刘阳, 马艳妮, 杰米拉·买买提江, 等. 超声处理对罗布羊背最长肌成熟品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 181−193. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090034

LIU Yang, MA Yanni, JIEMILA Maimaitijiang, et al. Effect of Ultrasonic Treatment on the Ripening Quality of Lop Sheep Longissimus Dorsi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 181−193. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090034

·研究与探讨·

超声处理对罗布羊背最长肌成熟品质的影响

刘　阳[1], 马艳妮[1], 杰米拉·买买提江[1], 马　倩[1], 李　娜[1],
朱勒都孜·哈布都里赛买提[2], 巴吐尔·阿不力克木[1,*]
（1.新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052;
2.塔城地区农产品质量安全检验检测中心, 新疆塔城 834700）

摘　要: 为探究超声处理对宰后羊肉成熟过程中品质的影响，本研究以罗布羊背最长肌为研究对象，在超声功率 250 W，频率 22 kHz，时间 30 min，温度 4 ℃ 的条件下处理，探究分别在 4 ℃ 条件成熟 0、1、2、3、4、5 d 的品质特性变化，分析挥发性盐基氮（Total Volatile Base Nitrogen，TVB-N）值、菌落总数、pH、色泽、保水性、质构特性、肌原纤维蛋白降解、微观结构以及挥发性风味等指标的变化规律。结果表明：随着成熟时间的延长，TVB-N 值和菌落总数呈上升趋势；pH 在成熟 1 d 后上升；剪切力、硬度在成熟 1 d 后显著降低（P<0.05）；L^*值在成熟第 3 d 时达到最大值；蒸煮损失在成熟 3 d 后显著降低（P<0.05）。超声处理后 pH 上升速率加快，蒸煮损失较低，TVB-N 值和剪切力在成熟第 3 d 后显著低于冷藏组（P<0.05）。十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳（SDS-PAGE）结果显示，在成熟期间，大分子蛋白逐渐降解，小分子蛋白含量升高，嫩度改善；透射电子显微镜和苏木精-伊红染色法（Hematoxylin-eosin staining）结果表明，羊肉在成熟期间肌节逐渐增长，肌纤维直径和面积减小；经超声处理后，肌节长度显著增长（P<0.05），肌纤维密度增大，肌肉组织逐渐松弛。在成熟 0 d 和 3 d 时共定性出 82 种挥发性风味物质，其中十六醛、十六酸乙酯、壬醛、十八醛、十四酸乙酯、2-十一烯醛和十四醛为羊肉中关键香气成分，且超声处理后在成熟 3 d 时醛类物质含量明显提升，可改善羊肉风味。综上所述，超声处理可以有效改善羊肉嫩度，提升羊肉品质，且在第 3 d 时，羊肉达到最佳成熟期，品质最佳。

关键词: 罗布羊, 背最长肌, 超声处理, 宰后成熟, 成熟品质
中图分类号: TS251.5+3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0181−13
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090034　　本文网刊:

Effect of Ultrasonic Treatment on the Ripening Quality of Lop Sheep Longissimus Dorsi

LIU Yang[1], MA Yanni[1], JIEMILA Maimaitijiang[1], MA Qian[1], LI Na[1],
ZHULEDUZI Habudulisaimaiti[2], BATUER Abulikemu[1,*]
（1.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2.Tacheng Agricultural Product Quality and Safety Inspection and Testing Center, Tacheng 834700, China）

Abstract: This study investigated the effects of ultrasonic treatment on the quality characteristics of postmortem mutton from the longissimus dorsi muscle of Lop sheep during ripening. Ultrasonic treatment was applied at 250 W and 22 kHz for 30 min at 4 ℃. The meat was then aged at 4 ℃ for up to 5 days, and quality parameters were evaluated at 0, 1, 2, 3, 4, and 5 days. Analyses included total volatile base Nitrogen (TVB-N), total viable count, pH, color, water-holding capacity, texture profile, myofibrillar protein degradation, microstructure, and volatile flavor compounds. The results indicated that TVB-N values and total viable counts increased with prolonged aging time. pH increased after 1 day of aging, while shear force and hardness significantly decreased (P<0.05). The L^* value reached its maximum on day 3. Cooking loss was signifi-

收稿日期: 2025−09−05
基金项目: 新疆维吾尔自治区科技计划重点研发计划项目（2023B02015-3）; 新疆维吾尔自治区科技创新领军人才项（2022TSYCLJ0014）。
作者简介: 刘阳（1997−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工, E-mail: 15699209296@163.com。
*** 通信作者:** 巴吐尔·阿不力克木（1968−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品加工原理与技术, E-mail: batur6805@126.com。

cantly reduced after 3 days of aging (P<0.05). Ultrasonic treatment accelerated the pH increase, reduced cooking loss, and resulted in substantially lower TVB-N and shear force values compared to the untreated control after 3 days (P<0.05). SDS-PAGE analysis revealed gradual degradation of high-molecular-weight proteins and an increase in low-molecular-weight protein content, which contributed to improved tenderness. Transmission electron microscopy and Hematoxylin–Eosin staining showed that sarcomere length increased during aging, while muscle fiber diameter and cross-sectional area decreased. Ultrasonication significantly increased sarcomere length (P<0.05), increased muscle fiber density, and promoted structural loosening of the muscle tissue. A total of 82 volatile flavor compounds were identified at 0 and 3 days of aging. Key aroma compounds included hexadecanal, ethyl palmitate, nonanal, octadecanal, ethyl tetradecanoate, 2-undecenal, and tetradecanal. The aldehyde content increased significantly by day 3 in the ultrasonicated group, suggesting enhanced flavor development. In conclusion, ultrasonic treatment improved the tenderness and overall quality of mutton, with optimal quality observed on the third day of aging.

Key words: Lop sheep; longissimus dorsi muscle; ultrasonication; postmortem aging; mature of quality

罗布羊是南疆地区代表性肉脂兼用型绵羊品种，具有抗逆性强、遗传性能稳定、屠宰性能好的优势[1]，其肉质嫩软，营养价值高，深受群众青睐[2]。目前，加工产品以屠宰后的生鲜羊肉为主，加工利用率较低，排酸效果较差，未形成完整的全产业链[3]，难以满足市场对高品质羊肉的需求。

研究表明，羊肉在宰后 2 h 便开始进入僵直期，宰后 24 h 时达到最大僵直期，嫩度变差[4]。而肌肉经过低温排酸，可使肉充分解僵，提升嫩度，改善其食用品质[5]。目前常用的排酸方法有 4 ℃ 吊挂法、钙盐注射法等，但在实际生产中存在生产周期长、肉品风味不佳等问题，难以保证羊肉获得最佳成熟品质。

超声波处理作为一种新型食品物理加工技术，广泛应用于肉制品加工行业[6]。已有报道指出，超声波引起的空化能可对肌肉肌纤维结构造成物理破坏，以此来改善肉品品质[7]。韦田等[8]研究超声处理对猪肉腌制品质特性的影响，发现超声处理可有效提高猪肉的系水力和色泽。WANG 等[9]研究发现，超声联合微酸性电解水解冻技术可有效改善羊肉肌原纤维蛋白的流变性和凝胶持水性。杜鹏飞等[10]研究超声波解冻对羊肉品质的影响，结果表明超声波解冻显著提高了羊肉的新鲜度，并对羊肉营养成分无显著影响。但是关于超声处理对宰后羊肉成熟期间的成熟品质的影响鲜有报道。

本研究采用超声波技术对罗布羊背最长肌进行超声处理，测定羊肉成熟期间的 TVB-N 值、菌落总数等安全性指标，pH、色泽、保水性、质构特性等食用品质指标，肌原纤维蛋白分布、肌纤维微观结构等组织学指标以及挥发性风味，分析超声处理对羊肉成熟期间成熟品质的影响，为羊肉品质的提升提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

肉样采自新疆尉犁县，随机选取 2 只 6 月龄健康无病的舍饲罗布羊。按传统方式屠宰后选取背最长肌，每份约 1 kg，装入自封袋中，在 2 h 内以 4 ℃ 冷藏条件下运回实验室冷藏。

氯化钠、甲醇、二甲苯、戊二醛、无水乙醇　天津市鑫铂特化工有限公司；磷酸氢二钠、磷酸二氢钠　西陇化工股份有限公司；氯化镁、冰乙酸　天津市光复科技发展有限公司；EGTA、醋酸双氧铀、柠檬酸铅、锇酸、苏木精-伊红　均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司；甲醇、邻二氯苯　均为色谱级，天津市鑫铂特化工有限公司；考马斯亮蓝　白鲨生物科技有限公司；4% 多聚甲醛组织固定液　广州赛国生物科技有限公司；SDS-PAGE 凝胶制备试剂盒　北京索莱宝科技有限公司。

KQ-250DE 型数控超声清洗器　昆山市超声仪器有限公司；SW-CJ-1FD 型净化工作台　上海博迅医疗仪器股份有限公司；DHP-9162 型电热恒温培养箱　上海一恒科学仪器有限公司；C-LM 3B 型数显式肌肉嫩度仪　东北农业大学工程学院；CR-10 型色差仪　广东三恩时科技有限公司；PHS-2F 型 pH 计　上海仪电科学仪器股份有限公司；TA-XT2i 型质构仪　英国 Stable Micro System 公司；DYCZ-24DN 型电泳仪　北京市六一仪器厂；Champ Gel 7800 型全自动凝胶成像仪　北京赛智创业科技有限公司；HC-3016R 高速冷冻离心机　上海生物科技有限公司；BMJ-1 型生物组织包埋机　天津天利航空机电有限公司；KF-PRX-040 型扫片机　麦克奥迪实业集团有限公司；Hitachi HT-7800 透射电子显微镜　日本日立有限公司；7890-5975C 型气相色谱-质谱联用仪　安捷伦科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理　实验第一组将肉样置于 4 ℃ 条件下低温冷藏，记为对照组（CK 组），第二组将肉样置于真空塑封袋中，以超声功率为 250 W，频率 22 kHz，时间 30 min，温度 4 ℃ 的条件处理，将样品置于 4 ℃ 条件下成熟，记为超声处理组（US 组）。各组样品成熟时间均为 0、1、2、3、4、5 d，分别按时间点取样进行检测分析。

1.2.2 挥发性盐基氮（TVB-N）　依据 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》的半微量定氮法进行测定。重复三次，取均值。

1.2.3　菌落总数　参考 GB 4789.2-2022 食品安全国家标准《食品微生物学检验 菌落总数测定》。结果用 lg CFU/g 表示。

1.2.4　pH　参考 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》。重复五次，取均值。

1.2.5　色泽　将肉样切分为 4 cm×4 cm×1 cm 的肉块，按照国际照明委员会的 CIE1976 L^*、a^*和 b^*测定标准，用色差仪测定，采用国际 Hunter 值，以 L^*（亮度）、a^*（红色）和 b^*（黄色）值表示。每个样品选五个区域测定，取均值。

1.2.6　质构特性　将肉样切成 2 cm×2 cm×2 cm 大小。使用 P/0.5 S 型探头，测前速度为 2 mm/s，测中速度为 2 mm/s，测后速度为 2 mm/s，测定间隔时间为 5 s，压缩比为 50%，触发力为 5 g，测定其硬度、弹性、内聚性、咀嚼性和恢复力等 5 项参数。每项重复测定五次，取均值。

1.2.7　嫩度　取蒸煮后的肉块，沿肌纤维方向切成 3 cm×1 cm×1 cm 的肉条。使用嫩度仪垂直于肌纤维剪切测定其剪切力值，刀头型号为 XL 1155，刀头下降速度为 1 mm/s，每个样品重复测定五次，取均值。

1.2.8　蒸煮损失　参考姚黄兵[11] 的方法并稍作修改。取 10 g 肉样，修整成长方体状，称重后装进蒸煮袋，在 80 ℃ 的水浴锅中加热 15 min，取出后冷却至室温，用滤纸吸干表面水分，称重，计算蒸煮损失。重复三次，取均值。

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

式中：m_1 为蒸煮前样品重量，g；m_2 为蒸煮后样品重量，g。

1.2.9　肌原纤维蛋白（MP）提取　参考马萌等[12] 的方法并稍作修改，取 2.5 g 肉样切碎，加入 8 倍体积的蛋白提取液（0.1 mol/L NaCl、10 mmol/L 磷酸缓冲液、2 mmol/L $MgCl_2$、1 mmol/L EGTA），以 7500 r/min 高速匀浆 30 s，在 4 ℃、6000 r/min 条件下离心 10 min，弃去上清液，重复 3 次。相同离心匀浆参数条件下向提取物中加入 8 倍体积 0.1 mol/L NaCl 洗涤液洗涤沉淀 3 次，得到的白色沉淀物即为 MP。

1.2.10　SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳（SDS-PAGE）　参考 LEI 等[13] 的方法稍作修改，向提取的 MP 中加入 2×蛋白上样缓冲液，100 ℃ 煮沸加热 5 min，使蛋白变性，随后进行电泳。电泳条件：浓缩胶浓度 5%，电压 90 V，40 min；分离胶浓度 12%，电压 120 V，120 min；染色、脱色 24 h。

1.2.11　微观结构的观察

1.2.11.1　H&E 染色　取样品（5 mm×5 mm×2 mm）组织若干块，立即使用 4% 多聚甲醛溶液在 4 ℃ 条件下固定 24 h，用一系列乙醇溶液（70%、80%、90%、95%、100%）脱水，每次 60 min，随后用石蜡包埋后快速移入切片机，切片厚度为 7 μm，垂直于肌纤维的方向进行切割，获得石蜡切片。采用苏木精-伊红染色液染色，中性树脂封片干燥，在偏光显微镜下（200×）观察、拍照。

1.2.11.2　透射电子显微镜（SEM）　取样品 1 mm×1 mm×1 mm 组织若干块，立即使用 2.5% 戊二醛溶液在 4 ℃ 条件下固定 24 h，随后用磷酸盐缓冲液（0.1 mol/L，pH7.4）洗涤 3 次，每次 15 min，再用 1% 锇酸溶液固定 2 h 后，用磷酸盐缓冲液漂洗 3 次，每次 15 min。用一系列乙醇溶液（30%、50%、70%、90% 和 100%）脱水，每次 20 min，随后将样品插入包埋板，在 70 ℃ 烘箱烘烤 12~48 h，取出树脂块，用超薄切片机将包埋样本的树脂块切成 70~90 nm 的超薄切片，再用铜网捞片，最后使用醋酸双氧铀和柠檬酸铅染色 5~15 min，干燥处理后在透射电子显微镜下采用 4000 倍的放大倍率观察并拍照。

1.2.12　挥发性风味物质测定

1.2.12.1　风味物质萃取　将样品切碎，取 5 g 样品置于 20 mL SPME 顶空瓶中，加入 50 μL 浓度为 0.65 μg/mL 内标物质邻二氯苯，随后用铝盖封口；在顶空进样器中将样品以 80 ℃ 平衡 20 min，然后将萃取头插入 SPME 顶空瓶并在 80 ℃ 下萃取 40 min，吸附挥发性风味物质，随后立即转移至 GC 进样口在 250 ℃ 条件下解吸 10 min。

1.2.12.2　气相色谱（GC）条件　毛细管色谱柱选用 DB-5ms（30 m×250 μm×0.25 μm）；柱箱采取程序升温模式，起始温度为 40 ℃，保持 2 min，随后以 5 ℃/min 的速度上升至 250 ℃，保持 5 min；进样模式为不分流，以 He 为载气，恒定流速为 1 mL/min；进样口温度设置为 250 ℃；溶剂延迟为 5 min。

1.2.12.3　质谱（MS）条件　离子源、四极杆和色谱质谱接口温度分别为 230、150 和 250 ℃；采集模式为全扫描，质量扫描范围为 30~500 aum。

1.2.12.4　定性定量分析　利用未知物分析软件进行定性分析，定性标准如下：将挥发性风味物质的质谱图通过与国家标准与技术研究所（NIST14.L）谱图数据库中碎片离子谱图以及标准品的保留时间进行匹配，选择匹配度大于 80% 的挥发性风味物质。采取内标法对挥发性风味物质进行定量分析，计算公式为：

$$C_i = \frac{C_{is} \times A_i \times V}{A_{is} \times m}$$

式中：C_i 为各挥发性风味物质的含量（μg/kg）；C_{is} 为内标的质量浓度（μg/mL）；A_i 为各挥发性风味物质的色谱峰面积；A_{is} 为内标的色谱峰面积；m 为待测样品质量（g）；V 为内标物体积（μL）。

1.2.12.5　相对气味活度值（relative odor activity value，ROAV）　挥发性风味物质 ROAV 计算参考刘登勇等[14] 的方法。将 ROAV≥1.0 的挥发性风味成分作为关键风味化合物，将 0.1≤ROAV<1.0 的挥

发性风味成分作为对总体香气具有重要修饰作用的风味化合物。

$$ROAV \approx \frac{C_i}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i} \times 100$$

式中：C_i 为挥发性组分的相对含量(%)；C_{max} 为对香气贡献最大挥发性组分的相对含量(%)；T_i 为挥发性组分的风味阈值(μg/kg)；T_{max} 为对香气贡献最大挥发性组分的风味阈值(μg/kg)。

1.3 数据处理

每组实验的结果均采用平均值±标准差表示。使用 SPSS 26.0 软件对数据结果进行统计分析，Duncan 法对均值进行显著性检验，$P<0.05$ 为差异显著。使用 Origin 2021 软件绘制图表。使用 image J 软件对肌节长度、肌纤维直径、肌纤维面积和肌纤维密度进行测量。利用未知物分析软件中的 NIST 14 数据库对挥发性成分进行定性分析，使用 SIMCA 14.1 软件绘制 OPLS-DA 图和 VIP 分析图，使用迈维云网站绘制聚类热图。

2 结果与分析

2.1 超声处理对宰后成熟期罗布羊肉 TVB-N 的影响

TVB-N 值是评价肉品品质的关键指标之一。肉类标准规定 TVB-N 值超过 15 mg·100 g^{-1} 时肉品失去其食用价值[15]。由图 1 可看出，随着成熟时间的延长，羊肉的 TVB-N 值总体呈上升趋势，LIANG 等[16]对不同贮藏温度下羊肉新鲜度检测时发现，在贮藏期间 TVB-N 值均呈增加趋势，与本研究结果相似。成熟 3 d 后，US 组的 TVB-N 值显著低于 CK 组($P<0.05$)，可能由于肌肉在超声过程中相关蛋白或微生物的生化反应速率下降，导致蛋白降解量下降，使羊肉中 TVB-N 值减少[17]；成熟第 5 d 时，CK 组和 US 组的 TVB-N 值均达到最大值，分别为 14.29 和 12.13 mg·100 g^{-1}，但均未超过肉类标准规定的限量标准，可进行后续相关指标测定。

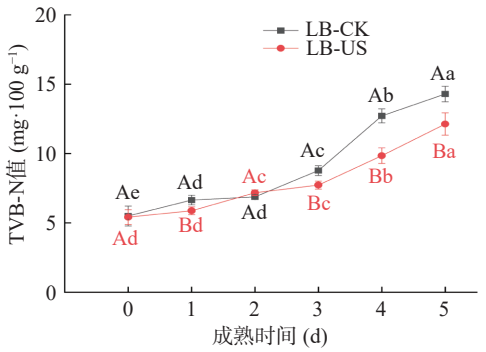


图 1 超声处理对宰后成熟期罗布羊肉 TVB-N 的影响

Fig.1 Effect of ultrasonic treatment on TVB-N of Lop mutton at postmortem maturation

注：小写字母不同表示同一处理组不同成熟时间差异显著($P<0.05$)，大写字母不同表示同一成熟时间不同处理组之间差异显著($P<0.05$)；图 2~图 4 同。

2.2 超声处理对宰后成熟期罗布羊肉菌落总数的影响

菌落总数是反映肉品卫生状况的重要指标。GB 16869-2005《鲜、冻禽产品》中规定，鲜肉中菌落总数不得超过 6 lg CFU/g。由图 2 所示，随着成熟时间的延长，羊肉的菌落总数呈显著上升的趋势($P<0.05$)，在成熟第 5 d 时达到最大值，CK 组为 5.64 lg CFU/g，US 组为 5.18 lg CFU/g，均符合国家标准。与 CK 组相比，US 组菌落总数值在成熟 0~5 d 内均低于 CK 组，其中成熟第 1、3、4 和 5 d 时显著低于 CK 组($P<0.05$)，表明超声处理可抑制羊肉中微生物生长，此结果与朱彬等[18]的研究结论一致，他们指出超声波产生强大的空化作用可以有效破坏微生物的细胞结构，可减少羊肉中微生物数量。

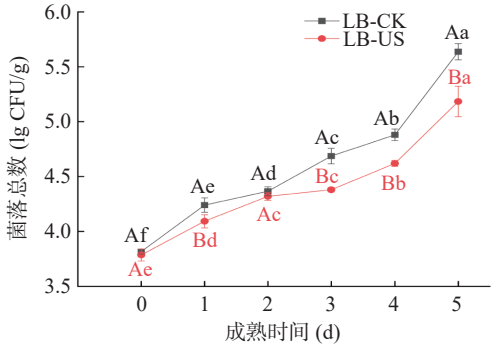


图 2 超声处理对宰后成熟期罗布羊肉菌落总数的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic treatment on total bacterial count of Lop mutton at postmortem maturation

2.3 超声处理对宰后成熟期罗布羊肉 pH 的影响

pH 的变化趋势可以反映宰后初期肉品质的变化情况[19]。如图 3 所示，羊肉的 pH 总体呈先降低再升高的变化趋势。成熟第 1 d 时 pH 达到最小值，CK 组为 5.51，US 组为 5.53，显著低于第 0 d($P<0.05$)，随后上升，可能是由于肌肉中糖原发生无氧酵解，导致丙酮酸和乳酸含量增加，pH 降低；随着成熟时间的增加，羊肉发生自溶现象，肌肉中的蛋白质等物质逐渐被分解成胺类物质，且分解代谢反应也会消耗一些酸类物质[15]，因此羊肉 pH 逐渐回升。成熟 3~4 d，US 组的 pH 显著高于 CK 组($P<0.05$)，与李心悦等[20]的研究结果一致，可能是超声产生的空化效应导致脱氨基酶和蛋白水解酶的释放，蛋白质空间构

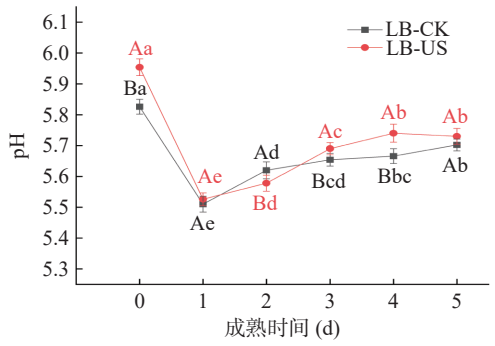


图 3 超声处理对宰后成熟期罗布羊肉 pH 的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic treatment on pH of Lop mutton at postmortem maturation

造发生改变致使离子基团位置改变，导致 pH 升高[21]；成熟 1~5 d，CK 组和 US 组的 pH 上升速率分别为 3.45% 和 3.62%，说明超声处理可加速羊肉排酸，与张莉[22] 对哈萨克羊肉的研究结果相似。

2.4　超声处理对宰后成熟期罗布羊肉色泽的影响

色泽是评价羊肉品质的重要指标之一，可直观地反映肉品的新鲜度。由表 1 可知，随着成熟时间的延长，羊肉的 L^*值呈先上升再下降的变化趋势，成熟第 3 d 达到最大值，显著高于第 0 d（P<0.05），可能是 pH 降低至蛋白质等电点，减弱对水分的牵引力，使肌肉内部的游离水扩散到肉品表面造成反光，导致 L^*值升高[23]，成熟 3 d 后，在羊肉中微生物数量逐渐增加以及肌内脂肪氧化等因素的共同作用下，L^*值开始下降[24]；US 组的 L^*值在成熟第 2~4 d 时显著高于 CK 组（P<0.05），研究表明，超声产生的空化效应导致肌纤维结构遭到破坏，使肌红蛋白被释放，肌红蛋白的含量下降，导致 L^*值增高[25]。在成熟期内 a^*值持续下降，b^*值持续上升，这是因为肌肉中肌红蛋白与空气中的氧气接触，产生氧合肌红蛋白，随着氧化程度加深，氧合肌红蛋白逐渐转化为高铁肌红蛋白，使肉色变暗[26]；超声处理对羊肉的 a^*和 b^*值影响较小，这与朱晓玲等[27] 关于顺序超声模式下对肌肉组织 a^*和 b^*值的研究结果相似，可能是与超声功率和时间有关。

2.5　超声处理对宰后成熟期罗布羊肉质构特性的影响

质构特性可以反映出肌肉的组织状态，是衡量肉品质的重要指标。由表 2 所示，随着成熟时间的延长，羊肉的剪切力、硬度和咀嚼性均呈先上升后下降的显著变化趋势（P<0.05），而内聚性、弹性和恢复力呈下降趋势，造成这一现象的原因可能是成熟前期肌肉 pH 急剧下降，导致肌肉进入僵直期，表现为剪切力上升，随着成熟时间的延长，肌肉肌原纤维结构分解或内肽酶促进的蛋白水解作用等都会使剪切力下降，与张佳莹[28] 和 MANHEEM 等[29] 的研究结果一致，他们指出随着储藏时间的增加，肌肉剪切力先上升再下降。成熟 1 d 后，US 组的剪切力显著低于 CK 组，这表明超声处理可显著提升羊肉嫩度，改善其质构特性。研究表明，超声波产生的反复压缩与拉伸的机械作用破坏了肌细胞中的溶酶体膜，使组织蛋白酶释放量增加，促进了细胞内外蛋白质的水解，提升了肉品嫩度[30]，这也是超声处理降低羊肉硬度和咀嚼性的主要原因。但是，超声处理对羊肉的弹性和恢复力没有显著影响（P>0.05）。

2.6　超声处理对宰后成熟期罗布羊肉蒸煮损失的影响

蒸煮损失能反映肉品的保水性，蒸煮损失越低，羊肉的保水性越好。如图 4 所示，随着成熟时间的延长，羊肉的蒸煮损失总体呈先上升后下降的变化趋势。成熟 1 d 时，CK 组和 US 组的蒸煮损失达到最

表 1　超声处理对宰后成熟期罗布羊肉色泽的影响

Table 1　Effect of ultrasonic treatment on the color of Lop mutton at postmortem maturity

色值	组别	成熟时间(d)					
		0	1	2	3	4	5
L^*	CK	32.53±1.76^{Ac}	32.85±2.40^{Ac}	34.56±2.28^{Bbc}	38.53±0.46^{Ba}	36.94±0.58^{Bab}	35.01±2.65^{Abc}
	US	32.33±1.91^{Ac}	33.86±0.78^{Ac}	37.53±0.81^{Ab}	40.53±0.99^{Aa}	40.47±1.30^{Aa}	36.81±1.20^{Ab}
a^*	CK	18.76±1.08^{Aa}	17.15±0.89^{Bbc}	17.34±0.83^{Ab}	16.90±0.65^{Abc}	17.00±1.13^{Abc}	15.81±0.74^{Ac}
	US	19.35±1.85^{Aa}	18.29±0.35^{Aab}	17.21±0.41^{Abc}	17.14±1.31^{Abc}	17.08±0.46^{Abc}	16.53±0.49^{Ac}
b^*	CK	18.67±0.49^{Ab}	18.90±1.83^{Ab}	20.10±1.50^{Aab}	20.19±1.15^{Aab}	21.32±1.06^{Aa}	21.70±1.55^{Aa}
	US	16.26±0.98^{Bc}	18.35±1.22^{Ab}	20.17±1.38^{Aa}	20.81±0.63^{Aa}	21.47±1.22^{Aa}	21.63±0.77^{Aa}

注：L^*：表示明度，L^*越大，表示颜色越亮；a^*：表示红度，a^*越大，表示颜色越红；b^*：表示黄度，b^*越大，表示颜色偏黄。小写字母不同表示同一处理组不同成熟时间差异显著（P<0.05）；大写字母不同表示同一成熟时间不同处理组之间差异显著（P<0.05）；表2~表3同。

表 2　超声处理对宰后成熟期罗布羊肉质构特性的影响

Table 2　Effect of ultrasonic treatment on the texture characteristics of Lop mutton at postmortem maturity

质构特性	组别	成熟时间(d)					
		0	1	2	3	4	5
剪切力	CK	55.29±3.91^{Ab}	69.05±4.12^{Aa}	50.45±1.87^{Ab}	40.44±4.47^{Ac}	35.57±3.71^{Ac}	35.26±2.81^{Ac}
	US	56.94±3.88^{Aa}	61.42±2.02^{Ba}	46.10±3.34^{Bb}	31.54±2.97^{Bc}	28.98±2.32^{Bc}	29.19±2.85^{Bc}
硬度(g)	CK	436.86±16.79^{Ab}	595.14±18.76^{Aa}	462.18±30.40^{Ab}	396.22±25.03^{Ac}	324.27±26.46^{Ad}	295.35±25.86^{Ad}
	US	414.11±12.93^{Bb}	509.64±38.44^{Ba}	434.44±7.83^{Ab}	355.88±21.44^{Bc}	305.99±20.87^{Ad}	285.35±19.12^{Ad}
弹性	CK	0.99±0.01^{Aa}	0.96±0.03^{Aab}	0.97±0.01^{Aab}	0.96±0.03^{Aab}	0.94±0.07^{Aab}	0.92±0.01^{Ab}
	US	0.97±0.01^{Aab}	0.96±0.01^{Aab}	0.97±0.01^{Aa}	0.96±0.01^{Aab}	0.92±0.06^{Abc}	0.89±0.06^{Ac}
内聚性	CK	0.73±0.04^{Aa}	0.69±0.11^{Aab}	0.64±0.11^{Abcd}	0.58±0.03^{Acd}	0.56±0.05^{Ad}	0.57±0.06^{Ad}
	US	0.60±0.04^{Ba}	0.58±0.06^{Aab}	0.56±0.14^{Aab}	0.58±0.12^{Aab}	0.58±0.07^{Aab}	0.48±0.02^{Bb}
咀嚼性(g)	CK	282.68±6.67^{Ab}	334.17±14.79^{Aa}	234.79±36.44^{Abc}	217.94±41.81^{Ac}	208.91±45.14^{Ac}	224.27±29.04^{Ac}
	US	221.81±25.59^{Bb}	276.44±42.59^{Ba}	230.52±35.61^{Aab}	199.28±28.48^{Ab}	184.20±37.49^{Ab}	131.48±27.15^{Bc}
恢复力	CK	0.43±0.11^{Aa}	0.38±0.04^{Aab}	0.33±0.07^{Aab}	0.33±0.03^{Ab}	0.31±0.04^{Ab}	0.31±0.06^{Ab}
	US	0.34±0.04^{Aa}	0.33±0.08^{Aa}	0.31±0.10^{Aab}	0.28±0.08^{Aab}	0.28±0.07^{Aab}	0.19±0.05^{Bb}

大值，分别为 36.14% 和 34.30%，随后显著下降（P<0.05），可能是宰后肌肉的 pH 降低，导致肌肉内蛋白质电荷数量锐减，蛋白质分子间的作用力减弱，其空间也被压缩，以至于蛋白质分子间的水分被挤出，肌肉的蒸煮损失升高，保水性变差[31]，随着成熟时间的延长，肌肉 pH 逐渐回升，偏离蛋白质等电点，导致蛋白质对水的吸附能力增强，使保水性回升[32]。成熟第 0、1、2、4 d，US 组的蒸煮损失显著低于 CK 组（P<0.05），可能是由于超声波促进肌原纤维蛋白网的构建，使水分子牢牢锁定在肌纤维之间的空隙中[33]，导致蒸煮损失变少；综上所述，超声处理能有效提升羊肉的保水性，这与徐静等[34] 的研究结果一致。

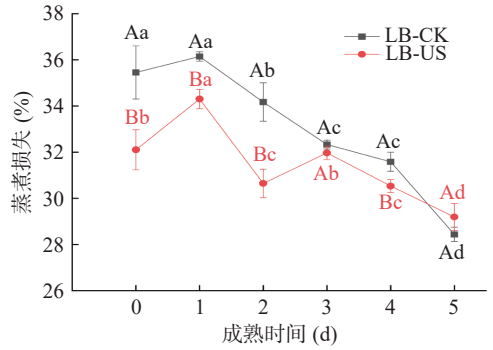


图 4　超声处理对宰后成熟期罗布羊肉蒸煮损失的影响

Fig.4　Effect of ultrasonic treatment on cooking loss of Lop mutton at postmortem maturation

2.7　超声处理对宰后成熟期罗布羊肉肌原纤维蛋白的 SDS-PAGE 分析

为揭示超声处理对羊肉 MP 的影响，对羊肉进行 SDS-PAGE 分析。如图 5 所示，所有样品均出现了典型的肌球蛋白重链（MHC）、肌动蛋白（Actin）和肌球蛋白轻链（MLC）的 MP 蛋白谱。随着成熟时间的延长，CK 组低于 48 kDa 的条带颜色逐渐加深变宽且出现模糊拖尾现象，这些现象表明肌肉中的内源蛋白酶使大分子量的蛋白水解生成了小分子量的蛋白条带，小分子量蛋白出现聚集现象[35]。小分子蛋白含量越高，肌肉越嫩[36]，这与 2.5 中剪切力、硬度的试验结果相对应。与 CK 组相比，随着成熟时间的延长，US 组的 Actin 和 MLC 蛋白条带变浅，这可能是超声处理过程中持续的机械冲击和空化通过水裂解反应产生高活性自由基，导致蛋白质发生氧化降解[37]；但也有研究指出超声处理会导致肌肉中 Actin 和 MLC 被微生物氧化降解[38]，导致蛋白条带强度减弱。

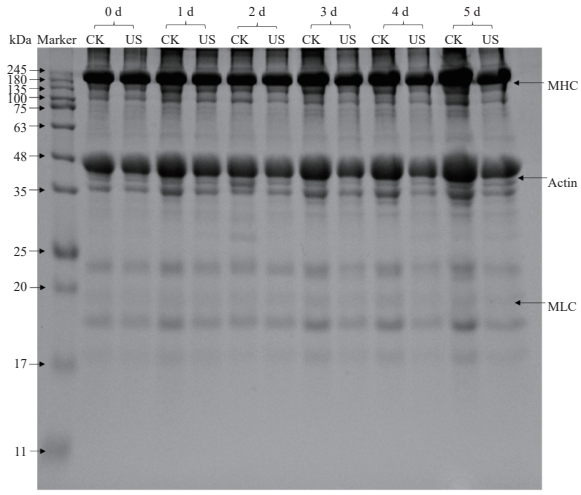


图 5　超声处理宰后成熟期罗布羊肉肌原纤维蛋白 SDS-PAGE 凝胶电泳图谱

Fig.5　SDS-PAGE profiles of myofibrillar proteins from Lop mutton during postmortem aging

2.8　超声处理对宰后成熟期罗布羊肉微观结构的影响

图 6 为肌肉纵切图，同时对肌节长度进行测量，结果如表 3 所示。肌原纤维的基本组成单位是肌节，由明带（I 带）和暗带（A 带）构成，Z 线和 M 线分别位于 I 带和 A 带的中央，由细胞骨架蛋白构成，易发生蛋白结构变性[39]。成熟第 0 d 时，CK 组和 US 组的 Z 线和 M 线均清晰完整，成熟第 1 d 时，CK 组 Z 线保持完整，而 US 组 Z 线开始断裂，成熟第 5 d 时，可观察到 US 组的肌节大面积弯曲变形，M 线模糊变弱，Z 线都发生了不同程度的断裂以及塌陷；成熟第 1 d，肌节长度均达到最小值，有研究表明，肌节长度与嫩度呈正相关，随着成熟时间的延长，肌节呈显著增长趋势[40]，与本研究的质构特性结果相对应；与 CK 组相比，成熟第 1 d 后，US 组的肌节显著增长（P<0.05），肌肉较为松弛，表明超声可以使羊肉变

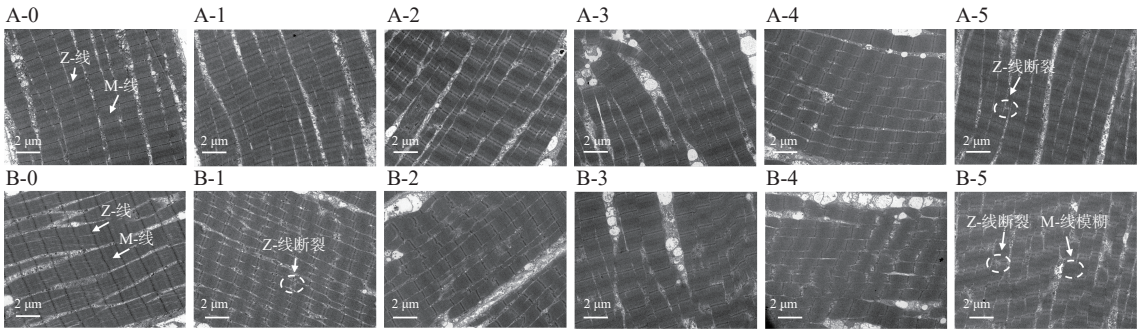


图 6　超声处理宰后成熟期罗布羊肉肌原纤维超微结构图（纵切，4000 倍）

Fig.6　Ultrastructural images of Lop mutton myofibrils at post-mortem maturity after ultrasonic treatment (longitudinal section, 4000×)

注：A 为 CK 组；B 为 US 组；图 6A 和图 6B 从左到右依次为成熟 0~5 d。

表 3　超声处理宰后成熟期罗布羊肉肌原纤维特性的变化

Table 3　Changes in myofibrils properties of Lop mutton at post-mortem maturation after ultrasonic treatment

指标	组别	成熟时间(d)					
		0	1	2	3	4	5
肌节长度(μm)	CK	1.54 ± 0.03^{Ad}	1.40 ± 0.04^{Be}	1.62 ± 0.04^{Bc}	1.70 ± 0.04^{Bb}	1.72 ± 0.03^{Bb}	1.76 ± 0.05^{Ba}
	US	1.51 ± 0.03^{Bf}	1.42 ± 0.03^{Ae}	1.71 ± 0.05^{Ad}	1.84 ± 0.05^{Ac}	1.90 ± 0.08^{Ab}	1.95 ± 0.04^{Aa}
肌纤维直径(μm)	CK	48.62 ± 3.12^{Aa}	47.76 ± 3.14^{Aab}	47.37 ± 1.89^{Aabc}	46.71 ± 1.55^{Abc}	46.44 ± 1.38^{Abc}	45.78 ± 1.88^{Ac}
	US	48.46 ± 3.40^{Aa}	47.29 ± 2.90^{Aab}	46.43 ± 3.22^{Aab}	46.15 ± 2.70^{Ab}	45.63 ± 2.48^{Ab}	45.13 ± 2.37^{Aba}
肌纤维面积(μm^2)	CK	1576.00 ± 219.99^{Aa}	1479.35 ± 364.58^{Aa}	1391.11 ± 221.09^{Aab}	1194.72 ± 184.39^{Abc}	1085.49 ± 331.89^{Ac}	817.49 ± 81.41^{Ad}
	US	1509.73 ± 304.80^{Aa}	1347.80 ± 296.41^{Aab}	1189.70 ± 196.40^{Bbc}	1025.30 ± 188.73^{Bc}	1009.20 ± 187.81^{Ac}	781.59 ± 124.29^{Ad}
肌纤维密度（纤维数/mm^2）	CK	521.53 ± 27.31^{Ad}	563.25 ± 24.89^{Ad}	628.82 ± 26.94^{Bc}	694.38 ± 11.25^{Bb}	733.12 ± 17.89^{Bab}	759.95 ± 27.20^{Ba}
	US	524.51 ± 26.19^{Ae}	587.10 ± 26.20^{Ad}	683.95 ± 20.48^{Ac}	728.65 ± 16.12^{Abc}	773.36 ± 16.12^{Ab}	825.51 ± 29.08^{Aa}

嫩。有研究指出，肉品在经过超声处理后，产生空化能引起肌纤维周围的结缔组织发生弱化现象，使肌肉变嫩[41]。

图 7 为肌肉横切图，同时对肌纤维直径、肌纤维面积和肌纤维密度进行测量，结果如表 3 所示。在成熟第 0 d 时，肌肉的肌纤维直径和面积均为最大值，单位面积内肌纤维数量最小，表示此时肌肉组织较为紧密；成熟第 5 d 时，肌肉的肌纤维直径和面积均显著低于第 0 d($P<0.05$)，且肌纤维密度最大，表示此时肌肉组织结构较为松散。张立新等[42] 指出，肌肉的剪切力与肌纤维直径和肌纤维密度相关，肌纤维直径越小，肌纤维密度越大，则剪切力越小，表现为肌肉越嫩；与 CK 组相比，在成熟第 2 d 后，US 组的肌纤维密度显著高于 CK 组($P<0.05$)，在成熟 0~5 d 内，肌纤维直径和面积均小于 CK 组，但无明显差异，表明肌肉在超声波的空化作用下，破坏了肌纤维的完整性，使肌纤维形态发生改变。LIU 等[43] 研究发现，鱼肉经过超声波处理后，肌纤维结构被破坏，纤维之间的空间增大，与本研究结果一致。

2.9　超声处理对宰后成熟期罗布羊肉挥发性风味的影响

由上文可知，羊肉色泽、保水性、嫩度均在成熟 3 d 后得以提升，综合 TVB-N 值和菌落总数的结果，选择成熟第 3 d 的羊肉进行挥发性风味物质测定，同时以成熟第 0 d 作为对照。由表 4 可知，在罗布羊中共检测出 82 种挥发性风味物质，包括醛类 19 种、酯类 17 种、烷烃类 10 种、酸类 6 种、烯烃类 6 种、醇类 8 种、酮类 5 种以及 11 种其他类物质。这些挥发

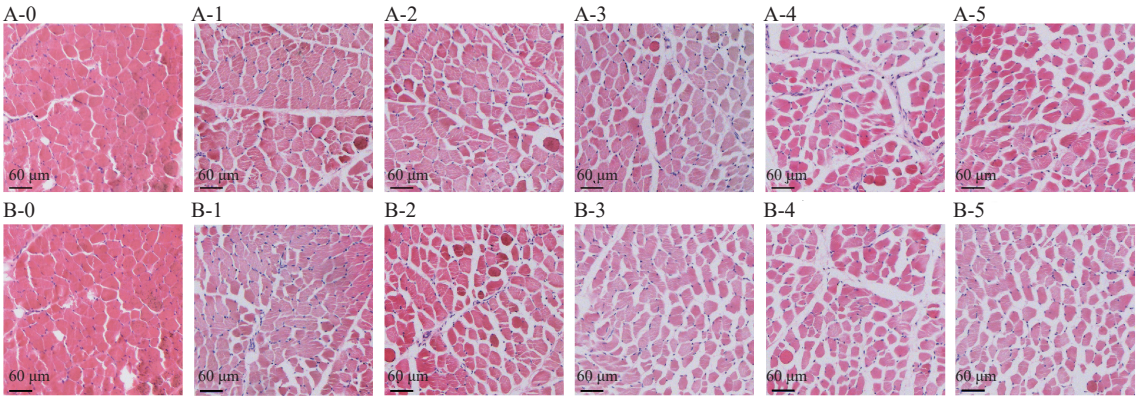


图 7　超声处理宰后成熟期罗布羊肉肌原纤维微观结构图(横切，200×)

Fig.7　Microstructure diagrams of myofibrils of Lop mutton at postmortem maturity after ultrasonic treatment (cross-section, 200×)

注：A 为 CK 组；B 为 US 组；图 7A 和图 7B 从左到右依次为成熟 0~5 d。

表 4　宰后成熟过程罗布羊肉挥发性风味成分(μg/kg)

Table 4　Volatile flavor compounds in Lop mutton meat during post-slaughter aging (μg/kg)

序号	保留时间(min)	香气成分	分子式	CAS	LB-CK		LB-US	
					0 d	3 d	0 d	3 d
1	7.7932	庚醛	$C_7H_{14}O$	111-71-7	2.02±0.73	2.84±0.76	5.39±1.81	2.08±0.90
2	9.5326	苯甲醛	C_7H_6O	100-52-7	7.72±1.85	8.63±3.33	8.30±3.26	12.44±4.45
3	10.8615	辛醛	$C_8H_{16}O$	124-13-0	10.58±1.43	11.19±3.86	12.42±3.41	13.53±2.05
4	12.1093	苯乙醛	C_8H_8O	122-78-1	Nd	0.47±0.18	Nd	0.40±0.13
5	13.9514	壬醛	$C_9H_{18}O$	124-19-6	36.38±3.09	43.85±15.67	37.10±10.17	52.32±17.10
6	15.5936	反式-2-壬烯醛	$C_9H_{16}O$	18829-56-6	1.93±0.12	Nd	2.25±0.53	1.03±0.24

续表 4

序号	保留时间（min）	香气成分	分子式	CAS	LB-CK		LB-US	
					0 d	3 d	0 d	3 d
7	16.9225	癸醛	$C_{10}H_{20}O$	112-31-2	4.95±0.86	4.69±2.80	4.29±2.96	10.09±2.92
8	18.4945	反式-2-癸烯醛	$C_{10}H_{18}O$	3913-81-3	4.34±0.48	1.89±0.62	1.85±0.27	1.07±0.06
9	19.7387	十一醛	$C_{11}H_{22}O$	112-44-7	1.64±0.22	1.40±0.71	1.77±0.48	2.17±0.48
10	19.9927	反式-2,4-癸二烯醛	$C_{10}H_{16}O$	25152-84-5	Nd	Nd	Nd	0.58±0.05
11	21.2387	2-十一烯醛	$C_{11}H_{20}O$	2463-77-6	7.95±0.94	3.74±1.28	Nd	Nd
12	22.4001	十二醛	$C_{12}H_{24}O$	112-54-9	3.47±0.52	2.39±1.07	Nd	Nd
13	24.9120	十三醛	$C_{13}H_{26}O$	10486-19-8	4.30±0.48	2.29±1.11	3.61±1.40	3.40±1.56
14	27.2943	十四醛	$C_{14}H_{28}O$	124-25-4	11.57±1.83	5.60±2.80	8.02±3.19	4.77±3.12
15	29.5577	十五醛	$C_{15}H_{30}O$	2765-11-9	23.37±3.37	11.21±7.20	15.91±6.48	11.61±4.70
16	31.7221	十六醛	$C_{16}H_{32}O$	629-80-1	143.52±29.94	97.84±77.84	119.43±59.75	165.98±22.39
17	33.0096	13-甲基-十四醛	$C_{15}H_{30}O$	75853-51-9	5.24±0.29	0.71±0.23	5.06±2.55	Nd
18	33.7497	十七醛	$C_{17}H_{34}O$	1000376-70-0	9.68±1.87	5.77±4.68	9.36±4.38	11.26±4.07
19	35.7052	十八醛	$C_{18}H_{36}O$	638-66-4	28.12±7.63	20.27±16.73	25.59±13.63	23.11±12.59
20	5.1157	丁酸乙酯	$C_6H_{12}O_2$	105-54-4	Nd	0.74±0.21	Nd	0.93±0.00
21	8.1462	4-羟基丁酸内酯	$C_4H_6O_2$	96-48-0	Nd	Nd	Nd	0.53±0.09
22	10.2945	正己酸乙烯酯	$C_8H_{14}O_2$	3050-69-9	Nd	Nd	0.83±0.35	Nd
23	13.7822	庚酸乙酯	$C_9H_{18}O_2$	106-30-9	2.52±0.62	1.92±0.42	2.22±0.47	2.01±0.36
24	16.6885	辛酸乙酯	$C_{10}H_{20}O_2$	106-32-1	16.60±2.23	12.63±4.48	8.00±3.11	14.31±2.46
25	19.4471	壬酸乙酯	$C_{11}H_{22}O_2$	123-29-5	18.31±2.71	8.50±2.87	8.78±4.61	9.98±0.28
26	20.8696	3-苯丙酸乙酯	$C_{11}H_{14}O_2$	2021-28-5	0.92±0.15	0.56±0.14	0.76±0.27	0.63±0.09
27	21.7267	二乙基二硫代氨基甲酸甲酯	$C_6H_{13}NS_2$	686-07-7	24.64±1.47	36.08±12.88	64.13±18.99	38.29±14.47
28	22.0599	癸酸乙酯	$C_{12}H_{24}O_2$	110-38-3	15.20±1.81	12.76±5.45	11.04±2.99	19.32±7.46
29	26.8838	月桂酸乙酯	$C_{14}H_{28}O_2$	106-33-2	4.95±0.60	4.97±2.73	3.98±2.01	6.16±2.13
30	31.2432	十四酸乙酯	$C_{16}H_{32}O_2$	124-06-1	23.12±2.84	14.43±4.35	8.22±1.10	14.35±6.49
31	33.2707	十五酸乙酯	$C_{17}H_{34}O_2$	41114-00-5	3.31±0.42	2.20±0.54	2.62±0.84	1.27±0.28
32	34.6375	邻苯二甲酸二丁酯	$C_{16}H_{22}O_4$	84-74-2	Nd	Nd	1.93±0.47	Nd
33	34.8085	9-十六碳烯酸乙酯	$C_{18}H_{34}O_2$	54546-22-4	4.97±1.36	2.99±1.09	Nd	1.81±1.42
34	35.2119	十六酸乙酯	$C_{18}H_{36}O_2$	628-97-7	76.80±12.04	49.20±17.83	30.77±3.17	42.73±17.68
35	38.3774	反油酸乙酯	$C_{20}H_{38}O_2$	6114-18-7	11.49±1.53	8.69±4.98	6.37±3.52	6.14±2.60
36	38.8366	十八酸乙酯	$C_{20}H_{40}O_2$	111-61-5	4.61±0.74	3.78±2.10	2.33±0.65	2.51±1.33
37	19.5191	十三烷	$C_{13}H_{28}$	629-50-5	Nd	Nd	1.00±0.42	1.05±0.35
38	24.1499	十四烷	$C_{14}H_{30}$	629-54-9	3.45±0.47	2.13±0.65	3.48±2.18	4.09±0.80
39	23.7110	2,6,10-三甲基十三烷	$C_{16}H_{34}$	3891-99-4	Nd	Nd	Nd	2.98±0.74
40	24.6378	十五烷	$C_{15}H_{32}$	629-62-9	Nd	Nd	3.08±1.19	4.64±1.97
41	26.9864	十六烷	$C_{16}H_{34}$	544-76-3	2.86±0.47	2.63±0.74	3.91±1.42	6.26±2.25
42	29.2175	十七烷	$C_{17}H_{36}$	629-78-7	3.56±0.54	3.69±1.65	4.63±1.06	5.22±1.49
43	29.3489	2,6,10,14-四甲基十五烷	$C_{19}H_{40}$	1921-70-6	Nd	2.14±1.19	Nd	2.29±0.59
44	31.3440	十八烷	$C_{18}H_{38}$	593-45-3	Nd	2.57±1.23	4.18±1.25	3.35±1.28
45	31.3476	十九烷	$C_{19}H_{40}$	629-92-5	2.70±0.50	Nd	Nd	Nd
46	31.5547	2,6,10,14-四甲基十六烷	$C_{20}H_{42}$	638-36-8	1.97±0.33	3.82±1.90	8.77±3.39	4.14±1.72
47	12.9593	正辛醇	$C_8H_{18}O$	111-87-5	2.25±1.40	4.55±1.76	4.31±0.82	6.65±1.10
48	13.3897	2-苯异丙醇	$C_9H_{12}O$	617-94-7	Nd	Nd	Nd	0.52±0.16
49	17.3367	2-苯氧基乙醇	$C_8H_{10}O_2$	122-99-6	Nd	Nd	Nd	1.69±0.44
50	28.6287	环十二醇	$C_{12}H_{24}O$	1724-39-6	Nd	Nd	1.69±0.67	Nd
51	28.8556	反-2-十二烯-1-醇	$C_{12}H_{24}O$	69064-37-5	Nd	0.68±0.43	Nd	Nd
52	31.0991	3,7,11-三甲基-1-十二醇	$C_{15}H_{32}O$	6750-34-1	1.47±0.20	1.10±0.56	1.64±0.88	1.07±0.56
53	33.1770	14-甲基-8-十六烯-1-醇	$C_{17}H_{34}O$	30689-78-2	6.84±1.52	4.66±3.91	5.39±3.93	Nd
54	34.0720	1-十六烷醇	$C_{16}H_{34}O$	36653-82-4	0.70±0.21	Nd	Nd	Nd
55	15.9863	辛酸	$C_8H_{16}O_2$	124-07-2	Nd	Nd	Nd	3.44±0.74
56	18.7232	壬酸	$C_9H_{18}O_2$	112-05-0	4.31±0.91	3.08±1.55	4.03±0.93	3.85±0.92
57	21.3396	癸酸	$C_{10}H_{20}O_2$	334-48-5	3.53±0.50	5.09±1.97	4.13±1.45	9.82±4.05
58	26.1311	月桂酸	$C_{12}H_{24}O_2$	143-07-7	1.32±0.30	2.66±0.86	2.57±1.11	4.57±2.23
59	30.5427	十四酸	$C_{14}H_{28}O_2$	544-63-8	6.06±2.86	5.02±1.68	3.62±0.76	7.67±2.44

续表 4

序号	保留时间（min）	香气成分	分子式	CAS	LB-CK		LB-US	
					0 d	3 d	0 d	3 d
60	34.5780	棕榈酸	$C_{16}H_{32}O_2$	1957-10-3	10.18±6.65	13.34±8.02	4.39±0.90	14.18±9.09
61	7.0532	苯乙烯	C_8H_8	100-42-5	Nd	Nd	0.96±0.30	1.06±0.30
62	11.6269	环己烯	$C_{10}H_{16}$	1461-27-4	Nd	Nd	4.82±1.24	Nd
63	11.6322	右旋萜二烯	$C_{10}H_{16}$	5989-27-5	2.21±1.18	3.67±1.50	Nd	8.75±3.02
64	12.5632	萜品烯	$C_{10}H_{16}$	99-85-4	1.61±0.19	2.98±0.21	Nd	2.02±0.66
65	22.7674	三甲基亚甲基双环十一碳烯	$C_{15}H_{24}$	118-65-0	1.17±0.19	Nd	Nd	Nd
66	32.3020	(E)-3,7,11,15-四甲基-2-十六碳烯	$C_{20}H_{40}$	14237-73-1	2.22±0.43	5.96±3.05	17.88±8.73	6.98±3.45
67	10.3916	甲基庚烯酮	$C_8H_{14}O$	110-93-0	Nd	0.82±0.21	1.11±0.19	0.82±0.28
68	12.7955	苯乙酮	$C_{10}H_{20}O$	98-86-2	Nd	0.39±0.09	Nd	Nd
69	16.5589	2-癸酮	$C_{10}H_{20}O$	693-54-9	Nd	0.70±0.29	0.80±0.28	Nd
70	19.0653	3-十一酮	$C_{11}H_{22}O$	2216-87-7	1.05±0.16	Nd	Nd	Nd
71	23.5148	香叶基丙酮	$C_{13}H_{22}O$	689-67-8	2.34±0.53	2.78±0.36	Nd	3.52±0.87
72	6.6246	乙基苯	C_8H_{10}	100-41-4	Nd	0.38±0.07	0.61±0.16	0.38±0.05
73	7.0640	对二甲苯	C_8H_{10}	106-42-3	Nd	Nd	1.76±1.12	Nd
74	11.5044	邻异丙基甲苯	$C_{10}H_{14}$	527-84-4	12.89±1.30	14.83±0.64	13.13±1.53	14.02±1.67
75	16.2564	甘菊蓝	$C_{10}H_8$	275-51-4	Nd	Nd	2.02±0.67	Nd
76	17.1765	2,3-二氢噻吩	C_4H_6S	1120-59-8	Nd	5.72±1.85	9.70±3.66	Nd
77	19.3408	百里香酚	$C_{10}H_{14}O$	89-83-8	Nd	2.37±0.72	Nd	3.22±0.55
78	19.6542	N,N-二丁基甲酰胺	$C_9H_{19}NO$	761-65-9	2.23±0.17	6.07±2.63	6.69±2.45	8.11±3.06
79	21.9626	烟酰胺	$C_6H_6N_2O$	98-92-0	3.81±1.29	1.83±0.73	Nd	4.35±0.93
80	29.7000	1,2-环氧十六烷	$C_{16}H_{32}O$	7320-37-8	1.12±0.08	1.06±0.56	Nd	Nd
81	32.6171	1,2-环氧十八烷	$C_{18}H_{36}O$	7390-81-0	6.47±1.03	Nd	Nd	3.92±2.53
82	33.4886	十六烷基二甲基叔胺	$C_{18}H_{39}N$	112-69-6	Nd	Nd	Nd	7.67±4.25

注：“Nd”表示未检出。

性物质多数与蛋白质和脂质的氧化降解以及相关代谢反应产物的相互作用有关。由图 8A 所示，羊肉中醛类和酯类物质的占比之和均达到 80% 左右，表明醛类和酯类是羊肉中的主要挥发性风味物质；与 CK 组相比，US 组中醛类物质含量在成熟第 3 d 时明显增多，可能是超声产生的空化能导致脂质氧化或氨基酸降解[44]，使其含量提升。由图 8B 所示，与成熟 0 d 相比，成熟 3 d 后其挥发性化合物数量增多，且羊肉经超声处理后，挥发性物质数量均高于 CK 组，这与 XI 等[45] 和 FANG 等[44] 的研究结果相似。

羊肉中挥发性风味物质的构成较为复杂，仅从单一的成分分析中难以确定出羊肉的差异风味物质。因此，对挥发性风味物质的含量进行正交偏最小二乘判别分析（OPLS-DA），可以对不同组别的样品进行有效区分，R^2x、R^2y 分别为 X、Y 矩阵的解释率，Q^2 为模型的预测性能。如图 9A 所示，R^2x 为 0.974，R^2y 为 0.979，Q^2 为 0.859，此模型中的 R^2 和 Q^2 均超过 0.5，表明该模型有较好的拟合程度。其次各组间样本点间距较远，表明处理组之间风味差异较大。如图 9B 所示，经过置换检验（n=200），Q^2 的回归线与纵轴的相交点为负值，表示该统计模型验证有效。

为进一步探寻罗布羊肉关键香气成分，对罗布羊肉进行变量投影重要性因子（VIP）分析。VIP 分析可量化每个变量对羊肉宰后成熟期风味的贡献，其值越大，说明羊肉风味差异越显著，贡献越大[46]。将

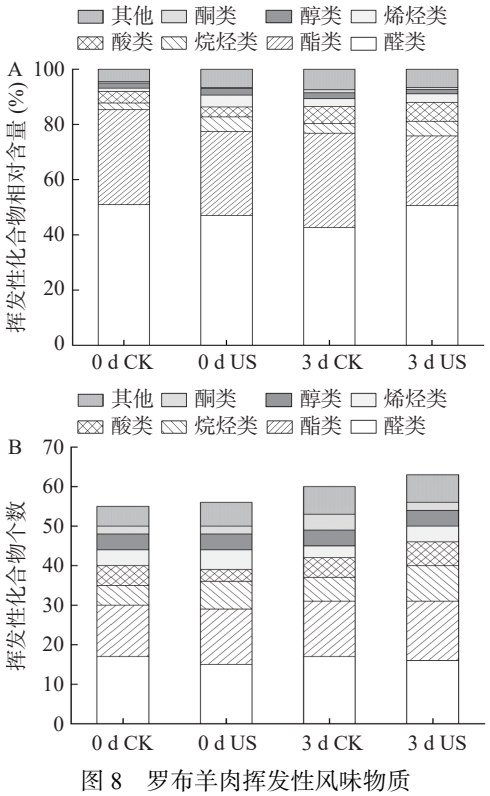


图 8　罗布羊肉挥发性风味物质

Fig.8　Volatile flavor compounds in Lop mutton

VIP>1 作为筛选标准，如图 9C 所示，符合标准的物质代表的柱子标为红色，共筛选出 22 种 VIP>1 挥发性风味物质，其中醛类 8 种，酯类 6 种，酸类 2 种，烯

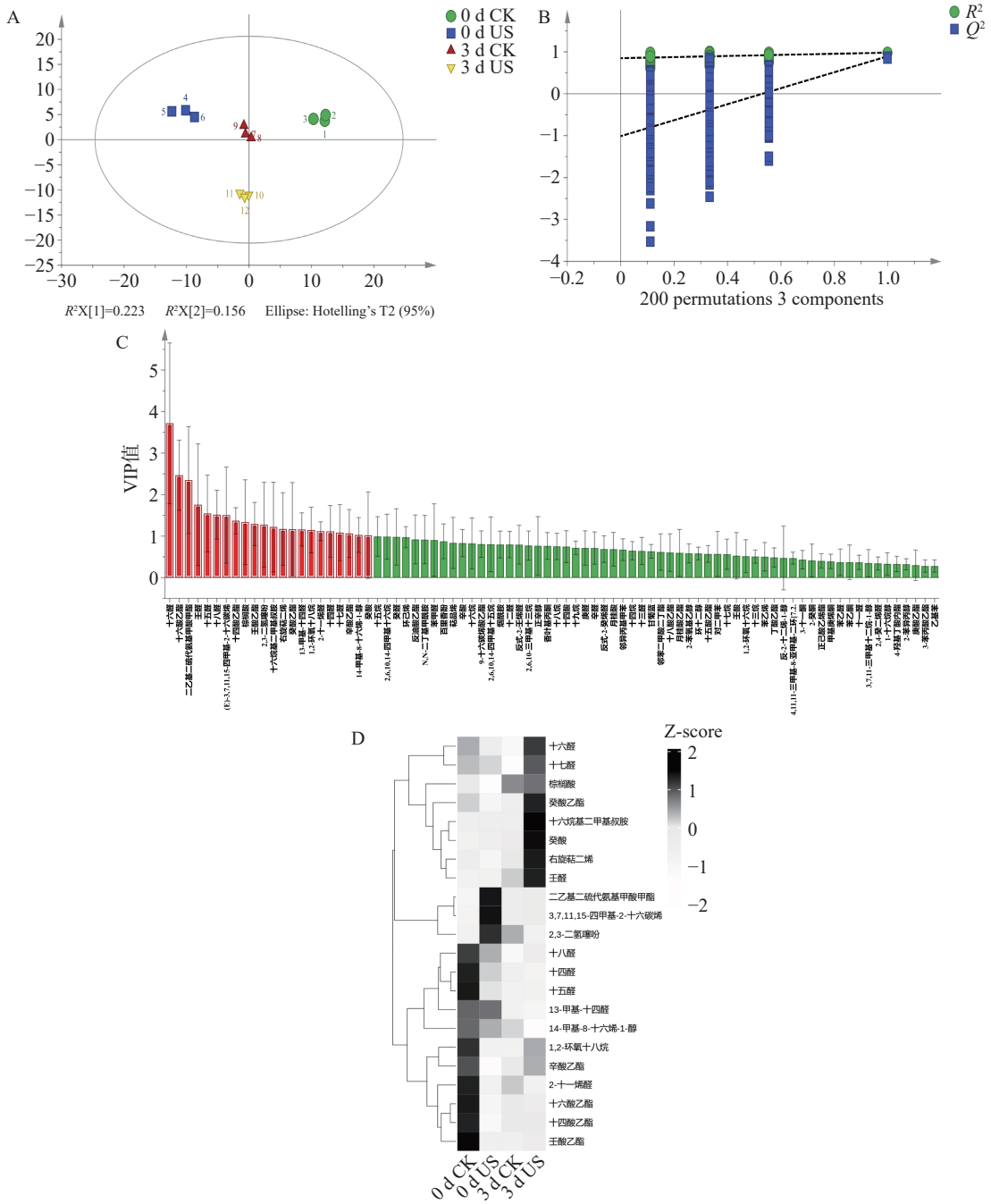


图 9　宰后成熟过程中罗布羊肉挥发性物质多元统计分析

Fig.9　Multivariate statistical analysis of volatile compounds in Lop mutton during postmortem aging

注: A 为挥发性风味物质得分图; B 为置换检验图; C 为 VIP 图; D 为聚类热图。

烃类 2 种, 醇类 1 种, 其他类 3 种。为了系统对比各组关键差异风味化合物, 对筛选出的挥发性风味物质进行聚类热图分析, 以颜色梯度表征香气成分含量的高低。如图 9D 所示, 在 CK 组中, 罗布羊肉中仅有棕榈酸、壬醛和 2,3-二氢噻吩等少数风味化合物在成熟 3 d 时含量显著增加; 在 US 组中, 十六醛、十七醛、棕榈酸、癸酸乙酯、十六烷基二甲基叔胺、癸酸、右旋萜二烯和壬醛的含量均在成熟 3 d 时达到最大值, 表明羊肉经超声处理后, 在成熟 3 d 时其挥发性风味物质的含量明显增加, 组成更为丰富。

感觉阈值决定了肉中香味的受感知程度, ROAV 表示该化合物对整体风味的贡献。宰后成熟过程中十六醛的峰面积最高, 且阈值较低, 设置十六醛的 ROAV 为 100。一般 0.1≤ROAV<1 时, 认为该香气组分对羊肉总体风味具有重要修饰作用, ROAV≥1 时认为该香气组分是羊肉中关键香气成分[46]。本研究结果如表 5 所示, 共有 14 种香气成分可计算 ROAV, 其中, 十六醛、十六酸乙酯、壬醛、十八醛、十四酸乙酯、2-十一烯醛、十四醛 7 种香气成分 ROAV 大于 1, 表明这 7 种香气成分是罗布羊肉中的关键香气成分。醛类物质阈值较低, 一般具有果香味和青草味[47], 且能掩盖膻味[23], 对羊肉整体香气起

表 5　罗布羊挥发性风味物质的 ROAV

Table 5　ROAV of volatile flavor compounds in Lop mutton

序号	CAS	香气成分	VIP值	阈值(μg/kg)[48]	ROAV				香气描述[48−51]
					0 d CK	0 d US	3 d CK	3 d US	
1	629-80-1	十六醛	3.72	0.91	100	100	100	100	花香、蜡香、青草香
2	628-97-7	十六酸乙酯	2.47	14	3.50	1.93	4.02	1.60	−
3	686-07-7	二乙基二硫代氨基甲酸甲酯	2.35	−	−	−	−	−	果香
4	124-19-6	壬醛	1.76	1	23.85	30.40	50.13	27.40	酸味
5	2765-11-9	十五醛	1.55	43	0.35	0.29	0.26	0.14	脂肪味、花香或甜味
6	638-66-4	十八醛	1.52	1	17.81	19.21	18.58	12.66	脂肪香味
7	14237-73-1	3,7,11,15-四甲基-2-十六碳烯	1.51	−	−	−	−	−	奶油坚果气味
8	124-06-1	十四酸乙酯	1.37	5.5	2.69	1.33	3.09	1.37	青草香、脂肪味
9	1957-10-3	棕榈酸	1.34	10300	0.001	0.0004	0.001	0.001	脂肪味
10	123-29-5	壬酸乙酯	1.29	850	0.01	0.01	0.01	0.01	−
11	1120-59-8	2,3-二氢噻吩	1.27	−	−	−	−	−	−
12	112-69-6	十六烷基二甲基叔胺	1.22	−	−	−	−	−	蜡香、脂肪味
13	5989-27-5	右旋萜二烯	1.17	10	0.15	−	0.51	0.52	柑橘香
14	110-38-3	癸酸乙酯	1.16	51	0.19	0.20	0.28	0.20	脂肪味、果香
15	75853-51-9	13-甲基-十四醛	1.16	−	−	−	−	−	−
16	7390-81-0	1,2-环氧十八烷	1.15	−	−	−	−	−	烃味
17	2463-77-6	2-十一烯醛	1.12	0.78	6.55	Nd	5.54	Nd	青草香、腊香、脂肪香
18	124-25-4	十四醛	1.11	0.55	13.46	11.58	10.92	4.39	青草味
19	1000376-70-0	十七醛	1.08	−	−	−	−	−	特殊的芳香气味
20	106-32-1	辛酸乙酯	1.06	12.87	0.83	0.61	1.13	0.62	果香味
21	30689-78-2	14-甲基-8-十六烯-1-醇	1.03	−	−	−	−	−	−
22	334-48-5	癸酸	1.02	120	0.02	0.03	0.05	0.04	烃味

注：“−”表示未知。

到积极作用。进一步结合阈值和聚类热图分析，结果表明，羊肉在超声处理后，具有特殊蜡香味和青草香味的十六醛和十七醛含量在成熟 3 d 时达到最大值，对羊肉整体香气起到良好的改善效果；此外，棕榈酸、癸酸乙酯虽然阈值较高，但在成熟 3 d 时其含量显著增加，也可赋予羊肉一定的脂肪香味。综上所述，醛类物质对羊肉整体风味贡献度最大，且羊肉经过超声处理后，在成熟第 3 d 时风味最佳。

3　结论

通过超声处理对罗布羊背最长肌成熟品质的研究发现，随着成熟时间的延长，羊肉 TVB-N 值在 0~5 d 成熟期内符合国家鲜肉标准；pH 在成熟第 1 d 后逐渐回升；L^*值在成熟第 3 d 时达到最大值；剪切力、硬度值在成熟 1 d 后逐渐下降；肌原纤维蛋白降解，嫩度得以改善；蒸煮损失率在成熟 3 d 后持续降低，保水性增强；肌纤维直径和肌纤维面积变小，肌纤维密度增加，肌肉组织逐渐松弛。对羊肉进行挥发性风味物质测定发现，罗布羊肉中的关键香气成分为十六醛、十六酸乙酯、壬醛、十八醛、十四酸乙酯、2-十一烯醛和十四醛。超声处理后，羊肉排酸效率增加，其 L^*值、嫩度和保水性显著提高，肌肉的肌节长度、肌纤维密度也随之增大，成熟 3 d 时挥发性风味物质中醛类物质明显增多。因此，羊肉在成熟 3 d 后，色泽、保水性、嫩度以及风味明显提升，结合 TVB-N 值和菌落总数，羊肉在成熟第 3 d 时，其品质和安全性均达到最佳状态。综上所述，超声处理可以有效改善羊肉嫩度，提升羊肉品质，在成熟第 3 d 时达到最佳成熟期，品质最好。

© 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］唐丽苹，阿米妮古丽，王旭，等. 罗布羊屠宰性能及肉品质特征分析与评价[J]. 新疆农业科学，2025，62(1)：251−260. ［TANG Liping, A Miniguli, WANG Xu, et al. Analysis and evaluation of slaughter performance and meat quality characteristics of Luobu sheep[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2025, 62(1): 251−260.］

［2］古丽娜·巴克，乌西坤·艾力木拜克. 罗布羊羊肉品质分析[J]. 中国草食动物科学，2022，42(6)：63−67. ［GULNAR·Baki, UXKUN·Alimbak. Analysis of mutton quality in lopnur sheep[J]. China Herbivore Science, 2022, 42(6): 63−67.］

［3］曾树霖，曾荣. 新疆羊肉产业现状及未来发展趋势[J]. 食品安全导刊，2022(36)：147−152. ［ZENG Shulin, ZENG Rong. Present situation and future development trend of Xinjiang mutton industry[J]. Food Safety Guide Magazine, 2022(36): 147−152.］

［4］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 of physicochemical characteristics of lamb longissimus dorsi muscle during rigor development and aging[J]. Food Science, 2017, 38(21): 112−118.］

[5] WANG Linlin, YU Qunli, HAN Ling, et al. Study on the effect of reactive oxygen species-mediated oxidative stress on the activation of mitochondrial apoptosis and the tenderness of yak meat [J]. Food Chemistry, 2018, 244: 394−402.
[6] 张茸茸, 刘佳丽, 李亦凡, 等. 超声技术对肌原纤维蛋白结构的影响及其在肌肉食品中的应用现状[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(21): 10−19. [ZHANG Rongrong, LIU Jiali, LI Yifan, et al. Influence of ultrasound technology on the structure of myofibrillar proteins and its current applications in muscle-based food products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(21): 10−19.]
[7] JAYASOORIYA S D, TORLEY P J, D'ARCY 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.
[8] 韦田, 梅林, 王志耕, 等. 超声波对猪肉腌制效率及其品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(11): 176−180. [WEI Tian, MEI Lin, WANG Zhigeng, et al. Effects of ultrasonic treatment on pork curing efficiency and quality[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(11): 176−180.]
[9] WANG Jun, KONG Dewei, HAN Rongwei, et al. Ultrasound combined with slightly acidic electrolytic water thawing improved rheological properties, quality and structure of mutton myofibrillar protein gel[J]. Meat Science, 2025, 225: 109806.
[10] 杜鹏飞, 王维婷, 李孟孟, 等. 超声波解冻对羊肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(1): 39−44. [DU Pengfei, WANG Weiting, LI Mengmeng, et al. Effect of ultrasonic thawing on quality characteristics of frozen mutton[J]. Meat Research, 2020, 34(1): 39−44.]
[11] 姚黄兵. 脉冲电场解冻猪里脊肉的效果及品质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024. [YAO Huangbing. Study on the effect and quality of pulsed electric field thawing on pork tenderloin[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.]
[12] 马萌, 马佳荣, 高爽, 等. 宰后成熟期间细胞凋亡酶-3 抑制剂对滩羊肉保水性及嫩度的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(5): 96−105. [MA Meng, MA Jiarong, GAO Shuang, et al. Effect of caspase-3 inhibitor on water retention and tenderness of Tan sheep meat during postmortem aging[J]. Food Science, 2025, 46(5): 96−105.]
[13] LEI Yongdong, DENG Xiaorong, ZHANG Zhiwei, et al. Effects of oxidation on the physicochemical properties and degradation of mutton myofibrillar proteins[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(7): 2932−2942.
[14] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: "ROAV"法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370−374. [LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian. "ROAV" method: A new method for determining key odor compounds of Rugao ham[J]. Food Science, 2008, 29(7): 370−374.]
[15] 吴治材, 郭中华, 曹春平, 等. 分割羊肉冰温保鲜及其预制肉品开发[J]. 食品工程, 2024(3): 56−60. [WU Zhicai, GUO Zhonghua, CAO Chunping, et al. Ice-temperature preservation of splitted lamb and development of its restructured products[J]. Food Engineering, 2024(3): 56−60.]
[16] LIANG Ce, ZHANG Dequan, ZHENG Xiaochun, et al. Effects of different storage temperatures on the physicochemical properties and bacterial community structure of fresh lamb meat[J]. Food Science of Animal Resources, 2021, 41(3): 509−526.
[17] 周大鹏, 蓝蔚青, 莫雅娴, 等. 超声前处理对冷藏海鲈鱼品质及蛋白质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(17): 204−211. [ZHOU Dapeng, LAN Weiqing, MO Yaxian, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the quality and protein characteristics in Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicas*) during refrigeration[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(17): 204−211.]
[18] 朱彬, 唐宏刚, 张晋, 等. 超声处理对羊肉冷藏期间色泽稳定性和货架期品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(10): 2492−2498. [ZHU Bin, TANG Honggang, ZHANG Jin, et al. Effects of ultrasonic treatment on color stability and preservation quality of mutton during refrigeration[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(10): 2492−2498.]
[19] ZHAO Yilong, HE Sangang, HUANG Jinfeng, et al. Genome-wide association analysis of muscle pH in texel sheep× Altay sheep F_2 resource population[J]. Animals, 2023, 13(13): 2162.
[20] 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.]
[21] 董智铭, 姜萩婉, 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.]
[22] 张莉. 不同宰后成熟、冷冻及解冻方式对哈萨克羊肉品质的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022. [ZHANG Li. Effects of different postmortem aging, freezing and thawing methods on the quality of Kazakh sheep[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.]
[23] 李双格, 蒋泽丽, 杨海霞, 等. 宰后僵直过程对吐鲁番黑羊肉品质特性及挥发性风味物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(12): 174−182. [LI Shuangge, JIANG Zeli, YANG Haixia, et al. Analysis of quality characteristics and volatile flavor substances of Turpan black lamb during post-slaughter rigor mortis period[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(12): 174−182.]
[24] 马爱娟, 邓绍林, 李东岭, 等. 高压静电场结合不同贮藏温度对鸡肉货架期及品质的影响[J/OL]. 南京农业大学学报, 2025 (2025-09-11). https://link.cnki.net/urlid/32.1148.S.20250911.1100.002. [MA Aijuan, DENG Shaolin, LI Dongling, et al. Effect of high voltage electrostatic field combined with different storage temperatures on shelf-life and quality of chicken meat[J/OL]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025 (2025-09-11). https://link.cnki.net/urlid/32.1148.S.20250911.1100.002.]
[25] 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[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(12): 100−106. [YUAN Jiayi, JIANG Feiyan, HAO Chenming, et al. Effects of ultrasound-assisted tumbling marination on quality of duck legs meat[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(12): 100−106.]
[26] 闫凯, 李玉娇, 侯天赐, 等. 滚揉结合袋装处理对宰后成熟过程中羊肉品质的影响[J]. 中国草食动物科学, 2025, 45(6): 49−57. [YAN Kai, LI Yujiao, HOU Tianci, et al. Effects of tumbling combined with bag packaging on the quality of mutton during postmortem aging[J]. China Herbivore Science, 2025, 45(6): 49−57.]
[27] 朱晓玲, 盘赛昆, 吴平, 等. 多频超声解冻模式对牛腩肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 291−300. [ZHU Xiaoling, PAN Saikun, WU Ping, et al. Effect of multi-frequency ultrasonic thawing mode on the quality of beef brisket[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 291−300.]

［28］ 张佳莹. 线粒体通路信号介导细胞凋亡机制及对宰后牛肉嫩化影响[D]. 兰州：甘肃农业大学, 2020. ［ZHANG Jiaying. The mechanism of effects of mitochondrial pathway signaling mediated apoptosis on bovine muscle tenderization during postmortem aging[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.］
［29］ MANHEEM K, ADIAMO O, ROOBAB U, et al. A comparative study on changes in protein, lipid and meat-quality attributes of camel meat, beef and sheep meat（mutton）during refrigerated storage[J]. Animals, 2023, 13(5): 904.
［30］ 司马胜雪, 郝贝贝, 武泽文, 等. 超声时间对延边黄牛肉品质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 169−174. ［SIMA Shengxue, HAO Beibei, WU Zewen, et al. Effects of ultrasonic treatment time on meat quality of Yanbian yellow cattle[J]. Food and Machinery, 2024, 40(7): 169−174.］
［31］ 李荣, 罗瑞明, 杜瑞, 等. 宰后成熟过程中线粒体损伤与滩羊肉嫩度的关联性分析[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 54−61. ［LI Rong, LUO Ruiming, DU Rui, et al. Relationship between mitochondrial damage and meat tenderness of Tan sheep during postmortem aging[J]. Food Science, 2023, 44(21): 54−61.］
［32］ SABZI F, VARIDI M J, VARIDI M, et al. Effect of verjuice（*Vitis vinifera* L.）on physicochemical and textural properties of beef M. biceps femoris[J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12(8): 5497−5517.
［33］ 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: 960−967.
［34］ 徐静, 丁珊珊, 曹江伟, 等. 超声波清洗处理对猪肉品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 99−106. ［XU Jing, DING Shanshan, CAO Jiangwei, et al. Effect of ultrasonic cleaning treatment on pork quality[J]. Food Science, 2023, 44(19): 99−106.］
［35］ 杜琪, 廖月琴, 吴盈茹, 等. 冷藏过程中细点圆趾蟹肌肉品质变化研究[J]. 核农学报, 2023, 37(5): 1012−1021. ［DU Qi, LIAO Yueqin, WU Yingru, et al. Changes in quality characteristics of sand crab（*Ovalipes punctatus*）during chilled storage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(5): 1012−1021.］
［36］ 俞彭欣. 和田地区不同品种不同部位羊肉营养品质与食用品质特性差异研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学, 2022. ［YU Pengxin. Study on the difference of nutritional quality and edible quality of mutton of different varieties and parts in Hetian prefecture[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.］
［37］ LIU Haotian, ZHANG Huan, LIU Qian, et al. Solubilization and stable dispersion of myofibrillar proteins in water through the destruction and inhibition of the assembly of filaments using high-intensity ultrasound[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105160.
［38］ 石雨婷. 超声解冻对羊肉品质及肌原纤维蛋白结构的影响[D]. 通辽：内蒙古民族大学, 2024. ［SHI Yuting. The effects of ultrasonic thawing on the quality and myofibrillar protein structure of lamb meat[D]. Tongliao: Inner Mongolia University for the Nationalities, 2024.］
［39］ ZHANG Yinyin, ZHANG Daojing, HUANG Yajun, et al. L-arginine and L-lysine degrade troponin-T, and L-arginine dissociates actomyosin: Their roles in improving the tenderness of chicken breast[J]. Food Chemistry, 2020, 318: 126516.
［40］ KIM H J, PARK J, SONG S M, et al. Quality enhancement techniques for cow meat: Current approaches and future directions[J]. Food Science of Animal Resources, 2025, 45(1): 185−198.
［41］ PEÑA-GONZALEZ E, ALARCON-ROJO A D, GARCIA-GALICIA I, et al. Ultrasound as a potential process to tenderize beef: Sensory and technological parameters[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 53: 134−141.
［42］ 张立新, 文泽芳, 志莉, 等. 滇中牛公牛和昭通牛公牛肉品质的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2025, 61(9): 402−409. ［ZHANG Lixin, WEN Zefang, ZHI Li, et al. Study on beef quality of Zhongdian Niugong and Zhaotong Niugong[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2025, 61(9): 402−409.］
［43］ LIU Jun, XIE Changxin, MA Wenhan, et al. Effects of ultrasound-assisted low-salt curing on water retention, tenderness and *in vitro* digestive characteristics of grass carp（*Ctenopharyngodon idellus*）[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 113: 107214.
［44］ FANG Yujuan, ZHANG Jian, MA Chao, et al. Ultrasound-induced modifications of beef flavor characteristics during post-mortem aging[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 108: 106979.
［45］ XI Linjie, SUN Yanan, JIANG Shengqi, et al. Evaluation of effects of ultrasound-assisted curing on the flavor of Chinese bacon[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 96: 106424.
［46］ YUAN Haibin, WU Huachang, QIAO Mingfeng, et al. Characterization of flavor profile of sauced pork from different regions of China based on E-nose, E-tongue and gas chromatography–ion mobility spectroscopy[J]. Molecules, 2024, 29(7): 1542.
［47］ YUAN Can, XU Chengjian, CHEN Lilan, et al. Effect of different cooking methods on the aroma and taste of chicken broth[J]. Molecules, 2024, 29(7): 1532.
［48］ 里奥, 范海默特. 化合物香味阈值汇编(第二版)[M]. 北京：科学出版社, 2015. ［VAN GEMERTL L J. Compilations of flavour threshold values in water and other media（2nd ed）[M]. Beijng: Science Press, 2015.］
［49］ 熊晓筱. 基于风味和脂质组学探究不同品种鸭胸肉加工的风味形成[D]. 扬州：扬州大学, 2025. ［XIONG Xiaoxiao. Exploring the flavor formation in processed duck breast from different breeds based on flavoromics and lipidomics[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2025.］
［50］ 靳林诗. 调理羊肉串低温贮藏过程菌群演替规律及植物精油保鲜效果研究[D]. 邯郸：河北工程大学, 2025. ［JIN Linshi. Study on the dynamics of microbial community in the low-temperature storage process of lamb skewers and the preservation technology of plant essential oils[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2025.］
［51］ 蒲丹丹, 孙杰, 陈海涛, 等. SDE-GC-MS 结合 GC-O 对比熟湖南腊肉和熟广东腊肉的挥发性风味成分[J]. 食品科学, 2015, 36(24): 131−136. ［PU Dandan, SUN Jie, CHEN Haitao, et al. Comparative analysis of volatile flavor compounds of cooked Hunan and Guangdong bacon by simultaneous distillation and extraction combine with gas chromatography-mass spectrometry（SDE-GC-MS）and gas chromatography-olfactometry（GC-O）[J]. Food Science, 2015, 36(24): 131−136.］