

## 大气压冷等离子体在即食肉制品中的应用研究进展

程腾, 薛冬, 冯坤, 吕静, 相启森

### Research Progress on the Application of Atmospheric Cold Plasma in Ready-to-eat Meat Products

CHENG Teng, XUE Dong, FENG Kun, L Jing, and XIANG Qisen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100032>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 大气压冷等离子体在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展

Research Progress of Atmospheric Cold Plasma in Fresh-cut Fruits and Vegetables Preservation

食品工业科技. 2021, 42(1): 368-372 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030152>

#### 等离子体活化水在食品工业中应用研究进展

A review of application of plasma-activated water in food industry

食品工业科技. 2018, 39(7): 348-352 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.07.062>

#### 低温等离子体在农产品加工保藏中应用的研究进展

Research Progress on the Application of Cold Plasma in Food Sterilization and Preservation

食品工业科技. 2021, 42(11): 390-396 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070214>

#### 用于调理鸡肉的大气等离子体冷杀菌工艺优化

Process Optimization of Nonthermal Sterilization of Atmospheric Plasma Technology Applied on Pre-processed Chicken

食品工业科技. 2019, 40(16): 145-150 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.024>

#### 冷等离子体技术对黄瓜表面大肠杆菌O157:H7生物膜的清除作用研究

Antimicrobial activity of cold nitrogen plasma against Escherichia coli O157:H7 biofilms on cucumber

食品工业科技. 2017(02): 162-165 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.02.022>

#### 低温等离子体冷杀菌对盐水鸭货架期及风味品质的影响

Effects of Cold Plasma Sterilization on Shelf Life and Flavor Quality of Salted Duck

食品工业科技. 2021, 42(17): 70-77 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010031>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程腾,薛冬,冯坤,等.大气压冷等离子体在即食肉制品中的应用研究进展 [J].食品工业科技,2023,44(15):427-433. doi:10.13386/j.issn1002-0306.2022100032

CHENG Teng, XUE Dong, FENG Kun, et al. Research Progress on the Application of Atmospheric Cold Plasma in Ready-to-eat Meat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(15): 427-433. (in Chinese with English abstract). doi:10.13386/j.issn1002-0306.2022100032

· 专题综述 ·

# 大气压冷等离子体在即食肉制品中的应用研究进展

程 腾<sup>1,2</sup>, 薛 冬<sup>1,2</sup>, 冯 坤<sup>1,2</sup>, 吕 静<sup>1,2</sup>, 相启森<sup>1,2,\*</sup>

(1.郑州轻工业大学食品与生物工程学院,河南郑州 450001;

2.河南省冷链食品质量安全控制重点实验室,河南郑州 450001)

**摘要:**即食肉制品在加工、运输、贮藏和销售等环节极易污染细菌、酵母菌和霉菌,造成腐败变质并引发食源性疾病。大气压冷等离子体(Atmospheric cold plasma, ACP)是一种新型非热加工技术,具有杀菌效果好、处理温度低且对食品营养和感官影响小等优点,在食品杀菌保鲜领域具有广阔的应用前景。本文概述了ACP对微生物的杀灭作用和影响因素,介绍了ACP在即食肉制品杀菌保鲜中的应用研究进展,并探讨了ACP处理对即食肉制品中脂质、蛋白质、色泽及感官品质等指标的影响,以期为ACP在即食肉制品杀菌保鲜中的实际应用提供参考。

**关键词:**即食肉制品,冷等离子体,非热杀菌技术,杀菌保鲜,应用

中图分类号:TS201.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2023)15-0427-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100032

本文网刊: 



## Research Progress on the Application of Atmospheric Cold Plasma in Ready-to-eat Meat Products

CHENG Teng<sup>1,2</sup>, XUE Dong<sup>1,2</sup>, FENG Kun<sup>1,2</sup>, LÜ Jing<sup>1,2</sup>, XIANG Qisen<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:** Ready-to-eat meat (RTE) products are potential to contaminate bacteria, yeasts and molds during the processing, transport, storage, and sale periods, causing food spoilage and foodborne diseases. As a new non-thermal sterilization technology, atmospheric cold plasma (ACP) is effective and green and has shown great potential in food sterilization and preservation. This paper summarizes the inactivation effects of ACP on microorganisms as well as the factors influencing the antimicrobial efficacy of ACP. The recent progress in the applications of ACP in the sterilization and preservation of RTE meat products is also reviewed in this article. Meanwhile, the effects of ACP treatments on the lipids, proteins, color parameter and sensory quality parameters of RTE meat products are also well discussed. This paper provides references for the potential application of ACP technology in the sterilization and preservation of RTE meat products.

**Key words:** ready-to-eat meat products; atmospheric cold plasma; non-thermal sterilization technology; sterilization and preservation; application

即食肉制品是指经部分或完全熟制,不需烹调或只需简单加热就能食用的肉制品<sup>[1]</sup>。因具有营养丰富、食用方便等优点,即食肉制品受到消费者的广

泛青睐。然而,即食肉制品在加工、贮藏和销售等环节极易污染细菌、酵母菌和霉菌,造成食品腐败变质,甚至引发食源性疾病,严重危害消费者的身心健康。

收稿日期: 2022-10-09

基金项目: 郑州市协同创新专项(2021ZDPY0201);国家自然科学基金(32202190)。

作者简介: 程腾(1991-),男,博士,讲师,研究方向:食品物理杀菌技术,E-mail:tengcheng@zzuli.edu.cn。

\*通信作者: 相启森(1984-),男,博士,副教授,研究方向:食品安全控制,E-mail:xiangqisen2006@163.com。

康。2017~2018 年全国食物中毒事件流行特征分析表明,肉及肉制品引起的食物中毒事件数分别占 11.78% 和 10.65%<sup>[2-3]</sup>。因此,在即食肉制品加工贮藏过程中,有效杀灭微生物以保障其安全至关重要。热杀菌技术在食品加工领域应用广泛,但易对食品的营养和感官造成不良影响。近年来,超高压、脉冲电场等非热加工技术在食品工业中的应用受到了广泛关注。大气压冷等离子体(Atmospheric cold plasma, ACP)是一种新型非热加工技术,能够有效杀灭微生物并较好地保持食品的营养和感官品质,有效延长产品货架期,在食品加工领域具有良好的应用前景。本文主要介绍了 ACP 的产生方式和影响其工作效率的因素,并综述了该技术在肉品加工和保鲜中的应用,旨在为 ACP 在即食肉制品加工和保鲜领域的实际应用提供参考。

## 1 大气压冷等离子体

等离子体通常是指一种“准中性”电离气体,它可以由任何中性气体在高电压下电离,产生电子、离子、自由基、原子及紫外光子等物质。ACP 指在大气压(常压)条件下产生的整体温度较低的等离子体,具有活性成分丰富、环境友好等优点,广泛应用于食品加工和食品安全控制等领域。

### 1.1 ACP 产生方法

目前主要采用介质阻挡放电(Dielectric barrier discharge, DBD)、辉光放电、微波放电、电晕放电、滑动弧放电等产生 ACP<sup>[4-5]</sup>。在食品工业加工过程中较为广泛的是 DBD 等离子体和大气压冷等离子体射流(Atmospheric pressure plasma jet, APPJ)(见图 1)。DBD 装置一般由两个金属电极组成,其中至少一个电极覆盖介质材料(如玻璃、石英和陶瓷)。APPJ 装置将高压电极置于绝缘管内部,通过流动的载气气流吹动形成放电活性区域并由喷嘴喷出等离子体<sup>[6]</sup>。

### 1.2 影响 ACP 杀菌效果的因素

ACP 对微生物的杀灭效果受放电参数(电压、功率、频率等)、处理条件(处理时间、气体流速、处理间距等)、微生物种类等多种因素的影响。

1.2.1 放电参数 研究发现,ACP 对微生物的杀灭效果与电压、频率、放电功率等因素有关。例如,马良军等使用 DBD 等离子体处理单增李斯特菌悬液(8 lg CFU/mL),结果发现,于 40 kV 下处理 120 s 后,单增李斯特菌仅降低了约 0.50 lg CFU/mL;当电压升高至 80 kV,单增李斯特菌完全失活。这可能是因为,随着电压的升高,ACP 在放电过程中会产生更多的活性物质,从而增强了对微生物的杀灭效果<sup>[7]</sup>。此外,随着电源频率的升高,ACP 对微生物的杀灭效果也随之增强。经放电电压为 6 kV、频率为 20 kHz 和 40 kHz 的 APPJ 处理 4 min,铜绿假单胞菌生物膜分别降低了 4.00 和 6.40 lg CFU/mL。这可能是因为,电源频率决定了 ACP 放电之间的持续时间;增

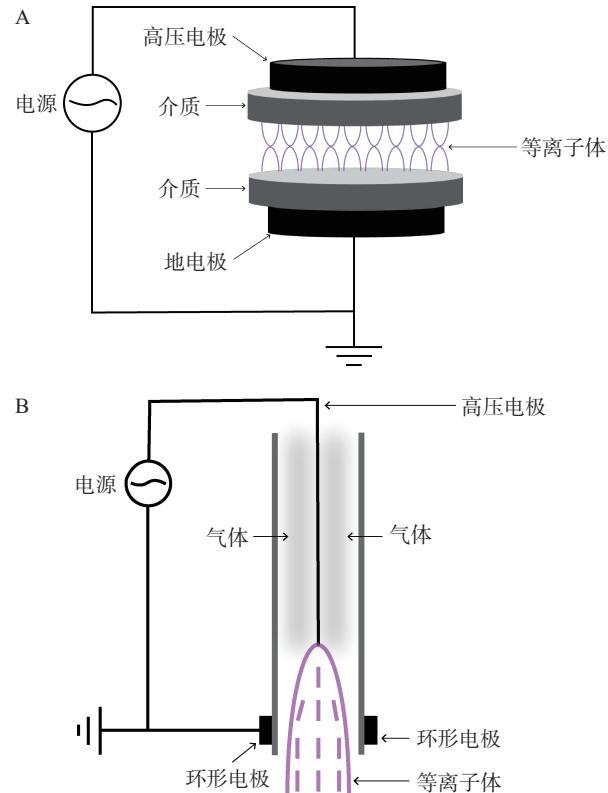


图 1 介质阻挡放电等离子体(A)和大气压冷等离子体射流(B)

Fig.1 Dielectric barrier discharge plasma (A) and atmospheric pressure plasma jet (B)

加频率会减少滞后时间,增加了单位时间内的放电周期数,最终增强了 ACP 对微生物的杀灭效果。而等离子体放电功率主要由交流电源的电压和频率决定,并随着频率和电压的升高而增加<sup>[8]</sup>。因此,ACP 对微生物的杀灭效果随放电功率的升高而增强。

1.2.2 处理条件 此外,ACP 对微生物的杀灭效果与处理时间、处理间距、放电气体(组成、流速和相对湿度)等有关。研究发现,随处理时间的延长,放电过程会产生更高浓度的活性物质,进而增强了对微生物的杀灭效果<sup>[9]</sup>。随着处理间距的增加,一方面,短寿命的活性物质可能无法到达样品;另一方面周围气体阻挡了等离子体到达样品,从而降低了 ACP 对微生物的杀灭效果。此外,ACP 对微生物的杀灭效果也受放电气体组成的影响。Xu 等<sup>[10]</sup>研究发现,在放电气体(氦气)中添加浓度为 0.5% 的氧气时,ACP 对微生物的杀灭效果最佳,然而进一步添加氧气会降低 ACP 对微生物的杀灭效果,这可能是因为氧气是电负性气体,氧气的电子附着损失超过电子碰撞离解,从而导致氧自由基减少。因此,在实际应用中,首先要确定最佳的气体混合比例,以获得 ACP 对微生物的最佳杀灭效果。而且,放电气体流速较小时,短寿命的活性物质可能无法到达样品,流速较大时,活性物质分布不均匀,从而降低了 ACP 对微生物的杀灭效果<sup>[11]</sup>。而放电气体相对湿度的增加会产生更多的羟基自由基,从而增强 ACP 的杀菌效果<sup>[12]</sup>。

1.2.3 微生物种类 ACP 对不同种类微生物的杀灭

效果存在较大差异。研究发现, ACP 对细菌、真菌和细菌芽孢的杀灭效果逐渐降低。例如, Lee 等<sup>[13]</sup>使发现的 DBD 等离子体(放电电压为 6 kV)杀灭大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、酿酒酵母和枯草芽孢杆菌芽孢的 D 值(杀灭 90% 微生物所需时间)分别为 18、19、115 s 和 14 min。与细菌相比, 细菌芽孢具有多层外壳而不容易被 ACP 灭活。真菌的细胞壁主要由几丁质和  $\beta$ -D 葡聚糖组成, 机械强度更高, 使其不易被 ACP 杀灭。此外, 草兰氏阴性菌外膜由脂多糖和相对较薄的肽聚糖层(约 2 nm)组成, 而草兰氏阳性菌具有稳定且较厚的肽聚糖层(约 40 nm)<sup>[14]</sup>。因此, 与草兰氏阳性菌相比, 草兰氏阴性菌对 ACP 处理更敏感。

**1.2.4 环境因素** ACP 对微生物的杀灭效果还取决于样品的表面结构、基质材料、pH 等。经射频大气压冷等离子体处理 2 min, 接种于聚苯乙烯、琼脂平板表面的金黄色葡萄球菌降低了 3~4 log N/N<sub>0</sub>(N 为初始菌落数, N<sub>0</sub> 处理后菌落数), 而牛肉干处理 10 min 表面的金黄色葡萄球菌降低了 3~4 log N/N<sub>0</sub>。这可能是因为牛肉干的表面粗糙, 为微生物提供了保护作用<sup>[15]</sup>。此外, 相对于液体基质, ACP 对固体基质表面的微生物具有更好的杀灭效果, 这是因为活性物质能

够与固体表面的微生物直接接触, 而对于液体基质中的微生物, 活性物质首先作用于等离子体-液体界面, 然后通过液体扩散作用于微生物<sup>[16]</sup>。Kayes 等<sup>[17]</sup>将大肠杆菌接种于 pH 5 和 7 的琼脂培养基上, 经辉光放电等离子体处理 90 s 后, 大肠杆菌分别降低了 1.3 和 4.4 lg CFU/cm<sup>2</sup>。与 pH 为 7 的环境相比, 酸性环境不适宜微生物的生长, 这使得大多数微生物对 ACP 的处理更加敏感。

## 2 ACP 在即食肉制品杀菌保鲜中的应用

### 2.1 ACP 对即食肉制品中微生物的杀灭效果

研究表明, ACP 处理能够有效灭活酱卤牛肉、烧鸡、鸡肉香肠、火腿等即食肉制品表面的微生物, 延长其货架期(见表 1)。然而, ACP 的杀菌效果受放电电压、处理时间等因素的影响。因此, 在实际应用中需根据产品特性优化 ACP 处理工艺参数。

此外, 等离子体活化水<sup>[31]</sup>(Plasma-activated water, PAW)、等离子体活化溶液(Plasma-activated solution, PAS)<sup>[32]</sup>、等离子体活化盐水<sup>[33]</sup>、等离子体活化植物蛋白溶液<sup>[34]</sup>等也被广泛应用于即食肉制品的生产和安全控制。例如, Inguglia 等<sup>[33]</sup>将生牛肉片浸泡在 200 mL 经 APPJ 处理的活化盐水中并于 4 °C 下腌

表 1 ACP 在即食肉制品杀菌中的应用

Table 1 Application of ACP in the sterilization of ready-to-eat meat products

研究对象	微生物	等离子体源	处理参数	杀菌效果	参考文献
酱卤牛肉	菌落总数	DBD	功率: 400 W; 时间: 3 min; 气体: 75% CO <sub>2</sub> +25% N <sub>2</sub> ; 贮藏温度: 4 °C	经 DBD 等离子体处理后, 对照组和处理组菌落总数分别于贮藏 6 和 12 d 超过限量标准(4.90 lg CFU/g)	[18]
牛肉干	金黄色葡萄球菌单增李斯特菌	DBD	频率: 42 kHz; 电压: 25 kV; 时间: 300 s; 流速: 1 L/min; 气体: O <sub>2</sub>	经 DBD 等离子体处理后, 样品表面金黄色葡萄球菌和单增李斯特菌分别降低了 0.85 和 0.83 lg CFU/cm <sup>2</sup>	[19]
牛肉干	大肠杆菌单增李斯特菌沙门氏菌黄曲霉菌	DBD	频率: 15 kHz; 时间: 10 min; 气体: 空气	经 DBD 等离子体处理后, 样品表面大肠杆菌、单增李斯特菌、沙门氏菌和黄曲霉菌分别降低了 2 至 3 lg CFU/g	[20]
酱卤鸭腿	菌落总数	DBD	功率: 500 W; 时间: 180 s; 气体: 空气; 贮藏温度: 25 °C	经 DBD 等离子体处理后, 对照组和处理组菌落总数分别于贮藏 1 和 3 d 超过限量标准(4.90 lg CFU/g), 货架期延长了 2 d	[21]
烧鸡	菌落总数假单胞菌乳酸菌霉菌和酵母	DBD	电压: 70 kV; 时间: 3 min; 气体: Ar; 贮藏温度: 4 °C	经 DBD 等离子体处理后, 与空气对照组相比, 在贮藏 15 d 处理组菌落总数、霉菌和酵母菌、乳酸菌和假单胞菌分别降低了约 3.10, 2.60, 2.80 和 1.90 lg CFU/g, 样品货架期延长了 5 d	[22]
盐水鸭	菌落总数大肠杆菌	DBD	电压: 75 kV; 气体: 空气; 时间: 2 min; 贮藏温度: 4 °C	经 DBD 等离子体处理后, 菌落总数和大肠杆菌分别降低了 97.8%、99.8%, 货架期延长了 9 d	[23]
水煮鸡肉沙拉	嗜温好氧细菌沙门氏菌	DBD	电压: 24 kV; 时间: 2 min; 气体: 空气; 贮藏温度: 4 °C	经 DBD 等离子体处理后, 嗜温好氧菌和沙门氏菌分别降低 1.30 和 1.0 lg CFU/g, 贮藏 14 d 后, 嗜温好氧细菌和沙门氏菌仍比对照组低 0.60 和 0.70 lg CFU/g	[24]
水煮鸡胸肉	大肠杆菌沙门氏菌	DBD	电压: 15 V; 频率: 50 kHz; 时间: 5 min; 气体: 空气; 处理间距: 10 mm	经 DBD 处理后, 大肠杆菌和沙门氏菌菌落数分别降低了 1.40 和 1.80 lg CFU/g	[25]
水煮鸡胸肉	嗜温好氧细菌沙门氏菌	DBD	电压: 24 kV; 时间: 3 min; 气体: 空气; 贮藏温度: 4 °C	经 DBD 等离子体处理后, 嗜温好氧细菌、沙门氏菌分别降低了 0.70、1.45 lg CFU/cm <sup>3</sup> , 在贮藏 21 d, 与对照组相比, 嗜温好氧细菌、沙门氏菌分别降低了 0.90、1.7 lg CFU/cm <sup>3</sup>	[26]
鸡肉香肠	菌落总数霉菌和酵母	APPJ	功率: 70 W; 时间: 400 s; 气体: 空气; 流速: 10 L/min	经 APPJ 处理后, 样品表面菌落总数降低 1.89 lg CFU/g, 霉菌和酵母降低 1.20 lg CFU/g	[27]
低脂火腿	沙门氏菌单增李斯特菌	DBD	电压: 10 kV; 频率: 2 kHz; 时间: 20 min; 气体: 空气或 N <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub>	经以空气和 N <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> 为所产生 DBD 等离子体处理后, 火腿片表面沙门氏菌分别降低了 1.14 和 1.84 lg CFU/g, 单增李斯特菌分别降低了 1.02 和 2.55 lg CFU/g	[28]
猪肉火腿	单增李斯特菌	DBD	频率: 3500 Hz; 电压: 28 kV; 时间: 180 s; 气体: 空气; 处理间距: 2 mm; 处理温度: 4 °C 和 23 °C	经 DBD 等离子体处理后, 添加了 1% 和 3% NaCl 火腿, 在 4 °C 处理下菌落数分别降低了 1.75 和 1.51 lg CFU/cm <sup>2</sup> , 在 23 °C 处理下菌落数分别降低了 1.78 和 1.43 lg CFU/cm <sup>2</sup>	[29]
猪肉火腿	单增李斯特菌	DBD	频率: 3500 Hz; 电压: 30 kV; 气体: 20% O <sub>2</sub> +20% N <sub>2</sub> +60% CO <sub>2</sub> ; 贮藏温度: 4 °C	经 DBD 等离子体处理后, 在贮藏 7 d, 单增李斯特菌菌落降低值超过 6 lg CFU/cm <sup>2</sup>	[30]

制 20 h, 工作气体为空气, 结果发现, 采用等离子体活化盐水腌制的牛肉干表面单增李斯特菌降低了 0.85 lg CFU/g。

## 2.2 ACP 杀灭微生物的作用机制

ACP 主要通过等离子体产生过程中生成的活性物质、带电粒子、紫外线等杀灭微生物。ACP 放电过程中产生大量的活性氧和活性氮物质(如臭氧、羟基自由基和一氧化氮等), 这些物质诱导微生物细胞膜脂质发生氧化反应, 改变细胞膜结构, 同时活性物质还可扩散到细胞内, 进一步损伤蛋白质和核酸等大分子物质, 从而导致微生物死亡<sup>[35]</sup>。此外, 等离子体产生的带电粒子聚集细胞表面, 所产生的静电排斥力超过细胞膜的抗张强度, 使得细胞膜受损, 造成微生物失活<sup>[36]</sup>。Sato 等<sup>[37]</sup>发现当气体流速和处理间距较小时, 紫外线在 APPJ 杀灭大肠杆菌失活过程中起主要作用。在今后的研究中, 应综合运用代谢组学、蛋白质组学、转录组学等方法系统阐明 ACP 杀灭微生物的作用机制。

## 2.3 ACP 在即食肉制品中替代亚硝酸盐的应用

亚硝酸盐广泛用于肉制品的腌制加工, 能够改善产品的色泽和风味。研究发现, ACP 处理可产生亚硝酸盐, 广泛应用于肉类的腌制加工。Jung 等<sup>[38]</sup>使用 DBD 等离子体处理由生鲜猪肉、水和氯化钠组成的肉糜, 并真空包装后水浴 20 min。结果发现, 随着 DBD 等离子体处理时间的延长, 熟肉糜中亚硝酸盐含量逐渐升高, 30 min 时达到 65.96 ppm。此外, Yong 等<sup>[39]</sup>使用电源频率为 15 kHz 的 DBD 等离子体制备 PAW, 并将其用于腌制猪里脊肉制得火腿, 结果发现, 与亚硝酸钠处理的火腿相比, PAW 处理组样品发色效果更好( $a^*$ 值增加), 亚硝酸盐残留量降低, 好氧微生物降低了 0.33 lg CFU/g。类似地, Monika 等<sup>[34]</sup>使用 APPJ 活化植物蛋白浓缩物的水溶液作为猪肉香肠中的替代亚硝酸盐, 结果显示, 在储存 8 d 后处理组香肠的亚硝酸盐含量与对照组相近(亚硝酸盐含量 20.69~21.89 mg/kg)。以上结果表明, ACP 处理可替代肉类腌制加工中的亚硝酸盐添加, 而且不影响香肠本身的风味<sup>[40~41]</sup>。

此外, 一些研究评价了 ACP 对即食肉制品安全性的影响。Kim 等<sup>[42]</sup>采用 DBD 等离子体处理含有 1% 焦磷酸钠(w/v)的蒸馏水(500 mL)4 h 制备 PAS, 并将其用于制备猪肉乳化香肠。鼠伤寒沙门氏菌回复突变试验表明猪肉乳化香肠提取液没有致突变性。8 周龄雌性 Balb/c 小鼠喂食猪肉乳化香肠 32 d 后, 其血清 TNF- $\alpha$  值低于 10 pg/mL, 表明未发生炎症反应。综上所述, 作为传统亚硝酸盐的替代品, ACP 在即食肉制品加工领域应用前景广阔。

## 3 ACP 对即食肉制品品质的影响

ACP 在有效杀灭即食肉制品表面的微生物的同时, 也会对其品质造成影响。

### 3.1 ACP 对即食肉制品脂质的影响

研究发现, ACP 处理对即食肉制品脂质氧化的

影响与处理条件、样品的脂肪含量、气体成分等有关。Rod 等<sup>[43]</sup>使用 DBD 等离子体处理牛肉干, 结果发现, 随 DBD 等离子体放电功率的升高和处理时间的延长, 样品中硫巴比妥酸反应物(Thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)含量逐渐升高。在功率为 15.5 W, 处理时间为 5 s 时, 牛肉干的 TBARS 值为 0.27 mg MDA/kg, 处理时间增加至 20 s 时, TBARS 值为 0.33 mg MDA/kg; 在 62 W 条件下处理 5 s, 牛肉干的 TBARS 值为 0.30 mg MDA/kg。然而, Yong 等<sup>[44]</sup>使用 DBD 等离子体处理生鲜猪肉切片并制备猪肉干, 结果发现, 经 DBD 等离子体处理 60 min 后, 样品的 TBARS 含量为 2.27 mg MDA/kg, 低于对照组样品(3.84 mg MDA/kg)。这可能是与亚硝酸盐的抗氧化作用有关, 由亚硝酸盐衍生的亚硝酸依次形成亚硝酸酐和一氧化氮; 一氧化氮可通过与氧气反应生成二氧化氮, 还可以与肌红蛋白的铁离子结合来抑制脂质氧化; 此外, 一氧化氮可通过清除脂质过氧化自由基来抑制脂质过氧化反应<sup>[45]</sup>。

此外, Gök 等<sup>[19]</sup>发现经放电气体为氧气的 DBD 等离子体处理后, 牛肉干的 TBARS 值为 0.91 mg MDA/kg; 而使用 25% 氧气+75% 氩气为放电气体时, 牛肉干的 TBARS 值降低至 0.78 mg MDA/kg, 这可能是因为惰性气体比例的增加, 减少活性氧等物质的形成, 从而导致 TBARS 值降低<sup>[46]</sup>。在今后的研究中, 可综合运用气相色谱—质谱联用等方法研究 ACP 处理对即食肉制品挥发性风味成分的影响规律。此外, 也可通过添加精油、迷迭香提取物等来抑制 ACP 造成的肉制品脂质氧化。

### 3.2 ACP 对即食肉制品蛋白质的影响

研究发现, ACP 处理可造成即食肉制品中的蛋白质发生分解和氧化, 进而影响产品品质。李欣欣等<sup>[18]</sup>使用 DBD 等离子体处理酱卤牛肉 3 min 并于 4 °C 贮藏, 与对照组相比, 不同处理功率(300~500 W)的酱卤牛肉总挥发性盐基氮(Total volatile basic nitrogen, TVB-N)含量变化不同。其中, 在贮藏第 20 d, 400 W 处理组酱卤牛肉 TVB-N 值最低, 低于对照组和其他处理组。Lee 等<sup>[47]</sup>使用 DBD 等离子体(600 W)处理肉糜 60 min 并制备罐装火腿; 结果发现, 亚硝酸钠和芹菜粉所制备样品的羰基含量分别为 0.97 和 1.10 nmol/mg, 而 DBD 等离子体处理的火腿羰基含量为 1.18 nmol/mg, 表明 DBD 等离子体处理促进了罐装火腿中蛋白质的氧化。因此, 在实际应用中, 应严格控制处理条件, 将即食肉制品中蛋白质的分解和氧化程度控制在可接受范围内。

### 3.3 ACP 对即食肉制品色泽的影响

色泽直接影响着消费者对食品的接受程度。研究发现, 与白肉相比, ACP 对牛肉、猪肉等红肉的色泽影响较大。Yong 等<sup>[44]</sup>使用 DBD 等离子体处理生鲜猪肉切片 60 min, 与对照组相比, 所制得猪肉干的  $L^*$  值和  $a^*$  值分别增加了 1.74 和 6.29,  $b^*$  值减少了

2.18, 猪肉干呈现更亮的红色。李欣欣等<sup>[18]</sup>发现, 经 DBD 等离子体处理 3 min, 酱卤牛肉的  $L^*$  值略有增大,  $a^*$  和  $b^*$  值没有显著变化; 随着贮藏时间的延长, 处理组和对照组的  $L^*$ 、 $b^*$  值呈现先增大后趋于稳定的趋势, 而  $a^*$  值在贮藏第 20 d 降至最低值。ACP 中的一氧化氮可与肌红蛋白或高铁肌红蛋白反应并生成亚硝化肌红蛋白(NO-Mb, 亮红色)或亚硝化高铁肌红蛋白(NO-MMb, 暗红色), 进而造成  $a^*$  值升高。白肉的肌红蛋白含量较低, 因此 ACP 处理对其色泽的影响可以忽略不计。例如, Lee 等<sup>[26]</sup> 使用 24 kV 的 DBD 等离子体处理水煮鸡胸肉 3 min, 在 4 和 24 °C 储存期间, 与对照组相比, 处理组样品的色泽未发生显著变化。此外, 李季林等<sup>[48]</sup> 使用射频放电冷等离子体在 600 W 功率下处理 6 min 制备 PAW, 应用于火腿发色, 发现与亚硝酸盐腌制的火腿相比, PAW 组样品的  $a^*$  值升高而  $b^*$  值降低,  $L^*$  值无显著差异, 这可能是由于 PAW 腌制比亚硝酸盐腌制形成更多的 NO-Mb。Yadav 等<sup>[29]</sup> 也发现了类似的研究结果。综上所述, ACP 处理显著影响肉品的色泽参数, 这可能与其造成脂肪氧化、肌红蛋白氧化和持水性变化等有关, 相关机制仍有待深入研究。

#### 3.4 ACP 对即食肉制品感官品质的影响

研究发现, ACP 处理影响即食肉制品的感官品质。李欣欣等<sup>[18]</sup>发现经 DBD 等离子体处理后, 酱卤牛肉的感官评分总体上均略低于对照组样品, 这可能是因为冷等离子体处理导致酱卤牛肉的水分减少, 进而影响口感。另外, 经 DBD 等离子体处理 180 s 后, 酱卤鸭腿的感官评分高于处理时间为 300 和 480 s 处理组样品的感官评分, 表明 DBD 等离子体处理时间过长会对酱卤鸭腿的感官品质造成不良影响<sup>[21]</sup>。Yong 等<sup>[20]</sup>发现经 DBD 等离子体处理时间超过 10 min 后, 牛肉干产生异味, 这可能是因为含硫化合物被自由基分解产生二甲基二硫、甲硫醇和硫化氢等含硫挥发物, 也可能与脂质氧化产生的腐臭气味有关。然而, Hui 等<sup>[49]</sup> 使用 DBD 等离子体处理腌制鲜牛肉块 30 min, 静置 4 h 后进行木炭或蒸汽烘烤, 结果发现, 相较于木炭烤肉, ACP 处理改善了蒸汽烤肉的风味品质。与木炭加热相比, 蒸汽加热能够抑制大部分羰基化合物的产生, 而这些脂质氧化衍生的羰基化合物会导致样品出现异味。在今后的研究中, 可综合利用电子鼻、电子舌等设备系统分析 ACP 对即食肉制品感官品质的影响。

### 4 结论与展望

作为一种非热加工技术, ACP 可以有效杀灭即食肉制品表面的微生物并广泛应用于肉类的腌制加工中。研究发现, ACP 处理对肉品品质的影响因种类、处理工艺参数等的不同而存在差异。在今后的研究中, 应系统分析 ACP 处理对蛋白质和脂质的氧化程度、感官特性、亚硝酸盐残留量、营养特性(必需氨基酸、维生素等)及生物利用率等指标的影响,

同时评估 ACP 处理对肉品造成的潜在安全风险, 确保其安全可用至关重要。此外, 还应系统优化 ACP 处理工艺参数, 建立统一规范的技术标准, 为其工业化应用提供理论依据。最后, 可将 ACP 技术与其他技术(温热、冷藏、抗菌剂等)协同使用, 从而最大限度地减少 ACP 处理对肉品品质的不良影响, 推动该技术在即食肉制品加工中的应用。

### 参考文献

- [1] 刘阳, 唐莉娟, 王凌云, 等. 即食肉制品产业发展现状与市场前景[J]. 食品工业, 2017, 38(2): 275–279. [ LIU Y, TANG L J, WANG L Y, et al. Industry development status and market prospects of ready-to-eat meat products[J]. Food Industry, 2017, 38(2): 275–279. ]
- [2] 刘辉, 任婧寰, 伍雅婷, 等. 2018 年全国食物中毒事件流行特征分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(1): 147–153. [ LIU H, REN J H, WU Y T, et al. Epidemiological characteristics of food poisoning events in China, 2018[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(1): 147–153. ]
- [3] 王霄晔, 任婧寰, 王哲, 等. 2017 年全国食物中毒事件流行特征分析[J]. 疾病监测, 2018, 33(5): 359–364. [ WANG X Y, REN J H, WANG Z, et al. Epidemiological characteristics of food poisoning events in China, 2017[J]. Disease Surveillance, 2018, 33(5): 359–364. ]
- [4] MANDAL R, SINGH A, PRATAP S A. Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 80: 93–103.
- [5] 相启森, 张嵘, 范刘敏, 等. 大气压冷等离子体在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 368–372. [ XIANG Q S, ZHANG R, FAN L M, et al. Research progress of atmospheric cold plasma in fresh-cut fruits and vegetables preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 368–372. ]
- [6] PANKAJ S K, WAN Z F, KEENER K M. Effects of cold plasma on food quality: A review[J]. Foods, 2018, 7(1): 4.
- [7] 马良军, 王佳媚, 黄明明, 等. 不同处理条件对介质阻挡放电低温等离子体杀菌效果及影响机理研究[J]. 微生物学报, 2019, 59(8): 1512–1521. [ MA L J, WANG J M, HUANG M M, et al. Sterilization by dielectric barrier discharge low temperature plasma under different treatment conditions[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2019, 59(8): 1512–1521. ]
- [8] ALKAWAREEK M Y, ALGWARI Q T, LAVERTY G, et al. Eradication of *pseudomonas aeruginosa* biofilms by atmospheric pressure non-thermal plasma[J]. Plos One, 2012, 7(8): e44289.
- [9] WANG L, XIA C, GUO Y, et al. Bactericidal efficacy of cold atmospheric plasma treatment against multidrug-resistant *Pseudomonas aeruginosa*[J]. Future Microbiology, 2020, 15(2): 115–125.
- [10] XU Z M, SHEN J, CHENG C, et al. *In vitro* antimicrobial effects and mechanism of atmospheric-pressure He/O<sub>2</sub> plasma jet on *Staphylococcus aureus* biofilm[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2017, 50(10): 105201.
- [11] NISHIME T, BORGES A C, KOGA-ITO C Y, et al. Non-thermal atmospheric pressure plasma jet applied to inactivation of different microorganisms[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 312: 19–24.
- [12] PATIL S, MOISEEV T, MISRA N N, et al. Influence of high voltage atmospheric cold plasma process parameters and role of relative humidity on inactivation of *Bacillus atrophaeus* spores inside a

- sealed package[J]. *Journal of Hospital Infection*, 2014, 88(3): 162–169.
- [13] LEE K N, PAEK K H, JU W T, et al. Sterilization of bacteria, yeast, and bacterial endospores by atmospheric-pressure cold plasma using helium and oxygen[J]. *Journal of Microbiology*, 2006, 44(3): 269–275.
- [14] LAROUSSI M, MENDIS D A, ROSENBERG M. Plasma interaction with microbes[J]. *New Journal of Physics*, 2003, 5(1): 410–411.
- [15] KIM J S, LEE E J, CHOI E H, et al. Inactivation of *staphylococcus aureus* on the beef jerky by radio-frequency atmospheric pressure plasma discharge treatment[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 22: 124–130.
- [16] SMET C, NORIEGA E, ROSIER F, et al. Influence of food intrinsic factors on the inactivation efficacy of cold atmospheric plasma: Impact of osmotic stress, suboptimal pH and food structure[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 38: 393–406.
- [17] KAYES M M, CRITZER F J, KELLY-WINTENBERG K, et al. Inactivation of foodborne pathogens using a one atmosphere uniform glow discharge plasma[J]. *Foodborne Pathogens & Disease*, 2007, 4(1): 50–59.
- [18] 李欣欣, 李大宇, 赵子瑞, 等. 低温等离子体处理功率对酱牛肉贮藏品质的影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(5): 1934–1940. [LI X X, LI D Y, ZHAO Z R, et al. Effect of low-temperature plasma treatment power on storage quality of spiced beef[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(5): 1934–1940.]
- [19] 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]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 56: 102188.
- [20] YONG H I, LEE H, PARK S, et al. Flexible thin-layer plasma inactivation of bacteria and mold survival in beef jerky packaging and its effects on the meat's physicochemical properties[J]. *Meat Science*, 2018, 123: 151–156.
- [21] 黄现青, 宋莲军, 赵秋艳, 等. 低温等离子体(500 W)处理对真空包装酱卤鸭腿货架期的影响[J]. *肉类工业*, 2018, 3: 30–32. [HUANG X Q, SONG L J, ZHAO Q Y, et al. Effect of low temperature plasma (500 W) treatment on the shelf life of vacuum packaged sauced stewed duck leg[J]. *Meat Industry*, 2018, 3: 30–32.]
- [22] ZHANG Y L, LEI Y, HUANG S H, et al. In-package cold plasma treatment of braised chicken: Voltage effect[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 11(4): 845–853.
- [23] 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 C, QIAN J, SHENG X W, et al. Effects of cold plasma sterilization on shelf life and flavor quality of salted duck[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(17): 70–77.]
- [24] LEE E S, JEON Y J, MIN S C. Microbial inactivation and quality preservation of chicken breast salad using atmospheric dielectric barrier discharge cold plasma treatment[J]. *Foods*, 2021, 10(6): 1214.
- [25] GONZÁLEZ-GONZÁLEZ C R, LABO-POPOOLA O, DELGADO-PANDO G, 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-Food Science and Technology*, 2021, 149: 111898.
- [26] 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.
- [27] ZERAATPISEH F, YAZDI F T, SHAHIDI F. Investigation of effect of cold plasma on microbial load and physicochemical properties of ready-to-eat sliced chicken sausage[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 59(10): 3928–3937.
- [28] LIS K A, BOULAABA A, BINDER S, et al. Inactivation of *Salmonella Typhimurium* and *Listeria monocytogenes* on ham with nonthermal atmospheric pressure plasma[J]. *Plos One*, 2018, 13(5): e0197773.
- [29] YADAV B, SPINELLI A C, GOVINDAN B N, et al. Cold plasma treatment of ready-to-eat ham: Influence of process conditions and storage on inactivation of *Listeria innocua*[J]. *Food Research International*, 2019, 123: 276–285.
- [30] YADAV B, SPINELLI A C, MISRA N N, 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]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(4): 1203–1212.
- [31] ZHOU R W, ZHOU R S, WANG P Y, et al. Plasma activated water: Generation, origin of reactive species and biological applications[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2020, 53(30): 303001.
- [32] GAVASKER R, RATHORE S V. Optimization of process parameters to generate plasma activated water and study of physico-chemical properties of plasma activated solutions at optimum condition[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(8): 084901.
- [33] INGUGLIA E S, OLIVEIRA M, BURGESS C M, et al. Plasma-activated water as an alternative nitrite source for the curing of beef jerky: Influence on quality and inactivation of *Listeria innocua*[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 59: 102276.
- [34] MARCINKOWSKA-LESIAK M, WOJTASIK-KALINOWSKA I, ONOPIUK A, et al. Application of atmospheric pressure cold plasma activated plant protein preparations solutions as an alternative curing method for pork sausages[J]. *Meat Science*, 2022, 187: 108751.
- [35] XIANG Q S, LIU X F, LI J G, 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.
- [36] LUNOV O, CHURPITA O, ZABLOTSKII V, et al. Non-thermal plasma mills bacteria: Scanning electron microscopy observations[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(5): 053703.
- [37] SATO T, MIYAHARA T, DOI A, et al. Sterilization mechanism for *Escherichia coli* by plasma flow at atmospheric pressure[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(7): 073902.
- [38] JUNG S, LEE J, LIM Y, et al. Direct infusion of nitrite into meat batter by atmospheric pressure plasma treatment[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 39: 113–118.
- [39] YONG H I, PARK J, KIM H J, et al. An innovative curing process with plasma-treated water for production of loin ham and for its quality and safety[J]. *Plasma Processes & Polymers*, 2018, 15(2): e1700050.
- [40] MARCINKOWSKA-LESIAK M, WOJTASIK-KALINOWSKA I, ONOPIUK A, et al. Plasma-activated milk powder as a sodium nitrite alternative in pork sausages[J]. *Meat Science*, 2022, 192:

108880.

[ 41 ] 倪思思. 等离子体活化水在中式香肠中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021. [ NI S S. Application of plasma activated water in Chinese sausage [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. ]

[ 42 ] KIM H J, SUNG N Y, YONG H I, et al. Mutagenicity and immune toxicity of emulsion-type sausage cured with plasma-treated water [J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2016, 36(4): 494–498.

[ 43 ] ROD S K, 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 Microbiology*, 2012, 30(1): 233–238.

[ 44 ] YONG H I, LEE S H, KIM S Y, et al. Color development, physicochemical properties, and microbiological safety of pork jerky processed with atmospheric pressure plasma [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 53: 78–84.

[ 45 ] HOGG N, KALYANARAMAN B. Nitric oxide and lipid peroxidation [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1999, 1411(2–3): 378–384.

[ 46 ] 刘宸成, 王佳媚, 陈姑, 等. 低温等离子体对动物源食品中脂质氧化作用研究进展 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(20): 6535–6544. [ LIU C C, WANG J M, CHEN G, et al. Research progress of lipids oxidation of animal-derived food by cold plasma [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(20): 6535–6544. ]

[ 47 ] LEE J, JO K, LIM Y, et al. The use of atmospheric pressure plasma as a curing process for canned ground ham [J]. *Food Chemistry*, 2018, 240: 430–436.

[ 48 ] 李季林, 陈雅淇, 成军虎. 射频等离子体活性水处理对火腿发色的影响 [J]. *食品科学*, 2021, 42(22): 9–15. [ LI J L, CHEN Y Q, CHENG J H. Effect of plasma activated water on the color development of ham [J]. *Food Science*, 2021, 42(22): 9–15. ]

[ 49 ] HUI T, FANG Z F, MA Q L, et al. Effect of cold atmospheric plasma-assisted curing process on the color, odor, volatile composition, and heterocyclic amines in beef meat roasted by charcoal and superheated steam [J]. *Meat Science*, 2023, 196: 109046.