

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80879

静电场辅助升温延缓气调包装羊肋排 10 °C 贮藏期间肉色褐变的作用及潜在机制研究

黄知几^{1,2} 王 榕^{1,2,3} 陈秉彦^{1,2} 祝乐为⁴ 李欣蔚⁴ 林怡秦^{1,2,3}
林丽娟^{1,2} 刘 芸^{1,2} 林晓姿^{1,2} 李维新^{1,2}

(1. 福建省农业科学院农产品加工研究所, 福建 福州 350003; 2. 福建省农产品(食品)加工重点实验室, 福建 福州 350003; 3. 福建农林大学食品科学学院, 福建 福州 350002; 4. 福州优予食品科技有限公司, 福建 福州 350111)

摘要: [目的] 解决以冻羊肉为原料加工的肉品在货架期间易褐变氧化的问题。[方法] 对升温时的冻切片羊肋排进行静电场处理后采用不同气体成分进行气调包装, 在气调包装后将肉样置于 10 °C 下贮藏, 并在贮藏的第 0, 48, 72, 96 h 采样测定肉色、菌落数、氧化水平、抗氧化酶活力等指标。[结果] 经 25 kV 静电场处理 30 min 后, 高氧包装 (70% O₂ + 30% CO₂, EO 组) 肉样的褐变速率和菌落数增长显著低于未经电场处理的高氧包装组 (O 组)。贮藏 48 h 时, EO 组样本的 *a** 值为 O 组的 1.55 倍, 菌落数均值比 O 组低 0.95 lg(CFU/g), 抗氧化酶活力和蛋白质疏基含量显著高于 O 组, 而乳酸脱氢酶活力则显著低于 O 组样本。[结论] 对未完全化冻的切片羊排进行静电场处理可有效延缓高氧气调包装后羊肋排的肉色褐变、氧化水平及菌落数的升高。

关键词: 静电场; 气调包装; 肉色; 羊肋排

Effects and mechanisms of electrostatic field-assisted temperature rising on inhibiting color browning of modified atmosphere-packaged lamb ribs during 10 °C storage

Huang Zhiji^{1,2} Wang Rong^{1,2,3} Chen Bingyan^{1,2} Zhu Lewei⁴ Li Xinwei⁴ Lin Yiqin^{1,2,3}
Lin Lijuan^{1,2} Liu Yun^{1,2} Lin Xiaozhi^{1,2} Li Weixin^{1,2}

(1. Institute of Food Science and Technology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350003, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Agricultural Products (Food) Processing, Fuzhou, Fujian 350003, China;
3. College of Food Science and Technology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;
4. Fuzhou Youyu Food Technology Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350111, China)

Abstract: [Objective] To address the problem of browning and oxidation in meat products processed from frozen lamb during shelf life. [Methods] Frozen sliced lamb ribs during temperature elevation were treated with an electrostatic field and then packaged using modified atmosphere packaging with different gas compositions. The samples were stored at 10 °C after packaging, and meat color, total viable count, oxidation level, and antioxidant enzyme activity were measured at 0, 48, 72, and 96 h of storage. [Results] After treatment with a 25 kV electrostatic field for 30 min, samples packaged under high-oxygen conditions (70% O₂ + 30% CO₂, EO group) showed significantly lower

基金项目: 福建省农业科学院自由探索科技创新项目 (编号: ZYTS202418); 福建省农业科学院食品加工科技创新团队 (编号: CXTD2021016-1)

通信作者: 林晓姿 (1975—), 女, 福建省农业科学院农产品加工研究所研究员, 学士。E-mail: lyne00@163.com

收稿日期: 2025-09-27 **改回日期:** 2026-03-31

引用格式: 黄知几, 王榕, 陈秉彦, 等. 静电场辅助升温延缓气调包装羊肋排 10 °C 贮藏期间肉色褐变的作用及潜在机制研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 103-109.

Citation: Huang Zhiji, Wang Rong, Chen Bingyan, et al. Effects and mechanisms of electrostatic field-assisted temperature rising on inhibiting color browning of modified atmosphere-packaged lamb ribs during 10 °C storage[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 103-109.

browning rate and slower increase in total viable count compared to the high-oxygen packaging group without electrostatic field treatment (O group). At 48 h of storage, the a^* value of the EO group was 1.55 times that of the O group, while the mean total viable count was 0.95 lg (CFU/g) lower than that of the O group. The EO group exhibited significantly higher antioxidant enzyme activity and protein sulfhydryl content, while lactate dehydrogenase activity was significantly lower than that of the O group. **[Conclusion]** Electrostatic field treatment of partially thawed sliced lamb ribs effectively delays the increase in meat color browning, oxidation level, and total viable count in lamb ribs packaged under high-oxygen modified atmosphere conditions.

Keywords: electrostatic field; modified atmosphere packaging; meat color; lamb ribs

羊肉营养丰富,是中国居民重要的肉食来源之一^[1-2]。2024年,福建城镇居民总数为3 011万人,人均牛羊肉消费量6.4 kg,而省内的牛羊肉年产量仅5.2万t^[3],远不能满足当地居民的消费需求。故食用冷冻及解冻肉是上述地区消费牛羊肉的重要途径。预制肉类食品是以畜禽肉或水产品为主要原料,经分割、修整及调制等加工处理后,未经熟制且在冷藏或冷冻条件下贮存、运输和销售的非即食肉类产品^[4]。冻肉是生产预制肉类食品的重要原料^[5],但生产过程中的解冻处理会破坏肌肉的组织结构,非冻结条件下解冻肉的贮存、运输则会进一步促进肉品表面微生物的增殖及肉品本身氧化水平的升高。不仅如此,非冻藏的预制肉类食品虽通常放于冷柜进行货架展示,但受环境温度波动影响,其实际存放温度常常高达10℃左右^[6]。上述因素使得预制肉类食品在生产后的肉品品质迅速下降。肉色是判别肉品品质最为直观的指标^[7-9],极易受氧化水平增加或微生物增殖导致的肉品表面氧分压降低的影响,使高铁肌红蛋白占比增加,从而发生褐变,大大降低消费者的接受度^[10-15]。因此,在解冻过程中降低肌肉组织氧化水平和减少微生物数量,对提升感官品质稳定性^[16-17]和提升以冻肉为原料的预制肉类食品货架期间品质具有重要意义。

电场辅助处理作为一种新兴的动物源产品加工及保鲜技术,可起到延缓冷冻食品^[18]及冰鲜贮藏水产^[19]的品质劣变,减少解冻导致的肌肉组织损伤,提升动物源食品持水性及减少肉品微生物的作用^[20]。余铭等^[19]在对虾冰温贮藏期间进行低频电场辅助处理,可显著抑制蛋白质降解,并维持蛋白质的结构稳定性。付慧鑫等^[21]采用变温高湿协同低压静电场对牛肉进行解冻处理后发现,在静电场的作用下,牛肉的汁液流失和蒸煮损失率显著减少,解冻后的肌原纤维结构及肌肉蛋白结构更加完整。杨川等^[22]对采用低压静电场高湿法(电场强度2.5 kV、相对湿度98%、温度4℃)和高湿法(相对湿度98%、温度4℃)进行解冻的羊肉样品进行分析后发现,结合低压静电场处理的羊肉在解冻后蛋白质的二级结构和三级结构最为稳定,同时蛋白质氧化水平和汁液流失率较低。董春燕等^[23]采用3.75 kV高压静电场对猪肉在10℃下解冻48 h后发现,高压静电场解冻可显著减少猪肉的汁液损失、氧化水平及微生物的生长。此外,较高的电场强度有利于提升冷藏期的肉品品质^[24]。如在冷藏期间对罗非鱼

肉施加>1 kV/cm的高压电场可显著降低样品的总挥发性盐基氮(T-VBN)含量和菌落总数水平。该作用结果可能与较高的电场强度更有利于产生离子风(coronal wind)从而生成较多臭氧,并进一步通过臭氧产生减菌抑菌效果有关^[25]。目前,有关静电场辅助升温处理对冻肉在冰点以上的货架展示阶段肉品品质变化的研究鲜见报道,对贮藏期间肉色变化行为的影响及作用机制尚不明确。

试验拟以冷冻滩羊肋排(2~13肋)为对象,在升温过程中进行静电场处理,分析采用不同气体成分进行气调包装的切片羊肋排在贮藏期间的外观及肉色变化,通过测定羊肋排贮藏期间的菌落总数、蛋白质和脂质氧化水平、抗氧化及能量代谢相关酶活力等指标,分析冻肉在升温过程中进行静电场处理这一手段调控货架期间肉色变化的潜在作用机制,为延缓以冻羊肉为原料的预制肉类食品冷藏过程中的品质劣变提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冻滩羊肋排:单块羊肋排质量为2.45~2.55 kg,6月龄公羔羊,第2~13肋,新乡市雨轩清真食品股份有限公司;

气调盒:规格220 mm×132 mm×40 mm,抗冻耐热PP材质,厦门亿乐天新材料有限公司;

气调膜:EVA/EVOH/PE共挤膜,厚度25 μm,23℃干燥条件下氧气透过率为 2.0×10^{-4} cm³/(m²·d·Pa),38℃、90%相对湿度下水蒸气透过率为20 g/(m²·d),升辉新材料股份有限公司;

三氯乙酸、硼酸:分析纯,西陇科学股份有限公司;

乙二醇四乙酸二钠、硫代巴比妥酸、氧化镁:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

1,1,3,3-四乙氧基丙烷:标准品,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

氯化钾、尿素、乙二醇四乙酸、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)、2,4-二硝基苯肼、盐酸胍、乙酸乙酯:上海捷世凯生物科技有限公司;

盐酸、甲基红、溴甲酚绿、乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

平板计数琼脂:广东环凯微生物科技有限公司;

超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)试剂盒(NBT法)(微量法)、过氧化氢酶(catalase, CAT)试剂盒

(钼酸铵比色法)(微量法)、乳酸脱氢酶(LDH)试剂盒:福建荷瑞生物科技有限公司;

恒温恒湿试验箱:HWS-250型,天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司;

分光测色仪:ST70型,广东三思时科技有限公司;

微孔板分光光度计:BioTek Epoch 2型,安捷伦科技(中国)有限公司;

手持均质仪:MT-30K型,杭州米欧仪器有限公司;

高压直流电源:TCM6000i型,大连泰思曼科技有限公司;

静电场发生装置:参照 Xu 等^[26]的方法构建,将高压直流电源的阳极和阴极分别接至两块平行放置且间距为 15 cm 的 304 不锈钢板(50 cm×50 cm)上。将两块不锈钢板(电极板)固定于亚克力材质的罩子内,用于屏蔽电场。

1.2 试验方法

1.2.1 样品处理 将整块冷冻的羊肋排(2~13肋,不拆除包装膜)于 10 °C 解冻库中回温至中心温度达 -3 °C 后,用砍排机将羊肋排切成厚度约 1.8 cm 的肉片。剔除无成片肌肉组织或无平整切面的肉样。将剩余肉片随机打散,取 50% 肉片样本放入已置于解冻库(10 °C)中平衡温度的静电场发生装置内进行静电场处理(25 kV, 约 1.67 kV/cm, 30 min),另 50% 置于封闭的塑料框内放置 30 min 作为对照。静电场处理结束后采用不同的气体组成对肉片进行气调包装(2片/盒),以一盒肉样为一个样本,每个处理组在每个采样时间点取 6 个样品进行指标测定。各组电场—气调处理方式:

(1) 高氧气调组(O):解冻库静置 30 min(无静电场处理)后气调包装(70% O₂+30% CO₂)。

(2) 电场高氧气调组(EO):静电场处理 30 min 后气调包装(70% O₂+30% CO₂)。

(3) 无氧气调组(C):解冻库静置 30 min(无静电场处理)后气调包装(100% CO₂)。

(4) 电场无氧气调组(EC):静电场处理 30 min 后气调包装(100% CO₂)。

气调包装后,样品于 10 °C 贮藏 96 h,分别于第 0, 48, 72, 96 h 取生肉片样本直接测定肉色、pH 值和菌落总数。样品冻存:每个取样时间点分别从各组的生肉片样本中切取成片的肌肉组织用液氮冷冻研磨成粉后,置于 -80 °C 冰箱保存。

1.2.2 肉色测定 采用分光测色仪(色差仪)对羊肋排肌肉组织表面的亮度值(L*)、红度值(a*)及黄度值(b*)进行测定^[27]。

1.2.3 pH 值测定 将校准后的便携式 pH 计套上金属刀头后直接插入肉样中测定^[27]。

1.2.4 脂质氧化水平测定 参照 GB 5009.181—2016,将肉样与含 5 mg/L 乙二胺四乙酸二钠的三氯乙酸水溶液

(75 g/L)按质量体积比 1:10 (g/mL)混匀, 50 °C 振摇 30 min, 4 °C、8 000×g 离心 10 min, 取上清液和不同浓度的 1, 1, 3, 3-四乙氧基丙烷(标准品)与硫代巴比妥酸溶液于 90 °C 反应 30 min, 移取反应后液体 200 μL 于 96 孔板, 测定 532 nm 处吸光值, 并计算丙二醛含量。

1.2.5 巯基含量 参照殷燕涛^[28]的方法,按式(1)计算蛋白质中的巯基含量。

$$PSH = \frac{OD_{412nm} \times 10^6 \times D}{\epsilon \times \rho}, \quad (1)$$

式中:

PSH——总巯基含量, nmol/g;

OD_{412 nm}——412 nm 处吸光值;

ε——摩尔吸光系数, 13 600 L/(mol·cm);

D——稀释倍数;

ρ——蛋白质量浓度, mg/mL。

1.2.6 羰基含量测定 参照张如玉^[29]的方法。按式(2)计算羰基含量。

$$PCC = \frac{OD_{\text{样品}} - OD_{\text{对照}}}{4.4 \times \rho}, \quad (2)$$

式中:

PCC——羰基含量, nmol/mg;

OD——吸光值;

ρ——蛋白质量浓度, mg/mL。

1.2.7 菌落计数 参照 GB 4789.2—2022。

1.2.8 总挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)测定 参照 GB 5009.228—2016。

1.2.9 酶活力测定 参照试剂盒说明书对样品中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和乳酸脱氢酶(LDH)进行测定。

1.3 数据处理

采用单因素方差分析评估组间的显著性。最小二乘均值通过 Tukey's t 检验进行多重比较。 $P < 0.05$ 认为组间差异具有统计学意义。采用斯皮尔曼相关性分析氧化水平、酶活力、菌落总数与红度值(a^*)之间的相关性。采用 GraphPad Prism 10.1.2 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 对羊肋排贮藏期间外观及肉色的影响

由图 1 和图 2 可知,切片羊排在贮藏初期肌肉组织颜色较为鲜艳,随着贮藏时间的延长,各处理组肉样表面的色泽逐渐向暗红色及灰褐色转变。但 EO 组肉样的肌肉组织色泽在贮藏 48, 96 h 均比同时期的其余各组更为鲜艳。 a^* 值是反映畜肉肉色最为关键的指标。随着贮藏时间的延长,各处理组肉品表面的 a^* 均呈下降趋势。但在贮藏 48, 96 h 时,EO 组的 a^* 值显著高于同贮藏期的各处理组,而 O 组的 a^* 值则显著低于各处理组。说明在对回温冻羊肋排进行常规高氧气调包装(70% O₂ + 30% CO₂)前实

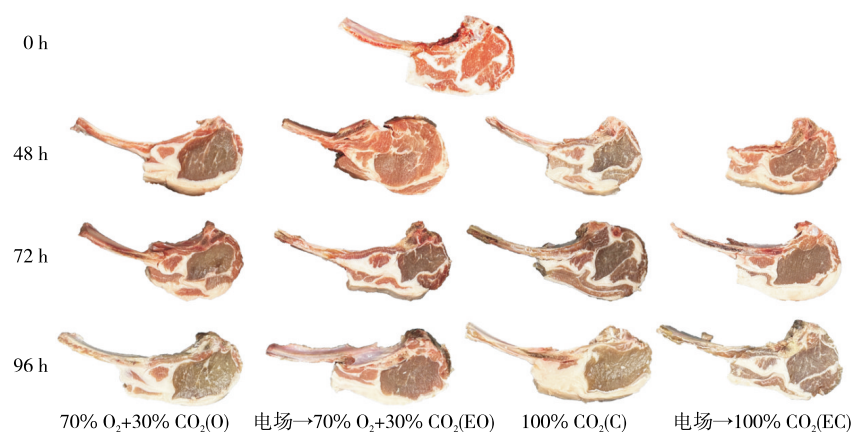
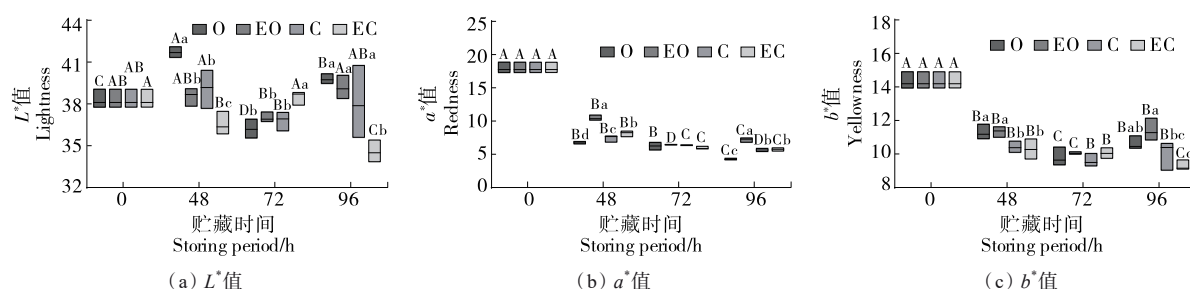


图 1 羊肋排在货架期间的外观变化

Figure 1 Appearance of lamb ribs during their shelf life



大写字母表示不同贮藏期相同处理差异显著 ($P < 0.05$); 小写字母表示不同处理相同贮藏期差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 羊排在贮藏期间的肉色变化

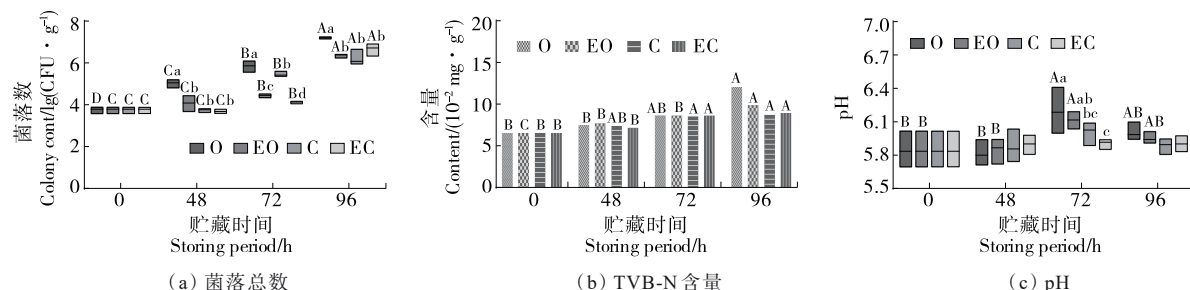
Figure 2 Changes in meat color of lamb ribs during storage

施适当的静电场处理,可有效延缓贮藏期间肌肉组织表面的肉色劣变。

2.2 对气调包装羊肉新鲜度的影响

由图 3 可知,静电场辅助升温处理可显著抑制贮藏期间菌落数的升高。其中,EO 组的肉样菌落数在各贮藏期均显著低于 O 组。周光宏^[30]指出,肉品表面的 a^* 值与微生物的增殖有着一定的联系,好氧菌的增殖会消耗肉品表面的氧气从而降低肉品表面氧分压;较低的氧分压会诱使氧合肌红蛋白转化为高铁肌红蛋白,从而导致肉色

褐变。EO 组肉色褐变进程的延缓可能与微生物增殖受到抑制存在关联。虽然静电场处理联合纯 CO_2 气调贮藏也能显著抑制微生物在羊排贮藏期间的增殖,但可能受气体环境中自带的低氧分压的影响(使氧气直接从肌红蛋白中脱离形成暗红/紫红色的脱氧肌红蛋白),EC 处理并未显现出显著的护色效果。此外,O 组肉样的菌落总数均值在贮藏 72 h 时达 $5.8 \lg(\text{CFU/g})$ (GB/T 9961—2008《鲜、冻胴体羊肉》中的限量为 $5 \times 10^5 \text{ CFU/g}$);贮藏 96 h 时,各处理组菌落数均 $> 5.7 \lg(\text{CFU/g})$,超过标准限量。



大写字母表示不同贮藏期相同处理差异显著 ($P < 0.05$); 小写字母表示不同处理相同贮藏期差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 羊肋排肌肉组织中菌落总数、TVB-N 含量及 pH 的变化

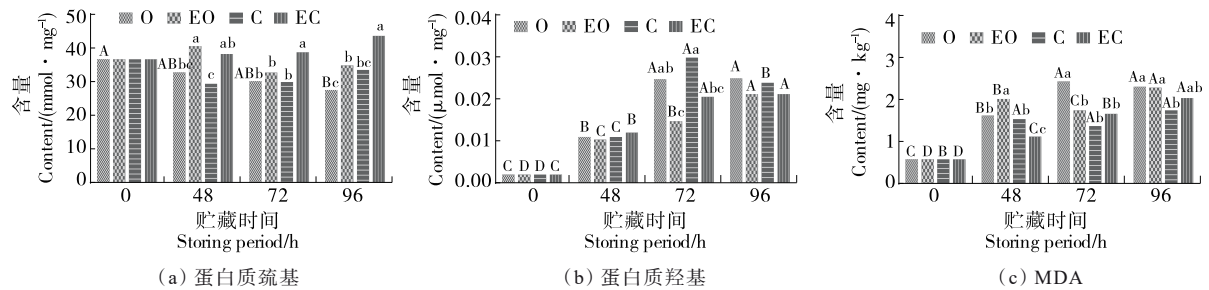
Figure 3 Total viable count, TVB-N level, and pH in the muscle tissue of lamb ribs

该结果提示 10 °C 贮藏条件下,未经静电场处理的高氧气调羊肋排放置时间应 < 72 h,经静电场处理的羊肉放置时间应 < 96 h。此外,各处理组样品的 TVB-N 含量随着贮藏时间的延长而增加,但在相同贮藏时间点的各处理组间 TVB-N 含量并无显著性差异。

2.3 对氧化水平的影响

肌肉组织中脂质及蛋白质的氧化是诱导畜肉褐变的重要因素^[31],其氧化产生的自由基会诱导肌红蛋白中的

二价铁离子向三价铁进行转化,从而产生色泽劣变。巯基和羰基含量是反映蛋白质氧化水平的重要指标。巯基含量越高则蛋白质氧化程度越低,羰基含量越高则蛋白质氧化水平越高。由图 4 可知,EO 组的蛋白质巯基含量在贮藏 48,96 h 时均显著高于 O 组,而羰基含量在贮藏 72 h 时显著低于 O 组。该结果提示在进行高氧气调包装前进行电场辅助升温处理,可显著抑制贮藏期间肌肉组织的蛋白质氧化水平,从而延缓羊肉表面 a^* 值的降低。



大写字母表示不同贮藏期相同处理差异显著 ($P < 0.05$);小写字母表示不同处理相同贮藏期差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 贮藏期间羊肋排肌肉组织中蛋白质巯基、蛋白质羰基和 MDA 含量的变化

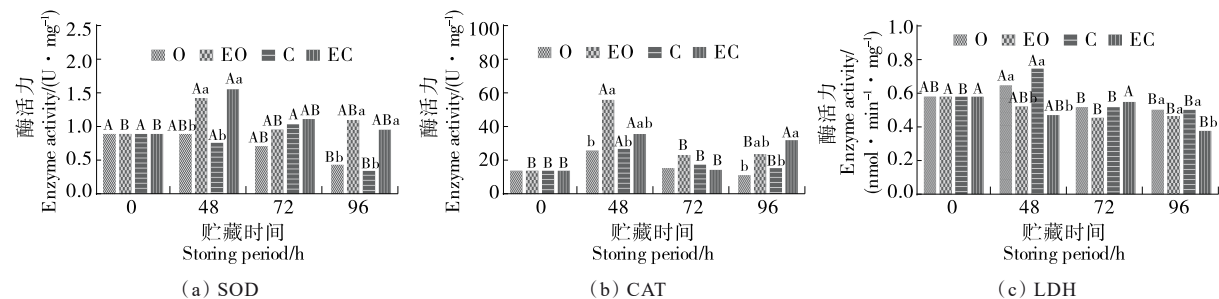
Figure 4 Changes in protein sulfhydryl groups, protein carbonyl groups, and MDA content in lamb rib muscle tissue during storage

2.4 对抗氧化酶及乳酸脱氢酶活力的影响

肉品自身的抗氧化能力是调节肌肉组织中蛋白质氧化水平影响肉色的潜在因素^[32]。由图 5 可知,静电场辅助升温可增加肌肉组织中的 SOD 和 CAT 酶活力,提示静电场辅助回温可通过上调抗氧化酶活力来降低肌肉组织中的蛋白质氧化水平,从而延缓肉色褐变的进程。LDH 活力的升高对鲜肉 a^* 值的提升有促进作用。在 O 和 EO 组中,LDH 活力在各贮藏时间点并未随着 a^* 值的升高而升高,说明静电场升温处理并非通过提升高氧气调包装肉样贮藏期间 LDH 的活力来延缓肉色褐变。Bao 等^[31]研究表明,线粒体中的 LDH 通常被认为可以通过将丙酮酸转化成乳酸的同时产生还原型辅酶 I (NADH),并间接地基于 NADH 的还原能力,抑制氧合肌红蛋白向高铁肌红蛋

白的转变,从而抑制肉色褐变。NADH 是电子传递链的起点,可作为反应底物诱导活性氧自由基的产生^[33]。冻肉在冷冻及升温解冻过程中受冰晶的机械作用,生物膜受到损伤。线粒体中的活性氧自由基更易外泄到细胞基质中提升肉的氧化水平,从而导致肉色进一步褐变。静电处理会降低肌肉组织中 LDH 的活力,可能反映了静电处理会使三羧酸循环相关酶活力受到抑制,从而降低基于电子传递链产生的自由基水平,间接抑制肌肉组织的氧化水平,最终起到护色作用。

由图 6 可知,在高氧气调包装条件下,肉样的 a^* 值与氧化水平有较强的相关性。其中,蛋白质巯基含量、SOD 水平、MDA 水平、菌落总数及蛋白质羰基含量与 a^* 值的相关系数绝对值均 > 0.6 ,提示抑制氧化水平升高和抑制微



大写字母表示不同贮藏期相同处理差异显著 ($P < 0.05$);小写字母表示不同处理相同贮藏期差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 贮藏期间滩羊肋排肌肉组织中 SOD、CAT 和 LDH 活力的变化

Figure 5 Changes in the activities of SOD, CAT, and LDH in the muscle tissue of Tan lamb ribs during storage

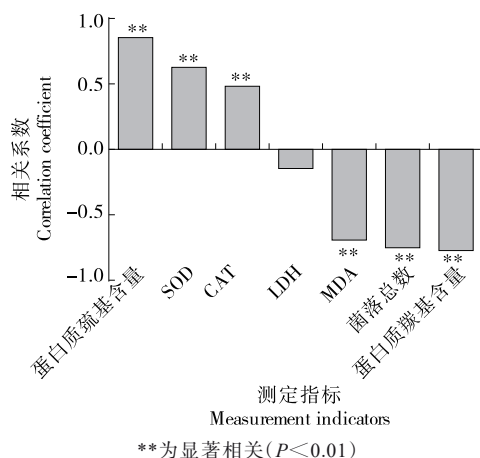


图6 氧化相关指标及菌落总数与红度值(a^*)的相关性分析
Figure 6 Correlation analysis of oxidation-related indices and total viable count with redness value

生物生长是静电场辅助处理延缓肉色褐变进程的重要因素。

解冻或冻肉的回温缓化过程是决定肉类品质的关键环节,不同处理方式会显著调控肌肉在非冻结状态时的微观结构状态和基本品质指标,这种调控效应会潜在地影响后续贮藏期间肉品的品质变化特性^[33]。作为预制肉类食品的主要原料,冷冻肉的回温或解冻方法是否适宜,不仅关系到解冻后的初始品质,也对延缓调理制品在冷藏期间的整体品质劣变具有重要意义。

3 结论

探究了静电场辅助升温处理对采用不同气调包装处理的羊排在 10℃贮藏期间肉色的影响。结果表明,在采用气调包装(70% O₂ + 30% CO₂)前进行静电场辅助处理,可有效通过抑制贮藏期间肉品表面菌落数的增加,提升抗氧化酶(超氧化物歧化酶和过氧化氢酶)活力降低肌肉组织中的蛋白质氧化水平,从而显著抑制肉品表面的褐变进程。

虽然研究发现静电场辅助升温处理对高氧气调包装羊排贮藏期肉色褐变的抑制作用,但仍未对其作用机制进行深入研究。在后续的研究中应进一步从线粒体电子传递链与活性氧代谢入手,进一步解析其对肌肉组织结构的影响及对肌红蛋白结构变化的调控路径,为静电场技术在冷冻预制肉制品回温与贮藏中的应用提供更系统的理论依据与工艺支撑。

参考文献

[1] Zhang R Y, Yoo M J Y, Realini C E, et al. In-bag dry- vs. wet-aged lamb: quality, consumer acceptability, oxidative stability and *in vitro* digestibility[J]. Foods, 2020, 10(1): 41.
[2] 李孟轶, 张文广, 姜新华, 等. 基于高光谱成像技术的冷鲜羊

肉 pH 值无损检测[J]. 食品与机械, 2024, 40(11): 128-134.

Li M Y, Zhang W G, Jiang X H, et al. Nondestructive detection of chilled mutton pH value using hyperspectral imaging technique[J]. Food & Machinery, 2024, 40(11): 128-134.

- [3] 国家统计局. 2025 年中国统计年鉴[DB/OL]. (2025-09)[2026-03-31]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2025/indexch.htm>. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2025 [DB/OL]. (2025-09)[2026-03-31].
[4] 中华人民共和国商务部. SB/T 10482—2008 预制肉类食品质量安全要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 2. Ministry of Commerce of the People's Republic of China. SB/T 10482—2008 Quality safety requirement of prepared meat products[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009: 2.
[5] Hasani A, Kokthi E, Zoto O, et al. Analyzing consumer perception on quality and safety of frozen foods in emerging economies: evidence from Albania and Kosovo[J]. Foods, 2022, 11(9): 1 247.
[6] 中华人民共和国农业部. NY/T 2073—2011 调理肉制品加工技术规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 3. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 2073—2011 Technical regulation for processing of prepared meat products[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2011: 3.
[7] Ramanathan R, Hunt M C, Price T, et al. Strategies to limit meat wastage: focus on meat discoloration[J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2021, 95: 183-205.
[8] Siddiqui S A, Bahmid N A, Mahmud C M M, et al. Consumer acceptability of plant-, seaweed-, and insect-based foods as alternatives to meat: a critical compilation of a decade of research[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(23): 6 630-6 651.
[9] Ruedt C, Gibis M, Weiss J. Meat color and iridescence: origin, analysis, and approaches to modulation[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(4): 3 366-3 394.
[10] Zhang R Y, Realini C E, Kim Y H B, et al. Challenges and processing strategies to produce high quality frozen meat[J]. Meat Science, 2023, 205: 109311.
[11] Ramanathan R, Denzer M, Kiyimba F, et al. Role of postmortem bioenergetics in beef colour chemistry[J]. Italian Journal of Animal Science, 2023, 22(1): 711-727.
[12] Wang Z M, He Z F, Gan X, et al. Interrelationship among ferrous myoglobin, lipid and protein oxidations in rabbit meat during refrigerated and superchilled storage[J]. Meat Science, 2018, 146: 131-139.
[13] Ramanathan R, Denzer M L, Kiyimba F, et al. Metabolomics of meat color: practical implications[J]. Current Proteomics, 2022, 19(4): 299-307.
[14] Sales L A, Rodrigues L M, Silva D R G, et al. Effect of freezing/irradiation/thawing processes and subsequent aging on tenderness, color, and oxidative properties of beef[J]. Meat

- Science, 2020, 163: 108078.
- [15] Zhu W H, Han M L, Bu Y, et al. Plant polyphenols regulating myoglobin oxidation and color stability in red meat and certain fish: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(8): 2 276-2 288.
- [16] Zhu M M, Li H J, Xing Y, et al. Understanding the influence of fluctuated low-temperature combined with high-humidity thawing on gelling properties of pork myofibrillar proteins[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134238.
- [17] Hu F F, Qian S Y, Huang F, et al. Combined impacts of low voltage electrostatic field and high humidity assisted-thawing on quality of pork steaks[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 111987.
- [18] 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.
- Bai J X, Tungalag D, Gerelt B, et al. Effect of low-voltage electrostatic field-assisted freezing on sheep liver quality[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(4): 114-122.
- [19] 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 M, Xu L J, Chen H Q, et al. Quality change of prawn during low-frequency electric field ice temperature storage[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(3): 122-127.
- [20] Li Y, Ma F, Zhang Y L, et al. Volumetric physical-field-thawing techniques and their combination for muscle foods: applications and innovations[J]. *Meat Science*, 2025, 228: 109883.
- [21] 付慧鑫,张婷,乔雪,等. 变温高湿协同低压静电场处理对牛肉解冻效果及蛋白氧化的影响[J]. *食品工业科技*, 2026, 47(3): 375-382.
- Fu H X, Zhang T, Qiao X, et al. Effects of variable temperature and high humidity combined with low voltage electrostatic field treatment on thawing effect and protein oxidation of beef[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2026, 47(3): 375-382.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Ma Z M, Zhang Y X, Pu A F, et al. A preliminary exploration of the synergistic preservation effect of electrostatic field and superchilling on muscle foods: mechanisms, influencing factors, applications, and challenges[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2025, 24(1): e70066.
- [25] Dalvi-Isfahan M, Hamdami N, Le-Bail A, et al. The principles of high voltage electric field and its application in food processing: a review[J]. *Food Research International*, 2016, 89: 48-62.
- [26] Xu Y Q, Leng D M, Li X, 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*, 2024, 439: 138096.
- [27] 中华人民共和国农业部. NY/T 2793—2015 肉的食用品质客观评价方法[S]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 3-4.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 2793—2015 Objective methods for evaluating eating quality attributes of meat[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 3-4.
- [28] 殷燕涛. 蛋白质氧化对牛肉蛋白消化特性与肠道健康的影响及机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022: 27-28.
- Yin Y T. Insight into the impact of oxidation on beef protein digestibility and dietary oxidized beef protein on gut health [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022: 27-28.
- [29] 张如玉. 超声波协同滚揉腌制对猪肉蒸煮火腿品质的影响及其机理探究[D]. 南京: 南京农业大学, 2024: 32.
- Zhang R Y. Effects and mechanism of ultrasonic-assisted tumbling curing on the quality of pork cooked ham[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2024: 32.
- [30] 周光宏. 肉品加工学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 106-112.
- Zhou G H. Meat science and technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 106-112.
- [31] Bao Y L, Erbjerg P, Estévez M, et al. Freezing of meat and aquatic food: underlying mechanisms and implications on protein oxidation[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(6): 5 548-5 569.
- [32] 刘金鑫. 不同包装体系中乳酸钙对冷却牛肉肉色稳定性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018: 7-8.
- Liu J X. Effect of calcium lactate with different packaging systems on stability of cool beef during storage[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018: 7-8.
- [33] Zou B, Jia F, Ji L, et al. Effects of mitochondria on postmortem meat quality: characteristic, isolation, energy metabolism, apoptosis and oxygen consumption[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(30): 11 239-11 262.