

新琼寡糖延缓西番莲果实采后衰老及其与呼吸代谢关系研究

林育钊^{1,3}, 罗振宇², 陈东晓², 汪莹², 陈莲⁴, 陈洪彬^{1,3*}, 张坤^{2*}

(¹福建省海洋藻类活性物质制备与功能开发重点实验室·泉州师范学院, 福建泉州 362000; ²集美大学海洋食品与生物工程学院, 福建厦门 361021; ³泉州师范学院海洋与食品学院, 福建泉州 362000; ⁴闽南师范大学生物科学与技术学院, 福建漳州 363000)

摘要:【目的】研究外施新琼寡糖对西番莲果实采后衰老的延缓作用及其对呼吸代谢的影响。【方法】以黄果西番莲为研究对象, 对采后果实进行 180 mg·L⁻¹ 新琼寡糖 (NAOS) 与蒸馏水 (对照组) 浸泡 15 min 处理, 置于 (25±1) °C、相对湿度 85% 下贮藏 18 d, 测定腐烂率、硬度、失重率、果皮水分含量、果肉可溶性固形物 (TSS) 和可滴定酸 (TA) 含量、呼吸强度、呼吸代谢途径关键酶[磷酸己糖异构酶 (PGI)、琥珀酸脱氢酶 (SDH)、葡萄糖-6-磷酸脱氢酶 (G-6-PDH) 和 6-磷酸葡萄糖酸脱氢酶 (6-PGDH)]、呼吸末端氧化酶[细胞色素 C 氧化酶 (CCO)、抗坏血酸氧化酶 (AAO) 和多酚氧化酶 (PPO)]、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸激酶 (NADK) 活性、吡啶核苷酸[烟酰胺腺嘌呤二核苷酸 (NAD) 及其还原型 (NADH)、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸 (NADP) 及其还原型 (NADPH)] 含量等的变化。【结果】与对照组对比, NAOS 处理可使西番莲果实维持较高的硬度、果皮水分含量、果肉 TSS 和 TA 含量, 以及较低的腐烂率和失重率。NAOS 处理可推迟并抑制西番莲果实的呼吸高峰, 使果皮保持较低的 PGI、SDH、CCO、AAO 和 PPO 活性、NAD 和 NADH 含量, 较高的 G-6-PDH+6-PGDH 总活性、NADK 活性、NADP 和 NADPH 含量。【结论】NAOS 处理通过调控呼吸代谢途径, 即削弱糖酵解与三羧酸循环, 增强磷酸戊糖途径, 降低电子传递链水平, 进而推迟呼吸高峰、减少能量与底物的消耗, 最终减缓西番莲果实腐烂发生、维持采后品质。NAOS 处理可通过调节采后西番莲果实的生理代谢, 推迟其后熟衰老, 有效控制西番莲果实的衰败。

关键词: 西番莲果实; 新琼寡糖; 采后衰老; 呼吸代谢; 呼吸代谢途径

中图分类号: S667.9 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2025)02-0001-08

Neoagaro-oligosaccharide delay the postharvest decay of passion fruit via regulating the respiratory metabolism

LIN Yuzhao^{1,3}, LUO Zhengyu², CHEN Dongxiao², WANG Ying², CHEN Lian⁴, CHEN Hongbin^{1,3*}, ZHANG Shen^{2*}

(¹Fujian Province Key Laboratory for the Development of Bioactive Material from Marine Algae/Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, Fujian, China; ²College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China; ³College of Oceanology and Food Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, Fujian, China; ⁴School of Biological Science and Biotechnology, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, Fujian, China)

Abstract: [Objective] The passion (*Passiflora caerulea* L.) fruit is a typical tropical and subtropical fruit native to Brazil. In China, passion fruit is widely cultivated in Guangxi, Fujian, Hainan, Guangdong and Yunnan Provinces. The passion fruit has unique flavor and contains a variety of nutrients with dietary therapy effect. However, as a climacteric fruit, the harvested passion fruit is highly sensitive to ethylene and thereby the respiration climacteric

收稿日期: 2024-09-04

接受日期: 2024-11-30

基金项目: 福建省海洋藻类活性物质制备与功能开发重点实验室开放基金 (2022-KF10); 福建省自然科学基金面上项目 (2023J01902, 2023J01776, 2021J01992); 龙岩市科技计划重点项目 (2023LYF9025)

作者简介: 林育钊, 男, 讲师, 博士, 研究方向为果蔬采后生物学与保鲜技术。E-mail: yuzhaolin820@163.com

***通讯作者** Author for correspondence. E-mail: yummyway@163.com; E-mail: szhang8811@jmu.edu.cn

can be activated very soon, which leads to rapid postharvest ripening and senescence, and meanwhile serious decay develops, such as pericarp shrinking, disease outbreak, and mechanical injury-induced browning. These quality deteriorations will greatly reduce the shelf-life and commercial value of passion fruit. Therefore, to inhibit the decay development and maintain the quality of postharvest passion fruit, it is of great significance to develop effective postharvest technology to retard the postharvest ripening and senescence and enhance the storability. The utilization of marine biological resources is drawing lots of attention currently in the field of agri-food preservation. The oligosaccharides obtained from seaweed is a promising substance for maintaining fruit quality, but to date little information is known about neither its regulation mechanism underlying the quality-keeping effect, nor its effects on postharvest passion fruit. On the other hand, As the key factor in postharvest ripening and senescence, respiration is so crucial to fruit physiological change that should be given the first and foremost attention when considering quality variation. Also, respiration is an integrated reflection of a series of metabolic processes known as the hub of matter and energy metabolism. The respiratory metabolic pathways involving material metabolism of harvested fruit include Embden-Meyerhof-Parnas (EMP), tricarboxylic acid (TCA) cycle and pentose phosphate pathway (PPP), and the pathways involving energy production include electron transport chain (ETC). Besides, pyridine nucleotides act as cofactors in these pathways and thereby can be seen as the indicators of the balance in respiratory metabolic pathways. Therefore, in this study, the effects of neoagaro-oligosaccharide (NAOS) solution dipping treatment on the quality of postharvest passion fruit were investigated, with specific regards to its regulatory mechanism on the respiratory metabolism, aiming to provide technical reference and theoretical basis for retarding the postharvest decay and extending the shelf-life of passion fruit. **【Methods】**The yellow passion fruit was harvested at commercial maturity and the fruit selected for test was divided into two groups. One group of fruit was soaked in 180 mg·L⁻¹ NAOS solution for 15 min and the other one was soaked in distilled water as control. The fruit was then air dried and stored at (25±1) °C and 85% relative humidity for 18 days. During the storage, the changes of fruit decay rate, respiration rate, firmness, weight loss rate, pericarp moisture content, and the contents of total soluble solids (TSS) and titrable acid (TA) in pulp were investigated to evaluate the effect of NAOS treatment on fruit quality. Furthermore, the enzyme activities of respiratory metabolic pathways were assayed, such as phosphohexose isomerase (PGI) in EMP, succinate dehydrogenase (SDH) in TCA, glucose-6-phosphate dehydrogenase (G-6-PDH) and 6-phosphogluconate dehydrogenase (6-PGDH) in PPP, cytochrome C oxidase (CCO) in ETC and other terminal oxidases including ascorbic acid oxidase (AAO) and polyphenol oxidase (PPO). Besides, the contents of pyridine nucleotides including nicotinamide adenine dinucleotide (NAD) and its reduced form (NADH), and nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADP) and its reduced form (NADPH) and the activity of involving enzyme, NAD kinase (NADK), were determined. **【Results】** Compared to the control group, NAOS-treated fruit could maintain higher firmness, pericarp moisture content, and the contents of pulp TSS and TA during the storage, with lower weight loss rate and decay rate; moreover, NAOS treatment delayed the respiration climacteric of postharvest passion fruit, lowered the activities of PGI, SDH, CCO, AAO and PPO, as well as the contents of NAD and NADH, but elevated the levels of G-6-PDH+6-PGDH, NADK, NADP and NADPH. **【Conclusion】** NAOS treatment could regulate the respiratory metabolism of harvested passion fruit via alleviating the EMP-TCA pathway and ETC, and enhancing the PPP, which jointly contributed to retarded respiration climacteric and reduced substrate consumption, leading to slower postharvest ripeness and senescence, and thereby the decay occurrence was inhibited and the quality was maintained. Therefore, NAOS treatment could be an effective handling to control the postharvest decay of passion fruit via regulating its physiological activities.

Key words: Passion fruit; Neoagaro-oligosaccharide; Postharvest decay; Respiratory metabolism; Respiratory metabolic pathways

西番莲 (*Passiflora caerulea* L.) 果实俗称百香果, 是一种特色的热带、亚热带果品, 在

中国广西、福建、海南、广东、云南等地广泛栽培^[1-3]。西番莲果实富含多种营养物质，如维生素、酚类、有机酸、矿物质等^[1, 4-5]，具有抗氧化、降血压、降血脂和抗肿瘤等功效^[6-7]，且因风味独特、香气浓郁而深受消费者的喜爱^[6]。然而，因西番莲果实为呼吸跃变型果实，采后呼吸强度高，后熟衰老速度快，果实极易发生腐烂、皱缩等衰败现象，进而影响品质和商业价值^[1, 4]。因此，通过采后处理减缓果实品质败坏对西番莲的保鲜流通具有重要意义。

呼吸代谢是果实重要的生理代谢活动，跃变型果实采后成熟衰老和品质变化尤其与呼吸代谢密切相关^[8-10]。呼吸强度及糖酵解（EMP）、三羧酸（TCA）循环、磷酸戊糖途径（PPP）等不同呼吸代谢途径的水平均可影响果实采后品质^[10-12]。另外，呼吸代谢途径的改变也与呼吸代谢相关酶酶活、吡啶核苷酸含量等有关^[9]。有研究报道，过氧化氢处理^[9]、病原菌侵染^[11]等能导致果实采后较低水平的 PPP 以及较高水平的 EMP 和 TCA 循环，从而造成果实品质劣变。相反地，三磷酸腺苷^[8]、酸性电解水^[10]、柠檬丙酯^[13]等处理可保持果实采后较高水平的 PPP 以及较低水平的 EMP 和 TCA 循环，从而维持果实品质。

海藻寡糖是由海藻多糖降解得到的低聚合度活性物质^[14-15]，主要有琼胶寡糖、岩藻寡糖、褐藻寡糖及卡拉胶寡糖。其中，琼胶寡糖是由琼二糖为重复单位连接形成，包含新琼寡糖（Neogaro-oligosaccharide, NAOS）和琼寡糖^[16]。有研究发现，海藻寡糖具有安全性高、成本低、水溶性好、生物相容性高等优点，兼具提高植物抗氧化、抗逆性和生长调节等作用^[14-16]。相关研究表明，褐藻寡糖处理能提高草莓果实的采后品质，延长其货架期^[17]。另外，蓝炎阳等^[18]报道，海藻寡糖处理可保持蜜柚可溶性固形物（TSS）、总糖、有机酸等物质的含量，提高果实硬度，延长其贮藏期。Hou 等^[19]研究报道，琼胶寡糖处理可推迟樱桃番茄果实的呼吸高峰，延缓维生素 C 与可滴定酸（TA）含量的下降，从而减缓品质劣变。然而，目前海藻寡糖维持果实采后品质的作用机制尚不清楚，关于海藻寡糖应用于西番莲果实采后保鲜的研究报道也较少。因此，本研究采用龙须菜降解所得的海藻寡糖—新琼寡糖（NAOS）溶液对西番莲果实进行采后处理，探究 NAOS 溶液处理减缓西番莲果实衰老的作用及其与呼吸代谢的关系，以期利用海藻寡糖维持果实采后品质、延长保鲜期提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料与处理

成熟度为约八成成熟的钦蜜 9 号西番莲果实，采摘于福建省热带作物科学研究所（福建漳州），采后运到实验室，将大小、色泽均一，无病害、无损伤的健康果实清洗后备用。

NAOS 溶液由自然资源部第三海洋研究所（福建厦门）提供，主要成分为深海火色杆菌 *Flammeovirga* sp. OC4 降解龙须菜所得的四糖和六糖的混合溶液，有效浓度为 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。该溶液为淡褐色透明水溶液，有轻微发酵腥臭味，常温下理化性状稳定，加水稀释至处理所用浓度（ $180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ）后近乎无色无味。

在预试验中，选用 0（对照）、60、120、180、240 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NAOS 溶液浸泡处理西番莲果实 15 min，晾干后包装于聚乙烯薄膜袋（袋两侧各有 9 个 3 mm 微孔）中，在 $(25 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ 、

相对湿度 85%条件下贮藏 18 d，定期取样测定果实腐烂率。结果发现，在贮藏第 18 d 时，不同处理组的果实腐烂率分别为：32.38%（对照）>27.62%（120 mg·L⁻¹）>26.67%（60 mg·L⁻¹）>24.76%（240 mg·L⁻¹）>17.14%（180 mg·L⁻¹）。因 180 mg·L⁻¹ NAOS 处理最能有效减缓西番莲果实采后衰败，所以本研究中使用该浓度处理。

将挑选出的果实分为处理组和对照组，每组 3 次重复。（1）NAOS 处理组：180 mg·L⁻¹ NAOS 溶液浸泡果实 15 min；（2）对照组（Control）：蒸馏水浸泡果实 15 min。随后将两组的果实均取出晾干、装入打孔聚乙烯薄膜袋（15 个/袋），置于（25±1）℃、相对湿度 85% 条件下贮藏 18 d，贮藏期内定期（每 3 d）随机取样测定相关指标；另外，在贮藏 1 d 时，还测定呼吸强度。

1.2 测定方法

1.2.1 腐烂率 以果实腐烂率评价其衰败程度。取一袋西番莲果实，参照 Li 等^[20]的方法评价果实采后腐烂率。

1.2.2 硬度 参照 Hao 等^[21]的方法测定果实硬度，结果以 N 表示。

1.2.3 失重率 参照 Lin 等^[22]的方法测定果实失重率，结果以百分比表示。

1.2.4 果皮水分含量 参照罗振宇等^[23]的方法，采用直接干燥法测定西番莲果皮水分含量，结果以百分比表示。

1.2.5 果肉 TSS 和 TA 含量 从西番莲果实取出果肉，经研磨后过滤。参照 Lin 等^[22]的方法测定果实果肉的 TSS 和 TA 含量，结果以百分比表示。

1.2.6 呼吸强度 参照 Zhang 等^[8]和 Liu 等^[10]的方法测定西番莲果实呼吸强度，结果用 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ 表示。

1.2.7 呼吸代谢途径相关酶活性 参照 Lin 等^[11]和 Sun 等^[12]的方法测定西番莲果皮呼吸代谢途径关键酶（包括 PGI、SDH 及 G-6-PDH+6-PGDH）的活性。此外，参照 Lin 等^[11]和 Sun 等^[12]的方法测定西番莲果皮 CCO、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶活性。上述结果均以 U·mg⁻¹ protein 表示。

1.2.8 NADK 活性 参照 Lin 等^[9, 13]的方法测定西番莲果皮 NADK 活性，结果以 U·mg⁻¹ protein 表示。

1.2.9 吡啶核苷酸含量 参照 Lin 等^[11]和 Sun 等^[12]的方法测定西番莲果皮吡啶核苷酸（NAD、NADH、NADP 和 NADPH）含量，结果用 μmol·g⁻¹ 表示。

1.3 数据处理

本研究测定的指标均进行 3 次重复，结果以平均值±标准误表示。利用 SPSS 软件（版本号：26）的方差分析与 Duncan 检验对所获得的数据进行统计及分析。在数据图中，用*、**分别表示在同一贮藏时间 NAOS 处理组和对照组间具有显著（*p*<0.05）、极显著（*p*<0.01）的差异。

2 结果与分析

2.1 果实腐烂率

腐烂率的高低可反映果实采后品质的水平。由图 1 可知，对照果实腐烂率在贮藏 0~3 d 均为 0，随后迅速升高。然而，NAOS 处理组果实在贮藏 0~9 d 未出现腐烂，在贮藏 9~18 d 腐烂率逐渐上升。贮藏 6~18 d 期间 NAOS 处理组果实的腐烂率均低于对照组，并在 9~18 d 期间差异达到极显著 ($p < 0.01$)。在贮藏 18 d 时，NAOS 处理组果实的腐烂率仅为对照组的 52.93%。

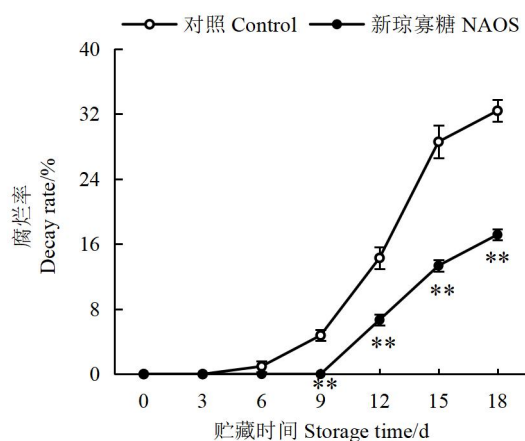


图 1 NAOS 处理对西番莲果实腐烂率的影响

Fig. 1 Effects of NAOS treatment on the decay rate of passion fruit

2.2 果实硬度和失重率

果实质地是反映跃变型果实后熟过程的重要指标。由图 2-A 可知，对照组和 NAOS 处理组果实的硬度从贮藏 0 d 时的 69.61 N 分别逐渐下降至贮藏 18 d 时的 19.68 N 和 40.59 N。在贮藏 3~18 d 期间，NAOS 处理组果实的硬度高于对照组，且在贮藏 12 d 和 18 d 时差异为极显著 ($p < 0.01$)。

果实失重主要由蒸腾作用造成的水分流失以及呼吸消耗所导致^[22]。由图 2-B 可知，在贮藏期内西番莲果实失重率上升。在 3~18 d 期间，NAOS 处理组果实的失重率均低于对照组，其中在贮藏 6~18 d 差异极显著 ($p < 0.01$)，在 18 d 时处理组为对照组的 58.86%。

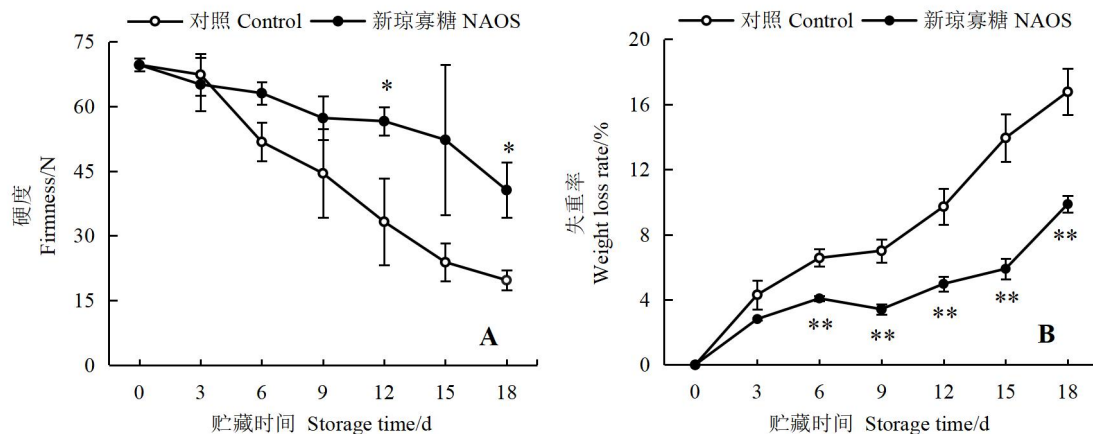


图 2 NAOS 处理对西番莲果实硬度 (A) 和失重率 (B) 的影响

Fig. 2 Effects of NAOS treatment on the firmness (A) and weight loss rate (B) of passion fruit

2.3 果皮水分含量

皱缩是西番莲果实最显著的采后品质劣变特征之一，果皮失水是引起皱缩的主要原因，加速果实耐贮性下降和衰败进程^[23]。由图 3 可知，对照组果实果皮水分含量在贮藏 0~18 d 期间快速降低。NAOS 处理组果实果皮水分含量在贮藏 0~12 d 期间变化较小，12~15 d 快速降低，15~18 d 无明显变化。在贮藏 18 d 时处理组与对照组的差异为极显著 ($p < 0.01$)。以上结果表明，在贮藏期间 NAOS 处理组果实可保持较高的果皮水分含量。

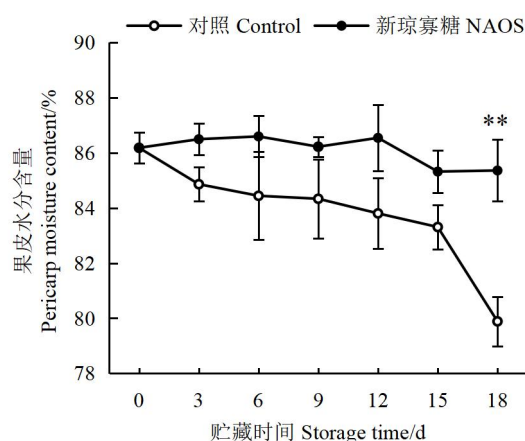


图 3 NAOS 处理对西番莲果实果皮水分含量的影响

Fig. 3 Effects of NAOS treatment on the moisture content of passion fruit pericarp

2.4 果肉 TSS 和 TA 含量

TSS 和 TA 含量是影响果实食用品质的直接因素，其含量在采后的变化深受呼吸代谢等生理活动影响。由图 4-A 可知，对照组西番莲果实 TSS 含量在贮藏 0~3 d 呈上升趋势而在贮藏 3~18 d 下降。NAOS 处理组果实 TSS 含量在贮藏 0~6 d 与对照组相近而在贮藏 9~18 d 处理组果实 TSS 含量虽缓慢下降但均显著 ($p < 0.05$) 高于对照组。由图 4-B 可知，对照组果实 TA 含量在贮藏 0~3 d 迅速降低，随后持续下降，从贮藏 0 d 的 4.89% 下降到贮藏 18 d 的 1.26%。NAOS 处理组果实 TA 含量在贮藏期内缓慢降低，在 3~18 d 期间均高于对照组，并且在 6~18 d 差异达到极显著 ($p < 0.01$) 水平。

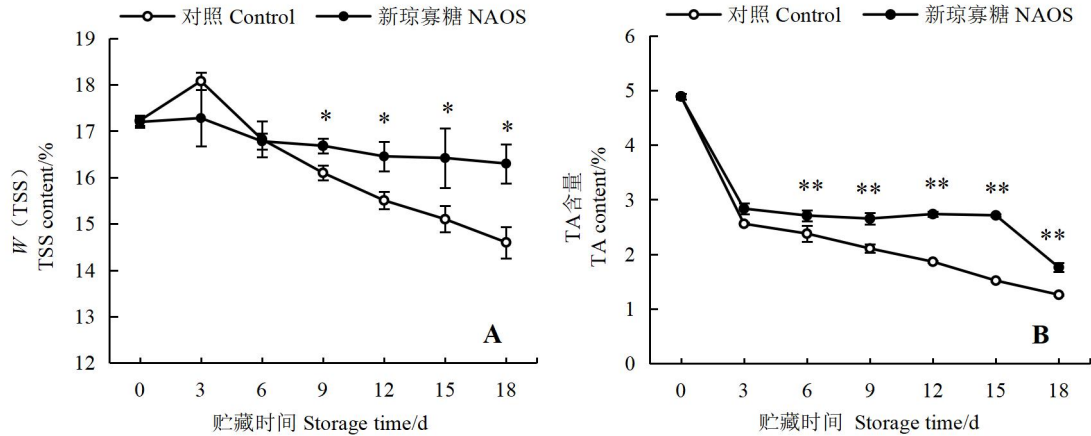


图 4 NAOS 处理对西番莲果实果肉 TSS (A) 和 TA (B) 含量的影响

Fig. 4 Effects of NAOS treatment on the contents of TSS (A) and TA (B) of passion fruit pulp

2.5 果实呼吸强度

呼吸是采后果实重要的生理代谢活动,高呼吸强度会导致底物消耗增多,促进果实衰败,缩短货架期^[22]。由图 5 可知,对照组呼吸强度在贮藏 0~1 d 快速上升,并在 1 d 达到呼吸高峰 (154.46 mg CO₂ kg⁻¹·h⁻¹),随后下降;而 NAOS 处理组果实呼吸强度在贮藏 0~6 d 上升,6 d 时达到呼吸峰值 (99.96 mg CO₂ kg⁻¹·h⁻¹),随后波动变化。NAOS 处理组果实呼吸强度在贮藏 1 d 时极显著 ($p < 0.01$) 低于对照,在贮藏 3 d 时显著 ($p < 0.05$) 低于对照。

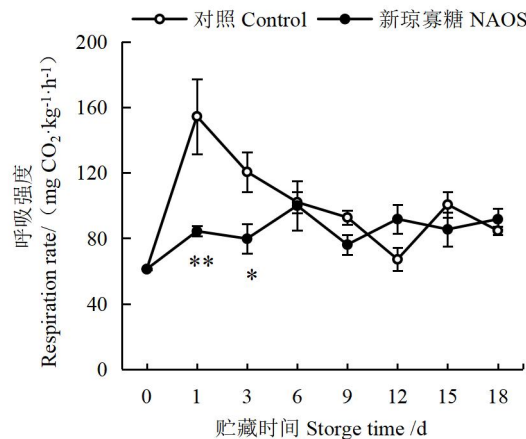


图 5 NAOS 处理对西番莲果实呼吸强度的影响

Fig. 5 Effects of NAOS treatment on the respiration rate of passion fruit

2.6 果皮呼吸代谢途径关键酶活性

PGI 和 SDH 分别是 EMP 和 TCA 循环的关键酶,而 G-6-PDH 与 6-PGDH 是 PPP 的关键酶,它们活性的高低可反映各呼吸代谢途径水平的变化^[10-11]。由图 6-A 可知,西番莲果实 PGI 活性在贮藏 0~3 d 略有降低,3~12 d 快速上升,随后迅速下降。与对照组相比,NAOS 处理组果皮 PGI 活性维持在较低水平,并且在贮藏 3、12、18 d 差异显著 ($p < 0.05$),在贮藏 6~9 d 和 15 d 差异为极显著 ($p < 0.01$)。

由图 6-B 可知，对照组和 NAOS 处理组果实的果皮 SDH 活性均在贮藏 0~3 d 升高，随后下降。在同一贮藏时间内 NAOS 处理组的果皮 SDH 活性均低于对照组，并在 6~18 d 达到极显著 ($p < 0.01$) 差异。

如图 6-C 所示，对照组果实果皮 G-6-PDH 和 6-PGDH 总活性在贮藏 0~3 d 快速升高，3~18 d 逐渐下降。NAOS 处理组果皮 G-6-PDH 和 6-PGDH 总活性在贮藏 0~3 d 升高较快，3~18 d 整体呈下降趋势。在同一贮藏时间内 NAOS 处理组果皮 G-6-PDH 和 6-PGDH 总活性均高于对照组，并且贮藏 3 d 时差异显著 ($p < 0.05$)，6~18 d 期间差异极显著 ($p < 0.01$)。

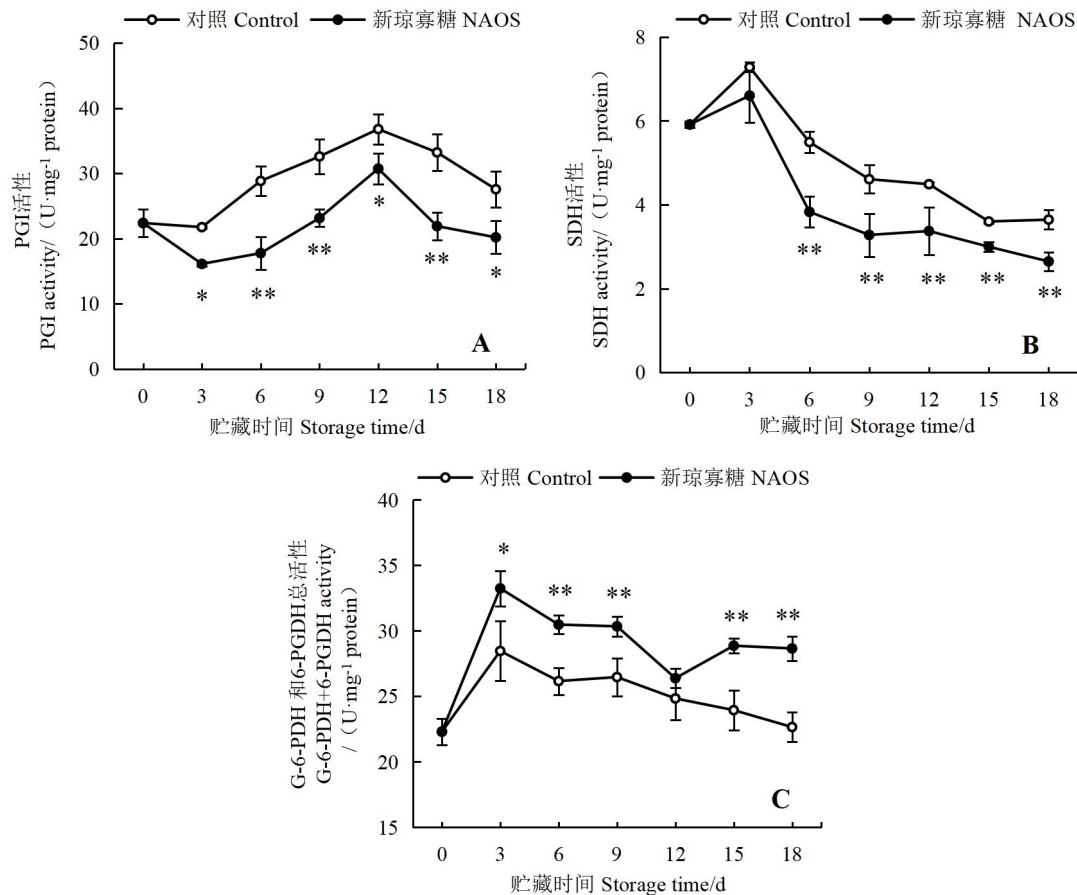


图 6 NAOS 处理对西番莲果实果皮 PGI (A)、SDH (B) 和 G-6-PDH+6-PGDH (C) 活性的影响

Fig. 6 Effects of NAOS treatment on activities of PGI (A), SDH (B) and G-6-PDH+6-PGDH (C) in pericarp of passion fruit

2.7 果皮 NADK 活性

NADK 能催化 NAD 磷酸化生成 NADP，它们分别参与不同的呼吸代谢途径^[11]。由图 7 可知，对照组果实果皮 NADK 活性在贮藏 0~3 d 降低，3~12 d 呈现上升趋势，12~15 d 下降后有所上升。NAOS 处理组果皮 NADK 活性在贮藏 0~3 d 较快上升，3~9 d 下降，9~18 d 上升。在相同贮藏时间，NAOS 处理组果皮 NADK 活性均高于对照组，并且在贮藏 3~6 d 和 15~18 d 达到极显著 ($p < 0.01$) 差异，在 12 d 时达到显著 ($p < 0.05$) 差异。在贮藏 18 d，

NAOS 处理组果皮 NADK 活性是对照组的 1.60 倍。

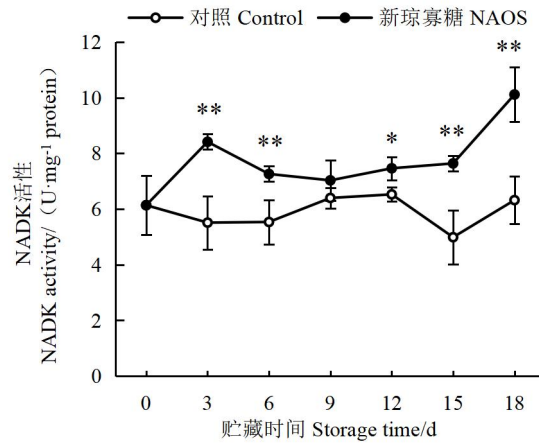


图 7 NAOS 处理对西番莲果实果皮 NADK 活性的影响

Fig. 7 Effects of NAOS treatment on the NADK activity in pericarp of passion fruit

2.8 果皮吡啶核苷酸含量

NAD (H) 与 NADP (H) 等吡啶核苷酸是参与调节呼吸代谢的重要辅助因子^[10-13]。由图 8-A 可知, 对照组果实果皮 NAD 含量于贮藏 0~9 d 快速升高, 9~18 d 整体略有下降; 而 NAOS 处理组果皮 NAD 含量在贮藏 0~3 d 变化较小, 3~9 d 快速升高, 随后快速降低。与对照组相比, 在相同贮藏时间内 NAOS 处理组果皮 NAD 含量低于对照组, 并在贮藏 3~6 d 和 15~18 d 达到极显著 ($p < 0.01$) 差异。

如图 8-B 所示, 对照组和 NAOS 处理组果皮 NADP 含量在贮藏期内不断降低, 分别从 0 d 时的 $11.22 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 下降至 18 d 时的 $7.19 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $8.18 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。与对照果实对比, 在相同贮藏时间内 NAOS 处理组果皮 NADP 含量高于对照组, 且在贮藏 15~18 d 达到极显著 ($p < 0.01$) 差异。

由图 8-C 可知, 对照组果实的果皮 NADH 含量于贮藏 0~6 d 快速上升, 6~9 d 下降, 9~12 d 快速升高, 随后逐渐降低。NAOS 处理组果皮 NADH 含量在贮藏 0~6 d 略有下降, 6~15 d 快速上升, 15~18 d 快速下降。在 3~18 d 期间 NAOS 处理组果皮 NADH 含量低于对照组, 且在贮藏 6 d 和 12 d 差异达到极显著差异 ($p < 0.01$) 水平, 在贮藏 9 d 时差异达到显著差异 ($p < 0.05$) 水平。

由图 8-D 可知, 对照组果实果皮 NADPH 含量在贮藏 0~3 d 下降, 3~15 d 整体呈上升趋势, 15~18 d 快速降低。NAOS 处理组果皮 NADPH 含量在贮藏 0~6 d 快速上升, 6~9 d 降低, 在 9~12 d 迅速升高, 随后维持在较高水平。在贮藏 3~12 d 和 18 d 时, NAOS 处理组果皮 NADPH 含量极显著 ($p < 0.01$) 高于对照组, 在 15 d 时显著 ($p < 0.05$) 高于对照组。

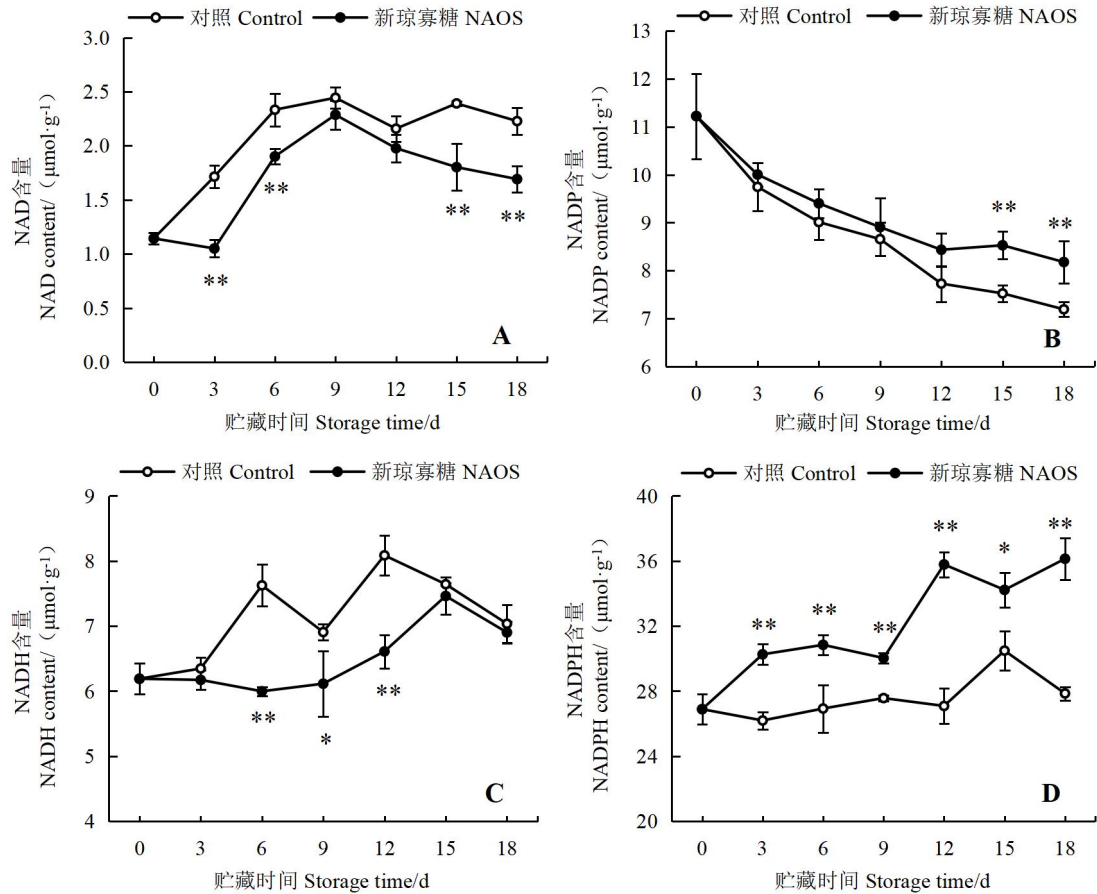


图 8 NAOS 处理对西番莲果实果皮 NAD (A)、NADP (B)、NADH (C) 和 NADPH (D) 含量的影响

Fig. 8 Effects of NAOS treatment on the contents of NAD (A), NADP (B), NADH (C) and NADPH (D) in pericarp of passion fruit

2.9 果皮呼吸末端氧化酶活性

作为呼吸末端氧化酶，CCO 在电子传递链（ETC）细胞色素途径中起着关键作用，其活性可反映 ETC 运转水平^[10]。由图 9-A 可知，两组果实果皮 CCO 活性均在贮藏 0~3 d 快速上升，在 3 d 达到峰值(对照组为 217.53 U·mg⁻¹ protein, NAOS 处理组为 153.63 U·mg⁻¹ protein)，随后不断降低。在整个贮藏期内 NAOS 处理组果实果皮 CCO 活性低于对照组，并在 3 d 和 9~15 d 达到极显著 ($p < 0.01$) 差异，18 d 时达到显著 ($p < 0.05$) 差异。

如图 9-B 所示，对照组果皮 AAO 活性在贮藏 0~6 d 迅速上升，6~18 d 快速下降。NAOS 处理组果皮 AAO 活性在贮藏 0~9 d 逐渐升高，9~18 d 快速下降。在贮藏 6~18 d 期间 NAOS 处理组果皮 AAO 活性均低于对照组，且在贮藏 6~15 d 差异为极显著 ($p < 0.01$)，18 d 时差异为显著 ($p < 0.05$)。

如图 9-C 所示，对照组和 NAOS 处理组果实果皮 PPO 活性在贮藏期间均呈现整体上升的趋势。在相同贮藏时间内 NAOS 处理组果皮 PPO 活性均低于对照组，并在贮藏 3 d 和 9 d 达到极显著 ($p < 0.01$) 差异，在 12~18 d 达到显著 ($p < 0.05$) 差异。

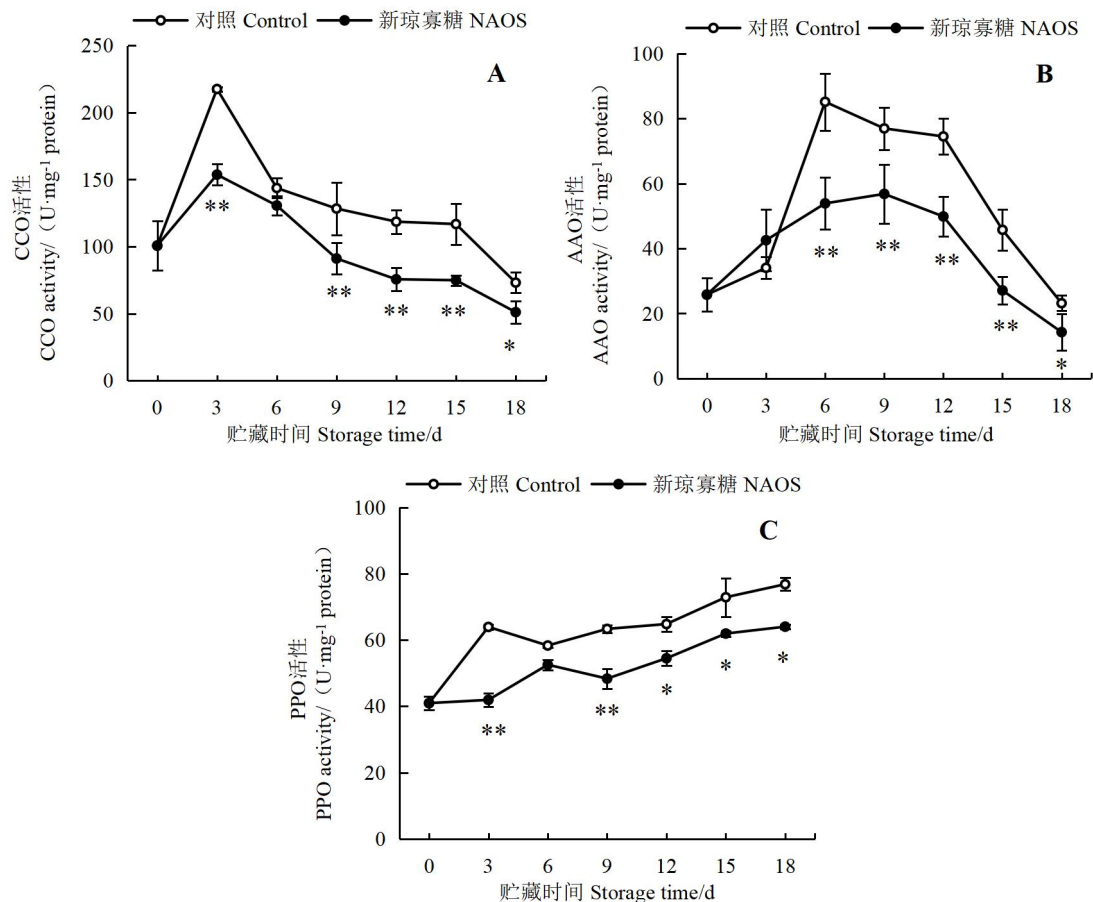


图 9 NAOS 处理对西番莲果实果皮 CCO (A)、AAO (B) 和 PPO (C) 活性的影响

Fig. 9 Effects of NAOS treatment on the activities of CCO (A), AAO (B) and PPO (C) in pericarp of passion fruit

3 讨论

呼吸作用是跃变型果实采后成熟衰老的标志之一,也是果实组织获取能量用于维持各种生理代谢的主要方式^[24]。然而,呼吸代谢伴随着能量消耗和营养物质降解,高呼吸强度可促进果实成熟和衰老,加速果实品质变化^[10, 25]。本研究发现,与对照组相比,NAOS 处理可延缓西番莲果实呼吸高峰,同时降低其峰值。NAOS 处理组果实还保持了较高的果实硬度、果皮水分含量、果肉 TSS 和 TA 含量,较低的失重率和腐烂率。笔者试验结果证明 NAOS 处理可维持西番莲果实的采后品质、减缓果实失重和腐烂等衰老现象发生。推测原因是,NAOS 处理降低西番莲果实呼吸水平,可能一方面延缓果实后熟衰老,减少因组织结构、成分变化和代谢活动引起的水分流失,从而保持了果皮水分含量,维持果实硬度,减少皱缩;另一方面可能减少糖和有机酸等底物消耗,从而维持果肉 TSS 和 TA 等呈味物质的水平。类似地,Liu 等^[10]研究表明,酸性电解水处理减缓龙眼果肉自溶发生、稳定果实品质与其保持较低的呼吸强度有关。Lin 等^[22]研究发现,壳聚糖处理可降低龙眼果实呼吸强度,保持较高的果肉营养物质含量,进而维持其品质。

EMP、TCA 循环与 PPP 是主要的呼吸代谢途径，与果实采后品质有关^[10-12]。其中，EMP 是最基本的呼吸途径，它将葡萄糖氧化为丙酮酸，随后进入 TCA 循环，而 TCA 循环与能量供给有关。PPP 不仅是植物中 NADPH 的主要来源，也为许多合成反应提供中间产物，也与植物应对外界胁迫有关^[26]。呼吸代谢途径关键酶可调节上述呼吸代谢途径及呼吸强度，进而影响果实采后品质^[13, 27-28]。在 EMP 中，PGI 可将葡萄糖-6-磷酸转变成果糖-6-磷酸，PGI 活性高低可评价 EMP 水平高低^[29]。SDH 是 TCA 循环的关键酶，可将琥珀酸脱氢转化成延胡索酸^[9, 30]。另外，G-6-PDH 和 6-PGDH 是 PPP 的关键酶，酶活性可评价 PPP 水平^[9-10]。此外，NAD (H)、NADP (H) 等吡啶核苷酸也能调节呼吸代谢^[9, 13]。NAD 在 NADK 的作用下被磷酸化成 NADP^[13]。NAD (H) 含量与 EMP、TCA 循环水平有关，而 NADP (H) 含量将影响 PPP 水平^[13]。本研究发现，与对照组对比，NAOS 处理组具有延后的且较低的呼吸高峰及较低的腐烂率，同时也保持较低的 PGI、SDH 活性、NAD (H) 含量，较高的 G-6-PDH+6-PGDH、NADK 活性、NADP (H) 含量。因此，NAOS 处理降低西番莲果实的 PGI、SDH 活性而提升 G-6-PDH+6-PGDH 总活性，也提高果实的 NADK 活性、NADP (H) 含量而降低 NAD (H) 含量，增强了 PPP 水平而削弱了 EMP 与 TCA 循环水平，从而延缓果实呼吸高峰而减轻其采后品质变化，进而减缓腐烂发生。类似地，Lin 等^[13]研究发现，柠檬酸丙酯处理减缓龙眼果肉发生自溶与其保持较高水平的 PPP、较低水平的 EMP 和 TCA 循环有关。Li 等^[29]研究表明，海藻糖处理提高苹果的 G6PDH 活性而降低 PGI、SDH 活性，进而提高 PPP 水平而降低 EMP、TCA 循环水平，从而保持果实品质。

CCO、AAO 及 PPO 是重要的呼吸末端氧化酶^[12-13]，它们影响着电子传递链 (ETC)，间接反映电子传递效率和呼吸代谢水平^[10, 31]。本研究发现，和对照组相比，NAOS 处理组在贮藏 0~18 d 保持较低 CCO 和 PPO 活性，在贮藏 6~18 d 保持较低 AAO 活性。同时，NAOS 处理组具有较低的呼吸高峰与腐烂率。因此推测，NAOS 处理通过降低呼吸末端氧化酶水平而削弱电子传递效率及呼吸代谢，推移呼吸高峰，有利于减少能量与底物的消耗，进而稳定果实品质而延缓衰老发生。类似地，Lin 等^[27]研究发现，较低活性的 AAO 和 CCO 是减缓龙眼发生果皮褐变的关键因素。Song 等^[32]研究报道，一氧化氮处理延缓桃果实冷害发生与其具有较低的 CCO 活性有关。

4 结论

NAOS 处理降低了西番莲果实的 PGI 和 SDH 活性、NAD (H) 含量，提高了 NADK 和 G-6-PDH+6-PGDH 活性、NADP (H) 含量，从而保持较低的 EMP 和 TCA 循环水平，并且减缓电子传递，增强 PPP 水平，从而减少能量及营养物质的消耗。NAOS 处理可调节西番莲果实采后呼吸代谢途径，抑制呼吸高峰，延缓后熟和衰老，从而减少水分散失和物质消耗，维持果实质量、质地、呈味物质和外观等品质特征，减缓果实衰老。本研究表明 NAOS 具有调控采后西番莲果实生理、延缓其品质败坏的作用，这为海藻寡糖在果蔬采后保鲜和生

理调控方面的应用提供了理论依据。

参考文献 References:

- [1] 林育钊, 陈蕾伊, 陈佳怡, 蒋璇靓, 郑金水, 陈洪彬. ϵ -聚赖氨酸对西番莲果实采后病害与抗病物质代谢的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(3): 142-149.
- LIN Yuzhao, CHEN Leiyi, CHEN Jiayi, JIANG Xuanjing, ZHENG Jinshui, CHEN Hongbin. Effect of ϵ -poly-L-lysine on postharvest diseases and disease-resistant substance metabolism in passion fruits[J]. Food Science, 2024, 45(3): 142-149.
- [2] 林育钊, 陈蕾伊, 陈洪彬, 郑金水, 蒋璇靓, 杨菁美. 4种包装材料对西番莲果实贮藏效果的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 134-140.
- LIN Yuzhao, CHEN Leiyi, CHEN Hongbin, ZHENG Jinshui, JIANG Xuanjing, YANG Jingmei. Effects of four packaging materials on preservation of passion flower (*Passiflora caerulea* L.) fruit[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 134-140.
- [3] 郭欣, 林育钊, 曾玲珍, 林静颖, 余星星, 林河通. 不同浓度壳聚糖处理对采后西番莲果实耐贮性和贮藏品质的影响[J]. 热带作物学报, 2020, 41(8): 1665-1673.
- GUO Xin, LIN Yuzhao, ZENG Lingzhen, LIN Jingying, YU Xingxing, LIN Hetong. Effects of different concentrations of chitosan treatment on storability and storage quality of passion fruit postharvest[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(8): 1665-1673.
- [4] 陈果, 林育钊, 郭欣, 林河通. 西番莲采后品质劣变及贮藏保鲜技术研究进展[J]. 亚热带植物科学, 2020, 49(4): 323-328.
- CHEN Guo, LIN Yuzhao, GUO Xin, LIN Hetong. Research advances in quality deterioration and storage technologies of harvested passion fruit[J]. Subtropical Plant Science, 2020, 49(4): 323-328.
- [5] YOU M, DUAN X Y, LI X, LUO L J, ZHAO Y, PAN H H, GONG W L, YANG L R, XIANG Z, LI G F. Effect of 1-methylcyclopropene combined with chitosan-coated film on storage quality of passion fruit[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2022, 27: 100679.
- [6] WANG H L, CHEN H B, LIN Y, LI M L, LIU Q Q, LIN Y Z, JIANG X J, CHEN Y H. Insights into the isolation, identification, and biological characterization analysis of and novel control strategies for *Diaporthe passiflorae* in postharvest passion fruit[J]. Journal of Fungi, 2023, 9(10): 1034.
- [7] DO CARMO SANTOS J T, PETRY F C, DE CASTRO TOBARUELA E, MERCADANTE A Z, GLORIA M B A, COSTA A M, LAJOLO F M, HASSIMOTTO N M A. Brazilian native passion fruit (*Passiflora tenuifila* Killip) is a rich source of proanthocyanidins, carotenoids, and dietary fiber[J]. Food Research International, 2021, 147: 110521.
- [8] ZHANG S, LIN H T, LIN Y F, LIN Y X, HUNG Y C, CHEN Y H, WANG H, SHI J. Energy status regulates disease development and respiratory metabolism of *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff. & Maubl.-infected longan fruit[J]. Food Chemistry, 2017, 231: 238-246.

-
- [9] LIN Y X, LIN H T, CHEN Y H, WANG H, LIN M S, RITENOUR M A, LIN Y F. The role of ROS-induced change of respiratory metabolism in pulp breakdown development of longan fruit during storage[J]. Food Chemistry, 2020, 305: 125439.
- [10] LIU Q Q, XIE H L, CHEN Y H, LIN M S, HUNG Y C, WANG H, FAN Z Q, LIN Y F, LIN H T. Acidic electrolyzed oxidizing water delayed the breakdown occurrence in pulp of fresh longan by regulating the metabolisms of respiratory and energy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 205: 112531.
- [11] LIN L J, LIN H T, CHEN Y, ZHANG H L, WANG X Q, LIN M S, CHEN Y H, WANG H, FAN Z Q, LIN Y F. Respiratory and energy metabolisms participate in the disease occurrence of fresh Chinese olive caused by *Pestalotiopsis microspora*[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 205: 112514.
- [12] SUN B L, KUANG X Y, LIN H T, LIN M S, CHEN Y Z, ZENG L Z, LIN Y F, CHEN Y H, WANG H, FAN Z Q. The role of respiratory metabolism in chilling injury development of Chinese olive fruit during cold storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 205: 112489.
- [13] LIN Y X, LIN Y F, LIN M S, CHEN L, LI H, LIN H T. Propyl gallate postharvest treatment improves the storability of longans by regulating the metabolisms of respiratory and disease-resistance substances[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 206: 112556.
- [14] 余劲聪. 海藻寡糖在农业领域的应用研究进展[J]. 南方农业学报, 2016, 47(6): 921-927.
YU Jincong. Research progress in application of seaweed oligosaccharides in agriculture[J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(6): 921-927.
- [15] LI L, JIANG J J, YAO Z, ZHU B W. Recent advances in the production, properties and applications of alginate oligosaccharides - a mini review[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2023, 39(8): 207.
- [16] 万艳玲, 温超, 龚林锋, 曾翰庭, 王成鹏. 新琼寡糖对多头切花月季“爱丽丝”保鲜效果的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(17): 154-157.
WAN Yanling, WEN Chao, GONG Linfeng, ZENG Hanting, WANG Chengpeng. Effects of Neoagaro-oligosaccharides on preservation of spray cut rose 'Alice' [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(17): 154-157.
- [17] BOSE S K, HOWLADER P, JIA X C, WANG W X, YIN H. Alginate oligosaccharide postharvest treatment preserve fruit quality and increase storage life *via* abscisic acid signaling in strawberry[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 665-674.
- [18] 蓝炎阳, 高剑龙, 曾润颖, 王少峰. 海藻寡糖对琯溪蜜柚保鲜品质的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2013, 42(5): 480-484.
LAN Yanyang, GAO Jianlong, ZENG Runying, WANG Shaofeng. Effects of algae-oligosaccharides treatment on storage quality of Guanxi honey pomelo fruit[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2013, 42(5): 480-484.

-
- [19] HOU Y P, GAO J, GU L, WANG S F, ZENG R. Effects of agaro-oligosaccharide treatment on postharvest quality of cherry tomatoes during cold storage[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39: 949-955.
- [20] LI M L, LIN Q, CHEN Y Z, CHEN Y H, LIN M S, HUNG Y C, LIN H T. Acidic electrolyzed water treatment suppresses *Phomopsis longanae* Chi-induced the decreased storability and quality properties of fresh longans through modulating energy metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134572.
- [21] HAO Y Q, CHEN F H, WU G B, GAO W Y. Impact of postharvest nitric oxide treatment on lignin biosynthesis-related genes in wax apple (*Syzygium samarangense*) fruit[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(45): 8483-8490.
- [22] LIN Y Z, LI N, LIN H T, LIN M S, CHEN Y H, WANG H, RITENOUR M A, LIN Y F. Effects of chitosan treatment on the storability and quality properties of longan fruit during storage[J]. *Food Chemistry*, 2020, 306: 125627.
- [23] 罗振宇, 陈晓婷, 李雨函, 汪莹, 苏金强, 杨静, 兰嘉滢, 倪辉, 张琄, 林河通. 采后黄金百香果失水规律及其与品质劣变的关系[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(1): 369-377.
- LUO Zhenyu, CHEN Xiaoting, LI Yuhan, WANG Ying, SU Jinqiang, YANG Jing, LAN Jiaying, NI Hui, ZHANG Shen, LIN Hetong. Postharvest water loss pattern of golden passion fruit and its relationship with quality deterioration[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(1): 369-377.
- [24] HU W Y, ZHANG X Y, GODANA E A, GU X Y, ZHAO L N, ZHANG H Y. *Yarrowia lipolytica* reduces the disease incidence of *Asparagus* infected by *Fusarium proliferatum* by affecting respiratory metabolism and energy status[J]. *Biological Control*, 2021, 159: 104625.
- [25] TAN X L, FAN Z Q, ZENG Z X, SHAN W, KUANG J F, LU W J, SU X G, TAO N G, LAKSHMANAN P, CHEN J Y, ZHAO Y T. Exogenous melatonin maintains leaf quality of postharvest Chinese flowering cabbage by modulating respiratory metabolism and energy status[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 177: 111524.
- [26] TAO S K, ZHU Y, PAN Y G, ZHANG Z K, HUANG L J. Enhancement of respiratory metabolism of the pentose phosphate pathway (PPP) strengthens the chilling tolerance of postharvest *Papaya* fruit stored at 1 °C[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 191: 111988.
- [27] LIN Y F, CHEN Y Z, ZHENG Y, ZHANG H L, LIN M S, WANG H, FAN Z Q, CHEN Y H, LIN H T. Energy and respiratory metabolism participate in dicyclohexylcarbodiimide and disodium succinate-mediated the alteration of energy status modulating pericarp browning of fresh longan[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 213: 112959.
- [28] CHEN Y H, SUN J Z, LIN H T, LIN M S, LIN Y F, WANG H, HUNG Y C. Salicylic acid reduces the incidence of *Phomopsis longanae* Chi infection in harvested longan fruit by affecting the energy status and respiratory metabolism[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 160: 111035.

-
- [29] LI C Y, SUN L, ZHU J, CHENG Y, HUANG R, FAN Y T, GUO M, GE Y H. Trehalose maintains the quality of *Malus domestica* by mediating sucrose and respiratory metabolism[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 295: 110857.
- [30] CHEN C Y, CAI N, WAN C P, KAI W B, CHEN J Y. Carvacrol delays *Phomopsis* stem-end rot development in pummelo fruit in relation to maintaining energy status and antioxidant system[J]. *Food Chemistry*, 2022, 372: 131239.
- [31] WANG D, MA Q, LI D, LI W X, LI L, AALIM H, LUO Z S. Moderation of respiratory cascades and energy metabolism of fresh-cut pear fruit in response to high CO₂ controlled atmosphere[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 172: 111379.
- [32] SONG C C, ZHAO Y Y, LI A, QI S N, LIN Q, DUAN Y Q. Postharvest nitric oxide treatment induced the alternative oxidase pathway to enhance antioxidant capacity and chilling tolerance in peach fruit[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 167: 113-122.