

采前喷施油茶饼粕提取液对火龙果果实采后抗病性的影响

叶霞¹, 吴倩¹, 谢国芳^{2*}

1. 贵阳学院食品与制药工程学院, 贵州贵阳 550005; 2. 贵州大学酿酒与食品工程学院/贵州省农畜产品贮藏与加工重点实验室, 贵州贵阳 550025

摘要: 为探究采前喷施油茶饼粕提取液对火龙果果实采后抗病性的影响, 本研究以紫红龙火龙果为试材, 在果实采前喷施不同浓度油茶饼粕提取液, 同时以喷施清水为对照 (CK), 采后果实贮藏于(10±0.5)℃, 相对湿度 90%~95%条件下, 分析各处理的火龙果果实的采后理化、营养成分、活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 代谢及防御酶活力的变化, 并对各指标进行相关性分析和综合评分。结果表明: 采前喷施油茶饼粕提取液处理均能有效降低火龙果果实的腐烂指数 (decay index, DI); 贮藏后期, 经油茶饼粕提取液处理的火龙果果实的呼吸速率 (respiratory rate, RR)、乙烯释放速率 (ethylene release rate, ERR) 得到有效抑制; 油茶饼粕提取液处理能有效延缓其抗坏血酸 (ascorbic acid, AsA) 含量下降, 提高其过氧化氢酶 (catalase, CAT)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 等抗氧化酶活力, 有效促进其过氧化氢 (hydrogen peroxide, H₂O₂) 代谢, 降低果实体内 H₂O₂ 含量, 有效清除其生理代谢过程中积累的自由基。同时, 油茶饼粕提取液处理能有效提高火龙果果实的苯丙氨酸解氨酶 (phenylalanine ammonia-lyase, PAL)、过氧化物酶 (peroxidase, POD)、多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO)、β-1,3-葡聚糖酶 (β-1,3-glucanase, GLU) 及几丁质酶 (chitinase, CHI) 等防御相关酶活力, 从而提高果实抗病能力。相关性分析发现, 火龙果果实腐烂指数与 ROS 积累、膜脂过氧化密切相关, 减轻氧化应激、维持细胞膜完整性是提高火龙果果实抗病性的基础, 增强果实的抗病能力有助于减轻腐烂。主成分分析发现, 采前喷施 1.00% 油茶饼粕提取液组的火龙果综合评分最高, 表明其效果最佳。综上所述, 采前喷施 1.00% 油茶饼粕提取液处理通过提高火龙果果实抗氧化及抗病性来维持其品质。该研究结果为油茶饼粕提取液在火龙果采后贮藏保鲜中的应用提供理论参考。

关键词: 火龙果; 油茶饼粕; 采前喷施; 活性氧; 抗病性

中图分类号: S436.67 文献标识码: A

Effect of Preharvest Spraying Extract from *Camellia oleifera* Cake on the Disease Resistance of Postharvest Pitaya Fruit

YE Xia¹, WU Qian¹, XIE Guofang^{2*}

1. Food and Pharmaceutical Engineering Institute, Guiyang University, Guiyang, Guizhou 550005, China; 2. School of Liquor and Food Engineering, Guizhou University / Guizhou Key Laboratory of Agricultural and Animal Products, Guiyang, Guizhou 550025, China

Abstract: To explore the effect of the extract from *Camellia oleifera* cake on the postharvest disease resistance of pitaya, pitaya Zihonglong was sprayed with different concentrations of *C. oleifera* cake extract before harvest. The fruits were stored at (10±0.5)℃ and 90%–95% RH after harvest. The changes of physical and chemical properties, nutritional components, reactive oxygen species (ROS) metabolism and defense-related enzyme activities of pitaya fruits after harvest were analyzed, and the correlation between each index and comprehensively scores were analyzed. The results indicated that the preharvest spraying extract from *C. oleifera* cake could effectively reduce the decay index (DI) of pitaya fruit. The respiratory rate (RR) and ethylene release rate (ERR) of pitaya fruit were effectively inhibited by *C.*

收稿日期 2022-11-25; 修回日期 2022-12-31

基金项目 贵州省科技支撑计划项目 (黔科合支撑[2019]2323); 贵阳学院研究生科研基金项目 (No. GYU-YJS[2020]-05)。

作者简介 叶霞 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏技术与应用。*通信作者 (Corresponding author): 谢国芳 (XIE Guofang), E-mail: gfxie@gzu.edu.cn。

oleifera cake extract at the later storage period. Pitaya fruit treated with *C. oleifera* cake extract effectively delayed the decrease of ascorbic acid (AsA) content, and increased the activities of catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD) and other antioxidant enzymes, effectively promoted the metabolism of hydrogen peroxide (H_2O_2) in fruit, reduced the H_2O_2 content, and effectively removed the ROS accumulation during the fruit physiological metabolism. Meanwhile, the *C. oleifera* cake extract effectively increased the activities of defense-related enzymes such as phenylalanine ammonialyase (PAL), peroxidase (POD), polyphenol oxidase (PPO), β -1,3-glucanase (GLU) and chitinase (CHI) in pitaya fruit, thus improving its disease resistance. Correlation analysis founded that pitaya fruit DI was closely related to the ROS accumulation and membrane lipid peroxidation. Decreasing oxidative stress and maintaining the integrity of cell membrane were the basis for improving the disease resistance of pitaya fruit, and enhancing the disease resistance of pitaya fruit was helpful to reduce decay. Comprehensive evaluation showed that the comprehensive score of pitaya fruit preharvest spraying with 1.00% *C. oleifera* cake extract was the highest, indicating that its treatment effect was the best. In conclusion, preharvest spraying with 1.00% *C. oleifera* cake extract could maintain quality of pitaya fruit by improving the antioxidant and disease resistance. The results provide a theoretical reference for the application of *C. oleifera* cake extract in the postharvest storage and preservation of pitaya.

Keywords: pitaya; *Camellia oleifera* cake; preharvest spraying; reactive oxygen; disease resistance

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.10.020

火龙果 (*Hylocereus undulatus*) 又称吉祥果、玉龙果、芝麻果等, 起源于拉丁美洲^[1], 是仙人掌科 (Cactaceae) 量天尺属 (*Hylocereus*) 多年生攀援的典型热带植物^[2-3]。火龙果果实外形亮丽、口感清甜^[2], 且富含甜菜色素、不饱和脂肪酸、有机酸、植物多糖、蛋白质及微量元素^[4], 具有预防便秘、降血脂及抗氧化等作用^[5-6], 深受消费者的青睐。然而, 火龙果成熟于高温多雨的夏秋季节, 采后生理代谢旺盛, 加速果实衰老腐烂, 缩短果实货架期, 严重制约其产业发展^[3, 7]。

油茶 (*Camellia oleifera* Abel.) 又称茶子树或茶油树, 起源于中国, 是我国重要木本食用油料树种, 与油棕、椰子和油橄榄并称世界四大木本油料植物^[8]。我国年产油茶籽 265 万 t 左右, 加工油茶籽油后产生约 70 万 t 饼粕, 大部分被废弃^[9]。研究显示, 油茶饼粕对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、沙门氏菌等食源性致病菌^[10]和稻瘟病菌、柑橘青霉病菌、黄瓜炭疽病菌、番茄小核病菌、玉米小斑病菌等植物病原菌均具有较好的抑制作用^[11], 还发现其对圣女果和荔枝具有较好的保鲜效果^[12-13]。

前期研究发现, 采前喷施油茶饼粕提取液可维持火龙果采后贮藏品质^[14-15], 但其作用机理尚不明确。为此, 以紫红龙火龙果为试材, 采前喷施不同浓度的油茶饼粕提取液, 探究油茶饼粕提取液对火龙果果实采后抗病性的影响。研究结果为油茶饼粕提取液在火龙果的贮藏保鲜中的应用提供理论基础, 同时对提高油茶资源的利用率具有重要意义, 为开发绿色、环保的果蔬贮藏保鲜

新技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试材料 紫红龙火龙果: 于 2019 年 9 月 6 日采摘于贵州省罗甸县火龙果基地, 八成熟时采收, 选择无机械损伤、无病虫害、大小一致的果实开展试验。

油茶饼粕提取液: 以采自贵州省思南县野生油茶树的油茶果经液压榨油后的饼粕为原料, 参照谢国芳等^[15]的方法进行提取。

1.1.2 仪器与设备 YGA2100 型 O_2 和 CO_2 分析仪, 北京阳光亿事达; ES100 型乙烯分析仪, 意大利 FCE 公司; PAL-BX 手持型糖酸一体机, 日本 Atago 公司; TCL-16A 冷冻离心机, 长沙平凡仪器仪表有限公司; UV-2550 紫外分光光度计, 日本岛津公司。

1.2 方法

1.2.1 油茶饼粕提取液处理 采前 1 d, 采用浓度分别为 0.05%、0.10%、0.25%、0.50%、1.00% 的油茶饼粕提取液对火龙果果实进行喷施 (以果面水珠下滴为准), 每个处理设 3 次重复, 以相邻果树果实喷施清水为对照 (CK)。采后立即运回贵阳学院实验室, 散去田间热, 置于 $(10 \pm 0.5)^\circ C$ 、相对湿度 90%~95% 下贮藏, 每 7 d 取样分析, 液氮冻样, 于 $-80^\circ C$ 超低温冰箱保存, 备用。

1.2.2 火龙果理化特性的测定 采用分级法测定果实腐烂指数 (decay index, DI), 依照果实腐烂面积分为 4 级, 0 级: 果实表面无腐烂现象; 1 级:

果实表面腐烂面积小于 1/4; 2 级: 果实表面腐烂面积为 1/4~1/2; 3 级: 果实表面腐烂面积大于 1/2。腐烂指数= $\sum(\text{腐烂级别} \times \text{该级别果实数}) / (\text{最高级别} \times \text{总果实数})$ 。呼吸速率 (respiratory rate, RR) 和乙烯释放速率 (ethylene release rate, ERR) 测定参照 XIE 等^[16]的方法。相对电导率 (relative conductivity, RC) 测定参照曹建康等^[17]的方法。脂氧合酶 (lipoxygenase, LOX) 活力测定参照邵琪等^[18]的方法。

1.2.3 火龙果营养成分的测定 总可溶性固形物 (total soluble solid, TSS) 含量采用 PAL-BX 手持型糖酸一体机测定, 每个重复随机取 4 个果实, 去皮, 果肉切碎并混匀, 4000 r/min 离心 10 min, 取少量上清液于糖酸一体机测定其 TSS 含量, 重复测定 3 次, 结果用 °Brix 表示。抗坏血酸 (ascorbic acid, AsA) 含量测定参照 NUNCIO-JÁUREGUI 等^[19]的方法。

1.2.4 火龙果活性氧代谢的测定 过氧化氢 (hydrogen peroxide, H₂O₂) 含量和过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活力测定参照 SHADMANI 等^[20]的方法; 采用南京建成生物工程研究所 SOD 试剂盒测定超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活力。

1.2.5 火龙果防御相关酶活力的测定 苯丙氨酸解氨酶 (phenylalanine ammonialyase, PAL) 活力测定参照 YU 等^[21]的方法; 过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活力测定参照 LI 等^[22]的方法; 多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 活力测定参照 ZHANG 等^[23]的方法; β -1,3-葡聚糖酶 (β -1,3-glucanase, GLU)、几丁质酶 (chitinase, CHI) 活力测定参照 PAN 等^[24]的方法。

1.3 数据处理

每组试验设 3 个重复, 使用 Excel 2016 软件整理数据, 结果以平均值 \pm 标准差表示。采用 GraphPad Prism 9.0 软件制图, 采用 RStudio 软件进行皮尔逊相关性分析, 并生成相关性矩阵, 采用 IBM SPSS 25 软件进行单因素方差分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 采前喷施油茶饼粕提取液对火龙果理化特性的影响

不同浓度油茶饼粕提取液处理火龙果后, 贮藏至 21 d 时开始腐烂, 处理组果实腐烂指数均低于 CK (图 1A)。油茶饼粕提取液处理火龙果后,

采后贮藏期间火龙果果实呼吸速率呈下降趋势, 除 0.25% 浓度处理果实的乙烯释放速率呈先增后降外, 其他均呈持续上升趋势, 且贮藏 21 d 时, 与 CK 相比, 处理组均显著抑制火龙果果实的呼吸速率和乙烯释放速率 ($P < 0.05$, 图 1B~图 1C)。油茶饼粕提取液处理火龙果后, 火龙果果皮的相对电导率均呈先升后降趋势, 与 CK 相比, 油茶饼粕提取液可有效抑制相对电导率的增加 (图 1D)。火龙果果实的脂氧合酶 (LOX) 活力均呈先降后升趋势, 贮藏 7 d 和 14 d 时, 与 CK 相比, 1.00% 油茶饼粕提取液可有效抑制 LOX 活力升高 (图 1E)。

2.2 采前喷施油茶饼粕提取液对火龙果营养成分的影响

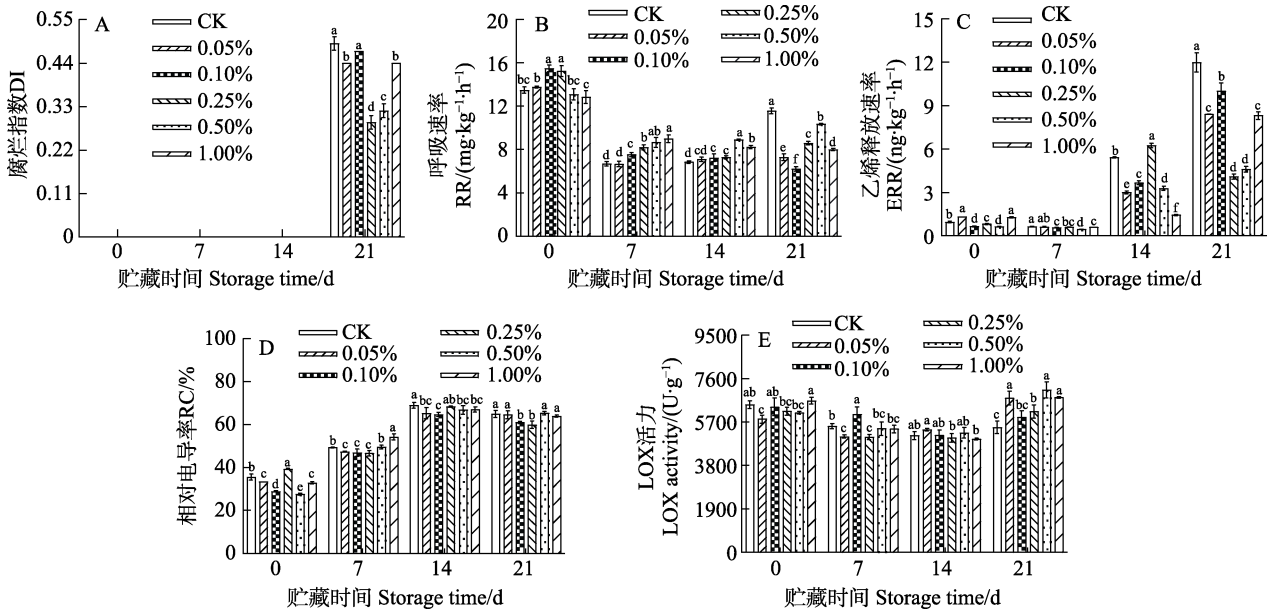
油茶饼粕提取液处理能有效维持火龙果果实总可溶性固形物 (TSS) 含量, 且采收贮藏 21 d 时均显著高于 CK ($P < 0.05$); 贮藏期间, 火龙果果实抗坏血酸 (AsA) 含量呈下降趋势, 其中 1.00% 油茶饼粕提取液处理能有效维持果实 AsA 含量 (图 2)。

2.3 采前喷施油茶饼粕提取液对火龙果活性氧代谢的影响

油茶饼粕提取液处理可显著提高火龙果果实采收时 H₂O₂ 含量 ($P < 0.05$), 但随着贮藏时间的延长, 尤其是贮藏末期 CK 的 H₂O₂ 含量显著高于处理组 ($P < 0.05$, 图 3A)。贮藏期间, 火龙果果实过氧化氢酶 (CAT) 活力呈下降趋势, 贮藏前 14 d, 0.10% 油茶饼粕提取液处理组火龙果果实的 CAT 活力均显著高于 CK ($P < 0.05$); 贮藏 21 d 时处理组果实 CAT 活力均显著低于 CK ($P < 0.05$), 可能是由于果实体内的 H₂O₂ 浓度的增加激活 CAT 活力 (图 3B)。油茶饼粕提取液处理后, 贮藏期间火龙果果实超氧化物歧化酶 (SOD) 活力呈先升后降趋势, 且 0.05% 油茶饼粕提取液处理能有效维持果实 SOD 活力 (图 3C)。

2.4 采前喷施油茶饼粕提取液对火龙果防御相关酶活力的影响

0.10% 和 0.50% 油茶饼粕提取液处理能显著提高火龙果果实采收时苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活力, 0.05%、0.25%、1.00% 油茶饼粕提取液处理的果实贮藏期间 PAL 活力逐渐上升, 贮藏 21 d 时处理组 PAL 活力均显著高于 CK ($P < 0.05$, 图 4A)。贮藏期间, 火龙果果实过氧化物酶 (POD)

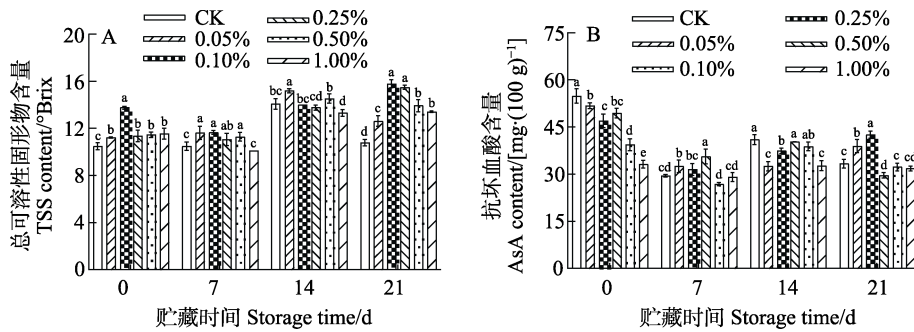


不同小写字母表示相同时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters represent significant difference between different treatments at the same time ($P < 0.05$).

图 1 采前油茶饼粕提取液处理对火龙果理化特性的影响

Fig. 1 Effects of preharvest treatment of *C. oleifera* cake extract on physicochemical properties of pitaya

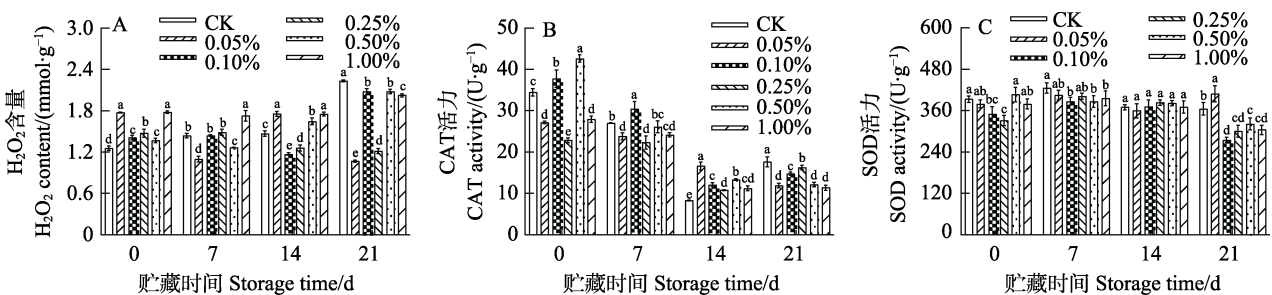


不同小写字母表示相同时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters represent significant difference between different treatments at the same time ($P < 0.05$).

图 2 采前油茶饼粕提取液处理对火龙果营养成分的影响

Fig. 2 Effect of preharvest treatment of *C. oleifera* cake extract on the nutrition contents of pitaya



不同小写字母表示相同时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters represent significant difference between different treatments at the same time ($P < 0.05$).

图 3 采前油茶饼粕提取液处理对火龙果活性氧代谢的影响

Fig. 3 Effects of preharvest treatment of *C. oleifera* cake extract on reactive oxygen species metabolism of pitaya

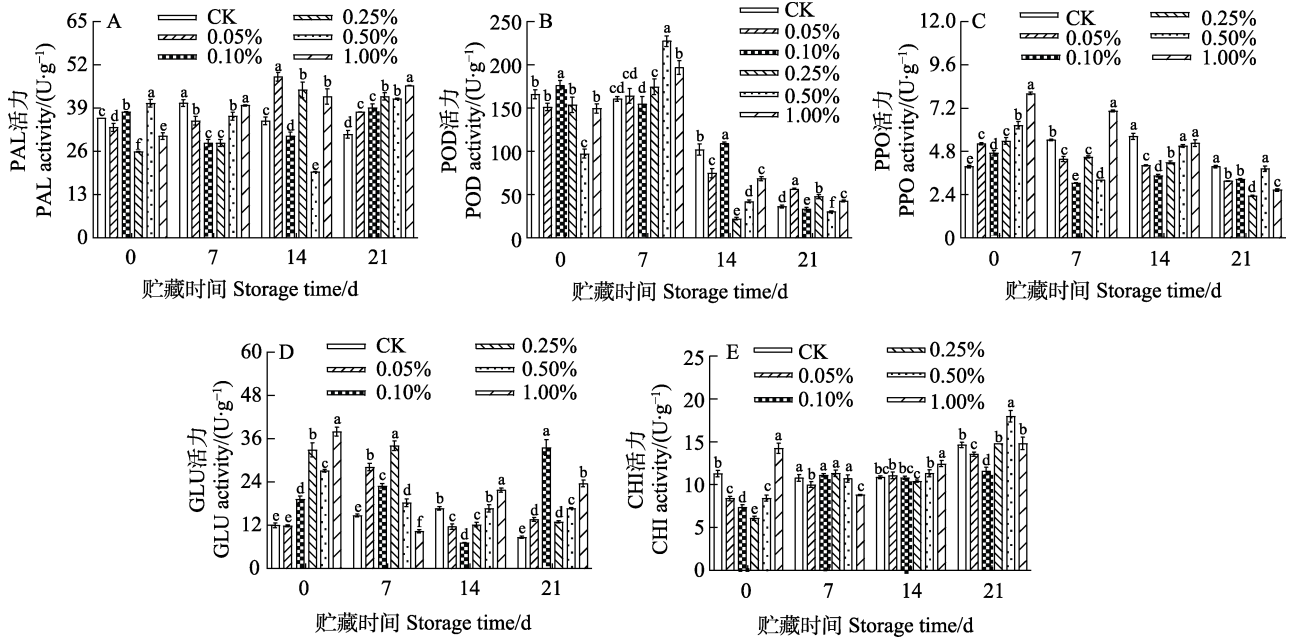
活力呈先升后降趋势，贮藏 21 d 时，0.05%、0.25%、1.00%处理组的 POD 活力显著高于 CK ($P < 0.05$, 图 4B)。油茶饼粕提取液处理能显著

提高火龙果果实采收时 (0 d) 多酚氧化酶 (PPO) 活力 ($P < 0.05$, 图 4C)。与 CK 相比，油茶饼粕提取液处理能显著提高火龙果果实采收后的 β -1,3-

葡聚糖酶 (GLU) 活力 ($P<0.05$), 并能有效延缓贮藏期间 GLU 活力的下降 (图 4D)。CK 和 1.00% 油茶饼粕提取液处理的火龙果果实几丁质酶 (CHI) 活力呈先降后升趋势, 其余处理组则呈持续上升趋势, 说明油茶饼粕提取液可有效维持或提高火龙果 CHI 活力, 从而增强果实抗病性 (图 4E)。

2.5 不同指标间的相关性分析

如表 1 所示, 腐烂指数 (DI) 与乙烯释放速率 (ERR)、相对电导率 (RC)、 H_2O_2 含量、脂氧合酶 (LOX) 和几丁质酶 (CHI) 活力呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与总可溶性固形物 (TSS) 含量和苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活力呈显著正相关



不同小写字母表示相同时间不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters represent significant difference between different treatments at the same time ($P<0.05$).

图 4 采前油茶饼粕提取液处理对火龙果防御酶活力的影响

Fig. 4 Effects of preharvest treatment of *C. oleifera* cake extract on defense-related enzymes activity of pitaya

表 1 不同指标间相关性分析

Tab. 1 Correlation analysis among indicators

指标 Index	DI	RR	ERR	RC	TSS	H_2O_2	ASA	LOX	SOD	CAT	PAL	PPO	POD	CHI	GLU
DI	1														
RR	-0.174	1													
ERR	0.857**	-0.297*	1												
RC	0.427**	-0.721**	0.632**	1											
TSS	0.296*	-0.358**	0.413**	0.548**	1										
H_2O_2	0.458**	0.104	0.432**	0.215	0.109	1									
ASA	-0.145	0.574**	-0.036	-0.405**	-0.024	-0.112	1								
LOX	0.442**	0.429**	0.129	-0.300*	0.010	0.177	0.183	1							
SOD	-0.538**	-0.031	-0.445**	-0.258*	-0.609**	-0.460**	-0.061	-0.325**	1						
CAT	-0.422**	0.611**	-0.621**	-0.922**	-0.570**	-0.226	0.242*	0.216	0.353**	1					
PAL	0.242*	-0.264*	0.181	0.233*	0.286*	0.081	-0.259*	0.140	-0.209	-0.139	1				
PPO	-0.526**	0.380**	-0.441**	-0.414**	-0.410**	0.120	0.097	-0.128	0.384**	0.338**	-0.212	1			
POD	-0.633**	0.291*	-0.768**	-0.674**	-0.664**	-0.372**	0.057	-0.119	0.458**	0.661**	-0.280*	0.349**	1		
CHI	0.638**	-0.319**	0.520**	0.515**	0.275*	0.386**	-0.463**	0.347**	-0.301*	-0.494**	0.228	-0.351**	-0.560**	1	
GLU	-0.052	0.137	-0.200	-0.399**	-0.073	0.112	0.023	0.163	-0.156	0.233*	-0.242*	0.271*	0.178	-0.097	1

注: *表示显著相关 ($P<0.05$); **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

($P < 0.05$), 与超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、多酚氧化酶 (PPO) 及过氧化物酶 (POD) 活力呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。相对电导率与乙烯释放速率、TSS 含量和 CHI 活力呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 PAL 活力呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与呼吸速率 (RR)、抗坏血酸 (AsA) 含量、CAT、PPO、POD 和 β -1,3-葡聚糖酶 (GLU) 活力呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 LOX 和 SOD 活力呈显著负相关 ($P < 0.05$)。H₂O₂ 含量与乙烯释放速率和 CHI 活力呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与呼吸速率、SOD 活力、POD 活力呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

2.6 火龙果抗病性评价因素主成分分析

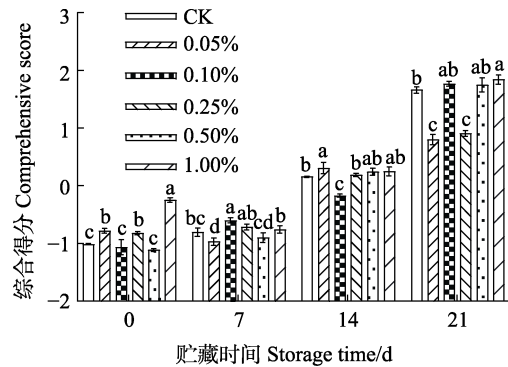
由表 2 可知, 前 5 个因子的累计方差贡献率达 79.90%, 保留了 15 项指标的大部分信息。将所提取的因子进行旋转处理, 由 5 个因子的载荷值可知, 因子 1 的方差贡献高达 38.64%, 代表相对电导率、POD 活力、乙烯释放速率、CAT 活力和腐烂指数; 因子 2 主要代表 LOX 活力和呼吸速率; 因子 3 主要代表 CHI 活力和 AsA 含量; 因子 4 主要代表 PPO 活力、H₂O₂ 含量和 PAL 活力; 因子 5 主要代表 TSS 含量、SOD 和 GLU 活力。

表 2 主成分因子载荷矩阵
Tab. 2 Component load matrix after principal component analysis

指标 Index	主成分因子 Principal component factor				
	1	2	3	4	5
RC	0.353	-0.281	-0.030	0.133	0.109
POD	-0.350	-0.088	0.137	-0.123	-0.088
ERR	0.346	0.130	-0.066	0.077	0.307
CAT	-0.339	0.195	0.090	-0.256	-0.051
DI	0.320	0.279	0.121	-0.131	0.168
CHI	0.296	0.091	0.395	-0.131	0.092
TSS	0.279	-0.003	-0.365	0.101	-0.434
PPO	-0.242	0.016	0.247	0.433	0.107
SOD	-0.238	-0.330	0.168	-0.123	0.384
LOX	0.036	0.503	0.117	-0.361	-0.033
RR	-0.230	0.439	-0.127	0.016	0.213
H ₂ O ₂	0.168	0.290	0.319	0.393	0.161
ASA	-0.134	0.283	-0.613	0.106	0.204
PAL	0.157	-0.029	0.087	-0.462	-0.270
GLU	-0.103	0.229	0.133	0.371	-0.560
特征值	5.795	2.468	1.388	1.267	1.066
贡献率/%	38.636	16.452	9.254	8.450	7.110
累计方差贡献率/%	38.636	55.088	64.342	72.792	79.901

2.7 采前喷施油茶饼粕提取液对火龙果采后综合评分的影响

综合评分结果显示, 1.00%油茶饼粕提取液处理火龙果果实贮藏期间综合评分均高于 CK (图 5), 说明 1.00%油茶饼粕提取液处理效果较好。



不同小写字母表示相同时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters represent significant difference between different treatments at the same time ($P < 0.05$).

图 5 采前油茶饼粕提取液处理对火龙果采后综合评分的影响

Fig. 5 Effects of preharvest treatment of *C. oleifera* cake extract on comprehensive score of pitaya

3 讨论

火龙果果实为呼吸跃变型水果, 而高强度的呼吸作用会消耗果实的营养物质^[25]。本研究中, 与 CK 相比, 贮藏后期不同浓度油茶饼粕提取液处理能显著抑制火龙果果实呼吸速率和乙烯释放速率, 有效提高火龙果果实 TSS 含量, 维持果实 AsA 含量稳定。细胞膜通透性是衡量膜完整性的重要指标, 相对电导率是衡量细胞膜损坏程度的重要指标^[13]。本研究发现, 与 CK 相比, 贮藏后期不同浓度油茶饼粕提取液均能有效抑制火龙果果实相对电导率的增加, 并有效抑制其腐烂指数上升。说明油茶饼粕提取液可有效减轻火龙果果实细胞膜的损伤程度, 保持膜结构和功能的完整性, 从而减轻品质劣变的程度。

活性氧 (ROS) 代谢是果蔬采后重要的生理代谢活动, 低水平的 ROS 在细胞中发挥信号转导作用, 而高水平的 ROS 则会导致细胞代谢紊乱^[26], 其水平与 ROS 相关清除酶的活性有关^[27]。本研究中, 油茶饼粕提取液可有效维持或提高火龙果果实的 SOD 活力, 从而抑制 H₂O₂ 的积累。说明茶饼粕提取液可有效促进火龙果果实 H₂O₂ 代谢, 清除果实体内代谢过程中过多的 ROS 自由基, 从而提高果实的抗氧化能力。

已有研究显示, 油茶饼粕粗提物及其活性成分对食源性致病菌以及植物病原菌活性具有较好的抑制作用, 对果蔬具有良好的保鲜效果^[9-14]。PAL、POD、PPO、GLU 和 CHI 是植物抗病性相关的重要防御酶, 在保护植物免受氧化损伤、病原菌侵害中起着重要作用, 防御酶活力的增强可提高采后果蔬的抗病性^[11, 28]。PAL 是植物苯丙素途径中的关键酶, 在植物正常生长发育和抵御病原菌侵害过程中发挥重要作用, 并能延长采后果蔬的贮藏期^[29-30]。PPO 和 POD 参与果蔬活性氧代谢, 同时能催化形成木质素及其他酚类氧化产物有毒醌类等抗菌物质, 抵御病菌侵入, 从而保护植物体免受病菌侵害^[23, 31]。GLU 和 CHI 是两类重要的植物病程相关蛋白, 被认为是参与植物系统抗性的标记酶, 植物被病原体感染时, 会产生一些致病相关蛋白来抵抗病原体进一步的感染^[23]。GLU 可以降解致病性菌丝细胞壁上的 β -1,3-葡聚糖, 而 CHI 能够降解大多数病原体的细胞壁, 具有直接的抑菌作用^[24]。本研究结果表明, 与 CK 相比, 采前喷施油茶饼粕提取液可有效提高或维持火龙果采后贮藏期间果皮的 PAL、GLU 和 CHI 活力, 增强采后火龙果果实对病原菌的普遍抗性, 从而抑制果实腐烂指数上升。

相关性分析结果表明, 火龙果果实腐烂与 ROS 的积累、膜脂过氧化密切相关, 减轻火龙果果实氧化应激、维持细胞膜完整性是提高抗病性的基础。结果表明, 喷施油茶饼粕提取液可能在火龙果果实的抗氧化平衡中起着重要作用, 可维持细胞氧化还原稳态, 从而调节 ROS 对果实的毒性, 降低膜脂过氧化程度, 并提高果实的抗性, 缓解病原菌对生物膜的伤害, 减轻贮藏期间火龙果果实的腐烂。以上结果表明, 油茶饼粕提取液可激活 ROS 清除酶和抗病性相关酶活力, 进而降低 ROS 的积累, 提高火龙果抗病能力, 这可能是改善园艺作物贮藏期氧化和防御应激的关键。同时, 本研究通过主成分分析对所测指标进行有效降维, 并对不同处理的果实抗病性进行综合评价, 综合评分最高的为 1.00% 油茶饼粕提取液处理组, 说明其作用效果最佳。

综上所述, 采前喷施油茶饼粕提取液处理可通过提高火龙果果实 SOD 等 ROS 清除酶的活力, 降低 ROS 的积累, 减轻膜脂过氧化程度。同时, 提高果实 PAL、GLU 及 CHI 等防御相关酶活力, 增强火龙果果实的抗氧化和抗病性能力, 进而减

轻果实腐烂。这些结果说明油茶饼粕提取液处理对减轻火龙果果实腐烂与调控 ROS 代谢、提高抗氧化能力及抗病性密切相关。

参考文献

- [1] XU Y M, CAI Z J, BA L J, QIN Y H, SU X G, LUO D L, SHAN W, KUANG J F, LU W J, LI L L, CHEN J Y, ZHAO Y T. Maintenance of postharvest quality and reactive oxygen species homeostasis of pitaya fruit by essential oil *p*-anisaldehyde treatment[J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2434-2434.
- [2] 叶霞, 刘潇, 高敏, 杨秀群, 赵治兵, 谢国芳. 喷施有机酸和叶面肥对采收期火龙果果实品质的影响[J]. *南方农业学报*, 2022, 53(5):1296-1304.
YE X, LIU X, GAO M, YANG X Q, ZHAO Z B, XIE G F. Effects of spraying organic acid and foliar fertilizer on fruit quality of pitaya at harvest[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2022, 53(5): 1296-1304. (in Chinese)
- [3] 张绿萍, 穆波, 金吉林, 鲍远放, 王宇, 王彬, 弓德强, 黄鑫. 采前喷施茉莉酸甲酯对火龙果采后品质和生理特性的影响[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(7): 1806-1815.
ZHANG L P, MU B, JIN J L, BAO Y F, WANG Y, WANG B, GONG D Q, HUANG X. Effects of pre-harvest application of methyl jasmonate on quality and physiological characteristics of pitaya[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(7): 1806-1815. (in Chinese)
- [4] 刘瑞玲, 潘旭婕, 吴伟杰, 韩延超, 陈杭君, 郜海燕. 红肉火龙果采后品质劣变及苹果酸代谢研究[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(5): 300-308.
LIU R L, PAN X J, WU W J, HAN Y C, CHEN H J, GAO H Y. Studies on quality deterioration and organic acid metabolism of red pitaya during storage[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(5): 300-308. (in Chinese)
- [5] SONG H Z, CHU Q, XU D D, XU Y, ZHENG X D. Purified betacyanins from *Hylocereus undatus* peel ameliorate obesity and insulin resistance in high-fat-diet-fed mice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(1): 236-44.
- [6] SONG H Z, CHU Q, YAN F J, YANG Y Y, HAN W, ZHENG X D. Red pitaya betacyanins protects from diet-induced obesity, liver steatosis and insulin resistance in association with modulation of gut microbiota in mice[J]. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 2016, 31(8): 1462-9.
- [7] 杜晓静, 白新鹏, 李卓婷, 刘品, 曹君, 姜泽放, 邓志勇, 高晓东. 辐照对火龙果果浆杀菌效果及品质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(23): 106-112.
DU X J, BAI X P, LI Z T, LIU P, CAO J, JIANG Z F, DENG Z Y, GAO X D. Effect of irradiation treatment on

- microbial inactivation and quality of pitaya pulp[J]. Food Science, 2018, 39(23): 106-112. (in Chinese)
- [8] 孔庆博, 姜惠, 郭春雨, 陈涛, 冯士令, 丁春邦, 周莉君. 油茶主要化学成分及药理活性研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(4): 194-202.
KONG Q B, JIANG H, GUO C Y, CHEN T, FENG S L, DING C B, ZHOU L J. Research progress on main chemical constituents and pharmacological activities of *Camellia oleifera*[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2022, 37(4): 194-202. (in Chinese)
- [9] 王承瑞, 刘思思, 易有金, 李昌珠, 肖志红, 刘汝宽. 油茶籽饼粕中活性成分对果蔬保鲜作用的研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 121-126.
WANG C R, LIU S S, YI Y J, LI C Z, XIAO Z H, LIU R K. Advance in the effect of active ingredients of oil-tea camellia seed cake and meal on the preservation of fruits and vegetables[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(10): 121-126. (in Chinese)
- [10] ZHANG D D, NIE S P, XIE M Y, HU J L. Antioxidant and antibacterial capabilities of phenolic compounds and organic acids from *Camellia oleifera* cake[J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29(1): 17-25.
- [11] 黄继光, 陈秀贤, 徐汉虹, 王浩. 茶皂素对 12 种植物病原菌的抑菌活性[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(2): 50-53.
HUANG J G, CHEN X X, XU H H, WANG H. Studies on inhibitory activity of tea saponin against twelve plant pathogenic fungi[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(2): 50-53. (in Chinese)
- [12] 肖新生, 胡绍文, 周洁. 油茶饼提取物对圣女果保鲜作用的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(11): 141-143.
XIAO X S, HU S W, ZHOU J. Study on cherry tomatoes preservation by use of defatted cake of oil-tea camellia extract[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(11): 141-143. (in Chinese)
- [13] ZHANG Z K, HU M J, YUN Z, WANG J B, FENG G, GAO Z Y, SHI X Q, JIANG Y M. Effect of tea seed oil treatment on browning of litchi fruit in relation to energy status and metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 132: 97-104
- [14] 谢国芳, 谢玲, 范宽秀, 刘永玲, 赵治兵. 生长期喷施抑菌剂对‘紫红龙’火龙果采后品质的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(7): 663-670.
XIE G F, XIE L, FAN K X, LIU Y L, ZHAO Z B. Effects of spraying bacteriostatic agents on postharvest quality of ‘Zihonglong’ pitaya[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2019, 34(7): 663-670. (in Chinese)
- [15] 谢国芳, 陈欢欢, 杨飞艳, 谢玲, 赵治兵, 刘永玲. 油茶饼粕提取条件优化及其在火龙果贮藏保鲜中的应用[J]. 热带作物学报, 2019, 40(7): 1399-1405.
XIE G F, CHEN H H, YANG F Y, XIE L, ZHAO Z B, LIU Y L. Extraction conditions optimization of *Camellia oleifera* cake and its application in the storage of pitaya fruits[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(7): 1399-1405. (in Chinese)
- [16] XIE G F, TAN S M, YU L. Effect of cultivar on quality of the common bean during storage[J]. Intention Agricultural Engineering Journal, 2015, 24(2): 69-78.
- [17] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 152-156.
CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 152-156. (in Chinese)
- [18] 邵琪, 解群杰, 刘贺娟, 齐红岩. 接种枯萎病菌对甜瓜脂氧合酶活性及基因表达的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(4): 479-486.
SHAO Q, XIE Q J, LIU H J, QI H Y. Effects of LOX activity and gene expression of *Cucumis melo* var. *makuwa* inoculated by *Fusarium oxysporum*[J]. Journal of Plant Physiology, 2016, 52(4): 479-486. (in Chinese)
- [19] NUNCIO-JÁUREGUI N, MUNERA-PICAZO S, CALÍN-SÁNCHEZ Á, WOJDYŁO A, HERNÁNDEZ F, CARBONELL-BARRACHINA A Á. Bioactive compound composition of pomegranate fruits removed during thinning[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2015, 37: 11-19.
- [20] SHADMANI N, AHMAD S H, SAARI N, DING P, TAJDIN N E. Chilling injury incidence and antioxidant enzyme activities of *Carica papaya* L. ‘Frangi’ as influenced by postharvest hot water treatment and storage temperature[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 99: 114-119.
- [21] YU C, ZENG L, SHENG K, CHEN F, ZHOU T, ZHENG X, YU T. γ -Aminobutyric acid induces resistance against *Penicillium expansum* by priming of defence responses in pear fruit[J]. Food Chemistry, 2014, 159: 29-37
- [22] LI H, SUO J G, HAN Y, LIANG C Q, JIN M J, ZHANG Z K, RAO J P. The effect of 1-methylcyclopropene, methyl jasmonate and methyl salicylate on lignin accumulation and gene expression in postharvest ‘Xuxiang’ kiwifruit during cold storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 124: 107-118
- [23] ZHANG M L, XU L Y, ZHANG L Y, GUO Y H, QI X, HE L. Effects of quercetin on postharvest blue mold control in kiwifruit[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 228: 18-25.
- [24] PAN L Y, ZHAO X Y, CHEN M, FU Y Q, XIANG M L, CHEN J Y. Effect of exogenous methyl jasmonate treatment

- on disease resistance of postharvest kiwifruit[J]. Food Chemistry, 2019, 305(3): 125483.
- [25] 杨倩, 张李香, 李丽, 张相敏, 周国辉, 刘涛. 磷化氢熏蒸南洋臀纹粉蚧的效果及对火龙果品质的影响[J]. 植物保护, 2022, 48(1): 52-60.
- YANG Q, ZHANG L X, LI L, ZHANG X M, ZHOU G H, LIU T. Effects of phosphine fumigation on the survival of *Planococcus lilacius* and postharvest quality of imported pitaya fruits[J]. Plant Protection, 2022, 48(1): 52-60. (in Chinese)
- [26] XU C, ZHANG X Y, LIANG J, FU Y J, WANG J, JIANG M, PAN L. Cell wall and reactive oxygen metabolism responses of strawberry fruit during storage to low voltage electrostatic field treatment[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192: 112017.
- [27] LIN Y X, LIN Y F, LIN M S, FAN Z Q, LIN H T. Influence of hydrogen peroxide on the ROS metabolism and its relationship to pulp breakdown of fresh longan during storage[J]. Food Chemistry: X, 2021, 12: 100159.
- [28] 吴苏喜, 吴美芳, 谢妍祎, 周青青, 谭传波, 张谦益. 油茶蒲不同溶剂粗提液的总黄酮提取率与抗氧化活性比较[J]. 中国油脂, 2019, 44(6): 116-119, 123.
- WU S X, WU M F, XIE Y Y, ZHOU Q Q, TAN C B, ZHANG Q Y. Total flavonoids extraction rate and antioxidant activities of crude extracts from *Camellia oleifera* fruit hull by different solvents[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(6): 116-119, 123. (in Chinese)
- [29] WEI X B, GUAN W L, YANG Y J, SHAO L L, MAO L C. Methyl jasmonate promotes wound healing by activation of phenylpropanoid metabolism in harvested kiwifruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 175: 111472.
- [30] ZHU J, LI C Y, SUN L, GE Y H. Ethephon accelerates wound healing in ginger rhizomes by modulating antioxidant enzyme activities and secondary metabolite production[J]. Food Science, 2022, 43(5): 244-251.
- [31] 盘柳依, 赵显阳, 陈明, 付永琦, 向妙莲, 陈金印. 茉莉酸甲酯调控防御酶活性诱导猕猴桃果实抗采后软腐病[J]. 植物保护, 2019, 45(1): 75-80.
- PAN L Y, ZHAO X Y, CHEN M, FU Y Q, XIANG M L, CHEN J Y. Regulation of defense enzymes by methyl jasmonate to induce the resistance of kiwifruits against soft rot[J]. Plant Protection, 2019, 45(1): 75-80. (in Chinese)