低温等离子体对水产品常见微生物灭活效果影响的研究进展

刘书成[1,2,3]，徐 杰[1]，徐雯晴[1]，孙钦秀[*1,2,3]，魏 帅[1,2,3]，夏秋瑜[1,2,3]，韩宗元[1,2,3]，王泽富[1,2,3]

（1. 广东海洋大学 食品科技学院，广东 湛江 524088；2. 大连工业大学 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心，辽宁 大连 116034；3. 南方海洋科学与工程广东省实验室（湛江），广东 湛江 524088）

摘要：水产品极易腐败变质，需要采取一定的措施抑制其腐败变质。低温等离子体（Cold Plasma，CP）作为一种新型高效的广谱冷杀菌技术，可以在大气压下实现均匀、稳定放电，且对常见水产品致病菌和腐败菌具有较好的杀灭效果，可以延长水产品的货架期。作者综述了CP产生方式、灭活微生物机制及影响其灭菌效果的因素，同时探讨了CP对不同种微生物的杀灭效果及对水产品品质的影响，以期为CP在水产品保鲜中的应用提供参考。

关键词：低温等离子体；水产品；杀菌机理；品质影响

中图分类号：TS 254.4　**文章编号：**1673-1689（2023）02-0001-09　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.02.001

Research Progress on Inactivation of Common Microorganisms in Aquatic Products by Cold Plasma

LIU Shucheng[1,2,3]，*XU Jie*[1]，*XU Wenqing*[1]，*SUN Qinxiu*[*1,2,3]，*WEI Shuai*[1,2,3]，*XIA Qiuyu*[1,2,3]，*HAN Zongyuan*[1,2,3]，*WANG Zefu*[1,2,3]

（1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhanjiang), Zhanjiang 524088, China）

Abstract: Aquatic products are very susceptible to spoilage, which requires certain measures to inhibit spoilage and deterioration. As a new and efficient broad-spectrum cold sterilization technology, cold plasma (CP) can achieve uniform and stable discharge under atmospheric pressure, and has a good killing effect on the common pathogenic and spoilage bacteria in aquatic products, which can extend the shelf life of aquatic products. The generation modes, the mechanism of microorganism inactivation and the factors affecting the sterilization effect of CP were reviewed in this paper. Meanwhile, the killing effect of CP on different kinds of microorganisms and the effect on

收稿日期：2021-12-14

基金项目：广东省科技创新战略专项资金项目（2022A05036）；广东普通高等学校海洋食品绿色加工技术研究团队项目（2019KCXTD011）。

作者简介：刘书成（1977—），男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事海洋食品加工新技术方面的研究。E-mail：Lsc771017@163.com

*** 通信作者：**孙钦秀（1986—），女，博士，讲师，主要从事食品冷冻新技术方面的研究。E-mail：sunqinxiugo@163.com

the quality of aquatic products were also discussed, aiming to provide the reference for the application of CP in the preservation of aquatic products.

Keywords: cold plasma (CP), aquatic products, sterilization mechanism, quality impact

我国是水产品生产大国,2020 年全国水产品总产量达到了 6 549.02 万 t[1]。因水产品具有营养成分丰富、水分含量高、组织脆弱等特点,在加工、贮藏以及运输过程中很容易受到微生物污染而引发腐败变质,从而降低水产品的营养和经济价值[2],这严重制约着水产品的发展与推广,因此需要采取一定的措施来抑制水产品的腐败变质。目前食品中常用的杀菌技术主要包括热杀菌和非热杀菌。传统的热杀菌技术在杀菌的同时容易引起蛋白质变性,导致水产品丧失其原有的风味、色泽甚至质构改变。而非热杀菌技术因其在较低的温度下实现杀菌并可以最大限度地保持水产品原有的色泽和风味,所以在水产品保鲜中的应用受到了广大科研工作者和生产者的关注。

低温等离子体(Cold Plasma,CP)被称为“物质第四态”,是一种新型节能环保的非热杀菌技术。等离子体是通过放电给气体施加足够多的能量,使气体电离形成一种由带电离子、自由电子以及活化的中性物质(激发态)等组成的电离气体。自 20 世纪 90 年代以来,等离子体被广泛应用于抑制微生物[3-4],在果蔬、畜禽产品和水产品等保鲜中均有研究[5-6]。作者主要对 CP 产生方式、影响 CP 微生物灭活机制及其灭菌效果进行了介绍,综述了 CP 对不同微生物的灭活效果及其对水产品品质的影响,以期为 CP 在水产品中更广泛的应用提供参考。

1 低温等离子体概述

1.1 低温等离子体简介

低温等离子体的形成方式包括介质阻挡放电、滑动弧放电、电晕放电和射频放电等[7]。由于介质阻挡放电等离子体能实现均匀、稳定的放电,且不会因放电而产生火花,目前被广泛应用于食品行业。1987 年,Kanazawa 等人使用介质阻挡的方式,在大气压下进行放电,解决了 CP 设备一直以来需要低气压而导致的设备要求高、加工成本高、不适合自动化连续加工等缺点,从而使得等离子体工业化应用成为可能[8]。介质阻挡放电是指在气体间隙中插入塑料、石英以及陶瓷等绝缘介质材料,并将之隔开约 0.1 mm 到几厘米进行放电的一种形式,也称为无声放电[7,9]。介质阻挡放电电极结构主要有平板结构和同轴结构,虽然电极结构不同,但放电机理一致。如图 1(a)所示[9],两个电极中一个连接电源,一个接地,介质层可以覆盖两个或者一个电极,也可以悬浮于电极之间。其中平板结构普遍运用于食品领域,平板结构设备简单示意图见图 1(b)[10]。

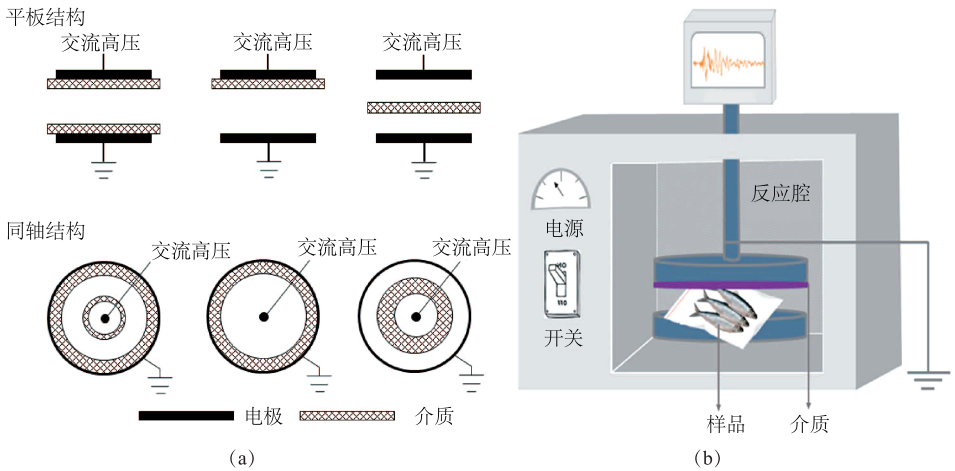


图 1 介质阻挡放电电极结构和平板结构装置

Fig. 1 Electrode structure of dielectric barrier discharge and the flat structure device

1.2 影响低温等离子体灭菌效果的因素

CP 的保鲜效果受到许多因素的影响,如 CP 设备的电极或介质材料、电极间距、处理电压及频率、工作气体等,同时处理时间也是一个非常重要的影响因素。此外,CP 的保鲜效果还与其处理对象的性质有关。

不同电极材料对 CP 灭活微生物的影响是不一样的,银和黄铜电极比不锈钢和玻璃/黄铜电极对单增李斯特菌(*Listeria monocytogenes*,LM)灭活效果更好,这可能是由于放电导致电极材料产生铜离子或银离子,增加了抑菌能力,但是不同材料电极对大肠杆菌(*Escherichia coli*,*E.coli*)的灭活效果无显著差异[11]。同时,该研究也证明微生物的灭活效果还取决于处理时间,处理时间越长对微生物的灭活效果越好[11]。Thomas-Popo 等人也发现 CP 灭菌效果具有时间依赖性[12]。这可能是由于随着放电时间的延长,气体电离程度增加,活性物质及带电粒子浓度增加,从而对微生物的灭活效果也增强。

电极间距也是影响 CP 灭菌效果的因素之一。CP 的灭菌效果随电极间距的增加而降低,电极间距增加时,电离气流到达样品处的含量减少,与样品的接触也减少,降低了 CP 灭菌效果。Chris 等人发现当电极间距为 1 cm 时,沙门氏菌(*Salmonella*,SA)、LM、*E.coli* 的活菌减少数均在 3 lg (CFU/g)以上,而当电极间距增加到 7 cm 时,活菌减少数则为 0.5 lg(CFU/g)左右[13]。

处理时施加的电源功率也是影响 CP 灭菌效果的重要指标,功率可以通过电压及电流的函数来表达,电压及电流也是影响 CP 灭菌效果的因素。Zhuang 等人发现 CP 的细菌灭活效果与电压相关,冷藏 5 d 后,在 55 kV 下 CP 处理的样品的细菌数量显著低于未处理的鱼片(P<0.05),嗜冷菌总数减少量为 0.8 lg(CFU/g)[14],但并不是电压越大灭活效果越好。施加 75 kV 电压和 80 kV 电压对嗜冷菌总数减少量没有显著性差异(P>0.05),这可能是采用电离包装内的气体进行 CP 处理,由于气体含量一定,施加高强度电压并不能使气体产生更多的活性成分。

在 CP 系统中进行放电的气体种类,如氧气、氮气、氩气、二氧化碳等会影响微生物的灭活效率。由于气体种类不同,所以电离产生的活性物质不同,极大影响 CP 的效率。研究者在对比了工作气体为空气和改性气体 M65 (O_2 体积分数 65%、CO_2 体积分数 30%、N_2 体积分数 5%)的 CP 对椰汁的保鲜效果之后发现,当使用空气时,*E.coli* 减少量为 1.07 lg (CFU/mL),而 M65 处理组大肠杆菌减少量为 1.79 lg(CFU/mL),这是因为 M65 中含有大量氧气,CP 处理后产生了较高体积分数的臭氧[15]。但是,Wan 等人的研究却得到了相反的结果,他们发现在 110 kV 的 CP 处理时,空气组对 *E.coli* 灭活效果高于 M65 处理组,这与其施加高电压有关,高电压会导致臭氧猝灭,影响灭菌效果[16]。

2 低温等离子体灭活微生物的机理

目前,虽然科研者们针对 CP 对各类食品原料的杀菌效果进行了大量研究[12-14],但是 CP 对于微生物确切的灭活机制还没有明确定论。目前普遍认为 CP 处理后的微生物失活可以归因于活性物质、带电粒子、紫外线辐射(Ultraviolet,UV)等几个方面,这与 CP 设备以及工作气体组成有直接关系[3],见图2。

CP 系统可以产生大量的活性物质,主要为活性氧(Reactive Oxygen Species,ROS)和(或)活性氮(Reactive Nitrogen Species,RNS),主要包括 O_3、OH·H_2O_2、NO_X 等,它们可以单独或联合作用[17],对细菌细胞膜造成氧化损伤。同时活性物质还可以进入细胞内造成胞内 DNA、蛋白质、脂质等物质氧化,从而使细胞失活。ROS 可以通过轰击微生物细胞表面来破坏膜脂,对细胞膜造成损伤,这种效应被称为 CP 的“蚀刻”效应[18]。

此外,等离子产生的带电粒子还可以通过静电力破坏或电穿孔导致微生物细胞凋亡[3]。静电力破坏是带电粒子在微生物表面累积,产生静电力,引发静电干扰,导致细胞膜的电张力超过负荷,破坏微生物细胞膜,导致其死亡。而电穿孔效应是由于带电粒子作用于微生物表面破坏其化学键,使微生物细胞膜产生孔洞,导致胞内物质渗出,致使微生物凋亡。

CP 系统中产生的 UV 对于微生物的灭活效应一直有待研究,研究者们得出了许多相互矛盾的结论。Seyed 等人认为 CP 产生的 UV 会迅速减弱,所以忽略不计,不会到达样品表面,对酸樱桃汁中 *E.coli* 的灭活作用不大[19]。但是,也有学者提出,UV 通过破坏细菌细胞中的 DNA,并抑制其 DNA 复制,从而导致 CP 处理后的微生物失活[3]。

虽然,UV 在 CP 系统中的微生物灭活机制还不完全清晰,但是关于活性物质以及带电粒子的作用已经被广泛证实,CP 具有较好的微生物灭活效果。

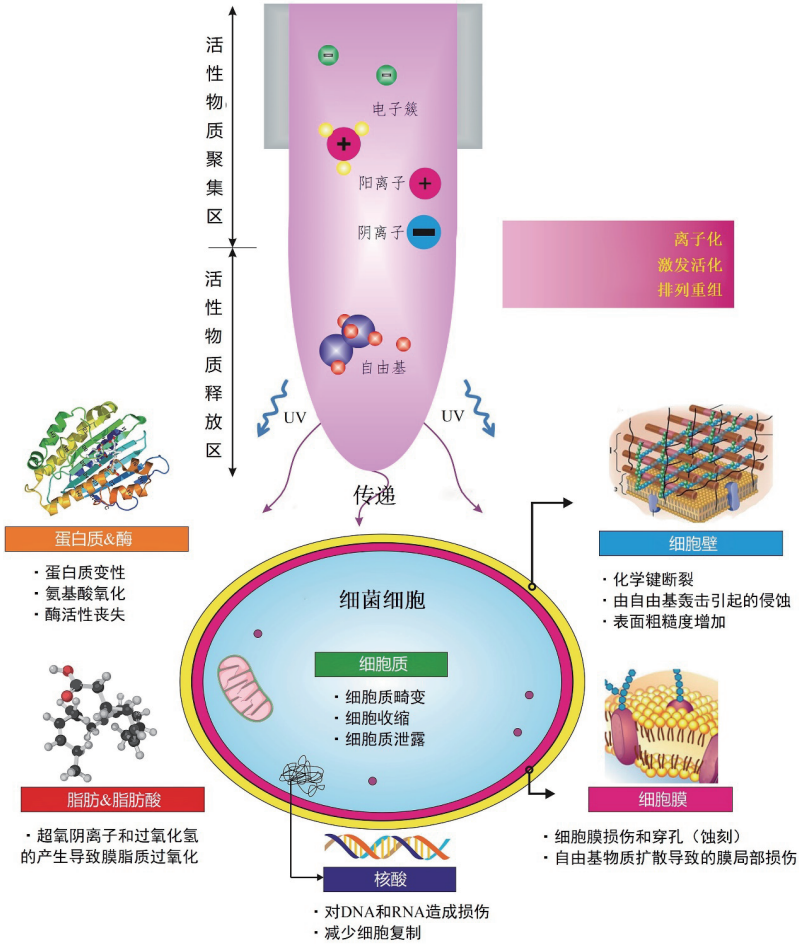


图 2　CP 导致细菌细胞结构功能丧失和灭活的作用示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the effect of CP on the loss of structural function and inactivation of bacterial cells

3 低温等离子体对常见微生物的影响

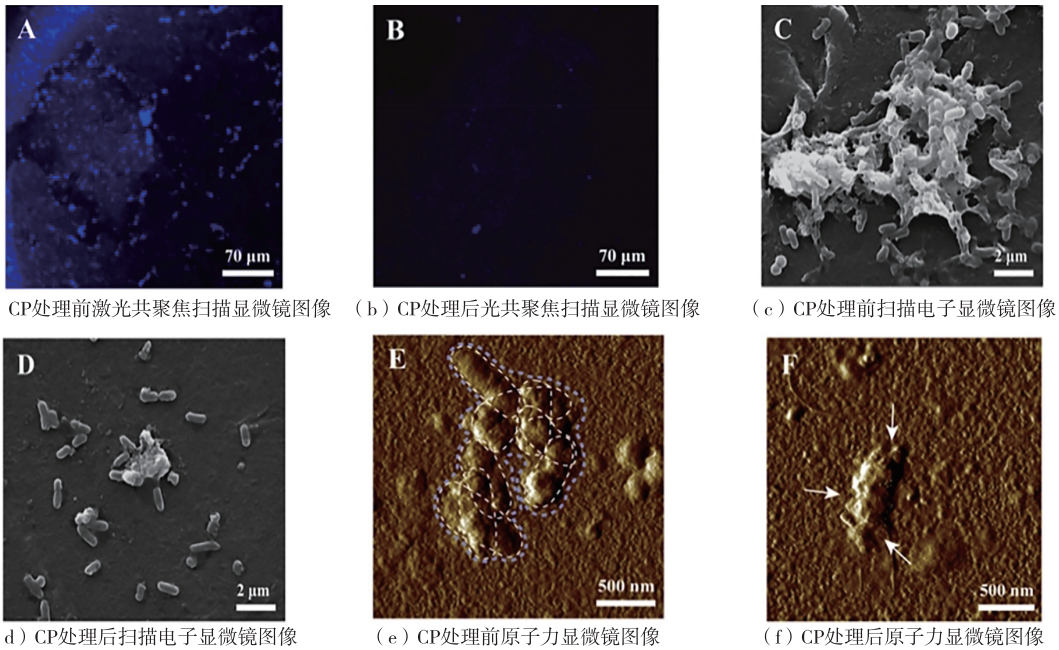
导致水产品腐败变质的微生物主要有致病菌和致腐菌两大类,常见的水产品致病菌有 LM、*E.coli* O157:H7 (O157)、SA 和副溶血性弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*,VB)等,常见的水产品腐败菌有假单胞杆菌(*Pseudomonas*,PS)、希瓦氏菌(*Shewanella*,SH)等[20]。CP 具有广谱杀菌作用,CP 对水产品中常见微生物均有较好的抑制作用。

3.1 CP 对致病菌的影响

3.1.1 CP 对单增李斯特菌的影响 LM 在 4 ℃的环境温度下能较长时间生长繁殖，可耐受冷冻环境。中国各地疾控中心均有报道水产品中 LM 阳性,其检出率在 4%~17%，人体感染 LM 能引起全身性疾病,死亡率较高[21-22]。所以,亟须加强对水产品中 LM 的控制,以减少其危害。

窦勇等人在探究 CP 对 LM 的影响时，发现在电源功率 182 W 和氮气流量 52 cm^3/min 下处理 LM 菌悬液 67 s,可以增加 LM 细胞膜流动性,导致膜变形破裂,使胞内蛋白质及 DNA 渗出。同时该研究也证明了经过 CP 处理会产生大量 ROS，刺激 LM 细胞,造成氧化损伤,进一步破坏 LM 细胞膜[23]。与此同时,Cui 等人发现 CP 处理能产生大量的 ROS,与 LM 细胞膜中的 DNA、蛋白质、脂质等生物大分子反应,破坏其细胞膜[24],其 LM 微观结构见图 3(a)、3(b)。与未处理样品相比,CP 处理组 LM 生物膜荧光强度明显下降,三维结构解体分散,表明菌落数量减少；而 LM 的扫描电镜图显示,CP 处理后胞外

聚合物减少,生物膜厚度随之减少,细菌暴露,从而更易使 LM 灭活,见图 3(c)、3(d)。LM 的原子力显微镜结果也清楚表明,经过 CP 处理后,LM 细胞膜变形严重,见图 3(e)、3(f)。此外,CP 对 LM 的影响还与工作气体组成(O_2 和 He 比例)、处理电压等有关,当加强处理电压、减少工作气体中氧气时,对 LM 生物膜的破坏效果增加[24]。



(a) CP处理前激光共聚焦扫描显微镜图像 (b) CP处理后光共聚焦扫描显微镜图像 (c) CP处理前扫描电子显微镜图像

(d) CP处理后扫描电子显微镜图像 (e) CP处理前原子力显微镜图像 (f) CP处理后原子力显微镜图像

图 3 CP 处理前后的 LM 生物膜结构图像

Fig. 3 Images of LM biofilm structures before and after CP treatment

3.1.2 CP 对大肠杆菌 O157:H7 的影响 *E.coli* O157:H7 是最危险的食源性致病菌之一,可以导致溶血性尿毒症以及肾衰竭[25]。已有证据显示在水产品检测到了 O157 的感染[26]。北京市动物食品安全检测技术重点实验室随机抽检了当地的各类水产品 99 份,*E. coli* 的检出率为 22.22%[27]。因此,亟须通过有效方法来减少水产品中 O157 污染。

Juhyun 等人对固定在载玻片上的 O157 直接进行 CP 处理,可以发现 CP 可以有效灭活 O157,且灭活效果与处理时间和电流成正比[28]。Sudheer 等人研究了 CP 对食品基质中 O157 的灭活效果[29],发现通过在液体中直接放电来处理柑橘果汁,当频率为 40 Hz 时,*E. coli* 的存活量最少,这可能是放电频率与电穿孔效应有关,从而导致细菌失活,但具体机制尚不明了。通过观察发现 CP 处理之后的 *E. coli* 细胞边界模糊,且随着处理时间的延长,细胞膜的损伤越来越严重,这表明 CP 对 *E. coli* 细胞膜具有较强的机械损伤作用[13]。

3.1.3 CP 对沙门氏菌的影响 SA 与许多食源性疾病的爆发有关,能引起急性肠胃炎。SA 分布广泛,水产品亦是其感染对象[30],陕西省疾控中心发现在当地 418 份水产品中 SA 检出率为 3.83%[31]。SA 属于在食品中不可检出微生物,因此必须加强对水产品中 SA 的监控。

Lin 等人研究了 CP 系统处理功率及处理时间对 SA 及其生物膜的影响[32],结果表明当处理功率为 600 W 时,SA 活菌减少数最多,处理 2 min 后 SA 活菌数减少 3.13 lg(CFU/g),同时也发现 SA 生物膜破坏程度与活菌数变化趋势一致,且 SA 活力也明显降低,这是由于 CP 系统产生大量的 ROS,破坏了 SA 细胞膜,也增加了细胞内的氧化应激,导致细胞失活。Mahnot 在 CP 处理前加入 400 μg/g 柠檬酸,于 90 kV 电压下处理椰汁,SA 活菌数减少 5 lg(CFU/g),引起微生物减少的主要原因是 CP 系统产生了活性物质,而活性物质与柠檬酸反应形成过氧有机酸体系,使其具有更高的抗菌功效[33]。

3.1.4 CP 对副溶血性弧菌的影响 VB 广泛存在于鱼类、贝类等水产品中,人体感染 VB 后可出现肠胃炎、败血症甚至是死亡[34]。中国国家食品安全风险评估中心对全国 13 个省市的水产品进行评估,发

现 VB 感染率为 14.7%，连云港市疾控中心甚至发现某些贝类产品中 VB 的感染率高达 54.4%[35-36]，所以控制水产品中 VB 的污染具有迫切性。

Olatunde[37]等人在 80 kV 的 CP 体系中处理 VB 菌悬液，2.5 min 后 VB 活菌减少数为 2.79 lg(CFU/g)，处理 5 min 后基本无活菌存在；经过 CP 处理后的菌悬液电导率大幅上升，表明细胞受损伤，胞内物质渗出；同时，脂质氧化是细菌膜破裂的指标，该研究发现细菌的脂质氧化程度加深，这归因于 CP 系统产生的活性物质对脂质的氧化作用。目前关于 CP 对于 VB 影响的研究还比较少，但是 VB 是典型的革兰氏阴性菌，而 CP 对于其他革兰氏阴性菌（如 *E.coli*、SA 等）作用机制的研究已经很深入[37]，其灭活机制见图 4。CP 可以诱导活性物质的产生，同时 UV 及带电粒子的存在会导致细胞内成分渗出，造成 DNA 和脂质的氧化，从而使细胞失活。

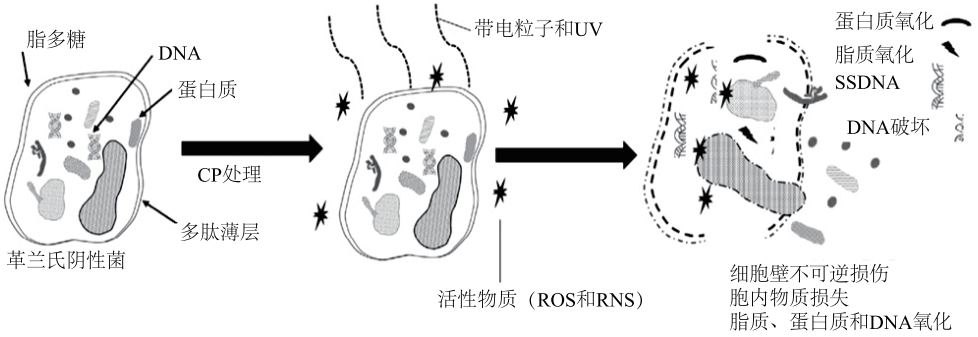


图 4　CP 对革兰氏阴性菌的作用机制

Fig. 4　Proposed mechanism of action of CP against gram-negative bacteria

3.2　CP 对致腐菌的影响

3.2.1　CP 对假单胞杆菌的影响　PS 是革兰氏阴性菌，能在 4 ℃下生长，是典型的水产品致腐菌，在有氧条件下多为淡水鱼的特定腐败菌[38]。水产品感染 PS 后，蛋白质被分解，表面发黏，出现严重异味，从而造成水产品腐败。

Albertos 等人研究了 CP 对鲑鱼鱼体上的 PS 的影响[39]。结果显示，在贮藏初期 CP 对 PS 表现出较强的抑制作用，且电压越高，灭活效果越好，但在贮藏后期不同电压对于 PS 的灭活效果无显著性差异（P>0.05），这可能与 PS 是一种需氧微生物有关，在贮藏后期 PS 对氧气含量的敏感性大于 CP 处理。同时，Albertos 等人还证明了在 CP 处理中，处理电压对 PS 的影响大于处理时间[40]。Patange 等人也发现在 CP 系统中，处理电压越高，PS 失活效果越好，在 70 kV 电压下处理 120 s 后 PS 活菌数减少量可达到 3.0 lg(CFU/g)[41]。

3.2.2　CP 对希瓦氏菌的影响　SH 是嗜冷性细菌，为低温储藏海产品中的优势腐败菌，能够将水产品中的氧化三甲胺还原为三甲胺，产生氨气等不良气体，具有较强的腐败能力，严重影响水产品的品质[38]。

目前关于 CP 对于 SH 的影响还鲜见报道，仅有利用 CP 技术产生等离子体活化水（Plasma-Activated Water，PAW）对 SH 影响的相关研究。刘舒彦等人发现 PAW 对 SH 活菌的抑制效果与其制备时间呈正相关，当 PAW 处理 60 min 时 SH 抑制率达到了 99.90%[42]，这是由于 PAW 中含有的大量活性物质（ROS 和 RNS）与 SH 细胞肽聚糖发生氧化作用，破坏其细胞壁，同时也引起蛋白质变性和核酸水解。SH 同属于革兰氏阴性菌，而 CP 对革兰氏阴性菌的灭活机理认为 CP 对 SH 也是具有很好的灭活效果，但还需要大量实验证明。

4　低温等离子体对水产品保鲜过程中生理生化指标的影响

CP 对水产品进行杀菌的同时也对水产品的品质产生了影响，主要包括两方面：一方面 CP 具有广谱杀菌效果，可以灭活水产品中大部分的致病菌和致腐菌，抑制水产品品质的劣变；另一方面由于等离子体产生的一些活性物质会对水产品的蛋白质、脂质等成分造成影响，既有有利方面也有不利方面。

水产品的色泽是消费者在购买时最先考量的指标，很大程度上也代表其品质。研究发现，随着 CP 处理时间的延长，水产品的亮度值（L*）和黄度值（b*）均显著增加（P<0.05），而红度值（a*）呈现下降

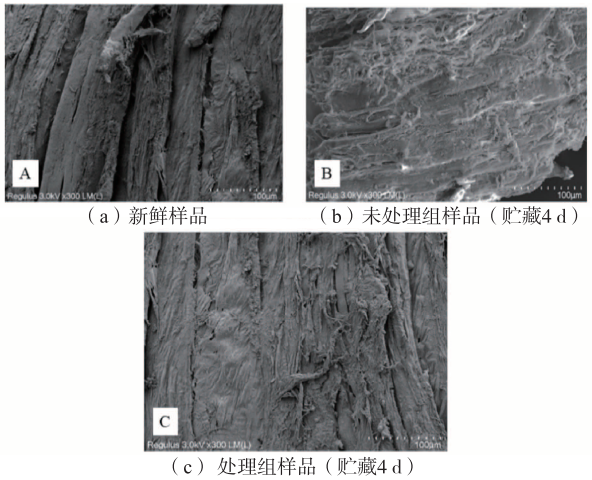
趋势[43]。L^* 上升及 a^* 下降都是由于脂质氧化导致的,而 b^* 的变化与肌红蛋白在活性物质作用下氧化生成高铁血红蛋白有关,这些都与 CP 产生的活性成分有关。但是,Albertos 等人则发现经过 CP 处理后水产品的色泽没有显著变化,这可能与试验所用的原料种类、处理电压以及处理时间有关[40]。CP 对水产品色泽的影响还有待进一步确定。

水产品的质地与其组成和结构相关,会极大地影响消费者对水产品的接受程度。CP 处理之后的水产品总体质地均优于未处理组,这可能是由于经过 CP 处理之后,蛋白质发生更多的交联,形成了更加致密的网络结构[44-45],还可能是 CP 处理之后抑制了水产品表面微生物以及内源酶活性而减缓其质地劣化。同时,经过 CP 处理后产生的活性物质会造成水产品中的蛋白质氧化,这也可以在一定程度上提高其凝胶强度[46]。

水产品肌肉组织的微观结构与其品质紧密相关,肌肉组织结构的改变会引起质构、色泽、营养价值等一系列变化。胡晓梦等人利用 CP 处理时发现,贮藏 4 d 之后的水产品肌肉微观组织与新鲜样品差别不大[47],但是未经处理的肌肉肌原纤维组织松散、粗糙,甚至有糜烂现象,见图 5。这表明 CP 可以增强肌原纤维组织的稳定性,肌原纤维蛋白是肌肉结缔组织的组成部分,其降解会导致微观结构的劣化,而经过 CP 处理之后有效抑制了某些腐败微生物产生的蛋白酶对肌原纤维蛋白的破坏[47-48]。

挥发性盐基氮(TVB-N)变化是由于腐败菌生长导致含氮化合物分解,是鱼新鲜度的重要指标。水产品经过 CP 处理之后,在贮藏期间都表现出 TVB-N 的增加量低于未处理组,且随着贮藏时间的延长差异越显著[43,48],这表明 CP 能有效延缓微生物的降解作用,抑制 TVB-N 的生成。此外,CP 处理与使用防腐剂焦亚硫酸钠相比,TVB-N 变化相当[49],这意味着 CP 处理可以替代当前的化学防腐剂,减少化学污染。

脂质氧化是水产品产生异味的主要原因。CP 处理时间的延长以及处理电压的增加都可显著增加



(a)新鲜样品 (b)未处理组样品(贮藏4 d)
(c)处理组样品(贮藏4 d)

图 5 虾肉微观组织图(×3 000)

Fig. 5 Microstructure diagram of shrimp (×3 000)

鱼类产品的脂质氧化程度,这可能与 CP 产生的活性物质有关(如臭氧),鱼类产品含有的大量多不饱和脂肪酸在大量活性物质的作用下,氧化程度越来越高[40,43]。而徐惠倩等人用 CP 处理虾产品时,在贮藏前期虾的脂质氧化程度与未处理组无显著差异,没有产生较高的脂质氧化,这可能与虾的外壳有关,其阻止了 CP 产生的活性成分与肌肉直接接触[50]。

5 展 望

CP 技术作为一种新型有效的非热杀菌技术具有广谱杀菌效果,已经被广泛应用于食品的杀菌及保鲜研究中,对水产品中常见的致病菌、致腐菌均有较好的灭活作用,且基本随处理电压及处理时间的增加而效果增强,在水产品保鲜方面具有良好的发展前景。但是有关不同 CP 电极及阻挡介质材料的处理效果的研究还比较少,同时,CP 产生的 UV 对灭活微生物的具体作用也不明确,这将是未来研究的重点。

虽然 CP 产生的各种活性成分具有很好的抗菌性能,但是在处理水产品中具有一定的局限性甚至是负面影响,因此探索合适的处理方式以达到良好的抑菌效果同时还能保持较好的品质将是未来研究的热点。

参考文献:

[1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 2021 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2021.

[2] ZHAO Y M,ALBA M D,SUN D W,et al. Principles and recent applications of novel non-thermal processing technologies for the fish industry-a review[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**,2019,59(5):728-742.
[3] NASIRU M M,FRIMPONG E B,MUHAMMAD U,et al. Dielectric barrier discharge cold atmospheric plasma:Influence of processing parameters on microbial inactivation in meat and meat products[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**,2021,20(3):2626-2659.
[4] GOVAERT M,SMET C,VERGAUWEN L,et al. Influence of plasma characteristics on the efficacy of cold atmospheric plasma (CAP) for inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella typhimurium* biofilms[J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**,2019,52:376-386.
[5] FLORA-GLAD C E,SUN D W,CHENG J H. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry:current applications and future trends[J]. **Trends in Food Science and Technology**,2017,69:46-58.
[6] PRASAD P,MEHTA D,BANSAL V,et al. Effect of atmospheric cold plasma (ACP) with its extended storage on the inactivation of *Escherichia coli* inoculated on tomato[J]. **Food Research International**,2017,102:402-408.
[7] 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.
[8] KANAZAWA S,KOGOMA M,MORIWAKI T,et al. Stable glow plasma at atmospheric pressure[J]. **Journal of Physics D:Applied Physics**,1988,21(5):838-840
[9] 邵涛,严萍. 大气压气体放电及其等离子体应用[M]. 北京:科学出版社,2015.
[10] OLATUNDE O O,SHIEKH K A,BENJAKUL S. Pros and cons of cold plasma technology as an alternative non-thermal processing technology in seafood industry[J]. **Trends in Food Science and Technology**,2021,111:617-627.
[11] LUIGI R,ANNACHIARA B,ELEONORA I,et al. Influence of the electrode material on the decontamination efficacy of dielectric barrier discharge gas plasma treatments towards *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli*[J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**,2016,37:170-176.
[12] THOMAS-POPO E,MENDONCA A,MISRA N N,et al. Inactivation of Shiga-toxin-producing *Escherichia coli*,*Salmonella enterica* and natural microflora on tempered wheat grains by atmospheric cold plasma[J]. **Food Control**,2019,104:231-239.
[13] CHRIS T,KEDAR P,JAMEY J,et al. Inactivation of *Salmonella enterica*,Shiga toxin-producing *Escherichia coli*,and *Listeria monocytogenes* by a novel surface discharge cold plasma design[J]. **Food Control**,2018,84:455-462.
[14] 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]. **The Journal of Applied Poultry Research**,2019,28(4):801-807.
[15] MAHNOT N K,MAHANTA C L,FARKAS B E,et al. Atmospheric cold plasma inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes* in tender coconut water:Inoculation and accelerated shelf-life studies[J]. **Food Control**,2019,106:106678.
[16] WAN Z F,MISRA N N,LI G,et al. High voltage atmospheric cold plasma treatment of *Listeria innocua* and *Escherichia coli* K-12 on Queso Fresco (fresh cheese)[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2021,146:111406.
[17] CHOI E H,UHM H S,KAUSHIK N K. Plasma bioscience and its application to medicine[J]. **AAPPS Bulletin**,2021,31(10):1-38.
[18] KAAVYA R,PANDISELVAM R,ABDULLAH S,et al. Emerging non-thermal technologies for decontamination of *Salmonella* in food[J]. **Trends in Food Science and Technology**,2021,112:400-418.
[19] SEYED M H,SAJAD R,BAHRAM H S,et al. The effect of atmospheric pressure cold plasma on the inactivation of *Escherichia coli* in sour cherry juice and its qualitative properties[J]. **Food Science and Nutrition**,2020,8(2):870-883.
[20] 钟强,董春晖,黄志博,等. 酸性电解水保鲜机理及其在水产品中应用效果的研究进展[J]. 食品科学,2021,42(5):288-295.
[21] 孙晓岩,蒋林,单芙蓉,等. 营口市 2019 年水产品中单增李斯特菌检测分析[J]. 海峡预防医学杂志,2021,27(2):78-79.
[22] 石奔,赵薇,杨修军,等. 2011~2019 年吉林省市售食品中单增李斯特菌污染情况分析[J]. 食品安全质量检测学报,2020,11(23):9046-9051.
[23] 窦勇,姚妙爱,闾怀中,等. 冷等离子体对单核增生李斯特菌的杀菌机理[J]. 中国农业科学,2020,53(24):5104-5114.
[24] CUI H Y,LI H,ABDEL-SAMIE M A,et al. Anti-*Listeria monocytogenes* biofilm mechanism of cold nitrogen plasma[J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**,2020,67:102571.
[25] SHARMA V K,AKAVARAM S,SCHAUT R G,et al. Comparative genomics reveals structural and functional features specific to the genome of a foodborne *Escherichia coli* O157:H7[J]. **BMC Genomics**,2019,20(1): 196.
[26] SIVARAMAN G K,SUDHA S,MUNEEB K H,et al. Molecular assessment of antimicrobial resistance and virulence in multi

drug resistant ESBL-producing *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae* from food fishes,Assam,India[J]. **Microbial Pathogenesis**,2020,149:104581.
[27] SUN C T,WANG Y C,MA S Z,et al. Surveillance of antimicrobial resistance in *Escherichia coli* and enterococci from food products at retail in Beijing,China[J]. **Food Control**,2020,119:107483.
[28] JUHYUN K,TAEHOON L,PRADEEP P,et al. Afterglow dielectric-barrier discharge air plasma (ADDAP) for the inactivation of *Escherichia coli* O157:H7[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2019,105:177-181.
[29] SUDHEER K Y,POOYA E,SHANE R,et al. Application of high voltage electrical discharge plasma for the inactivation of *Escherichia coli* ATCC 700891 in tangerine juice[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2017,90:180-185.
[30] AGREGAN R,MUNEKATA P E S,ZHANG W G,et al. High-pressure processing in inactivation of *Salmonella* spp. in food products[J]. **Trends in Food Science and Technology**,2021,107:31-37.
[31] 席昭雁,张阿峰,吴荣,等. 陕西省食品中沙门氏菌监测研究[J]. 中华疾病控制杂志,2011,15(8):671-673.
[32] LIN L,LIAO X,LI C Z,et al. Inhibitory effect of cold nitrogen plasma on *Salmonella typhimurium* biofilm and its application on poultry egg preservation[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2020,126:109340.
[33] MAHNOT N K,MAHANTA C L,KEENER K M,et al. Strategy to achieve a 5-log *Salmonella* inactivation in tender coconut water using high voltage atmospheric cold plasma (HVACP)[J]. **Food Chemistry**,2019,284:303-311.
[34] JEONG-MIN L,RINI N A,KEUN-SUNG K. Comparative evaluation of three agar media-based methods for presumptive identification of seafood-originated *Vibrio parahaemolyticus* strains[J]. **Food Control**,2020,116:107308.
[35] 杨舒然,裴晓燕,李莹,等. 生食动物性水产品中副溶血性弧菌和创伤弧菌污染状况分析[J]. 中国食品卫生杂志,2019,31(6):574-576.
[36] 靳亚玲,朱晓露,张明娟,等. 连云港市零售鲜活双壳贝类中副溶血性弧菌污染调查[J]. 江苏预防医学,2021,32(2):222-224.
[37] OLATUNDE O O,BENJAKUL S,VONGKAMJAN K. Dielectric barrier discharge cold atmospheric plasma:Bacterial inactivation mechanism[J]. **Journal of Food Safety**,2019,39(6):12705.
[38] 赵二科,朱军莉,冯立芳,等. 冷藏大黄鱼 SSO 希瓦氏菌致腐能力差异机制初探[J]. 水产学报,2015,39(2):256-264.
[39] 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 and Emerging Technologies**,2019,53:85-91.
[40] ALBERTOS I,MARTí N-DIANA A B,CULLEN P J,et al. Effects of dielectric barrier discharge (DBD) generated plasma on microbial reduction and quality parameters of fresh mackerel (*Scomber scombrus*) fillets[J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**,2017,44:117-122.
[41] PATANGE A,BOEHM D,ZIUZINA D,et al. High voltage atmospheric cold air plasma control of bacterial biofilms on fresh produce[J]. **International Journal of Food Microbiology**,2019,293:137-145.
[42] 刘舒彦,李海蓝,李湃,等. 等离子体活化水对希瓦氏菌及鲈鱼品质的影响[J]. 肉类研究,2020,34(9):25-30.
[43] 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.
[44] KODDY J K,MIAO W,HATAB S,et al. Understanding the role of atmospheric cold plasma (ACP) in maintaining the quality of hairtail (*Trichiurus lepturus*)[J]. **Food Chemistry**,2021,343:128418.
[45] NYAISABA B M,MIAO W H,HATAB S,et al. Effects of cold atmospheric plasma on squid proteases and gel properties of protein concentrate from squid (*Argentinus ilex*) mantle[J]. **Food Chemistry**,2019,291:68-76.
[46] NYAISABA B M,LIU X X,ZHU S C,et al. Effect of hydroxyl-radical on the biochemical properties and structure of myofibrillar protein from Alaska pollock (*Theragra chalcogramma*)[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2019,106:15-21.
[47] 胡晓梦,陈静,邓尚贵,等. 低温等离子体对中华管鞭虾(*Solenocera crassicorni*)菌相变化及品质特性的影响[J].食品科学,2021,42(19):141-147.
[48] CHEN J,WANG S Z,CHEN J Y,et al. Effect of cold plasma on maintaining the quality of chub mackerel (*Scomber japonicus*):Biochemical and sensory attributes[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**,2018,99(1):39-46.
[49] ZOUELM F,ABHARI K,HOSSEINI H,et al. The effects of cold plasma application on quality and chemical spoilage of Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during refrigerated storage[J]. **Journal of Aquatic Food Product Technology**,2019,28(6):624-636.
[50] 徐慧倩,严金红,唐玲玲,等. 低温等离子体对南美白对虾冷藏期间品质保持的效果[J]. 现代食品科技,2021,37(4):116-123.