

低温等离子体处理对羊肉脂质与蛋白质氧化性质的影响

岑南香, 刘宸成, 陈 姑, 桑晓涵, 符婉丽, 刘雅夫, 王佳媚

Effects of Cold Plasma Treatments on Lipids and Protein Oxidation Properties of Mutton

CEN Nanxiang, LIU Chencheng, CHEN Gu, SANG Xiaohan, FU Wanli, LIU Yafu, and WANG Jiamei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021100306>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

羊肉冷藏期间蛋白与脂质氧化及风味变化分析

Analysis of Change of Protein and Lipid Oxidation and Flavor in Mutton during Refrigeration Storage

食品工业科技. 2021, 42(19): 36–42

低温等离子体杀菌工艺的优化及其对梨汁品质和抗氧化活性的影响

Optimization of processing parameters of low temperature plasma sterilization and its effect on quality and oxidation resistance of pear juice

食品工业科技. 2018, 39(9): 212–216,221

水煮牛肉冷藏期间脂质和蛋白质氧化与质构特性变化

Changes of Lipid Oxidation, Protein Oxidation and Texture Properties in Braised Beef during Chilled Storage

食品工业科技. 2018, 39(17): 79–83,88

水产品贮藏加工中的蛋白质氧化对其结构性质及品质的影响研究进展

Effects of Protein Oxidation on the Structural Properties and Quality of Aquatic Products during Storage and Processing

食品工业科技. 2019, 40(18): 319–325,333

宰后不同冷却方式对羊肉品质的影响

Effects of Different Cooling Methods on Quality of Mutton after Slaughter

食品工业科技. 2020, 41(7): 261–264,270

低温等离子体杀灭食源性致病菌的研究进展

Research Progress of Cold Plasma in Killing Foodborne Pathogens

食品工业科技. 2021, 42(6): 363–370,382



关注微信公众号，获得更多资讯信息

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021100306

CEN Nanxiang, LIU Chencheng, 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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021100306

· 研究与探讨 ·

低温等离子体处理对羊肉脂质与蛋白质氧化性质的影响

岑南香, 刘宸成, 陈姑, 桑晓涵, 符婉丽, 刘雅夫, 王佳媚*

(海南大学食品科学与工程学院, 海南海口 570228)

摘要:以新鲜羊肉为研究对象, 通过测定羊肉色差、pH、TBARS 值、羰基含量、总巯基含量和蛋白表面疏水性, 分析不同低温等离子体处理条件(处理时间、处理电压、处理次数、处理后放置时间)对羊肉色泽、脂质及蛋白质氧化的影响。结果表明:采用低温等离子体处理使羊肉的 L^* 值升高, a^* 值和 b^* 值下降, 处理电压超过 50 kV 后, a^* 值下降显著($P<0.05$), 但各处理组之间的总色差值(ΔE)无显著差异($P>0.05$); TBARS 值、羰基含量、表面疏水性随处理时间延长、处理电压升高和处理后放置时间延长而逐渐升高, 处理时间达到 5 min 时, 羊肉 TBARS 值升至 0.215 mg/kg, 而 pH 和总巯基含量则呈相反变化趋势;当累计处理时间固定(3 min), 处理次数从 1 增加至 4, 羊肉 TBARS 值、羰基含量、表面疏水性呈下降趋势, 而 pH 和总巯基含量升高。综上, 低温等离子体处理未能显著影响羊肉色泽, 但促进了羊肉中脂质和蛋白质氧化。

关键词: 羊肉, 低温等离子体, 脂质氧化, 蛋白质氧化, 品质

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)14-0085-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021100306

本文网刊:



Effects of Cold Plasma Treatments on Lipids and Protein Oxidation Properties of Mutton

CEN Nanxiang, LIU Chencheng, CHEN Gu, SANG Xiaohan, FU Wanli, LIU Yafu, WANG Jiamei*

(College of Food Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: With fresh mutton as the research object, the effects of different cold plasma treatment conditions (treatment time, treatment voltage, treatment times, post-storage time after treatment) on mutton were studied by measuring mutton chromatism, pH value, thiobarbituric acid-reactive substances (TBARS) value, carbonyl content, total sulphydryl content, and protein surface hydrophobicity. The results showed that cold plasma treatment increased L^* value, and decreased a^* value and b^* value of mutton. When the treatment voltage exceeded 50 kV, the a^* value decreased significantly ($P<0.05$), but the total color (ΔE) difference between the treatment groups had no significant difference ($P>0.05$). TBARS value, carbonyl content and surface hydrophobicity were increased gradually with the extension of treatment time, treatment voltage and storage time after treatment. When the treatment time was as long as 5 min, TBARS value of mutton was increased to 0.215 mg/kg, the pH value and total sulphydryl content of mutton showed the opposite trend. When total treatment time was fixed (3 min), with the increase of treatment times, TBARS value, carbonyl content, and surface hydrophobicity of mutton were decreased, while pH value and total sulphydryl content were increased. Therefore, cold plasma treatment could not affect the color significantly. However it promoted the oxidation of both lipids and protein in mutton.

Key words: mutton; cold plasma; lipids oxidation; protein oxidation; quality

收稿日期: 2021-11-01

作者简介: 岑南香 (1999-), 女, 本科, 研究方向: 食品安全, E-mail: 2063089093@qq.com。

* 通信作者: 王佳媚 (1984-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品安全, E-mail: jiamei2029@163.com。

羊肉是日常生活中常食用的红肉之一, 羊肉风味独特、肉质细嫩、味道鲜美, 具有高蛋白、低脂肪、低胆固醇等特点, 是不饱和脂肪酸的良好来源, 且富含人体所必需的氨基酸和微量元素, 营营养价值高^[1], 深受消费者喜爱。近年来, 随着城市化的发展, 羊肉的生产基地与消费市场相隔较远, 羊肉的运输与贮藏保鲜成为问题^[2]。目前羊肉贮藏保鲜的方法主要有冷藏(0~4℃)、冻藏(-18℃以下)、冰温保鲜、微冻保鲜、气调包装保鲜技术^[3]、添加抗氧化剂、精油保鲜等。

低温等离子体(atmospheric cold plasma, ACP)是一种新兴的非热杀菌技术, 具有处理温度低、抗菌特性好、营养破坏少、作用后无残留、能最大限度地保持原有的感官特性、无毒副产品以及成本低等优点^[4], 使其在多种食品杀菌中得到广泛应用。Stratakos 等^[5]研究表明, 牛肉经低温等离子体处理后, 大肠杆菌数量显著减少, 且杀菌时间影响杀菌效果。Dirks 等^[6]研究表明, 低温等离子体对鸡胸肉和鸡腿皮肤表面的微生物具有显著的抑制作用, 可将微生物总数降低一个对数周期。Jayasena 等^[7]研究表明, 经低温等离子体处理后, 猪肉和牛肉的 L^* 值无显著变化 ($P>0.05$), a^* 值显著降低 ($P<0.05$)。低温等离子体能有效杀死肉类表面的微生物, 但对其味道、颜色、气味、风味及可接受性等感官参数存在一定的影响。因此, 优化处理参数, 控制处理条件, 有效控制低温等离子体处理对肉品品质所造成的影响, 是应用研究的重要内容之一。目前, 低温等离子体在牛肉^[8]、猪肉^[9]、鸡胸肉^[10-11]、鸭肉^[12]等畜禽肉中有较多应用研究, 而羊肉中的研究相对较少。

肉类在贮藏过程中都不可避免地发生氧化反应, 肉类氧化变质主要是由脂质氧化和蛋白质氧化及二者之间存在的交互氧化作用引起的^[13]。评价畜禽肉脂质氧化的常用指标有硫代巴比妥酸反应物值(TBARS)、过氧化值(POV)、酸价(AV)等, 反映蛋白质氧化的指标有羰基含量、总巯基含量、活性巯基含量、表面疏水性、二硫键含量等。另外, 色泽和 pH 也常用作评价肉类氧化变质的指标。本研究从脂质氧化和蛋白质氧化出发, 探讨不同低温等离子体处理条件对羊肉色泽、pH、TBARS 值、羰基含量、总巯基含量和蛋白表面疏水性的影响, 为推动低温等离子体在羊肉贮藏保鲜技术中的应用提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜本地黑山羊后腿肉 购于海南海口市沿江三农贸市场; 尿素、氯化钾、乙酸乙酯、无水乙醇、HCl 西陇科学股份有限公司; 氯化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、SDS、溴酚蓝 广东广试试剂科技有限公司; 2-硫代巴比妥酸、三氯乙酸、2,4-二硝基苯肼、盐酸胍、DTNB、乙二胺四乙酸二钠 国药集团

化学试剂有限公司; 总蛋白定量测试盒(BCA 法) 南京建成生物工程研究所。

PHS-25 pH 计 奥维实验仪器有限公司; MAP-H360 型复合气调包装机 苏州森瑞保鲜设备有限公司; 低温等离子体发生器 美国 Phoenix 公司; PL303 电子分析天平 美国梅特勒-托利多公司; 722G 紫外-可见分光光度计 北京普析通用仪器有限公司; HH-4 数显恒温水浴锅 常州澳华仪器有限公司; CR-10 色差计 日本 Konica Minolta 公司; 高速分散机、制冰机 中外合资广州柯尼塔电器有限公司; TGL-16MS 型台式高速冷冻离心机 上海卢湘仪离心机仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 新鲜羊肉剔除多余脂肪和结缔组织, 称取大小基本一致的羊肉块(10 g 左右), 用色差仪测量色差后将其放入塑料包装盒中, 用包装机进行空气密封包装后进行如下处理: A 处理时间: 在 70 kV 条件下分别处理 0、1、2、3、4、5 min; B 处理电压: 在 40、50、60、70、80 kV 电压条件下处理 3 min; C 处理次数: 在 70 kV 条件下分别处理 0 次、1 次(180 s)、2 次(每次 90 s, 间隔时间 30 s)、3 次(每次 60 s, 间隔时间 30 s)、4 次(每次 45 s, 间隔时间 30 s), 累计处理时间均为 3 min。D 处理后放置时间: 在 70 kV 条件下处理 3 min 后在 4℃ 放置 0、24 h。打开包装测定相关指标, 未经低温等离子体处理的样品包装后放置相同时间取样。

1.2.2 色差测定 色差仪用标准白板校正后, 测定样品处理前后表面色差值, 记录其亮度值(L^*)、红度值(a^*)及黄度值(b^*), 分别在待测样品上取 5 个测量点, 结果取平均值。总色差值 ΔE 的计算公式^[14] 为:

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad \text{式 (1)}$$

式中: L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 为未包装处理前的色差值; L^* 、 a^* 、 b^* 为处理后的色差值。

1.2.3 pH 的测定 根据 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》进行测定。

1.2.4 TBARS 含量的测定 根据 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》进行测定。

1.2.5 肌原纤维蛋白提取 参考文献 [15] 中的方法并作适当改进。称取 5 g 羊肉糜于 25 mL PBS 缓冲液中匀浆 4 次, 每次 10 s, 均质机转速为 10000 r/min, 每次转完冰一会。均质完离心(10000 r/min, 4℃, 10 min), 倒掉上清液, 沉淀用 PBS 缓冲液洗 3 次后加入 20 mL 0.6 mol/L NaCl 的 PBS 缓冲液, 均质, 放入 4℃ 冰箱提取 18 h 后再次离心(10000 r/min, 4℃, 10 min), 所得膏状沉淀即为肌原纤维蛋白, 肌原纤维蛋白浓度用试剂盒进行测定。

1.2.6 羰基含量的测定 参考黄倩等^[16]的方法并作适当改进。用 0.6 mol/L NaCl 的 PBS 缓冲液将蛋白

浓度调整为 2 mg/mL, 取 0.5 mL 稀释过后的蛋白溶液, 加入 0.5 mL 2 mol/L HCl 溶液(含 0.01 mol/L 2,4-二硝基苯肼), 空白组(用 0.6 mol/L NaCl PBS 缓冲液代替蛋白)加入 0.5 mL 2 mol/L HCl 溶液(不含 2,4-二硝基苯肼), 混匀后在 25 ℃ 下反应 1 h, 再加入 0.5 mL 三氯乙酸(质量分数 20%), 混匀后离心(4 ℃, 12000 r/min, 10 min), 弃上清后, 用 1 mL 乙醇乙酸乙酯溶液(1:1, v/v)对沉淀洗涤 3 次, 洗完后用 1.5 mL 6 mol/L 盐酸胍溶液对蛋白溶液进行悬浮, 并在 37 ℃ 条件下水浴保温 15 min 溶解沉淀, 再将反应液在 12000 r/min、4 ℃ 下离心 15 min 除去不溶物质, 以空白组为对照, 测定吸光度值(波长为 370 nm), 计算公式如下:

$$\text{羰基含哩 (nmol/mg)} = \frac{A \times n \times 10^6}{\varepsilon \times \rho} \quad \text{式 (2)}$$

式中: A 为 370 nm 波长处的吸光度; n 为稀释倍数; ε 为摩尔吸光系数 22000(L·mol⁻¹·cm⁻¹); ρ 为蛋白质量浓度(mg/mL)。

1.2.7 总巯基含量的测定 参考徐红艳等^[17]的方法并作适当改进。用 0.6 mol/L NaCl 的 PBS 缓冲液将蛋白浓度调整为 2 mg/mL, 取 0.5 mL 稀释后的蛋白溶液依次加入 2 mL 尿素-十二烷基硫酸钠溶液(含 8.0 mol/L 尿素, 30 g/L SDS, 0.1 mol/L 磷酸钠缓冲液, pH7.4)和 0.5 mL 10 mmol/L DTNB 试剂(溶解在 0.1 mol/L 磷酸钠缓冲液中, pH7.4), 在室温下反应 15 min, 取上清液在 412 nm 下测定吸光值。用 0.6 mol/L NaCl 的 PBS 缓冲液代替蛋白液用于空白对照。计算公式如下:

$$\text{总巯基含量 (nmol/mg)} = \frac{A \times n \times 10^6}{\varepsilon \times \rho} \quad \text{式 (3)}$$

式中: A 为 412 nm 波长处的吸光度; n 为稀释倍数; ε 为摩尔吸光系数 11400(L·mol⁻¹·cm⁻¹); ρ 为蛋白质量浓度(mg/mL)。

1.2.8 表面疏水性的测定 参考黄倩等^[16]的方法并作适当改进。用 0.6 mol/L NaCl 的 PBS 缓冲液将蛋白浓度调整为 2 mg/mL, 取 1 mL 稀释后份蛋白溶液, 加入 200 μ L 1 mg/mL 溴酚蓝溶液后进行离心处理(6000 r/min, 15 min), 并对上清液进行 10 倍稀释, 以 0.6 mol/L NaCl 的 PBS 缓冲液为空白对照, 测定吸光度值(波长为 595 nm)。以溴酚蓝结合量来表示表面疏水性, 计算公式如下:

$$\text{溴酚蓝结合量} (\mu\text{g}) = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 200 \quad \text{式 (4)}$$

式中: A_1 为空白对照组溴酚蓝吸光值; A_2 为样品吸光值。

1.3 数据处理

每个试验重复四次。采用 Microsoft Office Excel 2016 进行处理, 结果用平均值±标准差表示。采用 Origin 2021 软件作图, DPS 18.10 软件对数据进行单因素方差分析, Duncan 新复极差法进行差异显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 低温等离子体处理对羊肉色泽的影响

色泽是影响肉制品的重要感官参数之一^[18], 不仅能反映肉的新鲜程度, 而且对深加工制品的品质优劣起着重要作用^[2]。羊肉色泽主要受肌红蛋白的影响^[19]。如表 1 所示, 不同低温等离子体处理条件均使羊肉的亮度值 L^* 升高, 红度值 a^* 和黄度值 b^* 下降, 各处理组间的总色差值 ΔE 无显著差异($P>0.05$)。当处理电压超过 50 kV, a^* 值下降显著($P<0.05$), 低

表 1 低温等离子体处理对羊肉色泽的影响

Table 1 Effect of cold plasma treatment on the color of mutton

处理条件	L^*		a^*		b^*		ΔE	
	处理前	处理后	处理前	处理后	处理前	处理后		
处理时间(min)	1	36.1±2.55 ^a	36.3±2.05 ^a	14.6±0.35 ^a	11.8±1.63 ^a	10.6±0.35 ^a	9.5±0.00 ^b	3.0±2.00 ^a
	2	31.6±0.28 ^b	35.0±1.48 ^a	13.4±1.63 ^a	8.8±0.07 ^b	9.5±0.78 ^a	8.3±0.35 ^a	6.1±0.42 ^a
	3	39.6±0.21 ^a	40.6±4.67 ^a	15.0±1.06 ^a	9.9±0.35 ^b	11.4±0.00 ^a	9.0±1.48 ^a	6.5±2.26 ^a
	4	36.9±3.75 ^a	37.7±0.50 ^a	12.6±3.04 ^a	8.2±0.14 ^a	9.5±0.50 ^a	9.2±0.42 ^a	5.4±3.18 ^a
	5	36.1±0.21 ^a	39.4±2.55 ^a	13.4±1.48 ^a	6.4±0.14 ^b	9.5±0.14 ^a	8.0±0.50 ^b	8.0±2.26 ^a
	40	36.4±1.41 ^a	39.3±2.47 ^a	13.1±0.64 ^a	10.4±2.20 ^a	8.5±0.07 ^a	8.4±0.71 ^a	4.2±4.45 ^a
处理电压(kV)	50	37.6±2.83 ^a	39.0±2.26 ^a	15.4±4.24 ^a	10.5±0.28 ^a	10.4±1.63 ^a	9.6±1.63 ^a	5.6±4.53 ^a
	60	33.3±1.77 ^a	36.4±2.12 ^a	13.4±1.06 ^a	8.5±0.21 ^b	9.1±1.56 ^a	7.8±0.64 ^a	5.9±1.48 ^a
	70	39.6±0.21 ^a	40.6±4.67 ^a	15.0±1.06 ^a	9.9±0.35 ^b	11.4±0.00 ^a	9.0±1.48 ^a	6.5±2.26 ^a
	80	38.0±2.33 ^a	39.4±2.33 ^a	15.6±0.92 ^a	9.4±0.85 ^b	11.1±1.34 ^a	8.5±0.28 ^a	6.8±2.05 ^a
	1	39.6±0.21 ^a	40.6±4.67 ^a	15.0±1.06 ^a	9.9±0.35 ^b	11.4±0.00 ^a	9.0±1.48 ^a	6.5±2.26 ^a
	2	36.1±0.50 ^b	38.6±0.14 ^a	15.6±3.18 ^a	8.2±1.56 ^b	10.4±1.06 ^a	8.4±0.78 ^a	8.1±4.88 ^a
处理次数	3	37.5±3.82 ^a	39.3±1.27 ^a	13.1±1.20 ^a	7.9±0.07 ^b	9.6±1.06 ^a	8.8±0.71 ^a	5.9±0.42 ^a
	4	42.0±5.94 ^a	42.4±5.80 ^a	12.8±3.25 ^a	7.6±1.06 ^a	10.6±0.28 ^a	9.2±0.50 ^b	5.6±1.91 ^a
	0	39.6±0.21 ^a	40.6±4.67 ^a	15.0±1.06 ^a	9.9±0.35 ^b	11.4±0.00 ^a	9.0±1.48 ^a	6.5±2.26 ^a
	24	40.7±0.14 ^a	41.4±0.64 ^a	14.7±1.41 ^a	11.7±0.78 ^a	11.8±1.06 ^a	10.5±1.77 ^a	3.4±0.78 ^a

注: 处理前后字母不同表示差异显著($P<0.05$); 最后一列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

温等离子体处理过程中产生的自由基能将肌红蛋白血红素辅基中心的 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} , 高铁肌红蛋白不断积累而出现褐变, 导致 a^* 值下降^[2]。 L^* 值增大是由于肉中的肌原纤维蛋白能够通过毛细作用保持肉中水分, 当肌原纤维蛋白发生氧化时, 肌肉自身水分溶出, 鲜肉的持水力降低, 导致鲜肉表面水分含量增大, 使亮度值增大^[19]。综上可知, 低温等离子体处理能够在一定程度上影响羊肉处理前后的色差值, 但是总色差值 ΔE 没有发生显著变化, 即色泽品质未发生改变。

2.2 低温等离子体处理对羊肉 pH 的影响

pH 常作为评价肉类新鲜程度的指标之一, 是因为 pH 能够将肌肉内游离的 H^+ 和 OH^- 的浓度通过一定形式呈现出来^[20]。处理时间对羊肉 pH 如图 1A 所示, 随着处理时间延长, pH 呈现先下降后上升的趋势, 处理 3 min 时 pH 最低, 为 5.64; 当处理电压小于 70 kV 时, pH 随处理电压的升高显著降低($P < 0.05$)(图 1B); 图 1C 所示, 累计处理时间一定(3 min)处理 4 次时, 羊肉 pH 变化最低, 处理 1 次和 2 次的差异不显著($P > 0.05$); 处理后放置 24 h 的 pH 未发现显著($P > 0.05$)变化(图 1D)。本研究中低温等离子体激发空气产生 NO 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 H^+ 和 H_2O_2 等活性成分^[21], 这些呈酸性物质引起羊肉 pH 下降。当处理电压升高, 处理时间延长, 低温等离子体处理过程中形成的呈酸性基团增加, 可与肉中的蛋白质等物质反应中和部分酸性成分, 未能在羊肉中呈现酸性。当累计处理时间固定(3 min)而进行短时多次间歇处理时, 每一次的直接处理时间被缩短, 低温等离子体中产生的活性成分数量减少, 间歇时间部分活性成分因寿命短而消失^[22], 因此, 尽管累计处理时间(3 min)较长, 但对羊肉 pH 影响不明显。低温等离子体产生的活性氧和活性氮等自由基寿命短^[22], 对羊肉 pH 不能长时间起作用。综上, 羊肉 pH 受低温等离子体处理电压、时间和累计次数的影响明显, 随着处理后放置时间延长影响作用逐渐消失。

2.3 低温等离子体处理对羊肉 TBARS 值的影响

脂质氧化的主要产物是过氧化物, 过氧化物在酶的作用下进一步分解形成丙二醛(MDA)等低分子量产物, 通过量化脂质氧化初级产物丙二醛含量表示肉类脂质氧化的程度^[19]。如图 2A 所示, 当处理时间超过 1 min 时, 羊肉 TBARS 值随处理时间的延长而不断升高($P < 0.05$); 当电压低于 70 kV 时, TBARS 值随电压的升高略微增加, 当处理电压超过 70 kV 时, TBARS 值增幅明显(图 2B); 图 2C 可知, 当累计处理时间固定(3 min), 随着处理次数的增多, 羊肉 TBARS 值降低, 处理 1 次和 2 次的 TBARS 值相差不大; 处理后放置 24 h, 羊肉 TBARS 值显著($P < 0.05$)升高至 0.235 mg/kg。本研究采用空气作为低温等离子体的激发气体, 可形成活性氧(ROS)、活性氮(RNS)等具有高氧化活性的基团, 羊肉富含不饱和脂

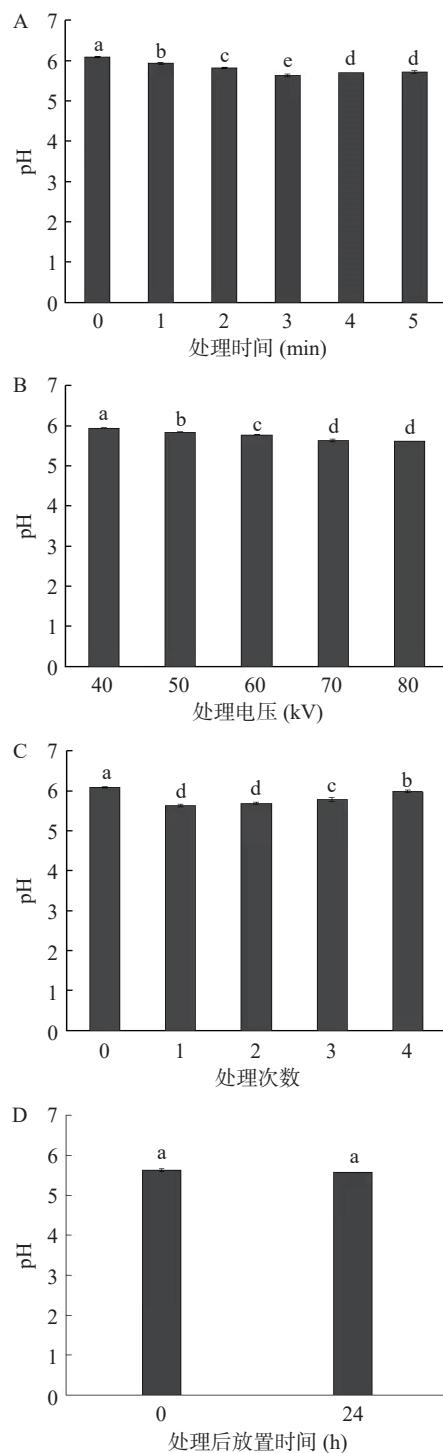


图 1 低温等离子体处理对羊肉 pH 的影响

Fig.1 Effects of cold plasma treatment on pH value of mutton

注: 不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$; 图 2~图 5 同。

肪酸, 易受到 ROS、RNS 等活性基团攻击, 提取氢离子而氧化降解生成低分子量产物。延长处理时间, 升高处理电压, 能够促进羊肉中脂质的氧化, 类似现象在新鲜草鱼^[21]中已有报道。当累计处理时间一样(3 min), 处理次数越多, 活性氧及活性氮生成含量相对较少^[23], 与羊肉中脂质和蛋白质的反应时间和作用量变少, 使得羊肉的氧化程度相对较弱。综上, 不同低温等离子体处理条件均引起羊肉 TBARS 值升高, 且研究表明, 当肉类的 TBARS 值大于 0.6 mg/kg

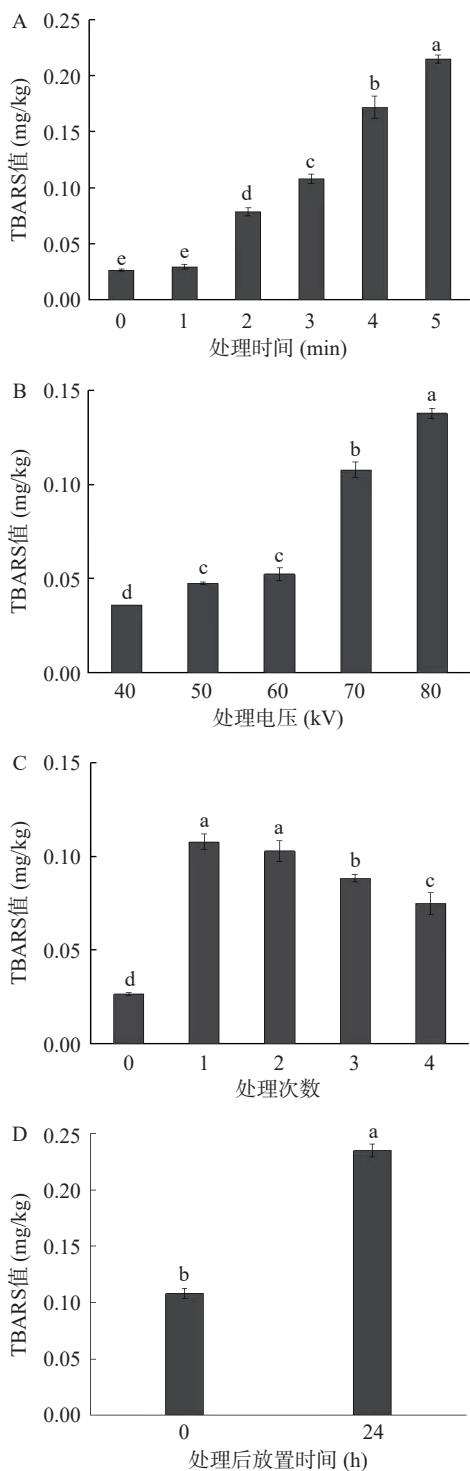


图 2 低温等离子体处理对羊肉 TBARS 值的影响

Fig.2 Effects of cold plasma treatment on TBARS value of mutton

时,会对肉类的品质产生影响^[24],实验中最高TBARS值为0.235 mg/kg,远远低于上述值,低温等离子体处理虽会促进羊肉中脂质的氧化,但未对羊肉品质造成负面影响。

2.4 低温等离子体处理对羊肉肌原纤维蛋白羰基含量的影响

羰基是评定肉类中蛋白质氧化最常用的指标,通常由氨基酸残基侧链基团氧化而成^[25]。如图3A所示,随着处理时间延长,羊肉中羰基含量呈显著上

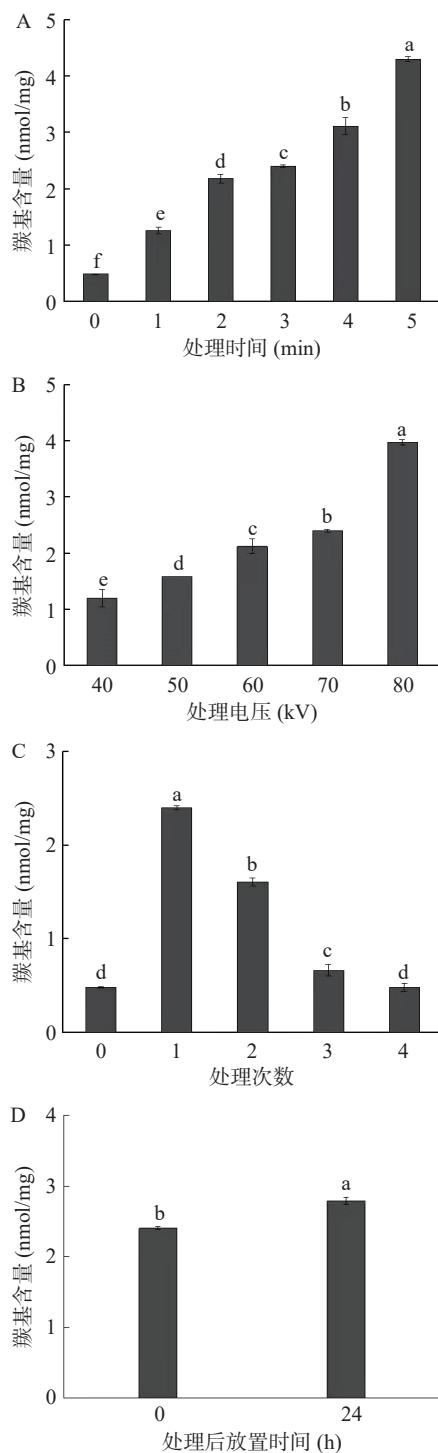


图 3 低温等离子体处理对羊肉肌原纤维蛋白羰基含量的影响

Fig.3 Effects of cold plasma treatment on carbonyl content of mutton myofibrillar protein

升趋势($P<0.05$),处理5 min后羰基含量增加到4.31 nmol/mg;各组羰基含量随处理电压的升高呈显著上升趋势($P<0.05$),在处理电压为80 kV时,羰基含量为3.98 nmol/mg(图3B);累计处理时间固定(3 min)时,处理次数越多,羊肉羰基含量越低,处理4次组与未处理差异不显著($P>0.05$)(图3C),而处理后放置24 h,羰基含量显著($P<0.05$)升高至2.79 nmol/mg。羰基含量上升由低温等离子体产生的活性氧和活性氮自由基造成,活性氧和活性氮氧化

氨基酸残基侧链,尤其是侧链上有 NH^+ 或 NH_2 基团的氨基酸,从而导致肌原纤维蛋白氧化^[17]。随着处理时间延长,活性物质浓度增加,羰基含量不断上升,表明羊肉肌原纤维蛋白氧化程度增加,类似现象在用等离子体活性水腌制猪肉的研究中也有发现^[25]。Luo 等^[26]的研究中发现,随着处理电压的升高,游离氨基酸含量明显增多,低温等离子体处理产生的活性物质能与游离氨基酸反应生成羰基,导致羰基含量升高。由于低温等离子体中产生的活性自由基半衰期短^[23],处理后 24 h 全部消失,无法直接对羊肉造成影响。但是,脂质和蛋白质氧化过程是复杂的链式反应,低温等离子体中的活性自由基激发羊肉中相关氧化反应后,产生的次级产物或者反应生成物能够继续作用,促进脂质和蛋白质氧化。综上,低温等离子体处理能够促进羊肉肌原纤维蛋白的氧化,并且处理后放置时间延长能够增强蛋白质的氧化变性。

2.5 低温等离子体处理对羊肉肌原纤维蛋白总巯基含量的影响

巯基反应活性很强,能氧化形成二硫键和其他巯醇氧化产物,当总巯基含量减少,表示氧化程度增加,总巯基含量可作为肌原纤维蛋白氧化的一个重要指标^[27]。如图 4A 所示,随着低温等离子体处理时间的延长,羊肉中的总巯基含量逐渐降低,在处理 5 min 后,总巯基含量为 44.08 nmol/mg;图 4B 所示,当处理电压达到 70 kV 后,总巯基含量趋于稳定。随着处理时间延长,低温等离子体产生的活性物质会诱导蛋白质氧化作用增强,通过巯基分子内或者分子间交联影响二硫键的生成,进而破坏蛋白质的结构。在高电压下,等离子体中各类粒子会聚合或发生反应一部分,对蛋白质的氧化作用相对减弱^[28],使得总巯基含量相对稳定。当累计处理时间固定(3 min)时,处理次数越多,总巯基含量升高,低温等离子体对羊肉蛋白质氧化作用越低,可能与脂质氧化衍生物含量的降低或活性氧的含量有关^[13]。处理后放置过程中,羊肉中蛋白质的氧化反应持续,氧化程度增加。巯基具有较强的亲核性和还原性,在维持肌原纤维蛋白空间结构稳定、保持理化功能方面等具有重要意义^[29]。综上,不同低温等离子体处理条件可降低羊肉的总巯基含量,破坏肌原纤维蛋白的空间结构和稳定性,从而促进蛋白质变性。

2.6 低温等离子体处理对羊肉肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

蛋白表面疏水性反映蛋白质分子内部疏水基团的暴露程度,暴露程度越大,疏水性越强^[29],一般通过与溴酚蓝的结合量来反映其表面疏水性。随着处理时间延长,溴酚蓝结合量呈显著升高趋势($P<0.05$),处理 5 min 后溴酚蓝的结合量为 68.58 μg (图 5A);随着处理电压升高,溴酚蓝结合量显著升高($P<0.05$),80 kV 处理后为 65.46 μg (图 5B);累计处理时间固定(3 min)时,溴酚蓝结合量随处理次数增多呈

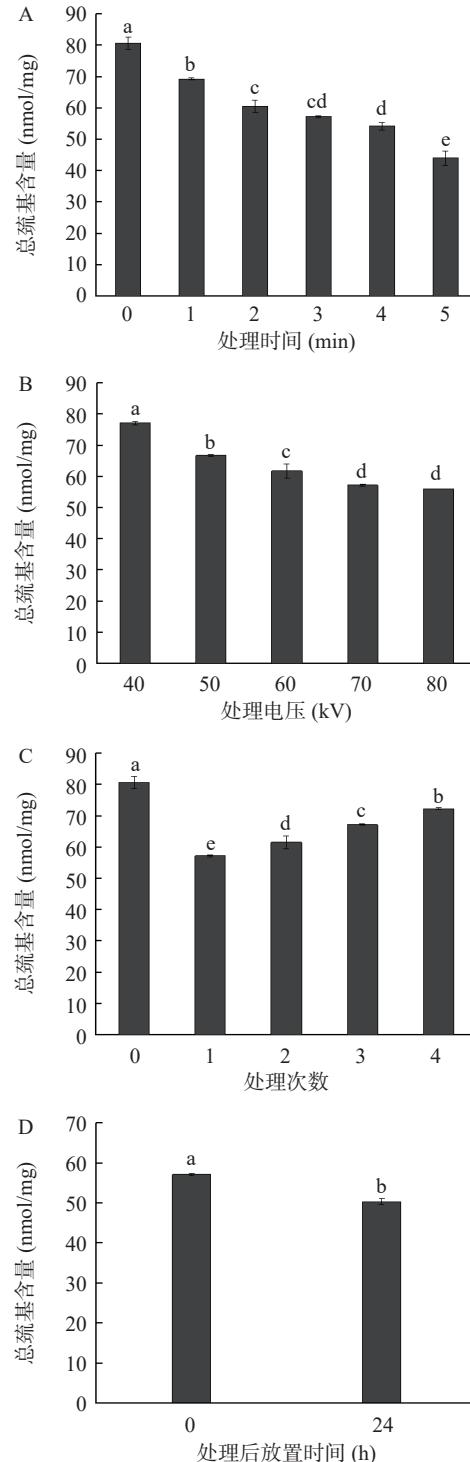


图 4 低温等离子体处理对羊肉肌原纤维蛋白总巯基含量的影响

Fig.4 Effects of cold plasma treatment on total sulphydryl content of mutton myofibrillar protein

显著下降趋势($P<0.05$)(图 5C),延长放置时间,显著增加溴酚蓝结合量($P<0.05$),这与张海璐等^[18]研究氧化时间对羊肉肌原纤维蛋白表面疏水性的影响的结果一致。肌原纤维蛋白表面疏水性是指蛋白分子与水分子间相互排斥的物理特性,蛋白质发生氧化时会导致埋藏在蛋白质内部结构的疏水性氨基酸残基暴露出来,使其分子间产生聚集和交联^[30]。Luo 等^[26]的研究指出,低温等离子体处理会导致肌原纤维蛋

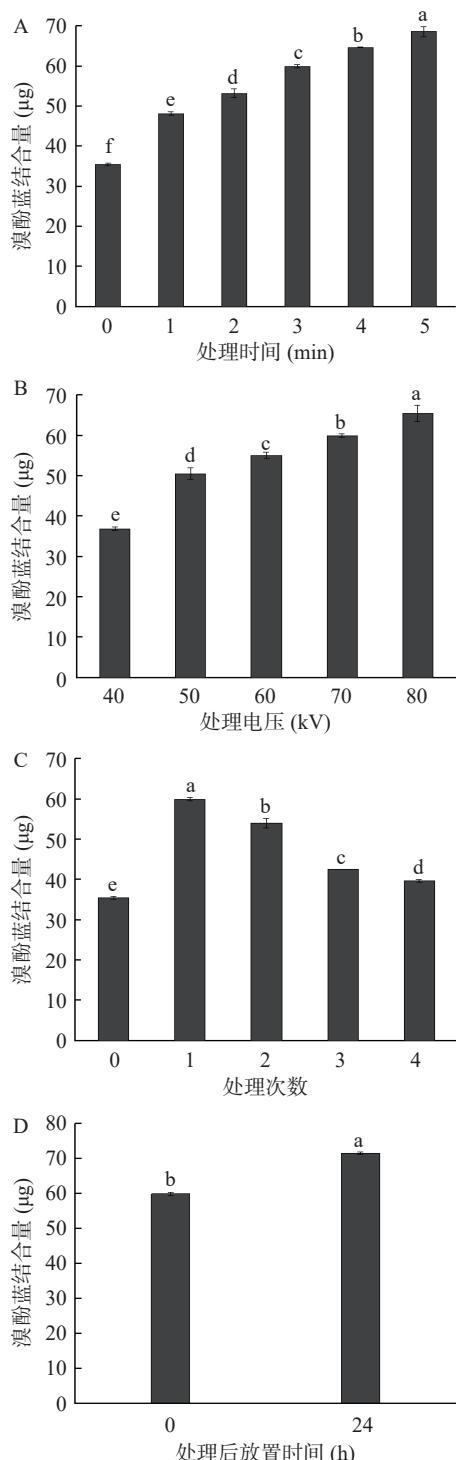


图 5 低温等离子体处理对羊肉肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

Fig.5 Effects of cold plasma treatment on surface hydrophobicity of mutton myofibrillar protein

白 α -螺旋结构向其他结构形式展开, α -螺旋含量降低可减弱肌原纤维蛋白结合水的能力, 增强肌原纤维蛋白的表面疏水性。随着处理时间延长、处理电压升高, 低温等离子体中活性基团对疏水性氨基酸的攻击增加, 导致蛋白质表面疏水性升高。累计处理时间固定(3 min), 处理次数增加使得相应的处理时间减少, 有效的活性粒子减少, 蛋白质氧化程度减弱, 蛋白质分子聚集或交联使其疏水性降低^[17]。综上, 低温等

离子体处理减弱了蛋白质折叠程度, 促进内部疏水基团暴露, 加速羊肉肌原纤维蛋白失活和降解。

2.7 脂质和蛋白质氧化指标相关性分析

不同低温等离子体处理条件下羊肉中脂质和蛋白质氧化指标进行相关性结果见表 2。随着处理时间延长, 羊肉 TBARS 值与同条件下羰基含量和表面疏水性呈极显著相关($P<0.01$), 与总巯基含量呈极显著负相关($P<0.01$), 表明羊肉中脂质与蛋白质氧化的变化趋势高度一致。随着处理电压升高, 羊肉 TBARS 值与羰基含量呈显著正相关($P<0.05$); 当累计处理时间固定(3 min)时, 随着处理次数增多, 羊肉 TBARS 值与总巯基含量和表面疏水性分别呈显著负相关和正相关($P<0.01$)。上述结果表明, 处理时间是影响低温等离子体处理羊肉中脂质和蛋白质氧化的重要因素, 其对羊肉脂质和蛋白质氧化的变化趋势影响一致。低温等离子体处理产生大量活性自由基, 同时攻击羊肉脂质和蛋白质, 由于脂质和蛋白质氧化属于链式持续反应, 处理时间变化会直接影响活性自由基与羊肉中脂质和蛋白质的氧化反应时间, 因此, 低温等离子体处理时间对羊肉氧化的影响作用大于其他因素。

表 2 不同处理条件下脂质和蛋白质氧化指标相关性分析

Table 2 Correlation relationships analysis between oxidation index of lipids and protein under different treatment conditions

处理条件	指标	TBARS值	羰基含量	总巯基含量	表面疏水性
处理时间	TBARS值	1			
	羰基含量	0.972**	1		
	总巯基含量	-0.928**	-0.985**	1	
	表面疏水性	0.920**	0.960**	-0.983**	1
处理电压	TBARS值	1			
	羰基含量	0.931*	1		
	总巯基含量	-0.836	-0.825	1	
	表面疏水性	0.865	0.881*	-0.990**	1
处理次数	TBARS值	1			
	羰基含量	0.934	1		
	总巯基含量	-0.990*	-0.969*	1	
	表面疏水性	0.962*	0.992**	-0.980*	1

注: *表示相关性显著($P<0.05$); **表示相关性极显著($P<0.01$)。

3 结论

低温等离子体处理后, 羊肉 TBARS 值、羰基含量和蛋白表面疏水性升高, 而总巯基含量降低, 表明低温等离子体处理能够促进新鲜羊肉中脂质和蛋白质氧化。不同处理条件对羊肉脂质和蛋白质氧化影响存在较大差异, 其中处理时间在促进羊肉中脂质和蛋白质氧化具有极显著的影响。羊肉 pH 受处理时间、处理电压和处理次数(累计处理时间固定)的影响明显, 而色泽在同条件下未发生明显变化。低温等离子体处理后羊肉的氧化程度均在可接受范围内, 适度氧化还可能对肉制品的品质产生有益的影响。因此, 低温等离子体处理时应严格控制处理条件, 为今

后低温等离子体在羊肉贮藏保鲜中的应用提供参考依据。

参考文献

- [1] 马惠敏, 王振宇, 黄彩燕, 等. 包装对羊肉冷藏过程中热休克蛋白表达及羊肉品质的影响[J]. *肉类研究*, 2021, 35(3): 35–40.
- [MA H M, WANG Z Y, HUANG C Y, et al. Effect of packaging on expression of heat shock proteins in lamb and lamb quality during refrigeration storage[J]. *Meat Research*, 2021, 35(3): 35–40.]
- [2] 许立兴, 薛晓东, 仵轩轩, 等. 微冻及冰温结合气调包装对羊肉的保鲜效果[J]. *食品科学*, 2017, 38(3): 232–238. [XU L X, XUE X D, WU X X, et al. Comparative effects of superchilling and ice-temperature combined with modified atmosphere packaging on mutton quality during storage[J]. *Food Science*, 2017, 38(3): 232–238.]
- [3] 马强, 王芳, 鹿平, 等. 气调包装技术在冷鲜肉的应用与前景[J]. *新农业*, 2020, 10: 45–48. [MA Q, WANG F, LU P, et al. Application and prospect of modified atmosphere packaging technology in cold and fresh meat[J]. *New Agriculture*, 2020, 10: 45–48.]
- [4] 韩格, 陈倩, 孔保华. 低温等离子体技术在肉品保藏及加工中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(3): 286–292. [HAN G, CHEN Q, KONG B H. Recent advances in application of cold plasma technology in meat preservation and processing[J]. *Food Science*, 2019, 40(3): 286–292.]
- [5] STRATAKOS A C, GRANT I R. Evaluation of the efficacy of multiple physical, biological and natural antimicrobial interventions for control of pathogenic *Escherichia coli* on beef[J]. *Food Microbiology*, 2018, 76: 209–218.
- [6] DIRKS B P, DOBRYNIN D, FRIDMAN G, et al. Treatment of raw poultry with nonthermal dielectric barrier discharge plasma to reduce *Campylobacter jejuni* and *Salmonella enterica*[J]. *Journal of Food Protection*, 2012, 75(1): 22–28.
- [7] JAYASENA D D, KIM H J, YONG H I, et al. Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin: Effects on pathogen inactivation and meat-quality attributes[J]. *Food Microbiology*, 2015, 46: 51–57.
- [8] GK V, AKTOP S, ZKAN M, et al. The effects of atmospheric cold plasma on inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* and some quality characteristics of pastirma-A dry-cured beef product[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 56: 102–188.
- [9] 孟婧怡, 黄明伟, 王佳媚, 等. 低温等离子体冷杀菌处理时间及电压强度对生鲜猪肉脂质氧化的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(3): 135–141. [MENG J Y, HUANG M M, WANG J M, et al. Impact of cold plasma cold sterilization processing time and voltage on fresh pork lipid oxidation[J]. *Food Science*, 2019, 40(3): 135–141.]
- [10] ZHUANG H, ROTHROCK M J, HIETT K L, et al. In-package antimicrobial treatment of chicken breast meat with high voltage dielectric barrier discharge-electric voltage effect[J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2019, 28(4): 801–807.
- [11] 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 & Biotechnology*, 2016, 25(4): 1189–1195.
- [12] 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: 1–16. [WANG C, QIAN J, SHENG X W, et al. Effects of low-temperature plasma cold sterilization on shelf life and flavor quality of brine duck[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021: 1–16.]
- [13] 何晓娜, 杨晓玲, 王宏博, 等. 羊肉冷藏期间蛋白与脂质氧化及风味变化分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 7. [HE X N, YANG X L, WANG H B, et al. Analysis of change of protein and lipid oxidation and flavor in mutton during refrigeration storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 7.]
- [14] 王佳媚, 符腾飞, 刘雅夫. 不同气调包装组分协同壳聚糖基复合涂膜对金鲳鱼冷藏品质的影响[J]. *肉类研究*, 2021, 35(1): 59–65. [WANG J M, FU T F, LIU Y F. Combined effects of modified atmosphere packaging with different gas compositions and chitosan-based composite coatings on quality of *Trachinotus ovatus* during refrigerator storage[J]. *Meat Research*, 2021, 35(1): 59–65.]
- [15] ZHANG Z Y, YANG Y L, ZHOU P, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 678–686.
- [16] 黄倩, 黄兰兰, 陈炼红, 等. 冻融对冷藏藏羊肉保水性及蛋白氧化和溶解特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 8. [HUANG Q, HUANG L L, CHEN L H, et al. Effects of repeated freezing-thawing on water holding capacity, myofibrillar protein oxidation and dissolution characteristics of Tibetan mutton during chilled storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 8.]
- [17] 徐红艳, 张珍, 陈雪琴, 等. 复配香辛料精油处理对冷藏藏羊肉氧化特性的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2020, 38(2): 90–98. [XU H Y, ZHANG Z, CHEN X Q, et al. Effect of compound spice essential oil on oxidation characteristics of Tibetan mutton during refrigeration[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 38(2): 90–98.]
- [18] 张海璐, 黄翔, 杨燃, 等. 氧化对羊肉肌原纤维蛋白分子与理化特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 8–14. [ZHANG H L, HUANG X, YANG R, et al. Effect of oxidation on molecular and physicochemical properties of mutton myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2020, 41(23): 8–14.]
- [19] 陈春梅, 陆辰燕, 沈银涵, 等. 蒸煮温度对羊肉肌原纤维蛋白特性的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(7): 40–45. [CHEN C M, LU C Y, SHEN Y H, et al. Effect of cooking temperature on the characteristics of mutton myofibrillar proteins[J]. *Meat Research*, 2020, 34(7): 40–45.]
- [20] 陈晓楠, 赵金丽, 张宾, 等. 低温冻藏过程中鮰鱼肌肉蛋白质氧化特性研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(17): 38–45. [CHEN X N, ZHAO J L, ZHANG B, et al. Oxidation of muscle protein in mackerel during cryopreservation[J]. *Packaging Engineerin*, 2020, 41(17): 38–45.]
- [21] 王艺月, 姜竹茂, 钱婧, 等. 等离子体处理对生鲜鱼肉杀菌效能及贮藏品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021. [WANG Y Y, JIANG Z M, QIAN J, et al. Effect of cold plasma on microbial decontamination and storage quality of fish fillets[J]. *Food and Fer-*

- mentation Industries, 2021.]
- [22] 钱婧, 王治, 章建浩, 等. 低温等离子体冷杀菌对血红蛋白诱导猪肉脂质氧化的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(19): 1–7.
[QIAN J, WANG Y, ZHANG J H, et al. Effect of cold plasma sterilization on hemoglobin-induced lipid oxidation of fresh pork[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(19): 1–7.]
- [23] ATTRI P, KIM Y H, PARK D H, et al. Generation mechanism of hydroxyl radical species and its lifetime prediction during the plasma-initiated ultraviolet (UV) photolysis[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9332.
- [24] GREENE B E, CUMUZE T H. Relationship between TBA numbers and inexperienced panelists assessments of oxidized flavor in cooked beef[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 47(1): 52–54.
- [25] 孙克奎, 金声琅, 潘雅燕, 等. 等离子体活性水腌制对猪肉肌原纤维蛋白氧化及结构的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(14): 36–41. [SUN K K, JIN S L, PAN Y Y, et al. Effects of plasma-activated water curing on oxidation and structure of pork myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2020, 41(14): 36–41.]
- [26] LUO J, MUSTAPHA M N, WEN J Y, et al. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatment on the structure and binding capacity of aroma compounds of myofibrillar proteins from dry-cured bacon[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020: 117.
- [27] 陈家盛, 宫玉婷, 董依雪, 等. 低温等离子体处理对冰鲜鱿鱼品质特性的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(5): 231–235. [CHEN J S, GONG Y T, DONG Y X, et al. Effect of plasma treatment on quality characteristics of chilled squid[J]. *Food Industry*, 2021, 42(5): 231–235.]
- [28] 乔维维, 黄明朋, 王佳媚, 等. 低温等离子体对生鲜牛肉杀菌效果及色泽的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(23): 237–242.
[QIAO W W, HUANG M M, WANG J M, et al. The effect of low-temperature plasma on the sterilization effect and color of fresh beef[J]. *Food Science*, 2017, 38(23): 237–242.]
- [29] 卜丽丹, 李文慧, 赵超, 等. 茶多酚- β -环糊精包合物对羊肚冷藏期间肌原纤维蛋白氧化的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(3): 227–235. [BAN L D, LI W H, ZHAO C, et al. Effect of tea polyphenol/hydroxypropyl- β -cyclodextrin inclusion complex on myofibrillar protein oxidation in ovine tripe during refrigerated storage[J]. *Food Science*, 2021, 42(3): 227–235.]
- [30] 鲁小川, 张伊侬, 潘成磊, 等. 孜然精油对微冻贮藏羊肉肌原纤维蛋白结构和功能特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(21): 110–117. [LU X C, ZHANG Y N, PAN C L, et al. Effect of cumin (*Cuminum cyminum* L.) essential oil on the structure and functional properties of myofibrillar protein of mutton during super-chilling storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(21): 110–117.]