

超声处理对哈萨克羊肉品质的影响

张莉, 孙佳宁, 朱明睿, 邢世均, 刘广娟, 肖志远, 姜美龄, 王子荣*

(新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: 为研究超声对羊肉品质的影响, 采用超声波 (40 kHz、100 W、时间 0、20、40 min) 处理羊半膜肌, 测定其在 4 °C 下 0、2、12、24、72、120、168 h 的理化指标及肌原纤维蛋白 (Myofibrillar proteins, MP) 特性等指标。结果表明: 成熟过程中, 超声处理后肉品质显著高于直接冷藏组 ($p < 0.05$), 超声 20 min 组第 168 h, pH 值 (5.58)、L* 值 (38.82)、肌原纤维小片化指数 (Myofibrillar fragmentation index, MFI) (69.40), 蛋白溶解度 (17.40%) 均显著高于直接冷藏组 ($p < 0.05$), 剪切力 (37.54 N) 显著低于直接冷藏组 ($p < 0.05$), 具有较好的食用品质; 同期, 超声 40 min 半膜肌的蒸煮损失 (26.23%) 比超声 20 min (25.83%) 大, 因此为了减少质量损失及能源消耗, 认为超声时间控制在 20 min 左右较好; 超声处理后肌肉成熟时间为 24 h, 相比直接冷藏组 (72 h) 缩短了 48 h。综上, 超声处理能够提高肉品嫩度、缩短肌肉成熟时间, 对肉品的改善具有积极作用。

关键词: 超声处理; 羊肉; 嫩度; 品质

文章编号: 1673-9078(2022)04-121-128

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.4.0808

Effects of Ultrasonic Treatments on the Quality of Kazakh Lamb

ZHANG Li, SUN Jianing, ZHU Mingrui, XING Shijun, LIU Guangjuan, XIAO Zhiyuan, JIANG Meiling,

WANG Zirong*

(College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)

Abstract: To examine the effects of ultrasound on lamb quality, ultrasonic treatments (at 40 kHz and 100 W for 0, 20, and 40 min) were performed on the semimembranosus muscles of sheep. The physical and chemical properties as well as the myofibrillar protein characteristics of the lamb were measured at 4 °C at 0, 2, 12, 24, 72, 120, and 168 h. The results demonstrate that during aging, the quality of lamb meat after the ultrasonic treatment is significantly better than that of the untreated lamb meat which was directly subjected to cold storage ($p < 0.05$). After 168 h, the pH value (5.58), L* value, myofibrillar fragmentation index (69.40), and protein solubility (17.40%) of the lamb meat subjected to 20-min ultrasonic treatment were considerably higher than those of the untreated lamb meat subjected to direct cold storage ($p < 0.05$), whereas the shear force of the former (37.54 N) was remarkably lower than that of the latter ($p < 0.05$). These indicators reveal the improved quality of the ultrasonic-treated lamb meat. In addition, the cooking loss of the semimembranosus muscles from the lamb meat that underwent 40-min treatment (26.23%) was greater than that from lamb meat treated for only 20 min (25.83%). Hence, to reduce the quality loss and energy consumption, ultrasonic treatments for approximately 20 min are recommended. The aging time of semimembranosus muscles from the ultrasonic-treated group was 24 h, which was 48 h shorter than that of muscle from untreated lamb (72 h). Overall, ultrasonic treatments can enhance lamb tenderness and improve meat quality while shortening the aging time.

Key words: ultrasonic treatment; lamb; tenderness; quality

引文格式:

张莉, 孙佳宁, 朱明睿, 等. 超声处理对哈萨克羊肉品质的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(4): 121-128, +9

ZHANG Li, SUN Jianing, ZHU Mingrui, et al. Effects of ultrasonic treatments on the quality of kazakh lamb [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(4): 121-128, +9

哈萨克羊属“肉脂兼用”型, 在新疆存栏数量占

收稿日期: 2021-07-27

基金项目: 新疆自治区重点研发计划项目 (2020B02017-2)

作者简介: 张莉 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与安全,

E-mail: 1587779886@qq.com

通讯作者: 王子荣 (1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与安全,

E-mail: wangzirong212@126.com

比最大^[1]。该品种羊常年放牧, 适应能力较强, 具有四肢健壮, 肌肉发达的特点。但由于其生产周期长, 导致肉硬度大, 口感较差^[2], 消费者的接受度低。肉品嫩度不仅与自身品种有关, 还与宰后成熟程度有关。动物经屠宰死亡后, 生命活动也随之停止, 糖酵解过程进入无氧呼吸阶段, 肌肉开始僵直, 此时肉的硬度大、保水性差、加工性能低。随着成熟时间的延长,

胴体在解僵的作用下硬度降低,嫩度增加,系水力和风味均有所增加,从肌肉转变为可食用肉。研究表明,宰后充分成熟对肉的颜色、嫩度及保水性等有明显改善^[3,4],通过延长成熟期可以提高肉的食用品质^[5]。因此了解原料肉在僵直-成熟过程中的品质变化,对肉制品加工企业有重要意义。

超声波是指频率在 20~100 kHz、强度>1 W/cm²的物理加工技术,具有效率高、操作简单、污染小及安全性高的优点,广泛应用于肉制品加工^[6]。超声波产生的空化、机械及热效应不仅可以改变肉制品的蛋白结构^[7,8],还可以破坏肌肉细胞的完整性、促进酶促反应作用于肉类组织。该技术能够有效改善肉品嫩度,缩短肉品所需成熟时间,减少资源浪费。李兰会等^[9]发现超声波水浴处理,能明显提高山羊肉块的嫩度,使山羊肉提前 3 d 成熟。朱琪等^[10]利用超声波处理羊背最长肌,发现超声波处理降低了欧拉藏羊肉的剪切力值、硬度值,提高了欧拉藏羊肉的蛋白溶解性、MFI,认为超声处理能够较大程度改善肌肉品质。

目前超声波对羊肉嫩度影响效果研究较少,因此本研究以哈萨克羊半膜肌为试验对象,分别超声处理 0、20、40 min 后置于 4 °C 冰箱进行冷藏成熟,以 pH 值、ATP 含量、色差、蒸煮损失、剪切力、MFI 及 MP 溶解度、浊度等指标为评判标准,研究超声对羊肉嫩度及品质的影响,为预测和控制宰后肌肉嫩化的速度和程度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

哈萨克羊(14 月龄),新疆乌鲁木齐市米东区新华凌市场;KH₂PO₄,分析纯,云诚化工有限公司;K₂HPO₄,分析纯,廊坊天科生物科技有限公司;KCl,分析纯,山东凯米科化工股份有限公司;牛血清白蛋白,北京索莱宝科技有限公司;ATP 含量测定试剂盒、总蛋白定量测定试剂盒,南京建成生物工程研究所。其余试剂均为分析纯。

KQ250DE 数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;HR40-IIA2 生物安全柜,青岛海尔特种电器有限公司;FSH-2A 可调高速匀浆机,常州天瑞仪器有限公司;SF-GL-16A 高速冷冻离心机,上海菲恰尔分析仪器有限公司;T6 新世纪紫外分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2 试验方法

1.2.1 原料处理

哈萨克羊(6 只未去势的 14 月龄公羊、质量约 50 kg),宰前 24 h 禁食禁水,屠宰放血 30 min 内取出半膜肌,剔除肌肉表面脂肪、筋膜及结缔组织,装入标记好的自封袋,置于冰盒内(0~4 °C)2 h 内运回实验室。

1.2.2 试验设计

将半膜肌沿肌纤维方向分割成 200±5 g 的肉块,分别置于标记好的真空包装袋内,浸于超声波清洗器内,设置超声频率:40 kHz,功率:100 W,超声时间:20 min、40 min,温度:20 °C 左右,对照组采用直接冷藏处理。所有处理组均设置 3 个平行,于 4 °C 冰箱冷藏 0、2、12、24、72、120、168 h 后测定相关指标^[10]。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 pH 值

参照郭守立等^[11]的方法,将 TESTO 205 便携式 pH 计的探头插入肉样 2 cm 左右,测定其 pH 值,待读数稳定,记录结果并取平均值,每个样品随机取 6 个点进行测试。

1.3.2 ATP 含量

参照李桂霞等^[12]的方法,采用 ATP 含量测试盒测定。利用天平准确称取 1.0 g 肉样,加入 9 mL 煮沸的双蒸水,调整高速匀浆机转速为 11000 r/min,冰浴条件下匀浆 3 次,每次 30 s(中间间隔 60 s),制成 10% 的匀浆液,置于 10 mL 离心管内,并在沸水中煮 10 min,取出后混匀抽提 1 min,设置离心机参数,转速:3500 r/min、时间:10 min,取上清液待用。用双蒸水将上清液浓度调整为 0.5%,总蛋白定量测定试剂盒测定蛋白浓度,以每克蛋白含有 ATP 的物质的量作为 ATP 含量单位。

1.3.3 色差

参照郭守立等^[11]的方法,将肉样取出后用吸水纸擦干其表面的水分并置于试验台表面,同时对色差仪进行校准,校准完毕测定样品的亮度值(L*值)、红绿值(a*值)及蓝黄值(b*值),每个样品随机选取 6 个点进行测定,结果取平均值。

1.3.4 蒸煮损失

参考 Gambuteanu 等^[13]的方法,并在其基础上进行优化。沿肌肉纤维方向,将肉样切成 5 cm×3 cm×2 cm 肉条,用吸水纸将其表面水分擦干称重,记为 m₁并置于蒸煮袋内,将蒸煮袋置于 85 °C 水浴锅中加热,当肉样中心温度为 70±1 °C,立即取出,并将样品流出汁液进行擦拭,冷却至室温后对肉条称重,记为 m₂,称重后的肉样用于剪切力测定,蒸煮损失按照下列公式进行计算。

$$\text{蒸煮损失} / \% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.5 剪切力

参照李桂霞等^[12]的方法。沿肌纤维方向用取样器取直径为 1 cm 的肉柱,利用肌肉嫩度仪下测定剪切力。

1.3.6 MFI

参考 Culler 等^[14]的方法,利用天平准确称取 1.0 g 肉样,切碎后加入 10 mL 预冷的 MFI 缓冲液(100 mmol/L KCl、11.2 mmol/L KH₂PO₄、8.8 mmol/L K₂HPO₄、1 mmol/L MgCl₂、1 mmol/L NaN₃),按照 1.3.2 的方法制备组织匀浆液,再将匀浆液置于高速冷冻离心机中,设置参数为转速:2500 r/min、温度:4 ℃、时间:20 min,去除上清液,此过程重复两次,得到 MP 沉淀。再加入 5.0 mL 预冷的 MFI 缓冲液将沉淀充分悬浮,用 200 目筛网过滤悬浮液去除结缔组织,利用双缩脲法测定滤液的蛋白浓度,最后用 MFI 缓冲液将蛋白浓度调整为 0.50±0.05 mg/mL,540 nm 波长处测定紫外吸光度 A,结果乘 200 得到 MFI。

1.3.7 MP 溶解度、浊度

1.3.7.1 MP 提取

参考 Park 等^[15]的方法,利用天平准确称取 1.0 g 肉样,加入 10 mL 预冷的 920 mmol/L 的磷酸钾缓冲液(0.1 mol/L KCl、2 mmol/L MgCl₂、2 mmol/L EDTA pH 6.8),按照 1.3.2 的方法制备组织匀浆液,将匀浆液置于高速冷冻离心机中,设置参数转速:2500 r/min、温度:4 ℃、时间:20 min,弃上清液,此过程重复两次,得到 MP 沉淀,将沉淀与 4 mL 0.1 mol/L 氯化钠溶液充分悬浮,将悬浮液置于高速冷冻离心机内,设置参数转速:2500 r/min、温度:4 ℃、时间:20 min,弃上清液,此过程重复两次,得到纯化 MP 沉淀。

1.3.7.2 MP 溶解度

参照 Zhang 等^[16]的方法,并稍做优化。向 MP 沉淀内加入 1.3.7.1 中的磷酸缓冲液使浓度调整为 2.0 mg/mL,取 5 mL 加入 10 mL 离心管内,设置高速冷冻离心机参数转速:10000 r/min、温度:4 ℃、时间:20 min,双缩脲法测定上清液蛋白质浓度。

1.3.7.3 MP 浊度

参照 Li 等^[17]的方法,向 MP 沉淀中加入 1.3.7.1 中的磷酸缓冲液使调整浓度为 1.0 mg/mL,在 660 nm 处测定紫外吸光值,磷酸盐缓冲液做空白对照,每个样品测定 3 次,结果取平均值。

1.4 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2016 整理、作图,运用 SPSS 19.0 软件(SPSS 公司)(Duncan 法)分析数据

差异性,结果以(平均值±标准差)表示。

2 结果与讨论

2.1 超声处理对羊半膜肌 pH 值的影响

pH 值反映肌肉乳酸、无机磷酸的沉积量,间接反映糖酵解程度。超声处理羊半膜肌的 pH 值变化情况如图 1 所示。随成熟时间的延长,肌肉 pH 值呈先下降后缓慢上升趋势。超声处理组的 pH 值较直接冷藏组下降速度缓慢,且提前到达最低点,12 h 后大于直接冷藏组($p < 0.05$);超声处理组在 72 h 后 pH 值变化不显著($p > 0.05$),直接冷藏组在 120 h 后到达最小值(5.39)后小幅度上升。

机体死后呼吸停止,糖酵解进入无氧呼吸阶段,糖原分解产生乳酸导致机体 pH 值下降^[18],而后缓慢上升可能是微生物的繁殖作用或蛋白质发生降解产生含氮化合物^[19]。研究表明该技术可以延缓肉品 pH 值降低,高 pH 值肉的钙蛋白酶活性高、蛋白降解速度快且嫩度高^[20]。Got 等^[21]用超声波(2.6 MHz, 10 W/cm²)处理牛的半膜肌发现,初始 pH 值高的肉,嫩度较高;Jayasooriya 等^[22]用超声波(24 kHz, 12 W/cm²)处理发现其 pH 值降低缓慢,剪切力显著降低,与本研究结果一致。可能是由超声产生的空穴效应引起,空穴效应能使蛋白水解酶、脱氨基酶释放,提高碱性胺类的利用率^[23,24],而酸性蛋白基团的数量降低^[25],另外超声能够促进某些离子从细胞内释放到细胞外,导致某些离子基团位置发生改变^[26],最终导致 pH 值升高。

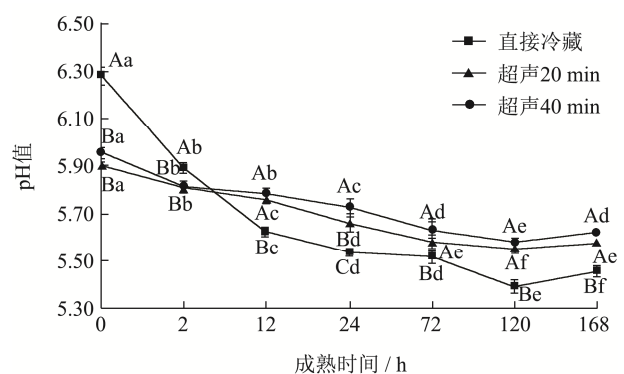


图 1 不同超声时间对羊半膜肌 pH 的影响

Fig.1 The effect of different ultrasound time on the pH of the semimembranosus in sheep

注:图中不同大写字母表示同一时间不同处理差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示同一处理不同时间差异显著($p < 0.05$),下同。

2.2 超声处理对羊半膜肌 ATP 含量的影响

ATP 是直接供给肌肉代谢的能源物质。不同处理下肌肉的 ATP 含量变化情况如图 2 所示。随着成熟时间的延长,各处理间均呈先上升后下降趋势,超声处理组显著低于直接冷藏组 ($p<0.05$)。半膜肌超声 20 min、超声 40 min 组分别在 12、2 h 后开始下降,72 h 后下降不明显,说明成熟完全,直接冷藏组在 24 h 后始终处于下降趋势。上述结果表明,超声处理可以使肌肉提前进入僵直期,并加快成熟进程。

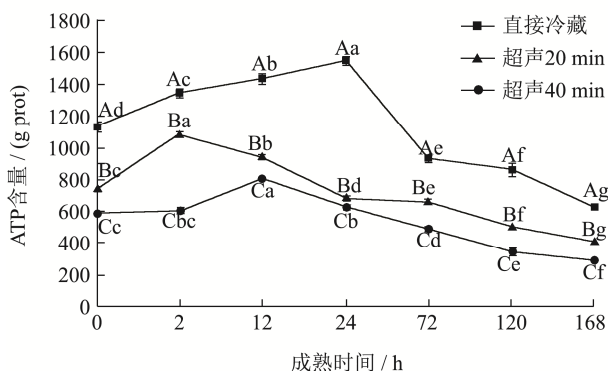


图 2 不同超声时间对羊半膜肌 ATP 含量的影响

Fig.2 The effect of different ultrasound time on the ATP content of the semimembranosus in sheep

宰后羊呼吸停止,但机体的功能活动仍在继续,为维持能量平衡,骨骼肌内的酶在无氧条件下进行糖代谢合成 ATP,产生乳酸^[27],随着肌肉内 ATP 的消耗殆尽,引发肌质网的钙泵功能奔溃,钙离子被释放但不能回收,随着肌浆钙离子浓度的增大,肌肉嫩度降低,进入僵直状态;另外 ATP 含量降低促进腺苷酸活化蛋白激酶 [Adenoisune5'-monophosphate (AMP)-activated protein kinase, AMPK]活化,它的活化会增加机体对葡萄糖的摄取,抑制糖原合成代谢,加快糖酵解进程,引起 pH 值发生变化,最终影响肌肉成熟

表 1 不同超声时间对羊半膜肌亮度值 (L^*)、红绿值 (a^*)、黄蓝值 (b^*) 的影响

Table 1 The influence of different ultrasound time on the brightness value (L^*), red-green value (a^*), blue-yellow value (b^*) of the semimembranosus in sheep

超声时间/min	成熟时间/h							
	0	2	12	24	72	120	168	
L^*	0	27.67±1.32 ^{ABa}	28.24±0.63 ^{Aa}	32.66±0.91 ^{Ab}	34.82±1.35 ^{Ab}	38.72±2.21 ^{Ac}	34.73±1.74 ^{Ab}	35.15±0.69 ^{Ab}
	20	30.44±1.40 ^{Ad}	36.03±2.13 ^{Bc}	35.16±1.13 ^{Bd}	37.37±1.09 ^{Bc}	45.24±1.77 ^{Ba}	37.98±0.54 ^{Bc}	38.82±1.48 ^{Bb}
	40	27.26±1.68 ^{Bd}	32.30±2.10 ^{Cc}	38.08±0.81 ^{Cb}	38.99±1.17 ^{Bb}	43.13±1.34 ^{Ba}	34.70±1.74 ^{Ac}	34.66±0.82 ^{Ac}
a^*	0	7.70±0.03 ^{Af}	8.71±0.03 ^{Ad}	9.54±0.02 ^{Ab}	10.37±0.03 ^{Aa}	9.21±0.02 ^{Ac}	8.56±0.04 ^{Ae}	7.55±0.03 ^{Ag}
	20	7.43±0.02 ^{Be}	8.35±0.04 ^{Bc}	9.46±0.02 ^{Bb}	9.67±0.02 ^{Ba}	8.31±0.03 ^{Bc}	8.25±0.02 ^{Bd}	7.45±0.02 ^{Be}
	40	7.37±0.05 ^{Bf}	8.18±0.02 ^{Ce}	8.65±0.03 ^{Cb}	8.86±0.64 ^{Ca}	8.32±0.05 ^{Bc}	8.26±0.03 ^{Bd}	7.38±0.04 ^{Bf}
b^*	0	7.78±0.42 ^{Aa}	6.65±0.33 ^{Aa}	7.85±0.90 ^{Aa}	7.72±0.52 ^{Aa}	6.94±1.52 ^{Aa}	7.32±0.88 ^{Aa}	7.02±0.57 ^{Aa}
	20	6.68±0.41 ^{Bde}	5.50±0.17 ^{Be}	8.61±0.57 ^{Abc}	11.76±1.11 ^{Ba}	9.27±0.83 ^{Bb}	8.29±1.10 ^{Abc}	7.40±0.53 ^{Ac}
	40	6.62±0.53 ^{Bc}	4.69±0.33 ^{Cd}	9.43±0.22 ^{Bb}	10.78±0.91 ^{Bb}	11.42±0.63 ^{Ca}	7.50±0.61 ^{Ac}	7.56±0.38 ^{Ac}

注:表中不同大写字母表示同一时间不同处理差异显著 ($p<0.05$),不同小写字母表示同一处理不同时间差异显著 ($p<0.05$)。

速度^[28-30],此外, Nakashima 等^[31]表明 AMPK 的激活刺激了骨骼肌中 MP 的降解,也对肉品嫩度有积极作用。本试验发现超声处理能够较大程度降低肌肉内 ATP 含量,进一步验证了超声处理可以降低肌肉硬度,提升肉品嫩度。

2.3 超声处理对羊半膜肌色差的影响

肉的颜色直接影响消费者的购买欲望,它是人们判断肉品新鲜度的重要指标^[32]。超声处理后羊半膜肌的色差变化情况如表 1 所示。随着成熟时间的延长,超声处理后肌肉 L^* 值均显著高于直接冷藏组 ($p<0.05$),而 a^* 值低于同期直接冷藏组 ($p<0.05$)。超声处理产生空化效应和机械效应,空化泡破裂产生局部的瞬时高温、高压^[33],使肌纤维结构遭到破坏,自由水含量上升, L^* 值升高,肉色更加鲜亮;但超声处理降低了羊肉的 a^* 值,分析认为是氧合肌红蛋白 (MbO_2) 被氧化生成褐色的高铁肌红蛋白 (Metmyoglobin, MetMb),且肌红蛋白变性,使其 a^* 值降低^[34]; b^* 值变化趋势不显著 ($p>0.05$),这与陈丽艳等^[35]研究结果一致,可能与超声功率和超声时间有关。

2.4 超声处理对羊半膜肌蒸煮损失的影响

蒸煮损失反映肉的保水性,超声处理后羊半膜肌的蒸煮损失变化情况如图 3 所示。不同处理下半膜肌的蒸煮损失变化趋势相同,0~24 h 逐渐上升至最大值,此时超声 40 min (35.67%) > 直接冷藏 (34.74%) > 超声 20 min (33.83%); 24~168 h 超声处理组显著低于直接冷藏组 ($p<0.05$),第 168 h 时,超声 20 min 与超声 40 min 分别降低了 3.28%、2.78%,说明超声处理能够在一定程度上提高肉的保水性。

超声强度、时间能够直接影响肉品持水性。Zou 等^[36]发现当超声强度高于 93.33 W/cm²时, 经腌制后的牛肉蒸煮损失逐渐增加; Zhang 等^[16]发现当超声强度低于 150 W/cm²时, MP 凝胶结构均匀致密且保水性较高, 但高于 150 W/cm²时, 凝胶内部出现孔洞, 且随着超声强度加大, 保水性显著降低。Li 等^[37]研究不同超声时间 (10、20、30、40 min) 对鸡胸肉蛋白功能特性的影响, 表明 10 min 或 20 min 均能提高其持水能力, 改善肌肉质构, 但 40 min 时, 产品持水能力显著降低, 失水率增加。

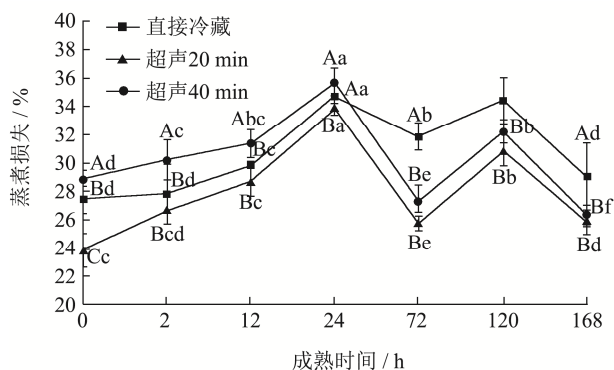


图3 不同超声时间对羊半膜肌蒸煮损失的影响

Fig.3 The effect of different ultrasound time on the cooking loss of the semimembranosus in sheep

2.5 超声处理对羊半膜肌剪切力的影响

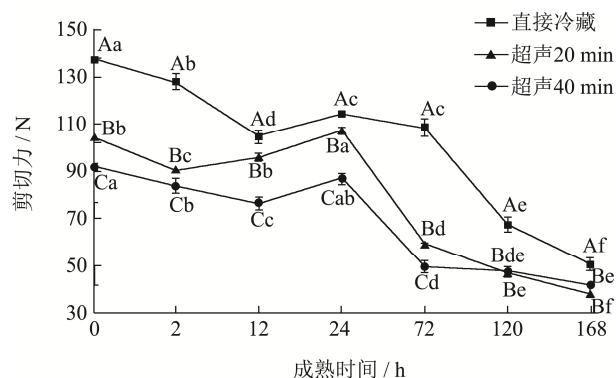


图4 不同超声时间对羊半膜肌剪切力的影响

Fig.4 The effect of different ultrasound time on the shear force of the semimembranosus in sheep

剪切力是评价肉嫩度的重要指标, 剪切力越大, 嫩度越差^[38]。超声处理后肌肉的剪切力变化情况如图4所示。随着成熟时间的延长, 肌肉各处理组均呈下降趋势, 超声处理组显著低于直接冷藏组 ($p < 0.05$), 12~24 h 时, 各处理组缓慢上升, 表明肌肉进入僵直前期。超声处理组在 24~168 h 显著下降至最小值 (超声 20 min 为 37.54 N, 超声 40 min 为 41.37 N) ($p < 0.05$), 而直接冷藏组缓慢下降至最小值 (50.42 N)。上述结果表明超声处理使得肌肉提前进入僵直

期, 并且对肉的嫩化起积极作用。

嫩度的大小是各种生物化学物质相互作用的结果, 受肌肉纤维收缩、胶原蛋白、结缔组织含量及 pH 值的影响^[39,40]。超声产生热效应、空化效应及机械效应能破坏肌肉结缔组织、MP 和溶酶体等, 使钙蛋白酶、组织蛋白酶及 Ca²⁺等固体物质提前释放并进入细胞间隙, 肌肉提前僵直; 随着成熟时间的延长, 肌纤维拉伸, 肌节长度增加, 实现肌肉嫩化^[41,42]。

2.6 超声处理对羊半膜肌 MFI 的影响

MFI 用于预测宰后肌肉的嫩度大小, MFI 值越大, MP 降解程度越大, 嫩度越高^[43,44]。超声处理后肌肉的 MFI 变化情况如图5所示。随着成熟时间的延长, 半膜肌不同处理间差异显著, 超声处理组均显著大于直接冷藏组 ($p < 0.05$), 超声处理组在 2~24 h 缓慢下降, 进入僵直期, 在 24 h 时达到最小值 (超声 20 min 为 32.20, 超声 40 min 为 37.60) 后呈上升趋势; 直接冷藏组在 2~72 h 始终呈下降趋势, 72 h 时达到最小值 (25.92) 后呈上升趋势。Wang 等^[45]发现, 超声处理 (20 kHz、25 W/cm²) 提高了肉品的 MFI, 增加了嫩度。Yeung 等^[46]利用超声处理猪腰肉发现, 超声后的 MFI 显著提高, 嫩度得到很大程度的改善, 与本研究结果一致。

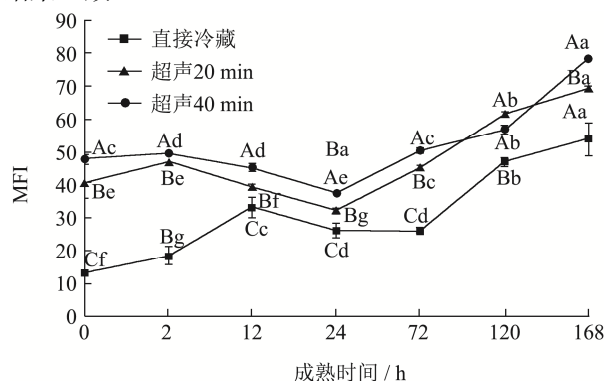


图5 不同超声时间对羊半膜肌 MFI 的影响

Fig.5 The effect of different ultrasound time on the MFI of the semimembranosus in sheep

2.7 超声处理对羊半膜肌 MP 溶解度的影响

蛋白溶解度是溶液中的蛋白质量占肌肉总蛋白质量的比, 它反映蛋白质与水之间的平衡与相互作用, 与肌肉的持水性相关^[47]。超声处理后肌肉的 MP 溶解度变化情况如图6所示。肌肉的溶解度随着成熟时间的延长呈波动上升趋势, 超声处理组均显著大于直接冷藏组 ($p < 0.05$)。超声处理组及直接冷藏组分别在 24 h、72 h 达到最小值 (超声 20 min 为 11.90%、超声 40 min 为 17.71%, 直接冷藏为 5.20%) 后逐渐上升。

这与 Hasnain 等^[48]研究结果一致。超声波空化效应产生局部高温高压, 导致蛋白小聚体破碎、分子结构变得疏松, 疏水性氨基酸释放, 使更多的亲水基团暴露到蛋白质的表面, 增加蛋白质与水的相互作用^[49], 导致 MP 溶解度的增加。

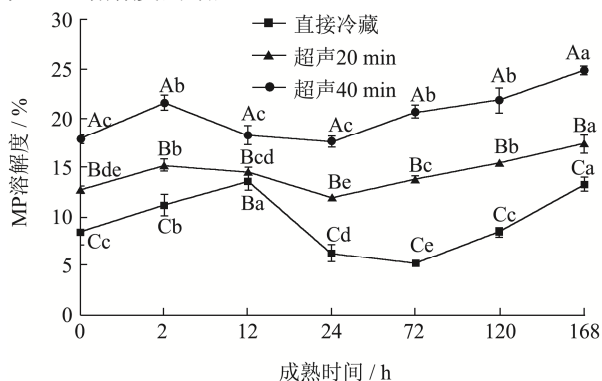


图6 不同超声时间对羊半膜肌 MP 溶解度的影响

Fig.6 The effect of different ultrasound time on the MP solubility of the semimembranosus in sheep

2.8 超声处理对羊半膜肌 MP 浊度的影响

浊度用于评估 MP 分散体的聚集水平^[50], 浊度越高, 说明蛋白质聚集程度越高, 溶液中悬浮颗粒粒径越大, 反之亦然。超声处理后肌肉的浊度变化如图 7 所示。随着成熟时间的延长, 各处理组均呈波动下降趋势, 且超声处理组始终低于直接冷藏组 ($p < 0.05$)。超声处理组及直接冷藏组分别在 12、2 h 后开始上升, 在 24、72 h 后开始下降; 超声产生的空化效应使氢键断裂, 疏水相互作用遭到破坏, 进而导致蛋白聚集体破碎、可溶性蛋白结构遭到破坏, 减小了蛋白质的粒径, 降低了样品的浊度, 与溶解度结果对应。

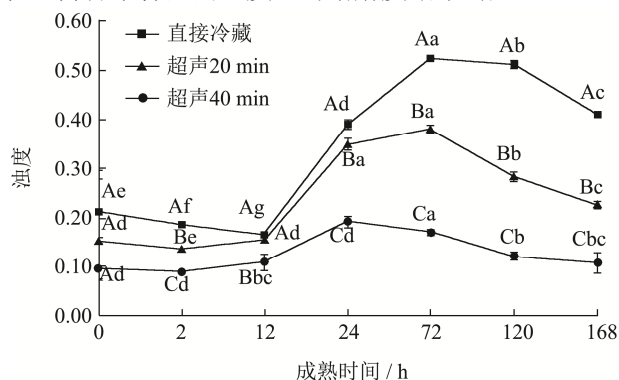


图7 不同超声时间对羊半膜肌浊度的影响

Fig.7 The effect of different ultrasound time on the turbidity of the semimembranosus in sheep

3 结论

动物宰后呼吸停止、供氧中断, 为维持稳态, 机体进入无氧酵解, 该过程产生能量物质, 但随着糖原

的消耗殆尽, ATP 含量降低, 并积累了大量乳酸, 导致肌肉的 pH 值迅速下降, 肌肉进入僵直阶段, 此时肌肉嫩度较差; 随着肌肉解僵, 肌肉剪切力下降, 促进 MP 聚合和降解程度高, MP 溶解度增加。本试验中超声处理能够显著提高肌肉的 pH 值、L*值、MFI 及 MP 溶解度, 降低肌肉 ATP 含量蒸煮损失及剪切力, 进而改善肉品保水性及嫩度, 缩短肌肉成熟所需时间。与超声 20 min 相比, 超声 40 min 的蒸煮损失较大, 且能耗较大, 因此认为超声时间控制在 20 min 左右较好。

参考文献

- [1] 耿娟. 哈萨克羊、湖羊、萨福克羊杂交繁育体系建立初探[J]. 中国畜禽种业, 2019, 15(9): 107
GENG Juan. A preliminary study on the establishment of a hybrid breeding system for Kazakh sheep, Hu sheep and Suffolk sheep [J]. China Livestock and Poultry Seed Industry, 2019, 15(9): 107
- [2] 甫拉提江·艾力皮别克, 努尔木江·叶里哈力, 王骁, 等. 萨福克羊和湖羊与伊犁哈萨克羊杂交后代生产性能研究[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(6): 66-68
Pulatijiang·Ailipibek, Nurmujiang·Yelihali, WANG Xiao, et al. Production performance of Suffolk sheep, Hu sheep and Yili Kazak sheep hybrids [J]. China Animal Husbandry Magazine, 2020, 56(6): 66-68
- [3] Wang Y, Li X, Li Z, et al. Phosphorylation of sarcoplasmic and myofibrillar proteins in three ovine muscles during postmortem ageing [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(7): 1643-1651
- [4] 曹宪福, 杨志成, 姜廷波, 等. 肌肉嫩度的影响因素分析[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2016, 21: 60-63
CAO Xianfu, YANG Zhicheng, JIANG Tingbo, et al. Analysis of influencing factors of muscle tenderness [J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2016, 21: 60-63
- [5] 魏直升, 王勇峰, 余群力, 等. 新疆褐牛不同部位牛肉在成熟过程中的品质变化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 64-70
WEI Zhisheng, WANG Yongfeng, YU Qunli, et al. Quality changes of beef in different parts in Xinjiang [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(2): 64-70
- [6] Alarcon-rojo A D, Carrillo-lopez L M, Reyes-villagrana R, et al. Ultrasound and meat quality: a review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 55: 369-382
- [7] Zhong Z, Xiong Y L. Thermosonication-induced structural change and solution properties of mung bean protein [J].

- Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 62: 104908
- [8] Ma W, Wang J, Xu X, et al. Ultrasound treatment improved the physicochemical characteristics of cod protein and enhanced the stability of oil-in-water emulsion [J]. Food Research International, 2019, 121: 247-256
- [9] 李兰会,张志胜,李艳琴,等.超声波在羊肉嫩化中的应用研究[J].食品科学,2005,4:107-111
LI Lanhui, ZHANG Zhisheng, LI Yanqin, et al. Study on the application of ultrasound in mutton tenderization [J]. Food Science, 2005, 4: 107-111
- [10] 朱琪.超声波与辐照处理对欧拉藏羊肉品质及肌内结缔组织特性的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2018
ZHU Qi. Effects of ultrasound and irradiation on the quality and intramuscular connective tissue properties of Oula Tibetan lamb [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018
- [11] 郭守立,候良忠,郭晓峰,等.猪宰后不同部位白肌肉与正常肉品质变化、能量代谢的差异[J].肉类研究,2016,30(6):19-24
GUO Shouli, HOU Liangzhong, GUO Xiaofeng, et al. Differences in quality changes and energy metabolism between white muscle and normal meat in different parts of pigs after slaughter [J]. Meat Research, 2016, 30(6): 19-24
- [12] 李桂霞,李欣,李铮,等.宰后僵直及成熟过程中羊背最长肌理化性质的变化[J].食品科学,2017,38(21):112-118
LI Guixia, LI Xin, LI Zheng, et al. Changes in the back of sheep back in the back of the back of the sheep after the slaughter, the ripening process [J]. Food Science, 2017, 38(21): 112-118
- [13] Gambuteanu C, Alexe P. Comparison of thawing assisted by low-intensity ultrasound on technological properties of pork longissimus dorsi muscle [J]. Journal of Food Science & Technology, 2015, 52(4): 2130
- [14] Culler R D, Jr F C P, Smith G C, et al. Relationship of myofibril fragmentation index to certain chemistry, physical and sensory characteristics of bovine longissimus muscle [J]. Journal of Food Science, 1978, 43(4): 1177-1180
- [15] Park D, Xiong Y L, Alderton A L. Concentration effects of hydroxyl radical oxidizing systems on biochemical properties of porcine muscle myofibrillar protein [J]. Food Chemistry, 2007, 101(3): 1239-1246
- [16] Zhang Z Y, Regenstein J M, Zhou P, et al. Effects of high intensity ultrasound modification on physicochemical property and water in myofibrillar protein gel [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34(8): 960-967
- [17] Li K, Liu J Y, Fu L, et al. Comparative study of thermal gelation properties and molecular forces of actomyosin extracted from normal and pale, soft and exudative-like chicken breast meat [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2019, 32(5): 721-733
- [18] 于红,马晓琳,刘永峰,等.宰后成熟对山羊肉理化性质及蛋白质表达的影响[J].食品工业科技,2021,42(24):24-30
YU Hong, MA Xiaolin, LIU Yongfeng, et al. The effect of post-slaughter maturation on the physical and chemical properties and protein expression of goat meat [J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(24): 24-30
- [19] 马秀丽.CaCl₂ 处理对不同品种牛肉成熟过程中品质及能量代谢的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2018
MA Xiuli. CaCl₂ treatment affects the quality and energy metabolism of different varieties of beef maturity [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018
- [20] Huff-lonergan E, Mitsuhashi T, Beekman D D, et al. Proteolysis of specific muscle structural proteins by μ -calpain at low pH and temperature is similar to degradation in postmortem bovine muscle [J]. Journal of Animal Science, 1996, 74(5): 993-1008
- [21] Got F, Culioli J, Berge P, et al. Effects of high-intensity high-frequency ultrasound on ageing rate, ultrastructure and some physicochemical properties of beef [J]. Meat Science, 1999, 51(1): 35-42
- [22] Jayasooriya S D, Torley P J, Darcy B R, et al. Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine semitendinosus and longissimus muscles [J]. Meat Science, 2007, 75(4): 628-639
- [23] 黄姗芬.基于过渡态理论的超声诱导蛋白酶特性及结构变化研究[D].镇江:江苏大学,2017
HUANG Shanfen. Study on the characteristics and structural changes of ultrasonic induced protease based on the transition state theory [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017
- [24] Huang M T, Bao J C, Hallstrom B M, et al. Efficient protein production by yeast requires global tuning of metabolism [J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1131
- [25] Amiri A, Sharifian P, Soltanizadeh N. Application of ultrasound treatment for improving the physicochemical, functional and rheological properties of myofibrillar proteins [J]. International Journal of Biological Macromolecules Structure Function and Interactions, 2018, 111(1): 139-147
- [26] Kang D C, Zhang W G, Lorenzo J M, et al. Structural and functional modification of food proteins by high power ultrasound and its application in meat processing [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(11): 1914-1933

- [27] Ya Y Y, Ling H, Qun L Y, et al. Study of the AMP-activated protein kinase role in energy metabolism changes during the postmortem aging of yak longissimus dorsal [J]. *Animals*, 2020, 10(3): 427
- [28] 李朝阳,李良玉,刁静静.pH 和温度对蛋白结构和功能特性影响的研究进展[J].*科学技术创新*,2019,18:59-60
LI Chaoyang, LI Liangyu, DIAO Jingjing. Research progress on the influence of pH and temperature on the structure and functional properties of protein [J]. *Science and Technology Innovation*, 2019, 18: 59-60
- [29] Peng L, Tian T W, Yan W M, et al. Effect of ultimate pH on postmortem myofibrillar protein degradation and meat quality characteristics of Chinese yellow crossbreed cattle [J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 4: 174253
- [30] 高永芳,宫玉霞,杨雅媛,等.AMPK 活性对宰后牛肉糖酵解、肌肉内环境及品质的影响[J].*食品科学*,2019,40(17):45-52
GAO Yongfang, GONG Yuxia, YANG Yayuan, et al. Effects of AMPK activity on glycolysis, internal muscle environment and quality of post-mortem beef [J]. *Food Science*, 2019, 40(17): 45-52
- [31] Kazuki N, Yoko Y. AMPK activation stimulates myofibrillar protein degradation and expression of atrophy-related ubiquitin ligases by increasing FOXO transcription factors in C₂C₁₂ myotubes [J]. *Japan Society for Bioscience, Biotechnology, and Agrochemistry*, 2014, 71(7): 1650-1656
- [32] Jie W, Mauricio A E, Xian B J, et al. Calpastatin gene polymorphism is associated with rabbit meat quality traits [J]. *Journal of Applied Animal Research*, 2017, 45(1): 342-345
- [33] Das P, Bhattacharyya S K, Baner J P, et al. Acoustic cavitation assisted synthesis and characterization of photoluminescent carbon quantum dots for biological applications and their future prospective [J]. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2021, 25: 100641
- [34] 王安然.超声处理对牛肉品质的影响及机理研究[D].南京:南京农业大学,2018
WANG Anran. Research on the effects and mechanism of ultrasound treatment on beef quality [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018
- [35] 陈丽艳,潘道东,曹锦轩,等.超声波处理对鹅肉蛋白结构及品质的影响[J].*核农学报*,2018,32(12):2363-2372
CHEN Liyan, PAN Daodong, CAO Jinxuan, et al. Effects of ultrasonic treatment on the structure and quality of goose protein [J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2018, 32(12): 2363-2372
- [36] Zou Y H, Zhang W G, Kang D C, et al. Improvement of tenderness and water holding capacity of spiced beef by the application of ultrasound during cooking [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(3): 828-836
- [37] Li K, Kang Z L, Zou Y F, et al. Effect of ultrasound treatment on functional properties of reduced-salt chicken breast meat batter [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(5): 2622-2633
- [38] 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. Effect of ultrasonic treatment combined with papain on chicken breast tenderness [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(11): 162-167
- [39] 顾思远.超声波在肉品加工中应用研究[J].*现代食品*,2019, 12:95-97,104
GU Siyuan. Research on application of ultrasonic in meat processing [J]. *Modern Food*, 2019, 12: 95-97, 104
- [40] 王晶,罗欣,朱立贤,等.不同极限 pH 值牛肉品质差异及机制的研究进展[J].*食品科学*,2019,40(23):283-288
WANG Jing, LUO Xin, ZHU Lixian, et al. Research progress on the difference and mechanism of beef quality with different pH limit [J]. *Food Science*, 2019, 40(23): 283-288
- [41] 罗辉,杨波,李亚蕾,等.宰后成熟期间能量物质、pH 和肌原纤维小片化对秦川牛肉嫩度的影响及其机理[J/OL].*食品科学*:1-14[2021-08-27]
LUO Hui, YANG Bo, LI Yalei, et al. The effect of energy substances, pH and myofibril fragmentation on the tenderness of Qinchuan beef during postmortem maturity and its mechanism [J/OL]. *Food Science*, 1-14[2021-08-27]
- [42] Wang Y, Wu H, Yi Y, et al. Effects of chloride injections and ultrasonic treatment on the microstructure of longissimus lumborum muscle fibers from beef cattle as investigated by atomic force microscopy [J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 2671-2680
- [43] 刁小琴,关海宁,乔秀丽,等.超声处理对肌原纤维蛋白凝胶特性和结构的影响[J].*食品工业*,2020,41(2):197-200
DIAO Xiaoqing, GUAN Haining, QIAO Xiuli, et al. Effect of ultrasonic treatment on the characteristics and structure of myoblast fibrino gel [J]. *Food Industry*, 2020, 41(2): 197-200
- [44] 丰永红.肌纤维类型影响牛肉成熟过程中蛋白降解的机制研究[D].北京:中国农业科学院,2020
FENG Yonghong. Study on the mechanism of muscle fiber type affecting protein degradation during beef maturation [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020

(下转第 9 页)