

液氮速冻对调理鸡排冻藏期间品质特性的影响

胡郁汉, 蔡伟业, 陈建平, 黄文权, 阚启鑫, 林炯圻, 杨 寒, 宋明月

Effect of Liquid Nitrogen Quick Freezing on the Quality Characteristics of Prepared Chicken Chops during Frozen Storage

HU Yuhan, CAI Weiye, CHEN Jianping, HUANG Wenquan, KAN Qixin, LIN Jiongqi, YANG Han, and SONG Mingyue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同温度液氮速冻对斑点叉尾品质的影响

Effect of Liquid Nitrogen Quick Freezing at Different Temperatures on the Quality of Channel Catfish

食品工业科技. 2019, 40(3): 261-267 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.03.041>

血浆蛋白对调理猪排品质特性的影响

Effects of Blood Plasma on the Quality Characteristics of Prepared Pork Chops

食品工业科技. 2020, 41(17): 24-31 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.005>

液氮间歇式浸渍冻结对饺子冻裂率及感官品质特性的影响

Effects of Intermittent Liquid Nitrogen Immersion Freezing on the Freezing-cracking Rate and Sensory Quality of Dumplings

食品工业科技. 2021, 42(3): 25-30 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020119>

不同抗冻剂对鱿鱼滑冻藏期间品质特性的影响

Effects of Different Cryoprotectant on the Quality Characteristics of Squid Mince during Frozen Storage

食品工业科技. 2023, 44(11): 388-396 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022080078>

不同冻结方式对沙光鱼品质的影响

Effects of Different Freezing Methods on the Quality of *Synechogobius hasta*

食品工业科技. 2021, 42(9): 313-319 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110184>

不同糖类对反复冻融下冻藏南美白对虾虾仁品质特性的影响

Effect of Different Saccharides on the Quality of Peeled Shrimp During Frozen Storage with Freeze-thaw Cycles

食品工业科技. 2020, 41(8): 279-284 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.08.044>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

胡郁汉, 蔡伟业, 陈建平, 等. 液氮速冻对调理鸡排冻藏期间品质特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 363–371. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090022

HU Yuhang, CAI Weiye, CHEN Jianping, et al. Effect of Liquid Nitrogen Quick Freezing on the Quality Characteristics of Prepared Chicken Chops during Frozen Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 363–371. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090022

· 贮运保鲜 ·

液氮速冻对调理鸡排冻藏期间品质特性的影响

胡郁汉¹, 蔡伟业¹, 陈建平¹, 黄文权², 阚启鑫², 林炯圻², 杨 寒^{3,*}, 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: 为探究液氮速冻对调理鸡排冻藏期间品质特性的影响, 文章采用 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻、 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻对调理鸡排进行冻结, 然后将样品置于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冻藏 0~180 d, 评价指标包括感官评分、色泽、持水性、质构特性、电子鼻结果分析、pH、相关氧化指标以及菌落总数。结果表明: 随着冻藏时间的延长, 各组的感官评分明显降低 ($P<0.05$), 而液氮速冻能够有效维持样品的持水性、质构特性和风味成分, 并对其色泽产生影响。冻藏第 180 d, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻组、 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻组的离心损失率为 13.47%、8.53% 和 10.80%; 滴水损失率分别为 9.30%、7.64% 和 8.35%; 硬度分别为 54.60、60.05 和 65.17 N; $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻组的 a^* 值显著高于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻组 ($P<0.05$)。3 个处理组的 pH 均呈现先下降后上升的变化趋势, 不同冷冻方法并未对调理鸡排的菌落总数产生显著影响 ($P>0.05$), 冻藏期间各组的菌落总数均低于 5 lg (CFU/g)。通过测定相关氧化指标发现, 液氮速冻能够有效延缓样品的蛋白和脂质氧化, 冻藏第 180 d, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻组的丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量分别比 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻组高出 21.95% 和 37.43%, 总巯基 (sulfhydryl group, -SH) 含量分别较其他两组降低了 26.58% 和 44.09%。综上所述, 三种冷冻方式下的调理鸡排在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏 180 d 后依旧具有较高的食用安全性, 而液氮速冻能够显著改善调理鸡排在冻藏期间的品质特性。

关键词: 液氮速冻, 调理鸡排, 冻藏, 品质特性, 电子鼻, 菌落总数

中图分类号: TS251.55

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)17-0363-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090022



本文网刊:

Effect of Liquid Nitrogen Quick Freezing on the Quality Characteristics of Prepared Chicken Chops during Frozen Storage

HU Yuhang¹, CAI Weiye¹, CHEN Jianping¹, HUANG Wenquan², KAN Qixin²,

LIN Jiongqi², YANG Han^{3,*}, 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: To investigate the impact of liquid nitrogen quick freezing on the quality of prepared chicken chops during frozen storage, this study compared $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ air freezing with $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ liquid nitrogen quick freezing. Then the frozen

收稿日期: 2023-09-05

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题项目 (SL2022B03J01173)。

作者简介: 胡郁汉 (1971-), 男, 大专, 高级工程师, 研究方向: 食品加工与预制菜产品开发, E-mail: huyuhan988@163.com。

* 通信作者: 杨寒 (1994-), 男, 硕士, 研究方向: 食品工程, E-mail: yujinyanghan@126.com。

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

samples were stored in a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ refrigerator for 0~180 days. The evaluation criteria included sensory scores, color, water holding capacity, texture characteristics, electronic nose analysis, pH, oxidation indicators, and total bacterial count. The results revealed a significant decrease in sensory scores for all groups with the extension of frozen time ($P<0.05$). However, the water holding capacity, texture characteristics, and flavor components of the samples treated with liquid nitrogen quick freezing were effectively maintained. Liquid nitrogen quick freezing also had an impact on the color of the samples. On the 180th day of frozen storage, the centrifugal loss rates for the $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ air freezing, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ liquid nitrogen quick freezing groups were 13.47%, 8.53%, and 10.80%, respectively. The drip loss rates were 9.30%, 7.64%, and 8.35%, and the hardness values were 54.60, 60.05, and 65.17 N, respectively. The a^* value of the $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ liquid nitrogen quick freezing group was significantly higher than that of the $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ air freezing group ($P<0.05$). The pH of all treatment groups initially decreased and then increased. Different freezing methods did not significantly affect the total bacterial count of the prepared chicken chops ($P>0.05$), and the count remained below 5 lg (CFU/g) during frozen storage. Measurement of relevant oxidation indicators revealed that liquid nitrogen quick freezing effectively delayed protein and lipid oxidation. On the 180th day of frozen storage, the malondialdehyde (MDA) content in the $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ air freezing group was 21.95% and 37.43% higher than that in the $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ liquid nitrogen quick freezing groups, respectively. The total sulfhydryl group (-SH) content was reduced by 26.58% and 44.09% compared to the other two groups, respectively. In summary, the prepared chicken chops by all three freezing methods remained safe for consumption after being frozen at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 180 days. But the quality characteristics of the prepared chicken chops treated with liquid nitrogen quick freezing were significantly improved during frozen storage.

Key words: liquid nitrogen quick freezing; prepared chicken chops; frozen storage; quality characteristics; electronic nose; total bacterial count

调理鸡排具有食用方便、营养美味的特点,一直深受消费者的青睐。相比于熟制品,调理鸡排等预制肉制品通常未经灭菌处理,所以在常温环境下保质期较短^[1]。冷冻是保存预制菜和肉类食品的常用方法,其原理是在低温环境下,食品中的水分活度降低,微生物的生长繁殖和酶活性也受到抑制。食品在完成冻结后,通常会在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下的环境温度中进行后续的冻藏。而在冻藏过程中,冷冻食品中的化学组分会进一步发生变化,如水分的迁移、冰晶的重结晶、蛋白质和脂质的氧化等,从而对其品质特性产生消极的影响。其中,冷冻方法的选择、冻藏的温度和时间、抗氧化剂的使用等因素都会影响冻藏食品的品质。因此,食品在冻藏期间的品质变化规律及控制方法一直是科研人员的研究热点。

相比于传统的空气冷冻,浸渍冷冻、物理场辅助冷冻(超声波、磁场、高压)等冷冻技术在提升冷冻速率和改善冷冻产品品质方面体现出一定的优势,但是其弊端也较为明显。这些新型冷冻方式无法一次性冷冻大量产品,此外,浸渍冷冻会使物料有吸收载冷剂溶质的风险,物理场辅助冷冻需要特定的设备才能操作。而作为一种已经成功实现商业化应用的速冻方法,液氮速冻已被证实在果蔬、海产、肉类等各类食品的冷冻中具有良好的应用价值。液氮的沸点极低($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$),在瞬时汽化中会带走食品的大量潜热和显热,从而完成对食品的快速冷冻^[2]。经过液氮速冻的食品由于能更加快速地通过最大冰晶生成带($-1\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$),因此通常也具有更好的食用品质和更长的冻藏期限。当前,液氮速冻技术已广泛用于海产类等生鲜食品的冷冻加工,而液氮速冻对禽类预制菜冻藏品质特性的影响鲜有报道。

前期课题组通过实验发现 $-80\sim-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是针对

调理鸡排较为合适的液氮速冻温度。本文以调理鸡排为研究对象,采用 -80 、 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻对其进行速冻处理,同时以 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气缓冻作为对照,通过分析比较调理鸡排在冻藏6个月期间的感官评分、色泽、持水性、质构特性、电子鼻结果、pH、氧化稳定性以及菌落总数差异,以探讨液氮速冻改善调理鸡排冻藏品质的作用,推广液氮速冻技术在预制菜冷冻中的应用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜调理鸡排 广州酒家集团利口福食品有限公司提供;氯化钠(分析纯) 广州化学试剂厂;平板计数琼脂(PCA) 广东环凯微生物科技有限公司;丙二醛(malondialdehyde, MDA)试剂盒、总巯基(sulfhydryl group, -SH)试剂盒 南京建成生物工程研究所。

DJL-QFL 液氮速冻隧道机 深圳市德捷力低温技术有限公司;LT502 电子天平 常熟市天量仪器有限公司;LRH-150 生化培养箱 上海一恒科学仪器有限公司;PHS-3E pH计 上海仪电科学仪器股份有限公司;DC-P3A 新型色彩色差仪 北京纽利德科技有限公司;VersaMax 光栅型酶标仪 美国Molecular Devices公司;EZ-SX500N 质构仪 日本岛津公司;RD-60DTZ 低速离心机 上海卢湘仪离心机仪器有限公司;PEN3 型便携式电子鼻系统 德国Airsense公司。

1.2 实验方法

1.2.1 调理鸡排的速冻及冻藏处理 将同一批次的调理鸡排随机分为三组,其中一组直接置于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱进行冻藏;另外两组样品置于隧道式液氮速冻机

表 1 调理鸡排感官评分表
Table 1 Sensory rating form of prepared chicken chops

评分标准	色泽(25分)	气味(25分)	组织形态(25分)	组织结构(25分)
优	呈嫩粉色,表面富有光泽(19~25)	鸡肉的正常气味与腌料香气浓郁,无其他异味(19~25)	表面光滑,肌肉组织致密完整,纹理清晰(19~25)	坚实富有弹性,手指按压后凹陷快速复原(19~25)
良	嫩粉色稍浅,光泽度较低(12~18)	鸡肉固有气味与腌料香气较淡,略有异味(12~18)	表面基本光滑,肌肉组织紧密,纹理较清晰(12~18)	较有弹性,手指按压后凹陷较快复原(12~18)
中	肉色整体偏黄,光泽暗淡(6~11)	鸡肉固有气味消失,异味明显(6~11)	表面粗糙,有裂纹,肌肉组织不紧密,局部松散(6~11)	稍有弹性,手指按压后凹陷复原较慢(6~11)
差	肉色发白或呈暗灰色,体表无光泽(0~5)	整体出现异味和臭味(0~5)	表面粗糙,裂纹较大,肌肉组织松散(0~5)	无弹性,手指按压后凹陷不消失(0~5)

进行液氮速冻,速冻温度分别设置为-80 ℃和-100 ℃,速冻时间设置为 20 min,完成速冻后放入-18 ℃冰箱进行冻藏。期间,分别在冻藏 0、60、120、180 d 时取出解冻制样,测定相关品质指标。

1.2.2 感官评价 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。感官评定小组由 10 位食品专业的学生组成,评定结果取 10 人的平均值。调理鸡排感官评分表参照李凤霞等^[3]方法进行设计,见表 1。

1.2.3 色泽测定 将样品加工成 3 cm×3 cm×1 cm 的块状,放于生理盐水中漂洗干净,用滤纸擦干后待用。色差仪采用标准白板校准后,对肉块表面进行色泽测定,记录亮度值(L^*)、红度值(a^*)和黄度值(b^*)。

1.2.4 持水性测定 离心损失率:称取 4 块 5 g 样品用滤纸包裹,置于 50 mL 离心管中,4000 r/min 离心 20 min,取出样品,剥去滤纸后擦干表面水分称重。按照以下公式计算离心损失率:

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

式中: X_1 表示离心损失率,%; M_1 表示离心前质量,g; M_2 表示离心后质量,g。

滴水损失率:称取 4 块形状、大小相近肉样,记录重量。用细铁丝悬挂于一次性水杯中央,外套一层保鲜袋并系紧袋口将肉样密封在杯内。在冰箱 4 ℃条件下悬挂保存 48 h 后,去掉保鲜袋、细铁丝和一次性水杯,用滤纸吸干肉块表面残留的水分,然后称重。按照以下公式计算滴水损失率:

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

式中: X_2 表示滴水损失率,%; P_1 表示悬挂前质量,g; P_2 表示悬挂后质量,g。

1.2.5 质构特性测定 将样品加工成 1 cm×1 cm×1 cm 的块状,质构仪选择 TPA 模式,探头型号为 P/36R 柱形探头。设定参数:测试速率为 2.5 mm/s,返回速率为 1.0 mm/s,行程应变比设置为 40%,触发力为 0.1 N。

1.2.6 电子鼻分析 称取 5 g 样品剪碎后放入顶空瓶中,采用直接顶空吸气法,电子鼻分析样品参数如下:预采样时间:5 s;冲洗时间:60 s;采集时间:120 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 2。

表 2 电子鼻传感器性能描述
Table 2 Performance description of electronic nose sensors

阵列序号	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

1.2.7 pH 测定 pH 计采用两点校正法进行校准。取 5 g 样品加入 45 mL 蒸馏水匀浆,放置 30 min,期间不断搅拌,之后用 pH 计进行测定,等待显示屏数值稳定后读取并记录。

1.2.8 丙二醛(MDA)含量测定 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量,按照南京建成生物工程有限公司试剂盒说明书步骤进行试验操作。

1.2.9 总巯基(-SH)含量测定 采用分光光度法测定总巯基(-SH)含量,按照南京建成生物工程有限公司试剂盒说明书步骤进行试验操作。

1.2.10 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》^[4]进行调理鸡排菌落总数的测定。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 进行实验结果的统计,IBM SPSS Statistics 27 进行单因素方差分析,Duncan 多重比较法进行显著性差异分析, $P<0.05$ 表示差异显著,使用 Origin 2022 进行绘图,各组实验均重复 3 次及以上,实验数据按照“平均值±标准差”来表示。

2 结果与分析

2.1 冻藏期间调理鸡排的感官评分变化

感官评价有助于确定食品的食品品质以及保质期限^[5]。图 1 为不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的感官评分变化。冻藏第 0 d,各冷冻处理组的感官评分较高,均在 85 分以上。随着冻藏时间的延长,各组感官评分开始下降,主要表现在样品出现色

泽变暗、香气变淡、汁液损失增加、弹性降低以及部分肉样组织松散掉落等现象。其中, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻组和 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻组的感官评分在冻藏第 60 d 开始出现显著下降($P<0.05$), 而 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻组的感官评分直至冻藏第 120 d 才表现出显著性差异($P<0.05$), 这可能是由于过慢或者过快的冷冻速率都不利于肉品感官品质的保持, 冷冻速率过慢会促使细胞外产生大而不规则的冰晶, 从而导致肉样更为严重的机械损伤和汁液流失; 而过快的冷冻速率可能会使样品的压应力与冰晶的拉应力相差太大, 同样加剧细胞的损伤^[6]。冻藏期间, 相较于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻组, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻组的感官评分始终较低, 且降幅更为明显。冻藏第 180 d, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻组的感官评分为 69.4 分, 较冻藏第 0 d 下降了 18.8 分, 而 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻组的感官评分分别为 74.8 分和 74.4 分。因此, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻均更有利于长期保持冻藏样品的感官品质。

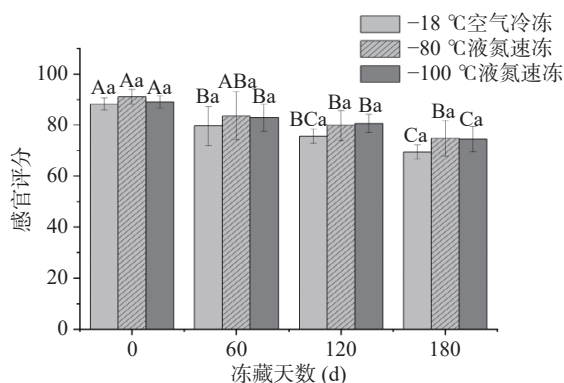


图1 不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的感官评分变化
Fig.1 Sensory score changes of prepared chicken chops under different freezing conditions during frozen storage

注: 不同小写字母(a~c)表示同一冻藏时间不同处理组间具有显著差异($P<0.05$); 不同大写字母(A~C)表示不同冻藏时间相同处理组间具有显著差异($P<0.05$); 图2~图4、图6~图9同。

2.2 冻藏期间调理鸡排的色泽变化

肉类食品的颜色会对消费者的选择产生影响, 亮度(L^* 值)、红度(a^* 值)和黄度(b^* 值)是评价肉制品颜色的常用指标。冻藏期间, 尽管不同组别的样品 L^* 值变化趋势不同, 但在冻藏 120 d 后各组亮度无显著性差异($P>0.05$)。肉制品的红度主要由肌红蛋白的含量和状态所决定, 红度越高表示肉品的新鲜度越好^[7]。各组样品的 a^* 值均在冻藏前 60 d 表现出上升的趋势, 然后开始下降, 其结果与孙金辉等^[8]研究类似, 这可能是因为冻藏前 60 d, 肉类表面形成的冰晶会发生升华, 从而使更多的肌肉组织能与空气接触发生氧化还原反应, 还原态肌红蛋白(紫红色)转变为氧合肌红蛋白(鲜红色); 而随着冻藏时间的增加, 鸡肉的红度会进一步发生改变, 有可能是因为氧合肌红蛋白开始氧化成高铁肌红蛋白(棕色), 且解冻后流失的汁液较多, 因此肉类整体的红度下降^[9-10]。在冻藏

180 d 后, $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻组的 a^* 值显著高于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻组($P<0.05$)。肉品的黄度被认为与其脂质氧化程度密切相关, b^* 值越高, 脂质氧化越严重, 因为脂肪氧化会引发非酶褐变进而反应生成黄色素^[11]。冻藏期前 120 d, 各组样品的 b^* 值表现出下降的趋势, 这可能与样品中增加的氧合肌红蛋白含量相关; 冻藏 180 d 时, 各组样品的 b^* 值重新上升, 且与第 120 d 相比具有显著性差异($P<0.05$), 其原因可能是此时样品的脂质氧化程度较高, 其氧化生成产物中的黄色类色素导致肉品呈现较高的 b^* 值^[12]。

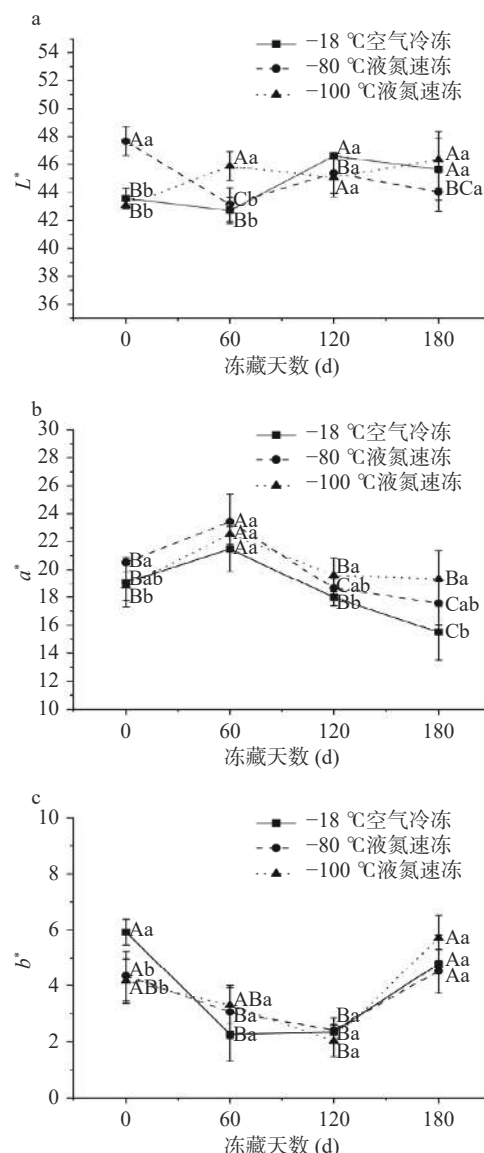


图2 不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的色泽变化
Fig.2 Changes in color of prepared chicken chops under different freezing conditions during frozen storage

2.3 冻藏期间调理鸡排的持水性变化

离心损失和滴水损失是表征肉类持水性的常用方法, 是评价肉类品质的重要指标^[13]。图3a 是不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的离心损失变化。冻藏前 60 d, 不同冷冻组的离心损失率不存在显著性差异($P>0.05$); 冻藏第 120 d, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻组的离心损失率(13.76%)显著高于 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻

组(8.97%);冻藏第 180 d, -18°C 空气冷冻组的离心损失率(13.47%)显著高于 -80°C 液氮速冻组(8.53%)。

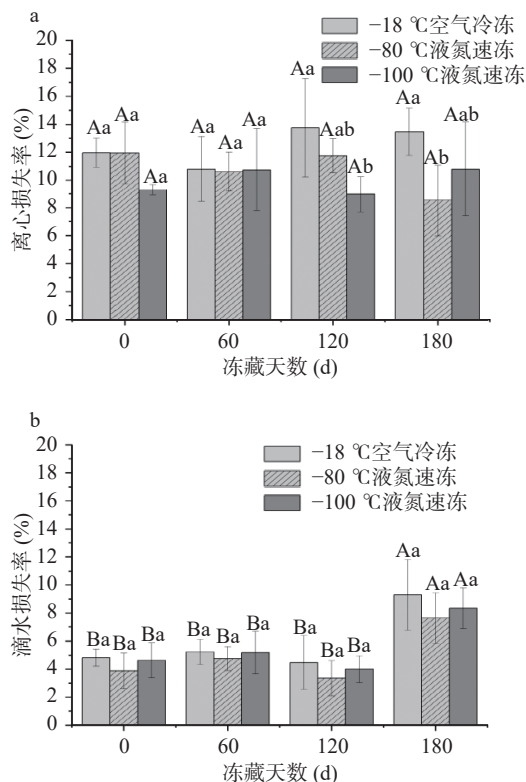


图 3 不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的持水性变化

Fig.3 Changes in water holding capacity of prepared chicken chops under different freezing conditions during frozen storage
注: a 是不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的离心损失变化; b 是不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的滴水损失变化。

图 3b 是不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的滴水损失变化。冻藏前 120 d, 各处理组的滴水损失率没有明显的上升趋势($P > 0.05$)。冻藏第 180 d, 三组样品的滴水损失率显著升高($P < 0.05$), 其中 -18°C 空气冷冻组的滴水损失率最高, 从冻藏 120 d 的 4.47% 上升到 9.30%, 而 -80°C 和 -100°C 液氮速冻组的滴水损失率分别为 7.64% 和 8.35%。

以上结果表明, 随着冻藏时间的延长, 肉类食品的持水性会有所下降, 这是因为在冻藏期间, 冰晶的重结晶会对肌肉组织结构造成破坏, 另外肌原纤维蛋白的氧化也会导致持水性的降低^[14-15]。而在冷冻工艺的选择方面, 液氮速冻更有利于保持调理鸡排的持水性, 且 -80°C 和 -100°C 液氮速冻之间差异不显著, 这归因于液氮速冻较快的冷冻速率能缩小样品通过最大冰晶生成区的时间, 使样品形成细小均匀的冰晶, 从而减少冰晶对样品的损伤^[16]。此外, 所有处理组在冻藏前 120 d 表现出较为稳定的持水性, 其原因可能是调理鸡排在冻前腌渍使用的调味品和香辛料能够一定程度上保持样品的持水性。

2.4 冻藏期间调理鸡排的质构特性变化

图 4 为不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的质构特性变化。对于动物性原料而言, 在一定范围内, 硬度越大表示肉质越好^[17]。由图 4a 可知, 随着

冻藏时间的延长, 不同处理组的样品的硬度显著降低($P < 0.05$)。肌肉食品的质构特性被认为与肌原纤维蛋白的完整性密切相关, 引起冻藏肉类食品硬度下降的原因主要有以下三点, 一是冻藏过程中冰晶的重结晶会对肌肉组织产生破坏, 二是肌原纤维蛋白在冻藏期间不断发生氧化和变性, 三是水解酶在冷冻解冻的过程中会对蛋白质产生水解作用^[18]。 -18°C 空气冷冻组的硬度始终小于 -80°C 和 -100°C 液氮速冻组, 且在冻藏 120 d 时与 -100°C 液氮速冻组相比表现出显著性差异($P < 0.05$)。 -18°C 空气冷冻组与 -80°C 液氮速冻组的弹性在冻藏期间变化不大, 而 -100°C 液氮速冻组的弹性在冻藏第 120 d 时显著升高($P < 0.05$)。 -18°C 空气冷冻组的咀嚼性在冻藏 60 d 后出

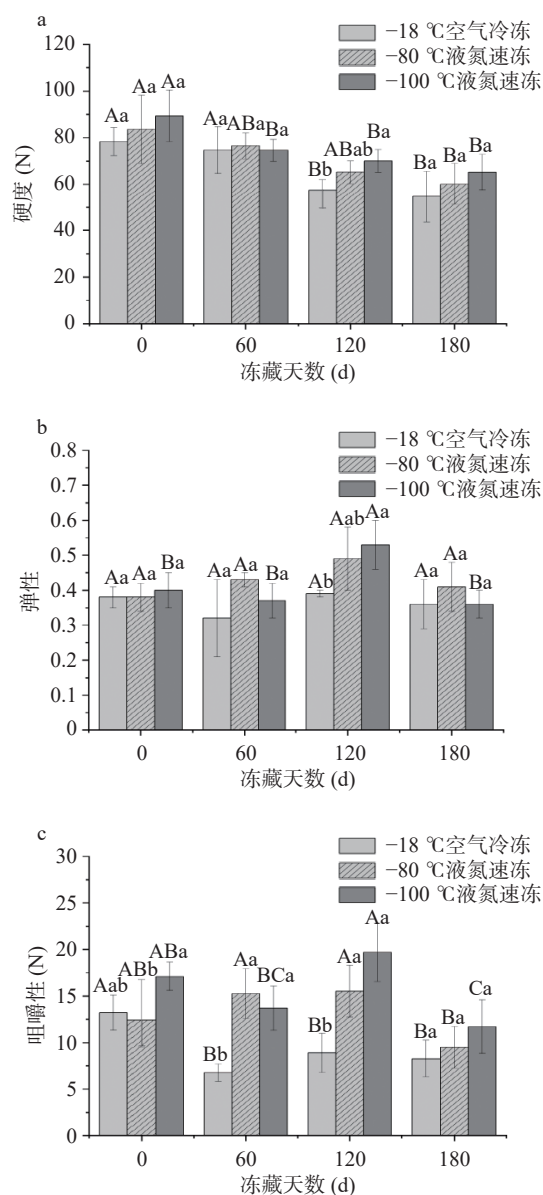


图 4 不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的质构特性变化

Fig.4 Changes in texture characteristics of prepared chicken chops under different freezing conditions during frozen storage
注: a 是不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的硬度变化; b 是不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的弹性变化; c 是不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的咀嚼性变化。

现显著下降($P<0.05$),冻藏过程中液氮速冻组的弹性和咀嚼性始终优于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻组。综上所述,相比于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻,液氮速冻更有利于维持调理鸡排在冻藏期间的质构特性,其原因可能是液氮速冻形成的细小冰晶能够减少对样品肌原纤维的破坏^[19]。

2.5 冻藏期间调理鸡排的电子鼻结果分析

图5为不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的

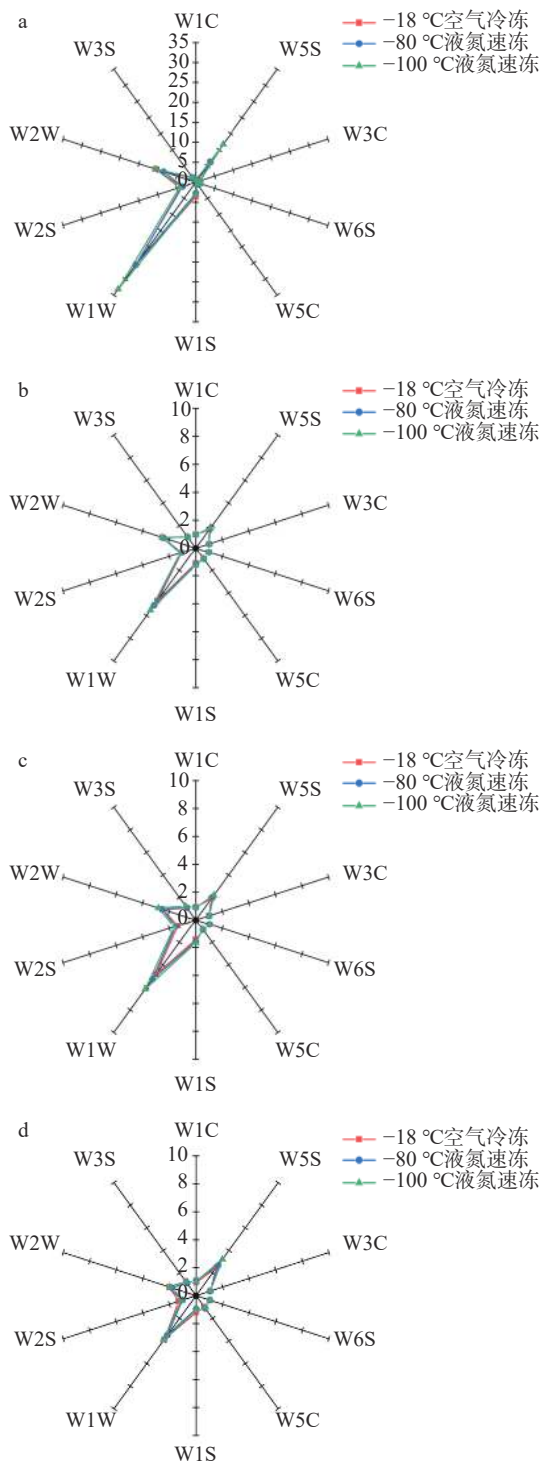


图5 不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的电子鼻结果分析

Fig.5 Analysis of electronic nose results of prepared chicken chops under different freezing conditions during frozen storage

注: a、b、c、d 分别表示不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏第0、60、120、180 d的电子鼻结果分析。

电子鼻结果分析,对比不同冻藏时间的电子鼻雷达图可以发现,3个处理组的风味强度轮廓大致相同,表明不同处理组之间的挥发性成分存在类似的地方。其中传感器W5S、W1W、W2W的响应值较高,它们表示的风味物质类型分别为氮氧化物、硫化物和芳香有机硫化物,而这一类物质一定程度上可以代表调理肉制品的芳香气味^[20-21]。冻藏过程中,不同处理组的W5S、W1W、W2W的响应值在冻藏0 d时明显较高,表明此时的调理鸡排具有较为浓郁的芳香气味。随着冻藏时间的延长,上述传感器的响应值开始降低,同时变化趋势趋于平缓。此外,冻藏期间 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻组在W5S、W1W、W2W传感器上的响应值总体大于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气冷冻组。上述结果表明冻藏时间会对调理鸡排的香气产生影响,而液氮速冻处理有利于减少样品中风味物质的损失。

2.6 冻藏期间调理鸡排的pH变化

由图6可知,在冻藏180 d的情况下,不同冷冻组的调理鸡排的pH均呈现先下降后上升的趋势,变化显著($P<0.05$),孙金辉等^[8]在冻藏土鸡鸡肉时发现类似的结果。冻藏前期,调理鸡排pH的下降可能归因于样品在解冻过程中损失了部分水分和可溶性物质,同时积累了酸性产物^[22-23];冻藏后期,可能是鸡肉中的蛋白质在微生物和酶的共同作用下发生降解,生成碱性物质,从而导致pH的上升^[24-25]。 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻组的pH在冻藏期间始终低于另外两个处理组,这可能是因为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气缓冻与 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮速冻会对样品的细胞产生更为严重的破坏,使得解冻后渗出更多的细胞液,经酶解后产生氨基酸及碱性物质,最后导致较高的pH。前者对细胞的破坏作用主要表现在较低的冷冻速率诱导形成大而不规则的冰晶,后者可能是因为速冻终温与冻藏温度($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$)温差较大,加剧了冰晶的重结晶现象。以上说明尽管不同冷冻方法处理的调理鸡排的pH有所差异,但在冻藏期间的pH变化规律并未受到影响。

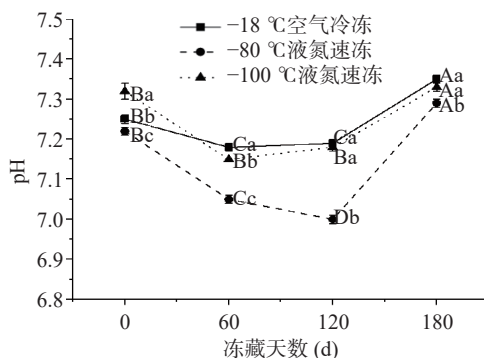


图6 不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的pH变化

Fig.6 Changes in pH of prepared chicken chops under different freezing conditions during frozen storage

2.7 冻藏期间调理鸡排的丙二醛含量变化

动物性原料中丰富的蛋白质和脂质在贮藏过程

中极易氧化,其中脂质氧化被认为是造成冻藏肉类品质下降的重要原因^[26]。丙二醛(MDA)作为脂质氧化过程中的中间产物,其含量能够一定程度上反映肌肉食品的脂质氧化程度。图 7 是不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的丙二醛含量变化。在本次实验中,样品的 MDA 含量表现出与 b^* 值相似的变化规律。冻藏前 120 d,各冷冻组的 MDA 含量总体呈下降趋势,这可能是因为调理鸡排中黑胡椒等香辛料具有一定的抗氧化能力,能够延缓脂质氧化,使得样品中丙二醛的生成速率小于其分解速率^[27],有研究指出在脂质氧化过程中,丙二醛可能会进一步分解成其他有机酸和醇,从而造成含量的下降^[28]。随着冻藏时间的延长,冰晶会进一步发生膨胀和迁移,从而对细胞产生破坏,使细胞中的氧化酶和促氧化剂流出,加速脂质氧化进程^[29-30],因此在冻藏 180 d 后,三组样品的 MDA 含量均急剧上升,其中-18 ℃ 空气冷冻组的 MDA 含量显著高于-80 ℃ 和-100 ℃ 液氮速冻组 ($P<0.05$),这可能是因为-18 ℃ 空气冷冻组较慢的降温速率容易诱导形成体积较大的冰晶,从而对肌肉细胞产生更为严重的破坏,加速脂质氧化进程,相反液氮速冻能够有效缩短冷冻时间,形成的冰晶体积较小,样品结构受破坏的程度也较低。以上表明液氮速冻能够一定程度上延缓调理鸡排在冻藏期间的脂质氧化进程。

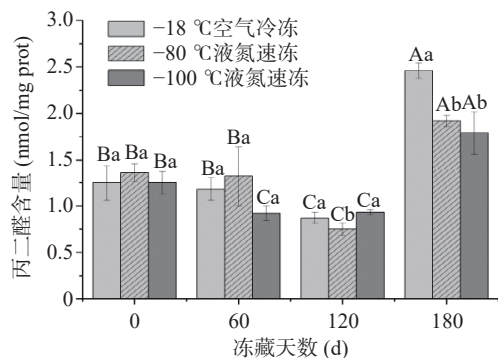


图 7 不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的丙二醛含量变化

Fig.7 Changes of MDA content of prepared chicken chops under different freezing conditions during frozen storage

2.8 冻藏期间调理鸡排的总巯基含量变化

作为蛋白质中最具活性的官能团之一,巯基(-SH)会在蛋白质冷冻变性时暴露,此时巯基极易氧化成二硫键(S-S),进而改变蛋白质的高级结构,因此巯基的含量一定程度上能反映蛋白质的氧化程度^[31-32]。由图 8 可知,随着冻藏时间的延长,每个处理组的总巯基含量呈现先快后慢的下降趋势,而且差异显著 ($P<0.05$)。冻藏前 60 d,-18 ℃ 空气冷冻组、-80 ℃ 液氮速冻组和-100 ℃ 液氮速冻组的总巯基含量分别下降了 45.56%、18.94% 和 36.75%。冻藏前期巯基含量降幅较大的原因可能是暴露在蛋白分子外部的巯基先被氧化^[33]。冻藏 180 d 后,-100 ℃ 液氮速

冻组的总巯基含量显著多于-18 ℃ 空气冷冻组 ($P<0.05$)。影响蛋白质氧化的因素很多,冻藏过程中活性氧(ROS)的攻击、氧化酶的参与以及肌原纤维结构的破坏均有可能促进蛋白的氧化^[34-35]。液氮速冻能明显抑制样品在冻藏期间总巯基含量的下降,改善蛋白质在冻藏过程中的氧化现象,这可能是因为经过液氮速冻处理的样品形成的冰晶细小且均匀,肌原纤维受破坏的程度更小。

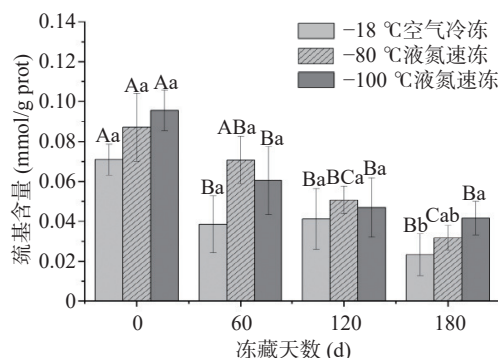


图 8 不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的总巯基含量变化

Fig.8 Changes in total sulphydryl content of prepared chicken chops under different freezing conditions during frozen storage

2.9 冻藏期间调理鸡排的菌落总数变化

菌落总数是反映肉品食用安全及腐败程度的一项重要指标,对于冷冻预制肉类食品,其菌落总数不得超过 6.48 lg(CFU/g)^[36]。图 9 所示,不同冷冻处理组的样品的菌落总数在冻藏期间均无显著性差异 ($P>0.05$)。三组样品的菌落总数在冻藏 60 d 时明显较少(均少于 4 lg(CFU/g)),这有可能是冻藏初期部分不耐受低温的微生物大量死亡,同时冰晶的形成和生长会对细菌的细胞膜产生破坏作用,这同样导致菌落总数的减少,此外调理鸡排中的部分香辛料也发挥了一定的抑菌作用^[37-38]。随着冻藏时间的延长,调理鸡排中一些耐冷细菌会重新生长繁殖,从而导致菌落总数的增加,但各处理组的菌落总数在冻藏 180 d 期间均少于 5 lg(CFU/g),肉品并未发生变质。以上说明冷冻方式的差异并不会显著影响调理鸡排的菌落总数。

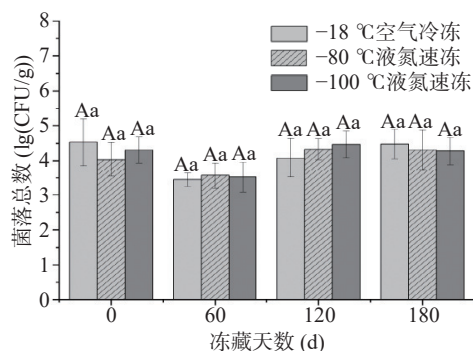


图 9 不同冷冻条件下调理鸡排在冻藏期间的菌落总数变化
Fig.9 Changes in total bacterial count of prepared chicken chops under different freezing conditions during frozen storage

3 结论

本实验探究了液氮速冻对调理鸡排冻藏期间品质特性的影响。实验结果表明,随着冻藏时间的延长,不同处理组的品质特性均呈现不同程度的下降。在180 d的冻藏过程中,各组的感官评分明显降低,而液氮速冻处理有利于改善样品的持水性和质构特性,同时减少样品中风味物质的损失。通过测定相关氧化指标发现,液氮速冻能够有效抑制调理鸡排的脂质和蛋白氧化进程,从而延缓肉质的劣变。不同的冷冻方式并未影响调理鸡排 pH 和色泽的变化规律,且各组的菌落总数在冻藏期间一直保持在 5 lg(CFU/g) 以下。综上所述,液氮速冻作为一种能够提升冷冻速率、缩短冻结时间的速冻方法,有利于进一步改善调理鸡排在冻藏期间的品质特性,而-80℃、-100℃液氮速冻处理的样品之间品质差异并不显著。

© 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] 周凯,周干,谢勇,等.不同温度对调理鸡排低温贮藏品质特性的影响(英文)[J]. *食品科学*, 2021, 42(17): 210-217. [ZHOU Kai, ZHOU Gan, XIE Yong, et al. Effects of different temperatures on the quality characteristics of prepared chicken steak during low-temperature storage[J]. *Food Science*, 2021, 42(17): 210-217.]
- [2] 张馨月,石金明,李凌云,等.液氮速冻与浸液式速冻对白切鸡食用品质的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2021, 44(5): 958-965. [ZHANG Xinyue, SHI Jinming, LI Lingyun, et al. Effects of liquid nitrogen quick freezing and immersion chilling freezing on eating quality of soft-boiled chicken[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2021, 44(5): 958-965.]
- [3] 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, 27. [LI Fengxia, HU Yuanqing, LUO Wenhui, et al. Application of sensory evaluation in the formula optimization of prepared chicken chop[J]. *China Condiment*, 2018, 43(3): 14-17, 27.]
- [4] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. GB 4789.2-2022 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2022. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 4789.2-2022 National food safety standard. Food microbiology inspection determination of total colony[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.]
- [5] 王瑶,王颖,王萍,等.辣子鸡丁贮藏过程中的品质变化[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(18): 346-358. [WANG Yao, WANG Ying, WANG Ping, et al. Quality change of spicy diced chicken during storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(18): 346-358.]
- [6] 杨作苗.液氮速冻方式保持金鲳鱼肌肉品质的研究[D]. 湛江:广东海洋大学, 2022. [YANG Zuomiao. Study of liquid nitrogen quick-freezing methods to maintain the muscle quality of golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2022.]
- [7] TAO Y, MA L, LI D, et al. Proteomics analysis to investigate the effect of oxidized protein on meat color and water holding capacity in Tan mutton under low temperature storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 146: 111429.
- [8] 孙金辉,李瑞成,李兴艳,等.冻藏条件对土鸡肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(2): 307-311. [SUN Jinhui, LI Ruicheng, LI Xingyan, et al. Influence of different frozen storage condition on the quality of native chicken meat[J]. *Food Science*, 2013, 34(2): 307-311.]
- [9] 牛力,陈景宜,黄明,等.不同冻结速率对鸡胸肉品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2011, 37(10): 204-208. [NIU Li, CHEN Jingyi, HUANG Ming, et al. Effects of different freezing rate on the quality of chicken breast[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2011, 37(10): 204-208.]
- [10] 常海军,李雪,许晶冰.不同冻藏时间对重庆“城口山地鸡”肉品质的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2018, 53(3): 143-149. [CHANG Haijun, LI Xue, XU Jingbing. Effect of different frozen storage time on chicken quality of 'Chengkou mountain chicken'[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2018, 53(3): 143-149.]
- [11] ANNA A P, MALGORZATA 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, 2018: 1-9.
- [12] 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.
- [13] 余青青,刘娇,洪惠,等.生鲜肉持水性机理研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(5): 241-247. [YU Qingqing, LIU Jiao, HONG Hui, et al. Research progress on the mechanism of water-holding capacity of fresh meat[J]. *Food Science*, 2023, 44(5): 241-247.]
- [14] 贾娜,金伯阳,刘丹,等.儿茶素对肌原纤维蛋白氧化、结构及凝胶特性的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(4): 13-19. [JIA Na, JIN Boyang, LIU Dan, et al. Effect of catechin on the oxidation, structure and gel properties of myofibrillar protein[J]. *Meat Research*, 2020, 34(4): 13-19.]
- [15] ZHANG Y, ERTBJERG P. On the origin of thaw loss: Relationship between freezing rate and protein denaturation[J]. *Food Chemistry*, 2019, 299: 125104.
- [16] 赵远恒,郭嘉,陈六彪,等.食品液氮速冻技术研究进展[J]. *制冷学报*, 2019, 40(2): 1-11. [ZHAO Yuanheng, GUO Jia, CHEN Liubiao, et al. Review of liquid nitrogen quick-freezing technology in food[J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(2): 1-11.]
- [17] 孙志利,张洁玲,陈小宝,等.温度波动对冻藏南美白对虾品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(4): 246-252. [SUN Zhili, ZHANG Jieling, CHEN Xiaobao, et al. Effects of temperature fluctuation on the quality of frozen *Penaeus vannamei*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(4): 246-252.]
- [18] GALLART-JORNET L, RUSTAD T, BARAT J M, et al. Effect of superchilled storage on the freshness and salting behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets[J]. *Food Chemistry*, 2007, 103(4): 1268-1281.
- [19] SHI L, YANG T, XIONG G, et al. Influence of frozen storage temperature on the microstructures and physicochemical properties of pre-frozen perch (*Micropterus salmoides*)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 92: 471-476.
- [20] 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. [QIANG Yu, JIANG Wei, LIU Chengjiang, et al. Flavor escape behavior of stewed beef with soy sauce during air-cooling and refrigeration[J].

Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(16): 3224–3241.]

[21] 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. [GAO Shuang, DING Dan, LUO Ruiming. Analysis of volatile aroma components of roasted lamb leg by solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose[J]. *Meat Research*, 2020, 34(10): 40–46.]

[22] COLEEN L, TREVOR J B, LOUWRENS C H. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review[J]. *Meat Science*, 2012, 91(2): 93–98.

[23] CHEN T H, ZHU Y P, HAN M Y, et al. Classification of chicken muscle with different freeze-thaw cycles using impedance and physicochemical properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 196: 94–100.

[24] SONG Y, LIU L, SHEN H, et al. Effect of sodium alginate-based edible coating containing different anti-oxidants on quality and shelf life of refrigerated bream (*Megalobrama amblycephala*) [J]. *Food Control*, 2011, 22(3-4): 608–615.

[25] BENJAKUL S, SUTTHIPAN N. Muscle changes in hard and soft shell crabs during frozen storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42(3): 723–729.

[26] SEBAHATTIN S T, FATMA I, AYL A S. Antioxidant activity of pomegranate peel extract on lipid and protein oxidation in beef meatballs during frozen storage[J]. *Meat Science*, 2017, 129: 111–119.

[27] 徐红艳, 张珍, 陈雪琴, 等. 复配香辛料精油处理对冷藏藏羊肉氧化特性的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2020, 38(2): 90–98.

[XU Honyan, ZHANG Zhen, CHEN Xueqin, et al. Effect of compound spice essential oil on oxidation characteristics of Tibetan mutton during refrigeration[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 38(2): 90–98.]

[28] KUO J C, WANG S Y, HUANG C J, et al. Effects of phosphate type, packaging method and storage time on the characteristics of Chinese sausage 1[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1987, 11(4): 325–338.

[29] 井月欣, 张健, 王茂剑, 等. 盐渍海参在冻藏过程中的品质变化[J]. *食品科技*, 2022, 47(3): 149–154. [JING Yuexin, ZHANG Jian, WANG Maojian, et al. Changes in quality of salted sea cucumber during freezing storage[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(3): 149–154.]

[30] GROTTA L, CASTELLANI F, PALAZZO F, et al. Treat-

ment optimisation and sample preparation for the evaluation of lipid oxidation in various meats through TBARS assays before analysis [J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 10: 1870–1880.

[31] HU Y, ZHANG M, ZHAO Y, et al. Effects of different calcium salts on the physicochemical properties of silver carp myosin[J]. *Food Bioscience*, 2022, 47: 101518.

[32] 谢晨, 熊泽语, 李慧, 等. 金针菇多糖对三文鱼片冻藏期间品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(22): 178–183. [XIE Chen, XIONG Zeyu, LI Hui, et al. Effects of polysaccharide from *Flammulina velutipes* on quality of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets during frozen storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(22): 178–183.]

[33] 高文宏, 侯睿, 曾新安. 水溶性大豆多糖改善浸渍冷冻鱼糜蛋白的变性[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(2): 134–140. [GAO Wenhong, HOU Rui, ZENG Xinan. Mitigating protein denaturation of surimi via immersion-freezing using water-soluble soybean polysaccharide(s) [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(2): 134–140.]

[34] 丘静, 秦德丽, 刘纯友, 等. 低温贮藏过程中水牛肉蛋白质的变化[J]. *食品与机械*, 2022, 38(2): 137–142. [QIU Jing, QIN Deli, LIU Chunyou, et al. Protein changes of buffalo meat during low temperature storage[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(2): 137–142.]

[35] 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.

[36] 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, 2008. [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, 2008.]

[37] 党美琪, 杨眉, 安玥琦, 等. 猪肉-鱼肉复合狮子头贮藏期间的品质变化规律[J]. *肉类研究*, 2023, 37(2): 26–31. [DANG Meiqi, YANG Mei, AN Yueqi, et al. Quality changes in pork-fish composite meatballs during storage[J]. *Meat Research*, 2023, 37(2): 26–31.]

[38] 王萍, 井月欣, 张健, 等. 南极冰鱼外裹糊鱼块在冻藏过程中品质变化[J]. *食品科技*, 2021, 46(3): 111–115. [WANG Ping, JING Yuexin, ZHANG Jian, et al. Quality changes of Antarctic ice fish fillets coated with batter during frozen storage[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(3): 111–115.]