

环丙烯类乙烯效应抑制剂二次处理对番茄乙烯生成及其基因表达的影响

程顺昌¹, 徐方旭¹, 付琳¹, 魏宝东¹, 冷俊颖¹, 冯叙桥^{*1,2}

(1. 沈阳农业大学 食品学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 渤海大学 食品科学研究院, 辽宁 锦州 121013)

摘要: 为研究不同支链长度的3种环丙烯类乙烯效应抑制剂二次处理对番茄采后乙烯生物合成及乙烯生物合成关键基因表达的影响,分别采用0.75 μ L/L 1-MCP(1-Methylcyclopropene, 1-甲基环丙烯), 2 μ L/L 1-PentCP (1-pentylcyclopropene, 1-戊基环丙烯) 和 0.5 μ L/L 1-OCP (1-octylcyclopropene, 1-辛基环丙烯)处理番茄,以不处理为对照,并于贮藏第8天进行了二次处理,对处理后番茄果实常温货架期间的乙烯生物合成及其基因表达情况进行了研究。结果表明:3种乙烯效应抑制剂处理均能不同程度地抑制番茄果实采后贮藏过程中的呼吸强度和乙烯释放量,同时抑制了ACS2和ACO1基因的表达量,上述效果又随支链长度的延长而呈现减弱的趋势;3种处理均较好地保持了番茄果实贮藏期间的品质,二次处理对果实贮藏特性影响不大。

关键词: 番茄; 1-甲基环丙烯; 结构相似物; 乙烯; 基因表达

中图分类号: S 609.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673—1689(2013)05—0474—07

Effect of Twice Treatment with Different Cyclopropene Ethylene Inhibitors on Postharvest Ethylene Biosynthesis and Gene Expression of Tomato Fruits

CHENG Shun-chang¹, XU Fang-xu¹, FU Lin¹, WEI Bao-dong¹, LENG Jun-ying¹, FENG Xu-qiao^{*1,2}

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Research Institute of Food Science, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

Abstract: Effect of twice treatment with three cyclopropene ethylene inhibitors with different 1-substituted branch chain lengths on postharvest ethylene biosynthesis and gene expression of tomato fruits (*Solanum lycopersicum* L.) were investigated in this manuscript. The fruits were packed with plastic bags (0.02 mm) after being fumigated for 20h with 0.75 μ L/L 1-MCP (1-Methylcyclopropene), 2 μ L/L 1-PentCP (1-pentylcyclopropene) or 0.5 μ L/L 1-OCP (1-octylcyclopropene) and then stored at ambient temperature (20 °C) for maturation evaluation, and second time treated would be in 8 days as the first. The results show that treatments with any one of these three inhibitors, compared with that of the untreated fruits, reduced ethylene production and respiration rate were decreased and, the express level of ACS2 and ACO1 gene were lower in the

收稿日期: 2012-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(30972064); 辽宁省科技厅重点项目(2008205001); 沈阳农业大学青年教师科研项目(20112010)。

* 通信作者: 冯叙桥(1961—), 男, 河北曲阳人, 农学博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事农产品质量与安全研究。

Email: feng_xq@hotmail.com

fruits. Furthermore, these effects tended to decrease as the 1-substituted branch chain length of the cyclopropenes increased. In addition, treatments with any inhibitors delayed physiological metabolism and maintained fruit quality. Twice treatments, however, did not exert obvious effects.

Keywords: tomato, 1-MCP, structure analogues, ethylene, gene expres

1-MCP 是一种有效的乙烯作用抑制剂,能够在一定贮藏期内,去除乙烯对贮藏果实的作用^[1]。1-MCP 抑制乙烯效应的作用,被认为是与乙烯受体结合而阻断了乙烯调控的生理生化过程,在众多的研究中发现,经 1-MCP 处理后的果实能够完成正常的成熟过程,只是成熟进程受到了延迟。因此,对于 1-MCP 延缓果实成熟作用机理的解释可能是以下情况之一:一种情况是 1-MCP 处理后经过一段时间,1-MCP 从乙烯作用受体上脱落,最终乙烯再与其受体结合,从而完成其成熟过程;还可能是由于有新的乙烯受体合成,继而与乙烯结合,完成成熟过程^[2-3]。

近年来,又发现 1-MCP 的结构相似物,也有延缓果蔬成熟衰老的作用,但对其作用机理的研究较少^[4-5]。

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)属于呼吸跃变型果实,采收后仍然进行着生命活动,表现出明显的色泽、硬度、糖酸含量和成熟衰老等变化,是进行果蔬采后生理学研究理想的模式材料。1-MCP 和 1-PentCP 和 1-OCP 等环丙烯类属于乙烯作用抑制剂,被认为是影响了乙烯与受体的结合过程,从而影响乙烯效应的发挥。本研究中以番茄为试材,采用 1-MCP 及其结构相似物中相互间分子量差异较大的两种化合物 1-PentCP 和 1-OCP,采用二次处理的方式处理番茄果实,对其常温贮藏期间的乙烯生物生成及关键基因表达进行了研究,以探究环丙烯类乙烯作用抑制剂的作用机理,比较不同侧链长度对果蔬成熟衰老进程的影响。期望为探究 1-甲基环丙烯类保鲜剂的作用机理和筛选适宜的果蔬保鲜剂提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验材料 试验用番茄果实于 2011 年 9 月 30 日采自沈阳市苏家屯王岗乡一长势良好的菜地,手工采摘后装入纸箱中立即运回实验室,剔除残

次、病虫、机械伤害果后,挑选成熟度为绿熟期,质量、大小和颜色均匀一致的果实进行试验处理。

1.1.2 处理材料 1-MCP 粉剂,由中国农科院果树所提供(3.4%含量分数)。1-PentCP(1-pentylcyclopropene,1-戊基环丙烯)和 1-OCP(1-octylcyclopropene,1-辛基环丙烯),主要参照 Al Dulayymi^[6-7]的方法,在沈阳农业大学食品学院实验室合成,质量分数 30%,样品被分装成 0.5 mL 的小包装,保藏于-80℃超低温冰箱中备用,使用前用乙醚稀释至 50 mL,同样浓度的乙醚通过实验排除了对番茄果实可能产生的生理效应。

1.2 处理方法

将挑选的果实随机分为 4 组,每条约 50 个果,将果实分别放入 1 m³ 的塑料帐内,分别进行以下处理:

1)1-MCP 处理,参照孙希生^[8]的方法,称取质量分数 3.4%的 1-MCP 粉剂,放入开放的培养皿中,按质量比 1:16 加入 40℃温水,迅速封闭塑料帐,1-MCP 体积分数为 0.75 μL/L;

2)1-PentCP 处理,取 1-PentCP 的乙醚溶液 1.13 mL 滴于滤纸上,置于塑料帐内,迅速封闭塑料帐,1-PentCP 体积分数为 0.5 μL/L;

3)1-OCP 处理,取 1-OCP 的乙醚溶液 3.3 mL,滴于滤纸上,置于塑料帐内,迅速封闭塑料帐,1-OCP 体积分数为 2 μL/L;

4)对照(CT),果实不采用任何处理,密封于塑料帐内。各处理在 20℃下密封 20 h 后,装入 0.02 mm 保鲜袋(国家农产品保鲜工程研究中心生产的果蔬专用保鲜袋)中,于 20℃下贮藏,贮藏第 9 天,4 个处理分别进行第二次处理,方法同第一次处理的方法,定期测定相应指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 呼吸强度与乙烯释放量的测定 取 6 个果称重后置于 4.6 L 的真空干燥器内,分别在果实放进干燥器开始和放置 1 h 后测定干燥器中的 CO₂ 浓度(PBI Dansensor CheckPoint O₂/CO₂ 测定仪,丹

麦), 计算公式如下:

呼吸强度 (mg/(kg·h)) = CO₂ 浓度变化差 × 44 × (干燥器的体积 - 果实体积) / 22.4 / 果实质量 / 1 000

乙烯测定方法与呼吸强度测定相同, 果实在干燥器内密闭 1 h 后, 用注射器抽取 1 mL 样气用气相色谱仪 (CP-3800, 美国, 瓦里安公司) 测定乙烯释放量。色谱条件: FID 检测器, 柱温 60 °C, 检测器温度 270 °C; N₂ 体积流量 4.0 mL/min, 重复 3 次, 取平均值。外标法定量。以下述公式计算乙烯释放量:

乙烯释放量 (μL/(kg·h)) = 乙烯浓度 × (罐子体积 - 果实体积) / 2 / 果实质量 / 1 000

1.3.2 RNA 提取及 ACO₁ 和 ACS₂ 基因表达检测 参照杨亮等^[9]的方法, 采用改进的异硫氰酸胍法提取总 RNA, 提取的 RNA 用琼脂糖凝胶电泳检测 RNA 完整性, 使用紫外分光光度计测定总 RNA 纯度。RNA 反转录: 采用购自天根生化科技 (北京) 有限公司 (Tiangen Biotech (北京) Co., Ltd) 的反转录试剂盒, 合成 cDNA 第一链, 引物为 Oligo(dT)。反转录产物 PCR 扩增: 根据 Genbank 已收录的番茄 ACS 和 ACO 家族基因序列设计引物, 进行 PCR 扩增。以凝胶电泳和成像表征不同处理对 ACS₂ 和 ACO₁ 表达的影响。引物分别为 ACS₂-F: 5' - GCGCAACAATGGAAGAAGAATA-3', ACS₂-R: 5' - GACAACCTGGTCTATGTACTTAGACAT-3'; ACO₁-F: 5' - CAGAGGTTTAAGGAAGTAGTGGCA-3', ACO₁-R: 5' - GATATTAGAAGTAGGAAGATGGCG-3'。

1.3.3 果实色度的测定 用 CR-400 型色差计 (日本柯尼卡美能达) 测果实的 L、a、b 值, L 代表亮度 (数值 0~100); a 代表颜色变化 (数值 -60~60, 从绿到红); b 代表颜色变化 (-60~60, 从蓝到黄)^[10]。

1.3.4 硬度测定 用便携式果实硬度计测定 (探头直径 5 mm, 测定深度 10 mm, FT-327, Fruit Test™ 意大利), 单果重复 4 次, 每次测定 3 个果, 取平均值。

1.3.5 可溶性固形物测定 采用 WYT-1 型 (上海精密仪器仪表公司) 手持折光仪测定。

1.3.6 可滴定酸含量测定 采用酸碱滴定法进行测定, 单位为每 100 g 样品中酸的质量 (%)。

1.4 统计分析

试验数据采用 Excel 进行数据计算并作图, SPSS "one-way ANOVA" 进行差异显著性分析。p < 0.05 表示差异显著, p < 0.01 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 1-MCP 及其相似物二次处理对番茄果实呼吸强度和乙烯生成量的影响

2.1.1 不同处理对番茄果实呼吸强度的影响 番茄属于典型的呼吸跃变型果实。从图 1 中可以看出, 对照和处理果实采收时呼吸强度较高, 之后迅速下降, 之后缓慢上升, 最后又下降, 呈现波动的趋势。

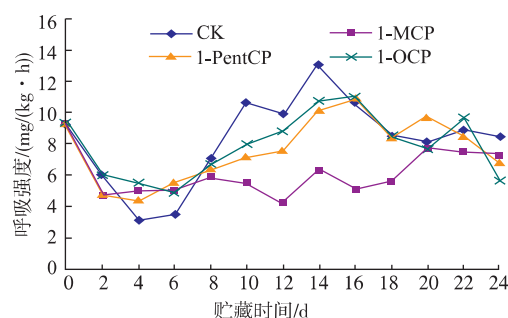


图 1 不同处理对番茄果实呼吸强度的影响

Fig. 1 Effect of treatments with 1-MCP or its structural analogues on respiration intensity

对照果实在第 14 天达到呼吸高峰, 1-MCP 处理果实在第 22 天出现呼吸高峰, 而 1-PentCP 和 1-OCPC 处理果实的呼吸高峰出现在第 16 天。因此不同处理均不同程度地延迟了呼吸高峰出现的时间, 抑制了呼吸高峰的峰值, 其中以 1-MCP 处理效果最好。

2.1.2 不同处理对番茄果实中乙烯释放量的影响 1-MCP 类乙烯抑制剂能够与乙烯竞争作用位点, 因而能够抑制乙烯的生理作用。从图 2 可以看出, 番茄果实采收后贮藏前期乙烯生成量很少, 在贮藏的后期生成量升高, 达到一定峰值后, 生成量又下降至初始水平。

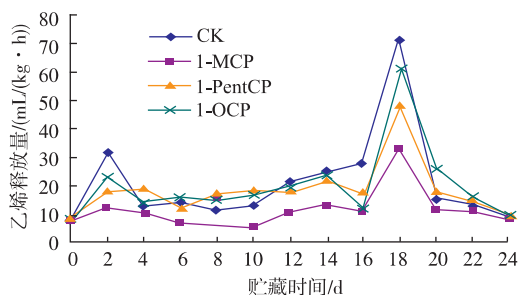


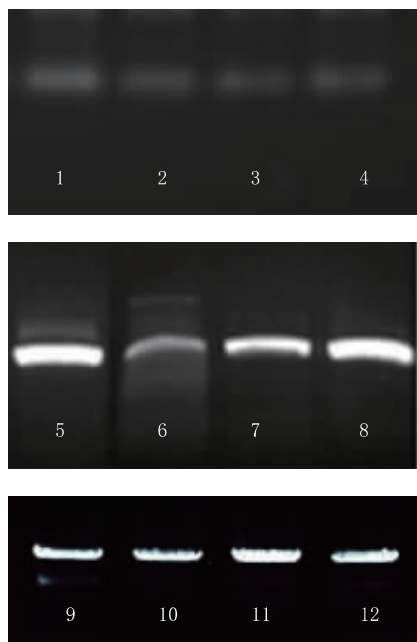
图 2 不同处理对番茄果实乙烯释放量的影响

Fig. 2 Effect of treatments with 1-MCP or its structural analogues on ethylene production

贮藏第 18 天时,对照果乙烯释放量达到 $71.70 \mu\text{L}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,1-MCP 处理果乙烯释放量为 $33.48 \mu\text{L}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,1-PentCP 处理和 1-OCp 处理果实乙烯释放量分别为 $48.90 \mu\text{L}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 和 $61.70 \mu\text{L}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 。各处理均能不同程度地抑制乙烯释放量,其中 1-MCP 抑制效果最佳。

2.2 1-MCP 及其相似物二次处理对番茄果实贮藏期间乙烯合成关键基因表达的影响

2.2.1 不同处理对番茄果实中 ACS2 基因表达的影响 图 3 表明,在贮藏过程中,ACS2 基因的表达量逐渐增大。



注:1、2、3、4分别为贮藏第4d的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACS2表达情况;5、6、7、8分别为贮藏第8d的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACS2表达情况;9、10、11、12分别为贮藏第12d的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACS2表达情况。

注:1、2、3、4分别为贮藏第4d的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACS2表达情况;5、6、7、8分别为贮藏第8天的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACS2表达情况;9、10、11、12分别为贮藏第12天的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACS2表达情况。

图 3 不同处理对番茄果实中 ACS2 基因表达的影响

Fig. 3 Effect of treatment with 1-MCP or its structural analogues on ACS2 gene expression in tomato fruits

贮藏第 4 天,对照果和各处理番茄果实中

ACS2 基因的表达微乎其微,对照果的表达量较多。贮藏第 8 天,1-MCP 和 1-PentCP 处理果不同程度地抑制 ACS2 基因的表达,而 1-OCp 处理效果不明显,其中 1-MCP 处理果效果最明显。贮藏第 12 天,各个处理果实中 ACS2 基因表达增加,处理间差异不大。结果说明,1-MCP 处理和 1-PentCP 处理可以抑制番茄果实成熟过程中 ACS2 基因的表达,从而影响番茄果实的成熟衰老进程。其中以 1-MCP 处理效果最好,1-OCp 处理效果不明显。

2.2.2 不同处理对番茄果实中 ACO1 基因表达的影响 绿熟期番茄在采后初期,ACO1 基因表达处于较低水平,随着果实的成熟,ACO1 继续积累,积累到最高点后,随着乙烯生成量的上升而快速降低。从图 4 可以看出,随着贮藏天数的增加,各处理的番茄果实中 ACO1 基因表达量逐渐增大。



注:1、2、3、4分别为贮藏第4d的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACO1表达情况;5、6、7、8分别为贮藏第8d的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACO1表达情况;9、10、11、12分别为贮藏第12d的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACO1表达情况。

注:1、2、3、4分别为贮藏第4天的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACO1表达情况;5、6、7、8分别为贮藏第8天的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACO1表达情况;9、10、11、12分别为贮藏第12天的CK、1-MCP、1-PentCP、1-OCp处理番茄果实中ACO1表达情况。

图 4 1-MCP 及其结构相似物二次处理对番茄果实中 ACO1 基因表达的影响

Fig. 4 Effect of treatment with 1-MCP or its structural analogues on ACO1 gene expressions in tomato fruits

贮藏第4天,对照和处理番茄果实中 *ACO1* 基因表达都很弱;贮藏第8天,1-MCP 处理抑制了 *ACO1* 基因的表达,1-PentCP 和 1-OCP 处理对 *ACO1* 基因表达影响不大;贮藏第12天时,各个处理果实中 *ACO1* 基因表达明显增加,其中对照果的表达最强,1-MCP 及其结构相似物处理不同程度抑制了 *ACO1* 基因的表达。

2.3 1-MCP 及其相似物二次处理对番茄果实贮藏期间品质的影响

2.3.1 1-MCP 及其相似物二次处理对番茄果实颜色的影响 转色期的番茄果实贮藏过程中果实颜色逐渐由绿色转为红色,因此色度中 *b* 值逐渐增大,环丙烯类乙烯作用抑制剂处理,不同程度地抑制了番茄果实转色的进程,在贮藏第8-12天时,各处理均显著抑制了果实的转色(图5)。

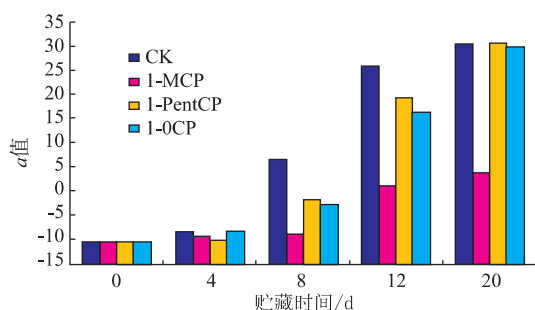


图5 不同处理对番茄果实颜色的影响

Fig. 5 Effect of treatments with 1-MCP or its structural analogues on ACS activity

其中 1-MCP 处理差异极显著,但在第20天时,1-MCP 处理果实转色不充分,还呈现较多的绿色,与对照和其他两个处理果实的色度差异极显著,而 1-PentCP 和 1-OCP 处理与对照果实的色度差异不显著。因此环丙烯类抑制剂可以较明显地抑制番茄果实贮藏过程中颜色的变化,其中以 1-MCP 处理效果最好。

2.3.2 1-MCP 及其相似物二次处理对番茄果实硬度的影响 由图6可看出,在常温贮藏条件下,随着贮藏天数的增加,各处理番茄果实硬度均呈不断下降趋势。

对照果实的硬度下降的程度略大于个处理果实。贮藏中期,1-MCP 处理果实硬度下降平缓,1-PentCP 和 1-OCP 处理果实软化进程较快于 1-MCP 处理。但各处理果实软化速度和程度均低于对照果,其中 1-MCP 处理效果较好。

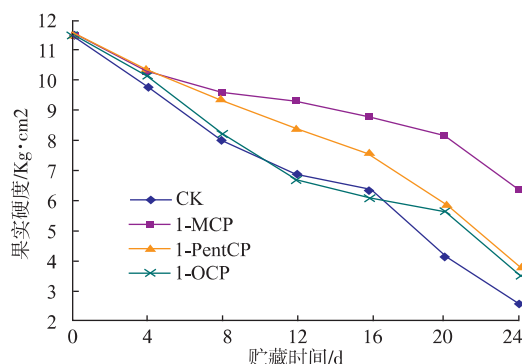


图6 1-MCP 及其相似物二次处理对番茄果实硬度的影响

Fig. 6 Effect of treatment with 1-MCP or its structural analogues on firmness of tomato fruits

2.3.3 1-MCP 及其相似物二次处理对番茄果实可溶性固形物含量的影响 从图7中可看出,对照果的可溶性固形物(SSC)含量变化趋势是先上升后下降,而各处理果实中可溶性固形物含量一直处于缓慢上升的趋势。

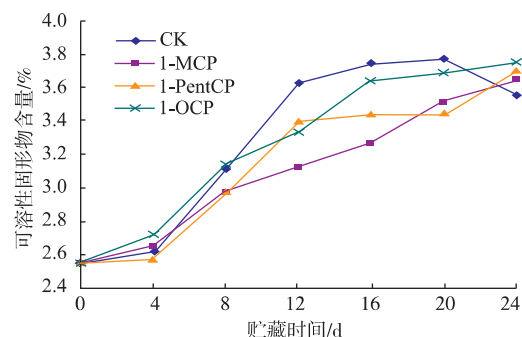


图7 1-MCP 及其结构相似物二次处理对番茄果实中可溶性固形物含量的影响

Fig. 7 Effect of treatment with 1-MCP or its structural analogues on SSC of tomato fruits

整个贮藏期,1-MCP 处理、1-PentCP 和 1-OCP 处理果实SSC 含量上升速度和对对照果差异不大,并且各处理果中 SSC 含量虽低些,但是相差不明显。由此表明,各处理对番茄果实中可溶性固形物含量的影响很小。

2.3.4 1-MCP 及其相似物二次处理对番茄果实可滴定酸含量的影响 从图8中看出,番茄果实中可滴定酸含量在贮藏过程中总体呈现下降的趋势。

1-MCP 及其结构相似物处理均不同程度地抑制了果实贮藏过程中可滴定酸含量的下降速度,即处理后果实中可滴定酸含量在整个贮藏过程中的含量高于对照果实,其中以 1-MCP 处理抑制作用

最为明显。但贮藏末期,处理果与对照果实中可滴定酸含量之间差异不显著。由此表明,1-MCP 及其结构相似物处理对番茄果实贮藏后期的品质影响不大。

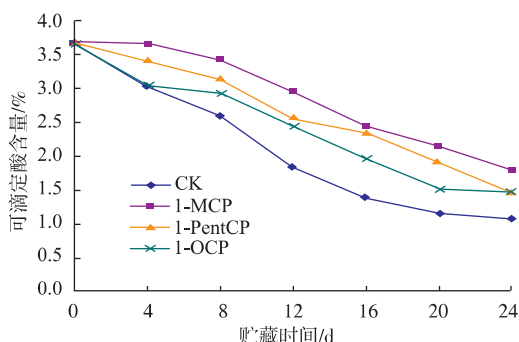


图 8 1-MCP 及其结构相似物二次处理对番茄果实中可滴定酸含量的影响

Fig. 8 Effect of treatment with 1-MCP or its structural analogues on Titratable acidity content of tomato fruits

3 讨论

研究发现,1-MCP、1-PentCP 和 1-OCP 处理能不同程度地抑制寒富苹果和番茄果实采后贮藏过程中的呼吸强度和乙烯生成量^[11-12];进一步的研究发现,3 种乙烯抑制剂主要是通过抑制番茄果实中 ACS2 和 ACO1 基因的的表达而实现的,而且对基因表达的抑制程度与对果实成熟衰老的影响程度相一致,即抑制表达越明显,果实成熟衰老进程出现越晚,品质保持时间越长。

环丙烯类化合物主要通过竞争性结合乙烯受体,而使乙烯无法完成正常的生理效应。而这种结合受乙烯受体和环丙烯类化合物的空间位置,诱导效应和双键与甲基位置等因素的影响。1-MCP,1-PentCP 和 1-OCP 是分别具有 1,5,8 个碳的支链的环丙烯类物质。本试验研究发现,不同乙烯抑制剂

处理后对果实呼吸强度和乙烯生成量具有明显的抑制作用,利于保持果实细胞膜完整性,延缓果实成熟衰老进程。其中以 1-MCP (0.75 $\mu\text{L/L}$) 和 1-PentCP (2 $\mu\text{L/L}$) 的效果较好,1-OCP 处理效果不明显。这与项目组前期的研究结果相一致^[11-13],而 Sisler 等人对香蕉研究发现,1-位碳链长度的增长利于提高环丙烯类化合物抑制乙烯的效应,支链长度在 5 个碳以上的环丙烯类抑制剂,其最小抑制浓度也较小,随着支链碳链长度的延长,其化合物在香蕉常温贮藏中表现出了更好的保鲜效果^[14]。本研究中,1-OCP 处理效果不明显的主要原因可能是由于 1-OCP 处理的体积分数较低 (0.5 $\mu\text{L/L}$);Sisler 等人研究发现,1-OCP 处理香蕉和康乃馨花的保鲜效果比 1-MCP 和 1-PentCP 处理效果好的前提是 1-OCP 浓度和 1-MCP 处理的浓度相同或较低^[15]。

1-MCP 处理对果实的保鲜作用,会随着贮藏时间延长,果实依然可以完成后熟过程,仅仅是延缓了果实的后熟进程;采用环丙烯类乙烯作用抑制剂二次处理能有效延缓果实后熟和乙烯生物合成关键酶基因的表达,但第二次处理效果并不明显,这可能处理时间较长有关;陈金印等研究发现,处理 12 h 的猕猴桃中,1-MCP 二次处理与一次处理有一定的差异,但处理 24 h 的,二次处理与一次处理效果差异不大^[16]。

4 结语

综上所述,3 种乙烯抑制剂 (1-PentCP、1-OCP 和 1-MCP) 在番茄果实的贮藏保鲜中具有抑制生理代谢、保持细胞结构完整性等积极作用;1-MCP 类乙烯作用抑制剂可能主要是通过抑制番茄果实中 ACS 和 ACO 基因的表达而实现的。其中尤以 1-MCP (0.75 $\mu\text{L/L}$) 和 1-PentCP (2 $\mu\text{L/L}$) 处理效果较为明显。

参考文献:

- [1] 周拥军,郅海燕,陈文煊,等. 1-MCP 处理对翠冠梨贮藏效果的影响[J]. 浙江农业学报,2006,18(2):121-124.
ZHOU Yong-jun,GAO Hai-yan,CHEN Wen-xuan,et al. Effect of treatment of 1-MCP on storage efficiency of Cuiguan pear[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2006,18(2):121-124.(in Chinese)
- [2] 张平,张鹏,寇文丽,等. 1-甲基环丙烯对不同脱涩程度冰温贮藏磨盘柿生理品质的影响[J]. 食品与生物技术学报,2012,31(5):462-467.
ZHANG Ping,ZHANG Peng,KOU Wen-li,et al. Effect of 1-MCP on physiology quality of mopan persimmon with different De-astringency degree during ice temperature storage[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2012,31(5):462-467. (in

- Chinese)
- [3] 王友升, 陈小燕, 李丽萍, 等. 1-甲基环丙烯对李果实采后衰老期间非挥发性风味物质影响的多变量分析[J]. 食品科学, 2012, 33(14): 301-306.
- WANG You-sheng, CHEN Xiao-yan, LI Li-ping, et al. Multivariate analysis of the effect of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) on Non-Volatile flavor compounds in plum fruits during postharvest ripening[J]. **Food Science**, 2012, 33(14): 301-306. (in Chinese)
- [4] Apelbaum A, Sisler E C, Feng X, et al. Assessment of the potency of 1-substituted cyclopropenes to counteract ethylene-induced processes in plants[J]. **Plant Growth Regulation**, 2008, 55: 101-113.
- [5] Feng X, Apelbaum A, Sisler E C, et al. Control of ethylene activity in various plant systems by structural analogues of 1-methylcyclopropene[J]. **Plant Growth Regulation**, 2004, 42: 29-38.
- [6] Al Dulayymi J R, Baird M S, Simpson M J, et al. Structure based interference with insect behaviour cyclopropenes analogs of pheromones containing α -Alkenes[J]. **Tetrahedron**, 1996, 52: 12509-12520.
- [7] Al Dulayymi A R, Al Dulayymi J R, Baird M S, et al. Simple four and five carbon cyclopropane and cyclopropenes synthetic intermediates[J]. **Russ J Org Chem**, 1997, 33: 798-816.
- [8] 孙希生, 王文辉, 李志强, 等. 1-MCP 对砀山酥梨保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2001(6): 14-17.
- SUN Xi-sheng, WANG Wen-hui, LI Zhi-qiang, et al. Effects of 1-MCP on cold storage of Dangshansuli pears[J]. **Storage and Process**, 2001(6): 14-17. (in Chinese)
- [9] 杨亮, 付丽娅, 刘仲齐, 等. 富含多糖番茄果实组织中总 RNA 的有效提取方法[J]. 南开大学学报: 自然科学版, 2005, 38(5): 36-39.
- YANG Liang, FU Li-ya, LIU Zhong-qi, et al. An effective method for extracting total RNA from tomatofruit tissue rich in polysaccharides[J]. **Acta Scientiarum Naturallum: Universitatis Nankaiensis**, 2005, 38(5): 36-39. (in Chinese)
- [10] 张克宏, 杜俊娟. 1-MCP 对猕猴桃包装贮藏生理的影响研究[J]. 食品科学, 2007, 28(11): 575-579.
- ZHANG Ke-hong, DU Jun-juan. Study on effects of 1-MCP on kiwifruit quality and physiological characteristics during packaging storage[J]. **Food Science**, 2007, 28(11): 575-579. (in Chinese)
- [11] 程顺昌, 冷俊颖, 任小林, 等. 不同环丙烯类乙烯抑制剂对苹果常温贮藏保鲜效果的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 269-273.
- CHENG Shun-chang, LENG Jun-ying, REN Xiao-lin, et al. Effect of different 1-substituted cyclopropenes as ethylene inhibitors on postharvest physiology of apple stored at ambient temperature[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2012, 28(6): 269-273. (in Chinese)
- [12] 付琳, 程顺昌, 魏宝东, 等. 1-MCP 及其结构相似物处理对番茄采后贮藏效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(1): 195-198.
- FU Lin, CHENG Shun-chang, WEI Bao-dong, et al. Effects of 1-MCP and its structural analogues treatment on Post-harvest storage of tomato[J]. **Food and Fermentation Industries**, 2012, 38(1): 195-198. (in Chinese)
- [13] 魏宝东, 冷俊颖, 程顺昌, 等. 1-甲基环丙烯及其结构类似物处理对寒富苹果贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(12): 281-284.
- WEI Bao-dong, LENG Jun-ying, CHENG Shun-chang, et al. Effect of 1-MCP and its structural analogue on Hanfu apple quality during storage at ambient temperature[J]. **Food Science**, 2012, 33(12): 281-284. (in Chinese)
- [14] Sisler E C, Alwan T, Goren R, et al. 1-Substituted cyclopropenes: effective blocking agents for ethylene receptor in plants[J]. **Plant Growth Reg**, 2003, 40: 223-228.
- [15] Sisler E C, Serek M, An Roh K, et al. The effect of chemical structure on the antagonism by cyclopropenes of ethylene responses in banana[J]. **Plant Growth Reg**, 2001, 33: 107-110.
- [16] 陈金印, 付永琦, 刘康. 1-MCP 处理对美味猕猴桃果实采后生理生化变化的影响[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(6): 940-947.
- CHEN Jin-yin, FU Yong-qi, LIU Kang. Effects of 1-MCP treatment on Post-harvest physiology and Bio-chemistry of kiwi fruit [J]. **Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis**, 2007, 29(6): 940-947. (in Chinese)