

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80848

低压静电场辅助冻藏对羊肝品质的影响

白嘉鑫^{1,2} 董同力嘎^{1,2} 格日勒图^{1,2} 李少博³ 云雪艳^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 畜产副产物综合利用内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010018;

3. 中国农业与农村部食品科学与技术研究所农产品加工重点实验室, 北京 100193)

摘要: [目的] 探究低压静电场 (LVEF) 对羊肝冻藏品质的影响。[方法] 以新鲜羊肝为原料, 熟制后在不同温度下 (−20, −40 °C) LVEF 辅助冻藏, 定期取样分析羊肝色泽、解冻损失率、pH 值、硬度、咀嚼性、菌落总数 (TVC)、挥发性盐基总氮 (TVB-N)、维生素 A 含量、微观结构、水分分布等指标得出贮藏期间羊肝品质的变化。[结果] 在 30 d 贮藏期内, LVEF 辅助 −40 °C 组羊肝贮藏末期 TVC、TVB-N 含量、pH 值、维生素 A 含量分别为 3.38 lg(CFU/g)、13.37 mg/100 g、6.06、8 016 μg/100 g, 解冻损失率、色泽、硬度、咀嚼性等指标均高于对照组, 贮藏品质显著好于对照组 ($P < 0.05$)。LVEF 处理组的扫描电镜图显示结构排列整齐紧密, 损伤程度小。T₂ 弛豫时间表明 LVEF 有效阻止了不易流动水向自由水转变, 提高了羊肝保水性。[结论] LVEF 可以缓解羊肝贮藏品质的变化, 减少冷冻后冰晶对内部结构的破坏。

关键词: 低压静电场; 羊肝; 冷冻; 贮藏品质; 冰晶生长

Effect of low-voltage electrostatic field-assisted freezing on sheep liver quality

BAI Jiaxin^{1,2} TUNGALAG Dong^{1,2} GERELT Borjigin^{1,2} LI Shaobo³ YUN Xueyan^{1,2}

(1. Faculty of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Engineering Research Center of Comprehensive Utilization of Livestock

By-products of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

3. Key Laboratory of Agro-Products Processing, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of a low-voltage electrostatic field (LVEF) on the quality of frozen sheep liver. [Methods] Fresh sheep liver was used as raw material, cooked, and then frozen under different temperatures (−20, −40 °C) with LVEF assistance. Periodic sampling was conducted to analyze changes in color, thawing loss rate, pH value, hardness, chewiness, total viable count (TVC), total volatile basic nitrogen (TVB-N), vitamin A content, microstructure, and moisture distribution during storage. [Results] After 30 days of storage, the TVC, TVB-N content, pH value, and vitamin A content in the LVEF-assisted −40 °C group were 3.38 lg(CFU/g), 13.37 mg/100 g, 6.06, and 8 016 μg/100 g, respectively. The thawing loss rate, color, hardness, and chewiness in this group were higher than those in the control group, indicating significantly better storage quality ($P < 0.05$). Scanning electron microscopy images showed that the LVEF-treated samples exhibited a neatly and tightly arranged structure with minimal damage. T₂ relaxation time analysis demonstrated that LVEF effectively prevented the transition of immobilized water into free water, thereby improving the water retention capacity of sheep liver.

基金项目: 一流学科科研专项项目 (编号: YLXKZX-NND-017); 国家现代农业产业技术体系资助 (编号: CARS-38); 内蒙古自治区高等学校国际科技合作项目 (编号: GHXM-003); 自治区青年科技人才发展项目 (创新团队) (编号: NMGIRT2310)

通信作者: 云雪艳 (1990—), 女, 内蒙古农业大学副教授, 博士。E-mail: yun_imau@163.com

收稿日期: 2024-08-21 **改回日期:** 2025-02-20

引用格式: 白嘉鑫, 董同力嘎, 格日勒图, 等. 低压静电场辅助冻藏对羊肝品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 114-122.

Citation: BAI Jiaxin, TUNGALAG Dong, GERELT Borjigin, et al. Effect of low-voltage electrostatic field-assisted freezing on sheep liver quality[J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 114-122.

[Conclusion] LVEF can mitigate changes in the storage quality of sheep liver and reduce ice crystal damage to its internal structure after freezing.

Keywords: low-voltage electrostatic field; sheep liver; frozen; storage quality; ice crystal growth

羊肝被誉为食品中“维生素A之王”,对夜盲症等多种眼疾有预防和治疗作用^[1]。其含铁丰富,还具有益血、补铁的功效^[2]。在中国,羊肝产量庞大,各种速食羊肝产品遍布各大超市,一般通过冷冻贮藏方式延长其保质期,但加工羊肝制品在传统的慢速冻结中会形成大小不一、形状杂乱的冰晶,刺破细胞^[3],破坏羊肝内部结构。解冻时造成羊肝营养流失、蛋白质变性、颜色劣变和发酥变渣等问题^[4]。

近年来,很多研究者将物理技术用于食品辅助冷冻贮藏保鲜^[5]。其中低压静电场(LVEF)通过产生特殊的静电波^[6],作用于细胞中的水分子,在冻藏过程中可以与水分子发生共振,钝化冰晶形状,抑制微生物生长,达到保鲜作用^[7]。此外,牛肉冷冻后造成肌原纤维蛋白变性显著影响其保水能力,导致解冻后出现汁液流失,色泽劣变等现象^[8]。传统冷冻方式也会造成肉制品肌原纤维损伤,解冻后水分流失,嫩度下降^[9]。LVEF辅助冻藏牛肉可提高其持水性,并且降低肌原纤维蛋白变性^[10],还可减小牛肉冻藏期间冰晶的体积,缓解冰晶对内部结构的破坏^[11]; LVEF辅助冷藏鳕鱼片可抑制挥发性盐基总氮含量和降低菌落总数^[12]。但关于LVEF辅助熟制羊肝的贮藏特性研究鲜有报道。

研究拟以生羊肝为试验材料,熟制后置于低压静电场和非静电场的 $-20, -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻藏,在冻藏0, 15, 30 d时取样分析其色泽、pH、解冻损失、菌落总数(TVC)、挥发性盐基总氮(TVB-N)、维生素A含量、硬度、咀嚼性、微观结构、水分分布等指标,确定LVEF辅助冻藏羊肝的最佳工艺,为其在羊肝等副产物冻藏中的应用提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与仪器

鲜羊肝:呼和浩特市东瓦窑农贸批发市场;

甲醇:色谱级,德国Merck公司;

平板计数琼脂培养基(PCA):青岛海博生物技术有限公司;

氢氧化钾、氯化钾、氧化镁、硼酸、甲基红指示剂、溴甲酚绿指示剂:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

无水硫酸钠、L-抗坏血酸:分析纯,麦克林化学试剂有限公司;

磷酸缓冲液、电子显微镜固定液(2.5%戊二醛pH 7.2~7.1):麦克林化学试剂有限公司;

无水乙醇、石油醚:分析纯,天津风船化学试剂科技

有限公司;

色差仪:CR-20型,日本Konica Minolta Holdings公司;

pH计:PHS-3C型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

质构仪:TA-XT2型,英国SMS公司;

半自动凯氏定氮仪:K9840型,海能科技有限公司;

高压灭菌锅:TOMYSX-500型,北京仪和方圆科技有限公司;

高效液相色谱仪:Primaide型,日本日立公司;

旋转蒸发器:RE52-86A型,上海亚荣生化仪器厂;

电子扫描显微镜:TM4000型,南通欣跃实验仪器设备有限公司;

核磁共振成像分析仪:NMI20型,上海纽迈电子科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 羊肝制作工艺流程

羊肝预处理→清洗→切割→浸泡→煮制→称重→真空包装→水检→成品备用

原料羊肝预处理:将鲜羊肝表面及内部多余的膜和血筋处理干净,切成大块,用清水反复清洗3次以上。

浸泡:清洗后将羊肝在水中浸泡2~5 h去除血水,期间多次换水并用手不断将血水挤出。

煮制:以 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速度进行煮制,当其中心温度达到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时迅速取出后放入 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中保温20 min。

真空包装:将煮制好的羊肝冷却后,切成大小相同的块状($3\text{ cm}\times 3\text{ cm}\times 2\text{ cm}$),用PA/PE复合膜($11\text{ cm}\times 8\text{ cm}$)真空包装。

水检:检验真空包装是否漏气。

1.2.2 样品贮藏及分组 将真空包装的成品随机分为4组,分别放置于 $-20, -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻藏,并标记为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}+$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}+$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}+$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}+$ 为LVEF处理组, $-20, -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为直接冻藏组。分别在冻藏0, 15, 30 d时取样,置于室温下完全解冻后测试各项指标。静电场装置如图1所示,由电场发生装置和放电板组成,平行放置在冰箱内产生低压静电场。静电场装置放置72 h,待样品完全冷冻后将其取出。

1.2.3 解冻损失率测定 参照惠庆玲等^[13]的方法。

1.2.4 色泽测定 用色差仪测定样品表面颜色特性。

1.2.5 pH值测定 参照GB 5009.237—2016。

1.2.6 TVB-N含量测定 参照GB 5009.228—2016。

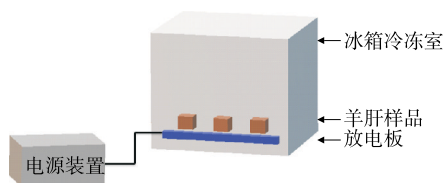


图 1 低压静电场处理试验装置

Figure 1 Experimental apparatus for low-voltage electrostatic field treatment

1.2.7 菌落总数测定 参照 GB 4789.2—2022。

1.2.8 维生素 A 含量测定 参照 GB 5009.82—2016。

1.2.9 硬度、咀嚼性的测定 将羊肝切成 1 cm×1 cm×1 cm 的块状,放置在压缩盘中心,每组 3 个样。质构仪测定参数:选用 TA 18 探头,测试速度 1 mm/s,压缩比 50%。

1.2.10 扫描电镜观察 参照景安琪等^[14]的方法。

1.2.11 水分分布测定 取不同冷冻处理组解冻后的羊肝,将其切成大小相同的块状(1 cm×1 cm×1 cm),用保鲜膜包裹,减少水分流失,然后置于核磁共振管底部,采用低场核磁共振技术(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)对不同冻结方式羊肝的水分分布进行检测。采用 CPMG(carr-purcell-meiboom-gill)序列测定样品横向弛豫时间 T_2 ,每个处理组样品重复测定 3 次。主要参数为:核磁管腔体温度 30 °C,采样频率 100 kHz,主频 20 MHz,回波个数 5 000,频率偏置 796 572 Hz,90°脉冲 7.0 μs,180°脉冲 13.52 μs,累加次数 8,模拟增益 20。对扫描后的曲线进行反演,得到样品的 T_2 分布情况。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)分析:回波时间 18 ms,模拟增益 6,数字增益 3,重复采样次数 3。

1.3 数据处理

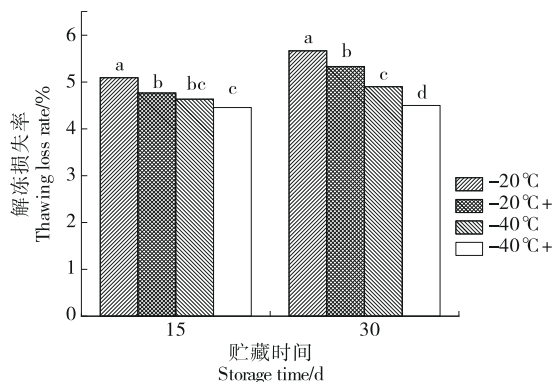
每组试验重复 3 次,结果以平均值±标准差表示。采用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件进行数据统计分析,采用最小显著性差异(least significance difference, LSD)法进行显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著,采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 羊肝解冻损失率的变化

羊肝解冻后大量汁液流失,会造成解冻损失,伴随大量营养成分流失和质构特性下降^[15]。如图 2 所示,随贮藏时间的延长,各组羊肝解冻损失率逐渐增加。贮藏第 30 天,所有 LVEF 辅助冻藏组解冻损失率显著低于直接冻藏组($P<0.05$),主要是因为直接冻藏组羊肝在冻结过程中内部形成大的冰晶,破坏细胞结构,导致细胞膜的破裂,在解冻时汁液流失增多。而 LVEF 辅助冻藏可以钝化冰晶的形状,减小冰晶的尺寸,缓解冰晶对细胞结构造成

的损伤,提高羊肝的保水性,有效缓解解冻过程中的汁液流失现象。Wu 等^[16]探究 LVEF 辅助冻藏猪肉时也发现,LVEF 辅助冻藏组与 CK 组相比解冻损失率显著降低。但在 -40 °C 冷冻时,LVEF 辅助冻藏和直接冻藏组羊肝持水力均显著高于 -20 °C 冷冻组($P<0.05$)。这可能是因为 -20 °C 时,冷冻速度较慢,形成的冰晶体积大且尖锐,对羊肝组织的破坏程度更大,解冻后汁液流失更多。



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 2 贮藏期间羊肝解冻损失率的变化

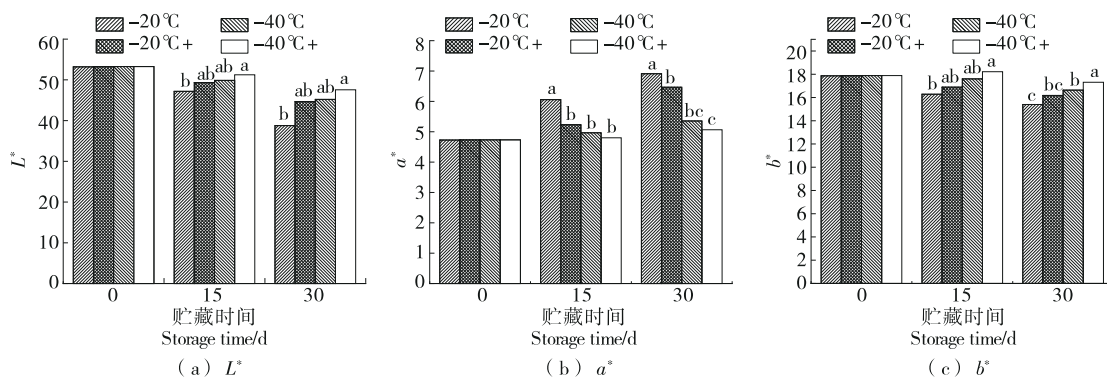
Figure 2 Changes in the thawing loss rate of sheep liver during storage

2.2 羊肝色泽的变化

如图 3 所示,随贮藏时间的延长,所有组羊肝 L^* 均呈下降趋势、 a^* 值均呈上升趋势、 b^* 值均呈下降趋势。 L^* 下降可能是由于羊肝在解冻后失水严重使其失去原有光泽^[17]。 a^* 值上升可能是因为羊肝在解冻时血红蛋白与氧气发生反应进一步被氧化,使其颜色更暗^[18]。 b^* 值下降可能与羊肝脂肪氧化有关,使其表面呈现出黄褐色^[19]。贮藏期内同一冷冻温度下,LVEF 辅助冻藏组, L^* 和 b^* 略高于直接冻藏组、 a^* 略低于直接冻藏组。主要是因为 LVEF 可以使冷冻过程中形成更小、更均匀的冰晶,有效减少解冻后的水分流失^[20]。从而可以有效维持羊肝色泽的稳定。在 -40 °C 冷冻时,LVEF 辅助冻藏和直接冻藏组羊肝贮藏效果均优于 -20 °C 冷冻组,这可能是一 -20 °C 下冷冻速度慢,形成的冰晶无规则且尖锐,使羊肝结构松散解冻后失水严重,导致色泽出现劣变。

2.3 羊肝 pH 值的变化

如图 4 所示,各组 pH 值随贮藏时间延长均呈上升趋势,但 LVEF 辅助冻藏组贮藏期内 pH 和 pH 上升速度显著低于直接冻藏组($P<0.05$)。因为 LVEF 可以改变细胞膜跨膜电位差来降低微生物以及水解酶的活性,减少蛋白质分解为氨类等碱性物质^[21],减缓贮藏过程中 pH 的升高。贮藏第 30 天,-40 °C 直接冻藏组羊肝 pH 值显著低于

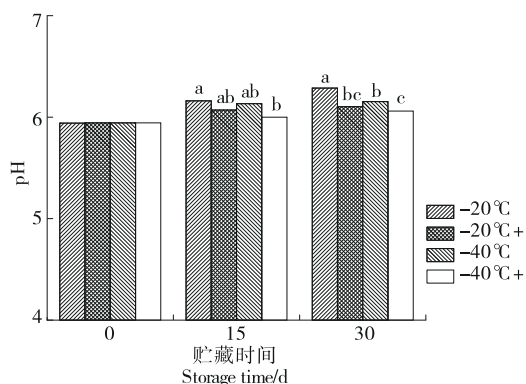


小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图3 贮藏期间羊肝色泽的变化

Figure 3 Changes in the color of sheep liver during storage

-20 °C直接冻藏组($P < 0.05$),表明-40 °C下冷冻效果更好。这可能是一40 °C下冻结速率快、冻结温度低可有效抑制微生物的生长,降低蛋白质的分解^[22]。柳银强等^[23]在探究不同冷冻温度对羊肉品质影响时也发现,贮藏温度越低,pH值上升越慢。综上,LVEF辅助冻藏可以有效缓解羊肝贮藏期间pH的上升速度。



小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

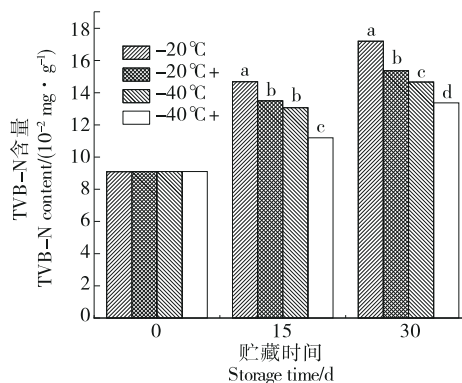
图4 贮藏期间羊肝pH的变化

Figure 4 Changes in liver pH during storage

2.4 羊肝 TVB-N 的变化

GB 5009.288—2016规定:TVB-N值超过20 mg/100 g时即为腐败。如图5所示,各处理组TVB-N含量随贮藏时间延长呈增长趋势。主要原因是微生物在贮藏过程中分解蛋白质,产生氨类等碱性物质,导致其含量升高^[24]。贮藏第30天,-40 °C所有冻藏组的TVB-N含量显著低于-20 °C冻藏组($P < 0.05$)。表明更低的温度可以缓解TVB-N的积累,对羊肝贮藏效果更好。但同一冻藏温度下,LVEF辅助冻藏组TVB-N含量显著低于直接冻藏组。这是因为LVEF具有抑制微生物活性的作用^[25],进而延缓TVB-N积累^[26]。Hsieh等^[27]在研究LVEF辅助冻藏对罗

非鱼品质的影响时也发现,LVEF处理可以降低TVB-N的积累。以上结果表明,LVEF辅助冻藏羊肝,可以有效缓解TVB-N的积累速度。



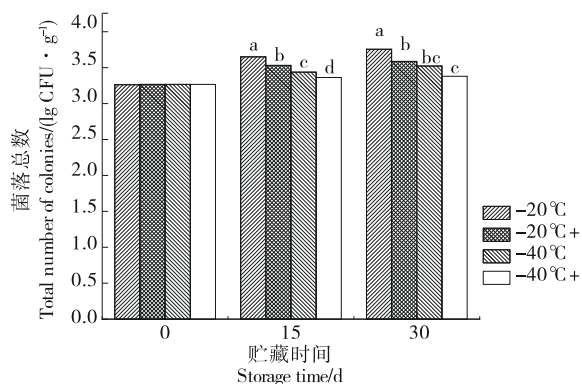
小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图5 贮藏期间羊肝TVB-N的变化

Figure 5 Changes in TVB-N in sheep liver during storage

2.5 羊肝菌落总数的变化

GB 2707—2016规定:肉品菌落总数达到6 lg(CFU/g)以上视为变质。如图6所示,羊肝的初始菌落总数为3.27 lg(CFU/g),各组菌落总数均呈上升趋势,但30 d内均<6 lg(CFU/g)。贮藏第30天,-20 °C辅助冻藏组菌落总数为3.59 lg(CFU/g),显著低于直接冻藏组的($P < 0.05$),此结果也与TVB-N的趋势一致。主要是因为LVEF可以破坏微生物的细胞膜,使细胞因膜结构紊乱、通透性发生改变而死亡^[28]。-40 °C下所有冻藏组的菌落总数均低于-20 °C组,这是因为羊肝在-40 °C下快速冷冻,可以在短时间内将羊肝温度降低到冰点以下,从而有效抑制微生物的生长和繁殖。田浩杨^[29]的研究也表明,更低的温度环境可以有效减少微生物的生长和繁殖速率。



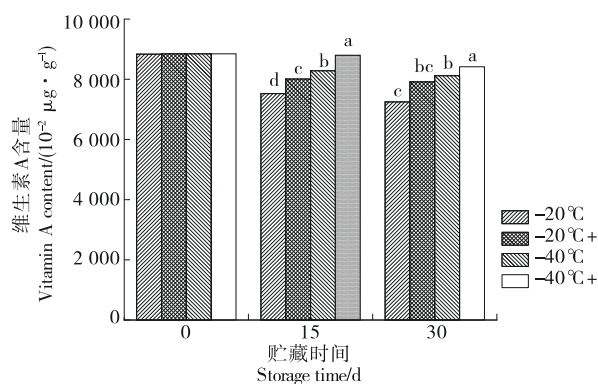
小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 6 贮藏期间羊肝菌落总数的变化

Figure 6 Changes in the total number of colonies in sheep liver during storage

2.6 羊肝维生素 A 含量的变化

维生素 A 是羊肝中主要微量营养素,对维持视力等方面起着重要作用^[30]。图 7 为羊肝贮藏期间维生素 A 含量变化情况。维生素 A 初始含量为 8 846 $\mu\text{g}/100\text{g}$,贮藏第 30 天,-20 $^{\circ}\text{C}$ 直接冻藏组与 LVEF 辅助冻藏组维生素 A 含量分别为 7 247, 7 917 $\mu\text{g}/100\text{g}$; -40 $^{\circ}\text{C}$ 直接冻藏组与 LVEF 辅助冻藏组维生素 A 含量分别为 8 119, 8 416 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 。所有 LVEF 辅助冻藏组维生素 A 含量显著高于直接冻藏组 ($P < 0.05$), 主要是因为贮藏过程中冰晶对羊肝内部结构造成不可逆的损伤,在解冻的过程中造成大量汁液流失,使部分维生素 A 随之流失。而 LVEF 辅助冻藏时可以修饰冰晶的形状,缓解冰晶对羊肝结构造成的损伤,减少解冻后汁液流失现象,进而有效保留羊肝中的营养成分。同时,-40 $^{\circ}\text{C}$ 所有冻藏组维生素 A 含量均高于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 下冻藏组,主要还是因为 -40 $^{\circ}\text{C}$ 下冻藏形成更小、更均匀的冰晶,解冻损失少,营养成分有



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

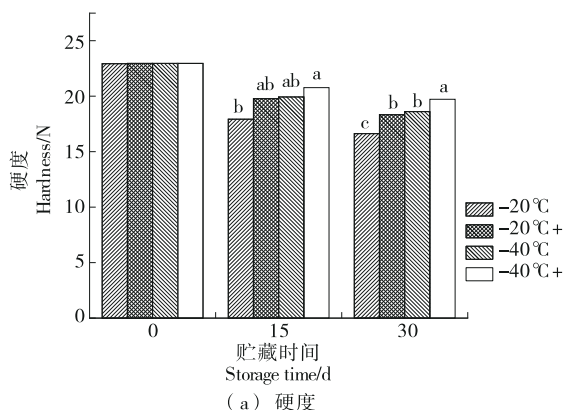
图 7 贮藏期间羊肝维生素 A 含量的变化

Figure 7 Changes in vitamin A content in sheep liver during storage

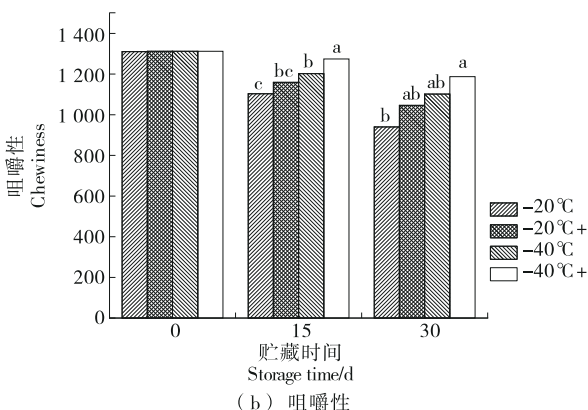
效保留。因此,通过 LVEF 辅助冻藏羊肝,可以有效缓解维生素 A 的流失率,保持羊肝中的维生素 A 含量。

2.7 羊肝硬度、咀嚼性的变化

由图 8 可知,贮藏第 30 天,所有 LVEF 辅助冻藏组硬度、咀嚼性均高于直接冻藏组,主要原因是直接冷冻过程中生成的大冰晶刺破细胞,使内部结构造成不可恢复的损伤,导致解冻后细胞间隙扩大、结构松散,从而影响羊肝的嫩度。此外,冷冻还会使蛋白质结构造成机械损伤,随着冻藏时间的延长,蛋白质网络结构被破坏,最终导致硬度、咀嚼性明显降低^[31]。而 LVEF 处理产生的静电波可以与羊肝中水分子发生共振,改变冷冻过程中冰晶的大小及形状,使其更加圆润,有效减缓冰晶对细胞的损伤^[32]。谢勇^[33]在用 LVEF 辅助冻藏牛排时同样也发现 LVEF 可以显著提高其硬度、弹性以及咀嚼性。-40 $^{\circ}\text{C}$ 下各组硬度、咀嚼性均略优于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 下的,表明 -40 $^{\circ}\text{C}$ 下的贮藏效果更好。综上,LVEF 可以有效改善羊肝贮藏期间



(a) 硬度



(b) 咀嚼性

小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 8 贮藏期间羊肝硬度、咀嚼性的变化

Figure 8 Changes in liver hardness and chewiness during storage

的嫩度。

2.8 羊肝扫描电镜观察

如图9所示,初始羊肝肝小叶大小均匀一致,排列紧密,整体呈现出有序的结构。随着贮藏时间的延长,各处理组羊肝呈现越来越松散的趋势。其中 -20°C 直接冻藏组内部结构受损严重,肝小叶之间的间隙变大且发生断裂。而LVEF辅助 -20°C 冻藏组,肝小叶排列相对紧凑,内部结构受损程度较小。Xie等^[34]通过LVEF辅助

冻藏对牛肉贮藏期间微观结构观察时同样发现,直接冻藏会使内部结构破坏严重,但是LVEF处理可以有效缓解这一现象。 -40°C 下直接冻藏组与LVEF辅助冻藏组差异不显著,但均优于 -20°C 冷冻组,值得注意的是 -40°C 下LVEF辅助冻藏组肝小叶排列更加整齐平缓。综上,LVEF辅助结合更低温度冻藏可以使冷冻过程中形成的冰晶更小、更均匀,减少大冰晶形成对内部结构的破坏。

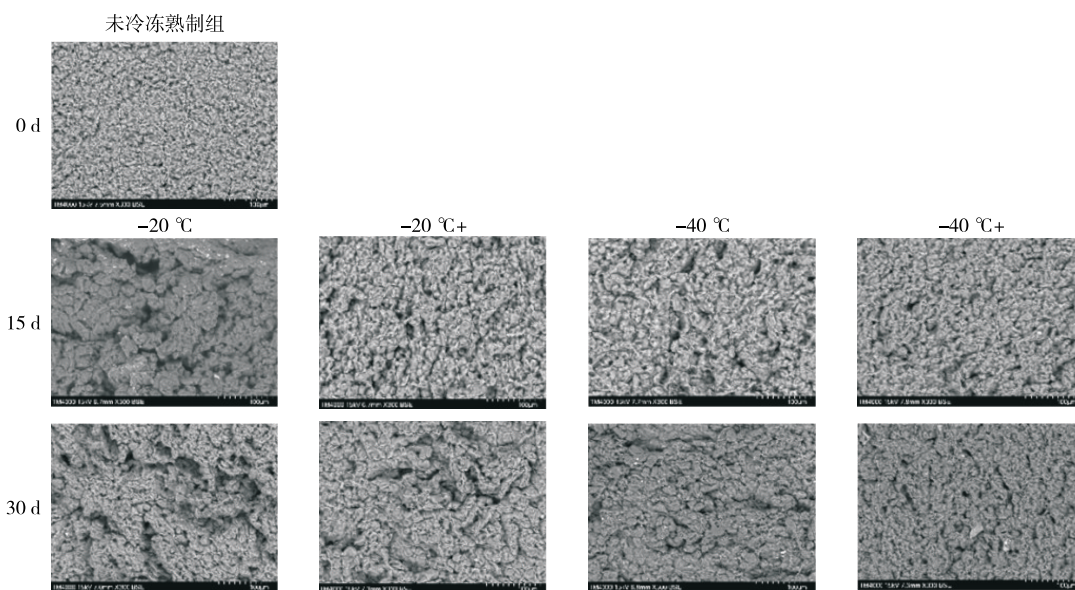


图9 贮藏期间羊肝扫描电镜观察

Figure 9 Scanning electron microscopy of sheep liver during storage (300×)

2.9 羊肝水分分布

图10展示了羊肝贮藏第30天的弛豫时间 T_2 ,从左至右3个峰依次代表结合水(T_{21} : 0~1 ms)、不易流动水(T_{22} : 1~100 ms)、自由水(T_{23} : 100~1 000 ms)。由图10可以看出,各处理组 T_{22} 峰面积均最大,说明羊肝中主要存在的水分为不易流动水。相比于直接冷冻贮藏,LVEF处理组不易流动水所占比例较高。说明LVEF处理组羊肝的水分流动性更低,持水力更好。弛豫时间越短表明持水力越好^[35],LVEF辅助 -20°C 处理组的弛豫时间小于直接冻藏组,说明直接冻藏组羊肝在贮藏过程中,部分水分形成大而尖锐的冰晶,这些冰晶可能会对蛋白质结构造成破坏,进而影响蛋白质与水分子之间的相互作用,降低蛋白质的保水能力和结合能力^[36]。 -20°C 、 -40°C 直接冻藏组自由水含量比LVEF处理组显著高($P<0.05$),也说明LVEF处理可以减少不易流动水向自由水转变^[37]。Jia等^[38]也发现,LVEF可以增强肉样品中不易流动水比例,降低自由水的比例。综上,LVEF可以抑制冰晶的生长,降低蛋白的变性程度,提高羊肝在贮

藏过程中的保水性。

H质子密度成像图可以直观地反映羊肝样品中的水分分布情况。颜色越红,表明羊肝中水分含量越高,蓝色越多,则表明水分含量越低。如图11所示,随贮藏时间的

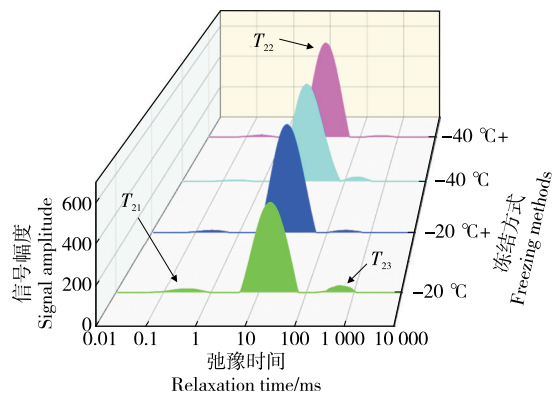


图10 不同处理方式对贮藏期间羊肝弛豫时间 T_2 影响
Figure 10 Effect of different treatments on liver relaxation time T_2 during storage

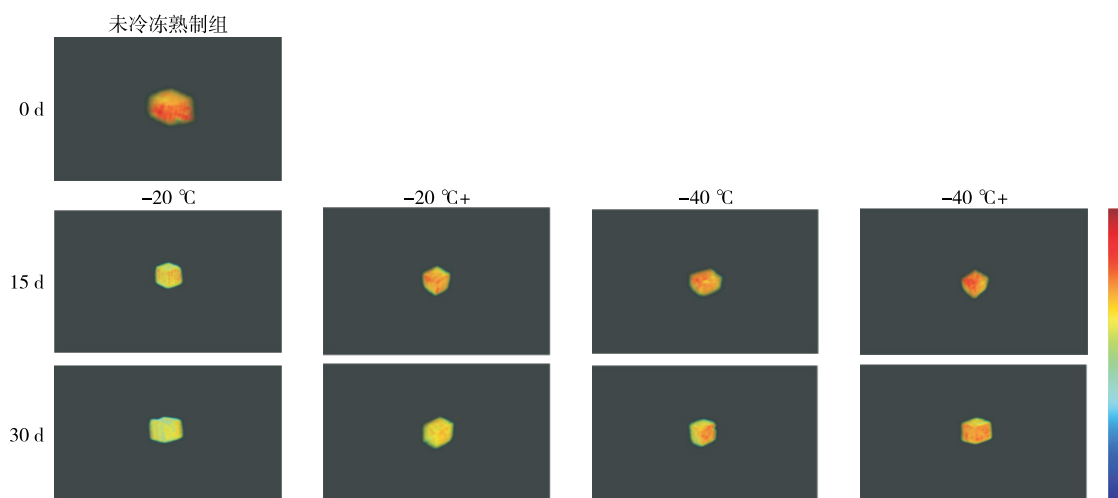


图 11 贮藏期间羊肝 H 质子密度成像图

Figure 11 Imaging of H proton density in sheep liver during storage

延长各处理组中红色区域逐渐减少,也证明了羊肝解冻后导致一部分水分流失。第 0 天羊肝样品中水分含量较高,样品图呈现亮红色,色泽分布比较均匀。贮藏第 15 天,-20 °C 直接冻藏组呈现大面积黄绿色,表明羊肝在贮藏期间水分流失严重。而 LVEF 辅助冻藏组红色区域更多,也证明了 LVEF 可以有效缓解贮藏过程中水分的流失^[39]。贮藏第 30 天,同一冻结温度下,直接冻藏组的图像中,颜色绿色居多红色较少,LVEF 辅助冻藏组的颜色红色区域明显更多。由此可见,LVEF 辅助冻藏可以较好地保留羊肝中的水分。

3 结论

该研究将低压静电场技术应用于熟制羊肝的贮藏中,分别在 -20,-40 °C 下施加低压静电场。结果表明,低压静电场辅助冻藏可以有效控制羊肝贮藏期间微生物的生长、TVB-N 积累和 pH 值升高,降低了解冻后汁液流失现象,改善了羊肝冻结后的品质,使其维生素 A 含量得到有效保留且硬度咀嚼性更好。同时,低压静电场处理可以降低冰晶对内部结构的损伤,减少不易流动水向自由水的转变,增强羊肝的保水性。

参考文献

[1] 张晓燕, 吴子健, 陆健康, 等. 羊肝蛋白稳定性及 NaCl 质量分数对其功能特性的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 1-6.
ZHANG X Y, WU Z J, LU J K, et al. Stability of sheep liver protein and effects of NaCl concentration on its functional characteristics[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3): 1-6.

[2] FRØSLIE A, ULVUND M J, MNINA J N, et al. Trace elements in grass, cattle liver and sheep liver from districts surrounding Karatina Kenya II: copper, molybdenum, zinc and sulphur[J].

Nordisk Veterinaermedicin, 1983, 35(5): 213-218.

[3] 张小羽. 奶豆腐加工工艺优化及冻藏保鲜技术研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022: 3-4.
ZHANG X Y. Optimization of processing technology of hurood and study on preservation technology of frozen storage[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022: 3-4.

[4] 余小领. 冷冻和解冻工艺对猪肉保水性和组织结构的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008: 18-19.
YU X L. Study on the effects of freezing and thawing process on water holding capacity and structure of pork[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008: 18-19.

[5] 曾敏, 王军. 低压静电场结合包装对采后樱桃番茄品质的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(17): 25-32.
ZENG M, WANG J. Effects of low voltage electrostatic field combined with packaging treatment on quality of postharvest cherry tomatoes[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(17): 25-32.

[6] 刘瑜, 李保国. 解冻技术在肉制品中的应用研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(5): 65-72.
LIU Y, LI B G. Research progress of the application of thawing technology in meat products[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(5): 65-72.

[7] FAROUK M M, WIELICZKO K J, MERTS I. Ultra-fast freezing and low storage temperatures are not necessary to maintain the functional properties of manufacturing beef[J]. Meat Science, 2004, 66(1): 171-179.

[8] 钱书意, 李侠, 孙圳, 等. 不同冻结温度下牛肉的肌原纤维蛋白变性与肌肉持水性[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 24-30.
QIAN S Y, LI X, SUN Z, et al. Myofibrillar protein denaturation and water-holding capacity of beef frozen at different temperatures[J]. Food Science, 2018, 39(15): 24-30.

- [9] 路立立. 阻隔性包装和低压静电场对猪肉品质影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015: 34-36.
LU L L. Effects of barrier packaging and low-voltage static electric field technology on pork meat quality[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015: 34-36.
- [10] 高柯, 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.
- [11] 李侠, 钱书意, 杨方威, 等. 低压静电场下不同隔距冻结—解冻对牛肉品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 278-285.
LI X, QIAN S Y, YANG F W, et al. Effects of different gauges under low voltage electrostatic field assisting thawing-freezing on beef quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 278-285.
- [12] HUANG H, SUN W Q, XIONG G Q, et al. Effects of HVEF treatment on microbial communities and physicochemical properties of catfish fillets during chilled storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109667.
- [13] 惠庆玲, 邹同华, 宋睿琪, 等. 不同冷冻方式对真空解冻猪肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(24): 115-120.
HUI Q L, ZUO T H, SONG R Q, et al. Effects of different freezing methods on the quality of vacuum thawing pork[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(24): 115-120.
- [14] 景安琪, 吕南, 双全, 等. 羊肝干的加工工艺优化及食用品质的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(17): 64-70.
JING A Q, LÜ N, SHUANG Q, et al. Study on sheep liver jerky's processing technology and edible quality[J]. Food Research and Development, 2020, 41(17): 64-70.
- [15] HULANKOVA R, BORILOVA G, ABDULLAH F A A, et al. Microbiological quality of organic chicken meat during refrigerated storage in air and modified atmospheres[J]. British Poultry Science, 2018, 59(5): 506-513.
- [16] WU G Y, YANG C, LIN H X, et al. To what extent do low-voltage electrostatic fields play a role in the physicochemical properties of pork during freezing and storage?[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(3): 1 721-1 733.
- [17] ZHU L G, BREWER M S. Discoloration of fresh pork as related to muscle and display conditions[J]. Journal of Food Science, 1998, 63(5): 763-767.
- [18] KARAMUCKI T, JAKUBOWSKA M, RYBARCZYK A, et al. The influence of myoglobin on the colour of minced pork loin[J]. Meat Science, 2013, 94(2): 234-238.
- [19] 张鸽, 尤娟, 杨宏. 冻结方式对猪肝理化特性和蛋白质氧化的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 342-349.
ZHANG G, YOU J, YANG H. Effect of freezing methods on the physical and chemical properties and protein oxidation of porcine liver[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 342-349.
- [20] 徐耀宗, 刘丰怡, 齐元之, 等. 低压静电场处理对双孢蘑菇采后贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2024, 45(11): 88-95.
XU Y Z, LIU F Y, QI Y Z, et al. Effects of low voltage electrostatic field treatment on postharvest storage quality of *Agaricus bisporus*[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(11): 88-95.
- [21] SCHOTTROFF F, GRATZ M, KROTTENTHALER A, et al. Pulsed electric field preservation of liquid whey protein formulations—influence of process parameters, pH, and protein content on the inactivation of *Listeria innocua* and the retention of bioactive ingredients[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 243: 142-152.
- [22] 王敬, 钱坤, 任连泉. 鲤鱼在冷冻贮藏下鱼肉品质变化研究[J]. 农产品质量与安全, 2020(1): 91-93.
WANG J, QIAN K, REN L Q. Carp fish quality changes in frozen storage[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2020 (1): 91-93.
- [23] 柳银强, 徐嘉宾, 年芳, 等. 不同贮藏温度对湖羊羊肉品质特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(6): 159-168, 175.
LIU Y Q, XU J B, NIAN F, et al. The effect of different storage temperatures on the quality characteristics of Hu sheep mutton[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56 (6): 159-168, 175.
- [24] 韩春阳, 黎芊芊, 张丽芳, 等. 壳聚糖/肉桂精油复合涂膜对罗非鱼肉的保鲜效果研究[J]. 包装工程, 2023, 44(11): 20-26.
HAN C Y, LI Q Q, ZHANG L F, et al. Effects of chitosan/cinnamon essential oil composite coating on preservation of tilapia meat in chilled storage[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(11): 20-26.
- [25] 高天麒, 夏雨婷, 吴伟伦, 等. 高压静电场联合食盐腌制对鲟鱼冷藏品质的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 138-148.
GAO T Q, XIA Y T, WU W L, et al. Effect of high voltage electrostatic field combined with salt treatment on cold storage quality of channel catfish[J]. Packaging Engineering, 2023, 44 (7): 138-148.
- [26] 胡斐斐. 低压静电场辅助冻藏及解冻对猪肉品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021: 12-13.
HU F F. Effect of low-voltage electrostatic field-assisted frozen storage/thawing on quality of pork[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021: 12-13.
- [27] HSIEH C W, LAI C H, LEE C H, et al. Effects of high-voltage

- electrostatic fields on the quality of tilapia meat during refrigeration[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(6): M312-M317.
- [28] 何向丽. 猪里脊肉冻结解冻特性及高压静电场(HVEF)解冻机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016: 58-60.
- HE X L. Freezing and thawing characteristics of pork tenderloin meat and the mechanism of high voltage electrostatic field (HVEF)thawing [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016: 58-60.
- [29] 田浩杨. 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉品质的影响[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2024: 16-17.
- TIAN H Y. Effects of ultra low temperature freezing and frozen storage on the quality of cooked mussel meat[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2024: 16-17.
- [30] 王朝宗, 张洪峰, 王乐, 等. 维生素 A 生理功能研究现状[J]. *临床医药文献电子杂志*, 2015, 2(1): 196-197.
- WANG C Z, ZHANG H F, WANG L, et al. Research status of vitamin A's physiological functions[J]. *Journal of Clinical Medical Literature*, 2015, 2(1): 196-197.
- [31] 廖媛媛. 不同冻结方式对大黄鱼品质影响的研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2014: 20-40.
- LIAO Y Y. Study on quality changes of *Pseudosciaena crocea* subject to different freezing methods[D]. Ningbo: Ningbo University, 2014: 20-40.
- [32] 王丽平, 李苑, 余海霞, 等. 高压电场对生鲜食品保鲜机理研究进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(3): 278-283.
- WANG L P, LI Y, YU H X, et al. Progress in the knowledge of the preservation mechanism of raw fresh foods by high voltage electric field[J]. *Food Science*, 2017, 38(3): 278-283.
- [33] 谢勇. 低压静电场辅助冻结对调理牛排品质的影响及机理探究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021: 17-19.
- XIE Y. Effects of low voltage electrostatic field on the quality characteristics in prepared beef steak during freezing process and mechanism analysis[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021: 17-19.
- [34] XIE Y, CHEN B, GUO J, et al. Effects of low voltage electrostatic field on the microstructural damage and protein structural changes in prepared beef steak during the freezing process[J]. *Meat Science*, 2021, 179: 108527.
- [35] ZHANG M C, XIA X F, LIU Q, et al. Changes in microstructure, quality and water distribution of porcine longissimus muscles subjected to ultrasound-assisted immersion freezing during frozen storage[J]. *Meat Science*, 2019, 151: 24-32.
- [36] XIE Y, ZHOU K, CHEN B, 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.
- [37] QIAN S Y, LI X, WANG H, et al. Effects of low voltage electrostatic field thawing on the changes in physicochemical properties of myofibrillar proteins of bovine Longissimus dorsi muscle[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 261: 140-149.
- [38] JIA G L, HE X L, NIRASAWA S, et al. Effects of high-voltage electrostatic field on the freezing behavior and quality of pork tenderloin[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 204: 18-26.
- [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 F F, QIAN S Y, LI X, et al. Effect of low voltage electrostatic field-assisted chilling storage on quality of beef [J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 132-138.