刘金晓, 王晶, 王维婷, 等. 不同强度静磁场辅助解冻对羊肉品质、水分分布以及肌原纤维蛋白的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 184−193. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090198
LIU Jinxiao, WANG Jing, WANG Weiting, et al. Effects of Different Intensity Static Magnetic Fields on the Quality, Moisture Distribution, and Myofibrillar Proteins of Thawed Lamb Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 184−193. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090198

· 研究与探讨 ·

不同强度静磁场辅助解冻对羊肉品质、水分分布以及肌原纤维蛋白的影响

刘金晓[1,2], 王　晶[3], 王维婷[2], 熊国远[1], 杜鹏飞[2], 倪来学[4], 姚现琦[4], 胡　鹏[2], 曹建芳[2], 马艳丽[2,*], 于　鲲[1,*]
（1.安徽科技学院, 安徽滁州 233100;
2.山东省农业科学院农产品加工与营养研究所/农业农村部新食品资源加工重点实验室, 山东济南 250100;
3.光明乳业股份有限公司乳业研究院/上海乳业生物工程技术研究中心/乳业生物技术国家重点实验室, 上海 201103;
4.临沂金锣文瑞食品有限公司, 山东临沂 276002）

摘　要: 为研究静磁场辅助解冻对羊肉品质的影响。以羊背最长肌为研究对象，经−18 ℃ 常规冷冻 24 h 后，置于磁电耦合恒温箱中，在 4 ℃ 条件下分别施加 0、1、2、3、4、5、6 mT 强度的静磁场进行解冻。随后对样品的保水性、脂质氧化程度、挥发性盐基氮（TVB-N）、水分分布及肌原纤维蛋白结构等指标进行系统测定。结果显示，与 0 mT 对照组相比，2 mT 静磁场处理的解冻时间显著减少了 28.96%，解冻损失、离心损失和蒸煮损失分别显著降低了 55.32%、20.71% 和 21.55%（P<0.05）。低场核磁共振与磁共振成像分析表明，静磁场（2 mT）处理有效抑制了解冻过程中水分的迁移，最大限度地保留了不易流动水，提高了水分保持能力。此外，静磁场（2 mT）辅助解冻显著降低了硫代巴比妥酸（TBARS）和 TVB-N（P<0.05），表明脂质氧化和蛋白质分解程度受到抑制。静磁场（2 mT）处理使肌原纤维蛋白总巯基含量较高，而羰基含量和表面疏水性较低，说明蛋白质氧化和变性程度减轻。二级和三级结构分析结果进一步表明，静磁场（2 mT）有助于维持蛋白质结构的稳定性。综上所述，静磁场辅助解冻可有效改善羊肉的保水性，抑制脂质与蛋白质氧化，并稳定肌原纤维结构，从而提升解冻羊肉的整体品质。本研究为羊肉解冻新技术的开发提供了理论依据和技术支持。

关键词: 羊肉, 静磁场辅助解冻, 品质变化, 水分分布, 肌原纤维蛋白
中图分类号: TS251.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0184−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090198　　本文网刊:

Effects of Different Intensity Static Magnetic Fields on the Quality, Moisture Distribution, and Myofibrillar Proteins of Thawed Lamb Meat

LIU Jinxiao[1,2], WANG Jing[3], WANG Weiting[2], XIONG Guoyuan[1], DU Pengfei[2], NI Laixue[4], YAO Xianqi[4], HU Peng[2], CAO Jianfang[2], MA Yanli[2,*], YU Kun[1,*]
（1.Anhui Institute of Science and Technology, Chuzhou 233100, China;
2.Institute of Agricultural Products Processing and Nutrition, Shandong Academy of Agricultural Sciences,

收稿日期: 2025−09−19
基金项目: 山东省重点研发计划项目（2024CXGC010913）; 安徽科技学院引进人才项目（SPYJ202102）; 安徽省高等学校科学研究项目（自然科学类）（2022AH051647）; 安徽省高校优秀科研创新团队（2024AH010007）; 安徽科技学院科技创新团队（2023KJCXTD003）; 市国资委企业创新发展与能级提升项目（2022013）; 国家肉羊产业技术体系建设专项（CARS-38-21）; 山东省羊产业技术体系（SDAIT-10-09）。
作者简介: 刘金晓（1998−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: jinxiaoliu98@163.com。
*** 通信作者:** 马艳丽（1987−）, 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 肉类加工与储藏, E-mail: dr_mayanli@163.com。
于鲲（1989−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工, E-mail: yukun@ahstu.edu.cn。

Key Laboratory of New Food Resources Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China；
3.Bright Dairy Co., Ltd., Dairy Research Institute, Shanghai Dairy Biotechnology Engineering Research Center,
State Key Laboratory of Dairy Biotechnology, Shanghai 201103, China；
4.Linyi Jinluo Wenrui Food Co., Ltd., Linyi 276002, China）

Abstract: This study investigated the effects of static magnetic field-assisted thawing on lamb quality using longissimus dorsi muscles as the experimental material. Following conventional freezing at −18 ℃ for 24 hours, samples were thawed at 4 ℃ in a magnetoelectric coupling thermostatic chamber under static magnetic fields of 0, 1, 2, 3, 4, 5, and 6 mT. A comprehensive analysis was performed to evaluate water-holding capacity, lipid oxidation, total volatile basic nitrogen (TVB-N), moisture distribution, and myofibrillar protein structure. The results demonstrated that compared with the 0 mT control, the 2 mT magnetic field treatment significantly reduced thawing time by 28.96% and markedly decreased thawing loss, centrifugation loss, and cooking loss by 55.32%, 20.71%, and 21.55%, respectively (P<0.05). Analysis via low-field nuclear magnetic resonance and magnetic resonance imaging revealed that the 2 mT static magnetic field treatment effectively inhibited water migration during thawing, which maximized the retention of immobile water and enhanced water-holding capacity. Furthermore, this assisted thawing process significantly reduced thiobarbituric acid (TBARS) and TVB-N (P<0.05), suggesting effective suppression of lipid oxidation and protein degradation. Finally, the treatment increased the total sulfhydryl content while reducing carbonyl content and surface hydrophobicity of myofibrillar proteins, demonstrating diminished protein oxidation and denaturation. Analysis of the secondary and tertiary structures further indicated that the 2 mT static magnetic field contributed to the stability of the protein structure. In summary, static magnetic field-assisted thawing effectively improved the water-holding capacity of lamb, inhibited lipid and protein oxidation, and stabilized the myofibrillar structure, thus enhancing the overall quality of the thawed product. This study provides a theoretical basis and technical support for the development of new thawing technologies for lamb meat.

Key words: lamb; static magnetic field assisted thawing; quality change; moisture distribution; myofibrillar protein

羊肉因其高蛋白、低脂肪且风味独特而成为全球范围内重要的肉类消费品[1−2]。随着冷链物流技术的发展，冷冻保存已成为保障羊肉长期供应、调节市场供需及维持其商业价值的关键手段。然而，解冻作为冷冻肉制品加工与消费前的必要环节，其过程对肉的最终品质具有决定性影响[3]。传统的解冻方法（如空气解冻、流水解冻、冷藏解冻等）往往存在解冻时间长、汁液流失严重、蛋白质变性加剧等问题，严重制约了冷冻羊肉产业的效益提升与高质量发展[4]。因此，开发高效、节能且能最大程度保持肉品原有品质的新型解冻技术已成为肉类工业亟待解决的关键问题之一。

为克服传统解冻技术的弊端，各种新兴解冻技术，如高压静电场解冻[5]、超声波解冻[6]、欧姆加热解冻[7] 及射频解冻[8] 等已被广泛研究。其中，磁场辅助解冻作为一种非热物理场技术，因其潜在的“非热效应”和能效高、操作简便、环境友好等优点而备受关注[9]。静磁场作用下，水分子会围绕磁场方向发生迁移，既能防止水分子聚集，又能破坏大水簇形成小水簇，从而抑制重结晶，同时可以增强肉品的热传导，提高解冻速率，抑制蛋白质变性[10−12]。现有研究表明，静磁场辅助解冻能够显著降低解冻、蒸煮损失，保持样品的持水能力，维持肌肉纤维束的完整性[13−14]，但目前静磁场主要聚焦于猪肉[15]、牛肉[16] 上，并且研究内容较单一片面，而针对羊肉这一重要经济肉类的系统研究仍十分缺乏。因此，本研究旨在系统解析静磁场强度对羊肉解冻速率的调控作用，重点揭示其改善汁液流失的深层机制与水分分布优化之间的内在关联，并进一步探究静磁场对肌原纤维蛋白在解冻过程中二级和三级结构的影响规律。

基于此，本文首先研究静磁场的解冻效率及对羊肉的保水性的影响；进而解析解冻过程中羊肉内部水分分布与迁移规律；最后分析肌原纤维蛋白的理化特性（巯基含量、羰基含量、表面疏水性）及二级、三级结构变化，从蛋白质分子水平揭示静磁场辅助解冻的作用机理。本研究旨在为静磁场辅助肉类解冻提供理论依据和数据支撑，为开发高品质冷冻羊肉制品的解冻工艺开辟新途径。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

羊背最长肌　取自济南市全福广场售卖的 9 月龄白山羊；甲醇、盐酸胍、盐酸、碳酸钾、硼酸、氯化钾、三氯乙酸、磷酸氢二钾、乙酸乙酯、乙醇　国药集团化学试剂有限公司；甲基红、溴甲酚绿　西陇科学股份有限公司；氯化钠、甘氨酸、尿素、EGTA（乙二醇双（2-氨基乙基醚）四乙酸）、EDTA（乙二胺四乙酸）　上海源叶生物科技有限公司；溴酚蓝、DTNB（5,5'-二硫代双（2-硝基苯甲酸））、DNPH（2,4-二硝基苯肼）　上海麦克林生化科技股份有限公司；硫代巴比妥酸反应试剂盒　上海酶联生物科技有限公司；所有试剂皆为分析纯。

XHF-D 高速分散器　宁波新芝生物科技股份有限公司；DK-8D 电热恒温水槽　上海精宏实验设备有限公司；TGL-16A 离心机　平凡科技有限公司；synergyH1 多功能酶标仪　BioTek 公司；NMI20-

015V-1 核磁共振分析仪　苏州纽迈仪器股份有限公司; MF10 磁电耦合恒温箱　英都斯特(无锡)感应科技有限公司; LR200D 无纸记录仪　杭州联测自动化技术有限公司; OHG-92435-III 电热恒温鼓风干燥箱　上海新苗医疗器械制造有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品预处理　样品采用羊背最长肌, 运回实验室立即剔除筋膜, 进行分割。每个肉块重 80±5 g, 随机分成 7 组, 每组 3 块。将肉块装入自封袋中放入 −18 ℃ 冰箱进行冷冻 24 h, 随后解冻。样品于 4 ℃ 的磁电耦合恒温箱内样品架上完成解冻。实验组的样品采用静磁场辅助解冻(SMFT), 磁场强度分别设置为 1、2、3、4、5、6 mT; 对照组则采用在相同温度下不施加磁场(0 mT)。所有样品的放置位置与包装方式保持一致。采用无纸记录仪监测, 将连接记录仪的探头插入肉品中心位置, 每 2 min记录一次温度, 直至样品中心温度为 1 ℃, 即为解冻完成, 绘制解冻曲线, 随后置于室温 1 h, 进行检测。

1.2.2　羊肉保水性测定

1.2.2.1　解冻损失测定　参考朱晓玲等[6] 的研究方法进行测定。将解冻前的羊肉样品精确称重, 所对应质量 M_1 (g), 当羊肉样品已经解冻之后, 将其外表面上的汁液用厨房吸水纸全部擦干, 然后进行称重得到 M_2(g), 根据公式计算解冻损失率。每组样品进行 3 次平行实验。

$$解冻损失(\%) = (M_1 - M_2)/M_1 \times 100 \qquad 式(1)$$

1.2.2.2　蒸煮损失测定　参考褚筱然等[17] 的研究方法测定。将解冻后的肉切成均匀大小, 重 20 g 的肉块。对肉样进行称量, 记录其质量为 M_3(g)。随后将该肉样装入蒸煮袋内, 置于 80 ℃ 水浴环境中进行加热处理; 当肉样中心温度监测达到 75 ℃ 时, 开始计时并持续保温 20 min。加热完成后, 将装有肉样的蒸煮袋取出, 自然冷却至室温, 再对冷却后的肉样进行精确称重, 记录此时质量为 M_4(g), 根据公式计算蒸煮损失率。每组样品进行 3 次平行实验。

$$蒸煮损失(\%) = (M_3 - M_4)/M_3 \times 100 \qquad 式(2)$$

1.2.2.3　离心损失的测定　参考 Li 等[18] 的研究方法, 稍作修改。称取约 2.5 g 样品(M_5), 将该样品集中放入 50 mL 离心管中。需提前在离心管底部铺垫充足的脱脂棉, 并在脱脂棉上方覆盖双层快速定性滤纸。在 4 ℃ 下以 4000 r/min 的转速离心 10 min。离心后, 立即称重(M_6), 每组样品进行 3 次平行实验。

$$离心损失(\%) = (M_5 - M_6)/M_5 \times 100 \qquad 式(3)$$

1.2.3　硫代巴比妥酸值(TBARS)　采用硫代巴比妥酸反应物(TBARS)酶联免疫分析(ELISA)试剂盒方法测定。称取 5 g 粉碎的样品, 加入 10 mL 70% 甲醇溶液, 匀浆过滤。取 25 μL 样品与 25 μL 稀释液加入 96 孔板中, 随后加入 50 μL 抗硫代巴比妥酸反应物(TBARS)抗体酶结合物, 轻柔振荡混匀后, 于 37 ℃ 反应 30 min。弃去孔内液体, 使用洗液洗涤 5 次, 每次洗涤结束后于吸水纸上拍干。依次加入 50 μL 显色液 A 与 50 μL 显色液 B, 轻柔振荡混匀, 37 ℃ 避光显色 10 min。最后每孔加入 50 μL 终止液, 混匀后立即进行检测。使用分光光度计在 450 nm 下检测吸光度。

1.2.4　挥发性盐基氮(TVB-N)　参考 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中的微量扩散法测定, 稍作修改。将 2 g 解冻的羊肉样品与 8 mL 蒸馏水混合, 匀浆 30 s, 用滤纸过滤沉淀。将过滤液体(1 mL)和饱和 K_2CO_3 溶液(1 mL)添加到康威培养皿的外室, 然后将 1 mL 硼酸溶液和一滴混合指示剂(1 mL 1 g/L 甲基红乙醇、5 mL 溴甲酚绿乙醇的 EtoH 溶液)加入到康威培养皿的内室中, 37 ℃ 培养 120 min, 用 10 mmol/L HCl 滴定内室中得到的混合物直到出现淡粉红色。空白用蒸馏水。

1.2.5　水分含量的测定　参考 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法测定。

1.2.6　低场核磁(LF-NMR)　参照王新颖等[19] 的方法, 从自封袋中取出解冻后的羊肉样品, 擦干样品表面的水分, 切成约为 1 cm×1 cm×1 cm 形状的肉块, 用生料带缠绕样品以减少测试过程中水分散失, 置于核磁管中进行接下来的测试, 测试序列为层-回波(Q-CPMG)测试序列, 参数设置为: 扫描频率 SF=21 MHz, 采样间隔时间 TW=1000 ms, 累加次数 NS=4, 回波时间 TE=0.300 ms, 回波个数 NECH=10000。数据测试完成后, 对得到的数据进行反演, 反演方法为 SIRT, 迭代次数=800000, 得到样品的 T_2 弛豫图谱。

1.2.7　磁共振成像(MRI)　参照尚柯等[20] 的方法, 同 LF-NMR 制样方法一致, 将样品管插入核磁共振成像分析仪(MRI)中, 使用纽迈核磁共振分子应用软件 V3.0 进行成像, 再用纽迈核磁共振图像处理软件(颜色为 Jet)分析出水分分布及状态。主要参数如下: average=4, 选择 coronal 截面, slice=3, width=4, 每组样品进行 3 次平行实验。

1.2.8　肌原纤维蛋白提取　参考李宇豪等[21] 的测定方法, 将解冻完成的肉样切碎后称取 2 g, 加入 4 倍体积缓冲液(0.1 mol/L KCl, 20 mmol/L K_2HPO_4, 1 mmol/L EGTA, pH6.9), 用高速分散器匀浆 30 s, 在 4 ℃ 下以 4300 r/min 离心 15 min, 弃上清液, 重复以上步骤两次, 后用 4 倍体积 0.1 mol/L KCl 溶液进行洗涤并离心两次, 并在最后一次离心前, 使用 2 层纱布过滤, 最终离心所得提取物即为肌原纤维蛋白。

1.2.8.1　总巯基含量的测定　参照 Zhang 等[22] 的方法, 稍作修改。将肌原纤维蛋白溶液稀释至浓度

为 2 mg/mL，取 1 mL 稀释后的蛋白溶液与 8 mL 缓冲液（含 0.086 mol/L Tris-HCl、0.09 mol/L 甘氨酸、4 mmol/L EDTA、8 mol/L 尿素，pH8.0）涡旋混匀，于 10000×g 离心 15 min。取 4.5 mL 上清液，加入 0.5 mL Ellman 试剂，混匀后于 40 ℃ 水浴中反应 25 min。使用酶标仪在波长 412 nm 处测定吸光度，用摩尔消光系数 13600 L/(mol·cm)进行计算，结果以 nmol/mg 表示。

$$总巯基含量(nmol/mg)=\frac{A\times d}{\varepsilon\times 2} \qquad 式（4）$$

式中：A：溶液吸光度；ε：摩尔消光系数；d：稀释倍数；2：MP 浓度，mg/mL。

1.2.8.2　羰基含量的测定　参考杨川等[23]的方法，稍加修改。将肌原纤维蛋白溶液浓度调节至 2 mg/mL，取 1 mL 置于离心管中，加入等体积 10 mmol/L 2,4-二硝基苯肼溶液，另设空白对照，加 1 mL 2 mol/L HCl。反应体系于避光条件下反应 1 h，每 15 min 涡旋振荡一次。反应后加 1 mL 20% 三氯乙酸，摇床混合均匀后继续反应 15 min。于 4 ℃ 下以 10000×g 离心 15 min，弃上清液。沉淀使用乙酸乙酯-乙醇（1∶1，v/v）混合液充分洗涤 3 次，直至完全脱色。所得沉淀中加入 3 mL 6 mol/L 盐酸胍溶液，涡旋溶解后 37 ℃ 水浴反应 15 min。离心取上清液，在 370 nm 波长下测定吸光度值，计算羰基含量，摩尔消光系数为 22000 L/(mol·cm)。

$$羰基含量(nmol/mg)=\frac{A\times d}{\varepsilon\times 2} \qquad 式（5）$$

式中：A：溶液吸光度；ε：摩尔消光系数；d：稀释倍数；2：MP 浓度，mg/mL。

1.2.8.3　表面疏水性　参照 Yang 等[24]的方法，稍加修改。调整肌原纤维蛋白溶液浓度为 2 mg/mL，取 1 mL 蛋白溶液加入 200 μL 1 mg/mL 溴酚蓝溶液，充分反应 15 min。以磷酸盐缓冲液作为空白对照组。离心 15 min 后，取上清液稀释 10 倍。在波长 595 nm 处测各组吸光度，以结合态的疏水 BPB 结合量（总 BPB 与游离 BPB 的差值）作为表面疏水性指数，计算公式：

$$溴酚蓝结合量(\mu g)=\frac{200\ \mu g\times(A_{对照}-A_{样品})}{A_{对照}} \qquad 式（6）$$

式中：$A_{对照}$：对照组吸光度；$A_{样品}$：样品吸光度。

1.2.8.4　傅里叶红外光谱测定（FTIR）　参照 Zhu 等[25]的方法，对提取出来的肌原纤维蛋白，使用 ATR 法进行测定。仪器条件如下：扫描波数：400~4000 cm^{-1}；扫描次数：64 次。用 PeakFit 4.12 分析肌原纤维蛋白各部分二级结构所占的比例。

1.2.8.5　内源荧光光谱测定　参照 Xie 等[26]的方法，对提取出来的肌原纤维蛋白，采用荧光光谱进行波长扫描，仪器条件如下：激发波长：295 nm；狭缝宽度：2.5 nm；波长扫描范围：300~400 nm；扫描速度：12000 nm/min。

1.3　数据处理

采用 SPSS 27 软件和 Origin 2022 软件进行统计分析，数据以平均值±标准差（SD）表示。采用单因素方差分析（ANOVA）对组间差异进行统计学分析，然后进行 Duncan 多重范围检验作为事后分析。以 $P<0.05$ 为显著性差异。

2　结果与分析

2.1　静磁场辅助解冻对羊肉解冻曲线的影响

图 1 显示了不同强度静磁场辅助羊肉解冻的温度-时间变化，羊肉在 50 min 内从−18 ℃ 迅速升至−5 ℃，所消耗的解冻时间主要集中在最大冰晶形成区（−5~−1 ℃）。对照 0 mT、SMFT-1、SMFT-2、SMFT-3、SMFT-4、SMFT-5、SMFT-6 的总解冻时间分别为 518、456、368、406、448、484、484 min。与对照相比，磁场解冻时间均有所降低，SMFT-1、SMFT-2、SMFT-3、SMFT-4、SMFT-5、SMFT-6 解冻时间分别缩短了 11.97%、28.96%、21.62%、13.51%、6.56%、6.56%，其中最显著的是 SMFT-2，缩短了 28.96%，说明随着磁场强度偏离 2 mT，解冻速率逐渐下降。Wang 等[13]和 Miñano 等[27]研究发现，磁场中存在“窗口效应”，是指样品在不同处理条件下产生的特定有效作用，其受磁场强度、处理时间、频率等因素影响。而 SMFT-2 解冻时间最短，考虑 SMFT-2 是特殊窗口强度。

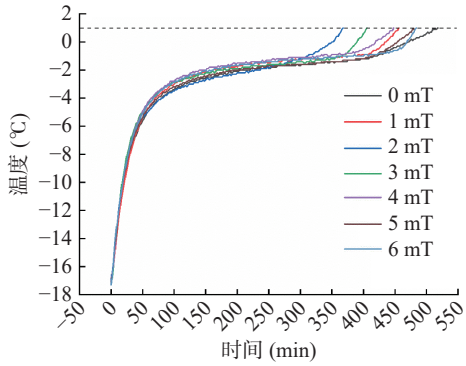


图 1　羊肉的解冻曲线

Fig.1　Thawing curve of lamb

2.2　静磁场辅助解冻对羊肉保水性的影响

解冻损失、离心损失和蒸煮损失是评价肉保水性的关键参数，对其感官品质和营养价值具有显著影响[3]。如图 2 所示，与对照组相比，SMFT 组在解冻损失、离心损失和蒸煮损失方面均显著降低（$P<0.05$）。从机理上看，解冻过程中冰晶融化为水，部分水分未能被肌纤维重新吸收，导致细胞液流失、保水性下降，进而引起肉质劣变[23]。静磁场处理能够有效缓解上述损失，其作用机制主要与其对肌肉蛋白（MP）的修饰作用有关，该修饰促进了蛋白质与水分之间的相互作用，从而增强了保水性[25]。其中，经

2 mT 静磁场处理的样品各项损失最小，保水性最佳。具体而言，与对照组相比，该处理使解冻损失、离心损失和蒸煮损失分别降低了 55.32%、20.71% 和 21.55%，表明 2 mT 静磁场处理对改善羊肉保水性效果最为显著。静磁场辅助解冻对肉品保水性的效果与乔雪[28]的研究结果一致。

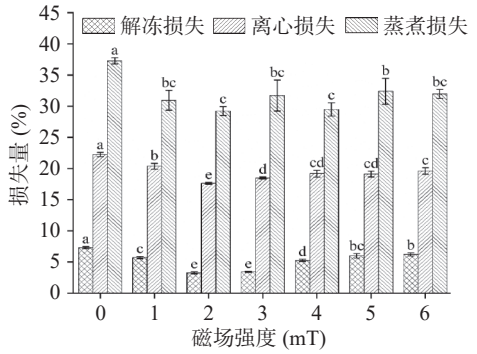


图 2 羊肉在静磁场辅助解冻后的保水性

Fig.2 Water retention of lamb after static magnetic field assisted thawing

注：图中不同小写字母表示差异显著（P<0.05），图 2~图 5、图 8~图 11 同。

2.3 静磁场辅助解冻对羊肉 TBARS 的影响

TBARS 常用于评估脂质氧化程度，其含量越高，表明氧化劣变越严重[29]。如图 3 所示，对照组（0 mT）与静磁场处理组（1、2、3、4、5、6 mT）之间的 TBARS 存在显著差异（P<0.05）。与对照组（0.55 mg/kg）相比，静磁场处理使 TBARS 分别降低了 36.36%、43.63%、38.18%、25.45%、23.63% 和 12.73%。其中，2 mT 处理组的 TBARS 值降幅最大，说明该条件下对脂质氧化的抑制效果最好。静磁场抑制脂质氧化的机制可能与其影响水分子运动及其内部结构有关。磁场可改变水分子的运动方向、内能及氢键排列，并通过调控肉中主要极性成分（如水分子和氨基酸）的分子运动轨迹来改善其理化品质[30]。适当的磁场强度（如 2 mT）可有效抑制脂肪氧化，但随着强度进一步提高，TBARS 出现回升，这是由于较高强度的磁场刺激促进了自由基的生成，以及冰晶对细胞的破坏，导致脂肪与氧气和促氧化物质接触，加速了脂质氧化[7,22,25]。

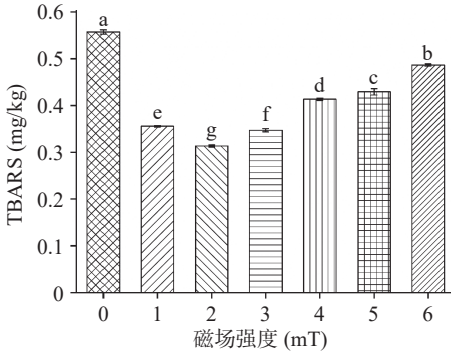


图 3 羊肉在静磁场辅助解冻后的 TBARS

Fig.3 TBARS of lamb after magnetic field assisted thawing

2.4 静磁场辅助解冻对羊肉 TVB-N 的影响

TVB-N 值是评价肉类新鲜度的重要指标，其含量通常随新鲜度下降而上升[31]。如图 4 所示，与对照组（0 mT，9.52 mg/100 g）相比，静磁场处理组（1、2、3、4、5、6 mT）的 TVB-N 值均显著降低（P<0.05），分别降至 5.41、4.50、6.48、8.07、7.45 和 7.72 mg/100 g。其中，2 mT 处理组的 TVB-N 值最低，表明该条件下羊肉的新鲜度保持最好。在解冻过程中，内源酶和腐败微生物的作用会导致氨和胺类等碱性含氮物质积累，从而使 TVB-N 值升高[32−33]。静磁场辅助解冻通过提高解冻速率、缩短解冻时间，有效减缓了这类物质的生成，因此显著降低了 TVB-N 值，有助于维持羊肉的新鲜品质。

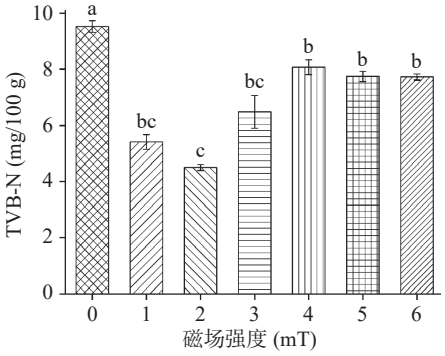


图 4 羊肉在静磁场辅助解冻后的 TVB-N

Fig.4 TVB-N of lamb after static magnetic field assisted thawing

2.5 静磁场辅助解冻对羊肉水分含量的影响

水分含量是评价羊肉解冻后品质的关键指标，较高的水分含量通常意味着更好的肉质[25]。如图 5 所示，静磁场处理组的水分含量显著高于对照组（P<0.05）。在不同强度静磁场处理（1、2、3、4、5、6 mT）下，水分含量依次为 77.85%、87.78%、83.66%、81.06%、78.83% 和 79.30%，均显著高于对照组（0 mT）的 73.39%。其中，2 mT 静磁场处理组的水分含量最高，该结果与前述保水性变化趋势一致。静磁场通过促进水分子振动、增强热传导并抑制冰晶重结晶，有效减少了羊肉解冻时的汁液流失，从而使

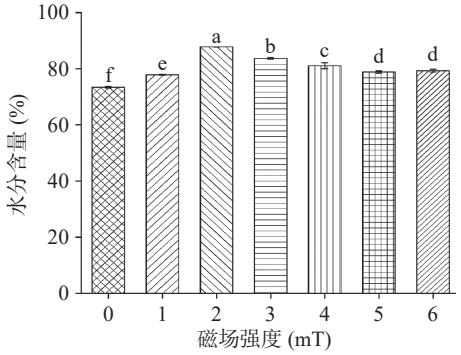


图 5 羊肉在静磁场辅助解冻后的水分含量

Fig.5 Moisture content of lamb after static magnetic field assisted thawing

其最终能保留更高的整体水分含量[34]。

2.6　静磁场辅助解冻对羊肉水分分布的影响

低场核磁共振(LF-NMR)技术能够快速、准确地分析肌肉组织中水分的分布与流动性[35]。如图 6a 所示，样品中主要存在三种不同状态水分：结合水(T_2b，0.1~10 ms)，包括强结合水(T_2b_1，0.1~1 ms)和弱结合水(T_2b_2，1~10 ms)；不易流动水(T_{21}，10~100 ms)；以及自由水(T_{22}，100~1000 ms)[36]。静磁场处理组的 T_{21} 组分比例(P_{21})高于对照组，而 T_{22} 组分比例(P_{22})则低于对照组(图 6b)。其中，经 2 mT 静磁场处理(SMFT-2 mT)的样品 P_{21} 最高，P_{22} 最低。该结果表明，静磁场处理有效抑制了水分的迁移，减少了自由水的流失，从而有助于提高羊肉的保水性。尤其在 2 mT 条件下效果最为明显，这可能是由于静磁场增强了解冻过程中水分子与蛋白质之间的分子间作用力，包括氢键、离子键和疏水相互作用，从而改善了水分的保持能力[24]，上述结果与栗俊广等[15]研究结果一致。

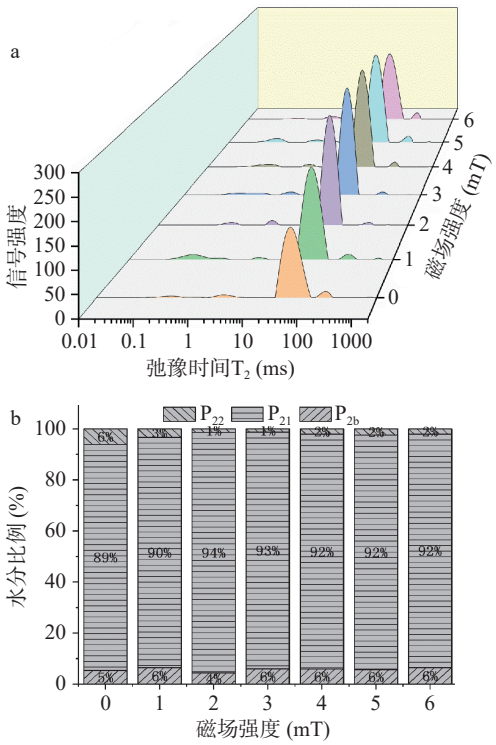


图 6　羊肉在静磁场辅助解冻后的水分分布情况

Fig.6　Moisture distribution of lamb after static magnetic field assisted thawing

2.7　静磁场辅助解冻对羊肉 MRI 的影响

磁共振成像(MRI)是一种基于材料内部氢质子(H^+)密度分布的可视化技术[15]。羊肉经静磁场辅助解冻后的 MRI 质子密度图像如图 7 所示。图像中颜色深浅反映质子密度差异：红色区域表示较高质子密度，蓝色区域则表示较低质子密度。对照组(0 mT)图像中以蓝色为主，表明氢质子密度最低；而经静磁场处理的组别则显示出更多的红黄色区域，说明质子密度较高。其中，2 mT 静磁场处理组的质子密度最高，该组样品内部红色区域较密集，含水量高，边缘呈绿色，含水量较低，原因是解冻过程中细胞结构得以保持完整，所以不同状态的水分得以有效保持，稳定性较好[37]。该结果表明，静磁场处理有助于抑制解冻过程中水分的迁移，从而提高水分的保留能力。这一现象与前述解冻损失较低和水分含量较高的结果一致，进一步验证了静磁场在改善羊肉保水性方面的积极作用。

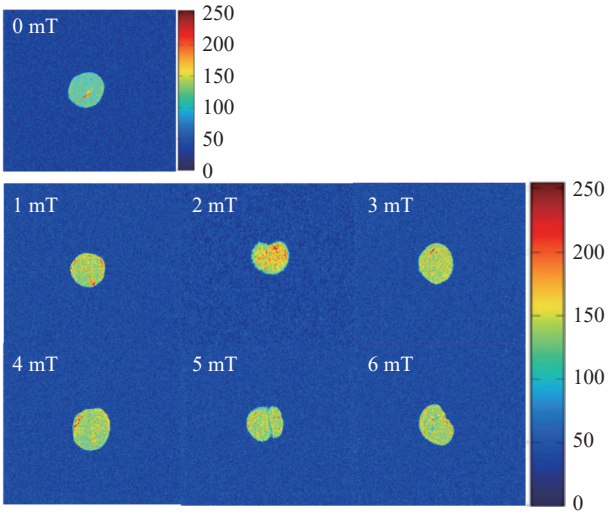


图 7　羊肉在静磁场辅助解冻后的质子密度加权伪彩图像

Fig.7　Proton density-weighted pseudo-color image of lamb after static magnetic field-assisted thawing

2.8　静磁场辅助解冻对羊肉总巯基的影响

巯基是肌原纤维蛋白(MP)氨基酸残基中的关键反应基团，对维持肌球蛋白的空间结构具有重要作用[38]。如图 8 所示，静磁场处理组(1、2、3、4、5、6 mT)的总巯基含量均显著高于对照组(0 mT)。在解冻过程中蛋白质结构的解折叠导致巯基暴露，但部分暴露的巯基容易氧化成二硫键，降低总巯基含量。较高的巯基含量通常意味着蛋白质氧化程度较低，肌原纤维蛋白结构受到的破坏也较小。而静磁场处理提高解冻速率，进而缩短氧化时间来减缓 MP 的氧化。其中，经 2 mT 静磁场处理(SMFT-2 mT)的样品总巯基含量最高，比对照组高出 98.4%。该结果表

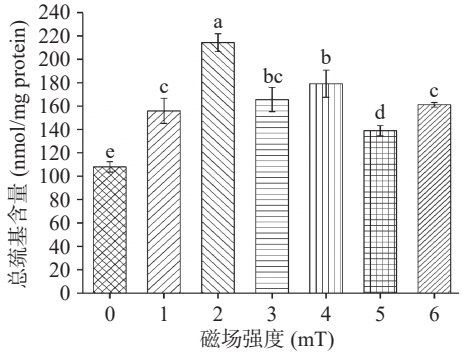


图 8　羊肉在静磁场辅助解冻后的总巯基含量

Fig.8　Total sulfhydryl content of lamb after static magnetic field assisted thawing

明, SMFT-2 mT 处理能有效抑制蛋白质氧化, 有助于维持肌原纤维蛋白结构的稳定性, 从而更好地保留羊肉的品质特性。

2.9 静磁场辅助解冻对羊肉羰基的影响

羰基含量是评估蛋白质氧化程度的重要指标, 其升高与肌原纤维蛋白(MP)构象和结构的变化密切相关[39]。多种机制可导致羰基含量增加, 例如氨基酸侧链氧化、肽链断裂、与非蛋白羰基化合物的结合以及非酶糖基化反应等[40]。如图 9 所示, 对照组(0 mT)的羰基含量为 11.44 nmol/mg, 而静磁场处理组(1、2、3、4、5、6 mT)的含量分别为 8.06、5.56、6.34、7.32、8.02 和 7.79 nmol/mg, 均显著低于对照组(P<0.05)。这一结果说明静磁场辅助解冻能够有效抑制蛋白质的氧化进程。与 SMFT-2 mT 相比, 过高强度的磁场处理可能会诱导蛋白质氧化, 这与张娟[41] 的研究结果一致。

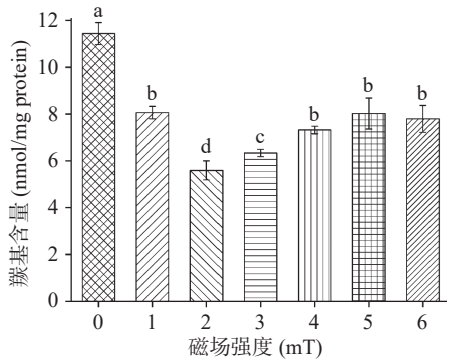


图 9 羊肉在静磁场辅助解冻后的羰基含量

Fig.9 Carbonyl content of lamb after static magnetic field assisted thawing

2.10 静磁场辅助解冻对羊肉肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

表面疏水性的增加通常意味着蛋白质构象发生破坏, 导致原本包埋在内部的疏水残基暴露[42]。如图 10 所示, 与 0 mT 对照组相比, 静磁场处理组的表面疏水性显著降低(P<0.05)。在解冻过程中, 蛋白质结构往往变得松散并发生构象变化, 进一步促使疏水基团暴露, 从而增加表面疏水性。而在磁场条件下, 水分子倾向于重新定向和有序排列, 从而减少疏水基团的暴露。静磁场增强了蛋白质与水分子的相互作用, 并减缓了肌原纤维蛋白的氧化速率。该结果与 Wang 等[13] 的研究结论一致。2 mT 静磁场处理组的表面疏水性最低, 而随着磁场强度进一步增加, 表面疏水性出现显著回升(P<0.05), 表明过高强度的磁场处理会破坏蛋白质构象, 将疏水基团从蛋白分子的内部带到表面, 导致疏水性增强。该结果与张娟[41] 和 Yang 等[24] 的研究结果一致。

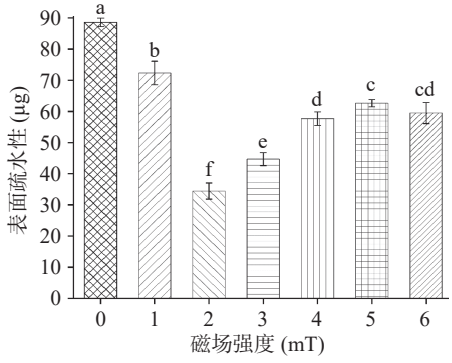


图 10 羊肉肌原纤维蛋白在静磁场辅助解冻后的表面疏水性

Fig.10 Surface hydrophobicity of lamb myofibrillar proteins after static magnetic field assisted thawing

2.11 静磁场辅助解冻对羊肉肌原纤维蛋白二级结构的影响

图 11 展示了不同强度静磁场辅助解冻下羊肉肌原纤维蛋白的傅里叶变换红外光谱(FTIR)及其二级结构含量变化。酰胺 I 带(1600~1700 cm^{-1})对蛋白质二级结构变化高度敏感, 因其包含 C=O 和 NH 基团的振动信息, 常被用于分析蛋白质变性与聚集[43]。图 11a 显示, 该区域吸收峰由多种二级结构组分叠加形成, 包括 α-螺旋、β-折叠、β-转角和无规卷曲。从图 11b 可以看出, 与静磁场处理组相比, 0 mT 对照组的 α-螺旋含量显著下降。由于 α-螺旋的稳定性依赖于蛋白质链中 C=O 与 N–H 基团间的分子内氢键, 该结果表明静磁场有助于维持氢键稳定性。随着磁场强度从 2 mT 继续升高, β-转角含量减少, 无规卷曲比例增加, 说明蛋白质发生进一步变性; 同时 β-折叠含量上升, 提示蛋白质分子间相互作用增强并形成聚集体。这一变化趋势与 Mohsenpour 等[30] 的

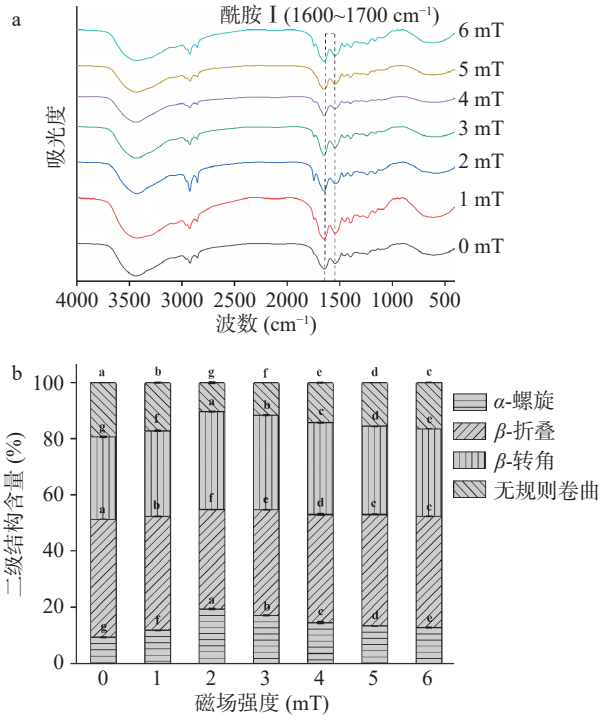


图 11 静磁场辅助解冻后羊肉肌原纤维蛋白的 FT-IR 和二级结构含量

Fig.11 FT-IR and secondary structure content of lamb myofibrillar proteins after static magnetic field assisted thawing

研究结果一致，适宜的静磁场强度能够缓解蛋白质氧化变性，并抑制 α-螺旋向 β-折叠的转化。

2.12　静磁场辅助解冻对羊肉肌原纤维蛋白三级结构的影响

内源荧光光谱技术可通过监测色氨酸残基的荧光特性来反映肌原纤维蛋白（MP）三级结构的变化[44]。荧光强度降低通常表明蛋白质结构发生损伤，这主要是由于氧化作用导致其三级构象稳定性下降[45]。如图 12 所示，与 0 mT 对照组相比，1~6 mT 静磁场处理组表现出更高的荧光强度和更小的最大发射波长（λ_{max}）蓝移，说明蛋白质在解冻过程中变性程度较轻，色氨酸氧化较少。磁场处理中蛋白质与其他分子的相互作用可能改变色氨酸残基的微环境，进而影响其荧光特性。其中，2 mT 静磁场处理组的荧光强度最高，λ_{max} 蓝移最高。随着磁场强度进一步增加，荧光强度逐渐降低，同时 λ_{max} 出现明显红移，表明蛋白质在解冻过程中发生聚集，更多色氨酸残基暴露并被氧化[31]。

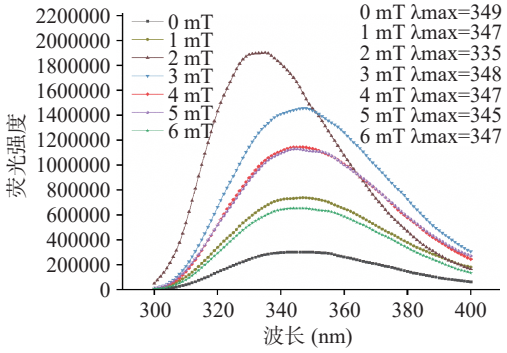


图 12　静磁场辅助解冻后羊肉肌原纤维蛋白的内源荧光光谱

Fig.12　Endogenous fluorescence spectra of lamb myofibrillar proteins after static magnetic field-assisted thawing

3　结论

本研究系统考察了不同强度静磁场辅助解冻对羊肉品质、水分分布与肌原纤维蛋白特性的影响，深入揭示了该技术提升羊肉品质的作用机制。结果表明，2 mT 静磁场处理提高解冻速率达 28.96%，且解冻速率随磁场强度偏离该值而逐渐下降；该处理条件可有效降低解冻损失、蒸煮损失与离心损失，显著改善羊肉的保水性。此外，2 mT 静磁场有助于抑制水分子迁移、维持较高水分含量，同时延缓脂质氧化并降低挥发性盐基氮值。该处理能够维持肌原纤维蛋白结构稳定性，表现为总巯基含量上升、羰基含量与肌原纤维蛋白表面疏水性下降，并更好地保持了蛋白质的二级与三级结构构象，从而有效缓解蛋白质氧化变性。综上，本研究明确了 2 mT 为静磁场辅助羊肉解冻的最佳磁场强度，相关结果不仅为解析磁场改善肉品品质的机制提供了理论参考，也为该技术在未来工业化应用中的参数优化奠定了基础。尽管当前研究明确了 2 mT 条件下的积极效果，但磁场与其他解冻参数的协同效应及其在更多肉类基质中的适用性仍有待进一步探讨，未来研究应致力于探索多场耦合的协同解冻策略，并推动该技术从实验室向实际生产场景的转化应用。

© 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] 秦越. 中国居民肉类消费特征与趋势研究[D]. 北京：中国农业科学院, 2022. [QIN Y. Study on the characteristics and trend of chinese residents' meat consumption[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.]

[2] 张婧譞, 寇宗红, 尤泰斐, 等. 不同贮藏条件下羊肉中挥发性盐基氮和生物胺含量变化[J]. 农产品加工, 2025(19)：11−16,23. [ZHANG J X, KOU Z H, YOU T F, et al. Changes in volatile base nitrogen and biological amines of mutton under different storage modes[J]. Agricultural Products Processing, 2025(19): 11−16, 23.]

[3] 程秀峰, 马琴, 黄雪松, 等. 4 种解冻方式对羊肉解冻后品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(16)：49−57. [CHENG X F, MA Q, HUANG X S, et al. Effect of four thawing methods on quality of lamb[J]. Food Research and Development, 2025, 46(16): 49−57.]

[4] 王静杰, 朱传旭, 吴煜彤, 等. 解冻方法对原料肉品质及蛋白质结构影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16)：363−368. [WANG J J, ZHU C X, WU Y T, et al. Research progress on effects of thawing method on meat quality and protein structure of raw materials[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(16): 363−368.]

[5] 董春燕, 张晓东, 谢婧荷, 等. 两种解冻温度下高压静电场对维持猪肉品质的影响[J]. 制冷技术, 2024, 44(5)：48−54. [DONG C Y, ZHANG X D, XIE J H, et al. Effect of high-voltage electrostatic field on keeping pork quality at two thawing temperatures[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2024, 44(5): 48−54.]

[6] 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 X L, PAN S K, WU P, et al. The 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.]

[7] 戴妍. 欧姆加热对猪肉蛋白质降解、氧化以及凝胶特性的影响[D]. 北京：中国农业大学, 2014. [DAI Y. Effects or ohmic cooking on pork meat protein degradations, oxidations and gellation characteristics[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.]

[8] 程腾, 薛冬, 赵嘉乐, 等. 射频处理对冷冻鸡胸肉解冻效果的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(11)：201−209. [CHENG T, XUE D, ZHAO J L, et al. Effect of radio frequency treatment on thawing efficiency of frozen chicken breast[J]. Food Science, 2024, 45(11): 201−209.]

[9] 段婷. 浸渍速冻与电/磁场辅助解冻对罗非鱼片品质影响的研究[D]. 长沙：中南林业科技大学, 2025. [DUAN T. Effects of immersion freezing and electric/magnetic field-assisted thawing on the quality of tilapia fillets[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2025.]

[10] JIANG J, ZHANG L, YAO J, et al. Effect of static magnetic field assisted thawing on physicochemical quality and microstruc-

ture of frozen beef tenderloin[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 914373.
[11] 孙明鑫, 李宛玲, 李倚天, 等. 磁场辅助对生鲜调理肉冷冻/解冻的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(6): 211−218. [SUN M X, LI W L, LI Y T, et al. Effect of magnetic field-assisted treatment on freezing and thawing of prepared meat products[J]. Food Science, 2025, 46(6): 211−218.]
[12] 马国骄, 金亚美, 杨哪, 等. 交变磁场对猪肉和牛肉冻藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 140−149. [MA G J, JIN Y M, YANG N, et al. Effect of alternating magnetic field on quality of frozen pork and beef[J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 140−149.]
[13] WANG W X, LIN H X, GUAN W Q, et al. Effect of static magnetic field-assisted thawing on the quality, water status, and myofibrillar protein characteristics of frozen beef steaks[J]. Food Chemistry, 2024, 436: 137709.
[14] 江俊波. 电磁场辅助肌肉解冻过程影响的研究[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2022. [JIANG J B. Study on the effect of electromagnetic field assisted thawing of muscle[D]. Hefei: Anhui Medical University, 2022.]
[15] 栗俊广, 程宇轩, 赵建生, 等. 不同强度磁场辅助冷冻对猪肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(24): 248−253. [LI J G, CHENG Y X, ZHAO J S, et al. Effect of magnetic field-assisted freezing of different intensities on quality of pork meat[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(24): 248−253.]
[16] 林珩迅. 静磁场辅助超冰温贮藏对牛肉品质的影响[D]. 天津: 天津商业大学, 2021. [LIN Y X. Effect of static magnetic field assisted controlled supercooling-point storage on quality of beef[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2021.]
[17] 褚筱然, 王海洁, 杜鹏飞, 等. 不同解冻方式对驴肉品质特性的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(2): 131−137. [CHU X R, WANG H J, DU P F, et. al. Effects of different thawing methods on quality characteristics of donkey meat[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(2): 131−137.]
[18] LI R, GUO M, LIAO E, et al. Effects of repeated freezing and thawing on myofibrillar protein and quality characterstics of marinated Enshi black pork[J]. Food Chemistry, 2022, 378: 131994.
[19] 王新颖, 李俊熙, 毛云, 等. 碱性氨基酸调控对牦牛肉糜制品品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(22): 115−122. [WANG X Y, LI J X, MAO Y, et al. Effects of alkaline amino acids on regulating quality characteristics of yak minced meat products[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(22): 115−122.]
[20] 尚柯, 杨方威, 李侠, 等. 静电场辅助冻结-解冻对肌肉保水性及蛋白理化特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 157−162. [SHANG K, YANG F W, LI X, et al. Effect of electrostatic field-assisted freezing-thawing on water-holding capacity and physicochemical characteristics of beef muscle proteins[J]. Food Science, 2018, 39(3): 157−162.]
[21] 李宇豪, 陶迎梅, 雷雨, 等. 磁场辅助冷冻对调理猪肉蛋白特性和品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 76−83. [LI Y H, TAO Y M, LEI Y, et al. Effect of magnetic field assisted freezing on the properties and quality characteristics of myofibrillar protein in prepared pork[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 76−83.]
[22] ZHANG Z, 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.
[23] 杨川, 武广玉, 李应彪, 等. 低压静电场结合高湿解冻对羊肉保水性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 86−94. [YANG C, WU G Y, LI Y B, et al. Effect of low voltage electrostatic field combined with high humidity thawing on water holding capacity of frozen lamb meat[J]. Food Science, 2023, 44(11): 86−94.]
[24] YANG K, WANG L, GUO J, et al. Structural changes induced by direct current magnetic field improve water holding capacity of pork myofibrillar protein gels[J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128849.
[25] ZHU M M, XING Y, ZHANG J, et al. Low-frequency alternating magnetic field thawing of frozen pork meat: Effects of intensity on quality properties and microstructure of meat and structure of myofibrillar proteins[J]. Meat Science, 2023, 204: 109241.
[26] XIE Y, ZHOU K, CHEN B, et al. Mechanism of low-voltage electrostatic fields on the water-holding capacity in frozen beef steak: Insights from myofilament lattice arrays[J]. Food Chemistry, 2023, 428: 136786.
[27] MIÑANO H L A, SILVA A C D S, SOUTO S, et al. Magnetic fields in food processing perspectives, applications and action models[J]. Processes, 2020, 8(7): 814.
[28] 乔雪. 电磁耦合处理对牛肉冻结-解冻效果的影响研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2024. [QIAO X. Study on the effect of electromagnetic coupling treatments on freezing and thawing of beef[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2024.]
[29] 李子涵, 苏伟, 母应春, 等. 电磁场保鲜对贵州黑山羊品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(11): 379−387. [LI Z H, SU W, MU Y C, et al. Effects of electromagnetic field preservation on the quality of Guizhou black goat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(11): 379−387.]
[30] MOHSENPOUR M, NOURANI M, ENTESHARY R. Effect of thawing under an alternating magnetic field on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet characteristics[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134255.
[31] 李翰卿, 马俪珍, 陈胜军, 等. 不同解冻方式对鸢乌贼胴体肌肉品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(5): 20−28. [LI H Q, MA L Z, CHEN S J, et al. Effect of different thawing methods on muscle quality of *Sthenoteuthis oualaniensis*[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(5): 20−28.]
[32] LIN H, ZHAO S, HAN X, et al. Effect of static magnetic field extended supercooling preservation on beef quality[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131264.
[33] 王晋, 高学慧, 陈云云, 等. 解冻方式对船载超低温鱿鱼肌肉保水性及品质的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 159−164,197. [WANG J, GAO X H, CHEN Y Y, et al. Effect of thawing methods on water retention and quality of ship-borne ultra-low-temperature squid muscle[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 159−164,197.]
[34] WANG S, ZHANG L, WANG H, et al. Magnetic field: A non-thermal technology in food processing[J]. Food Control, 2024, 166: 110692.
[35] QIAN S, LI X, ZHANG C, et al. Effects of initial freezing rate on the changes in quality, myofibrillar protein characteristics and myowater status of beef steak during subsequent frozen storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 143: 148−156.
[36] WANG B, BAI X, DU X, et al. Comparison of effects from ultrasound thawing, vacuum thawing and microwave thawing on the quality properties and oxidation of porcine longissimus lumborum[J]. Foods, 2022, 11(9): 1368.
[37] ZHANG X, WU Y, LIN Y, et al. Influence of low voltage

programmed thawing on the quality of frozen pork and its myofibrillar protein[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 98: 103858.
[38] ZHANG Y, LI Y, GUO J, et al. Effect of two-stage low-temperature tempering process assisted by electrostatic field application on physicochemical and structural properties of myofibrillar protein in frozen longissimus dorsi of tan mutton[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 140001.
[39] KONG D, HAN R, YUAN M, et al. Ultrasound combined with slightly acidic electrolyzed water thawing of mutton: Effects on physicochemical properties, oxidation and structure of myofibrillar protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 93: 106309.
[40] DAVIES M J. Protein oxidation and peroxidation[J]. Biochemical Journal, 2016, 473(7): 805−825.
[41] 张娟. 基于肌原纤维蛋白特性解析低频磁场辅助解冻对猪肉品质的影响[D]. 新乡：河南科技学院, 2023. [ZHANG J. The effect of low-frequency magnetic field assisted thawing on porcine quality with myofibrillar proteins properties[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2023.]
[42] 单帅琦. 磁场辅助冻结对调理鸡胸肉品质及肌原纤维蛋白功能的影响研究[D]. 郑州：郑州轻工业大学, 2025. [SHAN S Q. Effect of magnetic field assisted freezing on the quality of prepared chicken breast and the function of myofibrillar protein[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2025.]
[43] ZHAO S M, LIU Y, YANG L, et al. Low-frequency alternating magnetic field and $CaCl_2$ influence the physicochemical, conformational and gel characteristics of low-salt myofibrillar protein[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101341.
[44] 梁雯雯, 郭建, 汪秋宽, 等. 不同解冻方式对鲢鱼肌球蛋白结构和性质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 7−12. [LIANG W W, GUO J, WANG Q K, et al. Effects of different thawing methods on the structure and properties of silver carp myosin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(21): 7−12.]
[45] DING Y, AHMED F, ZHAO Y, et al. Evaluating the effects of magnetic nanoparticles combined with ultrasound thawing on the physicochemical quality and myofibrillar protein properties in Antarctic krill (*Euphausia superba*)[J]. Food Chemistry, 2025, 488: 144822.