

叶力瑕, 牛耀星, 王燕, 等. 低剂量电子束辐照对徐香猕猴桃生理品质与氧化酶的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 355–362.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090168

YE Lixia, NIU Yaoxing, WANG Yan, et al. Effects of Low Dose Electron Beam Irradiation on Physiological Quality and Oxidase of Kiwifruit Xuxiang[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 355–362. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090168

· 贮运保鲜 ·

低剂量电子束辐照对徐香猕猴桃生理品质与氧化酶的影响

叶力瑕¹, 牛耀星¹, 王 燕¹, 蔚江涛², 白俊青², 罗安伟^{1,*}
(1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西咸阳 712100;
2.杨凌核盛辐照技术有限公司, 陕西咸阳 712100)

摘 要: 为明确低剂量电子束辐照对徐香猕猴桃采后生理品质以及相关氧化酶的影响。以徐香猕猴桃为试验材料, 经 0 (对照)、200 和 400 Gy 低剂量电子束进行辐照后, 于温度 0~1 ℃、相对湿度 90%~95% 冷库中贮藏, 定期测定硬度、失重率、可溶性固形物含量、可滴定酸、呼吸速率、总叶绿素、维生素 C、丙二醛、氧化酶活性指标, 研究低剂量电子束对猕猴桃采后贮藏品质的影响。结果表明, 低剂量电子束辐照处理可以显著抑制猕猴桃硬度、失重率、可滴定酸及维生素 C 含量的下降, 延缓可溶性固形物含量上升, 降低呼吸速率, 在贮藏后期有效抑制了叶绿素的分解, 减少丙二醛含量的积累。在贮藏期 126 d 时, 200 和 400 Gy 处理组的硬度分别比对照组高 58.96% 和 82.45%, 失重率分别比对照组低 12.4% 和 27.27%。同时, 不同辐照处理组均能保持较低的多酚氧化酶活性水平, 且 400 Gy 辐照处理组过氧化物酶与过氧化氢酶活性最高峰峰值比对照组高 43.63% 和 21.36%。综合认为, 低剂量电子束辐照可以通过影响猕猴桃采后贮藏生理品质和氧化酶活性来延缓果实衰老, 从而达到猕猴桃保鲜的目的, 且 400 Gy 剂量电子束辐照组效果最好。该研究为低剂量电子束辐照技术在猕猴桃贮藏方面的应用提供了理论依据。

关键词: 电子束辐照, 猕猴桃, 品质, 氧化酶

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)14-0355-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090168

本文网刊:



Effects of Low Dose Electron Beam Irradiation on Physiological Quality and Oxidase of Kiwifruit Xuxiang

YE Lixia¹, NIU Yaoxing¹, WANG Yan¹, YU Jiangtao², BAI Junqing², LUO Anwei^{1,*}

(1.College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Xianyang 712100, China;

2.Yangling Hesheng Irradiation Technologies Co., Ltd., Xianyang 712100, China)

Abstract: To clarify the low dose electron beam irradiation on the effect of postharvest physiological quality and related oxidase of Xuxiang kiwifruit. Using Xuxiang kiwifruit as the test materials, after irradiation with low dose electron beams of 0 (control), 200 and 400 Gy, the samples were stored in cold storage with temperature of 0~1 ℃ and relative humidity of 90%~95%, then regularly tested the hardness, weight loss, total soluble solid, titratable acid, respiration rate, total chlorophyll, vitamin C, malondialdehyde and oxidase activity indexes to study the effect of low dose electron beam on physiological qualities of postharvest Xuxiang kiwifruit. The results showed that low dose electron beam irradiation could significantly inhibit the decrease of hardness, weight loss, titratable acid and vitamin C, slow the increase of total soluble solid, reduce respiration rate, effectively inhibit the decomposition of chlorophyll and reduce the accumulation of malonaldehyde in kiwifruit during the later stage of storage. At 126 days of storage, the hardness of 200 and 400 Gy

收稿日期: 2022-09-16

基金项目: 陕西省重点研发计划 (2018ZDXM-NY-056), 企业委托项目 (TG20220611)。

作者简介: 叶力瑕 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果品蔬菜贮藏与加工, E-mail: hutaoxy@126.com。

* 通信作者: 罗安伟 (1971-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 果品蔬菜贮藏与加工, E-mail: luowanwei@nwsuaf.edu.cn。

treatment groups was 58.96% and 82.45% higher than that of control group, and the weight loss rate was 12.4% and 27.27% lower than that of control group respectively. Meanwhile, the activity levels of polyphenol oxidase in different irradiation groups were kept low, and the peak values of peroxidase and catalase activities in 400 Gy irradiation group were higher than those in the control group by 43.63% and 21.36%. In conclusion, low dose electron beam irradiation can delay fruit senescence by affecting the physiological quality and oxidase activity of postharvest kiwifruit storage, so as to achieve the purpose of keeping kiwifruit fresh. And the effect of 400 Gy dose electron beam irradiation group was the best. The study provided a theoretical basis for the application of low dose electron beam irradiation in kiwifruit storage.

Key words: electron beam irradiation; kiwifruit; quality; oxidase

猕猴桃富含维生素 C 和膳食纤维, 具有极高的营养价值, 已进入世界主流消费水果前列^[1]。但猕猴桃属于呼吸跃变型果实, 采后易腐烂变质, 组织结构被破损, 从而导致生理品质下降, 严重影响了果实的贮藏品质^[2]。果实的腐烂变质与细胞分子的氧化损伤有着密切关系, 活性氧对细胞分子造成的氧化损伤会导致不可逆的有害变化^[3], 除此之外, 过量的活性氧会引起脂质过氧化, 从而导致丙二醛(MDA)积累^[4]。目前, 有研究表明, 通过调控氧化酶活性, 包括过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、多酚氧化酶(PPO)等, 可以有效抑制果实中活性氧的产生、降低氧化损伤的程度, 从而减缓果实的褐变。因此, 保持良好的采后品质对猕猴桃贮藏保鲜具有重要的现实意义^[5]。

电子束辐照是一种非热食品保鲜技术, 通常可以杀灭食品中的害虫, 消除食品中的病原微生物, 具有杀菌效果显著、实施剂量可调、维持果蔬组织结构和营养成分、无污染、无残留等优点^[6], 已广泛应用于食品贮藏保鲜与加工行业^[7]。近年来, 许多研究表明适宜剂量的电子束辐照可以延长果蔬的贮藏期, 在芒果^[8]、双孢蘑菇^[9]、鲜蘑菇^[10]、哈密瓜^[11]、樱桃^[12]等果实中均起到了良好的保鲜效果。张玥等^[13]研究表明低剂量(0~0.9 kGy)辐照可以减少板栗的菌落总数, 延长板栗的贮藏期。孙大洋等^[14]以辐照剂量为 0.1、0.3、0.5、0.7、1.0 kGy 的高能电子束对槟榔芋进行辐照处理, 发现低剂量(0.1、0.3 kGy)电子束辐照可以显著降低槟榔芋的腐烂率, 具有良好的保鲜效果, 而高剂量(1.0 kGy)会对槟榔芋造成损伤。国内关于电子束辐照对猕猴桃采后保鲜的研究报道较少, 且大多数研究采后生理品质和软化相关酶的影响^[7,15-16], 关于低剂量电子束辐照对猕猴桃采后氧化酶的影响缺乏报道。因此, 本研究旨在探究低剂量电子束辐照对徐香猕猴桃采后冷藏期间生理生化品质与氧化酶活性的影响, 该研究为推动电子束辐照技术在猕猴桃保鲜领域的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

徐香猕猴桃 于 2021 年 10 月 7 日在陕西省眉县猕猴桃基地(纬度 34°17' N 和经度 107°46' E)可溶性固形物含量达到 6.5%~7.0% 时采收; 聚乙烯袋厚度为 0.03 mm, 于陕西省眉县猕猴桃基地购买; 氢

氧化钠、酚酞、无水乙醇、三氯乙酸、磷酸、愈创木酚、冰乙酸、邻苯二酚、抗坏血酸 均为分析纯, 广东光华科技股份有限公司; 红菲咯啉、三氯化铁、Triton X-100、硫代巴比妥酸溶液、聚乙二醇 6000、聚乙烯吡咯烷酮、二硫苏糖醇 均为分析纯, 北京索莱宝科技有限公司。

电子束辐照装置、DZ-10MeV/20kW 高能电子直线加速器 扫描宽度为 80 cm, 陕西杨凌核盛辐照技术有限公司; TAXT PLUS/50 物性测定仪 探头直径为 0.5 cm, 英国 Stable Micro Systems 公司; T-203 电子天平 北京科普尔科技发展有限公司; DK-98-11-A 电热恒温水浴锅 天津市泰斯特仪器有限公司; PAL-1 数显糖度计 日本爱拓有限公司; HC-3018R 高速冷冻离心机 安徽中科中佳科学仪器有限公司; N6000 双光束紫外分光光度计 上海佑科仪器仪表有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 电子束处理 根据李瑞娟等^[6]的研究方法略作调整, 室温下以 0(作为对照)、200 和 400 Gy 的剂量进行辐照。将大小均一、无机械伤、成熟度一致的猕猴桃果实装入 0.03 mm 厚的聚乙烯袋中单层摆放于辐照托盘中, 通过传送带运送到辐照室进行辐照。将重铬酸银剂量计分别放在猕猴桃正面和背面进行剂量跟踪, 200、400 Gy 处理组实际辐照剂量为 230、410 Gy。辐照完成后 1 h 内运回冷库, 在冷库中开袋预冷 12 h, 冷库温度为 0~1 °C, RH 为 90%~95%。每 14 d 取一次样测定各项品质指标, 重复 3 次, 以果肉硬度低于 0.5 kg/cm² 时(猕猴桃已成熟至可食用或腐烂)^[17] 结束试验。

1.2.2 基础指标测定

1.2.2.1 硬度 每个处理组随机取 5 个果实, 在其赤道部位每 120°取 1 个点, 削去果皮, 使用物性测定仪, 在 TPA 模式下重复测定 3 次, 测试模式为 Messure Force in Compression, 使用直径 0.5 cm 的 P2 探头, 预压速率 1.00 mm/s, 下压速率 5.00 mm/s, 压后上行速率 5.00 mm/s, 两次压缩中间停顿 5.00 s, 单位为 kg/cm²。

1.2.2.2 失重率 每个处理组在第 0 d 随机取 20 个果实进行称重, 即为贮前果实质量。每 14 d 称取固定果实的重量, 重复 3 次, 取平均值, 单位 %。

$$\text{失重率}(\%) = \frac{\text{贮前果实质量} - \text{贮后果实质量}}{\text{贮前果实质量}} \times 100$$

1.2.2.3 可溶性固形物(TSS) 每个处理组每 14 d 随机取 5 个果实, 使用数显糖度计测定 TSS 质量分数, 单位为 %。

1.2.2.4 可滴定酸(TA) 参照曹建康等^[18]的酸碱中和法略作修改, 称取 5.0 g 样品置于研钵中磨碎, 转移到 50 mL 容量瓶中摇匀, 于 8000 r/min 离心机中离心 15 min。取 10.0 mL 上清液, 转入三角瓶中, 加入 2 滴 1% 酚酞指示剂, 用 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液滴定。滴定至溶液初显粉色并在 0.5 min 内不褪色时为终点。TA 以柠檬酸计, 重复 3 次。

1.2.2.5 呼吸速率 参照周冉冉^[10]的方法略作修改, 每 14 d 称取 1 kg 果实放置于密封干燥器中, 同时放入二氧化碳测定仪, 并开始计时。30 min 后开始读数, 即为初始数据。1 h 后再读一次数, 重复三次。单位为 CO₂ mg/(kg·h)。

$$X = \frac{(W_1 - W_2) \times V \times M}{V_0 \times m \times t} \times 100$$

式中: X: 呼吸强度(mg·kg⁻¹·h⁻¹); W₁: 测定前密闭容器中 CO₂ 含量(%); W₂: 测定后密闭容器中 CO₂ 含量(%); V: 密闭容器总体积(L); M: CO₂ 的摩尔质量(g·mol⁻¹); V₀: 测定温度下的 CO₂ 摩尔体积(L·mol⁻¹); m: 样品质量(g); t: 测定时间(h)。

1.2.2.6 总叶绿素 参考王凤婷^[19]以及盛璐^[20]的浸提法略作修改, 称取 1.0 g 果实样品研磨后放入 10 mL 试管中, 加入 95% 无水乙醇在 30 ℃ 下浸提 14 h, 并用试管塞塞紧, 浸提均在黑暗中。当果肉组织完全变白时, 利用紫外可见分光光度计仪器测定波长为 649、665 nm 处的吸光度并记录, 将吸光度根据 Arnon 公式^[21]计算, 得出叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素的总含量, 重复 3 次, 单位为 μg/g。

$$\text{Chla} = \frac{(13.95D_{665} - 6.88D_{649}) \times V}{m}$$

$$\text{Chlb} = \frac{(24.96D_{649} - 7.32D_{665}) \times V}{m}$$

$$\text{Chl} = \text{Chla} + \text{Chlb}$$

式中: Chla、Chlb 和 Chl 分别为叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的含量, μg/g; V 为样品提取液总体积, mL; m 为样品质量, g; D₆₆₅、D₆₄₉ 分别为 649、665 nm 处的吸光度值。

1.2.2.7 维生素 C(V_C) 根据曹建康等^[18]的分光光度计法, 称取 10.0 g 样品于研钵中, 加入 20 mL 50 g/L 三氯乙酸溶液, 冰浴研磨后转入 100 mL 容量瓶中, 并用 50 g/L 三氯乙酸溶液定容, 混合、提取 10 min 后过滤。取 1.0 mL 样品提取液于试管中, 加入 1.0 mL 50 g/L 三氯乙酸溶液, 再加入 1.0 mL 无水乙醇、0.5 mL 0.4% 磷酸-乙醇溶液、1.0 mL 5 g/L 红菲咯啉-乙醇溶液和 0.5 mL 0.3 g/L FeCl₃-乙醇溶

液。在波长 534 nm 处测定吸光度值, 重复 3 次, 单位为 mg/100 g。

1.2.2.8 丙二醛(MDA) 参考曹建康等^[18]的方法。称取 1.0 g 样品, 加入 5.0 mL 100 g/L 三氯乙酸溶液, 冰浴研磨后于 10000 r/min 冷冻离心机 20 min。取 2.0 mL 上清液, 加入 2.0 mL 0.67% 硫代巴比妥酸溶液, 混合后在沸水浴中煮沸 20 min, 取出冷却后再离心一次。分别测定在 450、532 和 600 nm 波长处的吸光度值, 重复 3 次, 单位为 nmol·g⁻¹。

1.2.3 氧化酶活性测定 POD、CAT、PPO 活性参考曹建康等^[18]的方法。具体如下: POD: 称取 1.0 g 样品加入 1.0 mL 提取缓冲液(含 1 mmol 聚乙二醇 6000、4% 聚乙烯吡咯烷酮和 1% Triton X-100), 冰浴研磨后于 10000 r/min 冷冻离心机离心 30 min, 收集上清液即为酶提取液, 低温保存备用。

取一支试管, 加入 3.0 mL 25 mmol/L 愈创木酚溶液和 0.5 mL 酶提取液, 再加入 200 μL 0.5 mol/L 过氧化氢溶液, 同时开始计时。在反应后 15 s 开始测定在 470 nm 处吸光度值, 并每隔 1 min 记录一次, 连续测定 6 个点。重复 3 次。以每克猕猴桃果肉样品每分钟吸光度变化值增加 0.01 为 1 个酶活单位, 酶活用 U/g 表示。

PPO: 取一支试管, 加入 4.0 mL 50 mmol/L、pH5.5 的乙酸-乙酸钠溶液和 1.0 mL 50 mmol/L 邻苯二酚溶液, 最后加入 100 μL 上述酶提取液, 同时开始计时。在反应后 15 s 开始测定在 420 nm 处吸光度值, 并每隔 1 min 记录一次, 连续测定 6 个点。重复 3 次。以每克猕猴桃果肉样品每分钟吸光度变化值增加 0.01 为 1 个酶活单位, 酶活用 U/g 表示。

CAT: 称取 1.0 g 样品加入 1.0 mL 提取缓冲液(含 5 mmol 二硫苏糖醇和 5% 聚乙烯吡咯烷酮), 冰浴研磨后于 10000 r/min 冷冻离心机离心 30 min, 取 100 μL 上清液于试管中, 加入 2.9 mL 20 mmol/L 过氧化氢溶液, 同时开始计时。在反应后 15 s 开始测定在 240 nm 处吸光度值, 并每隔 30 s 记录一次, 连续测定 6 个点。重复 3 次。以每克猕猴桃果肉样品每分钟吸光度变化值减少 0.01 为 1 个酶活单位, 酶活用 U/g 表示。

1.3 数据处理

试验数据以平均值±标准误差的形式表示, 采用 SPSS 26.0 软件对获得的数据进行方差分析, 用于完全随机设计试验采用 Duncan 法进行多重比较。P<0.05、P<0.01 的值表示有统计学意义。采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 电子束辐照对果实硬度和失重率的影响

果实软化是果实采后品质降低的一大特征, 且硬度是评价果实软化最直观的指标。在贮藏期间, 如图 1A 所示, 在贮藏期 0~56 d 内, 对照组果肉硬度随

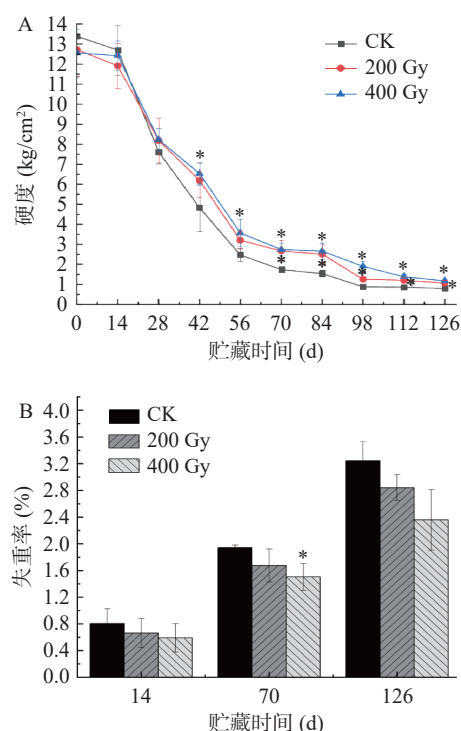


图1 不同剂量电子束辐照处理对徐香猕猴桃硬度(A)和失重率(B)的影响

Fig.1 Effect of different doses of electron beam irradiation on hardness (A) and weight loss (B) in Kiwifruit Xuxiang

注: *表示同一贮藏期辐照处理组与对照组之间存在显著性差异($P<0.05$);图2~图5同。

贮藏期延长迅速下降,辐照组的果肉有同样相似的下降趋势,随即缓慢下降。贮藏期42和56 d电子束辐照组的果实硬度均显著高于对照组($P<0.05$)。贮藏期70~126 d时400 Gy辐照处理组相对于对照组具有极显著性差异($P<0.01$)。说明电子束辐照处理可以有效减缓猕猴桃软化。

失重率是评估果实采后品质的另一个重要指标^[22]。如图1B,随贮藏期增加,各处理组失重率均上升。对照组失重率始终高于电子束辐照处理组,且在贮藏期126 d时对照组失重率(3.24%)比200和400 Gy电子束辐照处理组分别高0.4%和0.88%。在贮藏期70 d时,400 Gy辐照处理组显著减少了猕猴桃的水分流失($P<0.05$)。除此之外,不同剂量辐照处理组与对照组之间差异不显著($P>0.05$)。说明低剂量电子束辐照可以降低猕猴桃的失重率,且400 Gy剂量辐照的猕猴桃效果更好。

2.2 电子束辐照对TSS和TA的影响

电子束辐照处理对冷藏期间猕猴桃TSS的影响如图2A所示,在贮藏期0~70 d时TSS含量快速上升,贮藏期70~126 d时TSS含量增幅减小,趋于稳定。并在贮藏期28 d时辐照组TSS含量均极显著低于对照组($P<0.01$),贮藏期112~126 d时400 Gy辐照组TSS含量显著比对照组低($P<0.05$),电子束辐照处理组之间没有显著性差异($P>0.05$)。结果表明,电子束辐照可以减少TSS含量的增加。

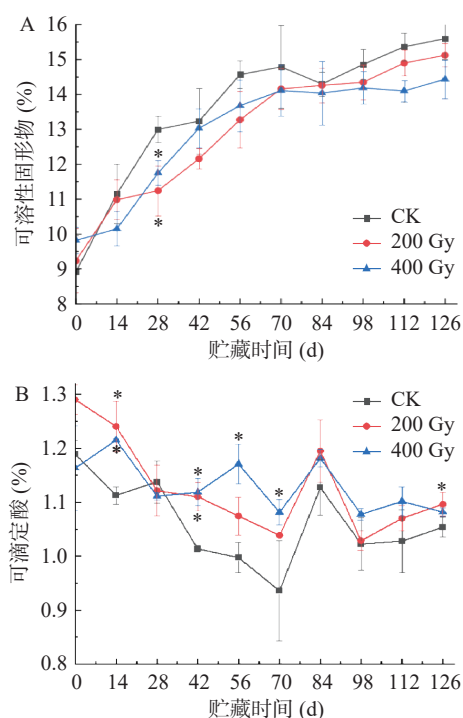


图2 不同剂量电子束辐照处理对徐香猕猴桃TSS(A)和TA(B)的影响

Fig.2 Effect of different doses of electron beam irradiation on TSS (A) and TA (B) in Kiwifruit Xuxiang

电子束辐照处理对冷藏期间猕猴桃TA的影响如图2B所示,在贮藏期14和42 d时辐照处理组显著高于对照组($P<0.05$)。除贮藏期56 d外,辐照处理组之间差异不显著($P>0.05$)。在贮藏前70 d期间,各组TA质量分数呈下降趋势,对照组下降最为明显,下降了21.28%。贮藏期70~126 d时,TA质量分数先上升后下降,总体来看辐照处理组TA质量分数高于对照组。说明辐照处理能够保持TA的含量,维持猕猴桃品质。

2.3 电子束辐照对总叶绿素和V_C的影响

叶绿素,包含叶绿素a和叶绿素b,是猕猴桃果实呈现绿色的重要原因^[23],可以作为评价果实新鲜程度的指标。如图3A,在整个贮藏期间,电子束处理组和对照组叶绿素总量均降低。在贮藏28 d后略有上升趋势,随后持续降低。对照组与辐照组以及辐照组之间叶绿素总量差异显著($P<0.05$)。贮藏期28~126 d,400 Gy辐照组显著高于对照组($P<0.05$),且对照组叶绿素总量下降到初始的62.25%。说明电子束处理对叶绿素含量下降有减缓作用,可抑制叶绿素的降解。综合比较,400 Gy辐照处理效果最好。

V_C是衡量猕猴桃品质的主要指标,与酶的氧化分解密切相关^[24]。如图3B所示,在整个贮藏期间,V_C含量逐渐下降。在贮藏期14和42 d时辐照处理组显著高于对照组($P<0.05$)。除贮藏56 d外,辐照处理组之间差异不显著($P>0.05$)。贮藏期70~126 d时,电子束400 Gy剂量辐照组V_C含量显著高于对照组($P<0.05$),整个贮藏期间200 Gy辐照组与对照

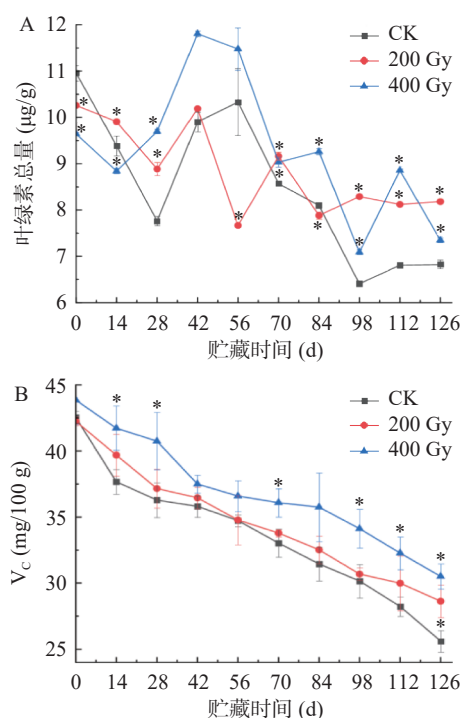


图 3 不同剂量电子束辐照处理对徐香猕猴桃叶绿素总量 (A) 和 V_c (B) 的影响

Fig.3 Effects of different doses of electron beam irradiation on total chlorophyll (A) and V_c (B) in Kiwifruit Xuxiang

组差异不显著 ($P>0.05$)。在贮藏期 126 d 时, 对照组、200 和 400 Gy 电子束辐照组分别从 42.54、42.25 和 43.86 mg/100 g 下降到 25.61、28.63 和 30.51 mg/100 g。说明低剂量电子束辐照可以减少猕猴桃在采后贮藏期间 V_c 的损失率。

2.4 电子束辐照对呼吸速率的影响

如图 4 所示, 在贮藏期 14~28 d 时, 猕猴桃呼吸速率先呈上升趋势, 出现呼吸高峰后迅速下降, 对照组、200 和 400 Gy 辐照处理组呼吸高峰分别为 15.15、14.42 和 13.26 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 。在贮藏期 28~126 d 时呼吸速率缓慢下降, 且在整个贮藏期间经电子束辐照处理的猕猴桃的呼吸速率受到了明显的抑制。除了贮藏期 98~126 d 时 400 Gy 剂量辐照组与对照组存在显著差异性 ($P<0.05$), 其余贮藏时间辐照

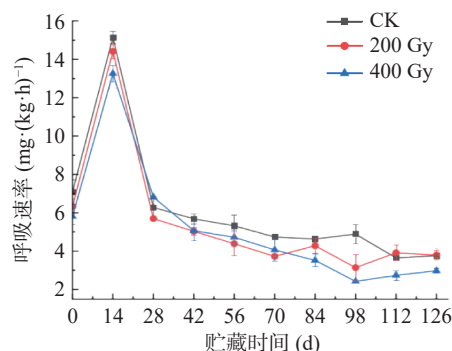


图 4 不同剂量电子束辐照处理对徐香猕猴桃呼吸速率的影响

Fig.4 Effect of different doses of electron beam irradiation on respiration rate in Kiwifruit Xuxiang

组与对照组差异不显著 ($P>0.05$)。

2.5 电子束辐照对 MDA 以及相关氧化酶活性的影响

如图 5A 所示, MDA 含量在冷藏期间各组呈现大致相同的上升趋势, 但辐照组始终低于对照组。随贮藏时间延长, 对照组 MDA 含量从 2.13 nmol/g 增加至 4.24 nmol/g。贮藏期 28~84 d 时, 400 Gy 辐照组显著低于对照组 ($P<0.05$)。在贮藏期 28、42 和

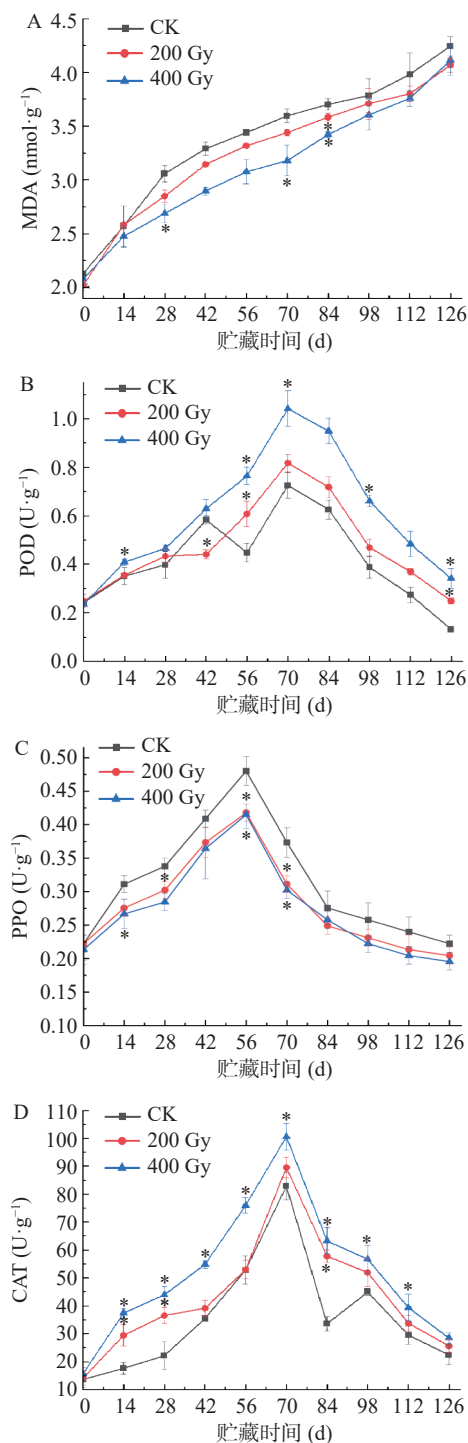


图 5 不同剂量电子束辐照处理对徐香猕猴桃 MDA 含量 (A) 以及 POD 活性 (B)、PPO 活性 (C) 和 CAT 活性 (D) 的影响

Fig.5 Effect of different doses of electron beam irradiation on activities of MDA content (A), POD activity (B), PPO activity (C) and CAT activity (D) in Kiwifruit Xuxiang

84 d 时, 200 Gy 辐照组显著低于对照组($P<0.05$)。结果表明, 电子束辐照能抑制 MDA 含量积累, 延缓猕猴桃的衰老过程。

如图 5B 所示, 在贮藏期前 70 d 时, 各组猕猴桃 POD 活性均呈上升趋势, 逐渐达到峰值。在贮藏期第 70 d 时, 辐照组 POD 活性高于对照组, 且 200 和 400 Gy 电子束辐照组 POD 活性分别是对照组的 1.13 和 1.51 倍。在贮藏期 70 d 后各组 POD 活性持续性下降。贮藏期 56~126 d 时 400 Gy 辐照组显著高于对照组($P<0.05$), 并且在贮藏期 42 d 后, 辐照组之间存在显著性差异($P<0.05$)。结果表明低剂量电子束辐照可保持较高的 POD 活性, 其中 400 Gy 辐照处理组效果更为显著。

如图 5C 所示, 除贮藏期 28、56 和 70 d 外, 不同电子束辐照处理组与对照组之间 PPO 活性均差异性不显著($P>0.05$), 电子束辐照处理组之间 PPO 活性差异性也不显著($P>0.05$)。在贮藏前 14 d 时, 对照组 PPO 活性增加了 40%, 而 200 和 400 Gy 辐照组仅增加了 24% 和 25%。在贮藏前 56 d 中, 各组 PPO 活性逐渐上升至峰值, 对照组、200 和 400 Gy 辐照组分别达到最大值 0.48、0.42 和 0.41 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ 。同时, 对照组与辐照组 PPO 活性显示出类似的走势, 但辐照组整体明显比对照组 PPO 活性低。结果表明, 电子束辐照可以钝化 PPO 活性, 延缓猕猴桃的氧化衰老。

如图 5D 所示, 在整个贮藏期间, 各组 CAT 活性呈现出先上升后下降的趋势。在贮藏期 70 d 时, 对照组、200 和 400 Gy 电子束辐照组 CAT 活性均达到峰值, 分别为 82.86、89.55 和 100.57 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ 。除贮藏期 112~126 d 外, 400 Gy 辐照组 CAT 活性始终显著高于对照组($P<0.05$)。200 Gy 辐照组 CAT 活性仅在贮藏期 14、28 和 84 d 时显著高于对照组($P<0.05$), 因此总的来说 200 Gy 辐照组与对照组差异不显著。结果表明, 电子束辐照可以使猕猴桃 CAT 活性在贮藏期间保持较高水平, 有效延缓猕猴桃采后的衰老进程。

3 讨论

果实的硬度和失重率是体现果实衰老退化的直观指标, 其中硬度主要反映了果实的成熟度和萎焉程度, 失重率则是反映果实的新鲜程度^[25]。本研究结果表明电子束辐照处理可以有效的减缓徐香猕猴桃硬度下降趋势以及失重率的上升趋势。Barkaoui 等^[26]研究表明经电子束辐照处理的草莓重量损失受到的影响小于对照组, 且硬度的下降速率减缓, 与本试验具有相似的结果。同时, 与电子束辐照处理樱桃^[12]、金丝绞瓜^[27]、芒果^[28]等保持良好的硬度以及降低失重率的研究结果相一致。

TSS 含量与 TA 含量构成固酸比, 会对果实的口感造成一定影响, 因此 TSS 和 TA 可以影响果实的营养和风味。在果实贮藏期, TSS 含量中糖分的积累

量大于呼吸消耗的分解量, 从而 TSS 含量呈上升趋势。TA 决定了果实的酸度, 随贮藏期延长而逐渐被消耗^[29]。以葡萄柚和柠檬为例, 有研究发现 0.4 和 1 kGy 的电子束辐照对葡萄柚以及柠檬的 TSS 含量和 TA 含量影响很小^[30], 但本文发现 0.4 kGy 的电子束辐照能较好的减缓猕猴桃 TSS 含量的上升和 TA 含量的下降, 这可能是由于不同品种试材对辐照耐受能力不同所致。而在本研究中, 电子束辐照可以减缓 TSS 的增加, 降低 TA 的消耗。郭一丹等^[31]使用电子束对冬枣进行辐照结果表明辐照组 TSS 含量低于对照组, TA 含量逐渐下降, 有利于保持果实的品质, 结果与本研究一致。

呼吸作用是导致采后果实衰老的主要过程, 并与一系列氧化反应密切相关。通过将存在有氧底物中的糖转化为能量, 从而加快衰老进程^[32]。在贮藏前期, 呼吸速率较低, 果实的食用品质良好, 随后进入贮藏中期时, 呼吸速率急增, 同时说明果实进入了后熟阶段, 最后随继续贮藏, 果实逐渐开始腐烂^[33]。本研究表明电子束辐照可以有效抑制徐香猕猴桃呼吸强度, 有利于减缓猕猴桃后熟的进程, 可以保持果实的食用品质。这一研究结果分别在哈密瓜^[34]、芒果^[35]、葡萄^[36]等呼吸跃变型果实上有类似的体现。

抑制叶绿素降解在植物衰老方面的抗氧化系统中发挥着重要作用, 在贮藏过程中, 猕猴桃果肉由于叶绿素降解导致绿色逐渐消失变为黄色的过程, 反映了果实的衰老^[37]。同时 V_C 也是一种抗氧化化合物, 与叶绿素一样对果实的抗氧化、抗衰老发挥重要作用, 可以维持果实的营养品质^[28]。本研究结果表明, 电子束辐照处理组比对照组的果实能更好的保持总叶绿素和 V_C , 王秋芳等^[38]以及黄略略等^[39]也分别在葡萄和荔枝中证明了类似的结果。Pongsri 等^[37]研究表明电子束辐照延缓了叶绿素降解过程以及增加了 V_C 含量, 这些结果说明电子束辐照有可能应用于猕猴桃果实或其他果实以延缓成熟衰老的进程。

MDA 一般被认为是脂质过氧化的指标, 可以降低膜的完整性, 导致膜渗漏增加以及细胞的衰老^[40]。与抗氧化系统密切相关的酶主要有 POD、PPO、CAT 等氧化酶。POD 是果实中重要的过氧化物清除剂, 可以通过清除自由基提高过氧化物的抗逆反应^[34]。PPO 是果实果实褐变的主要原因。褐变是由于氧化二酚产生邻醌, 邻醌聚合形成棕色产物。CAT 主要作用是通过去除 H_2O_2 , 降低活性氧对细胞成分的破坏性影响, 来保持膜的完整性^[40]。随着贮藏期延长, 果蔬细胞逐渐破裂, 细胞膜流动性变差, 细胞结构被破坏, 导致酶和底物接触, 从而发生反应使果实成熟衰老。从本研究结果可以看出, 相比于对照组, 低剂量电子束辐照组可以明显减少 MDA 的积累以及 PPO 活性的增加, 抑制细胞膜脂过氧化进程。保持较高的 POD 和 CAT 活性。据报道, 适宜剂量的电子束辐照可以抑制双孢菇 MDA 的积累速率, 增强

POD 和 CAT 活性,保持较低的 PPO 活性,延缓双孢菇褐变^[15,40]。Nguyen 等^[41]研究用 500 Gy 电子束辐照芒果可以激活 CAT 活性,减少活性氧的产生。类似的研究结果同样体现在哈密瓜^[34]、巨峰葡萄^[38]、香菇^[42]等果实上。此外,王秋芳等^[38]研究表明高剂量的电子束辐照会对巨峰葡萄品质造成不良影响,促进 PPO 活性的上升,原因是过高剂量电子束辐照会破坏细胞膜系统,并且不同品种试材对辐照耐受能力不同。

4 结论

本试验采用 200 和 400 Gy 电子束辐照方式研究了对其生理品质和氧化酶的影响,发现电子束辐照处理组各项生理生化指标都优于对照组。随贮藏期延长,各处理组硬度均呈下降趋势,对照组下降最为明显,下降了 94.07%。且在贮藏期最后一天,相对于 200 Gy 辐照组,400 Gy 辐照组 POD 和 CAT 活性均极显著高于对照组。因此,400 Gy 剂量组在冷藏期间对于猕猴桃的保鲜效果更佳,在减缓猕猴桃褐变衰老的过程中体现了重要作用,更有效降低了猕猴桃贮藏期间的腐烂变质。低剂量电子束辐照在猕猴桃贮藏保鲜中具有应用价值,可以保持猕猴桃的食用价值,增强贮藏性能。在后续的研究中,可分析贮藏期猕猴桃基因表达、转录组等的变化规律,进一步深入探究低剂量电子束辐照对猕猴桃贮藏保鲜效果的影响。

参考文献

- [1] RICHARDSON D P, ANSELL J, DRUMMOND L N. The nutritional and health attributes of kiwifruit: A review[J]. *European Journal of Nutrition*, 2018, 57(8): 2659–2676.
- [2] 陈璐,张小丽,高柱,等.猕猴桃采后贮藏保鲜的影响因素和主要技术研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(13): 87–92, 99. [CHEN L, ZHANG X L, GAO Z, et al. Advances on influencing factors and main techniques of kiwifruit storage and preservation after harvest[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(13): 87–92, 99.]
- [3] ZHANG Y, GONG Y, CHEN L, et al. Hypotaenidia delays senescence of peach fruit by regulating reactive oxygen species metabolism[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 253: 295–302.
- [4] TIAN S, QIN G, LI B. Reactive oxygen species involved in regulating fruit senescence and fungal pathogenicity[J]. *Plant Molecular Biology*, 2013, 82(6): 593–602.
- [5] LI R. Electron-beam irradiation delayed the postharvest senescence of kiwifruit during cold storage through regulating the reactive oxygen species metabolism[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021: 8.
- [6] 李瑞娟,杨淑霞,王丹,等.高能电子束辐照对猕猴桃细胞壁降解相关酶活性和基因表达的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(1): 326–334. [LI R J, YANG S X, WANG D, et al. Effects of high energy electron beam irradiation on cell wall degradation related enzyme activities and gene expression of Kiwifruit[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(1): 326–334.]
- [7] NGUYEN T T. Electron beam radiation delayed the disassembly of cell wall polysaccharides in harvested mangoes[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021: 9.
- [8] TRUC N T, UTHAIRATANAKIJ A, SRILAONG V, et al. Effect of electron beam radiation on disease resistance and quality of harvested mangoes[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, 180: 109289.
- [9] YURTTAS Z S, MOREIRA R G, CASTELL-PEREZ E. Combined vacuum impregnation and electron-beam irradiation treatment to extend the storage life of sliced white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. *Journal of Food Science*, 2014, 79(1): E39–E46.
- [10] 周冉冉,高虹,范秀芝,等.~(60)Co-γ射线和电子束辐照对鲜香菇保鲜效果的初步研究[J]. *核农学报*, 2019, 33(3): 490–497. [ZHOU R R, GAO H, FAN X Z, et al. Preliminary comparison of preservation effect of fresh *Lentinus edodes* by ~(60)Co-γ ray and electron beam irradiation[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(3): 490–497.]
- [11] MAHMOUD B S M. Effects of X-ray treatments on pathogenic bacteria, inherent microflora, color, and firmness on whole cantaloupe[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012: 5.
- [12] 戚蓉迪,颜伟强,岳玲,等.电子束辐照对进口甜樱桃保鲜效果的影响[J]. *核农学报*, 2014, 28(5): 839–844. [QI R D, YAN W Q, YUE L, et al. Effect of electron beam irradiation on fresh-keeping of sweet cherry[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(5): 839–844.]
- [13] 张玥,刘伟,靳健乔,等.不同剂量电子束辐照处理对新鲜板栗贮藏效果研究[J]. *保鲜与加工*, 2016, 16(4): 56–60. [ZHANG Y, LIU W, JIN J Q, et al. Storage effect of different doses of electron beam irradiation on fresh Chinese chestnut[J]. *Storage and Process*, 2016, 16(4): 56–60.]
- [14] 孙大洋,商飞飞,潘中田,等.电子束辐照对槟榔芋贮藏效果的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(8): 135–140. [SUN D Y, SHANG F F, PAN Z T, et al. Effect of electron beam irradiation on storage of areca taro[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(8): 135–140.]
- [15] DONG S, GUO J, YU J, et al. Effects of electron-beam generated X-ray irradiation on the postharvest storage quality of *Agaricus bisporus* [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 80: 103079.
- [16] 周慧娟,叶正文,施春晖,等.高能电子辐照对猕猴桃保鲜效果的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(25): 133–138. [ZHOU H J, YE Z W, SHI C H, et al. Effect of electron beam on fresh-keeping quality of kiwifruit[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(25): 133–138.]
- [17] 黄天姿,梁锦,王丹,等.电子束辐照对猕猴桃品质及抗性系统的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(9): 70–76. [HUANG T Z, LIANG J, WANG D, et al. Effect of electron beam irradiation on quality and resistance system of kiwifruit[J]. *Food Science*, 2021, 42(9): 70–76.]
- [18] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M]. 中国轻工业出版社, 2007. [CAO J K, JIANG W W, ZHAO Y M. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. China Light Industry Press, 2007.]
- [19] 王凤婷,张鑫生,潘洪玉,等.蔬菜叶绿素不同提取方法的比较[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(6): 1–3, 6. [WANG F T, ZHANG X S, PAN H Y, et al. Comparison on different methods of chlorophyll extraction from vegetables[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(6): 1–3, 6.]
- [20] 盛璐,黄媛媛,张茜茹,等.不同提取液对铁线莲“亲爱的”叶绿素含量测定的影响[J]. *赤峰学院学报(自然科学版)*, 2020,

- 36(8): 13–16. [SHENG L, HUANG Y Y, ZHANG Q R, et al. Effects of different extracts on chlorophyll content determination of Clematis "Dear" [J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2020, 36(8): 13–16.]
- [21] 张怀斌. 叶绿素的光学性质及其应用[D]. 济南: 山东师范大学, 2008. [ZHANG H B. Optical properties of chlorophyll and its application [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2008.]
- [22] RASTEGAR S, KHANKAHDANI H H, RAHIMZADEH M. Effects of melatonin treatment on the biochemical changes and antioxidant enzyme activity of mango fruit during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 259: 108835.
- [23] 张鹏, 陈曦冉, 贾晓昱, 等. CO₂ 伤害对软枣猕猴桃风味品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 378–386. [ZHANG P, CHEN X R, JIA X Y, et al. Effects of CO₂ injury on the flavor quality of Actinidia arguta[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 378–386.]
- [24] 罗安伟, 王丹, 梁锦, 等. 侵染青霉菌猕猴桃生理品质与电学特性相关性研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 332–341, 307. [LUO A W, WANG D, LIANG J, et al. Relationship between postharvest physiology, quality and electrical properties of kiwifruit infected with *Penicillium expansum* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 332–341, 307.]
- [25] 耿新丽, 郑贺云, 张翠环, 等. 臭氧对甜瓜贮藏性能的影响研究[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(6): 8–11. [GENG X L, ZHENG H Y, ZHANG C H, et al. Effect of ozone treatments on postharvest storage characteristics of melon fruits[J]. *Storage and Process*, 2021, 21(6): 8–11.]
- [26] BARKAOUI S, MANKAI M, MILOUD N B, et al. E-beam irradiation of strawberries: Investigation of microbiological, physicochemical, sensory acceptance properties and bioactive content [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 73: 102769.
- [27] 李阳, 沙飞, 高月霞, 等. 高能电子束辐照对金丝绞瓜的保鲜效果[J]. 现代食品科技, 2021, 37(2): 171–182. [LI Y, SHA F, GAO Y X, et al. Effect of high energy electron beam irradiation on the preservation of spaghetti squash[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(2): 171–182.]
- [28] 董婷, 高鹏, 蒋毅, 等. 电子束辐照对芒果品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(2): 279–283, 289. [DONG T, GAO P, JIANG Y, et al. Effect of electron beam irradiation on mango quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(2): 279–283, 289.]
- [29] 石彬, 李咏富, 何扬波, 等. ~(60)Co- γ 射线辐照对“贵长”猕猴桃储藏品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(15): 6042–6048. [SHI B, LI Y F, HE Y B, et al. Effect of ~(60)Co- γ ray irradiation on storage quality of "Guichang" kiwifruit[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(15): 6042–6048.]
- [30] RAMAKRISHNAN S R, JO Y, NAM H A, et al. Implications of low-dose e-beam irradiation as a phytosanitary treatment on physicochemical and sensory qualities of grapefruit and lemons during postharvest cold storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 245: 1–6.
- [31] 郭一丹, 李奎, 蔚江涛, 等. 电子束和 ~(60)Co- γ 射线辐照对冬枣的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 276–281. [GUO Y D, LI K, YU J T, et al. Effect of electron beam and ~(60)Co- γ ray irradiations on the fresh-keeping of winter jujube[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(6): 276–281.]
- [32] NOURIAN F, RAMASWAMY H S, KUSHALAPPA A C. Kinetics of quality change associated with potatoes stored at different temperatures[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2003, 36(1): 49–65.
- [33] 万璇, 彭俊森, 聂娇娇, 等. 褪黑素处理对“贵长”猕猴桃贮藏品质的影响[J/OL]. 分子植物育种: 1–19[2022-09-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20220221.1652.005.html>. [WAN X, PENG J S, NIE J J, et al. Effect of melatonin treatment on the storage quality of 'Guichang' kiwifruit[J/OL]. Molecular Plant Breeding: 1–19[2022-09-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20220221.1652.005.html>]
- [34] 周任佳, 乔勇进, 王海宏, 等. 高能电子束辐照对鲜切哈密瓜生理生化品质的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(2): 300–305, 323. [ZHOU R J, QIAO Y J, WANG H H, et al. Effect of high-energy electron beam irradiation on physiological quality of Fresh-cut Hami melon[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(2): 300–305, 323.]
- [35] MORENO M, CASTELL-PEREZ M E, GOMES C, et al. Effects of electron beam irradiation on physical, textural, and microstructural properties of "Tommy Atkins" mangoes (*Mangifera indica* L.) [J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71(2): E80–E86.
- [36] 康芬芬, 魏亚东, 罗加凤, 等. 辐照检疫处理对葡萄采后生理影响的初步研究[J]. 植物检疫, 2011, 25(2): 25–27. [KANG F F, WEI Y D, LUO J F, et al. Primary study of irradiation effects on postharvest physiology of grape[J]. Plant Quarantine, 2011, 25(2): 25–27.]
- [37] PONGSRI R. Impact of electron-beam irradiation combined with shellac coating on the suppression of chlorophyll degradation and water loss of lime fruit during storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021: 12.
- [38] 王秋芳, 陈召亮, 乔勇进, 等. 高能电子束辐照对巨峰葡萄保鲜效果的研究[J]. 核农学报, 2010, 24(2): 319–324, 329. [WANG Q F, CHEN Z L, QIAO Y J, et al. Preservation effect of high energy electron beam on Kyoho Grape[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(2): 319–324, 329.]
- [39] 黄略略, 乔方, 方长发, 等. 电子束辐照对糯米糍荔枝采后保鲜效果的研究[J]. 食品工业, 2015, 36(2): 143–146. [HUANG L L, QIAO F, FANG C F, et al. Studies on the preservation effect of high energy electron beam on Nuomici lychees[J]. The Food Industry, 2015, 36(2): 143–146.]
- [40] DUAN Z, XING Z, SHAO Y, et al. Effect of electron beam irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of the white button mushroom, *agaricus bisporus* [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(17): 9617–9621.
- [41] NGUYEN T T, UTHAIRATANAKIJ A, SRILAONG V, et al. Impact of electron beam irradiation on the chlorophyll degradation and antioxidant capacity of mango fruit[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2021, 64(1): 19.
- [42] 张玉, 周冉冉, 高虹, 等. 低剂量电子束辐照对香菇采后抗氧化能力的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(12): 70–76. [ZHANG Y, ZHOU R R, GAO H, et al. Effect of postharvest low dose electron beam irradiation on the antioxidant capacity of Lentinula edodes[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(12): 70–76.]