

1-MCP 延缓采后台湾青枣果实衰老及其与能量代谢的关系

陈 莲¹, 王璐璐^{2,3}, 林河通^{2,3*}, 林艺芬^{2,3}, 陈艺晖^{2,3}

1 漳州职业技术学院食品与生物工程系, 福建漳州 363000

2 福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002

3 福建农林大学农产品产后技术研究所, 福建福州 350002

摘 要 研究 1-甲基环丙烯(1-MCP)处理对采后‘中青’台湾青枣果实贮藏品质与烟酰胺腺嘌呤二核苷酸激酶(NADK)活性、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NAD)、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADP)、还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NADH)、还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADPH)、能量物质[三磷酸腺苷(ATP)、二磷酸腺苷(ADP)、一磷酸腺苷(AMP)]及能荷(EC)的关系。采后台湾青枣果实用 1.8 $\mu\text{L/L}$ 的 1-MCP 处理 12 h 后在 $(15\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 下贮藏, 定期测定能量物质、NAD、NADP、NADH 和 NADPH 含量、NADK 活性及细胞膜透性, 并在贮藏前后测定果实品质指标和腐烂率。结果表明: 1-MCP 处理保持‘中青’台湾青枣果实较高的 ATP、NADP、NADPH 含量, NADK 活性和能荷值, 较低的 NAD 和 NADH 含量, 延缓贮藏期间细胞膜透性的增加; 保持较高的果实硬度、可溶性固形物(TSS)、有机酸(TA)和维生素 C 含量, 延缓果皮叶绿素含量下降, 降低腐烂率。据此认为, 1-MCP 处理延缓采后台湾青枣果实衰老降低腐烂率可能与细胞保持较高的能荷水平有关。

关键词 台湾青枣; 果实; 1-甲基环丙烯(1-MCP); 品质; 能量代谢

中图分类号 TS255.3; S667.9

文献标识码 A

Delaying Senescence of Harvested *Ziziphus mauritiana* Lamk Fruit by Postharvest 1-Methylcyclopropene(1-MCP) Treatment and Its Relation to Energy Metabolism

CHEN Lian¹, WANG Lulu^{2,3}, LIN Hetong^{2,3*}, LIN Yifen^{2,3}, CHEN Yihui^{2,3}

1 Department of Food and Bioengineering, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou, Fujian 363000, China

2 College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China

3 Institute of Postharvest Technology of Agricultural Products, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract The effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on the storage quality of the harvested *Ziziphus mauritiana* Lamk. cv. Zhongqing fruit were investigated, with regard to its relationship with the activity of nicotinamide adenine dinucleotide kinase (NADK) activity, contents of nicotinamide adenine dinucleotide (NAD), nicotinamide adenine dinucleotide hydrogen (NADH), nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADP) and nicotinamide adenine dinucleotide phosphate hydrogen (NADPH), contents of adenosine triphosphate (ATP), adenosine diphosphate (ADP) and adenosine monophosphate (AMP), and energy charge (EC). The harvested fruits were treated with 1.8 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP for 12 h then stored at $(15\pm 1)^{\circ}\text{C}$. The cellular membrane permeability, contents of ATP, ADP and AMP, NADK activity and contents of NAD, NADH, NADP, NADPH were determined regularly during the storage, while fruit quality was evaluated on the first and the last day of storage. The results showed that 1-MCP treatment could maintain higher activity of NADK, lower the content of NAD and NADH, increase the content of NADP and NADPH, delay the decrease of ATP content and energy charge, and retard the increase of cellular membrane permeability during storage; In addition, it could also keep higher firmness, contents of vitamin C, total soluble solids (TSS) and titratable acid (TA) in fruits, retard the decrease of chlorophyll content in pericarp and decrease fruit decay. Therefore, it could be concluded that 1-MCP treatment could maintain the quality and delay the senescence of harvested *Ziziphus mauritiana* fruit due to higher retained cellular energy charge.

Key words *Ziziphus mauritiana* Lamk.; fruit; 1-methylcyclopropene (1-MCP); quality; energy metabolism

doi 10.3969/j.issn.1000-2561.2017.01.031

收稿日期 2016-01-29

修回日期 2016-11-19

基金项目 国家科技支撑计划专项(No. 2007BAD07B06); 福建省自然科学基金项目(No. 2011J05171); 福建省教育厅中青年教师教育科研项目(No. JA15691); 福建农林大学高水平大学建设项目(No. 612014042)。

作者简介 陈 莲(1978—), 女, 博士, 副教授; 研究方向: 果蔬采后生物学与保鲜技术。*通讯作者(Corresponding author): 林河通(LIN Hetong), E-mail: hetonglin@163.com。

台湾青枣(*Ziziphus mauritiana* Lamk.)属鼠李科(Rhamnaceae)枣属(*zizyphus* Mill.)又称为印度枣、毛叶枣、滇刺枣等,原产印度和中国云南。台湾青枣果实口感脆甜、清香爽口,具有较高的抗氧化活性,且在春节前成熟上市,深受消费者欢迎^[1-2]。台湾青枣果实采后易衰老,果皮颜色由青绿色转为黄绿色乃至黄色,部分或全部变成红色或黑色,果肉硬度下降,口感由脆变软,食用品质快速下降。如何延缓台湾青枣果实采后衰老引起的品质劣变进程,延长果实货架期成为中国台湾青枣产业进一步发展急需解决的问题^[3]。

近年研究表明,果实采后因为细胞内能量生成速率降低或可用的能量供应不足加速采后果实衰老和褐变^[4-6]。细胞能量生成速率和水平在果实采后成熟衰老期间发生明显变化,油棕^[4]、龙眼^[7]、梨^[8]、荔枝^[9]等果实采后贮藏期间 ATP 浓度或能荷值均下降。刘亭等^[10]研究表明,能量水平不仅与呼吸强度、呼吸途径密切相关而且还参与果实采后衰老和品质变化的调控。细胞内因能量供给不足及能量生成速率下降导致呼吸途径发生变化从而改变呼吸强度和能量代谢水平。陈梦茵等^[11]研究发现,龙眼果实细胞能量供给不足导致植物细胞中吡啶核苷酸(NAD、NADH、NADP 和 NADPH)含量发生变化,认为吡啶核苷酸作为呼吸链的成员参与呼吸代谢能量产生过程,其含量的变化导致呼吸途径发生变化。顾采琴等^[7,12]对草莓、番茄等果实衰老过程中吡啶核苷酸含量变化研究也表明其在采后呼吸代谢和能量代谢水平变化起重要作用。呼吸链是植物细胞主要的活性氧产生场所,细胞因能量供给不足导致呼吸途径的改变或呼吸链受损引起活性氧(O_2 和 H_2O_2)大量生成,活性氧攻击膜系统导致膜透性不断上升,细胞区室化被破坏最终导致果实褐变腐烂^[5,13-15]。果实采后的 ATP 含量和能荷值与衰老程度呈负相关^[13,15-16]。另一方面,荔枝^[9]、龙眼^[6]果实采后外源 ATP 处理能提高果皮组织的 ATP 含量和能荷水平,维持细胞膜的完整性,延缓衰老,延长货架期。可见,果实细胞组织 ATP 含量和能荷水平与果实采后贮藏期间衰老密切相关。如何稳定果实采后能量的生成速率成为延缓果实衰老和品质劣变的一个突破方向。

近年研究发现,适宜浓度乙烯抑制剂(1-MCP)处理在延缓果实衰老方面的效果显著,如 1-MCP 处理能有效的延缓荔枝、油棕、台湾青枣果实采后衰老及品质劣变延长果实货架期^[1,4,17]。Qu 等^[17]分别用乙烯、1-MCP 处理采后荔枝果实,发现乙烯降

低了果皮中的能荷值加剧细胞能量亏缺加速衰老褐变而 1-MCP 处理延缓了衰老品质劣变,认为 1-MCP 处理延缓衰老与能量代谢有关。张兰等^[18]通过数字基因表达谱(DGE)技术研究 1-MCP 处理的芒果果实发现,果实呼吸关键酶的表达丰度显著下调,认为 1-MCP 处理抑制果实呼吸强度,降低能量代谢,延缓果实衰老。李辉等^[4]研究认为,采后 1-MCP 处理可能是通过改变‘油棕’果实的呼吸途径从而改变呼吸强度和能量代谢水平,保持细胞能量水平,维持呼吸链中活性氧清除平衡,延缓果实衰老。目前未见有关台湾青枣果实细胞能量代谢的报道。笔者以福建省主栽台湾青枣果实品种‘中青’(*Ziziphus mauritiana* Lamk. cv. Zhongqing)果实为材料,研究台湾青枣果实贮藏期间细胞能量水平和生理品质的变化规律及相关性,为控制采后台湾青枣果实衰老、延长果实货架期提供科学依据和生产指导。

1 材料与方法

1.1 材料

供试的果实于 2012 年 12 月采自福建省漳州平和县山格镇示范科技园。采收当天‘中青’台湾青枣(*Ziziphus mauritiana* Lamk. cv. Zhongqing)果实运到福建农林大学农产品产后技术研究所食品贮藏保鲜实验室(福州),挑选单果重约为 100~140 g,大小、色泽相似、没有病虫害和机械伤、八成熟果实进行试验。

1.2 方法

1.2.1 果实前期处理 果实用清水清洗、晾干后如下处理:①1-MCP 处理:1-MCP 浓度为 $1.8 \mu\text{L/L}$ ^[1]。果实上平放根据浓度裁剪并喷湿的纸片型 1-MCP,在 $(15\pm 1)^\circ\text{C}$ 下泡沫箱里密闭处理 12 h。②对照(CK):果实不做任何处理,在 $(15\pm 1)^\circ\text{C}$ 下泡沫箱里密闭 12 h。1-MCP 为台湾利统股份有限公司提供的纸片型 AnsiP-S(商品名:安喜布)。处理后的台湾青枣果实用 0.015 mm 的聚乙烯薄膜袋密封包装,每袋装果 10 个,包装后在 $(15\pm 1)^\circ\text{C}$ 下贮藏 15 d。

1.2.2 果实细胞膜透性的测定 10 个台湾青枣果实除去外果皮后从赤道面切取厚度 1 cm 的柱形果肉(直径为 5 mm)2 g,参照陈艺晖等^[19]的方法,加入 25 mL 蒸馏水,于 25°C 下放置 2 h,用 DDS-IIA 型电导仪来测定电导度,记为 C_1 。浸出液用沸水浴煮 30 min 后测定电导度,记为 C_2 。相对渗透率 = $(C_1/C_2)\times 100\%$ 。

1.2.3 果实 ATP、ADP 和 AMP 含量的测定 参照 Chen 等^[20]的方法, 从 10 个除去外果皮后的台湾青枣果实赤道面切取厚度 1 cm 的柱形果肉 10 g, 用岛津 LC-20AT 型高效液相色谱仪测定 ATP、ADP 和 AMP 的含量, 采用 C₁₈ 反向柱, 检测波长为 254 nm, 进样体积 50 μ L, 流速 1.0 mL/min。ATP、ADP 和 AMP 的定性采用保留时间, 定量通过外标法与标品进行比对, 结果以 μ g/g FW 表示。根据所得数值按照下列公式计算能荷(EC):

$$EC=[ATP+1/2ADP]/[ATP+ADP+AMP]$$

1.2.4 果实 NADK 活性的测定 从 10 个除去外果皮后的台湾青枣果实赤道面切取厚度 1 cm 的柱形果肉 5 g, 参照顾采琴等^[7]的方法测定果实 NADK 活性, 以每小时生成 1 μ mol NADP 需要的酶量为 1 个 NADK 活性单位(U), 结果以 U/mg protein 表示。

1.2.5 果实 NADP、NADPH、NAD 和 NADH 含量的测定 从 10 个除去外果皮后的台湾青枣果实赤道面切取厚度 1 cm 的柱形果肉 3 g, 参照顾采琴等^[7]的方法测定果实 NAD、NADH、NADP 和 NADPH 含量, 结果以 nmol/g FW 表示。

1.2.6 蛋白质含量测定 参照刘士平等^[21]的方法, 采用考马斯亮蓝 G250 染色法测定, 以牛血清蛋白作标准曲线。

1.2.7 果实硬度测定 随机取 10 个台湾青枣果实, 每个果实赤道线上相对 4 个部位的去皮果肉用 EZ Test EZ-S 质构分析仪测定, 结果以 N/cm² 表示。

1.2.8 果皮叶绿素含量测定 从 10 个台湾青枣果实中用刨皮刀取果实赤道面上的外果皮 1 g, 参照朱广廉等^[22]的方法测定叶绿素含量, 结果以 mg/hg FW 表示。

1.2.9 果实可滴定酸含量测定 从 10 个除去外果皮后的台湾青枣果实赤道面切取厚度 1 cm 的柱形果肉 10 g, 参照蔡永萍^[23]的方法, 用 NaOH 溶液滴定法测定果实可滴定酸含量。

1.2.10 果实可溶性固形物含量测定 随机取 10 个台湾青枣果实, 用 WYT-1 型手持折光仪测定果实可溶性固形物含量。

1.2.11 果实维生素 C 含量测定 从 10 个除去外果皮的台湾青枣赤道面切取厚度 1 cm 的柱形果肉 1.0 g, 参照曹建康^[24]的方法测定维生素 C 含量, 结果以 mg/hg FW 表示。

1.2.12 果实腐烂指数测定 随机取 5 袋台湾青枣果实(共 50 个), 参照陈学红等^[25]的方法, 以果实表面出现水渍状病斑作为是否腐烂的判别依据, 按照腐烂面积将果实划分为 4 级: 0 级, 无腐烂; 1 级, 果实表面有 1~3 个小腐烂斑点; 2 级, 腐烂面积占 25%~50%; 3 级, 腐烂面积大于 50%。果实腐烂指数/%= Σ (腐烂级别 \times 该级果实数)/最高腐烂级别 \times 总果数 \times 100。

1.3 数据分析

数据分析采用 SPSS 16.0 数据分析软件和 Duncan 多重比较法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 1-MCP 对采后台湾青枣果实贮藏 15 d 后果实品质的影响

由表 1 可知, 在贮藏第 15 天, 对照台湾青枣果实硬度 3.5 N/cm², 而 1-MCP 处理的台湾青枣果实硬度 5.0 N/cm², 为对照的 1.4 倍, 显著高于对照($p<0.05$); 对照果实果皮叶绿素含量 3.19 mg/hg FW, 1-MCP 处理的果皮叶绿素含量为 4.89 mg/hg FW, 是对照的 1.53 倍, 显著高于对照($p<0.05$); 对照果实可溶性固形物为 6.97%, 可滴定酸为 0.08%, 而 1-MCP 处理的可溶性固形物为 7.93%, 可滴定酸为 0.12%, 两者间差异显著($p<0.05$); 对照果实维生素 C 含量为 1.82 mg/hg FW, 而 1-MCP 处理的果实维生素 C 含量为 4.92 mg/hg FW, 为对照的 2.7 倍, 显著高于对照($p<0.05$); 对照果实腐烂指数高达 63.3%, 而 1-MCP 处理的腐烂指数为 29.5%, 仅为对照的 46.6%, 显著低于对照($p<0.05$)。上述结果表明, 对照台湾青枣果实采后易衰老腐烂, 而 1-MCP 处理能有效的抑制果实外观色泽变化、保持较高的硬度、可溶性固形物、可滴定酸、维生素 C 含量, 较好的保持果实外观品质和商品价值, 降低腐烂率。

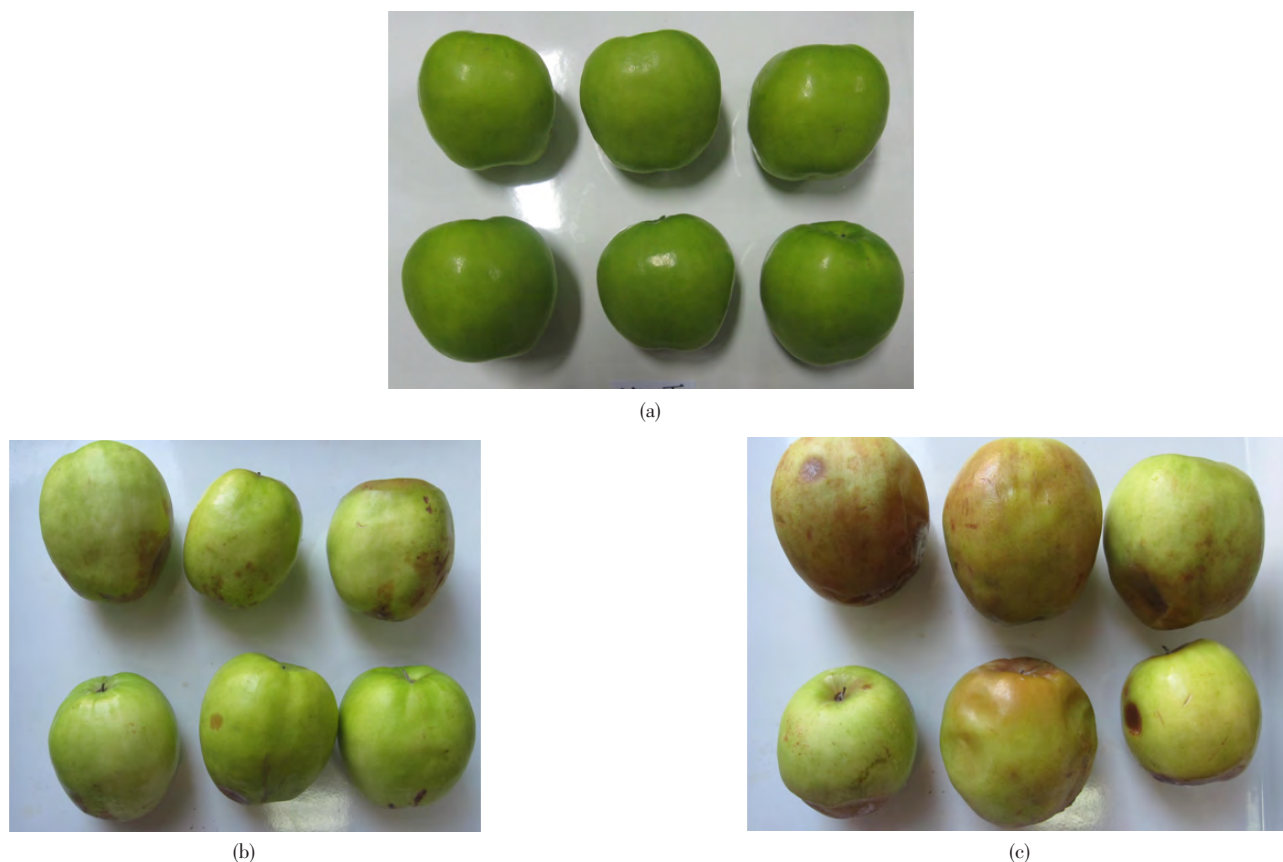
表1 1-MCP处理对采后‘中青’台湾青枣果实在(15 \pm 1) $^{\circ}$ C下贮藏15 d后品质的影响

Table 1 Effects of 1-MCP treatments on quality of harvested *Ziziphus mauritiana* Lamk. CV. Zhongqing fruit stored at (15 \pm 1) $^{\circ}$ C for 15 d

时间	处理	硬度/(N \cdot cm ⁻²)	维生素C (mg \cdot hg ⁻¹ FW)	叶绿素含量 (mg \cdot hg ⁻¹ FW)	可溶性固形物/%	可滴定酸/%	腐烂指数/%
0 d	1-MCP处理(CK)	(7.3 \pm 0.12)c	(7.17 \pm 0.40)c	(12.8 \pm 0.04)c	(10.6 \pm 0.442)c	(0.19 \pm 0.000 4)c	0 a
15 d	CK	(3.5 \pm 0.18)a	(1.82 \pm 0.20)a	(3.19 \pm 0.99)a	(6.97 \pm 0.201)a	(0.08 \pm 0.009 9)a	(63.3 \pm 3.7)c
15 d	1-MCP处理	(5.0 \pm 0.19)b	(4.92 \pm 0.23)b	(4.89 \pm 0.57)b	(7.93 \pm 0.208)b	(0.12 \pm 0.008 1)b	(29.5 \pm 1.5)b

说明: 同一列内数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著(数据为平均值 \pm 标准差, 重复数 $n=3$)。

Note: Different small letters mean significant different at 0.05 level (Date=Mean \pm Standard, $n=3$).



(a) 为台湾青枣果实贮藏第0天; (b) 为1-MCP处理台湾青枣果实贮藏第15天; (c) 为对照(CK)台湾青枣果实贮藏第15天。
(a) *Ziziphus mauritiana* Lamk. fruit at harvesting day (day 0); (b) *Ziziphus mauritiana* Lamk. fruit at 15 days of storage after 1-MCP treatment; (c) *Ziziphus mauritiana* Lamk. fruit at 15 days of storage in control fruit.

图1 台湾青枣果实贮藏第0天、1-MCP处理第15天和对照第15天外观品质

Fig. 1 The appearance quality of *Ziziphus mauritiana* Lamk. fruit at harvesting day (day 0), at 15 days of storage after 1-MCP treatment and at 15 days of storage in control fruit

2.2 1-MCP 对采后台湾青枣果实细胞膜透性的影响

果实衰老程度常用细胞膜透性来反映, 一般常用细胞膜相对渗透率来表示。由图 2 可知, 随贮藏时间的延长, 对照台湾青枣果实细胞膜透性不断上升, 而 1-MCP 处理的台湾青枣果实细胞膜相对渗透率在贮藏 0~3 d 略有下降, 随后随贮藏时间的延长不断上升。在贮藏第 15 天对照台湾青枣果实细胞膜相对渗透率为 61.0%, 而 1-MCP 处理的细胞膜相对渗透率为 42.6%, 两者间差异极显著 ($p < 0.01$)。在贮藏 6~15 d 内, 对照台湾青枣果实细胞膜相对渗透率极显著 ($p < 0.01$) 高于处理。说明 1-MCP 处理有效地减缓台湾青枣果实细胞膜透性的升高, 保持较低的细胞膜相对渗透率, 较好的维持果实细胞膜结构的完整性, 延缓果实衰老。

2.3 1-MCP 对采后台湾青枣果实 ATP、ADP、AMP 含量和能荷值的影响

由图 3-a 可知, 对照和 1-MCP 处理的台湾青枣果实 ATP 含量在整个贮藏期间均呈下降趋势。在贮藏同一时间内 1-MCP 处理的 ATP 含量均比对

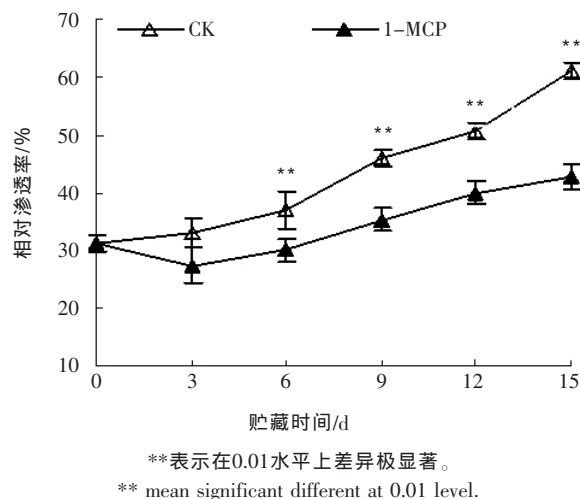


图2 1-MCP处理对采后‘中青’台湾青枣果实细胞膜相对渗透率的影响

Fig. 2 Effects of 1-MCP treatment on cell membrane relative leakage rate of harvested *Ziziphus mauritiana* Lamk. CV. Zhongqing fruit

照的高。

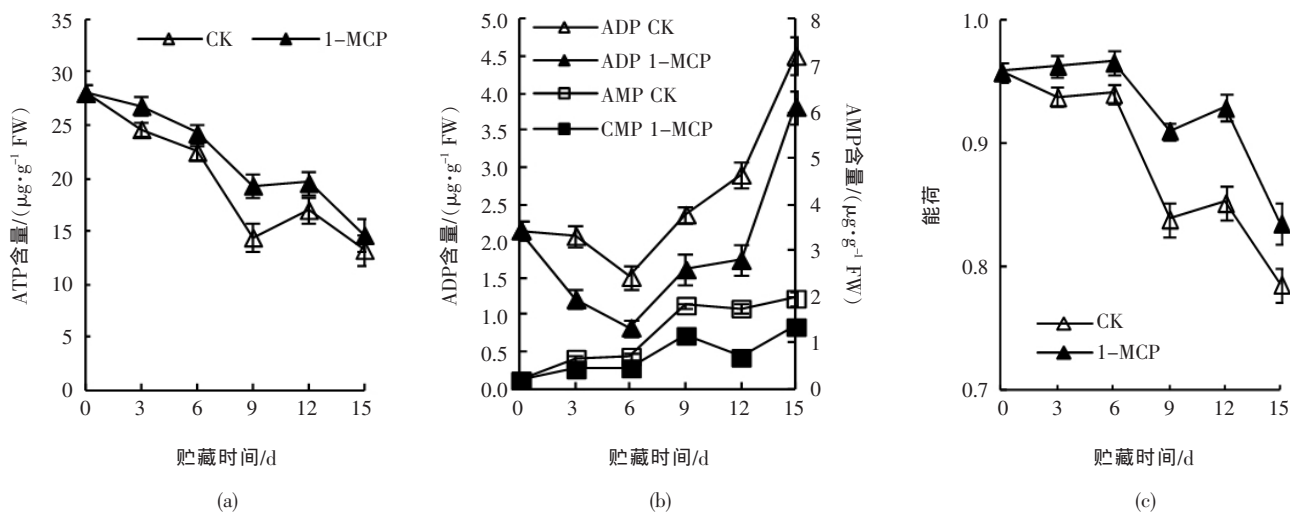
由图 3-b 可知, 在整个贮藏期间, 对照和 1-

MCP 处理的台湾青枣果实 AMP 含量呈阶梯上升, ADP 含量均呈先下降后上升的趋势。在贮藏同一时间内 1-MCP 处理的 AMP、ADP 含量均比对照的低。

由图 3-c 可知,在整个贮藏期间,对照和 1-MCP 处理的台湾青枣果实能荷值呈阶梯下降。在贮藏同

一时间 1-MCP 处理的果实能荷值均高于对照。

上述结果表明, 1-MCP 处理能有效减缓采后台湾青枣果实 ATP 含量的下降和 ADP、AMP 含量的升高, 抑制果实能荷值的下降, 延缓果实的衰老。



(a) 为 ATP 含量; (b) 为 ADP、AMP 含量; (c) 为能荷。

(a) Content of adenosine triphosphate (ATP); (b) Contents of adenosine diphosphate (ADP) and adenosine monophosphate (AMP); (c) Content of energy charge.

图3 1-MCP处理对采后‘中青’台湾青枣果实ATP、ADP和AMP含量及能荷的影响

Fig. 3 Effects of 1-MCP treatment on contents of ATP, ADP and AMP and energy charge of harvested *Ziziphus mauritiana* Lamk. CV. Zhongqing fruit

2.4 1-MCP 对采后台湾青枣果实 NADK 活性的影响

NADK 是催化 NAD 与 ATP 磷酸化生产 NADP 的唯一酶。由图 4 可知, 台湾青枣果实 NADK 活性在贮藏前期先上升, 对照在贮藏第 6 天达到最大

值 4.74 U/mg protein, 1-MCP 处理在贮藏第 3 d 达到最大值 7.94 U/mg protein, 随后两者 NADK 活性都下降; 在贮藏期间, 1-MCP 处理的台湾青枣果实 NADK 活性都高于对照。说明 1-MCP 处理能维持较高的 NADK 活性。

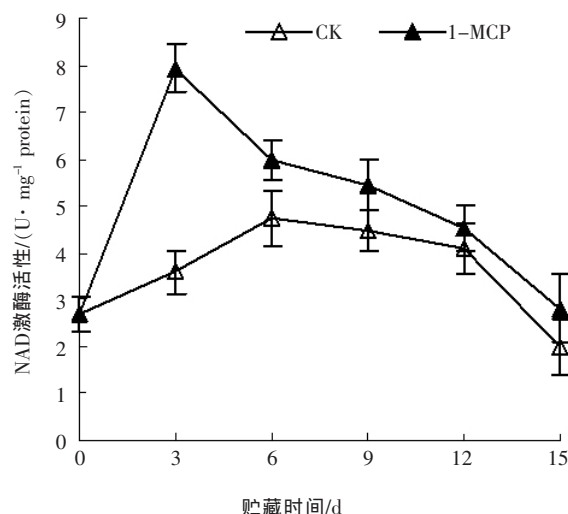


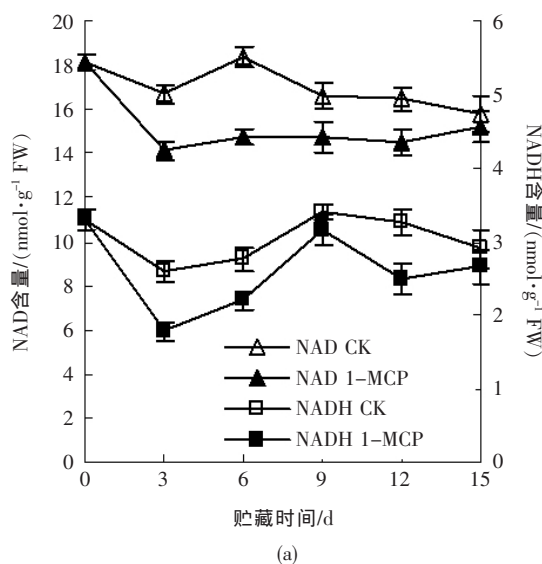
图4 1-MCP处理对采后‘中青’台湾青枣果实NADK活性的影响

Fig. 4 Effects of 1-MCP treatment on activity of NADK of harvested *Ziziphus mauritiana* Lamk. CV. Zhongqing fruit

2.5 1-MCP 对采后台湾青枣果实 NAD、NADP、NADH 和 NADPH 含量的影响

NADP 是 NAD 在 NADK 催化下磷酸化作用的产物, NADH 和 NADPH 是 NAD 和 NADP 的还原态形式。由图 5-a 可知, 对照台湾青枣果实 NAD 含量除了贮藏 3~6 d 小幅度上升外, 总体上呈下降趋势, 而 1-MCP 处理的 NAD 含量在贮藏初期 0~3 d 快速下降后其 NAD 含量在贮藏 3~15 d 变化不大; 在贮藏同一时间内, 1-MCP 处理的果实 NAD 含量均低于对照。

由图 5-a 可知, 对照和 1-MCP 处理的台湾青枣果实 NADH 含量在贮藏 0~9 d 先下降后上升, 之后缓慢下降; 在贮藏同一时间内, 1-MCP 处理的台湾青枣果实 NADH 含量都低于对照。



(a) 为 NAD、NADH 含量; (b) 为 NADP、NADPH 含量。
(a) Contents of NAD, NADH; (b) Contents of NADP, NADPH.

由图 5-b 可知, 对照台湾青枣果实 NADP 含量随贮藏时间的延长而下降; 1-MCP 处理的果实 NADP 含量在贮藏 0~6 d 快速上升, 随后下降; 在贮藏同一时间内, 1-MCP 处理的果实 NADP 含量高于对照。

由图 5-b 可知, 对照和 1-MCP 处理的台湾青枣果实 NADPH 含量在贮藏初期 0~6 d 快速下降, 贮藏 6~9 d 快速上升, 随后下降; 在贮藏同一时间内, 1-MCP 处理的台湾青枣果实 NADPH 含量高于对照果实。

上述结果表明, 1-MCP 处理可使采后的台湾青枣果实保持较高的 NADP(H) 的含量和较低的 NAD(H) 含量。表明 1-MCP 处理可促进台湾青枣果实贮藏期 NAD 的磷酸化, 与高 NADK 活性相一致。

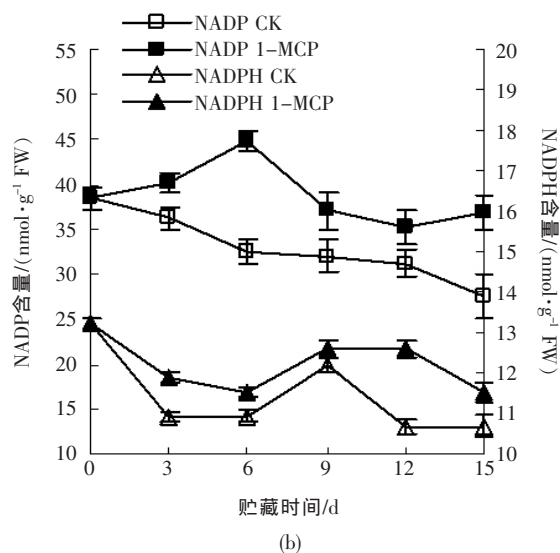


图5 1-MCP处理对采后‘中青’台湾青枣果实NAD、NADH、NADP和NADPH含量的影响
Fig. 5 Effects of 1-MCP treatment on contents of NAD, NADH and NADP, NADPH of harvested *Ziziphus mauritiana* Lamk. CV. Zhongqing fruit

3 讨论

3.1 1-MCP 对采后台湾果实衰老的延缓及其与能量水平的关系

台湾青枣果实采后易衰老, 叶绿素降解, 果皮变色, 果肉硬度下降。如何延缓衰老, 延长了果实货架期成为台湾青枣果实采后急需解决的问题^[1-2]。衰老是一个需要能量的过程, 衰老过程中许多消耗 ATP 的反应得以激活, 比如叶绿素的分解, 水解酶的活化、酸的破坏、细胞软化等。本研究结果发现, 对照台湾青枣果实在贮藏期间 ATP 含量不断下降, ATP 作为细胞能量指示物, 其含量的不断下

降表明果实采后贮藏期间可用能量不断减少。同时观察到果实品质随贮藏时间的延长而不断下降, 到贮藏第 15 天时果实叶绿素降解, 果皮颜色由绿色变成黄色, 果肉变软, 有机酸、可溶性固形物和维生素 C 含量下降果实风味变淡, 果实腐烂指数高达 63.3% (表 1)。由此可见, 采后台湾青枣果实有限的可用能量的减少加剧果实贮藏期间的衰老, 导致果实贮藏后期品质快速下降, 腐烂率快速增加。1-MCP 处理的台湾青枣果实 ATP 含量虽然也随贮藏时间的延长而下降但在贮藏同一时间内均高于对照 (图 3-a), 可见 1-MCP 处理能较好的维持组织

的能量水平; 果实品质随贮藏时间的延长而下降, 同样在贮藏第 15 天, 1-MCP 处理的果实果皮叶绿素含量、果肉硬度及可溶性固形物、有机酸、维生素 C 含量都高于对照, 果实腐烂指数仅为 29.5%, 显著低于对照(表 1)。由此可见, 果实贮藏期间细胞能量水平发生明显的改变, 能量状态与果实成熟衰老有关, 适当的能量生成和能量水平可延迟果实衰老。1-MCP 处理能有效延缓组织能量水平的下降(图 3-a), 较好地保持外观品质和商品价值, 降低腐烂率(表 1), 有效延缓采后台湾青枣果实的衰老进程。

细胞膜降解是果实衰老的一个基本特征。在本研究中发现, 在贮藏期间对照果实 ATP 含量下降, ADP、AMP 含量上升, 能荷值下降(图 3-a、3-b、3-c), 细胞膜相对渗透率快速上升(图 2), 相关分析表明, 对照台湾青枣果实能荷值(Y)(图 3-c)与台湾青枣果实细胞膜相对渗透率(X)(图 2)呈极显著负相关($y = -0.0058x + 1.1367$, $r = 0.9694$)。这与荔枝^[10]、龙眼^[7]、桃^[26]、油棕^[4]果实衰老进程中 ATP、能荷值下降而膜透性上升相一致。Rawlyer 等^[27]提出能量生成与细胞膜完整性有直接关系。Yi 等^[28]进一步研究发现提供外源能量 ATP 抑制了荔枝果实贮藏期间膜脂降解。能量代谢在细胞膜修复保持其完整性中起着重要的调节作用, 细胞内可利用能量的有限而导致膜透性的上升, 膜完整性丧失使酶和底物混合, 果实品质下降进而出现腐烂。本研究结果发现, 1-MCP 处理的台湾青枣果实 ATP 含量、能荷水平在贮藏期间均高于对照, ADP、AMP 含量和细胞膜透性在贮藏期间均低于对照果实(图 3-a、3-b、3-c、2)。说明采后台湾青枣在贮藏期间由于细胞内 ATP 及能荷水平的下降, 细胞内可利用能量的有限减弱了细胞膜自身的修复能力, 加速细胞膜渗漏, 导致细胞膜的区室化功能破坏, 果实品质快速下降。而 1-MCP 处理维持较高的 ATP 和能荷水平, 增强了细胞膜自身的修复功能, 较好保持细胞膜完整性, 延缓果实衰老。

3.2 1-MCP 对采后台湾青枣果实衰老的延缓及其与吡啶核苷酸水平的关系

NADK 是催化 NAD 与 ATP 磷酸化生成 NADP 的唯一酶。本研究结果发现, 在贮藏期间 1-MCP 处理的果实 NADK 活性和 NADP 含量高于对照(图 4、5-b), NAD 含量低于对照果实(图 5-a), 这与 NADK 能催化 NAD 磷酸化生成 NADP 相一致。与对照果实相比, 1-MCP 处理保持果实较高的 NADP 含量, NADP 主要参与磷酸戊糖途径(Pentose

phosphate pathway, 简称 PPP)生成 ATP 和 NADPH, 而主要参与糖酵解和三羧酸循环生成 ATP 和 NADH 的 NAD 含量较低, 推测 1-MCP 处理可能通过 NADK 影响细胞内 NAD 与 NADP 含量比例导致采后磷酸戊糖途径的提高, 从而改变呼吸强度和能量代谢水平, 影响果实贮藏寿命。

呼吸链是植物细胞主要的活性氧产生场所。在整个贮藏期间 1-MCP 处理的果实 NADH 含量均低于对照而 NADPH 含量均高于对照(图 5-a、5-b), NADH 含量高时不仅对能量生成起抑制作用且 NADH 传递电子速率快所生成的活性氧也较多^[29]。而 NADPH 其传递电子速率较 NADH 慢所生成的活性氧也较 NADH 少^[29], 而且 NADPH 通过抗坏血酸-谷胱甘肽循环在清除自由基方面起重要作用。这与 1-MCP 处理果实中 ATP 含量较高(图 3-a), 活性氧的产生少, 活性氧清除能力比对照强相一致^[30], 也与 1-MCP 处理能较好保持果实细胞膜完整性、保持果实品质相一致(表 1)。因此, 1-MCP 处理可通过 NADK 调节细胞内 NAD(H)和 NADP(H)的含量, 从而影响细胞中活性氧的产生和清除能力, 保持细胞膜的完整性从而延缓果实的衰老进程。

4 结论

与对照果实相比, 1-MCP 处理的采后‘中青’台湾青枣果实维持较高的 ATP 含量和能荷水平, 保持细胞 NADK 较高活性, 提高 NADP(H)含量, 降低 NAD(H)含量, 一方面在引起呼吸代谢途径改变的同时抑制呼吸链中电子漏造成的活性氧含量的增加, 保持细胞活性氧代谢的平衡, 抑制了活性氧对细胞膜的攻击; 另一方面高能荷水平保持了细胞膜自身的修复能力, 延缓细胞膜透性的增加, 较好地保持果实细胞膜完整性; 延缓果实叶绿素含量、硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸含量、维生素 C 含量的下降, 果实外观品质保持较好, 腐烂率降低。而对照台湾青枣果实到贮藏第 15 天果皮变黄、果肉变软、风味变淡、维生素 C 含量下降, 腐烂率高达 63.3%。因此, 认为 1-MCP 处理延缓衰老降低腐烂率与能量代谢有关。

参考文献

- [1] 陈 莲, 林河通, 王璐璐, 等. 安喜布处理对采后台湾青枣果实的保鲜效应[J]. 中国食品学报, 2014, 14(12): 113-120.
- [2] 陈 莲, 林河通, 郭巧玲, 等. 台湾青枣多糖抗氧化活性的研究[J]. 热带作物学报, 2010, 31(5): 863-866.
- [3] Yadav P, Kumar S, Jain V, et al. Cell wall metabolism of two varieties of ber (*Ziziphus mauritiana* Lam.) fruit during ripening[J].

- Food Technology and Biotechnology, 2012, 50(4): 467-472.
- [4] 李 辉, 林毅雄, 林河通, 等. 1-MCP 延缓采后‘油榛’果实衰老及其与能量代谢的关系[J]. 现代食品科技, 2015, 31(4): 121-127.
- [5] Jiang Y M, Jiang Y L, Qu H X, *et al.* Energy aspects in ripening and senescence of harvested horticultural crops[J]. Stewart Postharvest Review, 2007, 4: 1-5.
- [6] 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.
- [7] 顾采琴, 朱冬雪, 李 棋. 草莓果实采后 NAD 激酶活性与 NAD(H)、NADP(H) 含量及活性氧代谢的关系[J]. 中国农业科学, 2007, 40(2): 352-357.
- [8] Saquet A A, Streif J, Bangerth F. Changes in ATP, ADP and pyridine nucleotide levels related to the incidence of physiological disorders in ‘Conference’ pears and ‘Jonagold’ apples during controlled atmosphere storage[J]. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2000, 75(2): 243-249;
- [9] Song L L, Jiang Y M, Gao H Y, *et al.* Effects of adenosine triphosphate on browning and quality of harvested litchi fruit. American Journal of Food Technology, 2006, 1: 173-178.
- [10] 刘 亭, 钱政江, 杨 恩, 等. 呼吸活性和能量代谢与荔枝果实品质劣变的关系[J]. 果树学报, 2010, 27(6): 946-951.
- [11] 陈梦茵, 林河通, 洪延康, 等. DNP 和 ATP 对 *Phomopsis longanae* Chi 侵染的龙眼果实病害发生、能荷状态和呼吸代谢的调控[J]. 现代食品科技, 2015, 31(5): 49-59.
- [12] 顾采琴, 关军锋, 席均芳, 等. 草莓和番茄果实采后 NAD 激酶、NADP 磷酸酶活性变化的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1381-1384.
- [13] Duan X W, Jiang Y M, Su X G, *et al.* Role of pure oxygen treatment in browning of litchi fruit after harvest[J]. Plant Science, 2004, 167(3): 665-668.
- [14] Saquet A A, Streif J, Bangerth F. Energy metabolism and membrane lipid alterations in relation to brown heart development in ‘Conference’ pears during delayed controlled atmosphere storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 30(2): 123-132.
- [15] Veltman R H, Lenthéric I, Van der Plas L H W, *et al.* Internal browning in pear fruit (*Pyrus communis* L. cv Conference) may be a result of a limited availability of energy and antioxidants[J]. Biology and Technology, 2003, 28: 295-302.
- [16] Su X G, Jiang Y M, Duan X W, *et al.* Effects of pure oxygen on the rate of skin browning and energy status in Longan fruit[J]. Food Technology and Biotechnology, 2005, 43: 359-365.
- [17] Qu H, Duan X, Su X, *et al.* Effects of anti-ethylene treatments on browning and energy metabolism of harvested litchi fruit[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2006, 46(8): 1085-1090.
- [18] 张 兰, 李节法, 陈香玲, 等. 芒果果实响应 1-MCP 处理的数字基因表达谱分析[J]. 园艺学报, 2015, 42(10): 2031-2038.
- [19] 陈艺晖, 林河通, 林艺芬, 等. 拟茎点霉侵染对采后龙眼果皮 LOX 活性和膜脂脂肪酸组分的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(3): 260-266.
- [20] 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: 24-28.
- [21] 刘士平, 龚美珍. 生物化学实验[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2014: 67-69.
- [22] 朱广廉, 钟海文, 张爱琴. 植物生理学实验[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990: 51-54.
- [23] 蔡永萍. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 2014: 176-177.
- [24] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 39-41.
- [25] 陈学红, 郑永华, 杨震峰, 等. 高氧处理对草莓采后腐烂和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 200-202.
- [26] 陈文烜, 宋丽丽, 廖小军. 减压贮藏技术对水蜜桃采后能量代谢的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 226-230.
- [27] Rawlyer A, Pavelic D, Gianinazzi C, *et al.* Membrane lipid integrity relies on a threshold of ATP production rate in potato cell cultures submitted to anoxia[J]. Plant Physiology, 1999, 120(1): 293-300.
- [28] Yi C, Jiang Y, Shi J, *et al.* Effect of adenosine triphosphate on changes of fatty acids in harvested litchi fruit infected by *Peronophythora litchii*[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 54(3): 159-164.
- [29] Dobrota C. Energy dependant plant stress acclimation[J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2006, 5: 243-251.
- [30] 陈 莲, 林钟铨, 林河通, 等. 安喜布处理对台湾青枣果实果皮活性氧代谢和细胞膜透性的影响[J]. 热带作物学报, 2013, 34(4): 704-709.

责任编辑: 古小玲