

# 表面不规则的难清洗果蔬清洗技术研究进展

魏丽娜\*, 吴玉茜, 张艳, 徐颖

(陕西科技大学食品科学与工程学院, 西安 710021)

**摘要:** 清洗是果蔬前处理中不可或缺的重要环节, 正确的清洗方式可以有效减少微生物含量和农药残留, 驱除果蔬内部藏有的虫体, 延长果蔬保质期, 保障人们的食用安全。不规则的果蔬因表面凹凸不平而难以清洗干净, 尤其是窝眼和缝隙处易有微生物与农药残留。而且像西兰花和菜花内部还藏有虫体, 土豆和生姜还带有泥沙, 更增加了清洗难度。本文从表面不规则的难清洗果蔬存在的微生物、农药残留和虫体残留的食用安全问题出发, 介绍了目前常用的物理清洗技术(超声波清洗、气泡清洗和干洗)、化学清洗技术(家庭常用和工业常用)和复合清洗技术(超声波协同和超高压协同), 并从微生物、农药残留和虫体残留方面评价了这些清洗技术对常见的表面不规则的难清洗果蔬的清洗效果, 并对其在应用中存在的问题进行了探讨, 为表面不规则的难清洗果蔬的清洗提供参考。

**关键词:** 表面不规则; 果蔬; 清洗技术; 微生物; 农药残留; 虫体残留

## Research progress on cleaning technology of hard-to-clean fruits and vegetables with irregular surfaces

WEI Li-Na\*, WU Yu-Xi, ZHANG Yan, XU Ying

(School of Food Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** Cleaning is an indispensable part of the pre-processing of fruits and vegetables. The correct cleaning method can effectively reduce the microbial content and pesticide residues, drive away the insects hidden inside the fruits and vegetables, extend the shelf life of fruits and vegetables, and ensure the safety of people's consumption. Irregular fruits and vegetables are difficult to clean because of their uneven surfaces, especially in the nooks and crannies, which are prone to microbial and pesticide residues. Also, things like broccoli and cauliflower harbour worm bodies inside, and potato and ginger have sediment, making them even more difficult to clean. Starting from the food safety problems of microorganisms, pesticide residues and insect residues in hard-to-clean fruits and vegetables with irregular surfaces, this paper introduced the physical cleaning techniques (ultrasonic cleaning, bubble cleaning and dry cleaning), chemical cleaning techniques (commonly used at home and in industry) and combined cleaning techniques (ultrasonic synergy and ultra-high pressure synergy), and evaluated the cleaning effects of these cleaning technologies on hard-to-clean fruits and vegetables with irregular surfaces in terms of microbiological, pesticide residues and insect residues. This paper provides a reference for the cleaning of hard-to-clean fruits and vegetables with irregular surfaces, and discusses the problems that exist in their application.

基金项目: 陕西省重点研究开发项目(2017TSCXL-NY-02-03)、陕西省重点研发计划项目(2022NY-027)

Fund: Supported by the Key Research and Development Project of Shaanxi Province (2017TSCXL-NY-02-03), and the Key Research and Development Plan of Shaanxi Province (2022NY-027)

\*通信作者: 魏丽娜, 博士, 副教授, 主要研究方向为果蔬加工及保鲜。E-mail: weilina\_sust@163.com

\*Corresponding author: WEI Li-Na, Ph.D, Associate Professor, School of Food Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China. E-mail: weilina\_sust@163.com

**KEY WORDS:** irregular surfaces; fruits and vegetables; cleaning technology; microorganism; pesticide residue; insect residue

## 0 引言

近年来,因为果蔬加工前处理中清洗环节不充分导致的食品安全问题日益增多,尤其是表面不规则的难清洗果蔬,因凹凸不平处易有微生物残留,爆发了多起食源性疾病(食物中毒),如:草莓导致甲型肝炎病毒的爆发<sup>[1]</sup>;羽衣甘蓝因单核细胞增生性李斯特菌(*Listeria monocytogenes*, *L. monocytogenes*)污染而被召回<sup>[2]</sup>。农药在防治作物病虫害、草害和调节作物生长等方面起到了巨大的作用,但是果蔬中过量的农药残留会影响人类的健康<sup>[3]</sup>。菜花、草莓等果蔬,农药易残留在凹凸不平的表面,难以通过雨水、空气等环境净化,易超标,如:黑龙江省友谊县市场监督管理局检出某蔬菜店的西蓝花氧乐果为0.28 mg/kg(最大残留限量为 $\leq 0.02$  mg/kg)<sup>[4]</sup>;呼和浩特市农牧局执法人员检出欣月种植农民专业合作社生产销售的草莓烯酰吗啉为0.17 mg/kg(最大残留限量为0.05 mg/kg)<sup>[5]</sup>。虽然杀虫剂能很好地防治害虫,但是过多地依赖杀虫剂会增加虫体的抗药性以致果蔬采后仍有虫体残留,如:菜花、西兰花等蔬菜,虫体(斜纹夜蛾、甜菜夜蛾、菜青虫和小菜蛾)可藏匿于蔬菜内部,使得常规清洗变得困难。

相对于表面光滑规则的果蔬而言,表面不规则的果

蔬因其凹凸不平及不规则的形状,存在较多的窝眼及缝隙,更难清洗,并易导致微生物和农药残留,从而给果蔬制品,特别是鲜食及鲜切等果蔬制品食用带来潜在的安全问题。基于此,本文综述了现有的物理、化学及复合清洗技术应用用于表面不规则的难清洗果蔬的研究现状,以期多种难清洗果蔬的清洗方式提供一定借鉴。

## 1 物理清洗技术

目前物理清洗技术,应用最为广泛的为超声波清洗技术,其次还有气泡清洗以及干洗等,其分别利用超声波、冲击和机械摩擦作用除去果蔬表面的污垢,不需要添加任何化学清洗剂,具有安全、高效、无腐蚀和环保等优点。表1总结了物理清洗技术对表面不规则果蔬的清洗效果。

### 1.1 超声波清洗

超声波清洗主要是靠超声波的空化作用,空化泡破碎瞬间产生的巨大冲击波,能够有效破坏果蔬表面以及缝隙的污染物,非常适用于形状不规则、表面不光滑的果蔬清洗。许多文献报道过超声波清洗可以减少表面不规则的果蔬微生物含量,如:赵跃萍等<sup>[6]</sup>发现超声波清洗可减少芹菜中存在的细菌和大肠杆菌(*Escherichia coli*, *E. coli*)的数量,并

表1 物理清洗技术对表面不规则的果蔬清洗效果研究

Table 1 Study on the effects of physical cleaning technology on fruits and vegetables with irregular surfaces

| 清洗技术  | 食品基质        | 清洗参数                    | 食用安全问题                  | 减少量          | 参考文献 |
|-------|-------------|-------------------------|-------------------------|--------------|------|
| 超声波清洗 | 芹菜          | 30°C 50 W<br>10 min     | 菌落数                     | 0.7 lg cfu/g | [6]  |
|       |             |                         | <i>Escherichia coli</i> | 0.4 lg cfu/g |      |
|       | 葡萄干         | 100 W 5 min<br>料液比 1:10 | 霉菌                      | 95.6%        | [7]  |
|       |             |                         | 温度 55°C                 |              |      |
|       | 红枣          | 时间 4 min<br>功率 100 W    | 细菌总数                    | <50 CFU/g    | [8]  |
|       |             |                         | $\alpha$ -氯氰菊酯          | 91.2%        |      |
|       | 草莓          | 40 kHz 5 min            | 吡啶菌酯                    | 89.4%        | [9]  |
|       |             |                         | 戊唑醇                     | 84.5%        |      |
|       |             |                         | 毒死蜱                     | 79.1%        |      |
|       |             |                         | 虫体                      | 97%          |      |
| 西兰花   | 450 W 4 min | 虫体                      | 93.01%                  | [3]          |      |
|       |             | 菜花                      | 93.01%                  |              |      |
| 气泡清洗  | 散叶圆白菜       | 160 L/min<br>3 min      | 损伤率                     | 8.1%         | [10] |
|       |             |                         | 清洁率                     | 70%          |      |
|       | 西兰花         | 4000 L/h                | 虫体                      | 90%          | [11] |
| 干洗    | 土豆          |                         | 泥沙清洁率                   | >95%         | [12] |
|       |             |                         | 损伤率                     | <1%          |      |

且发现随着微生物数量的减少,芹菜中亚硝酸盐的增加量也在减缓,是因为亚硝酸盐的形成跟杂菌有密切关系;较为褶皱的葡萄干易存在微生物污染问题,尤其是霉菌污染,汤梦婷<sup>[7]</sup>以黑加仑葡萄干为对象,研究发现经适宜的超声强度清洗,可大大减少其表面霉菌残留;超声波清洗红枣目前仅有张春兰等<sup>[8]</sup>做过研究,发现超声波清洗可降低红枣细菌总数,并且清洗温度越高,功率越大,细菌总数越少,但是清洗时间对其影响不大。针对表面不规则的果蔬农药残留问题,LOZOWICKA 等<sup>[9]</sup>发现超声波清洗可降低生草莓中 16 种农药(10 种杀菌剂和 6 种杀虫剂)的残留量;陈迪勇等<sup>[13]</sup>研究表明超声波清洗可有效去除白菜表面的有机磷农药(敌敌畏、乐果、甲基对硫磷、对硫磷),并且超声处理时间的延长可以提高清洗效果,但是过度延长处理时间会导致蔬菜组织的破坏程度加剧。利用超声波会影响虫体的组织机能、对其神经系统产生干扰的原理<sup>[3]</sup>,黄晓鹏<sup>[3]</sup>针对西兰花和菜花内部易存在虫体的问题,研究了超声波清洗对西兰花和菜花的驱虫效果,发现西兰花和菜花经超声清洗,除虫率分别达到 97%和 93.01%。可见,超声波清洗技术对表面不规则的果蔬有很好的清洗效果。但是超声波清洗参数过大,会对果蔬品质产生不良影响(如:破坏组织状态和减少营养物质含量),所以可以考虑与紫外线<sup>[14]</sup>、辐射技术<sup>[15]</sup>和洗洁精等表面活性剂<sup>[16]</sup>相结合,达到良好清洗效果的同时可以很好的维持果蔬品质。

## 1.2 气泡清洗

气泡清洗是一种利用风机在水下产生气体形成气泡来清洗果蔬的方法。当气泡上升时,冲击果蔬,使其振荡并翻滚,而且气泡带动的水浪和爆裂后的水花进入果蔬表面的凹凸缝隙以及茎杆的夹缝处,可以有效地冲掉泥沙和杂物,从而达到清洗果蔬的目的<sup>[17]</sup>。丁小明等<sup>[10]</sup>使用自行搭建的气泡式清洗机研究了蔬菜清洗效果与处理参数之间的关系,发现该清洗机的最佳清洗时间为 3 min,最大清洗体积比与蔬菜的密度、清洗液浊度、清洗量呈正线性相关,清洁率可达到 70%以上。此外,在清洗液浊度允许范围内,清洗液可以连续使用,从而节约了资源。陈亦辉等<sup>[11]</sup>使用气泡清洗机对西兰花除虫效果进行了研究,发现气泡清洗机的气体流量增加到 4000 L/h 时,除虫率最高达到 90%。可见,气泡清洗需要控制好气体流量和清洗时间等处理条件,如果气体流量过小,果蔬受到的水和气泡的作用就会减弱,无法达到清洗的效果;而如果气体流量过大,则可能会导致某些杂质还来不及被过滤除去,再次附着在果蔬表面,而且过高的气体流量也会增加能源消耗。

## 1.3 干洗技术

干洗技术,是指不经过水洗,而是利用特定的设备来完成除杂任务,主要适用于水洗后易出现腐烂问题的果蔬以及含泥沙较多的果蔬的初步清洗。杨红光等<sup>[12]</sup>针对马铃

薯收获后泥沙含量较多以及水洗后易发生腐烂问题,采用干洗技术研究马铃薯的清洗,发现马铃薯经各种干洗机干洗以后,泥沙清洁率普遍达到 95%以上,伤薯率普遍低于 1%。但是科研工作者们对干洗技术在果蔬中的应用研究有限,后续应扩大干洗技术应用的食品基质,同时也需加强小型果蔬干洗设备的研制,以便在实验室开展小规模研究。

## 2 化学清洗技术

目前,化学清洗技术主要包括以家庭常用的盐水清洗和小苏打( $\text{NaHCO}_3$ )清洗,以工业常用的二氧化氯( $\text{ClO}_2$ )清洗、过氧乙酸(peroxyacetic acid, PAA)清洗、臭氧水清洗、电解水清洗和等离子体活化水(plasma-activated water, PAW)清洗这两大类。表 2 列举了各种化学清洗技术对表面不规则的不同果蔬微生物和农药残留的清洗效果研究。

### 2.1 家庭常用的化学清洗技术

食盐清洗作为一种有效去除果蔬农药残留和减少微生物存在的清洗方式,被家庭广泛使用。盐水浓度比果蔬组织细胞中细胞液浓度大,导致微生物细胞破坏,同时也导致果蔬表面的农药渗透到盐水中,从而使果蔬微生物数量降低、农药残留量降低。王晓军<sup>[30]</sup>发现食盐清洗的时间和浓度跟农药去除率不都成正比,其中,1%食盐水清洗蔬菜 10~15 min,对农药残留去除效果最好。刘英等<sup>[18-19]</sup>、王微等<sup>[31]</sup>发现淡盐水清洗对芹菜里面常见的啮螬酯、吡虫啉和有机磷农药(甲拌磷、二嗪农、甲基对硫磷、马拉硫磷、水胺硫磷和氧化乐果)有较好的去除效果,建议用盐水浸洗 10~15 min 来清洗芹菜。盐水溶液因具有较高的渗透压,还可起到一定驱虫作用。王颖等<sup>[32]</sup>发现 3%盐水清洗杨梅,对杨梅的虫体有很好的去除效果。 $\text{NaHCO}_3$ 清洗主要是通过改变清洗液的酸碱度,将果蔬中的农药溶解到清洗液中,从而达到减少微生物、去除农药残留的目的。樊皓宇<sup>[20]</sup>发现 10%  $\text{NaHCO}_3$  溶液对草莓的农药残留(联苯腈酯、多菌灵和多效唑)有很好的洗脱效果,推荐食用草莓之前用稀苏打水浸泡 10 min 以上。可见,食盐和  $\text{NaHCO}_3$  清洗可以作为家庭清洗表面不规则果蔬的方法,但是溶液浓度和浸泡时间跟清洗效果和品质不是呈正比的,所以选择合适的浓度和浸泡时间是非常重要的。

### 2.2 工业常用的化学清洗技术

$\text{ClO}_2$  是一种易溶于水的强氧化剂,可以作为清洗技术是因为强的氧化性使其具有抗菌能力,表现为:  $\text{ClO}_2$  与细胞膜的氧化化合物和蛋白质反应,导致细胞膜氧化损伤<sup>[33]</sup>;破坏微生物体内的 DNA,影响微生物结构,从而使其失活<sup>[34]</sup>。高佳等<sup>[21]</sup>针对西兰花存在的微生物问题,研究了  $\text{ClO}_2$  对其清洗效果,发现  $\text{ClO}_2$  浓度越高,西兰花存在的细菌总数、霉菌和酵母菌越少,说明  $\text{ClO}_2$  浓度跟微生物减少量呈正相关。但是同时也发现高浓度的  $\text{ClO}_2$  会破坏西兰

表 2 化学清洗技术对表面不规则的果蔬清洗效果研究

Table 2 Study on the effect of chemical cleaning technology on fruits and vegetables with irregular surfaces

| 清洗技术                  | 食品基质 | 清洗参数                       | 微生物/农药                                      | 减少量                            | 参考文献 |
|-----------------------|------|----------------------------|---|--------------------------------|------|
| 1.5%食盐                | 芹菜茎  | 40°C 5 min                 | 啞螨酯   | 57.5%                          | [18] |
| 1.5%食盐                | 芹菜叶  | 10°C 20 min                | 啞螨酯   | 71.3%                          | [18] |
| 1.0%食盐                | 芹菜   | 25°C 20 min                | 吡虫啉   | 75%                            | [19] |
| 2% NaHCO <sub>3</sub> | 草莓   | 30°C 10 min                | 乙螨唑   | 39%                            | [20] |
| ClO <sub>2</sub>      | 西兰花  | 25 mg/L                    | 菌落总数  | 0.80 log CFU                   | [21] |
|                       |      | 75 mg/L                    | 霉菌和酵母<br>总数                                 | 1.45 log CFU<br>0.77 log CFU   |      |
|                       |      |                            |   | 1.22 log CFU                   |      |
| PAA                   | 草莓   | 240 mg/L<br>97 s           | 大肠杆菌数                                       | 3.4 log                        | [22] |
| 臭氧水                   | 草莓   | 8.9 mg/L<br>64 min         | <i>E. coli</i> O157:H7<br><i>Salmonella</i> | 2.9 log CFU/g<br>3.3 log CFU/g | [23] |
|                       | 菠萝   | 2.0 mg/L<br>5 min          | 菌落总数  | 1.44 log CFU/g                 | [24] |
| 酸性电解水                 | 葡萄干  | 12.8 mg/L<br>120 min       | 赭曲霉毒素                                       | 60.2%                          | [25] |
|                       |      | 240 min                    |   | 82.5%                          |      |
|                       | 菜花   | 9.12 mg/L<br>20 min        | 甲胺磷   | 63.12%                         |      |
|                       |      |                            | 乐果  | 49.34%                         |      |
| 酸性电解水                 | 西兰花  |                            | 甲拌磷   | 61.39%                         |      |
|                       |      |                            | 毒死蜱   | 72.28%                         |      |
|                       |      |                            | 高效氯氟氰<br>菊酯                                 | 62.38%<br>74.26%               |      |
|                       |      |                            | 氟氯氰菊酯<br>腐霉利<br>百菌清                         | 57.43%<br>53.47%               |      |
| 等离子体活化水               | 菠萝   | 70 W 4 min 制备<br>20 min 清洗 | 菌落数   | 0.431 lg CFU/g                 | [28] |
|                       | 草莓   | 50 V 1 kHz 2 min           | <i>Salmonella typhimurium</i>               | 2 log CFU/g                    | [29] |

花的维生素 C 和叶绿素, 切割部位会产生黑色褐斑, 所以使用 ClO<sub>2</sub> 清洗并不是浓度越高越好。PAA 清洗是基于其可以杀菌, 即改变溶液的 pH, 使细胞内环境发生变化, 自身的强氧化性及产生的自由基可以阻断微生物某些重要的代谢途径<sup>[35-36]</sup>。而且, PAA 清洗是一种可持续且环保的技术, 其分解产物乙酸、过氧化氢、氧气和水几乎没有毒性。PAULA 等<sup>[22]</sup>用 PAA 清洗草莓, 发现草莓表面附着的 *E. coli* 数目显著减少。臭氧水清洗是利用臭氧水的氧化性, 来灭活微生物和降解污染物。臭氧引起微生物死亡是一个复杂的氧化过程, 会影响各种重要的细胞成分, 如细胞包膜、遗传物质、酶系统和细胞蛋白<sup>[37-38]</sup>。BIALKA 等<sup>[23]</sup>发现经过臭氧水清洗, 可减少草莓表面 *E. coli*、沙门氏菌(*Salmonella*)的数量。李琰儒<sup>[24]</sup>发现不同浓度臭氧水以及不同的处理时间都可以降低鲜切菠萝表面的微生物数量, 而且臭氧水浓度越高, 处理时间越长, 鲜切菠萝表面的微生物数量越少。臭氧还可以氧化真菌毒素芳香环上的双键和羟基, 使分解产物的毒性降低<sup>[39-40]</sup>, 从而减少果蔬表面毒素对人体的危害。TORLAK<sup>[25]</sup>发现臭氧清洗可显著降低

葡萄干初始赭曲霉毒素 A (ochratoxins A, OTA) 浓度, 而且清洗时间越长, OTA 浓度越低。臭氧水去除果蔬农药残留, 一方面是使用臭氧水将农药从果蔬表面洗脱并转移至水中; 另一方面是臭氧易于攻击有机分子中的双键, 并且臭氧在水中产生的单原子氧、羟基和羟基自由基能有效地分解有机分子, 通过破坏分子中的强极性键, 将大分子有机物降解为酸、醇、胺和氧化物等小分子化合物<sup>[41]</sup>。王瑾<sup>[26]</sup>发现臭氧水可降解菜花表面的农药, 但是用水浸泡后再使用臭氧水可显著提高农药的降解率。由此可知, ClO<sub>2</sub> 清洗、PAA 清洗和臭氧水清洗主要是利用其氧化性来达到对果蔬的清洗效果, 但是需要考虑清洗剂的浓度对果蔬品质的影响, 而且臭氧对农药的降解跟其在水中的溶解度有关。

电解水又称电生功能水或离子水, 是酸性电解水和碱性电解水的总称。电解水能够有效地去除果蔬中的农药残留, 很大程度上是因为其理化特性, 酸性电解水具有低的 pH、高的氧化还原电位(oxidation reduction potential, ORP), 碱性电解水具有高的 pH、良好的乳化性, 而有机磷类农药大部分含有“P=S”和“C=O”双键, 其受到 HOCl

和·OH 攻击易发生断裂, 从而使农药失效<sup>[42]</sup>。朱旭冉<sup>[27]</sup>发现酸性电解水可以有效地降解西兰花表面存在的多种农药残留, 去除率可达到 53%~75%。PAW 是用等离子体[一种电离气体, 由电场、带电粒子、紫外线光子和包括活性氧(active oxygen, ROS)和活性氮(active nitrogen, RNS)在内的活性物质组成<sup>[43]</sup>]激发水分子制备而得, 其富含多种不同的杀菌活性物质, 能够有效杀灭微生物, 同时不受处理对象的形状限制<sup>[28]</sup>。陈玥等<sup>[28]</sup>发现 PAW 清洗鲜切菠萝可以使含菌量从 3.035 lg CFU/g 降低到 2.604 lg CFU/g。吕啸野<sup>[29]</sup>发现 PAW 处理可以减少草莓表面的鼠伤寒沙门氏菌(*Salmonella typhimurium*), 其杀灭率达到 99%以上。同时, PAW 由于产生亚稳态反应性物质, 包括硝酸盐、亚硝酸盐和过氧化氢, 可以有效降解农药<sup>[44]</sup>。可见, 电解水清洗和 PAW 清洗主要是利用其产生的活性物质及理化特性来达到清洗目的, 但是在对农药残留方面没有明确农药的降解产物及其去向, 同时也可以将电解水清洗和 PAW 清洗与其他先进技术相结合, 实现果蔬食用安全和食用品质的高度平衡。

### 3 复合清洗技术

单一的清洗技术虽然有较好的清洗效果, 但是会受到自身技术的局限。而复合清洗可以减弱彼此的局限性, 显著提高清洗效果, 表 3 列举了超声波协同和超高压协同对难清洗果蔬的净化效果。

#### 3.1 超声波协同

超声波清洗主要是超声产生的空化作用, 但是空化作用的效果受许多因素影响, 包括溶液的特性(表面张力和黏度)<sup>[50]</sup>、洗涤液和果蔬之间形成的空气膜<sup>[51]</sup>。一些化

学物质, 如盐、表面活性剂和酒精可能会改变洗涤溶液的界面特性和接触角。接触角反映了液体在固体表面的润湿性, 接触角越小, 润湿性越强<sup>[51-52]</sup>, 空气膜越不容易形成, 超声波更容易到达果蔬表面产生空化效应。茶皂素, 一种天然表面活性剂, 通过降低溶液的界面张力、黏度和接触角, 可以有效地抑制微生物对蔬菜表面的粘附<sup>[53-54]</sup>。乙酸锌, 作为一种盐, 可以降低溶液的接触角, 锌离子也有助于抑制细菌<sup>[55]</sup>。乙醇是食品加工中常用的试剂, 有助于降低表面张力和增加润湿性<sup>[56]</sup>。界面张力和黏度的降低更有利于超声空化气泡的形成和气泡直径的增加, 从而增强超声空化<sup>[57]</sup>。表面活性剂的加入可以促进有效空化气泡的形成, 增强超声对表面的剪切作用, 减少细菌附着<sup>[53]</sup>。ZHANG 等<sup>[16]</sup>发现用乙酸锌溶液或茶皂素溶液或乙醇溶液或双频扫描超声清洗均可减少菜花表面的微生物, 但是乙酸锌、茶皂素和乙醇的双频扫描超声清洗显著提高了对花菜表面微生物的去除效率。这种现象可能是由于乙酸锌、茶皂素和乙醇可以降低溶液的界面张力和黏度, 增加果蔬湿润度, 从而使超声空化增强, 因此减少了新鲜菜花表面的细菌黏附。针对表皮褶皱较多的葡萄干存在不易水洗和安全品质低的问题, 智颀等<sup>[45]</sup>采用乙醇-超声波清洗无核白葡萄干, 发现在室温、85%乙醇、液料比 1.5:1 (mL/g)、超声频率 40 kHz、清洗 2 次、每次超声 1 min 的条件下, 无核白葡萄干清洗效果理想, 糖溶出较少, 且杀菌率高, 这一清洗方式为无核白葡萄干提供了参考, 但是葡萄干有许多品种, 后续也可以利用此技术对其他品种进行研究。以上结果证实了超声波与一些化学物质(盐、表面活性剂和酒精)联合可以提高果蔬的清洗效果, 这是因为这些化学物质可以增强超声波的超声空化作用, 从而增强超声波清洗的效果。

表 3 协同清洗技术对表面不规则的果蔬清洗效果评价

Table 3 Evaluation of collaborative cleaning technique on fruits and vegetables with irregular surfaces

| 清洗技术                              | 食品基质 | 清洗参数  | 安全问题                    | 减少量   | 参考文献 |
|-----------------------------------|------|---|-------------------------|---|------|
| 0.5%乙酸锌、0.06%茶皂素和 5%乙醇分别与双频扫描超声结合 | 菜花   | (20±1) kHz 与 (28±1) kHz 15 min                          | 细菌总数<br>大肠菌群<br>霉菌和酵母   | 1.37~1.94 log CFU/g<br>1.52~1.85 log CFU/g<br>1.26~1.66 log CFU/g | [16] |
| 超声波+85%乙醇                         | 白葡萄干 | 40 kHz<br>1 min 共 2 次<br>PAA 浸泡 10 min, 再 40 kHz、60 W/L | 霉菌                      | >99%  | [45] |
| 超声波+0.04% PAA                     | 生姜   | 超声 10 min, 然后 180 r/min<br>摇床振荡 10 min                  | 菌落数                     | 2.20 log CFU/g  | [46] |
| 超声波+1% NaHCO <sub>3</sub>         | 韭菜   | 100 W<br>10 min   | 敌敌畏                     | 54%~64%   | [47] |
| 超声波+气泡                            | 生菜   | 1000 W<br>15 min<br>25 m <sup>2</sup> /h                | 乐果<br>毒死蜱<br>三唑磷        | 87.11%<br>70%<br>84.14%   | [48] |
|                                   | 西兰花  | 150 W<br>15 min<br>5000 L/h                             | 虫体                      | 97.1%   | [11] |
| 超高压+0.05%苯扎氯铵                     | 西兰花  | 400 MPa 1 min   | <i>L. monocytogenes</i> | 7.9 log CFU   | [49] |

超声协同 PAA 联合清洗有着更低的微生物量,是因为超声空化和传质作用促进 PAA 进入到微生物的细胞内部,使抗菌性增强<sup>[58]</sup>。张龙等<sup>[46]</sup>评估了 PAA 单独或与超声联合使用对生姜清洗的研究。结果表明,单独用 PAA 仅可降低表面微生物约 0.80 log CFU/g, 仅可让表面泥沙清洁率从 5.31%降低至 4.50%, 而 PAA 联合超声清洗微生物含量降低 2.20 log CFU/g, 表面泥沙清洁率从 5.31%降低至 1.85%。可见,这种联合清洗还可以提高泥沙清洁率,是因为浸泡有利于分散软化泥沙,超声空化作用促进了泥沙的剥离<sup>[59]</sup>,为带泥沙的果蔬提供了新的清洗方式。

超声波清洗与 NaHCO<sub>3</sub> 协同对果蔬表面有机磷农药有很好的去除效果,边广等<sup>[47]</sup>比较了超声波清洗、NaHCO<sub>3</sub> 清洗及两者联合对韭菜表面敌敌畏农药的去除效果。结果表明,单独用超声波清洗去除率不到 25%,单独用 NaHCO<sub>3</sub> 清洗去除率可达 45%~55%,而超声波联合 NaHCO<sub>3</sub> 清洗去除率可达 54%~64%。此外,由于敌敌畏属于脂溶性物质,在水中去除率仅为 15%~20%,而其在碱性溶液中易分解。可见,在日常清洗中,对于不同果蔬容易存在的农药残留类型,选择最适清洗技术是非常重要的。

超声协同气泡清洗对蔬菜农药残留和虫体残留有良好的去除效果。张瑞等<sup>[48]</sup>用超声波气泡清洗对生菜表面乐果、毒死蜱和三唑磷这 3 种农药残留量进行了检测,发现当超声波功率为 1000 W,气泡强度为 25 m<sup>2</sup>/h,清洗时间为 15 min,乐果、毒死蜱和三唑磷的去除率分别达到 87.11%、70%和 84.14%。陈亦辉等<sup>[11]</sup>发现西兰花经过盐水浸泡,在超声波清洗辅助下,气泡清洗的除虫率高达 97.1%。而仅用超声波清洗除虫率为 96.5%,仅用气泡清洗除虫率最高为 90%。此外,超声波协同气泡清洗都属于物理技术,不会造成二次污染,但是需要考虑在清洗过程中对果蔬的损伤率。

### 3.2 超高压协同

超高压(high hydrostatic pressure, HHP)处理使微生物失活主要是由于高压在细菌膜中形成孔隙,细胞成分泄漏、形态结构受损而导致细胞死亡<sup>[60]</sup>。苯扎氯铵(benzalkonium chloride, BEC)是阳离子表面活性剂,其杀灭微生物的机制主要是通过 BEC 中带正电的氮基团和细胞膜中带负电的化合物之间的静电相互作用,从而使微生物细胞膜损伤、穿孔和细胞死亡<sup>[61]</sup>。WOO 等<sup>[49]</sup>研究了 BEC 和 HHP 对西兰花表面 *L. monocytogenes* 的清洗效果。发现单独用 BEC 或 HHP 处理,可使 *L. monocytogenes* 分别减少 2.3 log CFU 和 5.5~5.6 log CFU,而协同处理使 *L. monocytogenes* 减少了 7.9 log CFU。结果说明 HHP 和 BEC 联合可以提高抗菌效果,这是因为高压可能会对细菌细胞造成亚致死损伤,使其更容易受到 BEC 的影响,对细胞膜造成更大损伤,进而影响细胞的生理功能。

## 4 总结与展望

本文综述了物理、化学和复合清洗技术对表面不规则的难清洗果蔬的清洗效果。物理技术分别为:超声波清洗主要是利用超声空化作用破坏果蔬表面以及缝隙的污染物,从而达到杀菌、去虫和减少农药残留的清洗效果;气泡清洗是通过气泡冲击果蔬使其振荡并翻滚,及气泡带动的水浪和爆裂后的水花进入果蔬表面的凹凸缝隙,从而达到清洗果蔬的目的;干洗是利用干洗机转动和振动等作用来达到清洗效果。化学清洗技术总结为:盐水通过提高清洗液的渗透压来达到清洗的目的;NaHCO<sub>3</sub> 通过改变清洗液的酸碱度,达到减少微生物、去除农药残留的目的;ClO<sub>2</sub> 和臭氧水都是利用其强的氧化性,破坏微生物体内的 DNA、蛋白质和细胞膜来达到杀菌的效果,而且臭氧易于攻击有机分子中的双键,从而起到降解农药的作用;PAA 通过改变洗涤液的酸碱度以及自身的氧化性,使细胞内环境发生变化,阻断某些重要的代谢途径,达到减少微生物的清洗目的;电解水通过其产生的 HOCl 和·OH 攻击有机磷农药中的“P=S”和“C=O”双键,从而使农药失效;PAW 通过产生硝酸盐、亚硝酸盐和过氧化氢等活性物质来达到清洗的目的。复合清洗技术分别为:超声波与茶皂素、乙醇以及乙酸锌的联合清洗可以提高清洗效果,是因为茶皂素、乙醇和乙酸锌可以降低界面张力和黏度,增加湿润度,利于超声空化气泡的形成和气泡直径的增加,从而增强超声空化;超声和 PAA 联合清洗使抗菌性增强,是因为超声空化和传质作用促进 PAA 进入到微生物的细胞内部;超声和 NaHCO<sub>3</sub> 协同及超声和气泡协同在果蔬清洗中有应用,但是目前没有明确的协同机制;HHP 和 BEC 联合清洗提高杀菌效果,是因为高压可能会对细菌细胞造成亚致死损伤,使其更容易受到 BEC 的影响,对细胞膜造成更大损伤,进而影响细胞的生理功能。

然而,对于表面不规则的果蔬清洗技术的研究尚有以下不足的方面,还需要研究者在未来的探讨中加以改进。

(1)目前基本上都是对比不同清洗技术对果蔬微生物、农药残留或虫体残留等单一方面的研究,但是果蔬的安全问题是由多方面因素引起的,比如:果蔬自身携带的微生物、农药和虫体;采摘和搬运中果蔬受到磕碰产生“伤口”;清洗容器存在的微生物、生物被膜;化学清洗剂残留等。所以,后续的研究可以侧重在一种清洗技术对引起果蔬食用安全问题的多方面研究。

(2)对于不同的果蔬,易于污染的微生物不同,存在的农药残留种类不同,但是目前,人们对各种果蔬的清洗方式还没有系统的技术参数。后续研究者们可以针对每种果蔬易于存在的微生物和农药残留以及对食品品质影响等问题来进行研究,期望建立一份各种果蔬清洗技术的数据库。

(3)果蔬农药残留经过清洗处理后,其农药成分是否会发生转化、毒性是否会降低及是否还有其他潜在的危害等问题还有待研究。

(4)目前,干洗技术在果蔬清洗领域研究有限,可能是因为干洗设备较大,不适宜在实验室做小规模的研究,而更多报道的是果蔬干洗机的研制。对于土豆、韭菜和红薯等含泥沙较多的蔬菜如果只进行水洗,一方面会清洗不干净,另一方面泥沙会在水池中堆积,所以,后续可以侧重研发适用于实验室和家庭使用的小型干洗设备,将干洗技术和水洗技术相结合,提高果蔬清洗质量。

(5)加强复合清洗技术的应用研究。目前,研究较多的是超声协同清洗,研究者们可以加强其他物理技术(如:气泡清洗、等离子体清洗等)的协同。同时,表面活性剂因其具有降低表面张力的能力,可以考虑跟物理技术或化学技术结合,在提高作用效果的同时,降低作用浓度。总而言之,通过物理清洗技术和化学清洗技术以及多种化学清洗技术相结合起到协同增效的结果,弥补单一清洗技术的不足(清洗效果有限、物理清洗技术参数过大会影响果蔬品质、化学清洗技术浓度过大会影响人体健康),以提高果蔬的品质、安全和经济效益。

#### 参考文献

- [1] Food and Drug Administration. Outbreak investigation of hepatitis a virus infections: Frozen strawberries (february 2023) [EB/OL]. [2023-05-08]. <http://www.fda.gov/food/outbreaks-foodborne-illness/outbreak-investigation-hepatitis-virus-infections-frozen-strawberries-february-2023> [2023-05-12].
- [2] Food and Drug Administration. Lancaster foods updates voluntary recall of various expired kale, spinach and collard green products due to potential health risk [EB/OL]. [2023-05-12]. <http://www.fda.gov/safety/recalls-market-withdrawals-safety-alerts/lancaster-foods-updates-voluntary-recall-various-expired-kale-spinach-and-collard-green-products-due-permalink=D74500CDCA1008781514EB980669311488230001E76FB BF9A1A74D56B9ED3410> [2023-05-16].
- [3] 黄晓鹏. 超声波去除蔬菜农药残留及驱虫效果的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.  
HUANG XP. Research on effect of removing pesticide residue and expel pests by ultrasonic in vegetable [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
- [4] 友谊县市场监督管理局通告. 关于 2020 年 9 月份 2 批次不合格食品风险控制情况的通告[EB/OL]. [2020-09-29]. <https://www.hljyy.gov.cn/c/2020-09-29/506429.shtml> [2023-04-30].  
Circular of Market Supervision Administration of Youyi County. On September 2020 batches unqualified food risk control of circular [EB/OL]. [2020-09-29]. <https://www.hljyy.gov.cn/c/2020-09-29/506429.shtml> [2023-04-30].
- [5] 呼和浩特市农牧局通告. 欣月种植农民专业合作社销售农药残留不符合农产品质量安全标准的草莓案[EB/OL]. [2022-05-06]. [http://nmj.huhhot.gov.cn/ztzl/xzzfxxs/zfajgs/202205/t20220506\\_1253064.html](http://nmj.huhhot.gov.cn/ztzl/xzzfxxs/zfajgs/202205/t20220506_1253064.html) [2023-05-10].  
Circular of Hohhot Agriculture and Animal Husbandry Bureau. Case of strawberry sales of Xinyue Professional Farmer Cooperative whose pesticide residues do not meet the quality and safety standards of agricultural products [EB/OL]. [2022-05-06]. [http://nmj.huhhot.gov.cn/ztzl/xzzfxxs/zfajgs/202205/t20220506\\_1253064.html](http://nmj.huhhot.gov.cn/ztzl/xzzfxxs/zfajgs/202205/t20220506_1253064.html) [2023-05-10].
- [6] 赵跃萍, 王晓斌, 杨天宇, 等. 超声波清洗对鲜切芹菜品质的影响[J]. 现代食品科技, 2011, 27(1): 32-35, 79.  
ZHAO YP, WANG XB, YANG TY, *et al.* Influence of ultrasonic cleaning on the quality of fresh cut celery [J]. Mod Food Sci Technol, 2011, 27(1): 32-35, 79.
- [7] 汤梦婷. 葡萄干表面霉菌菌群分析及清洗方法研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.  
TANG MT. Diversity analysis and cleaning methods of mycoflora on raisin surface [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021.
- [8] 张春兰, 陈胜慧子, 杨爱霞, 等. 超声波清洗对红枣细菌总数的影响[J]. 食品工业, 2017, 38(1): 36-38.  
ZHANG CL, CHEN SHZ, YANG AIX, *et al.* Effect of ultrasonic cleaning on the total bacterial count in jujube [J]. Food Ind, 2017, 38(1): 36-38.
- [9] LOZOWICKA B, JANKOWSKA M, HRYNKO I, *et al.* Removal of 16 pesticide residues from strawberries by washing with tap and ozone water, ultrasonic cleaning and boiling [J]. Environ Monit Assess, 2016, 188: 51-69.
- [10] 丁小明, 王莉. 气泡清洗方式清洗叶类蔬菜的试验研究[J]. 农机化研究, 2007, (12): 119-123.  
DING XM, WANG L. Experimental study on cleaning leafy vegetables by bubble cleaning [J]. Agric Mech Res, 2007, (12): 119-123.
- [11] 陈亦辉, 郑丹丹, 洪广, 等. 调理用冷冻西兰花清洗除虫研究[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(9): 1553-1555, 1558.  
CHEN YH, ZHENG DD, HONG G, *et al.* Study on cleaning and de-worming of frozen broccoli for conditioning [J]. Zhejiang Agric Sci, 2017, 58(9): 1553-1555, 1558.
- [12] 杨红光, 谢焕雄, 颜建春, 等. 马铃薯采后机械化清洗技术综述[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3): 115-120.  
YANG HG, XIE HX, YAN JC, *et al.* A review of postharvest mechanized potato cleaning technology [J]. J Chin Agric Chem, 2020, 41(3): 115-120.
- [13] 陈迪勇, 王杰, 张颖, 等. 超声清洗去除蔬菜上有机磷农药残留[J]. 贵州科学, 2016, 34(2): 57-60.  
CHEN DY, WANG J, ZAHNG Y, *et al.* Ultrasonic cleaning for removal of organophosphorus pesticide residues on vegetables [J]. Guizhou Sci, 2016, 34(2): 57-60.
- [14] 靳慧霞, 董滨, 孙颖, 等. 超声协同紫外灭活大肠杆菌实验研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(11): 22-27, 42.  
JIN HX, DONG B, SUN Y, *et al.* Synergistic efficiency of *E. coli* inactivation under US and UV [J]. Environ Sci and Technol, 2010, 33(11): 22-27, 42.
- [15] 丘苑新, 黄小丹. 超声波处理协同  $^{60}\text{Co}\gamma$  辐照对番茄酱的灭菌效果研究[J]. 广东农业科学, 2011, 38(4): 105-108.  
QIU YX, HUANG XD. Effect of ultrasound treatment assisted with  $^{60}\text{Co}\gamma$ -irradiation on microorganism inactivation of ketchup [J]. Guangdong Agric Sci, 2011, 38(4): 105-108.
- [16] ZHANG L, YU X, YAGOUB AEA, *et al.* Effects of low frequency multi-mode ultrasound and its washing solution's interface properties on freshly cut cauliflower [J]. Food Chem, 2022. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130683

- [17] 陈勤超. 水流式与气泡式蔬菜清洗机清洗效果的比较与研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.  
CHEN QC. Comparison and research on the cleaning effect of water flow and bubble type vegetable washing machine [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007.
- [18] 刘英, 张昌朋, 李韵之, 等. 清洗对芹菜中啮螨酯残留的去除效果[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(11): 2345–2348.  
LIU Y, ZHANG CP, LI YZ, *et al.* Effect of washing on the removal of acarofenolate residue in celery [J]. Zhejiang Agric Sci, 2020, 61(11): 2345–2348.
- [19] 刘英, 王新全, 汤涛, 等. 不同清洗方法对芹菜中吡虫啉残留的去除效果[J]. 农药学报, 2019, 21(4): 492–499.  
LIU Y, WANG XQ, TANG T, *et al.* Removal effect of imidacloprid residue in celery by different washing method [J]. J Pestic Sci, 2019, 21(4): 492–499.
- [20] 樊皓宇. 几种清洗液对草莓农药残留去除效果的研究[J]. 高考, 2018, (33): 244.  
FAN HY. Study on the removal effect of several cleaning fluids on pesticide residues in strawberry [J]. Coll Entrance Exam, 2018, (33): 244.
- [21] 高佳, 斯跃洲, 朱永清, 等. 二氧化氯水溶液清洗对鲜切西兰花冷藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(3): 24–30.  
GAO J, SI YZ, ZHU YQ, *et al.* Effect of chlorine dioxide solution cleaning on the cold storage quality of fresh-cut broccoli [J]. Storage Process, 2019, 19(3): 24–30.
- [22] PAULA MGM, SARA SM, MARCELA PA, *et al.* Spray washing disinfection with peracetic acid in the processing of fresh-cut strawberries: An alternative for dipping techniques [J]. Int J Fruit Sci, 2019, 19(3): 258–275.
- [23] BIALKA KL, DEMIRCI A. Efficacy of aqueous ozone for the decontamination of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* on raspberries and strawberries [J]. J Food Protech, 2007, 70(5): 1088–1092.
- [24] 李琰儒. 臭氧水处理对鲜切菠萝品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.  
LI YR. Effects of aqueous ozone treatments on quality of fresh-cut pineapple [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [25] TORLAK E. Use of gaseous ozone for reduction of ochratoxin A and fungal populations on sultanas [J]. Aust J Grape Wine Res, 2019, 25(1): 25–29.
- [26] 王瑾. 臭氧对鲜切花椰菜保鲜及农药残留降解的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.  
WANG J. Studies on ozone effects to preservation and degradation of pesticide residues in fresh-cut cauliflower [D]. Nanchang: Nanchang University, 2008.
- [27] 朱旭冉. 电生功能水对鲜切蔬菜农药残留去除及品质影响研究[D]. 张家口: 河北北方学院, 2020.  
ZHU XR. The effects of electrolyzed functional water on the removal of pesticide residues and quality in fresh-cut vegetables [D]. Zhangjiakou: Hebei North University, 2020.
- [28] 陈玥, 杨同亮, 孟琬星, 等. 等离子体活化水对鲜切菠萝品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(3): 105–110.  
CHEN Y, YANG TL, MENG WX, *et al.* Effects of plasma-activated water on quality of fresh-cut pineapples [J]. Food Res Dev, 2021, 42(3): 105–110.
- [29] 吕啸野. 低温等离子体灭活 *Salmonella typhimurium* 研究及草莓保鲜应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.  
LV XY. *Salmonella typhimurium* cold plasma inactivation and strawberry preservation application [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [30] 王晓军. 比较分析不同清洗方法对东北常见蔬菜中残留有机磷农药的去除效果[D]. 吉林: 延边大学, 2020.  
WANG XJ. Comparative analysis of different cleaning methods for the removal of organophosphorus pesticide residues in common vegetables in Northeast China [D]. Jilin: Yanbian University, 2020.
- [31] 王微, 胡毅, 鄢人雨, 等. 不同洗涤方法对芹菜中有机磷农药的去除效果[J]. 农技服务, 2022, 39(12): 35–39.  
WANG W, HU Y, YAN RY, *et al.* Removal of organophosphorus pesticides in celery by different washing methods [J]. Agric Technol Serv, 2022, 39(12): 35–39.
- [32] 王颖, 滕淑涵, 余晔, 等. 杨梅清洗除虫的五种方法比较[J]. 中学生物教学, 2020, (23): 70–72.  
WANG Y, TENG SH, YU Y, *et al.* Comparison of five methods of bayberry cleaning and pest control [J]. Biol Teach Second Sch, 2020, (23): 70–72.
- [33] 努尔开西·肉扎洪, 侯媛媛, 赵雅芹, 等. 二氧化氯熏蒸处理对蚕豆品质及褐变的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 222–230.  
ROUZHAHONG NEKX, HOU YY, ZHAO YQ, *et al.* Effect of chlorine dioxide fumigation on quality and browning of broad beans [J]. Food Sci, 2023, 44(1): 222–230.
- [34] 倪孟侨, 刘琛, 时梦瑶, 等. 二氧化氯在食品保鲜中的发展前景[J]. 应用化工, 2021, 50(8): 2265–2268.  
NI MQ, LIU C, SHI MY, *et al.* Development prospect of chlorine dioxide in food preservation [J]. Appl Chem Ind, 2021, 50(8): 2265–2268.
- [35] 马睿, 王维康, 张小磊, 等. 过氧乙酸的消毒特性及在饮用水消毒中的应用潜能[J]. 广东化工, 2023, 50(5): 1–4, 11.  
MA R, WANG WK, ZHANG XL, *et al.* Disinfection characteristics of peracetic acid and its application potential in drinking water disinfection [J]. Guangdong Chem Ind, 2023, 50(5): 1–4, 11.
- [36] LIU YG, ZHU LX, DONG PC, *et al.* Acid tolerance response of *Listeria monocytogenes* in various external pHs with different concentrations of lactic acid [J]. Foodborne Pathog Dis, 2020, 17(4): 253–261.
- [37] 饶克诚, 黄文, 王益, 等. 食用菌品质评价因素及保鲜技术研究进展[J/OL]. 食品工业科技: 1-16. [2023-06-25]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110107  
RAO KC, HUANG W, WANG Y, *et al.* Research advances on quality evaluation factors and preservation technology of edible mushrooms [J/OL]. Sci Technol Food Ind: 1-16. [2023-06-25]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110107
- [38] WANG T, YUN JM, ZHANG Y, *et al.* Effects of ozone fumigation combined with nano-film packaging on the postharvest storage quality and antioxidant capacity of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Postharvest Biol Technol, 2021. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2021.111501
- [39] 李智高, 毛永杨, 狄朋敏, 等. 食品中黄曲霉毒素的降解方法的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(14): 4597–4602.  
LI ZG, MAO YY, DI PM, *et al.* Research progress on the degradation methods of aflatoxin in food [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(14): 4597–4602.



- [40] 刘芳, 李萌萌, 卞科. 臭氧对食品中真菌毒素的降解效果及影响因素研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 282–286, 293.  
LIU F, LI MM, BIAN K. Research progress on degradation effect and influencing factors of mycotoxins in food by ozone [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(18): 282–286, 293.
- [41] LIU C, CHEN C, JIANG A, *et al.* Effects of aqueous ozone treatment on microbial growth, quality, and pesticide residue of fresh-cut cabbage [J]. Food Sci Nutr, 2021, 9(1): 52–61.
- [42] 李慧颖, 李嘉欣, 郝建雄. 微酸性电解水对溶液体系中有机磷农药的降解机制及途径分析研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(5): 1906–1913.  
LI HY, LI JX, HAO JX. Study on the degradation mechanism and pathway of chlorpyrifos by slightly acidic electrolyzed water in aqueous system [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(5): 1906–1913.
- [43] SAINZ-GARCÍA A, GONÁLEZ-MARCOS A, MÚGICA-VIDAL R, *et al.* Application of atmospheric pressure cold plasma to sanitize oak wine barrels [J]. LWT-Food Sci Technol, 2021. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.110509.
- [44] SARANGAPANI C, SCALLY L, GULAN M, *et al.* Dissipation of pesticide residues on grapes and strawberries using plasma-activated water [J]. Food Bioprocess Technol, 2020, 13(10): 1728–1741.
- [45] 智颖, 黄文书, 麦尔哈巴·艾合麦提, 等. 乙醇-超声清洗无核白葡萄干工艺研究[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(1): 97–102, 108.  
ZHI J, HUANG WS, MAIERHABA·AHMT, *et al.* Research of ethanol-ultrasonic cleaning technique for thompson seedless raisins [J]. Storage Process, 2020, 20(1): 97–102, 108.
- [46] 张龙, 赵鑫洪, 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.* Effects of ultrasonic combined with peroxide acetic acid washing on the quality of ginger [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(10): 3068–3074.
- [47] 边广, 李璐. 不同清洗方法对蔬菜农药残留去除效果研究[J]. 预防医学论坛, 2019, 25(6): 471–473.  
BIAN G, LI L. Study on the effect of different washing methods on the removal of pesticide residues from vegetables [J]. Prev Med Forum, 2019, 25(6): 471–473.
- [48] 张瑞, 丁为民, 王鸣华. 超声波气泡清洗对残留有机磷农药去除效果的试验[J]. 江苏农业科学, 2011, (1): 354–356.  
ZHANG R, DING WM, WANG MH. Experiment on the effect of ultrasonic bubble cleaning on the removal of residual organophosphorus pesticides [J]. Jiangsu Agric Sci, 2011, (1): 354–356.
- [49] WOO HJ, PARK JB, KANG JH, *et al.* Combined treatment of high hydrostatic pressure and cationic surfactant washing to inactivate *Listeria monocytogenes* on fresh-cut broccoli [J]. J Microbiol Biotechnol, 2019, 29(8): 1240–1247.
- [50] DAI J, BAI M, LI C, *et al.* Advances in the mechanism of different antibacterial strategies based on ultrasound technique for controlling bacterial contamination in food industry [J]. Trends Food Sci Technol, 2020, 105: 211–222.
- [51] MUHAMMAD S, WUYTS K, NUYTS G, *et al.* Characterization of epicuticular wax structures on leaves of urban plant species and its association with leaf wettability [J]. Urban For Urban Gree, 2020, 47: 126557.
- [52] EDACHERY V, SHASHANK R, KAILAS SV. Influence of surface texture directionality and roughness on wettability, sliding angle, contact angle hysteresis, and lubricant entrapment capability [J]. Tribol Int, 2021. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106932
- [53] HUANG K, WRENN S, TIKEKAR R, *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.
- [54] FINK R, POTOČNIK A, ODER M. Plant-based natural saponins for *Escherichia coli* surface hygiene management [J]. LWT-Food Sci Technol, 2020. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109018.
- [55] SHELDON JR, SKAARL EP. Metals as phagocyte antimicrobial effectors [J]. Curr Opin Immunol, 2019, 60: 1–9.
- [56] YONEMOTO Y, TOMIMITSU I, SHIMIZU K, *et al.* Wettability model for water-ethanol binary mixture droplet on roughened low-surface-energy solids [J]. Int J Multiphas Flow, 2021. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103569.
- [57] LUO J, XU W, ZHAI Y, *et al.* Experimental study on the mesoscale causes of the influence of viscosity on material erosion in a cavitation field [J]. Ultrason Sonochem, 2019. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2019.104699
- [58] ALMEIDA DAL, ALVES DRDK, SILVA OSB, *et al.* Ultrasound improves antimicrobial effect of sodium dichloroisocyanurate to reduce *Salmonella typhimurium* on purple cabbage [J]. Int J Food Microbiol, 2018, 269: 12–18.
- [59] JIANG Q, ZHANG M, XU B. Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: A review [J]. Ultrason Sonochem, 2020. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2020.105261
- [60] 姜志东, 张君怡, 马嘉欣, 等. 超高压杀菌效果及机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 145–154.  
JIANG ZD, ZHANG JY, MA JX, *et al.* Research progress on the microbial inactivation effect and mechanism of high hydrostatic pressure [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(5): 145–154.
- [61] BAZINA L, MARAVIC A, KRCE L, *et al.* Discovery of novel quaternary ammonium compounds based on quinuclidine-3-ol as new potential antimicrobial candidates [J]. Eur J Med Chem, 2019, 163: 626–635.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

## 作者简介



魏丽娜, 博士, 副教授, 主要研究方向为果蔬加工及保鲜。  
E-mail: weilina\_sust@163.com