

应可沁,李子言,程序,等. 等离子体活化水作为解冻介质对牛肉杀菌效能及品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 338–345. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060219

YING Keqin, LI Ziyang, CHENG Xu, et al. Effect of Plasma-activated Water as Thawing Media on the Sterilization and Quality of Beef[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 338–345. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060219

等离子体活化水作为解冻介质对牛肉杀菌效能及品质的影响

应可沁,李子言,程 序,钱 婧,章建浩*,严文静*

(南京农业大学食品科技学院, 国家肉品质量安全控制工程技术研究中心, 江苏省肉类加工与质量控制协同中心, 江苏南京 210095)

摘 要:目的: 研究低温等离子体活化水(plasma-activated water, PAW)作为解冻介质对牛肉微生物安全及生鲜品质的影响。方法: 采用射频等离子体发生装置, 处理水量为 300 mL, 以高压电源处理时间(40、60、80、100、120 s)为试验因素, 制备不同处理时长的 PAW。将放置至常温(25 ℃)的 PAW 作为冷冻牛腱子肉的解冻介质, 以介质与样品 4:1 的质量比例静置浸泡解冻 10 min, 测定牛肉和解冻介质中的菌落总数、亚硝酸根含量、pH, 及牛肉保水性(汁液损失率、持水力)、脂质氧化和蛋白质流失状况。结果: 随着等离子体活化水制备时间的延长, 其减菌效果显著增强($P<0.05$), 解冻后牛肉中的菌落总数可降低 0.91 lg(CFU/g)。将等离子体活化水作为解冻介质可显著增强牛肉的持水力($P<0.05$), 汁液损失率最多可降低 1.83%, 脂质氧化程度可降低 0.0944 mg/kg, 蛋白流失可减少 0.085 mg/mL, 牛肉经解冻后, 亚硝酸根含量最高为 3.38 mg/kg, 仍小于定量限, 解冻后肉品 pH 最大仅增加 0.06, 即该解冻方式并不会对牛肉的亚硝酸根、pH 产生显著影响($P<0.05$)。本研究为低温等离子体活化水在肉制品解冻方面的应用提供了一定的理论依据和数据参考。

关键词:低温等离子体活化水, 冷冻牛肉, 冷杀菌, 解冻介质, 品质

中图分类号: TS251.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)02-0338-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060219

本文网刊:



Effect of Plasma-activated Water as Thawing Media on the Sterilization and Quality of Beef

YING Keqin, LI Ziyang, CHENG Xu, QIAN Jing, ZHANG Jianhao*, YAN Wenjing*

(Jiangsu Synergetic Innovation Center of Meat Processing and Quality Control, National Center of Meat Quality and Safety Control, College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Objective: Evaluating the effects of plasma-activated water (PAW) used as a thawing medium on the microbial safety and fresh quality of beef. Methods: The PAW was prepared by treating the 300 mL deionized water with the plasma jet for various times (40, 60, 80, 100, 120 s). Using the PAW, which was placed at room temperature (25 ℃) to thaw the frozen beef tendon meat for 10 min, and the mass ratio of PAW to beef was 4:1. The beef's and the thawing media's physicochemical properties such as the total number of colonies, nitrite, and pH were assessed, and water retention (purge loss, water holding capacity), lipid oxidation, and protein loss of beef were evaluated. Results: As the preparation time of plasma-activated water prolonged, the antibacterial activity of PAW significantly increased ($P<0.05$), and the number of total viable bacteria in beef after thawing treatment was reduced by 0.91 lg(CFU/g). PAW treatment significantly enhanced the water holding capacity of beef ($P<0.05$). After thawing, the juice leakage, lipid oxidation and protein loss were reduced by 1.83%, 0.0944 mg/kg and 0.085 mg/mL, respectively. After thawing, the maximum content of nitrite content in beef was 3.38 mg/kg, which was still lower than the limit of quantification, while the pH value of thawed meat only increased by 0.06. The results showed that such a treatment had no significant effect on the nitrite content and pH of beef ($P<0.05$). This

收稿日期: 2021-06-24

基金项目: 十四五国家重大科技项目课题(2021YFD2100503); 大学生创新项目(202018YX14)。

作者简介: 应可沁(1999-), 女, 本科, 研究方向: 畜产品加工与质量控制, E-mail: yingqk15@163.com。

* 通信作者: 章建浩(1961-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品加工与质量控制, E-mail: nau_zjh@njau.edu.cn。

严文静(1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品安全, E-mail: ywj1103@njau.edu.cn。

study would provide a theoretical basis and data reference for the application of PAW in the thawing of frozen meat products.

Key words: plasma-activated water; frozen beef; cold sterilization; thawing media; quality

在食品工业高速发展的情况下,冷冻肉作为一种常见的加工食品原料,具有广阔的市场空间。解冻主要是使肉类冻结过程中形成的冰晶融化被重新吸收,以恢复到原有新鲜状态的过程^[1]。在这个缓慢且不均匀的过程中,部分肉很可能会暴露在有利于微生物生长的温度条件下,而解冻过程中,肉品内发生变化的许多物质则为微生物的生长提供了足够的水分和养分;同时,肉品保水性等品质特性的变化不仅归因于冻结时形成的冰晶对细胞的破坏作用,还与解冻过程中肌肉组织中蛋白氧化、构象、聚集特性的改变密切相关^[2]。因此,冷冻肉制品的解冻过程不仅对其微生物安全性起重要作用,还会影响肉的关键品质属性。当前常用的传统解冻方法主要包括空气解冻法和水解冻法,空气解冻法生产成本虽低,但也有解冻速度较慢、汁液流失现象严重等缺点^[2];水解冻法速度虽快,但也存在可溶性物质流失、易被水中微生物所污染等问题。近年来,更多新型的肉类解冻方法也开始出现,包括微波、高压、真空及超声解冻等。与传统方法相比,新型的解冻技术解冻速度较快、所需空间较小,具有一定优势,但仍然存在影响着肉品品质、成本过高等不足,无法实现工业的普遍化应用。

然而,目前有关于解冻过程中微生物控制的研究较少,在食品的工业化应用中,亟需一种能够确保微生物安全性并保持冷冻肉最大品质的解冻方法。低温等离子体是指在高压电源的作用下,不同气体分子被部分或者完全电离分解成离子、电子、中性粒子、自由基、基态和激发态分子以及紫外光子等物质的集合,它被认为是第四态物质^[3]。当水通过等离子体放电区域后便会形成等离子体活化水(plasma-activated water, PAW)。空气中的氧气、氮气和与水蒸气与等离子体发生反应,会生成多种短寿命的活性氧、活性氮等,这些气态活性物质溶解到水溶液后,会使等离子体活化水中的硝酸根、亚硝酸根、过氧化氢以及过氧亚硝基等物质得到积累^[4],且过氧化氢等物质浓度随着等离子体处理时间延长而增加^[5]。由于等离子体活化水具有高氧化还原电位(ORP)、低 pH 以及过氧化氢等活性氧氮物质积累等特点^[6],能破坏微生物的脂质、蛋白质、DNA 等^[7],已被表明具有广谱杀菌特性,但其研究主要集中于果蔬产品的浸泡杀菌,鲜应用于禽蛋制品或肉制品^[8]。

因此,本文将等离子体活化水作为新型的解冻介质对冷冻牛肉进行处理,研究不同处理时间(40、60、80、100、120 s)制得的等离子体活化水对解冻牛肉及介质中的菌落总数、保水性、脂质氧化、亚硝酸根含量、pH、蛋白质流失状况等理化指标的影响,以期用高效、简单、安全、低成本的等离子体活化水解

冻法同时实现肉品的解冻与杀菌^[9],在应对食品安全问题的同时,最大程度地保障牛肉的品质与风味,为其工业化应用提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

牛腱子肉 南京苏果超市卫岗店;硫代巴比妥酸、甲醇、三氯乙酸、乙二胺四乙酸二钠、氯化钠、乙酸、氢氧化钾、标准的结晶牛血清清蛋白、硫酸铜、酒石酸钾钠 均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;平板计数琼脂(PCA) 青岛高科技工业园海博生物技术有限公司。

PG-1000ZD 低温等离子体喷枪 南京苏曼等离子科技有限公司;静音无油空气压缩机 浙江藤井空压机有限公司;CR-400 型全自动色差仪 柯尼卡美能达控股公司;JA2203N 型电子天平 上海民桥精密科学仪器有限公司;BSC-250 型恒温恒湿箱 上海博迅实业有限公司;DPH-9162 电热恒温培养箱 上海一恒科学仪器有限公司;BagMixer400CC 均质器 法国 Interscience 公司;UV-2600 紫外分光光度计 日本岛津公司;数显式 pH 测试仪 梅特勒—托利多仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 等离子体活化水的制备 参照钱婧等^[10]的方法制备等离子体活化水,采用射频等离子装置作为等离子体的发生器,以空气作为工作气体,装置的孔口固定在液面下方约 10 mm 处,待处理去离子水量为 300 mL,处理时间为 40、60、80、100、120 s。将不同处理时间制得的等离子体活化水放置至常温(25 ℃),作为解冻介质。在解冻开始前,取部分解冻介质进行亚硝酸根含量与 pH 的测定。

1.2.2 样品的预处理 选取新鲜牛腱子肉,剔除筋膜后,顺着肌纤维的方向切成(10±2)g 的、形状大小均匀、扁平方形的肉块,分装于密封袋,置于-20 ℃贮藏 24 h 后,用于后续实验的测定。解冻时,将解冻介质与冷冻牛肉以 4:1 的质量比例进行浸泡解冻,以同样为 25 ℃ 的去离子水(DIW)浸泡解冻作为对照组进行浸泡解冻。在解冻介质中静置浸泡 10 min 后,用洁净的镊子夹出样品。依据测定指标的目的不同,有选择性地测定解冻前、解冻后、介质及样品中的指标。

1.2.3 对菌落总数的影响 参照 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》的方法进行检测。解冻后牛肉中微生物的测定:将 10 g 牛肉置于无菌均质袋中,加入 90 mL 无菌生理盐水,用均质器以 4 次/s 的档位持续拍打 2 min

后, 10 倍梯度逐步稀释均质袋中的混合液, 进行涂布测定, 结果以 $\lg(\text{CFU/g})$ 表示。解冻介质中微生物的测定: 吸取解冻液, 10 倍稀释至合适梯度, 进行涂布测定, 结果以 $\lg(\text{CFU/mL})$ 表示。

1.2.4 对保水性的影响 汁液损失率测定: 测定牛肉在解冻前的质量并记录, 测定解冻后、用吸水纸吸除表面汁液后的牛肉质量并记录。汁液损失率可用以下公式计算:

$$A(\%) = \frac{m - m_1}{m} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: A 表示汁液损失率, %; m 表示解冻前质量, g ; m_1 表示解冻后质量, g 。

持水力测定: 将解冻后的牛肉剪成均匀的碎块, 在 4°C 下以 $15000 \times g$ 的速度离心 10 min , 记录并比较离心前质量与离心后的质量差别来衡量持水力的差别, 从而反映等离子体活化水对其保水性的影响。持水力计算可用以下公式计算:

$$\text{WHC}(\%) = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{m_1}\right) \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: WHC 表示持水力, %; m_1 表示离心前质量, g ; m_2 表示离心后质量, g 。

1.2.5 对亚硝酸盐残留量的影响 参照 GB 4789.2-2016《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》的方法进行检测, 检测解冻介质及牛肉的亚硝酸根含量。

1.2.6 对脂质氧化的影响 根据 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》, 参照黄明明等^[11]的方法进行测定。

1.2.7 对 pH 的影响 参照 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》的方法进行检测。称取 5 g 牛肉, 加入 45 mL 去离子水, 用高速均质机均质 60 s , 过滤后取上清液, 将 pH 计室温下校正后, 进行测定滤液及解冻前后介质的 pH。

1.2.8 对蛋白质含量的影响 参考李宁^[12]的方法进行测定。用标准的结晶牛血清清蛋白(BSA)配制 10 mg/mL 的标准蛋白溶液, 分别取 0 、 0.2 、 0.4 、 0.6 、 0.8 、 1.0 mL 的标准蛋白溶液, 用水补足到 1 mL , 与 4 mL 的双缩脲试剂反应 30 min 制得标准曲线。从不同处理组中各取 1 mL 解冻介质作为样品测定, 在 540 nm 处进行比色测定, 将吸光度代入标准曲线方程, 以计算解冻介质中蛋白质的含量, 以判断牛肉中蛋白质的流失状况。所得标准曲线方程为以下公式:

$$y = 0.5395x \quad \text{式 (3)}$$

式中: y 表示吸光度; x 表示蛋白质浓度, mg/mL 。

1.3 数据处理

采用 SPSS(版本 25)软件进行单因素方差分析(ANOVA), Duncan 统计检验, 差异水平 $P < 0.05$ 为显著水平。数据以平均值 $\pm$ 标准差(SD)表示, 采用 Origin2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 等离子活化水浸泡解冻对解冻牛肉及其介质的菌落总数群的影响

在传统方法解冻的过程中, 解冻时肉品会暴露在有利于微生物生长的环境温度下, 且由于肉制品含有丰富的蛋白质、脂肪等营养物质, 拥有较高的水分活度, 便为微生物的生长提供了充足的养分和水分^[13]。因此, 控制冷冻牛肉经解冻后的菌落总数对保障食品安全非常重要。由图 1a 可知, 经不同解冻介质解冻后, 对照组牛肉中微生物的菌落总数为 $5.14 \lg(\text{CFU/g})$, 当解冻介质为经过不同处理时间(40 、 60 、 80 、 100 、 120 s)所制得的等离子体活化水时, 牛肉中的菌落总数分别降低至 4.96 、 4.84 、 4.63 、 4.42 、 $4.23 \lg(\text{CFU/g})$, 各组处理间均具有显著性差异, 且随着等离子体处理时间的延长, 减菌效果显著增强($P < 0.05$)。由图 1b 可观察到, 解冻介质中的菌落总数也呈现相同变化规律, 对照组解冻介质的菌落总数为 $3.19 \lg(\text{CFU/mL})$, 而实验组的分别为 2.87 、 2.71 、 2.55 、 2.04 、 $1.60 \lg(\text{CFU/mL})$, 各组间均存在显著性差异($P < 0.05$), 从结果中得出, 对微生物的减菌效果与等离子体活化水的处理时长有关, 且随着处理时长的增加, 其对于解冻肉品的杀菌效果能够显著增强($P < 0.05$)。这种减菌效果是因为在低温等离子体活化水具有高氧化还原电位、低 pH 等特点, 且存在大量活性氧(ROS)和活性氮(RNS), 例如过氧化氢(H_2O_2)、单重

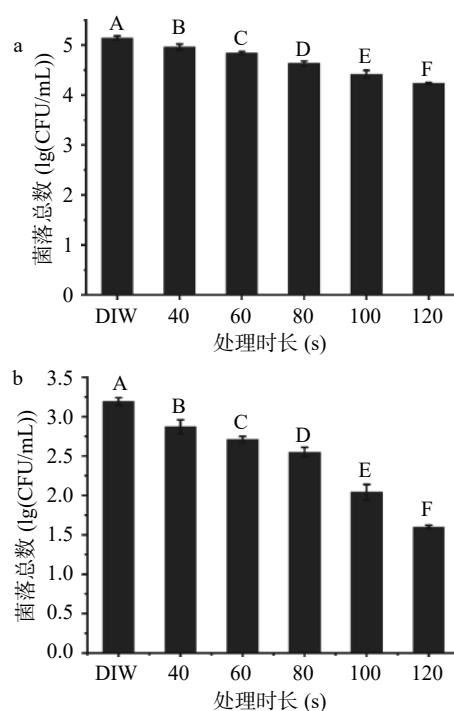


图1 解冻后牛肉及解冻介质中的菌落总数

Fig.1 Total number of colonies in thawed beef and thawed media

注: a: 解冻后牛肉中的菌落总数; b: 解冻后解冻介质中的菌落总数; 不同大写字母表示不同处理组之间在 $P < 0.05$ 水平下有显著性差异; 图 2~图 6 同。

态氧($^1\text{O}_2$)、臭氧(O_3)、一氧化氮(NO)和羟基($-\text{OH}$),以及电子、离子等^[14],这些物质能够破坏微生物的细胞壁、脂质与蛋白质等。此外,还会使微生物氧化应激,导致细胞膜渗漏与细胞死亡^[15]。所以当其用作浸泡解冻的介质时,能够发挥广谱杀菌的效用。

2.2 等离子活化水浸泡解冻对解冻牛肉保水性的影响

保水性是肉类品质的重要指标,直接影响肉品的风味、营养价值、色泽、嫩度等。肉类在冷冻时会形成冰晶,而在解冻的过程中,这些能够损伤肉品结构的冰晶融化,因为肉类往往无法完全吸收冰晶融化出来的水,便会造成汁液损失^[1];持水力则影响肉的外观、热加工过程中的熟肉得率及咀嚼时的多汁性等^[15]。由图 2a、图 2b 可知,将等离子体活化水作为解冻介质时,解冻牛肉的保水性不会发生显著变化($P>0.05$)。随着其制备时间的增加,解冻牛肉的汁液损失率整体趋势上先下降再上升,分别为 1.11%、0.51%、0.44%、1.75%、3.23%;对照组汁液损失率为 1.68%。处理组的持水力分别为 94.55%、94.56%、97.36%、97.88%、94.75%,整体趋势上先上升再下降,对照组的持水力为 94.43%,这可归因于当等离子体处理时间较短时,制得的等离子体活化水不会使解冻牛肉的蛋白质结构、肌肉纤维的完整性和空间结构遭到破坏^[16]。甚至,处理时长在一定范围内的等离子体活化水浸泡解冻能在一定程度上帮助维持其结构的稳定性,有利于保水性的提升。这是因为,保水性与肌原纤维蛋白的静电荷数及蛋白质的网状结构息息相关^[17],等离子体活化水中存在大量正负离

子^[18],促使蛋白质的静电荷效应增强与网络结构形成,有利于水分的保持;但当等离子体活化水处理时长达到、以及超过 80 s 时,牛肉样品的汁液流失率上升、持水力下降。这是因为,在相同的浸泡时间下,随着处理时间的延长,等离子体活化水中的活性物质含量积累过高,会破坏样品的组织结构,使肌纤维收缩、空隙增大^[19]。此外,解冻过程中往往伴随着蛋白质的氧化变性,这是导致汁液流失与保水性下降的重要原因^[20],而等离子体活化水浸泡则会促进蛋白质的氧化^[4],从而影响其保水性。已知优质肉品的汁液损失率应小于 8.0%,持水力应高于 76%^[21],本实验样品经等离子体活化水浸泡解冻后均在此范围内,且与对照组相比未发生显著变化,即解冻后牛肉属于优质肉品,仍具有优良的食品品质。

2.3 等离子活化水浸泡解冻对解冻牛肉及其介质的亚硝酸盐含量的影响

一方面,亚硝酸盐的来源包括蔬菜、水果和加工肉类,肉制品中原本就存在一定的亚硝酸盐^[22]。另一方面,制备低温等离子体活化水会产生大量活性氧与活性氮,例如一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO_2)、三氧化二氮(N_2O_3)、四氧化二氮(N_2O_4)等,这些氮氧化物能够参与亚硝酸根的形成^[23]。而长期摄入过多的亚硝酸盐会对人体健康造成损害,因此有必要对解冻样品及介质中亚硝酸根的含量做检测。由图 3a、图 3b 可观察到,对照组解冻牛肉的亚硝酸根含量为 0.99 mg/kg,解冻介质的为 0 $\mu\text{mol/L}$ 。经牛肉浸泡解

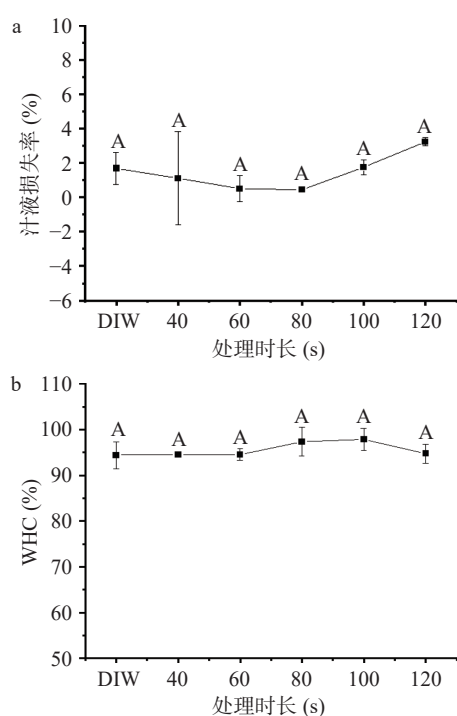


图 2 解冻后牛肉汁液损失率及持水力变化

Fig.2 Changes of juice leakage and water holding capacity of beef juice after thawing

注: a: 解冻后牛肉汁液损失率; b: 解冻后牛肉持水力。

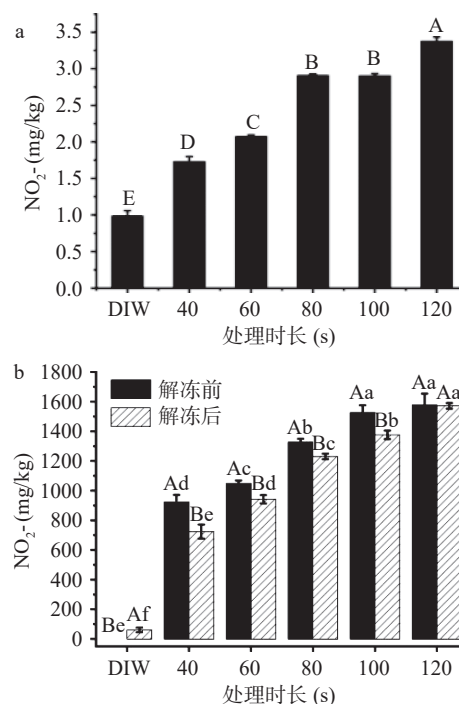


图 3 解冻后牛肉及解冻介质中的亚硝酸根含量

Fig.3 Nitrite content in thawed beef and thawed media

注: a: 解冻后牛肉中亚硝酸盐含量; b: 解冻介质中亚硝酸盐含量; 不同小写字母表示同一解冻程度不同处理时长下数据差异显著, $P<0.05$ 。

冻后,解冻介质中的亚硝酸根含量与解冻前相比显著降低($P<0.05$)。经等离子体活化水浸泡解冻后的牛肉中亚硝酸根含量与对照组相比显著增加($P<0.05$),且随着处理时长的增加,其中亚硝酸根的含量也越高,实验组牛肉中亚硝酸根的含量分别为 1.73、2.07、2.91、2.90、3.38 mg/kg。鲜肉制品中亚硝酸盐的定量限(limit of quantitation, LOQ)为 4.5 ppm^[24],而本实验中,样品经过不同处理时长的等离子体活化水浸泡解冻后,等离子体活化水处理时长为 120 s 的肉品亚硝酸根含量最高,为 3.38 ppm,不超过允许的最大浓度,因此仍可以认为其是“天然的”,不对人体造成危害,符合食品安全,具有较好的品质。

2.4 等离子活化水浸泡解冻对解冻后牛肉脂质氧化的影响

肉品脂质氧化的程度与其风味、色泽与营养价值息息相关。一般来说,人体感官能够感知到的最低酸败值为 1.0 mg/kg^[25]。在冷冻过程中,肉品中形成冰晶,破坏了肌细胞的结构,使肌纤维失去其完整性^[26],另外,解冻过程中血红素铁等氧化剂的释放^[27]也能使解冻后肉类脂质氧化的速度增大,对其货架期造成负面影响。由图 4 可知,解冻后对照组牛肉的丙二醛含量为 0.0984 mg/kg,与之相比,经等离子体活化水浸泡解冻处理后,牛肉的脂质氧化程度显著降低($P<0.05$),分别为 0.034、0.035、0.020、0.004、0.036 mg/kg,且均小于 1.0 mg/kg,不会对产品的风味造成影响。由此可知,处理时长在一定范围内的低温等离子体活化水浸泡解冻可以显著降低牛肉脂质氧化的程度,保护肉品的品质。这可能是因为,通过等离子体活化水浸泡解冻后,牛肉样品中亚硝酸盐的含量会升高,而亚硝酸盐不仅能够发色、抑制微生物生长,更能够抑制脂质氧化^[28]。此外,已知脂质氧化的机理包括三种途径:自动氧化、酶促氧化、光氧化^[29],其中,动物体内的脂氧合酶会促使 PUFA 氧化,产生脂质氢过氧化物,加剧脂质氧化中酶促氧化途径的程度^[30]。而低温等离子体活化水可以通过破坏酶的次级结构、特殊的化学键或侧链的化学修饰等方式灭活内源酶^[31]。因此,等离子体活化水抑制了脂氧合酶这一内源酶的活性,也可能是抑制脂质氧化

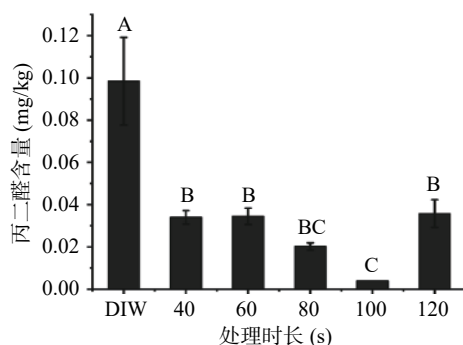


图4 解冻后牛肉脂质氧化程度

Fig.4 Degree of lipid oxidation in thawed beef

程度的原因。然而,当等离子体活化水处理时长为 120 s 时,较之处理时长为 100 s,肉品经浸泡解冻后的丙二醛含量显著增加($P<0.05$)。这是因为随着处理时长的增加,等离子体活化水中活性氧及活性氮等活性氧化剂含量上升,从而在一定程度上加大脂质氧化的程度。但本实验等离子体活化水处理时长为 120 s 时,其脂质氧化程度仍小于对照组,不造成负面影响。

2.5 等离子活化水浸泡解冻对解冻后牛肉及解冻牛肉前后介质 pH 的影响

pH 是评价肉类品质的重要指标之一,直接影响肉制品的保水性、新鲜程度等^[32]。由图 5a 可知,解冻前,等离子体活化水的 pH 显著小于对照组 DIW 的 pH($P<0.05$),为 5.72。且随着处理时长的增加, pH 逐渐降低,分别为 3.25、3.12、2.99、2.92、2.88。这是因为等离子体活化水中富含活性氧和氮类物质^[33],这些氮氧化合物与水反应则可以参与生成硝酸根和亚硝酸根^[34],提供酸化作用,从而使等离子体活化水具有低 pH,更有利于其减菌作用。经过解冻后,对照组的 pH 较之解冻前显著下降($P<0.05$),为 5.17,这可能是因为解冻过程中,水中电解质流失,肉品中矿物和小分子蛋白质渗出流失,导致离子平衡的改变^[35],从而影响 pH;而实验组介质的 pH 则在解冻后显著提高,分别为 4.84、4.53、4.45、4.21、4.11,参照本实验亚硝酸根含量的测定,这可能是因为介质中的亚硝酸根转移至肉品中,使介质的 pH 有所回升;或是因为低温等离子体活化水中的活性物质能够

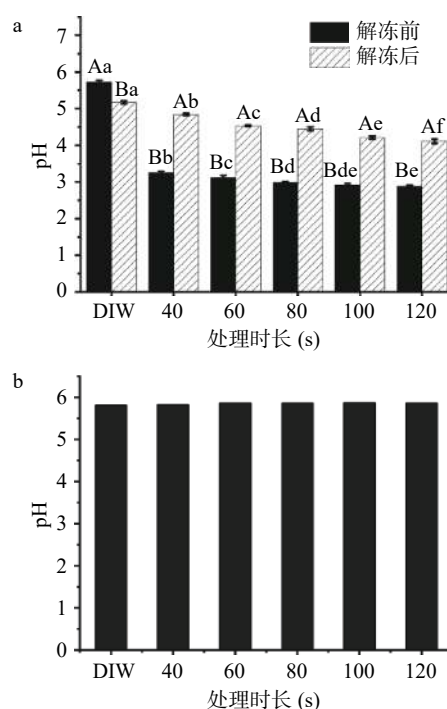


图5 解冻后介质及牛肉中的 pH 变化

Fig.5 Changes of pH before and after thawing media and thawed beef

注: a: 解冻后介质中 pH; b: 解冻后牛肉中 pH。

抑制微生物分解蛋白质、含氮化合物等,使其碱性增加^[36];也可能是因为,导致等离子体活化水具有低 pH 特点的化学活性成分寿命短,硝酸、亚硝酸等易分解,因此低 pH 的现象只能持续较短时间,也不会产生健康风险^[37]。已知肉制品解冻的过程中,最终 pH 上升 0.2,则会导致明显的促进肉腐败^[38],而本实验解冻后,经等离子体活化水浸泡解冻处理的介质 pH 较之对照组均显著下降,且低 pH 可以抑制微生物的生长,可认为不会加剧肉的腐败速度。由图 5b 可知,对照组肉品的 pH 为 5.81,实验组肉品 pH 分别为 5.82、5.86、5.86、5.87、5.86,这些差值很小,可能是因为误差或样品原料本身的差异所造成的,且均在正常范围值内^[39],不会影响风味,具有较好的食用品质。

2.6 等离子活化水浸泡解冻对解冻牛肉蛋白质流失状况的影响

在解冻过程中,肉品中部分可溶性蛋白质会伴随汁液损失而流失,从而降低肉品的营养价值。由图 6 可知,对照组解冻介质中蛋白质含量为 0.160 mg/mL,实验组中蛋白质含量则分别为 0.111、0.098、0.092、0.075、0.146 mg/mL。除处理时长为 120 s 的处理组外,与对照组相比,低温等离子体活化水浸泡解冻可以显著降低解冻介质中蛋白质的含量,即显著降低解冻过程中牛肉的蛋白质流失程度,且随着处理时长的增加,其作用越显著($P<0.05$)。这可能是因为,在解冻过程中汁液损失的同时伴随着矿物质和蛋白质的流失,而肉品系水力实质上受蛋白质分子静电荷效应的影响^[40]。等离子体活化水的电导率会随着处理时间的增加而显著升高,并产生大量正负离子^[18],这些离子的电荷增大大了解冻牛肉肌原纤维间的静电斥力,诱导肌原纤维的膨胀^[20],因而提升了其保水性^[34],维持了其肌纤维组织结构的完整性^[41],使可溶性蛋白质等内容物渗出减少,因此随着处理时长的增大,其蛋白质流失状况降低程度越显著。但当处理时长达到 120 s 时,蛋白质流失率上升,这可能是因为经长时间处理后的等离子体活化水 pH 较低,打破了样品内的电离平衡,且当制备等离子体活化水时处理时间过长时,导致其中活性成分过多,从而引起了蛋白质的分

解、变性,甚至大分子空间网络结构的破坏^[42],从而使导致此处理时蛋白质流失程度较高,但仍小于对照组,具有良好的营养价值。可认为以低温等离子体活化水作为浸泡解冻的介质这一解冻方式,处理时长在一定范围内时,对降低蛋白质流失率有显著的积极作用,超过此范围(本实验为 120 s)时,也不会造成负面影响,这一点与保水性的实验结果在一定程度上具有相关性。

3 结论

本文将等离子体活化水作为新型的解冻介质用于冷冻牛肉的解冻。随着 PAW 制备时间的延长,其减菌效果显著增强,当等离子体处理时间为 120 s 时,冷冻牛肉经 PAW 处理后其菌落数可从 5.14 lg (CFU/g) 降至 4.23 lg (CFU/g),可明显降低浸泡解冻带来的微生物污染风险。当 PAW 制备时间不超过 100 s 时,PAW 可维持牛肉结构的稳定性,利于保水性的提升,并显著降低解冻过程中牛肉蛋白质的流失。同时,PAW 处理可明显降低牛肉脂质氧化现象,且不会对牛肉的 pH 及亚硝酸根含量造成显著影响。综上所述,等离子活化水有望成为一种新型的解冻介质用于冷冻肉品的解冻,在高效解冻杀菌的同时不会对肉品品质造成明显的影响。

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):5363-5368. [ZHANG Shuai, XU Le, LIANG Xiaohui, et al. Research progress of freezing and defrosting technology of meat product[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(16): 5363-5368.]
- [2] 彭泽宇,朱明明,孙红东,等.肉品新型解冻技术及其对蛋白质特性影响的研究进展[J].食品科学,2020,41(19):303-310. [PENG Zeyu, ZHU Mingming, SUN Hongdong, et al. Recent advances in new meat thawing technologies and their effects on protein properties[J]. Food Science, 2020, 41(19): 303-310.]
- [3] THIRUMDAS R, KOTHAKOTA A, ANNAPURE U, et al. Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018: 7721-7731.
- [4] JING Q A, YW A, HONG Z B, et al. Plasma activated water-induced formation of compact chicken myofibrillar protein gel structures with intrinsically antibacterial activity[J]. Food Chemistry, 2021, 351: 129278.
- [5] ZHAO Y M, PATANGE A, SUN D W, et al. Plasma-activated water: Physicochemical properties, microbial inactivation mechanisms, factors influencing antimicrobial effectiveness, and applications in the food industry[J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2020, 19(6): 3951-3979.
- [6] 焦滇,朱育攀,许航博,等.等离子体活化水冰对纯培养及三文鱼片表面单增李斯特菌杀菌效果研究[J].郑州大学学报(理学版),2019,51(3):97-103. [JIAO Zhen, ZHU Yupan, XU Hangbo, et al. Plasma-activated water ice Inactivation of *Listeria monocytogenes* in pure culture and salmon strips[J]. Journal of Zhengzhou University(Natural Science Edition), 2019, 51(3): 97-103.]

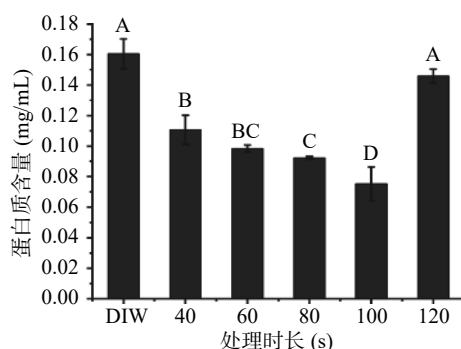


图 6 解冻后介质中蛋白质含量的变化

Fig.6 Changes of protein content in the media after thawing

- [7] 陈烨芝, 徐淑婷, 曹锦萍, 等. 低温等离子活化水对沙糖橘采后防腐保鲜的效果[C]// 河南: 中国园艺学会 2019 年学术年会暨成立 90 周年纪念大会论文摘要集, 2019. [CHEN Yezhi, XU Shuting, CAO Jinping, et al. Effect of low temperature plasma activated water on preservative and fresh-keeping of sweet orange after harvest[C]// Henan: Chinese Society of Horticulture Abstracts of 2019 Academic Annual Conference and 90th Anniversary Conference, 2019.]
- [8] 康超娣, 相启森, 刘骁, 等. 等离子体活化水在食品工业中应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 348–352. [KANG Chaodi, XIANG Qisen, LIU Xiao, et al. A review of application of plasma-activated water in food industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(7): 348–352.]
- [9] TIAN Y, MA R, ZHANG Q, et al. Assessment of the physicochemical properties and biological effects of water activated by non-thermal plasma above and beneath the water surface[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2015, 12(5): 439–449.
- [10] 钱婧, 仲安琪, 王露丹, 等. 等离子体活性水对生鲜黄鱼杀菌效果及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 277–283. [QIAN Jing, ZHONG Anqi, WANG Ludan, et al. Effects of plasma-activated water on the microbial decontamination and quality of yellow croaker slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(10): 277–283.]
- [11] 黄明明, 乔维维, 章建浩, 等. 低温等离子体冷杀菌对生鲜牛肉主要腐败菌及生物胺抑制效应研究[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(4): 17–23. [HUANG Mingming, QIAO Weiwei, ZHANG Jianhao, et al. Effects of cold plasma cold sterilization on major spoilage bacteria and biogenic amines in beef[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 36(4): 17–23.]
- [12] 李宁. 几种蛋白质测定方法的比较[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2006, 26(2): 132–134. [LI Ning. The comparison on various methods for determining different proteins[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2006, 26(2): 132–134.]
- [13] 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 Fangbo, LV Meng, FU Yongjie, et al. Research progress on the application of high voltage electrostatic field thawing technology in meat and meat products[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(5): 303–308.]
- [14] GUO L, XU R, GOU L, et al. Mechanism of virus inactivation by cold atmospheric-pressure plasma and plasma-activated water[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2018, 84(17): 726–736.
- [15] 刘晓畅. 牦牛肉品质特性研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(11): 78–83. [LIU Xiaochang, ZHANG Shou, SUN Baozhong, et al. Progress in understanding quality characteristics of yak meat[J]. *Meat Research*, 2020, 34(11): 78–83.]
- [16] 周建伟, 孟倩, 高德, 等. 超声加工技术对牛肉及其制品品质影响的研究进展[J]. 现代食品科技, 2020, 36(1): 302–308. [ZHOU Jianwei, MENG Qian, GAO De, et al. Research progress on the effects of ultrasonic technology on the quality of beef and its derived products[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2020, 36(1): 302–308.]
- [17] 张昕. 不同解冻工艺对鸡胸肉品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017. [ZHANG Xin. Effects of different thawing methods on the quality of chicken breast [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.]
- [18] 康超娣. 等离子体活化水对鸡肉源 *P. deceptionensis* 杀菌效果及机制研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2019. [KANG Chaodi. Research of sterilization effect and mechanisms of plasma-activated water on *P. deceptionensis* isolated from chicken meat [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2019.]
- [19] 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. [HE Xiangli, LU Donglan. Effect of air-thawing temperature on quality of pork tenderloin meat[J]. *Meat Research*, 2020, 34(2): 92–98.]
- [20] 宦海珍. 秘鲁鲑鱼解冻过程中蛋白质氧化介导的保水性机制研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2019. [HUAN Haizhen. The mechanism of water holding capacity mediated by protein oxidation in *dosidicus gigas* during thawing [D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.]
- [21] 邸静. 冷冻牛肉解冻方法的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014. [DI Jing. Studies on thawing methods of frozen beef [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.]
- [22] BEDALE W, SINDELAR J J, MILKOWSKI A L. Dietary nitrate and nitrite: Benefits, risks, and evolving perceptions[J]. *Meat Science*, 2016, 120: 85–92.
- [23] 倪思思, 樊丽华, 廖新浴, 等. 冷等离子体技术替代肉制品中亚硝酸盐的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 233–238. [NI Sisi, FAN Lihua, LIAO Xinyu, et al. Recent advances in nitrite replacement by cold plasma technology in meat products[J]. *Food Science*, 2020, 41(11): 233–238.]
- [24] XIAO S, CORNFORTH D, WHITTIER D, et al. Nitrite spray treatment to promote red color stability of vacuum packaged beef[J]. *Meat Science*, 2015, 99: 8–17.
- [25] 李文东, 韩玲, 余群力, 等. 冷却方式对牦牛肉贮藏过程中品质变化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(20): 203–211. [LI Wendong, HAN Ling, YU Qunli, et al. Effect of chilling methods on the quality of yak meat during storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(20): 203–211.]
- [26] 施雪, 夏继华, 卢进峰, 等. 冻结、解冻过程对肌肉品质的影响[J]. 食品工业, 2012(7): 212–214. [SHI Xue, XIA Jihua, LU Jinfeng, et al. Effects of repeated freezing-thawing methods on quality of muscle[J]. *The Food Industry*, 2012(7): 212–214.]
- [27] SHANG X, YAN X, LI Q, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on myoglobin and lipid oxidations of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) surimi with different pork back fat content[J]. *Food Sci Anim Resour*, 2020, 40(6): 969–979.
- [28] JUNG S, LEE J, LIM Y, et al. Direct infusion of nitrite into meat batter by atmospheric pressure plasma treatment[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016(39): 113–118.
- [29] 刘文轩, 罗欣, 杨啸吟, 等. 脂质氧化对肉色影响的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 247–256. [LIU Wenxuan, LUO Xin, YANG Xiaoyin, et al. Recent progress in research on the effect of lipid oxidation on meat color[J]. *Food Science*, 2020, 41(21):

247-256.]

[30] MIN B, NAM K C, CORDRAY J, et al. Endogenous factors affecting oxidative stability of beef loin, pork loin, and chicken breast and thigh meats[J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(6): C439-C46.

[31] MISRA N N, PANKAJ S K, SEGAT A, et al. Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016(55): 39-47.

[32] 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): 119-124.

[HUI Qingling, ZOU Tonghua, SONG Ruiqi, et al. Effects of different freezing methods on the quality of vacuum thawing pork[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(24): 119-124.]

[33] JOSHI I, SALVI D, SCHAFFNER D W, et al. Characterization of microbial inactivation using plasma-activated water and plasma-activated acidified buffer[J]. *Journal of Food Protection*, 2018, 81(9): 1472-1480.

[34] 王晨, 钱婧, 盛孝维, 等. 低温等离子体冷杀菌对盐水鸭货架期及风味品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(17): 70-77.

[WANG Chen, QIAN Jing, SHENG Xiaowei, et al. Effects of cold plasma sterilization on shelf life and flavor quality of salted duck[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(17): 70-77.]

[35] LEYGONIE C, BRITZ T J, HOFFMAN L C. Meat quality comparison between fresh and frozen/thawed ostrich *M. iliofibularis*[J]. *Meat Science*, 2012, 91(3): 364-368.

[36] 艾春梅, 谢小本, 廖新浴, 等. 等离子体活化冰对东方对虾保鲜及品质的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(3): 136-142. [AI Chunmei, XIE Xiaoben, LIAO Xinyu, et al. Effect of plasma-

activated water(PAW) ice on the quality of shrimps (*Penaeus orientalis*) during storage[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(3): 136-142.]

[37] GUO J, QIN D, LI W, et al. Inactivation of *Penicillium italicum* on kumquat via plasma-activated water and its effects on quality attributes[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2021, 343(10): 109090.

[38] 张帆, 范远景, 刘培志, 等. 不同解冻方法对鸭肉品质的影响[J]. *肉类研究*, 2016, 30(5): 35-39. [ZHANG Fan, FAN Yuanjing, LIU Peizhi, et al. Effect of different thawing methods on the quality of duck meat[J]. *Meat Research*, 2016, 30(5): 35-39.]

[39] 李璐倩, 严琪格, 哈玉洁, 等. 不同解冻方法对牦牛肉品质特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(23): 127-134. [LI Luqian, YAN Qige, HA Yujie, et al. Effects of different thawing methods on the quality characteristics of yak meat[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(23): 127-134.]

[40] 杜鹏飞, 汝医, 孙蓓, 等. 超声波解冻对羊肉品质的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(1): 39-44. [DU Pengfei, RU Yi, SUN Bei, et al. Effect of ultrasonic thawing on quality characteristics of frozen mutton[J]. *Meat Research*, 2020, 34(1): 39-44.]

[41] 钱书意. 肌肉蛋白冷冻变性介导的解冻汁液"回吸"机制[D]. 天津: 天津商业大学, 2018. [QIAN Shuyi. The mechanism of thawing drip "reabsorption" mediated by muscle protein freezing denaturation [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2018.]

[42] 斯兴开, 杨惠琳, 韦翔, 等. 低温等离子体对草鱼鱼肉品质的影响[J]. *食品科技*, 2018, 43(10): 180-185. [SI Xingkai, YANG Huilin, WEI Xiang, et al. Effect of low temperature plasma on the quality of grass carp[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(10): 180-185.]