

## 冷等离子体处理对生鲜鸡胸肉杀菌效果及品质影响

程腾<sup>1,2</sup>, 薛冬<sup>1,2</sup>, 郑凯茜<sup>1,2</sup>, 相启森<sup>1,2</sup>, 白艳红<sup>1,2</sup>

(1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院, 郑州 450001;

2. 河南省冷链食品质量与安全控制重点室, 郑州 450001)

**摘要:** **目的** 研究沿面介质阻挡放电 (Surface Dielectric Barrier Discharge, SDBD) 等离子体对生鲜鸡胸肉的杀菌作用及品质影响。**方法** 采用放电功率为 260 W 的 SDBD 等离子体分别处理生鲜鸡胸肉 2 min 和 4 min, 并于 4 °C 贮藏 12 d。每隔 3 d 取样, 测定菌落总数、色泽、pH、汁液流失率、硫代巴比妥酸反应物 (Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS) 含量、挥发性盐基氮 (Total Volatile Basic Nitrogen, TVB-N) 含量及质构特性。**结果** 经 SDBD 等离子体处理 2 min 或 4 min, 并于 4 °C 贮藏 12 d 后, 生鲜鸡胸肉的菌落总数分别为 7.16 lg(CFU/g) 和 6.70 lg(CFU/g), 均低于对照组样品的菌落总数 (7.55 lg(CFU/g))。此外, SDBD 等离子体处理能够显著 ( $P < 0.05$ ) 改善冷藏期间鸡胸肉的品质参数, 如 pH、色泽 ( $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$ )、汁液流失率、TVB-N 含量和质构特性 (硬度、弹性、咀嚼性等), 但对脂质氧化具有促进作用。**结论** SDBD 等离子体对生鲜鸡胸肉具有良好的杀菌效果, 并有效保持了其品质, 在鸡胸肉保鲜上具有巨大的应用前景。

**关键词:** 沿面介质阻挡放电; 鸡胸肉; 微生物失活; 品质指标

中图分类号: S609+3

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2023)13-0084-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.011

### Effect of Cold Plasma Treatment on Microbial Inactivation and Quality Attributes of Fresh Chicken Breasts

CHENG Teng<sup>1,2</sup>, XUE Dong<sup>1,2</sup>, ZHENG Kai-xi<sup>1,2</sup>, XIANG Qi-sen<sup>1,2</sup>, BAI Yan-hong<sup>1,2</sup>

(1. College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou 450001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the effect of surface dielectric barrier discharge (SDBD) plasma treatment on the microbial inactivation and quality attributes of fresh chicken breasts. The chicken breasts samples were treated with SDBD plasma at 260 W for 2 min and 4 min respectively and then stored at 4 °C for up to 12 days. The physicochemical properties of chicken breasts were measured every three days, including the total viable count (TVC), color, pH, drip loss, thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) and total volatile basic nitrogen (TVB-N) as well as textural parameters. After storage at 4 °C for 12 days, the TVC of samples treated with SDBD plasma for 2 min or 4 min increased to 7.16 lg(CFU/g) and 6.70 lg(CFU/g), respectively, lower than the 7.55 lg(CFU/g) of the control samples. In addition, the SDBD plasma treatment also effectively improved the quality attributes of refrigerated chicken breasts, including pH, color ( $L^*$ ,  $a^*$ , and  $b^*$ ), drip loss, TVB-N content, and textural parameters (such as hardness, springiness, and chewiness), but remarkably

收稿日期: 2022-10-11

基金项目: 河南省重大公益专项 (201300110100); 国家自然科学基金 (32072356); 郑州市协同创新专项 (2021ZDPY0201)

作者简介: 程腾 (1991—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品物理杀菌技术。

通信作者: 白艳红 (1975—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为肉制品加工与安全控制。

promoted the lipid oxidation of chicken breasts. In summary, SDBD plasma treatment has good microbial inactivation for fresh chicken breasts and maintains the quality attributes, which has great application prospects in chicken breast preservation.

**KEY WORDS:** surface dielectric barrier discharge (SDBD); chicken breasts; microbial inactivation; quality attributes

肉类营养丰富, 极易在加工、包装、贮藏和运输等过程污染微生物, 主要包括乳酸菌、沙门氏菌 (*Salmonella* spp.)、李斯特菌 (*Listeria* spp.)、假单胞菌 (*Pseudomonas* spp.)、魏斯氏菌 (*Weissella* spp.)、空肠弯曲杆菌 (*Campylobacter* spp.) 等<sup>[1-2]</sup>。微生物不仅导致肉品发生腐败变质, 失去食用价值并造成经济损失, 而且会引发食源性疾病, 严重威胁消费者健康。目前, 主要采用低温冷冻、冰温贮藏、气调包装等技术进行肉品保鲜, 但普遍存在能耗高、品质劣变严重等问题。近年来, 超高压、辐照、冷等离子体、脉冲电场等非热加工技术在肉品保鲜领域的应用受到广泛关注<sup>[3-4]</sup>。

等离子体是一种宏观呈电中性的电离气体, 主要由电子、正离子、负离子、自由基、基态原子或原子团、分子、光子等组成, 被认为是继固态、液态和气态之后物质存在的第 4 种状态。冷等离子体 (Cold Plasma, CP) 是一种新型的食品非热加工技术, 主要通过气体放电产生, 具有处理温度低、处理效率高、能耗低、无二次污染、操作简便等优点。在食品杀菌保鲜、杀虫、降解农药残留和真菌毒素、失活食品内源酶等领域具有广泛的应用前景<sup>[5-8]</sup>。Ulbin-Figlewicz 等<sup>[9]</sup>发现, 经低压冷等离子体 (0.8 MPa, 氦气) 处理 10 min 后, 猪肉表面嗜冷菌、菌落总数和酵母/霉菌总数分别降低了 2.70、2.96 和 3.08 lg(CFU/cm<sup>2</sup>), 同时未对其色泽、pH 等品质指标造成不良影响。王晨等<sup>[10]</sup>发现, 冷等离子体处理能够有效杀灭预包装盐水鸭的鸭胸肉及鸭脖表面微生物, 最多可使货架期从 5~6 d 显著延长至 15 d, 同时能够有效降低产品汁液损失率, 并抑制贮藏期间总色差的升高。这些研究表明, CP 处理可有效防止肉及肉制品的腐败, 并降低食品安全风险, 在肉及肉制品应用上巨大的潜力。目前, 关于 CP 在生鲜肉保鲜领域的应用研究主要集中在生鲜猪肉、牛肉、羊肉等产品<sup>[11-13]</sup>, CP 处理能够抑制微生物的生长, 维持生鲜肉的色泽, 起到保鲜和延长货架期的效果。CP 关于生鲜禽肉杀菌保鲜的应用研究尚不充分。本文以生鲜鸡胸肉为研究对象, 以未经 CP 处理的生鲜鸡胸肉为对照组, 研究沿面介质阻挡放电 (Surface Dielectric Barrier Discharge, SDBD) 等离子体处理不同时间后, 生鲜鸡胸肉在 4 °C 冷藏条件下的微生物生长及品质变化规律; 分析其对鸡胸肉微生物指标、理化指标 (持水力、pH、色泽、硫代巴比妥酸反应物 (Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS)、挥发性盐基氮 (Total Volatile Basic Nitrogen, TVB-N) 等) 和感官品质的影响, 以

期为 CP 技术在生鲜肉保鲜领域的应用提供技术支撑和理论依据。

## 1 实验

### 1.1 材料与试剂

主要材料与试剂: 冷鲜鸡胸肉购于郑州某大型超市, 4 °C 贮藏备用; 平板计数琼脂、营养琼脂和营养肉汤, 北京路桥技术有限责任公司; 硫代巴比妥酸、三氯乙酸、叔丁基羟基茴香醚等均为分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

### 1.2 仪器与设备

主要仪器与设备: SC-80C 型全自动色差仪, 北京康光光学仪器有限公司; PHSJ-3F 型 pH 计, 上海仪电科学仪器有限公司; HX-4M 型拍打式匀浆机, 上海沪析实业有限公司; TA.XT.Plus 型质构分析仪, 英国 Stable Micro System 公司; UV-1800PC 型紫外可见分光光度计, 上海美析仪器有限公司; SW-CJ-1FD 型超净工作台, 苏州安泰空气技术有限公司; TGL-16M 型台式高速冷冻离心机, 上海卢湘仪离心机仪器有限公司; THZ-103B 型恒温培养摇床, 上海一恒科学仪器有限公司; Tecan Spark 20 型多功能微孔板读数仪, 瑞士 Tecan 公司。

## 1.3 方法

### 1.3.1 SDBD 等离子体处理

采用的 SDBD 等离子体装置示意图见图 1。在超净工作台内, 用无菌刀切成尺寸为 2 cm×2 cm×1 cm (4.00 g±0.05 g) 的肉块。将鸡胸肉样品置于 SDBD 等离子体装置进行处理 2 min 或 4 min, 放电功率为 260 W, 以未处理组作为对照。将各组样品置于 4 °C 贮藏 12 d。每 3 d 取样, 测定菌落总数和理化指标。

### 1.3.2 菌落总数测定

处理结束后, 按照 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》测定菌落总数<sup>[14]</sup>, 结果表示为 lg(CFU/g)。

### 1.3.3 色泽测定

参考 Xiang 等<sup>[15]</sup>的方法, 采用 WSC-80C 型全自动色差计测定样品的色差。测定参数为  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值, 每次测定前用比色板对色差计进行校准, 每个样品重复 8 次, 取平均值。通过式 (1) 计算总色差  $\Delta E$ 。

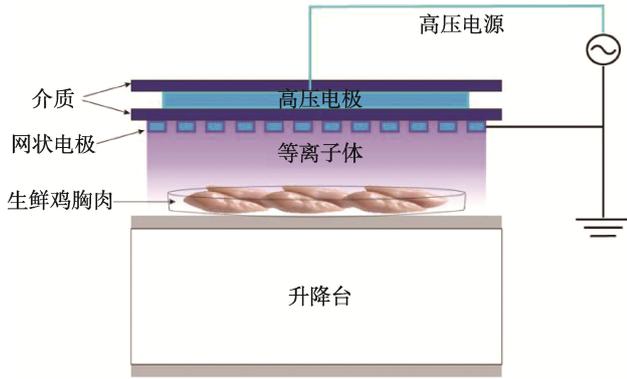


图1 沿面介质阻挡放电装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the surface dielectric barrier discharge plasma system

$$\Delta E = [(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中： $L_0^*$ 、 $a_0^*$ 和 $b_0^*$ 为第0天鸡胸肉样品的色泽参数； $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 为同一鸡胸肉样品经不同处理后的色泽参数。

### 1.3.4 pH的测定

参考 Wang 等<sup>[16]</sup>的方法，将 10 g 样品绞碎后加入蒸馏水至 100 mL，均质，制备样品匀浆液；然后用 pH 计测定（25±1）℃条件下每组样品匀浆液的 pH 值，每个样品测 3 次，结果取平均值。

### 1.3.5 汁液流失率测定

参照 Liu 等<sup>[17]</sup>的方法，将样品分别储藏 0、3、6、9 和 12 d 后取出样品，用吸水纸吸去表面水分后再次称量，每个样品做 3 次平行实验。

$$J = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100\% \quad (2)$$

式中： $J$ 为汁液流失率，%； $m_1$ 为样品的初始质量，g； $m_2$ 为贮藏不同时间后样品的质量，g。

### 1.3.6 脂肪氧化测定

参考 Nam 等<sup>[18]</sup>的方法测定样品的 TBARS 值，取 5 g 样品加入 15 mL 蒸馏水并用均质机（12 000×g）均质 10 s；从中取出 1 mL 均质液置于 25 mL 比色管中，加入 50 μL 质量分数为 7.2%的叔丁基羟基苯酚（Butylated Hydroxyanisole, BHA）溶液、2 mL 的硫代巴比妥酸（Thiobarbituric Acid, TBA）和三氯乙酸（Trichloroacetic Acid, TCA）的混合液（含浓度为 20 mmol/L 的 TBA 与质量分数为 15%的 TCA 溶液），涡旋混匀后在 90℃水浴中反应 15 min；随后冷却、离心（2 000×g，10 min），取上清并使用紫外分光光度计读取其在 532 nm 处的吸光度。相同条件下使用 1 mL 的蒸馏水代替样品作为空白对照，每组做 3 个平行实验，取平均值。TBARS 值（ $T$ ）表示为冷鲜鸡胸肉中的丙二醛含量（mg/kg），计算式见式（3）。

$$T = (A_{532S} - A_{532C}) \times 5.88 \quad (3)$$

### 1.3.7 挥发性盐基氮含量测定

参考 Wang 等<sup>[16]</sup>的方法测定样品的 TVB-N 含量。将不同贮藏时间和不同处理组的样品绞碎，之后称取 10.0 g 样品并置于锥形瓶中，加入 75 mL 去离子水搅拌均匀并振摇，使试样在样液中分散均匀，浸渍 30 min。采用自动凯式定氮仪法测定 TVB-N 含量，每组样品做 3 个平行实验。

### 1.3.8 质构分析

采用 TA-XT plus 质构仪对样品（2 cm×2 cm）进行测试<sup>[17]</sup>，使用直径为 50 mm 的圆柱形探头（P50）测试。测试前速为 10 mm/s、测中速度为 2 mm/s、测后速度为 5 mm/s，压缩样品高度为 3 mm，时间为 5 s，触发类型为自动，触发力为 5 g。每个样品重复 8 次<sup>[19]</sup>。

### 1.3.9 数据分析

每次均重复 3 次，实验结果表示为平均值±标准差。采用 Prism 软件（Graphpad 7.0）绘图，采用 SPSS 24.0 进行单因素方差分析（One-Way ANOVA），采用 LSD 多重比较进行显著性分析（ $P < 0.05$ ）。

## 2 结果与分析

### 2.1 SDBD 等离子体对鸡胸肉的杀菌效果

菌落总数是反映肉的腐败程度的重要指标。一般认为生鲜畜禽肉中微生物的限量标准为 6 lg(CFU/g)。由图 2 可知，随着贮藏时间的延长，各处理组鸡胸肉菌落总数逐渐升高。经在 4℃贮藏 6 和 12 d 后，对照组样品菌落总数由初始的(4.01±0.25) lg(CFU/g)升高至(6.00±0.65) lg(CFU/g)和(7.62±0.31) lg(CFU/g)。与对照组相比，SDBD 等离子体处理组样品菌落总数明显降低。经 SDBD 等离子体处理 2 min 和 4 min 并于 4℃贮藏后，样品中菌落总数分别为(3.62±0.25) lg(CFU/g)和(3.53±0.25) lg(CFU/g)（图 2）。这可能是因为 CP 处理过程中会产生臭氧和氮氧化物等活性氧物质<sup>[20]</sup>。活性氧与细胞膜发生反应，或者通过细胞膜的扩散进入细胞，胞内成分被破坏，从而导致细胞死亡<sup>[21]</sup>。以上结果表明，SDBD 等离子体处理能够有效抑制贮藏过程中鸡胸肉中微生物的生长繁殖，这与杜曼婷等<sup>[13]</sup>报道的 CP 对羊肉的杀菌效果随处理时间的延长而逐渐增强相一致。这可能是因为处理时间的延长会使等离子体中的活性氧、活性氮等活性物质的浓度增加<sup>[22]</sup>。Fröhling 等<sup>[23]</sup>也发现，经微波放电等离子体处理并于 5℃贮藏 20 d 后，猪肉中菌落总数为 2.05~2.08 lg(CFU/g)，显著低于对照组样品中的菌落总数 9.69 lg(CFU/g)。此外，其他非热加工技术也逐渐应用于生鲜肉保鲜领域，Kruk 等<sup>[24]</sup>采用超高压技术处理鸡胸肉 5 min，在 450 MPa 和 600 MPa 的压力下沙门氏菌和大肠杆菌等致病菌几乎被消除，但是较高的

压力导致色泽劣变, 肉的硬度、咀嚼性等质构特性显著降低。

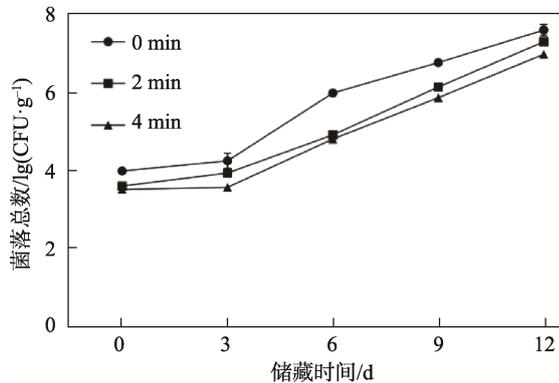


图 2 SDBD 等离子体处理对贮藏过程中鸡胸肉菌落总数的影响

Fig.2 Effect of SDBD plasma treatment on the total viable count of chicken breasts during storage

## 2.2 SDBD 等离子体处理对鸡胸肉色泽的影响

色泽是评价肉品质指标的之一, 直接影响到消费者对肉品的购买意向。 $a^*$ 值代表红度值,  $b^*$ 值代表黄度值,  $L^*$ 值代表亮度值。鸡胸肉在贮藏过程中, 由于氧化的作用, 肌红蛋白会生成高铁肌红蛋白, 导致  $a^*$ 值和  $L^*$ 值下降, 另外一些生化反应, 比如微生物分

泌的水溶性或脂溶性色素也会导致  $L^*$ 值下降。由表 1 可知, 所有鸡胸肉样品在贮藏期间的  $L^*$ 值、 $a^*$ 值均逐渐降低, 在贮藏第 12 天, 测得处理组的  $L^*$ 值显著高于对照组的,  $a^*$ 值无显著差异 ( $P>0.05$ )。鸡胸肉的  $b^*$ 值在贮藏期间持续上升, 这可能是因为鸡胸肉的脂肪氧化程度加深<sup>[25]</sup>。在贮藏第 12 天, 处理组样品的  $b^*$ 值显著低于对照组的, 说明 SDBD 等离子体处理有利于维持鸡胸肉的黄度值。经放电功率为 260 W 的 SDBD 等离子体处理 2 min 和 4 min 后, 与对照组相比, 处理组鸡胸肉的  $a^*$ 值分别降低了 1.39 和 2.62。这可能是因为 CP 处理过程中产生的活性物质如过氧化氢与肌红蛋白反应, 导致  $a^*$ 值降低。同样地, Luo 等<sup>[26]</sup>也发现 DBD 等离子体处理导致猪肉的  $a^*$ 值显著下降。此外, Moutiq 等<sup>[27]</sup>认为 CP 处理肉品的色泽变化可能是因为等离子体电极温度的升高, 这导致样品温度升高 5~6 °C。鸡肉的肌肉和脂肪结构非常敏感, 更容易氧化变色, 因此, 在 CP 处理过程中, 通过冷却电极来防止样品温度升高, 对保持肉品色泽非常重要。

总色差 ( $\Delta E$ ) 是表示生鲜鸡胸肉在不同时间的色差参数。鸡胸肉在冷藏期间  $\Delta E$  值的变化如表 1 所示。各组样品鸡胸肉  $\Delta E$  值在贮藏期间持续升高。在贮藏 12 d 后, 对照组样品的  $\Delta E$  值最高, 为 (13.57±0.73)。SDBD 等离子体处理后样品的  $\Delta E$  值显著低于对照组的 ( $P<0.05$ )。以上结果表明, SDBD 等离子体处理能够较好地保持鸡胸肉的色泽。

表 1 不同处理组生鲜鸡胸肉在贮藏期间的色泽变化

Tab.1 Changes in color characteristics of chicken breasts in each group during storage

色泽参数	处理时间/min	贮藏时间/d				
		0	3	6	9	12
$L^*$ 值	0	57.61±0.94 <sup>Aa</sup>	52.92±1.59 <sup>Bb</sup>	48.30±0.52 <sup>Cc</sup>	46.08±0.84 <sup>Bd</sup>	45.49±0.47 <sup>Cd</sup>
	2	57.62±1.19 <sup>Aa</sup>	54.58±0.61 <sup>Ab</sup>	50.64±1.15 <sup>Bc</sup>	49.82±1.00 <sup>Ac</sup>	47.82±0.66 <sup>Bd</sup>
	4	58.13±1.51 <sup>Aa</sup>	55.57±1.16 <sup>Ab</sup>	52.57±0.64 <sup>Ac</sup>	51.56±0.72 <sup>Ac</sup>	50.89±0.22 <sup>Ac</sup>
$a^*$ 值	0	8.31±0.86 <sup>Aa</sup>	5.01±0.69 <sup>Ab</sup>	4.36±0.43 <sup>Ab</sup>	3.91±0.62 <sup>Ab</sup>	3.87±0.34 <sup>Ab</sup>
	2	6.92±1.76 <sup>Ba</sup>	3.70±0.55 <sup>Bb</sup>	3.46±0.43 <sup>Ab</sup>	3.49±0.35 <sup>Ab</sup>	3.41±0.31 <sup>Ab</sup>
	4	5.69±1.02 <sup>Ca</sup>	3.94±0.86 <sup>Bb</sup>	3.61±0.55 <sup>Ab</sup>	3.67±0.51 <sup>Ab</sup>	3.61±0.45 <sup>Ab</sup>
$b^*$ 值	0	8.65±0.65 <sup>Ac</sup>	10.31±0.84 <sup>Ab</sup>	11.54±1.03 <sup>Aab</sup>	11.87±0.89 <sup>Aab</sup>	12.85±0.46 <sup>Aa</sup>
	2	8.26±1.15 <sup>Ac</sup>	9.74±0.34 <sup>Ab</sup>	10.86±0.38 <sup>ABab</sup>	11.07±0.44 <sup>Aa</sup>	11.00±0.48 <sup>Bab</sup>
	4	7.68±0.34 <sup>Ac</sup>	8.89±1.04 <sup>Abc</sup>	9.68±0.92 <sup>Bab</sup>	10.56±1.02 <sup>Aab</sup>	10.92±0.66 <sup>Ba</sup>
$\Delta E$	0		5.96±0.70 <sup>Ac</sup>	10.51±0.71 <sup>Ab</sup>	12.75±0.36 <sup>Aa</sup>	13.57±0.73 <sup>Aa</sup>
	2		4.67±1.56 <sup>Bc</sup>	8.22±1.53 <sup>Bb</sup>	8.98±1.58 <sup>Bb</sup>	10.76±1.68 <sup>Ba</sup>
	4		3.33±0.81 <sup>Cb</sup>	6.26±1.15 <sup>Ca</sup>	7.45±1.16 <sup>Ca</sup>	8.20±1.44 <sup>Ca</sup>

注: 结果用平均值±标准差表示 ( $n=8$ ); 经 LSD 检验, 同一列的不同大写字母 (A—C) 表示随处理时间的不同质构参数的平均值有显著性差异 ( $P<0.05$ ), 同一行的不同小写字母 (a—c) 表示随贮藏时间的不同质构参数的平均值有显著性差异 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 SDBD 等离子体处理对鸡胸肉 pH 的影响

pH 是判断肉品质和新鲜程度的重要指标之一。由图 3 可知, 鸡胸肉的初始 pH 值为 ( $5.33\pm 0.08$ )。随着贮藏时间的延长, 鸡胸肉样品的 pH 逐渐升高, 并在第 12 天升高至 ( $7.55\pm 0.53$ )。鸡胸肉样品 pH 的变化规律与图 3 中菌落总数的变化相一致。贮藏过程中, 在微生物的作用下, 鸡胸肉样品中的氨基酸和蛋白质发生分解, 并生成氨、胺类等碱性物质, 从而造成 pH 值升高<sup>[28]</sup>。与对照组相比, 贮藏过程中 SDBD 等离子体处理样品的 pH 值均显著降低 ( $P<0.05$ )。经放电功率为 260 W 的 SDBD 等离子体处理 2 min 或 4 min, 并于 4 °C 贮藏 12 d 后, 处理组鸡胸肉的 pH 分别升高至 ( $6.77\pm 0.53$ ) 和 ( $6.55\pm 0.53$ )。上述结果与 Fröhling 等<sup>[23]</sup>的报道一致。Fröhling 等发现, 经于 5 °C 贮藏 20 d 后, 生鲜猪肉的 pH 值由初始的 5.6 升高至 6.0, 而微波放电冷等离子体处理猪肉的 pH 在贮藏过程中未发生显著变化。经放电功率为 260 W 的 SDBD 等离子体处理 2 min 或 4 min 后, 与对照组相比, 处理组鸡胸肉的 pH 值分别降低了 0.10 和 0.16。这可能是因为 CP 处理过程中产生了大量氮氧化物, 其中氮氧化物与肌肉表面的水反应形成浓度较低的硝酸和亚硝酸<sup>[29]</sup>。

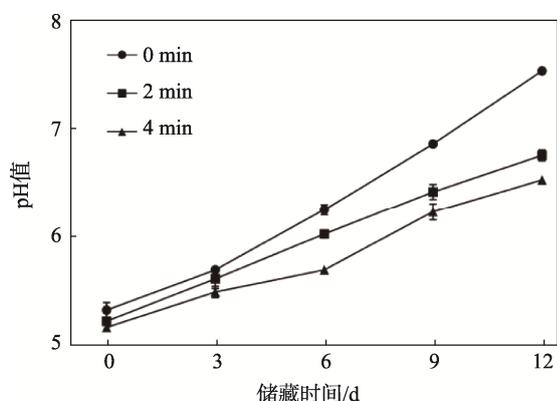


图 3 贮藏过程中鸡胸肉 pH 的变化规律  
Fig.3 Changes in the pH values of chicken breasts during storage

### 2.4 SDBD 等离子体处理对鸡胸肉汁液流失率的影响

持水力是评价鲜肉与肉制品品质的重要指标之一。持水力影响冷鲜肉的嫩度、色泽、多汁性、蒸煮损失和风味等品质指标<sup>[30]</sup>, 常用汁液流失率来评价肉品的持水性。由图 4 可知, 鸡胸肉的汁液流失率随贮藏时间的延长而逐渐升高。SDBD 等离子体处理鸡胸肉后于 4 °C 贮藏 12 d, 对照组的鸡胸肉样品的汁液流失率为 ( $7.60\pm 1.38$ )%, 显著高于初始的 ( $2.64\pm 0.66$ )%

( $P<0.05$ )。与对照组相比, SDBD 等离子体处理能够显著抑制贮藏过程中汁液流失率的升高。经放电功率为 260 W 的 SDBD 等离子体处理 2 min 或 4 min 并于 4 °C 贮藏 12 d 后, 鸡胸肉样品的汁液流失率分别为 ( $6.35\pm 1.38$ )% 和 ( $4.85\pm 1.38$ )%, 均低于对照组样品。经放电功率为 260 W 的 SDBD 等离子体处理 2 min 或 4 min 后, 与对照组相比, 处理组鸡胸肉的汁液流失率分别降低了 1.29% 和 0.92%。这可能是因为肉的 pH 值降低, 当 pH 值达到主要蛋白质的等电点, 如肌球蛋白, 蛋白质上的正负电荷数量基本相等, 正负基团相互吸引, 导致蛋白质所能吸收和保持的水量减少。此外, 鸡胸肉表面蛋白质的变性也会导致肌肉的汁液流失率下降<sup>[31]</sup>。然而, Moutiq 等<sup>[27]</sup>采用介质阻挡放电等离子体处理包装袋内的鸡胸肉 3 min, 发现鸡胸肉的持水力未发生显著变化 ( $P>0.05$ ), 但该研究未评价贮藏过程中鸡胸肉样品持水力的变化情况。CP 处理对改善肉品冷藏过程中持水力的作用机制尚不明确, 有待今后进一步深入研究探讨。

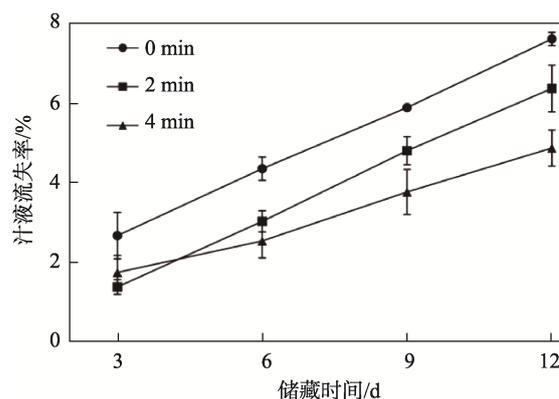


图 4 贮藏过程中鸡胸肉液流失率的变化规律  
Fig.4 Changes in the drip loss of chicken breasts during storage

### 2.5 SDBD 等离子体处理对鸡胸肉 TBARS 含量的影响

研究证实脂质氧化是肉类加工过程中引起品质劣变的主要因素。如图 5 所示, 随贮藏时间的延长, 各组鸡胸肉样品的 TBARS 含量逐渐升高。SDBD 等离子体处理鸡胸肉后于 4 °C 贮藏 12 d, 对照组的鸡胸肉样品的 TBARS 含量由初始的 ( $0.17\pm 0.05$ ) mg/kg 升高至 ( $1.22\pm 0.14$ ) mg/kg。与对照组相比, SDBD 等离子体处理造成鸡胸肉样品 TBARS 含量显著升高。经放电功率为 260 W 的 SDBD 等离子体处理 2 min 或 4 min, 并于 4 °C 贮藏 12 d 后, 鸡胸肉样品的 TBARS 含量分别升高至 ( $1.32\pm 0.14$ ) mg/kg 和 ( $1.49\pm 0.14$ ) mg/kg。经放电功率为 260 W 的 SDBD 等离子体处理 2 min

或 4 min 后, 与对照组相比, 处理组鸡胸肉 TBARS 含量分别升高了 0.06 mg/kg 和 0.10 mg/kg。类似结果在生鲜猪肉、牛肉、羊肉等中已有报道<sup>[32-33]</sup>。岑南香等<sup>[33]</sup>也发现, 冷等离子体处理能够促进生鲜羊肉发生脂质氧化, 且 TBARS 值随冷等离子体处理时间延长、处理电压升高和处理后放置时间延长而逐渐升高。与牛肉、猪肉等红肉相比, CP 处理鸡胸肉脂质氧化程度较小, 这可能是因为鸡胸肉的脂肪含量较低<sup>[34]</sup>。Lee 等<sup>[35]</sup>使用 24 kV 的 DBD 等离子体处理水煮鸡胸肉 3 min, 结果发现, 在 4 °C 贮藏期间, 处理组鸡胸肉的 TBARS 值与对照组相比无显著差异。沿面介质阻挡放电所产生的等离子体富含活性氧、活性氮等活性物质, 能够诱导鸡胸肉发生脂质氧化, 进而造成 TBARS 含量升高<sup>[32-33]</sup>。因此, 在今后的研究中, 应通过优化处理工艺、添加抗氧化剂等方法抑制 CP 处理造成的肉品脂质氧化, 避免 CP 处理对肉品品质造成不良影响。

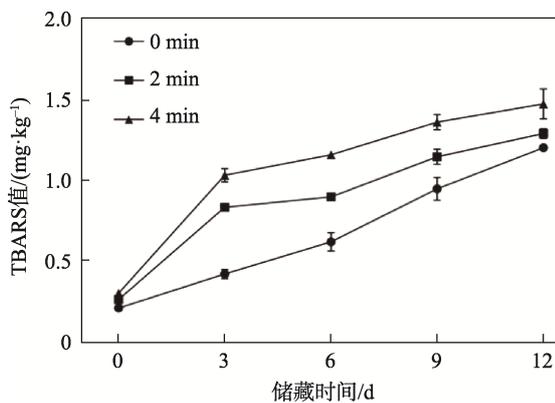


图 5 贮藏过程中鸡胸肉 TBARS 含量的变化规律

Fig.5 Changes in the TBARS contents of chicken breasts during storage

## 2.6 SDBD 等离子体处理对鸡胸肉 TVB-N 含量的影响

TVB-N 是评价肉质新鲜度的重要指标。如图 6 所示, 各组鸡胸肉样品的 TVB-N 含量随贮藏时间的延长而逐渐升高。在 4 °C 贮藏 12 d 后, 对照组样品的 TVB-N 含量由初始的 (10.94±0.34) mg/kg 升高至 (72.73±12.16) mg/kg。在贮藏过程中, 微生物的作用下, 肉和肉制品中的蛋白质、核酸等发生分解并产生氨和胺类物质(如二甲胺、三甲胺、腐胺和尸胺等), 进而造成 TVB-N 含量升高<sup>[36]</sup>。由图 6 可知, 经放电功率为 260 W 的 SDBD 等离子体处理 2 min 或 4 min, 并于 4 °C 贮藏 12 d 后, 鸡胸肉样品的 TVB-N 含量分别为 (55.71±12.16) mg/kg 和 (49.16±12.16) mg/kg, 均显著低于对照组样品。以上结果表明, SDBD 等离子体处理能够有效抑制贮藏过程中鸡胸肉样品

TVB-N 含量显著升高并延长其货架期。这可能与 SDBD 等离子体的杀菌作用有关。翟国臻等<sup>[37]</sup>也发现空气、氮气和氩气滑动弧放电等离子体能够有效杀灭冷鲜猪肉表面微生物, 并抑制贮藏过程中 TVB-N 含量的升高。

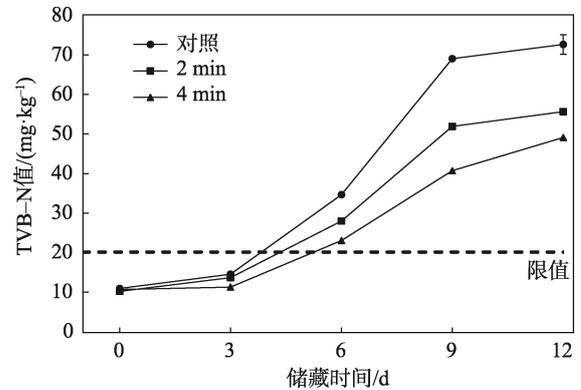


图 6 贮藏过程中鸡胸肉 TVB-N 含量的变化规律

Fig.6 Changes in TVB-N contents of chicken breasts during storage

## 2.7 SDBD 等离子体处理对鸡胸肉质构特性的影响

肉品的质构是其主要的感官指标之一, 直接关系到嫩度、口感、可食性等食用品质。由表 2 可知, 在贮藏过程中, 鸡胸肉的硬度、弹性、咀嚼性及回弹力均呈下降趋势, 且处理组样品整体优于对照组样品。这可能由于对照组微生物迅速增加, 破坏了鸡胸肉的结构, 导致鸡胸肉的品质下降。硬度的下降可能是由于肌肉在内源性蛋白酶和微生物的作用下, 肌原纤维结构变得松软<sup>[38]</sup>, 致使鸡胸肉硬度降低。处理组样品的硬度下降速度较缓, 从第 3 天开始显著高于对照组 ( $P<0.05$ )。弹性能够反映样品在一定时间内恢复形变的能力。Alamprese 等<sup>[39]</sup>认为产品自身的含水率对其弹性的影响比较明显, 在特定条件下, 产品的含水率越高, 弹性越大, 因此鸡胸肉的汁液损失率增加, 持水性下降, 弹性呈下降趋势。由表 2 可以看出, 鸡胸肉的弹性随着时间的延长呈下降趋势, 且 SDBD 等离子体处理组样品优于对照组样品, 这与鸡胸肉的汁液损失率趋势保持一致。经放电功率为 260 W 的 SDBD 等离子体处理 2 min 和 4 min 后, 与对照组相比, 处理组鸡胸肉的硬度、弹性及回弹力无显著变化。类似地, Lee 等<sup>[40]</sup>研究发现 DBD 等离子体处理对鸡胸肉质构的变化无显著影响。Royintarat 等<sup>[41]</sup>使用超声和等离子体活化水协同处理鸡肉, 发现其质构无显著变化, 这可能是由于超声系统的耗散能量较低, 不足以改变肌肉特性。

表2 不同处理组鸡胸肉在储藏期间的质构变化  
Tab.2 Changes in textural parameters of chicken breasts in each group during storage

质构参数	处理时间/min	贮藏时间/d				
		0	3	6	9	12
硬度/g	0	1 614.43±99.32 <sup>Aa</sup>	1 111.04±68.78 <sup>Cb</sup>	822.70±63.33 <sup>Cc</sup>	404.47±59.26 <sup>Cd</sup>	196.61±43.45 <sup>Ce</sup>
	2	1 660.65±85.37 <sup>Aa</sup>	1 236.35±115.70 <sup>Bb</sup>	969.77±76.63 <sup>Bc</sup>	660.02±70.06 <sup>Bc</sup>	390.56±45.65 <sup>Bd</sup>
	4	1 650.39±158.28 <sup>Aa</sup>	1 310.85±197.25 <sup>Ab</sup>	1 167.81±331.71 <sup>Ac</sup>	834.65±89.25 <sup>Ac</sup>	502.94±54.82 <sup>Ac</sup>
弹性/%	0	0.95±0.03 <sup>Aa</sup>	0.93±0.02 <sup>Bab</sup>	0.90±0.02 <sup>Bbc</sup>	0.89±0.03 <sup>Bcd</sup>	0.86±0.01 <sup>Ad</sup>
	2	0.93±0.04 <sup>Aa</sup>	0.92±0.01 <sup>Ba</sup>	0.94±0.01 <sup>Aa</sup>	0.91±0.01 <sup>ABa</sup>	0.91±0.01 <sup>Aa</sup>
	4	0.96±0.03 <sup>Aa</sup>	0.97±0.01 <sup>Aa</sup>	0.95±0.01 <sup>Aa</sup>	0.93±0.01 <sup>Ab</sup>	0.92±0.01 <sup>Ab</sup>
咀嚼性	0	1 375.10±98.89 <sup>Aa</sup>	787.17±65.65 <sup>Bb</sup>	246.64±44.78 <sup>Cc</sup>	175.06±45.22 <sup>Ccd</sup>	132.25±20.89 <sup>Bd</sup>
	2	1 214.67±77.25 <sup>Bc</sup>	895.57±22.16 <sup>Ab</sup>	435.20±39.79 <sup>Bab</sup>	362.52±68.20 <sup>Ba</sup>	318.02±72.95 <sup>Aab</sup>
	4	1 151.18±75.73 <sup>Cc</sup>	945.52±49.34 <sup>Abc</sup>	517.68±25.44 <sup>Aab</sup>	615.43±98.48 <sup>Aab</sup>	388.57±56.70 <sup>Aa</sup>
回弹力/%	0	0.63±0.07 <sup>Aa</sup>	0.44±0.02 <sup>Bb</sup>	0.28±0.04 <sup>Cbc</sup>	0.23±0.03 <sup>Ccd</sup>	0.20±0.04 <sup>Cd</sup>
	2	0.59±0.04 <sup>Aa</sup>	0.55±0.07 <sup>Aa</sup>	0.43±0.02 <sup>Bb</sup>	0.35±0.02 <sup>Bc</sup>	0.32±0.05 <sup>Bc</sup>
	4	0.58±0.03 <sup>Aa</sup>	0.59±0.06 <sup>Aa</sup>	0.54±0.09 <sup>Aab</sup>	0.49±0.03 <sup>Abc</sup>	0.41±0.03 <sup>Ac</sup>

注：结果用平均值±标准差表示（ $n=8$ ）；经 LSD 检验，同一列的不同大写字母（A—C）表示随处理时间的不同质构参数的平均值有显著性差异（ $P<0.05$ ），同一行的不同小写字母（a—c）表示随贮藏时间的不同质构参数的平均值有显著性差异（ $P<0.05$ ）。

### 3 结语

本研究评价了 SDBD 等离子体对生鲜鸡胸肉的杀菌作用及品质影响。结果表明，SDBD 等离子体能够有效抑制冷藏过程中微生物的生长繁殖，同时能够有效保持冷藏期间鸡胸肉的 pH、色泽和质构特性，并抑制汁液流失率和 TVB-N 含量的升高，但会促进脂质氧化。综合分析，SDBD 等离子体不仅可应用于生鲜禽肉的杀菌保鲜，同时在其他生鲜肉产品安全及品质控制方面也具有巨大的应用潜力。在今后的工作中，应研发适用于肉品保鲜处理的等离子体设备，推动其产业化应用；同时还应重点研究 CP 处理对肉品中脂肪组分等的影响，严格控制处理条件，将脂质氧化控制在可接受范围内。此外，可将 CP 技术与其他技术（冷藏、保鲜剂等）协同使用，在有效杀灭微生物的同时，避免对食品品质造成不良影响。

#### 参考文献：

- [1] HEREDIA N, GARCIA S. Animals as Sources of Food-Borne Pathogens: A Review[J]. *Animal Nutrition*, 2018, 4(3): 250-255.
- [2] LUONG N D M, COROLLER L, ZAGOREC M, et al. Spoilage of Chilled Fresh Meat Products during Storage: A Quantitative Analysis of Literature Data[J]. *Microorganisms*, 2020, 8(8): 1198.
- [3] LI Hui, SUN Xiao-hong, LIAO Xiao-jun, et al. Control

of Pathogenic and Spoilage Bacteria in Meat and Meat Products by High Pressure: Challenges and Future Perspectives[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(6): 3476-3500.

- [4] ROSARIO D K A, RODRIGUES B L, BERNARDES P C, et al. Principles and Applications of Non-Thermal Technologies and Alternative Chemical Compounds in Meat and Fish[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(7): 116-1183.
- [5] BIRANIA S, ATTKAN A K, KUMAR S, et al. Cold Plasma in Food Processing and Preservation: A Review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 45(9): 14110.
- [6] UCAR Y, CEYLAN Z, DURMUS M, et al. Application of Cold Plasma Technology in the Food Industry and Its Combination with Other Emerging Technologies[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114: 355-371.
- [7] ZHANG Ya-li, LEI Yang, HUANG Su-hong, et al. In-Package Cold Plasma Treatment of Braised Chicken: Voltage Effect[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022(4): 845-853.
- [8] 相启森, 董闪闪, 郑凯茜, 等. 大气压冷等离子体在食品农药残留和真菌毒素控制领域的应用研究进展[J]. *轻工学报*, 2022, 37(3): 1-9.
- XIANG Qi-sen, DONG Shan-shan, ZHENG Kai-xi, et al. Research Progress in the Application of Atmospheric

- Pressure Cold Plasma in the Control of Pesticide Residues and Mycotoxins in Food[J]. *Journal of Light Industry*, 2022, 37(3): 1-9.
- [9] ULBIN-FIGLEWICZ N, BRYCHCY E, JARMOLUK A. Effect of Low-Pressure Cold Plasma on Surface Microflora of Meat and Quality Attributes[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(2): 1228-1232.
- [10] 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 Xiao-wei, et al. Effect of Low Temperature Plasma Cold Sterilization on Shelf Life and Flavor Quality of Salted Duck[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(17): 70-77.
- [11] ULBIN-FIGLEWICZ N, JARMOLUK A. Effect of Low-Pressure Plasma Treatment on the Color and Oxidative Stability of Raw Pork During Refrigerated Storage[J]. *Food Science and Technology International*, 2016, 22(4): 313-324.
- [12] JADHAV H B, ANNAPURE U. Consequences of Non-Thermal Cold Plasma Treatment on Meat and Dairy Lipids – A Review[J]. *Future Foods*, 2021, 4: 100095.
- [13] 杜曼婷, 黄俐, 高梦丽, 等. 介质阻挡放电低温等离子体处理对宰后羊肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(21): 87-92.
- DU Man-ting, HUANG Li, GAO Meng-li, et al. Effect of Dielectric Barrier Discharge Low Temperature Plasma Treatment on Lamb Meat Quality[J]. *Food Science*, 2022, 43(21): 87-92.
- [14] 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[S].
- GB 4789.2—2016, National food Safety Standard -- Food Microbiological Examination -- Aerobic Plate Count[S].
- [15] XIANG Q S, ZHANG R, FAN L M, et al. Microbial Inactivation and Quality of Grapes Treated by Plasma-Activated Water Combined with Mild Heat[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 126: 109336.
- [16] WANG W W, ZHAO D B, XIANG Q S, et al. Effect of Cinnamon Essential Oil Nanoemulsions on Microbiological Safety and Quality Properties of Chicken Breast Fillets during Refrigerated Storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 152: 112376.
- [17] LIU Fei, CHANG Wei, CHEN Mao-shen, et al. Tailoring Physicochemical Properties of Chitosan Films and Their Protective Effects on Meat by Varying Drying Temperature[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 212: 150-159.
- [18] NAM K C, LEE E J, AHN D U, et al. Dose-Dependent Changes of Chemical Attributes in Irradiated Sausages[J]. *Meat Science*, 2011, 88(1): 184-188.
- [19] SORO A B, WHYTE P, BOLTON D J, et al. Application of a LED-UV Based Light Technology for Decontamination of Chicken Breast Fillets: Impact on Microbiota and Quality Attributes[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 145: 111297.
- [20] HÄHNEL M, WOEDTKE T V, WELTMANN K D. Influence of the Air Humidity on the Reduction of Bacillus Spores in a Defined Environment at Atmospheric Pressure Using a Dielectric Barrier Surface Discharge[J]. *Plasma Processes & Polymers*, 2010, 7(3/4): 244-249.
- [21] ZIUZINA D, PATIL S, CULLEN P J, et al. Atmospheric Cold Plasma Inactivation of Escherichia Coli in Liquid Media Inside a Sealed Package[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2013, 114(3): 778-787.
- [22] WANG Li-yun, XIA Chuan-kai, GUO Ya-jun, et al. Bactericidal Efficacy of Cold Atmospheric Plasma Treatment Against Multidrug-Resistant Pseudomonas Aeruginosa[J]. *Future Microbiology*, 2020, 15: 115-125.
- [23] FRÖHLING A, DUREK J, SCHNABEL U, et al. Indirect Plasma Treatment of Fresh Pork: Decontamination Efficiency and Effects on Quality Attributes[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 16: 381-390.
- [24] KRUK Z A, YUN H, RUTLEY D L, et al. The Effect of High Pressure on Microbial Population, Meat Quality and Sensory Characteristics of Chicken Breast Fillet[J]. *Food Control*, 2011, 22(1): 6-12.
- [25] BEN FADHEL Y, LEROY V, DUSSAULT D, et al. Combined Effects of Marinating and  $\Gamma$ -Irradiation in Ensuring Safety, Protection of Nutritional Value and Increase in Shelf-Life of Ready-to-Cook Meat for Immunocompromised Patients[J]. *Meat Science*, 2016, 118: 43-51.
- [26] LUO J, XU W, LIU Q, et al. Dielectric Barrier Discharge Cold Plasma Treatment of Pork Loin: Effects on Muscle Physicochemical Properties and Emulsifying Properties of Pork Myofibrillar Protein[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 162: 113484.
- [27] MOUTIQ R, MISRA N N, MENDONÇA A, et al. In-Package Decontamination of Chicken Breast Using Cold Plasma Technology: Microbial, Quality and Storage Studies[J]. *Meat Science*, 2020, 159: 107942.
- [28] MARCINKOWSKA-LESIAK M, ZDANOWSKA-

- SASIADEK Z, STELMASIAK A, et al. Effect of Packaging Method and Cold-Storage Time on Chicken Meat Quality[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2016, 14(1): 41-46.
- [29] MAHNOT N K, MAHANTA C L, KEENER K M, et al. Strategy to Achieve a 5-Log Salmonella Inactivation in Tender Coconut Water Using High Voltage Atmospheric Cold Plasma (HVACP)[J]. *Food Chemistry*, 2019, 284: 303-311.
- [30] CHENG Qiao-fen, SUN Da-wen. Factors Affecting the Water Holding Capacity of Red Meat Products: A Review of Recent Research Advances[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2008, 48(2): 137-159.
- [31] HUFF-LONERGAN E, LONERGAN S M. Mechanisms of Water-Holding Capacity of Meat: The Role of Post-mortem Biochemical and Structural Changes[J]. *Meat Science*, 2005, 71(1): 194-204.
- [32] XIANG Qi-sen, LIU Xiu-fang, LI Jun-guang, et al. Influences of Cold Atmospheric Plasma on Microbial Safety, Physicochemical and Sensorial Qualities of Meat Products[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(3): 846-857.
- [33] 岑南香, 刘宸成, 陈姑, 等. 低温等离子体处理对羊肉脂质与蛋白质氧化性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(14): 85-93.
- CEN Nan-xiang, LIU Chen-cheng, CHEN Gu, et al. Effects of Cold Plasma Treatments on Lipids and Protein Oxidation Properties of Mutton[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(14): 85-93.
- [34] GAVAHIAN M, CHU Y H, MOUSAVI K A, et al. A Critical Analysis of the Cold Plasma Induced Lipid Oxidation in Foods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 77: 32-41.
- [35] LEE E S, CHEIGH C I, KANG J H, et al. Evaluation of in-Package Atmospheric Dielectric Barrier Discharge Cold Plasma Treatment as an Intervention Technology for Decontaminating Bulk Ready-To-Eat Chicken Breast Cubes in Plastic Containers[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18): 6301.
- [36] BEKHIT A E D A, HOLMAN B W B, GITERU S G, et al. Total Volatile Basic Nitrogen (TVB-N) and Its Role in Meat Spoilage: A Review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 280-302.
- [37] 翟国臻, 李佳, 郭杉杉, 等. 滑动弧放电等离子体处理对冷鲜猪肉保鲜的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(1): 189-197.
- ZHAI Guo-zhen, LI Jia, GUO Shan-shan, et al. Effect of Gliding Arc Discharge Plasma Treatment on the Preservation Effect of Cold Fresh Pork[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(1): 189-197.
- [38] 田晓静, 文绍山, 申晓蓉, 等. 基于质地特性的鸡肉新鲜度研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(17): 63-66.
- TIAN Xiao-jing, WEN Shao-shan, SHEN Xiao-rong, et al. Study on Freshness of Chicken Based on Texture Characteristics[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(17): 63-66.
- [39] ALAMPRESE C, FONGARO L, CASIRAGHI E. Effect of Fresh Pork Meat Conditioning on Quality Characteristics of Salami[J]. *Meat Science*, 2016, 119: 193-198.
- [40] LEE H, YONG H I, KIM H J, et al. Evaluation of the Microbiological Safety, Quality Changes, and Genotoxicity of Chicken Breast Treated with Flexible Thin-Layer Dielectric Barrier Discharge Plasma[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2016, 25(4): 1189-1195.
- [41] ROYINTARAT T, CHOI E H, BOONYAWAN D, et al. Chemical-Free and Synergistic Interaction of Ultrasound Combined with Plasma-Activated Water (PAW) to Enhance Microbial Inactivation in Chicken Meat and Skin[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1559.

责任编辑: 曾钰婵