

解冻方式对猪肉品质、理化性质与微观结构的影响

Effects of thawing methods on the quality, physicochemical properties and microstructure of pork

王 丽¹ 陈 伟^{1,2} 王远亮¹ 李宗军¹ 夏 迪¹

WANG Li¹ CHEN Wei^{1,2} WANG Yuanliang¹ LI Zhongjun¹ XIA Di¹

(1. 湖南农业大学食品科学与技术学院, 湖南 长沙 410000; 2. 防城港职业技术学院, 广西 防城港 538000)

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410000, China;

2. Fangchenggang Vocational and Technical College, Fangchenggang, Guangxi 538000, China)

摘要:目的:探究冷冻猪肉最佳解冻方式。方法:考察了低频电场解冻、空气解冻、静水解冻 3 种解冻方式对解冻后猪肉的汁液损失率、水分含量、持水力、pH 值、色差、挥发性盐基氮、菌落总数、质构特性、脂肪氧化和蛋白质氧化程度的影响。结果:低频电场解冻后汁液损失率(1.09%)、剪切力(2 600.15 N)、硫代巴比妥酸值(TBARS)增加量(62.50%)较低,色泽好,pH 值接近鲜肉,蛋白质氧化程度较小,滋味物质丰富,对肉的微观结构破坏小,肌肉组织和肌纤维结构保持较好;静水解冻后菌落总数较少、对蛋白质氧化值的影响较小。结论:低频电场解冻下猪肉的品质、理化性质与微观结构要优于其他两种解冻方式。

关键词:低频电场解冻;空气解冻;静水解冻;猪肉品质;微观结构

Abstract: Objective: To investigate the best defrosting method for frozen pork. Methods: Investigated the effects of three thawing methods, namely low-frequency electric field thawing, air thawing and hydrostatic thawing, on the juice loss rate, moisture content, water holding capacity, pH, colour difference, volatile saline nitrogen, total bacterial colony, textural characteristics, fat oxidation and protein oxidation of pork after thawing. Results: The low frequency electric field thawing resulted lower juice loss (1.09%), shear force (2 600.15 N),

increase in thiobarbituric acid value (TBARS) (62.50%), good colour, pH close to that of fresh meat, less protein oxidation, richer taste material, less damage to the microstructure of the meat, better maintenance of muscle tissue and muscle fibre structure. The hydrostatic thawing resulted lower total bacterial colony count and low protein oxidation. Conclusion: The quality, physicochemical properties and microstructure of pork under low frequency electric field thawing were better than the other two thawing methods.

Keywords: low frequency electric field thawing; air thawing; hydrostatic thawing; pork quality; microstructure

冷冻作为食品贮藏的方法之一,因其能够抑制肉中酶的活性和微生物的生长,保证肉的品质和稳定性,成为目前应用最广泛、效果最佳且安全性较高的肉类贮藏方式^[1],但冷冻肉在食用前需进行解冻处理,采用不恰当的解冻方式,会对肉的品质产生负面影响。因此,选择适当的解冻方法尤为重要^[2]。刘梦等^[3]研究了不同气体比例对金枪鱼气调解冻及贮藏期间保鲜效果的影响,发现气体解冻对金枪鱼的色泽影响较大,且气调包装有助于金枪鱼保鲜;梁诗惠等^[4]对冷冻鸡腿肉肌原纤维蛋白进行探究,发现流水解冻对冷冻鸡腿肉的蛋白影响较小;Zhao 等^[5]研究发现,超声解冻能提高冷藏过程中羊肉的持水能力,增加羊肉的色泽,还能降低硫基含量并抑制蛋白质氧化;Gan 等^[6]研究发现,超声解冻可以更好地保持肉类的品质。郭恒等^[7]研究了解冻温度对冷冻鲈鱼质构的影响,发现 4℃冰箱解冻后鲈鱼的黏聚性最大,且黏聚性随解冻温度的升高而减少,可能是温度的增加使鲈鱼肌肉细胞间的结合力下降。此外,还有研究发现,脉冲电场解冻显著降低了鸭肉解冻损失率和蛋白质含量^[8],减少了

基金项目:湖南省重点研发项目(编号:2022NK2035, 2022NK2027);湘潭市科技计划项目(编号:NY-ZD20211001)

作者简介:王丽,女,湖南农业大学在读硕士研究生。

通信作者:王远亮(1977—),男,湖南农业大学教授,博士。

E-mail: wangyuanliang@hunau.edu.cn

收稿日期:2023-04-24 **改回日期:**2023-07-10

解冻过程中肌原纤维蛋白的结构损伤^[9]。目前,有关传统解冻方法对肉质的影响已有一些研究,但绝大多数仅限于对肉的品质或质构进行探讨,且主要集中于实验室研究,工业化应用且以猪肉为解冻对象的研究甚少。

研究拟以猪肉为研究对象,采用低频电场解冻、空气解冻、静水解冻 3 种解冻方式对猪肉汁液损失率、水分含量、持水力、pH 值、色差、挥发性盐基氮、菌落总数、质构特性、脂肪氧化和蛋白质氧化程度的影响,以期为肉类工业冻藏原料肉的解冻提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜猪后腿肉:市售;

氯化钠、硫酸铜、硫酸钾、浓硫酸、甲基红、乙醇、硼酸、亚甲基蓝、氧化镁、浓盐酸、石油醚、乙二醇四乙酸二钠、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、三氯甲烷、盐酸胍、Tris-HCl 缓冲液、2-硝基苯甲酸、2,4-二硝基苯肼、氢氧化钠、乙酸乙酯、戊二醛、戊二酸:分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

智能水分含量测定仪:ZYS-50B 型,湘仪天平仪器设备有限公司;

冷冻离心机:3-18R 型,湖南恒诺仪器设备有限公司;

可见分光光度计:WFJ 7200 型,上海尤尼柯仪器有限公司;

电热消解仪:EHD20 型,北京莱伯泰科仪器股份有限公司;

电热鼓风干燥箱:WGL-125B 型,天津泰斯特仪器有限公司;

台式高速离心机:TG16MW 型,湖南赫西仪器装备有限公司;

酶标仪:Spectra Max[®] ABS Plus 型,美谷分子仪器有限公司;

色差仪:NR200 型,深圳市三恩时科技有限公司;

pH 计:PHS-3E 型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

食品物性测试仪:TVT-6700 型,英国 Stable Micro Systems 公司。

1.2 方法

1.2.1 样品处理 除去原料肉表面脂肪及筋腱组织,分割成 100 g 左右,用密封袋进行包装,置于-20℃冰箱中冻藏备用。

1.2.2 样品解冻

(1) 自然空气解冻:将密封袋包装的肉样放置在 25℃恒温培养箱中进行解冻,肉块中心的解冻终点温度

为 4℃,解冻时间约为 240 min。

(2) 静水解冻:将密封袋包装的肉样置于 25℃恒温水浴锅中将其完全浸泡进行解冻,肉块中心的解冻终点温度为 4℃,解冻时间约为 180 min。

(3) 低频电场解冻:将密封袋包装的肉样放在低频解冻设备中,解冻温度为 25℃,肉块中心的解冻终点温度为 4℃,解冻时间约为 200 min。

1.2.3 指标测定

(1) 水分含量:按 GB 5009.3—2016 执行。

(2) 持水力:根据文献[10]。

(3) 汁液损失率:根据文献[11]。

(4) 色度:根据文献[12]。

(5) pH 值:按 GB/T 9695.5—2008 执行。

(6) 菌落总数:按 GB 4789.2—2022 执行。

(7) 蛋白质:按 GB 5009.5—2016 执行。

(8) 挥发性盐基氮:按 GB 5009.228—2016 执行。

(9) 脂肪含量:按 GB 5009.6—2016 执行。

(10) 质构特性:根据文献[13]。

(11) 硫代巴比妥酸值(TBARS):根据文献[14]。

(12) 蛋白质氧化总巯基:根据文献[15]。

(13) 蛋白质氧化羰基:根据文献[16]。

(14) 滋味物质:根据文献[17],修改如下:准确称取 50 g 肉样,加入 3 倍质量的水,沸水烹制 30 min,待冷却至室温将肉块与汤汁一起用匀浆机匀浆 20 s,匀浆 2 次,静置 5 min 保证滋味物质溶出,5 000 r/min 离心 10 min。取上清液滤纸过滤除去油脂后进行测定。

(15) 肌纤维微观结构:根据文献[18]。

1.3 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行统计分析,用 Origin 2021 软件绘图。数据均为 3 次重复试验的平均值,用平均值±标准差表示, $P<0.05$ 表示差异显著。

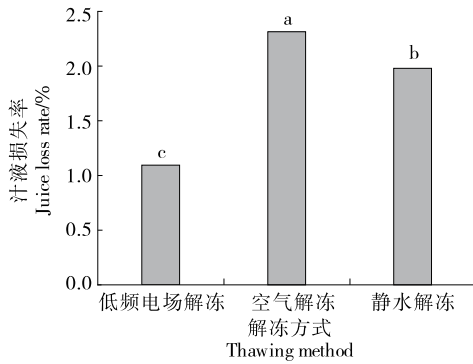
2 结果与分析

2.1 对猪肉解冻损失率的影响

由图 1 可知,3 种解冻方式具有显著性差异($P<0.05$),其中低频电场解冻后解冻损失率最小,空气解冻的解冻损失率最高。这是由于电场解冻速度快,冰晶产生的速度较为均匀,细胞的机械压缩小,解冻过程中对细胞的刺穿少,组织结构的损失少,因此利用其解冻的汁液损失少。

2.2 对猪肉保水性的影响

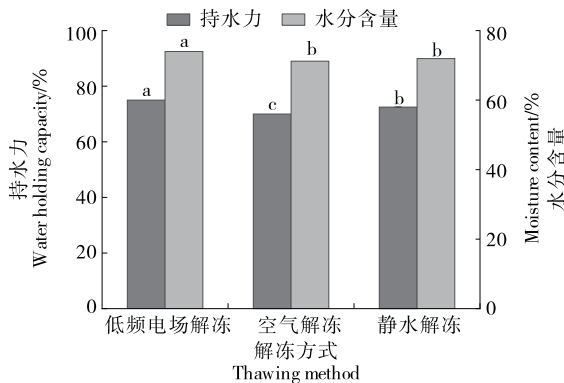
由图 2 可知,在持水力方面,空气解冻后为 70.00%,低频电场解冻后为 75.00%,静水解冻后为 72.50%,3 种解冻方式具有显著性差异($P<0.05$);在水分含量方面,使用低频电场解冻后水分含量为 73.98%,静水解冻后为 71.94%,空气解冻后为 71.196%,其中低频电场解冻显著



小写字母不同表示不同样品之间差异显著 ($P < 0.05$)

图1 解冻方式对猪肉解冻损失率的影响

Figure 1 Effects of thawing methods on pork quality



小写字母不同表示不同样品之间差异显著 ($P < 0.05$)

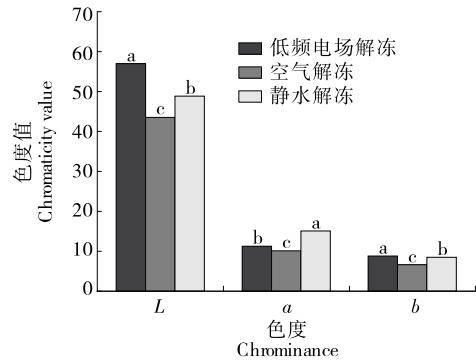
图2 解冻方式对猪肉保水性的影响

Figure 2 Effects of thawing methods on the water retention of pork

高于空气解冻和静水解冻 ($P < 0.05$)。这是由于解冻过程中,随着冰晶的融化,细胞内亲水胶体吸收水分,出现水分逐渐向细胞扩散和渗透,解冻速率大,可以使冰晶解冻汁液全部向细胞内渗透而不至于外溢流失^[19]。并且通过对猪肉肌纤维结构的影响得出,低频电场解冻后猪肉的微观结构破坏最小,肌肉组织和肌纤维结构保持较为完整,低频电场实现快速解冻,避免冰晶对细胞造成损伤。因此,低频电场解冻后对猪肉的保水效果好。

2.3 对猪肉色泽的影响

由图3可知,从 L^* 值来看,使用低频电场解冻后 L^* 值最大为56.95,空气解冻后 L^* 值最小为43.54,静水解冻后 L^* 值为48.86,3种解冻方式具有显著性差异 ($P < 0.05$);从 a^* 值和 b^* 值来看,低频电场解冻后 a^* 值和 b^* 值分别为11.27,8.80,空气解冻后 a^* 值和 b^* 值分别为10.12,6.64,静水解冻后 a^* 值和 b^* 值分别为15.08,8.50,3种解冻方式在 a^* 值和 b^* 值中不存在显著性差异 ($P > 0.05$),其范围均在0~15。由此可得,通过对3种方式解冻的猪肉的色泽进行分析,发现相比空气解冻和静水解



小写字母不同表示不同样品之间差异显著 ($P < 0.05$)

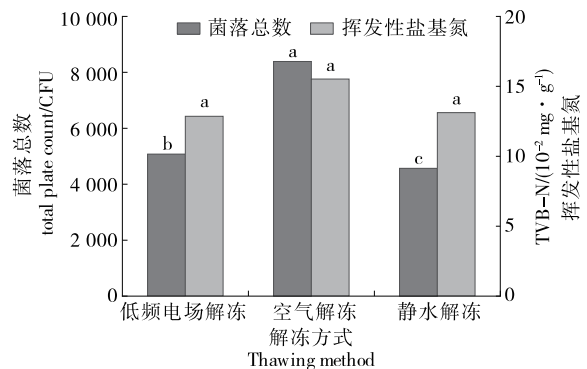
图3 解冻方式对猪肉色泽的影响

Figure 3 Effects of thawing methods on the color of pork

冻,低频电场解冻后猪肉的色泽较好。与姚薇等^[20]研究类似,解冻冷鲜肉糜时施加高压静电场会使其 a 值升高、 b 值降低,电场处理有助于保持肉糜原有的色泽。解冻过程中,肉的 L 值下降是由解冻损失引起的微观结构变化和光反射率下降引起。电场解冻的肉样含水率较高,提高了光线的折射率,从而使肉样表面亮度增加^[21]。

2.4 对猪肉新鲜度的影响

当肉中挥发性盐基氮含量 < 15 mg/100 g时,猪肉是新鲜的,而3种方式中只有空气解冻的挥发性盐基氮含量超过了15.00 mg/100 g,为15.52 mg/100 g,静水解冻后为13.12 mg/100 g,低频电场解冻后为12.86 mg/100 g,3种解冻方式之间无显著性差异 ($P > 0.05$),其中低频电场解冻挥发性盐基氮含量最低,新鲜效果最好(见图4);在对菌落总数测定时发现,空气解冻后微生物数目最多,静水解冻后最少(见图4),可能是由于静水中隔绝氧气使微生物无法生长,低频电场解冻由于温度较高微生物适合繁殖导致菌落总数高于静水解冻;说明低频电场解冻后猪肉的挥发性盐基氮含量较低,减少了蛋白质的分解,有效延长肉品的保质期,与He等^[22]的研究相似。



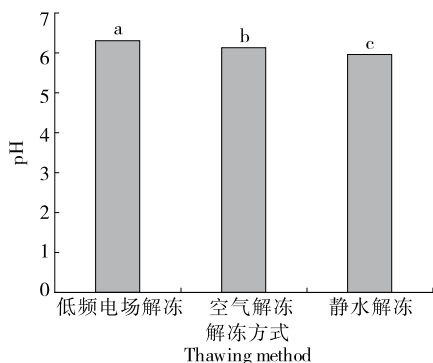
小写字母不同表示不同样品之间差异显著 ($P < 0.05$)

图4 解冻方式对猪肉新鲜度的影响

Figure 4 Effects of thawing methods on pork freshness

2.5 对猪肉 pH 值的影响

新鲜猪肉的 pH 值一般为 6.50 左右^[23]。由图 5 可知,使用 3 种方式解冻后猪肉的 pH 值均小于 7.00,且三者的 pH 值具有显著性差异($P<0.05$)。其中,使用低频电场解冻后猪肉的 pH 值最高,猪肉的新鲜程度相比其余两种解冻方式要好。肉的解冻过程中,蛋白质被快速分解,产生碱性物质使得肉 pH 升高,推测低频电场解冻对肉的颜色和蛋白质氧化变性有较大的影响。这与 He 等^[24]的研究一致,高压静电场解冻对肉的 pH 值影响较小,或许由于电场可以延缓猪肉碱性物质的产生,从而延缓 pH 值的增大。



小写字母不同表示不同样品之间差异显著($P<0.05$)

图 5 解冻方式对猪肉 pH 值的影响

Figure 5 Effects of thawing methods on pork pH

2.6 对猪肉脂肪和蛋白质的影响

由表 1 可知,低频电场解冻、空气解冻、静水解冻后脂肪含量分别为 3.20, 2.90, 3.40 g/100 g, 蛋白质含量分别为 1.72, 1.66, 1.70 g/100 g, 3 种解冻方式之间无显著性差异($P>0.05$), 因此, 可以判断出使用低频电场解冻后

表 1 解冻方式对猪肉脂肪和蛋白质的影响

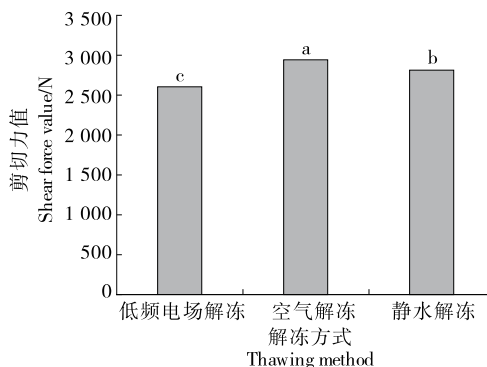
Table 1 Effects of thawing methods on pork fat and protein g/100 g

解冻方式	脂肪	蛋白质
空气解冻	2.90±0.04	1.66±0.02
静水解冻	3.40±0.04	1.70±0.04
低频电场解冻	3.20±0.07	1.72±0.01

对猪肉的脂肪和蛋白质不会产生太大的影响。

2.7 对猪肉嫩度的影响

研究^[25]表明,肉类在冷冻过程中会产生大量冰晶,影响肌肉纤维,降低其可塑性。如图 6 所示,使用低频电场解冻后猪肉的剪切力值最小,为 2 600.15 N;空气解冻后的剪切力值最大,为 2 942.24 N;静水解冻后的剪切力值为 2 813.36 N, 3 种解冻方式之间具有显著性差异($P>0.05$)。因此,相比其他两种解冻方式,低频电场解冻后猪肉的嫩度最好,肉的嫩度与其保水性能有关,猪肉的保水性好,嫩度越好,空气解冻和静水解冻后猪肉的剪切力大于低频电场的,可能是在解冻过程中汁液损失率比低频电场的大。



小写字母不同表示不同样品之间差异显著($P<0.05$)

图 6 解冻方式对猪肉嫩度的影响

Figure 6 Effects of thawing methods on pork tenderness

2.8 对猪肉质构特性的影响

选取了硬度、弹性、凝聚性和胶黏性 4 个具有代表性的质构指标来评价猪肉品质的变化^[26]。如表 2 所示,在硬度方面,低频电场解冻后硬度最大为 151.46 N,空气解冻后硬度最低为 81.11 N,静水解冻后为 142.43 N,三者之间具有显著性差异($P<0.05$);在弹性方面,静水解冻后弹性最大为 0.97,空气解冻后弹性最小为 0.76,低频电场解冻后为 0.81,三者之间具有显著性差异($P<0.05$);在凝聚性方面,对其进行方差分析发现,3 种解冻方式之间无显著性差异($P>0.05$);在胶黏性方面,低频电场解冻后胶黏性最大为 175.12 N,静水解冻后胶黏性最小为 45.26 N,空气解冻后胶黏性为 89.31 N,三者之间具有显

表 2 解冻方式对猪肉质构的影响[†]

Table 2 Effects of thawing methods on pork texture

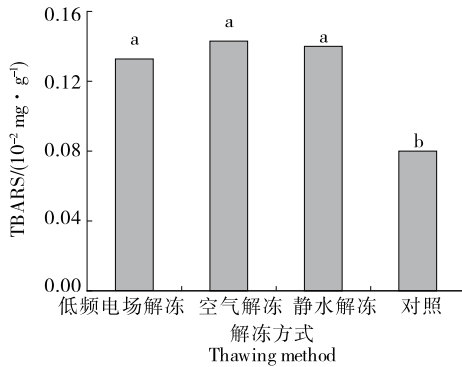
解冻方式	硬度/N	凝聚性	弹性	胶黏性/N
空气解冻	81.11±3.98 ^c	0.66±0.11	0.76±0.02 ^c	89.31±7.98 ^b
静水解冻	142.43±9.27 ^b	0.60±0.05	0.97±0.02 ^a	45.26±6.65 ^c
低频电场解冻	151.46±7.32 ^a	0.67±0.01	0.81±0.08 ^b	175.12±8.45 ^a

[†] 同列小写字母不同表示不同样品之间差异显著($P<0.05$)。

著性差异($P<0.05$)。在解冻过程中,由于微生物和酶的作用,肌肉被分解,导致肉类样品的硬度降低。电场具有更快的解冻速度,解冻后肉的硬度、凝聚性最大,表明此时肉中的肌肉细胞具有更大的结合力,肌肉组织更紧密。

2.9 对猪肉脂肪氧化的影响

由图 7 可知,使用 3 种方式解冻后,猪肉 TBARS 值相比对照组(鲜肉)有所增加($P<0.05$),证明解冻方式能够影响脂肪氧化。其中,相比对照,低频电场解冻 TBARS 值增加了 62.50%,空气解冻后 TBARS 值增加了 78.75%,静水解冻后 TBARS 值增加了 75.00%,3 种解冻方式之间具有显著性差异($P<0.05$)。这可能是由于电场解冻过程隔绝了外界空气,减少了空气对肉脂肪的氧化^[27]。



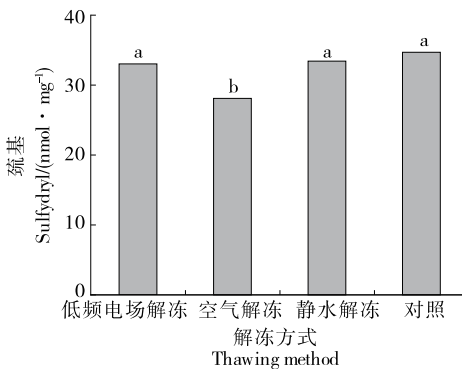
小写字母不同表示不同样品之间差异显著($P<0.05$)

图 7 解冻方式对猪肉脂肪氧化的影响

Figure 7 Effects of thawing methods on pork fat oxidation

2.10 对蛋白质氧化巯基的影响

从图 8 可以看出,采用 3 种方式解冻后猪肉总巯基值相比对照组都有不同程度的减少,这是由于巯基在分子之间或分子内部二硫键的形成来源于蛋白质的氧化作用,能够影响其功能性。相比对照组,低频电场解冻后硫



小写字母不同表示不同样品之间差异显著($P<0.05$)

图 8 解冻方式对蛋白质氧化巯基值的影响

Figure 8 Effects of thawing methods on the thiol value of protein oxide

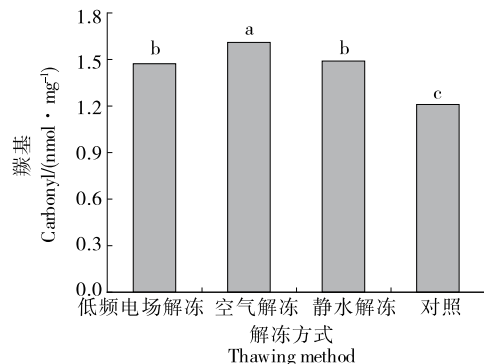
基含量减少了 4.80%,空气解冻后巯基含量减少了 19.00%、静水解冻后巯基含量减少了 3.40%,采用静水解冻后对蛋白质氧化巯基值的影响最小,但是经方差分析发现,3 种解冻方式之间无显著性差异($P>0.05$)。空气解冻后巯基含量较低,表明蛋白质氧化程度较高。而电场和静水解冻对肉肌原纤维蛋白巯基含量影响较小^[15]。

2.11 对蛋白质氧化羰基的影响

由图 9 可知,与鲜肉相比,经不同方法解冻后猪肉羰基含量均有增加,表明解冻过程会加速羰基化合物的形成。其中,低频电场解冻后羰基含量相比对照增加了 21.48%,空气解冻增加了 33.05%,静水解冻增加了 23.14%,3 种解冻方式之间具有显著性差异($P<0.05$),说明使用低频电场解冻的效果要比传统解冻方式对猪肉蛋白质氧化的影响小。这与张树峰等^[15]的研究一致,空气解冻的肉中肌原纤维蛋白羰基含量最高,可能是肉在电场解冻时解冻时间较长,蛋白质发生氧化所致。

2.12 对猪肉滋味物质的影响

由图 10 可以看出,使用 3 种方式解冻后猪肉鲜味、酸味和苦味变化最为显著,与刁华玉等^[28]的研究类似,解冻后甜味和苦味滋味贡献较大。这可能与冻结解冻过程



小写字母不同表示不同样品之间差异显著($P<0.05$)

图 9 解冻方式对猪肉蛋白质氧化羰基的影响

Figure 9 Effects of thawing methods on carbonyl oxide value of pork protein

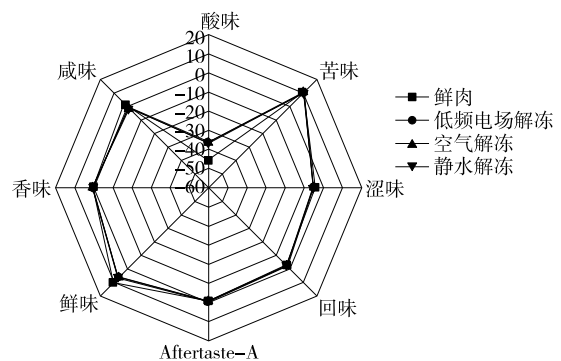


图 10 解冻方式对猪肉滋味物质的影响

Figure 10 Effects of thawing methods on the taste substances of pork

中在酶的作用下蛋白质水解使氨基酸数量的增加有关。

2.13 对猪肉肌纤维结构的影响

如图 11 所示,在 100 倍的放大倍数下,新鲜猪肉的肌肉结构紧凑、肌肉纤维连结紧密且排列有序;空气解冻后猪肉的肌肉组织完整性丧失严重,致密结构遭到了严重破坏,肌纤维的间隙增大;静水解冻后的肌纤维结构要比空气解冻的紧密,但是肌肉组织的完整性也遭到了一定的破坏;低频电场解冻后,猪肉的微观结构破坏最小,肌肉组织和肌纤维结构保持较为完整,这与唐梦^[29]的研究一致。在电场解冻过程中,通过加速氢键的断裂,改变了水分子的组成,实现快速解冻,避免冰晶对细胞造成损伤,这对保持肉类及其制品的原始组织结构尤为重要^[30]。

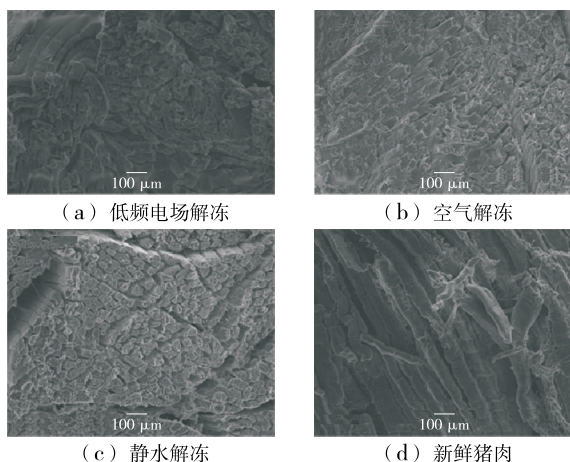


图 11 解冻方式对猪肉肌原纤维结构的影响

Figure 11 Effect of thawing methods on the structure of pork myofibrils

3 结论

通过不同解冻方式对猪肉进行解冻,不同解冻方式在保持猪肉的品质方面各有不同。低频电场解冻后汁液损失率、剪切力、硫代巴比妥酸值显著低于其他两种解冻方式,持水力和水分含量最高,pH 值接近鲜肉,而且蛋白质氧化程度较小,解冻后的滋味物质更丰富。3 种解冻方式解冻后猪肉的 5 种滋味物质与对照相比发生显著变化,鲜味、酸味和苦味变化最为显著。采用低频电场解冻后对微观结构的破坏较小,肌肉组织和肌纤维结构保持的完整性比其余两种解冻方式要好。综上所述,低频电场解冻方法在贮藏过程中能够保持猪肉的色泽、保水性、汁液损失率、硬度、胶黏性、咀嚼性、凝聚性、回弹性,很好地保护了肌细胞微观结构的完整性,有效减少汁液流失,是一种较为理想的解冻方法。

参考文献

[1] 张帅,徐乐,梁小慧,等. 肉类冷冻解冻技术研究进展[J]. 食品安

全质量检测学报, 2019, 10(16): 5 363-5 368.

ZHANG S, XU L, LIANG X H, et al. Research progress of freezing and defrosting technology of meat product[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2019, 10(16): 5 363-5 368.

[2] BAO Y L, BOEREN S, ERTBJERG P. Myofibrillar protein oxidation affects filament charges, aggregation and water-holding[J]. Meat Science, 2018, 135: 102-108.

[3] 刘梦,曲超,史智佳,等. 不同气体比例对金枪鱼气调解冻及贮藏期间保鲜效果的影响[J]. 肉类研究, 2017, 31(3): 12-17.

LIU M, QU C, SHI Z J, et al. Effect of different modified atmospheres in preserving the quality of tuna during thawing and subsequent storage[J]. Meat Research, 2017, 31(3): 12-17.

[4] 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.

LIANG S H, FENG Y M, DENG H R, et al. Effects of thawing methods on protein oxidation characteristics of chicken thigh meat[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(5): 223-229.

[5] ZHAO B, SHI Y X, XU C C, et al. Effects of ultrasound-assisted thawing on lamb meat quality and oxidative stability during refrigerated storage using non-targeted metabolomics[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106211.

[6] GAN S, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effects of different thawing methods on quality of unfrozen meats[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 134: 168-175.

[7] 郭恒,钱怡,李颖杰,等. 解冻温度对冷冻鲈鱼品质、质构及超微结构的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(12): 49-56.

GUO H, QIAN Y, LI Y J, et al. Effects of defrosting temperature on the quality and ultrastructure of frozen mackerel[J]. Chinese Journal of Food, 2014, 14(12): 49-56.

[8] LUNG C T, CHANG C K, CHENG F C, et al. Effects of pulsed electric field-assisted thawing on the characteristics and quality of pekin duck meat[J]. Food Chemistry, 2022, 390: 133137.

[9] CHANG C K, LUNG C T, GAVAHIAN M, et al. Effect of pulsed electric field-assisted thawing on the gelling properties of pekin duck meat myofibrillar protein[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 350: 111482.

[10] 马翼飞,刘欢,单钱艺,等. 不同解冻方式对小黄鱼品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 222-228.

MA Y F, LIU H, DAN Q Y, et al. Effect of different thawing methods on the quality of little yellow croaker[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(1): 222-228.

[11] 惠庆玲,邹同华,宋睿琪,等. 不同冷冻方式对真空解冻猪肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(24): 115-120.

HUI Q L, ZUO T H, SONG R Q, et al. Effects of different freezing methods on the quality of vacuum thawing pork[J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(24): 115-120.

[12] 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): 1 607-1 617.

ZHANG L, SUN J L, ZHU M R, et al. Effects of thawing methods

- on quality and microstructure of frozen mutton[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2022, 36(8): 1 607-1 617.
- [13] 谭明堂, 谢晶, 王金锋. 解冻方式对鲑鱼品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 94-101.
- TAN M T, XIE J, WANG J F. Effects of different thawing methods on quality of squid[J]. Food Science, 2019, 40(13): 94-101.
- [14] 顾赛麒, 周洪鑫, 郑皓铭, 等. 干制方式对腌腊草鱼脂肪氧化和挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 1-10.
- GU S Q, ZHOU H X, ZHENG H M, et al. Effects of different drying methods on lipid oxidation and volatile flavor components of cured grass carp[J]. Food Science, 2018, 39(21): 1-10.
- [15] 张树峰, 陈丽丽, 赵利, 等. 不同解冻方法对脆肉鲩鱼肉品质特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 56-62.
- ZHANG S F, CHEN L L, ZHAO L, et al. Effect of different thawing methods on quality characteristics of *Ctenopharyngodon idellus* C. et V[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(3): 56-62.
- [16] 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.
- FENG Y M, LIANG S H, DENG H R, et al. Effects of different thawing methods on the quality characteristics of the duck leg meat[J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(3): 336-345.
- [17] 鲁伟. 冰鲜黄鸡肉品质评定与鲜度分级研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2017: 56.
- LU W. Evaluation of meat quality and classification of freshness for chilled yellow chicken [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017: 56.
- [18] 荣建华, 张亮子, 谢淑丽, 等. 冷冻对脆肉鲩和草鱼肉微观结构和质构特性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(12): 243-248.
- RONG J H, ZHANG L Z, XIE S L, et al. Effects of freeze on the microstructure and texture of crisp grass carp and grass carp muscle[J]. Food Science, 2015, 36(12): 243-248.
- [19] 孙芳, 李培龙, 孟繁博, 等. 高压静电解冻技术对牛肉品质的影响研究[J]. 中国牛业科学, 2011, 37(6): 13-17.
- SUN F, LI P L, MENG F B, et al. Effect of high-voltage electrostatic field thawing beef on beef quality[J]. China Cattle Science, 2011, 37(6): 13-17.
- [20] 姚薇, 王标, 马玲, 等. 高压静电场冻融处理对肉糜品质的影响[J]. 农产品加工, 2016(3): 17-19.
- YAO W, WANG B, MA L, et al. Effect of high static-electric voltage field on minced pork quality during freezing and thawing process[J]. Agricultural Products Processing, 2016(3): 17-19.
- [21] KONO S, KON M, ARAKI T, et al. Effects of relationships among freezing rate, ice crystal size and color on surface color of frozen salmon fillet[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214: 158-165.
- [22] HE X L, JIA G L, TATSUMI E, et al. Effect of corona wind, current, electric field and energy consumption on the reduction of the thawing time during the high-voltage electrostatic-field (HVEF) treatment process [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34: 135-140.
- [23] 周光宏, 徐幸莲. 肉品学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 183-210.
- ZHOU G H, XU X L. Meatology[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999: 183-210.
- [24] HE X L, LIU R, NI L Z S, et al. Effect of high voltage electrostatic field treatment on the thawing characteristics and post-thaw quality of frozen pork tenderloin[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(2): 245-250.
- [25] XIA X F, KONG B H, LIU J, et al. Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle [J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(1): 280-286.
- [26] 袁静, 冯美琴, 孙健. 热加工方式对猪肉品质及氧化特性的影响[J/OL]. 食品科学. (2023-04-14) [2023-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20230413.1809.006.html>.
- YUAN J, FENG M Q, SUN J. The effect of thermal processing methods on the quality and oxidation characteristics of pork[J/OL]. Food Science. (2023-04-14) [2023-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20230413.1809.006.html>.
- [27] 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.
- ZHENG X, ZENG L, BAI X Z, et al. Effects of different thawing methods on pork physicochemical properties and microbial counts [J]. Meat Research, 2018, 32(4): 14-19.
- [28] 刁华玉, 林松毅, 陈冬, 等. 解冻方式对南极磷虾肉理化特性和滋味的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(4): 228-238.
- DIAO H Y, LIN S Y, CHEN D, et al. Effect of thawing methods on the physico-chemical and taste characteristics of antarctic krill meat[J]. Chinese Journal of Food, 2023, 23(4): 228-238.
- [29] 唐梦. 高压静电场解冻对罗非鱼片品质影响及其机理的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 76.
- TANG M. Study on the thawing effect of high voltage electrostatic field on the quality of tilapia and its mechanism[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017: 76.
- [30] 臧芳波, 吕蒙, 付永杰, 等. 高压静电场解冻技术在肉类及肉制品中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 303-308.
- ZANG F B, LU M, FU Y J, et al. Research progress on the application of high voltage electrostatic field thawing technology in meat and meat products[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(5): 303-308.