

1-MCP 延缓采后‘油棕’果实衰老及其与能量代谢的关系

李辉^{1,2}, 林毅雄^{1,3}, 林河通^{1,3}, 袁芳^{1,3}, 林艺芬^{1,3}, 陈艺晖^{1,3}

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002) (2. 闽南师范大学生物科学与技术学院, 福建漳州 363000)

(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‘油棕’果实衰老的影响及其与能量代谢的关系。采后‘油棕’果实分别用 0 (对照) 和 1.2 $\mu\text{L/L}$ 的 1-MCP 处理 12 h, 之后在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 下贮藏。贮藏期间定期测定果实细胞膜透性, ATP、ADP 和 AMP 含量, NAD 激酶 (NADK) 活性, NAD、NADH、NADP 和 NADPH 含量。结果表明: 与对照果实相比, 1-MCP 处理能延缓‘油棕’果实细胞膜透性的上升, 促进贮藏后期 (12~18 d) ATP 含量的积累, 延缓整个贮藏期间能荷值的下降; 1-MCP 处理可保持‘油棕’果实较高的 NADK 活性, 降低 NAD 和 NADH 含量, 提高 NADP 和 NADPH 含量。据此认为, 1-MCP 处理能较好维持采后‘油棕’果实细胞膜结构的完整性, 延缓果实衰老可能与保持较高的能荷值有关。

关键词: 油棕; 果实; 1-甲基环丙烯 (1-MCP); 衰老; 能量代谢

文章编号: 1673-9078(2015)4-121-127

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.4.020

Delayed Senescence in Harvested ‘Younai’ Plums Induced by 1-MCP Treatment and Its Relation to Energy Metabolism

LI Hui^{1,2}, LIN Yi-xiong^{1,3}, LIN He-tong^{1,3}, YUAN Fang^{1,3}, LIN Yi-fen^{1,3}, CHEN Yi-hui^{1,3}

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China) (2. School of Biological Science and Biotechnology, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China) (3. Institute of Postharvest Technology of

Agricultural Products, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on the senescence of harvested ‘Younai’ (*Prunus salicina* Lindl. cv. Younai) plums and its relation to energy metabolism was investigated in this study. Harvested ‘Younai’ plums were treated with 0 (control) and 1.2 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP for 12 h, and stored at $25 \pm 1^\circ\text{C}$. The cell membrane permeability, ATP, ADP, and AMP content, NAD kinase (NADK) activity, and NAD, NADH, NADP, and NADPH expression was analyzed in the control and sample plums during storage. The results of these analyses revealed that MCP-1 treatment slowed the increase in cell membrane permeability, promoted ATP accumulation during the late stage of fruit storage (12~18 days), and delayed the decrease in the level of energy charge during the whole storage period (compared to the control samples). In addition, 1-MCP treatment resulted in the maintenance of a relatively high NADK activity, a reduction in NAD and NADH content, and an increase in the NADP and NADPH content in the 1-MCP treated-‘Younai’ plums. Based on these results, it was concluded that the MCP-1 treatment induced the maintenance of the integrity of the cell membrane structure, and the delay in the senescence of harvested ‘Younai’ plums was correlated with the maintenance of a higher level of energy charge.

Key words: Younai (*Prunus salicina* Lindl. cv. Younai) plum; fruit; 1-methylcyclopropene; senescence; energy metabolism

收稿日期: 2014-07-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAD07B06); 福建省教育厅科研项目 (JA13200); 闽南师范大学杰出青年科研人才计划项目 (SJ12004); 闽南师范大学博士科研启动项目 (L21231)

作者简介: 李辉 (1983-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程

通讯作者: 林河通 (1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向:

农产品加工及贮藏工程

榛 (*n à*) (*Prunus salicina* Lindl.) 又称奈李、桃形李、歪嘴李, 属蔷薇科 (*Rosaceae*) 李属 (*Prunus*), 在我国福建、浙江、湖南、江西和广西等省区都有种植。榛果实营养丰富、可食率高 (可达 97% 以上)、果味浓香、甜酸适口, 深受消费者青睐, 是国内外市场上畅销的名贵果品。但榛果实成熟于 7 月下旬至 8 月上旬, 正值盛夏高温时节, 采后易出现软化、腐烂等品质劣变, 从而限制榛果实的长期贮藏和远距

离运销,因此,榛果实采后保鲜贮运成为生产上亟待解决的问题,研究开发榛果实保鲜新技术具有重要的理论和实践意义。

近年来的研究表明,采后果蔬衰老与能量状况有关,衰老可能与可利用的能量有限或能量产生较低有关。正常情况下,果蔬组织通常能够合成足够的能量以维持正常的生命活动;但当采后果蔬衰老或遭受逆境胁迫时,则会导致呼吸链受损、ATP合成能力降低,细胞因能量亏缺会出现代谢与功能的紊乱,从而造成细胞结构的破坏和功能的丧失,最终导致细胞死亡^[1]。

1-甲基环丙烯(1-MCP)是一种乙烯受体抑制剂,可以通过与乙烯竞争受体而延缓果实的衰老^[2,3],但关于1-MCP延缓采后果实衰老及其与能量代谢关系的研究未见报道。本文以福建省主栽榛品种‘油榛’(Prunus salicina Lindl. cv. Younai)果实为材料,研究1-MCP处理对‘油榛’果实细胞膜透性、ATP、ADP和AMP含量、能荷、NAD激酶(NADK)活性、NAD、NADH、NADP和NADPH含量的影响,旨在阐明1-MCP延缓采后‘油榛’果实衰老与能量代谢的关系,为控制采后‘油榛’果实衰老、延长果实保鲜期提供科学依据和生产指导。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

供试‘油榛’果实采自福建省古田县科技示范果园,在果实约9成熟时采收。果实采收当天运至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,选择大小适中、果形端正、色泽一致、无机械伤的健康果实进行试验。经挑选的果实用60 mg/L的二氧化氯溶液消毒浸泡5 min,取出晾干后进行以下处理:(1)1-MCP处理:本试验选取1-MCP的处理浓度为1.2 μL/L。果实装入体积约0.04 m³的泡沫箱后,根据1.2 μL/L的处理浓度裁取适宜大小的纸片型1-MCP,纸片型1-MCP用蒸馏水喷湿后平铺于果实上,迅速将泡沫箱密封,并在(25±1)℃下处理12 h^[4]。

(2)对照(CK):果实放入体积约0.04 m³的泡沫箱内,在(25±1)℃下密闭12 h。处理后的果实用0.015 mm厚的聚乙烯薄膜袋包装,每个处理组50袋,每袋装果10个。果实包装后在(25±1)℃,相对湿度90%下贮藏,贮藏期间每隔3 d取样测定相关指标。本试验所用1-MCP为纸片型Ansip-S(商品名:安喜布),由台湾利统股份有限公司提供。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 细胞膜透性的测定

细胞膜透性可采用相对电导率表示,参照Luo等^[5]的方法测定细胞膜相对电导率。

1.2.2 ATP、ADP和AMP含量的测定

参照Liu等^[6]的方法,采用HPLC测定ATP、ADP和AMP的含量,结果以μg/g FW表示。

能荷按以下公式计算:

$$\text{能荷} = \frac{[\text{ATP}] + 0.5[\text{ADP}]}{[\text{ATP}] + [\text{ADP}] + [\text{AMP}]}$$

1.2.3 NAD激酶(NADK)活性的测定

参照顾采琴等^[7]的方法,以每mg蛋白每小时降低1个OD值为1个酶活力单位,结果以U/mg protein表示。

1.2.4 NADP、NADPH、NAD和NADH含量的测定

参照Gibon等^[8]、顾采琴等^[7]的方法,结果以μmol/g FW表示。

1.2.5 数据分析

以上各指标测定均重复3次,取其平均值,数据采用SPSS 16.0数据分析软件进行方差分析(ANOVA)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‘油榛’果实细胞膜透性的影响

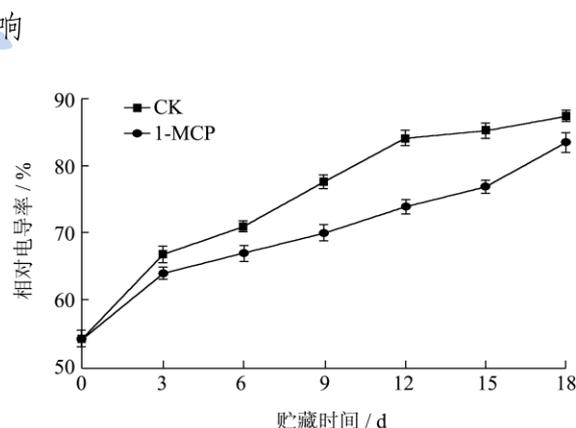


图1 1-MCP对采后‘油榛’果实细胞膜相对电导率的影响

Fig.1 Effect of 1-MCP on the relative cell membrane conductivity of harvested ‘Younai’ plums

采后果实的衰老与细胞膜透性的上升有关,细胞内膜结构破坏,则透性增加,细胞内电解质大量外渗,因而电导率增大。因此,果实细胞膜相对电导率大小可以反映细胞膜的完整性和果实的衰老程度^[1]。由图1可知,‘油榛’果实细胞膜相对电导率随贮藏时间的延长而增加。在整个贮藏期间的同一贮藏时期,经1-MCP处理的果实细胞膜相对电导率都低于对照。统

计分析发现,经 1-MCP 处理的果实细胞膜相对电导率显著 ($P < 0.05$) 低于对照果实。上述结果表明,1-MCP 处理能有效延缓‘油棕’果实细胞膜相对电导率的增加和延缓果实衰老,较好地维持细胞膜结构的完整性。

2.2 1-MCP 对采后‘油棕’果实 ATP、ADP 和 AMP 含量及能荷水平的影响

由图 2a 可知,对照和 1-MCP 处理的果实 ATP 含量在贮藏期间变化趋势基本一致,总体呈下降的趋势。其中贮藏 0~12 d 内 ATP 含量都呈快速下降趋势,贮藏 12~15 d 内 ATP 含量快速上升,之后较快下降。统计分析表明,贮藏 0~9 d 内 1-MCP 处理果实的 ATP 含量低于对照果实,但差异不显著 ($P > 0.05$),12~18 d 内 1-MCP 处理果实的 ATP 含量显著高于对照果实 ($P < 0.05$)。以上结果表明,与对照果实相比,1-MCP 处理在贮藏前期 (0~9 d) 保持较低的 ATP 含量,但促进贮藏后期 (12~18 d) ATP 含量的积累。

由图 2b 可以看出,对照和 1-MCP 处理的果实 ADP 含量在贮藏期间总体呈先下降后上升再下降的趋势。1-MCP 处理果实的 ADP 含量在 0~9 d 内低于对照果实,12~18 d 内高于对照果实。上述结果表明,1-MCP 处理能延缓贮藏后期 ADP 含量的下降。

由图 2c 可知,对照和 1-MCP 处理‘油棕’果实 AMP 含量在贮藏期间总体呈先上升后下降再上升的趋势。其中贮藏 0~6 d 内 AMP 含量变化不大,6~12 d 内快速升高,12~15 d 内较快下降,15~18 d 内较快上升,18 d 时升高至约 12 d 时的水平。进一步的比较发现,在整个贮藏期间的同一贮藏时期,经 1-MCP 处理的果实 AMP 含量都低于对照,两者间差异极显著 ($P < 0.01$)。以上结果表明,1-MCP 处理能保持‘油棕’果实较低的 AMP 含量。

能荷是细胞中可利用能量的一个量化指标,表示细胞中腺苷酸系统的能量状态。由图 2d 可知,对照和 1-MCP 处理的果实能荷在贮藏期间变化趋势基本一致,其中贮藏 0~9 d 内缓慢下降,9~12 d 内急速下降,并在贮藏第 12 d 时降至最低值,此时对照和 1-MCP 处理的果实能荷值分别为 0.60 和 0.65,12~15 d 内快速升高,之后较快下降,贮藏 18 d 时对照和 1-MCP 处理的果实能荷值分别为 0.70 和 0.74。进一步的比较发现,在整个贮藏期间的同一贮藏时期,经 1-MCP 处理的果实能荷值都高于对照果实,且两者间差异显著 ($P < 0.05$),这在贮藏后期更为明显。以上结果表明,1-MCP 处理能延缓‘油棕’果实贮藏期间能荷的下降。

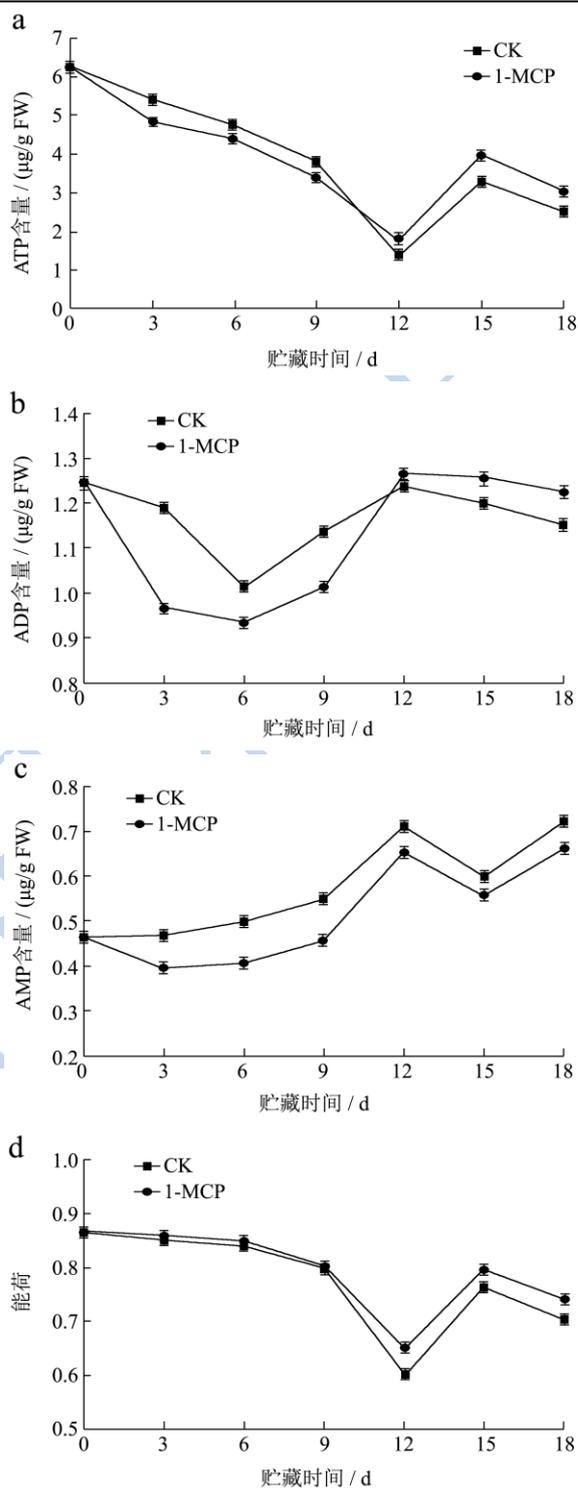


图 2 1-MCP 对采后‘油棕’果实 ATP (a)、ADP (b)、AMP (c) 含量及能荷水平 (d) 的影响

Fig.2 Effect of 1-MCP on the (a) ATP, (b) ADP, (c) AMP content, and (d) the level of energy charge in harvested ‘Younai’ plums

2.3 1-MCP 对采后‘油棕’果实 NADK 活性的影响

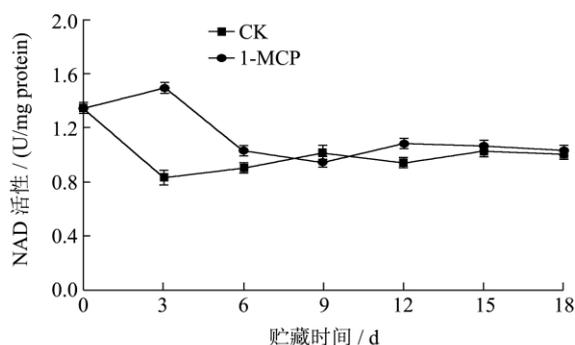


图3 1-MCP对采后‘油棕’果实NADK活性的影响

Fig.3 Effect of 1-MCP on the NAD kinase activity of harvested ‘Younai’ plums

由图3可知,对照和1-MCP处理的果实NADK活性在贮藏期间总体呈下降趋势。其中对照果实NADK活性在贮藏0~3 d内快速下降,第3 d时NADK活性降至最低值,比0 d时下降了38.2%,3~9 d内缓慢回升,之后变化不大。1-MCP处理果实的NADK活性在贮藏0~3 d内较快上升,3~9 d内快速下降,9~12 d内有所回升,12~18 d内略有下降。进一步比较发现,在整个贮藏期间的同一贮藏时期,除第9 d外,经1-MCP处理的果实NADK活性均高于对照果实,说明1-MCP处理能抑制‘油棕’果实NADK活性的下降。

2.4 1-MCP对采后‘油棕’果实NAD、NADP、NADH和NADPH含量的影响

在NADK的催化下,NAD可磷酸化生成NADP。由图4-A可知,对照果实的NAD含量在贮藏0~6 d内缓慢上升,6~9 d内较快下降,第9 d时降至约0 d时的水平,9~12 d内快速回升,12~15 d内迅速下降,之后有所回升。1-MCP处理果实的NAD含量在贮藏0~6 d内变化不大,6~9 d内较快下降,第9 d时NAD含量降至最低值,12~15 d内NAD含量持续升高,第15 d时NAD含量最高,比同期对照果实高出38.7%,之后略有下降,但仍高于对照果实。统计分析表明,贮藏0~12 d内的同一贮藏时间,1-MCP处理果实的NAD含量显著 ($P<0.05$) 低于对照果实,表明1-MCP处理可促进‘油棕’果实贮藏前期(0~12 d) NAD的磷酸化。

NADP是NAD在NADK催化下磷酸化作用的产物。由图4-B可知,对照果实NADP含量在贮藏0~6 d内缓慢下降,之后分别在第9 d和第15 d时出现2个峰值,15~18 d内快速下降。经1-MCP处理的果实贮藏0~9 d内缓慢上升,并在第9天时出现峰值,9~12 d内较快下降,12~18 d内又快速上升,18 d时含量为同期对照的1.53倍。在整个贮藏期间的同一贮藏时期,除第15 d

外,经1-MCP处理的果实NADP含量均高于对照果实。

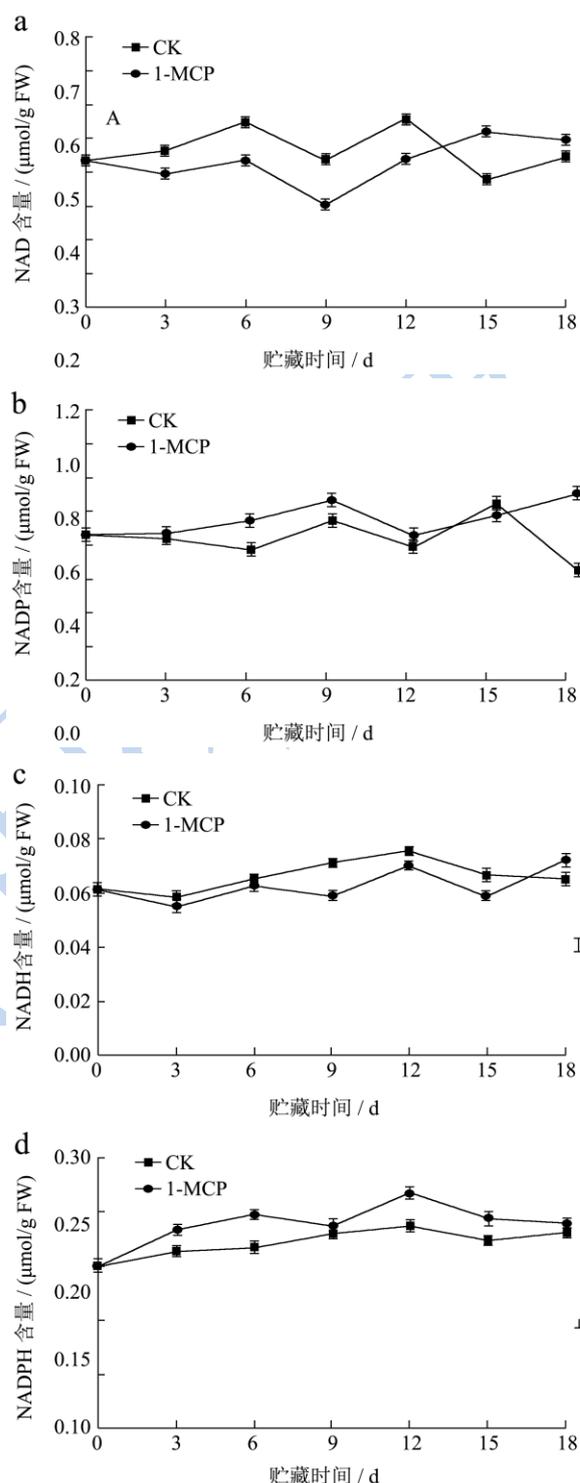


图4 1-MCP对采后‘油棕’果实NAD含量(a)、NADP含量(b)、NADH含量(c)和NADPH含量(d)的影响

Fig.4 Effect of 1-MCP on the (a) NAD, (b) NADP, (c) NADH, and (d) NADPH content of harvested ‘Younai’ plums

NADH是NAD的还原态形式,在电子传递中可作为电子供体给出电子。由图4-C可以看出,对照果实NADH含量在贮藏0~3 d内有所下降,3~12 d内持续上升,并在贮藏第12 d时含量最高,之后缓慢下降。经

1-MCP处理的果实NADH含量在整个贮藏期间变化较为平稳。统计分析表明,在贮藏0~15d内,经1-MCP处理的果实NADH含量显著($P<0.05$)低于对照果实。以上结果表明,1-MCP处理可使‘油棕’果实在贮藏期间保持较低的NADH含量。

NADPH是NADP的还原态形式,在电子传递中也作为电子供体给出电子。由图4d可以看出,对照和1-MCP处理的果实NADPH含量在贮藏期间总体呈上升趋势。其中对照果实NADPH含量在贮藏0~12d内缓慢上升,并在贮藏第12d时含量最高,之后缓慢下降。而经1-MCP处理的果实NADPH含量在贮藏0~6d内较快上升,6~9d内略有下降,9~12d快速上升,并在贮藏第12d时含量最高,之后缓慢下降。统计分析表明,在整个贮藏期间,1-MCP处理果实的NADPH含量显著($P<0.05$)高于对照果实。以上结果表明,1-MCP处理可使‘油棕’果实在贮藏期间保持较高的NADPH含量。

3 讨论

3.1 1-MCP对采后‘油棕’果实衰老的延缓及其与能量水平的关系

我们前期的研究表明,1-MCP处理可降低‘油棕’果实呼吸强度和呼吸峰值,保持较高的果实硬度,延迟果实外观颜色转变,延缓果实的后熟和衰老^[4]。细胞膜是较早反映衰老相关变化的一个关键部位,细胞膜的降解是果实衰老的一个基本特征,细胞膜的降解表现为细胞膜透性增加。本研究表明,1-MCP处理抑制了‘油棕’果实细胞膜相对电导率的增加(图1),说明1-MCP处理较好地维持了细胞膜结构的完整性,从而延缓了果实衰老。

研究表明,在果蔬的衰老过程中,能量的产生和水平会发生明显变化,说明衰老与能量状况密切相关。如冷藏荔枝果实的ATP、ADP含量和能荷水平随贮藏时间的延长会逐渐降低^[6]。Rawyle等^[9]研究表明,在厌氧条件下马铃薯细胞ATP的合成有一个阈值,低于此值会导致细胞膜脂的水解,说明ATP合成与膜脂降解之间存在相关,能量代谢对细胞膜完整性起着重要的调节作用。能量缺失会促进活性氧积累,破坏细胞膜的完整性,导致果实衰老劣变发生^[10]。而通过适当处理维持细胞内的能量代谢水平,可有效延缓果实的衰老。例如,经草酸处理的芒果和桃果实^[11,12],经茉莉酸甲酯处理的枇杷果实^[13],在贮藏过程中能保持较高的ATP含量及能荷值,延缓了果实衰老。

由此看来,果实贮藏期间的能量水平对细胞功能的维持非常重要,能量欠缺会引发组织的衰老,而维持组织的能量水平,可延缓衰老的进程。在本研究中发现,与对照果实相比,1-MCP处理果实ATP和ADP含量在贮藏前期(0~9d)较低,但贮藏后期(12~18d)高于对照果实。这可能归因于1-MCP处理通过降低乙烯的生成和抑制其作用,降低了‘油棕’果实的呼吸强度,呼吸作用减弱,从而导致能量(ATP含量)生成较低。但可利用能量的减少可能降低整个代谢的速率,使得代谢活动所消耗的ATP较低和贮藏期间不利的化学反应的发生率降低,植物体内的ATP积累,这可能是贮藏后期1-MCP处理果实ATP和ADP含量高于对照果实的原因。另外,贮藏后期(12~18d)ATP上升,这可能与‘油棕’果实贮藏第12d时出现第2个呼吸高峰^[14]、吸速率增强而导致ATP含量相应增加有关。本研究还发现,1-MCP处理果实的能荷值始终高于对照果实,这可能是由于处理果实的呼吸作用较低和ATP的消耗较低,造成ATP的积累所致。1-MCP处理果实的ATP消耗较低,因此其能量平衡比对照果实更为有利。能量需求少也反映了细胞结构和膜功能的完整性和高效性,需要进行损伤修复的能量就少。经1-MCP处理的‘Jonagold’苹果在贮藏期间其ATP含量比对照果实低,但ATP/ADP比值较高^[15],这与本文的研究结果一致。

综合以上分析认为,1-MCP处理能降低‘油棕’果实贮藏前期的ATP含量,也能促进贮藏后期(12~18d)ATP含量的积累,保持较高的能荷值,延缓果实后熟和衰老。因此,1-MCP处理延缓‘油棕’果实衰老与能荷水平调节有关。

3.2 1-MCP对采后‘油棕’果实衰老的延缓及其与吡啶核苷酸水平的关系

吡啶核苷酸水平与果实的后熟、衰老进程密切相关。吡啶核苷酸在植物细胞中参与的代谢过程包括参与呼吸的调节辅助因子和电子传递,NADPH和NADP的生物合成及脂肪酸的去饱和作用。NAD⁺与NADP⁺通常可作为脱氢酶的辅酶参与生物体内的氧化还原反应,NADH、NADPH等还原型辅酶是物质还原反应的氢供体(H⁺和电子),可为植物体内有机物质的生物合成提供还原力。此外,还原型的NADPH在抗坏血酸-谷胱甘肽循环中作为电子供体起重要作用,它参与清除因各种胁迫条件产生的破坏膜结构的自由基。

NADK可通过催化NAD磷酸化生成NADP,调节NAD和NADP的水平,这对许多代谢过程具有重

要的调控作用。NAD⁺与NADP⁺可参与生物体内的氧化还原反应，作为电子受体接受电子，在生物体内起传递电子的重要作用，例如NAD⁺可在糖酵解途径与三羧酸循环途径中得到电子形成NADH，NADP⁺在戊糖磷酸途径中得到电子形成NADPH。由于NAD⁺与NADP⁺参与的呼吸代谢途径不同，它们含量的改变会导致细胞内氧化还原状态和细胞信号转导途径的改变。

本研究表明，1-MCP处理果实的NADK活性和NADP含量高于对照（图3、图4b），而NAD含量低于对照（图4a），这与NADK能催化NAD磷酸化生成NADP相吻合。联系到1-MCP处理能较好地维持细胞膜结构的完整性（图1），我们认为较高的NADK活性有利于延缓果实的衰老进程，这与外源乙烯处理会抑制NADK活性，加快草莓果实的衰老^[6]一致。此外，联系到NAD参与糖酵解（EMP）途径和三羧酸循环（TCA），而NADP参与戊糖磷酸途径（PPP），因此推测1-MCP处理可能诱导了‘油棕’果实戊糖磷酸途径的提高，对照果实主要以EMP途径和TCA循环代谢途径为主。由于EMP和TCA是呼吸代谢途径的主干线，PPP是支路，所以，1-MCP处理提高果实的PPP代谢途径，在总呼吸中所占比例加大，其呼吸强度会比以EMP、TCA为主要途径的低，导致呼吸底物消耗少，产生的ATP含量低（图2a）。可见，NADK通过影响‘油棕’果实的NAD与NADP比例可能改变果实的呼吸代谢途径，从而改变呼吸强度和能量代谢水平（图2），影响果实贮藏寿命。

呼吸作用除了为生命活动提供能量外，还为植物体内有机物质的生物合成提供还原力，如NADH和NADPH，它们分别是NAD和NADP的还原态形式，在电子传递链中可作为电子供体给出电子。例如，NADH在氧化磷酸化途径中将电子通过呼吸链最终传递给氧，促成ATP的生成，NADPH是细胞中生物合成代谢及许多生命活动赖以进行的重要还原力。在呼吸链的电子传递过程中，NADH和NADPH均会产生O₂⁻和H₂O₂，加速细胞氧化和衰老，但NADH比NADPH传递电子的速率快，会产生更多的活性氧。此外，NADPH在抗坏血酸-谷胱甘肽循环中作为电子供体起重要作用，可保持谷胱甘肽（GSH）的还原状态，NADPH参与清除各种胁迫条件下产生的破坏膜结构的自由基。本文研究表明，1-MCP处理果实的NADH和NADPH含量分别低于和高于对照（图4c、图4d），这可能意味着1-MCP处理果实中活性氧的产生少，活性氧清除能力比对照强（论文尚未发表）。这也与1-MCP处理能较好保持果实细胞膜完整性、延

缓果实衰老相一致（图1）。因此，1-MCP处理可通过改变NADH和NADPH的含量而影响细胞中活性氧的产生和清除能力，从而延缓果实的衰老进程。

4 结论

4.1 1-MCP处理能延缓‘油棕’果实细胞膜透性的上升，降低‘油棕’果实在贮藏前期ATP的合成，但促进贮藏后期（12~18d）ATP含量的积累，并显著延缓‘油棕’果实贮藏期间能荷值的下降，1-MCP处理延缓‘油棕’果实衰老可能与保持较高的能荷值有关。

4.2 1-MCP处理可保持‘油棕’果实较高的NADK活性，提高NADP和NADPH含量，降低NAD和NADH含量，认为1-MCP延缓‘油棕’果实衰老进程与1-MCP改变果实呼吸强度和能量水平有关。

参考文献

- [1] 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, 3(2): 1-5
- [2] 关军锋,高曼曼,赵倩.1-MCP对不同采收期“五九香”梨冷藏品质的影响[J].*现代食品科技*,2014,30(4):130-135
GUAN Jun-feng, GAO Man-man, ZHAO Qian. Effect of 1-MCP on quality of different harvested ‘Wujiuxiang’ pears during cold storage [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(4): 130-135
- [3] 陈艺晖,张华,林河通,等.1-MCP处理对杨桃果实采后生理和贮藏品质的影响[J].*现代食品科技*,2014,30(1):16-21
CHEN Yi-hui, ZHANG Hua, LIN He-tong, et al. Effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on postharvest physiology and storage quality of carambola fruits [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(1): 16-21.
- [4] 李辉,林河通,袁芳,等.不同浓度1-MCP处理对采后油木奈果实的保鲜效应[J].*农业机械学报*,2012,43(5):114-121
LI Hui, LIN He-tong, YUAN Fang, et al. Effects of different concentrations of 1-MCP treatments on freshness of harvested Younai fruits [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(5): 114-121
- [5] Luo Z S, Chen C, Xie J. Effect of salicylic acid treatment on alleviating postharvest chilling injury of ‘Qingnai’ plum fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 62(2): 115-120
- [6] Liu H, Song L L, You Y L, et al. Cold storage duration affects litchi fruit quality, membrane permeability, enzyme activities and energy charge during shelf time at ambient temperature [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011,

- 60(1): 24-30
- [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
- GU Cai-qin, ZHU Dong-xue, LI Qi. Relationship between NAD kinase and NAD(H), NADP(H) and active oxygen during ripening and senescence of postharvested strawberry fruit [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(2): 352-357
- [8] Gibon Y, Larher F. Cycling assay for nicotinamide adenine dinucleotides: NaCl precipitation and ethanol solubilization of the reduced tetrazolium [J]. *Analytical Biochemistry*, 1997, 251(2): 153-157
- [9] Rawyler 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
- [10] 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
- [11] Li P Y, Zheng X L, Liu Y, et al. Pre-storage application of oxalic acid alleviates chilling injury in mango fruit by modulating proline metabolism and energy status under chilling stress [J]. *Food Chemistry*, 2014, 142(1): 72-78
- [12] Jin P, Zhu H, Wang L, et al. Oxalic acid alleviates chilling injury in peach fruit by regulating energy metabolism and fatty acid contents [J]. *Food Chemistry*, 2014, 161(1): 87-93
- [13] Cao S F, Cai Y T, Yang Z F, et al. Effect of MeJA treatment on polyamine, energy status and anthracnose rot of loquat fruit [J]. *Food Chemistry*, 2014, 145(1): 86-89
- [14] 李辉,林河通,袁芳,等.1-MCP 处理对‘油木奈’果实采后生理和品质的影响[J].热带作物学报,2012,33(2):279-285
- LI Hui, LIN He-tong, YUAN Fang, et al. Effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on postharvest physiology and quality of ‘Younai’ fruits [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2012, 33(2): 279-285
- [15] Xuan H, Streif J. Effect of 1-MCP on respiration and concentration of ATP/ADP in the fruit tissue of ‘Jonagold’ apple after storage [J]. *Acta Horticulturae*, 2008, 796: 129-135
- [16] 顾采琴.Ca²⁺-CaM 与乙烯调节草莓果实 NAD 激酶和 NADP 磷酸酶活性的关系[J].广州大学学报:自然科学版, 2007,6(1):46-49
- GU Cai-qin. Relationship between Ca²⁺-CaM and ethylene's regulation on NAD kinase and NADP phosphatase in strawberry fruit [J]. *Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition*, 2007, 6(1): 46-49