear Force Method for Meat Tenderness Measurement: NY/T 1180-2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006: 1−4.]

[16] LI C B, LI J, ZHOU G H, et al. Electrical stimulation affects metabolic enzymephosphorylation, protease activation, and meat tenderization in beef[J]. Journal of Animal Science, 2012, 90(5): 43−51.

[17] CHENG J R, ZHU M J, LIU X M. Insight into the conformational and functional properties of myofibrillar protein modified by mulberry polyphenols[J]. Food Chemistry, 2020, 308: 125592.

[18] 常海军, 伯朝英, 石源伟, 等. 姜黄素对羟自由基诱导的肌原纤维蛋白氧化及结构的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 74−83. [CHANG Haijun, BO Chaoying, SHI Yuanwei, et al. Effects of curcumin on myofibrillar protein oxidation and structure induced by hydroxyl radicals[J]. Journal of Chinese Food Science, 2023, 23(11): 74−83.]

[19] 王文艳, 陈睿璇, 魏贞, 等. 超声波辅助菠萝蛋白酶对牛肉嫩度的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(6): 110−116. [WANG Wenyan, CHEN Ruixuan, WEI Zhen, et al. Effect of ultrasound-assisted bromelain on beef tenderness[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(6): 110−116.]

[20] LI H J, FENG J, SHI S, et al. Evaluation of effects of ultrasound-assisted saucing on the quality of chicken gizzards[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106038.

[21] 吴平, 姚芳, 王正云, 等. 超声协同嫩化剂改善淘汰蛋鸡肉嫩度的工艺优化及其对肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 56−68. [WU Ping, YAO Fang, WANG Zhengyun, et al. Optimization of ultrasound-assisted tenderizer technology to improve the tenderness of cull hen meat and its impact on meat quality[J]. Food Industry Technology, 2024, 45(12): 56−68.]

[22] 张杨, 胡磊, 汪少芸, 等. 响应面优化酶解法制备蒲公英籽蛋白抗氧化肽工艺[J]. 食品工业科技, 2016, 37(5): 258−262. [ZHANG Yang, HU Lei, WANG Shaoyun, et al. Optimization of

the preparation of dandelion seed protein antioxidant peptides by response surface methodology enzymatic hydrolysis process[J]. Food Industry Science and Technology, 2016, 37(5): 258−262.]

[23] DU X, LI H, NUERJIANG M, et al. Application of ultrasound treatment in chicken gizzards tenderization: Effects on muscle fiber and connective tissue[J]. Ultrason Sonochemistry, 2021, 79: 105786.

[24] LI L L, ZHANG G Y, ZHENG Y, et al. Effects of ultrasound-assisted curing on the quality and microstructure of low-sodium beef jerky[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 101: 106679−106679.

[25] 张新斌. 超声波辅助蛋白酶对牛肉干品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024. [ZHANG Xinbin. The impact of ultrasonic-assisted protease on the quality of dried beef[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.]

[26] 吴佳, 赵鸾, 魏娜, 等. 动态高压微射流处理对低盐肌原纤维蛋白溶解度和结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(11): 129−135. [WU Jia, ZHAO Luan, WEI Na, et al. Effects of dynamic high-pressure microfluidization treatment on the solubility and structure of low-salt myofibrillar proteins[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(11): 129−135.]

[27] 张梦琪. 菠萝蛋白酶-超声波联合技术对冻干鸡肉加工工艺及品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024. [ZHANG Mengqi. Effects of bromelain-ultrasonic combined technology on the processing technology and quality of freeze-dried chicken meat [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.]