



食品科学

Food Science

ISSN 1002-6630, CN 11-2206/TS

《食品科学》网络首发论文

题目： 采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮膜脂代谢的影响
作者： 林毅雄，林河通，陈艺晖，王慧，林艺芬
网络首发日期： 2019-03-19
引用格式： 林毅雄，林河通，陈艺晖，王慧，林艺芬. 采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮膜脂代谢的影响[J/OL]. 食品科学.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20190315.1135.044.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮膜脂代谢的影响

林毅雄^{1,2}, 林河通^{1,2*}, 陈艺晖^{1,2}, 王 慧^{1,2}, 林艺芬^{1,2*}

(1.福建农林大学食品科学学院, 福州 350002; 2.福建农林大学农产品产后技术研究所, 福州 350002)

摘 要: 为了研究采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮膜脂代谢的影响, 以‘福眼’龙眼为材料, 在龙眼盛花期后 70 d、90 d、110 d 用浓度为 10 mg/kg 的胺鲜酯喷施龙眼果实 3 次, 以蒸馏水喷施为对照。龙眼果实盛花期后 120 d 采收, 采后龙眼果实经过挑选、清洗和晾干后用 0.015 mm 厚的聚乙烯薄膜袋密封包装(每袋 50 个龙眼果实, 每个处理各 50 袋), 在 $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 85 % 下贮藏。结果表明, 采前喷施胺鲜酯可延缓采后龙眼果实贮藏期间果皮细胞膜透性的增加, 降低果皮脂氧合酶 (LOX)、脂酶和磷脂酶 D (PLD) 等膜脂降解酶活性, 延缓果皮膜磷脂[磷脂酰胆碱 (PC) 和磷脂酰肌醇 (PI)]和不饱和脂肪酸[油酸 ($\text{C}_{18:1}$)、亚油酸 ($\text{C}_{18:2}$)、亚麻酸 ($\text{C}_{18:3}$)]的降解, 保持较高的 PC 和 PI 含量及脂肪酸不饱和指数 (IUFA)、脂肪酸不饱和度 (U/S), 保持较低的磷脂酸 (PA) 含量, 维持正常细胞膜区室化功能和结构。因此, 采前喷施胺鲜酯增强采后龙眼果实耐贮性与采前喷施胺鲜酯能有效降低采后龙眼果实贮藏期间果皮膜脂代谢有关。

关键词: 龙眼果实; 耐贮性; 胺鲜酯 (DA-6); 膜脂代谢; 膜脂降解酶

Pre-harvest Spraying Diethyl Aminoethyl Hexanoate on Membrane Lipid Metabolism in Pericarp of Longan Fruits During Postharvest Storage

LIN Yixiong^{1,2}, LIN Hetong^{1,2*}, CHEN Yihui^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, LIN Yifen^{1,2*}

(1.College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2.Institute of Postharvest Technology of Agricultural Products, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to investigate the effects of pre-harvest spraying diethyl aminoethyl hexanoate (DA-6) on membrane lipid metabolism in pericarp of longan fruits during postharvest storage, fruits of ‘Fuyan’ longan (*Dimocarpus longan* Lour. cv. Fuyan) were sprayed with 10 mg/kg DA-6 or distilled water (as control) for 3 times at 70, 90 and 110 days after full bloom. Longan fruits were harvested at 120 days after full bloom, the harvested longans were selected, cleaned and dried prior to packaging in 0.015 mm thick polyethylene bag (50 fruits per bag, 50 bags per group), then stored at $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ and 85 % relative humidity. The results showed that, compared with the control fruits, pre-harvest spraying DA-6 could retard an increase in cell membrane permeability, reduce the

基金项目：国家自然科学基金青年基金项目 (31701653)；国家自然科学基金面上项目 (31671914, 30972070, 311711776)；福建省自然科学基金项目 (2015J01608)；福建省财政厅科技项目 (K81MLV01A)。

作者简介：林毅雄 (1989 年—)，男，博士生，研究方向为农产品加工及贮藏工程。Email: 393874860@qq.com

*通信作者：林河通 (1967 年—)，男，博士，教授，博士生导师，研究方向为农产品加工及贮藏工程。E-mail: hetonglin@163.com

林艺芬 (1986 年—)，女，博士，副教授，博士生导师，研究方向为农产品加工及贮藏工程。E-mail: yifenlin@126.com

activities of membrane lipid-degrading enzymes such as lipoxygenase (LOX), lipase and phospholipase D (PLD), keep higher contents of phosphatidylcholine (PC) and phosphatidylinositol (PI), higher index of unsaturated fatty acids (IUFA) and unsaturation of fatty acids (U/S) but lower content of phosphatidic acid (PA) in pericarp of harvested longan fruit during storage. Therefore, pre-harvest spraying DA-6 could delay the degradation of unsaturated fatty acids[oleic acid ($C_{18:1}$), linoleic acid, ($C_{18:2}$), linolenic acid, ($C_{18:3}$)] of cellular membrane, which was beneficial for the maintenance of cellular structure. From the results, it could be concluded that pre-harvest spraying DA-6 for increasing fruit storability was related to pre-harvest spraying DA-6 effectively alleviating membrane lipid metabolism in pericarp of harvested longan fruits during storage.

Keywords: longan fruit; storability; diethyl aminoethyl hexanoate (DA-6); membrane lipid metabolism; membrane lipid-degrading enzymes

DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20181224-283

中图分类号: TS255.3 S667.1 **文献标志码:** A

龙眼 (*Dimocarpus longan* Lour.) 俗称‘桂圆’, 是一种主要分布在中国、泰国、越南、印度、澳大利亚以及美国等地区的世界名优热带亚热带水果。龙眼果实具有较高营养价值和药用功效, 因此深受人们的喜爱^[1-5]。但是龙眼果实成熟于高温、高湿的夏季, 采后生理代谢旺盛, 极易容易发生品质劣变, 主要现象为果皮褐变、果肉自溶和果实腐烂等。在室温下极不耐贮藏, 一周左右全部发生品质劣变, 这严重影响龙眼果实食用品质、龙眼产业的发展及龙眼长期贮藏, 造成较大的经济损失^[6-15]。因此, 采取有效的保鲜方法是促进龙眼产业发展的重要措施。本课题组前期研究发现, 能量亏缺、病原菌侵染会增强采后龙眼果实贮藏期间的果皮膜脂代谢水平, 主要表现为膜脂降解相关酶[脂氧合酶 (lipoxygenase, LOX)、脂酶 (lipase) 和磷脂酶 D (phospholipase, PLD)]活性增强、膜磷脂[磷脂酰胆碱 (phosphatidylcholine, PC) 和磷脂酰肌醇 (phosphatidylinositol, PI)]和膜不饱和脂肪酸[油酸 (oleic acid, $C_{18:1}$)、亚油酸 (linoleic acid, $C_{18:2}$)、亚麻酸 (linolenic acid, $C_{18:3}$)]降解而导致细胞膜结构破坏, 最后使龙眼果实发生品质劣变, 影响其果实耐贮性^[17-18]。林河通等^[19]研究发现, 在龙眼果实采前套袋处理可减轻采后龙眼果实贮藏期间品质劣变的发生, 提高果实耐贮性。此外, 何燕文等^[20]研究报道, 在龙眼果实成熟期的采前 1 周和采前 1 天分别喷施浓度为 6 g/L 的壳聚糖和 20 % 高良姜提取液, 可提高采后龙眼果实的耐贮性。据此推测, 采后龙眼果实的耐贮性与膜脂代谢密切相关, 同时其膜脂代谢可通过采前或采后保鲜技术进行调节, 而提高采后龙眼果实耐贮性。但是, 目前对龙眼果实保鲜的研究主要集中在采后处理, 较少涉及采前田间管理措施的研究。因此认为, 很有必要深入研究开发采前田间管理措施来提高采后龙眼果实品质和耐贮性的新型保鲜技术。

胺鲜酯, 化学名称为已酸二乙氨基乙醇酯 (diethyl aminoethyl hexanoate, DA-6), 是一种新型植物细胞的分裂生长调节剂, 其具有安全性、无潜在危害、无毒性及使用简单等优点, 同时可提高作物的坐果率、产量及改善品质^[21]。前人研究发现, 采前喷施胺鲜酯可能提高冬枣、菠萝的单果重、果实硬度及果肉维生素C和可溶性总糖含量^[22, 23]。本课题组前期研究发现, 采前

喷施浓度为10 mg/kg的胺鲜酯可有效降低采后贮藏期间龙眼果实呼吸强度、保持较好果实外观品质,较高果肉营养物质含量,而提高龙眼果实耐贮性和保鲜效果,延缓采后龙眼果实品质劣变的发生,如延缓采后龙眼果皮褐变和果肉自溶的发生,降低果实失重率、保持较高的好果率^[21]。目前有关采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮膜脂代谢的影响及其与采后龙眼果实耐贮性的关系未见研究报道。因此,本文研究采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮膜脂代谢的影响,旨在为控制龙眼果实品质劣变的发生提供适用技术和科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

以福建省主栽培‘福眼’龙眼(*Dimocarpus longan* Lour. cv. Fuyan)果实为试验材料,试验基地在福建省安溪县龙眼科技示范果园,选择树龄(8年)和生长一致的‘福眼’龙眼果树作为采前喷施研究对象。前期预实验中发现,在采前的龙眼盛花期喷施不同浓度胺鲜酯(0~15 mg/kg),其中10 mg/kg为最佳处理浓度,可较好控制采后龙眼果实品质劣变(如果皮褐变、果肉自溶、果实腐烂)的发生。因此,正式试验采用的胺鲜酯浓度为10 mg/kg,并在龙眼盛花期后70 d、90 d和110 d分别采用10 mg/kg的胺鲜酯喷施龙眼果实,同时以喷施蒸馏水作为对照组;不同处理组喷施龙眼果树各6株。

龙眼果实在盛花期后120 d采收,采收当天先在冷库预冷,之后用3~4℃冷藏车在3小时内运到福建农林大学农产品产后技术研究所(福州)。选择大小均匀、色泽一致、无病斑、无机械损伤的健康果实作为试验材料。龙眼果实先用蒸馏水清洗、之后晾干,并用0.015 mm厚的聚乙烯(PE)薄膜袋包装(50个果实/袋),对照组和胺鲜酯处理组各50袋,之后在(28±1)℃、相对湿度80%下贮藏。贮藏期间每天取样测定龙眼果皮细胞膜透性、膜脂降解相关酶活性、膜磷脂和膜脂肪酸组分及含量。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 果皮细胞膜透性的测定

从10个龙眼果实取直径为5 mm的果皮圆片30个,按照Lin Yifen等^[15,17]和Zhang Shen等^[18]和赵云峰等^[24]的方法测定龙眼果皮细胞膜透性,结果用相对渗透率(%)表示龙眼果皮细胞膜透性大小。

1.2.2 果皮细胞膜脂降解酶 LOX、脂酶和 PLD 活性的测定

(1) LOX活性测定:从10个龙眼果实中取果皮1 g,按照Lin Yifen等^[15-17]、Zhang Shen等^[18]和陈昆松等^[25]的方法测定LOX活性。

(2) 脂酶活性测定:从10个龙眼果实中取果皮1 g,按照Lin Yifen等^[15-17]、Zhang Shen等^[18]和宋丽丽等^[26]的方法测定脂酶活性。

(3) PLD活性测定:从10个龙眼果实中取果皮1 g,按照Lin Yifen等^[15-17]、Zhang Shen等^[18]和Yi Chun等^[27]的方法测定PLD活性。

(4) 酶提取液蛋白质含量:按照考马斯亮蓝G250染色法^[28]测定,以牛血清蛋白作标准曲线。

LOX、脂酶和 PLD 活性以 $\text{U mg}^{-1} \text{ protein}$ 表示。

1.2.3 果皮细胞膜磷脂组分和含量的测定

龙眼果皮细胞膜磷脂混合物的提取参考 Lin Yifen 等^[17]、Zhang Shen 等^[18]、Bang 等^[28]和杨文龙等^[29]的方法并作修改,从 10 个龙眼果实中取果皮 5 g 加液氮磨碎,加 15 mL 2:1 的 Folch 试剂(氯仿甲醇溶液)到 50 mL 带盖的离心管中,超声提取 1 h 后在 4°C 9 000 g 下离心 20 min。离心管中液体分层,去掉上层液体,将下层氯仿相倒入 10 mL 的离心管中,加入 1 mL 丙酮漩涡 2 min,重复加 3 次后,用氮气吹干,然后溶于 1 mL 的 2:1 Folch 试剂中,样品经 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后低温存放备用。

高效液相色谱岛津 LC-2030C 3D 检测条件:色谱柱 SIL 100A ($4.8\text{mm}\times 250\text{mm}$, $5 \mu\text{m}$);进样量 $10 \mu\text{L}$ 、柱温 40°C 、流速 0.8 mL/min 、测定波长 254 nm 、采用等度洗脱的方式;蒸发光散射检测器岛津 ELSD-LTII 检测条件:检测器增益 5、检测器温度 40°C ;检测器压力 350 kPa ;流动相 A 为正己烷-异丙醇-乙酸-三乙胺比例为 $814.2:170:15:0.8 \text{ (V/V)}$;流动相 B 为异丙醇-水-乙酸-三乙胺比例为 $844.2:140:15:0.8 \text{ (V/V)}$ 。

以上结果以 mg g^{-1} 表示。

1.2.4 果皮细胞膜脂脂肪酸组分和含量的测定

参照 Lin Yifen 等^[15-17]、Zhang Shen 等^[18]和陈莲等^[30]的方法,用高效气相色谱测定龙眼果皮细胞膜脂脂肪酸组分含量;并计算龙眼果皮细胞膜脂脂肪酸相对含量、脂肪酸不饱和指数(index of unsaturated fatty acids, IUFA)和脂肪酸不饱和度(unsaturation of fatty acids, U/S),结果以百分比(%)表示。

以上各指标测定均重复 3 次,取其平均值。

1.3 数据分析

采用 SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, Illionis, USA) 数据分析软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮细胞膜透性的影响

由图 1 可知,龙眼果实的果皮细胞膜透性随贮藏时间的延长呈上升趋势,说明龙眼果实在采后贮藏期间是逐渐衰老的。与对照龙眼果实比较,采前喷施胺鲜酯可有效地抑制采后龙眼果实贮藏期间果皮细胞膜透性的升高,并在采后贮藏的同一时间,其果皮细胞膜透性始终低于对照龙眼果实。如贮藏至 2 d、4 d 和 5 d 时,对照龙眼果实的果皮细胞膜透性分别为 59.45 %、72.69 % 和 76.66 %,而采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮细胞膜透性分别为 41.95 %、51.94 % 和 64.18 %,二者之间的差异都达极显著($P<0.01$)水平。上述结果表明,采前喷施胺鲜酯可有效延缓采后龙眼果实果皮细胞膜透性的增加。

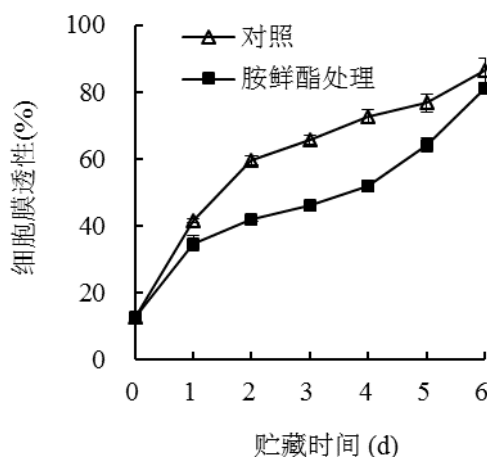


图1 采前喷施胺鲜酯 (DA-6) 对采后龙眼果实贮藏期间果皮细胞膜透性的影响

Fig. 1 Effects of pre-harvest spraying diethyl aminoethyl hexanoate (DA-6) on cell membrane permeability in pericarp of harvested longan fruits during storage

2.2 采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮细胞膜脂降解酶活性的影响

由图2A可知,对照龙眼果实的果皮LOX活性随贮藏时间的延长而升高,其中,在贮藏前3d内快速上升,3~4d内急速上升,随后上升幅度变缓。而经采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮LOX活性在贮藏前3d内快速上升,3~5d内快速下降,贮藏末期内急速上升。进一步比较发现,采前喷施胺鲜酯可有效降低采后龙眼果实贮藏期间的果皮LOX活性,且在贮藏4~6d内,其果皮LOX活性极显著 ($P<0.01$) 低于对照果实。

由图2B可知,龙眼果实的果脂酶活性随贮藏时间的延长而逐渐升高,但不同处理变化不同。其中,对照龙眼果实的果脂酶活性在贮藏0~1d内较慢上升,1~2d内变化不大,2~3d内快速上升,3~4d内缓慢下降,4~6d内快速上升;而采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果脂酶活性在贮藏0~3d内缓慢上升,3~4d内缓慢下降,4~6d内快速上升。进一步比较发现,采前喷施胺鲜酯可有效降低采后龙眼果实贮藏期间的果脂酶活性,且显著 ($P<0.05$) 低于对照果实。

由图2C可知,对照龙眼果实的果皮PLD活性在采后贮藏0~1d内较慢上升,1~2d内缓慢下降,2~3d内较快上升,3~4d内缓慢上升,4~6d内快速上升。采前喷施胺鲜酯可有效降低龙眼果实贮藏期间的果皮PLD活性,且在贮藏3~6d内,其果皮PLD活性极显著 ($P<0.01$) 低于对照果实。

上述结果表明,采前喷施胺鲜酯可有效降低采后龙眼果实的果皮LOX、脂酶和PLD等膜脂降解相关酶活性。

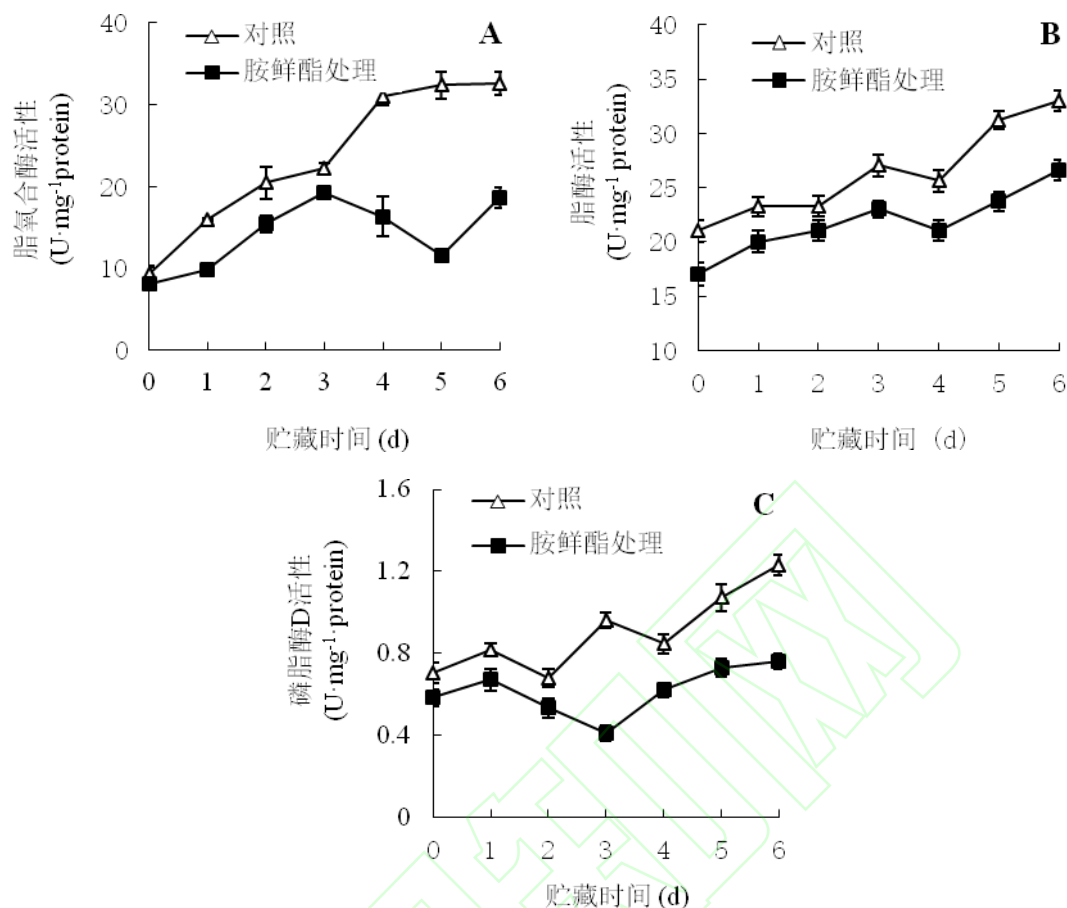


图2 采前喷施胺鲜酯 (DA-6) 对采后龙眼果实贮藏期间果皮 LOX (A)、脂酶 (B) 和 PLD (C) 活性的影响

Fig. 2 Effects of pre-harvest spraying diethyl aminoethyl hexanoate (DA-6) on LOX (A), lipase (B), PLD (C) activity in pericarp of harvested longan fruits during storage

2.3 采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮细胞膜磷脂组分含量的影响

PC、PI 是果蔬等植物细胞膜磷脂的主要组分, 磷脂酸 (phosphatidylinositol, PA) 是 PC、PI 的降解产物^[17,18]。由图 3 A 可知, 龙眼果实果皮 PC 含量随贮藏时间的延长总体呈下降趋势。其中, 对照龙眼果实的果皮 PC 含量在采后贮藏 0~1 d 内快速下降, 1~2 d 内缓慢上升, 2~3 d 内急速下降, 3~4 d 内较快上升, 贮藏 4 d 之后则快速下降; 而采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮 PC 含量在贮藏 0~1 d 内缓慢下降, 1~3 d 内缓慢升高, 贮藏 3 d 之后快速下降。进一步比较发现, 在采后贮藏的同一时间, 采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮 PC 含量极显著 ($P<0.01$) 高于对照果实。

由图 3 B 可知, 龙眼果实的果皮 PI 含量随贮藏时间的延长总体呈下降趋势。其中, 对照龙眼果实的果皮 PI 含量在贮藏 0~1 d 内较慢下降, 1~2 d 内缓慢升高, 2~3 d 内急速下降, 3~4 d 内急速升高, 贮藏 4 d 之后则缓慢下降; 而采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮 PI 含量在贮藏 0~1 d 内缓慢下降, 1~3 d 内缓慢上升, 贮藏 3 d 之后缓慢下降。进一步比较发现, 在采后贮藏的同一时间, 采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮 PI 含量极显著 ($P<0.01$) 高于对照果实。

由图 3 C 可知, 龙眼果实的果皮 PA 含量随贮藏时间的延长而升高。进一步比较发现, 在

采后贮藏的同一时间, 采前喷施胺鲜酯可保持较低的果皮 PA 含量。如采收当天和贮藏第 4 天时, 采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮 PA 含量分别比对照龙眼果实低 24.82 %、17.73 %。

上述结果表明, 采前喷施胺鲜酯可保持采后龙眼果实贮藏期间较高的果皮 PC、PI 等磷脂组分含量, 减少磷脂降解产物 PA 的生成。

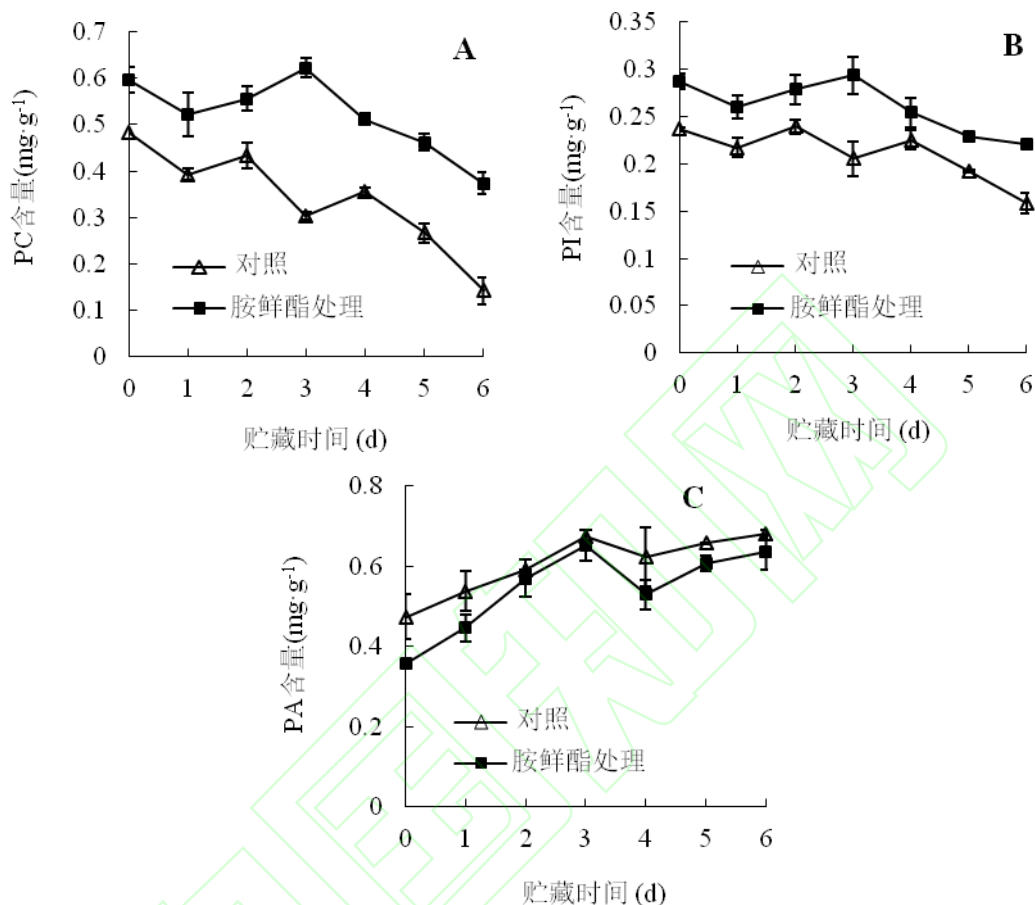


图 3 采前喷施胺鲜酯 (DA-6) 对采后龙眼果实贮藏期间果皮 PC (A)、PI (B) 和 PA (C) 含量的影响

Fig. 3 Effects of pre-harvest spraying diethyl aminoethyl hexanoate (DA-6) on contents of PC (A), PI (B) and PA (C) in pericarp of harvested longan fruits during storage

2.4 采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮细胞膜脂脂肪酸含量的影响

由图 4 A 可知, 龙眼果实的果皮油酸 (oleic acid, C_{18:1}) 相对含量随贮藏时间的延长而下降。进一步比较发现, 在采后贮藏的同一时间, 采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮油酸含量都极显著 ($P<0.01$) 高于对照果实。

由图 4 B 可知, 龙眼果实的果皮亚油酸 (linoleic acid, C_{18:2}) 相对含量随贮藏时间的延长总体呈下降趋势。其中, 对照果实的果皮亚油酸相对含量在贮藏 0~1 d 内缓慢下降, 1~2 d 内变化不大, 2~3 d 内缓慢下降, 3~5 d 内变化不大, 5~6 d 内较慢下降; 而采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮亚油酸相对含量在贮藏 0~1 d 内略有升高, 1~4 d 内缓慢下降, 4~5 d 内略有升高, 5~6 d 内略有下降。进一步比较发现, 在采后贮藏的同一时间, 采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮亚油酸含量都高于对照果实。

由图 4 C 可知, 对照龙眼果实的果皮亚麻酸 (linolenic acid, $C_{18:3}$) 相对含量在贮藏 0~1 d 内缓慢下降, 1~2 d 内缓慢升高, 2~3 d 内缓慢下降, 3~6 d 内变化不大; 而采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮亚麻酸相对含量在贮藏 0~2 d 内缓慢升高, 2~4 d 内缓慢下降, 而 4~6 d 内变化不大。进一步比较发现, 在采后贮藏的同一时间, 采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮亚麻酸含量都高于对照果实。

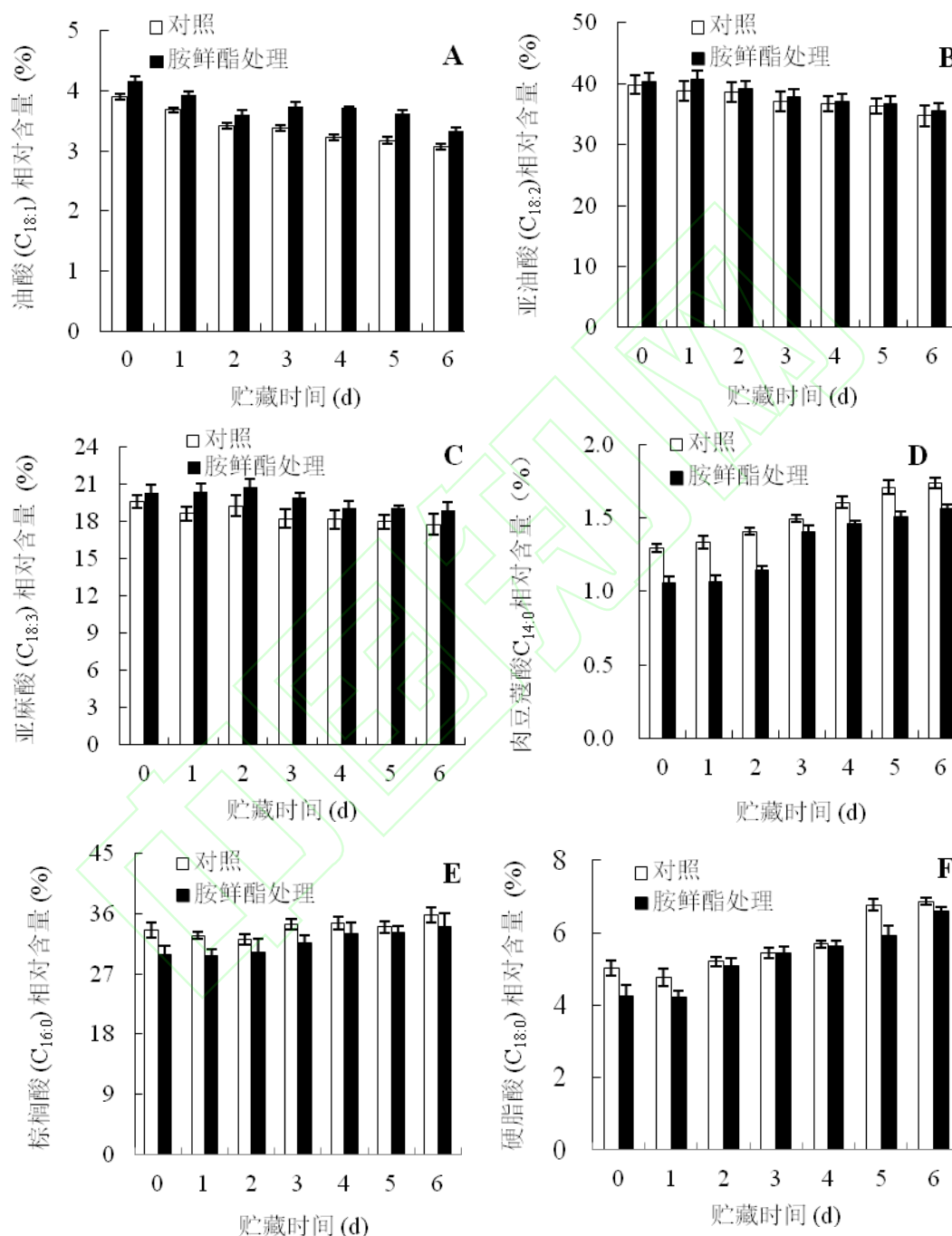


图 4 采前喷施胺鲜酯 (DA-6) 对采后龙眼果实贮藏期间果皮膜脂脂肪酸组分的影响

Fig. 4 Effects of pre-harvest spraying diethyl aminoethyl hexanoate (DA-6) on fatty acid constituents of membrane lipids in pericarp of harvested longan fruits during storage

由图 4 D 可知, 龙眼果实的果皮肉豆蔻酸 (myristic acid, $C_{14:0}$) 相对含量随贮藏时间的延长而升高。其中, 对照龙眼果实的果皮肉豆蔻酸相对含量在贮藏 0~6 d 内缓慢增加; 而采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮肉豆蔻酸相对含量在贮藏 0~1 d 内变化不大, 1~3 d 内缓慢增加, 3~6 d 内略有升高。进一步比较发现, 在采后贮藏的同一时间, 采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮肉豆蔻酸含量都极显著 ($P<0.01$) 低于对照果实。

由图 4 E 可知, 对照龙眼果实的果皮棕榈酸 (palmitic acid, $C_{16:0}$) 相对含量在贮藏 0~2 d 内变化不大, 2~3 d 内缓慢升高, 3~4 d 内略有升高, 4~5 d 内略有下降, 5~6 d 内缓慢升高; 而采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮棕榈酸相对含量在 0~2 d 内变化不大, 2~4 d 内缓慢升高, 4~6 d 内变化不大。进一步比较发现, 在采后贮藏的同一时间, 采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮棕榈酸含量都低于对照果实。

由图 4 F 可知, 对照龙眼果实的果皮硬脂酸 (stearic acid, $C_{18:0}$) 相对含量在贮藏前 1 d 内缓慢下降, 1~4 d 缓慢升高, 4~5 d 内快速升高, 5~6 d 内变化不大; 而采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮硬脂酸相对含量在贮藏 0~1 d 内变化不大, 1~2 d 内快速升高, 2~6 d 内缓慢升高。进一步比较发现, 在采后贮藏的同一时间, 采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮硬脂酸含量都低于对照果实。

上述结果表明, 与对照龙眼果实比较, 采前喷施胺鲜酯能保持采后龙眼果实贮藏期间较高的果皮油酸 ($C_{18:1}$)、亚油酸 ($C_{18:2}$)、亚麻酸 ($C_{18:3}$) 等不饱和脂肪酸相对含量, 延缓果皮肉豆蔻酸 ($C_{14:0}$)、棕榈酸 ($C_{16:0}$)、硬脂酸 ($C_{18:0}$) 等饱和脂肪酸相对含量的增加。

2.5 采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮细胞膜脂肪酸不饱和指数和不饱和度的影响

由图 5 可知, 龙眼果实的果皮膜脂肪酸不饱和指数 (index of unsaturated fatty acids, IUFA) 和膜脂肪酸不饱和度 (unsaturation of fatty acids, U/S) 随贮藏时间的延长而不断下降。进一步比较发现, 在采后贮藏的同一时间, 采前喷施胺鲜酯的龙眼果实果皮膜脂肪酸不饱和指数和不饱和度都极显著 ($P<0.01$) 高于对照果实。上述结果表明, 采前喷施胺鲜酯可有效地降低采后龙眼果实的果皮不饱和脂肪酸降解和饱和脂肪酸生成, 从而保持较高的龙眼果皮膜脂肪酸不饱和指数和不饱和度。

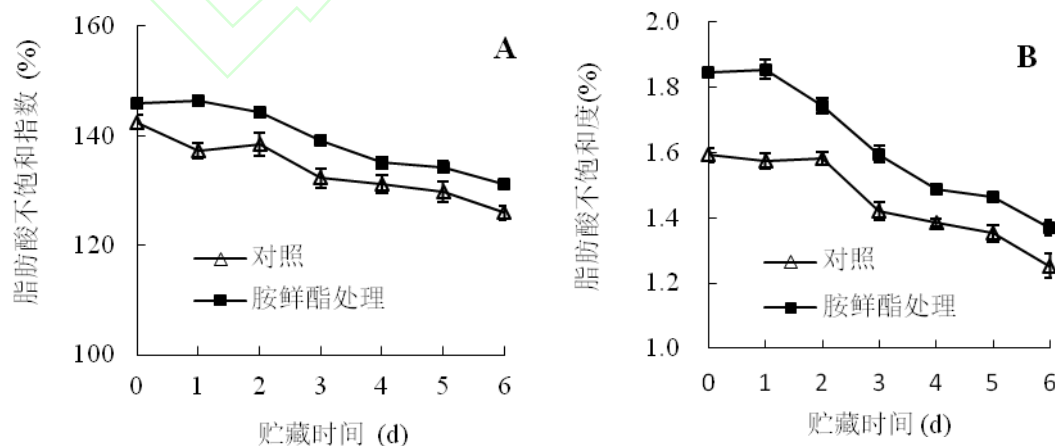


图 5 采前喷施胺鲜酯 (DA-6) 对采后龙眼果实贮藏期间果皮 IUFA (A) 和 U/S (B) 的影响

Fig. 5 Effects of pre-harvest spraying diethyl aminoethyl hexanoate (DA-6) on IUFA (A) and U/S (B) in pericarp of harvested longan fruits during storage

3 讨论

3.1 采前喷施胺鲜酯增强采后龙眼果实耐贮性及其与果皮细胞膜透性和膜脂降解酶活性的关系

细胞膜结构的完整性是果蔬进行正常生理代谢的基本条件,细胞膜结构和功能的破坏标志着果蔬衰老的启动^[15-18,31,32]。当果蔬在能量亏缺、病原菌侵染、活性氧攻击等逆境胁迫会引起生理代谢失调(如膜脂代谢增强),导致细胞膜结构和膜区室化受到破坏,表现为细胞膜透性增加,最后影响采后果蔬的耐贮性^[16-18]。因此,采后果蔬的耐贮性可以通过细胞膜透性大小进行评价。通常情况下,细胞膜透性越小,则果蔬耐贮性越强;反之,细胞膜透性越大,则果蔬耐贮性越差。

细胞膜主要由脂类(磷脂占70%以上)、蛋白质及少量碳水化合物组成,其具有流动性和选择透过性^[15-18,31,32]。当生理代谢失调时,相关膜脂组分会发生降解,其与膜脂降解相关酶(PLD、脂酶和LOX)活性升高有关^[15-18]。PLD是催化细胞膜磷脂水解的起始酶,并且PLD是唯一催化膜磷脂降解的关键酶。因此,通常可以用PLD活性的高低来评价膜磷脂分解程度^[15-18,33-37]。膜磷脂降解的产物可被酯酶进一步去酯化,生成游离脂肪酸^[15-18,33-37]。LOX是膜脂肪酸代谢的关键酶,其主要催化含有顺,顺-1,4-戊二烯结构的多不饱和脂肪酸(如油酸、亚油酸、亚麻酸)而生成游离脂肪酸,同时激活膜脂过氧化作用而积累自由基,进而攻击细胞膜系统,其会引起细胞膜的损伤主要表现为细胞膜透性增大^[7,9,10,15-18,35-37]。Zhang Shen等^[18]报道,焦腐病菌[*Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff. & Maubl.]接种的龙眼果实耐贮性的降低与PLD、脂酶、LOX活性升高密切相关。Lin Yifen等^[15,16]报道,用外源过氧化氢处理的龙眼果实果皮PLD、脂酶、LOX保持较高酶活性,导致细胞膜透性增大,而降低采后龙眼果实耐贮性;反之,用桉油素处理的龙眼果实保持降低膜脂降解酶活性,同时保持较低细胞膜透性,最后提高采后龙眼果实耐贮性。同时,本课题组前期研究发现,采后台湾青枣、橄榄和“油棕”等果实分别用1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)、热空气和1-MCP处理,可降低采后果实贮藏期间膜脂降解相关酶活性,并保持较低细胞膜透性,从而提高采后果实耐贮性^[35-37]。因此认为,采后果蔬的耐贮性可通过适当的保鲜技术调节膜脂降解酶活性,从而延缓衰老进程。

目前对控制龙眼保鲜的研究主要集中在采后处理,较少涉及采前管理措施。本研究发现,采前喷施胺鲜酯可降低采后龙眼果实贮藏期间的果皮PLD、脂酶、LOX等膜脂降解酶活性,减轻采后龙眼果实的果皮细胞膜结构破坏,降低果皮细胞膜透性。联系到采前喷施胺鲜酯可以减少采后龙眼果实的果皮褐变和果肉自溶,提高采后龙眼果实耐贮性和保鲜效果^[21]。据此认为,采前喷施胺鲜酯可提高采后龙眼果实的耐贮性,与采前喷施胺鲜酯降低采后龙眼果实的果皮膜脂降解酶活性、较好维持果皮细胞膜结构有关。

3.2 采前喷施胺鲜酯增强采后龙眼果实耐贮性及其与果皮膜磷脂组分的关系

PC和PI是果蔬等植物细胞膜磷脂的主要组分,共同维持细胞膜系统的结构和功能^[17-18,38-41]。PLD是催化膜磷脂降解的起始酶和关键酶,以磷脂特别是PC为底物生成产物PA和胆碱,导致膜磷脂降解和磷脂酸的显著积累,而破坏细胞膜磷脂双分子层、引起生理代谢失调^[17-18,40,41]。在磷脂酸磷酸酯酶和非特异性酯酰基水解酶的作用下,PA被催化成磷酸甘油二酯;磷酸甘油二酯

接着被相关水解酶水解成游离脂肪酸,从而导致细胞膜结构破坏^[42]。同时,前人研究报道,采后果蔬在机械损伤、冷害、病原菌侵染等逆境胁迫下会引起细胞内PLD活性增强,启动对质膜磷脂双分子层的降解,促进膜磷脂PC和PI的降解,PA含量的显著积累而导致细胞膜透性增加,最后降低采后果蔬的耐贮性^[17-18,37,43,44]。许佳妮等^[41]研究认为橙油处理使柑橘果实PLD活性增强,使PC和PI含量下降、PA含量上升,导致细胞膜结构破坏,而使细胞膜透性增加,最后降低柑橘果实耐贮性。Lin Yifen^[17]等和Zhang Shen^[18]研究发现,采后龙眼果实果皮细胞透性增加与PA含量的积累具有密切正相关性,与PC和PI含量下降呈显著负相关。因此认为,果蔬细胞膜结构的完整性可以通过PC、PI和PA含量的高低来评价细胞膜损伤程度,从而进一步判断果蔬的耐贮性。

本研究发现,龙眼果实的果皮PC、PI等磷脂组分含量随采后贮藏时间的延长而下降,但磷脂降解产物PA含量反而随采后贮藏时间的延长而增加。相关分析表明,对照龙眼果实的果皮细胞膜透性(y)与PA含量(x)呈显著正相关($y=308.4x-127.5$, $r=0.902$, $P<0.05$),认为龙眼果皮PA含量可用于评价采后龙眼果实的果皮细胞膜完整性,从而进一步用于评价采后龙眼果实的耐贮性。本研究还发现,采前喷施胺鲜酯可保持采后龙眼果实较高的果皮PC和PI含量、及较低的果皮PA含量。联系到采前喷施胺鲜酯可提高采后龙眼果实耐贮性和保鲜效果^[21]。据此认为,采前喷施胺鲜酯可提高采后龙眼果实的耐贮性,与采前喷施胺鲜酯保持采后龙眼果实较高的果皮PC、PI等磷脂组分含量,及减少磷脂降解产物PA的生成有关。

3.3 采前喷施胺鲜酯增强采后龙眼果实耐贮性及其与果皮膜脂肪酸组分的关系

细胞膜脂肪酸组分及含量的改变是影响细胞膜功能和生理特性的原因之一,从而影响采后果蔬耐贮性^[15-18,30,31,35-37,41]。细胞膜脂肪酸组分中的不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸的比例大小与膜流动性有关,因此,可通过膜脂肪酸不饱和度评价果蔬的耐贮性^[7,9-10,15-18,35-37]。通常情况下,膜脂肪酸不饱和度越高,则膜流动性越大,耐贮性越强;反之,膜脂肪酸不饱和度越低,则膜流动性越小,耐贮性越差^[15-18,30,31,35-37,41]。同时,膜脂肪酸不饱和度与细胞膜透性呈负相关性;膜脂肪酸不饱和度越高,细胞膜透性越低;反之,膜脂肪酸不饱和度越低,细胞膜透性越高^[15-18]。膜脂肪酸组分及含量的改变与膜脂过氧化作用有关;细胞膜的不饱和脂肪酸在自由基和脂氧合酶(LOX)作用下会发生过氧化作用,而使细胞膜脂肪酸比例发生改变,导致膜的流动性变小和细胞透性变大,最后细胞膜功能丧失及膜区室化破坏^[15-18,30,31,35-37,41]。目前,在龙眼、台湾青枣、油棕、橄榄、柑橘等果蔬的研究发现,采后果蔬耐贮性与其膜脂脂肪酸的种类及比例紧密相关^[15-18,35-37]。其中,细胞内外物质交换及细胞膜流动性与膜脂肪酸不饱和度密切相关,从而影响采后果蔬耐贮性和货架期^[15-18,35-37]。

本研究发现,与对照相比,采前喷施胺鲜酯能有效延缓龙眼果实采后贮藏期间果皮油酸($C_{18:1}$)、亚油酸($C_{18:2}$)、亚麻酸($C_{18:3}$)等不饱和脂肪酸相对含量的下降,及果皮肉豆蔻酸($C_{14:0}$)、棕榈酸($C_{16:0}$)、硬脂酸($C_{18:0}$)等饱和脂肪酸相对含量的增加,保持较高的龙眼果皮膜脂肪酸不饱和指数和不饱和度。联系到采前喷施胺鲜酯可提高采后龙眼果实耐贮性和保鲜效果^[21]。据此认为,采前喷施胺鲜酯可提高采后龙眼果实的耐贮性,与采前喷施胺鲜酯降低

采后龙眼果实果皮不饱和脂肪酸降解和饱和脂肪酸生成, 较好维持龙眼果皮细胞膜功能有关。

4 结论

采前喷施浓度为10 mg/kg的胺鲜酯可提高采后龙眼果实的耐贮性, 与采前喷施胺鲜酯可降低龙眼果实采后贮藏期间果皮LOX、脂酶和PLD等膜脂降解酶活性, 延缓果皮磷脂酰胆碱(PC)、磷脂酰肌醇(PI)等膜磷脂、以及膜脂不饱和脂肪酸[油酸($C_{18:1}$)、亚油酸($C_{18:2}$)、亚麻酸($C_{18:3}$)]降解, 较好维持龙眼果皮细胞膜结构完整性有关。

参考文献:

- [1] CHEN Y H, LIN H T, JIANG Y M, et al. *Phomopsis longanae* Chi-induced pericarp browning and disease development of harvested longan fruit in association with energy status[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 93(7): 24-28. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2014.02.003.
- [2] CHEN M Y, LIN H T, ZHANG S, et al. Effects of adenosine triphosphate (ATP) treatment on postharvest physiology, quality and storage behavior of longan fruit [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(5): 971-982. DOI 10.1007/s11947-014-1462-z.
- [3] 陈艺晖, 林河通, 林艺芬, 等. 拟茎点霉侵染对龙眼果实采后果皮褐变和活性氧代谢的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(23):4858-4866. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2011.23.012.
- [4] 林艺芬, 林毅雄, 林河通, 等. ‘东壁’和‘福眼’龙眼果实果皮褐变差异的生理机制[J]. *食品科学*, 2016, 37(20): 221-227. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201620038.
- [5] 林育钊, 林河通, 林艺芬, 等. ‘东壁’和‘福眼’龙眼采后果肉自溶的差异性研究[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(11): 181-186. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2017.11.024.
- [6] 林毅雄, 林艺芬, 陈艺晖, 等. 过氧化氢对采后龙眼果实贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(22):244-248. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201622037.
- [7] LIN Y F, CHEN M Y, LIN H T, et al. DNP and ATP induced alteration in disease development of *Phomopsis longanae* Chi inoculated longan fruit by acting on energy status and reactive oxygen species production-scavenging system [J]. *Food Chemistry*, 2017, 228, 497-505. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.02.045.
- [8] LIN Y F, HU Y H, LIN H T, et al. Inhibitory effects of propyl gallate on tyrosinase and its application in controlling pericarp browning of harvested longan fruits [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(11): 2889-2895. DOI: 10.1021/jf305481h.
- [9] LIN Y F, LIN 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. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2014.05.001.
- [10] LIN Y F, LIN Y X, LIN H T, et al. Inhibitory effects of propyl gallate on browning and its relationship to active oxygen metabolism in pericarp of harvested longan fruit [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(2):1122-1128. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.10.008.
- [11] LIN Y F, LIN Y X, LIN H T, et al. Hydrogen peroxide-induced pericarp browning of harvested longan fruit in association with energy metabolism [J]. *Food Chemistry*, 2017, 225, 31-36. DOI:

- 10.1016/j.foodchem.2016.12.088.
- [12] LIN Y F, LIN Y X, LIN H T, et al. Application of propyl gallate alleviates pericarp browning in harvested longan fruit by modulating metabolisms of respiration and energy [J]. Food Chemistry, 2018, 240, 863-869. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.07.118.
- [13] LIN Y X, LIN Y F, CHEN Y H, et al. Hydrogen peroxide induced changes in energy status and respiration metabolism of harvested longan fruit in relation to pericarp browning [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64, 4627-4632. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b01430.
- [14] ZHANG S, LIN H T, LIN Y F, et al. Energy status regulates disease development and respiratory metabolism of *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff.& Maubl.-infected longan fruit [J]. Food Chemistry, 2017, 231, 238-246. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.03.132.
- [15] LIN Y F, LIN H T, LIN Y X, et al. The roles of metabolism of membrane lipids and phenolics in hydrogen peroxide-induced pericarp browning of harvested longan fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111, 53-61. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2015.07.030.
- [16] LIN Y F, LIN Y X, LIN H T, et al. Inhibitory effects of propyl gallate on membrane lipids metabolism and its relation to increasing storability of harvested longan fruit [J]. Food Chemistry, 2017, 217, 133-138. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.08.065.
- [17] LIN Y F, CHEN M Y, LIN H T, et al. *Phomopsis longanae*-induced pericarp browning and disease development of longan fruit can be alleviated or aggravated by regulation of ATP-mediated membrane lipid metabolism [J]. Food Chemistry, 2018, 269, 644-651. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.07.060.
- [18] ZHANG S, LIN Y Z, LIN H T, et al. *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff. & Maubl.-induced disease development and pericarp browning of harvested longan fruit in association with membrane lipids metabolism [J]. Food Chemistry, 2018, 244:93-101. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.10.020.
- [19] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2007.12.045.
- [20] 何燕文, 梁 和, 韦剑锋, 等. 采前喷施壳聚糖和高良姜溶液对龙眼采后耐贮性的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(10):81-84. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6850.2005.10.021.
- [21] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2016.09.000.
- [22] 谭晓红, 王贵禧, 陈金印, 等. 采前 DA-6 和 DCPTA 处理对冬枣果实品质发育的影响[J]. 林业科学研究, 2007, 20(4):485-489. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1498.2007.04.008
- [23] 姚艳丽, 孙光明, 刘忠华, 等. DA-6 和 DCPTA 对菠萝果实品质发育的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(7):1218-1222. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2011.07.007
- [24] 赵云峰, 林河通, 林娇芬, 等. 龙眼果实采后呼吸强度、细胞膜透性和品质的变化[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2005, 34(2): 263-268. DOI: 10.3321/j.issn:1671-5470.2005.02.030.
- [25] 陈昆松, 徐昌杰, 许文平, 等. 猕猴桃和桃果实脂氧合酶活性测定方法的建立[J]. 果树学报, 2003, 20(6): 436-438. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9980.2003.06.003.

- [26] 宋丽丽. 能量在香石竹切花衰老作用中的生理生化与分子机制[D]. 广州: 中国科学院博士学位论文, 2006.
- [27] YI C, QU H X, JIANG Y M, et al. ATP-induced changes in energy status and membrane integrity of harvested litchi fruit and its relation to pathogen resistance [J]. *Journal of Phytopathology*, 2008, 156 (6): 365-371. DOI: 10.1111/j.1439-0434.2007.01371.x.
- [28] BRADFORD M M. Rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72: 248-254. DOI:10.1016/0003-2697(76)90527-3.
- [29] 杨文龙. 东北 10 种树木叶片磷脂含量的比较测定[D]. 东北林业大学, 2008.
- [30] 陈 莲, 林河通, 陈艺晖, 等. 2, 4-二硝基苯酚对采后龙眼果皮脂氧合酶活性和膜脂脂肪酸组分的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2009, 17(5): 477-482. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3395.2009.5.2329.
- [31] 李喜艳, 王加启, 卜登攀, 等. 多不饱和脂肪酸对细胞膜功能影响的研究进展[J]. *生物技术通报*, 2009, 12: 22-26.
- [32] ANTUNES M D C, SFAKIOTAKIS E M. Changes in fatty acid composition and electrolyte leakage of 'Hayward' kiwifruit during storage at different temperatures [J]. *Food Chemistry*, 2008, 110: 891-896. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.02.089.
- [33] SIRIKESORN L, KETSA S, VAN DOORN W G. Low temperature-induced water-soaking of *Dendrobium* inflorescences: Relation with phospholipase D activity, thiobarbituric-acid staining membrane degradation products, and membrane fatty acid composition [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 80: 47-55. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2013.01.007.
- [34] PALIYATH G, MURR D P, HANDA A K, et al. *Postharvest biology and technology of fruits, vegetables, and flowers* [M]. Ames: Wiley-Blackwell Publishing, 2008: 195-202.
- [35] 陈 莲, 王璐璐, 林河通, 等. 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. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2018.10.026.
- [36] 李 辉, 林毅雄, 林河通, 等. 1-甲基环丙烯延缓采后“油棕”果实衰老及其与膜脂代谢关系[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(12): 143-151. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2018.10.026.
- [37] 孔祥佳, 林河通, 郑俊峰, 等. 热空气处理诱导冷藏橄榄果实抗冷性及其与膜脂代谢的关系[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(4): 752-760. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2012.04.016.
- [38] WANG X M, DEVAIAH S P, ZHANG W H, et al. Signaling functions of phosphatidic acid [J]. *Progress in Lipid Research*, 2006, 45(3): 250-278. DOI: 10.1016/j.plipres.2006.01.005.
- [39] TESTERINK C, MUNNIK T. Phosphatidic acid: a multifunctional stress signaling lipid in plants [J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(8): 368-375. DOI: 10.1016/j.tplants.2005.06.002.
- [40] ZHANG W H, YU L J, ZHANG Y Y, et al. Phospholipase D in the signaling networks of plant response to abscisic acid and reactive oxygen species [J]. *Biochimica Et Biophysica Acta*, 2005, 1736(1): 1-9. DOI: 10.1016/j.bbalip.2005.07.004.
- [41] 许佳妮, 曹 琦, 邓丽莉, 等. 食品科学低成熟度柑橘果实油胞病发病进程中的膜脂代谢[J]. *食品科学*, 2016, 37 (24): 262-270. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201624042.

- [42] MAO L C, PANG H Q, WANG G Z, et al. Phospholipase D and lipoxygenase activity of cucumber fruit in response to chilling stress [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 44 (1):42-47. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2006.11.009.
- [43] 李 丽, 游向荣, 孙 健, 等. 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. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.01.018.
- [44] ZHAO Y Y, QIAN C L, CHEN J C, et al. Responses of phospholipase D and lipoxygenase to mechanical wounding in postharvest cucumber fruits [J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2010, 11(6):443-450. DOI: 10.1631/jzus.B090035.

