

DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022446

引用格式: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 Weiqing, LIU Lin, SUN Xiaohong, 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.

酸性电解水发生机理及在水产领域中的应用研究进展

蓝蔚青^{1,2}, 刘琳¹, 孙晓红^{1,2*}, 赵亚楠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(上海海洋大学), 上海, 201306)

摘 要 酸性电解水(acidic electrolyzed water, AEW)是一种新型非热杀菌技术。相较于其他杀菌保鲜技术,酸性电解水可快速达到理想杀菌保鲜效果,不会对人体与环境产生负面影响。该文介绍了酸性电解水的制备原理与理化特性、作用效果及在水产领域的应用研究进展,提出存在问题与改进建议,并对其发展前景予以展望。旨在为酸性电解水在水产品保鲜与加工中的应用提供理论参考,以期为其在水产领域的应用推广奠定基础。

关键词 酸性电解水;发生机理;水产;研究进展

Research progress on the occurrence mechanism of acidic electrolyzed water (AEW) and its application in aquaculture

LAN Weiqing^{1,2}, LIU Lin¹, SUN Xiaohong^{1,2*}, ZHAO Yanan¹, XIE Jing^{1,2*}

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

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

ABSTRACT Acidic electrolyzed water (AEW) is one of novel non-thermal sterilization technologies. Compared with other sterilization and preservation technologies, AEW treatment can kill microorganisms quickly and effectively to achieve the effects of sterilization and preservation, which has no negative impact on human body and environment. In this paper, the preparation principle and physico-chemical properties of AEW were mainly summarized; the research progress of AEW in aquaculture was introduced; the main problems and suggestions for improvement were put forward; the development of AEW treatment was also prospected so as to provide the theoretical reference for the application of AEW in the preservation and process of aquatic products, which also lay a foundation for its application and promotion in the field of aquaculture.

Key words acidic electrolyzed water (AEW); occurrence mechanism; aquaculture; research progress

我国是世界渔业生产大国、世界第一水产养殖大国与水产品贸易大国,水产品在国民经济中占有重要地位。据2019年中国渔业统计年鉴^[1]显示,2018年我国水产品总产量为6 457.66万t,其中养殖产量4 991.60万t,捕捞产量1 466.60万t。然而,由于水

产品中微生物与内源酶作用,其在贮运期间易产生三甲胺、哌啶等腥臭味和毒性物质,发生腐败变质,丧失其原有的优良感官与营养品质^[2]。因此,开展水产品杀菌保鲜是当前的研究热点。

目前,水产品的常见保鲜方式有物理保鲜、化学保鲜

第一作者:博士,高级工程师(孙晓红副教授和谢晶教授为共同通讯作者, E-mail: xhsun@shou.edu.cn, jxie@shou.edu.cn)

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项(2019YFD0901602);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-47);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)

收稿日期:2019-10-02, 改回日期:2019-10-30

与生物保鲜,其中分类方式与主要优缺点如表 1 所示。

表 1 水产品常用保鲜方式与主要特点

Table 1 Common fresh-keeping methods and main characteristics of aquatic products

保鲜方式	物理保鲜	化学保鲜	生物保鲜
主要代表	低温保鲜、气调保鲜、辐照保鲜、超高压保鲜等	电解水保鲜、乳酸保鲜、臭氧保鲜等	乳酸链球菌素、茶多酚、聚赖氨酸、溶菌酶等
优点	抑菌效果好,保持产品原有风味 ^[3]	保鲜效果好,取材广泛 ^[4]	安全性高,应用前景好 ^[5]
缺点	能耗大,成本高	安全性低,对产品风味产生影响	成分获取困难,成本较高,抑菌研究有待深入

近年来,随着消费者安全营养与健康理念的逐年提升,其对水产品保鲜技术提出更高要求,电解水杀菌保鲜处理技术应运而生。电解水技术最早源于 20 世纪末期,是指水经电解作用后发生化学反应,在阴阳两级分别得到碱性电解水与酸性电解水,其中酸性电解水氧化能力较强且含有一定浓度的含氯化合物,能穿透微生物的细胞膜导致菌体死亡,属化学保鲜。日本首先利用酸性电解水来杀灭金黄色葡萄球菌^[6]。我国在 1995 年引进酸性电解水,相关开发及利用已获得国家许可^[7]。与其他保鲜技术相比,酸性电解水具有杀菌速度快、保鲜能力强且安全无毒的特点。近年来,酸性电解水以其安全无毒、杀菌效果极佳的特点引起国际关注。本文主要综述了酸性电解水的制备原理与特性、作用效果与机制、酸性电解水在水产领域中的应用研究进展,提出存在问题与改进建议,并对其发展前景予以展望。

酸性电解水利用有隔膜装置电解制备,微酸性电解水与中性电解水通过无隔膜装置电解获得,两种装置所制得的电解水对于水产品均具有杀菌保鲜能力。其中,在电解槽中,阴阳两极发生电化学反应。 $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$; $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCl} + \text{HClO}$; $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$,在阳极获得酸性电解水; $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$,在阴极获得碱性电解水,具体如图 1 所示。

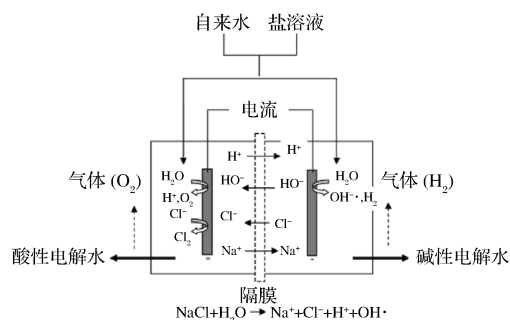


图 1 酸性电解水制备原理^[8]

Fig. 1 Preparation principle of acidic electrolyzed water

其中,赵爱静等^[9]研究发现,电解液中 Na^+ 与 Cl^- 浓度远高于水发生弱电解而产生的 H^+ 与 OH^- 浓度,在电场作用下,阳极产生 Cl_2 ,生成 HCl 与 HClO ,造成在阳极附近 H^+ 浓度高于 OH^- 浓度,在阳极生成酸性电解水。目前,多数酸性电解水的杀菌机理研究主要是从 pH 值、氧化还原电位 (oxidation reduction potential, ORP) 与有效含氯量 (available chlorine concentration, ACC) 对微生物的细胞形态、生理生化反应等影响开展研究,对其杀菌机理通常认为是物理杀菌与化学杀菌共同作用的结果^[10]。

1 酸性电解水在水产领域中的应用研究进展

1.1 水产原料减菌化

水产原料会携带食源性致病菌,酸性电解水处理原料后,除发挥其消毒作用外,还可避免清洗液对环境造成污染与水产原料的交叉污染,降低微生物污染几率。已有研究表明,酸性电解水对水产品表面的单增李斯特菌、大肠杆菌与副溶血性弧菌等有较好杀灭作用。如 OZER 等^[11]在 35 ℃ 下用酸性电解水 (pH = 2.6, ORP = 1 150 mV, ACC = 90 ppm) 处理三文鱼 64 min,结果得出三文鱼中的单增李斯特菌降低了 1.12 个对数值,大肠杆菌降低了 1.07 个对数值;XIE 等^[12]利用酸性电解水处理接种副溶血性弧菌的虾仁,发现在 50 ℃ 下处理虾仁 1 min,其表面副溶血性弧菌数减少了 2.12 个对数值;MAHMOUD 等^[13]利用酸性电解水 (pH = 2.22 ± 0.01, ACC = (40.8 ± 0.09) mg/L) 处理鲤鱼片,发现菌落总数减少 2.16 个对数值,与对照组相比,酸性电解水能有效杀灭微生物;莫永根等^[14]研究发现,在 22 ℃ 下用酸性电解水处理南美白对虾 64 min,对虾表面总菌降低了 0.86 个对数值;HUANG 等^[15]以罗非鱼为研究对象,在 25 ℃ 下用酸性电解水处理 10 min,发现大肠杆菌降低了 0.76 个对数值,肠炎弧菌降低了 2.61 个对数值;许愈等^[16]研究发现使用 pH = 2.32 ± 0.01, ORP = (1 166.3 ± 2.6) mV, ACC = (48 ± 2) μg/mL 的酸性电解水能完全杀灭副溶血性弧菌,使单增李斯特菌数下降 1.45 个对数值;李秀丽等^[17]以熟制虾仁为研究对象,在 pH 值为 3.0,料液比为 1:2,浸泡时间为 25 min 的条件下采用酸性电解水处理虾仁,结果表明,细菌总数降至 1.94 个对数值;PHUVASATE 等^[18]研究酸性电解水冰处理金枪鱼 24 h,发现产气杆菌减少 2.4 个对数值,摩化摩根菌减少 3.5 个对数值。

1.2 加工设备表面杀菌

水产品在加工过程中通常会与不同设备接触,设备材质大多为不锈钢、瓷砖与玻璃等。采用酸性电解水对捕捞器具进行杀菌消毒,可防止器具与水产品间交叉污染。酸性电解水对水产品加工设备的杀菌消毒,其灭菌效果理想且在水产品加工企业中应用前景广泛^[19]。研究发现,酸性电解水对不锈钢等材质的加工设备表面微生物有良好的杀灭作用,如酸性电解水可将 10 CFU/mL 的病原菌原液在 1 min 内全部杀死;酸性电解水能将加工设备表面含有的 10 CFU/cm² 病原菌在 5 min 内全部杀灭^[20];AYEBAH 等^[21] 研究发现,不锈钢材质设备表面的单增李斯特菌经酸性电解水浸泡 30~120 s 后,病原菌数明显减少;LIU 等^[22] 研究得出不同材质设备表面的洁净程度会对酸性电解水的杀菌效果产生影响,有机物会降低电解水的杀菌效果;沈晓盛等^[23] 通过对加工设备表面人为染菌后,利用酸性电解海水对其消毒,发现 10⁷ CFU/cm² 的病原菌在 5 min 内几乎全部杀灭;VENKITANARAYANAN 等^[24] 在 35 ℃ 下利用氧化电解水浸泡切板 20 min,发现切板上大肠杆菌 O157:H7 全部失活。研究还发现大肠杆菌和单增李斯特菌在浸泡切板的去离子水中恢复活性,在氧化电解水中无此现象。

1.3 水产养殖环境消毒

随着水产养殖业的迅速发展,水产品的养殖面积与生产规模不断扩大,养殖环境恶化、病原菌污染、水质变差等问题日益凸显。在养殖环境的恶化引起病原菌大量繁殖,若不能有效杀死致病菌,就会产生由于病原菌残留而使鱼虾等品质下降甚至死亡,不仅会使水产养殖户经济损失巨大,更会使消费者的健康受到损害,限制了水产养殖业发展。

目前,大部分养殖场采用臭氧杀菌、二氧化氯杀菌、紫外线杀菌等杀菌技术来净化水体。臭氧是强氧化剂,但如何控制臭氧量,使其均匀溶于海水中并在海水中保持稳定的浓度存在困难^[25]。二氧化氯杀菌效率较高,但其见光易分解,且在特殊水质条件下会产生醛类等有毒产物。紫外杀菌效果受多种因素影响,照射强度随着照射时间的增加而减小,使杀菌效果减弱。酸性电解水具有广谱高效、安全无害、环境友好等特点,操作简单且成本低,在水产养殖业的应用有着其他技术方法无法比拟的优势,利用深海水为原料制备的电解水杀菌效果更有效^[26]。在更换池塘水时利用酸性电解水对养殖池塘杀菌消毒,可降低潜在的病原菌数^[27]。其中,JORQUERA 等^[27] 以养殖扇贝为研究对象,发现酸性电解水对水体中的鳃弧菌

杀灭作用良好,当海水电解电流 ≥ 1.3 A 时,病原菌几乎全部失活,且杀菌成本低。

1.4 水产品贮藏保鲜

酸性电解水因其具有瞬时广谱杀菌作用,在水产品贮藏保鲜中得到广泛应用。其中,孙江萍等^[28] 由体外酶动力学分析得出,酸性电解水($\text{pH} = 2.35 \pm 0.01$, $\text{ORP} = 1\,172.40 \pm 0.46$ mV, $\text{ACC} = (72 \pm 1)$ mg/L)可降低南美白对虾黑变过程中多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活力,抑制黑斑形成,使货架期延至 5 d;蓝蔚青等^[29] 结果发现酸性电解水处理抑制带鱼冷藏期间总挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)值、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)值、细菌总数与 pH 值升高,其中以电解 11 min 产生的酸性电解水($\text{pH} = 2.62 \pm 0.01$, $\text{ORP} = (1\,149.1 \pm 0.6)$ mV, $\text{ACC} = (41.5 \pm 0.7)$ mg/L)保鲜效果最佳;付娇娇等^[30] 分析了南美白对虾在 0、4 与 25 ℃ 贮藏期间中肠道微生物变化规律,发现经 500 mg/L 的酸性电解水处理南美白对虾,使虾体肠道内微生物多样性减少,微生物群落发生改变。水产品贮藏以冰藏为主,此法不仅消耗成本高,且肉质易硬化,鲜度降低,使其商业与营养价值有所降低。将酸性电解水制成冰或冰衣,既可发挥其广谱抑菌性,又能使其作用时间延长。如姚鑫等^[31] 研究表明,酸性电解水冰($\text{pH} = 2.38 \pm 0.01$, $\text{ORP} = (1\,153.21 \pm 1.51)$ mV, $\text{ACC} = (44 \pm 1)$ mg/L)不会对小黄鱼贮藏期间的感官与质构产生不良影响,能使其 pH 值、脂肪酶与组织蛋白酶 D 活力显著降低,抑制微生物数增长;ZHAO 等^[32] 发现酸性电解水冰明显延缓了虾中肌原纤维蛋白降解,抑制腐败菌生长;林婷^[33] 发现酸性电解水冰可保鲜虾,使 pH 值、色泽等变化不大,由传统平板计数法与聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳(polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis, PCR-DGGE)得出酸性电解水冰能有效抑制虾体内微生物数上升,减少致病菌多样性,对虾肌原纤维结构有良好保持作用;高萌等^[34] 研究表明,在 -18 ℃ 下,酸性电解水($\text{pH} = 4.5$, $\text{ORP} = 836.5$ mV, $\text{ACC} = 31.7$ mg/L)镀冰衣可使金枪鱼肉在贮藏期间细菌总数降低,特别是在 0~160 d,金枪鱼体内菌数、大肠埃希氏菌数始终保持在较低水平,呈显著下降趋势,可防止金枪鱼运输期间的“干耗油烧”等,保持其鲜度。

2 存在问题与解决办法

酸性电解水自身较高的有效氯浓度与低 pH 值

可能会对加工设备及操作人员产生腐蚀,且对水产品原料表面产生不利影响。如王玲^[35]研究发现,酸性电解水处理虽可有效抑制鲟鱼表面病原菌,延长了其保质期,但鱼肉中残留氯与其他因素会引起鱼肉色泽改变;因此,近年来对微酸性电解水、中性电解水与碱性电解水研究逐渐增多。

2.1 微酸性电解水、中性电解水与碱性电解水

微酸性电解水属于新型杀菌保鲜技术,其具有安全高效、无残留、无污染等特点,现已广泛应用在水产品保鲜与加工前处理等领域中。牛会平等^[36]研究了微酸性电解水与强酸性电解水的消毒能力,发现在有效氯浓度相同的情况下,微酸性电解水对大肠杆菌与金黄色葡萄球菌的杀灭能力更强;岑建伟等^[37]研究发现利用微酸性电解水处理罗非鱼后,鱼体表面菌落数显著减少,货架期比对照组延长了2~3 d;李国威等^[38]研究利用微酸性电解水处理活品鲜夷扇贝,发现微酸性电解水处理2 min和4 min两组的扇贝存活率最高,且经微酸性电解水处理后虾夷扇贝体内的细菌总数降低;于福田等^[39]发现利用有效氯质量浓度为35.00 mg/L的微酸性电解水处理罗非鱼,杀菌率达 $(81.59 \pm 0.04)\%$;同时,中性电解水与碱性电解水也得到较好应用。其中,向思颖等^[40]研究发现采用中性电解水处理冷鲜草鱼肉,能使鱼肉品质得到有效保持,且可将其货架期延长4 d左右;梁风雪等^[41]利用响应面分析法得出碱性电解水处理罗非鱼活体的最佳工艺参数为pH值为10,盐度为8‰,处理时间为60 min,在此条件下,其减菌率达94.1%。

2.2 微酸性电解水与其他处理方式相结合

此外,还有研究学者将微酸性电解水与其他处理方式相结合,以充分发挥其综合效果。其中,XUAN等^[42]研究发现,鱿鱼经微酸性电解水冰处理后,其体内的总菌数显著降低,对其外观褐变与软化有所抑制,使其鲜度得到保持;KIM等^[43]在4℃条件下用微酸性电解水冰处理秋刀鱼,表明微酸性电解水冰能有效抑制秋刀鱼中好氧嗜冷菌的生长繁殖与鱼体的脂肪氧化,保持其良好的感官品质,相比自来水冰保藏,能使其货架期延长4~5 d。YEN等^[44]利用微酸性电解水(pH=5.92, ORP=810 mV, ACC=20 mg/L)结合抗坏血酸处理罗氏沼虾,发现其在4℃贮藏期间的货架期延长了3 d;郑炜等^[45]以凡纳滨对虾虾仁为研究对象,利用微酸性电解水冰衣与气调包装联合处理,发现虾仁色泽在冷冻期间得到有效保持;弱酸性冰衣会对生虾仁的挥发性气味造成不良影响,但对煮

熟虾仁无影响。

3 前景与展望

消费者对水产品的质量要求越来越高,水产品的保鲜技术将有3个发展趋势:(1)水产品保鲜技术更加注重环境友好,无残留,对人体不产生潜在危害性;(2)水产品保鲜技术将以多种保鲜技术综合使用为发展方向,不同保鲜技术可弥补彼此不足,结合使用更能有效高效保证水产品品质,延长其货架期;(3)水产品保鲜技术将以不受季节、地域等限制方向发展,更注重实际操作性与节能性^[46]。

酸性电解水对人体安全无毒、环境友好等特点适应水产品保鲜技术的发展趋势。相关研究表明,其对水产品杀菌保鲜方面有着显著效果,可抑制水产品中细菌的生长繁殖,对其感官与营养影响不大。随着科技水平的提高与水产品保鲜技术的发展,酸性电解水将以其高效、安全、广谱等优势,在水产品杀菌保鲜中拥有广阔的应用前景。因此,后期可加强酸性电解水对水产养殖行业的杀菌研究,根据水产品不同成长时期对杀菌要求高低制备不同浓度电解水;同时,在养殖业水体杀菌与水产品清洗杀菌中,针对不同水产品对其进行应用过程的杀菌动力学分析,得出适宜酸性电解水的初始特性参数、反应时间等工艺条件,使酸性电解水生产设备的成本与能耗进一步降低,保证最佳杀菌效果;还有,可利用栅栏技术,将酸性电解水与其他处理技术有机结合,最大限度发挥酸性电解水的杀菌保鲜作用;政府、研究机构与相关企业还可共同完善与酸性电解水技术使用相关的标准规范,深入对酸性电解水的杀菌保鲜作用机理研究,使酸性电解水技术在水产品的杀菌保鲜中得到更好推广应用。

参 考 文 献

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 2019年中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [2] 杨帆, 万金庆, 张楠, 等. 水产品腐败机理及控制方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 282-285.
- [3] 王倩, 孙晓红, 蓝蔚青, 等. 保鲜冰在水产品保藏中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 226-230.
- [4] 李娜, 谢晶. 鱿鱼保鲜技术的研究进展[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 40-46.
- [5] 王硕, 谢晶, 刘爱芳. 生物保鲜技术在海产品中的应用及展望[J]. 包装工程, 2017, 38(1): 137-142.
- [6] 杨燕. 酸性氧化电位水及其在医疗中的应用现状[J]. 实用医药杂志, 2005, 61(11): 77-78.
- [7] 杜明润, 李信, 肖伟, 等. 电解水与电解水技术的研究进展[J]. 长江蔬菜, 2018, 11(10): 27-29.

- [8] HUANG Y R, HUNG Y C, HSU S Y, et al. Application of electrolyzed water in the food industry[J]. Food Control, 2008, 19(4): 329–345.
- [9] 赵爱静,王萌,赵飞,等. 酸性电解水冰对南美白对虾杀菌保鲜效果的研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(3): 126–131.
- [10] 赵莉. 酸性电解水杀菌机制研究及其应用性分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- [11] OZER N P, DEMIRCI A. Electrolyzed oxidizing water treatment for decontamination of raw salmon inoculated with *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* Scott A and response surface modeling [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 72(3): 234–241.
- [12] XIE J, SUN X, PAN Y, et al. Combining basic electrolyzed water pretreatment and mild heat greatly enhanced the efficacy of acidic electrolyzed water against *Vibrio parahaemolyticus* on shrimp [J]. Food Control, 2012, 23(2): 324.
- [13] MAHMOUD B S M, YAMAZAKI K, MIYASHITA K, et al. Decontamination effect of electrolyzed NaCl solutions on carp [J]. Letters in Applied Microbiology, 2004, 39(2): 169–173.
- [14] 莫根永,曹荣,徐丽敏. 强酸性电解水用于对虾减菌化前处理的试验研究[J]. 渔业现代化, 2010, 37(3): 37–41.
- [15] HUANG Y R, HSIEH H S, LIN S Y, et al. Application of electrolyzed oxidizing water on the reduction of bacterial contamination for seafood[J]. Food Control, 2006, 17(12): 987–993.
- [16] 许愈,赵莉,刘海泉,等. 酸性电解水对副溶血性弧菌和单核细胞增生李斯特氏菌杀菌效果的比较研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(16): 4 223–4 228.
- [17] 李秀丽,吴冬梅,罗红宇. 酸性电解水对熟制虾仁抑菌作用的研究[J]. 食品工业, 2013, 34(9): 108–110.
- [18] PHUVASATE S, SU Y C. Effects of electrolyzed oxidizing water and ice treatments on reducing histamine-producing bacteria on fish skin and food contact surface[J]. Food Control, 2010, 21(3): 286–291.
- [19] 王潇. 酸性电解水对中华管鞭虾保鲜效果的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2015.
- [20] 祁凡雨,郑琦琦,裴洛伟,等. 酸性氧化电位水在水产养殖和水产品中的应用[C]. 杭州: 水产工业化养殖技术研讨会, 2012.
- [21] AYEBAH B, HUNG Y C, FRANK J F. Enhancing the bactericidal effect of electrolyzed water on *Listeria monocytogenes* biofilms formed on stainless steel [J]. Journal of Food Protection, 2005, 68(7): 1 375–1 380.
- [22] LIU C, DUAN J, SU Y C. Effects of electrolyzed oxidizing water on reducing *Listeria monocytogenes* contamination on seafood processing surfaces [J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 106(3): 248–253.
- [23] 沈晓盛,刘长军,蔡友琼,等. 电解海水的抑菌活性及对食品加工表面材料的消毒效果[J]. 微生物学通报, 2008, 35(11): 1 833–1 839.
- [24] VENKITANARAYANAN K S, ZHAO T, DOYLE M P. Inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 by combinations of GRAS chemicals and temperature [J]. Food Microbiology, 1999, 16(1): 75–82.
- [25] 曹薇,施正香,朱志伟,等. 电解功能水在养殖业的应用展望[J]. 农业工程学报, 2006, 22(S2): 150–154.
- [26] 谢军,孙晓红,潘迎捷,等. 酸性电解水在水产品安全中的应用[J]. 渔业现代化, 2010, 37(2): 55–58.
- [27] JORQUERA M A, VALENCIA G, EGUCHI M, et al. Disinfection of seawater for hatchery aquaculture systems using electrolytic water treatment[J]. Aquaculture, 2002, 207(3–4): 213–224.
- [28] 孙江萍,赵莉,俞文英,等. 酸性电解水对南美白对虾中多酚氧化酶活性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 7–12.
- [29] 蓝蔚青,谢晶. 酸性电解水对冷藏带鱼保鲜效果的影响研究[J]. 天然产物研究与开发, 2011, 23(5): 913–917.
- [30] 付娇娇,彭织云,刘海泉,等. 酸性电解水处理后南美白对虾贮藏过程中肠道微生物的多样性变化[J]. 食品工业科技, 2015, 36(4): 73–78.
- [31] 姚鑫,赵爱静,杜苏萍,等. 酸性电解水冰对小黄鱼品质及肌肉组织中酶活力变化的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 250–256.
- [32] ZHAO L, ZHANG Z H, WANG M, et al. New insights into the changes of the proteome and microbiome of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) stored in acidic electrolyzed water ice [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(19): 4 966–4 976.
- [33] 林婷. 电解水冰保鲜水产品的应用性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013.
- [34] 高萌,张宾,励建荣,等. 基于酸性电解水处理的金枪鱼杀菌技术研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(6): 230–234.
- [35] 王玲. 酸性电解水处理对鲟鱼冰温贮藏品质变化的影响[D]. 大连: 大连工业大学, 2018.
- [36] 牛会平,李慧颖,吴彤娇,等. 微酸性电解水与强酸性电解水消毒能力比较及分析[J]. 河北医药, 2018, 40(1): 124–126.
- [37] 岑剑伟,于福田,杨贤庆,等. 微酸性电解水对罗非鱼片保鲜效果的研究[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(18): 209–214.
- [38] 李国威,傅润泽,沈建,等. 微酸性电解水对活品虾夷扇贝存活率的影响及杀菌效果[J]. 渔业现代化, 2016, 43(1): 68–74.
- [39] 于福田,岑剑伟,李来好,等. 罗非鱼片微酸性电解水杀菌工艺响应面法优化研究[J]. 南方水产科学, 2019, 15(1): 77–84.
- [40] 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.
- [41] 梁凤雪,陈海强,梁钻好,等. 碱性电解水对罗非鱼活体杀菌工艺优化[J]. 农业工程, 2019, 9(5): 62–67.
- [42] XUAN X T, FAN Y F, LING J G, et al. Preservation of squid by slightly acidic electrolyzed water ice[J]. Food Control, 2017, 73: 1 483–1 489.
- [43] KIM W T, LIM Y S, SHIN I S, et al. Use of electrolyzed water ice for preserving freshness of pacific saury (*Cololabis saira*) [J]. Journal of Food Protection, 2006, 69(9): 2 199–2 204.
- [44] YAN W, ZHANG Y Q, YANG R J, 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.
- [45] 郑炜,谢超,梁佳,等. 弱酸性电解水冰衣和气调包装对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)虾仁品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 183–187.
- [46] 蔡路昀,台瑞瑞,曹爱玲,等. 冷冻因素对水产品品质的影响及冷冻保鲜的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(20): 308–313.