

硝普钠处理对采后红毛丹褐变及活性氧代谢的影响

沈思涵^{1,2}, 贯雨晴^{1,2}, 孙涵嘉², 郑中兵^{2*}, 陈 萍^{1,2*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 海南大学南繁学院(三亚南繁研究院), 海南三亚 572025

摘 要: 红毛丹果实口感香嫩多汁, 但不耐储藏, 采后 2~3 d 易发生褐变, 对红毛丹的市场流通产生了限制。因此, 绿色、安全、便捷的采后保鲜技术对红毛丹产业发展至关重要。本研究旨在探究外源硝普钠(SNP)处理对采后红毛丹果皮褐变及其活性氧代谢的影响, 为采后红毛丹褐变问题提供新思路。以保研7号红毛丹品种为材料, 采用 200 $\mu\text{mol/L}$ 的 SNP 浸泡处理, 以蒸馏水处理为对照, 测定处理后红毛丹贮藏过程中的失重率、褐变指数及抗氧化相关酶活性。结果表明: SNP 处理可以有效抑制采后红毛丹果皮褐变指数的上升, 较好地维持果皮颜色; SNP 处理的红毛丹果皮与对照组相比, 活性氧(ROS)清除酶[超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)]活性显著提高, 使得果皮中活性氧自由基清除能力提升; 多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)活性均低于对照, 有效抑制酶促褐变发生; 此外, 与对照组相比, SNP 处理还可以显著抑制红毛丹果皮的膜脂降解相关酶活性[脂氧合酶(LOX)]的上升, 维持果皮细胞结构完整性, 同时褐变相关基因 *NIWRKY23*、*NIWRKY57* 的表达量显著上调。由此可见, SNP 处理可增强红毛丹果皮抗氧化能力, 减轻活性氧的氧化破坏, 延缓果皮褐变的发生。该研究结果可为 SNP 在采后红毛丹的应用提供理论依据及实践基础。

关键词: 红毛丹; 硝普钠; 果皮褐变; 活性氧代谢

中图分类号: S667.9 文献标志码: A

Effects of Sodium Nitroprusside Treatment on Browning and Active Oxygen Metabolism of Postharvest Rambutan

SHEN Sihan^{1,2}, GUAN Yuqing^{1,2}, SUN Hanjia², ZHENG Zhongbing^{2*}, CHEN Ping^{1,2*}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. School of Breeding and Multiplication (Sanya Institute of Breeding and Multiplication), Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China

Abstract: The fruit of rambutan has a delicate and juicy taste, but it is not resistant to storage. It is prone to browning 2–3 days after harvest, which limits the market circulation of rambutan. Therefore, green, safe and convenient post-harvest preservation technology is very important for the development of the rambutan industry. The purpose of the study was to explore the effects of exogenous sodium nitroprusside (SNP) treatment on the browning of postharvest rambutan peel and its active oxygen metabolism, and to provide new ideas for the browning of postharvest rambutan. The Baoyan 7 rambutan was soaked with 200 $\mu\text{mol/L}$ SNP, and the control was treated with distilled water. The weight loss rate, browning index and antioxidant enzyme activity of rambutan during storage were measured. The results showed that SNP treatment could effectively inhibit the increase of browning index of postharvest rambutan peel and maintain the peel color. Compared with the control group, the activity of reactive oxygen species (ROS) scavenging enzymes [superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX)] was significantly increased in the peel of rambutan treated with SNP, which improved the scavenging ability of reactive oxygen species radicals in the peel. The activities of polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) were lower than those of the control, which effectively inhibited the occurrence of enzymatic browning. In addition, compared with the control group, SNP treatment can also significantly inhibit the increase of membrane lipid degradation-related enzyme activity (lipoxygenase,

收稿日期 2025-09-02; 接受日期 2025-10-18

基金项目 海南大学南繁学院创新创业训练项目 (No. NFCX2024-28)。

作者简介 沈思涵 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果树学。*通信作者 (Corresponding author): 郑中兵 (ZHENG Zhongbing), E-mail: zhengzhongbing9807@163.com; 陈 萍 (CHEN Ping), E-mail: chenping199607@163.com。

LOX) and maintain the structural integrity of pericarp cells. At the same time, the expression levels of browning-related genes *NIWRKY23* and *NIWRKY57* was significantly up-regulated. This shows that SNP treatment can enhance the antioxidant capacity of the peel of rambutan, reduce the oxidative damage of reactive oxygen species (ROS), and delay the occurrence of peel browning. The results of this study can provide theoretical basis and practical basis for the application of SNP in postharvest rambutan.

Keywords: rambutan; sodium nitroprusside; peel browning; active oxygen metabolism

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.12.020

红毛丹 (*Nephelium lappaceum* L.) 果肉营养丰富, 肉厚汁多, 风味独特, 具有清热解毒、提高免疫力的作用^[1]。保研 7 号红毛丹品种, 年产量较高, 具有较高的稳产性^[2]。红毛丹需完熟后采摘, 运输过程中其柔刺状突起的颜色逐渐发生变化, 由基底部向果皮延伸直至腐烂, 造成严重的经济损失^[3-4]。

酶促褐变是由促氧化酶系列[多酚氧化酶 (PPO)、过氧化物酶 (POD) 等]催化酚类物质生成醌类化合物进一步发生氧化反应, 最终聚合形成黑色素的反应过程, 影响酶促褐变形成的条件有酚类底物、酶和氧气^[5]。研究认为红毛丹采后果皮褐变是由于 2 种主要的酚类底物 (表儿茶素和原花青素) 在 PPO 催化下形成褐变产物而导致^[6]。LIN 等^[7]认为活性氧 (ROS) 的产生可能破坏细胞膜的结构, 造成龙眼果皮细胞分隔化的丧失, 使位于质体和其他细胞器的 PPO 和 POD 与液泡中的酚类底物接触, 形成褐色聚合物。

ROS 在植物中持续生成, 既是代谢过程的副产物, 也是胁迫响应的信号组成部分。然而, 过量 ROS 会对植物产生危害^[8]。为减轻采后贮藏过程中 ROS 对组织产生的不良影响, 果蔬细胞通常会激活内源性抗氧化防御系统, 包括抗氧化酶以及非酶抗氧化物质^[9]。这些抗氧化酶和物质能够清除或中和 ROS, 维持果蔬组织的氧化抗氧化平衡。

采用一氧化氮 (NO) 对芒果果实进行处理, 能够有效减轻膜脂过氧化, 从而延缓其衰老^[10]。大量的研究已经证明用硝普钠 (SNP) 作为 NO 的供体, 对延缓园艺产品衰老具有显著优势。SNP 在较低浓度条件下, 表现出良好的保鲜效果, 且不会产生残留毒性, 同时还能降低成本^[11]。SNP 处理与间歇升温联合, 可通过抑制乙烯生成量维持果实品质, 预防桃果实贮藏期间冷害^[12]。SNP 溶液浸渍芒果果实, 可降低其呼吸强度, 有效维持果实硬度, 保持抗坏血酸及酚类物质含量^[13]。脐橙经 SNP 处理后, 其果皮和果肉中的脂质过氧化程度及过氧化氢浓度下降, 从而延长保鲜时间^[14]。

SNP 处理通过抑制细胞壁降解酶的活性, 有助于保持果实的品质^[15]。此外, SNP 溶液的应用能有效防止水果在低温环境下的冷害现象^[16], 并抑制褐变过程^[17], 减少超氧阴离子自由基和过氧化氢的积累^[18]。SNP 处理通过增强抗氧化酶活性提高苹果果实对链格孢菌的采后抗性^[19]。刘涛等^[20]研究发现 SNP 可以延缓樱桃果实采后的衰老, 有效延长樱桃果实的贮藏期。SNP 保鲜剂可减少香蕉可溶性蛋白和可溶性固形物的积累^[21]。李果采收前施用 SNP 溶液, 可有效维持果实中总抗氧化能力、黄酮类化合物含量及可滴定酸度, 进而提升其保鲜性能并改善贮藏期间的品质特性^[22]。

WRKY 家族目前已在越来越多物种中被鉴定。通过转录组分析发现 WRKY 与核桃^[23]、苹果^[24]、荔枝^[25]的褐变有关。WRKY 转录因子参与植物响应脱落酸 (ABA) 通路与非生物胁迫^[26]。ZHANG 等^[27]通过转录组数据分析发现 WRKY 转录因子是 ROS 代谢相关基因表达的重要诱导因子, 且与红毛丹果实褐变相关。

目前, 红毛丹栽培面积不断增加, 但其采后褐变问题严重影响经济价值。目前关于缓解采后红毛丹褐变及 WRKY 转录因子的研究鲜有报道。在红毛丹保鲜方法中, 崔志富等^[28]采用真空和 10 °C 低温结合处理, 显著延缓了红毛丹果皮褐变, 使红毛丹果实保鲜期延长。邓浩等^[29]研究表明, 压差预冷后的红毛丹果实贮藏品质比冷库预冷效果好。目前, 气调、低温等保鲜方法在红毛丹保鲜应用中虽取得了良好的效果, 但其设备投资和运营成本较高, 红毛丹的采后保鲜技术是红毛丹产业化发展的关键环节之一^[30]。有效的保鲜技术能延缓果实褐变发生, 本研究以保研 7 号红毛丹为材料, 通过测定贮藏期间红毛丹果皮的褐变指数、抗氧化相关酶等相关指标, 探究 SNP 处理对采后红毛丹果皮褐变及 ROS 代谢的影响, 为进一步控制新鲜红毛丹采后果皮褐变提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料

红毛丹采自海南省保亭黎族苗族自治县，品种为保研 7 号，挑选无机械损伤、无病虫害、成熟度相近的果实用于试验（设置 2 个处理，每处理 46 个果实）。将运回的果实浸泡在制备的次氯酸钠溶液（0.1 mL/L）中 30 s，随后用蒸馏水冲洗干净，晾干。本课题组前期用 3 个不同浓度 SNP 处理红毛丹，通过分析其褐变的生理生化及转录组数据发现，200 μmol/L SNP 处理组中的 WRKY 转录因子是 ROS 代谢通路相关基因表达的重要诱导因子^[18, 27]。因此，本试验采用 200 μmol/L SNP 溶液浸泡红毛丹果实 2 h（以蒸馏水作为对照），随后将其放在通风的室内风干，置于 25 ℃环境中贮存。贮藏期间（处理后第 1、2、3、4、5、6、7 天）对果实进行取样。测定每个取样日果实的失重率、褐变指数。将样品保存在-80 ℃用于后续试验。

1.2 方法

1.2.1 失重率测定 在贮藏前和每次取样结束时，用电子天平称量果实的质量，计算失重率，并以百分比表示。

1.2.2 褐变指数测定 褐变指数参考 SHAO 等^[31]的方法，并作适当修改。将果实根据褐变面积划分为 5 个水平：0，无果皮褐变；1，0<果皮褐变面积≤25%；2，25%<果皮褐变面积≤50%；3，50%<果皮褐变面积≤75%；4，75%<果皮褐变面积≤100%。褐变指数=Σ(褐变水平×水平水果数量)/(最高水平×每个处理的果实总数)。

1.2.3 抗氧化相关酶活性测定 抗氧化相关酶 PPO、POD、过氧化氢酶（CAT）、抗坏血酸过氧化物酶（APX）、超氧化物歧化酶（SOD）的活性测定参考曹建康等^[32]的方法，略有改动。（1）PPO 活性测定：在冰浴条件下研磨样品，收集上清液，低温保存，依次将试剂和酶提取液加入试管，使用分光光度计测 420 nm 波长处的吸光度变化。酶活性的单位为ΔOD₄₂₀/min·g。（2）POD 活性测定：上清液制备与 PPO 相同，在实验体系中首先加入愈创木酚溶液和酶提取物，随后快速混入 H₂O₂ 溶液以启动酶促反应。测定 470 nm 处 OD 值的变化值，酶活性的单位为ΔOD₄₇₀/min·g。（3）CAT 活性测定：将 H₂O₂ 溶液和酶提取液反应，测定波长 240 nm 处吸光度值，酶活性的单位为 0.01ΔOD₂₄₀/min·g。（4）APX 酶活性测定：称取样品，在冰浴条件下研磨匀浆后，制备上清液，

依次将反应缓冲液、酶提取液、H₂O₂ 溶液加入试管中，记录在 290 nm 处的吸光度值，单位为 0.01ΔOD₂₉₀/min·g。（5）SOD 活性测定：称取样品，在冰浴条件下研磨成匀浆，收集上清液，配制 2 支对照管，其中一支对照管放置于避光环境中，另一管则在 4000 lx 日光灯下进行 15 min 光照处理，随后置于无光照处以终止反应，测定 560 nm 处吸光度。（6）脂氧合酶（LOX）活性采用苏州格锐思生物科技有限公司试剂盒测定。

1.2.4 植物激素相关指标测定 脱落酸（ABA）和乙烯（ETH）含量使用酶联免疫分析试剂盒（酶免生物科技有限公司）进行测定。

1.2.5 褐变相关基因表达分析 通过对本课题组前期转录组数据分析获取的 2 个与红毛丹褐变相关的 WRKY 转录因子，分别命名为 NIWRKY23、NIWRKY57 基因，采用擎科多糖多酚植物总 RNA 提取试剂盒（TSP412）提取 RNA，具体参照说明书操作流程提取第 4 天处理组 and 对照组的果皮总 RNA。以擎科逆转录试剂盒 SynScript® III RT SuperMix for qPCR 进行逆转录扩增，将反转录 cDNA 产物 2 倍稀释后作为 qPCR 模板，以擎科 ArtiCanCEO SYBR qPCR Mix 进行扩增，测定 NIWRKY23、NIWRKY57 基因在对照组和处理组的表达水平。以 ACTIN 作为内参基因^[27]，引物信息见表 1。

表 1 本研究所用引物	
Tab. 1 Primers used in this study	
引物名称 Primer name	引物序列（5'-3'） Primer sequence (5'-3')
actin-F	GGCGATGAAGCTCAGTCTAAA
actin-R	TGCCAGATCCTTTCCATGTC
NIWRKY23-F	CCTACGAGGGTCAACACACC
NIWRKY23-R	GGCATTGTCCCCTGATTTGG
NIWRKY57-F	CCCCAGGAAACTCCCACTTC
NIWRKY57-R	TCCCCAAGCAACCCTTCATC

1.3 数据处理

本研究采用 Excel 软件进行数据预处理与统计，运用 SPSS Statistics 27 软件进行方差分析，使用 GraphPad Prism 8 软件制图。

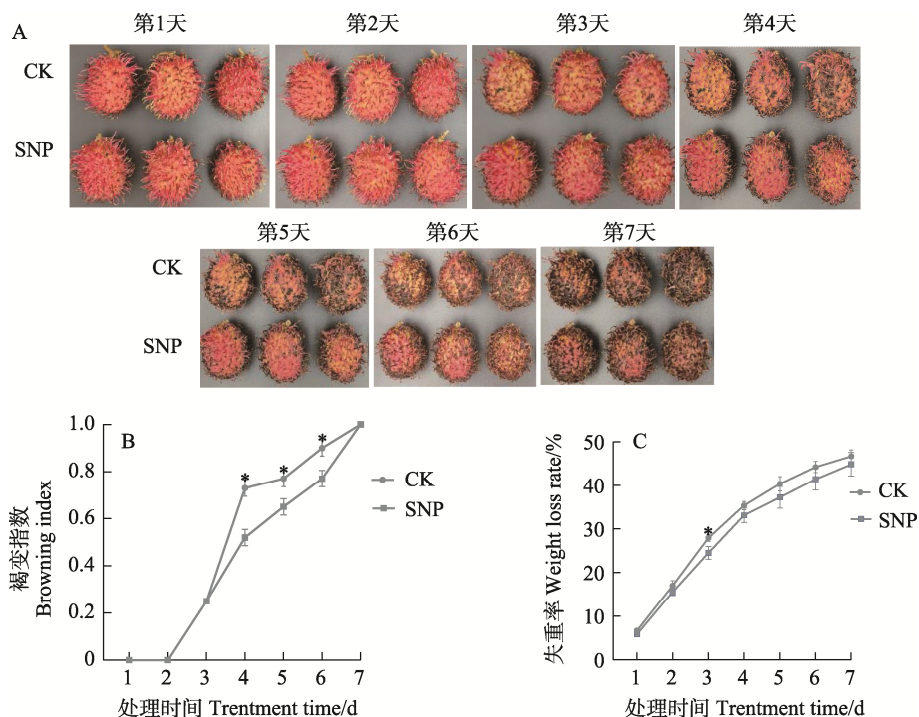
2 结果与分析

2.1 SNP 处理对红毛丹褐变的影响

随着储藏周期的推进，红毛丹果实表皮组织的褐化程度呈现持续上升趋势。与对照组相比，

SNP 处理的红毛丹褐变指数在第 4、5、6 天显著降低,第 7 天果皮均变为深褐色(图 1A、图 1B)。由图 1C 可知,红毛丹的失重率不断升高,整体趋势与褐变指数变化相似,随着果实中水分的持

续流失,果皮组织的生理活性逐渐减弱,致其外观呈现褐变现象。SNP 处理的红毛丹失重率则低于对照组,第三天的失重率存在显著差异,表明 SNP 处理可以延缓红毛丹果皮的褐变。



A: 褐变图; B: 褐变指数; C: 失重率; *表示差异显著 ($P<0.05$)。
A: Browning map; B: Browning index; C: Weight loss rate; * indicates significant difference ($P<0.05$).

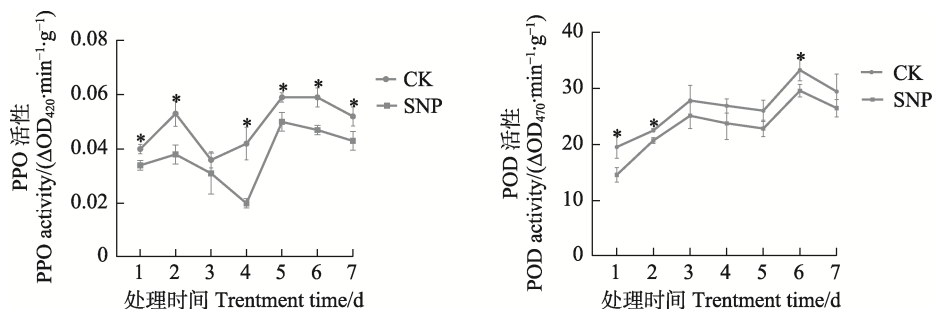
图 1 SNP 处理对红毛丹褐变的影响

Fig. 1 Effect of SNP treatment on browning of rambutan

2.2 SNP 处理对红毛丹果皮活性氧相关酶的影响

由图 2 可知, SNP 处理后红毛丹果皮 PPO 活性先降低后上升,第 4 天降至最低,与对照组相比降低 52.38%,处理后 7 天内的 PPO 活性均低于对照组。在果皮 PPO 和 POD 的催化作用下,酚类化合物被氧化为醌类物质,此类物质进一步

聚合使果皮出现深褐色。在整个贮藏期间, SNP 处理组的红毛丹果皮 PPO 活性与对照组在第 1、2、4、5、6、7 天均存在显著差异,可见 SNP 处理抑制红毛丹果皮的 PPO 活性。SNP 处理的红毛丹果皮中 POD 活性低于对照组,第 1、2、6 天存在显著差异,表明 SNP 处理可以抑制红毛丹果皮的 POD 活性,降低果皮中的过氧化作用,维持果皮色泽。



*表示差异显著 ($P<0.05$)。
* indicates significant difference ($P<0.05$).

图 2 SNP 处理对红毛丹果皮 PPO 和 POD 活性的影响

Fig. 2 Effects of SNP treatment on PPO and POD activities in pericarp of rambutan

APX 升高能够清除活性氧,减少对细胞膜的损伤,CAT 能够将过氧化氢催化分解成水和氧气,起着抗氧化作用。由图 3 可知,在贮藏期间 APX 活性呈逐渐上升趋势,且在第 4、5、6 天显著高于对照组。除第 1、2、5 天外,SNP 处理组的 CAT 活性均显著高于对照,其中,第 3 天到第 5 天的酶活性呈现降低的趋势,说明 SNP 处理有提高 CAT、APX 活性,延缓红毛丹果皮褐变的作用。SNP 处理的果皮 SOD 活性在整个贮藏期间变化平缓,在第 3、5、7 天与对照组相比分别提高 17.40%、20.08%、7.82%。LOX 在脂肪酸代谢过程

中扮演着重要角色,影响细胞的氧化应激反应^[33]。经 SNP 处理的红毛丹果皮 LOX 活性在贮藏期间逐渐升高,第 5 天达到峰值后逐渐减弱,第 1、2、7 天的 LOX 活性显著低于对照。综上,SNP 处理红毛丹果实能有效延缓果皮中 ROS 清除酶 (CAT、APX、SOD) 活性下降,提高 ROS 清除率,进而延缓 ROS 对红毛丹果实的损伤,降低 LOX 活性可能有助于延缓果皮褐变。

2.3 SNP 处理对红毛丹果皮中植物激素的影响

由图 4 可知,ETH 含量在 SNP 处理的第 2、4 天存在显著差异,第 4 天后变化较平稳。ABA

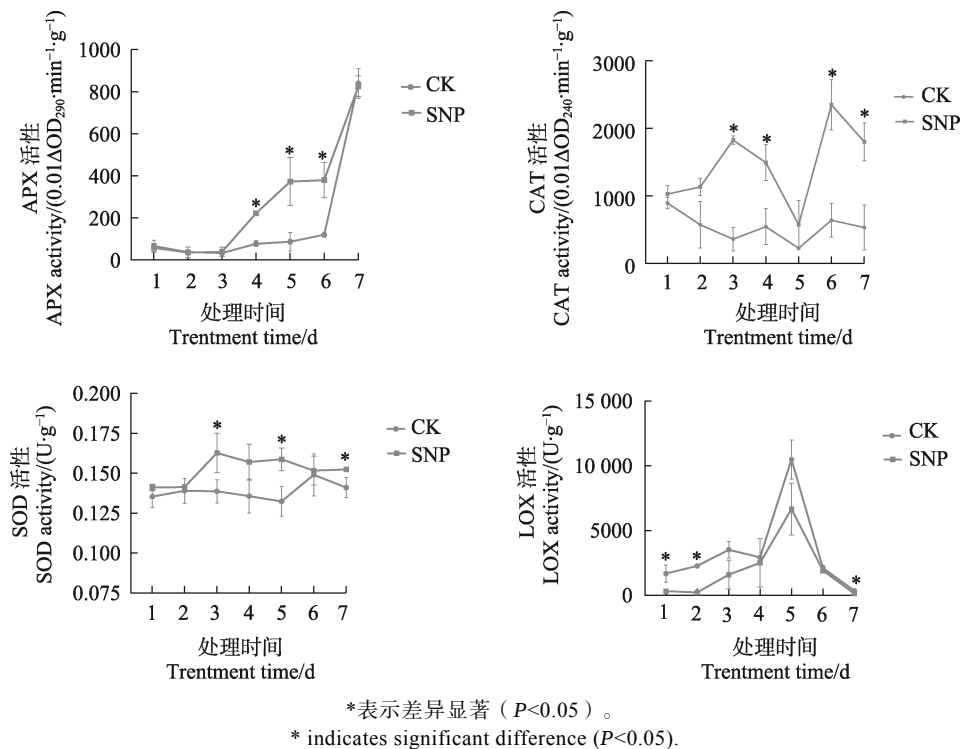


图 3 SNP 处理对红毛丹果皮 APX、CAT、SOD、LOX 活性的影响
Fig. 3 Effects of SNP treatment on activities of APX, CAT, SOD, LOX in peel of rambutan

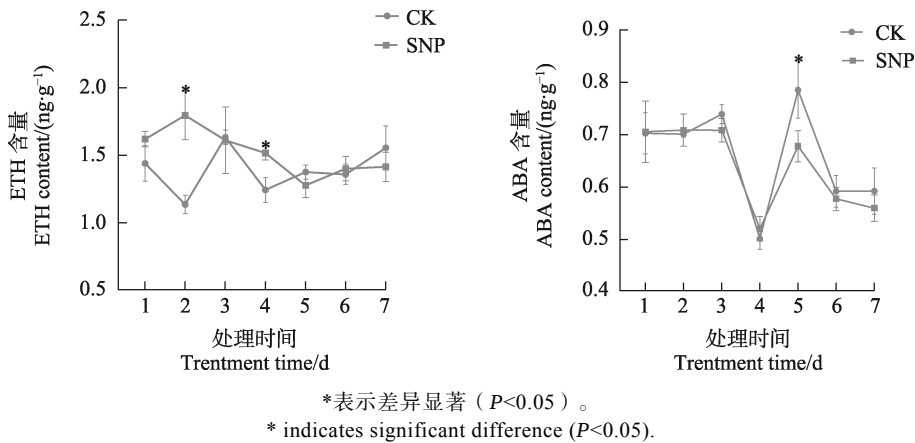
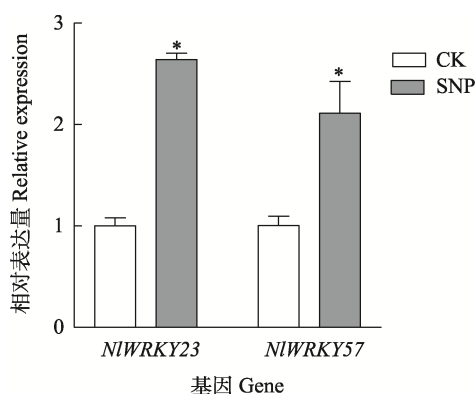


图 4 SNP 处理对红毛丹果皮中 ETH 和 ABA 含量的影响
Fig. 4 Effects of SNP treatment on ETH and ABA content in peel of rambutan

含量仅在第 5 天与对照存在显著差异, 与对照组相比降低 13.64%, 说明 SNP 处理可能在红毛丹褐变后期导致 ABA 含量变化。

2.4 SNP 处理对红毛丹果皮中褐变相关基因表达的影响

由图 5 可知, SNP 处理对红毛丹果皮中 *NIWRKY23*、*NIWRKY57* 基因表达具有较大影响。与对照相比, *NIWRKY23*、*NIWRKY57* 的表达量显著上调, 表明 SNP 处理能提高红毛丹果皮 *NIWRKY23*、*NIWRKY57* 基因的表达量。WRKY 转录因子能够特异性结合基因下游启动子中的 W-box 顺式作用元件^[34], 其保守的 WRKY 结构域能与下游基因 *MdPPO* 7^[35]、*MdSOD* 1、*MdCAT* 1 和 *MdAPX* 1^[36] 启动子中的 W-box 特异性结合, 调控下游基因的表达。推测 WRKY 转录因子可能在延缓红毛丹褐变过程中发挥调控作用。



*表示差异显著 ($P < 0.05$)。

* indicates significant difference ($P < 0.05$).

图 5 红毛丹果皮中 *NIWRKY23*、*NIWRKY57* 基因表达分析

Fig. 5 Expression of *NIWRKY23* and *NIWRKY57* gene in pericarp of rambutan

3 讨论

红毛丹在采摘后极易出现褐变现象, 不仅显著降低果实的品质, 还造成严重的经济损失^[37]。当前, 控制鲜切果蔬褐变的技术主要是通过化学、物理或生物的方法对鲜切产品进行处理, 以减轻机械损伤、抑制褐变相关酶的活性, 延缓鲜切果蔬褐变^[38]。薛鹏宇^[39]发现龙眼果实在贮藏期间, 随着果实的衰老, 膜系统受损, 区域化分布逐渐丧失, 原本存在于液泡中的褐变底物酚类物质与细胞质中的酚类氧化酶直接接触, 从而引起果皮发生褐变。此外, ROS 过度积累会导致膜脂过氧

化, 使膜流动性降低, 膜透性增大, 也加剧酶和底物之间的区域分隔消失, 使褐变加剧。本研究经 SNP 处理的红毛丹 LOX 活性受到抑制, 与帅良等^[40]用磷酸钠处理龙眼果抑制膜脂降解相关酶活性的结果相似。褐变与膜脂过氧化作用的增加与细胞膜结构的破坏密切相关, 表现为不饱和脂肪酸相对含量降低, 饱和脂肪酸相对含量增加, 膜脂过氧化产物过量积累^[7]。胡位荣等^[41]研究发现, 随着荔枝果实的成熟, LOX 的活性呈现上升趋势, 促使果皮细胞膜发生脂质过氧化反应, 致使细胞膜通透性显著提升, 进而破坏细胞内部区域化结构。在此过程中, 花色素苷和酚类物质从液泡中渗出, 在相关酶的作用下转化为酚类化合物, 随后经氧化反应生成褐色物质, 导致果皮出现典型的褐变现象。与此同时, 果肉组织也在 LOX 及其他相关酶类的作用下逐渐进入衰老阶段。本研究中 SNP 处理红毛丹果实后, 果皮中的 LOX 活性呈现相似的趋势且降低酶活性。

SNP 作为 NO 的供体, NO 通过与多种分子的相互作用参与植物的许多发育过程以及植物对各种非生物胁迫的响应, 这些相互作用共同导致活性氧 (ROS)、脯氨酸和谷胱甘肽生物合成、翻译后修饰 (如 S-亚硝基化) 以及基因和蛋白质表达调节的体内平衡^[42]。经外源过氧化氢处理的荔枝, 果皮中 O_2^- 和 H_2O_2 的积累量减少, 细胞膜透性降低, 可通过调节荔枝 ROS 代谢延缓其衰老进程^[43]。细胞内存在 ROS 清除体系, 而 SOD 作为清除体系中重要保护酶之一, 其对氧自由基具有抑制作用, 延缓植物衰老^[44]。劳琪珍等^[45]采用 SNP 处理三华李果实发现能有效保持抗氧化能力, 这与本研究中 SNP 处理红毛丹果实后提高抗氧化酶 (SOD、POD) 活性结论基本一致。王志科等^[46]发现外源 NO 处理可以通过诱导提高盐胁迫下抗氧化酶活性, 增加渗透调节物质的积累。

氧化酶 (PPO、POD) 的催化反应对于控制褐变至关重要, 这 2 种酶有一些共同的底物, 这些底物会导致黑色素的形成^[47]。程现勇等^[48]认为 PPO 和 POD 活性与采后荔枝果皮中酚类物质的氧化有关。本研究中经 SNP 处理后的红毛丹果皮 PPO 和 POD 活性降低, 与林玉钦等^[49]采用不同包装处理的红毛丹结论基本一致。通过荧光定量分析红毛丹果皮中 *NIWRKY23*、*NIWRKY57* 基因表达量上调, 说明 WRKY 基因与果皮的褐变相关。有研究表明, *SmeWRKY53* 显著降低鲜切茄子

果实的褐变度、PPO 和 POD 活性, 对 *PPOs* 基因及相关抗氧化酶基因的表达产生显著影响^[50], 与本研究结论相似。

本研究中经 SNP 处理的红毛丹果实在贮藏过程中能够减低红毛丹果实失重率, 提高抗氧化酶 (SOD、CAT、APX) 活性, 降低 PPO、POD、LOX 酶活, 维持果皮色泽, 同时 WRKY 转录因子可能在红毛丹褐变过程中起着调节作用。综上, SNP 处理可通过增强红毛丹果皮抗氧化能力, 减轻活性氧 (ROS) 的氧化, 延缓果皮褐变的发生, 为进一步提高红毛丹的品质, 解决采后褐变问题提供依据。

参考文献

- [1] 朱春霞, 巴良杰. 红毛丹采后品质变化与保鲜技术研究[J]. 新农业, 2022(3): 48-49.
ZHU C X, BA L J. Study on postharvest quality change and preservation technology of rambutan[J]. New Agriculture, 2022(3): 48-49. (in Chinese)
- [2] LI W, ZENG J K, SHAO Y Z. Rambutan: *Nephelium lappaceum*[M]//Exotic Fruits. Amsterdam: Elsevier, 2018: 369-375.
- [3] 张安妮, 吕金慧, 郑中兵. 红毛丹的贮藏保鲜技术研究进展[J]. 园艺与种苗, 2017, 37(11): 9-12.
ZHANG A N, LU J H, ZHENG Z B. Research progress in preservation methods of rambutan[J]. Horticulture & Seed, 2017, 37(11): 9-12. (in Chinese)
- [4] PAULL R E, REYES M E Q, REYES M U. Litchi and rambutan insect disinfestation: treatments to minimize induced pericarp browning[J]. Postharvest Biology and Technology, 1995, 6(1): 139-148.
- [5] 林玉钦. 红毛丹果皮褐变控制技术及其机理研究[D]. 海口: 海南大学, 2020.
LIN Y Q. Study on Pericarp browning inhibition technique and mechanism of rambutan[D]. Hankou: Hainan University, 2020. (in Chinese)
- [6] SUN J, SU W Q, PENG H X, ZHU J H, XU L X, BRUNA N M. Two endogenous substrates for polyphenoloxidase in pericarp tissues of postharvest rambutan fruit[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(6): C473-C477.
- [7] LIN Y F, LIN H T, LIN Y X, ZHANG S, CHEN Y H, JIANG X J. The roles of metabolism of membrane lipids and phenolics in hydrogen peroxide-induced pericarp browning of harvested longan fruit[J]. Postharvest Biology Technology, 2016, 111: 53-61.
- [8] 唐基涛, 帅良, 廖玲燕, 曲德智, 殷菲胧, 何妹英, 刘云芬. α -熊果苷处理对采后龙眼果皮褐变及活性氧代谢的影响[J]. 核农学报, 2025, 39(4): 784-792.
TANG J T, SHUAI L, LIAO L Y, QU D Z, YIN F L, HE M Y, LIU Y F. Effects of α -arbutin on pericarp browning and reactive oxygen metabolism of postharvest longan fruit[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39(4): 784-792. (in Chinese)
- [9] 彭海海. 番荔枝贮藏过程中品质变化与活性氧相关性调控研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022.
PENG H H. Correlation and regulation of quality changes and reactive oxygen species during storage of *Annona squamosa*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [10] 洪克前, 徐函兵, 张鲁斌, 贾志伟. 一氧化氮对采后芒果果实抗氧化酶活性的影响[J]. 热带作物学报, 2017, 38(8): 1529-1533.
HONG K Q, XU H B, ZHANG L B, JIA Z W. Effects of nitric oxide on activities of antioxidative enzymes of postharvest mango fruits[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(8): 1529-1533. (in Chinese)
- [11] 朱丽琴, 朱树, 周杰. NO 延缓园艺产品成熟和衰老的生理效应研究进展[J]. 园艺学报, 2008(10): 1539-1544.
ZHU L Q, ZHU S, ZHUOU J. Progress on physiological effect of NO on delaying maturation and senescence of horticultural products[J]. Acta Horticultura Sinica, 2008(10): 1539-1544. (in Chinese)
- [12] ZHU L Q, ZHOU J, ZHU S H. Effect of a combination of nitric oxide treatment and intermittent warming on prevention of chilling injury of 'Feicheng' peach fruit during storage[J]. Food Chemistry, 2009, 121(1): 165-170.
- [13] REN Y F, HE J Y, LIU H Y, LIU G Q, XIAO L R. Nitric oxide alleviates deterioration and preserves antioxidant properties in 'Tainon' mango fruit during ripening[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2017, 58(1): 27-37.
- [14] GHORBANI B, PAKKISH Z, KHEZRI M. Nitric oxide increases antioxidant enzyme activity and reduces chilling injury in orange fruit during storage[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2018, 46(2): 101-116.
- [15] ADHIKARY T, GILL P P S, JAWANDHA S K, BHARDWAJ R D, ANURAG R K. Efficacy of postharvest sodium nitroprusside application to extend storability by regulating physico-chemical quality of pear fruit[J]. Food Chemistry, 2020, 346: 128934.
- [16] ZHAO Y Y, TANG J X, SONG C C, QI S N, LIN Q, CUI Y, LING J G, DUAN Y Q. Nitric oxide alleviates chilling injury by regulating the metabolism of lipid and cell wall in cold-storage peach fruit[J]. Plant Physiology and Biochemis-

- try, 2021: 16963-16969.
- [17] VENKATACHALAM K. Exogenous nitric oxide treatment impacts antioxidant response and alleviates chilling injuries in longkong pericarp[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 237: 311-317.
- [18] ZHANG R N, YUAN Z Y, JIANG Y W, JIANG F, CHEN P. Sodium nitroprusside functions in browning control and quality maintaining of postharvest rambutan fruit[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12: 795671-795671.
- [19] HAN J, FAN Y Y, SUN T, AN J, DING Y, ZHANG W W, LIU F J, WANG C. Sodium nitroprusside (SNP) treatment increases the postharvest resistance of apple fruit to *Alternaria alternata* by enhancing antioxidant enzyme activity[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2024, 129: 102199.
- [20] 刘涛, 潘娜, 周聪, 杜瑾, 李学进, 赵薇, 姜云斌, 李喜宏, 杨相政. 硝普钠处理对先锋樱桃贮藏品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(17): 1-7.
- LIU T, PAN N, ZHOU C, DU J, LI X, ZHAO W, JIANG Y B, LI X H, YANG X Z. Effect of sodium nitroprusside application on the storage quality of van cherry[J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(17): 1-7. (in Chinese)
- [21] 张琦, 刘千, 张智, 罗锴, 陈萍. 硝普钠对香蕉采后品质及生理指标的影响[J]. *南方农业学报*, 2016, 47(7): 1198-1202.
- ZHANG Q, LIU Q, ZHANG Z, LUO K, CHEN P. Effects of sodium nitroprusside on postharvest quality and physiological indexes of banana[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(7): 1198-1202. (in Chinese)
- [22] RANA M, SINGH V, JAWANDHA S K, GILL P P S, GREWAL S K, SANGHA G S. Preharvest sodium nitroprusside application preserved antioxidant capacity and storage quality of plum fruit[J]. *Applied Fruit Science*, 2024, 66(4): 1249-1260.
- [23] ZHANG S L, TIAN L, ZHANG Y Q, ZHAO H, ZHAO J H, GUO J G, ZHU G P. *De novo* transcriptome assembly of the fresh-cut white husk of *Juglans cathayensis* Dode: insights for enzymatic browning mechanism of fresh-cut husk of walnut[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 257: 108654.
- [24] ZUO W F, LU L, SU M Y, ZHANG J, LI Y Y, HUANG S L, LI C X, WANG N, ZHANG Z Y, CHEN X S. Analysis of differentially expressed genes and differentially abundant metabolites associated with the browning of Meihong red-fleshed apple fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021: 174.
- [25] 程南谱, 王鑫, MUHAMMAD MUZAMMAL ASLAM, 邵远志, 李雯. 荔枝 *LcWRKY47* 基因的克隆、亚细胞定位、表达及延缓果实褐变的功能初探[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(10): 2025-2034.
- CHENG N P, WANG X, MUHAMMAD M A, SHAO Y Z, LI W. Preliminary study on the cloning, subcellular localization and expression of *LcWRKY47* in litchi and its function in delaying fruit browning[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(10): 2025-2034. (in Chinese)
- [26] CNEN H, LAI Z B, SHI J W, XIAO Y, CHEN Z X, XU X P. Roles of arabidopsis WRKY18, WRKY40 and WRKY60 transcription factors in plant responses to abscisic acid and abiotic stress[J]. *BMC Plant Biology*, 2010, 10(1): 281.
- [27] ZHANG R N, JING F, HE X R, YUAN Z Y, CHEN P, ZHENG Z B. Transcriptome profiling of *Nephelium lappaceum*: sodium nitroprusside-induced delays of postharvest browning[J]. *Physiologia Plantarum*, 2023, 175(3): e13932-e13932.
- [28] 崔志富, 易杰祥, 陈兵, 从心黎. 真空和低温处理对红毛丹保鲜效果的研究[J]. *基因组学与应用生物学*, 2015, 34(9): 1988-1992.
- CUI Z F, YI J X, CHEN B, CONG X L. Study on the fresh-keeping of rambutan treated by vacuum combined with low temperature[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2015, 34(9): 1988-1992. (in Chinese)
- [29] 邓浩, 尹青春, 林玉钦, 冯建成, 张容鹄. 不同预冷方式对红毛丹贮藏品质的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(1): 1-4. (in Chinese)
- DENG H, YIN Q C, LIN Y Q, FENG J C, ZHANG R H. Effects of different precooling methods on quality of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) during storage[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(1): 1-4. (in Chinese)
- [30] 陈加利, 吕金慧, 邢馨予, 陈琪, 陈萍. 硝普钠(SNP)对红毛丹采后生理指标的影响[J]. *南方农业*, 2018, 12(20): 137-139.
- CHE J L, LYU J H, XING X Y, CHEN Q, CHEN P. Effects of sodium nitroprusside (SNP) on postharvest physiological indexes of rambutan[J]. *South China Agriculture*, 2018, 12(20): 137-139. (in Chinese)
- [31] SHAO Z Y, XIE J H, CHEN P, LI W. Changes in some chemical components and in the physiology of rambutan fruit (*Nephelium lappaceum* L.) as affected by storage temperature and packing material[J]. *Fruits*, 2013, 68(1): 15-24.
- [32] 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.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Postharvest physiological and biochemical experimental guidance of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [33] GARDNE H W. Recent investigations into the lipoxygenase pathway of plants[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1991,

- 1084(3): 221-239.
- [34] RUSHTON P J, SOMSSISH I E, RINGLER P, SHEN Q X. WRKY transcription factors[J]. Trends in Plant Science, 2010, 15(5): 247-258.
- [35] ZOU H, LI C Z, WEI X Y, XIAO Q, TIAN X C, ZHU L C, MA B Q, MA F W, LI M G. Expression of the polyphenol oxidase gene *MdPPO7* is modulated by *MdWRKY3* to regulate browning in sliced apple fruit[J]. Plant Physiology, 2024, 197(6): kiae614.
- [36] LI Y G, ZHANG L Z, YUAN Z Y, ZHANG J T, ZHANG Y, WANG L J. MdWRKY71 as a positive regulator involved in 5-aminolevulinic acid-induced salt tolerance in apple[J]. Horticultural Plant Journal, 2025, 11(4): 1397-1413.
- [37] 刘士琦, 韦东伶, 刘家粮, 张伟敏, 张正科. 褪黑素对采后红毛丹果实褐变及膜脂代谢和能量代谢的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(18): 207-215.
- LIU S Q, WEI D L, LIU J L, ZHANG W M, ZHANG Z K. Effect of melatonin on browning, membrane lipid and energy metabolisms in postharvest rambutan fruit[J]. Food Science, 2024, 45(18): 207-215. (in Chinese)
- [38] 刘若冰, 宿玲绮, 刘波, 傅佳立, 张耸, 魏珉, 张小燕, 彭勇. 协同处理技术抑制鲜切果蔬褐变的研究进展[J/OL]. 食品工业科技, (2025-06-05)[2025-08-07]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025020203>.
- LIU R B, SU L Q, LIU B, FU J L, ZHANG S, WEI M, ZHANG X Y, PENG Y. Research progress on browning inhibition of fresh-cut fruits and vegetables by synergistic treatment technology[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, (2025-06-05)[2025-08-07]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025020203>. (in Chinese)
- [39] 薛鹏宇. 茉莉酸甲酯处理抑制龙眼果皮褐变机理的研究[D]. 南宁: 广西科技大学, 2023.
- XUE P Y. Study on the mechanism of inhibiting pericarp browning of longan by methyl jasmonate treatment[D]. Nanjing: Guangxi University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [40] 帅良, 庞纪伟, 廖玲燕, 郭晓娟, 何妹英, 刘云芬, 殷菲胧. 磷酸钠处理对龙眼果皮褐变的影响及其与活性氧和膜脂代谢的关系[J/OL]. 南京农业大学学报, (2024-12-19) [2025-08-07]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1148.s.20241219.0931.002>.
- SHUAI L, PANG J W, LIAO L Y, GUO X J, HE M Y, LIU Y F, YIN F L. Effect of trisodium phosphate treatment on browning of longan peel and its relationship with reactive oxygen species and membrane lipid metabolism[J/OL]. Journal of Nanjing Agricultural University, (2024-12-19) [2025-08-07]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1148.s.20241219.0931.002>. (in Chinese)
- [41] 胡位荣, 刘顺枝, 张昭其, 季作梁. 荔枝果实采后脂氧合酶活性的变化[J]. 华中农业大学学报, 2005(3): 285-289.
- HU W R, LIU S Z, ZHANG Z Q, JI Z L. Changes of lipoxygenase activity of postharvest litchi fruit[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2005(3): 285-289. (in Chinese)
- [42] WANI K I, NAEEM M, CASTROVERDE C D M, KALAJI H M, ALBAQAMI M, AFTAB T. Molecular mechanisms of nitric oxide (NO) Signaling and reactive oxygen species (ROS) homeostasis during abiotic stresses in plants[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(17): 9656-9656.
- [43] 潘家丽, 覃子倚, 李静, KHOO HOCK ENG, 董新红. 外源过氧化氢处理对采后荔枝褐变及活性氧代谢的影响[J]. 南方农业学报, 2022, 53(5): 1227-1234.
- PAN J L, QIN Z Y, LI J, KHOO H E, DONG X H. Effects of exogenous hydrogen peroxide treatment on browning and reactive oxygen metabolism of postharvest litchi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(5): 1227-1234. (in Chinese)
- [44] 张绿萍, 金吉林, 邓仁菊. 火龙果采后贮藏品质变化及活性氧代谢规律[J]. 南方农业学报, 2012, 43(4): 506-510.
- ZHANG L P, JIN J L, DENG R J. Post harvest changes in storage quality and active oxygen metabolism in pitaya (*Hylocereus undatus*)[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(4): 506-510. (in Chinese)
- [45] 劳琪珍, 刘英健, 刘云芬, 梁园丽, 闫寒, 陈美琦, 宋慕波. 外源硝普钠处理对三华李采后贮藏品质的影响[J]. 山东农业科学, 2025, 57(3): 81-87.
- LAO Q Z, LIU Y J, LIU Y F, LIANG Y L, YAN H, CHEN M Q, SONG M B. Effect of exogenous sodium nitroprusside treatment on postharvest quality of sanhua plum[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2025, 57(3): 81-87. (in Chinese)
- [46] 王志科, 王金成. 外源 NO 对 NaCl 胁迫下玉米种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 山东农业科学, 2025, 57(2): 78-83.
- WANG Z K, WANG J C. Effects of exogenous Nitric Oxide on seed germination and seedling physiological characteristics of maize under NaCl stress[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2025, 57(2): 78-83. (in Chinese)
- [47] 韦东伶. 褪黑素处理对红毛丹果实采后褐变及相关生理代谢的影响[D]. 海口: 海南大学, 2022.
- WEI D L. Effects of melatonin treatment on postharvest browning and related physiological metabolism in rambutan fruit[D]. Haikou: Hainan University, 2022. (in Chinese)
- [48] 程现勇, 赵宇, 江滔, 何春玲, 江炳伟, 赵俊生, 沈飞. 外源葡萄糖处理对采后荔枝果皮褐变及贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(7): 38-48.

- CHENG X Y, ZHAO Y, JIANG T, HE C L, JIANG B W, ZHAO J S, SHEN F. Effect of postharvest glucose treatment on the pericarp browning and quality of litchi fruit during storage[J]. *Storage and Process*, 2025, 25(7): 38-48. (in Chinese)
- [49] 林玉钦, 邓浩, 刘建卓, 王世萍, 张容鹄, 冯建成. 不同包装结合低温贮藏对‘保研-7 号’红毛丹品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(14): 186-191, 215.
- LIN Y Q, DENG H, LIU J Z, WANG S P, ZHANG R H, FENG J C. Effects of different packaging materials combined with low temperature storage on quality of Baoyan-7 rambutan[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(14): 186-191, 215. (in Chinese)
- [50] 刘晓慧. 基于转录组与代谢组学的鲜切茄子褐变机理研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- LIU X H. Mechanism of fresh-cut eggplant browning based on transcriptomics and metabolomics[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022. (in Chinese)