

# 超声波与微酸性电解水在食品杀菌保鲜中的应用研究进展

马江林<sup>1,2</sup>, 木泰华<sup>2\*</sup>, 张苗<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 文法学院, 北京 100124;

2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 治理“餐桌污染”和确保人民群众“舌尖上的安全”是党和国家管控食品安全和保障民生的重要举措之一。食品中微生物的生长会导致食品品质劣变, 造成食品货架期缩短, 从而引发食品安全这一备受大众关注的社会问题。超声波作为一种非热加工技术, 可以使一些微生物失活, 被认为是食品工业中传统杀菌保鲜技术的潜在替代方法。微酸性电解水是近几十年食品工业中最有前途的杀菌剂之一, 具有很强的广谱杀菌效果。超声波与微酸性电解水协同处理能够发挥“1+1>2”的杀菌效果, 在食品杀菌保鲜中具有巨大的应用潜力。本文综述了超声波、微酸性电解水单独作用和协同处理的杀菌机制、对微生物生长的影响及在食品杀菌保鲜中应用的研究进展, 并展望未来的发展趋势, 以期为其在食品加工与安全领域的研究与应用提供参考。

**关键词:** 超声波; 微酸性电解水; 协同; 杀菌保鲜

## Research progress on application of ultrasonic and slightly acidic electrolyzed water in food sterilization and preservation

MA Jiang-Lin<sup>1,2</sup>, MU Tai-Hua<sup>2\*</sup>, ZHANG Miao<sup>2</sup>

(1. Faculty of Humanities and Social Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science, Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

**ABSTRACT:** The control of “table pollution” and “safety on the tip of the tongue” of the people are one of the important measures taken by the party and the state to control food safety and ensure people’s livelihood. The growth of microorganisms in food will lead to the deterioration of food quality, shorten the shelf life of food, and cause food safety that is a social problem of public concern. As a non thermal processing technology, ultrasound can inactivate some microorganisms, and is considered as a potential alternative to traditional sterilization and preservation technology in the food industry. Slightly acidic electrolyzed water is one of the most promising fungicides in the food industry in recent decades, which has strong broad-spectrum germicidal efficacy. The synergistic treatment of ultrasound and slightly acidic electrolyzed water can bring “1+1>2” effect on the inhibition of microbial growth, and

**基金项目:** 北京市科委计划项目(Z191100004019012)、国家重点研发计划项目(2016YFE0133600)、中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-202X-IFST)

**Fund:** Supported by the Beijing Municipal Science and Technology Project (Z191100004019012), the National Key R & D Program of China (2016YFE0133600), and the Science and Technology Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ASTIP-202X-IFST)

\***通信作者:** 木泰华, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品化学与营养。E-mail: mutaihua@126.com

\***Corresponding author:** MU Tai-Hua, Ph.D, Professor, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science, No. 2 Yuan Ming Yuan West Road, Haidian District, Beijing 100193, China. E-mail: mutaihua@126.com

has great application potential in food sterilization and preservation. This paper reviewed the sterilization mechanism, the effect on microbial growth, and the application in food sterilization and preservation of ultrasound and slightly acidic electrolyzed water alone or synergistically, and prospected the future development trends, so as to provide reference for their research and application in the field of food processing and safety.

**KEY WORDS:** ultrasound; slightly acidic electrolyzed water; synergism; sterilization and preservation

## 0 引言

早在 2017 年新年伊始, 习近平总书记就对食品安全工作做出过重要指示。民以食为天, 加强食品安全工作关系我国亿万人民的身体健康和生命安全, 确保人民群众“舌尖上的安全”, 全面治理“餐桌污染”, 不断提高人民群众的满意度和获得感, 对于推动健康中国战略具有重要意义。

食品中微生物的生长会导致食品品质劣变, 造成食品货架期缩短, 引发食品安全问题。由微生物引发的食品安全问题一直是公众关注的社会热点。目前, 大量商业杀菌剂已被用于食品供应链中, 如氯气、过氧化物混合物、季铵盐化合物等<sup>[1]</sup>。然而, 上述杀菌剂具有对人类或环境的潜在毒性、化学残留、对食品质量的不利影响等缺点。因此, 研究与开发安全有效的食品杀菌保鲜方式受到了广泛关注<sup>[2]</sup>。

超声波是以机械振动的形式在媒介中传播的声波, 具有传统加工技术不可比拟的高效价廉、操作简单、绿色环保等优点, 现已被广泛应用于食品杀菌、提取、干燥等方面<sup>[3]</sup>。超声波有利于降低食品微生物带来的安全风险, 改善食品品质, 但低强度下单独作用时杀菌效果不明显<sup>[4-5]</sup>。电解水是在电解室中通过电解 NaCl 稀溶液(KCl 或 MgCl<sub>2</sub>)或稀盐酸溶液而产生, 由于其有效的抗菌活性和低廉的运行费用, 近 20 年来已成为食品工业中最有前途的杀菌剂之一。根据最终溶液的 pH, 电解水可分为强酸性电解水(pH 2.2~2.7)、弱酸性电解水(pH 2.7~5.0)、微酸性电解水(pH 5.0~6.5)、中性电解水(pH 6.5~7.5)和碱性电解水(pH 11.0~13.8)<sup>[1]</sup>。其中, 微酸性电解水因对环境友好、对人体无毒副作用、腐蚀性小、具有一定杀菌效果等优点, 引起食品领域的高度关注<sup>[6]</sup>。与单独作用相比, 将超声波与微酸性电解水联合使用可有效提升其杀菌效果<sup>[7]</sup>, 在食品杀菌保鲜中具有巨大的应用潜力。

本文综述了超声波与微酸性电解水单独作用和协同处理的杀菌机制、对微生物生长的影响, 以及在食品杀菌保鲜中应用的研究进展, 并对未来的发展趋势进行展望, 旨在为其在食品加工与安全领域的研究与应用提供一定参考, 为食品杀菌保鲜技术的拓展提供新思路。

## 1 超声波

超声波是由声波(非可听)产生的一种能量形式, 频率介于 20 kHz 和 1 GHz 之间。通常, 低频(20~100 kHz)超声

波对应于高功率, 而低功率则对应高于 100 kHz 的频率范围<sup>[4]</sup>。从 20 世纪初开始, 超声波开始商业化应用, 先是被用于通过回声测量水深, 后被开发用于医学成像、材料无损检测等<sup>[8]</sup>。超声波作为一种非热加工技术, 具有简单、快速、廉价和无破坏性等优点<sup>[9]</sup>, 可以使一些微生物失活, 能够对食品质量产生显著的积极影响<sup>[10]</sup>, 被认为是食品工业中传统杀菌保鲜技术的潜在替代方法<sup>[11]</sup>。

### 1.1 超声波的杀菌机制

超声波的机械效应、空化作用与化学效应通常被认为是导致微生物细胞膜完全破裂和微生物死亡的主要失活机制<sup>[12]</sup>。高强度超声波与液体介质的相互作用导致一种非常独特的空化现象, 由此产生大量声能的集中和转换<sup>[13]</sup>。在此过程中, 超声波通过诱导介质分子产生压缩波进行传播。在某些强度点上, 当超声波的稀疏作用超过介质分子间的吸引力时, 会形成空化泡。相当数量的蒸汽(或气体)在整流扩散过程中进入空化泡, 这些空化泡在膨胀阶段变大或在压缩阶段收缩, 部分排出蒸汽。根据应用的超声波频率, 空化泡可以在几个周期内增大并达到平衡尺寸, 由于超声振动而破灭。空化泡的每一次破灭都是一个限定的“热点”, 在超声频率为 20 kHz 的水介质系统中, 其产生的温度约为 4000 K, 压力大于 1000 个大气压<sup>[4]</sup>。在这种情况下, 水分子会被分解成高活性的自由基(H<sub>2</sub>O→OH·+H·), 引起还原反应和二次氧化, 造成分子的声分解及溶剂和溶质结构的改变<sup>[14]</sup>, 从而控制微生物引起的食品腐败变质<sup>[4]</sup>。

### 1.2 超声波对微生物生长的影响

超声波对微生物的灭活效果取决于频率、功率和温度等超声条件和微生物种类, 大多数微生物(甚至孢子)被完全或选择性地清除<sup>[4,12]</sup>。LIN 等<sup>[15]</sup>发现在超声波功率为 100 W、功率密度为 50 W/cm<sup>2</sup> 条件下处理 7.0 min 对大肠杆菌 O157:H7 的抑制效果达 68.91%; 超声波处理使大肠杆菌 O157:H7 细胞膜的通透性显著增加, 破坏了细胞膜的完整性, 并导致蛋白质和 DNA 的泄漏与代谢相关酶活性的降低; 进一步对抗菌机制的研究发现, 超声波能产生自由基, 从而导致细胞内氧化应激升高, 能量代谢减弱和己糖磷酸途径的抑制。LIAO 等<sup>[16]</sup>开展了超声波处理(功率 198 W、功率密度 252 W/cm<sup>2</sup>、频率 20 kHz、处理时间 0~12 min)对革兰氏阴性大肠埃希菌和革兰氏阳性金黄色葡萄球菌的多作用部位研究, 推测超声波对微生物的灭活作用可能不仅仅是简

单独破坏了细胞的外部结构;对于未处于超声波空化有效区的微生物细胞,可能由于超声波产生的自由基而受到内部损伤,但外部结构保持完整;而接近超声波场的微生物细胞则被高功率机械力立即完全破坏成碎片。

### 1.3 超声波在食品杀菌保鲜中的应用

超声波在食品杀菌保鲜中的应用受到了广泛的关注与研究,如在水果、蔬菜、粮油等中的应用。已有报道指出,超声波处理可以有效降低草莓灰霉病的发生,提高草莓的品质,延长草莓的货架期<sup>[17]</sup>。超声波处理可减少绿芦笋在 4 °C 贮藏 12 和 16 d 后的菌落、霉菌和酵母总数<sup>[18]</sup>。超声波处理可使黄瓜汁和苦瓜汁中大肠杆菌 O157:H7 细胞活力丧失,且对其感官品质无不良影响<sup>[15]</sup>。ALENYOREGE 等<sup>[19]</sup>发现超声波处理显著减少了鲜切大白菜中大肠杆菌和李斯特菌数量,延长了其贮藏期,但不影响其物理品质。FAN 等<sup>[20]</sup>指出超声波处理可降低鲜切生菜贮藏期间的菌落总数、霉菌和酵母数、大肠菌群数量,降低失重率、总色差、多酚氧化酶和过氧化物酶活性,提高总酚含量、维生素 C 和叶绿素含量,降低水分迁移率和呼吸速率,从而延长鲜切生菜的保鲜期。SALVE 等<sup>[21]</sup>发现超声波处理可以降低花生奶中酵母和霉菌总数,并使其分离指数和色泽得到改善。由此可见,超声波处理主要用于食品中细菌的去除,如大肠杆菌、李斯特菌等,并可抑制部分真菌的生长,如霉菌、酵母等。同时,从上述已有报道可以看出,一定条件的超声波处理可以在不影响食品品质的情况下,减少食品中微生物生长、延长食品保质期,在某些情况下还可以使其品质得到改善。然而,也有报道指出,单独使用超声波时,抑菌率往往达不到规定要求,通过增大超声波强度,虽然可以提高抑菌率,但会造成能量浪费和设备损失<sup>[5]</sup>(表 1)。

## 2 微酸性电解水

微酸性电解水是近几十年食品工业中最有前途的杀菌剂之一,具有广谱高效、绿色经济、安全无污染、保持

食品感官与营养品质等优点<sup>[22]</sup>。微酸性电解水的有效氯质量浓度(available chlorine concentration, ACC)、pH (5.0~6.5)和氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)是影响其杀菌效果的主要因素。自由基也被认为是微酸性电解水的杀菌成分,自由基产生的增加可提高微酸性电解水的抗菌效果<sup>[1]</sup>。

### 2.1 微酸性电解水的杀菌机制

微酸性电解水通过攻击微生物细胞的多个靶点(如细胞壁、细胞外膜和细胞内组分)而呈现杀菌特性。经微酸性电解水处理后,微生物细胞的表面形态由光滑、连续、明亮变为粗糙、皱缩甚至溶解<sup>[23]</sup>。与此同时,氯离子会攻击和破坏微生物细胞的保护屏障(细胞壁和细胞膜),从而增加细胞膜的通透性和细胞内化合物(K<sup>+</sup>、蛋白质和 DNA)的渗漏<sup>[24-25]</sup>。微酸性电解水通过膜扩散后,其中的次氯酸(HClO)和产生的自由基(如 O<sup>·</sup>、Cl<sup>·</sup>、OH<sup>·</sup>)不同程度地改变了正常细胞功能和细胞超微结构,诱导细胞坏死和凋亡,或转移到其他生理状态(如亚致死损伤和存活但不可培养状态)<sup>[1]</sup>。

### 2.2 微酸性电解水对微生物生长的影响

微酸性电解水对不同种类的微生物具有很强的抗菌活性,如大肠杆菌<sup>[24]</sup>、金黄色葡萄球菌<sup>[26]</sup>、沙门氏菌属<sup>[27]</sup>、副溶血弧菌<sup>[28]</sup>和蜡样芽孢杆菌等<sup>[27,29]</sup>。微酸性电解水 ACC 为 60 mg/L、处理时间为 5 min 时可以使大肠杆菌细胞膜通透性增强<sup>[24]</sup>。ACC 为 40 mg/L 的微酸性电解水在 30 s 和 1 min 内可使 2 种蜡状芽孢杆菌分别减少到检测极限以下<sup>[29]</sup>。此外,微酸性电解水对一些植物病原真菌也有一定的控制作用。微酸性电解水在 ACC 10 mg/L 下处理 15 min 或 ACC 30 mg/L 下处理 10 min 时,对灰葡萄孢菌的杀菌率可达 99.99%<sup>[30]</sup>。经过微酸性电解水处理后,灰葡萄孢菌、炭疽菌和辣椒疫霉的孢子无法培养<sup>[31]</sup>。因此,微酸性电解水具有很强的广谱抗细菌与真菌活性。

表 1 超声波在食品杀菌保鲜中的应用

Table 1 Application of ultrasonic in food sterilization and preservation

类别	作用对象	作用方式与条件	作用效果	参考文献
水果	草莓	30、60 W, 5、10 min	在贮藏 4 周时,灰霉病的发生率在 5%左右,比未经过超声波处理(-15%)的低约 10%	[17]
蔬菜	黄瓜和苦瓜汁	100 W, 50 /cm <sup>2</sup> , 7.0 min	4 °C 贮藏 7 d 时,黄瓜和苦瓜汁菌落总数分别为 4.42 和 3.70 log CFU/mL,显著低于未处理样品(8.77 和 8.67 log CFU/mL)	[15]
	鲜切大白菜	125.45 W/L, 40 kHz, 15 min	大肠杆菌和李斯特菌的对数减少预测值分别为 5.6 和 4.7 CFU/g,延长贮藏期 7 d	[19]
	鲜切生菜	23 W/L, 10 min	使菌落总数、霉菌和酵母数、大肠菌群数量分别降低 0.85、0.55 和 0.83 log CFU/g	[20]
粮油	花生奶	400 W, 3 min	酵母和霉菌总数的对数减少率为 0.9	[21]

### 2.3 微酸性电解水在食品杀菌保鲜中的应用

微酸性电解水已被用于新鲜水果、蔬菜、粮油和水产品等的杀菌保鲜中(表 2)。微酸性电解水能有效抑制草莓中匍枝根霉和灰葡萄孢菌的孢子萌发, 而抑制上述 2 种真菌孢子萌发所需 ACC 的不同可能是由于其细胞壁结构的不同所造成的<sup>[32]</sup>。微酸性电解水能有效降低莴苣中沙门氏菌数量, 但对其质构和风味均无影响<sup>[33]</sup>。微酸性电解水可使苜蓿中肠杆菌科细菌数量显著减少, 且对苜蓿芽品质无不良影响<sup>[34]</sup>。将微酸性电解水应用于糙米浸泡, 可以在不影响糙米品质的前提下减少微生物的数量, 甚至提高糙米的品质<sup>[35]</sup>。微酸性电解水可有效杀死鲜米线表面微生物, 延长其保鲜期<sup>[36]</sup>。微酸性电解水处理可延缓罗非鱼片在冷藏期间菌落总数、挥发性盐基氮、pH 的增加, 保持其鲜度, 并延长其货架期<sup>[37]</sup>。微酸性电解水在抑制或杀死食品中微生物、延长其保鲜期的同时, 还可以有效保持或改善食品品质。因此, 微酸性电解水在食品杀菌保鲜中具有广泛应用的潜力。

## 3 超声波与微酸性电解水协同处理

在某些情况下, 单独使用超声波处理不能达到理想的杀菌效果<sup>[38]</sup>。已有许多学者研究超声波与其他处理相结合防止微生物污染的方式, 如超声波和热处理结合<sup>[39]</sup>, 超声波和压力结合<sup>[21,40]</sup>, 超声波、热和压力结合<sup>[41]</sup>等。近期, 超声波和化学物质的协同组合也被证明对病原体具有良好的杀菌效果, 如微酸性电解水<sup>[28]</sup>、次氯酸钠<sup>[42]</sup>、醋酸和赤霉素<sup>[18]</sup>、二氧化氯<sup>[43]</sup>、油松提取物<sup>[44]</sup>、百里香精油纳米乳液<sup>[45]</sup>等。其中, 超声波与微酸性电解水协同处理因成本低廉、简便安全、快速有效等优点引起了广泛关注。

### 3.1 超声波与微酸性电解水协同处理的杀菌机制

超声波的机械效应、空化作用与化学效应可以导致微

生物细胞膜微裂纹的产生和细胞膜通透性的改变, 使微酸性电解水易于进入微生物细胞内部, 造成细胞内物质更多的渗漏, 有效地诱导细胞坏死或凋亡<sup>[7,46]</sup>, 从而发挥“1+1>2”的杀菌效果<sup>[47]</sup>。

### 3.2 超声波与微酸性电解水协同处理对微生物生长的影响

采用超声波单独处理(13.3 W/mL、10 min)仅使金黄色葡萄球菌减少 0.36 log CFU/mL, 微酸性电解水单独处理(ACC 30 mg/L、pH 6.1、ORP 893.5 mV)可使金黄色葡萄球菌减少 3.06 log CFU/mL, 而超声波与微酸性电解水协同处理可使其对数下降 3.68 log CFU/mL; 超声波单独处理后存活但不可培养状态细菌数量为 45.75%, 而超声波与微酸性电解水协同处理可使存活但不可培养状态细菌数量降至 0.07%; 与单独处理相比, 二者协同处理对金黄色葡萄球菌的外观和超微结构的损伤更大<sup>[48]</sup>。近期, LI 等<sup>[7]</sup>研究了超声波(300~500 W)和微酸性电解水(ACC 10~50 mg/L)协同处理对匍枝根霉生长的抑制作用, 发现超声波和微酸性电解水协同处理可显著抑制匍枝根霉的菌落直径和孢子萌发, 破坏细胞膜完整性, 导致核酸和蛋白质的渗漏, 造成线粒体膜电位的降低。超声波与微酸性电解水协同处理可对微生物造成更严重的损伤, 从而达到更好的杀菌效果。

### 3.3 超声波与微酸性电解水协同处理在食品杀菌保鲜中的应用

目前, 超声波与微酸性电解水协同处理逐渐被应用于不同食品的杀菌保鲜中, 如薯类、肉类和水产品等(表 3)。在近期研究中, 团队通过人工穿刺接种的方法将匍枝根霉接种到新鲜甘薯块根中并进行室温贮藏, 发现在贮藏

表 2 微酸性电解水在食品杀菌保鲜中的应用  
Table 2 Application of slightly acidic electrolyzed water in food sterilization and preservation

类别	作用对象	作用方式与条件	作用效果	参考文献
水果	草莓	ACC: 10~50 mg/L, ORP: 760 mV, pH 6.6, 7 min	ACC 分别为 10 和 50 mg/L 时, 可抑制匍枝根霉和灰霉菌的孢子萌发	[32]
蔬菜	莴苣	ACC: 50 mg/L, 45 s	使沙门氏菌数量减少 4 log CFU/g	[33]
	苜蓿	ACC: 35 mg/L, pH 6.0, 0.5 和 6 h	作用时间为 0.5 h 时, 肠杆菌科活菌数为 2.94 log CFU/g; 作用时间为 6 h 时, 肠杆菌科活菌未检出	[34]
粮油	糙米	ACC: 50、100 和 150 mg/L, 24 h	蜡样芽孢减少 1.6~3.3 log CFU/g	[35]
	鲜米线	ACC: 32 mg/L, 9 min	表面的减菌数量为 3.24 log CFU/g, 保鲜期可延长 16 h	[36]
水产品	罗非鱼片	pH 6.05, ACC: 31.39 mg/L, ORP: 900.63 mV, 10 min	货架期可延长 2~3 d	[37]

20 d 时, 超声波和微酸性电解水协同处理可使甘薯块根穿刺伤口处形成小的局部结痂, 说明其可有效控制甘薯块根中匍枝根霉的生长, 起到防治甘薯软腐病的作用<sup>[7]</sup>。CICHOSKI 等<sup>[49]</sup>指出超声波和微酸性电解水协同处理组合可有效减少鸡胸肉中肠杆菌、嗜温菌、乳酸菌和嗜冷菌数量, 但不影响其脂质和蛋白质氧化、剪切力、无氧糖酵解和肌纤维结构。PARK 等<sup>[50]</sup>研究发现与超声波或微酸性电解水单独处理相比, 超声波与微酸性电解水协同处理可显著减少鲜切鲱鱼片中大肠杆菌和副溶血性弧菌数量, 但不影响其感官品质。超声波与微酸性电解水组合处理表现出的协同增效作用, 有助于保证其对于食品的杀菌保鲜效果, 有助于扩大其在食品杀菌保鲜中的应用范围。

#### 4 结论与展望

超声波作为一种非热加工技术在微生物生长抑制方面具有良好的效果, 显示了其在食品杀菌保鲜中的潜在应用价值。微酸性电解水是食品工业中最有前途的微生物控制杀菌剂之一, 具有很强的广谱抗细菌与真菌活性。而超声波与微酸性电解水协同处理能够发挥“1+1>2”的杀菌效

果, 在食品杀菌保鲜中具有巨大的应用潜力。

然而, 目前超声波杀菌保鲜技术还不成熟, 在大规模推广应用中还面临许多挑战。首先, 缺乏超声波处理不同食品的相关标准和技术参数; 其次, 低强度下单独使用超声波时, 对于微生物的致死效果有限。微酸性电解水作为一种广谱高效的杀菌剂, 在食品杀菌保鲜方面的应用日益广泛。但是, 微酸性电解水的杀菌效果与有效氯质量浓度、处理时间、溶液温度等多种因素有关, 需要根据不同类型食品的特点来确定相关参数。同时, 超声波发生器、微酸性电解水发生装置的造价不高, 有利于工业化放大的实现, 可根据不同类型食品生产的要求及成本控制来选择超声波、微酸性电解水单独作用, 或超声波与微酸性电解水协同作用。此外, 为达到快速有效、绿色环保、食品品质改善等目的, 超声波与微酸性电解水协同处理与其他物理、化学、生物技术的结合, 将是食品杀菌保鲜技术的未来发展趋势。不同食品杀菌保鲜技术组合优化的基础研究与杀菌效果数据模型的建立, 有利于在保证食品安全的同时防止其对食品质量的不良影响, 同时有助于加快其产业化推广应用。

表 3 超声波与微酸性电解水协同处理在食品杀菌保鲜中的应用

类别	作用对象	作用方式与条件	作用效果	参考文献
薯类	甘薯	500 W, ACC: 50 mg/L, 55 °C	人工接种匍枝根霉甘薯块根的穿刺伤口处出现了小的局部结痂	[7]
肉类	鸡胸肉	230 W, 25 kHz, pH 6.0, ACC: 5 mg/L, ORP: 130~140 mV, 10 °C	嗜冷菌、乳酸菌和嗜温菌的减少率分别为 0.76、0.81 和 0.98 log CFU/g	[49]
水产品	鲱鱼	380 W, 37 kHz, ACC: 15 或 30 mg/L, 50 或 100 min	大肠杆菌和副溶血性弧菌数量分别减少 1.04~1.86 和 1.02~1.42 log CFU/mL	[50]

#### 参考文献

- ZHAO L, LI S, YANG H. Recent advances on research of electrolyzed water and its applications [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2021, 41: 180–188.
- LOPEZ-GALVEZ F, ALLENDE A, GIL M. Recent progress on the management of the industrial washing of fresh produce with a focus on microbiological risks [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2021, 38: 46–51.
- 周大鹏, 蓝蔚青, 莫雅娟, 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/OL]. *食品科学*, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=SPKX2021040200S&v=3RABDEYpQvnmzB5QUrNvXtLe1qgiddXRviOuLz35vCvf5hDbi1Q2KsshW5X6xySL>
- ZHOU DP, LAN WQ, MO YX, *et al.* Effects of ultrasonic combined with slightly acidic electrolyzed water treatment on quality effects of ultrasonic combined with slightly acidic electrolyzed water treatment on quality [J]. *Food Sci*, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=SPKX2021040200S&v=3RABDEYpQvnmzB5QUrNvXtLe1qgiddXRviOuLz35vCvf5hDbi1Q2KsshW5X6xySL>
- PAGNOSSA JP, ROCCHETTI G, RIBEIRO AC, *et al.* Ultrasound: Beneficial biotechnological aspects on microorganisms-mediated processes [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2020, 31: 24–30.
- DUAN B, SHAO X, HAN Y, *et al.* Mechanism and application of ultrasound-enhanced bacteriostasis [J]. *J Clean Prod*, 2021, 290: 125750.
- 曹泽钰. 微酸性电解水在食品安全领域的应用研究进展 [J]. *中国消毒学杂志*, 2020, 37: 229–232.
- CAO ZY. Research progress on the application of slightly acidic electrolyzed water in the field of food safety [J]. *Chin J Disinfect*, 2020, 37: 229–232.
- LI L, MU TH, ZHANG M. Contribution of ultrasound and slightly acid electrolytic water combination on inactivating rhizopus stolonifer in sweet potato [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, (1): 105528.
- MISRA N, KOUBAA M, ROOHINEJAD S, *et al.* Landmarks in the historical development of twenty first century food processing

- technologies [J]. *Food Res Int*, 2017, 97: 318–339.
- [9] MOHAMMADI V, GHASEMI-VARNAMKHAZI M, GONZ LEZ LA. Analytical measurements of ultrasound propagation in dairy products: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2017, 61: 38–48.
- [10] SINGLA M, SIT N. Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 73(6): 105506.
- [11] CARRILLO-LOPEZ LM, GARCIA-GALICIA IA, TIRADO-GALLEGOS JM, *et al*. Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 73(1751): 105467.
- [12] HUANG G, CHEN S, DAI C, *et al*. Effects of ultrasound on microbial growth and enzyme activity [J]. *Ultrason Sonochem*, 2017, 37: 144–149.
- [13] ALARCON-ROJO AD, CARRILLO-LOPEZ LM, REYES-VILLAGRANA R, *et al*. Ultrasound and meat quality: A review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 55: 369–382.
- [14] GALLO M, FERRARA L, NAVIGLIO D. Application of ultrasound in food science and technology: A perspective [J]. *Foods*, 2018, 7: 164.
- [15] LIN L, WANG X, LI C, *et al*. Inactivation mechanism of *E. coli* O157: H7 under ultrasonic sterilization [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 59: 104751.
- [16] LIAO X, LI J, SUO Y, *et al*. Multiple action sites of ultrasound on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. *Food Sci Human Well*, 2018, 7: 102–109.
- [17] ADAY MS, TEMIZKAN R, BUYUKCAN MB, *et al*. An innovative technique for extending shelf life of strawberry: Ultrasound [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2013, 52: 93–101.
- [18] WANG J, FAN L. Effect of ultrasound treatment on microbial inhibition and quality maintenance of green asparagus during cold storage [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 58: 104631.
- [19] ALENYOREGE EA, MA H, AHETO JH, *et al*. Response surface methodology centred optimization of mono-frequency ultrasound reduction of bacteria in fresh-cut Chinese cabbage and its effect on quality [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2020, 122: 108991.
- [20] FAN K, ZHANG M, BHANDARI B, *et al*. A combination treatment of ultrasound and  $\epsilon$ -polylysine to improve microorganisms and storage quality of fresh-cut lettuce [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 113: 108315.
- [21] SALVE AR, PEGU K, ARYA SS. Comparative assessment of high-intensity ultrasound and hydrodynamic cavitation processing on physico-chemical properties and microbial inactivation of peanut milk [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 59: 104728.
- [22] 戚铭, 罗自生, 王蕾, 等. 微酸性电解水在食品保鲜消毒领域的应用 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(12): 3795–3802.
- QI M, LUO ZS, WANG L, *et al*. Application of slightly acidic electrolyzed water in food preservation and disinfection [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(12): 3795–3802.
- [23] CHENG X, TIAN Y, ZHAO C, *et al*. Bactericidal effect of strong acid electrolyzed water against flow enterococcus faecalis biofilms [J]. *J Endod*, 2016, 42: 1120–1125.
- [24] YE Z, WANG S, CHEN T, *et al*. Inactivation mechanism of *Escherichia coli* induced by slightly acidic electrolyzed water [J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 1–10.
- [25] LI S, HUANG L, KE C, *et al*. Pathway dissection, regulation, engineering and application: Lessons learned from biobutanol production by solventogenic clostridia [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2020, 13: 1–25.
- [26] LIAO X, XUAN X, LI J, *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.
- [27] KIM HJ, TANGO CN, CHELLIAH R, *et al*. Sanitization efficacy of slightly acidic electrolyzed water against pure cultures of *Escherichia coli*, *Salmonella enterica*, *Typhimurium*, *Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus* spores, in comparison with different water hardness [J]. *Sci Rep*, 2019, 9: 1–14.
- [28] CHEN TY, KUO SH, CHEN ST, *et al*. Differential proteomics to explore the inhibitory effects of acidic, slightly acidic electrolysed water and sodium hypochlorite solution on *Vibrio parahaemolyticus* [J]. *Food Chem*, 2016, 194: 529–537.
- [29] HUSSAIN MS, TANGO CN, OH DH. Inactivation kinetics of slightly acidic electrolyzed water combined with benzalkonium chloride and mild heat treatment on vegetative cells, spores, and biofilms of *Bacillus cereus* [J]. *Food Res Int*, 2019, 116: 157–167.
- [30] 南松剑, 黄晓伶, 王朔, 等. 微酸性电解水对灰葡萄孢菌杀菌效果与作用机制研究 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50: 361–365, 389.
- NAN SJ, HUANG XL, WANG S, *et al*. Investigation on microbicidal potential and action mechanism for botrytis cinerea of slightly acidic electrolyzed water [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2019, 50: 361–365, 389.
- [31] SONG JY, KIM N, NAM MH, *et al*. Fungicidal effect of slightly acidic hypochlorous water against phytopathogenic fungi [J]. *Korean J Mycol*, 2013, 41: 274–279.
- [32] GUERRA-SIERRA BE, SANDOVAL-MEZA AX, GARC A-SANCH ZLT. Antifungal activity of acidic electrolyzed water against strawberry postharvest molds (*Fragaria x ananassa* Duch cv. *Camarosa*) [J]. *Acta Agronómica*, 2019, 68: 126–133.
- [33] CAP M, ROJAS D, FERNANDEZ M, *et al*. Effectiveness of short exposure times to electrolyzed water in reducing *Salmonella* spp and Imidacloprid in lettuce [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2020, 128: 109496.
- [34] ZHANG C, ZHAO Z, YANG G, *et al*. Effect of slightly acidic electrolyzed water on natural Enterobacteriaceae reduction and seed germination in the production of alfalfa sprouts [J]. *Food Microbiol*, 2021, 97: 103414.
- [35] ZHANG C, XIA X, LI B, *et al*. Disinfection efficacy of electrolyzed oxidizing water on brown rice soaking and germination [J]. *Food Control*, 2018, 89: 38–45.
- [36] 刘培红, 陈艾, 高晴, 等. 微酸性电解水对鲜米线杀菌及保鲜效果的研究 [J]. *食品工业*, 2018, 39: 164–168.
- LIU PH, CHEN A, GAO Q, *et al*. Study on sterilization and preservation of fresh rice noodles with slightly acidic electrolyzed water [J]. *Food Ind*, 2018, 39: 164–168.
- [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: 213–218.
- CEN JW, YU FT, YANG XQ, *et al*. Study on the preservation of *Tilapia* fillets with slightly acidic electrolyzed water [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45: 213–218.
- [38] WANG W, MA X, ZOU M, *et al*. Effects of ultrasound on spoilage microorganisms, quality, and antioxidant capacity of postharvest cherry

- tomatoes [J]. *J Food Sci*, 2015, 80: C2117–C2126.
- [39] ANSARI JA, ISMAIL M, FARID M. Investigation of the use of ultrasonication followed by heat for spore inactivation [J]. *Food Bioprod Proc*, 2017, 104: 32–39.
- [40] YILDIZ S, POKHREL PR, UNLUTURK S, *et al.* Shelf life extension of strawberry juice by equivalent ultrasound, high pressure, and pulsed electric fields processes [J]. *Food Res Int*, 2021, 140: 110040.
- [41] ZHU J, WANG Y, LI X, *et al.* Combined effect of ultrasound, heat, and pressure on *Escherichia coli* O157: H7, polyphenol oxidase activity, and anthocyanins in blueberry (*Vaccinium corymbosum*) juice [J]. *Ultrason Sonochem*, 2017, 37: 251–259.
- [42] ALENYOREGE EA, MA H, AYIM I, *et al.* Efficacy of sweep ultrasound on natural microbiota reduction and quality preservation of Chinese cabbage during storage [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 59: 104712.
- [43] MU Y, FENG Y, WEI L, *et al.* Combined effects of ultrasound and aqueous chlorine dioxide treatments on nitrate content during storage and postharvest storage quality of spinach (*Spinacia oleracea* L.) [J]. *Food Chem*, 2020, 333: 127500.
- [44] QIAO L, GAO M, ZHENG J, *et al.* Novel browning alleviation technology for fresh-cut products: Preservation effect of the combination of *Sonchus oleraceus* L. extract and ultrasound in fresh-cut potatoes [J]. *Food Chem*, 2021, 348: 129132.
- [45] GUO M, ZHANG L, HE Q, *et al.* Synergistic antibacterial effects of ultrasound and thyme essential oils nanoemulsion against *Escherichia coli* O157: H7 [J]. *Ultrason Sonochem*, 2020, 66: 104988.
- [46] WU S, NIE Y, ZHAO J, *et al.* The synergistic effects of low-concentration acidic electrolyzed water and ultrasound on the storage quality of fresh-sliced button mushrooms [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2018, 11: 314–323.
- [47] 和劲松. 微酸性电解水在食品加工中的应用技术研究[C]. 中国食品科学技术学会年会, 2018.
- HE JS. Research on application technology of slightly acidic electrolyzed water in food processing [C]. Annual Meeting of China Society of Food Science and Technology, 2018.
- [48] LI J, DING T, LIAO X, *et al.* Synergetic effects of ultrasound and slightly acidic electrolyzed water against *Staphylococcus aureus* evaluated by flow cytometry and electron microscopy [J]. *Ultrason Sonochem*, 2017, 38: 711–719.
- [49] CICHOSKI AJ, FLORES DRM, DE MENEZES CR, *et al.* Ultrasound and slightly acid electrolyzed water application: An efficient combination to reduce the bacterial counts of chicken breast during pre-chilling [J]. *Int J Food Microbiol*, 2019, 301: 27–33.
- [50] PARK SY, HA SD. Reduction of *Escherichia coli* and *Vibrio parahaemolyticus* counts on freshly sliced shad (*Konosirus punctatus*) by combined treatment of slightly acidic electrolyzed water and ultrasound using response surface methodology [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2015, 8: 1762–1770.

(责任编辑: 王欣郑丽)

## 作者简介



马江林, 硕士研究生, 主要研究方向为应用社会学和食品化学与营养。  
E-mail: max666@vip.qq.com



木泰华, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品化学与营养。  
E-mail: mutaihua@126.com