

低温等离子体对动物源食品中脂质氧化作用研究进展

刘宸成, 王佳媚*, 陈 姑, 桑晓涵, 蔡志成

(海南大学食品科学与工程学院, 海口 570000)

摘 要: 低温等离子体技术作为一种新兴非热杀菌技术, 具有广谱杀菌作用, 在食品杀菌保鲜领域已有广泛的应用研究, 但因低温等离子体含有大量活性自由基, 在杀死微生物的同时能够促进脂质和蛋白质氧化, 对产品品质造成一定影响。为降低低温等离子体处理对脂质氧化的促进作用, 减弱因脂质氧化对产品品质造成的负面影响, 添加抗氧化成为一种有效的途径。本文重点概述了低温等离子体处理对畜禽肉及其制品、水产及其制品、乳及其制品中脂质氧化的影响, 总结了处理时间、处理功率、处理电压、贮藏时间及样品中不饱和脂肪酸含量等因素对脂质氧化的影响。同时针对添加天然抗氧化剂降低低温等离子体处理食品中脂质氧化程度的研究内容进行总结和展望, 为低温等离子体技术在食品保鲜领域的深入研究及食品工业应用提供理论参考。

关键词: 低温等离子体; 动物源食品; 脂质氧化; 自由基; 处理参数; 抗氧化活性

Research progress of lipids oxidation of animal-derived food by cold plasma

LIU Chen-Cheng, WANG Jia-Mei*, CHEN Gu, SANG Xiao-Han, CAI Zhi-Cheng

(School of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570000, China)

ABSTRACT: As a new non-thermal sterilization technology, broad spectrum bactericidal action, cold plasma has been widely reported in the field of food sterilization and preservation. However, cold plasma contains a large number of active free radicals, which can accelerate the oxidations of lipids and protein, as well as kill microorganism, which has a certain impact on product quality. In order to reduce the promoting effect of cold plasma treatment on lipid oxidation, and weaken the negative effect of lipid oxidation to quality, adding antioxidant has become a potential effectively choice. This paper mainly summarized the effects of cold plasma on lipids oxidation of livestock and poultry meat and its products, aquatic products and its products, milk and its products, and summarized the effects of treatment time, treatment power and voltage, storage time, and unsaturated fatty acid content in the samples on lipid oxidation. At the same time, this paper summarized and prospected the investigations of adding natural antioxidants to reduce the degree of lipids oxidation, which provides theoretical references for the further research and industrial application of cold plasma technology in food preservation.

KEY WORDS: cold plasma; animal-derived food; lipids oxidation; free radicals; treatment parameters; antioxidant activity

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060568)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32060568)

*通信作者: 王佳媚, 博士, 副教授, 主要研究方向为非热加工技术、水产品加工与贮藏。E-mail: autumnjm@163.com

*Corresponding author: WANG Jia-Mei, Ph.D, Associate Professor, Hainan University, Haikou 570000, China. E-mail: autumnjm@163.com

0 引言

随着生活水平的提高,人们对于食品安全、食材新鲜度的要求也越来越高,生产和销售方在保障产品的微生物安全、延长食品货架期、维持生鲜风味等方面的挑战愈发严峻^[1-2]。热杀菌处理在食品工业中已经有广泛应用,但热处理会对食品产生不同程度的负面影响^[3]。例如,高温杀菌会促进鸭脖中重要的风味前体物质氨基酸和核苷酸分解,风味前体物质的减少使肉香味降低并产生异味^[4];蟹肉通过蒸制解冻导致肉中挥发性风味和滋味损失^[5]。新兴的超高压、超声波、脉冲电场和低温等离子体等非热杀菌技术具有良好的杀菌效果,且对食品的不良影响较小,可在保留食品天然风味的同时提高食品安全性。其中,低温等离子体作为热杀菌替代技术,因具有杀菌效果优良、对食品风味无显著影响等优势而备受关注。低温等离子体中含有带电粒子和活性物质,带电粒子可破坏细胞膜,活性物质也能够氧化蛋白和脂质使细胞膜裂解,从而达到杀菌目的^[6-7]。但低温等离子体中的活性物质所具有的高氧化活性,使其可与食品中脂质和蛋白质发生氧化反应,对食品品质产生不良影响。为此,本文概述低温等离子体对畜禽肉及其制品、水产及其制品、乳及其制品中脂质氧化的影响,总结处理电压、处理时间、处理功率等参数因素对产品中脂质氧化的影响,揭示低温等离子体诱发脂质氧化对食品品质影响,为低温等离子体技术在动物源食品保鲜领域的深入研究和食品工业中应用提供理论参考。

1 等离子体简介

1.1 等离子体概念

等离子体被称为除固体、液体和气体之外的第 4 种状态。根据气体热力学平衡状态分为高温等离子体和低温等离子体,当气体中电子和粒子达到热力学平衡时,气体温度在 $10^6 \sim 10^8$ K, 气体中双原子分解并被完全电离为等离子体状态;当气体中电子和粒子处于局部热力学平衡时,气体被部分电离且温度在 $300 \sim 2 \times 10^4$ K, 接近室温。低温等离子体通常是在电场中被高度电离的气体,含有正负离子、电子、紫外光、中性粒子等,整体呈电中性^[8-9]。因低温等离子体可以在室温下形成,无化学成分添加与残留,在食品工业中具有一定应用前景。

1.2 常见的低温等离子体产生系统

低温等离子体可通过高电能激发气体形成,在两个电极空隙间的气体中产生放电通道,电场加速使电子向负极移动,移动途中与气体分子发生碰撞导致电离,电离出的电子在电场中继续加速与气体分子发生碰撞,形成电子雪崩,最终充满整个放电通道^[10-11]。

1.2.1 介质阻挡放电

介质阻挡放电(dielectric discharge barrier, DBD)是指两个金属电极之间有玻璃、石英、聚合物、陶瓷构成的绝缘介质阻隔,用于阻隔两个电极之间形成稳定电流与电弧,当电极上的电压达到击穿气体的阈值时,导致介质间隙内的气体电离^[8]。DBD 系统主要包括高压和接地电极、电源、载气、控制器 4 部分(图 1)。

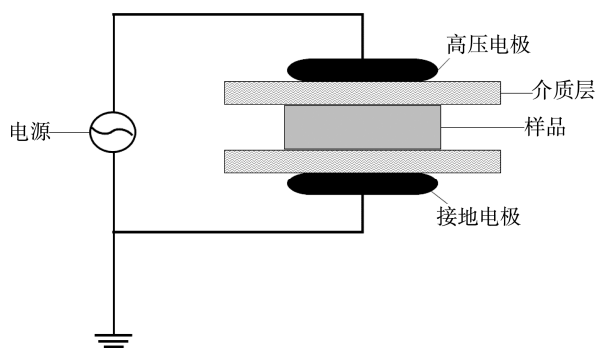


图 1 介质阻挡放电示意图

Fig.1 Schematic diagram of dielectric discharge barrier

1.2.2 大气压等离子体射流

大气压等离子体射流(atmospheric pressure plasma jet, APPJ),包括有高速气体流在中间通过的两个共轴电极,自由电子在射频场之间聚集之后,与环境中的气体分子发生碰撞之后产生等离子体。这些无弹力的碰撞产生的各种活性物质(激发态原子和分子及自由基)在装置的喷嘴处以很高的速度流出,将放电区的高能粒子和活性物质输送到开放空间,等离子体含有的活性物质无需限制在电极间隙中,具有广阔的应用前景^[12]。装置有高压针状电极、接地环电极、介质管、交流电源为高压电极提供电流(图 2)。工作时,针状电极积累大量电荷引发电子雪崩,正离子向阴极移动并最终充满整个电极间隙,从接地电极喷出的射流带走接地电极周围的高能粒子^[13]。

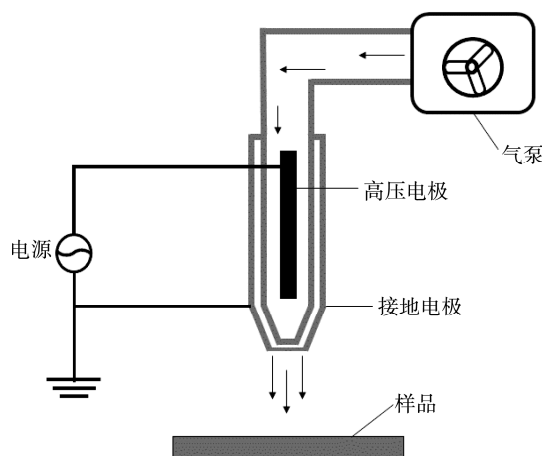


图 2 等离子体射流示意图

Fig.2 Schematic diagram of plasma jet

1.2.3 电晕放电

电晕放电(corona discharge plasma, CD)是对电极施加电压使周围电场强度升高产生导电区域且不会对附近物体产生电弧^[14]。发生设备通常由一个尖头电极来增强局部电场, 气体通过尖头孔出来, 成为电晕点附近的环境气体被激发, 尖头电极对应一个不对称的电极(平面), 由于电极的不对称性从而避免电弧的形成, 达到电晕放电的效果, 等离子体产生区域近似冠状(图 3)。

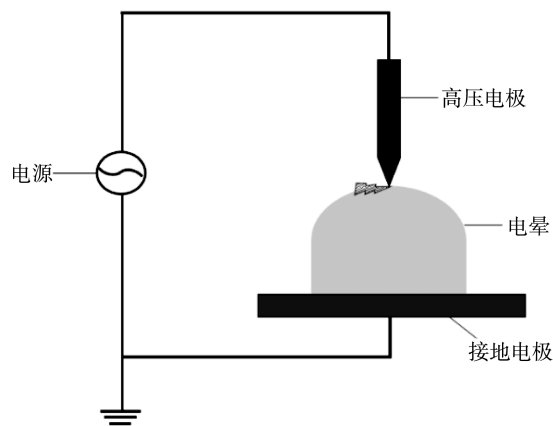


图 3 电晕放电示意图
Fig.3 Schematic diagram of corona discharge plasma

2 低温等离子体处理对动物源食品及其制品中脂质氧化的影响

低温等离子体在多种动物源食品及其制品中具有良好的杀菌效果^[15-17], 由于处理过程中会形成大量的活性自由基, 对产品品质造成不同程度影响, 其影响程度与产品种类和处理条件相关。低温等离子体的处理条件因素种类多样, 同时各类样品之间的差异明显, 有部分研究表明, 低温等离子体处理可加速食品中脂质氧化(表 1), 而部分研究表明, 低温等离子体处理对脂质氧化无显著影响(表 2)。由表 1~2 可知, 主要处理参数变化可引起牛肉、鸡肉及其制品、部分鱼类及其制品发生不同程度的脂质氧化, 产品的感官特性变化亦不尽相同, 主要处理参数包括: 所采用的低温等离子体系统、处理电压、处理时间、激发气体种类、处理功率等。低温等离子体处理可变参数多, 任一主要参数发生变化都会引起等离子体成分变化, 进而影响其与产品中脂肪酸的反应, 导致产品氧化程度不同。因此, 关于低温等离子体处理动物源食品及其制品中脂质氧化作用规律, 及其对产品品质和风味影响仍需进一步深入研究。

2.1 低温等离子体对牛肉及其制品脂质氧化影响

牛肉是深受大众喜爱的红色肉类, 其消费量逐年增加。生鲜牛肉的冷杀菌保鲜研究一直是众多学者关注的热点, 低温等离子体因其可以在室温下操作、不添加任何化

表 1 低温等离子体处理加速产品中脂质氧化的研究
Table 1 Research about accelerated lipids oxidation in food caused by cold plasma treatment

处理对象	处理参数	脂质氧化程度	感官评价变化	参考文献
牛肉	DBD, 72 kV, 86 s, 空气, O ₂ 35%+二氧化碳 35%+氮气 30%	低温等离子体处理显著增加 TBARS	抑制风味酸败	[6]
干腌牛肉	ACP, 25 kV, 42 kHz, 180、300 s, 纯氧, 纯氩气, 氩气+O ₂	O ₂ , 180 s 处理 TBARS 最高, 纯氩气处理降低脂质氧化	无差异	[15]
牛腰肉	DBD 系统, 平均功率 2 W, 2.5~10 min, 空气	10 min 处理促进 TBARS 显著增加	处理 7.5~10 min 显著降低口味评分, 10 min 显著降低总体评分	[17]
牛肉饼	DBD 系统, 50~70 kV, 50~110 Hz, 120 s	电压>60 kV, TBARS 值显著增加超过感官限值 2.5 mg/kg	颜色劣变	[18]
猪里脊	DBD 系统, 3 kV, 30 kHz, 5、10 min, 氮气(99.999%)、氩气(0.3% O ₂)	处理后 TBARS 增加, 惰性气体加入 O ₂ 显著促进脂质氧化	风味劣变	[19]
干制牛肉片	DBD 系统, 15.5、31、62 W, 70% Ar+30% O ₂ , 2.5、5、10、20、60 s	等离子体处理组 TBARS 显著大于未处理组, 冷藏 14 d 后<0.5 mg/kg 感官阈值	无差异	[20]
培根	大气压 DBD 系统, 75、100、125 W, 60、90 s, 氦气+O ₂	载气为纯 He 气 TBARS 值最低, He 中添加 O ₂ 增加脂质氧化; 随着功率增加, 脂质氧化加深	无差异	[21]
火腿	ACP, 30 kV, 载气: 20% O ₂ +20% N ₂ +60% CO ₂ 、100% CO ₂ , 5、10 min	含有 20% O ₂ 显著增加 TBARS	红度下降	[22]
非冻猪肉片	CDPJ 系统, 20 kV, 58 kHz, 1.50 A, 30、60、90、120 s	等离子体处理增加 POV, 而 TBARS 无显著增加, 非冻猪肉感官轻微降低	降低	[23]
猪背肌	DBD 系统, 30~80 kV, 10~70 s, 70% N ₂ +30% O ₂	TBARS 随处理电压和时间增加而增加但低于感官阈值	无差异	[24]

表 1(续)

处理对象	处理参数	脂质氧化程度	感官评价变化	参考文献
鲭鱼	DBD 系统, 70、80 kV, 1、3、5 min	处理后过氧化值增加, TBARS 无显著差异, 促进脂质初级氧化反应	—	[25]
鲱鱼	DBD 系统, 70、80 kV, 5 min	80 kV 处理显著增加 TBARS 值	随着电压增加, 颜色变化增大	[26]
干黑嘴鱼	DBD 系统, 3 kV, 1、5、10、20、30 min	处理 1 min, TBARS 值无显著差异, 处理 20、30 min 时是对照组的 1.5~1.6 倍	无差异	[27]
干阿拉斯加鳕鱼	CDPJ, 1.5A, 0~3 min	过氧化值无显著差异, TBARS 值随处理时间延长而增加	无差异	[28]
半干秋刀鱼	CDPJ, 20 kV, 58 kHz, 1.5 A, 0~10 min	脂肪酸氧化, 脂质氧化程度增加, TBARS 值随处理时间增加而增加	显著提高	[29]
鱿鱼干	CDPJ, 20 kV, 1.5 A, 58 kHz, 1、2、3 min	TBARS 值随处理时间增加而增加, 高于对照组	无差异	[30]
三文鱼寿司	DBD 系统, 70、80 kV, 5、10 min	等离子体处理后 TBARS 增加, 脂肪酸含量无显著差异	—	[31]
熏鲑鱼片	等离子体射流, 2 kV, 1 W, 1、2、4 min	TBARS 值随处理时间延长而增加但低于于感官阈值	无差异	[32]
蓝梭子蟹	DBD 系统, 80 kV, 5、10、15 min	脂质氧化随时间增加而增加, 不饱和脂肪酸含量降低	无差异	[33]
牛油和乳脂	CAP 系统, 60~80 kV, 3~30 min	不饱和脂肪酸含量下降, 小分子物质如醛, 酸含量增加	—	[34]
鲈鱼	DBD 系统, 80 kV, 5 min, 载气 CO ₂ :Ar:O ₂ (6:3:1)	等离子体促进脂质氧化	无差异	[35]

注: —表示文献没有相关研究; 低温大气等离子体(atmospheric cold plasma, ACP); 电晕放电等离子体射流(corona discharge plasma jet, CDPJ); 硫代巴比妥酸反应物质(thiobarbituric acid reactive substance, TBARS); 过氧化值(peroxide value, POV)。

表 2 低温等离子体处理未加速脂质氧化的研究
Table 2 Research about non-accelerated lipids oxidation in food caused by cold plasma treatment

处理对象	处理参数	脂质氧化程度	感官评价变化	参考文献
牛腰肉	DBD 系统, 15 kHz、2 W, 2.5、5、7.5、10 min, 空气	处理<10 min 处理组和对照组相比 TBARS 无显著差异	无差异	[17]
牛腰肉	DBD 系统, 8.16~9.44 kV,	无显著变化	无差别	[36]
鸡胸肉	DBD 系统, 15 kHz, 2W, 空气, 0~10min	无显著变化	总体接受度无显著差异	[37]
鸡胸肉	ACP 系统, 100 kV, 1、3、5 min	无显著变化	无差异	[38]
鸡胸肉	DBD 系统, 38.7 kV, 3.5 min, 空气	无显著变化	无差异	[39]
火腿	ACP 系统, 30 kV, 载气: 50%二氧化碳+50%氮气, 5、10 min	处理时间延长不增加 TBARS	无差异	[22]
冷冻猪肉片	CDPJ 系统, 20 kV, 58 kHz, 1.50 A, 30、60、90、120 s	等离子体处理增加过氧化值, 而 TBARS 无显著增加(0.55~0.56 mg/kg), 不同功率无差异, 脂质氧化程度低	冷冻猪肉感官无显著变化	[23]
猪肉糜	DBD 系统, 550 W, 0~30 min, 空气	无显著差异	烹饪后红度增加	[40]
鲭鱼	DBD 系统, 80 kV, 5 min	TBARS 值无显著差异	—	[41]
鲱鱼	DBD 系统, 70、80 kV, 5 min	70 kV 处理 TBARS 值无显著差异	随着电压增加, 颜色变化增大	[26]
干黑嘴鱼	DBD 系统, 3 kV, 1、5、10、20、30 min	处理 1 min, TBARS 值无显著差异	无差异	[27]
南美白对虾	DBD 系统, 50、60 kV, 60 s	脂肪含量无变化	抑制黑变, 风味无差异	[42]
生牛奶	DBD 系统, 3、6、9、12、15、20 min	脂肪酸组成无显著变化	无差异	[43]

学合成物质、无污染和有害残留,成为生鲜牛肉非热杀菌应用研究的热点技术。据报道,牛腰肉采用 DBD 系统处理 10 min 后,其 TBARS 值显著增加($P<0.05$),同时伴随滋味下降,腐败味增加,总体感官评价下降^[17]。同样用 DBD 系统处理牛肉饼,当处理电压高于 50 kV 时,处理后牛肉饼脂质氧化程度增加,脂质氧化产生的次级产物降低肌红蛋白稳定性,导致牛肉饼的红度值(a^*)下降,对产品感官造成负面影响^[18]。另外,低温等离子体处理产生的自由基促进脂质氧化形成的次级氧化产物如醛、醇、酮、酸等小分子风味物质^[19],可形成鱼腥味、金属味甚至腐臭味从而降低风味感官。

功率、时间、激发包装内气体成分等处理因素作为 DBD 系统的主要参数,改变其参数范围对牛肉干的 TBARS 值影响显著。与上述研究不同,有研究显示尽管在一定参数范围内,低温等离子体处理可以促进脂质氧化,但是并未观察到产品感官风味发生明显劣变^[20]。例如,采用 8.16~9.44 kV 功率的 DBD 系统处理牛腰肉,未发现其 TBARS 值有显著变化^[36],而乔维维^[6]采用 72 kV 低温等离子体处理牛肉 86 s,发现牛肉 TBARS 值有升高趋势,但产品品质无显著影响。有报道采用含有氧气的气体包装牛肉,经低温等离子体处理 3 和 5 min 发现,处理 5 min 能够加速牛肉脂质氧化,但是感官也未发生显著变化^[15],低温等离子体处理过程中,氧气被激发形成的臭氧、超氧阴离子、单分子氧等高反应性物质会加速肉中脂质氧化^[44],而处理电压和时间等在一定范围内不会对产品的感官风味产生显著影响。

综上,升高电压、延长处理时间及增加氧气含量,都会促进牛肉及其制品脂质氧化,增加脂质氧化的次级产物,特别是低分子醛类,进而造成牛肉产品感官品质和风味劣变。而降低电压、缩短处理时间和降低氧气含量,可减少低温等离子体处理过程中高氧化活性自由基的生成量,减弱对产品中脂质氧化的促进作用。因此,在实际应用中应该基于实际处理因素,严格控制低温等离子体处理的电压、时间和氧气含量等主要参数。

2.2 低温等离子体对鸡肉及其制品脂质氧化影响

鸡肉是一种高蛋白、低脂肪的禽肉,价格低廉而深受消费者喜爱^[45]。低温等离子体在鸡肉及其制品杀菌保鲜应用中有大量研究,同时,低温等离子体处理对鸡肉品质的影响也受到广泛关注。与羊肉、牛肉相比,鸡肉经低温等离子体处理后脂质氧化程度波动更低,这与鸡肉中脂质含量低有关^[37,46-47]。MOUTIQ 等^[38]发现鸡肉经 100 kV 低温等离子体处理 1~5 min 后,处理组和对照组之间的 TBARS 值无显著差异。同样的结果在 DBD 系统处理的鸡胸肉中也有发现^[39],当鸡胸肉采用 39 kV 处理 3.5 min,处理组和对照组鸡肉 TBARS 值之间没有显著差异。但是,长时间处

理会造成鸡肉风味品质下降,钱婧等^[24]研究发现,低温等离子体处理 10 min 可以对鸡胸肉起良好杀菌效果,同时对脂质氧化并未产生明显的促进作用,当延长处理时间(>10 min)会造成鸡肉风味下降,但仍在可接受范围内。

由于鸡肉脂肪含量较低,适当增加电压,提高杀菌效果的同时对脂质氧化的促进作用并不显著,有利于维持鸡肉的品质。低温等离子体在鸡肉产品中可能具有更加广泛的应用前景,但是长时间处理可能产生异味,因此,关于处理时间与鸡肉中脂质氧化程度及风味成分变化的相关性仍需进一步研究。

2.3 低温等离子体对猪肉及其制品脂质氧化影响

猪肉中含有大量脂肪酸, TBARS 变化可以更好地评估低温等离子体处理对样品脂质氧化的影响^[21]。TBARS 变化随着处理条件的改变而发生不同程度变动,包装内氧气含量是影响产品脂质氧化的重要因素之一。当包装中氧气含量增加, DBD 系统处理的猪腰肉中微生物数量显著下降, TBARS 升高,感官品质明显下降^[19]。例如,当增加即食火腿包装内氧气含量,低温等离子体处理后即食火腿的脂质氧化程度明显增加^[22]。猪肉的冻存状态也会影响低温等离子体处理过程中脂肪酸氧化程度,有研究采用 20 kV 电晕放电等离子体处理冷冻猪肉 60 s,猪肉中过氧化值显著增加,而处理 90 s 的未冷冻猪肉的过氧化值未明显增加^[23],此现象可能与冷冻过程中细胞结构被破坏导致渗出的细胞内物质的催化作用有关。低温等离子体处理条件在生鲜猪肉和猪肉糜中有不同影响结果,钱婧等^[24]研究低温等离子体处理(30~80 kV, 10~70 s)对生鲜猪肉脂质氧化作用,发现升高电压、延长处理时间能促进生鲜猪肉脂质氧化,但在所采用的处理条件下猪肉 TBARS 值仍在可接受范围内,未产生明显异味;而经 DBD 等离子体系统处理猪肉糜(30~60 min),未发现显著脂质氧化和感官改变^[40]。因此,控制等离子体处理的时间有利于维持猪肉品质,当低温等离子体激发气体中氧气含量增加,会影响处理后脂质氧化程度;同时,猪肉的冷冻状态也会影响其氧化程度。因此,明确处理因素变化与氧化产物和感官风味之间的关系,是研究低温等离子体处理条件对猪肉脂质氧化程度的关键。

2.4 低温等离子体对鱼类及其制品脂质氧化影响

2.4.1 低温等离子体对新鱼类脂质氧化影响

鱼肉中含有丰富的脂肪酸,新鲜鱼肉易于腐败,对热杀菌处理非常敏感,低温等离子体处理对鱼肉中脂质氧化的影响也是众多学者关注的重点之一。随着低温等离子体处理的电压升高和时间延长,新鲜鲭鱼(*Scombersc ombrus*)片的过氧化值和二烯值显著升高^[25],而处理组样品 TBARS 与对照组无显著差异,表明低温等离子体处理显著促进鱼肉中脂肪酸的一级氧化反应过程,但是对鱼肉中脂肪酸二级氧化产物无显著影响。同时,研究者发现,低

温等离子处理能显著增加新鲜鲭鱼片中油酸和二十碳五烯酸的含量,降低软脂酸含量^[25]。由于脂肪酸氧化是多级链式反应,反应持续时间较长,中间产物成分相对多。因此,低温等离子处理后立即取样与处理后放置一段时间取样,检测脂质氧化程度结果可能会有差异。PÉREZ-ANDRÉS等^[41]也有报道过类似的结果,采用DBD系统80 kV处理鲭鱼5 min,处理样品TBARS未显著增加,表明鱼肉脂质二级氧化产物未显著增加。但是,鱼肉经低温等离子体处理后在储藏过程中TBARS会呈现明显增加。ALBERTOS等^[26]采用70 kV低温等离子体处理鲱鱼(*Clupea harengus*),在贮藏9 d后样品TBARS高于未处理组,此结果说明鱼肉经低温等离子体处理后脂质氧化二级产物随着贮藏时间延长而逐渐积累;同时,该研究发现80 kV处理组鲱鱼的TBARS在贮藏1 d后即高于未处理组,贮藏6 d时鱼肉TBARS已超过可接受限值,形成明显异味,表明升高处理电压能够加速鱼肉中脂质氧化,加快二级氧化产物的形成和积累。因此,控制低温等离子体处理条件和贮藏条件是保持鱼肉脂质氧化程度在可接受范围内的关键。

2.4.2 低温等离子体对鱼类干制品脂质氧化影响

鱼干产品是常见的鱼类制品,通常在常温下贮藏,贮藏过程中会发生吸潮和腐败现象。低温等离子体技术能够在常温常压下对产品进行杀菌,有效实现防腐,且处理过程未有明显温度升高,有效避免了热处理技术对产品的伤害。研究显示,低温等离子体处理能够增加干制黑嘴鱼的TBARS值,但其pH、颜色和风味等没有显著变化^[27]。阿拉斯加鳕鱼干^[28]和半干秋刀鱼^[29]经低温等离子体处理后,TBARS值也显著增加,但过氧化值无明显变化。此结果除受低温等离子体处理条件差异影响,还可能与脂肪酸氧化反应过程有关。脂质氧化是链式反应,氧化过程中脂肪酸先降解成过氧化物类产物(过氧化值反映初级氧化程度),此类产物不稳定很容易进一步降解成为小分子醛类(TBARS反映二次氧化程度)。由于过氧化值产物是动态变化,检测结果变化不明显,而TBARS值产物得到相对稳定的积累,其结果变化明显。另外,有研究发现鱿鱼干经低温等离子体处理后TBARS随处理时间延长而增加^[30],再次证明了处理时间对脂质氧化的负面影响,同样的现象在三文鱼寿司^[31]和熏鱼^[32]中也有研究报道。因此,缩短处理时间是减低产品脂质氧化的有效途径,在后续研究过程中可尝试采用短时间多次处理,减弱处理过程对脂质氧化的促进作用,以期实现维持产品良好感官品质。

2.5 低温等离子体对虾、蟹脂质氧化影响

虾和螃蟹是深受大众喜爱的甲壳类产品,其抑菌保鲜方法一直是研究的热点。采用DBD低温等离子体处理蓝梭子蟹(*Portunus armatus*),其脂质氧化程度随处理时间的延长而加重,多不饱和脂肪酸含量降低^[33],这与蟹肉中富含多不饱和脂肪酸易于受到自由基攻击有关。低温等离

子体处理能够加速南美白对虾(凡纳对虾)中脂质氧化,但是对脂肪酸含量无显著影响^[42]。采用低温等离子体活化冰处理东方对虾(*Penaeus orientalis*),尽管处理样品的TBARS值随着贮藏时间延长而升高,但是低于对照组^[48],表明低温等离子体活化冰可以抑制虾的脂肪氧化,有利于维持冷藏过程中产品品质。由于低温等离子体在虾和蟹等甲壳类产品及其制品中的研究报道相对少,此技术对产品中脂质氧化的影响还有待进一步探索。

2.6 低温等离子体对牛乳及其制品脂质氧化影响

牛乳及其制品中含有大量的不饱和脂肪酸,经低温等离子体处理后容易发生氧化反应。SARANGAPANI等^[34]研究不同低温等离子体处理条件对乳制品和牛油中脂肪成分及氧化产物的影响,发现处理后乳脂和牛油中不饱和脂肪酸相对含量分别由34.06%和44.05%降至28.47%和38.60%;采用红外光谱和低场核磁共振分析得出产生的次氧化产物主要为壬醛、壬酸、己醛、戊醛等饱和醛和羧酸类物质。表明低温等离子体处理促使乳制品及牛油中的脂肪酸发生分解,降解成小分子物质,对风味特性的变化具有一定负面影响。同时,有报道称低温等离子体处理5 min可显著降低全脂牛奶中短链脂肪酸的浓度,不能改变牛奶中饱和脂肪酸浓度^[43]。低温等离子体中的产生臭氧、超氧阴离子及羟基自由基等活性氧自由基,只能攻击不饱和脂肪酸中的不饱和键,发生氧化反应,而对饱和状态的脂肪酸无影响。综上,低温等离子体处理后牛乳的风味成分种类、含量变化是研究关注的重点内容之一,同时处理后营养成分含量及对饮用后人体的营养价值变化,也是研究者应该关注的内容。

2.7 低温等离子体活化水对食品脂质氧化影响

低温等离子体活化水或者活化溶液是指经低温等离子体处理后含有活性成分的水或者溶液,可采用浸泡、清洗等途径用于食品的杀菌保鲜处理,是近几年的新兴研究方向,部分报道见表3。QIAN等^[49]采用低温等离子体活化乳酸浸泡鸡腿10 min,发现处理组样品TBARS值与对照组无显著差异,且贮藏过程样品的TBARS值增加缓慢。LUO等^[53]采用低温等离子体活化水腌制猪腰肉,发现在腌制后风干过程中,活化水处理组样品的脂质氧化程度降低。低温等离子体处理不添加亚硝酸盐的卤水,采用处理后卤水浸泡猪肉20~60 min制成猪肉干,发现样品的TBARS值随着浸泡时间延长而减少^[54],该研究认为,低温等离子体处理卤水产生NO_x,NO_x转化为亚硝酸根离子导致亚硝酸盐含量升高,亚硝酸盐抑制猪肉中脂质氧化;另一方面,NO_x可通过清除脂质过氧自由基来抑制脂质过氧化链反应。低温等离子体活化水或溶液在食品加工过程中能够减弱脂质氧化,有利于产品品质维持,这是低温等离子体技术未来研究发展的方向之一。关于活化水或者溶液中的主要成分、含量及其作用途径的研究还需进一步探索。

表 3 低温等离子体活化溶液对食品中脂质氧化的影响研究
Table 3 Effect of cold plasma-activated water on the lipids oxidation in food

处理对象	处理参数	脂质氧化程度	感官评价变化	参考文献
东方对虾	DBD 系统, 5 min 制得等离子体活化水	抑制脂质氧化	无差异	[48]
鸡腿	等离子体射流处理 0~0.2% (<i>V:I</i>)乳酸 40~100 s	处理后 TBARS 无显著差异, 冷藏期间抑制 TBARS 增加	抑制风味劣变	[49]
鳕鱼排	高压射流系统, 10 kV, 氧气和氩气, 处理 90 min, 浸泡鱼排 30~120 s	抑制脂质氧化	—	[50]
牛腱子肉	射流等离子体系统, 40、60、80、120 s 制得等离子体活化水浸泡 10 min	脂质氧化程度降低	无差异	[51]
南美对虾	压差直接放电系统, 60~70 W, 氮气:氧气 (85%:15%)处理去离子水 20 min 浸泡南美对虾 20 s	处理后 TBARS 无显著变化, 冷藏期间抑制脂质氧化	—	[52]
猪腰肉	DBD 系统, 50、60、70 kV, 1、2、3、4、5 min 制得等离子体水	等离子体浸泡猪肉 TBARS<对照组	无差异	[53]
猪肉干	DBD 系统, 4 kHz, 峰值电压 3.8 kV, 20、40、60 min	随处理时间增加, TBARS 减少	无差异	[54]
猪里脊	射流等离子体系统, 500 W, 120 s, 氮气, 添加柠檬草油	等离子体处理显著增加 TBARS, 添加柠檬草油抑制脂质氧化	无差异	[55]
鲈鱼	DBD 系统, 80 kV, 5 min, 载气为二氧化碳 + 氩气 + 氧气(6:3:1), 添加椰壳提取物	椰壳提取物抑制脂质氧化	无差异	[35]
亚洲鲈鱼	DBD 系统, 90%氩气/10%氧气, 5 min, 添加壳寡糖	添加壳寡糖显著抑制 TBARS 增加在贮藏 12 d<感官阈值	无差异	[56]
玉米油	CDPJ 系统, 20 kV, 去除生育酚的玉米油 2.5、5、10、30、60 min, 添加 α -生育酚玉米油 3、6、9、12 min	等离子体处理加速植物油脂质氧化, 添加抗氧化剂可以抑制脂质氧化, α -生育酚的抗氧化效果最好	等离子体处理产生异常挥发性气味	[57]

3 抑制低温等离子体对脂质氧化促进作用的途径

3.1 添加抗氧化剂

低温等离子体中含有大量活性氧和活性氮自由基, 这些自由基可促进产品中脂质氧化, 添加抗氧化剂能够降低脂质氧化, 是抑制低温等离子体促进产品脂质氧化的途径之一。化学抗氧化剂可能引起安全性问题, 在食品中的应用研究受到一定限制, 而天然提取物抗氧化剂在食品中的应用研究具有广阔前景, 添加天然抗氧化剂来解决低温等离子体处理加速食品脂质氧化的问题报道日渐增多。CUI 等^[55]在猪里脊肉中加入丁基羟基茴香醚(butyl hydroxyanisole, BHA)和柠檬草油, 经低温等离子体处理后样品 TBARS 未有明显增加, 而未添加抗氧化剂组样品的 TBARS 呈显著增加; 同时, 发现添加柠檬草油可降低猪肉氧化程度, 同时提高对李斯特菌的抑制效果^[55]。在鸡肉中添加迷迭香^[58]和芳樟醇纳米乳^[59]能够有效降低低温等离子体处理对脂质氧化的促进作用。同样地, 在鱼肉中添加天然抗氧化成分能够抑制低温等离子体处理后鱼肉中脂质氧化程度。使用椰壳提取物的脂质体涂抹鲈鱼片, 鱼片经低温等离子体处理后 TBARS 呈显著降低趋势^[35]; 涂抹不

同浓度壳聚糖的亚洲鲈鱼片, 经低温等离子体处理后, 鱼片过氧化值和 TBARS 随着壳聚糖浓度增加而降低, 且低于未涂膜组^[56]。使用单一抗氧化剂能够有效抑制低温等离子体处理对脂质氧化的加速作用, 使用两种或者多种抗氧化成分协同效果并不显著。NA 等^[57]研究发现添加 β 胡萝卜素、 α -生育酚和芝麻酚可显著抑制 CDPJ 对植物油中脂质氧化的促进效果, 但两种抗氧化剂并没有协同作用。由于天然抗氧化剂成分和种类繁多, 其结构和性质差异是决定抗氧化作用效果的重要因素, 因此, 采用抗氧化剂来抑制低温等离子体处理过程中产品的脂质氧化, 需要综合考虑所用抗氧化剂的结构、性质、浓度等因素。关于多种抗氧化成分协同使用效果, 除了关注其结构和性质, 还需要进一步研究各成分与低温等离子体中氧化活性成分的反应途径。

3.2 低温等离子体激发气体成分

当低温等离子体激发气体中含有氧气和氮气时, 能够激发形成具有高氧化活性的含氧和含氮自由基, 这些活性自由基能够与食品中脂肪酸发生氧化反应, 导致脂质氧化程度加重。因此, 通过控制激发气体中氧气及氮气含量的比例, 可以有效减少活性氧和活性氮自由基的生成量, 从而减弱其对脂肪酸的氧化作用。在载气中提高惰性气体

的比例,能够减少活性氧基团的形成,从而降低食品中脂质氧化的程度^[15,20]。KIM 等^[19]采用纯氮气、氮气含 0.3% 氧气作为激发介质气体处理猪腰肉,发现纯氮气处理组样品脂质氧化程度减弱,同时杀菌效果也有降低。使用纯惰性气体能够有效抑制产品的脂质氧化,但是会减弱杀菌效果,因此,使用惰性气体与氧气混合气体作为等离子体激发气体,可以实现对产品高效杀菌作用同时减弱脂质氧化。所用混合气体的含量比例,需要根据所处理产品种类、成分、以及低温等离子体处理条件等多种因素综合确定。

4 结束语

作为非热处理技术,与热处理技术相比,低温等离子体能够有效避免热量对食品感官和风味的负面影响。但当低温等离子体处理条件和参数不合理或激发气体中氧气含量较高时,低温等离子体中会产生大量臭氧、超氧阴离子、一氧化氮等活性氧物质,从而促进猪肉、牛肉、鸡肉、水产品及其制品的脂质氧化,对其感官和风味也具有负面影响。故在低温等离子体在食品保鲜应用研究中,除了关注其高效的抑菌效果之外,还需要深入探索其对产品品质的影响及作用机理。大部分文献报道显示,低温等离子体处理能够促进食品中脂肪酸的反应,导致氧化产物积累,表现为脂质氧化程度加重,对产品感官或风味品质存在不同程度的负面影响。因此,如何有效减弱低温等离子体造成的脂质氧化,降低氧化对产品品质的负面影响,是低温等离子体在食品中应用研究的重点内容。根据已有文献报道总结,未来可从以下几个方面展开相关研究:1)低温等离子体处理条件:针对不同性质的产品,严格控制电压、功率、时间、方式、次数等处理因素,可以通过监测处理过程中生成的主要活性自由基数量与脂质氧化程度进行调控;2)处理后产品贮藏条件:由于脂肪酸氧化是持续的链式反应,低温等离子体处理结束后,脂质氧化仍会持续进行。因此,处理后产品的贮藏条件(温度、湿度、环境中氧气含量、光照等)对脂质氧化反应的影响作用也不容忽视;3)添加抗氧化剂:抗氧化剂可有效消除低温等离子体中活性自由基,减少自由基对脂肪酸攻击氧化作用,从而达到降低脂质氧化的目的。具有抗氧化活性的天然提取物种类非常多,探索原料方便易得、安全无毒的天然提取物作为抗氧化剂,安全健康又经济实惠,有利于工业应用推广;4)包装气体成分:特别是采用 DBD 低温等离子体系统处理,包装气体采用不同组分的气体,控制包装内容氧气含量,降低含氧活性自由基的生成量,从而达到减弱脂质氧化的目的。因此,针对所包装产品的性质、脂肪含量不同,采用惰性气体、高二氧化碳等气体包装,探索低温等离子体处理后产品氧化与气体组分之间的关系;5)低温等离子体处理方式应用途径的新尝试,采用等离子体活化水或溶液,或者将活化溶液制成冰,用于食品的低温保鲜,扩展低温等离子体技术的应用途径和方法。

参考文献

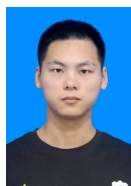
- [1] SAREMNEZHAD S, SOLTANI M, FARAJI A, *et al.* Chemical changes of food constituents during cold plasma processing: A review [J]. *Food Res Int*, 2021, 147: 110552.
- [2] UCAR Y, CEYLAN Z, DURMUS M, *et al.* Application of cold plasma technology in the food industry and its combination with other emerging technologies [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 114: 355–371.
- [3] PANKAJ SK, WAN Z, KEENER KM. Effects of cold plasma on food quality: A review [J]. *Foods*, 2018, 7(1): 4.
- [4] 宋玉申, 李聪, 崔萃, 等. 热杀菌条件对酱卤鸭脖品质的影响[J]. *肉类研究*, 2022, 36(4): 20–27.
- SONG YS, LI C, CUI C, *et al.* Effect of different thermal sterilization conditions on quality of sauced duckneck [J]. *Meat Res*, 2022, 36(4): 20–27
- [5] 孙颖璞, 高德梅, 许艳顺, 等. 复热方式对冻熟河蟹品质的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(3): 18–24, 31.
- SUN YY, GAO DM, XUN YS, *et al.* Effects of different reheating treatments on the quality of frozen cooked *Eriocheir sisensis* [J]. *Packag Food Mach*, 2022, 38(3): 18–24, 31.
- [6] 乔维维. 低温等离子体对牛肉杀菌效能特性及品质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- QIAO WW. Influence of cold plasma on sterilization an quality of fresh beef [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [7] 黄明明. 低温等离子体对金黄色葡萄球菌和鼠伤寒沙门氏菌杀菌机理及应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- HUANG MM. Mechanisms of staphylococcus aureus and *Salmonella typhimurium* inactivation and applications of cold plasma [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [8] 王俊鹏, 贺雅非, 李敏涵, 等. 冷等离子体技术在蛋白质改性中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(21): 299–307.
- WANG JP, HE ZF, LI MH, *et al.* Recent progress on application of cold plasma technology in protein modification [J]. *Food Sci*, 2021, 42(21): 299–307.
- [9] LEE J, LEE CW, YONG HI, *et al.* Use of atmospheric pressure cold plasma for meat industry [J]. *Korean J Food Sci An*, 2017, 37(4): 477.
- [10] GASANOVA S. Aqueous-phase electrical discharges: Generation, investigation and application for organics removal from water [J]. 2013, 62(4): 309–321.
- [11] KULAWIK P, TIWARI BK. Recent advancements in the application of non-thermal plasma technology for the seafood industry [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2019, 59(19): 3199–3210.
- [12] SUROWSKY B, SCHLÜTER O, KNORR D. Interactions of non-thermal atmospheric pressure plasma with solid and liquid food systems: A review [J]. *Food Eng Rev*, 2015, 7(2): 82–108.
- [13] 孟昭忠. 大气压等离子体射流的特性及其在细胞保护中的应用[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- MENG SZ. Characteristics of atmospheric pressure plasma jet and application in cell protection [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,

- 2018.
- [14] CHANG JS, LAWLESS PA, YAMAMOTO T. Corona discharge process [J]. IEEE T Plasma Sci, 1992, 19(6): 1152–1166.
- [15] GÖK V, AKTOP S, ÖZKAN 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]. Innov Food Sci Emerg, 2019, 56: 102188.
- [16] 仇俊, 翟国臻, 孙运金. 等离子体处理对生鲜牛肉杀菌效果及营养品质的影响[J]. 肉类研究, 2022, 36(4): 41–47.
- QIU J, ZHEI GZ, SUN YJ. Effects of plasma treatment on the sterilization and nutritional quality of fresh beef [J]. Meat Res, 2022, 36(4): 41–47.
- [17] JAYASENA DD, KIM HJ, YONG HI, *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 Microbiol, 2015, 46: 51–57.
- [18] WANG XJ, WANG ZB, 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 Sci, 2021, 176(12): 108456.
- [19] KIM HJ, YONG HI, PARK S, *et al.* Effects of dielectric barrier discharge plasma on pathogen inactivation and the physicochemical and sensory characteristics of pork loin [J]. Curr Appl Phys, 2013, 13(7): 1420–1425.
- [20] RØD SK, HANSEN F, LEIPOLD F, *et al.* Cold atmospheric pressure plasma treatment of ready-to-eat meat: Inactivation of *Listeria innocua* and changes in product quality [J]. Food Microbiol, 2012, 30(1): 233–238.
- [21] KIM B, YUN H, JUNG S, *et al.* Effect of atmospheric pressure plasma on inactivation of pathogens inoculated onto bacon using two different gas compositions [J]. Food Microbiol, 2011, 28(1): 9–13.
- [22] YADAV B, SPINELLI AC, MISRA NN, *et al.* Effect of in-package atmospheric cold plasma discharge on microbial safety and quality of ready-to-eat ham in modified atmospheric packaging during storage [J]. J Food Sci, 2020, 85(4): 1203–1212.
- [23] CHOI S, PULIGUNDLA P, MOK C. Corona discharge plasma jet for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* on inoculated pork and its impact on meat quality attributes [J]. Ann Microbiol, 2016, 66(2): 685–694.
- [24] 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 JH, *et al.* Effect of cold plasma sterilization on hemoglobin-induced lipid oxidation of fresh pork [J]. Packag Eng, 2020, 41(19): 1–7.
- [25] ALBERTOS I, MARTÍN-DIANA A, CULLEN PJ, *et al.* Effects of dielectric barrier discharge (DBD) generated plasma on microbial reduction and quality parameters of fresh mackerel (*Scomber scombrus*) fillets [J]. Innov Food Sci Emerg, 2017, 44: 117–122.
- [26] ALBERTOS I, MARTIN-DIANA AB, CULLEN PJ, *et al.* Shelf-life extension of herring (*Clupea harengus*) using in-package atmospheric plasma technology [J]. Innova Food Sci Emerg, 2019, 53: 85–91.
- [27] CHOI MS, JEON EB, KIM JY, *et al.* Impact of non-thermal dielectric barrier discharge plasma on *Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus* and quality of dried blackmouth angler (*Lophiomus setigerus*) [J]. J Food Eng, 2020, 278: 109952.
- [28] CHOI S, PULIGUNDLA P, MOK C. Microbial decontamination of dried alaska pollock shreds using corona discharge plasma jet: Effects on physicochemical and sensory characteristics [J]. J Food Sci, 2016, 81(4–6): M952–M957.
- [29] PULIGUNDLA P, CHOI S, MOK C. Microbial decontamination of Gwamegi (Semi-dried Pacific saury) using corona discharge plasma jet, including physicochemical and sensory evaluation [J]. J Aquatic Food Prod Technol, 2017. DOI: 10.1080/10498850.2017.1347592
- [30] CHOI S, PULIGUNDLA P, MOK C. Effect of corona discharge plasma on microbial decontamination of dried squid shreds including physicochemical and sensory evaluation [J]. LWT-Food Sci Technol, 2017, 75: 323–328.
- [31] KULAWIK P, ALVAREZ C, CULLEN PJ, *et al.* The effect of non-thermal plasma on the lipid oxidation and microbiological quality of sushi [J]. Innova Food Sci Emerg, 2018, 45: 412–417.
- [32] COLEJO S, ALVAREZ-ORDONEZ A, PRIETO M, *et al.* Evaluation of ultraviolet light (UV), non-thermal atmospheric plasma (NTAP) and their combination for the control of foodborne pathogens in smoked salmon and their effect on quality attributes [J]. Innova Food Sci Emerg, 2018, 50: 84–93.
- [33] OLATUNDE OO, CHANTAKUN K, BENJAKUL S. Microbial, chemical qualities and shelf-life of blue swimming crab (*Portunus armatus*) lump meat as influenced by in-package high voltage cold plasma treatment [J]. Food Biosci, 2021, 43: 101274.
- [34] SARANGAPANI C, RYAN KEOGH D, DUNNE J, *et al.* Characterisation of cold plasma treated beef and dairy lipids using spectroscopic and chromatographic methods [J]. Food Chem, 2017, 235: 324–333.
- [35] OLATUNDE OO, BENJAKUL S, VONGKAMJIAN K. Microbial diversity, shelf-life and sensory properties of Asian sea bass slices with combined treatment of liposomal encapsulated ethanolic coconut husk extract and high voltage cold plasma [J]. LWT, 2020, 134: 110232.
- [36] BAUER A, NI Y, BAUER S, *et al.* The effects of atmospheric pressure cold plasma treatment on microbiological, physical-chemical and sensory characteristics of vacuum packaged beef loin [J]. Meat Sci, 2017, 128: 77–87.
- [37] LEE H, YONG HI, KIM HJ, *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 Sci Biotechnol, 2016, 25(4): 1189–1195.
- [38] MOUTIQ R, MISRA NN, MENDONCA A, *et al.* In-package decontamination of chicken breast using cold plasma technology: Microbial, quality and storage studies [J]. Meat Sci, 2020, 159: 107942.
- [39] ROH SH, OH YJ, LEE SY, *et al.* Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, and Tulane virus in processed chicken breast via atmospheric in-package cold plasma treatment [J]. Lwt, 2020, 127: 109429.
- [40] JUNG S, LEE J, LIM Y, *et al.* Direct infusion of nitrite into meat batter by atmospheric pressure plasma treatment [J]. Innov Food Sci Emerg, 2017, 39: 113–118.
- [41] PÉREZ-ANDRÉS J, ALBA M, HARRISON SM, *et al.* Effects of cold

- atmospheric plasma on mackerel lipid and protein oxidation during storage [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 118: 108697.
- [42] 刘品, 陈静. 低温等离子体对南美白对虾防黑变及品质的研究[J]. 食品工业, 2018, 39(11): 184-187.
- LIU P, CHEN J. Study on prevention of blackening of *Penaeus vannamei* by low temperature plasma [J]. Food Ind, 2018, 39(11): 184-187.
- [43] KORACHI M, OZEN F, ASLAN N, *et al.* Biochemical changes to milk following treatment by a novel, cold atmospheric plasma system [J]. Int Dairy J, 2015, 42: 64-69.
- [44] 赵永强. 罗非鱼片臭氧减菌化处理中自由基的产生及其对产品品质与安全性的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- ZHAO YQ. Free radical producing in ozone sterilization pretreatment of Nile tilapia fillets and its effects on product quality and safety [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [45] 刘梦竹, 魏琦麟, 向蓉, 等. 鸡肉低温储藏保鲜技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(3): 104-110, 20.
- LIU MZ, WEI QL, XIANG R, *et al.* Research progress on techniques of chicken cryopreservation [J]. Storage Process, 2022, 22(3): 104-110, 20.
- [46] DOMINGUEZ R, PATEIRO M, GAGAOUA M, *et al.* A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products [J]. Antioxidants-Basel, 2019, 8(10): 429.
- [47] RHEE KS, ANDERSON LM, SAMS AR. Lipid oxidation potential of beef, chicken, and pork [J]. J Food Sci, 1996, 61(1): 8-12.
- [48] 艾春梅, 谢小本, 廖新浴, 等. 等离子体活化冰对东方对虾保鲜及品质的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 130-136.
- AI CM, XIE XB, LIAO XY, *et al.* Effect of plasma-activated water (PAW) ice on the quality of shrimps (*Penaeus orientalis*) during storage [J]. Food Mech, 2019, 35(3): 130-136.
- [49] QIAN J, CHEN W, HONG Z, *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.
- [50] CHAIJIAN M, CHAIJIAN S, PANYA A, *et al.* High hydrogen peroxide concentration-low exposure time of plasma-activated water (PAW): A novel approach for shelf-life extension of Asian sea bass (*Lates calcarifer*) steak [J]. Innova Food Sci Emerg, 2021, 74: 102861.
- [51] 应可沁, 李子言, 程序, 等. 等离子体活化水作为解冻介质对牛肉杀菌效能及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 338-345.
- YING KQ, LI ZY, CHENG X, *et al.* Effect of plasma-activated water as thawing media on the sterilization and quality of beef [J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 43(2): 338-345.
- [52] HERIANTO S, SHIH MK, LIN CM, *et al.* The effects of glazing with plasma-activated water generated by a piezoelectric direct discharge plasma system on whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. LWT, 2022, 154: 112547.
- [53] LUO J, WENJING Y, MUHAMMAD NM, *et al.* Evaluation of physicochemical properties and volatile compounds of Chinese dried pork loin curing with plasma-treated water brine [J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 13793.
- [54] YONG HI, LEE SH, KIM SY, *et al.* Color development, physicochemical properties, and microbiological safety of pork jerky processed with atmospheric pressure plasma [J]. Innova Food Sci Emerg, 2019, 53: 78-84.
- [55] CUI HY, WU J, LI CZ, *et al.* Promoting anti-*Listeria* activity of lemongrass oil on pork loin by cold nitrogen plasma assist [J]. J Food Saf, 2017. <https://doi.org/10.1111/jfs.12316>
- [56] SINGH A, BENJAKUL S. The combined effect of squid pen chitooligosaccharides and high voltage cold atmospheric plasma on the shelf-life extension of Asian sea bass slices stored at 4 degrees C [J]. Innova Food Sci Emerg, 2020, 64: 102339.
- [57] NA H, MOK C, LEE J. Effects of plasma treatment on the oxidative stability of vegetable oil containing antioxidants [J]. Food Chem, 2020, 302: 125306.
- [58] GAO Y, ZHUANG H, YEH HY, *et al.* Effect of rosemary extract on microbial growth, pH, color, and lipid oxidation in cold plasma-processed ground chicken patties [J]. Innova Food Sci Emerg, 2019, 57: 102168.
- [59] GONZALEZ C, OLAONIYE LP, GONZALO DP, *et al.* The effect of cold atmospheric plasma and linalool nanoemulsions against *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* on ready-to-eat chicken meat [J]. LWT, 2021, 149(2): 111898

(责任编辑: 郑丽 韩晓红)

作者简介



刘宸成, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。

E-mail: 1124342903@qq.com



王佳媚, 博士, 副教授, 主要研究方向为非热加工技术、水产品加工与贮藏。

E-mail: autumnjm@163.com