

空间电场联合低温贮藏对调理牛排品质的影响

王明珠, 谢勇, 檀利军, 李聪, 廖鲜艳, 黄俊逸, 徐宝才

Effect of Space Voltage Electrostatic Field Combined with Low-temperature Storage on Quality of Prepared Beef Steak

WANG Mingzhu, XIE Yong, TAN Lijun, LI Cong, LIAO Xianyan, HUANG Junyi, and XU Baocai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024080110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低压静电场处理对竹节虾(*Penaeus japonicus*)微冻贮藏过程中品质的影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field Treatment on the Quality of *Penaeus japonicus* during Microfreezing Storage

食品工业科技. 2020, 41(7): 1-6,12 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.001>

基于低压静电场技术(LVEF)协同低温对舟山杨梅保鲜过程中品质的影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field Combined with Low Temperature on Quality of Zhoushan Bayberry during Fresh-keeping

食品工业科技. 2020, 41(7): 265-270 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.044>

低压静电场处理对带鱼微冻贮藏期间品质变化影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field(LVEF)Treatment on the Quality Changes of *Trichiurus lepturus* during Micro-frozen Storage

食品工业科技. 2020, 41(23): 277-283 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019110043>

低频电场冰温保鲜对虾的水分迁移规律及品质变化的影响

Water Migration and Quality Change of Prawn Preserved under Controlled Freezing-point Storage Combined with Low Frequency Electric Field Technology

食品工业科技. 2022, 43(19): 372-378 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021100109>

低压静电场辅助解冻对牛肉品质的影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field Assisted Thawing on Beef Quality

食品工业科技. 2024, 45(17): 48-56 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090023>

不同温度下低压静电场辅助冷冻对沙棘果品质的影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field-assisted Freezing on Quality of Seabuckthorn Fruit

食品工业科技. 2025, 46(6): 120-127 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024040219>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王明珠, 谢勇, 檀利军, 等. 空间电场联合低温贮藏对调理牛排品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 344–351. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080110

WANG Mingzhu, XIE Yong, TAN Lijun, et al. Effect of Space Voltage Electrostatic Field Combined with Low-temperature Storage on Quality of Prepared Beef Steak[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 344–351. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080110

· 贮运保鲜 ·

空间电场联合低温贮藏对调理牛排品质的影响

王明珠¹, 谢 勇², 檀利军², 李 聪², 廖鲜艳¹, 黄俊逸¹, 徐宝才^{2,*}

(1. 上海大学生命科学学院, 上海 200444;

2. 合肥工业大学食品与生物工程学院, 安徽合肥 230601)

摘 要: 为研究空间电场辅助不同的低温贮藏方式对调理牛排品质的影响, 选取冷藏 (4 °C)、冰温 (−1 °C)、微冻 (−5 °C)、冷冻 (−18 °C) 以及空间电场分别联合冰温和微冻这六种低温贮藏方式处理牛排, 以新鲜产品为对照, 分析总活菌计数、pH、汁液损失率、色泽、质构特性、剪切力、肌肉微观结构等变化情况。结果表明: 空间电场具有明显的抑菌效应。冷藏组样品在第 5 d 时总活菌计数为 7.58 lg CFU/g, 冰温组样品在第 15 d 时总活菌计数为 7.20 lg CFU/g, 均超过可接受限值。随着环境中电场的施加, 可以将冰温贮藏的样品货架期从 15 d 延长至 20 d, 并且显著地提高了牛排的色泽稳定性; 另外, 空间电场对冰晶生长/再结晶表现出高效的抑制能力, 有效地阻止了微冻贮藏阶段冰晶的全轴向生长, 维持肌肉的微观结构, 进而降低了解冻损失约 28%。随着电场的施加, 剪切力下降的趋势得到了缓解, 降低率分别为 11.02% (冰温+电场) 和 2.13% (微冻+电场), 在第 20 d, 与微冻样品相比, 微冻+电场样品硬度、弹性、内聚力分别上升了 23%、2.7%、4%, 保持了良好的质构特性。结果表明, 在调理牛排的低温贮藏过程中, 施加空间电场来改善产品的品质是一种极具潜力的策略。

关键词: 空间电场, 冰温, 微冻, 贮藏品质, 保鲜

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)12-0344-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080110

本文网刊:



Effect of Space Voltage Electrostatic Field Combined with Low-temperature Storage on Quality of Prepared Beef Steak

WANG Mingzhu¹, XIE Yong², TAN Lijun², LI Cong², LIAO Xianyan¹, HUANG Junyi¹, XU Baocai^{2,*}

(1. School of Life Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: To investigate the effects of space electric field-assisted low-temperature storage on the quality of prepared beef steak, six storage methods were employed: refrigeration (4 °C), super-chilling (−1 °C), partial freezing (−5 °C), freezing (−18 °C), and space electric field-assisted super-chilling and partial freezing. Fresh steaks were used as a control to analyze changes in total viable bacterial count, pH, drip loss, color, texture characteristics, shear force, and muscle microstructure. The results indicated that the space electric field exhibited a pronounced antibacterial effect. The total viable bacterial count of the refrigerated group reached 7.58 lg CFU/g on the 5th day, and the super-chilling group reached 7.20 lg CFU/g on the 15th day both exceeding the acceptable limit. With the application of the electric field in the environment, the shelf life of the super-chilling samples could be extended from 15 to 20 d, and the color stability of the steak was significantly improved. Moreover, the space electric field demonstrated a highly effective inhibition of ice crystal growth and

收稿日期: 2024-08-12

基金项目: 国家重点研发专项-工业化菜肴新鲜度保持与贮运关键技术装备研发项目 (2023YFD2100703); 十四五国家重点研发计划项目 (2021YFD2100803); 安徽省重点研究与开发计划项目 (2023n06020030)。

作者简介: 王明珠 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工, E-mail: wzm991219@163.com。

* 通信作者: 徐宝才 (1973-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: baocaixu@163.com。

recrystallization, effectively preventing all-axial ice crystal growth during partial freezing, maintaining the microstructure of the muscle, and subsequently reducing thawing loss by approximately 28%. With the application of the electric field, the trend of decreasing shear force was mitigated, with reduction rates of 11.02% (space electric field-assisted super-chilling) and 2.13% (space electric field-assisted partial freezing). On the 20th day, compared with the partial freezing samples, the hardness, elasticity, and cohesiveness of the space electric field-assisted partial freezing samples increased by 23%, 2.7%, and 4%, respectively, maintaining good texture characteristics. These findings suggest that the application of a space electric field in low-temperature storage of prepared beefsteaks is a highly promising strategy for improving product quality.

Key words: space voltage electrostatic field (SVEF); super chilling; partial freezing; storage quality; preservation

作为最古老且有效的食品保鲜技术,低温贮藏 in 维持肌肉食品、水果和蔬菜的安全及质量方面发挥着关键作用^[1],根据贮藏环境温度的不同,现代工业中通常以冷藏(0~4℃)和冷冻(低于-18℃)两种方式来提高产品的品质稳定性。近年来,与传统肉制品相比,调理牛排因其食用方便、营养均衡等优势,越来越受到消费者的青睐。调理牛排产品通常采用冷藏或者冷冻方式进行贮运销售。传统的冷藏技术货架期较短,难以进行长线的冷链运输;此外,尽管冷冻技术可以大幅度延长货架期,但是贮藏过程中冰晶的生长/再结晶会对肌肉组织造成剧烈的机械损伤,解冻后过多的汁液损失会直接损害行业的经济效益和消费者的健康需求^[2]。因此,有必要开发新型的低温保存技术以维持食品原有的品质。

冰温贮藏是指将产品于 0℃ 至冰点的温度区间内贮藏,储存在冰温条件下的新鲜肉类因其更好的颜色、风味和营养价值而受到消费者的欢迎,已被认为是一种很有前景的鲜肉保鲜方法^[3]。然而,由于冰温贮藏的温度范围较窄,鲜肉容易发生细菌生长繁殖等一系列复杂的理化反应导致不可避免的品质劣化,货架期仍然达不到要求^[4]。微冻是一种通过部分冰结晶来保存食物的方法,通常是指低于食品冰点 1~2℃ 的温度范围^[5]。微冻已被证明可以显著抑制肉类^[6]、海鲜^[7] 和水果和蔬菜^[8] 的生化反应和微生物生长,从而延长食品的货架期。然而,由于控温技术的难度,在微冻贮藏过程中仍会发生冰晶的生长和重结晶,肌肉在贮藏过程中受到温度波动的破坏更为严重,从而影响肌肉在贮藏过程中的持水能力和品质^[9-10]。

最近,电场已经被证明是一种在低温保存过程中保持食品品质的有效方法,具有易于实施,适用性强和成本低廉等优点。许多学者针对电场辅助保鲜效果开展了相关研究,许昌^[11]以新疆油杏实生变异种为研究对象,发现冰温结合低压静电场保鲜技术可延长杏果实贮藏期,延缓杏果实品质下降,保持原有风味。高飞等^[12]研究发现低压静电场与微冻技术叠加应用能够更长时间保持舟山海捕红虾的营养价值。余铭等^[13]在冰温基础上施加低频电场保鲜对虾,结果表明,与常规冰温保鲜相比,低频电场冰温保鲜处理可显著抑制 Ca^{2+} -ATPase 活性下降和蛋白质

降解,维持蛋白质结构和性质的稳定,减缓虾肉品质劣变。目前电场技术应用于单一低温贮藏保鲜方式的研究较多,但是,在冰温和微冻领域综合评估调理肉制品品质的研究少见报道。

本研究以调理牛排为研究对象,通过冷藏、冰温、微冻、冷冻以及空间电场分别联合冰温和微冻这六种低温贮藏方式处理牛排,分别进行总活菌计数、pH、汁液损失率、色泽、质构特性、剪切力、肌肉微观结构变化分析等,评估了空间电场联合冰温和微冻技术对调理牛排品质的影响,旨在为空间电场在肌肉食品保鲜领域的应用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

牛背最长肌 合肥大润发精选超市(中华杂交夏南牛,雄性,24~36个月龄,屠宰后7d),全程装在冰盒中运回实验室并置于4℃冰箱中;食用盐 安徽润华盐业有限公司;蔗糖 成都太古糖业有限公司;碳酸氢钠 安琪酵母股份有限公司;三氯乙酸、硫代巴比妥酸、丙酮、盐酸、柠檬酸、乙酸铵、乙酸乙酯、2,4-二硝基苯肼、尿素、二甲醇、正丁醇、中性树脂 国药集团化学试剂有限公司;甘氨酸 北京索莱宝科技有限公司;无水乙醇、抗坏血酸、二水合磷酸二氢钠、十二水合磷酸氢二钠 上海沪试实验室器材股份有限公司;环保型脱蜡液、通用型组织固定液、苏木素-伊红(H&E)高清恒染试剂盒 武汉赛维尔生物科技有限公司;菲洛嗪 生工生物工程有限公司;新亚铜 美国 Sigma 公司;平板计数(PCA) 广东环凯生物科技有限公司。

YP6001N 电子天平 上海精密科学仪器有限公司;ESK 真空滚揉机 德国 Kakona GmbH 公司;IKA-Ultra-Turrax T25 匀浆机 德国 Braun 公司;NS800 型色差仪 深圳市三恩驰科技有限公司;Testo205 型 pH 计 德国 Testo 公司;HH 数显恒温水浴锅 江苏金坛区金城国胜实验仪器厂;GO1510 型全波长酶标仪 美国 Thermo Fisher Scientific 公司;GT14RD 型台式高速冷冻离心机 上海天美生化仪器设备工程有限公司;Donatello 脱水机 DIAPATH 公司;JB-P5 包埋机 武汉俊杰电子有限公司;RM2016 病理切片机 上海徕卡仪器有限公司;CRYOSTAR NX50 冰冻切片机 赛默飞世尔科

技(中国)有限公司;KD-P 组织摊片机 浙江金华市科迪仪器设备有限公司;JB-L5 冻台 武汉俊杰电子有限公司;ECLIPSE E100 正置光学显微镜 日本尼康;DS-U3 成像系统 日本尼康;MX-F 微型漩涡混合仪 北京大龙兴创实验仪器有限公司;DENBA+ 鲜度保持电场装置 日本 AGUA 商业株式会社。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 将研究所用牛肉用冰盒运输回实验室后置于 4 ℃ 冰箱中。在去除可见的结缔组织和外部脂肪后,将牛肉垂直于纤维方向切割成 40 mm×30 mm×10 mm 的牛排(每块重 50±0.5 g),共 228 块。牛排在腌制液中通过滚揉腌制 2 h。腌制液的成分是基于肉的总重量计算的,包括 2% 氯化钠(NaCl)、0.4% 白糖(蔗糖)、0.6% 碳酸氢钠、和 20% 冰水^[14]。腌制后的样品用聚乙烯袋在常压下包装(所有操作均在 4 ℃ 密闭操作间内进行)。每块牛排标记编号(从 1~228),并置于 4 ℃ 冰箱中直到后续的贮藏实验。所有牛排随机分配 6 组用于冷藏(4 ℃)、冰温(-1 ℃)、冰温+电场(-1 ℃+SVEF)、微冻(-5 ℃)、微冻+电场(-5 ℃+SVEF)和冷冻(-18 ℃)保存,除冷藏组和冰温组贮藏期分别为 5、15 d 外,其余各组贮藏期都为 20 d。在贮藏期间,冷藏组的样品在第 0、1、3、5 d 进行取样分析,冰温组的样品取样点为第 0、1、3、5、7、10 和 15 d,其余四组样品的取样点分别为第 0、1、3、5、7、10、15、20 d,在每个取样点进行品质指标的测定。

1.2.2 电场实验装置 空间电场装备(由配备电压控制器的电源(最大输出电压为 2500 V,最大电流为 0.2 mA)和电极板(43 cm×23 cm)组成。将调理牛排样品置于聚乙烯袋中,放在固定在腔室上的铜板(30 cm×20 cm)上,铜板与放电板平行,在-1 ℃ 与-5 ℃ 的恒温冰箱中进行储存实验。实验组在贮藏期间不间断地施加电压,施加电压为 2500 V,放电间隙设定为 30 cm。用于电场系统实现的实验装置如图 1 所示。

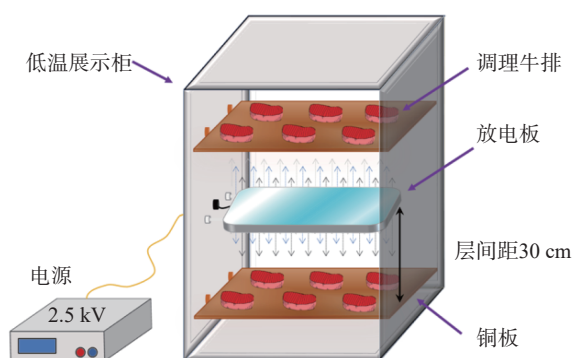


图 1 装配有空间电场的低温贮藏系统

Fig.1 Cryogenic storage systems equipped with space electric fields

1.2.3 菌落总数的测定 微生物群落总数按照 GB 4789.2-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验

菌落总数测定》(食品微生物学检验-需氧板计数)和 Li 等^[15]描述的平板菌落计数法进行测定。无菌称取 10 g 样品,并在实验室桨式搅拌器中与 90 mL 无菌生理盐水溶液匀浆 2 min。将匀浆样品悬液按 1:10 比例逐级稀释,每个稀释度取 1 mL 样品加入含有 25 mL 平板计数琼脂(PCA)的无菌培养皿中。总活菌计数(TVC)在 36±1 ℃ 条件下通过平板计数法在 PCA 平板上培养 48 h 后测定。实验结果以每克对数菌落形成单位(lg CFU/g)表示。

1.2.4 pH 的测定 在使用前,pH 计用 pH 分别为 4.01、7.00 和 10.00 的缓冲溶液在 25 ℃ 下进行校准。使用数字 pH 计测定匀浆的 pH。将 2 g 牛肉样品与 20 mL 蒸馏水混合匀浆 1 min,将 pH 计探头直接插入匀浆中进行测量,等待读数稳定或在 20 s 内波动幅度小于 0.05 时记录数据。每组设置 6 个平行样品,对同一样品重复测量 3 次,并取 6 个样品的平均值作为该水平下的最终测量结果。

1.2.5 持水力的测定 参考董福凯等^[16]的方法,以汁液流失率反应不同处理组的牛排的持水力,准确称取低温贮藏前的质量(m_1 , g)、低温贮藏后的质量(m_2 , g),按照以下公式计算汁液流失率:

$$\text{汁液流失率}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

1.2.6 色差的测定 先对色差仪进行黑白校准,使用白板校正色差仪,擦干样品表面水分,在低温环境(4±3 ℃)下进行样品的色泽测定,包括 L^* 值(亮度值)、 a^* 值(红度值)、 b^* 值(黄度值)。每组测量包括 6 个平行样品,对同一样品的 3 个不同部位进行 3 次测量,取平均值作为该水平下的最终测量结果。每个样品在实际测定前从低温环境(4±0.5 ℃)取出,测量后立即放回。

1.2.7 质构的测定 参考 Xie 等^[17]的方法稍加修改,将不同处理组的样品沿着平行肌纤维方向切成规则的立方体形状(10 mm×10 mm×10 mm),然后进行全质构分析(TPA)。所有 TPA 测试均使用圆柱形探头 P50。将样品放在探头下,设置参数如下:探头以 1 mm/s 的恒定速度向下移动,将样品压缩两次至原始厚度的 50%,触发力参数设置为 10 g,压缩之间的时间间隔为 5.0 s,选取硬度、弹性、内聚力作为测试指标。进行剪切力测试的样品前处理与质构测定前处理一致,将物性测定仪垂直于肌纤维方向剪切,并记录剪切力值,每组设置 6 个平行样品,对同一样品重复测量 8 次,取 6 个样品的平均值作为测量结果。

1.2.8 肌肉微观结构及冰晶形态观察 参考 Martino 等^[18]的方法,将不同处理组的牛排快速切成 10 mm×10 mm×10 mm 的立方体(所用刀具已预冷),并转移到组织固定剂(2.5% 戊二醛)中孵育过夜。然后使用冷冻切片机获取切片,并用苏木精和伊红染色。肌纤维被伊红染成红色,肌细胞核被苏木精染成蓝紫色,

白色区域为肌纤维之间的间隙,对于微冻和冷冻处理组,白色区域可视为贮藏过程生长的冰晶,最后通过光学显微镜以 200 倍放大观察。

1.3 数据处理

本实验采用 Excel 2019 软件处理数据,指标测定均为 6 次平行测定结果,表示为平均值 $\pm$ 标准差,利用 SPSS 25.0 软件进行 Duncan 法多重比较及显著性分析($P<0.05$ 表示差异显著)。通过 Graphpad Prism 8.4.3 和 Origin 2022 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏条件下调理牛排菌落总数的变化

微生物生长是导致肉类变质的重要因素,菌落总数是衡量肉品贮藏过程中腐败变质的关键微生物指标之一^[19]。调理牛排在不同低温贮藏条件下的总需氧菌落数变化如图 2 所示。初始 TAC 约为 3.87 lg CFU/g。可以直观地看到所有样品的 TAC 都随着时间的延长而增加,且冷藏样品的增加速率明显高于其余组样品,并在第 5 d 时超过可接受限值 6 lg CFU/g^[20]。随着环境温度的降低,冰温贮藏可将样品的货架期延长至 15 d,微冻和冷冻则远超过 20 d。

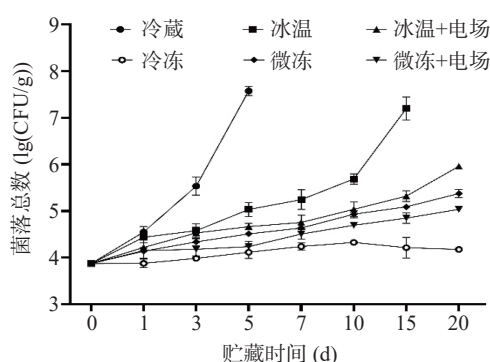


图 2 调理牛排在不同低温贮藏条件下的总需氧菌落数变化
Fig.2 Changes in total viable counts of prepared beef steak under different low-temperature storage conditions

在冰温阶段随着空间电场的施加,货架期延长至 20 d,可能归因于电场减少了腐败细菌的丰度和改变细菌阶段的分布,抑制了牛排优势腐败菌的生长^[21],同时,Zhang 等^[22]在采用低压静电场处理大黄鱼也得到类似的研究结果,电场抗菌的机制可能是由于引起细胞膜破裂和崩解,导致细菌细胞生长缓慢,甚至死亡。Huang 等^[19]研究了高压静电场对约翰逊不动杆菌的体外抗菌机理,发现高压静电场处理可激活约翰逊曲霉的氧化应激反应和 DNA 损伤保护/修复过程。既往研究表明,暴露于高压静电场会导致各种活性氧和氧化应激的产生急剧增加,随后攻击这些细菌细胞内存在的生物大分子^[23]。在微冻和冷冻阶段,由于较低的贮存温度对腐败菌有很好的抑制作用,货架期远超过 20 d,且施加电场处理组的菌落总数一直低于未施加电场组。

2.2 不同贮藏条件下调理牛排 pH 的变化

调理牛排在不同的贮藏方式下 pH 的变化如

图 3 所示,均呈现出先降后升的趋势,这主要归因于肉制品的贮藏过程伴随着多种生理生化反应,包括糖原代谢和 ATP 分解,这会导致肌肉体系 pH 的降低,此后随着微生物的生长以及内源酶的作用,引发氨和胺类等碱性物质积累,导致 pH 的上升^[24]。因此,pH 的变化可以反映肌肉组织的分解过程^[21],冰温组样品的 pH 在第 7 d 开始上升,随着空间电场的施加,样品 pH 相对稳定。可能是由于电场抑制了肉中细菌的生长和繁殖,减缓了胺的形成速度,并延缓了贮藏过程中 pH 的变化^[25]。有研究表明贮藏期的酶活性也诱导了 pH 的变化^[26],然而,电场技术提供了缓解这种现象的可能性^[27]。

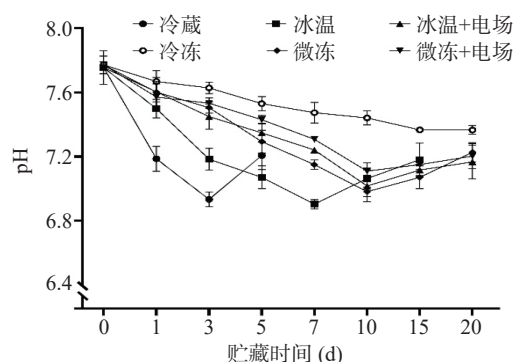


图 3 调理牛排在不同低温贮藏条件下的 pH 的变化
Fig.3 Changes in pH of prepared beef steak under different low-temperature storage conditions

2.3 不同贮藏条件下调理牛排持水力的变化

保水性是衡量肌肉食品品质的重要属性。本研究中,样品的保水性通过汁液损失率来评价。不同处理组样品的汁液损失率如图 4 所示,冷藏组样品的汁液损失率从 1.42% 上升到 3.32%,这归因于贮藏过程中微生物繁殖以及内源性蛋白酶的作用,较大幅度地降解了肌原纤维蛋白,导致肌原纤维蛋白的结构被破坏,造成蛋白质水合能力降低^[28]。在第 15 d,冰温组和冰温+电场组的损失率为 3.29%、2.32%,表明电场辅助冰温可以有效地改善贮藏过程中肌肉水分流失问题,这是因为电场有明显的抑菌作用,保持了肌原纤维蛋白结构的完整性并最终导致水分损失率的降低^[29]。

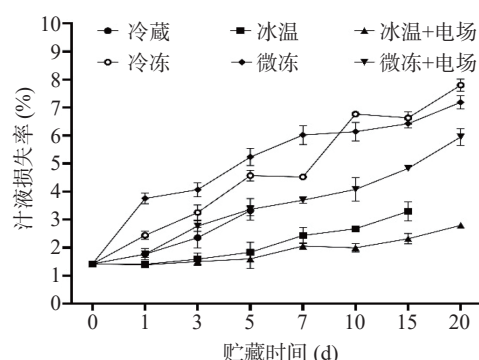


图 4 调理牛排在不同低温贮藏条件下的汁液损失率的变化
Fig.4 Changes in drip loss rate of prepared beef steak under different low-temperature storage conditions

微冻组和冷冻组的水分损失率一直处于较高水平,在第20 d,微冻组和冷冻组的损失率为7.19%、7.80%,这可能是因为冷冻过程中冰晶的过度横向生长导致持水能力下降,微冻组损失上升的原因是因为贮藏期间因温度波动和时间延长引发的冰再结晶。电场组减少了牛排约2%的水分损失,这是由于电场的介入可以有效降低肌丝点阵的密度,同时通过调节肌原纤维之间的静电和疏水相互作用来保持规则的晶格阵列使肌原纤维的持水能力显著提高^[30]。

2.4 不同贮藏条件下调理牛排微观结构的变化

不同处理组样品的肌肉纤维横截面如图5所示,其中肌纤维呈红色,白色区域则表示肌纤维之间的间隙。新鲜样品呈现出完整而紧密的肌纤维结构,随着贮藏时间的延长,冷藏组样品和冰温组样品的肌纤维间隙呈现逐步增大的趋势,这可能是因为腐败细菌和内源性酶的作用导致牛肉肌肉纤维的降解,其中部分会分解形成许多小碎片^[2]。随着电场的施加,样品的肌肉纤维更加完整,纤维间的间隙更小。该现象也证明了空间电场可以延缓肌细胞的破裂和纤维

分离。

然而,在微冻和冷冻样品中,肌肉细胞间空隙的增加可以视为冰晶对肌肉组织结构的破坏^[17,31],肌肉纤维之间出现了由冰晶留下的空隙,组织结构完整性受到破坏。与冷藏和冰温处理相比,冷冻导致了明显的肌原纤维结构损伤。此外,微冻样品肌束之间的空隙比冷冻样品大,表明微冻样品的组织受到了更严重的损害。与快速冷冻形成的小冰晶相比,微冻将在细胞外空间形成大冰晶,加重了冻结损伤。在电场结合微冻处理组中,肌肉纤维排列更为紧密,间隙较小,并且随着贮藏时间的延长表现更为显著,这与电场结合微冻样品中验证的高水合能力(WHC)一致。此外,结构损伤与冰晶形成有关。据以前的研究报道称,从热力学定律的角度来看,电场可以降低冰晶形成的自由能障碍^[32],这有助于增强成核速率和小冰晶核的数量^[33],导致牛肉肌肉纤维中小而均匀的冰晶的形成。因此,适当强度的电场处理可能减轻由于冰晶引起的肌肉微观结构损伤,对于保持调理牛排肌肉结构更为有效。

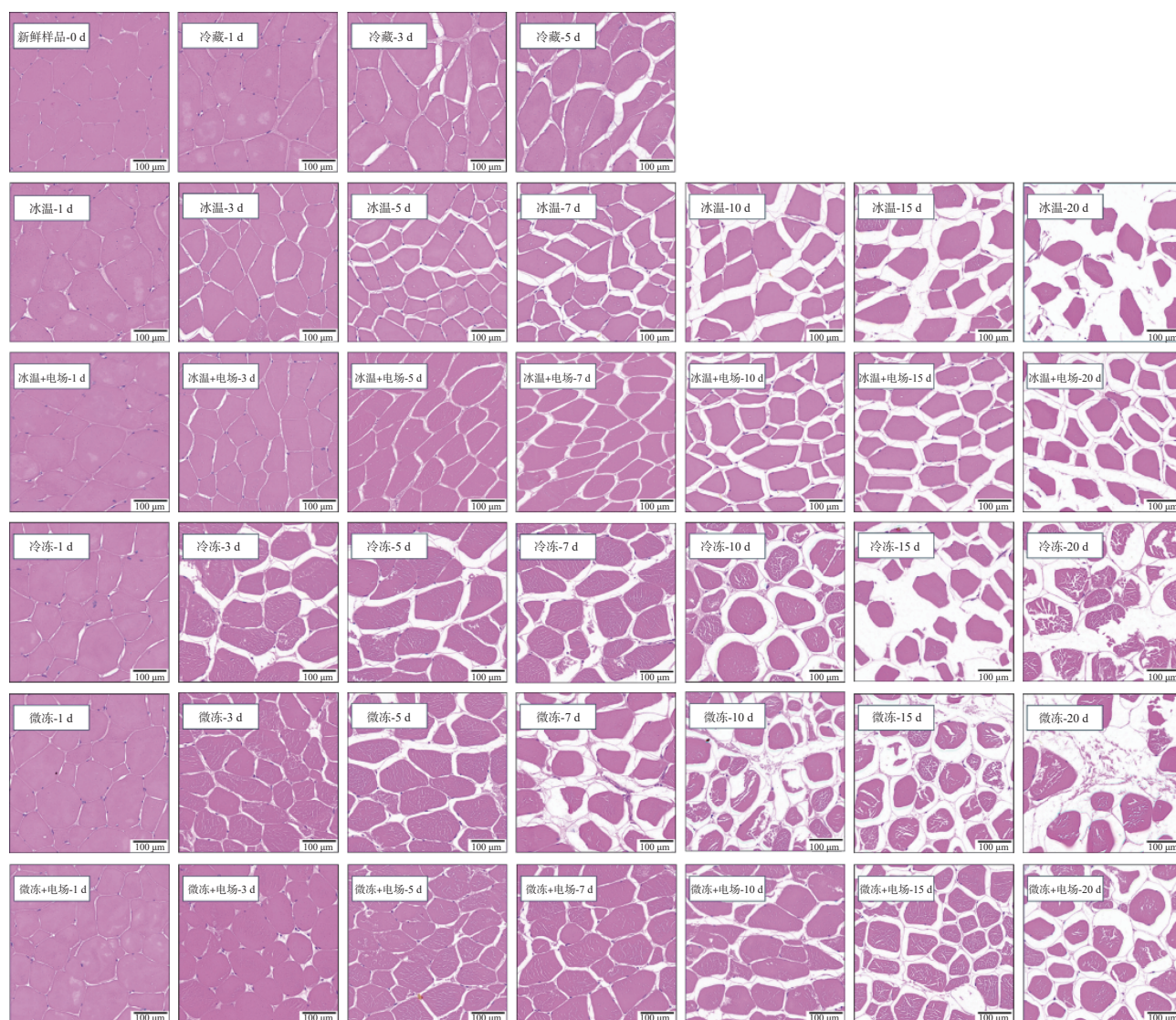


图5 调理牛排在不同低温贮藏条件下的微观结构的变化

Fig.5 Changes in the microstructure of prepared beef steak under different low-temperature storage conditions

2.5 不同贮藏条件下调理牛排色泽的变化

色泽在很大程度上决定了消费者对产品质量的认知, 从而显著影响购买决策^[34]。不同处理组牛排的 L^* 值(亮度), a^* 值(红度), b^* 值(黄度)的变化趋势见表 1。各处理组牛肉样品的 L^* 值在贮藏前期呈现上升趋势, 这是由于肉表面汁液外渗导致的折射率变化。随着贮藏时间的延长, 各组样品的 L^* 值下降, 可能是由于肉中的肌红蛋白被氧化为高铁肌红蛋白, 颜色变暗^[35]。牛排的 a^* 值呈现下降的趋势。在整个贮藏期间, 冰温组和冰温+电场组的 a^* 值显著高于其他组 ($P<0.05$), 保留了在贮藏过程中的颜色变化。即冰温组和电场处理中储存的样品的肉表面颜色远优于其他处理组, 这可能部分归因于冰温贮藏能有效抑制高铁肌红蛋白的积累, 冰温贮藏的肉类色泽更稳定^[36]。在贮藏第 10 d, 冰温组的 a^* 值显著下降 ($P<0.05$), 而冰温+电场组在第 10 d 仍可维持良好色泽。各处理组的 b^* 没有显著性差异。因此电场辅助冰温可以大幅度提高产品的色泽稳定性。

2.6 不同贮藏条件下调理牛排剪切力和质构的变化

人类对肉类适口性的感知源于咀嚼过程中涉及的感官和物理过程的复杂相互作用, 在决定肉类适口性的各种主观特性中, 嫩度起着重要作用^[37]。本研究中, 以剪切力的大小评估样品的嫩度, 不同处理组牛排的嫩度如图 6 所示。随着贮藏时间的延长, 各组样品的剪切力都呈现降低的趋势, 但是下降的速率存在显著的区别。在第 5 d 时, 冷藏牛排的剪切力从 66.140 N 到 24.985 N, 下降了 62.23%, 同时冰温和微冻样品剪切力分别为 39.210 N 和 45.124 N, 然而, 随着电场的施加, 剪切力下降的趋势得到了缓解, 降

低率分别为 11.02%(冰温+电场)和 2.13%(微冻+电场)。这可能归因于空间电场对内源酶的抑制从而减少肌原纤维蛋白的降解, 导致剪切力值较高^[38]。

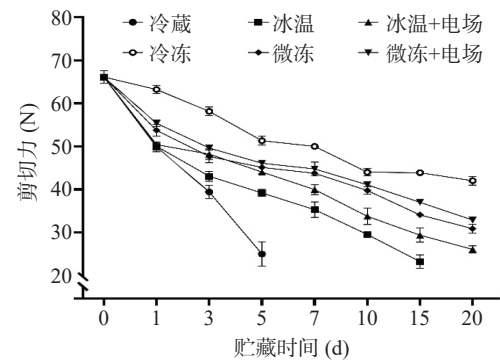


图 6 调理牛排在不同低温贮藏条件下的剪切力的变化
Fig.6 Changes in the shear force of prepared beef steak under different low-temperature storage conditions

质构特性也是评价肉制品品质的重要指标, 包括硬度, 弹性和内聚力。如表 2 所示, 新鲜牛排的硬度(884.99 g)、弹性(0.968)、内聚力(0.778)在低温贮藏期间呈现明显的下降趋势。在贮藏第 5 d 后, 冰温+电场组硬度均显著高于冰温组 ($P<0.05$), 有研究表明在电场辅助的条件下, 内源性蛋白酶系统作用被限制, 蛋白酶量减少和酶催化活性降低减缓蛋白降解速率, 相较于未加电场组, 肌纤维的排列更加紧致, 间隙小, 对肉的硬度有一定的维持作用^[39]。对于微冻贮藏, 冰晶对质构特性造成的破坏通过电场处理得到了部分恢复, 这可能是由于电场可有效减少冷冻过程中冰晶对肌肉的超微结构损伤, 保持了完整的肌原纤维

表 1 不同处理对调理牛排色泽的影响

Table 1 Effect of different treatments on color of prepared beef steak

组别	指标	贮藏时间(d)							
		0	1	3	5	7	10	15	20
冷藏	L^*	37.32±0.46 ^{Ac}	38.37±0.50 ^{Ab}	39.78±0.10 ^{Aa}	37.46±1.32 ^{Bc}	—	—	—	—
	a^*	18.97±0.53 ^{Aa}	16.86±0.26 ^{Bb}	14.66±0.42 ^{Cc}	10.58±0.89 ^{Dd}	—	—	—	—
	b^*	11.52±0.25 ^{Ac}	14.20±0.29 ^{Aa}	12.38±0.19 ^{Cb}	10.04±0.77 ^{Cd}	—	—	—	—
	L^*	37.32±0.46 ^{Ac}	38.77±0.74 ^{Aab}	39.27±0.16 ^{Ba}	38.75±1.20 ^{ABab}	38.06±0.22 ^{Cbc}	37.44±0.68 ^{Bc}	37.32±0.28 ^{Bc}	—
冰温	a^*	18.97±0.53 ^{Aabc}	18.53±0.49 ^{AcD}	19.43±0.05 ^{Aab}	19.55±0.06 ^{Ba}	18.67±0.53 ^{Bbc}	17.89±0.61 ^{Bd}	16.62±0.54 ^{Be}	—
	b^*	11.52±0.25 ^{Ac}	14.38±0.19 ^{Aa}	14.28±0.60 ^{Aa}	13.62±0.47 ^{ABa}	12.59±0.88 ^{Ab}	12.57±0.16 ^{Bb}	11.63±0.73 ^{Bc}	—
	L^*	37.32±0.46 ^{Ac}	38.44±0.41 ^{Aab}	38.78±0.14 ^{Ba}	38.73±0.07 ^{ABa}	38.57±0.66 ^{BCa}	38.30±0.88 ^{ABab}	38.56±0.72 ^{Aa}	37.57±0.15 ^{ABc}
	a^*	18.97±0.53 ^{Ab}	18.99±0.59 ^{Ab}	19.98±0.99 ^{Aa}	20.47±0.33 ^{Aa}	20.35±0.23 ^{Aa}	20.57±0.40 ^{Aa}	18.82±0.17 ^{Ab}	16.39±0.25 ^{Ac}
冰温+电场	b^*	11.52±0.25 ^{Af}	14.64±0.28 ^{Aa}	14.30±0.22 ^{Aab}	14.04±0.50 ^{ABc}	13.62±0.51 ^{ACd}	13.07±0.11 ^{ABd}	12.40±0.26 ^{Ae}	12.30±0.21 ^{Be}
	L^*	37.32±0.46 ^{Ade}	38.72±0.49 ^{Aab}	38.93±0.42 ^{Ba}	38.71±0.22 ^{ABab}	38.24±0.22 ^{BCab}	38.02±0.50 ^{ABbc}	37.82±0.09 ^{ABcd}	36.76±0.87 ^{Be}
	a^*	18.97±0.53 ^{Aa}	16.36±0.25 ^{BCb}	16.16±0.38 ^{Bb}	16.15±0.22 ^{Cb}	16.21±0.26 ^{Cb}	16.14±0.48 ^{Cb}	16.20±0.16 ^{Cb}	16.03±0.34 ^{Ab}
	b^*	11.52±0.25 ^{Ad}	14.10±0.68 ^{Aa}	13.55±0.06 ^{Bab}	13.64±0.03 ^{ABab}	13.54±0.60 ^{ABa}	13.27±0.62 ^{ABa}	12.89±0.27 ^{ABc}	12.68±0.34 ^{Ac}
冷冻	L^*	37.32±0.46 ^{Ad}	38.91±0.65 ^{ABc}	39.21±0.15 ^{Bab}	40.18±0.62 ^{Aa}	39.53±0.74 ^{Aa}	38.16±0.90 ^{ABcd}	36.09±0.30 ^{Ce}	34.63±0.58 ^{Df}
	a^*	18.97±0.53 ^{Aa}	16.11±0.26 ^{Cb}	15.73±0.23 ^{Bbc}	15.76±0.42 ^{Cbc}	14.92±0.08 ^{Dd}	15.04±0.61 ^{Dcd}	14.55±0.62 ^{Dd}	13.30±0.47 ^{Ce}
	b^*	11.52±0.25 ^{Ad}	13.91±0.87 ^{Aa}	13.67±0.47 ^{ABab}	13.16±0.03 ^{ABab}	13.06±0.60 ^{ABc}	12.97±0.43 ^{ABcd}	12.68±0.21 ^{Ac}	12.52±0.06 ^{ABc}
	L^*	37.32±0.46 ^{Ab}	38.67±0.64 ^{Aa}	38.98±0.38 ^{Ba}	39.12±0.93 ^{ABa}	39.00±0.46 ^{ABa}	38.71±0.11 ^{Aa}	37.08±0.92 ^{Bb}	35.66±0.22 ^{Cc}
微冻+电场	a^*	18.97±0.53 ^{Aa}	16.38±0.14 ^{BCb}	16.11±0.52 ^{Bb}	16.06±0.15 ^{Cb}	15.94±0.17 ^{Cb}	16.00±0.06 ^{Cb}	15.90±0.16 ^{Cb}	14.89±0.35 ^{Bc}
	b^*	11.52±0.25 ^{Ad}	14.18±0.58 ^{Aa}	13.94±0.18 ^{ABa}	13.33±0.26 ^{ABb}	13.17±0.41 ^{ABc}	13.11±0.20 ^{ABbc}	12.92±0.01 ^{ABc}	12.66±0.12 ^{Ac}

注: 同样的处理组在不同的贮藏时间, 不同的小写字母(abcd)表示存在显著性差异 ($P<0.05$); 不同的处理组在同样的贮藏时间, 不同的大写字母(ABCD)表示存在显著性差异 ($P<0.05$), 表2同。

表 2 不同处理对调理牛排质构的影响

Table 2 Effect of different treatments on texture of prepared beef steak

组别	指标	贮藏时间(d)							
		0	1	3	5	7	10	15	20
冷藏	硬度	884.99±10.65 ^{Aa}	781.18±9.10 ^{Ab}	568.42±15.58 ^{Ec}	443.06±7.89 ^{Dd}	—	—	—	—
	弹性	0.968±0.006 ^{Aa}	0.960±0.007 ^{Aab}	0.949±0.015 ^{Bb}	0.921±0.007 ^{Bc}	—	—	—	—
	内聚力	0.778±0.016 ^{Aa}	0.691±0.022 ^{Ab}	0.678±0.025 ^{Abc}	0.660±0.015 ^{Bc}	—	—	—	—
冰温	硬度	884.99±10.65 ^{Aa}	747.80±24.54 ^{Bb}	670.02±30.16 ^{Cc}	667.10±20.92 ^{Bc}	640.42±6.64 ^{Bc}	562.43±18.06 ^{Cd}	502.82±10.49 ^{Ce}	—
	弹性	0.968±0.006 ^{Aa}	0.968±0.006 ^{Aa}	0.965±0.002 ^{Aa}	0.964±0.002 ^{Aa}	0.953±0.002 ^{Bb}	0.951±0.012 ^{BCb}	0.932±0.005 ^{Cc}	—
	内聚力	0.778±0.016 ^{Aa}	0.726±0.049 ^{Ab}	0.677±0.021 ^{Abc}	0.683±0.011 ^{ABbc}	0.683±0.018 ^{ABbc}	0.683±0.018 ^{Ac}	0.670±0.013 ^{Ad}	—
冰温+电场	硬度	884.99±10.65 ^{Aa}	777.71±15.81 ^{Ab}	739.13±4.85 ^{Ac}	686.14±11.53 ^{Bd}	693.64±12.00 ^{Ad}	680.81±9.64 ^{Ad}	590.77±16.89 ^{Ae}	587.83±12.16 ^{Ae}
	弹性	0.968±0.006 ^{Aa}	0.967±0.004 ^{Aab}	0.966±0.001 ^{Aabc}	0.963±0.002 ^{Aabc}	0.962±0.002 ^{Aabc}	0.960±0.001 ^{Abc}	0.959±0.002 ^{Ac}	0.946±0.008 ^{Ad}
	内聚力	0.778±0.016 ^{Aa}	0.737±0.006 ^{Ab}	0.696±0.004 ^{Ac}	0.691±0.006 ^{Ac}	0.689±0.009 ^{Acde}	0.678±0.006 ^{ABde}	0.674±0.007 ^{Ae}	0.622±0.007 ^{Bf}
冷冻	硬度	884.99±10.65 ^{Aa}	787.47±7.83 ^{Ab}	705.38±12.88 ^{Bc}	711.22±5.74 ^{Ac}	678.15±10.57 ^{Ad}	640.57±14.17 ^{Be}	580.42±4.73 ^{ABf}	563.83±9.29 ^{Bf}
	弹性	0.968±0.006 ^{Aa}	0.968±0.002 ^{Aa}	0.967±0.001 ^{Aa}	0.964±0.001 ^{Aab}	0.957±0.006 ^{ABab}	0.952±0.002 ^{ABab}	0.956±0.005 ^{Ab}	0.935±0.016 ^{Ac}
	内聚力	0.778±0.016 ^{Aa}	0.713±0.003 ^{Ab}	0.692±0.004 ^{Ac}	0.687±0.026 ^{Ac}	0.674±0.009 ^{ABcd}	0.671±0.007 ^{ABcd}	0.655±0.003 ^{ABde}	0.641±0.003 ^{Ae}
微冻	硬度	884.99±10.65 ^{Aa}	708.22±10.13 ^{Cb}	616.11±9.43 ^{Dc}	562.72±13.81 ^{Cd}	526.72±13.81 ^{De}	491.58±17.11 ^{Df}	458.86±9.15 ^{Dg}	381.11±10.60 ^{Dh}
	弹性	0.968±0.006 ^{Aa}	0.967±0.002 ^{Aa}	0.965±0.002 ^{Aab}	0.960±0.001 ^{Ab}	0.951±0.001 ^{Bc}	0.943±0.003 ^{Cd}	0.935±0.005 ^{Ce}	0.906±0.005 ^{Bf}
	内聚力	0.778±0.016 ^{Aa}	0.720±0.030 ^{Ab}	0.691±0.001 ^{Ac}	0.680±0.008 ^{ABc}	0.669±0.002 ^{Bcd}	0.649±0.004 ^{Cde}	0.628±0.001 ^{BCe}	0.584±0.008 ^{Df}
微冻+电场	硬度	884.99±10.65 ^{Aa}	747.45±7.28 ^{Bb}	669.69±13.45 ^{Cc}	584.71±12.99 ^{Cd}	567.53±16.04 ^{Cd}	582.27±16.41 ^{Cd}	564.24±14.87 ^{Bd}	492.05±10.61 ^{Ce}
	弹性	0.968±0.006 ^{Aa}	0.968±0.004 ^{Aa}	0.966±0.002 ^{Aa}	0.964±0.003 ^{Aa}	0.956±0.005 ^{Bb}	0.952±0.002 ^{ABCb}	0.948±0.002 ^{Bb}	0.931±0.008 ^{Ac}
	内聚力	0.778±0.016 ^{Aa}	0.720±0.017 ^{Ab}	0.692±0.007 ^{Ac}	0.690±0.007 ^{Ac}	0.672±0.006 ^{ABd}	0.661±0.005 ^{BCde}	0.646±0.003 ^{ABe}	0.608±0.002 ^{Cf}

结构^[40]。因此,空间电场的应用不仅改善了调理牛排的质地特性,而且保持了牛肉肌肉更好的嫩度。

3 结论

在冰温贮藏过程中,电场可以抑制调理牛排贮藏过程中微生物的生长从而延长货架期,同时提高了肉色稳定性;在微冻过程中,电场可以抑制冰生长/重结晶,并降低汁液损失和改善质构特性,综上所述,在调理牛排的低温贮藏过程中应用空间电场可以有效地减缓冷冻食品的品质劣变。此外,低温贮藏过程中,空间电场如何影响肌肉蛋白质的理化特性和空间构象需进一步研究。

© The Author(s) 2025. 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] LI Dongmei, ZHU Zhiwei, SUN Dawen. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 46–55.
- [2] XIE Yong, ZHOU Kai, CHEN Bo, 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.
- [3] SUN Shuguo, ZHAO Juanhong, LUO Zhang, et al. Systematic evaluation of the physicochemical properties and the volatile flavors of yak meat during chilled and controlled freezing-point storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 57: 1351–1361.
- [4] XU Yuqian, WEN Xiangyuan, ZHANG Dequan, et al. Changes in the freshness and bacterial community of fresh pork in controlled freezing point storage assisted by different electrostatic field usage frequencies[J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 17(4): 939–954.

- [5] MAGNUSSEN OLA M, HAUGLAND A, TORSTVEIT HEMMINGSEN ANNE K, et al. Advances in superchilling of food—process characteristics and product quality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2008, 19(8): 418–424.

- [6] 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.

- [7] ELIASSON S, ARASON S, MARGEIRSSON B, et al. The effects of superchilling on shelf-life and quality indicators of whole Atlantic cod and fillets[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 100: 426–434.

- [8] LIU Dekun, XU Congcong, GUO Chunxiao, et al. Sub-zero temperature preservation of fruits and vegetables: A review[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 275: 109881.

- [9] TAO Yu, GUO Yiping, LI Jingwei, et al. Effect of temperature fluctuation during superchilling storage on the microstructure and quality of raw pork[J]. Meat Science, 2023, 198: 109096.

- [10] BAHUAUD D, MØRKØRE T, LANGSRUD Ø, et al. Effects of -1.5 degrees C super-chilling on quality of atlantic salmon (*Salmo salar*) pre-rigor fillets: Cathepsin activity, muscle histology, texture and liquid leakage[J]. Food Chemistry, 2008, 111(2): 329–339.

- [11] 许昌. 新疆油杏实生变异种生长发育特征及其果实低压静电场近冰温保鲜研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022. [XU Chang. Growth and development characteristics of xinjiang apricot seed variants and their fruits preservation at near ice temperature under low voltage electrostatic field[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.]

- [12] 高飞, 杨水兵, 夏宇, 等. 低压静电场对红虾微冻贮藏过程中品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(10): 21–28. [GAO Fei, YANG Shuibing, XIA Yu, et al. Effect of low-voltage electrostatic field on the quality of red shrimp during micro-freezing storage[J]. Food Research and Development, 2024, 45(10): 21–28.]

- [13] 余铭, 许丽娟, 陈海强, 等. 对虾低频电场冰温贮藏期间品质的变化[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 122–127. [YU Ming, XU

- Lijuan, CHEN Haiqiang, et al. Quality change of prawn during low-frequency electric field ice temperature storage[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(3): 122–127.]
- [14] WANG Ying, WANG Xiaofan, WANG Zhouping, et al. Effects of different freezing methods on the quality of conditioned beef steaks during storage[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(7): 144–196.
- [15] LI Dapeng, JIA Shiliang, ZHANG Longteng, et al. Post-thawing quality changes of common carp (*Cyprinus carpio*) cubes treated by high voltage electrostatic field (HVEF) during chilled storage[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 42: 25–32.
- [16] 董福凯, 查恩辉, 张振, 等. 不同包装方式调理牛排在冰温贮藏过程中品质变化特点[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(8): 247–253. [DONG Fukai, CHA Enhui, ZHANG Zhen, et al. Changes characteristics in the quality of conditioning steak in different packaging methods during ice-temperature storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(8): 247–253.]
- [17] XIE Yong, ZHOU Kai, CHEN Bo, et al. Applying low voltage electrostatic field in the freezing process of beef steak reduced the loss of juiciness and textural properties[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 68: 102600.
- [18] MARTINO M N, OTERO L, SANZ P, et al. Size and location of ice crystal in pork frozen by high-pressure-assisted freezing as compared to classical methods[J]. *Meat Science*, 1998, 50(3): 303–313.
- [19] HUANG Han, SUN Weiqing, XIONG Guangquan, et al. Effects of HVEF treatment on microbial communities and physico-chemical properties of catfish fillets during chilled storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 131: 109667.
- [20] 国家标准化管理委员会, 国家质量监督检验检疫总局. 鲜、冻禽产品: GB 16869—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [S standardization Administration of PRC, PRC State Administration of Quality Supervision and Quarantine. Fresh and frozen poultry products: GB 16869-2005[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.]
- [21] NICOLAI B M, VAN IMPE J F. Predictive food microbiology: A probabilistic approach[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1996, 42: 287–292.
- [22] ZHANG Jianyou, FEI Lifeng, CUI Pengbo, et al. Effect of low voltage electrostatic field combined with partial freezing on the quality and microbial community of large yellow croaker[J]. *Food Research International*, 2023, 169: 112933.
- [23] ZHANG Yihan, LIANG Yun, PAN Di, et al. Enhancing escherichia coli inactivation: Synergistic mechanism of ultraviolet light and high-voltage electric field[J]. *Foods*, 2024, 13(9): 109879.
- [24] MILAGROS M C G, CECYLYANA L C, ERICK S, et al. Effects of ultimate pH on quality of aged *Longissimus dorsi* muscle of Zebu Nellore (*Bos indicus*) during long-term frozen storage[J]. *Food Research International*, 2023, 174: 113675.
- [25] KO Wenqing, YANG Shangyan, CHANG Chaokai, et al. Effects of adjustable parallel high voltage electrostatic field on the freshness of tilapia (*Oreochromis niloticus*) during refrigeration[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 66: 151–157.
- [26] HU Rui, ZHANG Min, FANG Zhaoxiang. A novel synergistic freezing assisted by infrared pre-dehydration combined with magnetic field: Effect on freezing efficiency and thawed product qualities of beef[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 15: 104182.
- [27] SUWANDY V, CARNE A, VAN DE VEN R, et al. Effect of pulsed electric field treatment on the eating and keeping qualities of cold-boned beef loins: Impact of initial pH and fibre orientation[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8: 1355–1365.
- [28] CHEN Xue, DONG Pengcheng, LI Ke, et al. Effect of the combination of superchilling and super-chilled storage on shelf-life and bacterial community dynamics of beef during long-term storage[J]. *Meat Science*, 2022, 192: 108910.
- [29] 卢晓, 董鹏程, 张一敏, 等. 微冻贮藏对牛肉保水性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(7): 253–259. [LU Xiao, DONG Pengcheng, ZHANG Yimin, et al. Effect of superchilled storage on water-holding capacity of beef muscle[J]. *Food Science*, 2021, 42(7): 253–259.]
- [30] XU Yuqian, LENG Dongmei, LI Xin, et al. Effects of different electrostatic field intensities assisted controlled freezing point storage on water holding capacity of fresh meat during the early postmortem period[J]. *Food Chemistry*, 2023, 439: 138096.
- [31] QIAN Yunfang, XIE Jing, YANG Shengping, et al. Inhibitory effect of a quercetin-based soaking formulation and modified-atmospheric packaging (MAP) on muscle degradation of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(2): 1339–1346.
- [32] SUN Kangting, PAN Chuang, CHEN Shengjun, et al. Effect of water change on quality deterioration of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during partial freezing storage[J]. *Food Chemistry*, 2023, 416: 135836.
- [33] ALIZADEH E, CHAPLEAU N, DE LAMBALLERIE M, et al. Effect of different freezing processes on the microstructure of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2007, 8(4): 493–499.
- [34] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, LE-BAIL A. Effect of freezing under electrostatic field on the quality of lamb meat[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 37: 68–73.
- [35] MANCINI R A, HUNT M C. Current research in meat color[J]. *Meat Science*, 2005, 71(1): 100–121.
- [36] LI Xin, ZHANG Yan, LI Zheng, et al. The effect of temperature in the range of $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ on lamb meat color stability[J]. *Meat Science*, 2017, 134: 28–33.
- [37] 李文, 初振栋, 罗生金. 影响肉牛肉质因素的研究进展[J]. *中国草食动物科*, 2024: 1–9. [LI Wen, CHU Zhendong, LUO Shengjin, et al. Research progress on factors affecting beef cattle meat quality[J]. *China Herbivore Science*, 2024: 1–9.]
- [38] LAKSHMANAN R, PIGGOTT JOHN R, PATERSON A. Potential applications of high pressure for improvement in salmon quality[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2003, 14(9): 354–363.
- [39] 胡斐斐, 钱书意, 李侠, 等. 低压静电场辅助冷藏对牛肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 132–138. [HU Feifei, QIAN Shuyi, LI Xia, et al. Effect of low voltage electrostatic field-assisted chilling storage on quality of beef[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 132–138.]
- [40] XIE Yong, ZHOU Kai, CHEN Bo, et al. Synergism effect of low voltage electrostatic field and antifreeze agents on enhancing the qualities of frozen beef steak: Perspectives on water migration and protein aggregation[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023, 84: 103263.