

不同抽气速率下真空超声波对生菜内部大肠杆菌的去除效果及其品质变化

谢思芸¹, 温耀升¹, 张霞¹, 东方云¹, 李文静², 康会茹¹, 陈奕培¹, 林典军¹, 廖彩虎^{1*}

(1. 韶关学院广东省粤北食药资源利用与保护重点实验室, 食品学院, 广东韶关 512023)

(2. 广东省韶关市质量计量监督检测所, 广东韶关 512023)

摘要: 真空预冷过程会导致致病菌渗透至蔬菜气孔内部, 且无法通过常规清洗方式去除。为了去除已渗透至生菜气孔内部的大肠杆菌 (*Escherichia coli*), 选用三种抽气速率 α_1 (0.467 3/min)、 α_2 (0.323 5/min) 和 α_3 (0.161 7/min) 下的真空超声波 (VC-US) 复合清洗剂来进行清洗, 通过测定清洗前后的菌落数量及相关理化指标在贮藏过程中的变化, 评价其对生菜内部 *E. coli* 的清洗效果和对品质的影响。结果表明: α_3 组处理后, 生菜内部的 *E. coli* 数量从原始的 4.33 下降至 1.47 $\log_{10}$ CFU/cm², 优于 α_1 和 α_2 组 (分别下降至 2.03 和 1.92 $\log_{10}$ CFU/cm²) ($P<0.05$)。贮藏 2 d 后, α_3 组的 L^* 值和 b^* 值显著低于 α_1 组 ($P<0.05$), a^* 值则略高于 α_1 组, 但均与 α_2 组无显著性差异 ($P>0.05$); 三种不同处理方式后的叶绿素和维生素 C 的含量均无显著性差异 ($P>0.05$); 此外, α_3 组的失重率 (-19.89%) 显著低于 α_1 组 (-0.18%) 和 α_2 组 (-19.03%) ($P<0.05$)。综上所述, 较低抽气速率下的 VC-US 清洗方式能更有效地去除生菜内部的 *E. coli*, 且对品质无显著影响, 旨在为 VC-US 技术在蔬菜内部致病菌的去除提供理论依据和应用价值。

关键词: 生菜; 大肠杆菌; 真空超声波; 抽气速率; 去除效果

文章编号: 1673-9078(2026)04-177-183

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0086

Effects of Vacuum-ultrasonic Cleaning at Different Evacuation Rates on the Removal of *Escherichia coli* inside Lettuce and Its Quality Changes

XIE Siyun¹, WEN Yaosheng¹, ZHANG Xia¹, DONG Fangyun¹, LI Wenjing², KANG Huiru¹, CHEN Yipei¹,

LIN Dianjun¹, LIAO Caihu^{1*}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Utilization and Conservation of Food and Medicinal Resources in Northern Region & School of Food Science and Technology, Shaoguan University, Shaoguan 512023, China)

(2. Guangdong Shaoguan Supervision & Inspection Institute for Quality & Metrology, Shaoguan 512023, China)

Abstract: Vacuum cooling often results in the penetration of pathogenic bacteria into vegetable stomata, making conventional washing methods ineffective. To remove *Escherichia coli* that penetrates the stomata of lettuce, a vacuum-ultrasonic (VC-US)

引文格式:

谢思芸, 温耀升, 张霞, 等. 不同抽气速率下真空超声波对生菜内部大肠杆菌的去除效果及其品质变化[J]. 现代食品科技, 2026, 42(4): 177-183.

XIE Siyun, WEN Yaosheng, ZHANG Xia, et al. Effects of vacuum-ultrasonic cleaning at different evacuation rates on the removal of *Escherichia coli* inside lettuce and its quality changes [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 177-183.

收稿日期: 2024-05-18; 修回日期: 2025-06-20; 接受日期: 2025-06-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32272425); 广东省自然科学基金 (2020A1515011182); 广东省普通高校重点领域专项 (2022ZDX4042); 国家级大学生创新创业训练计划 (202210576017); 广东省大学生创新创业训练计划 (S202310576037); 韶关市科技计划项目 (210724144530340); 韶关学院自然科学基金 (SZ2020KJ05; SY2023KJ10); 海关总署科研项目 (2024HK131)

作者简介: 谢思芸 (1987-), 女, 硕士, 实验师, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: syxie@sgu.edu.cn

通讯作者: 廖彩虎 (1984-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: 154931443@qq.com

composite cleaning method was used at three evacuation rates: α_1 (0.467 3/min), α_2 (0.323 5/min), and α_3 (0.161 7/min). The effectiveness of VC-US and its impact on lettuce quality were evaluated by measuring the colony counts and relevant physicochemical properties before and after cleaning as well as the changes in these indicators during storage. The results showed that the α_3 group reduced *E. coli* counts inside lettuce from 4.33 to 1.47 $\log_{10}$ CFU/cm², which was significantly more effective than the α_1 and α_2 groups, whose *E. coli* counts were reduced to 2.03 and 1.92 $\log_{10}$ CFU/cm², respectively ($P < 0.05$). After two days of storage, L^* and b^* values of the α_3 group were significantly lower than those of the α_1 group ($P < 0.05$), whereas the a^* value was slightly higher; however, no significant difference was detected when compared with the α_2 group ($P > 0.05$). Chlorophyll and vitamin C contents showed no significant differences among the three treatment groups ($P > 0.05$). Additionally, the weight loss rate was significantly lower in the α_3 group (-19.89%) than in the α_1 (-0.18%) and α_2 (-19.03%) groups ($P < 0.05$). Collectively, these findings indicate that VC-US cleaning with a lower evacuation rate is more effective in removing *E. coli* inside lettuce without significantly affecting its quality, thus providing theoretical support and practical value for the application of VC-US technology in removing internal pathogens from vegetables.

Key words: lettuce; *Escherichia coli*; vacuum-ultrasound; evacuation rate; removal efficiency

真空预冷是实现果蔬采后快速消除田间热,降低呼吸代谢,并保持果蔬内在鲜度品质的关键技术,对解决果蔬采后腐烂问题具有重要意义^[1-4]。然而,在真空预冷过程中,伴随“负压-恒压-复压”的操作,微生物容易渗透至蔬菜组织内部。而且,这些微生物在后续的清洗和消毒过程中,由于蔬菜组织的“保护”,避免其与消毒剂直接接触,导致杀菌效果明显降低,从而增加了微生物误食的风险^[5-7]。相关研究表明,传统的蔬菜清洗方法(如自来水冲洗、果蔬清洗剂 and 消毒剂溶液浸泡等)对于已渗透至蔬菜气孔内的微生物去除效果有限^[8,9]。因此,亟需开发更为高效的清洗技术以达到 100% 去除蔬菜气孔内部微生物的效果。

超声波清洗技术具有成本低、操作简单、自动化程度和清洗效率高等特点,其产生的机械效应和空化效应能够有效地去除残留在果蔬表面沟壑、死角处的淤泥、杂质和微生物,近年来在果蔬清洗领域展现了广阔的应用前景^[10,11]。此外,有大量的研究表明,超声波产生的空穴效应通过气泡的快速膨胀和剧烈破裂产生的冲击波,对微生物具有显著的杀灭作用^[12-16]。然而,由于果蔬表面常覆盖有疏水性蜡质层,容易形成空气膜^[17],减弱了超声波的空穴效应^[18],从而影响其去除果蔬表面微生物的效果^[13-15]。因此,越来越多的学者研究将食品级表面活性剂^[18-20]和消毒剂^[21,22]应用于超声波清洗中,并取得了较为理想的效果。

在前期预实验中,利用真空超声波复合表面活性剂吐温 20 (Tween 20, 0.2%) 和次氯酸钠 (NaClO, 100 mg·L⁻¹),对已渗透至生菜气孔内部的 *E. coli* 具有一定的清除效果,并且对清洗后的蔬菜,在 2 d 的贮藏条件下,品质影响较小^[23]。然而,不同抽气速率下,

真空超声波处理过程中的液体沸腾和湍流强度可能存在较大差异,这种差异可能对超声波的机械效应和空穴效应产生影响,进而影响真空超声波的清洗效果。基于此,本文利用三种抽气速率 α_1 (0.467 3/min)、 α_2 (0.323 5/min) 和 α_3 (0.161 7/min) 下的真空超声波复合清洗剂对真空预冷后的生菜进行清洗,通过测定清洗前后的菌落数量及相关理化指标在贮藏过程中的变化,评价其对生菜内部 *E. coli* 的清洗效果和对生菜品质的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

生菜来自于韶关学院生农学院,选取标准为种植时间一致 (60 d),大小均匀,株高为 (25±2) cm,无虫害且无机械损伤的生菜,并于早上 7 点采摘后立刻送至实验室进行后续实验;大肠杆菌 (*Escherichia coli*) ATCC25922-sfGFP (携带 GFP 绿色荧光蛋白基因和卡那霉素抗性基因),购于上海北纳创联生物技术有限公司。

LB 肉汤培养基、0.1% 蛋白胨水培养基、琼脂粉、生物试剂级,北京陆桥技术股份有限公司;2,6-二氯酚钠、乙醇、草酸、维生素 C、次氯酸钠 (NaClO)、氯化钠 (NaCl),分析纯,西陇科学股份有限公司;硫酸卡那霉素,生物试剂级,北京索莱宝科技有限公司;吐温 20 (Tween 20),食品级,广州市锦旺化工有限公司。

1.2 仪器与设备

KM-50 真空预冷机,东莞科美斯制冷设备有限公司;BPS-100CL 恒温恒湿箱,上海一恒科学仪器有限公司;MultiSkan SkyHigh 全波长酶标仪,Thermo 公司;SP60 色差仪,美国爱色丽公司。

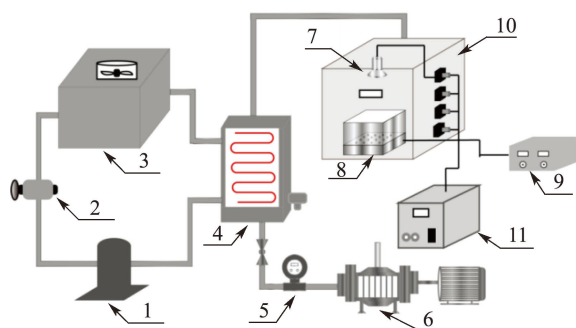


图 1 真空预冷复合超声波设备组合图

Fig.1 Combination diagram of vacuum cooling composite ultrasonic equipment (VC-US)

注: 1、压缩机; 2、膨胀阀; 3、冷凝器; 4、补水器; 5、电动阀; 6、真空泵; 7、摄像头; 8、超声波传感器; 9、超声波控制器; 10、真空箱; 11、数据处理器。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理与清洗方法

菌种的活化和生菜的接种方法参考谢思芸等^[23]的方法进行处理。采用 Tween 20 和 NaClO 的复合清洗液, 按照以下三种抽气速率 (α_1 、 α_2 和 α_3) 下的真空超声波进行处理。具体操作方法如下:

α_1 : 配置 3 L 含 0.2% Tween20 (V/V) 和 100 mg·L⁻¹ NaClO 溶液的清洗液, 放入超声波清洗槽中, 清洗液温度为 25 °C。将待清洗样品放入清洗液中, 确保生菜完全浸没于清洗液中。开启真空预冷机和超声波 (频率为 28.9 kHz, 功率为 300 W), 调节电动阀, 使得箱体压强从 101 330 Pa 将至终压 800 Pa 的时间为 4.5 min。终压达到后, 立刻关闭真空预冷机和超声波。复压后, 取出样品, 随后在无菌水中, 重复清洗 3 次。

α_2 : 与 α_1 操作基本一致。不同的是, 箱体压强从 101 330 Pa 将至终压 800 Pa 的时间为 6.5 min。

α_3 : 与 α_1 操作基本一致。不同的是, 箱体压强从 101 330 Pa 将至终压 800 Pa 的时间为 13 min。

最后, 将上述处理后的样品分别按照每 2 片为一组装入保鲜盒 (2 L) 中并加盖保藏, 在 (4±1) °C 冷库中贮藏 48 h, 每隔 24 h 取出样品并测定相关指标。所以, 三种处理方式, 清洗前后和 2 d 贮藏时间 (每日检测一次), 平行三次, 所以共需 60 盒, 一共 120 片生菜。同时, 真空预冷设备与接触原料的不锈钢架子、保鲜盒均提前进行紫外辐照 30 min, 超声波腔体用 300 mg·L⁻¹ NaClO 进行浸泡消毒过夜, 使用前用无菌水清洗 3 次。

1.3.2 生菜内部 *E. coli* 计数方法

参考谢思芸等^[23]方法, 计数结果以每平方厘米

E. coli 数量 ($\log_{10}$ CFU/cm²), 平行测定 3 次。

1.3.3 维生素 C 含量测定

参考东方云等^[24]的方法, 维生素 C 的含量通过以下公式计算:

$$X = \frac{(V_a - V_b) \times C \times T}{D \times W} \times 100 \quad (1)$$

式中:

X ——维生素 C 浓度, mg/100 g;

V_a ——样品提取液消耗的 2,6-二氯酚溶液的量, mL;

V_b ——空白消耗的 2,6-二氯酚溶液的量, mL;

C ——2,6-二氯酚标准液浓度, mol·L⁻¹;

T ——1 mL 2,6-二氯酚溶液对维生素 C 的滴定度;

D ——样品稀释倍数;

W ——用于测定的样品质量, g。

1.3.4 叶绿素含量测定

参考谢思芸等^[23]方法, 根据下列公式计算叶绿素含量。

$$Chl_a = 12.72 \times A_{663} - 2.59 \times A_{645} \quad (2)$$

$$Chl_b = 22.88 \times A_{645} - 4.67 \times A_{663} \quad (3)$$

$$Chl = Chl_a + Chl_b \quad (4)$$

$$D = \frac{Chl \times V}{m \times 1000} \quad (5)$$

式中:

Chl_a ——提取液中叶绿素 a 的质量浓度, mg·L⁻¹;

Chl_b ——提取液中叶绿素 b 的质量浓度, mg·L⁻¹;

Chl ——提取液中总叶绿素的质量浓度, mg·L⁻¹;

D ——样品中叶绿素含量, mg·g⁻¹;

A_{663} ——提取液在 663 nm 的 OD 值;

A_{645} ——提取液在 645 nm 的 OD 值;

V ——样品提取液总体积, mL;

m ——样品质量, g。

1.3.5 失重率测定

测定处理前后每组样品的质量, 并根据以下公式计算失重率, 平行测定 3 次。

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

W ——失重率, %;

m_1 ——清洗前样品质量, g;

m_2 ——清洗后样品质量, g。

1.3.6 色差的测定

利用色差仪对外观指标进行定量分析, 测定样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 每个样品取 5 个点进行测定。每组 3 个样品。

1.4 数据处理与分析

测定和结果分析采用 SPSS 22.0 进行处理。绘图采用 Origin 2022 软件处理。所有结果均表示为平均值 $\pm$ 标准误差。

2 结果与讨论

2.1 不同抽气速率下真空超声波处理对生菜气孔内部 *E. coli* 的清除效果

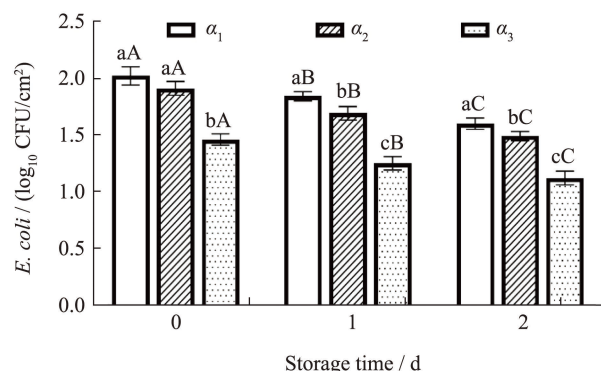


图2 不同抽气速率下真空超声波处理后生菜气孔内部 *E. coli* 的数量图

Fig.2 Numbers of *E. coli* in the stomata of lettuce after VC-US treatment with different evacuation rates

注：不同的小写字母表示在同一时间下，不同抽气速率之间具有显著差异 ($P < 0.05$)；图形上标不同的大写字母表示在同一抽气速率下，不同时间段之间具有显著差异 ($P < 0.05$)。

图2描述了不同抽气速率下真空超声波处理对生菜气孔内部 *E. coli* 的去除效果及清洗后残留的 *E. coli* 在贮藏过程中的变化情况。由图中可知，三种抽气速率的真空超声波处理均能够去除生菜内部的 *E. coli*，但去除效果存在着显著性差异 ($P < 0.05$)。其中，α₃ 组的去除效果最好，生菜内部 *E. coli* 数量从初始的 4.33 下降至 1.47 log₁₀ CFU/cm²，显著低于 α₁ 和 α₂ 组（分别下降至 2.03 和 1.92 log₁₀ CFU/cm²） ($P < 0.05$)。在贮藏期间，无论何种抽气速率，生菜内部残留的 *E. coli* 的数量也随着贮藏时间的延长而逐渐减少。贮藏 2 d 后，α₃ 组的生菜内部 *E. coli* 数量下降至 1.13 log₁₀ CFU/cm²，而 α₁ 和 α₂ 组分别为 1.61 和 1.50 log₁₀ CFU/cm² ($P < 0.05$)。总体而言，α₃ 组的去除效果最为显著，可能是由于真空环境增强了超声波的空穴效应，促进了 NaClO 与气孔内 *E. coli* 的接触，从而显著提升其杀菌效果^[25]。此外，较慢的抽气速率有助于实现长时间的震荡清洗，可能有利于将气孔内的 *E. coli* 洗出，并延长 NaClO 与内部 *E. coli* 的接触时间，从而进一步提高杀菌效果。然而，由于 *E. coli* 可能渗透较深，其完全去除仍存在

一定的局限性。

2.2 不同抽气速率下真空超声波处理对生菜贮藏过程外观品质的影响

不同抽气速率下真空超声波处理对生菜贮藏过程外观品质的影响详见图3、表1~3。由图3可知，与处理前相比，三种抽气速率处理的生菜在外观上均出现组织透明化的现象，其中，α₃ 组的组织透明化程度与 α₂ 组相似，比 α₁ 组更透明，出现上述情况可能是因为真空条件显著增强了超声波的空穴效应^[26]。在随后的复压过程中，由于气孔内外压差过大，导致大量的水分进入生菜组织，使其呈现透明化状态^[27]。透明化程度存在差异可能与抽气速率有关。随着贮藏时间的延长，生菜组织逐渐恢复至原状，但恢复速度存在差异，与 α₂ 和 α₃ 组相比较，α₁ 组的恢复速度最快，至贮藏第2天时，α₁ 组的生菜外观与清洗前无明显差异，这一现象可能与不同抽气速率导致的气孔开启程度差异，以及后续贮藏环境中湿度的变化有关^[28]。

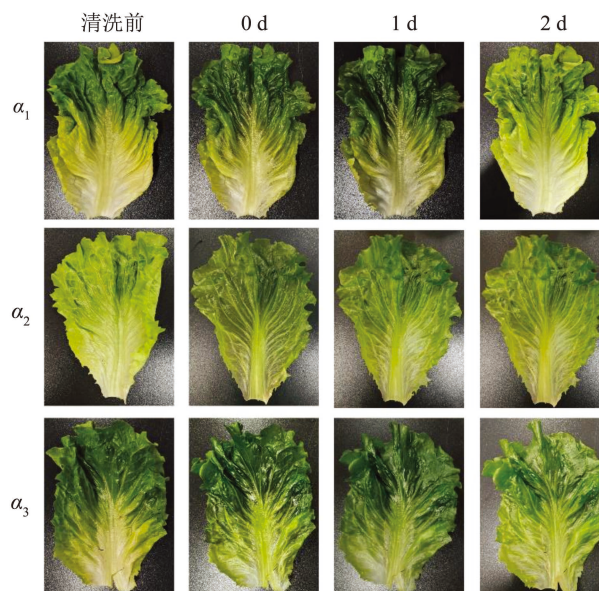


图3 不同抽气速率下真空超声波处理后生菜贮藏过程外观变化

Fig.3 Changes in the appearance of lettuce during storage after VC-US treatment with different evacuation rates

表1显示了不同抽气速率下真空超声波处理对生菜 L^* 值的影响及其随贮藏时间的变化规律。处理前，三种抽气速率的 L^* 值无显著性差异 ($P > 0.05$)。经过清洗后，各处理组均呈现不同程度的下降，而且随着贮藏时间的延长，各组的 L^* 值均逐渐回升，但下降幅度与回升速度因抽气速率不同而存在差异。具体而言，α₁ 组的 L^* 值在贮藏初期 (0 d) 从清洗前的 54.53 下降至 47.76，下降幅度显著高于 α₂ 和 α₃ 组 ($P < 0.05$)，α₁ 和 α₂ 组的 L^* 值对比清洗前，分别下降至 51.51 和

50.43。另外，在贮藏后期（2 d）， α_1 组的 L^* 值回升速度最快，显著高于处理前的 L^* 值（ $P<0.05$ ）。相对而言， α_2 和 α_3 组恢复速度较慢，贮藏 2 d 后仍未恢复至接近初始水平，两者无显著性差异（ $P>0.05$ ）。

表 1 不同抽气速率下真空超声波处理后生菜贮藏过程 L^* 值变化
Table 1 Changes in L^* of lettuce during storage after VC-US treatment at different evacuation rates

处理 方式	L^* 值			
	清洗前	0 d	1 d	2 d
α_1	54.53 ± 0.22 ^{aB}	47.76 ± 0.22 ^{cD}	52.00 ± 0.16 ^{bC}	56.10 ± 0.38 ^{aA}
α_2	54.53 ± 0.23 ^{aA}	51.51 ± 0.13 ^{aD}	52.63 ± 0.06 ^{aC}	53.27 ± 0.12 ^{bB}
α_3	54.51 ± 0.15 ^{aA}	50.43 ± 0.13 ^{bD}	51.55 ± 0.14 ^{cC}	53.60 ± 0.22 ^{bB}

注：同列右肩不同的小写字母表示在同一时间下，不同抽气速率之间具有显著差异（ $P<0.05$ ）；同列右肩不同的大写字母表示在同一抽气速率下，不同时间段之间具有显著差异（ $P<0.05$ ）。下同。

表 2 显示了不同抽气速率下真空超声波处理对生菜 a^* 值的影响及其随贮藏时间延长的变化趋势。清洗前，三种抽气速率处理的 a^* 值均为负值，且无显著差异（ $P>0.05$ ），表明生菜呈绿色。经过清洗后，各组的 a^* 值呈现不同程度的上升，具体表现为， α_3 组在贮藏初期（0 d） a^* 值从清洗前 -7.71 上升至 -4.57，上升幅度显著低于 α_1 和 α_2 组（ $P<0.05$ ），对比清洗前， α_1 和 α_2 组的 a^* 值分别上升至 -6.14 和 -6.84。而且，随着贮藏时间的延长，各组 a^* 值呈现下降的变化趋势，在贮藏后期（2 d），不同处理组后的 a^* 值无显著性差异（ $P>0.05$ ），且均接近于处理前的水平。

表 2 不同抽气速率下真空超声波处理后生菜贮藏过程 a^* 值变化
Table 2 Changes in a^* of lettuce during storage after VC-US treatment at different evacuation rates

处理 方式	a^* 值			
	清洗前	0 d	1 d	2 d
α_1	-7.71 ± 0.13 ^{aC}	-4.57 ± 0.14 ^{aA}	-5.86 ± 0.12 ^{aB}	-7.59 ± 0.19 ^{aC}
α_2	-7.69 ± 0.10 ^{aC}	-6.14 ± 0.08 ^{bA}	-6.68 ± 0.08 ^{bB}	-7.57 ± 0.15 ^{aC}
α_3	-7.71 ± 0.12 ^{aC}	-6.84 ± 0.13 ^{cA}	-7.17 ± 0.09 ^{cB}	-7.55 ± 0.19 ^{aC}

表 3 为不同抽气速率下真空超声波处理对生菜 b^* 值的影响及其随贮藏时间变化的规律。经过清洗后，各组的 b^* 值出现不同程度的下降，且以 α_1 组下降程度最大。而且，随着贮藏时间的延长，各处理组的 b^* 值均呈现上升的趋势，其中， α_1 组的 b^* 值回升幅度最大。贮藏 2 d 后的 b^* 值已超过处理前水平，此时 b^* 值为 17.01，且均显著高于 α_2 和 α_3 组（ $P<0.05$ ），此时 b^* 值分别为 13.05 和 14.49。在贮藏后期（2 d）时， α_3 组的 b^* 值明显低于 α_1 组，略高于 α_2 组，始终保持

较低水平。

表 3 不同抽气速率下真空超声波处理后生菜贮藏过程 b^* 值变化
Table 3 Changes in b^* of lettuce during storage after VC-US treatment at different evacuation rates

处理 方式	b^* 值			
	清洗前	0 d	1 d	2 d
α_1	15.88 ± 0.10 ^{aB}	9.08 ± 0.21 ^{cD}	12.72 ± 0.10 ^{aC}	17.01 ± 0.18 ^{aA}
α_2	15.90 ± 0.13 ^{aA}	12.65 ± 0.11 ^{bC}	11.56 ± 0.12 ^{bD}	13.05 ± 0.11 ^{cB}
α_3	15.91 ± 0.13 ^{aA}	13.11 ± 0.14 ^{aC}	12.89 ± 0.14 ^{aC}	14.49 ± 0.10 ^{bB}

2.3 不同抽气速率下真空超声波处理对生菜贮藏过程相关代谢产物含量的影响

2.3.1 不同抽气速率下真空超声波处理对生菜贮藏过程叶绿素含量变化影响

表 4 不同抽气速率下真空超声波处理后生菜贮藏过程叶绿素含量变化

Table 4 Changes in chlorophyll content of lettuce during storage after VC-US treatment at different evacuation rates

处理 方式	叶绿素含量/(mg/g)			
	清洗前	0 d	1 d	2 d
α_1	0.41 ± 0.05 ^{aA}	0.38 ± 0.03 ^{aAB}	0.36 ± 0.02 ^{aB}	0.35 ± 0.04 ^{aB}
α_2	0.41 ± 0.05 ^{aA}	0.36 ± 0.04 ^{aAB}	0.34 ± 0.03 ^{aAB}	0.33 ± 0.03 ^{aB}
α_3	0.43 ± 0.04 ^{aA}	0.36 ± 0.04 ^{aB}	0.33 ± 0.02 ^{aB}	0.33 ± 0.02 ^{aB}

表 4 展示了不同抽气速率下真空超声波处理对生菜叶绿素含量的影响及其随贮藏时间变化的情况。清洗前，三种处理方式的生菜叶绿素含量基本一致，介于 0.41~0.43 mg·g⁻¹ 之间。经过清洗后，三种处理组的叶绿素含量均呈现下降规律， α_3 组的下降程度较大，高于其他处理组。贮藏 2 d 后， α_3 组的叶绿素含量降至 0.33 mg·g⁻¹，而 α_1 和 α_2 组在 2 d 后的叶绿素分别下降至 0.35 和 0.33 mg·g⁻¹，三组间的差异无显著性（ $P>0.05$ ）。这表明，三种处理方式对生菜的叶绿素含量影响较小，均能较好地保持生菜的绿色品质。孟祥慧等^[29]研究也发现次氯酸钠协同超声波清洗对鲜切生菜有保绿作用。

2.3.2 不同抽气速率下真空超声波处理对生菜贮藏过程维生素 C 含量变化影响

不同抽气速率下真空超声波处理对生菜维生素 C 含量及其随贮藏时间变化的影响详见表 5。经过清洗后，各处理组的维生素 C 含量均出现下降，且以 α_3 组下降程度最大，高于其它处理组。而且，随着贮藏时间的延长，维生素 C 含量呈下降趋势，但下降速率存在一定差异。贮藏 2 d 后， α_1 组维生素 C 含量下降速度最缓慢，为 2.37 mg/100 g； α_2 组次之，为 2.29 mg/100 g；而 α_3

组下降程度最大,降至 2.25 mg/100 g ($P<0.05$)。这种下降趋势可能是由于真空和超声波的协同作用增强 NaClO 的氧化效应,从而加剧了维生素 C 的降解^[30]。总体来说,在后续 2 d 的贮藏期内,三种处理方式对维生素 C 的保留效果无显著性差异 ($P>0.05$),说明这三种方式均能较好地保留生菜的维生素 C。孟祥慧等^[29]的研究结果也显示,经过次氯酸钠协同超声波清洗,鲜切生菜能维持较高的维生素 C 含量。

表 5 不同抽气速率下真空超声波处理后生菜贮藏过程维生素C含量变化

Table 5 Changes in vitamin C of lettuce during storage after VC-US treatment at different evacuation rates				
处理 方式	维生素 C 含量/(mg/100 g)			
	清洗前	0 d	1 d	2 d
α_1	3.35 ± 0.11^{aA}	2.44 ± 0.10^{aB}	2.41 ± 0.14^{aB}	2.37 ± 0.13^{aB}
α_2	3.37 ± 0.08^{aA}	2.39 ± 0.10^{aB}	2.33 ± 0.10^{aB}	2.29 ± 0.15^{aB}
α_3	3.34 ± 0.18^{aA}	2.35 ± 0.18^{aB}	2.31 ± 0.18^{aB}	2.25 ± 0.13^{aB}

2.4 不同抽气速率下真空超声波处理对生菜贮藏过程重量的影响

不同抽气速率下真空超声波处理对生菜贮藏过程中失重率的变化详见表 6。由表中可知,清洗后的生菜均出现不同程度的吸水现象,其中, α_3 组的失重率为 -27.04%,显著低于其他处理组 ($P<0.05$)。这一现象可能是由于真空状态下超声波处理增强了水分渗透至生菜组织间隙的能力,导致生菜重量增加^[31]。随着贮藏时间的延长,各组的失重率逐渐增大,经过 2 d 的贮藏, α_1 组的重量恢复最快,失重率为 -0.18%,已基本接近清洗前的重量,而 α_2 和 α_3 组则分别为 -19.03% 和 -19.89%。总体来看,三种抽气速率下的真空超声波处理均能减少生菜在贮藏期的水分流失,尽管重量恢复速度存在差异,但整体效果均有助于维持生菜的水分含量。

表 6 不同抽气速率下真空超声波处理后生菜贮藏过程失重率变化

Table 6 Changes in weight loss rate of lettuce during storage after VC-US treatment with different evacuation rates				
处理 方式	失重率/%			
	0 d	1 d	2 d	
α_1	-20.11 ± 0.08^{aC}	-16.70 ± 0.10^{aB}	-0.18 ± 0.04^{aA}	
α_2	-26.31 ± 0.13^{bC}	-23.25 ± 0.11^{bB}	-19.03 ± 0.14^{bA}	
α_3	-27.04 ± 0.13^{cC}	-24.95 ± 0.12^{cB}	-19.89 ± 0.14^{cA}	

3 结论

相对而言,更低的抽气速率在去除生菜内部的

E. coli 方面表现出更佳的去除效果。同时,无论何种抽气速率处理,在外观品质和色差方面无明显差异,而且均在贮藏期间能持续降低 *E. coli* 的数量、较好地保持维生素 C 和叶绿素含量,并减少水分的损失。综上所述,采用较低的抽气速率能够获得更理想的清洗效果和较好的品质保留。但是,针对气孔内部微生物的去除仍有更大的优化空间,而且可能存在 Cl^- 残留的风险。因此,未来的研究将在优化 VC-US 的操作参数(真空度和超声波的频率等)的基础上,选用安全性更高的清洗剂代替次氯酸钠(NaClO),以期获得更有效更安全的清洗效果,最终实现即食蔬菜致病菌的零检出。

参考文献

[1] LIAO C H, YU Y G. An innovative method of immersion vacuum cooling for cooked meat products: immersion vacuum cooling with ultrasonic assistance [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(7): 2771-2782.

[2] 廖彩虎,单斌,钟瑞敏,等.不同真空预冷抽气速率对卷心菜预冷过程及贮藏后品质的影响[J].现代食品科技,2016,32(7):182-187.

[3] ZHU Z W, GENG Y, SUN D W. Effects of operation processes and conditions on enhancing performances of vacuum cooling of foods: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 85: 67-77.

[4] ZHU Z W, WU X W, GENG Y, et al. Effects of modified atmosphere vacuum cooling (MAVC) on the quality of three different leafy cabbages [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 94: 190-197.

[5] RANJBARAN M, DATTA A K. Pressure-driven infiltration of water and bacteria into plant leaves during vacuum cooling: A mechanistic model [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 246: 209-223.

[6] VONASEK E, NITIN N. Influence of vacuum cooling on *Escherichia coli* O157:H7 infiltration in fresh leafy greens via a multiphoton-imaging approach [J]. Applied Environmental Microbiology, 2016, 82(1): 106-115.

[7] 韦升坚,谢思芸,宋燕青,等.真空预冷处理对大肠杆菌O157:H7在卷心菜中渗透的影响[J].现代食品科技,2019,35(8):84-90.

[8] YARON S, RÖMLING U. Biofilm formation by enteric pathogens and its role in plant colonization and persistence [J]. Microbial Biotechnology, 2014, 7(6): 496-516.

[9] SELA S, MANULIS-SASSON S. What else can we do to mitigate contamination of fresh produce by foodborne pathogens [J]. Microbial Biotechnology, 2015, 8(1): 29-31.

[10] JIANG Q, ZHANG M, XU B. Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 69: 105261.

[11] AZAM S M R, MA H, XU B, et al. Efficacy of ultrasound treatment in the removal of pesticide residues from fresh vegetables: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 417-432.

- [12] ZHOU W, SARPONG F, ZHOU C. Use of ultrasonic cleaning technology in the whole process of fruit and vegetable processing [J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2874.
- [13] YU Y, WANG Y, OKONKWO C E, et al. Multimode ultrasonic-assisted decontamination of fruits and vegetables: A review [J]. *Food Chemistry*, 2024, 450(30): 139356.
- [14] WANG H, ZHANG Y, JIANG H, et al. A comprehensive review of effects of electrolyzed water and plasma-activated water on growth, chemical compositions, microbiological safety and postharvest quality of sprouts [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 129: 449-462.
- [15] WANG J, HUANG K, WU Z, et al. Effects of ultrasound-assisted low-concentration chlorine washing on ready-to-eat winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao): Cross-contamination prevention, decontamination efficacy, and fruit quality [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 82: 105905.
- [16] WANG J, WU Z. Combined use of ultrasound-assisted washing with in-package atmospheric cold plasma processing as a novel non-thermal hurdle technology for ready-to-eat blueberry disinfection [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 84: 105960.
- [17] MUSTAPHA A T, ZHOU C, AMANOR-ATIEMOH R, et al. Efficacy of dual-frequency ultrasound and sanitizers washing treatments on quality retention of cherry tomato [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 62: 102348.
- [18] ZHANG L, YU X, YAGOUB A E G A, et al. Effects of low frequency multi-mode ultrasound and it's washing solution's interface properties on freshly cut cauliflower [J]. *Food Chemistry*, 2022, 366: 130683.
- [19] HASSAN A N, FRANK J F. Influence of surfactant hydrophobicity on the detachment of *Escherichia coli* O157:H7 from lettuce [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2003, 87(1): 145-152.
- [20] HUANG R, CHEN H. Evaluation of inactivating *Salmonella* on iceberg lettuce shreds with washing process in combination with pulsed light, ultrasound and chlorine [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2018, 285: 144-151.
- [21] ALENYOREGE E A, MA H, AYIM I, et al. Reduction of *Listeria innocua* in fresh-cut Chinese cabbage by a combined washing treatment of sweeping frequency ultrasound and sodium hypochlorite [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 101: 410-418.
- [22] GIL M I, SELMA M V, LÓPEZ-GÁLVEZ F, et al. Fresh-cut product sanitation and wash water disinfection: problems and solutions [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2009, 134(1-2): 37-45.
- [23] 谢思芸,温耀升,张霞,等.不同清洗方式对生菜内部大肠杆菌的清洗效果及其贮藏期品质变化的影响[J].现代食品科技,2025, 41(3):184-191.
- [24] 东方云,黎锦杰,郭敏,等.不同预冷方式下鲜切苹果贮藏过程中品质变化比较[J].现代食品科技,2025,41(2):134-141.
- [25] 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 in Food Science & Technology*, 2020, 105: 211-222.
- [26] AZAM S M R, MA H, XU B, et al. Multi-frequency multi-mode ultrasound treatment for removing pesticides from lettuce (*Lactuca sativa* L.) and effects on product quality [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143: 111147.
- [27] LEI J, REN H, LI Y, et al. The combination of non-electrolytic hypochlorite water and ultrasonic treatment on the cleaning and preservation of baby cabbage [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 205: 116528.
- [28] VAŠTAKAITĖ-KAIRIENĖ V, KELLY N, RUNKLE E S. Regulation of the photon spectrum on growth and nutritional attributes of baby-leaf lettuce at harvest and during postharvest storage [J]. *Plants*, 2021, 10(3): 549.
- [29] 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.
- [30] MANI V P, ABDUL-RAHAMAN A, NIMBARE A C, et al. Effects of postharvest dipping of sodium hypochlorite and hydro-cooling on the quality of 'Petomech' tomato fruits [J]. *Journal of Postharvest Technology*, 2023, 11(4): 37-48.
- [31] WANG Y, WEN Y, WU X, et al. Application of ultrasonic treatment to enhance antioxidant activity in leafy vegetables [J]. *International Journal of Advance in Applied Science Research*, 2024, 3: 49-58.