

采前赤霉素处理对‘石硖’龙眼常温贮藏性的影响

宁陈宁¹, 林小兰¹, 李俊¹, 夏如云¹, 龙栎冰¹, 韩冬梅², 吴振先^{1,3*}, 罗焘^{1,3*}

(1. 华南农业大学园艺学院, 广东省果蔬保鲜重点实验室, 南方园艺产品保鲜教育部工程研究中心, 广东广州 510642) (2. 广东省农业科学院果树研究所, 农业部亚热带果树生物学与遗传资源利用重点实验室, 广东广州 510640) (3. 农业农村部华南地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 广东广州 510642)

摘要: 花后 85 d+95 d 以含 50 mg/L GA₃ (T1) 和 150 mg/L GA₃ (T2) 的赤霉素 920、含 50 mg/L (GA₄+GA₇)+0.33 mg/L EBRs (T3) 和 150 mg/L (GA₄+GA₇)+1 mg/L EBRs (T4) 的 2,4-表芸苔·赤霉酸及对照 (清水) 喷施处理‘石硖’龙眼, 商业成熟后采收, 于常温下 (25±1 °C, 相对湿度 85%) 贮藏, 分析各处理对生理、品质和贮藏性的影响。结果表明, T1、T2、T3 可延缓龙眼腐烂、质量损失、内果皮褐变和果肉自溶, T1 效果最显著。T1 显著延缓果皮的色度 L*、b*、h° 和 C* 值下降、a* 值的上升、相对电导率的升高、总酚和类黄酮含量的下降。T1 组果皮的总抗氧化能力平行高于对照, 贮藏后期的多酚氧化酶、漆酶和过氧化物酶活性显著低于对照, 而过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶的活性高于对照。T1 处理未显著影响果肉 TSS、TA 和维生素 C 含量。T1 延缓果肉自溶的显著效果可能与其显著下调贮藏中后期多聚半乳糖醛酸酶和 β-半乳糖苷酶的活性。因此, 采前 920 (50 mg/L GA₃) 喷施有效延缓常温贮藏‘石硖’的果皮褐变和果肉自溶, 可为采前激素处理提升龙眼贮藏性提供重要参考。

关键词: 龙眼; 赤霉素; 贮藏; 抗氧化

文章编号: 1673-9078(2025)02-153-166

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.2.0142

Effects of Preharvest Gibberellin Treatments on the Room-temperature Storability of ‘Shixia’ Longan Fruit

NING Chenning¹, LIN Xiaolan¹, LI Jun¹, XIA Ruyun¹, LONG Libing¹, HAN Dongmei², WU Zhenxian^{1,3*}, LUO Tao^{1,3*}

(1.College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Postharvest Science of Fruits and Vegetables, Engineering Research Center for Postharvest Technology of Horticultural Crops in South China Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)(2.Institute of Fruit Tree Research, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of South Subtropical Fruit Biology and Genetic Resource Utilization, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510640, China)(3.Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (South China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510642, China)

引文格式:

宁陈宁,林小兰,李俊,等.采前赤霉素处理对‘石硖’龙眼常温贮藏性的影响[J].现代食品科技,2025,41(2):153-166.

NING Chenning, LIN Xiaolan, LI Jun, et al. Effects of preharvest gibberellin treatments on the room-temperature storability of ‘Shixia’ longan fruit [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 153-166.

收稿日期: 2024-01-30

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家荔枝龙眼产业技术体系 (CARS-32); 广东省基础与应用基础研究基金面上项目 (2022A1515012049); 广西康养食品科学与技术重点实验室开放课题 (GXKYSYS202206); 广西自然科学基金-青年科学基金项目 (2022GXNSFBA035001); 广州市重点研发计划项目 (2023B01J2001-1); 国家自然科学基金青年基金项目 (31801910)

作者简介: 宁陈宁 (2000-), 女, 在读硕士, 研究方向: 龙眼品质保持与代谢调控研究。E-mail: ningcn@stu.scau.edu.cn

通讯作者: 吴振先 (1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 热带亚热带园艺产品采后科学与技术, E-mail: litchi2008@126.com; 共同通讯作者: 罗焘 (1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 园艺植物采后生物学与代谢组学, E-mail: luotao0502@scau.edu.cn

Abstract: At 85 and 95 days after flowering, ‘Shixia’ longan fruits were treated with four treatments (T1-4): gibberellin 920 containing 50 mg/L GA₃ (T1), gibberellin 920 with 150 mg/L GA₃ (T2), 2,4-epibrassinolide combined with gibberellic acid consisting of 50 mg/L (GA₄+GA₇) + 0.33 mg/L EBRs (T3), and 2,4-epibrassinolide combined/gibberellic acid with 150 mg/L (GA₄+GA₇) + 1 mg/L EBRs (T4)]. A control group was established by spraying the fruits with water. The commercially mature fruits were harvested and stored at room temperature (25 ± 1 °C, relative humidity of 85%) to evaluate the effect of each treatment on the physiology, quality, and storability of the fruits. The results showed that except T4, the other three treatments reduced the rotting rate, weight loss rate, endocarp browning, and pulp breakdown of longan during storage and T1 exhibited the most significant effects. T1 significantly delayed the decrease in *L**, *b**, *h°*, and *C** values; increase in *a** values and relative electrical conductivity; and decrease in total phenolic and flavonoid contents during storage. The total antioxidant capacity of the pericarp of the T1 group was consistently higher than that of the control group. Additionally, the activities of polyphenol oxidase, laccase, and peroxidase in the T1 pericarp were significantly lower than those in the control at the late storage stages. However, the activities of catalase and ascorbate peroxidase were higher in the T1 pericarp. T1 did not significantly affect the contents of total soluble solids, titratable acidity, and vitamin C in longan pulp. The remarkable effects of T1 on delaying pulp breakdown may be related to its significant reduction of activities of polygalacturonase and β-galactosidase in the middle and late storage stages. Therefore, preharvest 920 (50 mg/L GA₃) spraying delays the pericarp browning and pulp breakdown of ‘Shixia’ longan during room-temperature storage. These results provide an important reference for improving the storability of longan by preharvest hormone treatments.

Key words: longan; gibberellin; storage; antioxidation

龙眼 (*Dimocarpus longan* Lour.), 俗称桂圆, 是一种无患子科龙眼属的热带和亚热带水果, 其产地主要分布在亚洲南部, 包括中国、泰国、越南和印度^[1]。龙眼果皮和种子中含有丰富的多酚, 果肉多糖的活性高, 研究表明龙眼及其相关产品具有抗氧化、降血、抑菌、增强免疫力和抗肿瘤等作用^[2-4]。然而, 由于在夏季采收, 龙眼采后生理代谢旺盛, 在贮藏期间易腐烂、易发生果皮褐变和果肉自溶等劣变, 不耐贮藏的特性严重影响采后龙眼果实品质维持, 制约龙眼的采后贮运和远距离销售。

近30年来, 一系列物理的、化学的和生物的采后处理方法被报道可有效延缓龙眼果实的采后品质劣变、提高贮藏性和货架期^[1]。但关于采前处理提高龙眼果实贮藏性的报道仍然不多。研究发现采前用卡多赞^[5](稀释750倍)、二乙基二硫代氨基甲酸钠^[6](Sodium Diethyldithiocarbamate, DDTC)、ZnSO₄^[7]等处理龙眼, 可有效提高采后果实的抗病性, 延缓果皮褐变, 保持较高的好果率。植物生长调节剂在龙眼采前广泛应用, 合理的处理可有效保持采后龙眼果肉细胞膜结构的完整性、抑制采后龙眼果皮酚类物质的分解, 抑制活性氧和褐变相关酶的活性等, 从而延缓果肉自溶的发生和果皮褐变, 提高果实品质和贮藏性。采前喷施胺鲜酯 (Diethyl Aminoethyl Hexanoate, DA-6)^[8]、水杨

酸^[9]、MeJA^[10]、褪黑素^[11]等处理龙眼发现能有效提高采后龙眼果实的抗病能力, 进而减轻采后病害。

赤霉素是一类天然植物激素, 能促进植物提早开花和营养生长, 提高果实品质。在合适的采前时期以合适剂量的赤霉素处理有助于提高果实的品质和贮藏性被大量报道^[12]。赤霉素通常作为植物生长调节剂使用, 采前喷施可以保持果实较高呼吸速率^[13]、提高可溶性固形物 (Total Soluble Solid, TSS)^[14]、抑制花青素的降解^[15]和提高产量^[16]等。花后5 d以10 mg/L的GA₃喷施花穗可显著提高‘石硖’龙眼果实的单果重、体积、横纵径, 使得糖分积累提前, 但果实采收时并不改变糖组分比例^[17]。类似地, 花后10 d喷施30 mg/L GA₃并未改变龙眼成熟时的糖含量, 但可加快成熟过程中糖的积累^[18]。Luo等^[12]在花后85、95、105、115 d喷施50 mg/L GA₃, 相比对照, 显著降低留树龙眼果肉的退糖 (糖分消耗) 幅度, 并使果肉维持更高的还原型谷胱甘肽、维生素C、总类黄酮和总酚含量。综上所述, 外源赤霉素GA₃是一种安全有效的生长调节剂和保鲜剂, 有助于维持果实品质并提高采后贮藏性。本研究以广东主栽品种‘石硖’龙眼为试验对象, 在龙眼发育成熟期对果实进行不同浓度的920和GA₄+GA₇+BR喷施处理, 以清水为对照, 分析其对采后龙眼果实品质和贮藏性的影响。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料及处理

1.1.1 试验材料

本试验以广东省主栽的‘石硖’龙眼为材料,在惠东县荔龙专业种养合作社果园进行试验。2022年6月9日,挑选树势中等,挂果情况良好的试验树,根据树势保留果穗约占全树60%~70%。选取主轴长度约20~25 cm的果穗用于试验,依据结果枝粗度和营养状况,单穗果数控制在约50~70粒/穗。

1.1.2 试验试剂和仪器

试剂:赤霉素(商品名“920”,乳剂,GA₃有效成分含量3 wt.%),上海同瑞生物科技有限公司;2,4-表芸苔·赤霉酸(乳剂,总有效成分含量1.51 wt.%,赤霉酸GA₄+GA₇含量1.5 wt.%,2,4-表芸苔素内酯含量0.01 wt.%),陕西韦尔奇作物保护有限公司;交联聚乙烯吡咯烷酮、愈创木酚、邻苯二酚、表儿茶素、二硫苏糖醇、对硝基苯-β-D-吡喃半乳糖苷、FC福林酚,天津市麦克林生化科技股份有限公司;氯化钠、氢氧化钠、对硝基苯酚、无水乙醇,天津市大茂化学试剂厂;聚乙烯吡咯烷酮、乙二胺四乙酸、亚硝酸钠、硝酸铝,上海生工生物工程股份有限公司;φ=30%过氧化氢、L-(+)-抗坏血酸、无水碳酸钠,广东广试试剂科技有限公司;乙酸钠,天津市科密欧化学试剂有限公司;没食子酸,福晨(天津)化学试剂有限公司;芦丁:上海如吉生物科技有限公司。以上试剂均为分析纯。测定总抗氧化能力使用的试剂盒均购自南京建成生物工程研究所(FRAP法试剂盒型号A015-3-1;ABTS法试剂盒型号A015-2-1)。

仪器:NH310便携式电脑色差计,深圳市三恩驰科技有限公司;5426微型离心机,Eppendorf(中国)有限公司;iCEN-24R高速冷冻离心机,杭州奥盛仪器有限公司;PR-32α数显折光仪,ATAGO(爱拓)中国分公司/广州市爱宕科学仪器有限公司;KQ5200E型超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;Multiskan Sky全波长酶标仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;QL-901涡旋仪,海门市其林贝尔仪器制造有限公司;DDS-307电导率仪,成都世纪方舟科技有限公司。

1.1.3 采前处理与取样

每个处理选择15穗分布均匀、长势良好的果

穗。于花后2022年7月7日(花后85 d)和2022年7月17日(花后95 d)对果穗进行以下喷施处理(每个果穗500 mL):T1,GA₃当量为50 mg/L的920;T2,GA₃当量为150 mg/L的920;T3,2,4-表芸·赤霉酸(含50 mg/L GA₄+GA₇+0.33 mg/L 2,4-表芸苔素内酯EBRs);T4,2,4-表芸苔·赤霉酸(含150 mg/L GA₄+GA₇+1 mg/L EBRs);同时以清水喷施为对照(CK)。于2022年7月24日(花后102 d,90%~95%成熟度)将所有处理的果实采摘,采摘后立即运到实验室。

1.1.4 采后贮藏

每个处理挑选成熟度、大小一致、无病虫害和机械损伤的龙眼果实各600颗,分别用500 mg/L施保克浸泡2 min,室温晾30 min后装入塑料托盘,用0.01 mm厚的聚乙烯薄膜包装,贮藏在25±1℃,85%相对湿度的恒温箱中。以采果当天为第0天开始,在贮藏第3、6、8和10天测定生理指标、计算内果皮褐变指数和果肉自溶指数后,拍照记录。取样时去除种子,将果皮和果肉剥离分开,分别用液氮冻结彻底后以锡箔纸包好,放于自封袋,保存在-80℃冰箱中备用。

1.2 测定方法

1.2.1 果皮色度测定

参照吴振先等^[19]的方法,使用色差计测定龙眼外果皮的色度值。每个处理随机选取20个龙眼果实,在果实赤道部位随机选取3个点测定L*、a*、b*、C*、h°值,分别取平均数得到每个果的色度值,其中L*值(0黑~100白)表示亮度,L*值越大,果皮亮度越高;a*值由负到正表示由绿到红,即a*值越大越红;b*值由负到正表示由蓝到黄;C*值表示表示颜色的纯度或色彩的饱和度,即C*值越大,色彩越浓颜色越鲜艳。h°为色调角。每个处理重复3次。

1.2.2 失重率测定

每个处理随机取3盘龙眼果实,编号并称量(记录称重时间,并在该固定时间点进行后续的称重),记录为贮藏0 d时的初始质量,之后在贮藏第3、6、8和10天的固定时间点测定每盘果的质量,计算方法见公式(1):

$$A = \frac{M_0 - M_n}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

A —果实失重率 (Mass Loss, ML), %;

M_0 —贮藏第 0 天的果实质量, g;

M_n —贮藏第 n 天的果实质量, g。

1.2.3 内果皮褐变指数的评定

参照韩冬梅等^[20]的方法, 略有改动。每次随机取 3 盘龙眼果实, 剥开果皮, 根据内果皮褐变面积与果皮总面积的比值将褐变程度划分成 6 个等级: 0 级: 内果皮白皙无褐斑; 1 级: 褐斑面积 / 果皮总面积 < 25%; 2 级: 褐斑面积 / 果皮总面积为 25.1%~50%; 3 级: 褐斑面积 / 果皮总面积为 50.1%~75%; 4 级: 褐斑面积 / 果皮总面积为 75.1%~99%; 5 级: 全部褐变。记录每盘中每个褐变等级的果实数量, 根据公式 (2) 计算褐变指数。

$$B = \frac{\sum(S \times n)}{N} \quad (2)$$

式中:

B —内果皮褐变指数 (Pericarp Browning Index, PBI);

S —Score 褐变等级;

n —每个褐变等级的果实数量;

N —测定的果实总数量。

1.2.4 果肉自溶指数的测定

参照韩冬梅等^[20]的方法, 每次随机取 3 个重复的龙眼果实, 观察果实的自溶程度, 根据龙眼果肉自溶程度划分为 6 个等级, 记录不同自溶程度果实的数量, 计算果肉自溶指数 [见公式 (3)]: 0 级: 果肉完整有弹性, 无自溶现象; 1 级: 自溶面积小于整果总面积的 25%; 2 级: 自溶面积占整果总面积的 1/4~1/2; 3 级: 自溶面积占整果总面积的 1/2~3/4; 4 级: 自溶面积占整果总面积的 3/4~1; 5 级: 整果自溶、糜烂。

$$C = \frac{\sum(S \times n)}{N} \quad (3)$$

式中:

C —果肉自溶指数 (Ariil Breakdown Index, ABI);

S —Score 自溶等级;

n —每个自溶等级的果实数量;

N —测定的果实总数量。

1.2.5 拍照

在贮藏的第 0、3、6、8 和 10 天, 从每个处理中随机选取 10~15 个果实, 5 个用于整果外观拍照 (Canon G7X 单反相机)。另外 10 个果实, 果皮对半剥开, 根据 1.2.3 和 1.2.4 测定的内果皮褐变指数

和果肉自溶指数, 选取 5 个果实用于总体代表该组样品内果皮褐变和果肉自溶情况, 拍摄龙眼内果皮和果肉剖面。

1.2.6 果皮相对电导率测定

参照 Luo 等^[12]的方法, 取 10 个果实, 用打孔器制取 30 个直径为 0.5 cm 的圆片 (3 片 / 果), 用蒸馏水漂洗 3 次, 从中取出 10 个小圆片转入含 25 mL 蒸馏水的试管中, 30 min 后用 DDS-307 电导率仪测定浸泡液电导率 (D_1), 然后将试管放入沸水浴 15 min, 流水冷却至室温, 测定全透后的电导率 (D_2), 以蒸馏水做空白, 测定的电导率计为 D_0 , 重复 3 次。根据前后电导率的比值计算相对电导率, 见公式 (4)。

$$D = \frac{D_1 - D_0}{D_2 - D_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

D —果皮相对电导率, %;

D_0 —空白对照值;

D_1 —浸泡 30 min 后测定值;

D_2 —沸水浴后测定值。

1.2.7 可溶性固形物、可滴定酸和维生素 C 含量测定

随机取 20 个果, 去皮去核。参照 Long 等^[1]的方法, 略有修改。用 ATAGO PR-32 α 数显折光仪直接测定果汁可溶性固形物 (Total Soluble Solid, TSS, %) 含量, 用百分率表示, 重复 3 次。吸取果汁 1 mL 于烧杯中, 按照 1:100 的比例稀释龙眼果汁, 用糖酸一体机 (以柠檬酸计) 测定可滴定酸 (Titratable Acidity, TA, %) 含量, 重复 3 次。采用紫外可见分光光度计法测定维生素 C (Vc, mg/mL) 含量, 用 9 900 μ L 草酸溶液 [2% (m/V), pH 值 6.0] 加入 10 μ L 龙眼果汁, 于 267 nm 处测定吸光度, 根据标准曲线计算含量。

1.2.8 龙眼果皮多酚氧化酶、过氧化物酶活性的测定

参照 Luo 等^[12]的方法测定多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 和过氧化物酶 (Peroxidase, POD), 略有改动。取 0.3 g 龙眼果皮冻样, 加入 0.01 g 交联聚乙烯吡咯烷酮 (Polyvinylpyrrolidone Cross-linked, PVPP), 加液氮研细。加入 1.5 mL 的 0.05 mol/L pH 值 7.0 磷酸钠缓冲液, 冰浴浸提 20 min 后剧烈震荡 1 min, 4 $^{\circ}$ C 下 12 000 \times g 离心 20 min, 上清液即为粗酶液。每个样品酶活重复测定 3 次。

PPO 活性测定：300 μL 10 mmol/L 邻苯二酚溶液、300 μL 0.05 mol/L pH 值 7.0 磷酸钠缓冲液，加入 50 μL 酶提取液启动反应，迅速比色，测定 398 nm 条件下 OD 值在 180 s 内的变化量，以每分钟 OD_{398 nm} 变化 0.1 表示 1 个酶活单位 (U)，酶活计算参照公式 (5)。

$$E_1 = \frac{\Delta A_x \times V_t}{0.1 \times t \times V_1 \times FW} \quad (5)$$

式中：

E_1 ——果皮 PPO 酶活力，U/(g·min)；

ΔA_x ——反应前后 OD_{398 nm} 的变化值；

V_t ——酶提取液总体积，mL；

V_1 ——测定时使用酶提取液体积，mL；

FW ——样品鲜重，g；

t ——反应时间，min。

POD 活性测定：90 μL $\phi=0.2\%$ 愈创木酚、30 μL $\phi=0.46\%$ H₂O₂ 和 300 μL 0.05 mol/L pH 值 7.0 磷酸钠缓冲液混合，加入 10 μL 酶提取液启动反应，迅速比色，测定 470 nm 条件下 OD 值在 180 s 内的变化量，以每分钟 OD_{470 nm} 变化 0.1 表示 1 个酶活单位 (U)，酶活计算参照公式 (6)。

$$E_2 = \frac{\Delta A_x \times V_t}{0.1 \times t \times V_1 \times FW} \quad (6)$$

式中：

E_2 ——果皮 POD 酶活力，U/(g·min)；

ΔA_x ——反应前后 OD_{470 nm} 的变化值；

V_t ——酶提取液总体积，mL；

V_1 ——测定时使用酶提取液体积，mL；

FW ——样品鲜重，g；

t ——反应时间，min。

1.2.9 龙眼果皮漆酶活性的测定

参照 Fang 等^[21]的方法测漆酶 (Laccase, LAC)，取 0.3 g 龙眼果皮冻样，加入 0.01 g PVPP，液氮研磨成粉，加入 1.5 mL 含 0.5 mol/L 氯化钠的 0.05 mol/L pH 值 7.0 磷酸钠缓冲液，冰浴浸提 20 min 后剧烈震荡 1 min，4 $^{\circ}\text{C}$ 下 12 000 \times g 离心 20 min，上清液即为粗酶液。取 1 mL 2 mmol/L 表儿茶素，加入 10 μL 酶液启动反应，反应 10 min 后测定 OD_{380 nm}。以加入同体积的灭活酶为对照，酶活计算参照公式 (7)。

$$E_3 = \frac{(OD_1 - OD_2) \times V_t \times 1\ 000}{29\ 600 \times V_1 \times t \times FW} \quad (7)$$

式中：

E_3 ——果皮 LAC 酶活力， $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ；

ΔA_x ——反应前后 OD_{380 nm} 的变化值；

OD_1 ——有活力的 LAC 酶提取液反应后的 OD_{380 nm} 值；

OD_2 ——灭活的 LAC 酶提取液反应后的 OD_{380 nm} 值；

V_t ——反应体系最终体积，mL；

V_1 ——测定时使用酶提取液体积，mL；

FW ——样品鲜重，g；

t ——反应时间，h。

1.2.10 抗坏血酸过氧化物酶和过氧化氢酶活性测定

采用 Lin 等^[22]的方法测抗坏血酸过氧化物酶 (Ascorbate Peroxidase, APX) 和过氧化氢酶 (Catalase, CAT)，略作修改。准确称取研磨充分的龙眼组织 0.2 g，加 1 mL 0.05 mol/L 磷酸缓冲液 (含 2 mmol/L 抗坏血酸、1 mmol/L 乙二胺四乙酸，pH 值 7.0) 匀浆，冰浴浸提 30 min。12 000 \times g，4 $^{\circ}\text{C}$ 离心 20 min，上清液作为酶提取液用于 APX 和 CAT 酶活测量。

APX 酶活测定：将 2.3 mL 磷酸缓冲液 (0.05 mol/L，含 2 mmol/L 抗坏血酸、1 mmol/L 乙二胺四乙酸，pH 值 7.0)、0.3 mL 0.5 mmol/L 抗坏血酸和 0.3 mL 1 mmol/L H₂O₂ 混匀 (以磷酸缓冲液配制)，加 0.1 mL 酶提取液启动反应，立刻记录 290 nm 处吸光度在 180 s 内的下降 (反映抗坏血酸的氧化)。以每分钟吸光值变化 0.01 定义为 1 个酶活单位，酶活以 U/(g·min) 表示。

CAT 酶活测定反应体系含 2.8 mL $\phi=0.3\%$ H₂O₂ (以 0.05 mol/L pH 值 7.0 磷酸缓冲液配制) 和 0.2 mL 酶提取液。在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下记录 240 nm 处吸光度 180 s 内的变化。以每分钟吸光度变化 0.01 定义为一个单位，酶活以 U/(g·min) 表示。

1.2.11 龙眼果皮总酚、类黄酮和总抗氧化能力测定

制备样品提取液：取适量样品加入研钵中，加入液氮研磨成粉末。称取 0.1 g 样品粉末至预冷过 2 mL 离心管中，立即加入 1 000 μL $\phi=80\%$ 乙醇，震荡 1 min，超声波萃取 20 min (加冰降温至 4 $^{\circ}\text{C}$ 左右)，结束后取出放置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱，过夜，第二天涡旋 30~60 s，4 $^{\circ}\text{C}$ 下，12 000 \times g 离心 10 min，转移上清液到新的 2 mL 离心管中，用于总酚含量 (Total Phenolic Content, TPC)、总类黄酮含量 (Total Flavonoid Content, TFC) 和总抗氧化能力 (Total Antioxidant Capacity, TAC) 测定，每个样品设置 3 管重复，每管测定 2 次。

TPC 测定：参照 Shuai 等^[23]的方法，略有改动。取 10 μL 提取液于 5 mL 离心管中，加蒸馏水 590 μL ，摇匀。

同时另取 600 μL 蒸馏水作为空白对照管。分别依次加入 50 μL FC 福林酚试剂和 150 μL 20 wt.% Na_2CO_3 溶液,用蒸馏水定容至 2.5 mL, 30 $^\circ\text{C}$ 避光放置 0.5 h, 于 760 nm 下测定吸光值, 样品 $\text{OD}_{760\text{nm}}$ 记为 A_x , 空白对照记为 A_0 。用没食子酸标准品设置浓度梯度制作标准曲线。样品总酚含量以 A_x-A_0 的值从标准曲线获取 TPC 浓度。样品最终的 TPC 以没食子酸当量 (GAE) 按照公式 (8) 计算:

$$E_4 = \frac{C \times n \times V}{m} \quad (8)$$

式中:

E_4 —果皮 TPC 含量 (GAE), mg/g;

C —从标准曲线查得的 TPC 质量浓度, mg/mL;

n —测定时提取液稀释倍数;

V —提取液总体积, mL;

m —样品鲜重质量, g。

TFC 测定: 参照 Fraga 等^[24]的方法, 略有改动。取 20 μL 提取液于 2 mL 离心管中, 加 480 μL $\varphi=80\%$ 乙醇。同时另取 1 个 2 mL 离心管加入 500 μL $\varphi=80\%$ 乙醇, 作为空白对照。加入 50 μL 5 wt.% NaNO_2 溶液, 摇匀后放置 6 min。加入 50 μL 10 wt.% $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液, 摇匀后放置 6 min, 加入 400 μL 4 wt.% NaOH 溶液, 摇匀, 放置 10 min。于 510 nm 处测定吸光值, 样品 $\text{OD}_{510\text{nm}}$ 记为 A_x , 空白对照记为 A_0 。用芦丁标准品设置浓度梯度制作标准曲线。样品总类黄酮含量以 A_x-A_0 的值从标准曲线获取 TFC 浓度。样品最终的 TFC 以芦丁当量 (RE) 按照公式 (9) 计算:

$$E_5 = \frac{C \times n \times V}{m} \quad (9)$$

式中:

E_5 —果皮 TFC 含量 (RE), mg/g;

C —从标准曲线查得的 TFC 质量浓度, mg/mL;

n —测定时提取液稀释倍数;

V —提取液总体积, mL;

m —样品鲜重质量, g。

总抗氧化能力以 FRAP 法 (Ferric Ion Reducing Antioxidant Power, 铁离子还原 / 抗氧化能力法) 和 ABTS (2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) 法测定, 步骤简述如下:

FRAP 法: 取 100 μL 果皮提取液于 2 mL 离心管中, 加入 1 100 μL $\varphi=80\%$ 乙醇稀释, 摇匀, 配置 FRAP 工作液 (以 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 制作标准曲

线)。37 $^\circ\text{C}$ 孵育 4 min, 于 593 nm 处测定吸光值 A_x 。根据标准曲线计算每 g 鲜重的 FRAP (mmol $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}/\text{g}$) 抗氧化能力。

ABTS 法: 取 20 μL 果皮提取液于 2 mL 离心管中, 加入 980 μL $\varphi=80\%$ 乙醇稀释, 摇匀。将 ABTS 溶解在蒸馏水中, 加入过氧化氢, 使其氧化生成自由基 ABTS^+ , 配制 ABTS^+ 工作液。配制 Trolox 梯度浓度溶液用于制作标准曲线。样品提取液和标准液分别加入 ABTS^+ 溶液, 室温反应 6 min, 于 405 nm 处测定吸光值 A_x 。根据标准曲线以 Trolox 当量 (Trolox Equivalent, TE) 计算每 g 鲜重的总抗氧化能力 ABTS-AP (mmol/g)。

1.2.12 龙眼果肉细胞壁降解酶活性的测定

参照 Long 等^[1]的方法测定多聚半乳糖醛酸酶 (Ploygalacturonase, PG)、果胶酯酶 (Pectinesterase, PE) 和 β -半乳糖苷酶 (β -galactosidase, β -Gal) 酶活, 略作修改。1 g 样品与 5 mL 50 mmol/L 乙酸钠缓冲液 (含有 100 mmol/L NaCl 、5 mmol/L 二硫苏糖醇 (Dithiothreitol, DTT) 和 5 wt.% 聚乙烯吡咯烷酮, pH 值 5.2) 一起研磨, 4 $^\circ\text{C}$ 下 7 000 \times g 离心 20 min, 收集上清液用于 PE、PG 和 β -Gal 的酶活测定。

PG 酶活测定: 混合 0.65 mL 50 mmol/L 乙酸钠缓冲液 (pH 值 4.5) (提前预热)、0.25 mL 10 g/L 多聚半乳糖醛酸 (提前预热) 和 0.1 mL 酶液 (果肉酶提取液稀释 5 倍, 提前预热; 以沸水浴 5 min 的酶提取液为对照), 在 37 $^\circ\text{C}$ 下保温 1 h。迅速加入 0.75 mL 3,5-二硝基水杨酸试剂 (DNS 试剂), 沸水浴 5 min 后冷却至室温, 稀释 5 倍, 于 540 nm 处测定吸光度。根据样品反应管和对照管溶液吸光度值的差值, 从标准曲线上查得相应葡萄糖质量。以 37 $^\circ\text{C}$ 下每小时催化多聚半乳糖醛酸水解生成 1 μg 半乳糖醛酸所需酶量为一个酶活单位 U, 参照公式 (10):

$$E_6 = \frac{m' \times V \times 1.08 \times 1\,000}{V_S \times t \times m} \quad (10)$$

式中:

E_6 —果肉 PG 酶活力, U/(g \cdot h);

m' —从标曲查得的葡萄糖质量, mg;

V —酶提取液总体积, mL;

V_S —测定时使用酶提取液体积, mL;

t —酶促反应时间, h;

m —样品鲜重, g。

PE 酶活测定: 将 0.75 mL 酶液 (提前预热) 与

2.5 mL $\varphi=1\%$ 果胶（提前预热）混合，于 37 °C 保温 30 min。沸水浴 5 min 后，以 0.01 mol/L NaOH 滴定调节 pH 值至 7.4，记下使用 NaOH 的量。以每小时消耗 1 μmol NaOH 溶液所需酶量定义为一个 PE 酶活单位 U，酶活以 U/(g·h) 表示。

β -Gal 酶活测定：混合 0.25 mL 5 mmol/L 对硝基苯- β -D-吡喃半乳糖苷（提前预热）和 0.25 mL 酶提取液（提前预热；以沸水浴 5 min 的酶提取液为对照），在 37 °C 下保温 30 min。立即加入 1 mL 1 mol/L Na_2CO_3 摇匀终止反应。以 150 $\mu\text{mol/L}$ 对硝基苯酚（PNP）为标准，在 400 nm 处测定还原产物的浓度。以 37 °C 下每小时催化 PNP 水解释放产生 1 nmol PNP 所需酶量为一个 β -Gal 酶活单位 U，酶活计算参照公式（11）：

$$E_7 = \frac{m' \times V \times 1\,000}{V_s \times t \times m} \quad (11)$$

式中：

E_7 ——果肉 β -Gal 酶活力，U/(g·h)；

m' ——从标曲查得的 PNP 的量， μmol ；

V ——酶提取液总体积，mL；

V_s ——测定时使用酶提取液体积，mL；

t ——酶促反应时间，h；

m ——样品鲜重，g。

1.2.13 数据处理及分析方法

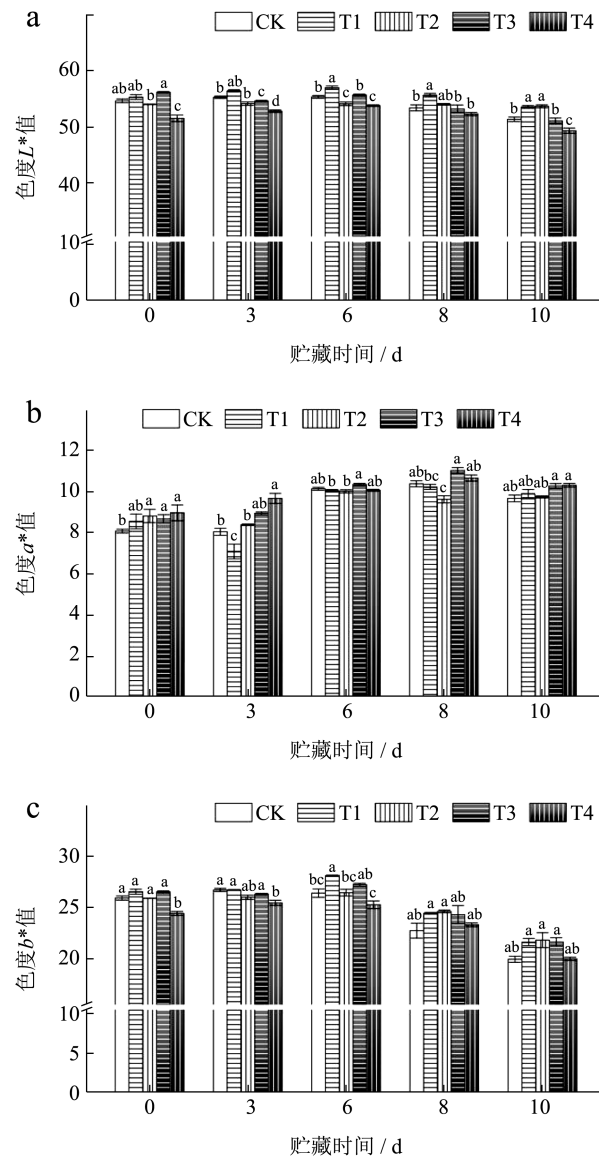
用 Microsoft Excel 进行原始数据整理和初步统计，结果用平均值 \pm S.E. ($n \geq 3$) 表示。用 SPSS 26.0 进行数据统计分析：以 Duncan 式均值比较法进行处理间差异显著性检验。用 OriginLab Origin 2023b 绘制图片。

2 结果与讨论

2.1 采前喷施 920 和 $\text{GA}_4+\text{GA}_7+\text{EBRs}$ 后常温贮藏期间‘石硖’龙眼果皮色度值的变化

由图 1 可知，对照组‘石硖’龙眼果皮亮度 L^* 值在常温贮藏前期保持稳定而 a^* 、 b^* 、 C^* 和 h° 值小幅升高，贮藏后期均急剧下降，果实外观颜色逐渐变暗，黄绿色褪去。总体看，4 个处理中，仅 T1 处理显著提高了龙眼果皮 L^* 值 ($P < 0.05$)，T1 处理组果皮 L^* 值在第 3~10 天平行高于对照，其他处理组与对照组无持续的显著差异（图 1a）。赤霉素处理可以抑制“贵妃”杧果果皮色度 a^* 值的升高^[25]，我们的结果显示，T1 处理和 T2 处理在

3 d 和 8 d 分别显著抑制了龙眼果皮 a^* 值的上升 ($P < 0.05$)。其他时间点各处理组果皮 a^* 值与对照组无显著差异（图 1b）。贮藏 6 d，T1 处理组果皮 b^* 值在 6 d 显著高于对照，4 个处理中 ($P < 0.05$)，仅 T1 处理组果皮 b^* 值在整个贮藏期都高于对照（图 1c）。贮藏 0 d 和 6 d，T1 处理的龙眼果皮 C^* 值显著高于对照 ($P < 0.05$)，而贮藏 3 d、6 d 和 8 d，T1 处理组果皮 h° 值显著高于对照 ($P < 0.05$)（图 1d 和图 1e）。“石硖”龙眼在贮藏期间，色度 L^* 、 b^* 和 h° 值呈下降趋势，与褐变指数呈负相关，龙眼色度 a^* 值呈上升趋势，与褐变指数呈正相关^[26]。本试验以上结果表明，采前 T1（920 含 50 mg/L GA_3 ）处理有效延缓贮藏期间龙眼色度 L^* 、 b^* 和 h° 值的下降和 a^* 值的上升，因而使果皮保持了较好的新鲜度，延缓了外观品质的劣变。



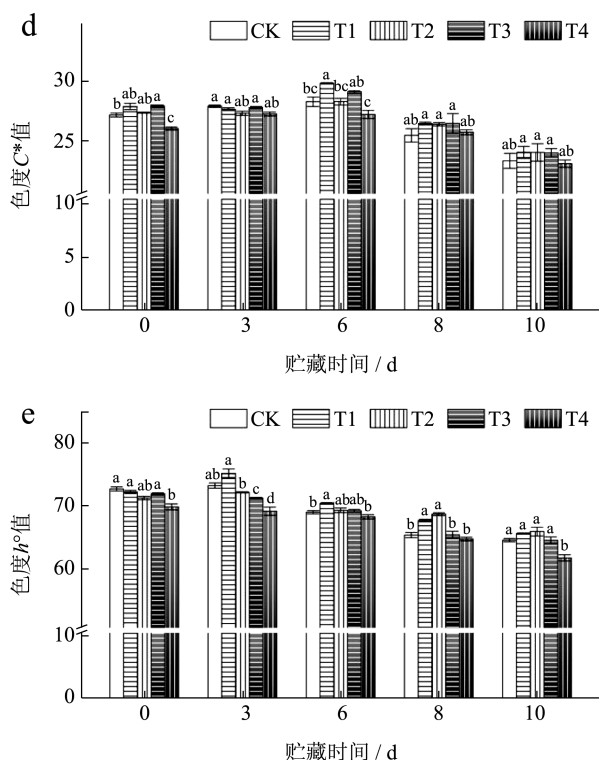


图1 采前喷施 920 和 GA_4+GA_7+EBRs 后常温贮藏期间‘石硤’龙眼色度的变化

Fig.1 Changes in chromatic values of ‘Shixia’ longan after preharvest spraying of 920 and GA_4+GA_7+EBRs during room-temperature storage

注：同一时间点的不同字母代表各样品间存在的差异显著性 ($P < 0.05$)。

2.2 采前喷施 920 和 GA_4+GA_7+EBRs 后‘石硤’龙眼常温贮藏性相关指标的变化

由图 2 可知，各组果实在贮藏 0~6 d 的内果皮发生轻微褐变，果肉自溶不明显，贮藏第 8~10 天，内果皮褐变和果肉自溶加剧，出现明显霉烂，整体来看，T1 处理组的贮藏效果最好，T2 和 T3 次之，T4 和对照组最差。

失水会导致龙眼果皮细胞膜结构损坏，膜透性增加，果皮相对电导率上升，膜脂过氧化加剧，加速果皮褐变^[27]。Long 等^[1]采前 50 mg/L GA_3 处理龙眼果实，可以延缓果实失重、果皮褐变、相对电导率增加和果肉自溶，显著提高了龙眼果实的贮藏性。由图 3 可知，常温贮藏期间对照组果实的失重率、内果皮褐变指数、果肉自溶指数、霉烂率和果皮相对电导率随贮藏时间的增加快速上升，贮藏第 3 天各处理组和对照组的失重率无显著差异，贮藏 6~10 d，T1 和 T2 处理组的失重率显著低于其他各组 ($P < 0.05$)，T1 和 T2 无显著差异 (图 3a)。贮

藏第 3 天各组内果皮开始褐变，贮藏第 6~10 天，T1 处理组内果皮褐变指数最低，分别比对照组降低了 0.13、0.99、1.35，显著低于对照和其他处理组 ($P < 0.05$) (图 3b)。贮藏第 6 天，各组果肉出现自溶，贮藏第 6~10 天，T1 处理组果肉自溶指数显著低于对照和其他处理组 ($P < 0.05$)，仅有 0.02%~1.52%，T2 和 T3 处理总体有一定抑制果肉自溶的效果 (图 3c)。贮藏第 6 天，T1 处理组果实未出现腐烂，其他各组果实开始霉烂，贮藏第 6~10 天，T4 和对照组果实腐烂快速上升，而 T1、T2 和 T3 显著延缓腐烂率的上升 ($P < 0.05$)，其中 T1 抑制腐烂效果最好，T3 次之 (图 3d)。贮藏第 8~10 天，T1 处理组果皮相对电导率最低，比对照组降低了 13.70%、22.64%，显著低于其他各组 ($P < 0.05$)，T2 和 T3 也显著抑制果皮相对电导率的升高 ($P < 0.05$)，总体抑制效果，T1 > T2 > T3，T4 无效果 (图 3e)。综上所述可知，采前 T1 (920 含 50 mg/L GA_3) 延缓龙眼果实失重、内果皮褐变、果肉自溶、腐烂和相对电导率升高的效果最好，可有效延缓常温贮藏龙眼果实的品质劣变。

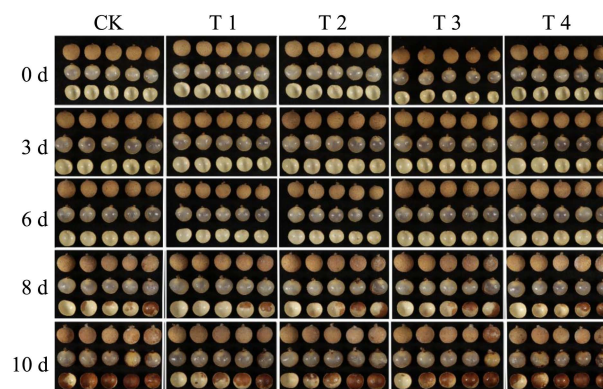
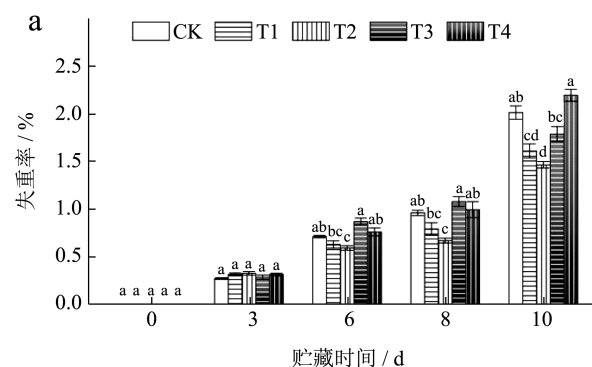


图2 采前喷施 920 和 GA_4+GA_7+EBRs 的‘石硤’龙眼常温贮藏期间内果皮和果肉外观

Fig.2 The inner skin and pulp appearance of ‘Shixia’ longan treated with preharvest spraying of 920 and GA_4+GA_7+EBRs during room-temperature storage



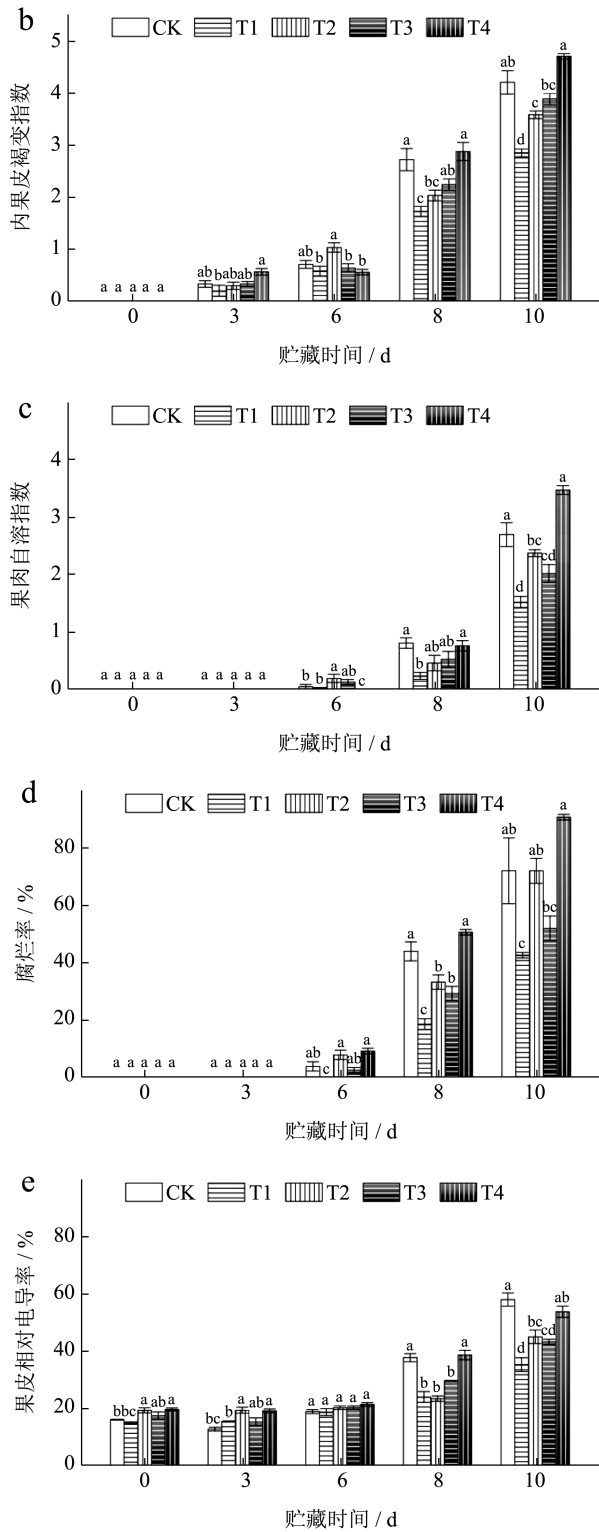


图3 采前喷施 920 和 GA₄+GA₇+EBRs 后 ‘石硤’ 龙眼常温贮藏性相关指标的变化
Fig.3 Changes in indexes related to room-temperature storability of ‘Shixia’ longan after preharvest spraying of 920 and GA₄+GA₇+EBRs

注：同一时间点的不同字母代表各样品间存在的差异显著性 (P<0.05)。

2.3 采前喷施 920 和 GA₄+GA₇+EBRs 后常温贮藏期间 ‘石硤’ 龙眼 TSS、TA 和 Vc 的变化

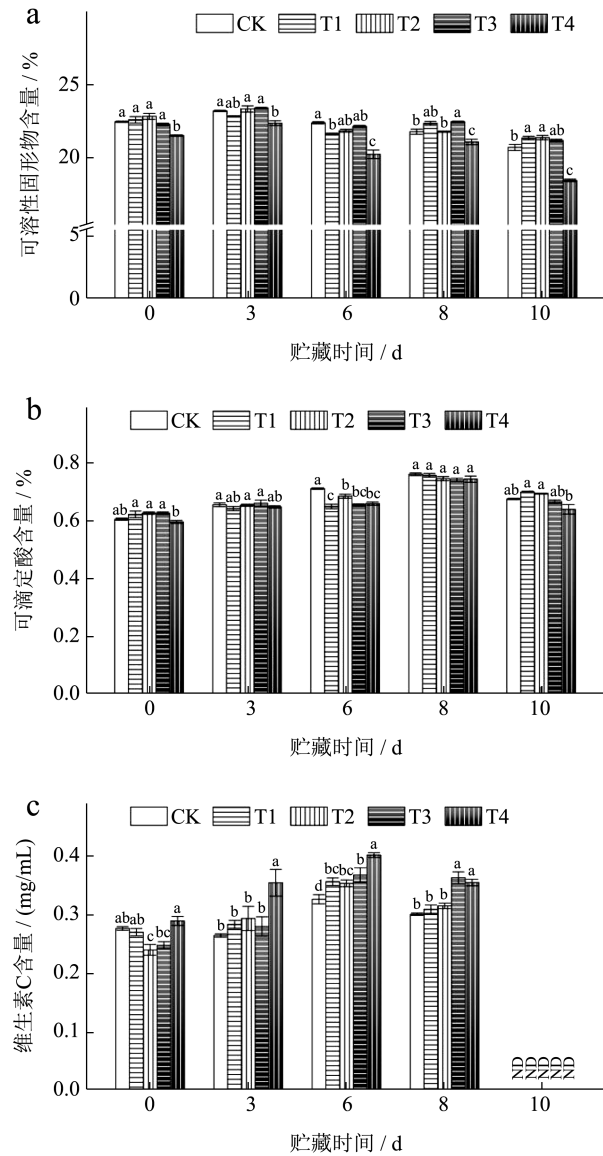


图4 采前喷施 920 和 GA₄+GA₇+EBRs 后常温贮藏期间 ‘石硤’ 龙眼 TSS、TA 和 Vc 含量的变化
Fig.4 Changes in TSS, TA, Vc of ‘Shixia’ longan after preharvest spraying of 920 and GA₄+GA₇+EBRs during room-temperature storage

注：同一时间点的不同字母代表各样品间存在的差异显著性 (P<0.05)。

由图 3a 可知，贮藏第 0~3 天，各组龙眼果肉 TSS 含量基本不变，T1、T2、T3 与对照组无显著差异，T4 组低于其他各组。贮藏第 6~10 天，各组果实 TSS 含量均呈下降趋势，对照组、T1、T2、T3 和 T4 分别下降了 1.67%、0.27%、0.47%、1.77%，T4 组下降幅度最大，平行低于其他各组，T1、

T2 和 T3 处理组间无显著差异, 均总体高于对照 (图 4a)。贮藏第 0~6 天, 各处理和对照组龙眼果肉可滴定酸含量均缓慢上升, 至第 8 天达到最高后下降。除 T4 组在第 0 天和第 10 天低于其他各组外, 总体看, T1、T2、T3 处理组和对照组无显著差异 (图 4b)。贮藏第 3~8 天, 各组果肉 Vc 含量均呈先升高后下降的趋势, 除 T4 组果肉 Vc 含量显著高于对照组之外 ($P < 0.05$), T4 组的 Vc 含量在贮藏第 3 天、第 6 天和第 8 天分别比对照组增加了 0.09、0.08、0.05 g, T1、T2、T3 处理组果肉 Vc 含量和对照组无显著差异 (图 4c)。郭明等^[28]研究发现采前喷施 GA_4+GA_7 能提高骏枣和灰枣的 Vc 含量。本试验结果表明, T4 处理在龙眼在常温贮藏期有效提高 Vc 含量。

2.4 采前T1处理后‘石硖’龙眼果皮常温贮藏期间PPO、POD和LAC酶活的变化

综合图 1、图 2、图 3 和图 4 的结果可知, T1 处理延缓常温贮藏‘石硖’龙眼果实品质劣变的效果最好。因此, 进一步分析 T1 处理对常温贮藏期‘石硖’龙眼果皮褐变相关酶活、总酚、总类黄酮、抗氧化相关酶活和总抗氧化能力的影响, 解析 T1 处理延缓龙眼果皮褐变的原因; 分析 T1 处理对常温贮藏期‘石硖’龙眼果肉果胶降解相关酶活的影响, 解析 T1 处理延缓龙眼果肉自溶的原因。

植物细胞中酚类物质在有氧条件下被 PPO 氧化形成褐色物质^[10]。POD 催化细胞内酚类和胺类化合物氧化的同时消耗 H_2O_2 ^[29]。LAC 可以催化龙眼果皮中表儿茶素和原花青素的聚合, 导致褐变^[30]。因此, PPO、POD 和 LAC 是催化龙眼果皮褐变的关键酶。进一步分析 T1 处理对常温贮藏期间龙眼果皮中这 3 种酶活力的影响。由图 4 可知, 常温贮藏期间, 对照组果皮 PPO 酶活缓慢下降, T1 处理组果皮 PPO 酶活整体平行低于对照, 在贮藏第 10 天, T1 处理组果皮 PPO 酶活显著低于对照 ($P < 0.01$) (图 5a)。贮藏 0~8 d, T1 处理组果皮 POD 酶活与对照组无显著差异, 但第 8~10 天, 对照组果皮 POD 酶活快速升高, T1 处理组果皮 POD 酶活极显著低于对照组 ($P < 0.001$) (图 5b)。对照组果皮 LAC 酶活先上升后下降, 贮藏第 0 天和第 3 天, T1 处理组 LAC 酶活略低于对照组, 但未达到显著。贮藏第 8 天, T1 处理组 LAC 酶活显著低于对照 (图 5c)。综上可知, 采前 T1 (920 含 50 mg/L GA_3) 处理可抑制常温贮藏期间 (尤其是后期) 龙眼果皮 PPO、

POD 和 LAC 的酶活, 有助于延缓褐变的发生。

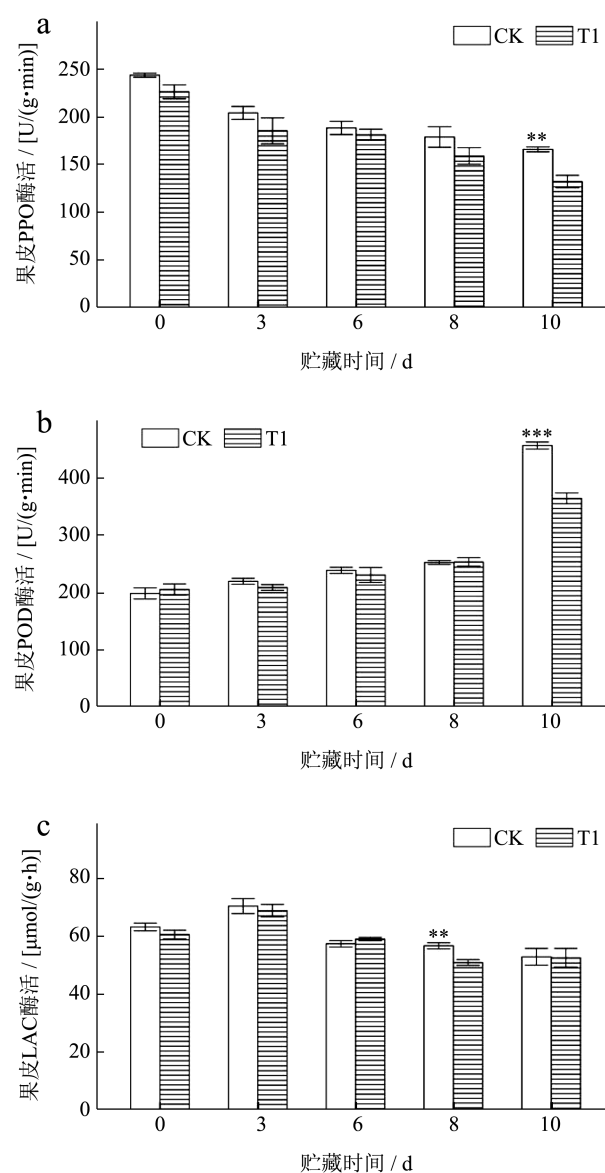


图 5 采前 T1 处理后常温贮藏期间‘石硖’龙眼果皮 PPO、POD 和 LAC 活性的变化

Fig.5 Changes in activities of PPO, POD, LAC in ‘Shixia’ longan pericarp after preharvest T1 spraying during room temperature storage

注: 星号表示同一时间点处理组和对照组之间存在显著差异: **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$ 。

2.5 采前T1处理后‘石硖’龙眼果皮常温贮藏期间总酚、总类黄酮、APX和CAT酶活及总抗氧化能力的变化

CAT 和 APX 是植物体内清除活性氧的关键酶^[11]。随着贮藏时间延长, 龙眼果皮中 POD、CAT、APX 等清除氧自由基的酶活性降低, 伴随超氧阴离子和 H_2O_2 等氧自由基的积累, 导致细胞膜的脂质

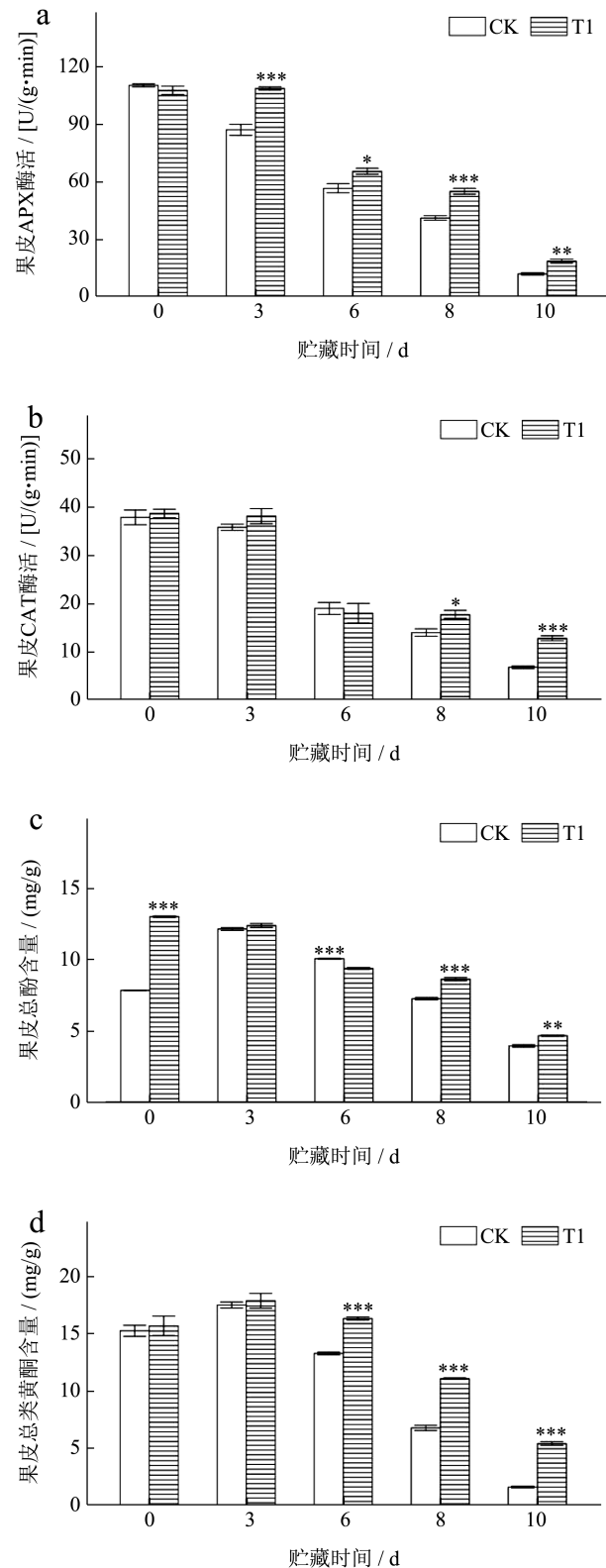
过氧化, 从而破坏龙眼细胞膜结构, 造成衰老和品质劣变^[31]。由图 5a~5b 可知, 常温贮藏期间, 对照组果皮 APX 和 CAT 活性都呈快速下降趋势。T1 处理组龙眼果皮 APX 酶活在贮藏 0~3 d 维持稳定, 之后开始下降, 但 T1 处理组果皮 APX 酶活在贮藏第 3~10 天均显著 / 极显著地平行高于对照组 (图 6a)。类似地, T1 处理组龙眼果皮 CAT 酶活在贮藏 0~3 d 维持稳定, 之后开始下降, T1 处理组果皮 CAT 酶活在贮藏 0~6 d 与对照组无显著差异, 贮藏第 8 天, T1 处理组果皮 CAT 酶活显著高于对照组 ($P < 0.05$), 而贮藏第 10 天, 极显著高于对照组 ($P < 0.01$) (图 6b)。因此, 采前 T1 处理可以有效延缓龙眼果实 CAT 活性的下降。

贮藏 0~3 d 对照组 ‘石硖’ 龙眼果皮总酚含量急剧上升, 之后随贮藏时间成倍下降。T1 处理组果皮总酚含量呈下降趋势, 从 13.04 mg/g 下降至 4.68 mg/g, 除贮藏第 6 天极显著低于对照组外 ($P < 0.01$), T1 处理组果皮总酚含量在贮藏第 0 天、8 天和 10 天均极显著高于对照组 ($P < 0.01$), 且贮藏第 0、8、10 天, 果皮总酚含量 T1 处理组比对照组高 5.17、1.38、0.72 mg/g。(图 6c)。对照组和 T1 处理组果皮的类黄酮含量均先略微升高, 之后快速降低。贮藏第 0 天和第 3 天, T1 处理组果皮类黄酮含量与对照组无显著差异, 之后的贮藏第 6、8 和 10 天平行地极显著高于对照组 ($P < 0.01$), 且果皮类黄酮含量比对照组高 3.05、4.3、3.8 mg/g (图 6d)。因此, T1 处理有效延缓总酚含量和总类黄酮含量的下降, 很好的保持了龙眼果皮的非酶促抗氧化能力, 有助于降低果皮褐变速率。

FRAP 法测定的对照组果皮总抗氧化能力呈先上升后下降的趋势, 与总酚总类黄酮含量变化趋势基本一致。贮藏的第 0~8 天, T1 处理组果皮的总抗氧化能力 FRAP 值平行地显著 / 极显著高于对照组 (图 6e)。ABTS 法测定的对照组果皮的总抗氧化能力随着贮藏时间逐渐下降。贮藏过程中, T1 处理组果皮的总抗氧化能力 TE 值逐渐缓慢升高, 贮藏第 8 天达到峰值, 之后下降。T1 处理组果皮的总抗氧化能力 TE 值, 除贮藏第 0 天显著低于对照组外 ($P < 0.01$), 贮藏的第 6 天和第 8 天均极显著高于对照组 ($P < 0.01$) (图 6f)。

GA₃ 作为一种重要的植物生长调节剂, 在火龙果^[32]、红枣^[15]和龙眼^[12]等果实的处理研究结果表明, 能够明显提高果蔬的贮藏品质。上述结果表明, 采前 T1 (920 含 50 mg/L GA₃) 处理显著延缓 ‘石硖’

龙眼果皮 APX 和 CAT 酶活的下降, 同时有效延缓了 ‘石硖’ 龙眼总酚、总类黄酮含量和总抗氧化能力的下降, 使果皮维持更高的酶促和非酶促的氧自由基清除能力, 有助于延缓氧自由基积累对膜脂的过氧化损伤, 维持细胞结构和功能的完整性, 从而有助于延缓常温贮藏 ‘石硖’ 龙眼果皮的褐变进程。



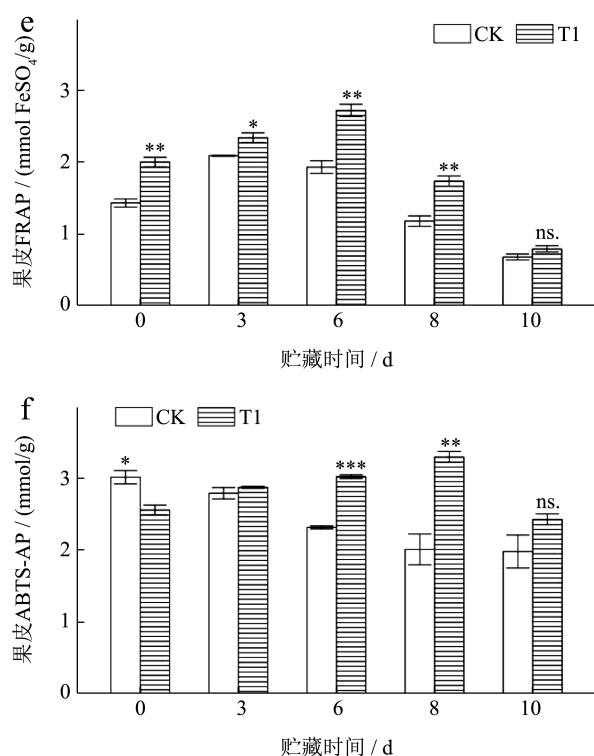


图6 采前 T1 处理后常温贮藏期间龙眼果皮 APX 和 CAT 酶活、总酚、总类黄酮和总抗氧化能力的变化

Fig.6 Changes in APX & CAT activities, TPC, TFC, and total antioxidant capacity in 'Shixia' longan pericarp after preharvest T1 spraying during room temperature storage

注: 星号表示同一时间点处理组和对照组之间存在显著差异, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。

2.6 采前T1处理后‘石硖’龙眼果肉常温贮藏期间PG、PE和 β -Gal酶活的变化

研究表明, 贮藏期间 PG、PE 和 β -Gal 酶活的升高促进果胶、纤维素和果胶半乳糖等植物细胞壁组物质的降解, 损坏细胞壁结构, 使果实软化^[34-36]。果胶降解是造成龙眼果肉自溶的直接原因, 主要受 PG、PE 和 β -Gal 酶活调节^[31,35]。如图 6 所示, 随着常温贮藏时间的延长, 对照组龙眼果肉 PG 活性先上升后降低, T1 处理组果肉 PG 酶活除在贮藏第 3 天和第 6 天极显著高于对照组外, 贮藏第 0、8 和 10 天, 均极显著低于对照组 ($P < 0.001$) (图 7a); 对照组和 T1 处理组果肉 PE 酶活呈小幅下降趋势, 但 T1 组和对照组无显著差异 (图 7b); 对照组和 T1 处理组果肉的 β -Gal 酶活均先下降后上升, 但在贮藏第 0 天和第 3 天, T1 处理组极显著高于对照 ($P < 0.01$), 而贮藏第 6 天和第 10 天, T1 处理的 β -Gal 酶活极显著低于对照果实 ($P < 0.01$) (图 7c)。上述结果表明, 采前 920 (50 mg/L GA₃)

处理‘石硖’龙眼可有效抑制常温贮藏后期 (第 6~10 天) 果肉中 PG 和 β -Gal 的酶活, 从而延缓果肉自溶, 有助于龙眼保持口感品质。

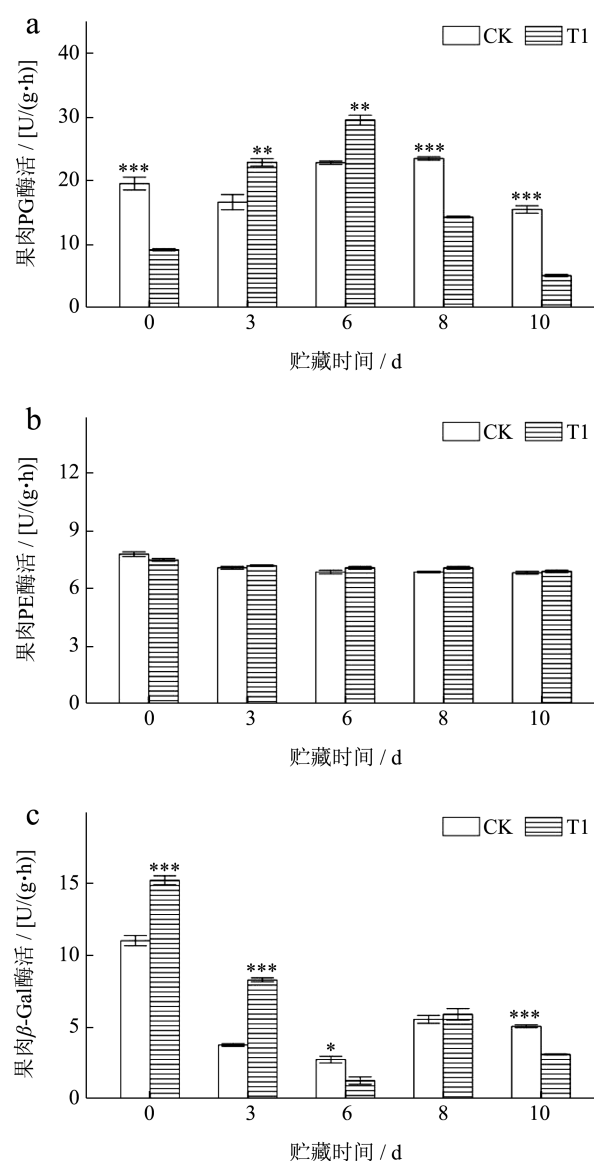


图7 采前 T1 处理后‘石硖’龙眼果肉常温贮藏期间 PG、PE 和 β -Gal 酶活的变化

Fig.7 Changes in activities of PG, PE, and β -Gal in 'Shixia' longan pulp after preharvest T1 spraying during room temperature storage

注: 星号表示同一时间点处理组和对照组之间存在显著差异: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$ 。

3 结论

本实验结果表明, 相比采前 (花后 85 d+95 d) 喷施对照 (清水)、920 (T2, 150 mg/L GA₃)、2,4-表芸苔·赤霉酸 [T3, 50 mg/L (GA₄+GA₇)+0.33 mg/L EBRs] 和 2,4-表芸苔·赤霉酸 [T4, 150 mg/L (GA₄

+GA7)+1 mg/L EBRs], 喷施 920 (T1, 50 mg/L GA₃) 均能显著提高‘石硖’龙眼常温 [(25±1) °C, 相对湿度 85%] 贮藏性, 但 T1 处理未显著影响果肉 TSS、TA 和维生素 C 含量。T1、T2、T3 均可延缓龙眼腐烂、质量损失、内果皮褐变和果肉自溶, 且 T1 效果最显著。T1 显著延缓果皮的色度 L^* 、 b^* 、 h° 和 C^* 值的下降、 a^* 值的上升、相对电导率的升高、总酚和类黄酮含量的下降, 且 T1 处理后果皮的总抗氧化能力平行高于对照, 贮藏后期的多酚氧化酶、漆酶和过氧化物酶活性显著低于对照, 而过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶的活性高于对照。T1 延缓果肉自溶可能是因为显著下调贮藏中后期多聚半乳糖醛酸酶和 β -半乳糖苷酶的活性。因此, 适宜的时间 (花后 85 d+95 d) 喷施 920 (50 mg/L GA₃) 能有效延缓常温贮藏‘石硖’的果皮褐变和果肉自溶, 表明赤霉素处理比赤霉素复合 2,4-芸苔素内酯处理对‘石硖’龙眼贮藏效果好, 这一结果为采前激素处理提升龙眼贮藏性提供重要参考。

参考文献

- [1] LONG L B, LAI T T, HAN D M, et al. A comprehensive analysis of physiologic and hormone basis for the difference in room-temperature storability between ‘Shixia’ and ‘Luosanmu’ longan fruits [J]. *Plants*, 2022, 11(19): 2503.
- [2] TAN S, KE Z, ZHOU C, et al. Polyphenol profile, antioxidant activity, and hypolipidemic effect of longan byproducts [J]. *Molecules*, 2023, 28(5): 2083.
- [3] WANG M, CHEN T, WANG Q, et al. Antioxidant, bacteriostatic and preservative effects of extractable condensed tannins isolated from longan pericarps and seeds [J]. *Plants*, 2023, 12: 512.
- [4] ZHANG X F, GUO S, HE Z T, et al. Phytochemical constituents and biological activities of longan (*Dimocarpus longan* Lour.) fruit: a review [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2020, 9(2): 95-102.
- [5] 方冬梅. 采前喷布卡多赞增强采后龙眼果实耐贮性及其作用机理[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [6] 林福兴. 采前喷布二乙基二硫代氨基甲酸钠对采后龙眼果实果皮褐变的控制及其作用机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- [7] LUO T, NIU J J, GUO X M, et al. Preharvest zinc sulfate spray improves the storability of longan (*Dimocarpus longan* Lour.) fruits by protecting the cell wall components and antioxidants of pericarp [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(3): 1098-1107.
- [8] 林毅雄, 林艺芬, 陈艺晖, 等. 采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实品质和耐贮性的影响[J]. *热带作物学报*, 2016, 37(9): 1819-1825.
- [9] 陈焯. 采前喷施水杨酸对采后龙眼果肉自溶的控制及其作用机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- [10] 薛鹏宇, 殷菲彤, 刘云芬, 等. 茉莉酸甲酯处理对采后龙眼果皮褐变的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(5): 169-178.
- [11] LUO T, YIN F L, LIAO L Y, et al. Postharvest melatonin treatment inhibited longan (*Dimocarpus longan* Lour.) pericarp browning by increasing ROS scavenging ability and protecting cytomembrane integrity [J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9, 4963-4973.
- [12] LUO T, LIN X L, LAI T T, et al. GA₃ treatment delays the deterioration of ‘Shixia’ longan during the on-tree preservation and room-temperature storage and up-regulates antioxidants [J]. *Foods*, 2023, 12(10): 2032.
- [13] 李丹, 赵晓敏, 李学文, 等. 采前赤霉素处理对无核白葡萄采后落粒及品质的影响[J]. *新疆农业大学学报*, 2016, 39(6): 472-476.
- [14] 冉娅琳, 李喜宏, 陈晓彤, 等. 不同临采期喷施赤霉素对“糖心”苹果“糖心”累积及贮藏品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(4): 1-6.
- [15] QU S S, LI M M, WANG G, et al. Application of ABA and GA₃ alleviated browning of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) via different strategies [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 181: 111672.
- [16] 郭建果. 赤霉素在无核白葡萄上的应用试验[J]. *农村科技*, 2010, 1: 24-25.
- [17] 刘丽琴, 李建光, 舒波, 等. GA₃对‘石硖’龙眼假种皮糖积累及蔗糖代谢相关酶的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(11): 2698-2703.
- [18] TAN S, XIE J H, WANG W, et al. Effects of Exogenous Plant Hormones on Sugar Accumulation and Related Enzyme Activities during the Development of Longan (*Dimocarpus longan* Lour.) Fruits [J]. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 2019, 94: 790-797.
- [19] 吴振先, 季作梁, 韩冬梅, 等. 荔枝果皮褐变程度的数学模型研究(英文)[J]. *果树学报*, 2006, 5: 695-698.
- [20] 韩冬梅, 潘学文, 李荣, 等. 石硖等3个品种龙眼果实成熟特性比较研究[J]. *福建果树*, 2008, 4: 22-27.
- [21] FANG F, ZHANG X L, LUO H H, et al. An intracellular laccase is responsible for epicatechin-mediated anthocyanin degradation in litchi fruit pericarp [J]. *Plant Physiology*, 2015, 169(4): 2391-2408.
- [22] LIN Y F, LI IN H T, ZHANG S, et al. The role of active oxygen metabolism in hydrogen peroxide-induced pericarp browning of harvested longan fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 96: 42-48.
- [23] SHUAI L, LIU H, LIAO L Y, et al. Widely targeted metabolic analysis revealed the changed pigmentation and

- bioactive compounds in the ripening *Berchemia floribunda* (Wall.) Brongn. Fruit [J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(3): 1375-1387.
- [24] FRAGA CARLOS G, CLOWERS BRIAN H, MOORE RONALD J, et al. Signature-discovery approach for sample matching of a nerve-Agent Precursor Using Liquid Chromatography-Mass Spectrometry, XCMS, and Chemometrics [J]. Analytical Chemistry, 2010, 82(10): 4165-4173.
- [25] 李娜,汤红,马冀恒,等.采前高浓度赤霉素处理对“贵妃”杧果实色泽发育的抑制效应[J].中国南方果树,2019, 48(2):20-25.
- [26] 毛佳.不同处理对龙眼色素物质变化的影响及其与果皮褐变关系的研究[D].广州:华南农业大学,2013.
- [27] 林河通,陈莲,孔祥佳,等.包装对龙眼果实贮藏期间果皮失水褐变和细胞超微结构的影响[J].农业工程学报, 2007,23(12):237-241.
- [28] 郭明,吴翠云,蒋卉,等.赤霉素对骏枣、灰枣叶片发育及果实品质的影响[J].塔里木大学学报,2012,24(3):40-45.
- [29] 肖鑫鑫,李佩艳,苏娇,等.褪黑素处理对金针菇贮藏品质和褐变的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(7):242-249.
- [30] LIU B, ZHU Q N, ZHOU X F, et al. Characterization of a pericarp browning related LACCASE 14-4 from longan fruit with a focus on (epi)catechin oxidative polymerization [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 185: 111802.
- [31] LIN Y X, LIN Y F, LIN M S, et al. 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.
- [32] 巴良杰,罗冬兰.赤霉素处理对火龙果贮藏品质的影响[J].包装工程,2019,40(13):12-17.
- [33] BURHAN OZTURK, ERDINC BEKTAS, ERDAL AGLAR, et al. Cracking and quality attributes of jujube fruits as affected by covering and pre-harvest Parka and GA₃ treatments [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 240: 65-71.
- [34] LIN L J, CHEN Y Z, LIN H T, et al. The difference of the cell wall metabolism between ‘Fuyan’ and ‘Dongbi’ longans and its relationship with the pulp breakdown [J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100496.
- [35] LIN Y Z, CHEN G, LIN H T, et al. Chitosan postharvest treatment suppresses the pulp breakdown development of longan fruit through regulating ROS metabolism [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 601-608.
- [36] 陆玲鸿,马媛媛,古咸彬,等.猕猴桃果实软化过程中细胞壁多糖物质含量与果胶降解相关酶活性变化[J].浙江农业学报,2022,34(12):2648-2658.