

微酸性电解水在水产品保鲜加工中的应用研究进展

朱峰^a, 吴怡^b, 蓝蔚青^{b,c,d}, 谢晶^{b,c,d}

(上海海洋大学 a.图书馆 b.食品学院 c.食品科学与工程国家级实验教学示范中心

d.上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: **目的** 对微酸性电解水在水产品保鲜加工中的应用研究进展进行总结, 为后续研究提供理论参考。

方法 在介绍微酸性电解水制备原理与作用机制的基础上, 围绕该技术在水产品保鲜加工中的应用研究进展予以阐述, 提出存在问题与解决办法。**结果** 水产品经微酸性电解水处理后, 可明显抑制水产品中的微生物生长, 延缓 pH 值升高, 改善保水性能, 保持产品色泽, 提升质构特性。然而, 随着消费者对水产品品质要求的不断提高, 仅使用微酸性电解水处理并非理想的方式, 可结合其他理化与生物保鲜技术, 以提升微酸性电解水的综合作用效果。**结论** 微酸性电解水在水产品保鲜加工中占有一定优势, 且能结合其他处理方式提升其在水产品杀菌保鲜与品质保持等方面的加工效率。

关键词: 微酸性电解水; 水产品; 保鲜加工; 研究进展

中图分类号: S985 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)07-0149-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.017

Research Progress on Application of Slightly Acidic Electrolyzed Water (SAEW) in Preservation and Processing of Aquatic Products

ZHU Feng^a, WU Yi^b, LAN Wei-qing^{b,c,d}, XIE Jing^{b,c,d}

(a. Library b. College of Food Science and Technology c. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering d. Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the research progress on application of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) in preservation and processing of aquatic products to provide theoretical reference for subsequent research. On the basis of introducing the preparation principle and action mechanism of SAEW, the application and the research progress of this technology in preservation and processing of aquatic products were introduced. The existing problems and solutions were put forward. The results showed that SAEW treatment can inhibit the growth of microorganisms, delay the rise of pH value, improve water retention, maintain product color, and enhance texture characteristics. However, with the continuous improvement of consumers' requirements for the quality of aquatic products, the use of SAEW treatment in aquatic products was not the most ideal method. It could be combined with other physicochemical and bio-preservation technologies to improve its comprehensive effect. Therefore, SAEW shows certain advantages in preservation and processing of aquatic products, and can be combined with other treatment methods to enhance the processing efficiency of

收稿日期: 2022-10-01

基金项目: 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)

作者简介: 朱峰 (1979—), 男, 硕士, 馆员, 主要研究方向为食品加工与信息化。

通信作者: 蓝蔚青 (1977—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品保鲜技术; 谢晶 (1968—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食品冷冻冷藏工程。

SAEW in sterilization and preservation.

KEY WORDS: slightly acidic electrolyzed water; aquatic products; preservation and processing; research progress

水产品富含优质蛋白质、低碳水化合物、 ω -3脂肪酸、维生素（尤其是D和B2）和矿物质，在肉类消费上占据很大市场^[1]。我国是世界上主要的水产品生产大国，水产品出口总额已连续多年独占鳌头^[2]。据统计，2021年我国水产品总产量为6 690.29万t，比2020年增长了2.16%^[3]。然而，捕获后的水产品微生物与内源酶的共同作用下极易腐败^[4-5]。对水产品采取适当保鲜方式并加以优化，一直是国内外研究学者的工作重点。目前，研究人员主要通过物理、化学和生物等方式抑制或杀灭腐败细菌，实现水产品保鲜。其中，热杀菌技术作为食品工业的传统灭菌方式，能有效杀灭水产品中的微生物，但其能量消耗较大，且易造成水产品原有感官品质和营养成分的损失。非热杀菌技术则因其装置设备造价昂贵、灭菌效果有限、微生物易产生抗性等因素，受限于水产品的实际应用中^[6-10]。因此，研发耗能低、安全高效并能最大限度保留水产品感官品质与营养价值的新型杀菌方式是主要研究热点。

微酸性电解水（Slightly Acidic Electrolyzed Water, SAEW）作为非热杀菌技术，具有低成本、广谱抑菌性、安全无毒等优势，并能有效保持食品在贮藏过程中的品质。微酸性电解水已得到日本厚生劳动省和美国食品药品监督管理局的认可，被列为食品添加剂中的杀菌剂^[11-13]。已有研究显示，微酸性电解水在蔬菜、水果、家禽等食品中的微生物控制方面取得良好成效，且不会对食品品质造成危害^[14-15]。近年来，微酸性电解水已在水产行业有所应用，能使水产品货架期得到相应延长^[16]。此外，微酸性电解水与其他保鲜技术的结合会产生协同效应，有助于延缓水产品的腐败进程^[17]。然而，关于微酸性电解水结合物理、化学和生物手段在水产品保鲜方面的有效性和适用性仍缺乏系统性综述。

基于此，本文在阐明微酸性电解水制备原理与作用机制的基础上，介绍该技术在水产品保鲜加工中的应用，重点综述微酸性电解水联合其他保鲜技术在水产品中的应用研究进展，并对其发展前景予以展望。

1 微酸性电解水制备原理及特点

如图1所示，微酸性电解水通常由无隔膜装置电解获得。低浓度的NaCl和稀HCl混合溶液直接加至安装有阴、阳电极的电解槽中，在直流电的作用下发生电化学反应，最终生成具有杀菌效果的微酸性电解水。pH值、氧化还原电位（Oxidation Reduction Potential, ORP）和有效氯浓度（Available Chlorine Concentration, ACC）是评价微酸性电解水作用效果

的3个重要因素，在杀菌过程中存在协同作用。微酸性电解水具有腐蚀性小、高效、安全无毒等特点。接近中性的pH值（5.0~6.5）使微酸性电解水对食品品质和加工设备的腐蚀作用较小，且决定了微酸性电解水中的有效氯大多以HClO的形成存在^[18]。据报道，微酸性电解水具有瞬时杀菌的优点，可快速夺取细菌电子电位，在几秒内杀死普通细菌^[19]。此外，微酸性电解水在完全发挥其杀菌功效后会迅速还原为普通水，不存在化学残留危害。

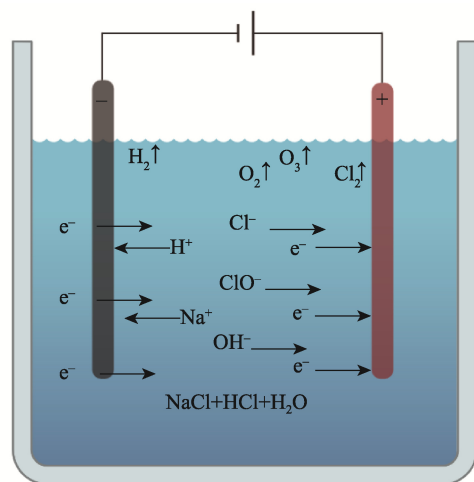


图1 微酸性电解水生成原理
Fig.1 Schematic diagram for generation of slightly acidic electrolyzed water^[18]

2 微酸性电解水对微生物的主要作用机理

新鲜水产品的肌肉组织通常相对无菌。然而，冷藏一段时间后，细菌开始分解其表面的低分子化合物，并迅速侵入肌肉组织，导致水产品快速腐败^[20]。对腐败菌的控制是微酸性电解水在水产品保鲜中取得良好效果的关键因素。目前，多数微酸性电解水的杀菌机理研究主要从有效氯与活性氧对微生物的细胞形态、生理生化反应等影响开展研究。微酸性电解水中的有效氯（特别是HClO）是其造成细菌细胞失活的第一要素。有研究显示，HClO的杀菌效果约为ClO⁻的80倍^[21]。相关研究表明，微酸性电解水通过多靶点作用于细菌结构^[22]。

如图2所示，微酸性电解水主要通过破坏细菌的保护屏障（细胞壁和细胞膜），阻碍蛋白质合成和干扰胞内代谢通路发挥其抑菌作用^[23]。微酸性电解水的主要抑菌成分包括有效氯和活性氧。首先，去离子化

的 ClO^- 无法进入细菌胞内环境, 而是在胞外发挥其氧化作用, 破坏细胞壁完整性, 并改变细胞膜通透性。其他有效氯和活性氧成分则通过破坏细胞膜的磷脂双分子层结构而进入细胞, 使胞内环境发生显著变化, 对细菌的生长和增殖功能造成严重威胁。有效氯穿过细胞膜后, 通过改变胞内的电子流破坏酶系统, 导致脱氢酶和 ATP 酶等代谢酶活性的下降, 对细胞的能量代谢和呼吸代谢造成干扰^[24]。有研究显示, 有效氯会作用于细菌核糖体, 影响蛋白质的合成^[25]。此外, 经微酸性电解水处理的细菌 DNA 易发生变性, 影响其复制、转录等生物学功能^[26]。与此同时, 活性氧在胞内的大量积累会影响细胞的氧化还原平衡。在微酸性电解水的多靶点作用下, 细菌胞内成分受到影响, 内容物泄露, 丧失正常的生理功能。Ding 等^[27]发现微酸性电解水(pH 值为 6.10、ORP 值为 894 mV、ACC 值为 30 mg/L)能改变金黄色葡萄球菌细胞膜的通透性和细胞质的超微结构, 引起胞内钾离子和蛋白质泄露, 导致细胞死亡; 菌体形态发生明显变化, 部分细胞壁塌陷, 细胞质中电子密度下降, 细胞中心出现空泡。

3 微酸性电解水在水产品保鲜中的应用研究进展

水产品贮藏过程中的 pH 值、保水性、硬度、色泽和气味等品质属性均会受到优势腐败菌和内源酶的影响^[28-29]。由于微酸性电解水不易对食品营养价

值造成损失, 所以越来越多的国内外科研工作者将其单独应用于水产品的减菌化预处理中, 在抑制微生物生长、延缓 pH 值升高、维持保水性能、保持产品色泽与提高质构特性等方面发挥重要作用。微酸性电解水在控制细菌增长和内源酶活性升高方面具有优势, 同时不会对水产品的品质属性产生不良影响, 并在后续的贮藏过程中能延缓水产品品质的劣变进程。

3.1 抑制微生物生长

水产品的微生物污染是导致其品质劣变和食源性疾病的重要因素。目前, 微酸性电解水在水产品的微生物控制方面已取得一定成效。据报道, 微酸性电解水能损伤沙门氏菌、大肠杆菌、单增李斯特菌和金黄色葡萄球菌的细胞膜结构, 这些细菌通常与水产品表面致病菌污染有关^[30]。此外, 微酸性电解水对希瓦氏菌等腐生菌的生长繁殖也有明显的抑制效果^[26]。其中, 于福田^[16]研究发现, ACC 值为 (31.39 ± 1.48) mg/L 的微酸性电解水能明显延缓罗非鱼片在贮藏过程中菌落总数的升高; 杨楠等^[31]用微酸性电解水 (pH 值为 6.06、ORP 值为 812 mV、ACC 值为 19.82 mg/L) 处理南美白对虾虾仁, 结果发现微酸性电解水能灭活虾仁表面致病菌。低 pH 会导致氯气快速挥发, 而微酸性电解水的 pH 接近中性, 因此, 在杀菌过程中, 有效氯能有效发挥杀菌作用, pH、氧化还原电位和活性氧则起协同杀菌作用^[32]。除对水产品的抑菌应用外, 微酸性电解水在水产品加工生产环境等方面的杀菌消毒也具备一定的发展潜力^[33]。

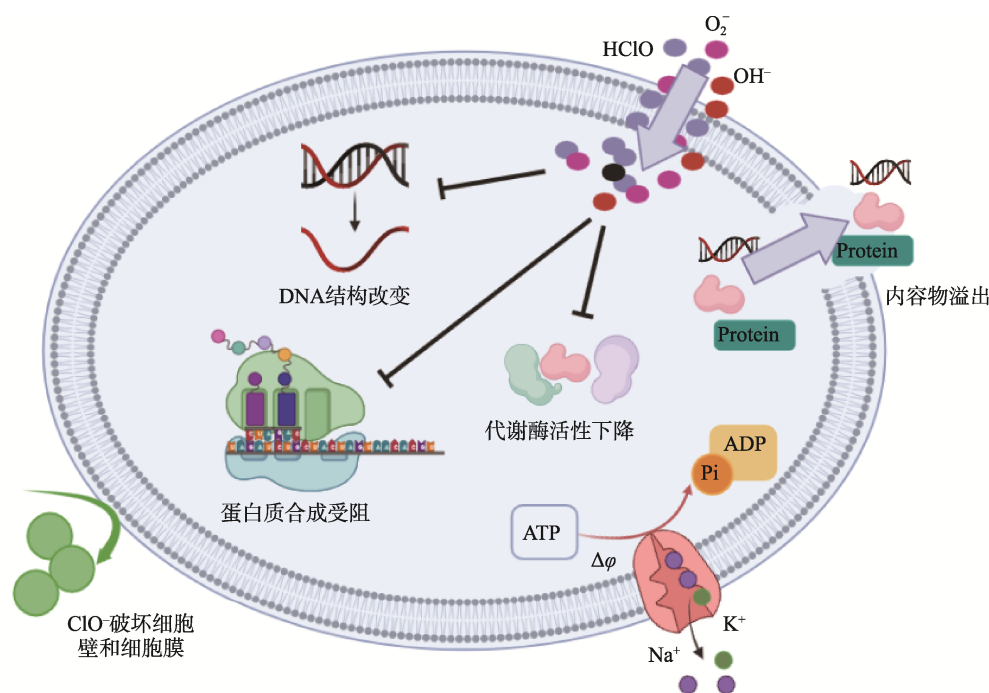


图 2 微酸性电解水抑菌作用机制分析^[19]

Fig.2 Analysis on antibacterial mechanism of slightly acidic electrolyzed water^[19]

3.2 延缓 pH 值升高

pH 值可指示水产品贮藏期间的新鲜度。水产品贮藏初期,肌肉组织中的糖原迅速分解为丙酮酸,随后转化为乳酸,pH 值随之降低^[34]。随后,水产品中的蛋白质或其他营养素会受蛋白酶和碱化细菌的影响^[35]分解,并产生一些碱性物质,如氨、三甲胺和其他碱性挥发性化合物,pH 值随之升高^[28]。现有研究显示,使用微酸性电解水(pH 值为 6.45, ORP 值为 803 mV, ACC 值为 22 mg/L)保存银鲈,可明显延缓其蛋白质和脂质氧化,降低碱性化合物的积累,抑制 pH 值上升^[36]; Xuan 等^[37]研究得出微酸性电解水冰(pH 值为(6.48±0.02)、OPR 值为(882±2) mV、ACC 值(25.00±5.00) mg/L)可有效维持鲢鱼的低水平 pH 值,这归因于微酸性电解水冰对细菌繁殖和蛋白质分解的抑制作用。HClO 可能是微酸性电解水延缓水产品 pH 上升的主要原因。如前所述,HClO 会破坏鱼肉中微生物的细胞结构,导致微生物失去代谢功能,由微生物引起的碱性化合物生成量也因此减少。与此同时,微酸性电解水可能会降低鱼肉中的内源酶活性,抑制蛋白质二硫键和羰基的形成,维持鱼肉蛋白质特性,减少由蛋白质降解引起的碱性化合物形成^[38]。因此,微酸性电解水对能维持水产品的 pH 值,能有效降低水产品的品质劣变速度。

3.3 维持保水性能

水产品的保水性与硬度、弹性、嫩度等质构特性密切相关。其中,刘慧^[39]研究发现,ACC 值为 40 mg/L 的微酸性电解水能显著抑制草鱼肌肉的水分流失,有效维持鱼肉品质;Li 等^[24]实验表明,微酸性电解水(pH 值为 6.2、ACC 值为 60 mg/L)显著抑制了镜鲤在冷藏期间的水分损失。容易释放的自由水位于肌肉中肌原纤维的肌动蛋白和肌球蛋白丝之间,而在冷藏过程中,水分通过蛋白质变质和肌肉降解而流失^[24],因此,水产品中的蛋白质结构是影响保水性的重要因素^[40]。有研究显示,微生物繁殖和蛋白质理化及功能性质的改变易对水产品的肌原纤维结构造成影响^[41]。如前所述,微酸性电解水能抑制微生物生长与内源酶活性,较好地保持水产品中肌肉纤维结构的完整性,使鱼肉组织中的水分得以保持。

3.4 保持产品色泽

色泽变化是水产品品质劣变的标志,直接影响水产品市场上的消费者接受度。研究学者通常采用亮度值(L^*)、红度值(a^*)和黄度值(b^*)来评价水产品贮藏过程中的色泽变化。在贮藏初期,水产品的 L^* 通常较大, a^* 和 b^* 则相对较小。随着贮藏时间的延长,水产品肌肉中的水分快速流失,造成 L^* 持续下降;同时,蛋白质逐渐被微生物和内源酶降解,脂质逐渐氧化,导致肌肉逐渐发红、发黑、变黄^[42]。其中,向

思颖等^[43]采用微酸性电解水处理冷鲜草鱼,发现蛋白质降解速度显著下降,色泽变化较少,货架期明显延长。微酸性电解水的抑菌作用可减少色素的损失程度和腐败菌对水产品中蛋白质的降解作用,保持肌肉中的水分,抑制 a^* 在贮藏过程中的变化^[44]。此外,微酸性电解水会延缓脂质氧化进程,减少黄色素形成,抑制 b^* 变化。

3.5 提高质构特性

贮藏过程中肌原纤维蛋白和胶原蛋白的降解是水产品质量特性发生变化的重要因素。新鲜水产品通常具备适当的硬度、弹性和回复力。然而,随着贮藏时间的延长,水产品肌肉蛋白结构发生变化,蛋白质因此降解,导致肌肉硬度、弹性、咀嚼性等质构特性持续下降,口感变差^[45]。其中,Zhang 等^[46]和杨琰瑜等^[47]使用微酸性电解水冰冷藏虾肉,发现缓慢释放的有效氯能显著抑制腐败菌生长和蛋白质氧化,延缓质构特性的下降速度。微酸性电解水对微生物生长的抑制作用可能会阻止微生物在贮藏过程中肌原纤维酶和肌浆蛋白酶等胞外酶的分泌,这些胞外酶是鱼类质地软化的重要原因之一^[48]。此外,微酸性电解水对蛋白酶活性的抑制可能是其维持肌肉纤维完整性的另一重要原因^[49]。微酸性电解水进入鱼肉组织时可能会减少由溶酶体组织蛋白酶、钙蛋白酶和蛋白酶体等蛋白酶的强大自溶能力诱导的肌原纤维蛋白水解和肌原纤维结构紊乱^[50]。综上,微酸性电解水可通过抑制腐败菌和内源酶对肌肉蛋白的降解来维持水产品的质构特性。

4 存在问题与解决办法

尽管微酸性电解水在保持水产品品质中发挥较好作用,但有研究显示,微酸性电解水单独处理对革兰氏阴性食源性致病菌的灭活作用有限,且微酸性电解水的杀菌效果易受空气和光照影响。此外,在实际生产中,水的温度、流速、硬度等因素都会影响电解水的理化特性,从而影响其杀菌效果^[19]。因此,微酸性电解水与其他保鲜技术的联合使用已成为增强作用效果的有效方法,是比单一处理手段更具优势的发展模式。

4.1 微酸性电解水结合物理保鲜技术

尽管微酸性电解水灭菌高效,但由于水产品肌肉结构复杂,所以微酸性电解水难以杀灭水产品肌肉内部细菌。目前,主要通过流化冰、超高压和超声波等物理保鲜技术与微酸性电解水结合来克服单一处理时的工艺不足。流化冰是一种新型的冷却介质,由微小冰晶、冰点抑制剂和液态水组成^[51]。其中,Liu 等^[52]发现,微酸性电解水-流化冰对鱼体肌肉孔隙的填充

充足,保证冷却过程中的密封性,可显著延缓鲭鱼中的微生物繁殖,减轻肌红蛋白和脂质的氧化程度,保持鲭鱼色泽。此外,流化冰还可减少对水产品表面的物理损伤^[53],在与微酸性电解水的结合上表现出明显优势,因此,流化冰能促进微酸性电解水与肌肉间隙间的接触,提高杀菌效果。相较于流化冰,微酸性电解水结合超高压或超声波在水产品保鲜中的研究相对广泛。

超高压技术是一种可有效杀菌、钝酶并对食品进行加工改性的非热杀菌技术^[54],具有压力传递均匀、维持营养成分、增强食品风味等优势。其中,王丽萍^[55]研究发现,微酸性电解水与超高压处理对蜡样芽孢杆菌芽孢具有显著协同效应,芽孢外壁和内膜均受到不同程度的损伤;Chen等^[56]研究表明,微酸性电解水结合超高压技术处理能抑制单增李斯特菌细胞壁肽聚糖的生物合成,诱导细胞失活。

超声波作为物理方法应用在食品领域中,具有绿色环保、节约成本、副产物少、可操作性强、作用效果好等优势。超声辅助处理可通过加快抗菌剂的扩散速度而提高灭菌效果,保证食品安全。其中,Li等^[57]研究超声波与微酸性电解水联合对沙门氏菌的协同杀菌机制。结果表明超声空化可削弱菌体细胞壁,破坏细胞膜上的化学键,增加细胞的通透性,促进微酸性电解水穿过细胞膜,造成细胞内部损伤;Forghani等^[58]在微酸性电解水浸渍处理过程中同时对产品进行超声波处理,结果比单独超声和单独微酸性电解水处理具有更高的抗菌效果;蓝蔚青等^[17]将超声联合微酸性电解水处理海鲈鱼,结果发现复合处理在抑制脂肪氧化与保持持水力等方面有较好效果,可使真空包装海鲈鱼的冷藏货架期至少延长6 d。因此,微酸性电解水在与物理保鲜技术的结合上具备一定的可行性和良好的发展潜力。此外,应通过优化操作参数,进一步改进组合工艺,以确保食品的安全性、感官质量和营养价值。

4.2 微酸性电解水结合化学保鲜技术

实际上,化学保鲜技术因存在非法、过量添加化学添加剂引发食源性疾病的問題而受到消费者的抵制。由于化学保鲜技术存在很大的化学残留隐患,因此,关于微酸性电解水与化学保鲜技术结合的研究较少。目前,与微酸性电解水联合使用的大部分化学保鲜剂主要集中在结构简单的有机酸方面。部分有机酸如抗坏血酸、异抗坏血酸、柠檬酸等可抑制多酚氧化酶的活性,从而抑制虾类黑变。其中,Yan等^[59]使用微酸性电解水和抗坏血酸对罗氏沼虾的黑色素和品质进行综合分析,发现二者联用可有效抑制黑色素沉着、细菌生长和蛋白质降解,并保持虾肉质地和感官特性。此外,有机酸与微酸性电解水在共同作用于水产品时会发挥一种协同效应,提高杀菌效果。蓝蔚青

等^[60]发现,冷藏凡纳滨对虾中的菌群结构在微酸性电解水和柠檬酸的作用下会发生显著变化,因此,微酸性电解水可结合化学保鲜剂提高微生物安全性,延缓水产品腐败。

4.3 微酸性电解水结合生物保鲜技术

与化学保鲜剂相比,生物保鲜剂来源广泛、无毒无害、容易降解,在水产领域中的应用愈发广泛^[61]。生物保鲜剂无污染、无残留的特点与微酸性电解水最大限度维持食品品质的初衷不谋而合。目前,已有研究将不同种类天然保鲜剂与微酸性电解水结合以增强对水产品的杀菌效果。壳聚糖是一种天然的高分子聚合物,因其无毒无害、广谱抑菌和生物可降解等特性常被作为一种天然、安全的生物保鲜剂使用。壳聚糖在与微酸性电解水协同灭菌时,其氨基所携带的正电荷能与腐败菌细胞膜表面的负电荷相互作用,影响细胞膜的正常功能,导致细菌繁殖受到抑制。壳聚糖在酸性条件下成膜性较好^[62],可减少氧气对水产品蛋白质和脂质的氧化作用。其中,Zhou等^[63]将微酸性电解水与壳聚糖联合处理河豚,结果发现二者联合处理能抑制微生物生长和肌原纤维降解,使河豚冷藏货架期延长4 d;Tantratian等^[42]研究发现,微酸性电解水(pH值为6.14、ACC值为60 mg/L)结合表没食子儿茶素没食子酸酯可使牡蛎在贮藏13 d内的菌落总数维持在6个对数值以内。此外,微酸性电解水在与ε-聚赖氨酸^[64]、迷迭香提取物^[65]等生物保鲜剂的联合使用方面也具备良好的发展前景。

5 结语

在食品加工领域,我国食品加工行业对冷处理方式需求迫切。微酸性电解水因其绿色环保、经济高效、制备简便、安全无毒等优势具有很大的发展潜力。作为非热处理方式,微酸性电解水对水产品的品质特征、理化性质和营养价值的维持具有突出优势,未来必将成为水产品保鲜的重点研究方向之一,为食品工业提供了新的发展思路。

目前,关于微酸性电解水的大多数研究主要集中在其杀菌效果方面。然而,微酸性电解水的杀菌机制与品质改善机制还缺乏系统阐述。此外,微酸性电解水在实际生产与实践中的应用也相对缺乏。为更好地推广应用微酸性电解水,相关领域的专家学者还应结合多学科深入探讨。近期研究显示,不同的物理、化学和生物手段与微酸性电解水的结合取得优异成效,且对水产品品质属性影响较小,因此,应深入发展具有“栅栏效应”的协同作用方式,进一步提高微酸性电解水的效果,实现工业化和商业化生产,进一步提升微酸性电解水在水产品保鲜加工中的应用价值。

参考文献:

- [1] ÇIÇEK S, ÖZOĞUL F. Nanotechnology-Based Preservation Approaches for Aquatic Food Products: A Review with the Current Knowledge[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022: 1-24.
- [2] ZHOU Ai-guo, ZHANG Yue, XIE Shao-lin, et al. Microplastics and Their Potential Effects on the Aquaculture Systems: A Critical Review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2021, 13(1): 719-733.
- [3] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴-2022[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022: 17-18. Bureau of Fishery Administration. 2022 China Fisheries Statistics Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022: 17-18.
- [4] ODEYEMI O A, ALEGBELEYE O O, STRATEVA M, et al. Understanding Spoilage Microbial Community and Spoilage Mechanisms in Foods of Animal Origin[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(2): 311-331.
- [5] MEI Jun, MA Xuan, XIE Jing. Review on Natural Preservatives for Extending Fish Shelf Life[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2019, 8(10): 490.
- [6] 谢晶, 谭明堂, 杨大章, 等. 我国渔业仓储保鲜和冷链物流发展现状[J]. *包装工程*, 2021, 42(11): 1-10. XIE Jing, TAN Ming-tang, YANG Da-zhang, et al. Development Status of Fisheries Storage-Preservation and Cold Chain Logistics in China[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(11): 1-10.
- [7] 徐娟, 张昭寰, 肖莉莉, 等. 食品工业中新型杀菌技术研究进展[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(16): 378-383. XU Juan, ZHANG Zhao-huan, XIAO Li-li, et al. Research Progress of New Sterilization Technology in Food Industry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(16): 378-383.
- [8] 白晶, 朱秋劲, 徐世涛, 等. 3 种绿色减菌技术在食品中的应用研究进展[J]. *肉类研究*, 2019, 33(12): 61-68. BAI Jing, ZHU Qiu-jin, XU Shi-tao, et al. Recent Progress in Application of Three Green Bacterial Decontamination Technologies in Foods[J]. *Meat Research*, 2019, 33(12): 61-68.
- [9] 吉永林, 许佩华, 史正, 等. 低温酸奶灌装设备杀菌技术[J]. *包装工程*, 2021, 42(19): 166-170. JI Yong-lin, XU Pei-hua, SHI Zheng, et al. Sterilization Technology of Low-Temperature Yogurt Filling Equipment[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(19): 166-170.
- [10] 陈执中, 姜宁. 新型“超级细菌”及抗菌新药的筛选[J]. *食品与药品*, 2010, 12(6): 439-441. CHEN Zhi-zhong, JIANG Ning. New "Superbug" and Screening of New Anti-Bacterial Drugs[J]. *Food and Drug*, 2010, 12(6): 439-441.
- [11] DENG Li-zhen, MUJUMDAR A S, PAN Zhong-li, et al. Emerging Chemical and Physical Disinfection Technologies of Fruits and Vegetables: A Comprehensive Review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(15): 2481-2508.
- [12] KIM C, HUNG Y C, BRACKETT R E. Efficacy of Electrolyzed Oxidizing (EO) and Chemically Modified Water on Different Types of Foodborne Pathogens[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2000, 61(2-3): 199-207.
- [13] 胡叶静, 李保国, 石茂占, 等. 鲜切蔬菜杀菌工艺及其对预制沙拉品质的影响[J]. *包装工程*, 2021, 42(21): 42-48. HU Ye-jing, LI Bao-guo, SHI Mao-zhan, et al. Sterilizing Technology of Fresh-Cut Vegetables and Its Effect on the Quality of Pre-Made Salad[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(21): 42-48.
- [14] ZHANG Wan-li, CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo. Application of Electrolyzed Water in Postharvest Fruits and Vegetables Storage: A Review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114: 599-607.
- [15] ZANG Y T, BING S, LI Y J, et al. Efficacy of Slightly Acidic Electrolyzed Water on the Microbial Safety and Shelf Life of Shelled Eggs[J]. *Poultry Science*, 2019, 98(11): 5932-5939.
- [16] 于福田. 微酸性电解水对罗非鱼片杀菌和保鲜效果的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019. YU Fu-tian. Study on Sterilization and Preservation Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water on Tilapia Fillets[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [17] 蓝蔚青, 张炳杰, 周大鹏, 等. 超声联合微酸性电解水处理对真空包装海鲈鱼冷藏期间品质变化的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(5): 62-68. LAN Wei-qing, ZHANG Bing-jie, ZHOU Da-peng, et al. Effect of Ultrasonic Combined with Slightly Acidic Electrolyzed Water Treatment on Quality Changes of Vacuum-Packaged Sea Bass (*Lateolabrax Japonicas*) during Refrigerated Storage[J]. *Food Science*, 2022, 43(5): 62-68.
- [18] ZHAO Lin, LI Shu-bo, YANG Hong-shun. Recent Advances on Research of Electrolyzed Water and Its Applications[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 41: 180-188.
- [19] 张建中, 王芳, 彭云, 等. 微酸性电解水性能及其在消毒领域的应用价值[J]. *广州化工*, 2021, 49(7): 130-133.

- ZHANG Jian-zhong, WANG Fang, PENG Yun, et al. Performance of Slightly Acidic Electrolyzed Water and Application Value in Disinfection Field[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(7): 130-133.
- [20] QIU Li-qing, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Shelf Life Extension of Aquatic Products by Applying Nanotechnology: A Review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(6): 1521-1535.
- [21] ANONYMOUS. Principle of Formation of Electrolytic Water[M]. Sakae, Toyooka, Aichi, Japan: Hoshizaki Electric Co., Ltd., 1997.
- [22] LIAO Xin-yu, XUAN Xiao-ting, LI Jiao, et al. Bactericidal Action of Slightly Acidic Electrolyzed Water Against, *Escherichia Coli*, and, *Staphylococcus Aureus*, Via Multiple Cell Targets[J]. Food Control, 2017, 79: 380-385.
- [23] 许愈. 酸性电解水结合超声波杀菌机制的初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- XU Yu. The Preliminary Study on Bactericidal Mechanism of Acidic Electrolyzed Water Combined with Ultrasound[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [24] LI Fang-fei, ZHONG Qiang, KONG Bao-hua, et al. Synergistic Effect and Disinfection Mechanism of Combined Treatment with Ultrasound and Slightly Acidic Electrolyzed Water and Associated Preservation of Mirror Carp (*Cyprinus Carpio* L.) during Refrigeration Storage[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132858.
- [25] 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.
- ZHONG Qiang, DONG Chun-hui, HUANG Zhi-bo, et al. Recent Progress in the Preservation Mechanism of Acidic Electrolyzed Water and Its Application in the Preservation of Aquatic Products[J]. Food Science, 2021, 42(5): 288-295.
- [26] LIU Lin, LAN Wei-qing, WANG Yan-bo, et al. Antibacterial Activity and Mechanism of Slightly Acidic Electrolyzed Water Against *Shewanella Putrefaciens* and *Staphylococcus Saprophytic*[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2022, 592: 44-50.
- [27] DING Tian, XUAN Xiao-ting, LI Jiao, et al. Disinfection Efficacy and Mechanism of Slightly Acidic Electrolyzed Water on *Staphylococcus Aureus* in Pure Culture[J]. Food Control, 2016, 60: 505-510.
- [28] CAMPOS C A, RODRÍGUEZ O, LOSADA V, et al. Effects of Storage in Ozonised Slurry Ice on the Sensory and Microbial Quality of Sardine (*Sardina Pilchardus*)[J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 103(2): 121-130.
- [29] 吴薇, 陶宁萍, 顾赛麒. 鱼肉特征性气味物质研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 381-385.
- WU Wei, TAO Ning-ping, GU Sai-qi. Research Progress in Characteristic Odor Compounds of Fish Meats[J]. Food Science, 2013, 34(11): 381-385.
- [30] NOVOSLAVSKIJ A, TERENTJEVA M, EIZENBERGA I, et al. Major Foodborne Pathogens in Fish and Fish Products: a Review[J]. Annals of Microbiology, 2016, 66(1): 1-15.
- [31] 杨楠. 微酸性电解水对南美白对虾虾仁杀菌效果及品质影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- YANG Nan. Study on the Sterilization Effect and Quality of Slightly Acidic Electrolyzed Water on *Penaeus Vannamei* Shrimp[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [32] IRAM A, WANG X, DEMIRCI A. Electrolyzed Oxidizing Water and Its Applications as Sanitation and Cleaning Agent[J]. Food Engineering Reviews, 2021, 13(2): 411-427.
- [33] 蓝蔚青, 刘琳, 孙晓红, 等. 酸性电解水发生机理及在水产领域中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(4): 294-298.
- LAN Wei-qing, LIU Lin, SUN Xiao-hong, et al. Research Progress on the Occurrence Mechanism of Acidic Electrolyzed Water (AEW) and Its Application in Aquaculture[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(4): 294-298.
- [34] HONG Hui, REGENSTEIN J M, LUO Yong-kang. The Importance of ATP-Related Compounds for the Freshness and Flavor of Post-Mortem Fish and Shellfish Muscle: A Review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(9): 1787-1798.
- [35] LI Ying-chang, YANG Zhong-yan, LI Jian-rong. Shelf-Life Extension of Pacific White Shrimp Using Algae Extracts during Refrigerated Storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(1): 291-298.
- [36] HUANG Xiao-ling, ZHU Song-ming, ZHOU Xiao-min, et al. Preservative Effects of the Combined Treatment of Slightly Acidic Electrolyzed Water and Ice on Pomfret[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021(1): 230-236.
- [37] XUAN Xiao-ting, FAN Yi-fei, LING Jian-gang, et al. Preservation of Squid by Slightly Acidic Electrolyzed Water Ice[J]. Food Control, 2017, 73: 1483-1489.

- [38] LAN Wei-qing, DU Jin-tao, LIU Lin, et al. SA-SI Treatment: a Potential Method to Maintain the Quality and Protein Properties on Mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) During Chilling Storage[J]. Food and Bio-process Technology, 2022, 15: 1603-1614.
- [39] 刘慧. 微酸性电解水对草鱼冷藏期间保鲜效果影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- LIU Hui. Study on the Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water on the Preservation of Grass Carp During Cold Storage[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- [40] WANG Bo, DU Xin, KONG Bao-hua, et al. Effect of Ultrasound Thawing, Vacuum Thawing, and Microwave Thawing on Gelling Properties of Protein from Porcine Longissimus Dorsi[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 64: 104860.
- [41] LI Pei-yun, MEI Jun, XIE Jing. Chitosan-Sodium Alginate Bioactive Coatings Containing E-Polylysine Combined with High CO₂ Modified Atmosphere Packaging Inhibit Myofibril Oxidation and Degradation of Farmed Pufferfish (*Takifugu Obscurus*) during Cold Storage[J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 140: 110652.
- [42] TANTRATIAN S, KAEPHEN K. Shelf-life of Shucked Oyster in Epigallocatechin-3-Gallate with Slightly Acidic Electrolyzed Water Washing under Refrigeration Temperature[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118: 108733.
- [43] 向思颖, 谢君, 徐芊, 等. 中性氧化电解水对冷鲜草鱼肉品质及质构的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(3): 239-244.
- XIANG Si-ying, XIE Jun, XU Qian, et al. Effect of Neutral Electrolyzed Water on Quality and Textural Characteristics of Chilled Fresh Grass Carp[J]. Food Science, 2017, 38(3): 239-244.
- [44] KONG De-wei, QUAN Chun-li, XI Qian, et al. Study on the Quality and Myofibrillar Protein Structure of Chicken Breasts during Thawing of Ultrasound-Assisted Slightly Acidic Electrolyzed Water (SAEW)[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 88: 106105.
- [45] 陈晓楠, 赵金丽, 张宾, 等. 低温冻藏过程中鲈鱼肌肉蛋白质氧化特性研究[J]. 包装工程, 2020, 41(17): 38-45.
- CHEN Xiao-nan, ZHAO Jin-li, ZHANG Bin, et al. Oxidation of Muscle Protein in Mackerel during Cryopreservation[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(17): 38-45.
- [46] ZHANG Bin, MA Lu-kai, DENG Shang-gui, et al. Shelf-Life of Pacific White Shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) as Affected by Weakly Acidic Electrolyzed Water Ice-Glazing and Modified Atmosphere Packaging[J]. Food Control, 2015, 51: 114-121.
- [47] 杨琰瑜, 张宾, 汪恩蕾, 等. 酸性电解水冰衣对单冻虾仁品质的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(6): 162-168
- YANG Yan-yu, ZHANG Bin, WANG En-lei, et al. Effect of Acidic Electrolyzed Water Coating Ice on Quality of Frozen Shrimp (*Litopenaeus Vannamei*)[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(6): 62-168
- [48] SHAO Liang-ting, CHEN Shan-shan, WANG Hao-dong, et al. Advances in Understanding the Predominance, Phenotypes, and Mechanisms of Bacteria Related to Meat Spoilage[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 822-832.
- [49] WANG Meng, WANG Jing-jing, SUN Xiao-hong, et al. Preliminary Mechanism of Acidic Electrolyzed Water Ice on Improving the Quality and Safety of Shrimp[J]. Food Chemistry, 2015, 176: 333-341.
- [50] FIDALGO L G, DELGADILLO, I, SARAIVA J A. Autolytic Changes Involving Proteolytic Enzymes on Atlantic Salmon (*Salmo Salar*) Preserved by Hyperbaric Storage[J]. LWT, 2020, 118: 108755.
- [51] ZHANG Rou-jia, CHENG Zhi-ming, DING Fu-yuan, et al. Improvements in Chitosan-Based Slurry Ice Production and Its Application in Precooling and Storage of *Pampus Argenteus*[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133266.
- [52] LIU Lin, LAN Wei-qing, PU Tian-ting, et al. Combining Slightly Acidic Electrolyzed Water and Slurry Ice to Prolong the Shelf-Life of Mackerel (*Pneumatophorus Japonicus*)[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9): 15762.
- [53] ZHAO Ya-nan, LAN Wei-qing, SHEN Jin-ling, et al. Combining Ozone and Slurry Ice Treatment to Prolong the Shelf-Life and Quality of Large Yellow Croaker (*Pseudosciaena Crocea*)[J]. LWT, 2022, 154: 112615.
- [54] 陈扬易, 谢晶, 钟小凡, 等. 超高压处理技术在水产品保鲜中的研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 266-270.
- CHEN Yang-yi, XIE Jing, ZHONG Xiao-fan, et al. Research Progress of Ultra-High Pressure Treatment Technology in the Preservation of Aquatic Products[J]. Food & Machinery, 2015, 31(4): 266-270.
- [55] 王丽萍. 黄泥螺超高压栅栏杀菌技术及机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- WANG Li-ping. Study on Sterilizing and Mechanism of

- High Pressure Processing Hurdle Technology for Mud Snail (*Buttacta Exarata*)[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.
- [56] CHEN Guan-wen, CHEN Yi-an, CHANG H Y, et al. Combined Impact of High-Pressure Processing and Slightly Acidic Electrolyzed Water on *Listeria Monocytogenes* Proteomes[J]. Food Research International (Ottawa, Ont), 2021, 147: 110494.
- [57] LI Jiao, DING Tian, LIAO Xin-yu, et al. Synergetic Effects of Ultrasound and Slightly Acidic Electrolyzed Water Against *Staphylococcus Aureus* Evaluated by Flow Cytometry and Electron Microscopy[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 711-719.
- [58] FORGHANI F. Ultrasonication Enhanced Low Concentration Electrolyzed Water Efficacy: on Bacteria Inactivation and Shelf Life Extension on Lettuce[J]. Food Science & Biotechnology, 2013, 22(1): 131-136.
- [59] YAN Wen, ZHANG Yi-qi, YANG Rui-jin, et al. Combined Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water and Ascorbic Acid to Improve Quality of Whole Chilled Freshwater Prawn (*Macrobrachium Rosenbergii*)[J]. Food Control, 2020, 108: 106820.
- [60] 蓝蔚青, 赵家欣, 张溪, 等. 微酸性电解水-复合保鲜剂对冷藏凡纳滨对虾品质及菌群结构影响[J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(6): 91-98.
- LAN Wei-qing, ZHAO Jia-xin, ZHANG Xi, et al. Effects of Mixture of Slightly Acidic Electrolytic Water and Compound Preservative on the Quality and Microflora Structure of *Litopenaeus Vannamei* during Refrigerated Storage[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41(6): 91-98.
- [61] 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.
- LAN Wei-qing, FENG Hao-jie, LIU Da-yong, et al. Research Progress on Mechanism of Microbial Source Bio-Preservatives on Spoilage Bacteria of Aquatic Products[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 31-38.
- [62] 闫运开, 宋见喜, 毛迪锐, 等. 植物多酚-壳聚糖抑菌保鲜膜的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 326-331.
- YAN Yun-kai, SONG Jian-xi, MAO Di-rui, et al. Research Progress of Plant Polyphenol-Chitosan Antibacterial Plastic Wrap[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 326-331.
- [63] ZHOU Ran, LIU Yuan, XIE Jing, et al. Effects of Combined Treatment of Electrolyzed Water and Chitosan on the Quality Attributes and Myofibril Degradation in Farmed Obscure Puffer Fish (*Takifugu Obscurus*) during Refrigerated Storage[J]. Food Chemistry, 2011, 129(4): 1660-1666.
- [64] FENG Hao-jie, LAN Wei-qing, SUN Xiao-hong, et al. Effects of Slightly Acidic Electrolyzed Water Pretreatment Combined with Biopreservatives on the Shelf Life of Refrigerated Obscure Pufferfish (*Takifugu Obscurus*)[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(2): 484-494.
- [65] 吴怡, 蓝蔚青, 刘嘉莉, 等. 微酸性电解水结合迷迭香提取物对冷藏鲈鱼片品质变化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(4): 47-55.
- WU Yi, LAN Wei-qing, LIU Jia-li, et al. Effects of Slightly Acidic Electrolyzed Water Combined Rosemary Extract on the Quality Change of Sea Bass Fillets (*Lateolabrax Japonicas*) during Refrigerated Storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(4): 47-55.

责任编辑: 曾钰婵