

热激-臭氧联合处理对鲜切芋头酶促褐变及抗氧化系统的影响

邓秀丽^{1,2}, 安容慧^{1,2}, 杨相政^{1,2}, 张榆涵³, 魏雯雯^{1,2*}

(1. 中华全国供销合作总社济南果品研究所, 山东济南 250000)(2. 果蔬冷链物流山东省工程研究中心, 山东济南 250000)(3. 山东农业工程学院食品科学与工程学院, 山东淄博 255300)

摘要: 为探究热激、臭氧(O₃)及其联合处理对鲜切芋头抗氧化系统与贮藏品质的影响, 采用45℃ 3 min热激、1.0 ppm O₃熏蒸10 min以及热激+O₃联合处理鲜切芋头, 系统分析其贮藏期间外观品质、褐变指数BI、菌落总数、总酚和类黄酮含量、褐变相关酶及抗氧化指标、过氧化氢(Hydrogen Peroxide, H₂O₂)和超氧阴离子(Superoxide Anion, O₂⁻)的动态变化规律。结果表明, 与单一处理相比, 联合处理保鲜效果更显著, 有效维持了鲜切芋头原始的色泽, 显著抑制菌落总数($P<0.05$)。在延缓氧化褐变方面, 联合处理有效抑制PPO活性($P<0.05$), 贮藏12 d, PPO活性较CK组降低7.72%, 较O₃处理降低12.28%, 抑制酶促反应。同时, 联合处理降低了总酚和类黄酮的过度积累, 与热激和O₃处理相比, 总酚含量降低6.20%和7.05%, 类黄酮含量降低2.42%和4.45%($P<0.05$), 进一步减少底物的供应。在氧化应激调控方面, 联合处理有效激活了抗氧化酶系统, 贮藏12 d, POD、SOD、CAT活性较对照组提高16.98%、15.07%和22.43%($P<0.05$), 有效缓解单一处理可能引起的代谢失衡。此外, 联合处理可同时抑制H₂O₂、O₂⁻等活性氧代谢产物的积累, 维持活性氧代谢平衡。为鲜切芋头绿色保鲜技术的开发提供理论依据与技术参考。

关键词: 鲜切芋头; 热激; 臭氧(O₃)熏蒸; 联合处理; 活性氧代谢; 抗氧化调控

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.7.0539

Effects of Combined Thermal Shock and Ozone Treatment on Enzymatic Browning and the Antioxidant System of Fresh-Cut Taro

DENG Xiuli^{1,2}, AN Ronghui^{1,2}, YANG Xiangzheng^{1,2}, ZHANG Yuhan³, WEI Wenwen^{1,2*}

(1. Jinan Fruit Research Institute of All China Federation of Supply and Marketing Co-operatives, Jinan 250000, China)

(2. Shandong Engineering Research Center for Fruit and Vegetable Cold Chain Logistics, Jinan 250000, China)

(3. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural Engineering University, Zibo 255300, China)

Abstract: To investigate the effects of thermal shock, ozone and combined treatment on the antioxidant system and storage quality of fresh-cut taro, fresh-cut taro was subjected to thermal shock at 45 °C for 3 min, O₃ fumigation at 1.0 ppm for 10 min and the combined treatment thermal shock+O₃ treatment. During storage, appearance quality, browning index (BI), total bacterial count, total phenolic and flavonoid content, the activities of browning related enzymes and antioxidant, as well as hydrogen peroxide (H₂O₂) and superoxide anion (O₂⁻) were systematically analyzed. The results showed that the combined treatment demonstrated a more significant preservation effect compared with single treatments. The original color and appearance of fresh-cut taro were effectively maintained, and total bacterial counts were significantly reduced ($P<0.05$). In terms of delaying oxidative browning, the combined treatment effectively inhibited PPO activity ($P<0.05$). After 12 days of storage, PPO activity was 7.72% lower than that in the CK group and 12.28% lower than in the O₃ group, thereby inhibiting enzymatic reactions. At the same time, the combined treatment reduced the excessive accumulation of total phenolics and flavonoids. Compared with heat shock and O₃ treatments, their levels decreased by approximately 6.20%, 7.05% and 2.42%, 4.45% respectively. In terms of oxidative stress response, antioxidant enzyme activities were effectively activated by the combined treatment. After 12 days of storage, POD, SOD, and CAT activities were increased by 16.98%, 15.07%, and 22.43% ($P<0.05$), respectively, compared to the control, which helped alleviate the metabolic imbalance that might be caused by a single treatment. Furthermore, the levels of reactive oxygen species (ROS) metabolites such as H₂O₂ and

收稿日期: 2026-04-09; 修回日期: 2026-07-02; 接受日期: 2026-07-02

基金项目: 中华全国供销合作总社科技创新项目 (GXXJ-2024-012)

作者简介: 邓秀丽 (1997-), 女, 硕士, 研究方向: 果蔬品质调控技术研究, E-mail: dengxiu0514@163.com

通讯作者: 魏雯雯 (1985-), 女, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜技术研究, E-mail: flying200807@163.com

O_2^- were reduced, thereby maintaining the balance of ROS metabolism. This provides a theoretical basis and technical reference for the development of green preservation technologies for fresh-cut taro.

Key words: fresh cut taro; heat shock; ozone (O_3) fumigation; combined treatment; reactive oxygen species (ROS) metabolism; antioxidant regulation

芋头 (*Colocasia esculenta* L.) 作为药食同源的特色农产品, 因其丰富的营养价值和功能性成分备受关注^[1]。近年来, 鲜切芋头展现出巨大的商业潜力。然而, 与传统表皮光滑的果蔬不同, 芋头表皮多毛且难以去除, 直接接触易引起皮肤瘙痒, 直接影响消费体验与市场接受度^[2]。鲜切加工可以有效解决这一问题, 它使消费者能够避开对生芋表皮直接接触, 从而大幅降低了过敏风险, 鲜切芋头也因此跃升为生鲜果蔬加工领域的主流产品之一^[3]。然而, 芋头组织富含淀粉、多酚类物质及多种活性氧代谢酶, 加工时产生的机械损伤会破坏细胞间的隔化, 导致细胞中的多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO)、苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalanine Ammonia Lyase, PAL) 与酚类化合物接触, 进而诱发以酶促褐变为核心的品质劣变反应^[3]。同时, 损伤的组织会诱导活性氧 (Reactive Oxygen Species, ROS), 如超氧阴离子 (Superoxide anions, O_2^-) 和过氧化氢 (hydrogen peroxide, H_2O_2) 含量的急剧积累, 对细胞膜系统造成不可逆的损伤^[4,5]。因此, 研发能有效控制鲜切芋头褐变及延缓其品质劣变的采后处理技术, 对于降低采后损耗、提升产业经济效益具有重要意义。

目前, 国内外针对鲜切芋头的保鲜研究多集中于使用护色剂^[6]、涂膜处理^[7]、紫外照射^[8]以及真空包装^[9]等。尽管这些技术在一定程度上能够抑制酶促褐变或延缓微生物生长, 但仍存在明显的局限性。化学护色剂虽能有效抑制多酚氧化酶 (PPO) 活性, 但其残留问题日益引发消费者对食品安全的担忧^[10]。涂膜处理虽能有效阻隔氧气和水分流失, 但对鲜切芋头保鲜效果有限^[7]。紫外照射设备成本高, 且温度和时间处理不当易破坏细胞膜结构^[8]。热激可通过直接抑制酶活性及诱导热激蛋白的产生降低果蔬酶促褐变并激活植物抗逆通路^[11]。适宜条件的热激能显著维持鲜切产品的色泽稳定性, 提高抗氧化能力。例如, 50 °C/5 min 热激能有效维持香菇片色泽, 提高超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD) 和过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 活性, 并抑制 POD 活性^[12]。热激联合槐花提取物可动态调节鲜切土豆抗氧化能力, 降低酶促褐变^[13]。但抑菌能力有限。臭氧处理 (O_3) 可以通过强氧化作用持续维持 ROS 系统平衡、有效控制表面微生物, 在鲜切保鲜中备受关注^[14]。在鲜切火龙果中, O_3 可以激活植物细胞的活性氧化防御机制^[15]。Li 等^[16]也认为, O_3 处理可显著抑制青椒 O_2^- 的积累, 降低表面微生物含量。然而, 现有研究多集中于单一处理的效果评价, 关于热激与 O_3 联合处理在鲜切芋头中的联合保鲜机制, 尤其是在褐变抑制、抗氧化调控及维持 ROS 代谢平衡方面的系统作用, 尚缺乏深入探讨。研究表明, 热激与臭氧联合处理可以在钝化褐变酶活性、稳定细胞膜结构的同时, 增强植物组织对臭氧处理的耐受性, 减少微生物侵染和细胞损伤^[17,18]。江靖等^[17]发现热激结合 O_3 处理对柑橘抗病性的诱导方面具有协同作用, 显著提高了柑橘抗氧化酶活性, 增强了 ROS 的清除能力和对微生物的抵抗能力。Panou 等^[18]研究发现, 加热处理可以降低 O_3 的有效使用浓度, 提高草莓的外观品质, 并降低表面微生物含量。二者联合有助于实现 ROS 代谢的平稳调控。

因此, 本研究以鲜切芋头为对象, 系统比较热激、臭氧熏蒸及其联合处理对贮藏期间品质与生理代谢的影响, 明确不同处理方式对鲜切芋头的保鲜效果, 重点揭示热激与臭氧联合处理在维持细胞膜完整性、激活内源抗氧化系统方面的联合作用机制, 以期对鲜切芋头的绿色高效保鲜提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

供试芋头为‘槟榔芋’ (*Colocasia esculenta* L. cv. Binglang) 购自中国广东省韶关市浈江区华南农产品交易中心, 采用常规大田种植方式, 于 2024 年 12 月 1 日采收并选购成熟度一致、形状均匀、外观完整、无病虫害和严重的机械损伤的球茎。收获后 48 h 内冷链运输 (温度 10 ± 1 °C) 到济南果品研究所贮藏保鲜中心实验室。

POD 活性检测试剂盒、SOD 活性检测试剂盒、CAT 活性检测试剂盒、PAL 活性试剂盒和 PPO 活性试剂盒, 晶美生物科技有限公司; 福林酚, 氯化铝, 碳酸钠, 硝酸钠, 没食子酸标准品 ($\geq 98\%$), 槲皮素标准品 ($\geq 98\%$), 阿拉丁生化科技股份有限公司; 磷酸盐缓冲液 (pH 7.8), 上海来铂生物集团有限公司; 磷酸羟胺溶液, 广东省精细化学品工程技术研究开发中心; 无水甲醇, 丙酮, 美国 Sigma-Aldrich 公司; α -萘胺, 对氨基苯甲酸溶液和四氯

化钛盐酸溶液, 麦克林生化科技有限公司。

1.2 主要仪器设备

GF-30G-A 臭氧发生器, 科尔诺臭氧发生器公司; HH-M6 恒温水浴锅, 江苏新春兰科学仪器有限公司; HP200 全自动色差仪, 上海汉谱光电科技有限公司; TU-1901 紫外可见分光光度仪, 北京普析通用仪器有限责任公司; OzoneTCL-1013 高速台式离心机, 上海安亭科学仪器厂; HJ-2A 磁力搅拌器, 常州苏瑞仪器有限公司; AP-25P 真空包装机, 深圳市艾谱电子科技有限公司。

1.3 处理方法

为确定热激与臭氧联合处理的最佳工艺参数, 查找文献并设置单因素实验, 确定最佳热激温度梯度(45、50、55 °C)和时间梯度(3 和 5 min), 最佳臭氧浓度梯度(0.5、1.0 和 5.0 ppm)和时间梯度(10 和 20 min)^[19,20]。以鲜切芋头的褐变指数(BI)为核心响应指标。结果显示: 45 °C或 50 °C热激处理 3 min 时 BI 值显著降低。1.0 ppm 臭氧处理 10 min 时可抑制 BI 值增长。在此基础上, 对优选条件进行验证, 最终确定: 热激(45 °C, 3 min)和臭氧熏蒸(浓度 1.0 ppm, 10 min)最佳处理条件。

样品处理: 将新鲜芋头洗净, 去皮, 切成 1 cm 厚的均匀薄片(每个 6~8 片), 共分成 4 组进行处理。热激组: 切片在 45 °C 的恒温水浴箱(蒸馏水)中浸泡 3 min; O₃ 熏蒸组: 切片放入 1.0 ppm 的臭氧发生器中熏蒸 10 min; 联合组: 切片先浸泡在 45 °C 的蒸馏水中 3 min, 然后放入 0.1×10⁻⁶ 的臭氧发生器中熏蒸 10 min; 对照组(CK): 切片浸泡在环境温度的蒸馏水中 3 min。

对照组和处理后的鲜切芋头均自然晾干, 用塑料薄膜(0.02 mm 聚乙烯)包装, 每袋 6 片样本(来自不同的个体), 每组 30 袋, 在 4 °C 下储存 12 d。每 2 d 进行测定, 每次测定随机选取 3 个未开封的独立包装作为平行样本(n=3), 从贮藏容器的上中下三层分别取样, 测定后样品不再放回测得相关指标。

1.4 实验方法

1.4.1 色差及褐变品质

使用色差仪测定芋头的颜色参数 L*(亮度)、a*(红绿色)、b*(黄蓝色), 根据公式(1)得出褐变指数(Browning index, BI)^[21]。

$$BI = \frac{100}{0.17} \times \left(\frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} - 0.31 \right) \quad (1)$$

式中:

BI——褐变指数;

L*——亮度;

a*——红绿色;

b*——黄蓝色。

1.4.2 总酚和类黄酮含量

参照 Hu 等^[22]方法, 取 0.5 g 鲜切芋头加入 7.5 mL 体积分数 80% 甲醇, 研磨至匀浆, 在 40 °C 黑暗条件下超声提取 40 min, 8 000×g 条件下离心 15 min。取 0.5 mL 上清液加入 0.5 mL 福林酚, 避光反应 5 min, 加入 0.5 mL 质量分数 7.5% 的 Na₂CO₃, 避光静置 90 min, 测定 760 nm 处吸光值, 结果以 mg·kg⁻¹ 表示。根据没食子酸标准曲线计算总酚含量。

参考 Zhu 等^[23]方法稍加修改, 类黄酮含量提取方法与酚类化合物相同。将 1 mL 上清液与 0.3 mL 质量分数 5% 的 NaNO₂ 混合, 5 min 后加入 0.5 mL 质量分数 2% 的 AlCl₃ 和 0.6 mL 质量分数 4% 的 NaOH, 室温静置 20 min, 测定 510 nm 处吸光值, 结果以 mg·kg⁻¹ 表示。根据槲皮素标准曲线获得总黄酮含量。

1.4.3 褐变相关酶

取 0.5 g 鲜切芋头样品, 加入 5 mL 预冷的磷酸盐缓冲液(50 mmol L⁻¹, pH 7.8), 在冰浴条件下研磨成匀浆, 将匀浆液在 4 °C 12 000×g 离心 20 min, 收集上清液用于酶活性的测定。采用 PAL 活性试剂盒和 PPO 活性试剂盒测定 PAL 和 PPO 活性, 严格按照说明书进行操作, 单位均为 U·L⁻¹。

1.4.4 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 含量

$O_2^{\cdot-}$ 含量参考 Xu 等^[5]方法,将 2 g 鲜切芋头与 5 mL 磷酸钠缓冲液 (50 mmol L^{-1} , pH 7.8) 研磨均匀,混合物在 4 °C 12 000×g 离心 20 min。取 1 mL 上清液,加入 1 mL 磷酸盐缓冲液 (50 mmol L^{-1} , pH 7.8) 和 1 mL 磷酸羟胺溶液,25 °C 下保温 1 h。加入 7 mmol L^{-1} 的 α -萘胺和 17 mmol L^{-1} 对氨基苯甲磺酸溶液,25 °C 恒温保持 20 min,在 530 nm 处测定吸光度。

H_2O_2 含量参考 Yuan 等^[24]方法并稍作修改。取 2 g 鲜切芋头,加入 5 mL 预冷的丙酮,均质 10 min。混合物在 4 °C 12 000×g 离心 20 min。取 1 mL 上清液,加入 0.2 mL 浓氨水和 0.1 mL 四氯化钛盐酸溶液,反应 5 min,在 4 °C 12 000×g 离心 20 min。将离心沉淀物与 3.0 mL 2 mol L^{-1} 硫酸充分溶解混合,测量 412 nm 处的吸光度值。

1.4.5 抗氧化酶活性

取 0.5 g 鲜切芋头样品,加入 5 mL 预冷的磷酸盐缓冲液 (50 mmol L^{-1} , pH 7.8),在冰浴条件下研磨成匀浆,将匀浆液在 4 °C 12 000×g 离心 20 min,收集上清液用于酶活性的测定。采用 POD 活性检测试剂盒、SOD 活性检测试剂盒和 CAT 活性检测试剂盒测定 POD、SOD 和 CAT 活性,严格按照说明书进行操作,单位分别为 $mU \cdot L^{-1}$ 、 $U \cdot L^{-1}$ 和 $U \cdot mL^{-1}$ 。

1.4.6 菌落总数

采用 GB 4789.2-2022 《食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定》测定。

1.5 数据处理

所有实验数据均采用 SPSS 26.0 软件 (美国芝加哥,SPSS 股份有限公司) 进行单因素方差分析 (ANOVA),使用 Duncan 法进行多次比较。每个处理取三个平行分析 ($n=3$),数据值以平均值±标准误差表示。采用 OriginPro 2021 软件 (美国马萨诸塞,OriginLab 股份有限公司) 进行图表绘制,图表中不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)。选取热激组、臭氧组、联合处理组及对照组在贮藏 0~12 d 的所有测定数据进行 Pearson 相关性分析。通过计算各指标间的相关系数绘制热图,并标注显著性水平 ($*P<0.05$, $**P<0.01$)。

2 结果与讨论

2.1 外观

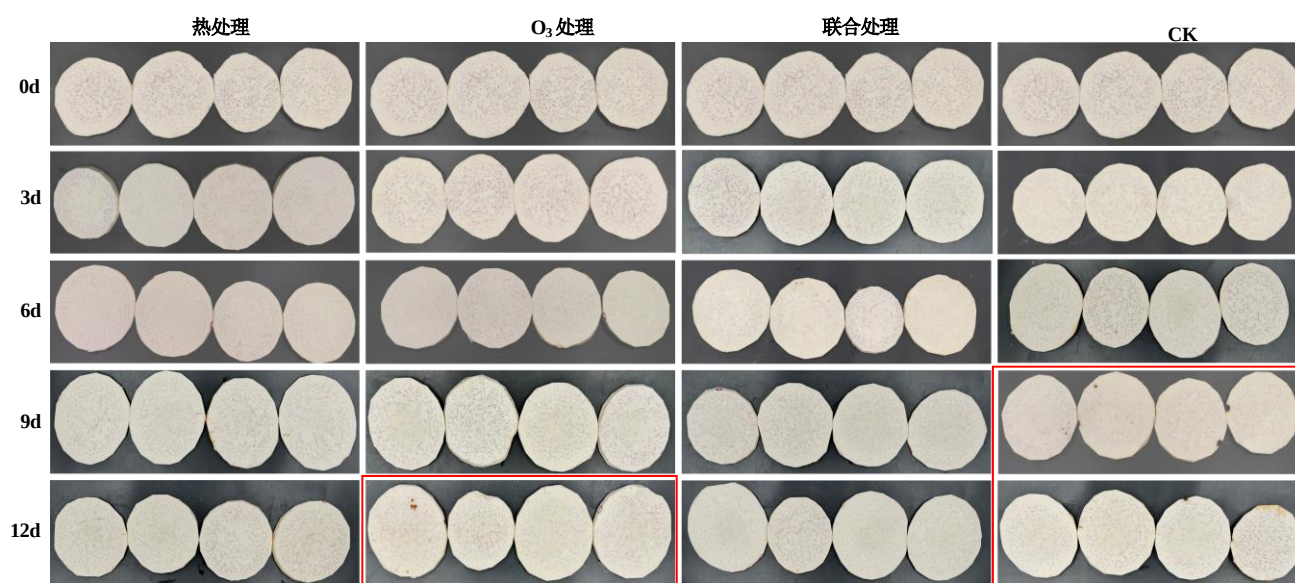


图 1 不同处理组鲜切芋头的外观变化

Fig.1 Appearance of fresh-cut taro under different treatments

鲜切处理会破坏果蔬组织的细胞结构,导致细胞质中的 PPO 和氧气接触,发生褐变^[25]。如图 1 所示,贮藏前 6 d,鲜切芋头表面鲜亮,结构紧密,整体品质良好。贮藏 9 d,CK 组表面出现轻微褐变,处理组未发生明显变化。

第 12 d 时, CK 组与 O_3 处理的芋头表面均出现明显的褐变, 芋头中心部位轻微变黄, 而热处理和联合处理组外观品质良好。研究表明, 热激处理可以诱导植物表皮细胞重排并改变角质层合成基因表达, 从而提高对细胞结构的保护能力, 延缓鲜切造成的褐变损伤^[26,27]。而臭氧处理虽然在贮藏后期缓解褐变的能力减弱, 但不会影响热激对芋头表面损伤细胞的保护作用, 从而使得联合处理组在贮藏 12 d 时仍能保持良好外观。因此, 热激和联合处理均能有效维持鲜切芋头的外观品质。

2.2 色差及褐变指数

色差是反映褐变严重程度的重要指标^[28]。图 2A 和 2B 可知, CK 组在贮藏期间 L^* 值下降最为明显, 且 BI 显著高于其它处理组 ($P<0.05$)。热激、臭氧和联合处理组在贮藏后期 (6~12 d) 均能够有效抑制 L^* 值的下降, 维持鲜切芋头外观色泽。贮藏 12 d, 热激组和联合组较 CK 组 L^* 值提高 1.61% 和 1.44%, 两者之间无显著性差异 ($P>0.05$)。谢章辉等^[29]和陈晟等^[30]发现, 热激可通过抑制 PPO、LOX 等酶活性, 减少花青素的氧化降解并提高类胡萝卜素的稳定性, 同时促进细胞结构重排, 提升表面光泽度。而臭氧的强氧化性可能会对花青素等水溶性色素造成轻微降解, 一定程度降低表皮光反射率^[31]。联合处理保留了热激的护色优势, 在避免色素过度损失的同时, 有效维持了鲜切芋头表皮光泽度。同样地, 热激和联合处理在抑制褐变底物氧化方面具有明显优势。贮藏 12 d, 热激组和联合组 BI 值分别降低 7.74% 和 8.17%, 显著抑制了鲜切芋头的褐变程度。研究认为, 热激可以通过钝化代谢酶活性延缓褐变, 而臭氧处理可降低因微生物代谢活动导致的色泽劣变^[29,32]。但值得注意的是, BI 值在贮藏第 12 d 出现下降现象, 可能是由于贮藏后期褐变底物 (如酚类) 被大量消耗, 部分褐色产物发生聚合或与细胞其他成分结合导致的^[33,34]。陈琳等^[35]在研究中报道, 可溶性醌作为褐变反应的副产物, 在鲜切芋头的整个贮藏过程中其含量总体呈“先上升后下降”的趋势, 表明褐变产物可能会随贮藏时间的延长而降低。王斌等^[36]还发现, 贮藏后期芋头切片可能出现组织软化或微生物生长, 导致褐变加重或通过次级代谢改变色泽 (色素等物质被降解)。这些现象通常不是指鲜切芋头恢复了新鲜度, 而是由于鲜切芋头逐渐衰老腐败而产生的复杂的生理生化反应引起的。综上, 热激和联合处理均能有效维持鲜切芋头的原有色泽和新鲜品质, 在抑制褐变方面展现出良好的应用潜力。

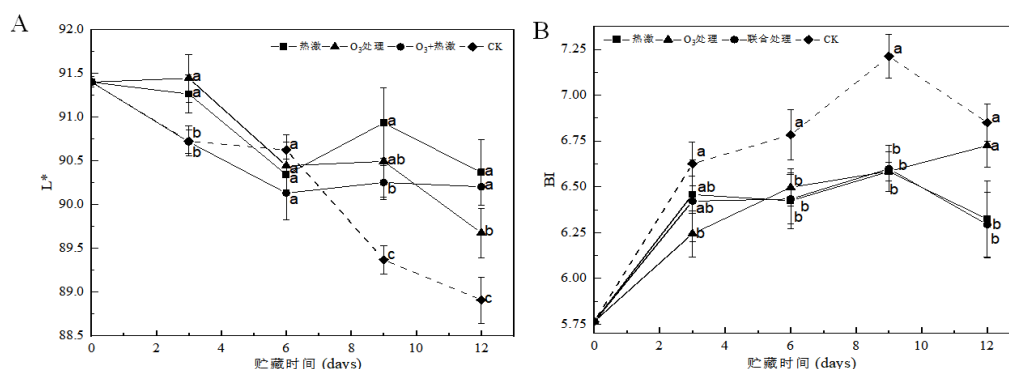


图 2 不同处理组鲜切芋头的色差变化: L^* 值 (A) 和 BI (B)

Fig.2 Color difference of fresh-cut taro under different treatments: L^* value (A) and BI (B)

注: 图中不同小写字母表示同一贮藏时间不同处理组间差异显著 ($P<0.05$), 相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。下同。

2.3 总酚、类黄酮含量

总酚和类黄酮是植物组织中 PPO 的主要作用底物, 在鲜切加工过程中, 氧气催化 PPO 与酚类底物接触导致褐变^[37]。如图 3A 所示, 贮藏期间鲜切芋头总酚含量呈先升高后降低的趋势, 第 6 d 达到峰值。CK 组总酚含量在贮藏期间始终保持较高的水平, 为酶促褐变提供了充足的底物, 更易加剧褐变。热激和 O_3 处理均可以抑制总酚含量的增加, 两者在贮藏期间无显著性差异 ($P>0.05$)。贮藏 12 d, 热激和 O_3 处理与 CK 组相比降低了约 5.49% 和 4.64%, 减少酶促褐变所需的底物供应。此外, 联合处理表现出更显著的抑制效果, 与单一处理 (热激和 O_3 处理) 相比, 贮藏 12 d 总酚含量下降 6.20% 和 7.05%。显著避免了因酚类过度氧化导致的色泽劣变, 有效维持了鲜切芋头的贮藏品质。类似的, 类黄酮作为另一类重要的酚类底物, 其含量的有效控制有助于减少 PPO 催化氧化反应的发生, 从而协同减轻组织褐变程度^[37,38]。如图 3B 所示, 联合处理可显著抑制类黄酮含量, 在整个贮藏期内始终

维持较低水平。贮藏 12 d, 与 CK 相比, 热激和 O_3 处理类黄酮含量分别降低 3.46% 和 1.41%, 而联合处理较 CK 组降低 5.79%, 较热激和 O_3 处理下降 2.42% 和 4.45%。研究表明, 热激处理可以通过上调热激蛋白表达和诱导抗氧化系统, 在转录或酶活性水平上减少酚类底物的从头合成^[39]。臭氧则利用其强氧化性加速酚类物质的氧化降解与清除^[40]。而联合处理中两者共同作用, 实现了总酚和类黄酮含量的显著下调, 使得联合处理在减少酶促褐变底物供应方面优于单一处理。因此, 联合处理可以抑制总酚和类黄酮的过度积累, 延缓鲜切芋头的酶促褐变。

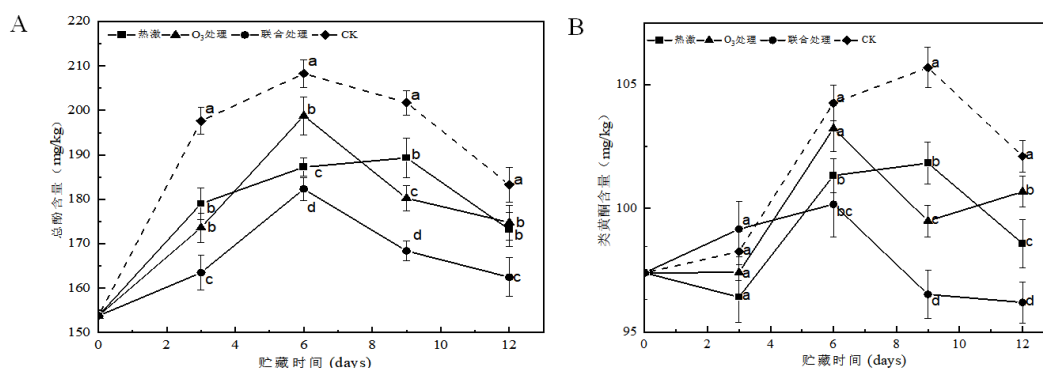


图 3 不同处理组鲜切芋头的总酚含量 (A) 和类黄酮含量 (B)

Fig.3 Total phenolic content (A) and flavonoid content (B) of fresh-cut taro under different treatments

2.4 PAL 和 PPO 活性

PAL 是苯丙烷代谢途中合成酚类物质的关键酶, PPO 则会催化酚类物质氧化聚合, 形成褐变产物^[41]。如图 4A 所示, 鲜切芋头在贮藏期间 PAL 活性呈现先上升后下降的趋势。与 CK 组相比, 贮藏前 6 d, 热激组 PAL 活性明显升高。贮藏 12 d, 热激处理与 CK 组 PAL 活性无显著性变化, 但其 PPO 活性较 CK 组降低 8.64%。表明单一热激处理可以短暂诱导 PAL 活性升高来启动防御响应, 并钝化 PPO 酶活性来抑制褐变。同时, 植物为了修复细胞损伤, 会消耗体内大量的酚类物质清除活性氧等代谢产物^[41,42], 造成总酚含量的降低。同样的, 单一臭氧处理在贮藏期间的维持了较高的 PAL 活性, 但 PPO 活性在贮藏第 9 d 开始明显增加。表明臭氧处理虽然也诱导了 PAL 活性的升高来增加组织的抗逆能力, 但由于臭氧处理对 PPO 活性的抑制能力有限, 导致鲜切芋头贮藏后期发生酶促褐变。联合处理组可以通过多靶点联合干预鲜切芋头的褐变过程。一方面利用热激抑制 PPO 活性抑制褐变反应, 另一方面通过双重胁迫调控 PAL 代谢信号抑制生理紊乱, 保持 PAL 和 PPO 活性在贮藏期间相对稳定^[43,44]。贮藏 12 d, 联合处理组 PAL 和 PPO 活性较 CK 组降低 3.08% 和 7.72% ($P < 0.05$), 较 O_3 组降低 15.74% 和 12.28%。因此, 联合处理可同时减缓 PAL 和 PPO 催化的酚类代谢反应, 降低因酶活过高导致的不良褐变产物积累。

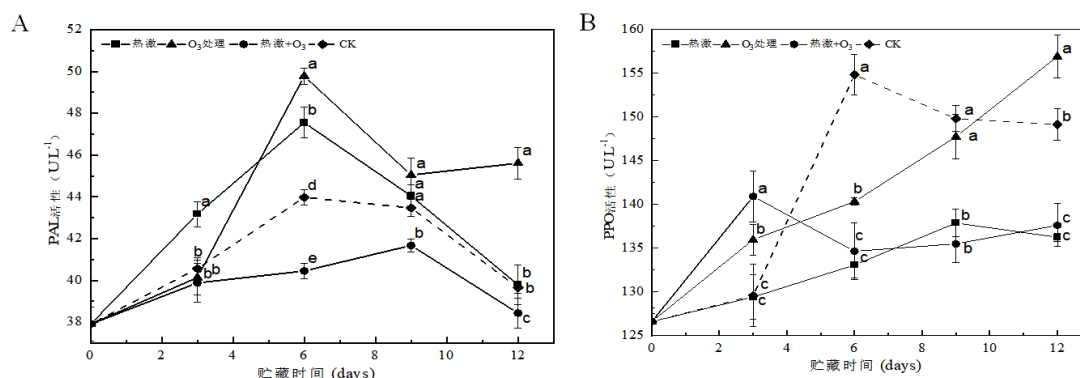


图 4 不同处理组鲜切芋头的 PAL 活性 (A) 和 PPO 活性 (B)

Fig.4 PAL activity(A) and PPO activity(B) of fresh-cut taro under different treatments

2.5 H_2O_2 、 $O_2^{\cdot-}$ 含量

H_2O_2 和 $O_2^{\cdot-}$ 过量积累会引发细胞膜渐进性结构损伤和品质劣变^[45]。如图 5A 和 5B 所示, 贮藏期间 H_2O_2 和

$O_2^{\cdot-}$ 含量呈波动式上升的趋势, CK 组显著高于其他处理组 ($P<0.05$)。热激或 O_3 处理均可以显著抑制 H_2O_2 和 $O_2^{\cdot-}$ 过量积累。贮藏 12 d 时, 热激组对 H_2O_2 的清除效果最优, 较 CK 下降 33.07%。这可能是由于热处理诱导了抗坏血酸-谷胱甘肽循环及相关过氧化物酶的表达, 增强了对过氧化物的特异性还原能力^[46]。而 O_3 处理组对 $O_2^{\cdot-}$ 的清除最为显著, 贮藏 12 d 较 CK 下降 34.25%。研究表明, 臭氧作为氧化激发子, 可以优先激活 SOD 活性, 从而加速 $O_2^{\cdot-}$ 的歧化反应^[47,48]。在此基础上, 联合处理有效缓解单一处理路径导致的代谢失衡。贮藏 12 d 后, 联合处理的 H_2O_2 和 $O_2^{\cdot-}$ 含量较 CK 分别下降 22.83%和 24.42%。这可能是由于热激与臭氧联合处理时, 芋头细胞内有限的能量与抗氧化通路可能存在竞争性抑制。但值得注意的是, 联合处理虽未达到热激或臭氧处理的最佳效果, 却实现了对 H_2O_2 和 $O_2^{\cdot-}$ 的双重调控, 这种双向调节可以将 ROS 水平整体维持在较低且平稳的范围内, 缓解过度防御带来的代谢负担。Li 等^[49]认为, 生理状态下 ROS 水平的适度波动是启动防御反应的必要信号。因此, 联合处理可以互补两种处理的优势, 同时抑制 H_2O_2 和 $O_2^{\cdot-}$ 的异常积累, 使其能够更全面地维持活性氧代谢稳态。

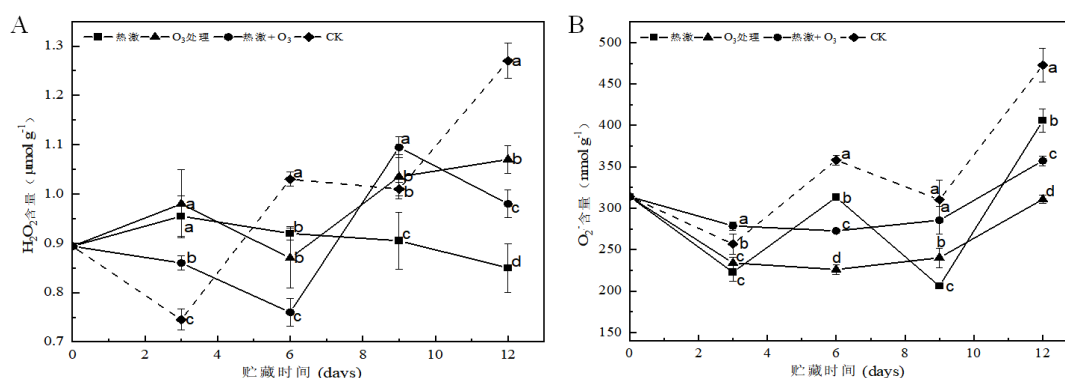


图5 不同处理组鲜切芋头的 H_2O_2 含量 (A) 和 $O_2^{\cdot-}$ 含量 (B)

Fig.5 H_2O_2 content(A) and $O_2^{\cdot-}$ content(B) of fresh-cut taro under different treatments

2.6 POD、SOD 和 CAT 活性

POD、SOD 和 CAT 是抗氧化系统的核心酶, 诱导激活其活性可以有效清除过量的 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 ^[50]。如图 6A 所示, 贮藏第 6 d, CK 组 POD 活性显著下降 ($P<0.05$), 表明其抗氧化能力随贮藏延长明显降低。热激处理和 O_3 处理均可以有效维持 POD 活性, 贮藏 12 d, POD 活性较 CK 组提高了 8.79%和 5.18%, 而联合处理较 CK 组提高了 16.98%, 进一步激发了芋头组织内抗氧化系统的代谢应答。Li 等^[51]发现, 热激处理可以诱导 POD 和 CAT 酶活性显著升高, 以清除过量 H_2O_2 并减轻氧化损伤。乐梨庆等^[20]认为, 适量的臭氧处理可以增强 SOD 催化歧化 $O_2^{\cdot-}$ 生成 H_2O_2 和 O_2 的能力, 进而提高 CAT 和 POD 分解过氧化氢的水平, 延缓组织衰老。因此, 联合处理可以通过热激与臭氧在信号转导和代谢调控的协同作用, 实现对 POD 活性的联合增效, 从而更有效地清除贮藏后期积累的 H_2O_2 , 延缓组织氧化衰老。此外, SOD 是抗氧化系统的第一道防线, CAT 可以高效的将 SOD 产生的 H_2O_2 进一步分解成 H_2O 和 O_2 , 从而防止其转化为更具毒性的羟基自由基^[52]。

如图 6B 和 6C 所示, SOD 和 CAT 活性波动差异反映了各组间独特的生理响应机制和胁迫程度。CK 组 SOD 和 CAT 活性呈明显的升高又降低的趋势, 这可能是植物细胞在贮藏前期感受到大量活性氧 (ROS) 积累产生的应激防御反应, 随后由于组织的衰老以及酶的过度消耗导致 CAT 活性快速下降^[52]。热激组 SOD 和 CAT 活性呈较大幅度的波动状态, 贮藏 12 d, SOD 活性与 CK 组无显著性差异 ($P>0.05$), CAT 活性维持在较稳定水平。Ling 等^[53]研究发现, 热激会激活植物的分层防御反应, SOD 和 CAT 活性初始激增会减轻果实氧化应激, 随后因代谢抑制或酶蛋白消耗出现下降。贮藏中后期 (4 d) 更深层的防御机制被激活, 以应对病原体的快速生长并延缓衰老, 而活性达到峰值后再次下降。联合处理和 O_3 处理可以有效提高鲜切芋头的抗氧化活性, 贮藏期间 SOD 和 CAT 活性呈明显的上升趋势。贮藏 12 d, SOD 活性较 CK 组分别增加了 15.07%、13.62%, CAT 活性增加了 22.43%和 25.31%, 两者之间无显著性差异 ($P>0.05$)。低浓度的臭氧处理可以作为生物激发子, 提供较温和、持续的抗氧化系统激活^[54]。而联合处理结合了热激的快速诱导和臭氧的持续保鲜作用, 可以有效提高 SOD 和 CAT 酶活性。因此, 联合处理与 O_3 处理能有效地激活并维持鲜切芋头组织的抗氧化系统, 提高 SOD 和 CAT 活性, 延缓氧化胁迫引起的品质劣变。

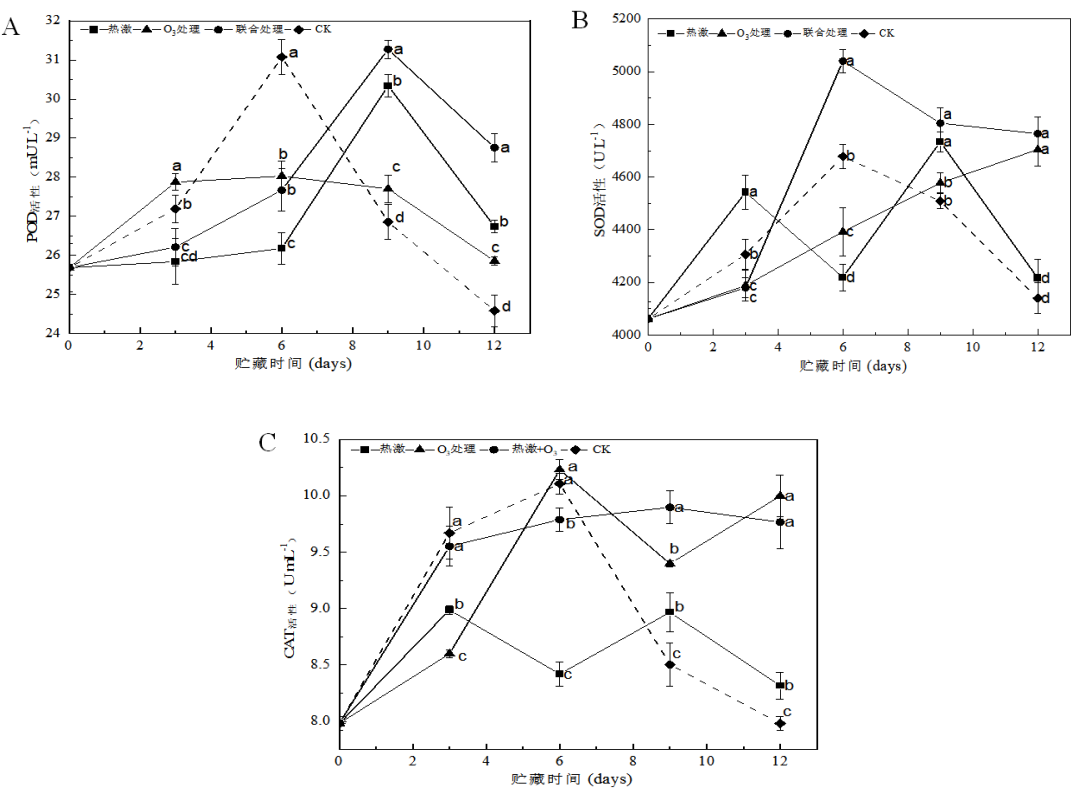


图 6 不同处理组鲜切芋头的 POD 活性 (A)、SOD 活性 (B) 和 CAT 活性 (C)

Fig.6 POD activity (A), SOD activity (B), and CAT activity (C) of fresh cut taro in different treatment groups

2.7 菌落总数

鲜切芋头在贮藏后期易受微生物污染而影响食用安全。由图 7 可知，随着贮藏时间的延长，鲜切芋头菌落总数呈上升的趋势。CK 组的鲜切芋头菌落总数显著高于其它处理组 ($P<0.05$)，贮藏至 9 d，菌落总数增加至 5.21 lg CFU/g，超出 5.0 lg CFU/g 的食品卫生安全标准限值^[55]。单一热激处理虽能部分抑制细菌增殖，但贮藏抑菌效果有限，贮藏 12 d，菌落总数快速增长至 5.33 lg CFU/g。而 O₃ 处理组与热激联合臭氧处理组则表现出显著的抑菌效果，二者均能有效控制微生物生长。贮藏 12 d，菌落总数分别增长至 3.98 lg CFU/g 和 4.15 lg CFU/g，两组之间无显著性差异 ($P<0.05$)。研究表明，热激可以导致芋头表面微生物细胞热应激损伤，但因缺乏后续的氧化胁迫，部分受损微生物可能修复并恢复生长，导致贮藏后期菌落总数反弹^[51]，臭氧能够更有效地穿透受损的微生物细胞膜，氧化细胞内还原性物质和核酸，从而杀死或抑制亚致死状态微生物的恢复与增殖^[18]。因此，臭氧与热激联合能更有效地抑制果蔬表面微生物增长，降低微生物代谢对营养物质的消耗速率，延长鲜切芋头的货架期。

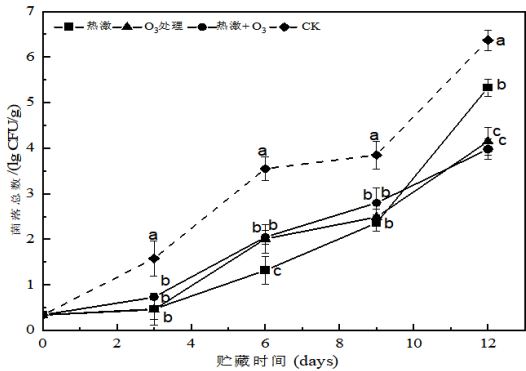


图 7 不同处理组鲜切芋头菌落总数

Fig.7 Total bacterial count of fresh cut taro in different treatment groups

2.8 相关性分析

如图 8 所示，鲜切产品的褐变指数 *BI* 与总酚含量、类黄酮含量、PPO 活性之间存在显著的正相关关系。表明 PPO 作为酶促褐变的直接催化酶，其活性的升高会加速鲜切芋头酚类物质的氧化聚合，导致褐变程度加深。 H_2O_2 和 $O_2^{\cdot-}$ 含量与 *BI* 呈极显著正相关。表明活性氧的大量积累不仅直接损伤细胞结构，破坏区室化屏障，还可能作为信号分子诱导 PPO 等酶的活性，加速褐变。而 *BI* 与 *L** 值呈显著负相关。这反映了随着褐变程度的加深，鲜切芋头表面颜色逐渐变暗，光泽度降低。综上所述，鲜切芋头的褐变主要是由 PPO 活性升高、酚类底物积累以及活性氧代谢失衡共同驱动的。其中，PPO 活性和总酚含量是控制褐变程度的关键指标，而维持较高的 SOD、CAT 等抗氧化酶活性对于延缓褐变具有重要意义。

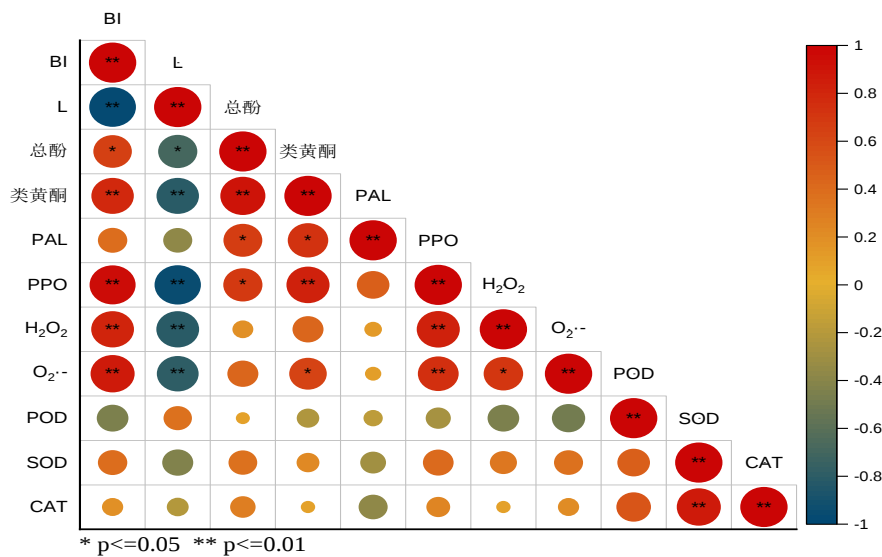


图 8 皮尔逊相关性分析
Fig.8 Pearson correlation analysis

3 结论

联合处理可有效提升鲜切芋头在贮藏期间的抗氧化水平与新鲜品质。综合各指标变化分析发现，不同处理组保鲜效果的差异主要源于其对褐变代谢和抗氧化系统的差异化调控能力。单一热处理可以有效抑制 *BI*，并通过钝化 PPO 酶活性和抑制 H_2O_2 含量，维持鲜切芋头良好的外观色泽并维持代谢平衡。但贮藏 12 d，菌落总数快速增长至 5.33 lg CFU/g，超出 5.0 lg CFU/g 的食品卫生安全标准限值。单独 O_3 处理虽能激活 SOD、CAT 活性并抑制 $O_2^{\cdot-}$ 含量增长，但其对关键褐变酶（PPO、PAL）活性的抑制效果有限。相比之下，热激+ O_3 联合处理显著提高了鲜切芋头 *L** 值，降低 *BI*，在显著抑制 PAL 和 PPO 等褐变酶活性的同时，激活了 SOD、CAT 和 POD 等抗氧化酶系统，使 H_2O_2 和 $O_2^{\cdot-}$ 含量均能维持在较低的平衡状态，保持了鲜切芋头的外观色泽和新鲜品质。此外，联合处理显著抑制了菌落总数 ($P<0.05$)，有效控制了鲜切芋头表面微生物的繁殖。皮尔逊相关性进一步分析表明，鲜切芋头的褐变主要是由 PPO 活性升高、酚类底物积累以及活性氧代谢失衡共同驱动的。联合处理在抑制酶促褐变、平衡活性氧代谢以及缓解微生物损伤等方面同时发挥关键作用，形成联合保鲜机制，为鲜切芋头的绿色、高效贮藏提供了可行的技术路径。

参考文献

[1] CHEN L, CHEN B Z, CHU L L, et al. The storage quality and transcriptome analysis of fresh-cut taro by L-ascorbic acid combined with ultrasonic treatment [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 112(1): 107178.

[2] LIN D S, SHUAI L, XU X L, et al. Salicylic acid inhibition on browning of fresh-cut taro by regulating phenolic compounds and active oxygen metabolism [J]. LWT - Food Science and Technology, 2024, 206(2): 116591.

[3] ITURRALDE G R, CINCO M F, MARTINEZ C O, et al. Emerging technologies for prolonging fresh-cut fruits' quality and safety during

- storage [J]. *Horticulturae*, 2022, 8(8): 731.
- [4] INTARASIT S, FAIYUE B, UTHAIBUTRA J, et al. Amelioration of nitrosative stress to reduce pericarp browning of harvested longan by chlorine dioxide [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 293(1): 110678.
- [5] XU D Y, CHEN C, ZHOU F H, et al. Vacuum packaging and ascorbic acid synergistically maintain the quality and flavor of fresh-cut potatoes [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2022, 162(3): 113356.
- [6] 马保香.不同护色方法筛选对鲜切芋头褐变及其贮藏品质的影响[J].*福建轻纺*,2025,1(7):9-16.
- [7] BARI A, GIANNOULI P. Gelatin and Gelatin/Rice Starch Coatings Affect Differently Fresh-Cut Potatoes and Colocasia Slices [J]. *Foods*, 2023, 11(8): 2383.
- [8] 周琪,陈晨,周福慧,等.短波紫外线控制鲜切苹果褐变与其活性氧代谢的相关性[J].*食品科学*,2019,40(5):102-109.
- [9] 袁晓,易景怡,付龙威,等.真空包装结合低温贮藏对鲜切芋头的保鲜效果[J].*食品工业科技*,2024,45(11):280-288.
- [10] 张鹏,颜碧,贾晓昱,等.鲜切莲藕防褐变剂配方优化及保鲜效果研究[J].*食品与发酵工业*,2022,48(1):169-175.
- [11] MA S, ZHOU N, FU Y H, et al. Combined ascorbic acid and mild heat treatment to improve the quality of fresh-cut carrots [J]. *Foods*, 2024, 13(12): 1904.
- [12] ZHANG L H, LI S F, WANG A J, et al. Mild heat treatment inhibits the browning of fresh-cut *Agaricus bisporus* during cold storage [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 82(1): 104-112.
- [13] QIAO L P, LIU Y H, DENG X L, et al. A new strategy for browning regulation: Flos sophorae immaturus extract and thermal treatment modulates nitric oxide and reactive oxygen species network in fresh-cut potatoes [J]. *Journal of Food Science*, 2023, 88(10): 4574-4590.
- [14] WANG Y J, LI Y X, YANG S H, et al. Mechanism of ozone treatment in delayed softening of fresh-cut kiwifruit during storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 204(1): 112469.
- [15] CHEN J R, HU Y F, WANG J M, et al. Combined effect of ozone treatment and modified atmosphere packaging on antioxidant defense system of fresh-cut green peppers [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2016, 40(6): 1145-1150.
- [16] LI C, WANG S, WANG J Y, et al. Ozone treatment promotes physicochemical properties and antioxidant capacity of fresh-cut red pitaya based on phenolic metabolism [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9(1): 1016607.
- [17] 江靖,朱向荣,苏东林,等.热激结合臭氧熏蒸对“涟红”蜜桔采后品质的影响[J].*食品与机械*,2018,34(12):120-123+171.
- [18] PANOU A A, AKRIDA D K, DEMERTZIS P, et al. Effect of gaseous ozone and heat treatment on quality and shelf life of fresh strawberries during cold storage [J]. *International Journal of Fruit Science*, 2021, 21(1): 218-231.
- [19] KECHINSKI C P, MONTERO C S, GUIMARÃES P V R, et al. Effects of ozonized water and heat treatment on the papaya fruit epidermis [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2012, 90(2): 118-122.
- [20] 乐梨庆,夏小龙,龙勇,等.臭氧处理对晚熟柑橘的采后贮藏品质变化及杀菌效果分析[J].*现代食品科技*,2024,40(10):227-238.
- [21] WANG B, HUANG Y G, ZHANG Z M, et al. Ferulic acid treatment maintains the quality of fresh-cut taro (*colocasia esculenta*) during cold storage [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9(1): 884844.
- [22] HU W, JIANG A, TIAN M, et al. Effect of ethanol treatment on physiological and quality attributes of fresh-cut eggplant [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(8): 1323-1326.
- [23] ZHU, L., HU, W., MURTAZA, A, et al. Browning inhibition in fresh-cut Chinese water chestnut under high pressure CO₂ treatment: Regulation of reactive oxygen species and membrane lipid metabolism [J]. *Food Chemistry*, 2023, 427(1): 136586.
- [24] YUAN X, TANG B L, WANG Y K, et al. Inhibitory effects of peppermint extracts on the browning of cold-stored fresh-cut taro and the phenolic compounds in extracts [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, 7(1): 1191396.
- [25] ZHANG L M, LIU Z L, SUN Y, et al. Combined antioxidant and sensory effects of active chitosan/zein film containing α -tocopherol on *Agaricus bisporus* [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 24(1): 100470.
- [26] PARK M H, KO D Y, DO K R, et al. Hot water treatment alleviates peel browning in oriental melons through cutin biosynthesis: A comprehensive metabolomics approach [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 204: 112451.
- [27] ORTAL G, ADI D F, PAULA T B, et al. Differential response to heat stress in outer and inner onion bulb scales [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2018, 69(16): 4047-4064.
- [28] LUO S Z Z, SUN Y, YUAN X, et al. Infrared radiation blanching-inhibited browning and extended shelf life of pecan kernels [J]. *Journal of Food Science*, 2023, 88(4): 1566-1579.

- [29] 谢章辉,高静.果蔬色泽在热加工和非热加工技术中的变化研究进展[J].现代食品科技,2024,40(5):1-12.
- [30] 陈晟,葛帅,罗耀华,等.不同采后处理对冷藏南丰蜜桔角质层形态结构及化学组成的影响[J].食品工业科技,2022,43(22):365-378.
- [31] 王燕,牛耀星,叶力瑕,等.臭氧处理对猕猴桃采后抗氧化系统的影响[J].食品研究与开发,2024,45(7):68-75.
- [32] SRIPONG K, UTHAIRATANAKIJ A, JITAREERAT P. Impact of gaseous ozone on microbial contamination and quality of fresh-cut durian [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 294(1): 110799.
- [33] NJUS D, ASMARO K., LI G, et al. Redox cycling of quinones reduced by ascorbic acid [J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2023, 373(1): 110397.
- [34] KECHINSKI C P, SERRER MONTERO C R, ZAPATA NOREÑA C P, et al. Effects of ozone in combination with hydrothermal treatment and wax on physical and chemical properties of papayas [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2012, 34: 57-63.
- [35] 陈琳,胡兴成,罗紫玮,等.L-抗坏血酸联合超声处理对鲜切芋艿贮藏品质的影响[J].食品科学,2024,45(11):267-277.
- [36] 王斌,林薇,袁晓.鲜切果蔬褐变机理及防控技术研究进展[J].食品科学,2025,46(7):367-384.
- [37] WANG S J, LI F, WANG G, et al. Polyphenol oxidase gene editing changed the flavonoid composition and browning process of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) callus [J]. *GENE*, 2025, 936(1): 149130.
- [38] 郝一帆,何文华,孙洁,等.壶瓶枣低温贮藏期间红变规律及转录组学分析[J].农业工程学报,2025,41(2):338-348.
- [39] 苗泽钰,黄慧中,张顺庭,等.热处理对鲜切荸荠贮藏品质的影响及机制研究[J].食品科技,2022,47(6): 44-51.
- [40] RINALDO B, MARCO B, CLAUDIA G. A review into the effectiveness of ozone technology for improving the safety and preserving the quality of fresh-cut fruits and vegetables [J]. *Foods*,2021,10(4): 748.
- [41] 邓孟胜,孙文奥,谢灵鸿,等.光甘草定对鲜切马铃薯酶促褐变的影响[J].食品科学,2026,47(2):279-289.
- [42] OUYANG N G, GUO L N, HONG C, et al. Effects of delayed tuber cutting after catalytic infrared heat treatment on browning of fresh-cut potatoes and its potential mechanisms [J]. *Food Chemistry*, 2025, 480(1): 143834.
- [43] MAGHOUMI M, GÓMEZ P A, MOSTOFI Y, et al. Combined effect of heat treatment, UV-C and super atmospheric oxygen packing on phenolics and browning related enzymes of fresh-cut pomegranate arils [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2013, 54(2): 389-396.
- [44] 杨昕臻,李梅,吴小华.鲜切马铃薯褐变控制技术研究进展[J].包装工程,2023,44(13): 112-119.
- [45] LI L, ZHANG Y Y, FAN X L, et al. Relationship between activated oxygen metabolism and browning of “Yali” pears during storage [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(5): e14392.
- [46] 辛奇,孙洁,冯欣欣,等.快速热激处理对甘薯愈伤层形成及代谢的影响[J].食品科学,2022,43(23):228-238.
- [47] ZHANG H J, LI K L, ZHANG X J, et al. Effects of ozone treatment on the antioxidant capacity of postharvest strawberry [J]. *RSC Advances*, 2020, 10(63): 38142-38157.
- [48] NIAZ N, HU W F, PAN S Y, et al. Heat shock combined with chemical treatment partially recovered chilling injury and improved antioxidant capacity in banana [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 113(1): 77.
- [49] LI X, CAO Z, CHEN M, et al. Redox signaling and homeostasis [J]. *Oral Science and Homeostatic Medicine*, 2025, 1(1): 1-18.
- [50] CHANG M S, AN S J, KIM G H, et al. Effects of heat treatment and various browning inhibitors on the quality of fresh-cut burdock [J]. *Acta Horticulturae*, 2018, 1209(63): 431-438.
- [51] LI Y X, CAI J B, LIU X. Integrated transcriptome and metabolome analysis of mature stage sand pear fruit response to high-temperature stress [J]. *Plants*, 2025, 14(17): 2776.
- [52] 郑晓梅,郑鄢燕,左进华,等.脉冲强光处理对青椒采后贮藏品质的影响[J].食品科学,2025,46(21):243-250.
- [53] LING L Z, YANG T, LONG X Q, et al. Antioxidant Defense Strategies Against *Diaporthe eres* Infection in Hongyang Kiwifruit [J]. *Biology*, 2025, 14(9): 1169.
- [54] 陈存坤,张慧杰,纪海鹏,等.臭氧精准处理提高采后草莓抗氧化酶活性和酚类物质含量[J].农业工程学报,2019,35(10):288-295.
- [55] 边昊,雷镇欧.超高压处理对鲜切芋头品质影响研究[J].四川旅游学院学报,2020,1:16-19.