

正己醇对机械伤香蕉采后生理特性影响及磷脂酶 D 的抑制作用

甘 婷^{1,2}, 黄 方^{1*}, 黄 敏^{1,2}, 易 萍^{1**}, 李 丽^{1,2**}, 李杰民¹, 零东宁¹,
陈瑜娴¹, 张 兰¹

1. 广西壮族自治区农业科学院农产品加工研究所, 广西南宁 530007; 2. 广西果蔬贮藏与加工新技术重点实验室, 广西南宁 530007

摘 要: 为保持采后香蕉贮藏品质, 延长贮藏期限, 以桂蕉 6 号香蕉为实验材料, 探究正己醇在常温贮藏条件下对采后香蕉果实品质和耐贮性的影响。挑选果实外观完好及成熟度、大小相近的香蕉果实, 随机分成对照组和处理组 2 组, 分别用蒸馏水和 0.1% 浓度正己醇处理, 取出晾干后置于 PE 保鲜袋中扎口包装, 于 25 °C 下贮藏 15 d, 每 3 d 取样观察测定香蕉果实的硬度、可溶性固形物 (TSS) 含量、呼吸强度、病情指数、丙二醛 (MDA) 含量、膜透性和 PLD 活性的变化, 利用实时荧光定量 PCR (qRT-PCR) 分析贮藏期间 *PLD γ* 和 *PLD ζ* 表达量的变化。研究结果显示: 正己醇处理可显著延缓采后香蕉果实软化的进程 ($P<0.05$), 其中, 9、12 d 延缓效果极显著 ($P<0.01$); 在 9 d 后, 正己醇处理极显著抑制 TSS 含量和病情指数的上升; 6 d 起, 正己醇处理显著抑制呼吸强度, 其中, 9 d 达到呼吸峰值, 较对照组极显著降低 33.93%; 12 d 后, 与对照组相比, 正己醇处理极显著降低 MDA 含量和膜透性的上升, 分别于 15 d 降低了 26.70% 和 62.20%。此外, 正己醇处理显著抑制采后香蕉果实 PLD 活性, 尤其是 6~12 d, 抑制效果极显著 ($P<0.01$); 在 15 d, 正己醇处理后香蕉 *PLD γ* 和 *PLD ζ* 表达量较对照组分别极显著降低 72.06% 和 33.08%。综合分析可知, 正己醇处理可有效延缓采后香蕉果实软化, 抑制果实呼吸强度和 PLD 活性, 减轻采后果实病害发生, 从而抑制 TSS、MDA 的产生和膜透性的增大, 并下调 *PLD γ* 和 *PLD ζ* 表达, 进而维持采后果实贮藏品质和延长贮藏期限。因此, 正己醇可作为一种水果保鲜剂, 不仅对维持采后果实品质及香蕉产业的发展具有重要意义, 且在采后贮藏期间具有良好的应用前景。

关键词: 香蕉; 正己醇; 磷脂酶 D 抑制剂; 采后品质; 生理特性

中图分类号: S668.1 文献标识码: A

Inhibitory Effects of 1-Hexanol on Postharvest Physiological Characteristics and Phospholipase D of Mechanically Injured Bananas

GAN Ting^{1,2}, HUANG Fang^{1*}, HUANG Min^{1,2}, YI Ping^{1**}, LI Li^{1,2**}, LI Jiemin¹, LING Dongning¹, CHEN Yuxian¹, ZHANG Lan¹

1. Institute of Agro-food Science and Technology Research, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Fruits and Vegetables Storage-Processing, Nanning, Guangxi 530007, China

Abstract: To maintain the storage quality and prolong the storage period of postharvest bananas, the present study used ‘Guijiao No.6’ as the test material to investigate the 1-hexanol effect on the fruit quality and storability of the postharvest bananas under room temperature storage conditions. Banana fruits with intact fruit appearance and similar ripeness and size were selected and randomly divided into control and treatment groups. The control and treatment groups were treated with water and 0.1% (V/V) aqueous solution of 1-hexanol, respectively. Then, the bananas were removed to air-dry and packaged in polyethylene bags with a zipper. Finally, the samples were stored at 25 °C for 15 days. Changes in firmness, soluble solids, respiration intensity, condition index, malondialdehyde (MDA), membrane permeability, and

收稿日期 2022-10-28; 修回日期 2022-12-19

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32160732, No. 32272784); 国家香蕉产业技术体系项目 (No. CARS-31)。

作者简介 甘 婷 (1999—), 女, 学士, 助理工程师, 研究方向: 农产品贮藏与保鲜; *同等贡献作者: 黄 方 (1994—), 女, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 农产品贮藏与保鲜。 **通信作者 (Corresponding author): 易 萍 (YI Ping), E-mail: pingyi@gxaas.net; 李 丽 (LI Li), E-mail: lili@gxaas.net。

PLD activity were measured every 3 days, and changes in *PLD* γ and *PLD* ζ expression during storage were analyzed by quantitative real-time PCR (qRT-PCR). The results showed that 0.1% (V/V) 1-hexanol significantly ($P<0.05$) delayed the process of postharvest banana fruit softening, and the delaying effect was highly ($P<0.01$) significant on days 9 and 12. From day 9, 1-hexanol highly significantly inhibited the rise in total soluble solids and condition index. From day 6, 1-hexanol significantly inhibited respiration, where the peak respiration was reached on day 9 and was highly significantly reduced by 33.93% compared to the control. After day 12, compared with the control group, 1-hexanol highly significantly reduced the rise of MDA content and membrane permeability, by 26.70% and 62.20% on day 15, respectively. In addition, 1-hexanol significantly inhibited PLD activity, especially from 6 to 12 days, and the inhibition was highly significant ($P<0.01$). At day 15, compared with the control group, 1-hexanol highly significantly reduced the banana expression of *PLD* γ and *PLD* ζ by 72.06% and 33.08%, respectively. In conclusion, 1-hexanol can effectively delay postharvest banana fruit softening, inhibit the respiration and PLD activity, and reduce postharvest fruit disease, thereby inhibiting total soluble solids, MDA production, and increased membrane permeability, and inhibiting *PLD* γ and *PLD* ζ expression, thereby maintaining postharvest fruit storage quality and extending storage life. Therefore, 1-Hexanol can be used as a fruit preservative, which is not only important for maintaining the post-harvest fruit quality and the development of the banana industry, but also has good application prospects during post-harvest storage.

Keywords: banana; 1-hexanol; phospholipase D inhibitor; postharvest quality; physiological property

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.03.012

香蕉 (*Musa nana* L.) 是世界四大水果之一, 原产于东南亚, 目前国内主产于广西、云南、海南及台湾等地^[1]。成熟香蕉具有气味芬芳、果肉细腻的特点。其次, 香蕉因富含蛋白质、VC、矿物质 K 等营养元素和多酚、胺类等活性成分, 且具有抗氧化、预防心血管等保健功能, 因此深受消费者喜爱^[2]。另外, 香蕉属于呼吸跃变型果实, 采后出现呼吸跃变, 乙烯释放量迅速上升, 从而促进香蕉成熟和衰老。但由于香蕉在贮运、销售等过程中易产生微生物、机械伤、冷害等采后病害, 尤其在贮运过程中常因振动产生的碰撞和挤压, 使组织细胞膜系统和细胞结构遭到破坏, 造成果实采后品质劣变, 加速果实成熟和衰老, 严重影响果实贮藏期限, 降低商品价值^[3]。因此, 有效延长具有机械伤香蕉的贮藏保鲜期, 保持其在贮藏期间的品质对香蕉产业的发展具有重要意义。

磷脂酶 D (phospholipase D, PLD), 全称磷脂酰胆碱磷脂水解酶, 是催化生物膜主要成分磷脂水解的关键酶^[4]。由于机械伤可使植物细胞膜完整性丧失, 激活并促进 PLD 与膜结合而提高 PLD 活性, 导致磷脂降解, 膜通透性改变, 最终造成植物伤害甚至死亡^[5]。目前, 随着人们生活水平提高, 越来越注重果蔬采后品质, 因此对果蔬采后保鲜技术的要求也不断提高。正己醇是植物脂氧合酶代谢途径中形成的代谢产物, 也是细胞膜衰老代谢关键酶磷脂酶 D 的抑制剂, 可用于果蔬采后保鲜^[6-8]。李英华等^[9-10]研究了不同浓度正己醇对草莓的保鲜效果, 发现 0.05% 正己醇处理可有效

抑制采后草莓呼吸作用和果实软化, 降低果实采后腐烂率, 较好地维持草莓 VC 含量; 0.1% 正己醇显著提高草莓在贮藏期间的抑菌能力, 减少微生物病害, 此外, 正己醇处理还有效抑制草莓 LOX 活性, 降低丙二醛 (MDA) 含量, 提高 POD 活性。正己醇处理在桃^[11]、桑葚^[12]等作物中均较好地维持果实品质, 延缓果实成熟衰老进程。

目前, 正己醇对香蕉在机械伤胁迫后其生理特性的影响尚无报道。因此, 研究正己醇对机械伤香蕉采后贮藏期间生理特性的影响, 为维持机械伤香蕉采后品质和延长贮藏期限提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验所用香蕉品种为桂蕉 6 号, 成熟度为 7~8 成熟, 采自广西南宁市坛洛镇果园。采后立即运回实验室, 将香蕉分成单根果指, 挑选果实外观完好、成熟度一致、大小相近、无病虫害的果实为材料。用 0.1% 次氯酸钠溶液浸泡清洗 10 min, 取出晾干备用。

正己醇 (1-hexanol) 购自中和化学 (山东) 有限公司; 磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、乙酸乙酯、NaOH 等试剂均为国产分析纯。

本试验所用仪器设备: BSA124s 型电子天平、GY-4 型果实硬度计、UV-3200 PCS 型紫外可见分光光度计、3-18ks 型高速冷冻离心机。

1.2 方法

1.2.1 材料处理 将预处理的香蕉果实进行模拟

机械损伤处理,采用不锈钢打孔器(直径为 2 mm)在香蕉中轴部位戳伤。随后将处理好的香蕉随机分成 2 组,每组 60 个香蕉果实,分别用蒸馏水(对照组)和(正己醇处理组) 0.1%浓度正己醇浸泡处理果实 10 min,然后自然晾干。晾干后的香蕉置于 PE 保鲜袋中扎口包装,于 25 ℃室温下贮藏 15 d,每 3 d 取样观察并测定相关指标,试验重复 3 次。

1.2.2 硬度的测定 使用 GY-4 型果实硬度计测定(探头直径为 5 mm),每次随机取 6~8 个香蕉,每个果面测 2 个点,最终取平均值为该果实的硬度。

1.2.3 可溶性固形物(TSS)含量测定 使用 MZB-53(N)便携式数显糖度计测定,取去皮香蕉的中部果肉进行切块打浆,重复测 6 次,最终取平均值为果实的 TSS 含量。

1.2.4 呼吸强度的测定 呼吸强度测定参照曹健康等^[13]的方法,采用静置法进行测定。

1.2.5 病情指数的测定 参考吴小建等^[14]的方法并加以改进,根据香蕉果实表面腐烂面积大小分为 0~4 级。分级标准为:0 级果(无病斑)、1 级果(<1/10 病斑)、2 级果(1/10~1/4 病斑)、3 级果(1/4~1/2 病斑)、4 级果(>1/2 病斑)。每次取样测量香蕉表面病斑的大小。

病情指数=Σ(腐烂级别×该级别样品数量)/ (最高级别×样品总数量)×100%

1.2.6 MDA 含量测定 参照刘瑶等^[15]的方法,采用硫代巴比妥酸法测定 450、532、600 nm 处的吸光值。

1.2.7 相对电导率测定 参考 SONG 等^[16]的方法,用相对电导率表示膜透性,并稍作修改。将样品煮沸 10 min 并冷却至室温,测定相对电导率。

1.2.8 PLD 酶活性测定 参照 SUN 等^[17]和 CHEN 等^[18]的方法,取磨样后的香蕉果肉组织 1 g,测定 PLD 活性及蛋白质含量,单位用 U/g 表示。

1.2.9 实时荧光定量分析 按照 RNAprep Pure Plant Kit 试剂盒说明书,提取香蕉果皮中轴组织总 RNA。取总 RNA 1 μg 使用 HiFiScript cDNA 试剂盒反转录合成 cDNA 第一链,用于后续实时荧光定量分析^[17]。根据 PLD 基因序列,使用 Premier 5.0 软件设计基因特异性引物(表 1),由生工生物工程(上海)股份有限公司合成引物。根据 Real time PCR Master Mix(SYBR Green)试剂盒说明书进行 RT-qPCR。以香蕉 *Actin* 基因

为内参基因^[19-20],采用 $2^{-\Delta\Delta C_T}$ 法计算 *PLD γ* 和 *PLD ζ* 基因的相对表达量。

表 1 实时荧光定量分析所用引物
Tab. 1 Primers for quantitative real-time PCR analysis

基因名称 Gene name	正向引物 (5'-3') Forward primer (5'-3')	反向引物 (5'-3') Reverse primer (5'-3')	扩增产物 Amplicon product/bp
<i>MaPLDγ</i>	TACCAGCACCACT CCTCCT	TCCAACGAACGG CACGAT	114
<i>MaPLDζ</i>	AAGAAGTTCGGAG CGGATGA	CCAAGCAGCAAG GTCACATT	176
<i>Actin</i>	CTCCTATGTTGCTC GCTTATG	GGCTACTACTTCG GTTCTTTC	146

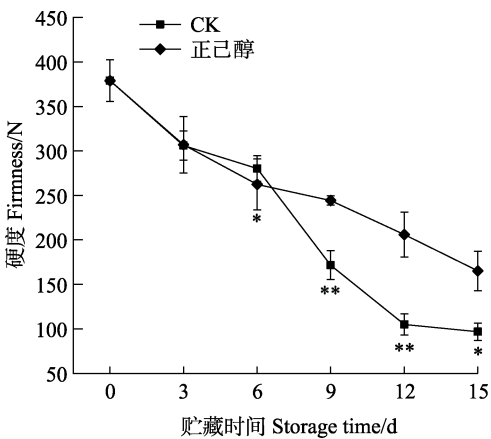
1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件对实验数据进行统计;利用 SPSS 26.0 软件 Duncan's 法对数据进行差异显著性分析;使用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 采后正己醇处理对香蕉硬度的影响

硬度是反映果实采后软化程度的重要指标^[21]。如图 1 所示,采后贮藏过程中,香蕉硬度整体呈下降趋势。贮藏 0 d,果实硬度最大,为 378.89 N。至贮藏 3 d,2 组硬度变化不明显。随贮藏时间增加,果实硬度逐渐降低。贮藏 6 d 时,处理组硬度为 262.38 N,在贮藏 15 d 降至最低值 165.25 N,较对照组显著提高 71% ($P<0.05$)。贮藏 15 d,对照组和处理组较贮藏 6 d 分别降低 65.5%和 37%,表明正己醇处理可延缓香蕉果实软化的进程。

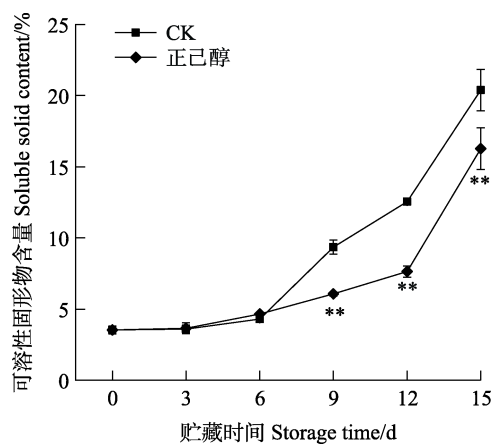


*表示差异显著 ($P<0.05$), **表示差异极显著 ($P<0.01$)。
* indicates significant difference ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图 1 采后正己醇处理对香蕉硬度的影响
Fig. 1 Effect of postharvest 1-hexanol treatment on banana firmness

2.2 采后正己醇处理对香蕉可溶性固形物 (TSS) 含量的影响

可溶性固形物 (TSS) 可反映果蔬的成熟度和品质状况。如图 2 所示, 采后贮藏过程中, 香蕉 TSS 含量整体呈上升趋势。贮藏 6 d 前, 2 组的 TSS 含量无显著差异。贮藏 9 d, 对照组和处理组的 TSS 含量分别为 9.35% 和 6.07%。贮藏 15 d, 香蕉 TSS 含量积累至最大值, 处理组为 16.27%, 较对照组降低 20% (相对值)。贮藏 9 d 后, 处理组 TSS 含量极显著低于对照组 ($P<0.01$), 表明 PLD 抑制剂正己醇在一定程度上降低了香蕉 TSS 含量, 维持果实品质, 延缓采后贮藏期限。



**表示差异极显著 ($P<0.01$)。

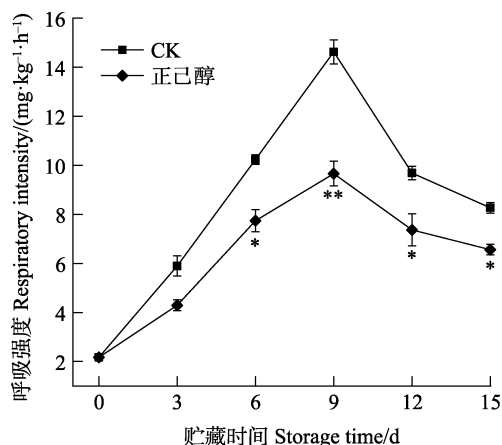
** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图 2 采后正己醇处理对香蕉可溶性固形物 (TSS) 含量的影响

Fig. 2 Effect of postharvest 1-hexanol treatment on soluble solids content of banana

2.3 采后正己醇处理对香蕉呼吸强度的影响

如图 3 所示, 采后贮藏过程中, 香蕉呼吸强度整体呈先上升后下降的趋势。贮藏 0 d, 香蕉呼吸强度为 $2.17 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, 随后逐渐上升。贮藏 6 d, 处理组呼吸强度为 $7.74 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, 显著低于对照组。对照组和处理组均于 9 d 出现呼吸峰, 处理组呼吸强度较对照组极显著降低 33.93%, 随后下降。贮藏 9~15 d, 对照组呼吸强度由 14.62 降至 $8.27 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, 处理组由 9.66 降至 $6.56 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, 处理组显著低于对照组 ($P<0.05$)。采后贮藏期间, 处理组呼吸强度均低于对照组, 其中 6~15 d 降低效果显著, 表明正己醇处理可有效抑制采后香蕉贮藏期间呼吸强度上升, 延缓果实成熟和衰老的进程。



*表示差异显著 ($P<0.05$), **表示差异极显著 ($P<0.01$)。

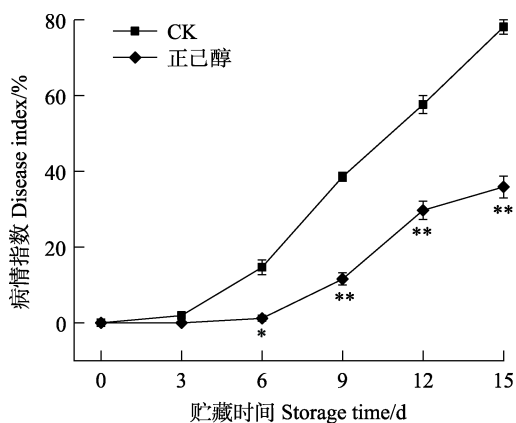
* indicates significant difference ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图 3 采后正己醇处理对香蕉呼吸强度的影响

Fig. 3 Effect of postharvest 1-hexanol treatment on the respiratory intensity of banana

2.4 采后正己醇处理对香蕉病情指数的影响

病情指数可反映采后贮藏期间果蔬的病害情况, 是衡量果实品质的重要指标^[22-23]。如图 4 所示, 随贮藏时间增加和果实逐渐成熟, 香蕉病情指数呈上升的趋势。贮藏 0 d, 香蕉病情指数为 0, 贮藏 6 d, 处理组病情指数为 1.22%, 显著低于对照组。贮藏 9~15 d, 处理组病情指数由 11.59% 升至 35.88%, 极显著低于对照组。贮藏 15 d, 香蕉病情指数最大, 处理组病情指数为 35.88%, 较对照组极显著降低 54.07%。综上, 正己醇处理可有效抑制贮藏期间香蕉果实病斑的扩大和增加, 降低采后果实病情指数。



*表示差异显著 ($P<0.05$), **表示差异极显著 ($P<0.01$)。

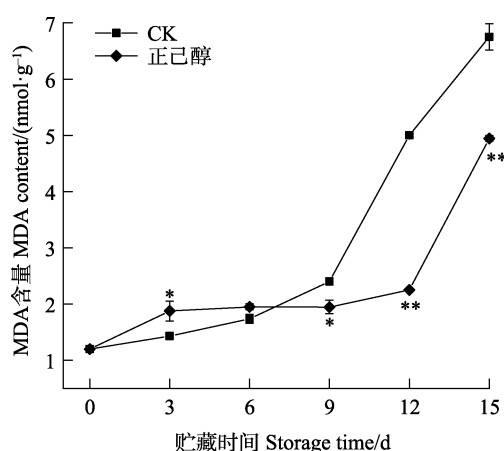
* indicates significant difference ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图 4 采后正己醇处理对香蕉病情指数的影响

Fig. 4 Effect of postharvest 1-hexanol treatment on the disease index of banana

2.5 采后正己醇处理对香蕉 MDA 含量的影响

MDA 是膜脂氧化的产物,加速采后果实衰老进程。如图 5 所示,采后贮藏期间,香蕉 MDA 含量整体呈上升的趋势。贮藏 9 d,对照组 MDA 含量为 2.4 nmol/g,显著低于对照组,随后于 15 d 迅速增至最大值 6.75 nmol/g。采后贮藏期间,处理组 MDA 含量较对照组推迟 3 d 上升,贮藏 12 d,处理组 MDA 含量为 2.25 nmol/g,较对照组极显著降低 55.00%,随后于贮藏 15 d 迅速增至最大值 4.95 nmol/g,较对照组极显著降低 26.70%。综上,PLD 抑制剂正己醇在采后贮藏过程中可抑制 MDA 生成,延缓果实衰老。



*表示差异显著 ($P<0.05$), **表示差异极显著 ($P<0.01$)。
* indicates significant difference ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图 5 采后正己醇处理对香蕉 MDA 含量的影响

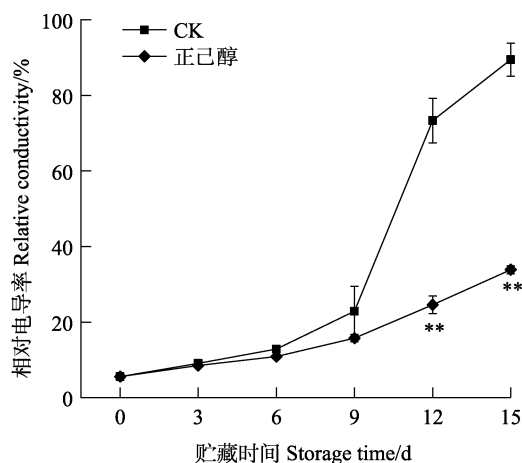
Fig. 5 Effect of postharvest 1-hexanol treatment on the MDA content of banana

2.6 采后正己醇处理对香蕉细胞膜透性的影响

如图 6 所示,随贮藏时间增加,香蕉的相对电导率整体呈上升趋势。贮藏 9 d,对照组和处理组的相对电导率分别为 22.88%和 15.75%,随后处理组相对电导率于贮藏 12 d 升至 24.56%,较对照组极显著下降 ($P<0.01$)。贮藏 15 d,香蕉相对电导率达到最大值,处理组的电导率为 33.84%,较对照组极显著降低 62.20% ($P<0.01$)。结果分析表明,贮藏 9 d 后,处理组的相对电导率和 MDA 含量均低于同期对照组,说明 PLD 抑制剂正己醇可有效抑制香蕉膜脂过氧化反应,延缓果实贮藏期限。

2.7 采后正己醇处理对香蕉 PLD 酶活性的影响

磷脂酶 D (PLD) 是催化磷脂水解的关键酶,在逆境胁迫下被激活的 PLD 可降解果实的细胞



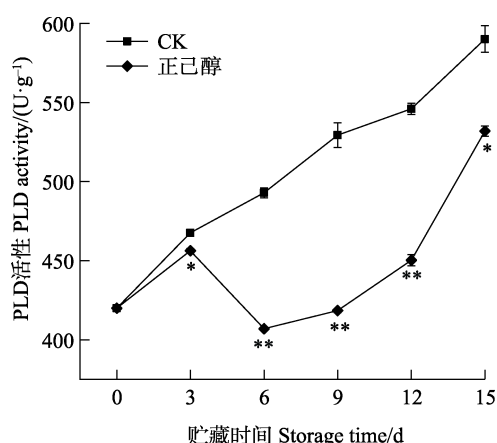
**表示差异极显著 ($P<0.01$)。

** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图 6 采后正己醇处理对香蕉细胞膜透性的影响

Fig. 6 Effect of postharvest 1-hexanol treatment on cell membrane permeability of banana

膜,导致膜透性增大,促进果实老化,降低果实品质^[24]。如图 7 所示,采后贮藏过程中,对照组 PLD 含量呈逐渐上升的趋势,处理组呈先上升后下降再上升的趋势。对照组 PLD 活性于贮藏 15 d 增至最大值 590.13 U/g。贮藏 3 d 处理组 PLD 活性为 456.25 U/g,显著低于对照组 ($P<0.05$),随后于 6 d 降至 407 U/g,较对照组极显著降低 17.4% ($P<0.01$)。贮藏 15 d,处理组 PLD 活性增至最大值 531.88 U/g,较对照组显著降低 10% ($P<0.05$)。处理组 PLD 活性在采后贮藏期间显著低于对照组 ($P<0.05$),表明正己醇处理可有效抑制 PLD 生成,维持果实品质,延缓贮藏期限。



*表示差异显著 ($P<0.05$), **表示差异极显著 ($P<0.01$)。

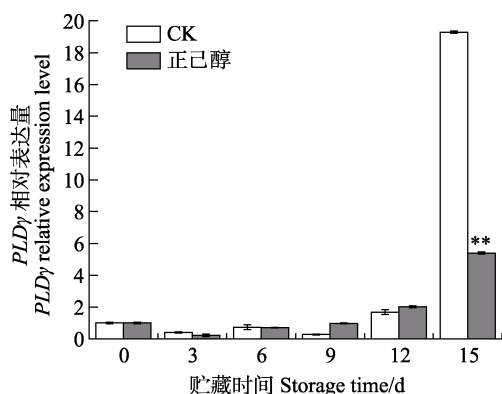
* indicates significant difference ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图 7 采后正己醇处理对香蕉 PLD 酶活性的影响

Fig. 7 Effect of postharvest 1-hexanol treatment on PLD enzyme activity in banana

2.8 采后正己醇处理对香蕉 $PLD\gamma$ 基因表达的影响

如图8所示,香蕉 $PLD\gamma$ 表达量整体呈上升的趋势。贮藏 0~12 d, 对照组和处理组的 $PLD\gamma$ 表达量均较低,且两组间的 $PLD\gamma$ 表达量无显著差异。贮藏 15 d, 香蕉 $PLD\gamma$ 表达量达到峰值,处理组 $PLD\gamma$ 表达量为 5.39, 较对照组极显著降低 72.06%; 对照组和处理组 $PLD\gamma$ 表达量较 12 d 上升 11.18 倍和 2.68 倍。综上, PLD 抑制剂正己醇可抑制采后香蕉 $PLD\gamma$ 表达,降低采后果实的膜脂代谢,延长贮藏期限。



**表示差异极显著 ($P<0.01$)。

** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图8 采后正己醇处理对香蕉 $PLD\gamma$ 基因表达的影响

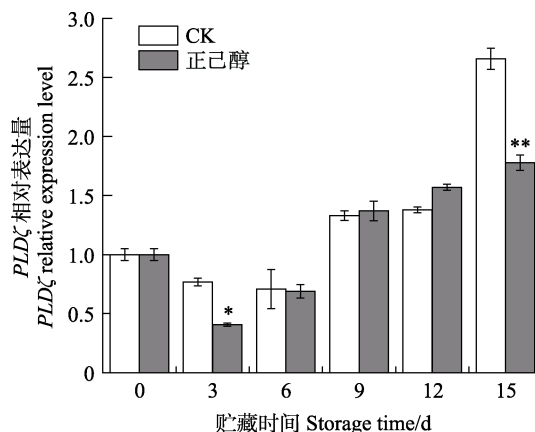
Fig. 8 Changes in $PLD\gamma$ gene expression in banana fruit by postharvest 1-hexanol treatment

2.9 采后正己醇处理对香蕉 $PLD\zeta$ 基因表达的影响

如图9所示,香蕉 $PLD\zeta$ 表达量在贮藏过程中呈先下降后上升的趋势。贮藏第3天,处理组 $PLD\zeta$ 表达量降至 0.41, 较对照组显著降低 46.75% ($P<0.05$), 随后上升。随贮藏时间增加, 香蕉 $PLD\zeta$ 表达量于 15 d 达到峰值, 处理组 $PLD\zeta$ 表达量为 1.78, 较对照组极显著降低 33.08% ($P<0.01$)。综上, PLD 抑制剂正己醇可抑制采后香蕉 $PLD\zeta$ 表达,降低采后果实的膜脂代谢,延长贮藏期限。

3 讨论

硬度是果实采后品质的重要指标之一,可反映果实采后的耐贮性。本研究结果表明,随贮藏时间增加,香蕉果实硬度不断降低,但与对照组相比,正己醇处理可有效抑制香蕉果实软化。采后贮藏期间,香蕉果实中的淀粉降解转化成葡萄糖,使果实 TSS 含量累积增大,表现为果实采后



*表示差异显著 ($P<0.05$), **表示差异极显著 ($P<0.01$)。

* indicates significant difference ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图9 采后正己醇处理对香蕉 $PLD\zeta$ 基因表达的影响

Fig. 9 Changes in $PLD\zeta$ gene expression in banana fruit by postharvest 1-hexanol treatment

成熟度变大而衰老,因此 TSS 含量可反映果实的营养价值和果实品质^[25-26]。本研究结果显示,贮藏期间香蕉果实 TSS 含量呈上升趋势,正己醇处理在贮藏后期极显著抑制了香蕉可溶性固形物含量上升 ($P<0.01$),从而维持采后香蕉贮藏品质,延长果实货架期。李英华^[27]研究发现,正己醇处理显著延缓采后草莓果实软化、抑制 MDA 累积,但对草莓 TSS 含量的影响不显著。

呼吸强度和病情指数是衡量果实采后贮藏期间的重要指标^[22,28]。本研究结果表明,与对照组相比,正己醇处理在贮藏期间可有效抑制采后香蕉果实呼吸强度和病情指数的上升,维持果实贮藏品质,其中,贮藏后期抑制效果极显著 ($P<0.01$)。霍宪起^[12]研究了不同浓度正己醇对采后桑葚的影响,发现 1.5 mL/L 和 1.0 mL/L 正己醇抑制采后桑葚呼吸强度的效果最佳。

丙二醛 (MDA) 是膜脂过氧化的产物,可反映膜脂过氧化的程度^[29]。果实采后的成熟衰老与膜脂过氧化反应密切相关,机械伤等非生物性逆境胁迫会促进膜脂过氧化反应,造成膜透性增大,电解质外渗,因此相对电导率可间接反映果实的膜透性^[30-32]。本研究结果显示,贮藏 0 d 时,香蕉 MDA 含量和相对电导率均较低,说明此时香蕉细胞膜完整性良好,过氧化程度不大。随贮藏时间增加,果实逐渐成熟衰老,香蕉 MDA 含量和相对电导率呈上升趋势,正己醇处理组 MDA 含量和相对电导率在贮藏后期显著低于对照组 ($P<0.05$),说明果实的成熟衰老会引起果实膜透

性的改变,正己醇处理可有效抑制果实 MDA 含量上升和膜透性的增大,从而延缓果实衰老的进程。

当果实衰老或遭受机械损伤等逆境胁迫时,会引起细胞膜发生膜脂代谢,促进果实衰老^[33]。磷脂是细胞膜的重要组成成分,PLD 是膜脂代谢过程中的关键酶,被激活的 PLD 可催化磷脂水解,进而破坏膜结构和膜功能,因此,PLD 的活性可反映磷脂的降解程度。蟠桃^[11]、青枣^[34]和南果梨^[35]的研究中表明,PLD 活性上升,膜脂代谢变快,说明 PLD 在膜脂代谢中有重要作用。

本研究结果显示,正己醇处理显著抑制了 PLD 活性的上调 ($P<0.05$),与对照组相比,正己醇处理在贮藏结束时极显著抑制了 *PLD γ* 和 *PLD ζ* 的表达量 ($P<0.01$),表明 PLD 抑制剂正己醇可有效延缓采后香蕉果实膜脂代谢的进程。李银^[11]研究发现,正己醇和正己醛处理均可抑制 PLD 活性,提高抗氧化酶系活性,延缓果实软化,维持果实采后品质。

综上,正己醇处理可有效抑制采后贮藏期间香蕉果实的呼吸作用,减轻果实病情指数,从而延缓香蕉果实软化的进程和减慢 TSS 的产生;另一方面,采后正己醇处理能有效抑制 PLD 活性,从而降低 MDA 含量和膜透性增大,并下调 *PLD γ* 和 *PLD ζ* 表达。因此,正己醇处理能够降低机械损伤对采后果实生物膜的影响,保护膜结构和膜功能,延长采后果实的贮藏期限,是维持机械伤香蕉采后贮藏品质的新方法。但正己醇处理延缓果实衰老的机理是否与果实本身抗氧化相关酶活性的提高有关,这有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 金钊,刘菊华. 浅谈科学技术在中国香蕉产业中的作用[J]. 热带农业科学, 2018, 38(9): 100-104.
- [2] 洪佳敏,何炎森,郑云云,周红玲,张帅,张少平. 香蕉成分及其保健功能研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(10): 176-181.
- [3] 贾彩红,金志强,刘菊华,张建斌,徐碧玉. 香蕉采后生理学研究进展[J]. 热带作物学报, 2012, 33(1): 189-193.
- [4] JIA C H, JIN Z Q, LIU J H, ZHANG J B, XU B Y. Research progress of postharvest physiology of banana fruits[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(1): 189-193. (in Chinese)
- [5] 李丽,游向荣,孙健,彭宏祥,李昌宝,何全光,张娥珍,廖芬,李志春. 植物磷脂酶 D 基因表达与衰老的关系[J]. 热带亚热带植物学报, 2012, 20(1): 99-106.
- [6] LI L, YOU X R, SUN J, PENG H X, LI C B, HE Q G, ZHANG E Z, LIAO F, LI Z C. Relationship between gene differential expression of phospholipase D and senescence of plants[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2012, 20(1): 99-106. (in Chinese)
- [7] 李丽,孙健,何雪梅,李昌宝,零东宁,饶川艳,肖占仕,盛金凤,郑凤锦,易萍. 逆境胁迫下植物磷脂酶 D 的生理功能和作用机制综述[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(8): 1-5.
- [8] LI L, SUN J, HE X M, LI C B, LING D N, RAO C Y, XIAO Z S, SHENG J F, ZHENG F J, YI P. Review: physiological function and mechanism of action of plant phospholipase D under adversity stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(8): 1-5. (in Chinese)
- [9] HILDEBRAND D F. Lipoygenases[J]. Physiologia Plantarum, 1989, 76(2): 249-253.
- [10] PALIYATH G, YADA R, MURR D P, PINHERO R G. Inhibition of phospholipase D: US6514914 B1[P]. 2003-02-04.
- [11] LANCIOTTI R, GIANOTTI A, PATRIGNANI F, BELLETTI N, GUERZONI M E, GARDINI F. Use of natural aroma compounds to improve shelf-life and safety of minimally processed fruits[J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(3/4): 201-208.
- [12] 李英华,袁海英,张辉,李祥. 正己醇处理对草莓果实采后生理和品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(5): 1022-1026.
- [13] LI Y H, YUAN H Y, ZHANG H, LI X. Effect of 1-Hexanol treatment on postharvest physiology and quality of strawberry fruit[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2009, 46(5): 1022-1026. (in Chinese)
- [14] 李英华,袁海英,巴吐尔,张辉. 新疆草莓采后主要致病病原真菌的鉴定及正己醇处理对其抑制作用[J]. 新疆农业大学学报, 2009, 32(1): 60-63.
- [15] LI Y H, YUAN H Y, BA T E, ZHANG H. Identification of pathogenic fungi from the post-harvest strawberry and effect of hexanol treatment on them[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2009, 32(1): 60-63. (in Chinese)
- [16] 李银. 磷脂酶 D 抑制剂对蟠桃果实采后贮藏品质调控的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010.
- [17] LI Y. Effect of phospholipase D inhibitor treatment on post-

- harvest quality maintenance of flat peach fruit[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [12] 霍宪起. 正己醇处理对桑葚采后生理与抗氧化酶的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(6): 252-255.
- HUO X Q. Effect of 1-hexanol treatment on physiology and antioxidant enzymes of post-harvest mulberry fruits[J]. Food Science, 2012, 33(6): 252-255. (in Chinese)
- [13] 曹健康, 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: 46-49.
- 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: 46-49. (in Chinese)
- [14] 吴小建, 陈茜, 梁朋光, 赵承刚, 栾会燕, 谢祖强, 冯小青, 向昱, 杨兆杏, 何雪梅. 炭疽病胁迫下采后香蕉的膜脂代谢[J]. 南方农业学报, 2021, 52(5): 1325-1333.
- WU X J, CHEN X, LIANG P G, ZHAO C G, LUAN H Y, XIE Z Q, FENG X Q, XIANG Y, YANG Z X, HE X M. Membrane lipid metabolism of postharvest banana under anthracnose stress[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(5): 1325-1333. (in Chinese)
- [15] 刘瑶, 左进华, 郑秋丽, 高丽朴, 史君彦, 王清. 氯化钙对机械伤番茄果实生理特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 264-269.
- LIU Y, ZUO J H, ZHENG Q L, GAO L P, SHI J Y, WANG Q. Effect of CaCl_2 Treatment on physiology characteristics of tomatoes with mechanical damage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 264-269. (in Chinese)
- [16] SONG L L, LIU H, YOU Y L, SUN J, YI C, LI Y B, JIANG Y M, WU J S. Quality deterioration of cut carnation flowers involves in antioxidant systems and energy status[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 170: 45-52.
- [17] SUN J, YOU X R, LI L, PENG H X, SU W Q, LI C B, HE Q G, LIAO F. Effects of a phospholipase D inhibitor on post-harvest enzymatic browning and oxidative stress of litchi fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 62(3): 288-294.
- [18] CHEN Y H, SUN J Z, LIN H T, LIN M S, LIN Y F, WANG H, HUNG Y C. Salicylic acid treatment suppresses *Phomopsis longanae* Chi-induced disease development of postharvest longan fruit by modulating membrane lipid metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 164(C): 111168.
- [19] YOU X R, ZHANG Y Y, LI L, LI Z C, LI M J, LI C B, ZHU J H, PENG H X, SUN J. Cloning and molecular characterization of phospholipase D (*PLD*) delta gene from longan (*Dimocarpus longan* Lour.)[J]. Molecular Biology Reports, 2014, 41(7): 4351-4360.
- [20] LI L, HE X M, SUN J, LI C B, LING D N, SHENG J F, YOU X R, LI J M, LIU G M, ZHENG F J, TANG Y Y. Cloning, characterization, and functional expression of phospholipase D α cDNA from banana (*Musa acuminata* L.)[J]. Journal of Food Quality, 2017: 1-7.
- [21] 马冀恒, 李雯, 陈明敏, 曾教科. 不同处理对采后芒果质构的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(12): 10-15.
- MA J H, LI W, CHEN M M, ZENG J K. Effects of different treatments on texture of postharvest mango fruits[J]. Storage and Process, 2021, 21(12): 10-15. (in Chinese)
- [22] 李丽, 何雪梅, 李昌宝, 孙健, 零东宁, 盛金凤, 饶川艳, 肖占仕, 李杰民, 郑凤锦, 刘国明, 唐雅园. 炭疽病菌侵染对香蕉采后品质变化及抗病相关酶活性的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(9): 83-90.
- LI L, HE X M, LI C B, SUN J, LING D N, SHENG J F, RAO C Y, XIAO Z S, LI J M, ZHENG F J, LIU G M, TANG Y Y. Effects of *Colletotrichum musae* infection on the postharvest quality and related enzymatic activities of banana fruit[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(9): 83-90. (in Chinese)
- [23] 喻文涛, 曲姗姗, 李萌萌, 王光, 朱世江. 采前脱落酸处理对荔枝贮藏的保鲜作用[J]. 现代食品科技, 2022, 38(10): 170-177.
- YU W T, QU S S, LI M M, WANG G, ZHU S J. Effect of preharvest abscisic acid treatment on preservation of lychee fruits[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 170-177. (in Chinese)
- [24] 赵宇瑛. 黄瓜磷脂酶D和抗氧化系统对采后机械损伤胁迫的响应[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- ZHAO Y Y. Responses of phospholipase D and antioxidant system to mechanical wounding in postharvest cucumber fruits[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [25] 董晨, 易有金, 刘思思, 李昌珠, 肖志红, 刘汝宽. 油茶皂素在香蕉保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 307-313.
- DONG C, YI Y J, LIU S S, LI C Z, XIAO Z H, LIU R K. Application of camellia saponin in the preservation of bananas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 307-313. (in Chinese)
- [26] 韦巧艳, 成清岚, 陈碧, 张鹏, 覃逸明. 魔芋葡甘露聚糖/纳米 ZnO 复合涂膜对香蕉常温保鲜效果的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 49-55.
- WEI Q Y, CHENG Q L, CHEN B, ZHANG P, QIN Y M. Influence of konjac glucomannan/nano-ZnO composite coating on the preservation effect of bananas at room temperature[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 49-55. (in Chinese)
- [27] 李英华. 正己醇对草莓果实采后抑菌及保鲜效果的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2009.

- LI Y H. Effect of 1-hexanol treatment on postharvest pathogenic fungi control and quality maintenance of strawberry fruits during storage period[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [28] 李琪, 李喜宏, 李瑶瑶, 陈兰, 陈欢欢, 黄新红, 马宏原. 不同机械伤对琯溪蜜柚采后生理生化变化影响[J]. 食品科技, 2014, 39(8): 38-41.
- LI Q, LI X H, LI Y Y, CHEN L, CHEN H H, HUANG X H, MA H Y. Effects of different mechanical damage on post-harvest physiology and biochemistry of Guanxi pomelo[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(8): 38-41. (in Chinese)
- [29] 李莹, 任艳青, 闫化学, 傅达奇, 罗云波. 机械伤对草莓果实理化品质的影响[J]. 食品科技, 2013, 38(4): 18-23.
- LI Y, REN Y Q, YAN H X, FU D Q, LUO Y B. Effect of mechanical stress on physical and chemical quality of strawberry[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(4): 18-23. (in Chinese)
- [30] 余经, 林育钊, 范中奇, 林艺芬, 林河通. 果蔬采后病害的发生与活性氧和膜脂代谢的关系研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2020, 16(2): 132-137.
- YU J, LIN Y Z, FAN Z Q, LIN Y F, LIN H T. Research progress on the relationship between disease occurrence and the metabolism of reactive oxygen species and membrane lipids in postharvest fruits and vegetables[J]. Subtropical Agriculture Research, 2020, 16(2): 132-137. (in Chinese)
- [31] 陈娇, 李芬芳, 李奕星, 袁德保. 外源抗坏血酸对香蕉常温后熟期果实品质的影响[J]. 中国南方果树, 2020, 49(1): 56-60.
- CHEN J, LI F F, LI Y X, YUAN D B. Effect of exogenous ascorbic acid on fruit quality of banana during post-ripening period at room temperature[J]. South China Fruits, 2020, 49(1): 56-60. (in Chinese)
- [32] 任紫烟, 程玉豆, 关晔晴, 张子德, 关军锋. 机械损伤对‘鸭梨’褐变的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(6): 35-41.
- REN Z Y, CHENG Y D, GUAN Y Q, ZHANG Z D, GUAN J F. Effects of mechanical damage on browning in ‘Yali’ pear[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(6): 35-41. (in Chinese)
- [33] 王静. 能量亏缺对果蔬采后组织衰老、褐变与病害的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(1): 237-242.
- WANG J. Effects of energy deficiency on tissue senescence, browning and diseases of postharvest fruits and vegetables[J]. Storage and Process, 2020, 20(1): 237-242. (in Chinese)
- [34] 陈莲, 王璐璐, 林河通, 林艺芬, 陈艺晖. 1-MCP对采后台湾青枣果实膜脂代谢的影响[J]. 中国食品学报, 2018, 18(10): 202-210.
- CHEN L, WANG L L, LIN H T, LIN Y F, CHEN Y H. Effects of 1-MCP treatment on metabolism of membrane lipids in harvested *Ziziphus mauritiana* Lamk. fruit[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(10): 202-210. (in Chinese)
- [35] SUN Y Y, SUN H J, LUO M L, ZHOU X, ZHOU Q, WEI B D, CHENG S C, JI S J. Membrane lipid metabolism in relation to core browning during ambient storage of ‘Nanguo’ pears[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 169: 111288.