

等离子体活化水联合鼓泡对鸡心果农残及大肠杆菌去除效果的影响

杨千慧, 毕金峰, 张子涵, 刘梦, 刘璇

Effect of Plasma-activated Water Combined with Bubbling on the Removal of Pesticide Residues and *Escherichia coli* on *Xanthoxylum chinensis*

YANG Qianhui, BI Jinfeng, ZHANG Zihan, LIU Meng, and LIU Xuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024100347>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等离子体活化水-苯乳酸协同杀灭大肠杆菌O157:H7作用及机制研究

Synergistic Inactivation Effects and Mechanisms of Plasma-Activated Water Combined with Phenyllactic Acid against *Escherichia coli* O157:H7

食品工业科技. 2022, 43(14): 138-143 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110116>

等离子体活化水对沙门氏菌的灭活作用及机制研究

Inactivation Effects and Mechanisms of Plasma-Activated Water against *S. typhimurium*

食品工业科技. 2021, 42(8): 138-143 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080241>

等离子体活化水糊化处理对蜡质玉米淀粉和玉米淀粉结构及性能的影响

Effects of Plasma-activated Water and Annealing on Structure and Properties of Waxy Maize Starch and Maize Starch

食品工业科技. 2023, 44(5): 36-42 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050109>

等离子体活化水作为解冻介质对牛肉杀菌效能及品质的影响

Effect of Plasma-activated Water as Thawing Media on the Sterilization and Quality of Beef

食品工业科技. 2022, 43(2): 338-345 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060219>

等离子体活化水对鲜切生菜杀菌效能及贮藏品质影响

Effect of Plasma Activated Water on Microbial Decontamination and Storage Quality of Fresh-cut Lettuce

食品工业科技. 2020, 41(21): 281-285,292 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019120106>

等离子体活性水对生鲜黄鱼杀菌效果及品质的影响

Effects of Plasma-activated Water on the Microbial Decontamination and Quality of Yellow Croaker Slices

食品工业科技. 2020, 41(10): 277-283 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.10.046>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨千慧, 毕金峰, 张子涵, 等. 等离子体活化水联合鼓泡对鸡心果农残及大肠杆菌去除效果的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 10–19. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100347

YANG Qianhui, BI Jinfeng, ZHANG Zihan, et al. Effect of Plasma-activated Water Combined with Bubbling on the Removal of Pesticide Residues and *Escherichia coli* on *Xantolis stenosepala* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 10–19. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100347

· 特邀主编专栏—地方特色食品: 加工技术、感官品质、风味特性和营养健康 (客座主编: 易俊洁、和劲松、郭超凡) ·

等离子体活化水联合鼓泡对鸡心果农残及大肠杆菌去除效果的影响

杨千慧¹, 毕金峰¹, 张子涵¹, 刘 梦¹, 刘 璇^{1,2,*}

(1. 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重点实验室, 北京 100193;

2. 中国农业科学院西部农业研究中心, 新疆昌吉 831100)

摘 要: 为解决鸡心果全果制浆的农残和有害微生物控制问题, 本文研究了在原料清洗环节, 等离子体活化水 (Plasma-activated water, PAW) 联合鼓泡处理对鸡心果表面农药 (多菌灵、吡虫啉、戊唑醇、吡唑醚菌酯和阿维菌素) 去除和大肠杆菌控制的效果。结果表明, 相较于单一鼓泡清洗 (5 种农药的去除率为 0.90%~25.06%), PAW 能够有效去除鸡心果表面农药残留 (5 种农药的去除率为 9.20%~72.82%)。随着放电功率、放电时间和放电气流量的增加, 农药去除率显著提高。在放电功率 120 W、时间 3 min、气流量 3 L/min 的条件下, 5 种农药的去除率最高, 分别达 64.80%、64.44%、69.81%、68.22% 和 72.82%。受限于现有等离子体发生器的工作电压 8 kV、处理时间等因素, 不同放电功率 PAW (大肠杆菌降低对数值 0.81~1.17 lg CFU/mL) 与鼓泡清洗 (1.14 lg CFU/mL) 对鸡心果表面大肠杆菌的控制效果无显著性差异。本研究结果为推动 PAW 作为绿色清洗技术提供了科学依据。

关键词: 等离子体活化水, 鼓泡, 农药残留, 大肠杆菌, 鸡心果, 去除效果

中图分类号: TS255.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)19-0010-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100347

本文网刊:



Effect of Plasma-activated Water Combined with Bubbling on the Removal of Pesticide Residues and *Escherichia coli* on *Xantolis stenosepala*

YANG Qianhui¹, BI Jinfeng¹, ZHANG Zihan¹, LIU Meng¹, LIU Xuan^{1,2,*}

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

2. Institute of Western Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, China)

Abstract: The control of pesticide residues and harmful microorganisms is an important issue in the *Xantolis stenosepala* pulp processing. In this study, plasma-activated water (PAW) combined with bubbling treatment was applied to investigate the removal of effect on pesticides (carbendazim, imidacloprid, tebuconazole, pyraclostrobin, and abamectin) and *Escherichia coli* on the surface of *X. stenosepala* during the raw material cleaning process. The results showed that compared to the single bubble cleaning (with pesticide removal rates ranging from 0.90% to 25.06%). PAW could effectively remove pesticide residues from the surface of *X. stenosepala* (with pesticide removal rates ranging from 9.20%

收稿日期: 2024-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (子课题) “寒地特色水果营养功能复合稳态制造关键技术与装备研究及应用示范” (2022YFD1600505-5); 国家苹果产业技术体系 (CARS-27); 新疆维吾尔自治区“天池英才”计划 (2022); 山东省枣庄市“枣庄英才”计划 (2022)。

作者简介: 杨千慧 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: yangqianhui2022@163.com。

*** 通信作者:** 刘璇 (1982-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: liuxuancaas@126.com。

to 72.82%). With increasing discharge power, extending discharge time, and elevating discharge gas flow rate, the pesticide removal rate increased significantly. The five pesticides had the highest removal rates of 64.80%, 64.44%, 69.81%, 68.22% and 72.82%, respectively, under the conditions of the PAW generator discharge power at 120 W, gas flow rate of 3 L/min and the treatment time of 3 min. Limited by the working voltage of the existing plasma generator (8 kV) and treatment time, there was no significant difference in the control effect on *E. coli* on the surface of *X. stenosepala* between PAW at different discharge powers (with *E. coli* reduction logarithms ranging from 0.81 to 1.17 lg CFU/mL) and bubbling washing (1.14 lg CFU/mL). The research results of this study provide scientific evidence to promote the study of PAW as a green cleaning technique.

Key words: plasma-activated water; bubbling; pesticide residues; *Escherichia coli*; *Xantolis stenosepala*; removal effect

鸡心果(*Xantolis stenosepala*), 又称塞外红, 是寒地小苹果的代表品种之一, 果肉紧脆多汁, 营养价值丰富, 内蒙古通辽等地区是其典型优势产区, 市场发展前景广阔。然而, 鸡心果的耐储性较差, 随着种植规模和产量的增加, 研究发现加工可缓解其鲜销供应压力, 实现转化增值是延长货架期的重要途径之一^[1-2]。鸡心果可食率高达 98%, 是适宜全果制浆的优良原料, 全果制浆不仅能最大限度保留其特有香气和营养成分, 符合当今消费者对高品质、健康食品的需求, 还可作为食品配料用于二次研发, 应用场景广泛^[3]。然而, 全果制浆过程中, 原料农药去除和成品农残控制至关重要; 同时, 采用低温非热加工技术全程控制有害微生物, 也是全果制浆品质提升技术创新的重点。原料清洗作为农药去除和微生物控制的关键环节, 其技术创新和效果提升对地域特色果品的高品质原浆加工具有重要意义。

等离子体活化水(Plasma-activated water, PAW)作为一种新兴的流体介质, 通过等离子体放电装置处理工作气体, 由生成的活性气体与水反应制备而成。PAW 富含羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、带电粒子(电子和离子)、硝酸盐(NO_3^-)、过氧化氢(H_2O_2)、亚硝酸盐(NO_2^-)和臭氧(O_3)等多种活性氧和活性氮等物质^[4]。研究发现, PAW 在食品原料清洗、减菌和消毒方面效果显著^[5-6], 尤其在果蔬清洗、农残降解及保鲜领域备受关注。Zheng 等^[7]研究表明, PAW 浸泡 10 min 可使葡萄表面辛硫磷减少 73.60%, 且未对其色泽、硬度、糖类和维生素 C 等造成不良影响; Murtaza 等^[8]报道, 番茄经 PAW 浸泡后, 表面百菌清和福美双分别减少了 85.3% 和 79.47%; 此外, PAW 浸泡处理鲜核桃仁可降低 1.15 lg CFU/g 总活菌数, 有效延缓了核桃的营养损失、褐变和酸败^[9]。相较于传统果品加工用原料清洗方式, 如毛辊清洗、臭氧水清洗、电解水清洗、添加过氧乙酸、含氯清洗消毒剂等^[10-13], PAW 具有绿色、安全、高效、无残留等特点。PAW 不仅能通过清洗移除部分农药和降低微生物水平, 还可以有效降解多种无机及有机物, 且对物料损伤极小, 使其在全果制浆原料的农残和微生物高标准控制方面展现出一定的应用潜力, 符合“最少加工”和“清洁标签”的消费需求。然而, 当前国内外关于 PAW 对果蔬农残和微生物控制的研究多集中于 PAW 静态浸泡, 从产业化应用的角度, 实现 PAW

同步制备和连续清洗是亟待解决的关键问题, 从而支撑工业化连续生产、效率提升和保证产能。

本研究引入 PAW 制备同步联合鼓泡清洗技术, 通过这一技术创新, PAW 的制备与物料清洗得以实现同步和连续化, 满足果实不间断输送和流动清洗的需求, 从而提高清洗效率并确保原料清洁质量的一致性。PAW 联合鼓泡利用小气泡的高效传质、高表面体积比及动态特性, 增强了等离子体的活化效率^[14], 展现了其在果品原料农药去除和微生物控制方面的应用潜力。本文以鸡心果为试验对象, 针对苹果种植中广泛使用且检出率较高的 5 种农药(多菌灵、吡虫啉、戊唑醇、吡唑醚菌酯和阿维菌素)及典型微生物致病菌(大肠杆菌), 探究 PAW 对农药去除及大肠杆菌的控制效果, 为 PAW 在果蔬原料清洗领域的研究及产业化应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鸡心果 购自内蒙古通辽市科尔沁区, 常温运输至实验室, 保存于 4 ℃ 冷库; 多菌灵(96%)、吡虫啉(95%)、戊唑醇(98%) 上海源叶生物科技有限公司; 吡唑醚菌酯(97%) 北京锦悦生物科技有限公司; 阿维菌素(97%) 北京沃凯生物科技有限公司; 乙腈、甲酸 色谱纯, 赛默飞世尔科技有限公司; 无水硫酸镁、氯化钠 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 柠檬酸钠二水合物 上海毕得医药科技股份有限公司; 柠檬酸二钠盐倍半水合物 上海皓鸿生物医药科技有限公司; PSA QuEChERS 专用超洁净填料 湖北雨晟云创实验科技有限公司; 陶瓷均质子 2 cm(长)×1 cm(外径), 上海安谱实验科技股份有限公司; 无水乙醇 分析纯, 北京市通广精细化工公司; 大肠杆菌 BNCC336435, 北纳生物科技有限公司; 营养肉汤培养基、营养琼脂培养基 奥博星生物技术有限公司; 50% 甘油无菌溶液 生命科学有限公司。

等离子体果蔬清洗灭菌一体机 由本团队设计并委托苏州丰源宝农业科技有限公司加工制造(图 1); ACQUITY UPLC H-Class/Xevo TQ-XS 超高效液相色谱-三重四级杆质谱联用仪 美国 Waters 公司; SCB-1360 超级洁净工作台 北京东联哈尔仪器制造有限公司; 5804R 台式低温高速离心机 德国 Eppendorf 公司; SB25-12DTN 超声波清洗机 宁

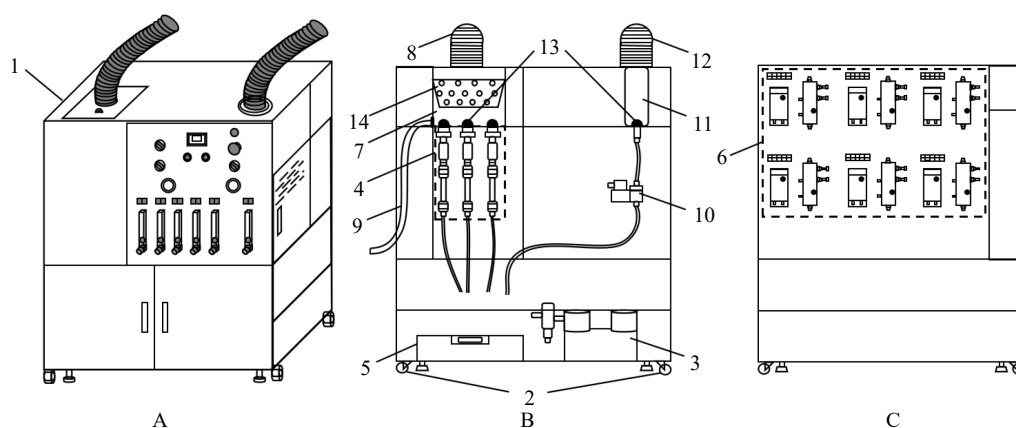


图1 等离子体果蔬清洗灭菌一体机结构示意图

Fig.1 Schematic structure of plasma fruit and vegetable washing and sterilizing integrated machine

注: 图 A、B、C 分别为等离子体果蔬清洗灭菌一体机本体、正面剖视、背面剖视结构示意图; 1. 主体, 2. 万向轮, 3. 空压机, 4. 止水单元, 5. 接水槽, 6. 放电单元, 7. 果蔬清洗槽, 8. 铝箔管, 9. 排水管路, 10. 单向阀, 11. 果蔬汁罐, 12. 铝箔管, 13. 曝气石, 14. 料篮。

波新芝生物科技股份有限公司; HZQ-F160 全温振荡培养箱 太仓市实验设备厂; L18-Y91A 高速破壁調理机 九阳股份有限公司; HH-4 数显恒温水浴锅 江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司; S470-uMix Seven Excellence 多参数测试仪、S210 pH 计 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 PAW 制备 采用等离子体果蔬清洗灭菌一体机, 在 8 kV 的工作电压和 4 mA 的电流条件下, 通过介质阻挡放电装置将常压空气电离产生活性气体, 该活性气体通过曝气石以鼓泡形式进入清洗槽, 并与槽内的水发生反应, 生成 PAW。

1.2.2 PAW 对鸡心果表面农药残留的影响

1.2.2.1 鸡心果初始样品制备 选取大小一致、成熟度相似、无病虫害且无机械损伤的鸡心果, 经流水冲洗后晾干。随后, 将果实浸泡于 5 mg/L 的多菌灵、吡虫啉、戊唑醇、吡唑醚菌酯和阿维菌素(苹果种植生产中常用且检出率较高的 5 种农药)混合标准储备液中, 浸泡时间为 20 min, 取出后置于通风柜, 在室温下晾干 24 h 待用^[15]。

1.2.2.2 鸡心果清洗处理 在果蔬清洗槽内加入 2.0 L 水, 在清洗槽内制备 PAW 的同时对物料进行清洗。控制鸡心果与 PAW 的料液比为 1:10, 以浸泡农药且未经清洗的鸡心果为对照组, 在制备 PAW 的放电时间为 3 min、气流量为 3 L/min 的条件下, 研究不同放电功率(30、60、90、120 和 150 W)、放电时间(1、2、3、4、5 和 6 min)和气流量(1、2、3、4、5 和 6 L/min)条件下制备的 PAW 及鼓泡清洗(仅加水鼓泡, 不通等离子体气体)对鸡心果表面农药残留的影响。

1.2.2.3 鸡心果农残检测样品制备 根据 GB 23200.121-2021《食品安全国家标准 植物源性食品中 331 种农药及其代谢物残留量的测定 液相色谱—质谱联用法》进行样品提取与净化^[16]。将处理后的鸡

心果用吸水纸吸干表面水分, 切分成约 1.5 cm×1.5 cm 的小块, 将切好的鸡心果块放入破壁机中, 进行 2 min 的打浆处理, 准确称取 10.0 g 鸡心果浆于 50 mL 塑料离心管中, 加入 10 mL 乙腈及 1 颗陶瓷均质子, 经过 1 min 剧烈振荡后, 再加入 4.0 g 无水硫酸镁、1.0 g 氯化钠、1.0 g 柠檬酸钠二水合物、0.5 g 柠檬酸二钠盐倍半水合物, 剧烈振荡 1 min 后, 于 4200 r/min 离心 5 min。吸取 2 mL 上清液于 10 mL 离心管中, 加入无水硫酸镁 300.0 mg 和 PSA 50.0 mg, 涡旋混匀并于 4200 r/min 离心 5 min, 上清液过 0.22 μm 滤膜, 待测。

1.2.2.4 5 种农残的定量检测 采用 ACQUITY BEH C₁₈ 柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm), 柱温 35 ℃, 进样量为 3 μL, 流速为 0.3 mL/min。流动相 A 为 0.1% 甲酸水, B 为乙腈, 梯度洗脱程序为 0~0.5 min, 95% A; 0.5~2.0 min, 95%~20% A; 2.0~2.5 min, 20%~2% A; 2.5~5.0 min, 2% A; 5.0~6.0 min, 2%~95% A; 6.0~6.5 min, 95% A。采用电喷雾三重四极杆串联质谱, 电喷雾离子源(Electrospray ionization, ESI)为正离子模式, 多反应监测(Multiple reaction monitoring, MRM)模式检测, 离子源温度为 150 ℃, 雾化器压力为 700 kPa, 碰撞气流速为 0.16 mL/min, 去溶剂温度为 500 ℃, 去溶剂流速为 900 L/h, 毛细管电压为 2.9 kV。5 种农药碎片离子及质谱检测参数见表 1, 通过保留时间和定性离子进行定性, 定量离子峰面积进行定量。

1.2.2.5 标准曲线制作 准确称量 50.0 mg 多菌灵、吡虫啉、戊唑醇、吡唑醚菌酯和阿维菌素 5 种农药标准品, 分别用乙腈溶解并定容至 50 mL, 配制成 1000 mg/L 的标准储备液, 储于 -20 ℃ 冰箱备用。取各农药标准储备液 5.0 mL 混合, 用乙腈定容至 50 mL, 配制成 100 mg/L 的农药混合标准溶液, 取 50 mL 100 mg/L 混合标准溶液, 用乙腈定容至 1000 mL, 配制成 5.0 mg/L 的混合标准溶液待用。称取 10.0 g 空白鸡心果浆, 按上述提取净化步骤制

表 1 农药碎片离子及质谱参数
Table 1 Fragment ions and MS parameters of pesticides

农药	保留时间(min)	母离子(m/z)	子离子(m/z)	去簇电压(V)	碰撞电压(V)
多菌灵	0.94	192.1	160.1*/132.1	30	28/18
吡虫啉	3.12	256.1	175.1*/209.1	25	20/15
戊唑醇	4.06	308	70.1*/125	35	20/35
吡唑醚菌酯	4.24	388	194*/163	25	25/12
阿维菌素	4.62	895	607.2*/751.1	40	45/40

注: *表示为定量离子。

备空白基质提取液,精确吸取一定量的混合标准溶液,用空白基质提取液稀释,配制成 5.00、10.00、50.00、100.00、200.00、500.00 ng/mL 的基质匹配标准工作溶液。按 1.2.2.4 的仪器检测条件检测,绘制多菌灵、吡虫啉、戊唑醇、吡唑醚菌酯和阿维菌素 5 种农药的基质匹配标准曲线($R^2\geq 0.997$)。

1.2.2.6 鸡心果农药残留率和去除率的计算

$$\text{农药残留率}(\%) = \frac{A_2}{A_1} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

$$\text{农药去除率}(\%) = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: A_1 为样品处理前农药残留量, mg/kg; A_2 为样品处理后农药残留量, mg/kg。

1.2.3 PAW 理化特性测定及其对 5 种农药降解作用的研究

1.2.3.1 PAW 电导率与 pH 测定 在果蔬清洗槽内加入 2.0 L 的去离子水,在不同放电功率和时间条件下,分别使用 pH 计和电导率仪测定 PAW 的 pH 与电导率。

1.2.3.2 PAW 对 5 种农药降解的影响 为明确 PAW 对农药的去除作用是清洗、降解,还是两者协同,本研究采用 PAW 处理农药溶液样品,对比处理前后农药溶液样品浓度差异。分别取 10 mL 1000 mg/L 的 5 种农药标准储备液,用去离子水定容至 2.0 L,将制备好的 5 种农药稀释液分别倒入清洗槽,在 1.2.2.2 所得最佳清洗条件下,对 5 种农药稀释液进行处理,在第 0、1、2、3 min 分别取样,所得样液过 0.22 μm 水系滤膜后,按 1.2.2.4 的仪器检测条件检测。

1.2.4 PAW 对鸡心果表面大肠杆菌的影响

1.2.4.1 大肠杆菌接种液制备 从 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱取出 1 支冻存管并溶解,在超净工作台内,用接种环挑取一环冻存菌液,划线接种于营养琼脂培养基上, $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温培养 18~24 h。挑取一环菌落,接种于 150 mL 营养肉汤液体培养基中,于 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 140 r/min 振荡培养 13 h,制备浓度为 10^9 CFU/mL 的菌悬液备用^[17]。

1.2.4.2 样品制备及处理 选取大小一致、成熟度相似、无病虫害且无机械损伤的鸡心果,用 75% 的乙

醇擦拭后,无菌水淋洗三次,再用无菌吸水纸吸干水分。将果实浸泡于 150 mL 大肠杆菌接种液中 20 min,随后移至无菌培养皿中,在超净工作台中晾 20 min,使菌体固定在果实表面^[18]。将染菌后的鸡心果分为 7 组,在不同放电功率(30、60、90、120 和 150 W)及鼓泡清洗条件下,以染菌但未清洗的鸡心果作为对照组,研究不同放电功率所制备的 PAW 对鸡心果表面大肠杆菌的控制效果。

1.2.4.3 大肠杆菌计数 将清洗后的鸡心果和对照组鸡心果分别放入 100 mL 的无菌生理盐水中,室温振荡洗脱,取 1 mL 振荡提取液于 9 mL 无菌生理盐水中,依次稀释 3~4 个梯度,将稀释后的样本涂布在营养琼脂培养基上,于 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温培养 18~24 h 后计数。统计菌落数在 10~300 个的可计数平板,按照式(3)计算鸡心果清洗前后大肠杆菌减少对数值:

$$\text{减少对数值} = \lg C_0 - \lg C \quad \text{式 (3)}$$

式中: C_0 为处理前菌落总数, CFU; C 为处理后菌落总数, CFU。

1.3 数据处理

采用 Excel 2021 对数据进行整理,数据以平均值 \pm 标准差表示,采用 SPSS 26 统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并用 Duncan's 法进行多重比较($P<0.05$,差异显著),用 Origin 2021 软件进行统计作图,每组实验重复三次。

2 结果与分析

2.1 PAW 对鸡心果表面农药残留的去除效果

2.1.1 不同放电功率所制备 PAW 对鸡心果表面农药残留的影响 如图 2 所示,与鼓泡清洗(5 种农药残留率 74.94%~99.10%)相比,不同放电功率制备的 PAW 显著降低了多菌灵、吡虫啉、戊唑醇、吡唑醚菌酯和阿维菌素 5 种农药的残留率($P<0.05$)。保持放电时间和气流量不变,在一定放电功率范围内,5 种农药的残留率随放电功率的增加呈下降趋势。但 PAW-150 W 处理后鸡心果表面 5 种农药的残留率均高于 PAW-120 W 处理后的残留率。ANOVA 分析结果表明,经 PAW-120 W 处理后,5 种农药的去除率均达到最高水平。其中,鸡心果表面多菌灵的去除效果最为显著,去除率高达 88.50%,是鼓泡清洗(10.77%)去除率的 8 倍。经 PAW-120 W 处理 3 min 后,5 种农药中吡虫啉的去除率最低,为 61.44%,而

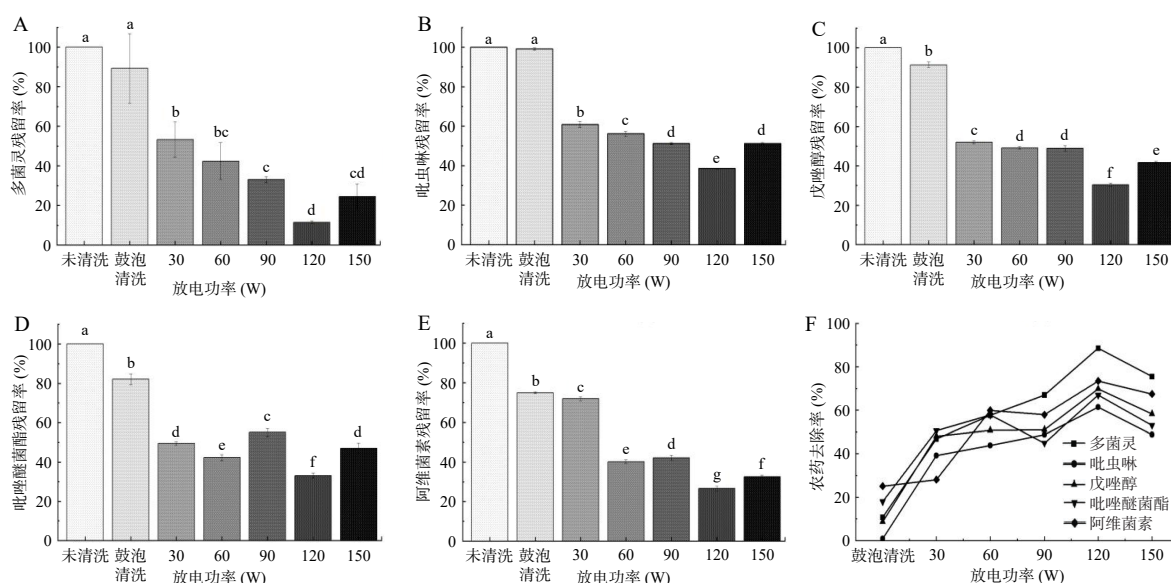


图2 不同放电功率所制备的PAW对鸡心果表面农药残留的影响

Fig.2 Effects of PAW generated by different discharge powers on pesticide residues on the surface of *X. stenosepala*

注: A、B、C、D、E 分别为不同放电功率下鸡心果表面多菌灵、吡虫啉、戊唑醇、吡唑醚菌酯和阿维菌素 5 种农药的残留率, F 为不同放电功率下鸡心果表面 5 种农药的去除率。不同小写字母表示存在显著性差异, $P < 0.05$, 图 3~图 4、图 6 同。

戊唑醇、吡唑醚菌酯和阿维菌素的去除率分别为 69.71%、66.88% 和 73.40%(图 2F)。O₃ 和 ·OH 作为 PAW 中的主要活性成分, 在农药降解过程中发挥着关键作用, 其中, O₃ 在酸性条件下通过直接反应降解农药, 通过裂解双键并与 ·OH、甲基(·CH₃)、甲氧基(·OCH₃)等官能团直接发生反应, 从而实现农药的氧化降解^[19]。而 ·OH 作为一种强氧化剂, 凭借其高达 2.80 eV 的氧化还原电位, 通过亲电攻击有效破坏农药分子中的化学键, 特别是对脂肪族和芳香族化合物表现出更高的降解效率^[20]。由于多菌灵分子中含有苯环、双键、·OCH₃ 等多个活性物质作用位点, 因此多菌灵能够被高效降解。

经 PAW-120 W 处理后, 5 种农药去除率均达到最大值, 其原因可能是较高的放电功率有利于放电装置内能量的增加, 从而产生更多的高能电子和自由基等活性物质, 进而提高单位体积内活性物质的浓度, 加快 PAW 处理过程中农药分子的降解速率。然而, 当放电功率进一步增加至 150 W 时, 5 种农药的去除率反而低于 PAW-120 W 处理后的去除率。推测其原因可能是过高的放电功率导致反应器温度升高, 不利于电子、O₃ 和 ·OH 等活性物质的产生, 降低了活性物质的生成速率和农药的降解速率。此外, 过高的放电功率还容易引发火花放电, 形成电流通道, 降低放电系统的稳定性, 导致大量的能量以热能形式流失, 降低能量的利用效率, 从而不利于农药的去除^[21]。崔运秋等^[22]的研究也报告了类似的结果, 适度增加电压和放电功率可提高四环素去除率; 但当电压和放电功率超过一定阈值时, 活性物质产生速率饱和, 且过多的电能转化为热能, 导致温度升高, 反而降低了四环素去除率及活性物质的有效性, 不利于有机物降解。因此, 为确保农药的去除效果, 本实验选取

120 W 的放电功率开展后续研究。

2.1.2 不同放电时间所制备 PAW 对鸡心果表面农药残留的影响 经 PAW 处理 1 min 后, 鸡心果表面的 5 种农药残留率显著低于未清洗的鸡心果 ($P < 0.05$)。当放电时间延长至 3 min 时, PAW 处理后鸡心果表面多菌灵、吡虫啉、戊唑醇、吡唑醚菌酯和阿维菌素 5 种农药的残留率均达到最低值, 分别为 37.12%、29.98%、34.52%、39.53% 和 18.51%(图 3A~图 3E)。当 PAW 处理时间超过 3 min 时, 5 种农药的残留率均呈现出先增加后减小的趋势, 推测原因可能是, 保持放电功率不变, 等离子体放电产生的 O₃、H₂O₂ 等活性物质的速率相对恒定, 在 1~3 min 内, 鸡心果表面农药的残留浓度较高, O₃、H₂O₂ 等活性物质与农药相互作用逐渐增强, 降解效率随之提高; 但随着放电时间的延长, 鸡心果表面农药残留量逐渐减少, 农药与活性物质反应后生成的中间产物可能会消耗部分活性物质, 从而降低与目标农药反应的活性物质浓度, 导致农药的降解效率下降^[23]。如图 3F 所示, 经 PAW 处理 3 min 后, 鸡心果表面 5 种农药的去除效果最为显著, 其中阿维菌素的去除率最高, 吡唑醚菌酯的去除率最低。这种差异可能与农药的官能团、稳定性及其在果实表面的附着方式有关。在 PAW 中, O₃、H₂O₂、NO₂⁻、NO₃⁻ 等活性物质凭借其强大的氧化能力, 通过破坏碳-碳双键等不饱和键和官能团, 进而分解多种有机化合物, 提高了农药的降解效率。阿维菌素是一种大环内酯类化合物, 其分子结构中含有酯基和缩醛结构, 这些结构在酸性条件下易发生水解, 导致其稳定性降低。此外, 阿维菌素分子还包含多个碳-碳双键和碳-氧双键等不饱和官能团, 以及多个 ·OH 和 ·OCH₃^[24], 这些官能团的存在使得阿维菌素分子具有较高的反应活性, 易与活性物

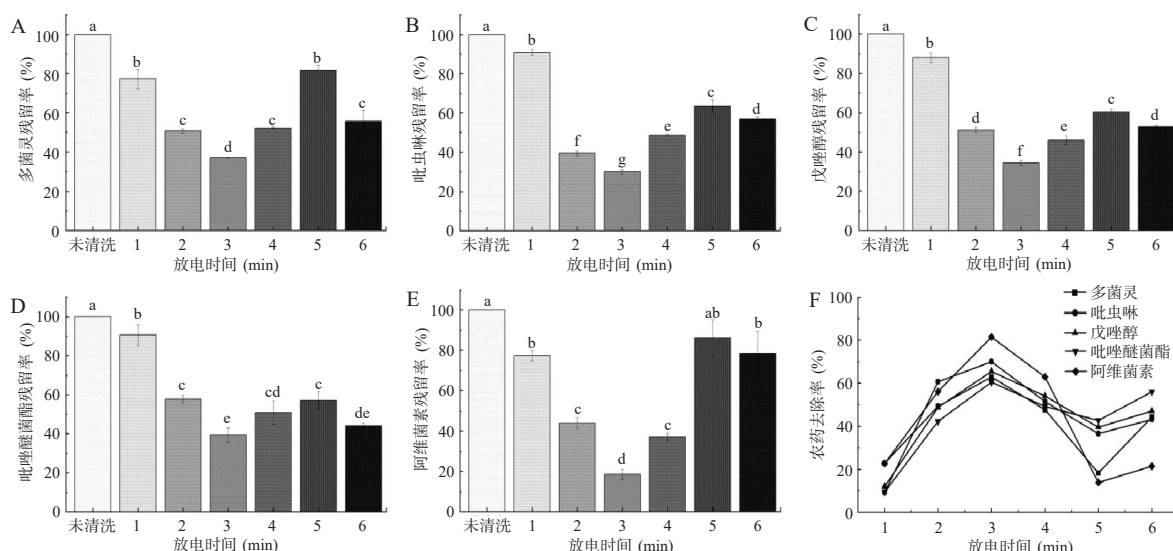


图3 不同放电时间所制备的PAW对鸡心果表面农药残留的影响

Fig.3 Effects of PAW generated by different discharge times on pesticide residues on the surface of *X. stenosepala*

注: A、B、C、D、E 分别为不同放电时间下鸡心果表面多菌灵、吡虫啉、戊唑醇、吡唑醚菌酯和阿维菌素 5 种农药的残留率, F 为不同放电时间下鸡心果表面 5 种农药的去除率。

质发生互作并被降解。同时,PAW 的高氧化还原电位(通常大于 500 mV)和酸性环境(pH 低于 3)被认为是促进农药降解的关键因素^[25]。这些特性共同作用,增强了 PAW 对农药的降解能力。尽管不同放电时间下 PAW 对 5 种农药的去除效果存在显著性差异,但总体变化趋势一致。综上,实验结果表明,PAW 处理鸡心果去除农残的最佳处理时间为 3 min,在此条件下,不仅能够确保最大限度地去除农药残留,同时还可以保持处理的有效性和经济性,因此固定处理时间为 3 min 开展后续研究。

2.1.3 不同气流量所制备 PAW 对鸡心果表面农药残留的影响 图 4A~E 表明,在放电功率和时间恒定的条件下,经不同放电气流量制备的 PAW 处理后,

鸡心果表面 5 种农药的残留率存在显著性差异。其中,戊唑醇在气流量为 3 L/min 时残留率最低(30.19%),阿维菌素在气流量为 4 L/min 时残留率最低(26.16%),而多菌灵、吡虫啉和吡唑醚菌酯在气流量为 3 L/min 和 4 L/min 时残留率无显著差异。这种差异可能与 PAW 中 H_2O_2 、 O_3 等活性物质的氧化还原作用及气流量的大小密切相关。如图 4F 所示,在气流量为 1 L/min 的低流速阶段,PAW 中的活性物质随活性气体含量的增加而增加,农药的去除率较高。在气流量为 2 L/min 的中流速阶段,可能由于 PAW 中活性物质分布的均匀性较差,且放电强度相对较弱,导致农药的去除率明显下降。在气流量为 3~6 L/min 高流速阶段,随着气流量的增大,等离子

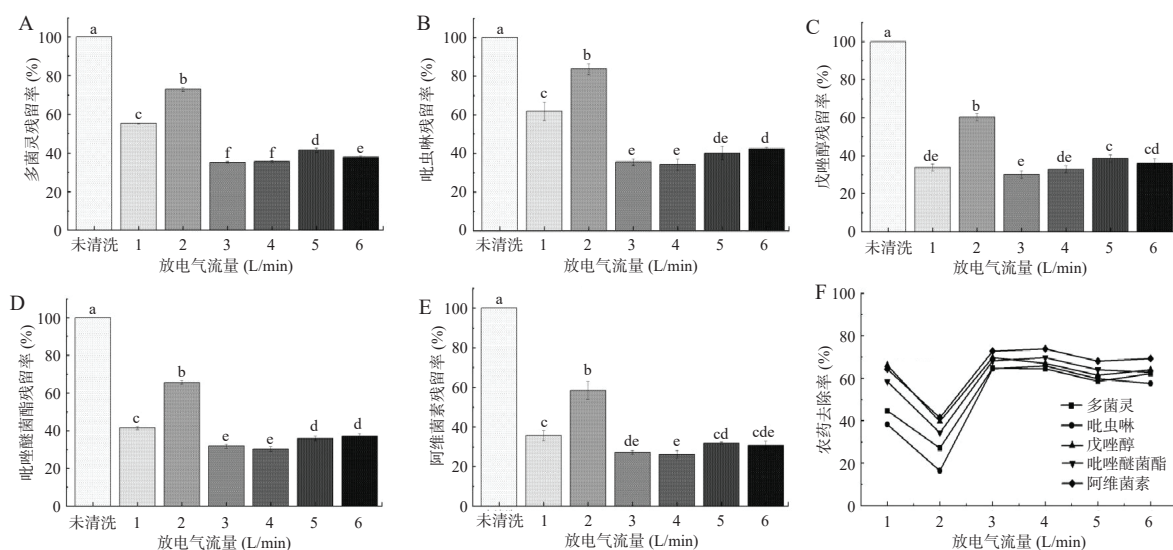


图4 不同放电气流量所制备的PAW对鸡心果表面农药残留的影响

Fig.4 Effects of PAW generated by different discharge flow rates on pesticide residues on the surface of *X. stenosepala*

注: A、B、C、D、E 分别为不同放电气流量下鸡心果表面多菌灵、吡虫啉、戊唑醇、吡唑醚菌酯和阿维菌素 5 种农药的残留率, F 为不同放电气流量下鸡心果表面 5 种农药的去除率。

体放电的均匀性和强度增强,PAW 中活性物质的含量增多,农药的去除率随之升高。然而,过高的气流量可能会导致部分活性物质被吹离 PAW,从而导致活性物质的利用率降低^[26],因此在 5~6 L/min 的高流速阶段,5 种农药的去除率有所下降。宋玲^[27]的研究同样指出,当鼓气速率过高时,气体在电场中的作用时间缩短,部分气体未能充分电离,同时过快的气流可能导致活性物质未能与目标化合物充分反应就被带出反应体系,从而降低了活性物质的利用率和与目标物质的反应效率。因此,实验结果表明,当放电气流量为 3 L/min 时,可实现农药的有效去除与能源消耗的平衡。综上所述,针对鸡心果表面农药残留,PAW 最佳处理条件为:放电功率 120 W,放电时间 3 min,气流量 3 L/min。

2.2 PAW 理化特性测定及其对 5 种农药降解作用的研究

2.2.1 不同等离子体放电功率及处理时间对 PAW pH 和电导率的影响

如图 5 所示,去离子水的初始 pH 和电导率分别为 5.25 和 1.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$,PAW 的 pH 随着放电时间的延长及放电功率的增加而显著降低($P<0.05$)。经 150 W 处理 6 min 后,PAW 的 pH 降低至 3.18(图 5A)。pH 下降的原因可能是等离子体在放电的过程中产生的亚硝酸根自由基($\cdot\text{NO}_2$)和 $\cdot\text{OH}$ 等物质溶解于水中,生成了亚硝酸(HNO_2)和硝酸(HNO_3)等物质,从而使 PAW 呈酸性^[28-29]。酸

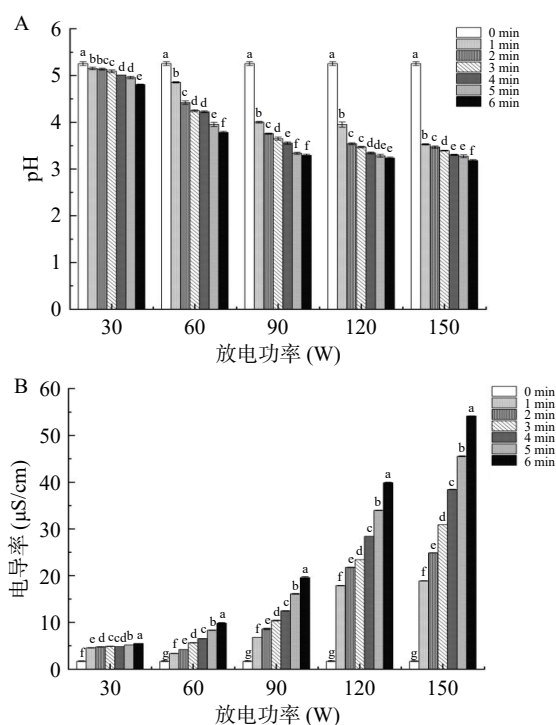


图 5 不同等离子体放电功率及时间对 PAW pH(A)和电导率(B)的影响

Fig.5 Effects of different plasma discharge powers and times on pH (A) and conductivity (B) of PAW

注:不同小写字母表示相同放电功率下不同时间处理组存在显著性差异, $P<0.05$ 。

性环境有利于有机污染物的降解,进而可能有助于减少农药残留^[30]。这主要是因为,在酸性条件下, H_2O_2 能够更高效地生成强氧化性自由基($\cdot\text{OH}$), $\cdot\text{OH}$ 具有极高的氧化还原电位,能够快速攻击并破坏有机污染物中的化学键,从而加速农药分子的降解。此外,酸性环境还能增强 O_3 等其他活性物质的氧化效率,使其在与农药分子反应时更加活跃,进一步提高了农药降解的速率和效果^[19-20]。

除了 pH 外,电导率也是反映 PAW 中离子浓度变化的重要指标^[31-32]。如图 5B 所示,当放电功率由 30 W 增加到 150 W,PAW 的电导率急剧增加;在同一放电功率下,电导率随放电时间的延长而上升,特别在 150 W 放电功率下处理 6 min 后,PAW 的电导率达到最大值 54.13 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。电导率的增加主要归因于:在等离子体放电过程中,空气中的氮气(N_2)和氧气(O_2)被电离,生成了一氧化氮(NO), NO 进一步与 O_2 或 O_3 反应生成二氧化氮(NO_2), NO_2 易溶于水,通过 NO_2 捕获电子或 NO 的氧化作用,生成了 NO_2^- 和 NO_3^- ^[33];同时,等离子体在放电过程中产生的高能电子加速了水分子的电离,生成离子、次级电子等活性物质^[34],这些离子和电子的存在显著增加了溶液的电导率。随着放电功率和时间的增加,放电强度增大,PAW 产生的电子和离子的密度更高,因此电导率的变化更为显著^[35]。这些结果与 Tian 等^[36]和 Laurita 等^[37]的研究一致。

2.2.2 PAW 对 5 种农药降解的影响

为了探究 PAW 对鸡心果表面农药的去除作用是清洗、降解,亦或是两者协同,在 PAW 处理鸡心果表面农药残留的最佳条件下(放电功率 120 W、放电时间 3 min、气流量 3 L/min),对农药溶液样品进行处理,并以未经等离子体气体处理的农药溶液作为空白对照。结果表明,多菌灵、吡虫啉和戊唑醇的浓度随着时间的延长显著降低($P<0.05$),而吡唑醚菌酯和阿维菌素在水中的溶解性较差而未被检出。经 PAW 处理 3 min 后,多菌灵的浓度比初始浓度降低了 27.26%,吡虫啉和戊唑醇的浓度分别减少了 645.50 和 300.70 $\mu\text{g}/\text{L}$ (表 2),实验结果表明,PAW 对农药具有显著的降解效果,并且其降解效率随着 PAW 酸性的增强和电导率的增加而提升。然而,由于农药稀释液的初始浓度过高,而等离子体生成活性物质的速率是一定的,导致农药在水中的降解效率(多菌灵 27.26%、吡虫啉 19.97% 和戊唑醇 21.68%)低于鸡心果表面的降解效率(多菌灵 64.80%、吡虫啉 64.44% 和戊唑醇 69.81%)。这种降解效果的差异可能归因于多种因素,包括但不限于农药在不同介质中表面吸附与溶解性的差异、反应环境的复杂性以及初始浓度的影响。

2.3 PAW 对鸡心果表面大肠杆菌的影响

在放电时间为 3 min,气流量为 3 L/min 的条件下,研究了不同放电功率所制备的 PAW 对鸡心果表

表 2 PAW 中 5 种农药的残留浓度
Table 2 Residue concentrations of five pesticides in PAW

时间(min)	农残				
	多菌灵(μg/L)	吡虫啉(μg/L)	戊唑醇(μg/L)	吡唑醚菌酯(μg/L)	阿维菌素(μg/L)
空白对照	4555.34±347.20 ^a	3233.02±153.76 ^a	1387.26±10.94 ^a	—	—
1	4442.04±96.62 ^a	2989.15±59.72 ^b	1233.03±14.37 ^b	—	—
2	3551.24±35.67 ^b	2793.19±85.14 ^{bc}	1172.35±14.26 ^{bc}	—	—
3	3313.33±66.53 ^b	2587.52±19.40 ^c	1086.56±72.49 ^c	—	—

注: 同列不同小写字母表示有显著性差异, $P<0.05$ 。—表示未检出。

面大肠杆菌的控制效果。由图 6 可知, 鸡心果经鼓泡清洗后, 大肠杆菌减少了 1.14 lg CFU/mL, 经 PAW-150 W 处理后, 大肠杆菌减少了 1.17 lg CFU/mL, 去除率最高可达 92.44%, 相比之下, PAW-60 W 处理后大肠杆菌的减少对数值最小(0.81 lg CFU/mL)。ANOVA 分析结果表明, PAW 处理与鼓泡清洗的效果无显著性差异, 这可能归因于当前等离子体发生器的工作电压 8 kV 所限(由于本装备设计为连续式 PAW 发生和同时清洗模式, 电压强度受限)。Han 等^[38] 研究报道, 在 PAW 的制备时间 30 min, 放电电压 15.2 kV, 放电频率 5.5 kHz 的条件下, 大肠杆菌减少了约 7 lg CFU/mL。可见在相对较高的放电电压、频率和时间条件下, 大肠杆菌的降低对数值更高。先前的研究在探索 PAW 对大肠杆菌的杀灭机制时, 初步认为其杀灭效果与制备 PAW 的放电时间和放电强度(包括放电电压、频率和功率)密切相关。当 PAW 中活性物质的浓度达到一定水平时, 其酸性 pH 和高电导率首先导致微生物产生物理应激, 随后, PAW 中的活性物质通过改变肽聚糖的结构和化学键, 诱导细胞壁氧化, 进而导致细胞膜上的蛋白质和脂质氧化, 致使细胞膜去极化、膜渗漏和细胞死亡^[25]。因此, 若放电电压不足, PAW 中 H_2O_2 、 O_3 及 NO_2^- 等活性物质的浓度将受到限制, 无法有效杀灭大肠杆菌。综上所述, 在本研究的参数条件下, PAW 对鸡心果的清洗效果主要依赖于物理冲击, 而非微生物灭活, 这在一定程度上影响了对大肠杆菌的控制效果^[39]。由此可见, 研究结果为后续连续式 PAW 制备及同步清洗装备的设计与优化, 提出了更高的要求。若要提高 PAW 对微生物的杀灭效果, 未来在 PAW

制备装备方面的研究应聚焦于提升和优化等离子体发生器的放电工作电压、频率等关键参数, 以提高 PAW 中的活性物质的浓度, 从而增强其杀菌能力, 拓展其在食品杀菌消毒领域的应用潜力。

3 结论

本研究采用 PAW 制备同步联合鼓泡清洗技术, 探究了 PAW 处理对鸡心果表面农药残留和大肠杆菌的作用效果。结果表明, PAW 处理后鸡心果表面 5 种农药残留率显著降低。在放电功率为 120 W, 放电时间为 3 min, 气流量为 3 L/min 的条件下, 鸡心果表面 5 种农药的去除率均达到最大值, 酸性环境和高电导率在农药的去除效果中起着重要作用。基于当前等离子体发生器的工作参数, PAW 和鼓泡清洗对大肠杆菌的控制效果无显著性差异, 推测可能与等离子体发生器的放电强度和时间有关。

与传统 PAW 静态制备和清洗相比, 本研究实现了 PAW 制备与清洗的同步和连续化, 提高了 PAW 制备和物料清洗效率, 满足了果实连续输送及流动清洗的实际需求。在实验室规模水平, 本研究初步验证了 PAW 在果蔬加工产业中原料连续清洗的潜在应用前景, 但仍需进一步系统研究以完善该技术及装备。未来研究应聚焦于 PAW 的化学特性及其与农药、微生物的作用机制; 活性物质与食品组分的互作及其对食品内在品质的影响; 设备性能、稳定性、能效、清洗工艺及成本效益的优化; 毒理学评估和消费者接受度等。PAW 清洗技术具有绿色环保、无污染的特点, 在农残去除方面潜力显著, 若能实现从小试到中试或生产型设备的升级和应用, 将为鲜果原料的清洗预处理、全果制浆的质量安全品质提升, 提供有力的技术和装备支撑。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 贾朝爽, 王志华, 王文辉, 等. 不同厚度自发气调包装袋对塞外红苹果冷藏期和货架期品质的影响[J]. 中国果树, 2023(5): 23–27, 42. [JIA C S, WANG Z H, WANG W H, et al. Effect of different thickness of spontaneous modified atmosphere packaging bags on the quality of cold storage and shelf life of 'Saiwaihong' apple[J]. China Fruits, 2023(5): 23–27, 42.]

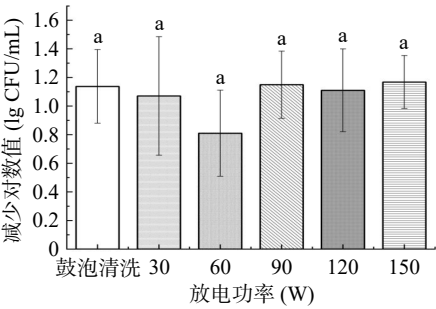


图 6 不同放电功率所制备的 PAW 对鸡心果表面大肠杆菌的控制效果
Fig.6 Control effects of PAW generated by different discharge powers on *E. coli* on the surface of *X. stenosepala*

- [2] 孙世民, 田帅, 贾朝爽, 等. 塞外红苹果果实 1-MCP 熏蒸结合低温贮藏方法的研究[J]. 中国果树, 2024(10): 21–27. [SUN S M, TIAN S, JIA C S, et al. Study on 1-MCP fumigation combined with low-temperature storage method for 'Saiwaihong' apple fruit[J]. China Fruits, 2024(10): 21–27.]
- [3] YANG C, ZHANG M, LU S, et al. Compound enzyme treatment depolymerizes cell wall polysaccharides and improves pulp quality of Goji Berry (*Lycium barbarum* L.)[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(11): 9252–9270.
- [4] MALAHLELA H K, BELAY Z A, MPHAAHLELE R R, et al. Recent advances in activated water systems for the postharvest management of quality and safety of fresh fruits and vegetables[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(2): e13317.
- [5] PERINBAN S, ORSAT V, RAGHAVAN V. Nonthermal plasma-liquid interactions in food processing: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(6): 1985–2008.
- [6] HADINOTO K, NIEMIRA B A, TRUJILLO F J. A review on plasma-activated water and its application in the meat industry[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(6): 4993–5019.
- [7] ZHENG Y, WU S, DANG J, et al. Reduction of phoxim pesticide residues from grapes by atmospheric pressure non-thermal air plasma activated water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 377: 98–105.
- [8] MURTAZA A, CHENG J H, SUN D W. Effect of plasma activated water and buffer solution on fungicide degradation from tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit[J]. Food Chemistry, 2021, 350: 129195.
- [9] XIAO H, ZHANG S, XI F, et al. Preservation effect of plasma-activated water (PAW) treatment on fresh walnut kernels[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 85: 103304.
- [10] MUSTAPHA A T, ZHOU C S, WAHIA H, et al. Sonozonation: Enhancing the antimicrobial efficiency of aqueous ozone washing techniques on cherry tomato[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 64: 105059.
- [11] ZHANG W L, CAO J K, JAING W B. Application of electrolyzed water in postharvest fruits and vegetables storage: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 599–607.
- [12] JIA W, YAN C, ATAWULA T, et al. Degradation of pesticide residues by gaseous chlorine dioxide on table grapes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 137: 142–148.
- [13] SAITO S, WANG F, OBENLAND D, et al. Effects of peroxacetic acid on postharvest diseases and quality of blueberries[J]. Plant Disease, 2021, 105(10): 3231–3237.
- [14] GAO Y W, LI M B, SUN C, et al. Microbubble-enhanced water activation by cold plasma[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 446: 137318.
- [15] 王迎鑫, 高庆超, 李亚辉, 等. 苹果泥加工及储藏过程中 6 种农药残留变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(24): 8128–8134. [WANG Y X, GAO Q C, LI Y H, et al. Residue changes of 6 kinds of pesticides during the production and storage of apple puree[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(24): 8128–8134.]
- [16] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GB 23200.121-2021 食品安全国家标准 植物源性食品中 331 种农药及其代谢物残留量的测定液相色谱-质谱联用法[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021: 2–4. [National Health Commission of the People's Republic of China. GB 23200.121-2021 National food safety standard Determination of 331 pesticides and metabolites residues in foods of plant origin Liquid chromatography-tandem mass spectrometry method[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021: 2–4.]
- [17] 相启森, 张嵘, 杜桂红, 等. 等离子体活化水对沙门氏菌的灭活作用及机制研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 138–143. [XIANG Q S, ZHANG R, DU G H, et al. Inactivation effects and mechanisms of plasma-activated water against *S. typhimurium*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 138–143.]
- [18] 刘元靖, 周育, 陈文学, 等. 草莓主要污染微生物类群抑菌清洗方法研究[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(8): 1422–1427. [LIU Y J, ZHOU Y, CHEN W X, et al. Study on the antimicrobial cleansing methods for reducing microorganism in strawberry[J]. Acta Agricultrae Zhejiangensis, 2015, 27(8): 1422–1427.]
- [19] AIDOO O F, OSEI-OWUSU J, CHIA S Y, et al. Remediation of pesticide residues using ozone: A comprehensive overview[J]. Science of the Total Environment, 2023, 894: 164933.
- [20] LEE Y Y, CHENG H C, FAN C H. Mechanistic explanation and influence of molecular structure on chemical degradation and toxicity reduction by hydroxyl radicals[J]. Rsc Advances, 2024, 14(20): 13926–13933.
- [21] 姜艳艳. 介质阻挡低温等离子体降解水中吡虫啉的研究[D]. 济南: 山东大学, 2013. [JIANG Y Y. The study on the degradation of acetaprid in pesticide wastewater by the low-temperature plasma using dielectric barrier discharge[D]. Jinan: Shandong University, 2013.]
- [22] 崔运秋, 程久珊, 籍海峰, 等. 大气压降膜 DBD 等离子体去除废水中四环素[J]. 环境工程学报, 2020, 14(2): 359–371. [CUI Y Q, CHENG J S, JI H F, et al. Removal of tetracycline from wastewater by atmospheric pressure falling filmdielectric barrier discharge plasma[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(2): 359–371.]
- [23] 柯梁建, 卢秀圆, 王兴权, 等. 介质阻挡放电低温等离子体降解水中吡虫啉、啉虫脒和三唑磷的研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 262–272. [KE L J, LU X Y, WANG X Q, et al. Degradation of imidacloprid, acetamiprid and triazophos in aqueous solution by dielectric barrier discharge low-temperature plasma[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 262–272.]
- [24] 向阳, 王元, 李乐天, 等. 阿维菌素在水产养殖生态系统中降解、毒性及其生态风险分析[J]. 生态毒理学, 2023, 18(3): 248–259. [XIANG Y, WANG Y, LI L T, et al. Degradation, toxicity and ecological risk analysis of avermectin in aquaculture ecosystem[J]. Asian Journals of Ecotoxicology, 2023, 18(3): 248–259.]
- [25] HAN Q Y, WEN X, GAO J Y, et al. Application of plasma-activated water in the food industry: A review of recent research developments[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134797.
- [26] 董乃舟. 介质阻挡放电低温等离子体气流调控及其对降解阿维菌素的影响机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2023. [DONG N Z. Investigation on airflow control of dielectric barrier discharge non-thermal plasma and its effecton degradation of avermectin[D]. Jinan: Shandong University, 2023.]
- [27] 宋玲. 气相介质阻挡放电活性粒子喷射降解水中有机污染物的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. [SONG L. Degradation of organic compounds in wastewater by active species sprayed

in a gas phase dielectric barrier discharge system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.]

[28] WANG H X, HAN R W, YUAN M D, et al. Evaluation of plasma-activated water: Efficacy, stability, physicochemical properties, and mechanism of inactivation against *Escherichia coli*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 184: 114969.

[29] MOHANDOSS S, MOHAN H, BALASUBRAMANIYAN N, et al. Pearl millet seed surface modification and improved germination by non-thermal plasma discharge: Understanding the role of reactive species[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2024, 44(2): 1031–1051.

[30] LI P, TAKAHASHI M, CHIBA K. Degradation of phenol by the collapse of microbubbles[J]. *Chemosphere*, 2009, 75(10): 1371–1375.

[31] MA R N, WANG G M, TIAN Y, et al. Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 300: 643–651.

[32] YANG X, ZHANG C, LI Q, et al. Physicochemical properties of plasma-activated water and its control effects on the quality of strawberries[J]. *Molecules*, 2023, 28(6): 2677.

[33] HA AN QUOC T, THIEN HUU P, DUYEN KY VO N, et al. Non-thermal plasma activated water for increasing germination and plant growth of *Lactuca sativa* L[J]. *Plasma Chemistry and Plasma*

Processing, 2022, 42(1): 73–89.

[34] LU B, ZHANG X, YU X, et al. Catalytic oxidation of benzene using DBD corona discharges[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(1): 633–637.

[35] THIRUMDAS R, KOTHAKOTA A, ANNAPURE U, et al. Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 77: 21–31.

[36] TIAN Y, MA R N, ZHANG Q, et al. Assessment of the physicochemical properties and biological effects of water activated by non-thermal plasma above and beneath the water surface[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2015, 12(5): 439–449.

[37] LAURITA R, BARBIERI D, GHERARDI M, et al. Chemical analysis of reactive species and antimicrobial activity of water treated by nanosecond pulsed DBD air plasma[J]. *Clinical Plasma Medicine*, 2015, 3(2): 53–61.

[38] HAN Q Y, HE Z Y, ZHONG C S, et al. The optimization of plasma activated water (PAW) generation and the inactivation mechanism of PAW on *Escherichia coli*[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(11): e17120.

[39] 倪思思. 等离子体活化水在中式香肠中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. [NI S S. Application of plasma activated water in Chinese sausage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.]