

不同解冻方式下速冻调理鸡排品质的比较分析

吕义忠¹, 黄文权², 阚启鑫², 邱舒娴¹, 陈锦成¹, 杨寒³, 王湘鹏², 宋明月^{2*}

(1. 广州酒家集团利口福食品有限公司, 广东广州 511442)(2. 华南农业大学食品学院, 广东省功能食品活性物重点实验室, 广东广州 510642)(3. 广东聿津食品有限公司, 广东肇庆 526238)

摘要: 为了比较不同解冻方式下速冻调理鸡排的品质, 采用五种常规解冻方式对调理鸡排进行解冻, 通过测定相关指标对其品质进行评价。结果表明: 微波解冻速度最快(156 s), 低温解冻速度最慢(28 806 s)。低温和静水解冻的调理鸡排的感官评分较高(85.2和84.8分); 微波解冻有利于保持鸡排的持水性。不同解冻方式下调理鸡排的 L^* 值无显著性差异($P>0.05$), 静水解冻组 a^* 值最高(18.84), 微波解冻组 b^* 值最高(6.43)。微波解冻后样品有最高的硬度和剪切强度, 且与其他解冻组相比存在显著性差异($P<0.05$), 空气炸锅解冻组的样品有较好的质构特性和嫩度。电子鼻结果表明, 静水和低温解冻有利于保留鸡排的香气。空气炸锅解冻后的鸡排TVB-N值最高(14.35 mg/100 g), 低温解冻后的鸡排菌落总数最多(3.44 lg CFU/g), 静水解冻有利于保持鸡排的新鲜度和卫生安全。微观组织图片显示, 室温、静水和低温解冻更有利于保持样品原有的组织结构。综上, 综合解冻速率和解冻品质而言, 静水解冻是针对调理鸡排较好的解冻方式。

关键词: 解冻方式; 解冻速度; 调理鸡排; 品质

文章编号: 1673-9078(2024)09-278-287

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.9.1016

Comparison Analysis of the Quality of Quick-frozen Prepared Chicken Chops Treated by Different Thawing Methods

LYU Yizhong¹, HUANG Wenquan², KAN Qixin², QIU Shuxian¹, CHEN Jincheng¹, YANG Han³,
WANG Xiangpeng², SONG Mingyue^{2*}

(1. Guangzhou Restaurant Group Likofu Food Co. Ltd., Guangzhou 511442, China)(2. College of Food Science, Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)(3. Guangdong Yujin Food Co. Ltd., Zhaoqing 526238, China)

Abstract: In order to compare the quality of quick-frozen prepared chicken chops treated by different thawing methods, five conventional thawing methods were used to thaw the prepared chicken chops, and the evaluation of their quality was performed through measuring relevant indicators. The results showed that microwave thawing was the fastest (156 s), and low-temperature thawing was the slowest (28 806 s). The sensory scores of the prepared chicken chops treated by low-temperature thawing and static water thawing were higher (85.2 and 84.8 points, respectively). Microwave thawing was

引文格式:

吕义忠, 黄文权, 阚启鑫, 等. 不同解冻方式下速冻调理鸡排品质的比较分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(9): 278-287.

LYU Yizhong, HUANG Wenquan, KAN Qixin, et al. Comparison analysis of the quality of quick-frozen prepared chicken chops treated by different thawing methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(9): 278-287.

收稿日期: 2023-08-28

基金项目: 广东省引进创新创业团队项目(2019ZT08N291); 广东省功能食品活性物重点实验室(2018B030322010); 农业和社会发展科技专项项目(SL2022B03J01173)

作者简介: 吕义忠(1971-), 男, 助理工程师, 研究方向: 食品加工与预制菜产品开发, E-mail: lktkxm@126.com

通讯作者: 宋明月(1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品化学, E-mail: songmy@scau.edu.cn

beneficial to maintaining the water-holding capacity of the chicken chops. There were no significant differences in the L^* values of the prepared chicken chops treated by different thawing methods ($P>0.05$). The a^* value of the static water thawing group was the highest (18.84), while the b^* value of the microwave thawing group was the highest (6.43). The hardness and shear strength of the samples treated by microwave thawing were the highest, showing significant differences compared with other thawing groups ($P<0.05$). The texture characteristics and tenderness of the samples treated by air-fryer thawing were better. The results of electronic nose analysis indicated that the aroma of chicken chops could be well retained by the static water thawing and low-temperature thawing. The TVB-N value of the chicken chops after thawing in the air fryer was the highest (14.35 mg/100 g), and the total bacterial count of chicken chops after the low-temperature thawing was the highest (3.44 lg CFU/g). Static water thawing was beneficial for maintaining the freshness and hygiene of chicken chops. The microscopic images showed that the room temperature thawing, static water thawing, and low-temperature thawing were more conducive to maintaining the original tissue structure of the sample. In summary, in terms of overall thawing rate and quality post thawing, static water thawing was a better way for defrosting prepared chicken chops.

Key words: thawing method; thawing speed; prepared chicken chops; quality

鸡肉作为我国第二大肉类消费品,近几年的产量和消费量迅速增长^[1]。调理鸡排是以鸡胸肉或鸡腿肉为原料,经过初加工、调味料腌制或上浆以后,再进行简单包装的禽类预制菜制品。调理鸡排具有高蛋白、低脂肪的特点,营养美味,消费者简单烹饪即可食用,深受大众喜爱^[2]。然而,肉制品中丰富的营养成分和较高的含水量有利于酶和微生物的活动,进而导致腐败变质^[3,4]。冷冻工艺是延长食品保质期的重要方法,诸如调理鸡排等调理食品通常需要经过冷冻及后续的冻藏以获得更长的货架期。

相比于新鲜食品,冷冻食品会不可避免的发生品质下降的问题。解冻是冷冻的逆过程,对冷冻产品的质量具有重要的影响^[5]。相比于冷冻工艺,解冻过程的控制更加复杂,这是因为解冻速度与解冻效果并非呈线性关系。不恰当的解冻方法会引发食品的脂肪氧化、蛋白质变性、风味损失、保水性降低及微生物污染等问题^[5]。近年来,人们积极研究各种新兴解冻方法,如超声辅助解冻、欧姆解冻、高压辅助解冻等,尽管这些解冻方式在提升解冻食品品质方面体现出一定的优势,但这些解冻方法需要特定的设备和装置,高昂的成本也限制了其可用性^[6]。空气解冻、低温解冻、水浴解冻、微波解冻等是食品加工中最为常用的解冻方式,具有成本低、适用性强等优点。何向丽等^[7]比较了不同空气解冻温度对猪里脊肉的影响,结果表明 30 °C 空气解冻能在保持猪肉颜色的同时减少汁液损失,而 12 °C 条件下解冻的肉品汁液损失较多,持水力较差。Lv 等^[8]考察了不同解冻方式对墨鱼品质的影响,发现静水解冻和流水解冻都能一定程度上保持产品

的品质,而微波解冻虽然缩短了解冻时间,但该解冻方式下样品的蛋白水解程度最高,持水性最差,TVB-N 含量也最高。王建军等^[9]研究了不同解冻方式对肉鸡食用品质的影响,研究发现相比常温空气解冻、超声波解冻和低温解冻,流水解冻的鸡肉有较好的色泽、嫩度和持水性,肌原纤维蛋白的性质和结构也更加稳定。张艳妮等^[10]研究发现,4 °C 解冻能够有效减缓冷冻鸡胸肉色泽的改变和汁液的流失,是常用解冻方式中最佳的解冻方法。由此可知,常规解冻方式在一定程度上能改善冷冻食品的品质,而由于不同食品之间的化学组分有所差异,因此针对不同物料的最适解冻方式和最佳解冻条件也不尽相同。基于此,本研究采用室温解冻、静水解冻、低温解冻、微波解冻、空气炸锅解冻这五种方式对速冻调理鸡排进行解冻处理,对比分析不同解冻方式下速冻调理鸡排的品质,从而为调理鸡排解冻方法的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

新鲜调理鸡排(鸡腿肉),由广州酒家集团利口福食品有限公司提供。

碳酸钾(20230102)、溴甲酚绿(20220812)、甲基红(20221115)(均为分析纯),天津市大茂化学试剂厂;盐酸(20220609)、氯化钠(20221002)(均为分析纯),广州化学试剂厂;硼酸(20230425)

(分析纯), 西陇化工股份有限公司; 平板计数琼脂(PCA)(20230502), 广东环凯微生物科技有限公司; 无水乙醇(20230510), 国药集团化学试剂有限公司; 苏木素-伊红染液(20230408), 湖北百奥斯生物科技有限公司; 环保透明剂、环保封片剂, 同声科技; 甲醛溶液(分析纯)(20230317), 天津市富宇精细化工有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

KD23B-BF(B) 微波炉, 广东美的微波炉制造有限公司; MAF01 空气炸锅, 宁波嘉乐智能科技股份有限公司; HH-4 数显恒温水浴锅, 金坛市华城海龙实验仪器厂; LT502 电子天平, 常熟市天量仪器有限公司; TP330 食品温度计, 汕头市三印贸易有限公司; LRH-150 生化培养箱, 上海一恒科学仪器有限公司; DC-P3A 新型色彩色差仪, 北京纽利德科技有限公司; PEN3 型便携式电子鼻系统, 德国 Airsense 公司; TA.XT PLUS 质构仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; RD-60DTZ 低速离心机, 上海卢湘仪离心机仪器有限公司; NanoZoomer S360 白光扫描仪, 日本 Hamamatsu (滨松) 公司。

1.2 实验方案

将同一批次的调理鸡排置于隧道式液氮速冻机中进行速冻, 腔体温度设置为 -80°C 。待调理鸡排中心温度达到 -18°C 时转移至 -18°C 冰箱冻藏 3 个月。将冻藏样品依照表 1 的方法分别进行解冻, 待肉样中心温度达到 4°C 后视为解冻完成。

表 1 不同解冻方式处理的调理鸡排

解冻方式	操作方法
室温解冻	冻结鸡排放入在无热源影响的操作台上进行解冻, 环境室温为 $(25 \pm 0.5)^{\circ}\text{C}$
静水解冻	冻结鸡排完全浸没在水浴中进行解冻, 水温控制为 $(20 \pm 0.5)^{\circ}\text{C}$
低温解冻	冻结鸡排放入冰箱保鲜层中进行解冻, 温度设置为 4°C
微波解冻	冻结鸡排放入微波炉中, 选择“解冻模式”进行解冻
空气炸锅解冻	冻结鸡排放入空气炸锅中进行解冻, 选择解冻模式, 温度设置为 40°C

1.3 测定指标

1.3.1 解冻温度曲线

将温度计插入调理鸡排的几何中心, 定时记录

中心温度变化, 以结果的平均值绘制调理鸡排的解冻温度曲线。

1.3.2 感官评分

调理鸡排感官评分标准见表 2。感官评定小组由 10 位感官评定人员组成, 年龄范围在 21 至 30 岁之间, 性别比例为 5 名男性 5 名女性。将各组样品随机编号, 并按照随机顺序提供给每位评定人员。评定结果取 10 人的平均值。

表 2 调理鸡排感官评分表

指标	评分依据	得分/分
色泽 (25分)	光泽自然, 呈嫩粉色, 色泽均匀	19~25
	表面光泽度较低, 嫩粉色稍浅	12~18
	表面色泽暗沉, 肌肉整体颜色偏白	6~11
	体表无光泽, 肉色发白, 色泽不均匀	0~5
气味 (25分)	香味浓郁, 具有鸡肉的正常气味与腌料的香气, 无其他异味	19~25
	鸡肉固有气味与腌料香气较淡, 略有异味	12~18
	鸡肉固有气味消失, 异味明显	6~11
组织形态 (25分)	整体出现异味和臭味	0~5
	肌肉组织致密完整, 纹理清晰	19~25
	肌肉组织紧密, 纹理较清晰, 无裂纹	12~18
	肌肉组织不紧密, 局部松散有裂纹,	6~11
组织弹性 (25分)	肌肉组织松散掉落, 裂纹较大	0~5
	弹性较好, 手指按压后凹陷快速复原	19~25
	稍有弹性, 手指按压后凹陷较快复原	12~18
	无弹性, 手指按压后凹陷复原较慢	6~11
	无弹性, 手指按压后凹陷不消失	0~5

1.3.3 持水性

样品的持水性采用解冻损失率和蒸煮损失率评价。

解冻损失率: 调理鸡排从 -18°C 冰箱中取出后立即进行第一次称重, 待解冻完成后, 用滤纸吸干样品表面水分再进行第二次称重。按照公式 (1) 计算解冻损失率:

$$X_1 = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

X_1 ——解冻损失率, %;

M_1 ——解冻前质量, g;

M_2 ——解冻后质量, g。

蒸煮损失率: 从每块调理鸡排中切取约 40 g 肉

样称重, 然后放入耐高温包装袋中, 80 ℃水浴加热 10 min 至肉块中心温度达到 70 ℃, 用滤纸吸干样品表面水分后再进行称重。按照公式 (2) 计算蒸煮损失率:

$$X_2 = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

X_2 —蒸煮损失率, %;

P_1 —蒸煮前质量, g;

P_2 —蒸煮后质量, g。

1.3.4 色泽

将调理鸡排加工成 $3 \times 3 \times 1 \text{ cm}^3$ 的块状, 放于生理盐水中漂洗干净后用滤纸擦干。色差仪预热 10 min, 然后依次用黑筒和标准白板进行校正。对肉块进行色泽测定, 记录亮度值 (L^*)、红度值 (a^*) 和黄度值 (b^*)。

1.3.5 质构分析

参照张根生^[11]的方法并略作修改, 解冻后的样品加工成 $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ 的块状, 质构仪选择 TPA 模式, 探头型号为 P/36R, 设定参数: 测试前速率为 2.0 mm/s, 测试中速率为 5.0 mm/s, 返回速率为 5.0 mm/s, 行程应变比设置为 50%, 2 次下压时间间隔为 5.0 s, 触发力为 5.0 g。

1.3.6 剪切强度测定

蒸煮后的样品加工成 $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ 的块状, 质构仪选择剪切模式, 探头型号为 HDP/BSW, 设定参数: 测试速率为 5.0 mm/s, 测定距离为 10 mm, 触发力为 5.0 N。

1.3.7 电子鼻分析

称取 10 g 样品剪碎后放入顶空瓶中, 采用直接顶空吸气法, 电子鼻设置条件为: 预采样时间: 5 s; 冲洗时间: 60 s; 采集时间: 180 s; 载气 (合成干燥空气): 流速 400 mL/min。电子鼻传感器的性能描述见表 3。

1.3.8 菌落总数测定

参考 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》^[12] 进行调理鸡排菌落总数的测定, 结果以 lg CFU/g 表示。

1.3.9 总挥发性盐基氮含量测定

参照 GB 5009.228-2016 《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》^[13] 中的微量扩散法测定调理鸡排的挥发性盐基氮含量, 结果以 mg/100 g 表示。

表 3 电子鼻传感器性能描述

Table 3 Performance description of electronic nose sensors

陈列序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	芳香成分, 苯类
2	W5S	灵敏度大, 对氮氧化合物很灵敏
3	W3C	芳香成分灵敏, 氨类
4	W6S	主要对氢化物有选择性
5	W5C	短链烷烃芳香成分
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	芳香成分, 对有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.3.10 微观组织观察

将调理鸡排修剪成 $1.5 \times 1.5 \times 0.3 \text{ cm}^3$ 的肉块组织后, 放入 $\varphi=10\%$ 中性福尔马林固定液中持续固定 48~72 h。将组织从固定液中取出, 将目的部位组织修平整并放入包埋框内, 用自来水水洗 20 min。然后依次进行脱水透明浸蜡、包埋和切片操作, 最终制得切片样品。切片样品脱蜡至水, 用苏木素染色液染色 4 min, 自来水洗 2 min, 再用 0.8% 盐酸酒精分化 2 s, 自来水冲洗, 入伊红染液染 20 s, 梯度乙醇溶液进行脱水, 用环保透明剂透明、封固、镜检。最后用白光扫描仪对切片进行图像采集, 目标区域放大 400 倍进行观察。

1.4 数据分析

使用 Excel 2016 进行数据整理, 数据统计分析采用 IBM SPSS Statistics 27 进行单因素方差分析, Duncan's 法进行显著性差异分析, $P < 0.05$ 表示差异性显著, 采用 R 语言进行主成分分析, 作图采用 Origin 2022, 各组实验均重复 3 次及以上。

2 结果与讨论

2.1 不同解冻方式下调理鸡排的解冻温度曲线

图 1 展示了不同解冻方式下调理鸡排的中心温度变化。5 种解冻方式的解冻速率由高至低依次是微波解冻 > 静水解冻 > 空气炸锅解冻 > 室温解冻 > 低温解冻, 解冻完成时间分别为 156、762、1 878、4 602、28 806 s。微波解冻利用电磁波使食品内部的分子间摩擦产热从而实现解冻, 在这个过程中物料内部的水分子会急剧运动和碰撞, 产生热能, 因

此解冻速度较快^[14]。水的传热系数比空气高，能够加快物料与环境之间的换热效率，所以静水解冻的解冻速率也较高。空气炸锅解冻、室温解冻和低温解冻都是以空气为传热介质的解冻方式，主要通过空气温度的变化来影响解冻速率。由于空气炸锅解冻有较高温度的热空气，所以相比于室温解冻和低温解冻可以进一步缩短解冻时间。低温解冻的环境与物料温差较小，因此换热缓慢，需要更长的时间才能完成解冻^[15]。由图1可知，5种解冻方式在-1~5℃的温度范围内解冻速度较慢，在其他温度范围的解冻速度较快，这主要是因为-1~5℃是食品最大冰晶生成和融化的温度带，在此阶段进行解冻时，冰晶融化吸收热量，食品的热导率也随着冰晶转化为水而变小，从而导致解冻速率的降低^[1,16]。总而言之，解冻速率与解冻介质、温度及方式等因素有关^[17]，微波有利于解冻时间的缩短，低温解冻处理解冻速率低。

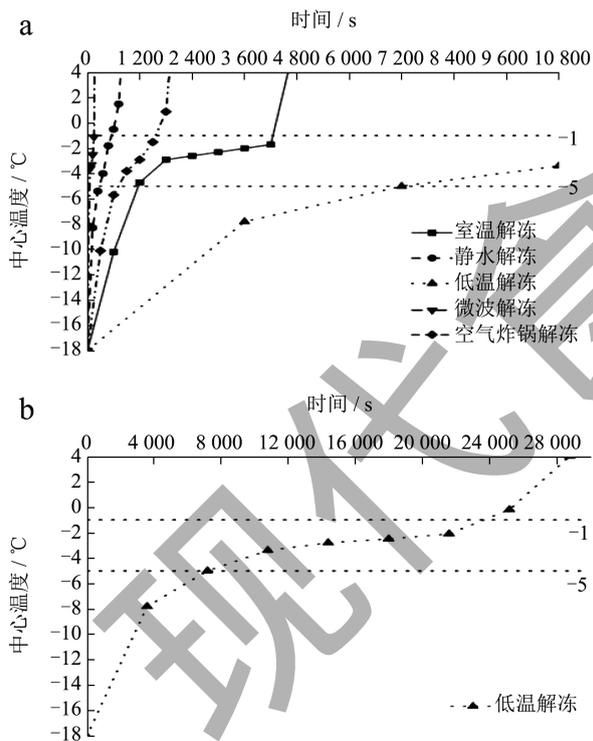


图1 不同解冻方式下调理鸡排的中心温度变化

Fig.1 Changes in core temperature of prepared chicken chops under different thawing methods

2.2 不同解冻方式下调理鸡排的感官评分

不同解冻方式下调理鸡排的感官评分见图2。室温解冻、静水解冻和低温解冻的调理鸡排感官评分显著高于微波解冻和空气炸锅解冻 ($P < 0.05$)，均在80分以上，其中低温解冻组评分最高(85.2分)。

微波解冻和空气炸锅解冻的调理鸡排感官评分较低(分别为63.6和70.4分)。在微波解冻组中，由于微波的快速加热具有选择性，使得解冻完成后的调理鸡排存在加热不均匀、边缘熟化、组织形态局部松散的现象。空气炸锅解冻组的鸡排肉色发白，有较多汁液渗出，这可能是由于解冻环境中过高的空气温度和较低的湿度而导致的。由此可知，室温解冻、静水解冻和低温解冻更有利于保持调理鸡排解冻后的感官品质。

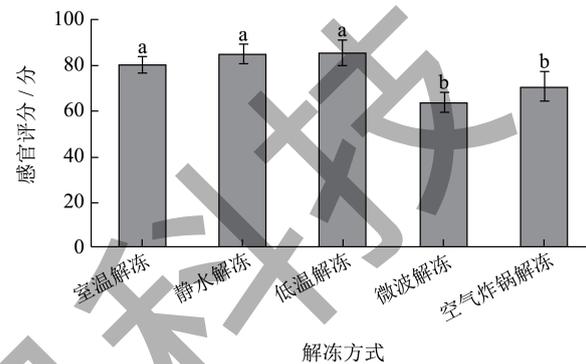


图2 不同解冻方式下调理鸡排的感官评分

Fig.2 Sensory evaluation of prepared chicken chops under different thawing methods

注：字母不同表示显著性差异 $P < 0.05$ 。下同。

2.3 不同解冻方式下调理鸡排的持水性

持水性被定义为肉类在外力作用时保持其水分的能力，对肉制品的出品率和感官品质有直接的影响。持水性可以通过水分含量、解冻损失、滴水损失、离心损失、蒸煮损失等指标来反映。解冻损失会引起肉类质量的变化与品质的下降，最终造成经济损失，是评价冻结肉类的重要指标^[18]。由图3可知，不同解冻方式下调理鸡排的解冻损失率和蒸煮损失率存在显著性差异 ($P < 0.05$)。在本实验中，微波解冻组样品的解冻损失率(4.46%)低于其他组别^[19]。可能因为微波能使解冻物料的内同时加热，因此更有利于维持食品的食品品质，也有学者认为短时间的微波解冻对肉组织的损伤较小，因此能减少水分损失^[6,20]。空气炸锅解冻组的解冻损失率最高(5.80%)。蒸煮损失是由于肌原纤维热变性，导致汁液和可溶性物质渗出而造成的，一定程度上决定了肉制品的产量^[21,22]。低温解冻和微波解冻组的蒸煮损失(分别为3.15%和2.70%)显著低于其他组别 ($P < 0.05$)，其次是室温解冻组和静水解冻组(分别为4.56%和4.91%)，空气炸锅解冻后的样品蒸煮损失率最高(5.61%)。综上，微波解

冻能够较好地保持调理鸡排的持水性，而空气炸锅解冻会导致样品损失更多的水分。

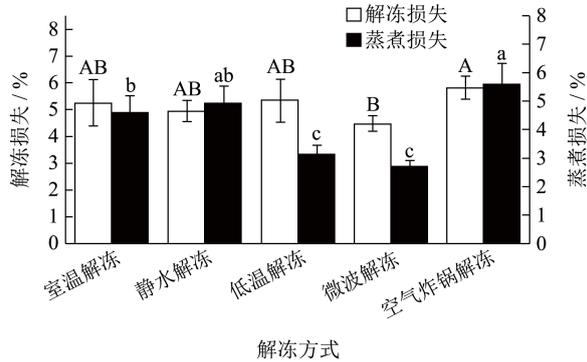


图3 不同解冻方式下调理鸡排的持水性

Fig.3 Water holding capacity of prepared chicken chops under different thawing methods

注：不同大写字母（A~B）表示不同处理组间的解冻损失具有显著差异（ $P < 0.05$ ），不同小写字母（a~c）表示不同处理组间的蒸煮损失具有显著差异（ $P < 0.05$ ）。

2.4 不同解冻方式下调理鸡排的色泽

色泽作为评定食品品质的重要指标，能够直接影响消费者的感官体验^[23]。表4展示了不同解冻方式下调理鸡排的色泽变化。由表4可知，不同解冻方式对调理鸡排的亮度（ L^* ）无显著性（ $P > 0.05$ ）的影响，赵水榕等^[24]研究同样发现，不同解冻方式（空气、冷藏、流水、盐水解冻）下调理猪肉饼的亮度并无显著性差异。经不同解冻方式的样品在红度（ a^* ）和黄度（ b^* ）方面存在显著性差异（ $P < 0.05$ ）。静水解冻组样品的 a^* 值最高（18.84），其次是室温解冻（17.09），这可能是因为静水解冻和室温解冻的解冻时间短、解冻环境温和，因此有利于氧合肌红蛋白（鲜红色）的形成；低温解冻、微波解冻和空气炸锅解冻组的 a^* 值最低，可能是过长的解冻时间和过高的解冻温度加速了肌红蛋白氧化生成高铁肌红蛋白（棕色），也有学者认为游离氨基酸与脂肪氧化形成的自由基反应能加速褐色素形成，从而导致红度下降^[25, 26]。此外，微波解冻组的 b^* 值（6.43）显著高于其他组别（ $P < 0.05$ ），这可能是由于微波能够促进肉样的脂质氧化，从而导致黄度的上升，Anna等^[27]认为，鸡肉色泽中 b^* 值的上升是脂质氧化的结果。有研究表明，微波解冻能诱导产生更多的脂质氧化产物^[28]。Kristin等^[29]指出脂肪氧化会引发非酶褐变进而反应生成黄色素。综上所述，静水

解冻和室温解冻能够更好地改善冻融后调理鸡排的色泽。

表4 不同解冻方式下调理鸡排的色泽

Table 4 The color of prepared chicken chops under different thawing methods

解冻方式	L^*	a^*	b^*
室温解冻	44.43 ± 3.28	17.09 ± 0.84 ^{ab}	1.95 ± 0.98 ^b
静水解冻	44.16 ± 3.66	18.84 ± 1.97 ^a	3.22 ± 0.88 ^b
低温解冻	43.84 ± 2.21	15.48 ± 2.33 ^b	3.50 ± 0.57 ^b
微波解冻	46.23 ± 1.78	15.06 ± 0.62 ^b	6.43 ± 2.60 ^a
空气炸锅解冻	44.96 ± 3.20	15.00 ± 1.92 ^b	3.58 ± 0.37 ^b

注：表中上标不同字母表示不同处理组具有显著性差异（ $P < 0.05$ ），表5同。

2.5 不同解冻方式下调理鸡排的质构特性和剪切强度

不同解冻方式下调理鸡排的质构特性见表5。由表5可知，解冻方式对调理鸡排的硬度具有显著性影响（ $P < 0.05$ ）。其中微波解冻组有最高的硬度（4884.15 g），而其他组的硬度值无明显差异，这可能是因为微波的过热作用会诱导蛋白氧化聚集，从而使硬度上升^[30]；咀嚼性表现出与硬度相似的规律。相比于其他解冻方式，空气炸锅解冻的调理鸡排的弹性、内聚性和回复性更高，咀嚼性仅次于微波解冻组，该结果表明空气炸锅解冻后肉样的回复能力和抵抗外界压力的能力较强，这更有利于产品咀嚼感的体验。尽管室温解冻组有较高的弹性（0.98），但是其咀嚼性、内聚性和回复性都呈现出较低的水平。静水解冻组和低温解冻组表现出相似的质构特性。有观点认为，肉制品的质构特性不仅与水分流失、蛋白质降解等内部因素有关，也与解冻时间、解冻温度等外部因素有关^[1, 31]。

剪切强度越大，代表肉品的柔嫩度越高^[32]。由图4可知，微波解冻会导致调理鸡排的剪切强度显著升高（ $P < 0.05$ ），该原因与其具有较高的硬度相似。其他解冻方式的剪切强度不存在显著性差异（ $P > 0.05$ ），其中空气炸锅组的剪切强度最小，为0.62 N/mm。以上结果说明相较于微波解冻，室温解冻、静水解冻、低温解冻和空气炸锅解冻都更有利于保持调理鸡排的嫩度，从而保证较好的口感，其中空气炸锅解冻的鸡排效果最好。综合质构指标和剪切强度评价，空气炸锅解冻组的样品有较好的质构特性和嫩度。

表 5 不同解冻方式下调理鸡排的质构特性

Table 5 Texture characteristics of prepared chicken chops under different freezing conditions

组别	硬度/g	弹性	咀嚼性/g	内聚性	回复性
室温解冻	3 813.58 ± 560.22 ^b	0.98 ± 0.01 ^a	2 065.82 ± 496.42 ^b	0.55 ± 0.05 ^b	0.52 ± 0.09 ^b
静水解冻	3 687.47 ± 422.58 ^b	0.93 ± 0.00 ^b	2 079.49 ± 295.41 ^b	0.60 ± 0.02 ^{ab}	0.55 ± 0.04 ^{ab}
低温解冻	3 516.16 ± 508.07 ^b	0.96 ± 0.02 ^a	2 097.87 ± 322.90 ^b	0.62 ± 0.06 ^{ab}	0.59 ± 0.08 ^{ab}
微波解冻	4 884.15 ± 655.34 ^a	0.95 ± 0.02 ^{ab}	2 886.67 ± 593.49 ^a	0.62 ± 0.05 ^{ab}	0.58 ± 0.06 ^{ab}
空气炸锅解冻	3 718.90 ± 623.99 ^b	0.98 ± 0.01 ^a	2 354.28 ± 415.92 ^{ab}	0.65 ± 0.07 ^a	0.70 ± 0.14 ^a

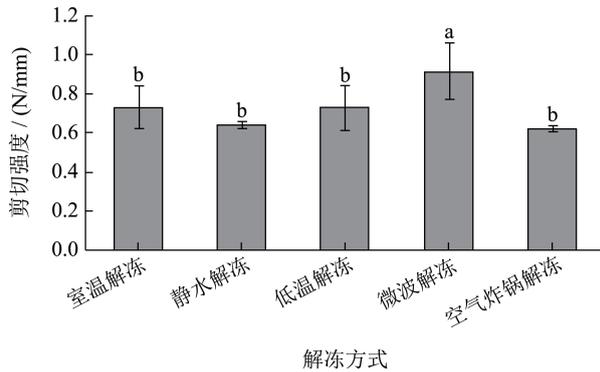


图 4 不同解冻方式下调理鸡排的剪切强度

Fig.4 Cutting strength of prepared chicken chops under different thawing methods

2.6 不同解冻方式下调理鸡排的电子鼻分析

不同解冻方式下调理鸡排的电子鼻传感器响应雷达图见图 5，尽管五种解冻方式对调理鸡排的挥发性气味影响有所差异，但是变化趋势基本一致，其中传感器 W5S、W1W、W2W 的响应值较高，上述传感器分别对氮氧化物、硫化物和芳香有机硫化物较为灵敏。挥发性硫化物通过与不同风味相互作用来增加香气的复杂性，从而赋予食品的品质和独特性^[33, 34]。含硫化合物常见于大葱、大蒜、洋葱等葱属植物中，具有浓郁的葱香香气^[35]，另外在酱油等调味品中也能检测到含硫化合物的存在^[36]。而部分学者在酱卤牛肉、烤羊腿、黄牛肉等肉制品中同样检测出了氮氧类化合物和硫化物类等芳香成分^[37-39]。结合调理鸡排气味的感官评价结果，可以认为传感器 W5S、W1W 和 W2W 能够一定程度上反映调理鸡排的香气。低温解冻和静水解冻后的调理鸡排的 W5S、W1W、W2W 的响应值均高于其他组别，说明这两组样品具有更加浓郁的香气，这可能是由于温和快速的解冻或低温有利于风味的保持。因此，低温解冻和静水解冻能够有效维持调理鸡排解冻后的香气。

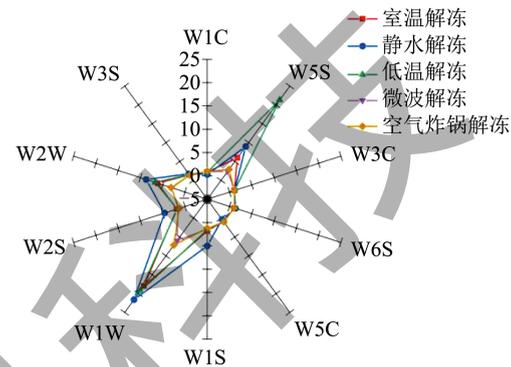


图 5 不同解冻方式下调理鸡排的电子鼻传感器响应雷达图

Fig.5 Response radar chart of electronic nose sensor for prepared chicken chops under different thawing methods

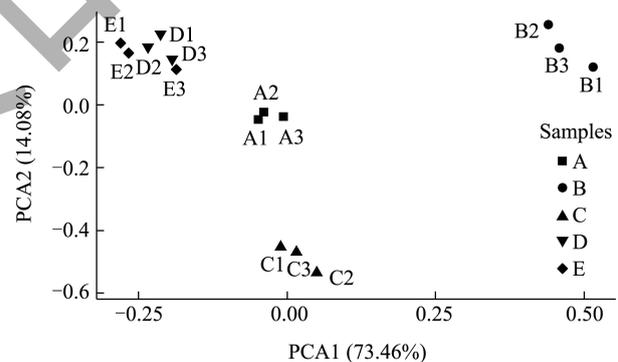


图 6 不同解冻方式下调理鸡排气味的 PCA 分析

Fig.6 PCA results of the odor of prepared chicken chops under different thawing methods

注：A~E 组别依次为室温解冻、静水解冻、低温解冻、微波解冻和空气炸锅解冻。

主成分分析是一种通过提取最小方差信息以反映多指标信息的统计学方法，图 6 是不同解冻方式下调理鸡排气味的 PCA 分析，PC1 的方差贡献率为 73.46%，PC2 的方差贡献率为 14.08%，总贡献率为 87.54%，大于 85%，表明 PCA 结果可以反映样品的差异信息。其中 PC1 的方差贡献率远大于 PC2，说明 PC1 对不同解冻方式下调理鸡排的气味变化起

主要作用。由图 6 可知，微波解冻组和空气炸锅解冻组样品的气味较为接近，这与电子鼻的结果相一致。而室温解冻、静水解冻和低温解冻组之间较为分散，表明这三种解冻方式的挥发性气味差异明显。综上，不同解冻方式下调理鸡排的气味存在明显差异，微波解冻组和空气炸锅解冻组的样品的气味相似度较高。

2.7 不同解冻方式下调理鸡排的菌落总数

菌落总数能够反映肉类的新鲜度和食用安全^[40]。图 7 显示了不同解冻方式对调理鸡排菌落总数的影响，不同解冻组存在显著性差异 ($P < 0.05$)。其中低温解冻组的菌落总数 (3.44 lg CFU/g) 显著多于其他解冻组 ($P < 0.05$)，这是因为一般情况下，长时间的解冻有利于微生物的生长繁殖^[41]。空气炸锅解冻与室温解冻的温度有利于微生物的快速繁殖，同时解冻时间充分，所以同样表现出较多的菌落总数。静水解冻与微波解冻的菌落总数水平较低 (分别为 3.13 和 3.15 lg CFU/g)，这可能有赖于较短的解冻时间。郑旭等^[42]研究结果发现，相比于空气解冻和 4 °C 低温解冻，静水解冻和微波解冻更有利于减少猪肉中的微生物数量。万海伦等^[43]研究结果表明，微波解冻能较好地抑制生食鱼片微生物的生长繁殖。以上说明，静水解冻和微波解冻组的样品有更高的食用安全性。

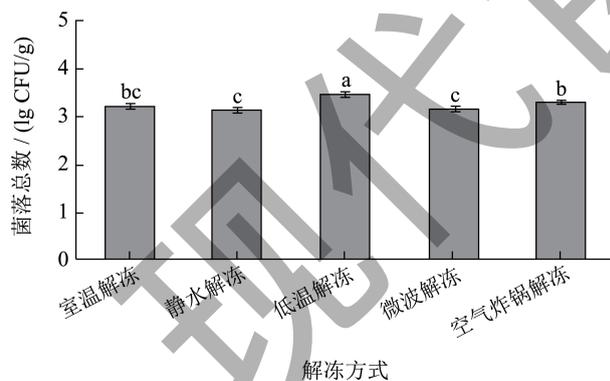


图 7 不同解冻方式下调理鸡排的菌落总数

Fig.7 The total number of bacterial colonies in prepared chicken chops under different thawing methods

2.8 不同解冻方式下调理鸡排的 TVB-N 值

由于酶和微生物的作用，肉品中的蛋白质会分解产生氨以及胺类等碱性含氮物质，即挥发性盐基氮^[43]。挥发性盐基氮含量能够反映肉品中蛋白质的降解程度，也是衡量肉品新鲜度的常见指标，TVB-N 值越高，蛋白质降解程度越高，肉品越不新

鲜^[15,44]。由图 8 可知，不同解冻组别样品的 TVB-N 值存在显著性差异 ($P < 0.05$)。静水解冻和低温解冻的 TVB-N 值最低 (分别为 4.90 和 5.60 mg/100 g)，我们推测前者是通过缩短解冻时间来减少微生物和内源酶对肉样的作用，而后者通过降低温度来抑制相关的反应进程。尽管微波解冻的时间也很短，但是微波产生的热能可能会促进蛋白质的分解，从而产生更多的碱性含氮物质，表现出更高的 TVB-N 值 (8.05 mg/100 g)。室温解冻组和空气炸锅解冻组的解冻时间长、解冻温度高，因此更有利于酶的作用和微生物的活动，其挥发性盐基氮含量也最高 (分别为 10.50 和 14.35 mg/100 g)。简言之，静水解冻和低温解冻有利于保持调理鸡排的新鲜度，减少其蛋白质降解和营养损失。

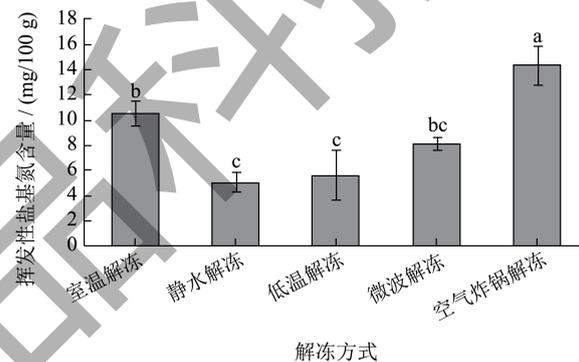


图 8 不同解冻方式下调理鸡排的 TVB-N 值

Fig.8 The TVB-N of prepared chicken chops under different thawing methods

2.9 不同解冻方式下调理鸡排的微观组织

微观组织结构能一定程度上反映肉品的纤维和韧性^[45]。图 9 为不同解冻方式下调理鸡排的微观组织。由图可知，室温解冻、静水解冻和低温解冻样品的肌纤维肌间隙紧密，排列整齐。张莉等^[46]在解冻羊肉时发现，静水解冻和冷藏解冻的样品肌肉没有明显间隙，与鲜肉较为接近。何向丽等^[7]研究结果也表明，4、20、30 °C 空气解冻下猪里脊肉的肌纤维形态与鲜肉相比无太大差异。然而，微波解冻和空气炸锅解冻的样品肌纤维肌间隙较宽。有相关研究发现，微波解冻过程中不均匀的传热会增大肉品肌纤维的间隙，从而导致保水性的降低^[23,47]。梁诗惠等^[48]研究发现，微波解冻会使鸡腿肉局部过度脱水，从而导致肌原纤维出现明显的收缩断裂。但在本实验中，尽管微波解冻组样品的肌纤维间隙有所增大，然而相比其他解冻方式却有更好的持水性，这可能是由于微波的快速加热能显著缩短样品的解

冻时间,从而减少肉样在解冻过程中的汁液流失,而由于样品的部分蛋白质已经发生变性,因此蒸煮后的汁液损失也较少。由此可知,室温解冻、静水解冻和低温解冻更有利于保持调理鸡排原有的组织结构。

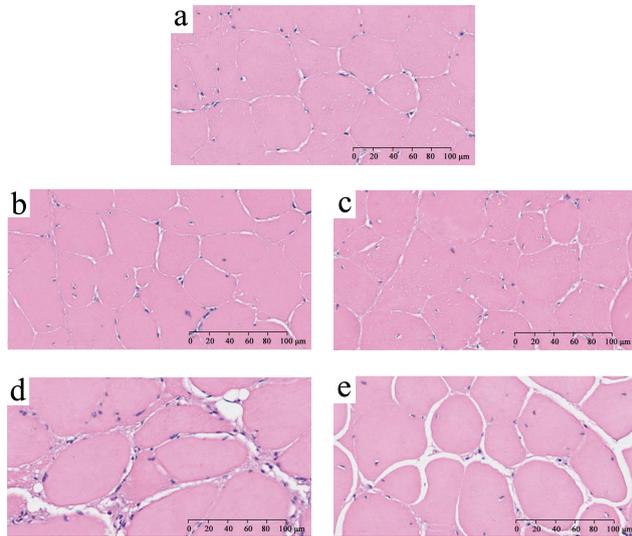


图9 不同解冻方式下调理鸡排的微观组织

Fig.9 Microstructure of prepared chicken chops under different thawing methods

注: a-e 组别依次为室温解冻、静水解冻、低温解冻、微波解冻和空气炸锅解冻,观察倍数400倍。

3 结论

本实验比较分析了室温、静水、低温、微波、空气炸锅五种常规解冻方式下速冻调理鸡排的品质。结果表明:微波解冻速度最快(156 s),能较好地保持调理鸡排的持水性(解冻损失4.46%,蒸煮损失2.70%),但是会导致样品的边缘熟化,对其色泽和微观组织的破坏也较为严重;而空气炸锅解冻和室温解冻会使样品的TVB-N值和菌落总数水平较高;经低温解冻和静水解冻的调理鸡排有着较高的感官评分(85.2和84.8分)和相似的质构特性,而且这两种解冻方式能更好地保持调理鸡排的风味和组织结构;但是低温解冻时间较长(28 806 s),会导致样品在解冻完成后菌落总数较多(3.44 lg CFU/g),且解冻后样品的色泽也不及静水解冻组。综上所述,结合解冻速率和解冻品质而言,静水解冻是针对调理鸡排较好的解冻方式。

参考文献

[1] KONG D W, QUAN C L, XI Q, et al. Study on the quality

and myofibrillar protein structure of chicken breasts during thawing of ultrasound-assisted slightly acidic electrolyzed water (SAEW) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 88: 106105.

- [2] 李凤霞,胡元庆,罗雯慧,等.感官评价在调理鸡排腌料配方优化中的应用[J].中国调味品,2018,43(3):14-17.
- [3] LI D N, ZHAO H H, MUHAMMAD A I, et al. The comparison of ultrasound-assisted thawing, air thawing and water immersion thawing on the quality of slow/fast freezing bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets [J]. Food Chemistry, 2020, 320: 126614.
- [4] WANG Y Y, RASHID M T, YAN J K, et al. Effect of multi-frequency ultrasound thawing on the structure and rheological properties of myofibrillar proteins from small yellow croaker [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105352.
- [5] LIN R R, YUAN H F, WANG C R, 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.
- [6] KIM Y B, JEONG J Y, KU S K, et al. Effects of various thawing methods on the quality characteristics of frozen beef [J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2013, 33(6): 723-729.
- [7] 何向丽,卢东岚.空气解冻温度对猪里脊肉品质的影响[J].肉类研究,2020,34(2):92-98.
- [8] LV Y, XIE J. Quality of cuttlefish as affected by different thawing methods [J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 33-52.
- [9] 王建军,雷阳,黄天然,等.不同解冻方式对817肉鸡食用品质和肌原纤维蛋白特性的影响[J].南京农业大学学报,2022,45(3):604-611.
- [10] 张艳妮,刘婷,张雯雯,等.不同解冻方式对鸡胸肉物理品质的影响[J].食品研究与开发,2021,42(22):57-63.
- [11] 张根生,张红蕾,岳晓霞,等.低温静水解冻对鸡胸肉品质特性的影响[J].食品与机械,2017,33(9):167-172.
- [12] GB 4789.2-2016,食品微生物学检验,菌落总数测定[S].
- [13] GB 5009.228-2016,食品安全国家标准,食品中挥发性盐基氮的测定[S].
- [14] 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.
- [15] 林二妹.不同冻藏温度及反复冻结-解冻对明虾贮藏品质影响研究[D].福州:福建农林大学,2016.
- [16] MINGCHENG Z, NIU H, QIAN C, 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.
- [17] CHRISTOPH J B. Methods for (industrial) thawing of fish blocks: A review [J]. Journal of Food Process Engineering, 2018, 41(1): e12598.
- [18] HONG H, LUO Y K, ZHOU Z Y, et al. Effects of different freezing treatments on the biogenic amine and quality changes

- of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) heads during ice storage [J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(2-3): 1476-1482.
- [19] 程天赋,俞龙浩,蒋奕,等.基于低场核磁共振探究解冻过程中肌原纤维水对鸡肉食用品质的影响[J].*食品科学*, 2019,40(9):16-22.
- [20] CHANDIRASEKARAN V, THULASI G. Effect of different thawing methods on physico-chemical characteristics of frozen buffalo meat [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2010, 8(6): 239-242.
- [21] ZHOU P C, XIE J. Effect of different thawing methods on the quality of mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2021, 30(9): 1213-1223.
- [22] OUYANG Q, LIU L, ZAREEF M, et al. Application of portable visible and near-infrared spectroscopy for rapid detection of cooking loss rate in pork: Comparing spectra from frozen and thawed pork [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 160: 113304.
- [23] 冯钰敏,梁诗惠,邓华荣,等.不同解冻方式对鸭腿肉品质特性的影响[J].*食品工业科技*,2023,44(3):336-345.
- [24] 赵水榕,张怡,李浩楠,等.解冻方式对调理猪肉饼品质的影响[J].*核农学报*,2020,34(4):759-769.
- [25] FAUSTMAN C, SPECHT S M, MALKUS L A, et al. Pigment oxidation in ground veal: Influence of lipid oxidation, iron and zinc [J]. *Meat Science*, 1992, 31(3): 351-362.
- [26] 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.
- [27] ANNA A P, MAŁGORZATA O, ZOFIA S. Physicochemical and sensory properties of broiler chicken breast meat stored frozen and thawed using various methods [J]. *Journal of Food Quality*, 2018, 3: 1-9.
- [28] WANG B, BAI X, DU X, et al. Comparison of effects from ultrasound thawing, vacuum thawing and microwave thawing on the quality properties and oxidation of porcine longissimus lumborum [J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1368.
- [29] KRISTIN H, ØYVIND L, KJARTAN S. Development of lipid oxidation and flesh colour in frozen stored fillets of Norwegian spring-spawning herring (*Clupea harengus* L.). Effects of treatment with ascorbic acid [J]. *Food Chemistry*, 2003, 82(3): 447-453.
- [30] BO W, XIN D, BAOHUA K, et al. Effect of ultrasound thawing, vacuum thawing, and microwave thawing on gelling properties of protein from porcine longissimus dorsi [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 64: 104860.
- [31] LIU D S, LIANG L, XIA W S, et al. Biochemical and physical changes of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillets stored at -3 and 0 degrees C [J]. *Food Chemistry*, 2013, 140(1-2): 105-114.
- [32] ROIHA I S, TVEIT G M, BACKI C J, et al. Effects of controlled thawing media temperatures on quality and safety of pre-rigor frozen Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 90: 138-144.
- [33] MATIAS I K, REBECCA C D, MANDY H, et al. Addition of volatile sulfur compounds to yeast at the early stages of fermentation reveals distinct biological and chemical pathways for aroma formation [J]. *Food Microbiology*, 2020, 89: 103435.
- [34] JO Y, CARTER B G, BARBANO D M, et al. Identification of the source of volatile sulfur compounds produced in milk during thermal processing [J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(10): 8658-8669.
- [35] 刘兵,常远,王瑞芳,等.葱属植物中挥发性风味物质研究进展[J].*食品科学*,2022,43(3):249-257.
- [36] 冯云子,周婷,吴伟宇,等.酱油风味与功能性成分研究进展[J].*食品科学技术学报*,2021,39(4):14-28.
- [37] 李明博,高青山,李官浩,等.中草药饲料添加剂对延边黄牛肉品质与风味物质的影响[J].*中国畜牧兽医*, 2023, 50(2):531-542.
- [38] 强宇,姜薇,刘成江,等.风冷与冷藏过程中酱卤牛肉风味逸散行为研究[J].*中国农业科学*,2022,55(16):3224-3241.
- [39] 高爽,丁丹,罗瑞明.基于固相微萃取-气相色谱-质谱和电子鼻法的烤羊腿中可挥发性香气成分分析[J].*肉类研究*,2020,34(10):40-46.
- [40] HSIEH C, LAI C, HO W, et al. Effect of thawing and cold storage on frozen chicken thigh meat quality by high-voltage electrostatic field [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(4): M193-M197.
- [41] LEE S, KIM E J, PARK D H, et al. Two-stage air thawing as an effective method for controlling thawing temperature and improving the freshness of frozen pork loin [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 140: 110668.
- [42] 郑旭,曾露,柏先泽,等.不同解冻处理对猪肉理化特性及微生物数量的影响[J].*肉类研究*,2018,32(4):14-19.
- [43] 万海伦,应晓国,赵波,等.不同解冻方式对生食鱼片解冻品质的影响[J].*食品科学*,2022,43(15):227-235.
- [44] XIANGLI H, RUI L, SATORU N, 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.
- [45] JIANG Q Q, NAKAZAWA N, HU Y Q, et al. Changes in quality properties and tissue histology of lightly salted tuna meat subjected to multiple freeze-thaw cycles [J]. *Food Chemistry*, 2019, 293: 178-186.
- [46] 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.
- [47] 王雪松,谢晶.不同解冻方式对冷冻竹荚鱼品质的影响[J].*食品科学*,2020,41(23):137-143.
- [48] 梁诗惠,冯钰敏,邓华荣,等.解冻方式对鸡腿肉蛋白氧化特性的影响[J].*食品与发酵工业*,2023,49(5):223-229.