

缓释植物精油保鲜剂结合电子束辐照技术 在上海蜜梨保鲜中的应用

岳 玲^{1,2} 雷 磊³ 孔秋莲^{1,2} 郑 琦^{1,2} 颜伟强^{1,2}

(1. 上海束能辐照技术有限公司, 上海 201401; 2. 上海市农业科学院, 上海 201106;

3. 上海潘垫生态农业发展有限公司, 上海 201402)

摘要: [目的] 探究缓释植物精油结合电子束辐照的复合保鲜技术对上海蜜梨贮藏品质及生理代谢的调控作用。[方法] 以上海蜜梨‘翠冠’为试材, 设置对照组、0.5 kGy 电子束辐照组、缓释植物精油组(SPEO)、0.5 kGy 电子束辐照结合缓释植物精油组, 定期测定贮藏期间果实硬度、失重率、可溶性固形物(TSS)含量、可滴定酸含量、维生素 C 含量等品质指标, 以及呼吸强度、多酚氧化酶(PPO)活性等生理代谢指标并分析保鲜效果差异。[结果] 与对照组相比, 各处理均能有效延缓蜜梨品质劣变, 0.5 kGy+SPEO 处理对果实硬度维持效果最优, 贮藏第 70 天失重率最低, 显著低于对照组; 能延缓 TSS 含量下降, 维持较高的可滴定酸和维生素 C 含量, 均显著高于其他处理组; 0.5 kGy+SPEO 处理还可推迟并降低呼吸高峰, 显著抑制 PPO 活性峰值, 延缓果实衰老及褐变。[结论] 0.5 kGy 辐照结合缓释精油具有协同增效作用, 可显著延缓蜜梨褐变衰老, 综合保鲜效果最优。

关键词: 上海蜜梨; 缓释植物精油; 电子束辐照; 保鲜; 贮藏品质; 生理代谢

Application of slow-release plant essential oil preservative combined with electron beam irradiation in the preservation of Shanghai sand pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai)

Yue Ling^{1,2} Lei Lei³ Kong Qiulian^{1,2} Zheng Qi^{1,2} Yan Weiqiang^{1,2}

(1. Shanghai Shuneng Irradiation Technology Co., Ltd., Shanghai 201401, China;

2. Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201106, China;

3. Shanghai Pandian Ecological Agriculture Development Co., Ltd., Shanghai 201402, China)

Abstract: [Objective] To investigate the regulatory effects of a composite preservation technology combining slow-release plant essential oil (SPEO) with electron beam irradiation on the storage quality and physiological metabolism of Shanghai sand pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai). [Methods] The fruits of Shanghai sand pear variety 'Cuiguan' are used as test materials. The experiment is conducted with four groups: control, 0.5 kGy electron beam irradiation, SPEO, and 0.5 kGy electron beam irradiation+SPEO. During storage, quality parameters including fruit firmness, weight loss rate, total soluble solids (TSS) content, titratable acid content, and vitamin C (V_C) content, as well as physiological metabolism indicators such as respiratory rate and polyphenol oxidase (PPO) activity, are measured to evaluate preservation performance. [Results] Compared with the control group, all treatments effectively delay fruit quality deterioration. The 0.5 kGy electron beam irradiation+SPEO treatment demonstrates the best performance in maintaining fruit firmness and achieves the lowest weight loss rate after 70 days of storage, which is significantly lower than that of the control. This combined treatment delays the

基金项目: 奉贤区科委社会类科技发展基金项目(编号: 202401); 上海市农业科技创新项目(编号: 沪农科 T2023322)

通信作者: 颜伟强(1974—), 男, 上海市农业科学院副研究员, 博士。E-mail: webweifree@163.com

收稿日期: 2026-05-26 **改回日期:** 2026-07-11

引用格式: 岳玲, 雷磊, 孔秋莲, 等. 缓释植物精油保鲜剂结合电子束辐照技术在上海蜜梨保鲜中的应用[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 106-111.

Citation: Yue Ling, Lei Lei, Kong Qiulian, et al. Application of slow-release plant essential oil preservative combined with electron beam irradiation in the preservation of Shanghai sand pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai)[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 106-111.

decline in TSS content while maintaining higher titratable acid content and V_C content, significantly outperforming other treatments. Furthermore, the 0.5 kGy electron beam irradiation+SPEO treatment delays and reduces the respiratory peak and significantly inhibits the peak PPO activity, effectively delaying fruit senescence and browning. [Conclusion] The combination of 0.5 kGy electron beam irradiation and SPEO exhibits a significant synergistic effect, effectively delaying pear browning and senescence and achieving optimal comprehensive preservation performance.

Keywords: Shanghai sand pear; slow-release plant essential oil; electron beam irradiation; preservation; storage quality; physiological metabolism

上海蜜梨(*Pyrus pyrifolia* Nakai)又叫黄花梨,果皮薄、肉质脆嫩,深受消费者欢迎,其中上海市奉贤区庄行镇所产的“庄行蜜梨”种植历史超600年,其种植面积占上海梨类种植的50%以上,2015年以“庄行蜜梨”命名和申报农产品地理标志顺利通过农业部专家组评审,是上海市名牌产品,曾被指定为上海世博会特供果品^[1-2]。翠冠是上海蜜梨中的优良品种,2023年其种植面积约占上海地区梨总面积的80%,2024年该比例达到约85%。由于上海蜜梨上市期集中,对采后保鲜的需求较大,加之果实上市期为夏季,采后果实代谢强度大,易出现衰老腐败问题,但关于其保鲜的研究却少见报道,因此采后贮运保鲜是产业发展中亟需解决的重要问题之一^[3-4]。

传统的保鲜技术主要是在冷藏的基础上辅助化学保鲜剂,控制微生物腐败和代谢强度以达到保鲜目的,随着食品产业的绿色转型,物理保鲜技术、天然活性组分应用等绿色高效的保鲜技术被广泛应用于新鲜农产品保鲜中^[5-6]。电子束辐照利用高能电子束照射产品,通过能量传递实现抑制生物酶活性、改变生物膜透性等,从而达到抑制发芽、延缓衰老、抑菌、杀虫等目的,被广泛应用于食品保鲜加工领域^[7-8]。植物精油来源天然、无毒、环境友好,是天然抑菌活性组分中研究和应用较多的种类^[9-10]。试验拟以上海蜜梨“翠冠”为对象,通过缓释植物精油保鲜剂结合电子束辐照处理方法,探究上海蜜梨的保鲜效果和品质变化,以期建立一种绿色高效的保鲜技术方法,推进上海蜜梨产业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

上海蜜梨“翠冠”:采自上海奉贤果园;

植物精油:上海源叶生物科技有限公司;

无水乙醇、木薯淀粉、丙烯酸胺、 β -环糊精、氢氧化钠、草酸、酚酞指示剂、2,6-二氯靛酚、邻苯二酚等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

电子加速器:IS1020型,10 MeV,20 kW,同方威视技术股份有限公司;

电子天平:BSA-3202S-CW型,德国赛多利斯科学仪器公司;

磁力搅拌水浴锅:SHJ-1AB型,常州金坛良友仪器有限公司;

真空干燥箱:0ZF-6000型,上海一恒科学仪器有限公司;

质构仪:TA-XT Plus型,英国SMS公司;

折光仪:MASTER型,日本ATAGO公司;

O_2/CO_2 气体分析测定仪:Dansensor[®] CheckPoint 3型,丹麦AMETEK/Mocon公司;

紫外可见分光光度计:UV-1800型,日本Shimadzu公司。

1.2 试验方法

1.2.1 蜜梨采收及预处理 清晨于上海奉贤果园采收蜜梨,采收后于 $(4\pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(85\pm 5)\%$ 下预冷24 h,选取果实大小均匀,成熟度一致,无病害和机械损伤的果实,装入0.02 mm厚度的聚乙烯薄膜保鲜袋中包装。

1.2.2 电子束辐照及缓释精油保鲜剂处理 设置对照组(CK,无任何处理)、0.5 kGy电子束辐照组(0.5 K)、缓释植物精油组(SPEO)、0.5 kGy电子束辐照结合缓释植物精油组(0.5 kGy+SPEO)共4个处理,每个处理10个重复,每个重复1个保鲜袋包装。电子束辐照处理使用10 MeV、20 kW电子加速器辐照,辐照时单层摆放,辐照剂量0.5 kGy,剂量误差 $\pm 10\%$ 。缓释植物精油组使用缓释植物精油保鲜剂,缓释植物精油载体基质为 β -环糊精和经改性处理木薯淀粉(质量比1:4),植物精油为薄荷精油、迷迭香精油和丁香精油(质量比1:1:1)、载体基质与精油质量比5:1,保鲜剂制备参照文献[13]的方法。所有处理果实均密封包装,于 $(4\pm 1)^\circ\text{C}$ 下冷藏70 d,定期测定相关指标。

1.2.3 果实硬度测定 参照周然等^[3]的方法。

1.2.4 失重率测定 采用称重法。

1.2.5 可溶性固形物含量测定 参照Li等^[11]的方法。

1.2.6 可滴定酸、维生素C含量测定 参照周然等^[3]的方法。

1.2.7 果实呼吸强度测定 参照段铃铃等^[12]的方法。

1.2.8 果实多酚氧化酶活性测定 参照田文慧等^[13]的方法。

1.3 统计与分析

采用SPSS软件进行显著性差异分析($P<0.05$ 表示

差异显著),采用 Origin 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 对果实硬度和失重率的影响

由图 1 可知,不同处理方式下果实硬度随贮藏时间的延长逐渐降低。贮藏前 10 d,各处理组硬度变化基本一致;贮藏第 10~40 天,硬度下降较为明显,至第 70 天时变化相对放缓,与 CK 组相比,0.5 K、SPEO、0.5 kGy+SPEO 组硬度降低相对较小,其中 0.5 kGy+SPEO 组效果最好,其次为 SPEO 和 0.5 K 组,表明电子束辐照结合缓释植物精油的保鲜方式可有效抑制蜜梨贮藏过程中的代谢活动,减缓果实的软化速率,实现延长贮藏期效果。

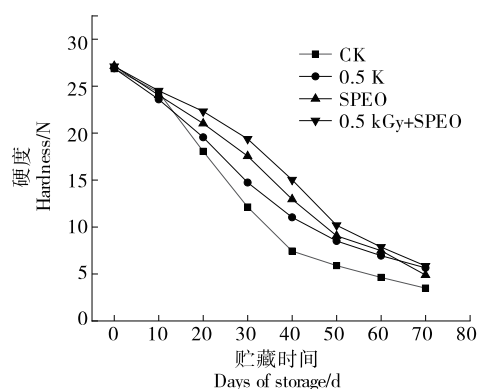


图 1 不同处理方式下蜜梨冷藏期间的硬度变化

Figure 1 Changes in firmness of sand pears during cold storage under different treatments

由图 2 可知,各处理组失重率均随贮藏时间的延长而上升,贮藏第 70 天,CK、0.5 K、SPEO、0.5 kGy+SPEO 组失重率分别为 19.5%、17.9%、16.4%、16.0%,贮藏前 10 d 失重率变化基本一致,之后经保鲜处理果实失重率均低于 CK 组,其中 0.5 kGy+SPEO 组失重率最小,说明辐照能够抑制果实代谢强度,SPEO 的抑菌作用减少了蜜梨在

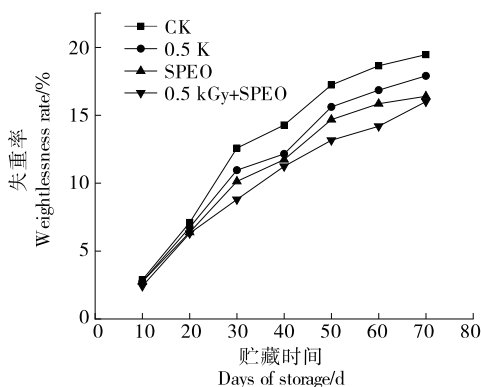


图 2 不同处理方式下蜜梨冷藏期间的失重率变化

Figure 2 Changes in weight loss rate of sand pears during cold storage under different treatments

贮藏过程中由于微生物对梨皮损伤而产生的水分流失。

硬度损失和失重是影响保鲜果蔬感官品质的主要问题,其中果实硬度还是反映耐贮性和软化程度的关键指标^[14-15]。贺泓铭等^[16-18]研究表明,辐照可降低小番茄、食用菌等多种新鲜农产品的采后硬度损失和失重率增加,与试验结果一致,且复合植物精油缓释保鲜剂后,效果得到进一步提升。

2.2 对果实 TSS、可滴定酸和维生素 C 含量的影响

2.2.1 TSS 含量 由图 3 可知,贮藏前 20 d,TSS 含量变化基本一致,CK 组 TSS 含量在第 20 天时达 12.9%,之后逐渐下降,而 0.5 K、SPEO、0.5 kGy+SPEO 组的 TSS 含量在第 20 天后仍在增加,约在第 40 天时下降。贮藏第 70 天,0.5 K、0.5 kGy+SPEO、SPEO、CK 组的 TSS 含量分别为 10.9%、11.3%、10.0%、9.8%,表明 0.5 kGy+SPEO 的保鲜方式对蜜梨中 TSS 含量的维持效果最佳。

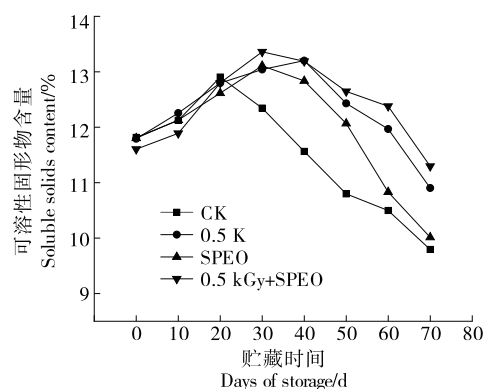


图 3 不同处理方式下蜜梨冷藏期间的 TSS 含量变化

Figure 3 Changes in total soluble solids content of sand pears during cold storage under different treatments

2.2.2 可滴定酸含量 由图 4 可知,可滴定酸含量总体呈下降趋势,CK 组降幅最为显著。贮藏初期(0 d),各组可滴定酸含量约为 0.19%,0~10 d 均快速下降,第 10 天后趋势分化明显:CK 组持续陡降,第 70 天时仅约 0.12%,显著低于各处理组($P<0.05$);SPEO 处理变化较为缓慢,第 70 天含量维持在 0.14% 左右,单独 0.5 kGy 辐照组降幅略高于单独 SPEO 处理,采用 0.5 kGy+SPEO 处理组效果最优,曲线最为平缓,第 70 天含量仍达 0.15%,显著高于其他组。SPEO 保鲜剂与辐照处理均能有效控制呼吸作用对有机酸的消耗,辐照与 SPEO 的协同作用对维持蜜梨采后可滴定酸含量、延缓风味劣变的效果最优。

2.2.3 维生素 C 含量 由图 5 可知,贮藏前期(0~10 d),各处理组维生素 C 含量下降迅速,其中 CK 组降幅最为显著,而 0.5 kGy+SPEO 组下降较为平缓,表现出良好的维

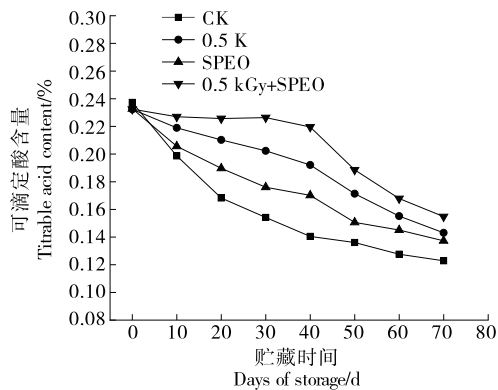


图4 不同处理方式下蜜梨冷藏期间的可滴定酸含量变化

Figure 4 Changes in titratable acid content of sand pears during cold storage under different treatments

生素C保留能力。贮藏中后期(10~70 d),各处理组维生素C含量继续缓慢降低,但组间差异逐渐扩大,至贮藏结束(第70天),CK组和SPEO组的维生素C含量降至2.68 mg/100 g,0.5 kGy+SPEO组保持较高水平,0.5 K组含量最低。0.5 kGy+SPEO组维生素C含量在贮藏中后期显著高于其他组($P<0.05$),表明电子束辐照与SPEO保鲜剂有协同作用,延缓了维生素C的降解。

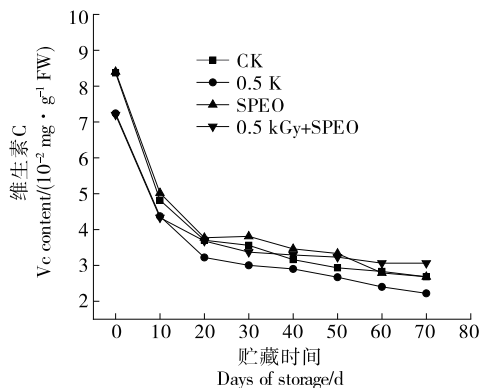


图5 不同处理方式下蜜梨冷藏期间的维生素C含量变化

Figure 5 Changes in V_C content of sand pears during cold storage under different treatments

维生素C是新鲜果蔬中重要的营养物质,具有抗氧化的功能,同时也是判断果蔬新鲜程度的一个重要指标,其含量在采后随贮藏时间延长而逐渐下降。石彬等^[19]研究表明,电子束辐照对猕猴桃采后贮藏中的维生素C含量变化有影响,其含量低于精油保鲜处理的,与试验结果一致。

2.3 对蜜梨生理代谢的影响

2.3.1 呼吸强度

由图6可知,蜜梨的呼吸强度随贮藏时

间的延长呈现典型的“先增强后减弱”的变化趋势,在贮藏第20天左右达到呼吸高峰,标志着果实由采收后的休眠状态转入旺盛的衰老阶段。不同处理组对呼吸峰的调控存在显著差异:CK组的呼吸峰值最高,且达峰值时间最早;相比之下,SPEO组和0.5 kGy+SPEO组的峰值显著降低,且高峰出现时间略有延后;0.5 K组的峰值虽有所降低,但在贮藏中后期(40~70 d)的呼吸速率却显著高于0.5 kGy+SPEO组,说明SPEO不仅能在贮藏前期抑制旺盛的呼吸作用,其释放的芥辣精油成分还能持续发挥抑菌作用,减少果实表面的微生物负荷,从而降低对底物的无效消耗,0.5 kGy+SPEO组合保鲜技术通过辐照与生物抑菌的协同效应,最大程度延缓了果实的代谢衰老进程。

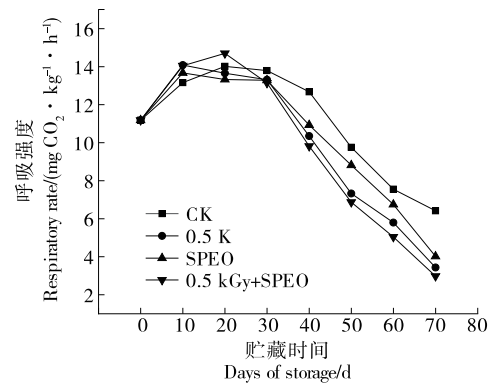


图6 不同处理方式下蜜梨冷藏期间的呼吸强度变化

Figure 6 Changes in respiratory rate of sand pears during cold storage under different treatments

2.3.2 多酚氧化酶活性 多酚氧化酶(PPO)是引发梨果实酶促褐变的关键酶^[20]。由图7可知,蜜梨PPO活性随贮藏时间的延长呈先升后降的变化规律,并在第20天达到峰值,与呼吸强度变化规律一致,表明此时果实衰老及褐变风险最高。不同处理方式对PPO活性的抑制效果差异显著:CK组的PPO活性上升最为剧烈,峰值最高,表明其褐变倾向最大。相比之下,保鲜处理组均能不同程度地降低峰值:0.5 kGy+SPEO组的调控效果最优,其活性曲线最为平缓,峰值被显著抑制,且峰值出现的时间略有延后;SPEO组的呼吸强度弱于0.5 kGy+SPEO组;0.5 K组虽然在贮藏初期表现出一定的抑酶活性,但在中后期(40~70 d)活性反弹明显,最终值高于0.5 kGy+SPEO组。

辐照可用于新鲜果蔬保鲜,效应主要有抑芽、抑制衰老、杀菌除虫等方面^[7,21]。但辐照对不同果蔬生理代谢的影响有所差异,可能与处理剂量、果蔬种类及其状态有关。Peng等^[22]研究发现,300,400,500 Gy不同剂量电子束辐照处理可降低马铃薯呼吸强度,但PPO活性高于对

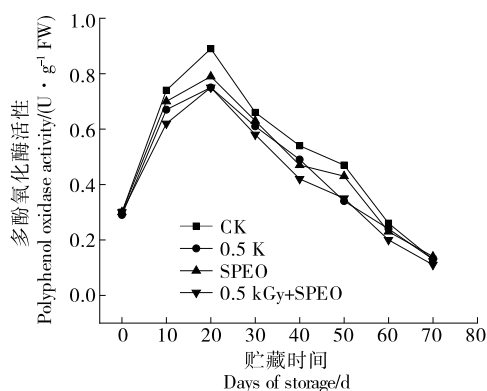


图 7 不同处理方式下蜜梨冷藏期间的多酚氧化酶活性变化

Figure 7 Changes in polyphenol oxidase activity of sand pears during cold storage under different treatments

照组。叶力瑕^[23]研究发现,400 Gy 剂量电子束、X 射线处理可降低猕猴桃呼吸强度和 PPO 活性,与试验结果一致。

3 结论

0.5 kGy 电子束辐照处理和植物精油缓释保鲜剂处理均可抑制上海蜜梨采后生理代谢强度,保持较好的感官品质和营养品质,综合电子束辐照和保鲜剂处理可进一步提升保鲜效果。冷藏保鲜 70 d 后,上海蜜梨的可溶性固形物含量、可滴定酸含量、维生素 C 含量均显著高于其他处理组,呼吸强度显著低于其他处理组;组合处理组的果实硬度与单一辐照组无显著差异,但显著高于对照组和单一植物精油缓释保鲜剂处理组;失重率与保鲜剂处理组接近,二者均显著低于其他处理组;多酚氧化酶活性较低,但与其他处理组无显著差异。综合考虑感官品质、营养品质、代谢活性等指标,0.5 kGy 电子束辐照处理结合植物精油缓释保鲜剂处理可有效延长上海蜜梨冷藏保鲜期。试验未明确植物精油缓释保鲜剂在贮藏过程中的缓释速率及其成分变化,后续可结合 GC-MS 等方法,研究贮藏过程中挥发性风味物质(如特征香气组分)变化,感官评价等。

参考文献

[1] 上海市奉贤区人民政府关于同意以上海市奉贤区蜜梨协会为主体申请“庄行蜜梨”地理标志证明商标并承担该证明商标后续管理监督等事务工作的批复[J]. 上海市奉贤区人民政府公报, 2025(24): 2.
Shanghai Municipal People's Government of Fengxian District. Approval on agreeing to apply for the geographical indication certification trademark of "Zhuanghang Honey Pear" with Shanghai Fengxian District Honey Pear Association as the main body and undertaking subsequent management and supervision

affairs[J]. Gazette of Shanghai Municipal People's Government of Fengxian District, 2025(24): 2.

[2] 王昌年. 庄行蜜梨打响品牌农民增收[N]. 东方城乡报, 2007-08-21(A03).
Wang C N. Zhuanghang honey pear builds brand to increase farmers' income[N]. Oriental Urban Rural Daily, 2007-08-21 (A03).
[3] 周然, 谢晶, 李云飞, 等. 羧甲基壳聚糖涂膜保鲜冷藏上海蜜梨的抗软化机理[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(1): 90-95.
Zhou R, Xie J, Li Y F, et al. Preservation mechanism of carboxymethyl chitosan coating on pear firmness during cold storage[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2012, 31 (1): 90-95.
[4] 周然, 闫丽萍, 谢晶, 等. 可食性涂膜对冷藏过程中上海蜜梨品质的影响[J]. 上海农业学报, 2010, 26(4): 53-56.
Zhou R, Yan L P, Xie J, et al. Effects of edible coatings on quality of Shanghai sand pear (*Pyrus pyrifolia*) during cold storage[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2010, 26(4): 53-56.
[5] 欧阳梦云, 李文革, 曹胜, 等. 电子束辐照对不同植物油制备的辣椒油类胡萝卜素和辣椒素类物质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 95-101.
Ouyang M Y, Li W G, Cao S, et al. Effects of electron beam irradiation on carotenoids and capsaicinoids in pepper oils prepared by different plant oils[J]. Food & Machinery, 2025, 41 (7): 95-101.
[6] 燕欣悦, 胡风庆, 宁崇, 等. 电子束辐照技术对食品品质的影响及在食品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 216-225.
Yan X Y, Hu F Q, Ning C, et al. Research progress on the effect of electron beam irradiation technology on food quality and its application in food[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 216-225.
[7] 刘泽松, 史君彦, 王清, 等. 辐照技术在果蔬贮藏保鲜中的应用研究进展[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4): 236-242.
Liu Z S, Shi J Y, Wang Q, et al. Research advance on application of irradiation technology in storage and preservation of fruits and vegetables[J]. Storage and Process, 2020, 20(4): 236-242.
[8] 张娜, 潘祎, 段俊宇, 等. 果蔬物理保鲜技术研究进展与现状[J]. 冷藏技术, 2026, 49(1): 1-9.
Zhang N, Pan Y, Duan J Y, et al. Research progress and current status of physical preservation technologies for fruits and vegetables[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2026, 49(1): 1-9.
[9] 曲梦锐, 刘雨辰, 王东营. 壳聚糖-黄精精油复合涂膜对苹果果实的保鲜功效[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 115-120.
Qu M R, Liu Y C, Wang D Y. Preservation performance of chitosan-Polygonatum essential oil composite coating film on apple fruits [J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 115-120.
[10] 孙碗晴, 张怡, 黄玉婷, 等. 植物精油对菠萝蜜采后致病菌的抑制及保鲜效果[J/OL]. 核农学报. (2026-05-18) [2026-06-

- 23]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2265.S.20260514.1958.002>.
Sun W Q, Zhang Y, Huang Y T, et al. Effects of plant essential oils on postharvest pathogens inhibition and preservation of jackfruit[J/OL]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences. (2026-05-18) [2026-06-23]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2265.S.20260514.1958.002>.
- [11] Li R, Shi J R, Li C, et al. Characterization of the key odorant compounds in 'Qinguan' apples (*Malus domestica*) [J]. LWT- Food Science and Technology, 2023, 184: 115052.
- [12] 段铃铃, 丁小玲, 刘翠华. 瑞雪苹果近成熟期果实品质的变化及其采收成熟度的综合判定[J]. 中国果树, 2026(6): 28-35.
Duan L L, Ding X L, Liu C H. Changes of fruit quality of 'Ruixue' apple near maturity and comprehensive determination of harvesting maturity[J]. China Fruits, 2026(6): 28-35.
- [13] 田文慧, 郑琦, 岳玲, 等. 几种植物精油的黄曲霉菌抑制活性及其缓释保鲜剂对烧卖保鲜效果的研究[J]. 上海农业学报, 2025, 41(4): 114-122.
Tian W H, Zheng Q, Yue L, et al. Inhibitory activity of several plant essential oils against *Aspergillus flavus* and effects of slow-released preservative on preservation of Shaomai[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2025, 41(4): 114-122.
- [14] He Y H, Xue J, Li H, et al. Ethylene response factors regulate ethylene biosynthesis and cell wall modification in persimmon (*Diospyros kaki* L.) fruit during ripening[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 168: 111255.
- [15] Su Q F, Feng Y F, Li X L, et al. Allelic variation in an expansin, MdEXP-A1, contributes to flesh firmness at harvest in apples[J]. Molecular Horticulture, 2025, 5(1): 3.
- [16] 贺泓铭, 李志宇, 刘兴睿, 等. γ 射线辐照对野生菌保鲜效果影响的研究[J]. 四川农业科技, 2026(3): 175-179.
He H M, Li Z Y, Liu X R, et al. Effects of γ -ray irradiation on preservation of wild edible fungi[J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2026(3): 175-179.
- [17] 黄烁, 马凤深, 方泽坤, 等. 不同剂量电子束辐照对小番茄营养品质的影响[J]. 农业研究与应用, 2026, 39(3): 379-391.
Huang S, Ma F S, Fang Z K, et al. Influence of electron beam irradiation on the nutritional quality of cherry tomatoes[J]. Journal of Agricultural Research and Application, 2026, 39(3): 379-391.
- [18] 崔媛, 钟媛媛, 蔺江涛, 等. 电子束转靶X射线预处理对双孢菇采后贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 242-249.
Cui Y, Zhong Y Y, Wei J T, et al. Effect of electron beam generated X-ray pretreatment on postharvest storage quality of the mushroom *agaricus bisporus*[J]. Food Science, 2024, 45(23): 242-249.
- [19] 石彬, 李咏富, 何扬波, 等. 几种天然植物复合精油与高能电子辐照对‘红阳’猕猴桃采后保鲜的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(10): 42-47.
Shi B, Li Y F, He Y B, et al. The influence of several natural plant compound essential oil and high-energy electron irradiation on preservation of 'Hong-Yang' kiwi fruit after harvest[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(10): 42-47.
- [20] Wang P Y, Gao J, Gao W X, et al. NaHS maintains the quality of fresh-cut pear during cold storage by alleviating browning and microbial contamination: a multi-omics study[J]. European Food Research and Technology, 2026, 252(7): 265.
- [21] 庄倩莹, 崔兴茫, 邱佳容, 等. 电子束辐照对采后果蔬保鲜中的作用机理及其应用研究进展[J/OL]. 食品工业科技. (2025-12-18) [2026-04-12]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070335>.
Zhuang Q Y, Cui X M, Qiu J R, et al. Advances in the mechanism and application of electron beam irradiation for postharvest preservation of fruits and vegetables[J/OL]. Science and Technology of Food Industry. (2025-12-28) [2026-04-12]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070335>.
- [22] Peng X, Li Y L, Wang S, et al. Electron beam irradiation inhibited potato sprouting by regulating the metabolism of membrane lipid peroxidation and antioxidant[J]. Potato Research, 2025, 68(1): 391-407.
- [23] 叶力瑕. 电子束与X射线辐照对猕猴桃品质和电学特性的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024: 12-16.
Ye L X. Effects of electron beam and X-ray irradiation on quality and electrical properties of kiwifruit[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2024:12-16.