汤雅楠,摆玉蔷,任驰,等. 超快速冷却对宰后早期羊肉品质及肌原纤维蛋白特性的影响 [J]. 食品工业科技,2026,47(7):93−102. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030141
TANG Yanan, BAI Yuqiang, REN Chi, et al. Effects of Very Fast Chilling on Early Postmortem Lamb Meat Quality and Myofibrillar Protein Characteristics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 93−102. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030141

·研究与探讨·

超快速冷却对宰后早期羊肉品质及肌原纤维蛋白特性的影响

汤雅楠,摆玉蔷,任　驰,赵欣然,冷冬梅,侯成立,李　欣*,张德权
(中国农业科学院农产品加工研究所/农业农村部农产品质量安全收贮运管控重点实验室,北京 100193)

摘　要:探究超快速冷却对宰后早期羊肉品质及肌原纤维蛋白特性的影响,为研发生鲜肉僵直前品质保持技术提供依据。实验选取宰后 1 h 羊背最长肌(longissimus thoracis et lumborum)为试验材料,随机分为 3 组进行冷却处理:对照组(降温速度 4.8 ℃/h)、降温处理组 1(降温速度 23.0 ℃/h)、降温处理组 2(降温速度 25.1 ℃/h),降温处理组 1 和降温处理组 2 均为超快速冷却处理组,分析不同降温速度对羊肉品质及肌原纤维蛋白特性的影响,并阐明其作用机制。结果表明,降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉 pH、肌原纤维蛋白(Myofibrillar Protein,MP)溶解性、MP 凝胶保水性、MP 乳化活性及乳化稳定性、ATP 含量显著高于对照组(P<0.05),而降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉剪切力、蒸煮损失、MP 凝胶硬度、乳酸含量显著低于对照组(P<0.05)。在宰后 24 h,降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉 MP 溶解性分别比对照组高 16.13%、29.84%,MP 凝胶保水性分别比对照组高 3.02%、5.93%。降温处理组 2 在宰后 72 h 的乳化活性和乳化稳定性分别为 51.63 m^2/g、41.18%,均显著高于对照组的乳化活性(43.16 m^2/g)和乳化稳定性(37.76%)(P<0.05)。降温处理组 2 的羊肉肌原纤维蛋白溶解度在宰后 72 h 内差异不显著,凝胶保水性和乳化活性在宰后 12 h 内差异不显著,表明超快速冷却处理在一定程度上保持了羊肉僵直前的品质。羊肉中 ATP 含量和乳酸含量变化分析结果显示,降温处理组 1 和降温处理组 2 的乳酸含量显著低于对照组,而 ATP 含量显著高于对照组(P<0.05),表明降温处理组 1 和降温处理组 2 延缓了糖酵解速率,进而延缓 pH 的下降,保持了羊肉僵直前的品质。上述研究结果说明,超快速冷却处理可有效保持羊肉僵直前的品质,采用降温速度 25.1 ℃/h 的处理效果更显著。

关键词:羊肉,超快速冷却,僵直前,溶解性,凝胶特性,乳化性
中图分类号:TS251.1　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1002−0306(2026)07−0093−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030141
本文网刊:

Effects of Very Fast Chilling on Early Postmortem Lamb Meat Quality and Myofibrillar Protein Characteristics

TANG Yanan, BAI Yuqiang, REN Chi, ZHAO Xinran, LENG Dongmei, HOU Chengli, LI Xin*, ZHANG Dequan
(Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-products Quality and Safety in Harvest, Storage, Transportation, Management and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

Abstract: The purpose of this study was to analyze the effects of very fast chilling (VFC) on early postmortem lamb meat quality and myofibrillar protein characteristics, and provide theoretical basis for the development of pre-rigor maintain quality techniques for fresh meat. The longissimus thoracis et lumborum muscles were collected within 1 h after slaughter,

收稿日期: 2025−03−13
基金项目: 河北省重点研发计划项目(22327105D);中国农业科学院农产品加工研究所创新工程(CAAS-ASTIP-2025-IFST)。
作者简介: 汤雅楠(2001−),女,硕士研究生,研究方向:肉品科学与技术,E-mail:17690575015@163.com。
*** 通信作者:** 李欣(1983−),女,博士,研究员,研究方向:肉品科学与技术,E-mail:xinli.caas@gmail.com。

which were used as experimental material, the muscles were assigned into three chilling groups respectively: Control group (the chilling rate was 4.8 ℃/h), Chilling 1 group (the chilling rate was 23.0 ℃/h), Chilling 2 group (the chilling rate was 25.1 ℃/h). Chilling 1 and Chilling 2 groups were both very fast chilling treatment groups. The analysis focused on the impacts of varying chilling rates on lamb quality and myofibrillar protein characteristics, and the mechanistic basis was clarified. The results showed that pH, myofibrillar protein (MP) solubility, water retention of MP gel, MP emulsification activity, MP emulsification stability and ATP content of the samples from the Chilling 1 and Chilling 2 groups were significantly higher than those from the Control group, but shear force, cooking loss, MP gel hardness and lactic acid content were significantly lower than Control group (P<0.05). At 24 h postmortem, the MP solubility of Chilling 1 and 2 Groups were 16.13% and 29.84% higher than that of the Control group, respectively, with corresponding 3.02% and 5.93% improvements in water retention of MP gel. At 72 h postmortem, the emulsifying activity and emulsifying stability of Chilling 2 group were 51.63 m^2/g and 41.18%, respectively, both significantly higher than the emulsifying activity (43.16 m^2/g) and emulsifying stability (37.76%) of the Control group (P<0.05). There was no difference in myofibrillar protein solubility of lamb meat within 72 h postmortem, no difference in MP gel water retention and MP emulsification activity were observed within 12 h postmortem of Chilling 2 group. This showed VFC treatment maintained the pre-rigor lamb meat quality to a certain extent. The results of ATP and lactic acid contents in lamb meat showed that the lactic acid contents in the Chilling 1 and Chilling 2 groups were significantly lower compared to the Control group, while the ATP content was significantly higher than Control group (P<0.05). The results demonstrated that the Chilling 1 and Chilling 2 groups slowed down the rate of glycolysis, which in turn delayed the decline of pH levels, and this contributed to maintaining pre-rigor lamb meat quality. These results suggested that VFC treatment could effectively maintain pre-rigor lamb meat quality, and the treatment effect with a chilling rate of 25.1 ℃/h was more significant.

Key words: lamb meat; very fast chilling; pre-rigor; solubility; gel properties; emulsibility

生鲜肉是我国肉类消费市场中最重要的产品之一[1]。其中,僵直前的生鲜肉在我国消费市场中受到消费者广泛欢迎。但宰后肌肉僵直前的时间短,良好的品质难以保持[2]。因此,如何保持僵直前生鲜肉的品质成为肉类产业中亟需解决的重点和难点问题。

生鲜肉的品质与肌原纤维蛋白特性密切相关,而宰后不同阶段肉的肌原纤维蛋白特性存在显著差异。肖雄[3] 比较分析了僵直前和解僵后羊肉品质差异,结果发现僵直前阶段羊肉的保水性、溶解性、乳化性、风味物质种类和含量以及营养成分含量显著高于解僵后的羊肉。Li 等[4] 研究发现僵直前羊肉凝胶离心损失显著低于最大僵直期和解僵后羊肉,僵直前羊肉凝胶表面更光滑、致密,表现出较好的凝胶特性。Song 等[5] 对僵直前期和贮藏 3 d 处于解僵后的鸡胸肉腌制后的品质进行分析,结果表明僵直前鸡肉腌制后的保水性、蛋白溶解性显著高于解僵后的鸡肉。Sukumaran 等[6] 研究了不同原料肉制成的香肠溶解性变化,发现僵直前生鲜肉制成的香肠溶解性显著大于解僵后生鲜肉制成的香肠。但如何保持生鲜肉僵直前的品质尚不清楚。超快速冷却(Very Fast Chilling, VFC)是指在宰后 5 h 内使畜禽肉中心温度降至冰点附近的冷却过程[7],降温速度≥7.6 ℃/h,可以通过风冷[8]、浸渍冷却[9] 等方式实现对生鲜肉的超快速冷却。超快速冷却技术具有快速降低畜禽肉中心温度、降低畜禽肉微生物繁殖、延缓宰后肉的僵直进程等优点[10−11]。研究表明,与常规冷却(降温速度< 5 ℃/h)相比,超快速冷却能够抑制宰后肉的僵直进程[12−13]。采用 VFC 处理的肉样中宰后早期 Ca^{2+}大量释放,促进肌原纤维蛋白的降解,使宰后羊肉的剪切力在宰后 2~336 h 均未出现显著升高[11],抑制了宰后僵直,在一定程度上保持了生鲜肉僵直前的嫩度;采用 VFC 处理后肉中 ATP 含量、磷酸果糖激酶活性显著高于对照组,表明 VFC 处理延缓了宰后肉中的糖酵解进程[14],抑制了宰后肉的僵直,然而 VFC 处理能否保持僵直前肉的品质尚不清楚。因此,本研究拟解决的关键问题是 VFC 处理如何影响僵直前生鲜肉的品质。

本研究以羊背最长肌为研究对象,分析不同降温速度处理对宰后早期羊肉品质及肌原纤维蛋白特性的影响,明确 VFC 处理能否保持羊肉僵直前的品质,为研发生鲜肉僵直前品质保持技术提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

实验用小尾寒羊背最长肌　河北金宏清真肉类有限公司;氯化钠(颗粒)、pH7.0 磷酸盐缓冲液、三氯甲烷(氯仿)　国药集团化学试剂有限公司;BCA 蛋白浓度测定试剂盒　美国 Thermo 公司;玉米油　北京伊诺凯科技有限公司;ATP、乳酸含量检测试剂盒　北京索莱宝科技有限公司。

Testo 205 便携式 pH 计　德国德图公司;CM-600D 色差计　青岛富勒姆科技有限公司;C-LM4 嫩度仪　东北农业大学;Ultra Turrax Disperser S25 分散器　德国 IKA 公司;N1124R 冷冻研磨仪　北京赫德有限公司;SuperMax 3000FA 型多功能酶标仪　上海闪谱生物科技有限公司;TA-XT plus C 物性测定仪(质构仪)　英国 Stable Micro Systems 公司;SU8010 扫描电镜　日本日立公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理　选择 30 个生长发育水平一致的 7 月龄小尾寒羊双侧背最长肌，在宰后 1 h 内随机分成 3 组进行如下冷却处理：对照组（降温速度 4.8 ℃/h）样品置于 0~4 ℃ 冷藏柜贮藏至宰后 72 h；降温处理组 1（降温速度 23.0 ℃/h）样品置于−20 ℃ 冷却间中冷却，中心温度降至−1 ℃ 时转移至−1~0 ℃ 冷藏柜贮藏至宰后 72 h；降温处理组 2（降温速度 25.1 ℃/h）样品置于−35 ℃ 冷却间中冷却，中心温度降至−1 ℃ 时转移至−1~0 ℃ 冷藏柜贮藏至宰后 72 h。通过将样本置于不同的环境温度以实现不同的平均降温速度（降温速度=（初始温度−终点温度）/冷却时间），降温处理组 1 和降温处理组 2 均为超快速冷却处理。分别在宰后 1、6、12、24、72 h 取样测定，宰后 1 h 为宰后立即取样时间点。

1.2.2 肉品质测定

1.2.2.1 pH　利用 pH4、7 和 10 的校准液对 pH 计进行校准，将校准后的便携式 pH 计探头插入肌肉中，插入深度为 2 cm，连续测定 3 次，结果取平均值。

1.2.2.2 肉色　在宰后各时间点使用色差计测定肉色，测定前分别用白板和黑板对色差计进行校准。每个样品各选取不同位置测定 3 次，亮度值（L^*）、红度值（a^*）、黄度值（b^*）结果从仪器读取并计算平均值。

1.2.2.3 剪切力　参照 Hopkins 等[15] 的方法，略有修改。将样品（约 4 cm×3 cm×3 cm）装入密封袋中，浸入 71 ℃ 的水中蒸煮 35 min（样品的中心温度达到 71 ℃）。蒸煮完成后将样品置于流水冷却 10 min，并置于 4 ℃ 冷藏柜过夜。每个样品被切成 6 条小肉条（1.0 cm×1.0 cm×1.5 cm），用嫩度仪测定样品剪切力。

1.2.2.4 蒸煮损失　参照 Hopkins 等[15] 的方法，略有修改。样品重量约为 30.00±0.5 g，记录为 M_1，置于无菌袋中，从袋中抽出空气。然后置于 71 ℃ 的恒温水浴中蒸煮 35 min。蒸煮完成后将样品置于流水冷却 10 min。样品表面水分用滤纸擦干后称重，该重量记录为 M_2，蒸煮损失由式（1）计算：

$$蒸煮损失(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \qquad 式（1）$$

1.2.3 肌原纤维蛋白特性的测定

1.2.3.1 肌原纤维蛋白的提取　参考 Amiri 等[16] 的方法提取肌原纤维蛋白，并进行修改。称取 3.00±0.02 g 样品，加入 30 mL 提取缓冲液 A（0.1 mol/L 氯化钾，0.002 mol/L 氯化镁，0.002 mol/L EGTA 和 0.02 mol/L 磷酸氢二钾，pH6.8），使用匀浆器 6000 r/min 匀浆（15 s 一次，10 s 间隔，共 3 次）。以 4000 r/min、4 ℃ 离心 15 min。随后向沉淀物中加入 24 mL 提取缓冲液 B（0.1 mol/L 氯化钾，0.002 mol/L 氯化镁，0.002 mol/L EGTA，0.02 mol/L 磷酸氢二钾，Triton X-100 体积分数 10%，pH6.8），使用匀浆器 6000 r/min 匀浆（15 s 一次，10 s 间隔，共 3 次），以 4000 r/min、4 ℃ 离心 15 min，并使用缓冲液 B 重复此过程 2 次。随后向沉淀物中加入 24 mL 提取缓冲液 C（0.1 mol/L 氯化钾溶液），以 4000 r/min、4 ℃ 离心 15 min，使用缓冲液 C 重复上述匀浆和离心操作步骤 2 次。沉淀即为肌原纤维蛋白，加入 5 mL 溶液 D（0.6 mol/L NaCl，0.05 mol/L 磷酸氢二钠，pH6.8）匀浆成肌原纤维蛋白溶液。肌原纤维蛋白溶液浓度参照 BCA 蛋白浓度测定试剂盒进行检测。

1.2.3.2 溶解性　测定盐溶性蛋白溶解性按照 Xu 等[17] 的方法并稍作修改。按照 1.2.3.1 的方法提取肌原纤维蛋白，用磷酸盐缓冲液（0.6 mol/L 氯化钠，0.05 mol/L 磷酸氢二钠，pH6.25）将肌原纤维蛋白溶液浓度调至 5 mg/mL（P_2），4 ℃ 下 5500×g 离心 15 min，测定上清液蛋白质量浓度。离心后，将上清液的蛋白浓度记为 P_1。肌原纤维蛋白溶解性由式（2）计算：

$$溶解性(\%) = \frac{P_1}{P_2} \times 100 \qquad 式（2）$$

1.2.3.3 凝胶特性　肌原纤维蛋白凝胶的制备：按照 1.2.3.1 的方法提取肌原纤维蛋白，并用溶液 D（0.6 mol/L NaCl，0.05mol/L 磷酸氢二钠，pH6.8）将肌原纤维蛋白溶液浓度调至 25 mg/mL，用匀浆器混匀。将配好的肌原纤维蛋白溶液转移至离心管中进行水浴梯度加热，加热模式为 1 ℃/min，加热至 80 ℃ 并稳定 1 h 后得到肌原纤维蛋白凝胶，然后置于冰水混合物中冷却 10 min，再置于 4 ℃ 冰箱中备用。对肌原纤维蛋白凝胶进行后续测定前，将样品置于室温 30 min。

凝胶保水性测定：称取 1.00±0.02 g（M_3）肌原纤维蛋白凝胶样品置于 2 mL 离心管中，在 4 ℃ 下以 8000×g 离心 30 min。用滤纸吸收水分并称重（M_4），凝胶保水性由式（3）计算：

$$凝胶保水性(\%) = \frac{M_4}{M_3} \times 100 \qquad 式（3）$$

凝胶硬度的测定：参照 Zhang 等[18] 的方法，略有修改。使用配有圆柱形探头（P/0.5）和 25 kg 称重传感器的质构仪，双压缩循环测试设置为原始高度的 50% 压缩，运行时间设置为 1 s。测试速度为 1 mm/s，触发力为 5 g，测定凝胶的硬度。

凝胶微观结构的测定：参考王浩等[19] 的方法并稍作修改。从肌原纤维蛋白凝胶的中心区域切出立方体样品（2 mm×2 mm×3 mm），使用 2.5% 的戊二醛 4 ℃ 条件下固定 48 h，取出后用 0.1 mol/L，pH7.0 的磷酸缓冲液漂洗 3 次，每次 15 min，然后用乙醇进行梯度脱水，各梯度脱水时间均为 15 min，最后再使用无水乙醇脱水 30 min。将脱水后的样品进行 CO_2 临界点干燥，镀膜后置于扫描电子显微镜下观察。

1.2.3.4 乳化性　参考 Zhao 等[20] 的方法测定肌原纤维蛋白的乳化性。按照 1.2.3.1 的方法提取肌原

纤维蛋白，并用磷酸盐缓冲溶液（0.6 mol/L NaCl，0.1 mol/L K_2HPO_4，pH6.8）将肌原纤维蛋白溶液浓度调为 1 mg/mL。将 8.0 mL 肌原纤维蛋白溶液和 2.0 mL 玉米油加入离心管中，匀浆 1 min，从离心管底取 50 μL 匀浆液，加入到 5 mL 0.1%（w/v）SDS 溶液中，混匀后在 500 nm 波长处测定吸光值 A_0，静置 10 min 后在同一位置取匀浆液 50 μL，加入到 5 mL 0.1% SDS 溶液中，振荡混匀后测定吸光值 A_{10}，用 0.1% SDS 溶液作空白对照。乳化活性指数（EAI）和乳液稳定性指数（ESI）分别使用式（4）和（5）计算：

$$EAI(m^2/g)=\frac{2\times 2.303\times 500}{C\times(1-\varphi)\times 10^4}\times A_0 \quad 式（4）$$

$$ESI(\%)=\frac{A_{10}}{A_0}\times 100 \quad 式（5）$$

式中：A_0 和 A_{10} 分别表示第一次和 10 min 后的吸光度，C 是乳化前的肌原纤维蛋白溶液浓度（g/mL），φ 是乳液的油体积分数（v/v）。

1.2.4 糖酵解进程指标测定

1.2.4.1 乳酸含量 参照试剂盒说明书进行乳酸含量检测。

1.2.4.2 ATP 含量 参照试剂盒说明书进行 ATP 含量检测。

1.3 数据处理

采用 SPSS Statistics 27.0 统计学分析软件中的一般线性模型对数据进行分析，并用 Duncan 多重比较法检验比较平均值之间的差异（$P<0.05$）。所有实验均重复 3 次，结果均以平均值±标准误差表示。采用 Origin 2021 软件对实验结果进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同降温速度处理对宰后早期羊肉品质的影响

不同降温速度处理组羊肉的 pH 差异显著（图 1），且均随宰后时间延长而逐渐降低。在宰后 6~24 h，降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉 pH 显著高于对照组（$P<0.05$），降温处理组 2 的 pH 显著高于降温处理组 1（$P<0.05$）。可见，超快速冷却处理延缓了羊肉 pH 的下降，且降温处理组 2 效果更显著（$P<0.05$）。

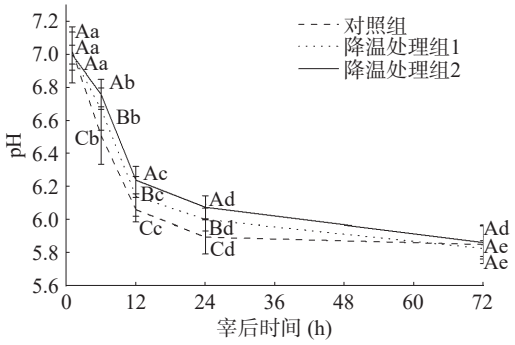


图 1 不同降温速度处理羊肉 pH 变化

Fig.1 Changes of pH in lamb meat treated by different chilling rates

注：不同小写字母表示同一处理组在宰后不同时间差异显著（$P<0.05$），不同大写字母表示同一时间点不同处理组间差异显著（$P<0.05$）。图 2~图 6、图 8~图 9、表 1~表 2 同。

由表 1 可知，在羊肉成熟过程中，不同降温处理组羊肉的 L^* 值均逐渐增大，在宰后 12~24 h，降温处理组 2 的 L^* 值显著大于对照组和降温处理组 1（$P<0.05$）。降温处理组 2 的 a^* 先增大后减小，而降温处理组 1 的 a^* 先减小后增大。不同降温处理组羊肉的 b^* 值均逐渐增大，在宰后 1~72 h，降温处理组 2 和对照组的 b^* 值差异不显著（$P>0.05$）。

如图 2 所示，降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉剪切力在宰后 6~72 h 显著低于对照组（$P<0.05$）。对照组和降温处理组 1 羊肉剪切力均先增大后减

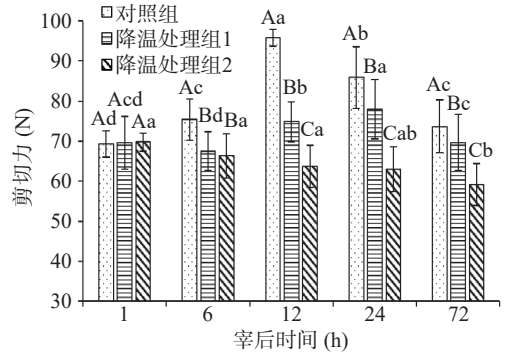


图 2 不同降温速度处理羊肉剪切力变化

Fig.2 Shear force changes in lamb meat treated by different chilling rates

表 1 不同降温速度处理羊肉色泽变化

Table 1 Color changes in lamb meat treated by different chilling rates

	处理	宰后时间（h）				
		1	6	12	24	72
L^*	对照组	33.37±2.39^{Ad}	34.89±1.96^{Ac}	35.52±2.56^{Bbc}	36.64±2.39^{Bb}	39.68±2.55^{Aa}
	降温处理组1	33.18±1.47^{Ab}	31.54±1.56^{Bb}	32.08±1.62^{Cb}	33.34±1.33^{Cb}	36.60±2.26^{Ba}
	降温处理组2	33.39±1.87^{Ac}	35.31±1.64^{Ab}	36.65±1.76^{Ab}	38.59±3.43^{Aa}	38.94±3.13^{Aa}
a^*	对照组	12.25±1.23^{Ac}	13.47±1.06^{Aab}	12.95±1.27^{Ab}	13.54±1.19^{Aa}	13.77±0.99^{Aa}
	降温处理组1	12.71±0.88^{Ab}	11.21±1.55^{Bc}	10.19±1.31^{Bd}	12.45±1.87^{Bb}	14.58±2.21^{Ba}
	降温处理组2	10.58±1.13^{Ab}	10.91±1.01^{Bb}	13.40±0.79^{Aa}	12.55±1.42^{Ba}	12.43±1.22^{Aa}
b^*	对照组	8.57±1.14^{Ad}	9.28±0.93^{Ac}	10.11±1.41^{Abc}	11.16±1.34^{Aa}	11.09±1.06^{Aab}
	降温处理组1	9.01±0.77^{Ab}	8.35±1.31^{Ab}	8.40±1.34^{Bb}	9.31±1.36^{Bb}	10.56±1.39^{Aa}
	降温处理组2	8.39±1.28^{Ac}	8.75±0.94^{Ac}	9.98±0.81^{Ab}	10.59±1.53^{Ab}	11.25±1.31^{Aa}

小，降温处理组 2 羊肉剪切力随宰后时间延长而逐渐下降。在宰后 1~12 h，对照组羊肉剪切力显著增大（P<0.05），在宰后 12 h 达到最大值，剪切力值为 95.86 N，随后逐渐下降。降温处理组 1 羊肉剪切力在宰后 1~24 h 逐渐增大，在宰后 24 h 达到最大值，剪切力值为 78.01 N，随后降低。而降温处理组 2 羊肉剪切力在宰后 1~24 h 差异不显著（P>0.05）。结果表明超快速冷却改善了羊肉嫩度，可以在一定程度上保持羊肉僵直前的嫩度。

不同降温速度处理组羊肉蒸煮损失变化如图 3 所示。随宰后时间延长，不同降温速度处理组羊肉蒸煮损失先上升后下降。在宰后 1~24 h，对照组羊肉蒸煮损失显著增大（P<0.05），在宰后 24 h 达到最大，随后减小。降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉蒸煮损失在宰后 1~12 h 逐渐增大，在宰后 12 h 达到最大，分别为 28.5% 和 31.5%，随后逐渐减小。在宰后 24 h，降温处理组 1 羊肉的蒸煮损失 25.34%，显著低于对照组羊肉的蒸煮损失（28.72%）（P<0.05）。在宰后 72 h，对照组、降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉蒸煮损失分别为 18.26%、16.28%、15.28%，超快速冷却处理组羊肉蒸煮损失均显著低于对照组（P<0.05）。

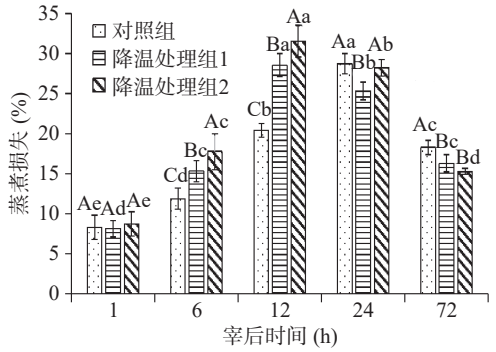


图 3　不同降温速度处理羊肉蒸煮损失变化

Fig.3　Cooking loss changes in lamb meat treated by different chilling rates

生鲜肉的色泽和嫩度等肉品质是影响消费者购买欲望的关键因素，肌肉中 pH 下降速度和程度也会影响肌肉蛋白特性进而对肉品质产生重要影响[21]。在本实验中，降温处理组 1、降温处理组 2 的 pH 在宰后 6~24 h 显著高于对照组，表明超快速冷却延缓了宰后肉 pH 的下降，可能是由于低温抑制了糖酵解酶的活性，使糖酵解速度降低，延缓了 pH 的下降[22]，这与前人结果一致[23]。不同降温速度处理组的肉色 L^*值、a^*值、b^*值在宰后 6~24 h 差异显著，但在宰后 72 h，降温处理组 2 和对照组的肉色差异不显著，颜统晶[13] 研究超快速冷却对羊肉色泽的影响结果也是如此。肉色受多种因素的影响，如 pH、肌红蛋白氧化状态等[24−26]。超快速冷却减缓了肌肉 pH 的下降速率，影响肌红蛋白（决定肉色的关键蛋白质）的状态。然而，随着宰后肉的成熟，不同降温处理组的肌肉 pH 都会趋向稳定，使得肉色差异减小。另外，超快速冷却可以降低肌肉组织中酶活性以及化学反应速率，这短暂影响了肌红蛋白向氧化形式转变的速度。但随着宰后肉的成熟，不同降温处理组肌肉中的肌红蛋白都会经历氧化过程，最终导致肉色趋于一致。这可能是导致降温处理组 2 的肉色在宰后 72 h 与对照组差异不显著的原因。Huezo 等[27] 发现风冷降低了肌肉的 L^*值，但在本实验中超快速冷却使肉表面形成一层薄“硬壳”，这阻止了肌肉中水分的蒸发，因此，未对肉品的色泽产生较大影响，还改善了生鲜肉的保水性，Singh 等[28] 在研究超快速冷却肌肉时也得出此结论。降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉剪切力显著低于对照组，可能是因为超快速冷却较早地激活了钙蛋白酶进而促进细胞骨架蛋白降解，破坏了肌原纤维蛋白结构而降低了剪切力，改善了肉嫩度[12]。

2.2　不同降温速度处理对宰后早期羊肉肌原纤维蛋白特性的影响

2.2.1　不同降温速度处理对宰后早期羊肉肌原纤维蛋白溶解性的影响　降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉肌原纤维蛋白溶解性显著高于对照组（P<0.05），在宰后 12~72 h，降温处理组 2 显著高于降温处理组 1（图 4，P<0.05）。在宰后 24 h，降温处理组 1、降温处理组 2 羊肉肌原纤维蛋白溶解性分别比对照组高 16.13%、29.84%。在宰后 1~24 h，不同降温速度处理组羊肉肌原纤维蛋白溶解性均逐渐降低。对照组和降温处理组 1 羊肉肌原纤维蛋白溶解性在宰后 1~24 h 显著降低（P<0.05），但降温处理组 2 羊肉肌原纤维蛋白溶解性在宰后 1~72 h 差异不显著（P>0.05）。以上数据表明超快速冷却处理在一定程度上保持了羊肉僵直前的溶解性。李文博等[29] 探究了羊肉在宰后成熟过程中肉品质变化，结果发现僵直前肉的溶解度显著高于解僵后肉的溶解度。本研究结果表明，超快速冷却处理组羊肉肌原纤维蛋白溶解性显著大于对照组，降温处理组 2 保持了羊肉僵直前的肌原纤维蛋白溶解性。有研究指出，蛋白质变性程度与其溶解性密切相关，即溶解性越大，蛋白

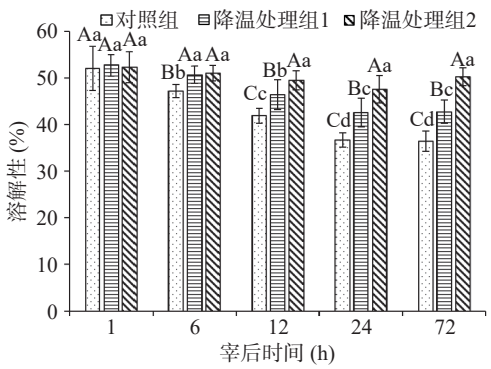


图 4　不同降温速度处理羊肉溶解性变化

Fig.4　Solubility changes in lamb meat treated by different chilling rates

质变性程度越低[30]。由于超快速冷却处理组的羊肉在宰后处于较低的环境温度下，有效抑制了蛋白质氧化变性过程，从而使肌原纤维蛋白溶解性显著大于对照组。

2.2.2 不同降温速度处理对宰后早期羊肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响 不同降温速度处理组羊肉肌原纤维蛋白凝胶保水性变化如图 5 所示。在同一采样时间，降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉肌原纤维蛋白凝胶保水性显著高于对照组（$P<0.05$）。在宰后 1~24 h，不同降温速度处理组羊肉肌原纤维蛋白凝胶保水性均逐渐降低，而降温处理组 2 凝胶保水性在宰后 1~12 h 差异不显著（$P>0.05$）。在宰后 24 h，降温处理组 1、降温处理组 2 蛋白凝胶保水性分别比对照组高 3.02%、5.93%。研究结果显示超快速冷却在一定程度上可以保持羊肉僵直前的凝胶保水性。

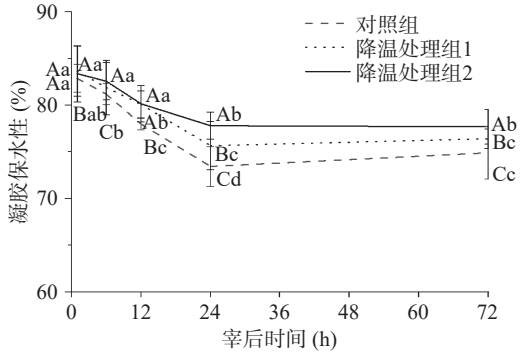


图 5 不同降温速度处理羊肉凝胶保水性变化

Fig.5 Gel water retention changes of lamb meat treated by different chilling rates

降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉肌原纤维蛋白凝胶硬度在宰后 6~72 h 显著低于对照组（图 6，$P<0.05$）。在宰后 24 h，降温处理组 1 和降温处理组 2 的凝胶硬度分别为 26.07、25.23 g，均显著低于对照组（31.38 g）（$P<0.05$）。随宰后时间延长，不同降温速度处理组羊肉肌原纤维蛋白凝胶硬度均先增大后减小。在宰后 1~24 h，对照组和降温处理组 1 羊肉肌原纤维蛋白凝胶硬度逐渐升高，在 24 h 达到最大，

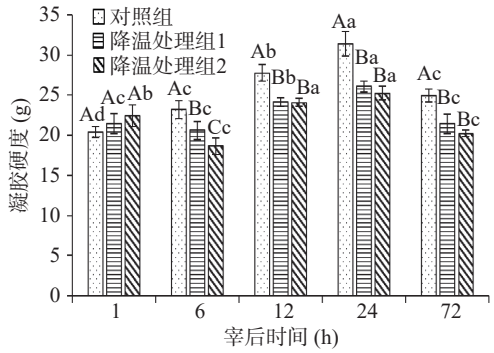


图 6 不同降温速度处理羊肉凝胶硬度变化

Fig.6 Gel hardness changes of lamb meat treated by different chilling rates

随后下降。而降温处理组 2 在宰后 1~72 h 先下降后上升，随后再下降。

不同降温速度处理对羊肉肌原纤维蛋白凝胶微观结构的影响如图 7 所示。与对照组和降温处理组 1 的羊肉肌原纤维蛋白凝胶相比，降温处理组 2 的凝胶网络结构明显更致密。宰后 1 h 的肌原纤维蛋白凝胶网络结构光滑且致密，孔洞比较小（如图中圈出所示），但随宰后时间延长，不同降温速度处理组羊肉肌原纤维蛋白凝胶网络结构变得松散，孔洞变大。在宰后 72 h，如图中圈出所示，降温处理 1 和降温处理组 2 蛋白凝胶网络比对照组的蛋白凝胶网络较均匀致密，且孔洞明显更少且较小。该结果说明超快速冷却通过促进蛋白质交联形成致密的凝胶网络结构，进而改善了羊肉凝胶特性。

Li 等[4] 研究发现僵直前羊肉凝胶保水性显著大于最大僵直期和解僵后羊肉，僵直前羊肉凝胶表面更光滑、致密。胡胜杰[31] 利用变温处理（肉样分割后先置于 0~4 ℃ 储存 4 h，然后转入 12 ℃ 储存 4 h，最后转入 0~4 ℃ 贮藏）显著改善了生鲜肉凝胶保水性。本研究结果表明，与对照组相比，超快速冷却处理显著降低了肌原纤维蛋白凝胶硬度，改善了凝胶保水性，凝胶表面孔隙较小，显示出较均匀、致密的凝胶网络结构，且降温处理组 2 羊肉肌原纤维蛋白凝胶保水性在宰后 1~12 h 差异不显著。肌原纤维蛋白在加热过程中通过相互作用形成三维凝胶网络结构，pH 对生鲜肉凝胶网络结构有显著影响，实质上是蛋白质分子的静电荷效应[19,32]。蛋白质分子所带静电荷对凝胶性有双重意义：一是静电荷是蛋白质分子吸引水分子的中心，二是由于静电荷增加蛋白质分子间静电排斥力，使凝胶网格结构松弛、均匀，而静电荷减少，蛋白质分子间发生凝聚紧缩，无法形成有序的凝胶网络结构，当肉的 pH 接近等电点时静电荷降到最低[32]。超快速冷却处理组 pH 较大，远离等电点，使负电荷增加影响凝胶网络中肌球蛋白分子间的静电排斥，形成致密的凝胶网络结构，也为水分子提供了更多的结合位点，增强了凝胶保水性。

2.2.3 不同降温速度处理对宰后早期羊肉肌原纤维蛋白乳化性的影响 降温处理组 1 和降温处理组 2 的羊肉肌原纤维蛋白乳化活性在宰后 12~72 h 显著高于对照组，降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉肌原纤维蛋白乳化稳定性在宰后 6~72 h 显著高于对照组（表 2，$P<0.05$）。降温处理组 2 在宰后 72 h 的乳化活性和乳化稳定性分别为 51.63 m^2/g、41.18%，均显著高于对照组的乳化活性（43.16 m^2/g）和乳化稳定性（37.76%）（$P<0.05$）。随宰后时间延长，不同降温处理组羊肉肌原纤维蛋白乳化活性和乳化稳定性逐渐降低，但降温处理组 2 羊肉肌原纤维蛋白乳化活性在宰后 1~12 h 差异不显著（$P>0.05$）。Xiao 等[33] 研究发现僵直前羊肉乳化活性显著大于解僵后羊肉。本研究结果表明，在宰后 12~72 h，降温处理组 1

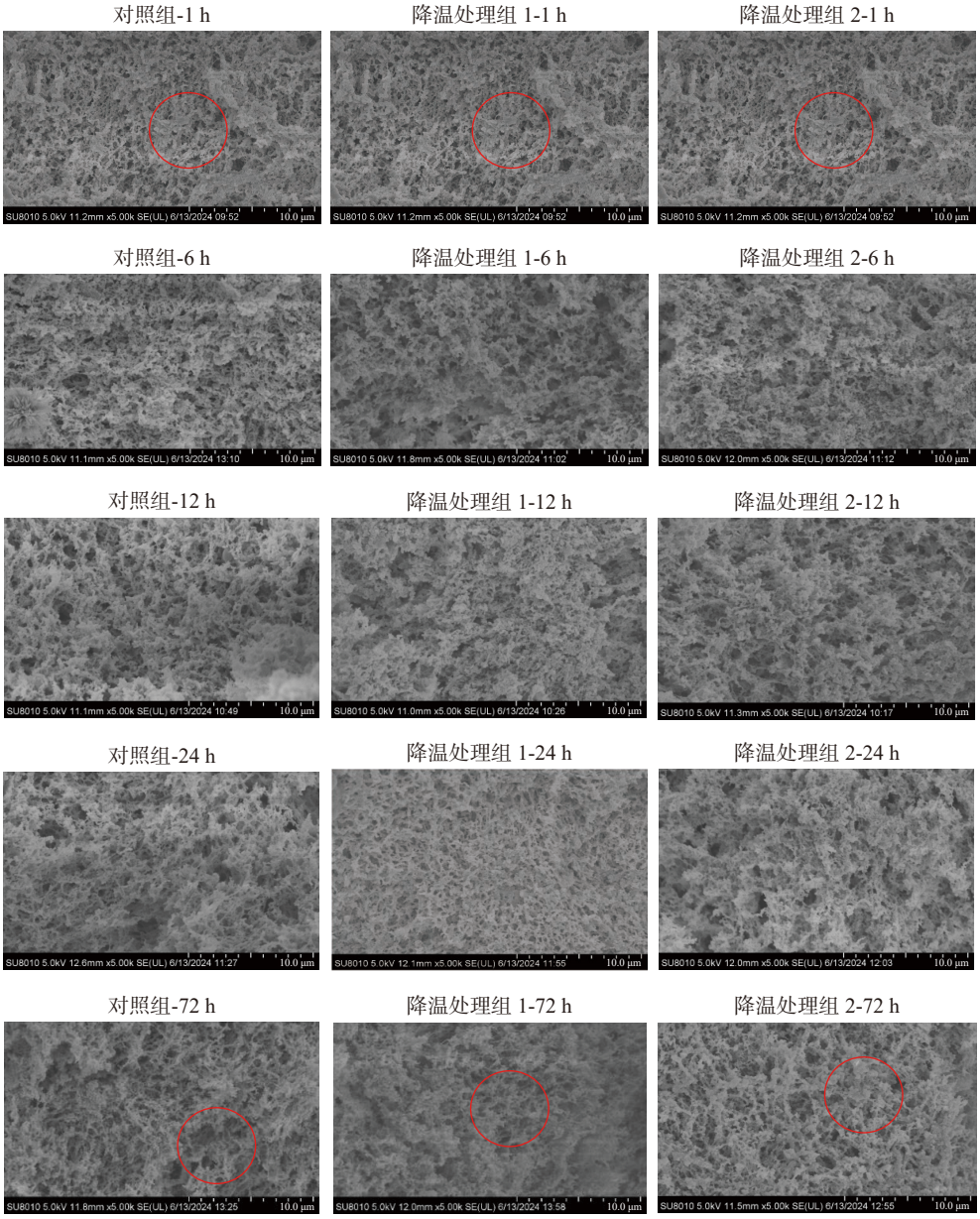


图 7　不同降温速度处理羊肉凝胶微观结构变化

Fig.7　Gel microstructure changes of lamb meat treated by different chilling rates

注：凝胶样品均在扫描电镜电压 5000×下观察。

表 2　不同降温速度处理羊肉乳化性变化

Table 2　Emulsification changes in lamb meat treated by different chilling rates

处理		宰后时间（h）				
		1	6	12	24	72
乳化活性（m^2/g）	对照组	55.03±1.57^{Aa}	53.08±2.67^{Aa}	50.88±1.38^{Cb}	46.29±0.96^{Cc}	43.16±2.17^{Cd}
	降温处理组1	54.77±2.33^{Aa}	53.19±1.32^{Aa}	51.41±1.14^{Bb}	46.76±1.33^{Bc}	47.84±0.77^{Bc}
	降温处理组2	53.82±1.95^{Aa}	53.15±1.56^{Aa}	51.73±2.36^{Aa}	49.27±1.99^{Ab}	51.63±1.83^{Aa}
乳化稳定性（%）	对照组	45.39±2.25^{Aa}	43.05±1.55^{Bb}	39.23±0.99^{Cc}	36.69±0.86^{Cd}	37.76±0.71^{Ccd}
	降温处理组1	44.42±1.62^{Aa}	42.98±1.42^{Aa}	39.69±0.63^{Bb}	38.01±1.04^{Bc}	38.52±1.41^{Bbc}
	降温处理组2	45.16±1.57^{Aa}	43.73±0.72^{Aa}	41.61±2.51^{Ab}	39.11±1.36^{Ac}	41.18±0.83^{Ab}

和降温处理组 2 羊肉乳化活性和乳化稳定性显著大于对照组，可能是因为超快速冷却处理组 pH 较大，此时 pH 远离蛋白等电点，乳液所带净电荷多，分子间作用力较强，吸附在油水界面蛋白质分子也较多，乳化性也越大[34]。有研究表明，乳化稳定性较高的蛋白乳液中粒子不易聚集，进而使肌肉保水性增强[35]。此外，蛋白质乳化性与其溶解度呈正相关关系[36]，蛋白质溶解性越大，可溶性蛋白质含量越高，不仅有利于形成稳定的交联键，还有更多的蛋白可以结合水分，从而提高了蛋白乳化性，这与本研究结果一致。

2.3 不同降温速度处理对宰后早期羊肉糖酵解进程的影响

降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉中的乳酸含量在宰后 6~72 h 显著低于对照组(图 8, $P<0.05$)。在宰后 12~24 h, 降温处理组 2 羊肉中乳酸含量显著低于降温处理组 1($P<0.05$)。随宰后时间延长, 不同降温速度处理组羊背最长肌中的乳酸含量均呈上升趋势, 在宰后 72 h 均达到最大。在宰后 72 h, 降温处理组 2 羊肉中乳酸含量为 5.37 μmol/g, 显著低于降温处理组 1(6.29 μmol/g)和对照组(7.3 μmol/g), 且降温处理组 1 羊肉中乳酸含量显著低于对照组($P<0.05$)。由此可见, 超快速冷却显著减少了羊肉中乳酸的产生, 延缓了糖酵解进程。

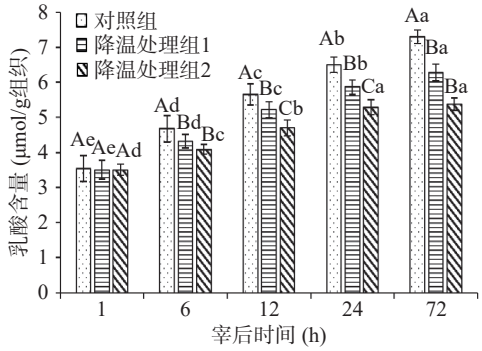


图 8 不同降温速度处理羊肉中乳酸含量变化

Fig.8 Lactate content changes in lamb meat treated by different chilling rates

不同降温速度处理羊肉中的 ATP 含量变化如图 9 所示。在宰后 6~72 h, 降温处理组 1 和降温处理组 2 羊肉中的 ATP 含量显著高于对照组($P<0.05$)。在宰后 6~24 h, 降温处理组 2 羊肉中 ATP 含量显著高于降温处理组 1($P<0.05$)。随宰后时间延长, 不同降温速度处理组羊肉中 ATP 含量均呈下降趋势, 在宰后 72 h 降到最低, 对照组、降温处理组 1、降温处理组 2 羊肉中 ATP 含量分别为 1.56、2.08、2.24 μmol/g, 同一时间点超快速冷却处理组羊肉中 ATP 含量显著高于对照组($P<0.05$)。

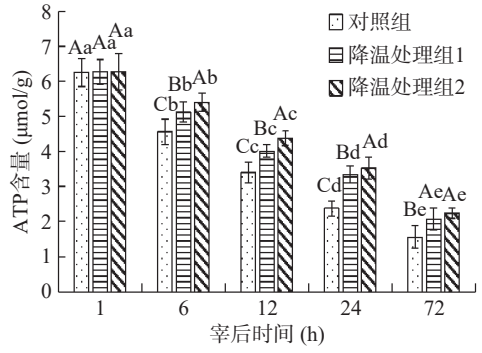


图 9 不同降温速度处理羊肉中 ATP 含量变化

Fig.9 ATP content changes in lamb meat treated by different chilling rates

畜禽屠宰后血液循环中断, 糖酵解途径成为宰后肉中主要的代谢方式, 超快速冷却可以延缓糖酵解速率。乳酸作为糖酵解反应的产物, 其含量变化可反映糖酵解水平和速率。宰后肉中 ATP 通过影响糖酵解酶的活性来改变肉中糖酵解进程[37]。本研究结果显示降温处理组 1 和降温处理组 2 的羊肉中乳酸含量显著低于对照组, 而 ATP 含量显著高于对照组, 表明超快速冷却处理显著延缓了糖酵解速率, 这与已有研究结果一致[38]。糖酵解反应产生乳酸和 ATP 分解产生氢离子, 造成宰后肉中 pH 降低[39], 而超快速冷却延缓了糖酵解反应及 ATP 分解, 因此超快速冷却处理组 pH 较高。与降温处理组 1 相比, 降温处理组 2 延缓了糖酵解反应, 因此降温处理组 2 的 pH 较大。Holdstock 等[40] 研究结果表明快速冷却可以延缓糖酵解速率, 与本研究结果一致。已有研究表明, 超快速冷却可以通过降低糖酵解过程中的己糖激酶、磷酸甘油酸激酶和乳酸脱氢酶活性来延缓糖酵解反应, 降低乳酸产生速率, 延缓肌肉中 pH 下降[41], 进而影响肉品质。

3 结论

本文探究了不同降温速度处理对宰后早期羊肉品质及肌原纤维蛋白特性的影响。结果表明, 与对照组相比, 超快速冷却处理显著延缓了羊肉 pH 的下降, 改善了羊肉嫩度及肌原纤维蛋白溶解性、凝胶特性和乳化性。其中, 降温速度为 25.1 ℃/h 的超快速冷却处理在宰后 72 h 内可保持羊肉僵直前的肌原纤维蛋白溶解性, 在宰后 12 h 内可保持羊肉僵直前的肌原纤维蛋白凝胶保水性和乳化活性。此外, 基于分析 ATP 含量和乳酸含量变化表明, 超快速冷却处理通过延缓糖酵解进程维持了羊肉僵直前的品质。本文初步明确了超快速冷却处理可保持羊肉僵直前的品质, 后续将进一步探究超快速冷却对宰后早期羊胴体不同部位肉品质的影响, 为研发生鲜肉僵直前品质保持技术提供依据。

© 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] 张德权, 侯成立. 热鲜肉与冷却肉品质差异之管见[J]. 肉类研究, 2020, 34(5): 83−90. [ZHANG Dequan, HOU Chengli. Humble opinion on the quality difference between hot meat and chilled meat[J]. Meat Research, 2020, 34(5): 83−90.]

[2] 崔丽娟, 仁庆考日乐, 王政纲, 等. 负向近冰点温度下绵羊宰后肌肉主要理化指标变化[J]. 食品工业科技, 2012, 33(3): 63−67. [[CUI lijuan, REN Qingkaorile, WANG Zhenggang et al. Changes of biochemical properties of sheep muscle stored at the temperature close to cryoscopic point[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(3): 63−67.]

[3] 肖雄. 僵直前和解僵后羔羊肉品质分析[D]. 锦州: 渤海大学,

2020.［XIAO Xiong. Analysis the quality of lamb meat pre-and post-rigor[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.］

［4］ LI S B, ZHANG D Q, XIANG C, et al. Insights into the gel and electronic sense characteristics of meat batters made from Funiu white goat and Oula sheep meat in different rigor states[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100523.

［5］ SONG D H, HAM Y K, HA J H, et al. Impacts of pre-rigor salting with KCl on technological properties of ground chicken breast[J]. Poultry Science, 2020, 99(1): 597−603.

［6］ SUKUMARAN A T, HOLTCAMP A J, CAMPBELL Y L, et al. Technological characteristics of pre- and post-rigor deboned beef mixtures from Holstein steers and quality attributes of cooked beef sausage[J]. Meat Science, 2018, 145: 71−78.

［7］ JOSEPH R L. Very fast chilling of beef and tenderness—a report from an EU concerted action[J]. Meat Science, 1996, 43: 217−227.

［8］ FERNÁNDEZ A M, VIEIRA C. Effect of chilling applied to suckling lamb carcasses on hygienic, physicochemical and sensory meat quality[J]. Meat Science, 2012, 92(4): 569−574.

［9］ LEE H C, METHENY M M, VILIANI S, et al. Effects of subzero saline chilling on broiler chilling efficiency, meat quality, and microbial safety[J]. Poultry Science, 2020, 99(10): 5158−5162.

［10］ LIANG C, ZHANG D, WEN X, et al. Effects of chilling rate on the freshness and microbial community composition of lamb carcasses[J]. LWT, 2022, 153: 112559.

［11］ BAI Y Q, REN C, HOU C L, et al. Phosphorylation and acetylation responses of glycolytic enzymes in meat to different chilling rates[J]. Food Chemistry, 2023, 421: 135896.

［12］ YAN T J, HOU C L, WANG Z Y, et al. Effects of chilling rate on progression of rigor mortis in postmortem lamb meat[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131463.

［13］ 颜统晶. 宰后早期超快速冷却处理调控肉品嫩度的机制研究[D]. 北京：中国农业科学院, 2022.［YAN Tongjing. Study on the mechanism of very fast chilling in early postmortem regulating meat tenderness[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.］

［14］ 摆玉蔷, 任驰, 吴赛赛, 等. 超快速冷却对生鲜羊肉中糖酵解酶表达量的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(9): 1−12.［BAI Yuqiang, REN Chi, WU Saisai, et al. Effect of ultra-fast chilling on the expression of glycolytic enzymes in fresh mutton[J]. Food Science, 2024, 45(9): 1−12.］

［15］ HOPKINS D L, TOOHEY E S, WARNER R D, et al. Measuring the shear force of lamb meat cooked from frozen samples: Comparison of two laboratories[J]. Animal Producyion Science, 2010, 50(5-6): 382−385.

［16］ AMIRI A, MOUSAKHANI-GANJEH A, SHAFIEKHANI S, et al. Effect of high voltage electrostatic field thawing on the functional and physicochemical properties of myofibrillar proteins[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 56: 102191.

［17］ XU Y X, ZHANG D Q, XIE F F, et al. Changes in water holding capacity of chilled fresh pork in controlled freezing-point storage assisted by different modes of electrostatic field action[J]. Meat Science, 2023, 204: 109269.

［18］ ZHANG Y L, WANG P, XU X L, et al. Effect of wooden breast myopathy on water-holding capacity and rheological and gelling properties of chicken broiler breast batters[J]. Poultry Science, 2020, 99(7): 3742−3751.

［19］ 王浩, 李苓, 杨明柳, 等. pH 对鳜鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(22): 67−75.［WANG Hao, LI Ling, YANG Mingliu, et al. Effects of pH on the gel properties of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) myofibrillar protein[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(22): 67−75.］

［20］ ZHAO B, ZHANG Y Y, SUN B G, et al. Insights into the trace Sr^{2+} impact on the gel properties and spatial structure of mutton myofibrillar proteins[J]. Food Research International, 2023, 164: 112298.

［21］ 王宇, 袁倩, 王柏辉, 等. 腺苷酸活化蛋白激酶活性及其级联效应对肉品品质的影响研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 298−304.［WANG Yu, YUAN Qian, WANG Baihui, et al. A review of the effect of AMP-activated protein kinase (AMPK) activity and AMPK cascade on meat quality[J]. Food Science, 2018, 39(17): 298−304.］

［22］ ZYBERT A, SIECZKOWSKA H, ANTOSIK K, et al. Relationship between glycolytic potential and meat quality of duroc pigs with consideration of carcass chilling system[J]. Annals of Animal Science, 2013, 13(3): 645−654.

［23］ RYBARCZYK A, KARAMUCKI T, PIETRUSZKA A, et al. The effects of blast chilling on pork quality[J]. Meat Science, 2015, 101: 78−82.

［24］ MICKELSON M A, WARNER R D, POLKINGHORNE R J, et al. Carcass chilling method and electrical stimulation effects on meat quality and color in lamb[J]. Meat Science, 2025, 219: 109662.

［25］ ZHANG Y M, HOPKINS D L, ZHAO X X, et al. Characterisation of pH decline and meat color development of beef carcasses during the early postmortem period in a Chinese beef cattle abattoir[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(7): 1691−1695.

［26］ LI X, ZHANG D, IJAZ M, et al. Colour characteristics of beef longissimus thoracis during early 72 h postmortem[J]. Meat Science, 2020, 170: 108245.

［27］ HUEZO R, SMITH D P, NORTHCUTT J K, et al. Effect of immersion or dry air chilling on broiler carcass moisture retention and breast fillet functionality[J]. Journal of Applied Poultry Research, 2007, 16(3): 438−447.

［28］ SINGH R K K, SHARMA N. Physical and biochemical changes in ultra-rapid air chilled broiler muscle and quality of marinated chicken breast filets[J]. Food Bioscience, 2022, 46: 101524.

［29］ 李文博, 罗玉龙, 郭月英, 等. 苏尼特羊宰后成熟过程中肌原纤维蛋白特性与肉品质的变化分析[J]. 食品科学, 2021, 42(3): 48−55.［LI Wenbo, LUO Yulong, GUO Yueying, et al. Analysis of changes in myofibrillar protein properties and meat quality during post-mortem aging of sunit sheep carcasses[J]. Food Science, 2021, 42(3): 48−55.］

［30］ CHOI Y M, LEE S H, CHOE J H, et al. Protein solubility is related to myosin isoforms, muscle fiber types, meat quality traits, and postmortem protein changes in porcine longissimus dorsi muscle[J]. Livestock Science, 2010, 127(2): 183−191.

［31］ 胡胜杰. 变温处理对猪肉品质的影响及其机制研究[D]. 新乡：河南科技学院, 2019.［HU Shengjie. Effect of variable temperature treatment on pork quality and its mechanism after slaughter

[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2019.]
[32] NI N, WANG Z, HE F, et al. Gel properties and molecular forces of lamb myofibrillar protein during heat induction at different pH values[J]. Process Biochemistry, 2014, 49(4): 631−636.
[33] XIAO X, HOU C L, ZHANG D Q, et al. Effect of pre- and post-rigor on texture, flavor, heterocyclic aromatic amines and sensory evaluation of roasted lamb[J]. Meat Science, 2020, 169: 108220.
[34] MCCREADY S T, CUNNINGHAM F E. Salt-soluble proteins of poultry meat: 1. Composition and emulsifying capacit1[J]. Poultry Science, 1971, 50(1): 243−248.
[35] YOUSSEF M K, BARBUT S. Physicochemical effects of the lipid phase and protein level on meat emulsion stability, texture, and microstructure[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(2): S108−S114.
[36] LAWAL O S, ADEBOWALE K O, OGUNSANWO B M, et al. On the functional properties of globulin and albumin protein fractions and flours of African locust bean (*Parkia biglobossa*)[J]. Food Chemistry, 2005, 92(4): 681−691.
[37] REN C, HOU C, LI Z, et al. Effects of temperature on protein phosphorylation in postmortem muscle[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(2): 551−559.
[38] 惠小洋, 余群力, 曹晖, 等. 两种冷却方式对宰后成熟过程中牛肉保水性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(11): 193−199. [HUI Xiaoyang, YU Qunli CAO Hui, et al. Effect of chilling methods on water-holding capacity of beef during postmortem aging[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(11): 193−199.]
[39] WYRWISZ J, MOCZKOWSKA M, KUREK M, et al. Influence of 21 days of vacuum-aging on color, bloom development, and WBSF of beef *Semimembranosus*[J]. Meat Science, 2016, 122: 48−54.
[40] HOLDSTOCK J, AALHUS J L, UTTARO B, et al. Understanding the effects of chilling on color and quality characteristics of bovine longissimus thoracis[J]. Meat Science, 2023, 195: 109003.
[41] 赵洋, 徐幸莲, 赵庭辉, 等. 混合冷却对宰后黄羽肉鸡能量代谢和品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(3): 102−109. [ZHAO Yang, XU Xinglian, ZHAO Tinghui, et al. Effect of mixed cooling on postmortem energy metabolism and meat quality of yellow-feathered broilers[J]. Food Science, 2024, 45(3): 102−109.]