

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240229007

超声波与过氧乙酸的杀菌机制及在食品保鲜中的应用进展

刘广琛, 孙红男*, 张 苗*, 木泰华

(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: 果蔬、肉类、水产品等食品中微生物的生长繁殖会引起食品腐败变质, 引发食品安全问题, 造成经济损失与食物浪费。超声波作为一种绿色环保的非热加工技术, 可利用空化效应消灭微生物。过氧乙酸是一种环境友好型的清洗剂, 可作为含氯清洗剂的良好替代物。超声波与过氧乙酸均为环境友好型保鲜方式, 二者联合使用在食品保鲜中具有巨大的应用潜力。本文对超声波、过氧乙酸单独使用或者二者联合处理的杀菌机制、微生物生长的抑制作用、及在食品保鲜中的应用进行综述, 并展望了未来的发展趋势, 以期为新型绿色环保保鲜技术的创建与应用提供参考。

关键词: 超声波; 过氧乙酸; 杀菌; 保鲜; 应用

Sterilization mechanism of ultrasound and peracetic acid and their application progress in food preservation

LIU Guang-Chen, SUN Hong-Nan*, ZHANG Miao*, MU Tai-Hua

(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 growth and reproduction of microorganisms in fruits, vegetables, meat, aquatic products and other foods can cause food spoilage, leading to food safety issues, economic losses, and food waste. Ultrasound, as a green and environmentally friendly non-thermal processing technology, can utilize cavitation effects to eliminate microorganisms. Peracetic acid is an environmentally friendly cleaning agent that can be used as a good substitute for chlorine containing cleaning agents. Both ultrasound and peracetic acid are environmentally friendly preservation methods, and their combined processing has great potential in food preservation. This paper, review the sterilization mechanism, inhibitory effect on microbial growth, and application in food preservation of ultrasound and peracetic acid alone or combination, and prospect the future development trends, thus to provide reference for the creation and application of novel green and environmentally friendly preservation technologies.

基金项目: 国家甘薯产业技术体系项目(CARS-10)、中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-202X-IFST)

Fund: Supported by the Earmarked Fund for Sweet Potato (CARS-10), and the Science and Technology Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ASTIP-202X-IFST)

*通信作者: 孙红男, 博士, 研究员, 主要研究方向为薯类加工、食品化学与营养。E-mail: sunhongnan@caas.cn

张 苗, 博士, 副研究员, 主要研究方向为薯类加工、食品化学与营养。E-mail: zhangmiao@caas.cn

*Corresponding author: SUN Hong-Nan, Ph.D, Professor, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, No. 2 Yuan Ming Yuan West Road, Haidian, Beijing 100193, China. E-mail: sunhongnan@caas.cn

ZHANG Miao, Ph.D, Associate Professor, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, No. 2 Yuan Ming Yuan West Road, Haidian, Beijing 100193, China. E-mail: zhangmiao@caas.cn

KEY WORDS: ultrasound; peracetic acid; sterilization; preservation; application

0 引言

果蔬、肉类、水产品等食品中微生物的生长繁殖会引起食品腐败变质,引发食品安全问题,造成经济损失与食物浪费。食品微生物腐败一直是食品安全领域的热点问题。目前,许多商业杀菌剂已被用于食品加工行业中,如氯气、二氧化氯、季铵化合物等^[1]。然而,上述杀菌剂可对人体产生刺激性及毒性、导致空气污染、破坏水生系统平衡、对食品品质产生不利影响等。因此,研发安全、环保、高效的食品杀菌保鲜方式引起了广泛关注^[2]。

超声波是一种非热处理技术,其频率通常高于人类能够听到的上限(20 kHz),范围在 20 kHz~2 MHz,其中 20~100 kHz 为低频超声波,当频率>100 kHz 时为高频超声波^[3]。高频超声使用低水平功率,对食品原料和参与反应的介质没有影响或影响有限;而低频超声使用更高功率水平时,可以给各种生物进程施加工理想的物理和化学变化^[4],使用后无残留,且仪器设备较为简单,广泛应用于食品工业领域。

过氧乙酸是一种无色、有刺激性气味、易挥发的液体,由醋酸和过氧化氢反应生成的弱有机酸,是一种强氧化剂,可作为漂白剂、消毒剂和清洁剂等来使用,同时可作为氯的替代品^[5],广泛应用于医疗器械和食品工业器具消毒。我国 GB/T 26371—2020《过氧化物类消毒液卫生要求》中规定了过氧乙酸的使用方法,但并没有限量要求。美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)允许过氧乙酸在含量不超过 80 mg/L 时,可间接作为食品添加剂^[6];且当过氧乙酸残留量不超过 80 mg/L 时,在处理后就不需要再用水清洗^[7]。过氧乙酸使用安全^[8],用于食品清洗与保鲜具有绿色、无残留的优点,具有广阔的应用前景。

本文综述了超声波、过氧乙酸单独使用或者二者联合处理的灭菌机制、对微生物生长的抑制作用、及在食品保鲜中应用的研究进展,并展望了未来的发展趋势,旨在为新型绿色环保保鲜技术的创建与应用提供参考。

1 超声波

1.1 超声波的灭菌机制

超声波的灭菌机制包括空化以及空化引起的一系列特殊效应,如机械效应、热效应和化学效应^[9-11]。液体介质中的微气泡会在超声波的作用下振动(图 1)。当超声波能量足够高时(通常为 25~50 kHz)^[9],会出现超声空化现象,即液体介质中的微气泡(空化核)会在超声作用下振动膨胀,不断聚集声场的能量^[10]。当能量达到一定阈值时,空化气

泡会迅速坍塌和破裂,整个过程约为 0.1 μ s,可以释放巨大的能量并产生 110 m/s 微射流,碰撞密度可达 1.5 kg/cm²。而空化对微生物细胞结构的一系列强烈物理和化学影响被认为是超声杀菌的主要原因^[11]。

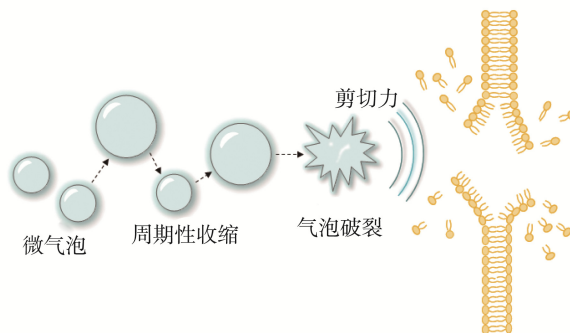


图1 超声波的灭菌机制

Fig.1 Sterilization mechanism of ultrasound

1.2 超声波对微生物生长的抑制作用

超声波对微生物生长的抑制作用与超声功率、频率和作用时间等超声波处理条件有关,其可作用于多种微生物,包括大肠杆菌、沙门氏菌、李斯特菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌等(表 1)。超声波处理能够破坏大肠杆菌细胞膜完整性,增加其细胞膜通透性^[12-14]。高强度超声波处理使肠炎沙门氏菌的部分细胞保持完整性,但会使其鞭毛缺失且细胞壁发生形变^[15]。超声波空化作用可引起鼠伤寒沙门氏菌的累积损伤及失活^[16]。超声波处理可灭活李斯特菌,使其数量减少^[17]。超声波处理也可使金黄色葡萄球菌细胞膜膨胀,并使其细胞边界变得模糊^[18]。同时,超声波破坏枯草芽孢杆菌细胞膜结构使其细胞内容物泄露,从而抑制其生长,并可导致其细胞内三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)含量的降低^[19]。

1.3 超声波在食品保鲜中的应用

超声波技术具有清洁、耗能低的优点,在食品保鲜中有着广泛应用(表 2)。

在果蔬保鲜方面,超声波处理可显著减少草莓上细菌、酵母菌和霉菌的数量,同时可以保持草莓的硬度,并提高其抗氧化活性^[20];同样地,经超声波处理的草莓,其嗜温需氧菌、霉菌和酵母菌的数量显著降低,但其品质并没有发生显著变化^[21]。超声波处理使蓝莓表面李斯特菌的数量减少,但对蓝莓的色泽与质地无显著影响^[22]。超声波处理能够降低番茄上嗜温菌的数量,且不影响番茄的硬度^[23]。超声波清洗可使生菜表面的大肠杆菌数量显著降低,但不影响生菜的品质^[24]。超声波处理能够显著降低冰

表 1 超声波对微生物生长的抑制效果
Table 1 Inhibitory effects of ultrasound on microbial growth

微生物	超声波处理条件	作用效果	参考文献
大肠杆菌	1500 W、20 kHz、振幅 90%、5 min	可对仙人掌汁中大肠杆菌进行灭活，使其在 2 d 内处于检出限以下	[12]
大肠杆菌 O157:H7	10 W/cm ² 、4 min	可对大肠杆菌 O157:H7 进行完全灭活	[13]
大肠杆菌 ATCC 11755	400 W、24 kHz，在 50℃处理 10 min，在 54 和 58℃处理 2 min	在 50℃条件下，使胡萝卜汁中大肠杆菌减少 3.5 log CFU/mL；在 54 和 58℃条件下，减少 5 log CFU/mL	[14]
肠炎沙门氏菌	20 kHz、振幅 80%、10 min	使生鸡蛋中肠炎沙门氏菌减少 3.6 log CFU/mL	[15]
鼠伤寒沙门氏菌	130 W、20 kHz、30 min	接种在猪肉上的沙门氏菌，在 30 min 减少了 3.25 log CFU/g	[16]
单核细胞增生李斯特菌	200 W、45 kHz、5 min	经处理鲑鱼片表面单核细胞增生李斯特菌，发现减少了 0.35 log CFU/g	[17]
金黄色葡萄糖球菌	60 kHz、430 kHz 和 1.12 MHz 下处理 2 min	经处理的金黄色葡萄糖球菌的灭活效率分别为 5.05、4.55 和 4.86 log CFU/mL	[18]
枯草芽孢杆菌	360 W、25 min	经处理的枯草芽孢杆菌细胞的数量减少了约 1.54 log CFU/mL	[19]

表 2 超声波在食品保鲜中的应用
Table 2 Application of ultrasound in food preservation

类别	作用对象	作用条件	作用效果	参考文献
果蔬	草莓	60 W、33 kHz	细菌计数从 5.91 下降到 3.91 log CFU/g，酵母和霉菌数量从 4.80 减少到 3.58 log CFU/g	[20]
	草莓	350 W、40 kHz、10 min	嗜温需氧菌降低了 0.66 log CFU/g；霉菌和酵母降低了 0.54 log CFU/g	[21]
	蓝莓	500 W、20 kHz、10 min	李斯特菌减少了 2.7 log CFU/g	[22]
	番茄	功率水平 10%~100%、45 kHz	在功率水平 80%、作用时间 15 min 时，嗜温菌数量降至 2.55 log CFU/g；在功率水平 100%、作用时间 19 min 时，嗜温菌数量降至 2.95 log CFU/g	[23]
	生菜	240 W、40 kHz	使生菜表面的大肠杆菌降低了 0.85 log CFU/g	[24]
	冰山莴苣	280 W/L、20 kHz、53 min	莴苣表面大肠杆菌 O157:H7 减少了 4.39 log CFU/mL	[25]
	罗马莴苣	30 W/L、37 kHz、30 min	大肠杆菌减少了 2.3 log CFU/g，金黄色葡萄糖球菌减少了 1.71 log CFU/g，肠炎沙门氏菌减少了 5.72 log CFU/g，李斯特菌减少了 1.88 log CFU/g	[26]
	莴苣	100 W、42 kHz、10 min	大肠杆菌 O157:H7 减少了 2.61 log CFU/cm ² ，李斯特菌减少了 2.23 log CFU/cm ² ，荧光假单胞菌减少了 1.1 log CFU/cm ²	[27]
	红辣椒	120 W、35 kHz、2 min、15 C	李斯特菌减少了 1.98 log CFU/g	[28]
	大白菜	125.45 W/L、40 kHz、15 min	大肠杆菌减少了 5.6 log CFU/g，李斯特菌减少了 4.7 log CFU/g	[29]
食用菌	花椰菜	50 W/L、20 kHz、5 min	嗜温需氧菌减少了 0.51 log CFU/g；霉菌和酵母减少了 0.52 log CFU/g；大肠菌群减少了 0.6 log CFU/g	[30]
	芦笋	40 KHz、360 W、10 min	US+赤霉素处理表现出较低的失重、较高的总可溶性固形物、抗坏血酸、叶绿素含量和总酚含量，以及保持较好的感官特性	[31]
	松露	35 kHz、10 min、4℃	嗜温需氧菌减少了 1 log CFU/g；假单胞菌减少了 1.6 log CFU/g；肠杆菌科减少了 1.5 log CFU/g；乳酸菌减少了 0.9 log CFU/g	[32]
	白蘑菇	20 KHz、400 W	降低 PPO 活性，增强抗氧化活性，改善白蘑菇在货架期内的颜色	[33]
	薯类	甘薯 40 kHz、10 min	US 处理可以降低鲜切甘薯的 PPO 和 POD 活性，同时提高其总抗氧化能力，从而抑制其褐变	[34]
肉类	羊肉	400 W、50 kHz、15 min	使金黄色葡萄糖菌游离细胞菌落数降低了 0.31 log CFU/g	[35]
	牛肉	20.96 W/cm ² 、120 min	使大肠杆菌 O157:H7 和蜡芽芽孢杆菌的菌落数减少了 40%	[36]
	猪肉	20 kHz 下处理 10、20 和 30 min	鼠伤寒沙门氏菌和大肠杆菌分别减少 1~4.3 和 1~4.6 log CFU/g	[37]
蛋类	鹌鹑蛋	35 kHz、15 min	需氧微生物、大肠菌群、沙门氏菌属、葡萄球菌属和霉菌酵母菌分别减少多达 20.7%、59.9%、58.12%、61.60%和 47.95%	[38]
	鸡蛋	140 W、35 kHz、30 min	可使受污染鸡蛋中的大肠杆菌被完全消除	[39]
水产品	海鲈鱼	600 W、20 kHz、5~20 min	当处理时间为 10 和 20 min 时，在贮藏 8 d 内可使菌落总数低于 7 log CFU/g；在贮藏 10 d 内可保持其总挥发性盐基氮在合格范围(≤30 mg/100 g)	[40]
	鲑鱼	51 W/L、30 kHz	嗜冷细菌和嗜温细菌分别降低了 1.5 和 1.1 log CFU/g	[41]

山莴苣表面大肠杆菌 O157:H7 的数量^[25];使用超声波处理罗马莴苣可以减少其表面大肠杆菌、金黄色葡萄糖球菌、肠炎沙门氏菌和李斯特菌的数量,但对其外观和质地没有显著影响^[26];同样地,超声波处理还可以减少莴苣表面荧光假单胞菌的数量^[27]。超声波处理能够降低红辣椒表面李斯特菌的数量,但不影响红辣椒本身的硬度^[28]。超声波处理的大白菜表面大肠杆菌及李斯特菌的数量降低,保质期得以延长^[29]。花椰菜经超声波处理后,其表面微生物的增殖得到延缓,并且其贮藏品质得到了保持^[30]。此外,经超声波处理的松露表面肠杆菌、假单胞菌等的数量降低,但松露的感官品质没有受到影响,且保质期得到有效延长^[31]。与此同时,超声波处理还会影响果蔬、食用菌、薯类等的生理生化指标,例如,当超声波作用于芦笋^[32]、白蘑菇^[33]和甘薯^[34]等时,会影响其多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)的活性以及失重率等。可以看出,超声波处理可以在不影响或改善果蔬品质的基础,减少果蔬中病原微生物的生长,使其保质期得到有效延长。

在肉类保鲜方面,超声波处理能够显著控制羊肉上金黄色葡萄球菌的生长,降低胞外多糖的含量,破坏生物膜胞外基质,并使菌体表面出现褶皱^[22]。在使用超声波处理牛肉时,牛肉表面的大肠杆菌 O157:H7 和蜡样芽孢杆菌细胞膜完整性被破坏,形成了细胞碎片^[23]。超声波处理降低了猪肉表面鼠伤寒沙门氏菌和大肠杆菌的发生率^[24]。

在处理蛋类产品方面,超声波处理使鹌鹑蛋的多种有害菌数量显著降低^[25]。经过超声波处理的鸡蛋的蛋壳强度、蛋白高度和蛋黄高度显著增加,而蛋壳上的大肠杆菌数量显著减少^[26]。

在水产品保鲜方面,超声波处理减缓了海鲈鱼菌落总数的增长,延长了海鲈鱼的货架期,并提高了鱼肉嫩度^[27]。超声波处理降低了鲑鱼表面嗜冷细菌与嗜温细菌的数量,并降低了鲑鱼的总脂质含量^[28]。然而,超声波单独作用的杀菌效果有限,因此可以和其他杀菌保鲜方式结合使用,以提高作用效果^[29]。

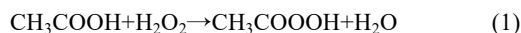
由上述报道可以看出,在一定条件下进行超声波处理能够减少食品中病原微生物的生长,并能够在不影响食品品质的前提下延长其保质期,在某些条件下还可使食品的品质得到改善。此外,通过对超声波在食品保鲜中应用时的作用条件及其作用效果进行比较可以看出,超声波在果蔬、食用菌、薯类、肉类、蛋类及水产品中应用时功率范围多在 60~500 W 之间,处理时间大多在 5~30 min (表 2),说明一定功率和时间超声波处理对不同食品保鲜均有一定的抑菌效果。然而,超声波处理在牛肉中应用时处理时间长达 120 min,说明超声波对于不同食品保鲜的有效作用条件有所不同,且作用效果有限。同时,超声波处理达不到完全杀灭食品中病原微生物的目的(表 2),因

此需要通过不同抑菌方式的联合作用,从而达到理想的抑菌效果。

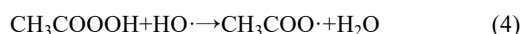
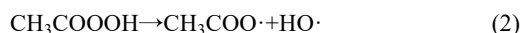
2 过氧乙酸

2.1 过氧乙酸的灭菌机制

过氧乙酸的化学式为 CH_3COOOH ,是由乙酸和过氧化氢混合反应产生的。具体反应式如(1)所示。



过氧乙酸灭菌主要依靠自由基的氧化作用^[42]。过氧乙酸会破坏蛋白质和酶等其他物质中的-SH、S-S 和双键等,从而导致脂蛋白细胞膜的化学渗透功能破坏,细胞内的过氧化物酶和过氧化氢酶失活,蛋白质、酶和其他代谢物中的敏感巯基和二硫键被氧化,与双键发生反应,造成 DNA 损伤^[43]。过氧乙酸的自由基反应式如(2)~(8)所示。



每个反应中产生的自由基都会参加氧化反应,其中 $\text{HO}\cdot$ 和 $\text{CH}_3\text{COO}\cdot$ 最为重要^[44]。此外,过氧乙酸分子中的有机部分可能有助于其渗透微生物的细胞膜^[45],从而达到更好的杀菌效果。

2.2 过氧乙酸对微生物生长的抑制作用

过氧乙酸通过氧化作用破坏细胞膜与胞内物质,以达到杀菌效果。过氧乙酸可以作用于多种微生物(表 3)。经过过氧乙酸处理的大肠杆菌,其细菌形态发生了显著变化,细胞壁和细胞膜无法维持原有形态,胞内物质流出^[46]。过氧乙酸处理大肠杆菌 O157:H7 可以完全抑制其生物膜的形成,并降低其代谢活性^[47];同样地,过氧乙酸处理可显著降低牛肉表面大肠杆菌 O157:H7 的数量^[48]。过氧乙酸可以去除金黄色葡萄球菌的黏附性,并使其细胞膜受损^[49]。过氧乙酸可以破坏细胞壁的二硫键,使沙门氏菌表面的黏附性降低,从而减少鸡胸肉表面的沙门氏菌^[50]。过氧乙酸作用于白色念珠菌^[51]时,可破坏白色念珠菌的细胞膜渗透性,并造成其 DNA 损伤。过氧乙酸作用于褐腐菌^[52]时,能够减少李果实褐腐病的发病率,并可显著减小发病后病斑的大小。过氧乙酸作用于单核细胞增生李斯特菌时,可以减少红芥菜和羽衣甘蓝叶片上李斯特菌的数量^[53]。过氧乙酸可以抑制青霉菌和灰霉菌在培养基中的纵向生长^[54]。

2.3 过氧乙酸在食品保鲜中的应用

过氧乙酸广泛应用于果蔬、肉类及水产品保鲜中(表4)。在果蔬保鲜方面,过氧乙酸可显著降低鲜切胡萝卜、白甘蓝和冰山生菜表面的微生物数量^[55]。同样地,使用过氧乙酸处理可以显著降低色拉生菜表面的菌落总数与大肠菌群数量^[56]。过氧乙酸处理可显著降低韭黄的失重率和菌落总数,延缓韭黄感官品质的下降,并延长其货架

期^[57]。与次氯酸钠相比,过氧乙酸可降低番茄、甜椒和黄瓜感染病菌的比例,且不影响其口感^[58]。过氧乙酸预处理还可以保持茄子的营养价值,并延长其保质期^[59]。此外,与含氯清洗剂相比,过氧乙酸在鲜切果蔬清洗过程中可避免氯化消毒副产物(disinfection by-products, DBP)的形成,从而避免氯污染的潜在风险以及洗涤废水对环境的影响^[60]。

表 3 过氧乙酸对微生物生长的抑制效果
Table 3 Inhibitory effects of peracetic acid on microbial growth

微生物	过氧乙酸处理条件	作用效果	参考文献
大肠杆菌	20 μmol/L 过氧乙酸, 处理 10 min	对大肠杆菌的对数去除率在 7.8 log CFU/mL	[46]
大肠杆菌 O157:H7	0.005%过氧乙酸	完全抑制了大肠杆菌 O157:H7 生物膜的形成, 并且使生物膜代谢活性降低达 43.49%	[47]
	400 mg/L 过氧乙酸喷洒	大肠杆菌 O157:H7 减少了 0.5 log CFU/mL	[48]
金黄色葡萄球菌	0.5%过氧乙酸, 处理 120 s	在处理 120 s 后灭活率达到 100%	[49]
沙门氏菌	200 和 400 mg/L 过氧乙酸喷洒	使沙门氏菌在鸡胸肉表面减少了 0.46 log CFU/mL	[50]
白色念珠菌	200 mg/L 过氧乙酸, 处理 1 min	平均杀灭对数值>5.00	[51]
褐腐菌	0.018%~0.360%过氧乙酸, 处理 1~30 min	对褐腐菌孢子的抑制率达 99.9%以上	[52]
单核细胞增生李斯特菌	80 mg/L 过氧乙酸, 处理 4 min	红芥菜和羽衣甘蓝叶片上的单核细胞增生李斯特菌种群分别减少了 1.09 和 1.11 log CFU/mL	[53]
青霉菌	750 mg/L 过氧乙酸, 处理 5 min	完全抑制了青霉菌的生长	[54]
灰酶菌	450 mg/L 过氧乙酸, 处理 5 min	对灰酶菌的抑制率达到了 93%	[54]

表 4 过氧乙酸在食品保鲜中的应用
Table 4 Application of peracetic acid in food preservation

类别	作用对象	过氧乙酸作用条件	作用效果	参考文献
果蔬	胡萝卜、白甘蓝和冰山生菜	0.0025%、0.0080%、0.015%和 0.025% 过氧乙酸, 浸泡 1~10 min	胡萝卜和白甘蓝的微生物减少量最高(分别为 0.5~3.5 和 0.5~3.5 log CFU/g), 其次是冰山生菜(0.4~2.4 log CFU/g)	[55]
	色拉生菜	100 mg/L 过氧乙酸, 浸泡 5 min	表面菌落总数降低了 1.7 log CFU/g, 大肠菌群数量降低了 1 log CFU/g	[56]
	韭黄	100 mg/L 过氧乙酸, 清洗 2 min	经处理的韭黄在贮藏 7 d 后对比清水冲洗菌落数降低了 1.85 log CFU/g	[57]
	番茄、甜椒和黄瓜	550 mg/L 过氧乙酸, 清洗 1 min	处理后贮藏 25 d, 未受感染率比次氯酸钠处理组高 25%, 比未处理组高 40%	[58]
	茄子	60 mg/L 过氧乙酸预处理	经过预处理的茄子失重率较低, 在 28 d 的贮藏过程中具有稳定的硬度, 并且保持了内部的总可溶性固体	[59]
	冰山茼蒿	80 mg/L 过氧乙酸	可以防止洗涤过程中微生物的交叉感染, 降低了 7.5 log CFU/100 mL 的微生物	[60]
肉类	鸡翅	550 mg/L 过氧乙酸, 旋转包装袋中浸泡 5 s, 或在 69~83 kPa 压力下喷洒	使病原菌减少了 0.9 log CFU/mL, 喷洒处理是使病原菌减少了 0.9 log CFU/mL	[61]
	鸡胸肉	100、400、500 或 1000 mg/L 过氧乙酸, 浸泡 4~30 s 或喷洒 5~10 s	在 1000 mg/L 过氧乙酸溶液中浸泡 30 s, 可使沙门氏菌和弯曲杆菌的数量分别减少 1.92 和 1.87 log CFU/mL	[62]
水产品	小龙虾	0.3%过氧乙酸	经处理后 24 d 仍然可保持低于可使用菌落上限	[63]

在肉类保鲜方面,浸泡和喷洒过氧乙酸都可以有效减少鸡翅表面空肠弯曲菌的数量^[61];并能有效减少鸡胸肉上沙门氏菌和弯曲杆菌的数量^[62]。在水产品保鲜方面,过氧乙酸可使熟制小龙虾的货架期延长 6 d,但会使小龙虾肉的硬度值和蛋白羰基含量上升^[63]。

由上述报道可以看出,过氧乙酸处理可以在不影响食品品质的前提下,减少食品中病原微生物的生长,有效延长其保质期。与此同时,通过对过氧乙酸在食品保鲜中应用时的作用条件及其作用效果进行比较可以看出,过氧乙酸在果蔬中应用时浓度范围在 25~550 mg/L 之间,处理时间大多在 1~10 min;而在肉类和水产品中应用时质量浓度范围在 550~3000 mg/L 之间,处理时间大多在 30 s 内(表 4),说明低浓度短时过氧乙酸处理在果蔬抑菌保鲜中适用,而高浓度超短时过氧乙酸处理在肉品和水产品保鲜中更适用。此外,较低浓度的过氧乙酸在果蔬抑菌保鲜即可获得优异的作用效果,说明过氧乙酸处理在果蔬保鲜领域具有更潜在的应用前景。

3 超声波与过氧乙酸联合处理

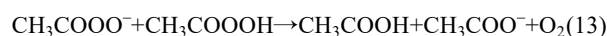
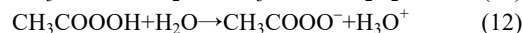
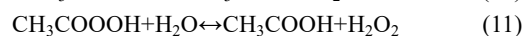
已有研究证明超声波联合清洗剂的使用优于二者单独使用的杀菌效果^[64]。超声波与过氧乙酸联合处理,操作简单、成本低、不污染环境,受到了广泛关注。

3.1 超声波与过氧乙酸联合处理的灭菌机制

超声波所产生的机械与空化作用是影响微生物的主要因素,空化作用会产生气泡,气泡破裂时产生的剪切力

能够破坏微生物的细胞膜,导致细胞内部物质流失,从而使过氧乙酸更快的进入细胞内部,破坏其内部的 DNA 和蛋白质等物质,加快细胞的死亡(图 2)。

超声波可以有效地活化过氧乙酸,提高过氧乙酸的杀菌能力,随着超声波功率的提高,会增加过氧乙酸的分解率,且优于热分解效果^[65],具体分解式如反应式(9)~(14)所示:



这也就解释了超声波与过氧乙酸联合处理优于二者单独使用的原因。

3.2 超声波与过氧乙酸联合处理在食品保鲜中的应用

目前,超声波与过氧乙酸联合处理主要应用于果蔬保鲜上(表 5)。MORAES 等^[66]使用超声波与过氧乙酸对甘蓝进行清洗,指出其可减少甘蓝表面的沙门氏菌,并可改变沙门氏菌的细胞形态。DOROSARIO 等^[67]研究了不同清洗方式对草莓品质的影响,发现超声波与过氧乙酸联合处理杀菌效果最好,且不影响草莓的感官品质。ALVARENGA 等^[68]也指出超声波与过氧乙酸联合处理对草莓的影响,结果表明草莓中花青素的含量不会随着处理时间的不同而发生变化,随着贮藏时间的延长,草莓 pH 降低,总可溶固形物和总可滴定酸的比值下降,但其理化特

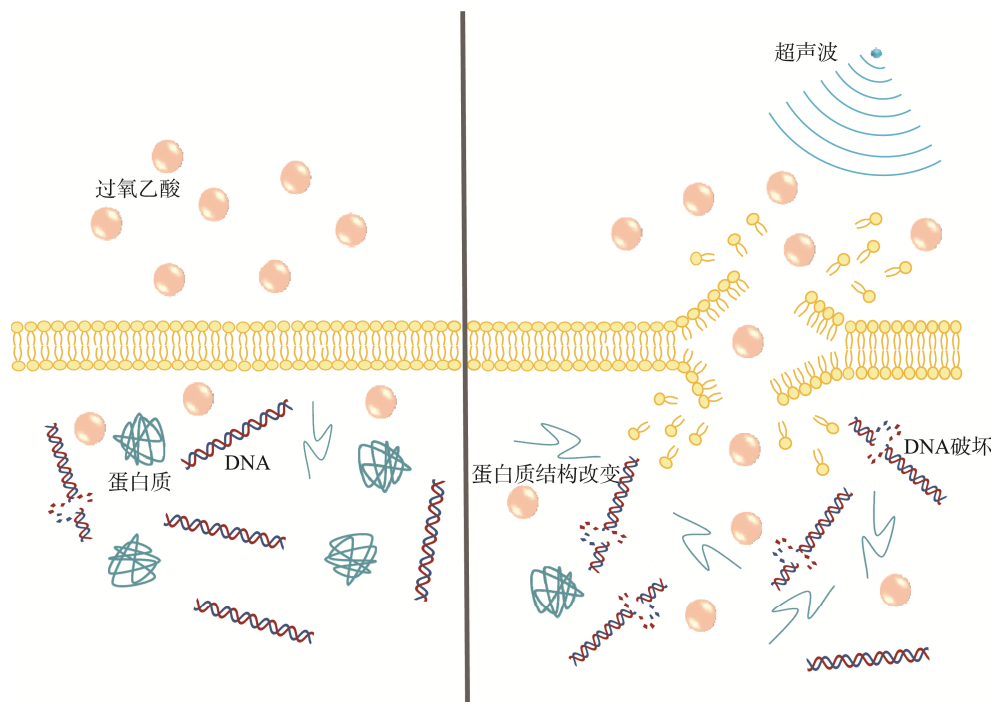


图 2 超声波联合过氧乙酸的杀菌机制

Fig.2 Sterilization mechanism of combined ultrasound and peracetic acid

表 5 超声波与过氧乙酸联合处理在食品保鲜中的应用
Table 5 Combined application of ultrasound and peracetic acid in food preservation

作用对象	联合作用条件	作用效果	参考文献
草莓	超声波 40 kHz、500 W; 过氧乙酸 40 mg/L; 处理 5 min	在 9 天的储存中使好氧中温菌、霉菌和酵母菌等降低 2.0 log CFU/g。超声波对肠链球菌的杀菌效果也得到了改善, 达到了 2.1 log CFU/g	[66]
草莓	超声波 2 kHz; 过氧乙酸 40 mL/L; 处理 5 min	需氧嗜温菌减少了 48.0 log CFU/g, 大肠菌群减少了 45.35~89.1 log CFU/g。	[67]
甘蓝	超声波 50 kHz、150 W; 过氧乙酸 20 mg/L; 处理 5 min	使甘蓝表面的肠道沙门氏菌降低了 2.5 log CFU/g, 改变了其细胞形态	[68]
生姜	超声波 40 kHz、60 W/L; 过氧乙酸质量浓度 0.04%; 处理 10 min	提高了表面泥沙的清洗率, 过氧乙酸清洗使生姜表面霉菌和酵母菌菌落数降低 0.80 log CFU/g, 而联合超声后可降低 2.20 log CFU/g	[69]
鲭鱼片	超声波 550 W, 25 kHz; 过氧乙酸 200 mg/L; 处理 10 min	总嗜温菌和总嗜冷菌分别降低了 0.32 和 0.52 log CFU/g	[70]

性无显著变化。张龙等^[69]发现超声波与过氧乙酸联合清洗显著提高了生姜表面清洁率、降低了霉菌和酵母菌菌落数。ZHAO 等^[70]采用超声波联合过氧乙酸清洗鲭鱼片, 降低了其总嗜温菌和总嗜冷菌的数量, 但不影响其品质。

4 结论与展望

超声波作为一种绿色环保的非热加工技术在抑制微生物生长方面具有很好的效果, 显示了其在食品保鲜中的应用潜力。过氧乙酸作为一种环境友好型的清洗剂, 是含氯清洗剂的良好替代物。而超声波与过氧乙酸联合处理可提高清洗和杀菌效率, 且不影响食品品质, 在食品保鲜中显示出广阔的应用前景。

然而, 超声波技术在食品保鲜中的大规模推广应用还面临诸多挑战。超声波对不同食品品质、不同种类微生物的影响不同, 研究与设计超声波辅助工艺以达到所需的微生物灭活条件, 同时将其对食品质量的影响降至最低至关重要。过氧乙酸对微生物的抑制效果与其浓度、处理时间等参数有关, 需要根据不同类型食品、不同种类微生物的特点来确定。同时, 超声波装置造价不高、过氧乙酸价格低廉, 可根据不同食品的保鲜需求选择单独的超声波、过氧乙酸处理或者将二者联合使用。此外, 在超声波与过氧乙酸联合使用的基础上, 还可协同其他物理、化学或者生物方法, 以实现安全环保、低廉高效、品质保持的食品杀菌保鲜。

参考文献

[1] PU Y, JIANG H, ZHANG Y, *et al.* Advances in propolis and propolis functionalized coatings and films for fruits and vegetables preservation [J]. Food Chem, 2023, 414: 135662.
[2] 石钰琢, 杨松, 黄栋, 等. 鲜切果蔬物理保鲜技术研究进展[J]. 食品科

技, 2023, 48(7): 37–42.
SHI YZ, YANG S, HUANG D, *et al.* Progress in physical preservation technology of fresh cut fruits and vegetables [J]. Food Sci Technol, 2023, 48(7): 37–42.
[3] BEVILACQUA A, CAMPANIELLO D, SPERANZA B, *et al.* Two nonthermal technologies for food safety and quality-ultrasound and high pressure homogenization: Effects on microorganisms, advances, and possibilities: A review [J]. J Food Prot, 2019, 82: 2049–2064.
[4] UMEGO EC, HE R, HUANG H, *et al.* Ultrasound-assisted fermentation: Mechanisms, technologies, and challenges [J]. J Food Process Pres, 2021, 45: e15559.
[5] LIPPMAN B, YAO S, HUANG R, *et al.* Evaluation of the combined treatment of ultraviolet light and peracetic acid as an alternative to chlorine washing for lettuce decontamination [J]. Int J Food Microbiol, 2020, 323: 108590.
[6] Food and Drug Administration . Chemicals used in washing or to assist in the peeling of fruits and vegetables [Z]. 2019.
[7] GOMBAS D, LUO Y, BRENNAN J, *et al.* Guidelines to validate control of cross-contamination during washing of fresh-cut leafy vegetables [J]. J Food Prot, 2017, 80: 312–330.
[8] 胡雪梅, 罗芳耀, 罗静红, 等. 4 种常用蔬菜清洗剂处理对鲜切萝卜抑菌及保鲜效果比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(15): 306–314.
HU XM, LUO FY, LUO JH, *et al.* Comparison of antibacterial ability and preservation effects of fresh-cut radish treated with 4 kinds of common vegetable cleaning agents [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(15): 306–314.
[9] PAPADOPOULOU V, SIDDEERS AE, LU KY, *et al.* Overcoming biological barriers to improve treatment of a *Staphylococcus aureus* wound infection [J]. Cell Chem Biol, 2023, 30: 513–526.
[10] ZUPANC M, PANDUR Z, PERDIH TS, *et al.* Effects of cavitation on different microorganisms: The current understanding of the mechanisms taking place behind the phenomenon. A review and proposals for further research [J]. Ultrason Sonochem, 2019, 57: 147–165.
[11] SHEN QJ, SUN J, PAN JN, *et al.* Ultrasound-synergized gas in ensuring

- the sterilization and physicochemical quality of fruit and vegetables: A review [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2024, 209: 112705.
- [12] CRUZ-CANSINO NS, REYES-HERNANDEZ I, DELGADO-OLIVARES L, *et al*. Effect of ultrasound on survival and growth of *Escherichia coli* in cactus pear juice during storage [J]. *Braz J Microbiol*, 2016, 47: 431–437.
- [13] LIN L, WANG X, LI C, *et al*. Inactivation mechanism of *E. coli* O157:H7 under ultrasonic sterilization [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 59: 104751.
- [14] POKHREL PR, BERMUDEZ-AGUIRRE D, MARTINEZ-FLORES HE, *et al*. Combined effect of ultrasound and mild temperatures on the inactivation of *E. coli* in fresh carrot juice and changes on its physicochemical characteristics [J]. *J Food Sci*, 2017, 82: 2343–2350.
- [15] TECHATHUVANAN C, DSOUZA DH. High intensity ultrasound for *Salmonella enteritidis* inactivation in culture and liquid whole eggs [J]. *J Food Sci*, 2018, 83: 1733–1739.
- [16] BONAHE E, HUANG X, YANG H, *et al*. Nondestructive monitoring, kinetics and antimicrobial properties of ultrasound technology applied for surface decontamination of bacterial foodborne pathogen in pork [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 70: 105344.
- [17] MIKS-KRAJNİK M, FENG LXJ, BANG WS, *et al*. Inactivation of *Listeria monocytogenes* and natural microbiota on raw salmon fillets using acidic electrolyzed water, ultraviolet light or/and ultrasounds [J]. *Food Control*, 2017, 74: 54–60.
- [18] BAI Y, ZHOU YH, CHANG RT, *et al*. Investigating synergism and mechanism during sequential inactivation of *Staphylococcus aureus* with ultrasound followed by UV/peracetic acid [J]. *J Hazard Mater*, 2024, 462: 132609.
- [19] LUO W, WANG JQ, WANG Y, *et al*. Bacteriostatic effects of high-intensity ultrasonic treatment on *Bacillus subtilis* vegetative cells [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 81: 105862.
- [20] GANI A, BABA WN, AHMAD M, *et al*. Effect of ultrasound treatment on physico-chemical, nutraceutical and microbial quality of strawberry [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2016, 66: 496–502.
- [21] CAO SF, HU ZC, PANG B, *et al*. Effect of ultrasound treatment on fruit decay and quality maintenance in strawberry after harvest [J]. *Food Control*, 2010, 21(4): 529–532.
- [22] PINHEIRO J, ALEGRIA C, ABREU M, *et al*. Influence of postharvest ultrasounds treatments on tomato (*Solanum lycopersicum*, CV. Zinac) quality and microbial load during storage [J]. *Ultrason Sonochem*, 2015, 27: 552–559.
- [23] 孟祥慧, 马鑫敏, 谷恒梅, 等. 超声-次氯酸钠-植酸联合处理提高鲜切生菜的保鲜效果[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 336–341.
- MENG XH, MA XM, GU HM. Improvement of freshness of fresh-cut lettuce by combined ultrasound-sodium hypochlorite-phytate treatment [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(19): 336–341.
- [24] CARMEN SR, MARIA EV, ROSA OR, *et al*. Selection of a decontamination treatment for fresh *Tuber aestivum* and *Tuber melanosporum* truffles packaged in modified atmospheres [J]. *Food Control*, 2011, 22: 626–632.
- [25] ELIZAQUIVEL P, SANCHEZ G, SELMA MV, *et al*. Application of propidium monoazide-qPCR to evaluate the ultrasonic inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in fresh-cut vegetable wash water [J]. *Food Microbiol*, 2012, 30: 316–320.
- [26] ANGELIKI B, VASILIKI S, APOSTOLOS V. Ultraviolet light and ultrasound as non-thermal treatments for the inactivation of microorganisms in fresh ready-to-eat foods [J]. *Int J Food Microbiol*, 2013, 167: 96–102.
- [27] HUANG K, STEVEN W, ROHAN T, *et al*. Efficacy of decontamination and a reduced risk of cross-contamination during ultrasound-assisted washing of fresh produce [J]. *J Food Eng*, 2018, 224: 95–104.
- [28] ALEXANDRE EMC, BRANDAO TRS, SILVA CLM. Impact of non-thermal technologies and sanitizer solutions on microbial load reduction and quality factor retention of frozen red bell peppers [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2013, 17: 99–105.
- [29] EVANS AA, HAILE M, JOSHUA HA, *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: 2020, 108991.
- [30] ZHANG HC, SHAWN T, ROHAN VT. Inactivation of *Listeria innocua* on blueberries by novel ultrasound washing processes and their impact on quality during storage [J]. *Food Control*, 2021, 121: 107580.
- [31] ZHANG L, YU XJ, ABU EAY, *et al*. Effects of low frequency multi-mode ultrasound and its washing solution's interface properties on freshly cut cauliflower [J]. *Food Chem*, 2022, 366: 130683.
- [32] 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.
- [33] LAGNIKA C, ZHANG M, MOTHIBE KJ. Effects of ultrasound and high pressure argon on physico-chemical properties of white mushrooms (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2013, 82: 87–94.
- [34] 张娇娇, 吴海虹, 孙晋跃, 等. 超声波联合乳酸对金黄色葡萄球菌的杀菌效果[J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(6): 1686–1693.
- ZHANG JJ, WU HH, SUN JY, *et al*. Bactericidal effect of ultrasound combined with lactic acid on *Staphylococcus aureus* [J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 2022, 38(6): 1686–1693.
- [35] KANG DC, JIANG YH, XING LJ, *et al*. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Bacillus cereus* by power ultrasound during the curing processing in brining liquid and beef [J]. *Food Res Int*, 2017, 102: 717–727.
- [36] ERNEST B, HUANG XY, YANG HY, *et al*. Nondestructive monitoring, kinetics and antimicrobial properties of ultrasound technology applied for surface decontamination of bacterial foodborne pathogen in pork [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 70: 105344.
- [37] AYGUN A, SERT D, COPUR G. Effects of propolis on eggshell microbial activity, hatchability, and chick performance in Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*) eggs [J]. *Poultry Sci*, 2012, 91: 1018–1025.
- [38] SERT D, AYGUN A, TORLAK E, *et al*. Effect of ultrasonic treatment on reduction of *Escherichia coli* ATCC 25922 and egg quality parameters in experimentally contaminated hens' shell eggs [J]. *J Sci Food Agric*, 2013, 93: 2973–2978.
- [39] 周大鹏, 蓝蔚青, 莫雅娴, 等. 超声前处理对冷藏海鲈鱼品质及蛋白质

- 特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(17): 204–211.
- ZHOU DP, LAN WQ, MO YX, *et al.* Effect of ultrasonic pre-treatment on quality and protein characterization of frozen sea bass (*Perca fluviatilis*) [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(17): 204–211.
- [40] PEDROS-GARRIDO S, CONDON-ABANTO S, BELTRAN JA, *et al.* Assessment of high intensity ultrasound for surface decontamination of salmon (*S. salar*), mackerel (*S. scombrus*), cod (*G. morhua*) and hake (*M. merluccius*) fillets, and its impact on fish quality [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2017, 41: 64–70.
- [41] ZHU Z, CHEN Z, ZHOU Q, *et al.* Freezing efficiency and quality attributes as affected by voids in plant tissues during ultrasound-assisted immersion freezing [J]. Food Bioprocess Technol, 2018, 11: 1615–1626.
- [42] GAD SC. Peracetic acid [B]. Encyclopedia of toxicology (fourth edition), 2024, 7, 343–347.
- [43] SHIN M, NA G, KANG JW, *et al.* Application of combined treatment of peracetic acid and ultraviolet-C for inactivating pathogens in water and on surface of apples [J]. Int J Food Microbiol, 2024, 411: 110519.
- [44] FLORES MJ, LESCANO MR, BRANDI RJ, *et al.* A novel approach to explain the inactivation mechanism of *Escherichia coli* employing a commercially available peracetic acid [J]. Water Sci Technol, 2014, 69(2): 358–363.
- [45] KIOVUNEN J, HEINONEN-TANSKI H. Inactivation of enteric microorganisms with chemical disinfectants, UV irradiation and combined chemical/UV treatments [J]. Water Res, 2005, 39(8): 1519–1526.
- [46] 蒋励铭, 卞静, 张晓晖, 等. 电化学活化过氧乙酸灭活水中大肠杆菌[J]. 中国环境科学, 2023, 43(8): 3966–3973.
- JIANG LM, BIAN J, ZHANG XH, *et al.* Inactivation of *Escherichia coli* in water by electrochemically activated peroxyacetic acid [J]. China Environ Sci, 2023, 43(8): 3966–3973.
- [47] 吴丽娜, 刘响阁, 张一敏, 等. 乳酸和过氧乙酸对大肠杆菌O157:H7生物膜的抑制作用及其机制[J]. 食品科学, 2022, 43(9): 10–18.
- WU LN, LIU YG, ZHANG YM, *et al.* Inhibition of *Escherichia coli* O157:H7 biofilm by lactic acid and peroxyacetic acid and its mechanism [J]. Food Sci, 2022, 43(9): 10–18.
- [48] NORASAK K, TERRANCE MA, WANG R, *et al.* Evaluation of peracetic acid treatment on beef trimmings and subprimals against *Salmonella* and *E.coli* O157:H7 within regulatory retained water limitations [J]. J Food Prot, 2024, 87(3): 100217.
- [49] LEE SHI, CAPPATO LP, CORASSIN CH, *et al.* Effect of peracetic acid on biofilms formed by *Staphylococcus aureus* and *Listeria monocytogenes* isolated from dairy plants [J]. J Dairy Sci, 2016, 99: 2384–2390.
- [50] RAMIREZ-HERNANDEZ A, BRASHEARS MM, SANCHEZ-PLATA MX. Efficacy of lactic acid, lactic acid–acetic acid blends, and peracetic acid to reduce *Salmonella* on chicken parts under simulated commercial processing conditions [J]. J Food Prot, 2018, 81: 17–24.
- [51] SETLOW B, KORZA G, BLATT KMS, *et al.* Mechanism of *Bacillus subtilis* spore inactivation by and resistance to supercritical CO₂ plus peracetic acid [J]. J Appl Microbiol, 2016, 120: 57–69.
- [52] 张晓瑜, 张晓宇, 王艳伟, 等. 过氧乙酸对采后李果实褐腐菌抑制作用的研究[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(15): 3659–3661.
- ZHANG XY, ZHANG XY, WANG YW. Studies on the inhibitory effect of peroxyacetic acid on the brown rot fungus of postharvest plum fruits [J]. Hubei Agric Sci, 2015, 54(15): 3659–3661.
- [53] CHAE-HUN LEE, JI-HOON KANG, HYUK-JE WOO, *et al.* Combined treatment of nut by-product extracts and peracetic acid against *Listeria monocytogenes* on red mustard and kale leaves [J]. LWT-Food Sci Technol, 2020, 129: 109608.
- [54] HATAMZADEH S, AKBARI ON, RAHNAMA K, *et al.* Comparison of the antifungal activity of chlorine dioxide, peracetic acid and some chemical fungicides in post-harvest management of *Penicillium digitatum* and *Botrytis cinerea* infecting sweet orange and strawberry fruits [J]. Agric Res, 2024, 13: 72–84.
- [55] VANDEKINDEREN I, DEVLIEGHERE F, MEULENAER BD, *et al.* Optimization and evaluation of a decontamination step with peroxyacetic acid for fresh-cut produce [J]. Food Microbiol, 2009, 26(8): 882–888.
- [56] 蒋巧俊, 雷大峰, 董正沈, 等. 二氧化氯、过氧乙酸处理对色拉生菜品质的影响研究[J]. 食品科技, 2021, 46(4): 30–36.
- JIANG QJ, LEI DF, DONG ZS, *et al.* Studies on the effect of chlorine dioxide and peroxyacetic acid treatment on the quality of salad lettuce [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(4): 30–36.
- [57] 王祖莲, 陈晴, 罗芳耀, 等. 4种常用蔬菜清洗剂对韭黄清洗后常温货架品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 3847–3853.
- WANG ZL, CHEN Q, LOU FY, *et al.* Effects of four commonly used vegetable detergents on the shelf quality of leeks at room temperature after washing [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(12): 3847–3853.
- [58] ALVARO JE, MORENO S, DIANEZ F, *et al.* Effects of peracetic acid disinfectant on the postharvest of some fresh vegetables [J]. J Food Eng, 2009, 95(1): 11–15.
- [59] MOGHASSEM HAMIDI R, SHEKARFOROUSH SS, HOSSEINZADEH S, *et al.* Evaluation of the effect of neutral electrolyzed water and peroxyacetic acid alone and in combination on microbiological, chemical, and sensory characteristics of poultry meat during refrigeration storage [J]. Food Sci Technol Int, 2021, 27(6): 499–507.
- [60] PETRI E, VIRTO R, MOTTURA M, *et al.* Comparison of peracetic acid and chlorine effectiveness during fresh-cut vegetable processing at industrial scale [J]. J Food Prot, 2021, 84: 1592–1602.
- [61] GONZALEZ SV, GEORNARAS I, NAIR MN, *et al.* Evaluation of immersion and spray applications of antimicrobial treatments for reduction of *campylobacter jejuni* on chicken wings [J]. Foods, 2021, 10(4): 903.
- [62] KUMAR S, SINGH M, COSBY DE, *et al.* Efficacy of peroxy acetic acid in reducing *Salmonella* and *Campylobacter* spp. populations on chicken breast fillets [J]. Poult Sci, 2020, 99(5): 2655–2661.
- [63] 罗小莹, 李述刚, 褚上, 等. 过氧乙酸和二氧化氯清洗剂对熟制小龙虾贮藏品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(11): 70–77.
- LUO XY, LI SG, ZHU S, *et al.* Effect of peroxyacetic acid and chlorine dioxide detergents on the storage quality of cooked crayfish [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(11): 70–77.
- [64] 郭宇道, 雷兴梦, 刘瑶, 等. 超声波联合水杨酸处理对冬枣采后黑斑病的防控研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(4): 68–76.
- GUO YX, LEI XM, LEI Y, *et al.* Research on the prevention and control

- of postharvest black spot disease of winter jujube by ultrasound combined with salicylic acid treatment [J]. *Food Ferment Ind*, 2024, 50(4): 68–76.
- [65] MENDOZA IC, LUNA EO, POZO MD, *et al.*, Conventional and non-conventional disinfection methods to prevent microbial contamination in minimally processed fruits and vegetables [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2022, 165: 113714.
- [66] MORAES-MOTTA-MACHADO-MC, LEPAUS BM, BERNARDES PC, *et al.* Ultrasound, acetic acid, and peracetic acid as alternatives sanitizers to chlorine compounds for fresh-cut kale decontamination [J]. *Molecules*, 2022, 27: 7019.
- [67] DOROSARIO DKA, DASILVA MY, PEIXOTO JMC, *et al.* Ultrasound improves chemical reduction of natural contaminant microbiota and *Salmonella enterica* subsp. *enterica* on strawberries [J]. *Int J Food Microbiol*, 2017, 241: 23–29.
- [68] ALVARENGA PDL, VASCONCELOS CM, SAO JJ. Application of ultrasound combined with acetic acid and peracetic acid: Microbiological and physicochemical quality of strawberries [J]. *Molecules*, 2021, 26: 16.
- [69] 张龙, 赵鑫淇, 任梓菲, 等. 超声联合过氧乙酸清洗对生姜品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(10): 3068–3074.
ZHANG L, ZHAO XQ, REN ZF, *et al.* Effect of ultrasound combined with peroxyacetic acid cleaning on the quality of ginger [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(10): 3068–3074.
- [70] ZHAO YM, MARCIA O, CATHERINE MB, *et al.* Combined effects of

ultrasound, plasma-activated water, and peracetic acid on decontamination of mackerel fillets [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 150: 111957.

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)

作者简介



刘广琛, 硕士研究生, 主要研究方向为食品化学与营养。

E-mail: lgc200728@163.com



孙红男, 博士, 研究员, 主要研究方向为薯类加工、食品化学与营养。

E-mail: sunhongnan@caas.cn



张 苗, 博士, 副研究员, 主要研究方向为薯类加工、食品化学与营养。

E-mail: zhangmiao@caas.cn