

电子束辐照对不同成熟度番茄后熟及乙烯生成的影响

王海宏^{1,2}, 孔秋莲^{*1,2}, 颜伟强^{1,2}, 岳玲^{1,2}, 马俊²,
陈志军^{1,2}, 戚蓉迪², 包英姿², 戚文元^{1,2}

(1. 上海市农业科学院 作物育种栽培研究所, 上海 201403; 2. 上海束能辐照技术有限公司, 上海 201403)

摘要: 为明确电子束辐照对跃变型果蔬采后后熟和保鲜的影响, 以不同成熟度番茄为试材, 10 MeV、10 kW 电子直线加速器为射线源, 采用不同剂量(0、0.4、1.0 kGy)电子束辐照新鲜采收的番茄果实, 测定货架(20±1℃, 50% RH, 14 d)期间的果皮红色指数、乙烯释放量、ACC 合成酶(ACS2)基因和 ACC 氧化酶(ACO1)基因的表达量及保鲜效果。结果表明, 电子束辐照可抑制番茄果实货架期后的变红后熟, 剂量越高, 抑制程度越大, 果皮红色指数越低。电子束辐照对 14 d 货架期间番茄果实的失重、皱缩、霉变无显著影响。电子束辐照对番茄果实乙烯释放量、ACC 合成酶基因和 ACC 氧化酶基因表达量的影响因番茄果实成熟度不同而异。对成熟度低的绿熟期果实, 电子束辐照可抑制其乙烯释放和 ACC 合成酶基因、ACC 氧化酶基因的表达。对成熟度高的红熟期果实, 电子束辐照可促进其乙烯释放, 但乙烯合成关键酶基因表达量高低因电子束辐照剂量而异, 1.0 kGy 处理可抑制 ACC 合成酶基因、ACC 氧化酶基因的表达。

关键词: 电子束; 辐照; 番茄; 后熟; 乙烯

中图分类号: TS 251.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673—1689(2018)06—0617—07

Effect of Electron Beam Irradiation on Ripening and Ethylene Production of Tomato Fruits Harvested at Different Mature Stages

WANG Haihong^{1,2}, KONG Qiulian^{*1,2}, YAN Weiqiang^{1,2}, YUE Ling^{1,2}, MA Jun²,
CHEN Zhijun^{1,2}, QI Rongdi², BAO Yingzi², QI Wenyuan^{1,2}

(1. Crop Breeding and Cultivation Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Shanghai Shuneng Irradiation Technology Co. Ltd, Shanghai 201403, China)

Abstract: The goal was to study the effect of electron beam (e-beam) irradiation on postharvest ripening and storage quality of climacteric fruits. Tomato fruits harvested at green, pink and red stages of ripeness were exposed to 0, 0.4, and 1.0 kGy e-beam irradiation by linear accelerator (10 MeV, 10 kW), and held as shelf-life storage (20±1 °C, 50% RH) for 14 days. The red color index of tomato, ethylene production, expression of ACC synthetase (ACS2) gene and ACC oxidase

收稿日期: 2015-09-27

基金项目: 上海市科技兴农项目(沪农科攻字(20116)第 6-3-4 号, 沪农科创字(2018)第 1-6 号); 上海市农产品保鲜与加工技术服务平台项目(14DZ2293900)。

作者简介: 王海宏(1980—), 男, 安徽亳州人, 农学硕士, 助理研究员, 主要从事农产品保鲜加工方面的研究。E-mail: whhchina@163.com

* 通信作者: 孔秋莲(1971—), 女, 山东菏泽人, 农学博士, 研究员, 主要从事食品辐照加工方面的研究。E-mail: qiuliankong@yahoo.com

引用本文: 王海宏, 孔秋莲, 颜伟强, 等. 电子束辐照对不同成熟度番茄后熟及乙烯生成的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(06): 617-623.

(ACO1) gene, storage quality were measured termly. Our results indicated that: red turning of tomato skin was suppressed by e-beam irradiation in a dose dependent manner. The red color indexes were declined with irradiation dose increase. E-beam irradiation showed no significant effects on weight loss, wrinkling and decay of tomato fruits during shelf-life time of 14 days. The effects of e-beam irradiation on ethylene production, expression of ACS2 gene and ACO1 gene were varied with mature stages of harvested tomato fruits. For tomatoes harvested at green stage, production of ethylene and expression of ACS2 gene and ACO1 gene were inhibited by e-beam irradiation. For tomatoes harvested at red stage, production of ethylene was promoted by e-beam irradiation. But effects of e-beam irradiation on expression of ACS2 gene and ACO1 gene for tomatoes harvested at red stage were varied with irradiation dose, and the tomatoes irradiated by 1.0 kGy e-beam showed lower expression level of ACS2 gene and ACO1 gene.

Keywords: electron beam, irradiation, tomato, ripening, ethylene

利用辐射源产生的 γ 射线、加速器产生的高能电子束或X射线辐照农产品可杀虫、灭菌、抑制酶活,在新鲜农产品采后保鲜和检疫等方面具有重要意义^[1]。农产品辐照加工是一种非热加工技术,可有效地保持农产品原有的品质、色泽和营养成分^[2]。辐照加工已被世界近60个国家或地区允许用于40多种食品的处理,以达到杀虫、杀菌、抑制发芽等保障卫生安全、延长货架期等目的^[1]。

电子束作为一种新型加工射线源,较传统 γ 射线具有无放射废物、剂量率高、经济高效等优点,近年来已成为新型辐照加工装置的核心设备^[3-4]。国内外学者对电子束辐照加工农产品开展了大量研究,但大都关注电子束辐照对产品品质、微生物安全、保鲜效果等方面的影响^[5-6],对采后后熟过程的影响报道不多。虽然国外关于辐照可抑制新鲜果蔬乙烯生成的研究早有报道,但结论大都源于 γ 射线辐照装置^[7-8]。另外,为保证品质和延长采后贮运时间,呼吸跃变型新鲜农产品的采摘成熟度因采后用途不同而不同,而有关辐照,尤其是电子束辐照对不同成熟度果实的采后后熟影响则少见报道。

作者以呼吸跃变型果蔬番茄为试材,研究不同剂量电子束辐照对不同成熟度番茄的后熟及乙烯生成影响,为电子束辐照加工农产品的广泛应用提供进一步的参考依据。

1 材料与方法

1.1 不同成熟度番茄

番茄(圣西娜):采摘于上海市农业科学院庄行

试验站,成熟度按美国农业部分类^[9],选取绿熟期(果实着红面积0%)、粉熟期(果实着红面积30%~60%)、红熟期(果实着红面积90%以上)三个成熟度采摘。采摘后立即运至实验室,剔除病虫害果、斑点果,小心去除花萼及果柄。所有果实均仔细挑选,保证色泽、大小基本一致,然后进行辐照处理。

1.2 辐照处理

辐照在上海束能辐照技术有限公司进行,辐照设备为日本IHI公司ESS-010-03直线电子加速器(能量10 MeV,功率10 kW)。

试验设3个剂量处理,0、0.4、1.0 kGy,每个剂量处理重复3次,每次重复辐照75个果实。所有辐照处理都在采摘后2 h内完成。番茄果实单层摆放在托盘中,利用重铬酸银化学剂量计进行剂量检测,保证实际剂量在设定剂量的 $\pm 10\%$ 范围内。

辐照处理结束后将75个果实随机分成9组,其中6组每组10个果实,分别用于分析乙烯释放量、保鲜效果及果皮红色指数;另外3组每组5个果实,用于分析乙烯合成关键酶(ACC合成酶ACS2、ACC氧化酶ACO1)基因表达量。所有果实均放置在纸盒中,在室温下模拟货架期条件存放($20 \pm 1^\circ\text{C}$, 50% RH) 14 d。存放期间定期取样测定果皮红色指数变化和乙烯释放量,存放至第14天时,测定保鲜效果(皱缩率、失重率、霉变率)和ACC合成酶ACS2和ACC氧化酶ACO1基因的表观量。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 保鲜效果及后熟变红程度

1)果实皱缩率:以皱缩果实个数占总调查果实

个数的百分比表示。果实花萼处出现明显皱缩即认定为皱缩果实^[10]。

2)果实失重率:

$$\text{果实失重率} = \frac{\text{存放结束时质量} - \text{存放开始时质量}}{\text{存放开始时质量}} \times 100\%$$

3)果实霉变率:以霉变果实个数占总调查果实个数的百分比表示。

4)果皮红色指数:后熟变红程度以果实红色指数表示,果实分级参考美国农业部番茄成熟度分类^[9],计算方法参考果实褐变指数^[11]。0级:果实青绿,无变红;1级:果实<10%面积变红;2级:果实10%~30%面积变红;3级:果实30%~60%面积变红;4级:果实60%~90%面积变红;5级:果实>90%面积变红。

$$\text{果实红色指数} = \frac{\sum (\text{各级果实数} \times \text{级数})}{\text{总果实数} \times \text{最高级数}} \times 100$$

1.3.2 乙烯释放量 气相色谱法,参考王磊等方法^[12]。番茄果实密封在对乙烯没有吸附效果的塑料盒中,25℃下静置15~16 h,采用顶空法,抽取1 mL气体测定乙烯含量,并根据果实质量和密封盒内空气体积计算乙烯释放速率。乙烯含量测定使用气相色谱(Model N6980, Agilent Inc., Wilmington, USA)仪。色谱条件为Porapak Q色谱柱,柱长1 m,内径3 mm,检测口温度150℃,柱温60℃,载气(氮气)流量25 mL/min, FID检测器。每次测定结束后,番茄果实放回各自的纸盒中,继续模拟货架期条件存放。乙烯释放速率以C₂H₄ μL/(h·kg)表示。为比较不同处理番茄果实货架期间乙烯释放量的变化情况,以货架期0 d时各处理的乙烯释放速率为基准值,计算各处理货架期间的乙烯释放速率与其相应基准值的比值,表示各处理货架期间的乙烯释放量的变化。

1.3.3 乙烯合成关键酶 ACC 合成酶(ACS2)、ACC 氧化酶(ACO1)基因的表达量分析 利用荧光定量PCR分析番茄ACO1和ACS2基因表达。番茄果肉组织加入2.5倍体积的Trizol试剂(Invitrogen),匀浆后参照产品Trizol Reagent(Invitrogen)说明书步骤提取总的RNA。使用1 μg的RNA样品反转合成cDNA,具体步骤参照产品试剂盒PrimeScript™ II 1st Strand cDNA Synthesis Kit (Takara)说明书。荧光定量PCR使用试剂盒SYBR® Premix Ex Taq™ II real time PCR Kit (Takara),具体步骤参考产品说

明书。扩增LeACS2引物为,正向5'-GAGGTTTCGTAGGTGTTGAGAAAAGT-3',反向5'-GGAATAGGTGACGAAAGTGGTGACA-3'^[13],扩增LeACO1引物为,正向5'-ACAAACAGACGGGACACGAA-3',反向5'-CTCTTTGGCTTGAAACTTGA-3'^[14],扩增LeTUA引物为,正向5'-AGCTCATTAGCGGCAAAGAA-3',反向5'-AGTACCCCCACCAACAGCA-3'^[15]。其中Alpha-tubulin基因LeTUA被选作内参用于标准化其他几个基因表达的测定。每个处理中选3个番茄果实分析ACO1和ACS2基因表达,果实切片后立即放入液氮贮存在-80℃冰箱中待分析,切片均质后一式三份用于每项分析。

1.4 数据分析

采用SPSS软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 电子束辐照对番茄保鲜效果的影响

由表1可以看出,货架期存放14 d后,不同成熟度采摘的果实皱缩率均以0.4 kGy处理最低,其中绿熟果0.4 kGy电子束处理显著低于红熟果1.0 kGy电子束处理,其它各处理间无显著差异。果皮失水皱缩的规律和失重率之间并未表现明显相关性,货架期间的番茄果实出现较大幅度失重,电子束辐照处理的果实失重率低于未辐照处理,但各处理间差异不显著。番茄货架期间的霉变率较低,各处理间番茄果实的霉变率无显著差异。因此,不同剂量电子束辐照处理对番茄果实货架期间的失重率和霉变率影响不显著,对相同成熟度采收的番茄果实,不同剂量电子束辐照处理对货架期间的皱缩率影响也不显著。

2.2 电子束辐照对番茄后熟变红的影响

番茄果实的表皮颜色可作为果实成熟程度的指示因子^[9]。用果实表皮红色指数衡量货架期14 d番茄果实的后熟情况,从图1看出,电子束处理抑制了果实的后熟变红,相同成熟度果实间表现为电子束剂量越高,变红受抑制程度越高;相同电子束剂量处理间则表现为采收成熟度越低,变红受抑制程度越高。统计分析表明,电子束对番茄果实货架期表皮变红的影响因成熟度而异,粉熟期采收的果实不同剂量电子束处理间表皮变红程度无显著差异,其果皮红色指数与红熟期采收的果实也无显著差异。绿熟期采收的番茄其货架期间的果皮变红程

度受电子束处理影响较大,不同剂量间表现显著差异,经过货架期 14 d 后熟存放后,其表皮红色指数和红熟期采收的果实差异显著。

表 1 电子束辐照对货架期存放 14 d 后番茄果实的皱缩、失重和霉变的影响

Table 1 Effects of E-beam irradiation on percent of wrinkle, weight loss and decay of tomatoes after 14 days of shelf-life

处理	皱缩率/%	失重率/%	霉变率/%
绿熟果 0 kGy	13.7 ^{ab}	7.41 ^a	0.0 ^a
绿熟果 0.4 kGy	0.0 ^a	5.72 ^a	0.0 ^a
绿熟果 1.0 kGy	10.0 ^{ab}	5.41 ^a	3.3 ^a
粉熟果 0 kGy	6.7 ^{ab}	6.70 ^a	0.3 ^a
粉熟果 0.4 kGy	3.3 ^{ab}	6.52 ^a	3.3 ^a
粉熟果 1.0 kGy	6.7 ^{ab}	5.87 ^a	6.7 ^a
红熟果 0 kGy	13.3 ^{ab}	8.29 ^a	0.0 ^a
红熟果 0.4 kGy	6.7 ^{ab}	8.04 ^a	6.7 ^a
红熟果 1.0 kGy	16.7 ^b	6.52 ^a	10.0 ^a

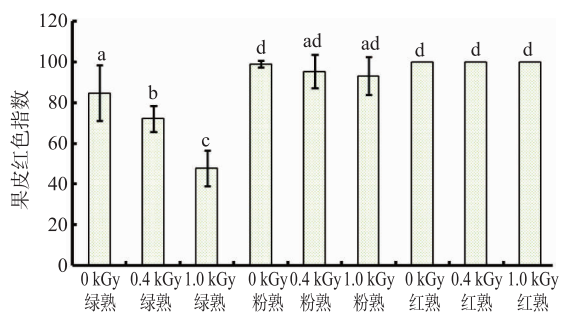


图 1 电子束辐照对货架期存放 14 d 后番茄果实果皮红色指数的影响

Fig. 1 Effects of E-beam irradiation on red color indexes of tomatoes skin after 14 days of shelf-life

2.3 电子束辐照对货架期间番茄乙烯释放量的影响

图 2 显示了货架期间电子束辐照处理的番茄果实乙烯释放量的变化情况。番茄果实采收后乙烯释放量的变化受采收成熟度和辐照剂量的双重影响。绿熟期采收的果实,电子束辐照处理的乙烯释放量的变化小于未处理的对照果实;货架期 0~10 d 内乙烯释放量快速增加,电子束辐照可抑制其增加幅度,其中货架期 0~5 d 内不同电子束剂量间差别不大,但 5~10 d 期间表现为 1.0 kGy 处理的乙烯释放量大大高于 0.4 kGy 处理;在货架期 10~14 d 内,各处理的乙烯释放量呈下降趋势,不同剂量间表现为 0 kGy 处理乙烯释放量最大,1.0 kGy 处理次之,

0.4 kGy 处理最低。粉熟期采收的果实,其乙烯释放量的变化低于绿熟期采收的果实,电子束辐照对乙烯释放量变化的影响因剂量而异,0.4 kGy 对乙烯释放影响很少,和未辐照的对照处理差别不大,而 1.0 kGy 则促进了乙烯释放量的增大,货架期 5~14 d 内明显高于对照和 0.4 kGy 处理。红熟期采收的果实,其采后乙烯释放量的变化最小,货架期 0~5 d 内乙烯释放量下降,5 d 后呈现逐渐上升趋势,电子束辐照可增加其上升幅度,且剂量越高,增加幅度越大。

由此看出,电子束辐照处理可影响番茄果实的采后乙烯释放,但影响效果因采摘成熟度而异。对成熟度低的绿熟期果实,电子束处理可抑制其乙烯释放,从而抑制后熟。随着成熟度提高,电子束辐照反而促进了乙烯释放,表现为剂量越高,促进幅度越大。

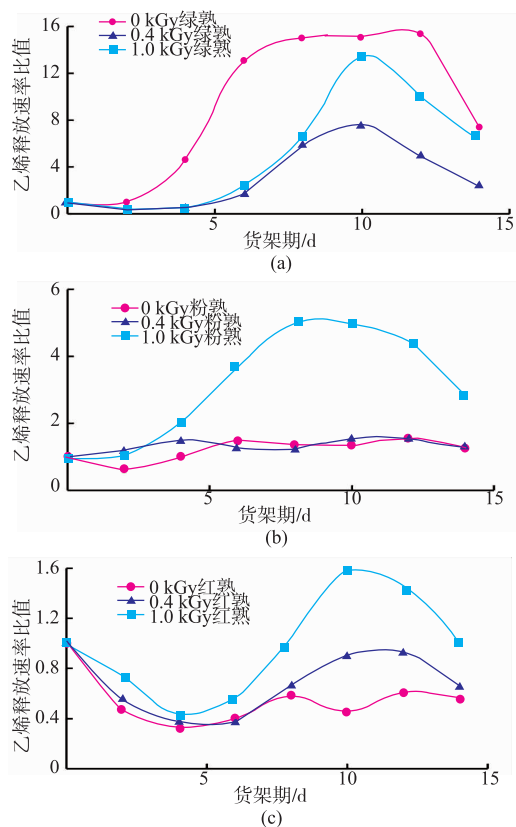


图 2 电子束辐照对番茄果实货架期间乙烯释放量的影响

Fig. 2 Effects of E-beam irradiation on ethylene production of tomatoes during shelf-life time

2.4 电子束辐照对番茄乙烯合成关键酶基因表达量的影响

植物体内乙烯的生成量主要由 1-氨基环丙烷-

1-羧酸(ACC)合成酶(ACS)和氧化酶(ACO)决定,而这两个关键酶生成量的多少是其 mRNA 表达的结果^[16]。在番茄基因组中至少存在着 12 个 ACS 和 7 个 ACO 基因,其中 *LeACS2*、*LeACO1* 在番茄果实成熟过程中发挥主要作用^[17],Oeller 等将 ACS2 基因反向插入载体并转化番茄后,乙烯合成降低 99.5%^[18]。

作者选择两个有代表性的乙烯合成关键基因 *LeACS2* 和 *LeACO1*,用定量荧光 PCR 测定其基因表达水平。由图 3 可见,辐照对 ACC 合成酶、ACC 氧化酶基因表达量的影响因成熟度而异。货架期存放 14 d 后,绿熟期番茄果实的 ACC 合成酶和 ACC 氧化酶基因表达量均以未辐照处理最高,但不同剂量辐照处理果实的 ACC 合成酶基因表达量差异不大;而 ACC 氧化酶基因表达量则随辐照处理剂量增加而降低。粉熟期和红熟期番茄果实的 ACC 合成酶、ACC 氧化酶基因表达量和辐照处理之间并未表现和绿熟期果实一样的相关性,但都以 1.0 kGy 辐照处理的果实最低。因此,辐照处理对番茄果实乙烯合成关键酶基因表达量的影响因成熟度而异,绿熟期果实的酶基因表达量受辐照抑制,且剂量越高,抑制幅度越大,和采后果皮红色指数、乙烯释放量变化的结果一致。

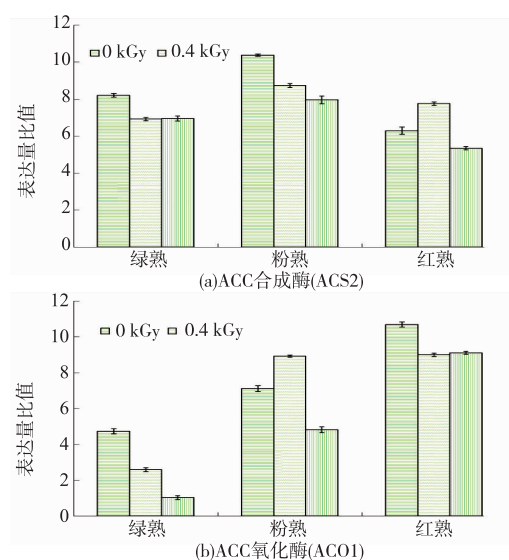


图 3 电子束辐照对货架期 14 d 后番茄果实 ACC 合成酶、ACC 氧化酶基因表达量的影响

Fig. 3 Effects of E-beam irradiation on expression of ACS2, ACO1 genes of tomatoes after 14 days shelf-life time

3 讨论

新鲜果蔬采摘时的生理成熟程度是影响果实品质和采后贮藏效果的重要因素。对番茄等呼吸跃变型果实,其摘收成熟度的选择因采后贮藏时间长短要求而异。赵彤等研究采摘成熟度对番茄贮藏品质的影响,发现红熟前期果实(着红面积 10%~40%)和红熟中期果实(着红面积 40%~70%)采收后室温下(18±2℃)存放,果实分别在 13 d 和 5 d 时完全变红,腐烂率均为 0%,失重率分别为 0.63%和 0.79%;而绿熟期果实(着红面积 0%)则于 18 d 时完全变红,但腐烂率和失重率分别高达 54.5%和 1.53%,显著高于其他采摘成熟度处理,提出红熟前期和红熟中期采摘的果实可用于短时间贮藏,绿熟期采摘的果实不利于贮藏^[19]。作者研究发现,未辐照处理的番茄果实货架期存放 14 d 后,绿熟期采摘番茄果实的失重率和皱缩率均高于粉熟期采摘果实,和赵彤等研究结果一致。但腐烂率方面,绿熟期采摘番茄果实和粉熟期采摘果实差别不大,原因可能在于番茄品种差异、栽培技术措施等方面。

辐照处理可抑菌、杀虫、抑制果蔬的采后代谢强度,从而起到保鲜、检疫的作用。G.J. STRYDOM 等研究发现^[20],绿熟香蕉经 0.2 kGy 辐照处理后,其后熟过程受到抑制。本研究同样表明,辐照可抑制绿熟和粉熟番茄果实的后熟变红,在 1.0 kGy 剂量范围内,剂量越高,抑制作用越大。辐照对番茄果实后熟变红的抑制效果受采摘成熟度影响,相同辐照剂量下,绿熟果实的后熟受抑制程度大于粉熟果实。王愈等研究表明^[21-22],不同电场处理也可抑制番茄果实采后后熟变红,原因可能在于电场处理可抑制叶绿素降解,同时通过延缓后熟,从而使处理番茄果实色泽转变变慢。

番茄为典型的呼吸跃变型果实,果实的成熟受乙烯调控。程蕾等研究表明^[23],适宜浓度的乙烯抑制剂 1-Pent CP 和 1-MCP 能抑制番茄果实衰老,其作用机理可能是通过对果实乙烯受体基因表达的调控实现的。适宜剂量辐照处理也可抑制新鲜果蔬的后熟和衰老,但辐照对新鲜果蔬采后乙烯释放的调控受品种等外在因素影响,乙烯释放量变化和后期转化并不一定表现相关性。赵克俭等研究表明^[24],苹果辐照后乙烯生成量变化因品种而异,晚熟品种国光辐照后乙烯生成量增加,而早熟品种伏苹果辐照

后乙烯生成量降低,且乙烯生成量随辐照剂量增加而下降。G.J. STRYDOM 等研究发现^[20],0.2 kGy 辐照可抑制绿熟香蕉后熟过程,但导致乙烯释放增加。本研究同样表明,辐照可抑制绿熟和粉熟番茄果实的后熟变红,但辐照对乙烯释放量的影响因番茄果实的采摘成熟度而异,绿熟期采摘的番茄果实,辐照可导致其乙烯释放量降低;而粉熟期采摘的番茄果实,1.0 kGy 辐照导致乙烯释放量升高。

乙烯作为重要的内源激素,在果实发育、成熟老化、采后保鲜中起着非常重要的作用^[25-26]。乙烯的生物合成途径已经于 20 世纪 70 年代末被明确,ACC 合酶(ACS)和 ACC 氧化酶(ACO)是乙烯生物合成的两个关键酶^[27]。有报道表明,1-MCP 通过降低柿果 ACS、ACO 酶活性,达到降低内源乙烯合成速度、抑制采后成熟软化的效果^[28]。程顺昌等研究表明^[29],环丙烯类乙烯效应抑制剂不同程度地抑制绿熟期番茄果实采后贮藏过程中的果实转红和乙烯释放,同时抑制了 ACS2 和 ACO1 基因的表达量,认为环丙烯类后熟抑制剂的作用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。本研究也表明,绿熟期采摘番茄果实的 ACC 合成酶(ACS2)和 ACC 氧化酶(ACO1)基因表达量低于粉

熟期和红熟期采摘的番茄果实,辐照处理导致绿熟期番茄果实的 ACC 合成酶(ACS2)和 ACC 氧化酶(ACO1)的基因表达量降低,和果皮红色指数、乙烯释放量的变化结果一致。因此认为,电子束辐照抑制绿熟番茄果实后熟变红的原因之一是通过抑制乙烯合成关键酶的基因表达,进而抑制乙烯的生成释放,从而抑制果实后熟转色。

综上所述,适宜剂量辐照处理可抑制新鲜果蔬的后熟衰老,对番茄等呼吸跃变型果蔬,较低的采摘成熟度可增强辐照处理对果蔬后熟衰老的抑制效果,综合考虑食用品质、保鲜时长等因素,选择适宜的采摘成熟度是保证电子束最佳辐照保鲜效果的关键。

4 结 语

采摘时的生理成熟程度是影响番茄果实采后电子束辐照保鲜技术效果的重要因素。采用 1.0 kGy 及以下剂量电子束辐照处理低成熟度的绿熟期番茄果实,可延缓果实后熟变红,保持较低的乙烯释放量和乙烯合成关键酶(ACS2、ACO1)基因表达量,货架(20±1 °C,50% RH,14 d)期间的失重、皱缩、霉变未受到显著影响。

参考文献:

- [1] LIANG Hongbin, ZHANG Yubao, WANG Qiang, et al. Electron accelerator and its application[J]. **Innovation and Application of Science and Technology**, 2012, 3(1): 3. (in Chinese)
- [2] BEATRICE H L, AHMED E Y. Alternative food-preservation technologies: efficacy and mechanisms[J]. **Microbes and Infection**, 2002, 4: 433-440.
- [3] WU Zhenhua, ZHANG Hong, ZHAO Weiping, et al. Study on radiation sterilization of electron beam accelerator[J]. **Nuclear Physics Review**, 2009, 26(1): 80-83. (in Chinese)
- [4] SHULIU L, DEVAPRIYA K, RICHARD A. Holley. Use of lactic acid with electron beam irradiation for control of *Escherichia coli* O157:H7, non-O157 VETC *E. coli*, and *Salmonella* serovars on fresh and frozen beef[J]. **Food Microbiology**, 2015, 46: 34-39.
- [5] SONG Tingshan. Application of electron beam on radiation crosslinking[J]. **Usage of Rubber Resources**, 2005, 6: 19-22. (in Chinese)
- [6] MARIA A M M. Elena Castell-Perez, Carmen Gomes, et al. Quality of electron beam irradiation of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) at medium dose levels (1.0~3.2 kGy)[J]. **LWT**, 2007, 40: 1123-1132.
- [7] STRYDOM G J, WHITEHEAD C S. The effect of ionizing radiation on ethylene sensitivity and postharvest ripening of banana fruit[J]. **Scientia Horticulturae**, 1990, 41: 293-304.
- [8] CHERVIN C, TRIANTAPHYLIDIS C, LIBERT M F, et al. Reduction of wound-induced respiration and ethylene production in carrot root tissues by gamma irradiation[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 1992, 2: 7-17.
- [9] CHENG Shunchang, XU Fangxu, FU Lin, et al. Effect of twice treatment with different cyclopropene ethylene inhibitors on postharvest ethylene biosynthesis and gene expression of tomato fruits[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2013,

- 32(5):474-480.(in Chinese)
- [10] PALASH B,EAST A R,HEWETT E W,et al. Intermittent warming interactions on the ripening of green mature tomatoes[J]. **Acta Horticulturae**, (ISHS) 880:153-160.
- [11] KONG Qiulian,XIU Deren,HU Wenyu,et al. Studies of SO₂ injury during storage for Niunai grape variety and its control[J]. **Journal of Fruits Science**,2001,18(1):28-31.(in Chinese)
- [12] WANG Lei,ZHANG Zide,ZHANG Xiaona,et al. Effects of 1-MCP treatment on ethylene biosynthesis metabolism of fig fruits during storage[J]. **Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology**,2013,13(4):119-124.(in Chinese)
- [13] AOKI K,YANO K,SUZUKI A,et al. Large-scale analysis of full-length cDNAs from the tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivar Micro-Tom,a reference system for the *Solanaceae* genomics[J]. **BMC Genomics**,2010,11:210.
- [14] JAFARI Z,HADDAD R,HOSSEINI R,et al. Cloning,identification and expression analysis of ACC oxidase gene involved in ethylene production pathway[J]. **Mol Biol Rep**,2013,40(2):1341-1350.
- [15] M Expósito-Rodríguez,BORGES A A,A Borges-Pérez,et al. Selection of internal control genes for quantitative real-time RT-PCR studies during tomato development process[J]. **BMC Plant Biol**,2008,8:131.
- [16] FU Xiumei,ZHU Honglin,ZHOU Xiu,et al. Cloning of ACC oxidase gene cDNA from tomato and construction of three plant expression vectors[J]. **Acta Agriculturae Boreali-Sinica**,2009,24(supplement):1-4. (in Chinese)
- [17] WANG Ying,KONG Junhua,CHEN Weiwei,et al. Fruit ripening-related transcription factors in tomato[J]. **Acta Horticulturae Sinica**,2014,41(9):1181-1820. (in Chinese)
- [18] PAUL W O,LU M W,LOVERINE P T,et al. Reversible inhibition of tomato fruit senescence by antisense RNA[J]. **Science**,1991,254(5030):437-439.
- [19] ZHAO Tong,YU Sihan,WEI Qiang,et al. Effects of harvest ripeness on storage quality of tomato fruits[J]. **Chinese Agricultural Science Bulletin**,2015,31(7):241-245. (in Chinese)
- [20] STRYDOM G J,WHITEHEAD C S. The effect of ionizing radiation on ethylene sensitivity and postharvest ripening of banana fruit[J]. **Scientia Horticulturae**,1990,41:293-304.
- [21] WANG Yu,WANG Baogang,LI Lite. Effects of electric fields on quality of mature-green tomato fruits during storage[J]. **Food Science**,2010,31(20):434-438.(in Chinese)
- [22] WANG Yu,WANG Baogang,LI Lite. Effect of two types of high voltage electric fields treatments on the storage quality of mature green tomato fruit[J]. **Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery**,2010,41(7):123-127. (in Chinese)
- [23] CHENG Lei,MA Rong,XU Fangxu,et al. Effect of different concentrations of 1-Pent CP on postharvest physiology and quality of tomato fruits[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2013,32(1):30-36.(in Chinese)
- [24] ZHAO Kejian,WANG Hong. A study on the effects of gamma radiation on the respiration and ethylene production of apple fruit [J]. **Acta Horticulturae Sinica**,1987,14(1):35-39.(in Chinese)
- [25] 李兴亮. 苹果果实发育及成熟进程中乙烯发生的信号传导机制[D]. 北京:中国农业大学,2014.
- [26] ZHANG Wangshu,ZHENG Jintu,WANG Guoyun,et al. Changes in respiratory rate,ethylene production rate and quality of postharvest Chinese bayberry fruits with different maturities[J]. **Journal of Plant Physiology and Molecular Biology**,2005,31(4):417-424.(in Chinese)
- [27] ZUO Jinhua,CHEN Anjun,SUN Aidong,et al. Research progress on the factors related to tomato fruit ripening and senescence [J]. **Scientia Agricultura Sinica**,2010,43(13):2724-2734.(in Chinese)
- [28] LIU Le,RAO Jingping,CHANG Xiaoxiao,et al. Effects of propylene and 1-methylcyclopropene on expressions of ACC synthase and ACC oxidase genes in persimmon fruits[J]. **Scientia Agricultura Sinica**,2009,42(6):2092-2097.(in Chinese)