

^{60}Co - γ 射线辐照对榛子鲜果采后生理及脂质营养的影响

王冠¹, 岳鑫颖¹, 吕春茂^{1*}, 孟宪军¹, 宣景宏², 杨明源¹

(1.沈阳农业大学食品学院, 辽宁 沈阳 110866; 2.辽宁省绿色农业技术中心, 辽宁 沈阳 110027)

摘要: 采用 ^{60}Co - γ 射线辐照处理(0、0.25、0.50、0.75、1.00 kGy)榛子鲜果, 动态监测(4.0±0.5)℃条件下冷藏3个月期间其生理指标及脂质营养的变化。结果显示, 0.25~1.00 kGy的辐照可延缓榛子鲜果超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活力的下降, 并降低其多酚氧化酶活力; 其中0.50 kGy处理组效果最为显著, 贮藏结束时0.50 kGy处理组榛子鲜果的呼吸速率较未辐照样品降低了25.81%, 丙二醛含量减少了18.5%, 脂氧合酶活力降低了4.18%。辐照对榛子脂肪酸组成和相对含量、过氧化值、酸价无显著影响。对贮藏90 d的榛子鲜果各指标进行主成分分析, 发现0.50 kGy ^{60}Co - γ 射线辐照贮藏效果最好。综上, ^{60}Co - γ 辐照可通过影响采后榛子果实的生理活动来延缓果实的衰老, 有效延长其保质期。

关键词: ^{60}Co - γ 射线辐照; 榛子鲜果; 贮藏生理; 脂质

Effect of ^{60}Co - γ Irradiation on Postharvest Physiology and Lipid Nutrition of Fresh Hazelnuts

WANG Guan¹, YUE Xinying¹, LÜ Chunmao^{1*}, MENG Xianjun¹, XUAN Jinghong², YANG Mingyuan¹

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Liaoning Green Agricultural Technology Center, Shenyang 110027, China)

Abstract: Fresh hazelnuts were treated by ^{60}Co - γ irradiation (0, 0.25, 0.50, 0.75 and 1.00 kGy) and stored at (4.0 ± 0.5) °C for up to three months. Changes in physiological indexes and lipid nutrition were monitored during the storage period. The results showed that irradiation at a dose of 0.25–1.00 kGy delayed the decline in superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activity, and reduced the activity of polyphenol oxidase (PPO) in fresh hazelnuts. The irradiation dose of 0.50 kGy was the most effective, and at the end of storage, the respiratory intensity, malondialdehyde (MDA) content and lipoygenase activity of the irradiated sample decreased by 25.81%, 18.50% and 4.18% compared with those of the non-irradiated one, respectively. However, irradiation had no significant effect on fatty acid composition and content, peroxide value (POV) or acid value (AV). Principal component analysis (PCA) performed on fresh hazelnuts stored for 90 d also showed that 0.50 kGy ^{60}Co - γ irradiation imparted the best storage quality to fresh hazelnuts. These results suggest that ^{60}Co - γ irradiation can delay the senescence and effectively extend the shelf life by affecting the postharvest physiology of fresh hazelnuts.

Keywords: ^{60}Co - γ irradiation; fresh hazelnut; storage physiology; lipid

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220906-057

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)15-0212-08

引文格式:

王冠, 岳鑫颖, 吕春茂, 等. ^{60}Co - γ 射线辐照对榛子鲜果采后生理及脂质营养的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 212-219.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220906-057. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Guan, YUE Xinying, LÜ Chunmao, et al. Effect of ^{60}Co - γ irradiation on postharvest physiology and lipid nutrition of fresh hazelnuts[J]. Food Science, 2023, 44(15): 212-219. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220906-057. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-09-06

基金项目: 辽宁省“揭榜挂帅”科技攻关项目(2022JH1/10900006); 辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10200037)

第一作者简介: 王冠(1997—)(ORCID: 0000-0003-0416-4918), 女, 硕士研究生, 研究方向为果蔬加工与贮藏。

E-mail: 1412821307@qq.com

*通信作者简介: 吕春茂(1970—)(ORCID: 0000-0002-2681-979X), 男, 教授, 博士, 研究方向为果蔬加工与贮藏。

E-mail: Syaulcm70@syau.edu.cn

榛子 (*Corylus avellana* L.) 是世界上四大坚果之一, 因其具有独特的风味和口感而备受欢迎^[1]。榛子不仅味道鲜美, 且含有丰富的蛋白质、脂肪和多种维生素等营养成分^[2]。长期食用榛子对人类健康有益, 例如可预防心脑血管疾病^[3]、降低血脂^[4]、补脑益神、抗艾滋病^[2]等。传统的平榛一般为干制炒食, 目前人工园艺化栽培的平欧大榛子除兼具营养与功效之外, 因其鲜果个大、榛仁饱满及口味独特, 采摘后大多数被鲜食, 只有少部分干制。榛子鲜果采摘期主要集中在7、8月, 其采后代谢旺盛, 倘若鲜果采后处理不当, 在贮藏时就会导致榛子油脂氧化、产生异味, 甚至发生发霉变质等, 使其商品性显著降低, 带来巨大的经济损失^[5-6]。目前, 新鲜榛果的保存技术包括低温处理^[7]、气调保鲜^[8]、复合膜保鲜^[9]等。但以上方法在实际应用中存在着贮藏效果不佳、投资成本高、操作复杂等问题。因此, 开发高效、环保的榛子鲜果保鲜技术迫在眉睫。

⁶⁰Co- γ 射线辐照技术利用一定剂量的电离射线辐照食品, 杀灭其中的病原微生物, 从而延长食品的保质期^[10]。研究表明, ⁶⁰Co- γ 射线辐照技术具有可保持食品原有的品质和风味、能彻底地消灭微生物、应用类型广、节约能源等特点, 因而被广泛应用于果蔬保鲜中, 且效果显著^[11]。辐照食品是否安全一直受到国际学者的关注, 并对其进行了大量毒性实验, 结果表明辐照是一种安全可行的方法^[12]。叶爽等^[13]研究发现, 1.0 kGy的辐照处理可使香菇保持较好的色泽及硬度, 同时减少水分流失, 延长其保质期。Wang Chen等^[14]研究表明, 2.5 kGy辐照处理可使蓝莓在低温条件下的保质期延长至63 d, 并有效降低蓝莓果实的腐烂率。Hu Haichao等^[15]利用0.3 kGy的 γ 射线辐照完全抑制了新鲜核桃的发芽现象。Bhattacharjee等^[16]研究表明, 0.25 kGy的 γ 射线辐照可完全抑制腰果在贮藏期6个月内的微生物污染。但目前还鲜有⁶⁰Co- γ 射线辐照应用于榛子鲜果保鲜的研究。

榛子鲜果在贮藏过程中易发生霉变酸败进而使其贮藏品质下降。因此, 本研究以榛子鲜果为试材, 通过研究不同⁶⁰Co- γ 射线辐照对采后榛子鲜果贮藏期间呼吸作用、膜脂过氧化作用的影响, 探究辐照对榛子鲜果脂质营养的影响程度, 进而总结辐照保鲜对榛子鲜果品质影响的规律, 以期为榛子鲜果商品化处理新技术和辐照处理在榛子鲜果保鲜领域的应用提供技术参考和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

实验材料为2021年从辽宁省本溪市桓仁富民水果专业合作社购买的新鲜‘达维’榛子。

正己烷、硫代巴比妥酸、四氮唑蓝 (nitro-blue tetrazolium, NBT)、核黄素、愈创木酚、氢氧化钾、甲醇、冰乙酸、异丙醇、石油醚、三氯甲烷 国药集团化学试剂有限公司; 磷酸盐缓冲液、乙二醇四乙酸二钠 广州和为医药科技有限公司; 亚油酸钠 上海源叶生物科技有限公司; 3%过氧化氢、0.1 mol/L硫代硫酸钠标准溶液 福州飞净生物科技有限公司; 1 mol/L Tris-HCl缓冲液 北京索莱宝科技有限公司; 除甲醇为色谱纯外, 上述试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

SN-QX13D超声波清洗机 上海尚仪仪器设备有限公司; RE-52AA旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂; DW-86L490超低温立式冰箱 青岛海尔特种电器有限公司; pHs-25雷磁数显pH计 上海仪电科学仪器股份有限公司; K-GH10果蔬呼吸强度仪 三克(重庆)仪器有限公司; CR21N2400604高速冷冻离心机 日本HITACHI公司; XMTD-8222电热恒温水浴锅 常州国华电器有限公司; ENO酶标仪 美国伯腾仪器有限公司; 7890-5975气相色谱-质谱联用仪 美国Agilent公司。

1.3 方法

1.3.1 辐照处理与榛子油的提取

选用成熟度、色泽一致、不受病虫和机械损害的榛子鲜果。将4.5 kg样品分装到30个聚乙烯 (polyethylene, PE) 袋子中 (厚度0.08 mm), 每个袋子150 g, 每10袋装入一个无盖瓦楞纸盒 (40 cm×30 cm×30 cm)。将瓦楞纸盒放至周转箱中, 并在周转箱中放置冰块, 运至辽宁省农科院钴源辐射辐照中心。静态常温辐照 (0、0.25、0.50、0.75、1.00 kGy), 辐射源为⁶⁰Co- γ 射线, 剂量率为3 Gy/min。处理后的榛子在 (4.0±0.5) °C的冷库中贮藏3个月, 每15 d取样一次。每次取样时, 在不同处理组随机选取3袋样品, 将其去皮后快速磨碎搅拌均匀, 在-80 °C贮存待测。

参考吕春茂等^[17]的方法将榛子粉与正己烷按料液比1:6 (m/V) 混合放入锥形瓶中, 利用超声波清洗器 (500 W) 在35 °C下提取1 h, 随后用旋转蒸发器在45 °C条件下除去有机溶剂, 得到榛子油, 并用棕色瓶在-80 °C冰箱保存待用。

1.3.2 呼吸速率测定

将200 g榛子鲜果放入密封的容器中, 使用果蔬呼吸强度仪测量初始呼吸速率 A_0 和1 h后的呼吸速率 A_1 , 结果以mg/(g·h)表示^[15]。

1.3.3 鲜食榛子粗酶液的提取

参考黄天姿等^[18]的方法并进行改进, 称取1.0 g冷冻研磨的榛子粉, 加入7 mL磷酸盐缓冲液 (0.05 mol/L, pH 7.8), 于冰浴中混合, 4 °C离心20 min (14 000 r/min), 所得上清液即为粗酶液。

1.3.4 丙二醛含量测定

采用硫代巴比妥酸法^[19]测定丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量。

1.3.5 脂氧合酶活力测定

参考王琛等^[20]的方法进行改进,将0.2 mL粗酶液(1.3.3节)、0.1 mL亚油酸钠(10 mmol/L)和2.7 mL磷酸盐缓冲液(100 mmol/L, pH 6.4)混合均匀,在30 ℃下水浴20 min,测定混合液在反应开始时以及反应1 min后在234 nm波长处的吸光度,按公式(1)计算脂氧合酶(lipoxygenase, LOX)活力。

$$\text{LOX活力}/(\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})) = \frac{(A_1 - A_0) \times V_1}{m \times V_2} \quad (1)$$

式中: A_1 为反应1 min时混合液的吸光度; A_0 为反应开始时混合液的吸光度; V_1 为样品提取液总体积/mL; V_2 为吸取的样品液体积/mL; m 为榛子样品的质量/g; V_2 为反应总体积/mL。

1.3.6 超氧化物歧化酶活力测定

采用NBT法^[21]进行改进,取4支试管,在其中2支对照管中加入0.1 mL粗酶液(1.3.3节),2支测定管中加入0.1 mL磷酸盐缓冲液(0.05 mol/L, pH 7.8)和1.2 mL反应液(0.3 mL 130 mmol/L蛋氨酸溶液、0.3 mL 750 $\mu\text{mol/L}$ NBT溶液、0.3 mL 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 乙二胺四乙酸二钠溶液、0.3 mL 20 $\mu\text{mol/L}$ 核黄素溶液)。将1支对照管置于暗处,其余3支试管以4 000 lx的日光灯照射20 min,以暗处对照管为空白,测定各处理组在560 nm波长处吸光度,按公式(2)计算超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活力。

$$\text{SOD活力}/(\text{U}/\text{g}) = \frac{A_0 - A_1}{0.5 \times A_1 \times m \times V_1} \quad (2)$$

式中: A_0 为照光对照管吸光度; A_1 为测定管吸光度; m 为榛子样品质量/g; V_1 为样品提取液总体积/mL。

1.3.7 过氧化氢酶活力的测定

参考刘雅琳等^[21]的方法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活力。

1.3.8 多酚氧化酶活力测定

采用愈创木酚法^[22]测定多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活力。

1.3.9 脂肪酸组成和含量测定

参考曹子伦等^[23]的方法进行改进。

脂肪酸甲酯化:取50 mg榛子油在碘量瓶中,加2 mL石油醚-苯混合溶液(1:1, V/V),振荡摇匀,再加入2 mL氢氧化钾-甲醇溶液(0.4 mol/L)。在室温下静置1 h,加蒸馏水使全部有机相甲醇溶液升至瓶颈上部,澄清后吸取上清液待测。

气相色谱条件:色谱柱为弹性石英毛细管柱(30 m \times 0.25 mm, 0.25 μm);升温程序为初始温度

50 ℃,以10 ℃/min升至250 ℃,保持5 min;汽化温度为260 ℃;载气为 N_2 ;压力0.4 MPa;进样量1 μL 。根据面积归一化法进行分析,对脂肪酸甲酯峰面积进行求和。以单一脂肪酸甲酯峰面积占总脂肪酸甲酯峰面积的比例作为脂肪酸的相对含量。

1.3.10 过氧化值、酸价的测定

榛子油过氧化值的测定依据GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》^[24],榛子油酸价的测定依据GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》^[25]。

1.4 数据统计与分析

所有实验设置3次重复。利用SPSS 25.0软件对数据进行方差分析、显著性分析、相关性分析和主成分分析(principal component analysis, PCA),使用Excel 2010软件处理数据,并利用Origin 2018软件作图。采用Duncan检验进行显著性分析,以 $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 ^{60}Co - γ 射线辐照对榛子鲜果采后生理的影响

2.1.1 对呼吸速率的影响

采后果蔬的主要生命活动都是通过呼吸进行的,呼吸速率升高会加剧果实组织的生命代谢活动,不但影响其品质,也关系着果蔬的寿命^[26]。由图1可知,各处理组榛子鲜果的呼吸速率均先上升后下降,在15 d时出现峰值。在45 d后辐照组呼吸速率明显低于对照组。在贮藏90 d时,0.25、0.50、0.75、1.00 kGy辐照处理组的呼吸速率相比对照组分别降低了19.35%、25.81%、22.58%、16.13%。证明辐照促进了贮藏初期榛子果实的呼吸作用,但明显抑制了冷藏后期榛子鲜果的呼吸代谢过程,其中且0.50 kGy和0.75 kGy辐照处理的效果更好。

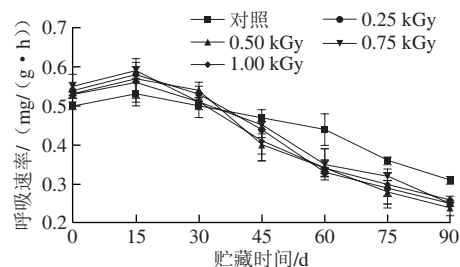


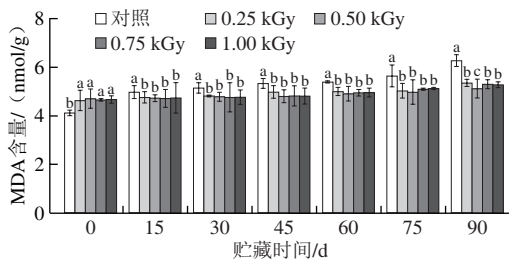
图1 不同辐照剂量对榛子鲜果贮藏期间呼吸速率的影响

Fig. 1 Effects of different irradiation doses on respiratory rate of fresh hazelnuts during storage

2.1.2 对MDA含量的影响

MDA含量是反映细胞膜破坏程度的主要生理指标。图2结果显示,在贮藏过程中,各组榛子鲜果MDA含量呈现上升趋势。0 d时,辐照组榛子鲜果的MDA含量

显著高于对照组 ($P < 0.05$), 而在随后贮藏的15~90 d过程中则相反, 即对照组的MDA含量显著高于辐照组 ($P < 0.05$)。贮藏结束时, 0.25、0.50、0.75、1.00 kGy辐照组的MDA含量分别为5.34、5.11、5.29、5.27 nmol/g, 显著低于对照组 (6.27 nmol/g) ($P < 0.05$), 其中0.50 kGy辐照处理组的榛子MDA含量最低, 与对照组相比减少了18.5%。由此可以看出, 辐照处理能够很好地抑制采后榛子果实中MDA含量的增加, 从而缓解榛子鲜果的衰老。



同一贮藏时间不同剂量之间小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图2 不同辐照剂量对榛子鲜果贮藏期间MDA含量的影响

Fig. 2 Effects of different irradiation doses on MDA content of fresh hazelnuts during storage

2.1.3 对LOX活力的影响

LOX活力与采后果蔬的成熟与衰老密切相关^[27]。如图3所示, 0 d时各辐照组榛子鲜果的LOX活力均大于对照组 ($P < 0.05$), 推测辐照使榛子鲜果产生了应激反应。但这种现象在低温贮藏过程中逐渐消失, 在贮藏15~30 d内0.50、0.75、1.00 kGy辐照组LOX活力均呈现下降趋势。对照组及0.25 kGy辐照组在30 d时LOX活力上升, 而0.50、0.75、1.00 kGy辐照组在45 d时出现该现象; 在贮藏末期 (90 d), 0.25、0.50、0.75 kGy和1.00 kGy辐照组的LOX活力相比于对照组分别降低2.62%、4.18%、3.48%、3.14%。以上结果表明, 辐照处理可通过抑制榛子鲜果贮藏后期LOX活力来保证其贮藏品质, 其中0.50 kGy剂量的辐照效果最好。

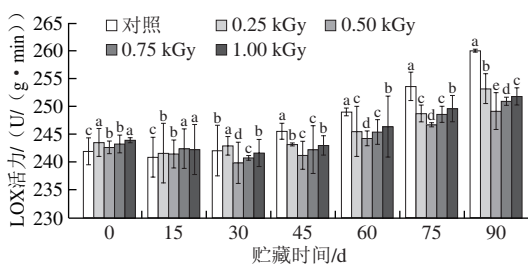


图3 不同辐照剂量对榛子鲜果贮藏期间LOX活力的影响

Fig. 3 Effects of different irradiation doses on LOX activity of fresh hazelnuts during storage

2.1.4 对SOD活力的影响

SOD是一种具有抗氧化活性的酶, 它与果蔬的抗逆及延缓衰老有很大关系。如图4所示, 90 d内各组榛子

鲜果的SOD活力均先增加后下降。对照组在30 d时开始下降, 而各辐照组均在45 d时开始下降, 推测是辐照所引起的榛子鲜果应激反应所致。0.50、0.75、1.00 kGy辐照组的SOD活力始终较高, 其中0.50 kGy辐照组在贮藏结束时SOD活力最高, 为105.3 U/g, 高于对照组3.5%。因此, 适宜的辐照能有效地维持榛子鲜果SOD活力, 从而减缓其贮藏后期的衰老速度。

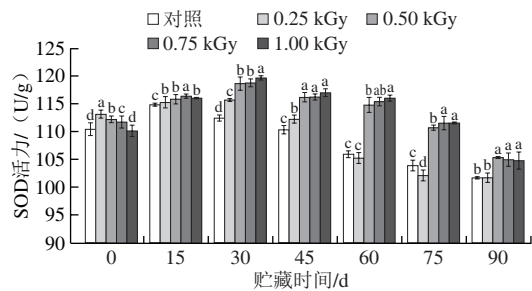


图4 不同辐照剂量对榛子鲜果贮藏期间SOD活力的影响

Fig. 4 Effects of different irradiation doses on SOD activity of fresh hazelnuts during storage

2.1.5 对CAT活力的影响

由图5可知, 各组榛子鲜果的CAT活力均先升高后下降。对照组和0.25 kGy辐照组在贮藏15 d时出现峰值, 分别为71.23 U/(g·min)和71.56 U/(g·min), 0.50、0.75、1.00 kGy辐照组在30 d时出现峰值, 分别为77.88、76.75 U/(g·min)和75.64 U/(g·min)。其中大于0.25 kGy剂量辐照处理组的榛子鲜果CAT活力始终显著高于对照组 ($P < 0.05$), 但0.25 kGy辐照组与对照组差异不显著 ($P > 0.05$)。由此可见, 适当的辐照处理可抑制榛子鲜果CAT活力的下降, 维持良好的H₂O₂清除能力。

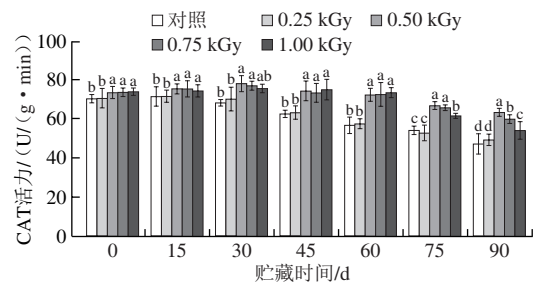


图5 不同辐照剂量对榛子鲜果贮藏期间CAT活力的影响

Fig. 5 Effects of different irradiation doses on CAT activity of fresh hazelnuts during storage

2.1.6 对PPO活力的影响

PPO会使果蔬发生酶促褐变反应, 从而降低其营养价值。如图6所示, 贮藏期各组榛子鲜果的PPO活力持续增加, 但对照组始终处于最高水平 ($P < 0.05$)。其中15 d时对照组榛子PPO活力从1.21 U/g (0 d)增加至

2.83 U/g, 增加了1.34 倍, 而各辐照组PPO活力在贮藏期间增加较为缓慢, 并且辐照剂量越高变化越平缓。说明辐照在一定程度上可以抑制榛子鲜果PPO活力的增加, 从而延缓其褐变。

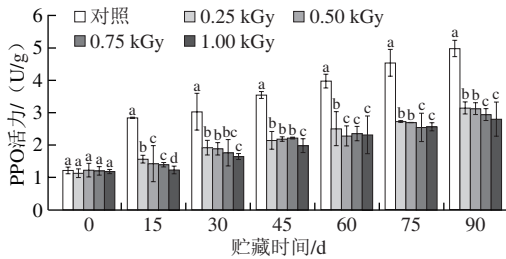


图6 不同辐照剂量对榛子鲜果贮藏期间PPO活力的影响

Fig. 6 Effects of different irradiation doses on PPO activity of fresh hazelnuts during storage

2.2 ⁶⁰Co-γ射线辐照对榛子鲜果脂质营养的影响

2.2.1 对脂肪酸含量的影响

本研究共测得棕榈酸、棕榈油酸、硬脂酸、油酸、亚油酸5种主要脂肪酸。其中饱和脂肪酸包括棕榈酸、硬脂酸, 不饱和脂肪酸包括棕榈油酸、油酸、亚油酸。从表1中可以看出, 在同一贮藏期内辐照榛子中的脂肪酸相对含量无显著性差异 ($P>0.05$), 且脂肪酸组成没有发生变化, 说明辐照不会改变脂肪酸的组成和相对含量。但从贮藏时间来分析, 可能是因为贮藏时间延长加速了脂肪氧化, 导致不饱和脂肪酸水解。因此, 不饱和脂肪酸相对含量减少, 同时饱和脂肪酸的相对含量增高。

表1 不同辐照剂量对榛子鲜果贮藏期间脂肪酸相对含量的影响

Table 1 Effects of different irradiation doses on fatty acid relative contents of fresh hazelnuts during storage

贮藏时间/d	辐照剂量/kGy	棕榈酸	棕榈油酸	硬脂酸	油酸	亚油酸
0	0	4.83±0.14 ^{af}	0.25±0.04 ^{4A}	1.63±0.04 ^{4D}	81.23±0.23 ^{4A}	12.06±0.03 ^{4A}
	0.25	4.86±0.07 ^{af}	0.24±0.04 ^{4A}	1.64±0.12 ^{4D}	81.21±0.11 ^{4A}	12.05±0.02 ^{4A}
	0.50	4.85±0.13 ^{af}	0.25±0.05 ^{4A}	1.64±0.06 ^{4C}	81.22±0.13 ^{4A}	12.04±0.05 ^{4A}
	0.75	4.87±0.11 ^{af}	0.23±0.03 ^{4A}	1.66±0.03 ^{4C}	81.21±0.04 ^{4A}	12.03±0.11 ^{4A}
	1.00	4.86±0.02 ^{af}	0.24±0.08 ^{4A}	1.65±0.08 ^{4C}	81.20±0.14 ^{4A}	12.05±0.03 ^{4A}
15	0	4.97±0.13 ^{af}	0.23±0.07 ^{4A}	1.65±0.11 ^{4C}	81.19±0.13 ^{4AB}	11.96±0.02 ^{4B}
	0.25	4.99±0.10 ^{af}	0.22±0.03 ^{4A}	1.66±0.06 ^{4D}	81.18±0.02 ^{4AB}	11.95±0.12 ^{4B}
	0.50	4.98±0.25 ^{af}	0.22±0.02 ^{4A}	1.67±0.10 ^{4C}	81.17±0.05 ^{4AB}	11.96±0.05 ^{4B}
	0.75	4.99±0.22 ^{af}	0.20±0.12 ^{4A}	1.69±0.02 ^{4C}	81.18±0.17 ^{4AB}	11.94±0.03 ^{4B}
	1.00	4.97±0.16 ^{af}	0.21±0.06 ^{4AB}	1.69±0.08 ^{4C}	81.16±0.14 ^{4AB}	11.97±0.06 ^{4B}
30	0	5.17±0.02 ^{abD}	0.21±0.04 ^{4AB}	1.66±0.05 ^{4C}	81.13±0.16 ^{4B}	11.83±0.12 ^{4C}
	0.25	5.19±0.19 ^{abD}	0.20±0.12 ^{4AB}	1.65±0.06 ^{4D}	81.12±0.02 ^{4B}	11.84±0.03 ^{4C}
	0.50	5.16±0.15 ^{abD}	0.19±0.01 ^{4AB}	1.67±0.06 ^{4C}	81.13±0.16 ^{4B}	11.85±0.01 ^{4C}
	0.75	5.18±0.21 ^{abD}	0.18±0.04 ^{4AB}	1.68±0.03 ^{4C}	81.11±0.11 ^{4B}	11.85±0.10 ^{4C}
	1.00	5.12±0.07 ^{abD}	0.18±0.05 ^{4B}	1.66±0.04 ^{4C}	81.12±0.11 ^{4B}	11.92±0.11 ^{4C}
45	0	5.27±0.09 ^{4C}	0.22±0.06 ^{4A}	1.69±0.05 ^{4C}	81.04±0.19 ^{4C}	11.78±0.04 ^{4D}
	0.25	5.29±0.18 ^{4C}	0.19±0.02 ^{4AB}	1.70±0.13 ^{4C}	81.03±0.03 ^{4C}	11.79±0.03 ^{4D}
	0.50	5.30±0.14 ^{4C}	0.20±0.08 ^{4AB}	1.71±0.10 ^{4B}	81.01±0.11 ^{4C}	11.78±0.12 ^{4D}
	0.75	5.27±0.16 ^{4C}	0.17±0.03 ^{4AB}	1.71±0.04 ^{4C}	81.02±0.13 ^{4C}	11.83±0.16 ^{4D}
	1.00	5.31±0.25 ^{4C}	0.18±0.04 ^{4AB}	1.72±0.05 ^{4B}	81.00±0.03 ^{4C}	11.79±0.07 ^{4D}

续表1

贮藏时间/d	辐照剂量/kGy	棕榈酸	棕榈油酸	硬脂酸	油酸	亚油酸
60	0	5.34±0.19 ^{bc}	0.19±0.02 ^{4B}	1.71±0.02 ^{4B}	80.96±0.14 ^{4D}	11.80±0.06 ^{4D}
	0.25	5.36±0.13 ^{bc}	0.18±0.06 ^{4B}	1.74±0.08 ^{4B}	80.94±0.17 ^{4D}	11.78±0.02 ^{4D}
	0.50	5.39±0.07 ^{bc}	0.19±0.11 ^{4AB}	1.73±0.07 ^{4AB}	80.93±0.07 ^{4D}	11.76±0.03 ^{4DE}
	0.75	5.36±0.14 ^{4B}	0.17±0.02 ^{4AB}	1.72±0.07 ^{4B}	80.92±0.13 ^{4D}	11.83±0.25 ^{4D}
	1.00	5.37±0.17 ^{bc}	0.16±0.01 ^{4BC}	1.72±0.04 ^{4B}	80.95±0.15 ^{4D}	11.80±0.14 ^{4D}
75	0	5.39±0.26 ^{4B}	0.18±0.04 ^{4BC}	1.73±0.03 ^{4AB}	80.91±0.07 ^{4DE}	11.79±0.03 ^{4D}
	0.25	5.41±0.06 ^{4B}	0.17±0.03 ^{4BC}	1.75±0.04 ^{4AB}	80.90±0.07 ^{4D}	11.77±0.05 ^{4D}
	0.50	5.42±0.14 ^{4B}	0.16±0.06 ^{4C}	1.74±0.02 ^{4A}	80.89±0.11 ^{4D}	11.79±0.03 ^{4D}
	0.75	5.38±0.11 ^{4B}	0.17±0.08 ^{4AB}	1.76±0.11 ^{4B}	80.87±0.10 ^{4DE}	11.82±0.06 ^{4D}
	1.00	5.41±0.31 ^{4B}	0.18±0.02 ^{4B}	1.77±0.06 ^{4A}	80.86±0.02 ^{4E}	11.78±0.14 ^{4DE}
90	0	5.49±0.17 ^{4A}	0.16±0.04 ^{4C}	1.76±0.04 ^{4A}	80.86±0.15 ^{4E}	11.73±0.11 ^{4E}
	0.25	5.53±0.25 ^{4A}	0.15±0.03 ^{4C}	1.78±0.02 ^{4A}	80.84±0.12 ^{4E}	11.70±0.09 ^{4E}
	0.50	5.51±0.19 ^{4A}	0.16±0.03 ^{4C}	1.76±0.11 ^{4A}	80.86±0.07 ^{4D}	11.71±0.02 ^{4E}
	0.75	5.54±0.15 ^{4A}	0.14±0.05 ^{4C}	1.79±0.05 ^{4A}	80.85±0.09 ^{4E}	11.68±0.06 ^{4E}
	1.00	5.52±0.22 ^{4A}	0.15±0.06 ^{4C}	1.78±0.02 ^{4A}	80.83±0.13 ^{4E}	11.72±0.02 ^{4E}

注: 同一指标, 肩标小写字母不同表示同一贮藏时间不同辐照剂量之间差异显著 ($P<0.05$), 肩标大写字母不同表示同一辐照剂量不同贮藏时间之间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2.2 对过氧化值的影响

过氧化值经常被用来衡量脂质氧化程度。如图7所示, 整个贮藏期各处理组榛子鲜果的过氧化值都不断增加。90 d时对照组及0.25、0.50、0.75 kGy和1.00 kGy辐照组榛子鲜果的过氧化值分别为0.33、0.39、0.37、0.36、0.34 mmol/kg, 其中辐照组的过氧化值略高于对照组, 但是无显著差异 ($P>0.05$)。在贮藏期内所有处理组榛子鲜果的过氧化值整体处于较低水平, 且均低于坚果食品油脂过氧化值的安全限值 (3.17 mmol/kg) [28]。以上结果表明, 低于剂量1.00 kGy的辐照对榛子鲜果过氧化值的影响不大。

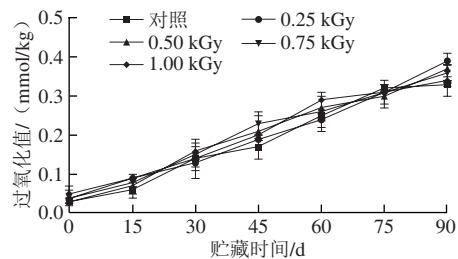


图7 不同辐照剂量对榛子鲜果贮藏期间过氧化值的影响

Fig. 7 Effects of different irradiation doses on peroxide value of fresh hazelnut during the storage period

2.2.3 对酸价的影响

酸价是衡量油品质的重要指标。如图8所示, 随着贮藏时间延长, 各处理组酸价都不断增加, 在贮藏90 d时, 对照组及0.25、0.50、0.75 kGy和1.00 kGy辐照组酸价分别为0.53、0.59、0.57、0.56、0.54 mg/g, 各辐照组均略高于对照组, 但无显著差异 ($P>0.05$)。因为辐照处理会加速脂肪的自氧化, 但本研究辐照剂量小于1.00 kGy, 低剂量的辐照处理对食品脂质氧化程度无明显影响。

同样, 各组榛子鲜果的酸价均在坚果食品油脂酸价的安全限值范围内 (3 mg/g) [28]。

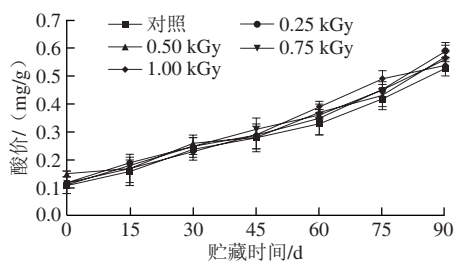


图8 不同辐照剂量对榛子鲜果贮藏期间酸价的影响

Fig. 8 Effects of different irradiation doses on acid value of fresh hazelnuts during storage

2.3 相关性分析结果

如表2所示, 榛子鲜果的呼吸速率与MDA含量、LOX活力、PPO活力、CAT活力、过氧化值、酸价相关。其中呼吸速率与MDA含量、LOX活力、PPO活力呈极显著正相关 ($P < 0.01$, 其中 r 分别为0.974、0.961、0.857), 即随着贮藏过程中榛子鲜果MDA含量、LOX活力、PPO活力的下降, 呼吸速率也随之下降, 反之亦然; 榛子鲜果的呼吸速率与CAT活力、过氧化值、酸价呈显著正相关 ($P < 0.05$, 其中 r 分别为0.737、0.757、0.757), 但与SOD活力无显著相关性。

表2 榛子鲜果贮藏期间各指标间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between respiratory rate and physiological indexes of fresh hazelnuts during storage

指标	呼吸速率	MDA含量	LOX活力	SOD活力	CAT活力	PPO活力	过氧化值	酸价
呼吸速率	1.000							
MDA含量	0.974**	1.000						
LOX活力	0.961**	0.984**	1.000					
SOD活力	0.621	0.719*	0.810**	1.000				
CAT活力	0.737*	0.745*	0.852**	0.913**	1.000			
PPO活力	0.857**	0.931**	0.894**	0.691*	0.595	1.000		
过氧化值	0.757*	0.618	0.549	-0.026	0.247	0.453	1.000	
酸价	0.757*	0.618	0.549	-0.026	0.247	0.453	1.000**	1.000

注: *.显著相关 ($P < 0.05$); **.极显著相关 ($P < 0.01$)。

2.4 PCA结果

在相关性分析基础上, 对反映榛子鲜果生理特性的各指标进行PCA。由表3可知, 提取到第2个主成分时累计方差贡献率达到94.803%, 且特征值均大于1, 因此可认为提取的前2个主成分能反映榛子鲜果的辐照处理效果。

由图9可知, 呼吸速率、LOX活力、MDA含量、PPO活力与y轴距离远, 说明其对第1主成分 (PC1) 贡献较大; 而酸价和过氧化值距离x轴较远, 说明其对第2主成分 (PC2) 贡献较大。因此, 可以通过测定榛子果实的呼吸速率、LOX活力、MDA含量、PPO活力、酸价和过氧化值来判断其品质。

表3 各主成分的特征值与方差贡献率

Table 3 Eigenvalues and variance contribution rates of principal components

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	5.761	72.008	72.008	5.761	72.008	72.008
2	1.824	22.795	94.803	1.824	22.795	94.803
3	0.396	4.950	99.753			
4	0.020	0.247	100.000			
5	0.000	0.000	100.000			
6	0.000	0.000	100.000			
7	0.000	0.000	100.000			
8	0.000	0.000	100.000			

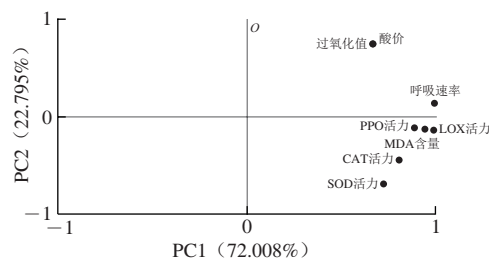


图9 榛子鲜果贮藏过程中各指标主成分分析因子载荷图

Fig. 9 PCA loading plot of physiological parameters of hazelnuts during storage

由表4可知, 2个主成分 (PC1、PC2) 可表示原本的8个指标, 由此对90 d时不同剂量辐照处理对榛子鲜果的影响进行评价。得出各主成分得分 F_1 、 F_2 : $F_1 = 0.413Z_1 + 0.411Z_2 + 0.412Z_3 + 0.30Z_4 + 0.334Z_5 + 0.370Z_6 + 0.275Z_7 + 0.275Z_8$ (Z_i 为标准化后数据); $F_2 = 0.102Z_1 - 0.017Z_2 - 0.103Z_3 - 0.510Z_4 - 0.329Z_5 - 0.086Z_6 + 0.549Z_7 + 0.549Z_8$ (Z_i 为标准化后数据)。其中 F_1 、 F_2 分别为PC1、PC2得分。

表4 主成分因子载荷矩阵

Table 4 Loading matrix of principal components

指标	PC1得分系数	PC2得分系数
呼吸速率	0.413	0.102
MDA含量	0.411	-0.017
LOX活力	0.412	-0.103
SOD活力	0.301	-0.510
CAT活力	0.334	-0.329
PPO活力	0.370	-0.086
过氧化值	0.275	0.549
酸价	0.275	0.549

通过2个主成分对不同辐照处理对榛子果实的影响进行评价计算综合得分。以 F_1 和 F_2 作线性组合, PC1的方差贡献率为72.00%, PC2的方差贡献率为22.80%, 由此计算综合得分 (F): $F = 72.00\%F_1 + 22.80\%F_2$ 。

由表5可知, 在贮藏90 d时榛子鲜果综合得分的关系为: 0.50 kGy辐照组 > 0.75 kGy辐照组 > 1.00 kGy辐照组 > 0.25 kGy辐照组 > 对照组, 因此, 经过辐照处理更有利于榛子鲜果的贮藏, 且0.50 kGy辐照处理效果最好。

表5 不同辐照剂量的榛子鲜果在贮藏90 d时主成分得分和综合得分
Table 5 Principal component scores and synthetic scores of fresh hazelnuts treated with different irradiation doses and stored for 90 d

辐照剂量/kGy	F_1	F_2	F
0.00	0.480	-0.666	0.194
0.25	0.491	-0.671	0.201
0.50	0.550	-0.736	0.228
0.75	0.537	-0.723	0.222
1.00	0.516	-0.703	0.211

3 讨论

榛子鲜果采收后仍会进行一系列的生命活动，呼吸速率越快则果实品质降低越快。本研究中榛子鲜果在(4.0±0.5)℃条件下冷藏，辐照组呼吸速率在0~30 d时高于对照组，推测这是辐照处理榛子果实产生的应激反应所致^[29]。30 d后辐照组榛子果实的呼吸速率明显低于对照组。胡海超^[30]的研究也发现0.3 kGy辐照处理提高了核桃贮藏前期的呼吸强度，但抑制了其在贮藏后期呼吸强度的升高。⁶⁰Co-γ辐照会导致果蔬的生理损伤，同时刺激果蔬中的酶产生一系列的保护活动来修复部分损伤^[29]。MDA是一种脂质氧化的最终产物，LOX能氧化多聚不饱和脂肪酸，使果实变软，造成细胞膜受损老化。有研究表明，0.6 kGy和0.8 kGy的γ射线辐照可有效降低采收后蘑菇的MDA含量^[31]，同时也有实验证明辐照有效抑制了鲜食核桃冷藏后期LOX活性的升高^[32]。从本实验结果看，辐照后榛子鲜果的MDA含量低于对照组，因此辐照处理可对榛子鲜果贮藏期间膜脂过氧化起到抑制作用。

SOD、CAT、PPO是保护酶系统中重要的3种酶，在消除自由基、提高植物体内的抗逆性方面起重要作用^[33]。在本实验中，经过辐照处理的榛子鲜果SOD活力均高于对照组，且0.50 kGy和1.00 kGy辐照组贮藏期间SOD、CAT活力下降更为平缓。邵传龙等^[34]也在经过辐照处理的苦草种子中发现相同的规律。本研究结果显示辐照抑制了PPO活力的增加，Ashtari等^[35]的结果也显示⁶⁰Co-γ射线辐照处理的石榴种皮PPO活力较低，其原因可能是辐照改变了PPO的结构，从而使其生物活性下降^[36]。因此，辐照可通过对采后果蔬的酶活力产生影响来达到保鲜的效果，后续可从酶代谢途径以及基因水平展开进一步的研究。

榛子含有丰富的油脂，油脂氧化程度是衡量榛子品质的方法之一。本研究结果显示，不高于1.00 kGy的低剂量辐照不影响榛子脂肪酸的组成及相对含量。对过氧化值、酸价的研究结果也证明辐照会轻微加速榛子的氧化，但与对照组差异不显著。Park等^[37]发现当辐照剂量大于15 kGy时牛肉饼才会发生脂质氧化，马艳萍^[38]发现只有0.5 kGy的辐照抑制了核桃仁的脂肪酸败，其他剂量的辐照处理会加速其氧化进程。因此推测过高剂量的

辐照会电离产生自由基从而诱导脂质氧化，但小于1.00 kGy的低剂量辐照对脂质氧化的影响较小。

4 结论

本研究探索了⁶⁰Co-γ射线辐照对榛子鲜果采后生理及脂质营养的影响。由结果可知，⁶⁰Co-γ射线辐照抑制了榛子鲜果PPO活力，并延缓SOD和CAT活力的下降。其中0.50 kGy辐照处理效果最为显著，可明显降低呼吸速率，减少MDA的积累，抑制LOX活力的上升；但辐照不会影响榛子鲜果的脂质氧化以及脂肪酸的组成和相对含量。PCA结果显示0.50 kGy辐照组的综合得分最高。总体而言，低温可与⁶⁰Co-γ射线共同作用以使榛子鲜果保持较高的贮藏品质。

参考文献:

- [1] 刘亚娜, 杨小红, 耿阳阳, 等. 不同野生榛子果实特性及营养成分分析[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(1): 117-122. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2021.01.020.
- [2] 常存, 段楠, 刘新杰. 榛子的营养成分测定及保健功能研究[J]. 黑龙江科学, 2019, 10(16): 44-45. DOI:10.3969/j.issn.1674-8646.2019.16.017.
- [3] OREM A, YUCESAN F B, OREM C, et al. Hazelnut-enriched diet improves cardiovascular risk biomarkers beyond a lipid-lowering effect in hypercholesterolemic subjects[J]. Journal of Clinical Lipidology, 2013, 7(2): 123-131. DOI:10.1016/j.jacl.2012.10.005.
- [4] 周美含, 郭勇, 魏贞, 等. 榛仁降脂活性肽分离纯化及结构鉴定[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 124-129. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180606-077.
- [5] DE SANTIS D, FARDELLI A, MENCARELLI F, et al. Storage hazelnuts: effect on aromatic profile and sensory attributes[J]. VII International Congress on Hazelnut, 2009, 845: 693-700. DOI:10.17660/actahortic.2009.845.109.
- [6] KAYA-ALTOP E, HAGHNAMA K, STARASLAN D, et al. Long-term perennial weed control strategies: economic analyses and yield effect in hazelnut (*Corylus avellana*) [J]. Crop Protection, 2016, 80: 7-14. DOI:10.1016/j.cropro.2015.10.022.
- [7] 左慧, 王明坤, 安学征. 榛果采收后的处理及深加工[J]. 种子科技, 2021, 39(1): 50-51; 54. DOI:10.19904/j.cnki.cn14-1160/s.2021.01.022.
- [8] 王佳兴. 温度联合气调贮藏对平欧杂种榛坚果主要油脂品质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2014: 1. DOI:10.26949/d.cnki.gblyu.2014.000013.
- [9] 张春红, 常南, 高慧楠. 谷朊粉与玉米醇溶蛋白复合膜的制备及其在榛子仁保鲜中的应用[J]. 中国油脂, 2010, 35(4): 21-24.
- [10] 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.
- [11] 董婷, 高鹏, 汪茵月, 等. 电子束辐照对果蔬品质影响的研究进展[J]. 北方园艺, 2020(16): 133-138. DOI:10.11937/bfy.20194080.
- [12] RAVINDRAN R, JAISWAL A K. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 363-368. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.02.002.
- [13] 叶爽, 陈蕊, 高虹, 等. γ射线辐照对香菇采后贮藏过程中水分特性及理化指标的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 91-97. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200917-230.

- [14] WANG Chen, GAO Ya, TAO Ye, et al. Influence of γ -irradiation on the reactive-oxygen metabolism of blueberry fruit during cold storage[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 41: 397-403. DOI:10.1016/j.ifset.2017.04.007.
- [15] HU Haichao, JING Nanan, PENG Yuhang, et al. ^{60}Co γ -ray irradiation inhibits germination of fresh walnuts by modulating respiratory metabolism and reducing energy status during storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 182: 111694. DOI:10.1016/j.postharvbio.2021.111694.
- [16] BHATTACHARJEE P, SINGHAL R S, GHOLAP A S, et al. Compositional profiles of γ -irradiated cashew nuts[J]. *Food Chemistry*, 2003, 80(2): 159-163. DOI:10.1016/S0308-8146(02)00248-0.
- [17] 吕春茂, 张奥, 丛皓天, 等. 不同包装及变温条件下榛子碎货架期预测模型建立与分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2021, 52(2): 171-179.
- [18] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200505-031.
- [19] 张清航, 张永涛. 植物体内丙二醛(MDA)含量对干旱的响应[J]. *林业勘查设计*, 2019(1): 110-112. DOI:10.3969/j.issn.1673-4505.2019.01.052.
- [20] 王琛, 李雪涛, 陶焯, 等. ^{60}Co γ 辐照对低温贮藏蓝莓品质和膜脂过氧化作用的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(22): 318-323. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201622049.
- [21] 刘雅琳, 余金明, 刘英. 蔬果中超氧化物歧化酶活性测定及保鲜作用探究[J]. *南方农业*, 2020, 14(12): 120-122. DOI:10.19415/j.cnki.1673-890x.2020.12.058.
- [22] 刘朝斌, 李书影, 叶姐, 等. 鲜食核桃仁抑制褐变与脱色方法及货架期保鲜效应[J]. *食品科学*, 2022, 43(9): 232-241. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210210-159.
- [23] 曹子伦, 雷芬芬, 郑竟成, 等. 不同产地南瓜籽油组成及氧化稳定性的差异[J]. *食品科学*, 2022, 43(12): 283-289. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210821-271.
- [24] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定: GB 5009. 227—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 8-31.
- [25] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中酸价的测定: GB 5009. 229—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 8-31.
- [26] ISLAM A, ACKALIN R, OZTURK B, et al. Combined effects of *Aloe vera* gel and modified atmosphere packaging treatments on fruit quality traits and bioactive compounds of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit during cold storage and shelf life[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 187: 111855. DOI:10.1016/j.postharvbio.2022.111855.
- [27] 樊晓岚, 李月圆, 张引引, 等. 降温方式对鸭梨采后FAD及LOX基因表达及其褐变的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(5): 222-227. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180102-017.
- [28] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 坚果与籽类食品: GB 19300—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 12-24.
- [29] 刘泽松, 史君彦, 左进华, 等. UV-C和LED红光复合处理对西兰花贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(17): 238-245. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190805-052.
- [30] 胡海超. γ 射线辐照抑制鲜核桃萌发的呼吸代谢生理机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 31.
- [31] HOU L, LIN J, MA L, et al. Effect of ^{60}Co gamma irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of *Volvariella volvacea*[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 235: 382-390. DOI:10.1016/j.scienta.2018.02.074.
- [32] 胡海超, 刘慧, 李晴, 等. 低剂量辐照鲜核桃冷藏期的生理与品质变化[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(8): 170-175. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2018.08.029.
- [33] 党俊梅, 张少英, 邵世勤, 等. 甜菜抗(耐)丛根病生理基础的研究II. 超氧化物歧化酶(SOD)、酯氧合酶(LOX)、丙二醛(MAD)与甜菜抗(耐)丛根病的关系[J]. *中国糖料*, 2000(3): 7-12.
- [34] 邵传龙, 陈洪国, 龚旭昇. ^{60}Co γ 射线辐照对苦草种子萌发及生长的影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2021, 39(6): 48-54.
- [35] ASHTARI M, KHADEMI O, SOUFBAF M, et al. Effect of gamma irradiation on antioxidants, microbiological properties and shelf life of pomegranate arils cv. 'Malas Saveh'[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 244: 365-371. DOI:10.1016/j.scienta.2018.09.067.
- [36] 董闪闪. DBD等离子体对鲜切苹果微生物及多酚氧化酶的失活作用及机制研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022: 36. DOI:10.27469/d.cnki.gzzqc.2022.000151.
- [37] PARK J G, YOON Y, PARK J N, et al. Effects of gamma irradiation and electron beam irradiation on quality, sensory, and bacterial populations in beef sausage patties[J]. *Meat Science*, 2010, 85(2): 368-372. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.01.014.
- [38] 马艳萍. 鲜食核桃采后生理及辐照效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010: 93.