

低温等离子体技术在水产品保鲜中的应用研究进展

蓝蔚青^{1,2}, 陈雪宁¹, 谢 晶^{1,2,*}

(1.上海海洋大学食品学院, 上海 201306;

2.上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 上海 201306)

摘 要: 水产品流通期间易受微生物与内源酶影响, 使其品质发生劣变, 采用非热杀菌技术处理可保持其营养价值, 延缓腐败进程, 延长贮藏货架期, 提升其商品价值。本文在比较常用非热杀菌技术的作用原理及主要特点的同时, 阐明低温等离子体技术的杀菌机制及在水产品品质改善、减菌处理、黑变抑制与安全控制中的应用研究进展, 针对当前单一使用低温等离子体技术而产生的问题提供解决方法, 并展望低温等离子体技术的未来发展趋势, 以期为该技术在水产品保鲜中的应用提供理论参考。

关键词: 水产品; 低温等离子体; 非热杀菌技术; 保鲜; 研究进展

Recent Progress of Cold Plasma Technology in the Preservation of Aquatic Products

LAN Weiqing^{1,2}, CHEN Xuening¹, XIE Jing^{1,2,*}

(1.College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2.National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering,
Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China)

Abstract: Aquatic products are easily affected by microorganisms and endogenous enzymes during distribution, resulting in their quality deterioration. Non-thermal sanitization technology can maintain the nutritional value, delay the process of spoilage, prolong the shelf-life and enhance the commodity value of aquatic products. This review paper compares the principles and main characteristics of the common non-thermal sterilization technologies, describes the sterilization mechanism of cold plasma technology, and summarizes recent progress in its application in the quality improvement, bacterial decontamination, blackening inhibition, and safety control of aquatic products. Moreover, possible solutions to the problems of applying cold plasma technology alone are proposed, and future trends in the development of cold plasma technology are discussed. Through this review, we hope to provide a theoretical rationale for the application of this technology in the preservation of aquatic products.

Keywords: aquatic products; cold plasma; non-thermal sterilization technology; preservation; progress

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220406-032

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2022) 06-0060-07

引文格式:

蓝蔚青, 陈雪宁, 谢晶. 低温等离子体技术在水产品保鲜中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(6): 60-66.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220406-032. <http://www.rlyj.net.cn>

LAN Weiqing, CHEN Xuening, XIE Jing. Recent progress of cold plasma technology in the preservation of aquatic products[J]. Meat Research, 2022, 36(6): 60-66. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220406-032. <http://www.rlyj.net.cn>

收稿日期: 2022-04-06

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2019YFD0901602); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-47-G26); 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心能力提升项目(19DZ2284000)

第一作者简介: 蓝蔚青(1977—)(ORCID: 0000-0002-0509-4494), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为食品保鲜技术。

E-mail: wqlan@shou.edu.cn

*通信作者简介: 谢晶(1968—)(ORCID: 0000-0002-0507-4136), 女, 教授, 博士, 研究方向为食品冷冻冷藏工程。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

我国是世界渔业大国，水产品产量连续多年稳居世界第一。2020年全国水产品产量达6 545.21 wt，比上年增长1.0%。水产品味道鲜美，富含膳食蛋白、不饱和脂肪酸和人体所需的矿物质，在人类的膳食营养中起重要作用，成为我国居民膳食中的重要支柱^[1]。然而，由于水产品的成分特性，使其在流通期间易受微生物和内源酶的影响，产生不良风味和有毒物质，降低商品价值，带来食品安全问题^[2-3]。此外，因地理位置、季节气候、流通运输等因素，会使水产品的品质、风味和营养价值等方面受到影响。

当前研究发现，嗜冷菌的代谢活动是导致水产品腐败变质的主因，其主要包括腐败希瓦氏菌（*Shewanella putrefaciens*）、荧光假单胞菌（*Pseudomonas fluorescens*）与金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）等^[4]。微生物通过分解水产品中的营养成分、形成生物被膜或群体感应，产生有毒有害物质，使其质构改变，风味流失，最终导致腐败^[5]。俞滢洁等^[6]模拟三文鱼的冷链物流过程，鉴定出假单胞菌和产H₂S菌为三文鱼贮藏末期的主要腐败菌。大黄鱼中希瓦氏菌属细菌的生物膜形成能力更强，其易使鱼体发黏变质^[7]。于淑池等^[8]研究发现，卵形鲳鲹在0℃贮藏条件下，荧光假单胞菌、草莓假单胞菌与蜡样芽孢杆菌的致病能力较强。因此，如何降低水产品流通或贮藏期间微生物带来的负面影响，保持其新鲜度，成为当前水产品保鲜领域的前沿问题。

传统的热处理技术虽能灭酶杀菌，但会破坏水产品中的营养物质和感官风味。非热灭菌技术包括低温等离子体、酸性电解水、臭氧、高压、超声和辐照等。其中，低温等离子体技术应用最广泛，其与其他非热杀菌技术相比，作用原理与主要优缺点如表1所示。

故与其他非热杀菌技术相比，低温等离子体的主要优势在于能保持产品的整体质量、感官属性和营养价值。由于具有以上优点，低温等离子体技术现已广泛应用于果蔬、肉制品、乳制品与水产品的灭菌保鲜上^[21-23]。

基于此，本文在比较常用非热杀菌技术的作用原理与主要优缺点基础上，通过对低温等离子体在水产品品质改善、减菌处理、黑变抑制与安全控制等方面中的应用研究进展予以阐述，提出其存在问题与解决办法，展望低温等离子体的发展前景，以期为该技术在水产品保鲜中的应用提供理论参考。

表1 常用非热杀菌技术作用原理及主要优缺点

Table 1 Principles, advantages and disadvantages of common non-thermal sterilization technologies

杀菌方式	酸性电解水	臭氧	超声	超高压	低温等离子体
作用原理	依靠电解水中的次氯酸与氧化还原电位实现杀菌 ^[9-10]	破坏分解菌体细胞壁，氧化细胞内源酶或核酸 ^[13]	空化效应起主导作用，即高功率超声通过破坏细胞膜和损伤细胞内生物大分子（如蛋白质、核酸），从而灭活菌体 ^[15]	对物料施加静水压力（100~1 000 MPa），从而灭酶失活，蛋白变性，最终达到抑菌目的 ^[17]	通过对工作气体施加电场而产生反应活性物质与带电粒子等杀菌物质 ^[19]
优点	杀菌高效、安全可靠、生产成本低	高效、广谱灭菌、残留少	对食品营养损伤小、效能高、无污染残留 ^[16]	作用均匀、杀菌效率高、能耗低、无污染、操作简便	操作简单、对食品品质影响小、安全经济
缺点	仅作用于原料表面 ^[11-12]	有毒性，会造成脂肪、蛋白质氧化 ^[14]	杀菌不彻底、在空气中易衰减，功率要求高	可能会造成外观形变，硬度和黏性增加 ^[18]	穿透性低、会破坏蛋白质结构 ^[20]

1 低温等离子体技术的特点及作用原理

1.1 等离子体的概念及特点

等离子体以第4种状态（除固、液、气状态外）存在，但因其组成中含有大量未结合的正负离子、中性物质和电子等，故导电性强^[24]。等离子体是一种完全或部分电离的呈中性状态的气体，根据其热力学状态可分为高温等离子体和低温等离子体^[25]。而低温等离子体是一种通过对中性气体施加能量（如热、电场和微波等）而产生的部分电离气体，且因等离子体中的温度差异（电子与重粒子间），故低温等离子体最大特点是处于非局部热力学平衡状态^[24]。

1.2 等离子体的产生方式

近年来，研究学者对于等离子体技术的研究愈益深入。当前，因介质阻挡放电（dielectric barrier discharge, DBD）法和大气压等离子体射流（atmospheric pressure plasma jet, APJ）法适用范围较广、易于操作，可大量制备，故在食品加工保鲜领域中应用广泛。特别是在水产品这种易腐且需低温贮藏的食品中，可在对水产品外观形态影响较小的情况下，利用等离子体产生的活性物质进行灭菌，以确保其保留更多营养成分。依据放电形式的不同，低温等离子体的产生方式分为DBD法、APJ法、微波放电法和电晕放电法，详见表2。

表2 低温等离子体的主要产生方式

Table 2 Main types of cold plasma generators and their characteristics and applications

制备方法	操作形式	特点	应用
DBD	由2个用电介质层隔开的导电电极组成，当两极间的电压被阻隔，就会产生微放电效应，生成低温等离子体	电离程度强、适用范围广、生产能力强、操作简单方便	保持肉类新鲜品质 ^[26]
APJ	利用电场和外加气流使产生的低温等离子体从放电区域流动，形成射流	放电均匀稳定、适用性强，但有经济限制	灭活病毒 ^[27]
微波放电	在工作气体存在的条件下，通过电缆或导体将产生的低温等离子体引到工作区域	处理简便，处理面积大	分析测定食品中的元素 ^[28]
电晕放电	在直流电压或脉冲电压模式下微弱放电	处理不均匀、能量低、适用范围小	降解乙烯 ^[29]

1.3 低温等离子体的杀菌机制

由于水产品保鲜体系通常在低于4℃的低温条件下进行，而低温等离子体的宏观温度较低，能保持其低温状态^[30]。因此，可通过低温等离子体产生的活性物质破

坏菌体细胞,影响微生物细胞膜的流动性与完整性,使菌体死亡。同时,其还能通过抑制酶活性等方式来实现保鲜目的。低温等离子体技术的作用机理与微生物的结构密切相关,革兰氏阳性菌比革兰氏阴性菌对低温等离子体的敏感性要弱。其原因在于革兰氏阴性菌的细胞外膜是低温等离子体诱导的活性氧攻击的主要作用靶点,因其相互反应会破坏细胞膜结构的完整性,使核酸等生物大分子泄露,导致菌体死亡;而对细胞壁较厚的革兰氏阳性菌则通过氧化细胞内膜,使内部的生物大分子氧化损伤,造成蛋白质变性、氨基酸氧化修饰、DNA与蛋白质交联和DNA双链断裂等(图1)。但当前因低温等离子体技术的部分局限性,还不能更深入了解其灭菌机制,故应在改良其工艺的基础上,与蛋白质组学、基因组学和代谢组学等组学技术相结合,为水产品的保鲜机制提供理论参考。

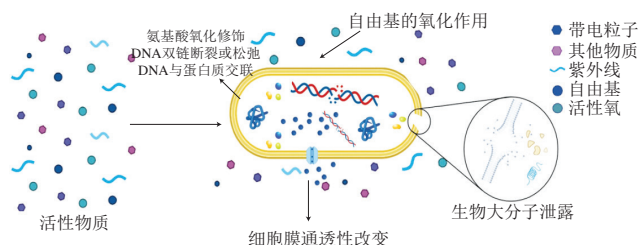


图1 低温等离子体灭菌的作用原理
Fig. 1 Sterilization mechanism of cold plasma

2 低温等离子体技术在水产品保鲜中的应用

2.1 品质改善

因水产品捕捞、运输、贮藏、销售等操作单元易发生腐败变质,而降低其营养价值和商品价值,故探索绿色、高效的保鲜方式至关重要。相关研究显示,低温等离子体预处理鱼虾类可延缓其品质劣变和感官质量下降。如斯兴开等^[31]研究发现,草鱼经40 kV电压处理2 min后,与对照组相比,其硬度、弹性与咀嚼性分别增加0.32、0.29、0.64倍,原有生鲜风味得以维持;同时,低温等离子体处理还可延缓水产品褐变,增加其亮度值(L^*),王佳媚等^[32]研究得出,卵形鲳鲹经低温等离子体激发处理后,样品的 L^* 升高,黄度值(b^*)降低,使鱼肉褐变进程变缓,维持其品质;Nyaisaba等^[33]以鲑鱼凝胶为研究对象,经60 kV、5 min低温等离子体处理后发现,其可有效抑制酶活性,主要由于蛋白质聚合物与低温等离子体产生的活性物质间的化学反应能延缓肌球蛋白降解,提高凝胶持水性;Chen Jing等^[34]实验发现,鲭鱼贮藏14 d时,未处理组的总挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)含量是处理组的2.73倍,且在贮藏6 d就已超过阈值,而处理组的TVB-N

含量明显较低,经低温等离子体处理后货架期可延长8 d;Koddy等^[35]研究发现,带鱼经50 kV、180 s低温等离子体处理后,肌肉硬度达到最大值,可能是由于低温等离子体处理使带鱼的肌肉蛋白氧化,形成更致密的蛋白质网络;金图南^[36]发现,鱿鱼经60 kV处理15 s后冷藏8 d,其总色差值变化较小,感官评分降幅明显延缓,在延长货架期2~3 d的同时还能维持其营养价值。因此,虽然水产品的品质特性会受到低温等离子体处理强度影响,但在可控范围内,可改善其质构特性,延长货架期。

2.2 减菌处理

微生物活动是导致水产品腐败的主因,水产品新鲜度与微生物种类及数量密切相关。低温等离子体具有杀菌效率高、操作简便、无残留、无污染等优点,因而在水产品减菌化处理中得到应用,尤其对假单胞菌属、肠杆菌属与弧菌属等产组胺等产毒细菌有良好效果。Choi等^[37]研究发现,随着DBD处理时间的延长,黑嘴鱼干表面的金黄色葡萄球菌和蜡样芽孢杆菌数量明显减少,其中处理组在处理30 min后,2种菌分别减少1.03、1.06 ($\lg(\text{CFU/g})$),且未对其色泽带来不良影响;Albertos等^[38]通过DBD产生低温等离子体,发现低温等离子体减菌效果与微生物的种类、处理时间和电压强度有关,且达到最大施加能量时(80 kV、5 min),处理组的过氧化值(peroxide value, PV)比对照组高5.42倍,说明脂质氧化程度与施加能量成正比。此外,施姿鹤等^[39]经优化后的实验得出,新鲜鲈鱼经59.9 kV低温等离子体处理71.5 s后,能显著抑制弧菌生长,贮藏14 d时其弧菌数才达到4.68 ($\lg(\text{CFU/g})$),且对产组胺肠杆菌属的作用效果最佳;Odunayo等^[40]研究低温等离子体处理时间与亚洲海鲈鱼品质的关系,发现与对照组样品相比,经低温等离子体处理5 min以上的样品,其微生物(菌落总数、肠菌数、产亚硫酸氢菌与假单胞菌等)的生长受到抑制,保质期比未处理组延长6 d,但脂质氧化程度也会随着时间延长更为明显。因此,低温等离子体的施加强度越大,抑菌效果越好,但也会促进脂质或蛋白质氧化,要合理控制工艺参数。

2.3 黑变抑制

虾类贮藏期间易发生黑变,其通常出现在头、胸,随后扩展至尾部。这主要是由于体内的多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)催化酪氨酸氧化为醌,最终聚合沉积形成黑色素^[41]。由于水产品中的酶多为由氨基酸形成的三维结构聚合物,低温等离子体产生的活性物质可通过影响其分子结构,改变其功能特性。研究表明,低温等离子体技术可抑制虾体黑变,降低其感官和质构带来的负面影响。胡晓梦等^[42]研究得出,中华管鞭虾(*Solenocera crassicornis*)经40 kV电压处理90 s后于4 °C条件下冷藏10 d时,处理组的感官评分刚达到感官

拒绝点,而未处理样品在4 d时已不被接受,货架期延长6 d;刘品等^[43]研究表明,南美白对虾经50 kV低温等离子体处理60 s后,其体内的PPO二级结构改变,酶活力下降,黑变受到抑制,7 d才完全黑变,相较于对照组延长2 d。Bjoern等^[44]研究表明,食品模型系统中PPO经180 s低温等离子体射流处理后,其酶活性降低约90%,联合圆二色性和色氨酸荧光分析,表明其酶活性的降低与低温等离子体使二级结构氧化修饰有关。可见,该技术通过抑制内源酶的活性可降低水产品中肌原纤维蛋白的氧化速率,维持蛋白质内部组织结构,保证其感官品质。

2.4 安全控制

在水产品贮藏期间,某些致病菌或腐败菌的代谢活动会产生有毒的生物胺及致病物质,而这些物质的产生会伴随着品质变化,故探究低温等离子体技术对水产品安全控制、鲜度评价与人类健康的影响至关重要。Choi等^[45]研究发现,新鲜牡蛎经1.1 kV电压处理60 min后,诸如病毒含量减少1.68 (lg (CFU/μL)),而处理30 min后病毒含量只降低1.05 (lg (CFU/μL)),且不影响其品质。DBD通过对混合气体放电产生的低温等离子体,可破坏微生物细胞内的生物大分子,继而消除有毒有害物质。如施姿鹤等^[39]研究DBD产生的低温等离子体对鲑鱼食用安全的影响,发现经59.9 kV处理71.5 s后,至贮藏14 d,其组胺含量为72.34 mg/100 g,未超过阈值100 mg/100 g,说明该处理使产组胺的微生物被大量灭活,使货架期延长6 d;此外,Choi等^[46]研究发现,新鲜牡蛎与DBD间接处理(1.1 kV、13 mm、N₂流速1.5 L/min)1 h后,处理组样品的糖原含量和整体质构与对照组无显著差异,表明该处理方式在灭活非致病性大肠杆菌和血

清性大肠杆菌O157:H7的同时,还能保持其良好品质。因此,低温等离子体技术既能高效杀菌,又可保障水产品的食用安全,是一种新型兼具品质控制和灭菌保鲜的技术。

低温等离子体技术在水产品保鲜中应用的部分研究如表3所示。

3 现存问题与解决方法

等离子体技术虽灭菌效率高,但因水产品高脂、高蛋白的特性和等离子体释放的活性物质会诱导生物大分子交联氧化,使水产品风味与营养价值相应降低^[47]。同时,其杀菌效果或氧化速率与电压强度、作用频率和作用时间等参数直接相关。另外,低温等离子体只作用于水产品表面,穿透性较差,无法彻底杀菌^[48]。陈俊羽等^[49]研究凡纳滨对虾的营养品质时发现,若等离子体长时间处理水产品,会破坏其蛋白质结构,降低其保水性;Sonawane等^[50]研究80 kV低温等离子体预处理5 min,结果表明,鲑鱼在-20、4、8 °C条件下,其羰基含量显著升高,蛋白质氧化速率与贮藏温度呈正相关。另外,可通过使用DBD、射频或电晕放电来产生等离子体。各种气体操作设备会产生多种不同特性的等离子体,使其在食品基质中进行灵活应用。因此,将等离子体与其他保鲜技术联用或改良发射装置,合理控制工艺参数,就能发挥其各自优势,延缓水产品的蛋白质与脂肪氧化,保持其色泽与感官特性,发挥综合作用效果。

3.1 等离子体活化水(冰)

将处理用水通过等离子体技术制成离子体活化水(plasma activated water, PAW)是等离子体应用的新趋

表3 低温等离子体技术在水产品保鲜中的应用

Table 3 Application of cold plasma technology in aquatic product preservation

应用	研究对象	工艺参数	作用效果	参考文献
品质改善	草鱼	处理电压20、30、40 kV, 处理时间1、2、3 min	在40 kV下,草鱼片的硬度、弹性和咀嚼性显著增加,TVB-N含量处于一级鲜度范围	[31]
	金鲳鱼	处理电压60、70、80 kV, 处理时间1、2、3 min	在80 kV下处理鱼片3 min,其菌落总数和TVB-N含量分别下降1.40 (lg (CFU/g)) 和2.60 mg/100 g, L*升高	[32]
	鱿鱼凝胶	处理电压60 kV, 处理时间15、60、120、180、240、300 s	处理时间越长,蛋白酶的活性越低,处理时间达到240 s时,酶活性的降低幅度最大	[33]
	鲭鱼	处理电压60 kV, 处理时间60 s	对照组的TVB-N含量在贮藏6 d达到32.84 mg/100 g,已超过限值,而处理组直至14 d才达到35.47 mg/100 g,货架期延长8 d	[34]
	带鱼	处理电压50 kV, 处理时间30、60、120、180、240、300 s	处理240 s后,蛋白酶提取物的酶活性降至最低(0.035 U/mg),且因其持水力达到65.81%,故L*比对照组高1.7	[35]
杀菌处理	鱿鱼	处理电压60 kV, 处理时间45 s	冷藏12 d后,处理组的TVB-N含量仍未超过阈值(30 mg/100 g),与对照组相比,货架期延长2~3 d	[36]
	黑嘴干制鱼片	放电电压1 kV, 施加电压3 kV, 处理时间1、5、10、20、30 min, 处理电极距3 mm	处理30 min后,金黄色葡萄球菌和蜡样芽孢杆菌的减少量分别为1.03、1.06 (lg (CFU/g)),但随处理时间的延长(≥20 min),质量有所损失	[37]
	鲭鱼	处理电压70、80 kV, 处理时间1、2、3 min, 温度15 °C, 相对湿度50%	需氧嗜温菌对低温等离子体处理不敏感,需氧嗜冷菌对暴露时间的敏感性高于施加电压,而乳酸菌和假单胞菌则相反	[38]
黑变抑制	鲑鱼	处理电压59.9 kV, 处理时间71.5 s (最佳处理条件)	在整个贮藏期间,低温等离子体能显著抑制肠杆菌和弧菌的生长繁殖,且在优化后的处理条件下,处理组的菌落总数比对照组减少64.02%	[39]
	亚洲海鲈鱼	处理电压80 kV, 处理时间2.5、5.0、7.5、10.0 min	与对照组相比,通过延长处理时间(≥5 min)来抑制微生物增殖,延长亚洲海鲈鱼的货架期至12 d	[40]
	中华管鞭虾	处理电压40 kV, 处理时间90 s	对照组虾体的头部在贮藏4 d已脱落且出现黑变,处理组直至贮藏10 d才接近感官不可接受值,货架期延长6 d	[42]
安全控制	南美白对虾	处理电压50 kV, 处理时间60 s	贮藏8 d,处理组的PPO活力比对照组低1.4 U,且黑变程度明显较轻,有效延长货架期2 d	[43]
	牡蛎	最小放电电压1.1 kV, 处理时间10、20、30、60 min	处理30、60 min后,新鲜牡蛎中的诸如病毒分别减少1.05、1.68 (lg (CFU/μL)),且pH值和色泽无明显变化	[45]
	牡蛎	最小放电电压1.1 kV, 操作时间最长60 min, 间隔10 min, 处理电极距3 mm	处理60 min后,致病性大肠杆菌O157:H7数降低1.19 (lg (CFU/g)),灭菌效果与暴露时间的长短有关	[46]

势,也能增强其渗透性,改善间接灭菌的不足。PAW具有制取简单、无残留和含有高浓度活性氧(或活性氮)等特点^[9,48]。Herianto等^[51]通过PAW进行南美白对虾包冰衣处理,结果发现,该处理可使南美白对虾在整个贮藏期间的菌落总数始终低于6 (lg (CFU/g)),使处理组样品的pH值在贮藏8 d时仍低于腐败阈值,货架期延长3 d。同时上述研究也发现,处理组样品的 L^* 在贮藏前8 d都保持稳定,仅在贮藏9 d增至47.5,故PAW能导致PPO的构象发生变化,有效延缓虾的黑变。Zhao Yiming等^[52]将鲭鱼块在PAW中浸渍15 min,发现其能立即灭活荧光假单胞菌,但作用效果会受到液体状态和处理时间影响。为更好将其应用在水产品低温保鲜上,研究人员将PAW冻结后制成等离子体活化水冰(plasma activated water ice, PAWI),其既有冰的特点,还兼备水的优势,可发挥低温保鲜与抑菌的双重作用。Liao Xinyu等^[53]使用PAWI,应用于基围虾贮藏10 d期间,从贮藏7 d开始,自来水冰样品的黑变程度大于处理组,且在贮藏8 d后,其菌落总数始终低于腐败限值,同时,因PAWI处理后微生物生长受到抑制,故而使基围虾的TVB-N含量在9 d的贮藏期内保持低于20 mg/100 g,延缓因微生物代谢活动导致的蛋白质和脂肪氧化,最终延长基围虾货架期4~8 d;焦湊等^[54]也发现,PAWI可有效抑制单增李斯特菌的生长,特别是在贮藏第5天,处理组(经等离子体活化15 min后制备的冰)菌落总数比用无菌水冰处理组降低1.5 (lg (CFU/mL)),减缓三文鱼片贮藏期间TVB-N含量的升高,保持其新鲜度。

3.2 等离子体与生物保鲜剂联合处理

由于等离子体处理产生的活性物质会加速水产品中的蛋白质和脂质氧化,导致其保水性下降与质地劣变,故其推广还未得到充分应用。为改进其作用效果,可将等离子体技术与生物保鲜剂相结合。Olatunde等^[55]用200 mg/L乙醇椰子壳提取物预处理亚洲鲈鱼后,再用氩氧混合物(体积比90:10)作用5 min产生的高压冷大气等离子体(high voltage cold atmospheric plasma, HVCAP)处理,发现不仅处理组鱼片的菌落总数降低0.7 (lg (CFU/g)),且能有效延缓HVCAP诱导的脂质氧化,可使亚洲鲈鱼的冷藏货架期延长至15 d;Shiekh等^[56]研究茶芒叶提取物对太平洋白对虾贮藏过程中脂肪和蛋白质氧化的影响,结果显示,在整个贮藏过程中,添加茶芒叶提取物样品的PV和硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARs)值低于其他组,表明茶芒叶提取物与等离子体(16 kV、电极距离2 cm)结合能延缓太平洋白对虾的腐败进程;Singh等^[57]研究发现,亚洲鲈鱼片经0.2 g/100 mL壳寡糖处理后,再用氩氧混合物(体积比90:10)作用5 min产生的HVCAP处理后,其TBARs值和PV分别比其他处理组降低

28%~64%与40%~46%,能明显延缓其蛋白质和脂质氧化速率,货架期至少延长12 d。当前,食品行业的流行趋势是采用天然保鲜剂联合其他保鲜技术处理,这种联合处理带来的双重功效既可解决脂质或蛋白质氧化的问题,又可保持消费者“绿色安全”的消费观念。

3.3 其他方法

为强化等离子体技术对水产品的保鲜效果,可将等离子体与气调包装、超声和其他技术等相结合,发挥其最大协同效应。Ahmad等^[58]发现,太平洋对虾经等离子体联合栅栏技术处理后,其感官品质得到保持,特别是黑变程度降低,使其货架期达到18 d;汪春玲等^[59]研究表明,罗非鱼片经70 kV的低温等离子体处理60 s后结合气调(CO₂、O₂、N₂体积比6:1:3)包装处理,发现等离子体处理后包装内的气体比例有所改变,表明等离子体产生的活性物质与CO₂结合,使罗非鱼片表面产生酸化作用,可达到双重灭菌的作用,使鱼片的冷藏货架期延长至18 d;Shiekh等^[60]用脉冲电场预处理太平洋白对虾后,用不同浓度的茶芒叶提取物浸泡,然后通过DBD产生的高压低温等离子体处理太平洋白对虾,发现其脂质和蛋白质氧化程度相应延缓,货架期延长至18 d。目前,生产等离子体功能化液体对水产品进行消毒灭菌也是一种新趋势。等离子体功能化水(plasma functionalized water, PFW)的产生是通过使用2种不同模式对水或某种溶液进行等离子体放电处理^[61]。Esua等^[62]将PFW与等离子体功能缓冲液分别同超声处理相结合,利用超声辅助渗透来抑制致病菌的生长,发现联合处理组的大肠杆菌最大减少量分别为1.39、1.31 (lg (CFU/g)),且其效果优于单一处理,可能是由于等离子体-液体相互作用过程中引起的强酸化效应,能减弱细菌的抵抗能力。另外,Zhao Yiming等^[63]通过超声联合等离子体活化水分析得出,鲭鱼片中的嗜中温菌数和嗜冷菌数降幅最明显,且联合处理后的嗜冷菌数比单一用过氧乙酸处理降低0.11 (lg (CFU/g))。因此,采用适宜的工艺参数,并与其他技术相结合,就有可能增强等离子体活化水在工业应用的灵活性,提高成本效益。

4 结 语

随着当前人们对新鲜食品需求的提升和对食品质量安全的重视,许多食品工业都在研究低温等离子体产生技术。低温等离子体技术具有作用温度低、操作简单、安全无残留和高效环保等特点,被广泛应用于品质改善、减菌处理、黑变抑制(甲壳类)和安全控制等水产品保鲜中。在水产品贮藏保鲜方面,当前我国在努力朝着非热加工的方向转变,而等离子体技术作为非热加工技术之一,也在为转变提供新的思路和理论指导。



然而, 因等离子体的本质是活跃的电离气体, 对水产品的保鲜效果还有局限性, 主要涉及电压强度、工作气体、处理时间和活性物质的控制等, 均难以用统一标准予以控制, 故其统一性和安全性都是未来的重大挑战。其次, 虽然PAW处理过程会更加温和, 操作更加灵活、方便, 但其杀菌物质作用时间较短和促进脂质氧化, 降低水产品的整体接受度, 故应考虑与恰当的抗氧化剂耦合、完善工艺参数等来提升其作用效果。最后, 等离子体技术作为一种新型的灭菌(或抗生物被膜)技术, 其灭菌机制的研究尚未明确, 可与新兴的组学技术联用, 来弥补当前技术的不足, 从而使其在未来的水产品保鲜领域得到更广泛应用。

参考文献:

- [1] MOHANTY B P, MAHANTY A, GANGULY S, et al. Nutritional composition of food fishes and their importance in providing food and nutritional security[J]. Food Chemistry, 2019, 293: 561-570. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.11.039.
- [2] JIANG Qingqing, NAKAZAWA N, HU Yaqin, et al. Changes in quality properties and tissue histology of lightly salted tuna meat subjected to multiple freeze-thaw cycles[J]. Food Chemistry, 2019, 293(5): 178-186. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.04.091.
- [3] 蓝蔚青, 冯豪杰, 刘大勇, 等. 微生物源生物保鲜剂对水产品腐败菌作用机制研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 31-38. DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.05.005.
- [4] 原林, 丁长河. 冷藏食品中的常见微生物及其防控[J]. 粮食与食品工业, 2016, 23(6): 29-33.
- [5] 尹一鸣, 徐永霞, 张朝敏, 等. 水产品贮藏期间风味劣变机理的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 269-274. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.023480.
- [6] 俞滢洁, 林婷, 杨胜平, 等. 姜黄素结合胡椒碱对冷链物流运输过程中三文鱼保鲜效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 152-160. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026357.
- [7] 张雯, 卞丹, 阮成旭, 等. 大黄鱼源腐败菌的黏附特性与生物膜特性分析[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 84-90. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180730-369.
- [8] 于淑池, 王睿迪, 张婉悦, 等. 0℃贮藏卵形鲳鲹货架期的研究及特定腐败菌的分离与鉴定[J]. 食品科技, 2020, 45(9): 128-136. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2020.09.020.
- [9] 胡叶静, 李保国, 石茂占, 等. 鲜切即食果蔬冷杀菌技术研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 43-49. DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.07.006.
- [10] SHENG Xiaowei, SHU Dengjun, LI Yanjiao, et al. Combined approach consisting of slightly acidic electrolyzed water and chitosan coating to improve the internal quality of eggs during storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 101(6): 2355-2361. DOI:10.1002/jsfa.10858.
- [11] AFARI G K, HUNG Y C. A meta-analysis on the effectiveness of electrolyzed water treatments in reducing foodborne pathogens on different foods[J]. Food Control, 2018, 93(5): 150-164. DOI:10.4315/0362-028X-81.sp1.1.
- [12] 李晓燕, 孟庆瑶, 赵宜范, 等. 生鲜食品冷链过程中消毒杀菌技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 414-418. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021010017.
- [13] GONCALVES A A, MIKAELLE K. Ozone as a safe and environmentally friendly tool for the seafood industry[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2016, 25(2): 210-229. DOI:10.1080/10498850.2013.841785.
- [14] 李学鹏, 刘慈坤, 王金鼎, 等. 水产品贮藏加工中的蛋白质氧化对其结构性质及品质的影响研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(18): 319-325; 333. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.18.051.
- [15] ISHRAT M, AHMAD N G, VIKAS N, et al. Ultrasonication and food technology: a review[J]. Cogent Food and Agriculture, 2015, 1(1): 1071022. DOI:10.1080/23311932.2015.1071022.
- [16] 周建伟, 孟倩, 高德, 等. 超声加工技术对牛肉及其制品品质影响的研究进展[J]. 现代食品科技, 2020, 36(1): 296-302. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.1.041.
- [17] 杨瑞学. 超高压技术在食品加工领域的应用[J]. 农业工程, 2012, 2(5): 30-36.
- [18] 叶安妮. 超高压处理不同水产品的品质变化及其机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 6. DOI:10.27151/d.cnki.ghnl.2019.002757.
- [19] 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. DOI:10.1371/journal.pone.0197773.
- [20] 杨新文, 牛文俊, 成军虎, 等. 低温等离子体技术及其对食品品质与微生物的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 199-203. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2019.09.038.
- [21] 马晓艳, 王娟, 张海红, 等. 低温等离子体处理对采后黄花菜活性氧代谢和品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 254-260. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201023-233.
- [22] 马虹兵, 阮榕生, 林向阳, 等. 低温等离子体用于液体食品的低温杀菌[J]. 农业工程学报, 2002(5): 155-159.
- [23] JANGI F, EBADI M T, AYYARI M. Qualitative changes in Hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) as affected by cold plasma, packaging method and storage duration[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2021, 22: 100289. DOI:10.1016/j.jarmap.2020.100289.
- [24] OKYERE A Y, RAJENDRAN S, ANNOR G A. Cold plasma technologies: their effect on starch properties and industrial scale-up for starch modification[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 451-463. DOI:10.1016/j.crf.2022.02.007.
- [25] 韩格, 陈倩, 孔保华. 低温等离子体技术在肉品保藏及加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 286-292. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180128-387.
- [26] HUANG Mingming, WANG Jiamei, ZHUANG Hong, 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. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.11.016.
- [27] HUANG Yiming, CHANG W C, HSU C L. Inactivation of norovirus by atmospheric pressure plasma jet on salmon sashimi[J]. Food Research International, 2021, 141: 110108. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110108.
- [28] OLIVERIRA L B, MELO J C, MOETE E S D B, et al. Multi-element determination in chocolate bars by microwave-induced plasma optical emission spectrometry[J]. Food Chemistry, 2021, 351: 129285. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129285.
- [29] 方一超. 直流正电晕降解乙烯的实验与机理初探[J]. 食品工业科技, 2012, 33(12): 173-175; 179. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2012.12.053.
- [30] BAGGIO A, MARINO M, INNOCENTE N, et al. Antimicrobial effect of oxidative technologies in food processing: an overview[J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(3/4): 669-692. DOI:10.1007/s00217-020-03447-6.
- [31] 斯兴开, 杨惠琳, 韦翔, 等. 低温等离子体对草鱼鱼肉品质的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(10): 180-185. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2018.10.031.
- [32] 王佳媚, 彭菲, 符腾飞. 不同低温等离子体处理条件对金鲳鱼品质影响[J]. 食品工业, 2020, 41(9): 30-34.
- [33] NYAISABA B M, MIAO Wenhua, 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(5): 68-76. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.04.012.
- [34] CHEN Jing, WANG Shengzhe, CHEN Junyu, 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, 9(1): 39-46. DOI:10.1002/jsfa.9138.
- [35] KODDY J K, MIAO Wenhua, 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128418.
- [36] 金图南. 低温等离子体对冰鲜鲢鱼保鲜作用的研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017: 23-32.
- [37] CHOI M S, JEON E B, KIM J Y, 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]. Journal of Food Engineering, 2020, 278: 109952. DOI:10.1016/j.foodeng.2020.109952.
- [38] ALBERTOS I, MARTÍN-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. DOI:10.1016/j.ifset.2017.07.006.
- [39] 施姿鹤, 陈静, 陈星洁, 等. 介质阻挡放电低温等离子体在鲈鱼杀菌及组胺含量控制中的作用[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 237-243. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201718037.
- [40] ODUNAYO O O, SOOTTAWAT B, KITIYA V. Dielectric barrier discharge high voltage cold atmospheric plasma: an innovative nonthermal technology for extending the shelf-life of Asian sea bass slices[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(7): 1871-1880. DOI:10.1111/1750-3841.14669.
- [41] KIMBUATHONG N, LEELAPHIWAT P, HARNKARNSUJARIT N. Inhibition of melanosis and microbial growth in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) using high CO₂ modified atmosphere packaging[J]. Food Chemistry, 2020, 312(5): 126114. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.126114.
- [42] 胡晓梦, 陈静, 邓尚贵, 等. 低温等离子体对中华管鞭虾(*Solenocera crassicornis*)菌相变化及品质特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(19): 141-147. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200929-368.
- [43] 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.
- [44] BJOERN S, AXEL F, OLIVER S, et al. Cold plasma effects on enzyme activity in a model food system[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 19: 146-152. DOI:10.1016/j.ifset.2013.04.002.
- [45] CHOI M S, JEON E B, KIM J Y, et al. Virucidal effects of dielectric barrier discharge plasma on human norovirus infectivity in fresh oysters (*Crassostrea gigas*)[J]. Foods, 2020, 9(12): 1731. DOI:10.3390/foods9121731.
- [46] CHOI M S, JEON B J, KIM J Y, et al. Application of dielectric barrier discharge plasma for the reduction of non-pathogenic *Escherichia coli* and *E. coli* O157:H7 and the quality stability of fresh oysters (*Crassostrea gigas*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112698. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112698.
- [47] 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. DOI:10.1016/j.tifs.2021.03.026.
- [48] 章建浩, 黄明明, 王佳媚, 等. 低温等离子体冷杀菌关键技术装备研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(4): 8-16.
- [49] 陈俊羽, 薛德奖, 袁梦佳, 等. 低温等离子体对凡纳滨对虾营养成分及品质的影响[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 526-531.
- [50] SONAWANE S K, PATIL M T, PATIL S. Non-thermal plasma: an advanced technology for food industry[J]. Food Science and Technology International, 2020, 26(8): 727-740. DOI:10.1177/1082013220929474.
- [51] HERIANTO S, SHIH M K, LIN C M, 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-Food Science and Technology, 2022, 154: 112547. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112547.
- [52] ZHAO Yiming, OJHA S, BURGESS C M, et al. Influence of various fish constituents on inactivation efficacy of plasma-activated water[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 55(6): 2630-2641. DOI:10.1111/ijfs.14516.
- [53] LIAO Xinyu, SU Yuan, LIU Donghong, et al. Application of atmospheric cold plasma-activated water (PAW) ice for preservation of shrimps (*Metapenaeus ensis*)[J]. Food Control, 2018, 94: 307-314. DOI:10.1016/j.foodcont.2018.07.026.
- [54] 焦滇, 朱育攀, 许航博, 等. 等离子体活化水冰对纯培养及三文鱼片表面单增李斯特菌杀菌效果研究[J]. 郑州大学学报(理学版), 2019, 51(3): 97-103. DOI:10.13705/j.issn.1671-6841.2019022.
- [55] OLATUNDE O O, BENJAKUL S, VONGKAMJAN K. Combined effects of high voltage cold atmospheric plasma and antioxidants on the qualities and shelf-life of Asian sea bass slices[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2019, 54: 113-122. DOI:10.1016/j.ifset.2019.03.012.
- [56] SHIEKH K A, BENJAKUL S, QI Hang, et al. Combined hurdle effects of pulsed electric field and vacuum impregnation of chamuang leaf extract on quality and shelf-life of pacific white shrimp subjected to high voltage cold atmospheric plasma[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 28: 100600. DOI:10.1016/j.fpsl.2021.100600.
- [57] 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 °C[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2020, 64: 102339. DOI:10.1016/j.ifset.2020.102339.
- [58] AHMAD S K, SOOTTAWAT B, SAQIB G. Impact of pulsed electric field and vacuum impregnation with Chamuang leaf extract on quality changes in Pacific white shrimp packaged under modified atmosphere[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111899. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111899.
- [59] 汪春玲, 周佳莹, 付仁豪, 等. 等离子体处理对气调罗非鱼片保鲜品质的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(10): 147-152; 159. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2019.10.024.
- [60] SHIEKH K A, ZHOU Peng, BENJAKUL S. Combined effects of pulsed electric field, chamuang leaf extract and cold plasma on quality and shelf-life of *Litopenaeus vannamei*[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 100975. DOI:10.1016/j.fbio.2021.100975.
- [61] ESUA O J, OKON J, CHENG Junhui, et al. Functionalization of water as a nonthermal approach for ensuring safety and quality of meat and seafood products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 61(3): 1-19. DOI:10.1080/10408398.2020.17.
- [62] ESUA O J, CHENG Junhui, SUN Dawen. Novel technique for treating grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) by combining plasma functionalized liquids and ultrasound: effects on bacterial inactivation and quality attributes[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105660. DOI:10.1016/j.ultsonch.2021.105660.
- [63] ZHAO Yiming, OLIVERIRA M, BURGESS C M, et al. Combined effects of ultrasound, plasma-activated water, and peracetic acid on decontamination of mackerel fillets[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 150: 111957. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111957.