

低温等离子体激发介质对罗非鱼片 脂质氧化和酶活性影响

桑晓涵¹, 王媛媛¹, 王佳媚^{1*}, 蔡志成¹, 曾丽仙¹, 邓文韬¹, 姜竹茂²

(1. 海南大学食品科学与工程学院, 海南海口 570228) (2. 烟台大学生命科学学院, 山东烟台 264005)

摘要: 该研究通过脂质初级和次级氧化产物含量变化, 脂肪氧合酶 (Lipoxygenase, LOX)、脂肪酶、酸性脂肪酶、中性脂肪酶和磷脂酶活性变化, 评价了激发介质 (GasA: 10% O₂:50% N₂:40% CO₂, GasB: 22% O₂:78% N₂, GasC: 30% O₂:30% N₂:40% CO₂) 对低温等离子体处理罗非鱼片冷藏过程中脂质氧化和酶活性影响。结果表明: 低温等离子体处理能够促进罗非鱼片脂质氧化, 同时降低脂质氧化相关酶活性。在冷藏期间, 10% O₂ 含量处理组中罗非鱼片过氧化值和硫代巴比妥酸值为 0.49 meq/kg 和 1.05 mg/kg, 显著低于 21% 和 30% O₂ 处理组 ($P < 0.05$)。LOX、脂肪酶、酸性脂肪酶、中性脂肪酶和磷脂酶的酶活性在冷藏期间均呈现先上升后下降的变化趋势, 并在第 2 天时达到最大。上述 5 种酶失活程度随处理组中 O₂ 含量的升高而增加, 在 30% O₂ 含量时酶活性最低, 10% O₂ 含量时酶活性最高。因此, 低温等离子体激发介质中低 O₂ 含量, 有利于延缓罗非鱼片脂质氧化, 并维持的氧化相关酶活性。该研究结果为调控低温等离子体处理对罗非鱼脂质氧化提供理论基础和技术支撑。

关键词: 罗非鱼片; 低温等离子体; 激发介质; 脂质氧化; 酶

文章编号: 1673-9078(2025)05-155-162

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0364

Effects of Cold Plasma Excitation Media on Lipid Oxidation and Enzyme Activity of Tilapia Fillets

SANG Xiaohan¹, WANG Yuanyuan¹, WANG Jiamei^{1*}, CAI Zhicheng¹, ZENG Lixian¹, DENG Wentao¹,
JIANG Zhumao²

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

(2. College of Life Sciences, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: In this paper, the effects of excitation media (GasA:10% O₂:50% N₂:40% CO₂, GasB:22% O₂:78% N₂, GasC:30% O₂:30% N₂:40% CO₂) on lipid oxidation and enzyme activity of tilapia fillets treated with cold plasma during cold storage were evaluated based on the changes in lipid primary and secondary oxidation products and the activities of lipoxygenase (LOX), lipase, acid lipase, neutral lipase, and phospholipase. The results showed that cold plasma treatment could promote lipid oxidation in tilapia fillets and reduce the activities of lipid oxidation-related. During cold storage, the

引文格式:

桑晓涵,王媛媛,王佳媚,等.低温等离子体激发介质对罗非鱼片脂质氧化和酶活性影响[J].现代食品科技,2025,41(5):155-162.

SANG Xiaohan, WANG Yuanyuan, WANG Jiamei, et al. Effects of cold plasma excitation media on lipid oxidation and enzyme activity of tilapia fillets [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(5): 155-162.

收稿日期: 2024-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32060568); 山东省自然科学基金项目 (ZR2020KC013)

作者简介: 桑晓涵 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工与贮藏, E-mail: 17861120582@163.com

通讯作者: 王佳媚 (1984-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 非热杀菌加工技术、肉类保鲜与贮藏, E-mail: jiamei2029@163.com

peroxide value and thiobarbituric acid value of tilapia fillets in the 10% O₂ treatment group were 0.49 meq/kg and 1.05 mg/kg, which were significantly lower than those of the 21% and 30% O₂ treatment groups ($P < 0.05$). The enzyme activities of LOX, lipase, acid lipase, neutral lipase, and phospholipase all showed a trend of initial increase then decrease during cold storage, reaching their maximum on the second day. The degree of inactivation of the above five enzymes increased with the increase in O₂ content in the treatment group, with the enzyme activity being the lowest at a 30% O₂ content and the highest at a 10% O₂ content. Therefore, a low O₂ content in cold plasma excitation medium is conducive to delaying lipid oxidation in tilapia fillets and maintaining the activities of oxidation-related enzymes. The results of this study provide a theoretical basis and technical support for regulating the lipid oxidation of tilapia by cold plasma treatment.

Key words: tilapia fillets; cold plasma; excitable media; lipid oxidation; enzyme activity

罗非鱼 (*Oreochromis mossambicus*) 鱼肉营养丰富, 含有大量必需氨基酸, 肉质细嫩、风味独特, 受到消费者的推崇^[1]。罗非鱼含水量高^[2], 易受到微生物污染, 在储存过程中容易腐败变质。水产品具有非常强的热敏感性, 常用的传统抑菌保鲜方法有冷藏和冷冻, 但运输成本昂贵, 保鲜期短, 且冻藏过程中会破坏鱼肉本身的结构特性^[3]。低温等离子体是一种新兴的非热保鲜技术, 在延缓腐败变质同时能够维持水产品原有品质, 被广泛应用于水产保鲜。然而, 研究表明低温等离子体能够加速脂质氧化^[3,4], 因此, 应用低温等离子体杀菌保鲜时, 将脂质氧化控制在可接受范围内十分重要。

脂质氧化过程十分复杂, 主要分为自动氧化和酶促氧化, 自动氧化是在光和金属离子作用下发生的氧化; 酶促氧化则是脂质在脂肪氧合酶 (Lipoxygenase, LOX) 等酶作用下产生的氧化^[5]。低温等离子体产生的含氧活性基团, 如臭氧 (O₃)、羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$)、过氧化氢 (H₂O₂)、一氧化氮 (NO) 等, 易氧化不饱和脂肪酸双键, 并伴有一系列的脂质自氧化反应^[6,7]。低温等离子体处理过程形成的反应活性物质, 如电子、正负离子、分子 (基态或激发态)、活性氧 (Reactive Oxygen Species, ROS)、活性氮 (Reactive Nitrogen Species, RNS) 和电磁辐射 (紫外线光子和可见光) 等, 主要取决于所使用的气体成分组成^[8]。激发介质不同导致自由基成分不同, 不同自由基对脂肪酸的作用途径有差异, 使脂质氧化程度有一个变化趋势, 可能对品质造成影响^[9]。改变低温等离子体激发介质中 Ar、O₂ 和 CO₂ 比例后, 鲈鱼片的脂质氧化程度有显著性改变 ($P < 0.05$)^[4]。太平洋白虾在 Ar:Air (80:20) 以及 Ar:O₂ (80:20) 的激发介质下经低温等离子体处理后, 脂质氧化值和脂肪酸含量均有较大差异^[10]。同时, 低温等离子体处理对酶的构象造成不可逆影

响, 导致酶的功能发生改变。Tolouie 等^[9]研究表明脂肪酶和脂肪氧合酶分别在 Ar 和 N₂ 等离子体处理后, 活性有不同程度的下降。在不同 Ar 和 O₂ 比例的激发介质下经低温等离子体处理后, 酶活性变化之间也存在明显差异^[11]。此外, 水产品中多种酶在低温等离子体处理后均表现出明显的下降趋势^[12]。

目前, 关于低温等离子体激发介质对脂质氧化和酶的相关性研究不多。因此, 本研究采用不同激发介质 [GasA : 10% O₂:50% N₂:40% CO₂, GasB : 22% O₂:78% N₂, GasC : 30% O₂:30% N₂:40% CO₂ (体积分数)] 作为低温等离子体激发气体, 测定低温等离子体处理后罗非鱼片在冷藏过程中的过氧化值 (Peroxide Value, POV)、硫代巴比妥酸值 (Thiobarbituric Reactive Substances, TBARS)、LOX 活性、脂肪酶活性、酸性脂肪酶活性、中性脂肪酶活性和磷脂酶活性, 探索激发介质与脂质氧化以及酶活性之间的相关性。

1 材料与方法

1.1 材料与方法

新鲜罗非鱼片, 购自海南泉溢食品有限公司。

甲醇、冰乙酸、碘化钾、硫代硫酸钠、三氯乙酸、可溶性淀粉、乙二醇四乙酸二钠、二硫苏糖醇, 上海阿拉丁生化科技有限公司; 三氯甲烷、硫代巴比妥酸, 上海西陇化工有限公司; 磷酸缓冲液、亚油酸、吐温-20、柠檬酸缓冲液, 国药集团化学试剂有限公司; 脂肪酶 (Lipase, LPS) 试剂盒, 苏州格锐思生物科技有限公司; 鱼酸性脂肪酶 (Acidic Lipase, ALPS)、鱼磷脂酶 (Phospholipase, PL)、鱼中性脂肪酶 (Neutral Lipase, NLPS) 试剂盒, 上海信誉生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

BK130/36 低温等离子体, 美国 Phoenix 公司; MAP-H360 包装机, 苏州森瑞生鲜设备有限公司; T18 高速分散机, 德国 IKA 公司; ST-16R 高速冷冻离心机, 美国 Thermo Scientific; 722G 紫外可见光光度计, 北京普析通用仪器有限公司; HH-4 数显恒温水浴锅, 常州奥华仪器有限公司; DGG-9123A 电热鼓风干燥箱, 上海森信实验仪器公司。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

将 100 g 新鲜罗非鱼片随机分成三组放在食品塑料包装盒中, 分别充入 GasA: 10% O₂: 50% N₂: 40% CO₂, GasB: 22% O₂: 78% N₂ 和 GasC: 30% O₂: 30% N₂: 40% CO₂ (体积分数) 并密封。密封后的包装盒采用 Wang 等^[13]描述的介质阻挡放电 (Dielectric Barrier Discharge, DBD) 系统于 70 kV 处理 3 min, 处理后在 4±1 °C 中储存 8 d, 每 2 d 取样。未经低温等离子体处理的样品作为对照组, 同步进行存贮和取样。

1.3.2 鱼油提取

根据 Folch 等^[14]的方法提取鱼油, 并略作修改。将 5 g 切碎的鱼肉加入 50 mL 氯仿-甲醇 (2:1 V/V)。在室温下充分振荡 4 h 后, 再向混合物中加入 11.25 mL 的氯化钾溶液 (0.88%, 质量分数) 继续振荡 30 min。将混合物过滤, 得到初滤液。将滤液在 3 552 g 下离心 10 min 后, 取下层氯仿层, 氮气吹干。

1.3.3 POV的测定

依据 Ke 等^[15]描述的方法测定鱼油的 POV 值。将 1 g 脂质溶于 30 mL 氯仿-乙酸 (2:1, V/V) 溶解, 加 1 mL 饱和碘化钾, 然后充分混匀。在黑暗中孵育 3 min 后, 加 100 mL 去离子水并充分振摇。用硫代硫酸钠 (0.01 mol/L) 的标准溶液进行滴定混合物, 直至溶液呈黄色。随后, 加入 1 mL 淀粉指示剂, 继续滴定至蓝色消失, 并进行空白测定。

1.3.4 TBARS的测定

参照 Du 等^[16]的研究方法并稍加修改。将 5 g 切碎的鱼肉与 25 mL 7.5% (ϕ) 三氯乙酸 (含 0.1% EDTA, 质量分数) 在 6 000 r/min 下匀浆 1 min。在 50 °C 振荡 30 min 后, 以 5 328 g 离心 5 min, 然后将上述滤液 5 mL, 与硫代巴比妥酸溶液 (20 mmol/L, 5 mL) 溶液混合, 另取 5 mL 三氯乙酸混合液作为

样品空白。将混合物置于 90 °C 水浴内反应 30 min, 并冷却至室温, 在 532 nm 处测量吸光度值。TBARS 值根据丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 的标准曲线计算, 以 mg MDA/kg 鱼肉表示。

1.3.5 LOX的测定

依据 Liu 等^[17]描述的方法提取粗酶, 将鱼肉与磷酸盐缓冲液 (50 mmol/L, 1 mmol/L DTT, 1 mmol/L EDTA, pH 值 7.4) 以 1:5 (m/V) 的比例混合来提取 LOX, 然后使用手持式电动混合器在冰浴中以 4 000 r/min 匀浆。将混合物在冰浴中搅拌半小时, 并在 4 °C, 8 880 g 下离心 20 min。用滤纸过滤上清液, 得粗酶溶液。

制备底物液, 取 2.9 mL 0.05 mol/L 的柠檬酸缓冲溶液 (pH 值 5.5), 加入 200 μ L 底物液, 于 20 °C 水浴中混匀, 待其在 234 nm 处的吸光值稳定后, 加入 0.1 mL 粗酶液并快速混匀, 于 20 °C, 234 nm 处测定混合溶液 1 min 内吸光值的增量。定义 1 mg 酶蛋白在 1 min 内吸光值增加 0.001 为 1 个酶活力单位。

1.3.6 脂肪酶活性测定

采用苏州格锐思生物科技有限公司 G0902W 试剂盒进行测定。称取约 0.1 g 组织, 加入 1 mL 提取液, 在冰上进行均浆, 在 4 °C 以 10 656 g 下离心 10 min 后, 取上清液, 依据试剂盒测定。定义 1 mg 酶蛋白每分钟催化 1 μ mol 底物为 1 个酶活力单位。

1.3.7 脂肪水解酶活性测定

酸性脂肪酶、中性脂肪酶和磷脂酶的测定分别采用上海信裕生物科技有限公司 XY968901a、XY968701a 和 XY967701a 试剂盒进行测定, 其原理均采用酶联免疫分析法对酶活性进行测定。测定方法: 称取 2 g 鱼肉, 按照 1:9 (m/V) 的比例加入预冷好的磷酸盐缓冲液 (0.01 mmol/L, pH 值 =7.4)。在冰水浴条件下以 3 552 g 下离心 20 min, 取上清液依据试剂盒测定。脂肪水解酶活性结果以 U/g 表示。

1.4 数据处理与统计

所有的实验重复测定 3 次, 数据表示为平均值 ± 标准差, 使用 SPSS 20.0 软件对数据进行显著性分析, 用于单因素方差分析 (ANOVA), 使用 Origin 2019 绘制图表, 并使用 Duncan 多重比较检验 ($P < 0.05$) 分析显著差异。

2 结果与分析

2.1 初级氧化产物

如图1所示, 处理组的POV值显著高于未处理组 ($P<0.05$), 表明低温等离子体处理显著促进了罗非鱼片初级氧化产物的生成。未处理组鱼肉POV值随包装气体中 O_2 含量的递增而增加, 考虑是 O_2 含量越高, 促氧化性越强^[18]。无论激发介质如何变化, 处理组与未处理组的POV值均随着冷藏时间的延长而增加。冷藏期间, GasA-CP组罗非鱼片的POV值低于GasB-CP组和GasC-CP组, 说明罗非鱼片在 $\varphi=10\%$ O_2 含量的激发介质下经低温等离子体处理后, 可能减缓了不饱和脂肪酸的氧化, 使产生的氢过氧化物含量降低^[6], 减缓了POV值的增加。太平洋白虾在低 O_2 含量激发介质下, 经低温等离子体处理10 min后, 太平洋白虾中细胞外酶、微生物酶等分泌的氢过氧化物含量减少, 使得POV值降低^[10]。

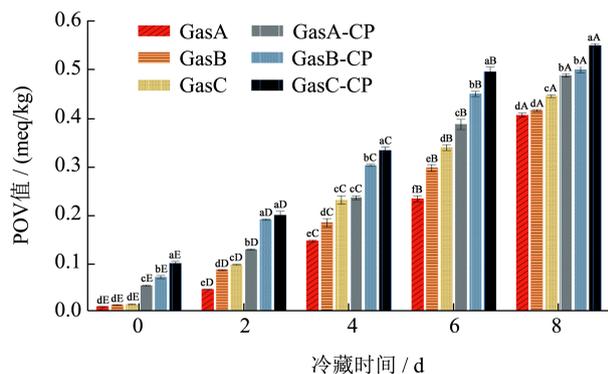


图1 低温等离子体激发介质对罗非鱼片POV值影响

Fig.1 Effects of cold plasma excitation medium on the POV of tilapia fillets

注: 图中小写字母不同表示相同时间组间差异显著 ($P<0.05$); 大写字母不同表示组内不同时间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

在冷藏期间, GasA-CP组、GasB-CP组和GasC-CP组罗非鱼片的POV值持续升高, 且GasC-CP组罗非鱼片的POV值增加最大, 可能与低温等离子体产生的ROS和RNS的含量有关, 这二者主要来源于 O_2 和 N_2 。研究发现, 当低温等离子体激发介质中含有 O_2 时, ROS可能在诱导样品脂质氧化中起主要作用^[19]。采用不同激发介质的低温等离子体处理枯草芽孢杆菌孢子时, O_2 含量增加时导致臭氧等ROS的含量增加, 进而促进过氧化物的形成, 加

速脂质氧化^[20]。尽管低温等离子体激发 N_2 产生的RNS起到一定的促氧化作用, 但来源于 N_2 的RNS含量对激发介质中 O_2 含量也具有依赖性^[6]。因此, 改变低温等离子体处理时的激发介质, 促进了罗非鱼片脂质氧化程度的差异性, 其中, 激发介质中 O_2 含量起到了重要作用。

2.2 次级氧化产物

脂质氧化中产生的MDA是脂质过氧化反应的代表性最终产物。如图2所示, 0 d时, 处理组罗非鱼片TBARS值均显著高于未处理组 ($P<0.05$), 未处理组中TBARS值随包装气体中 O_2 含量的增加而上升。所有组中罗非鱼片TBARS值随冷藏时间的延长而升高。在冷藏期间, GasC-CP组中TBARS值高于其他处理组, 且在8 d时升高至1.15 mg/kg, 但未超过可接受限值 (2.5 mg/kg)^[21]。GasA-CP组、GasB-CP组和GasC-CP组罗非鱼片的TBARS值在冷藏期间随激发介质中 O_2 含量的增加而增加, 冷藏8 d后分别增加到1.05、1.13和1.15 mg/kg。采用相同的DBD系统处理猪肉, 发现增加激发介质中的 O_2 含量的增加, 提高了猪肉中TBARS值^[22]。

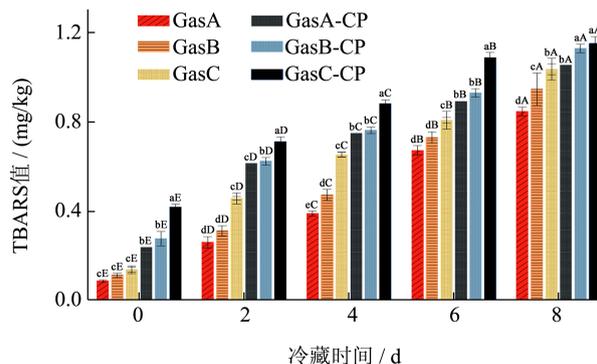


图2 低温等离子体激发介质对罗非鱼片TBARS值影响

Fig.2 Effects of cold plasma excitation medium on the TBARS of tilapia fillets

Xu等^[23]发现低温等离子体处理后金鲷鱼中TBARS值的升高与臭氧形成有关。含10%和20% O_2 含量 (体积分数) 的混合气体用于高压冷大气等离子体低温等离子体处理后, 发现增加激发介质中 O_2 含量, 能有效促进臭氧的形成^[24]。臭氧作用于脂质中的不饱和键, 形成臭氧氧化物, 臭氧氧化物非常不稳定, 易形成醛等化合物^[25]。因此, 在低温等离子体处理中, O_2 含量降低能有效减缓罗非鱼片中次级氧化值的增加。

2.3 LOX活性

如图3所示, 0 d时, 各处理组罗非鱼片 LOX 活性均低于未处理组罗非鱼片 LOX 活性。可能是低温等离子体产生的活性自由基能够使得蛋白质的构象和结构发生改变, 对 LOX 活性有失活作用^[11]。类似研究发现, 橄榄油中的 LOX 经低温等离子体处理后同样活性下降^[26]。在冷藏过程中, 所有组罗非鱼片 LOX 活性均先上升后下降, 在 2 d 时 LOX 活性最高。酶活性受温度、水分活度、底物浓度等影响, 在冷藏前 2 d, 由于鱼肉中水分活度和酶反应底物较高, 导致酶活性有短暂的上升。随着冷藏时间延长, 水分活度和底物浓度的降低会使 LOX 的活性下降。此外, 脂质氧化产生的氢过氧化物能够氧化 LOX 中的硫醇基团, 导致 LOX 活性下降^[27]。未处理组中, 高 O₂ 含量组中 LOX 活性较高, 可能是高含量 O₂ 存在下促进了罗非鱼片中的脂质氧化反应, 使得酶促反应途径处于较高的活跃状态; 处理组中, 高 O₂ 含量对酶活的失活作用最强, 可能是高 O₂ 含量会生成更多的 ROS, 如臭氧^[28], 造成酶二级结构 α -螺旋展开, 以及部分氨基酸侧链修饰的改变^[29], 进而造成酶失活。Surowsky 等^[11]也发现低温等离子体处理时激发介质中 O₂ 含量较高时, 更易使 LOX 失活。而由 POV 值的结果显示, 高氧激发介质下的低温等离子体处理后有较多氢过氧化物形成, 这一物质对 LOX 活性有着失活作用。

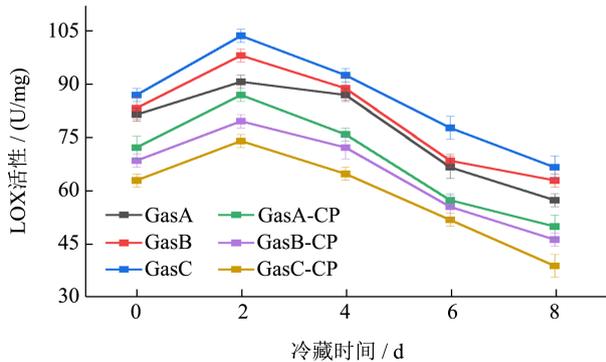


图3 低温等离子体激发介质对罗非鱼片 LOX 活性影响
Fig.3 Effects of cold plasma excitation medium on the LOX activity of tilapia fillets

2.4 脂肪酶活性

与 LOX 类似, 脂肪酶与脂质氧化中的生化反应密切相关, 例如甘油三酯的水解和氢过氧化物的形成^[30]。罗非鱼片在冷藏过程中脂肪酶活性变化如图4所示, 所有处理组都呈现先升高后下降的趋势, 在 2 d 时达到最大, 且处理组的脂肪酶活性低于未

处理组。低温等离子体造成脂肪酶失活主要是减少蛋白质二级结构中 α -螺旋和 β -折叠含量, 改变蛋白质的构象^[31]。但 LOX 活性下降了 3.54%~4.92%, 脂肪酶活性下降了 27%~48.8%。与 LOX 相比, 脂肪酶受等离子体影响更大, 失活率较高。我们推测由于两种酶的二级结构不同, 导致低温等离子体对脂肪酶的结构有更强的破坏性。Tolouie 等^[32]研究了不同处理时间和电压下等离子体处理对小麦胚芽中内源酶活性的影响, 结果表明随着处理电压与时间的增加, 酶活性逐渐下降, 且脂肪酶的失活率要高于 LOX, 绿原酸对草鱼冷藏过程中的酶活性变化也有类似的结果^[30]。

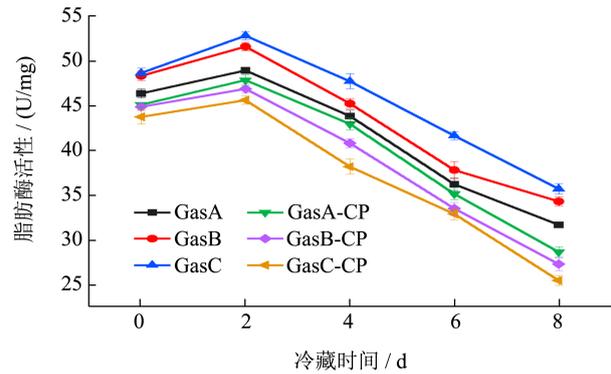
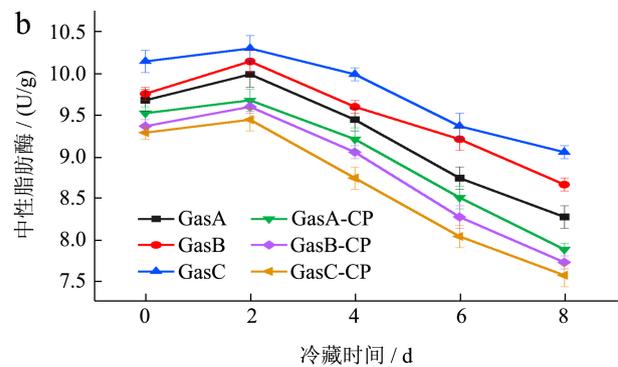
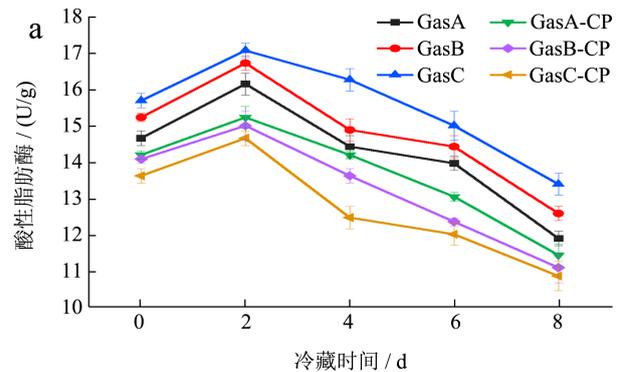


图4 低温等离子体激发介质对罗非鱼片脂肪酶活性影响
Fig.4 Effects of cold plasma excitation medium on the lipase activity of tilapia fillets

2.5 脂肪水解酶活性



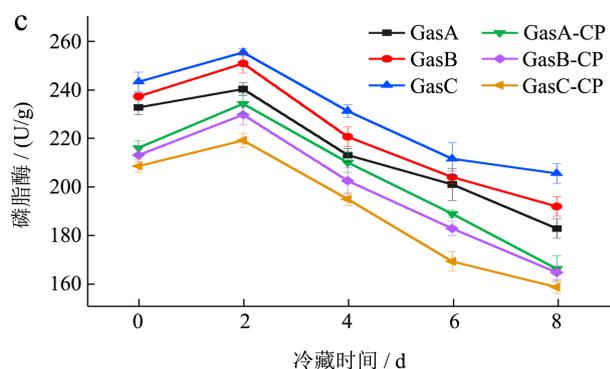


图5 低温等离子体激发介质对罗非鱼片酸性脂肪酶 (a), 中性脂肪酶 (b) 和磷脂酶 (c) 活性影响

Fig.5 Effects of cold plasma excitation medium on the acid lipase (a), neutral lipase (b) and phospholipase (c) activity of tilapia fillets

脂肪水解酶参与脂质的分解, 能够从脂肪组织中的甘油三酯、甘油二酯和甘油单酯中释放短链脂肪酸。如图5显示了不同低温等离子体激发介质对罗非鱼片在冷藏过程中脂肪水解酶活性的变化。如图5所示, 无论激发介质如何变化, 处理组中脂肪水解酶活性低于未处理组, 即低温等离子体产生的活性物质能够减弱酶活性。金鲳鱼经低温等离子体处理后也发现酸性脂肪酶, 中性脂肪酶和磷脂酶活性下降的现象^[12]。随着处理组激发介质中O₂含量的增加, 脂肪水解酶活性下降, 与LOX和脂肪酶的变化趋势一致。在冷藏期间, 脂肪水解酶活性均先升高, 后有明显的下降趋势。在冷藏期间, 磷脂酶表现出比酸性脂肪酶和中性脂肪酶更高的

活性, 可能是罗非鱼片中磷脂酶的稳定性更强。研究可知, 低温等离子体产生的ROS/RNS对酶中活性基团造成氧化损伤, 进而破坏其结构导致变性失活^[6]。因此, 增加激发介质中O₂含量能够促使低温等离子体产生更多反应活性物质, 增强对脂肪水解酶活性的失活作用。

2.6 皮尔森相关性分析

低温等离子体处理对罗非鱼片冷藏过程中脂质氧化值与酶活性之间的皮尔森相关性分析结果如表1所示。POV值和TBARS值之间的相关性系数为0.971, 即低温等离子体处理后罗非鱼片初级氧化值和次级氧化值之间具有非常强的正相关性 ($P < 0.01$)。LOX、脂肪酶、酸性脂肪酶、中性脂肪酶和磷脂酶之间呈现显著正相关 ($P < 0.01$), 它们在脂质氧化中过氧化物生成以及不饱和脂肪酸分解中起到协同作用。酶活性值与脂质氧化值之间呈现显著负相关 ($P < 0.01$), 其中, POV值和TBARS值与脂肪酶活性变化之间的负相关性最强, 皮尔森相关系数分别为-0.909和-0.838, 表明初级氧化和次级氧化都受脂肪酶的活性的影响更强。罗非鱼片冷藏过程中酶活性减弱, 但脂质氧化值增加, 即增加O₂含量, 有利于降低与脂质氧化相关的酶活性^[11]。但高氧含量和低温等离子体处理, 二者加速了罗非鱼片中脂质氧化过程中氢过氧化物、醛、醇等氧化产物的生成^[19]。

表1 脂质氧化值与酶活性之间的Pearson相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficient between lipid oxidation value and enzyme activity

	POV	TBARS	LOX	脂肪酶	酸性脂肪酶	中性脂肪酶	磷脂酶
POV	1						
TBARS	0.971**	1					
LOX	-0.790**	-0.730**	1				
脂肪酶	-0.909**	-0.838**	0.934**	1			
酸性脂肪酶	-0.810**	-0.742**	0.961**	0.945**	1		
中性脂肪酶	-0.881**	-0.821**	0.953**	0.976**	0.969**	1	
磷脂酶	-0.881**	-0.819**	0.953**	0.971**	0.966**	0.984**	1

注: ** $P < 0.01$ 。

3 结论

低温等离子体处理后能够促进罗非鱼片脂质初级氧化和次级氧化, 同时能够降低LOX、脂肪酶和脂肪水解酶类的反应活性。激发介质中的O₂含量

越高, 低温等离子体处理后罗非鱼片脂质氧化程度越高, 冷藏8 d后, 在30% O₂含量处理组中POV值和TBARS值为0.55 meq/kg和1.15 mg/kg, 显著高于其他处理组 ($P < 0.05$); 同时所有相关酶类活性均呈现先上升后下降的趋势, 在冷藏2 d时达

到最高,但冷藏8 d后,在30% O₂含量处理组中 LOX 和脂肪酶活性仅有 38.89 U/mg 和 25.54 U/mg,脂肪水解酶活性也均维持在最低水平,而10% O₂含量处理组中相关酶活性下降了17.23%~41.64%,低于其他处理组中酶活性的变化量。Person 相关性表明,在罗非鱼片冷藏期间脂质氧化值与酶活性变化呈显著负相关($P < 0.01$),酶促氧化受抑制作用明显。低氧激发介质有利于减缓罗非鱼片的脂质氧化,维持一个相对高的酶活性。

通过调整激发介质,可以控制低温等离子体处理对脂质氧化的影响以及对酶活性的作用。本研究发现脂质氧化与酶活性变化呈显著负相关($P < 0.01$),但低温等离子体激发介质的差异导致产生的自由基含量和数量不同,造成脂质氧化反应的过程具有复杂性,因此,关于低温等离子体对脂质氧化的作用机理仍需要进一步的研究。

参考文献

- [1] MOHAMED E E, YOUNIS E R, MOHAMED E A. Impact of atmospheric cold plasma (ACP) on maintaining bolti fish (*Tilapia nilotica*) freshness and quality criteria during cold storing [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(5): e15442.
- [2] WONG L W, LOKE X J, CHANG C K, et al. Use of the plasma-treated and chitosan/gallic acid-coated polyethylene film for the preservation of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets [J]. Food Chemistry, 2020, 329: 126989.
- [3] ALBERTOS I, MARTIN-DIANA A B, CULLEN P J, et al. Shelf-life extension of herring (*Clupea harengus*) using in-package atmospheric plasma technology [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 53: 85-91.
- [4] OLATUNDE O O, BENJAKUL S, VONGKAMJAN K. Shelf-life of refrigerated Asian sea bass slices treated with cold plasma as affected by gas composition in packaging [J]. International Journal of Food Microbiology, 2020, 324: 108612.
- [5] 郇延军,周光宏,徐幸莲,等.金华火腿生产过程中脂质氧化及脂肪氧合酶变化特点研究[J].食品科学,2008,3:60-65.
- [6] DHARINI M, JASPIN S, MAHENDRAN R. Cold plasma reactive species: Generation, properties, and interaction with food biomolecules [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134746.
- [7] 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.
- [8] KE Z G, BAI Y P, ZHU H, et al. Characteristics of myoglobin degradation by cold plasma and its pro-oxidative activity on lipid in washed fish muscle [J]. Food Chemistry, 2022, 389: 132972.
- [9] TOLOUIE H, MOHAMMADIFAR M A, GHOMI H, et al. Argon and nitrogen cold plasma effects on wheat germ lipolytic enzymes: Comparison to thermal treatment [J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128974.
- [10] SHIEKH K A, BENJAKUL S. Effect of high voltage cold atmospheric plasma processing on the quality and shelf-life of Pacific white shrimp treated with Chamuang leaf extract [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 64: 102435.
- [11] SUROWSKY B, FISCHER A, SCHLUETER O, et al. Cold plasma effects on enzyme activity in a model food system [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 19: 146-152.
- [12] WANG S T, LIU Z Q, ZHAO M T, et al. Chitosan-wampee seed essential oil composite film combined with cold plasma for refrigerated storage with modified atmosphere packaging: A promising technology for quality preservation of golden pompano fillets [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 224: 1266-75.
- [13] WANG J M, FU T F, SANG X H, et al. Effects of high voltage atmospheric cold plasma treatment on microbial diversity of tilapia (*Oreochromis mossambicus*) fillets treated during refrigeration [J]. International Journal of Food Microbiology, 2022, 375: 109738.
- [14] FOLCH J, LEES M, STANLEY G H S. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues [J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, 226(1): 497-509.
- [15] KE Z G, BAI Y, BAI Y W, et al. Cold plasma treated air improves the characteristic flavor of Dry-cured black carp through facilitating lipid oxidation [J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131932.
- [16] DU H Y, LIU C, UNSALAN O, et al. Development and characterization of fish myofibrillar protein/chitosan/rosemary extract composite edible films and the improvement of lipid oxidation stability during the grass carp fillets storage [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 463-475.
- [17] LIU Q Y, LEI M L, LIN J J, et al. The roles of lipoxigenases and autoxidation during mackerel (*Scomberomorus niphonius*) dry-cured processing [J]. Food Research International, 2023, 173: 113309.
- [18] ŚMIECIŃSKA K, DASZKIEWICZ T. Lipid oxidation and color changes in beef stored under different modified atmospheres [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(3): e15263.
- [19] GAVAHIAN M, CHU Y H, MOUSAVI KHANEGHAH

- 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.
- [20] KEENER K M, JENSEN J L, VALDRAMIDIS V P, et al. Decontamination of Bacillus subtilis Spores in a Sealed Package Using a Non-thermal Plasma System [C]. Proceedings of the Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security. Springer Netherlands: Dordrecht, 2012: 445-455.
- [21] WANG X T, WANG Z B, ZHUANG H, et al. Changes in color, myoglobin, and lipid oxidation in beef patties treated by dielectric barrier discharge cold plasma during storage [J]. Meat Science, 2021, 176: 108456.
- [22] HUANG M M, WANG J M, ZHUANG H, et al. Effect of in-package high voltage dielectric barrier discharge on microbiological, color and oxidation properties of pork in modified atmosphere packaging during storage [J]. Meat Science, 2019, 149: 107-113.
- [23] XU J, SUN Q X, DONG X P, et al. Insight into the microorganisms, quality, and protein structure of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) treated with cold plasma at different voltages [J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100695.
- [24] OLATUNDE O O, BENJAKUL S, VONGKAMJAN K. High voltage cold atmospheric plasma: Antibacterial properties and its effect on quality of Asian sea bass slices [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 52: 305-12.
- [25] SEGA A, ZANARDI I, CHIASSERINI L, et al. Properties of sesame oil by detailed ¹H and ¹³C NMR assignments before and after ozonation and their correlation with iodine value, peroxide value, and viscosity measurements [J]. Chemistry and Physics of Lipids, 2010, 163(2): 148-56.
- [26] AMANPOUR A, VANDAMME J, POLAT S, et al. Non-thermal plasma effects on the lipoxygenase enzyme activity, aroma and phenolic profiles of olive oil [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 54: 123-131.
- [27] FU X J, XU S Y, WANG Z. Kinetics of lipid oxidation and off-odor formation in silver carp mince: The effect of lipoxygenase and hemoglobin [J]. Food Research International, 2009, 42(1): 85-90.
- [28] HAN L, BOEHM D, AMIAS E, et al. Atmospheric cold plasma interactions with modified atmosphere packaging inducer gases for safe food preservation [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 38: 384-392.
- [29] PANKAJ S K, MISRA N N, CULLEN P J. Kinetics of tomato peroxidase inactivation by atmospheric pressure cold plasma based on dielectric barrier discharge [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 19: 153-7.
- [30] CAO Q J, DU H Y, HUANG Y, et al. The inhibitory effect of chlorogenic acid on lipid oxidation of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) during chilled storage [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12: 1-12.
- [31] SUTAR S A, THIRUMDAS R, CHAUDHARI B B, et al. Effect of cold plasma on insect infestation and keeping quality of stored wheat flour [J]. Journal of Stored Products Research, 2021, 92: 101774.
- [32] TOLOUIE H, MOHAMMADIFAR M A, GHOMI H, et al. The impact of atmospheric cold plasma treatment on inactivation of lipase and lipoxygenase of wheat germs [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 346-352.