

不同液氮速冻温度下预制鸡排的品质变化

黄文权^{1,2}, 阚启鑫^{1,2}, 黄丰景¹, 李玉坤¹, 杨寒³, 刘果², 陈宇立², 谢灿杰^{1*}, 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: 为探究不同液氮速冻温度下预制鸡排的品质变化, 该文采用液氮喷雾 (-80、-100、-120 °C) 对鸡排进行速冻, 同时以 4 °C 保鲜冷藏和 -18 °C 冰箱缓冻作对照, 评价指标包括冷冻速率、感官评分、持水性、pH 值、色泽、质构特性以及氧化指标测定。结果表明: 液氮速冻工艺能显著缩短鸡排冷冻时间; 液氮速冻 -100 °C 鸡排的感官得分 (70.83 分) 最接近 4 °C 保鲜冷藏下的鸡排 (84.00 分), 而液氮速冻 -120 °C 会导致鸡排表面出现裂纹; 液氮速冻能够较好地保持预制鸡排的持水性, 液氮速冻 -100 °C 鸡排的离心损失率为 20.95%, 而 -18 °C 冰箱缓冻鸡排的离心损失率高达 32.84%; 各组别的 pH 值存在显著性差异 ($P < 0.05$), 色泽指标无显著性差异 ($P > 0.05$), 液氮速冻组各项质构指标总体优于 -18 °C 冰箱缓冻; 相比 -18 °C 缓冻, 液氮速冻 -80 °C 和 -100 °C 鸡排的丙二醛含量分别减少了 22.54% 和 15.02%, 谷胱甘肽过氧化物酶活分别提高了 66.13% 和 132.58%。综上所述, 相比 -18 °C 缓冻, 液氮速冻的鸡排保留有更好的食用品质, 加工温度设置为 -80 °C 至 -100 °C 之间相对合适。

关键词: 液氮速冻; 温度; 预制鸡排; 品质

文章编号: 1673-9078(2024)01-149-157

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.0110

Quality Changes of Pre-made Chicken Chops under Different Liquid Nitrogen Flash-freezing Temperatures

HUANG Wenquan^{1,2}, KAN Qixin^{1,2}, HUANG Fengjing¹, LI Yukun¹, YANG Han³,
LIU Guo², CHEN Yuli², XIE Canjie^{1*}, 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 explore the quality changes of pre-made chicken chops under different liquid nitrogen flash-freezing temperatures, liquid nitrogen spray (-80, -100, -120 °C) was used to freeze chicken chops, whereas fresh storage at 4 °C and slow freezing at 18 °C were used as controls. The evaluation indicators included freezing speed, sensory score, water holding capacity, pH, color, texture

引文格式:

黄文权, 阚启鑫, 黄丰景, 等. 不同液氮速冻温度下预制鸡排的品质变化[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 149-157.

HUANG Wenquan, KAN Qixin, HUANG Fengjing, et al. Quality changes of pre-made chicken chops under different liquid nitrogen flash-freezing temperatures [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 149-157.

收稿日期: 2023-02-05

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项项目 (SL2022B03J01173)

作者简介: 黄文权 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与预制菜产品开发, E-mail: hwq@stu.scau.edu.cn

通讯作者: 谢灿杰 (1973-), 男, 高级工程师, 研究方向: 食品加工与预制菜产品开发, E-mail: 1768761172@qq.com; 共同通讯作者: 宋明月 (1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品化学, E-mail: songmy@scau.edu.cn

and oxidation index. The results showed that treating chicken chops with liquid nitrogen flash-freezing considerably shortened the freezing time. The sensory score of chicken chops treated with liquid nitrogen flash-freezing at $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (70.83 points) was the closest to that of chicken chops refrigerated at $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (84.00 points), whereas treatment with liquid nitrogen flash-freezing at $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ caused cracks on the surface of the chops. The water holding capacity of pre-made chicken chops can be effectively maintained by liquid nitrogen flash-freezing. The centrifugal loss rate of chicken chops treated with liquid nitrogen flash-freezing at $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ was 20.95%, whereas that of chicken chops treated with slow freezing at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ was as high as 32.84%. A significant difference was detected in pH among the different groups ($P<0.05$), but not in color ($P>0.05$). The texture indices of the liquid nitrogen flash-freezing groups were generally superior to those of the $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ slow-freezing group. Compared with slow freezing at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, the malondialdehyde content of chicken chops treated with liquid nitrogen flash-freezing at -80 and $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ decreased by 22.54% and 15.02%, respectively, whereas their glutathione peroxidase activity increased by 66.13% and 132.58%, respectively. In conclusion, compared with the slow freezing at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, chicken chops treated with liquid nitrogen flash-freezing retained superior eating quality. It is recommended that the processing temperature be maintained between -80 and $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: liquid nitrogen flash-freezing; temperature; pre-made chicken chop; quality

预制菜是在加工厂完成食品原料加工后,以成品(Ready-made Food)或半成品(Semi-finished Food)的形态供应给消费者的菜品^[1]。预制菜从生产商流通至消费者的全过程需要较长的时间,但产品中丰富的营养成分使其在贮藏或运输过程中容易发生腐败变质,因此通常需要冷冻处理来抑制微生物和酶的活性,从而延长产品的保质期^[2]。为了提高冷冻食品的品质,一些新型冷冻技术如浸渍冷冻、超声辅助冷冻、电场辅助冷冻等方法相继衍生,其中以液氮冷冻为核心的关键技术受到了研究者的极大关注。

液氮速冻作为一种速冻技术已经成功实现了商业规模冷冻^[3],其速冻原理在于液氮的沸点极低,而当液氮与物料接触时,二者巨大的温差使液氮瞬间发生相变(从液态转变为气态),这个过程能够带走食品大量的潜热和显热,从而使食品快速的降温。通过液氮冷冻的食品降温速度快,通过最大冰晶生成带的时间短,因此在速冻过程中食品形成的冰晶较小,有助于减少组织和细胞的机械损伤,更有利于保持食品的品质。

近年来,中国已成为第二大鸡肉消费国,鸡肉在我国肉类消费总量中占比20%^[4,5]。高蛋白、低脂肪的鸡肉具有必需氨基酸、矿物质、维生素等丰富的营养素^[6,7],而且易于烹饪,因此以鸡肉为原料的预制品受到了消费者的青睐。但选择合适的冷冻方式以提高鸡肉的食用品质是当前的研究热点和难点。

Kim等^[8]采用液氮速冻对鸡胸肉进行冻结,发现快速冻结的鸡胸肉会有更小和更均匀的细胞内冰晶,其解冻损失也少于慢速冻结的鸡胸肉。杨

禹新等^[9]研究发现,液氮速冻比常规的冻结方式($-35\text{ }^{\circ}\text{C}$)能更加快速地将整鸡冻结至 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$,较高的冻结速率使得细小的冰晶均匀分布在肌纤维细胞内外,因此鸡肉的汁液流失和营养损失也更少,从而具有更好的食用品质和卫生质量。吴伟彬等^[10]研究了液氮速冻对黄羽肉鸡的品质影响,结果发现相比于普通空气冷冻,液氮速冻处理的鸡肉肌细胞排列更加均匀整齐,纤维间的间隙较小。此外,液氮速冻还能降低肌原纤维蛋白的降解程度,从而提高鸡肉的持水性和总巯基含量。虽然液氮速冻具有一定的优越性,但其最佳冷冻工艺因物料而异,这是因为物料之间的组织结构和化学组成存在差异^[11]。本文采用液氮喷雾对鸡排进行速冻,同时以 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏和 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 缓冻作对照,结合感官及理化评价指标的测定,以此探究不同冷冻工艺对预制鸡排的品质影响,明确预制鸡排液氮速冻的最佳条件,并为液氮速冻在预制菜中的实际应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

预制鸡排,由广州酒家集团利口福食品有限公司提供。丙二醛(Malondialdehyde, MDA)、总巯基(Sulfhydryl Group, -SH)、总超氧化物歧化酶(Total Superoxide Dismutase, T-SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione Peroxidase, GSH-Px)试剂盒购于南京建成生物工程研究所。

1.1.2 主要仪器设备

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；WST-491-SGN 数显温度显示仪，安徽极讯自动化仪表有限公司；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；Enspire2300 多功能酶标仪，美国 Perkin Elmer 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。

1.2 实验方案

将同一批次的预制鸡排随机分为 5 组，其中 2 组置于保鲜冷藏（No Freezing, NF）和冰箱缓冻（Refrigerator Freezing, RF）作为对照组，保鲜冷藏组样品放于 4 °C 冰箱平衡温度 24 h，冰箱缓冻组样品放于 -18 °C 冰箱冷冻 16 h 至样品中心温度达到 -18 °C。另外 3 组样品置于隧道式液氮速冻机进行液氮速冻（Liquid Nitrogen Freezing, LNF），冻结温度分别为 -80、-100、-120 °C，速冻时间设置为 20 min。冻结好后的样品置于冰箱 4 °C 解冻 12 h 后进行制样。表 1 为不同处理方法的预制鸡排。

表 1 不同处理方法的预制鸡排

Table 1 Pre-made chicken chops with different treatment methods

组别	处理方法
NF _{4 °C}	4 °C 保鲜冷藏
RF _{-18 °C}	-18 °C 冰箱缓冻
LNF _{-80 °C}	-80 °C 液氮速冻
LNF _{-100 °C}	-100 °C 液氮速冻
LNF _{-120 °C}	-120 °C 液氮速冻

1.3 测定指标

1.3.1 中心温度测定和平均降温速率计算

采用数显温度显示仪和温度计测定预制鸡排的中心温度变化。平均降温速率的结果通过计算降温过程中某一阶段的降温度数（°C）与该阶段降温所用时间（min）的比值来表示^[9]。

1.3.2 感官评分

感官评分制作表参照李凤霞等^[12]的方法进行设计，并适当调整。预制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 预制鸡排感官评分表

Table 2 Sensory rating form of pre-made chicken chop

指标	评分依据	得分/分
色泽 (20分)	表面富有光泽，呈嫩粉色	16~20
	表面光泽度较低，嫩粉色稍浅	11~15
	表面色泽暗沉，肌肉整体偏黄色	6~10
	体表无光泽，肉色呈黄白色或暗灰色	0~5
气味 (20分)	具有鸡肉的正常气味与腌料的香气，无其他异味	16~20
	鸡肉固有气味与腌料香气较淡，略有异味	11~15
	鸡肉固有气味消失，异味明显	6~10
组织形态 (20分)	整体出现异味和臭味	0~5
	表面光滑，肌肉组织致密完整，纹理清晰	16~20
	表面基本光滑，无裂纹，肌肉组织紧密，纹理较清晰	11~15
	表面粗糙，有裂纹，肌肉组织不紧密，局部松散	6~10
组织弹性 (20分)	表面粗糙，裂纹较大，肌肉组织松散	0~5
	坚实富有弹性，手指按压后凹陷快速复原	16~20
	较有弹性，手指按压后凹陷较快复原	11~15
整体喜好程度 (20分)	稍有弹性，手指按压后凹陷复原较慢	6~10
	无弹性，手指按压后凹陷不消失	0~5
	整体感觉很好，无不良感官体验	16~20
整体喜好程度 (20分)	整体感觉较好，略有不良感官体验	11~15
	整体感觉一般，不良感官体验较多	6~10
	整体感觉较差，不良感官体验明显	0~5

1.3.3 持水性

样品的持水性采用离心损失率和滴水损失率评价。

离心损失率：称取 4 块 5 g 样品，用剪刀剪碎后用滤纸包裹，置于放有脱脂棉的 15 mL 离心管中，在 2 852 g 下离心 20 min，取出样品，剥去滤纸后称重。按照公式（1）计算离心损失率：

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

式中：

X_1 ——离心损失率，%；

M_1 ——离心前质量，g；

M_2 ——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 °C 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,然后称质量。按照公式(2)计算滴水损失率:

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

式中:

X_2 ——滴水损失率, %;

P_1 ——悬挂前质量, g;

P_2 ——悬挂后质量, g。

1.3.4 pH值和色泽

参照巨晓军等^[13]的方法, pH计采用两点校正法进行校准后,将探头插入鸡肉内部并被完全包裹,待数值稳定15 s后,读取pH值,同一肉样重复测定3次,取平均值。选择不同样品的不同部位,加工成3块3 cm×3 cm×1 cm的块状,将肉块放于生理盐水中漂洗干净后用滤纸擦干。色差仪采用标准白板校准后,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 质构特性

将样品加工成1 cm×1 cm×1 cm的块状,质构仪选择TPA模式,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。每个样品测定重复5次取平均值。

1.3.6 氧化指标测定

采用硫代巴比妥酸法测定MDA含量,分光光度法测定-SH含量,羟胺法测定T-SOD活性,比色法测定GSH-Px活力。按照试剂盒说明书步骤进行试验操作。

1.4 数据分析

使用Excel 2016进行数据整理,数据分析采用IBM SPSS Statistics 27进行单因素方差分析(ANOVA)和Duncan多重比较,作图采用Origin 2022,结果用平均值±标准差表示, $P < 0.05$ 表示差异性显著。

2 结果与讨论

2.1 不同冷冻条件下预制鸡排的冷冻速率

食品的冻结过程根据温度的不同可分为预冷阶段(-1℃以上)、最大冰晶生成区阶段(-1~-5℃)和过冷阶段(-5℃以下)^[14]。由图1可知,相比于RF_{-18℃},LNF组的样品在最大冰晶生成区的停留时间显著缩短,并且能够更加快速地完成食品的冻结,这是因为液氮汽化时能带走大量的热量(383.1 kJ/m³),而自然空气冷冻的换热系数较低。Gao等^[15]研究同

样发现,液氮冷冻加快了鱼糜在最大冰晶形成区的冻结速度,缩短了鱼糜的冻结时间。通过最大冰晶生成区的时间长短通常被视为衡量冷冻食品品质的标准,这个阶段的降温速度越快,越有利于形成均匀而细小的胞内胞外冰晶,从而最大程度减少冰晶对冷冻食品的损伤^[16]。Zhang等^[17]研究发现超声波辅助冷冻能够缩短鸡胸肉在最大冰晶形成区的停留时间,鸡胸肉中生成的冰晶细小而均匀,肌肉组织的破坏较小,从而展示出较好的食用品质。表3为不同冷冻条件下样品在不同阶段的平均降温速率,无论是在哪一个阶段,液氮速冻的平均降温速率都明显高于-18℃冰箱缓冻,液氮温度设置越低,冷冻速度越快。RF_{-18℃}在最大冰晶生成区的平均降温速率仅为0.009℃/min,而LNF_{-80℃}、LNF_{-100℃}和LNF_{-120℃}在这个温度阶段的降温速率分别是其186倍、188倍和256倍。如表3所示,食品在预冷阶段和过冷阶段的降温速度较快,因为这两个阶段不涉及水分的相变,而在最大冰晶生成区阶段,大部分的水会冻结成冰^[18],相变的过程会释放热量,因此导致降温速率的减缓,这与Li等^[19]的实验结果类似。综上,液氮速冻能够提升预制鸡排的冷冻速率,在快速完成食品冻结的同时更好地保证产品品质。

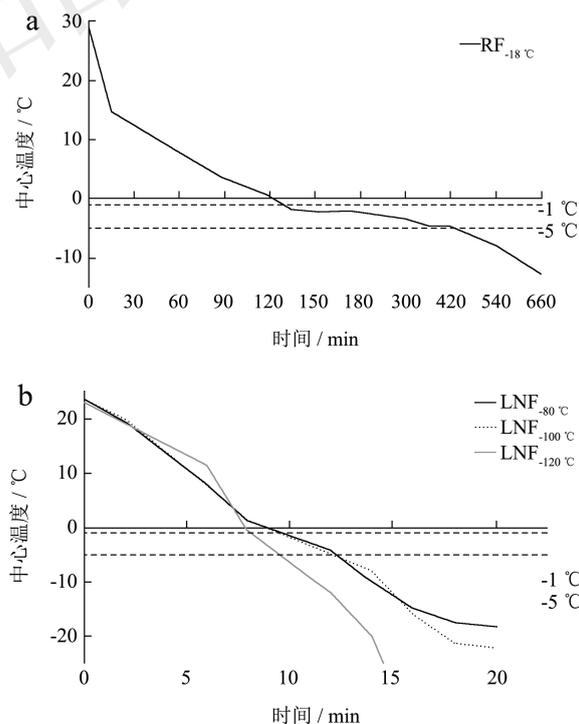


图1 不同冷冻条件下预制鸡排的中心温度变化

Fig.1 Central temperature changes of pre-made chicken chops under different freezing conditions

注:(a)是RF_{-18℃}的中心温度变化;(b)是LNF的中心温度变化。

表 3 不同冷冻条件下预制鸡排的平均降温速率
Table 3 Average cooling rate of pre-made chicken chops under different freezing conditions

不同冷冻条件	平均降温速率/°C/min		
	预冷阶段 (-1 °C以上)	最大冰晶生成区阶段 (-1~-5 °C)	过冷阶段 (-5 °C以下)
RF _{-18 °C}	0.24	0.009	0.032
LNF _{-80 °C}	2.47	1.67	1.74
LNF _{-100 °C}	2.67	1.69	2.12
LNF _{-120 °C}	3.00	2.30	5.22

2.2 不同冷冻条件下预制鸡排的感官评分

由图 2a 可知, NF_{4 °C}有着最高的感官评分, 为 84.00 分, 其余组别的总分由高到低排序依次是 LNF_{-100 °C} > LNF_{-80 °C} > RF_{-18 °C} > LNF_{-120 °C}, 各组之间差异显著 ($P < 0.05$)。如图 2b 所示, 样品的感官评价包括色泽、气味、组织形态、组织弹性和整体喜好。就色泽和气味而言, 经过冷冻后再解冻的样品肉色稍浅, 鸡肉和腌料的香气也在这个过程中产生损失; 就组织形态和组织弹性而言, 冷冻过程中形成的冰晶会对鸡肉组织产生挤压和破坏, 因此冷冻鸡肉的组织形态会出现局部松散或不完整的情况, 弹性表现出不同程度的降低。图 3 为不同冷冻条件下解冻后预制鸡排的外观性状对比图, 如图所示, 除了 LNF_{-120 °C} 以外, 其余组别鸡排的外观性状并无太大差异, 然而 LNF_{-120 °C} 的鸡排出现了明显的龟裂现象, 这可能是因为冷冻过程中冷却介质与物料温差过大而导致。冷却介质温度较低, 会造成物料的表面温度与中心温度出现较大的温差, 当物料中心温度降至冰晶形成时, 物料中心体积膨胀, 而此时

物料表面早已经冷冻定型, 因此只有通过龟裂的形式来释放中心因为冰晶形成而产生的压力。杨瑾莉等^[20]使用喷淋式液氮速冻机对火龙果块进行速冻, 结果发现液氮速冻 -100 °C 处理的样品表面裂纹明显, 而液氮速冻 -40、-60 和 -80 °C 处理的样品完整性好。据报道, 液氮喷淋传热系数可以达到约 425 W/(m²·°C), 在这个冷冻温度下容易造成食品的低温断裂^[21]。因此, 在对物料进行冷冻时不宜选用过低的液氮速冻温度。

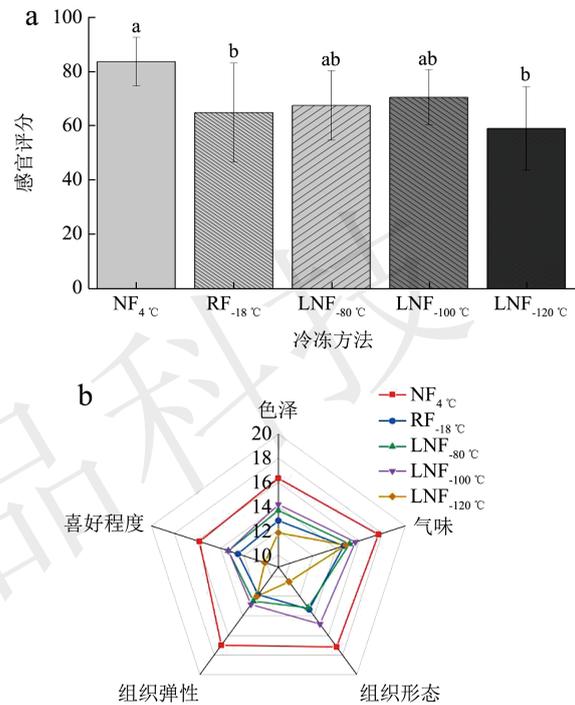


图 2 不同冷冻条件下预制鸡排的感官评分

Fig.2 Sensory evaluation of pre-made chicken chops under different freezing conditions

注: (a) 是各组的感官评价总分; (b) 是各指标的具体得分。图中字母不同表示显著性差异 $P < 0.05$, 图 4 同。

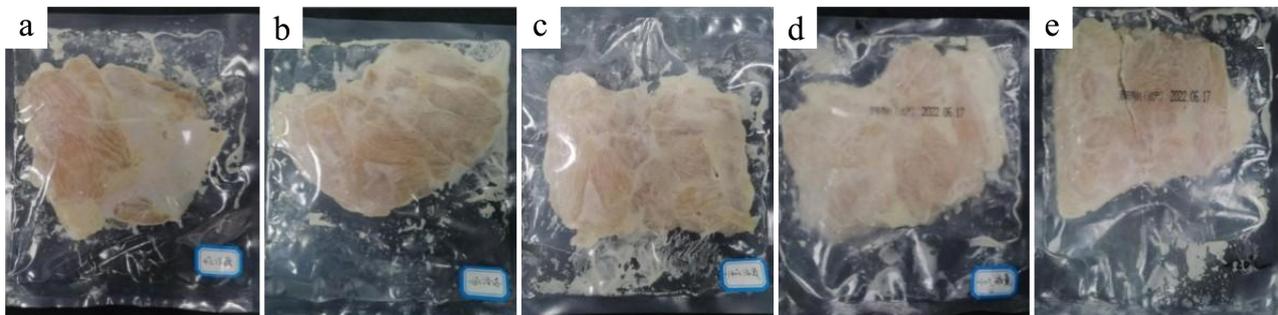


图 3 不同冷冻条件下解冻后预制鸡排的外观性状对比图

Fig.3 Comparison chart of appearance characteristics of pre-made chicken chops after thawing under different freezing conditions

注: a~e 组别依次为 NF_{4 °C}、RF_{-18 °C}、LNF_{-80 °C}、LNF_{-100 °C} 和 LNF_{-120 °C}。

2.3 不同冷冻条件下预制鸡排的持水性

持水性是指肉类保持自身或外部添加水分的能力,是衡量肉类品质的一个重要指标。肉类的持水性能主要由肌原纤维蛋白的完整性所决定,冷冻过程中,冰晶的生长和重结晶会对肌原纤维蛋白产生破坏,因此与新鲜肉类相比,冷冻肉的持水性通常会表现出不同程度的下降。Soncu等^[22]研究发现,随着冷冻贮藏时间的延长,鸡肉的持水性呈下降趋势,且鸡腿肉的持水性能比鸡胸肉下降的更加明显。不同冷冻条件下预制鸡排的持水性如图4所示,不同组别的离心损失和滴水损失存在显著性差异($P<0.05$)。NF_{4℃}表现出最好的持水性,离心损失率仅为16.35%,其次是LNF组,RF_{-18℃}持水性下降最严重,其离心损失率高达32.84%,比LNF_{100℃}高出11.89%,这是因为较低的冷冻速率会形成大而规则的冰晶,从而对肌肉组织产生更严重的破坏。NF_{4℃}的滴水损失高于其他冷冻组别,有可能是因为冷冻组别的鸡排在经历解冻后产生了额外的汁液流失,因此在之后的实验中表现出较少的滴水损失。于冰等^[23]研究了液氮速冻与-18℃的普通式冷冻对鸡肉持水性的影响,相比于-18℃的普通式冷冻,液氮速冻能够显著提升鸡肉的持水性,主要体现在解冻损失、滴水损失和蒸煮损失的降低。综合考察,液氮速冻能够减少冷冻冰晶对鸡肉肌原纤维的损伤,从而改善冷冻预制鸡排的持水性。

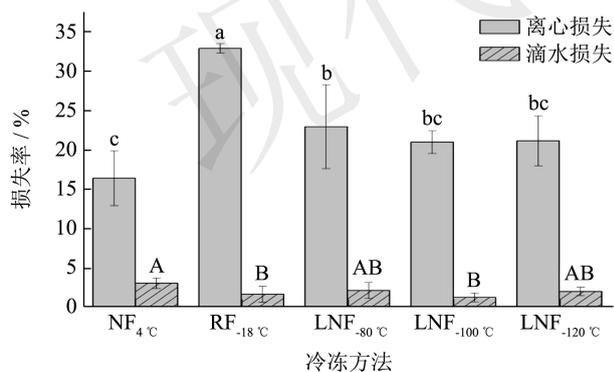


图4 不同冷冻条件下预制鸡排的持水性

Fig.4 Water holding capacity of pre-made chicken chops under different freezing conditions

2.4 不同冷冻条件下预制鸡排的pH值和色泽

表4展示了不同冷冻条件下预制鸡排的pH值的色泽变化。不同冷冻方式对预制鸡排的pH值影响具有显著性差异($P<0.05$),除了LNF_{100℃}之外,其他冷冻组别的样品相比于NF_{4℃}均有不同程度的

下降,而且LNF组的pH值显著高于RF_{-18℃},表明液氮速冻能够延缓预制鸡排在冷冻初期的pH值下降,这与张馨月等^[24]研究结果类似。有学者认为,冷冻肉类的pH值下降可能是冷冻诱导蛋白质变性后释放氢离子而导致的^[25]。因此,LNF组有着比RF_{-18℃}更高的pH值可能归因于液氮速冻比慢速冷冻更有利于抑制蛋白质在冷冻过程中的变性。色泽方面,不同组别样品的L*值、a*值和b*值均无显著性差异($P>0.05$)。Yu等^[26]在对虾的冷冻处理中发现了类似的结果,在冻藏初期,-18℃冰箱冷冻、-35℃鼓风冷冻和液氮速冻处理的对虾的亮度、红度和黄度差异性不显著。有研究表明,液氮与物料之间过大的温差会导致冷冻后的成品表面颜色发白,但解冻后该现象并不明显。综上,液氮速冻工艺能改善冷冻初期预制鸡排pH值下降的问题,并且不会对其色泽产生负面影响。

表4 不同冷冻条件下预制鸡排的pH值和色泽变化

Table 4 Changes of pH value and color of pre-made chicken chops under different freezing conditions

组别	pH值	L*	a*	b*
NF _{4℃}	6.98±0.08 ^b	61.60±4.23 ^a	7.84±1.16 ^a	7.76±2.72 ^a
RF _{-18℃}	6.78±0.06 ^d	60.03±2.78 ^a	6.92±0.88 ^a	7.93±2.78 ^a
LNF _{-80℃}	6.81±0.03 ^{cd}	60.50±2.78 ^a	8.78±2.38 ^a	6.04±5.32 ^a
LNF _{-100℃}	7.12±0.03 ^a	62.71±5.08 ^a	6.72±2.59 ^a	8.64±1.48 ^a
LNF _{-120℃}	6.89±0.04 ^c	61.92±3.33 ^a	7.64±0.01 ^a	10.2±0.27 ^a

注:同一列不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$),同一字母表示差异性不显著($P>0.05$),下同。

2.5 不同冷冻条件下预制鸡排的质构特性

TPA质构测试通过对样品进行两次压缩来模拟口腔咀嚼运动,以此获得食品的质构特性^[27]。表5展示了不同冷冻条件下预制鸡排的质构特性。与NF_{4℃}相比,RF_{-18℃}和LNF组的各项质构指标均表现出不同程度的下降,这是因为冷冻初期形成的冰晶会撕裂肌肉纤维,使其脱水、收缩和变形,从而破坏了肌肉的组织结构,结果是肉的硬度和弹性下降^[28]。在本实验中,LNF_{-80℃}和LNF_{-100℃}有着最接近NF_{4℃}的硬度和弹性,但各组别无显著性差异($P>0.05$),这是因为合适的液氮速冻温度有利于鸡肉内部形成更为细小的冰晶,从而减少对肌纤维的破坏,而冷冻速度较慢的空气缓冻和过低的液氮速冻温度都会对鸡肉组织产生更为严重的损害。梁锐等^[29]认为,冷冻肉类硬度的变化归因于由冻结浓缩和体积膨胀

所诱导的肌原纤维蛋白变性。张诚等^[30]研究发现, 冻藏温度越低, 越有利于保持鸡肉的硬度。然而常海军等^[31]研究结果表明, 随着冻藏时间的增加, 鸡肉的硬度、胶黏性和咀嚼性表现出先增加后降低的趋势。有学者认为, 冷冻过程中肌肉组织水分的减少会导致硬度的上升^[32]。因此, 冷冻肉类的质构变化可能是蛋白质和水分综合变化的结果。各项质构指标中除了硬度和弹性之外均存在显著性差异 ($P < 0.05$), LNF_{-120℃}的咀嚼性和内聚性最接近NF_{4℃}, LNF_{-80℃}的粘结性最接近NF_{4℃}。简言之, 相比于-18℃缓冻, 液氮速冻更有利于保持鸡排的质构特性。

2.6 不同冷冻条件下预制鸡排的氧化稳定性

不同冷冻条件下预制鸡排的氧化稳定性见表6。冷冻方式的不同并未对冷冻初期预制鸡排的氧化指标产生显著性影响 ($P > 0.05$)。MDA是脂质氧化的次级产物, 其含量常被用于评价肉类的脂质氧化程度, MDA含量越高, 细胞氧化损伤和脂质氧化越严重^[33]。相比于NF_{4℃}、LNF_{-80℃}和LNF_{-100℃}的MDA含量分别减少了19.51%和11.70%, 证明低温快速冷冻能够延缓样品的脂质氧化; 而RF_{-18℃}的MDA含量增加了3.90%, 这可能是因为缓冻过程中大冰晶对细胞的破坏作用比短时间的低温更能影响脂质氧化进程。牛力等^[34]研究发现, -25℃和-35℃

冻结下的鸡胸肉的TBARS值比-15℃冻结的更低。LNF_{-120℃}的MDA含量最高, 有可能是因为过低的液氮温度造成样品断裂, 破坏了细胞结构, 从而释放出更多的促氧化剂促进脂质氧化。巯基是蛋白质中活性最强的基团, 在冷冻过程中容易转化成二硫键从而影响蛋白质的结构^[35]。巯基含量越低, 蛋白质氧化程度越高。RF_{-18℃}的巯基含量低于NF_{4℃}, 说明短期的冻融会促进鸡排的蛋白氧化, LNF_{-80℃}和LNF_{-120℃}的巯基含量高于NF_{4℃}, 然而LNF_{-100℃}的巯基含量有所减少, 但无统计学差异 ($P > 0.05$)。GSH-Px和T-SOD是抗氧化系统的关键酶, 能够控制促氧化因子和清除自由基, 从而保护细胞免受氧化损伤^[36,37], 是评价肉类品质优劣的重要指标。Utama等^[38]研究发现, 鸡胸肉和鸡腿肉在冷藏期间的SOD活性和GSH-Px活性不断下降, 并且认为这两种抗氧化酶的活性与脂质氧化呈显著负相关。在本实验中, LNF组的SOD活力均低于NF_{4℃}和RF_{-18℃}, 然而其GSH-Px活力却有所提高, 表明液氮速冻在短期内会降低超氧化物歧化酶的活力, 但是能提高谷胱甘肽过氧化物酶的活性。Carvalho等^[39]研究发现, 越快完成鸡肉的冷却, 越有利于保持鸡肉的SOD和GSH-Px酶活性, 而且鸡肉的蛋白和脂质氧化程度也越低。综上, 合适的液氮速冻温度有利于减少冷冻初期鸡排生成的脂质氧化产物, 同时提高GSH-Px活力。

表5 不同冷冻条件下预制鸡排的质构特性

Table 5 Texture characteristics of pre-made chicken chops under different freezing conditions

组别	硬度/N	弹性	咀嚼性/N	内聚性	粘结性/J
NF _{4℃}	95.11±13.42 ^a	0.40±0.04 ^a	21.90±5.81 ^a	0.58±0.11 ^a	0.05±0.01 ^a
RF _{-18℃}	86.95±16.02 ^a	0.38±0.02 ^a	12.05±4.52 ^b	0.41±0.03 ^b	0.03±0.01 ^b
LNF _{-80℃}	92.74±15.00 ^a	0.40±0.03 ^a	14.30±2.51 ^b	0.39±0.05 ^b	0.05±0.01 ^a
LNF _{-100℃}	92.21±12.27 ^a	0.39±0.03 ^a	14.29±1.80 ^b	0.40±0.05 ^b	0.04±0.00 ^{ab}
LNF _{-120℃}	89.08±17.04 ^a	0.37±0.09 ^a	15.75±2.45 ^{ab}	0.50±0.05 ^{ab}	0.04±0.01 ^{ab}

表6 不同冷冻条件下预制鸡排的氧化指标分析

Table 6 Analysis of oxidation index of pre-made chicken chops under different freezing conditions

组别	MDA含量/(nmol/mg prot)	-SH含量/(mmol/g prot)	T-SOD活力/(U/mg prot)	GSH-Px活力/(U/mg prot)
NF _{4℃}	2.05±0.09 ^a	0.044±0.01 ^a	18.02±3.54 ^a	3.64±0.91 ^a
RF _{-18℃}	2.13±0.55 ^a	0.040±0.01 ^a	18.72±4.88 ^a	3.10±0.75 ^a
LNF _{-80℃}	1.65±0.37 ^a	0.058±0.00 ^a	15.03±2.71 ^a	5.15±3.41 ^a
LNF _{-100℃}	1.81±0.26 ^a	0.032±0.01 ^a	15.90±2.21 ^a	7.21±1.84 ^a
LNF _{-120℃}	2.25±1.10 ^a	0.047±0.03 ^a	16.76±5.00 ^a	4.30±1.63 ^a

3 结论

本实验采用液氮速冻工艺对预制鸡排进行冷冻处理。结果表明,液氮速冻能够显著缩短鸡排冻结时间,提高冷冻速率。相比于-18℃空气缓冻,液氮速冻能够更好地维持预制鸡排的感官属性、持水性和质构特性;相比于4℃冷藏保鲜,液氮速冻一定程度上延缓了样品的脂质氧化和pH值下降,提高GSH-Px活力,同时并未对其色泽产生显著性影响。因此,液氮速冻工艺是一种理想的速冻方法,能够在提升冷冻效率的同时较好地保持预制鸡排在冷冻前的食用品质。值得注意的是,液氮速冻-120℃会使肉样出现低温断裂的情况,因此不建议采用过低温度进行液氮速冻。

参考文献

- [1] 赵福振,杨格,杨铭铎,等.发展预制菜产业的意义与前景——基于预制菜的食品属性[J].中国调味品,2022,47(10):215-220.
- [2] 王娟,高群玉,娄文勇.我国预制菜行业的发展现状及趋势[J].现代食品科技,2023,39(2):99-103.
- [3] BAINY E M, CORAZZA M L, LENZI M K. Measurement of freezing point of tilapia fish burger using differential scanning calorimetry (DSC) and cooling curve method [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 161: 82-86.
- [4] WANG H H, QIN Y, LI J H, et al. Edible quality of soft-boiled chicken processing with chilled carcass was better than that of hot-fresh carcass [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(2): 797-804.
- [5] 刘丽莉,孟圆圆,张宸旖,等.鸡肉冰点调节剂的筛选及其贮藏期间品质变化[J].食品研究与开发,2020,41(8):17-24
- [6] CHEN J L, FAN Y Q, ZHANG X G, et al. Effect of antifreeze protein on the quality and microstructure of frozen chicken breasts [J]. Food Chemistry, 2022, 404(15): 134555.
- [7] ALEXANDRAKIS D, DOWNEY G, SCANNELL A. Rapid non-destructive detection of spoilage of intact chicken breast muscle using near-infrared and fourier transform mid-infrared spectroscopy and multivariate statistics [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(1): 338-347.
- [8] KIM H W, MILLER D K, YAN F F, et al. Probiotic supplementation and fast freezing to improve quality attributes and oxidation stability of frozen chicken breast muscle [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 34-41.
- [9] 杨禹新,李航宇,郑华,等.包装方式对黄羽肉鸡液氮速冻降温速率的影响[J].中国家禽,2021,43(7):82-87.
- [10] 吴伟彬,林捷,潘伟杰,等.液氮速冻温度对黄羽肉鸡微观结构和理化性质的影响[J].食品科技,2021,46(6):115-120.
- [11] YANG Z, LIU S, SUN Q, et al. Insight into muscle quality of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) frozen with liquid nitrogen at different temperatures [J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131737.
- [12] 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.
- [13] 巨晓军,屠云洁,邹剑敏,等.不同货架期对冷鲜鸡肉品质的变化及相关性分析[J].中国畜牧杂志,2017,53(11):101-104.
- [14] 唐君言,邵双全,徐洪波,等.食品速冻方法与模拟技术研究进展[J].制冷学报,2018,39(6):1-9.
- [15] GAO W H, HUANG Y P, ZENG X A, et al. Effect of soluble soybean polysaccharides on freeze-denaturation and structure of myofibrillar protein of bighead carp surimi with liquid nitrogen freezing [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 135: 839-844.
- [16] 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.
- [17] ZHANG C, LI Y, XIA X, et al. Changes in muscle quality and physicochemical characteristics of chicken breast subjected to ultrasound-assisted immersion freezing during long-term frozen storage [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 142: 10-18.
- [18] KIM Y B, WOO S M, JEONG J Y, et al. Temperature changes during freezing and effect of physicochemical properties after thawing on meat by air blast and magnetic resonance quick freezing [J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2013, 33(6): 763-771.
- [19] LI X, YANG X, GAI R, et al. Study of the dynamic characteristics of the food freezing process using a cryogenic immersion freezing tank [J]. Food Science and Technology, 2022, 42: 19822.
- [20] 杨瑾莉,罗司嘉,丁皓玥,等.液氮速冻对火龙果块微生物和品质的影响研究[J].制冷学报,2020,41(3):91-101.
- [21] 陈绍桥.液氮在食品速冻中的应用[J].肉类工业,2002,10: 36-37.
- [22] DEMIROK SONCU E. Protein oxidation and subsequent changes in chicken breast and thigh meats during long-term frozen storage [J]. Agricultural and Food Science, 2020, 29(5): 505-514.
- [23] 于冰,孙京新,于林宏,等.不同的冷冻和解冻方式对鸡肉品质的影响[J].肉类研究,2015,29(1):6-9.
- [24] 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.

- [25] AUGUSTYŃSKA-PREJSNAR A, ORMIAN M, SOKOŁOWICZ Z. Physicochemical and sensory properties of broiler chicken breast meat stored frozen and thawed using various methods [J]. *Journal of Food Quality*, 2018: 1-9.
- [26] YU L X, JIANG Q X, YU D W, et al. Quality of giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) during the storage at -18 degrees C as affected by different methods of freezing [J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 2100-2109.
- [27] 孙彩玲,田纪春,张永祥.TPA质构分析模式在食品研究中的应用[J].*实验科学与技术*,2007,2:1-4.
- [28] ISHIGURO H, HORIMIZU T. Three-dimensional microscopic freezing and thawing behavior of biological tissues revealed by real-time imaging using confocal laser scanning microscopy [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(23-24): 5642-5649.
- [29] 梁锐,张宾,李淑芳,等.鲑鱼在不同冻藏温度下品质变化的研究[J].*浙江海洋学院学报(自然科学版)*,2012, 31(4): 345-349.
- [30] 张诚,申铨日,王文法.冻藏过程中文昌鸡肉肌原纤维蛋白变化规律研究[J].*食品工业科技*,2014,35(11):98-102.
- [31] 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.
- [32] LEE Y S, SAHA A, XIONG R, et al. Changes in broiler breast fillet tenderness, water-holding capacity, and color attributes during long-term frozen storage [J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(4): E162-E168.
- [33] LIU J B, YAN H L, ZHANG Y, et al. Effects of stale maize on growth performance, immunity, intestinal morphology and antioxidant capacity in broilers [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2020, 33(4): 605-614.
- [34] 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.
- [35] JIN S, PANG Q, LIU R, et al. Dietary curcumin decreased lipid oxidation and enhanced the myofibrillar protein structure of the duck (*Anas platyrhynchos*) breast muscle when subjected to storage [J]. *LWT*, 2020, 133: 109986.
- [36] SURAI P F, KOCHISH I I, FISININ V I, et al. Antioxidant defence systems and oxidative stress in poultry biology: an update [J]. *Antioxidants*, 2019, 8(7): 235.
- [37] ZHANG W F, TIAN M, SONG J S, et al. Effect of replacing inorganic trace minerals at lower organic levels on growth performance, blood parameters, antioxidant status, immune indexes, and fecal mineral excretion in weaned piglets [J]. *Tropical Animal Health and Production*, 2021, 53(1): 121.
- [38] UTAMA D T, LEE S G, BAEK K H, et al. Correlation between antioxidant enzyme activity, free iron content and lipid oxidation in four lines of Korean native chicken meat [J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2016, 36(1): 44-50.
- [39] CARVALHO R H, IDA E I, MADRUGA M S, et al. Collapse of the endogenous antioxidant enzymes in post-mortem broiler thigh muscles triggers oxidative stress and impairs water-holding capacity [J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2019, 56(3): 1371-1379.