

低压静电场辅助解冻对牛肉品质的影响

乔雪, 乔雅洁, 付慧鑫, 孟新涛, 张婷

Effect of Low Voltage Electrostatic Field Assisted Thawing on Beef Quality

QIAO Xue, QIAO Yajie, FU Huixin, MENG Xintao, and ZHANG Ting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

等离子体活化水作为解冻介质对牛肉杀菌效能及品质的影响

Effect of Plasma-activated Water as Thawing Media on the Sterilization and Quality of Beef
食品工业科技. 2022, 43(2): 338-345 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060219>

高压静电场处理对鲜切黄甜竹笋冷藏下品质的影响

Effects of High-Voltage Electrostatic Field (HVEF) Treatment on the Quality of Fresh-Cut Bamboo Shoots (*Acidosasa edulis*) During Cold Storage
食品工业科技. 2021, 42(23): 319-325 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120141>

不同间歇微波解冻方式对牦牛肉品质特性、脂质氧化的影响

Effects of Different Intermittent Microwave Thawing Methods on the Quality Characteristics and Lipid Oxidation of Yak Meat
食品工业科技. 2024, 45(12): 38-46 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070044>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

乔雪, 乔雅洁, 付慧鑫, 等. 低压静电场辅助解冻对牛肉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 48–56. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090023

QIAO Xue, QIAO Yajie, FU Huixin, et al. Effect of Low Voltage Electrostatic Field Assisted Thawing on Beef Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 48–56. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090023

· 研究与探讨 ·

低压静电场辅助解冻对牛肉品质的影响

乔雪^{1,2}, 乔雅洁^{1,2}, 付慧鑫^{1,2}, 孟新涛^{2,3}, 张婷^{2,3,*}

(1.新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052;
2.新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所, 新疆乌鲁木齐 830091;
3.新疆农副产品精深加工工程技术中心, 新疆乌鲁木齐 830091)

摘要:为筛选冷冻牛肉适宜的解冻方式, 更好地维持其解冻后食用品质。本文以 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻的牛背最长肌为研究对象, 以自然解冻为对照组(CK), 以与低压静电场发生板隔距分别为 20、30、40 cm (LVEFT20、LVEFT30、LVEFT40) 为处理组, $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为解冻终温, 采用常规品质检测结合气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectroscopy, GC-IMS) 技术, 对比分析不同低压静电场发生板隔距解冻对牛肉品质和挥发性化合物变化的影响。结果表明: 与 CK 相比, 低压静电场辅助解冻处理可缩短牛肉的解冻时间, 降低牛肉解冻汁液流失率和蒸煮损失, 抑制其微生物的生长, 使其保持较好的色泽和剪切力。其中, LVEFT30 处理较好, 其解冻时间较 CK 缩短 7 h, 解冻后牛肉的解冻汁液流失率、解冻汁液中蛋白质质量分数、蒸煮损失率分别降低了 45.79%、21.32% 和 27.48%, 剪切力仅为 66.99 N, 挥发性盐基氮(TVB-N)、菌落总数、色泽、挥发性化合物种类及相对含量接近新鲜牛肉。可见, 静电板隔距为 30 cm 适于牛肉解冻, 可使其保持较好的品质, 该结果为生产中冷冻牛肉的解冻提供科学依据和技术指导。

关键词: 低压静电场, 解冻, 牛肉, 品质

中图分类号: TS251.52

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)17-0048-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090023

本文网刊:



Effect of Low Voltage Electrostatic Field Assisted Thawing on Beef Quality

QIAO Xue^{1,2}, QIAO Yajie^{1,2}, FU Huixin^{1,2}, MENG Xintao^{2,3}, ZHANG Ting^{2,3,*}

(1.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2.Institute of Storage and Processing of Agricultural Products, Xinjiang Academy of

Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China;

3.Xinjiang Agricultural and Sideline Products Deep Processing Engineering Technology Center, Urumqi 830091, China)

Abstract: To screen the suitable thawing method of frozen beef and better maintain its eating quality and flavor after unfreezing, in this paper, the strip loin frozen at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ was taken as the research object, and the naturally frozen one was taken as the control group (CK), the ones with distances of 20, 30, and 40 cm (LVEFT20, LVEFT30, LVEFT40) from the low-voltage electrostatic filed generating plate were taken as the treatment groups, and $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ was the final temperature of unfreezing. The test method of combining conventional quality with gas chroma-tography-mass spectrometry (GC-IMS) was adopted to compare and analyze the effects of different low-voltage electrostatic field unfreezing on beef quality and flavor. The results revealed that compared with CK, the low-voltage electrostatic field assistance unfreezing treatment could shorten the unfreezing time of beef samples, improve the loss rate of unfreezing juice and cooking loss, cut down on the nutrient loss of unfrozen beef, inhibit the growth of microorganisms, and allow beef to maintain a better color, shear force, and flavor. Among them, the treatment of LVEFT30 was the best. The unfreezing time was 7 hours shorter than that of CK. The unfreezing juice loss rate and protein mass fraction, and cooking loss rate of beef after unfreezing were reduced by

收稿日期: 2023-09-05

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项“肉牛精准饲喂及贮运保鲜与综合利用关键技术集成与示范”项目(2021A02003-4)。

作者简介: 乔雪(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮运保鲜, E-mail: 2356955647@qq.com。

* 通信作者: 张婷(1980-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品贮运与加工, E-mail: zhangtingkikie@163.com。

45.79%, 21.32%, and 27.48%, and the shear force was only 66.99 N. Total volatile basic nitrogen (TVB-N), total bacterial count, color, volatile compounds types, and relative contents were similar to those of fresh beef. Therefore, the beef can maintain good quality when frozen beef was defrosted with a distance of 30 cm from the electrostatic plate. This result provides a scientific basis and technical support for unfreezing frozen beef in production.

Key words: low voltage electrostatic field; thawing; beef; quality

牛肉因其丰富的氨基酸和营养成分而享誉全球,被称为“肉中娇子”^[1-2]。然而,在加工和运输过程中,由于微生物污染或氧化,牛肉很容易变质^[3]。冷冻是通过抑制微生物生长和酶活性来保持牛肉品质的常用方法,但牛肉在后续加工和食用前往往受解冻方式的影响,常规解冻不可避免地会发生质量损失,包括颜色恶化、保水能力下降、质地变化、风味变化等^[4]。因此,研发安全、高效、适用的牛肉解冻技术具有十分重要的实践意义。

近年来,很多研究都致力于利用物理场辅助解冻处理来解决传统解冻方法的缺点。其中包括高压解冻^[5]、微波解冻^[6]、超声解冻^[7]、射频解冻^[8]、磁场解冻^[9]及高压静电场解冻^[10]等。然而,微波解冻、射频解冻及超声解冻是基于加热效应的热解冻方法,均能达到快速解冻的效果,但由于热解冻过程会引起受热不均匀导致物料的局部过热^[11-13]。高压解冻、磁场解冻及高压静电场解冻属于非热解冻方法,均可缩短解冻时间,但能耗高且存在安全隐患限制其商业化应用。研究表明,低压静电场辅助解冻产生的能量能加速冻结食品的冰层结构氢键崩溃,使冰晶粒径减小,促进冰晶到小分子水的状态,从而加速解冻^[14]。另一方面静电场产生的电晕风带动空气粒子在冻结物料表面产生湍流和涡旋,从而增加传热系数,加快解冻速率^[15]。低压静电场作为一种新型解冻技术,具有操作简单、安全节能、便于工业生产应用等优点,已在猪肉^[16]、牛肉^[17]、羊肉^[18]上引起关注。但不同种类、不同品种肉品适宜的低压静电场强度不同,目前该技术在牛肉解冻方面的研究虽有报道,但鲜见低压静电场处理对解冻牛肉营养品质、微生物和香气变化的综合报道。为此,本研究以新疆褐牛冷冻牛肉背最长肌为研究对象,将低压静电场应用于牛肉解冻,以自然解冻为对照组(CK),以与低压静电场发生板隔距分别为 20、30、40 cm(LVEFT20、LVEFT30、LVEFT40)为处理组,以 2 ℃ 为解冻终温,采用常规品质结合气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectroscopy, GC-IMS)技术,探究不同低压静电场发生板隔距辅助解冻对牛肉解冻时间、色泽及流失汁液色泽、流失汁液蛋白质量分数、解冻汁液流失率、蒸煮损失、剪切力、新鲜度及解冻后香气变化的影响,以期选择适宜的低压静电场解冻处理,为生产中冷冻牛肉的解冻提供科学依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

牛肉 新疆沙依巴克区小巴依克西路店,品种

为新疆褐牛,取新鲜宰杀牛肉背最长肌部位,4 ℃ 排酸 24 h,每份牛肉样品采集后,由塑料包装袋包裹后放入专用样品取样箱,于 1 h 内运回新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所肉品分析实验室;盐酸、硫酸

四川西院科学有限公司;硫酸铜、硫酸钾、硼酸、95% 乙醇、氧化镁、氢氧化钠、葡萄糖、无水乙醇、氯化钠 天津市致远化学试剂有限公司;甲基红、溴甲酚绿 上海源叶生物科技有限公司;胰蛋白胨、酵母浸粉、琼脂 北京奥博星生物技术有限责任公司;2-戊酮(2-Pentanone)、2-己酮(2-Hexanone)、2-庚酮(2-Heptanone)、2-辛酮(2-Octanone)、2-壬酮(2-Nonanone)、2-丁酮(2-Butanone) Sigma 公司。

KSE36AOR 型台式多路温度测试仪 宁波科顺仪器仪表有限公司;YS6060 台式分光测色仪 深圳市三恩时科技有限公司;testo205 pH 计 德国仪器国际贸易(上海)有限公司;LDZX-75L-I 立式高压蒸汽灭菌器 上海申安医疗器械厂;SCI-VS 可调式混匀仪 美国 Scilogex 公司;SPX-100B-ZII 型生化培养箱 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司;DL-1 电子万用炉 北京市永光明医疗仪器有限公司;K9840 自动凯氏定氮仪、SH420F 石墨消解仪 海能未来技术集团股份有限公司;QJS-BO2X5 小熊绞肉机 小熊电器股份有限公司;C-LM.3B 数显式肌肉嫩度仪 东北农业大学工程学院;SSW-600-2S 电热恒温水槽、SW-CJ-2FD 超净工作台 上海博讯实业有限公司医疗设备厂;自制低压静电场装置 北京艾德创机器人科技有限公司;DW-FL270 超低温冷冻储藏箱 中科美菱低温科技股份有限公司;FlavourSpec 气相离子迁移谱联用仪 德国 G.A.S 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 实验处理与设置 选用外观新鲜、肉色红润、无结缔组织的牛肉背最长肌,切成大约 5 cm×4 cm×4 cm 左右的块状(每块大约 85±5 g)。切样时,平行于肌肉纤维进行切割,整个实验所用肉块的肌纤维方向基本一致。

选取 24 块肉样随机分为 4 组,分别为自然解冻(CK,无电场施加,静止空气解冻)为对照组,与低压静电场发生板隔距 20、30、40 cm(LVEFT20、LVEFT30、LVEFT40)为处理组,用透明聚乙烯膜包装后将肉样置于-20 ℃ 冰柜中冻藏,一周后取出,放置于 4 ℃ 低温冰箱中进行解冻试验,期间将温度记录仪传感器插入肉样几何中心监测并记录其中心温度,当解冻终温为 2 ℃ 时,取样进行以下相关指标的测定。试验组肉样的解冻过程均在低压静电场环境

下进行,以上各处理做3个试验重复。

1.2.2 检测指标及方法

1.2.2.1 解冻时间的测定 解冻过程中,样品的温度用热电偶进行测量,每次解冻时将热电偶插入到样品的几何中心位置,温度的变化每1 h记录一次。总的解冻时间是指样品几何中心温度从初始温度(-18℃)上升到(2℃)所用的时间。

1.2.2.2 解冻汁液流失率及流失汁液蛋白质质量分数测定 样品在解冻前先进行称重(A_1)。待肉样完全解冻后先用吸水纸擦拭其表面渗出的汁液,至表面无明显水光后称量其重量(A_2),解冻前后重量变化即为解冻损失,表示为:

$$\text{解冻汁液流失率}(\%) = (A_1 - A_2) / A_1 \times 100$$

吸取流失汁液5 mL,0.2 g硫酸铜、3 g硫酸钾及10 mL硫酸于消化管中置于石墨消解仪中进行消解,待溶液呈绿色冷却至淡蓝色时上凯氏定氮仪中蒸馏后滴定。流失汁液中蛋白质质量分数的测定方法按照GB 5009.5-2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》进行。

1.2.2.3 蒸煮损失测定 蒸煮损失测定的方法参考NY/T 2793-2015《肉的食用品质客观评价方法》。将解冻后的肉样,用滤纸吸干表面水分,用温度记录仪测定肉样品的中心温度,称重记为 B_1 后置于蒸煮袋内,将样品置于72℃水浴锅中加热,当肉样中心温度为70℃,立即取出,冷却至室温后取出肉样称重记为 B_2 。每组样品进行3次平行实验。计算公式如下:

$$\text{蒸煮损失率}(\%) = (B_1 - B_2) / B_1 \times 100$$

1.2.2.4 色泽及流失汁液色泽测定 用台式分光测色仪YS6060测量牛肉解冻后的表面颜色,测量模式:反射模式,测量口径为25 mm,光源D65,10°标准观测仪和CIE $L^*a^*b^*$ 显色系统。从每个样品表面随机选取三个位置以获得各位置的颜色,分别记录 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值, L^* 值表示亮度, a^* 值表示红绿范围, b^* 值表示蓝黄范围。最终每个样品的颜色 L^* 、 a^* 和 b^* 值为这三点的平均值。

用台式分光测色仪YS6060测量牛肉解冻后的流失汁液色泽,测量模式:透射模式,其余条件与肉色泽测量条件一致。

1.2.2.5 剪切力测定 测定完蒸煮损失后,将肉样分割成1 cm×1 cm×2 cm的肉柱,使用肌肉嫩度仪并沿垂直肌纤维方向剪切样品,并记录其剪切力值(N)。

1.2.2.6 pH测定 手持pH计进行两点校准,校准后将便携式pH计的探头插入肉样中心,测定其pH,待读数稳定,每组肉样随机测试3次,结果取平均值。

1.2.2.7 TVB-N测定 称取肉样30 g,绞肉机搅碎,按照GB 5009.228-2016《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》测定TVB-N值。

1.2.2.8 菌落总数测定 称取肉样25 g,绞肉机搅碎,加入到225 mL 0.9%无菌NaCl溶液中,制备10倍稀释液。菌落总数的测定方法按照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》进行。

1.2.2.9 挥发性化合物测定 牛肉用绞肉机搅碎,进行样品测定前称取5 g样品于20 mL顶空进样瓶中。顶空气相瓶内的孵化温度为55℃、孵化时间10 min。色谱柱类型:FS-SE-54-CB-0.5 15m ID:0.53 mm,色谱柱温度60℃、运行时间20 min,载气:高纯氮气(≥99.999%),流速梯度设置为0~2 min为2.00 mL/min,2~4 min由2.00 mL/min增至10.00 mL/min,4~6 min增至20.00 mL/min,6~10 min增至50.00 mL/min,10~12.3 min增至80.00 mL/min,12.3~15 min增至100.00 mL/min,15~17.3 min增至125.00 mL/min,17.3~20 min保持150.00 mL/min。顶空进样针温度60℃、气体进样量1000 μL。

挥发性化合物采用2014NIST气相保留指数数据库的标准质谱图对得到的谱图进行串联检索和人工解析,通过二维正交进行定性分析;以C4~C9的酮为外标物,计算各化合物的保留指数,作为辅助定性;最后,采用面积归一法计算不同组分的峰面积占总峰面积的比值,表示为不同挥发性化合物的相对含量。保留指数(Retention Index, RI)计算公式如下:

$$RI = 100n + 100 \times \frac{T_{Rx} - T_{Rn}}{T_{Rn+1} - T_{Rn}}$$

式中:RI表示待测组分的保留指数; T_{Rx} 表示为待测组分的保留时间s; n 和 $n+1$ 分别表示为外标物的碳原子数; $T_{Rn} < T_{Rx} < T_{Rn+1}$ ^[19]。

1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2022软件处理数据,指标测定为3次平行测定结果,表示为平均值±标准差,利用IBM SPSS Statistics 26统计分析软件进行显著性分析($P < 0.05$);分析图采用SigmaPlot 15.0软件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同低压静电场处理对牛肉解冻时间的影响

在解冻过程中,解冻时间对冻肉解冻品质起着至关重要的作用。图1为不同板间距低压静电场处理组与对照组牛肉样品的解冻复温曲线。如图1所示,对照组与处理组解冻过程具有相同温度变化趋势。在0~1 h所有样品的中心温度迅速升高,可能是由于解冻初期样品与周围环境温差较大造成的。1 h后复温曲线明显减缓,这是因为随着样品中含冰量的减少,导热率降低,因此解冻速度下降^[20]。整个解冻过程,CK处理组解冻时间为18 h,LVEFT20处理组解冻时间为15 h,LVEFT30处理组解冻时间为11 h,LVEFT40处理组解冻时间为14 h,其中解冻时间以LVEFT30最短,比CK缩短38.89%,其次是LVEFT20和LVEFT40,分别较CK组缩短16.67%

和 22.22%, 这可能与低压静电场处理产生的电晕风促进热传递从而缩短牛肉的解冻时间有关^[21]。可见, 适宜的低压静电场处理有助于缩短牛肉的解冻时间。

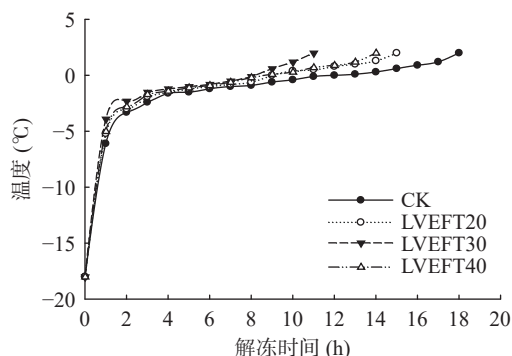


图 1 不同低压静电场解冻处理条件下牛肉的解冻曲线

Fig.1 Thawing curves of beef under different low voltage electrostatic field thawing treatment conditions

2.2 不同低压静电场处理对牛肉解冻损失率、流失汁液中蛋白质质量分数及蒸煮损失的影响

牛肉解冻过程中随着解冻汁液的流失, 牛肉中的营养物质和蛋白质也会减少, 从而影响其口感和营养价值^[22-23]。如图 2 所示, 处理组 LVEFT20、LVEFT30、LVEFT40 的肉样解冻汁液流失率分别为 5.88%、4.51%、5.39%, 显著低于 CK 的 8.32% ($P<0.05$); 流失汁液中蛋白质质量分数分别为 13.66%、11.55%、13.07%, 显著低于 CK 的 14.68% ($P<0.05$); 流失汁液中蛋白质质量分数越高, 说明经解冻后肉的营养价值越低。表明低压静电场解冻改善了牛肉在解冻过程中的液体渗出, 降低牛肉在解冻后的营养流失。其中, 处理组 LVEFT30 处理后的牛肉汁液流失现象改善最为明显。

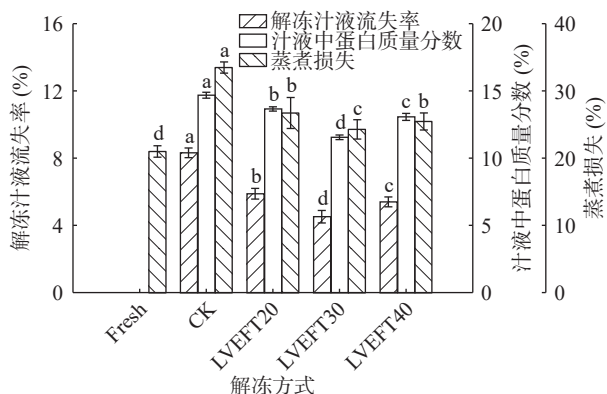


图 2 不同低压静电场处理对冷冻牛肉解冻汁液流失率、汁液中蛋白质质量分数和蒸煮损失的影响

Fig.2 Effect of different low voltage electrostatic field treatments on thawing juice loss, protein amount fraction in juice and cooking loss of frozen beef

注: 图中不同字母表示同一指标不同组别差异显著 ($P<0.05$), 图 3 同。

为进一步评价解冻牛肉的保水性, 本研究对蒸

煮损失进行了测定, 从图 2 可知, CK 处理组解冻后, 牛肉的蒸煮损失达到 33.48%, 而处理组 LVEFT20、LVEFT30 和 LVEFT40 蒸煮损失分别达到 26.72%、24.28% 和 25.46%, 分别比 CK 降低 20.19%、27.48% 和 23.95%, 表明低压静电场处理可显著降低牛肉解冻后蒸煮损失 ($P<0.05$), 可能是由于低压静电场解冻有效地保留了蛋白质与水之间的结合能力^[24]。可见, 适宜的低压静电场可从一定程度上抑制牛肉解冻蒸煮损失, 其中处理组 LVEFT30 效果最显著。

2.3 不同低压静电场处理对牛肉色泽及汁液色泽的影响

冻肉解冻后色泽的变化是消费者衡量其可接受程度的重要指标^[25-26]。由表 1 可知, 新鲜牛肉 L^* 和 a^* 值分别为 37.97 和 20.43, 解冻后, CK 对照组 L^* 和 a^* 显著降低 ($P<0.05$), 而处理组 LVEFT20、LVEFT30 和 LVEFT40 牛肉的色差值均与 Fresh 无显著差异 ($P>0.05$)。表明低压静电场辅助解冻有利于维持解冻后牛肉的色泽。

研究发现, 牛肉解冻后汁液中除有本身的水分外, 还有包含一些溶解在其中的肌红蛋白、矿物质、维生素等物质, 流失汁液的 a^* 值可从一定程度上反映其溶质含量^[27]。由表 1 可以看出, 对照组 CK 牛肉解冻流失汁液 a^* 值达到 51.44, 处理组 LVEFT20、LVEFT30 和 LVEFT40 解冻后牛肉汁液 a^* 值依次为 47.15、45.85 和 47.54, CK 处理显著高于低压静电场各处理组 ($P<0.05$), 可能由于对照组 CK 解冻过程中冰晶对细胞的严重损伤导致流失汁液中溶质含量高, 或随着解冻时间的延长流失汁液中的肌红蛋白氧化为氧合肌红蛋白所致^[28]。可见, 低压静电场处理可显著抑制牛肉解冻后汁液 a^* 值变化, 其中处理组 LVEFT30 效果最为明显。

2.4 不同低压静电场处理对牛肉剪切力和 pH 的影响

剪切力值是肌肉嫩度的反映指标, 剪切力越大, 肌肉嫩度越差^[29]。由表 1 可知, 牛肉解冻后, 处理组 LVEFT20、LVEFT30 和 LVEFT40 肉样的剪切力分别为 69.04、66.99 和 68.77 N, 显著低于 CK 的 87.96 N ($P<0.05$), 可能是由于肌纤维的严重收缩, 肌节缩短, 纤维密度增加, 使肌肉的保水性下降, 导致剪切力值的增加^[20-32]。低压静电场辅助解冻减轻了冰晶对牛肉组织结构造成的损伤, 显著改善了解冻后牛肉的嫩度, 其中处理组 LVEFT30 与鲜牛肉剪切力更接近。

pH 在一定程度上能反映肉的持水能力^[33]。从表 1 可知, 新鲜牛肉 pH 为 5.55, 解冻后 CK 处理组牛肉 pH 为 5.29, 下降了 4.68%, 而处理组 LVEFT20、LVEFT30 和 LVEFT40 的肉样 pH 与鲜牛肉无显著差异 ($P>0.05$), 可能是因为低压静电场处理有利于维持牛肉的保水性, 电场作用对牛肉中离子平衡破坏程度较小^[34], 也与低压静电场解冻抑制牛肉蛋白质变性抑制氢离子的释放有关^[35]。可见, 低压静电场解冻处理对利于维持牛肉解冻后 pH。

表 1 不同低压静电场处理对冷冻牛肉色差、流失汁液色差、pH、剪切力的影响

Table 1 Effect of different low voltage electrostatic field treatments on color difference of frozen beef, color difference of lost juices, pH, and shear force

处理	肉色泽			汁液色泽	pH	剪切力(N)
	L^*	a^*	b^*	a^*		
Fresh	37.97±0.32 ^a	20.43±0.64 ^a	13.94±0.99 ^a		5.55±0.11 ^a	63.97±1.01 ^c
CK	34.96±1.05 ^b	18.51±0.47 ^b	14.01±0.78 ^a	51.44±0.09 ^a	5.29±0.06 ^b	87.96±1.53 ^a
LVEFT20	36.14±1.46 ^{ab}	19.14±0.59 ^{ab}	13.80±0.21 ^a	47.15±0.20 ^c	5.45±0.01 ^a	69.04±1.43 ^b
LVEFT30	37.83±1.12 ^a	20.34±0.26 ^a	13.90±0.47 ^a	45.85±0.05 ^d	5.52±0.04 ^a	66.99±1.01 ^{bc}
LVEFT40	36.04±0.14 ^{ab}	19.25±0.91 ^{ab}	13.82±0.23 ^a	47.54±0.10 ^b	5.44±0.02 ^a	68.77±0.95 ^b

注:表中同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.5 不同低压静电场处理对牛肉 TVB-N 值和菌落总数的影响

TVB-N 主要由肌肉食品中的蛋白质或非蛋白氮化合物通过腐败微生物降解产生,被广泛用作肉类食品的新鲜度指标^[36]。如图 3 所示,牛肉解冻处理后,TVB-N 值均有不同程度的增加。检测发现,新鲜牛肉 TVB-N 值为 9.49 mg/100 g,解冻后对照组 CK、处理组 LVEFT20、LVEFT30 和 LVEFT40 肉样的 TVB-N 分别为 11.83、10.57、9.85 和 10.61 mg/100 g,与牛肉鲜样相比,解冻后各组牛肉 TVB-N 值分别增加了 24.66%、11.38%、3.8% 和 11.80%,其中低压静电场组 TVB-N 值增幅显著低于对照组 CK($P<0.05$),表明低于静电场处理解冻可显著抑制牛肉蛋白的分解,减缓其腐败程度,其中处理组 LVEFT30 抑制 TVB-N 值增加效果最显著。

菌落总数可以作为评估肉品新鲜度和食用安全的重要指标之一^[37]。图 3 为不同解冻处理对牛肉菌落总数的影响。可以看出,各解冻处理组牛肉样品的菌落总数均显著大于新鲜牛肉($P<0.05$)。LVEFT20、LVEFT30 和 LVEFT40 处理组的肉样菌落总数分别为 3.35、2.71 和 3.32 lg CFU/g,显著低于 CK 的 4.12 lg CFU/g($P<0.05$),可能是低压静电场处理组解冻时间较短以及静电场条件下改变了微生物细胞膜内外电势,抑制了微生物的生长及繁殖^[15]。可见,低压静电场解冻可抑制牛肉微生物的生长繁殖,其中,

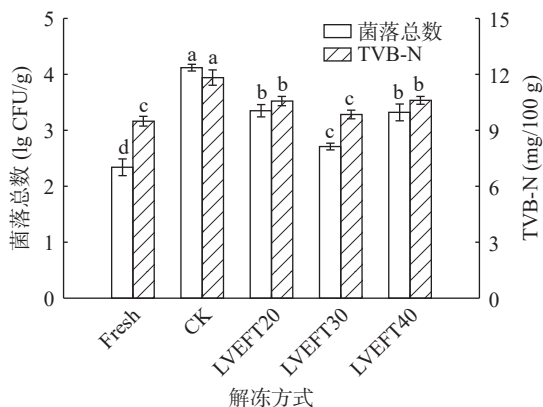


图 3 不同低压静电场处理对冷冻牛肉 TVB-N 值和菌落总数的影响

Fig.3 Effects of different low voltage electrostatic field treatments on TVB-N values and colony counts of frozen beef

LVEFT30 维持解冻牛肉新鲜度的效果最好。

2.6 不同低压静电场处理冷冻牛肉解冻后中挥发性化合物分析

运用 GC-IMS 对比不同解冻条件处理下牛肉的挥发性化合物差异,利用 LAV 分析软件中 Report 插件功能,分别生成了三维图谱(图 4)和二维差异图谱(图 5)。图 4 和图 5 中,颜色深浅表示挥发性化合物含量的高低,浅蓝色表示牛肉挥发性化合物含量较低,红色表示牛肉挥发性化合物含量较高。可直观看出,与新鲜牛肉相比,经不同低压静电场解冻后的牛肉,挥发性化合物含量发生不同程度的变化(如图 4 和图 5 中 a、b、c、d、e 区域所示)。其中 LVEFT30 条件下 a、b、c、d 区域中的含量接近新鲜牛肉;CK 条件下 e 区域中的含量高于各处理组,可能是因为 CK 处理组解冻时间较长,牛肉在长时间解冻过程中会发生复杂的脂肪酸、氨基酸及碳水化合物等生理生化代谢反应所致^[38-39]。图 6 中,选取新鲜牛肉的谱图作为参比,扣除其谱图后得到其他样品谱图。当挥发性化合物含量相同时,背景颜色为白色,而当挥发性化合物含量超过参照值时,颜色为红色,低于参照值时,颜色为蓝色。通过图 6 可以更加明显地看出,对照组 CK 解冻处理下牛肉挥发性化合物含量与新鲜牛肉差异较大。综合得出,LVEFT30 处理组解冻后挥发性化合物含量更接近新鲜牛肉。

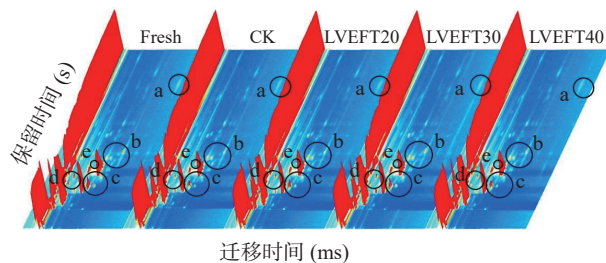


图 4 不同低压静电场处理冷冻牛肉样品中挥发性化合物三维图谱

Fig.4 Three-dimensional spectrum of volatile compounds in frozen beef samples treated by different low voltage electrostatic fields

为了更加直观地对比分析低压静电场处理对牛肉解冻后挥发性化合物的影响,由表 2 可知,牛肉中共有 32 种挥发性化合物,其中酮类 14 种、醇类 7 种、醛类 5 种、酯类 3 种、酸类 2 种、未知物 1 种,

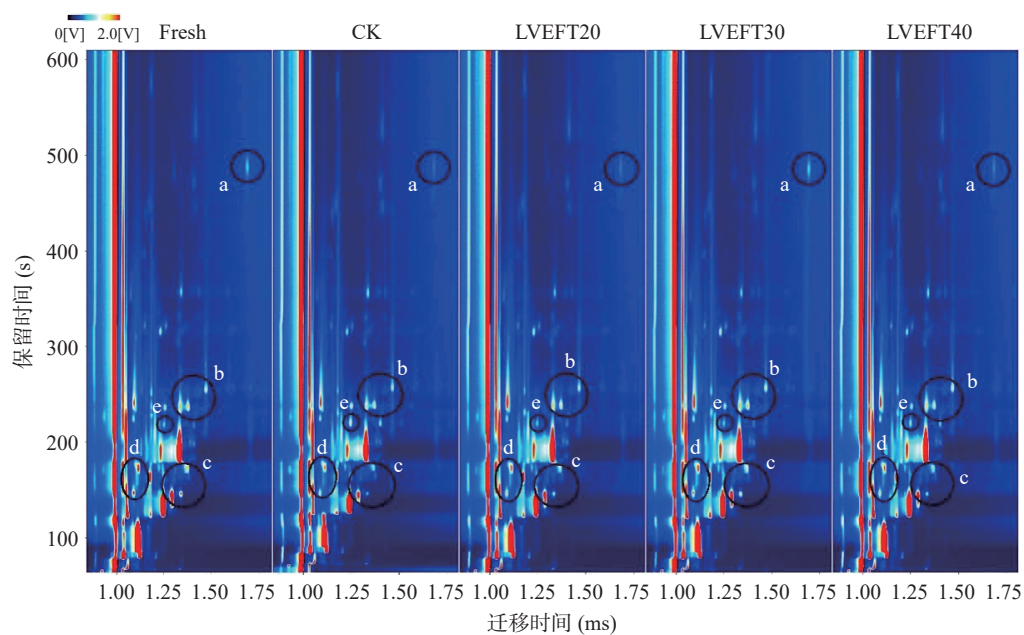


图 5 不同低压静电场处理冷冻牛肉样品中挥发性化合物二维图谱

Fig.5 Two-dimensional spectrum of volatile compounds in frozen beef samples treated by different low voltage electrostatic fields

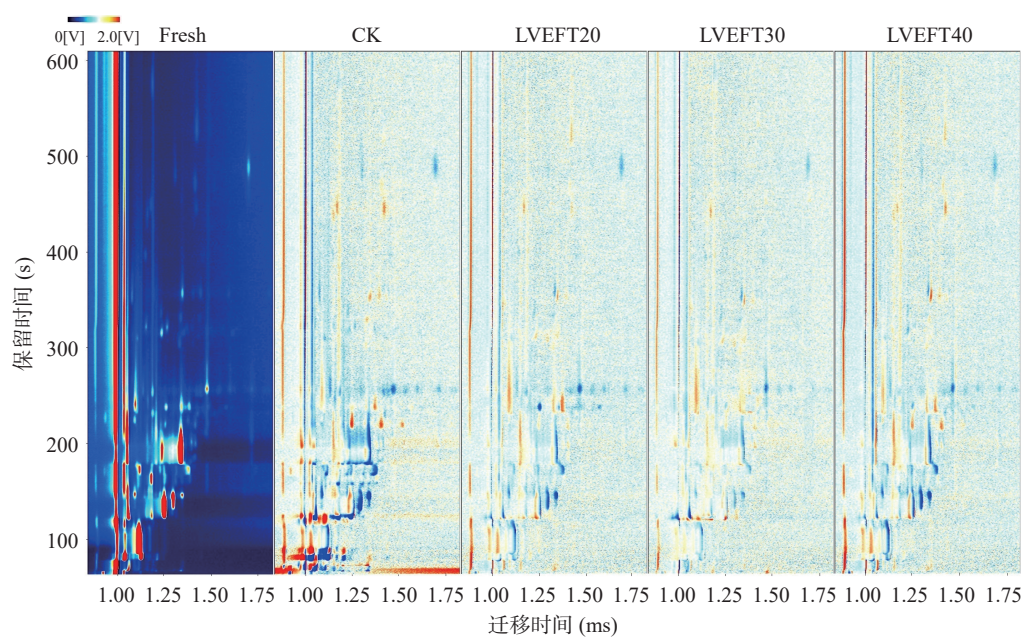


图 6 不同低压静电场处理冷冻牛肉样品中挥发性化合物二维对比差异图

Fig.6 Two-dimensional contrast difference of volatile compounds in frozen beef samples treated by different low-voltage electrostatic fields

表 2 不同低压静电场处理冷冻牛肉样品中挥发性化合物分析

Table 2 Analysis of volatile compounds in frozen beef samples treated by different low voltage electrostatic fields

类别	化合物名称	RI	Rt(s)	Dt(ms)	相对含量(%)				
					Fresh	CK	LVEFT20	LVEFT30	LVEFT40
醇类	乙醇(M)	436.8	96.68	1.05	11.51±0.41 ^b	12.17±0.05 ^a	10.53±0.02 ^d	11.05±0.04 ^c	10.45±0.15 ^d
	乙醇(D)	433.7	96.06	1.13	10.29±0.11 ^a	9.82±0.19 ^b	10±0.08 ^{ab}	10.27±0.21 ^a	10.01±0.22 ^{ab}
	正丁醇	658.4	165.49	1.18	1.91±0.05 ^b	2.16±0.04 ^a	1.88±0.04 ^b	1.76±0.01 ^c	1.94±0.03 ^b
	2-甲基丁醇	714.1	193.74	1.23	1.34±0.01 ^b	1.59±0.03 ^a	1.36±0.06 ^b	1.35±0.1 ^b	1.26±0.01 ^b
	2-乙基己醇	1026.8	527.63	1.41	0.14±0.0 ^b	0.11±0.02 ^b	0.14±0.03 ^a	0.13±0.01 ^{ab}	0.14±0.01 ^{ab}
	正己醇	862.5	305.29	1.33	0.16±0.02 ^a	0.2±0.03 ^a	0.17±0.03 ^a	0.17±0.02 ^a	0.18±0.02 ^a
	异丁醇	623.9	150.71	1.17	0.24±0.01 ^a	0.19±0.02 ^b	0.21±0.01 ^b	0.23±0.0 ^a	0.21±0.01 ^b

续表 2

类别	化合物名称	RI	Rt(s)	Dt(ms)	相对含量(%)				
					Fresh	CK	LVEFT20	LVEFT30	LVEFT40
酮类	羟基丙酮	675.8	173.70	1.23	0.27±0.01 ^b	0.4±0.02 ^a	0.24±0.01 ^b	0.25±0.0 ^b	0.25±0.02 ^b
	2-丁酮(M)	591.1	138.33	1.06	3±0.24 ^a	2.51±0.16 ^b	2.77±0.13 ^{ab}	2.93±0.27 ^a	2.68±0.09 ^{ab}
	2-丁酮(D)	594.2	139.41	1.25	10.29±0.11 ^a	9.82±0.19 ^b	10±0.08 ^{ab}	10.27±0.21 ^a	10.01±0.22 ^{ab}
	羟基丙酮	642.1	158.25	1.04	0.27±0.01 ^b	0.4±0.02 ^a	0.24±0.01 ^b	0.25±0.0 ^b	0.25±0.02 ^b
	2-戊酮(M)	679	175.27	1.12	1.38±0.07 ^a	1.23±0.04 ^b	1.21±0.01 ^b	1.34±0.02 ^a	1.17±0.02 ^b
	2-戊酮(D)	673.1	172.37	1.37	0.88±0.06 ^a	0.58±0.01 ^c	0.62±0.02 ^c	0.79±0.08 ^b	0.64±0.05 ^c
	3-羟基-2-丁酮(M)	726.6	200.98	1.06	0.82±0.09 ^b	1.1±0.07 ^a	0.84±0.01 ^b	0.83±0.05 ^b	0.84±0.03 ^b
	3-羟基-2-丁酮(D)	721	197.72	1.33	7.7±0.14 ^b	9.3±0.02 ^a	7.27±0.06 ^c	7.38±0.07 ^c	7.25±0.11 ^c
	环戊酮(M)	789.3	242.63	1.10	1.28±0.11 ^c	1.6±0.04 ^a	1.48±0.08 ^{ab}	1.6±0.08 ^a	1.44±0.05 ^b
	环戊酮(D)	791.3	244.07	1.34	0.54±0.03 ^a	0.59±0.03 ^a	0.56±0.04 ^a	0.58±0.03 ^a	0.55±0.03 ^a
	2-己酮	775.4	232.49	1.19	0.38±0.02 ^a	0.34±0.01 ^b	0.35±0.03 ^b	0.39±0.01 ^a	0.37±0.02 ^b
	2-庚酮	877.9	320.85	1.26	0.33±0.0 ^a	0.27±0.01 ^b	0.28±0.01 ^b	0.31±0.02 ^a	0.28±0.03 ^b
	环己酮	879.4	322.46	1.16	0.27±0.02 ^a	0.23±0.02 ^b	0.23±0.02 ^b	0.24±0.01 ^b	0.24±0.01 ^b
	1-辛烯-3-酮	1002.8	485.93	1.68	0.27±0.06 ^a	0.19±0.01 ^b	0.18±0.01 ^b	0.25±0.01 ^a	0.22±0.01 ^b
	3-甲基-2-丁烯醛	763.9	224.52	1.10	0.36±0.06 ^b	0.55±0.02 ^a	0.33±0.01 ^b	0.24±0.01 ^b	0.34±0.01 ^b
醛类	正丁醛	601.1	141.95	1.30	4.01±0.01 ^a	2.82±0.09 ^d	2.96±0.06 ^c	3.53±0.05 ^b	2.84±0.12 ^{cd}
	庚醛	911.9	358.51	1.34	0.46±0.03 ^a	0.47±0.03 ^a	0.42±0.06 ^a	0.45±0.05 ^a	0.44±0.01 ^a
	3-甲硫基丙醛	908.9	354.89	1.08	0.26±0.02 ^a	0.2±0.01 ^b	0.19±0.03 ^b	0.25±0.02 ^a	0.18±0.02 ^b
	丙醛	505.3	112.25	1.05	1.24±0.09 ^b	1.83±0.15 ^a	0.95±0.01 ^c	1.04±0.0 ^c	0.98±0.01 ^c
	乙酸甲酯	564.3	129.27	1.18	1.7±0.34 ^a	2.08±0.14 ^a	1.71±0.14 ^a	1.63±0.62 ^a	1.52±0.0 ^a
酯类	甲酸丁酯	739.8	208.95	1.21	0.54±0.04 ^a	0.4±0.05 ^b	0.43±0.02 ^b	0.49±0.01 ^a	0.43±0.01 ^b
	2-甲基丁酸乙酯	873.7	316.50	1.23	0.78±0.03 ^a	0.58±0.02 ^b	0.6±0.07 ^b	0.77±0.02 ^a	0.59±0.05 ^b
酸类	乙酸(M)	615.5	147.38	1.10	1.46±0.04 ^a	0.9±0.09 ^d	1.09±0.04 ^c	1.22±0.03 ^b	1.04±0.02 ^c
	乙酸(D)	612.7	146.30	1.34	1.71±0.1 ^a	0.61±0.07 ^d	0.9±0.05 ^c	1.21±0.09 ^b	0.79±0.04 ^c
	未知物				0.27±0.03 ^a	0.24±0 ^a	0.24±0.01 ^a	0.25±0.01 ^a	0.25±0.01 ^a

注: RI表示保留指数; Rt表示保留时间; Dt表示迁移时间; M与D分别表示为Monomer单体与Dimer二聚体; 同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

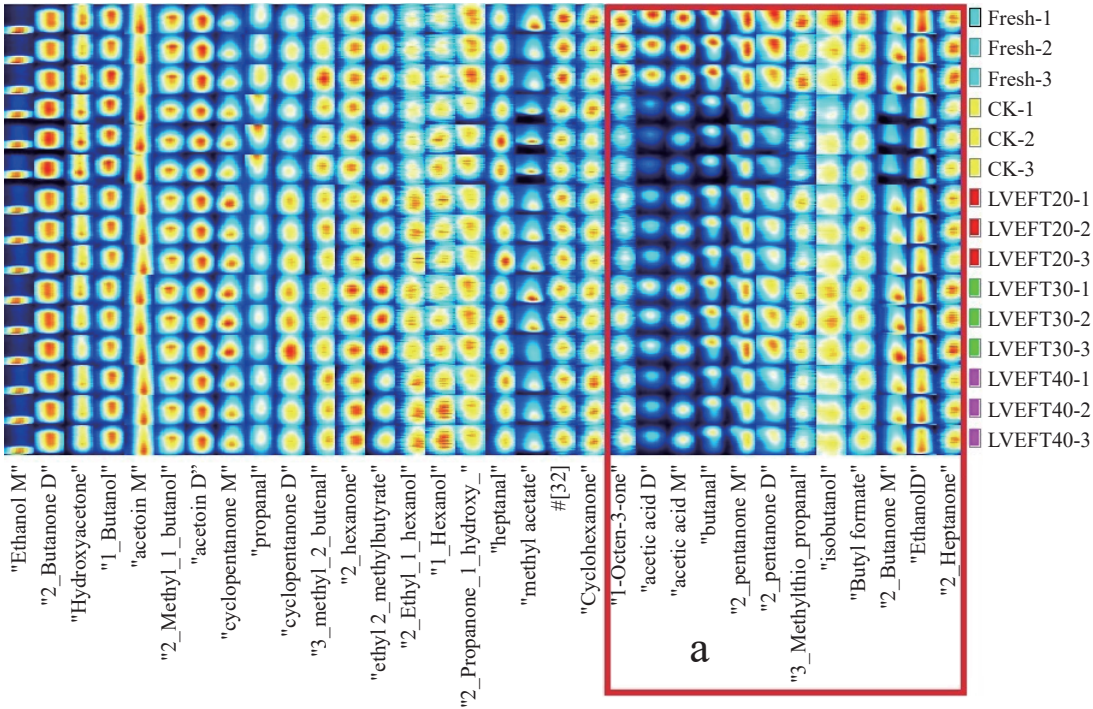


图 7 不同低压静电场处理冷冻牛肉样品中挥发性化合物指纹图谱

Fig.7 Fingerprints of volatile compounds in frozen beef samples treated with different low voltage electrostatic fields

不同低压静电场处理对牛肉 32 种挥发性化合物相对含量影响不同。利用 LAV 中的插件程序 Gallery

Plot, 进一步构建不同解冻处理下冷冻牛肉样品的指纹图谱库(见图 7), 发现与新鲜牛肉对比, 不同低压

静电场解冻处理组对牛肉挥发性化合物种类影响不显著,但对 1-辛烯-3-酮、乙酸(二聚体)、乙酸(单体)、正丁醛、2-戊酮(单体)、2-戊酮(二聚体)、3-甲硫基丙醛、异丁醇、甲酸丁酯、2-丁酮(单体)、乙醇(二聚体)、2-庚酮 12 种挥发性化合物含量的影响较大(见图 7 其红框部分),其中,CK 处理组解冻对以上 12 种挥发性化合物相对含量影响较为显著($P<0.05$),低压静电场处理组 LVEFT30 解冻牛肉对以上 12 种挥发性化合物相对含量较 CK 高 4.38%~49.59%,表明低压静电场处理有利于维持牛肉解冻后挥发性化合物的相对含量,其中 LVEFT30 处理组解冻后挥发性化合物相对含量更接近新鲜牛肉。

3 结论

本研究采用 20、30 和 40 cm 的静电板隔距处理牛肉冻样,结果发现,低压静电场处理可在不同程度缩短牛肉的解冻时间,静电板隔距不同,解冻时间不同,其中 LVEFT30 处理组解冻牛肉时间最短,为 11 h,与对照组 CK 相比缩短 38.89%。不同低压静电场处理对牛肉解冻后流失汁液、蛋白质量分数、蒸煮损失、剪切力、TVB-N 值、微生物及 12 种挥发性化合物的相对含量均有显著的影响,但对解冻后牛肉色泽、pH 影响不大。低压静电场可从一定程度抑制牛肉解冻后汁液流失、蛋白质量分数和蒸煮损失,使其牛肉的色泽及流失汁液色泽更接近于鲜样,剪切力维持在 66.99~69.04 N,TVB-N 值和微生物也均保持在牛肉食用安全范围内。系统比较分析发现,LVEFT30 处理组对牛肉的解冻效果最为明显,该结果为生产中牛肉低压静电解冻技术的应用提供了科学依据,也为今后牛肉解冻技术的升级优化与推广奠定前期工作基础。

© The Author(s) 2024. 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] AL-DALALI S, LI C, XU B. Effect of frozen storage on the lipid oxidation, protein oxidation, and flavor profile of marinated raw beef meat[J]. *Food Chemistry*, 2022, 376: 131881.
- [2] 孟新涛, 潘俨, 邹淑萍, 等. 不同储藏条件下鲜牛肉特征风味动态变化分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(15): 289-298. [MENG X T, PAN Y, ZOU S P, et al. Analysis on dynamic change of characteristic flavor of fresh beef under different storage conditions[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(15): 289-298.]
- [3] LIU H, SAITO Y, AL RIZA D F, et al. Rapid evaluation of quality deterioration and freshness of beef during low temperature storage using three-dimensional fluorescence spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2019, 287: 369-374.
- [4] ZHANG Y, DING C. The study of thawing characteristics and mechanism of frozen beef in high voltage electric field[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 134630-134639.
- [5] LI L. Effects of high pressure versus conventional thawing on

the quality changes and myofibrillar protein denaturation of slow/fast freezing beef rump muscle[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 42: e91421.

- [6] HU R, ZHANG M, JIANG Q, et al. A novel infrared and microwave alternate thawing method for frozen pork: Effect on thawing rate and products quality[J]. *Meat Science*, 2023, 198: 109084.
- [7] WU B, QIU C, GUO Y, et al. Ultrasonic-assisted flowing water thawing of frozen beef with different frequency modes: Effects on thawing efficiency, quality characteristics and microstructure[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111484.
- [8] LLAVE Y, ERDOĞDU F. Radio frequency processing and recent advances on thawing and tempering of frozen food products[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(3): 598-618.
- [9] 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 influence of electromagnetic field on muscle thawing process[D]. Hefei: Anhui Medical University, 2022.]
- [10] AMIRI A, MOISAKHANI-GANJEH A, SHAFIEKHANI S, et al. Effect of high voltage electrostatic field thawing on the functional and physicochemical properties of myofibrillar proteins[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 56: 102191.
- [11] DONG J, KOU X, LIU L, et al. Effect of water, fat, and salt contents on heating uniformity and color of ground beef subjected to radio frequency thawing process[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 68: 102604.
- [12] SUN Y, JIA Y, SONG M, et al. Effects of radio frequency thawing on the quality characteristics of frozen mutton[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2023, 139: 24-33.
- [13] YU H, MEI J, XIE J. New ultrasonic assisted technology of freezing, cooling and thawing in solid food processing: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022: 106185.
- [14] 刘蕊, 闫琳婧, 赵明博, 等. 低压静电场对冷冻猪肉冰晶生长影响的试验研究[J]. *农产品加工*, 2022(17): 20-24. [LIU R, YAN L J, ZHAO M B, et al. Experimental study on effect of low voltage electrostatic field on ice crystal growth of frozen pork[J]. *Agricultural Products Processing*, 2022(17): 20-24.]
- [15] 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 cold storage assisted by low voltage electrostatic field on beef quality[J]. *Food Science*, 2019, 42(1): 132-138.]
- [16] 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 retention of mutton[J]. *Food Science*, 2023, 44(11): 86-94.]
- [17] CHEN Z, WANG Y, GUO L, et al. Application of multi-frequency ultrasonic thawing on pork: Thawing rate, quality properties and microstructure[J]. *Food Physics*, 2024(1): 100002.
- [18] 唐树培, 李保国, 高志新. 高压静电场解冻羊胴体的实验研究[J]. *制冷学报*, 2016, 37(3): 5. [TANG S P, LI B G, GAO Z X. High voltage electrostatic field thaw sheep carcass experimental study[J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(3): 5.]
- [19] 牛志雅, 王亚杰, 张高庆, 等. 基于 GC-IMS 技术分析五种市售不同工艺油莎豆油理化品质与风味差异[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(1): 258-267. [NIU Z Y, WANG Y J, ZHANG G Q et al. Analysis of physicochemical quality and flavor differences of five

- commercially available oil with different processes based on GC-IMS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(1): 258–267.]
- [20] RAHBARI M, HANDANI N, MIRZAEI H, et al. Effects of high voltage electric field thawing on the characteristics of chicken breast protein[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 216: 98–106.
- [21] HU F, QIAN S, HUANG F, et al. Combined impacts of low voltage electrostatic field and high humidity assisted-thawing on quality of pork steaks[J]. *LWT*, 2021, 150: 111987.
- [22] CHENG H, SONG S, JUNG E Y, et al. Comparison of beef quality influenced by freeze-thawing among different beef cuts having different muscle fiber characteristics[J]. *Meat Science*, 2020, 169: 108206.
- [23] QIAN S, HU F, MEHMOOD W, et al. The rise of thawing drip: Freezing rate effects on ice crystallization and myowater dynamics changes[J]. *Food Chemistry*, 2022, 373: 131461.
- [24] QIAN S, 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.
- [25] HUGHES J M, CLARKE F M, PURSLOW P P, et al. Meat color is determined not only by chromatic heme pigments but also by the physical structure and achromatic light scattering properties of the muscle[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(1): 44–63.
- [26] POHLMAN F W. Effects of labeling and consumer health trends on preferred ground beef color characteristics, fat content, and palatability in simulated retail display[J]. *Meat and Muscle Biology*, 2017, 1(3): 9.
- [27] LI Y, JIA W, ZHANG C H, et al. Fluctuated low temperature combined with high-humidity thawing to reduce physicochemical quality deterioration of beef[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7: 3370–3380.
- [28] TIAN Y, DING C. Effect of high-voltage electric field on thawing kinetics and quality characteristics of frozen beef[J]. *Processes*, 2023, 11(9): 2567.
- [29] 张远红, 董华发, 李滢, 等. 电击晕处理对肉鸽应激及宰后鸽肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(5): 6. [ZHANG Y H, DONG H F, LI Y, et al. Effect of shock stun treatment on stress and meat quality of pigeons after slaughter[J]. *Food Science*, 2023, 44(5): 6.]
- [30] MA D, KIM Y H B. Proteolytic changes of myofibrillar and small heat shock proteins in different bovine muscles during aging: Their relevance to tenderness and water-holding capacity[J]. *Meat Science*, 2020, 163: 108090.
- [31] SUN Q, KONG B, LIU S, et al. Ultrasound-assisted thawing accelerates the thawing of common carp (*Cyprinus carpio*) and improves its muscle quality[J]. *LWT*, 2021, 141: 111080.
- [32] ZHANG M, HAILI N, CHEN Q, et al. Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles[J]. *Meat Science*, 2018, 136: 1–8.
- [33] ZHANG M, JIN Z, GUO R, et al. The two-stage air thawing based on low voltage electric field (LVEF) can make the quality of thawed chicken breast close to that before freezing[J]. *LWT*, 2023, 173: 114344.
- [34] ZHU Y, LI F, TANG J, et al. Effects of radio frequency, air and water tempering, and different end-point tempering temperatures on pork quality[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(4): e13026.
- [35] LEYJONIE C, BRITZ T J, HOFFMAN L C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat[J]. *Meat Science*, 2012, 91(2): 93–98.
- [36] ZHANG Y, LIU G, XIE Q, et al. A comprehensive review of the principles, key factors, application, and assessment of thawing technologies for muscle foods[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023, 22(1): 107–134.
- [37] 张莉, 孙佳宁, 朱明睿, 等. 解冻方式对羊肉品质及微观结构的影响[J]. *核农学报*, 2022, 36(8): 1607–1617. [ZHANG L, SUN J N, ZHU M R, et al. Effects of thawing methods on quality and microstructure of mutton[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2022, 36(8): 1607–1617.]
- [38] LIN R, YUAN H, WANG C, et al. Study on the flavor compounds of fo tiao qiang under different thawing methods based on GC-IMS and electronic tongue technology[J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1330.
- [39] BAP G, NIU J, LI S, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the quality, nutrients and volatile compounds of dry-cured yak meat[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 82: 105864.