

超声波联合紫外杀菌在椰子水中的應用

李芹¹, 吴雨豪¹, 周建伟², 刘东红^{1,3}, 郑鑫⁴, 胡秘芬⁴, 江英英⁴, 吕瑞玲^{1,3*}

(1. 浙江大学宁波科创中心, 浙江宁波 315100) (2. 浙大宁波理工学院, 浙江宁波 315100)

(3. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江杭州 310058) (4. 宁波方太厨具有限公司, 浙江宁波 315336)

摘要: 该研究探讨超声波和紫外联合处理对椰子水中微生物的杀灭效果以及对贮藏期椰子水品质的影响。以紫外、超声波单独处理作对比, 探究联合处理对椰子水中大肠杆菌 O157:H7 的杀灭效果。同时对贮藏期椰子水中糖含量、酶活性和挥发性化合物进行检测和分析, 探究联合处理对贮藏期椰子水品质的影响。实验结果表明, 超声波与紫外联合处理杀菌效果最佳, 采用该技术对椰子水处理 180 s 后 (超声波, 频率 20 000 Hz, 功率 200 W; 紫外, 功率 8 W, 波长 253.7 nm, 照射距离 6 cm), 大肠杆菌 O157:H7 计数降低 8.31 个对数值。在贮藏实验中, 29 种挥发性化合物的峰值面积百分比未发生明显变化, 理化指标保持稳定, 且贮藏 12 d 后的椰子水总色差值不超过 1。该研究证明联合处理 180 s 是椰子水杀菌的较优条件, 因其协同效应大幅提升了杀菌效果, 为超声波联合紫外杀菌技术的开发与应用提供科学的理论依据。

关键词: 超声波; 紫外; 非热杀菌; 椰子水; 大肠杆菌 O157:H7

文章编号: 1673-9078(2025)10-241-252

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.0930

Application of Ultrasound Combined with Ultraviolet Sterilization to Coconut Water

LI Qin¹, WU Yuhao¹, ZHOU Jianwei², LIU Donghong^{1,3}, ZHENG Xin⁴,

HU Mifen⁴, JIANG Yingying⁴, LYU Ruiling^{1,3*}

(1. Ningbo Innovation Center, Zhejiang University, Ningbo 315100, China) (2. NingboTech University, Ningbo 315100, China)

(3. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

(4. Ningbo Fotile Kitchen Ware Co. Ltd., Ningbo 315336, China)

Abstract: The sterilization effects of the ultrasound (US) and ultraviolet (UV) combined treatment on microorganisms in coconut water and on the quality of coconut water during storage were investigated in this study. The sterilization effect of the combined treatment on the *Escherichia coli* O157:H7 in coconut water was compared with those of UV alone and US alone. Meanwhile, the sugar content, enzyme activity and volatile compounds in the coconut water during storage were determined and analyzed to explore the effect of the combined treatment on the quality of coconut water over storage. The experimental results showed that the combination of US and UV treatment had the best sterilization effect. After the combined treatment on coconut water for 180 s (US, frequency 20 000 Hz, power 200 W; UV, power 8 W, wavelength 253.7 nm, distance 6 cm), the count of *Escherichia coli* O157:H7 decreased by 8.31 log₁₀ CFU/mL. During storage t, the peak area percentages of 29 volatile compounds did not change

引文格式:

李芹, 吴雨豪, 周建伟, 等. 超声波联合紫外杀菌在椰子水中的應用[J]. 现代食品科技, 2025, 41(10): 241-252.

LI Qin, WU Yuhao, ZHOU Jianwei, et al. Application of ultrasound combined with ultraviolet sterilization to coconut water [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 241-252.

收稿日期: 2024-07-02; 修回日期: 2024-10-17; 接受日期: 2024-10-21

基金项目: 宁波市企业创新联合体项目 (2022H006); 云南省重大科技专项计划 (202202AE090019-33); 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划 (2023C01173)

作者简介: 李芹 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 非热杀菌技术, E-mail: liqinzju@163.com

通讯作者: 吕瑞玲 (1993-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品非热加工技术, E-mail: lvruling@zju.edu.cn

significantly; the physicochemical indexes remained stable, and the total color difference value of the coconut water after 12 days of storage did not exceed one. The study demonstrated that the combined treatment for 180 s was a better approach for coconut water sterilization, because its synergistic effect greatly improved the sterilization effect, which provides a scientific theoretical basis for the development and application of the ultrasound and ultraviolet combined sterilization technology.

Key words: ultrasound; ultraviolet; non-thermal sterilization; coconut water; *Escherichia coli* O157:H7

椰子, 作为棕榈科椰树的果实, 含有丰富的糖分、脂肪、蛋白质、维生素和矿物质, 对健康大有裨益。尤其是椰子水, 这种椰子内部自然形成的液体, 因其营养丰富和口感独特而受到广泛喜爱。它不仅是一种天然饮品, 还富含电解质和多种营养成分, 其等渗性与人体体液相似, 有助于促进肾脏功能^[1]。同时, 椰子水的活性成分对促进细胞活力和延缓衰老具有重要作用^[2]。此外, 其丰富的挥发性物质赋予了椰子水独特的风味, 包括有机酸、醇、酯、醛、酮等物质^[3]。然而, 椰子水容易在收获和加工过程中受到微生物污染, 影响品质, 因此保持其品质和风味的同时确保食品安全, 是食品加工技术领域的一个重要挑战。

超声波技术 (Ultrasound, US), 作为一种非热加工手段, 其独特的物理特性使其在食品无损检测、干燥、乳化、均质化等方面展现出显著优势^[4]。此外, US 还常被用于食品的杀菌处理, 包括酶杀菌、冷冻与解冻等过程杀菌^[5]。US 通常与其他热加工或非热技术结合使用, 以改善产品质量, 保留生物活性成分, 并提高微生物的杀菌效率^[6]。该技术对工业规模应用有多方面的影响, 如促进质量转移、脱气、空化、均质化、低温巴氏杀菌以及加工过程中生物活性成分的提取^[7]。US 的原理是在液体中形成微泡, 这些微泡生长直至不稳定并崩溃, 促成了震波的形成, 引发一种被称为空化的湍流和微流效应。空化能破坏细胞壁及细胞壁膜, 并提高生物活性成分提取率^[8]。在果蔬汁生产中, 紫外 (Ultraviolet, UV) 同样常被用来处理果蔬汁的杀菌和对包装容器的杀菌。然而, UV 只能杀死表面的微生物, 对于果蔬汁内部的微生物效果有限。因此, 在果蔬汁生产中, 可采取紫外与其他杀菌方法结合使用, 以确保产品的安全和品质。

该实验聚焦于新鲜椰子水的杀菌和保存, 应用超声波与紫外联合处理技术对椰子水进行杀菌, 旨在评估其对椰子水中微生物的杀灭效果以及对椰子水在贮藏期间品质和风味的影响, 为超声波联合紫外杀菌技术的开发提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

椰子购于盒马超市; 大肠杆菌 O157:H7 由实验室 -80 °C 冷冻保藏, 购于北纳生物。

伊红美蓝培养基 (Eosin-methylene Blue Medium, EMB)、平板计数琼脂 (Plate Count Agar, PCA)、营养肉汤培养基 (Nutrient Broth, NB), 杭州微生物试剂有限公司。

乙醇、氯化钠, 国药集团化学试剂有限公司; 蔗糖合成酶 (Sucrose Synthase, SS) 活性检测试剂盒、蔗糖磷酸合成酶 (Sucrose Phosphate Synthase, SPS) 活性检测试剂盒、酸性转化酶 (Acid Invertase, AI) 活性检测试剂盒、中性转化酶 (Neutral Invertase, NI) 活性检测试剂盒, 北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

SCIENTZ-IIID 超声波细胞粉碎机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; CZ3457 紫外灯管, 飞利浦公司; HWS-26 电热恒温水浴锅, 上海齐欣科学仪器有限公司; MDF-U54V 医用低温箱, 普和希健康医疗器械 (上海) 有限公司; CM-700d/600d 分光测色计, 日本柯尼卡美能达控股株式会社; PAL-1 色差仪, 日本爱拓公司; LC-DDB-1M 便携式电导率仪, 上海力辰邦西仪器科技有限公司; PH-100C PH 检测笔, 河南邦特集团有限公司; THZ-D 恒温振荡器, 苏州培英实验设备有限公司; OptiClean1300 超净工作台, 利康精密科技 (上海) 有限公司; HWS-160DY 低温恒温恒湿培养箱, 宁波科晟实验仪器有限公司; PALRSI85 气相色谱系统, 安捷伦公司; e2695 高效液相色谱仪, 沃特世公司。

1.3 实验方法

1.3.1 不同处理后接种大肠杆菌O157:H7的椰子水中大肠杆菌O157:H7残留量的测定

从新鲜的椰子中取出椰子水混匀, 置于烧杯中备

用。将 9 lg CFU/mL 的大肠杆菌 O157:H7 菌悬液与新鲜椰子水以 1:10 比例混合, 制得 50 mL 试样, 再将其移入石英烧杯中。将试样分为四组, 分别为对照组 (CK)、US 组 (处理频率为仪器固定频率 20 000 Hz, 参考高帮君等^[9]的超声波杀菌研究, 设置功率 200 W)、UV 组 (功率 8 W, 波长 253.7 nm, 照射距离 6 cm)、UV+US 组 (同时进行, 将烧杯放入超声波细胞粉碎机的隔音箱中, 超声波探头浸至溶液中央深度, 紫外灯管垂直放置于烧杯旁, 隔音箱门闭合并外覆黑布, 遥控控制同时开始杀菌, 操作参数如前), 对试样进行处理。处理后的三组椰子水样品, 在每个预定时间点, 取出 500 μ L 样本并加入含有 4.5 mL 无菌生理盐水 (质量浓度 0.85%) 的试管中。经过 10 倍系列梯度稀释直至达到适宜的浓度, 随后取 100 μ L 稀释液进行涂布培养。将培养皿放置于培养箱内过夜, 并在第二天进行菌落数量测定。

1.3.2 贮藏实验

将新鲜椰子水分成四组, 包括 CK 组、US 组、UV 组、UV+US 组, 处理参数同 1.3.1。分别处理完成后, 样品被密封于容量瓶中并保存在 4 $^{\circ}$ C 的恒温环境下。在第 0、3、6、9、12 天, 从每组中取样测定相关的品质指标; 所有操作均在无菌环境下进行。

1.3.3 贮藏期椰子水色泽的测定

为评价不同处理方法及贮藏期限对椰子水色泽的影响, 使用色差仪分别测量各处理组在不同时间点的亮度 (L^*)、红绿色度 (a^*) 以及黄蓝色度 (b^*)。椰子水的总色差, 作为评估贮藏前后颜色变化的指标, 计算公式如下。

$$\Delta E = \sqrt{(L_t^* - L_0^*)^2 + (a_t^* - a_0^*)^2 + (b_t^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

式中:

L_0^* ——新鲜椰子水的亮度;

a_0^* ——新鲜椰子水的红绿色度;

b_0^* ——新鲜椰子水的黄蓝色度;

L_t^* ——存放 t 天后椰子水的亮度;

a_t^* ——存放 t 天后椰子水的红绿色度;

b_t^* ——存放 t 天后椰子水的黄蓝色度。

1.3.4 贮藏期椰子水理化指标的测定

使用多项设备进行椰子水四项理化指标的测定。通过 PAL-1 数显手持糖度计测量嫩椰子水的总可溶性固形物 (Total Soluble Solids, TSS) 含量。使用 LC-DDB-1M 电导率仪评估椰子水的离子浓度。借助手持 PH 检测笔, 测定椰子水的 pH 值以评估其酸碱度。通过计算 $^{\circ}$ Brix 与 pH 的比值, 引入了糖酸比值这一指标,

用以综合评价椰子水的甜酸平衡情况^[10]。

1.3.5 贮藏期椰子水香气化合物的测定

取 5 mL 处理后的椰子水样品, 加入 2.0 g 氯化钠, 置于顶空瓶中。使用聚四氟乙烯内衬的硅胶盖密封顶空瓶, 在 50 $^{\circ}$ C 下搅拌 10 min。使用二乙烯苯/聚二甲基硅氧烷固相微萃取纤维对样本进行萃取, 萃取时间 60 min, 萃取得到的化合物通过电子电离模式引入气相色谱-质谱仪 (Gas Chromatography-mass Spectrometry, GC-MS) 进行分析。质谱条件: 能量 70 eV, 质量扫描范围 m/z 35~300。色谱条件: 色谱柱为 DB-WAX 熔融硅毛细管柱 (30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m), 升温程序: 初始温度 40 $^{\circ}$ C 保持 3 min, 以 5 $^{\circ}$ C/min 的升温速率升至 120 $^{\circ}$ C, 再以 10 $^{\circ}$ C/min 的速率升至 250 $^{\circ}$ C 并保持 5 min; 载气 (He) 流速 1 mL/min。

1.3.6 贮藏期椰子水葡萄糖、果糖、蔗糖含量的测定

所有样本稀释 20 倍后, 使用 0.45 μ m 微孔滤膜进行精细过滤, 确保样本的纯净。过滤后的样本存放在棕色液相色谱瓶中, 准备进行后续分析。实验采用了高效液相色谱 (HPLC) 技术, 通过向系统中注入 10 μ L 的样本进行分析。样本通过设定在 4 $^{\circ}$ C 的自动进样器加载, 而色谱柱保持在 35 $^{\circ}$ C 的恒温环境中。流动相选择 70:30 体积比混合的乙腈与去离子水, 速度维持 1.0 mL/min。通过对比标准品, 测定椰子水样品中各糖分的具体含量^[11]。

1.3.7 贮藏期椰子水的糖代谢相关酶活性测定

采用 AI、NI 活性检测试剂盒测定酶活性, 单位 U/g, 表示每克组织每分钟催化产生 1 μ g 还原糖。首先将样品进行 20 倍稀释, 稀释好的样品与蔗糖标准溶液一同在 37 $^{\circ}$ C 水浴中孵育 30 min 后煮沸 10 min, 流水冷却后取上清液加入显色剂, 进一步煮沸 10 min。冷却后样品在 540 nm 波长下记录吸光值, 根据公式计算 AI 及 NI 活性。

采用 SS、SPS 活性检测试剂盒测定酶活性, 单位 U/g, 表示每克组织每分钟催化产生 1 μ g 蔗糖。同样, 样品进行 20 倍稀释, 稀释好的样品加入含 UDP-葡萄糖的反应缓冲液, 在 25 $^{\circ}$ C 水浴中反应 10 min 后煮沸 10 min, 流水冷却后取上清液加入显色剂, 80 $^{\circ}$ C 水浴保温 20 min。冷却后样品在 480 nm 波长下记录吸光值, 根据公式计算 SS 及 SPS 活性。

1.3.8 数据处理与分析

每组实验 3 次平行, 数据采用 Excel 软件计算, 结果以平均值和标准差表示 (mean $\pm$ SD); 以 SPSS 软件进行单因素方差分析 (ANOVA), $P < 0.05$ 表示

差异显著, 采用 Origin 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 不同处理对接种大肠杆菌 O157:H7 后椰子水的杀菌效果

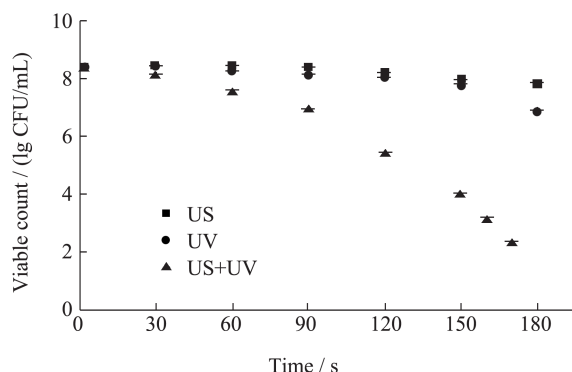


图 1 不同处理对椰子水中大肠杆菌 O157:H7 的杀菌效果

Fig.1 The bactericidal effect of different treatments on *Escherichia coli* O157:H7 in coconut water

在食品工业中, 保持新鲜椰子水的质量是一项挑战, 椰子水一旦开口, 会因酶促反应和微生物污染而开始变质。而热处理会改变其感官和营养特性, 因此, 需要研究非热杀菌技术, 如超声波、高压处理、紫外处理、脉冲光等, 用于保持椰子水品质和延长其保质期^[12]。由于化学物质等成分的存在, 椰子水对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、蜡样芽孢杆菌等菌种均有抗菌作用^[13]。因此, 探寻接种大量大肠杆菌 O157:H7 的杀菌效果实验, 对于实际的工业生产具有指导意义。

由图 1 可以看出, 随着处理时间的增长, 所有组别的大肠杆菌 O157:H7 数量均明显下降, 表明 UV、US 及联合处理都具有一定的杀菌效果。相同处理时间下, 单独 UV 处理的大肠杆菌 O157:H7 数量低于单独 US 处理的数量, 表明紫外对大肠杆菌 O157:H7 的杀菌作用强于超声波。而超声波与紫外联合处理显示出最佳的杀菌效果, 180 s 内杀灭了 8.31 个对数的大肠杆菌 O157:H7, 尤其是后半程杀菌速率显著升高。这表明, 虽然单独 UV 或 US 都能降低椰子水中的大肠杆菌 O157:H7 数量, 但二者的联合使用可能会因为协同效应而提供最有效的杀菌效果。对比 Gabriel^[14]的研究发现, 处理接种在椰子水中的大肠杆菌 O157:H7 的杀菌速率要低于接种在生理盐水中, 这可能是由于椰子水含有丰富的有机物质如糖分、维生素、矿物质等, 这些成分为大肠杆菌提供了一定的保护, 同时 TSS 的

存在增加了液体的浊度, 也一定程度上造成了紫外穿透力的减弱, 影响了联合处理的杀菌效果。观察到 180 s 时间处理下, 各处理组在杀菌效果下产生了显著差异, 因此后续将贮藏期实验中的椰子水处理时间统一为 180 s。

2.2 不同处理对贮藏期椰子水色泽的影响

由表 1 和表 2 可以看出经过不同处理的椰子水在贮藏过程中色泽变化的情况。色泽参数包括亮度 (L^*)、红绿色度 (a^*) 和黄蓝色度 (b^*)。所有处理组在贮藏期间的 L^* 值都有轻微的变化, 但整体保持相对稳定, 表明处理和贮藏过程对椰子水的亮度影响不大。在不同时间点, 单独 UV 和单独 US 处理组相比对照组和联合处理组 a^* 值显示出略微的变化, 表明这两种处理方法对椰子水的红绿色度影响有限。与对照组相比, 超声波处理组在初始贮藏阶段显示出稍高的 b^* 值, 但随着时间的推移, 所有处理组的 b^* 值趋于一致, 说明长时间贮藏过程中各处理方法对椰子水黄蓝色度的影响趋同。总体来看, 超声波、紫外以及它们的联合处理对椰子水色泽的影响较小, 但在贮藏期初期超声波处理组的黄蓝色度略高, 这可能与超声波对细胞结构的影响有关, 导致了色素质的释放。随着贮藏时间的延长, 色泽的变化趋于稳定, 表明经过处理的椰子水在视觉上能够较长时间保持质量。

此外, 表 1 中的数据表明, 在贮藏期的最后一天, 所有处理组的总色差 (Total Colour Difference, TCD) 值均未超过 1, 这意味着与开始时相比, 所有处理过的椰子水样本的颜色变化均不足以被肉眼察觉。对比 Awua 等^[15]对椰子水在 121 °C 和 150 kPa 下高压灭菌 20 min, 观察到椰子水强烈的黄色, 可见超声波和紫外联合处理对椰子水色泽的影响较小, 远优于高压灭菌。

2.3 不同处理对贮藏期椰子水理化指标的影响

椰子水中的可溶性固形物, 其主要成分为糖类, 主要有葡萄糖、果糖和蔗糖。从图 2a 中可以看出, 所有处理组的 TSS 在贮藏期间波动, 但总体趋势相对稳定, 表明三种处理对椰子水中溶解固形物含量的影响有限。所有组别的 TSS 值在第 3 天左右出现了一个峰值, 随后回落, 这可能是由于自然挥发、细菌活动或成分之间的相互作用导致可溶性固形物的暂时性浓缩。在第 3 天后, 所有组别的 TSS 值趋于一致, 这表明随着存储时间的延长, 各种处理的影响趋于稳定。

表 1 贮藏期间不同处理对椰子水色泽的影响

Table 1 The effect of different treatments during storage on the color of coconut water					
Groups	CK	US	UV	US+UV	
<i>L</i> *	Day 0	48.87 ± 0.03 ^{A,a}	48.13 ± 0.14 ^{A,b}	49.21 ± 0.17 ^{A,c}	48.68 ± 0.08 ^{A,a}
	Day 3	48.45 ± 0.16 ^{B,a}	48.74 ± 0.28 ^{B,ab}	48.92 ± 0.15 ^{B,b}	49.09 ± 0.17 ^{B,b}
	Day 6	48.69 ± 0.06 ^{C,a}	48.27 ± 0.03 ^{AC,b}	48.42 ± 0.07 ^{C,c}	48.28 ± 0.06 ^{C,b}
	Day 9	48.61 ± 0.07 ^{BC,a}	48.67 ± 0.04 ^{B,a}	48.88 ± 0.10 ^{B,b}	49.11 ± 0.12 ^{B,c}
	Day 12	49.03 ± 0.01 ^{A,a}	48.51 ± 0.13 ^{BC,b}	49.02 ± 0.07 ^{AB,a}	48.73 ± 0.08 ^{A,c}
<i>a</i> *	Day 0	0.44 ± 0.01 ^{A,a}	0.52 ± 0.01 ^{A,b}	0.39 ± 0.01 ^{A,c}	0.44 ± 0.01 ^{A,a}
	Day 3	0.47 ± 0.01 ^{BC,a}	0.51 ± 0.01 ^{A,b}	0.38 ± 0.01 ^{A,c}	0.44 ± 0.01 ^{A,d}
	Day 6	0.48 ± 0.01 ^{C,a}	0.45 ± 0.01 ^{B,b}	0.47 ± 0.01 ^{B,c}	0.48 ± 0.01 ^{B,a}
	Day 9	0.46 ± 0.01 ^{AB,a}	0.49 ± 0.01 ^{C,b}	0.53 ± 0.01 ^{C,c}	0.45 ± 0.01 ^{A,a}
	Day 12	0.44 ± 0.01 ^{A,a}	0.46 ± 0.02 ^{B,a}	0.42 ± 0.01 ^{D,b}	0.44 ± 0.01 ^{A,a}
<i>b</i> *	Day 0	1.20 ± 0.01 ^{A,a}	1.49 ± 0.03 ^{A,b}	1.15 ± 0.02 ^{A,c}	1.11 ± 0.01 ^{A,c}
	Day 3	1.21 ± 0.01 ^{A,a}	1.19 ± 0.02 ^{B,a}	1.13 ± 0.01 ^{AB,b}	1.14 ± 0.01 ^{B,b}
	Day 6	1.28 ± 0.01 ^{B,a}	1.15 ± 0.01 ^{C,b}	1.12 ± 0.01 ^{B,c}	1.17 ± 0.01 ^{C,d}
	Day 9	1.30 ± 0.01 ^{C,a}	1.24 ± 0.01 ^{D,b}	1.14 ± 0.01 ^{A,c}	1.21 ± 0.01 ^{D,d}
	Day 12	1.24 ± 0.01 ^{D,a}	1.17 ± 0.01 ^{BC,b}	1.22 ± 0.01 ^{C,c}	1.22 ± 0.01 ^{D,c}

注：不同大、小写字母分别代表同一列、行中存在显著性差异（*P*<0.05）。下表同。

表 2 贮藏期椰子水总色差的变化

Table 2 Changes in total color difference of coconut water during storage				
Groups	CK	US	UV	US+UV
Day 0	—	—	—	—
Day 3	0.19 ± 0.14 ^{A,a}	0.47 ± 0.16 ^{A,a}	0.14 ± 0.14 ^{A,a}	0.21 ± 0.22 ^{A,a}
Day 6	0.04 ± 0.02 ^{AB,a}	0.16 ± 0.07 ^{B,a}	0.67 ± 0.35 ^{B,b}	0.17 ± 0.03 ^{A,a}
Day 9	0.08 ± 0.02 ^{AB,a}	0.37 ± 0.19 ^{AB,b}	0.18 ± 0.14 ^{A,ab}	0.20 ± 0.05 ^{A,ab}
Day 12	0.03 ± 0.01 ^{B,a}	0.27 ± 0.10 ^{AB,b}	0.08 ± 0.07 ^{A,a}	0.02 ± 0.01 ^{A,a}

从图 2b 中可以看出，所有处理组的 pH 值在贮藏初期有轻微的下降，这可能是由于贮藏过程中有机酸的积累或微生物活动所导致。随着贮藏时间的增长，各组的 pH 值波动，但总体保持在 7.0 左右，表明椰子水在贮藏过程中的酸碱性和稳定性。超声波处理组和紫外处理组的 pH 值在存储期内波动不大，这可能是由于超声波、紫外处理在一定程度上控制了微生物的增长，从而减缓了酸度的变化。联合处理组的 pH 值在存储期间整体变化最小，说明这种组合处理能够更有效地抑制微生物活动，从而保持椰子水的 pH 稳定。存储期结束时，各处理组的 pH 值有所上升，可能是由于某些微生物产生碱性物质，或者是贮藏过程中有机酸分解。椰子水在收获后继续展现出代谢活性，涉及三羧酸循环、糖异生、发酵作用及氨基酸的转换过程。在这些代谢过程中，一些关键的有机酸成分，如草酸、酒石酸、丙酮酸和苹果酸等，可能会因为代谢活动而

快速消耗。当这些酸性物质减少时，未被代谢的碱性成分可能会导致椰子水的 pH 值上升^[16]。

从图 2c 中可以看出，各处理组的电导率在第 3 天时呈现下降趋势，这可能是由于椰子水中溶解离子的初步消耗。在第 3 天至第 9 天期间，电导率上升，反映了微生物活动的增加，因为微生物的代谢产物可以影响椰子水中的电解质平衡。此外，电导率的增加也可能与椰子水自身代谢过程中的离子释放有关。第 9 天后，所有处理组的电导率再次下降，这可能是由于较长时间的贮藏导致椰子水中一些电解质如有机酸盐的降解。联合处理组在整个存储周期内的电导率变化相对较平稳，表明超声波与紫外处理的协同效应在控制微生物生长和维持电解质稳定性方面具有一定的优势。

图 2d 显示了贮藏期各处理组椰子水糖酸比的变化。糖酸比是影响椰子水风味的关键因素之一，高糖酸比通常意味着更甜的口感，而低糖酸比则带来较酸

的口感^[17]。在贮藏期间,糖酸比的稳定性反映了产品在货架上的稳定性,而糖酸比值的显著变动暗示着椰子水品质的变化^[18]。

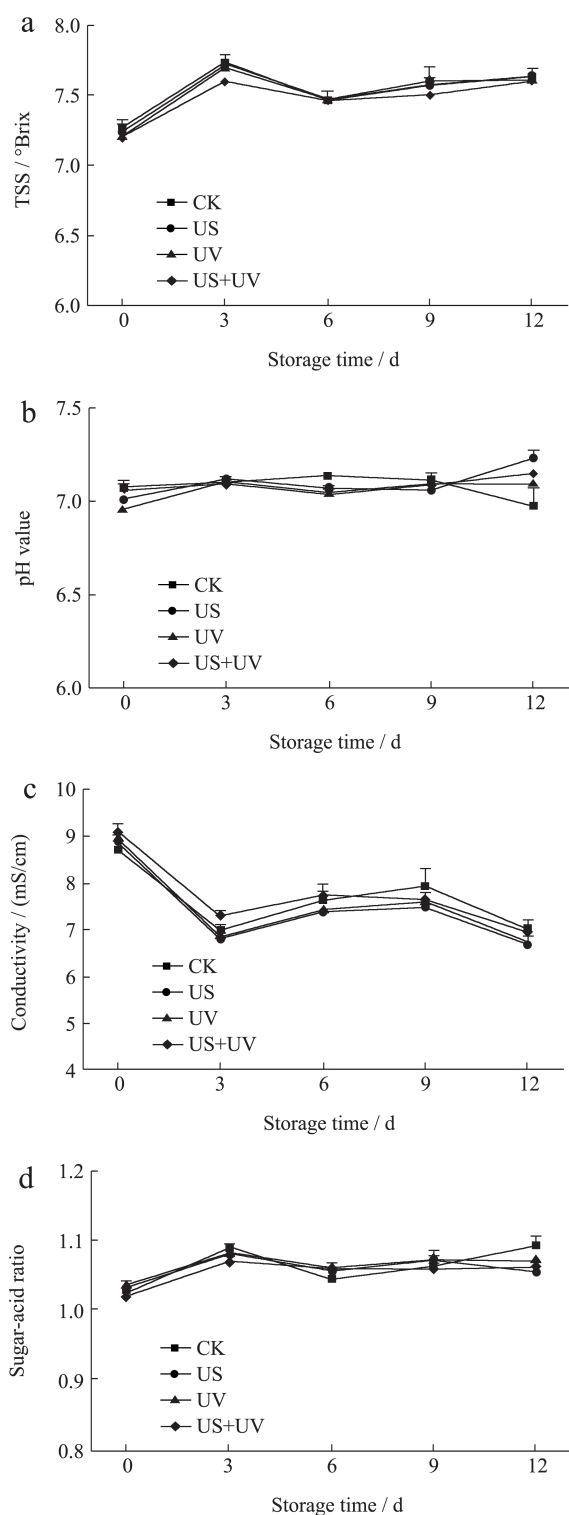


图2 不同处理对椰子水理化指标的影响

Fig.2 The impact of different treatments on the physicochemical indicators of coconut water

注:(a) 可溶性固形物;(b) 酸碱度;(c) 电导率;(d) 糖酸比值。

图2d显示所有处理组的糖酸比在整个贮藏期间保持相对稳定,波动范围较小。这表明在贮藏期间,椰子水中糖与有机酸的相对含量保持一致,这对于保持椰子水的风味特性尤为重要。第3天时,观察到糖酸比有轻微的增加,这可能与微生物活动的变化有关,导致了有机酸的降解速率低于糖类的降解速率。但到第12天,糖酸比再次稳定,表明微生物活动减缓或糖类和酸类的降解达到一个新的平衡状态。这一糖酸比的稳定性表明,在所观察的贮藏周期内,无论是自然存储还是采用超声波、紫外或二者的联合处理,椰子水的风味特性和质量都得到了有效维持。同时,超声波和紫外处理的椰子水在贮藏期间的糖酸比变化较对照组更加稳定,特别是联合处理组,这可能是因为杀菌效果减少了糖分的微生物降解。

综合来看,超声波与紫外联合处理能较好地维持椰子水的品质,包括TSS、pH、电导率和糖酸比值,这对于保鲜和延长货架期是有利的。

2.4 不同处理对贮藏期椰子水香气化合物的影响

实验共识别出29种挥发性化合物,这些化合物包括4种醇、5种酯、5种醛、5种烷烃、4种酸、4种酮、1种芳香族化合物和1种烯烃类化合物,详细列表见表3,峰值面积百分比用来表示香气化合物成分在椰子水中的相对含量。

表3中,含量排名前十的成分依次为芳樟醇、辛酸、四氢-6-丙基-2H-吡喃-2-酮、乙酰乙酯、十二烷酸、1,3-双(1,1-二甲基乙基)苯、苯甲醛、正癸酸、壬醛、癸酸乙酯。芳樟醇的含量居首,其独特的甜木香气为椰子水添加了轻盈清新的酒精风味^[19]。壬醛,是一种具有果香和蜡状香气的醛类化合物,为椰子水增添了香气的复杂性。乙酰乙醇则带有黄油和奶油的香气,通常是由微生物发酵产生的,对椰子水的口感和香气复杂度产生影响^[20]。同时,在检测中观察到较多的酸性物质,这些酸性物质不仅赋予椰子水酸甜的风味,也对食品的风味和保质具有重要作用。多种有机酸有助于调节椰子水的pH值,抑制微生物生长,延长保质期。虽然酯、醛和酮类化合物含量不高,但它们共同赋予了椰子水丰富而复杂的香气特征^[21,22]。

综合来看,各处理组在贮藏期内,椰子水的香气化合物成分未发生显著性变化,表明良好的贮藏条件(冷藏)可以有效减缓化学反应的速率,保护挥发性化合物不受损失。同样地,李昀展等^[23]采用超声波对延边酱牛肉杀菌,发现超声杀菌对牛肉挥发性物质的影响较小,烷烃类关键性风味物质相对含量较高,有助于保持牛肉良好风味。

表 3 各处理组椰子水挥发性化合物的峰面积百分比

Table 3 Peak area percentage of volatile compounds in coconut water under each treatment group													
挥发性化合物	RT/min	CK			US			UV			US+UV		
		0 d	6 d	12 d	0 d	6 d	12 d	0 d	6 d	12 d	0 d	6 d	12 d
醇类	2-甲基-1-丁醇	10.54	2.33 ± 0.22 ^a	2.24 ± 0.13 ^a	2.38 ± 0.04 ^a	2.37 ± 0.16 ^a	2.25 ± 0.17 ^a	2.35 ± 0.05 ^a	2.29 ± 0.32 ^a	2.27 ± 0.25 ^a	2.24 ± 0.15 ^a	2.37 ± 0.35 ^a	2.39 ± 0.36 ^a
	芳樟醇	11.13	32.23 ± 0.49 ^a	34.31 ± 0.52 ^a	32.68 ± 0.25 ^a	32.51 ± 0.54 ^a	32.76 ± 0.73 ^a	33.54 ± 0.43 ^a	32.34 ± 0.08 ^a	33.34 ± 0.37 ^a	34.19 ± 0.37 ^a	33.78 ± 0.43 ^a	32.59 ± 0.13 ^a
	α-松油醇	14.23	0.68 ± 0.25 ^a	0.63 ± 0.09 ^a	0.68 ± 0.07 ^a	0.72 ± 0.16 ^a	0.66 ± 0.18 ^a	0.75 ± 0.07 ^a	0.59 ± 0.04 ^a	0.65 ± 0.12 ^a	0.71 ± 0.28 ^a	0.66 ± 0.51 ^a	0.64 ± 0.34 ^a
	雪松醇	22.96	0.67 ± 0.09 ^a	0.68 ± 0.27 ^a	0.72 ± 0.34 ^a	0.65 ± 0.57 ^a	0.67 ± 0.34 ^a	0.64 ± 0.14 ^a	0.74 ± 0.16 ^a	0.71 ± 0.17 ^a	0.69 ± 0.32 ^a	0.65 ± 0.34 ^a	0.67 ± 0.37 ^a
	乙酰乙酯	12.46	7.24 ± 0.16 ^a	6.89 ± 0.25 ^a	6.87 ± 0.17 ^a	7.16 ± 0.37 ^a	6.93 ± 0.27 ^a	6.94 ± 0.15 ^a	6.79 ± 0.34 ^a	6.82 ± 0.35 ^a	7.24 ± 0.09 ^a	7.45 ± 0.27 ^a	7.34 ± 0.16 ^a
酯类	2-甲基丙酸, 3-羟基-2,4-三甲基戊酯	19.25	0.84 ± 0.13 ^a	0.82 ± 0.15 ^a	0.78 ± 0.26 ^a	0.82 ± 0.27 ^a	0.86 ± 0.35 ^a	0.81 ± 0.37 ^a	0.75 ± 0.27 ^a	0.83 ± 0.34 ^a	0.86 ± 0.27 ^a	0.84 ± 0.37 ^a	0.79 ± 0.15 ^a
	癸酸乙酯	21.19	2.44 ± 0.22 ^a	2.42 ± 0.25 ^a	2.47 ± 0.12 ^a	2.45 ± 0.32 ^a	2.44 ± 0.24 ^a	2.39 ± 0.34 ^a	2.65 ± 0.27 ^a	2.56 ± 0.26 ^a	2.64 ± 0.27 ^a	2.51 ± 0.21 ^a	2.48 ± 0.16 ^a
	5-羟基戊酸, 2,4-二叔丁基苯酯	29.63	1.15 ± 0.04 ^a	1.17 ± 0.13 ^a	1.27 ± 0.24 ^a	1.05 ± 0.34 ^a	1.04 ± 0.27 ^a	1.07 ± 0.34 ^a	1.18 ± 0.04 ^a	1.12 ± 0.35 ^a	1.25 ± 0.15 ^a	1.04 ± 0.34 ^a	1.17 ± 0.25 ^a
醛类	邻苯二甲酸丁酯	31.52	0.91 ± 0.15 ^a	0.85 ± 0.34 ^a	0.83 ± 0.09 ^a	0.94 ± 0.16 ^a	0.96 ± 0.14 ^a	0.81 ± 0.07 ^a	0.94 ± 0.12 ^a	0.85 ± 0.17 ^a	0.93 ± 0.08 ^a	0.84 ± 0.04 ^a	0.83 ± 0.14 ^a
	癸醛	13.70	0.95 ± 0.53 ^a	0.91 ± 0.45 ^a	0.94 ± 0.64 ^a	0.93 ± 0.24 ^a	0.97 ± 0.27 ^a	0.95 ± 0.27 ^a	0.91 ± 0.18 ^a	0.92 ± 0.17 ^a	0.96 ± 0.37 ^a	0.88 ± 0.17 ^a	0.87 ± 0.37 ^a
	壬醛	15.43	2.64 ± 0.15 ^a	2.61 ± 0.35 ^a	2.65 ± 0.45 ^a	2.57 ± 0.24 ^a	2.67 ± 0.34 ^a	2.63 ± 0.15 ^a	2.58 ± 0.24 ^a	2.64 ± 0.34 ^a	2.56 ± 0.25 ^a	2.56 ± 0.21 ^a	2.66 ± 0.34 ^a
	苯甲醛	18.61	4.51 ± 0.34 ^a	4.34 ± 0.67 ^a	4.15 ± 0.64 ^a	4.67 ± 0.37 ^a	4.37 ± 0.54 ^a	4.37 ± 0.34 ^a	4.64 ± 0.27 ^a	4.37 ± 0.34 ^a	4.63 ± 0.64 ^a	4.67 ± 0.34 ^a	4.61 ± 0.24 ^a
	十二碳醛	19.32	0.85 ± 0.25 ^a	0.91 ± 0.14 ^a	1.23 ± 0.24 ^b	0.92 ± 0.34 ^a	0.85 ± 0.24 ^a	1.26 ± 0.17 ^b	0.91 ± 0.34 ^a	0.93 ± 0.34 ^a	1.36 ± 0.14 ^b	0.88 ± 0.18 ^a	0.87 ± 0.13 ^a
烷烃	1-壬醛	21.64	1.52 ± 0.15 ^a	1.48 ± 0.13 ^a	1.46 ± 0.35 ^a	1.46 ± 0.27 ^a	1.52 ± 0.23 ^a	1.53 ± 0.54 ^a	1.56 ± 0.34 ^a	1.51 ± 0.64 ^a	1.48 ± 0.13 ^a	1.54 ± 0.34 ^a	1.49 ± 0.34 ^a
	2-甲基十二烷	10.36	0.92 ± 0.13 ^a	0.95 ± 0.34 ^a	0.93 ± 0.35 ^a	0.94 ± 0.15 ^a	0.86 ± 0.25 ^a	0.94 ± 0.41 ^a	0.86 ± 0.25 ^a	0.88 ± 0.34 ^a	0.87 ± 0.24 ^a	0.94 ± 0.15 ^a	0.86 ± 0.15 ^a
	丙基环丙烷	14.52	1.27 ± 0.21 ^a	1.29 ± 0.34 ^a	1.27 ± 0.34 ^a	1.33 ± 0.17 ^a	1.28 ± 0.28 ^a	1.18 ± 0.38 ^a	1.34 ± 0.27 ^a	1.27 ± 0.15 ^a	1.34 ± 0.27 ^a	1.27 ± 0.34 ^a	1.29 ± 0.27 ^a
	十三烷	16.38	0.87 ± 0.13 ^a	0.83 ± 0.42 ^a	0.88 ± 0.37 ^a	0.84 ± 0.15 ^a	0.81 ± 0.14 ^a	0.87 ± 0.13 ^a	0.81 ± 0.37 ^a	0.93 ± 0.24 ^a	0.84 ± 0.18 ^a	0.94 ± 0.14 ^a	0.87 ± 0.08 ^a
	十五烷	22.59	0.91 ± 0.23 ^a	0.93 ± 0.34 ^a	0.98 ± 0.14 ^a	0.95 ± 0.34 ^a	0.93 ± 0.24 ^a	0.86 ± 0.34 ^a	0.87 ± 0.18 ^a	0.86 ± 0.24 ^a	0.94 ± 0.37 ^a	0.84 ± 0.15 ^a	0.94 ± 0.13 ^a
酸类	十六烷	24.68	0.71 ± 0.21 ^a	0.73 ± 0.43 ^a	0.67 ± 0.24 ^a	0.81 ± 0.13 ^a	0.73 ± 0.14 ^a	0.83 ± 0.17 ^a	0.71 ± 0.34 ^a	0.86 ± 0.15 ^a	0.84 ± 0.17 ^a	0.75 ± 0.34 ^a	0.76 ± 0.27 ^a
	乙酸	16.89	0.48 ± 0.09 ^a	0.45 ± 0.15 ^a	0.43 ± 0.34 ^a	0.54 ± 0.15 ^a	0.53 ± 0.34 ^a	0.57 ± 0.14 ^a	0.54 ± 0.28 ^a	0.57 ± 0.15 ^a	0.46 ± 0.14 ^a	0.47 ± 0.34 ^a	0.48 ± 0.51 ^a
	十二烷酸	24.22	6.34 ± 0.17 ^a	6.24 ± 0.37 ^a	6.14 ± 0.43 ^a	6.37 ± 0.17 ^a	6.14 ± 0.37 ^a	6.34 ± 0.38 ^a	6.28 ± 0.15 ^a	6.27 ± 0.27 ^a	6.37 ± 0.34 ^a	6.14 ± 0.17 ^a	6.37 ± 0.37 ^a
	辛酸	26.60	12.23 ± 0.24 ^a	12.37 ± 0.15 ^a	12.32 ± 0.34 ^a	12.27 ± 0.27 ^a	12.34 ± 0.27 ^a	12.24 ± 0.17 ^a	12.36 ± 0.34 ^a	12.27 ± 0.17 ^a	12.37 ± 0.28 ^a	11.37 ± 0.34 ^a	12.27 ± 0.17 ^a
	正癸酸	29.10	4.27 ± 0.17 ^a	4.24 ± 0.34 ^a	4.17 ± 0.15 ^a	4.34 ± 0.34 ^a	4.28 ± 0.27 ^a	4.64 ± 0.27 ^a	4.73 ± 0.37 ^a	4.44 ± 0.17 ^a	4.34 ± 0.3 ^a	4.68 ± 0.27 ^a	4.27 ± 0.38 ^a

续表 3

挥发性化合物	RT/min	CK			US			UV			US+UV		
		0 d	6 d	12 d	0 d	6 d	12 d	0 d	6 d	12 d	0 d	6 d	12 d
2,4,4-三甲基-3-(甲基丁基)环己-2-烯酮	17.35	0.75 ± 0.15 ^a	0.76 ± 0.34 ^a	0.71 ± 0.07 ^a	0.67 ± 0.34 ^a	0.69 ± 0.24 ^a	0.76 ± 0.15 ^a	0.73 ± 0.34 ^a	0.71 ± 0.18 ^a	0.67 ± 0.07 ^a	0.64 ± 0.17 ^a	0.74 ± 0.16 ^a	0.73 ± 0.34 ^a
5,9-十一碳二烯-2-酮, 6,10-二甲基-四氢-6-丙基-2H-吡喃-2-酮	20.07	0.84 ± 0.19 ^a	0.87 ± 0.09 ^a	0.86 ± 0.15 ^a	0.94 ± 0.34 ^a	0.94 ± 0.34 ^a	0.88 ± 0.27 ^a	0.81 ± 0.27 ^a	0.83 ± 0.34 ^a	0.87 ± 0.24 ^a	0.84 ± 0.15 ^a	0.81 ± 0.34 ^a	0.85 ± 0.24 ^a
7,9-二叔丁基-1-氧杂螺(4.5)癸-6,9-二烯-2,8-二酮	25.74	8.52 ± 0.24 ^a	8.57 ± 0.15 ^a	8.59 ± 0.34 ^a	8.36 ± 0.54 ^a	8.57 ± 0.34 ^a	8.58 ± 0.37 ^a	9.05 ± 0.24 ^a	8.68 ± 0.17 ^a	8.84 ± 0.24 ^a	8.52 ± 0.13 ^a	8.57 ± 0.07 ^a	8.86 ± 0.13 ^a
3-丙氧基-1-丙烯	30.70	0.54 ± 0.34 ^a	0.53 ± 0.24 ^a	0.59 ± 0.24 ^a	0.48 ± 0.14 ^a	0.47 ± 0.34 ^a	0.56 ± 0.27 ^a	0.57 ± 0.24 ^a	0.64 ± 0.14 ^a	0.67 ± 0.07 ^a	0.48 ± 0.34 ^a	0.51 ± 0.18 ^a	0.52 ± 0.21 ^a
1,3-双(1,1-二甲基乙基)苯	15.33	0.76 ± 0.12 ^a	0.69 ± 0.07 ^a	0.74 ± 0.24 ^a	0.72 ± 0.16 ^a	0.76 ± 0.35 ^a	0.79 ± 0.09 ^a	0.74 ± 0.14 ^a	0.72 ± 0.34 ^a	0.76 ± 0.25 ^a	0.77 ± 0.03 ^a	0.68 ± 0.17 ^a	0.73 ± 0.28 ^a
其他	16.33	5.34 ± 0.16 ^b	5.37 ± 0.36 ^b	5.28 ± 0.27 ^a	5.64 ± 0.34 ^a	5.56 ± 0.27 ^a	5.34 ± 0.15 ^a	5.27 ± 0.24 ^a	5.64 ± 0.46 ^b	5.52 ± 0.37 ^a	5.16 ± 0.24 ^a	5.64 ± 0.17 ^a	5.56 ± 0.56 ^a

注: 不同小写字母代表表同一行中存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.5 不同处理对贮藏期椰子水中果糖、葡萄糖和蔗糖含量的影响

图3显示了椰子水贮藏期间蔗糖、葡萄糖、果糖含量及甜度的变化趋势。由图3a可以看出,所有处理组的蔗糖含量随着贮藏时间增加而下降,这可能是由于椰子水中的酶促反应,如蔗糖酶活性改变,导致蔗糖被分解成单糖^[24]。超声波处理组在前6 d的蔗糖含量相对稳定,第6天开始下降速度加快,表明超声波可能在一开始抑制了蔗糖酶的活性,但这种保护作用随时间减弱。紫外处理组的蔗糖含量整体呈现平稳的下降,可能是由于紫外对微生物造成的抑制作用减少了蔗糖的降解。联合处理组的蔗糖含量在整个贮藏周期中下降最为缓慢,说明联合处理更有效地保护了蔗糖不被分解,可能是因为这种处理方式加强了对微生物的抑制和酶活性的调控。

由图3b可以看出,对照组的葡萄糖含量随存储时间增加逐渐降低,这可能是由于在没有杀菌处理的条件下,葡萄糖被微生物代谢或参与非酶促的布朗反应^[25]。超声波处理组的葡萄糖含量呈现与紫外处理组相似的趋势,但总体降低幅度较大,表明超声波处理强化了葡萄糖的消耗或转化。联合处理的葡萄糖含量在存储期内下降最慢,结合 Tongdonyod 等^[26]的研究,这表明联合处理可最有效地保持葡萄糖含量,其协同效果降低了微生物代谢速率或保护了葡萄糖不被分解。

由图3c观察到,果糖含量在所有组别中保持相对稳定,其中联合处理组在贮藏周期内显示出最小的变化,表明联合处理更可以维持椰子水中的果糖含量。

甜度反映了蔗糖、葡萄糖和果糖总含量的变化。图3d显示,所有处理组的甜度随贮藏时间呈现下降趋势,这与蔗糖和葡萄糖含量的降低一致,而甜度的降低会影响椰子水的感官品质。总体来看,所有处理组的甜度随存储时间延长而降低,表明糖分的降解是椰子水贮藏过程中普遍发生的现象。然而,物理处理方法如超声波和紫外,特别是它们的联合使用,可以在一定程度上延缓这一过程,可能因为它们在抑制微生物生长方面存在的协同效果,对于提高椰子水的贮藏稳定性和保持其感官品质有重要的意义。

整体而言,椰子水在贮藏期内,糖类含量和甜度都有所降低,葡萄糖和果糖含量显著高于蔗糖,这些变化可能与糖的自然代谢、微生物活动以及物理处理后的酶活性变化有关^[27]。同时,联合处理后的椰子水在各项数据,都保持了最佳的稳定性,表明联合处理对椰子水的保鲜贮存具有优势。

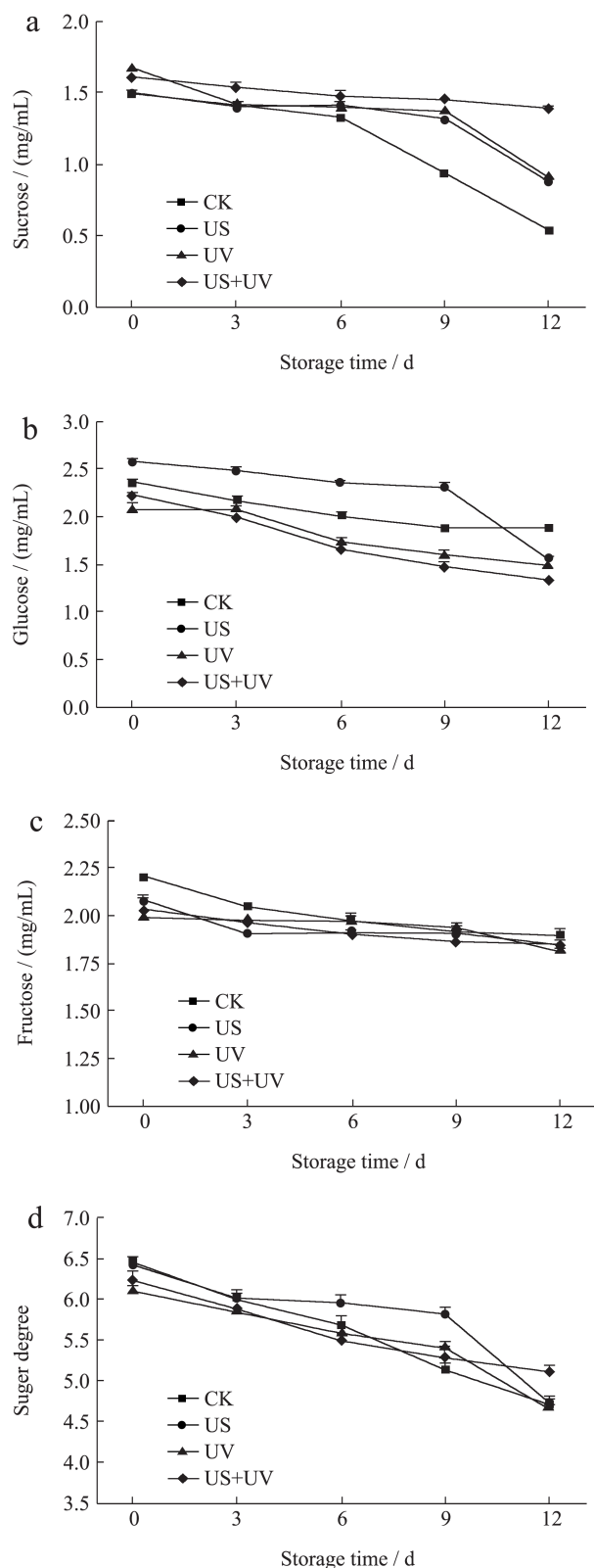


图3 贮藏期间椰子水中不同糖含量的变化

Fig.3 Changes in different sugar contents in coconut water during storage

注: (a) 蔗糖; (b) 葡萄糖; (c) 果糖含量; (d) 甜度。

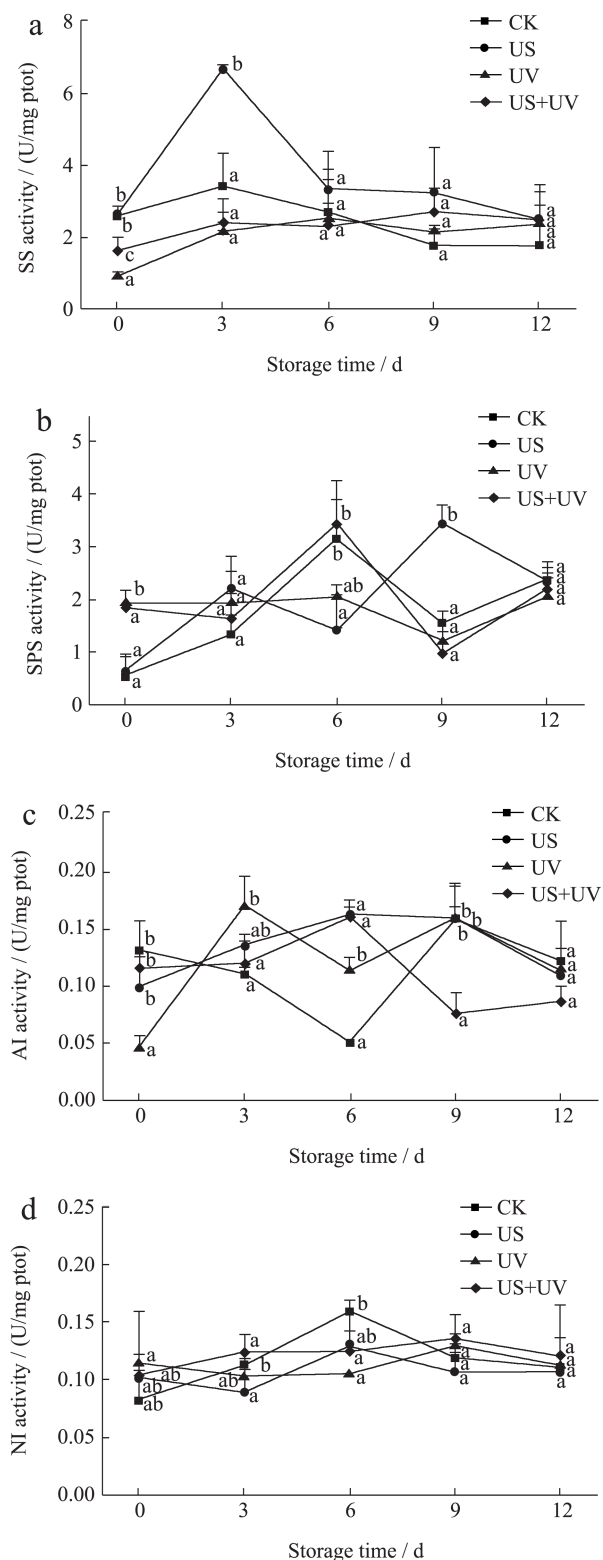


图4 椰子水贮藏期间糖代谢相关酶活性的变化

Fig.4 Changes in activities of sugar metabolism-related enzymes during coconut water storage

注: (a) SS; (b) SPS; (c) AI; (d) NI.

2.6 不同处理对贮藏期椰子水中糖代谢相关酶活性的影响

由图 4a 可以看出, 所有处理组 SS 活性总体呈现出先增后减的趋势, 在中期达到最高峰值, 但各组变化幅度和峰值出现的时间不同。这可能是由于在存储初期, 内源性酶活性较高, 随着存储时间延长, 酶活性因蛋白质结构的变性或者抑制剂的累积而降低。超声处理组的变化幅度最大, SS 活性在第 3 天时急剧增加, 达到峰值 6.66 U/mg, 这可能由于超声波处理引起的空化效应破坏了酶的结构, 但这种效应并未持久, 因为活性水平在达到峰值后快速降低。联合处理组 SS 活性的变化趋势相比其他处理组更为平稳, 在第 9 天达到峰值, 这表明联合处理可能有助于保持 SS 活性的稳定, 在调节酶活性方面效果更佳。

图 4b 显示出在贮藏期间各项处理组的 SPS 活性均有波动, 其中紫外处理组变化相对其他处理组较平缓。这可能是因为紫外对 SPS 活性的影响相对温和, 或者紫外处理更有效地延缓了酶活性的衰减。但最终各组处理的 SPS 活性没有显著差异, 表明随着时间的推移, 处理方法初始时可能对 SPS 活性有显著影响, 但这些效果在贮存期末段减弱, 随着贮存时间进一步延长, 可供 SPS 使用的底物 (如果糖-6-磷酸) 较少, 限制了酶的作用导致所有组别趋于一致。

图 4c、4d 显示 AI 和 NI 活性在贮藏期间出现一定水平的波动, 但最终同样无显著性差异。图 4c 显示在第 0 天, 超声、紫外以及联合处理增强了 AI 活性, 表明各项处理可能在初期提供了激活或抑制酶的瞬时效果, 但这些效果没有持续, 导致长期看各组间差异不显著。此外, 随着贮藏时间的延长, 酶可能因各种非生物因素 (如 pH 变化、酶蛋白变性等) 而达到一定的稳定性, 从而导致最终活性差异不显著。同时观察到 AI 与 NI 活性在整个处理间保持较低的活性水平, 长期贮藏可能导致底物 (即蔗糖) 逐渐被耗尽, 从而限制了 AI 和 NI 的活性, 这与图 4 观察到的现象一致。

整体看来, 超声波、紫外以及二者联合处理能够通过调控糖代谢相关酶的活性, 从而保持贮藏期间蔗糖、果糖以及葡萄糖的含量稳定。同时, 联合处理组的各项酶活性变化相对更稳定, 也证实了图 4 贮藏期间蔗糖、果糖、葡萄糖含量更为稳定的结果。椰子水中含有丰富的糖分, 糖分的代谢是一个复杂过程, 其中蔗糖磷酸合成酶 (SPS)、蔗糖合酶 (SS)、酸性转化酶 (AI) 以及中性转化酶 (NI) 扮演着至关重要

的角色^[12,28]。廖光联等^[29]的研究显示,SPS 利用果糖-6-磷酸作为底物,催化形成蔗糖磷酸盐,该盐在蔗糖磷酸酶的作用下被转化为蔗糖。SS 在植物成熟过程中特别重要,它参与蔗糖的合成,通过转化 UDP-葡萄糖和 ADP-葡萄糖来积累蔗糖^[30]。AI 与 NI 代表两种不同的转化酶形式,负责将蔗糖不可逆转化为葡萄糖与果糖^[31]。这一系列酶促的蔗糖合成和分解代谢过程的动态平衡,决定了椰子水中糖类的最终含量^[32]。因此,理解和控制这些酶活性对于调节椰子水的糖含量、优化其贮藏条件、维护风味和营养价值至关重要。

3 结论

实验以新鲜椰子水为原料,探索了超声波、紫外以及联合处理对椰子水微生物杀灭效果及贮藏期间椰子水品质的影响。经过接种实验发现,超声波与紫外联合处理能显著降低椰子水中大肠杆菌 O157:H7 的数量,显示出比单独使用超声波或紫外更优的杀菌效果,联合处理在 180 s 内杀灭了 8.31 个对数值的大肠杆菌 O157:H7。而通过贮藏实验发现,联合处理技术对椰子水的理化指标在贮藏期内的保持有积极作用,能有效维持椰子水的色泽、风味、电导率、pH 值以及糖酸比的稳定性。

以上研究表明,超声波与紫外联合处理 180 s (超声波,频率 20 000 Hz,功率 200 W;紫外,功率 8 W,波长 253.7 nm,照射距离 6 cm) 是椰子水杀菌的较优条件。超声波与紫外联合处理技术在提高椰子水微生物安全性、保持食品品质和延长货架期方面具有重要的应用潜力。这为食品加工和保鲜领域提供了一种新的解决方案,尤其是对于追求非热加工以保持食品营养和感官品质的产品来说,展现了极大的应用价值。未来研究可进一步优化处理参数,探索更广泛的食物类型应用,以实现更高效、环保的食品加工与保鲜技术。

参考文献

- [1] DEBMANDAL M, MANDAL S. Coconut (*Cocos nucifera* L.: Arecaceae): in health promotion and disease prevention [J]. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 2011, 4(3): 241-247.
- [2] STEINER I, DESSER A. Coconut water-composition, properties and processing [J]. Ernährung, 2008, 32(12): 513-516.
- [3] NAIK M, SUNIL C, RAWSON A, et al. Tender coconut water: a review on recent advances in processing and preservation [J]. Food Reviews International, 2022, 38(6): 1215-1236.
- [4] JIANG Q, ZHANG M, XU B. Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: a review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 69: 105261.
- [5] PATIST A, BATES D. Ultrasonic innovations in the food industry: from the laboratory to commercial production [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(2): 147-154.
- [6] MADANAYAKE N, HOSSAIN A, ADASSOORIYA N. Nanobiotechnology for agricultural sustainability, and food and environmental safety [J]. Quality Assurance and Safety of Crops and Foods, 2021, 13(1): 20-36.
- [7] GENG N, SONG J, LUO S, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction of soluble dietary fiber from fresh corn bract and its physicochemical and structural properties [J]. Quality Assurance and Safety of Crops and Foods, 2022, 14(2): 119-130.
- [8] ZIA S, KHAN M, ZENG X, et al. Combined effect of microwave and ultrasonication treatments on the quality and stability of sugarcane juice during cold storage [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2019, 54(8): 2563-2569.
- [9] 高帮君,张志鹏,吴彬彬,等.起泡性专用蛋清液超声波杀菌工艺优化[J].食品科技,2020,45(7):33-37.
- [10] QURESHI T, NADEEM M, MAKEN F, et al. Influence of ultrasound on the functional characteristics of indigenous varieties of mango (*Mangifera indica* L.) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 64: 104987.
- [11] ZHANG Y, CHEN W, CHEN H, et al. Metabolomics analysis of the deterioration mechanism and storage time limit of tender coconut water during storage [J]. Foods, 2020, 9(1): 46.
- [12] RAJASHRI K, RASTOGI N K, NEGI P. Non-thermal processing of tender coconut water-a review [J]. Food Reviews International, 2022, 38: 34-55.
- [13] FOWOYO P, ALAMU J. Nutritional composition and antimicrobial acidity of coconut water against selected gastrointestinal pathogens [J]. International Journal of Microbiology and Application, 2018, 5(1): 1-8.
- [14] GABRIEL A. Previous physicochemical stress exposures influence subsequent resistance of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica*, and *Listeria monocytogenes* to ultraviolet-C in coconut liquid endosperm beverage [J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 201: 7-16.
- [15] AWUAA, DOE E, AGYARE R. Exploring the influence of sterilisation and storage on some physicochemical properties of coconut (*Cocos nucifera* L.) water [J]. BMC Research Notes, 2011, 4: 451.
- [16] FAMIANI F, CULTRERA N, BATTISTELLI A, et al. Phosphoenolpyruvate carboxykinase and its potential role in the catabolism of organic acids in the flesh of soft fruit during ripening [J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(421): 2959-2969.
- [17] PRADES A, DORNIER M, DIOP N, et al. Coconut water uses, composition and properties: a review [J]. Fruits, 2012, 67(2): 87-107.
- [18] XU S, MA Z, CHEN Y, et al. Characterization of the flavor and nutritional value of coconut water vinegar based on metabolomics [J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130872.
- [19] DA F A, BIZERRA A, DE S J, et al. Constituents and antioxidant activity of two varieties of coconut water (*Cocos nucifera* L.) [J]. Revista Brasileira De Farmacognosia-Brazilian Journal of Pharmacognosy, 2009, 19(1B): 193-198.
- [20] PRADES A, ASSA R, DORNIER M, et al. Characterisation of the volatile profile of coconut water from five varieties using an optimised HS-SPME-GC analysis [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(12): 2471-2478.

- [21] DE M F, APREA E, ENDRIZZI I, et al. Effects of pasteurization on volatile compounds and sensory properties of coconut (*Cocos nucifera* L.) water: thermal vs. high-pressure carbon dioxide pasteurization [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(7): 1393-1404.
- [22] WANG W, CHEN H, KE D, et al. Effect of sterilization and storage on volatile compounds, sensory properties and physicochemical properties of coconut milk [J]. Microchemical Journal, 2020, 153: 104532.
- [23] 李昀展,陈俊霞,周阳,等.不同杀菌方式对延边酱牛肉挥发性风味物质的影响[J].食品科技,2024,49(2):106-110.
- [24] TAN T, CHENG L, BHAT R, et al. Composition, physicochemical properties and thermal inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase from coconut (*Cocos nucifera*) water obtained from immature, mature and overly-mature coconut [J]. Food Chemistry, 2014, 142: 121-128.
- [25] RAJ K, AKSHAY H, SIVA S, et al. Impact of 280 nm UV-C LEDs on the microbial safety and nutritional quality in tender coconut water [J]. Food and Humanity, 2023, 1: 864-872.
- [26] TONGDONYOD S, THIKHAM S, KITTIWACHANA S, et al. Optimization of pulsed electric fields combined with mild heat treatment on microbial inactivation of tender coconut water and evaluation of quality attributes during storage [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 90: 103507.
- [27] SANTOSO U, KUBO K, OTA T, et al. Nutrient composition of kopyor coconuts (*Cocos nucifera* L.) [J]. Food Chemistry, 1996, 57(2): 299-304.
- [28] CHEN Y, GE Y, ZHAO J, et al. Postharvest sodium nitroprusside treatment maintains storage quality of apple fruit by regulating sucrose metabolism [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 154: 115-120.
- [29] 廖光联,钟敏,黄春辉,等.果实糖代谢及其相关酶基因研究进展[J].江西农业大学学报,2020,42(1):187-195.
- [30] 赵艳侠,亓桂梅,董兴全,等.葡萄果实中糖代谢及转运机制研究进展[J].中国果树, 2019,5:7-11.
- [31] YANG L, CHEN J, SUN X, et al. Inhibition of sucrose and galactosyl-sucrose oligosaccharide metabolism in leaves and fruits of melon (*Cucumis melo* L.) under low light stress [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 244: 343-351.
- [32] NGUYEN-QUOC B, FOYER C. A role for 'futile cycles' involving invertase and sucrose synthase in sucrose metabolism of tomato fruit [J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(358): 881-889.