

# 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

谢思芸, 温耀升, 张霞, 东方云, 叶俊, 周书亦, 张梓炜, 叶键文, 廖彩虎\*

(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)

**摘要:** 真空预冷过程会导致致病菌渗透至蔬菜气孔的内部, 难以用常规清洗方式去除。为了去除渗透至生菜气孔内的大肠杆菌 (*Escherichia coli*) 单独清洗剂清洗 (CK) 作为对照组, 利用超声波 (US)、真空超声波 (VC-US) 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* 的清洗效果和品质的影响。结果表明: VC-US 处理后, 生菜内部的 *E. coli* 数量从原始的 4.33 下降至 1.97 log CFU/cm<sup>2</sup>, 优于 US 和 CK 组 (分别下降至 3.03 和 2.85 log CFU/cm<sup>2</sup>) ( $P < 0.05$ )。贮藏 2 d 后, VC-US 组 *L\** 值显著高于 CK 和 US 组, 而 *a\** 值和 *b\** 值显著低于 CK 和 US 组 ( $P < 0.05$ ); VC-US 组叶绿素和维生素 C 的含量略低于 CK 和 US 组, 但差异性不显著 ( $P > 0.05$ ); 此外, VC-US 组的失重率 (-18.56%) 显著低于 CK (0.79%) 和 US (0.16%) 组 ( $P < 0.05$ )。综上所述, VC-US 处理作为一种复合型处理方式不仅能更有效地去除生菜内部的 *E. coli*, 且对品质无显著影响。该研究为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; 去除; 品质

文章编号: 1673-9078(2025)03-184-191

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.1890

## Impact of Lettuce Washing Methods on the Efficiency of Internal *Escherichia coli* Removal and Quality Changes during Storage

XIE Siyun, WEN Yaosheng, ZHANG Xia, DONG Fangyun, YE Jun, ZHOU Shuyi, ZHANG Ziwei,  
YE Jianwen, LIAO Caihu\*

(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)

**Abstract:** Vacuum cooling often results in the penetration of pathogenic bacteria into the stomata of vegetables, hindering their removal using conventional washing methods. A control group (CK) was washed with a cleaning agent alone, whereas experimental groups were subjected to ultrasonic (US) or vacuum-ultrasonic (VC-US) treatment combined with

引文格式:

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.

XIE Siyun, WEN Yaosheng, ZHANG Xia, et al. Impact of lettuce washing methods on the efficiency of internal *Escherichia coli* removal and quality changes during storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 184-191.

收稿日期: 2024-04-19

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项目 (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项目 (202210576017); 广东省大学生创新创业训练计划项目 (S202310576037); 韶关市科技计划项目 (210724144530340); 韶关学院自然科学基金项目 (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

washing with a leaning agent to eliminate *Escherichia coli* that penetrated the stomata of lettuce after vacuum cooling. The *E. coli* removal efficiency of these treatments and their impact on lettuce quality during storage were evaluated via measuring bacterial colony counts and key physicochemical indicators before and after treatment. The number of *E. coli* in the lettuce decreased from 4.33 to 1.97 log CFU/cm<sup>2</sup> after VC-US treatment, indicating higher removal efficiency than that of the US and CK groups (to 3.03 and 2.85 log CFU/cm<sup>2</sup>, respectively;  $P < 0.05$ ). After two days of storage, the VC-US group had a significantly higher  $L^*$  value but considerably lower  $a^*$  and  $b^*$  values than the CK and US groups ( $P < 0.05$ ). The chlorophyll and vitamin C contents in the VC-US group were slightly, but not significantly, lower than those in the CK and US groups, ( $P > 0.05$ ). Additionally, the weight loss rate in the VC-US group (-18.56%) was significantly lower than those in the CK (0.79%) and US (0.16%) groups ( $P < 0.05$ ). In conclusion, VC-US treatment, as a composite method, effectively removes *E. coli* from within lettuce and does not significant affect lettuce quality. This study provides a theoretical basis and practical insights for the removal of pathogenic bacteria from within vegetables.

**Key words:** lettuce; *Escherichia coli*; vacuum-ultrasonic cleaning; pathogen removal; quality

真空预冷作为蔬菜采后商品化处理、气调保鲜、冷链贮运和配送的前置关键技术，对解决生鲜农产品尤其是叶菜类采后腐烂问题的具有重要的实际意义，也是当前最为有效的技术手段<sup>[1-4]</sup>。然而，在真空预冷过程中，伴随“负压-恒压-复压”的操作，微生物易渗透至蔬菜组织内部。由于组织的“保护作用”，这些这些微生物在随后的清洗和消毒过程中，往往无法与消毒剂直接接触，导致杀菌效果明显降低，从而增加了微生物污染和误食的风险<sup>[5-7]</sup>。相关研究表明，传统的蔬菜清洗方法（如自来水冲洗、果蔬清洗剂和消毒剂溶液浸泡等）对于已渗透至蔬菜气孔内的微生物去除效果有限<sup>[8,9]</sup>。因此，亟需开发更为高效的清洗技术以充分去除蔬菜气孔内部的微生物污染。

超声波清洗技术因其低成本、操作简便、自动化程度高以及显著的清洗效率，近年来在果蔬清洗领域展现了广阔的应用前景<sup>[10,11]</sup>。超声波产生的机械效应和空化效应能够有效地去除残存于果蔬表面起皱、沟壑、死角处的淤泥、杂质和微生物<sup>[10,11]</sup>。此外，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<sup>[12-16]</sup>。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<sup>[17]</sup>，减弱了超声波的空穴效应<sup>[18]</sup>，进而限制了其去除果蔬表面微生物的能力<sup>[13-15]</sup>。因此，越来越多学者研究将食品级表面活性剂<sup>[18-20]</sup>和消毒剂<sup>[21,22]</sup>应用于超声波清洗中，取得了较为理想的效果。

在前期预实验中，尽管利用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) 可有效地去除叶菜表面的大肠杆菌

(*Escherichia coli*, *E. coli*)，但对已渗透至生菜气孔内部的 *E. coli* 的去除效果非常有限。研究表明，真空条件下超声波处理能够明显增加液体的沸腾和湍流强度，从而有效地增加了超声波的机械效应和空穴效应<sup>[3]</sup>。因此，理论上，采用真空超声波复合清洗剂（含 Tween 20 和 NaClO）应能够有效去除已渗透至生菜气孔内部的 *E. coli*。然而，现有文献针对上述复合技术，特别是对蔬菜气孔内部 *E. coli* 的去除研究鲜见报告。基于此，本文以单独清洗剂清洗 (CK) 作为对照组，利用超声波 (US)、真空超声波 (VC-US) 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* 的清洗效果和品质的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

生菜来自韶关学院生农学院，选取标准为种植时间一致 (60 d)，大小均匀，株高为  $25 \pm 2$  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；*E. coli* ATCC25922-sfGFP (质粒型) 上海北纳创联生物技术有限公司，携带 GFP 绿色荧光蛋白和卡那霉素抗性基因。

硫酸卡那霉素 (生物试剂级)，北京索莱宝科技有限公司；2,6-二氯酚酚钠、抗坏血酸、草酸、乙醇、次氯酸钠 (NaClO)、氯化钠，分析纯，西陇科学股份有限公司；LB 肉汤培养基、0.1% 蛋白胨水培养基、琼脂粉，购于北京陆桥技术股份有限公司；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; SP60 色差仪, 美国爱色丽公司; MultiSkan SkyHigh 全波长酶标仪, Thermo 公司; BPS-100CL 恒温恒湿箱, 上海一恒科学仪器有限公司。

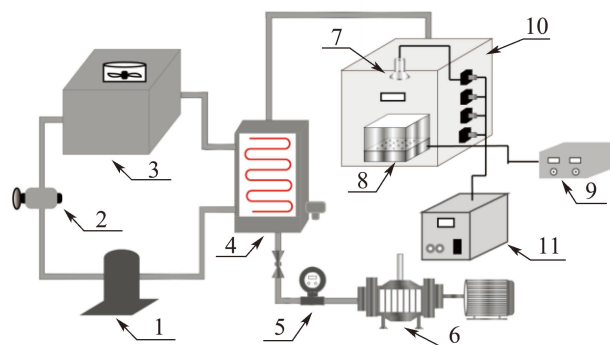


图 1 真空预冷复合超声波设备组合图

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

注: 1 为压缩机, 2 为膨胀阀, 3 为冷凝器, 4 为补水器, 5 为电动阀, 6 为真空泵, 7 为摄像头, 8 为超声波传感器, 9 为超声波控制器, 10 为真空箱, 11 为数据处理器。

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 样品处理与清洗方法

**菌种活化:** 将 *E.coli* 接种于含有 50  $\mu\text{g/mL}$  卡那霉素的 LB 培养液中, 在 37  $^{\circ}\text{C}$  恒温摇床中孵育 24 h, 活化过程重复 2 次。随后于 4  $^{\circ}\text{C}$ , 10 300 $\times$ g 离心 10 min, 弃上清液, 将沉淀重悬于 100 mL 含有 50  $\mu\text{g/mL}$  卡那霉素的 0.1% 无菌蛋白胨水中, 得到约  $3\times 10^{10}$  CFU/mL 的细菌悬浮液, 并于 4 $\pm$ 1  $^{\circ}\text{C}$  暂存备用。使用前, 将悬浮液稀释至初始浓度 ( $1\times 10^8$  CFU/mL)。

**生菜的接种:** 在无菌工作台中, 去除生菜外层叶片, 挑选大小均匀且无机械损伤的叶片样本 (叶片大小为 20 $\pm$ 1 cm), 放入无菌包装袋中。分别将叶片于 25  $^{\circ}\text{C}$  上述悬浮液浸泡 10 min, 同时开启磁力搅拌确保菌悬液均匀混合。接种后, 取出叶片, 自然滴干直至不再滴水。随后, 将叶片放入 2 L 无菌包装盒中, 25  $^{\circ}\text{C}$  放置 2 h, 湿度控制在 95%~98% 以模拟从田间到工厂的运输条件。完成上述接种后, 立刻将样品进行真空预冷后, 预冷后于 4 $\pm$ 1  $^{\circ}\text{C}$  暂存备用。

将上述经过真空预冷的样品, 按照以下不同的清洗方式 (CK、US 和 VC-US) 进行处理。根据前期预研究结果, Tween 20 和 NaClO 组合一起的清洗效果最佳。因此, 以下采用的清洗液均为 Tween

20 和 NaClO 的组合。具体操作方法如下:

**CK:** 配置 3 L 含 0.2% Tween 20 (V/V) 和 100 mg/L NaClO 溶液的清洗液, 清洗液温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ 。将待清洗样品浸没于清洗液中, 浸泡 6 min, 立刻放入无菌水中, 重复清洗 3 次;

**US:** 配置 3 L 上述清洗液, 放入超声波清洗槽中, 清洗剂温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ 。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, 随后开启超声波 (频率为 28.9 kHz, 功率为 300 W), 维持 6 min。结束后, 关闭超声波, 立刻放入无菌水中, 重复清洗 3 次;

**VC-US:** 与 US 操作基本一致。不同的是, 开启真空预冷机, 调节电动阀, 使得箱体压强从 101 330 Pa 降至终压 800 Pa 的时间为 6 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。

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 $\pm$ 1  $^{\circ}\text{C}$  冷库中贮藏 48 h, 每隔 24 h 取出样品并测定相关指标。所以, 3 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。其中, 真空预冷设备与接触原料的不锈钢架子、保鲜盒均经过紫外辐照 30 min 处理, 超声波腔体用 300 mg/L 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

参考韦升坚等<sup>[7]</sup>方法, 稍作修改, 具体方法如下: 将上述完成清洗的样本, 放置于超净工作台中, 正反面紫外照射各 10 min 后, 使用直径 10 mm 的圆形打孔器随机从生菜叶脉两侧取下 15 叶片样本, 放入 5 mL 无菌离心管中, 加入 1 mL 生理盐水, 捣碎混匀后, 选择合适梯度进行稀释, 平板计数。计数结果以每厘米平方 *E. coli* 数量 ( $\log$  CFU/cm<sup>2</sup>), 平行测定 3 次。

### 1.3.3 维生素 C 含量测定

参考 Martiñon 等<sup>[23]</sup>的方法, 取 10.00 g 样品进行测定, 每个处理组重复 3 次, 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<sub>a</sub>——样品提取液消耗的 2,6-二氯靛酚溶液的量, mL;

- $V_0$ —空白消耗的 2,6-二氯靛酚溶液的量, mL;  
 $C$ —2,6-二氯靛酚标准液浓度, mol/L;  
 $T$ —1 mL 2,6-二氯靛酚溶液对维生素 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

参考王丽敏等<sup>[24]</sup>方法,并稍作修改。取 2.00 g 新鲜叶片剪碎,然后放入 50 mL 离心管中,加入 20 mL  $\varphi=95\%$  乙醇,避光浸提 24 h,提取液分别在 663、645 nm 测定 OD 值,平行测定 3 次,根据下列公式计算叶绿素含量。

$$B_1 = 12.72 \times A_{663} - 2.59 \times A_{645} \quad (2)$$

$$B_2 = 22.88 \times A_{645} - 4.67 \times A_{663} \quad (3)$$

$$B = B_1 + B_2 \quad (4)$$

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

式中:

$B_1$ —提取液中叶绿素 a 的质量浓度, mg/L;

$B_2$ —提取液中叶绿素 b 的质量浓度, mg/L;

$B$ —提取液中总叶绿素的质量浓度, mg/L;

$E$ —样品中叶绿素含量, mg/g;

$A_{663}$ —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。

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

式中:

$H$ —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 真空超声波清洗方式对生菜气孔内部 *E. coli* 的清除效果

图 2 描述了不同清洗方式对生菜气孔内部 *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。由图 2 可知,不同清洗方式对生菜内部 *E. coli* 的去除效果存在着显著性差异 ( $P < 0.05$ )。清洗前,三个处理组生菜内部 *E. coli* 数量为  $4.33 \log \text{CFU}/\text{cm}^2$ 。VC-US 处理后,生菜内部 *E. coli* 数量下降至  $1.97 \log \text{CFU}/\text{cm}^2$ ,而 CK 组和 US 组则分别下降至 3.03 和  $2.85 \log \text{CFU}/\text{cm}^2$  ( $P < 0.05$ )。在贮藏过程中,无论何种清洗方式,生菜内部残留的 *E. coli*,其数量也随着贮藏时间的延长而逐渐下降。贮藏 2 d 后,VC-US 处理后生菜内部 *E. coli* 数量下降至  $1.52 \log \text{CFU}/\text{cm}^2$ ,而 CK 组和 US 组分别为  $2.56 \log \text{CFU}/\text{cm}^2$  和  $2.78 \log \text{CFU}/\text{cm}^2$  ( $P < 0.05$ )。由此可知,VC-US 处理对生菜内部 *E. coli* 去除效果最佳,其可能由于真空环境增强了超声波的空穴效应,促进了 NaClO 与气孔内部 *E. coli* 的接触,从而显著提升其杀菌能力<sup>[25]</sup>。然而,尽管 VC-US 处理表现出显著优势,由于 *E. coli* 渗透较深,其清除效果仍然存在一定的局限性。

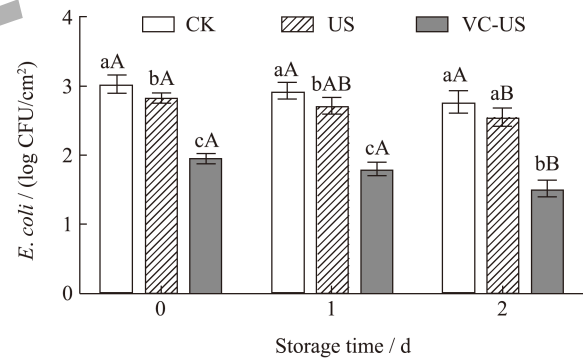


图 2 不同清洗方式处理后生菜气孔内部 *E. coli* 的数量图

Fig.2 The number of *E. coli* in the stomata of lettuce after treatment with different cleaning methods

注:不同的小写字母表示在同一时间下,不同处理方式之间具有显著差异 ( $P < 0.05$ );不同的大写字母表示在同一处理方式,不同时间段之间具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 不同清洗方式对生菜贮藏过程外观品质的影响

不同清洗方式对生菜贮藏过程外观品质的变化详见图 3、表 1~3。由图 3 可知,与清洗前相比,CK 和 US 处理组的生菜在 2 d 的贮藏期内外观上未

出现明显变化,表明添加清洗剂以及超声波处理方式对生菜的外观品质影响较小。但是,经过 VC-US 处理组出现组织透明化的现象,其可能原因为真空条件下超声波的空穴效应增强<sup>[26]</sup>,促使生菜组织的气孔打开,排出组织中的气体,并维持气孔开启状态,在随后的复压过程,由于气孔内外压差过大,导致大量的水分进入生菜组织,使生菜呈现透明的状态<sup>[27]</sup>。随着贮藏时间的延长,生菜组织开始逐渐恢复原状,这一现象可能与后续贮藏环境中湿度的变化有关<sup>[28]</sup>。

表 1 显示了不同清洗方式对生菜  $L^*$  值的影响及其随贮藏时间的变化。清洗前,三种清洗方式的  $L^*$  值无显著差异。对于 CK 处理组而言,  $L^*$  值在 0 d 相较清洗前略有上升,随后呈持续下降趋势,但整个贮藏期间变化不显著,表现出较好的稳定性;而 US 和 VC-US 处理组的  $L^*$  值则呈现出先下降后上升的趋势,其中,VC-US 处理组的下降幅度显著高于 US 组 ( $P < 0.05$ ),但是在后期贮藏过程,VC-US 处理组  $L^*$  值的恢复速度明显优于 US 组,表现为最高的  $L^*$  值。

表 2 展示了不同清洗方式对生菜  $a^*$  值的影响及其随贮藏时间延长的变化。清洗前,三种清洗方式的  $a^*$  值无显著差异 ( $P > 0.05$ ),均为负值,说明生菜呈现为绿色。对于 CK 处理组,  $a^*$  值在贮藏

初期 (0 d 和 1 d) 较清洗前有所上升,随后在 2 d 时略有下降,但整体变化幅度较小。相比之下,US 和 VC-US 处理组,  $a^*$  值在贮藏初期明显上升,其中 VC-US 处理组 0 d 和 1 d 时的  $a^*$  值显著高于 US 组 ( $P < 0.05$ ),表明 VC-US 处理组  $a^*$  值在初期下降明显。然而,贮藏到 2 d 时,VC-US 的  $a^*$  值显著下降,其恢复效果优于 US 组,并最终接近清洗前的水平。

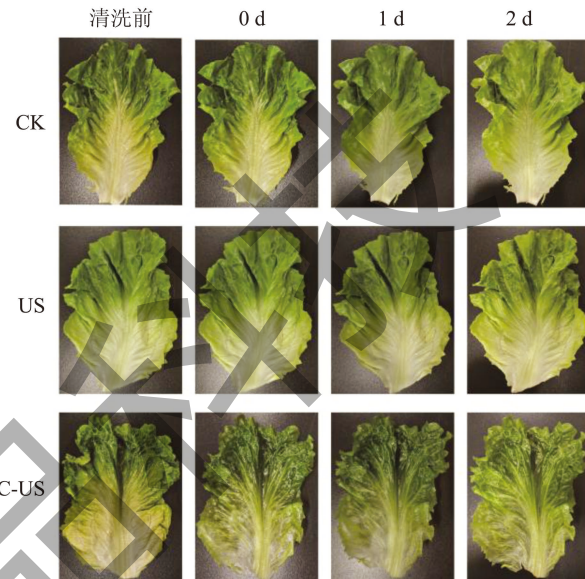


图 3 不同清洗方式处理后生菜贮藏过程外观变化

Fig.3 The number of *E. coli* inside the stomata of lettuce after treatment with different cleaning solutions

表 1 不同清洗方式处理后生菜贮藏过程  $L^*$  值变化

Table 1 Changes in  $L^*$  of lettuce during storage after treatment with different cleaning methods

处理方式	$L^*$ 值			
	清洗前	0 d	1 d	2 d
CK	54.53 ± 0.06 <sup>AA</sup>	54.93 ± 0.29 <sup>AA</sup>	54.89 ± 0.33 <sup>AA</sup>	54.65 ± 0.24 <sup>AA</sup>
US	54.76 ± 0.27 <sup>AA</sup>	53.67 ± 0.18 <sup>BB</sup>	52.55 ± 0.14 <sup>BC</sup>	53.97 ± 0.16 <sup>AB</sup>
VC-US	54.56 ± 0.25 <sup>AB</sup>	51.73 ± 0.31 <sup>CD</sup>	52.87 ± 0.13 <sup>BC</sup>	55.02 ± 0.25 <sup>BA</sup>

注:同列右肩不同的小写字母表示在同一时间下,不同处理方式之间具有显著差异 ( $P < 0.05$ );同列右肩不同的大写字母表示在同一处理方式,不同时间段之间具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。下同。

表 2 不同清洗方式处理后生菜贮藏过程  $a^*$  值变化

Table 2 Changes in  $a^*$  of lettuce during storage after treatment with different cleaning methods

处理方式	$a^*$ 值			
	清洗前	0 d	1 d	2 d
CK	-7.71 ± 0.02 <sup>AC</sup>	-7.33 ± 0.08 <sup>CA</sup>	-7.63 ± 0.07 <sup>BC</sup>	-7.54 ± 0.10 <sup>AB</sup>
US	-7.71 ± 0.12 <sup>AB</sup>	-6.82 ± 0.13 <sup>BA</sup>	-7.71 ± 0.05 <sup>BB</sup>	-7.63 ± 0.09 <sup>AB</sup>
VC-US	-7.73 ± 0.12 <sup>AC</sup>	-5.77 ± 0.15 <sup>AA</sup>	-6.89 ± 0.17 <sup>AB</sup>	-7.87 ± 0.17 <sup>BC</sup>

表 3 不同清洗方式处理后生菜贮藏过程 $b^*$ 值变化Table 3 Changes in  $b^*$  of lettuce during storage after treatment with different cleaning methods

处理方式	$b^*$ 值			
	清洗前	0 d	1 d	2 d
CK	15.9 ± 0.15 <sup>ab</sup>	14.74 ± 0.11 <sup>aC</sup>	16.77 ± 0.11 <sup>aA</sup>	16.83 ± 0.10 <sup>aA</sup>
US	15.9 ± 0.13 <sup>aC</sup>	13.57 ± 0.15 <sup>bD</sup>	16.93 ± 0.13 <sup>aA</sup>	16.64 ± 0.12 <sup>ab</sup>
VC-US	15.9 ± 0.18 <sup>aA</sup>	12.48 ± 0.13 <sup>cB</sup>	11.04 ± 0.14 <sup>bC</sup>	11.07 ± 0.15 <sup>bC</sup>

表 4 不同清洗方式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 treatment with different cleaning methods

处理方式	叶绿素含量/(mg/g)			
	清洗前	0 d	1 d	2 d
CK	0.42 ± 0.03 <sup>aA</sup>	0.39 ± 0.04 <sup>aA</sup>	0.36 ± 0.04 <sup>aA</sup>	0.35 ± 0.05 <sup>aA</sup>
US	0.41 ± 0.05 <sup>aA</sup>	0.37 ± 0.04 <sup>aA</sup>	0.35 ± 0.04 <sup>aA</sup>	0.34 ± 0.03 <sup>aA</sup>
VC-US	0.41 ± 0.04 <sup>aA</sup>	0.36 ± 0.04 <sup>aAB</sup>	0.34 ± 0.03 <sup>aAB</sup>	0.33 ± 0.05 <sup>ab</sup>

表 5 不同清洗方式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 treatment with different cleaning methods

处理 方式	维生素 C 含量/(mg/100 g)			
	清洗前	0 d	1 d	2 d
CK	3.31 ± 0.15 <sup>aA</sup>	2.51 ± 0.07 <sup>ab</sup>	2.47 ± 0.07 <sup>ab</sup>	2.43 ± 0.07 <sup>ab</sup>
US	3.32 ± 0.18 <sup>aA</sup>	2.46 ± 0.05 <sup>ab</sup>	2.44 ± 0.05 <sup>ab</sup>	2.41 ± 0.05 <sup>ab</sup>
VC-US	3.38 ± 0.22 <sup>aA</sup>	2.37 ± 0.21 <sup>ab</sup>	2.35 ± 0.15 <sup>ab</sup>	2.3 ± 0.07 <sup>ab</sup>

表 3 展示了不同清洗方式对生菜  $b^*$  值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  $b^*$  值无显著性差异, 样品呈现稳定的黄色。对于 CK 处理组,  $b^*$  值在 0 d 时显著下降 ( $P < 0.05$ ), 随后逐渐上升, 在后续 2 d 恢复至接近清洗前水平, 黄色稳定性较好。对于 US 处理组,  $b^*$  值在清洗后显著下降, 随后在 2 d 时有所回升, 并恢复至接近清洗前的水平。相比之下, VC-US 处理组的  $b^*$  值下降最为显著, 尤其是 0 d 和 1 d,  $b^*$  值明显低于其他两组 ( $P < 0.05$ ), 表明黄色显著减弱, 且在 2 d 时未能恢复, 始终保持较低水平。

### 2.3 不同清洗方式对生菜贮藏过程相关代谢产物含量的影响

#### 2.3.1 不同清洗方式对生菜贮藏过程叶绿素含量变化影响

表 4 展示了不同清洗方式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 0.41~0.42 mg/g 之间。随着贮藏时间的延长, 叶绿素含量均呈现下降趋势, 但是下降幅度有所不同。具体而言, CK 处理组的叶

绿素含量下降幅度最小, 在 2 d 后仍保持在 0.35 mg/g, US 处理组次之, 为 0.34 mg/g, 而 VC-US 的叶绿素含量下降最大, 为 0.33 mg/g。然而, 无论在处理方式还是贮藏时间上, 三个处理组之间均无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 表明三种清洗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。

#### 2.3.2 不同清洗方式对生菜贮藏过程维生素C含量变化影响

表 5 展示了不同清洗方式对生菜中维生素 C 含量的影响及其随贮藏时间变化的情况。清洗前, 生菜中维生素 C 含量在 3.31~3.38 mg/100 g 之间。随着贮藏时间的延长, 维生素 C 含量整体呈下降趋势, 但是下降速率存在差异。具体而言, CK 处理组维生素 C 下降最慢, 在贮藏 2 d 后含量为 2.43 mg/100 g; US 处理组次之, 为 2.41 mg/100 g; VC-US 处理组下降最快, 2 d 后为 2.3 mg/100 g, 较清洗前下降了 1.08 mg/100 g, 且清洗前后存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。这可能是由于 NaClO 对维生素 C 的氧化作用在 US 和 VC-US 处理下更为显著, 尤其在 VC-US 处理组, 通过真空和超声波的协同作用, 进一

步加速了NaClO的氧化作用,从而加剧了维生素C的降解<sup>[29]</sup>。然而,总体来看,3种处理方式在贮藏期间对维生素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。

#### 2.4 不同清洗方式对生菜贮藏过程质量的影响

不同清洗方式对生菜贮藏过程中失重率的变化详见表6。由表中可知,清洗后的生菜在贮藏初期(0 d)都出现不同程度的吸水现象,所有处理组的失重率均为负值,其中,VC-US处理组的失重率为-25.95%,显著低于其他处理组( $P<0.05$ ),表现出更强的吸水能力,这可能由于超声波利用促进水进入生菜组织间隙中导致生菜增重<sup>[30]</sup>。随着贮藏时间的延长,三个处理组的失重率均逐渐增大。具体而言,CK和US处理组的失重率在2 d时转为正值,表明生菜吸水后水分开始流失,且表现出质量下降的趋势。相比之下,而VC-US处理组在2 d时失重率仍为负值(-18.56%),尽管较0 d有所减少,但水分流失速度明显较慢,且其外观性状逐渐恢复至常态。总体而言,VC-US处理方式在保持生菜水分和延缓失水过程方面明显优于其他组,显示出对延长生菜贮藏期的潜在优势。

表6 不同清洗方式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 treatment with different cleaning methods

处理方式	失重率/%		
	0 d	1 d	2 d
CK	$-3.88 \pm 0.07^{ac}$	$-0.41 \pm 0.05^{ab}$	$0.79 \pm 0.05^{aa}$
US	$-6.92 \pm 0.08^{bc}$	$-1.84 \pm 0.06^{bb}$	$0.16 \pm 0.03^{ba}$
VC-US	$-25.95 \pm 0.09^{cc}$	$-22.80 \pm 0.11^{cb}$	$-18.56 \pm 0.13^{ca}$

### 3 结论

相较于CK和US处理而言,VC-US处理不仅能更有效地去除生菜内部的*E. coli*,而且在贮藏过程能有效维持较高的维生素C和叶绿素的含量,同时有效减缓失重率上升。在外观品质和色差值方面,VC-US处理组与其他处理组差异较小,结合了真空条件和超声波的双重优势,其中,超声波的空穴效应能够有效去除生菜内部的*E. coli*,并在贮藏期间持续降低*E. coli*的数量;同时,真空环境显著增加了超声波的空穴效应,从而实现更有效的杀菌效果。总体而言,VC-US作为一种复合型的处理方式,已显示出其在生菜气孔清洗中的应用潜力。未来研究

将进一步优化VC-US的操作参数,例如抽气速率、恒压时间、真空度以及超声波的频率和功率等,以期获得更理性的清洗效果,最终实现即食蔬菜致病菌零检出的目标。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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] 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.
- [11] JIANG Q, ZHANG M, XU B. Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 69: 105261.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [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] 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.
- [16] 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.
- [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 its 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] MARTIÑON M E, MOREIRA R G, CASTELL-PEREZ M E, et al. Development of a multilayered antimicrobial edible coating for shelf-life extension of fresh-cut cantaloupe (*Cucumis melo* L.) stored at 4 C [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 56(2): 341-350.
- [24] 王丽敏,王喜月,袁树枝,等.叶类蔬菜在流通配送过程中的品质变化研究[J].*食品科技*,2023,48(6):39-47.
- [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] 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.
- [30] 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.