李欣怡, 靳爽爽, 王明月, 等. 等离子体活化水协同有机酸对冰鲜鸡抑菌效果及贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 412−419. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060087

LI Xinyi, JIN Shuangshuang, WANG Mingyue, et al. Effect of Plasma Activated Water Synergistic Organic Acids on Antibacterial Effect and Quality of Chilled Chicken during Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 412−419. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060087

· 贮运保鲜 ·

等离子体活化水协同有机酸对冰鲜鸡抑菌效果及贮藏品质的影响

李欣怡[1,2], 靳爽爽[3], 王明月[1,2], 邓绍林[2,3], 孔晓慧[3], 王晓明[3], 徐幸莲[1,2], 韩敏义[1,2,3,*]

（1.岭南现代农业科学与技术广东省实验室云浮分中心, 广东云浮 527400;
2.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, 江苏南京 210095;
3.温氏食品集团股份有限公司, 广东云浮 527400）

摘　要: 本文旨在探索延长冰鲜鸡货架期的新方法，解决制约行业高质量发展的瓶颈问题。现以冰鲜鸡为研究对象，探究等离子体活化水（plasma activated water，PAW）协同有机酸（0.2% 柠檬酸、0.2% 乳酸溶液）对冰鲜鸡的抑菌效果及 4 ℃ 条件下贮藏品质的影响。结果表明，等离子体活化水协同有机酸处理能有效抑制冰鲜鸡菌落总数及大肠菌群数的增长（P<0.05），可使初始菌落总数降低 0.77~1.21 lg CFU/g、大肠菌群数降低 0.07~0.57 lg CFU/g。在贮藏期间，等离子体活化水协同有机酸处理能显著抑制冰鲜鸡 pH、K 值、丙二醛含量的增长（P<0.05）；在贮藏前期（0~8 d），等离子体活化水协同有机酸处理未对肉色造成不良影响。等离子体活化水协同有机酸处理能降低鸡肉剪切力但并不显著（P>0.05）。虽然等离子体活化水协同有机酸处理使冰鲜鸡亚硝酸盐含量显著增加（P<0.05），最高为 21.43 mg/kg，但仍在安全范围内，不会引发食品安全问题。综上所述，与 NaClO 处理相比，PAW、PAW 协同有机酸处理有效延长冰鲜鸡货架期至 8、12 d，维持贮藏品质。本研究可为 PAW 协同有机酸在冰鲜鸡保鲜方面的应用提供理论依据。

关键词: 等离子体活化水, 有机酸, 冰鲜鸡, 贮藏品质, 货架期

中图分类号: TS251.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0412−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060087

本文网刊:

Effect of Plasma Activated Water Synergistic Organic Acids on Antibacterial Effect and Quality of Chilled Chicken during Storage

LI Xinyi[1,2], JIN Shuangshuang[3], WANG Mingyue[1,2], DENG Shaolin[2,3], KONG Xiaohui[3], WANG Xiaoming[3], XU Xinglian[1,2], HAN Minyi[1,2,3,*]

（1.Yunfu Branch of Guangdong Provincial Laboratory of Lingnan Modern Agricultural Science and Technology, Yunfu 527400, China;
2.College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, National Engineering Research Center for Meat Quality and Safety Control, Nanjing 210095, China;
3.Wen's Food Group Co., Ltd., Yunfu 527400, China）

Abstract: In order to investigate the novel method to extend the shelf life of chilled chicken, thereby addressing the bottleneck restricting that constrains high-quality development of the industry, the antibacterial effect and storage quality at 4 ℃ of plasma activated water (PAW) and organic acids (0.2% citric acid, 0.2% lactic acid solution) on chilled chicken were

收稿日期: 2025−06−09

基金项目: 现代农业产业集群创新创业人才项目（YF2024NYRC01）; 广东省重点领域研发计划项目（2023B0202020002）。

作者简介: 李欣怡（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: lixinyi@stu.njau.edu.cn。

*** 通信作者:** 韩敏义（1975−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: myhan@njau.edu.cn。

explored in the current investigation. The results showed that PAW synergistic organic acid treatment effectively inhibited the increase of total viable count (TVC) and coliform population of chilled chickens (P<0.05). It reduced the initial TVC by 0.77~1.21 lg CFU/g and the coliform bacteria count by 0.07~0.57 lg CFU/g. During storage, the PAW synergistic organic acid treatment inhibited the increase of the pH, K value and malondialdehyde content of chilled chickens (P<0.05). In the early stage of storage (0~8 d), PAW synergistic organic acid treatment had not an adverse effect on the color. The synergistic treatment of PAW with organic acid reduced the shear force of the sample, but not significant (P>0.05). Although PAW and organic acid treatment increased the nitrite content of chilled chickens (P<0.05), to a maximum of 21.43 mg/kg, which was still within the safe range and would not cause food safety issues. In conclusion, compared with NaClO treatment, PAW and PAW synergistic organic acids treatment effectively extended the shelf life of chilled chicken by 8 and 12 d, and maintain storage quality. This study could provide a theoretical basis for the application of PAW synergistic organic acids in the preservation of chilled chicken.

Key words: plasma activated water; organic acids; chilled chicken; storage quality; shelf life

2024 年，我国鸡肉产量为 1500 万吨，已成为继美国之后的世界第二大鸡肉生产国[1]。近年来，受“禁活”政策以及疫情影响，冰鲜鸡逐渐成为主流消费趋势[2]。然而，冰鲜鸡本身携带的微生物以及环境中的污染源（设备、人员、空气），在屠宰脱毛、掏膛、分割处理等环节侵入组织，并在运输、销售过程中因温度波动而增殖，从而导致其腐败变质甚至引发食品安全问题，严重威胁消费者身体健康，同时也降低产品品质，严重缩短货架期，造成巨大经济损失，阻碍行业高质量发展[3−4]。目前，主要采用的冷藏、添加次氯酸钠、低温等离子体技术等保鲜方法都存在一定的局限性[5]，例如，次氯酸钠可能与有机物反应生成致癌物，引发食品安全问题[6]；低温等离子体放电过程中产生的部分活性物质会使食物脂质氧化加剧，导致氧化副产物的形成，从而对食品的感官和营养成分产生一定的负面影响、降低消费者对食品的接受度[7−8]。因此，食品行业需要寻求更加绿色、安全、高效的新型抑菌方法，在不损害人体健康的前提下，抑制冰鲜鸡腐败变质、延长货架期、保留冰鲜鸡原有风味特性。

等离子体活化水（Plasma activated water, PAW），是将等离子体发生装置置于水中或水表面进行等离子放电产生[9]。PAW 不仅能有效地杀灭食品中的微生物，还能维持食品本身的品质不受显著性影响，并且具有操作简单、处理时间短、效率高等优点[10]。有机酸主要包括柠檬酸、乳酸、乙酸等，由于其具有良好的杀菌效果且安全系数高，已广泛应用于食品行业[11]。然而，单一的 PAW 或有机酸抑菌效果有限，若将 PAW 与有机酸联合处理，不仅能增强抑菌效果，还能减少二者使用量，降低成本[12]。Wu 等[13] 和 Zhang 等[14] 利用 PAW 与酒石酸联合处理鲜切菠萝及莴苣，可使表面金黄色葡萄球菌分别减少 1.92 和 4.04 lg CFU/g，此外，将 PAW 与柠檬酸联合使用处理鲜切菠萝抑菌效果也明显提高。Qian 等[15] 发现，在相同条件下，0.2% 乳酸与 PAW 联合处理能够使牛肉表面沙门氏菌降低 3.52 lg CFU/g，而单一的 2% 乳酸仅降低 3.45 lg CFU/g。Kang 等[16] 将鼠伤寒沙门氏菌接种于鸡胸肉及鸡腿肉表面，采用 PAW 与乙酸联合处理 10 min，鸡胸肉和鸡腿肉表面沙门氏菌分别减少 0.98 和 1.19 lg CFU/g。Jyung 等[17] 发现有机酸种类不同，协同效果也会表现出差异，甚至不具有协同作用。考虑到乳酸、柠檬酸不仅价格低廉、抑菌效果好且可用于禽类加工，现将同浓度的柠檬酸、乳酸与 PAW 协同处理，探究能否提高对冰鲜鸡表面微生物的杀菌效果，及其对冰鲜鸡贮藏期间品质的影响。

本文采用 PAW、PAW 协同有机酸（乳酸、柠檬酸）对冰鲜鸡进行处理，研究不同处理对冰鲜鸡微生物指标（菌落总数、大肠菌群数）、理化指标（pH、色差、丙二醛、K 值、亚硝酸盐）及品质（剪切力）的影响，为延长冰鲜鸡货架期以及 PAW 协同有机酸作为一种新型杀菌技术提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

冰鲜鸡　品种为鲜妃子凤公鸡，45~50 日龄，宰后时间为预冷后 2 h 获得，新兴县温氏佳丰食品有限公司；微生物菌落总数计数测试片、微生物大肠菌群计数测试片　美国 3M 公司；乳酸、柠檬酸　分析纯，国药集团化学试剂有限公司；高氯酸、氢氧化钾　分析纯，日本 QSSOLUTION 公司；丙二醛含量检测试剂盒　北京索莱宝生物科技有限公司；食品亚硝酸盐含量测定试剂盒　上海百生跃生物科技有限公司。

PAW-2 等离子体活化水设备　苏州屹润食品科技有限公司；SW-CJ-2FD 超净工作台　沪净医疗器械上海有限公司；MS 3 basic 微型漩涡混合仪　德国 IKA 公司；DNP-9162 恒温培养箱　上海甘易仪器设备有限公司；pH-STAR 肉质 pH 值直测仪　德国麦特斯公司；Chroma Meter CR-400 便携式色差仪　日本 Konica Minolta 公司；C-LM3B 数显式肌肉嫩度仪　哈尔滨东北农业大学工程学院；QS-3201 鲜度仪　日本 QSSOLUTION 公司；Infinite200 Pro 多功能酶标仪　瑞士帝肯公司；SYG-A2-4 电热恒温水浴锅　天津市泰斯特仪器有限公司；UV-6100 紫外可见光分光光度计　上海元析有限公司；5810R 高速冷冻离心机、5425R 高速离心机　德国艾本德公司。

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计 本研究共设四个处理组，分别为 NaClO（NaClO 浓度为 0.005%）、等离子体活化水（PAW）、等离子体活化乳酸（plasma activated lactic acid, PALA）、等离子体活化柠檬酸（plasma activated citric acid, PACA）。

1.2.2 活化水制备 分别配制 0.2%（w/v）柠檬酸溶液、0.2% 乳酸溶液（v/v）[15]，将 3L 配制的溶液置于等离子体流射装置中，打开等离子体流射装置，处理 20 min，处理完成后将其置于密闭容器中冷却至室温。考虑到工厂实际生产情况，料液比 1.5∶1 刚好浸没冰鲜鸡且不造成浪费，将整鸡按照该比例于不同处理组中浸泡 15 min 后沥干水分，放入无菌袋中，贮存于 4 ℃ 条件下。

1.2.3 菌落总数及大肠菌群测定 冰鲜鸡样品经不同抑菌剂（NaClO、PAW、PALA、PACA）处理 15 min 后，立即取出装入无菌密封袋中，于 4 ℃ 条件下贮藏 14 d，每隔 2 d 对样品的微生物进行监测。微生物监测采用丁紫璇等[18]的方法，在无菌袋中加入 0.9% 生理盐水，生理盐水与冰鲜鸡质量比为 1∶1，将其置于恒温振荡器振荡 10 min，转速为 300 r/min。对混合液按梯度进行 10 倍稀释，选取合适梯度，吸取 1 mL 稀释液滴加于菌落总数测试片和大肠菌群测试片，并于 37 ℃ 恒温培养箱培养 48 h。

1.2.4 pH 测定 使用便携式 pH 计测量鸡肉的 pH。在测量前，需要使用 pH 分别为 4.01 和 7.00 的校准液对仪器进行校准。将 pH 计探头插入鸡胸肉中心，确保探头插入深度一致，待仪器稳定后读数。

1.2.5 色泽测定 使用色差仪评估不同处理组样品的颜色变化。测量前，仪器用标准白板进行校准，观察角为 2°，选择 C 光源。先用滤纸擦拭冰鲜鸡样品表面水分，将孔径为 8 mm 的探头垂直于样品表面，对冰鲜鸡表皮进行测量。颜色值表示为 L^*（+亮度，−暗度）、a^*（+红色，−绿色）和 b^*（+黄色，−蓝色）。

1.2.6 鲜度值测定 取 0.2 g 鸡胸肉置于 2 mL 微量离心管中并加入 600 μL 高氯酸溶液。用剪刀于 30 s 内快速剪碎样品，再加入氢氧化钾调节样品 pH，使得溶液呈中性。将其静置 5 min 后，取上清液待用。将滤纸固定在电泳槽固定支架上，并将电泳缓冲液均匀喷涂在滤纸上，使滤纸浸透。吸取 5 μL 上清液滴加在滤纸的指定位置上，推进鲜度仪主机内，在 800 V 电压条件下，电泳分离 5 min。结束后取出滤纸放置于干燥箱干燥 2 min。采集影像后，使用 K 值计算软件即可得到 K 值。

1.2.7 丙二醛含量测定 采用丙二醛检测试剂盒测定不同处理组冰鲜鸡样品的丙二醛含量，称取约 0.2 g 鸡胸肉，加入 2 mL 提取液进行冰浴匀浆；于 8000 r/min，4 ℃ 条件下离心 10 min，取上清液进行测定。

1.2.8 亚硝酸盐含量测定 采用亚硝酸盐含量检测试剂盒测定不同处理组冰鲜鸡样品的亚硝酸盐含量，准确称取 0.4 g 鸡胸肉，匀浆，加入 1 mL 提取液一，沸水浴 15 min，冷却至室温后，依次加入 1 mL 提取液二、1 mL 提取液三、2 mg 试剂三，静置 30 min，于 8000 r/min，25 ℃ 条件下离心 20 min，取上清液进行测定。

1.2.9 剪切力测定 取鸡胸肉剔除表面可见脂肪和肌膜，将其修剪成 1 cm×1 cm×3 cm 的肉条，置于蒸煮袋中，于 80 ℃ 的水浴锅中加热 20 min 后取出。利用嫩度计按照垂直于肌纤维方向对样品进行切割，剪切力值单位为（N）。

1.2.10 感官评价 感官评价参考丁紫璇[19]的方法，评价小组由 8 名成员组成，从鸡肉的色泽、气味、表面组织状态及整体接受性四个方面进行评价，评价标准如表 1 所示。

1.3 数据处理

所有样品平行测定 3 次，数据以平均值±标准差表示。双因素方差分析采用 IBM SPSS Statistics 27.0（IBM 公司，美国），利用 Duncan 多重比较对数据的显著性进行分析，显著性水平为 0.05。采用 Origin 2024（Origin Lab 公司，美国）软件绘图。

2 结果与分析

2.1 冰鲜鸡贮藏期内菌落总数和大肠菌群数的变化

从图 1（A）可知，贮藏第 0 d 时，与 NaClO 组相比，冰鲜鸡经 PAW、PALA、PACA 处理后，表面菌落总数差异显著（$P<0.05$）。在贮藏期间，NaClO 组的菌落总数增长最快，并于第 6 d 超出 GB 16869-2005《鲜、冻禽产品》所规定的临界值 6 lg CFU/g，而 PAW、PALA、PACA 处理组仅为 5.68、4.26、3.71 lg CFU/g，远低于 NaClO 组，其中 PACA 处理组抑菌效果最佳。从实验结果可知，PAW、PALA、PACA 处理组分别于第 8、14、14 d 超出临界值。由

表 1 冰鲜鸡肉的感官评分标准

Table 1 Standards for sensory evaluation of chilled chicken

指标	得分标准		
	8~10（分）	5~7（分）	1~4（分）
色泽	色泽正常，有光泽	色泽暗淡，光泽度差	色泽暗淡，无光泽
气味	正常鸡肉气味	鸡肉味淡，微异味	鸡肉味消失，有异味
表面组织状态	外表微干、不粘手	外表干燥、微粘手	粘手
整体接受性	可接受度高	可接受度一般	不可接受

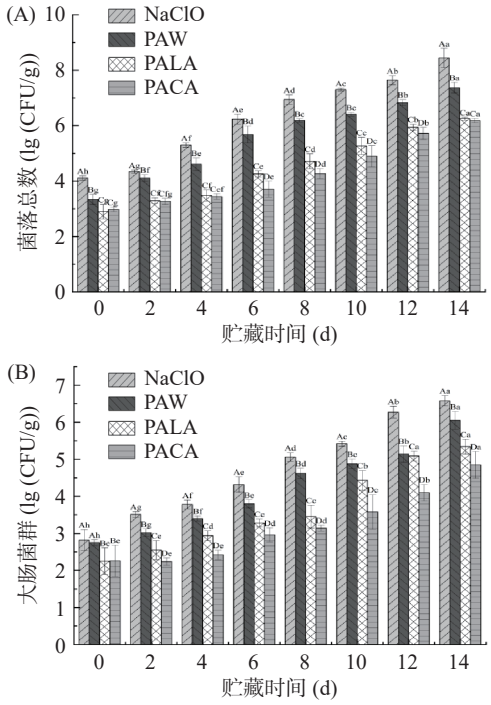


图 1　不同处理组冰鲜鸡贮藏期内菌落总数(A)和大肠菌群(B)的变化

Fig.1　Changes of total viable count (A) and coliforms (B) of chilled chicken with different treatment during storage

注：图中不同大写字母表示同一时间内不同处理组之间差异显著，不同小写字母表示不同时间内同一处理组之间差异显著(P<0.05)，图 2~图 5 同。

此可见，以 NaClO 处理组为对照，PAW 协同有机酸处理能够延长冰鲜鸡货架期。从微生物方面来看，PAW、PALA、PACA 处理能使冰鲜鸡货架期分别延长 2、8、8 d。由图 1(B)可知，第 0 d 时，NaClO 处理组大肠菌群数为 2.82 lg CFU/g，经 PAW 处理后大肠菌群数仅降低 0.07 lg CFU/g，而 PALA、PACA 处理后，大肠菌群数显著降低至 2.25、2.26 lg CFU/g(P<0.05)。随着贮藏时间的延长，PAW、PALA、PACA 处理组对大肠菌群均有良好的抑菌效果，其中 PACA 处理组抑菌效果最佳。研究发现，等离子体活化溶液中的活性氧和活性氮物质具有抑菌作用，氧化应激会降低膜电位，并导致细菌细胞膜破裂，这些物质可以有效抑制肉类在贮藏期间微生物的生长[20]。若将等离子体活化水与有机酸结合，产生的反应性物质可以促进过氧亚硝酸(ONOOH)的形成，ONOOH 与 H_2O_2 进一步相互作用生成过氧硝酸，从而增强抑菌效果[16,21]，这也是 PAW 协同有机酸抑菌效果更佳的主要原因。综上可知，PAW 能有效抑制贮藏期间冰鲜鸡表面菌落总数和大肠菌群数的增长，经有机酸调控后，PACA 处理组抑菌效果最佳。

2.2　冰鲜鸡贮藏期内 pH 的变化

pH 是反映肉品新鲜程度的重要指标之一。如图 2 所示，所有处理组冰鲜鸡样品的 pH 总体上呈先下降后上升的趋势。屠宰后，肉类中的糖类物质分解产生大量乳酸以及 ATP 的降解使得 pH 下降[22]。随着贮藏时间的延长，肉类在内源酶及微生物的作用下，蛋白质分解产生碱性含氮物质导致 pH 上升[23]。与 NaClO 组相比，PAW 协同有机酸处理组 pH 显著(P<0.05)降低，造成该现象的原因是 PAW 协同有机酸溶液中存在大量 HNO_2、HNO_3 等酸性物质，这些酸性物质在抑制腐败微生物的同时也使鸡肉 pH 显著降低[15]。pH 在一定程度上可以反映肉品的腐败程度，当 pH 达到 6.20 时，肉类开始变质，这与菌落总数变化相对应[24]。由此可见，PAW 协同有机酸处理可以有效抑制冰鲜鸡贮藏期间 pH 的上升，延缓变质。

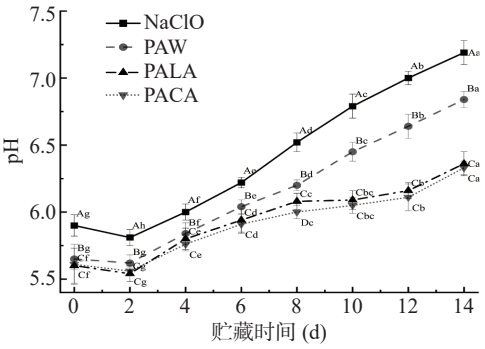


图 2　不同处理组冰鲜鸡贮藏期内 pH 的变化

Fig.2　Changes in pH of chilled chicken with different treatment during storage

2.3　冰鲜鸡贮藏期内色泽的变化

消费者常将肉色与肉品新鲜程度及品质联系在一起，肉色直接决定了消费者的购买意愿。由表 2 可知，不同处理组样品的 L^*值、a^*值与 b^*值在贮藏期的 0~8 d 无显著差异(P>0.05)。在贮藏末期(12~14 d)，PALA、PACA 处理组样品的颜色更加偏黄偏绿，其特征是 b^*值增加、a^*值降低变为负值。PAW 协同有机酸溶液中的 ROS 会使肉中肌红蛋白氧化为高铁肌红蛋白，从而导致鸡肉 a^*值降低[25]。但鸡皮中不含肌红蛋白，故而表皮 a^*值降低与肌红蛋白变化无关。研究表明，溶液中 ROS 等强氧化性物质以及低 pH 对色泽产生不良影响[26-27]。此外，利用有机酸浸泡处理也会造成鸡皮 a^*值降低、b^*值增加[28]。Deumier 等[29] 研究发现，有机酸处理会导致鸡皮颜色变黄变绿，其中乳酸处理后的 b^*值高于柠檬酸处理。Kim 等[30] 的研究也表明乳酸处理会导致鸡翅的 a^*值降低，在贮藏后期 b^*值无显著变化。由此推测样品表皮 a^*值降低可能与溶液性质以及添加有机酸有关。因此，在选择 PAW 协同有机酸溶液作为鸡肉胴体的消毒剂时，不仅要考虑抑菌效果，还要考虑其对表皮颜色的影响。

2.4　冰鲜鸡贮藏期内 K 值的变化

由于肉类在屠宰后三磷酸腺苷(ATP)会逐渐转化为磷酸腺苷(ADP)、腺苷酸(AMP)、肌苷酸(IMP)、次黄嘌呤核苷酸(HxR)以及次黄嘌呤(Hx)，因此常用 ATP 降解化合物的相对比例即 K 值，来预测肉类新鲜程度[31]。由图 3 可知，随着贮藏时间的延长，冰

表 2 不同处理组冰鲜鸡贮藏期内色泽的变化

Table 2 Changes in colour of chilled chicken with different treatment during storage

指标	处理条件	贮藏时间(d)							
		0	2	4	6	8	10	12	14
L^*	NaClO	73.38±0.39^{Aa}	72.93±0.91^{Aa}	72.87±0.33^{Ba}	72.46±0.98^{Aab}	72.29±0.44^{Abc}	70.86±0.82^{Ac}	69.26±0.73^{Ad}	67.55±1.51^{Ae}
	PAW	73.65±0.58^{Aa}	73.25±0.43^{Aa}	73.15±0.64^{Aab}	72.91±0.52^{Aab}	72.42±0.61^{Abc}	71.28±0.51^{Ac}	70.50±1.16^{Ad}	68.58±1.21^{Ae}
	PACA	73.73±0.83^{Aa}	73.4±0.66^{Aa}	73.63±0.60^{Aa}	72.99±0.29^{Aa}	72.49±0.46^{Ab}	71.20±1.04^{Ab}	69.86±1.12^{Ac}	68.73±1.42^{Ad}
	PALA	73.46±0.61^{Aa}	73.6±0.64^{Aa}	73.69±0.52^{Aa}	72.92±0.34^{Aa}	72.52±0.86^{Ab}	71.27±1.20^{Ab}	70.37±1.12^{Ab}	68.65±1.40^{Ac}
a^*	NaClO	1.37±0.21^{Aa}	1.24±0.17^{Aa}	1.32±0.36^{Aa}	1.17±0.12^{Aa}	0.83±0.23^{Ab}	0.74±0.18^{Ab}	0.71±0.15^{Abc}	0.49±0.35^{Ac}
	PAW	1.19±0.08^{Aa}	1.09±0.09^{Aab}	1.04±0.21^{Aab}	1.05±0.18^{Aab}	0.77±0.25^{Ab}	0.71±0.21^{Ab}	0.67±0.19^{Ab}	0.14±0.75^{Ac}
	PACA	1.16±0.35^{Aa}	1.07±0.12^{Aa}	1.05±0.30^{Aa}	1.03±0.14^{Aa}	0.63±0.28^{Aa}	0.11±0.52^{Bb}	−0.87±0.51^{Bc}	−0.88±0.78^{Bc}
	PALA	1.01±0.29^{Aa}	1.10±0.20^{Aa}	1.04±0.11^{Aa}	1.05±0.15^{Aa}	0.56±0.21^{Ab}	0.16±0.53^{Bc}	−0.90±0.36^{Bd}	−1.09±0.56^{Bd}
b^*	NaClO	1.13±0.15^{Aa}	1.20±0.30^{Aa}	1.18±0.21^{Aab}	1.23±0.37^{Aab}	1.26±0.29^{Aab}	1.41±0.24^{Aab}	1.66±0.31^{Aab}	1.70±0.35^{Aab}
	PAW	1.34±0.40^{Ab}	1.32±0.31^{Ab}	1.30±0.27^{Ab}	1.38±0.28^{Aab}	1.42±0.25^{Aab}	1.52±0.32^{Aab}	1.72±0.41^{Aa}	1.78±0.44^{Aa}
	PACA	1.11±0.27^{Ac}	1.26±0.34^{Aab}	1.22±0.24^{Abc}	1.31±0.19^{Aa}	1.35±0.14^{Aa}	1.45±0.29^{Aa}	1.75±0.33^{Aa}	1.81±0.38^{Aa}
	PALA	1.19±0.28^{Ab}	1.25±0.21^{Aab}	1.24±0.17^{Aab}	1.27±0.24^{Aab}	1.39±0.21^{Aa}	1.54±0.24^{Aa}	1.73±0.30^{Aa}	1.82±0.53^{Aa}

注: 表中不同大写字母表示同一时间内不同处理组之间差异显著, 不同小写字母表示不同时间内同一处理组之间差异显著(P<0.05), 表3、表4同。

鲜鸡发生腐败变质, 不同处理组样品的 K 值逐渐增大。贮藏初期(0~2 d), 不同处理组冰鲜鸡样品的 K 值无显著差异(P>0.05)。贮藏至第 6 d 时, 不同处理组冰鲜鸡样品的 K 值差异显著(P<0.05), 这主要是肌苷酸转换为次黄嘌呤和次黄嘌呤苷酸的速度降低导致的[32]。综上可知, 等离子体活化水协同有机酸能够抑制冰鲜鸡 K 值的上升, 有利于贮藏期间冰鲜鸡新鲜度的保持, 其中, PAW 协同有机酸处理抑制效果更佳, PACA 与 PALA 处理组无显著差异(P>0.05), 其次是 PAW 处理组。

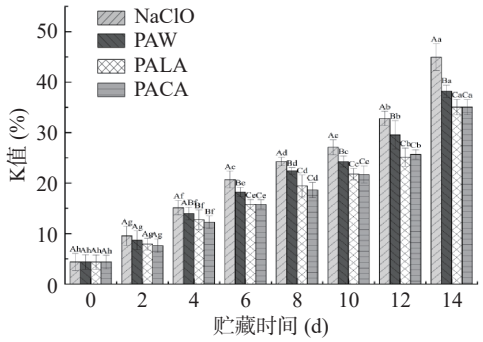


图 3 不同处理组冰鲜鸡贮藏期内 K 值的变化

Fig.3 Changes in K value of chilled chicken with different treatment during storage

2.5 冰鲜鸡贮藏期内丙二醛含量的变化

脂质氧化是导致肉及肉制品产生异味及食用品质下降的主要因素, 并会在贮藏过程中显著加剧[33]。从图 4 可知, 四个处理组中, NaClO 处理组脂质氧化现象最为严重, 从第 0 d 的 0.15 mg/kg 上升至第 14 d 的 1.23 mg/kg。PAW 处理组的 TBARS 含量也在增加, 但增加幅度较小, 从第 0 d 的 0.14 mg/kg 上升至第 14 d 的 0.80 mg/kg; PALA、PACA 处理组在脂质氧化方面都表现出良好的抑制效果, 在整个储藏期间冰鲜鸡样品的 TBARS 值都处于较低水平, 到了贮藏末期, 样品的 TBARS 值分别为 0.70、0.68 mg/kg, 丙二醛含量显著降低(P<0.05)。有相关研究表明, 肉类的 TBARS 值在 0.5~1.0 mg /kg 范围内即发生了脂质氧化[34]。若以 0.50 mg /kg 作为标准, 则 NaClO、PAW、PALA、PACA 处理组分别于第 6、8、12、12 d 超出限值。Qian 等[35] 发现等离子体活化乳酸溶液处理鸡腿肉能够抑制丙二醛含量的增长, 这与本文研究结果一致。研究表明, 等离子体活化溶液能够抑制鸡肉贮藏期间丙二醛含量的增长, 可能与溶液中的 NO 有关。首先, 亚硝酸盐具有抗氧化作用。此外, 虽然游离铁会促进脂质氧化的发生, 但 NO 可与肌红蛋白的 Fe^{2+}结合, 从而减少游离铁的释放来抑制脂质氧化[36–37]。综上可知, PAW、PALA、PACA 处理能够延缓冰鲜鸡脂质氧化。

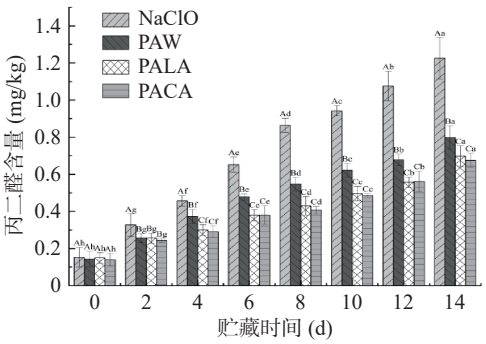


图 4 不同处理组冰鲜鸡贮藏期内丙二醛的变化

Fig.4 Changes in malondialdehyde of chilled chicken with different treatment during storage

2.6 冰鲜鸡贮藏期内亚硝酸盐含量的变化

由于亚硝酸盐在一定条件下可能与肉中的蛋白质反应生成致癌物质且过量摄入亚硝酸盐会引发中毒, 因此, 有必要检测样品的亚硝酸盐含量。从图 5 可知, 冰鲜鸡经等离子体活化溶液处理后, 其表面亚硝酸盐含量显著增加(P<0.05), 但仍低于检出限值, 并不会引发食品安全问题[38]。在贮藏期间, NaClO 处理组冰鲜鸡样品的亚硝酸盐含量逐渐增加, 从 3.69 mg/kg 增加至 4.67 mg/kg。随着微生物的生长繁殖, 硝酸根还原菌及还原酶可将硝酸盐转化为亚硝

酸盐[39]，从而导致亚硝酸盐含量增加。而等离子体活化溶液处理组样品的亚硝酸盐含量逐渐降低，PAW、PALA、PACA 处理组样品的亚硝酸盐含量分别从 18.50、19.63、21.43 mg/kg 分别降至 5.92、7.94、8.04 mg/kg。由于 PAW 及 PAW 协同有机酸溶液中含有大量硝酸盐、亚硝酸盐[40]，经处理后，冰鲜鸡表面难免会有残留，故而造成冰鲜鸡亚硝酸盐含量显著增加（P<0.05）。在亚硝酸盐还原酶的作用下，亚硝酸盐会被还原为 NO，从而导致亚硝酸盐含量降低[41]。

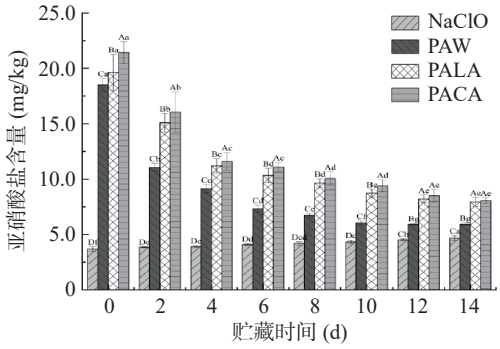


图 5　不同处理组冰鲜鸡贮藏期内亚硝酸盐的变化

Fig.5　Changes in nitrite of chilled chicken with different treatment during storage

2.7　冰鲜鸡贮藏期内剪切力的变化

肌肉嫩度是影响鸡肉品质重要因素之一，影响着消费者的偏好和接受程度，可以通过剪切力的大小来评估。从表 3 可知，随着贮藏时间的延长，不同处理组冰鲜鸡样品的剪切力值呈下降趋势，即冰鲜鸡肉质越嫩。鸡肉在贮藏期间，随着内源性蛋白酶的激活，肌原纤维逐渐降解，肌肉结构松弛，且随着微生物的生长繁殖，肌原纤维降解加剧，从而导致剪切力下降[42]。而 PACA、PALA 能显著抑制微生物生长繁殖、延缓蛋白质组织的降解，从而能较好地维持鸡肉的嫩度。与 NaClO 处理组相比，鸡肉经 PAW、PALA、PACA 处理后，剪切力略有下降，但无显著差异（P>0.05）。研究表明，低浓度的有机酸处理会降低肉品的机械抵抗力并弱化结缔组织，但未对肌肉肌理造成改变，故而 PAW 协同有机酸处理组样品的剪切力无显著变化[43–44]。此外，还与溶液中的 ROS 有关。Wang 等[45] 研究发现，PAW 中的 ROS 能促使氧化应激反应的发生，诱导细胞凋亡，从而改善肉品的嫩度。由此可见，等离子体活化水协同有机酸处理能在一定程度上改善肉类的嫩度。

2.8　冰鲜鸡贮藏期内感官评价的变化

由表 4 可知，不同处理组冰鲜鸡样品在色泽、气味、表面组织状态、整体接受性这四个方面的评分随着贮藏时间的延长呈现降低趋势。在整个贮藏期间，NaClO 组感官评分下降最快，PAW 组下降速度次之，PAW 协同有机酸处理组下降速度最慢。在贮藏

表 3　不同处理组冰鲜鸡贮藏期内剪切力的变化

Table 3　Changes in shear force of chilled chicken with different treatment during storage

指标	处理方式	贮藏时间(d)							
		0	2	4	6	8	10	12	14
剪切力(N)	NaClO	22.87±0.93^{Aa}	19.84±0.70^{Ab}	17.88±1.20^{Ac}	16.64±0.91^{Ad}	15.98±0.90^{Ade}	15.10±0.63^{Aef}	13.72±1.28^{Bf}	12.45±0.85^{Bg}
	PAW	22.63±0.72^{Aa}	19.23±0.65^{Ab}	17.14±0.73^{Ac}	16.16±0.92^{Ad}	15.75±0.58^{Ade}	15.07±0.56^{Aef}	14.55±0.51^{ABf}	13.58±0.60^{Ag}
	PACA	22.42±0.58^{Aa}	19.18±0.91^{Ab}	17.11±0.70^{Ac}	16.01±0.77^{Ad}	15.74±0.39^{Ad}	15.00±0.51^{Ae}	14.80±0.93^{Ae}	13.64±0.71^{Af}
	PALA	22.55±0.88^{Aa}	19.07±1.42^{Ab}	17.13±0.63^{Ac}	15.92±0.75^{Ad}	15.57±0.57^{Ad}	15.05±0.67^{Ade}	14.65±0.63^{ABe}	13.70±0.73^{Af}

表 4　不同处理组冰鲜鸡贮藏期内感官评分的变化

Table 4　Changes in sensory scores of chilled chicken with different treatment during storage

指标	处理方式	贮藏时间(d)							
		0	2	4	6	8	10	12	14
色泽	NaClO	9.67±0.52^{Aa}	9.00±0.89^{Aa}	7.33±0.82^{Bb}	5.33±0.82^{Bc}	4.67±1.03^{Bc}	3.33±0.82^{Cd}	2.33±0.82^{Ce}	1.83±0.98^{Be}
	PAW	9.83±0.41^{Aa}	9.33±0.52^{Aa}	8.00±0.63^{ABb}	7.67±0.52^{Ab}	7.17±0.75^{Ab}	5.33±1.03^{Bc}	3.50±1.05^{Bd}	1.50±0.55^{Be}
	PACA	9.83±0.41^{Aa}	9.17±0.75^{Aab}	8.33±0.52^{Ab}	7.33±0.82^{Ac}	7.33±0.82^{Ac}	7.00±0.89^{Acd}	6.17±0.75^{Ade}	5.50±1.04^{Ae}
	PALA	9.83±0.41^{Aa}	9.17±0.75^{Aa}	8.17±0.41^{Ab}	7.50±0.55^{Abc}	7.67±0.52^{Abc}	7.17±0.75^{Ac}	6.00±0.63^{Ad}	6.17±0.98^{Ad}
气味	NaClO	9.50±0.55^{Aa}	8.33±0.52^{Ab}	5.17±1.17^{Cc}	3.33±0.82^{Cd}	3.00±0.89^{Cd}	2.50±0.55^{Cd}	1.50±0.55^{Ce}	1.00±0.00^{Be}
	PAW	10.00±0.00^{Aa}	9.00±0.63^{Ab}	7.33±0.82^{Bc}	5.33±1.21^{Bd}	4.67±0.82^{Bde}	3.83±0.75^{Be}	3.00±0.63^{Bf}	1.50±0.55^{Bf}
	PACA	10.00±0.00^{Aa}	9.50±0.55^{Aa}	8.67±0.52^{Ab}	8.00±0.63^{Abc}	7.67±0.52^{Ac}	6.00±0.89^{Ad}	5.17±0.75^{Ae}	3.50±0.55^{Ae}
	PALA	10.00±0.00^{Aa}	9.33±0.52^{Aa}	8.50±0.55^{Ab}	8.17±0.75^{Abc}	7.50±0.55^{Ac}	6.17±0.75^{Ad}	5.17±0.75^{Ae}	3.67±0.82^{Ae}
表面组织状态	NaClO	10.00±0.00^{Aa}	9.17±0.75^{Aa}	7.83±0.72^{Bb}	6.17±0.75^{Bc}	4.50±1.05^{Cd}	3.83±0.75^{Cd}	2.50±1.05^{Be}	1.50±0.55^{Cf}
	PAW	10.00±0.00^{Aa}	9.50±0.55^{Aab}	8.83±0.75^{Ab}	7.50±0.55^{Ac}	6.00±0.63^{Bd}	5.17±0.75^{Be}	4.17±0.75^{Af}	3.17±0.55^{Bg}
	PACA	10.00±0.00^{Aa}	9.33±0.52^{Aab}	9.00±0.63^{Ab}	7.67±0.82^{Ac}	7.17±0.75^{Ac}	6.17±0.55^{Ad}	5.16±0.72^{Ae}	4.83±0.75^{Ae}
	PALA	10.00±0.00^{Aa}	9.50±0.55^{Aab}	9.00±0.63^{Ab}	7.83±0.41^{Ac}	6.83±0.75^{ABd}	6.33±0.52^{Ad}	5.17±0.75^{Ae}	4.67±0.82^{Ae}
整体接受性	NaClO	10.00±0.00^{Aa}	8.83±0.75^{Ab}	5.67±0.82^{Bc}	3.83±0.75^{Cd}	3.83±0.72^{Cd}	1.83±0.75^{Ce}	1.33±0.52^{Bef}	1.00±0.00^{Cf}
	PAW	10.00±0.00^{Aa}	8.83±0.75^{Ab}	8.33±0.52^{Ab}	6.83±0.41^{Bc}	5.50±1.05^{Bd}	4.50±1.05^{Be}	4.17±0.75^{Ae}	2.67±0.82^{Bf}
	PACA	10.00±0.00^{Aa}	9.00±0.63^{Ab}	8.83±0.75^{Ab}	7.33±0.82^{ABc}	8.00±0.63^{Ac}	7.17±0.41^{Ac}	5.33±1.03^{Ad}	4.33±0.82^{Ae}
	PALA	10.00±0.00^{Aa}	9.00±0.63^{Ab}	8.67±0.52^{Ab}	7.83±0.75^{Ac}	7.67±0.52^{Ac}	7.17±0.75^{Ac}	5.00±0.89^{Ad}	4.83±0.75^{Ad}

初期(0~2 d),不同组别感官评分无显著差异(P>0.05)。NaClO 组样品在第 4 d 开始出现表面色泽变淡、鸡肉味淡且伴有些许异味现象但仍处于可接受范围内;到了第 6 d 出现异味明显、接触样品表面粘手等现象,处于不可接受状态;其余处理组在第 6 d 仍处于可接受水平。PAW 处理组于第 10 d 达到不可接受状态,PAW 协同有机酸处理组在第 14 d 达到不可接受状态。由于微生物代谢、脂质氧化和降解、蛋白质氧化降解等反应导致鸡肉挥发性成分发生变化,从而导致鸡肉气味发生改变[46],这表明 NaClO 组很可能在第 4 d 就已经开始轻微腐败,而 PAW、PAW 协同有机酸处理具有一定的抑菌效果,故而气味评分降速缓慢。整个贮藏期间,PAW 协同有机酸处理组各个方面的评分最高,表明 PAW 协同有机酸处理能够较好地维持冰鲜鸡的贮藏稳定性。

3 结论

本文以冰鲜鸡为研究对象,探究了 PAW 协同有机酸对冰鲜鸡抑菌效果及贮藏品质的影响。研究结果表明,相较于 NaClO 组,PAW 协同有机酸具有显著抑菌效果(P<0.05)。PAW 协同有机酸处理在延缓 pH 上升、维持冰鲜鸡新鲜度以及抑制脂质氧化方面相比 NaClO 和 PAW 组具有显著提升(P<0.05)。钱婧[26] 的研究也表明,PAW 协同有机酸处理可显著抑制鸡肉 pH 上升并延缓脂质氧化的发生。虽然 PAW 协同有机酸处理在贮藏前期未对肉色造成不良影响,但到了贮藏末期(12~14 d),鸡肉的 a^*值降为负数。此外,PAW 协同有机酸处理能够较好地维持冰鲜鸡的贮藏稳定性,并在一定程度上能够降低鸡肉的剪切力,改善鸡肉嫩度。综合各项指标,PAW、PALA、PACA 处理组的货架期分别从 6 d 延长至 8、12、12 d。本研究结果可为延长肉品货架期及维持贮藏品质提供新的研究思路,为推动 PAW 在食品领域的应用提供一定的理论参考。然而,目前 PAW 协同有机酸在肉制品中的应用鲜有报道,该技术的安全性仍待考察,实际应用仍面临挑战;同时 PAW 协同有机酸的抑菌机理尚不明确,仍待进一步研究。综上所述,PAW 在食品领域中具有较高的研究价值,更多的应用领域还有待进一步开发和研究。

© The Author(s) 2026. 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] 张怡, 吴辰, 黄亚州, 等. 2023 年全球肉鸡生产、贸易及产业经济发展研究[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(3): 328−334. [ZHANG Yi, WU Chen, HUANG Yazhou, et al. Study on global broiler production, trade and industrial economic development in 2023[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2024, 60(3): 328−334.]

[2] 张蒙, 张宝锁. 肉鸡养殖业陷入极限成本竞争 产业安全受影响[J]. 中国禽业导刊, 2023, 40(9): 40−42. [ZHANG Meng, ZHANG Baosuo. Broiler breeding industry is trapped in the extreme cost competition, and the industrial safety will be affected[J]. Guide to Chinese Poultry, 2023, 40(9): 40−42.]

[3] Anonymous. Moving forward on food loss and waste reduction[M]. FAO, ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.

[4] NYCHAS G E, SKANDAMIS P N, TASSOU C C, et al. Meat spoilage during distribution[J]. Meat Science, 2008, 78(1−2): 77−89.

[5] NORTHCUTT J, SMITH D, INGRAM K D, et al. Recovery of bacteria from broiler carcasses after spray washing with acidified electrolyzed water or sodium hypochlorite solutions[J]. Poultry Science, 2007, 86(10): 2239−2244.

[6] DEMIRCAN B, VELIOGLU Y S, GIUFFRÈ A M. Effects of washing with boric acid solutions on residual boric acid content, microbiological load, and quality of fresh-cut spinach[J]. Heliyon, 2024, 10(11): e31974.

[7] 邱月, 王旭骅, 谢雪华, 等. 低温等离子体杀菌对肉品食用品质的影响规律与机制研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(6): 332−340. [QIU Yue, WANG Xuhua, XIE Xuehua, et al. Overview on changes and mechanism of low-temperature plasma sterilization on edible quality of meat products[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(6): 332−340.]

[8] ZHANG Yali, LEI Yang, HUANG Suhong, et al. In-package cold plasma treatment of braised chicken: Voltage effect[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(4): 845−853.

[9] HADINOTO K, RAO N R H, ASTORGA J B, et al. Hybrid plasma discharges for energy-efficient production of plasma-activated water[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 451: 138643.

[10] 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, 77(7): 21−31.

[11] COBAN H B. Organic acids as antimicrobial food agents: Applications and microbial productions[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2020, 43(4): 569−591.

[12] 张静. 有机酸联合等离子体活化水对金黄色葡萄球菌的抑制机理及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [ZHANG Jing. Sterilization mechanism and application of the combination with plasma-activated water and organic acids on *Staphylococcus aureus* [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]

[13] WU Wei, ZHANG Jing, LI Tangjun, et al. Antimicrobial effect of plasma-activated water combined with tartaric acid against *Staphylococcus aureus* and its application on fresh-cut *Asparagus* lettuce[J]. Food Bioscience, 2024, 60: 104293.

[14] ZHANG Jing, HU Zhenyang, CHEN Danying, et al. Inactivation effect of *Staphylococcus aureus* and application on fresh-cut pineapples by plasma-activated tartaric acid[J]. Food Bioscience, 2023, 54: 102789.

[15] QIAN J, ZHUANG H, NASIRU M M, et al. Action of plasma-activated lactic acid on the inactivation of inoculated *Salmonella enteritidis* and quality of beef[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 57: 102196.

[16] KANG T, YIM D, KIM S S, et al. Effect of plasma-activated acetic acid on inactivation of *Salmonella typhimurium* and quality traits on chicken meats[J]. Poultry Science, 2022, 101(5): 101793.

[17] JYUNG S, KANG J W, KANG D H. Inactivation of *Listeria monocytogenes* through the synergistic interaction between plasma-activated water and organic acid[J]. Food Research International, 2023, 167: 112687.

[18] 丁紫璇, 王静文, 胡海静, 等. 基于脉冲光的冰鲜鸡保鲜技术

研究[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(3): 587−594. [DING Zixuan, WANG Jingwen, HU Haijing, et al. Research on chilled chicken wing preservation technology based on pulsed light[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(3): 587−594.]
[19] 丁紫璇. 全谱脉冲光波对冰鲜鸡的保鲜效果研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022. [DING Zixuan. Effect of full-spectrum pulsed light wave on chilled chicken preservation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.]
[20] HUI Teng, FANG Zhengfeng, MA Qianli, et al. Effect of cold atmospheric plasma-assisted curing process on the color, odor, volatile composition, and heterocyclic amines in beef meat roasted by charcoal and superheated steam[J]. Meat Science, 2023, 196: 109046.
[21] MA Mingyu, ZHANG Yanzhe, LÜ Yang, et al. The key reactive species in the bactericidal process of plasma activated water[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(18): 185207.
[22] YU D W, REGENSTEIN J M, ZANG J H, et al. Inhibition of microbial spoilage of grass carp (*Ctenopharyngodon* idellus) fillets with a chitosan-based coating during refrigerated storage[J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 285: 61−68.
[23] KANATT S R. Development of active/intelligent food packaging film containing *Amaranthus* leaf extract for shelf life extension of chicken/fish during chilled storage[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 100506.
[24] SUJIWO J, KIM D, JANG A. Relation among quality traits of chicken breast meat during cold storage: Correlations between freshness traits and torrymeter values[J]. Poultry Science, 2018, 97(8): 2887−2894.
[25] QIAN Jing, YAN Longfei, YING Keqin, et al. Plasma-activated water: A novel frozen meat thawing media for reducing microbial contamination on chicken and improving the characteristics of protein[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131661.
[26] 钱婧. 等离子体活化水对肠炎沙门氏菌的抑菌机制及其在鸡肉保鲜中的应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2023. [QIAN Jing. Bacteriostatic mechanisms of plasma-activated water against *Salmonella enteritidis* and its application in chicken preservation [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2023.]
[27] XU Yingyin, TIAN Ying, MA Ruonan, et al. Effect of plasma activated water on the postharvest quality of button mushrooms, *Agaricus bisporus*[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 436−444.
[28] BILGILI S F, CONNER D E, PINION J L, et al. Broiler skin color as affected by organic acids: Influence of concentration and method of application[J]. Poultry Science, 1998, 77(5): 752−757.
[29] DEUMIER F. Pulsed-vacuum immersion of chicken meat and skin in acid solutions. Effects on mass transfers, colour and microbial quality[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2004, 39(3): 277−286.
[30] KIM C R, MARSHALL D L. Quality evaluation of refrigerated chicken wings treated with organic acids[J]. Journal of Food Quality, 2000, 23(3): 327−335.
[31] ZHUANG Shuai, LI Yan, HONG Hui, et al. Effects of ethyl lauroyl arginate hydrochloride on microbiota, quality and biochemical changes of container-cultured largemouth bass (*Micropterus salmonides*) fillets during storage at 4 ℃[J]. Food Chemistry, 2020, 324: 126886.
[32] 王馨云. 冷藏条件下金枪鱼品质变化与水分迁移的相关性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020. [WANG Xinyun. Correlation analysis between quality changes and water migration of tuna during cold storage[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.]
[33] GADEKAR Y P, JAIRATH G, SONI A, et al. Utilisation of pumpkin seed (*Cucurbita maxima*) as a meat matrix preservative: Influence on colour and lipid stabilities[J]. Meat Science, 2025, 223: 109769.
[34] TARLADGIS B G, WATTS B M, YOUNATHAN M T, et al. A distillation method for the quantitative determination of malonaldehyde in rancid foods[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1960, 37(1): 44−48.
[35] QIAN Jing, WANG Chen, ZHUANG Hong, et al. Evaluation of meat-quality and myofibrillar protein of chicken drumsticks treated with plasma-activated lactic acid as a novel sanitizer[J]. LWT, 2021, 138: 110642.
[36] ZHANG Changyan, LUO Yulong, DENG Ziyao, et al. Recent advances in cold plasma technology for enhancing the safety and quality of meat and meat products: A comprehensive review[J]. Food Research International, 2025, 202: 115701.
[37] PARTHASARATHY D K, BRYAN N S. Sodium nitrite: The "cure" for nitric oxide insufficiency[J]. Meat Science, 2012, 92(3): 274−279.
[38] HONIKEL K O. The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products[J]. Meat Science, 2008, 78(1-2): 68−76.
[39] 邹小欠, 杜传来, 王忻宇, 等. 不同腌制工艺对臭鳜鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 28−35. [ZOU Xiaoqian, DU Chuanlai, WANG Xinyu, et al. Effects of different curing methods on the quality of stinky mandarin fish[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 28−35.]
[40] JUNG S, KIM H J, PARK S, et al. Color developing capacity of plasma-treated water as a source of nitrite for meat curing[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2015, 35(5): 703−706.
[41] MAJOU D, CHRISTIEANS S. Mechanisms of the bactericidal effects of nitrate and nitrite in cured meats[J]. Meat Science, 2018, 145: 273−284.
[42] BU Xinrong, WANG Huihui, WANG Yujiao, et al. Effects of iron-catalyzed oxidation and methemoglobin oxidation systems on endogenous enzyme activity and myofibrillar protein degradation in yak meat[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134647.
[43] STANISŁAWCZYK R, RUDY M, GIL M, et al. The effect of citric acid, NaCl, and $CaCl_2$ on qualitative changes of horse meat in cold storage[J]. Processes, 2020, 8(9): 1099.
[44] 柯志刚, 田玉玲, 刘书来, 等. 等离子体活化水耦合生物保鲜剂对牛肉的保鲜作用[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 20−29. [KE Zhigang, TIAN Yuling, LIU Shulai, et al. Effect of plasma-activated water combined with biological preservatives on beef preservation[J]. Food Science, 2025, 46(2): 20−29.]
[45] WANG Linlin, YU Qunli, HAN Ling, et al. Study on the effect of reactive oxygen species-mediated oxidative stress on the activation of mitochondrial apoptosis and the tenderness of yak meat[J]. Food Chemistry, 2018, 244: 394−402.
[46] BLEICHER J, EBNER E E, BAK K H. Formation and analysis of volatile and odor compounds in meat: A review[J]. Molecules, 2022, 27(19): 6703.