

## 低压静电场协同低温高湿解冻对牛肉嫩度和持水性的影响

李晴晴，白小佳，林珩迅，张春晖，夏双梅，李侠

### Effects of Low Voltage Electrostatic Field Combined with Low Temperature and High Humidity Thawing on Beef Tenderness and Water Retention

LI Qingqing, BAI Xiaojia, LIN Hengxun, ZHANG Chunhui, XIA Shuangmei, and LI Xia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110149>

## 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>

#### 超高压处理协同低温贮藏对卤牛肉品质的影响

Effect of Ultra-High Pressure Combined with Low Temperature Storage on Quality of Marinated Beef  
食品工业科技. 2021, 42(21): 334–343 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030049>

#### 超声波协同冷冻保护剂对速冻饺子馅持水性及质构的影响

Effect of Ultrasonic Synergistic Cryoprotectant on Water Retention and Texture of Quick-frozen Dumplings Stuffing  
食品工业科技. 2020, 41(11): 1–6 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.11.001>

#### 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>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李晴晴,白小佳,林珩迅,等. 低压静电场协同低温高湿解冻对牛肉嫩度和持水性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(20): 49–58.  
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110149

LI Qingqing, BAI Xiaoja, LIN Hengxun, et al. Effects of Low Voltage Electrostatic Field Combined with Low Temperature and High Humidity Thawing on Beef Tenderness and Water Retention[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(20): 49–58. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110149

· 研究与探讨 ·

# 低压静电场协同低温高湿解冻对牛肉嫩度和持水性的影响

李晴晴<sup>1,2</sup>,白小佳<sup>1</sup>,林珩迅<sup>2</sup>,张春晖<sup>2</sup>,夏双梅<sup>3,\*</sup>,李侠<sup>2,\*</sup>

(1.天津科技大学食品科学与工程学院,天津 300457;

2.中国农业科学院农产品加工研究所,农业农村部农产品加工综合性重点实验室,北京 100193;

3.中国农业科学院农产品加工研究所,农业农村部农产品及加工品质量监督检验  
测试中心,北京 100193)

**摘要:**为探究低压静电场协同低温高湿解冻对牛肉嫩度和持水性的影响,本研究以牛背最长肌为试验材料,分析了低压静电场解冻(电压 2500 V,温度 4 °C,相对湿度 50%)、低温高湿解冻(温度 4 °C,相对湿度 98%)、低压静电场协同低温高湿解冻(电压 2500 V,温度 4 °C,相对湿度 98%)与低温解冻(温度 4 °C,相对湿度 50%)四种解冻方式对冷冻牛肉剪切力、质构、水分分布、水分含量、持水性、感官评价的影响。结果表明:低压静电场协同低温高湿解冻的解冻时间最短(804 min),其中解冻损失(2.06%)、蒸煮损失(26.09%)与离心损失(15.00%)显著低于其余三种解冻方式( $P<0.05$ ),垂直肌纤维剪切力值(95.46 N)和平行肌纤维剪切力值(41.69 N)最低,自由水含量最低,水分迁移较少,水分含量(68.31%)最高,嫩度品质最优,该解冻方式样品的组织状态、气味、弹性及色泽均最优(总体可接受度最高);综上,低压静电场协同低温高湿解冻加快了牛肉解冻速率、减少了汁液流失,改善了牛肉持水性和嫩度,品质最佳。本研究结果将为低压静电场协同低温高湿解冻技术在冷冻牛肉解冻的产业应用提供理论依据。

**关键词:**冷冻牛肉,低压静电场,低温高湿解冻,协同作用,持水性,嫩度

中图分类号:TS251.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2024)20-0049-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110149

本文网刊:



## Effects of Low Voltage Electrostatic Field Combined with Low Temperature and High Humidity Thawing on Beef Tenderness and Water Retention

LI Qingqing<sup>1,2</sup>, BAI Xiaoja<sup>1</sup>, LIN Hengxun<sup>2</sup>, ZHANG Chunhui<sup>2</sup>, XIA Shuangmei<sup>3,\*</sup>, LI Xia<sup>2,\*</sup>

(1.College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2.Institute of Agricultural Products Processing, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China;

3.Institute of Agricultural Products Processing, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Quality Supervision, Inspection and Testing Center of Agricultural Products and Processed Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

**Abstract:** To investigate the effects of a low-pressure electrostatic field combined with low temperature and high humidity

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100803-01);“许昌英才计划”第四批创新人才团队项目(2024XCH2300702-01)。

作者简介: 李晴晴(1998-),女,硕士研究生,研究方向:肉品科学,E-mail: 2583744386@qq.com。

\*通信作者: 夏双梅(1971-),女,硕士,副研究员,研究方向:食品分析检测,E-mail: xiashuangmei@caas.cn。

李侠(1985-),女,博士,副研究员,研究方向:肉品科学,E-mail: lixia5299@163.com。

on beef tenderness, this study utilized bovine *longissimus dorsi* muscle as the experimental material. The analysis included low-pressure electrostatic field thawing (at a temperature of 4 °C and relative humidity of 50%), low temperature and high humidity thawing (at a temperature of 4 °C and relative humidity of 98%), low-pressure electrostatic field combined with low temperature and high humidity thawing (temperature 4 °C and relative humidity 98%), and low temperature thawing (temperature 4 °C and relative humidity 50%). The parameters examined encompassed shear force, texture, water distribution, water content, water holding capacity, and sensory evaluation of frozen beef. The findings revealed that low-voltage electrostatic field combined with low-temperature and high-humidity thawing exhibited the shortest thawing time (804 min) compared to the other three thawing methods. The thawing loss (2.06%), cooking loss (26.09%), and centrifugation loss (15.00%) were significantly lower than the other three thawing methods ( $P < 0.05$ ). The shear force values for vertical muscle fibers (95.46 N) and parallel muscle fibers (41.69 N) were the lowest, while water content (68.31%) was the highest, indicating superior tenderness quality. Sensory evaluation results indicated that the tissue state, odor, elasticity, and color of meat samples thawed by low-voltage electrostatic field combined with low temperature and high humidity were superior to those of other thawing methods, with the overall acceptability being the highest.

**Key words:** frozen beef; low-pressure electrostatic field; low temperature and high humidity thawing; synergistic effect; water retention; tenderness

牛肉营养丰富,具有高蛋白质、低脂肪的特点,深受消费者的喜爱<sup>[1-2]</sup>。2022年中国牛肉产量718万吨,但是无法满足市场需求,进口量仍达到269万吨<sup>[3]</sup>。冷冻可有效延缓因微生物繁殖导致的品质劣变,延长保质期,是肉品国际贸易流通的主要形式<sup>[4]</sup>。解冻作为冷冻肉加工前必不可少的步骤,直接影响其品质。这是由于解冻过程中发生的物理化学变化及微生物生长导致了肉色泽、质构、风味等品质的劣变。传统的解冻方式通过冷水、空气等方式实现解冻<sup>[5]</sup>,但解冻速率慢、解冻汁液流失严重<sup>[6]</sup>。研究表明缓慢的解冻速率会导致冰晶在0 °C发生重结晶,对肌肉的界面张力和组织结构造成破坏,影响蛋白结构及其水合能力,导致冷冻肉解冻后持水性下降,质构发生劣变<sup>[7]</sup>。针对冷冻肉解冻损失率高、组织结构损伤严重、质构品质差的问题,近年来国内外学者提出了新型复合解冻技术,例如脉冲磁场辅助解冻<sup>[8]</sup>;超声联合远红外或微波解冻<sup>[9]</sup>;超声辅助微酸性电解水解冻<sup>[10]</sup>、射频加热技术<sup>[11]</sup>等。但上述几种复合解冻方式操作繁琐,设备成本高,短时间内难以产业化应用。因此,还需进一步开发简单高效的协同解冻方式。

低压静电场作为一种新型非热保鲜技术<sup>[12]</sup>,具有能耗低、效率高、成本低、操作简单等优势<sup>[13]</sup>。在解冻过程中低压静电场会使得带电粒子在电场作用下发生定向运动,形成离子风,加速冰晶的融化<sup>[14]</sup>,从而加快解冻速率,并且低压静电场还能延缓蛋白变性,保持肉样光泽,维持肉样品质<sup>[15]</sup>。胡斐斐等<sup>[16]</sup>通过研究低压静电场辅助解冻对猪肉的影响,发现该方式可以有效延缓猪肉品质的劣变,加快解冻速率。另外,高湿解冻作为一种备受关注的解冻方式,其通过保持较高的相对湿度可使肉样表面形成水膜,防止肉样与氧气过分接触,从而有效地维持解冻肉颜色的稳定性<sup>[17]</sup>。同时高湿条件可能会改变解冻环境的介电特性,增强静电效应,提高冰晶消融速率<sup>[18-19]</sup>。因此为进一步提高解冻肉的品质,基于两种解冻方式的解

冻效果和作用原理,本文提出了一种新型的复合解冻方式。

本研究旨在低温高湿环境下引入低压静电场技术,以牛背最长肌(*Longissimus dorsi*)作为实验材料,通过探究低温解冻、低压静电场解冻、低温高湿解冻及低压静电场协同低温高湿解冻对牛肉嫩度及持水性表征指标的影响,以期为低压静电场协同低温高湿解冻技术在冷冻肉解冻阶段的产业应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

牛肉 购自河北福成五丰食品股份有限公司三河肉牛屠宰分公司,选取10头长势相似、检疫及格、重量约为300 kg的2岁公牛,每头牛宰后悬挂风冷排酸24 h(温度0~4 °C、相对湿度90%、循环冷风风速2 m/s),取两条牛背最长肌,共20条,全程4 °C低温冷链运输至实验室。

YC-520L 冰箱 长虹美菱股份有限公司;DEN-BAs 静电场装置 日本 AGUA 商事株式会社;L93-4 温度记录仪 杭州路格科技有限公司;NK5500 湿度记录仪 美国 Kestrel 有限公司;MesoMR23-060H-I 低场核磁共振仪 上海纽迈电子科技有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 材料预处理 选取10头牛左右两侧牛背最长肌,共20条,剔除可见脂肪、筋膜及结缔组织,每条牛背最长肌平均切割为5块(5 cm×4 cm×3 cm, 85 g),共100块,每个处理组从每条牛背最长肌中取出一块,共20块,5组,分别为鲜样(fresh meat, FM)、低温解冻(low temperature thawing, RT)、低温高湿解冻(low temperature and high humidity thawing, LHHT)、低压静电场解冻(low voltage electrostatic field defrosting, LVEF-RT)以及低压静电场协同低温高湿解冻(low-voltage electrostatic fields synergize

with low-temperature and high-humidity thawing, LVEF-LHHT)。鲜样作为对照组, 其他解冻组环境温度均设置为 4 ℃, 高湿组相对湿度为 98%, 低湿组则为 50%。将 RT, LHHT, LVEF-RT, LVEF-LHHT 4 组样品置于冰箱-18 ℃ 下冻藏 7 d 后取出, 在相应解冻条件下进行解冻处理, 待肉样中心温度上升至 4 ℃ 认为解冻完成。

**1.2.2 低压静电场协同低温高湿解冻处理** 如图 1 所示, 低压静电场协同低温高湿设备由连接板 (36 cm×30 cm), 放电源和变压器(最大输出电压 2500 V, 最大电流 0.2 mA)组成。密封的聚丙烯盒 (15 cm×12 cm×9 cm)两侧固定了 2 块吸收 45 mL 蒸馏水的聚乙烯醇海绵 (9 cm×6 cm×2.5 cm)构成 LVEF-LHHT 和 LHHT 组所需高湿环境。将未处理海绵放置在 RT 组和 LVEF-RT 组盒子内部进行对照处理。待冷冻完成后, 取出 20 块肉样放置在 7 个聚丙烯盒中作为一个解冻组, 放样完成后加盖密封将所有样品立即置于 4 ℃ 冰箱中解冻, 区别在于非低压静电场处理组直接置于冰箱中即可, 而低压静电场解冻组则需将聚丙烯盒放置在通电的静电板上。

**1.2.3 解冻曲线测定** 参考杨川等<sup>[20]</sup> 的方法并稍作修改, 温度记录仪测定时间间隔为 1 min, 冻藏前选取三块肉样将温度计探针插入中心部位, 连接温度记录仪, 实验时打开温度记录仪, 当牛肉中心温度升至 4 ℃ 则视为实验完成。使用 LOGGER 软件获取数据并绘制曲线。

**1.2.4 贮藏损失率的测定** 参考 Zhang 等<sup>[21]</sup> 的方法, 分别称取牛肉冻藏前质量 ( $M_0/g$ ) 和解冻后质量 ( $M_1/g$ ), 称重前先将牛肉表面擦干, 贮藏损失率公式如下:

$$\text{贮藏损失率}(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

**1.2.5 离心损失率的测定** 参考 Li 等<sup>[22]</sup> 的方法并稍作修改, 将解冻后牛肉切为 1 g 大小后用滤纸包好放入离心管中 1500×g 离心 5 min, 分别称量牛肉离心前质量 ( $M_2/g$ ) 和离心后质量 ( $M_3/g$ ), 离心损失率公

式如下:

$$\text{离心损失率}(\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_2} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

**1.2.6 蒸煮损失率的测定** 参考 Zhang 等<sup>[21]</sup> 的方法, 称取牛肉蒸煮前质量 ( $M_4/g$ ), 将牛肉放入蒸煮袋中, 置于 80 ℃ 水浴锅中加热 30 min, 流动水降温至 25 ℃ 后称取蒸煮后质量 ( $M_5/g$ ), 蒸煮损失率公式如下:

$$\text{蒸煮损失率}(\%) = \frac{M_4 - M_5}{M_4} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

**1.2.7 pH 的测定** 参考颜培等<sup>[23]</sup> 的方法, 将手持式 pH 计探针冲洗明净并擦干, 探头插入牛肉中, 点击测定, 数值稳定后读数并记录, 每次测定完成后将探头洗净。

**1.2.8 剪切力的测定** 参考王策<sup>[24]</sup> 的方法并稍作修改, 将牛肉置于蒸煮袋中并放置在 80 ℃ 水浴锅中加热 30 min 后冷却至室温, 将牛肉沿肌纤维方向切成 2 cm×1 cm×1 cm 大小的长方体, 分别测定垂直于肌纤维方向和平行于肌纤维方向的剪切力, 测定前速度、测定速度和测定后速度均为 2 mm/s。每个处理组进行 6 次重复。

**1.2.9 质构(texture profile analysis, TPA)的测定** 参考杨汝晴等<sup>[25]</sup> 的方法并稍作修改, 将牛肉置于蒸煮袋中并放置在 80 ℃ 水浴锅中加热 30 min, 测定样品硬度、恢复力、内聚力、弹性、黏性和咀嚼性, 设定触发类型和触发力分别为 Strain 和 5 g, 测前速度为 2 mm/s, 测定速度为 2 mm/s, 测后速度为 5 mm/s。测定方向为沿肌纤维平行方向。每个处理组进行 6 次重复。

**1.2.10 低场核磁弛豫时间** 低场核磁共振 (low field-nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 参考李侠等<sup>[26]</sup> 的方法并稍作修改, 将解冻后的牛肉切成 2 cm×2 cm×3 cm 的长方形块, 放入核磁共振管中心位置进行测量, 主频 23 MHz, 偏移频率 250 kHz, 90°脉冲时间 22 μs, 180°脉冲时间 44 μs, 采样点数 250060, 重复时间 100000 ms, 累加次数 8 次, 回波

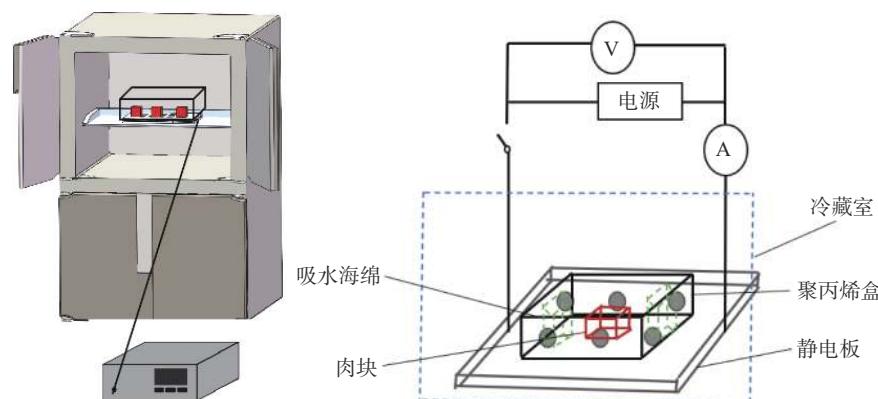


图 1 低压静电场协同低温高湿解冻设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of low voltage electrostatic field combined with low temperature and high humidity thawing equipment

数2000。选取CPMG序列测定T<sub>2</sub>值,将得到的信号值进行反演。

**1.2.11 氢质子成像观察** 氢质子成像观察参考刁华玉等<sup>[27]</sup>的方法并稍作修改,将解冻后的牛肉切成2 cm×2 cm×3 cm的长方形块,放入核磁管中心位置进行测量,采用自旋回波成像序列对牛肉进行氢质子密度成像观察。重复时间为2000 ms,通过CPMG序列测得T<sub>2</sub>值,选取自旋回波时间20 ms。

**1.2.12 水分含量的测定** 水分含量测定参考国标GB 5009.3-2016测定方法,选用直接干燥法进行测定,将坩埚置于105℃干燥箱中,瓶盖斜放于坩埚边,加热60 min,拿出盖好,置于干燥器中冷却30 min,并重复干燥至前后两次质量不超过2 mg,即为恒重,称量坩埚质量记为M<sub>6</sub>。将牛肉切碎,称取5 g(至0.0001 g)放入坩埚中,称取坩埚和肉样的质量,记为M<sub>7</sub>,然后再将坩埚放入105℃的干燥箱中,盖子斜放于坩埚边,干燥4 h,盖子盖好拿出,放置于干燥箱中冷却30 min后称量,然后再放在烘箱中干燥箱干燥60 min,放入干燥器中冷却0.5 h后称量,并重复上述操作至前后两次重量差不超过2 mg,即为最终质量。并记作M<sub>8</sub>。水分含量计算公式如下:

$$\text{水分含量}(\%) = \frac{(M_7 - M_6) - (M_8 - M_6)}{(M_7 - M_6)} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

**1.2.13 感官评价** 参考姜纪伟<sup>[28]</sup>的方法并稍作修改,采用定量描述法分别将牛肉的弹性、气味、组织状态、色泽4个部分各分为5级,评价小组由具有感官评价经验且经过专业培训的10位食品专业人员(5男5女,年龄在23~28)组成。在光线充足无气味的环境中对鲜样及四种解冻方式下的牛肉进行感官评分,感官评定人员在感官评价过程中不能相互交流,具体评分标准如表1所示,计算10位感官评价人员对不同方式解冻的牛肉评分平均值。分数在9~10之间为一级品质,7~8之间为二级品质,5~6之间为三级品质,3~4为四级品质,0~2为五级品质。

### 1.3 数据处理

除剪切力与质构指标测定重复6次,其余所有实验均重复3次,测量结果取3次平均值,采用SPSS 20.0软件进行样品间差异显著性检验分析(Duncan检验法,P<0.05),采用Origin 2021软件进

行图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同解冻方式对牛肉解冻速率的影响

解冻速率的快慢直接影响冷冻肉的品质。快速解冻下肉的保水性更好<sup>[29]</sup>,慢速解冻则会引起微生物生长繁殖、蛋白质氧化等问题,从而导致肉品质劣变。然而,也有研究持相反观点,认为慢速解冻有利于减少解冻损失,保持解冻肉的品质<sup>[30]</sup>。

不同解冻方式下解冻时间如图2所示,所有解冻处理组在-18~-5℃温区升温速率较快,但通过最大冰晶形成区域(-5到-1℃)时升温速率骤减,耗时最长,而该区域的解冻速率很大程度上影响了解冻时间和解冻肉品质。与RT组(1513 min)相比,LVEF-RT组(1305 min)和LHHT组(1267 min)的解冻时间较短,二者解冻效率较高<sup>[31]</sup>。电场效应促进了样品中水分子的极化,这可能会增强水分子的动能,减少相变所需的时间,并进一步加速冰晶的融化<sup>[32]</sup>;也有研究表明,静电场可使肉样冰层结构中的氢键加速断裂,进一步加快其解冻的速度<sup>[33]</sup>,因此,LVEF解冻所需时间短。Zhang等<sup>[21]</sup>和Qian等<sup>[15]</sup>的报道也证明了电场具有加快解冻速率的作用。高湿条件增加了冷冻牛肉与环境的热转换效率,提高了解冻速率,这与彭泽宇等对冷冻猪肉低温高湿解冻的研究一致<sup>[34]</sup>,与上述三种解冻方式相比,LVEF-LHHT组的解冻时

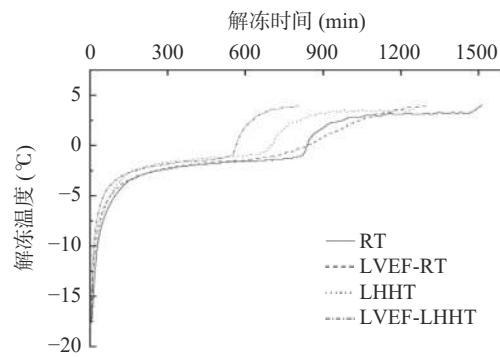


图2 不同解冻方式下牛肉的中心温度变化曲线

Fig. 2 Central temperature variation curves of beef under different thawing modes

注: FM: 新鲜样品; RT: 低温解冻; LVEF-RT: 低压静电场解冻; LHHT: 低温高湿解冻; LVEF-LHHT: 低压静电场协同低温高湿解冻。

表1 不同解冻方式下牛肉感官评价

Table 1 Sensory evaluation of beef under different thawing methods

| 弹性(10分)             | 组织状态(10分)              | 气味(10分)              | 色泽(10分)               |
|---------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|
| 按压肉样表面后立即恢复<br>9~10 | 表面清爽,不发黏<br>9~10       | 牛肉特征气味明显,无异味<br>9~10 | 色泽正常,肌肉切面富有光泽<br>9~10 |
| 按压肉样表面恢复较快<br>7~8   | 表面有少许渗出汁液,不发黏<br>7~8   | 有牛肉气味,无异味<br>7~8     | 色泽正常,肌肉切面有光泽<br>7~8   |
| 按压肉样表面凹陷恢复缓慢<br>5~6 | 表面渗出汁液较多,不发黏<br>5~6    | 无明显异味<br>5~6         | 色泽稍暗淡,肌肉切面稍有光泽<br>5~6 |
| 按压肉样表面凹陷恢复<br>3~4   | 表面渗出汁液多且浑浊,稍发黏<br>3~4  | 有酸臭味产生<br>3~4        | 色泽较暗淡,肌肉切面无光泽<br>3~4  |
| 按压肉样表面凹陷无法恢复<br>0~2 | 表面渗出汁液多且浑浊,发粘严重<br>0~2 | 异味明显,难以接受<br>0~2     | 色泽暗淡,肌肉切面无光泽<br>0~2   |

间(804 min)最短, 可能是在高湿条件下水蒸气冷凝释放大量潜热, 并在肉样表面不断形成水膜, 水的比热远大于空气, 传热速率大幅提高, 解冻时间减少<sup>[35]</sup>; 同时电场存在下电极周围产生的离子被加速, 由此产生的动量从空气中的离子转移到中性空气分子中, 形成电晕风, 而分散的流体被移到表面, 在边界层上带来湍流, 使传热速率进一步增加, 解冻速率进一步加快<sup>[15]</sup>。因此低压静电场协同低温高湿解冻的解冻效果最好, 解冻效率最高。

## 2.2 不同解冻方式对牛肉持水性的影响

牛肉的持水性可以通过贮藏损失率、离心损失率和蒸煮损失率表示。如表 2 所示, 与 FM 相比, 经过解冻后各处理组牛肉的离心损失率( $P<0.05$ )和蒸煮损失率上升( $P<0.05$ ), 表明解冻处理会降低牛肉的持水性。其中, LVEF-RT 组和 LHHT 组的贮藏损失率、离心损失率和蒸煮损失率显著低于 RT 组( $P<0.05$ )。这可能是因为 RT 组解冻时间过长, 蛋白质氧化严重, 肌肉水合能力下降, 保水性降低<sup>[36]</sup>。低压静电场和低温高湿解冻所需解冻时间较短(图 2), 并且低压静电场可促进解冻过程中蛋白复性, 有效降低了解冻过程中肌肉的汁液损失<sup>[17]</sup>; 高湿环境下解冻能够保护肉样的蛋白水合面, 降低肉样表面水分的蒸发<sup>[34]</sup>。在所有解冻处理组中, LVEF-LHHT 组的贮藏损失率(2.06%)、离心损失率(15.00%)、蒸煮损失率(26.09%)最低, 表明在高湿环境与静电效应的协同作用下, LVEF-LHHT 组能够有效加快解冻过程冰晶消融<sup>[15]</sup>, 减少牛肉解冻过程中的汁液损失, 低压静电场和低温高湿解冻协同处理能够较好地维持肌纤维的结构, 使得水分子被牢固地束缚在体系中, 从而进一步降低离心损失和蒸煮损失<sup>[15]</sup>。充分维持牛肉的保水性。

表 2 不同解冻方式对牛肉持水性的影响

Table 2 Effects of different thawing methods on water retention of beef

| 解冻方式      | 贮藏损失率(%)               | 离心损失率(%)                | 蒸煮损失率(%)                 |
|-----------|------------------------|-------------------------|--------------------------|
| FM        | /                      | 6.00±0.01 <sup>d</sup>  | 22.63±0.01 <sup>c</sup>  |
| RT        | 3.88±0.01 <sup>a</sup> | 28.67±0.01 <sup>a</sup> | 33.38±0.02 <sup>a</sup>  |
| LVEF-RT   | 2.51±0.01 <sup>b</sup> | 20.67±0.01 <sup>b</sup> | 28.80±0.02 <sup>b</sup>  |
| LHHT      | 2.39±0.01 <sup>b</sup> | 22.67±0.01 <sup>b</sup> | 28.99±0.01 <sup>b</sup>  |
| LVEF-LHHT | 2.06±0.01 <sup>c</sup> | 15.00±0.02 <sup>c</sup> | 26.09±0.02 <sup>bc</sup> |

注: 不同小写字母(a~d)表示不同解冻方式下差异显著( $P<0.05$ ); FM: 新鲜样品; RT: 低温解冻; LVEF-RT: 低压静电场解冻; LHHT: 低温高湿解冻; LVEF-LHHT: 低压静电场协同低温高湿解冻。

## 2.3 不同解冻方式对牛肉 pH 的影响

pH 是衡量生肉质量的重要指标之一, 与肉的嫩度和新鲜度有着密切的关系<sup>[37]</sup>, 排酸 24 h 的生鲜牛肉 pH 范围为 5.6~6.0<sup>[38]</sup>。不同解冻方式对牛肉 pH 的影响如图 3 所示, 与 FM 相比, 肉样解冻后各组 pH 均降低, 而 pH 的降低会导致多肽链网络结构的收缩和肌原纤维蛋白、肌浆蛋白变性, 降低肉样的保

水性<sup>[39~40]</sup>。与 RT 组、LVEF-RT 组和 LHHT 组相比, LVEF-LHHT 组牛肉的 pH 与鲜样较为接近, 可能是由于经过 LVEF-LHHT 解冻的牛肉汁液流失少, 肌肉中的矿物质和可溶性蛋白质随之流失程度也会减少<sup>[21]</sup>。这也与保水性结果一致(表 2)。

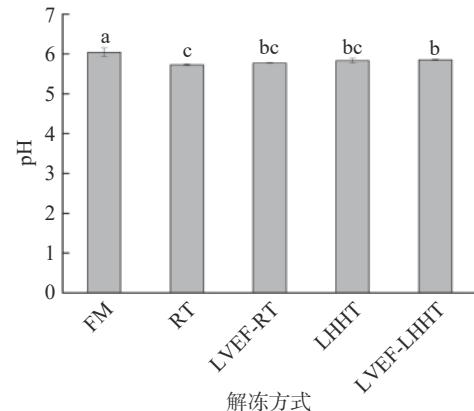


图 3 不同解冻方式对牛肉 pH 的影响

Fig.3 Effects of different thawing methods on beef pH

注: 不同小写字母(a~c)表示不同解冻方式下差异显著( $P<0.05$ ); FM: 新鲜样品; RT: 低温解冻; LVEF-RT: 低压静电场解冻; LHHT: 低温高湿解冻; LVEF-LHHT: 低压静电场协同低温高湿解冻。

## 2.4 不同解冻方式对牛肉剪切力的影响

嫩度的直接表征指标为剪切力, 嫩度与剪切力值呈负相关<sup>[41]</sup>, 而剪切力会受到肉的保水能力和结构完整性的影响<sup>[42]</sup>。如图 4 所示, 与 FM 组牛肉垂直肌纤维剪切力和平行肌纤维剪切力相比, 牛肉经过解冻后剪切力均下降, 这可能是因为肌肉的肌纤维网络结构会被冻藏期间产生的冰晶破坏<sup>[43]</sup>, 肌原纤维也会被挤压和破坏, 从而导致解冻后牛肉切割力下降<sup>[44]</sup>。其中 LVEF-LHHT 组牛肉垂直肌纤维剪切力和平行肌纤维剪切力显著低于其他解冻处理组, 这一结果可

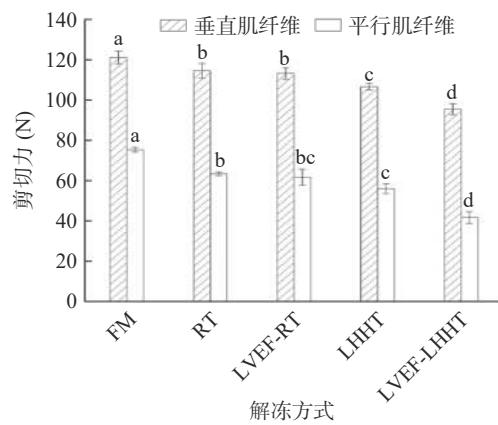


图 4 不同解冻方式对牛肉剪切力的影响

Fig.4 Effects of different thawing methods on the shear force of beef

注: 不同小写字母(a~d)表示不同解冻方式下差异显著( $P<0.05$ ); FM: 新鲜样品; RT: 低温解冻; LVEF-RT: 低压静电场解冻; LHHT: 低温高湿解冻; LVEF-LHHT: 低压静电场协同低温高湿解冻。

能是由于 LVEF-LHHT 组解冻后汁液损失较小, 从而导致肌肉内部含水量更高。因此, 切断肌肉纤维所需力量更小<sup>[44]</sup>, 这也与牛肉的持水性结果保持一致, 表明 LVEF-LHHT 更能改善牛肉的嫩度。

## 2.5 不同解冻方式对牛肉 TPA 的影响

肉样的质地特征是肉制品力学性能评价的重要指标, 硬度、内聚性、咀嚼性和弹性是评估肉类质地的代表性参数, 但在各种质地属性中, 硬度决定了肉类的商业价值, 被消费者十分看重<sup>[45]</sup>。解冻后牛肉的纹理剖面分析如表 3 所示, RT 组、LVEF-RT、LHHT 组和 LVEF-LHHT 组硬度均低于 FM 组, 说明牛肉经过解冻后嫩度增加, 这可能与酶作用引起的肌纤维断裂和冰晶形成引起的结构完整性丧失有关<sup>[46]</sup>。LVEF-LHHT 组牛肉的硬度、咀嚼性相对于 RT 组、LVEF-RT 组和 LHHT 组更低, 这可能是由于 LVEF-LHHT 处理能够有效地降低牛肉在解冻过程中肌肉的结构损伤, 完整的肌纤维结构使得牛肉具有较好的质地特性以及较高的持水性, 汁液流失少<sup>[47]</sup>, 这也与剪切力结果相一致。表明 LVEF-LHHT 对牛肉的嫩化效果较好。

## 2.6 不同解冻方式对牛肉解冻过程中水分分布的影响

牛肉水分的分布和流动性可以用 LF-NMR 来评估, 三个峰代表了三种形式的水, 弛豫时间分别是结合水( $T_{2b}$ , 范围 0.1~10 ms)、不易流动水( $T_{21}$ , 范围 10~100 ms 左右)和自由水( $T_{22}$ , 范围 100~1000 ms) (表 4)<sup>[16]</sup>, 在解冻过程中, 肌肉的结合水( $P_{2b}$ )、不易

流动水( $P_{21}$ )和自由水( $P_{22}$ )所占比例会发生改变<sup>[44]</sup>, 不同解冻方式肉样的弛豫时间如图 5 所示, 牛肉经解冻后, 弛豫时间发生右移, 不易流动水含量降低, 自由水含量升高, 解冻后肌肉中的不易流动水“态变”为自由水, 自由水含量升高, 保水性变差。这可能是由于在缓慢融化过程中, 冰晶引起的水-蛋白质相互作用减弱, 蛋白质之间的氢键断裂和水-肌原纤维结构被破坏<sup>[48]</sup>, 解冻后, 水无法回到被破坏的细胞内空间, 导致潜在的解冻损失。LVEF-LHHT 组的弛豫时间相对于 RT 组、LVEF-RT 组、LHHT 组更接近于鲜样, 自由水相对比例显著( $P<0.05$ )高于其他三种解冻方式。这可能是由于在低压静电场和低温高湿度处理的协同作用下, 蛋白质与水的结合能力较强, 抑制了由冰晶尖刺挤压引起的肌原纤维蛋白变性, 保护了肌肉纤维的完整结构<sup>[49]</sup>, 从而使得 LVEF-LHHT 组牛肉具有与鲜样相似的持水能力。

氢质子密度成像可以直观地反映水分在牛肉中的分布和迁移情况, 一般来说, 红色代表 H 质子密度高, 而蓝色表明水信号强度减弱。由图 5B 可以看出, FM 组的肉样相对于解冻后肉样偏红, 这可能是因为解冻过程中融化冰晶体中的水分会被肌纤维和蛋白质重新吸收<sup>[44]</sup>, 但是解冻会导致的肌纤维结构被破坏以及蛋白质的变性, 这些变化会使得蛋白质和水的相互作用减弱, 解冻后未被吸收的不易流动水会变为自由水, 解冻汁液发生流失; RT 组牛肉的红色部分相对于 LVEF-RT 组和 LHHT 组较少, 这可能是

表 3 不同解冻方式对质构的影响  
Table 3 Effects of different thawing methods on texture

| 解冻方式      | 硬度(N)                        | 恢复力(N)                   | 内聚力(N)                  | 弹性                      | 黏性                          | 咀嚼性(N)                       |
|-----------|------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| FM        | 3427.30±174.36 <sup>a</sup>  | 32.17±1.30 <sup>a</sup>  | 0.71±0.01 <sup>a</sup>  | 71.34±1.69 <sup>a</sup> | 3367.76±273.25 <sup>a</sup> | 1579.38±28.58 <sup>a</sup>   |
| RT        | 3396.23±249.64 <sup>ab</sup> | 26.53±0.27 <sup>c</sup>  | 0.63±0.01 <sup>d</sup>  | 62.20±0.83 <sup>d</sup> | 2093.61±105.80 <sup>b</sup> | 1527.28±122.57 <sup>ab</sup> |
| LVEF-RT   | 3166.13±129.67 <sup>b</sup>  | 27.84±0.6 <sup>bc</sup>  | 0.68±0.01 <sup>bc</sup> | 68.29±0.98 <sup>b</sup> | 2399.78±435.08 <sup>b</sup> | 1510.02±72.62 <sup>ab</sup>  |
| LHHT      | 3105.53±93.09 <sup>b</sup>   | 28.18±0.57 <sup>b</sup>  | 0.68±0.00 <sup>bc</sup> | 65.50±1.03 <sup>c</sup> | 2419.28±165.06 <sup>b</sup> | 1403.56±47.00 <sup>bc</sup>  |
| LVEF-LHHT | 3035.54±120.31 <sup>b</sup>  | 30.91±0.33 <sup>ab</sup> | 0.70±0.01 <sup>ab</sup> | 68.95±1.06 <sup>b</sup> | 2264.43±150.30 <sup>b</sup> | 1278.63±41.66 <sup>c</sup>   |

注: 不同小写字母(a~d)表示不同解冻方式下差异显著( $P<0.05$ ); FM: 新鲜样品; RT: 低温解冻; LVEF-RT: 低压静电场解冻; LHHT: 低温高湿解冻; LVEF-LHHT: 低压静电场协同低温高湿解冻。

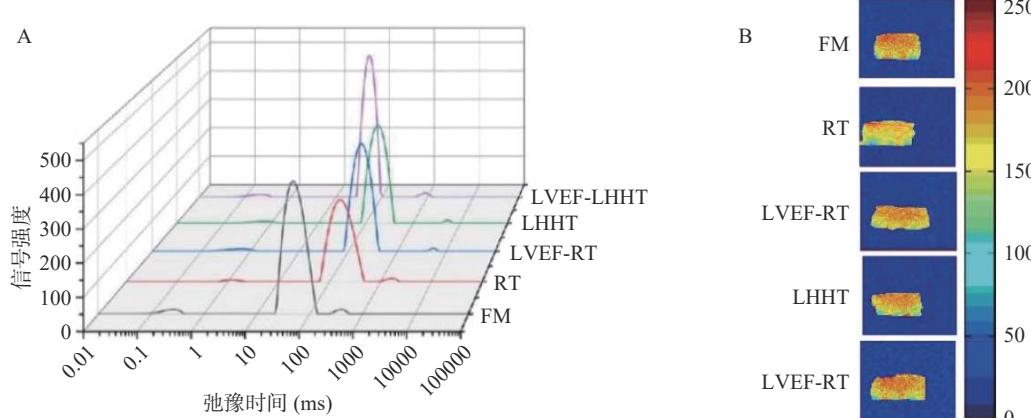


图 5 不同解冻方式对牛肉  $T_2$  弛豫时间(A)和氢质子成像观察(B)

Fig.5  $T_2$  relaxation time (A) and hydrogen proton imaging observation (B) of beef by different thawing methods

表 4 不同解冻方式对结合水、不易流动水和自由水影响  
Table 4 Effects of different thawing methods on bound water, immobile water and free water

| 解冻方式      | 结合水(%)                 | 不易流动水(%)                 | 自由水(%)                  |
|-----------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| FM        | 2.03±0.02 <sup>a</sup> | 97.14±0.01 <sup>a</sup>  | 0.83±0.03 <sup>d</sup>  |
| RT        | 2.16±0.02 <sup>a</sup> | 95.05±0.41 <sup>d</sup>  | 2.79±0.41 <sup>a</sup>  |
| LVEF-RT   | 2.25±0.02 <sup>a</sup> | 96.29±0.13 <sup>bc</sup> | 1.46±0.11 <sup>b</sup>  |
| LHHT      | 2.65±0.01 <sup>a</sup> | 96.36±0.08 <sup>bc</sup> | 1.26±0.08 <sup>bc</sup> |
| LVEF-LHHT | 2.85±0.02 <sup>b</sup> | 95.89±0.09 <sup>b</sup>  | 0.99±0.09 <sup>cd</sup> |

注: 不同小写字母(a~d)表示不同解冻方式下差异显著( $P<0.05$ ); FM: 新鲜样品; RT: 低温解冻; LVEF-RT: 低压静电场解冻; LHHT: 低温高湿解冻; LVEF-LHHT: 低压静电场协同低温高湿解冻。

由于低温解冻的牛肉解冻期间肌原纤维结构破坏严重, 汁液流失较多<sup>[47]</sup>。LVEF-LHHT 组牛肉的红色部分相对于其他三种解冻方式红色部分较多, 更接近于鲜样, 这可能是由于低压静电场与低温高湿协同处理能够有效地维持肌纤维结构, 抑制蛋白质变性, 对内部水分子的运动有较强的限制作用<sup>[50]</sup>。这也与持水性结果(表 2)相一致。

## 2.7 不同解冻方式对牛肉水分含量的影响

水分含量是决定肉与肉品质量的重要因素<sup>[44]</sup>。如图 6 所示, 牛肉经过冷冻解冻后 RT 组、LVEF-RT 组、LHHT 组和 LVEF-LHHT 组均显著低于 FM 组( $P<0.05$ ), 水分含量下降, 这可能是由于牛肉在贮藏解冻过程中部分肌肉蛋白变性, 与水分子的结合能力减弱, 牛肉的保水性下降, 进而导致肌肉的水分发生流失<sup>[51]</sup>。LVEF-LHHT 组和 LHHT 组牛肉的水分含量显著高于 LVEF-RT 组和 RT 组牛肉( $P<0.05$ ), 表明经过 LHHT 和 LVEF-LHHT 相对于 RT 和 LVEF-RT 会降低肌原纤维蛋白劣变, 对牛肉组织结构的破坏程度较小<sup>[52]</sup>, 能够较好地保持牛肉的持水性。这也与肉样的低场核磁和氢质子密度成像结果(图 5)相一致。

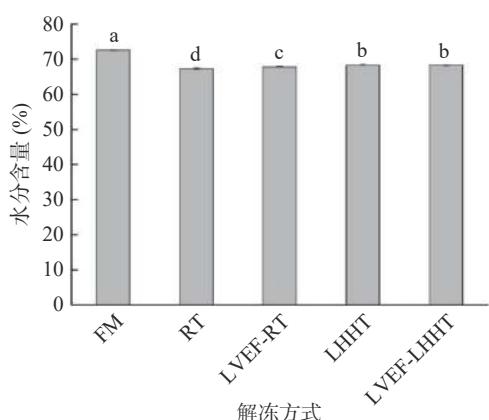


图 6 不同解冻方式对牛肉水分含量的影响

Fig.6 Effects of different thawing methods on beef moisture content

注: 不同小写字母(a~d)表示不同解冻方式下差异显著( $P<0.05$ ); FM: 新鲜样品; RT: 低温解冻; LVEF-RT: 低压静电场解冻; LHHT: 低温高湿解冻; LVEF-LHHT: 低压静电场协同低温高湿解冻。

## 2.8 不同解冻方式对牛肉感官评价的影响

如图 7 所示, FM、LVEF-LHHT、LVEF-RT、LHHT、RT 组牛肉的感官评分依次降低, 表明肉样经解冻后其新鲜度下降, 肉样的品质逐渐发生劣变。低压静电场协同低温高湿解冻后的牛肉相对于其他三种解冻方式最好, 肌肉更具光泽, 表面干爽, 具有牛肉特征气味, 按压肉样表面后立马恢复, 处于一级品质(9~10), 与鲜样牛肉品质最为接近。这可能是由于 LVEF-LHHT 抑制了解冻过程中肌红蛋白的氧化变性, 并且协同处理方式也能有效地降低脂肪氧化, 从而减少有利于促进氧合肌红蛋白氧化的脂肪氧化产物<sup>[53]</sup>, 维持了牛肉的色泽; 此外, 二者协同处理相对于其他解冻方式能够有效地维持牛肉肌纤维结构, 增强持水性, 维持牛肉的弹性; 并且 LVEF-LHHT 抑制了微生物的生长, 延缓解冻肉的腐败变质, 减少不良气味的产生<sup>[28]</sup>。

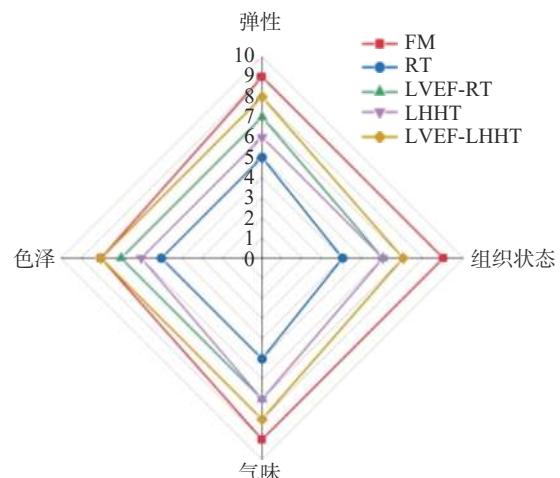


图 7 不同解冻方式对冷冻牛肉感官评价的影响

Fig.7 Effects of different thawing methods on sensory evaluation of beef

注: FM: 新鲜样品; RT: 低温解冻; LVEF-RT: 低压静电场解冻; LHHT: 低温高湿解冻; LVEF-LHHT: 低压静电场协同低温高湿解冻。

## 2.9 相关性分析

不同解冻处理下牛肉的指标相关性如图 8 所示, 剪切力与解冻时间、解冻损失、蒸煮损失、离心损失、pH、硬度呈现非常明显的正相关关系( $P<0.01$ ), 与牛肉恢复力、内聚力、弹性、黏性、咀嚼性、水分含量呈极明显的负相关关系( $P<0.01$ ), 牛肉的解冻损失与解冻时间呈极显著正相关( $P<0.01$ ), 解冻时间对蒸煮损失、离心损失均有显著影响。相关性分析表明, 随着解冻时间的延长, 牛肉的持水性下降, 肌肉中的矿物质和可溶性蛋白等物质会随解冻汁液发生流失<sup>[21]</sup>, 牛肉的 pH 随之下降, 进一步导致肌肉蛋白质发生变性, 肌纤维组织结构被破坏, 剪切力随之上升, 嫩度下降。

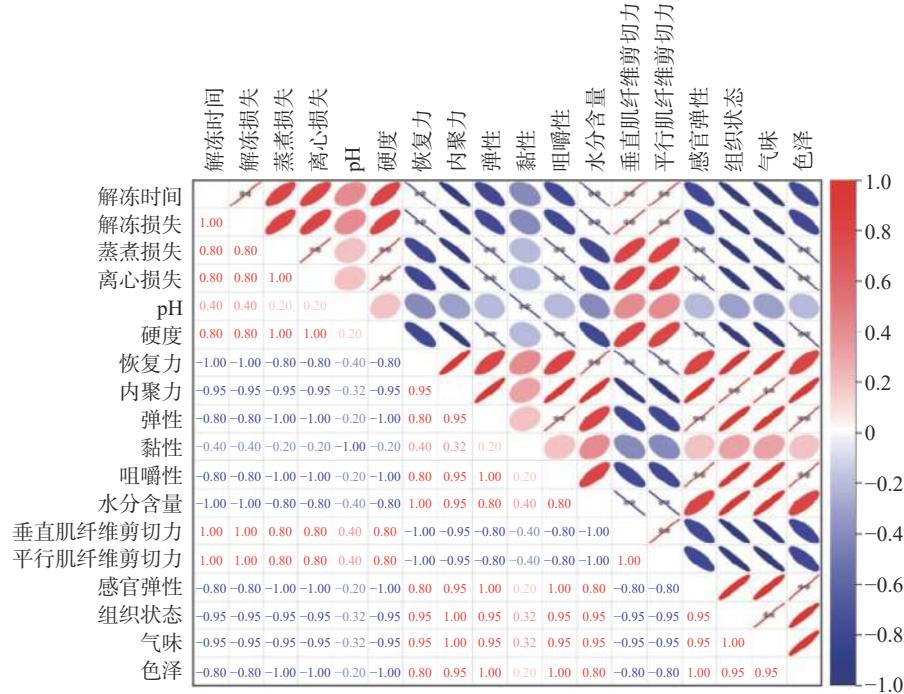


图 8 解冻后肉样指标相关性分析

Fig.8 Correlation analysis of meat sample indexes after thawing

### 3 结论

本研究通过对不同解冻方式下牛肉嫩度及持水性相关指标的分析,发现牛肉经过解冻后其持水性下降,品质发生劣变,不同的解冻方式会对牛肉的品质造成不同程度的影响,与 RT、LVEF-RT、LHHT 组相比,LVEF-LHHT 组能够显著缩短解冻时间,增强持水性,延缓水分的迁移,减少汁液流失,从而更好地保持牛肉的嫩度,延缓牛肉品质的劣变。目前的研究结果证明了低压静电场协同低温高湿解冻在肉类解冻技术中的潜在应用,证明其能有效地保持冷冻肉的品质,后期可进一步对 LVEF-LHHT 处理对肉类品质的改善机制进行研究。

© 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] FARIDNIA F, MA Q L, BREMER P J, et al. Effect of freezing as pre-treatment prior to pulsed electric field processing on quality traits of beef muscles[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 29: 31–40.
- [2] MA Q, HAMID N, OHEY I, et al. Effect of chilled and freezing pre-treatments prior to pulsed electric field processing on volatile profile and sensory attributes of cooked lamb meats[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 37: 359–374.
- [3] 2022年中国冷冻冷藏食品工业运行报告[J].中国食协冷冻冷藏食品专业委员会,2022. [Operation report of China's frozen and refrigerated food Industry in 2022[J]. Frozen and Refrigerated Food Professional Committee of China Food Association, 2022.]
- [4] LEE H J, KWON J A, KIM M, et al. Effect of supercooling on storage ability of different beef cuts in comparison to traditional storage methods[J]. Meat Science, 2023, 199: 109–137.
- [5] CHEFTEL J C, CULIOLI J. Effects of high pressure on meat: A review[J]. Meat Science, 1997, 46(3): 211–236.
- [6] 梁雪, 刘九阳, 孔保华, 等. 新型物理场辅助解冻技术提升原料肉品质的研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(2): 54–61. [LIANG X, LIU J Y, KONG B H, et al. Research progress of new physical field assisted thawing technology to improve the quality of raw meat[J]. Meat Research, 2023, 37(2): 54–61.]
- [7] CAI L Y, CAO M J, CAO A L, et al. Ultrasound or microwave vacuum thawing of red seabream (*Pagrus major*) fillets [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 47: 122–132.
- [8] 尚佳宇, 徐祥, 徐大伦, 等. 解冻方式对炝蟹食用品质的影响 [J]. 食品科学, 2024, 45(6): 192–198. [SHANG J Y, XU X, XU D L, et al. Effect of defrosting method on the quality of edible Crab[J]. Food Science, 2024, 45(6): 192–198.]
- [9] CAI L Y, ZHANG W D, CAO A L, et al. Effects of ultrasonics combined with far infrared or microwave thawing on protein denaturation and moisture migration of *Sciaenops ocellatus* (red drum)[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 55: 96–104.
- [10] KONG D W, QUAN C L, XI Q, et al. Effects of ultrasound-assisted slightly acidic electrolyzed water thawing on myofibrillar protein conformation and gel properties of chicken breasts[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134738.
- [11] 尹从绪, 李嘉伟, 刘斌. 射频加热技术在食品解冻应用的研究进展 [J]. 冷藏技术, 2023, 46(4): 72–77. [YIN C X, LI J W, LIU B. Research progress of radiofrequency heating technology in food thawing[J]. Refrigeration Technology, 2023, 46(4): 72–77.]
- [12] 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. Effect of different freezing-thawing intervals on beef quality under low voltage electrostatic field[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 278–285.]
- [13] 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 refrigeration on beef quality[J]. Food Science, 2021, 42(1): 132–138. ]
- [ 14 ] 唐梦, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场解冻技术在食品中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(10): 373–376. [ TANG M, CEN J W, LI L H, et al. Research progress of high voltage electrostatic field thawing technology in food[J]. Food Industry Science and Technology, 2016, 37(10): 373–376. ]
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 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. [ HU F F. Effect of low-voltage electrostatic field assisted freezing and thawing on pork quality[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. ]
- [ 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, 2021, 150: 111987.
- [ 18 ] 胡瑞. 基于肉表面湿度调控的物理场协同速冻/解冻典型生鲜肉品质提升研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [ HU R. Research on physical field coordination of quick-freezing/thawing typical fresh meat quality improvement based on meat surface humidity regulation[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023. ]
- [ 19 ] 朱明明, 彭泽宇, 鲁森, 等. 高湿度结合不同温度解冻对猪肉理化及蛋白特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 127–133.
- [ ZHU M M, PENG Z Y, LU S, et al. Effects of high humidity combined with different temperature thawing on physicochemical and protein properties of pork[J]. Food Science, 2019, 40(17): 127–133. ]
- [ 20 ] 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 lamb[J]. Food Science, 2023, 44(11): 86–94. ]
- [ 21 ] ZHANG M C, JIN Z C, 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.
- [ 22 ] LI D P, JIA S L, ZHANG L T, 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.
- [ 23 ] 颜培, 喻世刚, 王钢, 等. 冻藏鸡肉的新鲜度测定与分析[J]. 四川畜牧兽医, 2019, 46(9): 28–30. [ YAN P, YU S G, W G, et al. Determination and analysis of freshness of frozen chicken[J]. Sichuan Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2019, 46(9): 28–30. ]
- [ 24 ] 王策. 含氧气调包装对冷却肉持水性的影响机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018. [ WANG C. Effect mechanism of oxygen-containing packaging on water holding capacity of chilled meat[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. ]
- [ 25 ] 杨汝晴, 陈玉磊, 孙乐常, 等. 鲈鱼在4℃冷藏过程中的肌肉品质变化[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 239–245. [ YANG R Q, CHEN Y L, SUN L C, et al. Changes in muscle quality of perch during 4℃ refrigeration[J]. Food Science, 2023, 44(1): 239–245. ]
- [ 26 ] 李侠, 李银, 张春晖, 等. 高氧气调包装对不同品种冷却猪肉贮藏品质及持水性的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 236–243. [ LI X, LI Y, ZHANG C H, et al. Effects of high oxygen conditioning packaging on storage quality and water holding capacity of different varieties of chilled pork[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 236–243. ]
- [ 27 ] 刁华玉, 林松毅, 梁瑞, 等. 南极磷虾肉冻融循环过程水分的迁移及微观结构变化[J]. 中国食品学报, 2022, 22(6): 242–250. [ DIAO H Y, LIN S Y, LIANG R, et al. Water transport and microstructure changes of Antarctic krill during freeze-thaw cycle[J]. Chinese Journal of Food Science, 2021, 22(6): 242–250. ]
- [ 28 ] 姜纪伟. 冷冻罗非鱼片射频解冻效果的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021. [ QIANG J W. Study on radiofrequency thawing effect of frozen tilapia filet[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021. ]
- [ 29 ] NGAPO T M, BABARE I H, REYNOLDS J, et al. Freezing and thawing rate effects on drip loss from samples of pork[J]. Meat Science, 1999, 53(3): 149–158.
- [ 30 ] GONZALEZ-SANGUINETTI S, ANON M C, CALVELO A. Effect of thawing rate on the exudate production of frozen beef[J]. Journal of Food Science, 1985, 50(3): 697–700.
- [ 31 ] 张春晖, 李侠, 李银, 等. 低温高湿变温解冻提高羊肉的品质[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 267–273. [ ZHANG C H, LI X, LI Y, et al. Improvement of mutton quality by low temperature and high humidity variable temperature thawing[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 267–273. ]
- [ 32 ] CAI L, CAO M, REGENSTEIN J, et al. Recent advances in food thawing technologies[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(4): 953–970.
- [ 33 ] HE X, LIU R, NIRASAWA S, et al. Effect of high voltage electrostatic field treatment on thawing characteristics and post-thawing quality of frozen pork tenderloin meat[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(2): 245–250.
- [ 34 ] 彭泽宇, 朱明明, 张海曼, 等. 低温高湿解冻改善猪肉品质特性[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(8): 79–85. [ PENG Z Y, ZHU M M, ZHANG H M, et al. Improvement of pork quality characteristics by low temperature and high humidity thawing[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(8): 79–85. ]
- [ 35 ] 崔燕, 朱麟, 尚海涛, 等. 低温高湿解冻对南美白对虾保水性及肌原纤维蛋白生化特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(2): 81–89. [ CUI Y, ZHU L, SHANG H T, et al. Effects of low temperature and high humidity thawing on water retention and biochemical characteristics of myofibrillar protein of *Penaeus vannamei*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(2): 81–89. ]
- [ 36 ] WANG B, KONG B H, LI F F, et al. Changes in the thermal stability and structure of protein from porcine longissimus dorsi induced by different thawing methods[J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126–135.
- [ 37 ] 孙金辉. 冻藏、反复冻融及解冻方式对兔肉品质的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2013. [ SUN J H. Effects of frozen storage, repeated freezing and thawing methods on quality of rabbit meat[D]. Chongqing: Southwest University, 2013. ]
- [ 38 ] 张文祥, 潘嘹, 卢立新. 包装生鲜牛肉 pH 值的高光谱无损检测方法[J]. 食品与发酵工业, 2019, 49(22): 273–278. [ ZHANG W X, PAN L, LU L X. Hyperspectral nondestructive testing method for pH value of packaged fresh beef[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 49(22): 273–278. ]
- [ 39 ] SUN Q X, KONG B H, LIU S C, et al. Ultrasound-assisted thawing accelerates the thawing of common carp (*Cyprinus carpio*) and improves its muscle quality[J]. LWT, 2021, 141: 111080.

- [ 40 ] SUN Q X, SUN F D, ZHENG D M, et al. Complex starter culture combined with vacuum packaging reduces biogenic amine formation and delays the quality deterioration of dry sausage during storage[J]. *Food Control*, 2019, 100: 58–66.
- [ 41 ] XIA X F, KONG B H, LIU Q, et al. Physicochemical change and protein oxidation in porcine *Longissimus dorsi* as influenced by different freeze-thaw cycles[J]. *Meat Science*, 2009, 83(2): 239–245.
- [ 42 ] JIA G, LIU H, NIRASAWA S, et al. Effects of high-voltage electrostatic field treatment on the thawing rate and post-thawing quality of frozen rabbit meat[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 41: 348–356.
- [ 43 ] 张昕. 不同解冻工艺对鸡胸肉品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017. [ZHANG X. Effects of different thawing processes on the quality of chicken breast meat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.]
- [ 44 ] LEYGONIE C, BRITZ T J, HOFFMAN L C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review[J]. *Meat Science*, 2012, 91(2): 93–98.
- [ 45 ] MITTAL G S, NADULSKI R, BARBUT S, et al. Textural profile analysis test conditions for meat products[J]. *Food Research International*, 1992, 25(6): 12–21.
- [ 46 ] MOUSAKHANI-GANJEH A, HAMDAMI N, Soltanizadeh N. Impact of high voltage electric field thawing on the quality of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 156: 39–44.
- [ 47 ] XIE Y, ZHOU K, CHEN B, 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.
- [ 48 ] 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: 131–461.
- [ 49 ] WANG Q, LI Y, SUN D W, et al. Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: principles and applications[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2018, 58(13): 2285–2298.
- [ 50 ] 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.
- [ 51 ] 夏天兰, 刘登勇, 徐幸莲, 等. 低场核磁共振技术在肉与肉制品水分测定及其相关品质特性中的应用[J]. 食品科学, 2011, 32(21): 253–256. [XIA T L, LIU D Y, XU X L, et al. Application of low-field nuclear magnetic resonance technology in the determination of moisture content and related quality characteristics of meat and meat products[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 32(21): 253–256.]
- [ 52 ] 白建, 王瑞. 宰后浸烫对鸡肉水分含量的影响[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(7): 42–44. [BAI J, WANG R. Effect of dipping on moisture content of chicken meat after slaughter[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(7): 42–44.]
- [ 53 ] 何佳玲. 解冻方式对三文鱼品质影响及基于介电特性的品质预测[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021. [HE J L. Effects of thawing methods on quality of salmon and quality prediction based on dielectric properties[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.]